



ISSN 1005-0094
CODEN SHDUEM

BIODIVERSITY SCIENCE

生物多样性

第25卷 第2期
2017年2月

Vol.25 No.2
February 2017

中国植物区系地理研究专辑



主 办

中国科学院生物多样性委员会

中国植物学会

中国科学院植物研究所

中国科学院动物研究所

中国科学院微生物研究所

Biodiversity Committee, CAS

Botanical Society of China

Institute of Botany, CAS

Institute of Zoology, CAS

Institute of Microbiology, CAS

<http://www/biodiversity-science.net>

•编者按•

多学科融合、多尺度探索 ——植物区系地理研究的新趋势

孙 航*

(中国科学院昆明植物研究所东亚植物多样性与生物地理学重点实验室, 昆明 650201)

Multi-disciplinary integration and multi-scale exploration: a new trend in the study of Floristic Geography

Hang Sun*

Key Laboratory for Plant Diversity and Biogeography, Kunming Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650201

植物区系地理学(Floristic Geography)是以植物分类学为基础,从空间格局(地理分布)上来探讨地球上或一定区域内植物的构成及其地理格局形成和起源演化过程的学科。当今的植物区系地理学研究正从两大方面发展:宏观上从地质历史-生态环境-植物群落-植物区系及大尺度空间格局方面探讨区系地理格局的成因;微观上从生命之树-物种形成-分子机制(基因组进化)揭示区系地理成分的起源及进化机制;或是二者(宏、微观)结合精确地揭示植物区系的形成演变(物种形成)以及空间分异(区系分区)。本专辑共收录了12篇有关植物区系或植物区系地理研究的论文,包括了植物区系形成的地质背景、系统发育在植物区系研究中的应用、亲缘地理、细胞地理、植物区系格局以及区系研究的趋势及展望等,在一定程度上反映了我国植物区系地理的研究趋势和方向。

在植物区系形成的地质背景方面,周渐昆等(2017)总结了新生代以来中国境内的主要地质事件并通过亚热带常绿阔叶林主要组成成分(如壳斗科、樟科、木兰科、豆科、金缕梅科等)和子遗特有成分地质历史的变迁,讨论了若干重要地质事件如古新世-始新世极热事件、青藏高原隆升、季风气候形成、干旱带演变和第四纪冰期等对生物多样性的影响,为植物区系形成与演变提供了重要的地质背景。刘杰等(2017)综述了地质历史和气候变化对青

藏高原及邻近地区植物多样性演化和维持的影响,总结了当前的研究进展,并对未来研究中值得关注的问题进行了展望。

在结合系统发育研究植物区系时空格局的形成方面,彭丹晓等(2017)从3个方面总结了区域生命之树在植物区系研究中的应用:(1)在时间维度上,通过生命之树类群的分化时间和进化速率估算,反映区系演化历史,揭示区系的时间分化格局;(2)在空间维度上,结合系统发育信息与物种分布数据,揭示区系内生物多样性的空间格局,并在此基础上进行区系分区;(3)整合生物地理信息和气候环境数据,分析区系中生物类群对古地理事件以及气候变化的响应机制,以揭示形成现存生物多样性格局的生态、地理和历史因素。李嵘和孙航(2017)基于云南种子植物1,983个属的系统发育关系,结合其地理分布,从进化历史的角度分析了不同地理单元的分类群组成、系统发育组成及其相似性,探讨了各个地理单元的系统发育结构及地理单元间的系统发育相似性。慈秀芹和李捷(2017)讨论了系统发育多样性的概念、测度方法以及在植物区系研究和生物多样性保护中的应用,也强调了DNA条形码研究促进了系统发育多样性的发展,为构建解决能力较好的宏系统发育树提供了可能。

在结合亲缘地理研究植物区系形成和分化方面,邱英雄等(2017)分析比较了近年来东亚第三纪

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: sunhang@mail.kib.ac.cn

子遗植物的种群遗传学与亲缘地理学的研究结果,从暖温带落叶林类群的东西谱系分化、温带植物类群的南北谱系分化与物种形成、中国-日本谱系分化、中国大陆-台湾间断分布植物类群的谱系分化以及西北干旱带植物类群的谱系分化等方面总结了它们的谱系地理格局式样,分析了其形成的地史背景和气候成因。并指出基因组数据和生物地理模型的使用以及群落水平的整合亲缘地理学研究已成为未来的研究方向。

在植物区系地理格局形成方面,沈泽昊等(2017)整合了中国境内14座主要山地的高山植物区系数据,重点分析了其种子植物区系地理成分的构成、不同山地之间的相似性及其环境和空间相关因素。文章指出中国山地的高山带分布着物种丰富的种子植物区系,其地理分异显示北热带和东亚成分自南向北减少而北温带成分增加,自西向东古地中海成分减少、北温带成分增加,而东亚成分在中部达到最大值,地理距离的隔离是高山植物区系分异的首要因素,高山带的面积大小也影响到其区系成分的构成,夏季热量是影响中国高山植物区系地理分异的首要气候因子等。朱华(2017)研究了中国南部的热带植物区系,指出中国的热带地区种子植物区至少有227科2,181属12,844种,区系构成以热带分布属占优势,并以热带亚洲分布属所占比例最大,标志着其热带边缘性质和具有热带亚洲植物区系的特点;由于不同地区地质历史及生态环境的差异,中国热带植物区系在不同地区的组成和地理成分也有一定差异,其成因与喜马拉雅山脉隆升过程中发生的地质事件有关。

在细胞地理研究方面,王家坚等(2017)收集了青藏高原与横断山的染色体资料,并按科属及其分布型、生活型以及海拔分布等各个方面进行统计分析,结果表明新多倍化在该地区只约占23%的比例,远低于其他高山地区,其中低基数的二倍体占有近一半的比例(43.3%),反映了二倍体水平上的染色

体结构和核型进化是本地区物种分化的另一重要机制。

在植物区系地理研究的趋势及展望方面,孙航等(2017)综述了植物区系地理学的研究现状、存在的问题和今后的发展趋势,指出需加强对植物区系薄弱或空白地区的调查,补充和完善植物标本的详细信息,提高标本鉴定的准确性。同时还指出,植物区系地理学的研究步入了多学科融合交叉、综合研究分析的时代:一方面,利用物种信息数据库,融合生态学、古植物学以及地质历史等探讨区系空间地理格局的成因;另一方面结合系统发育、分子系统进化(甚至到进化基因组学)、生命之树以及分子生物地理学等揭示区系的起源和进化。同时,各学科快速发展,产生了大量的数据,新的分析方法或新理论的出现和运用,使得植物区系地理研究也进入了大数据时代,进而使得植物区系地理学由定性的现象认识和描述,逐步深入到了定量地探索机理和形成时代。张明理等(2017)总结了西北干旱区和中亚植物区系地理研究现状,指出西北干旱区作为中亚干旱区的东部,应该结合西部的中亚五国,在一个自然地理区域的基础上研究其区系地理,才有更广泛的地理研究意义;同时强调分子系统发育和生物地理研究对区系地理研究的意义和潜力。

总之,本专辑论文在一定程度上反映出我国的植物区系地理学研究已经步入了多学科融合交叉、综合研究分析的新时代。随着学科的快速深入发展和相互渗透,植物区系地理学的研究也正日益成为生物多样性或生物地理学研究的热点领域。中国是全球植物多样性最为丰富的国家之一,也是解决许多生物地理学或进化生物学重大理论问题的关键地区,植物区系地理的研究方兴未艾。

文中引用的文献见附录1(<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2017035-1.pdf>)

(责任编辑:周玉荣)

• 综述 •

植物区系地理研究现状及发展趋势

孙 航^{1*} 邓 涛¹ 陈永生^{1,2} 周 卓¹

1 (中国科学院昆明植物研究所东亚植物多样性与生物地理学重点实验室, 昆明 650201)

2 (中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 中国植物区系地理学在植物区系的调查、分布区类型的划分和研究、植物区系分区以及区域植物区系的分析等方面有了丰富的研究积累。但这些研究绝大部分是利用传统方法对植物物种或分类群数据进行统计分析, 因此仍处于对区系现象的认识和描述阶段, 缺乏空间格局形成过程、形成机制方面的深入探索。此外, 还存在植物区系调查薄弱甚至是空白的地区, 许多植物标本缺乏详细或精确的信息, 植物物种鉴定的准确性还需要提高。同时, 随着植物区系地理以及相关学科快速发展, 植物区系地理学的研究步入了多学科交叉融合、综合研究分析的阶段, 学科界限趋于模糊。一方面, 利用物种信息数据库, 融合生态学、古植物学以及地质历史等探讨区系空间地理格局的成因; 另一方面, 结合系统发育、分子系统进化(甚至到进化基因组学)、生命之树以及分子生物地理学等揭示区系的起源和进化; 同时, 各学科的快速发展, 产生了大量的数据, 新的分析方法或新理论的出现和运用, 使植物区系地理研究也进入到了大数据时代, 进而使得植物区系地理研究由定性的现象认识和描述, 逐步深入到了定量地解释区系现象和探索其形成机制的时代。

关键词: 植物区系地理; 区系调查; 学科交叉; 生态学; 分子系统学; 生物地理学; 大数据

Current research and development trends in floristic geography

Hang Sun^{1*}, Tao Deng¹, Yongsheng Chen^{1,2}, Zhuo Zhou¹

1 Key Laboratory for Plant Diversity and Biogeography of East Asia, Kunming Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650201

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract: This paper summarizes the research status, existing issues, and trends in floristic geography. There is now a wealth of research accumulation on floristic investigations, distribution types of genera, floristic regions, and regional floristic analysis. It is also noted that most of these studies utilize simple statistical analyses, comparative studies, traditional methods, and single subjects, to provide a basic understanding and description of the floristic phenomenon, which is lacking spatial pattern formation processes and detailed exploration of formation mechanisms. Additionally, there are still some weak and non-existent areas of botanical investigation. Many existing specimens lack detailed or accurate information and the precise identification of plant species also needs to be much improved. At the same time, when analyzing the development trends of floristic geography, with the rapid development of related disciplines, including the development of biogeography and analysis methods and improvements, floristic geography research is an area of multidisciplinary integration, comprehensive research, and analysis. On the one hand, using database information, and combining ecology, paleobotany, and geology can allow us to probe into spatial pattern formation. On the other hand, combining phylogenetics, the tree of life, and molecular biogeography allow us to reveal floristic origins and evolution. The rapid development of various disciplines has given rise to a large amount of data, meanwhile, the emergence and application of new analytical methods and theories incorporate big data into floristic geography research, which will enhance qualitative understanding and description, and allow us to further explore the mechanisms of formation quantitatively.

收稿日期: 2016-09-20; 接受日期: 2016-11-07

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(31590823)和中科院战略性 B 类先导科技专项(XDB03030106)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: sunhang@mail.kib.ac.cn

Key words: floristic geography; floristic investigation; comprehensive research; ecology; molecular phylogenetics; biogeography; big data

1 前言

植物区系地理学(Floristic Geography)是植物地理学或生物地理学的重要分支学科,是一门主要研究全球或某一地区所有植物种类的组成、现代和过去分布规律以及起源进化和演变历史的科学(王荷生, 1992)。在20世纪中叶以前,胡先骕、刘慎谔、李惠林等开启了中国植物地理学研究,为中国植物区系地理的研究奠定了前期的基础。到了20世纪中后期,吴征镒(1965)发表《中国植物区系的热带亲缘》一文,成为中国植物区系地理学研究的开端和标志。此后,以吴征镒为代表的植物学家对中国植物区系地理进行了全面系统的研究,植物区系地理学的研究进入了一个繁盛的阶段。同时,《中国植物志》和地方植物志的编研也进展显著,特别是进入21世纪以来,《中国植物志》中文版80卷126册(1959–2004)全部出版,之后中美合作的*Flora of China* (Vols.1–25)也相继完成;地区植物志方面,目前为止有26个省市已经完成编研,北京、台湾、内蒙古和宁夏等地区甚至还出了第二版或修订版,重庆市植物则由《四川植物志》记载;除湖南、江西和广西3省尚未完成以及陕西和吉林两省尚未开展编研外,总体上讲中国的植物种类调查已在省市一级基本完成或至少完成一次记载(马金双, 2011),所有这些为中国植物区系深入细致的研究奠定了重要的基础。最新统计数字表明,迄今为止,中国植物区系共有种子植物259科2,935属29,818余种(恩格勒系统),其中特有属256个,特有种15,000–18,000种,是北半球拥有植物区系最为丰富的国家。吴征镒等按照地理成分和发生成分相结合的原则,将中国种子植物3,116属(1983年的数据)划分为15大分布区类型和31个变型(吴征镒和王荷生, 1983; 吴征镒, 1991);随后吴征镒等(2003b)又提出了世界种子植物的分布区类型系统,将世界种子植物的科划分为18大分布型,中国有15个大分布型,74个变型(中国有38个),同时又进一步完善了种子植物属的分布区系统,将中国属的分布区类型划分为15大类型和35个亚型(吴征镒等, 2003a, 2006)。

与此同时,吴征镒等(1979)在其原来区划的基础上,对中国植物区系区划提出了新的草案,将中国植物区系分为4个植物区(古热带植物区、东亚植物区、泛北极植物区、古地中海植物区),7个亚区,以及24个地区和49个亚地区(Wu & Wu, 1998; 吴征镒和孙航, 2014)。因此,中国植物区系的组成、地理分布格局以及性质特征和植物区系分区已初步弄清。具体如下:

(1)在植物区系的调查和采集方面。到目前为止我国采集并数字化的植物标本近一千万份(NSII, <http://www.nsii.org.cn/>),基本覆盖了我国所有的山地。对其中的500万份数字化的植物标本进行分析,结果显示平均每个县约4,138份记录,1,895份记录/km²。尤其以青藏高原–横断山区、云贵高原、秦巴、武陵山、罗霄山脉、南岭等区域采集最为密集(Yang et al, 2014)。随着调查的深入以及研究手段的进步,近10年来每年平均约有12个新分类群发表。

(2)中国植物区系的基本特征和分区框架已完成。除了植物志等著作外,一系列区系地理研究的重要的专著、专集相继出版或修订,如《中国自然地理——植物地理》(吴征镒和王荷生, 1983)、《中国种子植物区系地理》(吴征镒等, 2011)、《种子植物分布区类型及其起源与分化》(吴征镒等, 2006)、《种子植物科属地理》(路安民, 1999)、《中国被子植物科属综论》(吴征镒等, 2003a)、《中国植物地理》(应俊生和陈梦玲, 2011)、《中国植物区系地理》(吴征镒和孙航, 2014)、《中国植物区系与植被地理》(陈灵芝等, 2015)、*Plants of China* (Hong & Blackmore, 2013)等,基本弄清了中国植物区系的家底和区系组成特征及地理分布格局。此外,区域植物区系也有了系统的研究,如东北植物区系(傅沛云等, 1995; 曹伟等, 1995)、华北植物区系(王荷生等, 1995; 王荷生, 1997)、华中植物区系(祁承经等, 1995)、华东植物区系(刘昉勋等, 1995)、西北荒漠植物区系(刘嫫心, 1995; 尹林克, 1997; 潘晓玲等, 2003)、华夏植物区系(张宏达, 1980, 1994)、黄土高原植物区系(张文辉等, 2002)、滇黔桂地区(方瑞征等, 1995)、西藏植物区系(吴征镒, 1987)、青藏高原植物区系(武素

功等, 1995)、云南植物区系(李锡文, 1995a, b; 朱华, 2008)、中国南部热带植物区系(朱华, 2017)、横断山植物区系(Wu, 1988; 李锡文和李捷, 1993)、秦岭植物区系(应俊生, 1994)、台湾植物区系(Hsieh, 2002)、南海岛屿植物区系(邢福武等, 1993, 1996; 吴德邻等, 1996)等, 以及特有区系(王荷生和张镜铨, 1994a, b; 应俊生, 1996; 郝日明, 1997; Wu et al, 2007)等。此外, 宋之琛等(1983)、陶君容(1992, 2000)也研究了中国的古植物区系。

科属植物地理研究方面, 在2000年以前, 科属地理格局的研究主要是基于传统的系统进化并结合地理分布式样来进行综合分析, 比较有代表性的是路安民(1999)主编的《种子植物科属地理》, 收录了中国45个代表性类群地理分布格局的研究, 为探讨中国植物区系的起源提供了重要资料。但由于当时研究方法的局限以及研究资料的缺乏, 种属植物地理的研究参差不齐。随着分子系统学的发展, 科属植物地理学的研究进入了崭新的阶段, 产生了分子生物地理学, 再结合化石资料和地质学证据发展成了历史生物地理学, 现今已逐步进入到了基因组时代(Wen et al, 2013)。到目前为止已有300个以上的类群或支系不同程度地开展了分子生物地理学的研究。此外, 近来谱系地理学的研究也快速发展, 为探讨植物区系的冰期避难所以及种群分化历史提供了直接的证据(Qiu et al, 2011; Liu et al, 2012), 迄今为止, 已有120余个物种开展了谱系地理学的研究, 为深入探讨中国植物区系的起源、时间和迁移途径和地理格局的形成提供了重要的基础资料。

在植物区系数据库建设方面, 目前国内提供植物区系信息的数据库已近20个, 比较有影响力的如中国数字植物标本馆(CVH, <http://www.cvh.org.cn/>)、国家标本资源共享平台(NSII)、中国在线植物志(<http://www.eflora.cn/>)、*Flora of China* (FOC, <http://www.floraofchina.org/>)、中国植物物种信息数据库(<http://db.kib.ac.cn/eflora/>)、中国植物图像库(PPBC) (<http://www.plantphoto.cn/>)等。随着计算机信息技术的发展, 植物物种以及标本等信息的数字化工作的开展, 极大地丰富了植物区系地理研究的基础资料, 同时也使得植物区系地理逐步从定性转入更深入细致的定量研究。

综上, 经过几代植物学家的努力, 中国作为一个生物多样性大国, 在植物区系的基本特征、分区、

起源等研究方面已积累了丰富的资料, 不仅推动了植物区系或植物多样性的起源形成演变等基础理论问题的深入研究, 也为生物多样性的保护提供了重要的理论基础和实践指导。

2 存在的问题

虽然经过几代植物学工作者的研究, 中国植物区系的组成、地理格局等已基本清楚, 但这些研究仍处于对现象的描述阶段, 绝大部分仍然是基于基础数据, 利用传统方法进行统计分析, 缺乏整合物种地理格局、环境因子、地质历史或系统发育等信息, 定量分析与探究区系构成以及地理分布格局成因的研究, 还有许多植物区系调查薄弱甚至是空白的地区。具体表现如下。

2.1 植物区系分析和调查还需要补充和完善

中国植物区系的调查还存在空白或薄弱地区, 基本的物种数据还需补充和完善, 例如, 许多标本记录信息不够详细, 拥有GPS记录的则更少(初步统计仅占全部标本的10%左右), 许多标本采集集中在20世纪50–80年代以及本世纪初的2000–2009年, 一些区系研究的物种数据仅引自文献或是来源于很少的标本记录, 还有许多类群的分类学研究需要深入。

近10年来, 我国高等植物平均每年有120余个新种发表, 也从一方面表明, 植物区系的调查以及植物分类学研究还需要继续深入。另外, 标本资料的正确鉴定也是植物区系地理研究的瓶颈。近20年来, 随着植物考察的深入和扩大, 我国植物标本馆标本的采集量有了很大幅度的增加, 但被分类学专家鉴定的标本数量非常有限, 并且许多标本鉴定可能是错误的。这事实上是全球性的问题。Goodwin等(2015)以姜科植物为例, 指出在热带植物标本中约有50%的标本鉴定是不正确的, 温带植物的标本可能也存在同样的情况。在中国虽然没有进行过调查分析, 但错误鉴定和没有被鉴定的标本可能也接近该比例。这势必会影响到对标本资料的应用和数据库资料的准确性。

2.2 植物分布区类型需要进一步补充和修订

虽然吴征镒等(2006, 2011)进一步修订和完善了中国属的分布区类型(划分为15大类型和35个亚型), 但最近的植物分类学特别是结合分子系统学的研究表明, 不少科属的分类发生了变化, 如小属

的合并、大属的拆分或种在属间的转移等,使得其原来界定的分布区发生了变化,初步统计大约有 733 个属需要重新界定分布范围。另外随着区系调查的深入,一些新的类群或新的地理分布记录被发现和发表,如丹霞兰属(*Danxiaorchis*)、假合头菊属(*Parasyncalathium*)、宽昭木属(*Foonchewia*)、征镒麻属(*Zhengyia*)等,这些新类群需要补充分布信息。因此,我们还需要根据最新的区系调查及分类研究成果完善或修订中国植物属级的分布区类型。

在植物区系区划上,区系的分区仍然是框架性的,主要的依据还是特有性及其等级的高低,如,“区(realm or kingdom)”主要是依据特有高分类阶元如科、亚科和族等,“地区(region)”则依据特有属和大量的特有种。区划的阶元越低,特有分类单位的分类等级越低,如到了“小区(district)”,则可能主要是依据种下特有等级如亚种(Takhtajan, 1986)。

当然,在区系区划中也考虑了植被的因素。吴征镒等(2011)在中国植物区系区划中特别是确定地区和亚地区的界限时还考虑了植被区划。但这些区划原则都是定性的,或是在一定程度上简化了区系的关系。由于缺乏详细的地理尺度上的资料和数据,制约了在生物地理分区方面的深入分析和精细的划分,使得人们广泛地使用粗放的植被类型、生物群落或气候类型的图来简易地划分生物地理的次级区划(Kreft & Jetz, 2010)。

可见,中国区系区划的工作仍然是非常不足的,区系边界特别是次级分区的边界仍然是不清楚的。即使是一级分区如中国植物区系古热带植物区的边界和古地中海植物区的边界仍然需要详实的资料进一步界定,即便是研究得比较清晰的中国-喜马拉雅森林植物亚区和中国-日本森林植物亚区的分界线也不十分明确。中国植物区系次级分区中的地区和亚地区,目前还缺乏详细的物种组成和分布信息的资料,也缺乏定量的统计分析(Zhang et al, 2016b);甚至部分区划单元的范围和特征可能需要重新界定。因此,植物区系区划定性的现象描述还没有完善,还无法定量地对区系格局进行解释或对形成机制进行深入研究。

阐明中国植物区系各分布区类型的形成和起源是揭示中国植物区系地理格局形成的基础。通常相同分布区类型应该有着相似的形成历史、形成机制,也经历过相同或相似的地质环境变迁,因此,

研究分布区形成可回答植物区系来源、形成时间和散布机制等生物地理学中的重要理论问题。但迄今为止,除了东亚-北美间断分布类型外(Wen et al, 2016),对其他中国植物区系各分布区类型的起源和形成的研究还不多。此外,虽然随着分子系统和生物地理学等学科快速发展,中国植物区系中已有至少 300 个不同分类阶元的类群开展了分子生物地理学或历史生物地理学的研究,为揭示中国植物区系的来源、传播途径、起源时间以及同地质环境的变迁提供了重要的证据。但相对于中国接近 3,000 属来说,也仅是 1/10。还需要进行多类群、多层次、多方法、多学科的综合研究。

3 发展趋势

3.1 在区系调查方面,注重植物信息数据的完整和精细收集

植物区系的调查采集(包括资料的收集)在不断发展的生物学中将继续发挥重要的作用(Wen et al, 2015)。但目前中国仍然有许多调查薄弱的区域,有些地区甚至没有植物区系的调查,如藏东南-云南边境部分地区以及金沙江、雅砻江、怒江部分河谷地区,最近在雅砻江还发现有古老的特有种雅砻江冬麻豆(*Salweenia bouffordiana*) (Yue et al, 2011)等,甚至在区系调查较为密集的神农架地区,近年还发现古老的特有种征镒麻属(Deng et al, 2013)。在植物区系的野外调查上,除仍需秉承传统的标本采集及完整的生境及性状信息记录外,还应加强对植物数字化信息,如GPS、海拔、生境、图片及DNA样品等资料的全面搜集。过去由于大多数标本采集记录缺乏GPS信息,制约了植物区系定量区划工作的开展。GPS及海拔信息对区系区划意义重大,在这两类信息的基础上,可以通过DIVA GIS从气候图层中分别提取不同分布区植物在3个时期即末次间冰期(the Last Interglacial, LIG; c. 120–140 ka)、末次冰盛期(Last Glacial Maximum, LGM; c. 21 ka)和现今(Current; c. 1950–2000)的19个生物气候因子,进而可以分析不同分布类型植物在气候因素方面的差异,还可以通过生态位模拟方法推测不同植物的历史潜在分布区,这些方法在如今的生态学和居群遗传学研究中都得到了广泛的应用(Smith & Donoghue, 2010; Wang et al, 2015; Luo et al, 2016),而所有的这些都需要精确的GPS采集记录。因此,

今后还需要对标本记录资料或调查信息不全的物种进行原产地的补充调查和信息(GPS、图片等)的采集。

此外,通过系统和深入的区系调查和采集还会获得新的分布信息,如有些植物在原产地已经灭绝,但可能在其他区域发现。如富宁油果樟(*Syndiclis fooningensis*)在模式产地富宁灭绝,但在邻近的那坡县有发现,刺萼参(*Echinocodon draco*)的模式产地湖北省郧西县已经灭绝,但在陕西安康县发现有少量居群(Hong, 2016)。

3.2 加强分类学特别是地区植物志或专著的编写和修订,进一步核实物种名录,提高物种数据的准确度

目前植物区系数据库主要来源于已经出版的植物志书、专著和各类植物名录以及植物标本馆的标本(特别是分布的详细数据),虽然《中国植物志》、*Flora of China*以及地方植物志和名录已经提供了大量的植物区系的信息和分布数据,但由于对物种概念的理解不同、异名、裸名物种鉴定不够准确以及分类学的处理和分类群归属的变更、调查的不足,加上录入的标本数据鉴定的准确性不足等,植物区系的深入研究特别是大尺度的物种多样性准确分析受到了很大的影响。今后植物分类学家的一个重要任务就是提升标本鉴定的准确率、规范物种名称、提高植物区系数据库物种信息的准确率。

3.3 构建各类信息齐全的植物区系大数据,并且利用数据库信息对植物区系进行分析

近年来各类物种数据不断增加,利用数据库中的物种信息可以:(1)对植物区系的分布格局现象进行精确描述,并探讨其影响因素;(2)探讨区系特有性格局的成因,确定特有类群的分布格局并界定特有中心成因以及提出保护对策;(3)为植物区系分布和分异边界提供精确的描述;(4)获取植物潜在的进化信息(如短时间尺度的表型变化等)。因此,信息齐全的数据库建设对今后植物区系的研究至关重要。目前国内已经有了一些利用物种信息数据库进行的研究,如Mao等(2013)分析了青藏高原物种丰富度格局,发现青藏高原物种的丰富度集中在南部和东部区域,这与这些区域的环境异质性、水分及能量的变化等有密切的关系。Zhang等(2009a)通过对横断山区一些重要类群的物种丰富度进行的梯度分析,提出了以北纬29°线为横断山植物区系的南

北分界线;并且发现海拔3,000–4,000 m是物种丰富度、特有度最高的范围,也是植物区系剧烈分化的场所(Zhang et al, 2009b);Zhang等(2016a)通过对青藏高原植物区系进行网格划分,定量地对青藏高原植物区系进行了分区研究。此外,对区系中特有类群的分布格局和特有中心的定量分析和确定如López-Pujol等(2011)、Huang等(2011, 2012)、Feng等(2015)对中国特有类群的空间格局及成因开展了深入的定量研究。

3.4 与相关学科结合,揭示植物区系地理格局的时空演化历程

3.4.1 与生态学结合,解释区系中物种分布的格局及其相关的环境因素

近年来,生态学家和生物地理学家都在更大范围内探索和解释生物地理格局或分布模式,生物地理学和生态学的交叉成为植物区系地理研究发展的重要方向,如根据系统发育推测区域中物种分布区的形成过程,用谱系地理分析揭示遗传多样性地理历史、物种归类以及生态位的分割、生态空间的饱和以及区域生物区系的多样化和发生发展等(Emerson et al, 2011; Ricklefs & Jenkins, 2011)。与生态学结合还体现在生物地理学和生态学在集合种群(metapopulation)、集合群落(metacommunity)、区域群落等尺度上均采用共同的研究方法和技术手段来探讨不同尺度区系形成的时空进程(Jenkins & Ricklefs, 2011)。因此,在未来植物区系的研究中,无论是在小的地区尺度还是在大的区域尺度上均会涉及到从种群到群落以及更大范围的植物群落或植物区系的深入探究,并逐步从区系构成、特征和性质等现象的定性描述,深入到区系不同尺度的空间构成的时间和空间进化历程以及形成机制等机理上的解释。

随着植物区系地理学研究的深入,需要解释为什么一些物种会分布在一些区域而不在其他范围中出现,除了物种自身的散布能力外,生态因素是主要的限制因子。生态位模型(Ecological Niche Modeling, ENM)或物种分布模型(Species Distribution Modeling, SDM)的提出为分析物种的空间格局提供了新方法(Soberón & Peterson, 2005),并已在生物地理和生物多样性保护等领域被广泛使用(朱耿平等, 2013)。生态位模型是整合物种分布信息(如来自标本记录的信息),结合气候、地形、土壤性质

乃至物种的相互作用和生理条件等来预测物种可能的分布区或特定需求的生态条件,在现代植物地理格局形成的研究中结合生态位模型来揭示大尺度生物地理格局也是生物地理学发展的趋势(Wen et al, 2013)。例如Zhang等(2016b)利用物种分布模型(SDM)将中国植物区系分为5个主要的植物地理区域和11个亚区域,补充和修订了原有的植物地理分布,同时还发现年降水量是影响植物区系丰富度的核心因素。

3.4.2 与系统发育结合,探讨植物区系的进化历史和亲缘关系

(1)探讨区系的起源和形成时间。近年来,越来越多的研究者开始将系统发育信息整合到不同尺度的区系地理或生态地理的研究中(Emerson & Gillespie, 2008),用以探讨区系的系统发育多样性(phylogenetic diversity)及区系的进化潜力。因此,在大数据以及生态学等学科融合的基础上,可结合系统发育信息对不同区域的植物区系进行系统发育多样性指数的计算及差异性比较,从而推测不同区域间区系的相似性、差异性及其进化关系(Kreft & Jetz, 2010)。分子进化树包含生物进化关系的重要信息,不仅可以准确反映某一区系内某一类群与其姐妹群的系统发育关系,推测该生物类群与其姐妹群的分化时间,还可以通过结合生物地理学的研究来推测类群可能的地理来源。这样能揭示植物区系的分化时间、形成历史、空间格局的进化历程以及植物区系的进化潜力。最近,Swenson和Umaña (2014)提出了植物系统发育区系学(phylofloristics)的概念,利用区系中多个系统发育树来评估岛屿特有的植物区系格局和系统发育区系的相似性,并根据比较特有和非特有类群的结果来分析这些相似性与空间和环境距离等因素的关系。近年来,越来越多的区系进化历史的研究开始注重与系统发育的研究相结合。Verboom等(2009)结合系统发育关系估测了以Fynbos和Succulent karoo两种植物群落为代表的南非开普植物区系的起源时间及分化时间,该研究表明,Succulent karoo区系是中新世后才发展起来的与气候波动联系紧密的年轻区系,而Fynbos区系尽管有些类群的起源可以追溯到渐新世,但是绝大多数类群的起源和分化时间都很年轻。Hooen等(2010)的研究表明,有着最为丰富的热带植物多样性的亚马逊植物区是更新世以前在安第斯山脉隆

升的背景下形成的年轻的植物区系。加利福尼亚现代植物区系的形成主要是起源于北极-第三纪和古地中海第三纪成分和外来迁移的类群,进化历程中灭绝率低,也是一个重要的避难所(Lancaster & Kay, 2013)。Crisp和Cook (2013)基于以往发表的85个有关澳大利亚植物类群的系统发育的研究,提出澳大利亚植物区系成分的主要来源并非像以往学者认为的那样有着冈瓦纳起源的背景,所研究类群中只有45%的类群来源于冈瓦纳大陆,且澳大利亚不同的植物群落有着不同的来源背景,其占优势的旱生植物区系是中心世以来在气候变干变冷的背景下形成的。Linder (2014)对非洲的植物区系的研究表明,整个非洲可以分为6个以不同地理分布为中心的植物区系,其中最古老的是低地森林(lowland forest)植物区系,而最年轻的热带高山植物区系(tropic-alpine flora)是上新世和更新世在东非火山山顶发育而成的。

此外,随着系统发育的研究积累,进化生物学家们发现在进化历程中各进化支系主要的生态位比预期的要保守,也即系统发育生态位的保守性(phylogenetic niche conservatism)(Harvey & Pagel, 1991)。Donoghue (2008)指出这种系统发育生态位的保守性对群落和区域植物区系的形成有重要的作用;与物种就地进化出的适应机制相反,若是物种迁移通道存在的话,新的环境常会被缓慢迁移的物种所占据,这些物种相关的适应机制在原来区域就已经进化形成,而不是在新环境中进化形成。这能更深入地理解物种的分化、灭绝和迁移等生物地理格局的成因,如Smith和Donoghue (2010)通过对*Caprifolium*生物地理格局的研究,探讨了马德雷-特提斯间断模式(Madreal-Tethyan disjunct)的形成以及*Hypericum*生物地理进化历史的重建(Meseguer et al, 2015)等。

(2)植物区系分区的定量和精细划分。植物区系分区一直是区系区划研究的一个重要内容(Cox, 2001)。结合系统发育的区系区划更加精细和定量,能够客观地反映生物区系的进化历史(Holt et al, 2013)。当前,基于系统进化的区系区划的最具代表性的研究来自于动物的区系区划。Holt等(2013)在华莱士动物区系区划的基础上,利用Pairwise phylogenetic beta diversity的方法,通过整合21,037种哺乳动物、鸟类、两栖类的系统发育关系及地理分布,

对全世界动物区系进行了重新划分, 确立了全球的动物区系分区。植物区系区划方面, Li等(2015)通过对云南种子植物1,983属的地理分布资料, 并结合系统发育关系将云南省划分为8个生物地理小区, 聚为南、北两个大的地理单元。兔耳风属(*Ainsliaea*)、粉花绣线菊(*Spiraea japonica*)复合群的系统学及生物地理学研究也从侧面印证了东亚植物区系中国-日本和中国-喜马拉雅地区的划分(Zhang et al, 2006; Mitsui et al, 2008)。

(3)结合群体遗传和亲缘地理学研究, 探讨植物区系的次级分区及避难所。近年来随着群体遗传学和亲缘地理学的发展, 很多学者开始利用亲缘地理学的研究方法探讨植物区系的次级分区。Amarilla等(2015)基于对南美过渡带(The South American Transition Zone)的植物*Munroa argentina*的亲缘地理学研究, 证实了该地区植物区系亚地区的划分。亲缘地理学研究还为植物区系分界线形成的时间和机制提供了依据, 区系分区上会存在着分割某两个地区的地理分界线如田中-楷永线(Tanaka-Kaiyong Line) (Li & Li, 1997), Fan等(2013)通过对*Sophora davidii*的亲缘地理学研究表明, 田中-楷永线并不是由于地质活动造成的, 而是由更新世气候和植被类型的改变所塑造。Bai等(2016)利用*Juglans section Cardiocaryon*的亲缘地理学研究揭示了在新近纪(Neogene)和更新世(Pleistocene)东亚植物区存在一条南北分界线。

(4)与古植物及地质历史资料结合, 探讨植物区系形成的历史进程。古植物学的相关研究为理解植物区系的历史演变提供了依据(Tiffney & Manchester, 2001)。近年来, 随着越来越多的化石类群的发表, 从大尺度上探讨植物区系的演变成为可能。Jacques等(2013)利用整个中国已经发表的74个地点的144个化石群对新近纪整个中国的植被进行了重建, 并推测气候变冷及季风的变化是影响中国不同地区植物区系演变的重要因素。Xing等(2015)对从数据库中提取出的5个不同地质年代的55个木本被子植物化石区系的数据进行了排序和聚类分析, 推测了木本被子植物区系在新生代的演变。该研究表明, 现代不同地区的木本被子植物区系的形成是新生代以来在不同的地质年代各个地区中存在着扩散障碍(dispersal barriers)的结果, 扩散障碍导致了不同地区的木本被子植物区系平行进化, 同

时气候变化在木本被子植物区系的地理演化中扮演着重要的角色(Xing et al, 2015)。

气候的变化是驱动植物区系演变的重要驱动因素之一, 结合化石分布和气候数据的模型模拟, 为我们探寻气候变化对植物区系演变的影响提供了可能性。Huang等(2015)利用孑遗植物的分布和气候数据的相关性分析, 认为孑遗植物在新生代的历史分布与降水有关。孑遗植物在北半球曾经的广泛分布很可能与当时的湿润气候有关, 而当前的孑遗植物的狭域分布与新生代全球变冷的背景下的气候变干相关(Huang et al, 2015)。Hui等(2011)对天水盆地的孢粉研究表明, 在中新世早期这一地区还有温带性质的常绿阔叶林存在, 而自8.5 Ma之后逐步被草原植被所代替, 并认为全球性的气候变化(干旱)是驱动这一地区区系演变的因素。

地质变迁是影响植物分布格局的重要因素, 其中对植物区系变迁影响较大的地质变迁主要包括海陆格局的改变以及局部地区的造山运动等(Tiffney & Manchester, 2001; Milne & Abbott, 2002)。随着地质学和生物学的不断发展, 一些研究者开始从地质演化角度揭示某一特定区域的区系形成机制, 特别是综合地质历史、气候演变以及分子钟、生物地理进化、分化速率等所有的信息和成果, 利用元分析(meta-analysis)方法来研究生物区系的形成与演变。如Favre等(2015)综合了有关青藏高原生物多样性进化的所有成果, 结合青藏高原的地质历史, 通过元分析重建了其生物多样性的形成和演变历程。类似的还有Hoorn等(2010)通过结合该区域的地质演化研究和系统发育研究, 提出了亚马逊植物区系的形成很可能与安第斯山脉隆升及山脉隆升引起的地域性的环境变化(地形、流域系统、气候变化)相关。地质变迁可以促进植物区系的演变和发展, 同样现存的植物区系分布模式又可以反映某些特定的地质历史变迁。最近, Zhu (2016)通过比较海南岛与越南以及我国广东广西的植物区系相似性认为, 海南岛与越南植物区系具有更高的相似性, 并认为海南岛的起源是大陆性的, 并且至少是在始新世时, 海南岛与越南及中国广西是相互毗邻的。

4 展望

当今的植物区系地理学的研究步入了多学科融合交叉(生态学、系统发育、古植物及地质历史

等)、多尺度深入(种群、类群、区系、大尺度格局等)、综合研究分析等一个崭新的时代,学科界限日趋模糊;整合分子系统发育、生态学、化石及地质历史等多学科资料的交叉融合,开展精细尺度的植物区系起源与进化以及空间格局形成机制的研究,已成为近年来新的研究热点。植物区系进一步调查完善和全数据库构建大数据分析(数据挖掘-大数据分析-多方法的运用),使植物区系地理研究也逐步由定性的现象描述进入到解释区系格局形成机制以及区系区划的定量研究,这成为区系地理学学科发展的另一趋势。其中最重要的是基础物种信息数据库的完善和信息的准确,一方面需要植物分类学家更深入和细致的研究和分类修订,对植物标本进行系统的清理和正确的鉴定,对物种基础的数据库进行审核;另一方面,需要补充完善物种的各类信息如形态-地理、系统发育、繁殖、生态、环境、GPS、染色体、遗传以及基因组等形成物种全息数据库。这是植物区系地理学家面临的新的机遇和挑战。

致谢: 陈家辉博士提供相关资料,特此致谢。

参考文献

- Amarilla LD, Anton AM, Chiapella JO, Manifesto MM, Angulo DF, Sosa V (2015) *Munroa argentina*, a grass of the South American transition zone, survived the Andean uplift, aridification and glaciations of the Quaternary. *PLoS ONE*, 10, e0128559.
- Bai WN, Wang WT, Zhang DY (2016) Phylogeographic breaks within Asian butternuts indicate the existence of a phytogeographic divide in East Asia. *New Phytologist*, 209, 1757–1772.
- Cao W, Fu PY, Liu SZ, Li JY, Qin ZS, Yu XH, Zhu CX (1995) Studies on the flora of the seed plants from the flora subregion of NE China Plain. *Acta Botanica Yunnanica*, 17(Suppl. VII), 22–31. (in Chinese with English abstract) [曹伟, 傅沛云, 刘淑珍, 李冀云, 秦忠时, 于兴华, 朱彩霞 (1995) 东北平原植物区系亚地区种子植物区系研究. 云南植物研究, 17(增刊VII), 22–31.]
- Chen LZ (ed.) *Floristics and Vegetation Geography of China*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [陈灵芝主编. 中国植物区系与植被地理. 科学出版社, 北京]
- Cox CB (2001) The biogeographic regions reconsidered. *Journal of Biogeography*, 28, 511–523.
- Crisp MD, Cook LG (2013) How was the Australian flora assembled over the last 65 million years? A molecular phylogenetic perspective. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 44, 303–324.
- Deng T, Kim C, Zhang DG, Zhang JW, Li ZM, Nie ZL, Sun H (2013) *Zhengyia shennongensis*: a new bulbiferous genus and species of the nettle family (Urticaceae) from central China exhibiting parallel evolution of the bulbil trait. *Taxon*, 62, 89–99.
- Donoghue MJ (2008) A phylogenetic perspective on the distribution of plant diversity. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 105, 11549–11555.
- Emerson BC, Cicconardi F, Fanciulli PP, Shaw PJA (2011) Phylogeny, phylogeography, phylobetadiversity and the molecular analysis of biological communities. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 366, 2391–2402.
- Emerson BC, Gillespie RG (2008) Phylogenetic analysis of community assembly and structure over space and time. *Trends in Ecology & Evolution*, 23, 619–630.
- Fan DM, Yue JP, Nie ZL, Li ZM, Comes HP, Sun H (2013) Phylogeography of *Sophora davidii* (Leguminosae) across the ‘Tanaka-Kaiyong Line’, an important phytogeographic boundary in Southwest China. *Molecular Ecology*, 22, 4270–4288.
- Fang RZ, Bai PY, Huang GB, Wei YG (1995) A floristic study on the seed plants from tropics and subtropics of Dian-Qian-Gui. *Acta Botanica Yunnanica*, 17(Suppl. VII), 111–150. (in Chinese with English abstract) [方瑞征, 白佩瑜, 黄广宾, 韦毅刚 (1995) 滇黔桂热带亚热带(滇黔桂地区和北部湾地区)种子植物区系研究. 云南植物研究, 17(增刊VII), 111–150.]
- Favre A, Päckert M, Pauls SU, Jähnić SC, Uhl D, Michalak I, Muellner-Riehl AN (2015) The role of the uplift of the Qinghai-Tibetan Plateau for the evolution of Tibetan biotas. *Biological Reviews*, 90, 236–253.
- Feng G, Mao LF, Sandel B, Swenson NG, Svenning JC (2015) High plant endemism in China is partially linked to reduced glacial-interglacial climate change. *Journal of Biogeography*, 43, 145–154.
- Fu PY, Li JY, Cao W, Ding TY, Qin ZS, Liu SZ, Zhu CX (1995) Studies on the flora of the seed plants from the flora region of NE China. *Acta Botanica Yunnanica*, 17(Suppl. VII), 11–21. (in Chinese with English abstract) [傅沛云, 李冀云, 曹伟, 丁托娅, 秦忠时, 刘淑珍, 朱彩霞 (1995) 东北植物区系地区种子植物区系研究. 云南植物研究, 17(增刊VII), 11–21.]
- Goodwin ZA, Harris DJ, Filer D, Wood JRI, Scotland RW (2015) Widespread mistaken identity in tropical plant collections. *Current Biology*, 25, R1066–R1067.
- Hao RM (1997) On the areal-types of the Chinese endemic genera of seed plants. *Acta Phytotaxonomica Sinica*, 36, 500–510. (in Chinese with English abstract) [郝日明 (1997) 试论中国种子植物特有属的分布区类型. 植物分类学报, 36, 500–510.]
- Harvey PH, Pagel MS (1991) *The Comparative Method in Evolutionary Ecology*. Oxford University Press, Oxford.

- Holt BG, Lessard JP, Borregaard MK, Fritz SA, Araújo MB, Dimitrov D, Fabre PH, Graham CH, Graves GR, Jönsson KA, Nogués-Bravo D, Wang ZH, Whittaker RJ, Fjeldsø Jon RC (2013) An update of Wallace's zoogeographic regions of the world. *Science*, 339, 74–78.
- Hong DY (2016) A Monograph of *Codonopsis* and Allied Genera. Science Press, Beijing.
- Hong DY, Blackmore S (2013) Plants of China: A Companion of the Flora of China. Science Press, Beijing.
- Hoorn C, Wesselingh FP, ter Steege H, Bermudez MA, Mora A, Sevink J, Sanmartín I, Sanchez-Meseguer A, Anderson CL, Figueiredo JP, Jaramillo C, Riff D, Negri FR, Hooghiemstra H, Lundberg J, Stadler T, Sarkanen T, Antonelli A (2010) Amazonia through time: Andean uplift, climate change, landscape evolution, and biodiversity. *Science*, 330, 927–931.
- Hsieh CF (2002) Composition, endemism and phytogeographical affinities of the Taiwan flora. *Taiwania*, 47, 298–310.
- Huang JH, Chen B, Liu C, Lai JS, Zhang JL, Ma KP (2012) Identifying hotspots of endemic woody seed plant diversity in China. *Diversity and Distributions*, 18, 673–688.
- Huang JH, Chen JH, Ying TS, Ma KP (2011) Features and distribution patterns of Chinese endemic seed plant species. *Journal of Systematics and Evolution*, 49, 81–94.
- Huang YJ, Jacques FMB, Su T, Ferguson DK, Tang H, Chen WY, Zhou ZK (2015) Distribution of Cenozoic plant relicts in China explained by drought in dry season. *Scientific Reports*, 5, 14212.
- Hui Z, Li J, Xu Q, Song C, Zhang J, Wu F, Zhao Z (2011) Miocene vegetation and climatic changes reconstructed from a sporopollen record of the Tianshui Basin, NE Tibetan Plateau. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 308, 373–382.
- Jacques FMB, Shi G, Wang WM (2013) Neogene zonal vegetation of China and the evolution of the winter monsoon. *Bulletin of Geosciences*, 88, 17.
- Jenkins DG, Ricklefs RE (2011) Biogeography and ecology: two views of one world. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 366, 2331–2335.
- Kreft H, Jetz W (2010) A framework for delineating biogeographical regions based on species distributions. *Journal of Biogeography*, 37, 2029–2053.
- Lancaster LT, Kay KM (2013) Origin and diversification of the California flora: re-examining classic hypotheses with molecular phylogenies. *Evolution*, 67, 1041–1054.
- Li R, Kraft NJB, Yang J, Wang YH (2015) A phylogenetically informed delineation of floristic regions within a biodiversity hotspot in Yunnan, China. *Scientific Reports*, 5, 9396.
- Li XW (1995a) A floristic study on the seed plants from tropical Yunnan. *Acta Botanica Yunnanica*, 17, 115–128. (in Chinese with English abstract) [李锡文 (1995a) 云南热带种子植物区系. 云南植物研究, 17, 115–128.]
- Li XW (1995b) A floristic study on the seed plants from the region of Yunnan Plateau. *Acta Botanica Yunnanica*, 17, 1–14. (in Chinese with English abstract) [李锡文 (1995b) 云南高原地区种子植物区系. 云南植物研究, 17, 1–14.]
- Li XW, Li J (1997) The Tanaka-Kaiyong Line—an important floristic line for the study of the flora of East Asia. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 84, 888–892.
- Li XW, Li J (1993) A preliminary floristic study on the seed plants from the region of Hengduan Mountain. *Acta Botanica Yunnanica*, 15, 217–231. (in Chinese with English abstract) [李锡文, 李捷 (1993) 横断山脉地区种子植物区系的初步研究. 云南植物研究, 15, 217–231.]
- Linder HP (2014) The evolution of African plant diversity. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2, 38.
- Liu FX, Liu SL, Yang ZB, Hao RM, Yao J, Huang ZY, Li N (1995) A floristic study on the seed plants from the region of East China. *Acta Botanica Yunnanica*, 17(Suppl. VII), 93–110. (in Chinese with English abstract) [刘昉勋, 刘守炉, 杨志斌, 郝日明, 姚金, 黄致远, 李宁 (1995) 华东地区种子植物区系研究. 云南植物研究, 17(增刊VII), 93–110.]
- Liu JQ, Sun YS, Ge XJ, Gao LM, Qiu YX (2012) Phylogeographic studies of plants in China: advances in the past and directions in the future. *Journal of Systematics and Evolution*, 50, 267–275.
- Liu YX (1995) A study on origin and formation of the Chinese desert floras. *Acta Phytotaxonomica Sinica*, 33, 131–143. (in Chinese with English abstract) [刘焯心 (1995) 试论荒漠地区植物区系的发生与形成. 植物分类学报, 33, 131–143.]
- López-Pujol J, Zhang FM, Sun HQ, Ying TS, Ge S (2011) Centres of plant endemism in China: places for survival or for speciation? *Journal of Biogeography*, 38, 1267–1280.
- Lu AM (1999) The Geography of Spermatophytic Families and Genera. Science Press, Beijing. (in Chinese) [路安民 (1999) 种子植物科属地理. 科学出版社, 北京.]
- Luo D, Yue JP, Sun WG, Xu B, Li ZM, Comes HP, Sun H (2016) Evolutionary history of the subnival flora of the Himalaya-Hengduan Mountains: first insights from comparative phylogeography of four perennial herbs. *Journal of Biogeography*, 43, 31–43.
- Ma JS (2011) The Outline of Taxonomic Literature of Eastern Asian Higher Plants. Higher Education Press, Beijing. (in Chinese) [马金双 (2011) 东亚高等植物分类学文献概览. 高等教育出版社, 北京.]
- Mao LF, Chen SB, Zhang JL, Hou YH, Zhou GS, Zhang XS (2013) Vascular plant diversity on the roof of the world: spatial patterns and environmental determinants. *Journal of Systematics and Evolution*, 51, 371–381.
- Meseguer AS, Lobo JM, Ree R, Beerling DJ, Sanmartín I (2015) Integrating fossils, phylogenies, and niche models into biogeography to reveal ancient evolutionary history: the case of *Hypericum* (Hypericaceae). *Systematic Biology*, 64, 215–232.
- Milne RI, Abbott RJ (2002) The origin and evolution of Tertiary relict floras. *Advances in Botanical Research*, 38,

- 281–314.
- Mitsui Y, Chen ST, Zhou ZK, Peng CI, Deng YF, Setoguchi H (2008) Phylogeny and biogeography of the genus *Ainsliaea* (Asteraceae) in the Sino-Japanese region based on nuclear rDNA and plastid DNA sequence data. *Annals of Botany*, 101, 111–124.
- Pan XL, Dang RL, Lv GH, Gu FX, Jiang XC, Wu GH, Shen GM, Chang SL, Wei Y (2003) Plant Floristic Geography and Its Resources Utilization in Arid Desert Area, Northwest China. Science Press, Beijing. (in Chinese) [潘晓玲, 党荣理, 吕光辉, 顾峰雪, 姜孝成, 伍光和, 沈观冕, 常顺利, 魏英 (2003) 西北干旱荒漠区植物区系地理与资源利用. 科学出版社, 北京.]
- Qi CJ, Yu XL, Xiao YT, Cao TR, Zheng Z, Yin GP (1995) A study on the flora of the seed plants from the floristic region of central China. *Acta Botanica Yunnanica*, 17(Suppl. VII), 55–92. (in Chinese with English abstract) [祁承经, 喻勋林, 肖育檀, 曹铁如, 郑重, 尹国萍 (1995) 华中植物区种子植物区系的研究. 云南植物研究, 17(增刊VII), 55–92.]
- Qiu YX, Fu CX, Comes HP (2011) Plant molecular phylogeography in China and adjacent regions: tracing the genetic imprints of Quaternary climate and environmental change in the world's most diverse temperate flora. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 59, 225–244.
- Ricklefs RE, Jenkins DG (2011) Biogeography and ecology: towards the integration of two disciplines. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 366, 2438–2448.
- Smith SA, Donoghue MJ (2010) Combining historical biogeography with niche modeling in the *Caprifolium* clade of *Lonicera* (Caprifoliaceae, Dipsacales). *Systematic Biology*, 59, 322–341.
- Soberón J, Peterson AT (2005) Interpretation of models of fundamental ecological niches and species' distributional areas. *Biodiversity Informatics*, 2, 1–10.
- Song ZC, Li HM, Zheng YH, Liu GW (1983) Miocene floristic region of China. In: *Palaeobiogeographic Provinces of China* (ed. Editorial Committee of Paleontology Basic Theory Book Series), pp. 178–184. Science Press, Beijing. (in Chinese) [宋之琛, 李浩敏, 郑亚惠, 刘耕武 (1983) 我国中新世植物区系. 见: 中国古生物地理区系(编著: 古生物学基础理论丛书编委会), pp. 178–184. 科学出版社, 北京.]
- Swenson NG, Umaña MN (2014) Phylofloristics: an example from the Lesser Antilles. *Journal of Plant Ecology*, 7, 166–175.
- Takhtajan A (1986) *Floristic Regions of the World*. University of California Press, Berkeley, CA.
- Tao JR (1992) The Tertiary vegetation and flora and floristic regions in China. *Acta Phytotaxonomica Sinica*, 30, 25–43. (in Chinese with English abstract) [陶君容 (1992) 中国第三纪植被和植物区系历史及分区. 植物分类学报, 30, 25–43.]
- Tao JR (2000) The Evolution of the Late Cretaceous-Cenozoic Floras in China. Science Press, Beijing. (in Chinese) [陶君容 (2000) 中国晚白垩世至新生代植物区系的发展与演变. 科学出版社, 北京.]
- Tiffney BH, Manchester SR (2001) The use of geological and paleontological evidence in evaluating plant phylogeographic hypotheses in the Northern Hemisphere tertiary. *International Journal of Plant Sciences*, 162, S3–S17.
- Verboom GA, Archibald JK, Bakker FT, Bellstedt DU, Conrad F, Dreyer LL, Forest F, Galley C, Goldblatt P, Henning JF, Mummenhoff K, Linder HP, Muasya AM, Oberlander KC, Savolainen V, Snijman DA, Niet T, Nowell TL (2009) Origin and diversification of the Greater Cape flora: ancient species repository, hot-bed of recent radiation, or both? *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 51, 44–53.
- Wang HS (1992) *Floristic Geography*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [王荷生 (1992) 植物区系地理. 科学出版社, 北京.]
- Wang HS (1997) *Floristic Geography of North China*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [王荷生 (1997) 华北植物区系地理. 科学出版社, 北京.]
- Wang HS, Zhang YL (1994a) The distribution patterns of spermatophytic families and genera endemic to China. *Acta Geographica Sinica*, 49, 403–417. (in Chinese with English abstract) [王荷生, 张镔锂 (1994a) 中国种子植物特有科属的分布型. 地理学报, 49, 403–417.]
- Wang HS, Zhang YL (1994b) The biodiversity and characters of spermatophytic genera endemic to China. *Acta Botanica Yunnanica*, 16, 209–220. (in Chinese with English abstract) [王荷生, 张镔锂 (1994b) 中国种子植物特有属的多样性和特征. 云南植物研究, 16, 209–220.]
- Wang HS, Zhang YL, Huang JS, Wu ZF, Zhao SL, Wang HS, Zhang ZW, Chen YS, Zhang CL (1995) A floristic study on the seed plants in the north China region. *Acta Botanica Yunnanica*, 17(Suppl. VII), 32–54. (in Chinese with English abstract) [王荷生, 张镔锂, 黄劲松, 吴志芬, 赵善伦, 王合生, 张振万, 陈彦生, 张春林 (1995) 华北地区种子植物区系研究. 云南植物研究, 17(增刊VII), 32–54.]
- Wang ZW, Chen ST, Nie ZL, Zhang JW, Zhou Z, Deng T, Sun H (2015) Climatic factors drive population divergence and demography: insights based on the phylogeography of a riparian plant species endemic to the Hengduan Mountains and adjacent regions. *PLoS ONE*, 10, e0145014.
- Wen J, Ickert-Bond SM, Appelhans MS, Dorr LJ, Funk VA (2015) Collections-based systematics: opportunities and outlook for 2050. *Journal of Systematics and Evolution*, 53, 477–488.
- Wen J, Nie ZL, Ickert-Bond SM (2016) Intercontinental disjunctions between eastern Asia and western North America in vascular plants highlight the biogeographic importance of the Bering land bridge from late Cretaceous to Neogene. *Journal of Systematics and Evolution*, 54, 469–490.
- Wen J, Ree RH, Ickert-Bond SM, Nie ZL, Funk V (2013)

- Biogeography: Where do we go from here? *Taxon*, 62, 912–927.
- Wu DL, Xing FW, Ye HG, Li ZX, Chen BH (1996) Study on the spermatophytic flora of South China Sea Islands. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 4, 1–22. (in Chinese with English abstract) [吴德邻, 邢福武, 叶华谷, 李泽贤, 陈炳辉 (1996) 南海岛屿种子植物区系地理的研究. *热带亚热带植物学报*, 4, 1–22.]
- Wu SG, Yang YP, Fei Y (1995) On the flora of the alpine region in the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau. *Acta Botanica Yunnanica*, 17, 233–250. (in Chinese with English abstract) [武素功, 杨永平, 费勇 (1995) 青藏高原高寒地区种子植物区系的研究. *云南植物研究*, 17, 233–250.]
- Wu ZY (1965) The tropical floristic affinity of the flora of China. *Chinese Science Bulletin*, 1, 25–33. (in Chinese) [吴征镒 (1965) 中国植物区系的热带亲缘. *科学通报*, 1, 25–33.]
- Wu ZY (1987) *Flora of Tibet*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [吴征镒 (1987) *西藏植物志*. 科学出版社, 北京.]
- Wu ZY (1988) Hengduan Mountain flora and her significance. *Journal of Japanese Botany*, 63, 297–311.
- Wu ZY (1979) The regionalization of Chinese flora. *Acta Botanica Yunnanica*, 1, 1–24. (in Chinese with English abstract) [吴征镒 (1979) 论中国植物区系的分区问题. *云南植物研究*, 1, 1–24.]
- Wu ZY (1991) The areal-types of Chinese genera of seed plants. *Acta Botanica Yunnanica*, 13(Suppl. IV), 1–139. (in Chinese with English abstract) [吴征镒 (1991) 中国种子植物属的分布区类型. *云南植物研究*, 13(增刊IV), 1–139.]
- Wu ZY, Lu AM, Tang YC, Chen ZD, Li DZ (2003a) The Families and Genera of Angiosperms in China: A Comprehensive Analysis. Science Press, Beijing. (in Chinese) [吴征镒, 路安民, 汤彦承, 陈之端, 李德铎 (2003a) 中国被子植物科属综论. 科学出版社, 北京.]
- Wu ZY, Sun H (2014) The floristic geography of China. In: *Floristic and Vegetation Geography of China* (ed. Chen LZ). Science Press, Beijing. (in Chinese) [吴征镒, 孙航 (2014) 中国植物区系地理. 见: *中国植物区系与植被地理* (编著: 陈灵芝), 3–214页. 科学出版社, 北京.]
- Wu ZY, Sun H, Zhou ZK, Li DZ, Peng H (2011) Floristics of Seed Plants from China. Science Press, Beijing. (in Chinese) [吴征镒, 孙航, 周浙昆, 李德铎, 彭华 (2011) 中国种子植物区系地理. 科学出版社, 北京.]
- Wu ZY, Sun H, Zhou ZK, Peng H, Li DZ (2007) Origin and differentiation of endemism in the flora of China. *Frontiers of Biology in China*, 2, 125–143.
- Wu ZY, Wang HS (1983) *Chinese Physical Geography*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [吴征镒, 王荷生 (1983) *中国自然地理——植物地理*. 科学出版社, 北京.]
- Wu ZY, Wu SG (1998) A proposal for a new floristic kingdom (realm): the E. Asiatic Kingdom, its delineation and characteristics. In: *Floristic Characteristics and Diversity of East Asian Plants* (eds Zhang AL, Wu SG). China Higher Education Press, Beijing; Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- Wu ZY, Zhou ZK, Li DZ, Peng H, Sun H (2003b) The areal-types of the world families of seed plants. *Acta Botanica Yunnanica*, 25, 245–257. (in Chinese with English abstract) [吴征镒, 周浙昆, 李德铎, 彭华, 孙航 (2003b) 世界种子植物科的分布区类型系统. *云南植物研究*, 25, 245–257.]
- Wu ZY, Zhou ZK, Sun H, Li DZ, Peng H (2006) The Areal-Types of Seed Plants and Their Origin and Differentiation. Yunnan Science and Technology Press, Kunming. (in Chinese) [吴征镒, 周浙昆, 孙航, 李德铎, 彭华 (2006) 种子植物分布区类型及其起源与分化. 云南科技出版社, 昆明.]
- Xing FW, Li ZX, Ye HG, Chen BH, Wu DL (1993) A study on the floristic plant geography of Xisha Islands, South China. *Tropical Geography*, 13, 250–257. (in Chinese with English abstract) [邢福武, 李泽贤, 叶华谷, 陈炳辉, 吴德邻 (1993) 我国西沙群岛植物区系地理的研究. *热带地理*, 13, 250–257.]
- Xing FW, Wu DL, Ye HG, Li ZX, Chen BH, Li TH (1996) *Flora of Nansha Islands and Their Adjacent Islands*. China Ocean Press, Beijing. (in Chinese) [邢福武, 吴德邻, 叶华谷, 李泽贤, 陈炳辉, 李泰辉 (1996) *南沙群岛及其邻近岛屿植物志*. 海洋出版社, 北京.]
- Xing YW, Gandolfo MA, Linder HP (2015) The Cenozoic biogeographical evolution of woody angiosperms inferred from fossil distributions. *Global Ecology and Biogeography*, 24, 1290–1301.
- Yang WJ, Ma KP, Kreft H (2014) Environmental and socio-economic factors shaping the geography of floristic collections in China. *Global Ecology and Biogeography*, 23, 1284–1292.
- Yin LK (1997) Diversity and *ex situ* conservation of plants in the desert region of temperate zone in China. *Chinese Biodiversity*, 5, 40–48. (in Chinese with English abstract) [尹林克 (1997) 中国温带荒漠区的植物多样性及其易地保护. *生物多样性*, 5, 40–48.]
- Ying TS (1994) An analysis of the flora of Qinling Mountain region: its nature, characteristics and origins. *Acta Phytotaxonomica Sinica*, 32, 389–410. (in Chinese with English abstract) [应俊生 (1994) 秦岭植物区系的性质、特点和起源. *植物分类学报*, 32, 389–410.]
- Ying TS (1996) Areography of the endemic genera of seed plants in China. *Acta Phytotaxonomica Sinica*, 34, 479–485. (in Chinese with English abstract) [应俊生 (1996) 中国种子植物特有属的分布区学研究. *植物分类学报*, 34, 479–485.]
- Ying TS, Chen ML (2011) *Phytogeography of China*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [应俊生, 陈梦玲 (2011) *中国植物地理*. 科学出版社, 北京.]

- Yue XK, Yue JP, Yang LE, Li ZM, Sun H (2011) Systematics of the genus *Salweenia* (Leguminosae) from Southwest China with discovery of a second species. *Taxon*, 60, 1366–1374.
- Zhang DC, Boufford DE, Ree RH, Sun H (2009a) The 29 degrees N latitudinal line: an important division in the Hengduan Mountains, a biodiversity hotspot in southwest China. *Nordic Journal of Botany*, 27, 405–412.
- Zhang DC, Ye JX, Sun H (2016a) Quantitative approaches to identify floristic units and centres of species endemism in the Qinghai-Tibetan Plateau, south-western China. *Journal of Biogeography*, 43, 2465–2476.
- Zhang DC, Zhang YH, Boufford DE, Sun H (2009b) Elevational patterns of species richness and endemism for some important taxa in the Hengduan Mountains, southwestern China. *Biodiversity and Conservation*, 18, 699–716.
- Zhang HD (1980) The origin and development of the Cathaysian flora. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 19, 89–98. (in Chinese with English abstract) [张宏达 (1980) 华夏植物区系的起源与发展. 中山大学学报自然科学版, 19, 89–98.]
- Zhang HD (1994) Another theory on the origin and development of the Cathaysian flora. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 33, 1–9. [张宏达 (1994) 再论华夏植物区系的起源. 中山大学学报(自然科学版), 33, 1–9.]
- Zhang MG, Slik JWF, Ma KP (2016b) Using species distribution modeling to delineate the botanical richness patterns and phytogeographical regions of China. *Scientific Reports*, 6, 22400
- Zhang WH, Li DW, Liu GB, Xu XH (2002) The characteristic of the seed plant in Loess Plateau. *Bulletin of Botanical Research*, 22, 373–379. (in Chinese with English abstract) [张文辉, 李登武, 刘国彬, 徐兴华 (2002) 黄土高原地区种子植物区系特征. 植物研究, 22, 373–379.]
- Zhang ZY, Fan LM, Yang JB, Hao XJ, Gu ZJ (2006) Alkaloid polymorphism and ITS sequence variation in the *Spiraea japonica* complex (Rosaceae) in China: traces of the biological effects of the Himalaya-Tibet Plateau uplift. *American Journal of Botany*, 93, 762–769.
- Zhu GP, Liu GQ, Bu WJ, Gao YB (2013) Ecological niche modeling and its applications in biodiversity conservation. *Biodiversity Science*, 21, 90–98. (in Chinese with English abstract) [朱耿平, 刘国卿, 卜文俊, 高玉葆 (2013) 生态位模型的基本原理及其在生物多样性保护中的应用. 生物多样性, 21, 90–98.]
- Zhu H (2008) Distribution patterns of genera of Yunnan seed plants with references to their biogeographical significances. *Advances in Earth Science*, 23, 830–839. (in Chinese with English abstract) [朱华 (2008) 云南种子植物区系地理成分分布格局及其意义. 地球科学进展, 23, 830–839.]
- Zhu H (2016) Biogeographical evidences help revealing the origin of Hainan Island. *PLoS ONE*, 11, e0151941.
- Zhu H (2017) Tropical flora of southern China. *Biodiversity Science*, 25, [朱华 (2017) 中国南部热带植物区系. 生物多样性, 25, 204–217.]

(责任编辑: 邱英雄 责任编辑: 时意专)

• 综述 •

若干重要地质事件对中国植物区系形成演变的影响

周浙昆^{1,2*} 黄 健^{1,3} 丁文娜^{1,3}

1 (中国科学院西双版纳热带植物园热带森林生态学重点实验室, 云南勐腊 666303)

2 (中国科学院昆明植物研究所东亚植物多样性与生物地理学重点实验室, 昆明 650201)

3 (中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 地球环境是植物区系形成的重要基础。本文总结了新生代以来中国境内的主要地质事件, 并通过亚热带常绿阔叶林主要组成成分和孑遗特有成分地质历史的变迁, 讨论了若干重要地质事件对生物多样性的影响。新生代以来, 中国经历了古新世–始新世极热事件、青藏高原隆升、季风气候形成、干旱带演变和第四纪冰期等一系列地质事件, 这些事件使中国形成了复杂多样的地球环境, 为植物区系形成与演变提供了重要的地质背景。青藏高原的隆升改变了中国的地形地貌, 也使得古近纪以来横贯东西的干旱带在中新世以后变成了总体上东部湿润、西部干旱的格局, 这种格局的改变对中国植物区系成分的南北交流起到了重要的作用。壳斗科、樟科、木兰科、豆科、金缕梅科等亚热带常绿阔叶林的主要成分在始新世均已出现, 南方亚热带的常绿阔叶林在科、属组成上已经和现在非常接近。季风气候的形成与青藏高原的隆起关系密切并随之而演化发展。季风气候以冬春季干旱为特征, 深刻地影响着中国的植物区系空间分化格局。华中等季风气候变化率较小的地区, 冬春季相对湿润, 因此中国第三纪孑遗成分集中分布于这一区域。

关键词: 地球环境多样性; 生物多样性; 特有种; 新生代; 青藏高原; 常绿阔叶林

The impact of major geological events on Chinese flora

Zhekun Zhou^{1,2*}, Jian Huang^{1,3}, Wenna Ding^{1,3}

1 Key Laboratory of Tropical Forest Ecology, Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Mengla, Yunnan 666303

2 Key Laboratory for Plant Diversity and Biogeography of East Asia, Kunming Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650201

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract: Geological events are one of the critical factors that are responsible for the formation and development of regional flora. Major geological events are discussed in this article with an emphasis on their impacts on dominant elements of evergreen broad-leaved forests, as well as on relict and endemic elements of Chinese flora. Geological events contributing to the complex geological history of China include the Paleocene-Eocene Thermal Maximum (PETM), the uplifting of the Qinghai-Tibet Plateau, the formation and development of the monsoon climate, and the shifting of dry areas in China during the Cenozoic Era. As rich geological environments are the basis for forming and developing biodiversity, such biodiversity can be seen in the main elements of subtropical evergreen broad-leaved forests, which have been presented in China since the Neogene, and include Fagaceae, Lauraceae, Magnoliaceae, Fabaceae and Hamamelidaceae. The morphological characteristics of these elements are comparable with modern taxa at the genus level. The monsoon climate in China, especially dry winters and springs, strongly impacts floristic patterns. Relict and endemic plants are concentrated in Central China where winter and spring are comparatively humid. Monsoon intensity and development are correlated with the height of the Qinghai-Tibet Plateau.

收稿日期: 2016-05-04; 接受日期: 2016-10-19

基金项目: 国家自然科学基金–云南联合基金(U1502231)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: zhouzk@xtbg.ac.cn

Key words: geodiversity; biodiversity; endemic; Cenozoic; Qinghai-Tibet Plateau; evergreen broad-leaved forest

中国是世界上植物多样性最丰富的地区之一,已经记录的原生维管束植物有31,500种,占世界维管束植物的8%,是美国和加拿大维管束植物的1.5倍,其中50%以上的种类(约15,750种)是特有植物(Blackmore et al, 2013)。欧洲的陆地面积(包括岛屿)为1,016万km²,略大于我国,但是维管束植物的种类只有20,000–25,000种,为中国植物种类的2/3,其中特有植物仅有28% (Mabberley, 2008; Blackmore et al, 2013)。面积大于中国的北美和欧洲,植物多样性却远远小于中国。为何中国的植物区系如此多样?这是一个有趣的科学问题,对这个问题的回答需要多学科共同努力。

地球环境(地形地貌、古气候古环境、大气环流等)的多样性(geodiversity)是驱动生物多样性演变的重要原因(Jaramillo et al, 2006),而地质事件、地理位置和植物区系自身演化的历史则是解释一个地区生物多样性形成和演变的钥匙(Jaramillo et al, 2006; Blackmore et al, 2013)。已有许多研究从地理位置和现代植物区系成分等方面解释了中国植物区系复杂的原因(Axelrod et al, 1998; Qian & Ricklefs, 1999; 汤彦承, 2000; Ricklefs et al, 2004; 吴征镒等, 2005; 周浙昆和Momohara, 2005; Blackmore et al, 2013)。

在地理位置上,中国大陆纬度跨度较大,从18°N一直延伸至53.5°N,包含了从热带到温带的各种气候类型,加之青藏高原隆升所形成的复杂的地形地貌使得环境多样性尤为丰富,为各种不同习性的植物提供了广阔的生存空间(Blackmore et al, 2013)。特殊的地理位置则为不同区系成分的植物在此交流融汇提供了可能。中国大陆地区不仅包含了热带亚洲、北温带和东亚等区系成分,也包括古南大陆的成分甚至热带美洲、大洋洲和热带非洲等多种区系成分(吴征镒等, 2005)。

中国不仅有丰富的现代生物多样性,地质历史时期的生物多样性同样丰富。迄今为止最早的被子植物就发现于我国东北早白垩纪地层(Sun et al, 1998)。自早白垩纪以来,中国包含了几乎所有地质时代的植物区系,有代表性的包括东北辽宁北票早白垩纪的被子植物化石(Sun et al, 1998, 2011),新疆

阿勒泰古新世化石植物群(郭双兴等, 1984);海南长昌、广东茂名和辽宁抚顺始新世化石植物群(金建华等, 2006; 姚轶锋, 2006; 史冀忠等, 2008; 李景照等, 2009);广西南明和云南景谷渐新世植物群(中国新生代植物编写组, 1978; 邝国敦等, 2005);山东山旺、浙江下南山、福建漳浦、云南寻甸和文山中新世植物群(李浩敏, 1978; 周浙昆, 2000; 王宇飞, 2004; 任文秀等, 2010; Huang et al, 2016);云南永平、洱源、昆明上新世植物群(陶君容和孔昭宸, 1973; 苏涛, 2010; Su et al, 2013a)。丰富的化石记录为研究中国植物多样性格局的形成和演变提供了宝贵的材料。

现代植物区系是地史植物区系的延续,对其发展演变及其与环境间相互关系的研究必然要追溯其地质历史。中国是植物多样性最丰富的地区之一,同时又拥有丰富的化石记录,以及青藏高原隆升与环境变化这个天然的实验室,这为探索中国植物区系形成演变及其与环境演变的相互关系提供了基础。本文简要回顾了新生代以来影响中国植物区系形成演变的主要地质事件,总结了壳斗科、樟科、金缕梅科等亚热带常绿阔叶林优势类群的化石历史,以及中国特有种形成演变的地质背景,以期为了解中国植物区系的演变和现在植物多样性分布格局的形成提供线索。

1 新生代以来影响中国现代生物多样性格局的主要地质事件

古新世–始新世之交(距今大约55 Ma)地球上发生过一次全球变暖事件,这一事件导致深海温度增加约5℃,表层海水温度增加4–8℃,深海氧气含量严重降低,被称为“古新世–始新世极热”事件(Paleocene-Eocene Thermal Maximum, PETM)(Zachos et al, 1993)。极热事件在中国也有显著表现,根据苏涛等(2009)的古气候重建结果,早始新世的四川理塘的热鲁植物群和黑龙江依兰植物群所代表的古年均温比现代分别高了14.7℃和15℃。这次全球变暖事件造成许多陆地和海洋动物的灭绝(Crowley & North, 1988; Kennett & Stott, 1991; Harrington & Jaramillo, 2007; 苏涛等, 2009)。就中

国植物区系而言, 这次极热事件对生物多样性格局最大的影响是促进了植物区系成分跨大洋的交流与融合, 一些类群如大戟科、橄榄科、金虎尾科、樟科、天南星科、胡椒科等跨大洋的泛热带间断分布就是在极热期形成的(周浙昆等, 2006)。Davis等(2002)根据分子生物学研究和化石证据认为: 金虎尾科在古新世早期(约64 Ma)起源于南美的北部, 并从此地扩散到北美, 古近纪在古北大陆内传播至热带亚洲, 在这个过程中有些种类通过欧洲进入非洲, 这条传播路线又被称为“金虎尾路线”(周浙昆等, 2006)。这条传播路线的关键是热带成分能够跨越北大西洋陆桥, 在北半球高纬度地区进行长距离扩散, 而极热期的全球变暖为这种传播提供了可能。

青藏高原隆升是新生代以来亚洲乃至全球最重大的地质事件之一, 这次事件改变了亚洲的地理地貌特征和自然环境, 极大地影响了亚洲的大气环流, 导致了季风气候的形成和建立, 形成了亚洲内陆干旱化(Sun & Wang, 2005; 郑度和姚檀栋, 2005; 李吉均, 2006; 刘晓东和Dong, 2013), 这些环境变化对现代生物多样性格局产生了深刻影响。关于青藏高原隆起的时间及幅度, 至今仍存在较大分歧。不同的专家根据不同的材料、不同的研究方法, 对青藏高原隆起的时间及幅度都提出过不同的观点(徐仁等, 1973; 李吉均等, 1979, 2001, 2015; Coleman & Hodges 1994; Guo et al, 2002; Spicer et al, 2003)。这些观点大致可以归为以下3类: (1)青藏高原在中中新世甚至以前就已经达到并且一直保持着现在的高度(Spicer et al, 2003); (2)青藏高原经历了3次隆升和2次夷平(方小敏等, 2003; 李吉均等, 2015); (3)青藏高原缓慢隆升, 大约在晚上新世达到现在的高度(Deng & Ding, 2015)。鉴于青藏高原隆升过程的复杂性, 本文仅简述高原隆升后对生物多样性格局影响较大的几种环境效应。

青藏高原的强烈隆升使中国西部成为世界上最大的高地, 也使我国的地形地貌发生了根本的转变: 从原来的东高(西倾)西低变成了西高(东倾)东低(刘志飞等, 2001), 长江等大河随着高原的隆升而形成。高原和河流的形成对植物区系的交流产生了影响(郑洪波等, 2008), 改变了植物的分布格局, 最终影响了植物区系的格局(Zhang & Sun, 2011)。古

近纪东亚气候带状分异明显(Guo et al, 2002, 2008), 一条横贯东西的干旱带对中国植物区系的南北交流构成重大障碍(Guo et al, 2002, 2008)。随着青藏高原的不断隆升, 这条干旱带逐步变窄, 直到中新世最终形成了与今天相似的东部湿润、西部干旱的局面, 并且一直维持至今(Sun & Wang, 2005)。

季风气候的增强是青藏高原隆升引发的一个重要环境响应(Raymo & Ruddiman, 1992; An et al, 2001; Spicer et al, 2003)。季风气候是全球一种主要的气候类型(汪品先, 2009), 其典型特征是大气环流季节性反转所引起的干湿季交替(符淙斌和曾昭美, 1997; 汪品先, 2009)。季风系统直接影响着地球的大气圈、水圈和生物圈(汪品先, 2009)。全球约60%的人口生活在受季风气候影响的地区(汪品先, 2009; Singh et al, 2014)。亚洲季风的形成和演变与青藏高原的隆升、北极冰盖的形成、地球轨道的改变, 甚至CO₂浓度变化都有密切关系(Liu & Yin, 2002; Wang et al, 2005; Clift et al, 2008; Boos & Kuang, 2010; Dong et al, 2013; 刘晓东和Dong, 2013; 鹿化煜和郭正堂, 2013)。亚洲季风系统形成后, 最大的环境效应就是季节性增强, 形成干湿两季的显著变化, 造成全年降水的不均衡(Jacques et al, 2011; Su et al, 2013a, b)。以云南为例, 大部分地区全年80%以上的降水集中在夏、秋两季(通常从5月下旬至10月下旬), 而冬、春季(通常从11月至次年5月上旬)降水通常不到全年降水总量的15%(王宇, 1990, 2006)。这种水分分配的不均匀性形成了冬、春季的干旱(图1)。春季是大部分植物种子萌发、嫩叶突枝和树木生长的季节, 这段时期水分的缺乏会造成植物生理性缺水。且大部分植物的种子在秋季成熟, 冬季的干旱可能会造成脱水敏感性种子即顽拗性种子(recalcitrant seed)的死亡, 此类种子在含水量下降到12%–31%时普遍死亡(Roberts, 1973)。在长期冬、春季干旱的环境胁迫下, 部分植物种类或灭绝或迁移, 从而导致群落组成和植被类型的变化, 进而形成植物区系的改变(Jacques et al, 2011; Su et al, 2013b; Li et al, 2015; Zhang et al, 2015)。

第四纪冰期是最近一次地球历史上的重大事件, 对现代北半球生物多样性格局产生了深刻影响。覆盖欧洲和北美大部分地区的大冰盖使得欧洲

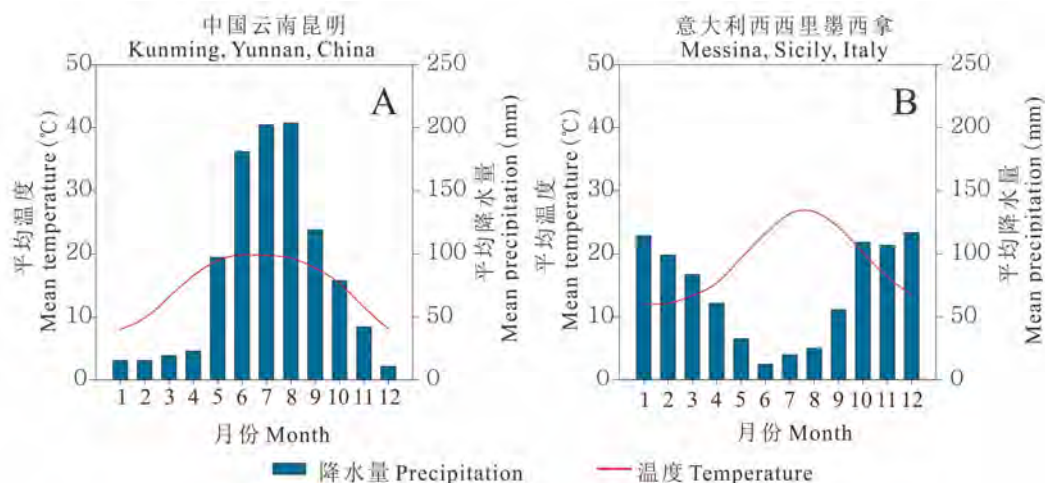


图1 季风气候区和地中海气候区不同的生态气候图(数据来源: <http://www.climateemps.com/>)

Fig. 1 Representatives of Monsoon climate and Mediterranean climate (data source: <http://www.climateemps.com/>)

和北美生物多样性受到毁灭性的影响,许多动植物类群灭绝(Hewitt, 2000),现代欧洲动植物区系是第四纪以后发展起来的相对年轻的植物区系(Willis & Niklas, 2004)。而在第四纪的中国则仅有山岳冰川而无大陆冰川(李吉均等, 2004),第四纪冰期对中国动植物区系的影响要远远小于欧洲和北美,使得许多古近纪和新近纪的成分(孑遗植物)得以保存(Huang et al, 2015)。

2 亚热带常绿阔叶林主要成分的地质历史

亚热带常绿阔叶林是东亚森林生态系统的一个典型植被类型,其主要成分是壳斗科、樟科、木兰科和山茶科(吴征镒等, 1987)(附录1)。其中,壳斗科、樟科和木兰科在北半球新生代地层中都有广泛的发现。

最早最可靠的壳斗科化石发现于美国佐治亚州的晚白垩纪地层,包括了 *Protofagaceae* 和 *Antiquacupula* 两个属(Herendeen et al, 1995; Sims et al, 1998)。这两个属都包含了雄花序、原位花粉和壳斗等器官,从这些器官上能够观察到壳斗科的典型特征:壳斗包裹透镜状的果实、三基数的花结构和三孔沟的原位花粉等。而两属间又有明显的差异,并且与现代壳斗科的任何一个类群都不一样(Herendeen et al, 1995; Sims et al, 1998)。这表明在晚白垩纪壳斗科植物已经出现并有两个类群,产生了一定的分化,将 *Protofagaceae* 和 *Antiquacupula* 称为

前壳斗科植物更为合适(Zhou, 2013b)。壳斗科的“现代化”始于始新世,该时期发现的壳斗科化石大多数在形态特征上与现代属已经非常相似,而且各现代属在始新世地层都已有发现(Zhou, 2013b)。

虽然在有些情况下仅凭叶化石甚至果实化石很难将壳斗科植物化石准确鉴定到属。比如栗属(*Castanea*)叶化石很难与栎属(*Quercus*)的有些种类分开,而壳斗又很难与栲属(*Castanopsis*)植物分开。但是借助叶结构、毛被、鳞片等特征,对于保存较好的化石鉴定到属,甚至属下等级都是有可能的。例如与栗属相似的栓皮栎(*Quercus variabilis*)和麻栎(*Quercus acutissima*)均有盲脉而栗属则无,这个特征能将栗属和栎属化石分开(Zhou et al, 1994; Zhou, 2013b)。石栎属(*Lithocarpus*)叶表皮的指状毛(Kvaček & Walther, 1989)和栲属叶表皮的鳞片(Liu et al, 2009)能将壳斗科化石准确鉴定到属水平,而青冈属(*Cyclobalanopsis*)毛被特征(保存在化石上为毛基)能将化石鉴定到种水平(Xing et al, 2012; 胡茜等, 2013)。到了晚渐新世,在中国除三棱栎属(*Trigonobalanus*)尚无化石报道外,壳斗科各属都已经有了化石记录(周浙昆, 1999; Zhou, 2013b)。壳斗科在新近纪植物群已基本成为优势类群,表明与现代森林特征类似的植被类型在中新世时便已经出现。

樟科是分布于热带和亚热带常绿阔叶林的一个大科,有 50 个以上的属和 2,500–3,000 个种

(Rohwer, 1993)。在全球范围内, 樟科具有从早白垩纪以来连续的化石记录(Lamotte, 1952; Taylor, 1988), 最早最可靠的记录发现于美国弗吉尼亚早白垩纪地层(von Balthazar et al, 2007)。在中国晚白垩纪就有樟科的化石记录, 黑龙江、辽宁、广西、广东和云南古近纪地层中都有樟科的化石记录(中国新生代植物编写组, 1978; Guo & Li, 1979; 陶君容和张川波, 1990; 张莹等, 1990; Li et al, 2009)。到了新近纪, 樟科在中国有了更广泛的分布, 在许多南方的新近纪植物群中都有樟科植物化石的发现(中国新生代植物编写组, 1978)。显而易见, 樟科和壳斗科一样是我国新近系地层中最常见的成分。

木兰科既是被子植物的基部类群, 又是东亚亚热带常绿阔叶林的重要成分(刘玉壶等, 1995)。在地质历史上, 木兰科有着广泛的分布和悠久的化石历史。最早最可靠的木兰科化石是发现于美国堪萨斯州早白垩纪地层的始花(*Archaeanthus linnenbergeri*) (Dilcher & Crane, 1984)。在中国, 最早的木兰科化石是发现于东北早白垩纪的原始木兰属(*Archimagolia*) (陶君容和张川波, 1992)。至晚白垩纪, 世界范围内的木兰科的化石记录逐渐丰富, 至少有20个化石种被报道(Zhou, 2013b)。中国木兰科的化石记录从渐新世晚期开始丰富起来。中新世以后, 木兰科与壳斗科、樟科一起成为我国地层中最常见的成分(Zhou, 2013a)。

山茶科也是东亚亚热带常绿阔叶林的主要成分。在北美和欧洲都有较多山茶科的化石记录, 在始新世已经有了厚皮香亚科(*Ternstroemiaceae*)和山茶亚科(*Camellioideae*)的分化(Grote & Dilcher 1989)。欧洲没有现代山茶科, 但是化石记录却较为丰富。从古新世到上新世, 桉木属(*Eurya*)一直存在于欧洲, 而厚皮香属(*Ternstroemia*)从始新世到中新世在欧洲都有分布。此外, 木荷属(*Schima*)、大头茶属(*Gordonia*)、广义的紫茎属(*Stewartia*) (包括*Hartia*和*Stuartia*)在欧洲都有化石记录(Grote & Dilcher, 1989)。丰富的化石记录使欧洲成为山茶科在新生代的分布中心。日本始新世有厚皮香属和山茶属(*Camellia*)的化石记录(Huzioka & Takahasi, 1970), 从渐新世起有大头茶属的化石记录, 从中新世起有紫茎属的化石记录(Grote & Dilcher, 1989)。山茶科在全球有19个属600多种, 而中国有12属274种, 其中有2个特有属和204个特有种(Min & Bartholomew,

2003), 是山茶科的现代分布中心。山茶科植物也是中国亚热带常绿阔叶林的主要成分, 但是相比壳斗科、樟科和木兰科, 山茶科在我国到目前未见确凿的化石记录, 究竟是山茶科在我国出现较晚还是我国古植物学研究不够充分, 有待证实。

金缕梅科既是被子植物系统研究的一个关键类群, 也是东亚植物区系的特征类群, 同时又是亚热带常绿阔叶林的重要成分(吴征镒等, 2005)。金缕梅科在欧亚大陆和美洲大陆新生代都有十分丰富的化石记录(Chandler, 1961; Knobloch & Kvaček, 1976; 中国新生代植物编写组, 1978; Tiffney, 1986; Tanai, 1992; 王希堇和李浩敏, 2000), 但白垩纪的化石记录相对较少(Friis & Endress, 1990; Crane et al, 2000)。金缕梅科有中国特有属5个, 其中, 山白树属(*Sinowilsonia*)等在始新世的美国就有分布(Manchester, 1994), 而中国没有化石记录; 牛鼻栓属(*Fortunearia*)在欧洲和东亚的古近纪至新近纪都有分布(Mai & Walther, 1978, 1991; Ozaki, 1991; Momohara, 1994; Momohara & Saito, 2001); 山铜材属(*Chunia*)、半枫荷属(*Semiliquidambar*)和四药门花属(*Tetrathyrium*)则没有化石记录。此外, 东亚特征的蕈树属(*Altingia*)在地史时期的美国和欧洲都有分布, 其近缘类群小蕈树属(*Microaltingia*)发现于美国新泽西白垩纪土伦期(Zhou et al, 2001), 在欧洲则有前蕈树属(*Protoaltingia*)的记录(Chandler, 1963), 而蕈树属在中国的化石记录还不清楚。同样为东亚特征的蜡瓣花属(*Corylopsis*)自古近纪便在北温带广泛记录, 在始新世便已出现在东亚(Guo, 2000)。

豆科是被子植物4个最大的科之一, 有着广泛而丰富的化石记录。在中国豆科既是热带亚热带常绿阔叶林中的重要成分, 也是新生代地层中的常见成分, 从始新世到第四纪地层中均有发现(Zhou, 2013b)。我国始新世豆科化石产于辽宁抚顺、山西渭南和西藏格尔, 种类有金合欢属(*Acacia*)、似含羞草属(*Mimosite*)、杭子梢属(*Campylotropis*)、胡枝子属(*Lespedeza*)和决明属(*Cassia*)等(中国新生代植物编写组, 1978)。渐新世豆科化石产于广西宁明和云南景谷, 类群有羊蹄甲属(*Bauhina*)、紫荆属(*Cercis*)和格木属(*Erythrophloeum*)等(中国新生代植物编写组, 1978; Wang et al, 2014)。豆科在中新世地层中更是被广泛报道, 包括山东山旺中中新世植物群和

云南小龙潭晚中新世植物群等(Guo & Zhou, 1992)。在小龙潭化石植物群中包含有豆科13个属17个种,构成了植物群的优势科(周浙昆, 2000)。

3 中国植物区系中孑遗和特有类群的形成与演变的地质背景

特有现象丰富是中国植物区系一个显著的特征,共有67个特有科239个特有属15,750个特有种(吴征镒等, 2005, 2011; Blackmore et al, 2013)。关于中国区系中特有现象的相关讨论认为“北极-第三纪”和就地起源是中国古特有成分的重要来源(吴征镒等, 2003, 2005; 周浙昆和Momohara, 2005)。Zhou (2013a)发现北热带成分也是中国特有成分的一个重要来源,这些学者均认为新近纪是中国植物区系特有成分形成的一个重要时期。

孑遗植物是曾经在地球上广泛分布,而如今仅分布于局部狭小区域的植物(Milne & Abbott, 2002; Huang et al, 2015),如水杉(*Metasequoia glyptostroboides*)、银杏(*Ginkgo biloba*)、杜仲(*Eucommia ulmoides*)等(图2, 附录2)。孑遗植物和特有植物几乎是同一现象从不同角度的描述,孑遗强调了起源的古老性,而特有则强调了分布的特殊性。在中国,绝大部分古特有植物都是孑遗植物。

水杉是最为典型的孑遗植物,最古老的水杉化石来自晚白垩纪地层。古近纪水杉已经广泛分布于北半球大部分地区,目前已经被发现和报道的水杉化石点有442个之多(LePage et al, 2005)。化石历史表明水杉起源于北半球高纬度地区,白垩纪晚期迅速扩散到北美、日本、俄罗斯及中国东北部(LePage et al, 2005; 周浙昆和Momohara, 2005)。古新世/始新世极热期后,全球温度总体上逐步变凉,水杉的分布区也逐步南移,在古近纪已经成为北半球最常见的裸子植物。晚上新世到更新世,水杉逐渐在北美、俄罗斯和日本灭绝,最后仅存于中国华中地区(LePage et al, 2005)。总体来说水杉的灭绝与第四纪冰期有密切的关系,欧洲和北美高纬度地区在冰盛期为冰川或冻土覆盖(Hewitt, 2000),在更新世冰期时,日本的水杉在向南迁移的过程中进入许多小盆地,之后由于海水入侵以及气候进一步恶化,水杉无路可退而最终绝灭(Momohara, 2005; 王雨晴等, 2015)。在北美上新世气候变冷,水杉沿山系的河谷向东南迁移,但遇到生态位相近的落羽杉

(*Taxodium distichum*)竞争,而落羽杉的幼苗更适应南部地区的光强及温湿度环境,使水杉处于劣势,最终导致了其绝灭(Jagels & Equiza, 2007)。对保存于中国华中地区的水杉的来源有两种观点:一种认为现在中国的水杉是更新世从日本迁移而来(Yang, 1998),另一种认为是中国原生的(梁广贞, 1988; 齐国凡等, 1993)。

与欧洲和北美不同,中国没有大陆冰川,植物区系受第四纪冰期的影响较小,没有遭遇毁灭性的破坏,使得许多古老的成分得以保存和延续(Kusky et al, 2011; Huang et al, 2015)。现在水杉分布的地区正处于我国三个特有属分布中心之一的川东-鄂西中心范围内(应俊生和张志松, 1984),其复杂独特的地貌条件也使该地区成为水杉的“避难所”。在水杉分布的区域不仅保存了水杉,还保存许多古老的孑遗成分,如珙桐(*Davidia involucrata*)、水青树(*Tetracentron sinense*)、连香树(*Cercidiphyllum japonicum*)和领春木(*Euptelea pleiospermum*)等(王希群等, 2005; Huang et al, 2015)。

中国植物区系中的孑遗植物或特有植物无一不是在地质历史上有过广泛分布的植物(Manchester et al, 2009)。Huang等(2015)最近对65个中国植物区系中的古特有属的分布进行了分析,这些古特有成分大多在新生代都有过广泛的分布。研究表明这些特有属最集中的区域是华中地区:重庆南川、湖北利川和广东乳源是特有属分布最多的区域,前者有28个属,后两者各有26个属(Huang et al, 2015),这个区域和胡秀英所提到的水杉区系基本吻合(Hu, 1980; 汤庚国和宋祥后, 1989)。其次是华东地区,包括福建和台湾(Huang et al, 2015)。这些区域有一个共同的特征即冬春季的降水较为丰富,以特有类群分布最多的南川、利川和乳源为例,11月到次年4月的降水分别是264 mm、364 mm和582 mm,相对湿润的冬春季是特有植物得以在这些地区保存的重要原因(Huang et al, 2015)。

新生代以来全球气候环境总体上经历了一个逐步变冷的过程(Zachos et al, 2001),在东亚,季风气候伴随着青藏高原的隆升而逐步增强,导致气候季节性增强(Xing et al, 2012; Jacques et al, 2011; Su et al, 2013b; Li et al, 2015; Zhang et al, 2015)。我国多个地区古气候重建的结果表明,新近纪的气候和现在相比温度变化不大,但是降水总体上更为丰富且

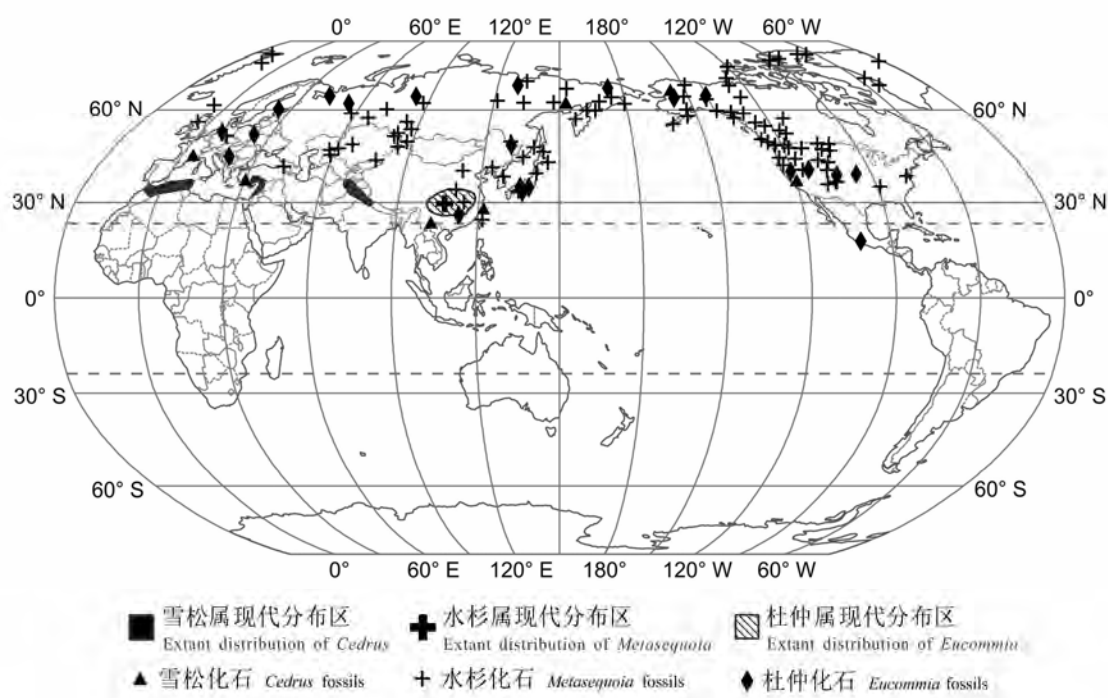


图2 一些孑遗植物(雪松属、水杉属和杜仲属)的历史地理分布

Fig. 2 The biogeographic distributions of some relict plants (*Cedrus*, *Metasequoia* and *Eucommia*)

季节性较弱(Jacques et al, 2011; Su et al, 2013b)。季风气候导致了有些植物类群的灭绝。雪松属(*Cedrus*)植物是常见的园林树种, 共有4个现生种, 除1种分布于喜马拉雅西坡外, 其余均分布于地中海地区(Qiao et al, 2007)。中国没有原生的雪松(*Cedrus deodara*)分布, 但在云南永平发现了晚上新世的雪松种鳞化石(Su et al, 2013b)。北美红杉(*Sequoia sempervirens*)是一种北美特有的大型乔木, 现存北美红杉仅分布于美国加利福尼亚少数地区(Noss, 1999)。在地史上北美红杉属(*Sequoia*)有较广泛的分布(Miki, 1941; Blazer, 1975; Ma et al, 2005), Zhang等(2015)在云南马关中新世地层中发现了北美红杉属的雄球果、鳞叶和条形叶的化石。古气候重建结果和现代种子生理学研究推测雪松和北美红杉在云南的灭绝与东亚冬季风增强有关: 雪松属种子成熟的时间大多在秋季, 而北美红杉的种子每年12月成熟, 次年1月从树上脱离然后萌发(Olsen et al, 1990), 它们的种子萌发和幼苗生长时间都在冬、春季。而晚中新世以来, 东亚季风的显著增强导致云南冬、春两季的降水量日趋减少(Xia et al, 2009; Jacques et al, 2011; Xing et al, 2012; Su et al, 2013a, b), 从而阻碍了雪松和北美红杉的幼苗生长, 最终

导致它们逐渐在云南灭绝。

中国植物区系中的古特有类群都有较长的地质历史, 大多在晚白垩纪或古近纪就已经出现, 它们在地质时期生活的环境大多是温暖湿润, 季节性不强(吴征镒等, 2005; Huang et al, 2015)。而现在它们也主要集中分布于冬春季相对湿润的华中、华东地区(Huang et al, 2015)。可见, 季风气候深刻地影响了中国生物多样性的分布格局。

4 结论

新生代以来, 中国所在的东亚大陆经历了古新世-始新世极热事件、青藏高原隆升、季风气候形成、干旱带演变和第四纪冰期等一系列地质事件, 这些地质事件为中国植物区系格局的形成与演变提供了复杂而重要的地质背景。

青藏高原的隆升改变了中国的地形地貌, 也使古近纪以来横贯东西的干旱带在中新世以后变成了总体上东部湿润、西部干旱的格局, 这种改变对中国植物区系成分的南北交流起到了重要作用。

壳斗科、樟科、木兰科、豆科、金缕梅科等亚热带常绿阔叶林的主要成分在始新世均已出现。在中国南方, 亚热带常绿阔叶林的科、属构成已经和

现在非常接近。

与青藏高原隆起相随而成的季风气候以冬、春季干旱为特征,深刻地影响着中国生物多样性的格局,第三纪孑遗成分主要分布在华中等冬春季相对湿润的地区。

参考文献

- An ZS, Kutzbach JE, Prell WL, Porter SC (2001) Evolution of Asian monsoons and phased uplift of the Himalayan Tibetan Plateau since Late Miocene times. *Nature*, 411, 62–66.
- Axelrod DI, Al Shehbaz I, Raven PH (1998) History of the modern flora of China. In: *Floristic Characteristics and Diversity of East Asian Plants: Proceedings of the First International Symposium of Floristic Characteristics and Diversity of East Asian Plants* (eds Zhang AL, Wu SG), pp. 43–55. Higher Education Press, Beijing.
- Blackmore S, Hong DY, Raven PH, Wortley AH (2013) Introduction. In: *Plants of China: A Companion to the Flora of China* (eds Blackmore S, Hong DY). Science Press, Beijing.
- Blazer AM (1975) Index of Generic Names of Fossil Plants, 1966–1973. U.S. Government Printing Office, Washington, DC.
- Boos WR, Kuang ZM (2010) Dominant control of the South Asian monsoon by orographic insulation versus plateau heating. *Nature*, 463, 218–222.
- Chandler MEJ (1961) The Lower Tertiary Floras of Southern England, Vol. 1, Palaeocene Floras: London Clay Flora. Trustees of the British Museum, London.
- Chandler MEJ (1963) The Lower Tertiary Floras of Southern England, Vol. 3, Flora of the Bournemouth Beds; the Boscombe and the Highcliff Sands. Trustees of the British Museum, London.
- Clift PD, Hodges KV, Heslop D, Hannigan R, van Long H, Calves G (2008) Correlation of Himalayan exhumation rates and Asian monsoon intensity. *Nature Geoscience*, 1, 875–880.
- Coleman M, Hodges K (1994) Evidence for Tibetan Plateau uplift before 14 Myr ago from a new minimum age for east-west extension. *Nature*, 374, 49–52.
- Crane PR, Friis EM, Pedersen KR (2000) The origin and early diversification of angiosperms. *Nature*, 374, 233–250.
- Crowley TJ, North GR (1988) Abrupt climate change and extinction events in earth history. *Science*, 240, 996–1002.
- Davis CC, Bell CD, Fritsch PW, Mathews S (2002) Phylogeny of *Acridocarpus-Brachylophon* (Malpighiaceae): implications for Tertiary tropical floras and Afroasian biogeography. *Evolution*, 56, 2395–2405.
- Deng T, Ding L (2015) Paleoaltimetry reconstructions of the Tibetan Plateau: progress and contradictions. *National Science Review*, 2, 417–437.
- Dilcher DL, Crane PR (1984) *Archaenthus*: an early angiosperm from the cenomanian of the western interior of North America. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 71, 351–383.
- Dong ZW, Qin X, Ren JW, Qin DH, Cui XQ, Chen JZ (2013) A 47-year high resolution chemistry record of atmospheric environment change from the Laohugou Glacier No. 12, north slope of Qilian Mountains, China. *Quaternary International*, 313, 137–146.
- Editorial Committee of Cenozoic Flora of China (1978) *Plant Fossils of China, Vol. 3, Cenozoic Flora of China*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [中国新生代植物编写组 (1978) 中国植物化石(第三册): 中国新生代植物. 科学出版社, 北京.]
- Fang XM, Li JJ, Zheng D (2003) Phases of plateau uplifting. In: *The Formation Environment and Development of the Qinghai-Tibet Plateau* (ed. Zheng D), pp. 37–48. Hebei Science & Technology Press, Shijiazhuang. (in Chinese) [方小敏, 李吉均, 郑度 (2003) 高原隆升的阶段性. 见: 青藏高原形成环境与发展(郑度编著), 37–48页. 河北科学技术出版社, 石家庄.]
- Friis EM, Endress PK (1990) Origin and Evolution of Angiosperm Flowers. Academic Press, Cambridge, Massachusetts.
- Fu CB, Zeng ZM (1997) Monsoon region—regions with the largest precipitation change rate globally. *Chinese Science Bulletin*, 42, 2306–2310. (in Chinese) [符淙斌, 曾昭美 (1997) 季风区——全球降水变化率最大的地区. 科学通报, 42, 2306–2310.]
- Grote PJ, Dilcher DL (1989) Investigations of angiosperms from the Eocene of North America: a new genus of Theaceae based on fruit and seed remains. *Botanical Gazette*, 150, 190–206.
- Guo SX (2000) New material of the late Cretaceous flora from Hunchun of Jilin, Northeast China. *Acta Palaeontologica Sinica*, 39, 226–250.
- Guo SX, Li HM (1979) Late cretaceous flora from Hunchun of Jilin. *Acta Palaeontologica Sinica*, 18, 547–559.
- Guo SX, Sun ZH, Li HM, Dou YW (1984) Paleocene megafossil flora from Altai of Xinjiang. *Bulletin of the Nanjing Institute of Geology and Palaeontology*, Academic Sinica, 8, 119–146. (in Chinese with English abstract) [郭双兴, 孙喆华, 李浩敏, 窦亚伟 (1984) 新疆阿勒泰古新世植物群. 中国科学院南京地质古生物研究所丛刊, 8, 119–146.]
- Guo ZT, Ruddiman WF, Hao QZ, Wu HB, Qiao YS, Zhu RX, Peng SZ, Wei JJ, Yuan BY, Liu TS (2002) Onset of Asian desertification by 22 Myr ago inferred from loess deposits in China. *Nature*, 416, 159–163.
- Guo ZT, Sun B, Zhang ZS, Peng SZ, Xiao GQ, Ge JY, Hao QZ, Qiao YS, Liang MY, Liu JF (2008) A major reorganization of Asian climate by the early Miocene. *Climate of the Past*, 4, 153–174.
- Harrington GJ, Jaramillo CA (2007) Paratropical floral extinction in the Late Palaeocene–Early Eocene. *Journal of the Geological Society*, 164, 323–332.
- Herendeen PS, Crane PR, Drinnan AN (1995) Fagaceous

- flowers, fruits, and cupules from the Campanian (Late Cretaceous) of central Georgia, USA. *International Journal of Plant Sciences*, 156, 93–116.
- Hewitt G (2000) The genetic legacy of the Quaternary ice ages. *Nature*, 405, 907–913.
- Hu Q, Xing YW, Hu JJ, Huang YJ, Ma HJ, Zhou ZK (2013) Evolution of stomatal and trichome density of the *Quercus delavayi* complex since the Late Miocene. *Chinese Science Bulletin*, 58, 2057–2067. (in Chinese) [胡茜, 星耀武, 胡瑾瑾, 黄永江, 马宏杰, 周浙昆 (2013) 中新世以来黄毛青冈复合群(*Quercus delavayi* complex)气孔及叶表皮毛密度的演变. *科学通报*, 58, 2057–2067.]
- Hu SY (1980) The Metasequoia flora and its phytogeographic significance. *Journal of the Arnold Arboretum*, 61, 41–94.
- Huang J, Su T, Lebreton-Anberrée J, Zhang ST, Zhou ZK (2016) The oldest Mahonia (Berberidaceae) fossil from East Asia and its biogeographic implications. *Journal of Plant Research*, 129, 209–223.
- Huang YJ, Jacques FMB, Su T, Ferguson DK, Tang H, Chen WY, Zhou ZK (2015) Distribution of Cenozoic plant relicts in China explained by drought in dry season. *Scientific Reports*, 5, 14212.
- Huzioka K, Takahasi E (1970) The Eocene Flora of the Ube Coal-field, Southwest Honshu, Japan. *Journal of the Mining College, Akita University Series A: Mining Geology*, 4, 1–88.
- Jacques FMB, Guo SX, Su T, Xing YW, Huang YJ, Liu YS, Ferguson DK, Zhou ZK (2011) Quantitative reconstruction of the Late Miocene monsoon climates of Southwest China: a case study of the Lincang flora from Yunnan Province. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 304, 318–327.
- Jagels R, Equiza MA (2007) Why did *Metasequoia* disappear from North America but not from China. *Bulletin of the Peabody Museum of Natural History*, 48, 281–290.
- Jaramillo C, Rueda MJ, Mora G (2006) Cenozoic plant diversity in the Neotropics. *Science*, 311, 1893–1896.
- Jin JH, Liao WB, Peng SL (2006) The origin and evolution of Guangdong flora in geological period. *Ecology and Environment*, 15, 831–837. (in Chinese with English abstract) [金建华, 廖文波, 彭少麟 (2006) 广东省地质时期植物区系的形成与演变. *生态环境*, 15, 831–837.]
- Kennett JP, Stott LD (1991) Abrupt deep sea warming, paleoceanographic changes and benthic extinctions at the end of the Paleocene. *Nature*, 353, 225–229.
- Knobloch E, Kvaček Z (1976) Miozäne Blatterfloren vom Westrand der Böhmisches Masse. Akademie Prague, Prague, Czech Republic. (in German)
- Kuang GD, Chen GJ, Chen YF, Huang ZT (2005) New information on the Tertiary biostratigraphy of the Ningming Basin, Guangxi. *Journal of Stratigraphy*, 28, 362–367. (in Chinese with English abstract) [邝国敦, 陈耿娇, 陈运发, 黄志涛 (2005) 广西南明盆地第三纪地层研究的新进展. *地层学杂志*, 28, 362–367.]
- Kusky T, Guo LA, Xiang SB, Guo XY, Xu XY (2011) A critical examination of evidence for a Quaternary glaciation in Mt. Laoshan, Eastern China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 40, 403–416.
- Kvaček Z, Walther H (1989) Paleobotanical studies in Fagaceae of the European Tertiary. *Plant Systematics & Evolution*, 162, 213–229.
- Lamotte RS (1952) *Catalogue of the Cenozoic Plants of North America Through 1950*. Geological Society of America, New York.
- LePage BA, Yang H, Matsumoto M (2005) The evolution and biogeographic history of *Metasequoia*. In: *The Geobiology and Ecology of Metasequoia* (eds LePage BA, Williams CJ, Yang H), pp. 3–114. Springer, Dordrecht, Netherlands.
- Li HM (1978) Age of Shanwang flora, Shandong and studies of the Late Tertiary flora in East China. *Proceedings of Palaeontological Society of China*, 14, 43–47. (in Chinese) [李浩敏 (1978) 山东山旺植物群的时代及我国东部地区晚第三纪植物群研究概况. *中国古生物学会讯*, 14, 43–47.]
- Li JJ (2006) The Qinghai-Tibet Plateau Uplifting and Environmental Evolution in Asia: Article Collection of Academician Li Ji-Jun. Science Press, Beijing, China. (in Chinese) [李吉均 (2006) 青藏高原隆升与亚洲环境演变: 李吉均院士论文选集. 科学出版社, 北京.]
- Li JJ, Fang XM, Pan BT, Zhao ZJ, Song YG (2001) Late Cenozoic intensive uplift of Qinghai-Xizang Plateau and its impacts on environments in surrounding area. *Quaternary Sciences*, 21, 381–391. (in Chinese with English abstract) [李吉均, 方小敏, 潘保田, 赵志军, 宋友桂 (2001) 新生代晚期青藏高原强烈隆起及其对周边环境的影响. *第四纪研究*, 21, 381–391.]
- Li JJ, Shu Q, Zhou SZ, Zhao ZJ, Zhang JM (2004) Review and prospects of Quaternary glaciation research in China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 26, 235–243. (in Chinese with English abstract) [李吉均, 舒强, 周尚哲, 赵志军, 张建明 (2004) 中国第四纪冰川研究的回顾与展望. *冰川冻土*, 26, 235–243.]
- Li JJ, Wen SX, Zhang QS, Wang FB, Zheng BX, Li BY (1979) Age, amplitude and form of the uplifting of the Qinghai-Tibet Plateau. *Science China*, 6, 608–616. (in Chinese) [李吉均, 文世宣, 张青松, 王富葆, 郑本兴, 李炳元 (1979) 青藏高原隆起的时代、幅度和形式的探讨. *中国科学*, 6, 608–616.]
- Li JJ, Zhou SZ, Zhao ZJ, Zhang J (2015) The Qingzang Movement: the major uplift of the Qinghai-Tibetan Plateau. *Science China: Earth Science*, 45, 1597–1608. (in Chinese) [李吉均, 周尚哲, 赵志军, 张军 (2015) 论青藏运动主幕. *中国科学: 地球科学*, 45, 1597–1608.]
- Li JZ, Qiu J, Liao WB, Jin JH (2009) Eocene fossil *Alseodaphne* from Hainan Island of China and its paleoclimatic implications. *Science in China Series D: Earth Science*, 39, 1753–1758. (in Chinese) [李景照, 邱珏, 廖文

- 波, 金建华 (2009) 海南岛始新世 *Alseodaphne* 化石及其古气候指示. 中国科学(D辑: 地球科学), 39, 1753–1758.]
- Li SF, Mao LM, Spicer RA, Lebreton-Anberrée J, Su T, Sun M, Zhou ZK (2015) Late Miocene vegetation dynamics under monsoonal climate in southwestern China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 425, 14–40.
- Liang GZ (1988) The valuable epibiotic plant of the *Metasequoia Glyptostrobes* and the geographical significance of its distribution. *Journal of Chongqing Teachers College (Natural Sciences Edition)*, 3, 5–119. (in Chinese with English abstract) [梁广贞 (1988) 珍稀孑遗植物水杉及其分布的植物地理学意义. 重庆师范学院学报(自然科学版), 3, 5–119.]
- Liu MQ, Deng M, Zhou ZK (2009) Taxonomic and ecological implications of leaf cuticular morphology in *Castanopsis*, *Castanea*, and *Chrysopsis*. *Plant Systematics and Evolution*, 283, 111–123.
- Liu XD, Dong BW (2013) Influence of the Tibetan Plateau uplift on the Asian monsoon-arid environment evolution. *Chinese Science Bulletin*, 58, 2906–2919. (in Chinese) [刘晓东, Dong BW (2013) 青藏高原隆升对亚洲季风-干旱环境演化的影响. 科学通报, 58, 2906–2919.]
- Liu XD, Yin ZY (2002) Sensitivity of East Asian monsoon climate to the uplift of the Tibetan Plateau. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 183, 223–245.
- Liu YH, Xia NH, Yang HQ (1995) The origin, evolution and phytogeography of Magnoliaceae. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 3(4), 1–12. (in Chinese with English abstract) [刘玉壶, 夏念和, 杨惠秋 (1995) 木兰科 (Magnoliaceae) 的起源、进化和地理分布. 热带亚热带植物学报, 3(4), 1–12.]
- Liu ZF, Wang PX, Wang CS, Shao L, Huang W (2001) Paleotopography of China during the Cenozoic: a preliminary study. *Geological Review*, 47, 467–475. (in Chinese with English abstract) [刘志飞, 汪品先, 王成善, 邵磊, 黄维 (2001) 中国新生代古地形演化的初步模型. 地质论评, 47, 467–475.]
- Lu HY, Guo ZT (2013) Evolution of the monsoon and dry climate in East Asia during late Cenozoic: a review. *Science China: Earth Science*, 43, 1907–1918. (in Chinese) [鹿化煜, 郭正堂 (2013) 晚新生代东亚气候变化: 进展与问题. 中国科学: 地球科学, 43, 1907–1918.]
- Ma QW, Li FL, Li CS (2005) The coast redwoods (*Sequoia*, *Taxodiaceae*) from the Eocene of Heilongjiang and the Miocene of Yunnan, China. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 135, 117–129.
- Mabberley DJ (2008) *Mabberley's Plant-book: A Portable Dictionary of Plants, Their Classifications and Uses*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Mai DH, Walther H (1978) *Die Floren der Haselbacher Serie im Weissester-Becken (Bezirk Leipzig, DDR)*. *Abhandlungen des Staatlichen Museums für Mineralogie und Geologie zu Dresden*, 28, 1–301. (in German)
- Mai DH, Walther H (1991) *Die oligozänen und untermiozänen Floren Nordwest-Sachsens und des Bitterfelder Raumes*. *Staatliches Museum für Mineralogie und Geologie zu Dresden, Dresden, Germany*. (in German)
- Manchester SR (1994) *Fruits and Seeds of the Middle Eocene Nut Beds Flora, Clarno Formation, Oregon*. *Paleontological Research Institution, New York*.
- Manchester SR, Chen ZD, Lu AM, Uemura K (2009) Eastern Asian endemic seed plant genera and their paleogeographic history throughout the Northern Hemisphere. *Journal of Systematics and Evolution*, 47, 1–42.
- Miki S (1941) On the change of flora in eastern Asia since Tertiary period (1): the clay or lignite beds flora in Japan with special reference to the *Pinus trifolia* beds in central Hondo. *Japanese Journal of Botany*, 8, 303–341.
- Milne RI, Abbott RJ (2002) The origin and evolution of tertiary relict floras. *Advances in Botanical Research*, 38, 281–314..
- Min TL, Bartholomew B (2003) *Camellia sinensis*. In: *Flora of China* (eds Wu ZY, Raven PH, Hong DY), pp. 364–366. Science Press, Beijing & Missouri Botanical Garden, St. Louis.
- Momohara A (1994) Floral and paleoenvironmental history from the late Pliocene to middle Pleistocene in and around central Japan. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 108, 281–293.
- Momohara A (2005) Paleogeology and history of *Metasequoia* in Japan, with reference to its extinction and survival in East Asia. In: *The Geobiology and Ecology of Metasequoia* (eds LePage BA, Williams CJ, Yang H), pp. 115–136. Springer, Dordrecht.
- Momohara A, Saito T (2001) Change of paleovegetation caused by topographic change in and around a sedimentary basin of the Upper Miocene Tokiguchi Porcelain Clay Formation, central Japan. *Geoscience Report of Shimane University*, 20, 49–58. (in Japanese with English abstract)
- Noss RF (1999) *The redwood forest: history, ecology, and conservation of the coast redwoods*. Island Press, Washington, DC.
- Olsen DF, Roy DF, Walters GA (1990) *Sequoia sempervirens* (D. Don) Endl. redwoods. *Silvics of North America*. US Department of Agriculture, Agricultural Handbook, 654, 541–551.
- Ozaki K (1991) Late Miocene and Pliocene floras in central Honshu, Japan. *Bulletin Kanagawa Prefectural Museum, Nature Science*, 244.
- Qi GF, Yang JJ, Su JZ (1993) Two unearthed ancient woods excavated from Wuhan City. *Acta Botanica Sinica*, 35, 722–726. (in Chinese with English abstract) [齐国凡, 杨家驹, 苏景中 (1993) 武汉出土的两种古木的研究. 植物学报, 35, 722–726.]
- Qian H, Ricklefs RE (1999) A comparison of the taxonomic richness of vascular plants in China and the United States. *The American Naturalist*, 154, 160–181.

- Qiao CY, Ran JH, Li Y, Wang XQ (2007) Phylogeny and biogeography of *Cedrus* (Pinaceae) inferred from sequences of seven paternal chloroplast and maternal mitochondrial DNA regions. *Annals of Botany*, 100, 573–580.
- Raymo ME, Ruddiman WF (1992) Tectonic forcing of late Cenozoic climate. *Nature*, 359, 117–122.
- Ren WX, Sun BN, Xiao L (2010) Quantitative reconstruction on paleoelevation and paleoclimate of Miocene Xiananshan Formation in Ninghai, Zhejiang Province. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 27, 93–98. (in Chinese with English abstract) [任文秀, 孙柏年, 肖良 (2010) 浙江宁海下南山组晚中新世古海拔与古气候定量重建. *微体古生物学报*, 27, 93–98.]
- Ricklefs RE, Qian H, Peter S. White PS (2004) The region effect on mesoscale plant species richness between eastern Asia and eastern North America. *Ecography*, 27, 129–136.
- Roberts EH (1973) Predicting the storage life of seeds. *Seed Science and Technology*, 1, 499–514.
- Rohwer JG (1993) Lauraceae: Nectandra. In: *Flora Neotropica* (ed. Zanoni T), pp. 332. The New York Botanical Garden, New York.
- Shi JZ, Liu ZJ, Liu R, Du JF, Zhang J, Liu F (2008) Quantitative reconstruction of the Eocene Palaeoclimate in the Fushun Basin, Liaoning Province. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 38, 50–55. (in Chinese with English abstract) [史冀忠, 刘招君, 柳蓉, 杜江峰, 张健, 刘沅 (2008) 辽宁抚顺盆地始新世古气候定量研究. *吉林大学学报(地球科学版)*, 38, 50–55.]
- Sims HJ, Herendeen PS, Crane PR (1998) New genus of fossil Fagaceae from the Santonian (Late Cretaceous) of central Georgia, USA. *International Journal of Plant Sciences*, 159, 391–404.
- Singh D, Tsiang M, Rajaratnam B, Diffenbaugh NS (2014) Observed changes in extreme wet and dry spells during the South Asian summer monsoon season. *Nature Climate Change*, 4, 456–461.
- Spicer RA, Harris NBW, Widdowson M, Herman AB, Guo SX, Valdes PJ, Wolfe JA, Kelley SP (2003) Constant elevation of southern Tibet over the past 15 million years. *Nature*, 421, 622–624.
- Su T (2010) On the establishment of the leaf physiognomy-climate model and a study of the Late Pliocene Yangjie Flora, Southwest China. PhD dissertation, Kunming Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Kunming. (in Chinese with English abstract) [苏涛 (2010) 叶相-气候中国模型的建立及上新世羊街植物群的研究. 博士学位论文, 中国科学院昆明植物研究所, 昆明.]
- Su T, Jacques FMB, Spicer RA, Liu YS, Huang YJ, Xing YW, Zhou ZK (2013a) Post-Pliocene establishment of the present monsoonal climate in SW China: evidence from the late Pliocene Longmen megafloora. *Climate of the Past*, 9, 1911–1920.
- Su T, Liu YS, Jacques FMB, Huang YJ, Xing YW, Zhou ZK (2013b) The intensification of the East Asian winter monsoon contributed to the disappearance of *Cedrus* (Pinaceae) in southwestern China. *Quaternary Research*, 80, 316–325.
- Su T, Xing YW, Yang QS, Zhou ZK (2009) Reconstruction of mean annual temperature in Chinese Eocene paleofloras based on leaf margin analysis. *Acta Palaeontologica Sinica*, 48, 65–72. (in Chinese with English abstract) [苏涛, 星耀武, 杨青松, 周浙昆 (2009) 基于叶缘分析法定量重建中国始新世植物群的年均温. *古生物学报*, 48, 65–72.]
- Sun G, Dilcher DL, Zheng SL, Zhou ZK (1998) In search of the first flower: a Jurassic angiosperm, *Archaeofructus*, from Northeast China. *Science*, 282, 1692–1695.
- Sun G, Dilcher DL, Wang HS, Chen ZD (2011) A eudicot from the Early Cretaceous of China. *Nature*, 471, 625–628.
- Sun XJ, Wang PX (2005) How old is the Asian monsoon system? Palaeobotanical records from China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 222, 181–222.
- Tanai T (1992) Tertiary vegetational history of East Asia. *Bulletin of the Mizunami Fossil Museum*, 19, 125–163.
- Tang GG, Song XH (1989) A study on woody flora of the Xindoushan. *Journal of Nanjing Forestry University (Nature Science Edition)*, 13, 55–61. (in Chinese with English abstract) [汤庚国, 宋祥后 (1989) 星斗山自然保护区木本植物区系研究. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 13, 55–61.]
- Tang YC (2000) On the affinities and the role of the Chinese Flora. *Acta Botanica Yunnanica*, 22, 1–26. (in Chinese with English abstract) [汤彦承 (2000) 中国植物区系与其它地区区系的联系及其在世界区系中的地位和作用. *云南植物研究*, 22, 1–26.]
- Tao JR, Kong ZC (1973) The fossil florule and sporo-pollen assemblage of the Shang-in coal series of Erhuan, Yunnan. *Acta Botanica Sinica*, 15, 120–130. (in Chinese with English abstract) [陶君容, 孔昭宸 (1973) 云南洱源三营煤系的植物化石群和孢粉组合. *植物学报*, 15, 120–130.]
- Tao JR, Zhang CB (1990) Early Cretaceous angiosperms of the Yanji basin, Jilin Province. *Acta Botanica Sinica*, 32, 220–229. (in Chinese with English abstract) [陶君容, 张川波 (1990) 吉林省延吉盆地早白垩纪被子植物化石. *植物学报*, 32, 220–229.]
- Tao JR, Zhang CB (1992) Two angiosperm reproductive organs from the early cretaceows of China. *Acta Phytotaxonomica Sinica*, 30, 423–426. (in Chinese with English abstract) [陶君容, 张川波 (1992) 中国早白垩纪被子植物生殖器官. *植物分类学报*, 30, 423–426.]
- Taylor DW (1988) Eocene floral evidence of Lauraceae: corroboration of the North American megafossil record. *American Journal of Botany*, 75, 948–957.
- Tiffney BH (1986) Fruit and seed dispersal and the evolution of the Hamamelidaceae. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 73, 394–416.
- von Balthazar M, Pedersen KR, Crane PR, Stampanoni M, Friis EM (2007) *Potomacanthus lobatus* gen. et sp. nov., a new flower of probable Lauraceae from the Early Cretaceous

- (Early to Middle Albian) of eastern North America. *American Journal of Botany*, 94, 2041–2053.
- Wang PX (2009) Geological evolution of the global monsoon. *Chinese Science Bulletin*, 54, 535–556. (in Chinese) [汪品先 (2009) 全球季风的地质演变. *科学通报*, 54, 535–556.]
- Wang PX, Clemens S, Beaufort L, Braconnot P, Ganssen G, Jian Z, Kershaw P, Sarnthein M (2005) Evolution and variability of the Asian monsoon system: state of the art and outstanding issues. *Quaternary Science Reviews*, 24, 595–629.
- Wang Q, Song ZQ, Chen YF, Shen S, Li ZY (2014) Leaves and fruits of *Bauhinia* (Leguminosae, Caesalpinoideae, Cercideae) from the Oligocene Ningming Formation of Guangxi, South China and their biogeographic implications. *BMC Evolutionary Biology*, 14, 88.
- Wang XQ, Li HM (2000) Discovery of another living fossil—*Shaniodendron subaequale* (H. T. Chang) Deng et al. in China—Clearing up paleobotanists' a long-term doubt. *Acta Palaeontologica Sinica*, 39, 308–317. (in English with Chinese abstract) [王希冀, 李浩敏 (2000) 活化石银缕梅的发现澄清了古植物学者中的一个疑问. *古生物学报*, 39, 308–317.]
- Wang XQ, Ma LY, Guo BX, Fan SH, Tan JX (2005) Analysis on the change of the original *Metasequoia glyptostroboides* population and its environment in Lichuan Hubei from 1948 to 2003. *Acta Ecologica Sinica*, 25, 972–977. (in Chinese with English abstract) [王希群, 马履一, 郭保香, 范深厚, 谭鉴锡 (2005) 湖北利川水杉原生种群及其生境 1948–2003年间变化分析. *生态学报*, 25, 972–977.]
- Wang Y (1990) Agricultural Climate Resources and Districts of Yunnan Province. China Meteorological Press, Beijing. (in Chinese) [王宇 (1990) 云南省农业气候资源及区划. 气象出版社, 北京.]
- Wang Y (2006) Yunnan Mountain Climate. Yunnan Science & Technology Press, Kunming. (in Chinese) [王宇 (2006) 云南山地气候. 云南科技出版社, 昆明.]
- Wang YF (2004) Evolutionary biology of some important plant taxa and their paleo-environments from the Mid-Miocene of Shanwang, Shandong Province, China. PhD dissertation, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing. (in Chinese with English abstract) [王宇飞 (2004) 山东山旺中新世植物重要类群演化生物学与古气候定量重建的研究. 博士学位论文, 中国科学院植物研究所, 北京.]
- Wang YQ, Momohara A, Sun M, Wang L, Lebreton-Anberrée J, Zhou ZK (2015) Climate change of central Japan during Pliocene to Pleistocene: evidence from stable carbon isotope and leaf morphology of fossil *Metasequoia*. *Quaternary Sciences*, 35, 767–775. (in Chinese with English abstract) [王雨晴, 百原新, 孙梅, 王力, Lebreton-Anberrée J, 周浙昆 (2015) 日本中部地区上新世到更新世过渡时期的气候演变: 来自水杉叶片化石稳定碳同位素及其形态性状的证据. *第四纪研究*, 35, 767–775.]
- Willis KJ, Niklas KJ (2004) The role of Quaternary environmental change in plant macroevolution: the exception or the rule? *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 359, 159–172.
- Wu ZY, Sun H, Zhou ZK, Li DZ, Peng H (2011) Floristics of Seed Plants from China. Science Press, Beijing. (in Chinese) [吴征镒, 孙航, 周浙昆, 李德铎, 彭华 (2011) 中国种子植物区系地理. 科学出版社, 北京.]
- Wu ZY, Sun H, Zhou ZK, Peng H, Li DZ (2005) Origin and differentiation of endemism in the flora of China. *Acta Botanica Yunnanica*, 27, 577–601. (in Chinese with English abstract) [吴征镒, 孙航, 周浙昆, 彭华, 李德铎 (2005) 中国植物区系中的特有性及其起源和分化. *云南植物研究*, 27, 577–601.]
- Wu ZY, Zhou ZK, Li DZ, Peng H, Sun H (2003) The areal-types of the world families of seed plants. *Acta Botanica Yunnanica*, 25, 245–257. (in Chinese with English abstract) [吴征镒, 周浙昆, 李德铎, 彭华, 孙航 (2003) 世界种子植物科的分布区类型系统. *云南植物研究*, 25, 245–257.]
- Wu ZY, Zhu YC, Jiang HQ (1987) Vegetation of Yunnan. Science Press, Beijing. (in Chinese) [吴征镒, 朱彦丞, 姜汉桥 (1987) 云南植被. 科学出版社, 北京.]
- Xia K, Su T, Liu YS, Xing YW, Jacques FMB, Zhou ZK (2009) Quantitative climate reconstructions of the late Miocene Xiaolongtan megaflora from Yunnan, Southwest China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 276, 80–86.
- Xing YW, Utescher T, Jacques FMB, Su T, Liu Y, Huang YJ, Zhou ZK (2012) Paleoclimatic estimation reveals a weak winter monsoon in southwestern China during the Late Miocene: evidence from plant macrofossils. *Palaeogeography, Palaeoclimatology Palaeoecology*, 358, 19–26.
- Xu R, Kong ZC, Sun XJ, Tao JR, Du NQ (1973) Quaternary botany research of the Mt. Everest region and the uplifting of the Himalayas. *Chinese Science Bulletin*, 6, 274–279. (in Chinese) [徐仁, 孔昭宸, 孙湘君, 陶君容, 杜乃秋 (1973) 珠穆朗玛峰地区第四纪古植物学的研究和喜马拉雅山的上升. *科学通报*, 6, 274–279.]
- Yang H (1998) From fossils to molecules: the *Metasequoia* tale continues. *Arnoldia*, 58, 60–71.
- Yao YF (2006) Eocene Palynoflora from Changchang Basin, Hainan Island and Its Bearing on the Implications of Palaeovegetation and Palaeoclimate. PhD dissertation, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing. (in Chinese with English abstract) [姚铁锋 (2006) 海南岛长昌盆地始新世孢粉植物群及其古植被和古气候研究. 博士学位论文, 中国科学院植物研究所, 北京.]
- Ying JS, Zhang ZS (1984) Endemism in the Flora of China—Studies on the Endemic Genera. *Journal of University of Chinese Academy of Sciences*, 22, 259–268. (in Chinese) [应俊生, 张志松 (1984) 中国植物区系中的特有现象—

- 特有属的研究. 中国科学院大学学报, 22, 259–268.]
- Zachos J, Pagani M, Sloan L, Thomas E, Billups K (2001) Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to present. *Science*, 292, 686–693.
- Zachos JC, Lohmann KC, Walker JCG, Wise SW (1993) Abrupt climate change and transient climates during the Paleogene: a marine perspective. *The Journal of Geology*, 101, 191–213.
- Zhang JW, D'Rozario A, Adams JM, Li Y, Liang XQ, Jacques FMB, Su T, Zhou ZK (2015) *Sequoia maguanensis*, a new Miocene relative of the coast redwood, *Sequoia sempervirens*, from China: implications for paleogeography and paleoclimate. *American Journal of Botany*, 102, 103–118.
- Zhang TC, Sun H (2011) Phylogeographic structure of *Terminalia franchetii* (Combretaceae) in Southwest China and its implications for drainage geological history. *Journal of Plant Research*, 124, 63–73.
- Zhang Y, Zhai P, Zheng S, Zhang W (1990) Late Cretaceous–Paleogene plants from Tangyuan, Heilongjiang. *Acta Palaeontologica Sinica*, 29, 237–245. (in Chinese with English abstract) [张莹, 翟培民, 郑少林, 张武 (1990) 黑龙江汤原晚白垩纪—早第三纪植物. *古生物学报*, 29, 237–245.]
- Zheng D, Yao TD (2005) The Qinghai-Tibet Plateau Uplifting and Its Environmental Effects. Science Press, Beijing. (in Chinese) [郑度, 姚檀栋 (2005) 青藏高原隆升与环境效应. 科学出版社, 北京.]
- Zheng HB, Wang PX, Liu ZF, Yang SY, Wang JL, Li QY, Zhou ZY, Jia JT, Li SQ, Jia JY, Chappell J, Saito Y, Inoue T (2008) Carving the history of East Asia's east-tilting topography and East Asian monsoon—an introduction to IODP proposal 683. *Advances in Earth Science*, 23, 1150–1160. (in Chinese with English abstract) [郑洪波, 汪品先, 刘志飞, 杨守业, 王家林, 李前裕, 周祖翼, 贾军涛, 李上卿, 贾健宜, Chappell J, Saito Y, Inoue T (2008) 东亚东倾地形格局的形成与季风系统演化历史寻踪——综合大洋钻探计划683号航次建议书简介. *地球科学进展*, 23, 1150–1160.]
- Zhou ZK (1999) Fossils of the Fagaceae and their implications in systematics and biogeography. *Acta Phytotaxonomica Sinica*, 37, 66–82. (in Chinese with English abstract) [周浙昆 (1999) 壳斗科的地质历史及其系统学和植物地理学意义. *植物分类学报*, 37, 66–82.]
- Zhou ZK (2000) Miocene Xiaolongtan flora, Kaiyuan, Yunnan. In: *The Evolution of the Late Cretaceous-Cenozoic Floras in China* (ed. Tao JR), pp. 64–72. Science Press, Beijing, China. (in Chinese) [周浙昆 (2000) 云南开远小龙潭中新世植物群. In: 中国晚白垩纪至新生代植物区系发展演变 (陶君容编著), 64–72页. 科学出版社, 北京.]
- Zhou ZK (2013a) History of vegetation in China. In: *Plants of China: A Companion to the Flora of China* (eds Blackmore S, Hong DY), pp. 103–119. Science Press, Beijing.
- Zhou ZK (2013b) Origin and development of the Chinese flora. In: *Plants of China: A Companion to the Flora of China* (eds Blackmore S, Hong DY), pp. 86–102. Science Press, Beijing.
- Zhou ZK, Crepet WL, Nixon KC (2001) The earliest fossil evidence of the Hamamelidaceae: Late Cretaceous (Turonian) inflorescences and fruits of *Altingioideae*. *American Journal of Botany*, 88, 753–766.
- Zhou ZK, Momohara A (2005) Fossil history of some endemic seed plants of East Asia and its phytogeographical significance. *Acta Botanica Yunnanica*, 27, 3–24. (in Chinese with English abstract) [周浙昆, Momohara A (2005) 一些东亚特有种子植物的化石历史及其植物地理学意义. *云南植物研究*, 27, 3–24.]
- Zhou ZK, Wilkinson H, Wu ZY (1994) Taxonomical and evolutionary implications of the leaf anatomy and architecture of *Quercus* L. subgenus *Quercus* from China. *Cathaya*, 7, 1–34.
- Zhou ZK, Yang XF, Yang QS (2006) Land bridge theory and Long-distance Dispersal—new evidence to old view. *Chinese Science Bulletin*, 51, 879–886. (in Chinese) [周浙昆, 杨雪飞, 杨青松 (2006) 陆桥说和长距离扩散——老观点, 新证据. *科学通报*, 51, 879–886.]

(责任编辑: 沈泽昊 责任编辑: 黄祥忠)

附录 Supplementary Material

附录1 亚热带常绿阔叶林主要成分及其外观。(A): 木兰科代表深山含笑;(B): 樟科代表薄叶润楠;(C): 壳斗科代表滇青冈;(D): 山茶科代表木荷;(E): 福建武夷山典型的中亚热带常绿阔叶林。

Appendix 1 Main components of subtropical evergreen broad-leaved forest and its landscape. (A), *Michelia maudiae*; (B), *Machilus leptophylla*; (C), *Cyclobalanopsis glaucoides*; (D), *Schima superba*; (E), Typical subtropical evergreen broad-leaved forest in Mt. Wuyi, Fujian Province.

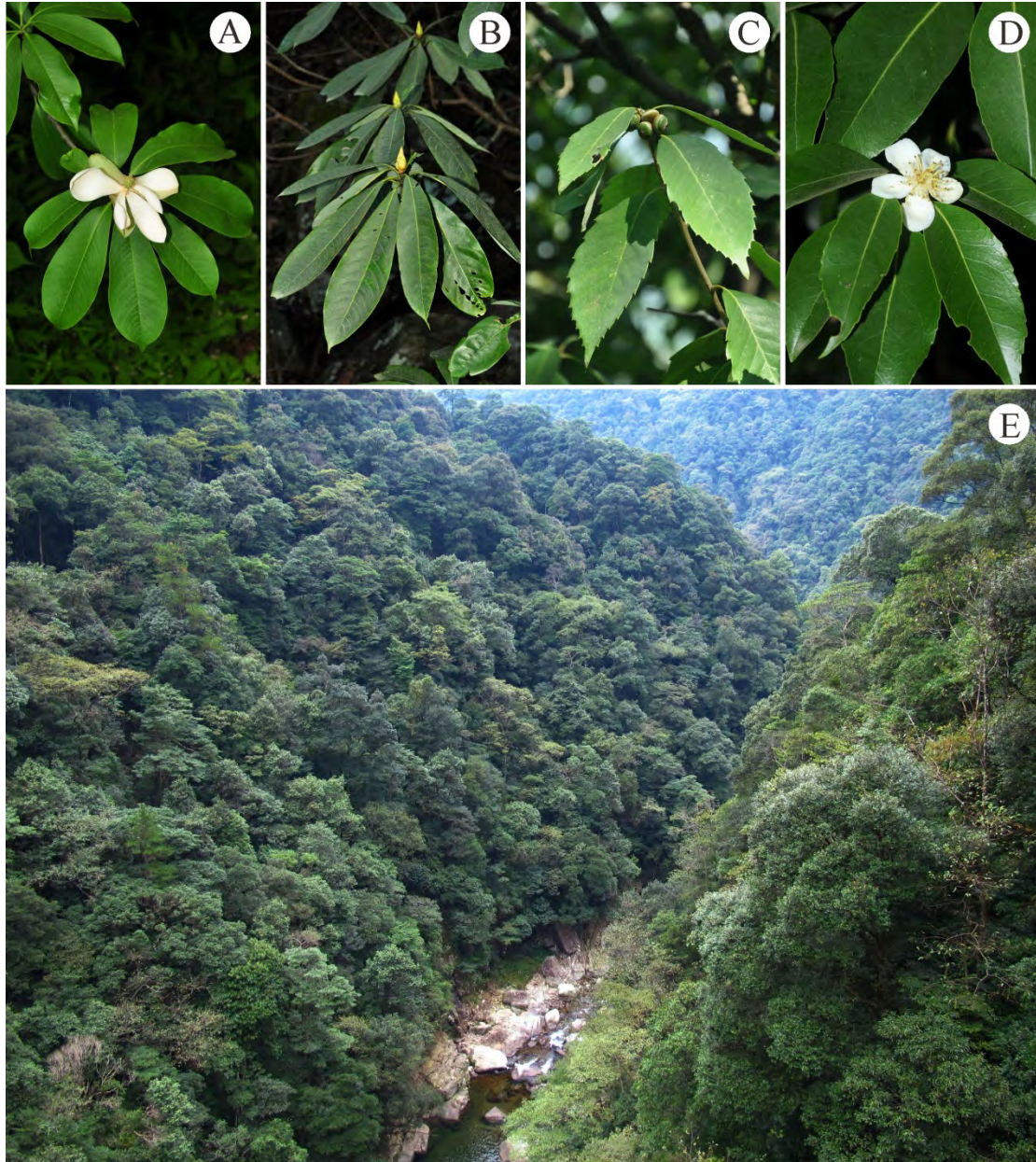
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2016120-1.pdf>

附录2 孑遗植物图示。(A): 雪松;(B): 水杉;(C): 杜仲。

Appendix 2 Pictures of some relict plants. (A), *Cedrus deodara*; (B), *Metasequoia glyptostroboides*; (C), *Eucommia ulmoides*.

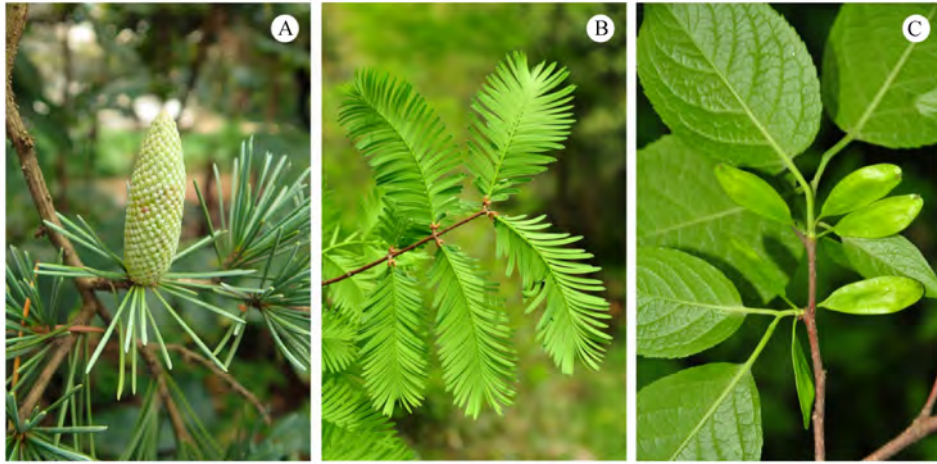
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2016120-2.pdf>

周浙昆, 黄健, 丁文娜. 若干重要地质事件对中国植物区系形成演变的影响. 生物多样性, 2017, **25** (2): 123–135.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016120>



附录1 亚热带常绿阔叶林主要成分及其外观。A: 木兰科代表深山含笑; B: 樟科代表薄叶润楠; C: 壳斗科代表滇青冈; D: 山茶科代表木荷; E: 福建武夷山典型的中亚热带常绿阔叶林。

Appendix 1 Main components of subtropical evergreen broad-leaved forest and its landscape. A, *Michelia maudiae*; B, *Machilus leptophylla*; C, *Cyclobalanopsis glaucoides*; D, *Schima superba*; E, Typical subtropical evergreen broad-leaved forest in Mt. Wuyi, Fujian Province.



附录2 孑遗植物图示。(A): 雪松; (B): 水杉; (C): 杜仲。

Appendix 2 Pictures of some relict plants. (A), *Cedrus deodara*; (B), *Metasequoia glyptostroboides*; (C), *Eucommia ulmoides*.

• 综述 •

东亚第三纪孑遗植物的亲缘地理学：现状与趋势

邱英雄* 鹿启祥 张永华 曹亚男

(浙江大学生命科学院濒危动植物保护生物学教育部重点实验室, 杭州 310058)

摘要: 通过分析比较近年来东亚第三纪孑遗植物的种群遗传学与亲缘地理学的研究结果, 总结了它们的谱系地理格局式样, 分析了其形成的共同地史或气候成因, 并对未来的研究提出了展望。东亚孑遗植物的谱系地理式样主要表现为以下4个方面: (1)中新世中期至晚期的气候变冷变干驱使孑遗植物发生了近期的物种形成, 而上新世末以及更新世的气候变化则促进了它们的种内谱系分化、遗传多样性形成以及种群的收缩与扩张, 种群的收缩与扩张导致部分类群形成地理谱系“缝合带”。(2)由于不同的植物类群具有不同的生态位需求以及生物学特点, 更新世冰期暴露的东海陆桥对中国–日本间断分布的孑遗植物具有不同的“过滤”与“廊道”效应, 从而导致其呈现不同的遗传隔离式样。(3)上新世末青藏高原的快速隆升以及上新世末/更新世初东亚季风气候的加强可能是多个亚热带地区分布的孑遗植物沿四川盆地附近发生东西谱系分化的根本原因, 也是西北干旱带分布的孑遗植物发生东西谱系分化的驱动因素。(4)自晚中新世以来的全球气候变冷变干驱使部分第三纪孑遗植物在更新世以前就已经从中国大陆或日本本岛迁入台湾, 并发生隔离分化, 形成了新的物种或地理谱系。总之, 历史与当代的地理以及环境共同影响了东亚第三纪孑遗植物的地理分布、遗传多样性、谱系分化以及物种形成。最后, 我们强调了目前由单位点的简单分子钟模型的运用造成的研究不足, 并对未来的研究提出了展望, 即基因组数据和生物地理模型的使用以及群落水平的整合亲缘地理学研究是未来的研究方向。

关键词: 东亚; 第三纪孑遗植物; 亲缘地理学; 冰期避难所; 物种形成; 迁移

Phylogeography of East Asia's Tertiary relict plants: current progress and future prospects

Yingxiong Qiu*, Qixiang Lu, Yonghua Zhang, Yanan Cao

Key Laboratory of Conservation Biology for Endangered Wildlife of the Ministry of Education, College of Life Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058

Abstract: In this review, based on recent studies of population genetics and phylogeographics of East Asia's Tertiary relict plants, we have outlined the main phylogeographic patterns and processes. We also summarize common geographic and environmental factors which may contribute to the phylogeographic patterns of East Asia's Tertiary relict plants and present future challenges and research prospects. There are four recurrent phylogeographic scenarios identified by different case studies, including: (1) the global cooling and aridification during the Middle and Late Miocene induced recent speciation, with climate change during the Late Pliocene and Pleistocene accounting for their intra-specific lineage divergence, genetic diversification and demographic expansion/contraction. The latitudinal contraction/expansion can lead to the formation of “suture zone” for some relict plants; (2) the effects of the formation of the glacial East China Sea land bridge, as a “corridor” or “filter”, have to account not only for habitat preferences per se but also for other biological features of different relict plant species; (3) the uplift of the Qinghai-Tibet Plateau (QTP) during the Late Pliocene and the intensification of East Asian monsoon system (EAMS) are the most suggestive factors responsible for the major phylogeographic break between the western and eastern lineages across the Sichuan Basin and northwestern arid regions; and (4) some Tertiary relict plants migrated southward to Taiwan from mainland China or Japan before the Pleistocene under global climatic cooling and aridification since the Late

收稿日期: 2016-10-12; 接受日期: 2016-12-08

基金项目: 国家自然科学基金(31370241, 31570214)和国家自然科学基金国际合作项目(31511140095, 31561143015)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: qyxhero@zju.edu.cn

Miocene, and refugial isolation that occurred between Taiwan and mainland Asia accelerated vicariant lineage diversification and speciation. Overall, both historical and contemporary geography and environment have affected the distribution, genetic diversity, lineage divergence and speciation of East Asia's Tertiary relict plants. Finally, we emphasize notable gaps in our knowledge due to the long-term application of simple molecular clock based on very limited genetic markers, and outline future research prospects for disentangling the evolution and biogeographic history of East Asia's Tertiary relict flora. We present the utilization of genome data and biogeography models and integrative phylogeographic research of multi-taxon communities as possible future directions.

Key words: East Asia; Tertiary relict plants; phylogeography; glacial refugia; speciation; migration

1 前言

北半球早第三纪时期温暖湿润的气候曾经维持了大量中高纬度及环北分布的植物物种(Tiffney, 1985a, b)。大约从渐新世早期(距今约34 Ma)开始, 由于气候变冷, 这些物种逐步向低纬度退缩(Wolfe, 1971), 到了晚第三纪至第四纪期间, 进一步南退到东亚、北美和欧洲西南部这三大冰期避难所区域。这些曾经在第三纪环北极连续分布, 但目前仅分布在上述三个区域的物种被称为第三纪孑遗物种(Tiffney, 1985a; Tiffney & Manchester, 2001; Milne & Abbott, 2002)。这三个地区保留下来的第三纪孑遗植物的物种丰富度差异极大, 以东亚地区最高, 北美次之, 欧亚大陆西南端最低, 反映了这些避难所内物种幸存率和多样化速率的不同(Tiffney, 1985a; Wen et al, 1998; Wen, 1999)。总的来说, 幸存率很大程度上取决于在地质历史时期的全球气候动荡过程中, 物种追踪适宜生境的难易程度。欧洲和北美大陆在冰期时因为被大面积冰川覆盖, 动、植物在向南迁移的过程中, 由于受到高山的阻隔而加速了灭绝(Tiffney, 1985a; Sang et al, 1997)。与欧洲和北美相比, 东亚地区在第四纪冰期仅形成有限的冰川覆盖(Qian, 1999), 加上中国南方地区分布有众多的高山和峡谷, 缓冲了剧烈的气候波动, 为物种原地存留提供了长期稳定的生境。此外, 由于没有阻碍植物向南迁移的地理屏障, 第三纪孑遗植物在该地区的灭绝率较低, 从而使得中国成为许多第三纪植物的避难所, 物种幸存繁衍至今(Axelrod et al, 1996; Qian & Ricklefs, 2000; López-Pujol et al, 2011a)。值得注意的是, 许多古特有物种支系曾广泛分布, 而现在仅局限分布在东亚地区相互隔离的避难所, 尤其在中国的中部和南部地区。化石记录显示一些物种曾在欧洲或北美分布, 但在新近纪气

候条件恶化后发生灭绝(Latham & Ricklefs, 1993; Axelrod et al, 1996; Manchester, 1999; Manchester et al, 2009), 如裸子植物中的单型属或寡型属有: 穗花杉属(*Amentotaxus*)、银杉属(*Cathaya*)、银杏属(*Ginkgo*)、水松属(*Glyptostrobus*)、水杉属(*Metasequoia*)、金钱松属(*Pseudolarix*)、台湾杉属(*Taiwania*)等。被子植物的单型属或寡型属包括: 滇桐属(*Craigia*)、青钱柳属(*Cyclocarya*)、珙桐属(*Davidia*)、双盾木属(*Dipelta*)、马蹄参属(*Diplopanax*)、香果树属(*Emmenopterys*)、杜仲属(单型科) (*Eucommia*)、牛鼻栓属(*Fortunearia*)、青檀属(*Pteroceltis*)、大血藤属(*Sargentodoxa*)、瘦椒树属(*Tapiscia*)、水青树属(*Tetracentron*)和昆栏树属(*Trochodendron*)等(López-Pujol et al, 2011b)。

目前用来解释第三纪孑遗植物的谱系分化与遗传多样性的进化假说主要有3种观点: (1)与以前的气候与地质事件相比, 第四纪气候动荡可能对第三纪孑遗植物的分布与遗传多样性影响很小; (2)更新世冰期与间冰期气候动荡对第三纪孑遗植物具有决定性影响, 因此其谱系分化时间与第四纪的气候动荡一致; (3)第三纪与第四纪的气候与地质事件对第三纪孑遗植物的物种形成与谱系分化均产生了一定影响, 物种形成可能追踪至早第三纪至晚第三纪, 而最近的遗传分化可能发生在第四纪(Zhao et al, 2013; Canestrelli et al, 2014)。解决以上争论的关键是解析第三纪孑遗植物何时发生分化以及它们如何应对第四纪气候动荡。早期, 不同学者利用化石资料、种群生态、群落生态学等方法对多个东亚第三纪孑遗植物如水杉(*Metasequoia glyptostroboides*) (LePage et al, 2005)、银杏(*Ginkgo biloba*) (Uemura, 1997)等孑遗植物的地理分布与进化历史进行了研究, 但这些方法并不能揭示其遗传多样性

与谱系地理格局,更无法阐明谱系分化、种群历史动态、地理扩张的历史过程与形成机制(Qian & Ricklefs, 2001)。此外,由于第三纪孑遗植物具有形态性状保守的特点,即使其经历了最近的分化过程,也很难从形态上进行鉴别(Nagalingum et al, 2011)。而利用种群遗传学与分子亲缘地理学分析方法不仅可以区分以前提出的多种不同的生物地理学假说,而且能够推断物种的进化历史(Avise, 2000),例如:种群扩张事件(Rogers & Harpending, 1992)、单倍型(haplotype)最近共同祖先与种群隔离时间、谱系分化后有效种群大小、分化后种群间的基因流状况等(Hey & Nielsen, 2007; Carstens & Knowles, 2007; Qiu et al, 2009a)。利用生态位模型可以预测物种在不同地质历史时期的潜在分布区(Wiens & Graham, 2005),并已经开始在植物种群遗传学与分子亲缘地理学研究中得到应用(Jakob et al, 2009)。

近年来,有关学者对东亚第三纪孑遗植物的遗传多样性、谱系地理结构、避难所以及迁移路线等进行了一系列研究,本文通过比较分析这些研究结果,总结了东亚第三纪孑遗植物共有的谱系地理式样,并分析其形成的地史与气候因素,将有助于加深对东亚第三纪孑遗植物区系起源与进化的理解。

2 谱系分化的式样、时间与机制

2.1 暖温带落叶林类群的东西谱系分化

银杏是著名的“活化石”植物,北半球分布的银杏及其近缘属的化石记录可以追踪到白垩纪。在北美与欧洲,银杏化石从古新世到上新世均有所发现,在东亚,距今最近的银杏化石是在更新世早期的日本发现的(Manchester et al, 2009)。目前银杏在全世界被广泛栽培,但其自然种群仅分布在中国。Gong 等(2008)利用 AFLP 标记和叶绿体 DNA(cpDNA)序列研究了银杏在中国亚热带和西南地区 13 个种群的遗传变异,发现母系遗传的叶绿体所揭示的银杏种群的遗传分化中等($F_{ST} = 0.35$),与双亲遗传的 AFLP 检测到的种群分化相似($F_{ST} = 0.28$),这可能与人类广泛传播其种子有关。特有 cpDNA 单倍型和 AFLP 等位基因数据均表明银杏可能存在两个山地避难所,即中国西南(三峡山区)和中国亚热带东部地区(西天目山),这与孢粉学证据以及种群生态学研究的结果一致(Harrison et al, 2001; Liu et

al, 2003; Tang et al, 2012)。银杏叶绿体单倍型的系统发育以及 STRUCTURE 分组分析表明,银杏存在与避难所分布一致的东西地理谱系分化式样。

对珙桐(*Davidia involucrata*)的研究同样揭示了主要的谱系隔离贯穿整个四川盆地。化石记录表明,珙桐在古新世、上新世在北美广泛分布,上新世珙桐种群也曾广泛分布于东亚,但第四纪冰期导致其发生了大规模的灭绝(Eyde, 1997; Manchester et al, 2009),仅在中国的西南与中部存留下来(彭玉兰等, 2003)。与银杏相比,珙桐的自然分布范围更小,但其叶绿体基因序列分析揭示的种群分化($F_{ST} = 0.765$)明显高于银杏,表明了其有限的种子传播能力。基于珙桐叶绿体基因序列变异的化石校正分子钟方法显示其东西谱系分化的时间为晚中新世/上新世(4.81 Ma)。

此外, Sakaguchi 等(2012)对五加科的第三纪孑遗树种刺楸(*Kalopanax septemlobus*)进行了亲缘地理学研究。该物种广泛分布于整个中国-日本森林植物亚区(Sino-Japanese Floristic Region),微卫星标记(SSR)与叶绿体序列分析均显示该物种的种群间遗传分化较高(SSR: $G_{ST} = 0.709$; cpDNA: $G_{ST} = 0.697$),其主要的谱系隔离线与中国-日本与中国-喜马拉雅森林植物亚区的隔离线一致, Sakaguchi 等(2012)利用溯祖理论的 IMA 模型方法揭示了刺楸谱系间的分化时间在更新世(0.28–0.74 Ma),表明谱系间的隔离已经经历了多个冰期-间冰期循环。

领春木属(*Euptelea*)为河岸植物群落的北极第三纪孑遗物种,其化石广泛分布于北半球的古新世至渐新世地层,东亚地区的化石记录在中国东南的中新世地层以及日本中部的上新世至更新世地层均有发现。该属为领春木科唯一属,现存两个种为中国的领春木(*E. pleiosperma*)以及日本的多花领春木(*E. polyandra*)。Cao 等(2016)对中国分布的领春木进行研究,发现其主要的谱系分化与中国-日本与中国-喜马拉雅森林植物亚区的隔离线一致(图 1),基于化石校正的分子钟方法估算的分化时间在上新世中晚期(3.64 (1.38–6.46) Ma)。考虑到西部谱系受印度洋季风影响(多雨的夏季与秋季),而中东部谱系受太平洋季风影响(较冷的冬季以及温暖湿润的夏季),东西谱系分化极有可能与青藏高原东缘的最后一次快速隆升(1.2–3.6 Ma)以及上新世与更新世时期东亚季风气候的加强有关(An et al, 2001)。

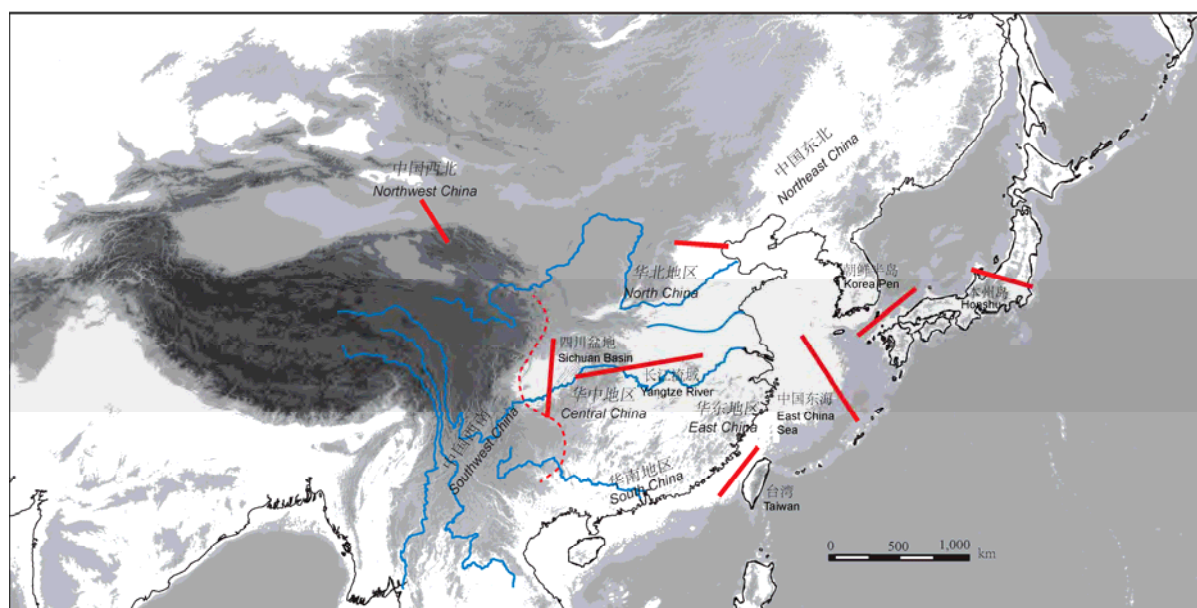


图1 东亚地区第三纪孑遗植物亲缘地理学研究中主要的谱系地理分隔线(以线段表示)以及中国-喜马拉雅森林亚区与中国-日本森林亚区地理分隔线(以虚线表示)

Fig. 1 Summary of the most common genetic discontinuities (solid lines) reported by phylogeographic studies of East Asia's Tertiary relict plants. Dashed line demarcates the boundary of Sino-Himalayan Forest sub-kingdom and Sino-Japanese Forest sub-kingdom.

2.2 温带植物类群的南北谱系分化与物种形成

南北方向的谱系分化也是第三纪孑遗植物遗传结构的常见式样, 这种式样形成的原因常常是由于环境与气候变化导致种群地理隔离而产生的初期分化, 而环境异质性造成的歧化选择与局域适应则进一步促进了谱系分化与物种形成。胡桃楸组(*Juglans* section *Cardiocaryon*)植物类群在早中新世曾广泛分布于北半球的较高纬度地区, 在第三纪晚期由于气候变冷向南方迁移(Hills et al, 1974), 现仅分布于东亚的两个独特地区: 南部与北部地区(Donoghue et al, 2001; Manos & Stanford, 2001; Xiang & Soltis, 2001; Milne & Abbott, 2002; Milne, 2006)。北部地区包括中国东北、韩国与日本, 而南部地区包括中国南部与东南部。尽管两个地区间没有山系与海洋的阻隔, 但早第三纪时期以及晚中新世至上新世时期在 35° – 45° N之间的东西向气候干旱带被认为是两个地区间植物迁移的主要障碍, 因此有可能促进第三纪孑遗植物的分化(Tiffney & Manchester, 2001; Guo ZT et al, 2008)。Bai等(2016)利用叶绿体基因和核基因片段以及核微卫星3种分子标记对东亚胡桃楸3个近缘种的70个种群进行研究, 验证了早第三纪东亚地区气候干旱带的形成促

进谱系分化与物种形成的假说。3种标记一致地揭示了东亚核桃楸存在南北谱系的分化(图1), 北部谱系包括*J. mandshurica*和*J. ailantifolia*, 分布于北方地区(中国东北、朝鲜和日本), 而南部谱系包括*J. cathayensis*, 分布于中国中部及南方地区, 生态位模型(ENM)预测的两个谱系在晚上新世(3 Ma)的潜在分布区不存在重叠现象。谱系间的分化可能与中新世的气候变化导致种群间的地理隔离有关, 而环境的适应性作用则维持甚至增强了谱系间的分化。晚更新世气候变化及伴随的海平面升降驱使的日本岛地理隔离与避难所分离可能促进了北部谱系的进一步分化。总之, 该研究凸显了第三纪以及第四纪气候动荡驱使了东亚第三纪孑遗植物的谱系分化与物种形成。Qi等(2012)对连香树(*Cercidiphyllum japonicum*)的研究发现, 其在南北方向上分化为中国长江以北和中国亚热带/日本南部两个谱系(图1), 分化时间约在1.89 Ma, 谱系分化可能与更新世气候动荡导致的反复的地理扩张与收缩以及长江作为种子传播的地理屏障有关。冰期东部种群退缩到南方避难所, 间冰期又以“leading edge”的形式向北方扩张, 这种南北向反复的地理扩张与收缩式样在青檀(*Pteroceltis tatarinowii*)中也被检测到

(Li et al, 2012)。

香果树(*Emmenopterys henryi*)为古热带孑遗成分,始新世时期其祖先曾在北美和欧洲都有分布(Manns et al, 2012)。Zhang等(2016)利用cpDNA片段、ITS序列以及AFLP分子标记对香果树分布区内38个种群进行了亲缘地理学和景观遗传学分析,3组数据均显示香果树沿长江流域存在南北两个主要的地理谱系(图1),化石校正的分子钟结果显示,两个谱系的分化时间在第三纪晚期(5.06 (1.68–8.91) Ma),与晚中新世/早上新世的全球气候变冷有关,该时期的气候变冷也被认为是东亚干旱化以及季风形成的主要诱因。上新世中期青藏高原隆升导致的地貌与东亚气候变化,则进一步促进了香果树南北两个谱系的内部分化(3.64–3.42 Ma)。失配分布和生态位模型分析表明香果树种群在末次冰期向北进行了扩张,在末次间冰期和当前气候下都发生种群收缩。基于AFLP数据的景观遗传学分析表明,地理隔离(isolation by distance, IBD)对香果树谱系地理结构的形成有主导作用,而近期的环境异质性则通过选择作用(isolation by environment, IBE)也对种群间的基因流具有明显的阻隔效应(structural equation modelling, SEM: IBD \approx 36.0% vs. IBE \approx 18.1%; multiple matrix regression with randomization, MMRR: IBD \approx 30.72% vs. IBE \approx 24.67%)。总之,历史与当代的地理以及环境共同影响了香果树的遗传结构式样。

水青树(*Tetracentron sinense*)是昆栏树科的单型属植物,是真双子叶的早期分化类群,始新世曾在北半球广布,现仅局限于中国西南和中部地区、尼泊尔以及缅甸北部(Pigg et al, 2001)。Sun等(2014)利用4个叶绿体基因片段研究了中国分布的水青树的谱系地理结构,发现其包括5个主要的地理谱系,与香果树类似,其谱系分化与中新世晚期的全球气候变冷以及喜马拉雅隆升导致的东亚季风加强有关。青钱柳(*Cyclocarya paliurus*)为胡桃科青钱柳属的唯一现存种,尽管该物种特有分布于中国亚热带地区,但青钱柳属物种的果实化石在北美的古新世至早始新世以及欧洲与亚洲的渐新世至早上新世地层中非常普遍(Manchester et al, 2009)。Kou等(2016)利用叶绿体和核基因片段两种分子标记对该种57个种群进行了研究,结果显示:青钱柳种内分化为6个谱系,这些谱系自东向西局域分布于中国

亚热带地区的不同山系,谱系共祖时间可追溯至早中新世晚期(16.69 Ma),与东亚季风气候开始加强和全球气候变冷的时间相一致,谱系分化的高峰分别在9.6 Ma与3.6 Ma左右,可能与中新世末期与上新世东亚季风两次加强有关。尽管青钱柳谱系地理结构式样符合多个避难所模型,但在更新世中期,该物种经历了至少两次的地理扩张事件。

2.3 中国–日本谱系分化

银杏与水杉的野生种群仅分布在中国,然而它们距今最近的化石记录在日本的更新世早期地层被发现,表明历史气候动荡导致了银杏与水杉近期在日本的灭绝,但也有些第三纪孑遗植物如连香树属(*Cercidiphyllum*)、领春木属以及刺楸属则间断分布于中国–日本的落叶林中。化石证据表明,连香树属的祖先类群是白垩纪以及第三纪北半球森林群落的主要组成树种(Mai, 1995; Meyer & Manchester, 1997; Manchester et al, 2009)。地球的逐渐变冷导致其在北美与西亚(中新世)以及欧洲(晚上新世)消失。在东亚,日本与中国的古新世到更新世中期地层中均发现有连香树属及其祖先类群的化石(Tanai, 1981; Crane & Stockey, 1985; Onoe, 1989; Uemura, 1991; Meyer & Manchester, 1997; Guo WY et al, 2010; Krassilov, 2010)。这些数据支持连香树属在东亚具有较长的进化历史。连香树属现存两个种:连香树(*C. japonicum*)与大叶连香树(*C. magnificum*),前者广泛分布于中国长江流域附近与日本南部山地暖温带落叶林以及北海道寒温带落叶林中,而后者则局域分布于日本本州中部的寒温带落叶林/亚高山森林。ITS与微卫星标记证实了两个种的分类地位,基于叶绿体单倍型序列的化石校正松散分子钟方法揭示其种间的分化时间为中新世晚期(约5.32 Ma),而连香树谱系间的分化则发生在更新世,中新世末期全球气候变冷可能促进了连香树属的物种形成。考虑到两个现存种的化石在更新世本州南部地层有记录,且ENM证实冰期日本南部、冰期暴露的东海陆桥以及中国东南部存在连香树的合适生境,说明日本南部、中国东南以及陆桥可能为连香树的重要避难所。冰期–间冰期循环导致中国及日本北部的连香树种群在冰期发生大面积的向南退缩以及冰后期向北扩张,这也为连香树与大叶连香树次生接触与杂交提供了机会。核基因与叶绿体基因系统发育结果存在冲突现象,表明两个种在

历史时期发生了不对称的基因杂交渐渗, 这一现象可能有利于连香树在间冰期(冰后期)向北扩张。与连香树相似, 中国-日本间断分布的领春木属两个种 *E. pleiosperma* 和 *E. polyandra* 在核基因与叶绿体基因上均互为单系类群的姐妹种, 且种间出现了明显的生态位分化。基于叶绿体序列的化石校正的松散分子钟方法揭示其种间分化发生在中新世末期, 而种内的谱系分化则发生在上新世末期至更新世初期, 中新世末期的全球气候变冷变干以及上新世末青藏高原快速隆升及其驱使的东亚气候变化可能是导致领春木属内两个物种以及种内谱系分化的关键因素, 然而谱系内的单倍型多样性形成则与晚第四纪的气候动荡有关。在更新世末期, 领春木属的两个种经历了不同的种群动态历史, 中国的领春木 *E. pleiosperma* 种群生存在多个山地避难所中, 通过沿海拔的迁移来追踪适宜生境, 从而维持其种群历史的稳定, 而日本 *E. polyandra* 则发生了重复性的沿纬度的地理收缩与扩张。

日本群岛在24 Ma开始与欧亚大陆分离, 然而自中新世以来(7.0–5.0 Ma; 2.0–1.3 Ma, 0.2–0.015 Ma), 伴随气候动荡的海平面变化驱使两地发生了多次的陆桥连接, 为间断分布物种的迁移与二次接触提供了机会。广泛的连香树与刺楸的研究案例中, 中国东南部与日本的种群共享同一个谱系, 表明它们之间的分化时间较迟。然而, 领春木属以及其他植物类群沿东海则发生了明显的地理谱系分化与物种形成, 如蛛网萼(*Platycrater arguta*) (Qiu et al, 2009b)、鹿蹄橐吾(*Ligularia hodgsonii*) (Wang et al, 2013)等。连香树与领春木同为河岸植物群落中的第三纪孑遗植物, 它们具有相似的繁育特点(如风媒传播种子与花粉、具有营养繁殖能力), 然而, 与领春木相比, 向北分布到日本北部的连香树能够忍耐更干更冷的气候以及具有更强的根蘖能力, 因此冰期暴露的东海陆桥能够为其提供迁移通道。由于第三纪孑遗植物具有不同的气候生态位需求以及生物学特点, 冰期暴露的东海陆桥对它们可能具有不同的“过滤”与“廊道”效应, 从而导致其呈现不同的遗传隔离式样。总之, 中新世末期的气候变冷变干能够驱使某些类群发生近期的物种形成(如连香树、领春木), 上新世末以及更新世气候变化则与它们的谱系分化、遗传多样性形成以及种群收缩与扩张有关, 而这种沿纬度的收缩与扩张现象能够导致日

本种群在本州中部形成明显的遗传隔离线(图1) (Qi et al, 2012; Sakaguchi et al, 2012; Cao et al, 2016)。

2.4 中国大陆-台湾间断分布植物类群的谱系分化

台湾位于欧亚板块与菲律宾海板块的交界带, 9 Ma的吕宋岛弧与欧亚大陆边缘碰撞造山运动形成了现今台湾及其附近海域的基本构造格局和特有的区域地质特征。自晚第三纪以来, 受到菲律宾海板块的挤压, 台湾中央山脉经历了强烈的隆升过程, 直到大约5–6 Ma才形成目前的地貌(Sibuet & Hsu, 2004)。因此台湾的植物区系最早可追溯至第三纪中新世末期和上新世早期, 其植物区系成分可能来源于相邻的中国大陆、琉球群岛和亚洲热带地区(如菲律宾、越南) (Hsieh, 2003; Chiang & Schaal, 2006)。研究那些间断分布于中国大陆、台湾岛、日本的第三纪孑遗植物的谱系多样性、谱系分化与种群动态历史, 有利于探明台湾岛植物区系的起源。

台湾杉(*Taiwania cryptomerioides*)是杉科台湾杉属的唯一幸存种(Chen et al, 1999; Farjon, 2005), 为常绿乔木, 第三纪在欧洲和东亚有较广泛的分布, 其距今最近的化石记录发现于日本北海道与本州的上新世地层中(Manchester et al, 2009), 现仅分布于台湾、越南北部及中国大陆的贵州、湖北、福建以及云南与缅甸交界处。基于5个叶绿体基因片段的序列分析发现, 该种包括9种单倍型, 其中中国大陆种群共享1个原始单倍型, 台湾地区种群则拥有独特的单倍型支系; 化石校正的分子钟方法估算的谱系分化时间为上新世晚期(约3.23–3.41 Ma), 云南-缅甸种群与越南种群分化时间为更新世早期(约1.0–1.39 Ma), 台湾、云南-缅甸交界处、越南为台湾杉的长期避难所(Chou et al, 2011)。Chou等(2011)研究表明, 自晚中新世以来的全球气候变冷变干可能驱使台湾杉沿两条路线逐渐向南迁移, 一条迁移路线是晚上新世末从日本或中国大陆迁移至台湾, 另一条是更新世早期通过中国大陆退缩至越南北部与云南-缅甸交界处。

Ge等(2015)利用cpDNA与mtDNA的序列变异对红豆杉科的穗花杉种复合体(*Amentotaxus argotaenia* species complex)的研究证实了早期的大陆向岛屿的迁移及随后隔离分化成种的假说。穗花杉种复合体包括4个形态学种, 均为常绿小乔木或灌木, 分布于我国南部、中部、西部及台湾南部。Ge等(2015)的结果表明, 大陆的广布种穗花杉(*A. argo-*

taenia)呈现明显的谱系地理结构,地理谱系的形成与南岭-武夷山脉以及长江流域的地理隔离作用有关,而台湾穗花杉(*A. formosana*)和大陆穗花杉的分化可以追溯至更新世早期(约2.4 Ma)。而Huang等(2004)对昆栏树科唯一幸存种昆栏树(*Trochodendron aralioides*)的研究则揭示了台湾植物区系与日本植物区系的关系。昆栏树为常绿灌木或小乔木,该物种的祖先类群在始新世至中新世曾分布于北美,更新世中期的日本本州地层也发现了现存种的化石。该研究表明,分布于台湾、琉球岛、日本本岛的昆栏树分化为两个地理谱系,即日本本岛谱系以及台湾-琉球谱系,研究者推测昆栏树有可能从日本本岛沿琉球岛链向南迁移至台湾,随后发生隔离分化形成两个地理谱系。尽管该研究并没有估算两个谱系的分化时间,但考虑到两个谱系在TCS网络图上存在3步的突变距离(*petA-psbJ*的长度为752 bp)以及叶绿体基因序列具有较低的变异速率(平均 $1.5 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{y}^{-1}$),根据简单分子钟估算的分化时间约为2 Ma,表明该物种可能在更新世早期就已经迁入台湾。

总之,第三纪孑遗植物可能沿两条路线在更新世以前就已经从中国大陆或日本本岛迁入台湾,并发生隔离分化,形成了新的物种或地理谱系。

2.5 西北干旱带植物类群的谱系分化

中国西北干旱区位于欧亚大陆腹地,自第三纪以来,由于青藏高原隆起以及古地中海西退,海洋季风难以波及该地区,加上蒙古-西伯利亚反气旋高压的形成和发展,逐渐形成大陆干旱区的特殊气候(吴征镒和王荷生,1983)。第四纪冰期以后,旱化增强,形成现代的荒漠面貌。植物地理学研究认为该地区属于“中亚、西亚-地中海植物区系”(Good, 1974),我们一般认为其属于“亚洲荒漠植物亚区”和“欧亚森林植物亚区”(吴征镒和王荷生,1983)。虽然中国西北地区的干旱荒漠植物没有受到第四纪冰川的直接影响,但是第三纪以来持续的全球气候变冷变干、青藏高原的隆起以及季风气候的形成导致的沙漠扩张、生境片段化等,促进了种群与谱系的遗传分化以及新种的形成(Meng et al, 2015)。

红砂(*Reaumuria soongarica*)是广布于中国西北干旱区的一种旱生灌木,为第三纪孑遗物种。Yin等(2015)对红砂的34个种群进行了研究,叶绿体基因片段和核基因ITS数据一致表明红砂存在东西地

区间的谱系分化(图1),东部种群分布于塔克拉玛干沙漠周边,西部种群则分布于库木塔格沙漠以西的干旱区(包括柴达木盆地、巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠等),估算的分化时间约在2.96 Ma,与青藏高原东北地区(包括柴达木盆地)的快速隆升时间一致。根据生态位模型分析推测,由于受到高原隆升及随后反复的季风气候动荡的影响,该物种在更新世的冰期和间冰期均发生了生境片段化并最终导致种内谱系分化。与西部种群相比,东部种群由于受季风气候影响更大,受选择作用的影响积累了更多突变而易于发生种群扩张,表明局域季风气候显著影响了种群动态。IBD分析表明东亚冬季季风也促进了纬度方向上种群间的种子传播与基因交流(Yin et al, 2015)。东西谱系分化式样也在同域分布的泡泡刺(*Nitraria sphaerocarpa*)中被发现(Su & Zhang, 2013),表明上新世末青藏高原的快速隆升以及季风气候的动荡可能对该地区植物的谱系分化与种群历史动态产生了一致性的影响。

3 总结

气候改变和威胁物种的生存主要通过扰乱物种适应性性状与环境之间的适合度,但植物可以通过3种途径应对气候的干扰(Aitken et al, 2008): (1)追踪适宜生境; (2)表型可塑性(phenological plasticity); (3)遗传上适应。对于那些在更新世气候动荡过程中没有发生明显地理扩张的物种,表型可塑性与生态位进化(niche evolution)可能是它们维持种群稳定性的主要生态策略(Jezkova et al, 2011)。由于具有生态位保守性(niche conservatism),追踪适宜生境则是森林关键物种响应气候变化的主要途径(Oberle & Schaal, 2011)。

由于不同的植物类群具有不同的生态位需求以及生物学特点,地质构造与环境变化对不同植物的谱系地理结构与种群动态可能会产生不同影响,但总的来说,东亚孑遗植物的谱系地理式样主要表现为以下4个方面: (1)中新世中期至晚期的气候变冷变干驱使孑遗植物发生了近期的物种形成(如连香树、领春木),而上新世末以及更新世气候变化则促进了它们的种内谱系分化、遗传多样性形成以及种群的收缩与扩张,种群的收缩与扩张导致部分类群形成地理谱系“缝合带”(如连香树、领春木、刺楸)。(2)由于不同的植物类群具有不同的生态位需

求以及生物学特点, 更新世冰期暴露的东海陆桥对中国-日本间断分布的孑遗植物具有不同的“过滤”与“廊道”效应, 从而导致其呈现不同的遗传隔离式样。(3)上新世末青藏高原的快速隆升以及上新世末/更新世初东亚季风气候的加强可能是多个亚热带地区分布的孑遗植物沿四川盆地附近发生东西谱系分化的根本原因(如珙桐、领春木等), 也是西北干旱带分布的孑遗植物发生东西谱系分化的驱动因素(如红砂)。(4)自晚中新世以来的全球气候变冷变干驱使部分第三纪孑遗植物在更新世以前就已经从中国大陆或日本本岛迁入台湾, 并发生隔离分化, 形成了新的物种或地理谱系(如台湾杉等)。基于香果树亲缘地理学与景观遗传学的研究表明, 地理隔离对东亚第三纪孑遗植物的谱系地理结构的形成起主导作用, 而近期的环境气候通过选择作用和对基因流的限制也对其有显著影响。因此, 历史与当代的地理以及环境效应共同影响了东亚第三纪孑遗植物的谱系分化、物种形成以及遗传多样性。

4 亲缘地理学发展展望

需要重新强调的是, 以上这些研究大多数是基于细胞器DNA (cpDNA或mtDNA)序列揭示单一物种的谱系地理结构、冰期“避难所”以及冰后期迁移路线。此外, 人们常将末次冰期-间冰期循环作为影响物种现代遗传结构的最深刻因素。事实上, 迄今为止所有已报道的种内谱系分化时间都要比末次冰期-间冰期早得多, 而基于单位点简单分子钟估算的谱系分化时间可能并不一定非常准确。

亲缘地理学进入了一个崭新和令人兴奋的阶段。在数据分析方面, 从早期的描述性阶段发展为使用溯祖模型来估测参数, 基于先验模型进行假说检验, 对空间历史动态进行精确估测, 以及对同域分布物种时间与空间的一致性进行检测。在这些方法论发展的同时, 人们利用新的方法可以获得大量的谱系地理数据, 随着基因组谱系地理数据增长、研究类群的快速积累以及古DNA分析技术的进步, 研究者可以解决近期(如末次冰期-间冰期)气候变化过程以及人类活动对物种种群动态历史的影响。此外, 以群落作为研究对象, 联合多个学科的分析方法研究群落的构建与进化被称为整合亲缘地理学, 已成为亲缘地理学未来研究的方向(Hickerson et al, 2010)。结合中国目前的亲缘地理学研究现状,

今后的发展方向包括: (1)加强景观遗传学分析方法以及基因组数据在亲缘地理学中的应用, 比较分析分布于不同植被下的多个类群的姐妹种或近缘种, 结合生态位模型以及地区性植被与气候的古记录数据, 鉴定物种的共有避难所, 基于模型评估不同物种之间谱系地理格局的一致性。揭示不同植被的历史变迁、景观特征、地理隔离、自然选择对谱系分化、物种形成、地理扩张以及杂交等的影响, 最终阐明遗传多样性与物种的形成机制。(2)基于“群落尺度”数据集(100个同域分布物种的DNA序列数据), 利用多阶ABC (approximate Bayesian computation)方法, 检测迁移和分化的时空模式, 精确定义群落组装模型, 在群落水平上检测经典的生物地理假说(如扩散与地理隔离)与群落组装假说(如中性假说、生态位假说、随机竞争组装模型等), 结合表型进化、花粉化石数据, 揭示气候变化如何驱使群落组装和进化等科学问题。以上研究将有助于更好地理解东亚第三纪孑遗植物的进化历史和孑遗机制。

参考文献

- Aitken SN, Yeaman S, Holliday JA, Wang T, Curtis-McLane S (2008) Adaptation, migration or extirpation: climate change outcomes for tree populations. *Evolutionary Applications*, 1, 95–111.
- An ZS, Kutzbach JE, Prell WL, Porter SC (2001) Evolution of Asian monsoons and phased uplift of the Himalaya-Tibetan Plateau since Late Miocene times. *Nature*, 411, 62–66.
- Avice JC (2000) *Phylogeography: the History and Formation of Species*. Harvard University Press, Cambridge.
- Axelrod DI, Al-Shehbaz I, Raven PH (1996) History of the modern flora of China. In: *Floristic Characteristics and Diversity of East Asian Plants* (eds Zhang AL, Wu SG), pp. 43–55. Higher Education Press, Beijing.
- Bai WN, Wang WT, Zhang DY (2016) Phylogeographic breaks within Asian butternuts indicate the existence of a phytogeographic divide in East Asia. *New Phytologist*, 209, 1757–1772.
- Canestrelli D, Bisconti R, Sacco F, Nascetti G (2014) What triggers the rising of an intraspecific biodiversity hotspot? Hints from the agile frog. *Scientific Reports*, 4, 5042.
- Cao YN, Comes HP, Sakaguchi S, Chen LY, Qiu YX (2016) Evolution of East Asia's Arcto-Tertiary relict *Euptelea* (Eupteleaceae) shaped by Late Neogene vicariance and Quaternary climate change. *BMC Evolutionary Biology*, 16, 66.
- Carstens BC, Knowles LL (2007) Estimating species phylogeny from gene-tree probabilities despite incomplete lineage sorting: an example from *Melanoplus grasshoppers*.

- Systematic Biology, 56, 400–411.
- Chiang TY, Schaal BA (2006) Phylogeography of plants in Taiwan and the Ryukyu Archipelago. *Taxon*, 55, 31–41.
- Chen JR, Dennis WS, Fu LG, Yu YF, Harald R, Huang CJ, Zhang YT, Bruce B (1999) Cycadaceae through Fagaceae. In: *Flora of China*, Vol. 4. (eds Wu ZY, Raven P), Science Press, Beijing & Missouri Botanical Garden, St. Louis.
- Chou YW, Thomas PI, Ge XJ, LePage BA, Wang CN (2011) Refugia and phylogeography of *Taiwania* in East Asia. *Journal of Biogeography*, 38, 1992–2005.
- Crane PR, Stockey RA (1985) Growth and reproductive biology of *Joffrea speirsii* gen. et sp. nov., a *Cercidiphyllum*-like plant from the Late Paleocene of Alberta, Canada. *Canadian Journal of Botany*, 63, 340–364.
- Donoghue MJ, Bell CD, Li JH (2001) Phylogenetic patterns in Northern Hemisphere plant geography. *International Journal of Plant Sciences*, 162, S41–S52.
- Eyde RH (1997) Fossil record and ecology of *Nyssa* (Cornaceae). *The Botanical Review*, 63, 97–123.
- Farjon A (2005) A Monograph of Cupressaceae and Sciadopitys. Royal Botanic Gardens, Kew.
- Ge XJ, Hung KH, Ko YZ, Hsu TW, Gong X, Chiang TY, Chiang YC (2015) Genetic divergence and biogeographical patterns in *Amentotaxus argotaenia* species complex. *Plant Molecular Biology Reporter*, 33, 264–280.
- Gong W, Chen C, Dobeš C, Fu CX, Koch MA (2008) Phylogeography of a living fossil: Pleistocene glaciations forced *Ginkgo biloba* L. (Ginkgoaceae) into two refuge areas in China with limited subsequent postglacial expansion. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 48, 1094–1105.
- Good R (1974) *The Geography of the Flowering Plants*, 4th edn. Longman, London.
- Guo WY, Yang J, Gromyko D, Ablaev AG, Wang Q, Li CS (2010) First record of *Cercidiphyllloxylon* (Cercidiphyllaceae) from the Palaeocene of Fushun, NE China. *Journal of Systematics and Evolution*, 48, 302–308.
- Guo ZT, Sun B, Zhang ZS, Peng SZ, Xiao GQ, Ge JY, Hao QZ, Qiao YS, Liang MY, Liu JF, Yin Q, Wei J (2008) A major reorganization of Asian climate by the early Miocene. *Climate of the Past*, 4, 153–174.
- Harrison SP, Yu G, Takahara H, Prentice IC (2001) Palaeovegetation (Communications arising): diversity of temperate plants in East Asia. *Nature*, 413, 129–130.
- Hey J, Nielsen R (2007) Integration within the Felsenstein equation for improved Markov chain Monte Carlo methods in population genetics. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 104, 2785–2790.
- Hickerson MJ, Carstens BC, Cavender-Bares J, Crandall KA, Graham CH, Johnson JB, Rissler L, Victoriano PF, Yoder AD (2010) Phylogeography's past, present, and future: 10 years after. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 54, 291–301.
- Hills LV, Klován JE, Sweet AR (1974) *Juglans eocinerea* n. sp., beaufort formation (Tertiary), southwestern Banks Island, Arctic Canada. *Canadian Journal of Botany*, 52, 65–90.
- Hsieh CF (2003) Composition, endemism and phylogeographical affinities of the Taiwan flora. *Flora of Taiwan*, 6, 1–14.
- Huang SF, Hwang SY, Wang JC, Lin TP (2004) Phylogeography of *Trochodendron aralioides* (Trochodendraceae) in Taiwan and its adjacent areas. *Journal of Biogeography*, 31, 1251–1259.
- Jakob SS, Martinez-Meyer E, Blattner FR (2009) Phylogeographic analyses and paleodistribution modeling indicate Pleistocene *in situ* survival of *Hordeum* species (Poaceae) in southern Patagonia without genetic or spatial restriction. *Molecular Biology and Evolution*, 26, 907–923.
- Jezkova T, Olah-Hemmings V, Riddle BR (2011) Niche shifting in response to warming climate after the last glacial maximum: inference from genetic data and niche assessments in the chisel-toothed kangaroo rat (*Dipodomys microps*). *Global Change Biology*, 17, 3486–3502.
- Kou YX, Cheng SM, Tian S, Li B, Fan DM, Chen YJ, Soltis DE, Soltis PS, Zhang ZY (2016) The antiquity of *Cyclocarya paliurus* (Juglandaceae) provides new insights into the evolution of relict plants in subtropical China since the late Early Miocene. *Journal of Biogeography*, 43, 351–360.
- Krassilov V (2010) *Cercidiphyllum* and Fossil Allies: Morphological Interpretation and General Problems of Plant Evolution and Development. Pensoft Publishers, Sofia-Moscow.
- López-Pujol J, Zhang FM, Sun HQ, Ying TS, Ge S (2011a) Centres of plant endemism in China: places for survival or for speciation? *Journal of Biogeography*, 38, 1267–1280.
- López-Pujol J, Wang HF, Zhang ZY (2011b) Conservation of Chinese plant diversity: an overview. In: *Research in Biodiversity-Models and Applications* (ed. Pavlinov I), pp. 163–202. InTech, Rijeka.
- Latham RE, Ricklefs RE (1993) Continental comparisons of temperate-zone tree species diversity. In: *Species Diversity in Ecological Communities* (eds Ricklefs RE, Schluter D), pp. 294–314. University of Chicago Press, Chicago.
- LePage BA, Yang H, Matsumoto M (2005) The evolution and biogeographic history of *Metasequoia*. In: *The Geobiology and Ecology of Metasequoia* (eds LePage BA, Williams CJ, Yang H), pp. 3–114. Springer, Dordrecht.
- Li XH, Shao JW, Lu C, Zhang XP, Qiu YX (2012) Chloroplast phylogeography of a temperate tree *Pteroceltis tatarinowii* (Ulmaceae) in China. *Journal of Systematics and Evolution*, 50, 325–333.
- Liu HY, Xing QR, Ji ZK, Xu LH, Tian YH (2003) An outline of Quaternary development of *Fagus* forest in China: palynological and ecological perspectives. *Flora*, 198, 249–259.
- Mai DH (1995) *Tertiäre Vegetationsgeschichte Mitteleuropas*. Springer, Heidelberg.
- Manchester SR (1999) Biogeographical relationships of North American Tertiary floras. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 86, 472–522.

- Manchester SR, Chen ZD, Lu AM, Uemura K (2009) Eastern Asian endemic seed plant genera and their paleogeographic history throughout the Northern Hemisphere. *Journal of Systematics and Evolution*, 47, 1–42.
- Manns U, Wikström N, Taylor CM, Bremer B (2012) Historical biogeography of the predominantly neotropical subfamily Cinchonoideae (Rubiaceae): into or out of America? *International Journal of Plant Sciences*, 173, 261–286.
- Manos PS, Stanford AM (2001) The historical biogeography of Fagaceae: tracking the Tertiary history of temperate and subtropical forests of the Northern Hemisphere. *International Journal of Plant Sciences*, 162, S77–S93.
- Meng HH, Gao XY, Huang JF, Zhang ML (2015) Plant phylogeography in arid Northwest China: retrospectives and perspectives. *Journal of Systematics and Evolution*, 53, 33–46.
- Meyer HW, Manchester SR (1997) Oligocene Bridge Creek Flora of the John Day Formation, Oregon. University of California Press, Berkeley.
- Milne RI, Abbott RJ (2002) The origin and evolution of Tertiary relict floras. *Advances in Botanical Research*, 38, 281–314.
- Milne RI (2006) Northern Hemisphere plant disjunctions: a window on Tertiary land bridges and climate change? *Annals of Botany*, 98, 465–472.
- Nagalingum NS, Marshall CR, Quental TB, Rai HS, Little DP, Mathews S (2011) Recent synchronous radiation of a living fossil. *Science*, 334, 796–799.
- Oberle B, Schaal BA (2011) Responses to historical climate change identify contemporary threats to diversity in *Dodecatheon*. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 108, 5655–5660.
- Onoe T (1989) Palaeoenvironmental analysis based on the Pleistocene Shiobara flora in the Shiobara volcanic basin, central Japan. Report of Geological Survey of Japan, 269, 1–207.
- Peng YL, Hu YQ, Sun H (2003) Allozyme analysis of *Davidia involucrata* var. *vilmoriniana* and its biogeography significance. *Acta Botanica Yunnanica*, 25, 55–62. (in Chinese with English abstract) [彭玉兰, 胡运乾, 孙航 (2003) 光叶珙桐的等位酶分析及其生物地理学意义. 云南植物研究, 25, 55–62.]
- Pigg KB, Wehr WC, Ickert-Bond SM (2001) *Trochodendron* and *Nordenskiöldia* (Trochodendraceae) from the Middle Eocene of Washington State, U.S.A. *International Journal of Plant Sciences*, 162, 1187–1198.
- Qi XS, Chen C, Comes HP, Sakaguchi S, Liu YH, Tanaka N, Sakio H, Qiu YX (2012) Molecular data and ecological niche modelling reveal a highly dynamic evolutionary history of the East Asian Tertiary relict *Cercidiphyllum* (Cercidiphyllaceae). *New Phytologist*, 196, 617–630.
- Qian H (1999) Spatial pattern of vascular plant diversity in North America north of Mexico and its floristic relationship with Eurasia. *Annals of Botany*, 83, 271–283.
- Qian H, Ricklefs RE (2000) Large-scale processes and the Asian bias in species diversity of temperate plants. *Nature*, 407, 180–182.
- Qian H, Ricklefs RE (2001) Palaeovegetation (communications arising): diversity of temperate plants in east Asia. *Nature*, 413, 130.
- Qiu YX, Guan BC, Fu CX, Comes HP (2009a) Did glacials and/or interglacials promote allopatric incipient speciation in East Asian temperate plants? Phylogeographic and coalescent analyses on refugial isolation and divergence in *Dysosmavervipellis*. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 51, 281–293.
- Qiu YX, Qi XS, Jin XF, Tao XY, Fu CX, Naiki A, Comes HP (2009b) Population genetic structure, phylogeography, and demographic history of *Platycrater arguta* (Hydrangeaceae) endemic to East China and South Japan, inferred from chloroplast DNA sequence variation. *Taxon*, 58, 1226–1241.
- Rogers AR, Harpending H (1992) Population growth makes waves in the distribution of pairwise genetic differences. *Molecular Biology and Evolution*, 9, 552–569.
- Sakaguchi S, Qiu YX, Liu YH, Qi XS, Kim SH, Han JY, Takeuchi Y, Worth JRP, Yamasaki M, Sakurai S (2012) Climate oscillation during the Quaternary associated with landscape heterogeneity promoted allopatric lineage divergence of a temperate tree *Kalopanax septemlobus* (Araliaceae) in East Asia. *Molecular Ecology*, 21, 3823–3838.
- Sang T, Crawford DJ, Stuessy TF (1997) Chloroplast DNA phylogeny, reticulate evolution and biogeography of *Paeonia* (Paeoniaceae). *American Journal of Botany*, 84, 1120–1136.
- Sibuet JC, Hsu SK (2004) How was Taiwan created? *Tectonophysics*, 379, 159–181.
- Su ZH, Zhang ML (2013) Evolutionary response to Quaternary climate aridification and oscillations in north-western China revealed by chloroplast phylogeography of the desert shrub *Nitraria sphaerocarpa* (Nitrariaceae). *Biological Journal of the Linnean Society*, 109, 757–770.
- Sun YX, Moore MJ, Yue LL, Feng T, Chu HJ, Chen ST, Ji YH, Wang HC, Li JQ (2014) Chloroplast phylogeography of the East Asian Arcto-Tertiary relict *Tetracentron sinense* (Trochodendraceae). *Journal of Biogeography*, 41, 1721–1732.
- Tanai T (1981) Geological notes on the fossil localities. In: *Paleobotanical Survey to Southern Chile* (ed. Nishida M), pp. 10–33. Chiba University, Chiba.
- Tang CQ, Yang YC, Ohsawa M, Yi SR, Momohara A, Su WH, Wang HC, Zhang ZY, Peng MC, Wu ZL (2012) Evidence for the persistence of wild *Ginkgo biloba* (Ginkgoaceae) populations in the Dalou Mountains, southwestern China. *American Journal of Botany*, 99, 1408–1414.
- Tiffney BH (1985a) The Eocene North Atlantic land bridge: its importance in Tertiary and modern phytogeography of the Northern Hemisphere. *Journal of the Arnold Arboretum*, 66, 243–273.

- Tiffney BH (1985b) Perspectives on the origin of the floristic similarity between eastern Asia and eastern North America. *Journal of the Arnold Arboretum*, 66, 73–94.
- Tiffney BH, Manchester SR (2001) The use of geological and paleontological evidence in evaluating plant phylogeographic hypotheses in the Northern Hemisphere Tertiary. *International Journal of Plant Sciences*, 162, S3–S17.
- Uemura K (1991) Middle Miocene plant megafossil assemblages from Onnebetsu and Niupu in the Nayoro area, Hokkaido. *Memoirs of the National Science Museum, Tokyo*, 24, 17–26.
- Uemura K (1997) Cenozoic history of *Ginkgo* in East Asia. In: *Ginkgo biloba—A Global Treasure: From Biology to Medicine* (eds Hori T, Ridge RW, Tulecke W, del Tredici P, Trémouillaux-Guille J, Tobe, H), pp. 207–221. Springer, Tokyo.
- Wang JF, Gong X, Chiang YC, Kuroda C (2013) Phylogenetic patterns and disjunct distribution in *Ligularia hodgsonii* Hook. (Asteraceae). *Journal of Biogeography*, 9, 1741–1754.
- Wen J (1999) Evolution of eastern Asian and eastern North American disjunct distributions in flowering plants. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 30, 421–455.
- Wen J, Shi SH, Jansen R, Zimmer E (1998) Phylogeny and biogeography of *Aralia* sect. *Aralia* (Araliaceae). *American Journal of Botany*, 85, 866.
- Wiens JJ, Graham CH (2005) Niche conservatism: integrating evolution, ecology, and conservation biology. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 36, 519–539.
- Wolfe JA (1971) Tertiary climatic fluctuations and methods of analysis of Tertiary floras. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 9, 27–57.
- Wu ZY, Wang HS (1983) *Phytogeography: Physical Geography in China (I)*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [吴征镒, 王荷生 (1983) 中国自然地理——植物地理(上册). 北京科学出版社, 北京.]
- Xiang QYJ, Soltis DE (2001) Dispersal-vicariance analyses of intercontinental disjuncts: historical biogeographical implications for angiosperms in the Northern Hemisphere. *International Journal of Plant Sciences*, 162, S29–S39.
- Yin HX, Yan X, Shi Y, Qian CJ, Li ZH, Zhang W, Wang LR, Li Y, Li XZ, Chen GX, Li XR, Nevo E, Ma XF (2015) The role of East Asian monsoon system in shaping population divergence and dynamics of a constructive desert shrub *Reaumuria soongarica*. *Scientific Reports*, 5, 15823.
- Zhang YH, Wang JJ, Comes HP, Peng H, Qiu YX (2016) Contributions of historical and contemporary geographic and environmental factors to phylogeographic structure in a Tertiary relict species, *Emmenopterys henryi* (Rubiaceae). *Scientific Reports*, 6, 24041.
- Zhao JL, Zhang L, Dayanandan S, Nagaraju S, Liu DM, Li QM (2013) Tertiary origin and Pleistocene diversification of dragon blood tree (*Dracaena cambodiana*-Asparagaceae) populations in the Asian tropical forests. *PLoS One*, 8, e60102.

(责任编辑: 葛学军 责任编辑: 黄祥忠)

• 综述 •

中国西北干旱区和中亚植物区系地理研究

张明理^{1,2*}¹ (中国科学院植物研究所, 北京 100093)² (中国科学院干旱区生物地理与生物资源重点实验室, 中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011)

摘要: 本文简要回顾了我国西北干旱区植物区系地理的研究历史, 其中植物区系和科属地理两方面的研究大多集中在1980年代以后。西北干旱区作为中亚干旱区的东部, 今后应该拓展到西部的前苏联中亚五国, 在一个自然地理区域的基础上开展区系地理研究才有更广泛的意义。分子系统发育和生物地理研究对区系地理研究有重要意义和潜力。对区系和植被中的关键类群, 只有进行深入的分子生物地理学研究, 才能使区系地理研究向纵深发展。类群的研究, 也应该联系青藏高原隆升和古地中海西退等历史和地质事件, 因为它们是中亚干旱的非生物的历史成因。

关键词: 西北干旱区; 中亚; 区系; 分子系统发育

A review on the floristic phytogeography in arid northwestern China and Central Asia

Mingli Zhang^{1,2*}¹ Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093² Key Laboratory of Biogeography and Bioresource in Arid Land, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011

Abstract: A floristic phytogeography of arid regions of northwestern China is outlined in this paper. Most researches of floristic cataloging and phytogeography of families and genera were started since 1980. We propose that Central Asia, as a natural region, should be regarded as a distinct unit to study, namely combining northwestern China, Kazakhstan, Uzbekistan, Kyrgyzstan, Tajikistan and Turkmenistan as one unit. Local research is not sufficient or holistic for study of plant floristics and evolutionary history. We address the significance and potential of molecular phylogeny and biogeography of families and genera. Linking geological and palaeoclimate events, especially the Qinghai-Tibetan Plateau uplift and the Tethys retreat in the historical floristic phytogeography and vegetation, is suggested as they are the main dynamics of Central Asian aridification.

Key words: arid northwestern China; Central Asia; floristics; molecular phylogeny

西北干旱区、东部季风区和青藏高寒区并称我国三大自然地理区(中国科学院《中国自然地理》编辑委员会, 1985)。西北干旱区地处亚洲内陆, 自晚新生代以来逐渐形成了干旱和半干旱气候, 其自东向西, 以鄂尔多斯-贺兰山为界, 分为两个自然地区: 内蒙古草原(半干旱气候)和西北荒漠(干旱气候)(中国科学院《中国自然地理》编辑委员会, 1985)。前苏联植物学家多将我国西北干旱区称为

“亚洲中部”(Central Asia), 而将前苏联中亚五国(哈萨克斯坦、乌兹别克斯坦、吉尔吉斯斯坦、塔吉克斯坦、土库曼斯坦)称为“中亚”(Middle Asia)(Grubov, 1999)。吴征镒(1979)认为前者为中亚东部, 后者为中亚西部。而Takhtajan (1986)认为准格尔-图兰(包括咸里海-图兰低地)为一个整体, 因此, 中亚干旱区应该包括以我国西北部干旱区为主体(蒙古-喀什葛尔)的东部区和以前苏联中亚五国为主体(包括准

收稿日期: 2016-12-19; 接受日期: 2017-02-17

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(2014CB954201)和中国科学院生物多样性保护策略项目(ZSSD-012)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: zhangml@ibcas.ac.cn

格尔, 准格尔-图兰区系)的西部构成的完整自然地理区域。

虽然干旱区植物区系的种类相对贫乏, 但其广阔的面积、特殊的干旱地理成分和历史成分(雍世鹏和朱宗元, 1990, 1992), 使得其在中国植物区系和欧亚以及北温带植物区系中占有重要地位(王荷生, 1979, 1992; 吴征镒和王荷生, 1983; Wu & Wu, 1998; 汤彦承, 2000; 吴征镒等, 2011)。

1 西北干旱区植物区系地理研究历史回顾

前苏联植物学家对西北干旱区、中亚植物区系和植被研究作了许多奠基性的工作。著名的如B.I. Grubov (1999)主编的*Plants of Central Asia: Plant Collections from China and Mongolia*, 这套植物志主要依据前苏联科学院科马洛夫植物研究所标本馆的馆藏标本编写完成, 现在已全部翻译成英文。V.L.Komarov (1908, 1945)基于锦鸡儿属(*Caragana*)、白刺属(*Nitraria*)、淫羊藿属(*Epimedium*)、党参属(*Codonopsis*)和藤山柳属(*Clematoclethra*)等5属的研究, 论述了蒙古植物区系的过渡性质和东亚植物区系的始生性质(Wulff, 1964)。1950年代, 由前苏联科学院地理研究所A. A. Junatov和中国科学院植物研究所秦仁昌、关克俭、李安仁、朱家楠、李世英、胡式之、张佃民、张新时等组成的中国科学院新疆综合考察队植被与区系考察组, 对新疆植物进行了系统的考察与采集(中国科学院新疆综合考察队, 1959), 并于1978年出版了《新疆植被及其利用》一书(中国科学院新疆综合考察队和中国科学院植物研究所, 1978)。1990年代, 吴征镒院士组织和主持了国家自然科学基金重大项目“中国种子植物区系研究”, 其中沈观冕(1993)^①完成了《荒漠植物名录》, 共记载68科361属1,079种; 杨昌友等(1993)^②完成《中国新疆天山植物名录》, 共记载106科564属2,175种(变种)。随着各省区植物志的完成, 例如《新疆植物志》、《内蒙古植物志》、《青海植物志》、《甘肃植物志》和《宁夏植物志》, 以及《中国沙漠植物志》、《滩羊区植物志》、《黄土高原植物志》等等(参见马金双, 2011的详细收集), 干旱区植物

种编目已基本完成。

对一些重要和热点地区的物种编目和区系分析也有许多积累。如赵一之(2014)对内蒙古区系, 李学禹等(1998)、赵业彬等(2003)、杨淑萍等(2007)对中国新疆帕米尔区系的调查和分析, 陈文俐和杨昌友(2000)、曹秋梅等(2015)对中国阿尔泰区系的调查研究, 朱宗元等(1999)、燕玲等(1999)对阿拉善-鄂尔多斯物种编目和区系分析, 黄俊华等(2014)对萨吾尔-塔尔巴哈台区系, 徐远杰等(2010)对伊犁-天山区系, 陈鹏和潘晓玲(2001)对河西走廊区系, 潘晓玲(1994)对塔里木区系, 潘晓玲和张宏达(1995)对柴达木区系, 赵一之(2006)对鄂尔多斯区系, 崔大方等(2000)^③对新疆天山野果林区系, 崔大方等(2001)对新疆木本植物区系, 黄俊华等(2013)对塔吉克斯坦区系, 以及赵一之(1997)对蒙古高原的特有属、赵一之和朱宗元(2003)对亚洲中部荒漠特有属, 党荣理和潘晓玲(2001)、潘晓玲等(2001)、冯纛和潘伯荣(2004)对西北干旱荒漠区植物区系的特有现象的研究。雍世鹏和朱宗元(1990, 1992)论述了戈壁荒漠植物的区系、植被。这些研究可以使我们了解一些重要和热点地区的物种编目, 科、属、种的组成, 以及区系的性质, 尤其是某些地区根据采集鉴定的第一手资料的物种编目, 为植物志提供了详细的补充, 是植物区系分析的基础。

相似性系数是植物区系研究很好的量化指标(傅德志和左家哺, 1995; 张镱锂, 1998), 应用该系数, 潘晓玲和左家哺(1997)分析了我国西北干旱区9个地区植物区系的相似性亲缘, 包括阿尔泰山、准噶尔盆地、天山、塔里木盆地、阿尔金山、阿拉善、河西走廊、柴达木盆地和阿里, 结果表明塔里木盆地、阿拉善、河西走廊和柴达木盆地植物区系关系密切, 而它们与准噶尔盆地植物区系差异较大; 山体间(阿尔泰山和天山)的关系不如荒漠区系的关系密切。任珺和陶玲(2003)依据相似性系数, 将中国20个沙漠植物区系单元聚类为3个大的区系: 蒙古沙漠植物区、西北沙漠植物区和华北沙漠植物区, 这个以区系为基础的分析, 与一般植被划分的结果相一致。

前苏联中亚五国的植物区系和生物多样性编

① 沈观冕 (1993) 荒漠植物名录. 中国科学院新疆生物土壤沙漠研究所, 乌鲁木齐.

② 杨昌友, 安争夕, 王兵, 买买提江, 樊建华, 李烨, 黄俊华 (1993) 中国新疆天山植物名录. 新疆八一农学院, 乌鲁木齐.

③ 崔大方, 廖文波, 孟冬丽, 许正 (2000) 中国天山野果林植物区系组成及地理成分分析. 全国系统与进化植物学青年学术研讨会会议论文集, 广州.

目比我国植物区系的研究要早得多, 其中首先要提到的是《苏联植物志》(Komarov & Shishkin (eds.) 1934–1964俄文版, 1963–2002英文版), 其中涉及到中亚五国的区系和地理分布。此后的中亚五国各加盟共和国的地方植物志, 以及《西伯利亚植物志》, 阿尔泰植物名录, 帕米尔植物名录(详细参阅马金双, 2011), 以及一些自然保护区的植物名录等, 都补充和完善了其区系资料。但大量的中亚植物区系、地理、植被、生物多样性研究多参考《苏联植物志》, 因为它的确是世界植物区系、植物志中的巨著和最有价值的参考资料之一。

2 西北干旱区和中亚植物科属地理研究简述

用一些重点植物科属来论证、推断植物区系的性质、起源和演化, 历来是植物区系地理研究的重要内容(Komarov, 1945; Wulff, 1964; 路安民, 1999)。温带荒漠的一些科属, 许多被用来讨论区系地理的性质。而前苏联区系和中亚科属地理的研究已积累了一百多年, 例如Iljin (1937)、Bobrov (1965)、Vassilchenko (1982)等的研究。白刺属以中亚干旱区为生物多样性和分布中心, Komarov (1908, 1947)曾用其作为经典例子, 来阐述冈瓦那板块的解离和该属的非洲起源并向澳大利亚和中亚扩散, 从此引发许多学者对此属生物地理研究的关注, 并提出了许多假设, 如支持Komarov的非洲起源说(Iljin, 1937; Vassilchenko, 1982; 潘晓玲等, 1999; Yang, 2006), 中亚本地起源说(Grubov, 1999), 古南大陆起源说(吴征镒和王荷生, 1983), 古地中海起源说(潘晓云等, 2003), 以及近年来的中亚东部起源说(Zhang et al, 2015a)等等。刘嫫心(1982)曾用藜科碱蓬属(*Suaeda*)、猪毛菜属(*Salsola*)和蒺藜科的霸王属(*Zygophyllum*)的分布, 讨论了干旱区5个分布区(准噶尔盆地、塔里木盆地、柴达木盆地、河西走廊和阿拉善)的区系关系, 并进一步论述了荒漠区系的演化和形成(刘嫫心, 1995)。刘慎谔(1985)则用怪柳属(*Tamarix*)、甘草属(*Glycyrrhiza*)、霸王属和白刺属的分布, 讨论了蒙古–新疆沙漠的起源, 表明我国西北部与中亚共有种是新的关系(地质年代较近), 而与我国东部共有种是老的关系(地质年代较远)。朱格麟(1996)讨论了荒漠植物区系中的重要类群—藜科的起源演化和分布格局, 赵一之(1993, 2009)对锦鸡儿属的分类分布、张明理(1998)对锦鸡

儿属的地理分布格局, 潘晓玲等(1999)对白刺属的起源演化, 张道远等(2003)对怪柳属起源演化等等研究, 都不同程度地揭示或阐明了科属分布的区系地理亲缘和关系。需要指出的是, 根据系统发育与地理分布相一致的原则, 一般凡对区系地理亲缘和分布格局解释得合理和有说服力的类群, 都基于其可靠的、支持率较高的系统发育树; 也就是说, 一个类群合适的生物地理格局和历史研究, 都需要一个可靠的系统发育树。

3 目前植物区系地理研究的几个热点

3.1 历史植物地理研究

近20多年来分子系统学和生物地理学的飞速发展, 大大推进了植物区系地理的研究, 使人们在分子层次上认识了生物的进化历史和分布格局。生物地理学中研究分布格局时采用的分子进化钟模型(Sanderson, 2002; Renner, 2005; Drummond & Rambaut, 2007; Ricklefs, 2007)和祖先分布区推断模型等(Nylander et al, 2008; Ree & Smith, 2008; Yu et al, 2015), 为区系地理研究提供了有效的方法, 在一定程度上能够给出科属类群较确切的起源时间和起源地点。虽然这些方法应用于干旱区植物类群的研究并不多, 但也有一些典型的案例, 例如对蒿属(*Artemisia*)(Miao et al, 2011)、锦鸡儿属(Zhang et al, 2009, 2015b; Zhang & Fritsch, 2010)、白刺属(Temirbayeva & Zhang, 2015; Zhang et al, 2015a)、木蓼属(*Atraphaxis*)(Zhang et al, 2014b)、红砂属(*Reaumuria*)(Zhang et al, 2014a)、裸果木属(*Gymnocarpos*)(Jia et al, 2016)和沙棘(*Hippophaë rhamnoides*)(Jia et al, 2012)的研究, 都探讨和回答了类群确切的起源时间和地点, 以及迁移、扩散等物种形成和演化事件。目前的研究均认为干旱区植物区系和植被的形成与青藏高原的隆升和古地中海的西退密切相关(例如 Miao et al, 2012; Zhang et al, 2014a,b), 这应该是合理的解释, 因为青藏高原的隆升和古地中海的西退强烈地引发了干旱气候的形成和发展, 从而驱动了干旱区植物的进化。如何更深入地探讨区系、植被和物种进化与地质、气候历史变迁的关系、作用和机制, 需要对大量类群进行深入研究。

3.2 植物谱系地理研究

近10多年来兴起和发展迅速的谱系地理学

(Phylogeography), 以个别种或若干近缘种的遗传变异、谱系结构和它们与地质、气候事件的相关性作为研究手段和目标(Avise, 2000), 研究生物进化与生态环境的适应, 为区系地理研究补充了许多有价值的资料和证据, 这些手段和方法也能应用到属一级水平(例如Liu et al, 2009; Meng & Zhang, 2013)。国内在青藏高原、东亚已有许多研究(见Qiu et al, 2011), 在干旱区植物地理研究中也有不少积累, 如沙冬青属(*Ammopiptanthus*)(Ge et al, 2005)、四合木(*Tetraena mongolica*)(Ge et al, 2011)、裸果木(*Gymnocarpos przewalskii*)(Ma et al, 2012)、半日花(*Helianthemum songaricum*)(Su et al, 2011)、白刺(*Nitraria sphaerocarpa*)(Su & Zhang, 2013)、霸王(*Zygophyllum xanthoxylon*)(Shi & Zhang, 2015)、木蓼(*Atraphaxis frutescens*)(Xu & Zhang, 2015)、红砂(*Reaumuria soongarica*)(Li et al, 2012)、船苞翠雀花(*Delphinium naviculare*)(Zhang & Zhang, 2012)、天山茶藨子(*Ribes meyeri*)(Xie & Zhang, 2013)、林地乌头(*Aconitum nemorum*)(Jiang et al, 2014)等, 详见Meng等(2015)的综述。这些研究都不同程度地分析了物种(属)的遗传多样性、谱系地理格局、物种分布的片断化、物种发生分化的时间、扩散方式, 以及分化的原因等等。

3.3 数字植物标本馆

互联网技术的普及和应用使得很多大数据和巨量数据库, 特别是物种名录、植物标本馆标本数据库能在网上共享, 例如英国皇家植物园KEW植物物种名称索引(<http://www.uk.ipni.org/index.html>)、美国密苏里植物园植物系统发育数据库(<http://www.mobot.org/mobot/research/apweb/>), 以及中国数字植物标本馆(<http://www.cvh.org.cn/>), 为物种名称、编目、分布资料、系统发育关系等信息的查询、提取和利用提供了方便、快速的工具。今后的区系地理研究, 借助和应用互联网技术, 可对植物种类编目、分布等数据进行方便的检索、提取和整合。

3.4 植物群落谱系学研究

最近 10 多年发展迅速的群落谱系学(Community phylogenetics)研究群落中物种的组成和关系时, 以物种间的系统发育关系为基础, 通过建立群落中物种的系统发育多样性指数和谱系指数, 进而评价生态因素(生境过滤和竞争排斥)与进化过程(物种分化、扩散和灭绝)对群落结构的影响

(Webb et al, 2002; Wiens et al, 2007; Kress et al, 2009; Eiserhardt et al, 2013)。群落系统发育在群落层次上讨论区系、植被的进化, 显然有别于科属种的生物进化研究, 在探讨区系地理、生物多样性和环境因子的解释等方面已显示出潜力(卢孟孟等, 2013, 2014; 米湘成等, 2014; Qian & Jiang, 2014; Li et al, 2014; 葛学军, 2015)。另外, 植物DNA条形码用一些标准DNA序列片段识别和鉴定生物物种(Li et al, 2011), 可用于监测和评估当前和过去的生物多样性(高连明, 2015), 也为植物区系地理研究注入了活力。

4 未来西北干旱区和中亚区系地理研究的几点看法

根据植物生物地理学的发展趋势及西北干旱区和中亚植物地理研究现状, 这里拟提出我国西北干旱区和中亚区系地理研究应该注意的几个问题和研究方向。

4.1 中亚区系和类群研究的完整性

要讨论中亚干旱区植物区系地理, 需要区系和类群两方面基础信息的完整性, 也就是说, 对有些植物区系, 我们尚且不知道其自然地理范围内确切的物种编目, 例如天山区系, 目前还没有整个天山的区系资料。在研究时, 不能只涉及中国的天山、中国的帕米尔、中国的阿尔泰, 而应该扩大到整个天山、整个帕米尔、整个阿尔泰等地区的植物区系。这就需要我们的研究拓展到中亚五国。当然, 走出国门进行野外调查采集困难不少, 有些几乎是不可能的, 但近年来国家“一带一路”战略的实施, 为科学研究创造了不少条件和机遇, 例如近年来对中亚五国、喜马拉雅及其邻近地区的考察和采集。

植物区系地理研究也需要科属分类学研究时类群的完整性。目前的研究还很少有对那些以中亚干旱区为分布中心的科属作过完整的分类学和区系地理研究, 多数是对某省、区, 如新疆某科属的植物分类, 这样的研究不能全面地反映整个中亚干旱区的区系地理特征, 当然也对分布于干旱区植物类群的分布格局及起源与演化历史研究没有多大价值。

4.2 干旱区植物类群的系统发育与起源研究

如上所述, 一个类群可靠的系统发育关系, 是其分布格局和区系地理研究非常重要的基础。在中

亚干旱区的类群中, 目前已有的、为数不多的研究类群, 大多基于形态特征演化的系统发育关系。然而, 我们更需要的是基于分子证据的系统发育与生物地理研究。研究表明, 只有基于DNA序列数据, 采用分子钟模型、祖先分布区模型等, 才有可能对植物的起源地点、起源时间作出确切的推断, 进而推断类群和区系的进化历史。

确定一个类群的起源与演化, 化石资料无疑是至关重要的。但干旱区目前发掘的植物化石种类数目, 如同现代植物区系、种类数目一样, 相对来说, 都是贫乏的(中国科学院北京植物研究所和南京地质古生物研究所, 1978; 吴向午, 1993, 2006)。然而, 从历史植物地理的角度看, 植物化石在植物区系地理研究中占有重要位置。缺乏植物化石, 我们就不能在时间尺度上对一个地区的植物区系和植被历史有深刻地了解和认识; 对一个科属植物类群的进化历史也会缺乏推断的基础, 或者推断的结论缺乏说服力和可信度。因此, 要注重植物大化石和孢粉数据的挖掘和采集。最近植物孢粉组合的研究, 对新生代以来植物和环境对气候变化的响应, 提供了有价值的证据, 例如见Sun & Zhang (2008), Liu等(2011), Miao等(2012)。

4.3 互联网与数字标本馆利用

目前的互联网数字标本馆已为植物区系、物种多样性编目和分布资料等提供了基础信息, 并在植物多样性保护等方面发挥了重要作用。建议有条件的研究院所和大学加强和管理好互联网植物分类和区系的信息, 它们将对植物区系地理研究发挥重要作用, 并且随着这方面工作的加强, 植物区系、物种多样性编目、分布资料等将会更方便、快捷地利用, 植物区系地理研究将更具潜力和活力。

致谢: 感谢两位审稿人提出了宝贵的修改意见。

参考文献

- Avice JC (2000) *Phylogeography: the History and Formation of Species*. Harvard University Press, Cambridge, MA.
- Bobrov EG (1965) On the origin of flora of the Old World deserts, as illustrated by the genus *Nitraria* L. *Botanicheskii Zhurnal*, 50, 1053–1067. (in Russian with English abstract)
- Cao QM, Yin LK, Chen YF, Yang ML, Yang GQ (2015) Analysis on characteristics of flora in south slope of Altai Mountain. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 35, 1460–1469. (in Chinese with English abstract) [曹秋梅, 尹林克, 陈艳锋, 杨美琳, 杨更强 (2015) 阿尔泰山南坡种

- 子植物区系特点分析. *西北植物学报*, 35, 1460–1469.]
- Chen P, Pan XL (2001) The floristic characteristics in the area of the Hexi Corridor. *Bulletin of Botanical Research*, 21, 24–30. (in Chinese with English abstract) [陈鹏, 潘晓玲 (2001) 河西走廊地区植物的区系特征. *植物研究*, 21, 24–30.]
- Chen WL, Yang CY (2000) A floristic study on the seed plant in Mts. Altay of China. *Acta Botanica Yunnanica*, 22, 371–378. (in Chinese with English abstract) [陈文俐, 杨昌友 (2000) 中国阿尔泰山种子植物区系研究. *云南植物研究*, 22, 371–378.]
- Cui DF, Liao WB, Zhang HD (2000) Analysis of the floristic geographical elements of families on the Xinjiang's spermatophytic flora. *Arid Land Geography*, 23, 326–330. (in Chinese with English abstract) [崔大方, 廖文波, 张宏达 (2000) 新疆种子植物科的区系地理成分分析. *干旱区地理*, 23, 326–330.]
- Cui DF, Liao WB, Zhang HD (2001) Studies on the floristic geography of the woody flora from Xinjiang in China. *Forest Research*, 14, 553–559. (in Chinese with English abstract) [崔大方, 廖文波, 张宏达 (2001) 新疆木本植物区系形成的探讨. *林业科学研究*, 14, 553–559.]
- Dang RL, Pan XL (2001) The Chinese endemic plant analysis in West-North Desert of China. *Bulletin of Botanical Research*, 21, 519–526. (in Chinese with English abstract) [党荣理, 潘晓玲 (2001) 西北干旱荒漠区植物区系的特有现象分析. *植物研究*, 21, 519–526.]
- Drummond AJ, Rambaut A (2007) BEAST: Bayesian evolutionary analysis by sampling trees. *BMC Evolutionary Biology*, 7, 214.
- Eiserhardt WL, Svenning JC, Baker WJ, Couvreur TLP, Henrik B (2013) Dispersal and niche evolution jointly shape the geographic turnover of phylogenetic clades across continents. *Scientific Reports*, 3, 1164.
- Feng Y, Pan BR (2004) Study on floristic and ecology of species endemic to Xinjiang. *Acta Botanica Yunnanica*, 26, 183–188. (in Chinese with English abstract) [冯纛, 潘伯荣 (2004) 新疆特有种植物区系及生态学研究. *云南植物研究*, 26, 183–188.]
- Fu DZ, Zuo JB (1995) Quantitative study on seed plant flora of China. III. Flora index. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 3(4), 23–29. (in Chinese with English abstract) [傅德志, 左家哺 (1995) 中国种子植物区系定量化研究. III. 区系指数 (Flora Index). *热带亚热带植物学报*, 3(4), 23–29.]
- Gao LM (2015) Applications of DNA barcoding in biodiversity inventory and assessment. *Biodiversity Science*, 23, 286–287. (in Chinese) [高连明 (2015) DNA条形码在生物多样性编目与评价中的应用. *生物多样性*, 23, 286–287.]
- Ge XJ (2015) Application of DNA barcoding in phylofloristics study. *Biodiversity Science*, 23, 295–296. (in Chinese) [葛学军 (2015) DNA条形码在植物系统发育区系学研究中的应用. *生物多样性*, 23, 295–296.]
- Ge XJ, Hwang CC, Liu ZH, Huang CC, Huang WH, Hung KH,

- Wang WK, Chiang TY (2011) Conservation genetics and phylogeography of endangered and endemic shrub *Tetraena mongolica* (Zygophyllaceae) in Inner Mongolia, China. *BMC Genetics*, 12, 1–12.
- Ge XJ, Yu Y, Yuan YM, Huang HW, Yan C (2005) Genetic diversity and geographic differentiation in endangered *Ammodiptanthus* (Leguminosae) populations in desert regions of Northwest China as revealed by ISSR analysis. *Annals of Botany*, 95, 843–851.
- Grubov VI (1999) *Plants of Central Asia: Plant Collections from China and Mongolia*. Science Publishers, Enfield.
- Huang JH, Yang CY, Xiang QB (2014) Geographical composition analysis of species in Saur-tarbagatai Mountains in China. *Acta Botanica Yunnanica*, 26, 12–18. (in Chinese with English abstract) [黄俊华, 杨昌友, 向其柏 (2014) 中国萨吾尔-塔尔巴哈台山地种的地理成分分析. 云南植物研究, 26, 12–18.]
- Huang JH, Zhai SX, Yao YX, Dai YL, Song DH, Tahan W (2013) Seed plant flora of Tajikistan. *Arid Land Geography*, 36, 584–590. (in Chinese with English abstract) [黄俊华, 翟申修, 姚雨仙, 戴永丽, 宋丹华, 吾买尔夏提·塔汗 (2013) 塔吉克斯坦种子植物区系分析. 干旱区地理, 36, 584–590.]
- Ijlin MM (1937) Summary of study of deserts flora of Middle Asia. *Soviet Botanical Journal*, 6, 95–109.
- Jia DR, Abbott RJ, Liu TL, Mao KS, Bartish IV, Liu JQ (2012) Out of the Qinghai-Tibet Plateau: evidence for the origin and dispersal of Eurasian temperate plants from a phylogeographic study of *Hippophaë rhamnoides* (Elaeagnaceae). *New Phytologist*, 194, 1123–1133.
- Jia SW, Zhang ML, Raab-Straube EV, Thulin M (2016) Evolutionary history of *Gymnocarpus* (Caryophyllaceae) in the arid regions from North Africa to Central Asia. *Biological Journal of Linnean Society*, doi: 10.1111/bij.12834.
- Jiang XL, Zhang ML, Zhang HH, Sanderosn SC (2014) Phylogeographic patterns of the *Aconitum nemorum* species group (Ranunculaceae) shaped by geological and climatic events in the Tianshan Mountains and their surroundings. *Plant Systematics and Evolution*, 300, 51–61.
- Komarov VL (1908) *Generis Caragana monographia*. *Acta Horti Petropolitani*, 29, 179–388.
- Komarov VL (1945) VL Komarov Opera Selecta, pp.159–342. Academic Science URSS, Moscow.
- Komarov VL, Shishkin BK (eds.) (1934–1964) *Flora Uniionis Rerumpublicarum Sovieticarum Socialisticarum*, Vols 1–30. Nauka, Moskow/Leningrad. [Komarov VL, Shishkin BK (eds.) (1963–2002). *Flora of USSR*, Vols 1–30. Isreal Program for Scientific Translations, Jersalem; Amerind/Plymouth, England, Enfield, New Delhi; Science Press, NH.]
- Kress WJ, Erickson DL, Jones FA, Swenson NG, Perez R, Sanjur O, Bermingham E (2009) Plant DNA barcodes and a community phylogeny of a tropical forest dynamics plot in Panama. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 106, 18621–18626.
- Li DZ, Gao LM, Li HT, Wang H, Ge XJ, Liu JQ, Chen ZD, Zhou SL, Chen SL, Yang JB, Fu CX, Zeng CX, Yan HF, Zhu YJ, Sun YS, Chen SY, Zhao L, Wang K, Yang T, Duan GW (2011) Comparative analysis of a large dataset indicates that internal transcribed spacer (ITS) should be incorporated into the core barcode for seed plants. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 108, 19641–19646.
- Li XY, Ma M, Yan P (1998) The index of the Pamirs seed plants in China. *Journal of Shihezi University (Natural Science)*, 26, 266–280. (in Chinese with English abstract) [李学禹, 马森, 阎平 (1998) 中国帕米尔高原种子植物名录. 石河子大学学报(自然科学版), 26, 266–280.]
- Li XH, Zhu XX, Niu Y, Sun H (2014) Phylogenetic clustering and overdispersion for alpine plants along elevational gradient in the Hengduan Mountains region. *Journal of Systematics and Evolution*, 52, 280–288.
- Li ZH, Chen J, Zhao GF, Guo YP, Kou YX, Ma YZ, Wang G, Ma XF (2012) Response of a desert shrub to past geological and climatic change: a phylogeographic study of *Reaumuria soongarica* (Tamaricaceae) in western China. *Journal of Systematics and Evolution*, 50, 351–361.
- Liu SE (1985) *Collected Works of Liu Shene*, pp. 270–274. Science Press, Beijing. (in Chinese) [刘慎谔 (1985) 刘慎谔文集, 270–274页. 科学出版社, 北京.]
- Liu YF, Wang Y, Huang HW (2009) Species-level phylogeographical history of *Myricaria* plants in the mountain ranges of western China and the origin of *M. laxiflora* in the Three Gorges mountain region. *Molecular Ecology*, 18, 2700–2712.
- Liu YS, Utescher T, Zhou Z, Sun B (2011) The evolution of Miocene climates in north China: preliminary results of quantitative reconstructions from plant fossil records. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 304, 308–317.
- Liu YX (1982) Observations on the formation of Chinese desert floras. *Acta Phytotaxonomica Sinica*, 20, 131–141. (in Chinese with English abstract) [刘嫖心 (1982) 我国荒漠植物区系形成的探讨. 植物分类学报, 20, 131–141.]
- Liu YX (1995) A study on origin and formation of the Chinese desert floras. *Acta Phytotaxonomica Sinica*, 33, 131–143. (in Chinese with English abstract) [刘嫖心 (1995) 试论我国沙漠地区植物区系的发生与形成. 植物分类学报, 33, 131–143.]
- Lu AM (1999) *Geography of the Families and Genera of Chinese Seed Plants*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [路安民 (1999) 种子植物科属地理. 科学出版社, 北京.]
- Lu MM, Ci XQ, Yang GP, Li J (2013) DNA barcoding of subtropical forest trees: a study from Ailao Mountains Nature Reserve, Yunnan, China. *Plant Diversity and Resources*, 35, 733–741. (in Chinese with English abstract) [卢孟孟, 慈秀芹, 杨国平, 李捷 (2013) 亚热带森林乔木树种DNA条形码研究: 以哀牢山自然保护区为例. 植物分类与资源学报, 35, 733–741.]
- Lu MM, Huang XC, Ci XQ, Yang GP, Li J (2014) Phylogenetic community structure of subtropical forests along elevational gradients in Ailao Mountains of Southwest China. *Biodiversity Science*, 22, 438–448. (in Chinese with English

- abstract) [卢孟孟, 黄小翠, 慈秀芹, 杨国平, 李捷 (2014) 沿海拔梯度变化的哀牢山亚热带森林群落系统发育结构. 生物多样性, 22, 438–448.]
- Ma JS (2011) The Outline of Taxonomic Literature of Eastern Asian Higher Plants. Higher Education Press, Beijing. (in Chinese) [马金双 (2011) 东亚高等植物分类学文献概览. 高等教育出版社, 北京.]
- Ma SM, Zhang ML, Sanderson SC (2012) Phylogeography of the rare *Gymnocarpus przewalskii* (Caryophyllaceae): indications of multiple glacial refugia in north-western China. Australian Journal of Botany, 60, 20–31.
- Meng HH, Gao XY, Huang JF, Zhang ML (2015) Plant phylogeography in arid Northwest China: retrospectives and perspectives. Journal of Systematics and Evolution, 53, 33–46.
- Meng HH, Zhang ML (2013) Diversification of plant species in arid Northwest China: species-level phylogeographical history of *Lagochilus* Bunge ex Benth (Lamiaceae). Molecular Phylogenetics and Evolution, 68, 398–409.
- Mi XC, Pei NC, Ma KP (2014) A review on the progress of community phylogenetics. In: Annual Review of New Biology (ed. Muming Poo), pp. 266–289. Science Press, Beijing. (in Chinese) [米湘成, 裴男才, 马克平 (2014) 群落系统发育学研究进展. 见: 新生物学年鉴2013 (蒲慕明主编), 266–289页. 科学出版社, 北京.]
- Miao YF, Herrmann M, Wu FL, Yan XL, Yang SL (2012) What controlled Mid-Late Miocene long-term aridification in Central Asia? Global cooling or Tibetan Plateau uplift: a review. Earth-Science Reviews, 112, 155–172.
- Miao YF, Meng QQ, Fang XM, Yan XL, Wu FL, Song CH (2011) Origin and development of *Artemisia* (Asteraceae) in Asia and its implications for the uplift history of the Tibetan Plateau: a review. Quaternary International, 236, 3–12.
- Nylander JAA, Olsson U, Alström P, Sanmartín I (2008) Accounting for phylogenetic uncertainty in biogeography: a Bayesian approach to dispersal-vicariance analysis of the thrushes (Aves: *Turdus*). Systematic Biology, 57, 257–268.
- Pan XL (1994) The study on Tarim Basin flora. Journal of Xinjiang University (Natural Science Edition), 11(4), 77–83. (in Chinese with English abstract) [潘晓玲 (1994) 塔里木盆地植物区系的研究. 新疆大学学报 (自然科学版), 11(4), 77–83.]
- Pan XL, Dang RL, Wu GH (2001) Flora Geography and Resources Utilization in Arid Northwest Desert. Science Press, Beijing. (in Chinese) [潘晓玲, 党荣理, 伍光和 (2001) 西北干旱荒漠区植物区系地理与资源利用. 科学出版社, 北京.]
- Pan XL, Shen GM, Chen P (1999) A preliminary research on taxonomy and systematics of genus *Nitraria*. Acta Botanica Yunnanica, 21, 287–295. (in Chinese with English abstract) [潘晓玲, 沈观冕, 陈鹏 (1999) 白刺属植物的分类学及系统学研究. 云南植物研究, 21, 287–295.]
- Pan XL, Zhang HD (1995) An analysis on the flora and the research on forming of that in Tsaidam Basin. Journal of Xinjiang University (Natural Science Edition), 12(1), 81–86. (in Chinese with English abstract) [潘晓玲, 张宏达 (1995) 柴达木盆地植物区系分析及其形成的探讨. 新疆大学学报 (自然科学版), 12(1), 81–86.]
- Pan XL, Zhang HD (1996) Diagnosis on the characters of the vegetation and flora in Kanas, Altai. Ecological Science, 15(2), 32–37. (in Chinese with English abstract) [潘晓玲, 张宏达 (1996) 哈纳斯自然保护区植被特点及植物区系形成的探讨. 生态科学, 15(2), 32–37.]
- Pan XL, Zuo JB (1997) Quantitative study on seed flora resemblance in northwestern China. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 17, 94–102. (in Chinese with English abstract) [潘晓玲, 左家哺 (1997) 中国西北地区种子植物区系相似性的定量研究. 西北植物学报, 17, 94–102.]
- Pan XY, Wei XP, Yu QS, Chen JK, Wang GX (2003) Polyploidy: classification, evolution and applied perspective of the genus *Nitraria* L. Chinese Bulletin of Botany, 20, 632–638. [潘晓云, 魏小平, 尉秋实, 陈家宽, 王根轩 (2003) 多倍化—白刺属的系统分类、进化特征及应用前景. 植物学通报, 20, 632–638.]
- Qian H, Jiang L (2014) Phylogenetic community ecology: integrating community ecology and evolutionary biology. Journal of Plant Ecology, 7, 97–100.
- Qiu YX, Fu CX, Comes HP (2011) Plant molecular phylogeography in China and adjacent regions: tracing the genetic imprints of quaternary climate and environmental change in the world's most diverse temperate flora. Molecular Phylogenetics and Evolution, 59, 225–244.
- Ree RH, Smith SA (2008) Maximum likelihood inference of geographic range evolution by dispersal, local extinction, and cladogenesis. Systematic Biology, 57, 4–14.
- Ren J, Tao L (2003) Quantitative analysis of similarity of Chinese desert plant floras. Journal of Desert Research, 23, 289–294. (in Chinese with English abstract) [任珺, 陶玲 (2003) 中国沙漠植物区系相似性的数值分析. 中国沙漠, 23, 289–294.]
- Renner SS (2005) Relaxed molecular clocks for dating historical plant dispersal events. Trends in Plant Science, 10, 550–558.
- Ricklefs RE (2007) Estimating diversification rates from phylogenetic information. Trends in Ecology & Evolution, 22, 601–610.
- Sanderson MJ (2002) Estimating absolute rates of molecular evolution and divergence times: a penalized likelihood approach. Molecular Biology and Evolution, 19, 101–109.
- Shi XJ, Zhang ML (2015) Phylogeographical structure inferred from cpDNA sequence variation of *Zygophyllum xanthoxylon* across North-west China. Journal of Plant Research, 128, 269–282.
- Su ZH, Zhang ML, Sanderson SC (2011) Chloroplast phylogeography of *Helianthemum songaricum* (Cistaceae) from northwestern China: implications for preservation of genetic diversity. Conservation Genetics, 12, 1525–1537.
- Su ZH, Zhang ML (2013) Evolutionary response to Quaternary climate aridification and oscillations in northwestern China revealed by chloroplast phylogeography of *Nitraria sphaerocarpa* (Nitrariaceae). Biological Journal of the Linnean Society, 109, 757–770.

- Sun JM, Zhang ZQ (2008) Palynological evidence for the Mid-Miocene climatic optimum recorded in Cenozoic sediments of the Tian Shan Range, northwestern China. *Global and Planetary Change*, 64, 53–68.
- Takhtajan A (1986) *Floristic Regions of the World*. University of California Press, Berkeley.
- Tang YC (2000) On the affinities and the role of the Chinese flora. *Acta Botanica Yunnanica*, 22, 1–26. (in Chinese with English abstract) [汤彦承 (2000) 中国植物区系与其它地区区系的联系及其在世界区系中的地位和作用. 云南植物研究, 22, 1–26.]
- Temirbayeva K, Zhang ML (2015) Molecular phylogenetic and biogeographical analysis of *Nitraria* based on nuclear and chloroplast DNA sequences. *Plant Systematics and Evolution*, 301, 1897–1906.
- The Editorial Committee of Chinese Physical Geography of the Chinese Academy of Sciences (1985) *Physical Geography of China: General Introduction*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [中国科学院《中国自然地理》编辑委员会 (1985) 中国自然地理: 总论. 科学出版社, 北京.]
- Vassilchenko IT (1982) On the origin of the flora of Middle Asia. *Botanicheskii Zhurnal*, 67, 722–728.
- Wang HS (1979) The basic features of Chinese flora. *Acta Geographica Sinica*, 34, 224–237. (in Chinese with English abstract) [王荷生 (1979) 中国植物区系的基本特征. 地理学报, 34, 224–237.]
- Wang HS (1992) *Floristic Geography*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [王荷生 (1992) 植物区系地理. 科学出版社, 北京.]
- Webb CO, Ackerly DD, McPeck MA, Donoghue MJ (2002) Phylogenies and community ecology. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 33, 475–505.
- Wiens JJ, Parra-Olea G, Garcia-Paris MM, Wake DB (2007) Phylogenetic history underlies elevational biodiversity patterns in tropical salamanders. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 274, 919–928.
- Wu CY (1979) The regionalization of Chinese flora. *Acta Botanica Yunnanica*, 1, 1–22. (in Chinese with English abstract) [吴征镒 (1979) 论中国植物区系的分区问题. 云南植物研究, 1, 1–22.]
- Wu CY, Wang HS (1983) *Physical Geography of China: Phytogeography (I)*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [吴征镒, 王荷生 (1983) 中国自然地理: 植物地理(上册). 科学出版社, 北京.]
- Wu CY, Sun H, Zhou ZK, Li DZ, Peng H (2011) *Phytogeography of Chinese Seed Plants*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [吴征镒, 孙航, 周浙昆, 李德铎, 彭华 (2011) 中国种子植物区系地理. 科学出版社, 北京.]
- Wu CY, Wu SG (1998) A proposal for new floristic kingdom (realm) - the E. Asiatic kingdom, its delimitation and characteristics. In: *Floristic Characteristics and Diversity of East Asian Plants* (eds Zhang AL, Wu SG). China Higher Education Press, Beijing and Springer-Verlag, Hongkong.
- Wu XW (1993) Index of generic names founded on Mesozoic-Cenozoic specimens from China in 1865–1990. *Acta Palaeontologica Sinica*, 32, 495–524. (in Chinese with English abstract) [吴向午 (1993) 中国中、新生代大植物化石新属索引(1865–1990). 古生物学报, 32, 495–524.]
- Wu XW (2006) Record of Mesozoic-Cenozoic megafossil plant generic names founded on Chinese specimens (1991–2000). *Acta Palaeontologica Sinica*, 45, 114–140. (in Chinese and English) [吴向午 (2006) 中国中、新生代大植物化石新属记录(1991–2000). 古生物学报, 45, 114–140.]
- Wulff EV (translated by Zhong CX, Lu DA, Shen ZA, Hong BG, Wu YS, Yao ZH, Zhou HB) (1964) *Historical Plant Geography*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [仲崇信, 陆定安, 沈祖安, 洪必恭, 吴玉树, 姚中和, 周鸿彬 (译) (1964) 历史植物地理学. 科学出版社, 北京.]
- Xie KQ, Zhang ML (2013) The effect of Quaternary climatic oscillations on *Ribes meyeri* (Saxifragaceae) in northwestern China. *Biochemical Systematics and Ecology*, 50, 39–47.
- Xinjiang Integrated Exploration Team, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences (1978) *Xinjiang Vegetation and Its Application*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [中国科学院新疆综合考察队, 中国科学院植物研究所 (1978) 新疆植被及其利用. 科学出版社, 北京.]
- Xinjiang Integrated Exploration Team, Chinese Academy of Sciences (1959) *Reports of Xinjiang Integrated Exploration*, pp. 128–186. Science Press, Beijing. (in Chinese) [中国科学院新疆综合考察队 (1959) 新疆综合考察报告汇编, 128–186页. 科学出版社, 北京.]
- Xu YJ, Chen YN, Li WH, Fu AH, Ma XD, Gui DW, Chen YP (2010) Distribution pattern and environmental interpretation of plant species diversity in the mountainous region of Ili River Valley, Xinjiang, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 34, 1142–1154. (in Chinese with English abstract) [徐远杰, 陈亚宁, 李卫红, 付爱红, 马晓东, 桂东伟, 陈亚鹏 (2010) 伊犁河谷山地植物群落物种多样性分布格局及环境解释. 植物生态学报, 34, 1142–1154.]
- Xu Z, Zhang ML (2015) Phylogeography of the arid shrub *Atraphaxis frutescens* (Polygonaceae) in northwestern China, evidence from cpDNA sequences. *Journal of Heredity*, 106, 184–195.
- Yan L, Wan T, Liu J (1999) Observation on the pollen morphology of endemic plants in Alashan Desert. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 13(2), 33–40. (in Chinese with English abstract) [燕玲, 宛涛, 刘军 (1999) 阿拉善荒漠区特有植物与特征植物花粉形态的研究. 干旱区资源与环境, 13(2), 33–40.]
- Yang QZ (2006) A discussion about new record in W. Sichuan and discontinuous distribution ways of Australia for genus *Nitraria* L. *Journal of Mountain Science*, 24, 137–143.
- Yang SP, Xu HY, Yan P (2007) Floristic elements of seed plants in the Pamirs Region of China. *Chinese Bulletin of Botany*, 24, 597–602. (in Chinese with English abstract) [杨淑萍, 徐海燕, 阎平 (2007) 中国帕米尔高原种子植物区系的特征. 植物学通报, 24, 597–602.]
- Yong SP, Zhu ZY (1990) A fundamental characteristics of gobi desert flora in the centre Asia. *Acta Scientiarum Naturalium*

- Universitatis Intramongolicae, 21, 241–247. (in Chinese) [雍世鹏, 朱宗元 (1990) 论戈壁荒漠植物区系的基本特性. 内蒙古大学学报(自然科学版), 21, 241–247.]
- Yong SP, Zhu ZY (1992) A certain fundamental characteristics of gobi desert vegetation in the centre Asia. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Intramongolicae, 23, 235–244. (in Chinese with English abstract) [雍世鹏, 朱宗元 (1992) 论戈壁荒漠生态区植被的若干基本特征. 内蒙古大学学报 (自然科学版), 23, 235–244.]
- Yu Y, Harris AJ, Blair C, He X (2015) RASP (reconstruct ancestral state in phylogenies): a tool for historical biogeography. Molecular Phylogenetics and Evolution, 87, 46–49.
- Zhang DY, Pan BR, Yin LK (2003) The phytogeographical studies of *Tamarix* (Tamaricaceae). Acta Botanica Yunnanica, 25, 415–427. (in Chinese with English abstract) [张道远, 潘伯荣, 尹林克 (2003) 桤柳科桤柳属的植物地理研究. 云南植物研究, 25, 415–427.]
- Zhang HX, Zhang ML (2012) Genetic structure of the *Delphinium naviculare* species group tracks Pleistocene climatic oscillations in the Tianshan Mountains, arid Central Asia. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 353–355, 93–103.
- Zhang ML (1998) A preliminary analytic biogeography in *Caragana* (Fabaceae). Acta Botanica Yunnanica, 20, 1–11. (in Chinese with English abstract) [张明理 (1998) 锦鸡儿属分析生物地理学的研究. 云南植物研究, 20, 1–11.]
- Zhang ML, Fritsch PW (2010) Evolutionary response of *Caragana* (Fabaceae) to Qinghai-Tibetan Plateau uplift and Asian interior aridification. Plant Systematics and Evolution, 288, 191–199.
- Zhang ML, Fritsch PW, Cruz BC (2009) Phylogeny of *Caragana* (Fabaceae) based on DNA sequence data from *rbcl*, *trnS-trnG*, and ITS. Molecular Phylogenetics and Evolution, 50, 547–559.
- Zhang ML, Hao XL, Sanderson SC, Byalt VV, Sukhoruhov AP, Zhang X (2014a) Spatiotemporal evolution of *Reaumuria* (Tamaricaceae) in Central Asia: insights from molecular biogeography. Phytotaxa, 167, 89–103.
- Zhang ML, Sanderson SC, Sun YX, Byalt VV, Hao XL (2014b) Tertiary montane origin of the Central Asian flora, evidence inferred from cpDNA sequences of *Atraphaxis* (Polygonaceae). Journal of Integrative Plant Biology, 56, 1125–1135.
- Zhang ML, Temirbayeva K, Sanderson SC, Chen X (2015a) Young dispersal of xerophil *Nitraria* lineages in intercontinental disjunctions of the Old World. Scientific Reports, 5, 13840.
- Zhang ML, Xue JJ, Zhang Q, Sanderson SC (2015b) Inferring ancestral distribution area and survival vegetation of *Caragana* (Fabaceae) in Neogene. Plant Systematics and Evolution, 301, 1831–1842.
- Zhang YL (1998) Coefficient of similarity—an important parameter in floristic geography. Geographical Research, 17, 429–434. (in Chinese with English abstract) [张镜铨 (1998) 植物区系地理研究中的重要参数: 相似性系数. 地理研究, 17, 429–434.]
- Zhao YB, Cui DF, Li XY, Yan P, Ma M (2003) Analysis on spermatophytic constituent and resources characteristics on the Pamirs in China. Journal of Plant Resources and Environment, 12(3), 44–49. (in Chinese with English abstract) [赵业彬, 崔大方, 李学禹, 阎平, 马森 (2003) 中国帕米尔高原种子植物组成及其资源分析. 植物资源与环境学报, 12(3), 44–49.]
- Zhao YZ (1993) Taxonomic study of the genus *Caragana* from China. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Intramongolicae, 24, 631–653. (in Chinese with English abstract) [赵一之 (1993) 中国锦鸡儿属的分类学研究. 内蒙古大学学报(自然科学版), 24, 631–653.]
- Zhao YZ (1997) Endemic genera and their basic characteristics of the Mongolian Plateau plants. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Intramongolicae, 28, 547–552. (in Chinese with English abstract) [赵一之 (1997) 蒙古高原植物的特有属及其基本特征. 内蒙古大学学报 (自然科学版), 28, 547–552.]
- Zhao YZ (2006) Vascular Plants of Ordos. Inner Mongolia University Press, Huohot. [赵一之 (2006) 鄂尔多斯高原维管植物. 内蒙古大学出版社, 呼和浩特.]
- Zhao YZ (2009) Classification and its floristic geography of *Caragana* Fabr. in the world. Inner Mongolia University Press, Huohot. [赵一之 (2009) 世界锦鸡儿属植物分类及其区系地理. 内蒙古大学出版社, 呼和浩特.]
- Zhao YZ (2014) Diagnostic Key of Vascular Plants in Inner Mongolia. Science Press, Beijing. [赵一之 (2014) 内蒙古维管植物检索表. 科学出版社, 北京.]
- Zhao YZ, Zhu ZY (2003) The endemic genera of desert region in Central Asia. Acta Botanica Yunnanica, 25, 113–121. (in Chinese with English abstract) [赵一之, 朱宗元 (2003) 亚洲中部荒漠区的植物特有属. 云南植物研究, 25, 113–121.]
- Institute of Botany, Nanjing Institute of Geology and Palaeontology, Academia Sinica (1978) Chinese Plant Fossils. Vol. 3. Science Press, Beijing. [中国科学院北京植物研究所, 南京地质古生物研究所 (1978) 中国新生代植物. 中国植物化石(第三卷). 科学出版社, 北京.]
- Zhu GL (1996) Origin, differentiation, and geographic distribution of the Chenopodiaceae. Acta Phytotaxonomica Sinica, 34, 486–504. (in Chinese with English abstract) [朱格麟 (1996) 藜科植物的起源、分化和地理分布. 植物分类学报, 34, 486–504.]
- Zhu ZY, Ma YQ, Liu ZL, Zhao YZ (1999) Endemic plants and floristic characteristics in Alashan-Ordos biodiversity center. Journal of Arid Land Resources and Environment, 13(2), 1–16. (in Chinese with English abstract) [朱宗元, 马毓泉, 刘钟龄, 赵一之 (1999) 阿拉善-鄂尔多斯生物多样性中心的特有植物和植物区系的性质. 干旱区资源与环境, 13(2), 1–16.]

(责任编辑: 王国宏 责任编辑: 闫文杰)

• 综述 •

区域生命之树及其在植物区系研究中的应用

彭丹晓^{1,2} 鲁丽敏^{1*} 陈之端¹

1 (中国科学院植物研究所系统与进化植物学国家重点实验室, 北京 100093)

2 (中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 区域生命之树是对一个区域内的所有物种进行生命之树重建, 在最近10年已成为生命科学领域的研究热点。生命之树反映了物种间的亲缘关系和进化信息, 可以将生物区系形成与发展过程中的进化和生态因素联系起来, 是揭示区系来源和演化规律的有效手段。本文从3个方面总结了区域生命之树在植物区系研究中的应用: (1) 在时间维度上, 通过生命之树类群分化时间和进化速率估算, 反映区系演化历史, 揭示区系的时间分化格局; (2) 在空间维度上, 结合系统发育信息与物种分布数据, 揭示区系内生物多样性的空间格局, 并在此基础上进行区系分区; (3) 整合生物地理信息和气候环境数据, 分析区系中生物类群对古地理事件以及气候变化的响应机制, 以揭示形成现存生物多样性格局的生态、地理和历史因素。此外, 我们阐述了区域生命之树与全球生命之树之间的关系; 指出由于类群取样不全而造成的时间估算偏差是区域生命之树研究中需要注意的问题; 建议对生物多样性热点地区从不同尺度进行大数据的整合分析。

关键词: 区域生命之树; 植物区系; 系统发育多样性; 分化时间估计; 时空格局; 环境因子

Regional tree of life and its application in floristic studies

Danxiao Peng^{1,2}, Limin Lu^{1*}, Zhiduan Chen¹

1 State Key Laboratory of Systematic and Evolutionary Botany, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract: The regional tree of life, reconstructing the tree of life to include the regional species pool, has been a research focus in biological science over the past decade. Informed by phylogenetic relationships among coexisting species, a regional tree of life can connect evolutionary and ecological factors during the evolution of a biota and thus has become an efficient tool to trace its temporal and spatial diversification. In this paper, we summarize the application of a regional tree of life in floristic studies in the following three fields: (1) To reveal temporal patterns of a flora by estimating divergence time and evolutionary rates based on the tree of life; (2) To reveal spatial patterns of the biodiversity in a flora and to guide the regionalization of floristic zones by integrating phylogenetic and spatial data; and (3) By integrating biogeographic and environmental data and investigating how taxa respond to paleogeographic events and thus climate change to reveal the underlying ecological, geographical and historic factors of the formation of the floristic biodiversity pattern. In addition, we highlight the relationship between the regional and global tree of life and indicate the potential to identify biased divergence times with incomplete taxa sampling using a regional tree of life. Finally, we suggest that future studies should integrate current mega data at different scales in hotspots to elucidate biodiversity patterns in a worldwide framework.

Key words: regional tree of life; flora; phylogenetic diversity; estimation of divergence time; temporal and spatial pattern; environmental factors

收稿日期: 2015-12-01; 接受日期: 2016-02-03

基金项目: 国家自然科学基金(31590822; 31500179; 31270268)、中国科学院国际合作局对外合作项目(GJHZ201321)、中非研究中心、中国科学院国际合作和教育发展计划项目(SAJC201315)和科技部基础研究专项(2013FY112100)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: liminlu@ibcas.ac.cn

1 区域生命之树简介

1.1 区域生命之树的概念和研究内容

达尔文在1859年就提出了生命之树(tree of life)的概念,他指出地球上的生命都是同源的,任何生物物种都是从一个共同祖先经过漫长的地质历史逐渐演化而来。生命之树又称系统发育树(phylogenetic tree),是指地球上的生命之间的关联和进化历史就像一棵树(鲁丽敏等, 2014),分支表示物种的分化,节点表示延伸分支所代表物种的最近共同祖先。生命之树不仅体现了生命的起源和生物类群间的亲缘关系,还能借以阐明生物的时空分布格局和多样化进程。区域生命之树(regional tree of life)则是在空间范围上对取样类群进行限定,构建包含一个区域内所有物种的生命之树,强调对特定区域生物进化、历史地理过程及生物多样性地理分布格局的研究。虽然生命之树的概念由来已久,但对一个区域内的物种进行生命之树重建,并用于研究该区系的生物多样性进化机制是在近10年才刚刚兴起的(Webb et al, 2002)。

随着生物信息技术的快速发展、生物数据的大量积累以及多学科交叉融合,区域生命之树已成为生命科学领域一个新的研究热点(Favre et al, 2015)。区域生命之树的研究跨越了不同的空间尺度,小至生态群落,大到生物区系。起初,生命之树渗透到群落生态学研究领域,形成一门新兴的交叉学科,称为群落系统发育学或系统发育群落生态学(Phylogenetic Community Ecology)。这门学科以物种生态位的系统发育保守性(phylogenetic niche conservatism, PNC)为理论基础,通过系统发育树所反映的系统发育信息将进化和生态因素联系起来,从而探讨物种共存和生物多样性的形成与维持机制(Webb et al, 2002)。随后,结合生命之树的生物区系研究受到了广泛关注(Forest et al, 2007)。最近,Swenson和Umaña (2014)提出了系统发育区系学(Phylofloristics)的概念,即:通过比较不同区系或同一区系内不同区域间物种组成的系统发育相似性,探讨不同区系的生物是如何响应地质、生态因子的变化而发生演替的。系统发育群落生态学和系统发育区系学研究的空间尺度虽然不同,但在研究内容上部分重合,群落水平的研究方法在经过物种多度的简化、面积的标准化处理之后往往也能应用

于区系水平的研究(葛学军, 2015)。

建立区域生命之树,可在时间维度上分析区域内类群整体的时间分化格局,也可以在空间维度上分析区域内类群整体的地理分布格局,或是整合生物地理信息和气候环境数据探讨区域生物多样化格局形成的生态和进化因素。

1.2 区域生命之树的特征量度

在具体的研究中,需要引入多种生物多样性量度指标,才能对区系的分布格局及其形成机制进行深入探讨。传统的物种丰富度(species richness)或分类群多样性(taxonomic diversity, TD)以物种数目为量度单位,一直是生物多样性最基本的衡量指标。自区域生命之树应用于生物区系研究以来,结合生命之树的多样性量度及其应用受到特别关注。Faith (1992)提出的系统发育多样性(phylogenetic diversity, PD)指标得到了广泛应用,该指标以系统发育树上符合最小距离路径(minimum spanning path)的分支的枝长(也可以是时间估算树的分化时间)总和来表示。有些研究通过计算和对比物种丰富度和系统发育多样性,已经证明物种丰富度和系统发育多样性之间并不一定正相关。例如,Forest等(2007)重建了南非好望角735属本土特有物种的生命之树,发现PD值所指示的生物多样性区域与通过物种丰富度估计的区域并不吻合,物种丰富度不具优势的好望角东部地区反而具有更高的系统发育多样性,在生物多样性保护方面具有更大的价值,但在之前实施的生物多样性保护策略中这些地区常常被忽视。因此,在分析区域的生物多样性格局和制定保护策略时要综合考虑物种丰富度和系统发育多样性,以全面揭示生态和进化因素在生物多样化进程中扮演的角色。此外,近年来基于物种功能特征的功能多样性(functional diversity, FD)在生态学领域也备受重视。功能性状是指可以影响生态系统属性或生物对环境变化产生应答的性状,是理解生态系统多样化进程及其对环境胁迫和干扰响应的重要途径(Chao et al, 2014)。功能多样性可通过3种方法量度:基于性状值(trait-value based)、基于系统发育树图(dendrogram based)和基于物种功能属性距离(distance-based)。目前,功能多样性与系统发育多样性和物种丰富度之间的相关性还没有定论,但已成为进化生态学研究关注的热点之一。Corbelli等(2015)对比了新热带南部4种群落(亚热带森林、草

原、造林区和农田)中的指示生物鸟类和蚂蚁的物种丰富度、系统发育多样性和功能多样性,结果显示三者呈正相关,且群落类型和用地情况对3种多样性指标影响显著。而Monnet等(2014)研究了法国鸟类的物种丰富度、系统发育多样性和功能多样性在过去20年的动态变化,结果显示物种丰富度和系统发育多样性在此期间有显著增加,而功能多样性并无明显变化。该研究显示不同层面的多样性指数之间的不同步性。因此,建议在宏观生态学研究采用尽可能多的指数以更好地理解群落组成的变化。Chao等(2014)还提出了属性多样性(attribute diversity)的概念,将分类群实体(物种)、系统发育实体(单位长度的分支)或功能实体(单位距离的物种对)看作有效物种数量(Hill numbers, effective number of species)中的“物种”进行度量,作为量化物种多样性、系统发育多样性和功能多样性的综合方法。

近年来,随着生命之树在植物区系研究中的广泛应用,系统发育多样性的概念不断丰富和发展,除了Faith (1992)的计算方法,各种具体的量化指标也陆续被提出。Whittaker (1960)指出,一个区域的生物多样性(γ 多样性)是由该区域局部生境的平均生物多样性(α 多样性)和这些生境之间的多样性差异(β 多样性)所决定的。在生命之树引入生物多样性研究后,区域生物系统发育多样性也可以分解为系统发育 α 多样性和系统发育 β 多样性(González-Caro et al, 2014)。Feng等(2012)以浙江古田山的森林群落样地为例,对8种系统发育 β 多样性指数进行了比较和相关性分析,结果显示不同指数对不同空间尺度的物种空间分布差异的解释能力不同,且意义相近的指数之间相关性较高。因此,在利用系统发育多样性指标对生物多样性进行量化时,要在理解其生态学意义的基础上根据具体情况选择合适的指标,以准确合理地反映区域的生物多样性。

除了系统发育多样性,对区域生命之树的其他特征的度量也受到关注。如:分类单元间平均谱系距离(mean pairwise phylogenetic distance, MPD)反映了系统发育树的分支结构特点,距离越大表示分支越发散(overdispersed),类群间亲缘关系较远;距离越小表示分支越聚集(clustered),类群间亲缘关系较近(Tsirogianis & Sandel, 2014)。Faith等(2004)和Rosauer等(2009)分别建立了系统发育特有性(phylogenetic endemism, PE)指数的概念。Mishler等

(2014)认为Faith等(2004)的方法旨在鉴别系统发育树上局限分布于某个特定区域的类群(特有属、特有种等),可称为绝对系统发育特有性(absolute phylogenetic endemism);而Rosauer等(2009)考虑了特有类群地理分布的相对幅度,称为加权的系统发育特有性(weighted phylogenetic endemism)。在考虑分支的长短、发散或聚集程度的基础上,Mishler等(2014)提出相对系统发育多样性(relative phylogenetic diversity, RPD)和相对系统发育特有性(relative phylogenetic endemism, RPE)的概念,以此区别类群的新特有和古特有性质,并根据特有属、种的数目和比例来判断一个地区是新特有还是古特有中心。

2 区域生命之树在植物区系研究中的应用

2.1 植物区系的生物多样性时间格局

植物区系是一个地区所有植物的总和,是植物界在一定自然历史环境中时空分布和演化的综合反映。它既反映了一个区域中植物和环境的因果关系,还反映了植物区系的自然历史演化脉络(吴征镒等, 2010)。系统发育树除了可以直观地呈现植物区系中的类群组成及类群间的亲缘关系外,还可以通过时间标定提供区系中各类群的分化时间,从而分析不同地质历史时期科、属、种的丰富度和关键创新性状(key innovations),并回答在哪个地史时期发生了物种快速分化以及区系生物多样性形成和发展的驱动力等科学问题。因此,系统发育树成为揭示植物区系生物多样性时间格局的有效手段。

具有时间标定的系统发育树(时间树)可以标识不同生物类群的分化时间和进化速率,而对区系群落中优势种、特征种或指示种分化时间的估算则能够帮助确定该区域典型植被形成的时间和过程,进而指示区系生物多样化过程中的重大地史事件和环境变迁。Pillon (2012)利用时间树对新喀里多尼亚区系多样化的时间和速率进行估算,结果表明所研究的12个植物类群都是在37 Myr之后才散布至该地区并分化,对应于该岛从澳洲大陆分裂后曾经被洪水淹没的时间,由此推测新喀里多尼亚区系是在该岛经历过这次洪水后重新出现时才形成的;又以热带雨林特有类群的冠群年龄(crown age)估算该岛雨林出现的时间,表明该岛的热带雨林生境至少存在了6.9 Myr。

物种快速分化可以导致植物区系的生物多样性增加,而分化时间和速率的不同则呈现出不同的物种多样化格局。高的物种丰富度可能由低灭绝率(保存了“早期的物种辐射”的物种多样性)或者“近期的快速物种辐射”导致。Linder (2008)对不同植物区系(安第斯山脉、新西兰、澳大利亚、非洲西南部、热带和欧亚大陆)时间标定类群分支的物种形成和灭绝的速率进行非线性回归分析,结果表明:澳大利亚的生物多样性是“早期物种辐射”遗留下来的,以新近纪气候和地理条件稳定为特点;新西兰植物区系是“近期的快速物种辐射”的结果,具有典型的上新世新生环境;新热带和好望角植物区系的高物种多样性则是“早期物种辐射”和“近期的快速物种辐射”共同作用的结果,兼具稳定的环境(亚马逊盆地和Cape Fold Mountain)和不稳定的环境(地壳运动比较活跃的安第斯山脉和南非西海岸)。

区系中类群的分化规律及散布过程反映了区系生物多样性的时间格局和区系的形成历史。Crisp和Cook (2013)综述了澳大利亚区系从冈瓦纳古陆分离后转变为如今的岛屿大陆过程中发生的主要进化和生态过程,强调了具有时间标定的系统发育树对于阐明澳大利亚区系历史和演化机制的重要性。该研究通过对比85个维管植物分支的分化时间,发现38个分支(45%)可能起源于冈瓦纳古陆,41个分支(48%)可能通过远距离散布到达澳大利亚。又通过对比在澳大利亚和其他大陆间断分布类群的分化时间,发现只有南美—澳大利亚间断表现出了明显的隔离分化(vacariance)特征,因为21个样本的分化时间中值为33 Myr,与两个大陆分离的时间相吻合。结合时间标定的系统发育分析还支持了澳大利亚温带区系起源于冈瓦纳古陆、热带类群是由亚洲扩散而来的假说。

2.2 植物区系的生物多样性空间格局

以植物区系物种分布信息和系统发育树为基础,通过比较地区间的物种丰富度、系统发育多样性及其变化,即对生物多样性空间格局进行横向比较(β 多样性)和关联分析,可以阐明区系物种的空间分布格局及其形成机制。Weigelt等(2015)对世界范围内的393个岛屿区系的物种分布格局进行分析,比较了各个岛屿的被子植物、棕榈类和蕨类植物的物种丰富度、系统发育多样性和结构,并与地质历史、环境因子和岛屿特征等关联,分析类群组成、

远距离扩散、环境过滤和原地物种形成对现存分布格局的作用。结果表明,相比于蕨类植物,物理和环境因子(特别是与定殖和远距离扩散相关的)能够更好地解释被子植物和棕榈类植物的分布规律,说明不同植物类群具有不同的扩散能力、物种形成相关特征和对环境的适应性,同一区系中不同植物类群的多样性格局只有在充分考虑各自散布机制的情况下才能进行合理的解释。

植物区系区划是在区域现存的生物多样性空间格局的基础上,综合地质历史、生物地理、气候变化等各种因素,将各个地域划分为具有生物时空分布特征的不同区域(吴征镒等, 2010; Li et al, 2015)。传统植物区系区划以植物类群的分布状况及其在该区域的特有性程度为基础,主要以物种丰富度和物种特有性为量度指标(吴征镒等, 2010)。利用区域生命之树,基于其所反映的系统发育信息和系统发育多样性等指标对植物区系进行系统发育地理分区,则可以把具有相同生态和进化历史的区域划分在一起,能更清晰地反映不同植物区系单元的演化历史和生物多样性空间格局。如Li等(2015)利用云南地区种子植物的1,983个属的分布和系统发育关系信息,提出云南植物区系分区系统,将云南地区划为南北两个地理单元,其下再分为8个不同的植物区系,与此前基于木本植物分布定性分析的区系划分结果大抵一致;并以 β 多样性为量度探讨了云南区系形成过程中物种丰富度和系统发育多样性的转换(turnover)格局,发现这两者高度相关,且均在中部地区表现为最低水平。

2.3 植物区系生物多样性时空格局的地理、生态因子解释

植物区系的生态环境分异是物种多样化的外因,而生物类群通过进化创新以适应环境变化是物种多样化的内因,可以通过系统发育树的结构得到反映。因此,在揭示区系时间和空间格局的基础上,系统发育树还可以将外界环境因子和关键适应性特征进化相联系,即结合物种分化的外因和内因,从而理解区系生物多样性的形成机制和动态变化规律(鲁丽敏等, 2014)。Lavergne等(2013)基于区域生命之树,通过birth-death模型对物种多样化速率进行分析,探讨了直布罗陀海峡对两岸植物区系生物多样性格局形成的影响。结果表明,陆桥对大陆间的物种迁移有影响,通过生活史特征的选择对类

群进行迁移过滤,使得生活周期短、借助风或动物传播的类群不成比例地分布于海峡两岸。此外,海峡对迁移的限制还使一些类群倾向于本地物种形成的多样化模式,在多样化速率相当的情况下,由于生境差异而产生了两岸大量的地方特有种。

大数据的整合分析是研究植物与环境相互影响的重要方向。特别是区域时间树引入植物区系的研究后,进化生态学家常常将系统发育关系、分化时间、多样化速率、生物地理重建和古气候数据进行关联分析,用以揭示区系生物多样化对地理、地质事件和气候变化的响应机制。Warren等(2011)基于系统发育树和过去几百万年的季节性降雨的变化数据,重建了好望角植物区系物种地理分布和开花物候的历史变化。结果显示,分别有14–41%和14–55%的物种符合预测适应气候变化的地理分布和开花物候转变,指出中新世以来的气候变化对好望角现存植物区系生物多样性格局的形成有显著影响。

3 存在问题与前景展望

3.1 区域生命之树和全球生命之树之间的关系

区域生命之树是全球生命之树在区域范围的取样,仅反映了在某个特定区域内的系统发育多样化格局。取样不全造成生命之树上分支缺失会影响对系统发育关系的判断,并造成全球树与区域树所反映的系统发育多样性的差异。但这两者反映的系统发育关系之间的误差是否会影响讨论生物多样性格局及其成因,目前的研究还少有涉及。以Weigelt等(2015)的工作为例,其研究用综合的全球岛屿区域树的系统发育数据与地理环境等因素进行分析,得到两者相关性显著的结果,由此揭示了世界范围适用的岛屿区系生物多样性格局形成模式。而在此基础上,可以通过合并所有岛屿区域树构建全球尺度的岛屿树,进一步比较岛屿的全球树和全球的岛屿树得到的多样化成因是否存在差异,为揭示全球生命之树和区域生命之树的关系提供参考。另一方面,区域生命之树由于取样不全而可能造成的系统发育关系分析误差也可以通过与完整呈现生物类群间系统发育关系的全球生命之树比对来进行修正。

3.2 区域生命之树的时间估计偏差

分子时间标定是确定一个物种分化事件发生

时间的过程。首先,利用DNA序列构建系统发育树,以序列的碱基替换数来衡量分支长度;然后,由于类群间的碱基替换率不同而不能直接将分支长度转化为估计的分化时间,所以第二步是将分支的碱基替换数转化为相对时间的度量(rate-smoothing);第三步是用化石进行校准,将相对时间转化为实际时间(Milne, 2006)。不同类群中包含的物种数量差异很大,系统发育树的类群取样数目会影响时间估计的准确性(Linder et al, 2005),而且不同的估算方法可能会产生不同的节点时间。区域生命之树的类群取样仅限于区域分布的物种,必然存在由于取样不全而造成对类群间亲缘关系和类群分化时间估计的精度降低的问题。此外,由于所取类群受限而化石记录有限,因此有可能出现所建的区域树的部分分支缺少化石校准数据(Lancaster & Kay, 2013),从而产生时间估算误差。Milne (2006)建议利用多个化石记录和多个基因序列来减小碱基替换率随机变异的影响,以此建立一个普遍适用的时间估算方法,使准确的时间标定不再局限于化石记录丰富的类群。同时,区域时间树存在的偏差是否可以采用区域时间树与区系内特征类群在世界范围取样所构建的时间树相互验证的方法进行校正?是否可以通过建立一个整合世界范围生物类群估算分化时间的数据库以便于数据的提取、比对和修订,再基于此数据库对区域生命之树进行时间标定?这些都是特别值得关注的问题。因此,探索区域生命之树时间的估算方法以解决由于取样不全而造成的误差,将成为今后研究的一个重要方面。

3.3 取样尺度的影响

区域生命之树在系统与进化生物学和生态学之间架起了桥梁,已经广泛应用于揭示区系生物多样性的时间和空间格局及其地理、生态成因,而在研究过程中取样尺度大小对结果的影响也是未来研究应该关注的方面。在时间尺度上,比较同一地区在不同时间跨度的物种丰富度和系统发育多样性的变化规律,阐明地质历史和气候变化对多样化的作用强度和快慢;在空间尺度上,比较不同空间大小的地区在某个历史时期的多样化规律,探讨空间取样大小造成的分析结果差异及原因;系统发育树建树的取样量和分类阶元水平也可能影响到分析结果。Qian和Zhang (2015)利用北美被子植物木本类群在科水平的系统发育树和物种水平的系统

发育树研究系统发育多样性与环境变量之间的关系,发现两种水平上的树得到的关系没有显著差异,表明高分辨率的科水平树在较大空间尺度上也能很好地反映环境因素对多样性格局的影响。但不同时间、空间尺度和不同分类阶元水平上建树尺度的组合得到的分析结果是否存在差异仍有待进一步研究。

3.4 对生物多样性热点地区研究成果的整合

生命之树已广泛应用于植物区系研究,尤其是生物多样性热点地区受到研究者的格外关注,并积累了一定的研究成果。但对同一地区的研究往往各有侧重,不同指标、模型和方法被用于解读和挖掘系统发育树中的信息,再结合不同的进化特征、生物地理分析和地质气候数据进行分析,得到了从不同角度对同一地区生物多样性起源演化的理解,因而加强世界范围内研究者的合作与交流很有必要。今后的研究除了对尚未涉猎的植物区系结合区域生命之树进行探讨,或是继续从新的方面加深对已有研究涉及的地区的多样化机制的认识之外,整合热点地区的研究以进行全方位、多角度、深层次的大数据整合分析,进而完整地阐明生物多样性热点地区生物多样性格局及其成因可能会成为今后重点研究方向。这将为最终解释全球生物多样性的形成机制和分布规律奠定基础。

致谢: 感谢中国科学院植物研究所胡海花博士对原稿提出修改意见并提供文献。

参考文献

- Chao A, Chiu CH, Jost L (2014) Unifying species diversity, phylogenetic diversity, functional diversity, and related similarity and differentiation measures through Hill numbers. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 45, 297–324.
- Corbelli JM, Zurita GA, Filloy J, Galvis JP, Vespa NI, Bellocq I (2015) Integrating taxonomic, functional and phylogenetic beta diversities: interactive effects with the biome and land use across taxa. *PLoS ONE*, 10, e0126854.
- Crisp MD, Cook LG (2013) How was the Australian flora assembled over the last 65 million years? A molecular phylogenetic perspective. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 44, 303–324.
- Faith DP (1992) Conservation evaluation and phylogenetic diversity. *Biological Conservation*, 61, 1–10.
- Faith DP, Reid CAM, Hunter J (2004) Integrating phylogenetic diversity, complementarity, and endemism for conservation assessment. *Conservation Biology*, 18, 255–261.
- Favre A, Päckert M, Pauls SU, Jähmig SC, Uhl D, Michalak I, Muellner-Riehl AN (2015) The role of the uplift of the Qinghai-Tibetan Plateau for the evolution of Tibetan biotas. *Biological Reviews*, 90, 236–253.
- Feng G, Zhang JL, Pei NC, Rao MD, Mi XC, Ren HB, Ma KP (2012) Comparison of phylobetadiversity indices based on community data from Gutianshan Forest Plot. *Chinese Science Bulletin*, 57, 623–630.
- Forest F, Grenyer R, Rouget M, Davies TJ, Cowling RM, Faith DP, Balmford A, Manning JC, Procheş Ş, van der Bank M, Reeves G, Hedderson TAJ, Savolainen V (2007) Preserving the evolutionary potential of floras in biodiversity hotspots. *Nature*, 445, 757–760.
- Ge XJ (2015) Application of DNA barcoding in phylofloristics study. *Biodiversity Science*, 23, 295–296. (in Chinese) [葛学军 (2015) DNA条形码在植物系统发育区系学研究中的应用. *生物多样性*, 23, 295–296.]
- González-Caro S, Umaña MN, Álvarez E, Stevenson PR, Swenson NG (2014) Phylogenetic alpha and beta diversity in tropical tree assemblages along regional-scale environmental gradients in northwest South America. *Journal of Plant Ecology*, 7, 145–153.
- Lancaster LT, Kay KM (2013) Origin and diversification of the California flora: re-examining classic hypotheses with molecular phylogenies. *Evolution*, 67, 1041–1054.
- Lavergne S, Hampe A, Arroyo J (2013) In and out of Africa: How did the Strait of Gibraltar affect plant species migration and local diversification? *Journal of Biogeography*, 40, 24–36.
- Li R, Kraft NJB, Yang J, Wang Y (2015) A phylogenetically informed delineation of floristic regions within a biodiversity hotspot in Yunnan, China. *Scientific Reports*, 5, 9396.
- Linder HP, Hardy CR, Rutschmann F (2005) Taxon sampling effects in molecular clock dating: an example from the African Restionaceae. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 35, 569–582.
- Linder HP (2008) Plant species radiations: where, when, why? *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 363, 3097–3105.
- Lu LM, Sun M, Zhang JB, Li HL, Lin L, Yang T, Chen M, Chen ZD (2014) Tree of life and its applications. *Biodiversity Science*, 22, 3–20. (in Chinese with English abstract) [鲁丽敏, 孙苗, 张景博, 李洪雷, 林立, 杨拓, 陈闽, 陈之端 (2014) 生命之树及其应用. *生物多样性*, 22, 3–20.]
- Milne RI (2006) Northern hemisphere plant disjunctions: a window on tertiary land bridges and climate change? *Annals of Botany*, 98, 465–472.
- Mishler BD, Knerr N, González-Orozco CE, Thornhill AH, Laffan SW, Miller JT (2014) Phylogenetic measures of biodiversity and neo- and paleo-endemism in Australian *Acacia*. *Nature Communications*, 5, 4473.
- Monnet AC, Jiguet F, Meynard CN, Mouillot D, Mouquet N, Thuiller W, Devictor V (2014) Asynchrony of taxonomic, functional and phylogenetic diversity in birds. *Global Ecology*

- ogy and Biogeography, 23, 780–788.
- Pillon Y (2012) Time and tempo of diversification in the flora of New Caledonia. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 170, 288–298.
- Qian H, Zhang J (2015) Are phylogenies derived from family-level supertrees robust for studies on macroecological patterns along environmental gradients? *Journal of Systematics and Evolution*, 54, 29–36.
- Rosauer D, Laffan SW, Crisp MD, Donnellan SC, Cook LG (2009) Phylogenetic endemism: a new approach for identifying geographical concentrations of evolutionary history. *Molecular Ecology*, 18, 4061–4072.
- Swenson NG, Umaña MN (2014) Phylofloristics: an example from the Lesser Antilles. *Journal of Plant Ecology*, 7, 166–175.
- Tsirogiannis C, Sandel B (2014) Computing the skewness of the phylogenetic mean pairwise distance in linear time. *Algorithms for Molecular Biology*, 9, 15.
- Warren BH, Bakker FT, Bellstedt DU, Bytebier B, Claßen-Bockhoff R, Dreyer LL, Edwards D, Forest F, Galley C, Hardy CR, Linder HP, Muasya AM, Mummenhoff K, Oberlander KC, Quint M, Richardson JE, Savolainen V, Schrire BD, van der Niet T, Verboom GA, Yesson C, Hawkins JA (2011) Consistent phenological shifts in the making of a biodiversity hotspot: the Cape flora. *BMC Evolutionary Biology*, 11, 39.
- Webb CO, Ackerly DD, McPeck MA, Donoghue MJ (2002) Phylogenies and community ecology. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 33, 475–505.
- Weigelt P, Kissling WD, Kisel Y, Fritz SA, Karger DN, Kessler M, Lehtonen S, Svenning JC, Kreft H (2015) Global patterns and drivers of phylogenetic structure in island floras. *Scientific Reports*, 5, 12213.
- Whittaker RH (1960) Vegetation of the Siskiyou Mountains, Oregon and California. *Ecological Monographs*, 30, 279–338.
- Wu ZY, Sun H, Zhou ZK, Li DZ, Peng H (2010) Floristics of Seed Plants from China. Science Press, Beijing. (in Chinese) [吴征镒, 孙航, 周浙昆, 李德铎, 彭华 (2010) 中国种子植物区系地理. 科学出版社, 北京.]

(责任编辑: 葛学军 责任编辑: 闫文杰)

• 综述 •

青藏高原及毗邻区植物多样性演化与维持机制：进展及展望

刘 杰¹ 罗亚皇¹ 李德铎² 高连明^{1*}

1 (中国科学院昆明植物研究所东亚植物多样性和生物地理学重点实验室, 昆明 650201)

2 (中国科学院昆明植物研究所中国西南野生生物种质资源库, 昆明 650201)

摘要: 生物多样性演化和维持受遗传和环境的共同影响。环境要素中, 地质和气候的影响最大。地质和气候过程对青藏高原及毗邻区植物多样性的演化和维持的影响尤为强烈。本文从不同时空尺度综述了青藏高原隆升、亚洲季风气候演变、冰期旋回的气候波动及偶联的环境变化对青藏高原及毗邻区植物多样性起源、演化、群体动态及维持机制的影响。总结了当前植物多样化和物种分布格局变迁和维持研究的最新进展和存在的不足, 展望了气候变化对植物遗传多样性的影响、杂交带及其群体动态和维持机制、植物多样性格局及其成因、季风气候演变对植物多样性维持的影响以及植物群落构建机制等五个值得深入的热点研究方向。

关键词: 气候变化; 杂交; 植物多样性; 群体历史; 青藏高原

Evolution and maintenance mechanisms of plant diversity in the Qinghai-Tibet Plateau and adjacent regions: retrospect and prospect

Jie Liu¹, Yahuang Luo¹, Dezhu Li², Lianming Gao^{1*}

1 Key Laboratory for Plant Diversity and Biogeography of East Asia, Kunming Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650201

2 Germplasm Bank of Wild Species in Southwest China, Kunming Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650201

Abstract: The evolution and maintenance of biodiversity is largely determined by the interaction of genetics and environmental factors. Geological and climatic histories, which played pivotal roles in the evolution and maintenance of plant diversity in the Qinghai-Tibet Plateau (QTP) and adjacent regions, are the most important environmental aspects. We review the major effects of QTP environmental changes associated with geological uplift, Asian monsoon evolution, and Pleistocene climatic oscillation on the origin, evolution, population demography, and maintenance mechanisms of plant diversity in the QTP and adjacent regions across spatiotemporal scales. Furthermore, we summarize the current progress and knowledge gaps on mechanisms of diversification and maintenance of plant diversity, and outline the effect of climate change on plant genetic diversity, hybrid zone dynamics, plant diversity patterns, the effect of Asian Monsoon evolution on plant diversity maintenance, and mechanisms of community assembly, the five additional future research hotspots.

Key words: climate change; hybridization; plant diversity; population demography; Qinghai-Tibet Plateau

区域生物多样性的时空演化除受物种本身固有的生物学特性决定外, 还受地质事件、气候历史等多种环境要素的影响(Godfray & Lawton, 2001), 涉及突变、遗传漂变和自然选择, 是物种形成、灭绝、迁移的耦合过程。其中与地质过程偶联的环境

变化, 在长时间尺度上的作用更加明显, 对生物多样性在物种及以上阶元的宏进化(macroevolution)具有重要的驱动作用。通过系统发育学、生物地理学和古生物学等学科手段可以解析长时间尺度上地质过程对区域生物多样性形成、演化和维持机制

收稿日期: 2016-10-12; 接受日期: 2017-02-13

基金项目: 国家重大科学研究计划(2014CB954100)、国家自然科学基金(41571059)和国家留学基金(201504910423)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: gaolm@mail.kib.ac.cn

的影响。近缘种及种内遗传格局及其变迁过程则主要受更新世以来(≤ 2.6 Ma, Ma即百万年)冰期旋回的气候波动影响(Avise, 2000; Hewitt, 2000), 通常表现为种群分布区在冰期收缩、间冰期扩张, 涉及到遗传变异格局、冰期避难所、冰期后的群体扩散路线以及群体历史等方面, 可利用分子谱系地理学、物种分布区模拟等学科方法进行探究。

素有“世界屋脊”和地球“第三极”之称的青藏高原是世界上面积最大、海拔最高的高原。大约在40–50 Ma, 印度板块和欧亚板块持续碰撞、挤压和拆沉, 导致了青藏高原的隆升和喜马拉雅山脉的形成(Molnar, 1986; Bouilhol et al, 2013; Jagoutz et al, 2015; Tada et al, 2016); 高原隆升的同时, 印度板块向东侧挤压, 形成了横断山(Harrison et al, 1992; 郑度和姚檀栋, 2004; Royden et al, 2008)。关于青藏高原隆升的时间、幅度和次数等问题一直存在争议。一些学者根据同位素、古磁学等方法, 认为青藏高原的西藏中部或北部部分地区在40 Ma已经到达了现在的高度或比现在还高, 随后逐渐下降(Lippert et al, 2014); 但是这些测定方法本身存在很多缺陷, 其结论还有待进一步探讨(Deng & Ding, 2015)。但是, 也有学者根据这些部分地点有争议性的年代标记结果, 认为整个青藏高原在40 Ma已经达到了现在平均4,000 m的海拔高度, 同时坚称第四纪冰期存在大冰盖(Renner, 2016)。尽管青藏高原哪些地区达到现有的海拔高度还需要进一步研究, 但是, 更多的地质学、地理学以及古生物学等证据表明, 从整个青藏高原(包括部分喜马拉雅山脉、横断山、昆仑山等)来说, 似乎不是一次隆升导致的, 隆升存在时间和空间的异质性, 多数地区在第三纪中晚期以来才隆升到现有高度。

青藏高原的隆升是中生代以来地球上最重大的地质历史事件之一, 高原隆升导致了其自身及周边环境的剧烈变化, 如亚洲季风气候形成和加强以及中亚干旱化等。一般认为亚洲季风形成于25–22 Ma, 此后在~14 Ma, 9–7 Ma, ~5 Ma和3.6 Ma等时期发生过显著的变化, 然而这种变化与青藏高原的阶段性隆升并不完全同步(Clift et al, 2008; An et al, 2014; Lu & Guo, 2014; Tada et al, 2016)。伴随着青藏高原的隆升及环境变化, 古近纪(66–23 Ma)由西向东横跨中国大陆宽阔的干旱带, 自新近纪(23–2.6 Ma)以来退缩至中国西北部地区(Sun & Wang,

2005)。更新世以来, 青藏高原地区经历了4次主要的冰期过程(施雅风等, 1998; Zheng et al, 2002; 易朝路等, 2005), 但未形成过大规模的统一冰盖(施雅风等, 1998; Shi, 2002; Owen et al, 2008), 这一假说也得到谱系地理学证据支持(见2.2节)。

综合考虑青藏高原及周边地区的地质构造, 生物多样性分布格局和特征(Mao et al, 2013; Yan et al, 2013; Zhang et al, 2016)及相关研究的关注区域, 本文所指的青藏高原及毗邻区域主要指青藏高原台面, 南部的喜马拉雅山脉, 东南部的横断山地区。这个区域是中国生物多样性重要的特有中心之一(López-Pujol et al, 2011; Huang et al, 2012), 也是生物多样性保护的优先地区(Huang et al, 2016; Zhang et al, 2017b)。该地区是地球上生物多样性最为富集的区域, 植被类型多样, 区系成分来源复杂, 是生态系统的脆弱区和气候变化的敏感区, 包含喜马拉雅(Himalaya)、中国西南山地(Mountains of Southwest China)和印度–缅甸(Indo-Burma) 3个全球生物多样性热点地区(Mittermeier et al, 2001)。

实际上, 不同时间尺度的地质、气候历史事件通常耦合在一起, 共同影响着青藏高原及毗邻区的生物多样性起源、演化和维持。近年来, 基于分子系统学、生物地理学、谱系地理学和古生物学等学科手段, 学者们对青藏高原及毗邻区植物多样性在不同时空尺度的演化历史与维持机制开展了深入研究(Liu et al, 2012, 2014b; Wen et al, 2014; Favre et al, 2015), 揭示了一些类群生物多样性起源、演化和维持机制。然而, 在科学发展与交叉的新形势下, 尚存在许多亟待探究的科学问题和值得深入的热点。本文以时间轴为序列, 试图对青藏高原及毗邻区植物多样性起源、演化与维持机制的研究进展进行综述, 在此基础上, 对未来值得深入的研究热点进行了展望, 以期为该地区植物多样性演化和维持机制的相关研究提供参考。

1 高原隆升及偶联的环境变化驱动了植物多样化

青藏高原隆升及偶联的季风气候演化, 造成了地表格局和环境的异质化, 形成了物种扩散的隔离障碍或通道, 扩展了生态、环境梯度, 提供了新生态位, 驱动了植物多样性演化。从源头上讲, 随着青藏高原隆升, 古地中海逐渐退却, 早期青藏高原

植物区系主要由第三纪残存的古地中海植物区系发展演化而来(孙航, 2002b), 后来高山植物区系的发展吸纳了北极的第三纪成分(孙航, 2002a), 同时也接受了来自中亚、东亚以及南半球等地区迁入的类群(Wen et al, 2014)。在环境变化的驱动下, 该地区孕育了许多特有成分, 很多类群发生了快速辐射演化, 同时有一些类群灭绝(见3.4节)。近年来, 分子系统学和生物地理学分析为此提供了有力证据, 以下将进行简要论述。

板块运动和高原隆升形成的高山、峡谷等地理障碍, 限制了物种基因流, 促进了植物异域分化。Zhao等(2016b)通过姜科距药姜属(*Cautleya*)和象牙参属(*Roscoea*)的演化历史分析, 发现两个属大约起源于44 Ma, 在32 Ma发生分化, 而随着喜马拉雅-青藏高原的第三次隆升(23 Ma)及其相伴的中南半岛快速侧向滑动, 两个属的祖先分布区被“撕裂”成两个不连续的区域, 此后异域分化为完全不同的类群。这两个属的演化历史正好映射了喜马拉雅-青藏高原早期不同隆升阶段的地质过程及其对植物多样性演化的影响。绣线菊属(*Spiraea*)的系统发育和生物地理分析也显示该属起源于13.4 Ma, 在4 Ma发生多样化, 这个过程与青藏高原前两次隆升密切相关(Khan et al, 2016)。基于报春花属(*Primula*)的*Armerina*组(Ren et al, 2015)和葱属(*Allium*)的*Cyathophora*亚属(Li et al, 2016)的研究表明, 两个类群的分化事件大约在4–3 Ma, 推测是最后一次青藏高原隆升和横断山隆起形成的地理隔离障碍促进了属内物种分化。

更多研究显示, 地质和气候过程对植物多样化的影响程度难以准确地单独量化, 通常认为在地质和气候事件的共同作用下, 生态位多样化驱动了区域内植物类群的快速辐射演化(rapid radiation) (Liu et al, 2012, 2014b; Wen et al, 2014; Favre et al, 2015; Hughes & Atchison, 2015)。橐吾属-垂头菊属-蟹甲草属(*Ligularia-Cremanthodium-Parasenecio*)复合体是以青藏高原及毗邻区为分布中心的类群, Liu等(2006)通过分子钟估算发现, 伴随着青藏高原从中新世到上新世的快速隆升, 新的生态位和地理隔离促成了异域物种形成, 导致该类群发生了快速的辐射演化。相似的结果也发现于如下类群中: 毛冠菊属(*Nannoglottis*) (Liu et al, 2002)、风毛菊属(*Saussurea*) (Wang et al, 2009c)、大黄属(*Rheum*) (Sun

et al, 2012)、景天属(*Rhodiola*) (Zhang et al, 2014)和葱属的*Cyathophora*亚属(Li et al, 2016)等。值得一提的是, Favre等(2016)通过龙胆属(*Gentiana*)的进化分析发现, 该属多样化速率随时间推移平稳增加, 在青藏高原地区未发生过快速辐射演化, 在中新世/上新世(约7 Ma)的生态位转换促进了物种多样化。

2 更新世以来物种分布格局的变迁和维持

谱系地理学解析的尺度多在更新世以来至末次冰盛期(Last Glacial Maximum, LGM), 通常基于群体遗传学、地理分布和气候数据的统计分析, 探讨物种分化历史和遗传格局、冰期避难所和冰期后扩散路线、分布格局变迁和群体历史等问题(Avise, 2000; Knowles, 2009; Avise et al, 2016)。通过不同植被类型、生活史和繁育系统的代表性类群的分子谱系地理学研究, 揭示了青藏高原及毗邻区植物类群的分布格局变迁和群体历史的基本式样(Qiu et al, 2011; Liu et al, 2012)。

2.1 地理隔离塑造了物种遗传格局

青藏高原的快速隆升, 极大地改变了该区域的地表格局, 包括主要山系的形成、“空中岛屿”(sky island)的出现、河流袭夺改道等, 这种地形地貌的变化驱动了植物近缘种及种内群体的遗传分化。

2.1.1 地理障碍促进了种内群体间的遗传分化

高原隆升形成的主要山系阻碍了植物群体间的基因流, 促进了物种群体间的分化。如碧罗雪山(湄公河-萨尔温江的分水岭)是喜马拉雅红豆杉(*Taxus wallichiana*) (Gao et al, 2007; Liu et al, 2013)和桃儿七(*Sinopodophyllum hexandrum*) (Li et al, 2011)东西向基因流的重要地理障碍, 导致了山脉东西两侧植物群体的遗传分化。喜马拉雅南坡和横断山区的高山峡谷促进了柏木属(*Cupressus*) (Xu et al, 2010)和川滇高山栎(*Quercus aquifolioides*) (Du et al, 2017)的异域分化。他念他翁山和念青唐古拉山的形成, 也导致了西藏沙棘(*Hippophaë tibetana*)、丝叶眼子菜(*Stuckenia filiformis*)和穗状狐尾藻(*Myriophyllum spicatum*)种内的遗传分化(Wang et al, 2010; Du & Wang, 2016; Wu et al, 2016)。

2.1.2 “空中岛屿”限制了物种的基因流

伴随着青藏高原隆升, 喜马拉雅-横断山区形成了大量的“空中岛屿”(He & Jiang, 2014), 这些“岛屿”上的气候、植被和物种与其周边低海拔地区完

全不同(Heald, 1951)。与此同时,低海拔的生境构成了扩散的隔离障碍,限制了“岛屿”间群体的基因流,分布于其上的高山植物群体通过自然选择和遗传漂变等过程发生遗传分化。Yue等(2009)发现分布于横断山区“空中岛屿”上的丛菴属(*Solms-laubachia*)特有物种大约在0.87 Ma发生分化,尽管这些物种间遗传距离相对较小,但遗传差异显著,推测是“空中岛屿”隔离所致。类似的结果也在风毛菊属(Wang et al, 2009c)和大黄属(Sun et al, 2012)中报道。在物种层面,Luo等(2016a)通过对4种高山冰原带植物的谱系地理学研究,发现物种的遗传格局呈“岛屿”状分异样式,不同“岛屿”上的群体间遗传分化十分明显。由此可见,该地区的“空中岛屿”对种间和种内的基因流都具有重要的限制作用。

2.1.3 河流改道扰动了物种遗传格局

历史上,西南山地的水系格局与目前相比有很大差异,伴随着青藏高原隆升和横断山脉的形成,这些河流发生过袭夺和改道(Clark et al, 2004)。水系的变迁改变了植物的扩散通道,促进了群体间遗传分化。基于干热河谷植物滇榄仁(*Terminalia franchetii*) (Zhang et al, 2011)和皱叶醉鱼草(*Buddleja crispa*) (Yue et al, 2012)的物种演化分析发现,当前物种的遗传格局很好地支持古红河河流系统南北走向的漏斗状结构假说,反映出河流袭夺之后的河流系统对植物群体遗传结构产生的影响。

2.2 冰期旋回对物种群体历史的影响

基于对已报道研究的整合分析,初步确定了青藏高原及邻近地区避难所的可能的位置(Qiu et al, 2011; Liu et al, 2012)。横断山地区是植物冰期的重要避难所之一,很多植物冰期退缩到该地区,随着冰期后气候回暖,又向外扩散,如长花马先蒿(*Pedicularis longiflora*) (Yang et al, 2008)、祁连圆柏(*Juniperus przewalskii*) (Zhang et al, 2005)和青海云杉(*Picea crassifolia*) (Meng et al, 2007)等。

分布在青藏高原台面和喜马拉雅山地的一些耐寒植物,在末次冰盛期时在微避难所中存活下来,冰期后又向外扩散,形成现今的分布格局。如西藏沙棘(Wang et al, 2010)、露蕊乌头(*Aconitum gymnanthum*) (Wang et al, 2009a)、大果圆柏复合群(*Juniperus tibetica* complex) (Opgenorth et al, 2010)、银露梅(*Potentilla glabra*) (Wang et al, 2009b)和西藏报春(*Primula tibetica*) (Ren et al, 2017)等。分

布于喜马拉雅山脉的一些类群,可能在最大冰期(1.2–0.6 Ma)后从横断山区扩散而来,而末次冰盛期对其遗传结构影响不大,如云南铁杉(*Tsuga dumosa*) (Cun & Wang, 2010)、喜马拉雅红豆杉(Liu et al, 2013)和西藏报春(Ren et al, 2017)等。

多数物种的种群扩张历史符合“冰期收缩,间冰期扩张”的式样,但也有一些物种的种群扩张历史与此相反,在冰期扩张,间冰期收缩,如喜马拉雅红豆杉(Liu et al, 2013)、丽江云杉(*Picea likiangensis*) (Li et al, 2013)、华西小石积(*Osteomeles schwerinae*) (Wang et al, 2015)等,最近基于简化基因组数据对西藏报春的研究也支持了该假说(Ren et al, 2017)。此外,一些物种没有发生过大范围分布区变迁,可能随着气候变化,就地沿海拔上下迁移,如云南铁杉(Cun & Wang, 2010)、川滇高山栎(Du et al, 2017)和部分呈“空中岛屿”分布的类群(Luo et al, 2016a)。

3 研究展望

随着DNA测序技术的发展和测序成本的降低,基因组数据被大规模用于系统发育基因组学(phylogenomics) (Delsuc et al, 2005; Pyron, 2015; Barrett et al, 2016)和群体基因组学(population genomics) (Luikart et al, 2003; Ellegren, 2014)等研究中。加之大数据处理方法的开发应用和计算能力的不断提高,使得基于基因组数据的系统发育、生物地理和群体遗传学分析方便易行(Abbott et al, 2016; Avise et al, 2016; Payseur & Rieseberg, 2016)。与此同时,伴随着生物多样性信息学(biodiversity informatics)的快速发展,大量的标本数据库(如GBIF和NSII等)、性状数据库(如TRY)和遗传数据库(如NCBI和iBOL等)在线共享,可以比较便捷地同时获取和分析大量物种的分布和遗传数据。此外,通过气象和环境数据库(如WorldClim和IPCC网站等)可获得物种分布点的气候和环境数据。因此,当前生物多样性演化和维持机制研究,趋向于将上述部分或全部数据耦合分析,综合探讨生物多样性演化与维持机制的相关科学问题。

就青藏高原及毗邻区基于系统发育和谱系地理学开展的生物多样性起源与演化机制研究而言,受限于系统发育关系的分辨率以及分歧时间估算的准确度,此前的多数工作仅基于少数DNA片段构建系统发育关系和推断物种演化历史,分歧时间的

估算也常常基于有限的化石记录和DNA平均进化速率,也缺乏详细的多样化机制分析。现在,叶绿体基因组、转录组、简化基因组(如RAD-seq)乃至全基因组测序已成为常规手段,更为可喜的是有可能通过基因组测序,获得不同世代间准确的DNA序列突变速率(如Xie et al, 2016)。因此,未来的工作需要尽可能实现类群和基因组的全面取样,通过系统发育基因组学构建更可靠的系统发育关系,利用更多的可靠化石点或者准确突变速率进行分歧时间估算和群体历史分析。此外,也应该充分考虑性状数据,在可能的情况下整合古孢粉和化石中的古DNA数据,以实现对青藏高原及毗邻区植物多样性起源、演化和灭绝的综合分析。通过区域内不同门类(动物、植物和微生物)特征类群的综合研究,也将有助于阐明区域多样性起源的时空格局和维持机制(如Merckx et al, 2015)。同时针对更多特征类群,通过宏进化和微进化(microevolution)的有机结合,开展从属级到物种水平的整合研究,提供更为完整的物种演化时间序列(如报春花属, Ren et al, 2015, 2017),将有助于阐明较长时间尺度上不同地质和气候事件对植物多样性不同层次的演化和维持机制的影响。如果能基于多个物种的转录组或基因组数据的比较谱系地理学(comparative phylogeography)和群体基因组学研究,将得出更为准确的物种分歧时间和群体历史过程,有助于揭示物种水平的演化格局。

除此之外,我们进一步展望了青藏高原及毗邻区未来研究中值得关注的5个热点科学问题。

3.1 气候变化对植物遗传多样性的影响

随着空间数据越来越容易获取以及分析方法的发展,物种分布区模拟(species distribution modeling)给谱系地理学研究带来了新视角(Alvarado-Serrano & Knowles, 2014)。基于物种分布区模拟,可以探讨气候变化对植物多样性可能产生的影响。此前,青藏高原及邻近区域的研究主要关注历史气候变化对物种分布格局的影响(如Liu et al, 2013; Sun et al, 2014),也有少量工作关注未来气候变化对物种分布的潜在影响(如Poudel et al, 2014; Wan et al, 2016),但尚未有探讨气候变化对区域物种多样性和系统发育多样性(phylogenetic diversity)(如Pio et al, 2014; Zhang et al, 2017a)和种内遗传多样性(intraspecific genetic diversity)(如Alsos et al, 2012;

Yannic et al, 2014; Inoue & Berg, 2017)的影响。将来的工作需要侧重多物种的整合分析(meta-analysis),以及在分析中融入遗传数据(Fordham et al, 2014; Ikeda et al, 2017),以便更准确地预测气候变化对植物遗传多样性可能产生的影响,为生物多样性的保护提供科学证据。

3.2 杂交带及其群体动态和维持机制

杂交带(hybrid zone)往往是近缘物种交汇的区域,是生物多样性演化研究的天然实验室(Hewitt, 1988),对物种的维持具有重要意义(Harrison, 1990)。目前欧洲和北美杂交带的位置及动态已比较清楚。

在青藏高原及毗邻区,伴随着青藏高原隆升,新形成的生境为杂交种提供了生态位,许多植物类群发生了快速辐射演化,在冰期-间冰期气候波动的驱动下,一些物种发生杂交而后产生新的物种。自然杂交和基因渐渗在橐吾属(*Ligularia*) (Liu et al, 2006; Yu et al, 2014)、杜鹃属(*Rhododendron*) (Ma et al, 2010; Zha et al, 2010)、绿绒蒿属(*Meconopsis*) (Yang et al, 2012)和红景天属(*Rhodiola*) (Zhang et al, 2014)等类群中都有报道。同域分布的丝叶眼子菜(*Stuckenia filiformis*)和莴齿眼子菜(*S. pectinata*) (Du & Wang, 2016),黑杨(*Populus nigra*)和苦杨(*P. laurifolia*) (Jiang et al, 2016)也发生了杂交,而同域分布的紫果云杉(*Picea purpurea*)和丽江云杉中也检测到了频繁的基因渐渗(Du et al, 2011)。此外,一些物种经历了同倍体杂交物种形成,如高山松(*Pinus densata*) (Ma et al, 2006; Gao et al, 2012)、丽江云杉(Sun et al, 2014)、居中虎榛子(*Ostryopsis intermedia*) (Liu et al, 2014a)和江孜沙棘(*Hippophaë gyantsensis*) (Jia et al, 2016)。由此可见杂交和基因渐渗在该地区植物多样性演化和维持中扮演着重要角色。

然而在青藏高原及毗邻区,杂交带的位置、群体的动态和维持机制等问题尚不清楚。此外,该地区典型的山地地貌中,在海拔梯度上是否存在杂交带及其动态机制也亟待探索。与此同时,近年来研究发现,物种形成伴随基因流存在可能是一种普遍式样(Nosil, 2008; Feder et al, 2012; 李忠虎等, 2014),但在上述杂交带的近缘物种中基因流在物种分化初期是否存在、其在时空层面的变化式样,以及在基因组中维持生殖隔离的分子机制(多少基因位点? 哪些位点以及如何决定? 如Poelstra et al,

2014)等仍不清楚。此前的多数研究基于单亲遗传的质体DNA的遗传证据(叶绿体、线粒体),缺乏双亲遗传的核基因证据,主要探讨物种的谱系历史,将来的研究需要基于生态、形态、质体和核基因组等证据,并结合同质园(common garden)以及基因功能验证实验进行杂交带及群体动态与维持机制的综合研究。

3.3 植物多样性格局及其成因

有关青藏高原及毗邻区植物多样性格局及成因,在不同空间尺度上已有一些研究。在区域尺度上,基于志书、标本数据的分析显示青藏高原的东部和南部是物种多样性和系统发育多样性的分布中心(Mao et al, 2013; Yan et al, 2013),也是特有物种的分布中心(López-Pujol et al, 2011; Huang et al, 2012; Zhang et al, 2016);分析发现物种丰富度与气候之间有强烈的关联,但不同生活型的植物关联程度不同(Mao et al, 2013; Yan et al, 2013)。基于群落调查数据,Wang等(2006)发现物种多样性随着海拔升高而降低,水平梯度上从东南向西北逐渐降低。然而,Shimono等(2010)并未发现植物多样性与海拔和维度之间存在紧密的相关性。在局域尺度上,Wang等(2007)对高黎贡山海拔梯度植物多样性格局进行了研究,发现植物多样性水平(科、属、种)随海拔升高呈偏峰分布,在中海拔最高,这种式样得到了独龙江流域(Li et al, 2015)和玉龙雪山(Xu et al, 2016)相关研究的支持。然而基于海拔梯度样方调查的数据则显示,随着海拔的升高,高黎贡山木本植物物种丰富度逐渐下降,而草本则先下降再上升(徐成东等, 2008),而两者在玉龙雪山都随海拔上升而下降(冯建孟等, 2006; Luo et al, 2016b, c)。

上述研究由于数据来源、研究尺度及调查方法和标准等不尽相同,得出的植物多样性格局及环境解释的主导因子差异较大,加之多数研究并未考虑系统发育多样性和功能性状多样性的格局,也未运用更准确的遗传数据(如DNA条形码)构建系统发育树。此外,也未能考虑更多的环境变量,如末次冰盛期以来的气候变化、环境异致性等,这些要素对欧洲、北美植物(Montoya et al, 2007; Svenning & Skov, 2007)以及东亚植物类群(Liu et al, 2017; Wang et al, 2017)分布格局形成有重要影响,然而这些要素如何影响青藏高原及毗邻区的植物多样性格局,尚待深入研究。因此将来有必要以整个青藏高原及

毗邻区为研究对象,在区域物种库构建中考虑地衣、苔藓、维管植物等类群,综合利用志书、标本、群落、遗传、功能性状等数据源,并考虑更多的环境变量,开展不同时空尺度上植物多样性水平梯度和海拔梯度格局及成因的耦合分析。

此外,在物种水平,种内遗传变异的格局及成因也值得关注。地理和环境等要素耦合造就了植物的遗传格局,解析它们对植物遗传格局的影响程度将有助于阐明遗传多样性的形成机制。此前,该地区的研究仅限于利用一代测序和常规分子标记获得遗传变异数据,进而与环境做关联分析。如Wu等(2016)发现穗状狐尾藻(*Myriophyllum spicatum*)的遗传格局在区域尺度上主要受环境要素制约,然而在具有明显的环境梯度的局域尺度上,地理要素更重要(Wu et al, 2015),而地理和环境要素的耦合塑造了云南松(*Pinus yunnanensis*)的遗传变异格局(Wang et al, 2013a)。目前,基因组数据(如全基因组或简化基因组)获取在非模式植物中变得简单可行(Ellegren, 2014),将来的研究,一方面需要考虑更多的环境变量,进一步量化每个环境要素的贡献(Wang et al, 2013b),开展更深入的遗传与环境关联分析(Rellstab et al, 2015),同时挖掘其中可能和生态环境适应相关的基因,揭示物种生态适应和形成的分子机制;另一方面需要从生态学的角度考虑生物要素的影响,同时结合物种的丰富度、适合度等开展综合研究(Pironon et al, 2015),阐明物种遗传多样性的维持机制。

3.4 季风气候演变对植物多样性维持的影响

青藏高原的隆升和亚洲季风气候的演变并非完全同步(Clift et al, 2008; An et al, 2014; Lu & Guo, 2014; Tada et al, 2016),亚洲季风演化更多受全球变冷的影响,并且印度季风先于东亚季风形成(Tada et al, 2016)。这意味着除了高原隆升的地质过程外,季风气候的转变可能是该地区植物演化的另一重要驱动力(Liu et al, 2013)。但此前的研究将物种演化笼统地归因于高原隆升促进了物种分化,缺少对季风气候对物种形成演化影响的讨论和评估。古生物学证据显示,晚上新世以来,伴随着青藏高原快速隆升和亚洲季风气候加强,西南地区冬春季降水显著减少,这导致了雪松属(*Cedrus*) (Su et al, 2013)和红杉属(*Sequoia*) (Zhang et al, 2015b)等植物类群在东亚消失。分子谱系地理学的结果也表明,

更新世(46–16 ka, ka为千年)亚洲季风气候减弱促进了华西小石积群体间的遗传分化(Wang et al, 2015)。而群体遗传学证据显示, 自2.96 Ma以来, 亚洲季风气候促进了红砂(*Reaumuria soongarica*)的生境片段化和物种分化, 同时冬季风促进了物种纬向的基因流(Yin et al, 2015)。

高原隆升和季风演变可能耦合影响植物的演化, 地表格局的变化会导致生境的异质化, 而季风的变化会进一步加剧生境的异质化(Liu et al, 2013)。这些要素综合影响现存物种的演化, 表现为现存物种间显著的生态位分化(Mao & Wang, 2011; Liu et al, 2013; Sun et al, 2014; Zhao et al, 2016a)。将来基于基因组数据和更准确的演化模型(如ABC、 $\delta a \delta i$ 和SFS等模型), 有可能估算出更为准确的物种分歧时间和群体动态历史, 进而结合植物生理生态特征的演化分析(如Pittermann et al, 2012)和更准确的季风演化过程重建(如Cheng et al, 2016), 有望解析季风气候演变对植物多样性维持机制的影响。

3.5 植物群落构建机制

生物群落的构建机制是生态学研究的核心问题。学者们普遍认为群落构建机制是由区域过程和局域过程共同决定的(Taylor & Aarssen, 1990; Zobel, 1997)。其中, 区域过程包括地质历史事件、物种形成、迁移扩散以及灭绝等, 决定了现有区域物种库的数量, 同时限制进入局域群落内的物种数量。局域过程则包括种间相互作用、生境过滤、扩散限制等, 它们最终影响局域群落内物种的组成。目前, 结合系统发育和功能性状维度为探讨群落构建机制如何沿时空格局的变化提供了新的思路(Webb et al, 2002; Kraft & Ackerly, 2010; Cavender-Bares et al, 2016)。

青藏高原及毗邻区区域尺度上群落构建的研究结果表明, 系统发育结构在多数区域呈聚集结构(Yan et al, 2013), 而在海拔梯度上, 系统发育结构在不同海拔间存在显著差异(Li et al, 2014; Li et al, 2015)。全新世以来, 人类活动对生物多样性及其赖以生存的地球环境产生了显著影响(Vitousek et al, 1997), 青藏高原及毗邻区也不例外(Chen et al, 2013)。人类活动的影响可能波及群落的物种、系统发育和功能多样性及群落构建机制, 如青藏高原地区持续的放牧改变了高寒草甸的群落性状结构(Niu et al, 2016), 不同演替阶段的高寒草甸群落的功能

多样性和群落结构相反(Zhang et al, 2015a)。然而, 如前所述(见3.3节), 上述研究存在数据源不同和研究尺度各异等缺陷, 难以耦合分析出全面格局和一般规律, 将来的研究需要基于大尺度(水平和海拔梯度)的森林及高寒草甸群落的地面监测(样地、环境), 空中观测(卫星、无人机等), 结合遗传、性状和环境等多维度数据, 综合研究自然过程和人类活动下的群落构建的时空变化格局。

致谢: 感谢责编委、编辑、审稿人以及吴增源、赵建立和余香琴三位博士提出的修改意见。

参考文献

- Abbott RJ, Barton NH, Good JM (2016) Genomics of hybridization and its evolutionary consequences. *Molecular Ecology*, 25, 2325–2332.
- Alsos IG, Ehrlich D, Thuiller W, Eidesen PB, Tribsch A, Schönswetter P, Lagaye C, Taberlet P, Brochmann C (2012) Genetic consequences of climate change for northern plants. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 279, 2042–2051.
- Alvarado-Serrano DF, Knowles LL (2014) Ecological niche models in phylogeographic studies: applications, advances and precautions. *Molecular Ecology Resources*, 14, 233–248.
- An Z, Sun Y, Chang H, Zhang P, Liu X, Cai Y, Jin Z, Qiang X, Zhou W, Li L (2014) Late Cenozoic climate change in monsoon-arid Asia and global changes. In: *Late Cenozoic Climate Change in Asia*, pp. 491–581. Springer, Berlin.
- Avice JC (2000) *Phylogeography: The History and Formation of Species*. Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts.
- Avice JC, Bowen BW, Ayala FJ (2016) In the light of evolution X: comparative phylogeography. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 113, 7957–7961.
- Barrett CF, Bacon CD, Antonelli A, Cano Á, Hofmann T (2016) An introduction to plant phylogenomics with a focus on palms. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 182, 234–255.
- Bouilhoul P, Jagoutz O, Hanchar JM, Dudas FO (2013) Dating the India-Eurasia collision through arc magmatic records. *Earth and Planetary Science Letters*, 366, 163–175.
- Cavender-Bares J, Ackerly DD, Hobbie SE, Townsend PA (2016) Evolutionary legacy effects on ecosystems: biogeographic origins, plant traits, and implications for management in the era of global change. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 47, 433–462.
- Chen H, Zhu Q, Peng C, Wu N, Wang Y, Fang X, Gao Y, Zhu D, Yang G, Tian J (2013) The impacts of climate change and human activities on biogeochemical cycles on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Global Change Biology*, 19, 2940–2955.
- Cheng H, Edwards RL, Sinha A, Spötl C, Yi L, Chen S, Kelly

- M, Kathayat G, Wang X, Li X, Kong X, Wang Y, Ning Y, Zhang H (2016) The Asian monsoon over the past 640,000 years and ice age terminations. *Nature*, 534, 640–646.
- Clark MK, Schoenbohm LM, Royden LH, Whipple KX, Burchfiel BC, Zhang X, Tang W, Wang E, Chen L (2004) Surface uplift, tectonics, and erosion of eastern Tibet from large-scale drainage patterns. *Tectonics*, 23, TC1006.
- Clift PD, Hodges KV, Heslop D, Hannigan R, Van Long H, Calves G (2008) Correlation of Himalayan exhumation rates and Asian monsoon intensity. *Nature Geoscience*, 1, 875–880.
- Cun YZ, Wang XQ (2010) Plant recolonization in the Himalaya from the southeastern Qinghai-Tibetan Plateau: geographical isolation contributed to high population differentiation. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 56, 972–982.
- Delsuc F, Brinkmann H, Philippe H (2005) Phylogenomics and the reconstruction of the tree of life. *Nature Reviews Genetics*, 6, 361–375.
- Deng T, Ding L (2015) Paleoaltimetry reconstructions of the Tibetan Plateau: progress and contradictions. *National Science Review*, 2, 417–437.
- Du FK, Hou M, Wang W, Mao K, Hampe A (2017) Phylogeography of *Quercus aquifolioides* provides novel insights into the Neogene history of a major global hotspot of plant diversity in south-west China. *Journal of Biogeography*, 44, 294–307.
- Du FK, Peng XL, Liu JQ, Lascoux M, Hu FS, Petit RJ (2011) Direction and extent of organelle DNA introgression between two spruce species in the Qinghai-Tibetan Plateau. *New Phytologist*, 192, 1024–1033.
- Du ZY, Wang QF (2016) Allopatric divergence of *Stuckenia filiformis* (Potamogetonaceae) on the Qinghai-Tibet Plateau and its comparative phylogeography with *S. pectinata* in China. *Scientific Reports*, 6, 20883.
- Ellegren H (2014) Genome sequencing and population genomics in non-model organisms. *Trends in Ecology & Evolution*, 29, 51–63.
- Favre A, Michalak I, Chen CH, Wang JC, Pringle JS, Matuszak S, Sun H, Yuan YM, Struwe L, Muellner-Riehl AN (2016) Out-of-Tibet: the spatio-temporal evolution of the temporal evolution of *Gentiana* (Gentianaceae). *Journal of Biogeography*, 143, 1967–1978.
- Favre A, Packert M, Pauls SU, Jahnig SC, Uhl D, Michalak I, Muellner-Riehl AN (2015) The role of the uplift of the Qinghai-Tibetan Plateau for the evolution of Tibetan biotas. *Biological Reviews*, 90, 236–253.
- Feder JL, Egan SP, Nosil P (2012) The genomics of speciation-with-gene-flow. *Trends in Genetics*, 28, 342–350.
- Feng JM, Wang XP, Xu CD, Yang YH, Fang JY (2006) Altitudinal patterns of plant species diversity and community structure on Yulong Mountains, Yunnan. *Journal of Mountain Science*, 24, 110–116. (in Chinese with English abstract) [冯建孟, 王襄平, 徐成东, 杨元合, 方精云 (2006) 玉龙雪山植物物种多样性和群落结构海拔梯度的分布格局. *山地学报*, 24, 110–116.]
- Fordham DA, Brook BW, Moritz C, Nogués-Bravo D (2014) Better forecasts of range dynamics using genetic data. *Trends in Ecology & Evolution*, 29, 436–443.
- Gao J, Wang B, Mao JF, Ingvarsson P, Zeng QY, Wang XR (2012) Demography and speciation history of the homoploid hybrid pine *Pinus densata* on the Tibetan Plateau. *Molecular Ecology*, 21, 4811–4827.
- Gao LM, Möller M, Zhang XM, Hollingsworth ML, Liu J, Mill RR, Gibby M, Li DZ (2007) High variation and strong phylogeographic pattern among cpDNA haplotypes in *Taxus wallichiana* (Taxaceae) in China and North Vietnam. *Molecular Ecology*, 16, 4684–4698.
- Godfray HCJ, Lawton JH (2001) Scale and species numbers. *Trends in Ecology & Evolution*, 16, 400–404.
- Harrison RG (1990) Hybrid zones: windows on evolutionary process. *Oxford Surveys in Evolutionary Biology*, 7, 69–128.
- Harrison TM, Copeland P, Kidd WSF, Yin A (1992) Raising Tibet. *Science*, 255, 1663–1670.
- He K, Jiang X (2014) Sky islands of southwest China. I. An overview of phylogeographic patterns. *Chinese Science Bulletin*, 59, 585–597.
- Heald WF (1951) Sky islands of Arizona. *Natural History*, 60, 56–63.
- Hewitt GM (1988) Hybrid zones: natural laboratories for evolutionary studies. *Trends in Ecology & Evolution*, 3, 158–167.
- Hewitt GM (2000) The genetic legacy of the Quaternary ice ages. *Nature*, 405, 907–913.
- Huang JH, Chen B, Liu CR, Lai JS, Zhang JL, Ma KP (2012) Identifying hotspots of endemic woody seed plant diversity in China. *Diversity and Distributions*, 18, 673–688.
- Huang JH, Huang JH, Liu CR, Zhang JL, Lu XH, Ma KP (2016) Diversity hotspots and conservation gaps for the Chinese endemic seed flora. *Biological Conservation*, 198, 104–112.
- Hughes CE, Atchison GW (2015) The ubiquity of alpine plant radiations: from the Andes to the Hengduan Mountains. *New Phytologist*, 207, 275–282.
- Ikeda DH, Max TL, Allan GJ, Lau MK, Shuster SM, Whitham TG (2017) Genetically informed ecological niche models improve climate change predictions. *Global Change Biology*, 23, 164–176.
- Inoue K, Berg DJ (2017) Predicting the effects of climate change on population connectivity and genetic diversity of an imperiled freshwater mussel, *Cumberlandia monodonta* (Bivalvia: Margaritiferidae), in riverine systems. *Global Change Biology*, 23, 94–107.
- Jagoutz O, Royden L, Holt AF, Becker TW (2015) Anomalous fast convergence of India and Eurasia caused by double subduction. *Nature Geoscience*, 8, 475–478.
- Jia DR, Wang YJ, Liu TL, Wu GL, Kou YX, Cheng K, Liu JQ (2016) Diploid hybrid origin of *Hippophaë gyantsensis* (Elaeagnaceae) in the western Qinghai-Tibet Plateau. *Biological Journal of the Linnean Society*, 117, 658–671.
- Jiang D, Feng J, Dong M, Wu G, Mao K, Liu J (2016) Genetic origin and composition of a natural hybrid poplar *Populus × jrtyschensis* from two distantly related species. *BMC Plant*

- Biology, 16, 1–12.
- Khan G, Zhang FQ, Gao QB, Fu PC, Xing R, Wang JL, Liu HR, Chen SL (2016) Phylogenetic analyses of *Spiraea* (Rosaceae) distributed in the Qinghai-Tibetan Plateau and adjacent regions: insights from molecular data. *Plant Systematics and Evolution*, 302, 11–21.
- Knowles LL (2009) Statistical phylogeography. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 40, 593–612.
- Kraft NJB, Ackerly DD (2010) Functional trait and phylogenetic tests of community assembly across spatial scales in an Amazonian forest. *Ecological Monographs*, 80, 401–422.
- Li L, Abbott RJ, Liu BB, Sun YS, Li LL, Zou JB, Wang X, Miehle G, Liu JQ (2013) Pliocene intraspecific divergence and Plio-Pleistocene range expansions within *Picea likiangensis* (Lijiang spruce), a dominant forest tree of the Qinghai-Tibet Plateau. *Molecular Ecology*, 22, 5237–5255.
- Li MJ, Tan JB, Xie DF, Huang DQ, Gao YD, He XJ (2016) Revisiting the evolutionary events in *Allium* subgenus *Cyathophora* (Amaryllidaceae): insights into the effect of the Hengduan Mountains Region (HMR) uplift and Quaternary climatic fluctuations to the environmental changes in the Qinghai-Tibet Plateau. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 94, 802–813.
- Li R, Kraft NJB, Yu H, Li H (2015) Seed plant phylogenetic diversity and species richness in conservation planning within a global biodiversity hotspot in eastern Asia. *Conservation Biology*, 29, 1552–1562.
- Li XH, Zhu XX, Niu Y, Sun H (2014) Phylogenetic clustering and overdispersion for alpine plants along elevational gradient in the Hengduan Mountains Region, southwest China. *Journal of Systematics and Evolution*, 52, 280–288.
- Li Y, Zhai SN, Qiu YX, Guo YP, Ge XJ, Comes HP (2011) Glacial survival east and west of the “Mekong-Salween Divide” in the Himalaya-Hengduan Mountains region as revealed by AFLPs and cpDNA sequence variation in *Sinopodophyllum hexandrum* (Berberidaceae). *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 59, 412–424.
- Li ZH, Liu ZL, Wang ML, Qian ZQ, Zhao P, Zhu J, Yang YX, Yan XH, Li YJ, Zhao GF (2014) A review on studies of speciation in the presence of gene flow: evolution of reproductive isolation. *Biodiversity Science*, 22, 88–96. (in Chinese with English abstract) [李忠虎, 刘占林, 王玛丽, 钱增强, 赵鹏, 祝娟, 杨一欣, 阎晓昊, 李银军, 赵桂仿 (2014) 基因流存在条件下的物种形成研究述评: 生殖隔离机制进化. *生物多样性*, 22, 88–96.]
- Lippert PC, van Hinsbergen DJJ, Dupont-Nivet G (2014) Early Cretaceous to present latitude of the central proto-Tibetan Plateau: a paleomagnetic synthesis with implications for Cenozoic tectonics, paleogeography, and climate of Asia. In: *Toward an Improved Understanding of Uplift Mechanisms and the Elevation History of the Tibetan Plateau: Geological Society of America Special Paper 507* (eds Nie J, Horton BK, Hoke GD), pp. 1–21.
- Liu BB, Abbott RJ, Lu ZQ, Tian B, Liu JQ (2014a) Diploid hybrid origin of *Ostryopsis intermedia* (Betulaceae) in the Qinghai-Tibet Plateau triggered by Quaternary climate change. *Molecular Ecology*, 23, 3013–3027.
- Liu J, Möller M, Provan J, Gao LM, Poudel RC, Li DZ (2013) Geological and ecological factors drive cryptic speciation of yews in a biodiversity hotspot. *New Phytologist*, 199, 1093–1108.
- Liu JQ, Duan YW, Hao G, Ge XJ, Sun H (2014b) Evolutionary history and underlying adaptation of alpine plants on the Qinghai-Tibet Plateau. *Journal of Systematics and Evolution*, 52, 241–249.
- Liu JQ, Gao TG, Chen ZD, Lu AM (2002) Molecular phylogeny and biogeography of the Qinghai-Tibet Plateau endemic *Nannoglottis* (Asteraceae). *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 23, 307–325.
- Liu JQ, Sun YS, Ge XJ, Gao LM, Qiu YX (2012) Phylogeographic studies of plants in China: advances in the past and directions in the future. *Journal of Systematics and Evolution*, 50, 267–275.
- Liu JQ, Wang YJ, Wang AL, Hideaki O, Abbott RJ (2006) Radiation and diversification within the *Ligularia-Crematodinium-Parasenecio* complex (Asteraceae) triggered by uplift of the Qinghai-Tibetan Plateau. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 38, 31–49.
- Liu YP, Shen ZH, Wang QG, Su XY, Zhang WJ, Shrestha N, Xu XT, Wang ZH (2017) Determinants of richness patterns differ between rare and common species: implications for Gesneriaceae conservation in China. *Diversity and Distributions*, 23, 235–246.
- López-Pujol J, Zhang FM, Sun HQ, Ying TS, Ge S (2011) Centres of plant endemism in China: places for survival or for speciation? *Journal of Biogeography*, 38, 1267–1280.
- Lu HY, Guo ZT (2014) Evolution of the monsoon and dry climate in East Asia during late Cenozoic: a review. *Science China: Earth Sciences*, 57, 70–79.
- Luikart G, England PR, Tallmon D, Jordan S, Taberlet P (2003) The power and promise of population genomics: from genotyping to genome typing. *Nature Reviews Genetics*, 4, 981–994.
- Luo D, Yue JP, Sun WG, Xu B, Li ZM, Comes HP, Sun H (2016a) Evolutionary history of the subnival flora of the Himalaya-Hengduan Mountains: first insights from comparative phylogeography of four perennial herbs. *Journal of Biogeography*, 43, 31–43.
- Luo YH, Liu J, Tan SL, Cadotte MW, Wang YH, Xu K, Li DZ, Gao LM (2016b) Trait-based community assembly along an elevational gradient in subalpine forests: quantifying the roles of environmental factors in inter- and intraspecific variability. *PLoS ONE*, 11, e0155749.
- Luo YH, Liu J, Tan SL, Cadotte MW, Xu K, Gao LM, Li DZ (2016c) Trait variation and functional diversity maintenance of understory herbaceous species coexisting along an elevational gradient in Yulong Mountain, Southwest China. *Plant Diversity*, 38, 303–311.
- Ma XF, Szmidszt AE, Wang XR (2006) Genetic structure and evolutionary history of a diploid hybrid pine *Pinus densata* inferred from the nucleotide variation at seven gene loci. *Molecular Biology and Evolution*, 23, 807–816.
- Ma YP, Zhang CQ, Zhang JL, Yang JB (2010) Natural hybridization between *Rhododendron delavayi* and *R. cyan-*

- carpum* (Ericaceae), from morphological, molecular and reproductive evidence. *Journal of Integrative Plant Biology*, 52, 844–851.
- Mao JF, Wang XR (2011) Distinct niche divergence characterizes the homoploid hybrid speciation of *Pinus densata* on the Tibetan Plateau. *The American Naturalist*, 177, 424–439.
- Mao LF, Chen SB, Zhang JL, Hou YH, Zhou GS, Zhang XS (2013) Vascular plant diversity on the roof of the world: spatial patterns and environmental determinants. *Journal of Systematics and Evolution*, 51, 371–381.
- Meng LH, Yang R, Abbott RJ, Miehle G, Hu TH, Liu JQ (2007) Mitochondrial and chloroplast phylogeography of *Picea crassifolia* Kom. (Pinaceae) in the Qinghai-Tibetan Plateau and adjacent highlands. *Molecular Ecology*, 16, 4128–4137.
- Merckx VSFT, Hendriks KP, Beentjes KK, Mennes CB, Becking LE, Peijnenburg KTCA, Afendy A, Arumugam N, de Boer H, Biun A, Buang MM, Chen P-P, Chung AYC, Dow R, Feijen FAA, Feijen H, van Soest CF, Geml J, Geurts R, Gravendeel B, Hovenkamp P, Imbun P, Ipor I, Janssens SB, Jocque M, Kappes H, Khoo E, Koomen P, Lens F, Majapun RJ, Morgado LN, Neupane S, Nieser N, Pereira JT, Rahman H, Sabran S, Sawang A, Schwallier RM, Shim P-S, Smit H, Sol N, Spait M, Stech M, Stokvis F, Sugau JB, Suleiman M, Sumail S, Thomas DC, van Tol J, Tuh FYY, Yahya BE, Nais J, Repin R, Lakim M, Schilthuizen M (2015) Evolution of endemism on a young tropical mountain. *Nature*, 524, 347–350.
- Mittermeier RA, Turner WR, Larsen FW, Brooks TM, Gascon C (2011) Global biodiversity conservation: the critical role of hotspots. In: *Biodiversity Hotspots: Distribution and Protection of Conservation Priority Areas* (eds Zachos FE, Habel JC), pp. 3–22. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Molnar P (1986) The geologic history and structure of the Himalaya. *American Scientist*, 74, 144–154.
- Montoya D, Rodríguez MA, Zavala MA, Hawkins BA (2007) Contemporary richness of holarctic trees and the historical pattern of glacial retreat. *Ecography*, 30, 173–182.
- Niu K, He JS, Lechowicz MJ (2016) Grazing-induced shifts in community functional composition and soil nutrient availability in Tibetan alpine meadows. *Journal of Applied Ecology*, 53, 1554–1564.
- Nosil P (2008) Speciation with gene flow could be common. *Molecular Ecology*, 17, 2103–2106.
- Opgenoorth L, Vendramin GG, Mao KS, Miehle G, Miehle S, Liepelt S, Liu JQ, Ziegenhagen B (2010) Tree endurance on the Tibetan Plateau marks the world's highest known tree line of the Last Glacial Maximum. *New Phytologist*, 185, 332–342.
- Owen LA, Caffee MW, Finkel RC, Seong YB (2008) Quaternary glaciation of the Himalayan-Tibetan orogen. *Journal of Quaternary Science*, 23, 513–531.
- Payseur BA, Rieseberg LH (2016) A genomic perspective on hybridization and speciation. *Molecular Ecology*, 25, 2337–2360.
- Pio DV, Engler R, Linder HP, Monadjem A, Cotterill FPD, Taylor PJ, Schoeman MC, Price BW, Villet MH, Eick G, Salamin N, Guisan A (2014) Climate change effects on animal and plant phylogenetic diversity in southern Africa. *Global Change Biology*, 20, 1538–1549.
- Pironon S, Vilellas J, Morris WF, Doak DF, García MB (2015) Do geographic, climatic or historical ranges differentiate the performance of central versus peripheral populations? *Global Ecology and Biogeography*, 24, 611–620.
- Pittermann J, Stuart SA, Dawson TE, Moreau A (2012) Cenozoic climate change shaped the evolutionary ecophysiology of the Cupressaceae conifers. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 109, 9647–9652.
- Poelstra JW, Vijay N, Bossu CM, Lantz H, Ryll B, Müller I, Baglione V, Unneberg P, Wikelski M, Grabherr MG, Wolf JBW (2014) The genomic landscape underlying phenotypic integrity in the face of gene flow in crows. *Science*, 344, 1410–1414.
- Poudel RC, Moller M, Liu J, Gao LM, Baral SR, Li DZ (2014) Low genetic diversity and high inbreeding of the endangered yews in Central Himalaya: implications for conservation of their highly fragmented populations. *Diversity and Distributions*, 20, 1270–1284.
- Pyron RA (2015) Post-molecular systematics and the future of phylogenetics. *Trends in Ecology & Evolution*, 30, 384–389.
- Qiu YX, Fu CX, Comes HP (2011) Plant molecular phylogeography in China and adjacent regions: tracing the genetic imprints of Quaternary climate and environmental change in the world's most diverse temperate flora. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 59, 225–244.
- Rellstab C, Gugerli F, Eckert AJ, Hancock AM, Holderegger R (2015) A practical guide to environmental association analysis in landscape genomics. *Molecular Ecology*, 24, 4348–4370.
- Ren G, Conti E, Salamin N (2015) Phylogeny and biogeography of *Primula* sect. *Armerina*: implications for plant evolution under climate change and the uplift of the Qinghai-Tibet Plateau. *BMC Evolutionary Biology*, 15, 161.
- Ren G, Mateo RG, Liu J, Suchan T, Alvarez N, Guisan A, Conti E, Salamin N (2017) Genetic consequences of Quaternary climatic oscillations in the Himalayas: *Primula tibetica* as a case study based on restriction site-associated DNA sequencing. *New Phytologist*, 213, 1500–1512.
- Renner SS (2016) Available data point to a 4-km-high Tibetan Plateau by 40 Ma, but 100 molecular-clock papers have linked supposed recent uplift to young node ages. *Journal of Biogeography*, 43, 1479–1487.
- Royden LH, Burchfiel BC, van der Hilst RD (2008) The geological evolution of the Tibetan Plateau. *Science*, 321, 1054–1058.
- Shi YF (2002) Characteristics of late Quaternary monsoonal glaciation on the Tibetan Plateau and in East Asia. *Quaternary International*, 97/98, 79–91.
- Shi YF, Li JJ, Li BY (1998) Uplift and environmental changes of Qinghai-Xizang (Tibetan) in the late Cenozoic. Guangdong Science and Technology Press, Guangzhou. (in Chinese) [施雅风, 李吉均, 李炳元 (1998) 青藏高原晚新生代隆升与环境变化. 广东科技出版社, 广州.]

- Shimono A, Ueno S, Gu S, Zhao X, Tsumura Y, Tang Y (2010) Range shifts of *Potentilla fruticosa* on the Qinghai-Tibetan Plateau during glacial and interglacial periods revealed by chloroplast DNA sequence variation. *Heredity*, 104, 534–542.
- Su T, Liu YS, Jacques FMB, Huang YJ, Xing YW, Zhou ZK (2013) The intensification of the East Asian winter monsoon contributed to the disappearance of *Cedrus* (Pinaceae) in southwestern China. *Quaternary Research*, 80, 316–325.
- Sun H (2002a) Evolution of Arctic-Tertiary flora in Himalayan-Hengduan Mountains. *Acta Botanica Yunnanica*, 24, 671–688. (in Chinese with English abstract) [孙航 (2002a) 北极-第三纪成分在喜马拉雅-横断山的发展及演化. 云南植物研究, 24, 671–688.]
- Sun H (2002b) Tethys retreat and Himalayas-Hengduan Mountains uplift and their significance on the origin and development of the Sino-Himalayan elements and alpine flora. *Acta Botanica Yunnanica*, 24, 273–288. (in Chinese with English abstract) [孙航 (2002b) 古地中海退却与喜马拉雅-横断山的隆起在中国喜马拉雅成分及高山植物区系的形成与发展上的意义. 云南植物研究, 24, 273–288.]
- Sun XJ, Wang PX (2005) How old is the Asian monsoon system? Palaeobotanical records from China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 222, 181–222.
- Sun YS, Abbott RJ, Li LL, Li L, Zou JB, Liu JQ (2014) Evolutionary history of purple cone spruce (*Picea purpurea*) in the Qinghai-Tibet Plateau: homoploid hybrid origin and Pleistocene expansion. *Molecular Ecology*, 23, 343–359.
- Sun YS, Wang AL, Wan DS, Wang Q, Liu JQ (2012) Rapid radiation of *Rheum* (Polygonaceae) and parallel evolution of morphological traits. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 63, 150–158.
- Svenning J-C, Skov F (2007) Could the tree diversity pattern in Europe be generated by postglacial dispersal limitation? *Ecology Letters*, 10, 453–460.
- Tada R, Zheng H, Clift PD (2016) Evolution and variability of the Asian monsoon and its potential linkage with uplift of the Himalaya and Tibetan Plateau. *Progress in Earth and Planetary Science*, 3, 4.
- Taylor DR, Aarssen LW (1990) Complex competitive relationships among genotypes of three perennial grasses: implications for species coexistence. *The American Naturalist*, 136, 305–327.
- Vitousek PM, Mooney HA, Lubchenco J, Melillo JM (1997) Human domination of Earth's ecosystems. *Science*, 277, 494–499.
- Wan DS, Feng JJ, Jiang DC, Mao KS, Duan YW, Miede G, Opgenoorth L (2016) The Quaternary evolutionary history, potential distribution dynamics, and conservation implications for a Qinghai-Tibet Plateau endemic herbaceous perennial, *Anisodus tanguticus* (Solanaceae). *Ecology and Evolution*, 6, 1977–1995.
- Wang BS, Mao JF, Zhao W, Wang XR (2013a) Impact of geography and climate on the genetic differentiation of the subtropical pine *Pinus yunnanensis*. *PLoS ONE*, 8, e67345.
- Wang H, Qiong L, Sun K, Lu F, Wang YG, Song ZP, Wu QH, Chen JK, Zhang WJ (2010) Phylogeographic structure of *Hippophae tibetana* (Elaeagnaceae) highlights the highest microrefugia and the rapid uplift of the Qinghai-Tibetan Plateau. *Molecular Ecology*, 19, 2964–2979.
- Wang JJ, Glor RE, Losos JB (2013b) Quantifying the roles of ecology and geography in spatial genetic divergence. *Ecology Letters*, 16, 175–182.
- Wang LY, Abbott RJ, Zheng W, Chen P, Wang YJ, Liu JQ (2009a) History and evolution of alpine plants endemic to the Qinghai-Tibetan Plateau: *Aconitum gymnanthum* (Ranunculaceae). *Molecular Ecology*, 18, 709–721.
- Wang LY, Ikeda H, Liu TL, Wang YJ, Liu JQ (2009b) Repeated range expansion and glacial endurance of *Potentilla glabra* (Rosaceae) in the Qinghai-Tibetan Plateau. *Journal of Integrative Plant Biology*, 51, 698–706.
- Wang QG, Su XY, Shrestha N, Liu YP, Wang SY, Xu XT, Wang ZH (2017) Historical factors shaped species diversity and composition of *Salix* in eastern Asia. *Scientific Reports*, 7, 42038.
- Wang W, Wang Q, Li S, Wang G (2006) Distribution and species diversity of plant communities along transect on the northeastern Tibetan Plateau. *Biodiversity and Conservation*, 15, 1811–1828.
- Wang YJ, Susanna A, Von Raab-Straube E, Milne R, Liu JQ (2009c) Island-like radiation of *Saussurea* (Asteraceae: Cardueae) triggered by uplifts of the Qinghai-Tibetan Plateau. *Biological Journal of the Linnean Society*, 97, 893–903.
- Wang ZH, Tang ZY, Fang JY (2007) Altitudinal patterns of seed plant richness in the Gaoligong Mountains, south-east Tibet, China. *Diversity and Distributions*, 13, 845–854.
- Wang ZW, Chen ST, Nie ZL, Zhang JW, Zhou Z, Deng T, Sun H (2015) Climatic factors drive population divergence and demography: insights based on the phylogeography of a riparian plant species endemic to the Hengduan Mountains and adjacent regions. *PLoS ONE*, 10, e0145014.
- Webb CO, Ackerly DD, McPeck MA, Donoghue MJ (2002) Phylogenies and community ecology. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 33, 475–505.
- Wen J, Zhang J, Nie ZL, Zhong Y, Sun H (2014) Evolutionary diversifications of plants on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Frontiers in Genetics*, 5, 4.
- Wu Z, Yu D, Li X, Xu X (2016) Influence of geography and environment on patterns of genetic differentiation in a widespread submerged macrophyte, Eurasian watermilfoil (*Myriophyllum spicatum* L., Haloragaceae). *Ecology and Evolution*, 6, 460–468.
- Wu Z, Yu D, Wang Z, Li X, Xu X (2015) Great influence of geographic isolation on the genetic differentiation of *Myriophyllum spicatum* under a steep environmental gradient. *Scientific Reports*, 5, 15618.
- Xie ZQ, Wang L, Wang LR, Wang ZQ, Lu ZH, Tian DC, Yang SH, Hurst LD (2016) Mutation rate analysis via parent-progeny sequencing of the perennial peach. I. A low rate in woody perennials and a higher mutagenicity in hybrids. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*,

- 283, 20161016.
- Xu CD, Feng JM, Wang XP, Yang X (2008) Vertical distribution patterns of plant species diversity in northern Mt. Gaoligong, Yunnan Province. *Chinese Journal of Ecology*, 27, 323–327. [徐成东, 冯建孟, 王襄平, 杨雪 (2008) 云南高黎贡山北段植物物种多样性的垂直分布格局. *生态学杂志*, 27, 323–327.]
- Xu TT, Abbott RJ, Milne RI, Mao K, Du FK, Wu GL, Ciren ZX, Miehle G, Liu JQ (2010) Phylogeography and allopatric divergence of cypress species (*Cupressus* L.) in the Qinghai-Tibetan Plateau and adjacent regions. *BMC Evolutionary Biology*, 10, 194.
- Xu X, Zhang H, Tian W, Zeng X, Huang H (2016) Altitudinal patterns of plant diversity on the Jade Dragon Snow Mountain, southwestern China. *SpringerPlus*, 5, 1566.
- Yan Y, Yang X, Tang Z (2013) Patterns of species diversity and phylogenetic structure of vascular plants on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Ecology and Evolution*, 3, 4584–4595.
- Yang FS, Li YF, Ding X, Wang XQ (2008) Extensive population expansion of *Pedicularis longiflora* (Orobanchaceae) on the Qinghai-Tibetan Plateau and its correlation with the Quaternary climate change. *Molecular Ecology*, 17, 5135–5145.
- Yang FS, Qin AL, Li YF, Wang XQ (2012) Great genetic differentiation among populations of *Meconopsis integrifolia* and its implication for plant speciation in the Qinghai-Tibetan Plateau. *PLoS ONE*, 7, e37196.
- Yannic G, Pellissier L, Ortego J, Lecomte N, Couturier S, Cuyler C, Dussault C, Hundertmark KJ, Irvine RJ, Jenkins DA (2014) Genetic diversity in caribou linked to past and future climate change. *Nature Climate Change*, 4, 132–137.
- Yi CL, Cui ZJ, Xiong HG (2005) Numerical periods of Quaternary glaciations in China. *Quaternary Sciences*, 25, 609–619. [易朝路, 崔之久, 熊黑钢 (2005) 中国第四纪冰期数值年表初步划分. *第四纪研究*, 25, 609–619.]
- Yin H, Yan X, Shi Y, Qian C, Li Z, Zhang W, Wang L, Li Y, Li X, Chen G, Li X, Nevo E, Ma XF (2015) The role of East Asian monsoon system in shaping population divergence and dynamics of a constructive desert shrub *Reaumuria soongarica*. *Scientific Reports*, 5, 15823.
- Yu J, Kuroda C, Gong X (2014) Natural hybridization and introgression between *Ligularia cymbulifera* and *L. tongolensis* (Asteraceae, Senecioneae) in four different locations. *PLoS ONE*, 9, e115167.
- Yue JP, Sun H, Baum DA, Li JH, Al-Shehbaz IA, Ree R (2009) Molecular phylogeny of *Solms-laubachia* (Brassicaceae) s.l., based on multiple nuclear and plastid DNA sequences, and its biogeographic implications. *Journal of Systematics and Evolution*, 47, 402–415.
- Yue LL, Chen G, Sun WB, Sun H (2012) Phylogeography of *Buddleja crispa* (Buddlejaceae) and its correlation with drainage system evolution in southwestern China. *American Journal of Botany*, 99, 1726–1735.
- Zha HG, Milne RI, Sun H (2010) Asymmetric hybridization in *Rhododendron agastum*: a hybrid taxon comprising mainly *F₁*s in Yunnan, China. *Annals of Botany*, 105, 89–100.
- Zhang DC, Ye JX, Sun H (2016) Quantitative approaches to identify floristic units and centres of species endemism in the Qinghai-Tibetan Plateau, south-western China. *Journal of Biogeography*, 43, 2465–2476.
- Zhang H, Qi W, John R, Wang W, Song F, Zhou S (2015a) Using functional trait diversity to evaluate the contribution of multiple ecological processes to community assembly during succession. *Ecography*, 38, 1176–1186.
- Zhang J, Nielsen SE, Chen Y, Georges D, Qin Y, Wang SS, Svenning J-C, Thuiller W (2017a) Extinction risk of North American seed plants elevated by climate and land-use change. *Journal of Applied Ecology*, 54, 303–312.
- Zhang JQ, Meng SY, Allen GA, Wen J, Rao GY (2014) Rapid radiation and dispersal out of the Qinghai-Tibetan Plateau of an alpine plant lineage *Rhodiola* (Crassulaceae). *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 77, 147–158.
- Zhang JW, D'Rozario A, Adams JM, Li Y, Liang XQ, Jacques FM, Su T, Zhou ZK (2015b) *Sequoia maguanensis*, a new Miocene relative of the coast redwood, *Sequoia sempervirens*, from China: implications for paleogeography and paleoclimate. *American Journal of Botany*, 102, 103–118.
- Zhang MG, Slik JWF, Ma KP (2017b) Priority areas for the conservation of perennial plants in China. *Biological Conservation*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biocon.2016.06.007>.
- Zhang Q, Chiang TY, George M, Liu JQ, Abbott RJ (2005) Phylogeography of the Qinghai-Tibetan Plateau endemic *Juniperus przewalskii* (Cupressaceae) inferred from chloroplast DNA sequence variation. *Molecular Ecology*, 14, 3513–3524.
- Zhang TC, Comes HP, Sun H (2011) Chloroplast phylogeography of *Terminalia franchetii* (Combretaceae) from the eastern Sino-Himalayan region and its correlation with historical river capture events. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 60, 1–12.
- Zhao JL, Gugger PF, Xia YM, Li QJ (2016a) Ecological divergence of two closely related *Roscoea* species associated with late Quaternary climate change. *Journal of Biogeography*, 43, 1990–2001.
- Zhao JL, Xia YM, Cannon CH, Kress WJ, Li QJ (2016b) Evolutionary diversification of alpine ginger reflects the early uplift of the Himalayan-Tibetan Plateau and rapid extrusion of Indochina. *Gondwana Research*, 32, 232–241.
- Zheng BX, Xu QQ, Shen YP (2002) The relationship between climate change and Quaternary glacial cycles on the Qinghai-Tibetan Plateau: review and speculation. *Quaternary International*, 97/98, 93–101.
- Zheng D, Yao TD (2004) Uplifting of Tibetan Plateau with Its Environmental Effects. Science Press, Beijing. (in Chinese) [郑度, 姚檀栋 (2004) 青藏高原隆升与环境效应. 科学出版社, 北京.]
- Zobel M (1997) The relative of species pools in determining plant species richness: an alternative explanation of species coexistence? *Trends in Ecology & Evolution*, 12, 266–269.

(责任编辑: 王志恒 责任编辑: 时意专)

• 综述 •

系统发育多样性在植物区系研究与生物多样性保护中的应用

慈秀芹 李 捷*

(中国科学院西双版纳热带植物园综合保护中心植物系统发育与保护生物学实验室, 昆明 650223)

摘要: 利用系统发育关系从进化角度理解物种的组成、分布格局对可为有效保护和合理利用生物多样性提供科学依据。以支长为基础的系统发育多样性是最基本的测度指数, 由此衍生出的几十个参数加大了选择难度。根据具体研究的问题选择合适的指标, 是目前最为可行的方案, 已经在植物系统发育区系研究和生物多样性保护中取得了一系列研究成果。DNA序列迅速积累特别是DNA条形码项目在全球的大力发展, 提供了海量的标准化数据, 为构建解决能力较好的宏系统发育树提供了可能。但是围绕系统发育多样性开展的相关研究还需要更多的物种分布、环境因子、气候等基础数据, 同时对其在生态系统功能上的表征作用需要进一步验证。

关键词: 进化历史; DNA条形码; 宏系统发育树; 多样性; 区系; 保护

Phylogenetic diversity and its application in floristics and biodiversity conservation

Xiuqin Ci, Jie Li*

Plant Phylogenetics and Conservation Group, Center for Integrative Conservation, Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650223

Abstract: The application of phylogenetic relationships helps us to understand species composition and species distribution patterns, which provide a scientific basis for the effective protection and sustainable use of biological diversity. Phylogenetic diversity (PD_{faith}), based on branch lengths of the phylogenetic tree, is the most basic measurement index. Many indices are derived from PD_{faith} , which makes difficult to choose the most appropriate parameters. The most effective and feasible way is to select suitable indices based on specific research questions, and some examples have been presented in plant phylofloristics and biodiversity conservation. DNA sequences have rapidly accumulated particularly through the global DNA barcoding project, which provides a standardized mass data, and can be used to reconstruct mega-phylogeny. But studies conducted around the phylogenetic diversity require more information, specifically data on species distribution, environmental factors, and climatic data. In addition, some fundamental questions need to be verified, such as the relationship between phylogenetic diversity and ecosystem functions.

Key words: evolutionary history; DNA barcoding; megaphylogeny; biodiversity; flora; conservation

物种之间的进化关系通过分子系统发育学的研究被越来越清晰地揭示出来, 如被子植物的APG (Angiosperm Phylogeny Group)系统(APG IV, 2016), 使得人们能够从进化的角度理解物种在不同尺度上的组成、起源及演化过程, 为更好地理解生物多

样性分布格局、有效保护与合理利用生物多样性提供科学依据。从某种意义上讲, 进化是一种不可逆转、无法预测的过程, 只有最大限度地保护物种进化上的多样性, 才能为生物多样性的演化保留潜能, 为将来合理开发与利用提供更多的种质资源。

收稿日期: 2016-07-12; 接受日期: 2016-10-16

基金项目: 国家自然科学基金(31500454)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: jieli@xtbg.ac.cn

无论是对生物多样性现状的评价还是对其未来发展变化的预测,都需要基于对生物进化历史的了解,系统发育多样性为我们从进化的角度研究植物区系的发生、演化,更全面地评估生物多样性提供了一个途径。

1 系统发育多样性的概念及测度方法

传统上以物种多样性如物种丰富度等指数来评估生物多样性,并建立了一套方便有效的评估方法。在过去相当长的时期里,这些指数对人们了解和认识植物区系的组成、变化和起源等起到了关键性的作用(Winter et al, 2009)。然而,从进化角度来看,物种与物种是不一样的,而且它们之间存在系统发育关系,并非每个物种都具有进化上的独立性(葛学军, 2015)。如果不考虑物种的进化历史,对植物区系组成、起源与演化的理解及生物多样性分布模式的认识可能是片面的,据此制定的保护策略也就不一定准确、全面(Forest et al, 2007; Pollock et al, 2015)。早在二十多年前,就有学者提出以分支分类(cladistics)表征物种之间的差异,从而对研究区域内的物种组成和差异有更深入的了解,为物种和生态系统保护提供科学依据(Vane-Wright et al, 1991)。1992年, Faith提出了以系统发育进化树上物种之间的支长(branch length)来表征系统发育多样性(phylogenetic diversity或phylodiversity, PD),使得整合物种进化历史对生物多样性进行全面深入的评估成为可能(Faith, 1992),并逐渐形成广泛的共识(如: Faith & Baker, 2006; Forest et al, 2007; Helmus et al, 2007)。

此后,其他学者运用最原始的系统发育多样性参数 PD_{faith} 及其衍生的各种相关参数在群落、生态系统、区域或全球尺度上开展了大量的研究工作(如: Knapp et al, 2008; Potter & Woodall, 2014; Daru & le Roux, 2016; Thornhill et al, 2016),但是关于衡量指标目前还没有形成完全统一的观点(Mouquet et al, 2012; Winter et al, 2013; Chiu et al, 2014)。一方面是因为该研究领域发展迅速,与系统发育多样性相关的指数众多(Pavoine & Bonsall, 2011; Tucker et al, 2016),不断有新的计算方法和参数被提出,如相对系统发育多样性(relative phylogenetic diversity)、相对系统发育特有性(relative phylogenetic endemism)等(Mishler et al, 2014),应用于不同尺度、不同区域

以及不同类群的研究中;另一方面,一些学者尝试对系统发育多样性的研究进行整合,却没有获得完整和成功的结果(Winter et al, 2013)。Ahrendsen等(2015)利用新一代测序技术对45个物种构建了系统发育树,整合分析了17个系统发育多样性参数,包含原始的系统发育多样性参数以及经过标准化、丰富度加权等不同处理后的指标。他们认为,这些不同的参数揭示了生物多样性的不同侧面,单一标准的指数无法完成对生物多样性的评估,与Tucker等(2016)提出的观点一致,即要针对不同的研究问题确定最合适的参数,而不能仅仅根据参数提出和使用历史的长短、个人经验和学科传统来进行取舍。选择合适的指数是非常困难的,目前最好的建议是从数学角度按照丰富度(richness)、发散度(divergence)和规律性(regularity)将其分为三大类,依据研究的问题来选择(Pavoine & Bonsall, 2011; Tucker et al, 2016)。

目前,不少学者已经应用系统发育多样性测度指标在群落系统发育、系统发育区系和生物多样性保护中开展了一系列研究工作,从新的视角理解群落、生态系统和全球尺度生物多样性的动态变化,为切实有效地保护物种及其进化历史提供了科学依据。关于群落系统发育已经有不少文章进行了整理和总结(如Cavender-Bares et al, 2009; Qian & Jiang, 2014),本文主要探讨系统发育多样性在植物区系研究和生物多样性保护中的应用。

2 系统发育多样性在植物区系研究中的应用

早期对植物区系的研究主要是将研究区域内全部的植物种类按照科、属、种进行数量统计,开展相似性分析。这样的研究把物种当作是独立的,没有考虑它们之间的系统发育关系(葛学军, 2015)。随着系统发育学的发展,以一个或者几个区系中的特有成分或者重要物种来论述区系的起源、进化的方法被逐渐采纳,但是以区系中的某个分支来代表整个区系的起源与演化并不全面,因为不同分支的进化历史和影响因素可能不同(Harrison & Cornell, 2008),会影响对整个区系起源与演化的理解。于是,有学者将系统发育学与区系研究结合起来,运用群落系统发育学研究的理论和方法,提出了系统发育区系学(phylofloristics) (Swenson & Umana, 2014;

葛学军, 2015)的概念。该理论考虑了研究区域内全部物种的进化关系, 因此能够更好地解释区系形成的生物地理和生态学过程。

在这样的理论框架下, 系统发育多样性在植物区系研究中得以运用, 并在不同地区、不同研究尺度上得到了实践。Qian等(2013)研究了北美大陆被子植物系统发育多样性的变化格局, 发现区系之间系统发育相似性与分类相似性显著相关, 地理距离与环境距离可以解释大部分系统发育多样性的变化。Swenson和Umana (2014)对小安的列斯群岛(Lesser Antilles)的18个岛屿进行了植物系统发育区系研究, 计算了每个岛屿系统发育多样性的各项指数及不同岛屿间的差异, 分析了这些指数与地理距离、生境因子的相关性, 认为历史上的扩散限制对区系组成的影响不大, 地形或者生境能够更好地解释不同岛屿系统发育多样性的差异, 不同生境导致物种分化产生了特有种。Li等(2015)利用野生种子植物属(1,983属)的地理分布及其系统发育关系, 计算了物种组成、系统发育多样性等指标, 从进化的角度对云南植物区系进行了重新分区, 并分析了各个区的系统发育结构, 有助于更好地理解生物多样性热点地区的多样性分布模式。

3 系统发育多样性在生物多样性保护中的应用

保护区域的划定和保护策略的制定常常基于所有物种具有同等的保护价值这一理念(Vane-Wright et al, 1991; Posadas et al, 2001)。然而, 物种之间由于进化历史的差异, 其保护价值不尽相同(Faith, 1992, 2015; Faith & Richards, 2012; Laity et al, 2015), 仅仅根据物种多样性开展评估并制定保护策略是不够准确、全面的(Knapp et al, 2008; Daru & le Roux, 2016; Wang et al, 2016)。研究表明, 物种多样性与系统发育多样性往往有着显著的正相关性(如Forest et al, 2007; Honorio Coronado et al, 2015), 但物种的进化历史会影响二者之间的相关程度(Rodrigues & Gaston, 2002); 在进化树不平衡或者独特物种具有狭域分布的情况下, 二者的相关程度会有所下降(Rodrigues et al, 2005; Tucker & Cadotte, 2013)。

有效的生物多样性保护需要把物种的进化历史纳入考量范围, 需要将进化维度的系统发育多样

性置于生物多样性研究与评估体系中(Davies et al, 2008; Frishkoff et al, 2014; Buerki et al, 2015; Costion et al, 2015)。由于系统发育多样性不受物种分类地位变更的影响, 可以相对较好地反映生态系统功能(Cadotte et al, 2008; Flynn et al, 2011; Srivastava et al, 2012), 加上具有比物种多样性更快的丧失速率(Sechrest et al, 2002), 使得其研究与评估更加迫切。正是由于系统发育多样性高的群落更稳定, 显示出更高的生产力, 拥有更多不同营养级的物种(Cadotte et al, 2012; Cadotte, 2013; Dinnage et al, 2012), 所以确立优先保护区域时, 首先要关注系统发育多样性高的区域, 以保存尽可能多的进化单元, 从而确保有效地保存地区内物种的进化历史(Sechrest et al, 2002; Jetz et al, 2012; Shapcott et al, 2015)。例如, Forest等(2007)通过比较南非开普敦地区植物物种多样性与系统发育多样性的分布格局, 发现西部地区由相对亲缘关系较近的属组成, 系统发育上是聚集的, 其系统发育多样性比预计要低; 而东部地区系统发育上表现为发散, 系统发育多样性比预计的更高, 据此认为东部地区具有更高的保护价值。

此外, 进化维度的系统发育多样性能够清晰地揭示出具有特殊进化历程或者濒危的分支(Isaac et al, 2007; Rosauer et al, 2009), 为确立优先保护区域或优化保护策略提供更为科学的依据。例如, Faith和Baker (2006)以澳大利亚新南威尔士地区一种有刺小龙虾(*Euastacus*)为研究对象, 通过构建系统发育树, 发现处于矿区等人为干扰环境下的一个特有分支具有较高的保护价值; 再如, Abellán等(2013)对位于伊比利亚半岛的伊比利亚国家公园4类淡水动物开展了系统发育多样性研究, 发现在进化上存在显著差异且处于濒危状态的类群有80% (12/15)没有被包含在现有的保护范围内, 提出增加新的保护区来覆盖淡水动物更多的进化历史。

一般来说, 相对于物种多样性(假设相同的物种数目)而言, 经历过快速物种形成和迁移稀少的地区往往具有相对较低的系统发育多样性, 而物种分化较慢和长距离扩散频繁的地区往往有相对较高的系统发育多样性(Davies & Buckley, 2012)。然而现实情况是, 人类越来越频繁的经济与社会活动加速了物种灭绝和外来种入侵两大过程, 在一定程度上改变了物种多样性和系统发育多样性及其二

者之间的关联式样。物种灭绝会造成物种多样性减少,但短期内对系统发育多样性的影响并不明显(Winter et al, 2009; Arroyo-Rodríguez et al, 2012);外来种入侵则在开始时可能会增加物种多样性,但其长期大面积扩散对本地近缘种造成入侵危害,会使系统发育多样性降低,最终不同地区之间物种多样性和系统发育多样性越来越趋于一致(Winter et al, 2009)。

综上,从进化的角度来探讨多样性,对于认识生物多样性、开展区域生物多样性的评估与保护具有非常重要的科学价值和现实意义(Athayde et al, 2015)。

4 DNA条形码极大地促进了系统发育多样性研究的发展

依靠分子数据获得研究区域内物种之间准确的进化关系,即构建分支支持率高的群落系统发育树,是从进化维度评估地区生物多样性的关键。然而要实现这一点并不容易(Winter et al, 2013)。基于APG系统,利用计算机程序PhyloMatic (Webb & Donoghue, 2005)构建区域物种的系统进化树被广泛应用于群落生态学研究(Cavender-Bares et al, 2006; Knebel & Hubbel, 2006)。但在许多情况下这并不能准确地揭示物种间的系统发育关系,尤其是在一些研究基础薄弱地区表现得较为明显,甚至有些类群因缺乏相关数据而无法被整合到PhyloMatic所产生的系统发育树中;即使在研究基础较好的类群中,也只能到属级水平,很多时候仅仅限于科级水平。随着GenBank数据库中积累的DNA序列数据越来越多,研究者们开始整合这些信息构建宏系统发育树(mega-phylogeny),获得了良好的结果。例如,Zanne等(2014)利用来自GenBank的序列数据构建了3万多个陆地植物的宏系统发育树;Chen等(2016)利用叶绿体基因和线粒体基因片段重建了我国6,098种维管植物的宏系统发育树,涵盖了我国93%的属,是第一次在大尺度上揭示我国维管植物属水平的进化关系,并在此框架下,开发了软件SoTree用以构建子系统发育树(subtree),为宏系统发育树在生态学等方面的应用提供了工具。

同时,DNA条形码的迅速发展和标准化数据为构建宏系统发育树提供了强有力的技术保障。利用DNA条形码数据所反映的物种间遗传距离,能够构

建高精度的系统发育树,确定物种之间的进化关系,因而从进化的维度将系统发育多样性纳入到生物多样性的评估体系中。Zhang等(2015)以加拿大Alberta地区种子植物区系为研究对象,利用Zanne等(2014)基于7个DNA序列片段所构建的系统进化树,同时结合其他研究结果重建了该地区近90%植物种类的进化树,评估了气候变化对物种丰富度、系统发育多样性、类群特有性和系统发育特有性的影响;发现在全球变化大背景下采用系统发育方法为优化保护策略提供了新的机会,能够进一步评估自然保护区对于保护珍稀、特有和进化显著植物种类的有效性。

Shapcott等(2015)运用DNA条形码数据对研究基础薄弱的澳大利亚东南部昆士兰热带雨林植物区系进行了生物多样性评估,结果显示多种指数反映出的多样性均与热带雨林的面积不相关,而系统发育多样性与清除前的热带雨林(preclearing rainforest)面积在各个地区中占有的比例和现存生态系统的多样性相关,同时发现避难所地区的系统发育多样性高于预估,而其他地区的系统发育结构呈现聚集状态,与近期分布区扩散一致。此项研究结果与之前在热带地区开展的相关工作(如:Fine & Kembel, 2011; Zhang et al, 2013)均显示出系统发育多样性是非随机分布的,证明热带森林的保护需要最大化系统发育多样性而不是简单地最大化保护面积。González-Orozco等(2015)选择了鱼类、树蛙、所有的植物属、金合欢类和桉树类5大类群,对澳大利亚东南部的Murray-Darling流域地区进行了生物多样性评估,发现每一类群所展示出的系统发育多样性和特有性中心是不一致的,但在某些类群之间出现了一致性的区域,从而为保护区设置及重点保护类群的确立提供了可靠线索。

5 存在的不足及将来的发展方向

近年来随着DNA条形码数据、新一代测序技术和计算工具的蓬勃发展(如R),以物种之间的进化关系为基础、依靠系统发育多样性及相关参数,对植物区系组成的变化、起源及多样性保护的研究开始发展起来,以物种空间分布为基础,整合环境因素或气候因子开展生物多样性在不同地区分布式样及形成原因的探讨(如: Pio et al, 2014; Pollock et al, 2015; Zhang et al, 2015),是目前开展相关研究的

主流。但是,受研究基础的限制,不同地区物种分布模型的构建水平和环境因子的评估水平是不一致的,前期开展的一些研究不一定能够很好地整合到系统发育多样性的相关研究上,一些迫切需要开展保护策略评估的生物多样性热点地区往往缺乏有力的数据支撑,影响研究工作的开展;另一方面,数据的共享和整合在国内仍存在较大的障碍,如前期积累的数据多是不同单位在不同时期开展的工作,难以进行整合分析,限制了在大尺度上研究生物多样性的分布模式。

此外,系统发育多样性的研究还受到一些更为本质的问题困扰,如依靠现有的数据无法充分解决物种间的进化关系(Sarkar et al, 2006),也有学者质疑系统发育多样性能否真正反映生态系统功能(Winter et al, 2013; Cardinale et al, 2015),系统发育多样性仅仅只是物种多样性的替代,还是能够更好地反映生物多样性的特征,并与生态系统功能相关联,这些都需要更多的实例来验证。需要在更多的生态类型、区域和类群中开展更为具体的工作,从而使得系统发育多样性特别是与物种多样性、功能性状多样性及生态系统功能方面的关系得到进一步揭示。

参考文献

- Abellán P, Sánchez-Fernández D, Picazo F, Millán A, Lobo JM, Ribera I (2013) Preserving the evolutionary history of freshwater biota in Iberian National Parks. *Biological Conservation*, 162, 116–126.
- Ahrendsen DL, Aust SK, Kellar PR (2015) Biodiversity assessment using next-generation sequencing: comparison of phylogenetic and functional diversity between Nebraska grasslands. *Plant Systematics and Evolution*, 302, 89–108.
- APG IV (2016) An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants: APG IV. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 181, 1–20.
- Arroyo-Rodríguez V, Cavender-Bares J, Escobar F, Melo FPL, Tabarelli M, Santos BA (2012) Maintenance of tree phylogenetic diversity in a highly fragmented rain forest. *Journal of Ecology*, 100, 702–711.
- Athayde EA, Cancian LF, Verdade LM, Morellato LPC (2015) Functional and phylogenetic diversity of scattered trees in an agricultural landscape: implications for conservation. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 199, 272–281.
- Buerki S, Callmender MW, Bachman S, Moat J, Labat J-N, Forest F (2015) Incorporating evolutionary history into conservation planning in biodiversity hotspots. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 370, 20140014.
- Cadotte MW (2013) Experimental evidence that evolutionarily diverse assemblages result in higher productivity. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 110, 8996–9000.
- Cadotte MW, Cardinale BJ, Oakley TH (2008) Evolutionary history and the effect of biodiversity on plant productivity. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 105, 17012–17017.
- Cadotte MW, Dinnage R, Tilman D (2012) Phylogenetic diversity promotes ecosystem stability. *Ecology*, 93, S223–S233.
- Cardinale BJ, Venail P, Gross K, Oakley TH, Narwani A, Allan E, Flombaum P, Joshi J, Reich PB, Tilman D, van Ruijven J (2015) Further re-analyses looking for effects of phylogenetic diversity on community biomass and stability. *Functional Ecology*, 29, 1607–1610.
- Cavender-Bares J, Keen A, Miles B (2006) Phylogenetic structure of Floridian plant communities depends on taxonomic and spatial scale. *Ecology*, 87, 109–122.
- Cavender-Bares J, Kozak KH, Fine PVA, Kembel SW (2009) The merging of community ecology and phylogenetic biology. *Ecology Letters*, 12, 693–715.
- Chen ZD, Yang T, Lin L, Lu LM, Li HL, Sun M, Liu B, Chen M, Niu YT, Ye JF, Cao ZY, Liu HM, Wang XM, Wang W, Zhang JB, Meng Z, Cao W, Li JH, Wu SD, Zhao HL, Liu ZJ, Du ZY, Wang QF, Guo J, Tan XX, Su JX, Zhang LJ, Yang LL, Liao YY, Li MH, Zhang GQ, Chung SW, Zhang J, Xiang KL, Li RQ, Soltis DE, Soltis PS, Zhou SL, Ran JH, Wang XQ, Jin XH, Chen YS, Gao TG, Li JH, Zhang SZ, Lu AM, China Phylogeny Consortium (2016) Tree of life for the genera of Chinese vascular plants. *Journal of Systematics and Evolution*, 54, 277–306.
- Chiu CH, Jost L, Chao A (2014) Phylogenetic beta diversity, similarity, and differentiation measures based on Hill numbers. *Ecological Monographs*, 84, 21–44.
- Costion CM, Edwards W, Ford AJ, Metcalfe DJ, Cross HB, Harrington MG, Richardson JE, Hilbert DW, Lowe AJ, Crayn DM (2015) Using phylogenetic diversity to identify ancient rain forest refugia and diversification zones in a biodiversity hotspot. *Diversity and Distributions*, 21, 279–289.
- Daru BH, le Roux PC (2016) Marine protected areas are insufficient to conserve global marine plant diversity. *Global Ecology and Biogeography*, 25, 324–334.
- Davies TJ, Buckley LB (2012) Exploring the phylogenetic history of mammal species richness. *Global Ecology and Biogeography*, 21, 1096–1105.
- Davies TJ, Fritz SA, Grenyer R, Orme CD, Bielby J, Bininda-Emonds OR, Cardillo M, Jones KE, Gittleman JL, Mace GM, Purvis A (2008) Phylogenetic trees and the future of mammalian biodiversity. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 105, 11556–11563.
- Dinnage R, Cadotte MW, Haddad NM, Crutsinger GM, Tilman D (2012) Diversity of plant evolutionary lineages promotes arthropod diversity. *Ecology Letters*, 15, 1308–1317.

- Faith DP (1992) Conservation evaluation and phylogenetic diversity. *Biological Conservation*, 61, 1–10.
- Faith DP (2015) Phylogenetic diversity, functional trait diversity and extinction: avoiding tipping points and worst-case losses. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 370, 200140011.
- Faith DP, Richards Z (2012) Climate change impacts on the Tree of Life: changes in phylogenetic diversity illustrated for *Acropora* Corals. *Biology*, 1, 906–932.
- Faith DP, Baker AM (2006) Phylogenetic diversity (PD) and biodiversity conservation: some bioinformatics challenges. *Evolutionary Bioinformatics Online*, 2, 121–128.
- Fine PVA, Kembel SW (2011) Phylogenetic community structure and phylogenetic turnover across space and edaphic gradients in western Amazonian tree communities. *Ecography*, 34, 552–565.
- Flynn DFB, Mirotnick N, Jain M, Palmer MI, Naeem S (2011) Functional and phylogenetic diversity as predictors of biodiversity-ecosystem-function relationships. *Ecology*, 92, 1573–1581.
- Forest F, Grenyer R, Rouget M, Davies TJ, Cowling RM, Faith DP, Balmford A, Manning JC, Procheş Ş, van der Bank M, Reeves G, Hedderson TAJ, Savolainen V (2007) Preserving the evolutionary potential of floras in biodiversity hotspots. *Nature*, 445, 757–760.
- Frishkoff LO, Karp DS, M'Gonigle LK, Mendenhall CD, Zook J, Kremen C, Hadly EA, Daily GC (2014) Loss of avian phylogenetic diversity in neotropical agricultural systems. *Science*, 345, 1343–1346.
- Ge XJ (2015) Application of DNA barcoding in phylofloristics study. *Biodiversity Science*, 23, 295–296. (in Chinese) [葛学军 (2015) DNA条形码在植物系统发育区系学研究中的应用. *生物多样性*, 23, 295–296.]
- González-Orozco CE, Mishler BD, Miller JT, Laffan SW, Knerr N, Unmack P, Georges A, Thornhill AH, Rosauer DF, Gruber B (2015) Assessing biodiversity and endemism using phylogenetic methods across multiple taxonomic groups. *Ecology and Evolution*, 5, 5177–5192.
- Harrison S, Cornell H (2008) Toward a better understanding of the regional causes of local community richness. *Ecology Letters*, 11, 969–979.
- Helmus MR, Bland TJ, Williams CK, Ives AR (2007) Phylogenetic measures of biodiversity. *The American Naturalist*, 169, E68–E83.
- Honorio Coronado EN, Dexter KG, Pennington RT, Chave J, Lewis SL, Alexiades MN, Alvarez E, Alves de Oliveira A, Amaral IL, Araujo-Murakami A, Arets EJMM, Aymard GA, Baraloto C, Bonal D, Brienen R, Cerón C, Cornejo Valverde F, Di Fiore A, Farfan-Rios W, Feldpausch TR, Higuchi N, Huamantupa-Chuquimaco I, Laurance SG, Laurance WF, López-Gonzalez G, Marimon BS, Marimon-Junior BH, Monteagudo Mendoza A, Neill D, Palacios Cuenca W, Peñuela Mora MC, Pitman NCA, Prieto A, Quesada CA, Ramirez Angulo H, Ruelas A, Ruschel AR, Salinas Revilla N, Salomão RP, Segalin de Andrade A, Silman MR, Spironello W, ter Steege H, Terborgh J, Toledo M, Valenzuela Gamarra L, Vieira ICG, Vilanova TE, Vos V, Phillips OL (2015) Phylogenetic diversity of Amazonian tree communities. *Diversity and Distributions*, 21, 1295–1307.
- Isaac NJB, Turvey ST, Collen B, Waterman C, Baillie JEM (2007) Mammals on the EDGE: conservation priorities based on threat and phylogeny. *PLoS ONE*, 2, e296.
- Jetz W, Thomas GH, Joy JB, Hartmann K, Mooers AO (2012) The global diversity of birds in space and time. *Nature*, 491, 444–448.
- Kembel SW, Hubbell SP (2006) The phylogenetic structure of a neotropical forest tree community. *Ecology*, 87, S86–S99.
- Knapp S, Kühn I, Schweiger O, Klotz S (2008) Challenging urban species diversity: contrasting phylogenetic patterns across plant functional groups in Germany. *Ecology Letters*, 11, 1054–1064.
- Laity T, Laffan SW, González-Orozco CE, Faith DP, Rosauer DF, Byrne M, Miller JT, Crayn D, Costion C, Moritz CC, Newport K (2015) Phylodiversity to inform conservation policy: an Australian example. *Science of the Total Environment*, 534, 131–143.
- Li R, Kraft NJB, Yang J, Wang Y (2015) A phylogenetically informed delineation of floristic regions within a biodiversity hotspot in Yunnan, China. *Scientific Reports*, 5, 9396.
- Mishler BD, Knerr N, González-Orozco CE, Thornhill AH, Laffan SW, Miller JT (2014) Phylogenetic measures of biodiversity and neo- and paleo-endemism in Australian *Acacia*. *Nature Communications*, 5, 4473.
- Mouquet N, Devictor V, Meynard CN, Munoz F, Bersier L-F, Chave J, Couteron P, Dalecky A, Fontaine C, Gravel D, Hardy OJ, Jabot F, Lavergne S, Leibold M, Mouillot D, Münkemüller T, Pavoine S, Prinzing A, Rodrigues ASL, Rohr RP, Thébaud E, Thuiller W (2012) Ecophylogenetics: advances and perspectives. *Biological Reviews*, 87, 769–785.
- Pavoine S, Bonsall M (2011) Measuring biodiversity to explain community assembly: a unified approach. *Biological Reviews*, 86, 792–812.
- Pio DV, Engler R, Linder HP, Monadjem A, Cotterill FPD, Taylor PJ, Schoeman MC, Price BW, Villet MH, Eick G, Salamin N, Guisan A (2014) Climate change effects on animal and plant phylogenetic diversity in southern Africa. *Global Change Biology*, 20, 1538–1549.
- Pollock LJ, Rosauer DF, Thornhill AH, Kujala H, Crisp MD, Miller JT, McCarthy MA (2015) Phylogenetic diversity meets conservation policy: small areas are key to preserving eucalypt lineages. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 370, 20140007.
- Posadas P, Miranda Esquivel DR, Crisci JV (2001) Using phylogenetic diversity measures to set priorities in conservation: an example from southern South America. *Conservation Biology*, 15, 1325–1334.
- Potter KM, Woodall CW (2014) Does biodiversity make a difference? Relationships between species richness,

- evolutionary diversity, and aboveground live tree biomass across U. S. forests. *Forest Ecology and Management*, 321, 117–129.
- Qian H, Jiang L (2014) Phylogenetic community ecology: integrating community ecology and evolutionary biology. *Journal of Plant Ecology*, 7, 97–100.
- Qian H, Swenson NG, Zhang JL (2013) Phylogenetic beta diversity of angiosperms in North America. *Global Ecology and Biogeography*, 22, 1152–1161.
- Rodrigues ASL, Gaston KJ (2002) Maximising phylogenetic diversity in the selection of networks of conservation areas. *Biological Conservation*, 105, 103–111.
- Rodrigues ASL, Brooks TM, Gaston KJ (2005) Integrating phylogenetic diversity in the selection of priority areas for conservation: does it make a difference? In: *Phylogeny and Conservation* (eds Purvis A, Gittleman JL, Brooks TM), pp. 101–199. Cambridge University Press, Cambridge.
- Rosauer DF, Laffan SW, Crisp MD, Donnellan SC, Cook LG (2009) Phylogenetic endemism: a new approach for identifying geographical concentrations of evolutionary history. *Molecular Ecology*, 18, 4061–4072.
- Sarkar S, Pressey RL, Faith DP, Margules CR, Fuller T, Stoms DM, Moffett A, Wilson KA, Williams KL, Williams PH, Andelman S (2006) Biodiversity conservation planning tools: present status and challenges for the future. *Annual Review of Environment and Resources*, 31, 123–159.
- Sechrest W, Brooks TM, da Fonseca GAB, Konstant WR, Mittermeier RA, Purvis A, Rylands AB, Gittleman JL (2002) Hotspots and the conservation of evolutionary history. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 99, 2067–2071.
- Shapcott A, Forster PI, Guymer GP, McDonald WJF, Faith DP, Erickson D, Kress WJ (2015) Mapping biodiversity and setting conservation priorities for SE Queensland's rainforests using DNA barcoding. *PLoS ONE*, 10, e0122164.
- Srivastava DS, Cadotte MW, MacDonald AM, Marushia RG, Mirotchnick N (2012) Phylogenetic diversity and the functioning of ecosystems. *Ecology Letters*, 15, 637–648.
- Swenson NG, Umana MN (2014) Phylofloristics: an example from the Lesser Antilles. *Journal of Plant Ecology*, 7, 166–175.
- Thornhill AH, Mishler BD, Knerr NJ, González-Orozco CE, Costion CM, Crayn DM, Laffan SW, Miller JT (2016) Continental-scale spatial phylogenetics of Australian angiosperms provides insights into ecology, evolution and conservation. *Journal of Biogeography*, 43, 2085–2098.
- Tucker CM, Cadotte MW (2013) Unifying measures of biodiversity: understanding when richness and phylogenetic diversity should be congruent. *Diversity and Distributions*, 19, 845–854.
- Tucker CM, Cadotte MW, Carvalho SB, Davies TJ, Ferrier S, Fritz SA, Grenyer R, Helmus MR, Jin LS, Mooers AO, Pavoine S, Purschke O, Redding DW, Rosauer DF, Winter M, Mazel F (2016) A guide to phylogenetic metrics for conservation, community ecology and macroecology. *Biological Reviews*, doi: 10.1111/brv.12252.
- Vane-Wright RI, Humphries CJ, Williams PH (1991) What to protect? Systematics and the agony of choice. *Biological Conservation*, 55, 235–254.
- Wang L, Young SS, Wang W, Ren G, Xiao W, Long Y, Li J, Zhu J (2016) Conservation priorities of forest ecosystems with evaluations of connectivity and future threats: implications in the Eastern Himalaya of China. *Biological Conservation*, 195, 128–135.
- Webb CO, Donoghue MJ (2005) Phylomatic: tree assembly for applied phylogenetics. *Molecular Ecology Notes*, 5, 181–183.
- Winter M, Devictor V, Schweiger O (2013) Phylogenetic diversity and nature conservation: where are we? *Trends in Ecology and Evolution*, 28, 199–204.
- Winter M, Schweiger O, Klotz S, Nentwig W, Andriopoulos P, Arianoutsou M, Basnou C, Delipetrou P, Didziulis V, Hejda M, Hulme PE, Lambdon PW, Pergl J, Pysek P, Roy DB, Kühn I (2009) Plant extinctions and introductions lead to phylogenetic and taxonomic homogenization of the European flora. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 106, 21721–21725.
- Zanne AE, Tank DC, Cornwell WK, Eastman JM, Smith SA, FitzJohn RG, McGlinn DJ, O'Meara BC, Moles AT, Reich PB, Royer DL, Soltis DE, Stevens PF, Westoby M, Wright IJ, Aarssen L, Bertin RI, Calaminus A, Govaerts R, Hemmings F, Leishman MR, Oleksyn J, Soltis PS, Swenson NG, Warman L, Beaulieu JM (2014) Three keys to the radiation of angiosperms into freezing environments. *Nature*, 506, 89–92.
- Zhang J, Nielsen SE, Stolar J, Chen Y, Thuiller W (2015) Gains and losses of plant species and phylogenetic diversity for a northern high-latitude region. *Diversity and Distributions*, 21, 1441–1454.
- Zhang JL, Swenson NG, Chen SB, Liu XJ, Li ZS, Huang JH, Mi XC, Ma KP (2013) Phylogenetic beta diversity in tropical forests: implications for the roles of geographical and environmental distance. *Journal of Systematic Evolution*, 51, 71–85.

• 研究报告 •

中国高山植物区系地理格局与环境 空间因素的关系

沈泽昊^{1*} 杨明正¹ 冯建孟² 李新辉³ 彭培好⁴ 郑 智⁵¹ (北京大学城市与环境学院生态学系, 地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871)² (大理大学农学与生命科学学院, 大理 671000)³ (西南林业大学资源与环境学院, 昆明 650224)⁴ (成都理工大学地球科学学院, 成都 610059)⁵ (中国科学院植物研究所植被与环境国家重点实验室, 北京 100093)

摘要: 高山带是具有极端环境和明确边界的植物分布区, 研究高山植物区系地理对于理解空间彼此隔离的极端高寒环境下植物区系的形成与相互联系具有重要意义。本研究整合了中国境内14座主要山地的高山植物区系数据, 用Jaccard指数测度不同区系之间的相似性, 运用相关分析和Mantel检验方法, 重点分析了中国高山种子植物区系地理成分的构成、不同山地之间的相似性及其环境和空间相关因素。结果表明, 中国山地的高山带分布着物种丰富的种子植物区系, 14座主要山地即包含了65科489属3,670种(含340个种下单位), 主要由北温带分布及其亚型、世界分布、旧世界温带分布和东亚分布及其中国-喜马拉雅分布亚型等成分构成, 缺少中国-日本分布类型, 中国特有属的比例较高(5.2%)。14座山地高山植物区系构成的地理分异显示: 北热带和东亚成分自南向北减少, 而北方温带成分增加; 自西向东古地中海成分减少, 北方温带成分增加, 而东亚成分在中部达到最大值; 在属级地理成分构成上, 北方山地和青藏高原周缘山地构成了区系成分近似的两大群组, 台湾高山植物区系与大陆东部北方高山带的区系联系更密切。地理隔离是高山植物区系分异的首要因素, 高山带的面积大小也影响到其区系成分的构成, 而夏季热量是影响中国高山植物区系地理分异的首要气候因子, 显示全球变暖对未来高山植物区系具有潜在的胁迫作用。

关键词: 高山带; 种子植物; 区系成分; 地理分异; 组成相似性; Mantel检验; 空间距离; 地貌; 气候

Geographic patterns of alpine flora in China in relation to environmental and spatial factors

Zehao Shen^{1*}, Mingzheng Yang¹, Jianmeng Feng², Xinhui Li³, Peihao Peng⁴, Zhi Zheng⁵¹ Department of Ecology, College of Urban and Environmental Sciences, MOE Key Laboratory for Earth Surface Processes, Peking University, Beijing 100871² School of Agronomy and Life Sciences, Dali University, Dali, Yunnan 671000³ College of Resources and Environment, Southwestern Forestry University, Kunming 650224⁴ College of Earth Sciences, Chengdu University of Science and Technology, Chengdu 610059⁵ State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093

Abstract: Alpine areas are global biomes with extreme environments and distinct boundaries. Studies on the geography of alpine flora help us to understand the formation of flora in an extremely cold and segregated environment, as well as the floristic relations between mountains. We integrated alpine flora data from 14 main mountain ranges in China, measured floristic similarities using the Jaccard index, and explored the percentage composition of areal-types of seed plants and the effects of geographical distance and environmental variation on flora similarities using correlation analyses and Mantel tests. Results indicated that Chinese al-

收稿日期: 2017-01-08; 接受日期: 2017-02-09

基金项目: 国家自然科学基金(41371190)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: shzh@urban.pku.edu.cn

pine zones harbor a flora characterized by high species richness, with 3,670 species (including 340 subspecies units) belonging to 489 genera and 65 families recorded in the alpine zone of 14 main mountain ranges. These genera are mainly constituted of areal-types of North Temperate distribution and their sub-types, Cosmopolitan, Old World Temperate, East Asia and Sino-Himalayan, while the Sino-Japanese type is absent. Those endemic to China revealed a distinct presence in alpine flora (5.2%). Based on the data from 14 alpine zones, geographical patterns of alpine floristic composition were characterized by a significant latitudinal decrease of tropic and East Asia areal-types, and an increase of northern temperate types. Along the longitudinal gradient, the percentages of Mediterranean types decreased while the northern temperate types increased, and East Asian elements peaked in the middle position. The alpine floras of 14 mountains were significantly correlated in terms of geographical element composition when measured at the genus level, revealing two groups of higher floristic correlations, mountains surrounding the Qinghai-Tibet Plateau and separated northern mountains, respectively. The alpine flora of Taiwan Island is more closely related with that of the northern mountains rather than that of the mountains found in Southwest China, which have more comparable latitudes. We found that geographic distance was the primary factor for deviation between alpine floras, while the physiognomy of alpine zones also influenced floristic composition, and the maximum temperature of warmest month (MTWM) was a critical climatic factor for geographical deviation of alpine flora composition in China, which suggests the potential stress effects of global warming on alpine flora.

Key words: alpine zone; seed plant; floristic elements; geographic differentiation; composition similarity; Mantel test; spatial distance; physiognomy; climate

植物区系地理是研究全球或某一区域所有植物的种类组成及其现代与过去的分布,并探讨其起源和演化历史的科学(王荷生, 1992)。植物区系地理通过系统分析不同植物类群的地理分布规律和类群间差异,进行植物区系成分分类和区系分区,为进一步从历史、环境和进化的途径探索植物区系演变的时空格局与机制奠定了宏观基础(张宏达, 1980; 陶君容, 1992)。在总结中国3,116个种子植物属的地理分布范围基础上,吴征镒(1991)把中国种子植物区系归纳为15个地理分布区类型和31个亚型,首次为中国植物区系地理的量化和比较研究提供了一个分析模板,在过去20年里极大地推动了中国境内的植物区系地理研究(路安民, 1999; 沈泽昊和张新时, 2000; 严岳鸿等, 2013; 陈灵芝, 2014)。植物区系地理成分分类体系的建立为植物多样性的构成分析提供了一个独特的框架与途径,也建立了一个基于自然环境时空分异的宏观机制性假说。然而,正如吴征镒等(2010)指出,针对这一业已建立的中国植物区系地理分类与分区体系,还有待针对特定的类群或区域,从历史、环境和进化角度进行验证及不同尺度的深入研究。

高山带(alpine zone)是全球气候和植被分类体系中具有鲜明判识标志的分类单元,分布在亚高山森林边界(即高山树线过渡带, alpine treeline ecotone)以上、永久雪线以下,以非乔木生活型为特

征的带状植物分布区域(Chapin III & Körner, 1994)。由于低温、大风、空气稀薄、紫外辐射强烈等独特的环境因素影响,高山植物普遍表现了与高山树线以下非乔木生活型植物显著不同的部分形态和生理属性(Bliss, 1971; Körner, 2003)。高山带植被在众多海拔数千米的高山上部呈岛屿状分布,被称为“天岛”(sky islands) (Marshall, 1957)。“天岛”之间的空间距离和海拔梯度上陡峭的、气候主导的环境变化,构成了高山之间动、植物物种隔离分布、遗传分化成种以至区系分化的强烈驱动力(Mary & Diamond, 1976; Kropf et al, 2006; Zhang et al, 2014);另一方面,适应高山环境的植物也通过各种传播途径实现了“天岛”之间的迁移扩散和基因交流(Packer, 1974; Tackenberg & Stöcklin, 2009; Wondimu et al, 2014),并形成了具有独特地理分布的高山带植物群。这群植物的地理分布特征在吴征镒(1991)提出的中国种子植物属分布区类型体系中得到印证,即北极-高山分布型(8-2型)的独特存在。

山地被称为生物迁移的障碍或桥梁,这取决于生物扩散方向与山脉延伸方向之间的关系(Wurster & Bird, 2014; Caplat et al, 2016)。如中国青藏高原-华北山地-白令海峡-北美西部的落基山脉就被认为是东亚与北美之间植物区系联系的桥梁(王文采, 1992; 路安民, 1999),而横断山区的平行山脉对很多植物种分布产生了明显的隔离作用(如Luo et al,

2016)。大量研究表明,山地是生物多样性分布的热点区域,其复杂多样的环境提供了丰富且相对稳定的生态位,成为变化环境中的生物避难所和博物馆(López-Pujol et al, 2011; Sandel et al, 2011);同时,山地特别是相对隔离的高山带特殊环境中具有较为强烈的隔离分化和成种过程(孙航, 2002; 于海彬和张镱锂, 2013; Luo et al, 2016)。然而,在宏观区域尺度上,山地之间的空间距离和延伸走向构成的空间格局对植物分布的总体影响,以及这种影响在区域植物区系构成中的反映还很少有研究(沈泽昊和张新时, 2000)。目前,中国高山植物区系的宏观分异格局尚不清楚,研究空间距离的区系隔离效应和山脉延伸走向的区系联系效应,对于理解高山植物扩散的宏观途径和区域山地格局对植物区系发育过程的影响具有重要意义。

中国的高山带主要分布在青藏高原及其周边,以及北方和台湾主要山系,具有气候寒冷、环境极端、交通不便等特点。因此,相比其他区域,针对高山带的植物区系地理研究仍相对缺乏。尤其是需要掌握足够数量的物种分布信息以获得相对可靠的植物分布范围数据,这对于高山带植物区系比较研究更是一个极具挑战性的问题。但在中国,已经有了一些针对特定山体或山脉的植物区系结构,特别是区系地理成分的分析工作,包括对天山(李利平等, 2011)、贺兰山(梁存柱, 2012)、秦岭太白山(任毅, 2006)、五台山(曹艳丽, 1999^①)、长白山(曹伟和李冀云, 2003)及青藏高原周缘高山的研究(如罗建等, 2006; 李恒等, 2000; 王静, 2012)。这些工作为开展山脉或山体为单元的宏观区域格局或比较研究提供了一定的基础,但迄今不同山地之间高山带植物区系的比较却十分少见。

本文针对中国主要高大山地的高山带种子植物区系,在大量野外调查和数据集成的基础上,进行高山带植物区系之间植物多样性与区系地理成分结构的比较研究,以期探讨高山植物区系成分的地理分异格局和相关因子,拟回答以下问题:(1)中国高山植物区系的多样性、科属构成与地理成分存在怎样的宏观格局?(2)高山种子植物区系的地理分异与业已建立的中国种子植物区系分区系统是否吻合?(3)空间距离和地理环境因素对中国高

山植物区系结构的宏观分异有怎样的影响?

1 数据与方法

1.1 物种数据、地理数据和气候数据

选择国内具有高山环境的14座主要山地,见图1。青藏高原及周缘山地以东的地区地势相对低平,仅有少数孤立的山峰达到海拔3,000 m以上高程。结合第四纪冰期气候的变化历史,一般认为除长白山、五台山和太白山以外中国大陆东部缺少典型的高山环境(张新时, 1994; 崔之久等, 2011)。台湾山脉最高峰达到3,997 m,但现代森林的分布上限达到海拔3,800 m以上(Li et al, 2013),故台湾高山带的存在颇具争议(赖明洲, 2003),中国种子植物区系也将台湾的高山植被带明确划归古热带植物区(吴征镒等, 2010)。本研究将台湾高山植物树线以上的植物区系数据纳入分析,通过与其他高山带植物区系的比较,以期获得新的证据。

参照*Flora of China*的植物分类系统,对所研究的14座山地的高山植物物种名录进行校核,得到中国高山植物区系的总物种名录。本文分析的高山植物物种数据部分来自各合作者的野外植物调查结果,另有部分山地的数据来自公开出版物,具体说明见表1。物种属性数据包括物种的拉丁科属种名、生活型及所在属的地理分布区类型,分布区类型依据吴征镒(1991)。根据定义,高山带植物应分布在高山树线以上,但很多高山植物可以向下分布到中山森林带。在第四纪冰期,青藏高原腹地以外的中国植被—气候带海拔普遍下移500–1,500 m(郑卓, 1999; 施雅风等, 2006)。随着冰后期气候变暖,物种分布范围上升,但根据野外调查观测,大量物种的分布下限当前仍滞留在高山树线以下。因此,本文中采取统一标准选择高山物种,即其分布的上限高度显著高于当前树线的海拔(>100 m),其下限不低于亚高山针叶林,即所在山地冷杉(*Abies* spp.)林和落叶松(*Larix* spp.)林的下限海拔,建立的物种名录不包括树线树种和少数海拔分布极宽的植物种,如车前(*Plantago* spp.)等。因为前者本来就属于亚高山分布,后者作为广布种对高山环境完全没有指示意义和山体之间的区分作用。

根据上述14座山地的高山树线和永久雪线,在Google Earth上运用“添加—多边形”工具勾画各个山地高山带分布范围的多边形(polygon),即高山树线

① 曹艳丽 (1999) 山西五台山高山林线的植被景观。北京大学硕士研究生毕业论文。



图1 本研究选择的中国14座山地的高山带分布地点
Fig. 1 Locations of alpine zone of 14 main mountain ranges in China

以上、永久雪线以下的地带范围(图1)。将数据存为.kmz文件,在地理信息系统软件ArcGIS 10.2 (www.esri.com/software/arcgis/)中转换成.shp格式。利用美国国家航空航天局发布的3"分辨率全球数字高程模型(SRTM v4.1, <http://datamirror.csdn.cn/>)截取各山地高山带范围,应用Asia North Albers Equal Area Conic投影后重采样成分辨率100 m的研究区数字高程模型(Farr & Kobrick, 2000; van Zyl, 2001),据此提取每座高山的最高海拔,并计算了各山地高山区域的投影面积。

同时,用各山地高山区的数字高程模型数据,从世界气候数据库(www.worldclim.org/, WorldClim v1.4)中,提取每个高山区的不同气候指标数据(BIO1–19)。该数据库利用全球各地气象站记录的气象观测资料,采用薄片样条函数模型插值生成全球气候栅格数据(1950–2000年平均值),在WPS1984投影下的空间分辨率为1 km (Hijmans et al, 2005)。

1.2 分析方法

分别在科、属、种水平评估和比较各山地高山带的植物多样性。采用中国种子植物属地理分布区类型系统(吴征镒, 1991)划分各山地高山带植物区系属的地理成分类型,并分别统计不同分布型的属数及其所包含的种数。参照吴征镒等(2010),根据不同地理成分之间的联系将世界分布型之外的类型进一步分为热带成分(T2–7)、北温带成分(T8–11)、古地中海成分(T12–13)和东亚成分(T14–15)。采用Pearson相关系数分析不同山地高山带植物区系之间的相似性,包括分类群构成和区系成分构成的相似性。

用一元线性或非线性回归模型分别拟合上述五大区系地理成分的属数百分比和种数百分比沿经度和纬度梯度的空间格局,并用全部15个地理分布型的属数百分比结合 t 检验来分析不同山地高山带的种子植物区系之间关联性的显著性水平。

表1 所分析的14座高山的基本特征
Table 1 The basic characteristics of the 14 mountains studied

山名 Mt. name	省份 Province	最高峰 Summit (m)	纬度范围 Latitudinal rang	树线海拔 Alpine Elev. (m)	林线树种下限 Lower limit (m)	高山林线树种 Alpine treeline species	高山带面积 Alpine area (ha)
天山 Mt. Tianshan ^[1]	新疆 Xinjiang	7,439	42°18'–44°15'	2,800	1,800	雪岭云杉 <i>Picea schrenkiana</i>	832,930.0
阿尔金山 Mt. Arjin ^[2]	新疆 Xinjiang	6,973	37°55'–39°35'	3,500	—	无	3,137.6
祁连山 Mt. Qilian ^[3]	青海 Qinghai	5,808	37°16'–39°19'	3,600	2,600	祁连圆柏 <i>Sabina przewalskii</i>	16,345.1
贺兰山 Mt. Helan ^[4]	宁夏 Ningxia	3,556	38°07'–39°30'	3,200	2,600	青海云杉 <i>P. erassifolia</i>	755.5
长白山 Mt. Changbai ^[5]	吉林 Jilin	2,750	41°42'–42°51'	2,100	1,800	岳桦 <i>Betula ermanii</i>	9,063.4
五台山 Mt. Wutai ^[6]	河北 Hebei	3,061	38°50'–39°05'	2,800	2,300	华北落叶松 <i>Larix principis-rupprechtii</i>	923.7
太白山 Mt. Taibai ^[7]	陕西 Shaanxi	3,767	33°49'–34°08'	3,400	2,800	太白红杉 <i>L. chinensis</i>	2,678.7
摩天岭 Mt. Motianling ^[8]	甘肃 Gansu	3,837	32°39'–32°49'	3,450	2,900	秦岭冷杉 <i>Abies chensiensis</i>	5,698.9
贡嘎山 Mt. Gongga ^[9]	四川 Sichuan	7,556	29°20'–30°20'	3,800	2,700	峨眉冷杉 <i>A. fabri</i>	68,413.9
高黎贡山 Mt. Gaoligong ^[10]	云南 Yunnan	5,128	24°40'–28°30'	4,000	3,000	急尖长苞冷杉 <i>A. georgei</i> var. <i>smithii</i>	93,695.2
玉龙雪山 Mt. Yulong ^[11]	云南 Yunnan	5,596	27°10'–27°15'	3,900	3,200	长苞冷杉 <i>A. georgei</i>	5,628.1
轿子雪山 Mt. Jiaozi ^[12]	云南 Yunnan	4,247	26°00'–26°10'	4,000	3,200	急尖长苞冷杉 <i>A. georgei</i> var. <i>smithii</i>	294.3
台湾山脉 Mts. Taiwan ^[13]	台湾 Taiwan	3,998	22°36'–24°26'	>3,998	3,000	台湾冷杉 <i>A. kawakamii</i>	3,277.2
珠峰 Mt. Zhumulangma#	西藏 Tibet	8,848	27°48'–29°19'	4,300	3,600	糙皮桦 <i>B. albo-sinensis</i> var. <i>septrionalis</i>	231,943.0

[1]李利平等(2011); [2]崔乃然, 彼得·爱克夫(1993); [3]杨全生等(2008); [4]梁存柱(2012); [5]曹伟和李冀云(2003); [6]曹艳丽(1999); [7]任毅(2006); [8]郑智等(2014); [9]沈泽昊等(2004); [10]李恒等(2000); [11]冯建孟等(2006); [12]彭华和刘恩德(2015); [13]张婉君等(2010); # 未发表数据。

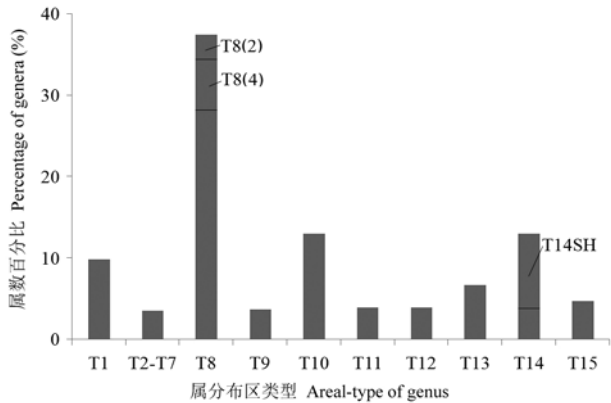


图2 中国14座山地的高山植物区系地理成分构成。T1: 世界分布型; T2–7: 热带分布型; T8–11: 北温带分布型; T12–13: 古地中海分布型; T14: 东亚分布型; T14SH: 中国–喜马拉雅分布型; T15: 中国特有分布型。

Fig. 2 Percentage compositions of alpine flora of 14 main mountains in China. T1, Cosmopolitan; T2–7, Tropic types; T8–11, North temperate types; T12–13, Mediterranean types; T14, East Asia types; T14SH, Sino-Himalayan type; T15, Endemic to China.

采用Mantel检验和偏Mantel检验来评估地理和环境距离对植物区系构成差异的影响(韩杰等, 2016)。选择各山地高山带分布范围的几何中心经纬度坐标代表该区地理位置, 选择高山树线海拔(m)、山体最大海拔(m)和地形投影面积(km²)作为地理距离相关

变量; 选用高山树线附近的平均气候状况, 包括年均温(mean annual temperature, MAT, °C)、最冷月最低温 (minimum temperature of coldest month, MTCM, °C)、最热月最高温(maximum temperature of coldest month, MTWM, °C)、年降水量(mean annual precipitation, MAP, mm)来代表各山地高山带的气候条件。用欧几里得距离计算各高山带之间的地理空间距离和环境距离, 用Jaccard相异性系数计算各高山植物区系之间的相异性, 用偏Mantel检验来评估空间距离和环境差异的独立贡献。

上述数量分析在统计软件R (Version 3.2.5; R Development Core Team 2015)中完成。

2 结果

2.1 中国高山植物区系的物种丰富度、科属及区系成分构成

根据统计, 全部14座山地的高山带植物区系包含维管束植物共计77科507属3,417种63亚种282变种; 其中, 蕨类植物12科18属86种5变种, 裸子植物1科2属10种2变种, 单子叶植物9科96属579种19亚种33变种, 双子叶植物55科391属2,742种44亚种242变种。

根据14座山地高山带的植物记录, 高山植物区系种类最多的前10科依次为: 菊科58属484种, 禾本科35属233种, 毛茛科24属233种, 蔷薇科20属201种, 杜鹃花科8属191种, 玄参科13属181种, 十字花科40属161种, 龙胆科12属152种, 石竹科15属151种, 莎草科7属147种。而种类最丰富的前10个属依次是: 杜鹃属(*Rhododendron*) 168种, 马先蒿属(*Pedicularis*) 120种, 报春花属(*Primula*) 96种, 龙胆属(*Gentiana*) 96种, 苔草属(*Carex*) 95种, 凤毛菊属(*Saussurea*) 92种, 虎耳草属(*Saxifraga*) 86种, 委陵菜属(*Potentilla*) 62种, 葶苈属(*Draba*) 58种, 早熟禾属(*Poa*) 54种。

这些高山植物全部489个种子植物属包含15个地理分布区类型18个亚类。其中世界分布型47属, 占总数的近10%。在其余442属中, 北温带分布(T8及其亚型)是最大的组分(180属), 占属级地理成分(除世界分布)的40.7%, 包括南、北温带间断分布(T8-4)的30属和北极-高山分布型(T8-2)的11属。其次是旧世界温带分布型(T10)和东亚-北美间断分布型(T9), 合计占15.4%; 古地中海分布型(T12和T13及各自的亚型)合计有54属, 占12.2%; 东亚特有分布型合计有66属, 其中中国-喜马拉雅分布亚型(T14SH)有47属, 占总数的10.6%, 而中国-日本分布亚型(T14SJ)完全未见于高山植物区系。中国特有分布型有23个属, 占5.2%。而热带分布诸型(T2-7)合计仅15属, 占3.4%。

2.2 高山植物区系成分及优势科属的地理格局

各山地高山种子植物区系地理成分的构成与其总体表现出类似的结构(附录1), 五大主要地理成分在14座山地中表现出不一致的地理格局特征(图3)。其中, 与基于种数统计的区系成分百分比相比, 基于属数统计的区系成分百分比沿经向和纬向地理梯度的变化更为显著。具体情况如下: (1)世界分布成分占全部种、属的比例沿纬度并无显著的梯度变化, 而分别在种($0.05 < P < 0.1$)和属($P < 0.05$)的层面呈现出自西向东增加的趋势。(2)热带成分自南向北在属和种数比例上都呈现接近显著($0.05 < P < 0.1$)的递减趋势, 自西向东在属的比例上也有接近显著的降低趋势。(3)作为高山植物区系主导性成分的北温带分布类型则出现与热带成分大致相反的趋势, 在属和种的比例上自南向北有接近显著的增加趋势, 且在经向上自西向东增加的趋势更为显著

($P < 0.001$), 在东部高山植物区系中几乎占到100%的比例。(4)古地中海成分的比例沿纬度梯度的变化并不显著, 仅在种水平有接近显著的自南向北增加趋势, 而在经向上属和种的比例从西向东均显著递减($P < 0.001$)。(5)包括东亚分布、中国-喜马拉雅分布和中国特有分布在内的东亚成分所占的比例, 在属和种水平都呈现出最为显著的沿纬度递减趋势($P < 0.001$), 而在经向上则表现为中间高、东西两边低的格局($P < 0.05$)。

在14座山地高山种子植物区系物种数最多的前10科中, 除杜鹃花科以外, 其余9科同时也是一半以上的山地(>7座)高山种子植物区系前10位的优势科(附录2)。在天山、祁连山、阿尔金山和珠峰蝶形花科成为优势科之一, 在高黎贡山(杜鹃花科第一)和台湾山脉(兰科第二)也分别有独特的重要科。在高山种子植物区系前10位的属中, 除早熟禾被嵩草(*Kobresia*)替代之外, 其余9属也正好是超过一半山地(>7座)前10位的优势属(附录2)。但各山地之间的差异较大, 例如: 台湾区系与区系整体的前10属仅有2个是相同的, 而珠峰区系与区系整体的前10属仅有1属不同。图4显示了各山地高山种子植物区系之间地理成分(以属数计)百分比的相似性空间格局。

从14座山地高山植物区系属的地理成分百分比可以看出, 各山地之间都存在不同程度的相似性, 表现出以下特点: (1)天山与高黎贡山、台湾山脉之间, 以及高黎贡山与贺兰山之间的高山植物区系地理成分相关不显著。(2)天山与其他山地的高山植物区系的关联相对最为疏远。(3)高黎贡山和珠峰的高山植物区系与青藏高原以外的北方山地(如长白山、五台山、太白山、天山和贺兰山)联系较弱, 而与同在高原周边的贡嘎山、摩天岭、祁连山的联系明显更强; 除天山以外, 北方山地之间的高山植物区系也有较密切的联系。(4)台湾海峡的存在并未造成台湾高山植物区系地理成分与大陆山地之间区系成分的更大差异, 但台湾的高山植物区系与北方山地(尤其是东部)的联系明显强于纬度接近的喜马拉雅-横断山区。

2.3 各山地高山植物区系联系的环境与空间关联

Mantel检验表明, 不同山地高山带之间的地理空间距离($R = 0.601$, $P = 0.001$)比环境距离($R = 0.551$, $P = 0.002$)对植物区系地理成分构成的差异性影响更大。尤其是偏Mantel检验表明, 在控制环

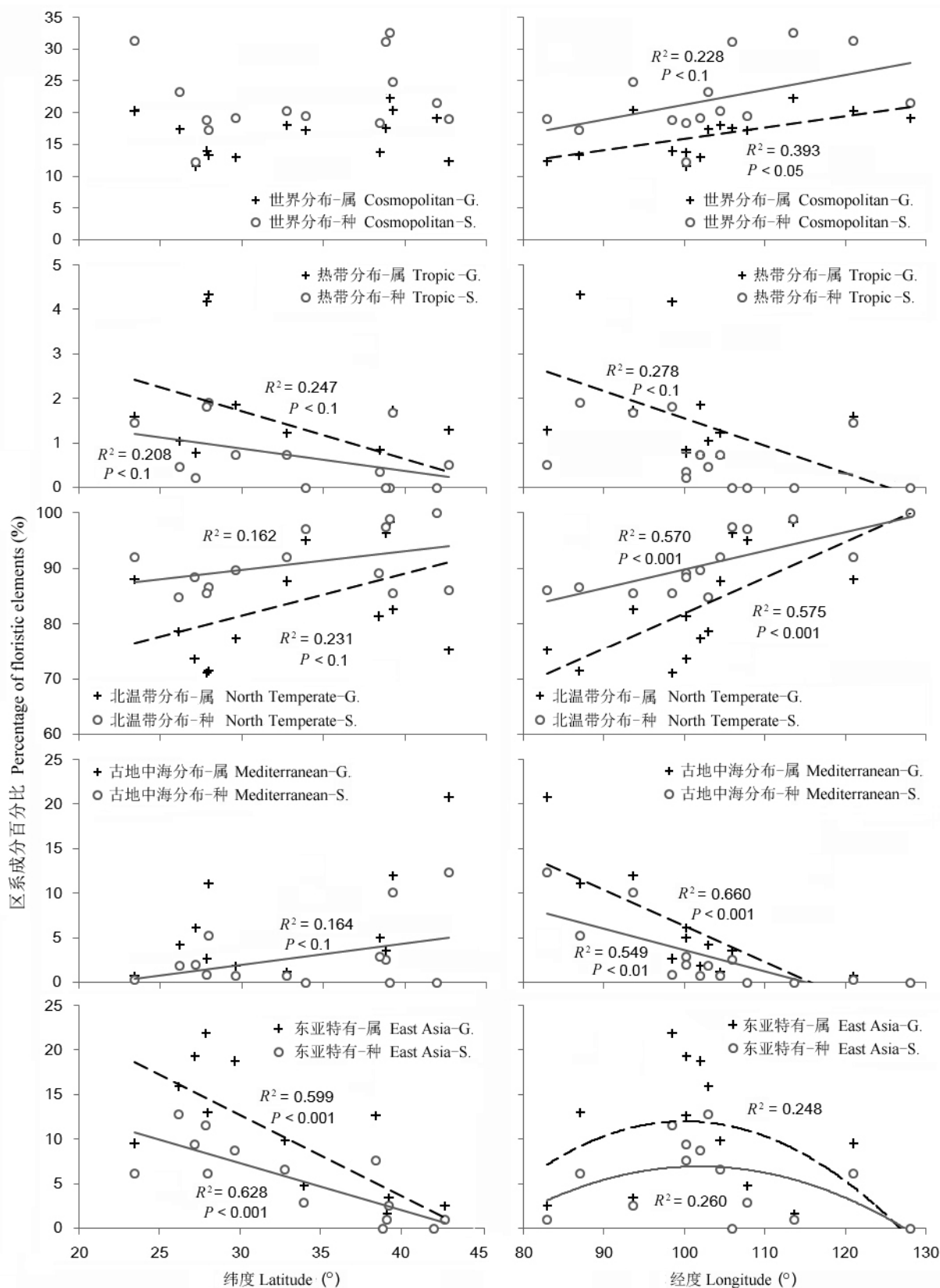


图3 不同区系地理成分百分比的经、纬度格局

Fig. 3 Latitudinal and longitudinal patterns of the geographical elements of alpine floras

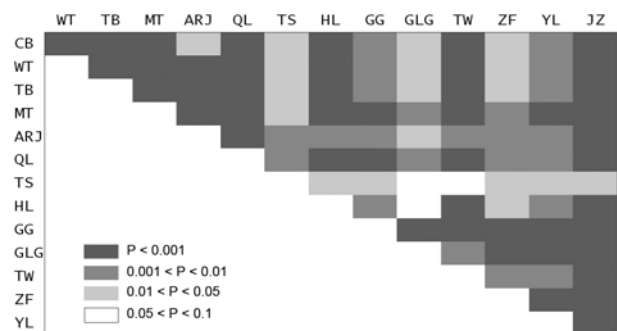


图4 14座山地高山种子植物区系属的地理分布区类型百分比构成的相似性格局

Fig. 4 The similarity patterns of the percentage composition of alpine floristic elements in the 14 main mountains in China

境差异(全部显著因子)影响的情况下,单纯的地理空间距离效应仍然显著($R = 0.445$, $P = 0.001$),而在控制距离效应的情况下,影响显著的环境因子距离矩阵对区系地理成分构成差异的解释力较低($R = 0.354$, $P = 0.008$)。

把高山带环境因子分为空间形态特征(包括高山带面积的log值和山体最大高度)和气候特征两部分。针对高山带空间特征差异的Mantel检验及控制地理距离的偏Mantel检验表明,高山带形态特征差异对区系地理成分构成差异的影响接近环境因子整体的影响, R 值分别为0.546 ($P = 0.002$)和0.353 ($P = 0.017$)。另一方面,气温、年降水量、最热月最高温、最冷月最低温4个高山带气候因子的差异影响中,最热月最高温差异对高山带区系地理成分构成的差异有最显著的影响,Mantel检验和控制地理距离的偏Mantel检验的 R 值分别为0.213 ($P = 0.046$)和0.201 ($P = 0.064$)。

各山地高山带之间地理距离对区系地理成分差异的影响在分别控制全部环境因子、空间形态因子和最热月最高温的效应下,偏Mantel检验的 R 值分别为0.440 ($P = 0.004$)、0.445 ($P = 0.004$)和0.598 ($P = 0.001$),也表明高山带空间特征的效应强于最热月最高温差异的效应。

3 讨论

根据统计,本研究涉及的14座主要山地的高山带至少分布有种子植物65科489属3,670种(含种下单位)。根据中国植物多样性的最新统计资料(王利松等, 2015),这些高山植物大约占中国分布的种子

植物总科数的24.9%、总属数的16.3%和总种数的12.3%。尽管高山带环境极端恶劣,植被稀疏、结构简单,但在这仅占全国陆地面积0.13% (投影面积约12,747.85 km²),分散于14座高山的区域内所分布的植物多样性是非常高的。

《中国种子植物区系地理》(吴征镒等, 2010)一书已经对中国的种子植物区系起源、成分结构、全球地位进行了全面总结,并提出了全国尺度的植物区系区划方案。已有的关于植物区系地理成分的分布格局的研究主要是以行政区域(一般为省)或特定自然地理区划单元(如自然地理区)为对象进行分析的,尽管区域间植物区系成分构成的比较是植物区系地理研究的一种重要途径(沈泽昊和张新时, 2000),但针对山地、平原、高原、湖泊等自然景观单元的植物区系比较往往局限在有限的区域范围内,并不能有效地检验中国植物区系区划系统的合理性。本研究首次在全国尺度上对高山植物区系的地理成分进行了区域比较和宏观格局分析。

3.1 高山植物区系的区域归属与联系

在中国种子植物区系分区系统中,天山属于泛北极植物区,阿尔金山、祁连山和贺兰山则属于古地中海植物区;台湾的高山带被明确划归古热带植物区,本文所涉及的其他山地均属于东亚植物区,其中长白山、五台山、太白山属于中国-日本森林亚区,西南山地包括摩天岭、贡嘎山、高黎贡山、玉龙雪山和轿子雪山均属于中国-喜马拉雅植物亚区,珠峰地区则属于青藏高原亚区(吴征镒等, 2010)。

本文结果表明,位于泛北极植物区中的天山高山带种子植物区系的确表现出与其余山地高山植物区系最大的平均差异;青藏高原周缘山地的高山植物区系之间存在着较为密切的联系,同处中国-日本植物区的北方山地如长白山、五台山、太白山之间也存在很高的区系相似性。此外,古地中海区系成分随经度增加而迅速降低并在贺兰山以东的北方山地不再出现。这些格局特征从高山植物区系的角度显示了不同区系地理成分的区域分异及其边界特征,为中国植物区系区划系统提供了支持。另外,本文数据还表明,在散布全国的14座山地高山植物区系中,中国特有分布属的比例达到5.2%,相比于中国植物区系地理成分整体构成而言(沈泽昊和张新时, 2000)是一个相当高的比例,表明高山

表2 14座主要山地高山种子植物区系地理成分构成相似性与空间距离、环境差异联系的Mantel检验及偏Mantel检验
Table 2 Mantel tests and partial Mantel tests for the correlations between the similarities of geographic elements composition and spatial distance, environmental distance among the 14 main mountains in China

距离矩阵 Distance matrices	<i>R</i>	<i>P</i>
环境距离 Environmental distance	0.5506	0.002
环境距离 地理距离 Environmental distance Geographic distance	0.3543	0.008
形态差异 Physiognomic difference	0.5455	0.002
形态差异 地理距离 Physiognomic difference Geographic distance	0.3532	0.017
最热月最高温差异 MTWM difference	0.2131	0.046
最热月最高温差异 地理距离 MTWM difference Geographic distance	0.2014	0.061
地理距离 Geographic distance	0.6006	0.001
地理距离 环境差异 Geographic distance Environmental distance	0.4401	0.004
地理距离 形态差异 Geographic Physiognomic distance	0.4451	0.003
地理距离 最热月最高温差异 Geographic MTWM distance	0.5979	0.001

带局部发生的物种形成十分旺盛。包括中国特有分布在内的东亚特有成分百分比在高山带呈现出自南向北递减、东西方向上中部隆起的分布格局，与全国整体和低海拔地区的格局完全吻合。显示出中国西南山地对于中国特有植物分布和东亚植物区系发育的重要意义。

但是，针对高山植物区系的分析也揭示了新的区系地理特征。首先，在14座山地高山植物区系的属级分类单元中均缺乏中国-日本植物区系成分。这也显示了中国-日本分布成分不属于高山分布型植物。其次，属于中国-日本植物区的长白山、五台山和太白山以及古地中海植物区东部边界的贺兰山在其高山植物区系中全部缺少属级的热带分布成分，而中国-喜马拉雅植物区和古地中海植物区的诸山地的高山植物区系中却还能找到与热带植物区系的微弱联系。第三，古地中海植物区系的成分普遍出现于中国-喜马拉雅植物区的山地中，有力支持了古地中海植物区系与中国-喜马拉雅植物区系的深远联系(孙航, 2002)。第四，也是最为突出的一点，划归古热带的台湾高山植物区系与中国北方山地的高山植物区系联系反而强于其与处在近似纬度的西南山地的高山植物区系。尽管基于特定山地植物区系种级地理成分构成的研究(沈泽昊等, 2004)、区域植物区系比较研究(陈之端等, 2012)及特定物种谱系地理研究的结果(Ying et al, 2016)都证实，存在着从西南山地经秦岭和大巴山-大别山向东的区系联系通道(王文采, 1992)，但本文结果表明对于高山植物区系而言，中国东部地区南北方向

的植物区系联系强度大于东西向的区系联系。这一结果为第四纪冰期/间冰期循环驱动中国东部南北向植物区系联系，包括实现岛屿与大陆之间物种扩散交流的机制性假说提供了新的佐证(王文采, 1992; 沈中桴, 1997; 叶建飞等, 2012)。

值得指出的是，目前基于植物区系地理成分构成进行的区系分区方案主要是针对较大区域进行的研究结果(吴征镒等, 2010)。本文数据针对高山区特定范围的数据，所得结果应是对既有成果的一种补充，也是在不同尺度上的验证。我们发现台湾的高山带植物区系仍保留有鲜明而深远的泛北极和东亚北部区系成分的影响，不应归于古热带植物区，这一结果与Zhu (2016)的观点一致；喜马拉雅山脉中段的珠峰地区高山带(尤其是南坡)植物区系也明显不同于青藏高原生物区；天山而不是隔海相望的台湾高山带的植物区系与中国其他高山区的植物区系更加隔离。这些与既有认识不一致之处值得进一步探索验证。

3.2 高山带范围和气候条件对区系成分构成的影响

岛屿面积、生境异质性和距离隔离是岛屿物种丰富度的决定因子(MacArthur & Wilson, 1967)，并且通过物种的迁移拓殖和局部灭绝过程来影响岛屿之间物种构成的更替(Qian & Ricklefs, 2012)。但是，不同研究对这几个因子影响作用的相对大小有不同的认识，并发现研究范围的尺度、岛屿生境之间的连通性、对象的生活史特征等都是潜在的影响因素(Chen et al, 2011; Keil et al, 2012; Si et al,

2014)。

本文结果表明, 中国高山植物区系之间的地理成分构成变化受地理距离的隔离比环境差异(主要是气候)的影响更大。同时, 在各气候因子中, 能量差异的影响高于寒冷限制和水分差异所带来的影响, 表现为单一环境因子的Mantel检验结果中, 暖季高温差异($R = 0.213$, $P = 0.046$)的相关性大于年均温差异($R = 0.189$, $P = 0.066$)、冷季低温差异($R = 0.185$, $P = 0.075$)和年降水量差异($R = 0.007$, $P = 0.469$)。另外, 区系相似性空间格局表明, 台湾海峡并没有显示出对高山植物区系产生空间距离之外的隔离效应。

高山带是同时受到山地之间的几何距离、沿海海拔梯度的非生物环境距离以及宽阔的山地森林带造成的生物竞争性距离等多重隔离的岛屿型非森林生境, 彼此之间物种迁移受隔离的程度应不亚于真正的岛屿。同时高山带是极端气候下形成的高度特化的生态系统, 彼此之间在气候环境上的相似性更为明显, 包括巨大的日温差、高辐射、稀薄空气和大风等(Körner, 2003)。本文分析的14座山地高山带之间的两两平均几何距离在16.836个经纬度, 即 $>1,000$ km, 由此带来的隔离效应强于环境距离是可以理解的。

另一方面, 面积大小和生境的异质性是岛屿承载不同生态属性物种能力的决定因子, 并决定了岛屿物种更替的灭绝速率(Russell et al, 2006; Si et al, 2014)。因此, 岛屿面积和海拔范围的差异与岛屿物种构成的差异具有正相关性的结果同样适用于高山带。全球高山树线的海拔高度非常一致地对应于生长季均温(约 6.7°C)等值线(Körner & Paulsen, 2004), 表明生长季的能量积累是山地高山带植物分布的主要限制因子。本文数据表明, 最热月最高温比其他气候指标对高山带植物区系相似性的影响更大, 主要的原因可能正是特定山地高山带的平均最热月最高温与高山带范围大小之间存在内在的关联。

3.3 研究结果的不确定性分析

受不同山地高山带植物区系调查强度和调查范围的影响, 本文分析的14座山地的高山植物区系名录会存在不同程度的不确定性, 主要包括调查不充分导致的物种名录不完整、物种鉴定不准确导致的种类误差、不同物种名录因采用不同分类系统而

造成的异名以及新近发表的物种或物种分类位置调整所带来的误差等等。为了降低数据的不确定性对结果可靠性的影响, 我们在数据分析阶段将不同名录的分类系统均调整为*Flora of China*的系统, 以消除异名产生的影响; 同时, 尽管统计了各高山植物区系全部维管束植物的丰富度, 但重点分析种子植物属的分布区类型, 这不仅可以降低物种鉴定误差带来的影响(主要出现在种和种下水平), 也避免了蕨类植物分布区类型划分没有直接依据的困难。需要说明的是, 目前的中国植物区系地理成分的分布区类型系统是基于种子植物属而建立的, 如果直接套用于种水平会存在一定的误差, 且这个误差从未得到评估。考虑到建立全国甚至仅仅高山带植物种的分布区类型都仍是一时难以完成的工作, 本文中不同区系地理成分的种数统计仅是对属水平分析的一种附加统计, 而非种的地理成分分析。

综上, 基于种子植物属的分布区类型的数据分析能较好地消减因取样不足造成的不同数据之间的可比性, 同时基于不同区系成分百分比构成的分析也消减了不同名录样本量大小差异的影响, 因此可以认为本文结果具有较高的可靠性。当然, 由于样本量和各山地数据质量的差异, 对高山植物多样性格局更加深入的分析会因而受限。

4 小结

中国山地的高山带分布着物种丰富的植物区系, 主要由北温带分布及其亚型、世界分布、旧世界温带分布和东亚分布及中国-喜马拉雅分布等地理成分构成, 缺少中国-日本分布成分, 中国特有属的比例较高。中国14座主要山地高山植物区系构成的地理分异显示了自南向北热带和东亚成分减少、北温带成分增加, 自西向东古地中海成分减少、北温带成分增加、而东亚成分在中部达到最大值的格局特征; 14座山地的高山植物区系之间在属级地理成分构成上具有显著的相似性, 其中北方山地和青藏高原周缘山地构成了区系成分近似的两大群组, 台湾与大陆东部北方山地的高山植物区系之间联系更深。上述结果对我国植物区系地理分区系统提供了一个独特的验证。此外, 地理距离的隔离是高山植物区系分异的首要因素, 高山带的面积大小也影响到其区系成分的构成, 而夏季热量是显著影响中国高山植物区系地理分异的关键气候因子。

致谢: 两位匿名审稿人对本文初稿提出宝贵意见和建议。谨致谢忱!

参考文献

- Bliss LC (1971) Arctic and alpine plant life cycles. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 2, 405–438.
- Cao W, Li JY (2003) *Natural Distribution of Plants in Changbai Mountain*. Northeast University Press, Shenyang. (in Chinese) [曹伟, 李冀云 (2003) 长白山植物自然分布. 东北大学出版社, 沈阳.]
- Caplat P, Edelaar P, Dudaniec RY, Green AJ, Okamura B, Cote J, Ekroos J, Jonsson PR, Löndahl J, Tesson SVM, Petit EJ (2016) Looking beyond the mountain, dispersal barriers in a changing world. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 14, 261–268.
- Chapin III FS, Körner C (1994) Arctic and alpine biodiversity, patterns, causes and ecosystem consequences. *Trends in Ecology & Evolution*, 9, 45–47.
- Chen LZ (2014) *Geography of Flora and Vegetation in China*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [陈灵芝 (2014) 中国植物区系与植被地理. 科学出版社, 北京.]
- Chen S, Jiang G, Zhang J, Li Y, Qian H (2011) Species turnover of amphibians and reptiles in eastern China, disentangling the relative effects of geographic distance and environmental difference. *Ecological Research*, 26, 442–456.
- Chen Z, Ying JS, Lu AM (2012) Disjunct distribution of seed plants between Southwest China and Taiwan Island of China. *Chinese Bulletin of Botany*, 47, 551–570. (in Chinese with English abstract) [陈之端, 应俊生, 路安民 (2012) 中国西南地区与台湾种子植物间断分布现象. 植物学报, 47, 551–570.]
- Cui NR, Akefu P (1993) The formation and the basic nature of the flora in the Argion Mountain Natural Reserve, China. *Journal of Xinjiang Normal University (Natural Sciences Edition)*, 1, 47–53. (in Chinese with English abstract) [崔乃然, 彼得·爱克夫 (1993) 中国阿尔金山自然保护区植物区系组成及基本特征. 新疆师范大学学报(自然科学版), 1, 47–53.]
- Cui ZJ, Chen YX, Zhang W, Zhou SZ, Zhou LP, Zhang M, Li CC (2011) Research history, glacial chronology and origins of Quaternary glaciations in China. *Quaternary Sciences*, 31, 749–764. (in Chinese with English abstract) [崔之久, 陈艺鑫, 张威, 周尚哲, 周力平, 张梅, 李川川 (2011) 中国第四纪冰期历史、特征及成因探讨. 第四纪研究, 31, 749–764.]
- Farr TG, Kobrick M (2000) Shuttle radar topography mission produces a wealth of data. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 81, 583–585.
- Feng JM, Wang XP, Xu CD, Yang YH, Fang JY (2006) Altitudinal patterns of plant species diversity and community structure on Yulong Mountains, Yunnan, China. *Journal of Mountain Science*, 24, 110–116. (in Chinese with English abstract) [冯建孟, 王襄平, 徐成东, 杨元合, 方精云 (2006) 玉龙雪山植物物种多样性和群落结构沿海拔梯度的分布格局. 山地学报, 24, 110–116.]
- Han J, Shen ZH, Shi SL, Peng PH (2016) Comparison of plant species diversity and composition in the dry valleys of Yalong River and Dadu River: evaluating the effects of climate, topography and space. *Biodiversity Science*, 24, 421–430. (in Chinese with English abstract) [韩杰, 沈泽昊, 石松林, 彭培好 (2016) 雅砻江和大渡河干旱河谷植被物种多样性比较: 气候、地形与空间的影响. 生物多样性, 24, 421–430.]
- Hijmans RJ, Cameron SE, Parra JL, Jones PG, Jarvis A (2005) Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 25, 1965–1978.
- Keil P, Schweiger O, Kühn I, Kunin WE, Kuussaari M, Settele J, Henle K, Brotons L, Pe'er G, Lengyel S, Moustakas A, Steinicke H, Storch D (2012) Patterns of beta diversity in Europe, the role of climate, land cover and distance across scales. *Journal of Biogeography*, 39, 1473–1486.
- Körner C, Paulsen J (2004) A world-wide study of high altitude treeline temperatures. *Journal of Biogeography*, 31, 713–732.
- Körner C (2003) *Alpine Plant Life: Functional Plant Ecology of High Mountain Ecosystems*. Springer, Berlin.
- Kropf M, Comes HP, Kadereit JW (2006) Long-distance dispersal vs vicariance, the origin and genetic diversity of alpine plants in the Spanish Sierra Nevada. *New Phytologist*, 172, 169–184.
- Li CF, Chytry M, Zelený D, Hsieh CF (2013) Classification of Taiwan forest vegetation. *Applied Vegetation Science*, 16, 698–719.
- Li H, Guo HJ, Dao ZL (2000) *Flora of Gaoligong Mountains*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [李恒, 郭辉军, 刀志灵 (2000) 高黎贡山植物. 科学出版社, 北京.]
- Li LP, Yin LK, Tang ZY (2011) Distribution patterns of the species richness of plants and animals in Xinjiang, China. *Arid Zone Research*, 28, 1–9. (in Chinese with English abstract) [李利平, 尹林克, 唐志尧 (2011) 新疆野生动植物物种丰富度的分布格局. 干旱区研究, 28, 1–9.]
- Liang CZ (2012) *Vegetation of Helan Mountain*. Sunshine Press, Yinchuan. (in Chinese) [梁存柱 (2012) 贺兰山植被. 阳光出版社, 银川.]
- López-Pujol J, Zhang FM, Sun HQ, Ying TS, Ge S (2011) Mountains of Southern China as “plant museums” and “plant cradles”, evolutionary and conservation insights. *Mountain Research and Development*, 31, 261–269.
- Lu AM (1999) *The Geography of Spermatophytic Families and Genera*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [路安民 (1999) 种子植物科属地理. 科学出版社, 北京.]
- Luo D, Yue JP, Sun WG, Xu B, Li ZM, Comes HP, Sun H (2016) Evolutionary history of the subnival flora of the Hi-

- malaya-Hengduan Mountains, first insights from comparative phylogeography of four perennial herbs. *Journal of Biogeography*, 43, 31–43.
- Luo J, Zheng WL, Pan G, Wang JS (2006) Study on spermatophyte flora of the alpine frigid zone in Shergyla Mountain of Tibet. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 24, 215–219. (in Chinese with English abstract) [罗建, 郑维列, 潘刚, 王景升 (2006) 色季拉山区高山寒带种子植物区系研究. *武汉植物研究*, 24, 215–219.]
- MacArthur RH, Wilson EO (1967) *The Theory of Island Biogeography*. Princeton University Press, Princeton.
- Marshall J (1957) *The Birds of the Pine-oak Woodland in Southern Arizona and Adjacent Mexico*. Pacific Coast Avifauna, 32, 5–125.
- Mary E, Diamond JM (1976) Birds on islands in the sky, origin of the montane avifauna of Northern Melanesia. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 73, 1765–1769.
- Packer JG (1974) Differentiation and dispersal in alpine floras. *Arctic and Alpine Research*, 6, 117–128.
- Peng H, Liu ED (2015) *Yunnan Jiaozi Snow Mountain National Nature Reserve*. China Forestry Publishing House, Beijing. (in Chinese) [彭华, 刘恩德 (2015) *云南轿子雪山国家级自然保护区*. 中国林业出版社, 北京.]
- Qian H, Ricklefs RE (2012) Disentangling the effects of geographic distance and environmental dissimilarity on global patterns of species turnover. *Global Ecology and Biogeography*, 21, 341–351.
- Ren Y (2006) *Study and Management of Biodiversity in Taibai Mountain Nature Reserve*. China Forestry Publishing House, Beijing. (in Chinese) [任毅 (2006) *太白山自然保护区生物多样性研究与管理*. 中国林业出版社, 北京.]
- Russell GJ, Diamond JM, Reed TM, Pimm SL (2006) Breeding birds on small islands, island biogeography or optimal foraging? *Journal of Animal Ecology*, 75, 324–339.
- Sandel B, Arge L, Dalsgaard B (2011) The influence of late Quaternary climate-change velocity on species endemism. *Science*, 334, 660–664.
- Shen ZH, Liu ZL, Wu J (2004) Altitudinal pattern of flora on the eastern slope of Mt. Gongga. *Biodiversity Science*, 12, 89–98. (in Chinese with English abstract) [沈泽昊, 刘增力, 伍杰 (2004) 贡嘎山东坡植物区系的垂直分布格局. *生物多样性*, 12, 89–98.]
- Shen ZH, Zhang XS (2000) A quantitative analysis on the floristic elements of the Chinese subtropical region and their spatial patterns. *Acta Phytotaxonomica Sinica*, 38, 366–380. (in Chinese with English abstract) [沈泽昊, 张新时 (2000) 中国亚热带地区植物区系地理成分及其空间格局的数量分析. *植物分类学报*, 38, 366–380.]
- Shen ZF (1997) *Biogeography of Taiwan*. I. Some preliminary thinking and studies. *Annals of Taiwan Provincial Museum*, 40, 361–450. (in Chinese) [沈中桴 (1997) *台湾的生物地理*. 1. 一些初步思考和研究. *台湾省立博物馆年刊*, 40, 361–450.]
- Shi YF, Cui ZJ, Su Z (2006) *The Quaternary Glaciations and Environmental Variations in China*. Hebei Science and Technology Publishing House, Shijiazhuang. (in Chinese) [施雅风, 崔之久, 苏珍 (2006) *中国第四纪冰川与环境变化*. 河北科学技术出版社, 石家庄.]
- Si X, Pimm SL, Russell GJ, Ding P (2014) Turnover of breeding bird communities on islands in an inundated lake. *Journal of Biogeography*, 41, 2283–2292.
- Sun H (2002) Tethys retreat and Himalayas-Hengduanshan Mountains uplift and their significance on the origin and development of the Sino-Himalayan elements and alpine flora. *Acta Botanica Yunnanica*, 24, 273–288. (in Chinese with English abstract) [孙航 (2002) 古地中海退却与喜马拉雅-横断山的隆起在中国喜马拉雅成分及高山植物区系的形成与发展上的意义. *云南植物研究*, 24, 273–288.]
- Tackenberg O, Stöcklin J (2009) Wind dispersal of alpine plant species, a comparison with lowland species. *Journal of Vegetation Science*, 19, 109–118.
- Tao JR (1992) The Tertiary vegetation and flora and floristic regions in China. *Acta Phytotaxonomica Sinica*, 30, 25–43. (in Chinese with English abstract) [陶君容 (1992) 中国第三纪植被与植物区系历史及分区. *植物分类学报*, 30, 25–43.]
- van Zyl JJV (2001) The shuttle radar topography mission (SRTM), a breakthrough in remote sensing of topography. *Acta Astronautica*, 48, 559–565.
- Wang HS (1992) *Floristic Geography*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [王荷生 (1992) *植物区系地理*. 科学出版社, 北京.]
- Wang J (2012) Study on the flora of spermatophyte in Xinluhai Nature Reserve of the Queer Mountain. *Journal of Anhui Agricultural Science*, 40, 11020–11021. (in Chinese with English abstract) [王静 (2012) 雀儿山新路海自然保护区高山种子植物区系研究. *安徽农业科学*, 40, 11020–11021.]
- Wang LS, Jia Y, Zhang XC, Qin HN (2015) Overview of higher plant diversity in China. *Biodiversity Science*, 23, 217–224. (in Chinese with English abstract) [王利松, 贾渝, 张宪春, 覃海宁 (2015) 中国高等植物多样性. *生物多样性*, 23, 217–224.]
- Wang WC (1992) On some distribution patterns and some migration routes found in the eastern Asiatic region. *Acta Phytotaxonomica Sinica*, 30, 1–24; 30, 97–117. (in English with Chinese abstract) [王文采 (1992) 东亚植物区系的一些分布式样和迁移路线. *植物分类学报*, 30, 1–24; 30, 97–117.]
- Wondimu T, Gizaw A, Tusiime FM, Masao CA, Abdi AA, Gussarova G, Popp M, Nemomissa S, Brochmann C (2014) Crossing barriers in an extremely fragmented system, two case studies in the afro-alpine sky island flora. *Plant Systematics and Evolution*, 300, 415–430.

- Wu ZY (1991) The areal-types of Chinese genera of seed plants. *Acta Botanica Yunnanica*, 13 (Suppl. IV), 1–139. (in Chinese with English abstract) [吴征镒 (1991) 中国种子植物属的分布区类型. 云南植物研究, 13(增刊IV), 1–139.]
- Wu ZY, Sun H, Zhou ZK, Li DZ, Peng H (2010) Floristic Geography of Seed Plants in China. Science Press, Beijing. (in Chinese) [吴征镒, 孙航, 周浙昆, 李德铎, 彭华 (2010) 中国种子植物区系地理. 科学出版社, 北京.]
- Wurster CM, Bird MI (2014) Barriers and bridges, early human dispersals in equatorial SE Asia. *Geology and Archaeology, Submerged Landscapes of the Continental Shelf* (eds Harff J, Bailey G, Lüth F), Special Publications, pp. 411. Geological Society, London.
- Yan YH, Zhang XC, Ma KP (2013) Pteridophytes in China: Diversity and Distribution. Science Press, Beijing. (in Chinese) [严岳鸿, 张宪春, 马克平 (2013) 中国蕨类植物多样性与地理分布. 科学出版社, 北京.]
- Yang QS, Liu JQ, Wang YK (2008) The Integrated Scientific Investigation Report of Gansu Qilian Mountain National Nature Reserve. Gansu Science and Technology Press, Lanzhou. (in Chinese) [杨全生, 刘建泉, 汪有奎 (2008) 甘肃祁连山国家级自然保护区综合科学考察报告. 甘肃科学技术出版社, 兰州.]
- Ye JF, Chen ZD, Liu B, Qin HN, Yang Y (2012) Disjunct distribution of vascular plants between southwestern area and Taiwan area in China. *Biodiversity Science*, 20, 482–494. (in Chinese with English abstract) [叶建飞, 陈之端, 刘冰, 覃海宁, 杨永 (2012) 中国西南与台湾地区维管植物的间断分布格局及形成机制. 生物多样性, 20, 482–494.]
- Yin XL, Li H, Chiu QA, Chen TY, Chen XY, Luo SJ, Shen ZH (2016) The phylogeography of *Fagus hayatae* (Fagaceae) in China: genetic isolation among populations. *Ecology & Evolution*, 6, 2805–2816.
- Yu HB, Zhang YL (2013) Advance in phylogeography of alpine plants in the Tibetan Plateau and adjacent region. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 33, 1268–1278. (in Chinese with English abstract) [于海彬, 张镜铨 (2013) 青藏高原及其周边地区高山植物谱系地理学研究进展. 西北植物学报, 33, 1268–1278.]
- Zhang HD (1980) Origin and development of flora in China. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 1, 89–98. (in Chinese with English abstract) [张宏达 (1980) 华夏植物区系的起源与发展. 中山大学学报(自然科学版), 1, 89–98.]
- Zhang JQ, Meng SY, Allen GA, Wen J, Rao GY (2014) Rapid radiation and dispersal out of the Qinghai-Tibetan Plateau of an alpine plant lineage *Rhodiola* (Crassulaceae). *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 77, 147–158.
- Zhang WJ, Lu QY, Liang J, Shen ZH (2010) Altitudinal gradients of species richness and range size of vascular plants in Taiwan, a test of Rapoport's rule. *Biodiversity Science*, 18, 312–322. (in Chinese with English abstract) [张婉君, 卢绮妍, 梁军, 沈泽昊 (2010) 台湾维管束植物物种丰富度和种域宽度的海拔格局及Rapoport法则检验. 生物多样性, 18, 312–322.]
- Zhang XS (1994) The basic ecological geographical types of altitudinal spectrum of mountain vegetation in China. In: *Studies of Vegetation Ecology, Memorial of Professor Xueyu Hou, the Famous Ecologist* (eds Jiang S, Chen CD), pp. 250–270. Science Press, Beijing. (in Chinese) [张新时 (1994) 中国山地植被垂直带的基本生态地理类型. 植被生态学研究——纪念著名生态学家侯学煜教授(姜恕, 陈昌笃 主编), 250–270页, 科学出版社, 北京.]
- Zheng Z, Gong DJ, Zhang Q, Zhao HB (2014) Vertical patterns of plant species diversity in the Baishuijiang Nature Reserve, explanation of area, climate and boundary constraint. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 25, 3390–3398. (in Chinese with English abstract) [郑智, 龚大洁, 张乾, 赵海斌 (2014) 白水江自然保护区植物物种多样性的垂直格局、面积、气候、边界限制的解析. 应用生态学报, 25, 3390–3398.]
- Zheng Z (1999) Response of altitudinal belts of vegetation to the late Quaternary climate changes in tropic Asia. *Geographic Research*, 18, 96–102. (in Chinese with English abstract) [郑卓 (1999) 亚洲热带山地植被垂直带对晚第四纪气候变化的响应. 地理研究, 18, 96–102.]
- Zhu H (2016) A biogeographical comparison between Yunnan, Southwest China, and Taiwan, Southeast China, with implications for the evolutionary history of the East Asian Flora. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 101, 750–771.

(责任编辑: 周玉荣)

附录 Supplementary Material

附录1 中国14座主要山地高山种子植物区系属的地理成分构成

Appendix 1 The percentage composition of floristic elements of alpine seed plants in 14 main mountain ranges in China
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2017014-1.pdf>

附录2 中国14座主要山地高山种子植物区系前10科和前10个属及其物种数

Appendix 2 The top 10 families and top 10 genera of seed plant species number of alpine flora in the 14 main mountains in China
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2017014-2.pdf>

附录1 中国14座主要山地高山种子植物区系属的地理成分构成
Appendix 1 The composition of floristic elements of alpine seed plants in 14 main mountain ranges in China

分布区类型 Areal-type	长白山 CB	五台山 WT	太白山 TB	摩天岭 MT	阿尔金山 ARJ	祁连山 QL	天山 TS	贺兰山 HL	贡嘎山 GG	高黎贡山 GLG	台湾山脉 TW	珠峰 ZF	玉龙雪山 YL	轿子雪山JZ	全部 Total
1	15	17	13	18	15	19	22	12	24	31	32	32	17	20	50
2				1	1	1	2		1	4	2	3	1	1	9
3									1	1		2			2
4												2			2
5										1					1
6												1			1
7									1	2		1			3
8	54	49	47	56	34	74	84	47	90	96	85	108	72	56	190
9	2		1	4	1	1	1		10	8	10	5	2	1	19
10	6	8	7	8	8	12	26	3	17	24	14	23	13	9	66
11	1	1	4	3	5	9	5	4	7	8	2	12	8	8	20
12					5	2	10	1			1	11	3	1	20
13				1	2	4	22	1	3	5		12	5	3	34
14			1	1		1			6	8	7	4	2	2	19
14SH			2	5	1	7	4		16	26	5	21	17	9	47
15		1		2	1	7			8	8		2	6	4	24
合计	78	76	75	99	73	137	176	68	184	222	158	239	146	114	507

附录2 中国14座山脉高山种子植物区系前10科和前10个属及其物种数
Appendix 2 The top 10 families and top 10 genera of seed plant species number of alpine flora in the 14 main mountains in China

序号	科名	Family	CB	科名	Family	WT	科名	Family	TB	科名	Family	MT	科名	Family	ARJ	科名	Family	QL	科名	Family	TS
1	菊科	Compositae	12	禾本科	Gramineae	22	菊科	Compositae	16	蔷薇科	Rosaceae	20	禾本科	Gramineae	29	菊科	Compositae	41	菊科	Compositae	80
2	毛茛科	Ranunculaceae	10	莎草科	Cyperaceae	20	毛茛科	Ranunculaceae	13	菊科	Compositae	18	十字花科	Cruciferae	19	禾本科	Gramineae	26	禾本科	Gramineae	71
3	石竹科	Caryophyllaceae	8	菊科	Compositae	18	禾本科	Gramineae	12	毛茛科	Ranunculaceae	16	菊科	Compositae	17	毛茛科	Ranunculaceae	26	十字花科	Cruciferae	45
4	杜鹃花科	Ericaceae	6	毛茛科	Ranunculaceae	10	虎耳草科	Saxifragaceae	8	百合科	Liliaceae	12	莎草科	Cyperaceae	17	莎草科	Cyperaceae	25	蝶形花科	Papilionaceae	29
5	蔷薇科	Rosaceae	5	龙胆科	Gentianaceae	9	莎草科	Cyperaceae	7	伞形科	Umbelliferae	12	蝶形花科	Papilionaceae	14	玄参科	Scrophulariaceae	20	毛茛科	Ranunculaceae	29
6	玄参科	Scrophulariaceae	5	玄参科	Scrophulariaceae	7	蓼科	Polygonaceae	7	蓼科	Polygonaceae	8	报春花科	Primulaceae	8	十字花科	Cruciferae	19	龙胆科	Gentianaceae	20
7	伞形科	Umbelliferae	5	石竹科	Caryophyllaceae	6	蔷薇科	Rosaceae	6	忍冬科	Caprifoliaceae	6	毛茛科	Ranunculaceae	8	龙胆科	Gentianaceae	19	石竹科	Caryophyllaceae	19
8	景天科	Crassulaceae	4	报春花科	Primulaceae	6	伞形科	Umbelliferae	6	灯芯草科	Juncaceae	6	蔷薇科	Rosaceae	7	蝶形花科	Papilionaceae	15	莎草科	Cyperaceae	19
9	蝶形花科	Papilionaceae	4	十字花科	Cruciferae	5	石蒜科	Amaryllidaceae	5	虎耳草科	Saxifragaceae	6	石竹科	Caryophyllaceae	4	石竹科	Caryophyllaceae	13	唇形科	Labiatae	19
10	蓼科	Polygonaceae	4	蔷薇科	Rosaceae	5	十字花科	Cruciferae	5	玄参科	Scrophulariaceae	6	藜科	Chenopodiaceae	4	蔷薇科	Rosaceae	12	玄参科	Scrophulariaceae	17
总种数 Total species number			111			144			128			172			157			338			492
	科名	Family	HL	科名	Family	GG	科名	Family	GLG	科名	Family	TW	科名	Family	ZF	科名	Family	YL	科名	Family	JZ
1	禾本科	Gramineae	18	菊科	Compositae	44	杜鹃花科	Ericaceae	106	菊科	Compositae	49	菊科	Compositae	105	菊科	Compositae	80	菊科	Compositae	28
2	莎草科	Cyperaceae	12	毛茛科	Ranunculaceae	38	菊科	Compositae	102	兰科	Orchidaceae	32	蔷薇科	Rosaceae	60	玄参科	Scrophulariaceae	43	龙胆科	Gentianaceae	24
3	石竹科	Caryophyllaceae	8	虎耳草科	Saxifragaceae	30	蔷薇科	Rosaceae	67	禾本科	Gramineae	30	十字花科	Cruciferae	47	杜鹃花科	Ericaceae	36	毛茛科	Ranunculaceae	19
4	菊科	Compositae	8	蔷薇科	Rosaceae	29	毛茛科	Ranunculaceae	61	蔷薇科	Rosaceae	26	蝶形花科	Papilionaceae	45	毛茛科	Ranunculaceae	33	蔷薇科	Rosaceae	19
5	毛茛科	Ranunculaceae	8	莎草科	Cyperaceae	25	玄参科	Scrophulariaceae	50	毛茛科	Ranunculaceae	24	毛茛科	Ranunculaceae	45	虎耳草科	Saxifragaceae	32	十字花科	Cruciferae	17
6	蔷薇科	Rosaceae	8	杜鹃花科	Ericaceae	24	龙胆科	Gentianaceae	44	莎草科	Cyperaceae	19	禾本科	Gramineae	39	十字花科	Cruciferae	29	石竹科	Caryophyllaceae	16
7	十字花科	Cruciferae	5	百合科	Liliaceae	24	报春花科	Primulaceae	44	鳞毛蕨科	Dryopteridaceae	16	莎草科	Cyperaceae	38	龙胆科	Gentianaceae	28	杜鹃花科	Ericaceae	16
8	龙胆科	Gentianaceae	5	禾本科	Gramineae	22	兰科	Orchidaceae	43	玄参科	Scrophulariaceae	15	玄参科	Scrophulariaceae	37	报春花科	Primulaceae	27	伞形科	Umbelliferae	15
9	蓼科	Polygonaceae	4	伞形科	Umbelliferae	22	石竹科	Caryophyllaceae	32	石竹科	Caryophyllaceae	14	虎耳草科	Saxifragaceae	32	伞形科	Umbelliferae	22	禾本科	Gramineae	13
10	玄参科	Scrophulariaceae	4	玄参科	Scrophulariaceae	21	虎耳草科	Saxifragaceae	31	龙胆科	Gentianaceae	12	报春花科	Primulaceae	29	石竹科	Caryophyllaceae	20	玄参科	Scrophulariaceae	13
总种数 Total species number			112			496			944			403			826			522			285
	属名	Genus	CB	属名	Genus	WT	属名	Genus	TB	属名	Genus	MT	属名	Genus	ARJ	属名	Genus	QL	属名	Genus	TS
1	乌头属	<i>Aconitum</i>	4	苔草属	<i>Carex</i>	15	风毛菊属	<i>Saussurea</i>	6	马先蒿属	<i>Pedicularis</i>	6	苔草属	<i>Carex</i>	8	风毛菊属	<i>Saussurea</i>	15	葶苈属	<i>Draba</i>	21
2	杜鹃属	<i>Rhododendron</i>	4	风毛菊属	<i>Saussurea</i>	7	葱属	<i>Allium</i>	5	蓼属	<i>Polygonum</i>	6	早熟禾属	<i>Poa</i>	8	马先蒿属	<i>Pedicularis</i>	13	棘豆属	<i>Oxytropis</i>	21
3	石竹属	<i>Dianthus</i>	3	马先蒿属	<i>Pedicularis</i>	6	苔草属	<i>Carex</i>	5	委陵菜属	<i>Potentilla</i>	6	嵩草属	<i>Kobresia</i>	7	苔草属	<i>Carex</i>	12	早熟禾属	<i>Poa</i>	20
4	龙胆属	<i>Gentiana</i>	3	龙胆属	<i>Gentiana</i>	5	葶苈属	<i>Draba</i>	4	香青属	<i>Anaphalis</i>	5	棘豆属	<i>Oxytropis</i>	7	龙胆属	<i>Gentiana</i>	10	苔草属	<i>Carex</i>	15
5	蓼属	<i>Polygonum</i>	3	早熟禾属	<i>Poa</i>	5	马先蒿属	<i>Pedicularis</i>	4	银莲花属	<i>Anemone</i>	5	葶苈属	<i>Draba</i>	6	嵩草属	<i>Kobresia</i>	10	红景天属	<i>Rhodiola</i>	12

6	柳属	<i>Salix</i>	3	毛茛属	<i>Ranunculus</i>	5	蓼属	<i>Polygonum</i>	4	忍冬属	<i>Lonicera</i>	5	委陵菜属	<i>Potentilla</i>	6	黄芪属	<i>Astragalus</i>	9	鹅观草属	<i>Roegneria</i>	12					
7	风毛菊属	<i>Saussurea</i>	3	羊茅属	<i>Festuca</i>	4	虎耳草属	<i>Saxifraga</i>	4	杜鹃属	<i>Rhododendron</i>	5	黄芪属	<i>Astragalus</i>	5	委陵菜属	<i>Potentilla</i>	8	风毛菊属	<i>Saussurea</i>	10					
8	耧斗菜属	<i>Aquilegia</i>	2	嵩草属	<i>Kobresia</i>	4	紫菀属	<i>Aster</i>	3	灯芯草属	<i>Juncus</i>	4	风毛菊属	<i>Saussurea</i>	5	虎耳草属	<i>Saxifraga</i>	8	点地梅属	<i>Androsace</i>	9					
9	碎米荠属	<i>Cardamine</i>	2	委陵菜属	<i>Potentilla</i>	4	龙胆属	<i>Gentiana</i>	3	风毛菊属	<i>Saussurea</i>	4	点地梅属	<i>Androsace</i>	4	葱属	<i>Allium</i>	7	委陵菜属	<i>Potentilla</i>	9					
10	苔草属	<i>Carex</i>	2	鹅观草属	<i>Roegneria</i>	4	忍冬属	<i>Lonicera</i>	3	虎耳草属	<i>Saxifraga</i>	4	碱茅属	<i>Puccinellia</i>	4	无心菜属	<i>Arenaria</i>	6	羊茅属	<i>Festuca</i>	8					
总种数 Total species number			111				144				128				172				157				338			492
	属名	Genus	HL	属名	Genus	GG	属名	Genus	GLG	属名	Genus	TW	属名	Genus	ZF	属名	Genus	YL	属名	Genus	JZ					
1	苔草属	<i>Carex</i>	7	杜鹃属	<i>Rhododendron</i>	21	杜鹃属	<i>Rhododendron</i>	89	苔草属	<i>Carex</i>	18	虎耳草属	<i>Saxifraga</i>	28	马先蒿属	<i>Pedicularis</i>	38	龙胆属	<i>Gentiana</i>	16					
2	早熟禾属	<i>Poa</i>	7	虎耳草属	<i>Saxifraga</i>	19	马先蒿属	<i>Pedicularis</i>	39	悬钩子属	<i>Rubus</i>	9	马先蒿属	<i>Pedicularis</i>	22	杜鹃属	<i>Rhododendron</i>	32	杜鹃属	<i>Rhododendron</i>	16					
3	委陵菜属	<i>Potentilla</i>	5	苔草属	<i>Carex</i>	15	报春花属	<i>Primula</i>	33	鳞毛蕨属	<i>Dryopteris</i>	8	委陵菜属	<i>Potentilla</i>	20	虎耳草属	<i>Saxifraga</i>	26	蓼属	<i>Polygonum</i>	10					
4	嵩草属	<i>Kobresia</i>	4	马先蒿属	<i>Pedicularis</i>	14	龙胆属	<i>Gentiana</i>	32	石松属	<i>Lycopodium</i>	8	嵩草属	<i>Kobresia</i>	19	风毛菊属	<i>Saussurea</i>	24	委陵菜属	<i>Potentilla</i>	10					
5	蓼属	<i>Polygonum</i>	4	报春花属	<i>Primula</i>	12	虎耳草属	<i>Saxifraga</i>	18	耳蕨属	<i>Polystichum</i>	8	报春花属	<i>Primula</i>	18	报春花属	<i>Primula</i>	20	虎耳草属	<i>Saxifraga</i>	10					
6	银莲花属	<i>Anemone</i>	3	嵩草属	<i>Kobresia</i>	10	委陵菜属	<i>Potentilla</i>	17	拉拉藤属	<i>Galium</i>	7	风毛菊属	<i>Saussurea</i>	18	龙胆属	<i>Gentiana</i>	17	报春花属	<i>Primula</i>	9					
7	葶苈属	<i>Draba</i>	3	委陵菜属	<i>Potentilla</i>	10	风毛菊属	<i>Saussurea</i>	16	红门兰属	<i>Orchis</i>	7	黄芪属	<i>Astragalus</i>	17	橐吾属	<i>Ligularia</i>	13	葶苈属	<i>Draba</i>	7					
8	毛茛属	<i>Ranunculus</i>	3	乌头属	<i>Aconitum</i>	9	苔草属	<i>Carex</i>	15	杜鹃属	<i>Rhododendron</i>	7	苔草属	<i>Carex</i>	17	垂头菊属	<i>Cremanthodium</i>	12	马先蒿属	<i>Pedicularis</i>	7					
9	繁缕属	<i>Stellaria</i>	3	灯芯草属	<i>Juncus</i>	9	茶藨子属	<i>Ribes</i>	15	千里光属	<i>Senecio</i>	7	龙胆属	<i>Gentiana</i>	15	葶苈属	<i>Draba</i>	12	蝇子草属	<i>Silene</i>	7					
10	葱属	<i>Allium</i>	2	忍冬属	<i>Lonicera</i>	9	紫堇属	<i>Corydalis</i>	14	堇菜属	<i>Viola</i>	7	杜鹃属	<i>Rhododendron</i>	15	无心菜属	<i>Arenaria</i>	10	乌头属	<i>Aconitum</i>	6					
总种数Total species number			112				496				944				403				826				522			285

• 研究报告 •

植物系统发育区系地理学研究： 以云南植物区系为例

李 嵘 孙 航

(中国科学院昆明植物研究所, 东亚植物多样性与生物地理学重点实验室, 昆明 650201)

摘要: 传统植物区系地理学研究主要以植物区系的分类群组成及其分布区类型的分析为主, 忽视了进化历史的分析。本文根据前期云南植物区系的分区研究, 基于云南种子植物1,983个属的系统发育关系, 结合其地理分布, 从进化历史的角度分析不同地理单元的分类群组成、系统发育组成及其相似性, 探讨各个地理单元的系统发育结构及地理单元间的系统发育相似性。结果表明: 云南植物区系不同地理单元的系统发育多样性与科或属的丰富度显著相关, 其系统发育结构为非随机型; 不同地理单元间的系统发育组成相似性与分类群组成相似性显著相关, 二者的聚类分析均表明具有热带植物区系性质的地理单元与具有温带植物区系性质的地理单元各自聚为一类。由此可见, 融合进化历史信息的植物区系分析有助于更加深入地理解植物区系的性质和来源。

关键词: 分类群组成; 系统发育多样性; 系统发育组成; 系统发育结构; 生物地理学

Phylofloristics: a case study from Yunnan, China

Rong Li, Hang Sun

Key Laboratory for Plant Diversity and Biogeography of East Asia, Kunming Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650201

Abstract: Traditional attempts of floristic studies typically focus on the analyses of taxonomic composition and areal-types of flora, often ignoring the rich context that evolutionary history can provide. In this study, based on the recent study examining the delineation of floristic regions in Yunnan, by combining data on the distributions and phylogenetic relationships of 1,983 genera of native seed plants, we explore how taxonomic composition, phylogenetic relatedness, and phylogenetic structure vary across the different geographic regions in this area. As predicted, phylogenetic diversity was well correlated with taxonomic diversity among the geographic regions. Using null model analyses, we found evidence of nonrandom phylogenetic structure across the region. Also, phylogenetic relatedness was well correlated with taxonomic composition between geographic regions in Yunnan. Cluster analyses of the similarities of phylogenetic relatedness and taxonomic composition show that geographic regions with tropical floristic affinity form a single cluster separate from another cluster composed of geographic regions with temperate floristic affinity. Our results show that the integration of phylogenetic information can help us to better understand the characteristics and origin of flora.

Key words: taxonomic composition; phylogenetic diversity; phylogenetic relatedness; phylogenetic structure; biogeography

植物区系(flora)是某一特定地区生长着的全部植物种类, 是植物科属种的自然综合体(吴征镒等, 2006)。植物区系研究在植物种类清查、生物资源开发、环境保护、国民经济建设等方面起着至关重要

的作用(吴征镒等, 2006)。我国植物区系地理学研究主要集中于对一个自然地理区域内所有植物的地理成分从科、属、种三个层次进行分析, 并通过与邻近地区的植物区系比较, 确定该地区现代植物区

收稿日期: 2016-01-03; 接受日期: 2016-03-28

基金项目: 国家自然科学基金(31370243, 31570212)、云南省应用基础研究计划(2014FB169)及云南省中青年学术技术带头人后备人才培养计划(2015HB092)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: lirong@mail.kib.ac.cn

系的性质、来源和地位,如吴征镒等(2010)关于我国种子植物区系的研究,表明中国种子植物区系的亚热带性质及热带亲缘等特点。

然而,植物区系是一个地区植物发生发展过程的反映,它是在地质历史长河中与环境共同作用的结果(吴征镒等, 2006)。除现代自然环境的影响外,进化历史过程中可能发生的隔离、分化、扩散或绝灭等事件对植物区系的形成也有重要影响(Ricklefs, 1987)。因此,植物区系的研究需包含进化历史的信息,方能更全面地理解植物区系的性质和来源(葛学军, 2015)。早期研究中,利用科属或属种的比例来反映一个地区植物区系的进化历史(Elton, 1946; 彭华, 1996; 李嵘等, 2007),或者通过科或属的分类群统计和分析来比较不同植物区系的相似程度(吴征镒等, 2006),但这些方法难以量化进化过程在区系形成中的作用。而且,这些分析忽略了物种或类群间的进化关系,从而难以揭示不同区系间进化历史的相似程度。系统发育分析方法在区域尺度上的应用为理解进化历史对现代植物区系的影响及比较不同区系间系统发育的相似性提供了可量化的指标和途径(Webb et al, 2002; Emerson & Gillespie, 2008; 葛学军, 2015)。

Swenson和Umaña (2014)在研究加勒比海小安第斯群岛的植物区系时,首次提出了植物系统发育区系学(phylofloristics)的概念,即应用系统发育的方法对现代植物区系进行研究。但在此之前,植物系统发育区系学已被用于全球不同地区的研究,如: Forest等(2007)对南非好望角植物区系的研究, Kooyman等(2011)对澳洲不同森林类型的植物区系研究和Qian等(2013a, b; 2015)对北美被子植物区系的研究。这些研究均表明结合进化历史的植物区系研究对理解植物区系的形成起着至关重要的作用。

我国有很好的植物区系研究基础,但从进化历史的角度研究植物区系才刚刚起步。当前研究主要以大型森林动态样地为平台或以木本植物为主,探讨不同生态过程对不同空间尺度树种系统发育组成的影响(如: Wang et al, 2012; Qiao et al, 2015; Qian et al, 2016),但这些研究忽视了反映林下小生境对植物区系形成起重要作用的草本植物的影响,而目前基于特定地区所有植物种类的植物系统发育区系地理学研究仅有零星报道(Li et al, 2014, 2015a, 2015b)。我国幅员辽阔,不同地区的地质历

史与现代自然环境千差万别,植物区系的形成原因大相径庭,因此,在我国开展植物系统发育区系地理学研究,对深入理解中国植物区系的成因具有重要意义。

云南是全球34个生物多样性热点地区中3个热点地区(喜马拉雅、印度-缅甸及中国西南山地)的交汇区(Mittermeier et al, 2004),植物种类位居全国之首(吴征镒, 1987),区系起源古老、地理成分复杂、特有现象丰富,是很多第三纪孑遗植物的避难所(李锡文, 1985, 1994; López-Pujol et al, 2011)。在中国植物区系区划中,本区域地跨古热带植物区、中国-日本森林植物亚区及中国-喜马拉雅森林植物亚区(吴征镒等, 2010)。近来基于系统发育的区系研究将云南分为8个地理单元(Li et al, 2015a),然而,各个地理单元的系统发育组成、系统发育结构及不同地理单元间的进化历史相似性仍缺乏深入的讨论。

鉴于此,本文在云南植物区系分区研究的基础上(Li et al, 2015a),从进化历史的角度分析不同地理单元的分类群组成、系统发育组成及其相似性,探讨各个地理单元的系统发育结构及地理单元间的系统发育相似程度,以期更全面地了解云南现代植物区系的性质和来源。

1 方法

1.1 研究地区

云南地处中国西南,位于 $21^{\circ}8'32'' - 29^{\circ}15'8''$ N, $97^{\circ}31'39'' - 106^{\circ}11'47''$ E,是一个高原内陆省份。自晚第三纪末至第四纪初以来的大规模山体隆升和深刻的高原解体,导致境内河谷深嵌、地势高耸,整体呈西北向东南倾斜,最高峰海拔6,740 m,最低点海拔76.4 m (杨一光, 1990)。因受印度洋西南季风及太平洋东南季风的影响,气候具有干湿季分明、降水丰沛、年温差小、日温差大等特点(王宇, 2006)。正是由于这种复杂的地形地貌加之丰厚的水热条件,造就了云南丰富多样的植物区系种类(吴征镒, 1987)。

1.2 数据来源

基于云南植物区系分区研究(Li et al, 2015a)划分的8个地理单元(图1),以《云南植物志》为基础(吴征镒, 1977-2006),构建不同地理单元种子植物的属级“有/无”数据矩阵。区系组成中的外来成分或栽



图1 基于云南植物区系分区研究划分的8个地理单元(引自 Li et al, 2015a)

Fig. 1 The delineation of eight floristic regions in Yunnan, China (adopted from Li et al, 2015a)

培种类不列入统计。科属范畴的界定和划分依据被子植物系统发育分类系统(Angiosperm Phylogeny Group Classification, APG)的观点(APG III, 2009)。本研究共计包括8,072条数据记录。

1.3 系统发育树构建

将云南植物区系的所有种子植物属作为物种库, 以种子植物系统发育关系(Zanne et al, 2014)为骨架, 利用PhyloMatic软件构建基于全部属的系统发育树(Webb & Donoghue, 2005)。对于科内无法解决的属间关系, 则以多歧分支(polytomy)的方式进行处理(Hardy et al, 2012) (图2)。

1.4 分类群组成与系统发育组成的多样性测量

采用科或属的丰富度(richness)与Faith (1992)的系统发育多样性(phylogenetic diversity, PD)来量化不同地理单元的分类群组成与系统发育组成多样性。丰富度以各个地理单元内科或属的绝对数量来衡量。系统发育多样性为地理单元内所有分类群在有根系统发育树上的支长总和。使用线性回归模型检测丰富度与系统发育多样性之间的相关性。

采用净相关指数(net relatedness index, NRI)度量不同地理单元的系统发育结构(Webb, 2000), 其计算公式如下:

$$NRI = -1 \times \frac{MPD_{\text{observed}} - MPD_{\text{randomized}}}{sdMPD_{\text{randomized}}} \quad (1)$$

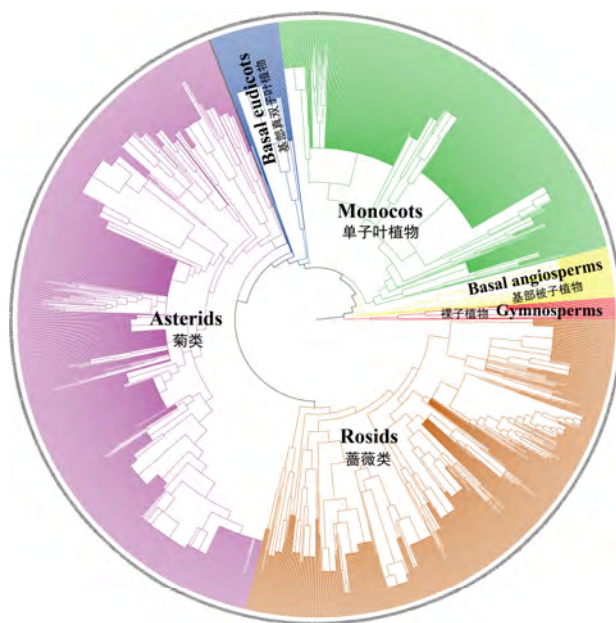


图2 云南植物区系的宏系统发育树

Fig. 2 The mega-phylogeny of seed plants in Yunnan

式中, MPD_{observed} 是观察地理单元分类群间的平均谱系距离 (mean phylogenetic distance, MPD), $MPD_{\text{randomized}}$ 表示随机过程产生的零地理单元分类群间的平均谱系距离, $sdMPD_{\text{randomized}}$ 表示零地理单元分类群间平均谱系距离的方差。如果 NRI 值为正, 则观察地理单元的 MPD 值小于通过零地理单元计算的 MPD 值, 表示植物区系的系统发育结构为聚集型(phylogenetic clustering); 反之, 如果 NRI 值为负, 则 MPD 值大于通过零地理单元计算的期望值, 表示系统发育结构为离散型(phylogenetic overdispersion)。

1.5 分类群组成与系统发育组成的相似性测度

采用 Sørensen 分类群相似性指数 (Sørensen, 1948) 及 PhyloSor 系统发育相似性指数 (Bryant et al, 2008) 测度云南植物区系不同地理单元的分类群组成与系统发育组成的相似程度, 其计算公式如下:

$$Sørensen = \frac{2 \times S_{ij}}{S_i + S_j} \quad (2)$$

$$PhyloSor = \frac{2 \times BL_{ij}}{BL_i + BL_j} \quad (3)$$

式中, S_{ij} 是 i 、 j 两个地理单元共有的分类群数目, S_i 与 S_j 是 i 、 j 两个地理单元各自的分类群数目; 类似地, BL_{ij} 是 i 、 j 两个地理单元共有的支长之和, BL_i 与 BL_j 是 i 、 j 两个地理单元各自的支长总和。Sørensen 与

PhyloSor的值在0与1之间。如为0,则表示植物区系完全不相同;如为1,则表示植物区系完全相同。运用Mantel检验分析分类群组成相似性与系统发育组成相似性之间的相关性(Legendre & Fortin, 2010)。

为了直观显示不同地理单元之间的区系组成相似程度,采用Ward的方法对分类群组成及系统发育组成相似性系数进行等级聚类分析(Kreft & Jetz, 2010)。

上述所有分析均采用R语言(R Core Team, 2014)的vegan (Oksanen et al, 2015)、picante (Kembel et al, 2010)、cluster (Maechler et al, 2015)等程序包计算。

2 结果

2.1 分类群多样性与系统发育多样性

基于被子植物系统发育分类系统(APG III, 2009)的统计,云南种子植物区系计有225个科1,983个属。8个地理单元的科、属组成及系统发育多样性见表1。地理单元VIII具有最高的科、属丰富度及系统发育组成多样性,地理单元VI具有最低的科、属丰富度及系统发育多样性。不同地理单元植物区系的系统发育多样性与科($R^2 = 0.97, P < 0.001$)或属($R^2 = 0.99, P < 0.001$)的丰富度呈显著正相关(图3)。

2.2 系统发育结构

云南种子植物区系在不同地理单元的系统发育结构不一致(表2),地理单元III的系统发育结构为离散型,其余地理单元均为聚集型。

2.3 分类群组成与系统发育组成相似性

云南种子植物区系不同地理单元间的系统发育组成相似性与分类群组成相似性呈显著正相关($R^2 = 0.99, P = 0.001$)。不同地理单元两两间($n = 28$)的平均分类群组成相似性(Sørenson指数)为0.665,地理单元VII与VIII的分类群组成最为相似(0.822),地理单元VII与VI的分类群组成差异最大(0.476)。不同地理单元两两间($n = 28$)的平均系统发育组成相似性(PhyloSor指数)为0.698,地理单元VII与VIII的系统发育组成最为相似(0.836),地理单元VII与VI的系统发育组成差异最大(0.526),系统发育组成平均相似性比分类群组成平均相似性高3.3%。

分类群组成与系统发育组成的相似性聚类分析(图4)也显示了云南种子植物区系不同地理单元间分类群组成与系统发育组成的相关性。不论是分

表1 云南种子植物区系不同地理单元的分类群多样性与系统发育多样性比较

Table 1 Comparison of taxonomic diversity and phylogenetic diversity of different geographic regions for the seed plants in Yunnan

地理单元 Geographic regions	科丰富度 Family richness	属丰富度 Genus richness	系统发育多样性 Phylogenetic diversity
I	180	1,226	134,237.26
II	149	725	82,676.45
III	176	990	112,736.74
IV	165	902	103,039.67
V	160	875	97,805.24
VI	126	520	63,362.67
VII	204	1,405	154,165.33
VIII	205	1,429	156,662.31

表2 云南种子植物区系不同地理单元的系统发育结构

Table 2 Phylogenetic structure of different geographic regions for the seed plants in Yunnan

地理单元 Geographic regions	净相关指数 Net relatedness index	系统发育结构 Phylogenetic structure
I	0.60	聚集型 Underdispersed
II	0.05	聚集型 Underdispersed
III	-1.20	离散型 Overdispersed
IV	0.81	聚集型 Underdispersed
V	0.02	聚集型 Underdispersed
VI	1.01	聚集型 Underdispersed
VII	1.35	聚集型 Underdispersed
VIII	1.00	聚集型 Underdispersed

类群组成聚类分析还是系统发育组成聚类分析,地理单元VII与VIII均聚为一类(南部区),其他6个地理单元聚为另一类(北部区);在北部区内,地理单元II与VI聚为一支,地理单元I、III、IV及V聚为另一支。

3 讨论

3.1 现代植物区系的进化历史

云南植物种类丰富,早期根据科属分布区类型的分析表明,云南植物区系地理成分复杂、联系广泛(李锡文, 1985; 吴征镒, 1987),该结论得到本研究的支持。从云南种子植物所含1,983个属所展示的进化关系来看(图2),这些属在系统发育树上的各个主要分支均有分布(如:裸子植物、基部被子植物、单子叶植物、基部真双子叶植物、蔷薇类、菊类等),表明云南植物区系在地质历史的不同时期与其他地区的植物区系有过广泛的联系和交流,并在适应

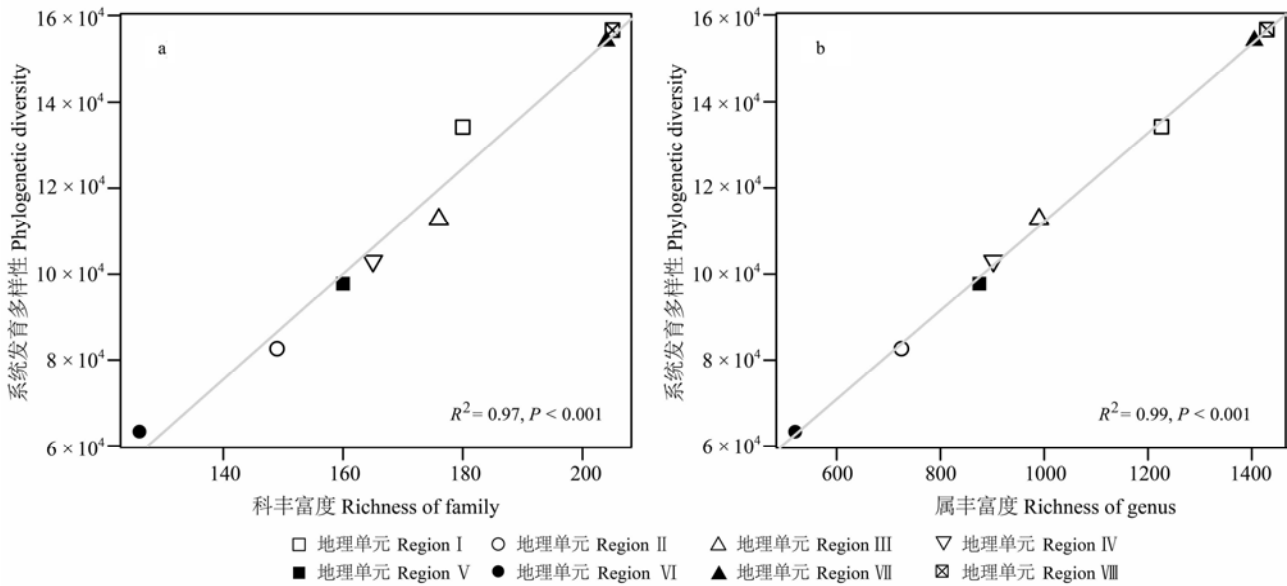


图3 云南植物区系不同地理单元系统发育多样性与科丰富度(a)和属丰富度(b)的关系(I–VIII代表的地理单元同图1)
Fig. 3 Relationships between phylogenetic diversity and family richness (a) or genus richness (b) among the floristic regions in Yunnan. I–VIII indicate different floristic regions as in Fig. 1.

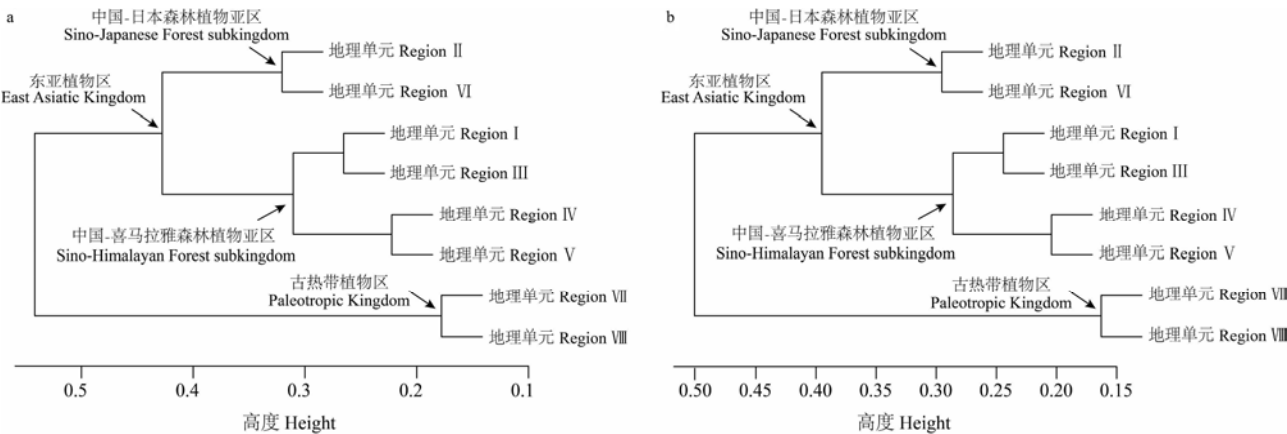


图4 云南植物区系不同地理单元间分类学组成(a)与系统发育组成(b)的相似性聚类
Fig. 4 A cluster dendrogram representing the taxonomic floristic similarity (a) and the phylofloristic similarity (b) between the geographic regions of Yunnan. I–VIII indicate different floristic regions as in Fig. 1.

当地的自然环境下产生了大量的后裔，逐渐演变为当今植物区系的外貌。

整体来说，云南植物区系的分类群多样性(科或属的丰富度)与系统发育多样性显著相关(图3)，然而，使用零模型(null model)保持植物区系分类群组成不变的情况下，随机产生的零地理单元系统发育组成与观察地理单元系统发育组成的比较发现，分类群多样性或系统发育多样性丰富的区域并不一定具有多样的系统发育组成，即云南植物区系显

示了非随机的系统发育结构，不同地理单元植物区系的进化组成不一致(表2)。8个地理单元中，有7个地理单元的系统发育结构为聚集型，表明组成这7个地理单元的分类群(科或属)在系统发育树上的位置相对较为聚集或者这些分类群主要来自相同的进化谱系(lineages)，如构成地理单元I的高山灌丛和高山草甸植被主要是由物种多样性高的杜鹃花科、报春花科及马先蒿属(*Pedicularis*)、龙胆属(*Gentiana*)、风毛菊属(*Saussurea*)等类群组成，这些

科属均来源于进化树上的菊类谱系;而地理单元III是离散型的系统发育结构,即这个地理单元植物区系的进化谱系组成较为多样,组成这个地理单元的分类群来自系统发育树上的更多谱系,如构成地理单元III的常绿阔叶林建群种主要是樟科、壳斗科及山茶科等类群的物种,这些科则分别来自于进化树上的基部被子植物、蔷薇类及菊类等谱系。

云南植物区系非随机的系统发育结构与其进化历史有关。自第三纪以来,伴随着印度板块与欧亚板块的碰撞,大规模的造山运动导致云南及其周边地区产生了复杂多样的地理环境(Harrison et al, 1992; An et al, 2001; Spicer et al, 2003),第四纪的气候变化更促进了云南植物区系的发展(Li & Walker, 1986)。地理单元III异质的生境及多样的气候条件(如:热带、亚热带与温带气候),加之处于热带与温带植物区系的过渡带,有助于不同生态耐受性的物种同域生存,从而造就了该区域多样的系统发育组成;相反,对其他地理单元来说,尽管也具有多样的生境与气候条件(如:地理单元I与VII),但因不是植物区系的交汇区,不利于不同生态耐受性的物种同域共存,从而导致相对较低的系统发育组成。与此相似的系统发育结构模式在南非好望角植物区系研究中已有报道(Forest et al, 2007; Tucker et al, 2012),因为地质历史及气候因素的不同,尽管好望角西部的物种多样性比东部高,但西部的系统发育组成却较东部低。

3.2 现代植物区系不同地理单元间的相似性

整体来看,云南植物区系不同地理单元间的系统发育组成相似性与分类群组成相似性显著相关,且前者比后者高,表明云南植物区系不同地理单元间的分类群组成差异较系统发育组成差异大,即不同地理单元的分类群组成主要由进化树上相同谱系内的不同类群构成,如组成云南植物区系主体的4个大科禾本科(158属)、兰科(134属)、菊科(117属)及豆科(105属),从科一级来看,在云南广泛分布,但从科内属一级来看,则不同的属在云南有不同的地理分布,这就导致不同地理单元间系统发育组成相似性比分类群组成相似性高,这从另一侧面也说明云南多样且独特的自然环境是生物分化和演化的舞台。

云南植物区系的分类群组成与系统发育组成相似性的聚类分析均表明南部地理单元VII与VIII

的区系相似,而北部6个地理单元的区系相近(图4)。在中国植物区系区划中,地理单元VII与VIII基本位于古热带植物区内,其他6个地理单元处于东亚植物区内(吴征镒等, 2010),这从局域尺度和系统发育的角度为Wu和Wu (1996)将东亚植物区提升为“Kingdom”提供了支持。南部地理单元VII与VIII为低海拔山地,主要受热带气候的影响,自第三纪以来,随着印度板块与欧亚板块的碰撞,热带亚洲成分由南向北渗入,从而演变成以热带亚洲成分为主的热带植物区系(Li, 1995a; Zhu et al, 2006; Zhu, 2008, 2013),该区域由于相对稳定的地质构造和气候环境,成为伯乐树属(*Bretschneidera*)、蒜头果属(*Malania*)等大量第三纪孑遗植物的避难所(Li, 1994)。北部6个地理单元为中海拔山地、云贵高原或高山峡谷区,主要为亚热带和温带气候,随着第三纪古地中海的退却及喜马拉雅的隆升,北温带植物区系成分由北向南渗透,从而造就了现今以北温带成分为主的温带植物区系(Li & Li, 1993; Li, 1995b; Sun, 2002; Zhu, 2012),该地区(特别西北部)地质运动活跃、山体高大、生境类型多样,成为绵参属(*Eriophyton*)、复芒菊属(*Formania*)等诸多新生类群的发源地(Li, 1994; Liu et al, 2014; Luo et al, 2016)。北部的6个地理单元内,地理单元II与VI的区系相似,地理单元I、III、IV及V的区系相近,这也印证了东亚植物区系中“中国-日本森林植物亚区及中国-喜马拉雅森林植物亚区”(吴征镒等, 2010)的区系划分。新生代以来,自然地理和气候条件在云南东西部的分化是形成不同地理单元间区系分化的重要因素之一(吴征镒, 1987),东部(地理单元II与VI)以石灰岩地貌为主,深受太平洋季风的影响,西部(地理单元I、III、IV及V)属高原地貌,基本为印度洋季风控制(Li & Li, 1992, 1997)。

3.3 问题与不足

植物系统发育区系地理学研究在我国刚刚起步,本文以云南植物区系为例,从进化历史的角度探讨不同地理单元的系统发育结构及它们之间的相似度,与仅基于分类群的区系分析相比,系统发育的区系分析能更深入地理解植物区系的性质和来源。然而,本研究中属间进化关系未解决及属的地理分布以县为单位限制了对植物区系的起源时间、演化、特有现象及区系分区等问题的深入了解,克服这些瓶颈则成为将来植物系统发育区系地理

学的重要方向。第一, 利用DNA条形码或基因组数据, 重建高精度区域性宏系统发育树 (megaphylogeny), 将加深对植物区系的起源及进化历史的理解; 第二, 基于标本馆藏标本数据, 构建精准的地区性植物地理分布网络, 结合地理信息系统 (GIS) 和系统发育的分析, 有助于深入认识植物区系特有现象及区系分区的本质; 第三, 综合进化、生态及地理分布等信息的全面分析, 有助于阐明生态过程与进化历史在植物区系形成中的作用。同时, 相关研究对生物多样性保护也具有重要的参考价值。

致谢: 感谢中国科学院昆明植物研究所信息中心的王雨华博士、李拓径博士提供本研究所需的基础数据。

参考文献

- An ZS, Kutzbach JE, Prell WL, Porter SC (2001) Evolution of Asian monsoons and phased uplift of the Himalaya-Tibetan Plateau since late Miocene times. *Nature*, 411, 62–66.
- APG III (2009) An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants: APG III. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 161, 105–121.
- Bryant JA, Lamanna C, Morlon H, Kerkhoff AJ, Enquist BJ, Green JL (2008) Microbes on mountainsides: contrasting elevational patterns of bacterial and plant diversity. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 105, 11505–11511.
- Elton C (1946) Competition and the structure of ecological communities. *Journal of Animal Ecology*, 15, 54–68.
- Emerson BC, Gillespie RG (2008) Phylogenetic analysis of community assembly and structure over space and time. *Trends in Ecology and Evolution*, 23, 619–630.
- Faith DP (1992) Conservation evaluation and phylogenetic diversity. *Biological Conservation*, 61, 1–10.
- Forest F, Grenyer R, Rouget M, Davies TJ, Cowling RM, Faith DP, Balmford A, Manning JC, Proches S, van der Bank M, Reeves G, Hedderson TAJ, Savolainen V (2007) Preserving the evolutionary potential of floras in biodiversity hotspots. *Nature*, 445, 757–760.
- Ge XJ (2015) Application of DNA barcoding in phylofloristics study. *Biodiversity Science*, 23, 295–296. (in Chinese) [葛学军 (2015) DNA条形码在植物系统发育区系学研究中的应用. *生物多样性*, 23, 295–296.]
- Hardy OJ, Coutron P, Munoz F, Ramesh BR, Pélissier R (2012) Phylogenetic turnover in tropical tree communities: impact of environmental filtering, biogeography and meso-climatic niche conservatism. *Global Ecology and Biogeography*, 21, 1007–1016.
- Harrison TM, Copeland P, Kidd WSF, Yin A (1992) Raising Tibet. *Science*, 255, 1663–1670.
- Kembel SW, Cowan PD, Helmus MR, Cornwell WK, Morlon H, Ackerly DD, Blomberg SP, Webb CO (2010) Picante: R tools for integrating phylogenies and ecology. *Bioinformatics*, 26, 1463–1464.
- Kooyman R, Rossetto M, Cornwell W, Westoby M (2011) Phylogenetic tests of community assembly across regional to continental scales in tropical and subtropical rain forests. *Global Ecology and Biogeography*, 20, 707–716.
- Kreft H, Jetz W (2010) A framework for delineating biogeographical regions based on species distributions. *Journal of Biogeography*, 37, 2029–2053.
- Legendre P, Fortin MJ (2010) Comparison of the Mantel test and alternative approaches for detecting complex multivariate relationships in the spatial analysis of genetic data. *Molecular Ecology Resources*, 10, 831–844.
- Li R, Dao ZL, Ji YH, Li H (2007) A floristic study on the seed plants of the northern Gaoligong Mountains in western Yunnan, China. *Acta Botanica Yunnanica*, 29, 601–615. (in Chinese with English abstract) [李嵘, 刀志灵, 纪运恒, 李恒 (2007) 高黎贡山北段种子植物区系研究. *云南植物研究*, 29, 601–615.]
- Li R, Kraft NJB, Yang J, Wang YH (2015a) A phylogenetically informed delineation of floristic regions within a biodiversity hotspot in Yunnan, China. *Scientific Reports*, 5, 9396.
- Li R, Kraft NJB, Yu HY, Li H (2015b) Seed plant phylogenetic diversity and species richness in conservation planning within a global biodiversity hotspot in eastern Asia. *Conservation Biology*, 29, 1552–1562.
- Li XH, Zhu XX, Niu Y, Sun H (2014) Phylogenetic clustering and overdispersion for alpine plants along elevational gradient in the Hengduan Mountains region, Southwest China. *Journal of Systematics and Evolution*, 52, 280–288.
- Li XW (1985) Floristic study of Yunnan Province. *Acta Botanica Yunnanica*, 7, 361–382. (in Chinese with English abstract) [李锡文 (1985) 云南植物区系. *云南植物研究*, 7, 361–382.]
- Li XW (1994) Two big biodiversity centers of Chinese endemic genera of seed plants and their characteristics in Yunnan Province. *Acta Botanica Yunnanica*, 16, 221–227. (in Chinese with English abstract) [李锡文 (1994) 中国特有属在云南的两大生物多样性中心及其特征. *云南植物研究*, 16, 221–227.]
- Li XW (1995a) A floristic study on the seed plants from tropical Yunnan. *Acta Botanica Yunnanica*, 17, 115–128. (in Chinese with English abstract) [李锡文 (1995a) 云南热带种子植物区系. *云南植物研究*, 17, 115–128.]
- Li XW (1995b) A floristic study on the seed plants from the region of Yunnan Plateau. *Acta Botanica Yunnanica*, 17, 1–14. (in Chinese with English abstract) [李锡文 (1995b) 云南高原地区种子植物区系. *云南植物研究*, 17, 1–14.]
- Li XW, Li J (1992) On the validity of Tanaka line and its significance viewed from the distribution of eastern Asiatic genera in Yunnan. *Acta Botanica Yunnanica*, 14, 1–12. (in

- Chinese with English abstract) [李锡文, 李捷 (1992) 从滇产东亚属的分布论述“田中线”的真实性和意义. 云南植物研究, 14, 1–12.]
- Li XW, Li J (1993) A preliminary floristic study of the seed plants from the region of the Hengduan Mountains. *Acta Botanica Yunnanica*, 15, 217–231. (in Chinese with English abstract) [李锡文, 李捷 (1993) 横断山脉地区种子植物区系的初步研究. 云南植物研究, 15, 217–231.]
- Li XW, Li J (1997) The Tanaka-Kaiyong line—an important floristic line for the study of the flora of East Asia. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 84, 888–892.
- Li XW, Walker D (1986) The plant geography of Yunnan Province, Southwest China. *Journal of Biogeography*, 13, 367–397.
- Liu JQ, Duan YW, Hao G, Ge XJ, Sun H (2014) Evolutionary history and underlying adaptation of alpine plants on the Qinghai-Tibet Plateau. *Journal of Systematics and Evolution*, 52, 241–249.
- López-Pujol J, Zhang FM, Sun HQ, Ying TS, Ge S (2011) Centres of plant endemism in China: places for survival or for speciation? *Journal of Biogeography*, 38, 1267–1280.
- Luo D, Yue JP, Sun WG, Xu B, Li ZM, Comes HP, Sun H (2016) Evolutionary history of the subnival flora of the Himalaya-Hengduan Mountains: first insights from comparative phylogeography of four perennial herbs. *Journal of Biogeography*, 43, 31–43.
- Maechler M, Rousseeuw P, Struyf A, Hubert M, Hornik K (2015) Cluster: Cluster Analysis Basics and Extensions. R package version 2.0.3.
- Mittermeier RA, Robles PG, Hoffmann M, Pilgrim J, Brooks T, Mittermeier CG, da Fonseca GAB (2004) Hotspots Revisited: Earth's Biologically Richest and Most Endangered Terrestrial Ecoregions. CEMEX/Agrupación Sierra Madre, Mexico City.
- Oksanen J, Blanchet FG, Kindt R, Legendre P, Minchin PR, O'Hara RB, Simpson GL, Solymos P, Stevens MHH, Wagner H (2015) Vegan: Community Ecology Package. R package version 2.0.3.
- Peng H (1996) The floristic equilibrium point of seed plants in Mt. Wuliangshan. *Acta Botanica Yunnanica*, 18, 385–397. (in Chinese with English abstract) [彭华 (1996) 无量山种子植物的区系平衡点. 云南植物研究, 18, 385–397.]
- Qian H, Richard F, Zhang JL, Zhang J, Chen SB (2016) Phylogenetic structure and ecological and evolutionary determinants of species richness for angiosperm trees in forest communities in China. *Journal of Biogeography*, 43, 603–615.
- Qian H, Swenson NG, Zhang JL (2013a) Phylogenetic beta diversity of angiosperms in North America. *Global Ecology and Biogeography*, 22, 1152–1161.
- Qian H, Wiens JJ, Zhang J, Zhang YJ (2015) Evolutionary and ecological causes of species richness patterns in North American angiosperm trees. *Ecography*, 38, 241–250.
- Qian H, Zhang YJ, Zhang J, Wang XL (2013b) Latitudinal gradients in phylogenetic relatedness of angiosperm trees in North America. *Global Ecology and Biogeography*, 22, 1183–1191.
- Qiao XJ, Jabot F, Tang ZY, Jiang MX, Fang JY (2015) A latitudinal gradient in tree community assembly processes evidence in Chinese forests. *Global Ecology and Biogeography*, 24, 314–323.
- R Core Team (2014) R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna.
- Ricklefs RE (1987) Community diversity: relative roles of local and regional processes. *Science*, 235, 161–171.
- Sørensen T (1948) A method of establishing groups of equal amplitude in plant sociology based on similarity of species, and its application to analyses of the vegetation on Danish commons. *Biologiske Skrifter*, 5, 1–34.
- Spicer RA, Harris NBW, Widdowson M, Herman AB, Guo S, Valdes PJ, Wolfe JA, Kelley SP (2003) Constant elevation of southern Tibet over the past 15 million years. *Nature*, 421, 622–624.
- Sun H (2002) Evolution of Arctic-Tertiary flora in Himalayan-Hengduan Mountains. *Acta Botanica Yunnanica*, 24, 671–688. (in Chinese with English abstract) [孙航 (2002) 北极-第三纪成分在喜马拉雅-横断山的发展及演化. 云南植物研究, 24, 671–688.]
- Swenson NG, Umaña MN (2014) Phylofloristics: an example from the Lesser Antilles. *Journal of Plant Ecology*, 7, 166–175.
- Tucker CM, Cadotte MW, Davies TJ, Rebelo AG (2012) Incorporating geographical and evolutionary rarity into conservation prioritization. *Conservation Biology*, 26, 593–601.
- Wang Y (2006) Yunnan Mountain Climate. Yunnan Science and Technology Press, Kunming. (in Chinese) [王宇 (2006) 云南山地气候. 云南科技出版社, 昆明.]
- Wang ZH, Fang JY, Tang ZY, Lin X (2012) Relative role of contemporary environment versus history in shaping diversity patterns of China's woody plants. *Ecography*, 35, 1124–1133.
- Webb CO (2000) Exploring the phylogenetic structure of ecological communities: an example for rain forest trees. *The American Naturalist*, 156, 145–155.
- Webb CO, Ackerly DD, McPeck MA, Donoghue MJ (2002) Phylogenies and community ecology. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 33, 475–505.
- Webb CO, Donoghue MJ (2005) Phylomatic: tree assembly for applied phylogenetics. *Molecular Ecology Notes*, 5, 181–183.
- Wu ZY (1977–2006) Flora Yunnanica. Science Press, Beijing. (in Chinese) [吴征镒 (1977–2006) 云南植物志. 科学出版社, 北京.]
- Wu ZY (1987) Vegetation of Yunnan. Science Press, Beijing. (in Chinese) [吴征镒 (1987) 云南植被. 科学出版社, 北京.]
- Wu ZY, Sun H, Zhou ZK, Li DZ, Peng H (2010) Floristics of

- Seed Plants from China. Science Press, Beijing. (in Chinese) [吴征镒, 孙航, 周浙昆, 李德铎, 彭华 (2010) 中国种子植物区系地理. 科学出版社, 北京.]
- Wu ZY, Wu SG (1996) A proposal for a new floristic kingdom (realm)—the E. Asiatic Kingdom, its delineation and characteristics. In: *Floristic Characteristics and Diversity of East Asian Plants* (eds Zhang AL, Wu SG), pp. 3–42. China Higher Education Press, Beijing; Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- Wu ZY, Zhou ZK, Sun H, Li DZ, Peng H (2006) The Areal-Types of Seed Plants and Their Origin and Differentiation. Yunnan Science and Technology Press, Kunming. (in Chinese) [吴征镒, 周浙昆, 孙航, 李德铎, 彭华 (2006) 种子植物分布区类型及其起源和分化. 云南科技出版社, 昆明.]
- Yang YG (1990) *Comprehensive Physical Regionalization in Yunnan*. China Higher Education Press, Beijing. (in Chinese) [杨一光 (1990) 云南省综合自然区划. 中国高等教育出版社, 北京.]
- Zanne AE, Tank DC, Cornwell WK, Eastman JM, Smith SA, FitzJohn RG, McGlinn DJ, O'Meara BC, Moles AT, Reich PB, Royer DL, Soltis DE, Stevens PF, Westoby M, Wright IJ, Aarssen L, Bertin RL, Calaminus A, Govaerts R, Hemmings F, Leishman MR, Oleksyn J, Soltis PS, Swenson NG, Warman L, Beaulieu JM (2014) Three keys to the radiation of angiosperms into freezing environments. *Nature*, 506, 89–92.
- Zhu H (2008) The tropical flora of southern Yunnan, China, and its biogeographical affinities. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 95, 661–680.
- Zhu H (2012) Biogeographical divergence of the flora of Yunnan, southwestern China initiated by the uplift of Himalaya and extrusion of Indochina block. *PLoS ONE*, 7, e45601.
- Zhu H (2013) The floras of southern and tropical southeastern Yunnan have been shaped by divergent geological histories. *PLoS ONE*, 8, e64213.
- Zhu H, Cao M, Hu H (2006) Geological history, flora, and vegetation of Xishuangbanna, southern Yunnan, China. *Biotropica*, 38, 310–317.

(责任编辑: 葛学军 责任编辑: 时意专)

• 研究报告 •

中国南部热带植物区系

朱 华*

(中国科学院西双版纳热带植物园综合保护中心, 云南勐腊 666303)

摘要: 中国的热带地区包括西藏东南部、云南西南到东南部、广西西南部、广东雷州半岛、台湾的南部和海南岛。依据现有植物区系的记录和资料, 中国的热带地区至少具有野生种子植物227科2,181属12,844种。中国的热带植物区系以热带和主产热带, 但分布区延伸到亚热带和温带的科为主, 在属的组成上, 也以热带分布属占优势, 并以热带亚洲分布属所占比例最大, 标志着其热带边缘性质和具有热带亚洲植物区系的特点。因不同地区地质历史及生态环境的差异, 中国热带植物区系在不同地区的组成和地理成分也有一定差异。总的来说, 我国西南部到东南部各热带地区的植物区系科和属的相似性分别在90%和64%以上, 但种的相似性一般低于50%。具体而言, 西藏东南部与云南东南部显示出具有更多的共同优势科属和更大的植物区系相似性; 云南南部和东南部热带亚洲成分比例最高, 虽然它们之间在种的相似性上最大, 但在优势的科属上差异较大; 海南植物区系热带成分总体比例最高, 其中又以泛热带分布比例最大。中国热带植物区系在不同地区间演化和发展上的差异与喜马拉雅隆升过程中发生的地质事件有关, 如印度支那板块向东南逃逸、云南发生地质板块顺时针旋转和位移、云南南部与东南部在地质历史上曾有的隔离以及海南岛向东南的位移等。

关键词: 中国南部; 热带植物区系; 组成; 特征; 起源与演化

Tropical flora of southern China

Hua Zhu*

Center for Integrative Conservation, Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Mengla, Yunnan 666303

Abstract: The Chinese tropical region has generally been recognized to be the area on the northern edge of tropical Asia, and includes southeastern Xizang (Tibet), southern Yunnan, southwestern Guangxi, southern Taiwan, and Hainan Island. Based on present floristic records and data from these tropical areas, 12,844 species of seed plants including 2,181 genera and 227 families, are recognized. The families that are distributed mainly in tropical areas but extended to the temperate zone contribute to the majority of the flora of tropical China, and genera with tropical distributions make up the most of the total flora, which indicate that the flora of tropical areas in China is marginally tropical in nature. The genera with the tropical Asian distribution contributed to the highest portion among the various distribution types, which implies tropical Asian or Indo-Malaysia affinity of the tropical flora of China. The tropical flora of China has conspicuous variations in floristic composition and geographical elements from region to region due to different geological history and ecological environments, although the floristic similarities at the family and generic levels are more than 90% and 64%, respectively but lower than 50% at the specific level, among the compared regional floras from southwestern China and southeastern China. We found that there are more similar dominant families and genera, and also higher similarities between families and genera between southeastern Tibet (Xizang) and southeastern Yunnan. The floras of southern and southeastern Yunnan have a higher portion of the tropical Asian elements compared with other tropical floras in China, and although they have the highest similarity at specific level, the dominant families and genera have conspicuous differences between them. The flora of Hainan has the highest ratio of tropical elements, of which the pan-tropical element has the highest portion.

收稿日期: 2016-02-26; 接受日期: 2016-08-10

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41471051, 31170195, 41071040)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: zhuh@xtbg.ac.cn

Differences in characteristics and evolution in these tropical floras could be influenced mainly by historical events occurring with uplift of Himalayas, such as the southeastward extrusion of the Indochina geoblock, clockwise rotation and southeastward movement of Lanping-Simao geoblock, divergent geological histories between southern and southeastern Yunnan, and southeastward movement of Hainan Island.

Key words: southern China; tropical flora; floristic composition; characteristics; origin and evolution

对中国存在热带雨林和热带植物区系的认识最早见于王启无对中国云南西南部的热带植被的描述中(Wang, 1939)。20世纪50–60年代,中国科学院和云南大学等在做了大量植被调查后,初步确定了在云南南部(西双版纳)具有一个热带植物区系(Fedorov, 1957)和生物地理意义上的真正热带雨林(Fedorov, 1958),但它们是印度、马来西亚的热带亚洲雨林不同的一种类型。吴征镒(1965)在初步总结中国植物区系的特征后提出了中国植物区系的热带亲缘,从历史渊源上阐明了中国植物区系具有热带起源背景,但并未对中国热带植物区系的分布区域进行划定。直到20世纪70年代初,典型的东南亚热带雨林类型——以龙脑香科植物为标识种的热带雨林在云南南部和广西西南部被发现,中国大陆具有东南亚类型的真正热带雨林这一事实才被国际上普遍接受(Whitmore, 1982, 1984, 1990),中国南部具有一个热带性质的植物区系,并与热带亚洲植物区系有直接的联系也被认可。对中国热带地区植物区系较完整的记录首见于中国科学院华南植物研究所编著的《海南植物志》(中国科学院华南植物研究所, 1964–1977)。进一步对中国热带地区的植物区系、植被的生物地理和生态学研究均证明了中国存在具有东南亚类型的热带雨林和热带植物区系(张宏达, 1963; 吴征镒, 1980, 1987; 李锡文, 1995; Hu, 1997; Zhu, 1997, 2008a, b; Zhu et al, 2003; Zhu & Roos, 2004; Zhu & Yan, 2009)。

典型的植物区系研究即研究物种的集合,它是研究世界某一地区所有野生植物种类的组成和分布,探讨其起源和演化历史的科学。具体来说,研究一个地区的植物区系就是研究该地区所有野生植物各分类等级(一般是科、属和种)的组成和地理成分构成,阐明该植物区的性质和特点,推测其可能的起源与演化。中国热带植物区系研究主要起始于对植被或群落类型的物种组成进行分析(张宏达等, 1957, 张宏达, 1963; 吴征镒, 1980, 1987)。随后,与植被研究相结合,针对植被或群落类型的物种组

成进行区系地理成分分析,并结合其生态外貌和结构特征来综合阐明植被和群落的自然属性。这种把植物区系地理学方法运用在具体植被和群落类型的研究上的尝试在云南热带地区得以深入开展(Zhu, 1994, 1997; 2008b; Zhu et al, 2005, 2006a, b, 2015)。此外,热带地区的植物区系研究也被广泛运用于自然保护区的研究,例如云南思茅茅菜阳河自然保护区(朱华等, 2006)、广西弄岗自然保护区(梁畴芬等, 1985)以及海南的多个自然保护区(丁坦等, 2002; 唐恬等, 2002; 张荣京等, 2007; 符国璠和洪小江, 2008)。还有一些是包含了热带地区在内的省区植物区系研究,如广东植物区系(张宏达, 1962; 廖文波和张宏达, 1994)、广西植物区系(苏志尧和张宏达, 1994)、云南植物区系(李锡文, 1985; Li & Walker, 1986)西藏植物区系(李恒和武素功, 1983)等,这些研究虽然都指明了其南部地区具有热带性质的植物区,并与热带亚洲植物区系有联系,但除在李恒和武素功(1983)的研究中详述了西藏南部喜马拉雅南坡的热带植物区及热带亚洲亲缘外,其他的省区研究较少对其热带植物区系进行专门论述。Zhu (2016a)对云南和台湾植物区系进行了较深入研究,特别是对这2个省区的热带植物区系成分与热带亚洲植物区系的关系进行了分析。

本文依据现有的中国热带地区植物区系的记录和资料,以典型的植物区系研究方法分析了中国热带植物区系的基本特征、组成和地理分异以及可能的起源与演化历史,以期为中国植物区系研究提供参考。

1 中国热带植物区系形成与演化的地质历史背景

喜马拉雅–青藏高原的隆升对地理、气候的影响不只限于它本身及周边地区,而且影响到晚新生代以来全球气候和大范围的环境变化(Raymo & Ruddimen, 1992; 施雅风等, 1998, 1999)。在南亚低空发生的西南季风即由于青藏高原的隆起而形成,

它对印度、中南半岛及中国西南的热带植被的发育具有决定性作用(刘东升等, 1998)。

在始新世晚期(距今约45 Ma), 印度板块与亚欧板块相碰撞, 融合成一体, 但此后喜马拉雅-青藏高原并未随之强烈隆起, 而是经历了一个漫长的抬升与夷平过程, 长期处于较低的海拔高度(1,000–2,000 m)。直到第四纪初, 于3.4 Ma或2.5 Ma才强烈隆升到达现在的高度(潘浴生等, 1998; 潘浴生, 1999)。喜马拉雅-青藏高原的隆升直接影响了东亚季风的形成。在青藏高原强烈隆升以前, 虽有主要受海陆分布影响的古季风, 但很弱。直到2.4 Ma, 青藏高原强烈隆升到相当高度, 东亚现代季风气候才形成(施雅风等, 1998)。在喜马拉雅山脉隆升达到一定的海拔高度(6,000 m)以上时, 南来的暖湿气流受高大山脉的阻挡, 造成南坡降水丰富, 在中国西南地区较低海拔处形成温暖湿润的亚热带、热带气候, 导致了热带雨林植被的发生和热带植物区系的演化。

由于印度板块与亚洲大陆的碰撞挤压, 引起喜马拉雅隆升和印度支那板块向东南逃逸, 同时在云南还发生了地质板块的旋转, 亦即从4千万年前的晚始新世至今, 思茅-兰坪地质板块随着印度支那板块向东南逃逸, 向南位移了800 km, 同时该地质板块旋转了约30° (Sato et al, 1999, 2007, 2011)。这些地质事件直接影响了中国西南部热带植物区系的形成与演化(Zhu, 2012, 2015)。

2 中国的热带地区

中国的热带地区主要分布在西藏东南部、云南西南至东南部、广西西南部、广东雷州半岛、台湾的南部和海南岛, 这些地区在生物地理上均属于热带亚洲的北部边缘(Zhu, 1997)。尽管中国热带的分界线充满争议且在运用上有广泛变化, 但气候和自然地理分带均显示中国的热带除西南部外, 一般位于北回归线以南(中国科学院地理研究所, 1999)。就气候而言, 南岭是一条热带分界线。在中国南部(如广东和广西), 这条界线约在24°–25° N, 但在福建东南部达26° N (竺可桢和宛敏渭, 1963)。植被与土壤被认为是比单一气候因子更好的决定生物-气候分带的指标(任美铎和杨初章, 1963; 任美铎和曾昭璇, 1991)。依此指标, 中国热带地区北界与北回归线比较匹配, 但在云南西部可达25° N, 在福建可达

25°30' N, 进一步向南, 大约在21°30' N。每年10℃以上的有效积温有8,000℃、最冷月均温 > 16℃的区域, 也被建议作为中国南部的热带北界(中国科学院地理研究所, 1959; 丘宝剑和卢其尧, 1961; 丘宝剑, 1986; 中国科学院地理研究所, 1999), 这条北界在地理学和气候学上被广泛使用, 该界线以南被称作真热带(吴绍洪和郑度, 2000)。然而, 在狭义定义上, 按照 Köppen-Geiger 的赤道季风气候分类(Kottek et al, 2006; Peel et al, 2007), 主要依据最低月均温18℃、年生物温(annual biotemperature) 25℃, 并具有龙脑香科植物分布, 那么中国热带地区则仅限于分布在海南省南部和台湾省南部(方精云, 2001; 方精云等, 2002)。

22°30' N被建议作为中国生物地理上的热带北界(Zhu et al, 2007; Zhu, 2013)。这条线与目前应用的中国热带雨林、季雨林北界吻合(吴征镒, 1980; 侯学煜, 1981, 1988; 张新时, 2007)。在该线以南的区域尽管10℃以上的年有效积温可能稍低于8,000℃, 但严格热带分布的植物如橡胶(*Hevea brasiliensis*)、咖啡(*Coffea arabica*)、菠萝密(*Artocarpus heterophyllus*)、胡椒(*Piper nigrum*)、菠萝(*Ananas comosus*)等均能够正常生长, 在冬季一般无需保护(徐祥浩, 1982)。在关于热带与亚热带的分界上, 张宏达(1964)认为把植物生活型和物候型作为标准是可靠的, 在广东, 热带界线不应超过雷州半岛北部。

在植物区系地理上, 热带分布属占70%以上区域(在一些地区植物区系中热带分布属可占到80%以上)的北界约在22°30' N, 这条界线与中国东南部年积温7,500℃等温线基本一致, 并与中国植被和植物区系区划匹配, 与中国热带雨林及东南亚性质的热带植物区系分布区域(Zhu, 1997, 2008a, b; Zhu & Roos, 2004)相符合, 该界线也与世界植物区系分区的泛北极或东亚植物区系与古热带植物区系的分界线(Takhtajan, 1978; Wu & Wu, 1996)相一致。尽管现在中国的边缘热带, 即21°30' N以南, 年积温8,000℃以上的区域在地理学和气候学上仍被广泛使用(中国科学院地理研究所, 1959; 丘宝剑和卢其尧, 1961; 丘宝剑, 1986; 中国科学院地理研究所, 1999), 但在一些地方植物区系研究中, 热带分布属占80%以上并在局部地区具有东南亚类型的热带雨林的区域, 其北界超出该界线。这也暗示了中国的热带雨林植被和热带植物区系在地质历史上曾有

更为广泛的分布。最近在福建24°12' N, 117°53' E的中中新世(Middle Miocene)地层发现了东南亚热带雨林标识物种龙脑香科植物(Shi & Li, 2010), 支持中国东部地区的热带和亚热带常绿阔叶林在中全新世(Mid-Holocene)曾北移(Yu et al, 2000; Zhu, 2013), 这与历史上中国南部气候比现在更热的说法一致(Morley, 1998)。

尽管中国的热带气候分界线仍不能统一, 但中国南部确实存在边缘热带气候(Domroes, 2003)。正如一些学者所说, 要在中国的热带和亚热带之间划出一条明显的界线是困难的。我们认为22°30' N大致可以作为中国生物地理上的热带北界(Zhu et al, 2007; Zhu, 2013)。因此, 本文所涉及的中国热带植物区系即指以22°30' N为中国南部和东南部的热带北界, 但在云南西部热带北界达到24°30' N, 在西藏南部的深切河谷可达到29° N (墨脱地区)的植物区系。

3 中国热带植物区系组成

按照中国生物地理上的热带北界, 中国的热带地区包括西藏东南部、云南西南到东南部、广西西南部、广东雷州半岛、台湾的南部和海南岛。依据作者掌握的现有植物区系的记录和资料, 主要包括西藏东南部、云南西南到东南部、广西西南部和海南岛。广东雷州半岛的原始植被早已遭到严重干扰破坏, 虽从残存的一些代表性物种可以看出其原始植物区系应是热带性质(张宏达等, 1957), 但目前仍无较全面的研究文献; 台湾的南部也因难以获得较完整的植物区系资料而在本文中未能涉及。就我们的资料而言, 中国的热带地区记录到野生种子植物227科(按APG III系统) 2,181属12,844种(包括亚种和变种)。

种子植物中, 含200种以上的特大科有14科, 包括兰科(823种, 153属)、豆科(692, 118)、禾本科(630, 170)、茜草科(534, 81)、菊科(484, 114)、唇形科(398, 75)、樟科(345, 18)、大戟科(335, 62)、蔷薇科(329, 36)、莎草科(301, 33)、荨麻科(274, 24)、杜鹃花科(257, 14)、壳斗科(248, 8)和爵床科(221, 56)。

含100–200种的大科有23科, 包括苦苣苔科(186, 34)、桑科(183, 10)、萝藦科(179, 41)、茶科(169, 13)、姜科(167, 20)、五加科(145, 21)、葡萄科(142, 9)、芸香科(136, 20)、卫矛科(133, 12)、玄参科(131, 35)、

葫芦科(128, 26)、毛茛科(128, 20)、夹竹桃科(127, 31)、天南星科(124, 28)、野牡丹科(124, 19)、紫金牛科(122, 5)、番荔枝科(118, 22)、无患子科(116, 24)、旋花科(114, 23)、蓼科(112, 8)、忍冬科(106, 14)、天门冬科(105, 16)及棕榈科(101, 18)。

这些特大科大部分都是中国及世界上广布的大科, 在含100–200种的大科中, 显然以热带–亚热带分布为主, 如苦苣苔科、桑科、萝藦科、茶科、姜科、五加科、芸香科、夹竹桃科、天南星科、野牡丹科、番荔枝科等。

有些科在种数上虽不占优势, 但却是构成森林上、中层乔木的主要科或代表科, 如无患子科、漆树科、橄榄科、杜英科、柿树科、使君子科、榆科、桃金娘科、藤黄科、五桠果科等。还有一些科种数虽不多, 但为群落的特征科, 在群落中通常有较大重要值, 如龙脑香科、四数木科、肉豆蔻科、茶茱萸科、粘木科、山榄科、使君子科、梧桐科、椴树科(石灰岩地区热带森林)等。

中国热带植物区系主体上以热带和主产热带的科为主, 属于热带性质的植物区系。就不同热带植被类型而言, 典型热带分布的科主要在热带雨林中, 热带和主产热带的科在热带雨林中占70–80%, 但在热带山地, 有相当数量的主产亚热带和主产温带的科。中国热带植物区系中含较多种数的科几乎都是主产热带、分布区延伸到亚热带和温带的科, 而非典型热带科, 标志着中国热带植物区系具有明显的热带边缘性质。

在原文献记录中, 中国热带植物区系还包括了作为中国特有科的瘿椒树科和大血藤科, 但瘿椒树科在*Flora of China*和APG IV (APG, 2016)以及文献Christenhusz和Byng (2016)中已包括了热带美洲的*Huerteia*属(4个种)在内, 成为热带亚洲(广义)–热带美洲分布科。大血藤属(*Sargentodoxa*)在*Flora of China*中归属于木通科, 并在越南、老挝也有分布, 本文接受*Flora of China*的处理, 这样, 中国热带植物区系中就没有中国热带地区的特有科了。

在种子植物属中, 榕属(*Ficus*)、楼梯草属(*Elatostema*)、石栎属(*Lithocarpus*)、杜鹃属(*Rhododendron*) (主要大量出现在西藏东南部和云南东南部)、悬钩子属(*Rubus*)、冬青属(*Ilex*)、石豆兰属(*Bulbophyllum*)、木姜子属(*Litsea*)、石斛属(*Dendrobium*)、蒲桃属(*Syzygium*)、罗伞属(*Ardisia*)、

山茶属(*Camellia*)、胡椒属(*Piper*)、崖爬藤属(*Tetrastigma*)、菝葜属(*Smilax*)、栲属(*Castanopsis*)、耳草属(*Hedyotis*)、冷水花属(*Pilea*)、凤仙花属(*Impatiens*)、山矾属(*Symplocos*)等为中国热带植物区系中的主要组成属。与科的情况类似, 这些主要组成属也以主产热带、分布区延伸到亚热带和温带的属为最多, 同样亦反映了中国热带植物区系的热带边缘性质。

4 中国热带植物区系的地理成分

按中国种子植物科属分布区类型划分(吴征镒, 1991; 吴征镒等, 2006), 统计了中国热带植物区系种子植物科属的分布区类型构成。本文主要按APG III系统(APG, 2009; Chase & Reveal, 2009)对中国的热带地区种子植物区系的科进行了修订, 对修订后分布区有改变的科, 亦根据情况做了相应调整(表1)。

从科的地理成分看, 中国热带植物区系中以泛热带分布的科比例最高, 有86科, 占37.8%; 其次是世界分布科, 有47科, 占20.70%; 排名第三的是北温带分布科, 占13.66%; 然后依次是热带亚洲至热带美洲间断分布科、旧世界热带分布科、热带亚洲分布科、热带亚洲至大洋洲分布及东亚分布科, 缺

中国特有分布科。热带分布科(类型2–7)合计132科, 占58.16%; 温带分布科(类型8–15)合计48科, 占21.14%; 热带分布科远优于温带分布科。

从属的地理成分看, 热带分布属(类型2–7)共占所统计属数的67.22%。在热带分布属中, 又以热带亚洲分布属最多, 占所统计属的26.04%, 如藤春属(*Alphonsea*)、崖摩属(*Ammora*)、腺萼木属(*Mycetia*)、香花藤属(*Aganosma*)、翅子树属(*Pterospermum*)、银钩花属(*Mitrephora*)、绞股兰属(*Gynostemma*)、麻楝属(*Chukrasia*)、芋属(*Colocasia*)、山楝属(*Aphanamixis*)、隐翼属(*Crypteronia*)、红光树属(*Knema*)等; 其次是泛热带分布属, 占15.82%, 如买麻藤属(*Gnetum*)、琼楠属(*Beilschmiedia*)、厚壳桂属(*Cryptocarya*)、胡椒属、山柑属(*Capparis*)、棒柄花属(*Cleidion*)、巴豆属(*Croton*)、薯蓣属(*Dioscorea*)、钩藤属(*Uncaria*)、苕麻属(*Boehmeria*)、牛奶菜属(*Marsdenia*)、崖豆树属(*Millettia*)、粗叶木属(*Lasianthus*)、巴戟属(*Morinda*)、罗伞属、羊蹄甲属(*Bauhinia*)等; 旧世界热带分布属占7.66%, 如蒲桃属、山牵牛属(*Thunbergia*)、岩棕属(*Dracaena*)、露兜树属(*Pandanus*)、翼核果属(*Ventilago*)、千金藤属(*Stephania*)、瓜馥木属(*Fissistigma*)、暗罗属(*Polyalthia*)、竹节树属(*Carallia*)、橄榄属

表1 中国热带植物区系科属的分布区类型
Table 1 Areal-types at family and genus levels of the flora in tropical China

分布区类型 Areal-types	科数 No. of family (%)	属数 No. of genus (%)
1 世界分布 Cosmopolitan	47 (20.70)	92 (4.22)
2 泛热带分布 Pantropic	86 (37.89)	345 (15.82)
3 热带亚洲至热带美洲间断分布 Tropical Asia and Tropical America disjuncted	14 (6.17)	57 (2.61)
4 旧世界热带分布 Old World Tropics	10 (4.41)	167 (7.66)
5 热带亚洲至大洋洲分布 Tropical Asia to Tropical Australasia	9 (3.96)	198 (9.08)
6 热带亚洲至热带非洲分布 Tropical Asia to Tropical Africa	3 (1.32)	131 (6.01)
7 热带亚洲分布 Tropical Asia (Indo-Malesia)	10 (4.41)	568 (26.04)
热带成分合计 Subtotal tropical elements (2–7)	132 (58.16)	1,466 (67.22)
8 北温带分布 North Temperate	31 (13.66)	190 (8.71)
9 东亚和北美间断分布 E. Asia and N. America disjuncted	9 (3.96)	79 (3.62)
10 旧世界温带分布 Old World Temperate	1 (0.44)	73 (3.35)
11 温带亚洲分布 Temperate Asia	0 (0.00)	16 (0.73)
12 地中海、西亚至中亚分布 Mediterranean, W. Asia to C. Asia	0 (0.00)	6 (0.28)
13 中亚分布 C. Asia	0 (0.00)	5 (0.23)
14 东亚分布 E. Asia	7 (3.08)	178 (8.16)
15 中国特有分布 Endemic to China	0 (0.00)	76 (3.48)
温带成分合计 Subtotal temperate elements (8–15)	48 (21.14)	623 (28.56)
总计 Total	227 (100.00)	2,181 (100.00)

(*Canarium*)、弯管花属(*Chassalia*)、假海桐属(*Pittosporopsis*)、紫玉盘属(*Uvaria*)等; 热带亚洲至大洋洲分布属占9.08%, 如银背藤属(*Argyrea*)、水锦树属(*Wendlandia*)、球兰属(*Hoya*)、瓜子金属(*Dischidia*)、崖爬藤属、黄檀属(*Dalbergia*)、臭椿属(*Ailanthus*)、蒴莲属(*Adenia*)、苏铁属(*Cycas*)、五桠果属(*Dillenia*)、紫薇属(*Lagerstroemia*)、翅子藤属(*Loeseneriella*)、九里香属(*Murraya*)、石仙桃属(*Pholidota*)、香椿属(*Toona*)等; 热带亚洲至热带非洲分布属占6.01%, 如木棉属(*Bombax*)、大风子属(*Flacourtia*)、使君子属(*Quisqualis*)、逼迫子属(*Bridelia*)、龙船花属(*Ixora*)、豆腐柴属(*Premna*)、飞龙掌血属(*Toddalia*)、尖叶木属(*Urophyllum*)、羊角拗属(*Strophanthus*)、帽蕊木属(*Mitragyna*)、芒属(*Miscanthus*)、藤黄属(*Garcinia*)、香茅属(*Cymbopogon*)、榆绿木属(*Anogeissus*)等。

温带分布属(包括中国特有属)合计占28.56%, 其中北温带分布属占8.71%, 居于温带分布属的首位, 如蒿属(*Artemisia*)、鹅耳枥属(*Carpinus*)、桦木属(*Betula*)、柳属(*Salix*)、山茱萸属(*Cornus*)、紫堇属(*Corydalis*)、松属(*Pinus*)、花楸属(*Sorbus*)等; 东亚分布属有178个, 占8.16%, 居于温带分布属的第二位, 如猕猴桃属(*Actinidia*)、射干属(*Belamcanda*)、三尖杉属(*Cephalotaxus*)、南酸枣属(*Choerospondias*)、蓬莱藤属(*Gardneria*)、拐枣属(*Hovenia*)、藤漆属(*Pegia*)、茵芋属(*Skimmia*)、旌节花属(*Stachyurus*)、枫杨属(*Pterocarya*)等。其他如东亚和北美间断分布属, 有五味子属(*Schisandra*)、石楠属(*Photinia*)、紫树属(*Nyssa*)、木犀榄属(*Osmanthus*)、木兰属(*Magnolia*)、十大功劳属(*Mahonia*)、八角属(*Illicium*)、栲属等; 旧世界温带分布属有筋骨草属(*Ajuga*)、香薷属(*Elsholtzia*)、角盘兰属(*Herminium*)、旋覆花属(*Inula*)、女贞属(*Ligustrum*)、重楼属(*Paris*)等。中国特有分布属有76个, 占3.48%, 如喜树属(*Camptotheca*)、拟单性木兰属(*Parakmeria*)、大血藤属(*Sargentodoxa*)、癭椒树属(*Tapiscia*)、通脱木属(*Tetrapanax*)、石笔木属(*Tutcheria*)等。

从属的分布区类型构成可以看出, 中国热带植物区系以热带分布属占优势, 热带性质明显, 并且有较多热带亚洲或印度-马来西亚植物区系的特点。

5 中国热带植物区系分异

由于中国的热带地区主要分布在西藏东南部、云南西南到东南部、广西西南部、广东雷州半岛、台湾的南部和海南岛, 它们的植物区系虽主要属于热带亚洲植物区系的北缘类型, 但从西到东, 因演化的地质历史不同, 生态环境亦有差异, 其植物区系的组成尽管基本一致, 但分异明显。

表2比较了西藏东南部、云南南部、云南东南部、广西西南部及海南热带植物区系的优势科组成。这5个地区植物区系除共同的世界性分布的优势大科, 如兰科、禾本科、菊科、豆科、茜草科等, 以及主要是泛热带分布的一些大科, 如大戟科、桑科、樟科及北温带分布的壳斗科外, 西藏东南部和云南东南部的共同优势科有在喜马拉雅和东亚山地大量演化的杜鹃花科和五加科, 云南南部和海南的共同优势科主要是热带分布的番荔枝科。

优势属的情况与优势科基本类似(表3), 但所比较地区的共同优势属不多, 除西藏东南部外, 其他4个地区植物区系中榕属均排名第一。其他优势属虽显示了较高的多样性, 但仍有规律。在西藏东南部, 杜鹃花属排名第一, 杜鹃花科树萝卜属(*Agapetes*)也排名在前。云南东南部也以杜鹃花属为优势属之一。热带性较强的蒲桃属和粗叶木属在云南南部和海南排在优势属之列。

表4比较了各地区植物区系属的分布区类型。除西藏墨脱外, 这些地区植物区系热带成分合计均在69%以上, 并以海南最高, 占到80.50%。如果从具体分布区类型构成来看, 云南南部和东南部热带亚洲成分比例最高; 西藏东南部北温带分布和东亚分布比例最高, 云南东南部次之, 这2类成分在海南也最低。

这些植物区系在优势科和属及地理成分构成上的分异是地质历史和生境对其植物区系演化影响的结果。西藏东南部与云南东南部具有一些特别的共同优势科属, 似乎印证了在地质板块碰撞和喜马拉雅隆升过程中, 云南发生了思茅-兰坪地质板块顺时针旋转, 也就是云南西北部和西藏东南部向北移动, 而云南东南部相应发生了南移, 形成一些云南西北部和西藏东南部与云南东南部的物种的对应演化和分布(Zhu & Yan, 2002; 朱华和阎丽春, 2003; Zhu, 2015)。云南南部和东南部热带亚洲成分

表2 西藏墨脱、云南南部、云南东南部、广西西南部及海南热带植物区系的优势科组成
Table 2 Dominant families in species richness across Chinese tropical areas (Motuo, Xizang; Southern Yunnan; Southeastern Yunnan; Southwestern Guangxi and Hainan)

西藏墨脱 ¹ Motuo, Xizang ¹	种数 No. of species	云南南部 ² Southern Yunnan ²	种数 No. of species	云南东南部 ³ Southeastern Yunnan ³	种数 No. of species	广西西南部 ⁴ Southwestern Guangxi ⁴	种数 No. of species	海南 ⁵ Hainan ⁵	种数 No. of species
兰科 Orchidaceae	181	兰科 Orchidaceae	377	兰科 Orchidaceae	276	豆科 Fabaceae	163	禾本科 Poaceae	267
杜鹃花科 Ericaceae	94	豆科 Fabaceae	261	豆科 Fabaceae	270	大戟科 Euphorbiaceae	105	兰科 Orchidaceae	264
禾本科 Poaceae	88	茜草科 Rubiaceae	201	茜草科 Rubiaceae	235	茜草科 Rubiaceae	105	豆科 Fabaceae	230
荨麻科 Urticaceae	77	禾本科 Poaceae	189	禾本科 Poaceae	215	菊科 Asteraceae	93	茜草科 Rubiaceae	199
樟科 Lauraceae	70	大戟科 Euphorbiaceae	148	菊科 Asteraceae	175	兰科 Orchidaceae	83	莎草科 Cyperaceae	172
蔷薇科 Rosaceae	61	唇形科 Lamiaceae	139	樟科 Lauraceae	141	禾本科 Poaceae	79	大戟科 Euphorbiaceae	160
菊科 Asteraceae	58	菊科 Asteraceae	137	荨麻科 Urticaceae	134	樟科 Lauraceae	68	菊科 Asteraceae	125
唇形科 Lamiaceae	50	樟科 Lauraceae	105	大戟科 Euphorbiaceae	127	蔷薇科 Rosaceae	65	唇形科 Lamiaceae	110
豆科 Fabaceae	49	荨麻科 Urticaceae	84	蔷薇科 Rosaceae	124	荨麻科 Urticaceae	58	樟科 Lauraceae	103
茜草科 Rubiaceae	47	姜科 Zingiberaceae	84	壳斗科 Fagaceae	109	壳斗科 Fagaceae	57	萝藦科 Asclepiadaceae	68
毛茛科 Ranunculaceae	35	桑科 Moraceae	83	桑科 Moraceae	104	桑科 Moraceae	47	爵床科 Acanthaceae	66
五加科 Araliaceae	31	爵床科 Acanthaceae	77	杜鹃花科 Ericaceae	95	芸香科 Rutaceae	46	壳斗科 Fagaceae	64
莎草科 Cyperaceae	29	萝藦科 Asclepiadaceae	66	唇形科 Lamiaceae	91	姜科 Zingiberaceae	46	桑科 Moraceae	60
壳斗科 Fagaceae	29	莎草科 Cyperaceae	63	莎草科 Cyperaceae	87	萝藦科 Asclepiadaceae	45	番荔枝科 Annonaceae	54
天南星科 Araceae	28	葫芦科 Cucurbitaceae	60	爵床科 Acanthaceae	85	苦苣苔科 Gesneriaceae	45	旋花科 Convolvulaceae	51
蓼科 Polygonaceae	28	壳斗科 Fagaceae	60	苦苣苔科 Gesneriaceae	80	夹竹桃科 Apocynaceae	43	紫金牛科 Myrsinaceae	49
苦苣苔科 Gesneriaceae	27	蔷薇科 Rosaceae	59	茶科 Theaceae	80	天门冬科 Asparagaceae	43	荨麻科 Urticaceae	49
桑科 Moraceae	23	番荔枝科 Annonaceae	57	天门冬科 Asparagaceae	67	紫金牛科 Myrsinaceae	42	桃金娘科 Myrtaceae	48
忍冬科 Caprifoliaceae	22	夹竹桃科 Apocynaceae	56	五加科 Araliaceae	62	唇形科 Lamiaceae	39	玄参科 Scrophulariaceae	48
大戟科 Euphorbiaceae	22	葡萄科 Vitaceae	56	金牛科 Myrsinaceae	60	葡萄科 Vitaceae	37	芸香科 Rutaceae	42

1 数据引自文献杨宁和周学武(2015); 2 数据引自文献朱华和闫丽春(2012); 3 数据引自文献Zhu和Yan (2009); 4 数据引自文献覃海宁和刘演(2010), 从中抽提出广西热带地区植物; 5 数据引自文献邢福武等(2012).
1 Data from Yang & Zhou (2015); 2 Data from Zhu & Yan (2012); 3 Data from Zhu & Yan (2009); 4 Data from Qin & Liu (2010), the native plants of tropical southwestern Guangxi were abstracted from this reference; 5 Data from Xing et al (2012).

比例最高, 可能是随印度支那板块向东南逃逸, 它们的植物区系演化受到热带亚洲植物区系的直接影响(Zhu, 2008a, 2012)。海南在地理上后来移至中国最南部, 热带气候形成, 热带植物区系也得以发展, 热带成分比例最高, 并且以泛热带分布比例最大(Zhu, 2016b)。另一方面, 云南南部与东南部之间在优势科属上产生较多差异, 原因可能就是云南南部与东南部在地质历史上曾有隔离, 在它们之间形成了生物地理分异(朱华, 2011; Zhu, 2013)。

表5比较了西藏东南部、云南南部和东南部、广西西南部及海南热带植物区系的科、属、种相似性。其科的相似性均在90%以上, 属的相似性均在64%以上, 但种的相似性从20%到53%, 反映了它们的植物区系在起源上(科、属层面)联系密切, 在种类组成上, 受地理位置、生态环境及地质历史的影响而分异明显。西藏东南部与云南东南部在科、属上有最大相似性, 再次印证了思茅-兰坪地质板块

顺时针旋转, 形成云南西北部和西藏东南部与云南东南部的一些物种对应分布的格局。云南东南部与广西西南部的植物区系属的相似性最大, 不仅因为它们的地理位置最近, 也因为它们有类似的地质历史背景。

我们的研究还发现, 云南南部植物区系中有237个属在云南东南部热带地区并没有见到, 而云南东南部热带植物区系中有349个属未见于云南南部, 包括57个东亚分布属、53个北温带分布属、22个中国特有分布属及17个东亚-北美间断分布属。云南南部与东南部热带地区具有类似的热带季风气候、热带雨林植被和植物区系, 它们的地理位置也靠近, 在种的相似性上最大, 但在优势的科属上却产生较大差异, 可能是因为它们在地质历史上曾有隔离(云南地质矿产局, 1995), 其植物区系起源背景不同, 这暗示着在云南南部与东南部之间可能存在一条历史生物地理线——“华线”(朱华, 2011;

表3 西藏墨脱、云南南部、云南东南部、广西西南部及海南热带植物区系的优势属组成

Table 3 Dominant genera in species richness across Chinese tropical areas (Motuo, Xizang; Southern Yunnan; Southeastern Yunnan; Southwestern Guangxi and Hainan)

西藏墨脱 ¹ Motuo, Xizang ¹	种数 No. of species	云南南部 ² Southern Yunnan ²	种数 No. of species	云南东南部 ³ Southeastern Yunnan ³	种数 No. of species	广西西南部 ⁴ Southwestern Guangxi ⁴	种数 No. of species	海南 ⁵ Hainan ⁵	种数 No. of species
杜鹃花属 <i>Rhododendron</i>	41	榕属 <i>Ficus</i>	65	榕属 <i>Ficus</i>	78	榕属 <i>Ficus</i>	35	榕属 <i>Ficus</i>	41
楼梯草属 <i>Elatostema</i>	31	石斛属 <i>Dendrobium</i>	47	悬钩子属 <i>Rubus</i>	53	紫金牛属 <i>Ardisia</i>	21	耳草属 <i>Hedyotis</i>	40
木姜子属 <i>Litsea</i>	22	石豆兰属 <i>Bulbophyllum</i>	40	秋海棠属 <i>Begonia</i>	51	扁蓄属 <i>Polygonum</i>	21	蒲桃属 <i>Syzygium</i>	36
扁蓄属 <i>Polygonum</i>	22	扁蓄属 <i>Polygonum</i>	34	楼梯草属 <i>Elatostema</i>	48	石栎属 <i>Lithocarpus</i>	19	冬青 <i>Ilex</i>	36
树萝卜属 <i>Agapetes</i>	19	木姜子属 <i>Litsea</i>	30	石栎属 <i>Lithocarpus</i>	48	悬钩子属 <i>Rubus</i>	19	飘拂草属 <i>Fimbristylis</i>	35
榕属 <i>Ficus</i>	19	薯蓣属 <i>Dioscorea</i>	28	杜鹃花属 <i>Rhododendron</i>	42	菝葜属 <i>Smilax</i>	19	莎草属 <i>Cyperus</i>	31
冷水花属 <i>Pilea</i>	18	蒲桃属 <i>Syzygium</i>	27	扁蓄属 <i>Polygonum</i>	39	崖爬藤属 <i>Tetrastigma</i>	18	紫金牛属 <i>Ardisia</i>	29
槭属 <i>Acer</i>	17	省藤属 <i>Calamus</i>	25	菝葜属 <i>Smilax</i>	39	山姜属 <i>Alpinia</i>	17	藁草属 <i>Carex</i>	29
山胡椒属 <i>Lindera</i>	16	胡椒属 <i>Piper</i>	25	藁草属 <i>Carex</i>	37	珍珠菜属 <i>Lysimachia</i>	17	石栎属 <i>Lithocarpus</i>	25
藁草属 <i>Carex</i>	15	秋海棠属 <i>Begonia</i>	24	冬青 <i>Ilex</i>	35	栎属 <i>Quercus</i>	17	粗叶木属 <i>asianthus</i>	25
毛兰属 <i>Eria</i>	15	毛兰属 <i>Eria</i>	22	栲属 <i>Castanopsis</i>	32	栲属 <i>Castanopsis</i>	16	山矾属 <i>Symplocos</i>	25
虾脊兰属 <i>Calanthe</i>	13	崖爬藤属 <i>Tetrastigma</i>	22	木姜子属 <i>Litsea</i>	32	楼梯草属 <i>Elatostema</i>	16	箬竹属 <i>Bambusa</i>	22
山白珠 <i>Gaultheria</i>	13	山蚂蝗属 <i>Desmodium</i>	21	胡椒属 <i>Piper</i>	29	槭属 <i>Acer</i>	15	扁蓄属 <i>Polygonum</i>	22
悬钩子属 <i>Rubus</i>	13	楼梯草属 <i>Elatostema</i>	21	崖爬藤属 <i>Tetrastigma</i>	28	冬青 <i>Ilex</i>	15	青冈属 <i>Cycloba-</i> <i>lanopsis</i>	21
柳属 <i>Salix</i>	13	石栎属 <i>Lithocarpus</i>	21	石斛属 <i>Dendrobium</i>	27	冷水花属 <i>Pilea</i>	15	石斛属 <i>Dendrobium</i>	20
石豆兰属 <i>Bulbophyllum</i>	12	紫云菜属 <i>Strobilanthes</i>	21	蛇根草属 <i>Ophiorrhiza</i>	27	莢蒾属 <i>Viburnum</i>	15	石豆兰属 <i>Bulbophyllum</i>	19
羊耳蒜属 <i>Liparis</i>	12	栲属 <i>Castanopsis</i>	20	槭属 <i>Acer</i>	26	秋海棠属 <i>Begonia</i>	14	柿属 <i>Diospyros</i>	19
菝葜属 <i>Smilax</i>	12	粗叶木属 <i>asianthus</i>	20	紫金牛属 <i>Ardisia</i>	26	铁线莲属 <i>Clematis</i>	14	紫珠属 <i>Callicarpa</i>	18
凤仙花属 <i>Impatiens</i>	11	菝葜属 <i>Smilax</i>	20	柃属 <i>Eurya</i>	26	茄属 <i>Solanum</i>	14	菝葜属 <i>Smilax</i>	18
蛇根草属 <i>Ophiorrhiza</i>	11	崖豆藤属 <i>Millettia</i>	19	卫矛属 <i>Euonymus</i>	25	山矾属 <i>Symplocos</i>	14	羊耳蒜属 <i>Liparis</i>	18

数据来源同表2。Data from references as Table 2.

表4 西藏墨脱、云南南部、云南东南部、广西西南部及海南热带植物区系属的分布区类型所占比例比较(%)

Table 4 Comparison of areal-types of genera of the floras across Chinese tropical areas (Motuo, Xizang; Southern Yunnan; Southeastern Yunnan; Southwestern Guangxi and Hainan)

属分布区类型 Areal-types of genera	西藏墨脱 ¹ Motuo, Xizang ¹	云南南部 ² Southern Yunnan ²	云南东南部 ³ Southeastern Yunnan ³	广西西南部 ⁴ Southwestern Guangxi ⁴	海南 ⁵ Hainan ⁵
1 世界分布 Cosmopolitan	7.60	4.67	4.57	5.43	5.07
2 泛热带分布 Pantropic	16.42	20.47	17.69	20.06	23.07
3 热带亚洲至热带美洲间断分布 Tropical Asia and Tropical America disjuncted	2.85	2.50	2.21	2.96	2.88
4 旧世界热带分布 Old World Tropics	6.38	9.91	8.55	9.19	11.46
5 热带亚洲至大洋洲分布 Tropical Asia to Tropical Australasia	8.14	10.72	6.04	9.98	13.18
6 热带亚洲至热带非洲分布 Tropical Asia to Tropical Africa	4.75	5.72	7.00	4.45	6.24
7 热带亚洲分布 Tropical Asia (Indo-Malesia)	16.28	27.72	27.34	23.22	23.77
热带成分合计 Subtotal tropical elements	54.82	77.03	69.00	69.86	80.5
8 北温带分布 North Temperate	15.06	5.48	8.18	7.71	4.60
9 东亚和北美间断分布 E. Asia and N. Amer. Disjuncted	5.16	2.58	3.46	3.95	2.49
10 旧世界温带分布 Old World Temperate	3.66	2.34	2.36	2.96	1.56
11 温带亚洲分布 Temperate Asia	0.68	0.40	0.44	0.49	0.31
12 地中海, 西亚至中亚分布 Mediterranea, W. Asia to C. Asia	0.54	0.24	0.22	0.30	0.16
13 中亚分布 C. Asia	0.14	0.16	0.07	0.00	0
14 东亚分布 E. Asia	11.94	5.88	8.84	7.11	3.74
15 中国特有分布 Endemic to China	0.41	1.21	3.02	2.17	1.48
温带成分合计 Subtotal temperate elements	37.58	18.29	26.59	24.7	14.34
总计	100	100	100	100	100.00

数据来源同表2。Data from references as Table 2.

表5 西藏墨脱、云南南部、云南东南部、广西西南部及海南热带植物区系的科、属、种相似性
Table 5 Comparison of floristic similarities at the family, generic and specific levels of the floras across Chinese tropical areas (Motuo, Xizang; Southern Yunnan; Southeastern Yunnan; Southwestern Guangxi and Hainan)

	西藏墨脱 Motuo, Xizang (159科737属1,790种) ¹	云南南部 Southern Yunnan (192科1,240属4,150种) ²	云南东南部 Southeastern Yunnan (191科1,350属4,987种) ³	广西西南部 Southwestern Guangxi (182科1,006属2,681种) ⁴	海南 Hainan (196科1,282属3,893种) ⁵
科相似性 Similarity coefficients at family level					
西藏墨脱 Motuo, Xizang	100				
云南南部 Southern Yunnan	93.71	100			
云南东南部 Southeastern Yunnan	99.37	93.19	100		
广西西南部 Southwestern Guangxi	94.97	93.41	95.05	100	
海南 Hainan	91.19	92.71	89.00	90.66	100
属相似性 Similarity coefficients at generic level					
西藏墨脱 Motuo, Xizang	100				
云南南部 Southern Yunnan	72.86	100			
云南东南部 Southeastern Yunnan	83.31	80.81	100		
广西西南部 Southwestern Guangxi	64.99	75.45	84.59	100	
海南 Hainan	64.31	72.02	67.47	71.47	100
种相似性 Similarity coefficients at specific level					
西藏墨脱 Motuo, Xizang	100				
云南南部 Southern Yunnan	32.74	100			
云南东南部 Southeastern Yunnan	39.94	53.33	100		
广西西南部 Southwestern Guangxi	18.99	40.1	48.71	100	
海南 Hainan	17.99	36.4	32.6	34.13	100

*两地区相似性系数 = 两地区共同具有的分类群数/含分类群较少的地区的分类群总数× 100%，数据来源同表2。
Similarity coefficient between A and B = the number of taxa shared by both A and B / the lowest number of taxa of A or B × 100%, Data from references as Table 2.

Zhu, 2013)。

6 结论与讨论

喜马拉雅剧烈隆升，东亚季风气候形成，在中国南方形成温暖湿润的亚热带、热带气候，导致了热带雨林植被的发生和热带植物区系的演化。

中国的热带地区主要分布在西藏东南部、云南西南至东南部、广西西南部、广东雷州半岛、台湾的南部和海南岛。尽管中国热带的分界线充满争议且在运用上有广泛变化，但22°30' N可作为中国生物地理上的热带北界。本文涉及的中国热带植物区系，即以该线为热带北界，但在云南西部可达到24°30' N，在西藏南部的深切河谷可达到29° N的墨脱。

依据现有植物区系的记录和资料，中国的热带植物区系具有野生种子植物区系227科2,181属12,844种。在组成中国的热带植物区系的特大科中，大部分都是中国及世界上广布的大科。除特大科外，中国的热带植物区系以主产热带但分布区延伸到

亚热带和温带的科为主，标志了中国热带植物区系的热带边缘性质。在中国热带植物区系的大属中，也以主产热带但分布区延伸到亚热带和温带的属为主，亦反映了中国热带植物区系的热带边缘性质。

中国热带植物区系中热带分布的科和属分别占总科和属数的58.00%和67.22%（按所有成分统计）。在热带分布的科中，又以泛热带分布的科比例最高，占总科数的37.80%；在热带分布的属中，则以热带亚洲分布属最多，占所统计属的26.04%。地理成分构成也明显反映了其热带边缘性质，并且有较多热带亚洲或印度-马来西亚植物区系的特点。

中国热带植物区系因不同地区地质历史及生态环境的差异，其植物区系的组成及地理成分上仍有一定分异。中国西南部到东南部，各地区植物区系科的相似性均在90%以上，属的相似性均在64%以上，但种的相似性一般低于50%。这些地区植物区系除共同的世界性分布的特大科，如兰科、禾本科、菊科、豆科、茜草科等外，以及主要是泛热带

分布的一些大科, 如大戟科、桑科、樟科及北温带分布的壳斗科外, 在西藏东南部和云南东南部均有在喜马拉雅和东亚山地大量演化的杜鹃花科和五加科, 在云南南部和海南均有主要是热带分布的番荔枝科。西藏东南部与云南东南部具有更多的共同优势科属和相似性, 显然是在喜马拉雅隆升过程中, 云南发生了地质板块顺时针旋转, 形成云南西北部和西藏东南部与云南东南部的一些物种对应演化的格局。海南可能由于其最南的地理位置, 热带植物区系得以充分发展。

在地理成分构成上, 西藏东南部热带成分比例相对较低, 北温带和东亚分布比例最高, 这不但因为其较高的纬度, 而且喜马拉雅的隆升对它也有明显影响。西藏东南部热带成分相对较低, 这一特征与孙航和周浙昆(1996, 1997)对喜马拉雅东部雅鲁藏布江大峡弯河谷地区种子植物区系的研究一致, 鉴于这一特征, 他们把墨脱雅鲁藏布江大峡弯地区归入到泛北极植物区中的东喜马拉雅植物地区。依据作者对杨宁和周学武(2015)的墨脱植物资料的分析, 其热带分布属占54.82%, 温带分布属占37.58%(表4), 考虑到墨脱地区具有以千果榄仁(*Terminalia myriocarpa*)为优势种的热带森林(孙航等, 1997; 杨宁和周学武, 2015), 笔者仍认为墨脱地区的植物区系应归为热带性质的植物区系。

从属的分布区类型构成可以看出, 中国热带植物区系以热带分布属占优势, 热带性质明显, 并且具有较多热带亚洲或印度-马来西亚植物区系的特点, 具有热带亚洲亲缘。张宏达(1980, 1994)承袭古生代华夏植物区系, 依据三迭纪以来在华南地台及其毗邻地区发展起来的有花植物区系, 仍主张将其统归入华夏植物区系, 并认为这里不仅保存了地球上最丰富的木兰目及其他多心皮类原始被子植物, 还有系统发育过程各个阶段上的许多关键性的科和目, 是最有可能的被子植物发源地。华夏植物区系地理范畴很大, 北起黑龙江, 东北部包括日本的本部和朝鲜半岛, 南部包括印支半岛、马来半岛、苏门答腊及加里曼丹, 这样的话, 中国热带植物区系在大范畴上同属于华夏植物区系。

致谢: 闫丽春女士帮助建立中国热带植物区系数据库, 特此致谢!

参考文献

- APG (2009) An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants: APG III. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 161, 105–121.
- APG (2016) An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants: APG IV. *Botanical Journal of Linnean Society*, 181, 1–20.
- Chang HT (1962) The characteristics of Kwangtung flora. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, (1), 1–34. (in Chinese) [张宏达 (1962) 广东植物区系的特点. 中山大学学报(自然科学版), (1), 1–34.]
- Chang HT (1963) The *Vatica astrotricha* forest from Hainan. *Acta Phytoecologia et Geobotanica Sinica*, 1(2), 142. (in Chinese) [张宏达 (1963) 海南岛的青皮林. 植物生态学与地植物学资料丛刊, 1(2), 142.]
- Chang HT (1964) The boundary of Chinese tropic and subtropic. *Acta Phytoecologia et Geobotanica Sinica*, 2(1), 139–140. (in Chinese) [张宏达 (1964) 关于热带与亚热带的分界问题. 植物生态学与地植物学资料丛刊, 2(1), 139–140.]
- Chang HT (1980) The origin and development of the Cathaysian flora. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, (1), 89–98. (in Chinese with English abstract) [张宏达 (1980) 华夏植物区系的起源与发展. 中山大学学报(自然科学版), (1), 89–98.]
- Chang HT (1994) A review on the origin of the Cathaysian flora. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 33(2), 1–9. (in Chinese with English abstract) [张宏达 (1994) 再论华夏植物区系的起源. 中山大学学报(自然科学版), 33(2), 1–9.]
- Chang HT, Zhang CC, Wang BS, Wu HM (1957) The Vegetation of Laichow Peninsula, Kwangtung. Science Press, Beijing. (in Chinese) [张宏达, 张超常, 王伯荪, 伍辉民 (1957) 雷州半岛的植被. 科学出版社, 北京.]
- Chase MW, Reveal JL (2009) A phylogenetic classification of the land plants to accompany APG III. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 161, 122–127.
- Christenhusz MJM, Byng JW (2016) The number of known plants species in the world and its annual increase. *Phytotaxa*, 261, 201–217.
- Ding T, Liao WB, Jin JH, Wang BS (2002) Floristic analysis on the seed plants of Mt. Diaoluo in Hainan Island. *Guihaia*, 22, 311–319. (in Chinese with English abstract) [丁坦, 廖文波, 金建华, 王伯荪 (2002) 海南岛吊罗山种子植物区系分析. 广西植物, 22, 311–319.]
- Domroes M (2003) Climatological characteristics of the tropics in China: climate classification schemes between German scientists and Huang Bingwei. *Journal of Geographical Science*, 13, 271–285.
- Fang JY (2001) Re-discussion about the forest vegetation zonation in eastern China. *Acta Botanica Sinica*, 43, 522–533. (in Chinese with English abstract) [方精云 (2001) 也论我国

- 东部植被带的划分. 植物学报, 43, 522–533.]
- Fang JY, Song YC, Liu H, Piao SL (2002) Vegetation-climate relationship and its application in the division of vegetation zone in China. *Acta Botanica Sinica*, 44, 1105–1122. (in Chinese with English abstract) [方精云, 宋永昌, 刘鸿雁, 朴世龙 (2002) 植被气候关系与我国的植被分区. 植物学报, 44, 1105–1122.]
- Fedorov An A (1957) The flora of southwestern China and its significance to the knowledge of the plant world of Eurasia. *Komarovskie Chtenija*, 10, 20–50. (in Russian)
- Fedorov An A (1958) The tropical rain forest of China. *Botaniceskij Žurnal SSSR*, 43, 1385–1480. (in Russian with English abstract)
- Fu GA, Hong XJ (2008) Flora of vascular plants of Jianfengling, Hainan Island. *Guihaia*, 28, 226–229. (in Chinese with English abstract) [符国瓊, 洪小江 (2008) 海南岛尖峰岭的维管植物区系. 广西植物, 28, 226–229.]
- Hou XY (1981) A further discussion on the principle and scheme for vegetation regionalization of China. *Acta Phytocologia et Geobotanica Sinica*, 5, 290–301. (in Chinese with English abstract) [侯学煜 (1981) 再论中国植被分区的原则和方案. 植物生态学与地植物学资料丛刊, 5, 290–301.]
- Hou XY (1988) *Vegetation Geography of China*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [侯学煜 (1988) 中国植被地理. 科学出版社, 北京.]
- Hu YJ (1997) The dipterocarp forest of Hainan Island, China. *Journal of Tropical Forest Science*, 9, 477–498.
- Institute of Geography, Chinese Academy of Sciences (1959) *Integrated Physiogeographical Regionalization of China (Draft)*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [中国科学院地理研究所 (1959) 中国综合自然区划(初稿). 科学出版社, 北京.]
- Kottek M, Grieser J, Beck C, Rudolf B, Rubel F (2006) World map of Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 15, 259–263.
- Li H, Wu SK (1983) The regionalization of Xizang (Tibet) flora and the floristic structure of south Himalaya region. *Acta Geographica Sinica*, 38, 252–261. (in Chinese with English abstract) [李恒, 武素功 (1983) 西藏植物区系区划和喜马拉雅南部植物地区的区系特征. 地理学报, 38, 252–261.]
- Li XW (1985) Floristic study of Yunnan Province. *Acta Botanica Yunnanica*, 7, 361–382. (in Chinese with English abstract) [李锡文 (1985) 云南植物区系. 云南植物研究, 7, 361–382.]
- Li XW, Walker D (1986) The plant geography of Yunnan Province, southwest China. *Journal of Biogeography*, 13, 367–397.
- Li XW (1995) A floristic study on the seed plants from tropical Yunnan. *Acta Botanica Yunnanica*, 17, 115–128. (in Chinese with English abstract) [李锡文 (1995) 云南热带种子植物区系. 云南植物研究, 17, 115–128.]
- Liang CF, Liang JY, Liu LF, Mo XL (1985) A report on the exploration of the flora of Longgang. *Guihaia*, 5, 191–209. (in Chinese with English abstract) [梁畴芬, 梁健英, 刘兰芳, 莫新礼 (1985) 弄岗植物区系考察报告. 广西植物, 5, 191–209.]
- Liao WB, Chang HT (1994) A comparison of the spermatophytic flora from Guangdong and its neighbouring regions. *Guihaia*, 14, 217–226. (in Chinese with English abstract) [廖文波, 张宏达 (1994) 广东种子植物区系与邻近地区的关系. 广西植物, 14, 217–226.]
- Liu DS, Zhang XS, Yuan BY (1998) Uplift and environmental evolution of Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau. In: *Formation, Evolution and Development of Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau* (eds Sun HL, Zheng D). pp. 179–230. Guangdong Science and Technology Press, Guangzhou. (in Chinese) [刘东升, 张新时, 袁宝印 (1998) 青藏高原隆起对周边地区的影响. 见: 青藏高原形成演化与发展(孙鸿烈, 郑度主编), 179–230页. 广东科技出版社, 广州.]
- Morley JR (1998) Palynological evidence for Tertiary plant dispersals in the SE Asian region in relation to plate tectonics and climate. In: *Biogeography and Geological Evolution of SE Asia* (eds Hall R, Holloway JD), pp. 221–234. Backbuys Publishers, Leiden.
- Institute of Geography, Chinese Academy of Sciences (1999) *National Nature Atlas of People's Republic of China*. Sino Map Press, Beijing. (in Chinese) [中国科学院地理研究所 (1999) 中华人民共和国国家自然地图集. 中国地图出版社, 北京.]
- Pan YS (1999) Formation and uplifting of the Qinghai-Tibet Plateau. *Earth Science Frontiers*, 6(3), 153–163. (in Chinese with English abstract) [潘浴生 (1999) 青藏高原的形成与隆升. 地学前缘, 6(3), 153–163.]
- Pan YS, Kong XR, Xiong SB (1998) Lithosphere structure, evolution and dynamics of Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau. In: *Formation, Evolution and Development of Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau* (eds Sun HL, Zheng D), pp. 1–72. Guangdong Science and Technology Press, Guangzhou. (in Chinese) [潘浴生, 孔祥儒, 熊绍柏 (1998) 青藏高原岩石圈结构、演化和动力学. 见: 青藏高原形成演化与发展(孙鸿烈, 郑度主编), 1–72页. 广东科技出版社, 广州.]
- Peel MC, Finlayson BL, McMahon TA (2007) Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, 4, 439–473.
- Qin HN, Liu Y (2010) *A Checklist of Vascular Plants of Guangxi*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [覃海宁, 刘演 (2010) 广西植物名录. 科学出版社, 北京.]
- Qiu BJ (1986) A new discussion on the regionalization of agroclimate in China. *Acta Geographica Sinica*, 41, 202–209. (in Chinese with English abstract) [丘宝剑 (1986) 中国农业气候区划新论. 地理学报, 41, 202–209.]
- Qiu BJ, Lu QR (1961) Agroclimatic division of tropical and southern subtropical regions in China. *Acta Geographica*

- Sinica, 27, 28–37. (in Chinese) [丘宝剑, 卢其尧 (1961) 我国热带-南亚热带的农业气候区划. 地理学报, 27, 28–37.]
- Raymo M, Ruddimen W (1992) Tectonic forcing of late Cenozoic climate. *Nature*, 359, 117–122.
- Ren ME, Yang RZ (1963) On some theoretical problems of the physical regionalization in China from a contradictory opinion—re-discussion on the physical regionalization in China. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, (3), 1–12. (in Chinese) [任美镔, 杨初章 (1963) 从矛盾观点论中国自然区划的若干理论问题——再论中国自然区划问题. 南京大学学报(自然科学版), (3), 1–12.]
- Ren ME, Zeng ZX (1991) The extent of tropical zone in China. *Scientia Geographica Sinica*, 11, 101–108. (in Chinese with English abstract) [任美镔, 曾昭璇 (1991) 论中国热带的范围. 地理科学, 11, 101–108.]
- Sato K, Liu YY, Zhu ZC, Yang ZY, Otofujii Y (1999) Paleomagnetic study of middle Cretaceous rocks from Yunlong, western Yunnan, China: evidence of southward displacement of Indochina. *Earth and Planetary Science Letters*, 165, 1–15.
- Sato K, Liu YY, Zhu ZC, Yang ZY, Otofujii Y (2001) Tertiary paleomagnetic data from northwestern Yunnan, China: further evidence for large clockwise rotation of the Indochina block and its tectonic implications. *Earth and Planetary Science Letters*, 185, 185–198.
- Sato K, Liu YY, Wang YB, Yokoyama M, Yoshioka S, Yang ZY, Otofujii Y (2007) Paleomagnetic study of Cretaceous rocks from Pu'er, western Yunnan, China: evidence of internal deformation of the Indochina block. *Earth and Planetary Science Letters*, 258, 1–15.
- Shi GL, Li HM (2010) A fossil fruit wing of *Dipterocarpus* from the middle Miocene of Fujian, China and its palaeoclimatic significance. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 162, 599–606.
- Shi YF, Li JJ, Li BY (1998) Uplift and environmental evolution of Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau. In: *Formation, Evolution and Development of Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau* (eds Sun HL, Zheng D), pp. 73–138. Guangdong Science and Technology Press, Guangzhou. (in Chinese) [施雅风, 李吉均, 李炳元 (1998) 青藏高原隆升与环境演化. 见: 青藏高原形成演化与发展(孙鸿烈, 郑度主编), 73–138页. 广东科技出版社, 广州.]
- Shi YF, Li JJ, Li BY, Yao TD, Wang SM, Li SJ, Cui ZJ, Wang FB, Pan BT, Fang XM, Zhang QS (1999) Uplift of the Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau and East Asia environmental change during Late Cenozoic. *Acta Geographica Sinica*, 54, 10–21. (in Chinese) [施雅风, 李吉均, 李炳元, 姚檀栋, 王苏民, 李世杰, 崔之久, 王富保, 潘保田, 方小敏, 张青松 (1999) 晚新生代青藏高原的隆升与东亚环境变化. 地理学报, 54, 10–21.]
- South China Institute of Botanical, Chinese Academy of Sciences (1964–1977) *Flora of Hainan*, Vols. 1–4. Science Press, Beijing. (in Chinese) [中国科学院华南植物研究所 (1964–1977) 海南植物志, 1–4卷. 科学出版社, 北京.]
- Su ZY, Chang HT (1994) Genera of Guangxi's flora: an areal type analysis. *Guihaia*, 14, 3–10. (in Chinese with English abstract) [苏志尧, 张宏达 (1994) 广西植物区系属的地理成分分析. 广西植物, 14, 3–10.]
- Sun H, Zhou ZK (1996) The characters and origin of the flora from the big bend gorge of Yalutsangpu (Brahmaputra) River, eastern Himalayas. *Acta Botanica Yunnanica*, 18, 185–204. (in Chinese with English abstract) [孙航, 周浙昆 (1996) 喜马拉雅东部雅鲁藏布江大峡谷河谷地区植物区系的特点和来源. 云南植物研究, 18, 185–204.]
- Sun H, Zhou ZK (1997) The phytogeographical affinities and nature of the big bend gorge of the Yalutsangpu Rivers, S.E. Tibet, E. Himalaya. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 3, 184–190. (in Chinese with English abstract) [孙航, 周浙昆 (1997) 喜马拉雅东部雅鲁藏布江大峡谷河谷地区种子植物区系的性质和近缘关系. 应用与环境生物学报, 3, 184–190.]
- Sun H, Zhou ZK, Yu HY (1997) The vegetation of the big bend gorge of Yalutsangpu River, S.E. Tibet, E. Himalayas. *Acta Botanica Yunnanica*, 19, 57–66. (in Chinese with English abstract) [孙航, 周浙昆, 俞宏渊 (1997) 喜马拉雅东部雅鲁藏布江大峡谷河谷地区植被组成特点. 云南植物研究, 19, 57–66.]
- Takhtajan A (Translated by Huang GC) (1988) *Floristic Regions of the World*. Science Press, Leningrad. Chinese version, Science Press, Beijing. [黄观程译 (1988) 世界植物区系区划. 科学出版社, 北京.]
- Tang T, Liao WB, Wang BS (2002) Studies on the flora of Wuzhishan, Hainan Island. *Guihaia*, 22, 297–304. (in Chinese with English abstract) [唐恬, 廖文波, 王伯荪 (2002) 海南五指山地区种子植物区系的特点. 广西植物, 22, 297–304.]
- Wang CW (1939) A preliminary study of the vegetation of Yunnan. *Bulletin of the Fan Memorial Institute of Biology*, 9(2), 65–125.
- Whitmore TC (1982) Fleeting impressions of some Chinese rain forests. *Commonwealth Forestry Review*, 61, 51–58.
- Whitmore TC (1984) *Tropical Rain Forest of the Far East*, 2nd edn. Clarendon Press, Oxford.
- Whitmore TC (1990) *An introduction to Tropical Rain Forests*. Clarendon Press, Oxford.
- Wu SH, Zheng D (2000) New recognition on the boundary between tropical and subtropical zone in the middle section of eco-geographic system. *Acta Geographica Sinica*, 55, 689–697. (in Chinese with English abstract) [吴绍洪, 郑度 (2000) 生态地理区域系统的热带北界中段界线的新认识. 地理学报, 55, 689–697.]
- Wu ZY (1965) The tropical floristic affinity of the flora of China. *Chinese Science Bulletin*, 16, 25–33. (in Chinese) [吴征镒 (1965) 中国植物区系的热带亲缘. 科学通报, 16, 25–33.]
- Wu ZY (1980) *Vegetation of China*, pp. 363–397. Science

- Press, Beijing. (in Chinese) [吴征镒 (1980) 中国植被, 363–397页. 科学出版社, 北京.]
- Wu ZY (1987) Vegetation of Yunnan, pp. 143–163. Science Press, Beijing. (in Chinese) [吴征镒 (1987) 云南植被, 143–163页. 科学出版社, 北京.]
- Wu ZY (1991) The areal-types of Chinese genera of seed plants. *Acta Botanica Yunnanica*, 13(Suppl. 4), 1–139. [吴征镒 (1991) 中国种子植物属的分布区类型. 云南植物研究, 13(增刊4), 1–139.]
- Wu ZY, Wu SG (1996) A proposal for a new floristic kingdom (realm)—the Asiatic kingdom, its delineation and characteristics. In: *Floristic Characteristics and Diversity of East Asian Plants* (eds Zhang AL, Wu SG), pp. 3–42. China Higher Education and Springer Press, Beijing.
- Wu ZY, Zhou ZK, Sun H, Li DZ, Peng H (2006) The Areal-types of Seed Plants and Their Origin and Differentiation. Yunnan Science and Technology Press, Kunming. (in Chinese) [吴征镒, 周浙昆, 孙航, 李德铎, 彭华 (2006) 种子植物分布区类型及其起源和分化. 云南科技出版社, 昆明.]
- Xing FW, Zhou JS, Wang FG, Zeng QW, Liu DM (2012) Inventory of Plant Species Diversity of Hainan. Huazhong Science and Technology Press, Wuhan. (in Chinese) [邢福武, 周劲松, 王发国, 曾庆文, 刘东明 (2012) 海南植物物种多样性编目. 华中科技大学出版社, 武汉.]
- Xu XH (1982) On the demarcation line of tropical and subtropical zones in southern China. *Acta Phytocologia et Geobotanica Sinica*, 6(1), 74–77. (in Chinese) [徐祥浩 (1982) 关于华南的热带与亚热带分界线问题. 植物生态学与地植物学丛刊, 6(1), 74–77.]
- Yang N, Zhou XW (2015) Plants of Motuo. China Forestry Publishing House, Beijing. (in Chinese) [杨宁, 周学武 (2015) 墨脱植物. 中国林业出版社, 北京.]
- Yu G, Chen X, Ni J, Cheddadi R, Guiot J, Han H, Harrison SP, Huang C, Ke M, Kong Z, Li S, Li W, Liew P, Liu G, Liu J, Liu Q, Liu KB, Prentice IC, Qui W, Ren G, Song C, Sugita S, Sun X, Tang L, Van Campo E, Xia Y, Xu Q, Yan S, Yang X, Zhao J, Zheng Z (2000) Palaeovegetation of China: a pollen data-based synthesis for the mid-Holocene and last glacial maximum. *Journal of Biogeography*, 27, 635–664.
- Yunnan Geology and Mineral Bureau (1995) Atlas of Geology and Palaeogeography of Yunnan. Yunnan Science and Technology Press, Kunming. (in Chinese) [云南地质矿产局 (1995) 云南岩相古地理图集. 云南科技出版社, 昆明.]
- Zhang RJ, Xing FW, Siu LP, Liu Y, Ye YS, Saichit Ng, Chen HF, Wang FG (2007) Spermatophyte flora of Yinggeling Mountain, Hainan. *Biodiversity Science*, 15, 382–392. (in Chinese with English abstract) [张荣京, 邢福武, 萧丽萍, 刘演, 叶育石, 吴世捷, 陈红锋, 王发国 (2007) 海南鹦哥岭的种子植物区系. 生物多样性, 15, 382–392.]
- Zhang XS (2007) Vegetation Maps of the People's Republic of China. Geological Publishing House, Beijing. (in Chinese) [张新时 (2007) 中华人民共和国植被图. 地质出版社, 北京.]
- Zhu H (1994) The floristic characteristics of the tropical rain forest in Xishuangbanna. *Chinese Geographical Science*, 4, 174–185.
- Zhu H (1997) Ecological and biogeographical studies on the tropical rain forest of south Yunnan, SW China with a special reference to its relation with rain forests of tropical Asia. *Journal of Biogeography*, 24, 647–662.
- Zhu H (2008a) The tropical flora of southern Yunnan, China, and its biogeographical affinities. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 95, 661–680.
- Zhu H (2008b) Advances in biogeography of the tropical rainforest in southern Yunnan, southwestern China. *Tropical Conservation Science*, 1, 34–42.
- Zhu H (2011) A new biogeographical line between South Yunnan and Southeast Yunnan. *Advances in Earth Science*, 26, 916–925. (in Chinese with English abstract) [朱华 (2011) 云南一条新的生物地理线. 地球科学进展, 26, 916–925.]
- Zhu H (2012) Biogeographical divergence of the flora of Yunnan, southwestern China initiated by the uplift of Himalaya and extrusion of indochina block. *PLoS ONE*, 7, 41600.
- Zhu H (2013) Geographical elements of seed plants suggest the boundary of the tropical zone in China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 386, 16–22.
- Zhu H (2015) Geographical patterns of Yunnan seed plants may be influenced by the Clockwise Rotation of the Simao-Indochina Geoblock. *Frontiers in Earth Science*, 3, 53. doi:10.3389/feart.2015.00053.
- Zhu H (2016a) A biogeographical comparison between Yunnan, Southwest China, and Taiwan, Southeast China, with implications for the evolutionary history of the East Asian Flora. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 101, 750–771.
- Zhu H (2016b) Biogeographical evidences help revealing the origin of Hainan Island. *PLoS ONE*, 11, e0151941.
- Zhu H, Cao M, Hu HB (2006a) Geological history, flora, and vegetation of Xishuangbanna, southern Yunnan, China. *Biotropica*, 38, 310–317.
- Zhu H, Chai Y, Zhou SS, Wang H, Yan LC (2015) Vegetation, floristic composition and species diversity in a tropical mountain nature reserve in southern Yunnan, SW China with implications to conservation. *Tropical Conservation Science*, 8, 528–546.
- Zhu H, Ma YX, Yan LC, Hu HB (2007) The relationship between geography and climate in the generic-level patterns of Chinese seed plants. *Acta Phytotaxonomica Sinica*, 45, 134–166.
- Zhu H, Roos MC (2004) The tropical flora of S. China and its affinity to Indo-Malesian flora. *Telopea*, 10, 639–648.
- Zhu H, Shi JP, Zhao CJ (2005) Species composition, physiognomy and plant diversity of the tropical montane evergreen broad-leaved forest in southern Yunnan. *Biodiversity and Conservation*, 14, 2855–2870.

- Zhu H, Wang H, Li BG (2006b) Species composition and biogeography of tropical montane rain forest in southern Yunnan of China. *Gardens' Bulletin Singapore*, 58, 81–132.
- Zhu H, Wang H, Li BG, Sirirugsa P (2003) Biogeography and floristic affinity of the limestone flora in southern Yunnan, China. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 90, 444–465.
- Zhu H, Yan LC (2002) A discussion on biogeographical lines of the tropical-subtropical Yunnan. *Chinese Geographical Science*, 12, 90–96.
- Zhu H, Yan LC (2003) Notes on the realities and significances of the “Tanaka line” and the “Ecogeographical Diagonal line” in Yunnan. *Advances in Earth Science*, 18, 871–877. (in Chinese with English abstract) [朱华, 闫丽春 (2003) 再论“田中线”和“滇西-滇东南”生态地理(生物地理)对角线”的真实性和意义. *地球科学进展*, 18, 871–877.]
- Zhu H, Yan LC (2009) Biogeographical affinities of the flora of southeastern Yunnan, China. *Botanical Studies*, 50, 467–475.
- Zhu H, Yan LC (2012) *Native Seed Plants in Xishuangbanna of Yunnan*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [朱华, 闫丽春 (2012) 云南西双版纳野生种子植物. 科学出版社, 北京.]
- Zhu H, Zhao CJ, Wang H, Zhou SS, Shi JP, Li BG (2006) A study on the flora of Caiyanghe Nature Reserve in Simao, Yunnan with references to the transition from tropical Asian flora to Eastern Asian flora. *Bulletin of Botanical Research*, 26(1), 38–52. (in Chinese with English abstract) [朱华, 赵崇奖, 王洪, 周时顺, 施济普, 李保贵 (2006) 思茅菜阳河自然保护区植物区系研究——兼论热带亚洲植物区系向东亚植物区系的过渡. *植物研究*, 26(1), 38–52.]
- Zhu KZ, Wan MW (1963) *Phenology*. Scientific Education Press, Beijing. (in Chinese) [竺可桢, 宛敏渭 (1963) 物候学. 科学教育出版社, 北京.]

(责任编辑: 王希华 责任编辑: 黄祥忠)

• 数据论文 •

青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征

王家坚¹ 彭智邦¹ 孙航² 聂泽龙¹ 孟盈^{1*}¹ (吉首大学生物资源与环境科学学院植物资源保护与利用重点实验室, 湖南吉首 416000)² (中国科学院昆明植物研究所东亚植物多样性与生物地理学重点实验室, 昆明 650201)

摘要: 青藏高原与横断山集特殊的地理位置和复杂的地形地势以及高度丰富的植物区系成分于一体, 成为世界上研究生物多样性起源与演化的热点地区之一。我们对这一地区被子植物的染色体数据进行了全面的统计分析, 结果表明新多倍体在该地区只约占23%的比例, 远低于其他高山地区, 这可能是由于这一地区特殊的地质历史或者复杂的地形和生境等因素所导致的。低基数的二倍体占近一半的比例(43.3%), 说明了二倍体水平上的染色体结构和核型进化也是本地区物种分化的另一重要机制。古多倍体, 即高基数二倍体, 也占有较大的成分(33.7%)。本地区物种在细胞学遗传演化途径上的多样性与这一地区极高的物种多样性和特有性可能存在一定的联系。通过对青藏高原及横断山地区被子植物区系进化中染色体演化机制的研究, 为探讨东亚以及北半球其他植物区系物种进化、高山植物区系起源和演化等许多重大问题提供了有益的帮助。

关键词: 青藏高原; 细胞地理; 染色体进化; 多倍体; 被子植物

Cytogeographic patterns of angiosperms flora of the Qinghai-Tibet Plateau and Hengduan Mountains

Jia-Jian Wang¹, Zhi-Bang Peng¹, Hang Sun², Ze-Long Nie¹, Ying Meng^{1*}¹ Key Laboratory of Plant Resources Conservation and Utilization, College of Biology and Environmental Sciences, Jishou University, Jishou, Hunan 416000² Key Laboratory for Plant Diversity and Biogeography of East Asia, Kunming Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650201

Abstract: The Qinghai-Tibet Plateau and Hengduan Mountains is an important hotspot to study the origin and evolution of plant biodiversity, which is characterized by high species richness and endemism, as well as a unique location and complicated topography. Based on a comprehensive survey of the chromosome numbers of angiosperms from the Qinghai-Tibet Plateau and Hengduan Mountains, our results indicated that the frequency of neopolyploids (23%) was much lower than expected. This was likely caused by the unique history, geology, and complicated topography and habitat. Another mechanism of chromosomal evolution is on the diploidy level (ca. 43.3%), with variations of chromosomal restructure and karyotype. The number of paleopolyploids (diploids with high base numbers) was large in plants from this mountain area (33.7%). The diversity of chromosomal evolution patterns of angiosperms from this region may be correlated to the high level of species richness and endemism. This study provides useful insight into our understanding of speciation, the origins of alpine flora and other important issues in eastern Asia and other regions in the Northern Hemisphere.

Key words: Qinghai-Tibet Plateau; cytogeography; chromosomal evolution; polyploidy; angiosperm

青藏高原和横断山是世界高山植物区系最为丰富的区域之一, 其维管植物种数占中国的一半以

收稿日期: 2016-09-29; 接受日期: 2016-11-28

基金项目: 国家自然科学基金(31560060, 31270273)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: mengyingnie@163.com

上(吴征镒, 1988; 武素功等, 1995; 孙航, 2002), 其中仅限于该区域分布的特有种类在35%以上(吴征镒, 1988; 李锡文和李捷, 1993)。青藏高原尤其是其东部高山峡谷和南部的喜马拉雅地区是世界上25个生物多样性热点地区之一(Myers et al, 2000)。青藏高原和横断山区还是世界上特殊环境类型最多及物种最丰富多样的区域之一(Ohba, 1988; 吴征镒, 1988)。

植物染色体多倍化与物种进化的关系一直备受关注, 多倍化是物种形成的一条重要途径, 特别是在被子植物中最为普遍(Stebbins, 1938, 1971; Levin, 1983; 洪德元, 1990; Masterson, 1994)。通常认为约有50–100%的高等植物存在多倍化起源(Soltis et al, 2009), 现存被子植物中约20–40%的种类是最近形成的多倍体(Stebbins, 1971)。多倍体在形态、生理和生活史等方面通常与它的祖先有明显的区别, 这些特征可能是多倍体适应新的生态环境的主要原因(Justin & Douglas, 2002; Soltis et al, 2004)。植物染色体加倍而产生的“预适应机制”对植物适应高海拔或高纬度极端环境有重要意义, 可能是植物适应复杂多变的生境特别是极端环境的主要机制(Otto, 2007), 所以, 多倍体又常见于具有恶劣环境的高山和极地地区。在80° N的北极圈附近多倍体的植物种类可占到80%以上(Brochmann et al, 2004)。

Nie等(2005)对横断山区被子植物染色体数据的统计中发现多倍体发生率仅为22%, 低于被子植物多倍体30–35%的平均水平, 这与该地区的植物区系特点极不吻合。横断山区植物区系是一个年轻的高山植物区系, 具有高度的物种多样性与特有性, 多倍体应该占有比较高的比例。然而横断山区只能代表青藏高原东南缘的区域, 为了全面了解我国西南高山地区植物的染色体演化情况, 还需要对整个青藏高原的植物染色体多倍体进化以及植物区系在细胞学方面的演化特征与机制进行全面和细致地分析和研究。

1 数据收集与染色体倍性统计分析

收集整理青藏高原和横断山区已报道的被子植物染色体资料并进行倍性统计, 染色体数据收录情况见附录1。同时结合植物的分布型、生活型与生境海拔资料进行分析。属的分布型是植物区系分

析的一个重要内容, 吴征镒(1991)全面整理分析了当时已有记载的中国种子植物属的分布区, 将其分布区概括为15个类型和30多个变型, 本文据此对青藏高原的类群进行统计分析。植物生活型分为草本和木本植物, 主要参考《中国植物志》和*Flora of China*。海拔数据主要根据文献记录的数据进行统计, 原始记载的海拔信息若为区间, 取其中间值为代表。

染色体倍性的确定主要依据Stebbins (1950)、Goldblatt (1980)与Lewis (1980)的方法。Stebbins (1950)根据配子染色体数与属内染色体基数的倍数情况把植物分为二倍体与多倍体, 二倍体(2n)是所在属染色体基数(x)的二倍(即通常所指的二倍体); 多倍体则为染色体基数(x)的3倍及3倍以上(主要是指新多倍体)。后来Grant等(1963)假定配子染色体数超过13的那些种大部分都是多倍体, 而小于13的则以二倍体为主。Goldblatt (1980)认为Grant等(1963)的方法太保守, 认为配子染色体数等于或大于11的被子植物都有多倍性, 甚至有些数目较低的植物也是由多倍体祖先衍生而来。Goldblatt (1980)的多倍体概念包括了各种类型的多倍体。为了对多倍体进行全面比较, 本文同时对新老多倍体进行统计分析, 新多倍体采用Stebbins的方法, 如果一个种同时有二倍体和多倍体的报道, 视为多倍体进行统计。古多倍体的统计则综合Goldblatt (1980)与Lewis (1980)的方法, 把凡是染色体数 $2n \geq 22$ 的二倍体都认为是古多倍体。

2 染色体倍性统计结果与分析

2.1 多倍体整体比例

通过收集青藏高原和横断山被子植物所有染色体报道数据, 总共得到1,491条染色体记录, 来自57科223属1,001种(包括变种, 表1, 附录1), 主要集中在菊科、百合科、毛茛科、龙胆科、豆科、蔷薇科、兰科、报春花科、十字花科和伞形科。被子植物新多倍体比例约为23%, 与聂泽龙(2002)^①对横断山区被子植物染色体数据的统计结果非常相似(458种, 新多倍体所占比例为24.0%)。与Khatoon 和 Ali (1993)基于喜马拉雅西部的巴基斯坦地区的被子植物染色体数据所进行的统计分析结果也很

^① 聂泽龙 (2002) 横断山区被子植物细胞地理学初探. 硕士学位论文, 中国科学院昆明植物研究所, 昆明。

表1 青藏高原与横断山被子植物区系染色体数目及倍性比例按分布型、生活型及海拔分布情况统计
Table 1 A summary of ploidy distribution of angiosperms from the Qinghai-Tibet Plateau and Hengduan Mountains according to their areal-types, life forms, and altitudes

		报道条数 No. of counts	种数 No. of species (%)			
			总数 Total	新多倍体 Neopolyploids	古多倍体 Paleopolyploids	二倍体 Diploids
分布型	Areal-type					
世界分布	Cosmopolitan	177	139	38 (27.3)	21 (15.1)	80 (57.6)
泛热带分布	Pantropic	37	33	3 (9.1)	15 (45.5)	15 (45.5)
东亚(热带、亚热带)及热带南美间断分布	East Asia (Tropical 1 & Subtropical) & Tropical South America disjuncted	1	1	0 (0.0)	1 (100)	0 (0.0)
旧世界热带分布	Old World Tropics	111	83	26 (31.3)	28 (33.7)	29 (34.9)
热带亚洲至热带大洋洲分布	Tropical Asia to Tropical 5 Australasia Oceania		5	2 (40.0)	2 (40.0)	1 (20.0)
热带亚洲至热带非洲分布	Tropical Asia to Tropical Af- 18 rica		11	2 (18.2)	4 (36.4)	5 (45.5)
热带亚洲(印度-马来西亚)分布	Tropical Southeast Asia 43 to Indo-Malaya & Tropical Southwest Pacific Islands		26	7 (26.9)	16 (61.5)	3 (11.5)
北温带分布	North Temperate	838	516	118 (22.9)	185 (35.8)	213 (41.3)
东亚和北美洲间断分布	East Asia & North America dis- 18 juncted		12	2 (16.7)	6 (50)	4 (33.3)
旧世界温带	Old World Temperate	11	11	2 (18.2)	3 (27.3)	6 (54.5)
温带亚洲分布	Temperate Asia	29	21	5 (23.8)	6 (28.6)	10 (47.6)
地中海区、西亚至中亚分布	Mediterranean & West to 1 Central Asia		1	0 (0.0)	0 (0.0)	1 (100.0)
中亚分布	Central Asia	21	17	3 (17.6)	6 (35.3)	8 (47.1)
东亚分布	East Asia	150	101	20 (19.8)	36 (35.6)	45 (44.6)
中国特有分布	Endemic to China	31	24	2 (8.3)	9 (37.5)	13 (54.2)
小计	Subtotal	1,491	1,001	230 (23.0)	338 (33.7)	433 (43.3)
生活型	Life form					
一年生草本	Annual herb	139	96	19 (19.8)	18 (18.8)	59 (61.5)
多年生草本	Perennial herb	1,208	796	182 (22.9)	289 (36.3)	325 (40.8)
木本	Woody	144	109	29 (26.6)	31 (28.4)	49 (45.0)
小计	Subtotal	1,491	1,001	230 (23.0)	338 (33.7)	433 (43.3)
海拔	Altitude					
<1,000 m		51	38	13 (34.2)	7 (18.4)	18 (47.4)
1,000–2,000 m		145	101	28 (27.7)	25 (24.8)	48 (47.5)
2,000–3,000 m		222	156	24 (15.4)	77 (49.4)	55 (35.3)
3,000–4,000 m		411	255	65 (25.5)	102 (40)	88 (34.5)
4,000–5,000 m		196	122	27 (22.1)	35 (28.7)	60 (49.2)
> 5,000 m		9	6	3 (50.0)	1 (16.7)	2 (33.3)
小计	Subtotal	1,034	678	160 (23.6)	247 (36.4)	271 (40.0)

相似，在其所列举的1,772种被子植物中新多倍体约占30.1%。这进一步加强了我们对青藏高原与横断山地区现有染色体倍性统计结果的可信度，表明整个喜马拉雅地区的被子植物多倍体分布比例比较低。

从整体来看，青藏高原与横断山被子植物的新多倍体比例(23%)相对来说偏低，如果把古多倍体也包括进来，则多倍体的比例可占到56.7% (表1)。

与整个被子植物界多倍体的比例接近(估计在50–70%左右)。Morton (1993)曾对非洲喀麦隆山植物的多倍性进行估计，仅新多倍体频率就达52.9%，如果把古多倍体成分包括进去，则比例更高。因此从本文收集的资料来看，整个青藏高原和横断山区的被子植物多倍体比例是偏低的，尤其是新多倍体比例。但由于青藏高原与横断山8,000–10,000种被子植物中，目前有染色体资料的种只占1/10左右，

与其研究地位极不相称,因此对这一地区的细胞学研究还需进一步加强。

2.2 按属分布型的染色体倍性分布

北温带成分这里是植物区系的主要成分,也是特征成分。从表1可见,北温带分布型类群报道的种类最多,在所有收集的1,001种植物中,属分布型为北温带成分的有516种,占了一半以上(表1),如果加上其他温带分布型,则远远超过一半。青藏高原及横断山的植物区系基本上为北温带性质,其重要性不仅在于它具有异常丰富的植物种类和复杂多样的区系成分,更在于其广泛分布的北温带成分和突出的东亚成分和中国-喜马拉雅成分(Wu, 1988; 李锡文和李捷, 1993)。因此本文所收集的染色体数据也表明我国西南地区植物区系为温带性质,特别是北温带性质。北温带分布型的倍性分布比例与整体水平非常接近,新多倍体约有22.9%,古多倍体比例为35.8% (表1)。

其次,东亚分布型的报道数是除世界广布型外仅次于北温带分布型的成分,位列第三(表1)。东亚成分和中国特有成分是西南地区被子植物区系的特征成分,其中东亚成分中的中国-喜马拉雅成分是由其他温带成分适应于高山环境的衍生结果(李锡文和李捷, 1993; 孙航, 2002)。青藏高原和横断山具有明显的东亚植物区系的烙印(孙航和李志敏, 2003)。本地区是东亚成分的主要形成中心之一,就地演化形成了一些中小型的特有属。因此研究本类型植物的细胞学特征也许更能反映我国西南植物区系成分的染色体倍性与进化特点。本次统计的东亚成分的倍性分布比例分别为19.8%(新多倍体), 35.6%(古多倍体)和44.6%(二倍体),其中新多倍体比例略低于北温带成分(表1),这可能是因为本类型大都是从北温带成分就地演化而来,故而具有相似的倍性分布规律。

2.3 植物生活型与染色体倍性分布

在所统计的1,001种青藏高原和横断山的被子植物中,多年生草本植物有796种,约占总数的80%,一年生草本植物96种,约占9.6%,木本植物109种,占10.9%。也就是说,该地区已有染色体数目报道的被子植物绝大部分为多年生草本植物,它们是该地区被子植物重要的生活型,可能更能适应这里严酷的生境。因此,多年生草本植物的多倍性更能反映我国西南高山地区被子植物区系的染色

体进化特点。多年生草本植物的新多倍体、古多倍体与二倍体的比例分别为22.9%、36.3%与40.8%,这与总的统计情况也非常相似。另外,新多倍体主要见于多年生植物和木本植物(其中多年生草本植物新多倍体比例为22%,木本植物的为26.6%),一年生植物则多为二倍体种,比例高达61.5% (表1)。

2.4 多倍体沿海拔的分布规律

本研究中有海拔记录的染色体报道的种类共有678种1,034条记录,经统计发现多倍体的比例与海拔没有明显的相关性(表1)。从新多倍体分布情况来看,在海拔5,000 m以上和1,000 m以下新多倍体的比例较高,分别是50%和34.2%,而在海拔2,000–3,000 m之间的比例最低,仅为15.4%,其他两个海拔段分别为22.1%和27.7%。但是海拔2,000–3,000 m段古多倍体所占比例最高,约为49.4%,其次是海拔3,000–4,000 m段,古多倍体占到40%,说明海拔2,000–4,000 m段植物属于古老成分的比较。但由于目前这一地区染色体资料并不是很多,需要更多的数据来进一步验证这些结果。

3 青藏高原与横断山被子植物区系成分多样化的细胞学演化途径

被子植物在青藏高原和横断山区得到了充分的发展和演化,这里植物种类丰富,并富有大量特有种(吴征镒和王荷生, 1983; 李锡文和李捷, 1993; 孙航和周浙昆, 1996)。在它们长期的发展分化过程中必然有许多错综复杂的染色体进化样式。无论是从总体情况来看,还是对其主要的成分比如北温带成分,以及其主要的的生活型(多年生草本),或者从其海拔分布情况来看,目前的数据表明整个青藏高原的被子植物多倍化频率都是非常低的,高基数的二倍体和真正的二倍体(低基数)都占有相当大的比例(表1),我们的统计结果揭示多倍体可能并非植物适应高寒生境的唯一途径,这一地区植物区系在细胞学上的演化机制是多样化的,新多倍化、古多倍化以及二倍体水平上的物种演化都是可能的重要途径。

从许多被子植物的重要类群和特有类群的染色体数据可以看出(表2, 3),这一地区被子植物细胞学演化的这几种方式都比较活跃。本地区被子植物染色体报道种数在10种以上的属有27属, 552种,占已有报道种类的一半以上,新多倍体的分布在这些

表2 报道种类10种以上的属的倍性分布情况
Table 2 Frequency of ploidy distribution of genus counted with more than 10 species

科名 Family	属名 Genus	报道条数 No. of counts	种数 No. of species (%)			
			总数 Total	新多倍体 Neopolyploids	古多倍体 Paleopolyploids	二倍体 Diploids
伞形科 Apiaceae	柴胡属 <i>Bupleurum</i>	15	12	1 (8.3)	0 (0.0)	11 (91.7)
伞形科 Apiaceae	独活属 <i>Heracleum</i>	34	16	2 (12.5)	14 (87.5)	0 (0.0)
伞形科 Apiaceae	藁本属 <i>Ligusticum</i>	12	11	2 (18.2)	9 (81.8)	0 (0.0)
天门冬科 Asparagaceae	黄精属 <i>Polygonatum</i>	27	18	3 (16.7)	14 (77.8)	1 (5.6)
菊科 Asteraceae	香青属 <i>Anaphalis</i>	37	18	15 (83.3)	3 (16.7)	0 (0.0)
菊科 Asteraceae	火绒草属 <i>Leontopodium</i>	20	13	7 (53.8)	6 (46.2)	0 (0.0)
菊科 Asteraceae	橐吾属 <i>Ligularia</i>	20	17	1 (5.9)	16 (94.1)	0 (0.0)
菊科 Asteraceae	风毛菊属 <i>Saussurea</i>	50	41	2 (4.9)	39 (95.1)	0 (0.0)
紫葳科 Bignoniaceae	角蒿属 <i>Incarvillea</i>	15	12	0 (0.0)	12 (100.0)	0 (0.0)
桔梗科 Campanulaceae	蓝钟花属 <i>Cyananthus</i>	23	14	2 (14.3)	0 (0.0)	12 (85.7)
豆科 Fabaceae	黄耆属 <i>Astragalus</i>	12	12	2 (16.7)	0 (0.0)	10 (83.3)
龙胆科 Gentianaceae	龙胆属 <i>Gentiana</i>	55	43	7 (16.3)	18 (41.9)	18 (41.9)
鸢尾科 Iridaceae	鸢尾属 <i>Iris</i>	13	10	0 (0.0)	10 (100.0)	0 (0.0)
百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>	91	35	14 (40.0)	3 (8.6)	18 (51.4)
百合科 Liliaceae	百合属 <i>Lilium</i>	69	25	2 (8.0)	23 (92.0)	0 (0.0)
百合科 Liliaceae	豹子花属 <i>Nomocharis</i>	23	11	1 (9.1)	10 (90.9)	0 (0.0)
百合科 Liliaceae	重楼属 <i>Paris</i>	27	18	1 (5.6)	0 (0.0)	17 (94.4)
列当科 Orobanchaceae	马先蒿属 <i>Pedicularis</i>	21	21	0 (0.0)	0 (0.0)	21 (100.0)
禾本科 Poaceae	鹅观草属 <i>Roegneria</i>	26	13	13 (100.0)	0 (0.0)	0 (0.0)
报春花科 Primulaceae	报春花属 <i>Primula</i>	25	18	0 (0.0)	13 (72.2)	5 (27.8)
毛茛科 Ranunculaceae	乌头属 <i>Aconitum</i>	71	45	9 (20.0)	0 (0.0)	36 (80.0)
毛茛科 Ranunculaceae	银莲花属 <i>Anemone</i>	11	10	1 (10.0)	0 (0.0)	9 (90.0)
毛茛科 Ranunculaceae	翠雀属 <i>Delphinium</i>	100	56	2 (3.6)	0 (0.0)	54 (96.4)
毛茛科 Ranunculaceae	毛茛属 <i>Ranunculus</i>	17	15	10 (66.7)	0 (0.0)	5 (33.3)
蔷薇科 Rosaceae	苹果属 <i>Malus</i>	22	11	6 (54.5)	5 (45.5)	0 (0.0)
蔷薇科 Rosaceae	悬钩子属 <i>Rubus</i>	29	27	11 (40.7)	0 (0.0)	16 (59.3)
虎耳草科 Saxifragaceae	虎耳草属 <i>Saxifraga</i>	10	10	4 (40.0)	2 (20.0)	4 (40.0)

类群中的比例大致可以划分为3个区段(表2)。其中高比例的有8属,即香青属(*Anaphalis*)、火绒草属(*Leontopodium*)、葱属(*Allium*)、苹果属(*Malus*)、悬钩子属(*Rubus*)、毛茛属(*Ranunculus*)、鹅观草属(*Roegneria*)和虎耳草属(*Saxifraga*),每个属的新多倍体比例都达到40%以上,其中鹅观草属全为新多倍体;新多倍体比例居中的有7属,即乌头属(*Aconitum*)、黄耆属(*Astragalus*)、蓝钟花属(*Cyananthus*)、龙胆属(*Gentiana*)、藁本属(*Ligusticum*)、独活属(*Heracleum*)和黄精属(*Polygonatum*),这些属的新多倍体比例在12.5–20%之间;新多倍体比例相对比较低的有12属,即银莲花属(*Anemone*)、翠雀属(*Delphinium*)、柴胡属(*Bupleurum*)、角蒿属(*Incarvillea*)、鸢尾属(*Iris*)、橐

吾属(*Ligularia*)、风毛菊属(*Saussurea*)、百合属(*Lilium*)、豹子花属(*Nomocharis*)、重楼属(*Paris*)、马先蒿属(*Pedicularis*)和报春花属(*Primula*),这些属的新多倍体比例在0–10%之间。新多倍体比较少的属往往具有较高的古多倍体或者二倍体比例,比如角蒿属和鸢尾属全为古多倍体,而马先蒿属和重楼属等多为二倍体(表2)。

从科水平来看,染色体报道种数超过10种的共有20科(表3)。新多倍体比例40%以上的有5科:蔷薇科、虎耳草科、天南星科、茄科和禾本科,特别是禾本科和茄科,分别为92.6%和81.8%;新多倍体比例居中的有8科:桔梗科、天门冬科、毛茛科、龙胆科、菊科、百合科、蓼科和兰科,新多倍体比例在16.7–26.9%之间;新多倍体比例偏少的有7科:紫葳

表3 报道种类10种以上的科的倍性分布情况统计表
Table 3 Frequency of ploidy distribution of family counted with more than 10 species

科名 Family	属数 No. of genus	报道条数 No. of counts	种数 No. of species (%)			
			总数 Total	新多倍体 Neopolyploids	古多倍体 Paleopolyploids	二倍体 Diploids
伞形科 Apiaceae	13	100	67	7 (10.4)	40 (59.7)	20 (29.9)
天南星科 Araceae	6	19	15	7 (46.7)	7 (46.7)	1 (6.7)
天门冬科 Asparagaceae	4	54	30	5 (16.7)	24 (80.0)	1 (3.3)
菊科 Asteraceae	28	200	149	35 (23.5)	75 (50.3)	39 (26.2)
紫葳科 Bignoniaceae	1	15	12	0 (0.0)	12 (100.0)	0 (0.0)
十字花科 Brassicaceae	12	29	22	3 (13.6)	0 (0.0)	19 (86.4)
桔梗科 Campanulaceae	3	28	18	3 (16.7)	2 (11.1)	13 (72.2)
豆科 Fabaceae	14	67	58	4 (6.9)	3 (5.2)	51 (87.9)
龙胆科 Gentianaceae	7	70	58	11 (19.0)	21 (36.2)	26 (44.8)
鸢尾科 Iridaceae	1	13	10	0 (0.0)	10 (100.0)	0 (0.0)
百合科 Liliaceae	16	251	114	27 (23.7)	49 (43.0)	38 (33.3)
兰科 Orchidaceae	12	37	26	7 (26.9)	19 (73.1)	0 (0.0)
列当科 Orobanchaceae	1	21	21	0 (0.0)	0 (0.0)	21 (100.0)
禾本科 Poaceae	6	47	27	25 (92.6)	1 (3.7)	1 (3.7)
蓼科 Polygonaceae	2	17	12	3 (25.0)	6 (50.0)	3 (25.0)
报春花科 Primulaceae	3	40	24	2 (8.3)	13 (54.2)	9 (37.5)
毛茛科 Ranunculaceae	22	247	159	29 (18.2)	1 (0.6)	129 (81.1)
蔷薇科 Rosaceae	6	61	47	19 (40.4)	8 (17.0)	20 (42.6)
虎耳草科 Saxifragaceae	5	25	23	10 (43.5)	3 (13.0)	10 (43.5)
茄科 Solanaceae	7	14	11	9 (81.8)	1 (9.1)	1 (9.1)

科、鸢尾科、列当科、豆科、报春花科、伞形科和十字花科，新多倍体比例在0–13.6%之间，特别是紫葳科、鸢尾科和列当科，没有新多倍体出现。

当然这几种方式不是绝对的，有时有交叉重叠现象。例如温带分布型的黄耆属和乌头属植物主要为二倍体水平上演化，但也有少数的新多倍化现象出现(黎斌等, 2004; Yuan & Yang, 2006); 而以横断山区为其分化中心和分布中心的藁本属和黄精属(王文采, 1993), 为染色体基数比较高的古多倍体, 同时演化出二倍体、四倍体和六倍体等(Zhou et al, 2008; Deng et al, 2009), 说明它们在早期多倍体二倍化后又进行新一轮的多倍化过程, 进化非常迅速和激烈。

多倍体一般被认为比其二倍体亲本具有更好的忍耐严酷自然条件的能力(Stebbins, 1971, 1980; Abbott & Brochmann, 2003; Brochmann et al, 2004)。但后来发现情况并不完全如此(Nie et al, 2005; Tkach et al, 2014), 本文同样发现多倍体比例在高山地区并不占优势。这可能一方面因为植物多倍体

与其本身内在因素与环境条件等各个方面息息相关, 另一方面植物适应环境条件的方式也是多种多样的。从本地区大量的二倍体广布属及许多特有二倍体属种可以看出(表1), 被子植物二倍体水平上的适应机制在这里是非常成功的。虽然青藏高原复杂的生境为这里的植物提供了很好的演化场所(吴征镒和王荷生, 1983; Boufford & Dyc, 2000), 但由于该地区特殊的地质历史背景(莫宣学和潘桂棠, 2006), 极其缓慢的抬升过程一方面有利于植物多倍化, 同时也让植物有机会选择其他的进化方式, 如在二倍体水平上染色体结构变化可能也是该地区被子植物的一条重要的进化途径, 大量的二倍体特有种及二倍体特有属便是一个很好的例证。另外, 从古多倍体占优势的类群可以看出青藏高原被子植物多倍化事件可能较多发生于地质抬升早期阶段的就地演化, 或者外地迁入的一些高基数的类群。由于本地区早期的地质抬升过程中环境变化程度更大, 生境的改变更迅速, 更有利于早期多倍体的形成。

综上所述, 现有数据表明青藏高原和横断山区新多倍体比例不占优势, 古多倍体和二倍体同时占有一定的比重, 这种倍性分布的平均性, 反映了本地区染色体进化的复杂机制, 这可能与该地区复杂的地质历史条件和地形地貌有关。被子植物染色体在该地区上演了各种可能的进化途径, 包括二倍体水平的染色体进化、非整倍性变化及新老多倍化方面等等, 甚至在一个类群内部也可能同时选择好几种方式。但由于现有染色体资料还比较缺乏, 同时人们越来越趋向于认为被子植物染色体进化是一个非常复杂的系统工程, 因此对本地区被子植物区系全面的倍性与地理分布情况及具体的染色体进化机制与途径等, 现在下结论还为时过早, 还需要大量的研究工作来论证这方面的推测。

参考文献

- Abbott RJ, Brochmann C (2003) History and evolution of the arctic flora: in the footsteps of Eric Hulten. *Molecular Ecology*, 12, 299–313.
- Boufford DE, Dyck PPV (2000) South-Central China. In: Hot-spots: Earth's Biologically Richest and most Endangered Terrestrial Ecoregions (eds Mittermeier RA, Myers N, Mittermeier CG), pp. 338–351. Graphic Arts Center Publishing Company, Portland.
- Brochmann C, Brysting AK, Alsos IG, Borgen L, Grundt HH, Scheen A, Elven R (2004) Polyploidy in arctic plants. *Biological Journal of the Linnean Society*, 82, 521–536.
- Deng XY, Wang Q, He XJ (2009) Karyotypes of 16 populations of eight species in the genus *Polygonatum* (Asparagaceae) from China. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 159, 245–254.
- Goldblatt P (1980) Polyploidy in angiospermum: monocotyledons. In: *Polyploidy: Biological Relevance* (ed. Lewis WH), p. 219. Springer, New York.
- Grant JK, De DC, Biochimie SBD (1963) *Methods of Separation of Subcellular Structural Components*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Hong DY (1990) *Plant Cytotaxonomy*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [洪德元 (1990) 植物细胞分类学. 科学出版社, 北京.]
- Justin R, Douglas WS (2002) Neopolyploidy in flowering plants. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 33, 589–639.
- Khatoun S, Ali SI (1993) *Chromosome Atlas of the Angiosperms of Pakistan*. BCC & T Press, Karachi.
- Levin DA (1983) Polyploidy and novelty in flowering plants. *The American Naturalist*, 122, 1–25.
- Lewis WH (1980) *Polyploidy: Biological Relevance*. Springer, New York.
- Li B, Chang ZY, Wu ZH, Xu LR (2004) A karyotype study of six *Astragalus* species from China. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 24, 711–715. (in Chinese with English abstract) [黎斌, 常朝阳, 吴振海, 徐朗然 (2004) 国产 6 种黄耆属植物的核型研究. 西北植物学报, 24, 711–715.]
- Li XW, Li J (1993) A preliminary floristic study on the seed plants from the region of Hengduan Mountain. *Acta Botanica Yunnanica*, 15, 217–231. (in Chinese with English abstract) [李锡文, 李捷 (1993) 横断山脉地区种子植物区系的初步研究. 云南植物研究, 15, 217–231.]
- Masterson J (1994) Stomatal size in fossil plants: evidence for polyploidy in majority of angiosperms. *Science*, 264, 421–424.
- Mo XX, Pan GT (2006) From the Tethys to the formation of the Qinghai-Tibet Plateau: constrained by tectono-magmatic events. *Earth Science Frontiers*, 13(6), 43–51. (in Chinese with English abstract) [莫宣学, 潘桂棠 (2006) 从特提斯到青藏高原形成: 构造-岩浆事件的约束. 地学前缘, 13(6), 43–51.]
- Morton JK (1993) Chromosome numbers and polyploidy in the flora of Cameroons Mountain. *Opera Botany*, 121, 159–172.
- Myers N, Mittermeier RA, Mittermeier CG, Fonseca GABD, Kent J (2000) Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, 403, 853–858.
- Nie ZL, Wen J, Gu ZJ, Boufford DE, Sun H (2005) Polyploidy in the flora of the Hengduan Mountains hotspot, southwestern China. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 92, 275–306.
- Ohba H (1988) The alpine flora of the Nepal Himalayas: an introductory note. In: *The Himalayan Plants*, Vol. 1. (eds Ohba H, Malla SB), pp. 19–46. University of Tokyo Press, Tokyo.
- Otto SP (2007) The evolutionary consequences of polyploidy. *Cell*, 131, 452–462.
- Soltis DE, Albert VA, Mack JL, Bell CD, Paterson AH, Zheng CF, Sankoff D, Pamphilis CW, Wall PK, Soltis PS (2009) Polyploidy and angiosperm diversification. *American Journal of Botany*, 96, 336–348.
- Soltis DE, Soltis PS, Tate JA (2004) Advances in the study of polyploidy since plant speciation. *New Phytologist*, 161, 173–191.
- Stebbins GL (1950) *Variation and Evolution in Plants*. Columbia University Press, New York.
- Stebbins GL (1938) Cytogenetic studies in *Paeonia*. II. The cytology of the diploid species and hybrids. *Genetics*, 23, 83–110.
- Stebbins GL (1971) *Chromosomal Evolution in Higher Plants*. Edward Arnold Ltd., London.
- Stebbins GL (1980) Polyploidy in plants: unsolved problems and prospects. In: *Polyploidy: Biological Relevance* (ed. Lewis WH), pp. 495–520. Springer, New York.
- Sun H (2002) Tethys retreat and Himalayas-Hengduanshan Mountains uplift and their significance on the origin and development of the Sino-Himalayan elements and alpine flora. *Acta Botanica Yunnanica*, 24, 273–288. (in Chinese with English abstract) [孙航 (2002) 古地中海退却与喜马拉雅-横断山脉造山运动对喜马拉雅-横断山脉地区高山植物区系的影响. 云南植物研究, 24, 273–288.]

- 拉雅—横断山的隆起在中国喜马拉雅成分及高山植物区系的形成与发展上的意义. 云南植物研究, 24, 273–288.]
- Sun H, Li ZM (2003) Qinghai-Tibet Plateau uplift and its impact on Tethys flora. *Advance in Earth Sciences*, 18, 852–862. (in Chinese with English abstract) [孙航, 李志敏 (2003) 古地中海植物区系在青藏高原隆起后的演变和发展. 地球科学进展, 18, 852–862.]
- Sun H, Zhou ZK (1996) The characters and origin of the flora from the big bend gorge of Yalutsangpu (Brahmabutra) River, eastern Himalayas. *Acta Botanica Yunnanica*, 18, 185–204. (in Chinese with English abstract) [孙航, 周浙昆 (1996) 喜马拉雅东部雅鲁藏布江大峡湾河谷地区植物区系的特点及来源. 云南植物研究, 18, 185–204.]
- Tkach N, Ree RH, Kuss P, Röser M, Hoffmann MH (2014) High mountain origin, phylogenetics, evolution, and niche conservatism of arctic lineages in the hemiparasitic genus *Pedicularis* (Orobanchaceae). *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 76(8), 75–92.
- Wang WT (1993) *Vascular Plants of the Hengduan Mountains*, Vol. 1. Science Press, Beijing. [王文采 (1993) 横断山区维管植物, 上册. 科学出版社, 北京.]
- Wu SG, Yang YP, Fei Y (1995) On the flora of the alpine region in the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau. *Acta Botanica Yunnanica*, 17, 233–250. (in Chinese with English abstract)
- [武素功, 杨永平, 费勇 (1995) 青藏高原高寒地区种子植物区系的研究. 云南植物研究, 17, 233–250.]
- Wu ZY (1988) Hengduan Mountains flora and her significance. *Journal of Japanese Botany*, 63, 297–311.
- Wu ZY (1988) Origin and evolution of the flora of Tibet. In: *Flora of Xizangica*, Vol. 5 (ed. Wu ZY), pp. 874–902. Science Press, Beijing. (in Chinese) [吴征镒 (1988) 西藏植物区系的起源及演化. 见: 西藏植物志, 第5卷 (吴征镒编), 874–902页. 科学出版社, 北京.]
- Wu ZY (1991) The areal-types of Chinese genera of seed plants. *Acta Botanica Yunnanica* (Suppl. IV), 1–139. (in Chinese with English abstract) [吴征镒 (1991) 中国种子植物属的分布区类型. 云南植物研究 (增刊IV), 1–139.]
- Wu ZY, Wang HS (1983) *Physical Geography of China: Phytogeography* (I). Science Press, Beijing. (in Chinese) [吴征镒, 王荷生 (1983) 中国自然地理: 植物地理(上册). 科学出版社, 北京.]
- Yuan Q, Yang QE (2006) Polyploidy in *Aconitum* subgenus *Lycotium* (Ranunculaceae). *Botanical Journal of the Linnean Society*, 150, 343–353.
- Zhou J, Pu FD, Peng HJ, Pan YZ, Gong X (2008) Karyological studies of ten *Ligusticum* species (Apiaceae) from the Hengduan Mountains region of China. *Caryologia*, 61, 333–341.

(责任编辑: 葛学军 责任编辑: 闫文杰)

附录 Supplementary Material

附录1 青藏高原与横断山被子植物染色体数据集

Appendix 1 Chromosome dataset of angiosperms from the Qinghai-Tibet Plateau and Hengduan Mountains

<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2016281-1.pdf>

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

附录1 青藏高原与横断山被子植物染色体数据集
Appendix 1 Chromosome dataset of angiosperms from the Qinghai-Tibet Plateau and Hengduan Mountains

Comments: n = gametic or haploid chromosome number; 2n = somatic chromosome number; x = chromosome base number; W(woody)=木本植物; PH (perennial herb) =多年生草本; AH (annual herb)=一年生草本; C (Cosmopolitan)=世界分布; P (Pantropic)=泛热带分布; TA (Tropical Asia)=热带亚洲分布; OWT (Old World Tropics)=旧世界热带分布; TA & TA (Tropical Asia & Trop. Australasia)=热带亚洲至热带大洋洲分布; TA to TA (Trop. Asia to Trop. Africa)=热带亚洲至热带非洲分布; TA (Trop. Asia)=热带亚洲; NT (North Temperate)=北温带分布; EA & NAD (E. Asia & N. Amer. disjuncted)=东亚和北美洲间断分布; OWT (Old World Temperate)=旧世界温带分布; TA (Temp. Asia)=温带亚洲分布; M、WA to CA (Mediterranea, W. Asia to C. Asia)=地中海区、西亚至中亚分布; CA (C. Asia)=中亚分布; EA (E. Asia)=东亚分布; EC (Endemic to China)=中国特有分布.

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
菝葜科 Smilacaceae	肖菝葜属 <i>Heterosmilax</i>	<i>H. yunnanensis</i> Gagnep.	四川峨眉山 Emei Mt., Sichuan		32	16	2x	1,700	W	TA	傅承新等, 1995a, b
菝葜科 Smilacaceae	菝葜属 <i>Smilax</i>	<i>S. chapaensis</i> Gagnep.	四川峨眉山 Emei Mt., Sichuan		32	16	2x		W	P	傅承新等, 1992
菝葜科 Smilacaceae	菝葜属 <i>Smilax</i>	<i>S. chapaensis</i> Gagnep.	四川峨眉山 Emei Mt., Sichuan		32	16	2x		W	P	傅承新等, 1993
菝葜科 Smilacaceae	菝葜属 <i>Smilax</i>	<i>S. menispermoidea</i> A. DC.	四川峨眉山 Emei Mt., Sichuan		32	16	2x		W	P	傅承新等, 1995a, b
菝葜科 Smilacaceae	菝葜属 <i>Smilax</i>	<i>S. tsinchengshanensis</i> Wang	四川峨眉山 Emei Mt., Sichuan		32	16	2x	1,500	W	P	傅承新等, 1993
百合科 Liliaceae	竹根七属 <i>Disporopsis</i>	<i>D. aspersa</i> (Hua) Engl.	四川峨眉山 Emei Mt., Sichuan		40	20	2x		PH	TA	顾志建等, 1990
百合科 Liliaceae	竹根七属 <i>Disporopsis</i>	<i>D. fusco-picta</i> Hance	云南腾冲 Tengchong, Yunnan		40	20	2x		PH	TA	顾志建等, 1990

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
百合科 Liliaceae	重楼属 <i>Paris</i>	<i>P. axialis</i> H. Li	四川雅安 Ya'an, Sichuan		12	6	2x	1,350	PH	OWT	岳海霞, 2011
百合科 Liliaceae	重楼属 <i>Paris</i>	<i>P. bashanensis</i> F. T. Wang & T. Tang	云南大理 Dali, Yunnan		10	5	2x		PH	OWT	顾志建和纳海燕, 1986
百合科 Liliaceae	重楼属 <i>Paris</i>	<i>P. cronquistii</i> (Takhtajan) H. Li	四川乐山 Leshan, Sichuan		10	5	2x	1,750	PH	OWT	岳海霞, 2011
百合科 Liliaceae	重楼属 <i>Paris</i>	<i>P. dulongensis</i> H. Li & S. Kurita	云南贡山 Gongshan, Yunnan		72	18	4x	1,300	PH	NT	顾志建等, 1992
百合科 Liliaceae	重楼属 <i>Paris</i>	<i>P. fargesii</i> Franch.	四川峨眉山 Emei Mt., Sichuan	5		5	2x		PH	OWT	汤彦承等, 1984
百合科 Liliaceae	重楼属 <i>Paris</i>	<i>P. forrestii</i> (Takht.) H. Li	云南大理 Dali, Yunnan		10	5	2x		PH	OWT	顾志建和纳海燕, 1986
百合科 Liliaceae	重楼属 <i>Paris</i>	<i>P. forrestii</i> (Takht.) H. Li	云南贡山 Gongshan, Yunnan		10	5	2x	1,320	PH	OWT	顾志建等, 1992
百合科 Liliaceae	重楼属 <i>Paris</i>	<i>P. luquanensis</i> H. Li	四川凉山 Liangshan, Sichuan		10	5	2x	2,250	PH	OWT	岳海霞, 2011
百合科 Liliaceae	重楼属 <i>Paris</i>	<i>P. mairei</i> H. Lév.	云南大理 Dali, Yunnan		10	5	2x		PH	OWT	顾志建和纳海燕, 1986
百合科 Liliaceae	重楼属 <i>Paris</i>	<i>P. mairei</i> H. Léveillé	云南贡山 Gongshan, Yunnan		10	5	2x	2,350	PH	OWT	顾志建等, 1992
百合科 Liliaceae	重楼属 <i>Paris</i>	<i>P. mairei</i> H. Léveillé	四川绵阳 Mianyang, Sichuan		10	5	2x	1,900	PH	OWT	岳海霞, 2011
百合科 Liliaceae	重楼属 <i>Paris</i>	<i>P. marmorata</i> Stearn	云南大理 Dali, Yunnan		10	5	2x		PH	OWT	顾志建和纳海燕, 1986
百合科 Liliaceae	重楼属 <i>Paris</i>	<i>P. marmorata</i> Stearn	四川雅安 Ya'an, Sichuan		10	5	2x	1,650	PH	OWT	岳海霞, 2011
百合科 Liliaceae	重楼属 <i>Paris</i>	<i>P. polyphylla</i> Sm.	四川峨眉山 Emei Mt., Sichuan		20	5	4x		PH	OWT	Wang & Xu, 1989
百合科 Liliaceae	重楼属 <i>Paris</i>	<i>P. polyphylla</i> Sm.	四川汶川 Wenchuan, Sichuan		10	5	2x		PH	OWT	Hong & Zhu, 1987
百合科 Liliaceae	重楼属 <i>Paris</i>	<i>P. Polyphylla</i> var. <i>alba</i>	四川雅安 Ya'an, Sichuan		10	5	2x	1,900	PH	OWT	岳海霞, 2011
百合科 Liliaceae	重楼属 <i>Paris</i>	<i>P. polyphylla</i> var. <i>chinensis</i> (Franch.) H. Hara	四川洪雅 Hongya, Sichuan		10	5	2x	1,650	PH	OWT	岳海霞, 2011
百合科 Liliaceae	重楼属 <i>Paris</i>	<i>P. polyphylla</i> var. <i>polyphylla</i>	四川都江堰 Dujiangyan, Sichuan		12	6	2x	1,350	PH	OWT	岳海霞, 2011

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
百合科 Liliaceae	重楼属 <i>Paris</i>	<i>P. polyphylla</i> var. <i>yunnanensis</i>	四川攀枝花 Panzhihua, Sichuan		10	5	2x	1,350	PH	OWT	岳海霞, 2011
百合科 Liliaceae	重楼属 <i>Paris</i>	<i>P. rugosa</i> H. Li & S. Kurita	云南贡山 Gongshan, Yunnan		10	5	2x	1,700	PH	OWT	顾志建等, 1992
百合科 Liliaceae	重楼属 <i>Paris</i>	<i>P. thibetica</i> Franch.	云南大理 Dali, Yunnan		10	5	2x		PH	OWT	顾志建和纳海燕, 1986
百合科 Liliaceae	重楼属 <i>Paris</i>	<i>P. thibetica</i> Franchet	四川雅安 Ya'an, Sichuan		10	5	2x	1,900	PH	OWT	岳海霞, 2011
百合科 Liliaceae	重楼属 <i>Paris</i>	<i>P. thibetica</i> var. <i>apetala</i> Hand. -Mazz.	云南贡山 Gongshan, Yunnan		10	5	2x	1,500	PH	OWT	顾志建等, 1992
百合科 Liliaceae	重楼属 <i>Paris</i>	<i>P. undulatis</i> H. Li & V. G. Soukup	四川峨眉山 Emei Mt., Sichuan		10	5	2x	2,100	PH	OWT	岳海霞, 2011
百合科 Liliaceae	沿阶草属 <i>Ophiopogon</i>	<i>O. angustifolius</i> (Wang & Tang) S. C. Chen	云南维西 Weixi, Yunnan		72	18	4x	3,100	PH	EA	张芝玉, 1998
百合科 Liliaceae	延龄草属 <i>Trillium</i>	<i>T. tschonoskii</i> Maxim.	四川峨眉山 Emei Mt., Sichuan		20	10	4x		PH	EA & NAD	Wang & Xu, 1989
百合科 Liliaceae	延龄草属 <i>Trillium</i>	<i>T. tschonoskii</i> Maxim.	四川峨眉山 Emei Mt., Sichuan		10	5	2x		PH	EA & NAD	王淑芬, 1989
百合科 Liliaceae	萱草属 <i>Hemerocallis</i>	<i>H. forrestii</i> Diels	云南丽江 Lijiang, Yunnan		22	12	2x	3,200	PH	OWT	熊治廷和陈心启, 1998
百合科 Liliaceae	萱草属 <i>Hemerocallis</i>	<i>H. multiflora</i> Stout	云南大理 Dali, Yunnan		33	11	3x	2,500	PH	OWT	熊治廷和陈心启, 1998
百合科 Liliaceae	萱草属 <i>Hemerocallis</i>	<i>H. plicata</i> Stapf	云南大理 Dali, Yunnan		22	11	2x	2,300	PH	OWT	熊治廷和陈心启, 1998
百合科 Liliaceae	洼瓣花属 <i>Lloydia</i>	<i>L. serotina</i> (L.) Reich	青海乐都 Ledu, Qinghai		48	8	6x	4,600	PH	NT	顾志建等, 1993
百合科 Liliaceae	洼瓣花属 <i>Lloydia</i>	<i>L. tibetica</i> Baker ex Oliv.	四川卧龙 Wolong, Sichuan		23	12	2x	3,550	PH	NT	高云东等, 2009
百合科 Liliaceae	铁线莲属 <i>Clematis</i>	<i>C. udensis</i> Trautv. & Mey.	四川峨眉山 Emei Mt., Sichuan		14	7	2x	2,750	PH	EA & NAD	李思锋和常朝阳, 1996

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
百合科 Liliaceae	铁线莲属 <i>Clematis</i>	<i>C. udensis</i> Trautv. & Mey.	云南丽江 Lijiang, Yunnan		28	7	4x	3,700	PH	EA & NAD	李思锋和常朝阳, 1996
百合科 Liliaceae	铁线莲属 <i>Clematis</i>	<i>C. udensis</i> Trautv. & Mey.	云南云龙 Yunlong, Yunnan		36	18	2x	2,800	PH	NT	王丽等, 1993
百合科 Liliaceae	扭柄花属 <i>Streptopus</i>	<i>S. simplex</i> D. Don	云南贡山 Gongshan, Yunnan		14	7	2x	3,440	PH	TA to TA	张挺和顾志建, 2005
百合科 Liliaceae	扭柄花属 <i>Streptopus</i>	<i>S. simplex</i> D. Don	云南片马、福贡 Pianma, Fugong, Yunnan		14	7	2x	3,100	PH	TA to TA	张挺和顾志建, 2005
百合科 Liliaceae	扭柄花属 <i>Streptopus</i>	<i>S. simplex</i> D. Don	云南香格里拉 Shangri-La, Yunnan		16	8	2x	3,600	PH	TA to TA	张挺和顾志建, 2005
百合科 Liliaceae	扭柄花属 <i>Streptopus</i>	<i>S. simplex</i> D. Don	云南小中甸 Xiaozhongdian, Yunnan		16	8	2x	3,500	PH	TA to TA	张挺和顾志建, 2005
百合科 Liliaceae	扭柄花属 <i>Streptopus</i>	<i>S. simplex</i> D. Don	西藏墨脱 Motuo, Tibet		48	12	4x	900	W	C	顾志建和孙先凤, 1998
百合科 Liliaceae	绵枣儿属 <i>Scilla</i>	<i>S. sinensis</i> (Lour.) Merr.	云南洱源 Eyuan, Yunnan		16	8	2x		PH	OWT	Ding et al, 1998
百合科 Liliaceae	假百合属 <i>Notholirion</i>	<i>N. bulbiferum</i> (Lingelsh.) Stearn	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		24	12	2x	3,400	PH	CA	Yu et al, 1996c
百合科 Liliaceae	假百合属 <i>Notholirion</i>	<i>N. bulbiferum</i> (Lingelsh.) Stearn	四川马尔康 Maerkang, Sichuan		24	12	2x	3,700	PH	CA	高云东等, 2009
百合科 Liliaceae	假百合属 <i>Notholirion</i>	<i>N. bulbiferum</i> (Lingelsh.) Stearn	四川马尔康 Maerkang, Sichuan		36	12	3x	4,048	PH	CA	高云东等, 2009
百合科 Liliaceae	假百合属 <i>Notholirion</i>	<i>N. bulbiferum</i> (Lingelsh.) Stearn	四川平武 Pingwu, Sichuan		24	12	2x	3,600	PH	CA	高云东等, 2009
百合科 Liliaceae	假百合属	<i>N. campanulatum</i> Cotton & Stearn	云南丽江 Lijiang, Yunnan		24	12	2x	3,000	PH	EA	王丽等, 1993

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
	<i>Notholirion</i>										
百合科 Liliaceae	假百合属	<i>N. campanulatum</i> Cotton & Stearn	云南宁蒗 Ninglang, Yunnan		24	12	2x	3,500	PH	CA	Yu et al, 1996c
	<i>Notholirion</i>										
百合科 Liliaceae	吉祥草属 <i>Reineckea</i>	<i>R. carnea</i> (Andr.) Kunth	四川峨眉山 Emei Mt., Sichuan		38	19	2x		PH	EA	汤彦承等, 1984
百合科 Liliaceae	大百合属	<i>C. giganteum</i> Makino	四川峨眉山 Emei Mt., Sichuan	8		8	2x		PH	EA & NAD	汤彦承等, 1984
	<i>Cardiocrinum</i>										
百合科 Liliaceae	大百合属	<i>C. giganteum</i> Makino	云南贡山 Gongshan, Yunnan		24	12	2x	2,700	PH	EA	谢晓阳等, 1992
	<i>Cardiocrinum</i>										
百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>	<i>A. anisopodium</i> Ledeb.	甘肃黄土高原子午岭林区 Ziwu Mt., Gansu		22	11	2x	1,400	PH	NT	范小峰等, 2000
百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>	<i>A. beesianum</i> W. W. Sm.	四川雅江 Yajiang, Sichuan		16	8	2x	4,401	PH	NT	周春景等, 2012
百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>	<i>A. carolinianum</i> DC.	青海可可西里, 金乌兰湖 Jinwulan Lake, Kekexili, Qinghai		16	8	2x	4,810	PH	NT	杨永平和武素功, 1993
百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>	<i>A. carolinianum</i> Delar.	青海玛多 Maduo, Qinghai		58	29	2x	4,800	PH	EA	Huang et al, 1996a
百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>	<i>A. cepa</i> var. <i>proliferum</i> Regel	四川汶川 Wenchuan, Sichuan		17	8–9	2x	1,655	PH	NT	魏先芹等, 2011
百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>	<i>A. changduense</i> J. M. Xu	西藏类乌齐 Leiwuqi, Xizang		16	8	2x	4,000	PH	NT	张宇澄等, 2008
百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>	<i>A. chienchuanense</i> J. M. Xu	云南剑川 Jianchuan, Yunnan		22	11	2x	2,800	PH	NT	Huang et al, 1995
百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>	<i>A. chrysanthum</i> Regel	四川雀儿山 Que'er Mt., Sichuan		16	8	2x	4,400	PH	NT	张宇澄等, 2008
百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>	<i>A. cyaneum</i> Regel	四川雀儿山 Que'er Mt., Sichuan		48	8	6x	4,400	PH	NT	张宇澄等, 2008
百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>	<i>A. cyaneum</i> Regel	西藏昌都 Changdu, Tibet		40	8	5x	3,150	PH	NT	张宇澄等, 2009
百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>	<i>A. cyaneum</i> Regel	四川理塘 Litang, Sichuan		16	8	2x	3,892	PH	NT	周春景等, 2012
百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>	<i>A. cyathophorum</i> E. Bureau & A. Franchet	西藏察雅 Chaya, Tibet		16	8	2x	3,780	PH	NT	杨蕾等, 1998

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>	<i>A. cyathophorum</i> E. Bureau & A. Franchet	西藏左贡 Zuogong, Tibet		16	8	2x	3,700	PH	NT	张宇澄等, 2008
百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>	<i>A. cyathophorum</i> E. Bureau & A. Franchet	Zhayab, Tibet		16	8	2x	3,780	PH	NT	杨蕾等, 1998
百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>	<i>A. cyathophorum</i> E. Bureau & A. Franchet	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		16	8	2x	3,250	PH	NT	杨蕾等, 1998
百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>	<i>A. delicatulum</i> Siev. ex Schult. F.	新疆托里 Tuoli, Xinjiang		16	8	2x	1,050	PH	NT	何兴金和许介眉, 2001
百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>	<i>A. eusperma</i> Airy-Shaw	四川巴塘 Batang, Sichuan		16	8	2x	3,950	PH	NT	张宇澄等, 2008
百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>	<i>A. eusperma</i> J. M. Xu	西藏昌都 Changdu, Tibet		16	8	2x	3,150	PH	NT	张宇澄等, 2009
百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>	<i>A. fasciculatum</i> Rendle	西藏达孜 Dazi, Tibet		20	10	2x	3,700	PH	NT	许介眉等, 1998
百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>	<i>A. fasciculatum</i> Rendle	四川理县 Lixian County, Sichuan		20	10	2x	2,300	PH	NT	许介眉等, 1998
百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>	<i>A. fasciculatum</i> Rendle	四川乡城 Xiangcheng, Sichuan		20	10	2x	2,950	PH	NT	Huang et al, 1995
百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>	<i>A. fasciculatum</i> Rendle	四川乡城 Xiangcheng, Sichuan		20	10	2x	2,800	PH	NT	许介眉等, 1998
百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>	<i>A. forrestii</i> Diels	四川雀儿山 Que'er Mt., Sichuan		16	8	2x	4,400	PH	NT	张宇澄等, 2008
百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>	<i>A. glomeratum</i> Prokh.	新疆天山 Tianshan Mt., Xinjiang		16	8	2x	2,600	PH	NT	何兴金和许介眉, 2001
百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>	<i>A. hookeri</i> Thwaites	云南大理 Dali, Yunnan		33	11	3x	2,050	PH	NT	Huang et al, 1995
百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>	<i>A. hookeri</i> Thwaites	云南大理 Dali, Yunnan		44	11	4x	2,050	PH	NT	Huang et al, 1995
百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>	<i>A. hookeri</i> Thwaites	四川宝兴 Baoxing, Sichuan		22	11	2x	1,100	PH	NT	张绍斌和许介眉, 2002
百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>	<i>A. hookeri</i> Thwaites	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		22	11	2x	3,200	PH	NT	Huang et al, 1995
百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>	<i>A. hookeri</i> var. <i>muliense</i> Airy-Shaw	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		22	11	2x	3,200	PH	NT	黄瑞复等, 1996b

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>	<i>A. liumhookeri</i> Thwaites	四川汉源 Hanyuan, Sichuan		22	11	2x	1,150	PH	NT	魏先芹等, 2011
百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>	<i>A. liumhookeri</i> Thwaites	云南丽江 Lijiang, Yunnan		33	11	3x	2,242	PH	NT	魏先芹等, 2011
百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>	<i>A. macranthum</i> Baker	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		14	7	2x	3,250	PH	NT	Huang et al, 1995
百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>	<i>A. macranthum</i> Baker	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		28	7	4x	3,250	PH	NT	Huang et al, 1995
百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>	<i>A. macranthum</i> Baker	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		28	7	4x	3,250	PH	NT	黄瑞复等, 1996b
百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>	<i>A. macranthum</i> Baker	西藏芒康 Mangkang, Tibet		28	7	4x	3,800	PH	NT	张宇澄等, 2009
百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>	<i>A. macrostemon</i> Bunge	四川宝兴邓池沟 Dengchigou, Baoxing, Sichuan		32	8	4x	1,000	PH	NT	朱世梅和许介眉, 1999
百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>	<i>A. macrostemon</i> Bunge	四川都江堰新棺山 Xinguan Mt., Dujiangyan, Sichuan		32	8	4x	700	PH	NT	朱世梅和许介眉, 1999
百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>	<i>A. macrostemon</i> Bunge	四川汶川玉龙 Yulong, Wenchuan, Sichuan		32	8	4x	1,200	PH	NT	朱世梅和许介眉, 1999
百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>	<i>A. macrostemon</i> Bunge	四川汶川 Wenchuan, Sichuan		32	8	4x	2,123	PH	NT	魏先芹等, 2011
百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>	<i>A. maowenense</i> J. M. Xu	四川汶川 Wenchuan, Sichuan		16	8	2x	1,425	PH	NT	魏先芹等, 2011
百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>	<i>A. nanodes</i> Airy Shaw	四川稻城 Daocheng, Sichuan		16	8	2x	4,500	PH	NT	景望春等, 1999
百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>	<i>A. omeiense</i> Z. Y. Zhu	四川峨眉山 Emei Mt., Sichuan		22	11	2x	1,400	PH	NT	Huang et al, 1995
百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>	<i>A. omeiense</i> Z. Y. Zhu	四川峨眉山 Emei Mt., Sichuan		22	11	2x	2,300	PH	NT	张宇澄等, 2008
百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>	<i>A. ovalifolium</i> Hand. -Mazz.	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		16	8	2x	3,600	PH	NT	景望春等, 1999
百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>	<i>A. ovalifolium</i> Hand. -Mazz.	四川汶川 Wenchuan, Sichuan		24	8	3x	2,200	PH	NT	景望春等, 1999
百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>	<i>A. prattii</i> C. H. Wright	四川理塘 Litang, Sichuan		16	8	2x	4,100	PH	NT	景望春等, 1999
百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>	<i>A. prattii</i> C. H. Wright	四川理县 Lixian County, Sichuan		32	8	4x	3,600	PH	NT	景望春等, 1999
百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>	<i>A. prattii</i> C. H. Wright apud Forb. et Hemsl.	青海玉树 Yushu, Qinghai		16	8	2x	3,700	PH	NT	薛春迎等, 2000

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>	<i>A. prattii</i> C. H. Wright apud Forb. et Hemsl.	青海玉树 Yushu, Qinghai		16	8	2x	3,800	PH	NT	薛春迎等, 2000
百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>	<i>A. przewalskianum</i> Regel	西藏察雅 Chaya, Tibet		32	8	4x	3,780	PH	NT	杨蕾等, 1998
百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>	<i>A. przewalskianum</i> Regel	四川理县 Lixian County, Sichuan		32	8	4x	2,300	PH	NT	杨蕾等, 1998
百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>	<i>A. przewalskianum</i> Regel	Zhayab, Tibet		32	8	4x	3,780	PH	NT	杨蕾等, 1998
百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>	<i>A. przewalskianum</i> Regel.	青海玛沁 Maqin, Qinghai		32	8	4x	3,400	PH	NT	薛春迎等, 2000
百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>	<i>A. przewalskianum</i> Regel.	青海囊谦 Nangqian, Qinghai		32	8	4x	3,550	PH	NT	薛春迎等, 2000
百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>	<i>A. przewalskianum</i> Regel.	青海囊谦 Nangqian, Qinghai		64	8	8x	3,600	PH	NT	薛春迎等, 2000
百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>	<i>A. przewalskianum</i> Regel.	青海玉树 Yushu, Qinghai		32	8	4x	3,700	PH	NT	薛春迎等, 2000
百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>	<i>A. przewalskianum</i> Regel.	青海玉树 Yushu, Qinghai		32	8	4x	3,600	PH	NT	薛春迎等, 2000
百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>	<i>A. przewalskianum</i> Regel.	青海玉树 Yushu, Qinghai		32	8	4x	3,750	PH	NT	薛春迎等, 2000
百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>	<i>A. przewalskianum</i> Regel.	西藏左贡 Zuogong, Tibet		32	8	4x	3,600	PH	NT	张宇澄等, 2008
百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>	<i>A. przewalskianum</i> Regel.	西藏八宿 Basu, Tibet		32	8	4x	3,750	PH	NT	周春景等, 2012
百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>	<i>A. przewalskianum</i> Regel.	四川壤塘 Rangtang, Sichuan		16	8	2x	3,800	PH	NT	周春景等, 2012
百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>	<i>A. ramosum</i> L	四川汶川 Wenchuan, Sichuan		28	7	4x	2,123	PH	NT	魏先芹等, 2011
百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>	<i>A. ramosum</i> L	四川小金 Xiaojin, Sichuan		32	8	4x	2,382	PH	NT	魏先芹等, 2011
百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>	<i>A. rude</i> J. M. Xu	四川理县 Lixian County, Sichuan		32	8	4x	2,700	PH	NT	魏先芹等, 2011
百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>	<i>A. rude</i> J. M. Xu	四川炉霍 Luhuo, Sichuan		16	8	2x	3,950	PH	NT	张宇澄等, 2008
百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>	<i>A. rude</i> J. M. Xu	四川理塘 Litang, Sichuan		16	8	2x	3,892	PH	NT	周春景等, 2012
百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>	<i>A. rude</i> J. M. Xu	四川雅江 Yajiang, Sichuan		16	8	2x	4,401	PH	NT	周春景等, 2012
百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>	<i>A. sativum</i> L.	四川汶川 Wenchuan, Sichuan		16	8	2x	1,655	PH	NT	魏先芹等, 2011
百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>	<i>A. sikkimense</i> Baker	四川炉霍 Luhuo, Sichuan		32	8	4x	3,950	PH	NT	张宇澄等, 2009
百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>	<i>A. sikkimense</i> Baker	西藏类乌齐 Leiwuqi, Tibet		32	8	4x	3,850	PH	NT	张宇澄等, 2009

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>	<i>A. sikkimense</i> Baker	西藏左贡 Zuogong, Tibet		32	8	4x	3,700	PH	NT	张宇澄等, 2009
百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>	<i>A. sikkimense</i> Baker	四川木里 Muli, Sichuan		32	8	4x	4,100	PH	NT	周春景等, 2012
百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>	<i>A. sikkimense</i> Baker	四川壤塘 Rangtang, Sichuan		32	8	4x	3,800	PH	NT	周春景等, 2012
百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>	<i>A. sikkimense</i> Baker	西藏达日 Dari, Tibet		52	13	4x	3,000	PH	NT	顾志建等, 1993
百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>	<i>A. subtilissimum</i> Ledeb.	四川壤塘 Rangtang, Sichuan		16	8	2x	3,800	PH	NT	周春景等, 2012
百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>	<i>A. trifurcatum</i> (Wang & Tang) J. M. Xu	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		16	8	2x	3,300	PH	NT	Huang et al, 1995
百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>	<i>A. tuberosum</i> Rottl. ex Spreng.	四川汶川玉龙 Yulong, Wenchuan, Sichuan		32	8	4x	1,100	PH	NT	杨蕾等, 1998
百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>	<i>A. tuberosum</i> Rottl. ex Spreng.	四川理县 Lixian County, Sichuan		32	8	4x	1,100	PH	NT	杨蕾等, 1998
百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>	<i>A. tuberosum</i> Rottl. ex Spreng.	四川乡城 Xiangcheng, Sichuan		32	8	4x	2,800	PH	NT	张宇澄等, 2009
百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>	<i>A. tuberosum</i> Rottl. ex Spreng.	云南保山 Baoshan, Yunnan		24	8	3x	1,500	PH	NT	黄瑞复等, 1985
百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>	<i>A. tuberosum</i> Rottl. ex Spreng.	四川理县 Lixian County, Sichuan		32	8	4x	1,100	PH	NT	杨蕾等, 1998
百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>	<i>A. tuberosum</i> Rottl. ex Spreng.	四川雅安 Ya'an, Sichuan		32	16	2x	400	PH	NT	周颂东等, 2007
百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>	<i>A. wallichii</i> Kunth	云南丽江 Lijiang, Yunnan		14	7	2x	3,248	PH	NT	魏先芹等, 2011
百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>	<i>A. wallichii</i> Kunth	云南香格里拉 Shangri-la, Yunnan		14	7	2x	3,275	PH	NT	魏先芹等, 2011
百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>	<i>A. wallichii</i> Kunth	云南宾川 Binchuan, Yunnan		14	7	2x	2,900	PH	NT	Huang et al, 1995
百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>	<i>A. wallichii</i> Kunth	云南保山 Baoshan, Yunnan		14	7	2x	3,000	PH	NT	杨世雄等, 2003
百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>	<i>A. wallichii</i> Kunth	云南香格里拉 Shangri-La, Yunnan		14	7	2x	3,380	PH	NT	杨世雄等, 2003
百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>	<i>A. wallichii</i> Kunth	四川巴塘 Batang, Sichuan		21	7	3x	3,900	PH	NT	张宇澄等, 2008
百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>	<i>A. wallichii</i> var. <i>platyphyllum</i> (Diels) J. M. Xu	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		14	7	2x	3,300	PH	NT	Huang et al, 1995
百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>	<i>A. xichuanense</i> J. M. Xu	四川康定 Kangding, Sichuan		32	8	4x	1,468	PH	NT	魏先芹等, 2011

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>	<i>A. xichuanense</i> J. M. Xu	四川雅江 Yajiang, Sichuan		17	8–9	2x	3,943	PH	NT	魏先芹等, 2011
百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>	<i>A. xichuanense</i> J. M. Xu	四川松潘 Songpan, Sichuan		16	8	2x	4,500	PH	NT	张宇澄等, 2008
百合科 Liliaceae	贝母属 <i>Fritillaria</i>	<i>F. cirrhosa</i> D. Don	四川德格 Dege, Sichuan		24	12	2x	4,230	PH	NT	高云东等, 2009
百合科 Liliaceae	贝母属 <i>Fritillaria</i>	<i>F. cirrhosa</i> D. Don	四川卧龙 Wolong, Sichuan		24	12	2x	3,560	PH	NT	高云东等, 2009
百合科 Liliaceae	贝母属 <i>Fritillaria</i>	<i>F. cirrhosa</i> D. Don	云南贡山 Gongshan, Yunnan		24	12	2x	4,100	PH	NT	谢晓阳等, 1992
百合科 Liliaceae	贝母属 <i>Fritillaria</i>	<i>F. mellea</i> S.Y. Tang & S.C. Yueh	四川茂县 Maoxian, Sichuan		24	12	2x	2,500	PH	NT	王淑芬和宋天瑛, 1994
百合科 Liliaceae	贝母属 <i>Fritillaria</i>	<i>F. unibracteata</i> P.G. Xiao & K.C. Hsia	四川马尔康 Maerkang, Sichuan		24	12	2x	3,700	PH	NT	高云东等, 2009
百合科 Liliaceae	贝母属 <i>Fritillaria</i>	<i>F. unibracteata</i> P.G. Xiao & K.C. Hsia	四川马尔康 Maerkang, Sichuan		24	12	2x	4,120	PH	NT	高云东等, 2009
百合科 Liliaceae	贝母属 <i>Fritillaria</i>	<i>F. unibracteata</i> var. <i>sulcisquamosa</i>	四川茂县 Maoxian, Sichuan		24	12	2x	2,500	PH	NT	王淑芬和宋天瑛, 1994
百合科 Liliaceae	贝母属 <i>Fritillaria</i>	<i>F. wabuensis</i> S.Y. Tang & S.C. Yueh	四川茂县 Maoxian, Sichuan		24	12	2x	2,500	PH	NT	王淑芬和宋天瑛, 1994
百合科 Liliaceae	豹子花属 <i>Nomocharis</i>	<i>N. aperta</i> (Franchet) E. H. Wilson	云南大理中和寺 Zhonghesi, Dali, Yunnan		24	12	2x	3,000	AH	EA	万娟等, 2011
百合科 Liliaceae	豹子花属 <i>Nomocharis</i>	<i>N. aperta</i> (Franchet) E. H. Wilson	云南香格里拉碧塔海 Bitahai, Shangri-la, Yunnan		24	12	2x	2,700	AH	EA	万娟等, 2011
百合科 Liliaceae	豹子花属 <i>Nomocharis</i>	<i>N. aperta</i> (Franchet) E. H. Wilson	云南香格里拉吉沙 Jisha, Shangri-la, Yunnan		24	12	2x	3,020	AH	EA	万娟等, 2011
百合科 Liliaceae	豹子花属 <i>Nomocharis</i>	<i>N. aperta</i> (Franchet) E. H. Wilson	云南香格里拉天生桥 Tianshengqiao, Shangri-la, Yunnan		24	12	2x	3,460	AH	EA	万娟等, 2011

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
百合科 Liliaceae	豹子花属 <i>Nomocharis</i>	<i>N. aperta</i> W. W. Sm. & W. E. Evans	云南贡山 Gongshan, Yunnan		24	12	2x	3,300	PH	EA	谢晓阳等, 1992
百合科 Liliaceae	豹子花属 <i>Nomocharis</i>	<i>N. basilissa</i> Farrer ex W. E. Evans	云南贡山 Gongshan, Yunnan		24	12	2x	3,400	PH	EA	谢晓阳等, 1992
百合科 Liliaceae	豹子花属 <i>Nomocharis</i>	<i>N. basilissa</i> Farrer ex W. E. Evans	云南福贡亚坪垭口 Fugong, Yunnan		36	12	3x	3,450	AH	EA	万娟等, 2011
百合科 Liliaceae	豹子花属 <i>Nomocharis</i>	<i>N. biluoensis</i> S. Y. Liang	云南云龙 Yunlong, Yunnan		14	7	2x	3,300	PH	EA & NAD	王丽等, 1993
百合科 Liliaceae	豹子花属 <i>Nomocharis</i>	<i>N. farreri</i> (W. E. Evans) Harrow	云南泸水 Lushui, Yunnan		24	12	2x	3,200	AH	EA	万娟等, 2011
百合科 Liliaceae	豹子花属 <i>Nomocharis</i>	<i>N. farreri</i> Cox	云南泸水 Lushui, Yunnan		24	12	2x	3,100	PH	EA	谢晓阳等, 1992
百合科 Liliaceae	豹子花属 <i>Nomocharis</i>	<i>N. forrestii</i> L. B. Balf	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		24	12	2x	3,800	PH	EA	Yu et al, 1996d
百合科 Liliaceae	豹子花属 <i>Nomocharis</i>	<i>N. mairei</i> H. Lév.	云南大理 Dali, Yunnan		24	12	2x	3,500	PH	EA	虞泓等, 1996b
百合科 Liliaceae	豹子花属 <i>Nomocharis</i>	<i>N. meleagrina</i> Franch.	云南贡山 Gongshan, Yunnan		24	12	2x	3,300	PH	EA	谢晓阳等, 1992
百合科 Liliaceae	豹子花属 <i>Nomocharis</i>	<i>N. meleagrina</i> Franchet	云南大理中和寺 Zhonghesi, Dali, Yunnan		24	12	2x	3,230	AH	EA	万娟等, 2011
百合科 Liliaceae	豹子花属 <i>Nomocharis</i>	<i>N. meleagrina</i> Franchet	云南香格里拉小中甸 Xiaozhongdian, Shangri-la, Yunnan		24	12	2x	3,100	AH	EA	万娟等, 2011
百合科 Liliaceae	豹子花属 <i>Nomocharis</i>	<i>N. meleagrina</i> Franchet	云南香格里拉至格咱 20 公里处		24	12	2x	3,100	AH	EA	万娟等, 2011

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
	<i>Nomocharis</i>		Between Geza and Shangri-la, Yunnan								
百合科 Liliaceae	豹子花属 <i>Nomocharis</i>	<i>N. pardanthina</i> Franch.	云南大理 Dali, Yunnan		24	12	2x	3,200	PH	NT	王丽等, 1993
百合科 Liliaceae	豹子花属 <i>Nomocharis</i>	<i>N. pardanthina</i> Franch.	云南贡山 Gongshan, Yunnan		24	12	2x	3,000	PH	EA	谢晓阳等, 1992
百合科 Liliaceae	豹子花属 <i>Nomocharis</i>	<i>N. pardanthina</i> Franch. f. punctulata Sealy	云南贡山 Gongshan, Yunnan		24	12	2x	3,300	PH	EA	谢晓阳等, 1992
百合科 Liliaceae	豹子花属 <i>Nomocharis</i>	<i>N. pardanthina</i> Franchet	云南福贡亚坪垭口 Fugong, Yunnan		23	12	2x	3,550	AH	EA	万娟等, 2011
百合科 Liliaceae	豹子花属 <i>Nomocharis</i>	<i>N. saluenensis</i> Balf. f.	云南丽江 Lijiang, Yunnan		24	12	2x	2,800	PH	NT	王丽等, 1993
百合科 Liliaceae	豹子花属 <i>Nomocharis</i>	<i>N. saluenensis</i> I. B. Balfour	云南贡山黑普山 Gongshan, Yunnan		24	12	2x	3,400	AH	EA	万娟等, 2011
百合科 Liliaceae	豹子花属 <i>Nomocharis</i>	<i>N. saluenensis</i> I. B. Balfour	云南香格里拉县格咱乡红山垭口 Xiangzaxiang, Shangri-la, Yunnan		24	12	2x	3,800	AH	EA	万娟等, 2011
百合科 Liliaceae	百合属 <i>Lilium</i>	<i>L. bakerianum</i> var. <i>rubrum</i> Stearn	云南大理 Dali, Yunnan		36	18	2x	3,200	PH	NT	王丽等, 1993
百合科 Liliaceae	百合属 <i>Lilium</i>	<i>L. bakerianum</i> Coll.	四川甘孜州泸定县 Luding, Ganzi, Sichuan		24	12	2x	1,800	PH	NT	卿秋静, 2011
百合科 Liliaceae	百合属 <i>Lilium</i>	<i>L. bakerianum</i> Coll. et Hemsl.	四川木里 Muli, Sichuan		24	12	2x	3,300	PH	NT	万娟等, 2011
百合科 Liliaceae	百合属 <i>Lilium</i>	<i>L. bakerianum</i> Coll. et Hemsl.	云南香格里拉哈巴雪山 Haba Snow Mt., Shangri-la, Yunnan		24	12	2x	2,800	PH	NT	万娟等, 2011
百合科 Liliaceae	百合属 <i>Lilium</i>	<i>L. bakerianum</i> Collett et Hemsley var.	云南丽江 Lijiang, Yunnan		24	12	2x	3,100	PH	NT	Gao et al, 2011

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
		<i>delavayi</i> (Franchet) E. H. Wilson									
百合科 Liliaceae	百合属 <i>Lilium</i>	<i>L. brownii</i> F. E. Brown ex Mieliez var. <i>viridulum</i> Baker	四川汶川 Wenchuan, Sichuan		24	12	2x	1,000	PH	NT	Gao et al, 2011
百合科 Liliaceae	百合属 <i>Lilium</i>	<i>L. brownii</i> F. E. Brown ex Spae	云南泸水 Lushui, Yunnan		24	12	2x	2,000	PH	NT	谢晓阳等, 1992
百合科 Liliaceae	百合属 <i>Lilium</i>	<i>L. davidii</i> Duch. ex Elwes	四川卧龙 Wolong, Sichuan		24	12	2x	2,560	PH	NT	高云东等, 2009
百合科 Liliaceae	百合属 <i>Lilium</i>	<i>L. davidii</i> Duch. ex Elwes	四川道孚 Daofu, Sichuan		24	12	2x	3,100	PH	NT	高云东等, 2009
百合科 Liliaceae	百合属 <i>Lilium</i>	<i>L. davidii</i> Duch. ex Elwes	云南大理 Dali, Yunnan		24	12	2x	2,400	PH	NT	Yu et al, 1996a
百合科 Liliaceae	百合属 <i>Lilium</i>	<i>L. davidii</i> Duch. ex Elwes	云南贡山 Gongshan, Yunnan		36	12	3x		PH	NT	谢晓阳和武全安, 1993
百合科 Liliaceae	百合属 <i>Lilium</i>	<i>L. davidii</i> Duch. ex Elwes	四川马尔康 Maerkang, Sichuan		24	12	2x	2,758	PH	NT	高云东等, 2009
百合科 Liliaceae	百合属 <i>Lilium</i>	<i>L. duchartrei</i> Franch.	四川卧龙 Wolong, Sichuan		24	12	2x	2,130	PH	NT	高云东等, 2009
百合科 Liliaceae	百合属 <i>Lilium</i>	<i>L. duchartrei</i> Franch.	四川马尔康 Maerkang, Sichuan		24	12	2x	2,800	PH	NT	高云东等, 2009
百合科 Liliaceae	百合属 <i>Lilium</i>	<i>L. duchartrei</i> Franch.	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		24	12	2x	3,200	PH	NT	黄瑞复和李劲峰, 1996
百合科 Liliaceae	百合属 <i>Lilium</i>	<i>L. duchartrei</i> Franch.	四川雅安市宝兴县 Baoxing, Ya'an, Sichuan		24	12	2x	2,400	PH	NT	卿秋静, 2011
百合科 Liliaceae	百合属 <i>Lilium</i>	<i>L. henrici</i> Franch.	云南大理 Dali, Yunnan		36	18	2x	3,200	PH	NT	王丽等, 1993
百合科 Liliaceae	百合属 <i>Lilium</i>	<i>L. henricii</i> Franch.	云南贡山黑普山 Gongshan, Yunnan		24	12	2x	3,200	PH	NT	万娟等, 2011
百合科 Liliaceae	百合属 <i>Lilium</i>	<i>L. lankongense</i> (Bur. et Franch.) Franch.	云南贡山黑娃底 Gongshan, Yunnan		24	12	2x	2,000	PH	NT	万娟等, 2011
百合科 Liliaceae	百合属 <i>Lilium</i>	<i>L. lankongense</i> (Bur. et Franch.) Franch.	四川乡城热打乡 Redaxiang, Xiangcheng, Sichuan		24	12	2x	2,700	PH	NT	万娟等, 2011
百合科 Liliaceae	百合属 <i>Lilium</i>	<i>L. lankongense</i> Franchet	云南丽江 Lijiang, Yunnan		24	12	2x	3,350	PH	NT	Gao et al, 2011

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
百合科 Liliaceae	百合属 <i>Lilium</i>	<i>L. lankongense</i> Franchet	云南香格里拉 Shangri-la, Yunnan		24	12	2x	3,400	PH	NT	Gao et al, 2011
百合科 Liliaceae	百合属 <i>Lilium</i>	<i>L. leucanthum</i> Baker	四川成都市龙泉山 Longquan Mt., Chengdu, Sichuan		24	12	2x	700	PH	NT	卿秋静, 2011
百合科 Liliaceae	百合属 <i>Lilium</i>	<i>L. lijiangsense</i> L. J. Peng	四川会东 Huidong, Sichuan		24	12	2x	2,680	PH	NT	Gao et al, 2011
百合科 Liliaceae	百合属 <i>Lilium</i>	<i>L. lophophorum</i> (Bur. et Franch.) Franch.	四川甘孜州泸定县 Luding, Ganzi, Sichuan		24	12	2x	3,500	PH	NT	卿秋静, 2011
百合科 Liliaceae	百合属 <i>Lilium</i>	<i>L. lophophorum</i> (Bur. et Franch.) Franch.	西藏昌都达马拉山 Damala Mt., Changdu, Tibet		24	12	2x	3,100	PH	NT	万娟等, 2011
百合科 Liliaceae	百合属 <i>Lilium</i>	<i>L. lophophorum</i> (Bur. et Franch.) Franch.	西藏昌都类乌齐县 Leiwuqi, Changdu, Tibet		24	12	2x	3,200	PH	NT	万娟等, 2011
百合科 Liliaceae	百合属 <i>Lilium</i>	<i>L. lophophorum</i> (Bur. et Franch.) Franch.	云南香格里拉大雪山 Snow Mt., Shangri-la, Yunnan		24	12	2x	3,700	PH	NT	万娟等, 2011
百合科 Liliaceae	百合属 <i>Lilium</i>	<i>L. lophophorum</i> (Bureau & Franch.) Franch.	四川稻城 Daocheng, Sichuan		24	12	2x	3,650	PH	NT	高云东等, 2009
百合科 Liliaceae	百合属 <i>Lilium</i>	<i>L. lophophorum</i> (Bureau & Franchet) Franchet var. <i>lophophorum</i>	四川道城 Daocheng, Sichuan		24	12	2x	3,650	PH	NT	Gao et al, 2011
百合科 Liliaceae	百合属 <i>Lilium</i>	<i>L. lophophorum</i> (Bureau & Franchet) Franchet var. <i>lophophorum</i>	四川卧龙 Wolong, Sichuan		24	12	2x	3,540	PH	NT	Gao et al, 2011
百合科 Liliaceae	百合属 <i>Lilium</i>	<i>L. matangense</i> J. M. Xu	四川马尔康 Maerkang, Sichuan		24	12	2x	3,188	PH	NT	高云东等, 2009
百合科 Liliaceae	百合属 <i>Lilium</i>	<i>L. nanum</i> Klotzsch	云南德钦 Deqin, Yunnan		24	12	2x	4,360	PH	NT	Gao et al, 2011
百合科 Liliaceae	百合属 <i>Lilium</i>	<i>L. nepalense</i> D. Don	云南泸水 Lushui, Yunnan		24	12	2x	2,700	PH	NT	谢晓阳等, 1992
百合科 Liliaceae	百合属 <i>Lilium</i>	<i>L. nepalense</i> D. Don	云南大理苍山 Cang Mt., Dali, Yunnan		24	12	2x	2,400	PH	NT	李标等, 2004

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
百合科 Liliaceae	百合属 <i>Lilium</i>	<i>L. primulinum</i> var. <i>burmanicum</i>	云南泸水 Lushui, Yunnan		24	12	2x	2,130	PH	NT	Gao et al, 2011
百合科 Liliaceae	百合属 <i>Lilium</i>	<i>L. regale</i> E. H. Wilson	四川汶川 Wenchuan, Sichuan		24	12	2x	1,250	PH	NT	高云东等, 2009
百合科 Liliaceae	百合属 <i>Lilium</i>	<i>L. regale</i> E. H. Wilson	四川茂县 Maoxian, Sichuan		24	12	2x	1,500	PH	NT	Gao et al, 2011
百合科 Liliaceae	百合属 <i>Lilium</i>	<i>L. regale</i> E. H. Wilson	四川汶川 Wenchuan, Sichuan		24	12	2x	1,250	PH	NT	Gao et al, 2011
百合科 Liliaceae	百合属 <i>Lilium</i>	<i>L. regale</i> E. H. Wilson	四川茂县 Maoxian, Sichuan		24	12	2x	1,648	PH	NT	刘华敏等, 2010
百合科 Liliaceae	百合属 <i>Lilium</i>	<i>L. regale</i> E. H. Wilson	四川茂县 Maoxian, Sichuan		24	12	2x	1,648	PH	NT	刘华敏等, 2010
百合科 Liliaceae	百合属 <i>Lilium</i>	<i>L. regale</i> E. H. Wilson	四川汶川县白云顶山 Baiyunding Mt., Wenchuan, Sichuan		24	12	2x	1,100	PH	NT	卿秋静, 2011
百合科 Liliaceae	百合属 <i>Lilium</i>	<i>L. regale</i> E. H. Wilson	四川茂县 Maoxian, Sichuan		24	12	2x	1,630	PH	NT	王红霞等, 2006
百合科 Liliaceae	百合属 <i>Lilium</i>	<i>L. regale</i> E. H. Wilson	四川汶川县后山 Houshan, Wenchuan, Sichuan		24	12	2x	1,460	PH	NT	王红霞等, 2006
百合科 Liliaceae	百合属 <i>Lilium</i>	<i>L. regale</i> E. H. Wilson	四川汶川县青坡 Qingpo, Wenchuan, Sichuan		24	12	2x	1,450	PH	NT	王红霞等, 2006
百合科 Liliaceae	百合属 <i>Lilium</i>	<i>L. regale</i> E. H. Wilson	四川汶川县燕乡水磨沟 Yanxiangshuimogou, Wenchuan, Sichuan		24	12	2x	1,485	PH	NT	王红霞等, 2006
百合科 Liliaceae	百合属 <i>Lilium</i>	<i>L. sargentiae</i> E. H. Wilson	四川都江堰 Dujiangyan, Sichuan		24	12	2x	980	PH	NT	Gao et al, 2011
百合科 Liliaceae	百合属 <i>Lilium</i>	<i>L. sargentiae</i> E. H. Wilson	四川峨眉市龙池县 Longchi, Emei, Sichuan		24	12	2x	970	PH	NT	卿秋静, 2011
百合科 Liliaceae	百合属 <i>Lilium</i>	<i>L. sargentiae</i> E. H. Wilson	四川峨眉市罗目镇 Luomu, Emei, Sichuan		24	12	2x	550	PH	NT	卿秋静, 2011
百合科 Liliaceae	百合属 <i>Lilium</i>	<i>L. sargentiae</i> E. H. Wilson	四川泸定县磨西镇 Moxi, Luding, Sichuan		24	12	2x	1,000	PH	NT	卿秋静, 2011

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
百合科 Liliaceae	百合属 <i>Lilium</i>	<i>L. sargentiae</i> E. H. Wilson	四川天全喇叭河 Laba River, Tianquan, Sichuan		24	12	2x	1,500	PH	NT	卿秋静, 2011
百合科 Liliaceae	百合属 <i>Lilium</i>	<i>L. sargentiae</i> E. H. Wilson	四川汶川县白云顶山 Baiyunding Mt., Wenchuan, Sichuan		24	12	2x	1,000	PH	NT	卿秋静, 2011
百合科 Liliaceae	百合属 <i>Lilium</i>	<i>L. sargentiae</i> E. H. Wilson	四川雅安市音乐阶梯 Music stairs, Ya'an, Sichuan		24	12	2x	700	PH	NT	卿秋静, 2011
百合科 Liliaceae	百合属 <i>Lilium</i>	<i>L. sargentiae</i> E. H. Wilson	四川宝兴县 Baoxing, Sichuan		24	12	2x	1,680	PH	NT	吴祝华等, 2007
百合科 Liliaceae	百合属 <i>Lilium</i>	<i>L. sempervivoideum</i> H. Léveillé	四川西昌 Xichang, Sichuan		24	12	2x	1,350	PH	NT	Gao et al, 2011
百合科 Liliaceae	百合属 <i>Lilium</i>	<i>L. souliei</i> (Franch.) Sealy	云南贡山 Gongshan, Yunnan		24	12	2x	3,500	PH	NT	谢晓阳等, 1992
百合科 Liliaceae	百合属 <i>Lilium</i>	<i>L. souliei</i> (Franch.) Sealy	云南香格里拉格咱红山 Zahong Mt., Shangri-la, Yunnan		24	12	2x	3,100	PH	NT	万娟等, 2011
百合科 Liliaceae	百合属 <i>Lilium</i>	<i>L. sulphureum</i> Baker apud Hook. f.	云南保山 Baoshan, Yunnan		24	12	2x	1,650	PH	NT	张绍斌等, 2004
百合科 Liliaceae	百合属 <i>Lilium</i>	<i>L. sulphureum</i> Baker ex J. D. Hooker	四川美姑 Meigu, Sichuan		24	12	2x	1,400	PH	NT	Gao et al, 2011
百合科 Liliaceae	百合属 <i>Lilium</i>	<i>L. taliense</i> Franchet	云南贡山 Gongshan, Yunnan		24	12	2x	2,000	PH	NT	谢晓阳等, 1992
百合科 Liliaceae	百合属 <i>Lilium</i>	<i>L. taliense</i> Franchet	云南丽江 Lijiang, Yunnan		24	12	2x	3,450	PH	NT	Gao et al, 2011
百合科 Liliaceae	百合属 <i>Lilium</i>	<i>L. taliense</i> Franchet	云南香格里拉 Shangri-la, Yunnan		24	12	2x	3,020	PH	NT	Gao et al, 2011
百合科 Liliaceae	百合属 <i>Lilium</i>	<i>L. taliense</i> Franchet	云南香格里拉 Shangri-la, Yunnan		24	12	2x	3,400	PH	NT	Gao et al, 2011
百合科 Liliaceae	百合属 <i>Lilium</i>	<i>L. tigrinum</i> Ker Gawl.	四川北川 Beichuan, Sichuan		36	12	3x	1,260	PH	NT	高云东等, 2009
百合科 Liliaceae	百合属 <i>Lilium</i>	<i>L. tigrinum</i> Ker Gawl.	四川松潘 Songpan, Sichuan		36	12	3x	2,850	PH	NT	高云东等, 2009
百合科 Liliaceae	百合属 <i>Lilium</i>	<i>L. wardii</i> Stapf ex Stern	西藏通麦 Tongmai, Tibet		24	12	2x		PH	NT	王中轩等, 2013
百合科 Liliaceae	百合属 <i>Lilium</i>	<i>L. wenshanense</i> L. J. Peng & F. X. Li	四川江油观雾山 Guanwu Mt., Jiangyou, Sichuan		24	12	2x	1,800	PH	NT	万娟等, 2011
百合科 Liliaceae	百合属 <i>Lilium</i>	<i>L. xanthellum</i> Wang et Tang	云南香格里拉东旺乡		24	12	2x	3,200	PH	NT	万娟等, 2011

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
			Dongwangxiang, Shangri-la, Yunnan								
			云南香格里拉尼西乡亚贡雪山								
百合科 Liliaceae	百合属 <i>Lilium</i>	<i>L. xanthellum</i> Wang et Tang	Nixixiangyagong snow Mt., Shangri-la, Yunnan		23	12	2x	3,300	PH	NT	万娟等, 2011
			云南香格里拉尼西乡亚贡雪山								
百合科 Liliaceae	百合属 <i>Lilium</i>	<i>L. xanthellum</i> Wang et Tang	Nixixiangyagong snow Mt., Shangri-la, Yunnan		24	12	2x	3,300	PH	NT	万娟等, 2011
败酱科 Valerianaceae	缬草属 <i>Valeriana</i>	<i>V. hardwickii</i> subsp. <i>latifolia</i> (Rehd. & Wils.) Y. F. Wu	四川宝兴 Baoxing, Sichuan	12		6	4x	1,850	PH	C	Hong & Zhang, 1990
报春花科 Primulaceae	羽叶点地梅属 <i>Pomatosace</i>	<i>P. filicula</i> Maxim.	青海玛沁 Maqin, Qinghai		20	10	2x		PH	EC	孔宏智和刘建全, 1999
报春花科 Primulaceae	点地梅属 <i>Androsace</i>	<i>A. bulleyana</i> Forrest	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		20	10	2x	3,400	PH	NT	Nakata et al, 1997
报春花科 Primulaceae	点地梅属 <i>Androsace</i>	<i>A. mariae</i> Kanitz	青海青海湖流域 Qinghai Lake, Qinghai		24	12	2x	3,200	PH	NT	黄荣福, 2003
报春花科 Primulaceae	点地梅属 <i>Androsace</i>	<i>A. spinulifera</i> (Franchet) R. Knuth	云南丽江 Lijiang, Yunnan		20	10	2x	3,200	PH	NT	Nakata et al, 1997
报春花科 Primulaceae	点地梅属 <i>Androsace</i>	<i>A. squarrosula</i> Maxim.	青海巴颜喀拉山 Bayankala Mt., Qinghai		80	10	8x	4,700	PH	NT	黄荣福, 2003
报春花科 Primulaceae	点地梅属 <i>Androsace</i>	<i>A. squarrosula</i> Maxim.	青海兴海 Xinghai, Qinghai		24	12	2x	3,900	PH	NT	黄荣福, 2003
报春花科 Primulaceae	点地梅属 <i>Androsace</i>	<i>A. squarrosula</i> Maxim.	青海兴海 Xinghai, Qinghai		40	10	4x	3,900	PH	NT	黄荣福, 2003

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
报春花科 Primulaceae	点地梅属 <i>Androsace</i>	<i>A. yargonensis</i>	青海达坂山 Daban Mt., Qinghai		60	10	6x	3,875	PH	NT	黄荣福, 2001
报春花科 Primulaceae	点地梅属 <i>Androsace</i>	<i>A. yargonensis</i>	青海巴颜喀拉山 Bayankala Mt., Qinghai		40	10	4x	4,700	PH	NT	黄荣福, 2003
报春花科 Primulaceae	点地梅属 <i>Androsace</i>	<i>A. yargonensis</i>	青海达坂山 Daban Mt., Qinghai		60	10	6x	3,900	PH	NT	黄荣福, 2003
报春花科 Primulaceae	点地梅属 <i>Androsace</i>	<i>A. yargonensis</i>	青海达坂山 Daban Mt., Qinghai		60	10	6x	3,900	PH	NT	黄荣福, 2001
报春花科 Primulaceae	点地梅属 <i>Androsace</i>	<i>A. yargonensis</i>	青海玛多 Maduo, Qinghai		40	10	4x	4,600	PH	NT	黄荣福, 2001
报春花科 Primulaceae	点地梅属 <i>Androsace</i>	<i>A. yargonensis</i>	青海巴颜喀拉山 Bayankala Mt., Qinghai		40	10	4x	4,800	PH	NT	黄荣福, 2001
报春花科 Primulaceae	点地梅属 <i>Androsace</i>	<i>A. zambalensis</i> (Petitm.) Hand. -Mazz.	青海昌马河 Changma River, Qinghai		20	10	2x	4,330	PH	NT	黄荣福, 2003
报春花科 Primulaceae	点地梅属 <i>Androsace</i>	<i>A. zambalensis</i> (Petitm.) Hand. -Mazz.	青海兴海 Xinghai, Qinghai		20	10	2x	3,900	PH	NT	黄荣福, 2003
报春花科 Primulaceae	报春花属 <i>Primula</i>	<i>P. aurantiaca</i> W.W.Sm.	云南剑川 Jianchuan, Yunnan		22	11	2x	3,100	PH	NT	朱慧芬等, 2001
报春花科 Primulaceae	报春花属 <i>Primula</i>	<i>P. beesiana</i> Forrest	云南丽江 Lijiang, Yunnan		22	11	2x	2,500	PH	NT	Nakata et al, 1997
报春花科 Primulaceae	报春花属 <i>Primula</i>	<i>P. beesiana</i> Forrest	云南丽江 Lijiang, Yunnan		22	11	2x	2,800	PH	NT	朱慧芬等, 2001
报春花科	报春花属 <i>Primula</i>	<i>P. bulleyana</i> Forrest	云南丽江 Lijiang, Yunnan		22	11	2x	2,800	PH	NT	朱慧芬等, 2001

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
Primulaceae											
报春花科 Primulaceae	报春花属 <i>Primula</i>	<i>P. capitata</i> subsp. <i>sphaerocephala</i>	云南德钦 Deqin, Yunnan		18	9	2x	4,300	PH	NT	张超等, 2012
报春花科 Primulaceae	报春花属 <i>Primula</i>	<i>P. denticulata</i> ssp. <i>sinodenticulata</i>	云南丽江 Lijiang, Yunnan		22	11	2x	2,350	PH	NT	张超等, 2012
报春花科 Primulaceae	报春花属 <i>Primula</i>	<i>P. forrestii</i> I. B. Balfour	云南丽江 Lijiang, Yunnan		24	12	2x	2,700	PH	NT	Nakata et al, 1997
报春花科 Primulaceae	报春花属 <i>Primula</i>	<i>P. malacoides</i> Franch.	云南大理 Dali, Yunnan		18	9	2x	1,800	PH	NT	张晓曼等, 2013
报春花科 Primulaceae	报春花属 <i>Primula</i>	<i>P. malacoides</i> Franchet.	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		18	9	2x	3,200	PH	NT	Nakata et al, 1997
报春花科 Primulaceae	报春花属 <i>Primula</i>	<i>P. monticola</i> (Hand. -Mazz.) F. H. Chen & C. M. Hu	四川汶川 Wenchuan, Sichuan		16	8	2x	3,700	PH	NT	朱慧芬等, 2001
报春花科 Primulaceae	报春花属 <i>Primula</i>	<i>P. poissoni</i> Franch.	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		22	11	2x	3,300	PH	NT	朱慧芬等, 2001
报春花科 Primulaceae	报春花属 <i>Primula</i>	<i>P. poissoni</i> Franchet.	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		22	11	2x	3,300	PH	NT	Nakata et al, 1997
报春花科 Primulaceae	报春花属 <i>Primula</i>	<i>P. pseudodenticulata</i> Pax	云南大理 Dali, Yunnan		16	8	2x	2,100	PH	NT	张超等, 2012
报春花科 Primulaceae	报春花属 <i>Primula</i>	<i>P. pulchella</i> Franchet.	云南丽江 Lijiang, Yunnan		16	8	2x	2,800	PH	NT	Nakata et al, 1997
报春花科 Primulaceae	报春花属 <i>Primula</i>	<i>P. pulverulenta</i> Duthie	四川康定 Kangding, Sichuan		22	11	2x	2,500	PH	NT	朱慧芬等, 2001

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
报春花科 Primulaceae	报春花属 <i>Primula</i>	<i>P. secundiflora</i> Franch.	云南大理 Dali, Yunnan		22	11	2x	3,200	PH	NT	张晓曼等, 2007
报春花科 Primulaceae	报春花属 <i>Primula</i>	<i>P. secundiflora</i> Franch.	云南德钦 Deqin, Yunnan		22	11	2x	4,300	PH	NT	朱慧芬等, 2001
报春花科 Primulaceae	报春花属 <i>Primula</i>	<i>P. secundiflora</i> Franchet.	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		22	11	2x	3,100	PH	NT	Nakata et al, 1997
报春花科 Primulaceae	报春花属 <i>Primula</i>	<i>P. serratifolia</i> Franch.	云南大理苍山 Cang Mt., Dali, Yunnan		22	11	2x	3,760	PH	NT	张晓曼等, 2007
报春花科 Primulaceae	报春花属 <i>Primula</i>	<i>P. sikkimensis</i> Hook	云南丽江 Lijiang, Yunnan		22	11	2x	3,200	PH	NT	张晓曼等, 2013
报春花科 Primulaceae	报春花属 <i>Primula</i>	<i>P. sikkimensis</i> Hook.	云南德钦 Deqin, Yunnan		20	10	2x	4,300	PH	NT	朱慧芬等, 2001
报春花科 Primulaceae	报春花属 <i>Primula</i>	<i>P. sinensis</i> Sabine ex Lindl.	四川卧龙 Wolong, Sichuan		22	11	2x	2,800	PH	NT	张晓曼等, 2007
报春花科 Primulaceae	报春花属 <i>Primula</i>	<i>P. sinolisteri</i> I. B. Balfour	云南禄劝 Luquan, Yunnan		24	12	2x	2,500	PH	NT	Nakata et al, 1997
报春花科 Primulaceae	报春花属 <i>Primula</i>	<i>P. sinolisteri</i> I. B. Balfour	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		22	11	2x	3,100	PH	NT	Nakata et al, 1997
报春花科 Primulaceae	报春花属 <i>Primula</i>	<i>P. viali</i> Delavay ex Franch.	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		22	11	2x	4,050	PH	NT	朱慧芬等, 2001
车前科 Plantaginaceae	车前属 <i>Plantago</i>	<i>P. depressa</i> Willd.	四川甘孜 Ganzi, Sichuan		12	6	2x	3,746	AH	C	钱敏等, 2015
车前科	车前属 <i>Plantago</i>	<i>P. depressa</i> Willd.	西藏昌都 Changdu, Tibet		12	6	2x	3,199	AH	C	钱敏等, 2015

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名	Families	属名	Genera	种名	Species	采集地点	Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献	Reference
Plantaginaceae	车前科	车前属	<i>Plantago</i>	<i>P. depressa</i>	Willd.	西藏昌都	Changdu, Tibet		12	6	2x	3,703	AH	C	钱敏等, 2015	
Plantaginaceae	车前科	车前属	<i>Plantago</i>	<i>P. depressa</i>	Willd.	西藏当雄	Dangxiong, Tibet		12	6	2x	4,515	AH	C	钱敏等, 2015	
Plantaginaceae	车前科	车前属	<i>Plantago</i>	<i>P. depressa</i>	Willd.	西藏定日	Dingri, Tibet		12	6	2x	4,308	AH	C	钱敏等, 2015	
Plantaginaceae	车前科	车前属	<i>Plantago</i>	<i>P. depressa</i>	Willd.	西藏工布江达	Gongbujiangda, Gongbu, Tibet		12	6	2x	4,000	AH	C	钱敏等, 2015	
Plantaginaceae	车前科	车前属	<i>Plantago</i>	<i>P. depressa</i>	Willd.	西藏江孜	Jiangzi, Tibet		12	6	2x	4,506	AH	C	钱敏等, 2015	
Plantaginaceae	车前科	车前属	<i>Plantago</i>	<i>P. depressa</i>	Willd.	西藏拉萨	Lhasa, Tibet		12	6	2x	3,650	AH	C	钱敏等, 2015	
Plantaginaceae	车前科	车前属	<i>Plantago</i>	<i>P. depressa</i>	Willd.	西藏浪卡子	Langkazi, Tibet		12	6	2x	4,453	AH	C	钱敏等, 2015	
Plantaginaceae	车前科	车前属	<i>Plantago</i>	<i>P. depressa</i>	Willd.	西藏浪卡子	Langkazi, Tibet		12	6	2x	4,761	AH	C	钱敏等, 2015	
Plantaginaceae	车前科	车前属	<i>Plantago</i>	<i>P. depressa</i>	Willd.	西藏林芝	Linzhi, Tibet		24	6	4x	3,783	AH	C	钱敏等, 2015	
Plantaginaceae	车前科	车前属	<i>Plantago</i>	<i>P. depressa</i>	Willd.	西藏林周	Linzhou, Tibet		12	6	2x	4,347	AH	C	钱敏等, 2015	
Plantaginaceae	车前科	车前属	<i>Plantago</i>	<i>P. depressa</i>	Willd.	西藏聂拉木	Nielamu, Tibet		12	6	2x	3,794	AH	C	钱敏等, 2015	

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
车前科 Plantaginaceae	车前属 <i>Plantago</i>	<i>P. depressa</i> Willd.	西藏曲水 Qushui, Tibet		12	6	2x	3,689	AH	C	钱敏等, 2015
车前科 Plantaginaceae	车前属 <i>Plantago</i>	<i>P. depressa</i> Willd.	西藏桑日 Sangri, Tibet		12	6	2x	3,590	AH	C	钱敏等, 2015
车前科 Plantaginaceae	车前属 <i>Plantago</i>	<i>P. depressa</i> Willd.	四川新龙 Xinlong, Sichuan		12	6	2x	3,182	AH	C	钱敏等, 2015
车前科 Plantaginaceae	车前属 <i>Plantago</i>	<i>P. depressa</i> Willd.	西藏亚东 Yadong, Tibet		24	6	4x	3,634	AH	C	钱敏等, 2015
车前科 Plantaginaceae	车前属 <i>Plantago</i>	<i>P. depressa</i> Willd.	西藏扎囊 Zhanang, Tibet		12	6	2x	3,559	AH	C	钱敏等, 2015
车前科 Plantaginaceae	车前属 <i>Plantago</i>	<i>P. erosa</i> Wall.	四川宝兴 Baoxing, Sichuan	9		9	2x	2,600	W	NT	Hong & Zhang, 1990
车前科 Plantaginaceae	车前属 <i>Plantago</i>	<i>P. major</i> L.	西藏日喀则 Rikeze, Tibet		12	6	2x	3,805	PH	C	钱敏等, 2015
车前科 Plantaginaceae	车前属 <i>Plantago</i>	<i>P. major</i> L.	西藏桑日 Sangri, Tibet		12	6	2x	3,590	PH	C	钱敏等, 2015
唇形科 Lamiaceae	鼠尾草属 <i>Salvia</i>	<i>S. castanea</i> Diels	云南丽江 Lijiang, Yunnan		16	8	2x	2,900	PH	C	Yang & Gong, 2004
唇形科 Lamiaceae	鼠尾草属 <i>Salvia</i>	<i>S. digitaloides</i> var. <i>digitaloides</i> Diels	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		16	8	2x	3,350	PH	C	Yang & Gong, 2004
唇形科 Lamiaceae	鼠尾草属 <i>Salvia</i>	<i>S. flava</i> Forrest ex Diels	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		16	8	2x	3,400	PH	C	Yang & Gong, 2004
唇形科 Lamiaceae	鼠尾草属 <i>Salvia</i>	<i>S. przewalskii</i> Maximowicz	云南丽江 Lijiang, Yunnan		32	8	4x	2,800	PH	C	Yang & Gong, 2004
唇形科 Lamiaceae	鼠尾草属 <i>Salvia</i>	<i>S. trijuga</i> Diels	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		16	8	2x	3,400	PH	C	Yang & Gong, 2004
唇形科 Lamiaceae	鼠尾草属 <i>Salvia</i>	<i>S. yunnanensis</i> C. H. Wright	云南洱源 Eyuan, Yunnan		16	8	2x	2,100	W	C	Yang & Gong, 2004
唇形科 Lamiaceae	青兰属	<i>D. heterophyllum</i> Benth.	青海果洛 Guoluo, Qinghai		24	6	4x	3,700	PH	OWT	顾志建等, 1993

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
<i>Dracocephalum</i>											
唇形科 Lamiaceae	荆芥属 <i>Nepeta</i>	<i>N. micrantha</i> Bunge	新疆古尔班通古特沙漠 Gurbantunggut Desert, Xinjiang		18	9	2x	199	AH	OWT	王立群等, 2013
唇形科 Lamiaceae	荆芥属 <i>Nepeta</i>	<i>N. sibirica</i> L.	喜马拉雅山脉东端的横断山区 Hengduan Mt. in the east margin of Tibet		18	9	2x		AH	OWT	孔维进等, 2008
大戟科 Euphorbiaceae	野桐属 <i>Mallotus</i>	<i>M. japonicus</i> var. <i>oreophicus</i> S. M. Hwang.	四川峨眉山 Emei Mt., Sichuan		44	11	4x	1,480	W	OWT	皮军等, 2008
豆科 Fabaceae	猪屎豆属 <i>Crotalaria</i>	<i>C. medicaginea</i>	云南鹤庆 Heqing, Yunnan		16	8	2x		AH	P	李建强, 1988
豆科 Fabaceae	猪屎豆属 <i>Crotalaria</i>	<i>C. medicaginea</i> Lamarck Encycl.	云南鹤庆 Heqing, Yunnan		16	8	2x		AH	P	刘建等, 1988
豆科 Fabaceae	猪屎豆属 <i>Crotalaria</i>	<i>C. sessiliflora</i> L.	四川理塘 Litang, Sichuan		22	11	2x	900	W	CA	顾志建和孙航, 1998
豆科 Fabaceae	猪屎豆属 <i>Crotalaria</i>	<i>C. sessiliflora</i> L.	西藏墨脱 Motuo, Tibet		16	8	2x	1,500	PH	EA & NAD	顾志建和孙先凤, 1998
豆科 Fabaceae	鱼鳔槐属 <i>Colutea</i>	<i>C. delavayi</i> Franchet Pl. Delavay.	四川乡城大雪山 Snow Mt., Xiangcheng, Sichuan		30	15	2x	4,360	PH	NT	陈光富等, 2013
豆科 Fabaceae	野豌豆属 <i>Vicia</i>	<i>V. hirsuta</i> (L.) Gray	四川宝兴 Baoxing, Sichuan		14	7	2x		AH	NT	洪德元, 1984
豆科 Fabaceae	野豌豆属 <i>Vicia</i>	<i>V. hirsuta</i> (L.) Gray	四川宝兴 Baoxing, Sichuan	7		7	2x		AH	NT	洪德元, 1984
豆科 Fabaceae	野豌豆属 <i>Vicia</i>	<i>V. sativa</i> L.	四川宝兴 Baoxing, Sichuan		10	5	2x		AH	NT	洪德元, 1984
豆科 Fabaceae	野豌豆属 <i>Vicia</i>	<i>V. sativa</i> L.	四川宝兴 Baoxing, Sichuan	6		6	2x		AH	NT	洪德元, 1984
豆科 Fabaceae	野豌豆属 <i>Vicia</i>	<i>V. tetrasperma</i>	四川宝兴 Baoxing, Sichuan		14	7	2x		AH	NT	洪德元, 1984

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
豆科 Fabaceae	野豌豆属 <i>Vicia</i>	<i>V. villosa</i> Roth.	四川宝兴 Baoxing, Sichuan		14	7	2x		AH	NT	洪德元, 1984
豆科 Fabaceae	野豌豆属 <i>Vicia</i>	<i>V. villosa</i> Roth.	四川宝兴 Baoxing, Sichuan		12	6	2x		AH	NT	洪德元, 1984
豆科 Fabaceae	山蚂蝗属 <i>Desmodium</i>	<i>D. yunnanense</i> Franch.	云南鹤庆 Heqing, Yunnan		22	11	2x		W	EA & NAD	崔现举, 1987
豆科 Fabaceae	苜蓿属 <i>Medicago</i>	<i>M. edgeworthii</i> Širj.	云南德钦 Deqin, Yunnan		14	7	2x	3,300	PH	NT	周自玮等, 2000
豆科 Fabaceae	苜蓿属 <i>Medicago</i>	<i>M. lupulina</i> L.	四川宝兴 Baoxing, Sichuan	8		8	2x		PH	OWT	洪德元, 1984
豆科 Fabaceae	木蓝属 <i>Indigofera</i>	<i>I. amblyantha</i> Craib	四川茂县 Maoxian, Sichuan		16	8	2x		W	P	郑霞等, 2011
豆科 Fabaceae	木蓝属 <i>Indigofera</i>	<i>I. bungeana</i> Walp	四川泸定 Luding, Sichuan		16	8	2x		W	P	郑霞等, 2011
豆科 Fabaceae	木蓝属 <i>Indigofera</i>	<i>I. delavayi</i> Franch	四川木里 Muli, Sichuan		16	8	2x		W	P	郑霞等, 2011
豆科 Fabaceae	木蓝属 <i>Indigofera</i>	<i>I. scabrida</i> Dunn	四川木里 Muli, Sichuan		16	8	2x		W	P	郑霞等, 2011
豆科 Fabaceae	木蓝属 <i>Indigofera</i>	<i>I. silvestrii</i> Pamp	四川泸定 Luding, Sichuan		16	8	2x		W	P	郑霞等, 2011
豆科 Fabaceae	木蓝属 <i>Indigofera</i>	<i>I. szechuensis</i> Craib	四川茂县 Maoxian, Sichuan		16	8	2x		W	P	郑霞等, 2011
豆科 Fabaceae	米口袋属 <i>Gueldenstaedtia</i>	<i>G. delavayi</i> Franchet.	云南丽江 Lijiang, Yunnan		16	8	2x		AH	C	聂泽龙, 2002
豆科 Fabaceae	锦鸡儿属 <i>Caragana</i>	<i>C. acanthophylla</i> Komarov Trudy	甘肃桥湾 Qiaowan, Jiuquan, Gansu		32	16	4x	1,360	PH	TA	常朝阳等, 2009
豆科 Fabaceae	锦鸡儿属 <i>Caragana</i>	<i>C. bicolor</i> Komarov Trudy	四川 Sichuan		16	8	2x		W	TA	Áskell, 1985
豆科 Fabaceae	锦鸡儿属 <i>Caragana</i>	<i>C. camilli-schneideri</i> Kom.	甘肃兰州 Lanzhou, Gansu		32	16	4x	1,920	PH	TA	常朝阳等, 2009
豆科 Fabaceae	锦鸡儿属 <i>Caragana</i>	<i>C. densa</i> Komarov Trudy	四川马尔康 Maerkang, Sichuan		16	8	2x	2,800	PH	TA	常朝阳等, 2009
豆科 Fabaceae	锦鸡儿属 <i>Caragana</i>	<i>C. erinacea</i> Komarov Trudy	新疆布克赛尔 Hoboksar, Xinjiang		32	16	4x	1,300	PH	TA	常朝阳等, 2009
豆科 Fabaceae	锦鸡儿属 <i>Caragana</i>	<i>C. franchetiana</i> Kom.	西藏东部 The east margin of Tibet		16	8	2x	3,650	W	TA	杨杰等, 2007
豆科 Fabaceae	锦鸡儿属 <i>Caragana</i>	<i>C. roborovskyi</i> Komarov Trudy	新疆乌鲁木齐妖魔山 Yaomo Mt., Urumchi, Xinjiang		16	8	2x	1,000	W	TA	常朝阳等, 2009
豆科 Fabaceae	棘豆属 <i>Oxytropis</i>	<i>O. glacialis</i> Benth. ex Bge.	西藏萨嘎 Saga, Tibet		16	8	2x	510	PH	NT	王丽等, 1994

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
豆科 Fabaceae	棘豆属 <i>Oxytropis</i>	<i>O. humifusa</i> Kar. et Kir.	西藏聂荣县 Nierong, Tibet		16	8	2x	4,680	PH	NT	刘亚辉等, 2011
豆科 Fabaceae	棘豆属 <i>Oxytropis</i>	<i>O. humifusa</i> Kar. et Kir.	西藏双湖 Shuanghu, Tibet		16	8	2x	4,984	PH	NT	刘亚辉等, 2011
豆科 Fabaceae	棘豆属 <i>Oxytropis</i>	<i>O. kansuensis</i> Bunge	四川九龙 Jiulong, Sichuan		16	8	2x	4,188	PH	NT	刘亚辉等, 2011
豆科 Fabaceae	棘豆属 <i>Oxytropis</i>	<i>O. kansuensis</i> Bunge	四川康定 Kangding, Sichuan		16	8	2x	3,800	PH	NT	刘亚辉等, 2011
豆科 Fabaceae	棘豆属 <i>Oxytropis</i>	<i>O. kansuensis</i> Bunge	四川理塘 Litang, Sichuan		16	8	2x	4,022	PH	NT	刘亚辉等, 2011
豆科 Fabaceae	棘豆属 <i>Oxytropis</i>	<i>O. kansuensis</i> Bunge	四川理塘 Litang, Sichuan		16	8	2x	4,078	PH	NT	刘亚辉等, 2011
豆科 Fabaceae	棘豆属 <i>Oxytropis</i>	<i>O. microphyllum</i> (Pall.) DC.	Lazhi, Tibet		16	8	2x	3,700	PH	NT	王丽等, 1994
豆科 Fabaceae	棘豆属 <i>Oxytropis</i>	<i>O. microphyllum</i> (Pall.) DC.	西藏普兰 Pulan, Tibet		16	8	2x	4,600	PH	NT	王丽等, 1994
豆科 Fabaceae	棘豆属 <i>Oxytropis</i>	<i>O. ochrocephala</i> Bunge	西藏聂荣县 Nierong, Tibet		16	8	2x	4,680	PH	NT	刘亚辉等, 2011
豆科 Fabaceae	棘豆属 <i>Oxytropis</i>	<i>O. sericopetala</i> Prain ex C. E. C. Fisch.	西藏日喀则 Rikeze, Tibet		16	8	2x	4,000	PH	NT	王丽等, 1994
豆科 Fabaceae	棘豆属 <i>Oxytropis</i>	<i>O. stracheyana</i> Benth.	西藏普兰 Pulan, Tibet		48	8	6x	4,600	PH	NT	王丽等, 1994
豆科 Fabaceae	棘豆属 <i>Oxytropis</i>	<i>O. stracheyana</i> Bunge	西藏双湖 Shuanghu, Tibet		48	8	6x	4,851	PH	NT	刘亚辉等, 2011
豆科 Fabaceae	棘豆属 <i>Oxytropis</i>	<i>O. tatarica</i> Cambess. ex Bunge	西藏噶尔县 Gaer, Tibet		16	8	2x	4,797	PH	NT	刘亚辉等, 2011
豆科 Fabaceae	棘豆属 <i>Oxytropis</i>	<i>O. tatarica</i> Cambess. ex Bunge	西藏革吉县 Geji, Tibet		16	8	2x	4,823	PH	NT	刘亚辉等, 2011
豆科 Fabaceae	黄耆属 <i>Astragalus</i>	<i>A. acaulis</i> Bakerin J. D. Hooker	四川 Sichuan		16	8	2x		PH	C	Áskell, 1985
豆科 Fabaceae	黄耆属 <i>Astragalus</i>	<i>A. ernestii</i> Comber	四川康定 Kangding, Sichuan		16	8	2x		PH	C	Áskell, 1985
豆科 Fabaceae	黄耆属 <i>Astragalus</i>	<i>A. hendersonii</i> Baker.	Wudaoliangzhi, Qinghai		16	8	2x	4,600	W	C	王丽等, 1994
豆科 Fabaceae	黄耆属 <i>Astragalus</i>	<i>A. kialensis</i> N. D. Simpson	云南 Yunnan		16	8	2x		PH	C	Áskell, 1985
豆科 Fabaceae	黄耆属 <i>Astragalus</i>	<i>A. oplites</i> Benth. ex Parker	西藏普兰 Pulan, Tibet		16	8	2x	3,700	W	C	王丽等, 1994
豆科 Fabaceae	黄耆属 <i>Astragalus</i>	<i>A. pastorius</i> Tsai & Yu	四川 Sichuan		32	8	4x		PH	C	Áskell, 1985
豆科 Fabaceae	黄耆属 <i>Astragalus</i>	<i>A. polycladus</i> Bur. et Franch.	四川理塘 Litang, Sichuan		16	8	2x	3,886	PH	C	刘玉红和王善敏, 1994

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
豆科 Fabaceae	黄耆属 <i>Astragalus</i>	<i>A. przewalskii</i> Bunge ex Maximowicz.	四川 Sichuan		16	8	2x		PH	C	Áskell, 1985
豆科 Fabaceae	黄耆属 <i>Astragalus</i>	<i>A. strictus</i> Graham	西藏波密 Bomi, Tibet		32	8	4x	3,300	PH	C	王丽等, 1994
豆科 Fabaceae	黄耆属 <i>Astragalus</i>	<i>A. sutchuenensis</i> Franch.	四川马尔康 Maerkang, Sichuan		16	8	2x	2,800	PH	C	黎斌等, 2004
豆科 Fabaceae	黄耆属 <i>Astragalus</i>	<i>A. tanguticus</i> Batalin	四川马尔康 Maerkang, Sichuan		16	8	2x	2,800	PH	C	黎斌等, 2004
豆科 Fabaceae	黄耆属 <i>Astragalus</i>	<i>A. tongolensis</i> Ulbrich	四川 Sichuan		16	8	2x		PH	C	Áskell, 1985
豆科 Fabaceae	高山豆属 <i>Tibetia</i>	<i>T. himalaica</i> (Baker) H. P. TsuiBull	四川稻城 Daocheng, Sichuan		16	8	2x		PH	EA	Nie et al, 2002
豆科 Fabaceae	高山豆属 <i>Tibetia</i>	<i>T. himalaica</i> (Baker) H. P. TsuiBull	四川理塘 Litang, Sichuan		16	8	2x		PH	EA	聂泽龙, 2002
豆科 Fabaceae	高山豆属 <i>Tibetia</i>	<i>T. tongolensis</i> (Ulbrich) H. P. TsuiBull	四川稻城 Daocheng, Sichuan		16	8	2x		PH	EA	Nie et al, 2002
豆科 Fabaceae	高山豆属 <i>Tibetia</i>	<i>T. yunnanensis</i> (Diels) H. P. Tsui	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		16	8	2x		PH	EA	聂泽龙, 2002
豆科 Fabaceae	高山豆属 <i>Tibetia</i>	<i>T. yunnanensis</i> (Franchet) H. P. TsuiBull	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		16	8	2x		PH	EA	Nie et al, 2002
豆科 Fabaceae	冬麻豆属 <i>Salweenia</i>	<i>S. bouffordiana</i> H. Sun	云南雅砻江 Yalong River, Yunnan		18	9	2x		W	EC	Yue et al, 2011
豆科 Fabaceae	冬麻豆属 <i>Salweenia</i>	<i>S. wardii</i> Baker f.	四川稻城 Daocheng, Sichuan		16	8	2x		W	EC	周其兴和孙航, 2000b
豆科 Fabaceae	冬麻豆属 <i>Salweenia</i>	<i>S. wardii</i> E. G. Baker	云南怒江 Nujiang River, Yunnan		18	9	2x		W	EC	Yue et al, 2011
豆科 Fabaceae	闭荚藤属 <i>Mastersia</i>	<i>M. assamica</i> Benth.	四川理塘 Litang, Sichuan		16	8	2x	700	W	TA & TA	顾志建和孙航, 1998
豆科 Fabaceae	闭荚藤属 <i>Mastersia</i>	<i>M. assamica</i> Benth.	西藏墨脱 Motuo, Tibet		30	15	2x	2,100	PH	NT	顾志建和孙先凤, 1998
豆科 Fabaceae	百脉根属 <i>Lotus</i>	<i>L. tenuis</i> Waldst. & Kit. ex Willd.	四川宝兴 Baoxing, Sichuan		12	6	2x		PH	OWT	洪德元, 1984
杜鹃花科 Ericaceae	杜鹃花属 <i>Rhododendron</i>	<i>R. leptothrium</i> Balf. f. & Forrest	云南维西 Weixi, Yunnan		26	13	2x		PH	NT	Gao, 2002
杜鹃花科 Ericaceae	杜鹃花属 <i>Rhododendron</i>	<i>R. mackenzianum</i> Forrest	云南贡山 Gongshan, Yunnan		26	13	2x		PH	NT	Gao, 2002

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
翡若翠科 Velloziaceae	镇苞菊属 <i>Tricholepis</i>	<i>T. furcata</i> DC.	西藏吉隆 Gyirong, Tibet		32	16	2x	2,800	PH	CA	陈光富等, 2013
翡若翠科 Velloziaceae	芒苞草属 <i>Acanthochlamys</i>	<i>A. bracteata</i> P. C. Kao	四川道孚 Daofu, Sichuan		38	19	2x	3,100	PH	EC	高宝纯等, 1993
禾本科 Poaceae	鸭茅属 <i>Dactylis</i>	<i>D. glomerata</i> L.	云南德钦 Deqin, Yunnan		16	8	2x	3,500	PH	OWT	周自玮等, 2000
禾本科 Poaceae	鸭茅属 <i>Dactylis</i>	<i>D. glomerata</i> L.	云南中甸白水台 Baishuitai, Zhongdian, Yunnan		14	7	2x	2,360	PH	NT	周自玮等, 2000
禾本科 Poaceae	披碱草属 <i>Elymus</i>	<i>E. anthosachnoides</i> (Keng) Á. Löve	四川巴塘 Batang, Sichuan		28	14	4x		PH	NT	Li et al, 1996
禾本科 Poaceae	披碱草属 <i>Elymus</i>	<i>E. atratus</i> (Nevski) Handel-Mazzetti	四川红原 Hongyuan, Sichuan		42	7	6x		PH	NT	刘玉红, 1985
禾本科 Poaceae	披碱草属 <i>Elymus</i>	<i>E. atratus</i> (Nevski) Handel-Mazzetti	四川若尔盖 Ruoergai, Sichuan		28	14	4x		PH	NT	卢宝荣等, 1990
禾本科 Poaceae	披碱草属 <i>Elymus</i>	<i>E. cylindricus</i> Honda	四川甘孜 Ganzhi, Sichuan		42	7	6x		PH	NT	刘玉红, 1985
禾本科 Poaceae	披碱草属 <i>Elymus</i>	<i>E. cylindricus</i> Honda	四川红原 Hongyuan, Sichuan		42	7	6x		PH	NT	卢宝荣等, 1990
禾本科 Poaceae	披碱草属 <i>Elymus</i>	<i>E. dahuricus</i> Turczaninow ex Grisebach	四川康定 Kangding, Sichuan		42	7	6x		PH	NT	刘玉红, 1985
禾本科 Poaceae	披碱草属 <i>Elymus</i>	<i>E. nutans</i> Grisebach	四川若尔盖 Ruoergai, Sichuan		42	7	6x		PH	NT	刘玉红, 1985
禾本科 Poaceae	披碱草属 <i>Elymus</i>	<i>E. sibiricus</i> Linnaeus	青海大通 Datong, Qinghai		28	7	4x		PH	NT	张同林等, 2015
禾本科 Poaceae	披碱草属 <i>Elymus</i>	<i>E. sibiricus</i> Linnaeus	四川康定 Kangding, Sichuan		28	7	4x		PH	NT	刘玉红, 1985
禾本科 Poaceae	披碱草属 <i>Elymus</i>	<i>E. sibiricus</i> Linnaeus	四川南坪 Nanping, Sichuan		42	7	6x		PH	NT	卢宝荣等, 1990
禾本科 Poaceae	披碱草属 <i>Elymus</i>	<i>E. sibiricus</i> Linnaeus	四川若尔盖 Ruoergai, Sichuan		28	7	4x		PH	NT	卢宝荣等, 1990
禾本科 Poaceae	披碱草属 <i>Elymus</i>	<i>E. submuticus</i> Keng ex Keng f.	四川 Sichuan		42	7	6x		PH	NT	蔡联炳和冯海生, 1997
禾本科 Poaceae	披碱草属 <i>Elymus</i>	<i>E. tangutorum</i> (Nevski) Handel-Mazzetti	四川茂汶 Maowen, Sichuan		42	7	6x		PH	NT	卢宝荣等, 1990

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
禾本科 Poaceae	披碱草属 <i>Elymus</i>	<i>E. tangutorum</i> (Nevski) Handel-Mazzetti	四川石渠 Shiqu, Sichuan		42	7	6x		PH	NT	刘玉红, 1985
禾本科 Poaceae	赖草属 <i>Leymus</i>	<i>L. secalinus</i> (Georgi) Tzvel.	青海西宁 Xining, Qinghai		28	7	4x		PH	NT	张同林等, 2015
禾本科 Poaceae	假鹅观草属 <i>Roegneria</i>	<i>R. altissima</i> Keng ex Y. L. Keng & S. L. Chen	四川巴塘 Batang, Sichuan		28	14	4x		PH	OWT	周永红等, 1993
禾本科 Poaceae	假鹅观草属 <i>Roegneria</i>	<i>R. breviglumis</i> Keng ex Y. L. Keng & S. L. Chen	四川若尔盖 Ruorgai, Sichuan		28	14	4x		PH	OWT	卢宝荣等, 1990
禾本科 Poaceae	假鹅观草属 <i>Roegneria</i>	<i>R. ciliaris</i> (Trin.) Nevski	四川汶川 Wenchuan, Sichuan		28	14	4x		PH	OWT	卢宝荣等, 1990
禾本科 Poaceae	假鹅观草属 <i>Roegneria</i>	<i>R. ciliaris</i> (Trin.) Nevski	四川南坪 Nanping, Sichuan		14	7	2x		PH	OWT	Sun et al, 1992
禾本科 Poaceae	假鹅观草属 <i>Roegneria</i>	<i>R. ciliaris</i> (Trin.) Nevski	四川雅安 Ya'an, Sichuan		28	14	4x		PH	OWT	孙根楼等, 1993b
禾本科 Poaceae	假鹅观草属 <i>Roegneria</i>	<i>R. dolichathera</i> Keng ex Y. L. Keng & S. L. Chen	四川汶川 Wenchuan, Sichuan		28	14	4x		PH	OWT	周永红等, 1993
禾本科 Poaceae	假鹅观草属 <i>Roegneria</i>	<i>R. elytrigioides</i> C. Yen & J. L. Yang	西藏昌都 Changdu, Tibet		28	14	4x		PH	OWT	丁春邦, 2004
禾本科 Poaceae	假鹅观草属 <i>Roegneria</i>	<i>R. gmelini</i> (Griseb.) Kitag.	四川若尔盖 Ruorgai, Sichuan		28	14	4x		PH	OWT	卢宝荣等, 1990
禾本科 Poaceae	假鹅观草属 <i>Roegneria</i>	<i>R. kamoji</i> (Ohwi) Ohwi	青海循化 Xunhua, Qinghai		16	8	2x	3,590	PH	EC	Zhang et al, 2009
禾本科 Poaceae	假鹅观草属 <i>Roegneria</i>	<i>R. kamoji</i> (Ohwi) Ohwi	四川理县 Lixian County, Sichuan		42	7	6x		PH	OWT	卢宝荣等, 1990

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
禾本科 Poaceae	假鹅观草属 <i>Roegneria</i>	<i>R. kamoji</i> Ohwi	四川都江堰玉垒山 Yulei Mt., Dujiangyan, Sichuan		42	7	6x	860	PH	OWT	肖苏等, 2008
禾本科 Poaceae	假鹅观草属 <i>Roegneria</i>	<i>R. kamoji</i> Ohwi	四川乐山麻壕墓 Mahaomu, Leshan, Sichuan		42	7	6x	390	PH	OWT	肖苏等, 2008
禾本科 Poaceae	假鹅观草属 <i>Roegneria</i>	<i>R. kamoji</i> Ohwi	四川西昌马道 Madao, Xichang, Sichuan		42	7	6x	1,520	PH	OWT	肖苏等, 2008
禾本科 Poaceae	假鹅观草属 <i>Roegneria</i>	<i>R. kamoji</i> Ohwi	四川雅安蒙山 Meng Mt., Ya'an, Sichuan		42	7	6x	680	PH	OWT	肖苏等, 2008
禾本科 Poaceae	假鹅观草属 <i>Roegneria</i>	<i>R. kamoji</i> Ohwi	四川雅安周公山 Zhougong Mt., Ya'an, Sichuan		42	7	6x	650	PH	OWT	肖苏等, 2008
禾本科 Poaceae	假鹅观草属 <i>Roegneria</i>	<i>R. nutans</i> (Keng) Keng ex Y. L. Keng & S. L. Chen	四川红原 Hongyuan, Sichuan		42	7	6x		PH	OWT	卢宝荣等, 1990
禾本科 Poaceae	假鹅观草属 <i>Roegneria</i>	<i>R. nutans</i> (Keng) Keng ex Y. L. Keng & S. L. Chen	四川红原 Hongyuan, Sichuan		28	14	4x		PH	OWT	孙根楼等, 1993a
禾本科 Poaceae	假鹅观草属 <i>Roegneria</i>	<i>R. nutans</i> (Keng) Keng ex Y. L. Keng & S. L. Chen	四川若尔盖 Ruorgai, Sichuan		42	7	6x		PH	OWT	卢宝荣等, 1990
禾本科 Poaceae	假鹅观草属 <i>Roegneria</i>	<i>R. parvigluma</i> Keng ex Y. L. Keng & S. L. Chen	四川理县 Lixian County, Sichuan		42	7	6x		PH	OWT	卢宝荣等, 1990
禾本科 Poaceae	假鹅观草属 <i>Roegneria</i>	<i>R. parvigluma</i> Keng ex Y. L. Keng & S. L. Chen	四川马尔康 Maerkang, Sichuan		28	14	4x		PH	OWT	卢宝荣等, 1990
禾本科 Poaceae	假鹅观草属 <i>Roegneria</i>	<i>R. pendulina</i> Nevski	四川理县 Lixian County, Sichuan		28	14	4x		PH	OWT	卢宝荣等, 1990
禾本科 Poaceae	假鹅观草属 <i>Roegneria</i>	<i>R. pendulina</i> Nevski	四川南坪 Nanping, Sichuan		28	14	4x		PH	OWT	卢宝荣等, 1990

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
	<i>Roegneria</i>										
禾本科 Poaceae	假鹅观草属	<i>R. sinica</i> Keng ex Y. L. Chen & S. L. Chen	四川阿坝 Aba, Sichuan		28	14	4x		PH	OWT	卢宝荣等, 1990
禾本科 Poaceae	假鹅观草属	<i>R. stricta</i> Keng ex Y. L. Keng & S. L. Chen	四川茂汶 Maowen, Sichuan		28	14	4x		PH	OWT	卢宝荣等, 1990
禾本科 Poaceae	假鹅观草属	<i>R. tenuispica</i> J. L. Yang & Y. H. Zhou	西藏昌都 Changdu, Tibet		28	7	4x	3,580	PH	OWT	杨俊良和周永红, 1994
禾本科 Poaceae	假鹅观草属	<i>R. tibetica</i> Á. Löve	西藏安多 Anduo, Tibet		24	7	4x		PH	OWT	张同林等, 2015
禾本科 Poaceae	钩毛草属 <i>Kelloggia</i>	<i>K. laxiflora</i> (Keng) S. L. Chen	西藏类乌齐 Leiwuqi, Tibet		16	8	2x	4,780	PH	EC	Zhang et al, 2009
禾本科 Poaceae	钩毛草属 <i>Kelloggia</i>	<i>K. melanthera</i> (Keng) S.L.Chen	四川若尔盖 Ruoergai, Sichuan		42	7	6x		PH	CA	周永红, 1994
禾本科 Poaceae	钩毛草属 <i>Kelloggia</i>	<i>K. thoroldiana</i> (Oliv.) J. L. Yang, Yen et Baum	青海三江源地区唐古拉乡 Tanggulaxiang, Sanjiangyuan, Qinghai		42	7	2x	3,500	PH	CA	李淑娟等, 2010
禾本科 Poaceae	早熟禾属 <i>Poa</i>	<i>P. attenuata</i> var. <i>vivipara</i> Rendl	青海巴颜喀拉山 Bayankala Mt., Qinghai		28	14	2x	5,200	PH	NT	Huang et al, 1996a
胡桃科 Juglandaceae	胡桃属 <i>Juglans</i>	<i>J. sigillata</i> Dode	云南漾濞 Yangbi, Yunnan		32	16	2x		W	NT	穆英林等, 1990
葫芦科 Cucurbitaceae	绞股蓝属 <i>Gynostemma</i>	<i>G. longipes</i> C. Y. Wu ex C. Y. Wu & S. K. Chen	云南丽江 Lijiang, Yunnan		44	11	4x		PH	TA	高信芬等, 1995
葫芦科 Cucurbitaceae	赤爬属 <i>Thladiantha</i>	<i>T. davidi</i> Franch.	四川彭县 Pengxian County, Sichuan		18	9	2x	1,230	W	TA to TA	李建强等, 1993
葫芦科	赤爬属 <i>Thladiantha</i>	<i>T. dentata</i> Cogn.	四川南川 Nanchuan, Sichuan		18	9	2x	1,650	W	TA to TA	李建强等, 1993

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
Cucurbitaceae											
葫芦科 Cucurbitaceae	赤爬属 <i>Thladiantha</i>	<i>T. lijiangensis</i> A. M. Lu & Zhi Y. Zhang	云南丽江 Lijiang, Yunnan		18	9	2x		W	TA to TA	李建强等, 1993
葫芦科 Cucurbitaceae	赤爬属 <i>Thladiantha</i>	<i>T. nudiflora</i> Hemsl. ex Forb. & Hemsl.	四川峨眉山 Emei Mt., Sichuan		18	9	2x	1,650	W	TA to TA	李建强等, 1993
虎耳草科 Saxifragaceae	梅花草属 <i>Parnassia</i>	<i>P. aff. cacuminum</i> Hand. -Mazz. f. <i>yushuensis</i> T. C. Ku	四川松潘 Songpan, Sichuan		18	9	2x	3,850	PH	NT	Tsuneo et al, 2001a
虎耳草科 Saxifragaceae	梅花草属 <i>Parnassia</i>	<i>P. brevistyla</i> (Brieg.) Hand. -Mazz.	四川松潘 Songpan, Sichuan		14	7	2x	3,420	PH	NT	Tsuneo et al, 2001a
虎耳草科 Saxifragaceae	梅花草属 <i>Parnassia</i>	<i>P. delavayi</i> Franch.	四川南坪 Nanping, Sichuan		14	7	2x	3,050	PH	NT	Tsuneo et al, 2001a
虎耳草科 Saxifragaceae	梅花草属 <i>Parnassia</i>	<i>P. viridifolia</i> Batalin	四川南坪 Nanping, Sichuan		36	9	4x	3,050	PH	NT	Tsuneo et al, 2001a
虎耳草科 Saxifragaceae	梅花草属 <i>Parnassia</i>	<i>P. yunnanensis</i> Franch. var. <i>longistipitata</i> Z. P. Jien	四川康定 Kangding, Sichuan		32	8	4x	3,750	PH	NT	Tsuneo et al, 1997a
虎耳草科 Saxifragaceae	金腰属 <i>Chrysosplenium</i>	<i>C. aff. lixianense</i> Jien ex J. T. Pan	四川南坪 Nanping, Sichuan		12	6	2x	3,050	PH	NT	Tsuneo et al, 2000b
虎耳草科 Saxifragaceae	金腰属 <i>Chrysosplenium</i>	<i>C. griffithii</i> Hook. f. & Thomson	四川康定 Kangding, Sichuan		18	9	2x	3,560	PH	NT	Tsuneo et al, 1997b
虎耳草科 Saxifragaceae	金腰属 <i>Chrysosplenium</i>	<i>C. griffithii</i> Hook. f. & Thomson	四川松潘 Songpan, Sichuan		36	9	4x	3,400	PH	NT	Tsuneo et al, 2000b
虎耳草科 Saxifragaceae	金腰属 <i>Chrysosplenium</i>	<i>C. lanuginosum</i> Hook. f. & Thomson	四川都江堰 Dujiangyan, Sichuan		16	8	2x	1,900	PH	NT	Tsuneo et al, 2000b

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
虎耳草科 Saxifragaceae	金腰属 <i>Chrysosplenium</i>	<i>C. pillosum</i> Maxim. var. <i>valdipilosum</i> Ohwi	四川松潘 Songpan, Sichuan		36	9	4x	3,400	PH	NT	Tsuneo et al, 2000b
虎耳草科 Saxifragaceae	金腰属 <i>Chrysosplenium</i>	<i>C. qinlingense</i> Jien ex J. T. Pan	四川南坪 Nanping, Sichuan		52	13	4x	3,050	PH	NT	Tsuneo et al, 2000b
虎耳草科 Saxifragaceae	黄水枝属 <i>Tiarella</i>	<i>T. polyphylla</i> D. Don	四川峨眉山 Emei Mt., Sichuan		14	7	2x		PH	EA & NAD	Soltis & Bohm, 1984
虎耳草科 Saxifragaceae	虎耳草属 <i>Saxifraga</i>	<i>S. aculeate</i> Balf. f.	四川康定 Kangding, Sichuan		28	7	4x	2,400	PH	NT	Tsuneo et al, 1998
虎耳草科 Saxifragaceae	虎耳草属 <i>Saxifraga</i>	<i>S. aurantiana</i> Franch.	四川松潘 Songpan, Sichuan		16	8	2x		PH	NT	Tsuneo et al, 2001b
虎耳草科 Saxifragaceae	虎耳草属 <i>Saxifraga</i>	<i>S. cardiophylla</i> Franch.	四川康定 Kangding, Sichuan		32	8	4x	3,620	PH	NT	Tsuneo et al, 1998
虎耳草科 Saxifragaceae	虎耳草属 <i>Saxifraga</i>	<i>S. divaricata</i> Engl. & Irmsher	四川康定 Kangding, Sichuan		22	11	2x	3,750	PH	NT	Tsuneo et al, 1998
虎耳草科 Saxifragaceae	虎耳草属 <i>Saxifraga</i>	<i>S. egregia</i> Engl.	四川松潘 Songpan, Sichuan		16	8	2x	3,500	PH	NT	Tsuneo et al, 2001b
虎耳草科 Saxifragaceae	虎耳草属 <i>Saxifraga</i>	<i>S. heleonastes</i> Harry Sm.	四川松潘 Songpan, Sichuan		16	8	2x	3,350	PH	NT	Tsuneo et al, 2001b
虎耳草科 Saxifragaceae	虎耳草属 <i>Saxifraga</i>	<i>S. hirculus</i> L.	四川松潘 Songpan, Sichuan		32	8	4x	3,850	PH	NT	Tsuneo et al, 2001b
虎耳草科 Saxifragaceae	虎耳草属 <i>Saxifraga</i>	<i>S. melanocentra</i> Franch.	四川松潘 Songpan, Sichuan		22, 23	11	2x	3,850	PH	NT	Tsuneo et al, 2001b
虎耳草科	虎耳草属 <i>Saxifraga</i>	<i>S. montana</i> Harry Sm.	四川康定 Kangding, Sichuan		32	8	4x	3,540	PH	NT	Tsuneo et al, 1998

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
Saxifragaceae											
虎耳草科 Saxifragaceae	虎耳草属 <i>Saxifraga</i>	<i>S. tibetica</i> A. Losinsk.	青海可可西里乌兰乌拉湖 Wulanwula Lake, Kekexili, Qinghai		16	8	2x	5,000	PH	NT	杨永平和武素功, 1993
虎耳草科 Saxifragaceae	鬼灯檠属 <i>Rodgersia</i>	<i>R. aesculifolia</i> Batalin	四川阿坝 Aba, Sichuan		30	15	2x		PH	OWT	Tsuneo et al, 2000a
虎耳草科 Saxifragaceae	鬼灯檠属 <i>Rodgersia</i>	<i>R. pinnata</i> Franch.	云南丽江 Lijiang, Yunnan		60	15	4x		PH	OWT	Akiyama et al, 1990
虎耳草科 Saxifragaceae	鬼灯檠属 <i>Rodgersia</i>	<i>R. pinnata</i> Franch.	云南丽江 Lijiang, Yunnan		c.75	15	5x		PH	OWT	Akiyama et al, 1990
桦木科 Betulaceae	桤木属 <i>Alnus</i>	<i>A. cremastogyne</i> Burk.	四川四川农大读书公园 Sichuan Agricultural University, Ya'an, Sichuan		56	14	4x	650	W	NT	任保青和刘军, 2006
桦木科 Betulaceae	桤木属 <i>Alnus</i>	<i>A. ferdinandi-coburgii</i> Schneid.	四川西昌市樟木乡 Zhangmuxiang, Xichang, Sichuan		56	14	4x	1,800	W	NT	任保青和刘军, 2006
桦木科 Betulaceae	桤木属 <i>Alnus</i>	<i>A. lanata</i> Duthie ex Bean	四川海螺沟国家公园 Hailuoguo, Sichuan		56	14	4x	1,800	W	NT	任保青和刘军, 2006
桦木科 Betulaceae	桤木属 <i>Alnus</i>	<i>A. nepalensis</i> D. Don.	四川西昌市樟木乡 Zhangmuxiang, Xichang, Sichuan		56	14	4x	1,800	W	NT	任保青和刘军, 2006
姜科 Zingiberaceae	象牙参属 <i>Roscoea</i>	<i>R. tibetica</i> Batalin	云南丽江 Lijiang, Yunnan		24	12	2x		AH	EA	陈忠毅等, 1988
姜科 Zingiberaceae	舞花姜属 <i>Globba</i>	<i>G. emeiensis</i> Z. Y. Zhu	四川峨眉山 Emei Mt., Sichuan		24	12	2x		PH	TA & TA	陈忠毅等, 1988
姜科	大苞姜属	<i>C. yunnanensis</i> (Gagnep.) R. M. Sm.	四川渡口 Dukou, Sichuan		42	21	2x		PH	TA	陈忠毅等, 1988

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
Zingiberaceae	<i>Caulokaempferia</i>										
金粟兰科	金粟兰属	<i>C. nervosus</i> Collett & Hemsl.	云南漾濞 Yangbi, Yunnan		30	15	2x		PH	TA	孔宏智, 2000
桔梗科	沙参属 <i>Adenophora</i>	<i>A. lobophylla</i> D. Y. Hong	四川金川 Jinchuan, Sichuan		34+2B	17	2x		PH	OWT	王可青和葛颂, 1998
桔梗科	沙参属 <i>Adenophora</i>	<i>A. potanini</i> Korsh.	四川宝兴 Baoxing, Sichuan		34	17	2x		PH	OWT	王可青和葛颂, 1998
桔梗科	沙参属 <i>Adenophora</i>	<i>A. stricta</i> Miq.	四川金川 Jinchuan, Sichuan		68	17	4x		PH	OWT	王可青和葛颂, 1998
桔梗科	蓝钟花属	<i>C. cordifolius</i> Duthie	Chaga, Gyirong, Tibet		14	7	2x	4,277	PH	EA	Chen et al, 2014
桔梗科	蓝钟花属	<i>C. dolichosceles</i> Marq	四川得荣 Pacong, Derong, Sichuan		10	5	2x	4,129	PH	EA	Chen et al, 2014
桔梗科	蓝钟花属	<i>C. flavus</i> Marq.	四川西昌 Xichang, Sichuan		12	6	2x	1,534	PH	EA	Chen et al, 2014
桔梗科	蓝钟花属	<i>C. formosus</i> Diels	云南中甸 Shikashan, Zhongdian, Yunnan		12	6	2x	4,100	PH	EA	Chen et al, 2014
桔梗科	蓝钟花属	<i>C. hookeri</i> C. B. Clarke	四川得荣 De-Ba Pass, Derong, Sichuan		24	6	4x	4,129	AH	EA	Chen et al, 2014
桔梗科	蓝钟花属	<i>C. hookeri</i> C. B. Clarke	四川得荣噶金雪山 Gajin Mt., Derong, Sichuan		24	6	4x	4,300	AH	EA	Chen et al, 2014
桔梗科	蓝钟花属	<i>C. hookeri</i> C. B. Clarke	西藏聂拉木 Nielamu, Tibet		24	6	4x	3,881	AH	EA	Chen et al, 2014

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
桔梗科 Campanulaceae	蓝钟花属 <i>Cyananthus</i>	<i>C. hookeri</i> C. B. Clarke	云南中甸大雪山 Snow Mt. Zhongdian, Yunnan		12	6	2x	4,323	AH	EA	Chen et al, 2014
桔梗科 Campanulaceae	蓝钟花属 <i>Cyananthus</i>	<i>C. incanus</i> Hook. f. & Thoms.	四川巴塘 Batang, Sichuan		10	5	2x	4,135	PH	EA	Chen et al, 2014
桔梗科 Campanulaceae	蓝钟花属 <i>Cyananthus</i>	<i>C. incanus</i> Hook. f. & Thoms.	Zelila, Yadong, Tibet		14	7	2x	4,109	AH	EA	Chen et al, 2014
桔梗科 Campanulaceae	蓝钟花属 <i>Cyananthus</i>	<i>C. incanus</i> Hook. f. & Thoms.	西藏聂拉木 Nielamu, Tibet		10	5	2x	3,881	PH	EA	Chen et al, 2014
桔梗科 Campanulaceae	蓝钟花属 <i>Cyananthus</i>	<i>C. inflatus</i> Hook. f. & Thoms.	西藏错那 Mama, Cuona, Tibet		28	7	4x	3,583	AH	EA	Chen et al, 2014
桔梗科 Campanulaceae	蓝钟花属 <i>Cyananthus</i>	<i>C. inflatus</i> Hook. f. & Thoms.	西藏林芝 Sejilashan, Tibet		14	7	2x	4,300	AH	EA	Chen et al, 2014
桔梗科 Campanulaceae	蓝钟花属 <i>Cyananthus</i>	<i>C. inflatus</i> Hook. f. & Thoms.	四川西昌 Xichang, Sichuan		28	7	4x	1,534	AH	EA	Chen et al, 2014
桔梗科 Campanulaceae	蓝钟花属 <i>Cyananthus</i>	<i>C. lichiangensis</i> W. W. Sm.	四川乡城大雪山 Snow Mt., Xiangcheng, Sichuan		14	7	2x	4,360	AH	EA	Chen et al, 2014
桔梗科 Campanulaceae	蓝钟花属 <i>Cyananthus</i>	<i>C. lichiangensis</i> W. W. Sm.	云南中甸大雪山 Snow Mt. Zhongdian, Yunnan		14	7	2x	4,323	AH	EA	Chen et al, 2014
桔梗科 Campanulaceae	蓝钟花属 <i>Cyananthus</i>	<i>C. lobatus</i> Wall. ex Benth	Zelila, Yadong, Tibet		14	7	2x	4,109	PH	EA	Chen et al, 2014
桔梗科 Campanulaceae	蓝钟花属 <i>Cyananthus</i>	<i>C. longiflorus</i> Franch	云南丽江玉龙雪山 Yulong Mt., Lijiang, Yunnan		12	6	2x	3,200	PH	EA	Chen et al, 2014
桔梗科	蓝钟花属	<i>C. macrocalyx</i> Franch.	四川得荣噶金雪山 Gajin Mt.,		10	5	2x	4,300	PH	EA	Chen et al, 2014

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
Campanulaceae	<i>Cyananthus</i>		Derong, Sichuan								
桔梗科	蓝钟花属	<i>C. macrocalyx</i> Franch.	云南中甸大雪山 Snow Mt.		10	5	2x	4,323	PH	EA	Chen et al, 2014
Campanulaceae	<i>Cyananthus</i>		Zhongdian, Yunnan								
桔梗科	蓝钟花属	<i>C. microphyllus</i> Edgew.	西藏聂拉木 Nielamu, Tibet		14	7	2x	3,881	PH	EA	Chen et al, 2014
Campanulaceae	<i>Cyananthus</i>										
桔梗科	蓝钟花属	<i>C. pedunculatus</i> C. B. Clarke	Zelila, Yadong, Tibet		14	7	2x	4,109	PH	EA	Chen et al, 2014
Campanulaceae	<i>Cyananthus</i>										
桔梗科	蓝钟花属	<i>C. petiolatus</i> Franch.	云南中甸大雪山 Snow Mt.		10	5	2x	4,323	PH	EA	Chen et al, 2014
Campanulaceae	<i>Cyananthus</i>		Zhongdian, Yunnan								
桔梗科	金钱豹属	<i>C. javanica</i> subsp. <i>javanica</i> Blume	云南马龙 Malong, Yunnan		16	8	2x	2,406	PH	TA	Zhang et al, 2010
Campanulaceae	<i>Campanumoea</i>										
桔梗科	金钱豹属	<i>C. javanica</i> subsp. <i>javanica</i> Blume	云南腾冲 Tengchong, Yunnan		16	8	2x	1,531	PH	TA	Zhang et al, 2010
Campanulaceae	<i>Campanumoea</i>										
菊科 Asteraceae	紫菀属 <i>Aster</i>	<i>A. vestitus</i> Franch	云南香格里拉桑拿 Sangna, Shangri-la, Yunnan		16	8	2x	3,370	PH	NT	李志等, 2015
菊科 Asteraceae	紫菀属 <i>Aster</i>	<i>A. vestitus</i> Franch	云南香格里拉小中甸 Xiaozhongdian, Shangri-la, Yunnan		16	8	2x	3,250	PH	NT	李志等, 2015
菊科 Asteraceae	亚菊属 <i>Ajania</i>	<i>A. myriantha</i> (Franch.) Ling ex C. Shih	四川汶川 Wenchuan, Sichuan		18	9	2x	1,400	PH	TA	Kondo et al, 1995
菊科 Asteraceae	亚菊属 <i>Ajania</i>	<i>A. myriantha</i> (Franch.) Ling ex C. Shih	四川汶川 Wenchuan, Sichuan		36	9	4x	1,400	PH	TA	Kondo et al, 1995
菊科 Asteraceae	亚菊属 <i>Ajania</i>	<i>A. przewalskii</i> Poljakov	四川理县 Lixian County, Sichuan		36	9	4x	3,800	PH	TA	Kondo et al, 1992b
菊科 Asteraceae	亚菊属 <i>Ajania</i>	<i>A. ramosa</i> (Chang) C. Shih	四川康定 Kangding, Sichuan		18	9	2x	3,100	W	TA	Kondo et al, 1992b

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
菊科 Asteraceae	亚菊属 <i>Ajania</i>	<i>A. tenuifolia</i> (Jacq.) Tzvel.	四川九龙 Jiulong, Sichuan		72	9	8x	4,200	PH	TA	陈建国等, 2010
菊科 Asteraceae	亚菊属 <i>Ajania</i>	<i>A. tenuifolia</i> (Jacq.) Tzvelev	四川康定 Kangding, Sichuan		36	9	4x	4,150	PH	TA	Kondo et al, 1992b
菊科 Asteraceae	蟹甲草属 <i>Parasenecio</i>	<i>P. deltophylla</i>	青海玛沁 Maqin, Qinghai		60	30	2x	3,400	PH	EA	刘建全, 2000
菊科 Asteraceae	蟹甲草属 <i>Parasenecio</i>	<i>P. latipes</i> (Franch.) Y. L. Chen	四川峨眉山 Emei Mt., Sichuan		60	30	2x	1,400	PH	EA	刘建全, 2000
菊科 Asteraceae	蟹甲草属 <i>Parasenecio</i>	<i>P. roborowskii</i> (Maxim.) Y. L. Chen	青海西宁 Xining, Qinghai		60	30	2x	2,200	PH	EA	刘建全, 2000
菊科 Asteraceae	香青属 <i>Anaphalis</i>	<i>A. aureopunctata</i> Lingelsh	四川康定 Kangding, Sichuan		28	14	2x	3,289	PH	NT	Meng et al, 2014
菊科 Asteraceae	香青属 <i>Anaphalis</i>	<i>A. aureopunctata</i> Lingelsh	云南丽江 Lijiang, Yunnan		24	14	2x	2,790	PH	NT	Meng et al, 2014
菊科 Asteraceae	香青属 <i>Anaphalis</i>	<i>A. aureopunctata</i> Lingelsh	云南云龙 Yunlong, Yunnan		56	14	4x	2,300	PH	NT	Meng et al, 2014
菊科 Asteraceae	香青属 <i>Anaphalis</i>	<i>A. aureopunctata</i> Lingelsh	四川乡城 Xiangcheng, Sichuan		24	14	2x	4,012	PH	NT	Meng et al, 2014
菊科 Asteraceae	香青属 <i>Anaphalis</i>	<i>A. aureopunctata</i> Lingelsh	四川盐源 Yanyuan, Sichuan		28	14	2x	2,921	PH	NT	Meng et al, 2014
菊科 Asteraceae	香青属 <i>Anaphalis</i>	<i>A. bicolor</i> (Franch.) Diels	四川康定 Kangding, Sichuan		56	14	4x	4,020	PH	NT	Meng et al, 2014
菊科 Asteraceae	香青属 <i>Anaphalis</i>	<i>A. bicolor</i> (Franch.) Diels	云南丽江 Lijiang, Yunnan		28	14	2x	2,790	PH	NT	Meng et al, 2014
菊科 Asteraceae	香青属 <i>Anaphalis</i>	<i>A. bicolor</i> (Franch.) Diels	四川理塘 Litang, Sichuan		56	14	4x	4,090	PH	NT	Meng et al, 2014
菊科 Asteraceae	香青属 <i>Anaphalis</i>	<i>A. bicolor</i> (Franch.) Diels	云南香格里拉 Shangri-la, Yunnan		56	28	4x	3,406	PH	NT	Meng et al, 2014
菊科 Asteraceae	香青属 <i>Anaphalis</i>	<i>A. bicolor</i> (Franch.) Diels	四川乡城 Xiangcheng, Sichuan		28	14	2x	3,460	PH	NT	Meng et al, 2014
菊科 Asteraceae	香青属 <i>Anaphalis</i>	<i>A. deserti</i> J. R. Drummond Bull	Dangxiong, Tibet		48	12	4x	4,653	PH	NT	Meng et al, 2012
菊科 Asteraceae	香青属 <i>Anaphalis</i>	<i>A. flavescens</i> Hand. -Mazz.	四川道城 Daocheng, Sichuan		28	14	2x	4,630	PH	NT	Meng et al, 2014
菊科 Asteraceae	香青属 <i>Anaphalis</i>	<i>A. flavescens</i> Hand. -Mazz.	四川康定 Kangding, Sichuan		28	14	2x	4,363	PH	NT	Meng et al, 2014
菊科 Asteraceae	香青属 <i>Anaphalis</i>	<i>A. flavescens</i> Hand. -Mazz.	四川乡城 Xiangcheng, Sichuan		28	14	2x	4,731	PH	NT	Meng et al, 2014
菊科 Asteraceae	香青属 <i>Anaphalis</i>	<i>A. latialata</i> Ling & Y. L. Chen	四川道城 Daocheng, Sichuan		56	14	4x	4,632	PH	NT	Meng et al, 2014

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
菊科 Asteraceae	香青属 <i>Anaphalis</i>	<i>A. latialata</i> Ling & Y. L. Chen	云南香格里拉 Shangri-la, Yunnan		56	14	4x	3,387	PH	NT	Meng et al, 2014
菊科 Asteraceae	香青属 <i>Anaphalis</i>	<i>A. latialata</i> Ling & Y. L. Chen	西藏芒康 Mangkang, Tibet		56	14	4x	3,911	PH	NT	Meng et al, 2014
菊科 Asteraceae	香青属 <i>Anaphalis</i>	<i>A. likiangensis</i> (Franch) Y. Ling	云南香格里拉 Shangri-la, Yunnan		56	14	4x	3,164	PH	NT	Meng et al, 2014
菊科 Asteraceae	香青属 <i>Anaphalis</i>	<i>A. margaritacea</i> (Linnaeus) Benth & J. D. Hooker Gen	Naqu, Tibet		72	12	6x	4,715	PH	NT	Meng et al, 2012
菊科 Asteraceae	香青属 <i>Anaphalis</i>	<i>A. margaritacea</i> (Linnaeus) Benth & J. D. Hooker Gen	Zuogong, Tibet		28	14	2x	4,350	W	NT	Meng et al, 2012
菊科 Asteraceae	香青属 <i>Anaphalis</i>	<i>A. nepalensis</i> var. <i>corymbosa</i> (Bureau & Franch.) Hand. -Mazz.	西藏昌都 Changdu, Tibet		84	14	6x	4,800	PH	NT	Meng et al, 2014
菊科 Asteraceae	香青属 <i>Anaphalis</i>	<i>A. nepalensis</i> var. <i>corymbosa</i> (Bureau & Franch.) Hand. -Mazz.	四川西昌 Xichang, Sichuan		28	14	2x	2,921	PH	NT	Meng et al, 2014
菊科 Asteraceae	香青属 <i>Anaphalis</i>	<i>A. nepalensis</i> var. <i>nepalensis</i> (Spreng.) Hand. -Mazz.	四川康定 Kangding, Sichuan		56	14	4x	3,289	PH	NT	Meng et al, 2014
菊科 Asteraceae	香青属 <i>Anaphalis</i>	<i>A. nepalensis</i> var. <i>nepalensis</i> (Spreng.) Hand. -Mazz.	云南香格里拉 Shangri-la, Yunnan		56	14	4x	4,317	PH	NT	Meng et al, 2014
菊科 Asteraceae	香青属 <i>Anaphalis</i>	<i>A. nepalensis</i> var. <i>nepalensis</i> (Spreng.) Hand. -Mazz.	四川盐源 Yanyuan, Sichuan		28	14	2x	3,060	PH	NT	Meng et al, 2014
菊科 Asteraceae	香青属 <i>Anaphalis</i>	<i>A. pachylaena</i> Y. L. Chen & Ling	四川木里 Muli, Sichuan		28	14	2x	3,060	PH	NT	Meng et al, 2014
菊科 Asteraceae	香青属 <i>Anaphalis</i>	<i>A. pannosa</i> Hand. -Mazz.	云南香格里拉 Shangri-la, Yunnan		56	14	4x	4,317	PH	NT	Meng et al, 2014
菊科 Asteraceae	香青属 <i>Anaphalis</i>	<i>A. plicata</i> Kitamura	Zuogong, Tibet		52	13	4x	3,710	PH	NT	Meng et al, 2012
菊科 Asteraceae	香青属 <i>Anaphalis</i>	<i>A. rhododactyla</i> W. W. Smith	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		72	18	4x	3,800	PH	NT	Meng et al, 2005a
菊科 Asteraceae	香青属 <i>Anaphalis</i>	<i>A. royleana</i> Candolle Prodr	云南泸水 Lushui, Yunnan		36	18	2x	3,100	PH	NT	Meng et al, 2005a
菊科 Asteraceae	香青属 <i>Anaphalis</i>	<i>A. stenocephala</i> Ling & Shih	云南德钦 Deqin, Yunnan		56	14	4x	2,955	PH	NT	Meng et al, 2014

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
菊科 Asteraceae	香青属 <i>Anaphalis</i>	<i>A. stenocephala</i> Ling & Shih	云南香格里拉 Shangri-la, Yunnan		56	14	4x	3,153	PH	NT	Meng et al, 2014
菊科 Asteraceae	香青属 <i>Anaphalis</i>	<i>A. surculosa</i> Hand. -Mazz.	四川天全 Tianquan, Sichuan		56	14	4x	2,716	PH	NT	Meng et al, 2014
菊科 Asteraceae	香青属 <i>Anaphalis</i>	<i>A. virens</i> C. C. Chang	云南香格里拉 Shangri-la, Yunnan		56	14	4x	3,800	PH	NT	Meng et al, 2014
菊科 Asteraceae	香青属 <i>Anaphalis</i>	<i>A. virens</i> C. Chang	四川乡城 Xiangcheng, Sichuan		56	14	4x	3,840	PH	NT	Meng et al, 2014
菊科 Asteraceae	香青属 <i>Anaphalis</i>	<i>A. xylorhiza</i> Schultz Bipontinus ex J. D. Hooker	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		36	18	2x	3,700	PH	NT	Meng et al, 2005a
菊科 Asteraceae	香青属 <i>Anaphalis</i>	<i>A. yunnanensis</i> (Franch.) Diels	四川木里 Muli, Sichuan		56	14	4x	3,669	PH	NT	Meng et al, 2014
菊科 Asteraceae	细莴苣属 <i>Stenoserris</i>	<i>S. graciliflora</i> (DC.) C. Shih	云南贡山 Gongshan, Yunnan		16	8	2x	3,130	PH	EA	Deng et al, 2011
菊科 Asteraceae	细莴苣属 <i>Stenoserris</i>	<i>S. leptantha</i> Shih	四川木里 Muli, Sichuan		16	8	2x	3,228	PH	EA	Deng et al, 2011
菊科 Asteraceae	橐吾属 <i>Ligularia</i>	<i>L. cyathiceps</i> Hand. -Mazz.	云南丽江 Lijiang, Yunnan		58	29	2x	3,600	PH	OWT	潘跃芝等, 2004a
菊科 Asteraceae	橐吾属 <i>Ligularia</i>	<i>L. dentata</i> (A. Gray) H. Hara	四川峨眉山 Emei Mt., Sichuan		58	29	2x	1,500	PH	OWT	Liu, 2004
菊科 Asteraceae	橐吾属 <i>Ligularia</i>	<i>L. dictyoneura</i> (Franch.) Hand. -Mazz.	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		58	29	2x		PH	OWT	龚洵等, 2001
菊科 Asteraceae	橐吾属 <i>Ligularia</i>	<i>L. dictyoneura</i> (Franchet) Handel-Mazzetti	云南丽江 Lijiang, Yunnan		58	29	2x	3,300	PH	OWT	Liu, 2004
菊科 Asteraceae	橐吾属 <i>Ligularia</i>	<i>L. hookeri</i> (C. B. Clarke) Hand. -Mazz.	云南大理 Dali, Yunnan		58	29	2x		PH	OWT	龚洵等, 2001
菊科 Asteraceae	橐吾属 <i>Ligularia</i>	<i>L. kanaitzensis</i> (Franch.) Hand. -Mazz.	云南丽江 Lijiang, Yunnan		58	29	2x		PH	OWT	龚洵等, 2001
菊科 Asteraceae	橐吾属 <i>Ligularia</i>	<i>L. latihastata</i> Hand. -Mazz.	云南丽江 Lijiang, Yunnan		58	29	2x		PH	OWT	龚洵等, 2001
菊科 Asteraceae	橐吾属 <i>Ligularia</i>	<i>L. liatroides</i> (C. Winkler) Handel-Mazzetti	青海玉树 Yushu, Qinghai		58	29	2x	3,500	PH	OWT	Liu, 2004
菊科 Asteraceae	橐吾属 <i>Ligularia</i>	<i>L. phyllocolea</i> Hand. -Mazz.	云南宁蒗 Ninglang, Yunnan		58	29	2x	3,700	PH	OWT	潘跃芝等, 2004a
菊科 Asteraceae	橐吾属 <i>Ligularia</i>	<i>L. pleurocaulis</i> (Franch.) Hand.-Mazz.	四川稻城 Daocheng, Sichuan		58	29	2x	4,500	PH	OWT	潘跃芝等, 2004

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
菊科 Asteraceae	橐吾属 <i>Ligularia</i>	<i>L. pleurocaulis</i> (Franch.) Hand.-Mazz.	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		58	29	2x	3,200	PH	OWT	潘跃芝等, 2004
菊科 Asteraceae	橐吾属 <i>Ligularia</i>	<i>L. purdomii</i> (Turrill) Chittenden	四川红原 Hongyuan, Sichuan		58	29	2x		PH	OWT	Liu, 2004
菊科 Asteraceae	橐吾属 <i>Ligularia</i>	<i>L. stenocephala</i> Matsum. & Koidzumi	云南大理 Dali, Yunnan		58	29	2x		PH	OWT	龚洵等, 2001
菊科 Asteraceae	橐吾属 <i>Ligularia</i>	<i>L. tangutorum</i> Pojarkova	青海玛沁 Maqin, Qinghai		58	29	2x	3,200	PH	OWT	Liu, 2004
菊科 Asteraceae	橐吾属 <i>Ligularia</i>	<i>L. tongolensis</i> (Franch.) Hand. -Mazz.	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		58	29	2x	3,200	PH	OWT	潘跃芝等, 2004a
菊科 Asteraceae	橐吾属 <i>Ligularia</i>	<i>L. tsangchanensis</i> (Franchet.) Handel-Mazzetti	云南大理 Dali, Yunnan		58	29	2x	3,000	PH	OWT	Liu, 2004
菊科 Asteraceae	橐吾属 <i>Ligularia</i>	<i>L. vellea</i> Hand. -Mazz.	云南丽江 Lijiang, Yunnan		58	29	2x		PH	OWT	龚洵等, 2001
菊科 Asteraceae	橐吾属 <i>Ligularia</i>	<i>L. virgaurea</i> (Maximowicz) Mattfeld <i>ex</i> Rehder & Kobuski	四川若尔盖 Ruoergai, Sichuan		58	29	2x		PH	OWT	Liu, 2004
菊科 Asteraceae	橐吾属 <i>Ligularia</i>	<i>L. virgaurea</i> (Maximowicz) Mattfeld <i>ex</i> Rehder & Kobuski	青海玛沁 Maqin, Qinghai		87	29	3x	3,700	PH	OWT	Liu, 2004
菊科 Asteraceae	橐吾属 <i>Ligularia</i>	<i>L. yunnanensis</i> (Franch.) Chang	云南大理 Dali, Yunnan		58	29	2x	3,600	PH	OWT	潘跃芝等, 2004
菊科 Asteraceae	鼠麴草属 <i>Gnaphalium</i>	<i>G. affine</i> D. Don	四川宝兴 Baoxing, Sichuan		16	8	2x	1,500	AH	EA	Hong & Zhang, 1990
菊科 Asteraceae	肉菊属 <i>Stebbinsia</i>	<i>S. umbrella</i> (Franch.) Lipschitz	西藏林芝色季拉 Sejila, Linzhi, Tibet		16	8	2x	4,450	PH	EA	Zhang et al, 2007
菊科 Asteraceae	毛鳞菊属 <i>Chaetoseris</i>	<i>C. beesiana</i> (Diels) C. Shih	云南丽江 Lijiang, Yunnan		16	8	2x	2,790	PH	EA	Deng et al, 2011
菊科 Asteraceae	毛鳞菊属 <i>Chaetoseris</i>	<i>C. cyanea</i> (D. Don) C. Shih	云南大理 Dali, Yunnan		16	8	2x	2,419	PH	EA	Deng et al, 2011
菊科 Asteraceae	毛鳞菊属 <i>Chaetoseris</i>	<i>C. cyanea</i> (D. Don) C. Shih	云南大理 Dali, Yunnan		16	8	2x	2,540	PH	EA	Deng et al, 2011
菊科 Asteraceae	毛鳞菊属	<i>C. dolichophylla</i> Shih	云南丽江 Lijiang, Yunnan		16	8	2x	2,790	PH	EA	Deng et al, 2011

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
	<i>Chaetoseris</i>										
菊科 Asteraceae	毛鳞菊属	<i>C. grandiflora</i> (Franch.) Shih	云南贡山 Gongshan, Yunnan		16	8	2x	3,130	PH	EA	Deng et al, 2011
	<i>Chaetoseris</i>										
菊科 Asteraceae	毛鳞菊属	<i>C. hastata</i> (Wall. ex DC.) Shih	云南贡山 Gongshan, Yunnan		16	8	2x	3,130	PH	EA	Deng et al, 2011
	<i>Chaetoseris</i>										
菊科 Asteraceae	毛鳞菊属	<i>C. likiangensis</i> (Franch.) Shih	云南丽江 Lijiang, Yunnan		16	8	2x	2,790	PH	EA	Deng et al, 2011
	<i>Chaetoseris</i>										
菊科 Asteraceae	毛鳞菊属	<i>C. lyriformis</i> Shih	四川康定 Kangding, Sichuan		16	8	2x	3,289	PH	EA	Deng et al, 2011
	<i>Chaetoseris</i>										
菊科 Asteraceae	毛鳞菊属	<i>C. lyriformis</i> Shih	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		16	8	2x	3,164	PH	EA	Deng et al, 2011
	<i>Chaetoseris</i>										
菊科 Asteraceae	毛鳞菊属	<i>C. taliensis</i> Shih	云南丽江 Lijiang, Yunnan		16	8	2x	2,790	PH	EA	Deng et al, 2011
	<i>Chaetoseris</i>										
菊科 Asteraceae	毛连菜属 <i>Picris</i>	<i>P. hieracioides</i> L. subsp. <i>japonica</i> Krylv.	四川宝兴 Baoxing, Sichuan		14	7	2x	2,600	AH	NT	Hong & Zhang, 1990
	毛冠菊属	<i>N. gynura</i> (C. Winkler) Ling & Y. L. Chen	青海玉树 Yushu, Qinghai		18	9	2x	3,600	PH	EC	刘建全等, 2000a
菊科 Asteraceae	橐吾属 <i>Nannoglottis</i>										
菊科 Asteraceae	橐吾属 <i>Nouelia</i>	<i>N. insignis</i> Franch.	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		54	9	6x	1,988	W	EC	彭玉兰等, 2002
菊科 Asteraceae	苦苣菜属 <i>Sonchus</i>	<i>S. arvensis</i> L.	四川峨眉山 Emei Mt., Sichuan	8		8	2x	1,700	PH	NT	Hong & Zhang, 1990
菊科 Asteraceae	绢毛苣属 <i>Soroseris</i>	<i>S. erysimoides</i> (H. -M.) C. Shih	西藏类乌齐 Leiwuqi, Tibet		16	8	2x	4,500	AH	EC	Zhang et al, 2009
菊科 Asteraceae	绢毛苣属 <i>Soroseris</i>	<i>S. erysimoides</i> (H. -M.) C. Shih	西藏南木林县 Nammulin, Tibet		16	8	2x	4,200	PH	EC	Zhang et al, 2009
菊科 Asteraceae	绢毛苣属 <i>Soroseris</i>	<i>S. gillii</i> (S. Moore) Stebbins	四川甘孜 Ganzi, Sichuan		42	7	6x		PH	CA	Zhang et al, 1998
菊科 Asteraceae	绢毛苣属 <i>Soroseris</i>	<i>S. gillii</i> (S. Moore) Stebbins	四川雅安 Ya'an, Sichuan		42	7	6x		PH	OWT	Zhang et al, 1998

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
菊科 Asteraceae	绢毛苣属 <i>Soroseris</i>	<i>S. glomerata</i> (Decne.) Stebbins	云南德钦白马山 Baima Mt., Deqin, Yunnan		16	8	2x	4,600	PH	EA	Zhang et al, 2007
菊科 Asteraceae	绢毛苣属 <i>Soroseris</i>	<i>S. glomerata</i> (Decne.) Stebbins	四川康定折多山 Zheduo Mt., Kangding, Sichuan		16	8	2x	4,500	PH	EA	Zhang et al, 2007
菊科 Asteraceae	绢毛苣属 <i>Soroseris</i>	<i>S. hirsuta</i> (Anth.) C. Shih	四川康定折多山 Zheduo Mt., Kangding, Sichuan		32	8	4x	4,400	PH	EA	Zhang et al, 2007
菊科 Asteraceae	绢毛苣属 <i>Soroseris</i>	<i>S. hirsuta</i> (Anth.) C. Shih	云南中甸红山 Hong Mt., Zhongdian, Yunnan		16	8	2x	4,420	PH	EA	Zhang et al, 2007
菊科 Asteraceae	绢毛苣属 <i>Soroseris</i>	<i>S. hookeriana</i> (C. B. Clarke) Stebbins	西藏羊八井雪古拉 Xuegula, Yangbajing, Tibet		16	8	2x	5,500	PH	EA	Zhang et al, 2007
菊科 Asteraceae	绢毛苣属 <i>Soroseris</i>	<i>S. teres</i> C. Shih	云南德钦白马山 Baima Mt., Deqin, Yunnan		32	8	4x	4,620	PH	EA	Zhang et al, 2007
菊科 Asteraceae	绢蒿属 <i>Seriphidium</i>	<i>S. borotalense</i> (Poljak.) Ling et Y. R.	新疆博乐县 Bole, Xinjiang		18	9	2x	447	PH	NT	贺学礼和张妙娟, 2009
菊科 Asteraceae	绢蒿属 <i>Seriphidium</i>	<i>S. minchiuensis</i> Y. R.	甘肃民勤 Minqin, Gansu		18	9	2x	1,436	PH	NT	贺学礼和张妙娟, 2009
菊科 Asteraceae	菊属 <i>Dendranthema</i>	<i>D. glabriusculum</i> (W. W. Sm.) C. Shih	四川昭觉 Zhaojue, Sichuan		54	9	6x	1,950	PH	OWT	Kondo et al, 1998
菊科 Asteraceae	菊属 <i>Dendranthema</i>	<i>D. lavandulifolium</i> (Fisch. ex Trautv.) Y. Ling & C. Shih	云南云龙 Yunlong, Yunnan		36	18	2x	2,800	PH	NT	汪劲武等, 1993
菊科 Asteraceae	菊属 <i>Aster</i>	<i>A. diplostephioides</i> Benth. & Hook. F.	青海玉树 Yushu, Qinghai		18	9	2x	3,850	PH	NT	刘建全, 1999
菊科 Asteraceae	菊属 <i>Aster</i>	<i>A. nitidus</i> Chang	四川理县 Lixian County, Sichuan		16	8	2x	2,100	PH	NT	殷根深等, 2010
菊科 Asteraceae	菊属 <i>Aster</i>	<i>A. souliei</i> Franchet J.	青海玉树 Yushu, Qinghai		18	9	2x	3,950	PH	NT	刘建全, 1999

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
菊科 Asteraceae	菊属 <i>Aster</i>	<i>A. yunnanensis</i> var. <i>labrangensis</i> (Handel-Mazzetti) Y. Ling	青海玉树 Yushu, Qinghai		18	9	2x	3,850	W	NT	刘建全, 1999
菊科 Asteraceae	火绒草属 <i>Leontopodium</i>	<i>L. artemisiifolium</i> Beauverd	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		26	12	2x	2,873	PH	NT	Anton et al, 2013
菊科 Asteraceae	火绒草属 <i>Leontopodium</i>	<i>L. calocephalum</i> (Franch) P. Beauv	四川甘孜 Ganzi, Sichuan		48	12	4x	4,012	PH	NT	王广艳等, 2013
菊科 Asteraceae	火绒草属 <i>Leontopodium</i>	<i>L. cf. stracheyi</i> C.B.Clarke ex Hemsl	云南维西 Weixi, Yunnan		26	13	2x	2,868	PH	NT	Anton et al, 2013
菊科 Asteraceae	火绒草属 <i>Leontopodium</i>	<i>L. dedekensii</i> Beauverd	云南奔子栏 Benzilan, Yunnan		26	13	2x	2,780	PH	NT	Anton et al, 2013
菊科 Asteraceae	火绒草属 <i>Leontopodium</i>	<i>L. dedekensii</i> Beauverd	云南丙中洛 Bingzhongluo, Yunnan		26	13	2x	1,692	PH	NT	Anton et al, 2013
菊科 Asteraceae	火绒草属 <i>Leontopodium</i>	<i>L. dedekensii</i> Beauverd	云南德钦 Deqin, Yunnan		26	13	2x	2,997	PH	NT	Anton et al, 2013
菊科 Asteraceae	火绒草属 <i>Leontopodium</i>	<i>L. franchetii</i> Beauv.	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		26	13	2x	3,406	PH	NT	王广艳等, 2013
菊科 Asteraceae	火绒草属 <i>Leontopodium</i>	<i>L. himalayanum</i> DC.	云南德钦 Deqin, Yunnan		24	12	2x	4,316	PH	NT	Anton et al, 2013
菊科 Asteraceae	火绒草属 <i>Leontopodium</i>	<i>L. japonicum</i> Miq.	Living collection of the University of Vienna Botanical Garden		26	13	2x		PH	NT	Anton et al, 2013
菊科 Asteraceae	火绒草属 <i>Leontopodium</i>	<i>L. japonicum</i> Miq.	Living collection of the University of Vienna		52	13	4x		PH	NT	Anton et al, 2013

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
Botanical Garden											
菊科 Asteraceae	火绒草属 <i>Leontopodium</i>	<i>L. muscoides</i> Handel-Mazzetti	云南贡山 Gongshan, Yunnan		36	18	2x	3,300	PH	NT	Meng et al, 2005a
菊科 Asteraceae	火绒草属 <i>Leontopodium</i>	<i>L. nanum</i> J. D. Hooker & Thomson ex C. B. Clarke	云南维西 Weixi, Yunnan		56	14	4x	4,100	AH	NT	Meng et al, 2005b
菊科 Asteraceae	火绒草属 <i>Leontopodium</i>	<i>L. pusillum</i> Beauverd	云南张店 Zhangdian, Yunnan		76	19	4x	4,150	AH	NT	Meng et al, 2005b
菊科 Asteraceae	火绒草属 <i>Leontopodium</i>	<i>L. sinense</i> Hemsl.	四川木里 Muli, Sichuan		26	13	2x	2,406	W	NT	王广艳等, 2013
菊科 Asteraceae	火绒草属 <i>Leontopodium</i>	<i>L. sinense</i> Hemsl.	四川木里 Muli, Sichuan		52	13	2x	3,074	W	NT	王广艳等, 2013
菊科 Asteraceae	火绒草属 <i>Leontopodium</i>	<i>L. sinense</i> Hemsl. ex Forb. & Hemsl	云南鹤庆 Heqing, Yunnan		48	12	4x	2,033	W	NT	Anton et al, 2013
菊科 Asteraceae	火绒草属 <i>Leontopodium</i>	<i>L. sinense</i> Hemsley	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		56	14	4x	4,400	AH	NT	Meng et al, 2005b
菊科 Asteraceae	火绒草属 <i>Leontopodium</i>	<i>L. souliei</i> Beauv.	四川木里 Muli, Sichuan		24	12	2x	3,669	PH	NT	王广艳等, 2013
菊科 Asteraceae	火绒草属 <i>Leontopodium</i>	<i>L. souliei</i> Beauverd	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		56	14	4x	4,100	AH	NT	Meng et al, 2005b
菊科 Asteraceae	火绒草属 <i>Leontopodium</i>	<i>L. stracheyi</i> Clarke ex Hemsl	四川甘孜 Ganzi, Sichuan		48	12	4x	4,174	PH	NT	王广艳等, 2013
菊科 Asteraceae	黄鹌菜属 <i>Youngia</i>	<i>Y. erythrocarpa</i> (Vaniot) Bab. & Stebbins	四川宝兴 Baoxing, Sichuan		14	7	2x	2,500	PH	NT	Hong & Zhang, 1990

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
菊科 Asteraceae	黄鹌菜属 <i>Youngia</i>	<i>Y. heterophylla</i> (Hemsl.) Babcock & Stebbins	四川峨眉山 Emei Mt., Sichuan		16	8	2x	1,600	PH	NT	Hong & Zhang, 1990
菊科 Asteraceae	华蟹甲属 <i>Sinacalia</i>	<i>S. tangutica</i> (Maxim.) B. Nord.	Xunhua & Huzhu, Qinghai		60	30	2x	1,800	PH	EC	刘建全, 2000
菊科 Asteraceae	合头菊属 <i>Syncalathium</i>	<i>S. chrysocephalum</i> (C. Shih) S.W. Liu	西藏亚东帕里 Pali, Yadong, Tibet		16	8	2x	4,100	PH	EA	Zhang et al, 2007
菊科 Asteraceae	合头菊属 <i>Syncalathium</i>	<i>S. disciforme</i> (Mattf.) Y. Ling	西藏昌都达马拉龙 Damalalong, Changdu, Tibet		16	8	2x	4,650	AH	EC	Zhang et al, 2007
菊科 Asteraceae	合头菊属 <i>Syncalathium</i>	<i>S. kawaguchii</i> (Kitam.) Y. Ling	云南德钦白马山 Baima Mt., Deqin, Yunnan		16	8	2x	4,260	PH	EC	Zhang et al, 2007
菊科 Asteraceae	合头菊属 <i>Syncalathium</i>	<i>S. kawaguchii</i> (Kitam.) Y. Ling	云南巧家药山 Yaoshan, Qiaojia, Yunnan		32	8	4x	3,850	PH	EA	Zhang et al, 2007
菊科 Asteraceae	合头菊属 <i>Syncalathium</i>	<i>S. pilosum</i> (Y. Ling) C. Shih	云南中甸红山 Hong Mt., Zhongdian, Yunnan		16	8	2x	4,400	PH	EC	Zhang et al, 2007
菊科 Asteraceae	合头菊属 <i>Syncalathium</i>	<i>S. souliei</i> (Franch.) Y. Ling	西藏南木林秋木乡 Qiumuxiang, Namulin, Tibet		16	8	2x	4,950	PH	EA	Zhang et al, 2007
菊科 Asteraceae	合头菊属 <i>Syncalathium</i>	<i>S. souliei</i> (Franch.) Y. Ling	西藏亚东则里拉山口 Zelila Mt., Yadong, Tibet		16	8	2x	4,200	PH	EA	Zhang et al, 2007
菊科 Asteraceae	蒿属 <i>Artemisia</i>	<i>A. minor</i> Jacq. C. B. Clarke	云南丽江 Lijiang, Yunnan		18	9	2x	3,600	PH	NT	顾志建等, 1993
菊科 Asteraceae	还阳参属 <i>Crepis</i>	<i>C. flexuosa</i> (Ledeb.) C. B. Clarke	青海玉树 Yushu, Qinghai		24	12	2x	4,600	PH	EA	顾志建等, 1993
菊科 Asteraceae	狗娃花属 <i>Heteropappus</i>	<i>H. crenatifolius</i> (Hand. -Mazz.) Griers.	四川红原 Hongyuan, Sichuan		18	9	2x	3,540	AH	EA	陈建国等, 2010
菊科 Asteraceae	风毛菊属 <i>Saussurea</i>	<i>S. acrourea</i> Cummins	甘肃甘南合作 Hezuo, Gannan, Gansu		26	13	2x		PH	NT	李霞, 2014

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
菊科 Asteraceae	风毛菊属 <i>Saussurea</i>	<i>S. brunneopilosa</i> Hand. -Mazz.	甘肃临潭 Lintan, Gansu		30	15	2x	4,000	PH	NT	王一峰等, 2008
菊科 Asteraceae	风毛菊属 <i>Saussurea</i>	<i>S. caudata</i> Franch.	四川九寨沟 Jiuzhaigou, Sichuan		30	15	2x	2,413	PH	NT	尚宝龙等, 2014
菊科 Asteraceae	风毛菊属 <i>Saussurea</i>	<i>S. ceterach</i> Hand. -Mazz.	青海囊谦 Nangqian, Qinghai		30	15	2x	3,940	PH	NT	He et al, 2002c
菊科 Asteraceae	风毛菊属 <i>Saussurea</i>	<i>S. chingiana</i> Hand.-Mazz.	甘肃夏河 Xiahe, Gansu		28	14	2x	3,100	PH	NT	王一峰等, 2010
菊科 Asteraceae	风毛菊属 <i>Saussurea</i>	<i>S. columnaris</i> Hand. -Mazz.	云南香格里拉 Shangri-la, Yunnan		32	16	2x	4,436	PH	NT	李双智等, 2013
菊科 Asteraceae	风毛菊属 <i>Saussurea</i>	<i>S. dschungdienensis</i> Hand. -Mazz.	西藏波密嘎龙拉 Galongla, Bomi, Tibet		32	16	2x	4,080	PH	NT	陈光富等, 2013
菊科 Asteraceae	风毛菊属 <i>Saussurea</i>	<i>S. eopygmaea</i> Hand. -Mazz.	青海玉树 Yushu, Qinghai		30	15	2x	4,060	PH	NT	He et al, 2002c
菊科 Asteraceae	风毛菊属 <i>Saussurea</i>	<i>S. epilobioides</i> Maxim.	甘肃玛曲 Maqu, Gansu		24	12	2x	3,420	PH	NT	王一峰等, 2006
菊科 Asteraceae	风毛菊属 <i>Saussurea</i>	<i>S. globosa</i> Chen	四川稻城 Daocheng, Sichuan		34	17	2x	4,039	PH	NT	李双智等, 2013
菊科 Asteraceae	风毛菊属 <i>Saussurea</i>	<i>S. globosa</i> Chen.	青藏高原东缘高寒草甸 Alpine meadow in the eastern margin of the Tibetan Plateau		32	16	2x	3,500	PH	NT	王一峰等, 2007
菊科 Asteraceae	风毛菊属 <i>Saussurea</i>	<i>S. gnaphalodes</i> (Royle) Sch. Bip.	青海巴颜喀拉山 Bayankala Mt., Qinghai		c. 21	7	3x	5,200	PH	C	Huang et al, 1996a
菊科 Asteraceae	风毛菊属 <i>Saussurea</i>	<i>S. graminea</i> Dunn	甘肃迭部 Diebu, Gansu		28	14	2x	3,930	PH	NT	王一峰等, 2008
菊科 Asteraceae	风毛菊属 <i>Saussurea</i>	<i>S. graminea</i> Dunn	四川甘孜 Ganzi, Sichuan		28	14	2x	4,904	PH	NT	李双智等, 2013
菊科 Asteraceae	风毛菊属 <i>Saussurea</i>	<i>S. hieracioides</i> Hook. F.	甘肃玛曲 Maqu, Gansu		32	16	2x	3,520	PH	NT	王一峰等, 2006
菊科 Asteraceae	风毛菊属 <i>Saussurea</i>	<i>S. hieracioides</i> Hook. F.	西藏芒康洛尼 Luoni, Mangkang, Tibet		36	18	2x	3,590	PH	NT	陈光富等, 2013
菊科 Asteraceae	风毛菊属 <i>Saussurea</i>	<i>S. hieracioides</i> Hook. F.	四川巴塘 Batang, Sichuan		32	16	2x	4,223	PH	NT	李双智等, 2013
菊科 Asteraceae	风毛菊属 <i>Saussurea</i>	<i>S. iodostegia</i> Hance	甘肃甘南曲河沟 Quhegou, Gannan, Gansu		32	16	2x	4,000	PH	NT	王一峰等, 2010

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
菊科 Asteraceae	风毛菊属 <i>Saussurea</i>	<i>S. japonica</i> Maxim.	甘肃迭部 Diebu, Gansu		28	14	2x	2,300	PH	NT	王转莉和王一峰, 2013
菊科 Asteraceae	风毛菊属 <i>Saussurea</i>	<i>S. japonica</i> Maxim.	甘肃甘南卓尼车巴沟 Zhuonichebagou, Gannan, Gansu		28	14	2x	2,700	PH	NT	王转莉和王一峰, 2013
菊科 Asteraceae	风毛菊属 <i>Saussurea</i>	<i>S. japonica</i> Maxim.	甘肃甘南卓尼尼巴乡 Zhuonibaxiang, Gannan, Gansu		28	14	2x	3,000	PH	NT	王转莉和王一峰, 2013
菊科 Asteraceae	风毛菊属 <i>Saussurea</i>	<i>S. japonica</i> Maxim.	甘肃甘南卓尼旗布寺 Zhuoniqibuchi, Gannan, Gansu		28	14	2x	2,550	PH	NT	王转莉和王一峰, 2013
菊科 Asteraceae	风毛菊属 <i>Saussurea</i>	<i>S. Kansuensis</i> Hand. -Mazz.	甘肃迭部光盖山 Guanggai Mt., Diebu, Gansu		26	13	2x	3,200	PH	NT	高天鹏等, 2009
菊科 Asteraceae	风毛菊属 <i>Saussurea</i>	<i>S. katochaete</i> Maxim.	甘肃玛曲 Maqu, Gansu		32	16	2x	4,150	PH	NT	李淮等, 2008
菊科 Asteraceae	风毛菊属 <i>Saussurea</i>	<i>S. katochaete</i> Maxim.	四川白玉 Baiyu, Sichuan		32	16	2x	4,437	PH	NT	李双智等, 2013
菊科 Asteraceae	风毛菊属 <i>Saussurea</i>	<i>S. leontodontoides</i> (DC.) Hand. -Mazz.	西藏芒康 Mangkang, Tibet		32	16	2x	4,096	PH	NT	张永增等, 2011
菊科 Asteraceae	风毛菊属 <i>Saussurea</i>	<i>S. likiangensis</i> Franch.	西藏察隅德姆拉 Chaoudemula, Tibet		32	16	2x	3,640	PH	NT	陈光富等, 2013
菊科 Asteraceae	风毛菊属 <i>Saussurea</i>	<i>S. macrotia</i> Franch.	甘肃卓尼 Zhuoni, Gansu		26	13	2x	3,100	PH	NT	高天鹏等, 2009
菊科 Asteraceae	风毛菊属 <i>Saussurea</i>	<i>S. medusa</i> Maxim.	甘肃玛曲 Maqu, Gansu		34	17	2x	4,400	PH	NT	王一峰等, 2008
菊科 Asteraceae	风毛菊属 <i>Saussurea</i>	<i>S. mongolica</i> (Franch.) Franch.	甘肃迭部 Diebu, Gansu		26	13	2x	3,000	PH	NT	王一峰等, 2008
菊科 Asteraceae	风毛菊属 <i>Saussurea</i>	<i>S. nigrescens</i> Maxim.	青藏高原东缘高寒草甸 Alpine meadow in the eastern margin of the Tibetan Plateau		32	16	2x	3,500	PH	NT	王一峰等, 2007
菊科 Asteraceae	风毛菊属 <i>Saussurea</i>	<i>S. parviflora</i> (Poir.) DC	甘肃甘南合作 Hezuo, Gannan,		26	13	2x		PH	NT	李霞, 2014

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
Gansu											
菊科 Asteraceae	风毛菊属 <i>Saussurea</i>	<i>S. peduncularis</i> Franch.	四川乡城正斗 Zhengdou, Xiangcheng, Sichuan		32	16	2x	2,873	W	EA	陈光富等, 2013
菊科 Asteraceae	风毛菊属 <i>Saussurea</i>	<i>S. pinnatidentata</i> Lipsch.	青藏高原东缘高寒草甸 Alpine meadow in the eastern margin of the Tibetan Plateau		28	16	2x	3,500	PH	NT	王一峰等, 2007
菊科 Asteraceae	风毛菊属 <i>Saussurea</i>	<i>S. polycolea</i> Hand. -Mazz.	甘肃迭部 Diebu, Gansu		32	16	2x	3,400	PH	NT	王一峰等, 2008
菊科 Asteraceae	风毛菊属 <i>Saussurea</i>	<i>S. polycolea</i> Hand. -Mazz.var. <i>acutisquama</i>	四川白玉 Baiyu, Sichuan		32	16	2x	4,437	PH	NT	李双智等, 2013
菊科 Asteraceae	风毛菊属 <i>Saussurea</i>	<i>S. przewalskii</i> Maximowicz	西藏类乌齐 Leiwuqi, Tibet		32	16	2x	4,030	PH	NT	岳学坤等, 2008
菊科 Asteraceae	风毛菊属 <i>Saussurea</i>	<i>S. przewalskii</i> Maximowicz	甘肃迭部 Diebu, Gansu		32	16	2x	4,000	PH	NT	李淮等, 2008
菊科 Asteraceae	风毛菊属 <i>Saussurea</i>	<i>S. retroserrata</i> Y. L. Chen et S. Y. Liang	四川冕宁 Mianning, Sichuan		16	8	2x	1,455	W	OWT	陈光富等, 2013
菊科 Asteraceae	风毛菊属 <i>Saussurea</i>	<i>S. sobarocephala</i> Diels	四川德格 Dege, Sichuan		34	17	2x	4,200	PH	NT	岳学坤等, 2008
菊科 Asteraceae	风毛菊属 <i>Saussurea</i>	<i>S. stella</i> Maxim.	甘肃甘南合作 Hezuo, Gannan, Gansu		30	15	2x	2,900	PH	NT	王一峰等, 2008
菊科 Asteraceae	风毛菊属 <i>Saussurea</i>	<i>S. subulisquama</i> Hand. -Mazz.	甘肃玛曲 Maqu, Gansu		30	15	2x	3,420	PH	NT	王一峰等, 2008
菊科 Asteraceae	风毛菊属 <i>Saussurea</i>	<i>S. sylvatica</i> Maxim	青藏高原东缘高寒草甸 Alpine meadow in the eastern margin of the Tibetan Plateau		34	16	2x	3,500	PH	NT	王一峰等, 2007
菊科 Asteraceae	风毛菊属 <i>Saussurea</i>	<i>S. tangutica</i> Maxim.	甘肃夏河 Xiahe, Gansu		34	17	2x	3,680	PH	NT	王一峰等, 2008
菊科 Asteraceae	风毛菊属 <i>Saussurea</i>	<i>S. tangutica</i> Maxim.	青海玛多 Maduo, Qinghai		c.42	7	6x	4,840	PH	C	Huang et al, 1996a
菊科 Asteraceae	风毛菊属 <i>Saussurea</i>	<i>S. tatsienensis</i> Franch.	西藏芒康 Mangkang, Tibet		34	17	2x	4,096	PH	NT	陆覃昱等, 2010

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
菊科 Asteraceae	风毛菊属 <i>Saussurea</i>	<i>S. undulata</i> Hand. -Mazz.	甘肃夏河 Xiahe, Gansu		26	13	2x	2,100	PH	NT	高天鹏等, 2009
菊科 Asteraceae	风毛菊属 <i>Saussurea</i>	<i>S. ussuriensis</i> Maxim.	甘肃迭部 Diebu, Gansu		24	12	2x	2,800	PH	NT	王一峰等, 2008
菊科 Asteraceae	风毛菊属 <i>Saussurea</i>	<i>S. variiloba</i> Ling	甘肃甘南合作 Hezuo, Gannan, Gansu		26	13	2x		PH	NT	李霞, 2014
菊科 Asteraceae	风毛菊属 <i>Saussurea</i>	<i>S. wellbyi</i> Hemsl.	青海玛多 Maduo, Qinghai		44	11	4x	4,000	PH	EC	Huang et al, 1996a
菊科 Asteraceae	飞蓬属 <i>Erigeron</i>	<i>E. annuus</i> Pers.	四川峨眉山 Emei Mt., Sichuan	7		7	2x	800	AH	C	Hong & Zhang, 1990
菊科 Asteraceae	飞蓬属 <i>Erigeron</i>	<i>E. breviscapus</i> (Vant.) Hand. -Mazz.	云南丽江玉龙雪山 Yulong Mt., Lijiang, Yunnan		18	9	2x	2,700	PH	C	冯定霞等, 2002
菊科 Asteraceae	垂头菊属 <i>Cremanthodium</i>	<i>C. brunneopilosum</i> S. W. Liu	四川红原 Hongyuan, Sichuan		58	29	2x	3,900	PH	EA	Liu et al, 2001
菊科 Asteraceae	垂头菊属 <i>Cremanthodium</i>	<i>C. discoideum</i> Maximowicz Bull	青海玛多 Maduo, Qinghai		58	29	2x	4,900	PH	EA	Liu et al, 2001
菊科 Asteraceae	垂头菊属 <i>Cremanthodium</i>	<i>C. ellisii</i> (Hook. f.) S. Kitamura	青海玛多 Maduo, Qinghai		116	29	4x	4,800	PH	EA	Huang et al, 1996a
菊科 Asteraceae	垂头菊属 <i>Cremanthodium</i>	<i>C. ellisii</i> (J. D. Hooker) Kitamura	青海玉树 Yushu, Qinghai		58	29	2x	4,500	PH	EA	Liu et al, 2001
菊科 Asteraceae	垂头菊属 <i>Cremanthodium</i>	<i>C. humile</i> Maxim.	青海巴颜喀拉山 Bayankala Mt., Qinghai		48	12	4x	5,200	PH	NT	Huang et al, 1996a
菊科 Asteraceae	垂头菊属 <i>Cremanthodium</i>	<i>C. humile</i> Maximowicz Bull	青海玛沁 Maqin, Qinghai		60	30	2x	4,300	PH	EA	Liu et al, 2001
菊科 Asteraceae	垂头菊属 <i>Cremanthodium</i>	<i>C. lineare</i> Maximowicz Bull	青海玛多 Maduo, Qinghai		58	29	2x	4,500	PH	EA	Liu et al, 2001
菊科 Asteraceae	垂头菊属	<i>C. microglossum</i> S. W. Liu	青海玉树 Yushu, Qinghai		58	29	2x	4,700	PH	EA	Liu et al, 2001

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
	<i>Cremanthodium</i>										
菊科 Asteraceae	垂头菊属 <i>Cremanthodium</i>	<i>C. stenoglossum</i> Y. Ling & S. W. Liu	青海玛多 Maduo, Qinghai		58	29	2x	5,000	PH	EA	Liu et al, 2001
菊科 Asteraceae	帚菊属 <i>Pertya</i>	<i>P. berberidoides</i> (Handel-Mazzetti) Y. C. Tseng	四川巴塘 Batang, Sichuan		64	16	4x	3,978	PH	NT	陈光富等, 2013
菊科 Asteraceae	莴苣属 <i>Lactuca</i>	<i>L. indica</i> (L.) Shih	四川泸州 Luzhou, Sichuan		18	9	2x		PH	OWT	蔡仕钰等, 2011
苦苣苔科 Gesneriaceae	直瓣苣苔属 <i>Ancylostemon</i>	<i>A. aureus</i> (Franch.) B. L. Burtt	云南宾川 Binchuan, Yunnan		34	17	2x		PH	EC	王印政和顾志建, 1999
苦苣苔科 Gesneriaceae	珊瑚苣苔属 <i>Corallodiscus</i>	<i>C. flabellatus</i> (Craib) B. L. Burtt	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		40	10	4x		PH	EA	鲁元学等, 2002b
昆栏树科 Trochodendraceae	水青树属 <i>Tetracentron</i>	<i>T. sinense</i> Oliver	云南贡山 Gongshan, Yunnan		38	19	2x		W	EA	Xue et al, 2008
兰科 Orchidaceae	紫斑兰属 <i>Hemipiliopsis</i>	<i>H. purpureopunctata</i> (K. Y. Lang) Y. B. Luo and S. C. Chen	西藏林芝 Linzhi, Tibet		42	21	2x	2,550	PH	EC	Luo, 2004
兰科 Orchidaceae	玉凤花属 <i>Habenaria</i>	<i>H. aitchisonii</i> Rchb. f. ex Aitch. & Hemsl.	云南鹤庆 Heqing, Yunnan		32	16	2x	2,300	PH	NT	Luo, 2004
兰科 Orchidaceae	玉凤花属 <i>Habenaria</i>	<i>H. aitchisonii</i> Rchb. f. ex Aitch. & Hemsl.	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		64	16	4x	2,550	PH	NT	Luo, 2004
兰科 Orchidaceae	玉凤花属 <i>Habenaria</i>	<i>H. delavayi</i> Finet Rev. Gén	西藏林芝 Linzhi, Tibet		42	21	2x	2,700	PH	NT	Luo, 2004
兰科 Orchidaceae	玉凤花属 <i>Habenaria</i>	<i>H. mairei</i> Schlechter Repert	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		40	20	2x	2,540	PH	NT	Luo, 2004
兰科 Orchidaceae	小红门兰属	<i>P. chusua</i> (D. Don) Soó	云南丽江 Lijiang, Yunnan		c.98	21	4x	3,400	PH	NT	Luo, 2004

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
	<i>Ponerorchis</i>										
兰科 Orchidaceae	小红门兰属	<i>P. chusua</i> (D. Don) Soó	云南维西 Weixi, Yunnan		42	21	2x	2,630	PH	NT	Luo, 2004
	<i>Ponerorchis</i>										
兰科 Orchidaceae	小红门兰属	<i>P. chusua</i> (D. Don) Soó	云南维西 Weixi, Yunnan		42	21	2x	3,300	PH	NT	Luo, 2004
	<i>Ponerorchis</i>										
兰科 Orchidaceae	小红门兰属	<i>P. chusua</i> (D. Don) Soó	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		42	21	2x	2,700	PH	NT	Luo, 2004
	<i>Ponerorchis</i>										
兰科 Orchidaceae	小红门兰属	<i>P. chusua</i> (D. Don) Soó	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		63	21	3x	3,600	PH	NT	Luo, 2004
	<i>Ponerorchis</i>										
兰科 Orchidaceae	舌喙兰属 <i>Hemipilia</i>	<i>H. cruciata</i> Finet	云南丽江 Lijiang, Yunnan		42	21	2x	2,450	PH	EA	Luo, 2004
兰科 Orchidaceae	舌喙兰属 <i>Hemipilia</i>	<i>H. cruciata</i> Finet	云南丽江 Lijiang, Yunnan		42	21	2x	2,520	PH	EA	Luo, 2004
兰科 Orchidaceae	舌喙兰属 <i>Hemipilia</i>	<i>H. cruciata</i> Finet	云南丽江 Lijiang, Yunnan		42	21	2x	2,620	PH	EA	Luo, 2004
兰科 Orchidaceae	舌喙兰属 <i>Hemipilia</i>	<i>H. cruciata</i> Finet	云南丽江 Lijiang, Yunnan		42	21	2x	2,700	PH	EA	Luo, 2004
兰科 Orchidaceae	舌喙兰属 <i>Hemipilia</i>	<i>H. cruciata</i> Finet	云南丽江 Lijiang, Yunnan		42	21	2x	2,780	PH	EA	Luo, 2004
兰科 Orchidaceae	舌喙兰属 <i>Hemipilia</i>	<i>H. flabellata</i> Bureau & Franch.	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		42	21	2x	2,810	PH	EA	Luo, 2004
兰科 Orchidaceae	舌喙兰属 <i>Hemipilia</i>	<i>H. flabellata</i> Bureau & Franch.	云南鹤庆 Heqing, Yunnan		42	21	2x	2,100	PH	EA	Luo, 2004
兰科 Orchidaceae	兰属 <i>Cymbidium</i>	<i>C. eburneum</i> Lindley	云南保山 Baoshan, Yunnan		40	10	4x		PH	TA & TA	李玉阁等, 2003
		<i>C. hookerianum</i> H. G. Reichenbach Gard.	云南腾冲 Tengchong, Yunnan		40	10	4x		PH	TA & TA	李玉阁等, 2004
兰科 Orchidaceae	阔蕊兰属 <i>Peristylus</i>	<i>P. coeloceras</i> Finet Rev. Gén	云南丽江 Lijiang, Yunnan		42	21	2x	2,720	PH	TA & TA	Luo, 2004
兰科 Orchidaceae	盔花兰属 <i>Galearis</i>	<i>G. diantha</i> (Schltr.) P. F. Hunt	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		42	21	2x	3,660	PH	EA & NAD	Luo, 2004
兰科 Orchidaceae	红门兰属 <i>Orchis</i>	<i>O. brevicealcarata</i> (Finet) P. F. Hunt	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		42	21	2x	3,200	PH	NT	Luo, 2004

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
兰科 Orchidaceae	独蒜兰属 <i>Pleione</i>	<i>P. bulbocodioides</i>	云南 Yunnan		120	20	6x		AH	TA	Stergianou 1989
兰科 Orchidaceae	独蒜兰属 <i>Pleione</i>	<i>P. forrestii</i> Schltr.	N. Burma & W. Yunnan		40	20	2x		AH	TA	Stergianou 1989
兰科 Orchidaceae	独蒜兰属 <i>Pleione</i>	<i>P. hookeriana</i> (Lindl.) B.S. Williams	Bhutan; Burma; NE. India; E. Nepal; Tibet, China		40	20	2x		AH	TA	Stergianou 1989
兰科 Orchidaceae	独蒜兰属 <i>Pleione</i>	<i>P. humilis</i> (Sm.) D. Don	Burma, NE. India, Nepal		40	20	2x		AH	TA	Stergianou 1989
兰科 Orchidaceae	独蒜兰属 <i>Pleione</i>	<i>P. limprichtii</i> Pink	四川 Sichuan		80	20	4x		AH	TA	Stergianou 1989
兰科 Orchidaceae	独蒜兰属 <i>Pleione</i>	<i>P. limprichtii</i> Pink	Records are not clear (Sichuan or Burma)		40	20	2x		AH	TA	Stergianou 1989
兰科 Orchidaceae	独蒜兰属 <i>Pleione</i>	<i>p. x confusa</i> P. J. Cribb & C. Z. Tang	N. Burma		40	20	2x		AH	TA	Stergianou 1989
兰科 Orchidaceae	独蒜兰属 <i>Pleione</i>	<i>P. yunnanensis</i> (Rolfe) Rolfe	N. Burma; Yunnan , Sichuan, China		40	20	2x		AH	TA	Stergianou 1989
兰科 Orchidaceae	独活属 <i>Heracleum</i>	<i>H. lanceum</i> (Thunb.) Vujik	云南维西 Weixi, Yunnan		72	18	4x	2,630	PH	OWT	Luo, 2004
兰科 Orchidaceae	独活属 <i>Heracleum</i>	<i>H. monorchis</i> (Linnaeus) R. Brown	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		38	19	2x	3,000	PH	OWT	Luo, 2004
兰科 Orchidaceae	兜兰属 <i>Paphiopedilum</i>	<i>P. armeniacum</i> S. C. Chen et F. Y. Liu	云南西部 The west of Yunnan		26	13	2x	1,700	PH	TA	杨志娟等, 2006
兰科 Orchidaceae	槽舌兰属 <i>Holcoglossum</i>	<i>H. flavescens</i> (Schltr.) Z. H. Tsi	云南宾川 Binchuan, Yunnan		38	19	2x		PH	EA	景望春等, 2007
兰科 Orchidaceae	槽舌兰属 <i>Holcoglossum</i>	<i>H. rupestre</i> (Hand. -Mazz.) Garay	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		38	19	2x		PH	EA	景望春等, 2007
兰科 Orchidaceae	槽舌兰属 <i>Holcoglossum</i>	<i>H. sinicum</i> Christenson	云南宾川 Binchuan, Yunnan		38	19	2x		PH	EA	景望春等, 2007
兰科 Orchidaceae	槽舌兰属 <i>Holcoglossum</i>	<i>H. weixiense</i> X. H. Jin & S. C. Chen	云南维西 Weixi, Yunnan		38	19	2x		PH	EA	景望春等, 2007
蓼科	莽麦属 <i>Fagopyrum</i>	<i>F. crispatifolium</i> J. L. Liu	四川凉山州普格县螺髻山镇 Puge,		32	8	4x	1,900	PH	OWT	刘建林等, 2009

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
Polygonaceae			Liangshan, Sichuan								
蓼科 Polygonaceae	荞麦属 <i>Fagopyrum</i>	<i>F. gracilipes</i> (Hemsl.) Dam. et Diels	四川凉山州普格县螺髻山镇 Puge, Liangshan, Sichuan		32	8	4x	1,910	AH	OWT	刘建林等, 2009
蓼科 Polygonaceae	荞麦属 <i>Fagopyrum</i>	<i>F. qiangcai</i> D. Q. Bai	四川理县 Lixian County, Sichuan		16	8	2x	1,190	AH	OWT	Shao et al, 2011
蓼科 Polygonaceae	荞麦属 <i>Fagopyrum</i>	<i>F. wenchuanense</i> J. R. Shao	四川汶川 Wenchuan, Sichuan		16	8	2x	1,190	AH	OWT	Shao et al, 2011
蓼科 Polygonaceae	大黄属 <i>Rheum</i>	<i>R. alexandrae</i> Batal.	西藏达日 Dari, Tibet		44	22	2x		PH	TA	刘瑞瑞, 2010
蓼科 Polygonaceae	大黄属 <i>Rheum</i>	<i>R. likiangense</i> Sam.	云南丽江 Lijiang, Yunnan		44	22	2x		PH	TA	刘瑞瑞, 2010
蓼科 Polygonaceae	大黄属 <i>Rheum</i>	<i>R. reticulatum</i> A. Los.	青海玛多 Maduo, Qinghai		44	22	2x		PH	TA	刘瑞瑞, 2010
蓼科 Polygonaceae	大黄属 <i>Rheum</i>	<i>R. rhomboideum</i> A. Los.	青海玉树 Yushu, Qinghai		44	22	2x		PH	TA	刘瑞瑞, 2010
蓼科 Polygonaceae	大黄属 <i>Rheum</i>	<i>R. tanguticum</i> Maxim. ex Balf.	青海达卡 Daka, Qinghai		22	11	2x	3,973	PH	TA	胡延萍等, 2007
蓼科 Polygonaceae	大黄属 <i>Rheum</i>	<i>R. tanguticum</i> Maxim. ex Balf.	青海大武 Dawu, Qinghai		22	11	2x	3,960	PH	TA	胡延萍等, 2007
蓼科 Polygonaceae	大黄属 <i>Rheum</i>	<i>R. tanguticum</i> Maxim. ex Balf.	青海吉卡 Jika, Qinghai		22	11	2x	4,018	PH	TA	胡延萍等, 2007
蓼科 Polygonaceae	大黄属 <i>Rheum</i>	<i>R. tanguticum</i> Maxim. ex Balf.	青海柯曲 Kequ, Qinghai		22	11	2x	4,021	PH	TA	胡延萍等, 2007

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
蓼科 Polygonaceae	大黄属 <i>Rheum</i>	<i>R. tanguticum</i> Maxim. ex Balf.	四川松潘 Songpan, Sichuan		22	11	2x	3,413	PH	TA	胡延萍等, 2007
蓼科 Polygonaceae	大黄属 <i>Rheum</i>	<i>R. tanguticum</i> Maxim. ex Balf.	青海果洛 Guoluo, Qinghai		44	22	2x		PH	TA	刘瑞瑞, 2010
蓼科 Polygonaceae	大黄属 <i>Rheum</i>	<i>R. webbianum</i> Royle	青海乐都 Ledu, Qinghai		44	22	2x		PH	TA	刘瑞瑞, 2010
蓼科 Polygonaceae	大黄属 <i>Rheum</i>	<i>R. wittrockii</i> Lundstr.	新疆伊犁 Ili, Xinjiang		44	11	4x		PH	TA	刘瑞瑞, 2010
列当科 Elaeagnaceae	沙棘属 <i>Hippophae</i>	<i>H. neurocarpa</i> S. W. Liu & T. N. He	四川稻城 Daocheng, Sichuan		24	12	2x		W	OWT	Cao and Lu, 1989
列当科 Elaeagnaceae	沙棘属 <i>Hippophae</i>	<i>H. rhamnoides</i> L. subsp. <i>sinensis</i> Rousi	四川南坪 Nanping, Sichuan		24	12	2x		W	OWT	Cao and Lu, 1989
列当科 Elaeagnaceae	沙棘属 <i>Hippophae</i>	<i>H. rhamnoides</i> L. subsp. <i>yunnanensis</i> Rousi	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		24	12	2x		W	OWT	Cao and Lu, 1989
列当科 Elaeagnaceae	沙棘属 <i>Hippophae</i>	<i>H. tibetana</i> Schlecht.	四川红原 Hongyuan, Sichuan		24	12	2x		W	OWT	Cao and Lu, 1989
列当科 Orobanchaceae	马先蒿属 <i>Pedicularis</i>	<i>P. densispica</i> Franch. ex Maxim.	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		16	8	2x		PH	NT	Cai et al, 2004
列当科 Orobanchaceae	马先蒿属 <i>Pedicularis</i>	<i>P. dichotoma</i> Bonati	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		16	8	2x		PH	NT	Cai et al, 2004
列当科 Orobanchaceae	马先蒿属 <i>Pedicularis</i>	<i>P. dolichocymba</i> Hand. -Mazz.	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		16	8	2x		PH	NT	Cai et al, 2004
列当科	马先蒿属	<i>P. dunniana</i> Bonati	云南香格里拉 Shangri-La, Yunnan		16	8	2x		PH	NT	Cai et al, 2004

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

[illegible]

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
列当科 Orobanchaceae	马先蒿属 <i>Pedicularis</i>	<i>P. rudis</i> Maxim.	青海平安县三合 Sanhe, Pingan, Qinghai		16	8	2x	2,600	PH	NT	黄荣福等, 1996
列当科 Orobanchaceae	马先蒿属 <i>Pedicularis</i>	<i>P. siphonantha</i> var. <i>delavayi</i> (Franch. ex Maxim.) Tsoong	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		14	7	2x		PH	NT	Cai et al, 2004
列当科 Orobanchaceae	马先蒿属 <i>Pedicularis</i>	<i>P. strobilacea</i> Franch. ex Hemsl.	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		16	8	2x		PH	NT	Cai et al, 2004
列当科 Orobanchaceae	马先蒿属 <i>Pedicularis</i>	<i>P. tricolor</i> Hand. -Mazz.	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		16	8	2x		PH	NT	Cai et al, 2004
列当科 Orobanchaceae	马先蒿属 <i>Pedicularis</i>	<i>P. tsekouensis</i> Bonati	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		16	8	2x		PH	NT	Cai et al, 2004
列当科 Orobanchaceae	马先蒿属 <i>Pedicularis</i>	<i>P. umbelliformis</i> Li	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		16	8	2x		PH	NT	Cai et al, 2004
柳叶菜科 Onagraceae	露珠草属 <i>Circaea</i>	<i>C. alpina</i> L. subsp. <i>angustifolia</i> (Hand. -Mazz.) D. E. Boufford	云南横断山 Hengduan Mts., Yunnan		22	11	2x		PH	NT	Seavey & Boufford, 1983
龙胆科 Gentianaceae	獐牙菜属 <i>Swertia</i>	<i>S. bifolia</i> Batalin	西藏噶尔县 Gaer, Tibet		28	7	4x	3,900	PH	NT	何廷农等, 1999
龙胆科 Gentianaceae	獐牙菜属 <i>Swertia</i>	<i>S. franchetiana</i> Harry Sm.	西藏昌都 Changdu, Tibet		20	10	2x	3,800	AH	NT	何廷农等, 1999
龙胆科 Gentianaceae	獐牙菜属 <i>Swertia</i>	<i>S. tetraptera</i> Maxim.	青海玛沁 Maqin, Qinghai		14	7	2x	3,800	AH	NT	何廷农等, 1999
龙胆科 Gentianaceae	獐牙菜属 <i>Swertia</i>	<i>S. wolfgangiana</i> Gruning	青海玛多 Maduo, Qinghai		28	7	4x	3,700	PH	NT	何廷农等, 1999
龙胆科	苜蓿属 <i>Medicago</i>	<i>M. stylophorus</i> (C. B. Clarke) Harry	云南德钦 Deqin, Yunnan		28	7	4x		PH	EA	刘建全等, 2002b

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
Gentianaceae		Smith									
龙胆科 Gentianaceae	龙胆属 <i>Gentiana</i>	<i>G. alsinoides</i> Franch.	云南丽江 Lijiang, Yunnan		20	10	2x	2,950	AH	C	Küpfer & Yuan, 1996
龙胆科 Gentianaceae	龙胆属 <i>Gentiana</i>	<i>G. altorum</i> Harry Smith	四川康定 Kangding, Sichuan		24	12	2x	3,600	PH	C	刘建全等, 2002a
龙胆科 Gentianaceae	龙胆属 <i>Gentiana</i>	<i>G. ampla</i> Harry Sm.	云南丽江 Lijiang, Yunnan		48	12	4x	3,700	PH	C	陈世龙等, 1997
龙胆科 Gentianaceae	龙胆属 <i>Gentiana</i>	<i>G. arethusae</i> var. <i>delicatula</i> C. Marquand	云南德钦 Deqin, Yunnan		24	12	2x	3,800	PH	C	刘建全等, 2002a
龙胆科 Gentianaceae	龙胆属 <i>Gentiana</i>	<i>G. aristata</i> Maxim.	甘肃碌曲 Luqu, Gansu		14	7	2x	3,450	AH	C	Küpfer & Yuan, 1996
龙胆科 Gentianaceae	龙胆属 <i>Gentiana</i>	<i>G. aristata</i> Maxim.	甘肃玛曲 Maqu, Gansu		14	7	2x	3,500	AH	C	Yuan & Küpfer, 1997
龙胆科 Gentianaceae	龙胆属 <i>Gentiana</i>	<i>G. asterocalyx</i> Diels	云南丽江 Lijiang, Yunnan		20	10	2x	2,900	AH	C	Küpfer & Yuan, 1996
龙胆科 Gentianaceae	龙胆属 <i>Gentiana</i>	<i>G. caeruleogrisea</i> T. N. Ho	青海玛沁 Maqin, Qinghai		16	8	2x	3,500	AH	C	He et al, 2002b
龙胆科 Gentianaceae	龙胆属 <i>Gentiana</i>	<i>G. callistantha</i> Diels & Gilg	甘肃碌曲 Luqu, Gansu		26	13	2x	3,500	PH	C	Yuan & Küpfer, 1997
龙胆科 Gentianaceae	龙胆属 <i>Gentiana</i>	<i>G. cephalantha</i> Franchet.	云南丽江 Lijiang, Yunnan		24	12	2x	3,000	PH	C	刘建全等, 2002a
龙胆科 Gentianaceae	龙胆属 <i>Gentiana</i>	<i>G. chinensis</i> Kusnezow	四川峨眉山 Emei Mt., Sichuan		24	12	2x	3,000	PH	C	He et al, 2002a

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
龙胆科 Gentianaceae	龙胆属 <i>Gentiana</i>	<i>G. clarkei</i> Kusnez.	青海可可西里库赛湖 Kuse Lake, Kekexili, Qinghai		16	8	2x	4,750	PH	NT	杨永平和武素功, 1993
龙胆科 Gentianaceae	龙胆属 <i>Gentiana</i>	<i>G. crassicaulis</i> Duthie ex Burkill	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		26	13	2x	3,300	PH	C	Yuan et al, 1998
龙胆科 Gentianaceae	龙胆属 <i>Gentiana</i>	<i>G. crassula</i> Harry Sm.	云南丽江 Lijiang, Yunnan		20	10	2x	4,300	AH	C	Yuan et al, 1998
龙胆科 Gentianaceae	龙胆属 <i>Gentiana</i>	<i>G. crassuloides</i> Bureau & Franch.	云南德钦 Deqin, Yunnan		40	10	4x	4,100	AH	C	Yuan et al, 1998
龙胆科 Gentianaceae	龙胆属 <i>Gentiana</i>	<i>G. crenulato-truncata</i> (Marq.) T. N. He	甘肃玛曲 Maqu, Gansu		18	9	2x	4,200	AH	C	Yuan & Küpfer, 1997
龙胆科 Gentianaceae	龙胆属 <i>Gentiana</i>	<i>G. delavayi</i> Franch.	云南丽江 Lijiang, Yunnan		26	13	2x	2,900	AH	C	Yuan & Küpfer, 1997
龙胆科 Gentianaceae	龙胆属 <i>Gentiana</i>	<i>G. exigua</i> Harry Sm.	云南丽江 Lijiang, Yunnan		20	10	2x	2,400	AH	C	Küpfer & Yuan, 1996
龙胆科 Gentianaceae	龙胆属 <i>Gentiana</i>	<i>G. haynaldi</i> Kanitz	四川理塘 Litang, Sichuan		18	9	2x	3,800	AH	C	陈世龙等, 1997
龙胆科 Gentianaceae	龙胆属 <i>Gentiana</i>	<i>G. haynaldi</i> Kanitz	西藏丁青 Dingqing, Tibet		20	10	2x	4,250	AH	C	Yuan et al, 1998
龙胆科 Gentianaceae	龙胆属 <i>Gentiana</i>	<i>G. haynaldi</i> Kanitz	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		20	10	2x	3,400	AH	C	Yuan & Küpfer, 1997
龙胆科 Gentianaceae	龙胆属 <i>Gentiana</i>	<i>G. heleonastes</i> Harry Sm.	甘肃玛曲 Maqu, Gansu		12	6	2x	3,650	AH	C	Küpfer & Yuan, 1996
龙胆科	龙胆属 <i>Gentiana</i>	<i>G. heleonastes</i> Harry Sm.	甘肃玛曲 Maqu, Gansu		12	6	2x	3,650	AH	C	Yuan & Küpfer, 1997

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
Gentianaceae											
龙胆科 Gentianaceae	龙胆属 <i>Gentiana</i>	<i>G. heleonastes</i> Harry Sm.	甘肃玛曲 Maqu, Gansu		36	6	6x	3,900	AH	C	Yuan et al, 1998
龙胆科 Gentianaceae	龙胆属 <i>Gentiana</i>	<i>G. heterostemon</i> Harry Sm.	云南大理 Dali, Yunnan		20	10	2x	2,100	AH	C	Küpfer & Yuan, 1996
龙胆科 Gentianaceae	龙胆属 <i>Gentiana</i>	<i>G. hyalina</i> T. N. Ho	青海玛多 Maduo, Qinghai		12	6	2x	4,300	AH	C	Yuan & Küpfer, 1997
龙胆科 Gentianaceae	龙胆属 <i>Gentiana</i>	<i>G. intricata</i> C. Marquand	云南丽江 Lijiang, Yunnan		20	10	2x	3,200	AH	C	Küpfer & Yuan, 1996
龙胆科 Gentianaceae	龙胆属 <i>Gentiana</i>	<i>G. intricata</i> C. Marquand	云南丽江 Lijiang, Yunnan		20	10	2x	2,700	AH	C	Yuan & Küpfer, 1997
龙胆科 Gentianaceae	龙胆属 <i>Gentiana</i>	<i>G. leucomelaena</i> Maxim.	四川若尔盖 Ruoergai, Sichuan		36	9	4x	4,200	AH	C	Yuan et al, 1998
龙胆科 Gentianaceae	龙胆属 <i>Gentiana</i>	<i>G. lhassica</i> Burkill	西藏丁青 Dingqing, Tibet		26	13	2x	4,200	PH	C	Yuan et al, 1998
龙胆科 Gentianaceae	龙胆属 <i>Gentiana</i>	<i>G. mairei</i> H. Lév.	云南丽江 Lijiang, Yunnan		20	10	2x	3,200	AH	C	Yuan et al, 1998
龙胆科 Gentianaceae	龙胆属 <i>Gentiana</i>	<i>G. microdonta</i> Franch.	云南丽江 Lijiang, Yunnan		24	12	2x	3,700	PH	C	陈世龙等, 1997
龙胆科 Gentianaceae	龙胆属 <i>Gentiana</i>	<i>G. microdonta</i> Franch.	云南丽江 Lijiang, Yunnan		24	12	2x	2,900	PH	C	He et al, 2002a
龙胆科 Gentianaceae	龙胆属 <i>Gentiana</i>	<i>G. nubigena</i> Edgew.	青海玛沁 Maqin, Qinghai		24	12	2x	4,900	PH	C	He et al, 2002b

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
龙胆科 Gentianaceae	龙胆属 <i>Gentiana</i>	<i>G. panthaica</i> Burkill	云南大理 Dali, Yunnan		20	10	2x	3,200	AH	C	Yuan & Küpfer, 1997
龙胆科 Gentianaceae	龙胆属 <i>Gentiana</i>	<i>G. praticola</i> Franch.	云南大理 Dali, Yunnan		20	10	2x	2,200	PH	C	Küpfer & Yuan, 1996
龙胆科 Gentianaceae	龙胆属 <i>Gentiana</i>	<i>G. prattii</i> Kusnezow	甘肃碌曲 Luqu, Gansu		18	9	2x	3,500	AH	C	Küpfer & Yuan, 1996
龙胆科 Gentianaceae	龙胆属 <i>Gentiana</i>	<i>G. prattii</i> Kusnezow	四川松潘 Songpan, Sichuan		20	10	2x	3,700	AH	C	Yuan et al, 1998
龙胆科 Gentianaceae	龙胆属 <i>Gentiana</i>	<i>G. pseudoaquatica</i> Kusnezow	西藏丁青 Dingqing, Tibet		20	10	2x	4,250	AH	C	Yuan et al, 1998
龙胆科 Gentianaceae	龙胆属 <i>Gentiana</i>	<i>G. pseudoaquatica</i> Kusnezow	甘肃碌曲 Luqu, Gansu		20	10	2x	3,300	AH	C	Küpfer & Yuan, 1996
龙胆科 Gentianaceae	龙胆属 <i>Gentiana</i>	<i>G. pseudoaquatica</i> Kusnezow	甘肃玛曲 Maqu, Gansu		20	10	2x	3,800	AH	C	Yuan & Küpfer, 1997
龙胆科 Gentianaceae	龙胆属 <i>Gentiana</i>	<i>G. pseudosquarrosa</i> Harry Sm.	四川松潘 Songpan, Sichuan		20	10	2x	3,400	AH	C	Yuan et al, 1998
龙胆科 Gentianaceae	龙胆属 <i>Gentiana</i>	<i>G. pudica</i> Maxim.	甘肃玛曲 Maqu, Gansu		20	10	2x	3,700	AH	C	Yuan & Küpfer, 1997
龙胆科 Gentianaceae	龙胆属 <i>Gentiana</i>	<i>G. serra</i> Franch.	云南丽江 Lijiang, Yunnan		34	17	2x	2,400	AH	C	He et al, 2002b
龙胆科 Gentianaceae	龙胆属 <i>Gentiana</i>	<i>G. souliei</i> Franch.	云南丽江 Lijiang, Yunnan		46	23	2x	2,400	AH	C	He et al, 2002b
龙胆科	龙胆属 <i>Gentiana</i>	<i>G. squarrosa</i> Ledeb.	甘肃碌曲 Luqu, Gansu		38	19	2x	3,700	AH	C	Yuan et al, 1998

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
Gentianaceae											
龙胆科 Gentianaceae	龙胆属 <i>Gentiana</i>	<i>G. stipitata</i> Edgew. subsp. <i>tizuensis</i> (Franch.) T. N. Ho	四川理塘 Litang, Sichuan		26	13	2x	3,800	PH	C	陈世龙等, 1997
龙胆科 Gentianaceae	龙胆属 <i>Gentiana</i>	<i>G. straminea</i> Maxim.	甘肃玛曲 Maqu, Gansu		52	13	4x	3,500	PH	C	Yuan & Küpfer, 1997
龙胆科 Gentianaceae	龙胆属 <i>Gentiana</i>	<i>G. subintricata</i> T. N. Ho	云南丽江 Lijiang, Yunnan		20	10	2x	2,900	AH	C	Küpfer & Yuan, 1996
龙胆科 Gentianaceae	龙胆属 <i>Gentiana</i>	<i>G. subintricata</i> T. N. Ho	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		20	10	2x	3,200	AH	C	Yuan et al, 1998
龙胆科 Gentianaceae	龙胆属 <i>Gentiana</i>	<i>G. tibetica</i> King ex Hook. f.	西藏昌都 Changdu, Tibet		52	26	4x	3,650	PH	C	Yuan et al, 1998
龙胆科 Gentianaceae	龙胆属 <i>Gentiana</i>	<i>G. veitchiorum</i> Hemsl.	四川理塘 Litang, Sichuan		24	12	2x	3,800	PH	C	陈世龙等, 1997
龙胆科 Gentianaceae	龙胆属 <i>Gentiana</i>	<i>G. waltonii</i> Burkill	西藏曲水 Qushui, Tibet		26	13	2x	3,700	PH	C	He et al, 2002a
龙胆科 Gentianaceae	龙胆属 <i>Gentiana</i>	<i>G. wasenensis</i> C. Marquand	四川宝兴 Baoxing, Sichuan		24	12	2x	3,400	PH	C	He et al, 2002b
龙胆科 Gentianaceae	龙胆属 <i>Gentiana</i>	<i>G. yunnanensis</i> Franch.	云南大理 Dali, Yunnan		24	12	2x	3,700	AH	C	Yuan et al, 1998
龙胆科 Gentianaceae	假龙胆属 <i>Gentianella</i>	<i>G. azurea</i> (Bunge) Holub	青海达日 Dari, Qinghai		22	11	2x	4,200	AH	NT	刘建全等, 2002c
龙胆科 Gentianaceae	假龙胆属 <i>Gentianella</i>	<i>G. gentianoides</i> (Franchet) Harry Smith	云南丽江 Lijiang, Yunnan		22	11	2x	2,900	AH	NT	刘建全等, 2002c

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
龙胆科 Gentianaceae	喉花草属 <i>Comastoma</i>	<i>C. arrectum</i> (Franchet.) Holub	云南德钦 Deqin, Yunnan		18	9	2x	3,900	AH	NT	刘建全和何廷龙, 2002
龙胆科 Gentianaceae	喉花草属 <i>Comastoma</i>	<i>C. beesianum</i> (W. W. Sm.) Holub	云南丽江 Lijiang, Yunnan		18	9	2x	2,800	AH	NT	刘建全和何廷龙, 2002
龙胆科 Gentianaceae	喉花草属 <i>Comastoma</i>	<i>C. chiuchense</i> T. N. Ho & J. Q. Liu	青海玛沁 Maqin, Qinghai		20	10	2x	4,450	AH	NT	刘建全和何廷龙, 2002
龙胆科 Gentianaceae	喉花草属 <i>Comastoma</i>	<i>C. pulmonarium</i> (Turczaninow) Toyokuni	青海玛沁 Maqin, Qinghai		18	9	2x	4,000	AH	NT	刘建全和何廷龙, 2002
龙胆科 Gentianaceae	喉花草属 <i>Comastoma</i>	<i>C. traillianum</i> (Forrest) Holub	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		18	9	2x	3,382	AH	NT	刘建全和何廷龙, 2002
龙胆科 Gentianaceae	辐花属 <i>Lomatogoniopsis</i>	<i>L. alpina</i> T. N. Ho & S. W. Liu	青海达日 Dari, Qinghai		12	6	2x		AH	EC	刘建全等, 2002b
龙胆科 Gentianaceae	扁蕾属 <i>Gentianopsis</i>	<i>G. grandis</i> (Harry Sm.) Ma	云南丽江 Lijiang, Yunnan		52	13	4x		AH	NT	Yuan & Küpfer, 1993
龙胆科 Gentianaceae	扁蕾属 <i>Gentianopsis</i>	<i>G. lutea</i> Ma	云南丽江 Lijiang, Yunnan		26	13	2x		AH	NT	Yuan & Küpfer, 1993
牻牛儿苗科 Geraniaceae	老鹳草属 <i>Geranium</i>	<i>G. eriostemon</i> Fisch. ex DC.	四川宝兴 Baoxing, Sichuan	5		5	2x	1,800	PH	C	Hong & Zhang, 1990
牻牛儿苗科 Geraniaceae	老鹳草属 <i>Geranium</i>	<i>G. platyanthum</i> Duthie	四川峨眉山 Emei Mt., Sichuan	9		9	2x	800	PH	NT	Hong & Zhang, 1990
毛茛科 Ranunculaceae	罂粟莲花属 <i>Anemoclema</i>	<i>A. glaucifolium</i> (Franch.) W. T. Wang	云南丽江 Lijiang, Yunnan		16	8	2x		PH	EC	杨亲二, 2002b
毛茛科	罂粟莲花属	<i>A. glaucifolium</i> (Franch.) W. T. Wang	云南宁蒗 Ninglang, Yunnan		16	8	2x		PH	EC	张国莉和龚洵, 2002

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
Ranunculaceae	<i>Anemoclema</i>										
毛茛科	银莲花属 <i>Anemone</i>	<i>A. begoniifolia</i> H. Lév. & Vaniot	四川南川 Nanchuan, Sichuan		16	8	2x		PH	C	杨亲二, 2002b
Ranunculaceae	银莲花属 <i>Anemone</i>	<i>A. davidi</i> Franch.	云南维西 Weixi, Yunnan		32	16	4x		PH	C	杨亲二, 2002b
毛茛科	银莲花属 <i>Anemone</i>	<i>A. demissa</i> Hook. f. & Thomson	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		14	7	2x		PH	C	杨亲二, 2002b
Ranunculaceae	银莲花属 <i>Anemone</i>	<i>A. flaccida</i> Fr. Schmidt	云南维西 Weixi, Yunnan		14	7	2x		PH	C	杨亲二, 2002b
毛茛科	银莲花属 <i>Anemone</i>	<i>A. hupehensis</i> Hort. ex Boynton f. alba W. T. Wang	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		16	8	2x		PH	C	杨亲二, 2002b
Ranunculaceae	银莲花属 <i>Anemone</i>	<i>A. obstusiloba</i> ssp. <i>ovalifolia</i> Brohl	青海可可西里乌兰乌拉湖 Wulanwula Lake, Kekexili, Qinghai		16	8	2x	4,800	PH	OWT	杨永平和武素功, 1993
毛茛科	银莲花属 <i>Anemone</i>	<i>A. rivularis</i> Wall.	云南丽江 Lijiang, Yunnan		16	8	2x		PH	C	杨亲二, 2002b
Ranunculaceae	银莲花属 <i>Anemone</i>	<i>A. rupestris</i> Wall.	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		14	7	2x		PH	C	杨亲二, 2002b
毛茛科	银莲花属 <i>Anemone</i>	<i>A. stolonifera</i> Maxim.	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		16	8	2x		PH	C	杨亲二, 2002b
Ranunculaceae	银莲花属 <i>Anemone</i>	<i>A. trullifolia</i> var. <i>colestina</i> (Franch.) Finet & Gagnep.	云南大理 Dali, Yunnan		14	7	2x		PH	C	杨亲二, 2002b
毛茛科	银莲花属 <i>Anemone</i>	<i>A. trullifolia</i> var. <i>holophylla</i> Diels	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		14	7	2x		PH	C	杨亲二, 2002b

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
毛茛科 Ranunculaceae	鸦跖花属 <i>Oxygraphis</i>	<i>O. delavayi</i> Franch.	云南维西 Weixi, Yunnan		16	8	2x	3,900	PH	TA	杨亲二, 2000a
毛茛科 Ranunculaceae	鸦跖花属 <i>Oxygraphis</i>	<i>O. glacialis</i> (Fish.) Bunge	青海可可西里玛章错钦 Mazhangcuoqin, Kekexili, Qinghai		16	8	2x	4,900	PH	TA	杨永平和武素功, 1993
毛茛科 Ranunculaceae	鸦跖花属 <i>Oxygraphis</i>	<i>O. glacialis</i> Bunge	云南德钦 Deqin, Yunnan		16	8	2x	3,900	PH	TA	杨亲二, 2000a
毛茛科 Ranunculaceae	鸦跖花属 <i>Oxygraphis</i>	<i>O. tenuifolia</i> W. E. Evans	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		16	8	2x	4,100	PH	TA	杨亲二, 2000a
毛茛科 Ranunculaceae	星叶草属 <i>Circaeaster</i>	<i>C. agrestis</i> Maxim.	青海大通 Datong, Qinghai		30	15	2x		PH	CA	孔宏智和杨亲二, 1997
毛茛科 Ranunculaceae	星果草属 <i>Asteropyrum</i>	<i>A. peltatum</i> J. R. Drumm. & Hutchinson	云南贡山 Gongshan, Yunnan		16	8	2x		PH	EC	杨亲二等, 1993b
毛茛科 Ranunculaceae	星果草属 <i>Asteropyrum</i>	<i>A. peltatum</i> J. R. Drumm. & Hutchinson	四川峨眉山 Emei Mt., Sichuan		16	8	2x	2,000	PH	EC	张芝玉, 1982
毛茛科 Ranunculaceae	乌头属 <i>Aconitum</i>	<i>A. brachypodium</i> Diels	云南丽江 Lijiang, Yunnan		16	8	2x	3,700	PH	NT	Yang et al, 1993a
毛茛科 Ranunculaceae	乌头属 <i>Aconitum</i>	<i>A. brachypodium</i> var. <i>laxiflorum</i> H. R. Fletcher & Lauener	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		16	8	2x	3,200	PH	NT	Yang et al, 1993a
毛茛科 Ranunculaceae	乌头属 <i>Aconitum</i>	<i>A. brevicaratum</i> (Finet & Gagnep.) Diels	云南丽江 Lijiang, Yunnan		32	16	4x		PH	NT	Yang et al, 1989
毛茛科 Ranunculaceae	乌头属 <i>Aconitum</i>	<i>A. brevicaratum</i> (Finet & Gagnep.) Diels	云南鹤庆 Heqing, Yunnan		32	8	4x	3,700	PH	NT	杨亲二等, 1994
毛茛科	乌头属 <i>Aconitum</i>	<i>A. brevicaratum</i> (Finet & Gagnep.)	云南丽江 Lijiang, Yunnan		32	8	4x	3,200	PH	NT	Yuan & Yang, 2006b

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
Ranunculaceae		Diels									
毛茛科	乌头属 <i>Aconitum</i>	<i>A. brevicalcaratum</i> var. <i>parviflorum</i> Chen & Liu	云南丽江 Lijiang, Yunnan		32	8	4x	3,200	PH	NT	Yuan & Yang, 2006b
Ranunculaceae	乌头属 <i>Aconitum</i>	<i>A. brevicalcaratum</i> var. <i>parviflorum</i> Chen & Liu	云南丽江 Lijiang, Yunnan		32	8	4x	4,000	PH	NT	杨亲二等, 1994
Ranunculaceae	乌头属 <i>Aconitum</i>	<i>A. brunneum</i> Hand. -Mazz.	四川松潘 Songpan, Sichuan		16	8	2x		PH	NT	杨亲二, 1996
Ranunculaceae	乌头属 <i>Aconitum</i>	<i>A. bulleyanum</i> Diels	云南鹤庆 Heqing, Yunnan		16	8	2x		PH	NT	Yang et al, 1989
Ranunculaceae	乌头属 <i>Aconitum</i>	<i>A. carmichaelii</i> Debeaux	云南大理 Dali, Yunnan		64	8	8x		PH	NT	Yang et al, 1989
Ranunculaceae	乌头属 <i>Aconitum</i>	<i>A. chrysotrichum</i> W. T. Wang	四川雅江 Yajiang, Sichuan		32	8	4x	3,600	PH	NT	Yuan & Yang, 2006b
Ranunculaceae	乌头属 <i>Aconitum</i>	<i>A. contortum</i> Finet & Gagnep.	云南大理 Dali, Yunnan		16	8	2x		PH	NT	Yang et al, 1989
Ranunculaceae	乌头属 <i>Aconitum</i>	<i>A. contortum</i> Finet & Gagnep.	云南云龙 Yunlong, Yunnan		16	8	2x	3,400	PH	NT	Yang et al, 1993a
Ranunculaceae	乌头属 <i>Aconitum</i>	<i>A. crassiflorum</i> Hand. -Mazz.	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		32	8	4x	3,700	PH	NT	杨亲二等, 1994
Ranunculaceae	乌头属 <i>Aconitum</i>	<i>A. crassiflorum</i> Hand. -Mazz.	云南德钦 Deqin, Yunnan		32	8	4x	3,600	PH	NT	Yuan & Yang, 2006b
Ranunculaceae	乌头属 <i>Aconitum</i>	<i>A. crassiflorum</i> Hand. -Mazz.	四川木里 Muli, Sichuan		32	8	4x	3,900	PH	NT	Yuan & Yang, 2006b

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
毛茛科 Ranunculaceae	乌头属 <i>Aconitum</i>	<i>A. crassiflorum</i> Hand. -Mazz.	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		32	8	4x	3,600	PH	NT	Yuan & Yang, 2006b
毛茛科 Ranunculaceae	乌头属 <i>Aconitum</i>	<i>A. crassiflorum</i> Hand. -Mazz.	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		32	8	4x	3,600	PH	NT	Yuan & Yang, 2006b
毛茛科 Ranunculaceae	乌头属 <i>Aconitum</i>	<i>A. crassiflorum</i> Hand. -Mazz.	四川雅江 Yajiang, Sichuan		32	8	4x	3,600	PH	NT	Yuan & Yang, 2006b
毛茛科 Ranunculaceae	乌头属 <i>Aconitum</i>	<i>A. crassiflorum</i> Hand. -Mazz.	四川雅江 Yajiang, Sichuan		32	16	4x		PH	NT	杨亲二, 2001a
毛茛科 Ranunculaceae	乌头属 <i>Aconitum</i>	<i>A. delavayi</i> Franch.	云南大理 Dali, Yunnan		16	8	2x		PH	NT	杨亲二, 2001a
毛茛科 Ranunculaceae	乌头属 <i>Aconitum</i>	<i>A. delavayi</i> Franch.	云南丽江 Lijiang, Yunnan		16	8	2x	2,900	PH	NT	Yang et al, 1993a
毛茛科 Ranunculaceae	乌头属 <i>Aconitum</i>	<i>A. episcopale</i> H. Lév.	云南大理 Dali, Yunnan		16	8	2x		PH	NT	Yang et al, 1989
毛茛科 Ranunculaceae	乌头属 <i>Aconitum</i>	<i>A. fengii</i> W. T. Wang	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		16	8	2x	3,970	PH	NT	Yang et al, 1993a
毛茛科 Ranunculaceae	乌头属 <i>Aconitum</i>	<i>A. fengii</i> W. T. Wang	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		32	8	2x	3,700	PH	NT	Yang et al, 1993a
毛茛科 Ranunculaceae	乌头属 <i>Aconitum</i>	<i>A. fengii</i> W. T. Wang	云南维西 Weixi, Yunnan		16	8	2x		PH	NT	杨亲二, 2001a
毛茛科 Ranunculaceae	乌头属 <i>Aconitum</i>	<i>A. forrestii</i> Stapf	云南丽江 Lijiang, Yunnan		16	8	2x		PH	NT	Yang et al, 1989
毛茛科	乌头属 <i>Aconitum</i>	<i>A. georgei</i> Comber	云南丽江 Lijiang, Yunnan		16	8	2x	3,200	PH	NT	Yang et al, 1993a

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

[illegible]

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
毛茛科 Ranunculaceae	乌头属 <i>Aconitum</i>	<i>A. ouvrardianum</i> Hand. -Mazz.	云南德钦 Deqin, Yunnan		16	8	2x	4,200	PH	NT	Yang et al, 1993a
毛茛科 Ranunculaceae	乌头属 <i>Aconitum</i>	<i>A. pendulicarpum</i> Chang ex W. T. Wang	云南德钦 Deqin, Yunnan		16	8	2x		PH	NT	Yang et al, 1989
毛茛科 Ranunculaceae	乌头属 <i>Aconitum</i>	<i>A. pendulum</i> Busch	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		16	8	2x	3,200	PH	NT	Yang et al, 1993a
毛茛科 Ranunculaceae	乌头属 <i>Aconitum</i>	<i>A. piepunense</i> Hand. -Mazz.	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		16	8	2x	3,400	PH	NT	Yang et al, 1993a
毛茛科 Ranunculaceae	乌头属 <i>Aconitum</i>	<i>A. piepunense</i> Hand. -Mazz.	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		32	8	4x	3,200	PH	NT	Yang et al, 1993a
毛茛科 Ranunculaceae	乌头属 <i>Aconitum</i>	<i>A. piepunense</i> Hand. -Mazz.	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		16	8	2x		PH	NT	杨亲二, 2001a
毛茛科 Ranunculaceae	乌头属 <i>Aconitum</i>	<i>A. piepunense</i> var. <i>pilosum</i> H. F. Comber	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		16	8	2x	3,700	PH	NT	Yang et al, 1993a
毛茛科 Ranunculaceae	乌头属 <i>Aconitum</i>	<i>A. pulchellum</i> Hand. -Mazz.	云南德钦 Deqin, Yunnan		16	8	2x	4,200	PH	NT	Yang et al, 1993a
毛茛科 Ranunculaceae	乌头属 <i>Aconitum</i>	<i>A. rilongense</i> Kadota	四川小金夹金山 Jiajin Mt., Xiaojin, Sichuan		32	8	4x	3,400	PH	NT	Yuan & Yang, 2006
毛茛科 Ranunculaceae	乌头属 <i>Aconitum</i>	<i>A. rockii</i> Fletcher & Lauener	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		16	8	2x	3,750	PH	NT	Yang et al, 1993a
毛茛科 Ranunculaceae	乌头属 <i>Aconitum</i>	<i>A. rockii</i> Fletcher & Lauener	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		32	8	4x	3,970	PH	NT	Yang et al, 1993a
毛茛科	乌头属 <i>Aconitum</i>	<i>A. scaposum</i> Franch	四川宝兴 Baoxing, Sichuan		16	8	2x		PH	NT	Yuan & Yang, 2006

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
Ranunculaceae											
毛茛科	乌头属 <i>Aconitum</i>	<i>A. scaposum</i> Franch	四川天泉二郎山 Erlang Mt., Tianquan, Sichuan		16	8	2x		PH	NT	Yuan & Yang, 2006
Ranunculaceae	乌头属 <i>Aconitum</i>	<i>A. scaposum</i> Franch.	云南大理 Dali, Yunnan		16	8	2x		PH	NT	杨亲二, 2001a
毛茛科	乌头属 <i>Aconitum</i>	<i>A. scaposum</i> Franch.	云南大理 Dali, Yunnan		16	8	2x		PH	NT	Yuan & Yang, 2006b
Ranunculaceae	乌头属 <i>Aconitum</i>	<i>A. sessiliflorum</i> (Finet & Gagnep.) Hand. -Mazz.	四川若尔盖 Ruoergai, Sichuan		16	8	2x		PH	NT	杨亲二, 1996
毛茛科	乌头属 <i>Aconitum</i>	<i>A. sinomontanum</i> Nakai	四川南坪 Nanping, Sichuan		16	8	2x		PH	NT	Yuan & Yang, 2006
Ranunculaceae	乌头属 <i>Aconitum</i>	<i>A. sinomontanum</i> Nakai	四川南坪 Nanping, Sichuan		16	8	2x		PH	NT	杨亲二, 1996
毛茛科	乌头属 <i>Aconitum</i>	<i>A. souliei</i> Finet & Gagnep.	云南德钦 Deqin, Yunnan		16	8	2x	4,300	PH	NT	Yang et al, 1993a
Ranunculaceae	乌头属 <i>Aconitum</i>	<i>A. spathulatum</i> W. T. Wang	云南鹤庆 Heqing, Yunnan		16	8	2x		PH	NT	Yang et al, 1989
毛茛科	乌头属 <i>Aconitum</i>	<i>A. stapfianum</i> Hand. -Mazz.	云南丽江 Lijiang, Yunnan		16	8	2x		PH	NT	Yang et al, 1989
Ranunculaceae	乌头属 <i>Aconitum</i>	<i>A. stramineiflorum</i> Chang ex W. T. Wang	云南维西 Weixi, Yunnan		16	8	2x		PH	NT	Yang et al, 1993a
毛茛科	乌头属 <i>Aconitum</i>	<i>A. tanguticum</i> (Maxim.) Stapf	青海祁连县冰沟大坂 Binggou, Qilian, Qinghai		16	8	2x	4,200	PH	NT	黄荣福和沈颂东, 1999

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
毛茛科 Ranunculaceae	乌头属 <i>Aconitum</i>	<i>A. tanguticum</i> (Maximowicz.) Stapf	青海玉树 Yushu, Qinghai		16	8	2x	3,500	PH	NT	刘建全, 2002
毛茛科 Ranunculaceae	乌头属 <i>Aconitum</i>	<i>A. tongolense</i> Ulbr.	四川理县 Lixian County, Sichuan		16	8	2x		PH	NT	杨亲二, 2001a
毛茛科 Ranunculaceae	乌头属 <i>Aconitum</i>	<i>A. transsectum</i> Diels	云南丽江 Lijiang, Yunnan		16	8	2x		PH	NT	Yang et al, 1989
毛茛科 Ranunculaceae	乌头属 <i>Aconitum</i>	<i>A. transsectum</i> Diels	云南丽江 Lijiang, Yunnan		16	8	2x	3,600	PH	NT	Yang et al, 1993a
毛茛科 Ranunculaceae	乌头属 <i>Aconitum</i>	<i>A. tsaii</i> W. T. Wang	云南泸水 Lushui, Yunnan		16	8	2x	3,400	PH	NT	Yang et al, 1993a
毛茛科 Ranunculaceae	乌头属 <i>Aconitum</i>	<i>A. tuguancunense</i> Q. E. Yang	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		16	8	2x		PH	NT	杨亲二和龚洵, 1995
毛茛科 Ranunculaceae	乌头属 <i>Aconitum</i>	<i>A. tuguancunense</i> Q. E. Yang	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		16	8	2x	2,800	PH	NT	Yang et al, 1993a
毛茛科 Ranunculaceae	乌头属 <i>Aconitum</i>	<i>A. wangii</i> Q. E. Yang	云南丽江 Lijiang, Yunnan		16	8	2x	3,200	PH	NT	Yang et al, 1993a
毛茛科 Ranunculaceae	乌头属 <i>Aconitum</i>	<i>A. wardii</i> Fletcher & Lauener	云南德钦 Deqin, Yunnan		32	16	4x		PH	NT	杨亲二等, 1994
毛茛科 Ranunculaceae	铁线莲属 <i>Clematis</i>	<i>C. brevicaudata</i> DC.	云南德钦 Deqin, Yunnan		16	8	2x		PH	C	杨亲二, 2002b
毛茛科 Ranunculaceae	铁线莲属 <i>Clematis</i>	<i>C. chrysocoma</i> Franch.	云南丽江 Lijiang, Yunnan		16	8	2x		PH	C	杨亲二, 2002b
毛茛科	铁线莲属 <i>Clematis</i>	<i>C. kockiana</i> C. K. Schneid.	云南云龙 Yunlong, Yunnan		16	8	2x		PH	C	杨亲二, 2002b

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
Ranunculaceae											
毛茛科 Ranunculaceae	铁线莲属 <i>Clematis</i>	<i>C. puberula</i> var. <i>ganpiniana</i> (H. Lév. & Vaniot) W. T. Wang	云南丽江 Lijiang, Yunnan		16	8	2x		PH	C	杨亲二, 2002b
毛茛科 Ranunculaceae	铁线莲属 <i>Clematis</i>	<i>C. ranunculoides</i> Franch.	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		16	8	2x		PH	C	杨亲二, 2002b
毛茛科 Ranunculaceae	铁线莲属 <i>Clematis</i>	<i>C. rehderiana</i> Craib	云南德钦 Deqin, Yunnan		16	8	2x		PH	C	杨亲二, 2002b
毛茛科 Ranunculaceae	铁破锣属 <i>Beesia</i>	<i>B. calthifolia</i> (Maxim.) Ulbr	四川峨眉山 Emei Mt., Sichuan		16	8	2x		PH	EA	商效民, 1985
毛茛科 Ranunculaceae	铁破锣属 <i>Beesia</i>	<i>B. calthifolia</i> Ulbr.	云南大理 Dali, Yunnan		32	16	4x		PH	EA	杨亲二, 1999a
毛茛科 Ranunculaceae	铁破锣属 <i>Beesia</i>	<i>B. calthifolia</i> Ulbr.	云南维西 Weixi, Yunnan		16	8	2x		PH	EA	杨亲二, 2002a
毛茛科 Ranunculaceae	铁破锣属 <i>Beesia</i>	<i>B. deltophylla</i> C. Y. Wu	西藏墨脱 Motuo, Tibet		16	8	2x		PH	EA	杨亲二等, 1995
毛茛科 Ranunculaceae	水毛茛属 <i>Batrachium</i>	<i>B. bungei</i> (Steud.) L. Liu	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		16	8	2x		PH	NT	杨亲二, 2001b
毛茛科 Ranunculaceae	水毛茛属 <i>Batrachium</i>	<i>B. bungei</i> (Steud.) L. Liu	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		24	12	3x		PH	NT	杨亲二, 2001b
毛茛科 Ranunculaceae	升麻属 <i>Cimicifuga</i>	<i>C. foetida</i> L.	云南大理 Dali, Yunnan		32	16	4x		PH	NT	杨亲二, 1999b
毛茛科 Ranunculaceae	升麻属 <i>Cimicifuga</i>	<i>C. foetida</i> L.	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		16	8	2x		PH	NT	杨亲二, 1999b

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
毛茛科 Ranunculaceae	升麻属 <i>Cimicifuga</i>	<i>C. foetida</i> L.	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		16	8	2x		PH	NT	杨亲二, 1993b
毛茛科 Ranunculaceae	升麻属 <i>Cimicifuga</i>	<i>C. foetida</i> L. var. <i>velutina</i> Franch. ex Finet & Gagnep.	云南丽江 Lijiang, Yunnan		16	8	2x		PH	NT	杨亲二, 1999b
毛茛科 Ranunculaceae	升麻属 <i>Cimicifuga</i>	<i>C. simplex</i> Wormsk. ex DC.	四川木里 Muli, Sichuan		16	8	2x		PH	NT	杨亲二, 1999b
毛茛科 Ranunculaceae	升麻属 <i>Cimicifuga</i>	<i>C. yunnanensis</i> Hsiao	云南德钦 Deqin, Yunnan		16	8	2x		PH	NT	杨亲二, 2002a
毛茛科 Ranunculaceae	升麻属 <i>Cimicifuga</i>	<i>C. yunnanensis</i> Hsiao.	云南丽江 Lijiang, Yunnan		16	8	2x		PH	NT	杨亲二, 1999b
毛茛科 Ranunculaceae	毛茛属 <i>Ranunculus</i>	<i>R. cantoniensis</i> DC.	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		32	16	4x		PH	C	邓院芳等, 2013
毛茛科 Ranunculaceae	毛茛属 <i>Ranunculus</i>	<i>R. felixii</i> H. Lév.	云南丽江 Lijiang, Yunnan		32	8	4x	3,600	PH	C	杨亲二, 2000b
毛茛科 Ranunculaceae	毛茛属 <i>Ranunculus</i>	<i>R. ficariifolia</i> H. Lév. & Vaniot	云南维西 Weixi, Yunnan		32	16	4x		PH	C	杨亲二, 2001b
毛茛科 Ranunculaceae	毛茛属 <i>Ranunculus</i>	<i>R. involucratus</i> Maxim.	青海玛多 Maduo, Qinghai		16	8	2x	4,450	PH	NT	Huang et al, 1996a
毛茛科 Ranunculaceae	毛茛属 <i>Ranunculus</i>	<i>R. japonicus</i> Thunb.	四川雅安 Ya'an, Sichuan		14	7	2x		PH	C	杨亲二, 2001b
毛茛科 Ranunculaceae	毛茛属 <i>Ranunculus</i>	<i>R. laetus</i> Wall.	云南大理 Dali, Yunnan		14	7	2x		PH	C	杨亲二, 2001b
毛茛科	毛茛属 <i>Ranunculus</i>	<i>R. nematolobus</i> Hand. -Mazz.	云南大理 Dali, Yunnan		16	8	2x		PH	C	杨亲二, 2001b

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

[illegible]

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
毛茛科 Ranunculaceae	驴蹄草属 <i>Caltha</i>	<i>C. palustris</i> L.	云南德钦 Deqin, Yunnan		64	8	8x		PH	NT	杨亲二, 2002a
毛茛科 Ranunculaceae	驴蹄草属 <i>Caltha</i>	<i>C. palustris</i> L.	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		48	8	6x		PH	NT	杨亲二, 2002a
毛茛科 Ranunculaceae	类叶升麻属 <i>Actaea</i>	<i>A. asiatica</i> Hara	云南大理 Dali, Yunnan		16	8	2x		PH	NT	杨亲二, 1998
毛茛科 Ranunculaceae	类叶升麻属 <i>Actaea</i>	<i>A. asiatica</i> Hara	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		16	8	2x		PH	NT	杨亲二, 2002a
毛茛科 Ranunculaceae	金莲花属 <i>Trollius</i>	<i>T. pumilus</i> var. <i>tanguticus</i> Brhl	青海门源县冷龙岭 Lenglong Mt., Menyuan, Qinghai		16	8	2x	4,200	PH	NT	黄荣福和沈颂东, 1999
毛茛科 Ranunculaceae	金莲花属 <i>Trollius</i>	<i>T. yunnanensis</i> Ulbr.	云南丽江 Lijiang, Yunnan		16	8	2x		PH	NT	杨亲二, 2002a
毛茛科 Ranunculaceae	碱毛茛属 <i>Halerpestes</i>	<i>H. sarmentosa</i> (Adams) Komarov	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		32	16	4x		PH	NT	杨亲二, 2001b
毛茛科 Ranunculaceae	鸡爪草属 <i>Calathodes</i>	<i>C. oxycarpa</i> Sprague	云南大理 Dali, Yunnan		16	8	2x	2,800	PH	EA	杨亲二, 1995
毛茛科 Ranunculaceae	鸡爪草属 <i>Calathodes</i>	<i>C. oxycarpa</i> Sprague	云南大理 Dali, Yunnan		16	8	2x		PH	EA	杨亲二, 2002a
毛茛科 Ranunculaceae	鸡爪草属 <i>Calathodes</i>	<i>C. oxycarpa</i> Sprague	四川峨眉山 Emei Mt., Sichuan		16	8	2x	2,400	PH	EA	张芝玉, 1982
毛茛科 Ranunculaceae	黄三七属 <i>Souliea</i>	<i>S. vaginata</i> Franch.	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		16	8	2x		PH	EA	杨亲二, 2002a
毛茛科	黄连属 <i>Coptis</i>	<i>C. deltoidea</i> C. Y. Cheng & P. G.	四川峨眉山双水井 Shuangshuijing,		27	9	3x	2,300	AH	NT	黄骥等, 2013

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
Ranunculaceae		Xiao	Emei Mt., Sichuan								
毛茛科	黄连属 <i>Coptis</i>	<i>C. omeiensis</i> (Chen) C.Y. Cheng	四川峨眉山九龙眼 Jiulongyan, Emei Mt., Sichuan		18	9	2x	1,420	AH	NT	黄骥等, 2013
Ranunculaceae	黄连属 <i>Coptis</i>	<i>C. teeta</i> Wall.	云南贡山 Gongshan, Yunnan		18	9	2x		AH	NT	杨亲二等, 1993b
毛茛科	独叶草属	<i>K. uniflora</i> Balf. f. & W. W. Sm.	四川峨眉山 Emei Mt., Sichuan		18	9	2x	2,750	PH	EC	张芝玉, 1982
Ranunculaceae	<i>Kingdonia</i>										
毛茛科	翠雀属 <i>Delphinium</i>	<i>D. albocoeruleum</i> Maxim.	青海甘德 Gande, Qinghai		16	8	2x	4,150	PH	NT	刘建全和何廷农, 1999
Ranunculaceae	翠雀属 <i>Delphinium</i>	<i>D. albocoeruleum</i> Maxim.	青海德令哈 Delingha, Qinghai		16	8	2x		PH	NT	Yuan & Yang, 2008
毛茛科	翠雀属 <i>Delphinium</i>	<i>D. albocoeruleum</i> Maxim.	青海甘德 Gande, Qinghai		16	8	2x		PH	NT	Yuan & Yang, 2008
Ranunculaceae	翠雀属 <i>Delphinium</i>	<i>D. autumnale</i> Hand. -Mazz.	四川木里 Muli, Sichuan		16	8	2x		PH	NT	Yuan & Yang, 2008
毛茛科	翠雀属 <i>Delphinium</i>	<i>D. batangense</i> Finet & Gagnep.	云南德钦 Deqin, Yunnan		16	8	2x		PH	NT	Yuan & Yang, 2008
Ranunculaceae	翠雀属 <i>Delphinium</i>	<i>D. batangense</i> Finet & Gagnep.	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		16	8	2x		PH	NT	Yuan & Yang, 2008
毛茛科	翠雀属 <i>Delphinium</i>	<i>D. beesianum</i> W. W. Sm.	云南德钦 Deqin, Yunnan		16	8	2x		PH	NT	Yuan & Yang, 2008
Ranunculaceae	翠雀属 <i>Delphinium</i>	<i>D. beesianum</i> W. W. Sm.	云南丽江 Lijiang, Yunnan		16	8	2x		PH	NT	Yuan & Yang, 2008

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
毛茛科 Ranunculaceae	翠雀属 <i>Delphinium</i>	<i>D. beesianum</i> W. W. Sm.	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		16	8	2x		PH	NT	Yuan & Yang, 2008
毛茛科 Ranunculaceae	翠雀属 <i>Delphinium</i>	<i>D. beesianum</i> W. W. Sm.	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		16	8	2x		PH	NT	杨亲二, 2001a
毛茛科 Ranunculaceae	翠雀属 <i>Delphinium</i>	<i>D. bonvalotii</i> Franch.	四川木里 Muli, Sichuan		16	8	2x		PH	NT	杨亲二, 2001a
毛茛科 Ranunculaceae	翠雀属 <i>Delphinium</i>	<i>D. bulleyanum</i> Forrest ex Diels	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		16	8	2x		PH	NT	杨亲二, 2001a
毛茛科 Ranunculaceae	翠雀属 <i>Delphinium</i>	<i>D. bulleyanum</i> G. Forrest ex Diels	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		16	8	2x		PH	NT	Yuan & Yang, 2008
毛茛科 Ranunculaceae	翠雀属 <i>Delphinium</i>	<i>D. caeruleum</i> Jacquem. ex Cambess.	四川康定 Kangding, Sichuan		16	8	2x		PH	NT	Yuan & Yang, 2008
毛茛科 Ranunculaceae	翠雀属 <i>Delphinium</i>	<i>D. caeruleum</i> Jacquem. ex Cambess.	四川松潘 Songpan, Sichuan		16	8	2x		PH	NT	Yuan & Yang, 2008
毛茛科 Ranunculaceae	翠雀属 <i>Delphinium</i>	<i>D. caeruleum</i> Jacquem. ex Cambess.	Zoige, Sichuan		16	8	2x		PH	NT	Yuan & Yang, 2008
毛茛科 Ranunculaceae	翠雀属 <i>Delphinium</i>	<i>D. caeruleum</i> Jacquem.	四川若尔盖 Ruorgai, Sichuan		16	8	2x		PH	NT	杨亲二, 1996
毛茛科 Ranunculaceae	翠雀属 <i>Delphinium</i>	<i>D. campylocentrum</i> Maxim.	四川红原 Hongyuan, Sichuan		16	8	2x		PH	NT	Yuan & Yang, 2008
毛茛科 Ranunculaceae	翠雀属 <i>Delphinium</i>	<i>D. candelabrum</i> var. <i>monanthum</i> (Hand. -Mazz.) W. T. Wang	青海祁连县冰沟大坂 Binggou, Qilian, Qinghai		16	8	2x	4,200	PH	NT	黄荣福和沈颂东, 1999
毛茛科	翠雀属 <i>Delphinium</i>	<i>D. candelabrum</i> var. <i>monanthum</i>	青海玉树 Yushu, Qinghai		16	8	2x	4,650	PH	NT	刘建全和何廷农,

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

[illegible]

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
毛茛科 Ranunculaceae	翠雀属 <i>Delphinium</i>	<i>D. delavayi</i> Franch.	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		16	8	2x		PH	NT	Yuan & Yang, 2008
毛茛科 Ranunculaceae	翠雀属 <i>Delphinium</i>	<i>D. delavayi</i> var. <i>pogonanthum</i> (Hand.-Mazz.) W. T. Wang	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		16	8	2x		PH	NT	杨亲二, 2001a
毛茛科 Ranunculaceae	翠雀属 <i>Delphinium</i>	<i>D. dolichocentroides</i> W. T. Wang	云南宁蒗 Ninglang, Yunnan		16	8	2x		PH	NT	Yuan & Yang, 2008
毛茛科 Ranunculaceae	翠雀属 <i>Delphinium</i>	<i>D. erlangshanicum</i> W. T. Wang	四川天全 Tianquan, Sichuan		16	8	2x		PH	NT	Yuan & Yang, 2008
毛茛科 Ranunculaceae	翠雀属 <i>Delphinium</i>	<i>D. forrestii</i> Diels	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		16	8	2x		PH	NT	杨亲二, 2001a
毛茛科 Ranunculaceae	翠雀属 <i>Delphinium</i>	<i>D. forrestii</i> Diels var. <i>forrestii</i>	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		16	8	2x		PH	NT	Yuan & Yang, 2008
毛茛科 Ranunculaceae	翠雀属 <i>Delphinium</i>	<i>D. grandiflorum</i> L.	四川理县 Lixian County, Sichuan		16	8	2x		PH	NT	杨亲二, 2001a
毛茛科 Ranunculaceae	翠雀属 <i>Delphinium</i>	<i>D. gyalanum</i> C. Marquand & Airy Shaw	西藏工布江达 Gongbujiangda, Gongbu, Tibet		16	8	2x		PH	NT	Yuan & Yang, 2008
毛茛科 Ranunculaceae	翠雀属 <i>Delphinium</i>	<i>D. gyalanum</i> C. Marquand & Airy Shaw	西藏浪卡子 Langkazi, Tibet		16	8	2x		PH	NT	Yuan & Yang, 2008
毛茛科 Ranunculaceae	翠雀属 <i>Delphinium</i>	<i>D. humilium</i> W. T. Wang	四川雅江 Yajiang, Sichuan		16	8	2x		PH	NT	Yuan & Yang, 2008
毛茛科 Ranunculaceae	翠雀属 <i>Delphinium</i>	<i>D. kamaonense</i> Huth	四川南坪 Nanping, Sichuan		16	8	2x		PH	NT	杨亲二, 1996
毛茛科	翠雀属 <i>Delphinium</i>	<i>D. kamaonense</i> Huth	青海玉树 Yushu, Qinghai		16	8	2x	4,020	PH	NT	刘建全和何廷农,

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
Ranunculaceae											1999
毛茛科	翠雀属 <i>Delphinium</i>	<i>D. kansuense</i> W. T. Wang	Pingan, Qinghai		16	8	2x		PH	NT	Yuan & Yang, 2008
Ranunculaceae	翠雀属 <i>Delphinium</i>	<i>D. likiangense</i> Franch.	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		16	8	2x		PH	NT	杨亲二, 2001a
毛茛科	翠雀属 <i>Delphinium</i>	<i>D. likiangense</i> Franchet	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		16	8	2x		PH	NT	Yuan & Yang, 2008
毛茛科	翠雀属 <i>Delphinium</i>	<i>D. micropetalum</i> Finet & Gagnepain	云南维西 Weixi, Yunnan		16	8	2x		PH	NT	Yuan & Yang, 2008
毛茛科	翠雀属 <i>Delphinium</i>	<i>D. mosoynense</i> Franch.	云南丽江 Lijiang, Yunnan		16	8	2x		PH	NT	Yuan & Yang, 2008
毛茛科	翠雀属 <i>Delphinium</i>	<i>D. mosoynense</i> Franch.	四川盐源 Yanyuan, Sichuan		16	8	2x		PH	NT	Yuan & Yang, 2008
毛茛科	翠雀属 <i>Delphinium</i>	<i>D. muliense</i> W. T. Wang	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		16	8	2x		PH	NT	Yuan & Yang, 2008
毛茛科	翠雀属 <i>Delphinium</i>	<i>D. nangchienense</i> W. T. Wang	青海玉树 Yushu, Qinghai		16	8	2x	3,540	PH	NT	刘建全和何廷农, 1999
毛茛科	翠雀属 <i>Delphinium</i>	<i>D. nangchienense</i> W. T. Wang	青海囊谦 Nangqian, Qinghai		16	8	2x		PH	NT	Yuan & Yang, 2008
毛茛科	翠雀属 <i>Delphinium</i>	<i>D. nangchienense</i> W. T. Wang	青海玉树 Yushu, Qinghai		16	8	2x		PH	NT	Yuan & Yang, 2008
毛茛科	翠雀属 <i>Delphinium</i>	<i>D. nangchienense</i> W. T. Wang	西藏 昌都 Changdu, Xizang		16	8	2x		PH	NT	Yuan & Yang, 2008

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
毛茛科 Ranunculaceae	翠雀属 <i>Delphinium</i>	<i>D. omeiense</i> W. T. Wang	四川峨眉山 Emei Mt., Sichuan		16	8	2x		PH	NT	Yuan & Yang, 2008
毛茛科 Ranunculaceae	翠雀属 <i>Delphinium</i>	<i>D. omeiense</i> W. T. Wang	四川木里 Muli, Sichuan		16	8	2x		PH	NT	Yuan & Yang, 2008
毛茛科 Ranunculaceae	翠雀属 <i>Delphinium</i>	<i>D. omeiense</i> W. T. Wang	四川喜德 Xide, Sichuan		16	8	2x		PH	NT	Yuan & Yang, 2008
毛茛科 Ranunculaceae	翠雀属 <i>Delphinium</i>	<i>D. omeiense</i> W. T. Wang	四川盐源 Yanyuan, Sichuan		16	8	2x		PH	NT	Yuan & Yang, 2008
毛茛科 Ranunculaceae	翠雀属 <i>Delphinium</i>	<i>D. orthocentrum</i> Franchet	四川松潘 Songpan, Sichuan		16	8	2x		PH	NT	Yuan & Yang, 2008
毛茛科 Ranunculaceae	翠雀属 <i>Delphinium</i>	<i>D. oxycentrum</i> W. T. Wang	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		16	8	2x		PH	NT	杨亲二, 2001a
毛茛科 Ranunculaceae	翠雀属 <i>Delphinium</i>	<i>D. pachycentrum</i> Hemsley	四川德格 Dege, Sichuan		16	8	2x		PH	NT	Yuan & Yang, 2008
毛茛科 Ranunculaceae	翠雀属 <i>Delphinium</i>	<i>D. potaninii</i> Huth	四川峨眉山 Emei Mt., Sichuan		16	8	2x		PH	NT	Yuan & Yang, 2008
毛茛科 Ranunculaceae	翠雀属 <i>Delphinium</i>	<i>D. potaninii</i> Huth	四川茂县 Maoxian, Sichuan		16	8	2x		PH	NT	Yuan & Yang, 2008
毛茛科 Ranunculaceae	翠雀属 <i>Delphinium</i>	<i>D. potaninii</i> Huth	四川天全 Tianquan, Sichuan		16	8	2x		PH	NT	Yuan & Yang, 2008
毛茛科 Ranunculaceae	翠雀属 <i>Delphinium</i>	<i>D. potaninii</i> Huth	四川宝兴 Baoxing, Sichuan		16	8	2x		PH	NT	Yuan & Yang, 2008
毛茛科	翠雀属 <i>Delphinium</i>	<i>D. pseudocampylocentrum</i> W. T.	四川小金 Xiaojin, Sichuan		16	8	2x		PH	NT	Yuan & Yang, 2008

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

[illegible]

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
毛茛科 Ranunculaceae	翠雀属 <i>Delphinium</i>	<i>D. spirocentrum</i> Hand. -Mazz.	云南大理 Dali, Yunnan		16	8	2x		PH	NT	杨亲二, 2001a
毛茛科 Ranunculaceae	翠雀属 <i>Delphinium</i>	<i>D. spirocentrum</i> Handel-Mazzetti	云南大理 Dali, Yunnan		16	8	2x		PH	NT	Yuan & Yang, 2008
毛茛科 Ranunculaceae	翠雀属 <i>Delphinium</i>	<i>D. spirocentrum</i> Handel-Mazzetti	云南维西 Weixi, Yunnan		16	8	2x		PH	NT	Yuan & Yang, 2008
毛茛科 Ranunculaceae	翠雀属 <i>Delphinium</i>	<i>D. spirocentrum</i> Handel-Mazzetti	云南维西 Weixi, Yunnan		32	8	4x		PH	NT	Yuan & Yang, 2008
毛茛科 Ranunculaceae	翠雀属 <i>Delphinium</i>	<i>D. spirocentrum</i> Handel-Mazzetti	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		16	8	2x		PH	NT	Yuan & Yang, 2008
毛茛科 Ranunculaceae	翠雀属 <i>Delphinium</i>	<i>D. tangkulaense</i> W. T. Wang	青海玛多 Maduo, Qinghai		16	8	2x		PH	NT	Yuan & Yang, 2008
毛茛科 Ranunculaceae	翠雀属 <i>Delphinium</i>	<i>D. tangkulaense</i> W. T. Wang	青海玛多 Maduo, Qinghai		16	8	2x	4,430	PH	NT	刘建全和何廷农, 1999
毛茛科 Ranunculaceae	翠雀属 <i>Delphinium</i>	<i>D. tangkulaense</i> W. T. Wang f. <i>xanthanthum</i> W. T. Wang et S. K. Wu	青海可可西里勒斜武担 Lexiewudan, Kekexili, Qinghai		16	8	2x	4,900	PH	NT	杨永平和武素功, 1993
毛茛科 Ranunculaceae	翠雀属 <i>Delphinium</i>	<i>D. tatsienense</i> Franchet var. <i>pseudomosoyense</i>	四川康定 Kangding, Sichuan		16	8	2x		PH	NT	Yuan & Yang, 2008
毛茛科 Ranunculaceae	翠雀属 <i>Delphinium</i>	<i>D. tatsienense</i> Franchet var. <i>pseudomosoyense</i>	四川雅江 Yajiang, Sichuan		16	8	2x		PH	NT	Yuan & Yang, 2008
毛茛科 Ranunculaceae	翠雀属 <i>Delphinium</i>	<i>D. tenii</i> H. Lév.	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		16	8	2x		PH	NT	杨亲二, 2001a
毛茛科	翠雀属 <i>Delphinium</i>	<i>D. thibeticum</i> var. <i>laceratilobum</i> W.	西藏江达 Jiangda, Tibet		16	8	2x		PH	NT	Yuan & Yang, 2008

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

[illegible]

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
毛茛科 Ranunculaceae	侧金盏花属 <i>Adonis</i>	<i>A. brevistyla</i> Franch.	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		16	8	2x		PH	OWT	杨亲二, 2001b
毛茛科 Ranunculaceae	侧金盏花属 <i>Adonis</i>	<i>A. coerulea</i> Maxim	青海可可西里察日措 Charicuo, Kekexili, Qinghai		24	6	4x	4,800	AH	C	杨永平和武素功, 1993
毛茛科 Ranunculaceae	美花草属 <i>Callianthemum</i>	<i>C. pimpinelloides</i> (D. Don) Hook. f. & Thoms.	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		32	16	4x		PH	OWT	杨亲二, 2001b
毛茛科 Ranunculaceae	美花草属 <i>Callianthemum</i>	<i>C. pimpinelloides</i> Hook. f. et Thoms.	青海可可西里乌兰乌拉湖 Wulanwula Lake, Kekexili, Qinghai		14	7	2x	4,800	PH	C	杨永平和武素功, 1993
茜草科 Rubiaceae	钩毛草属 <i>Kelloggia</i>	<i>K. chinensis</i> (Honglashan)	四川甘孜 Ganzi, Sichuan		34	17	2x	3,400	PH	OWT	Tu et al, 2005a
茜草科 Rubiaceae	钩毛草属 <i>Kelloggia</i>	<i>K. chinensis</i> (Napahai)	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		48	6	8x	3,700	PH	OWT	Tu et al, 2005a
茜草科 Rubiaceae	钩毛草属 <i>Kelloggia</i>	<i>K. chinensis</i> (Xialang)	四川石渠 Shiqu, Sichuan		44	11	4x	4,320	PH	EC	Tu et al, 2005a
蔷薇科 Rosaceae	悬钩子属 <i>Rubus</i>	<i>R. amabilis</i> Focke	四川雅安 Ya'an, Sichuan		14	7	2x	1,250	W	C	王小蓉等, 2008
蔷薇科 Rosaceae	悬钩子属 <i>Rubus</i>	<i>R. assamensis</i> Focke	四川雅安 Ya'an, Sichuan		28	7	4x	700	W	C	王小蓉等, 2008
蔷薇科 Rosaceae	悬钩子属 <i>Rubus</i>	<i>R. buergeri</i> Miq.	四川雅安 Ya'an, Sichuan		56	7	8x	850	W	C	王小蓉等, 2008
蔷薇科 Rosaceae	悬钩子属 <i>Rubus</i>	<i>R. caudifolius</i> Wuzhi	四川雅安 Ya'an, Sichuan		28	7	4x	1,700	W	C	王小蓉等, 2008
蔷薇科 Rosaceae	悬钩子属 <i>Rubus</i>	<i>R. cockburnianus</i> Hemsl.	四川天全 Tianquan, Sichuan		14	7	2x	1,800	W	C	王小蓉等, 2008
蔷薇科 Rosaceae	悬钩子属 <i>Rubus</i>	<i>R. corchorifolius</i> L. f.	四川雅安 Ya'an, Sichuan		14	7	2x	750	W	C	王小蓉等, 2008
蔷薇科 Rosaceae	悬钩子属 <i>Rubus</i>	<i>R. coreanus</i> Miq.	四川雅安 Ya'an, Sichuan		14	7	2x	680	W	C	王小蓉等, 2008
蔷薇科 Rosaceae	悬钩子属 <i>Rubus</i>	<i>R. ellipticus</i> Smith	四川雅安 Ya'an, Sichuan		14	7	2x	750	W	C	王小蓉等, 2008
蔷薇科 Rosaceae	悬钩子属 <i>Rubus</i>	<i>R. ellipticus</i> var. <i>obcordatus</i> (Franch.) Focke	四川雅安 Ya'an, Sichuan		14	7	2x	700	W	C	王小蓉等, 2008
蔷薇科 Rosaceae	悬钩子属 <i>Rubus</i>	<i>R. faberi</i> Focke	四川峨眉山 Emei Mt., Sichuan		28	7	4x	660	W	C	王小蓉等, 2008
蔷薇科 Rosaceae	悬钩子属 <i>Rubus</i>	<i>R. hirsutus</i> Thunb.	四川龙泉 Longquan, Sichuan		14	7	2x	700	W	C	王小蓉等, 2008

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
蔷薇科 Rosaceae	悬钩子属 <i>Rubus</i>	<i>R. ichangensis</i> Hemsl. & Ktze.	四川雅安 Ya'an, Sichuan		28	7	4x	700	W	C	王小蓉等, 2008
蔷薇科 Rosaceae	悬钩子属 <i>Rubus</i>	<i>R. ichangensis</i> Hemsl. & Kuntze	四川峨眉山 Emei Mt., Sichuan		28	14	4x		W	C	Iwatsubo & Naruhashi, 1992
蔷薇科 Rosaceae	悬钩子属 <i>Rubus</i>	<i>R. idaeopsis</i> Focke	四川西充 Xichong, Sichuan		21	7	3x	700	W	C	王小蓉等, 2008
蔷薇科 Rosaceae	悬钩子属 <i>Rubus</i>	<i>R. innominatus</i> S. Moore	四川天全 Tianquan, Sichuan		14	7	2x	2,000	W	C	王小蓉等, 2008
蔷薇科 Rosaceae	悬钩子属 <i>Rubus</i>	<i>R. inopertus</i> (Diels) Focke	四川雅安 Ya'an, Sichuan		14	7	2x	1,740	W	C	王小蓉等, 2008
蔷薇科 Rosaceae	悬钩子属 <i>Rubus</i>	<i>R. lambertianus</i> var. <i>glaber</i> Hemsl.	四川雅安 Ya'an, Sichuan		28	7	4x	680	W	C	王小蓉等, 2008
蔷薇科 Rosaceae	悬钩子属 <i>Rubus</i>	<i>R. mesogaeus</i> Focke	四川峨眉山 Emei Mt., Sichuan		14	7	2x	1,670	W	C	王小蓉等, 2008
蔷薇科 Rosaceae	悬钩子属 <i>Rubus</i>	<i>R. niveus</i> Thunb.	四川雅安 Ya'an, Sichuan		14	7	2x	700	W	C	王小蓉等, 2008
蔷薇科 Rosaceae	悬钩子属 <i>Rubus</i>	<i>R. parkeri</i> Hance	四川雅安 Ya'an, Sichuan		28	7	4x	680	W	C	王小蓉等, 2008
蔷薇科 Rosaceae	悬钩子属 <i>Rubus</i>	<i>R. parvifolius</i> L.	四川西充 Xichong, Sichuan		14	7	2x	550	W	C	王小蓉等, 2008
蔷薇科 Rosaceae	悬钩子属 <i>Rubus</i>	<i>R. parvifolius</i> L.	四川西充 Xichong, Sichuan		28	7	4x	550	W	C	王小蓉等, 2008
蔷薇科 Rosaceae	悬钩子属 <i>Rubus</i>	<i>R. pinfaensis</i> Lévl. & Vant.	四川峨眉山 Emei Mt., Sichuan		14	7	2x	850	W	C	王小蓉等, 2008
蔷薇科 Rosaceae	悬钩子属 <i>Rubus</i>	<i>R. pungens</i> Camb.	四川天全 Tianquan, Sichuan		14	7	2x	2,100	W	C	王小蓉等, 2008
蔷薇科 Rosaceae	悬钩子属 <i>Rubus</i>	<i>R. setchuenensis</i> Bureau & Franch.	四川天全 Tianquan, Sichuan		28	7	4x	2,000	W	C	王小蓉等, 2008
蔷薇科 Rosaceae	悬钩子属 <i>Rubus</i>	<i>R. stans</i> Focke	四川西昌 Xichang, Sichuan		14	7	2x	2,100	W	C	王小蓉等, 2008
蔷薇科 Rosaceae	悬钩子属 <i>Rubus</i>	<i>R. subinopertus</i> Yü & Lu	四川峨眉山 Emei Mt., Sichuan		14	7	2x	2,150	W	C	王小蓉等, 2008
蔷薇科 Rosaceae	悬钩子属 <i>Rubus</i>	<i>R. subtibetanus</i> Hand. -Mazz.	四川峨眉山 Emei Mt., Sichuan		14	7	2x	2,450	W	C	王小蓉等, 2008
蔷薇科 Rosaceae	悬钩子属 <i>Rubus</i>	<i>R. yiwuanus</i> Fang	四川雅安 Ya'an, Sichuan		28	7	4x	1,700	W	C	王小蓉等, 2008
蔷薇科 Rosaceae	绣线菊属 <i>Spiraea</i>	<i>S. japonica</i> var. <i>acuminata</i>	四川南川 Nanchuan, Sichuan		18	9	2x		W	NT	Zhang et al, 2002
蔷薇科 Rosaceae	绣线菊属 <i>Spiraea</i>	<i>S. japonica</i> var. <i>acuta</i>	云南大理 Dali, Yunnan		18	9	2x		W	NT	Zhang et al, 2002
蔷薇科 Rosaceae	绣线菊属 <i>Spiraea</i>	<i>S. japonica</i> var. <i>fortunei</i>	四川 南川 Nanchuan, Sichuan		36	9	4x		W	NT	Zhang et al, 2002
蔷薇科 Rosaceae	绣线菊属 <i>Spiraea</i>	<i>S. japonica</i> var. <i>incisa</i>	云南维西 Weixi, Yunnan		18	9	2x		W	NT	Zhang et al, 2002

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
蔷薇科 Rosaceae	蔷薇属 <i>Rosa</i>	<i>R. odorata</i> (Andr.) Sweet <i>var.erubescens</i>	云南维西永春 Weixi, Yunnan		21	7	3x	2,568	W	NT	蹇洪英等, 2010
蔷薇科 Rosaceae	蔷薇属 <i>Rosa</i>	<i>R. odorata</i> (Andr.) Sweet var. <i>erubescens</i>	云南丽江木家桥 Mujiqiao, Lijiang, Yunnan		21	7	3x	2,420	W	NT	蹇洪英等, 2010
蔷薇科 Rosaceae	蔷薇属 <i>Rosa</i>	<i>R. odorata</i> (Andr.) Sweet var. <i>pseudoindica</i>	云南丽江新主 Xinzhu, Lijiang, Yunnan		14	7	2x	2,346	W	NT	蹇洪英等, 2010
蔷薇科 Rosaceae	苹果属 <i>Malus</i>	<i>M. asiatica</i> Nakai	四川巴县 Baxian, Sichuan		68	17	4x		W	NT	梁国鲁, 1987
蔷薇科 Rosaceae	苹果属 <i>Malus</i>	<i>M. halliana</i> Koehne	四川昭觉 Zhaojue, Sichuan		34	17	2x		W	NT	梁国鲁和李晓林, 1993
蔷薇科 Rosaceae	苹果属 <i>Malus</i>	<i>M. halliana</i> Koehne	四川昭觉 Zhaojue, Sichuan		34	17	2x		W	NT	梁国鲁, 1987
蔷薇科 Rosaceae	苹果属 <i>Malus</i>	<i>M. hupehensis</i> (Pampanini) Rehder	四川马尔康 Maerkang, Sichuan		51	17	3x		W	NT	梁国鲁, 1987
蔷薇科 Rosaceae	苹果属 <i>Malus</i>	<i>M. hupehensis</i> (Pampanini) Rehder	四川盐源 Yanyuan, Sichuan		68	17	4x		W	NT	梁国鲁, 1987
蔷薇科 Rosaceae	苹果属 <i>Malus</i>	<i>M. kansuensis</i> (Batalin) C. K. Schneid.	四川小金 Xiaojin, Sichuan		34	17	2x		W	NT	梁国鲁, 1987
蔷薇科 Rosaceae	苹果属 <i>Malus</i>	<i>M. ombrophila</i> Handel-Mazzetti	四川盐源 Yanyuan, Sichuan		34	17	2x		W	NT	梁国鲁和李晓林, 1993
蔷薇科 Rosaceae	苹果属 <i>Malus</i>	<i>M. ombrophila</i> Handel-Mazzetti	四川盐源 Yanyuan, Sichuan		34	17	2x		W	NT	梁国鲁, 1987
蔷薇科 Rosaceae	苹果属 <i>Malus</i>	<i>M. rockii</i> Rehder	四川盐源 Yanyuan, Sichuan		34	17	2x		W	NT	梁国鲁和李晓林, 1993
蔷薇科 Rosaceae	苹果属 <i>Malus</i>	<i>M. rockii</i> Rehder	四川盐源 Yanyuan, Sichuan		34	17	2x		W	NT	梁国鲁, 1987
蔷薇科 Rosaceae	苹果属 <i>Malus</i>	<i>M. rockii</i> Rehder	四川昭觉 Zhaojue, Sichuan		51	17	3x		W	NT	梁国鲁和李晓林, 1993
蔷薇科 Rosaceae	苹果属 <i>Malus</i>	<i>M. rockii</i> Rehder	四川昭觉 Zhaojue, Sichuan		51	17	3x		W	NT	梁国鲁, 1987

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
蔷薇科 Rosaceae	苹果属 <i>Malus</i>	<i>M. sikkimensis</i> (Wenzig) Koehne ex C. K. Schneid.	四川盐源 Yanyuan, Sichuan		34	17	2x		W	NT	梁国鲁和李晓林, 1993
蔷薇科 Rosaceae	苹果属 <i>Malus</i>	<i>M. toringoides</i> (Rehd.) Hughes	四川阿坝 Aba, Sichuan		34	17	2x		W	NT	梁国鲁和李晓林, 1993
蔷薇科 Rosaceae	苹果属 <i>Malus</i>	<i>M. toringoides</i> (Rehd.) Hughes	四川阿坝 Aba, Sichuan		68	17	4x		W	NT	梁国鲁和李晓林, 1993
蔷薇科 Rosaceae	苹果属 <i>Malus</i>	<i>M. toringoides</i> (Rehd.) Hughes	四川马尔康 Maerkang, Sichuan		51	17	3x		W	NT	梁国鲁和李晓林, 1993
蔷薇科 Rosaceae	苹果属 <i>Malus</i>	<i>M. toringoides</i> (Rehder) Hughes	四川马尔康 Maerkang, Sichuan		51	17	3x		W	NT	梁国鲁, 1987
蔷薇科 Rosaceae	苹果属 <i>Malus</i>	<i>M. transitoria</i> (Batalin) C.K. Schneid.	四川阿坝 Aba, Sichuan		34	17	2x		W	NT	肖艳等, 1997
蔷薇科 Rosaceae	苹果属 <i>Malus</i>	<i>M. transitoria</i> (Batalin) C. K. Schneid.	四川阿坝 Aba, Sichuan		51	17	3x		W	NT	肖艳等, 1997
蔷薇科 Rosaceae	苹果属 <i>Malus</i>	<i>M. xiaojinensis</i> M. H. Cheng & N. G. Jiang	四川小金 Xiaojin, Sichuan		68	17	4x		W	NT	梁国鲁和李晓林, 1993
蔷薇科 Rosaceae	苹果属 <i>Malus</i>	<i>M. yunnanensis</i> (Franchet) C. K. Schneider	四川盐源 Yanyuan, Sichuan		34	17	2x		W	NT	梁国鲁和李晓林, 1993
蔷薇科 Rosaceae	苹果属 <i>Malus</i>	<i>M. yunnanensis</i> (Franchet) C. K. Schneider	四川盐源 Yanyuan, Sichuan		34	17	2x		W	NT	梁国鲁, 1987
蔷薇科 Rosaceae	牛筋条属 <i>Dichotomanthes</i>	<i>D. tristaniaecarpa</i> Kurz	云南腾冲 Tengchong, Yunnan		34	17	2x		W	EC	Zhou et al, 2000a
蔷薇科 Rosaceae	花楸属 <i>Sorbus</i>	<i>S. Koehneana</i> C. K. Schneider	云南德钦 Deqin, Yunnan		34	17	2x		W	NT	陈丹, 2014
蔷薇科 Rosaceae	花楸属 <i>Sorbus</i>	<i>S. setschwanensis</i> (C. K. Schneider) Koehne	四川峨眉山雷洞坪 Leidongping, Emei Mt., Sichuan		34	17	2x		W	NT	陈丹, 2014

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
鞘柄木科 Toricelliaceae	鞘柄木属 <i>Toricellia</i>	<i>T. angulata</i> var. <i>intermedia</i> (Harms) Hu	四川峨眉山 Emei Mt., Sichuan		24	12	2x		PH	EA	汤彦承等, 1984
茄科 Solanaceae	天仙子属 <i>Hyoscyamus</i>	<i>H. niger</i> L.	云南鹤庆 Heqing, Yunnan		48	6	8x	2,390	PH	EA	Tu et al, 2005a
茄科 Solanaceae	山莨菪属 <i>Anisodus</i>	<i>A. acutangulus</i> C. Y. Wu & C. Chen	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		22	11	2x	3,200	PH	EA & NAD	Tu et al, 2006
茄科 Solanaceae	山莨菪属 <i>Anisodus</i>	<i>A. acutangulus</i> C. Y. Wu & C. Chen	西藏芒康 Mangkang, Tibet		22	11	2x	4,300	PH	EA & NAD	Tu et al, 2006
茄科 Solanaceae	山莨菪属 <i>Anisodus</i>	<i>A. carniolicoides</i> (C. Y. Wu & C. Chen) D'Arcy & Z. Y. Zhang	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		22	11	2x	3,600	PH	EA & NAD	Tu et al, 2006
茄科 Solanaceae	山莨菪属 <i>Anisodus</i>	<i>A. luridus</i> Link	四川稻城 Daocheng, Sichuan		48	6	8x	3,750	PH	EA	Tu et al, 2005a
茄科 Solanaceae	山莨菪属 <i>Anisodus</i>	<i>A. luridus</i> Link & Otto	云南丽江 Lijiang, Yunnan		48	6	8x	3,100	PH	EA	Tu et al, 2005a
茄科 Solanaceae	山莨菪属 <i>Anisodus</i>	<i>A. sinensis</i> Pascher	四川稻城 Daocheng, Sichuan		48	6	8x	3,750	PH	EA	Tu et al, 2005a
茄科 Solanaceae	山莨菪属 <i>Anisodus</i>	<i>A. tanguticus</i> Pascher	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		48	6	8x	3,370	PH	EA	Tu et al, 2005a
茄科 Solanaceae	茄属 <i>Solanum</i>	<i>S. spirale</i> Roxb.	西藏墨脱 Motuo, Tibet		32	8	4x	1,700	PH	TA to TA	顾志建和孙先凤, 1998
茄科 Solanaceae	茄参属 <i>Mandragora</i>	<i>M. caulescens</i> C. B. Clarke	四川石渠 Shiqu, Sichuan		48	6	8x	2,900	PH	EA	Tu et al, 2005a
茄科 Solanaceae	泡囊草属 <i>Physochlaina</i>	<i>P. praealta</i> (Decne.) Miers	西藏聂荣县 Nierong, Tibet		14	7	2x	4,300	PH	CA	顾志建等, 1993
茄科 Solanaceae	马尿泡属 <i>Przewalskia</i>	<i>P. tangutica</i> Maxim.	四川稻城 Daocheng, Sichuan		48	6	8x	3,750	PH	EA	Tu et al, 2005a
茄科 Solanaceae	马尿泡属 <i>Przewalskia</i>	<i>P. tangutica</i> Maxim.	青海玛多 Maduo, Qinghai		28	14	2x	4,750	PH	NT	Huang et al, 1996a

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
茄科 Solanaceae	高原芥属 <i>Christolea</i>	<i>C. crassifolia</i> Camb	青海玛多 Maduo, Qinghai		14	7	2x	4,300	PH	NT	顾志建等, 1993
清风藤科 Sabiaceae	鼠尾草属 <i>Salvia</i>	<i>S. yunnanensis</i> Franch.	四川峨眉山 Emei Mt., Sichuan	22		22	4x	2,100	AH	C	Hong & Zhang, 1990
秋海棠科 Begoniaceae	秋海棠属 <i>Begonia</i>	<i>B. cavaleriei</i> H. Lév.	云南洱源 Eyuan, Yunnan		30	10	3x		PH	P	田代科等, 2002
忍冬科 Caprifoliaceae	忍冬属 <i>Lonicera</i>	<i>L. schneideriana</i> Rehder	四川峨眉山 Emei Mt., Sichuan		12	6	2x	1,200	AH	EA	Hong & Zhang, 1990
伞形科 Apiaceae	丝瓣芹属 <i>Acronema</i>	<i>A. paniculatum</i> (Franch.) Wolff	云南宾川 Binchuan, Yunnan		18	9	2x	2,200	PH	C	张丹等, 2010
伞形科 Apiaceae	鼠尾草属 <i>Salvia</i>	<i>S. evansiana</i> Hand. -Mazz.	云南大理 Dali, Yunnan		32	16	4x	2,550	PH	C	赵红霞等, 2006
伞形科 Apiaceae	鼠尾草属 <i>Salvia</i>	<i>S. multiorrhiza</i> Bunge	云南昆明西山 Xishan, Kunming, Yunnan		16	8	2x	1,891	PH	C	赵红霞等, 2006
伞形科 Apiaceae	羌活属 <i>Notopterygium</i>	<i>N. forbesii</i> Boissieu	四川马边山 Mabian Mt., Sichuan		22	11	2x	2,610	PH	EC	张雪梅等, 2006
伞形科 Apiaceae	羌活属 <i>Notopterygium</i>	<i>N. forbesii</i> Boissieu	四川屏山老君山 Laojun Mt., Pingshan, Sichuan		22	11	2x	1,950	PH	EC	张雪梅等, 2006
伞形科 Apiaceae	前胡属 <i>Peucedanum</i>	<i>P. songpanense</i> Shan et Pu	四川松潘 Songpan, Sichuan		22	11	2x	2,900	PH	OWT	张雪梅等, 2006
伞形科 Apiaceae	前胡属 <i>Peucedanum</i>	<i>P. turgeniifolium</i> Wolff	四川松潘 Songpan, Sichuan		22	11	2x	2,900	PH	OWT	张雪梅等, 2006
伞形科 Apiaceae	迷果芹属 <i>Sphallerocarpus</i>	<i>S. gracilis</i> (Bess.) K-Pol.	甘肃山丹县 Shandan, Gansu		20	10	2x	2,650	PH	CA	赵东利等, 2001
伞形科 Apiaceae	棱子芹属	<i>P. angelicoides</i> Benth. ex C. B. Clarke	云南丽江 Lijiang, Yunnan		22	11	2x		PH	OWT	秦慧贞等, 1989

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
	<i>Pleurospermum</i>										
伞形科 Apiaceae	棱子芹属	<i>P. franchetianum</i> Hemsl.	四川小金县巴郎山 Balang Mt., Xiaojin, Sichuan		18	9	2x	3,900	PH	OWT	蒲吉霞等, 2006
伞形科 Apiaceae	棱子芹属	<i>P. hookeri</i> var. <i>thomsonii</i> C. B. Clarke	四川松潘县黄龙寺 Huanglongsi, Songpan, Sichuan		22	11	2x	3,570	PH	OWT	蒲吉霞等, 2006
伞形科 Apiaceae	棱子芹属	<i>P. permum</i>	四川松潘县黄龙寺 Huanglongsi, Songpan, Sichuan		22	11	2x	3,570	PH	OWT	蒲吉霞等, 2006
伞形科 Apiaceae	棱子芹属	<i>P. permum</i>	四川小金县巴郎山 Balang Mt., Xiaojin, Sichuan		18	9	2x	3,900	PH	OWT	蒲吉霞等, 2006
伞形科 Apiaceae	棱子芹属	<i>P. rivulorum</i> (Diels) K. T. Fu & Y. C. Ho	云南丽江 Lijiang, Yunnan		22	11	2x		PH	OWT	秦慧贞等, 1989
伞形科 Apiaceae	茴芹属 <i>Pimpinella</i>	<i>P. arguta</i> Diels	四川汶川县卧龙 Wolong, Wenchuan, Sichuan		22	11	2x	2,318	PH	C	蒲吉霞等, 2006
伞形科 Apiaceae	茴芹属 <i>Pimpinella</i>	<i>P. candolleana</i> Wight et Arn.	云南德钦 Deqin, Yunnan		18	9	2x	3,462	PH	C	张丹等, 2010
伞形科 Apiaceae	茴芹属 <i>Pimpinella</i>	<i>P. diversifolia</i> DC.	四川茂县 Maoxian, Sichuan		18	9	2x	1,470	PH	C	蒲吉霞等, 2006
伞形科 Apiaceae	茴芹属 <i>Pimpinella</i>	<i>P. diversifolia</i> DC.	四川汶川县草坡乡 Caopoxiang, Wenchuan, Sichuan		18	9	2x	1,800	PH	C	蒲吉霞等, 2006
伞形科 Apiaceae	茴芹属 <i>Pimpinella</i>	<i>P. diversifolia</i> DC.	四川汶川县卧龙 Wolong, Wenchuan, Sichuan		18	9	2x	2,080	PH	C	蒲吉霞等, 2006
伞形科 Apiaceae	茴芹属 <i>Pimpinella</i>	<i>P. diversifolia</i> DC.	四川汶川县银杏 Yinxing, Wenchuan, Sichuan		18	9	2x	1,240	PH	C	蒲吉霞等, 2006
伞形科 Apiaceae	茴芹属 <i>Pimpinella</i>	<i>P. flaccida</i> C. B. Clarke	云南德钦 Deqin, Yunnan		18	9	2x	3,510	AH	C	张丹等, 2010
伞形科 Apiaceae	茴芹属 <i>Pimpinella</i>	<i>P. flaccida</i> C. B. Clarke	云南宾川 Binchuan, Yunnan	10		10	2x		PH	C	秦慧贞等, 1989

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
伞形科 Apiaceae	藁本属 <i>Ligusticum</i>	<i>L. acuminatum</i> Franch.	四川小金 Xiaojin, Sichuan		22	11	2x		PH	NT	潘泽惠等, 1985
伞形科 Apiaceae	藁本属 <i>Ligusticum</i>	<i>L. brachylobum</i> Franch.	云南鹤庆 Heqing, Yunnan	11		11	2x		PH	NT	秦慧贞等, 1989
伞形科 Apiaceae	藁本属 <i>Ligusticum</i>	<i>L. brachylobum</i> Franch.	云南香格里拉 Shangri-la, Yunnan		22	11	2x	3,500	PH	NT	Zhou et al, 2008
伞形科 Apiaceae	藁本属 <i>Ligusticum</i>	<i>L. capillaceum</i> H. Wolff	四川稻城 Daocheng, Sichuan		44	11	4x	3,740	PH	NT	Zhou et al, 2008
伞形科 Apiaceae	藁本属 <i>Ligusticum</i>	<i>L. daucoides</i> (Franch.) Franch.	四川稻城 Daocheng, Sichuan		22	11	2x	4,500	PH	NT	Zhou et al, 2008
伞形科 Apiaceae	藁本属 <i>Ligusticum</i>	<i>L. delavayi</i> Franch.	云南小中甸 Xiaozhongdian, Yunnan		22	11	2x	3,257	PH	NT	Zhou et al, 2008
伞形科 Apiaceae	藁本属 <i>Ligusticum</i>	<i>L. involucratum</i> Franch	四川雅江 Yajiang, Sichuan		22	11	2x	4,200	PH	NT	Zhou et al, 2008
伞形科 Apiaceae	藁本属 <i>Ligusticum</i>	<i>L. pteridophyllum</i> Franch.	云南五峰山		44	11	4x	3,500	PH	NT	Zhou et al, 2008
伞形科 Apiaceae	藁本属 <i>Ligusticum</i>	<i>L. pteridophyllum</i> Franch. ex Gliver	云南大理 Dali, Yunnan	11		11	2x		PH	NT	秦慧贞等, 1989
伞形科 Apiaceae	藁本属 <i>Ligusticum</i>	<i>L. rechingerianum</i> (Leute) R. H. Shan & F. D. Pu	云南维西 Weixi, Yunnan		22	11	2x	3,400	PH	NT	Zhou et al, 2008
伞形科 Apiaceae	藁本属 <i>Ligusticum</i>	<i>L. sikiangense</i> Hiroe	四川稻城 Daocheng, Sichuan		22	11	2x	4,500	PH	NT	Zhou et al, 2008
伞形科 Apiaceae	藁本属 <i>Ligusticum</i>	<i>L. tenuisectum</i> H.de Bossieu	云南丽江 Lijiang, Yunnan		22	11	2x	3,100	PH	NT	Zhou et al, 2008
伞形科 Apiaceae	独活属 <i>Heracleum</i>	<i>H. candicans</i> var. <i>obtusifolium</i>									
伞形科 Apiaceae	独活属 <i>Heracleum</i>	(Wallich ex de Candolle) F. T. Pu & M. F. Watson	四川康定 Kangding, Sichuan		22	11	2x	3,100	PH	NT	Deng et al, 2009
伞形科 Apiaceae	独活属 <i>Heracleum</i>	<i>H. candicans</i> var. <i>obtusifolium</i>									
伞形科 Apiaceae	独活属 <i>Heracleum</i>	(Wallich ex de Candolle) F. T. Pu & M. F. Watson	四川汶川 Wenchuan, Sichuan		22	11	2x	2,100	PH	NT	Deng et al, 2009
伞形科 Apiaceae	独活属 <i>Heracleum</i>	<i>H. candicans</i> Wall.	四川松潘 Songpan, Sichuan		22	11	2x		PH	NT	何廷农等, 1994
伞形科 Apiaceae	独活属 <i>Heracleum</i>	<i>H. candicans</i> Wall. ex DC.	四川稻城 Daocheng, Sichuan		22	11	2x	3,250	PH	NT	Deng et al, 2009
伞形科 Apiaceae	独活属 <i>Heracleum</i>	<i>H. candicans</i> Wall. ex DC.	四川理塘 Litang, Sichuan		22	11	2x	4,140	PH	NT	Deng et al, 2009
伞形科 Apiaceae	独活属 <i>Heracleum</i>	<i>H. candicans</i> Wall. ex DC.	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		22	11	2x	3,400	PH	NT	Deng et al, 2009

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
伞形科 Apiaceae	独活属 <i>Heracleum</i>	<i>H. candicans</i> Wall. ex DC.	四川雅江 Yajiang, Sichuan		22	11	2x	3,900	PH	NT	Deng et al, 2009
伞形科 Apiaceae	独活属 <i>Heracleum</i>	<i>H. franchetii</i> Hiroe	四川稻城 Daocheng, Sichuan		22	11	2x	3,750	PH	NT	Deng et al, 2009
伞形科 Apiaceae	独活属 <i>Heracleum</i>	<i>H. franchetii</i> Hiroe	四川康定 Kangding, Sichuan		22	11	2x	3,450	PH	NT	Deng et al, 2009
伞形科 Apiaceae	独活属 <i>Heracleum</i>	<i>H. franchetii</i> Hiroe	四川理塘 Litang, Sichuan		22	11	2x	3,900	PH	NT	Deng et al, 2009
伞形科 Apiaceae	独活属 <i>Heracleum</i>	<i>H. franchetii</i> Hiroe	四川雅江 Yajiang, Sichuan		22	11	2x	4,000	PH	NT	Deng et al, 2009
伞形科 Apiaceae	独活属 <i>Heracleum</i>	<i>H. franchetii</i> Hiroe	四川小金 Xiaojin, Sichuan		22	11	2x		PH	NT	何廷农等, 1994
伞形科 Apiaceae	独活属 <i>Heracleum</i>	<i>H. hemsleyanum</i> Diels	四川康定 Kangding, Sichuan		22	11	2x	3,080	PH	NT	Deng et al, 2009
伞形科 Apiaceae	独活属 <i>Heracleum</i>	<i>H. hemsleyanum</i> Diels	四川理县 Lixian County, Sichuan		22	11	2x		PH	NT	何廷农等, 1994
伞形科 Apiaceae	独活属 <i>Heracleum</i>	<i>H. henryi</i> H. Wolff	云南保山 Baoshan, Yunnan		22	11	2x	1,514	PH	NT	Deng et al, 2009
伞形科 Apiaceae	独活属 <i>Heracleum</i>	<i>H. henryi</i> H. Wolff	云南腾冲 Tengchong, Yunnan		44	11	4x	1,447	PH	NT	Deng et al, 2009
伞形科 Apiaceae	独活属 <i>Heracleum</i>	<i>H. henryi</i> H. Wolff	云南泸水 Lushui, Yunnan	22		11	4x		PH	NT	何廷农等, 1994
伞形科 Apiaceae	独活属 <i>Heracleum</i>	<i>H. kingdoni</i> H. Wolff	云南腾冲 Tengchong, Yunnan		44	11	4x	1,600	PH	NT	Deng et al, 2009
伞形科 Apiaceae	独活属 <i>Heracleum</i>	<i>H. millefolium</i> Diels	四川稻城 Daocheng, Sichuan		22	11	2x	3,970	PH	NT	Deng et al, 2009
伞形科 Apiaceae	独活属 <i>Heracleum</i>	<i>H. millefolium</i> Diels	四川雅江 Yajiang, Sichuan		22	11	2x	4,040	PH	NT	Deng et al, 2009
伞形科 Apiaceae	独活属 <i>Heracleum</i>	<i>H. millefolium</i> Diels	四川松潘 Songpan, Sichuan		22	11	2x		PH	NT	何廷农等, 1994
伞形科 Apiaceae	独活属 <i>Heracleum</i>	<i>H. millefolium</i> var. <i>longilobum</i> C. Norman	四川松潘 Songpan, Sichuan		22, 24	11	2x		PH	NT	何廷农等, 1994
伞形科 Apiaceae	独活属 <i>Heracleum</i>	<i>H. moellendorffii</i> Hance	四川汶川 Wenchuan, Sichuan		22	11	2x	2,000	PH	NT	Deng et al, 2009
伞形科 Apiaceae	独活属 <i>Heracleum</i>	<i>H. obtusifolium</i> Wall.	四川汶川 Wenchuan, Sichuan		22	11	2x		PH	NT	何廷农等, 1994
伞形科 Apiaceae	独活属 <i>Heracleum</i>	<i>H. souliei</i> H. Boissieu	四川康定 Kangding, Sichuan		22	11	2x	2,750	PH	NT	Deng et al, 2009
伞形科 Apiaceae	独活属 <i>Heracleum</i>	<i>H. souliei</i> H. Boissieu	四川康定 Kangding, Sichuan		22	11	2x	3,750	PH	NT	Deng et al, 2009
伞形科 Apiaceae	独活属 <i>Heracleum</i>	<i>H. stenopterum</i> Diels	四川稻城 Daocheng, Sichuan		22	11	2x	3,800	PH	NT	Deng et al, 2009
伞形科 Apiaceae	独活属 <i>Heracleum</i>	<i>H. stenopterum</i> Diels	四川理塘 Litang, Sichuan		22	11	2x	3,900	PH	NT	Deng et al, 2009

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
伞形科 Apiaceae	独活属 <i>Heracleum</i>	<i>H. stenopterum</i> Diels	四川松潘 Songpan, Sichuan		22	11	2x		PH	NT	何廷农等, 1994
伞形科 Apiaceae	独活属 <i>Heracleum</i>	<i>H. vicinum</i> H. Boissieu	四川汶川 Wenchuan, Sichuan		22	11	2x		PH	NT	何廷农等, 1994
伞形科 Apiaceae	独活属 <i>Heracleum</i>	<i>H. wenchuanense</i> F. T. Pu & X. J. He	四川汶川 Wenchuan, Sichuan		22	11	2x	3,500	PH	NT	Deng et al, 2009
伞形科 Apiaceae	独活属 <i>Heracleum</i>	<i>H. wolongense</i> F. T. Pu & X. J. He	四川汶川 Wenchuan, Sichuan		22	11	2x		PH	NT	何廷农等, 1994
伞形科 Apiaceae	独活属 <i>Heracleum</i>	<i>H. yungningense</i> Hand. -Mazz.	四川小金 Xiaojin, Sichuan		22	11	2x		PH	NT	何廷农等, 1994
伞形科 Apiaceae	独活属 <i>Heracleum</i>	<i>H. yungningense</i> Handel-Mazzetti	四川稻城 Daocheng, Sichuan		22	11	2x	3,590	PH	NT	Deng et al, 2009
伞形科 Apiaceae	东俄芹属 <i>Tongoloa</i>	<i>T. elata</i> H. Wolff	云南大理 Dali, Yunnan	11		11	2x		PH	EA	秦慧贞等, 1989
伞形科 Apiaceae	滇芎属 <i>Physospermopsis</i>	<i>P. rubrinervis</i> (Franch.) C. Norman	云南丽江 Lijiang, Yunnan	11		11	2x		PH	EA	秦慧贞等, 1989
伞形科 Apiaceae	当归属 <i>Angelica</i>	<i>A. apaensis</i> R. H. Shan & C. Q. Yuan	四川小金县梦笔山 Mengbing Mt., Xiaojin, Sichuan		22	11	2x	3,000	PH	NT	张桥英等, 2005
伞形科 Apiaceae	当归属 <i>Angelica</i>	<i>A. chinghaiensis</i> Shan ex K. T. Fu	四川松潘 Songpan, Sichuan		44	11	4x	3,500	PH	NT	潘泽惠等, 1991
伞形科 Apiaceae	当归属 <i>Angelica</i>	<i>A. dielsii</i> H. Boissieu	四川松潘 Songpan, Sichuan		22	11	2x	3,000	PH	NT	潘泽惠等, 1991
伞形科 Apiaceae	当归属 <i>Angelica</i>	<i>A. laxifoliata</i> Diels	四川汉源 Hanyuan, Sichuan		22	11	2x	1,900	PH	NT	潘泽惠等, 1991
伞形科 Apiaceae	当归属 <i>Angelica</i>	<i>A. laxifoliata</i> Diels	四川冕宁县石灰窑 Shihuiku, Mianning, Sichuan		22	11	2x	2,500	PH	NT	张桥英等, 2005
伞形科 Apiaceae	当归属 <i>Angelica</i>	<i>A. laxifoliata</i> Diels	四川汶川县巴郎山 Balang Mt., Wenchuan, Sichuan		22	11	2x	3,400	PH	NT	张桥英等, 2005
伞形科 Apiaceae	当归属 <i>Angelica</i>	<i>A. maowenensis</i> C. Q. Yuan & R. H. Shan	四川松潘 Songpan, Sichuan		22	11	2x	2,800	PH	NT	潘泽惠等, 1991
伞形科 Apiaceae	当归属 <i>Angelica</i>	<i>A. maowenensis</i> Yuan et Shan	四川汶川县巴郎山 Balang Mt., Wenchuan, Sichuan		22	11	2x	3,500	PH	NT	张桥英等, 2005
伞形科 Apiaceae	当归属 <i>Angelica</i>	<i>A. omeiensis</i> C. C. Yuan & R. H. Shan	Xiangxiangling, Mianning, Sichuan		22	11	2x	4,500	PH	NT	张桥英等, 2005

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
伞形科 Apiaceae	当归属 <i>Angelica</i>	<i>A. omeiensis</i> C. Q. Yuan & R. H. Shan	四川峨眉山 Emei Mt., Sichuan		22	11	2x	2,100	PH	NT	潘泽惠等, 1991
伞形科 Apiaceae	当归属 <i>Angelica</i>	<i>A. pseudoselinum</i> de Boiss.	四川平武 Pingwu, Sichuan		22	11	2x	3,050	PH	NT	张桥英等, 2005
伞形科 Apiaceae	当归属 <i>Angelica</i>	<i>A. setchuenensis</i> Diels	四川松潘 Songpan, Sichuan		22	11	2x	2,800	PH	NT	潘泽惠等, 1991
伞形科 Apiaceae	当归属 <i>Angelica</i>	<i>A. sinensis</i> (Oliv.) Diels	四川松潘 Songpan, Sichuan		22	11	2x	2,900	PH	NT	潘泽惠等, 1991
伞形科 Apiaceae	当归属 <i>Angelica</i>	<i>A. sinensis</i> (Oliv.) Diels	四川平武 Pingwu, Sichuan		22	11	2x	3,100	PH	NT	张桥英等, 2005
伞形科 Apiaceae	柴胡属 <i>Bupleurum</i>	<i>B. angustissimum</i> (Franch.) Kitag.	青海互助 Huzhu, Qinghai		12	6	2x	2,100	PH	NT	梁乾隆等, 2013
伞形科 Apiaceae	柴胡属 <i>Bupleurum</i>	<i>B. chaishoui</i> Shan et Sheh	四川茂县 Maoxian, Sichuan		12	6	2x	1,730	PH	NT	梁乾隆等, 2013
伞形科 Apiaceae	柴胡属 <i>Bupleurum</i>	<i>B. commelynoideum</i> de Boiss.	云南香格里拉 Shangri-la, Yunnan		28	7	4x	3,600	PH	NT	梁乾隆等, 2013
伞形科 Apiaceae	柴胡属 <i>Bupleurum</i>	<i>B. commelynoideum</i> de Boiss.	四川乡城 Xiangcheng, Sichuan		12	6	2x	4,370	PH	NT	梁乾隆等, 2013
伞形科 Apiaceae	柴胡属 <i>Bupleurum</i>	<i>B. commelynoideum</i> var. <i>flaviflorum</i>	四川松潘 Songpan, Sichuan		14	7	2x	2,810	PH	NT	梁乾隆等, 2013
伞形科 Apiaceae	柴胡属 <i>Bupleurum</i>	<i>B. condensatum</i> Shan et Y. Li	青海共和 Gonghe, Qinghai		12	6	2x	3,250	PH	NT	梁乾隆等, 2013
伞形科 Apiaceae	柴胡属 <i>Bupleurum</i>	<i>B. longicaule</i> Wall. ex DC. var. <i>amplexicaule</i>	云南香格里拉 Shangri-la, Yunnan		16	8	2x	3,270	PH	NT	梁乾隆等, 2013
伞形科 Apiaceae	柴胡属 <i>Bupleurum</i>	<i>B. marginatum</i> var. <i>stenophyllum</i> (Wolff) Shan & Y. Li	云南鹤庆 Heqing, Yunnan	7		7	2x		PH	NT	秦慧贞等, 1989
伞形科 Apiaceae	柴胡属 <i>Bupleurum</i>	<i>B. marginatum</i> Wall. ex DC.	西藏拉萨 Lhasa, Tibet		16	8	2x	3,800	PH	NT	梁乾隆等, 2013
伞形科 Apiaceae	柴胡属 <i>Bupleurum</i>	<i>B. microcephalum</i> Diels	四川理县 Lixian County, Sichuan		12	6	2x	2,750	PH	NT	梁乾隆等, 2013
伞形科 Apiaceae	柴胡属 <i>Bupleurum</i>	<i>B. microcephalum</i> Diels	四川马尔康 Maerkang, Sichuan		12	6	2x	2,816	PH	NT	梁乾隆等, 2013
伞形科 Apiaceae	柴胡属 <i>Bupleurum</i>	<i>B. microcephalum</i> Diels	四川马尔康 Maerkang, Sichuan		12	6	2x	2,840	PH	NT	梁乾隆等, 2013
伞形科 Apiaceae	柴胡属 <i>Bupleurum</i>	<i>B. petiolulatum</i> Franch.	云南香格里拉 Shangri-la, Yunnan		16	8	2x	3,180	PH	NT	梁乾隆等, 2013
伞形科 Apiaceae	柴胡属 <i>Bupleurum</i>	<i>B. petiolulatum</i> var. <i>tenerum</i>	四川红原 Hongyuan, Sichuan		12	6	2x	3,610	PH	NT	梁乾隆等, 2013
伞形科 Apiaceae	柴胡属 <i>Bupleurum</i>	<i>B. smithii</i> Wolff var. <i>parvifolium</i>	青海共和 Gonghe, Qinghai		14	7	2x	3,253	PH	NT	梁乾隆等, 2013

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
伞形科 Apiaceae	糙果芹属	<i>T. scaberulum</i> (Franch.) H.Wolff var.	云南宾川 Binchuan, Yunnan	9		9	2x		PH	TA to TA	秦慧贞等, 1989
	<i>Trachyspermum</i>	<i>ambrosiifolium</i> (Franch.) R. H. Shan									
山茶科 Theaceae	山茶属 <i>Camellia</i>	<i>C. pitardii</i> Cohen Stuart	四川会理 Huili, Sichuan		30	15	2x	2,150	W	TA	顾志建和孙航, 1997
山茶科 Theaceae	山茶属 <i>Camellia</i>	<i>C. reticulata</i> Lindl.	四川渡口 Dukou, Sichuan		90	15	6x	2,000	W	TA	肖调江等, 1996
山茶科 Theaceae	山茶属 <i>Camellia</i>	<i>C. reticulata</i> Lindl.	四川会理 Huili, Sichuan		30	15	2x		W	TA	肖调江等, 1996
山茶科 Theaceae	山茶属 <i>Camellia</i>	<i>C. reticulata</i> Lindl.	四川会理 Huili, Sichuan		60	15	4x		W	TA	肖调江等, 1996
山茶科 Theaceae	山茶属 <i>Camellia</i>	<i>C. reticulata</i> Lindl.	云南华坪 Huaping, Yunnan		90	15	6x	1,900	W	TA	顾志建和孙航, 1997
山茶科 Theaceae	山茶属 <i>Camellia</i>	<i>C. reticulata</i> Lindl.	云南腾冲 Tengchong, Yunnan		90	15	6x		W	TA	顾志建等, 1988
山茶科 Theaceae	山茶属 <i>Camellia</i>	<i>C. reticulata</i> Lindl.	云南腾冲 Tengchong, Yunnan	45		15	6x		W	TA	顾志建等, 1988
山茶科 Theaceae	山茶属 <i>Camellia</i>	<i>C. reticulata</i> Lindl.	云南腾冲 Tengchong, Yunnan	45		15	6x		W	TA	肖调江等, 1993
山茶科 Theaceae	山茶属 <i>Camellia</i>	<i>C. reticulata</i> Lindl.	四川米易 Miyi, Sichuan		90	15	6x	1,850	W	TA	顾志建和孙航, 1997
山茶科 Theaceae	山茶属 <i>Camellia</i>	<i>C. reticulata</i> Lindl.	四川攀枝花 Panzhihua, Sichuan		90	15	6x	1,700	W	TA	顾志建和孙航, 1997
山茶科 Theaceae	山茶属 <i>Camellia</i>	<i>C. reticulata</i> Lindl.	四川延边 Yanbian, Sichuan		30	15	2x	2,600	W	TA	顾志建和孙航, 1997
山茶科 Theaceae	山茶属 <i>Camellia</i>	<i>C. reticulata</i> Lindl.	四川延边 Yanbian, Sichuan		60	15	4x	1,650	W	TA	顾志建和孙航, 1997
山茶科 Theaceae	山茶属 <i>Camellia</i>	<i>C. reticulata</i> Lindl.	四川延边 Yanbian, Sichuan		30	15	2x		W	TA	夏丽芳等, 1994
山茶科 Theaceae	山茶属 <i>Camellia</i>	<i>C. saluenensis</i> Stapf ex Bean	云南保山 Baoshan, Yunnan	15		15	2x		W	TA	肖调江等, 1993
山茶科 Theaceae	山茶属 <i>Camellia</i>	<i>C. saluenensis</i> Stapf ex Bean	四川会理 Huili, Sichuan		30	15	2x	1,800	W	TA	顾志建和孙航, 1997
山毛榉科 Fagaceae	三棱栎属 <i>Trigonobalanus</i>	<i>T. doichangensis</i> (Camus) Forman	四川九龙 Jiulong, Sichuan		14	7	2x	1,060	W	TA	韩春艳和孙卫邦, 2005
山毛榉科 Fagaceae	三棱栎属 <i>Trigonobalanus</i>	<i>T. doichangensis</i> (Camus) Forman	西藏聂荣县 Nierong, Tibet		14	7	2x	1,475	W	TA	韩春艳和孙卫邦, 2005
山毛榉科 Fagaceae	三棱栎属 <i>Trigonobalanus</i>	<i>T. doichangensis</i> (Camus) Forman	西藏双湖 Shuanghu, Tibet		14	7	2x	1,640	W	TA	韩春艳和孙卫邦, 2005

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
山毛榉科 Fagaceae	栎属 <i>Quercus</i>	<i>Q. guyavaefolia</i> H. Lév.	云南丽江 Lijiang, Yunnan		24	12	2x		W	NT	曹明和周浙昆, 2000
芍药科 Paeoniaceae	芍药属 <i>Paeonia</i>	<i>P. delavayi</i> Franch. f. <i>lutea</i> (Delavay ex Franch.) S. G. Haw	云南丽江 Lijiang, Yunnan		10	5	2x	2,400	W	NT	杨涤清和朱燮桴, 1989
芍药科 Paeoniaceae	芍药属 <i>Paeonia</i>	<i>P. delavayi</i> Franch. f. <i>lutea</i> (Delavay ex Franch.) S. G. Haw	云南大理 Dali, Yunnan		10	5	2x	2,910	W	NT	龚洵等, 1999
芍药科 Paeoniaceae	芍药属 <i>Paeonia</i>	<i>P. delavayi</i> Franch. f. <i>lutea</i> (Delavay ex Franch.) S. G. Haw	云南大理 Dali, Yunnan		10	5	2x	3,000	W	NT	杨涤清和朱燮桴, 1989
芍药科 Paeoniaceae	芍药属 <i>Paeonia</i>	<i>P. delavayi</i> Franch. f. <i>lutea</i> (Delavay ex Franch.) S. G. Haw	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		10	5	2x	3,200	W	NT	龚洵等, 1991
芍药科 Paeoniaceae	芍药属 <i>Paeonia</i>	<i>P. obovata</i> Maxim.	四川卧龙 Wolong, Sichuan		20	10	4x		W	NT	Hong et al, 2001
十字花科 Brassicaceae	菥蓂属 <i>Thlaspi</i>	<i>T. arvense</i> L.	四川宝兴 Baoxing, Sichuan		28	14	2x	2,500	PH	C	Hong & Zhang, 1990
十字花科 Brassicaceae	团扇芥属 <i>Berteroa</i>	<i>B. incana</i> (L.) DC.	新疆阿勒泰 Altay, Xinjiang		16	8	2x		AH	OWT	庾忠云等, 2012
十字花科 Brassicaceae	条果芥属 <i>Parrya</i>	<i>P. nudicaulis</i> (L.) Regel	Semula, Lhasa, Tibet		14	7	2x	4,900	PH	NT	Yue et al, 2004
十字花科 Brassicaceae	糖芥属 <i>Erysimum</i>	<i>E. siliculosum</i> (Marschall von Bieberstein) de Candolle	新疆阜康 Fukang, Xinjiang		14	7	2x		PH	M、WA to CA	庾忠云等, 2012
十字花科 Brassicaceae	扇叶芥属 <i>Desideria</i>	<i>D. baiogoinensis</i> (K.C. Kuan & C. H. An) Al-Shehbaz	西藏米拉山墨竹工卡 Mozbugongka, Mila Mt., Tibet		14	7	2x	5,090	PH	CA	Yue et al, 2004
十字花科	山菥菜属 <i>Eutrema</i>	<i>E. deltoideum</i> (Hook. f. et Thoms.) O.	云南德钦 Deqin, Yunnan		14	7	2x	4,770	PH	NT	杜宁和顾志建, 2004

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
Brassicaceae		E. Schulz									
十字花科 Brassicaceae	山蓴菜属 <i>Eutrema</i>	<i>E. heterophylla</i> (W. W. Smith) Hara	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		14	7	2x	4,370	PH	NT	杜宁和顾志建, 2004
十字花科 Brassicaceae	山蓴菜属 <i>Eutrema</i>	<i>E. wasabi</i> (Siebold) Maxim.	云南大理 Dali, Yunnan		28	7	4x	3,000	PH	NT	杜宁和顾志建, 2004
十字花科 Brassicaceae	山蓴菜属 <i>Eutrema</i>	<i>E. yunnanense</i> Franch.	云南大理 Dali, Yunnan		28	7	4x	3,000	PH	NT	杜宁和顾志建, 2004
十字花科 Brassicaceae	芹叶芥属 <i>Smelowskia</i>	<i>S. calycina</i> (Steph) C. A. Mey	新疆塔什库尔干 Taxkorgan, Xinjiang		12	6	2x		PH	CA	庾忠云等, 2012
十字花科 Brassicaceae	假蒜芥属 <i>Sisymbriopsis</i>	<i>S. mollipila</i> (Maximowicz) Botsschantzev	新疆塔什库尔干 Taxkorgan, Xinjiang		14	7	2x		AH	CA	庾忠云等, 2012
十字花科 Brassicaceae	华羽芥属 <i>Sophiopsis</i>	<i>S. annua</i> (Rupr.) O. E. Schlz	新疆塔什库尔干 Taxkorgan, Xinjiang		12	6	2x		PH	CA	庾忠云等, 2012
十字花科 Brassicaceae	花旗杆属 <i>Dontostemon</i>	<i>D. elegans</i> DC.	新疆阜康 Fukang, Xinjiang		14	7	2x		PH	CA	庾忠云等, 2012
十字花科 Brassicaceae	对枝菜属 <i>Cithareloma</i>	<i>C. verum</i> Bunge	新疆阜康 Fukang, Xinjiang		12	6	2x		AH	CA	庾忠云等, 2012
十字花科 Brassicaceae	丛菴属 <i>Solms-laubachia</i>	<i>S. eurycarpa</i> (Maxim.) Botsch.	Basho, Yela Mt., Tibet		14	7	2x	4,710	PH	EA	Yue et al, 2004
十字花科 Brassicaceae	丛菴属 <i>Solms-laubachia</i>	<i>S. eurycarpa</i> (Maxim.) Botsch.	云南德钦 Deqin, Yunnan		14	7	2x	4,650	PH	EA	Yue et al, 2003
十字花科 Brassicaceae	丛菴属 <i>Solms-laubachia</i>	<i>S. eurycarpa</i> (Maxim.) Botsch.	四川亚丁稻城 Daocheng, Yading, Sichuan		14	7	2x	4,510	PH	EA	Yue et al, 2004

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
十字花科 Brassicaceae	丛菴属 <i>Solms-laubachia</i>	<i>S. lanata</i> Botsch.	Resela, Lhasa, Tibet		14	7	2x	4,800	PH	EA	Yue et al, 2004
十字花科 Brassicaceae	丛菴属 <i>Solms-laubachia</i>	<i>S. lanata</i> Botsch.	Semula, Lhasa, Tibet		14	7	2x	5,100	PH	EA	Yue et al, 2004
十字花科 Brassicaceae	丛菴属 <i>Solms-laubachia</i>	<i>S. linearifolia</i> (W. W. Sm.) O. E. Schulz	云南德钦 Deqin, Yunnan		14	7	2x	4,600	PH	EA	Yue et al, 2003
十字花科 Brassicaceae	丛菴属 <i>Solms-laubachia</i>	<i>S. minor</i> Hand. -Mazz.	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		14	7	2x	4,330	PH	EA	Yue et al, 2003
十字花科 Brassicaceae	丛菴属 <i>Solms-laubachia</i>	<i>S. platycarpa</i> (Hook. f. & Thomson) Botsch.	西藏当雄 Dangxiong, Tibet		14	7	2x	5,180	PH	EA	Yue et al, 2004
十字花科 Brassicaceae	丛菴属 <i>Solms-laubachia</i>	<i>S. pulcherrima</i> Muschl. ex Diels	云南丽江 Lijiang, Yunnan		14	7	2x	4,210	PH	EA	Yue et al, 2003
十字花科 Brassicaceae	丛菴属 <i>Solms-laubachia</i>	<i>S. pulcherrima</i> Muschl. ex Diels	云南丽江 Gangheba, Lijiang, Yunnan		14	7	2x	3,670	PH	EA	Yue et al, 2004
十字花科 Brassicaceae	丛菴属 <i>Solms-laubachia</i>	<i>S. retropilosa</i> Botsch.	四川芎城 Xiancheng, Sichuan		28	7	4x	4,790	PH	EA	Yue et al, 2003
十字花科 Brassicaceae	丛菴属 <i>Solms-laubachia</i>	<i>S. retropilosa</i> Botsch.	四川康定折多山 Zheduo Mt., Kangding, Sichuan		14	7	2x	4,060	PH	EA	Yue et al, 2004
十字花科 Brassicaceae	丛菴属 <i>Solms-laubachia</i>	<i>S. retropilosa</i> Botsch.	西藏左贡东大山 Dongda Mt., Zuogong, Tibet		14	7	2x	5,090	PH	EA	Yue et al, 2004
十字花科 Brassicaceae	丛菴属 <i>Solms-laubachia</i>	<i>S. xerophyta</i> (W. W. Sm.) H. F. Comber	四川稻城 Daocheng, Sichuan		14	7	2x	4,530	PH	EA	Yue et al, 2004
十字花科	丛菴属	<i>S. xerophyta</i> (W. W. Sm.) H. F.	四川中甸大雪山 Snow Mt.,		14	7	2x	4,340	PH	EA	Yue et al, 2004

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
Brassicaceae	<i>Solms-laubachia</i>	Comber	Zhongdian, Sichuan								
石竹科 Caryophyllaceae	蝇子草属 <i>Silene</i>	<i>S. davidii</i> (Franchet) Oxelman & Lidén	四川康定折多山 Zheduo Mt., Kangding, Sichuan		48	12	4x	4,700	AH	NT	Luo et al, 2011
石竹科 Caryophyllaceae	蝇子草属 <i>Silene</i>	<i>S. gracilicaulis</i> C. L. Tang	西藏乌齐县卡玛多 Kamaduo, wuqi, Tibet		24	12	2x	4,030	PH	NT	李志敏和何文洁, 2007
石竹科 Caryophyllaceae	蝇子草属 <i>Silene</i>	<i>S. gracilicaulis</i> C. L. Tang	西藏类乌齐县卡玛多 Kamaduo, Leiwuqi, Tibet		24	12	2x	3,500	PH	NT	李志敏和何文洁, 2007
石竹科 Caryophyllaceae	蝇子草属 <i>Silene</i>	<i>S. nepalensis</i> Majumdar	西藏八宿然乌 Ranwu, Basu, Tibet		24	12	2x	3,800	PH	NT	Luo et al, 2011
石竹科 Caryophyllaceae	蝇子草属 <i>Silene</i>	<i>S. nigrescens</i> (Edgeworth) Majumdar	西藏八宿安久拉山垭口 Anjiula Mt., Basu, Tibet		48	12	4x	3,700	PH	NT	Luo et al, 2011
石竹科 Caryophyllaceae	蝇子草属 <i>Silene</i>	<i>S. orientalmongolica</i> Kozhevnikov	西藏八宿安久拉山垭口 Anjiula Mt., Basu, Tibet		24	12	2x	4,800	AH	NT	Luo et al, 2011
石竹科 Caryophyllaceae	蝇子草属 <i>Silene</i>	<i>S. trachyphylla</i> Franchet	西藏左贡马克村 Make, Zuogong, Tibet		24	12	2x	4,800	PH	NT	Luo et al, 2011
石竹科 Caryophyllaceae	蝇子草属 <i>Silene</i>	<i>S. yetii</i> Bocquet	西藏芒康罗尼县 Luoni, Mangkang, Tibet		72	12	6x	4,000	PH	NT	Luo et al, 2011
石竹科 Caryophyllaceae	无心菜属 <i>Arenaria</i>	<i>A. roborowskii</i> Maxim.	四川甘孜 Ganzi, Sichuan		22	11	2x	4,190	PH	NT	罗元霞等, 2008
石竹科 Caryophyllaceae	繁缕属 <i>Stellaria</i>	<i>S. neglecta</i> Weihe	四川宝兴 Baoxing, Sichuan	14		14	2x	2,500	PH	C	Hong & Zhang, 1990
使君子科 Combretaceae	萼翅藤属 <i>Calycopteris</i>	<i>C. floribunda</i> (Roxb.) Lam. ex Poir.	云南盈江那邦坝 Nabangba, Yingjiang, Yunnan		26	13	2x	620	W	TA	杨志云等, 2002

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
薯蓣科 Dioscoreaceae	薯蓣属 <i>Dioscorea</i>	<i>D. althaeoides</i> Knuth	云南维西 Weixi, Yunnan		20	10	2x		PH	P	江苏省植物研究所薯蓣课题研究组, 1976
薯蓣科 Dioscoreaceae	薯蓣属 <i>Dioscorea</i>	<i>D. collettii</i> Hook. f.	四川峨眉山 Emei Mt., Sichuan		20	10	2x		PH	P	江苏省植物研究所薯蓣课题研究组, 1976
薯蓣科 Dioscoreaceae	薯蓣属 <i>Dioscorea</i>	<i>D. deltoidea</i> Wall.	云南德钦 Deqin, Yunnan		20	10	2x		PH	P	江苏省植物研究所薯蓣课题研究组, 1976
薯蓣科 Dioscoreaceae	薯蓣属 <i>Dioscorea</i>	<i>D. opposita</i> Thunb.	四川峨眉山 Emei Mt., Sichuan		#####	10	14x		PH	P	秦慧贞等, 1985
薯蓣科 Dioscoreaceae	薯蓣属 <i>Dioscorea</i>	<i>D. panthaica</i> Prain & Burkill	云南丽江 Lijiang, Yunnan		40	10	4x		PH	P	江苏省植物研究所薯蓣课题研究组, 1976
薯蓣科 Dioscoreaceae	薯蓣属 <i>Dioscorea</i>	<i>D. parviflora</i> C. T. Ting	云南永胜 Yongsheng, Yunnan		20	10	2x		PH	P	裴鉴等, 1979
薯蓣科 Dioscoreaceae	薯蓣属 <i>Dioscorea</i>	<i>D. zingiberensis</i> C. H. Wright	云南六库 Liuku, Yunnan		20	10	2x		PH	P	江苏省植物研究所薯蓣课题研究组, 1976
天门冬科 Asparagaceae	异黄精属 <i>Heteropolygonatum</i>	<i>H. pendulum</i> (Z. G. Liu & X. H. Hu) M. N. Tamura & Ogisu	四川贡嘎山 Gongga Mt., Sichuan		32	16	2x	2,200	PH	EC	Tamura et al, 1997
天门冬科 Asparagaceae	舞鹤草属 <i>Maianthemum</i>	<i>M. atropurpureum</i> (Franchet) La Frankie	四川峨眉山 Emei Mt., Sichuan		36	18	2x	2,300	PH	NT	唐自慧等, 2009
天门冬科 Asparagaceae	舞鹤草属 <i>Maianthemum</i>	<i>M. atropurpureum</i> (Franchet) La Frankie	重庆金佛山 Jinfo Mt., Chongqing		36	18	2x	2,000	PH	NT	唐自慧等, 2009
天门冬科 Asparagaceae	舞鹤草属 <i>Maianthemum</i>	<i>M. atropurpureum</i> (Franchet) La Frankie	四川峨眉 Emei, Sichuan		36	18	2x	2,300	PH	NT	唐自慧等, 2009
天门冬科	舞鹤草属	<i>M. atropurpureum</i> (Franch.) Wang &	云南贡山 Gongshan, Yunnan		32	16	2x	2,600	PH	NT	王丽等, 1993

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
Asparagaceae	<i>Maianthemum</i>	Tang									
天门冬科	舞鹤草属	<i>M. atropurpureum</i> (Franchet.) Wang & Tang	西藏八宿 Basu, Tibet		56	14	4x	4,418	PH	NT	Meng et al, 2010
Asparagaceae	<i>Maianthemum</i>	<i>M. forrestii</i> (W. W. Smith) La Frankie	西藏芒康 Mangkang, Tibet		28	14	2x	4,494	PH	NT	Meng et al, 2010
天门冬科	舞鹤草属	<i>M. fusca</i> Wall.	云南贡山 Gongshan, Yunnan		28	14	2x	2,800	PH	TA to TA	顾志建等, 1992
Asparagaceae	<i>Maianthemum</i>	<i>M. fusca</i> Wall.	云南云龙 Yunlong, Yunnan		30	15	2x	2,900	PH	NT	王丽等, 1994
天门冬科	舞鹤草属	<i>M. fusca</i> Wall.	西藏墨脱 Motuo, Tibet		36	18	4x	1,900	PH	NT	顾志建和孙先凤, 1998
Asparagaceae	<i>Maianthemum</i>	<i>M. henryi</i> (Baker) La Frankie	云南大理 Dali, Yunnan		36	18	2x	2,930	PH	NT	唐自慧等, 2009
天门冬科	舞鹤草属	<i>M. henryi</i> (Baker) La Frankie	四川峨眉山 Emei Mt., Sichuan		36	18	2x	1,740	PH	NT	唐自慧等, 2009
Asparagaceae	<i>Maianthemum</i>	<i>M. henryi</i> (Baker) La Frankie	四川康定 Kangding, Sichuan		36	18	2x	2,880	PH	NT	唐自慧等, 2009
天门冬科	舞鹤草属	<i>M. henryi</i> (Baker) La Frankie	四川卧龙 Wolong, Sichuan		36	18	2x	3,400	PH	NT	唐自慧等, 2009
Asparagaceae	<i>Maianthemum</i>	<i>M. henryi</i> (Baker) Hara	云南大理 Dali, Yunnan		78	13	6x	3,000	PH	NT	王丽等, 1995
天门冬科	舞鹤草属	<i>M. lichiangense</i> (W. W. Sm.) W. W. Sm.	Zuogong, Tibet		56	14	4x	3,710	PH	NT	Meng et al, 2010

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
天门冬科 Asparagaceae	舞鹤草属 <i>Maianthemum</i>	<i>M. nanchuanense</i> H. Li & J. L. Huang	重庆金佛山 Jinfo Mt., Chongqing		36	18	2x	1,800	PH	NT	唐自慧等, 2009
天门冬科 Asparagaceae	舞鹤草属 <i>Maianthemum</i>	<i>M. purpurea</i> (Wallich) La Frankie	Mangkang, Tibet		56	14	4x	3,699	PH	NT	Meng et al, 2010
天门冬科 Asparagaceae	舞鹤草属 <i>Maianthemum</i>	<i>M. szechuanicum</i> (F. T. Wang & Tang) H. Li	四川峨眉山 Emei Mt., Sichuan		36	18	2x	2,430	PH	NT	唐自慧等, 2009
天门冬科 Asparagaceae	舞鹤草属 <i>Maianthemum</i>	<i>M. tatsienensis</i> (Franchet) La Frankie	四川达州 Dazhou, Sichuan		36	18	2x	1,850	PH	NT	唐自慧等, 2009
天门冬科 Asparagaceae	舞鹤草属 <i>Maianthemum</i>	<i>M. tatsienensis</i> (Franchet) La Frankie	四川峨眉山 Emei Mt., Sichuan		36	18	2x	1,740	PH	NT	唐自慧等, 2009
天门冬科 Asparagaceae	舞鹤草属 <i>Maianthemum</i>	<i>M. tatsienensis</i> (Franchet) La Frankie	四川峨眉山 Emei Mt., Sichuan		36	18	2x	2,430	PH	NT	唐自慧等, 2009
天门冬科 Asparagaceae	舞鹤草属 <i>Maianthemum</i>	<i>M. tatsienensis</i> (Franchet) La Frankie	四川峨眉山 Emei Mt., Sichuan		36	18	2x	3,070	PH	NT	唐自慧等, 2009
天门冬科 Asparagaceae	舞鹤草属 <i>Maianthemum</i>	<i>M. tatsienensis</i> (Franchet) La Frankie	云南丽江 Lijiang, Yunnan		72	18	4x	2,800	PH	NT	唐自慧等, 2009
天门冬科 Asparagaceae	舞鹤草属 <i>Maianthemum</i>	<i>M. tatsienensis</i> (Franchet) La Frankie	云南大理 Dali, Yunnan		36	18	2x	2,930	PH	NT	唐自慧等, 2009
天门冬科 Asparagaceae	舞鹤草属 <i>Maianthemum</i>	<i>M. tatsienensis</i> (Franchet) La Frankie	四川峨眉 Emei, Sichuan		36	18	2x	3,070	PH	NT	唐自慧等, 2009
天门冬科 Asparagaceae	舞鹤草属 <i>Maianthemum</i>	<i>M. tatsienensis</i> (Franchet) La Frankie	四川峨眉 Emei, Sichuan		36	18	2x	2,430	PH	NT	唐自慧等, 2009
天门冬科	舞鹤草属	<i>M. tatsienensis</i> (Franchet) La Frankie	四川峨眉 Emei, Sichuan		36	18	2x	1,740	PH	NT	唐自慧等, 2009

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

[illegible]

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
天门冬科 Asparagaceae	黄精属 <i>Polygonatum</i>	<i>P. cirrhifolium</i> (Wall.) Royal	西藏双湖 Shuanghu, Tibet		42	7	6x	4,300	PH	OWT	顾志建等, 1993
天门冬科 Asparagaceae	黄精属 <i>Polygonatum</i>	<i>P. cirrhifolium</i> Royle	西藏波密 Bomi, Tibet		52	13	4x	3,000	PH	NT	顾志建等, 1993b
天门冬科 Asparagaceae	黄精属 <i>Polygonatum</i>	<i>P. cirrhifolium</i> Royle	四川康定 Kangding, Sichuan		56	14	4x	3,300	PH	NT	陈少风, 1989
天门冬科 Asparagaceae	黄精属 <i>Polygonatum</i>	<i>P. cirrhifolium</i> Royle	云南云龙 Yunlong, Yunnan		24	12	2x	3,100	PH	EA	王丽等, 1998
天门冬科 Asparagaceae	黄精属 <i>Polygonatum</i>	<i>P. curvistylum</i> Hua	云南大理 Dali, Yunnan		24	12	2x	3,200	PH	CA	王丽等, 1999
天门冬科 Asparagaceae	黄精属 <i>Polygonatum</i>	<i>P. curvistylum</i> Huu.	四川金佛山林下 Jinfo Mt., Sichuan		28	14	2x	1,900	PH	NT	杨继等, 1988
天门冬科 Asparagaceae	黄精属 <i>Polygonatum</i>	<i>P. franchetii</i> Huu.	四川金佛山沟边阴湿处 Jinfo Mt., Sichuan		26	13	2x	850	PH	NT	杨继等, 1988
天门冬科 Asparagaceae	黄精属 <i>Polygonatum</i>	<i>P. griffithii</i> Baker	西藏墨脱 Motuo, Tibet		16	8	2x	900	AH	P	顾志建和孙先凤, 1998
天门冬科 Asparagaceae	黄精属 <i>Polygonatum</i>	<i>P. hirtellum</i> Hand. -Mazz.	四川康定 Kangding, Sichuan		28	14	2x	2,880	PH	NT	Deng et al, 2009
天门冬科 Asparagaceae	黄精属 <i>Polygonatum</i>	<i>P. kingianum</i> Coll. et Hemsl.	四川金佛山河滩沙地 Jinfo Mt., Sichuan		26	13	2x	800	PH	NT	杨继等, 1988
天门冬科 Asparagaceae	黄精属 <i>Polygonatum</i>	<i>P. kingianum</i> Collett & Hemsl.	四川峨眉山 Emei Mt., Sichuan		26	13	2x	900	PH	NT	Deng et al, 2009
天门冬科	黄精属	<i>P. megaphyllum</i>	甘肃黄土高原子午岭林区 Ziwu Mt.,		20	10	2x	1,400	PH	NT	范小峰等, 2000

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
Asparagaceae	<i>Polygonatum</i>		Gansu								
天门冬科	黄精属	<i>P. odoratum</i> Druce	甘肃黄土高原子午岭林区 Ziwu Mt.,		16	8	2x	1,400	PH	NT	范小峰等, 2000
Asparagaceae	<i>Polygonatum</i>		Gansu								
天门冬科	黄精属	<i>P. odoratum</i> Druce	四川峨眉山 Emei Mt., Sichuan		22	11	2x	800	PH	NT	方永鑫, 1989
Asparagaceae	<i>Polygonatum</i>										
天门冬科	黄精属	<i>P. omeiense</i> Z. Y. Zhu	四川峨眉山 Emei Mt., Sichuan		22	11	2x	2,100	PH	NT	Deng et al, 2009
Asparagaceae	<i>Polygonatum</i>										
天门冬科	黄精属	<i>P. oppisitifolium</i> Royle.	西藏墨脱 Motuo, Tibet		22	11	2x	900	W	CA	顾志建和孙先凤, 1998
Asparagaceae	<i>Polygonatum</i>										
天门冬科	黄精属	<i>P. prattii</i> Baker	云南大理 Dali, Yunnan		28	14	2x		PH	NT	杨继等, 1992
Asparagaceae	<i>Polygonatum</i>										
天门冬科	黄精属	<i>P. sibiricum</i> Delar.	四川卧龙 Wolong, Sichuan		30	15	2x	1,900	PH	NT	Deng et al, 2009
Asparagaceae	<i>Polygonatum</i>										
天门冬科	黄精属	<i>P. sibiricum</i> Delar.	四川南坪 Nanping, Sichuan		24	12	2x	3,200	PH	NT	陈少风, 1989
Asparagaceae	<i>Polygonatum</i>										
天门冬科	黄精属	<i>P. tessellatum</i> Wang & Tang	云南大理 Dali, Yunnan		30	15	2x	2,620	PH	NT	Deng et al, 2009
Asparagaceae	<i>Polygonatum</i>										
天门冬科	黄精属	<i>P. verticillatum</i> All.	四川卧龙 Wolong, Sichuan		30	15	2x	2,050	PH	NT	Deng et al, 2009
Asparagaceae	<i>Polygonatum</i>										
天门冬科	黄精属	<i>P. zanlansciamense</i> Pamp.	四川金佛山林下阴湿处和路边草丛		28	14	2x	1,800	PH	NT	杨继等, 1988
Asparagaceae	<i>Polygonatum</i>		中 Jinfo Mt., Sichuan								
天门冬科	黄精属	<i>P. zanlansciamense</i> Pamp.	四川金佛山林下阴湿处和路边草丛		30	15	2x	1,800	PH	NT	杨继等, 1988
Asparagaceae	<i>Polygonatum</i>		中 Jinfo Mt., Sichuan								

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
天门冬科 Asparagaceae	黄精属 <i>Polygonatum</i>	<i>P. zanlanscianense</i> Pamp.	重庆金佛山 Jinfo Mt., Chongqing		30	15	2x	2,050	PH	NT	Deng et al, 2009
天门冬科 Asparagaceae	黄精属 <i>Polygonatum</i>	<i>P. zanlanscianense</i> Pamp.	重庆金佛山 Jinfo Mt., Chongqing		30	15	2x	2,100	PH	NT	Deng et al, 2009
天门冬科 Asparagaceae	黄精属 <i>Polygonatum</i>	<i>P. zanlanscianense</i> Pamp.	重庆金佛山 Jinfo Mt., Chongqing		30	15	2x	2,130	PH	NT	Deng et al, 2009
天南星科 Araceae	芋属 <i>Colocasia</i>	<i>C. gaoligongensis</i> H. Li & C. L. Long	云南腾冲 Tengchong, Yunnan		28	14	2x	3,700	PH	TA	Yang et al, 2003
天南星科 Araceae	芋属 <i>Colocasia</i>	<i>C. gaoligongensis</i> H. Li et C. L. Long	云南泸水 Lushui, Yunnan		28	14	2x	1,650	PH	TA	曹利民和龙春林, 2004
天南星科 Araceae	芋属 <i>Colocasia</i>	<i>C. leucophloea</i> Komarov Trudy	新疆吉木乃口岸附近 Jeminay, Xinjiang		32	16	4x	750	W	TA	常朝阳等, 2009
天南星科 Araceae	芋属 <i>Colocasia</i>	<i>C. licentiana</i> Handel-Mazzetti	四川红原 Hongyuan, Sichuan		16	8	2x	3,300	W	TA	常朝阳等, 2009
天南星科 Araceae	芋属 <i>Colocasia</i>	<i>C. opulens</i> Komarov Trudy	甘肃卓尼 Zhuoni, Gansu		16	8	2x	2,500	W	TA	常朝阳等, 2009
天南星科 Araceae	芋属 <i>Colocasia</i>	<i>C. tragacanthoides</i> (Pallas) Poiret	甘肃兰州 Lanzhou, Gansu		16	8	2x	1,600	W	TA	常朝阳等, 2009
天南星科 Araceae	岩芋属 <i>Remusatia</i>	<i>R. hookeriana</i> Schott	云南贡山 Gongshan, Yunnan		10	5	2x	2,300	PH	OWT	顾志建等, 1992
天南星科 Araceae	岩芋属 <i>Remusatia</i>	<i>R. hookeriana</i> Schott Oesterr	云南大理 Dali, Yunnan		28	14	2x		PH	TA to TA	龙春林等, 1989
天南星科 Araceae	岩芋属 <i>Remusatia</i>	<i>R. vivipara</i> Schott	云南大理 Dali, Yunnan		42	14	3x		PH	TA to TA	李恒和 Hay, 1992
天南星科 Araceae	岩芋属 <i>Remusatia</i>	<i>R. vivipara</i> Schott Oesterr	云南大理 Dali, Yunnan		42	14	3x		PH	TA to TA	龙春林等, 1989
天南星科 Araceae	天南星属 <i>Arisaema</i>	<i>A. biauriculatum</i> Buchet.	西藏墨脱 Motuo, Tibet		28	14	2x	1,100	PH	NT	顾志建和孙先凤, 1998
天南星科 Araceae	天南星属 <i>Arisaema</i>	<i>A. biauriculatum</i> W. W. Sm. ex Hand.-Mazt.	云南贡山 Gongshan, Yunnan		28	14	2x	2,600	PH	NT	顾志建等, 1992
天南星科 Araceae	天南星属 <i>Arisaema</i>	<i>A. dulongense</i> H. Li	云南贡山 Gongshan, Yunnan		26	13	2x	2,600	PH	NT	顾志建等, 1992

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
天南星科 Araceae	天南星属 <i>Arisaema</i>	<i>A. erubescens</i> Schott	云南贡山 Gongshan, Yunnan		56	14	4x	2,300	PH	NT	顾志建等, 1992
天南星科 Araceae	天南星属 <i>Arisaema</i>	<i>A. lobatum</i> Engl.	四川峨眉山 Emei Mt., Sichuan		56	14	4x	1,700	PH	NT	Hong & Zhang, 1990
天南星科 Araceae	薹芋属 <i>Amorphophallus</i>	<i>A. bannanensis</i> H. Li	云南贡山 Gongshan, Yunnan		26	13	2x	1,280	PH	TA to TA	顾志建等, 1992
天南星科 Araceae	菖蒲属 <i>Acorus</i>	<i>A. calamus</i> L.	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		66	11	6x		PH	NT	王红等, 2001
天南星科 Araceae	斑龙芋属 <i>Sauromatum</i>	<i>S. gaoligongense</i> Z. L. Wang & H. Li	云南保山 Baoshan, Yunnan		26	13	2x	2,290	PH	TA to TA	卞福花等, 2001
梧桐科 Sterculiaceae	昂天莲属 <i>Ambroma</i>	<i>A. augusta</i>	四川康定 Kangding, Sichuan		16	8	2x	900	AH	P	顾志建和孙航, 1998
五福花科 Adoxaceae	四福花属 <i>Tetradoxa</i>	<i>T. ometensts</i> (Hara) C. Y. Wu	四川峨眉山 Emei Mt., Sichuan		36	18	2x	2,300	PH	EC	梁汉心和张香兰, 1986
五福花科 Adoxaceae	华福花属 <i>Sinadoxa</i>	<i>S. corydalifolia</i> Z. Y. Wu, Z. L. Wu & R. F. Huang	青海玉树 Yushu, Qinghai		36	18	2x		PH	EC	卢学峰等, 2002a
苋科 Amaranthaceae	杯苋属 <i>Cyathula</i>	<i>C. officinalis</i> Kuan.	四川天全 Tianquan, Sichuan		34	17	2x	1,400	PH	TA to TA	范巧佳等, 2009
苋科 Amaranthaceae	杯苋属 <i>Cyathula</i>	<i>C. officinalis</i> Kuan.	四川天全二郎山 Erlang Mt., Tianquan, Sichuan		34	17	2x	1,550	PH	TA to TA	范巧佳等, 2009
小檗科 Berberidaceae	桃儿七属 <i>Sinopodophyllum</i>	<i>S. hexandrum</i> (Royle) T. S. Ying	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		12	6	2x	3,200	PH	EA	马绍宾和胡志浩, 1996
小檗科 Berberidaceae	山荷叶属 <i>Diphylleia</i>	<i>D. sinensis</i> H. L. Li J	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		12	6	2x	3,200	PH	EA & NAD	马绍宾和胡志浩, 1996
小檗科 Berberidaceae	鬼白属 <i>Dysosma</i>	<i>D. versipellis</i> (Hance) M. Cheng ex T. S. Ying	四川峨眉山 Emei Mt., Sichuan		12	6	2x	805	PH	EA	马绍宾和胡志浩, 1996

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
玄参科 Scrophulariaceae	缬草属 <i>Valeriana</i>	<i>V. henryi</i> T. Yamaz.	四川宝兴 Baoxing, Sichuan	12		12	2x	2,600	W	TA	Hong & Zhang, 1990
玄参科 Scrophulariaceae	缬草属 <i>Valeriana</i>	<i>V. javanica</i> Blume	四川峨眉山 Emei Mt., Sichuan		32	8	4x	1,700	PH	NT	Hong & Zhang, 1990
玄参科 Scrophulariaceae	缬草属 <i>Valeriana</i>	<i>V. laxa</i> Benth.	四川峨眉山 Emei Mt., Sichuan		16	8	2x	1,000	PH	NT	Hong & Zhang, 1990
玄参科 Scrophulariaceae	缬草属 <i>Valeriana</i>	<i>V. serpyllifolia</i> L.	四川宝兴 Baoxing, Sichuan		16	8	2x	1,600	PH	NT	Hong & Zhang, 1990
罂粟科 Papaveraceae	绿绒蒿属 <i>Meconopsis</i>	<i>M. horridula</i> J. D. Hooker & Thomson	Zuogong, Tibet		28	14	2x	3,620	PH	NT	Meng et al, 2010
罂粟科 Papaveraceae	绿绒蒿属 <i>Meconopsis</i>	<i>M. integrifolia</i> Franchet.	Zuogong, Tibet		56	14	4x	5,094	PH	NT	Meng et al, 2010
罂粟科 Papaveraceae	绿绒蒿属 <i>Meconopsis</i>	<i>M. pseudovenusta</i> G. Taylor	Rikaze, Tibet		28	14	2x	4,653	PH	NT	Meng et al, 2010
罂粟科 Papaveraceae	绿绒蒿属 <i>Meconopsis</i>	<i>M. racemosa</i> Maximowicz.	Mangkang, Tibet		24	12	2x	4,000	PH	NT	Meng et al, 2012
鸢尾科 Iridaceae	鸢尾属 <i>Iris</i>	<i>I. bulleyana</i> Dykes	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		40	20	2x	3,330	PH	NT	沈云光等, 2007
鸢尾科 Iridaceae	鸢尾属 <i>Iris</i>	<i>I. chrysographes</i> Dykes	云南丽江三道湾 Sandaowan, Lijiang, Yunnan		40	20	2x	3,200	PH	NT	沈云光等, 2007
鸢尾科 Iridaceae	鸢尾属 <i>Iris</i>	<i>I. colletii</i> Hook. f.	云南丽江甘海子 Ganhaizi, Lijiang, Yunnan		28	14	2x	3,070	PH	NT	沈云光等, 2007
鸢尾科 Iridaceae	鸢尾属 <i>Iris</i>	<i>I. cuniculiformis</i> Noltie & K.	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		22	11	2x	3,330	PH	NT	沈云光等, 2007
鸢尾科 Iridaceae	鸢尾属 <i>Iris</i>	<i>I. delavayi</i> Mich.	云南大理苍山 Cang Mt., Dali,		40	20	2x	3,050	PH	NT	沈云光等, 2007

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
Yunnan											
鸢尾科 Iridaceae	鸢尾属 <i>Iris</i>	<i>I. dolichosiphon</i> Noltie	云南小中甸 Xiaozhongdian, Yunnan		22	11	2x	3,280	PH	NT	沈云光等, 2007
鸢尾科 Iridaceae	鸢尾属 <i>Iris</i>	<i>I. forrestii</i> Dykes	云南丽江三道湾 Sandaowan, Lijiang, Yunnan		40	20	2x	3,020	PH	NT	沈云光等, 2007
鸢尾科 Iridaceae	鸢尾属 <i>Iris</i>	<i>I. forrestii</i> Dykes	云南宁蒗泸沽湖 Ninglang, Yunnan		40	20	2x	2,700	PH	NT	沈云光等, 2007
鸢尾科 Iridaceae	鸢尾属 <i>Iris</i>	<i>I. laevigata</i> Fisch.	云南腾冲北海湖 Tengchong, Yunnan		32	16	2x	1,700	PH	NT	沈云光等, 2007
鸢尾科 Iridaceae	鸢尾属 <i>Iris</i>	<i>I. ruthenica</i> var. <i>nana</i> Maxim.	云南中甸尼西 Nixi, Zhongdian, Yunnan		42	21	2x	3,630	PH	NT	沈云光等, 2007
鸢尾科 Iridaceae	鸢尾属 <i>Iris</i>	<i>I. ruthenica</i> var. <i>nana</i> Maxim.	云南丽江甘海子 Ganhaizi, Lijiang, Yunnan		42	21	2x	3,200	PH	NT	沈云光等, 2007
鸢尾科 Iridaceae	鸢尾属 <i>Iris</i>	<i>I. ruthenica</i> var. <i>nana</i> Maxim.	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		42	21	2x	3,330	PH	NT	沈云光等, 2007
鸢尾科 Iridaceae	鸢尾属 <i>Iris</i>	<i>I. subdichotoma</i> Y. T. Zhao	云南中甸三坝 Sanba, Zhongdian, Yunnan		42	21	2x	1,940	PH	NT	沈云光等, 2007
樟科 Lauraceae	樟属 <i>Cinnamomum</i>	<i>C. longipaniculatum</i> (Gamble) N. Chao ex H. W. Li	四川都江堰 Dujiangyan, Sichuan		24	12	2x		W	EA & NAD	陈成彬等, 1998
樟科 Lauraceae	山胡椒属 <i>Lindera</i>	<i>L. communis</i> Hemsl.	四川都江堰 Dujiangyan, Sichuan		24	12	2x		W	EA & NAD	陈成彬等, 1998
樟科 Lauraceae	山胡椒属 <i>Lindera</i>	<i>L. megaphylla</i> Hemsl.	四川都江堰 Dujiangyan, Sichuan		24	12	2x		W	EA & NAD	陈成彬等, 1998
樟科 Lauraceae	山胡椒属 <i>Lindera</i>	<i>L. pulcherrima</i> (Nees) Benth. ex Hook. f.	四川都江堰 Dujiangyan, Sichuan		24	12	2x		W	EA & NAD	陈成彬等, 1998
紫草科	微孔草属 <i>Microula</i>	<i>M. tibetica</i> Benth	新疆伊犁 Ili, Xinjiang		24	12	2x	5,000	PH	NT	顾志建等, 1993

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
Boraginaceae											
紫草科 Boraginaceae	软紫草属 <i>Arnebia</i>	<i>A. euchroma</i> Johnston.	新疆温泉县 Wenquan, Xinjiang		14	7	2x	2,600	PH	OWT	房淑敏和张海道, 1992
紫堇科 Fumariaceae	紫堇属 <i>Corydalis</i>	<i>C. omeiana</i> H. Tsang	四川宝兴 Baoxing, Sichuan	9		9	2x	1,500	AH	C	Hong & Zhang, 1990
紫葳科 Bignoniaceae	角蒿属 <i>Incarvillea</i>	<i>I. arguta</i> Royle	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		22	11	2x		PH	P	Chen et al, 2004
紫葳科 Bignoniaceae	角蒿属 <i>Incarvillea</i>	<i>I. berezovskii</i> Batalin	四川马尔康 Maerkang, Sichuan		22	11	2x		PH	P	Chen et al, 2004
紫葳科 Bignoniaceae	角蒿属 <i>Incarvillea</i>	<i>I. compacta</i> Maxim.	四川石渠 Shiqu, Sichuan		22	11	2x		PH	P	Chen et al, 2004
紫葳科 Bignoniaceae	角蒿属 <i>Incarvillea</i>	<i>I. delavayi</i> Bur. et Franch.	云南丽江 Lijiang, Yunnan		22	11	2x		PH	P	Chen et al, 2004
紫葳科 Bignoniaceae	角蒿属 <i>Incarvillea</i>	<i>I. dissectifolia</i> Q. S. Zhao	四川盐源 Yanyuan, Sichuan		22	11	2x		PH	P	Chen et al, 2004
紫葳科 Bignoniaceae	角蒿属 <i>Incarvillea</i>	<i>I. forrestii</i> Fletcher	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		22	11	2x		PH	P	肖华等, 2002
紫葳科 Bignoniaceae	角蒿属 <i>Incarvillea</i>	<i>I. lutea</i> Bur. et Franch.	四川稻城 Daocheng, Sichuan		22	11	2x		PH	P	Chen et al, 2004
紫葳科 Bignoniaceae	角蒿属 <i>Incarvillea</i>	<i>I. lutea</i> Bureau & Franch.	云南丽江 Lijiang, Yunnan		22	11	2x		PH	P	肖华等, 2002
紫葳科 Bignoniaceae	角蒿属 <i>Incarvillea</i>	<i>I. mairei</i> (H. Lév.) Griers.	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		22	11	2x		PH	P	肖华等, 2002

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

科名 Families	属名 Genera	种名 Species	采集地点 Location	n	2n	x	倍性 Ploidy	海拔 Altitude (m)	生活型 Life form	分布型 Areal-type	参考文献 Reference
紫葳科 Bignoniaceae	角蒿属 <i>Incarvillea</i>	<i>I. mairei</i> var. <i>grandiflora</i>	云南丽江 Lijiang, Yunnan		22	11	2x		PH	P	Chen et al, 2004
紫葳科 Bignoniaceae	角蒿属 <i>Incarvillea</i>	<i>I. mairei</i> var. <i>mairei</i>	云南大理 Dali, Yunnan		22	11	2x		PH	P	Chen et al, 2004
紫葳科 Bignoniaceae	角蒿属 <i>Incarvillea</i>	<i>I. sinensis</i> var. <i>sinensis</i>	四川马尔康 Maerkang, Sichuan		22	11	2x		PH	P	Chen et al, 2004
紫葳科 Bignoniaceae	角蒿属 <i>Incarvillea</i>	<i>I. younghusbandii</i> Sprague	西藏聂拉木 Nielamu, Tibet		22	11	2x		PH	P	Chen et al, 2004
紫葳科 Bignoniaceae	角蒿属 <i>Incarvillea</i>	<i>I. zhongdianensis</i> Grey-Wilson	云南中甸 Zhongdian, Yunnan		22	11	2x		PH	P	Chen et al, 2004
紫葳科 Bignoniaceae	角蒿属 <i>Incarvillea</i>	<i>I. zhongdianensis</i> Grey-Wilson	云南丽江 Lijiang, Yunnan		22	11	2x		PH	P	肖华等, 2002

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.

<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

Reference for Chromosome dataset

染色体数据集参考文献

Akiyama S, Ohba H, Wakabayashi M (1990) Notes on the interspecific relationship in the genus *Rodgersia* (Saxifragaceae). Journal of Japanese Botany, 65, 328–338.

Áskell Löve (1985) Chromosome number reports LXXXIX. International Association for Plant Taxonomy, 34(4), 727–730.

Bian FH, Wang ZL, Li H, Guan KY (2001) Karyotypic studies on two species in the genus *Sauromatum* (Araceae). Acta Botanica Yunnanica, 23, 473–478. (in Chinese with English abstract) [卞福花, 王仲朗, 李恒, 管开云 (2001) 天南星科斑龙芋属植物的核型研究. 云南植物研究, 23, 473–478.]

Cai J, Hong W, Gu ZJ, Mill RR, Li DZ (2004) Karyotype morphology of thirteen species of *Pedicularis* (Orobanchaceae) from the Hengduan Mountains Region, NW Yunnan, China. Caryologia, 57, 337–347.

Cai LB, Feng HS (1997) Study on karyotype of 3 species of *Elymus*. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 17, 238–241. (in Chinese with English abstract) [蔡联炳, 冯海生 (1997) 披碱草属 3 个种的核型研究. 西北植物学报, 17, 238–241.]

Cai SY, Gong S, Mei ZQ, Yu HQ (2011) Karyotype studies on Luzhou (Sichuan) *Pterocypsela indica* (Compositae). Journal of Luzhou Medical College, 34, 663–665. (in Chinese with English abstract) [蔡仕钰, 龚舒, 梅志强, 于海清 (2011) 四川泸州翅果菊的核型研究. 泸州医学院学报, 34, 663–665.]

Cao LM, Long CL (2004) Chromosome numbers of eight *Colocasia* taxa and karyotypes of five species occurring in China. Acta Botanica Yunnanica, 26, 310–316. (in Chinese with English abstract) [曹利民, 龙春林 (2004) 中国芋属植物染色体数目及 5 个种的核型报道. 云南植物研究, 26, 310–316.]

Cao M, Zhou ZK (2000) A karyotype analysis of 9 species of the *Quercus* from China. Guihaia, 20, 341–345, 390–392. (in Chinese with English abstract) [曹明, 周浙昆 (2000) 中国栎属九种植物的核型分析. 广西植物, 20, 341–345, 390–392.]

Cao YL, Lu RS (1989) Karyotype analysis of *Hippophae* L. in China. Acta Phytotaxonomica Sinica, 27, 118–123.

Chang ZY, Li B, Shi FC (2009) The chromosomes and karyotypes of some species in *Caragana* from China. Bulletin of Botanical Research, 29, 18–24. (in Chinese with English abstract) [常朝阳, 黎斌, 石福臣 (2009) 锦鸡儿属植物一些种类的染色体数目及核型研究. 植物研究, 29, 18–24.]

Chen CB, Li XL, Sun CR, Song WQ, Chen RY (1998) Studies on the karyotype of 9 species of 5 genus of Lauraceae in China. Journal of Wuhan Botanical Research, 16, 219–222. (in Chinese with English abstract) [陈成彬, 李秀兰, 孙成仁, 宋文芹, 陈瑞阳 (1998) 中国樟科 5 属 9 种植物的核型研究. 武汉植物学研究, 16, 219–222.]

Chen D (2014) Karyotype and seed morphology of seven species of *Sorbus*. Master Thesis, Nanjing Forestry University. (in Chinese with English abstract) [陈丹 (2014) 7 种花楸属植物核型和种子形态学研究. 硕士学位论文, 南京林业大学.]

Chen GF, Ba LJ, Sun WG, Lou X, Zhang JW, Li ZM (2013) Karyotypes and chromosome numbers of eight species from the family Asteraceae in the Hengduan Mountains and the adjacent regions. Plant Diversity, 35, 367–374. (in Chinese with English abstract) [陈光富, 巴罗菊, 孙文光, 娄笑, 张建文, 李志敏 (2013) 横断山及邻近地区八种菊科植物的染色体数目及核型. 植物分类与资源学报, 35, 367–374.]

Chen GF, Sun WG, Hong DY, Zhou Z, Niu Y, Nie ZL, Sun H, Zhang JW, Li ZM (2014) Systematic significance of cytology in *Cyananthus* (Campanulaceae) endemic to the Sino-Himalayan Region. Journal of Systematics

- 王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>
 and Evolution, 52, 260–270.
- Chen JG, Xu B, Li ZM, Sun H (2010) Karyological studies on two species of Compositae from the Hengduan Mountains, SW China. *Guihaia*, 30, 51–54. (in Chinese with English abstract) [陈建国, 徐波, 李志敏, 孙航 (2010) 横断山区两种菊科植物的核型研究. *广西植物*, 30, 51–54.]
- Chen SF (1989) Karyotype analysis of species of *Polygonatum* Mill. *Acta Phytotaxonomica Sinica*, 27, 39–48. (in Chinese with English abstract) [陈少风 (1989) 黄精属八种植物的染色体研究. *植物分类学报*, 27, 39–48.]
- Chen SL, He TN, Liu JQ (1997) The chromosome number of eight species in *Gentiana* (Gentianaceae) from alpine mountains of the western China. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 17, 547–550. (in Chinese with English abstract) [陈世龙, 何廷农, 刘建全 (1997) 中国西部高山 8 种龙胆属植物的染色体数目. *西北植物学报*, 17, 547–550.]
- Chen ST, Zhou ZK, Guan KY, Nakata M (2004) Karyomorphology of *Incarvillea* (Bignoniaceae) and its implications in distribution and taxonomy. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 144, 113–121.
- Chen ZY, Chen SZ, Huang XX, Huang SF (1988) A report on chromosome numbers on Chinese Zingiberaceae (5). *Guihaia*, 8, 143–147. (in Chinese with English abstract) [陈忠毅, 陈升振, 黄向旭, 黄少甫 (1988) 国产姜科植物的染色体计数(5). *广西植物*, 8, 143–147.]
- Chin HC, Chang MC, Ling PP, Ting GT, Dou FP (1985) A cytotaxonomic study on Chinese *Dioscorea* L.—The chromosome number and their relation to the origin and evolution of the genus. *Acta Phytotaxonomica Sinica*, 23, 11–18. (in Chinese with English abstract) [秦慧贞, 张美珍, 凌苹苹, 丁志遵, 窦方平 (1985) 中国薯蓣属细胞分类的研究——染色体数与该属起源和演化. *植物分类学报*, 23, 11–18.]
- Chin HC, Pan ZH, She ML, Wu ZJ (1989) A report on chromosome number of Chinese Umbelliferae. *Acta Phytotaxonomica Sinica*, 27, 268–272. (in Chinese with English abstract) [秦慧贞, 潘泽惠, 余孟兰, 吴竹君 (1989) 伞形科植物染色体数目报告. *植物分类学报*, 27, 268–272.]
- Cui XJ (1987) Karyotype analysis of 3 species of genus *Podocarpium* and chromosome number of 2 species of genus *Desmodium*. *Bulletin of Botanical Research*, 7, 123–130. (in Chinese with English abstract) [崔现举 (1987) 长柄山蚂蝗属三个种的核型分析及山蚂蝗属两个种的染色体数. *植物研究*, 7, 123–130.]
- Deng T, Meng Y, Sun H, Nie ZL (2011) Chromosome counts and karyotypes in *Chaetoseris* and *Stenoseris* (Asteraceae-Cichorieae) from the Hengduan Mountains of SW China. *Journal of Systematics and Evolution*, 49, 339–346.
- Deng XL, He XJ, He WL, Gao YD, Liu HY, Zhang YC (2009) Karyotype and cytogeography of the genus *Heracleum* (Apiaceae) in the Hengduan Mountains. *Journal of Systematics and Evolution*, 47, 273–285.
- Deng YF, Liao L, Li TJ, Wang SZ, Dang CQ, Xu LL (2013) The species diversity of three species of *Ranunculus*. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 41, 336–339. (in Chinese with English abstract) [邓院芳, 廖亮, 李同建, 汪诗泽, 党成强, 徐玲玲 (2013) 3 种毛茛属植物的物种内核型多样性. *江苏农业科学*, 41, 336–339.]
- Deng XY, Wang Q, He XJ (2009) Karyotypes of 16 populations of eight species in the genus *Polygonatum* (Asparagaceae) from China. *Botanical Journal of the Linnean Society* 159, 245–254.
- Ding CB (2004) Studies on Biosystematics of *Pseudoroegneria* (Poaceae: Triticeae). PhD dissertation, Sichuan Agricultural University. (in Chinese with English abstract) [丁春邦 (2004) 拟鹅观草属植物的生物系统学研究. 博士学位论文, 四川农业大学.]
- Ding KY, Ge S, Hong DY, Yu ZH (1998) Cytotype variation and cytogeography of *Scilla sineasis* (Louriro) Merrill (Hyacinthaceae) in China. *Hereditas*, 129, 151–160.
- Du N, Gu ZJ (2004) A comparative karyological study of the cultured *Eutrema wasabi* and its three related wild species. *Acta Botanica Yunnanica*, 26, 645–650. (in Chinese with English abstract) [杜宁, 顾志建 (2004) 栽培山嵛菜与三个野生种的核型比较. *云南植物研究*, 26, 645–650.]

- 王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>
- Fang SM, Zhang HD (1992) Karyotypic analysis of *Arnebia euchroma* and *Arnebia guttata*. Journal of Wuhan Botanical Research, 10, 176–178. (in Chinese with English abstract) [房淑敏, 张海道 (1992) 软紫草和黄花软紫草的核型研究. 武汉植物学研究, 10, 176–178.]
- Fang YX (1989) Cyto-geographical study on *Polygonatum odoratum*. Journal of Ecology, 8, 8–10. (in Chinese with English abstract) [方永鑫 (1989) 玉竹的细胞地理学研究. 生态学杂志, 8, 8–10.]
- Fan QJ, Tian ML, Yin RX, Luo X (2009) Chromosome karyotype analysis of *Cyathula officinalis* Kuan. Journal of Sichuan Agricultural University, 27, 279–283. (in Chinese with English abstract) [范巧佳, 田孟良, 尹若熙, 罗曦 (2009) 川牛膝染色体核型分析. 四川农业大学学报, 27, 279–283.]
- Fan XF, Guo XQ, Li SW (2000) The studies on the karyotype diversity of 4 species of Liliaceae in Ziwu Mountain. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 20, 882–888. (in Chinese with English abstract) [范小峰, 郭小强, 李师翁 (2000) 子午岭产 4 种百合科植物的核型多样性研究. 西北植物学报, 20, 882–888.]
- Feng DX, Dang CL (2002) Karyotype and allozyme analyses of three populations of *Erigeron breviscapus* from Yunnan. Plant Diversity, 24, 754–758. (in Chinese with English abstract) [冯定霞, 党承林 (2002) 短葶飞蓬云南三个种群的核型与等位酶分析. 植物分类与资源学报, 24, 754–758.]
- Fu CX, Shen CD, Hong DY (1993) Variation and evolution of the karyotype on *Smilax* L. Cathaya, 5, 151–166. (in Chinese with English abstract) [傅承新, 沈朝栋, 洪德元 (1993) 菝葜属的核型变异和进化. Cathaya, 5, 151–166.]
- Fu CX, Shen CD, Huang AJ (1995) The chromosome numbers of 11 species in *Smilax* L. and *Heterosmilax* Kunth. Journal of Wuhan Botanical Research, 13, 185–187. (in Chinese with English abstract) [傅承新, 沈朝栋, 黄爱军 (1995) 菝葜属和肖菝葜属 11 个种的染色体数目. 武汉植物学研究, 13, 185–187.]
- Fu CX, Shen CD, Zhong GD, Hong DY (1992) The chromosome numbers of 7 species in *Smilax* L. Journal of Wuhan Botanical Research, 10, 381–382. (in Chinese with English abstract) [傅承新, 沈朝栋, 钟国庆, 洪德元 (1992) 菝葜属 7 个种的染色体数目. 武汉植物学研究, 10, 381–382.]
- Gao BC, Tang Y, Guo WH (1993) A cytological study on *Acanthochlamys bracteata* P. C. Kao (Acanthochlamyaceae). Acta Phytotaxonomica Sinica, 31, 42–44. (in Chinese with English abstract) [高宝纯, 唐亚, 郭卫红 (1993) 芒苞草的细胞学研究. 植物分类学报, 31, 42–44.]
- Gao LM (2002) The Phylogeny and Geographical Distribution on *Rhododendron* and *Azaleastrum* (generalized). PhD Dissertation, Kunming Institute of Botany, Kunming. (in Chinese with English abstract) [高连明 (2002) 杜鹃属马银花亚属(广义)的系统发育与地理分布. 博士学位论文, 中国科学院昆明植物研究所, 昆明.]
- Gao TP, Wang ZL, Guo HQ, Wang YF, Fang XW (2008) Karyotypes of 3 species of *Saussurea* in eastern of Tibet Plateau. Acta Prataculturae Sinica, 18, 169–174. (in Chinese with English abstract) [高天鹏, 王转莉, 郭怀清, 王一峰, 方向文 (2008) 青藏高原东缘 3 种风毛菊属植物的核型研究. 草业学报, 18, 169–174.]
- Gao XF, Chen SK, Gu ZJ, Zhao JZ (1995) A chromosomal study on the genus *Gynostemma* (Cucurbitaceae). Acta Botanica Yunnanica, 17, 312–316. (in Chinese with English abstract) [高信芬, 陈书坤, 顾志建, 赵加治 (1995) 绞股蓝属的染色体研究. 云南植物研究, 17, 312–316.]
- Gao YD, Zhou SD, He XJ (2009) Karyotypes of four genus in Liliaceae (*s. str.*) from Hengduan Mountains of Southwestern China. Acta Botanica Yunnanica, 31, 399–405. (in Chinese with English abstract) [高云东, 周颂东, 何兴金 (2009) 中国横断山区狭义百合科四属部分植物核型研究. 云南植物研究, 31, 399–405.]
- Gao YD, Zhou SD, He XJ (2011) Karyotype studies in thirty-two species of *Lilium* (Liliaceae) from China. Nordic Journal of Botany, 29, 746–761.
- Gong X, Gu ZJ, Wu QA (1991) A cytological study of seven populations in *Paeonia delavayi* var. *lutea*. Acta Botanica Yunnanica, 13, 402–410. (in Chinese with English abstract) [龚洵, 顾志建 (1991) 黄牡丹七个居群的细胞学研究. 云南植物研究, 13, 402–410.]
- Gong X, Gu ZJ, Lu YX, Zhang CQ (2001) The karyotypes of seven species in *Ligularia*. Acta Botanica

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.

<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

Yunnanica, 23, 216–222. (in Chinese with English abstract) [龚洵, 顾志建, 鲁元学, 张长芹 (2001) 7 种橐吾属植物的核型. 云南植物研究, 23, 216–222.]

Gong X, Xiao TJ, Gu ZJ, Lu YX (1999) Giemsa C-banding patterns in 8 populations of *Paeonia delavayi* var. *lutea*. Acta Botanica Yunnanica, 21, 477–482. (in Chinese with English abstract) [龚洵, 肖调江, 顾志建, 鲁元学 (1999) 黄牡丹八个居群的 Giemsa C-带比较研究. 云南植物研究, 21, 477–482.]

Gu ZJ, Na HY (1986) Karyotype studies in eight taxa of *Paris*. Acta Botanica Yunnanica, 8, 313–318. (in Chinese with English abstract) [顾志建, 纳海燕 (1986) 几种重楼的染色体核型研究. 云南植物研究, 8, 313–318.]

Gu ZJ, Sun H (1998) The chromosome report of some plants from Motuo, Xizang (Tibet). Acta Botanica Yunnanica, 20, 207–210. [顾志建, 孙航 (1998) 西藏墨脱地区一些植物的染色体报道. 云南植物研究, 20, 207–210]

Gu ZJ, Sun XF (1997) A karyomorphological study of seventeen species of Chinese *Camellia*. Acta Botanica Yunnanica, 19, 159–170. (in Chinese with English abstract) [顾志建, 孙先凤 (1997) 山茶属 17 个种的核形态学研究. 云南植物研究, 19, 159–170.]

Gu ZJ, Wang L, Li H (1992) Karyomorphological studies of some monocots in Dulongjiang area. Acta Botanica Yunnanica, 5, 77–90. (in Chinese with English abstract) [顾志建, 王丽, 李恒 (1992) 独龙江地区部分单子叶植物的细胞形态学研究. 云南植物研究, 5, 77–90.]

Gu ZJ, Wang L, Gong X, Xiao TJ (1993) A cytological study of six populations of *Disporum cantoniense* (Liliaceae). Acta Phytotaxonomica Sinica, 31, 399–404. (in Chinese with English abstract) [顾志建, 王丽, 龚洵, 肖调江 (1993) 万寿竹六个居群的核型研究. 植物分类学报, 31, 399–404.]

Gu ZJ, Wang L, Sun H, Wu SG (1993) A cytological study of some plants from Tibetan Plateau. Acta Botanica Yunnanica, 15, 377–384. (in Chinese with English abstract) [顾志建, 王丽, 孙航, 武素功 (1993) 青藏高原一些种子植物的核型研究. 云南植物研究, 15, 377–384.]

Gu ZJ, Xia LF, Xie LS (1988) Report on the chromosome numbers of some species of *Camellia* in China. Acta Botanica Yunnanica, 10, 291–296. (in Chinese with English abstract) [顾志建, 夏丽芳, 谢立山 (1988) 中国部分山茶属植物的染色体数目报告. 云南植物研究, 10, 291–296.]

Gu ZJ, Yang QE, Kondo K (1990) A karyomorphological study on *Disporopsis* Hance in China. La Kromosomo II, 57, 1916–1925.

Han CY, Sun WB (2005) Karyotype of the 4 populations of *Trigonobalanus doichangensis* (Fagaceae), a rare and endangered plant in China. Acta Botanica Yunnanica, 27, 95–100. (in Chinese with English abstract) [韩春艳, 孙卫邦 (2005) 濒危植物三棱栎四个居群的核型. 云南植物研究, 27, 95–100.]

He TN, Liu JQ, Chen SL (2002) Contribution to the karyomorphology of 7 species in *Gentiana* (Gentianaceae). Acta Biologica Plateau Sinica, 15, 67–75.

He TN, Liu JQ, Chen SL (2002) Reports on the chromosome numbers of 8 species in *Gentiana* (Gentianaceae). Acta Biologica Plateau Sinica, 15, 63–66.

He TN, Liu JQ, Chen SL, Xue CY, Liu SW (2002) Chromosomes of nine species of the genus *Saussurea* (Compositae) from Qinghai. Acta Biologica Plateau Sinica, 15, 77–82.

He TN, Wang W, Xue CY (1999) A karyomorphological study on 5 species of *Swertia* (Gentianaceae). Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 19, 546–551. (in Chinese with English abstract) [何廷农, 王伟, 薛春迎 (1999) 獐牙菜属 5 种植物的核型研究. 西北植物学报, 19, 546–551.]

He XJ, Pu FD, Wang PL, Wang YP (1994) Studies on karyotypes of the genus *Heracleum* from China. Acta Phytotaxonomica Sinica, 32, 32–40. (in Chinese with English abstract) [何兴金, 溥发鼎, 王萍莉, 王幼平 (1994) 中国独活属的核型研究. 植物分类学报, 32, 32–40.]

He XJ, Xu JM (2001) Karyotypes of 4 species in *Allium* sect. *Haplostemon* Boiss. from China. Acta

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.

<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

Phytotaxonomica Sinica, 39, 423–432. (in Chinese with English abstract) [何兴金, 许介眉 (2001) 中国葱属单生组 4 种植物的核型研究. 植物分类学报, 39, 423–432.]

He XL, Zhang MJ (2009) Chromosome number and karyotype of seven species from *Seriphidium* (Compositae).

Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 29, 1155–1161. (in Chinese with English abstract) [贺学礼, 张妙娟 (2009) 7 种绢蒿属植物染色体数目和核型研究. 西北植物学报, 29, 1155–1161.]

Hong DY (1984) Chromosomes of six Fabaceous species from Baoxing County, Sichuan Province. Acta

Phytotaxonomica Sinica, 22, 301–305. (in Chinese with English abstract) [洪德元 (1984) 四川宝兴地区几种豆科植物的染色体. 植物分类学报, 22, 301–305.]

Hong DY, Pan KY, Rao GY (2001) Cytogeography and taxonomy of the *Paeonia obovata* polyploid complex (Paeoniaceae). Plant Systematics and Evolution, 227, 123–136.

Hong DY, Zhang SZ (1990) Observations on chromosomes of some plants from western Sichuan. Cathaya, 2, 191–197.

Hong DY, Zhu XY (1987) Cytotaxonomical studies on Liliaceae (s. l.) (1). Report on karyotypes of 10 species of

6 genera. Acta Phytotaxonomica Sinica, 25, 245–253. (in Chinese with English abstract) [洪德元, 朱相云 (1987) 百合科细胞分类学研究(1). 重楼等 6 属 10 种的核型报道. 植物分类学报, 25, 245–253.]

Huang J, Chen Z, Xia ZH, Shang HW (2013) Chromosome karyotypes of *Coptis* species in China. Acta Botanica

Boreali-Occidentalia Sinica, 33, 931–938. (in Chinese with English abstract) [黄骥, 陈浙, 夏志华, 商晗武 (2013) 国产黄连属植物的染色体核型分析. 西北植物学报, 33, 931–938.]

Huang RF, Dang CL, Yu H (1996) Studies on karyotypes of two species with basic chromosome number seven.

Acta Botanica Yunnanica, Suppl. VIII, 91–97. (in Chinese with English abstract) [黄瑞复, 党承林, 虞泓 (1996) 染色体基数为 7 的两种葱属植物的核型研究. 云南植物研究, 增刊VIII, 91–97.]

Huang RF (2003) Karyotypical studies of 6 species of *Androsace* (Primulaceae) in China with reference to their systematic significance. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 23, 1700–1712. (in Chinese with English

abstract) [黄容福 (2003) 国产 6 种点地梅属植物的核型及其系统学意义. 西北植物学报, 23, 1700–1712.]

Huang RF, Li JF (1996) Karyotype and its differentiation studies in the four populations of *Lilium duchartrei*.

Acta Botanica Yunnanica, 8, 15–22. (in Chinese with English abstract) [黄瑞复, 李劲峰 (1996) 宝兴百合四个居群的核型及其分化研究. 云南植物研究, 8, 15–22.]

Huang RF (2001) Variation of karyotype and ploidy of *Androsace yargongensis* (Primulaceae) in three

population in Q-Z Plateau. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 21, 526–531. (in Chinese with English abstract) [黄荣福 (2001) 雅江点地梅(报春花科) 3 个居群的核型和倍性变化. 西北植物学报, 21, 526–531.]

Huang RF, Wei RC, Yan YX (1985) Discovery of spontaneous triploid of *Allium tuberosum*. Journal of Wuhan

Botanical Research, 3, 429–431. (in Chinese with English abstract) [黄瑞复, 魏蓉城, 晏一祥 (1985) 自然三倍体韭的发现. 武汉植物学研究, 3, 429–431.]

Huang RF, Wei RC, Xu JM (1996) A study of karyotypes on *Allium hookeri* and its variety *Allium hookeri* var.

muliense. Acta Botanica Yunnanica, 8, 78–84. (in Chinese with English abstract) [黄瑞复, 魏蓉成, 许介眉 (1996) 宽叶韭及其变种木里韭的核型研究. 云南植物研究, 8, 78–84.]

Huang RF, Xu M, Yu H (1995) A study on karyotypes and their evolutionary trends in *Allium* sect. *Bromatorrhiza*

Ekberg (Liliaceae). Cathaya, 7, 133–145.

Huang RF, Shen SD, Lu XF (1996) Studies of karyotype and evolutionary of 6 species in genus *Pedicularis* Linn.

Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 16, 73–80. (in Chinese with English abstract) [黄荣福, 沈颂东, 卢学峰 (1996) 马先蒿属 6 个种的核型与进化研究. 西北植物学报, 16, 73–80.]

Huang RF, Shen SD (1999) Studies of the karyotype and evolution for three endemic species of Ranunculaceae

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.

<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

in Tibetan Plateau. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 19, 138–143. (in Chinese with English abstract) [黄荣福, 沈颂东 (1999) 青藏高原毛茛科 3 种特有植物核型和进化研究. 西北植物学报, 19, 138–143.]

Huang RF, Shen SD, Lu XF (1996) Studies on the chromosome number and polyploidy for a number of plants in the north-east Qinghai-Xizang Plateau. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 16, 310–318.

Hu YP, Xie XL, Wen Q, Zhao XD, Wang L, Li Y (2007) Studies on karyotypes of five populations of *Rheum tanguticum* (Polygonaceae). *Acta Botanica Yunnanica*, 29, 429–433. (in Chinese with English abstract) [胡延萍, 谢小龙, 温泉, 赵旭东, 王莉, 李毅 (2007) 唐古特大黄五个居群的核型. 云南植物研究, 29, 429–433.]

Iwatsubo Y, Naruhashi N (1992) Cytotaxonomical studies of *Rubus* (Rosaceae) I. Chromosome numbers of 20 species and 2 natural hybrids. *Journal of Japanese Botany*, 67, 270–275.

Jiangsu Institute of Botany (1976) Studies on Chinese *Dioscorea* sect. *Stenophora* Pr. et Burk and their chromosome numbers. *Journal of University of Chinese Academy of Sciences*, 14, 65–72. (in Chinese with English abstract) [江苏省植物研究所薯蓣课题调研组 (1976) 中国薯蓣属根茎组植物的分类和染色体数的研究. 中国科学院大学学报, 14, 65–72.]

Jian HY, Zhang H, Zhang T, Li SF, Wang QG, Yan HJ, Qiu XQ, Tang KX (2010) Karyotype analysis of different varieties on *Rosa odorata* Sweet. *Journal of Plant Genetic Resources*, 11, 457–461. (in Chinese with English abstract) [蹇洪英, 张颢, 张婷, 李树发, 王其刚, 晏慧君, 邱显钦, 唐开学 (2010) 香水月季(*Rosa odorata* Sweet)不同变种的染色体及核型分析. 植物遗传资源学报, 11, 457–461.]

Jing WC, Xu JM, Yang L (1999) A study on cytotaxonomy of section *Anguinum* of *Allium*. *Acta Phytotaxonomica Sinica*, 37, 20–34. (in Chinese with English abstract) [景望春, 许介眉, 杨蕾 (1999) 葱属宽叶组植物细胞分类学研究. 植物分类学报, 37, 20–34.]

Jin X, Zhang T, Gu ZJ, Li DZ (2007) Cytological studies on the genus *Holcoglossum* (Orchidaceae). *Botanical Journal of the Linnean Society*, 154, 283–288.

Junko M, Siro K, Gu ZJ, Li H (1992) C-banding patterns in eighteen taxa of the genus *Paris sensu Li*, Liliaceae. *Cytologia*, 57, 181–194.

Kondo K, Tanaka R, Ge S, Hong DY, Nakata M (1992) Cytogenetic studies on wild *Chrysanthemum sensu lato* in China. IV. Karyomorphological characteristics of three species of *Ajania*. *Journal of Japanese Botany*, 67, 324–329.

Kondo K, Tanaka R, Hong DY, Hizume M, Yang QE, Nakata M (1995) Cytogenetic studies on wild *Chrysanthemum sensu lato* in China. V. A chromosome study of three species of *Ajania*, *Cancrinia maximowiczii* and *Dendranthema lavandulifolium* in the Chrysantheminae, the Anthemideae, the Compositae in Chinese Highlands. *Journal of Japanese Botany*, 70, 85–94.

Kong HZ (2000) Karyotypes of *Sarcandra* Gardn. and *Chloranthus* Swarts. (Chloranthaceae) from China. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 133, 327–342. (in Chinese with English abstract) [孔宏智 (2000) 论金粟兰科的属间关系. 全国系统与进化植物学青年学术研讨会, 133, 327–342.]

Kong HZ, Liu JQ (1999) Karyomorphology of the genus *Pomatosace* Maxim. (Primulaceae). *Acta Phytotaxonomica Sinica*, 37, 445–450. (in Chinese with English abstract) [孔宏智, 刘建全 (1999) 中国特有属——羽叶点地梅属的细胞学研究. 植物分类学报, 37, 445–450.]

Kong HZ, Yang QE (1997) Karyomorphology and relationship of the genus *Circaeaster* Maxim. *Acta Phytotaxonomica Sinica*, 35, 494–499. (in Chinese with English abstract) [孔宏智, 杨亲二 (1997) 星叶草属的核形态及其系统位置. 植物分类学报, 35, 494–499.]

Kong WJ, Zhu LJ, Li ZM (2008) Studies on chromosome number and karyotype of *Nepetasibirica*. *Journal of Yunnan Normal University*, 28(5), 52–56. (in Chinese with English abstract) [孔维进, 朱丽娟, 李志敏

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.

<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

(2008) 荆芥属大花荆芥(*Nepetasibirica*)的染色体数目及核型分析. 云南师范大学学报(自然科学版), 28(5), 52–56.]

Küpfer P, Yuan YM (1996) Karyological studies on *Gentiana* sect. *Chondrophyllae* (Gentianaceae) from China. Plant Systematics and Evolution, 200, 161–176.

Liang HX, Zhang XL (1986) Floral anatomy of *Tetradoxa omeiensis*. Acta Botanica Yunnanica, 8, 436–440. (in Chinese with English abstract) [梁汉兴, 张香兰 (1986) 四福花花部解剖及维管系统的研究. 云南植物研究, 8, 436–440.]

Liang GL, Li XL (1993) Chromosome studies of Chinese species of *Malus* Mill. Acta Phytotaxonomica Sinica 31, 236–251. (in Chinese with English abstract) [梁国鲁, 李晓林 (1993) 中国苹果属植物染色体研究. 植物分类学报, 31, 236–251.]

Liang GL (1987) Observations of chromosomes of *Malus* species in China. Acta Phytotaxonomica Sinica, 25, 437–444. (in Chinese with English abstract) [梁国鲁 (1987) 中国苹果属染色体的观察. 植物分类学报, 25, 437–444.]

Liang QL, Wang CB, Ma XG, Zhao C, He XJ (2013) Chromosomal study on Chinese *Bupleurum* (Apiaceae). Plant Science Journal, 31(1), 11–22. (in Chinese with English abstract) [梁乾隆, 王长宝, 马祥光, 赵财, 何兴金 (2013) 中国柴胡属染色体数目和核型研究. 植物科学学报, 31(1), 11–22.]

Li B, Chang ZY, Wu ZH, Xu LR (2004) A karyotype study of six *Astragalus* species from China. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 24, 711–715. (in Chinese with English abstract) [黎斌, 常朝阳, 吴振海, 徐朗然 (2004) 国产 6 种黄耆属植物的核型研究. 西北植物学报, 24, 711–715.]

Li B, Yu H, Tang K (2004) Study on karyotypical variation in population of *Lilium nepalense*. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications, 16(1), 98–102. (in Chinese with English abstract) [李标, 虞泓, 唐坤 (2004) 紫斑百合居群核型变异式样. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 16(1), 98–102.]

Li H, Hay A (1992) Notes on the classification of genera *Remusatia* and *Gonatanthus* in Araceae. Acta Botanica Yunnanica, Suppl. 5, 27–33. (in Chinese with English abstract) [李恒, Hay A (1992) 天南星科岩芋属和曲苞芋属的分类问题. 云南植物研究, 增刊 5, 27–33.]

Li H, Wang ZL, Gong HD, Wang YF (2008) A study on karyotypes of two *Saussurea* species from the eastern Tibetan plateau. Journal of Northwest Normal University (Natural Science), 44, 95–98. (in Chinese with English abstract) [李淮, 王转莉, 巩红冬, 王一峰 (2008) 青藏高原东缘 2 种风毛菊属植物的核型研究. 西北师范大学学报(自然科学版), 44, 95–98.]

Li JQ (1988) On the karyotypes in six species of *Crotalaria* L. in Yunnan. Journal of Wuhan Botanical Research, 6(1), 15–22. (in Chinese with English abstract) [李建强 (1988) 云南猪屎豆属 6 种植物的核型初报. 武汉植物研究院, 6(1), 15–22.]

Li JQ, Wu ZY, Lu AM (1993) Cytological observation on the plants of *Thladianthinae* (Cucurbitaceae). Acta Botanica Yunnanica, 15, 101–104. (in Chinese with English abstract) [李建强, 吴征镒, 路安民 (1993) 葫芦科赤瓟亚族植物的细胞学观察. 云南植物研究, 15, 101–104.]

Li SF, Chang ZY (1996) A cytogeographical study on *Clintonia udensis* (Liliaceae). Acta Phytotaxonomica Sinica, 34, 29–38. (in Chinese with English abstract) [李思锋, 常朝阳 (1996) 七筋姑的细胞地理学研究. 植物分类学报, 34, 29–38.]

Li SJ, Li CH, He GY, Xu YC (2010) Analysis on chromosome karyotype of *Kengyilia thoroldiana* (Oliv.). Journal of Anhui Agricultural Sciences, 38, 3356–3357. (in Chinese with English abstract) [李淑娟, 李长慧, 何国英, 许永财 (2010) 梭罗草的染色体核型分析. 安徽农业科学, 38, 3356–3357.]

Li SZ, He TS, Zhang DC, Ding WQ (2013) Karyotypes of six species of genus *Saussurea* DC. in the Hengduan Mountains, southwestern China. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 33, 2194–2202. (in Chinese with

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.

<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

English abstract) [李双智, 何廷顺, 张大才, 丁文谦 (2013) 风毛菊属 6 种植物的核型分析. 西北植物学报, 33, 2194–2202.]

Li WJ, Liu JH, Li YP, Liu F (1996) Production and cytogenetic analysis of intergeneric hybrids between *Elymus anthosachnoides* and *Psathyrostachys huashanica* (Poaceae: Triticeae). Plant Systematics and Evolution, 202, 265–269.

Li X (2014) Classification of three species of *Saussurea* DC. in the Tibet Plateau. Master Thesis, Northwest Normal University. (in Chinese with English abstract) [李霞 (2014) 青藏高原三种风毛菊属植物的系统分类研究. 硕士学位论文, 西北师范大学.]

Li YG, Guo WH, Wu BJ (2003) A karyological study of six Chinese species of *Cymbidium*. Acta Botanica Yunnanica, 25(1), 83–89. (in Chinese with English abstract) [李玉阁, 郭卫红, 吴伯骥 (2003) 六种国产兰属植物的核型研究. 云南植物研究, 25(1), 83–89.]

Li ZM, He WJ (2007) Chromosome number and karyotype of *Silene gracilicaulis* (Caryophyllaceae) from Hengduan Mountains. Acta Botanica Yunnanica, 29, 439–440. (in Chinese with English abstract) [李志敏, 何文洁 (2007) 横断山区石竹科细蝇子草的染色体数目及核型报道. 云南植物研究, 29, 439–440.]

Li Z, Wang ZX, Geng SJ, Chen SM, Li WP (2015) A karyotypic study on three *Aster* species (Asteraceae). Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 35, 1148–1152. (in Chinese with English abstract) [李志, 王梓辛, 耿胜娟, 陈三茂, 黎维平 (2015) 菊科紫菀属 3 种植物的核型分析. 西北植物学报, 35, 1148–1152.]

Liu HM, Zhi L, Zhao LH, Sui SZ, Li MY (2010) Karyotype analysis of four wild *Lilium* species. Journal of Plant Genetic Resources, 11, 469–473. (in Chinese with English abstract) [刘华敏, 智丽, 赵丽华, 眭顺照, 李名扬 (2010) 四种野生百合核型分析. 植物遗传资源学报, 11, 469–473.]

Liu JL, Tang Y, Shao JR, Luo Q, Sun JX (2009) Karyotypic studies of two wild Buckwheat species in the *Fagopyrum* mill. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 29, 1798–1803. (in Chinese with English abstract) [刘建林, 唐宇, 邵继荣, 罗强, 孙俊秀 (2009) 荞麦属 2 个野生荞麦种的染色体核型研究. 西北植物学报, 29, 1798–1803.]

Liu JQ (2000) Karyomorphology of 4 species in *Sinacalia* and *Parasenecio* (Asteraceae: Senecioneae). Acta Botanica Yunnanica, 22, 447–450. (in Chinese with English abstract) [刘建全 (2000) 华蟹甲草属和蟹甲草属 4 种植物的核型. 云南植物研究, 22, 447–450.]

Liu JQ, He TN (1999) Karyotypes of seven species of *Delphinium* from southern Qinghai. Acta Botanica Yunnanica, 21, 471–476. (in Chinese with English abstract) [刘建全, 何廷农 (1999) 青海南部七种翠雀属植物的核型. 云南植物研究, 21, 471–476.]

Liu JQ, He TN, Chen SL (2002) Contributions to the karyomorphological data and taxonomic implications of *Sect. Kudoa* and *Sect. Monopodiae* in *Gentianal*. Acta Biologica Plateau Sinica, 15, 25–32. (in Chinese with English abstract) [刘建全, 何廷农, 陈世龙 (2002) 龙胆属华丽组和多枝组的核型资料及其分类学意义. 高原生物学集刊, 15, 25–32.]

Liu JQ, He TN, Chen SL (2002) The chromosome number of 5 species in Gentianaceae. Acta Biologica Plateau Sinica, 15, 49–52. (in Chinese with English abstract) [刘建全, 何廷农, 陈世龙 (2002) 五种龙胆科植物的染色体数目. 高原生物学集刊, 15, 49–52.]

Liu JQ, He TN, Chen SL (2002) The first chromosome data documentations of *Megacodon* and *Lomatogoniopsis* and the systematic significance (Gentianaceae). Acta Biologica Plateau Sinica, 15, 41–47. (in Chinese with English abstract) [刘建全, 何廷农, 陈世龙 (2002) 大钟花属和辐花属染色体资料的首次记载及其系统学意义. 高原生物学集刊, 15, 41–47.]

Liu JQ, He TN, Liu SW (2000) Systematic position of *Nannoglottis* Maxim. s. l. (Asteraceae) karyomorphological data. Acta Phytotaxonomica Sinica, 38, 236–241. (in Chinese with English abstract) [刘建全, 何廷农, 刘尚武 (2000) 毛冠菊属系统位置的核形态证据. 植物分类学报, 38, 236–241.]

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.

<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

Liu JQ (1999) Karyomorphological characteristics of three *Aster* species from southern Qinghai. Bulletin of Botanical Research, 19, 392–396. (in Chinese with English abstract) [刘建全 (1999) 青海南部三种紫菀属植物的核型研究. 植物研究, 19, 392–396.]

Liu JQ (2002) Karyomorphological comparison on *Aconitum tanguticum* and *A. gymnandrum* from different altitudes. Acta Biologica Plateau Sinica, 15, 33–36. (in Chinese with English abstract) [刘建全 (2002) 来自不同海拔的露蕊乌头和甘青乌头的核型比. 高原生物学集刊, 15, 33–36.]

Liu JQ, Liu SW, He TN, Lu AM (2001) Karyological studies on the Sino-Himalayan genus, *Cremanthodium* (Asteraceae: Senecioneae). Botanical Journal of the Linnean Society, 135, 107–112.

Liu JQ (2004) Uniformity of karyotypes in *Ligularia* (Asteraceae: Senecioneae), a highly diversified genus of the eastern Qinghai-Tibet Plateau highlands and adjacent areas. Botanical Journal of the Linnean Society, 144, 329–342.

Liu RR (2010) The karyotype of the genus *Rheumatum* in the Tibetan Plateau and its adjacent areas. Master Thesis, Lanzhou University. (in Chinese with English abstract) [刘瑞瑞 (2010) 青藏高原及其邻近地区物种丰富属——大黄属的核型研究. 硕士学位论文, 兰州大学.]

Liu YH (1985) Karyomorphology comparison of 11 species of *Elymus* in China. Journal of Wuhan Botanical Research, 40, 215–221. (in Chinese with English abstract) [刘玉红 (1985) 我国 11 种披碱草的核型研究. 武汉植物研究, 40, 215–221.]

Liu YH, Meng Y, Yang YH, Yang YP (2011) Chromosome numbers and karyotypes of six *Oxytropis* species (Fabaceae) from the Tibetan Plateau, China. Plant Diversity and Resources, 33, 423–431. (in Chinese with English abstract) [刘亚辉, 孟盈, 杨永红, 杨永平 (2011) 青藏高原六种棘豆属植物的染色体数目及核型报道. 植物分类与资源学报, 33, 423–431.]

Liu YH, Wang SM (1994) Karyotype study of *Astragalus* polycladous. Acta Agrestia Sinica, 2(1), 56–58. (in Chinese with English abstract) [刘玉红, 王善敏 (1994) 多枝黄芪的核型研究. 草地学报, 2(1), 56–58.]

Long CL, Li H, Liu XZ, Gu ZJ (1989) A cytogeographic study on the genus *Remusatia* (Araceae). Acta Botanica Yunnanica, 11, 132–138. (in Chinese with English abstract) [龙春林, 李恒, 刘宪章, 顾志健 (1989) 天南星科岩芋属的细胞地理学研究. 云南植物研究, 11, 132–138.]

Lu BR, Yan J, Yang JL (1990) Cytological observation of Triticeae Dumort in Xinjiang, Qinghai and Sichuan. Acta Botanica Yunnanica, 12, 57–66. (in Chinese with English abstract) [卢宝荣, 颜济, 杨俊良 (1990) 新疆、青海和四川等地区小麦族植物的细胞学观察. 云南植物研究, 12, 57–66.]

Lu QY, Chen GF, Li ZM (2010) Cytology research on *Saussurea tatsienensis* Franch (*Saussurea*). Journal of Yunnan Normal University (Natural Science edition), 30(6), 58–61. (in Chinese with English abstract) [陆覃昱, 陈光富, 李志敏 (2010) 风毛菊属打箭风毛菊(*Saussurea tatsienensis* Franch.)的细胞学研究. 云南师范大学学报(自然科学版), 30(6), 58–61.]

Lu XF, He TN, Liu JQ (2002) *Sinadoxa* is the most evolved in the muskroot family groups. Acta Biologica Plateau Sinica, 15, 105–112. (in Chinese with English abstract) [卢学峰, 何廷农, 刘建全 (2002) 华福花属是五福花科中最进化的类群吗. 高原生物学集刊, 15, 105–112.]

Lu YX, Sun XF, Zhou QX, Gu ZJ (2002) Chromosome numbers in ten species in the Gesneriaceae from Yunnan. Acta Botanica Yunnanica, 24, 377–382. (in Chinese with English abstract) [鲁元学, 孙先凤, 周其兴, 顾志健 (2002) 云南十种苦苣苔科植物的染色体数目报道. 云南植物研究, 24, 377–382.]

Luo D, Liu D, Xu B, Nie ZL, Sun H, Li ZM (2011) A karyological study of six species of *Silene* L. (Caryophyllaceae) from the Hengduan Mountains, SW China. Caryologia, 64(1), 10–13.

Luo YB (2004) Cytological studies on some representative species of the tribe Orchideae (Orchidaceae) from China. Botanical Journal of the Linnean Society, 145, 231–238.

Luo YX, Yue XK, Sun H, Li ZM (2008) Cytological studies on *Arenaria roborowskii* (Caryophyllaceae) from

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.

<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

- Hengduan Mountains. Acta Botanica Yunnanica, 30, 662–664. (in Chinese with English abstract) [罗元霞, 岳学坤, 孙航, 李志敏 (2008) 横断山脉地区青藏雪灵芝核形态学. 云南植物研究, 30, 662–664.]
- Ma SB, Hu ZH (1996) A karyotypic study on Podophylloideae (Berberidaceae). Acta Botanica Yunnanica, 18, 325–330. (in Chinese with English abstract) [马绍宾, 胡志浩 (1996) 小檗科鬼臼亚科植物的核型研究. 云南植物研究, 18, 325–330.]
- Meng Y, Nie ZL, Sun H, Yang YP (2010) Chromosome numbers and polyploidy in *Leontopodium* (Asteraceae: Gnaphalieae) from the Qinghai-Tibet Plateau of SW China. Caryologia, 65(2), 87–93.
- Meng Y, Nie ZL, Xie HY, Yang YP (2006) A karyomorphological study on four species of *Meconopsis* Vig. (Papaveraceae) from the Hengduan Mountains, SW China. Caryologia, 59, 1–6.
- Meng Y, Nie ZL, Yang YP, Gu ZJ (2005) Karyomorphology of *Maianthemum* sensu lato (Polygonatae, Ruscaceae). Journal of Plant Research, 118, 155–162.
- Meng Y, Sun H, Yang YP, Nie ZL (2010) Polyploidy and new chromosome counts in *Anaphalis* (Asteraceae: Gnaphalieae) from the Qinghai-Tibet Plateau of China. Journal of Systematics and Evolution, 48, 58–64.
- Meng Y, Yang YP, Sun H, Deng T, Nie ZL (2014) Chromosome numbers karyotypes and polyploidy evolution of *Anaphalis* species (Asteraceae: Gnaphalieae) from the Hengduan Mountains, SW China. Caryologia, 67, 238–249.
- Mu YL, Xi RT, Lü ZR (1990) Microsporogenesis observation and karyotype analysis of some species in genus *Juglans* L. Journal of Wuhan Botanical Research, 8, 301–310. (in Chinese with English abstract) [穆英林, 郝荣庭, 吕增仁 (1990) 核桃属部分种的小孢子发生及核型研究. 武汉植物研究院, 8, 301–310.]
- Masashi N, Wu QA, Syo K (1997) Cytological studies on Chinese plants introduced from Yunnan Province. I. Karyomorphology of some species of *Primula* and *Androsace* (Primulaceae). Bull. Bot. Gard. Toyama, 2, 1–15.
- Nie ZL (2002) A preliminarily cytogeographical study on the angiosperm flora in the Hengduan, China—with cytogeographical study of genus *Tibetia*. Master thesis, Kunming Institute of Botany, Kunming. (in Chinese with English abstract) [聂泽龙 (2002) 横断山区被子植物区系细胞地理学初探——兼论高山豆属细胞地理学研究. 硕士学位论文, 中国科学院昆明植物研究所, 昆明.]
- Nie ZL, Gu ZJ, Sun H (2002) Cytological study of *Tibetia* (Fabaceae) in the Hengduan Mountains region, China. Journal of Plant Research, 115(1), 17–22.
- Pan YZ, Gong X, Yang ZY, Yin Q (2004) Karyological studies on five species of the genus *Ligularia* (Compositae: Senecioneae). Acta Botanica Yunnanica, 26, 65–72. (in Chinese with English abstract) [潘跃芝, 龚洵, 杨志云, 尹擎 (2004) 五种橐吾属植物的核型研究. 云南植物研究, 26, 65–72.]
- Pan ZH, Chin HC, Wu ZJ, Yuan CQ, Liu SL (1985) A report on the chromosome numbers of Chinese Umbelliferae. Acta Phytotaxonomica Sinica, 23, 97–102. (in Chinese with English abstract) [潘泽惠, 秦慧贞, 吴竹君, 袁昌齐, 刘守炉 (1985) 伞形科植物染色体数目报告. 植物分类学报, 23, 97–102.]
- Pan ZH, Liu XT, She ML, Xu LR (1991) A study on karyotypes of eight species and geographical distribution of *Angelica* (Umbelliferae) in Sichuan. Acta Phytotaxonomica Sinica, 29, 431–438. (in Chinese with English abstract) [潘泽惠, 刘心恬, 余孟兰, 徐朗然 (1991) 四川当归属八种植物的核型及地理分布研究. 植物分类学报, 29, 431–438.]
- Pei J, Ding ZZ, Chin HC, Su P, Tang SY, Zhang HQ (1979) A preliminary systematic study of *Dioscorea* L. sect. *Stenophora* Uline. Acta Phytotaxonomica Sinica, 17, 61–72. (in Chinese with English abstract) [裴鉴, 丁志遵, 秦慧贞, 舒璞, 唐世蓉, 张涵庆 (1979) 中国薯蓣属根状茎组系统分类的初步研究. 植物分类学报, 17, 61–72.]
- Peng YL, Sun H, Gu ZJ (2002) Cytological study on *Nouelia* and *Leucomeris* Compositae. Acta Botanica Yunnanica, 24, 82–86. (in Chinese with English abstract) [彭玉兰, 孙航, 顾志建 (2002) 牻牛儿苗属及白菊

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.

<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

木属的细胞学研究. 云南植物研究, 24, 82–86.]

Pi J, Zhou SD, He XJ, Tang ZH, Wang Q (2008) Karyotypes of six populations of four species in the genus *Mallotus* (Euphorbiaceae) from China. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 28, 256–261. (in Chinese with English abstract) [皮军, 周颂东, 何兴金, 唐自慧, 王强 (2008) 大戟科野桐属 4 种 6 个居群的核型研究. 西北植物学报, 28, 256–261.]

Pu JX, He XJ, Zhang XM, Chen WW (2006) Karyotypes of Umbelliferae of four species in seven populations in Hengduan Mountains. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 26, 1989–1995. (in Chinese with English abstract) [蒲吉霞, 何兴金, 张雪梅, 陈薇薇 (2006) 横断山区伞形科 4 种 7 个居群植物的核型研究. 西北植物学报, 26, 1989–1995.]

Qian M, Wang GY, Meng Y, Yang YP (2015) Karyotypes and C-values of two *Plantago* species from the Qinghai-Tibet Plateau, China. *Plant Diversity and Resources*, 37, 407–415. (in Chinese with English abstract) [钱敏, 王广艳, 孟盈, 杨永平 (2015) 青藏高原二种车前属植物的核型和 C-值报道. 植物分类与资源学报, 37, 407–415.]

Qing QJ (2011) Karyotypes and genetic variations in 9 species of *Lilium*. Master thesis, Sichuan Agricultural University. (in Chinese with English abstract) [卿秋静 (2011) 九种百合属植物核型及遗传变异研究. 硕士学位论文, 四川农业大学.]

Ren BQ, Liu J (2006) Cytological study on *Alnus* in China. *Guihaia*, 26, 356–359. (in Chinese with English abstract) [任保青, 刘军 (2006) 中国桤木属植物的细胞学研究. 广西植物, 26, 356–359.]

Russell A, Safer S, Weiss-Schneeweiss H, Temsch E, Stuppner H, Stuessy TF, Samuel R (2013) Chromosome counts and genome size of *Leontopodium* species (Asteraceae: Gnaphalieae) from south-western China. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 171, 627–636.

Seavey SR, Boufford DE (1983) Observations of chromosomes in *Circaea* (Onagraceae). *American Journal of Botany*, 70, 1476–1481.

Shang BL, Meng KB, Wang YJ (2014) Karyotype analysis of five *Saussurea* species. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 34, 2220–2226. (in Chinese with English abstract) [尚宝龙, 蒙奎宾, 王玉金 (2014) 风毛菊属 5 种植物的核型分析. 西北植物学报, 34, 2220–2226.]

Shang XM, Li ZL (1984) Chromosome studies of 10 species of *Aconitum* in China. *Acta Phytotaxonomica Sinica*, 22, 378–385. (in Chinese with English abstract) [商效民, 李正理 (1984) 国产十种乌头的染色体研究. 植物分类学报, 22, 378–385.]

Shang XM (1985) Chromosome studies of subgenus *Gymnaconitum* endemic to China and *Beesia* (Ranunculaceae). *Acta Phytotaxonomica Sinica*, 23, 270–274. (in Chinese with English abstract) [商效民 (1985) 中国特有的露蕊乌头亚属及铁破锣的染色体研究. 植物分类学报, 23, 270–274.]

Shao JR, Zhou ML, Zhu XM, Wang DZ, Bai DQ (2011) *Fagopyrum wenchuanense* and *Fagopyrum qiangcai*, two new species of Polygonaceae from Sichuan, China. *Novon*, 21, 256–261.

Shen YG, Wang ZL, Guan KY (2007) Karyotypical studies on thirteen *Iris* plants from China. *Acta Phytotaxonomica Sinica*, 45, 601–618. (in Chinese with English abstract) [沈云光, 王仲朗, 管开云 (2007) 国产 13 种鸢尾属植物的核型研究. 植物分类学报, 45, 601–618.]

Soltis DE, Bohm BA (1984) Karyology and flavonoid chemistry of the disjunct species of *Tiarella* (Saxifragaceae). *Systematic Botany*, 9, 441–447.

Stergianou KK (1989) Habit differentiation and chromosome evolution in *Pleione* (Orchidaceae). *Plant Systematics and Evolution*, 166, 253–264.

Sun GL, Liu F, Yen C, Yang JL (1992) Biosystematic study between *Roegneria hondai* and *R. ciliaris* of the tribe Triticeae. *Guihaia*, 12, 222–228.

Sun GL, Yang JL, Yan J (1993) A biosystematics study on hybrids between *Psathyrostachys huashanica* and two

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.

<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

- species of *Roegneria*. Acta Phytotaxonomica Sinica, 31, 393–398. (in Chinese with English abstract) [孙根楼, 杨俊良, 颜济 (1993) 华山新麦草和鹅观草属两个种间物种生物学研究. 植物分类学报, 31, 393–398.]
- Sun GL, Yan J, Yang JL (1993) Studies on karyotypes of two species in *Kengyilia* and three species in *Roegneria*. Acta Phytotaxonomica Sinica, 31, 560–564. (in Chinese with English abstract) [孙根楼, 颜济, 杨俊良 (1993) 仲彬草属和鹅观草属几个种的核型研究. 植物分类学报, 31, 560–564.]
- Tamura MN, Ogisu M, Xu JM (1997) *Heteropolygonatum*, a new genus of the tribe Polygonateae (Convallariaceae) from west China. Kew Bulletin, 52, 949–956.
- Tang YC, Xiang QY, Cao YL (1984) Cytological studies on some plants of Sichuan and neighbouring regions (1). Acta Phytotaxonomica Sinica, 22, 343–350. (in Chinese with English abstract) [汤彦承, 向秋云, 曹亚玲 (1984) 四川及其邻近地区一些植物的细胞学研究(一). 植物分类学报, 22, 343–350.]
- Tang ZH, Gao YD, Zhou SD, He XJ (2009) Karyotypes of fifteen populations of four species in *Maianthemum* (Liliaceae) from Southwestern China. Acta Botanica Yunnanica, 31, 1–7. (in Chinese with English abstract) [唐自慧, 高云东, 周颂东, 何兴金 (2009) 中国西南地区鹿药属 4 种 15 居群核型研究. 云南植物研究, 31, 1–7.]
- Tian DK, Guan KY, Zhou QX, Gu ZJ (2002) Chromosome numbers of eight species of *Begonia* from Yunnan. Acta Botanica Yunnanica, 24, 245–249. (in Chinese with English abstract) [田代科, 管开云, 周其兴, 顾志建 (2002) 云南八种秋海棠属植物的染色体数目. 云南植物研究, 24, 245–249.]
- Tsuneo F, Katsuhiko K, Hong DY, Zhou SL, Hisakazu O (2000) A comparative chromosomal study of five species of *Chrysosplenium* collected in the northern part of Sichuan Province, China. Chromosome Science, 4, 69–74.
- Tsuneo F, Katsuhiko K, Hong DY, Zhou SL, Hironori D, Hisakazu O (2000) A cytological observation of *Rodgersia aesculifolia* Batalin (Saxifragaceae) collected in Shaanxi and Sichuan provinces, China. Chromosome Science, 4, 65–68.
- Tsuneo F, Katsuhiko K, Hong DY, Zhou SL, Hisakazu O (2001) Chromosomes in four species of *Parnassia* (Saxifragaceae) in the northern part of Sichuan Province, China. Chromosome Science, 5, 19–25.
- Tsuneo F, Katsuhiko K, Hong DY, Zhou SL (1997) Karyomorphological studies in *Parnassia yunnanensis* var. *longistipitata* in Sichuan Province, China. Chromosome Science, 1, 21–24.
- Tsuneo F, Katsuhiko K, Hong DY, Zhou SL, Takuko S (1997) Karyomorphology of *Chrysosplenium griffithii* collected in Sichuan Province, China. Chromosome Science, 1(2), 61–64.
- Tsuneo F, Katsuhiko K, Hong DY, Zhou SL, Takuko S (1998) A karyomorphological comparison of four *Saxifraga* species collected in the western part of Sichuan Province, China. Chromosome Science, 2, 103–109.
- Tsuneo F, Rie S, Katsuhiko K, Hong DY, Zhou SL, Hisakazu O (2001) Comparative karyomorphology of five species of *Saxifraga* in northern part of Sichuan Province, China. Chromosome Science, 5, 27–34.
- Tu TY, Sun H, Gu ZJ, Yue JP (2005) Cytological studies on the Sino-Himalayan endemic *Anisodus* and four related genera from the tribe Hyoscyameae (Solanaceae), and their systematic and evolutionary implications. Botanical Journal of the Linnean Society, 147, 457–468.
- Tu TY, Sun H, Bartholomew B, Nie ZL (2006) Cytological study on *Kelloggia* (Rubiaceae), an intercontinental disjunct genus between eastern Asia and western North America. Journal of Plant Research, 119, 397–400.
- Tuo ZY, Abulaity H, Zhou GL (2012) A report on chromosome numbers and karyotypes of 12 species of Brassicaceae from Xinjiang. Journal of Xinjiang Agricultural University, 35, 439–445. (in Chinese with English abstract) [庾忠云, 阿不来提·哈德尔, 周桂玲 (2012) 新疆 12 种十字花科植物核型报道. 新疆农业大学学报, 35, 439–445.]
- Wan J, Zhou SD, Gao YD, He XJ (2011) Karyotypes of twenty-five populations of thirteen species in

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.

<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

Nomocharis and *Lilium*. Plant Diversity and Resources, 33, 477–494. (in Chinese with English abstract) [万娟, 周颂东, 高云东, 何兴金 (2011) 豹子花属及百合属 13 种 25 居群的核型研究. 植物分类与资源学报, 33, 477–494.]

Wang GY, Meng Y, Nie ZL, Yang YP (2013) Karyotypes of five *Leontopodium* species from the Southeastern Qinghai-Tibet Plateau. Plant Diversity and Resources, 35, 355–360. (in Chinese with English abstract) [王广艳, 孟盈, 聂泽龙, 杨永平 (2013) 青藏高原东南缘五种火绒草属植物的核型. 植物分类与资源学报, 35, 355–360.]

Wang HX, Zhang YF, Yang BS (2006) Comparative analysis on variation patterns of karyotype in *Lilium*. Journal of Henan Institute of Science and Technology, 34(4), 38–40. (in Chinese with English abstract) [王红霞, 张艳芬, 杨保胜 (2006) 百合属植物核型变异式样对比分析. 河南科技学院学报: 自然科学版, 34(4), 38–40.]

Wang H, Li WL, Gu ZJ, Chen YY (2001) Cytological study on *Acorus* L. in southwestern China, with some cytogeographical notes on *A. calamus*. Acta Botanica Sinica, 43, 354–358. (in Chinese with English abstract) [王红, 李文丽, 顾志建, 陈永燕 (2001) 中国西南部菖蒲属的细胞学研究, 兼论菖蒲的细胞地理. 植物学报, 43, 354–358.]

Wang JW, Yang J, Li MX (1993) The morphological variation and the karyotypical characters of *Dendranthema indicum* and *D. lavandulifolium*. Acta Phytotaxonomica Sinica, 31, 140–146. (in Chinese with English abstract) [汪劲武, 杨继, 李懋学 (1993) 野菊和甘菊的形态变异及其核型特征. 植物分类学报, 31, 140–146.]

Wang KQ, Ge S (1998) A karyotype study on five species of *Adenophora*. Acta Botanica Yunnanica, 20, 58–62. (in Chinese with English abstract) [王可青, 葛颂 (1998) 国产沙参属五个种的核型研究. 云南植物研究, 20, 58–62.]

Wang L, Gu ZJ, Sun H (1994) Preliminary karyomorphological study on the plants in genera *Oxytropis* and *Astragalus* from Tibetan Plateau. Acta Botanica Yunnanica, 16, 53–59. (in Chinese with English abstract) [王丽, 顾志建, 孙航 (1994) 青藏高原几种黄芪和棘豆植物核型的初步研究. 云南植物研究, 16, 53–59.]

Wang L, Gu ZJ, Gong X, Xiao TJ (1993) A cytological study on fifteen species in six genera of Liliaceae from Yunnan. Acta Phytotaxonomica Sinica, 31, 549–559. (in Chinese with English abstract) [王丽, 顾志建, 龚洵, 肖调江 (1993) 百合科六属十五种植物的细胞学研究. 植物分类学报, 31, 549–559.]

Wang L, Gu ZJ, Sun H (1994) Preliminary karyomorphological study on the plants in genera *Oxytropis* and *Astragalus* from Qinghai-Xizang Plateau. Acta Botanica Yunnanica, 16, 53–59. (in Chinese with English abstract) [王丽, 顾志建, 孙航 (1994) 青藏高原几种黄芪和棘豆植物核型的初步研究. 云南植物研究, 16, 53–59.]

Wang LQ, Yang P, Nie XX, Gao Y, Lu T (2013) Chromosome karyotype of *N. micrantha* Bunge. Chinese Horticulture Abstracts, (8), 52–54. (in Chinese with English abstract) [王立群, 杨平, 聂晓霞, 高燕, 陆婷 (2013) 小花荆芥(*N. micrantha* Bunge)染色体的核型分析. 中国园艺文摘, (8), 52–54.]

Wang SF (1989) Karyotype uniformity of *Paris* and *Trillium tschonoskii*. Acta Botanica Yunnanica, 11, 75–79. (in Chinese with English abstract) [王淑芬 (1989) 重楼属和延龄草核型的一致性. 云南植物研究, 11, 75–79.]

Wang SF, Song TY (1994) A karyotypes report of four *Fritillaria*. Journal of Sichuan Normal University (Natural Science), 17(6), 93–99. (in Chinese with English abstract) [王淑芬, 宋天瑛 (1994) 贝母属 4 种核型的报道. 四川师范大学学报(自然科学版), 17(6), 93–99.]

Wang SF, Xu JM (1989) Cytotaxonomical studies on Liliaceae—Karyotypes of taxa of 2 genera. In: Plant Chromosome Research (ed. Hong DY), pp. 337–341. Nishiki, Hiroshima.

Wang XR, Tang HR, Fu HQ, Luo Y, Deng QX, Dong XL, Li L, Duan J (2008) Chromosome numbers and

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.

<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

karyotypes of 10 species wild *Bramble* (*Rubus* L.) from Southwest of China. *Acta Horticulturae Sinica*, 35, 343–350. (in Chinese with English abstract) [王小蓉, 汤浩茹, 付华清, 罗娅, 邓群仙, 董晓莉, 李玲, 段娟 (2008) 西南地区 10 种野生树莓的染色体数与核型研究. 园艺学报, 35, 343–350.]

Wang YF, Gong HD, Gao SF, Liang WF (2006) Karyotype study of five species of *Saussurea* in the eastern of Tibet Plateau. *Journal of Sichuan University(Natural Science)*, 43, 1132–1136. (in Chinese with English abstract) [王一峰, 巩红冬, 高素芳, 梁万福 (2006) 青藏高原东缘五种风毛菊属植物的核型研究. 四川大学学报(自然科学版), 43, 1132–1136.]

Wang YF, Gao SF, Gong HD, Liu J (2007) On karyotypes of four species of *Saussurea* DC. in the east of Qinghai-Tibet Plateau. *Journal of Northwest A and F University (Natural Science Edition)*, 35, 199–203. (in Chinese with English abstract) [王一峰, 高素芳, 巩红冬, 刘静 (2007) 青藏高原东缘高寒草甸风毛菊属 4 个优势种的核型研究. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 35, 199–203.]

Wang YF, Sha J, Wang ZL, Zhou SH, Yang ZB (2010) A report on karyotypes of two *Saussurea* species from the eastern Qinghai-Tibetan Plateau. *Journal of Northwest Normal University (Natural Science)*, 46, 75–78. (in Chinese with English abstract) [王一峰, 沙洁, 王转莉, 周生芸, 杨宗邦 (2010) 青藏高原东缘风毛菊属中两种植物的核型报道. 西北师范大学学报(自然科学版), 46, 75–78.]

Wang YF, Wang ZL, Gong HD, Guo HQ, Liang WF, Pang HL (2008) Karyotypic studies on 5 species of Subgen. *Amphilaena* and Subgen. *Saussurea* in *Saussurea* from the Qinghai-Tibetan Plateau. *Journal of Sichuan University(Natural Science)*, 45, 1221–1227. (in Chinese with English abstract) [王一峰, 王转莉, 巩红冬, 郭怀青, 梁万福, 庞海龙 (2008) 青藏高原风毛菊属中雪莲亚属和风毛菊亚属的五种植物的核型研究. 四川大学学报(自然科学版), 45, 1221–1227.]

Wang YF, Wang ZL, Gong HD, Guo HQ, Liang WF (2008) Study on karyotypes of 4 species of *Saussures* DC. in the east of Qinghai-Tibetan Plateau. *Journal of Northwest A and F University(Natural Science edition)*, 36, 165–170. (in Chinese with English abstract) [王一峰, 王转莉, 巩红冬, 郭怀清, 梁万福 (2008) 青藏高原东缘 4 种风毛菊属植物的核型研究. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 36, 165–170.]

Wang YZ, Gu ZJ (1999) Karyomorphology of four species in *Ancylostemon*, *Briggsiopsis* and *Lysionotus* (Gesneriaceae). *Acta Phytotaxonomica Sinica*, 37, 137–142. (in Chinese with English abstract) [王印政, 顾志建 (1999) 直瓣苣苔属、筒花苣苔属和吊石苣苔属 4 个种的核形态学研究. 植物分类学报, 37, 137–142.]

Xia LF, Gu ZJ, Wang ZL, Xiao TJ, Wang L, Katsuhiko K (1994) Dawn on the origin of *Camellia reticulata*—The new discovery of its wild diploid in Jinshajiang valley. *Acta Botanica Yunnanica*, 16, 255–262. (in Chinese with English abstract) [夏丽芳, 顾志建, 王仲朗, 肖调江, 王丽, 近藤胜彦 (1994) 探讨云南山茶起源的一线曙光——野生二倍体类型在金沙江流域的发现. 云南植物研究, 16, 255–262.]

Xiao TJ, Gu ZJ, Xia LF (1993) A study on meiosis of 9 species in genus *Camellia*. *Acta Botanica Yunnanica*, 15, 167–172. (in Chinese with English abstract) [肖调江, 顾志建, 夏丽芳 (1993) 九种山茶属植物的减数分裂研究. 云南植物研究, 15, 167–172.]

Xiao TJ, Xia LF, Wang ZL (1996) Studies on the giemsa C-bands of *Camellia* species, section *Camellia* from the middle reach of Jinshajiang Valley. *Acta Botanica Yunnanica*, 18, 81–86. (in Chinese with English abstract) [肖调江, 夏丽芳, 王仲朗 (1996) 金沙江中游地区红山茶组植物的 Giemsa C—带研究. 云南植物研究, 18, 81–86.]

Xiao H, Zhou QX, Gu ZJ, Guan KY (2002) Karyomorphology of six *Incarvillea* species. *Acta Botanica Yunnanica*, 24, 87–93. (in Chinese with English abstract) [肖华, 周其兴, 顾志建, 管开云 (2002) 角蒿属 6 个种的核形态学研究. 云南植物研究, 24, 87–93.]

Xie XY, Wu QA (1993) The determination of karyotype and isoesterase on triploid *Lilium davidii*. *Acta Botanica Yunnanica*, 15, 57–60. (in Chinese with English abstract) [谢晓阳, 武全安 (1993) 三倍体川百合的核型与

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.

<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

酯酶同工酶鉴定. 云南植物研究, 15, 57–60.]

Xie XY, Gu ZJ, Wu QA (1992) Cytological studies of the genus *Nomocharis* and its related genera. Acta Phytotaxonomica Sinica, 30, 487–497. (in Chinese with English abstract) [谢晓阳, 顾志健, 武全安 (1992) 豹子花属及其近缘属细胞学研究. 植物分类学报, 30, 487–497.]

Xiong ZT, Chen XQ (1998) Numerical cytotaxonomic studies of *Hemerocallis* (Liliaceae) from China. Acta Phytotaxonomica Sinica, 36, 205–215. (in Chinese with English abstract) [熊治廷, 陈心启 (1998) 中国萱草属(百合科)的数量细胞分类研究. 植物分类学报, 36, 205–215.]

Yang DQ, Zhu XF (1989) Karyotypic studies of *Paeonia obovata*, *P. delavayi* and *P. delavayi* var. *lutea*. Acta Botanica Yunnanica, 11, 139–144. (in Chinese with English abstract) [杨涤清, 朱燮桴 (1989) 草芍药、野牡丹和黄牡丹的核型研究. 云南植物研究, 11, 139–144.]

Yang J, Wang JW, Li MX (1992) Cytotaxonomic studies on the genus *Polygonatum*. III. Chromosome numbers and karyotypes of 6 species from China. Journal of Wuhan Botanical Research, 10, 201–206. (in Chinese with English abstract) [杨继, 汪劲武, 李懋学 (1992) 黄精属细胞分类学研究. III. 国产6种黄精的染色体数目和核型. 武汉植物学研究, 10, 201–206.]

Yang L, Xu JM, Zhang XL, Wang HQ (1998) Karyotypical studies of six species on the genus *Allium*. Acta Phytotaxonomica Sinica, 36, 36–46. (in Chinese with English abstract) [杨蕾, 许介眉, 张小亮, 万海清 (1998) 六种葱属植物核型研究. 植物分类学报, 36, 36–46.]

Yang QE (2000) A new species of *Ranunculus* from the northwest of Yunnan Province. Acta Phytotaxonomica Sinica, 38, 551–556. (in Chinese with English abstract) [杨亲二 (2000) 云南西北部毛茛属一新种——文采毛茛及其核型. 植物分类学报, 38, 551–556.]

Yang QE (1996) A karyotype study of 15 species in the tribe Delphineae (Ranunculaceae) from China. Acta Phytotaxonomica Sinica, 34, 39–47. (in Chinese with English abstract) [杨亲二 (1996) 国产十五种翠雀族植物的核型研究. 植物分类学报, 34, 39–47.]

Yang QE (2001) Cytology of 12 species in *Aconitum* L. and 18 species in *Delphinium* L. from China. Acta Phytotaxonomica Sinica, 39, 502–514. (in Chinese with English abstract) [杨亲二 (2001) 国产12种乌头属和18种翠雀属植物的细胞学研究. 植物分类学报, 39, 502–514.]

Yang QE (2001) Cytology of eleven species in the genus *Ranunculus* L. and five in its four related genera from China. Acta Phytotaxonomica Sinica, 39, 405–422. (in Chinese with English abstract) [杨亲二 (2001) 国产毛茛属11种及其4个近缘属5种植物的细胞学研究. 植物分类学报, 39, 405–422.]

Yang QE (2002) Cytology of the tribe Trollieae and of the tribe Cimicifugeae in the Ranunculaceae: a comparative study. Acta Phytotaxonomica Sinica, 40, 453–460. (in Chinese with English abstract) [杨亲二 (2002) 毛茛科金莲花族和升麻族细胞学的比较研究. 植物分类学报, 40, 453–460.]

Yang QE (2002) Cytology of ten species in *Anemone*, one in *Anemoclema* and six in *Clematis* (Trib. Anemoneae, Ranunculaceae) from China. Acta Phytotaxonomica Sinica, 40, 396–405. (in Chinese with English abstract) [杨亲二 (2002) 国产毛茛科银莲花族十七种植物的细胞学研究. 植物分类学报, 40, 396–405.]

Yang QE (1998) Does *Actaea asiatica* have the most symmetric and primitive karyotype in the Ranunculaceae? Acta Phytotaxonomica Sinica, 36, 490–495. (in Chinese with English abstract) [杨亲二 (1998) 类叶升麻具有毛茛科中最对称和最原始的核型吗? 植物分类学报, 36, 490–495.]

Yang QE, Gong X (1995) A new species of the genus *Aconitum* L. from Yunnan, with an observation on its B chromosomes. Acta Phytotaxonomica Sinica, 33, 572–575. (in Chinese with English abstract) [杨亲二, 龚洵 (1995) 云南乌头属一新种及其B染色体的初步观察. 植物分类学报, 33, 572–575.]

Yang QE, Gong X, Gu ZJ, Wu QA (1993) A karyomorphological study of five species in the Ranunculaceae from Yunnan, with a special consideration on systematic positions of *Asteropyrum* and *Calathodes*. Acta Botanica Yunnanica, 15, 179–190. (in Chinese with English abstract) [杨亲二, 龚洵, 顾志建, 武全安 (1993) 云南

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.

<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

五种毛茛科植物的核形态研究兼论星果草属和鸡爪草属的系统位置. 云南植物研究, 15, 179–190.]

Yang QE, Gu ZJ, Sun H (1995) The karyotype of *Beesia deltophylla* and its systematic significance. Acta Phytotaxonomica Sinica, 32, 225–229. (in Chinese with English abstract) [杨亲二, 顾志建, 孙航 (1995) 角叶铁破锣的核型及其系统学意义. 植物分类学报, 32, 225–229.]

Yang QE, Gu ZJ, Wu ZY, Katsuhiko K (1989) A karyomorphological study of some Yunnan species of *Aconitum* L. (Ranunculaceae). Kromosomo II, 55–56, 1838–1860.

Yang QE, Gu ZJ, Wu ZY (1994) A karyomorphological study in *Aconitum subgen. Lycoctonum* (Ranunculaceae) from Yunnan. Acta Botanica Yunnanica, 16, 61–74. (in Chinese with English abstract) [杨亲二, 顾志建, 吴征镒 (1994) 云南乌头属牛扁亚属的核形态研究. 云南植物研究, 16, 61–74.]

Yang QE, Gu ZJ, Wu ZY, Hong DY (1993) A karyomorphological study in *Aconitum subgen. Aconitum* (Ranunculaceae) from Yunnan, China. Cathaya, 5, 89–114.

Yang QE (1999) Karyomorphology of four species in *Cimicifuga* (Ranunculaceae) from China, with some cytogeographical notes on *C. foetida*. Acta Phytotaxonomica Sinica, 37, 433–444. (in Chinese with English abstract) [杨亲二 (1999) 国产毛茛科升麻属四种植物的核形态研究, 并略论升麻的细胞地理. 植物分类学报, 37, 433–444.]

Yang QE (2000) Karyomorphology of the genus *Oxygraphis* Bunge (Ranunculaceae). Acta Phytotaxonomica Sinica, 38, 350–354. (in Chinese with English abstract) [杨亲二 (2000) 毛茛科鸭跖花属的核形态研究. 植物分类学报, 38, 350–354.]

Yang QE (1995) On the chromosomes of *Calathodes* (Ranunculaceae) and its systematic position. Acta Phytotaxonomica Sinica, 33, 453–460. (in Chinese with English abstract) [杨亲二 (1995) 鸡爪草属的染色体及其系统位置. 植物分类学报, 33, 453–460.]

Yang QE (1999) The first discovery of diploid *Beesia calthifolia* and its tetraploid cell type. Acta Phytotaxonomica Sinica, 37, 1–9. (in Chinese with English abstract) [杨亲二 (1999) 二倍体铁破锣的核型及四倍体细胞型的首次发现. 植物分类学报, 37, 1–9.]

Yang X, Lu SG, Peng H (2008) Cytological studies on the eastern Asian family Trochodendraceae. Botanical Journal of the Linnean Society, 158, 332–335.

Yang Z, Gong X (2004) Cytological study of six *Salvia* species (Lamiaceae) from the Hengduanshan Mountains region of China. Caryologia, 57, 360–366.

Yang ZY, Yi TS, Li H, Gong X (2003) A cytological study on three species of *Colocasias* (Araceae) from Yunnan. Caryologia, 56, 323–327.

Yuan Q, Yang QE (2008) Low incidence of polyploids and high uniformity of karyotypes displayed by *Delphinium* (Ranunculaceae) in the Hengduan Mountains Region of south-west China. Botanical Journal of the Linnean Society, 158, 172–188.

Yuan Q, Yang QE (2006) Polyploidy in *Aconitum subgenus lycoctonum* (Ranunculaceae). Botanical Journal of the Linnean Society, 150, 343–353.

Yuan YM, Küpfer P (2009) Karyological studies of *Gentianopsis* Ma and some related genera of Gentianaceae from China. Cytologia, 58, 115–123.

Yuan YM, Küpfer P (1997) The monophyly and rapid evolution of *Gentiana sect. Chondrophyllae* Bunge s.l. (Gentianaceae): evidence from the nucleotide sequences of the internal transcribed spacers of nuclear ribosomal DNA. Botanical Journal of the Linnean Society, 123, 25–43.

Yuan YM, Philippe K, Louis Z (1998) Chromosomal evolution of *Gentiana* and *Jaeschkea* (Gentianaceae), with further documentation of chromosome data for 35 species from western China. Plant Systematics and Evolution, 210, 231–247.

Yue JP, Gu ZJ, Al-Shehbaz I, Sun H (2004) Cytological studies on the Sino-Himalayan endemic *Solms-laubachia*

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.

<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

- (Brassicaceae) and two related genera. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 145, 77–86.
- Yue JP, Sun H, Al-shehbaz I, Gu ZJ (2003) Cytological studies of five Chinese species of *Solms-laubachia* (Brassicaceae). *Harvard Papers in Botany*, 7, 467–473.
- Yue XK, Yue JP, Yang LE, Li ZM, Sun H (2011) Systematics of the genus *Salweenia* (Leguminosae) from southwest China with discovery of a second species. *Taxon*, 60, 1366–1374.
- Yu WB, Huang PH, Li DZ, Wan H (2010) A new species of *Pedicularis* (Orobanchaceae) from the Hengduan Mountains, southwestern China. *Novon*, 20, 512–518.
- Yu H, Huang RF, Dang CL (1996) A study on the Polymorphism of morphological character of *Nomocharis mairei*. *Acta Botanica Yunnanica*, Suppl. VIII, 48–58. (in Chinese with English abstract) [虞泓, 黄瑞复, 党承林 (1996) 宽瓣豹子花形态特征的多态性研究. 云南植物研究, 增刊VIII, 48–58.]
- Yu H, Huang RF, Dang CL (1996) A study on number variation of chromosome in *Nomocharis forrestii* population. *Acta Botanica Yunnanica*, Suppl. VIII, 23–34. (in Chinese with English abstract) [虞泓, 黄瑞复, 党承林 (1996) 滇蜀豹子花居群染色体数目变异的研究. 云南植物研究, 增刊VIII, 23–34.]
- Yu H, Huang RF, Wei RC (1996) Study on karyotypical diversity in *Lilium davidii*. *Acta Botanica Yunnanica*, 18(S8), 1–3. (in Chinese with English abstract) [虞泓, 黄瑞复, 魏蓉城 (1996) 川百合种内核型多样性研究. 云南植物研究, 18(S8), 1–3.]
- Zhang GL, Gong X (2002) The karyotype analysis of *Anemoclema glaucifolium* and *Heteroplexis microcephala* both endemic to China. *Acta Botanica Yunnanica*, 24, 765–768. (in Chinese with English abstract) [张国莉, 龚洵 (2002) 中国特有罂粟莲花和小花异裂菊的核型分析. 云南植物研究, 24, 765–768.]
- Zhang JW, Nie ZL, Sun H (2009) Cytological study on the genus *Syncalathium* (Asteraceae, Lactuceae), an endemic taxon to alpine scree of the Sino-Himalayas. *Journal of Systematics and Evolution*, 47, 226–230.
- Zhang JW, Sun H, Nie ZL (2007) Karyological studies on the Sino-Himalayan endemic *Soroseris* and two related genera of tribe Lactuceae (Asteraceae). *Botanical Journal of the Linnean Society*, 154, 79–87.
- Zhang XQ, Chi Y, Yang JL, Yang Y (1998) Cytogenetic analyses in *Kengyilia laxiflora* (Poaceae, Triticeae). *Plant Systematics and Evolution*, 212, 79–86.
- Zhang YF, Zhang CY, Zhang T, Guan HL, Yan SQ (2010) A cyto-evolutional study of *Campanumoea* Blume (Campanulaceae) and a possible pathway for secondary karyotype formation. *Plant Systematics and Evolution*, 285, 245–257.
- Zhang ZY, Sun H, Gu ZJ (2002) Karyomorphological study of the *Spiraea japonica* complex (Rosaceae). *Brittonia*, 54, 168–174.
- Zhang ZY (1982) Chromosome observations of three ranunculaceous genera in relation to their systematic positions. *Journal of the Chinese Academy of Sciences*, 20, 402–409. (in Chinese with English abstract) [张芝玉 (1982) 星果草属、独叶草属、鸡爪草属的染色体观察和系统位置的探讨. 中国科学院大学学报, 20, 402–409.]
- Zhou YH (1994) Study on karyotypes of 5 species of *Kengyilia*. *Guihaia*, 14, 163–169. (in Chinese with English abstract) [周永红 (1994) 仲彬草属 5 种植物的核型研究. 广西植物, 14, 163–169.]
- Zhou J, Pu FD, Peng HJ, Pan YZ, Gong X (2008) Karyological studies of ten *Ligusticum* species (Apiaceae) from the Hengduan Mountains Region of China. *Caryologia*, 61, 333–341.
- Zhou LH, Wei ZX, Wu ZY (2000) Pollen morphology and systematic position of the Chinese endemic genus *Dichotomanthes* (Rosaceae). *Acta Botanica Yunnanica*, 22, 143–147. (in Chinese with English abstract) [周丽华, 韦仲新, 吴征镒 (2000) 中国特有属牛筋条属的花粉形态与其系统位置. 云南植物研究, 22, 143–147.]
- Zhou YH, Sun GL, Yang JL (1993) Study on karyotypes of five species of *Roegneria*. *Guihaia*, 13, 149–154. (in Chinese with English abstract) [周永红, 孙根楼, 杨俊良 (1993) 鹅观草属 5 种植物的核型研究. 广西植

王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征. 生物多样性, 2017, 25 (2): 218–225.

<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016281>

物, 13, 149–154.]

Zhou QX, Sun H (2000) Cytological studies on *Salweenia wardii*. Plant Diversity, 22, 368–370. (in Chinese with English abstract) [周其兴, 孙航 (2000) 冬麻豆的细胞学研究. 植物分类与资源学报, 22, 368–370.]

Zhu HF, Zhang CQ, Gu ZJ, Gong X (2001) A karyomorphological study on nine species of *Primula* (Primulaceae). Plant Diversity, 23, 466–472. (in Chinese with English abstract) [朱慧芬, 张长芹, 顾志建, 龚洵 (2001) 九种报春花属植物的核形态学研究. 植物分类与资源学报, 23, 466–472.]