

# 中国种子植物物种多样性的尺度 分布格局及其气候解释

冯建孟\*

(大理学院生命科学与化学学院, 云南大理 671000)

**摘要:** 物种多样性分布格局的研究对于生物多样性的保护具有重要意义。为了解中国种子植物物种多样性的空间分布格局, 本研究利用大尺度的物种分布数据, 结合GIS和统计分析方法, 探讨了中国种子植物物种多样性的尺度分布格局及其与气候的关系。结果表明, 中国种子植物的物种丰富度和物种密度存在较大的空间变异。从南到北, 物种密度呈显著递减趋势, 而物种丰富度的递减趋势不够明显。面积、年平均温度、年平均降水量和无霜期对物种丰富度、物种密度分布格局均无显著影响。温度年较差、最冷月均温、年平均温度和年平均降水量的空间分异对物种丰富度的分布格局均有显著影响; 温度年较差、最冷月均温和单位面积的年平均温度、年平均降水量的空间分异均显著影响物种密度的分布格局。温度年较差在一定程度上决定了物种丰富度与物种密度的总体分布格局, 而年平均温度以及单位面积的年平均温度空间分异对上述格局的解释率则相对较低。在大尺度的物种多样性格局及其气候解释的相关研究中, 气候因子的空间变异和季节性分异相对表示气候总体水平的年平均温度和年平均降水量而言, 可能更值得关注。

**关键词:** 物种多样性, 气候因子, 季节性分异, 空间分异, 中国种子植物

## Spatial patterns of species diversity of seed plants in China and their climatic explanation

Jianmeng Feng\*

College of Life Science and Chemistry, Dali University, Dali, Yunnan 671000

**Abstract:** Understanding spatial patterns of species diversity is a hot topic in global ecology because of its significance to biodiversity conservation. We investigated spatial patterns of Chinese seed plant species diversity and analyzed the correlation between species richness and climatic factors at a large scale. Floral information was obtained from national and regional records of seed plants, and climatic data were taken from 642 observatory sites across China between 1970 and 2000. We detected large spatial variation in species richness and density. Species density decreased with latitude. The following did not affect the spatial patterns of species richness and species density: area, mean annual temperature, mean annual precipitation, and frost-free days. Spatial patterns of species richness were affected by annual variation in mean annual temperature, mean temperature during the coldest month, spatial variation of mean annual temperature and precipitation. Spatial patterns of species density were principally shaped by annual variation in mean annual temperature, mean temperature during the coldest month, spatial variation of mean annual temperature per unit area and spatial variation of mean annual precipitation per unit area. Linear step-wise regression models indicated that annual variation in mean annual temperature influenced spatial patterns of species richness, while spatial variation in mean annual temperature and the spatial variation in mean annual temperature per unit area fine-tuned them. Our results imply that spatial and seasonal variation in climatic factors can not be overlooked in research on spatial patterns of species diversity at large scales.

收稿日期: 2008-02-02; 接受日期: 2008-06-11

基金项目: 大理学院科研启动基金

\* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: fjm@pku.org.cn

**Key words:** species diversity, climatic factors, seasonal variation, spatial variation, Chinese seed plants

100多年来,了解物种多样性沿环境梯度的变化格局以及影响这些格局的生态因子是生物多样性研究的重要议题之一(Kratochwil,1999),也是保护生物学研究的基础。近半个世纪以来,国内外很多学者对物种多样性的空间格局进行了大量的研究,提出了若干个经典理论或假说(Klopfer, 1959; Whittaker, 1977; Rapoport, 1982; Wright, 1983; Schulze & Mooney, 1993; Colwell & Hurtt, 1994; Rosenzweig, 1995; Colwell & Lees, 2000; Rahbek & Graves, 2001)。如岛屿假说认为,物种多样性受到物种分布面积的强烈影响(MacArthur & Wilson, 1967; Bachman *et al.*, 2004; Kattan & Franco, 2004; Romdal *et al.*, 2005; Nogués-Bravo & Araújo, 2006); 能量假说认为能量是影响物种多样性分布格局的主导因素(Currie, 1991; Storch *et al.*, 2006; Willis *et al.*, 2007; Whittaker *et al.*, 2007); 生境异质性理论认为,生境的多样化是影响物种多样性的主要因素(O'Brien *et al.*, 2000; Rahbek & Graves, 2001)。与此相关的还有中间膨胀效应假说(Colwell & Lees, 2000),气候稳定假说(Klopfer, 1959)等多种假说均提出并验证了各自的理论或思想。但迄今为止,还没有一种理论或假说可以完全解释所有地区的物种多样性分布格局,因此,物种多样性的空间分布格局及其影响因素的研究有待进一步深入。

近半个世纪以来,国内外学者对中国植物物种多样性的分布格局进行了广泛、深入的研究,为以后进一步的研究打下了坚实的基础(吴征镒, 1980; Mackinnon *et al.*, 1996; 宋永昌, 1999; 应俊生, 2001; 方精云, 2004; Qian *et al.*, 2006; Zhu *et al.*, 2007)。但必须指出的是,上述研究对中国种子植物物种多样性的空间格局缺乏总体和量化的分析,相关研究有待进一步深入。目前,利用动植物志等资料研究大尺度的生物多样性分布格局,是一种较为成熟的方法。目前利用大尺度的物种分布数据,对区域尺度、国家尺度甚至是洲际尺度的物种多样性格局进行研究已经成为一种趋势,并取得了许多重要进展(如Colwell & Lees, 2000; Rahbek & Graves, 2001; Nogués-Bravo & Araújo, 2006; Storch *et al.*, 2006; Qian, 2007; Willis *et al.*, 2007; Whittaker *et al.*,

2007)。但国内以往这方面工作开展较少。本文以大尺度的物种分布数据为源数据,探讨中国种子植物物种多样性的大尺度分布格局,并利用年平均温度、温度年较差和最冷月均温等气候因子对此格局进行解释。

## 1 研究区域概况

中国陆地部分包括黑龙江、吉林、辽宁、山西、北京、山东等约34个省、自治区、直辖市和特别行政区。大部分地区(除青藏高原和西北地区以外)主要受西南季风和东南季风的影响。受季风影响,研究区域内气候的纬度分异显著,如以东部地区为例,研究区域的最南端的海南尖峰岭属于热带地区,月均温在15℃以上,年平均温度高达20℃(方精云等, 2004),而研究区域最北端的大兴安岭白卡鲁山属于寒温带地区,冬季寒冷漫长,夏季温湿短暂,年平均温度仅为-5.6至1.2℃(赵淑清等, 2004)。在经度梯度上,从东到西,由于受青藏高原隆起影响,季风作用逐渐减弱,降水呈递减趋势,年平均降水量从东部地区的1,500-2,000 mm,递减到西部地区的10 mm以下(刘明光, 1997)。从植被带的纬度分布来看,东部地区从北到南,依次分布着寒温带针叶林带、温带针阔叶混交林带、暖温带落叶常绿阔叶混交林带、亚热带常绿阔叶林带和热带雨林季雨林带(方精云, 2001);从植被带的经度分布来看,从东到西(以42°N为例)大致依次分布着针叶落叶阔叶林带、森林草原植被带、草原植被带和荒漠-半荒漠植被带,这与研究区域内的水分条件的空间分布格局是比较一致的(吴征镒, 1980)。

## 2 数据来源与方法

中国种子植物的大尺度分布信息主要来自《中国植物志》(中国科学院植物研究所, 2004)(电子版),并参考了其他地方植物志(广东省植物研究所, 1977; 中国科学院西北植物研究所, 1981; 吴征镒, 1983; 贺士元, 1993; 浙江植物志编辑委员会, 1993; 李伯刚, 1999; 刘尚武, 1999; 陈谦海, 2004; 中国科学院昆明植物所, 2006),根据上述大尺度的物种分布信息,获得以省、自治区或直辖市为研究单元的

种子植物的丰富度(表1)。由于北京、天津和上海3个直辖市面积较小,且城市化程度很高,故将北京、天津等相关数据并入河北省,而将上海并入江苏省。由于物种数据大都采集于重庆升格为直辖市之前,故将重庆并入四川省,不列为独立的分析单元。香港和澳门由于面积过小,将其并入广东省。单位面积的物种丰富度,即物种密度,通过如下公式估算获得(Qian, 1998):

$$\text{物种密度} = S/\ln A$$

其中, *S*为物种丰富度, *A*为面积。

气候数据部分来自国家气象局发布的1970–2000年的642个气象站点的观测数据,并对上述数据进行30年的年平均处理。另一部分来自文献朱大仁(2000)。本研究选用的气候因子主要包括年平均温度(mean annual temperature, MAT)、最冷月均温(temperature in the coldest month, TCM)、无霜期(frost-free days, FFD)、年平均降水量(mean annual precipitation, MAP)和温度年较差(annual variation of mean annual temperature, AVMAT)。其中,年平均温度(MAT)、最冷月均温(TCM)、无霜期(FFD)和年平均降水量(MAP)主要用于表示研究单元内气候的总体状况;温度年较差(AVMAT)则主要反映研究单元内温度的季节分异,用于指征气候的稳定性,这一指标一般随着纬度的升高呈递增趋势,也就是说,纬度越高,温度年较差越大,气候越不稳定(Rapport, 1982)。为了进一步反映大尺度空间内气候因子的空间分异,本研究还考虑了表示研究单元内最低年平均温度与最高年平均温度之差的年平均温度空间分异(spatial variation of mean annual temperature, SVMAT)、表示研究单元内最低的年平均降水量与最高年均降水量之差的年平均降水量空间分异 (spatial variation of mean annual precipitation, SVMAP)、单位面积年平均温度空间分异 (spatial variation of mean annual temperature against area, SVMATAA)和单位面积年平均降水量空间分异 (spatial variation of mean annual precipitation against area, SVMAPAA) (表2)对物种多样性格局的影响。

上述气候指标中,空间分异指标通过GIS方法获得。为获得空间分异指标,本研究将642个气象站点的观测数据进行30年的年平均处理,并利用ArcGIS Desktop8.3将上述数据集进行Kriging插值,

表1 各研究单元的种子植物的物种丰富度和物种密度  
Table 1 Species richness and species density in each study unit

研究单元 Units	物种数 Species richness	物种密度 Species density (No./km <sup>2</sup> )
宁夏 Ningxia	785	70.7
山东 Shandong	1,175	98.6
河南 Henan	1,656	137.5
黑龙江 Heilongjiang	1,666	128.0
吉林 Jilin	1,698	139.7
江苏 Jiangsu	1,699	147.6
山西 Shanxi	1,701	142.0
辽宁 Liaoning	1,737	145.7
河北 Hebei	1,959	161.2
内蒙古 Neimenggu	1,993	142.6
安徽 Anhui	2,001	168.9
青海 Qinghai	2,036	151.0
浙江 Zhejiang	2,750	238.9
海南 Hainan	2,763	264.8
江西 Jiangxi	2,822	234.3
福建 Fujian	2,977	254.5
湖南 Hunan	3,182	259.7
新疆 Xinjiang	3,252	227.6
陕西 Shaanxi	3,259	265.9
台湾 Taiwan	3,410	325.0
湖北 Hubei	3,430	282.2
甘肃 Gansu	3,579	274.9
贵州 Guizhou	4,821	398.4
广东 Guangdong	4,954	409.4
西藏 Xizang	6,106	435.4
广西 Guangxi	6,339	511.7
四川 Sichuan	9,684	740.3
云南 Yunnan	13,769	1,069.5

获得气候因子的空间栅格数据,在此基础上,将气候因子的空间栅格数据与各研究单元进行空间叠加,获得各研究单元气候的空间分异指标。有关气候因子对研究区域内植物物种多样性的影响,主要利用Microsoft Excel和SPSS 11.5统计软件包进行相关性分析和多元逐步回归分析。

3 研究结果

3.1 物种丰富度的大尺度分布格局

从图1可以看出,中国种子植物的物种丰富度存在较大的空间变异,从南到北总体上呈递减的空间分布格局,但趋势不够显著 ( $P = 0.11$ )。其中丰富度最高的区域为位于西南的云南和四川,其次为广西和西藏。物种丰富度最低的区域为北方的宁夏,

表2 影响植物物种多样性的气候因子  
Table 2 Climatic factors affecting spatial patterns of plant species diversity

	单位 Units
年平均温度 Mean annual temperature (MAT)	℃
最冷月均温 Mean temperature during the coldest month (TCM)	℃
无霜期 Frost-free days (FFD)	day
温度年较差 Annual variation of mean annual temperature (AVMAT)	℃
年平均降水量 Mean annual precipitation (MAP)	mm
年平均温度空间分异 Spatial variation of mean annual temperature (SVMAT)	℃
年降水量空间分异 Spatial variation of mean annual precipitation (SVMAP)	mm
单位面积年平均温度空间分异 Spatial variation of mean annual temperature per unit area (SVMATAA)	℃/km <sup>2</sup>
单位面积年降水量空间分异 Spatial variation of mean annual precipitation per unit area (SVMAPAA)	mm/km <sup>2</sup>

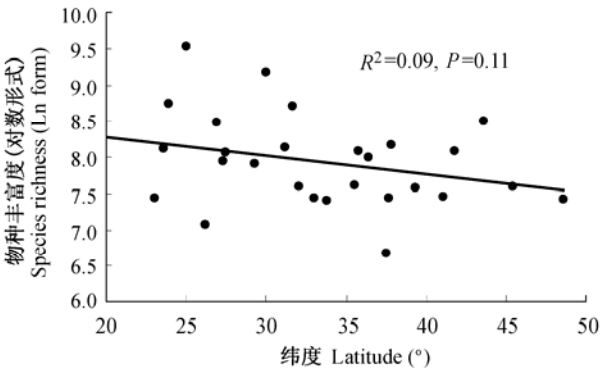


图1 物种丰富度在纬度梯度上的分布格局  
Fig. 1 Latitudinal patterns of species richness

这可能与该研究单元面积较小有关。物种丰富度较低的区域主要包括黑龙江、吉林、辽宁、山东、河南与河北等位于中国北部的研究单元。虽然青海的面积较大 (72万km<sup>2</sup>), 但其物种丰富度并不高。进一步分析, 发现虽然内蒙古和西藏的分布面积比较接近(分别为118万km<sup>2</sup>和123万km<sup>2</sup>), 但两者的物种丰富度相差巨大, 分别为1,993种和6,106种, 这可能意味着除了面积以外, 其他因素, 如气候因子可能也在强烈影响着中国种子植物物种丰富度的空间分布格局。同时, 基于二元相关性分析检验了植物物种丰富度和面积的关系, 结果显示两者之间没有显著相关关系( $P>0.05$ )。但偏相关分析则表明, 植物物种丰富度和面积之间存在显著的相关性 ( $P<0.05$ )。这说明, 尽管面积影响着物种丰富度的空间分布格局, 但可能由于气候等其他因素的共同作用, 使面积效应被掩盖或弱化。

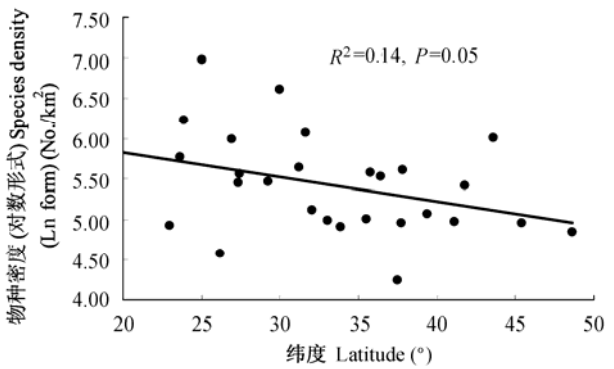


图2 物种密度在纬度梯度上的分布格局  
Fig. 2 Latitudinal patterns of species density

3.2 物种密度的大尺度分布格局

从图2可以看出, 单位面积下种子植物物种丰富度(即物种密度)的空间分布格局也存在较大的空间变异, 物种密度较高的区域主要包括云南、四川、广西等研究单元, 其次为台湾、广东、西藏和贵州等研究单元。物种密度较低的区域主要包括山东和宁夏等研究单元, 其次为河南、山西和内蒙古等位于北部地区的研究单元。总体上, 中国种子植物的物种密度从南到北呈显著的递减趋势 ( $P = 0.05$ )。比较高的区域主要集中在西南地区和华南地区, 其次为长江中下游地区; 而物种密度较低的区域主要为北方大部分地区。进一步分析发现, 青海与西藏同属青藏高原地区, 但物种密度差异明显; 内蒙古与同属干旱、半干旱地区的新疆相比, 物种密度差异亦十分明显。

表3 气候因子与物种丰富度、物种密度之间的相关性  
Table 3 Correlation between climatic factors and species richness and density

	气候因子 Climate factors									
	Area	MAT	MAP	SVMAT	SVMAP	TCM	AVMAT	FFD	SVMATAA	SVMAPAA
物种丰富度 Species richness	0.17 <sup>ns</sup>	0.30 <sup>ns</sup>	0.20 <sup>ns</sup>	0.44 <sup>*</sup>	0.63 <sup>***</sup>	0.44 <sup>*</sup>	-0.67 <sup>***</sup>	0.28 <sup>ns</sup>	—	—
物种密度 Species density	—	0.37 <sup>ns</sup>	0.28 <sup>ns</sup>	—	—	0.51 <sup>**</sup>	-0.72 <sup>***</sup>	0.34 <sup>ns</sup>	0.38 <sup>*</sup>	0.55 <sup>**</sup>

各种气候因子的缩写见表2 The abbreviations of the climate factors see Table 2. ns:  $P > 0.05$ ; \*  $P < 0.05$ ; \*\*  $P < 0.01$ ; \*\*\*  $P < 0.001$ .

3.3 气候因子对植物物种丰富度和物种密度大尺度分布格局的影响

从表3可以看出,影响物种丰富度大尺度格局的气候因子主要包括年平均温度(MAT)、最冷月均温(TCM)、温度年较差(AVMAT)的空间分异和年平均降水量的空间分异,但相对而言,面积、年平均温度、年平均降水量(MAP)和无霜期(FFD)等对丰富度格局的影响并不显著。进一步分析发现,温度年较差与丰富度之间呈显著负相关,即随着温度年较差的增加,丰富度呈递减趋势。而最冷月均温、年平均温度空间分异(SVMAT)和年平均降水量空间分异(SVMAP)均与物种丰富度呈显著的正相关关系,即随着上述气候因子的递增,丰富度呈增加趋势。多元逐步回归分析表明,进入回归方程的气候因子为温度年较差和年平均温度空间分异,其解释率分别为44.7%和25.0%,两者总解释率为69.7%,这说明反映温度季节性分异(气候稳定性)的温度年较差和年平均温度空间分异在很大程度上决定了丰富度的空间分布格局。

从表3还可以看出,影响物种密度空间分布格局的气候因子主要包括单位面积年平均温度空间分异(SVMATAA)、单位面积年平均降水量空间分异(SVMAPAA)、最冷月均温和温度年较差,但相对而言,年平均温度、年平均降水量和无霜期等对物种密度的空间分布格局的影响并不显著。进一步分析,发现温度年较差与密度之间呈显著的负相关关系,即随着温度年较差的增加,物种密度呈递减趋势。单位面积的年平均温度空间分异、单位面积的年平均降水量空间分异和最冷月均温均与物种密度呈正相关关系。多元逐步回归分析表明,进入回归方程的变量为指征温度季节性分异的温度年较差和单位面积年平均温度空间分异,其解释率分别为51.4%和17.5%,两者总解释率为68.9%,这说明,

温度的季节性分异和年平均温度空间分异在很大程度上决定了物种密度的空间分布格局。

4 讨论

研究结果表明,温度年较差显著影响物种丰富度和物种密度的空间格局。而且,相对年平均温度和年平均降水量的空间分异而言,其解释率较高。如前文所述,温度年较差表示的是研究单元内温度的季节性分异,即该地区气候的稳定性。根据“气候稳定”假说,在气候稳定地区物种的生态位相对比较窄,所以就有更多的空间容纳更多的物种。同时,由于各种资源在气候稳定地区比气候波动大的地区相对稳定,稳定的自然资源也有利于物种的进化与适应;反之,在气候波动较大的地区,可利用资源的供应相对而言较不稳定,物种的生态位相对较宽,可以容纳的物种相对较少。因此,温度年较差小的地区物种丰富度可能高于温度年较差大的地区(Klopfer, 1959)。同时,根据Rapoport法则,由南到北,随着纬度的增加,温度年较差呈增加趋势,所以,物种丰富度和物种密度呈递减趋势(Rapoport,1982),这在一定程度上解释了本研究中物种丰富度和物种密度由南到北的递减趋势。

研究结果还表明,年平均温度和年平均降水量的空间分异也显著影响物种丰富度和物种密度的空间格局。年平均温度和年平均降水量的空间分异或单位面积的空间分异表示的是热量和水分因子在空间上的变化。年平均温度和年平均降水量的空间分异越大,表明在空间上热量和水分梯度越大。对植物而言,意味着在热量和水分梯度上的生境越多样或越复杂。根据生境异质性假说,几乎很少有物种在所有的生境类型中出现,因此,随着生境类型或多样性的增加,物种多样性呈递增趋势(张金屯和金义兴, 1995; Cramer & Willig, 2002;

Tews *et al.*, 2004; Kadmon & Allouche, 2007)。所以, 热量和水分的空间分异越大, 意味着在热量和水分梯度上存在越多样的生境以满足不同物种对水热的需要, 故物种丰富度越高。作者还注意到, 同属青藏高原的西藏和青海物种密度却差异显著。这可能是因为, 在水分和热量的空间分异方面, 西藏明显高于青海 (西藏地区的年平均温度空间变幅为15.9℃, 年平均降水量的空间变幅为1,276 mm; 青海地区的年平均温度空间变幅为13.3℃, 年平均降水量的空间变幅为771 mm)。西藏尽管属于青藏高原, 但由于藏东南地区, 海拔和纬度均较低, 气候温暖湿润, 甚至分布有热带雨林, 与西藏的其他地区相比, 气候的空间差异显著。所以, 总体上, 西藏地区年平均温度和年平均降水量的空间分异相对较大, 这在热量和水分方面, 为植物造就了更加多样的生境, 从而支持了更多的植物物种。而青海与西藏相比, 地形变幅相对较小, 相应的热量和水分梯度可能亦相对较小, 在热量和水分梯度上, 生境的异质性相对较低, 故物种丰富度和物种密度与西藏相比相对较低。这在一定程度上也解释了为何四川和云南的物种丰富度和物种密度很高(年平均温度空间变幅分别高达23.7℃和18.1℃, 年平均降水量空间变幅分别为1,337 mm和1,700 mm)。同理, 也可以理解为何同属干旱-半干旱地区的新疆和内蒙古地区之间物种密度差异显著(温度空间变幅分别为19.2℃和13.9℃, 但平均降水量变幅比较接近, 均在500 mm左右)。

值得注意的是, 在众多气候因子中, 表示研究单元内气候总体状况的年平均温度和年平均降水量对物种丰富度和物种密度的空间分布格局无显著影响, 相反, 反映研究单元内气候季节性分异的温度年较差以及年平均温度空间分异和年平均降水量空间分异对上述格局均起着显著的影响, 这可能是因为本研究中各研究单元的空间分布面积较大, 研究单元内气候的空间分异强烈, 且季节分异较为明显, 而年平均温度和年平均降水量只能反映研究单元内总体的气候状况, 所含信息量较少, 不能较为全面地反映研究单元内气候的空间分异和季节分异。因此, 在有关大尺度的物种多样性格局及其气候解释的研究中, 相对反映总体水平的气候因子而言, 气候因子的大尺度空间变异以及季节性分异, 可能更值得关注。这也许是大尺度多样性研

究与中小尺度研究的区别之处。

## 参考文献

- Bachman S, Baker WJ, Brummitt N, Dransfield J, Moat J (2004) Elevational gradients, area and tropical island diversity: an example from the palms of New Guinea. *Ecography*, **27**, 299–310.
- Chen QH (陈谦海) (2004) *Flora of Guizhou* (贵州植物志) Guizhou Science & Technology Press, Guiyang. (in Chinese)
- Colwell RK, Hurtt GC (1994) Nonbiological gradients in species richness and a spurious Rapoport effect. *The American Naturalist*, **144**, 570–595.
- Colwell RK, Lees DC (2000) The mid-domain effect: geometric constraints on the geography of species richness. *Trends in Ecology and Evolution*, **15**, 70–76.
- Cramer MJ, Willig MR (2002) Habitat heterogeneity, habitat associations, and rodent species diversity in a sand-shinnery-oak landscape. *Journal of Mammalogy*, **83**, 743–753.
- Currie D (1991) Energy and large-scale patterns of animal- and plant-species richness. *The American Naturalist*, **137**, 27–49.
- Editorial Board of Flora of Zhejiang (浙江植物志编辑委员会) (1993) *Flora of Zhejiang* (浙江植物志). Zhejiang Science Press, Hangzhou. (in Chinese)
- Fang JY (方精云) (2001) Re-discussion about the forest vegetation zonation in eastern China. *Acta Botanica Sinica* (植物学报), **43**, 522–533. (in Chinese with English abstract)
- Fang JY (方精云) (2004) Exploring altitudinal patterns of plant diversity of China's mountains. *Biodiversity Science* (生物多样性), **12**, 1–4. (in Chinese with English abstract)
- Fang JY (方精云), Li YD (李意德), Zhu B (朱彪) (2004) Community structures and species richness in the montane rainforest of Jianfengling, Hainan Island, China. *Biodiversity Science* (生物多样性), **12**, 29–43. (in Chinese with English abstract)
- Guangdong Institute of Botany (广东省植物研究所) (1977) *Flora Hainanica*, Vol. IV (海南植物志第四卷). Science Press, Beijing. (in Chinese)
- He SY (贺士元) (1993) *Flora of Beijing* (北京植物志). Beijing Press, Beijing. (in Chinese)
- Institute of Botany of the Chinese Academy of Sciences (中国科学院植物研究所) (2004) *Flora Reipublicae Popularis Sinicae (Digital version)* (中国植物志电子版). <http://www.cvh.org.cn/>.
- Kadmon R, Allouche O (2007) Integrating the effects of area, isolation, and habitat heterogeneity on species diversity: a unification of island biogeography and niche theory. *The American Naturalist*, **170**, 443–454.
- Kattan GH, Franco P (2004) Bird diversity along elevational gradients in the Andes of Colombia: area and mass effects. *Global Ecology and Biogeography*, **13**, 451–458.

- Klopfer PH (1959) Environmental determinants of faunal diversity. *The American Naturalist*, **93**, 337–342.
- Kratochwil A (1999) Biodiversity in ecosystems: some principles. In: *Biodiversity in Ecosystems*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Kunming Institute of Botany of the Chinese Academy of Sciences (中国科学院昆明植物研究所) (2006) *Flora of Yunnan* (云南植物志) (1–16). Science Press, Beijing. (in Chinese)
- Li BG (李伯刚) (1999) *Flora of Sichuan* (四川植物志). Ethnic Press in Sichuan, Chengdu. (in Chinese)
- Liu MG (刘明光) (1997) *Album of Geography of China* (中国自然地图集). Sinomap Press, Beijing.
- Liu SW (刘尚武) (1999) *Flora of Qinghai* (青海植物志). People's Press in Qinghai, Xining. (in Chinese)
- MacArthur R, Wilson EQ (1967) *The Theory of Island Biogeography*. Princeton University Press, New Jersey.
- Mackinnon J, Sha M, Cheung C, Carey G, Zhu X, Melville D (1996) *A Biodiversity Review of China*. WWF International, Hongkong.
- Nogués-Bravo D, Araújo MB (2006) Species richness, area and climate correlates. *Global Ecology and Biogeography*, **15**, 452–460.
- Northwest Institute of Botany of the Chinese Academy of Sciences (中国科学院西北植物研究所) (1981) *Flora of Qinling Mountains* (秦岭植物志). Science Press, Beijing. (in Chinese)
- O'Brien EM, Field R, Whittaker RJ (2000) Climatic gradients in woody plant (tree and shrub) diversity: water-energy dynamics, residual variation and topography. *Oikos*, **89**, 588–600.
- Qian H (2007) Relationships between plant and animal species richness at a regional scale in China. *Conservation Biology*, **21**, 937–944.
- Qian H, Wang SL, He JS, Zhang JL, Wang LS, Wang LX, Guo K (2006) Phytogeographical analysis of seed plant genera in China. *Annals of Botany*, **98**, 1073–1084.
- Qian H (1998) Large-scale biogeographic patterns of vascular plant richness in North America: an analysis at the genera level. *Journal of Biogeography*, **25**, 829–836.
- Rahbek C, Graves GR (2001) Multiscale assessment of patterns of avian species richness. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, **98**, 4534–4539.
- Rapoport EH (1982) *Areography: Geographical Strategies of Species*. Pergamon Press, Oxford.
- Romdal TS, Colwell R, Rahbek C (2005) The influence of band sum area, domain extent, and range size on the latitudinal mid-domain effect. *Ecology*, **86**, 235–244.
- Rosenzweig ML (1995) *Species Diversity in Space and Time*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Schulze ED, Mooney HA (1993) *Biodiversity and Ecosystem Function*. Springer-Verlag, Berlin.
- Song YC (宋永昌) (1999) Perspective of the vegetation zonation of forest region in eastern China. *Acta Botanica Sinica* (植物学报), **41**, 541–552. (in Chinese with English abstract)
- Storch D, Davies RG, Zajiček S, Orme DL, Olson V, Thomas GH, Ding TS, Rasmussen PC, Ridgely RS, Bennett PM, Blackburn TM, Owens PF, Gaston KJ (2006) Energy, range dynamics and global species richness patterns: reconciling mid-domain effects and environmental determinants of avian diversity. *Ecology Letters*, **9**, 1308–1320.
- Tews J, Brose U, Grimm V, Tielborger K, Wichmann MC (2004) Animal species diversity driven by habitat heterogeneity/diversity: the importance of keystone structures. *Journal of Biogeography*, **31**, 79–92.
- Whittaker RH (1977) Evolution of species diversity in land communities. *Evolutionary Biology*, **10**, 1–67.
- Whittaker RJ, Nogués-Bravo D, Araújo MB (2007) Geographical gradients of species richness: a test of the water-energy conjecture of Hawkins *et al.* (2003) using European data for five taxa. *Global Ecology and Biogeography*, **16**, 76–89.
- Willis KJ, Kleczkowski A, New M, Whittaker R (2007) Testing the impact of climate variability on European plant diversity: 320 000 years of water–energy dynamics and its long-term influence on plant taxonomic richness. *Ecology Letters*, **10**, 673–679.
- Wright DH (1983) Species–energy theory: an extension of species–area theory. *Oikos*, **41**, 496–506.
- Wu ZY (吴征镒) (1980) *Vegetation in China* (中国植被). Science Press, Beijing. (in Chinese)
- Wu ZY (吴征镒) (1983) *Flora of Xizang* (西藏植物志). Science Press, Beijing (in Chinese).
- Ying TS (应俊生) (2001) Species diversity and distribution pattern of seed plants in China. *Biodiversity Science* (生物多样性), **9**, 393–398. (in Chinese with English abstract)
- Zhang JT (张金屯), Jin YX (金义兴) (1995) Plant community and heterogeneity. *Journal of Wuhan Botanical Research* (武汉植物学研究), **13**, 329–336. (in Chinese with English abstract)
- Zhao SQ (赵淑清), Fang JY (方精云), Piao SL (朴世龙) (2004) Structure and species diversity of boreal forests in Mt. Baikal, Huzhong area, Daxingan Mountains, Northeast China. *Biodiversity Science* (生物多样性), **12**, 182–189. (in Chinese with English abstract)
- Zhu DR (朱大仁) (2000) *Atlas of China* (分省中国地图集). SinoMap Press, Beijing. (in Chinese)
- 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* (植物分类学报), **45**, 134–166.

(责任编辑: 谢宗强 责任编辑: 周玉荣)