

• 研究报告 •

中国西南干旱河谷植物群落的数量分类和排序分析

刘 晔¹ 李 鹏² 许 玥² 石松林³ 应凌霄² 张婉君² 彭培好⁴ 沈泽昊^{2*}¹ (北京大学深圳研究生院城市规划与设计学院, 深圳 518055)² (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)³ (中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085)⁴ (成都理工大学旅游与城乡规划学院, 成都 610058)

摘要: 中国西南干旱河谷植被是我国西南横断山区特有的植被类型, 目前关于西南干旱河谷植被还没有整体性的群落类型划分研究。根据对甘肃、四川、云南三省九条主要河流的干旱河谷段野外调查和文献来源的1,339个植物群落样方数据, 采用自适应仿射传播聚类方法, 对我国西南干旱河谷的植物群落进行数量分类, 并采用典范对应分析方法进行排序分析。结果表明: (1)调查样方的植物群落分为7个植被型(稀树草原、肉质灌丛、常绿阔叶灌丛、暖性落叶阔叶灌丛、常绿硬叶林、落叶阔叶林和暖性针叶林), 24个群系, 31个群丛类型。暖性落叶阔叶灌丛是本植被区的代表性植被类型; 分布最广的群系为鞍叶羊蹄甲灌丛(Form. *Bauhinia brachycarpa*, 样方比例50.9%)、黄茅灌丛(Form. *Heteropogon contortus*, 样方比例11.9%)、孔颖草灌丛(Form. *Bothriochloa pertusa*, 样方比例5.6%)、黄荆灌丛(Form. *Vitex negundo*, 样方比例4.2%)、知风草灌丛(Form. *Eragrostis ferruginea*, 样方比例3.8%)、车桑子灌丛(Form. *Dodonaea viscosa*, 样方比例3.4%)、云南松疏林(Form. *Pinus yunnanensis*, 样方比例3.3%)。(2)冬季低温和降水的季节性是限制干旱河谷植物群落分布的主要气候因子。稀树草原、肉质灌丛是典型的干热河谷植被类型; 暖性落叶阔叶灌丛、常绿硬叶林、常绿阔叶灌丛是干暖河谷植被的优势类型; 暖性针叶林、落叶阔叶林则主要在干温河谷环境占优势。

关键词: 中国西南干旱河谷; 植被分类与排序; 自适应仿射传播聚类; 典范对应分析; 植被分区; 气候响应

Quantitative classification and ordination for plant communities in dry valleys of Southwest China

Ye Liu¹, Peng Li², Yue Xu², Songlin Shi³, Lingxiao Ying², Wanjun Zhang², Peihao Peng⁴, Zehao Shen^{2*}¹ School of Urban Planning and Design, Shenzhen Graduate School, Peking University, Shenzhen 518055² Department of Ecology, College of Urban and Environmental Sciences, the Key Laboratory for Earth Surface Processes of the Ministry of Education, Peking University, Beijing 100871³ State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085⁴ College of Tourism and Urban-rural Planning, Chengdu University of Technology, Chengdu 610058

Abstract: The vegetation in dry valleys of Southwest China is characterized by unique vegetation type. Based on plant community sample data (1,339 plots) collected for 9 valleys in Gansu, Sichuan and Yunnan provinces, we used an adaptive affinity propagation method for quantitative classification, and performed an ordination using canonical correspondence analysis. Results showed that the plant communities can be divided into 7 vegetation types (savanna, succulent thicket, evergreen broadleaved thicket, warm deciduous broadleaved thicket, evergreen sclerophyllous forest, deciduous broadleaved forest, warm needle-leaved forest with 24 formations and 31 associations. The most representative vegetation type was the warm deciduous broadleaved thicket, while the most common formations were Form. *Bauhinia brachycarpa* (50.9%), Form. *Heteropogon contortus* (11.9%), Form. *Bothriochloa pertusa* (5.6%), Form. *Vitex negundo* (4.2%), Form. *Eragrostis ferruginea* (3.8%), Form. *Dodonaea viscosa* (3.4%) and Form. *Pinus yunnanensis* (3.3%). Mean

收稿日期: 2015-09-11; 接受日期: 2016-02-15

基金项目: 国家自然科学基金(41371190)和交通运输部西部计划项目(2008 318 799 17)

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

temperature of the coldest month and precipitation seasonality are two dominant climatic factors, which limit the distribution of plant community types in the dry valleys. Savanna and succulent thicket are the dominant vegetation types in typical dry-hot valleys. Dry-warm valley are dominated by warm deciduous broadleaved thicket, evergreen sclerophyllous forest and evergreen broadleaved thicket. Warm needle-leaved forest and deciduous broadleaved forest are more adaptive to lower temperatures.

Key words: dry valleys of Southwest China; vegetation classification and ordination; adaptive-affinity propagation; canonical correspondence analysis; vegetation division; climate response

在中国西南横断山区, 由于大致呈南北走向的平行山岭对来自东南和西南季风的阻隔, 以及地形落差产生的“焚风效应”, 在深陷的江河谷地中广泛形成彼此隔离的局部性半干旱-干旱气候(张荣祖, 1992)。根据热量差异, 分别被定义为干热、干暖和干温河谷气候, 为一类典型的非地带性气候, 其特征是干湿季分明, 雨季多雨高湿, 旱季温暖至炎热而干旱, 气温年较差小(金振洲, 2002; 刘方炎等, 2010)。这类气候下发育的植被类型主要包括耐旱的稀树灌木丛或灌(禾)草丛, 分别被定义为半萨王纳植被(semi-savanna)、河谷型马基植被(Maquis), 被认为是萨王纳植被、马基植被类型的干旱河谷残余(张荣祖, 1992; 金振洲, 2002), 在外貌和区系成分上与印度、非洲的热带稀树草原有许多的联系和亲缘关系(Bourliere, 1983; 金振洲, 2002; 朱华和蔡琳, 2004; 刘晔, 2015)。

自20世纪80年代以来, 中国西南干旱河谷植被研究得到关注。在大量野外研究的基础上, 金振洲和欧晓昆(2000)及金振洲(2002)对滇川境内元江、金沙江、怒江和澜沧江流域的干热河谷与干暖河谷植物区系和植被进行了分类、分布、多样性和成因等方面的总结性研究; 刘方炎和朱华(2005)对元江干热河谷进行了群落学分析; 刘文彬(1994)、关文彬等(2004)、冶民生等(2004)对川西岷江上段干暖河谷植被进行了群落分类、排序和多样性研究; 庄翠珍等(2011)对怒江中游干旱河谷进行了植物群落划分。但迄今, 对于以横断山区为中心的我国亚热带西南地区广泛发育的干旱河谷植被的整体分类研究还属空白。关于中国西南干旱河谷植被的整体属性, 彼此隔离的干旱河谷段分布的植物群落类型及其构成差异, 以及环境条件和地理隔离对植物群落构成和区域分异的影响等, 还缺少整体性的认识。

全球不同的植物生态学流派根据植物在区系、外貌、结构、物种构成等方面的属性, 发展了不同

的植物群落分类方法和技术(Whittaker, 2012)。数量分析方法在群落分类中起着非常重要的作用(terBraak, 1986; Mabry et al, 2000), 是研究植物群落生态关系的重要方法(张金屯, 2004)。比较常用的植物群落数量分类方法包括多种等级聚类法、双向指示种分析TWINSPAN (Roleček et al, 2009)、K-means (DeCáceres & Wiser, 2012)、多元回归树MRT(黄甫昭等, 2014), 并可采用SES、Silhouette指数来评价分类结果。自适应仿射传播聚类(adaptive-affinity propagation, adaptive-AP)是一种新的数量分类方法(Frey & Dueck, 2007), 在生物信息学和天体物理学领域中应用较早, 并已开始引入生态学研究(Cardille & Lambois, 2009; Rueda et al, 2013)。相较于更常用的K-means等聚类算法, 自适应仿射传播聚类将所有数据点都作为潜在的聚类中心, 无需人为指定聚类数目(Frey & Dueck, 2007, 2008)。

西南干旱河谷的植物在独具特色的干旱河谷气候条件(杨勤业和郑度, 1989)和相对封闭的河谷环境下经历了长期的适应和演化过程(吴征镒和王荷生, 1983), 河谷内保存了非常丰富的植物物种, 包括较多的古老孑遗成分(金振洲, 2002; 朱鑫鑫, 2014), 因此对西南干旱河谷生物多样性的保护尤为重要; 而通过群落分类, 可以揭示群落不连续分布的原因, 反映群落与环境的关系, 为人们制定物种多样性保护对策, 可持续管理和利用植物资源提供重要参考(Goodall, 1974; Vetaas & Grytnes, 2002; 张金屯, 2004)。

本文尝试对我国西南干旱河谷植物群落进行整体分析, 依据宋永昌(2001)的植被分类系统, 采用最新数量分类方法对本区植被进行群落分类, 并探讨群落分异的主要环境机制, 以期揭示我国西南亚热带干旱河谷植被的整体分异特征和空间分布规律, 为进一步探讨这类植被与其独特环境的关系

提供基本的认识框架。

1 材料和方法

1.1 研究区域概况

根据大量样地调查和众多文献记载,我国亚热带的干旱河谷大体分布在 22° – 34° N, 96° – 105.5° E 的范围内,涉及怒江、澜沧江、元江、南盘江、金沙江、雅砻江、大渡河、岷江以及嘉陵江上游的白龙江诸流域的干流和主要支流的谷底至海拔3,000 m以下的两侧岸坡,随河道走向不规则分布,但往往与季风的盛行风向及地形阻挡程度有关,形成彼此隔离而面积大小不一的片断(金振洲和欧晓昆, 2000; 金振洲, 2002),具有独特而类似的气候、地貌和植被组合特征(张荣祖, 1992; 何永彬等, 2000; 包维楷和王春明, 2000; 邱祖青等, 2007; 明庆忠和史正涛, 2007)。

干旱河谷地貌上属于青藏高原东缘的横断山区,这一区域整体地势北高南低、平行岭谷总体上呈南北或西北–东南延伸,岭谷之间海拔落差普遍在2,000–3,000 m之间。

半干旱偏湿的河谷出现在西南纵向岭谷区的南部边缘与东部,半干旱偏干的河谷出现在滇西北与川西南的三江上段。总体上,西南干旱河谷的年降雨量低(500–900 mm),温度高(年均温大于 10°C),蒸发量大(降雨量小于蒸发量),与水平地带及河谷上部各垂直带的气候特征(西南地区中部、南部为湿润气候带的湿润热带、亚热带–常绿阔叶林带,北部为高原气候带的温暖和亚热带半湿润–湿润带)不相协调(张荣祖, 1992),不同河谷的气候差异较大(张荣祖, 1992; 金振洲, 1998, 1999)。

根据中国西南干旱河谷的地理分区,可划分为干热河谷、干暖河谷和干温河谷植被(杨勤业和郑度, 1989; 金振洲和欧晓昆, 2000)。干热河谷植被的优势植被类型为“稀树灌木草丛”,以丛生、狭叶、硬叶、毛叶旱生的禾草草丛为主构成大片草地植被,散生稀疏的乔、灌木,并有少数的肉质多刺灌丛,植物普遍具有扭曲、矮小、革叶、小叶、毛叶、多刺的形态特征(金振洲和欧晓昆, 2000)。干暖河谷植被多为小叶、硬叶、多刺、疏生、矮生的灌丛,常呈半荒漠状外貌,有散生的耐旱乔木和硬叶栎类灌丛分布(金振洲和欧晓昆, 2000)。干温河谷的主要植被类型为干旱小叶灌丛,以成丛散生的灌木为主,

少数伴生有禾本科草本植物。多数为亚热带成分,同时掺杂较多的高山温带(喜马拉雅)成分(张荣祖, 1992)。

1.2 样方数据

本文的样方数据包括野外调查和文献来源两部分,总计包含322个样点,1,339个面积100 m²的自然植被群落样方(图1)。

野外调查数据为本课题组调查采集,于2009年7月至2013年8月,在分布于云南、四川、甘肃境内干旱河谷的9个主要流域(包括怒江、澜沧江、元江、南盘江、金沙江、雅砻江、大渡河、岷江、白龙江流域)进行野外样方调查,共设置调查样点270个,10 m × 10 m的自然植被样方725个。清查样方中全部乔木、灌木、草本植物种类,测量每株乔木的胸径,计数并目测每种灌木、草本植物的多度、盖度,用GPS记录样点的经度、纬度和海拔。

文献数据主要根据《元江、怒江、金沙江、澜沧江干热河谷植被》(金振洲和欧晓昆, 2000)一书中,在1995–1998年间对分布于云南、四川境内的金沙江、元江、怒江及澜沧江流域干热河谷、干暖河谷植被的野外调查,包括52个样点,614个10 m × 10 m的自然植被样方数据。记录取样地点的位置和海拔,以及样地中全部乔木、灌木、草本植物的多优度。

将野外调查数据和文献数据汇总,参照Flora of China (Flora of China Editorial Committee, 2013)统一拉丁名。

1.3 数据处理

1.3.1 重要值

考虑到干旱河谷包含9个流域,干热、干暖、干温3种气候类型,各样点间既有环境差异,又有空间隔离,不同样点的群落物种组成随空间、环境距离的增加而变化(Condit et al, 2002; Soininen et al, 2007; Morlon et al, 2011),因此本文仅考虑某一物种在其所在样方中的相对重要性,对经典重要值计算公式(Curtis & McIntosh, 1951)做了调整,即不计算某一物种在全部样方中出现的频率,仅统计某一物种在样方中的多度和优势度(盖度),建立重要值(importance value)的样方–物种数据矩阵。计算公式如下:

乔木重要值(%) = (相对多度 + 相对优势度) / 2

灌木和草本重要值(%) = (相对多度 + 相对盖度) / 2

其中,物种*i*的相对多度 = (物种*i*的个体数/样方中

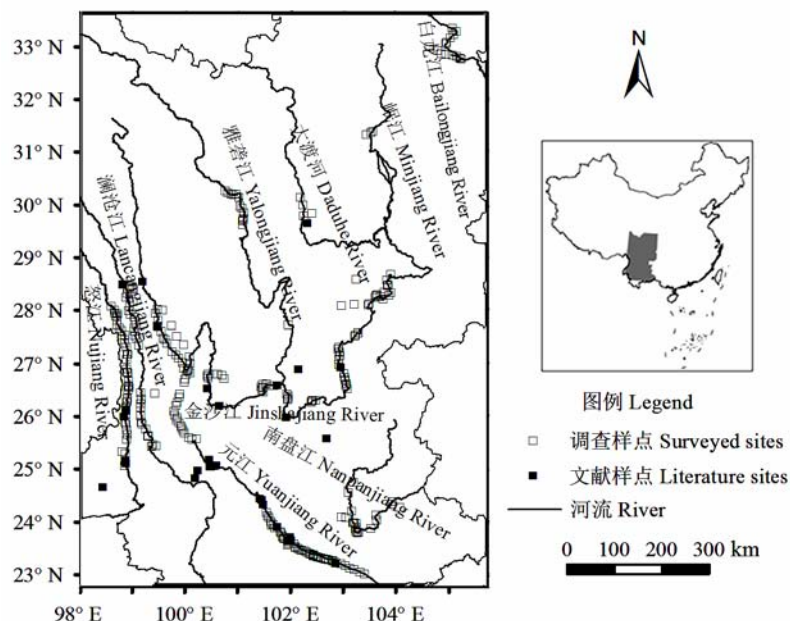


图1 中国西南干旱河谷的研究区域及样点分布(中国全图审图号GS(2008)1157号)

Fig. 1 Study area and distribution of sampling sites in dry valleys of Southwest China

全部物种的个体数) $\times 100\%$, 物种*i*的相对盖度 = (物种*i*的盖度/样方中全部物种的盖度) $\times 100\%$, 物种*i*的相对优势度 = (物种*i*的胸高断面积和/样方中全部物种的胸高断面积和) $\times 100\%$ (张金屯, 2004)。

1.3.2 气候数据

采用1 km分辨率的WorldClim的全球气候数据集的月均气温和降水数据(Hijmans et al, 2009), 以及中国国家气象信息中心(<http://www.nmic.gov.cn/>)提供的分布于研究区域内206个气象台站54年(1960.10–2014.2)的观测数据, 结合100 m分辨率的数字高程模型(SRTM, <http://datamirror.csdb.cn/>)进行海拔校正和插值, 生成各个调查样点的多年平均气候数据(刘晔, 2015)。

(1)月降水数据。首先利用台站观测平均值减去相同地理位置的WorldClim栅格数据值, 然后用残差进行Kriging插值生成残差值的空间格局数据, 再叠加在WorldClim数据上得到修正后的栅格值。

(2)月均温数据。采取同样方法得到台站数据与WorldClim数据的残差值, 结合WorldClim数据1 km像元的平均海拔与气象台站记录的海拔之间的高程差, 并结合 $0.55^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 的平均气温垂直递减率, 采用co-kriging插值方法得到月均温的空间修正数据, 并叠加在WorldClim的月均温栅格数据上。

利用校正后的气候数据, 提取各样点相应经纬度坐标上的气温、降水数据, 参考已有研究植物多样性和气候关系的结果(方精云等, 2002; Hawkins et al, 2003), 从能量和水分2个方面计算相关的气候指标。能量指标包括: 年均温(mean annual temperature, MAT); 最冷月均温(mean temperature of the coldest month, MTCM), 采用1月的均温值; 气温季节性(temperature seasonality, TSN), 年内各月均温值的标准差。水分指标: 年降水量(mean annual precipitation, MAP), 年内各月降水量之和; 干燥指数(aridity index, *k*), 由日均温 10°C 以上时期的温度与降水量计算得到, 即: $k = 0.16 \times (\text{全年} \geq 10^{\circ}\text{C} \text{的积温} / \text{全年} \geq 10^{\circ}\text{C} \text{的降水量})$ (中国科学院自然区划工作委员会, 1959); 降水季节性(precipitation seasonality, PSN), 年内各月平均降水量的变异系数(coefficient of variation)。

1.4 群落数量分类与排序

1.4.1 基于群落内部差异的群落数量分类

自适应仿射传播聚类(adaptive-AP)的计算原理和过程如下: (1)建立数据对象*n*间的相似度 $n \times n$ 的相似度矩阵*S*, 依据矩阵*S*对角线上的第*k*个数据对象的数值*s*(*k*, *k*)的大小, 即参考度*p*(preference), 作为评判第*k*个数据是否可以成为聚类中心的依据

(Frey & Dueck, 2007)。(2)计算每一次迭代过程的吸引度(R)和归属度(A), 根据 $R(k, k) + A(k, k)$ 值是否大于0来判断是否为聚类中心; $R(i, k)$ 表示i点到聚类中心k点的相似度, 反映k点是否适合作为i点的聚类中心; $A(i, k)$ 表示从聚类中心k点到i点的相似度, 反映i点是否选择k点作为其聚类中心; $R(i, k)$ 越大, k点作为聚类中心的可能性越大, $A(i, k)$ 越大, i点属于k点这一组聚类的可能性也越大(Frey & Dueck, 2007)。(3)通过扫描偏向参数空间, 搜索聚类数目空间, 寻找最优的聚类结果(自适应扫描); 通过降低参考度p以减少迭代中的震荡(自适应逃离), 并调整lam(阻尼系数)来降低震荡(自适应阻尼), 以控制迭代次数(王开军等, 2007)。

依据adaptive-AP的聚类结果, 将1,339个自然植被样方划分为不同的植物群丛, 用指示值(indicator value)分析计算每个群落类型里的指示种(Dufrene & Legendre, 1997), 计算公式为:

$$Indval_{ij} = (N_{individuals_{ij}} / N_{individuals_i}) \times (N_{sites_{ij}} / N_{sites_j}) \quad (1)$$

其中, $Indval_{ij}$ 表示物种i在类群j内的指示值, $N_{individuals_{ij}}$ 是指物种i在类群j内每个样方中的平均个体数, $N_{individuals_i}$ 是物种i在各类群内每个样方中的平均个体数之和, $N_{sites_{ij}}$ 表示物种i在类群j内出现的样方数, N_{sites_j} 是j类群所包含的总样方数。

选择重要值最高的物种作为群丛优势种, 指示值最高的两个物种为指示种。采用优势种为主, 指示种为辅, 即“指示种 + 指示种 - 优势种”的方法进行群丛的分类和命名; 以优势种原则划分群系和命名; 植被型依据外貌生态原则, 并参照中国植被分类系统(宋永昌, 2001)划分和命名; 植被型亚纲、植被型纲依据中国植被分类系统划分并命名(宋永昌, 2001)。

采用植被型-群系-群丛的分类等级, 其分类结果的编号规则如下: I、II、III、.....为植被型纲; I-I、II-1、III-1、.....为植被型亚纲; 一、二、三、.....为植被型; 1、2、3、.....为群系; 1-1、2-1、3-1、.....为群丛。

1.4.2 群落排序

本研究依据群落数量分类结果, 采用典范对应分析(canonical correspondence analysis, CCA)排序方法(张金屯, 2004), 用气候因子与排序轴夹角的余弦值表示各气候因子与排序轴的相关性, 用决定系

数(squared correlation coefficient, r^2)来表征各气候因子对群落物种分布的影响, 运用置换检验(permutation test), 置换次数999次, 检验各气候因子的显著性, 从能量和水分两方面选择显著影响群落物种分布的主要气候因子, 比较各植被类型之间在环境上的区别和联系。

Adaptive-AP采用matlab 10.0编程(王开军等, 2007), 指示值的计算采用R语言的labdsv程序包(Roberts, 2006), CCA排序分析采用R语言的vegan包(Oksanen et al, 2007)。

2 结果

2.1 植物群落分类

采用adaptive-AP聚类加指示种的方法, 将1,339个自然植被样方划分为3个植被型纲, 5个植被型亚纲, 7个植被型, 24个群系, 31个群丛(表1)。植被型及群系在中国西南干旱河谷的空间分布见图2。

本区植被以暖性落叶阔叶灌丛为最主要的植被型(样方比例60.8%)。鞍叶羊蹄甲灌丛(Form. *Bauhinia brachycarpa*, 样方比例50.9%)、黄茅灌丛(Form. *Heteropogon contortus*, 样方比例11.9%)、孔颖草灌丛(Form. *Bothriochloa pertusa*, 样方比例5.6%)、黄荆灌丛(Form. *Vitex negundo*, 样方比例4.2%)、知风草灌丛(Form. *Eragrostis ferruginea*, 样方比例3.8%)、车桑子灌丛(Form. *Dodonaea viscosa*, 样方比例3.4%)和云南松疏林(Form. *Pinus yunnanensis*, 样方比例3.3%)等是本区分布最广的植物群系(图2, 附录1)。不同植物群系的物种组成差别较大, 物种密度也有较大的差异(附录1)。

2.2 植物群落排序

依据植被型分类结果进行CCA排序, 分析环境梯度上植被类型的变化(图3)。以6个气候因子为环境变量的CCA分析表明, 第一轴主要受以最冷月均温为主的能量影响, 其中MTCM、MAT、MAP、PSN与第一轴正相关, TSN、k与第一轴负相关, 相关性由大到小依次为MTCM ($R = 0.99$)、MAT ($R = 0.96$)、k ($R = -0.94$)、TSN ($R = -0.83$)、MAP ($R = 0.80$)、PSN ($R = 0.78$); 第二轴主要受以降水季节性为主的水分影响, 除MAP与第二轴正相关外, 其余5个气候因子均与第二轴负相关, 相关性由大到小依次为PSN ($R = -0.63$)、MAP ($R = 0.60$)、TSN ($R = -0.55$)、k ($R = -0.34$)、MAT ($R = -0.28$)、MTCM

表1 中国西南干旱河谷植被分类表

Table 1 The classification system of plant communities in dry valleys of Southwest China

植被型纲 Vegetation type class	植被型亚纲 Vegetation type subclass	植被型 Vegetation type	群系 Formation	群丛 Association
I 草本植被 Herbaceous	I-1 旱生草本植被 Xeropoium	一 稀树草原 Savanna	1 从毛羊胡子草灌草丛 Form. <i>Eriophorum comosum</i>	1-1 叶下珠+牛角瓜-从毛羊胡子草群丛 Ass. <i>Phyllanthus urinaria</i> + <i>Calotropis gigantea</i> - <i>Eriophorum comosum</i>
			2 短梗苞茅灌草丛 Form. <i>Hyparrhenia diplandra</i>	2-1 黄花菜+矛叶荩草-短梗苞茅群丛 Ass. <i>Hemerocallis citrina</i> + <i>Arthraxon lanceolatus</i> - <i>Hyparrhenia diplandra</i>
			3 黄茅灌草丛 Form. <i>Heteropogon contortus</i>	3-1 密花树+清香木-戟叶酸模群丛 Ass. <i>Myrsine seguinii</i> + <i>Pistacia weinmanniifolia</i> - <i>Rumex hastatus</i>
				3-2 胡枝子+狭叶海漆-类芦群丛 Ass. <i>Lespedeza bicolor</i> + <i>Excoecaria acerifolia</i> var. <i>cuspidata</i> - <i>Neyraudia reynaudiana</i>
				3-3 洋紫荆+枣-黄茅群丛 Ass. <i>Bauhinia variegata</i> + <i>Ziziphus jujuba</i> - <i>Heteropogon contortus</i>
				3-4 芸香草+竹叶草-黄茅群丛 Ass. <i>Cymbopogon distans</i> + <i>Oplismenus compositus</i> var. <i>compositus</i> - <i>Heteropogon contortus</i>
			4 孔颖草灌草丛 Form. <i>Bothriochloa pertusa</i>	4-1 土沉香+檀子栎-孔颖草群丛 Ass. <i>Aquilaria sinensis</i> + <i>Quercus baronii</i> - <i>Bothriochloa pertusa</i>
				4-2 猪毛菜+戟叶酸模-孔颖草群丛 Ass. <i>Salsola collina</i> + <i>Rumex hastatus</i> - <i>Bothriochloa pertusa</i>
			5 木棉灌草丛 Form. <i>Bombax ceiba</i>	5-1 芦苇-木棉群丛 Ass. <i>Phragmites australis</i> - <i>Bombax ceiba</i>
			6 牛角瓜灌草丛 Form. <i>Calotropis gigantea</i>	6-1 九叶木蓝+孔颖草-牛角瓜群丛 Ass. <i>Indigofera linnaei</i> + <i>Bothriochloa pertusa</i> - <i>Calotropis gigantea</i>
			7 双花草灌草丛 Form. <i>Dichanthium annulatum</i>	7-1 牡蒿+龙珠果-双花草群丛 Ass. <i>Artemisia japonica</i> + <i>Passiflora foetida</i> - <i>Dichanthium annulatum</i>
			8 芸香草灌草丛 Form. <i>Cymbopogon distans</i>	8-1 地果+长节耳草-芸香草群丛 Ass. <i>Ficus tikoua</i> + <i>Hedyotis uncinella</i> - <i>Cymbopogon distans</i>
			9 知风草灌草丛 Form. <i>Eragrostis ferruginea</i>	9-1 鞍叶羊蹄甲+野丁香-野菊+知风草群丛 Ass. <i>Bauhinia brachycarpa</i> + <i>Leptodermis potaninii</i> - <i>Chrysanthemum indicum</i> + <i>Eragrostis ferruginea</i>
			10 仙人掌灌丛 Form. <i>Opuntia dillenii</i>	10-1 黑麦草+白饭树-仙人掌群丛 Ass. <i>Lolium perenne</i> + <i>Flueggea virosa</i> - <i>Opuntia dillenii</i>
			11 霸王鞭灌丛 Form. <i>Euphorbia royleana</i>	11-1 孔颖草+白饭树-霸王鞭群丛 Ass. <i>Bothriochloa pertusa</i> + <i>Flueggea virosa</i> - <i>Euphorbia royleana</i>
			12 清香木灌丛 Form. <i>Pistacia weinmanniifolia</i>	12-1 细花梗杭子梢+云南山蚂蝗-黄茅+虾子花+清香木群丛 Ass. <i>Campylotropis capillipes</i> + <i>Desmodium yunnanense</i> - <i>Heteropogon contortus</i> + <i>Woodfordia fruticosa</i> + <i>Pistacia weinmanniifolia</i>
			13 车桑子灌丛 Form. <i>Dodonaea viscosa</i>	13-1 木香花+光叶巴豆-黄茅+车桑子群丛 Ass. <i>Rosa banksiae</i> + <i>Croton laevigatus</i> - <i>Heteropogon contortus</i> + <i>Dodonaea viscosa</i>
II 灌丛 Scrub	II-1 刺灌丛及肉质灌丛 Thorn thicket and succulent thicket	二 肉质灌丛 Succulent thicket	14 光叶山黄麻灌丛 Form. <i>Trema cannabina</i>	14-1 细柄野芥+黄花稔-光叶山黄麻群丛 Ass. <i>Fagopyrum gracilipes</i> + <i>Sida acuta</i> - <i>Trema cannabina</i>
			15 狭叶山黄麻灌丛 Form. <i>Trema angustifolia</i>	15-1 羽芒菊+狭叶山黄麻-狭叶山黄麻群丛 Ass. <i>Tridax procumbens</i> + <i>Trema angustifolia</i> - <i>Trema angustifolia</i>
			16 鞍叶羊蹄甲灌丛 Form. <i>Bauhinia brachycarpa</i>	16-1 小叶荩草+北艾-鞍叶羊蹄甲群丛 Ass. <i>Arthraxon lancifolius</i> + <i>Artemisia vulgaris</i> - <i>Bauhinia brachycarpa</i>
			17 华西小石积灌丛 Form. <i>Osteomeles schwerinae</i>	17-1 香茶菜+裸叶粉背蕨-华西小石积群丛 Ass. <i>Isodon amethystoides</i> + <i>Aleuritopteris duclouxii</i> - <i>Osteomeles schwerinae</i>
	II-2 阔叶灌丛 Broadleaved thicket	三 常绿阔叶灌丛 Evergreen broadleaved thicket		
		四 暖性落叶阔叶灌丛 Warm deciduous broadleaved thicket		

表1 (续) Table 1 (continued)

植被型纲 Vegetation type class	植被型亚纲 Vegetation type subclass	植被型 Vegetation type	群系 Formation	群丛 Association
II 灌丛 Scrub	II-2 阔叶灌丛 Broadleaved thicket	四 暖性落叶阔叶灌丛 Warm deciduous broadleaved thicket	18 余甘子灌丛 Form. <i>Phyllanthus emblica</i>	18-1 垫状卷柏+翻白草-余甘子群丛 Ass. <i>Selaginella pulvinata</i> + <i>Potentilla discolor</i> - <i>Phyllanthus emblica</i>
			19 云南山蚂蝗灌丛 Form. <i>Desmodium yunnanense</i>	19-1 扭鞘香茅+类芦-云南山蚂蝗群丛 Ass. <i>Cymbopogon tortilis</i> + <i>Neyraudia reynaudiana</i> - <i>Desmodium yunnanense</i>
			20 黄荆灌丛 Form. <i>Vitex negundo</i>	20-1 碱菰+川甘亚菊-黄荆群丛 Ass. <i>Tripolium pannonicum</i> + <i>Ajania potaninii</i> - <i>Vitex negundo</i>
			21 细叶黄皮灌丛 Form. <i>Clausena anisum-olens</i>	21-1 细叶黄皮群丛 Ass. <i>Clausena anisum-olens</i>
			22 铁橡栎林 Form. <i>Quercus cocciferoides</i>	22-1 香附子+短柄扁担杆-铁橡栎群丛 Ass. <i>Cyperus rotundus</i> + <i>Grewia brachypoda</i> - <i>Quercus cocciferoides</i>
III 森林 Forest	III-1 阔叶林 Broadleaved forest	五 常绿硬叶林 Evergreen sclerophyllous forest	23 乌柏林 Form. <i>Triadica sebifera</i>	23-1 乌柏+藿香蓟-乌柏群丛 Ass. <i>Triadica sebifera</i> + <i>Ageratum conyzoides</i> - <i>Triadica sebifera</i>
				23-2 有芒鸭嘴草+乌柏-乌柏群丛 Ass. <i>Ischaemum aristatum</i> var. <i>aristatum</i> + <i>Triadica sebifera</i> - <i>Triadica sebifera</i>
				24-1 马缨丹+刺叶栎-云南松群丛 Ass. <i>Lantana camara</i> + <i>Quercus spinosa</i> - <i>Pinus yunnanensis</i>
	III-2 针叶林 Coniferous forest	七 暖性针叶林 Warm needle-leaved forest	24 云南松疏林 Form. <i>Pinus yunnanensis</i>	24-2 栓皮栎+南烛-云南松群丛 Ass. <i>Quercus variabilis</i> + <i>Vaccinium bracteatum</i> - <i>Pinus yunnanensis</i>
				24-3 云南松+普通针毛蕨-云南松群丛 Ass. <i>Pinus yunnanensis</i> + <i>Macrothelypteris torresiana</i> - <i>Pinus yunnanensis</i>

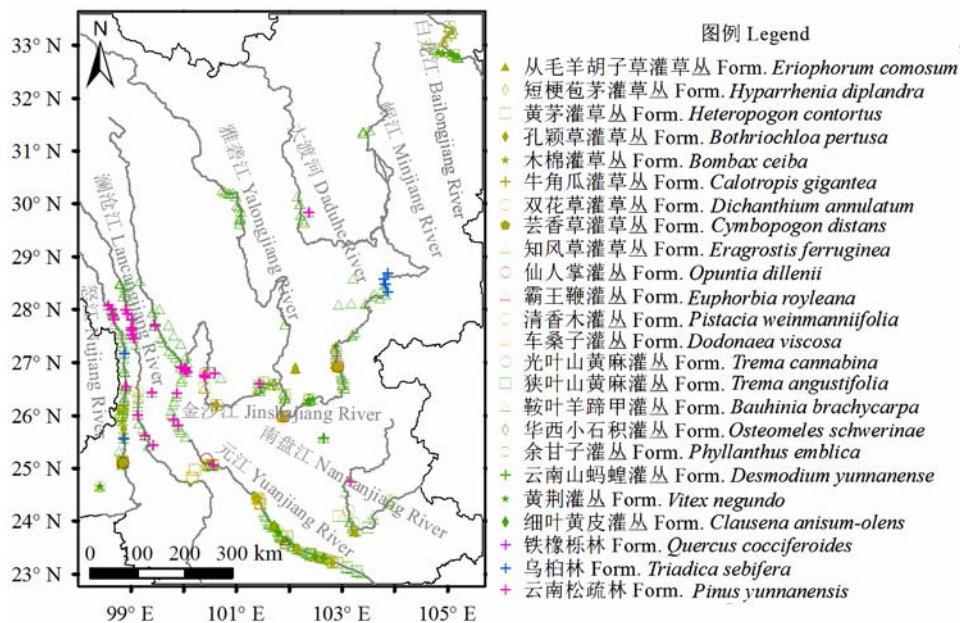


图2 中国西南干旱河谷的植被群系空间分布。不同颜色代表不同植被型。
Fig. 2 Spatial distribution of various vegetation formations in dry valleys of Southwest China. Different colors represent different vegetation types.

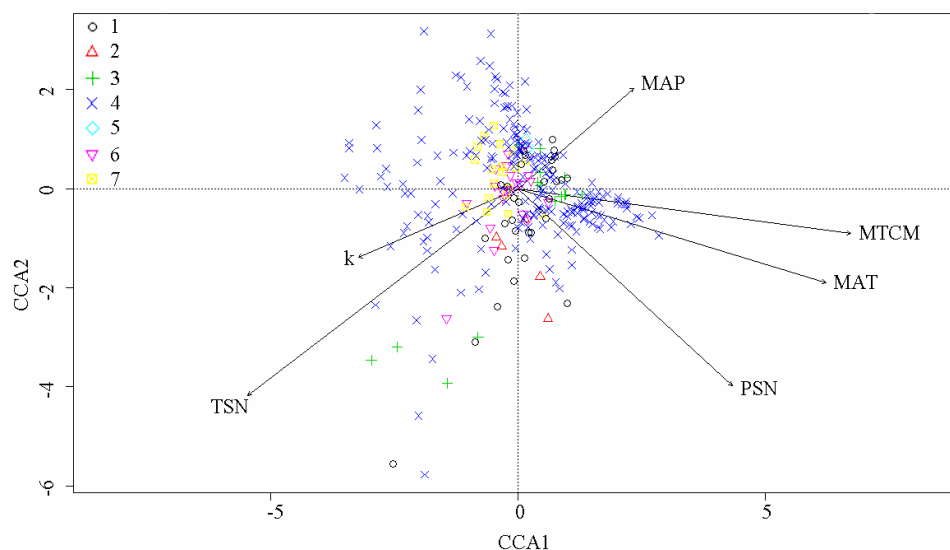


图3 7类植被型群落样方的CCA排序。1: 稀树草原; 2: 肉质灌丛; 3: 常绿阔叶灌丛; 4: 暖性落叶阔叶灌丛; 5: 常绿硬叶林; 6: 落叶阔叶林; 7: 暖性针叶林。MAT: 年均温; MTCM: 最冷月均温; TSN: 气温季节性; MAP: 年降水量; k : 干燥指数; PSN: 降水季节性。

Fig. 3 CCA analysis for the plots of 7 vegetation types. 1, Savanna; 2, Succulent thicket; 3, Evergreen broadleaved thicket; 4, Warm deciduous broadleaved thicket; 5, Evergreen sclerophyllous forest; 6, Deciduous broadleaved forest; 7, Warm needle-leaved forest. MAT, mean annual temperature; MTCM, mean temperature of the coldest month; TSN, temperature seasonality; MAP, mean annual precipitation; k , aridity index; PSN, precipitation seasonality.

($R = -0.14$)。6个气候变量均对群落物种分布有显著影响, 决定系数由大到小依次为MTCM ($r^2 = 0.70$)、TSN ($r^2 = 0.67$)、MAT ($r^2 = 0.64$)、PSN ($r^2 = 0.51$)、 k ($r^2 = 0.18$)、MAP ($r^2 = 0.13$)。从能量和水分两方面, 本区的群落物种分布主要受最冷月均温和降水季节性的共同影响。

不同植被型, 最冷月均温和降水季节性的分布情况见图4, 其中最冷月均温均值由高到低(12.89–7.90)依次为肉质灌丛>稀树草原>常绿阔叶灌丛>常绿硬叶林>暖性落叶阔叶灌丛>落叶阔叶林>暖性针叶林, 标准偏差由大到小(5.62–0.72)依次为常绿阔叶灌丛>暖性落叶阔叶灌丛>常绿硬叶林>稀树草原>落叶阔叶林>暖性针叶林>肉质灌丛; 降水季节性由大到小(93.82–74.12)依次为肉质灌丛>稀树草原>落叶阔叶林>暖性落叶阔叶灌丛>暖性针叶林>常绿硬叶林>常绿阔叶灌丛, 标准偏差由大到小(26.80–2.75)依次为暖性针叶林>落叶阔叶林>暖性落叶阔叶灌丛>常绿阔叶灌丛>稀树草原>常绿硬叶林>肉质灌丛。

依据图4的结果, 可将稀树草原、肉质灌丛划分为干热河谷植被类型, 暖性落叶阔叶灌丛、常绿硬

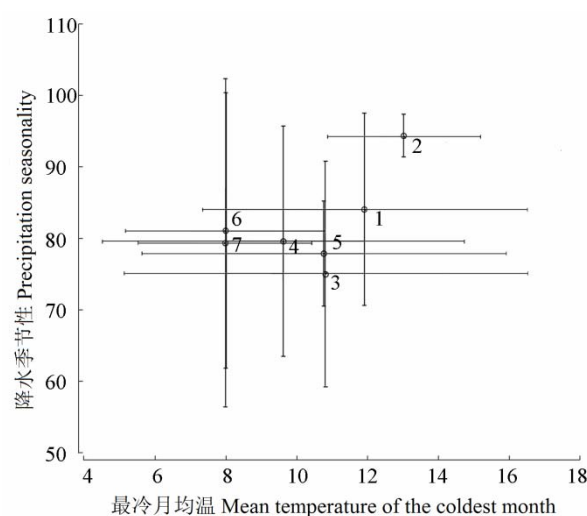


图4 不同植被型分布区的环境因子均值与标准偏差。1: 稀树草原; 2: 肉质灌丛; 3: 常绿阔叶灌丛; 4: 暖性落叶阔叶灌丛; 5: 常绿硬叶林; 6: 落叶阔叶林; 7: 暖性针叶林。

Fig. 4 The mean value and standard deviation of environmental factors in the distribution area of different vegetation types. 1, Savanna; 2, Succulent thicket; 3, Evergreen broadleaved thicket; 4, Warm deciduous broadleaved thicket; 5, Evergreen sclerophyllous forest; 6, Deciduous broadleaved forest; 7, Warm needle-leaved forest.

叶林、常绿阔叶灌丛划分为干暖河谷植被,而暖性针叶林、落叶阔叶林则属于干温河谷植被。

3 讨论

本文采用自适应仿射传播聚类的方法,从西南干旱河谷的整体角度,将本区的植被划分为7个植被型(稀树草原、肉质灌丛、常绿阔叶灌丛、暖性落叶阔叶灌丛、常绿硬叶林、落叶阔叶林、暖性针叶林)。根据最冷月均温和降水季节性,将7种植被型划分为干热、干暖、干温3种类型,其中稀树草原、肉质灌丛属于干热河谷植被类型;暖性落叶阔叶灌丛、常绿硬叶林、常绿阔叶灌丛属于干暖河谷植被类型;暖性针叶林、落叶阔叶林属于干温河谷植被类型。这一划分结果与根据地理分区(杨勤业和郑度, 1989)划分的干热、干暖河谷植被(金振洲和欧晓昆, 2000)基本一致,其中干热河谷植被以旱生的稀树草原为主,并散生有肉质灌丛;干暖河谷植被以常绿、暖性落叶阔叶灌丛为主,并散生有常绿硬叶林;并在此基础上补充了以暖性针叶林、落叶阔叶林为主的干温河谷植被。

不同植被型的空间分布情况表明(图2, 附录1),我国西南干旱河谷植被以干暖河谷植被类型为主(样方比例66.5%),广泛分布于该区域的9条江段河谷;在河谷的偏低海拔和偏南河道,分布着干热河谷植被类型(样方比例29.8%);在河谷的偏高海拔和偏北河道,分布着干温河谷植被类型(样方比例3.7%)。

由于采样时间及交通情况的限制,本研究缺失了对怒江中游的干旱、半干旱荒漠植被这一植被类型(庄翠珍等, 2011)的调查研究,划分结果仍有一定的不完整性和不确定性,这一不足将在以后的研究中补充完善。

本文采用CCA排序的方法,分析了西南干旱河谷的植被分布与气候的关系,结果显示本区环境梯度上植被型的变化主要受最冷月均温和降水季节性的影响,这两个因子共同制约着西南干旱河谷的植被分布。

西南干旱河谷的植被被认为是稀树草原植被的干旱河谷残余(张荣祖, 1992),与美国加州、智利、南非、澳大利亚以及地中海盆地的稀树草原在外貌、区系上有诸多相似之处(Bourliere, 1983; Dallman, 1998; 金振洲, 2002)。在上述干旱半干旱

的地中海气候区,植被分布与温度和降水关系显著(Spano et al, 1999; Ludwig et al, 2004),其中地中海盆地的稀树草原分布受最冷月均温和年实际蒸散的显著影响(Barboni et al, 2004),非洲的稀树草原与年降水、降水的年际变化显著相关(Zeng & Neelin, 2000; Martiny et al, 2005),美国加州临海地区的稀树草原群落组成与降水的年际变化显著相关(Garcia & Ustin, 2001)。这与本文的分析结果基本一致,最冷月均温和降水变异共同制约着稀树草原的植被分布,说明了西南干旱河谷植被与稀树草原植被在气候因子响应上的相似性,这一结论从现代气候的角度证明了西南干旱河谷植被与稀树草原植被的关联。

致谢:衷心感谢北京大学生态系沈利峰、王韬、杨柳、秦思雨,成都理工大学的段士中、褚延梅、杨健等同学在野外调查中的付出!衷心感谢赵子思先生在标本鉴定方面给与的帮助。

参考文献

- Bao WK, Wang CM (2000) Degradation mechanism of mountain ecosystem at the dry valley in the upper reaches of the Minjiang River. *Journal of Mountain Science*, 18, 57–62. (in Chinese with English abstract) [包维楷, 王春明 (2000) 岷江上游山地生态系统的退化机制. *山地学报*, 18, 57–62.]
- Barboni D, Harrison SP, Bartlein PJ, Jalut G, New M, Prentice IC, Sanchez-Goni MF, Spessa A, Davis B, Stevenson AC (2004) Relationships between plant traits and climate in the Mediterranean region: a pollen data analysis. *Journal of Vegetation Science*, 15, 635–646.
- Bourliere F (1983) *Ecosystems of the World, Tropical Savannas*. Elsevier Scientific Publishing Company, New York.
- Cardille JA, Lambois M (2009) From the redwood forest to the gulf stream waters: human signature nearly ubiquitous in representative US landscapes. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 8, 130–134.
- Condit R, Pitman N, Leigh EG, Chave J, Terborgh J, Foster RB, Núñez P, Aguilar S, Valencia R, Villa G, Muller-Landau HC, Losos E, Hubbell SP (2002) Beta-diversity in tropical forest trees. *Science*, 295, 666–669.
- Curtis JT, McIntosh RP (1951) An upland forest continuum in the prairie-forest border region of Wisconsin. *Ecology*, 32, 476–496.
- Dallman PR (1998) *Plant Life in the World's Mediterranean Climates: California, Chile, South Africa, Australia, and the Mediterranean Basin*. University of California Press, Berkeley.
- DeCáceres M, Wiser SK (2012) Towards consistency in vegetation classification. *Journal of Vegetation Science*, 23, 387–393.

- Dufrene M, Legendre P (1997) Species assemblages and indicator species: the need for a flexible asymmetrical approach. *Ecological Monographs*, 67, 345–366.
- Fang JY, Song YC, Liu HY, 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.]
- Flora of China Editorial Committee (2013) *Flora of China*. <http://foc.eflora.cn/> (accessed 2013-12-29)
- Frey BJ, Dueck D (2007) Clustering by passing messages between data points. *Science*, 315, 972–976.
- Frey BJ, Dueck D (2008) Response to comment on “Clustering by passing messages between data points”. *Science*, 319, 726.
- Garcia M, Ustin SL (2001) Detection of interannual vegetation responses to climatic variability using AVIRIS data in a coastal savanna in California. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39, 1480–1490.
- Goodall DW (1974) A new method for the analysis of spatial pattern by random pairing of quadrats. *Vegetatio*, 29, 135–146.
- Guan WB, Ye MS, Ma KM, Liu GH, Wang XL (2004) Vegetation classification and the main types of vegetation of the dry valley of Minjiang River. *Journal of Mountain Science*, 22, 679–686. (in Chinese with English abstract) [关文彬, 冶民生, 马克明, 刘国华, 汪西林 (2004) 岷江干旱河谷植被分类及其主要类型. *山地学报*, 22, 679–686.]
- Hawkins BA, Field R, Cornell HV, Currie DJ, Guegan JF, Kaufman DM, Kerr JT, Mittelbach GG, Oberdorff T, O’Brien EM, Porter EE, Turner JRG (2003) Energy, water, and broad-scale geographic patterns of species richness. *Ecology*, 84, 3105–3117.
- He YB, Lu PZ, Zhu T (2000) Causes for the formation of dry-hot valleys in Hengduan Mountain-Yunnan Plateau. *Resources Science*, 22(5), 69–72. (in Chinese with English abstract) [何永彬, 卢培泽, 朱彤 (2000) 横断山–云南高原干旱河谷形成原因研究. *资源科学*, 22(5), 69–72.]
- Hijmans RJ, Cameron S, Parra J (2009) WorldClim—global climate data. <http://www.worldclim.org>. (accessed 2014-07-01)
- Huang FZ, Wang B, Ding T, Xiang WS, Li XK, Zhou AP (2014) Numerical classification of associations in a northern tropical karst seasonal rain forest and the relationships of these associations with environmental factors. *Biodiversity Science*, 22, 157–166. (in Chinese with English abstract) [皇甫昭, 王斌, 丁涛, 向悟生, 李先琨, 周爱萍 (2014) 弄岗北热带喀斯特季节性雨林群丛数量分类及与环境的关系. *生物多样性*, 22, 157–166.]
- Jin ZZ (1998) Study on the floristic elements of seed plants in the dry-warm valleys of Yunnan and Sichuan. *Guihaia*, 18, 313–321. (in Chinese with English abstract) [金振洲 (1998) 滇川干暖河谷种子植物区系成分研究. *广西植物*, 18, 313–321.]
- Jin ZZ (1999) Study on the floristic elements of seed plants in the dry-hot valleys of Yunnan and Sichuan. *Guihaia*, 19, 1–14. (in Chinese with English abstract) [金振洲 (1999) 滇川干热河谷种子植物区系成分研究. *广西植物*, 19, 1–14.]
- Jin ZZ (2002) Floristic Features of Dry-hot and Dry-warm Valleys, Yunnan and Sichuan. Yunnan Science & Technology Press, Kunming. (in Chinese) [金振洲 (2002) 滇川干热河谷与干暖河谷植物区系特征. 云南科技出版社, 昆明.]
- Jin ZZ, Ou XK (2000) Yuanjiang, Nujiang, Jinshajiang, Lancangjiang Vegetation of Dry-Hot Valley. Yunnan University Press, Yunnan Science & Technology Press, Kunming. (in Chinese) [金振洲, 欧晓昆 (2000) 元江、怒江、金沙江、澜沧江干热河谷植被. 云南大学出版社, 云南科技出版社, 昆明.]
- Liu FY, Li K, Sun YY, Tang GY, Zhang CH (2010) Effects of climate on vegetation recovery in dry hot valleys of Hengduan Mountains Region in Southwest China. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 19, 1386–1391. (in Chinese with English abstract) [刘方炎, 李昆, 孙永玉, 唐国勇, 张春华 (2010) 横断山区干热河谷气候及其对植被恢复的影响. *长江流域资源与环境*, 19, 1386–1391.]
- Liu FY, Zhu H (2005) Numerical classification and diversity analysis for the vegetation in the dry-hot valley of Yuanjiang, Yunnan Province. *Guihaia*, 25, 22–25. (in Chinese with English abstract) [刘方炎, 朱华 (2005) 元江干热河谷植被数量分类及其多样性分析. *广西植物*, 25, 22–25.]
- Liu WB (1994) The main types in the semi-arid valley shrubs in the upper reaches of the Minjiang River. *Mountain Research*, 12, 27–31. (in Chinese with English abstract) [刘文彬 (1994) 岷江上游半干旱河谷灌丛的主要类型. *山地研究*, 12, 27–31.]
- Liu Y (2015) Plant Diversity and Phytogeography of Arid Valley in Major Rivers of the Southwestern China. PhD dissertation, Peking University, Beijing. (in Chinese with English abstract) [刘晔 (2015) 中国西南干旱河谷植被与植物多样性空间格局与生物地理机制. 博士学位论文, 北京大学, 北京.]
- Ludwig F, de Kroon H, Berendse F, Prins HHT (2004) The influence of savanna trees on nutrient, water and light availability and the understorey vegetation. *Plant Ecology*, 170, 93–105.
- Mabry C, Ackerly D, Gerhardt F (2000) Landscape and species level distribution of morphological and life history traits in a temperate woodland flora. *Journal of Vegetation Science*, 11, 213–224.
- Martiny N, Richard Y, Camberlin P (2005) Interannual persistence effects in vegetation dynamics of semi-arid Africa. *Geophysical Research Letters*, 32, L24403.
- Ming QZ, Shi ZT (2007) New discussion on dry valley formation in the Three Parallel Rivers Region. *Journal of Desert Research*, 27, 99–104. (in Chinese with English abstract) [明

- 庆忠, 史正涛 (2007) 三江并流区干热河谷成因新探析. *中国沙漠*, 27, 99–104.]
- Morlon H, Schwikl DW, Bryant JA, Marquet PA, Rebelo AG, Tauss C, Bohannan BJM, Green JL (2011) Spatial patterns of phylogenetic diversity. *Ecology Letters*, 14, 141–149.
- Natural Divisions Working Committee of Chinese Academy of Sciences (1959) Comprehensive Physical Regionalization of China. Science Press, Beijing. (in Chinese) [中国科学院自然区划工作委员会 (1959) 中国综合自然区划. 科学出版社, 北京.]
- Oksanen J, Kindt R, Legendre P, O'Hara B, Stevens MHH, Oksanen MJ, Suggests MASS (2007) The Vegan Package. <http://cran.r-project.org/> (accessed 2010-09-01)
- Qiu ZQ, Yang YH, Cao XW, Sun PJ, Sun XG (2007) Species diversity and floristic characteristics of woody plants in the dry valley of the Bailong River, China. *Journal of Gansu Agricultural University*, 42(5), 119–125. (in Chinese with English abstract) [邱祖青, 杨永宏, 曹秀文, 孙培坚, 孙学刚 (2007) 白龙江干旱河谷木本植物多样性及其区系地理特征. *甘肃农业大学学报*, 42(5), 119–125.]
- Roberts DW (2006) Labdsv: Laboratory for dynamic synthetic vegetation phenology. <http://www.ecology.msu.montana.edu/labdsv/R> (accessed 2010-09-01)
- Roleček J, Tichý L, Zelený D, Chytrý M (2009) Modified TWINSpan classification in which the hierarchy respects cluster heterogeneity. *Journal of Vegetation Science*, 20, 596–602.
- Rueda M, Rodríguez MÁ, Hawkins BA (2013) Identifying global zoogeographical regions: lessons from Wallace. *Journal of Biogeography*, 40, 2215–2225.
- Soininen J, McDonald R, Hillebrand H (2007) The distance decay of similarity in ecological communities. *Ecography*, 30, 3–12.
- Song YC (2001) Vegetation Ecology. East China Normal University Press, Shanghai. (in Chinese) [宋永昌 (2001) 植被生态学. 华东师范大学出版社, 上海.]
- Spano D, Cesaraccio C, Duce P, Snyder RL (1999) Phenological stages of natural species and their use as climate indicators. *International Journal of Biometeorology*, 42, 124–133.
- ter Braak CJF (1986) Canonical correspondence analysis: a new eigenvector technique for multivariate direct gradient analysis. *Ecology*, 67, 1167–1179.
- Vetaas OR, Grytnes JA (2002) Distribution of vascular plant species richness and endemic richness along the Himalayan elevation gradient in Nepal. *Global Ecology and Biogeography*, 11, 291–301.
- Wang KJ, Zhang JY, Li D, Zhang XN, Guo T (2007) Adaptive affinity propagation clustering. *Acta Automatica Sinica*, 33, 1242–1246. (in Chinese with English abstract) [王开军, 张军英, 李丹, 张新娜, 郭涛 (2007) 自适应仿射传播聚类. *自动化学报*, 33, 1242–1246.]
- Whittaker RH (2012) Classification of Plant Communities. Springer, Berlin.
- 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. 科学出版社, 北京.]
- Yang QY, Zheng D (1989) An outline of physico-geographic regionalization of the Hengduan Mountainous Region. *Mountain Research*, 7, 56–64. (in Chinese with English abstract) [杨勤业, 郑度 (1989) 横断山区综合自然区划纲要. *山地研究*, 7, 56–64.]
- Ye MS, Guan WB, Tan H, Ma KM, Liu G, Wang XL (2004) The α diversity of shrubs community in the arid valley of the Minjiang River. *Acta Ecologica Sinica*, 24, 1123–1130. (in Chinese with English abstract) [冶民生, 关文彬, 谭辉, 马克明, 刘国, 汪西林 (2004) 岷江干旱河谷灌丛 α 多样性分析. *生态学报*, 24, 1123–1130.]
- Zeng N, Neelin JD (2000) The role of vegetation–climate interaction and interannual variability in shaping the African savanna. *Journal of Climate*, 13, 2665–2670.
- Zhang JT (2004) Quantitative Ecology. Science Press, Beijing. (in Chinese) [张金屯 (2004) 数量生态学. 科学出版社, 北京.]
- Zhang RZ (1992) The Dry Valleys of the Hengduan Mountains Region. Science Press, Beijing. (in Chinese) [张荣祖 (1992) 横断山区干旱河谷. 科学出版社, 北京.]
- Zhu H, Cai L (2004) Vegetation of Upper Mekong Valley. Yunnan Education Publishing House, Kunming. (in Chinese) [朱华, 蔡琳 (2004) 澜沧江流域植被. 云南教育出版社, 昆明.]
- Zhu XX (2014) The Flora of Seed Plants in Three Rivers Valley of SW China. PhD dissertation, Kunming Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Kunming. (in Chinese with English abstract) [朱鑫鑫 (2014) 华西南三江河谷种子植物区系研究. 博士学位论文, 中国科学院昆明植物研究所, 昆明.]
- Zhuang CZ, Du F, Liu N, Zhang H, Chen Y, Du XL (2011) Vegetative characteristics in the dry valley of the middle reaches of Nujiang River in Tibet, China. *Plant Diversity and Resources*, 34, 433–442. (in Chinese with English abstract) [庄翠珍, 杜凡, 刘宁, 张辉, 陈勇, 杜小浪 (2011) 怒江中游西藏境内干旱河谷荒漠植被特征. *植物分类与资源学报*, 34, 433–442.]

(责任编辑: 朱华 责任编辑: 闫文杰)

附录 Supplementary Material

附录1 西南干旱河谷各群落的分布及主要物种组成

Appendix 1 Distribution and major species composition of plant communities in dry valleys of Southwest China

<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2015241-1.pdf>

刘晔, 李鹏, 许玥, 石松林, 应凌霄, 张婉君, 彭培好, 沈泽昊. 中国西南干旱河谷植物群落的数量分类和排序分析. 生物多样性, 2016, **24** (4): 378–388.
http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2015241

附录1 西南干旱河谷各群落的分布及主要物种组成

Appendix 1 Distribution and major species composition of plant communities in dry valleys of Southwest China

群系 Formation	流域 Watershed	样方数 Number of plots	海拔 Elevation (m)	北纬 North lati- tude (°)	经度 East longitude (°)	种密度 Species density (/100 m ²)	主要物种 Major species			盖度 Cover(mean ± SD) (%)	胸高断面积 Basal area (mean ± SD) (m ²)
							草本 Herb	灌木 Shrub	乔木 Tree	草本 Herb	灌木 Shrub 乔木 Tree
1 从毛羊胡子草 灌草丛 Form. <i>Eriophorum comosum</i>	JSJ、NPJ	13	700–1,439	23.80–26.92	101.80–103.24	12	从毛羊胡子草 <i>Eriophorum comosum</i> 、 细柄草 <i>Capillipedium par- viflorum</i>	车桑子 <i>Dodonaea viscosa</i> 、 戟叶酸模 <i>Rumex hastatus</i> 、 余甘子 <i>Phyllanthus emblica</i>		78.1±10.4	18.1±1.8
2 短梗苞茅灌丛 Form. <i>Hyparrhe- nia diplandra</i>	JSJ	9	1,520–1,630	25.97	101.80–101.89	14	短梗苞茅 <i>Hyparrhenia diplandra</i>	车桑子 <i>Dodonaea viscosa</i> 、 余甘子 <i>Phyllanthus emblica</i>		68.9±9.3	30.6±12
3 黄茅灌草丛 Form. <i>Heteropo- gon contortus</i>	BLJ、JSJ、LCJ、 NJ、NPJ、YJ	160	247–1,590	23.20–33.34	98.82–105.12	16	黄茅 <i>Heteropogon contortus</i> 、马桑 <i>Coriaria nepalensis</i> 、 类芦 <i>Neyraudia reynaudi- ana</i> 、 毛萼香茶菜 <i>Isodon eriocalyx</i>	戟叶酸模 <i>Rumex hastatus</i>		58.3±17.6	33.8±20
4 孔颖草灌丛 Form. <i>Bothri- ochloa pertusa</i>	JSJ、NJ、YJ	75	404–1,550	23.20–26.92	98.84–102.92	20	孔颖草 <i>Bothriochloa per- tusa</i> 、 西藏须芒草 <i>Andropogon munroi</i>	浆果楝 <i>Cipadessa baccif- era</i> 、 车桑子 <i>Dodonaea viscosa</i> 、 盐麸木 <i>Rhus chinensis</i>		59.1±22	24.8±12.9
5 木棉灌丛 Form. <i>Bombax ceiba</i>	JSJ、NJ	6	750–1,336	25.55–26.79	98.83–100.41	25	荞麦 <i>Fagopyrum esculentum</i>	木棉 <i>Bombax ceiba</i> 、 光叶山黄麻 <i>Trema can- nabina</i>		37.7±29.1	3.1±2.5
6 牛角瓜灌丛 Form. <i>Calotropis gigantea</i>	JSJ	10	770–930	26.92	102.90–102.92	17	孔颖草 <i>Bothriochloa pertusa</i>	牛角瓜 <i>Calotropis gigantea</i> 、 假烟叶树 <i>Solanum erian- thum</i>		33.8±20.9	50.5±11.4
7 双花草灌丛 Form. <i>Dichan- thium annulatum</i>	JSJ、NPJ、YJ	27	247–1,580	23.20–26.92	101.70–103.91	16	双花草 <i>Dichanthium annu- latum</i> 、 西藏须芒草 <i>Andropogon munroi</i> 、 牛筋草 <i>Eleusine indica</i>	羽萼木 <i>Colebrookea op- positifolia</i> 、 单叶拿身草 <i>Desmodium zonatum</i> 、 车桑子 <i>Dodonaea viscosa</i>		57.4±15.9	24.1±10.9
8 芸香草灌丛 Form. <i>Cymbopo- gon distans</i>	JSJ、YJ	12	1,070–1,430	23.89–26.92	101.30–102.92	17	芸香草 <i>Cymbopogon dis- tans</i> 、 长齿蔗茅 <i>Saccharum longe- setosum</i> 、 山野豌豆 <i>Vicia amoena</i>	灰毛莠 <i>Caryopteris forres- tii</i> 、 假杜鹃 <i>Barleria cristata</i> 、 堇花 <i>Wikstroemia canescens</i>		71.9±12.4	20.8±6.1
9 知风草灌丛 Form. <i>Eragrostis ferruginea</i>	BLJ	51	826–1,016	32.81–33.34	104.60–105.12	15	虎尾草 <i>Chloris virgata</i> 、 野菊 <i>Chrysanthemum indi- cum</i> 、 知风草 <i>Eragrostis ferruginea</i>	狭叶海漆 <i>Excoecaria acerifolia</i> var. <i>cuspidata</i> 、 甘肃野丁香 <i>Leptodermis purdomii</i> 、 黄荆 <i>Vitex negundo</i>		42.5±18.9	22.7±10.3

群系 Formation	流域 Watershed	样方数 Number of plots	海拔 Elevation (m)	北纬 North latitude (°)	经度 East longitude (°)	种密度 Species density (/100 m ²)	主要物种 Major species			盖度 Cover(mean ± SD) (%)	胸高断面积 Basal area (mean ± SD) (m ²)	
							草本 Herb	灌木 Shrub	乔木 Tree	草本 Herb	灌木 Shrub	乔木 Tree
10 仙人掌灌丛 Form. <i>Opuntia dillenii</i>	JSJ、NJ、YJ	23	718–1,500	25.09–27.21	98.86–102.92	24	百日菊 <i>Zinnia elegans</i> 、黑果黄茅 <i>Heteropogon melanocarpus</i> 、蛛丝毛蓝耳草 <i>Cyanotis arachnoidea</i>	仙人掌 <i>Opuntia dillenii</i> 、白饭树 <i>Flueggea virosa</i> 、薄叶羊蹄甲 <i>Bauhinia glauca</i> subsp. <i>tenuiflora</i>		23.6±8.3	49.2±12.1	
11 霸王鞭灌丛 Form. <i>Euphorbia royleana</i>	NJ、YJ	13	450–990	23.63–25.09	98.86–101.93	23	孔颖草 <i>Bothriochloa pertusa</i> 、野艾蒿 <i>Artemisia lavandulifolia</i>	霸王鞭 <i>Euphorbia royleana</i> 、白饭树 <i>Flueggea virosa</i> 、华西小石积 <i>Osteomeles schwerinae</i>		31.5±14.0	58.4±17.2	
12 清香木灌丛 Form. <i>Pistacia weinmanniifolia</i>	LCJ、NJ、YJ	25	760–1,549	24.31–26.44	98.42–101.45	20	紫马唐 <i>Digitaria violascens</i> 、细裂叶莲蒿 <i>Artemisia gmelinii</i> 、硬秆子草 <i>Capillipedium assimile</i>	清香木 <i>Pistacia weinmanniifolia</i> 、虾子花 <i>Woodfordia fruticosa</i> 、余甘子 <i>Phyllanthus emblica</i>		41.1±15.7	54.3±20.6	
13 车桑子灌丛 Form. <i>Dodonaea viscosa</i>	JSJ、YJ	45	950–1,630	25.03–26.92	100.40–102.92	15	孔颖草 <i>Bothriochloa pertusa</i> 、土瓜狼毒 <i>Euphorbia prolifera</i> 、白灰毛豆 <i>Tephrosia candida</i>	车桑子 <i>Dodonaea viscosa</i> 、滇榄仁 <i>Terminalia franchetii</i>		52.2±20.8	43.1±15.7	
14 光叶山黄麻灌丛 Form. <i>Trema cannabina</i>	JSJ	3	752–1,470	26.28–26.79	100.5–102.38	21	白茅草 <i>Bothriochloa ischaemum</i> 、西南莠草 <i>Themeda hookeri</i> 、硬秆子草 <i>Capillipedium assimile</i>	光叶山黄麻 <i>Trema cannabina</i> 、黄荆 <i>Vitex negundo</i> 、假杜鹃 <i>Barleria cristata</i>		21.6±10	36.8±1.8	
15 狭叶山黄麻灌丛 Form. <i>Trema angustifolia</i>	NPJ、YJ	6	229–1,038	23.05–23.87	102.4–103.49	14	双花草 <i>Dichanthium annulatum</i> 、龙爪茅 <i>Dactyloctenium aegyptium</i>	狭叶山黄麻 <i>Trema angustifolia</i>		50.4±16.2	21.2±11.4	
16 鞍叶羊蹄甲灌丛 Form. <i>Bauhinia brachycarpa</i>	BLJ、DDH、JSJ、LCJ、MJ、NJ、NPJ、YJ、YLJ	682	182–4,060	23.00–33.34	98.42–105.20	28	水莎草 <i>Cyperus serotinus</i> 、地海椒 <i>Physalisstrum sinense</i>	鞍叶羊蹄甲 <i>Bauhinia brachycarpa</i> 、茶条木 <i>Delavaya toxocarpa</i> 、牡荆 <i>Vitex negundo</i> var. <i>cannabifolia</i>		41.5±21.4	34.4±18.6	
17 华西小石积灌丛 Form. <i>Osteomeles schwerinae</i>	JSJ、YJ	23	460–1,620	23.63–26.58	100.40–101.93	19	芸香草 <i>Cymbopogon distans</i> 、细柄草 <i>Capillipedium parviflorum</i> 、孔颖草 <i>Bothriochloa pertusa</i>	华西小石积 <i>Osteomeles schwerinae</i> 、荆条 <i>Vitex negundo</i> var. <i>heterophylla</i>		43.6±20	55.4±16.7	
18 余甘子灌丛 Form. <i>Phyllanthus emblica</i>	JSJ、NJ、YJ	30	720–1,440	25.03–26.46	98.82–101.92	18	西南莠草 <i>Themeda hookeri</i> 、孔颖草 <i>Bothriochloa pertusa</i>	余甘子 <i>Phyllanthus emblica</i> 、车桑子 <i>Dodonaea viscosa</i> 、清香木 <i>Pistacia weinmanni-</i>		31.8±15	17.9±5.5	

群系 Formation	流域 Watershed	样方数 Number of plots	海拔 Elevation (m)	北纬 North latitude (°)	经度 East longitude (°)	种密度 Species density (/100 m ²)	主要物种 Major species			盖度 Cover(mean ± SD) (%)	胸高断面积 Basal area (mean ± SD) (m ²)	
							草本 Herb	灌木 Shrub	乔木 Tree		草本 Herb	灌木 Shrub 乔木 Tree
19 云南山蚂蝗灌丛 Form. <i>Desmodium yunnanense</i>	JSJ	10	1,500–1,600	25.57	102.60–102.65	53	香茶菜 <i>Isodon amethystoides</i> 、 辽东蒿 <i>Artemisia verbenacea</i> 、 云南兔儿风 <i>Ainsliaea yunnanensis</i>	<i>ifolia</i> 云南山蚂蝗 <i>Desmodium yunnanense</i> 、 鞍叶羊蹄甲 <i>Bauhinia brachycarpa</i> 、 毛叶黄杞 <i>Engelhardia spicata</i> var. <i>colebrookeana</i>		7.5±6.2	52.2±10.3	
20 黄荆灌丛 Form. <i>Vitex negundo</i>	BLJ、JSJ、NJ、YJ	56	477–1,330	23.49–32.86	98.42–105.17	17	西藏须芒草 <i>Andropogon munroi</i> 、 牛筋草 <i>Eleusine indica</i> 、 香茶菜 <i>Isodon amethystoides</i>	黄荆 <i>Vitex negundo</i> 、 滇榄仁 <i>Terminalia franchetii</i>		31.1±18.6	60±16.3	
21 细叶黄皮灌丛 Form. <i>Clausena anisum-olens</i>	YJ	4	379–465	23.28–23.78	101.70–102.65	17	牛膝菊 <i>Galinsoga parviflora</i> 、 双花草 <i>Dichanthium annulatum</i> 、 类黍尾稃草 <i>Urochloa panicoides</i>	细叶黄皮 <i>Clausena anisum-olens</i> 、 黄荆 <i>Vitex negundo</i>		67.2±16.9	28.4±14.7	
22 铁橡栎林 Form. <i>Quercus cocciferoides</i>	JSJ、NJ	6	1,386–1,890	25.57–26.54	98.91–102.65	38	五月艾 <i>Artemisia indica</i> 、 头花蓼 <i>Polygonum capitatum</i>	铁仔 <i>Myrsine africana</i> 、 密花荚蒾 <i>Viburnum congestum</i>	铁橡栎 <i>Quercus cocciferoides</i>	4.1±1.1	22.8±2.7	0.5±0.1
23 乌柏林 Form. <i>Triadica sebifera</i>	JSJ、NJ	6	358–1,356	25.55–28.68	98.86–103.87	45	野艾蒿 <i>Artemisia lavandulifolia</i> 、 有芒鸭嘴草 <i>Ischaemum aristatum</i> 、 芒 <i>Miscanthus sinensis</i>	光叶山黄麻 <i>Trema canabina</i>	乌柏 <i>Triadica sebifera</i>	36.6±18.6	59.7±5.9	0.2±0.1
24 云南松疏林 Form. <i>Pinus yunnanensis</i>	DDH、JSJ、LCJ、NJ、NPJ、YJ	44	870–2,590	24.74–29.83	98.58–103.17	29	刺芒野古草 <i>Arundinella setosa</i> 、 柔毛阴山芥 <i>Yinshania henryi</i>	芳香白珠 <i>Gaultheria fragrantissima</i> 、 清香木 <i>Pistacia weinmanniifolia</i>	云南松 <i>Pinus yunnanensis</i>	32.3±18.5	28.4±16.1	0.3±0.1

NJ: 怒江; LCJ: 澜沧江; YJ: 元江; NPJ: 南盘江; JSJ: 金沙江; YLJ: 雅砻江; DDH: 大渡河; MJ: 岷江; BLJ: 白龙江
 NJ, Nujiang River; LCJ, Lancangjiang River; YJ, Yuanjiang River; NPJ, Nanpanjiang River; JSJ, Jinshajiang River; YLJ, Yalongjiang River; DDH, Daduhe River; MJ, Minjiang River; BLJ, Bailongjiang River.