

· 研究报告 ·

# 中国西南干旱河谷植被的区系地理成分与空间分异

刘 晔<sup>1</sup> 朱鑫鑫<sup>2</sup> 沈泽昊<sup>3\*</sup> 孙 航<sup>4\*</sup>

1 (北京大学深圳研究生院, 城市规划与设计学院, 深圳 518055)

2 (信阳师范学院生命科学学院, 河南信阳 464000)

3 (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)

4 (中国科学院昆明植物研究所生物多样性与生物地理学重点实验室, 昆明 650204)

**摘要:** 根据对云南、四川、甘肃三省九条主要河流干旱河谷的植物群落调查数据, 对我国西南干旱河谷维管束植物区系的科、属分布区类型进行划分, 并分析其地理分布格局。结果表明: (1)西南干旱河谷区的植物区系地理成分复杂, 联系广泛, 共包含11个科级和15个属级分布区类型; 总体上, 科、属两级热带/温带成分比例分别为3.06和1.77, 显示了强烈的热带区系亲缘及温带区系的后期影响; 与地中海-西亚至中亚植物区系存在一定联系; 其东亚成分和中国特有成分比例低于亚热带区系平均水平, 且中国-喜马拉雅成分比例高于中国-日本成分。(2)从西南向东北方向, 植物区系的热带性质逐渐减弱, 温带性质逐渐增强; 科、属水平区系成分与古地中海-中亚区系的相似性逐渐增强; 东亚和中国特有成分比例增加; 南盘江与元江的干旱河谷植物区系之间存在中国-日本和中国-喜马拉雅成分的分界线。(3)根据干旱河谷植物属区系成分的比例构成将怒江、澜沧江和元江与其他流域分开, 显示了长江溯源侵蚀和水系合并对西南诸河流植物区系发育的影响。

**关键词:** 中国西南干旱河谷; 维管束植物; 区系成分; 相似性; 空间分异

## Flora compositions and spatial differentiations of vegetation in dry valleys of Southwest China

Ye Liu<sup>1</sup>, Xinxin Zhu<sup>2</sup>, Zehao Shen<sup>3\*</sup>, Hang Sun<sup>4\*</sup>

1 School of Urban Planning and Design, Shenzhen Graduate School, Peking University, Shenzhen 518055

2 College of Life Science, Xinyang Normal University, Xinyang, Henan 464000

3 Department of Ecology, College of Urban and Environmental Sciences, the Key Laboratory for Earth Surface Processes of the Ministry of Education, Peking University, Beijing 100871

4 Key Laboratory of Plant Diversity and Biogeography of East Asia, Kunming Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650204

**Abstract:** Based on plant community data collected from dry valleys of nine major rivers in Gansu, Sichuan and Yunnan provinces of Southwest China, we divided the families and genera of the vascular plants into geographic elements of Chinese flora, and analyzed the spatial patterns. We found the flora of dry valleys of Southwest China revealed a complex composition of geographic elements with wide floristic connections, including 11 family area-types and 15 genera area-types. The ratio of tropical versus temperate floristic elements was 3.06 at the family level, and 1.77 at the genus level, showing a distinctive affinity for tropical floras, and later imprints of temperate floras. A clear floristic linkage existed between the dry valley floras and the Mediterranean, Western- and Central-Asian floras. The percentages of East Asian elements and endemic Chinese elements were below the average value in the flora found for the subtropical region in China. The Sino-Himalayan element had a value higher than that for the Sino-Japan element in the dry valley floras. The floristic affinity to the tropics weakened while affinity to temperate flora intensified moving in the region from the southwest to northeast. Linkages with the Mediterranean-Central Asian floras, and also the percentage of East Asian elements and endemic Chinese elements increased in the same direction. A boundary between the Sino-Japan type and Sino-Himalayan type was detected between the dry valley floras of Nanpan-

收稿日期: 2015-09-11; 接受日期: 2016-02-02

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)

\* 共同通讯作者 Co-authors for correspondence. E-mail: shzh@urban.pku.edu.cn; hsun@mail.kib.ac.cn

jiang River and Yuanjiang River. With respect to the genus level floristic composition of geographic elements, Nujiang River, Lancangjiang River and Yuanjiang River were separated from the other rivers, which are all upper branches of the Yangtze River. This departure indicated the impacts of the evolution of the Yangtze River, which were characterized by headward erosion, river confluences, on the characteristics of modern flora in dry valleys.

**Key words:** dry valleys of Southwest China; vascular plants; floristic elements; similarity; spatial differentiation

现代植物区系的空间结构是植物对区域环境,尤其是气候条件长期适应的结果,可以反映植物类群的扩散、迁移和分布情况(王荷生, 1997), 对其进行研究不仅有助于了解植物群落的特征、性质、起源和分布(宋永昌, 2001), 还是植物群落分类、植被分区和植物地理研究的基础, 并且可为制定生物多样性保护对策、可持续地利用植物资源提供重要参考(Vetaas & Grytnes, 2002)。植物科的分布型可以反映相对古老的区系联系, 代表植物演化的区域共性。植物属的分类特征相对稳定, 同属种通常起源相同、进化趋势类似, 因此属的分布型可以反映更加一致的演化历程和区系发育环境(彭华和吴征镒, 1997; 吴征镒等, 2011; 应俊生和陈梦玲, 2011)。

西南干旱河谷的植物区系具有特定的来源组成, 并且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), 物种组成具有很显著的特有性(金振洲, 2002)。其中干热河谷以热带性质的科、属、种为主(金振洲和欧晓昆, 2000), 典型植被呈稀树草原外貌; 干暖河谷以热带性质的科、属占优势, 发育了与地中海沿岸的马基植被(Maquis)(河谷型马基植被)相似的外貌结构(张荣祖, 1992; 金振洲和欧晓昆, 2000); 干温河谷植物区系中温带成分的比例高于热带成分, 同时掺杂较多的高山(喜马拉雅)-北极成分(张荣祖, 1992)。

对我国西南地区干旱河谷的植物研究始于20世纪50年代; 80年代后, 《中国植被》、《四川植被》、《云南植被》等先后总结了干旱河谷植被的类型、结构及物种组成, 局部研究主要涉及植被、植物区系以及古植物学等方面(朱华, 1990; 曹永恒和金振洲, 1993; 金振洲和欧晓昆, 2000; 孙航和李志敏, 2003; Zhang et al, 2011), 特别是金振洲等(1995)和金振洲(2002)对川西和云南的干旱河谷植物区系地理、植被分类和地理进行了系统总结。然而, 迄今未见对我国西南各干旱河谷植物区系的汇总分析,

因此其整体特征、结构成分与地理分异还不清楚。

本文在对中国西南地区九大江河干旱河谷段的植被进行全面群落学调查的基础上, 进一步汇集有关文献中的植物分布数据, 首次对该区域干旱河谷植物区系的科、属地理成分的组成、分布及各流域之间的相关性进行分析、比较, 探讨西南干旱河谷植物区系的性质、组成特征和空间分化格局, 以期对其形成发育的背景、对外联系, 包括各大河流之间的关联有所反映。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区域概况

我国亚热带干旱河谷, 主要分布在横断山区范围内的几条大江河流域, 包括南盘江、元江、怒江、澜沧江、金沙江、雅砻江、大渡河、岷江以及白龙江等流域的局部河谷段(张荣祖, 1992; 包维楷和王春明, 2000; 明庆忠, 2006; 邱祖青等, 2007), 具有独特的气候、地貌和植被组合特征。区域地势整体北高南低、各条大江河谷底部的海拔也自北向南降低。具有干旱气候的河谷段随河道走向不规则分布, 一般只是在河谷底至两侧山地的一定海拔范围内, 总面积较小(金振洲和欧晓昆, 2000; 金振洲, 2002)。总体上, 西南干旱河谷的温度高、年降雨量低、蒸发量大, 与垂直带的高海拔地区及同一纬度东部地区的气候特征不同(张荣祖, 1992), 且不同河谷气候也有较大差异(张荣祖, 1992; 金振洲, 1998, 1999)。其中, 半湿润-半干旱河谷出现在西南纵向岭谷区的南部边缘与东部, 半干旱-干旱河谷出现在滇西北与川西南的三江上段。

干热河谷植被普遍具有扭曲、变矮、叶变小、革质、多毛或刺的形态特征, 以适应干旱气候。“稀树灌木草丛”以旱生禾草草丛为主构成大片草地植被, 并散生稀疏的乔木和灌木, 并有少数的肉质多刺灌丛(金振洲和欧晓昆, 2000; 刘晔等, 2016)。干暖河谷植被多为小叶、硬叶、多刺、疏生、矮生的

灌丛, 常成半荒漠状外貌, 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; 刘晔等, 2016)。干温河谷的主要植被类型为干旱小叶灌丛, 以成丛散生的阔叶灌丛为主, 草本植物稀少(刘伦辉, 1989; 张荣祖, 1992; 刘晔等, 2016)。

针对地质历史时期金沙江从石鼓被河流袭夺、与元江分离这一历史事件(Barbour, 1936; 任美镠等, 1959; Clark et al, 2004), 将金沙江流域干旱河谷以石鼓为界, 分为金沙江上段和金沙江下段。

### 1.2 样地设置与调查

2009年7月至2013年8月, 分别对云南、四川、甘肃境内的怒江、澜沧江、元江、南盘江、金沙江、雅砻江、大渡河、岷江、白龙江流域的干旱河谷进行野外样方调查, 共设置采样点275个, 调查了面积100 m<sup>2</sup> (10 m × 10 m)的植被样方993个, 采样区域基本覆盖了西南地区亚热带干旱河谷的分布范围(图1)。

植被调查采样尽量选取人为干扰不明显的地点。采样点总体上沿江设置, 样点之间的距离10 km左右。根据生境条件在每个样点设置2-6个样方。调查样方中草本、灌木的种类、多度、盖度, 以及乔木的种类、胸径、株高。测量记录样方经纬度和海拔信息, 以及坡度、坡向、坡位等环境因子。

在植被调查过程中, 野外采集植物标本6,000余份, 主要依据《中国植物志》、《云南植物志》和

《四川植物志》完成分类鉴定, 共记录2,340个物种。为了充分反映干旱河谷植物区系的构成及其分布状况, 本研究还收录已出版的云南和四川境内干旱河谷植物区系的研究成果, 包括金振洲和欧晓昆(2000)、金振洲(2002)、欧晓昆等(2006)及朱鑫鑫(2014)中的数据, 最终参照《中国植物志》(中国植物志编辑委员会, 1959-2004)统一拉丁名, 建立物种数据库。共包含分布于西南九大江河干旱河谷中的186科1,016属2,794种维管束植物(表1)。

### 1.3 数据处理

#### 1.3.1 植物区系地理成分分析

根据吴征镒等(2011)对世界和中国种子植物区系地理成分的划分, 以及《中国植物志第一卷》(吴征镒和陈心启, 2004)中对蕨类和石松类植物区系组成的划分, 对西南干旱河谷分布的维管束植物科、属进行分布区类型划分(附录1); 参照沈泽昊和张新时(2000), 将各分布区类型划分为世界分布成分、热带成分、北方温带成分、古地中海成分和东亚成分五大类, 分别在科、属水平上作进一步统计分析。

#### 1.3.2 植物区系地理成分相似性

选择Jaccard指数( $C_j$ )比较不同流域干旱河谷植物区系构成的相似性。计算公式是:

$$C_j = c / (a + b - c) \tag{1}$$

其中,  $c$ 表示两个样本共有的物种数,  $a$ 和 $b$ 分别表示样本A和样本B的物种数。  $C_j$ 的取值范围在0-1, 值

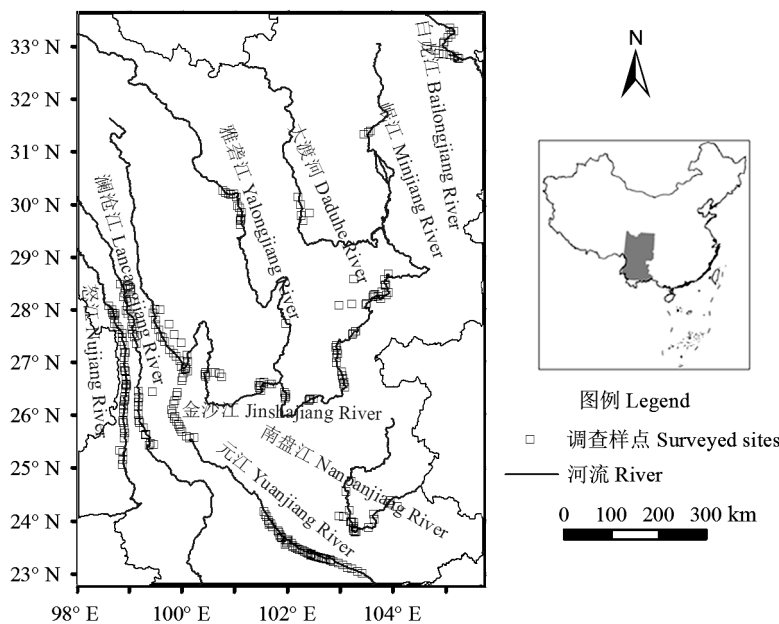


图1 西南九个流域干旱河谷的植物调查采样点分布(中国全图审图号GS(2008)1157号)  
Fig. 1 The distribution of sampling sites for the vegetation investigation in dry valleys of 9 rivers of Southwest China

表1 中国西南各流域干旱河谷植被的样方分布

Table 1 The plot distribution of vascular plants in dry valleys of Southwest China

流域 Valley	样方数 Number of plots	海拔 Elevation (m)	东经 East longitude (°)	北纬 North latitude (°)
白龙江 Bailongjiang River	136	762–1,016	104.6–105.21	32.76–33.35
大渡河 Daduhe River	47	1,200–1,432	102.17–102.38	29.64–30.14
金沙江 Jinshajiang River	563	358–3,298	99.17–103.88	25.56–28.69
澜沧江 Lancangjiang River	129	1,010–4,297	98.8–100.22	24.82–28.48
岷江 Minjiang River	24	1,710–2,270	103.42–103.54	31.33–31.4
南盘江 Nanpanjiang River	38	952–1,787	102.94–104.04	23.78–24.74
怒江 Nujiang River	385	680–1,999	98.42–98.91	24.65–28.07
雅砻江 Yalongjiang River	62	1,236–2,736	100.74–101.93	27.73–30.27
元江 Yuanjiang River	228	182–1,530	100.43–103.38	23.01–25.17

越大, 相似性越高。

## 2 结果

### 2.1 植物科属组成

所记录的西南干旱河谷分布的维管束植物共计186科1,016属2,794种, 包括蕨类和石松类植物29科56属165种、裸子植物4科12属20种、被子植物153科948属2,609种。其中, 种类最多的前四个科依次为菊科、禾本科、蝶形花科、蔷薇科, 共占总属数的25.69%, 总种数的26.38%; 另外, 唇形科、毛茛科、大戟科、茜草科也包含较多的种、属, 共占总属数的8.66%和总种数的11.20%。有15个属的物种数 >15, 分别为铁线莲属 (*Clematis*)、蒿属 (*Artemisia*)、悬钩子属 (*Rubus*)、栒子属 (*Cotoneaster*)、大戟属 (*Euphorbia*)、薹草属 (*Carex*)、蔷薇属 (*Rosa*)、柳属 (*Salix*)、栎属 (*Quercus*)、木蓝属 (*Indigofera*)、唐松草属 (*Thalictrum*)、榕属 (*Ficus*)、蓼属 (*Polygonum*)、薯蓣属 (*Dioscorea*)、堇菜属 (*Viola*), 占总种数的11.48%。总体上, 本区维管束植物优势科、优势属明显, 另有36个单属单种科, 520个单种属, 分别占本区总科数的19.35%, 总属数的51.18%, 反映了西南干旱河谷地区相对古老和复杂的植物区系组成。

不同流域由于干旱河谷的范围大小不同(表1), 科、属、种数差别较大(表2), 但菊科、蝶形花科、禾本科在各河流区系中均为种类最多的科(表2)。

### 2.2 植物区系地理成分构成

#### 2.2.1 科的区系成分构成与分布

记录的全部186科维管束植物属于11个分布区类型, 29科蕨类和石松类植物属于6个分布区类型,

4科裸子植物属于2个分布区类型, 153科被子植物属于11个分布区类型(表3)。其中包括世界分布58科, 占总数的31.2%。余下128科中不同地理成分占除世界分布科外总科数的百分比从大到小分别为: 泛热带分布(54.7%)、北温带分布(19.5%)、东亚和热带美洲间断分布(9.4%)、东亚和北美洲间断分布(3.9%)、热带亚洲至热带大洋洲分布(3.9%)、旧世界热带分布(3.1%), 其他类型仅含1–2科。温带分布(分布型8–10)合计31科, 占除世界分布科外总科数的24.2%, 而热带分布(分布型2–7)有95科, 占除世界分布科外总科数的74.2%, 近于前者3倍, 反映了干旱河谷植物区系较强的热带亲缘。

各流域的科分布类型组成, 均以泛热带分布为主, 其次为北温带分布, 还有一定数量的东亚(热带、亚热带)和热带美洲间断分布; 除主体的热带成分和温带成分, 大渡河、金沙江下段、澜沧江和怒江还有东亚分布(表3)。

#### 2.2.2 属的植物区系成分构成与分布

记录到的全部1,016属维管束植物属于中国植物区系的全部15个分布区类型, 56属蕨类和石松类植物属于11个分布区类型, 12属裸子植物属于6个分布区类型, 948属被子植物属于15个分布区类型(表4)。其中世界分布有71属, 占总属数的7.0%。余下945属中不同地理成分占除世界分布属外总属数的百分比从大到小的顺序为: 泛热带分布(22.2%)、北温带分布(16.0%)、热带亚洲(印度–马来西亚, 太平洋诸岛)分布(9.6%)、旧世界热带分布(8.1%)、旧世界温带分布(7.6%)、热带亚洲至热带大洋洲分布(6.2%)、东亚和北美洲间断分布(5.4%)、热带亚洲至热带非洲分布(5.0%)、热带亚洲和热带美洲间断

表2 中国西南各流域干旱河谷植被的主要维管束植物科组成  
Table 2 The composition of dominant families of vascular plants in dry valleys of Southwest China

流域 Valley	科数 Number of families	属数 Number of genera	种数 Number of species	种类最多的科 Top families of vascular plants		单属单种科数 Families with single genus and single species	
				科 Family	百分比 Percentage %		
					属 Genus		种 Species
白龙江 Bailongjiang River	63	125	153	禾本科、菊科、蔷薇科、蝶形花科 Gramineae, Compositae, Rosaceae, Fabaceae	32.80	37.25	38
大渡河 Daduhe River	80	174	239	菊科、禾本科、蝶形花科、百合科 Compositae, Gramineae, Fabaceae, Liliaceae	31.61	32.22	33
金沙江下段 Jinshajiang River Downstream	145	597	1,174	菊科、禾本科、蝶形花科、蔷薇科 Compositae, Gramineae, Fabaceae, Rosaceae	29.65	29.56	40
金沙江上段 Jinshajiang River Upstream	118	401	714	菊科、禾本科、蝶形花科、蔷薇科 Compositae, Gramineae, Fabaceae, Rosaceae	31.42	33.19	40
澜沧江 Lancangjiang River	138	465	882	菊科、禾本科、蝶形花科、蔷薇科 Compositae, Gramineae, Fabaceae, Rosaceae	28.17	31.41	37
岷江 Minjiang River	39	82	99	菊科、蔷薇科、蝶形花科、禾本科 Compositae, Rosaceae, Fabaceae, Gramineae	37.80	41.41	19
南盘江 Nanpanjiang River	66	163	206	禾本科、菊科、蝶形花科、大戟科 Gramineae, Compositae, Fabaceae, Euphorbiaceae	37.42	37.86	36
怒江 Nujiang River	161	621	1,176	禾本科、菊科、蝶形花科、唇形科 Gramineae, Compositae, Fabaceae, Labiatae	27.05	26.02	44
雅砻江 Yalongjiang River	73	164	240	菊科、蝶形花科、唇形科、蔷薇科 Compositae, Fabaceae, Labiatae, Rosaceae	29.27	31.67	35
元江 Yuanjiang River	89	338	496	禾本科、蝶形花科、菊科、大戟科 Gramineae, Fabaceae, Compositae, Euphorbiaceae	36.09	40.32	30

分布(4.2%)、东亚(东喜马拉雅-日本)分布(3.9%)、中国-喜马拉雅分布(3.7%)、温带亚洲分布(2.3%)、中国-日本分布(2.1%)、中国特有分布(1.7%)、地中海区、西亚至中亚分布(1.5%)、中亚分布(0.3%)(表4)。热带分布属(分布型2-7)有524属, 占总属数的55.4%; 温带分布属(分布型8-13)为313属, 占33.1%, 其中北方温带成分的属(分布型8-11)为296属, 占总数的31.3%, 古地中海成分的属(分布型12-13)为17属, 占1.8%, 东亚成分的属(分布型14及其2个亚型, 15)为108属, 占11.4%。

各流域干旱河谷种子植物区系的属级区系成分均以泛热带分布和北方温带分布为主, 而温带成分所占比例在属级远高于科级。此外, 岷江无热带亚洲和热带美洲间断分布分布型; 南盘江、怒江、元江不存在代表温带荒漠成分的中亚分布型; 南盘江无中国-喜马拉雅分布型, 岷江、雅砻江没有中国-日本分布型; 而雅砻江无中国特有分布属。其余12个分布型在西南干旱河谷各江段均有分布(表4)。

### 2.3 古地中海成分的分布比较

科水平没有古地中海成分的分布, 而属水平古

地中海成分的比例为1.8%, 包括17个属2个分布型, 其中木犀榄属(*Olea*)、牻牛儿苗属(*Erodium*)、小蓬属(*Nanophyton*)等14个属为地中海区-西亚至中亚分布, 紫菀木属(*Asterothamnus*)、对节刺属(*Horaninovia*)、角蒿属(*Incarvillea*)等3个属为中亚分布。

不同流域的古地中海成分比例从大到小依次为岷江、白龙江、大渡河、雅砻江、金沙江上段-金沙江下段-澜沧江、怒江、元江、南盘江(表4)。其中: 地中海区-西亚至中亚分布的比例从大到小依次为白龙江、大渡河、澜沧江-怒江、金沙江上段-金沙江下段-岷江-元江、雅砻江、南盘江; 中亚分布的比例从大到小依次为岷江、白龙江、雅砻江、大渡河、金沙江下段、金沙江上段-澜沧江(表4)。

从区内的西南向东北方向, 古地中海成分的比例逐渐增加, 表明与古地中海的联系逐渐增强; 地中海区-西亚至中亚分布, 以及中亚分布也有类似的格局。

### 2.4 热带成分/温带成分的分布比较

在整个研究区域, 植物区系中科级的热带成分与温带成分比值为3.06, 不同流域从大到小依次为

表3 中国西南九大流域干旱河谷维管束植物科的区系地理成分构成  
Table 3 The floristic elements composition of vascular plant family in dry valleys of nine major rivers of Southwest China

分布区类型 Area types	科数 Number of family		科地理成分的百分比构成 Percentage composition of flora components of family (%)												
	蕨类和石松 类植物 Ferns & Lycophytes	裸子植物 Gymno- sperms	被子植物 Angios- perms	总计 Total	白龙江 Bailong- jiang River	大渡河 Daduhe River	金沙江下段 Jinshajiang River Down- stream	金沙江上段 Jinshajiang River Upstream	澜沧江 Lan- jiang River	岷江 Min- jiang River	南盘江 Nan- panji- ang River	怒江 Nuji- ang River	雅砻江 Ya- long- jiang River	元江 Yuan- jiang River	总计 Total
1. 世界分布 Widespread	14		44	58	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
热带成分 Tropical elements	15	1	79	95	71.9	70.0	75.5	71.0	71.3	55.6	86.0	75.5	70.3	83.0	74.2
2. 泛热带分布 Pan-tropic	11		59	70	65.6	55.0	57.4	55.1	52.9	38.9	72.1	57.3	56.8	69.8	54.7
3. 东亚(热带、亚热带)和热带美洲间断分布 Trop. & Subtrop. E. Asia & Trop. Amer. Disjuncted	1		11	12	6.3	10.0	9.6	8.7	10.3	11.1	7.0	10.0	8.1	9.4	9.4
4. 旧世界热带分布 Old World Tropics			4	4	0.0	0.0	2.1	1.4	3.4	0.0	2.3	2.7	0.0	1.9	3.1
5. 热带亚洲至热带大洋洲分布 Trop. Asia & Trop. Australasia	1	1	3	5	0.0	2.5	3.2	2.9	2.3	5.6	2.3	2.7	5.4	1.9	3.9
6. 热带亚洲至热带非洲分布 Trop. Asia to Trop. Africa	1		1	2	0.0	2.5	2.1	1.4	1.1	0.0	2.3	0.9	0.0	0.0	1.6
7. 热带亚洲(热带东南亚至印度-马来、太平洋群岛)分布 Trop. Asia (Trop. SE. Asia & Indo-Malesia & Trop. S. & SW. Pacific islands)	1		1	2	0.0	0.0	1.1	1.4	1.1	0.0	0.0	1.8	0.0	0.0	1.6
北方温带成分 Temperate elements	3	28	28.1	31	28.1	27.5	23.4	29.0	26.4	44.4	14.0	21.8	29.7	17.0	24.2
8. 北温带分布 North Temperate	3	22	28.1	25	28.1	27.5	20.2	24.6	20.7	44.4	14.0	16.4	27.0	15.1	19.5
9. 东亚和北美洲间断分布 E. Asia & N. Amer. Disjuncted		5	0.0	5	0.0	0.0	2.1	2.9	4.6	0.0	0.0	4.5	0.0	1.9	3.9
10. 旧世界温带分布 Old World Temperate		1	0.0	1	0.0	0.0	1.1	1.4	1.1	0.0	0.0	0.9	2.7	0.0	0.8
东亚成分 East Asia elements	2	2	0.0	2	0.0	2.5	1.1	0.0	2.3	0.0	0.0	1.8	0.0	0.0	1.6
14. 东亚(东喜马拉雅-日本)分布 East Asia (E. Himalaya & Japan)	2	2	0.0	2	0.0	2.5	1.1	0.0	2.3	0.0	0.0	1.8	0.0	0.0	1.6
总计 Total	29	4	153	186	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

表4 中国西南九大流域干旱河谷维管束植物属的区系地理成分构成  
Table 4 The floristic elements composition of vascular plant genera in dry valleys of nine major rivers of Southwest China

分布区类型 Area types	属数 Number of genus		属地理成分百分比构成 Percentage composition of flora components of genera (%)											
	蕨类和石松类植物 Ferns & Lycophytes	被子植物 Gymno-sperms	白龙江 Bailongjiang River	大渡河 Daduhe River	金沙江下段 Jinshajiang River Downstream	金沙江上段 Jinshajiang River Upstream	澜沧江 Lancangjiang River	岷江 Minjiang River	南盘江 Napanjiang River	怒江 Nujiang River	雅砻江 Yalongjiang River	元江 Yuanjiang River	总计 Total	
1. 世界分布 Widespread	14	57	71	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
热带成分 Tropical elements	30	1 493	524	41.7	47.9	58.5	43.1	48.6	23.9	83.0	62.6	37.9	76.2	55.4
2. 泛热带分布 Pan-tropic	19	191	210	24.3	24.7	26.5	20.0	22.0	14.9	26.1	27.1	18.2	38.8	22.2
3. 热带亚洲和热带美洲间断分布 Trop. & Subtrop. E. Asia & (S.) Trop. Amer. Disjuncted	4	40	40	1.0	2.1	4.4	4.3	3.6	0.0	35.8	4.4	1.5	4.9	4.2
4. 旧世界热带分布 Old World Tropics	4	73	77	4.9	6.2	10	6.3	6.3	3.0	7.8	9.3	4.5	11.4	8.1
5. 热带亚洲至热带大洋洲分布 Trop. Asia to Trop. Australasia	2	1	56	59	2.9	4.1	4.6	4.1	1.5	4.1	6.5	6.1	6.2	6.2
6. 热带亚洲至热带非洲分布 Trop. Asia to Trop. Africa	4	43	47	3.9	6.2	5	2.9	4.6	1.5	3.2	4.4	4.5	6.5	5.0
7. 热带亚洲(印度-马来西亚, 太平洋诸岛)分布 Trop. Asia (Trop. SE. Asia & Indo-Malesia & Trop. S. & SW. Pacific islands)	1	90	91	4.9	4.8	8.1	5.1	8.0	3.0	6.0	10.9	3.0	8.5	9.6
北方温带成分 Temperate elements	6	7 283	296	39.8	38.4	30.7	45.7	40.3	61.2	14.7	28.6	51.5	16.6	31.3
8. 北温带分布 North Temperate	2	6 143	151	26.2	26.0	16.1	24.9	23.4	38.8	7.8	14.8	29.5	7.5	16.0
9. 东亚和北美洲间断分布 E. Asia & N. Amer. Disjuncted	1	51	51	3.9	6.2	5.4	6.3	6.0	1.5	3.7	6.0	5.3	3.3	5.4
10. 旧世界温带分布 Old World Temperate	1	70	72	6.8	4.8	7.4	12.3	8.5	14.9	2.8	6.7	13.6	4.6	7.6
11. 温带亚洲分布 Temp. Asia	3	19	22	2.9	1.4	1.9	2.3	2.4	6.0	0.5	1.2	3.0	1.3	2.3
古地中海成分 Mediterranean elements	17	17	17	4.9	2.7	1.7	1.7	1.7	6.0	0.5	1.4	2.3	1.3	1.8
12. 地中海区、西亚至中亚分布 Mediterranean, W. Asia & C. Asia	14	14	14	2.9	2.1	1.3	1.4	1.4	1.5	0.5	1.4	0.8	1.3	1.5
13. 中亚分布 C. Asia	3	3	3	1.9	0.7	0.4	0.3	0.2	4.5	0.0	0.0	1.5	0.0	0.3
东亚成分 East Asia elements	6	4 98	108	13.6	11.0	9.1	9.4	9.4	9.0	1.8	7.4	8.3	5.9	11.4
14. 东亚(东喜马拉雅-日本)分布 East Asia (E. Himalaya & Japan)	2	35	37	9.7	5.5	2.8	4.0	4.3	3.0	0.9	3.3	6.1	3.9	3.9
14(SH). 中国-喜马拉雅(SH)分布 Sino-Himalaya	3	2	30	35	1.9	3.4	2.6	2.9	3.0	0.0	1.8	2.3	1.3	3.7
14(S). 中国-日本(SJ)分布 Sino-Japan	1	19	20	1.0	1.4	1.9	1.4	1.4	0.0	0.5	1.1	0.0	0.3	2.1
15. 中国特有分布 Endemic to China	1	14	16	1.0	0.7	1.3	1.4	0.7	3.0	0.5	1.2	0.0	0.3	1.7
总计 Total	56	12 948	1,016	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

表5 西南各流域干旱河谷维管束植物科、属水平热带成分与温带成分的比值

Table 5 Tropical / temperate floristic elements ratio of vascular plants at family and genus level in dry valleys of Southwest China

分类等级 Taxonomic level	白龙江 Bailongjiang River	大渡河 Daduhe River	金沙江下段 Jinshajiang River Downstream	金沙江上段 Jinshajiang River Upstream	澜沧江 Lancangjiang River	岷江 Minjiang River	南盘江 Nanpanjiang River	怒江 Nujiang River	雅砻江 Yalongjiang River	元江 Yuanjiang River
科 Family	2.56	2.55	3.23	2.45	2.70	1.25	6.17	3.46	2.36	4.89
属 Genus	1.05	1.25	1.90	0.94	1.20	0.39	5.66	2.18	0.74	4.59

南盘江、元江、怒江、金沙江下段、澜沧江、白龙江、大渡河、金沙江上段、雅砻江、岷江(表5), 大致反映了纬度对热带和温带区系成分分布的影响。

属级植物区系热带成分与温带成分的比值为1.77, 反映了温带成分的影响在区系发育近期增强。不同流域比值从大到小依次为南盘江、元江、怒江、金沙江下段、大渡河、澜沧江、白龙江、金沙江上段、雅砻江、岷江(表5)。从西南向东北, 以及随着河谷平均海拔的上升, 热带成分与温带成分的比值逐渐减小, 热带性质逐渐减弱, 温带性质逐渐增强。

### 2.5 东亚成分的分布比较

科水平东亚成分的比例为1.6%, 仅怒江、澜沧江、金沙江下段和大渡河4个流域有东亚成分的分布, 该比例从大到小依次为澜沧江、大渡河、怒江、金沙江下段(表3)。

属水平东亚成分的比例为11.4%, 不同流域比例从大到小依次为白龙江、大渡河、澜沧江、金沙江上段-金沙江下段、岷江、怒江、雅砻江、元江、南盘江。其中中国-喜马拉雅分布的比例从大到小依次为大渡河、金沙江下段、澜沧江、岷江、金沙江上段、雅砻江、白龙江-怒江、元江, 在南盘江流域没有分布; 中国-日本分布的比例从大到小依次

为金沙江下段、澜沧江、金沙江上段、大渡河、怒江、白龙江、南盘江、元江, 而在岷江和雅砻江流域没有分布; 中国特有分布的比例从大到小依次为岷江、金沙江上段-金沙江下段、怒江、白龙江、大渡河-澜沧江、南盘江、元江, 雅砻江流域没有中国特有属的分布(表4)。

因此, 从西南向东北, 东亚成分的比例逐渐增加, 与东亚的联系逐渐增强; 除南盘江外, 其余9个流域干旱河谷的植物区系与喜马拉雅地区的联系均高于与日本的联系, 且中心区域与喜马拉雅和日本的联系高于周边区域。

### 2.6 不同流域植物区系组成相似性

综上所述, 西南各流域干旱河谷植物区系成分呈现了西南-东北方向的空间梯度分异。其区系成分组成相似性也表现出类似的空间格局(图2)。

科水平上(图2a), 10个流域首先分为2组: 位于西南部的怒江、元江和澜沧江河谷为一组; 另一组中, 雅砻江、大渡河、白龙江、南盘江相似性较高, 与金沙江(含上, 下段)河谷的相似性较低, 与岷江的相似性更低。同样, 在属水平上(图2b), 西南部的元江、怒江、澜沧江和金沙江干旱河谷区系成分分为一组, 其中元江更为特殊; 而甘肃、四川境内的其他河流为另一组。

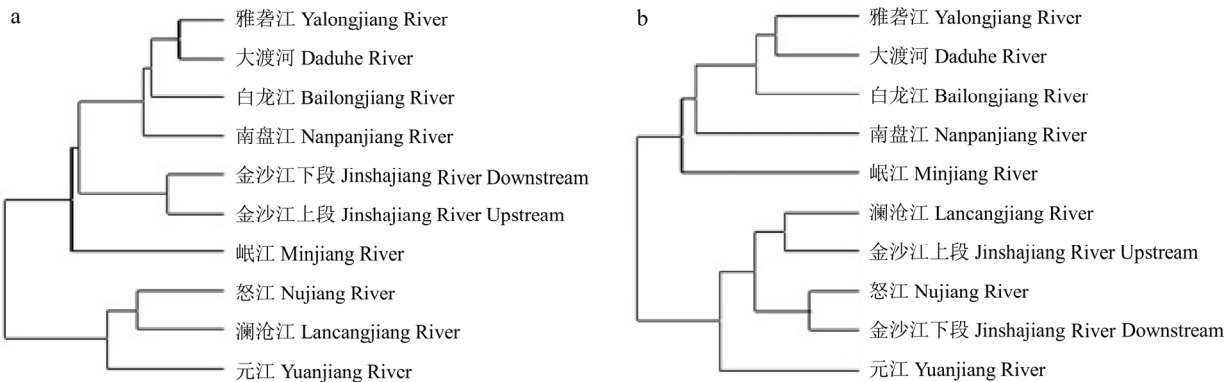


图2 中国西南不同流域干旱河谷的植物区系成分相似性。a: 科区系, b: 属区系。

Fig. 2 The similarity of flora types among dry valleys at family and genus level. a, family flora; b, genus flora.



### 3 讨论

中国亚热带地区的植物区系以泛热带和北温带分布的地理成分为主, 相对全国来说是东亚区系的核心地段, 特有性强(沈泽昊和张新时, 2000; 陈卫娟, 2006); 而中国西南亚热带地区的山体为温带性质, 以温带成分为主, 其次为东亚分布和以泛热带为主的热带成分, 热带成分随海拔上升而减少, 温带成分随海拔上升而增加(沈泽昊等, 2004; 伍杰等, 2012)。

干旱河谷位于我国西南亚热带地区的河谷低地, 植物区系成分主要为泛热带分布、北温带分布、热带亚洲分布, 以热带成分为主, 其次是温带成分, 并有一定的东亚成分和少数的古地中海成分, 中国特有属16属, 占中国种子植物特有分布属239属(吴征镒等, 2011)的7%。从科到属的区系地理成分构成中, 温带成分显著增加, 体现了热带向温带过渡的区系特征, 与我国亚热带植物区系的性质(陈卫娟, 2006; 沈泽昊和张新时, 2000)基本一致, 但由于干旱河谷特殊的环境条件, 其东亚成分的比例很小, 特有度低于亚热带区域的平均水平, 反映了本区植物区系的交汇过渡性质, 而特有性在各流域的差异, 说明了各流域古老性和孤立性程度的不同(应俊生和张志松, 1985; 苏志尧, 1999)。

东亚成分中, 除南盘江外, 其他各流域均为中国-喜马拉雅分布多于中国-日本分布, 表明本区与喜马拉雅植物区系有更近的亲缘, 并且这两个变型的总和明显超过了典型东亚成分, 说明东亚成分在元江与南盘江之间存在显著的过渡性, 该结果很好地支持了“田中线”假说(Tanaka, 1954; 李锡文和李捷, 1992; Li & Li, 1997), 表明红河断裂带对云南植物地理的影响在干旱河谷植物区系的分化中同样明显, 与针对云南植物区系分异的早期相关结果一致(朱华和阎丽春, 2003)。

本区与古地中海地区的联系共有17属, 其中与地中海、西亚等地联系的有14属, 与中亚联系的仅有3属, 反映了其与古地中海, 特别是地中海-西亚地区植物区系的渊源, 但这一联系并不突出。与中亚地区的区系联系很弱, 这与喜马拉雅山脉的隆起, 以及青藏高原的旱化和寒化, 导致两者所处环

境在水热方面的差异很大有关(朱鑫鑫, 2014)。沈泽昊和张新时(2000)统计了我国亚热带76个区域植物区系的属级地理成分构成; 地中海区, 西亚至中亚成分所占比例的平均值为0.82%; 中亚成分比例的均值为0.21%。相比而言, 西南干旱河谷植物区系中, 南盘江和雅砻江的地中海、西亚至中亚成分的百分比低于亚热带区域平均值, 澜沧江、怒江、元江和南盘江的中亚成分低于区域平均值。显示古地中海植物区系对当前西南干旱河谷植物区系的影响主要保留在区内偏东北部, 而非目前西南季风影响强烈的西南部分。

以流域为单位的植物区系组成相似性主要呈现了西南和东北的分化。从西南向东北, 热带性质逐渐减弱, 温带性质逐渐增强, 且与古地中海和东亚区系的联系逐渐增强, 特有性逐渐增加, 这一空间分异格局既可联系到水热条件的梯度差异(刘晔, 2015), 也应与河流发育的历史过程有关。青藏高原隆升以后, 长江溯源侵蚀, 导致河流袭夺自东向西的发生(崔之久等, 1998; 杨达源等, 2008), 嘉陵江、岷江、金沙江先后被纳入长江流域体系, 应对其上游各支流干旱河谷的植物区系构成产生深刻影响(张体操, 2010; Zhang et al, 2011; 朱鑫鑫, 2014), 并使之与迄今仍在长江流域以外的怒江、澜沧江和元江(包括其干旱河谷段)的植物区系保持更大的差异。

目前, 关于西南诸河流的干旱河谷缺乏全面的植物区系调查资料。本文基于植物群落的样方调查法, 对各干旱河谷植被进行了系统地植物采集调查, 并综合了部分干旱河谷的植物区系调查数据, 基于一个不完整但具代表性的物种样本完成相关分析。为了降低研究结果的不确定性, 我们针对植物科、属水平进行区系分析。今后我们将在进一步完善植物区系分布数据的基础上, 深化相关研究。

致谢: 衷心感谢北京大学生态系沈利峰、王韬、张婉君、秦思雨、李鹏、杨健、许玥、应凌霄等同学在野外调查中的付出! 衷心感谢赵子恩先生、石松林博士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

陈卫娟 (2006) 中亚热带常绿阔叶林植物区系地理研究. 华东师范大学硕士学位论文, 上海.

- 江上游山地生态系统的退化机制. *山地学报*, 18, 57–62.]
- Barbour GB (1936) Physiographic history of the Yangtze. *Geographical Journal*, 87, 17–32.
- Cao YH, Jin ZZ (1993) A research on the flora of Nujiang dry-hot valley in Lujiangba, Yunnan. *Guihaia*, 15, 132–138. (in Chinese with English abstract) [曹永恒, 金振洲 (1993) 云南潞江坝怒江干热河谷植被研究. *广西植物*, 15, 132–138.]
- Clark MK, Schoenbohm LM, Royden LH, Whipple KX, Burbfiel 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, 1006.
- Cui ZJ, Wu YQ, Liu GN, Ge DK, Pang QQ, Xu QH (1998) About “Kunlun-Yellow River” tectonic movement. *Science in China*, 28, 53–59. (in Chinese) [崔之久, 伍永秋, 刘耕年, 葛道凯, 庞其清, 许清海 (1998) 关于“昆仑-黄河运动”. *中国科学*, 28, 53–59.]
- Editorial Committee of Flora Republicae Popularis Sinicae (1959–2004) *Flora Republicae Popularis Sinicae*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [中国植物志编辑委员会 (1959–2004) *中国植物志*. 科学出版社, 北京.]
- 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.]
- Jin ZZ, Yang YP, Tao GD (1995) The floristic characteristics, nature and origin of seed plants in the dry-hot valley of Southwest China. *Acta Botanica Yunnanica*, 17, 129–143. (in Chinese with English abstract) [金振洲, 杨永平, 陶国达 (1995) 华西南干热河谷种子植物区系的特征, 性质和起源. *云南植物研究*, 17, 129–143.]
- 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 (1997) The Tanaka-Kaiyong line: an important floristic line for the study of the flora of East Asia. *Annals of the Missouri Botanic Garden*, 84, 888–892.
- Liu LH (1989) Vegetational types of the arid valleys in the Hengduan Mountains region. *Mountain Research*, 7, 175–182. (in Chinese with English abstract) [刘伦辉 (1989) 横断山区干旱河谷植被类型. *山地研究*, 7, 175–182.]
- 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.]
- Liu Y, Li P, Xu Y, Shi SL, Ying LX, Zhang WJ, Peng PH, Shen ZH (2016) Quantitative classification and ordination for plant communities in dry valleys of Southwest China. *Biodiversity Science*, 24, 378–388. (in Chinese with English abstract) [刘晔, 李鹏, 许玥, 石松林, 应凌霄, 张婉君, 彭培好, 沈泽昊 (2016) 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*, 24, 378–388.]
- Ming QZ (2006) The Landform Development and Environment Effects in the Area of Three Parallel Rivers, Northern Longitudinal Range-gorge Region. PhD dissertation, Lanzhou University, Lanzhou. (in Chinese with English abstract) [明庆忠 (2006) 纵向岭谷北部三江并流区河谷地貌发育及其环境效应研究. 博士学位论文, 兰州大学, 兰州.]
- Ou XK, Zhang ZM, Wang CY, Wu YC (2006) Meri Snow Mountain Vegetation Research. Science Press, Beijing. (in Chinese) [欧晓昆, 张志明, 王崇云, 吴玉成 (2006) 梅里雪山植被研究. 科学出版社, 北京.]
- Peng H, Wu ZY (1997) On the floristic relationships and position of seed plants in Mt. Wuliangshan. *Mountain Research*, 15(3), 1–6. (in Chinese with English abstract) [彭华, 吴征镒 (1997) 滇中南无量山种子植物区系联系及其地位. *山地研究*, 15(3), 1–6.]
- 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.]
- Ren ME, Bao HS, Han TC, Wang FY, Huang PH (1959) The landform and river capture in Jinshajiang valley in northwest Yunnan. *Acta Geographica Sinica*, 25, 135–155. (in Chinese with English abstract) [任美镛, 包浩生, 韩同春, 王飞燕, 黄培华 (1959) 云南西北部金沙江河谷地貌与河流袭夺问题. *地理学报*, 25, 135–155.]
- 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.]
- 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.]
- Su ZY (1999) Quantification of floristic endemism. *Journal of South China Agricultural University*, 20, 92–96. (in Chinese with English abstract) [苏志尧 (1999) 植物特有现象的量化. *华南农业大学学报*, 20, 92–96.]
- 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.]
- Tanaka T (1954) Species Problem in *Citrus*, pp. 58–69. Japanese Society for the Promotion of Science, Tokyo.
- 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 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.]
- Wu J, Yin XM, Liu ZF, Ruan JY (2012) Research on seed plant flora in Gongga Mountain Nature Reserve. *Journal of Sichuan Forestry Science and Technology*, 33, 46–49. (in Chinese with English abstract) [伍杰, 尹学明, 刘兆发, 阮建英 (2012) 贡嘎山自然保护区种子植物区系研究. *四川林业科技*, 33, 46–49.]
- Wu ZY, Chen XQ (2004) *Flora Republicae Popularis Sinicae*, Vol.1. Science Press, Beijing. (in Chinese) [吴征镒, 陈心启 (2004) 中国植物志第一卷. 科学出版社, 北京.]
- Wu ZY, Wang HS (1983) *Phytogeography of China*. 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.]
- 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.]
- Yang DY, Han ZY, Ge ZS, Xu QM, Chen KF, Xu YH, Li LP, Huang D, Lu HY (2008) Geomorphic process of the formation and incision of the section from Shigu to Yibin of the Jinshajiang River. *Quaternary Sciences*, 28, 564–568. (in Chinese with English abstract) [杨达源, 韩志勇, 葛兆帅, 胥勤勉, 陈可峰, 徐永辉, 李郎平, 黄典, 鹿化煜 (2008) 金沙江石鼓–宜宾河段的贯通与深切地貌过程的研究. 第 四纪研究, 28, 564–568.]
- Yang QY, Zheng D (1989) An outline of physic-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.]
- Ying JS, Chen ML (2011) *Chinese Plant Geography*. Shanghai Science & Technology Press, Shanghai. (in Chinese) [应俊生, 陈梦玲 (2011) 中国植物地理. 上海科学技术出版社, 上海.]
- Ying JS, Zhang ZS (1985) Endemism in the flora of China: studies on the endemic genera. *Acta Phytotaxonomica Sinica*, 22, 259–268. (in Chinese with English abstract) [应俊生, 张志松 (1985) 中国植物区系中的特有现象: 特有属研究. *植物分类学报*, 22, 259–268.]
- 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.]
- Zhang TC (2010) *Phylogeography and Phylogeny of Terminalia franchetii and Its Correlation with Honghe Diversion Events*. PhD dissertation, Kunming Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Kunming. (in Chinese with English abstract) [张体操 (2010) 滇榄仁谱系地理学, 种系分异及其与红河水系变迁的关系研究. 博士学位论文, 中国科学院昆明植物研究所, 昆明.]
- 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.
- Zhu H (1990) A study on the thorny succulent shrubs in dry-hot valley of Yuanjiang County. *Acta Botanica Yunnanica*, 12, 301–310. (in Chinese with English abstract) [朱华 (1990) 元江干热河谷肉质多刺灌丛的研究. *云南植物研究*, 12, 301–310.]
- Zhu H, Yan LC (2003) Notes on the realities and significances of the “Tanaka Line” and the “Ecogeographical Diagonal Line” in Yunnan. *Advance in Earth Sciences*, 18, 870–876. (in Chinese with English abstract) [朱华, 阎丽春 (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, 870–876.]
- 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.]

(责任编辑: 朱华 责任编辑: 闫文杰)

## 附录 Supplementary Material

### 附录1 西南干旱河谷维管束植物科、属区系地理成分

Appendix 1 The floristic elements composition of vascular plant family and genera in dry valleys of Southwest China  
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2015240-1.pdf>