

•综述•

云南干热河谷植被与环境研究进展

杨济达¹ 张志明¹ 沈泽昊² 欧晓昆^{1*} 耿宇鹏¹ 杨明玉¹¹ (云南大学生态学与地植物学研究所, 昆明 650091)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)

摘要: 特殊的地理位置和独特的地形地貌特征组合形成了典型的干热气候环境, 在云南省亚热带高原山地河谷下部发育了一类特有的植被类型, 即干热河谷植被。干热河谷植被具有非地带性和稀有性, 以及由土地利用变化为主的人为活动干扰导致的脆弱性。本文回顾了干热河谷植被的研究历史, 分别从干热河谷的植物群落学和植物区系学、干热河谷植被与土地的关系以及干热河谷植被保护与恢复三个方面进行了总结。植物群落与区系研究主要集中于群落分类、植被分类、群落特征、人为干扰影响、区系特征、性质和起源; 植被与土地关系研究侧重于土壤特性、土地利用/覆盖变化、土地退化及水土流失状况; 植被保护与恢复的热点在植被恢复目标、植被恢复功能区划、植被恢复引种及筛选及植被恢复效益评价研究。未来在这些区域应注重自然灾害及预防、水电工程建设对植被的影响及其响应等方面的研究, 深入开展大尺度植被时空格局的监测和动态服务功能分析。

关键词: 干热河谷; 植物群落; 植物区系; 土地关系; 植被恢复; 展望

Review of research on the vegetation and environment of dry-hot valleys in Yunnan

Jida Yang¹, Zhiming Zhang¹, Zehao Shen², Xiaokun Ou^{1*}, Yupeng Geng¹, Mingyu Yang¹¹ Institute of Ecology and Geobotany, Yunnan University, Kunming 650091² Department of Ecology, College of Urban and Environmental Sciences, Key Laboratory for Earth Surface Processes of Ministry of Education, Peking University, Beijing 100871

Abstract: The vegetation of the dry-hot valleys in southwestern China, especially in Yunnan, is unique as the valley bottom in a subtropical plateau and mountainous region, which is characterized by its geographic location, climate, and geomorphology. A long history of biological adaptation to the specific environmental contributes to the rarity and non-zonality of vegetation in these dry-hot valleys. Disturbances including land use through human activities have endangered some vegetation types in the dry-hot valleys. This paper examines the history of vegetation studies in the dry-hot valleys, and summarizes studies on flora, vegetation and land use and cover change, as well as vegetation restoration. Research of plant communities and flora have mainly focused on the classification of the community and vegetation types, the characteristics of the community, the influence of human disturbance, and the characteristics, nature and origin of the flora. The relationship between vegetation and land has mainly focused on the characteristics of soil, land use/cover change, land degradation and soil erosion. The hot spots of vegetation protection and restoration include the study of vegetation restoration objectives, functional zoning of vegetation restoration, the introduction and selection of vegetation restoration research, and evaluation of the effectiveness of vegetation restoration. We propose that more attention to be paid to the study of the prevention of natural disasters, the impacts of hydropower construction on vegetation, and in-depth vegetation monitoring and analysis of the spatiotemporal dynamics at multiple scales.

Key words: dry-hot valley; plant community; flora; land relationship; vegetation restoration; prospect

收稿日期: 2015-09-18; 接受日期: 2016-04-26

基金项目: 国家自然科学基金“退耕还林和村村通公路影响下山地植被景观“格局-过程”关系研究”(41361046)、国家自然科学基金“云南三江并流地区海拔树线的时空格局成因及其对气候变化的响应”(41371190)和国家自然科学基金“水热梯度变化对澜沧江河谷群落谱系结构的影响: 基于“胁迫梯度假说”的比较”(31160101)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: xkou@ynu.edu.cn

在第三纪起开始抬升形成的中国青藏高原至云贵高原面上, 由多条大河侵蚀切割形成了深陷的山岭—河谷地貌。由于地处低纬度, 在亚热带季风气候的影响下, 这种高原河谷地貌类型的背风雨影区, 特别是河谷低地, 形成了典型的干热气候, 并孕育演化形成了独特的干热河谷植被(郑远昌等, 1986)。干热河谷主要分布于云南、四川境内, 而在云南集中见于怒江、澜沧江、金沙江、元江(红河)等流域(欧晓昆, 1994; 金振洲, 1998; 沈泽昊等, 2016)。干热河谷是一类四周被湿润环境包围而下部呈现较干旱、温度较高, 使水热条件配合呈现出“干”和“热”特征的独特河谷生态景观。其特点是降水干湿季分明、水热组合失衡、热量高、降水少、蒸发强烈(杨勤业和沈康达, 1984; 何永彬等, 2000)。

山原地貌与季风气候是云南自然景观整体形成的两个基本因素, 而植被能够很好地反映当地的自然环境条件(姜汉桥, 1980)。经过长期演化, 干热河谷成为镶嵌在亚热带湿润与半湿润气候背景中的河谷型干旱区域, 是我国一类独特的生态系统, 其气候、植被、土壤等都具有鲜明的特点(何科昭等, 1996; 张叶春等, 1999), 其植物区系和植被类型与我国同一纬度其他区域的植被之间存在显著差异(金振洲和欧晓昆, 2000)。在长期人为活动干扰下, 干热河谷植被普遍稀疏、低矮并处于脆弱退化状态(钟祥浩, 2000; 方海东等, 2009)。干热河谷生物多样性资源的保护、生境恢复以及可持续管理引起了广泛关注(金振洲和欧晓昆, 1988; 欧晓昆, 1988)。本文在系统回顾中国西南部, 重点是云南省干热河谷的植被研究基础上, 分析了当前干热河谷植被研究所关注的主要领域, 提出未来应予以重视和优先研究的问题和方向, 以期对干热河谷特殊生境下植被以及整个中国西南纵向岭谷区生态系统的研究和管理实践提供参考。

1 干热河谷自然环境概况

1.1 地形与地貌

以云南省为主体的中国西南纵向岭谷区北高南低的山原地貌是该区域景观的突出特征之一(何永彬等, 2000)。高原随海拔有差别地上升和河流切割形成不同的格局分布: 中北部以滇中高原为主

体, 多宽广盆地, 海拔在1,600–1,900 m上下; 中南部残留高原面多小型山间盆地, 海拔一般为1,200–1,400 m; 南部的较大型河谷盆地则分布于海拔500–900 m范围内(姜汉桥, 1980)。中国西南干热河谷集中分布于怒江、澜沧江、金沙江以及元江(红河)流域峡谷内, 23°00′–28°10′ N, 98°50′–103°50′ E, 横跨5个经纬度, 其主体分布区域东南以云南蒙自的曼耗为界, 西以怒江峡谷为边, 北以金沙江流域永善为限, 依随江河道呈现出多不规则多边形。地势顺应江河流向北高南低、西高东低, 海拔沿河流自上而下逐渐降低, 属典型的江河两侧高中山峡谷地貌(金振洲和欧晓昆, 2000)。横断山区干热河谷总长4,105 km, 覆盖面积达到11,230 km², 其中金沙江流域的干热河谷总长2,929 km, 覆盖面积8,410 km², 分别占整个横断山区干热河谷总长和覆盖面积的71.4%和74.9% (Ma & McConchie, 2001)。

由于地处山脉横断、河谷深切的复杂区域, 覆盖面积广, 不同河流所处的干热河谷地段呈现出不同的地貌特征(表1)。

1.2 气候特征

地理位置、地形特征、大气环流和局地气流等因素的影响形成了河谷独特的气候环境(汤懋苍等, 1979)。“既干又热”是干热河谷的基本气候特征。由于河谷底部与上部的自然环境区别较大, 在干和热方面有一个适合植被生长的幅度范围。在干和热的水热配比上, “干”者应属于干旱至半干旱气候。干旱气候的全年蒸发量应大于降水量的3–6倍, 半干旱气候则全年蒸发量应大于降水量1–3倍; “热”者需要热至半热的气候, 热气候应有年均温>20℃, 日均温>10℃且年积温>7,000℃的水平, 半热气候应有年均温16–19℃, 日均温>10℃且年积温5,500–7,000℃的水平(钟祥浩, 2000; 金振洲和欧晓昆, 2000)。

张荣祖等(1992)明确提出了干热河谷的气候指标, 即最冷月平均气温>12℃, 最暖月平均气温24–28℃, 日均温≥10℃, 年平均积温>7,000℃, 持续天数>350天, 全年几无霜日, 年平均降雨量600–800 mm, 年平均蒸发量达2,750–3,850 mm, 年平均干燥度2.0以上。干热河谷即处于这一干热气候的幅度范围之内, 其中以元江流域的元江坝和金沙江流域的元谋龙江段气候最为典型(表2)。

表1 云南4条主要河流干热河谷分布情况
Table 1 The distribution of dry-hot valleys of four major rivers in Yunnan

| 河流 Rivers | 分布区域 Distribution | 两侧山脉 Mountain range | 分布长度 Length (km) | 底部海拔 Altitude (m) | 峰线高度 Peak line height (m) | 上下高差 Dispersion (m) |
|----------------------|---------------------------|-----------------------------|---------------------|----------------------|------------------------------|------------------------|
| 怒江 Nu River | 六库-龙陵 Liuku-Longling | 怒山/高黎贡山 Nushan/Gaoligong | 220 | <1,000 | 3,000 | 2,000 |
| 元江 Yuan River | 新平-蒙自 Xinping-Mengzi | 哀牢山/无量山 Ailao/Wuliang | 300 | 300-600 | 3,000 | 2,000 |
| 金沙江 Jinsha River | 鹤庆-布拖 Heqing-Butuo | 乌蒙山/云岭 Wumeng/Yunling | 850 | 700-1,200 | 2,500-3,500 | 2,000 |
| 澜沧江 Lancang River | 南涧-凤庆 Nanjian-Fengqing | 怒山南/无量山 Nushan/Wuliang | 250 | 800-900 | 2,500-3,000 | 1,500-2,000 |

表2 元江坝、金沙江元谋龙江干热河谷气候条件对比
Table 2 Comparison of climate condition between dry-hot valleys in Yuanjiangba and Longjiang, Yuanmou

| 气候因子 Climatic factors | 元江坝 Yuanjiangba | 元谋龙江 Longjiang, Yuanmou |
|---|--------------------|----------------------------|
| 年均温 Annual mean temperature (°C) | 23.7 | 21.5 |
| 最冷月均温 Average temperature of the coldest month (°C) | 16.7 | 15.1 |
| ≥10℃的年积温 ≥10℃ Annual accumulated temperature (°C) | 8,708.9 | 7,996.1 |
| 年均霜日 Annual mean frosty day | 0.7 | 2.0 |
| 年均降水量 Annual mean precipitation (mm) | 805.1 | 634.0 |
| 年均蒸发量 Annual mean evaporation (mm) | 2,750.9 | 3,847.8 |
| 年蒸发量/年降水量 Annual mean evaporation/annual mean precipitation | 3.4 | 6.1 |
| 年均相对湿度 Annual mean humidity (%) | 69 | 54 |
| 雨季/旱季降水量 Rainy season precipitation /dry season precipitation (%) | 81/19 | 92/8 |

1.3 干热河谷成因的几种假说

关于西南干旱河谷的成因, 不同学者提出了多种假说。这些观点也同样适用于云南干热河谷的形成机制, 主要包括:

(1)地史原生论。认为干热河谷的形成是基于历史长期自然地理环境演化的产物, 是高山隆起、河谷深切的地史时期就已完成并保留至今的原生格局(Schwein, 1972; 沈玉昌和龚国元, 1986; 杨勤业等, 1988)。这一说法侧重于地质的原生格局, 忽略了气候和后期的人为干扰的动态影响。

(2)焚风效应假说。从气象学角度较好地解释了由于西南季风或东南季风受到高大山脉的屏障阻隔作用, 导致山脉迎风坡截留雨水、背风坡少雨, 引发河谷两侧的山脉不同坡向有明显的降水差异, 加之河谷内焚风效应增温而形成河谷干热气候特征(Richner & Phillips, 1984; Gallus & Klemp, 2000; 何大明等, 2005)。该说法是目前干热河谷典型干热气候成因的主流观点, 但就其成因而言, 仅气象学原理仍旧不够完善。

(3)山谷风局地环流假说。强调了河流下切引发河谷内部相对封闭, 昼夜温差导致山谷风形成局部环流, 伴随热气环流的上升而呈现出下部干热而上部四周湿润的垂直分布的干旱现象(郑度和姚檀栋, 2004; 闵石头和王随继, 2007)。该观点过分强调河谷内部封闭空间, 忽略了外部因素的作用。

(4)次生干扰论。突出土地利用变化和人为干扰活动导致森林植被逆向演替和生态环境退化, 从而引起河谷由湿热环境向干热环境转变(许再富等, 1985)。这一说法则过分强调了人为活动的干扰而忽视了自然环境的演替和变化。

(5)综合论。综合前4种假说, 认为干热河谷是构造-地貌-古生态效应、环流-季风-“狭管”效应、地形波-局地环流-降水-焚风效应、植被-土地利用-人为活动干扰效应等综合作用而形成的原生性山地生态现象, 是局部地-水-生-人交互作用及耦合效应的综合产物(何永彬等, 2000; 明庆忠, 2006; 明庆忠和史正涛, 2007)。

2 干热河谷植被研究的历史

1957年, 曲仲湘、周纪纶等人对元江干热河谷植被进行了首次调查, 对于当地植物群落结构和种类作出了首次记录, 其调查结果刊于《综考会1957年西双版纳植被调查总结》(油印稿, 未刊)。1964年, 朱彦丞等对金沙江以及支流的干热河谷进行了首次植物群落学调查(吴征镒, 1980; 吴征镒和朱彦丞, 1987)。之后植被生态学家们针对干热河谷植被开展了较全面和深入的调查研究。

20世纪80年代中期开始到90年代末, 以金振洲为代表的学者对滇川干热河谷植被多样性特征以及植物区系进行了系统研究(金振洲和欧晓昆, 1998; 欧晓昆和金振洲, 1987, 1996), 按照Braun-Blanquet的植物群落学研究方法对云南四大江河流域干热河谷植被进行了取样调查, 得到样地记录542个, 建立群纲1个, 群目6个, 群属11个, 群丛67个, 建立了2,088种种子植物地理成分的数据库, 同时通过与世界同类植被的对比, 确定元江、怒江、金沙江、澜沧江四大江干热河谷植被为“河谷型萨王纳植被(Savanna of valley type)”, 它以其自身特有的群落特征和植物区系组成, 成为了我国西南河谷地区的一种特殊的植被类型, 同时也是世界植被中萨王纳植被的干热河谷残存者(周跃和金振洲, 1987; 欧晓昆, 1988; 曹敏和金振洲, 1989; 曹永恒和金振洲, 1993)。这些研究成果全面、深入地揭示了干热河谷植被与植物群落的多样性特征、植物资源的珍稀性和独特性以及资源利用的潜力, 同时也为干热河谷环境和植物资源的保护及可持续发展提供了理论基础。

21世纪以来, 生态学者们对西南干旱河谷地区的植物区系和植被群落再次开展了系统的调查研究工作, 从干热河谷植被的保护与恢复(钟祥浩, 2000; 罗辉和王克勤, 2006; 刘方炎等, 2010; 李昆等, 2011), 区域整体的植物地理和区系格局(朱华, 2008; 欧朝蓉等, 2015; 刘晔等, 2016a), 植物群落分类与群落构建(刘方炎等, 2007; 张建利等, 2010a; 李新辉等, 2016; 刘晔等, 2016b), 植物群落多样性的海拔梯度格局比较(杨阳等, 2016), 生物入侵(胡发广等, 2007; 许玥等, 2016)以及干热河谷资源环境问题与生物多样性保护(方海东等, 2009; 沈泽昊等, 2016)等方面进行了大量研究。从地理区系方面

进一步深入探索植被及植物群落与世界同类的地理联系和历史亲缘关系, 从景观格局层次开展植被分布格局与生态过程的关系研究, 以及从资源利用的角度权衡区域植被的保护与开发问题。

3 干热河谷植被研究现状

3.1 植物群落与植物区系

3.1.1 植物群落

干热河谷植被不同于其海拔上界的常绿阔叶林、山地针叶林等类型, 因而深入了解其群落特征显得尤为重要(金振洲和欧晓昆, 2000)。目前关于干热河谷植物群落的研究主要集中在以下几个方面:

(1)群落分类。基于法瑞植物群落学的理论和方法对滇川干热河谷植被进行了群落学分类。根据第四纪植被演化证据, 认为元谋干热河谷的稀树灌草丛类型中普遍存在的扭黄茅(*Heteropogon contortus*) + 车桑子(*Dodonaea viscosa*)群系由于水土流失加剧、人为破坏日盛而由稀树灌草丛退化而成的一种较为稳定的亚顶极植被类型(周麟, 1996)。按群落的外貌、种类组成和结构特点可以分为: 稀树灌草丛类型、肉质刺灌丛类型、扭曲云南松(*Pinus yunnanensis*)稀疏类型、小叶刺灌丛类型(刘伦辉, 1989; 杨兆平和常禹, 2007)。

(2)群落特征。群落外貌以“稀树灌木草丛”为明显特征。主要以大面积禾草草丛分布为主, 其中稀散分布乔木和灌丛, 在人为干扰下可成为“稀树草丛”、“稀灌草丛”和“草丛”外貌。群落结构主要以乔、灌、草3层或灌、草2层形式组成, 群落在河谷坡上为断续带状分布, 群落层次结构单一, 外貌随干湿季节交替变化明显, 植物多是中生种类, 旱生形态突出(刘伦辉, 1989; 金振洲和欧晓昆, 2000; 金振洲, 2002)。沿金沙江从上游到下游, 草地群落密度和Simpson多样性指数、Shannon-Wiener多样性指数逐渐增加, 而群落丰富度逐渐下降; 群落结构以扭黄茅为优势种群, 且自上而下多年生草本植物种类的比例逐渐增加, 灌木和一年生草本植物种类比例逐渐减少(张建利等, 2010a, b; 沈蕊等, 2010)。而典型的元谋干热河谷, 主要植物群落的多样性水平较低; 基于Patrick物种丰富度指数(S)、Shannon-Wiener多样性指数(H)、Simpson优势度指数(D)对物种多样性与植物生长型的分析表明, 按 S 指数排序为乔木层<草本层<灌木层; 按 H 指数排序为乔木层

<草本层<灌木层;按D指数排序为乔木层>草本层>灌木层(杨振寅等, 2008)。

(3)入侵植物的影响。干热河谷地区已经成为外来植物入侵的重灾区。如在怒江河谷, 入侵植物主要沿区内的道路网络扩散, 在大尺度上入侵物种分布主要受热量限制; 小尺度上, 水分条件和乡土植物群落的完整性构成了入侵植物分布的主要限制因子(许玥等, 2016)。入侵植物在群落构建过程中, 对元江干热河谷植被的谱系群落学研究表明, 空间距离的影响已超出环境因素的贡献(李新辉等, 2016)。

3.1.2 植物区系

了解一个地区的植物区系组成是进一步深入了解其植被以及生态系统的基础(姜汉桥, 1980)。云南干热河谷的植物区系主要位于中国西南热带与亚热带的多山区域, 其组成多样而特殊且具有明显特征(吴征镒等, 2005)。目前的研究主要分为三个方面:

(1)植物区系特征。云南干热河谷植物区系主要分布于金沙江、怒江、元江河谷以及澜沧江川西滇北部分。分布面积不大, 但物种组成丰富, 有162科755属1,791种(金振洲等, 1995; 金振洲, 2002)。物种组成中特有现象突出, 中国特有属21个, 干热河谷特有属6个, 中国特有种767个, 干热河谷特有种46个(金振洲等, 1995)。物种组成多为热带性或热带起源的耐旱种类, 其中热带种占一半以上, 同时具有长期适应干热河谷群落的特征种或区系标志种。优势或常见种多数为生态适生种或耐干热种类。乔木和灌木主要有木棉(*Bombax ceiba*)、菲岛桐(*Mallotus philippinensis*)、虾子花(*Woodfordia fruticosa*)、滇榄仁(*Terminalia franchetii*)、石山羊蹄甲(*Bauhinia comosa*)、坡柳(*Dodonaea viscosa*)等; 草丛优势种如扭黄茅、孔颖草(*Bothriochloa pertusa*)、双花草(*Dichanthium annulatum*)等(刘伦辉, 1989; 金振洲和欧晓昆, 2000; 金振洲, 2002)。独特的山地峡谷地貌和干热气候是干热河谷植物区系形成的近代原因, 而第三纪以后地史演变是其历史原因, 两者相辅相成(金振洲等, 1995)。

(2)植物区系性质。干热河谷植物区系具有偏热带的亚热带性质, 但云南各条河谷在种级区系组成上稍有差异, 元江、怒江河谷的区系性质偏向热带, 金沙江河谷下游则偏向温带(金振洲等, 1995; 欧晓

昆, 1988; 欧晓昆和金振洲, 1996)。朱华(2008)对于覆盖云南全境的31个地区的植物区系多度分布格局分析认为, 在热带成分中, 全热带分布属最多, 占13.64–46%, 其最大值出现在怒江和元江的干热河谷, 全热带分布属和热带亚洲至热带非洲分布属是干热河谷植被的主要成分。

(3)植物区系起源。干热河谷植物区系中有较多古南大陆起源的科和属, 同样也有与热带非洲稀树草原相同的属和种, 由于地史和近代的自然地理环境的变迁, 干热河谷植物在区系上有明显的热带起源, 带有古地中海后裔的残余性, 存在地理替代现象(金振洲等, 1995; 金振洲和欧晓昆, 2000)。在属水平上, 整个西南干旱河谷植物区系的特有性比例并不显著高于中国亚热带区域的平均值, 与古地中海区系的联系信号虽然清晰, 但在整个区系结构中的比例很低, 表明与地中海区系之间的隔离分化已非常显著(刘晔等, 2016a)。

3.2 植被与土地的关系

3.2.1 干热河谷土壤性质

干热河谷区域处于山脉横断、江流纵切的特殊地质环境中, 特殊的气候导致土壤也呈现出特殊性和复杂性(赵琳等, 2006)。目前的研究主要集中于以下几个方面: (1)土壤分类。元谋河谷土壤类型分为普通燥红土、表蚀燥红土、变性燥红土、表蚀干热的半干润变性土、普通干热的半干润变性土、普通薄层土、普通紫色土。河谷主要分布着燥红土(何毓蓉和黄成敏, 1995), 河谷内坡地大多陡峻土薄, 土壤含砾多、粗骨性强, 大多还含有一定数量的 CaCO_3 , 北部河谷分布较广的是由黄土状母质发育的褐土、灰褐土, 呈较强石灰反应, 南部由酸性的古红壤母质发育的燥红壤、褐红土的表层也有复钙现象, 反映了河谷土壤近代发育的早化趋势(李明森, 1991)。(2)土壤特性。元谋河谷土壤具有弱腐殖化特性, 其线胀系数 $\text{COLE} \geq 0.1$, 远远超过一般的土壤($\text{COLE} < 0.05$), 土壤同时具有变性特征; 根据岩性特征的诊断指标分析认为, 当地还存在紫色砂页岩岩性特征和薄层土的岩性特征(黄成敏和何毓蓉, 1997)。(3)土壤肥力。元谋不同植被类型林地土壤水分含量均较低, 土壤的物理性能较差, 有机质、养分含量极低(郭玉红等, 2007)。对元江植被土壤理化特征研究表明, 除了磷元素极其缺乏以外, 其他营养元素处于中等以上水平, 土壤肥力最好的是群

落结构复杂、具有残存性质的稀树旱生林(刘方炎等, 2007)。

3.2.2 土地利用/覆盖变化

经济、社会的发展加剧了人为活动对植被分布、演替以及退化的干扰, 脆弱生境与开发利用之间的矛盾使得干热河谷区域土地利用/覆盖变化成为该区域保护与开发的关注热点。

土地利用现状方面, 在金沙江河谷段未利用地面积最大, 占了总面积的53.15%, 而农用地(12.5 km^2)占总面积的43.22%, 其中林地占地比例为13.21% (任洪玉等, 2007)。在澜沧江流域, 在土地利用结构方面, 上游有林地面积比例远高于中游和下游, 耕地和灌木林地比例在下游最高, 疏林地、水域和建设用地比例在中游最高(姚华荣和崔保山, 2006)。

覆盖变化状况方面, 1960–2000年, 金沙江南岸区域30年间林地比例下降了3.18%, 森林覆盖率锐减了4.66%, 土地裸岩化和裸土化比例分别上升了5.75%和10.35%, 毁林开荒、乱砍滥伐等不合理利用方式导致陡坡山地上的自然植被包括森林和草丛成片地丧失, 有林地覆盖率降低, 裸地和裸岩石砾地面积明显增加(杨子生等, 2004)。而在云南元谋, 林地以灌木林、疏生林地为主, 有林地、其他林地较少, 高覆被度草地资源数量减少而中、低覆被度草地面积比例增大, 全区80%以上的林地和牧草地集中分布在海拔1,600 m以下; 而90%左右的草地和70%左右的林地分布在海拔1,100–1,600 m之间(何锦峰等, 2009)。在澜沧江流域, 1990–1998年间, 流域中森林片断化趋势增加, 森林覆盖率大大减少, 9年中森林减少达 $354.1 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 森林有林地(郁闭度>30%的天然林和人工林)从1990年的52.6%减少到1998年的35.3% (许建初等, 2003)。

在土地类型转变和景观格局变化方面, 对金沙江下游干热河谷土地利用/覆盖变化分析表明, 林地和耕地大幅度减少, 草地和建设用地面积显著增加, 土地利用类型转换的主要方向是林地转化为草地、耕地转化为建设用地和草地、草地转化为未利用地。林地是整个研究时段内减少幅度最大的土地类型, 其变化的主要方向为草地和未利用地, 分别转化40,953.2 ha和4,722.7 ha, 另外有林地向灌木林地转化161,300 ha, 林地在人为开发和自然气候变化的影响下不断退化, 覆盖度不断下降(李苗裔等,

2012), 在澜沧江段, 林地仍是减少幅度最大的土地类型, 主要改变为疏林、草地、灌丛和旱地, 其中转化面积最大的是疏林和荒草地类型(许建初等, 2003)。

综合来看, 云南干热河谷植被总体处于不同程度的退化状态, 金沙江干热河谷区域主要呈现出森林面积锐减、草地面积增加且高覆被草地面积下降, 中、低覆被草地面积增加的趋势(何锦峰等, 2009)。澜沧江流域土地利用/覆盖变化特点则是耕地少、利用率低; 有相当面积的林地, 但分布不平衡; 草场分散, 退化率高; 荒山荒地较多; 各地土地利用状况差异极大(许建初等, 2003; 姚华荣和崔保山, 2006)。

3.2.3 土地退化及水土流失

山高谷深、高差悬殊、地形破碎、气候干热加之人为活动, 使干热河谷地区地表植被稀疏、水土流失严重, 造成一系列严重的土地退化、生态系统退化问题。其中以金沙江中下游的干热河谷地段最为典型, 是中国水土流失最严重的地区之一(张建平等, 2001)。调查显示, 元谋县的水土流失面积为 $1,080.79 \text{ km}^2$, 占土地总面积的53.5%, 而典型的干热河谷水土流失面积为 236.46 km^2 , 占该区总面积的58.09%, 其中轻、中、强、极强度侵蚀面积分别占该区侵蚀面积的31.6%、32.1%、34.9%和1.4%。年总侵蚀量 $106.43 \times 10^4 \text{ t}$, 平均侵蚀模数为 $4,501 \text{ t/km}^2$ (刘海等, 2012)。根据调查统计, 金沙江下游水土流失面积已达 $16,000 \text{ km}^2$, 占总土地面积的60%, 母岩裸露、沟壑纵横, 使面蚀、沟蚀向深沟和溯源侵蚀方向迅速发展(刘刚才和刘淑珍, 1998), 有不同程度的退化土地面积为 $3,650.7 \text{ km}^2$, 占土地总面积的49.1%, 其中轻度退化土地 $2,752.2 \text{ km}^2$, 中度退化土地 618.7 km^2 , 强度退化土地 243.4 km^2 , 极强度退化(荒漠化)土地 36.4 km^2 , 分别占土地总面积的37.2%、8.2%、3.2%和0.5%(张建平和刘淑珍, 1998)。而在红河流域, 流域东部由于岩性多为较坚硬的石灰岩, 地形地貌已趋于低山丘陵, 地势平缓而坡度较小, 因而水土流失程度较轻, 江河水悬移质的多年平均值普遍低于 0.8 kg/m^3 , 侵蚀模数在 700 t/km^2 以下。而西部则处在由海拔2,000多米的台层向1,300多米台层过渡的坡陡流急裂点区域, 在哀牢山地段, 由于河谷下切较深加之植被退化, 风化而成的破碎岩石及紫色土第四纪红层导致严重的水

土流失,具体表现为河水含沙量较高,悬移质一般在 $2.5\sim 4.9\text{ kg/m}^3$,侵蚀模数达 $1,100\sim 1,900\text{ t/km}^2$ 左右(卢培泽等, 2000)。

3.3 干热河谷植被的保护与恢复

特殊、复杂的地理和气候环境造就了干热河谷植被的典型性和稀有性,同时失衡的水热配比条件加之不合理的人为活动及干扰导致了干热河谷植被的脆弱性和濒危性。因而干热河谷植被的保护与恢复成为了政府和研究者的关注目标和研究热点(柴宗新和范建荣, 2001; 张建平, 2001; 马焕成和曾小红, 2006)。

3.3.1 植被的恢复

从20世纪50年代至今,干热河谷植被恢复研究从不断摸索试验到逐渐深入扩展,无论从理论还是实践上都获得了丰富的科研成果(张金盈等, 2005; 杨振寅等, 2007; 方海东等, 2009; 李昆等, 2011)。目前基于干热河谷植被恢复研究主要归纳为4个方面:(1)植被恢复的目标。恢复的目标以及程度是植被恢复的首要问题。根据多元顶极论,因地制宜的保护和引种最终都能恢复成不同类型的顶极森林群落(周麟, 1996);而有些学者则强调以恢复和保护生态环境为主,根据生境斑块的异质性宜乔则乔、宜灌则灌、宜草则草,不应强求某种植被类型(金振洲和欧晓昆, 2000)。(2)植被恢复的功能区划。环境异质性决定了植被的生长状况,同时也导致了恢复模式的多元化。基于气候、小环境、土壤状况、适宜性、水土流失程度等多方面进行了植被恢复的分区、分模式规划(纪中华等, 1999, 2003, 2006; 陈利顶等, 2001)。(3)植被恢复引种及筛选。针对引进种的可行性和适应性,对不同物种进行引种实验,均取得了较好的效果,其中以赤桉(*Eucalyptus camaldulensis*)、柠檬桉(*E. citriodora*)、大叶相思(*Acacia auriculaeformis*)以及豆类等的引种效果较为突出(李昆和曾觉民, 1999; 李昆等, 2004; 杨忠等, 2000; 张信宝等, 2003)。(4)植被恢复效益评价。评估和度量恢复力度、程度以及由此产生的生态、经济效益,是检测不同技术方法是否得当、模式体系能否见效、理论实践成功与否的重要标志。目前开展了对水土保持、生物量以及生态环境等多方面的评估,有些已经取得不错的成果,有些则效果不佳。如刁阳光(1994)对新银合欢林和未造林地进行了连续4年的雨季观测,并对0–40 cm土层土壤进行

分析,发现新银合欢(*Leucaena leucocephala*)林对保持水土、改良土壤的作用十分明显,其经济价值也很高。而对人工赤桉林的群落结构、物种多样性以及生长量、生物量的分析发现,其密度普遍偏高、结构比较简单、群落稳定性较差,应降低乔木层密度以增加群落稳定性(王克勤和起家聪, 2000)。

3.3.2 植被恢复中存在的问题

干热河谷植被恢复研究虽然无论从理论还是实践方面都有大幅的突破和进展,但仍然存在许多问题。如退化生态系统的成因、干扰体系、驱动机制和退化生态过程及其机理等研究目前仍不够深入,缺乏从流域整体或系统水平的区域尺度的综合研究与示范,也缺乏对现有模式随着时间推移和经济发展的需求而变化的可持续性研究(方海东等, 2009)。当前植被恢复重建目标不明确,植被恢复研究缺乏尺度观,对乡土植物和封育措施研究重视不够等(杨振寅等, 2008)。

4 研究展望

4.1 植被与自然灾害的关系

由于河水冲刷和自然风化,干热河谷常被分割形成典型的“V”型地貌,地质条件复杂加之长期人类垦殖,使得该区植被的水源涵养功效衰减,滑坡、泥石流灾害频发(石承苍和雍国玮, 2001)。目前的研究主要针对水土流失状况及植被涵养水土能力,缺乏对灾害发生机理、预警以及模型预测等方面的研究,同时应深入探讨植被变化与水土流失之间的关系,建立“植被指示–灾害预警–灾害防治–灾后恢复”为一体的综合研究网络并进行长期动态监测,更系统地探究植被对防治水土流失的作用,从而更加科学地保护和恢复植被和环境。

4.2 大型工程建设对干热河谷植被的影响

干热河谷植被特殊的分布区域属典型的高原河谷地带,而这些河流正是水电工程开发建设重点区域,如长江中上游–金沙江,湄公河上游–澜沧江。同时,三江并流区地处西部少数民族聚居地区,经济发展相对落后,面临发展与保护的矛盾,这一地区是我国西部欠发达地区、山区交通基础设施快速发展的一个典型样本。水电和道路工程的建设对自然植被的影响是显而易见的,据《中国生态问题报告》,交通基础设施建设与水利工程建设已经成为我国生物多样性破坏的重要因素(姜睿等, 2012)。

工程建设活动不仅改变了地表的植被覆盖, 公路两侧的生境和交通工具的携带作用, 还为杂草和外来植物的入侵提供了机会(刘晔等, 2013), 这些都对生物多样性造成了影响。但目前尚缺乏对于工程建设对周边植被状况、群落构建、恢复能力等方面影响的深入研究。水电工程对于河流水文环境及其周边植被的影响, 将是今后干热河谷植被保护与恢复的全新研究领域。

4.3 河谷植被的保护与功能恢复

鉴于干热河谷地区植被类型的残余性和稀有性, 对于这一区域植被的保护与恢复仍然是一个重要的内容。四川攀枝花已经建立了以攀枝花苏铁(*Cycas panzhihuaensis*)为主要保护对象的苏铁自然保护区, 云南省也已经建立元江干热河谷国家级自然保护区, 而云南省级的玉龙雪山自然保护区也包括了从干热河谷到山顶雪山的整个垂直生态系统。可以预见, 植被的保护、特有植物的研究和植被利用将仍然是干热河谷区域植被研究的重要内容。

4.4 植被大尺度的生态过程和服务功能分析

近年来被广泛使用的群落谱系结构和谱系 β 多样性分析可以从一个较新的角度对不同尺度下的生态过程问题进行研究(Webb et al, 2002; Graham & Fine, 2008)。群落谱系结构的研究方法可以将生态学与进化学的相关理论结合起来, 探讨群落构建和植被变化中的生态过程问题, 特别是物种共存和多样性维持的机制(Webb et al, 2002; Cavender-Bares et al, 2004; Vamosi et al, 2008)。 β 多样性与谱系 β 多样性即物种随空间和进化时间发生替代的格局, 为了解不同尺度的生态过程奠定了基础(McKnight et al, 2007)。 β 多样性和谱系 β 多样性在局域和区域环境空间的分布特征与环境因子变化的关系极其密切, 对这些关系的分析可以揭示生态过程及其与尺度的关系, 从进化过程和生态过程角度更好地解释物种的分布和多样性的问题(Graham & Fine, 2008)。干热河谷植被群落类型多样性、分布空间跨度大且环境梯度明显, 是一个可利用谱系结构方法研究的理想对象。采用群落谱系结构相关的方法来分析云南干热河谷植物群落物种多样性及群落构建过程中可能存在的生态过程以及导致物种发生空间替代的原因, 可为今后的生物多样性研究和植被恢复工作提供理论支持。

参考文献

- Cao M, Jin ZZ (1989) Classification of vegetation in Qiaojia dry-hot valley of Jinsha River, Yunnan. *Acta Botanica Yunnanica*, 11, 324–336. (in Chinese with English abstract) [曹敏, 金振洲 (1989) 云南巧家金沙江干热河谷的植被分类. *云南植物研究*, 11, 324–336.]
- Cao YH, Jin ZZ (1993) A research on the vegetation of Nu River dry-hot valley in Lujiangba of Yunnan. *Guihaia*, 13, 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*, 13, 132–138.]
- Cavender-Bares J, Ackerly DD, Baum DA, Bazzaz FA (2004) Phylogenetic over dispersion in Floridian oak communities. *The American Naturalist*, 163, 823–843.
- Chai ZX, Fan JR (2001) Study on the restoration of vegetation in arid-hot valleys along the Jinsha River. *Journal of Mountain Research*, 19, 381–384. (in Chinese with English abstract) [柴宗新, 范建容 (2001) 金沙江干热河谷植被恢复的思考. *山地学报*, 19, 381–384.]
- Chen LD, Wang J, Fu BJ (2001) Strategy on sustainable development of eco-fragile area of xerothermic valley in Southwest China. *China Soft Science*, (6), 95–99. (in Chinese with English abstract) [陈利顶, 王军, 傅伯杰 (2001) 我国西南干热河谷脆弱生态区可持续发展策略. *中国软科学*, (6), 95–99.]
- Diao YG (1994) Study on the eco-economic function of artificial forest in the dry-hot valley of Jinsha River. *Forest Science and Technology*, 8(12), 26–27. (in Chinese) [刁阳光 (1994) 金沙江干热河谷人工林生态经济功能研究. *林业科技通讯*, 8(12), 26–27.]
- Fang HD, Duan CQ, Pan ZX, Sha YC, He L, Ji ZH (2009) Progress and perspectives on ecological restoration in the dry-hot valley of Jinsha River. *Environment and Ecology in the Three Gorges*, 2(1), 5–9. (in Chinese with English abstract) [方海东, 段昌群, 潘志贤, 沙毓沧, 何璐, 纪中华 (2009) 金沙江干热河谷生态恢复研究进展及展望. *三峡环境与生态*, 2(1), 5–9.]
- Gallus WA, Klemp JB (2000) Behavior of flow over steep orography. *Monthly Weather Review*, 128, 1153–1164.
- Graham C, Fine P (2008) Phylogenetic beta diversity: linking ecological and evolutionary processes across space and time. *Ecology Letters*, 11, 1265–1277.
- Guo YH, Lang NJ, He LP, Zheng K, Zhang LX, Wen SL, Jiang QC (2007) A study on soil characteristics of eight vegetation types in Yuanmou dry-hot valley. *Journal of West China Forestry Science*, 36(2), 56–64. (in Chinese with English abstract) [郭玉红, 郎南军, 和丽萍, 郑科, 张立新, 温绍龙, 江期川 (2007) 元谋干热河谷8种植被类型的林地土壤特性研究. *西部林业科学*, 36(2), 56–64.]
- He DM, Wu SH, Peng H, Yang ZF, Ou XK, Cui BS (2005) A study of ecosystem changes in longitudinal range-gorge region and transboundary eco-security in Southwest China. *Advance in Earth Sciences*, 20, 338–344. (in Chinese with English abstract)

- English abstract) [何大明, 吴绍洪, 彭华, 杨志峰, 欧晓昆, 崔保山 (2005) 纵向岭谷区生态系统变化及西南跨境生态安全研究. 地球科学进展, 20, 338–344.]
- He JF, Su CJ, Shu L, Yang Z (2009) A 3S-based study on land use and land cover change in the Jinsha River xerothermic valley—A case of Yuanmou County, Yunnan Province. *Journal of Mountain Science*, 27, 341–348. (in Chinese with English abstract) [何锦峰, 苏春江, 舒兰, 杨忠 (2009) 基于3S技术的金沙江干热河谷区LUCC研究-以云南省元谋县为例. 山地学报, 27, 341–348.]
- He KZ, He HS, Cai HB (1996) Formation and evolution of the western Yunnan orogenic belt. *Geological Review*, 42, 97–106. (in Chinese with English abstract) [何科昭, 何浩生, 蔡红飘 (1996) 滇西造山带的形成与演化. 地质论评, 42, 97–106.]
- He YB, Lu PZ, Zhu T (2000) Causes for the formation of dry-hot valleys in Hengduan Mountain-Yunnan Plateau. *Resources Science*, 22, 69–72. (in Chinese with English abstract) [何永彬, 卢培泽, 朱彤 (2000) 横断山-云南高原干热河谷形成原因研究. 资源科学, 22, 69–72.]
- He YR, Huang CM (1995) Soil taxonomic classification in Yuanmou dry-hot valley, Yunnan Province. *Mountain Research*, 13, 73–78. (in Chinese with English abstract) [何毓蓉, 黄成敏 (1995) 元谋干热河谷土壤分类. 山地研究, 13, 73–78.]
- Hu FG, Duan CF, Liu GH (2007) Investigation of alien invasive weed in farmland of Nujiang dry hot area in Yunnan Province. *Weed Science*, (4), 20–23. (in Chinese) [胡发广, 段春芳, 刘光华 (2007) 云南怒江干热河谷区农田外来入侵杂草研究. 杂草科学, (4), 20–23.]
- Huang CM, He YR (1997) Dynamic variation of soil water in Yuanmou dry-hot valley, Yunnan Province. *Mountain Research*, 15, 234–238. (in Chinese with English abstract) [黄成敏, 何毓蓉 (1997) 云南省元谋干热河谷土壤水分的动态变化. 山地研究, 15, 234–238.]
- Ji ZH, Li JZ, Sha YC (1999) Study on the recovery mode and benefit of land degradation in dry-hot valley vegetation. *Soil and Water Conservation in China*, (7), 27–29. (in Chinese with English abstract) [纪中华, 李建增, 沙毓沧 (1999) 金沙江干热河谷退化土地植被恢复模式及效益研究. 中国水土保持, (7), 27–29.]
- Ji ZH, Liu GH, Duan YT, Sha YC, Li JZ (2003) Model of plantation restoration and ecological agriculture in fragile ecological environment in arid hot valley of Jinsha River. *Journal of Soil Water Conservation*, 17(5), 19–22. (in Chinese with English abstract) [纪中华, 刘光华, 段曰汤, 沙毓沧, 李建增 (2003) 金沙江干热河谷脆弱生态系统植被恢复及可持续生态农业模式. 水土保持学报, 17(5), 19–22.]
- Ji ZH, Pan ZX, Sha YC, Fang HD, Liao CF, Bai DZ, Yang YX (2006) Model construction of ecological restoration in arid hot valley of Jinsha River. *Journal of Agro-Environment Science*, 25(S2), 716–720. (in Chinese with English abstract) [纪中华, 潘志贤, 沙毓沧, 方海东, 廖承飞, 拜得珍, 杨艳鲜 (2006) 金沙江干热河谷生态恢复的典型模式. 农业环境科学学报, 25(S2), 716–720.]
- Jiang HQ (1980) Characteristics and zonality of vegetation distribution in Yunnan. *Acta Botanica Yunnanica*, 2, 22–32. (in Chinese with English abstract) [姜汉侨 (1980) 云南植被分布的特点及其地带规律性. 云南植物研究, 2, 22–32.]
- Jiang R, Fang R, Chen XP, Shen ZH (2013) Study on the influence and countermeasures of highway construction on biodiversity in Sanjiang area. *Highway Traffic Science and Technology (Application Technology Edition)*, (12), 341–345. (in Chinese with English abstract) [姜睿, 房锐, 陈学平, 沈泽昊 (2013) 三江并流区公路建设对生物多样性的影响分析及对策研究. 公路交通科技(应用技术版), (12), 341–345.]
- 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) [金振洲 (1998) 滇川干暖河谷种子植物植物区系研究. 广西植物, 18, 313–321.]
- Jin ZZ (2002) The Features of Floras in the Dry-hot and Dry-warm Valleys in Yunnan and Sichuan Provinces. *Yunnan Science and 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 (1998) The phytosociological classification of Braun Blangute's syntaxa for the dry-hot valley vegetation in Yunnan-Sichuan region. *Acta Botanica Yunnanica*, 20, 279–294. (in Chinese with English abstract) [金振洲, 欧晓昆 (1998) 滇川干热河谷植被布朗布朗咯群落分类单位的植物群落学分类. 云南植物研究, 20, 279–294.]
- Jin ZZ, Ou XK (2000) The Vegetation of Dry Hot Valley of Yuanjiang River, Nujiang River, Jinsha River, Lancang River. *Yunnan Science and 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. 云南科技出版社, 昆明.]
- Jin ZZ, Ou XK, Zhou Y (1987) The general situation of natural vegetation in dry hot river valley of Yuanmou, Yunnan Province. *Acta Phytocologica Et Geobotanica Sinica*, 11, 308–317. (in Chinese) [金振洲, 欧晓昆, 周跃 (1987) 云南元谋干热河谷植被概况. 植物生态学与地植物学报, 11, 308–317.]
- Jin ZZ, Yang YP, Tao GD (1995) The floristic characteristics, nature and origin of seed plants in the dry hot river valley of southwestern of 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 K, Liu FY, Yang ZY, Sun YY (2011) Study status and trends of vegetation restoration of dry-hot valley in Southwest China. *World Forestry Research*, 24(4), 55–60. (in Chinese with English abstract) [李昆, 刘方炎, 杨振寅, 孙永玉 (2011) 中国西南干热河谷植被恢复研究现状与发

- 展趋势. 世界林业研究, 24(4), 55–60.]
- Li K, Zeng JM (1999) Effects of some tree species on soil in Yuanmou hot-dry valley. *Journal of Southwest Forestry College*, 19(3), 161–164. (in Chinese with English abstract) [李昆, 曾觉民 (1999) 元谋干热河谷地区不同造林树种对土壤的改良作用研究. 西南林学院学报, 19(3), 161–164.]
- Li K, Zhang CH, Cui YZ, Zhao YH, Shi YZ (2004) A study on the fitting afforestation tree species during converting the land for forestry in hot and arid valley of Jinsha River. *Forest Research*, 17, 555–563. (in Chinese with English abstract) [李昆, 张春华, 崔永忠, 赵一鹤, 施永泽 (2004) 金沙江干热河谷区退耕还林适宜造林树种筛选研究. 林业科学研究, 17, 555–563.]
- Li MS (1991) Rational land exploitation of dry valleys in the Hengduan Mountains region. *Journal of Natural Resources*, 6, 326–334. (in Chinese with English abstract) [李明森 (1991) 横断山区干旱河谷土地合理开发. 自然资源学报, 6, 326–334.]
- Li MY, Wang SY, Jiang R, Zhang W (2012) Analysis of land use/cover and landscape pattern change in the dry-hot valley (DHV) area: a case study in Derong County. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 30, 60–66. (in Chinese with English abstract) [李苗裔, 王石英, 蒋容, 张伟 (2012) 干热河谷区土地利用/覆被和景观格局变化分析——以得荣县为例. 四川农业大学学报, 30, 60–66.]
- Li XH, Liu YH, Liu Y, Xu Y, Yang Y, Shen ZH (2016) Impacts of geographical distances and environmental differences on the beta diversity of plant communities in the dry-hot valley of Yuanjiang River. *Biodiversity Science*, 24, 399–406. (in Chinese with English abstract) [李新辉, 刘延虹, 刘晔, 许玥, 杨阳, 沈泽昊 (2016) 地理距离及环境差异对云南元江干热河谷植物群落beta多样性的影响. 生物多样性, 24, 399–406.]
- 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, Shi JP, Chen XM (2007) Characteristics of plant communities and their soil fertilities in dry-hot valley of Yuanjiang County, Yunnan, China. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 13, 782–787. (in Chinese with English abstract) [刘方炎, 朱华, 施济普, 陈晓鸣 (2007) 元江干热河谷植物群落特征及土壤肥力研究. 应用与环境生物学报, 13, 782–787.]
- Liu GC, Liu SZ (1998) Impact on desertification of water environment characteristics of the dry-hot valley of Jinsha River. *Mountain Research*, 16, 156–159. (in Chinese with English abstract) [刘刚才, 刘淑珍 (1998) 金沙江干热河谷区水环境特性对荒漠化的影响. 山地研究, 16, 156–159.]
- Liu H, Chen QB, Wang KQ, Zhou L (2012) Soil erosion properties in typical section of dry-hot valley of Jinsha basin. *Journal of Soil and Water Conservation*, 26(5), 28–33. (in Chinese with English abstract) [刘海, 陈奇伯, 王克勤, 周玲 (2012) 金沙江干热河谷典型区段水土流失特征. 水土保持学报, 26(5), 28–33.]
- Liu LH (1989) Vegetational types of the arid valleys in the Hengduan mountainous 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, Zhu XX, Shen ZH, Sun H (2016a) Flora compositions and spatial differentiations of vegetation in dry valleys of Southwest China. *Biodiversity Science*, 24, 367–377. (in Chinese with English abstract) [刘晔, 朱鑫鑫, 沈泽昊, 孙航 (2016a) 中国西南干旱河谷植被的区系地理成分与空间分异. 生物多样性, 24, 367–377.]
- Liu Y, Li P, Xu Y, Shi SL, Ying LX, Zhang WJ, Peng PH, Shen ZH (2016b) 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 (2016b) 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.]
- Liu Y, Peng PH, Shi SL, Xu Y, Shen ZH (2016c) Quantitative classification and environmental interpretations for the structural differentiation of the plant communities in the dry valley of Jinshajiang River. *Biodiversity Science*, 24, 407–420. (in Chinese with English abstract) [刘晔, 许玥, 石松林, 彭培好, 沈泽昊 (2016) 金沙江干旱河谷植物群落的数量分类及其结构分异的环境解释. 生物多样性, 24, 407–420.]
- Liu Y, Shen LF, Wang T, Fang R, Jiang R, Shen ZH (2013) The intrusion pattern and influence factors of *Eupatorium adenophorum* along the highways of Sanjiang area in northwest Yunnan. *Highway Traffic Science and Technology (Application Technology Edition)*, (5), 284–288. (in Chinese with English abstract) [刘晔, 沈利峰, 王韬, 房锐, 姜睿, 沈泽昊 (2013) 滇西北三江并流地区公路沿线紫茎泽兰的入侵格局及影响因素. 公路交通科技(应用技术版), (5), 284–288.]
- Lu PZ, Zhu T, He YB (2000) Water and soil erosion in Hong River Basin. *Yunnan Environmental Science*, 19(1), 21–23. (in Chinese with English abstract) [卢培泽, 朱彤, 何永彬 (2000) 云南红河流域的水土流失与重点防治. 云南环境科学, 19(1), 21–23.]
- Luo H, Wang KQ (2006) Study on the soil seed bank and vegetation of mountain vegetation restoration area, Jinsha River hot-valley. *Acta Ecologica Sinica*, 26, 2432–2442. (in Chinese with English abstract) [罗辉, 王克勤 (2006) 金沙江干热河谷山地植被恢复区土壤种子库和地上植被研究. 生态学报, 26, 2432–2442.]
- Ma HC, McConchie JA (2001) The dry-hot valleys and foresta-

- tion in Southwest China. *Journal of Forestry Research*, 12, 35–39.
- Ma HC, Zeng XH (2006) Vegetation restoration in the dry and dry-hot valley areas. *Journal of Southwest Forestry College*, 25(4), 52–55. (in Chinese with English abstract) [马焕成, 曾小红 (2006) 干旱和干热河谷及其植被恢复. *西南林学院学报*, 25(4), 52–55.]
- McKnight M, White P, McDonald R, Lamoreux J, Sechrest W, Ridgely R, Stuart S (2007) Putting beta-diversity on the map: broad-scale congruence and coincidence in the extremes. *PLoS Biology*, 5, 2424–2432.
- Min ST, Wang SJ (2008) Valley morphological characteristics, development law and their cause in the longitudinal rang-gorge region. *Journal of Mountain Science*, 25, 524–533. (in Chinese with English abstract) [闵石头, 王随继 (2008) 滇西纵向岭谷区河谷形态特征, 发育规律及成因. *山地学报*, 25, 524–533.]
- Ming QZ (2006) The progress and significance of the research on the evolution of landforms and environment in the three parallel rivers area in north longitudinal range-gorge region. *Journal of Yunnan Normal University (Natural Science Edition)*, 26(3), 56–61. (in Chinese with English abstract) [明庆忠 (2006) 纵向岭谷北部三江并流区地貌与环境演化研究的进展及其重要意义. *云南师范大学学报(自然科学版)*, 26(3), 56–61.]
- Ming QZ, Shi ZT (2007) New discussion on dry valley formation in the three parallel rivers region. *Journal of Desert Research*, 27, 99–107. (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.]
- Ou CR, Zhu QK, Sun YY (2015) Research progress in the landscape pattern of dry-hot valley in Southwest China. *Journal of West China Forestry Science*, 44(6), 137–142. (in Chinese with English abstract) [欧朝蓉, 朱清科, 孙永玉 (2015) 中国西南干热河谷景观格局研究进展. *西部林业科学*, 44(6), 137–142.]
- Ou XK (1988) The study of flora in Yuanmou dry-hot river valley. *Acta Botanica Yunnanica*, 10, 11–18. (in Chinese with English abstract) [欧晓昆 (1988) 元谋干热河谷植物区系研究. *云南植物研究*, 10, 11–18.]
- Ou XK (1994) Ecological condition and ecological construction in dry-hot valley of Yunnan Province. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 3, 271–276. (in Chinese with English abstract) [欧晓昆 (1994) 云南省干热河谷地区的生态现状与生态建设. *长江流域资源与环境*, 3, 271–276.]
- Ou XK, Jin ZZ (1987) A research on the vegetation types of the dry-hot river valley in Yuanmou. II. Units above association. *Acta Botanica Yunnanica*, 9, 18–35. (in Chinese with English abstract) [欧晓昆, 金振洲 (1987) 元谋干热河谷植被的类型研究. II. 群丛以上单位. *云南植物研究*, 9, 18–35.]
- Ou XK, Jin ZZ (1996) A preliminary study on the flora and ecological diversity in Jinsha River dry-hot valley. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 14, 318–322. (in Chinese with English abstract) [欧晓昆, 金振洲 (1996) 金沙江干热河谷植物区系和生态多样性的初步研究. *武汉植物学研究*, 14, 318–322.]
- Ren HY, Liu JG, Wang AJ, Zou X (2007) Actualities of land use in upper Yangtze River Basin typical spots. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 24(5), 16–20. (in Chinese with English abstract) [任洪玉, 刘纪根, 王爱娟, 邹翔 (2007) 长江上游典型样区土地利用现状初步分析. *长江科学院院报*, 24(5), 16–20.]
- Richner H, Phillips PD (1984) A comparison of temperature from mountain tops and the free atmosphere—their diurnal variation and mean difference. *Monthly Weather Review*, 112, 1328–1340.
- Shen R, Zhang JL, He B, Li F, Zhang ZM, Zhou R, Ou XK (2010) The structure characteristic and analysis on similarity of grassland community in dry-hot valley of Yuan river. *Ecology and Environmental Sciences*, 19, 2821–2825. (in Chinese with English abstract) [沈蕊, 张建利, 何彪, 李峰, 张志明, 周睿, 欧晓昆 (2010) 元江流域干热河谷草地植物群落结构特征与相似性分析. *生态环境学报*, 19, 2821–2825.]
- Shen YC, Gong GY (1986) *The Introduction to Fluvial Geomorphology*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [沈玉昌, 龚国元 (1986) *河流地貌学概论*. 科学出版社, 北京.]
- Shen ZH, Zhang ZM, Hu JM, Han J, Yang JD, Ying LX (2016) Protection and utilization of plant biodiversity resources in dry valleys of Southwest China. *Biodiversity Science*, 24, 475–488. (in Chinese with English abstract) [沈泽昊, 张志明, 胡金明, 韩杰, 杨济达, 应凌霄 (2016) 西南干旱河谷植物多样性资源的保护与利用. *生物多样性*, 24, 475–488.]
- Shi CC, Yong GW (2001) Present situation of the ecological environment and the countermeasures for reconstruction of the ecological environment of xerothermic and droughty river valley areas in the upper reach of the Yangtze River. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 14, 114–118. (in Chinese with English abstract) [石承苍, 雍国玮 (2001) 长江上游干热干旱河谷生态环境现状及生态环境重建的对策. *西南农业学报*, 14, 114–118.]
- Tang MC, Shen ZB, Chen YY (1979) Average climatic characteristics of the plateau monsoon. *Acta Geographica Sinica*, 34, 33–42. (in Chinese with English abstract) [汤懋苍, 沈志宝, 陈有虞 (1979) 高原季风的平均气候特征. *地理学报*, 34, 33–42.]
- Vamosi SM, Heard SB, Vamosi JC, Webb CO (2008) Emerging patterns in the comparative analysis of phylogenetic community structure. *Molecular Ecology*, 18, 572–592.
- Wang KQ, Qi JC (2000) Study on the growth of *Eucalyptus camaldulensis* in dry hot-valley of Yuanmou. *Journal of Southwest Forestry University*, 20(2), 67–73. (in Chinese with English abstract) [王克勤, 起家聪 (2000) 元谋干热

- 河谷赤桉林生长规律研究. 西南林学院学报, 20(2), 67–73.]
- Webb CO, Ackerly DD, McPeck MA, Donoghue MJ (2002) Phylogenies and community ecology. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 33, 475–505.
- Wu CY (1980) *Vegetation of China*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [吴征镒 (1980) 中国植被. 科学出版社, 北京.]
- Wu CY, Sun H, Zhou ZK, Peng H, Li DZ (2005) Origin and differentiation of endemism in the flora of China. *Acta Botanica Yunnanica*, 27, 577–604. (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, 577–604.]
- Wu CY, Zhu YC (1987) *Vegetation of Yunnan*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [吴征镒, 朱彦丞 (1987) 云南植被. 科学出版社, 北京.]
- Xu JC, Zhang PF, Wang YH (2003) Land use and land cover in Lancang watershed of Yunnan. *Acta Botanica Yunnanica*, 25, 145–154. (in Chinese with English abstract) [许建初, 张佩芳, 王雨华 (2003) 云南澜沧江流域土地利用和覆盖变化. 云南植物研究, 25, 145–154.]
- Xu Y, Li P, Liu Y, Zhang WJ, Qin SY, Shen ZH (2016) Spatial patterns and determinants of species richness of alien and native plants in the Nujiang River valley. *Biodiversity Science*, 24, 389–398. (in Chinese with English abstract) [(许玥, 李鹏, 刘晔, 张婉君, 秦思雨, 沈泽昊 (2016) 怒江河谷入侵植物与乡土植物丰富度的分布格局与影响因子. 生物多样性, 24, 389–398.]
- Xu ZF, Tao GD, Yu PH, Wang YL (1985) An approach to the vegetational changes from Yuan River dry-hot valley of Yunnan in the last 500 years. *Acta Botanica Yunnanica*, 7, 403–412. (in Chinese with English abstract) [许再富, 陶国达, 禹平华, 王耀龙 (1985) 元江干热河谷山地五百年来植被变迁探讨. 云南植物研究, 7, 403–412.]
- Yang QY, Shen KD (1984) On vertical zonation of the north-western Yunnan. *Acta Geographica Sinica*, 39, 141–147. (in Chinese with English abstract) [杨勤业, 沈康达 (1984) 滇西北横断山地区的垂直自然带. 地理学报, 39, 141–147.]
- Yang QY, Zheng D, Liu YH (1988) The natural features and its exploitation and utilization of arid valleys of the Hengduan Mountains. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2(2), 17–24. (in Chinese with English abstract) [杨勤业, 郑度, 刘燕华 (1988) 横断山地区干旱河谷的自然特点及其开发利用. 干旱区资源与环境, 2(2), 17–24.]
- Yang Y, Han J, Liu Y, Zhongyong CR, Shi SL, Sina XL, Xu Y, Ying LX, Zhang WJ, Shen ZH (2016) A comparison of the altitudinal patterns in plant species diversity within the dry valleys of the Three Parallel Rivers region, northwestern Yunnan. *Biodiversity Science*, 24, 440–452. (in Chinese with English abstract) [杨阳, 韩杰, 刘晔, 忠永茨仁, 石松林, 斯那此里, 许玥, 应凌霄, 张婉君, 沈泽昊 (2016) 三江并流地区干旱河谷植物物种多样性海拔梯度格局比较. 生物多样性, 24, 440–452.]
- Yang Z, Zhang JH, Xu JZ, Luo J, Zhang XB (2000) Growth responses of eucalyptus artificial population to slopes in dry-hot valleys, Yuanmou, Yunnan. *Journal of Soil Water Conservation*, 14(5), 2–14. (in Chinese with English abstract) [杨忠, 张建辉, 徐建忠, 罗辑, 张信宝 (2000) 元谋干热河谷不同岩土组成坡地桉树人工林生长特征初步研究. 水土保持学报, 14(5), 2–14.]
- Yang ZP, Chang Y (2007) Ecology and its research progress of the dry hot valley in Southwest China. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 25, 90–99. (in Chinese with English abstract) [杨兆平, 常禹 (2007) 我国西南主要干旱河谷生态及其研究进展. 干旱地区农业研究, 25, 90–99.]
- Yang ZS, He YM, Li YH, Zhang YL, Wang YP (2004) Land use change and soil erosion control in dry-hot valley zone in the middle reaches of Jinsha River during 1960–2000: a case study in Binchuan County, Yunnan Province. *Progress in Geography*, 23(2), 16–26. (in Chinese with English abstract) [杨子生, 贺一梅, 李云辉, 张义琳, 王云鹏 (2004) 近40年来金沙江南岸干热河谷区的土地利用变化及其土壤侵蚀治理研究——以云南宾川县为例. 地理科学进展, 23(2), 16–26.]
- Yang ZY, Su JR, Li CF, Wang Y, Li ZH (2008) Species diversity of main communities in hot and dry valley, Yuanmou County. *Forest Research*, 21, 200–205. (in Chinese with English abstract) [杨振寅, 苏建荣, 李从富, 王云, 李正红 (2008) 元谋干热河谷主要植物群落物种多样性研究. 林业科学研究, 21, 200–205.]
- Yang ZY, Su JR, Luo D, Li ZH, Chen XM (2007) Progress and perspectives on vegetation restoration in the dry-hot valley. *Forest Research*, 20, 563–568. (in Chinese with English abstract) [杨振寅, 苏建荣, 罗栋, 李正红, 陈晓鸣 (2007) 干热河谷植被恢复研究进展与展望. 林业科学研究, 20, 563–568.]
- Yao HR, Cui BS (2006) The effect of Land use and its change on soil erosion of the Lancang River watershed in Yunnan Province. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 26, 1362–1371. (in Chinese with English abstract) [姚华荣, 崔保山 (2006) 澜沧江流域土地利用及其变化对土壤侵蚀的影响. 环境科学学报, 26, 1362–1371.]
- Zhang JL, Liu XK, Shen R, Shi W, Zhang ZM, Zhou R, Ou XK (2010b) The species quantitative & diversity characteristic of grassland community in hot-dry valley of Jinsha River. *Ecology and Environmental Sciences*, 19, 1519–1524. (in Chinese with English abstract) [张建利, 柳小康, 沈蕊, 施雯, 张志明, 周睿, 欧晓昆 (2010b) 金沙江流域干热河谷草地群落物种数量及多样性特征. 生态环境学报, 19, 1519–1524.]
- Zhang JL, Shen R, Shi W, Liu XK, Ou XK (2010a) The structure and similarity characteristic of the grassland community in hot-dry valley upper middle and lower of Jinsha River. *Ecology and Environmental Sciences*, 19, 1272–1277. (in Chinese with English abstract) [张建利, 沈蕊, 施雯, 柳小

- 康, 欧晓昆 (2010a) 金沙江流域干热河谷上中下游草地植物群落结构与相似性. *生态环境学报*, 19, 1272–1277.]
- Zhang JP, Liu SZ (1998) A preliminary study on land degradation in Panzhihua city on Jinsha river dry-hot valley area. *Journal of Desert Research*, 18, 150–153. (in Chinese with English abstract) [张建平, 刘淑珍 (1998) 金沙江干热河谷区攀枝花市土地退化初探. *中国沙漠*, 18, 150–153.]
- Zhang JP, Yang Z, Zhuang Z (2001) Soil and water erosion status and countermeasures in Yuanmou dry-hot valley. *Yunnan Geographic Environment Research*, 13(2), 22–27. (in Chinese with English abstract) [张建平, 杨忠, 庄泽 (2001) 元谋干热河谷区水土流失现状及治理对策. *云南地理环境研究*, 13(2), 22–27.]
- Zhang JY, Xu Y, Su CJ, Liu XL (2005) Research progress on vegetation restoration in the dry-hot valleys of the Jinsha River. *Research of Soil and Water Conservation*, 12(6), 101–104. (in Chinese with English abstract) [张金盈, 徐云, 苏春江, 刘兴亮 (2005) 金沙江干热河谷植被恢复研究进展. *水土保持研究*, 12(6), 101–104.]
- Zhang RZ (1992) *The Arid Valley of Hengduan Mountains*. 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 XB, Yang Z, Zhang JP (2003) Lithologic types on hill slopes and revegetation zoning in the Yuanmou hot-dry valley. *Scientia Silvae Sinicae*, 39(4), 16–22. (in Chinese with English abstract) [张信宝, 杨忠, 张建平 (2003) 元谋干热河谷坡地岩土类型与植被恢复分区. *林业科学*, 39(4), 16–22.]
- Zhang YC, Li JJ, Kuang MS, Chen Y (1999) Studies on development of Yuanmou basin and valleys during late Cenozoic. *Journal of Lanzhou University*, 35, 199–205. (in Chinese with English abstract) [张叶春, 李吉均, 况明生, 陈晔 (1999) 晚新生代元谋盆地演化与河谷发育研究. *兰州大学学报(自然科学版)*, 35, 199–205.]
- Zhao L, Lang NJ, Zheng K, Peng MJ (2006) A study on eco-environmental characteristics of dry and hot valley of Yunnan Province. *Forest Inventory and Planning*, 31(3), 114–117. (in Chinese with English abstract) [赵琳, 郎南军, 郑科, 彭明俊 (2006) 云南干热河谷生态环境特性研究. *林业调查规划*, 31(3), 114–117.]
- Zheng D, Yao TD (2004) *The Uplift of the Tibetan Plateau and 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.]
- Zheng YC, Gao SH, Chai ZX (1986) A preliminary study on the vertical natural zones in the Hengduan mountainous region. *Journal of Mountain Science*, 4, 76–83. (in Chinese with English abstract) [郑远昌, 高生淮, 柴宗新 (1986) 试论横断山地区自然垂直带. *山地学报*, 4, 76–83.]
- Zhong XH (2000) degradation of ecosystem and ways of its rehabilitation and reconstruction in dry and hot valley-take representative area of jinsha river, Yunnan province as an example. *Resources and environment in the Yangtze Basin*, 9, 376–383. (in Chinese with English abstract) [钟祥浩 (2000) 干热河谷区生态系统退化及恢复与重建途径: 以云南金沙江典型区为例. *长江流域资源与环境*, 9, 376–383.]
- Zhou L (1996) Vegetation evolution in Yuanmou dry-hot valley since Quaternary period. *Mountain Research*, 14, 239–243. (in Chinese with English abstract) [周麟 (1996) 云南省元谋干热河谷的第四纪植被演化. *山地研究*, 14, 239–243.]
- Zhou Y, Jin ZZ (1987) A research on the vegetation types of the dry-hot river valley in Yuanmou. II. Units below association. *Acta Botanica Yunnanica*, 9, 1–3. (in Chinese with English abstract) [周跃, 金振洲 (1987) 元谋干热河谷植被的类型研究. II. 群丛以下单位. *云南植物研究*, 9, 1–3.]
- Zhu H (2008) Distribution patterns of genera of Yunnan seed plants with references to their biogeographical significances. *Advances in Earth Science*, 23, 831–839. (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, 831–839.]

(责任编辑: 朱华 责任编辑: 时意专)