

刘方炎, 高成杰, 李昆, 张春华. 西南干热河谷植物群落稳定性及其评价方法[J]. 应用与环境生物学报, 2021, 27 (2): 334-350

Liu FY, Gao CJ, Li K, Zhang CH. Stability and evaluation methods of plant communities in the dry-hot valleys of Southwest China [J]. Chin J Appl Environ Biol, 2021, 27 (2): 334-350

# 西南干热河谷植物群落稳定性及其评价方法

刘方炎<sup>1,2</sup>✉ 高成杰<sup>1,2</sup> 李昆<sup>1,2</sup> 张春华<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中国林业科学研究院资源昆虫研究所 昆明 650233

<sup>2</sup>云南元谋荒漠生态系统国家定位观测研究站 元谋 651300

**摘要** 干热河谷是我国西南地区高山峡谷地貌下形成的一种特殊的生境类型; 植物群落稳定性研究对揭示该区域植物群落动态特征和变化规律具有重要理论和实践意义. 采用植物多样性与群落结构特征指标、土壤肥力指标、土壤微生物与酶活性指标以及群落优势种幼苗更新特征与凋落物生物量指标等反映群落稳定性的数量特征指标构建植物群落稳定性评价模型. 利用改进的层次分析法确定指标权重, 根据历年来西南干热河谷区相关研究结果确定各指标基准值, 采用极差法对各指标进行标准化处理, 通过综合评价指数法计算群落稳定性. 同时, 采用该评价方法体系评价元江干热河谷不同类型人工恢复植物群落以及虾子花 (*Woodfordia fruticosa*) 天然次生灌草丛群落的稳定性. 结果表明, 元江干热河谷不同类型植物群落稳定性综合评价指数在0.9-2.0之间. 其中, 久树 (*Schleichera trijuga*) 人工恢复植物群落稳定性指数最高 (1.93), 是该区域唯一超过天然次生植被虾子花灌草丛群落稳定性 (1.53) 的人工恢复植物群落. 其他植物群落中, 印楝 (*Azadirachta indica*) 群落和铁刀木 (*Cassia siamea*) 群落稳定性居中, 综合评价指数均高于1.0; 清香木 (*Pistacia weinmanniifolia*) 群落和车桑子 (*Dodonaea viscosa*) 群落稳定性相对较低, 分别为0.99和0.93. 采用该评价体系可以直观地量化群落内各评价指标以及群落稳定性综合评价指数在西南干热河谷区不同类型植物群落中所处的位置和状态; 评价结果与群落外貌、群落生长概况以及群落内部环境状况基本一致, 较好地反映了群落稳定性的实际情况. 另一方面, 适宜树种的选择在干热河谷人工植被恢复过程中起着非常关键的作用; 久树、印楝和铁刀木应是元江干热河谷人工植被恢复较适宜的树种, 经过一段时间的生长能够形成较稳定的植物群落. (图6 表7 参133 附表4)

**关键词** 群落稳定性; 层次分析法; 植物多样性; 土壤特征; 干热河谷

## Stability and evaluation methods of plant communities in the dry-hot valleys of Southwest China

LIU Fangyan<sup>1,2</sup>✉, GAO Chengjie<sup>1,2</sup>, LI Kun<sup>1,2</sup> & ZHANG Chunhua<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Research Institute of Resources Insects, Chinese Academy of Forestry, Kunming 650233, China

<sup>2</sup>Yuanmou Desert Ecosystem Research Station in Yunnan Province, Yuanmou 651300, China

**Abstract** Dry and hot valleys are special type of habitat formed under alpine gorges in Southwest China. Understanding plant community stability can help determine what drives changes in community characteristics in this area. In this study, a plant community stability evaluation model was established using quantitative characteristic indicators reflecting the stability of the community, such as plant diversity, community structure, soil fertility, soil microorganisms, soil enzyme activity, seedling regeneration characteristics, and litter biomass of dominant species in the community. An improved analytic hierarchy process was used to determine indicator weights and benchmark values of each indicator according to relevant research results of dry and hot valleys in Southwest China. The range method was used to standardize each indicator, and community stability was calculated using the comprehensive evaluation index method. The stability of different types of artificially restored plant communities as well as *Woodfordia fruticosa* natural secondary shrub and grass communities in dry and hot valleys of the Yuanjiang River were evaluated using the evaluation method system. The comprehensive evaluation index of stability of different types of plant communities in the dry and hot valleys of the Yuanjiang River ranged from 0.9–2.0. Among them, the stability index of the artificially restored *Schleichera trijuga* plant community was the highest (1.93). This community was the only artificially restored plant community that exceeded the stability index of *W. fruticosa* natural secondary shrub and grass communities (1.53). The stabilities of the *Azadirachta indica* and *Cassia siamea* communities were average, with a comprehensive evaluation index higher than 1.0. The stabilities of the *Pistacia weinmanniifolia* and *Dodonaea viscosa*

收稿日期 Received: 2021-01-16 接受日期 Accepted: 2021-03-26

国家重点研发计划项目 (2017YFC0505101) 资助 Supported by the National Key R&D Program of China (2017YFC0505101)

✉通讯作者 Corresponding author (E-mail: Lfyan701@163.com)

communities were relatively low (0.99 and 0.93, respectively). The position and status of each evaluation index and comprehensive evaluation index of community stability in different types of plant communities in the dry and hot valleys of Southwest China could be visually quantified using this evaluation system. The results of this evaluation were consistent with the appearance, growth profile, and internal environmental conditions of the community, which better reflected actual community stability. The selection of suitable tree species plays a key role in the restoration of artificial vegetation in dry and hot valleys. *Schleichera trijuga*, *A. indica*, and *C. siamea* are suitable tree species for artificial vegetation restoration in the dry and hot valleys of the Yuanjiang River. They can form relatively stable plant communities after a short period of growth.

**Keywords** plant community stability; Analytic Hierarchy Process; plant diversity; soil characteristics; dry-hot valley

如何量化评价植物群落稳定性是群落生态学研究长期关注的一个热点问题。1972年,法国生态学家Godron以群落内各种植物出现的相对频度与植物种类的数量之间的关系作为群落稳定性的判定依据提出了经典的Godron指数法<sup>[1]</sup>,首次对群落稳定性进行了实际可操作地量化评价,并被许多学者大量引用<sup>[2-6]</sup>。数十年来,尽管生态学家选取了多项指标,采用不同的数学分析方法对群落稳定性进行了量化评价<sup>[7-12]</sup>,但由于植物群落或生态系统的多样性和复杂性,迄今还没有一个统一的、具有可比性的、被广泛接受的植物群落稳定性评价的方法体系或模式。

现有的植物群落稳定性评价方法大体上可以归纳为两大类:一是基于不同生态指标的生物生态学法,即选取群落结构和外貌特征、植物种类组成、物种多样性、优势种年龄结构、种群密度、空间结构、植被生产力、生物量等单个或几个指标评价群落稳定性<sup>[8, 13-16]</sup>;另一类是基于主成分分析法、层次分析法、隶属函数值法等数学分析方法和群落演替模型、微分方程模型、食物网模型等数学模型的数学生态学法,即在建立评价指标体系的基础上,通过建立数学模型求取系统的平衡稳定点,量化群落稳定性评价指标<sup>[10-12, 17-21]</sup>。对于前一类方法来说,由于影响群落或生态系统的因素较多,同一指标在不同的群落类型或生态系统中的作用存在较大差异,因此,基于不同生态指标的生物生态学法度量群落稳定性过分强调了特定指标的重要性,与群落的实际状态存在较大偏差。而目前运用较多的、利用数学生态学法评价群落稳定性的方法大多理论过于深奥,指标过于繁杂,评价技术复杂,采用常规植物群落调查方法获取的数据难以在评价中加以利用。

植物群落演替理论认为,群落结构越复杂、功能越完善,群落就越稳定,顶极群落才是稳定性最高的群落<sup>[22]</sup>。后来的研究认为,植物群落演替是一个漫长的过程,处于某一特定演替阶段的植物群落在一定的边界范围内保持恒定状态,存在不同的稳定性特征,因此,每个演替阶段都是稳定的群落<sup>[19, 23]</sup>。由此可知,群落稳定性是一个相对的特征,它与研究区域的气候特征、地理位置、植物群落结构、土壤养分特征等因子密切相关。群落稳定性的评价不应存在统一的标准。因此,近年来,部分学者根据研究区域和研究对象的不同建立了不同的评价指标体系<sup>[10, 21, 24]</sup>。

干热河谷主要分布在我国西南的金沙江、元江、澜沧江、怒江及其支流的高、中山峡谷和宽谷盆地区域。低纬度的地理位置、河谷区域的凹陷地形和西南季风气流的影响形成了干热河谷区独特的、四周被湿润温凉环境包围而区域内呈现以“干”和“热”为主要特征的气候环境。经过长期演化,干热河谷植被成为我国植被中比较独特的一种干旱植物群落类

型,呈现出群落结构单一、树木矮化而散生、旱生禾草发达的稀树灌木草丛状,具有非地带性、稀有性和脆弱性等特点<sup>[25-27]</sup>。其中,木本植物不同程度消失,仅剩密集草被层的类型,属于本类型的一个退化阶段<sup>[25, 28]</sup>。长期以来,植被恢复是干热河谷区生态治理和水土保持研究与实践的重要方面。随着人为干扰活动的加剧以及全球气候变暖带来极端天气的频繁出现,干热河谷区生态恢复面临两个日益突出的问题,即维持天然次生植被的稳定性和建立稳定的人工恢复植被。因此,有必要寻找适合该区域定量测度植物群落稳定性及其动态特征的方法,以便针对不同植物群落以及同一群落不同发展阶段的群落稳定性特征进行量化和比较研究,从而掌握该区域植物群落的动态特征和变化规律。我们在西南干热河谷区已有研究基础上,以元江干热河谷不同类型植物群落为例,采用植物多样性与群落结构特征指标、土壤肥力指标、土壤微生物与酶活性指标以及群落优势种幼苗更新特征与凋落物生物量等指标,利用改进的层次分析法和综合评价指数法等构建了植物群落稳定性评价模型,以期为干热河谷不同类型植物群落稳定性特征的评价提供方法体系和科学依据。

## 1 研究方法

### 1.1 研究区概况

干热河谷位于我国西南地区,大致跨越6个纬度和5个经度(23°00'-29°00'N; 98°50'-103°50'E)<sup>[28]</sup>。区域地貌最大的特点是大江、大河及其大支流两侧的高、中山峡谷地貌。金沙江流域的元谋坝区、攀枝花干热河谷区和元江流域的元江坝区、红河县干热河谷是区域内最为典型的干热河谷区。全年降雨量在600-800 mm,年干燥度在1.50-3.99,在我国干旱气候分类系统中,属于半干旱类型<sup>[28-29]</sup>。但区域内降雨量的分配极为不均。雨季短暂(4-5个月),集中了全年降雨量的90%以上,旱季漫长(7-8个月),极为干旱。最冷月平均气温大于12℃,最暖月平均气温24-28℃,日均温≥10℃天数大于350 d。区域土壤以燥红土为主,水稻种植双季稻,一年三熟。气候类型与世界典型萨王纳地区极为类似。区域植被在外观上呈稀树草原状,具有独特的植物区系组成,常被称为“半萨王纳植被(semi-savanna)”或“河谷型萨王纳植被(savanna of valley type)”<sup>[28]</sup>。

### 1.2 研究地点与材料

元江干热河谷区位于云南省南部,是西南干热河谷的最南部区域,位置约在23°00'-25°00'N, 100°30'-103°30'E。本研究所选择的6种植物群落均为元江干热河谷分布面积较大、具有较强代表性和典型性的群落类型(图1)。其中,铁

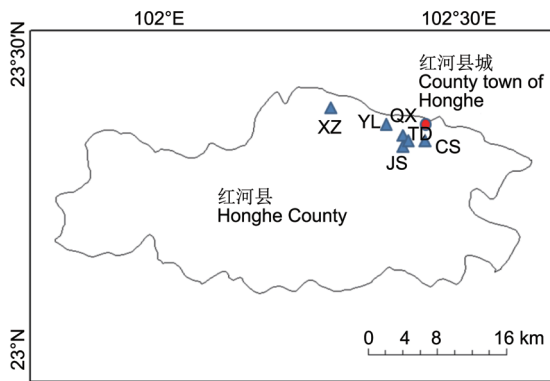


图1 研究区地理位置示意图。TD: 铁刀木群落; JS: 久树群落; CS: 车桑子群落; YL: 印楝群落; QX: 清香木群落; XZ: 虾子花灌草丛。SW: 西南; NW: 西北; N: 北坡; Honghe County: 红河县城。

**Fig. 1 Geographical location of the study area.** TD: *Cassia siamea* community; JS: *Schleichera trijuga* community; CS: *Dodonaea viscosa* community; YL: *Azadirachta indica* community; QX: *Pistacia weinmanniifolia* community; XZ: *Woodfordia fruticosa* community; SW: Southwest; NW: Northwest; N: North.

刀木 (*Cassia siamea*) 群落、车桑子 (*Dodonaea viscosa*) 群落、印楝 (*Azadirachta indica*) 群落和清香木 (*Pistacia weinmanniifolia*) 群落是境内2001-2003年间元江干热河谷退耕还林工程实施过程中营建的人工林; 久树 (*Schleichera trijuga*) 群落是2003年在热区资源开发与利用过程中营建的紫胶寄主林。目前, 这些人工林早已形成以主要造林树种为优势种的人工林群落。而随着紫胶产业的衰落, 久树人工林也失去了其产业功能, 演变为具有水土保持作用的人工恢复植物群落。虾子花 (*Woodfordia fruticosa*) 是元江干热河谷稀树灌草丛植被的重要组成部分, 由其组成的灌草丛植被是该区域典型的天然次生植物群落。本研究选择的调查区域均为各群落所在山坡的下坡位。

### 1.3 数据来源

**1.3.1 样地设置与调查** 2018年7月进行野外样方调查和取样。在每种植物群落中设置6个10 m × 10 m的样方, 调查群落内乔灌木植物; 采用相邻格子法把每个10 m × 10 m的样方细分为4个5 m × 5 m的样方, 在5 m × 5 m的样方正中间设置一个1 m × 1 m的小样方调查群落内的草本层植物。共设置144个1 m × 1 m小样方。对每个10 m × 10 m样方内树高1.5 m以上的植株进行每木检尺 (包括1.3 m以下分枝的乔木), 记录物种名称、胸径 (灌木记录株丛数)、冠幅、生长状况, 以及样方的海拔、坡度、坡向、坡位、优势种更新特征等指标; 在1 m × 1 m的小样方中, 记录物种名称、株 (丛) 数、平均高度及盖度 (共统计65种植物), 以及幼苗名称、高度、数量等林下更新状况, 并判断幼苗年龄 (当年生幼苗或往年生幼苗)。

在每个1 m × 1 m的小样方正中间利用自制金属方框 (0.3 m × 0.3 m) 设置样方收集方框内的凋落物, 并用土钻采集方框内0-20 cm表层土壤, 利用100 cm<sup>3</sup>环刀取样测定土壤容重。将收集的凋落物带回实验室烘干 (85 °C, 24 h) 后测定其生物量, 取平均值后换算成群落内单位面积凋落物生物量。土壤采集后, 人工去除活体根系和可见植物残体, 每一10 m × 10 m样方内的样品充分混匀后作为一个混合样带回实验室 (运输过程中采用保温箱冰袋降温的方法低温保存), 测定土壤理化性质、微生物含量和酶活性特征等。

**1.3.2 植物多样性分析** 采用Simpson多样性指数、Shannon-Wiener多样性指数、Pielou均匀度指数和Margalef丰富度指数对群落中草本层植物多样性特征进行分析。计算公式为

辛普森多样性指数 (Simpson's diversity index):

$$D = 1 - \sum P_i^2$$

香农-威纳指数 (Shannon-Weiner index):

$$H = - \sum P_i \ln P_i$$

Pielou均匀度指数:  $J_{sw} = (- \sum P_i \ln P_i) / \ln S$

Margalef丰富度指数:  $R = (S-1) / \ln N$

式中:  $S$ 为群落中物种数目,  $P_i$ 为属于种 $i$ 的个体在全个体中的比例,  $N_i$ 为种 $i$ 的数目,  $N$ 为所有种的数目。

**1.3.3 土壤理化性质、酶、微生物测定** 土壤样品的测定由云南三标农林科技有限公司完成。土壤理化性质检验依据: 土壤有机质的测定 (NY/T 1121.6-2006); 土壤全氮测定法 (NY/T 53-1987); 森林土壤氮的测定 (LYT1228-2015); 土壤全磷的测定 (GB 7852-87); 土壤有效磷的测定 (NY/T 1121.7-2014); 土壤全钾的测定 (GB 7854-87); 土壤速效钾的测定 (NY/T 889-2004); 土壤微生物 (包括真菌、细菌和放线菌) 的测定采用GB/T 14643.4-2009《第四部分: 土壤真菌的测定平皿计数法》、《土壤微生物生物量测定方法及其应用》; 碱性磷酸酶的测定采用磷酸苯二钠比色法; 脲酶的测定采用苯酚钠-次氯酸钠比色法; 蔗糖酶的测定采用3,5-二硝基水杨酸比色法。

### 1.4 植物群落稳定性评价模型的构建

**1.4.1 指标体系的构建** 在实际研究中, 不同学者针对不同的研究对象赋予了群落稳定性不同的含义。大体可以归纳为3个方面: ① 植物群落外部条件发生变化或存在扰动时系统维持原有结构与功能不变的能力, 即抵抗力稳定性; ② 植物群落受到扰动后恢复到原有状态的能力, 即恢复力稳定性; ③ 植物群落结构与功能保持在一个较高水平、波动较小的能力, 即持久力稳定性<sup>[31-34]</sup>。因此, 本评价指标体系主要从植物群落抵抗力稳定性、恢复力稳定性和持久力稳定性3个方面构建。

**1.4.2 评价指标的选取** 从现阶段不同学者对群落稳定性

表1 植物群落基本概况

Table 1 General situation of the plant communities

| 群落类型<br>Community type | 海拔<br>Altitude | 坡向<br>Aspect | 坡度<br>Slope | 种植密度<br>Dominant species density (n/hm <sup>2</sup> ) | 林下代表植物<br>Representative plants in the understorey                   |
|------------------------|----------------|--------------|-------------|-------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| TD                     | 526 m          | SW           | 23°         | 2017                                                  | 扭黄茅、蔓草虫豆 <i>Heteropogon contortus</i> , <i>Cajanus scarabaeoides</i> |
| JS                     | 530 m          | NW           | 26°         | 2867                                                  | 扭黄茅、狸尾豆 <i>H. contortus</i> , <i>Uria lagopodioides</i>              |
| CS                     | 675 m          | SW           | 18°         | 1650                                                  | 扭黄茅、独穗飘拂草 <i>H. contortus</i> , <i>Fimbristylis monostachya</i>      |
| YL                     | 550 m          | SW           | 31°         | 2551                                                  | 扭黄茅、藿香蓟 <i>H. contortus</i> , <i>Ageratum conyzoides</i>             |
| QX                     | 591 m          | SW           | 22°         | 3267                                                  | 扭黄茅、耳草 <i>H. contortus</i> , <i>Hedyotis auricularia</i>             |
| XZ                     | 597 m          | N            | 15°         | —                                                     | 扭黄茅、水蔗草 <i>H. contortus</i> , <i>Apluda mutica</i>                   |

TD: 铁刀木群落; JS: 久树群落; CS: 车桑子群落; YL: 印楝群落; QX: 清香木群落; XZ: 虾子花灌草丛。SW: 西南; NW: 西北; N: 北坡。

TD: *Cassia siamea* community; JS: *Schleichera trijuga* community; CS: *Dodonaea viscosa* community; YL: *Azadirachta indica* community; QX: *Pistacia weinmanniifolia* community; XZ: *Woodfordia fruticosa* community. SW: Southwest; NW: Northwest; N: North.



的理解来看,在选择群落稳定性评价指标时,应反映植物群落的组成、结构和功能等方面内容.理想情况下,评价指标越多,覆盖面就越广,也越能较好地反映群落稳定性的真实状况.但实际操作中,构建全面覆盖的评价体系是不现实的.因此,在选取评价指标时应兼顾科学性、代表性、可操作性和可信性等原则在诸多指标中进行筛选.目前,有关评价指标选取的方法主要包括以下3种:(1)频度统计法,即选取已有相关评价指标体系中使用频率较高指标;(2)理论分析法,即对群落稳定性内涵和外延进行综合分析和理论对比,选取针对性强的指标;(3)专家咨询法,即以拟定的较全面的群落稳定性评价指标为基础,通过咨询相关专家意见,最终确定评价指标<sup>[35-37]</sup>.

群落稳定性既与生境有关,也与群落结构和功能以及群落内植物多样性和兴旺程度有关.鉴于干热河谷生态环境和植被类型的特殊性和独特性,本文通过频度统计法(查阅文献,选择近年来相关研究中使用频率较高的一些指标)确定干热河谷植物群落稳定性较全面评价指标体系后,结合实际可操作性,最终确定了如下评价指标:即植物多样性指标(雨季时、草本层),包括Shannon-Wiener指数、Simpson指数、Margalef指数、Pielou指数;群落结构指标,包括乔灌草丛、稀树灌草丛、稀树草丛、灌草丛、稀灌草丛和草丛;土壤肥力特征指标,包括土壤有机质、容重、全氮、全磷、全钾、水解氮、有效磷、速效钾;土壤微生物指标,包括细菌、真菌、放线菌;土壤酶活性,包括脲酶、碱性磷酸酶、蔗糖酶;枯落物生物量;优势种幼苗更新.其中,植物多样性指标和群落结构指标归入群落抵抗力;土壤肥力指标、土壤微生物指标、土壤酶活性指标归入群落持久力;优势种幼苗更新特征和枯落物生物量归入群落恢复力.

**1.4.3 评价指标权重的确定** 干热河谷植物群落稳定性评价体系建立之后,需要对评价指标权重进行量化.在指标层权重的赋予上,为了避免片面性和主观性,本文采用改进的层次分析法(improved Analytic Hierarchy Process,简称IAHP

法)确定指标层各项指标权重<sup>[38-40]</sup>.具体步骤如下:

(1)根据干热河谷植物群落稳定性评价指标体系各层之间的关系构建一个自上而下的树状递阶层次结构,据此通过两两比较的形式可构造一个各要素对目标的相对重要性判断矩阵 $A$ ,即 $A_{ij}=2$ 或 $1$ 或 $0$ .其中, $A_{ij}$ 为第 $i$ 因素与第 $j$ 因素相比较的重要性.“2”表示第 $i$ 因素比第 $j$ 因素重要;“1”表示第 $i$ 因素与第 $j$ 因素同等重要;“0”表示第 $i$ 因素没有第 $j$ 因素重要. $A_{ii}=1$ , $A_{jj}=1$ .

(2)计算重要性排序指数 $R_i$ ,即 $R_i=\sum_{j=1}^n A_{ij}$ , $R_i$ 为矩阵 $A$ 中第 $i$ 行元素之和,取 $R_{\max}=\max\{R_i\}$ , $R_{\min}=\min\{R_i\}$ .

(3)构造判断矩阵 $B$ ,即

$$b_{ij}=\begin{cases} \frac{R_i-R_j}{R_{\max}-R_{\min}}\times(k_m-1)+1, & R_i\geq R_j \\ \frac{|R_i-R_j|}{R_{\max}-R_{\min}}\times(k_m-1)+1, & R_i<R_j \end{cases}$$

其中, $k_m=\frac{R_{\max}}{R_{\min}}$ , $m$ 为参评项目层.

(4)求判断矩阵 $B$ 的最优传递矩阵 $C$ ,即 $c_{ij}=\frac{1}{n}\sum_{k=1}^n(\log_{10}\frac{b_{ik}}{b_{jk}})$ , $n$ 为参评指标个数.

(5)求判断矩阵 $B$ 的拟优一致矩阵 $D$ ,即 $d_{ij}=10^{c_{ij}}$ .

(6)求 $D$ 的最大特征值对应的特征向量并进行归一化处理,采取方根法:①计算判断矩阵各行元素的乘积,再开 $n$ 次方根,即 $\bar{W}_n=\sqrt[n]{\prod_{j=1}^n D_{ij}}$ ;②对向量 $\bar{W}_1, \bar{W}_2, \bar{W}_3, \dots, \bar{W}_i, \dots, \bar{W}_n$ ,作归一化处理,即 $W_i=\frac{\bar{W}_i}{\sum_{j=1}^n \bar{W}_j}$ ,则 $W=(W_1, W_2, \dots, W_i, \dots, W_n)^T$ 为所求最大特征值 $\lambda_{\max}$ 对应最大特征向量,也即权重值.由此可得到各指标的权重(表2).

**1.4.4 评价指标的标准化及评价指数的计算** 由于群落稳定性评价指标体系中各项评价指标类型繁多且复杂,判断各指标优劣需要通过一定基准值进行比较确定(即 $X_{\max}$ 和 $X_{\min}$ 值).但到目前为止,各项评价指标并没有公认的基准值标准.本文根据近年来西南干热河谷区相关研究的文献资料(附表

表2 干热河谷植物群落稳定性评价指标体系及其权重  
Table 2 The evaluation index system and weight of plant community stability in the dry-hot valley

| 目标层<br>Target layer                                                                           | 项目层<br>Project level                                                   | 项目层权重<br>Weight of the project | 指标层<br>Index layer                    | 指标层权重<br>Weight of the index | 指标属性<br>Property of the index |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|---------------------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| 干热河谷植物群落稳定性评价体系<br>Evaluation index system of plant community stability in the dry-hot valley | 植物多样性与群落结构<br>Plant diversity and community structure                  | 0.4780                         | Shannon-Wiener指数 Shannon-Wiener index | 0.2539                       | 正 Positive                    |
|                                                                                               |                                                                        |                                | Simpson指数 Simpson index               | 0.2539                       | 正 Positive                    |
|                                                                                               |                                                                        |                                | Margalef指数 Margalef index             | 0.0250                       | 正 Positive                    |
|                                                                                               |                                                                        |                                | Pielou指数 Pielou index                 | 0.0348                       | 正 Positive                    |
|                                                                                               |                                                                        |                                | 群落结构 Community structure              | 0.4324                       | 正 Positive                    |
|                                                                                               | 土壤肥力特征<br>Characteristics of soil nutrient                             | 0.0547                         | 土壤有机质 Organic matter                  | 0.2934                       | 正 Positive                    |
|                                                                                               |                                                                        |                                | 容重 Bulk density                       | 0.2383                       | 负 Negative                    |
|                                                                                               |                                                                        |                                | 全氮 Total N                            | 0.0213                       | 正 Positive                    |
|                                                                                               |                                                                        |                                | 全磷 Total P                            | 0.0213                       | 正 Positive                    |
|                                                                                               |                                                                        |                                | 全钾 Total K                            | 0.0213                       | 正 Positive                    |
|                                                                                               |                                                                        |                                | 水解氮 Available N                       | 0.1348                       | 正 Positive                    |
|                                                                                               |                                                                        |                                | 有效磷 Available P                       | 0.1348                       | 正 Positive                    |
|                                                                                               |                                                                        |                                | 速效钾 Available K                       | 0.1348                       | 正 Positive                    |
|                                                                                               |                                                                        |                                | 细菌 Bacteria                           | 0.0833                       | 正 Positive                    |
|                                                                                               |                                                                        |                                | 真菌 Fungus                             | 0.0833                       | 正 Positive                    |
|                                                                                               | 土壤微生物与酶活性<br>Characteristics of soil microorganism and enzyme activity | 0.1593                         | 放线菌 Actinomycetes                     | 0.0833                       | 正 Positive                    |
|                                                                                               |                                                                        |                                | 脲酶 Urease                             | 0.2500                       | 正 Positive                    |
|                                                                                               |                                                                        |                                | 碱性磷酸酶 Phosphatase                     | 0.2500                       | 正 Positive                    |
|                                                                                               |                                                                        |                                | 蔗糖酶 Sucrase                           | 0.2500                       | 正 Positive                    |
|                                                                                               |                                                                        |                                | 幼苗更新方式 Seedling regeneration mode     | 0.1048                       | 正 Positive                    |
|                                                                                               | 优势种幼苗更新与凋落物<br>Characteristics of seedling regeneration and litter     | 0.3080                         | 幼苗结构组成 Seedling composition           | 0.5850                       | 正 Positive                    |
|                                                                                               |                                                                        |                                | 凋落物生物量 Litter biomass                 | 0.3102                       | 正 Positive                    |

表3 干热河谷植物群落稳定性评价指标基准值

Table 3 Standard value of evaluation index for plant community stability in the dry-hot valley

| 指标层<br>Index layer                            | 基准值<br>Maximum | Reference value<br>Minimum | 依据<br>The basis to judge                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|-----------------------------------------------|----------------|----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Shannon-Wiener指数<br>Shannon-Wiener index      | 2.94           | 0                          | 区域内不同植物群落多年研究结果, 见附表1<br>The results of research for many years on different plant communities in the region (see Table S1)                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Simpson指数<br>Simpson index                    | 1.00           | 0.02                       | 区域内不同植物群落多年研究结果, 见附表1<br>The results of research for many years on different plant communities in the region (see Table S1)                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Margalef指数<br>Margalef index                  | 10.52          | 0.20                       | 区域内不同植物群落多年研究结果, 见附表1<br>The results of research for many years on different plant communities in the region (see Table S1)                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Pielou指数<br>Pielou index                      | 0.99           | 0.11                       | 区域内不同植物群落多年研究结果, 见附表1<br>The results of research for many years on different plant communities in the region (see Table S1)                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 群落结构<br>Community structure                   | 6              | 1                          | “6”表示稀树灌丛或乔木层盖度30%以上的树林; “5”表示稀树灌丛; “4”表示稀树草丛; “3”表示灌草丛; “2”表示稀灌草丛; “1”表示草丛<br>“6” refers to sparse trees, shrubs and grasses communities or forests with a coverage of more than 30% of the arbor layer; “5” refers to sparse trees and shrubs communities; “4” refers to savanna communities; “3” refers to shrubs and grasses communities; “2” refers to sparse shrubs and grasses communities; “1” refers to grasses communities. |
| 土壤有机质<br>Organic matter ( $w/g\ kg^{-1}$ )    | 87.7           | 0.96                       | 区域内不同植物群落多年研究结果, 见附表2<br>The results of research for many years on different plant communities in the region (see Table S2)                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 容重<br>Bulk density ( $\rho/g\ cm^{-3}$ )      | 1.78           | 1.04                       | 区域内不同植物群落多年研究结果, 见附表2 (最小值出现在本研究中)<br>The results of research for many years on different plant communities in the region (see Table S1; the minimum appeared in this study)                                                                                                                                                                                                                                                          |
| 全氮<br>Total N ( $w/g\ kg^{-1}$ )              | 55.23          | 0.1                        | 区域内不同植物群落多年研究结果, 见附表2<br>The results of research for many years on different plant communities in the region (see Table S2)                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 全磷<br>Total P ( $w/g\ kg^{-1}$ )              | 3.1            | 0.07                       | 区域内不同植物群落多年研究结果, 见附表2<br>The results of research for many years on different plant communities in the region (see Table S2)                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 全钾<br>Total K ( $w/g\ kg^{-1}$ )              | 67.2           | 0.7                        | 区域内不同植物群落多年研究结果, 见附表2<br>The results of research for many years on different plant communities in the region (see Table S2)                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 水解氮<br>Available N ( $w/mg\ kg^{-1}$ )        | 228.69         | 1.5                        | 区域内不同植物群落多年研究结果, 见附表2<br>The results of research for many years on different plant communities in the region (see Table S2)                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 有效磷<br>Available P ( $w/mg\ kg^{-1}$ )        | 43.36          | 0.04                       | 区域内不同植物群落多年研究结果, 见附表2<br>The results of research for many years on different plant communities in the region (see Table S2)                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 速效钾<br>Available K ( $w/mg\ kg^{-1}$ )        | 579.2          | 3.54                       | 区域内不同植物群落多年研究结果, 见附表2<br>The results of research for many years on different plant communities in the region (see Table S2)                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 细菌<br>Bacteria ( $n/10^4\ g^{-1}$ )           | 2500           | 4.556                      | 区域内不同植物群落多年研究结果, 见附表3 (最小值出现在本研究中)<br>The results of research for many years on different plant communities in the region (see Table S3; the minimum appeared in this study)                                                                                                                                                                                                                                                          |
| 真菌<br>Fungus ( $n/10^4\ g^{-1}$ )             | 60.0           | 0.16                       | 区域内不同植物群落多年研究结果, 见附表3<br>The results of research for many years on different plant communities in the region (see Table S3)                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 放线菌<br>Actinomycetes ( $n/10^4\ g^{-1}$ )     | 190.2          | 0.01                       | 区域内不同植物群落多年研究结果, 见附表3<br>The results of research for many years on different plant communities in the region (see Table S3)                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 脲酶<br>Urease ( $\lambda/mg\ g^{-1}$ )         | 77.0           | 0.112                      | 区域内不同植物群落多年研究结果, 见附表3 (最小值出现在本研究中)<br>The results of research for many years on different plant communities in the region (see Table S3; the minimum appeared in this study)                                                                                                                                                                                                                                                          |
| 碱性磷酸酶<br>Phosphatase ( $\lambda/mg\ g^{-1}$ ) | 63.1           | 0                          | 区域内不同植物群落多年研究结果, 见附表3<br>The results of research for many years on different plant communities in the region (see Table S3)                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 蔗糖酶<br>Sucrase ( $\lambda/mg\ g^{-1}$ )       | 32.31          | 0.6                        | 区域内不同植物群落多年研究结果, 见附表3<br>The results of research for many years on different plant communities in the region (see Table S3)                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 优势种幼苗更新方式<br>Seedling regeneration mode       | 3              | 1                          | 根据优势种植物繁殖特性, “3”表示存在种子、根蘖和萌芽等多种更新方式, “2”表示存在两种更新方式 “1”表示仅存在种子更新方式<br>According to the reproductive characteristics of dominant species, “3” means many regeneration modes, such as seed, root tiller and sprout, “2” means two regeneration modes, and “1” means only seed regeneration modes.                                                                                                                                        |
| 优势种幼苗结构组成<br>Seedling composition             | 3              | 0                          | “3”表示群落优势种存在1年生、2年生以及3年生以上幼苗; “2”表示存在2年生和3年生以上幼苗; “1”表示仅存在1年生幼苗; “0”表示无更新幼苗<br>“3” means dominant species of community exist seedlings of 1 year, 2 years and more than 3 years; “2” means that there are 2-year-old and more than 3-year-old seedlings; “1” means only one-year-old seedlings; “0” means no regeneration seedlings                                                                                                   |
| 凋落物生物量<br>Litter biomass ( $m/t\ hm^{-2}$ )   | 95.5           | 0.04                       | 区域内不同植物群落多年研究结果, 见附表4<br>The results of research for many years on different plant communities in the region (see Table S4)                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |

1、2、3、4), 并以各项指标的最大值和最小值确定各项指标的基准值(表3)。

由于指标体系中各项评价指标的类型复杂, 是含有单位的量纲数据, 各指标之间缺乏可比性。为了便于不同量纲指标之间的比较, 本指标体系采用极差标准化法对原始数据进行标准化处理, 即转化为无量纲的标准化数据。该方法处理的结果与原始数据具有较好的相关性, 经过极差变换法计算之后, 标准值指标被压缩在[0, 1]之间, 离散度具有一致性, 且

正、负向指标均转化为正向指标, 最优值为1, 最劣值为0。具体公式<sup>[36]</sup>如下

$$\text{正相关的指标得分: } K_i = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min});$$

$$\text{负相关的指标得分: } K_i = (X_{\max} - X_i) / (X_{\max} - X_{\min});$$

式中:  $K_i$ 为第*i*项指标标准化分值,  $X_i$ 为第*i*项指标实际值,  $X_{\max}$ 为第*i*项指标最大值,  $X_{\min}$ 为第*i*项指标最小值。

由此建立的植物群落稳定性评价指标(plant community stability index, PCSI)计算公式如下

$$PCSI = \sum W_i I_i$$

其中,  $W_i$ 表示指标*i*的权重值,  $I_i$ 表示第*i*种指标的标准化值.

**1.4.5 数据处理** 不同植物群落植物多样性、土壤肥力、土壤微生物的各项指标以及凋落物生物指标之间的差异显著性采用的是单因素方差 (one-way Anova) 分析; 不同植物群落各指标之间多重比较显著性分析采用的是Tukey's Test. 层次分析法确定各指标权重采用美国Mathworks公司的Matlab 6.5软件完成.

2 研究结果

2.1 群落结构和植物多样性特征

在植物群落的结构特征上, 由于人工恢复树种的选择以及天然次生群落中优势物种个体特征的不同, 所形成的植物群落在结构上也存在明显差异, 其中, 铁刀木群落、久树群落、印楝群落和清香木群落均为稀树林群落, 车桑子群落和虾子花群落为灌丛群落 (表4). 不同类型植物群落林下植物的Shannon-Wiener指数、Simpson指数、Margalef指数和Pielou指数均存在极显著差异 ( $P < 0.01$ ), 但林下植物多样性指数与群落结构特征不存在明显的相关性. 天然次生的虾子花灌丛在4个植物多样性指数上均为最高, 且显著高于大多数人工恢复的稀树林群落 ( $P < 0.05$ ). 值得注意的是, 久树人工恢复群落在Shannon-Wiener指数、Margalef指数和Pielou指数上已与虾子花灌丛不存在显著差异 ( $P > 0.05$ ); 印楝群落的Shannon-Wiener指数和Pielou指数上也已与虾子花灌丛不存在显著差异 ( $P > 0.05$ ).

从历年来西南干热河谷区不同植物群落林下植物多样性研究结果 (表3、附表1) 可知, 该区域不同植物群落Shannon-Wiener指数在0-2.94之间, Simpson 指数在0.02-1.00之间,

Margalef指数在0.20-10.52之间, Pielou 指数在0.11-0.99之间. 通过极差标准化后 (所有数值均在0-1之间), 可以直观地看出本研究中所涉及的6种植物群落的林下植物多样性和结构特征指标在整个干热河谷区所处的位置和状态 (图2). 在多样性指数上, 所有群落的Margalef指数标准化值均较低 (小于0.2), 在西南干热河谷不同类型植物群落中处于较低的水平; 除了久树群落和虾子花群落的Simpson指数和Pielou指数标准化值相对较高 (大于0.6) 以外, 大部分群落的Shannon-Wiener指数、Simpson指数和Pielou指数相对较低 (小于0.5). 在群落结构上, 人工恢复群落的结构特征均为人为塑造, 因此, 标准化值大多数均为最高 (等于1), 仅车桑子群落相对较低 (等于0.4); 天然次生的虾子花群落, 由于没有乔木层存在, 标准化值也相对较低 (等于0.4).

2.2 土壤肥力、微生物与酶的特征

在土壤肥力各项指标中, 不同类型植物群落之间均存在极显著差异 ( $P < 0.01$ ) (表5). 天然次生的虾子花灌丛群落内, 土壤有机质、全氮、全磷和水解氮等营养特征显著高于所有人工恢复植物群落 ( $P < 0.05$ ), 全钾、速效钾以及容重等营养和物理特征显著优于大多数人工恢复植物群落 ( $P < 0.05$ ). 在人工恢复植物群落中, 印楝群落内的土壤有机质、容重、全氮和速效钾等指标特征处于最优, 其中, 有机质、全氮和速效钾显著优于其他人工恢复植物群落 ( $P < 0.05$ ); 久树群落内的全磷、全钾和水解氮等土壤营养指标最高, 其中, 全磷含量显著高于其他人工恢复植物群落 ( $P < 0.05$ ), 且与天然次生的虾子花灌丛不存在显著差异 ( $P > 0.05$ ); 铁刀木群落内有效磷含量最高, 甚至显著高于天然次生的虾子花灌丛 ( $P < 0.05$ ), 但水解氮含量显著低于其他群落 ( $P < 0.05$ ), 且容重值最大; 车桑子群落和清香木群落土壤有机质、全氮、全磷、水解氮和速效钾等土壤营养特征在各人工恢

表4 不同植物群落植物多样性与群落结构特征 (平均值±标准误)  
Table 4 Plant diversity and community structure of different plant communities

| 群落类型<br>Community type | Shannon-Wiener指数<br>Shannon-Wiener index | Simpson指数<br>Simpson index | Margalef指数<br>Margalef index | Pielou指数<br>Pielou index   | 群落结构<br>Community structure |
|------------------------|------------------------------------------|----------------------------|------------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| TD                     | 0.791 ± 0.172 <sup>a</sup>               | 0.428 ± 0.085 <sup>a</sup> | 0.931 ± 0.133 <sup>a</sup>   | 0.449 ± 0.118 <sup>a</sup> | 6                           |
| JS                     | 1.422 ± 0.096 <sup>b</sup>               | 0.624 ± 0.068 <sup>b</sup> | 1.470 ± 0.063 <sup>b</sup>   | 0.720 ± 0.075 <sup>b</sup> | 6                           |
| CS                     | 0.968 ± 0.086 <sup>a</sup>               | 0.364 ± 0.033 <sup>a</sup> | 1.052 ± 0.143 <sup>a</sup>   | 0.371 ± 0.075 <sup>a</sup> | 3                           |
| YL                     | 1.307 ± 0.105 <sup>b</sup>               | 0.547 ± 0.080 <sup>b</sup> | 1.078 ± 0.173 <sup>a</sup>   | 0.659 ± 0.118 <sup>b</sup> | 6                           |
| QX                     | 0.835 ± 0.124 <sup>a</sup>               | 0.386 ± 0.070 <sup>a</sup> | 1.003 ± 0.123 <sup>a</sup>   | 0.336 ± 0.063 <sup>a</sup> | 6                           |
| XZ                     | 1.442 ± 0.072 <sup>b</sup>               | 0.738 ± 0.044 <sup>c</sup> | 1.377 ± 0.096 <sup>b</sup>   | 0.804 ± 0.141 <sup>b</sup> | 3                           |
| Df                     | 5                                        | 5                          | 5                            | 5                          | /                           |
| F                      | 40.959                                   | 30.214                     | 17.817                       | 22.025                     | /                           |
| P                      | < 0.01                                   | < 0.01                     | < 0.01                       | < 0.01                     | /                           |

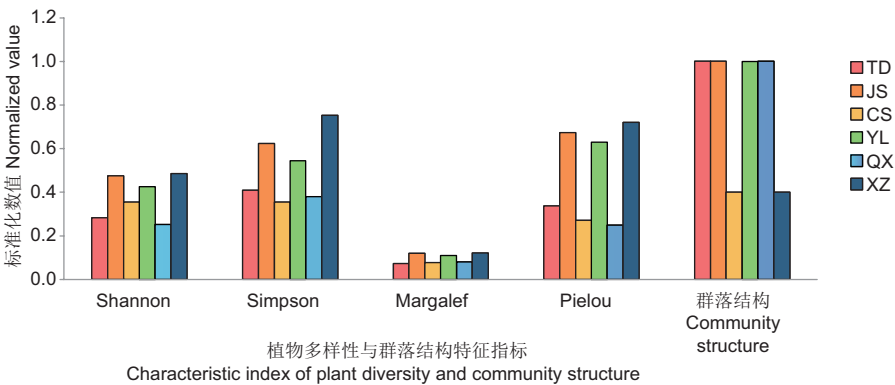


图2 不同植物群落植物多样性与群落结构的标准化数值特征.  
Fig. 2 Normalized values of plant diversity and community structure in different plant communities.



复植物群落中处于中等水平,但有效磷含量最低,容重值较大。

在土壤微生物和酶的特征方面,不同类型植物群落之间存在着极显著差异( $P < 0.01$ ) (表6)。天然次生的虾子花灌草丛群落内,脲酶和蔗糖酶含量显著高于所有人工恢复植物群落( $P < 0.05$ );但在土壤微生物和碱性磷酸酶含量上,与其他植物群落相比并不占有明显优势,甚至显著低于部分人工恢复植物群落( $P < 0.05$ )。在人工恢复植物群落中,铁刀木群落内细菌含量最高,其他微生物含量处于中等水平,脲酶和蔗糖酶含量最低;久树群落内真菌和放线菌含量最高,细菌和碱性磷酸酶含量与最高值无显著差异( $P < 0.05$ );车桑子群落中,细菌、放线菌和碱性磷酸酶含量为所有群落中最低,真

菌、脲酶和蔗糖酶含量处于中等水平;印楝群落中,真菌含量为所有群落中最低,其他微生物和酶活性指标处于中等或较低水平;清香木群落的土壤微生物和酶活性指标均处于所有群落的中等水平。

从近年来西南干热河谷区不同植物群落中土壤肥力、微生物与酶特征的研究结果(表3、附表2、附表3;数量单位见表3)可知,该区域不同植物群落土壤有机质含量在0.96-87.7之间,容重在1.04-1.78之间,全氮含量在0.1-55.23之间,全磷含量在0.07-3.1之间,全钾含量在0.7-67.2之间,水解氮含量在1.5-228.69之间,有效磷含量在0.04-43.36之间,速效钾含量在3.54-579.2之间,细菌含量在4.556-2500之间,真菌含量在0.16-60.0之间,放线菌含量在0.01-190.2之间,脲酶含量在

表5 不同植物群落土壤肥力特征(平均值±标准误)

Table 5 Characteristics of soil fertility in different plant communities (mean ± SD)

| 群落类型<br>Community type | 有机质<br>Organic matter<br>(w/g kg <sup>-1</sup> ) | 容重<br>Bulk density<br>(ρ/g/cm <sup>3</sup> ) | 全氮<br>Total N<br>(w/g kg <sup>-1</sup> ) | 全磷<br>Total P<br>(w/g kg <sup>-1</sup> ) | 全钾<br>Total K<br>(w/g kg <sup>-1</sup> ) | 水解氮<br>Available N<br>(w/mg kg <sup>-1</sup> ) | 有效磷<br>Available P<br>(w/mg kg <sup>-1</sup> ) | 速效钾<br>Available K<br>(w/mg kg <sup>-1</sup> ) |
|------------------------|--------------------------------------------------|----------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| TD                     | 12.35 ± 0.71 <sup>a</sup>                        | 1.21 ± 0.04 <sup>cd</sup>                    | 0.56 ± 0.07 <sup>a</sup>                 | 0.22 ± 0.04 <sup>a</sup>                 | 7.42 ± 0.54 <sup>ab</sup>                | 51.08 ± 1.82 <sup>a</sup>                      | 4.32 ± 0.34 <sup>d</sup>                       | 148.52 ± 2.71 <sup>a</sup>                     |
| JS                     | 24.43 ± 1.25 <sup>d</sup>                        | 1.09 ± 0.06 <sup>ab</sup>                    | 1.17 ± 0.06 <sup>c</sup>                 | 0.41 ± 0.03 <sup>c</sup>                 | 10.12 ± 0.68 <sup>cd</sup>               | 98.07 ± 1.41 <sup>c</sup>                      | 2.34 ± 0.19 <sup>b</sup>                       | 238.02 ± 7.92 <sup>c</sup>                     |
| CS                     | 18.09 ± 1.24 <sup>c</sup>                        | 1.31 ± 0.07 <sup>d</sup>                     | 1.07 ± 0.04 <sup>c</sup>                 | 0.25 ± 0.03 <sup>a</sup>                 | 6.21 ± 0.57 <sup>a</sup>                 | 68.80 ± 2.36 <sup>b</sup>                      | 1.57 ± 0.09 <sup>a</sup>                       | 196.31 ± 4.49 <sup>b</sup>                     |
| YL                     | 29.63 ± 1.11 <sup>e</sup>                        | 1.07 ± 0.08 <sup>ab</sup>                    | 1.48 ± 0.10 <sup>d</sup>                 | 0.33 ± 0.04 <sup>b</sup>                 | 9.32 ± 0.66 <sup>c</sup>                 | 88.98 ± 2.24 <sup>c</sup>                      | 3.92 ± 0.31 <sup>d</sup>                       | 315.63 ± 10.69 <sup>d</sup>                    |
| QX                     | 15.18 ± 1.33 <sup>b</sup>                        | 1.17 ± 0.08 <sup>bc</sup>                    | 0.93 ± 0.06 <sup>b</sup>                 | 0.27 ± 0.03 <sup>ab</sup>                | 7.77 ± 0.81 <sup>b</sup>                 | 67.31 ± 11.37 <sup>b</sup>                     | 2.16 ± 0.25 <sup>b</sup>                       | 149.74 ± 4.52 <sup>a</sup>                     |
| XZ                     | 44.77 ± 2.12 <sup>f</sup>                        | 1.05 ± 0.06 <sup>a</sup>                     | 2.52 ± 0.11 <sup>e</sup>                 | 0.48 ± 0.04 <sup>d</sup>                 | 11.43 ± 1.24 <sup>d</sup>                | 124.45 ± 2.96 <sup>d</sup>                     | 3.14 ± 0.24 <sup>c</sup>                       | 323.77 ± 8.85 <sup>d</sup>                     |
| Df                     | 5                                                | 5                                            | 5                                        | 5                                        | 5                                        | 5                                              | 5                                              | 5                                              |
| F                      | 285.497                                          | 13.069                                       | 451.630                                  | 49.594                                   | 35.953                                   | 123.051                                        | 111.936                                        | 883.765                                        |
| P                      | <0.01                                            | <0.01                                        | <0.01                                    | <0.01                                    | <0.01                                    | <0.01                                          | <0.01                                          | <0.01                                          |

表6 不同植物群落土壤微生物和酶活性特征(平均值±标准误)

Table 6 Characteristics of soil microorganisms and enzyme activities in different plant communities (mean ± SD)

| 群落类型<br>Community type | 细菌<br>Bacteria<br>(n/10 <sup>4</sup> g <sup>-1</sup> ) | 真菌<br>Fungus<br>(n/10 <sup>4</sup> g <sup>-1</sup> ) | 放线菌<br>Actinomycetes<br>(n/10 <sup>4</sup> g <sup>-1</sup> ) | 脲酶<br>Urease<br>(λ/mg g <sup>-1</sup> ) | 碱性磷酸酶<br>Alkaline phosphatase<br>(λ/mg g <sup>-1</sup> ) | 蔗糖酶<br>Sucrase<br>(λ/mg g <sup>-1</sup> ) |
|------------------------|--------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| TD                     | 12.011 ± 0.814 <sup>d</sup>                            | 10.891 ± 0.684 <sup>a</sup>                          | 26.500 ± 1.800 <sup>b</sup>                                  | 0.112 ± 0.020 <sup>a</sup>              | 0.425 ± 0.019 <sup>b</sup>                               | 0.770 ± 0.015 <sup>a</sup>                |
| JS                     | 10.583 ± 0.430 <sup>cd</sup>                           | 25.738 ± 1.495 <sup>d</sup>                          | 42.098 ± 1.339 <sup>d</sup>                                  | 0.276 ± 0.014 <sup>c</sup>              | 0.637 ± 0.011 <sup>d</sup>                               | 1.094 ± 0.025 <sup>c</sup>                |
| CS                     | 4.556 ± 0.532 <sup>a</sup>                             | 17.602 ± 0.904 <sup>c</sup>                          | 23.371 ± 1.469 <sup>a</sup>                                  | 0.142 ± 0.017 <sup>a</sup>              | 0.373 ± 0.015 <sup>a</sup>                               | 1.679 ± 0.040 <sup>d</sup>                |
| YL                     | 7.855 ± 1.097 <sup>b</sup>                             | 13.207 ± 0.689 <sup>b</sup>                          | 23.624 ± 1.708 <sup>ab</sup>                                 | 0.370 ± 0.016 <sup>d</sup>              | 0.525 ± 0.023 <sup>c</sup>                               | 2.358 ± 0.076 <sup>e</sup>                |
| QX                     | 7.620 ± 1.150 <sup>b</sup>                             | 17.928 ± 1.373 <sup>c</sup>                          | 39.461 ± 1.963 <sup>d</sup>                                  | 0.229 ± 0.022 <sup>b</sup>              | 0.646 ± 0.021 <sup>d</sup>                               | 0.956 ± 0.019 <sup>b</sup>                |
| XZ                     | 9.283 ± 1.457 <sup>bc</sup>                            | 14.497 ± 0.903 <sup>b</sup>                          | 32.715 ± 1.605 <sup>c</sup>                                  | 0.525 ± 0.021 <sup>e</sup>              | 0.546 ± 0.018 <sup>c</sup>                               | 4.144 ± 0.638 <sup>f</sup>                |
| Df                     | 5                                                      | 5                                                    | 5                                                            | 5                                       | 5                                                        | 5                                         |
| F                      | 42.156                                                 | 124.51                                               | 143.708                                                      | 421.737                                 | 204.715                                                  | 1635.252                                  |
| P                      | < 0.01                                                 | < 0.01                                               | < 0.01                                                       | < 0.01                                  | < 0.01                                                   | < 0.01                                    |

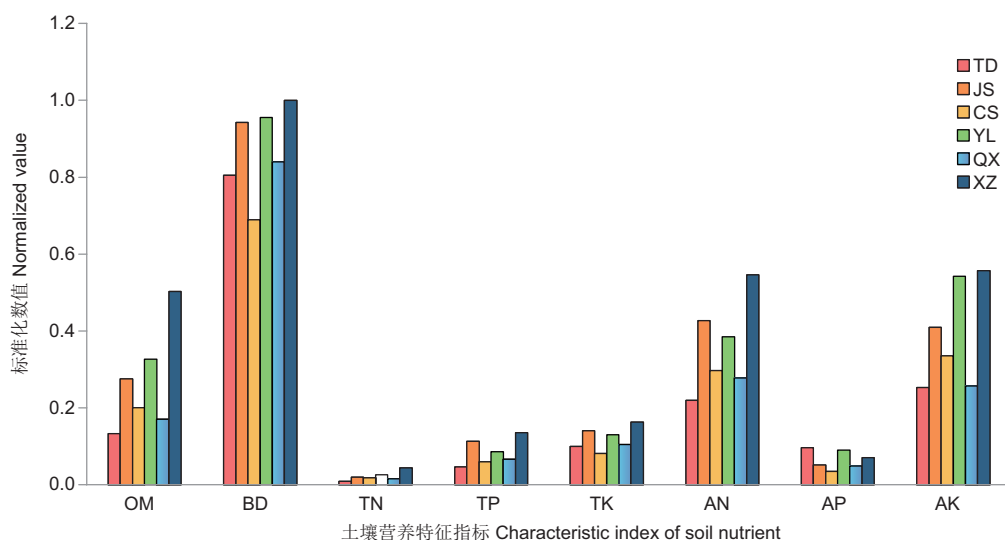


图3 不同植物群落土壤肥力标准化数值特征。OM: 有机质; BD: 容重; TN: 全氮; TP: 全磷; TK: 全钾; AN: 水解氮; AP: 有效磷; AK: 速效钾。

Fig. 3 Normalized values of soil fertility in different plant communities. OM: Organic matter; BD: Bulk density; TN: Total N; TP: Total P; TK: Total K; AN: Available N; AP: Available P; AK: Available K.

0.112-77.0之间,碱性磷酸酶含量在0-63.1之间,蔗糖酶含量在0.6-32.31之间.

从图3可以看出,所有植物群落容重的标准化值在西南干热河谷不同植物群落类型中均处于较高的水平,但土壤理化性质指标的标准化值均处于较低的水平(低于0.6),其中,全氮含量、全磷含量、全钾含量以及有效磷含量的标准化值甚至低于0.2.在土壤微生物和酶活性方面(图4),不同植物群落之间比较,真菌和放线菌的标准化值相对较高,但在整个干热河谷来看,也处于较低水平,标准化值大多低于0.4.细菌、脲酶、碱性磷酸酶和蔗糖酶的标准化值更低(低于0.1),部分指标的标准化值甚至接近极小值,处于最低的水平.

2.3 幼苗更新及凋落物特征

幼苗更新方式与植物个体的生物学特性相关(表7).在所有群落的优势种中,久树具有种子萌发、根蘖和萌芽等多种更新方式;铁刀木、车桑子、印楝、清香木和虾子花都具有种子萌发和萌芽2种更新方式.在林下幼苗结构组成方面,久树群落内存在1年生、2年生以及3年生以上幼苗,结构相对较为完整;虾子花灌草丛中存在2年生和3年生以上幼苗,调查当年没有发现1年生幼苗;铁刀木群落、车桑子群落和印楝群落内仅发现1年生幼苗;清香木群落内没有发现幼苗.在凋落物生物量方面,不同类型植物群落之间存在极显著差异( $P < 0.01$ ).各植物群落之间比较,久树群落内凋落物生物量最高,其次依次为虾子花灌草丛、铁刀木群落、印楝群落、清香木群落和车桑子群落.6个植物群落内的凋落物生物量大致可分为3个层次,其中,久树群落内凋落物生物量与虾子花灌草丛和铁刀木群落之间没有显著差异( $P > 0.05$ ),位于最高层;印楝群落内凋落物生物量居中,显著高于车桑子群落和清香木群落( $P < 0.05$ );车桑子群落和清香木群落内凋落物生物量最低,且两者之间没有显著差异( $P < 0.05$ ).

从不同植物的生物学特性来看,久树群落幼苗更新方式多样,在西南干热河谷不同植物群落类型中处于最高的水平(标准值为1),其他植物群落处于中等水平(标准值为0.5)(图5).在幼苗结构组成上,久树群落内存在不同年龄段幼

表7 不同植物群落幼苗更新及凋落物特征

Table 7 Characteristics of seedling regeneration and litter biomass in different plant communities

| 群落类型<br>Community type | 幼苗更新方式<br>Seedling regeneration mode | 幼苗结构组成<br>Seedling composition | 凋落物生物量<br>Litter biomass (m/t hm <sup>-2</sup> ) |
|------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------------------|
| TD                     | 2                                    | 1                              | 2.145 ± 0.227 <sup>c</sup>                       |
| JS                     | 3                                    | 3                              | 2.331 ± 0.197 <sup>c</sup>                       |
| CS                     | 2                                    | 1                              | 1.186 ± 0.133 <sup>a</sup>                       |
| YL                     | 2                                    | 1                              | 1.781 ± 0.252 <sup>b</sup>                       |
| QX                     | 2                                    | 0                              | 1.388 ± 0.100 <sup>a</sup>                       |
| XZ                     | 2                                    | 2                              | 2.220 ± 0.190 <sup>c</sup>                       |
| Df                     | /                                    | /                              | 5                                                |
| F                      | /                                    | /                              | 36.922                                           |
| P                      | /                                    | /                              | < 0.01                                           |

苗,在西南干热河谷不同植物群落类型中处于最高的水平(标准值为1),其幼苗结构组成状况甚至优于虾子花灌草丛(标准值为0.667).但铁刀木群落、车桑子群落和印楝群落内幼苗结构组成在整个干热河谷不同类型植物群落中相对较差(标准值为0.334),而清香木群落内完全无幼苗(标准化值为0).从历年来西南干热河谷区不同植物群落凋落物生物量研究结果(表3、附表4)可知,该区域不同植物群落内凋落物生物量在0.04-95.5 t/hm<sup>2</sup>之间.从图4可以看出,所有植物群落凋落物生物量的标准化值在西南干热河谷不同植物群落类型中均处于较低的水平(标准化值低于0.1).

2.4 群落稳定性评价特征

从图6可以看出,不同植物群落稳定性综合评价指数在0.9-2.0之间,其中,久树群落综合评价指数最高(1.93),以下依次为虾子花灌草丛(1.53)、印楝群落(1.52)、铁刀木群落(1.16)、清香木群落(0.99)和车桑子群落(0.93).

3 讨论与结论

稳定性是植物群落结构与功能的一个综合性特征,决定着植物群落的存在与发展.对陆地植被来说,群落的物种组成、植物多样性、内部环境以及较大尺度气候环境的变化等是

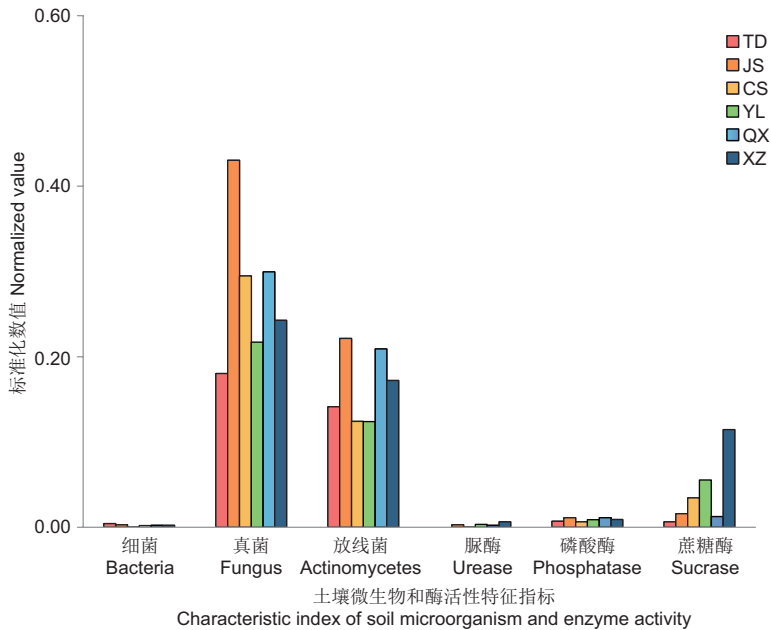


图4 不同植物群落土壤微生物和酶活性的标准化数值特征。  
Fig. 4 Normalized values of soil microbial and enzyme activities in different plant communities.



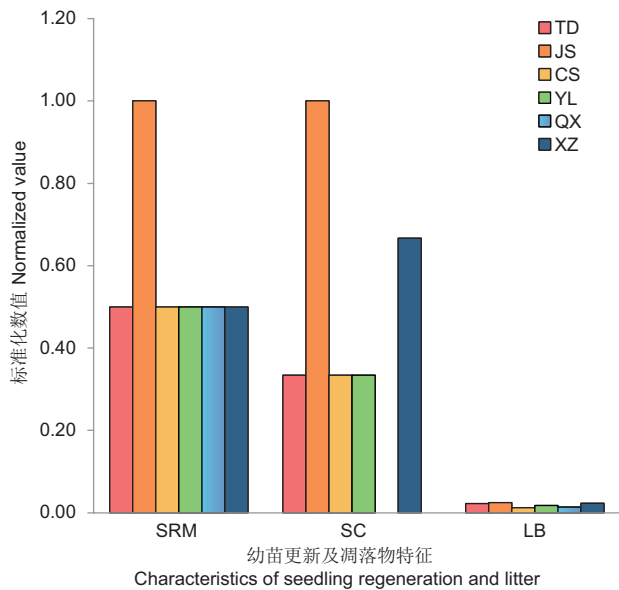


图5 不同植物群落幼苗更新及凋落物的标准化数值特征。SRM: 幼苗更新方式; SC: 幼苗结构组成; LB: 凋落物生物量。

Fig. 5 Normalized values of seedling regeneration and litter biomass in different plant communities. SRM: Seedling regeneration mode; SC: Seedling composition; LB: Litter biomass

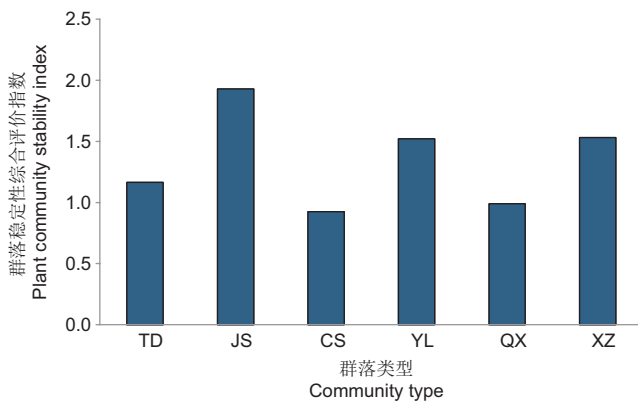


图6 不同植物群落稳定性的综合评价指数。

Fig. 6 Comprehensive evaluation index of the stability of different plant communities.

引起群落外貌、结构与功能发生变化的最重要的因子,必然会影响到群落稳定性地维持。植被演替理论认为,每一演替阶段都存在稳定的群落类型,较大尺度的气候环境决定了区域内植物群落处于阶段稳定性的诸多表现特征<sup>[41]</sup>。从理论上来说,群落稳定性可以表现出一系列的特征,度量的指标也是多样化的。已有的评价指标体系大多都是根据具体的研究区域和对象来确定的<sup>[24, 42-44]</sup>。在所有的评价指标中,群落的外貌和结构特征能够较好地反映群落的功能状况<sup>[45]</sup>,是群落稳定性最直观的一个指标,也是最早、最常用和最容易操作的一种评价天然植物群落稳定性的方法<sup>[46]</sup>。通常,群落结构越完整,越复杂,稳定性越高。干热河谷植被是亚热带湿润与半湿润气候背景下形成的极为独特的生态系统类型。整体外貌上看,植被普遍稀疏、低矮,呈“稀树灌草丛”、“稀树草丛”、“灌草丛”、“稀灌草丛”、或“草丛”等外貌状态,草本层植被丰富度显著高于乔灌木层。在大多情况下可以直接采用群落外貌和结构特征定性地判断群落稳定性特征。但在人工恢复植被生态系统中,群落的外貌和结构完全是由人为设计的,只要所选植物物种在短期内适应区域环境,人工营造植物群落的外貌和结

构可以达到理想的一致性。因此,仅利用这一指标评价群落的稳定性存在较大局限性。

大量研究表明,物种多样性可以反映群落特征和发展阶段,是判断群落稳定性的一个重要尺度<sup>[34, 47-48]</sup>。但物种多样性与群落稳定性之间的关系也存在较大争议。部分学者认为,物种多样性可以提高群落生产力,优化生态系统功能,增加了群落稳定性<sup>[7, 9, 48-51]</sup>。这样的研究结果并不难理解,一般来说,群落内植物种类越丰富,它们之间就越容易形成较为复杂的相互关系,从而使群落内各物种保持相对的平衡状态而趋于稳定。而且,当外界环境发生变化或群落内部种群发生波动时,物种多样性程度高的群落可以得到较大的缓冲<sup>[34]</sup>。然而,也早有学者认为物种多样性与群落稳定性之间并不存在简单的相关关系<sup>[49, 52-54]</sup>。因为影响物种多样性的因素太多,而且不同的稳定群落内物种多样性指数存在较大差异,因而不能简单地采用该项指标来度量群落的稳定性。目前,越来越多的研究认为,物种多样性与群落稳定性之间具有复杂的关系,它不能完全代表群落的稳定性,然而,它是植物群落经历破坏性干扰时维持生态系统功能的生物保险,是群落稳定性维持的必要条件<sup>[43, 55-57]</sup>。本研究结果支持这一结论。虾子花灌草丛是本研究中唯一的天然次生植被类型,其物种多样性指数(Shannon-Wiener指数和Simpson指数)、物种丰富度指数(Margalef指数)以及均匀度指数(Pielou指数)均为最高。在人工恢复植被中,久树群落和印楝群落与其最为接近。这与实际调查情况基本相符,也与最终植物群落稳定性的评价结果一致。表明物种多样性是干热河谷区植物群落稳定性评价指标体系中不可忽视的一个非常重要方面。另一方面,对于干热河谷植物群落来说,由于极其恶劣的自然地理条件,植物的侵入受到了严格限制,因而,群落内的植物种类通常不多。物种多样性是判断该区域植物群落复杂程度比较有效的指标之一,可以很好地描述群落的稳定性程度。

尽管不同学者对物种多样性与群落稳定性之间关系的认识存在分歧,但对于优势种在群落结构与功能上的作用问题却有共识,即优势种能否顺利繁殖更新是群落维持稳定的基本条件,优势种的发展或消失会严重影响群落的稳定性<sup>[47, 52, 53, 58]</sup>。因此,在判定群落稳定性特征时,除了考虑物种多样性特征,有必要分析优势种在群落中的生长和繁衍状况,如优势种幼苗更新方式、更新数量以及幼苗结构组成特征等内容。多样化的幼苗更新方式能够促进优势种植物的成功繁衍,从而为形成稳定的群落结构提供保障。在本研究涉及的6种植物群落中,优势种(或建群种)均具有多样的幼苗更新方式。其中,久树具有种子萌发、根蘖和萌芽3种更新方式,铁刀木、车桑子、印楝、清香木和虾子花都具有种子萌发和萌芽2种更新方式。这与人工恢复群落人为选择适宜建群种植物以及天然次生的乡土植物(虾子花)长期适应干热环境有关。同时,久树群落中由于优势种更新方式的多样化,群落内幼苗数量最多,幼苗组成结构最完整,从而增加了群落的稳定性。由此可以发现,在人工恢复植物群落的构建过程中,可以优先选用更新方式多样的适宜树种作为建群种植物,这样有利于林下幼苗的建成,以及形成更稳定的植物群落。

土壤肥力与植物个体和种群的繁衍以及群落结构和功能的关系密切,影响着植物群落物种组成、分布特征、种间关系和种的分布格局,这些都与植物群落的恒定性、耐性、弹性和持久性等稳定性特征密切相关<sup>[59-61]</sup>。其中,土壤容重大小反映了土壤结构状况、透气、透水和保水性能以及土壤穿透阻力,影响着植株根系生长和对水分、养分的吸收能力;而土壤有机质以及氮、磷、钾的含量是植物群落生产力最主要的影响因

素. 这些都是土壤肥力的重要指标,也是许多植物群落稳定性评价体系中的重要指标之一<sup>[15, 20, 62]</sup>. 从本研究结果可以看出,在土壤肥力特征各项指标中,天然次生的虾子花灌草丛群落明显优于人工恢复群落;而在人工恢复植物群落中,久树群落和印楝群落的大多数指标处于较高的水平,明显优于其他群落. 这一结果与各植物群落的群落学特征基本一致,较好地反映了群落的内部环境状况,是植物群落结构与功能的一个重要指标. 另一方面,土壤微生物和酶的特征也是植物群落稳定性特征的一个重要方面<sup>[24, 63-65]</sup>. 早有学者研究表明,真菌、细菌和放线菌等土壤微生物能将动植物残体和复杂的有机物分解成植物可以吸收的简单化合物,从而使植物群落内生物地球化学循环过程得以完成,对植物群落的结构和功能具有重要影响<sup>[66-67]</sup>. 土壤酶活性与土壤物理、化学和生物性质等因素有关,表征着植物群落内土壤营养元素循环状况,而且,土壤中的一切生化过程都是在酶的催化作用下完成的<sup>[68-69]</sup>. 值得注意的是,有报道指出,土壤微生物和酶活性与土壤肥力等因素的相关程度因生态系统不同而存在较大差异<sup>[70]</sup>. 本研究结果与这一结论基本一致. 即不同类型植物群落在土壤微生物和酶活性方面存在极显著差异,而且,不同微生物和酶在同一植物群落中的表现特征也并不一致. 对于天然次生的虾子花灌草丛来说,这是由于群落受到了较大程度的人为干扰,土壤微生物和酶的结构与功能并不完整. 而对于人工恢复植物群落来说,原有的自然生态系统已被完全改变,土壤微生物和酶的特征也需要在新的环境下重建,而且,不同人工恢复植物群落内土壤中的碳源底物、水分和养分供应不同,土壤微生物和酶的结构和功能也存在较大的差异.

凋落物是植物群落的重要组成部分. 地表凋落物层的存在可以有效减少水土流失和土壤侵蚀,增加土壤微生物数量和酶活性,是植物群落生物化学循环功能得以实现的主要调节器,在维持群落稳定方面起着重要作用<sup>[15, 71]</sup>. 已有研究表明,凋落物的数量受到植被类型、种类组成、年龄结构、生长密度等因素的显著影响<sup>[72-73]</sup>. 从本研究结果可以看出,在干热河谷不同建群种形成的植物群落中,凋落物的生物量存在极显著差异. 这主要是由于在人工恢复植物群落早期生长过程中,建群种植物在群落中占有绝对优势,而林下调落物的主要来源是建群种植物的枝、叶、干等构件,因此,建群种的选择对林下调落物生物量的影响极大,部分人工恢复植物群落内,如久树群落和铁刀木群落,凋落物的生物量已接近甚至超过了天然次生的虾子花灌草丛.

群落稳定性是一个非常复杂而又极为重要的问题. 经过

大量学者多年的研究,总结出了许多能够在实践中应用的评价方法. 但到目前为止,有关群落稳定性的量化评价还没有一个统一的、全面应用的指标体系. 这一方面给不同区域、不同类型植物群落稳定性特征的量化比较带来了不便,但另一方面也表明,由于区域位置、植物群落类型以及研究目的的不同,描述群落稳定性的具体指标和方法体系也应有差异. 干热河谷是我国西南地区亚热带湿润与半湿润气候背景下形成的一类非常独特的河谷型干热生态系统,植物区系和植物群落类型与我国同纬度其他区域存在显著差异,具有鲜明的区域特点. 因此,在构建植物群落稳定性特征评价体系以及评价该区域植物群落稳定性特征时,应充分体现区域内植物群落和立地环境的特点,如顶级植物群落类型、主要土壤类型与特点等. 本研究结合干热河谷植被与环境的现状以及多年来该区域内相关研究的成果,构建了植物群落稳定性的评价体系. 通过评价和比较元江干热河谷不同植物群落稳定性特征,了解了不同类型植物群落稳定性的真实现状以及在西南干热河谷区所处的位置. 总体来说,研究结果是比较理想的,但要全面了解西南干热河谷不同植物群落的稳定性特征,需要不断补充和更正历年研究结果. 而且,植物群落生长的小生境对群落稳定性特征的影响也应引起重视,如本研究中位于北坡的虾子花灌草丛和西北坡的久树群落的稳定性明显优于其他坡向的植物群落. 因此,有待更多的比较研究.

综上所述,植物多样性与群落结构特征指标、土壤肥力指标、土壤微生物与酶活性指标以及群落优势种幼苗更新特征与凋落物生物量等特征均是西南干热河谷区植物群落固有的、易于测定的指标,能够较好地反映西南干热河谷区植物群落稳定性基本特征. 本研究中采用这些指标构建的综合评价体系可以直观地量化群落内各评价指标以及群落稳定性综合评价指数在西南干热河谷区不同类型植物群落中所处的位置和状态. 评价结果与群落外貌、群落生长概况以及群落内部环境状况基本一致,较好地反映了群落稳定性的实际情况. 同时,干热河谷区植物群落内土壤特征的改变和恢复需要一个较长时间的过程. 尽管构建约20年的部分人工恢复植物群落(如久树群落、印楝群落)在群落外貌、物种组成、空间结构、物种多样性、幼苗更新特征以及综合的稳定性评价指数等特征方面已经非常接近,甚至超过了天然次生植物群落,但是在土壤肥力、土壤微生物和酶活性等特征方面大多指标上仍然不如天然次生植物群落.

## 参考文献 [References]

- Godron M. Some aspects of heterogeneity in grasslands of Cantal [J]. *Stat Ecol*, 1972, **3**: 397-415.
- 李育中. 植物群落稳定性的一种测定方法[J]. 中国草地, 1991 (2): 78-80 [Li YZ. A method and its application of determining plant community stability [J]. *Grassl China*, 1991 (2): 78-80]
- 安丽娟, 朱志红, 王孝安. 子午岭马栏林区主要森林群落的稳定性分析[J]. 西北植物学报, 2007, **27** (5): 1000-1007 [An LJ, Zhu ZH, Wang XA, Guo H. Stability analysis of major communities in Malan Forest Region of Ziuling Mountain [J]. *Acta Bot Bor-Occid Sin*, 2007, **27** (5): 1000-1007]
- 唐诚, 刘彤, 刘学录, 刘超. 古尔班通古特沙漠西南缘梭梭群落多样性和稳定性研究[J]. 干旱区资源与环境, 2010, **24** (8): 148-153 [Tang C, Liu T, Liu XL, Liu C. Study on species diversity and stability of *Haloxylon ammodendron* community in the southwestern edge of Gurbantonggut desert [J]. *J Arid Land Res Environ*, 2010, **24** (8): 148-153].
- 潘登, 张合平, 潘高. 桂南马尾松人工林不同年龄阶段群落动态与稳定性[J]. 生态学杂志, 2016, **35**(6): 1481-1490 [Pan D, Zhang HP, Pan G. Community dynamics and stability of different aged *Pinus massoniana* plantations in southern Guangxi [J]. *Chin J Ecol*, 2016, **35** (6): 1481-1490]
- 陈惠君, 杜虎, 宋同清. 木论喀斯特常绿落叶阔叶混交林群落数量分



- 类及稳定性[J]. 生物多样性, 2019, **27** (10): 1056-1068 [Chen HJ, Du H, Song TQ. Numerical classification of associations and their stabilities of karst evergreen deciduous broad-leaved mixed forests in Mulun National Nature Reserve [J]. *Bio Sci*, 2019, **27**(10): 1056-1068]
- 7 彭少麟. 森林群落稳定性与动态测度-年龄结构分析[J]. 广西植物, 1987, **7** (1): 67-72 [Peng SL. Stability and dynamic measurement of forest community age structure analysis [J]. *Guihaia*, 1987, **7**(1): 67-72]
  - 8 刘增文, 李雅素. 生态系统稳定性研究的历史与现状[J]. 生态学杂志, 1997, **16** (2): 58-61 [Liu ZW, Li YS. History and status of research of ecosystem stability [J]. *Chin J Ecol*, 1997, **16**(2): 58-61]
  - 9 Tilman D. Causes, consequences and ethics of biodiversity [J]. *Nature*, 2000, **405** (6783): 208-211
  - 10 高润梅, 石晓东, 郭跃东. 山西文峪河上游河岸林群落稳定性评价[J]. 植物生态学报, 2012, **36** (6): 491-503 [Gao RM, Shi XD, Guo YD. Community stability evaluation of riparian forest of the upper reaches of Wenyuhe in Shanxi, China [J]. *Acta Phytoecol Sin*, 2012, **36**(6): 491-503]
  - 11 陆龙龙, 郭忠玲, 范春楠. 吉林磨盘山次生落叶阔叶林群落特征和稳定性分析[J]. 应用生态学报, 2018, **29** (7): 2079-2087 [Lu LL, Guo ZL, Fan CN. Community characteristics and stability analysis of secondary deciduous broad-leaved forest in Mopan Mountains, Jilin Province, China [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2018, **29** (7): 2079-2087]
  - 12 徐海鹏, 于成, 舒朝成. 高原鼠兔干扰对高寒草甸植物群落多样性和稳定性的影响[J]. 草业学报, 2019, **28** (5): 92-101 [Xu HP, Yu C, Shu CC. The effect of plateau pika disturbance on plant community diversity and stability in an alpine meadow [J]. *Acta Pratacult Sin*, 2019, **28** (5): 92-101]
  - 13 黄建辉, 韩兴国. 生物多样性和生态系统稳定性[J]. 生物多样性, 1995, **3** (1): 31-37 [Huang JH, Han XG. Biodiversity and ecosystem stability [J]. *Bio Sci*, 1995, **3** (1): 31-37]
  - 14 李振基, 刘初钿. 武夷山自然保护区郁闭稳定甜槠林与人为干扰甜槠林生物多样性比较[J]. 植物生态学报, 2000, **24** (1): 64-68 [Li ZJ, Liu CD. Biodiversity and ecosystem stability comparison of species diversity between closed stable *Castanopsis eyrei* forest and human disturbance *Castanopsis eyrei* forest in Wuyishan Nature Reserve [J]. *Acta Phytoecol Sin*, 2000, **24**(1): 64-68]
  - 15 宋启亮, 董希斌. 大兴安岭不同类型低质林群落稳定性的综合评价[J]. 林业科学, 2014, **50** (6): 10-17 [Song QL, Dong XB. Comprehensive evaluation of forest community stability of different types of low-quality forest stands in the greater hignnan mountains[J]. *Sci Silv Sin*, 2014, **50**(6): 10-17]
  - 16 徐俏, 叶茂, 徐海量. 塔里木河下游生态输水对植物群落组成、多样性和稳定性的影响[J]. 生态学杂志, 2018, **37** (9): 57-64 [Xu Q, Ye M, Xun HL. Effects of ecological water conveyance on the composition, diversity and stability of plant community in the lower reaches of Tarim River [J]. *Chin J Ecol*, 2018, **37** (9): 57-64]
  - 17 Schoener TW. Stability and complexity in model ecosystems [J]. *Evolution*, 1974, **28** (3): 510-511
  - 18 阳含熙, 潘愉德, 伍业钢. 长白山阔叶红松林马氏链模型[J]. 生态学报, 1988, **8** (3): 19-27 [Yang HX, Pan YD, Wu YG. Markov chain model of broad leaved Korean pine forest in Changbai Mountain [J]. *Acta Ecol Sin*, 1988, **8** (3): 19-27]
  - 19 党承林, 王崇云, 王宝荣, 李彦玲, 黄其明. 植物群落的演替与稳定性[J]. 生态学杂志, 2002, **21** (2): 31-36 [Dong CL, Wang CY, Wang BR, Li YL, Huang QM. Succession and stability in plant community [J]. *Chin J Ecol*, 2002, **21** (2): 31-36]
  - 20 李荣, 张文辉, 何景峰. 不同间伐强度对辽东栎林群落稳定性的影响[J]. 应用生态学报, 2011, **22** (1): 18-24 [Li R, Zhang WH, He JF. Effects of thinning intensity on community stability of *Quercus liaotungensis* forest on Loess Plateau [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2011, **22** (1): 18-24]
  - 21 张滋芳, 毕润成, 张钦弟, 许强. 珍稀濒危植物矮牡丹生存群落优势种间联结性及群落稳定性[J]. 应用与环境生物学报, 2019, **25** (2): 291-299 [Zhang ZF, Bi RC, Zhang QD, Xu Q. Community stability and inter-specific associations between the rare plant *Paeonia suffruticosa* Andr. var. *spontanea* Rehd and dominant species [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2019, **25** (2): 291-299]
  - 22 Odum EP. Basic Ecology [M]. Philadelphia: Saunders College Publishing, 1983
  - 23 Walker BH. Biodiversity and ecological redundancy [J]. *Conserv Biol*, 1992, **6** (1): 18-23
  - 24 治民生, 吴斌, 关文彬, 马克明, 刘国华, 张宇清. 岷江上游植物群落稳定性研究[J]. 水土保持研究, 2009, **16** (1): 259-263 [Ye MS, Wu B, Guang WB, Ma KM, Liu GH, Zhang YQ. Plant community stability in the upper reaches of Minjiang River [J]. *Res Soil Water Conserv*, 2009, **16** (1): 259-263]
  - 25 刘伦辉. 横断山区干旱河谷植被类型[J]. 山地研究, 1989, **7** (3): 175-182 [Liu LH. Vegetation types of arid valley in Hengduan Mountain Area [J]. *J Mount Sci*, 1989, **7** (3): 175-182]
  - 26 金振洲, 杨永平, 陶国达. 华西南干热河谷种子植物区系的特征、性质和起源[J]. 植物分类与资源学报, 1995, **17** (2): 129-143 [Jin ZZ, Yang YP, Tao GD. The floristic characteristics, nature and origin of seed plants in the dry hot river valley of SW China [J]. *J Plant Clas Res*, 1995, **17** (2): 129-143]
  - 27 杨济达, 张志明, 沈泽昊, 欧晓昆, 耿宇鹏, 杨明玉. 云南干热河谷植被与环境研究进展[J]. 生物多样性, 2016, **24** (4): 462-474 [Yang JD, Zhang ZM, Sheng ZH, Ou XK, Geng YP, Yang MY. Review of research on the vegetation and environment of dry-hot valleys in Yunnan [J]. *Bio Sci*, 2016, **24** (4): 462-474]
  - 28 金振洲. 滇川干热河谷与干暖河谷植物区系特征[M]. 昆明: 云南科技出版社, 2002 [Jin ZZ. Floristic Characteristics of Dry Hot Valley and Dry Warm Valley in Yunnan and Sichuan [M]. Kunming: Yunnan Science and Technology Press, 2002]
  - 29 张荣祖. 横断山区干旱河谷[M]. 北京: 科学出版社, 1992 [Zhang RZ. The arid valley in the Hengduan Mountain Area [M]. Beijing: Science Press, 1992]
  - 30 吴征镒. 中国植被[M]. 北京: 科学出版社, 1980 [Wu ZY. Vegetation in China [M]. Beijing: Science Press, 1980]
  - 31 Margalef R. Diversity, stability and maturity in natural ecosystems [M]//Dobben WH, Lowe-mcconnell RH. Unifying Concepts in Ecology. Wageningen: Centre for Agricultural Publishing and Documentation, 1975: 151-160
  - 32 党承林. 植物群落的冗余结构-对生态系统稳定性的一种解释[J]. 生态学报, 1998, **18** (6): 665-672 [Dang CL. Redundancy structure in phytocoensosiums as an explanation of ecosystem stability [J]. *Acta Ecol Sin*, 1998, **18** (6): 665-672]
  - 33 Schlapfer F, Schmid B. Ecosystem effects of biodiversity: a



- classification of hypotheses and exploration of empirical results [J]. *Ecol Appl*, 1999, **9** (3): 893-912
- 34 张继义, 赵哈林. 植被 (植物群落) 稳定性研究评述[J]. 生态学报, 2003, **22** (4): 42-48 [Zhang JY, Zhao HL. Review on the study of vegetation stability [J]. *Chin J Ecol*, 2003, **22** (4): 42-48]
- 35 肖佳媚, 杨圣云. PSR模型在海岛生态系统评价中的应用[J]. 厦门大学学报(自然版), 2007, **46** (S1): 191-196 [Xiao JM, Yang SY. Application of the PSR model to the assessment of island ecosystem [J]. *J Xiamen Univ (Nat Sci Ed)*, 2007, **46** (S1): 191-196]
- 36 杨予静, 李昌晓, 丽娜·热玛赞. 基于PSR框架模型的三峡库区忠县汝溪河流域生态系统健康评价[J]. 长江流域资源与环境, 2013 (S1): 66-74 [Yang YJ, Li CX, LiNa RMZ. Ecosystem health assessment of Ruxi River Basin in Zhongxian County of Three Gorges Reservoir Area Based on PSR framework model [J]. *Resour Environ Yangtze Basin*, 2013 (S1): 66-74]
- 37 黄备, 魏娜, 孟伟杰, 张明霞. 基于压力-状态-响应模型的辽宁省长海海域海洋生物多样性评价 [J]. 生物多样性, 2016, **24** (1): 48-54 [Huang B, Wei N, Meng WJ, Zhang MX. Marine biodiversity evaluation based on the pressure-state-response (PSR) model of Changhai County, Liaoning Province [J]. *Biol Sci*, 2016, **24** (1): 48-54]
- 38 张天军, 苏琳, 乔宝明, 马咪娜. 改进的层次分析法在煤与瓦斯突出危险等级预测中的应用[J]. 西安科技大学报, 2010, **30** (5): 536-547 [Zhang TJ, Wu L, Qiao BM, Ma MN. Prediction of coal and gas outburst level based on improved AHP [J]. *J Xi'an Univ Sci Tech*, 2010, **30** (5): 536-547]
- 39 Gao CY, Wang WL. An improved analytic hierarchy process and application in Crain production [J]. *J NE Agric Univ (Eng Ed)*, 2012, **19** (2): 66-70
- 40 杨静. 基于DPSIR的线型输水工程生态环境影响评价及生态环境风险评价研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2016 [Yang J. Study on ecological environment impact assessment and ecological environment risk assessment of linear water conveyance project based on DPSIR [D]. Hefei: Hefei Polytechnic University, 2016]
- 41 Kimmins JP. Forest Ecology [M]. Beijing: China forestry press, 1992: 373-416 []
- 42 郑元润. 大青沟植物群落稳定性研究[J]. 生态学报, 1999, **19** (4): 578-580 [Zheng YR. Stability of Daqinggou forest community [J]. *Acta Ecol Sin*, 1999, **19** (4): 578-580]
- 43 马洪婧, 李瑞霞, 袁发银, 史璇燕, 关庆伟. 不同演替阶段柞树混交林群落稳定性[J]. 生态学报, 2013, **32** (3): 558-562 [Ma HJ, Li RX, Yuan FY, Shi LY, Guan QW. Stability of *Platycladus orientalis* mixed forest communities at different successional stages [J]. *Chin J Ecol*, 2013, **32** (3): 558-562]
- 44 Dendoncker M, Vincke C. Low topographic positions enhance woody vegetation stability in the Ferlo (Senegalese Sahel) [J]. *J Arid Environ*, 2019, **175** (4): 104087.1-104087.14.
- 45 包维楷, 刘照光. 四川瓦屋山原生和次生常绿阔叶林的群落学特征[J]. 应用与环境生物学报, 2002, **8** (2): 120-126 [Bao WK, Liu ZG. Community features of the primary and naturally secondarily evergreen broad-leaved forests in MT. Wawu In Sichuan, China [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2002, **8** (2): 120-126]
- 46 Hill AR. Ecosystem stability: some recent perspectives [J]. *Prog Phys Geog*, 1987, **11** (3): 315-333
- 47 Tilman D, Downing J A. Biodiversity and stability in grasslands [J]. *Nature*, 1994, **367** (6461): 363-365
- 48 Tilman D. Biodiversity population versus ecosystem stability [J]. *Ecology*, 1996, **77** (2): 350-363.
- 49 McNaughton SJ. Diversity and stability of ecological communities: a comment on the role of empiricism in ecology [J]. *Am Nat*, 1977, **111** (979): 515-525
- 50 Hector AB, Schmid C, Beierkuhnlein MC. Plant diversity and productivity experiments in European grassland [J]. *Science*, 1999, **286** (5542): 1123-1127
- 51 Kennedy T, Naeem S, Howe KM. Biodiversity as a barrier to ecological invasion [J]. *Nature*, 2002, **417** (4889): 636-638
- 52 May RM. Will a large complex system be stable [J]. *Nature*, 1972, **238** (5364): 413-414
- 53 May RM. Stability and Complexity in Model Ecosystems [M]. 2nd ed. Princeton, New Jersey, USA: Princeton University Press, 1974.
- 54 May RM. Stability and complexity in model systems [M]. Princeton: Princeton University Press, 1973: 447
- 55 Naeem S. Species redundancy and ecosystem reliability [J]. *Conserv Biol*, 1998, **12** (1): 39-44
- 56 Loreau M. Biodiversity and ecosystem functioning: recent theoretical advances [J]. *Oikos*, 2000, **91**: 3-11
- 57 王国宏. 再论生物多样性与生态系统稳定性[J]. 生物多样性, 2002, **10** (1): 126-134 [Wang GH. Further thoughts on diversity and stability in ecosystems. *Bio Sci*, 2002, **10** (1): 126-134]
- 58 John KH. Biodiversity and the productivity and stability of ecosystem [J]. *Tree*, 1996, **11** (9): 372-377
- 59 Gartlan JS, Newbery DM, Thomas KW. The influence of topography and soil phosphorous of the vegetation of Korup Forest Reserve Cameroun [J]. *Vegetatio*, 1986, **65** (3): 131-148
- 60 Vinton MA and Burke IC. Interactions between individual plant species and soil nutrient status in short-grass steppe. *Ecology*, 1995, **76**: 1116-1133
- 61 Baer SG, Blair JM, Collins SL, Knapp AK. Soil resources regulate productivity and diversity in newly established tallgrass prairie [J]. *Ecology*, 2003, **84**: 724-735
- 62 张梦毁, 张青, 亢新刚, 杨应军, 徐光, 张立新. 长白山云冷杉林不同演替阶段群落稳定性[J]. 应用生态学报, 2015, **26** (6): 1609-1616 [Zhang MT, Zhang Q, Kang XG, Yang YJ, Xu G, Zhang LX. Community stability for spruce-fir forest at different succession stages in Changbai Mountains, Northeast China [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2015, **26** (6): 1609-1616]
- 63 贺纪正, 李晶, 郑袁明. 土壤生态系统微生物多样性-稳定性关系的思考[J]. 生物多样性, 2013, **21** (4): 411-420 [He JZ, Li J, Zheng YM. Thoughts on the microbial diversity-stability relationship in soil ecosystems [J]. *Bio Sci*, 2013, **21** (4): 411-420]
- 64 张明霞, 王得祥, 彭舜磊, 黄雅昆, 张岗岗. 秦岭松栎混交林群落的稳定性[J]. 生态学报, 2015, **35** (8): 2564-2573 [Zhang MX, Wang DX, Peng SL, Huang YK, Zhang GG. Community stability analysis for the oak-pine mixed forest in Qinling Mountains [J]. *Acta Ecol Sin*, 2015, **35** (8): 2564-2573]
- 65 Peter AW, Fletcher WH, Robert WH. Initial richness, consumer pressure and soil resources jointly affect plant diversity and resource strategies during a successional field experiment [J]. *J Ecol*, 2020, **108** (6): 1-14
- 66 Harris WF, Santantonio D, McGinty D. The dynamic belowground

- ecosystem//Waring RH. Forests. Fresh Perspectives From Ecosystem Analysis. Corvallis: Oregon State University Press, 1980: 119-129
- 67 Meyer O. Functional groups of microorganisms//Schulze ED, Mooney HA. Biodiversity and Ecosystem Function [M]. New York: Springer-Verlag, 1993: 67-96
  - 68 陈文新. 土壤和环境微生物学[M]. 北京: 北京农业大学出版社, 1990: 19-35 [Chen WX. Soil and Environmental Microbiology [M]. Beijing: Beijing Agricultural University Press, 1990: 19-35]
  - 69 蔡晓布, 张永青, 邵伟. 不同退化程度高寒草原土壤肥力变化特征[J]. 生态学报, 2008, **28** (3): 1034-1044 [Cai XB, Zhang YQ, Shao W. Characteristics of soil fertility in alpine steppes at different degradation grades [J]. *Acta Ecol Sin*, 2008, **28** (3): 1034-1044]
  - 70 Kivlin SN, Treseder KK. Soil extracellular enzyme activities correspond with abiotic factors more than fungal community composition [J]. *Biogeochemistry*, 2014, **117** (1): 23-37
  - 71 郭辉, 董希斌, 蒙宽宏, 范煜婷. 小兴安岭低质林采伐改造后枯落物持水特性变化分析 [J]. 林业科学, 2010, **46** (6): 146-153 [Guo H, Dong XB, Meng KH, Fan YT. Analysis about change of water-holding characteristic of litter layer after logging reform in low-quality forest stands of Lesser Khingan Range [J]. *Sci Silv Sin*, 2010, **46** (6): 146-153]
  - 72 Celentano D, Zahawi RA, Finegan B, Ostertag R, Cole RJ, Holl KD. Litterfall dynamics under different tropical forest restoration strategies in costa Rica [J]. *Biotropica*, 2011, **43** (3): 279-287
  - 73 王忠禹, 刘国彬, 王兵, 汪建芳, 肖婧, 李兆松. 黄土丘陵区典型植物枯落物凋落动态及其持水性[J]. 生态学报, 2019, **39** (7): 2416-2425 [Wang ZY, Liu GB, Wang B, Wang JF, Xiao J, Li ZS. Litter production and its water holding capability in typical plants communities in the hilly region of the Loess Plateau [J]. *Acta Ecol Sin*, 2019, **39** (7): 2416-2425]
  - 74 方海东, 纪中华, 杨艳艳, 拜得珍, 廖承飞. 金沙江干热河谷新银合欢人工林物种多样性研究[J]. 水土保持研究, 2005, **12** (1): 135-137 [Fang HD, Ji ZH, Yang YX, Bai DZ, Liao CF. The study on species diversity of *Leucaena leucocephala* plantation in Jinsha River Hot and Dry Valley [J]. *Res Soil Water Conserv*, 2005, **12** (1): 135-137]
  - 75 何聪, 吴世祥, 胡翠华, 杨丹, 刘守江. 元谋干热河谷冲沟土壤墒情与植物多样性的关系研究[J]. 亚热带水土保持, 2019, **31** (1): 26-31 [He C, Wu SX, Hu CH, Yang D, Liu SJ. Study on the relationship between soil moisture content and plant diversity in the Gully of the Yuanmou Dry-hot Valley [J]. *Subtr Soil Water Conserv*, 2019, **31** (1): 26-31]
  - 76 李全发, 刘文耀, 沈有信, 刘伦辉, 徐海清. 南涧干热退化山地植被恢复的植物多样性变化[J]. 山地学报, 2005, **23** (5): 557-564 [Li QF, Liu WY, Sheng YX, Liu LH, Xu HQ. Change of plant diversity of different rehabilitated communities on degraded mountainous area of dry-hot valley in Nanjian [J]. *J Mount Sci*, 2005, **23** (5): 557-564]
  - 77 刘方炎, 李昆, 张春华. 金沙江干热河谷植被恢复初期的群落特征[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2007, **31** (6): 129-132 [Liu FY, Li K, Zhang CH. Characteristic analysis of the community during early stage of the vegetation restoration in Jinshajiang Dry-hot Valley [J]. *J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed)*, 2007, **31** (6): 129-132]
  - 78 刘方炎, 李昆, 马姜明. 金沙江干热河谷几种引进树种人工植被的生态学研究[J]. 长江流域资源与环境, 2008, **17** (3): 468-474 [Liu FY, Li K, Ma JM. Ecological study on several man-made forests of introduced species in Jinshajiang Dry-hot Valley [J]. *Resour Environ Yangtze Basin*, 2008, **17** (3): 468-474]
  - 79 刘方炎, 王小庆, 李昆, 孙永玉, 张志翔, 张春华. 金沙江干热河谷连栋群落物种组成与多样性特征[J]. 广西植物, 2012, **32** (1): 56-62 [Liu FY, Wang XQ, Li K, Sun YY, Zhang ZX, Zhang CH. Species composition and diversity characteristics of *Quercus franchetii* communities in dry-hot valley of Jinsha River [J]. *Guihaia*, 2012, **32** (1): 56-62]
  - 80 马姜明, 李昆. 元谋干热河谷人工林的土壤养分效应及其评价[J]. 林业科学研究, 2006, **19** (4): 467-471 [Ma JM, Li K. Effects of plantation on soil nutrient and evaluation in Yuanmou Dry-hot Valley [J]. *For Res*, 2006, **19** (4): 467-471]
  - 81 樊博, 闫帮国, 史亮涛, 潘志贤, 岳学文, 王春雪, 李建查. 外源元素添加对金沙江干热河谷植物群落结构和物种多样性的影响[J]. 热带农业科学, 2016, **36** (10): 102-108,113 [Fan B, Yan BG, Shi LT, Pan ZX, Yue XW, Wang CX, Li JC. Effects of exogenous elements on plant community structure and species diversity in dry-hot valley of Jinshajiang [J]. *Chin J Trop Agric*, 2016, **36** (10): 102-108,113]
  - 82 宋立奕, 郎南军, 郑科. 云南元谋干热河谷青桐天然更新种群结构与分布格局研究[J]. 植物科学学报, 2012, **30** (6): 558-567 [Song LY, Lang NJ, Zheng K. Population structure and spatial distribution patterns of a naturally regenerated *Jatropha curcas* L. population in a Dry Hot Yuanmou Valley in Yunnan [J]. *J Wuhan Bot Res*, 2012, **30** (6): 558-567]
  - 83 孙涛, 毕玉芬, 赵小社, 许岳飞, 冯林, 金德平. 围栏封育下山地灌草从草地植被植物多样性与生物量的研究[J]. 云南农业大学学报, 2007, **22** (2): 246-250, 279 [Sun T, Bi YF, Zhang XS, Xu YF, Feng L, Jin DP. Diversity and biomass of shrub-grasser vegetation of mountain grassland under enclosure [J]. *J Yunnan Agri Univ (Nat Sci Ed)*, 2007, **22** (2): 246-250, 279]
  - 84 王晨, 胡翠华, 吴世祥, 杜敏晴, 刘守江. 冲沟发育阶段与植被多样性关系研究——以元谋干热河谷为例[J]. 中国科技论文, 2018, **13** (9): 995-1001 [Wang C, Hu CH, Wu SX, Du MQ, Liu SJ. Study on the relationship between gully development stage and vegetation diversity: a case study of Yuanmou dry-hot valley [J]. *Chin Sci Paper*, 2018, **13** (9): 995-1001]
  - 85 王克勤, 郭逢春, 贺庭荣, 王健文, 李金洪. 金沙江干热河谷人工赤桉林群落结构 [J]. 中国水土保持科学, 2004, **2** (4): 37-41, 47 [Wang KQ, Guo FC, He TR, Wang JW, Li JH. The community structure of artificial *Eucalyptus camaldulensis* stands in the dry-hot valley of Jinsha River [J]. *Sci Soil Water Conserv*, 2004, **2** (4): 37-41, 47]
  - 86 王小庆, 刘方炎, 李昆, 陈友根. 元谋干热河谷滇榄仁群落林下物种多样性与幼苗更新特征[J]. 浙江农林大学学报, 2011, **28** (2): 241-247 [Wang XQ, Liu FY, Li K, Chen YG. Species diversity and seedling regeneration of three *Terminalia franchetii* communities in the hot-dry Yuanmou Valley [J]. *J Zhejiang For Col*, 2011, **28** (2): 241-247]
  - 87 吴世祥, 王晨, 杨丹, 胡翠华, 刘守江. 元谋干热河谷冲沟地形与植物多样性的关系探讨[J]. 亚热带水土保持, 2018, **30** (1): 1-5+14 [Wu SX, Wang C, Yang D, Hu CH, Liu SJ. Discussion on the Relationship between gully terrain and plant diversity in Yuanmou Dry-hot Valley [J]. *Subtrop Soil Water Conserv*, 2018, **30** (1): 1-5+14]
  - 88 杨万勤. 土壤生态退化与生物修复的生态适应性研究[D]. 重庆: 西南农业大学, 2001 [Yang WQ. Study on ecological adaptability of soil ecological degradation and bioremediation [D]. Chongqing:

- Southwest Agricultural University, 2001]
- 89 杨振寅, 苏建荣, 李从富, 王云, 李正红. 元谋干热河谷主要植物群落物种多样性研究[J]. 林业科学研究, 2008, **12** (2): 200-205 [Yang ZY, Su JR, Li CF, Wang Y, Li ZH. Species diversity of main communities in Hot and Dry Valley, Yuanmao County [J]. *For Res*, 2008, **12** (2): 200-205]
- 90 余娇娥, 司宏敏, 吴雪涛, 张戎, 苏文华, 周睿. 海拔梯度下元谋干热河谷植物群落特征[J]. 生态环境学报, 2018, **27** (11): 2017-2022 [Yu JE, Shi HM, Wu XT, Zhang Y, Su WH, Zhou R. Characteristics of plant communities in Yuanmou Dry-hot Valley under different elevation gradients [J]. *Ecol Environ Sci*, 2018, **27** (11): 2017-2022]
- 91 张建利, 王海宁, 毕玉芬, 张文. 封育对干热河谷稀树灌草丛退化草地土壤种子库和植物多样性的影响[J]. 草原与草坪, 2008 (1): 6-12, 17 [Zhang JL, Wang HN, Bi YF, Zhang W. Effects of enclosure management on soil seed bank and vegetation diversity of degraded grassland in dry-hot valley of Jinsha River [J]. *Grass/Turf*, 2008 (1): 6-12, 17]
- 92 张建利, 柳小康, 沈蕊, 施雯, 张志明, 周睿, 欧晓昆. 金沙江流域干热河谷草地群落物种数量及多样性特征[J]. 生态环境学报, 2010, **19** (7): 1519-1524 [Zhang JL, Liu XK, Sheng R, Shi W, Zhang ZM, Zhou R, Ou XK. The species quantitative & diversity characteristic of grassland community in hot-dry valley of Jinsha River [J]. *Ecol Environ Sci*, 2010, **19** (7): 1519-1524]
- 93 刘方炎, 朱华. 元江干热河谷植被数量分类及其多样性分析[J]. 广西植物, 2005, **25** (1): 22-25 [Liu FY, Zhu H. Numerical classification and diversity analysis for the vegetation in the dry-hot valley of Yuanjiang, Yunnan Province [J]. *Guihaia*, 2005, **25** (1): 22-25]
- 94 刘方炎, 朱华, 施济普, 陈晓鸣. 元江干热河谷植物群落特征及土壤肥力研究[J]. 应用与环境生物学报, 2007, **13** (6): 782-787 [Liu FY, Zhu H, Shi JP, Chen XM. Characteristics of plant communities and their soil fertilities in Dry-hot Valley of Yuanjiang County, Yunnan, China [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2007, **13** (6): 782-787]
- 95 沈蕊. 元江流域干热河谷典型灌草群落及土壤种子库研究[D]. 昆明: 云南大学, 2012 [Sheng R. Study on typical shrub grass community and soil seed bank in dry hot valley of Yuanjiang River Basin [D]. Kunming: Yunnan University, 2012]
- 96 孙玺雯, 杜凡, 王娟. 元江县干热河谷季雨林群落特征研究[J]. 西南林业大学学报, 2008, **28** (1): 6-11 [Sun XW, Du F, Wang J. Study on community features of monsoon forest in the Dry-hot Valleys in Yuanjiang County [J]. *J SW For Col*, 2008, **28** (1): 6-11]
- 97 陈奇伯, 王克勤, 李艳梅. 金沙江干热河谷不同类型植被改良土壤效应研究[J]. 水土保持学报, 2003, **17** (2): 67-70, 113 [Chen QB, Wang KQ, Li YM. Effect of different vegetation types on soil amelioration in dry-hot valley of Jinshajiang River Basin [J]. *J Soil Water Conserv*, 2003, **17** (2): 67-70, 113]
- 98 郭玉红, 郎南军, 江期川, 郑科, 张立新. 云南干热河谷区3种不同类型植被土壤的有效氮研究[J]. 贵州农业科学, 2010, **38** (4): 100-102 [Guo YH, Lang NJ, Jiang QC, Zheng K, Zhang LX. Study on soil available nitrogen (N) in 3 different types of vegetation in Yunnan Dry-hot Valleys [J]. *Guizhou Agri Sci*, 2010, **38** (4): 100-102]
- 99 陈全芳. 干热河谷区坡耕地氮、磷流失特征的研究[D]. 昆明: 西南林业大学, 2009 [Chen QF. Characteristics of nitrogen and phosphorus loss from sloping farmland in dry hot valley [D]. Kunming: Southwest Forestry University, 2009]
- 100 李艳梅, 陈奇伯, 梁茂. 干热河谷水电建设干扰对表土层土壤养分及微生物的影响[J]. 水土保持学报, 2016, **30** (1): 147-152 [Li YM, Chen QB, Liang M. Effect of disturbance of hydropower construction on soil nutrients and microorganisms in dry-hot river valley [J]. *J Soil Water Conserv*, 2016, **30** (1): 147-152]
- 101 刘光华. 罗望子人工林营建对元谋干热河谷退化生态系统的效应[D]. 北京: 中国农业大学, 2005 [Liu GH. Effects of tamarind plantation on degraded ecosystem in Yuanmou dry hot valley [D]. Beijing: China Agricultural University, 2005]
- 102 刘培静, 王克勤, 李苗苗, 王帅兵. 元谋干热河谷不同土地利用类型雨季前后土壤养分变化[J]. 中国水土保持, 2012 (10): 56-59 [Liu PJ, Wang KQ, Li MM, Wang SB. Changes of soil nutrients in different land use types in Yuanmou dry hot valley before and after rainy season [J]. *Soil Water Conserv Chin*, 2012 (10): 56-59]
- 103 马姜明. 元谋干热河谷地区人工林稳定性及人工生态系统管理的研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2004 [Ma JM. Study on the stability of plantation and the management of artificial ecosystem in Yuanmou dry hot valley [D]. Beijing: China Academy of Forestry Sciences, 2004]
- 104 聂小军, 张建辉, 刘刚才. 金沙江干热河谷侵蚀陡坡植被恢复对土壤质量的影响[J]. 生态环境学报, 2008, **17** (4): 1636-1640 [Nie XJ, Zhang JH, Liu GC. Effects of vegetation restoration on soil quality of eroded hillslopes in dry-hot valley of Jinsha River [J]. *Ecol Environ Sci*, 2008, **17** (4): 1636-1640]
- 105 彭辉, 杨艳鲜, 潘志贤, 岳学文, 闫帮国, 方海东, 纪中华. 云南金沙江干热河谷土壤肥力综合评价[J]. 热带作物学报, 2011, **32** (10): 1820-1823 [Peng H, Yang YX, Pan ZX, Yue XW, Yan BG, Fang HD, Ji ZH. Evaluation of soil fertility in dry-hot valley of Jinsha River [J]. *Chin J Trop Crops*, 2011, **32** (10): 1820-1823]
- 106 唐国勇, 李昆, 孙永玉, 张春华. 干热河谷不同利用方式下土壤活性有机碳含量及其分配特征[J]. 环境科学, 2010, **31** (5): 1365-1371 [Tang GY, Li K, Sun YY, Zhang CH. Soil labile organic carbon contents and their allocation characteristics under different land uses at dry-hot valley [J]. *Chin Environ Sci*, 2010, **31** (5): 1365-1371]
- 107 唐国勇, 高成杰, 李昆. 植被恢复对干热河谷退化土壤改良的影响[J]. 生态学报, 2015, **35** (15): 5157-5167 [Tang GY, Gao CJ, Li K. Effects of vegetation restoration on the amelioration of degraded soil in a dry-hot valley [J]. *Acta Ecol Sin*, 2015, **35** (15): 5157-5167]
- 108 王雪梅, 闫帮国, 赵广, 史亮涛, 刘刚才, 方海东. 云南元谋不同海拔土壤微生物对车桑子碳、氮、磷化学计量特征及土壤特性的影响[J]. 植物生态学报, 2017, **41** (3): 36-49 [Wang XM, Yan BG, Zhao G, Shi LT, Liu GC, Fang HD. Effects of microorganism on carbon, nitrogen and phosphorus of *Dodonaea viscosa* and the soils from different elevations in Yuanmou, Yunnan, China [J]. *Acta Phytocool Sin*, 2017, **41** (3): 36-49]
- 109 王雪梅, 刘泉, 闫帮国, 赵广, 刘刚才. 干热河谷车桑子光合生理特性对氮磷添加的响应[J]. 生态学报, 2019, **39** (22): 8615-8629 [Wang XM, Liu Q, Yan BG, Zhao G, Liu GC. Responses of photosynthetic characteristics of *Dodonaea viscosa* to nitrogen and phosphorus addition in a dry-hot valley [J]. *Acta Ecol Sin*, 2019, **39** (22): 8615-8629]
- 110 王艳丹, 张梦寅, 范建成, 何光熊, 张明忠, 方海东. 金沙江干热河谷银合欢人工林的土壤水分变化特征[J]. 热带生物学报, 2018, **9** (1): 61-68 [Wang YD, Zhang MY, Fan JC, He GX, Zhang MZ, Fang HD. Soil moisture of *Leucaena leucocephala* plantations in the dry-



- hot valley of Jinsha River, Yunnan [J]. *J Trop Biol*, 2018, **9** (1): 61-68]
- 111 吴彦, 吴宁, 和献锋. 攀枝花地区麻疯树人工林群落土壤特性[J]. 长江流域资源与环境, 2008, **17** (S1): 54-59 [Wu Y, Wu N, He XF. Analysis of traits of soil under *Jatropha curcas* plantation in Panzhihua, China [J]. *Resour Environ Yangtze Basin*, 2008, **17** (S1): 54-59]
  - 112 校亮, 熊东红, 张宝军, 张素, 吴汉, 杨丹. 干热河谷冲沟沟岸葛藤不同覆被状况及土壤性质差异分析[J]. 生态学报, 2018, **38** (14): 5047-5055 [Xiao L, Xiong DH, Zhang BJ, Zhang S, Wu H, Yang D. Analysis of soil properties in gully banks under different coverage of Kudzu in a dry-hot valley region [J]. *Acta Ecol Sin*, 2018, **38** (14): 5047-5055]
  - 113 杨艳鲜, 冯光恒, 潘志贤. 干热河谷罗望子人工林凋落物分解及养分释放[J]. 干旱区资源与环境, 2013, **27** (1): 104-109 [Yang YX, Feng GH, Pan ZX. Decomposition dynamics and nutrient release of litters of *Tamarindus indica* Linn. artificial forests in dry-hot valley, China [J]. *J Arid Land Res Environ*, 2013, **27** (1): 104-109]
  - 114 张昌顺, 李昆, 马姜明. 施肥对印楝幼林土壤酶活性的影响及其调控土壤肥力的作用[J]. 林业科学研究, 2006, **19** (6): 750-755 [Zhang CS, Li K, Ma JM. Effects of fertilization on soil enzyme activities and its role in adjusting-controlling soil fertility of young *Azadirachta indica* A. Juss. plantations [J]. *For Res*, 2006, **19** (6): 750-755]
  - 115 张昌顺, 李昆, 马姜明. 施肥对印楝人工林生长及土壤肥力的影响[J]. 长江流域资源与环境, 2007, **16** (3): 329-335 [Zhang CS, Li K, Ma JM. Effects of fertilization on growth and soil fertility of *Azadirachta indica* plantations [J]. *Resour Environ Yangtze Basin*, 2007, **16** (3): 329-335]
  - 116 张丹, 徐建忠, 兰凌. 紫色土表层和亚表层微生物数量比较[J]. 山地学报, 2001, **19** (2): 172-174 [Zhang D, Xu JZ, Lan L. Contrast research of microbe quantity between surface and subsurface purple soil [J]. *J Mount Sci*, 2001, **19** (2): 172-174]
  - 117 张建锋, 孙保平, 郭虎波. 干热河谷区6种典型林型土壤改良效应评价[J]. 中国水土保持科学, 2016, **14** (2): 98-105 [Zhang JF, Sun BP, Guo HB. Evaluation on effects of soil improvement for six typical forest types in dry-hot valley [J]. *Sci Soil Water Conserv*, 2016, **14** (2): 98-105]
  - 118 张建辉. 金沙江干热河谷典型区土壤特性与植被恢复技术[D]. 成都: 成都理工大学, 2011 [Zhang JH. Soil characteristics and vegetation restoration technology in typical area of Jinsha River dry hot valley [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011]
  - 119 张小平, 黄万胜. 不同银合欢品种在干热河谷区的适应性及对土壤的培肥效果研究[J]. 四川农业大学学报, 1993, **11** (1): 151-155 [Zhang XP, Huang WS. Study on adaptability of different *Leucaena leucocephala* varieties in dry hot valley and their effect on soil fertility [J]. *J Sichuan Agric Univer*, 1993, **11** (1): 151-155]
  - 120 张映翠. 乡土草本植物对干热河谷退化土壤修复的生态效应及机制研究[D]. 重庆: 西南农业大学, 2005 [Zhang YC. Ecological effect and mechanism of local herbs on the restoration of degraded soil in dry and hot valley [D]. Chongqing: Southwest Agricultural University, 2005]
  - 121 郑郁, 李占斌, 李鹏, 穆军. 金沙江干热河谷区不同土地利用方式下的土壤特性分异特征[J]. 水土保持研究, 2010, **17** (1): 174-177, 251 [Zheng Y, Li ZB, Li P, Mu J. Features of land use type on soil properties in the dry-hot valley of Jinsha River [J]. *Res Soil Water Conserv*, 2010, **17** (1): 174-177, 251]
  - 122 朱红业. 封禁恢复扭黄茅群落对退化燥红土土壤结构、水分和肥力的影响[D]. 北京: 中国农业大学, 2005 [Zhu HY. Effects of closure and restoration of *Stipa contortus* community on soil structure, moisture and fertility of degraded red soil [D]. Beijing: China Agricultural University, 2005]
  - 123 吴怀栋, 刘奇, 谭运洪. 元江干热河谷木质藤本的多样性及其与宿主树木的关系[J]. 植物科学学报, 2016, **34** (4): 547-554 [Wu HD, Liu Q, Tan YH. Liana diversity and its relationship with host trees in the Yuanjiang Dry-Hot Valley, Yunnan, China [J]. *Plant Sci J*, 2016, **34** (4): 547-554]
  - 124 高庭艳, 马培, 张丹. 云南元谋干热河谷区土壤微生物数量特征[J]. 武汉大学学报(理学版), 2008, **54** (2): 60-64 [Gao TY, Ma P, Zhang D. Quantitative characteristics of soil microorganism in Dry-Hot Valley, Yunnan Province [J]. *J Wuhan Univ (Nat Sci Ed)*, 2008, **54** (2): 60-64]
  - 125 魏雅丽, 郭芬芬, 陈安强. 元谋干热河谷植被恢复对土壤酶活性的影响特征[J]. 农业环境科学学报, 2011, **30** (1): 100-106 [Wei YL, Guo FF, Chen AQ. Effects of vegetation restoration on soil enzyme activity in Yuanmou Dry-hot Valley, China [J]. *J Agro-Environ Sci*, 2011, **30** (1): 100-106]
  - 126 肖贵贵, 范成志, 周建华. 攀枝花干热河谷区麻疯树土壤微生物种群数量分析[J]. 四川林业科技, 2012, **33** (1): 19-22 [XiaoYG, Fan CZ, Zhou JH. A quantitative analysis of soil microbial populations of *Jatropha curcas* trees in Dry-hot Valleys of Panzhihua [J]. *J Sichuan For Sci*, 2012, **33** (1): 19-22]
  - 127 熊亚, 李敏杰, 周洁. 麻疯树种植区与非种植区土壤微生物及酶活性的比较[J]. 湖北农业科学, 2013, **52** (3): 542-544 [Xiong Y, Li MJ, Zhou J. Comparison on the soil microbes and enzyme activity in *Jatropha curcas* L. planting area and no-planting area [J]. *Hubei Agri Sci*, 2013, **52** (3): 542-544]
  - 128 薛蕙, 李占斌, 拳鹏. 不同土地利用方式对干热河谷地区土壤酶活性的影响[J]. 中国农业科学, 2011, **44** (18): 3768-3777 [Xue S, Li ZB, Li P. Effect of land use on soil enzyme activity in dry-hot valley [J]. *Sci Agric Sin*, 2011, **44** (18): 3768-3777]
  - 129 张彦东, 孙志虎, 沈有信. 施肥对金沙江干热河谷退化草地土壤微生物的影响[J]. 水土保持学报, 2005, **19** (2): 88-91 [Zhang YD, Sun ZH, Sheng YX. Effect of fertilization on soil microorganism of deteriorated grassland in dry-hot valley Region of Jinsha River [J]. *J Soil Water Conserv*, 2005, **19** (2): 88-91]
  - 130 李昆, 曾觉民. 元谋干热河谷地区不同造林树种对土壤的改良作用研究[J]. 西南林学院学报, 1999, **19** (3): 161-164 [Li K, Zeng JM. Effects of some tree species on soil in Yuanmou Hot and Dry Valley [J]. *Coll SW For*, 1999, **19** (3): 161-164]
  - 131 刘文耀, 盛才余, 刘伦辉, 李昆. 南涧干热河谷退化山地植被恢复重建的研究[J]. 北京林业大学学报, 1999, **21** (3): 12-16 [Liu WY, Sheng CY, Liu LH, Li K. Vegetation restoration on degraded mountainous area of dry-hot river valley in Nanjian County, Yunnan Province [J]. *J Beijing For Univ*, 1999, **21** (3): 12-16]
  - 132 魏雅丽, 贺玉晓, 金杰, 熊维满, 刘刚才. 元谋干热河谷典型植被枯落物持水能力研究[J]. 干旱区资源与环境, 2014, **28** (3): 181-186 [Wei YL, He YX, Jin J, Xiong WM, Liu GC. Water conservation function of typical vegetation litters in Yuanmou dry-hot valley [J]. *J Arid Land Res Environ*, 2014, **28** (3): 181-186]
  - 133 熊壮, 叶文, 张树斌, 杨大新. 元江干热河谷稀树灌木凋落量动态特征[J]. 森林与环境学报, 2018, **38** (4): 439-443 [Xiong Z, Ye W, Zhang SB, Yang DX. Litterfall dynamic of a dry-hot valley savanna in Yuanjiang, Southwest China [J]. *J For Environ*, 2018, **38** (4): 439-443]

附表1 近年来西南干热河谷区不同植物群落植物多样性指数研究结果

Table S1 Research results of plant diversity index of different plant communities in the dry-hot valley of Southwest China over the years

| 植物多样性指标（雨季时、草本层） Plant diversity index (in rainy season, herbaceous layer) |                             |                               |                          | 研究区域<br>Study area | 引用文献<br>Citation |
|----------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|--------------------------|--------------------|------------------|
| Shannon-Wiener指数<br>Shannon-Wiener index                                   | Simpson 指数<br>Simpson index | Margalef 指数<br>Margalef index | Pielou指数<br>Pielou index |                    |                  |
| 0.356-0.454                                                                | 0.402-0.577                 |                               |                          | 金沙江 Jinsha River   | [74]             |
| 2.194-2.278                                                                | 0.854-0.870                 | 2.652-2.900                   | 0.847-0.860              | 金沙江 Jinsha River   | [75]             |
| 0.39-1.49                                                                  | 0.21-0.68                   | 0.5-1.64                      | 0.35-0.67                | 金沙江 Jinsha River   | [76]             |
| 1.20-1.50                                                                  |                             | 0.90-1.60                     |                          | 金沙江 Jinsha River   | [77]             |
| 0.40-1.30                                                                  |                             | 0.20-1.50                     |                          | 金沙江 Jinsha River   | [78]             |
| 1.70-2.60                                                                  | 0.71-0.93                   |                               | 0.42-0.71                | 金沙江 Jinsha River   | [79]             |
| 0-2.17                                                                     | 0.245-1.0                   |                               |                          | 金沙江 Jinsha River   | [80]             |
| 1.94-1.98                                                                  | 0.774-0.784                 |                               | 0.97-0.99                | 金沙江 Jinsha River   | [81]             |
| 1.275-2.198                                                                | 0.642-0.871                 |                               | 0.633-0.854              | 金沙江 Jinsha River   | [82]             |
| 0.03-0.43                                                                  | 0.836-0.962                 |                               | 0.50-0.79                | 金沙江 Jinsha River   | [83]             |
| 1.057-1.716                                                                | 0.503-0.741                 | 0.973-2.09                    | 0.597-0.803              | 金沙江 Jinsha River   | [84]             |
| 1.047-1.367                                                                |                             |                               | 0.202-0.371              | 金沙江 Jinsha River   | [85]             |
| 1.35-2.82                                                                  | 0.63-0.81                   |                               | 0.68-0.85                | 金沙江 Jinsha River   | [86]             |
| 1.02-1.76                                                                  | 0.514-0.781                 | 0.919-1.905                   | 0.669-0.845              | 金沙江 Jinsha River   | [87]             |
| 0.75-1.65                                                                  |                             |                               | 0.54-0.84                | 金沙江 Jinsha River   | [88]             |
| 0.913-2.0                                                                  | 0.178-0.510                 |                               | 0.385-0.819              | 金沙江 Jinsha River   | [89]             |
| 0.50-1.06                                                                  | 0.02-0.09                   |                               | 0.11-0.23                | 金沙江 Jinsha River   | [90]             |
| 0.784-2.190                                                                | 0.371-0.853                 | 0.781-1.749                   | 0.444-0.872              | 金沙江 Jinsha River   | [91]             |
| 0.265-0.532                                                                | 0.237-0.558                 | 3.504-10.523                  | 0.116-0.511              | 金沙江 Jinsha River   | [92]             |
| 1.13-2.41                                                                  | 0.35-0.63                   |                               | 0.38-0.72                | 元江 Yuanjiang River | [93]             |
| 1.61-2.94                                                                  |                             |                               | 0.28-0.77                | 元江 Yuanjiang River | [94]             |
| 0.347-0.833                                                                | 0.274-0.763                 |                               | 0.252-0.604              | 元江 Yuanjiang River | [95]             |
| 1.217-2.916                                                                | 0.605-0.981                 |                               | 0.554-0.947              | 元江 Yuanjiang River | [96]             |

附表2 近年来西南干热河谷区不同植物群落土壤肥力状况研究结果

Table S2 Research results of soil fertility of different plant communities in the dry-hot valley of Southwest China over the years

| 土壤肥力状况指标（0-20 cm土层） Soil fertility (0-20 cm soil layer) |                                               |                                          |                                          |                                          |                                                |                                                |                                                | 研究区域<br>Study area | 引用文献<br>Citation |
|---------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------|--------------------|------------------|
| 有机质<br>Organic matter<br>(w/g kg <sup>-1</sup> )        | 容重<br>Bulk density<br>(ρ/g cm <sup>-3</sup> ) | 全氮<br>Total N<br>(w/g kg <sup>-1</sup> ) | 全磷<br>Total P<br>(w/g kg <sup>-1</sup> ) | 全钾<br>Total K<br>(w/g kg <sup>-1</sup> ) | 有效氮<br>Available N<br>(w/mg kg <sup>-1</sup> ) | 有效磷<br>Available P<br>(w/mg kg <sup>-1</sup> ) | 速效钾<br>Available K<br>(w/mg kg <sup>-1</sup> ) |                    |                  |
| 1.47-1.77                                               |                                               |                                          |                                          |                                          | 2.27-8.04                                      | 1.7-2.5                                        | 30.9-70.7                                      | 金沙江 Jinsha River   | [97]             |
|                                                         |                                               |                                          |                                          |                                          | 22.69-130.05                                   |                                                |                                                | 金沙江 Jinsha River   | [98]             |
|                                                         |                                               |                                          |                                          |                                          | 66.78-94.89                                    | 4.26-43.36                                     | 64.21-499.62                                   | 金沙江 Jinsha River   | [99]             |
| 9.5-17.6                                                |                                               | 3.94-4.55                                | 1.11-1.756                               | 5.41-7.11                                | 28.80-47.81                                    | 9.14-10.46                                     | 3.54-5.39                                      | 金沙江 Jinsha River   | [100]            |
| 10.3                                                    |                                               | 0.16-0.68                                |                                          |                                          | 7.26-33.9                                      | 0.3-3.8                                        | 22.4-53.7                                      | 金沙江 Jinsha River   | [101]            |
|                                                         |                                               |                                          |                                          |                                          | 18.96-63.11                                    | 6.975-14.29                                    |                                                | 金沙江 Jinsha River   | [102]            |
| 1.37-1.78                                               |                                               |                                          |                                          |                                          | 10.37-57.32                                    | 0.37-2.90                                      | 22.98-140.08                                   | 金沙江 Jinsha River   | [103]            |
| 4.2-10.44                                               |                                               | 0.35-0.81                                |                                          |                                          | 12.85-57.32                                    | 0.37-1.20                                      | 19.63-140.08                                   | 金沙江 Jinsha River   | [80]             |
| 2.0-8.3                                                 | 1.51-1.74                                     |                                          |                                          |                                          |                                                |                                                |                                                | 金沙江 Jinsha River   | [104]            |
| 5.01-14.66                                              |                                               | 0.30-0.77                                | 0.17-0.46                                | 7.79-28.40                               | 10.15-33.35                                    | 1.31-5.01                                      | 52.47-368.36                                   | 金沙江 Jinsha River   | [105]            |
| 1.38-1.64                                               |                                               |                                          |                                          |                                          |                                                |                                                |                                                | 金沙江 Jinsha River   | [106]            |
| 1.45-1.68                                               |                                               |                                          |                                          |                                          |                                                | 0.75-14.85                                     | 24.09-60.49                                    | 金沙江 Jinsha River   | [107]            |
| 9.35-17.58                                              |                                               | 0.198-0.517                              | 0.268-0.287                              | 20.93-22.96                              | 46.6-97.18                                     |                                                | 86.73-123.6                                    | 金沙江 Jinsha River   | [108]            |
| 8.95-54.25                                              | 1.04-1.51                                     | 0.13-0.6                                 | 0.35-0.43                                | 31.83-35.19                              | 74.37-228.69                                   | 6.44-7.51                                      | 123.12-169.79                                  | 金沙江 Jinsha River   | [109]            |
| 11.52-24.31                                             | 1.6-1.77                                      |                                          |                                          |                                          |                                                |                                                |                                                | 金沙江 Jinsha River   | [110]            |
| 0.96-3.18                                               |                                               | 0.47-1.57                                | 0.36-0.86                                | 2.8-22.2                                 |                                                |                                                |                                                | 金沙江 Jinsha River   | [111]            |
| 1.60-8.50                                               | 1.41-1.59                                     |                                          |                                          |                                          |                                                | 0.04-2.50                                      | 68.0-342.0                                     | 金沙江 Jinsha River   | [112]            |
| 1.2-8.7                                                 |                                               | 0.24-0.87                                | 0.41-1.13                                | 15.7-36.7                                | 6.0-47.0                                       | 1.0-3.9                                        | 59.2-132.7                                     | 金沙江 Jinsha River   | [88]             |
| 1.53-1.59                                               |                                               |                                          |                                          |                                          | 10.72-27.91                                    | 1.66-6.54                                      | 60.45-122.34                                   | 金沙江 Jinsha River   | [113]            |
| 5.85-24.19                                              |                                               | 0.37-1.11                                | 0.21-0.63                                | 6.29-18.25                               | 36.71-74.88                                    | 1.09-10.42                                     | 66.22-217.81                                   | 金沙江 Jinsha River   | [89]             |
| 4.0-9.9                                                 |                                               | 0.4-0.7                                  | 0.1-0.4                                  | 5.1-11.8                                 |                                                |                                                |                                                | 金沙江 Jinsha River   | [114]            |
|                                                         |                                               |                                          |                                          |                                          | 29.9-48.1                                      | 4.04-11.7                                      | 27.39-57.4                                     | 金沙江 Jinsha River   | [115]            |
| 7.8-16.6                                                |                                               |                                          |                                          |                                          | 49.49-60.36                                    | 1.3-4.23                                       | 78.07-129.02                                   | 金沙江 Jinsha River   | [116]            |
| 6.12-31.79                                              |                                               | 0.8-2.2                                  | 0.25-0.78                                | 0.7-3.2                                  | 65-135                                         | 1.6-15.1                                       | 70.0-400.0                                     | 金沙江 Jinsha River   | [117]            |
| 2.4-30.0                                                | 1.08-1.34                                     | 0.29-0.60                                | 0.08-0.30                                | 11.8-26.0                                | 1.5-32.0                                       |                                                | 16.0-23.0                                      | 金沙江 Jinsha River   | [118]            |
| 9.4-33.5                                                |                                               | 0.7-1.9                                  | 0.5-3.1                                  | 10.4-67.2                                | 52.9-127.6                                     | 2.8-28.2                                       | 102.8-274.1                                    | 金沙江 Jinsha River   | [119]            |
| 11.4-70.92                                              |                                               | 20.84-55.23                              |                                          |                                          | 20.39-53.09                                    |                                                | 23.76-69.41                                    | 金沙江 Jinsha River   | [120]            |
| 2.5-9.1                                                 | 1.1-1.3                                       | 0.1-0.52                                 | 0.17-0.3                                 |                                          | 85.0-210.0                                     | 3.0-6.1                                        | 140.0-270.0                                    | 金沙江 Jinsha River   | [121]            |
| 4.51-10.1                                               | 1.52-1.64                                     | 0.48-0.71                                |                                          |                                          | 13.75-37.02                                    |                                                | 67.35-144.5                                    | 金沙江 Jinsha River   | [122]            |
| 22.05-35.68                                             |                                               | 0.96-1.63                                | 0.24-0.44                                |                                          | 77.39-132.69                                   | 1.28-3.57                                      | 95.5-165.03                                    | 元江 Yuanjiang River | [94]             |
| 87.7                                                    |                                               | 3.96                                     | 1.3                                      | 12.72                                    | 206.8                                          | 13                                             | 579.2                                          | 元江 Yuanjiang River | [123]            |

附表3 近年来西南干热河谷区不同植物群落土壤微生物和酶活性研究结果

Table S3 Research results of soil microorganism and enzyme activity of different plant communities in the dry-hot valley of Southwest China over the years

| 土壤微生物 (0-20 cm土层)<br>Soil microorganism (0-20 cm soil layer) |                                             |                                                     | 土壤酶活性 (0-20 cm土层)<br>Enzyme activity (0-20 cm soil layer) |                                                        |                                                  | 研究区域<br>Study area | 引用文献<br>Citation |
|--------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|--------------------|------------------|
| 细菌<br>Bacteria<br>( $n/10^4 \text{ g}^{-1}$ )                | 真菌<br>Fungus<br>( $n/10^4 \text{ g}^{-1}$ ) | 放线菌<br>Actinomycetes<br>( $n/10^4 \text{ g}^{-1}$ ) | 脲酶<br>Urease<br>( $\lambda/\text{mg g}^{-1}$ )            | 碱性磷酸酶<br>Phosphatase<br>( $\lambda/\text{mg g}^{-1}$ ) | 蔗糖酶<br>Sucrase<br>( $\lambda/\text{mg g}^{-1}$ ) |                    |                  |
| 377.71-947.89                                                | 1.06-1.87                                   | 2.23-6.03                                           |                                                           |                                                        |                                                  | 金沙江 Jinsha River   | [124]            |
|                                                              |                                             |                                                     | 38.0-77.0                                                 | 12.0-51.0                                              | 8.11-32.31                                       | 金沙江 Jinsha River   | [99]             |
| 13.24-15.39                                                  | 0.21-0.23                                   | 0.01-0.02                                           |                                                           |                                                        |                                                  | 金沙江 Jinsha River   | [100]            |
|                                                              |                                             |                                                     | 6.2-16.1                                                  | 1.9-5.3                                                | 1.45-16.7                                        | 金沙江 Jinsha River   | [125]            |
| 163.3-2500                                                   | 6.7-60.0                                    | 13.3-76.7                                           |                                                           |                                                        |                                                  | 金沙江 Jinsha River   | [126]            |
| 78.86-85.25                                                  | 6.35-12.48                                  | 3.34-8.40                                           |                                                           |                                                        |                                                  | 金沙江 Jinsha River   | [112]            |
| 20.1-24.1                                                    | 10.9-13.3                                   | 20.3-21.3                                           | 32.27-41.98                                               | 1.008-1.224                                            |                                                  | 金沙江 Jinsha River   | [127]            |
|                                                              |                                             |                                                     | 0.5-3.3                                                   | 4.0-14.0                                               | 1.4-3.6                                          | 金沙江 Jinsha River   | [128]            |
| 130-1410                                                     | 1.72-33.87                                  | 33.33-101.33                                        | 1.3-44.0                                                  | 0-0.672                                                |                                                  | 金沙江 Jinsha River   | [88]             |
| 325-798                                                      | 9.9-19.1                                    | 55.5-190.2                                          | 0.51-7.24                                                 | 19.7-63.1                                              | 0.6-2.0                                          | 金沙江 Jinsha River   | [114]            |
| 420-830                                                      | 0.16                                        | 6.1-7.4                                             |                                                           |                                                        |                                                  | 金沙江 Jinsha River   | [116]            |
| 103.2-174.7                                                  | 3.18-5.43                                   | 24.33-40.90                                         |                                                           |                                                        |                                                  | 金沙江 Jinsha River   | [129]            |
| 26.02-59.72                                                  |                                             |                                                     |                                                           |                                                        |                                                  | 金沙江 Jinsha River   | [120]            |
| 10.9-29.4                                                    | 7.5-19.4                                    | 0.18-1.07                                           |                                                           |                                                        |                                                  | 金沙江 Jinsha River   | [122]            |

附表4 近年来西南干热河谷区不同植物群落凋落物生物量研究概况

Table S4 Research results of litter biomass of different plant communities in the dry-hot valley of Southwest China over the years

| 凋落物生物量 Litter biomass ( $\text{m/t hm}^{-2}$ ) | 研究区域 Study area    | 引用文献 Citation |
|------------------------------------------------|--------------------|---------------|
| 0.229-1.483                                    | 金沙江 Jinsha River   | [130]         |
| 1.2-4.68                                       | 金沙江 Jinsha River   | [131]         |
| 0.05-2.8                                       | 金沙江 Jinsha River   | [106]         |
| 0.37-2.69                                      | 金沙江 Jinsha River   | [85]          |
| 2.041-5.751                                    | 金沙江 Jinsha River   | [132]         |
| 3.44-9.61                                      | 金沙江 Jinsha River   | [113]         |
| 0.04-0.71                                      | 金沙江 Jinsha River   | [118]         |
| 2.5-95.5                                       | 金沙江 Jinsha River   | [120]         |
| 2.143                                          | 元江 Yuanjiang River | [133]         |