

DOI: 10.11931/guihaia.gxzw201703010

引文格式: 温培才, 盛茂银, 王霖娇, 等. 西南喀斯特高原盆地石漠化环境植物群落结构与物种多样性时空动态 [J]. 广西植物, 2018, 38(1):11-23

WEN PC, SHENG MY, WANG LJ, et al. Temporal-spatial dynamics for plant community structure and species diversity of rocky desertification ecosystem in karst plateau basin, southwest China [J]. *Guihaia*, 2018, 38(1):11-23

西南喀斯特高原盆地石漠化环境植物群落结构与物种多样性时空动态

温培才^{1,2}, 盛茂银^{1,2*}, 王霖娇^{1,3}, 汪攀¹

(1. 贵州师范大学喀斯特研究院, 贵阳 550001; 2. 国家喀斯特石漠化防治工程技术研究中心, 贵阳 550001; 3. 贵州省喀斯特山地生态环境国家重点实验室培育基地, 贵阳 550001)

摘要: 为阐明西南典型喀斯特石漠化类型——喀斯特高原盆地石漠化植物群落结构和物种多样性特征及其演变规律, 科学支撑喀斯特石漠化治理, 选取了喀斯特高原盆地典型石漠化区贵州清镇簸箕小流域为研究区域, 对其植被进行广泛的野外勘察, 设置典型样方研究其植物群落结构和物种多样性特征; 运用空间替代时间方法, 研究石漠化演变过程中植物群落结构和物种多样性变化; 基于 2013—2015 连续 3 a 的监测数据, 研究其年际变化。结果表明: 研究区群落结构简单, 共记录到的植物分布 58 种, 其中草本层 18 科 24 属 28 种、木本层 17 科 25 属 30 种; 单种属的比例很高, 为 82.86%。不同等级石漠化环境植物群落高度、平均地径、平均冠幅、草本层生物量和灌木层生物量均具有显著差异; 植物种群密度在不同等级石漠化环境变化依次为轻度石漠化>中度石漠化>潜在石漠化>无石漠化。不同等级石漠化环境植物多样性指数、均匀度指数、丰富度指数和优势度指数均偏低, 而且 4 种指数均与石漠化等级演替无明显耦合关系。不同年份植物群落高度、平均地径、种群密度和灌木层生物量随着时间的推移均呈增加趋势, 但相邻年份增加不显著。研究区生态系统人为干扰逐渐减弱, 植被呈现出正向演替的趋势, 优势种的重要性趋于降低。该研究结果对我国西南喀斯特盆地生态功能恢复和石漠化植被重建具有一定的理论意义和实践指导价值。

关键词: 喀斯特高原盆地, 石漠化, 植物多样性, 演替

中图分类号: Q948.15, Q145 文献标识码: A 文章编号: 1000-3142(2018)01-0011-13

Temporal-spatial dynamics for plant community structure and species diversity of rocky desertification ecosystem in karst plateau basin, southwest China

收稿日期: 2017-09-11

基金项目: 国家自然科学基金(31660136); 贵州省水利厅科技项目(KT201409); 贵州省社会发展攻关计划课题(黔科合SZ[2014]3036号); 贵州省科学技术基金重点项目(黔科合基础[2016]1414); 贵州省普通高等学校科技拔尖人才支持计划项目(黔科合KY字[2016]064) [Supported by National Natural Science Foundation of China (31660136); R & D Fund of Guizhou Provincial Water Resources Department (KT201409); Guizhou R & D Program for Social Development ([2014]3036); Key Program of Guizhou Science and Technology Fund ([2016]1414); Support Plan for Science and Technology Top-notch Talents of Guizhou Higher Education Institutions ([2016]064)]。

作者简介: 温培才(1992-), 男, 广东湛江人, 硕士研究生, 主要从事喀斯特生态建设与区域经济研究, (E-mail) wenpeicai@126.com。

*通信作者: 盛茂银, 博士, 教授, 主要从事喀斯特植物生态学研究, (E-mail) shmoy@163.com。

WEN Peicai^{1,2}, SHENG Maoyin^{1,2*}, WANG Linjiao^{1,3}, WANG Pan¹

(1. Karst Research Institute, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China; 2. National Engineering Research Center for Karst Rocky Desertification Control, Guiyang 550001, China; 3. State Key Laboratory Incubation Base for Karst Mountain Ecology Environment of Guizhou Province, Guiyang 550001, China)

Abstract: Karst rocky desertification has become a very serious eco-environment issue in southwest China, severely hindering the local sustainable development of economy and society. Vegetation restoration is key to the rehabilitation of karst rocky desertification and a series of comprehensive controls for rocky desertification have been carried out in karst areas. But there are very short of the studies on plant community structure and species diversity of karst plateau basin ecosystem in southwest China. And the responses of plant community structure and species diversity to the succession of rocky desertification are still unclear. All these seriously hinder the control of rocky desertification. In the present study, a typical rocky desertification ecosystem of karst plateau basin, Boluo small watershed in Qingzhen City of Guizhou Province, was selected as experiment site. And five sample plots were set up for each degree of karst rocky desertification, namely, nil, potential, slight, and moderate. Then, the plant community structure and species diversity were investigated by ecological survey method from 2013 to 2015. The results showed that the plant community structure of rocky desertification ecosystem was very simple, only 58 plant species including 28 herbaceous species (belonging to 18 families, 24 genera) and 30 shrub species (belonging to 17 families, 25 genera) were recorded, and 82.36% of them belong to monotypic genus. There are obvious differences of plant community structure between different degrees of rocky desertification, and the plant population density among different degrees of rocky desertification also varies obviously, with the order of slight > moderate > potential > nil. The indices of plant diversity, evenness, richness and dominance all are low, and each of them has no coupling relationship with the rocky desertification. Along with the increase of the years, the plant community height, ground diameter, population density, and shrub biomass show an increasing trend, but there are not significant differences between adjacent years. The human disturbances on the ecosystem in study area getting weaker, the importance of dominant species tends to decrease, and the vegetation shows a trend of positive succession. The results have important values for the restoration of rocky desertification in karst plateau basin, southwest China.

Key words: karst plateau basin, rocky desertification, plant diversity, succession

喀斯特石漠化是指在脆弱的喀斯特生态地质环境基础上,由于受到人类不合理的社会经济活动干扰,造成人地矛盾突出、植被破坏、土壤侵蚀、基岩逐渐裸露、土地生产力退化甚至丧失、地表呈现类似荒漠景观的演变过程(熊康宁等,2011;Xu et al, 2013)。贵州是我国喀斯特面积最大,石漠化最为严重,生态环境效应最为突出的省份(苏维词等,2004)。其中,喀斯特面积占全省土地面积的73.8%,石漠化占21.34%,是我国的“喀斯特省”(高贵龙等,2003)。石漠化是我国西南喀斯特地区严峻的生态问题,严重制约了当地的社会经济发展(Wang et al, 2002)。

生物群落是指在相同时间生活在同一空间上的各物种种群的集合(牛翠娟等,2007)。物种多

样性是生物多样性在物种水平上的表现形式,可反映生物群落结构的复杂性,体现群落的结构类型、组织水平、发展阶段、稳定程度和生境差异,一直是生态学领域研究的热点(漆良华等,2007);同时物种多样性也是群落生态学的核心问题(王世雄,2013)。喀斯特地表浅薄土层与岩石相互镶嵌,导致土壤分布不连续,植被生境条件严酷(沈有信等,2005)。喀斯特地区由于石漠化分布广泛,土壤贫瘠,水土流失严重,植被生长缓慢且趋于旱生性、石生性和喜钙性演替(任海,2005),导致该地区的植被恢复工程面临很大困难。探明植物群落结构和物种多样性对石漠化演变的响应以及对植被的演变规律和内在驱动机制,是石漠化植被修复的科学依据。迄今为止,尽管对喀斯特

石漠化生态系统植物群落结构与物种多样性有一定研究(张承琴等,2015;文丽等,2015;吴林世等,2016),对喀斯特石漠化生态系统植被与环境因子间的相关性也有一些报道(张文等,2011;Li et al, 2013)。但是,这些研究仍不够系统深入,喀斯特石漠化生态系统植被群落结构特征仍不明确,植物物种多样性的变化规律及其驱动机制亟待探明。此外,上述研究的对象多是喀斯特高原峡谷、峰丛洼地、峰丛槽谷等区域的石漠化生态系统,而针对西南喀斯特石漠化典型的高原盆地轻—中度石漠化生态系统植物群落结构与物种多样性研究却鲜有报道,该区域的植物群落结构和物种多样性的时空动态演变规律及其内在驱动机制研究也很少,严重影响了该类型区的石漠化科学治理。为此,本研究以西南喀斯特高原盆地典型喀斯特石漠化生态系统为对象,探讨其植被群落结构与物种多样性特征及其在石漠化演变过程中的变化规律,以期为该类型区石漠化生态系统进一步的植被演替及其驱动机制研究提供基础,为该类型区石漠化治理和植被恢复保护提供科学依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

簸箩小流域位于贵州省清镇市红枫湖镇,属长江流域乌江水系,为典型的喀斯特高原盆地地貌,地势平缓,土壤以黄壤、黄色石灰土为主,中心点地理坐标为 $26^{\circ}30.961'N$, $106^{\circ}20.328'E$,海拔为 $1\ 271\sim 1\ 451\ m$ (表1)。研究区地处贵阳市的城市边缘地带,人类活动强烈。20世纪50年代,由于乱砍乱伐,坡地被大量开垦,植被遭受到不同程度的破坏,致使当地出现严重水土流失和基岩裸露状况。自20世纪末期,该区域实施了生态治理和保护工程,特别是2006年以来,实施了封山育林、人工造林等石漠化综合治理工程,区域内的生态环境得到一定的改善。目前,该区石漠化面积占总面积的13.1%,以潜在至轻度石漠化为主,无、潜在、轻度和中度石漠化面积分别占研究区总面积的58.46%、16.86%、13.44%和5.99%,非喀斯特面积占研究区总面积的5.25%。2013—2015

年,年均气温 $14\ ^{\circ}C$,年均降雨量 $1\ 215\ mm$,4—8月的降雨量占全年总降雨量的75%,属亚热带高原季风湿润气候。

1.2 研究方法

1.2.1 石漠化等级确定和样地建立 对照熊康宁等(2002)的喀斯特石漠化等级划分标准(表1),对研究区石漠化进行详细踏查。研究区石漠化演变等级可划分为无、潜在、轻度和中度4个等级,无强度以上石漠化等级。针对无、潜在、轻度和中度4个典型石漠化演变阶段建立调查样方,每个等级设置5个具有代表性的样方,每个样方大小为 $20\ m\times 20\ m$ 。每个样方利用GPS仪测定其地理坐标位置和海拔高度;用方格网判断样方的岩石裸露率(盛茂银等,2013);土层覆盖度和植被覆盖度分别通过测量样方土层覆盖面积和正午时植被的投影面积算出;土层厚度用插钎法测定(曾宪勤等,2008)。各样方基本情况见表2。

1.2.2 植被调查 于2013—2015年每年的8月,对20个样方逐一进行群落调查与采样。木本层统计植物的种类、数量、高度、冠幅、胸径和地径。研究区木本植物高度整体上较矮,较矮的植株直接采用卷尺测出,较高的植株采用简易的测高仪实测群落中的一株标准植株,其他的则与标准植株相比较测算。通过计算样方内所有木本植物的地径和冠幅的平均值得出每个样方的平均地径和平均冠幅。在每个样方对角线的两端和中点处选择5块 $1\ m\times 1\ m$ 的子样方统计草本层的种类、数量、高度和盖度。其中,草本层盖度采用量测法对其投影面积进行测算。每个样方的灌木层地上生物量采用喻理飞等(2002)总结的灌木层生物量变化趋势的回归公式进行计算。草本层地上生物量采用刈割法,采集草本植物地上部分并称其鲜重,带回实验室在 $80\ ^{\circ}C$ 下烘干至恒重并称其干重,算出单位面积干物质的重量。植物群落种群密度为群落中单位面积的植物个体数。

1.2.3 重要值计算 草本层和木本层的重要值计算参照张艳丽等(2013)的方法。计算公式:

木本层重要值 = (相对密度+相对优势度+相对频度)/3;草本层重要值 = (相对高度+相对盖度+相对频度)/3。

表 1 喀斯特石漠化等级分级标准

Table 1 Classification standard of karst rocky desertification

石漠化等级 Degree of rocky desertification	岩石裸露率 Percentage of exposed rock (%)	土层覆盖度 Soil coverage (%)	坡度 Slope (°)	植被和土层 覆盖度之和 Coverage of vegetation and soil (%)	平均土层厚度 Average of soil thickness (cm)
无 Nil	<40	>60	<15	>70	>20
潜在 Potential	>40	<60	>15	50~70	<20
轻度 Slight	>60	<30	>18	35~50	<15
中度 Moderate	>70	<20	>22	20~35	<10
强度 High	>80	<10	>25	10~20	<5
极强度 Extremely high	>90	<5	>30	<10	<3

表 2 研究样方基本情况表

Table 2 Basic information of sample plots set in the study

序号 No.	石漠化等级 Degree of rocky desertification	平均岩石裸露率 Average percentage of exposed rock (%)	平均土层覆盖度 Average of soil coverage (%)	平均植被覆盖度 Average of vegetation coverage (%)	平均土层厚度 Average of soil thickness (cm)	样方数 Sum of plots	编号 Serial number of plots
1	无 Nil	0	83	81	32	5	P1-5
2	潜在 Potential	42	56	13	19	5	P6-10
3	轻度 Slight	62	24	22	15	5	P11-15
4	中度 Moderate	71	13	20	10	5	P16-20

注: 各项数据均来源于野外实地勘测。

Note: Data in the table are derived from field surveys.

相对密度 = (某物种的个体数×100)/全部物种的个体数; 相对优势度 = (某物种的总胸高断面积×100)/全部物种的总胸高断面积; 相对频度 = (某物种的频度×100)/全部物种的总频度; 相对高度 = (某物种的平均高度×100)/全部物种的平均高度之和; 相对盖度 = (某物种的盖度×100)/全部物种的总盖度。

式中, 胸高断面积通过胸径算出, 频度为某种植物出现的样方数占整个样方数的百分比。

1.2.4 植物多样性分析 群落植物多样性基于以下指数分析: (1) Patrick 丰富度指数, $R = S$; (2)

Shannon-Wiener 指数, $H = - \sum_{i=1}^s (P_i \ln P_i)$; (3)

Pielou 均匀度指数, $E = H/\ln S$; (4) Simpson 优势

度指数, $D = 1 - \sum_{i=1}^s P_i^2$ 。

式中, S 为群落中物种总数, P_i 为物种 i 的个体总数占样方群落中总个体数的比例, 即 $P_i = n_i/N$, n_i 为物种 i 的总个体数, N 为群落中的个体总数 (马克平等, 1995; 王国明和叶波, 2017)。

1.3 数据处理与分析

用 Excel 2003 软件对数据进行整理与分析, 用 SPSS 22.0 软件进行单因素方差分析 (One-way ANOVA)。用多重比较 (Duncan 检验) 分析不同等级石漠化环境及不同年份植物群落结构和物种多样性变化。不同等级石漠化植物群落结构和物种多样性各项指标的数据结果均用 3 a 的平均值表示。

2 结果与分析

2.1 植物群落结构和物种分布的总体特征

植被物种调查结果见表 3。所调查样方草本层植物共有 18 科 24 属 28 种,其中菊科的物种最多,其次为禾本科和玄参科,表明菊科和禾本科草本植物对石漠化环境有较好的适应性。木本层植物共有 17 科 25 属 30 种,其中蔷薇科物种多样性最高,达到 7 属 8 种;其次为芸香科、鼠李科和忍冬科。研究区单种属占有很高的比例,为 82.86%,草本层的单属种有毛茛科、乌毛蕨科、百合科、木通科、葱科等;木本层有紫金牛科、马桑科、五加科、黄杨科等。物种重要值分析显示,方茎草(*Leporhabdos parviflora*)、芒(*Miscanthus sinensis*)、黑麦草(*Lolium perenne*)、五节芒(*Miscanthus floridulus*)、白车轴草(*Trifolium repens*)为草本层的优势物种,分布广泛。球核荚蒾(*Viburnum propinquum*)、钝叶栒子(*Cotoneaster hebephyllus*)、滇鼠刺(*Itea yunnanensis*)、小果蔷薇(*Rosa cymosa*)等为木本层的优势物种,其中以蔷薇科和忍冬科的灌木物种大量生长。在不同等级石漠化环境中,植物群落结构具有明显的差异。无石漠化环境的植物群落木本层主要以柏科、忍冬科等类群的物种为主,草本层主要以禾本科、蕨科、莎草科等类群的物种为主。在潜在和轻度石漠化环境中,植物群落木本层主要以虎耳草科、蔷薇科、紫金牛科等类群的物种为主,草本层以黑麦草、白车轴草和狗尾草(*Setaria viridis*)等物种为植物群落优势种。在中度石漠化环境中,植物群落木本层主要以蔷薇科、小檗科等类群的灌木物种为主,草本层以狗尾草、方茎草等物种为优势种。

2.2 植物群落结构和物种多样性对石漠化演变的响应

2.2.1 不同等级石漠化环境植物群落结构分析

2.2.1.1 植物群落高度

表 4 显示,研究区不同等级石漠化环境植物群落高度存在显著差异,无石漠化和中度石漠化环境的植物群落高度显著高于潜在和轻度石漠化,潜在石漠化和轻度石漠化间植物群落高度无显著的差异。中度石漠化环境的

植物群落高度较高,这与盛茂银等(2015)研究结果一致,支持喀斯特石漠化环境裸露岩石具有土壤养分聚集效应这一论断。随着石漠化程度增加,土壤养分先降低后增加,中强度石漠化土壤养分优于潜在和轻度石漠化土壤(盛茂银等,2015),加上中度石漠化环境植物木本群落结构更为简单、木本层物种较少,导致中度石漠化环境木本植物生长速度更快,显示了较高的植物群落高度。这一结果与研究区中度石漠化区域实施封山育林等生态恢复措施,降低人为砍伐等干扰有关。

2.2.1.2 木本植物平均地径

表 4 显示,植物群落木本植物平均地径在不同等级石漠化环境间存在明显差异。中度石漠化环境的植物群落木本植物平均地径显著高于潜在和轻度石漠化环境,而无、潜在和轻度石漠化环境的植物群落木本植物平均地径之间无显著差异。植物群落木本植物平均地径在不同等级石漠化环境间的变化与植物群落高度呈现了大约一致的变化趋势,显示研究区石漠化环境的植物群落木本植物平均地径与植物群落高度存在一定的耦合关系。

2.2.1.3 木本植物平均冠幅

群落木本植物平均冠幅在不同等级石漠化环境的差异也是显著的,且随石漠化等级的增加,木本植物平均冠幅呈现降低的变化趋势(表 4)。无石漠化环境的木本植物平均冠幅显著大于其他石漠化等级,轻度石漠化和中度石漠化差异不明显。

2.2.1.4 植被地上生物量

各石漠化等级草本层生物量与石漠化等级演替无明显耦合关系,但无石漠化和潜在石漠化的草本层生物量显著低于轻度石漠化和中度石漠化(表 4)。这一结果主要表明轻、中度石漠化岩石裸露率相对较高,杂草主要生长在石缝中,由于几乎无人活动的影响,杂草长势较好。各石漠化等级的灌木层生物量均很低,且随着石漠化程度的增加,灌木层生物量呈逐渐减少的变化趋势。可见,石漠化程度对草本层生物量和灌木层生物量的影响并不一致。

2.2.1.5 植物群落种群密度

由表 4 可知,不同等级石漠化环境植物种群密度有较大差异,表现为无石漠化区最小,轻度石漠化区最大,后者为前者的 3.32 倍。轻度石漠化和中度石漠化的种群密度

表 3 研究样方植物群落物种统计
Table 3 Species of plant community in sample plots studied

科名 Family	属名 Genus	种名 Species	重要值 Important value	
			2013	2015
草本层 Herb layer				
禾本科 Gramineae	芒属 <i>Miscanthus</i>	芒 <i>Miscanthus sinensis</i>	40.25	42.95
		五节芒 <i>M. floridulus</i>	35.19	36.82
	黑麦草属 <i>Lolium</i>	黑麦草 <i>Lolium perenne</i>	37.5	37.5
	狗尾草属 <i>Setaria</i>	狗尾草 <i>Setaria viridis</i>	22.36	23.78
菊科 Compositae	蒿属 <i>Artemisia</i>	牛尾蒿 <i>Artemisia dubia</i>	5.37	9.2
		青蒿 <i>A. carvifolia</i>	15.21	19.94
	白酒草属 <i>Conyza</i>	白酒草 <i>Conyza japonica</i>	—	2.3
	苦蕒菜属 <i>Ixeris</i>	苦蕒菜 <i>Ixeris polycephala</i>	3.58	3.07
	菊苣属 <i>Cichorium</i>	菊苣 <i>Cichorium intybus</i>	—	—
豆科 Leguminosae	车轴草属 <i>Trifolium</i>	白车轴草 <i>Trifolium repens</i>	35	35
凤尾蕨科 Pteridaceae	凤尾蕨属 <i>Pteris</i>	井栏边草 <i>Pteris multifida</i>	22.36	17.64
		蜈蚣草 <i>P. vittata</i>	25.05	25.31
毛茛科 Ranunculaceae	银莲花属 <i>Anemone</i>	野棉花 <i>Anemone vitifolia</i>	6.26	6.14
乌毛蕨科 Blechnaceae	狗脊属 <i>Woodwardia</i>	狗脊 <i>Woodwardia japonica</i>	—	—
玄参科 Scrophulariaceae	方茎草属 <i>Leptorhombos</i>	方茎草 <i>Leptorhombos parviflora</i>	43.83	46.79
		来江藤属 <i>Brandisia</i>	来江藤 <i>Brandisia hancei</i>	2.68
百合科 Liliaceae	百合属 <i>Lilium</i>	野百合 <i>Lilium brownii</i>	3.58	3.83
陵齿蕨科 Lindsaeaceae	乌蕨属 <i>Stenoloma</i>	乌蕨 <i>Stenoloma chusanum</i>	14.31	10.74
伞形科 Umbelliferae	胡萝卜属 <i>Daucus</i>	野胡萝卜 <i>Daucus carota</i>	2.68	3.83
木通科 Lardizabalaceae	八月瓜属 <i>Holboellia</i>	八月瓜 <i>Holboellia latifolia</i>	5.37	4.6
蕨科 Pteridiaceae	蕨属 <i>Pteridium</i>	食蕨 <i>Pteridium esculentum</i>	15.21	16.87
百合科 Liliaceae	百合属 <i>Lilium</i>	野百合 <i>Lilium brownii</i>	—	—
石竹科 Caryophyllaceae	鹅肠菜属 <i>Myosoton</i>	鹅肠菜 <i>Myosoton aquaticum</i>	3.58	3.07
莎草科 Cyperaceae	薹草属 <i>Carex</i>	羊须草 <i>Carex callitrichos</i>	19.68	18.41
		砾苔草 <i>C. stenophylloides</i>	16.1	14.57
小檗科 Berberidaceae	小檗属 <i>Berberis</i>	日本小檗 <i>Berberis thunbergii</i>	1.79	2.3
菝葜科 Smilacaceae	菝葜属 <i>Smilax</i>	菝葜 <i>Smilax china</i>	—	—
紫草科 Boraginaceae	琉璃草属 <i>Cynoglossum</i>	倒提壶 <i>Cynoglossum amabile</i>	—	6.14
木本层 Woody layer				
蔷薇科 Rosaceae	悬钩子属 <i>Rubus</i>	粉枝莓 <i>Rubus biflorus</i>	—	2.3
		火棘属 <i>Pyracantha</i>	火棘 <i>Pyracantha fortuneana</i>	6.91
	蔷薇属 <i>Rosa</i>	小果蔷薇 <i>Rosa cymosa</i>	10.36	13.82
		七姊妹 <i>R. multiflora</i>	3.45	3.45

续表3

科名 Family	属名 Genus	种名 Species	重要值 Important value	
			2013	2015
	桐子属 <i>Cotoneaster</i>	钝叶桐子 <i>Cotoneaster hebeophyllus</i>	19.58	17.27
	桃属 <i>Amygdalus</i>	桃 <i>Amygdalus persica</i>	—	—
	梨属 <i>Pyrus</i>	滇梨 <i>Pyrus pseudopashia</i>	—	—
	杏属 <i>Armeniaca</i>	凯特杏 <i>Armeniaca vulgaris</i>	—	—
小檗科 Berberidaceae	小檗属 <i>Berberis</i>	日本小檗 <i>Berberis thunbergii</i>	9.21	8.06
藤黄科 Guttiferae	金丝桃属 <i>Hypericum</i>	金丝桃 <i>Hypericum monogynum</i>	—	1.15
		金丝梅 <i>H. patulum</i>	3.45	3.45
豆科 Leguminosae	胡枝子属 <i>Lespedeza</i>	美丽胡枝子 <i>Lespedeza formosa</i>	—	1.15
忍冬科 Caprifoliaceae	荚蒾属 <i>Viburnum</i>	球核荚蒾 <i>Viburnum propinquum</i>	31.09	32.25
		珍珠荚蒾 <i>V. foetidum</i>	3.45	4.61
		金佛山荚蒾 <i>V. chinshanense</i>	5.76	6.91
鼠李科 Rhamnaceae	雀梅藤属 <i>Sageretia</i>	雀梅藤 <i>Sageretia thea</i>	3.45	3.45
	勾儿茶属 <i>Berchemia</i>	勾儿茶 <i>Berchemia sinica</i>	2.3	2.3
紫金牛科 Myrsinaceae	铁仔属 <i>Myrsine</i>	铁仔 <i>Myrsine africana</i>	14.97	16.12
马桑科 Coriariaceae	马桑属 <i>Coriaria</i>	马桑 <i>Coriaria nepalensis</i>	2.3	2.3
柏科 Cupressaceae	柏木属 <i>Cupressus</i>	柏木 <i>Cupressus funebris</i>	2.3	2.3
樟科 Lauraceae	木姜子属 <i>Litsea</i>	木姜子 <i>Litsea pungens</i>	3.45	3.45
五加科 Araliaceae	常春藤属 <i>Hedera</i>	常春藤 <i>Hedera nepalensis</i>	2.3	3.45
棕榈科 Palmae	棕榈属 <i>Trachycarpus</i>	棕榈 <i>Trachycarpus fortunei</i>	1.15	1.15
虎耳草科 Saxifragaceae	鼠刺属 <i>Itea</i>	滇鼠刺 <i>Itea yunnanensis</i>	20.73	23.03
芸香科 Rutaceae	花椒属 <i>Zanthoxylum</i>	花椒 <i>Zanthoxylum bungeanum</i>	2.3	2.3
		野花椒 <i>Z. simulans</i>	1.15	1.15
		飞龙掌血属 <i>Toddalia</i>	飞龙掌血 <i>Toddalia asiatica</i>	—
胡颓子科 Elaeagnaceae	胡颓子属 <i>Elaeagnus</i>	胡颓子 <i>Elaeagnus pungens</i>	4.61	5.76
桑科 Moraceae	榕属 <i>Ficus</i>	地果 <i>Ficus tikoua</i>	1.15	1.15
黄杨科 Buxaceae	野扇花属 <i>Sarcococca</i>	野扇花 <i>Sarcococca ruscifolia</i>	—	2.3

注: “—”表示该项数据缺失。

Note: “—” indicates the missing data.

均显著高于无石漠化和潜在石漠化, 显示了群落种群密度和草本生物量有相似的变化趋势, 群落草本层生物量与种群密度的大小密切相关。

2.2.2 不同等级石漠化物种多样性分析 研究区石漠化环境植物多样性的 4 种指数均很低, 表明该区植物生态系统已遭破坏, 植被恢复演替尚处

于较低阶段 (表 5)。对不同等级石漠化环境植物多样性指数进行多重比较分析显示, 不同等级石漠化环境多样性指数均无显著差异, 而均匀度、丰富度、优势度指数在不同等级石漠化环境存在显著差异。随着石漠化等级增加, 均匀度与丰富度指数呈现先降低后增加的变化趋势, 而优势度指

表 4 不同等级石漠化环境植物群落结构变化

Table 4 Changes of plant community among different degrees of rocky desertification

石漠化等级 Degree of rocky desertification	群落高度 Community height (m)	木本植物 平均地径 Average ground diameter of woody plants (cm)	木本植物 平均冠幅 Average crown of woody plants (m ²)	草本层生物量 Herb layer biomass (g·m ⁻²)	灌木层生物量 Woody layer biomass (g·m ⁻²)	种群密度 Population density (strain·m ⁻²)
无 Nil	1.64±0.18a	3.31±1.27ab	4.31±0.30a	63.08±12.52a	0.1628±0.0156a	5.13±2.60a
潜在 Potential	1.23±0.15b	2.26±0.56b	3.73±0.46b	53.96±5.22a	0.1570±0.1794ab	8.48±2.86a
轻度 Slight	1.12±0.17b	1.80±0.32b	2.91±0.54c	148.28±14.51b	0.1347±0.0035b	17.02±4.16b
中 Moderate	1.81±0.27a	4.33±1.62a	2.55±0.42c	115.75±16.15c	0.0897±0.0037c	14.28±1.82b

注：相同字母表示无显著差异，无相同字母表示有显著差异， $\alpha=0.05$ 。下同。

Note: Same letters represent no significant difference, different letters represent significant differences at 0.05 levels. The same below.

表 5 不同等级石漠化环境植物多样性指数

Table 5 Plant diversity indices of different degrees of rocky desertification surroundings

石漠化等级 Degrees of rocky desertification	多样性指数 Shannon-Wiener index	均匀度指数 Evenness index	丰富度指数 Richness index	优势度指数 Dominance index
无 Nil	2.70±0.23a	3.13±0.22a	7.47±0.81ab	0.25±0.11ac
潜在 Potential	2.65±0.21a	2.62±0.17b	7.56±0.69a	0.36±0.10b
轻度 Slight	2.75±0.28a	2.25±0.19c	6.73±0.60b	0.30±0.10ab
中度 Moderate	2.72±0.26a	3.04±0.22a	7.46±0.97ab	0.16±0.08c

数未呈现这一变化规律。结合研究区野外调查结果,进一步研究表明丰富度指数与均匀度指数随着石漠化恶化程度增加呈现先降低后增加的这一变化趋势与研究区中度石漠化区域开展较多的石漠化治理人工植被恢复工程措施有关。

2.3 植物群落结构和物种多样性的年际变化规律

2.3.1 不同年份的植物群落高度和木本植物的平均地径 表 6 显示,植物群落高度和木本植物平均地径的年际变化具有一致性,均随着年份的增加而呈增加的趋势,表现为 2015 年 > 2014 年 > 2013 年。相邻年份植物群落高度和木本植物平均地径均无显著差异,这可能是由于喀斯特环境土层浅薄、土壤贫瘠和保水保肥能力差限制了植物的生长。可见,研究区在自然条件下,石漠化生态环境植被状况可以得到逐步改善。

2.3.2 不同年份的灌木层生物量 不同年份的灌木

层生物量均很低(表 6),说明研究区灌木植物较少,植被演替尚处于较低阶段。各年间灌木层生物量无显著差异,但随年份增加,灌木层生物量呈现增加趋势。可见,石漠化地区灌木植物生长缓慢,可能与土层浅薄、土壤保水保肥能力差有关。

2.3.3 不同年份的植物种群密度 由表 6 可知,植物种群密度呈现出随着时间的推移而不断增加的趋势,2014 年和 2015 年的种群密度分别比 2013 年增加 26.18% 和 52.58%,但各年间的种群密度均无显著差异。这一结果显示了种群密度和灌木层生物量具有相同的变化趋势。

2.3.4 植物多样性指数年际变化 表 6 显示,该区 2013—2015 年 4 种植物多样性指数随着年份的增加均呈现增大的趋势,但不同指数增加的幅度有明显的差异。具体如下:①2013 年多样性指数显著小于 2014 年和 2015 年,但 2014 年和 2015 年的

表 6 不同年份植物群落结构变化

Table 6 Changes of plant community among different years

年份 Year	群落高度 Community height (m)	木本植物平均地径 Average ground diameter of woody plants(cm)	灌木层生物量 Woody layer biomass (g · m ⁻²)	种群密度 Population density (strain · m ⁻²)
2013	1.29±0.28a	2.31±0.99a	0.1303±0.0289a	8.90±4.87a
2014	1.44±0.28ab	2.77±1.05ab	0.1355±0.0322a	11.23±5.05a
2015	1.62±0.40b	3.22±1.07b	0.1360±0.0314a	13.58±6.35a

表 7 植物多样性指数年际变化

Table 7 Change of plant diversity indices among different years

年份 Year	多样性指数 Shannon-Wiener index	均匀度指数 Evenness index	丰富度指数 Richness index	优势度指数 Dominance index
2013	2.52±0.16a	2.61±0.35a	7.26±0.82a	0.22±0.11a
2014	2.72±0.19b	2.73±0.37ab	7.32±0.83a	0.27±0.12a
2015	2.88±0.23b	2.93±0.45b	7.39±0.82a	0.32±0.11a

多样性指数无显著差异。②2013 年均匀度指数显著小于 2015 年,但 2014 年的均匀度指数与 2013、2015 年均无显著性差异。③各年份丰富度指数和优势度指数无显著性差异。

3 讨论

3.1 喀斯特高原盆地轻—中度石漠化环境植物群落结构和物种多样性总体特征

研究区系典型的喀斯特高原盆地轻—中度石漠化区,本研究结果显示该区的植物群落组成简单,不管是草本层,还是木本层群落物种数量都明显偏少。物种组成较纬度相近的喀斯特高原峡谷花江示范区顶坛小流域(李晨等,2012)的要高,但比纬度相近的喀斯特高原山地的黔西县猴场村(李瑞等,2016)要低。可见,喀斯特不同地貌地区由于土壤理化性质、年均温和年均降雨量的差异,明显影响了植物的生长和物种组成。与未发生石漠化的喀斯特原始森林对比发现,研究区的植物物种数量明显低于广西乐业流星天坑植物群落(苏宇乔等,2016)、广西木论喀斯特森林(兰斯安

等,2016)和贵州茂兰原生性喀斯特森林(周凤娇等,2012)。这说明该喀斯特高原盆地生态系统在受到不同程度的干扰退化为石漠化生态系统后,植物物种数量显著降低,群落结构简单,生态环境遭受破坏。本研究结果也显示,研究区单属种的比例很高,与贵州紫云石漠化环境植物群落单属种的比例(76.47%)(张敏和陈世容,2015)接近,但比贵州茂兰喀斯特原始森林高 21.12%(侯满福等,2011),显示喀斯特地区石漠化环境植物群落单属种的比例明显高于非石漠化环境。

喀斯特石漠化环境土壤肥力低下、土层浅薄和地下水的渗漏限制了植物的生长和生物量的积累(于维莲等,2010)。本研究结果显示,随着年份的增加,喀斯特环境植物群落高度、平均地径和灌木层生物量均呈增加的趋势,但相邻年份增加均不显著。这显示了研究区植物群落在自然修复下趋于改善,但由于受到喀斯特石漠化恶劣生境的影响,植物生长缓慢。这也说明了石漠化环境对植物生长存在明显的胁迫作用。研究表明,随着年份的增加,植物种群密度显示出逐渐增加的趋势,显示出研究区人地关系矛盾渐趋减弱,坡地开

垦、植被破坏等人为活动对生态系统的干扰明显减少,植被恢复过程中呈现出自然恢复的态势。2015年的多样性指数和均匀度指数显著大于2013年,也反映出研究区人类活动对植物群落的干扰逐渐减弱,植被演替呈现以自然恢复为主的趋势;且随着植被的正向演替,植物优势种的重要性趋于降低,物种多样性得到改善。

3.2 喀斯特高原盆地石漠化演变过程中植物群落结构和物种多样性的响应

本研究中,喀斯特环境植物群落高度和木本植物平均地径在中度石漠化区最大,这与前人研究结果一致(盛茂银等,2015;Sheng et al,2016)。盛茂银等(2013)研究表明,随着石漠化程度增加,土壤养分先降低后增加,中强度石漠化土壤养分优于潜在和轻度石漠化土壤。此外,中强度石漠化环境木本植物群落结构更为简单、物种较少。因此,中度石漠化环境木本植物土壤养分更充足,生长速度更快,显示了较高的植物群落高度和平均地径。这一结果间接支持了盛茂银等(2015)提出的喀斯特石漠化环境裸露岩石土壤养分聚集效应学说。随着石漠化程度的增加,植被平均冠幅和灌木层生物量呈现减小的趋势,表明沿无、潜在、轻度和中度石漠化梯度干扰递增,石漠化总体生境仍是趋于恶化,植物群落总体生长受环境胁迫趋于加重。光照是影响植物生长和分布的一个重要因素(Whitmore,1996),而林下植物的更新受光照及其空间分布的影响更大(Nicotra et al,2008)。无石漠化和潜在石漠化区草本层生物量均显著低于中度石漠化和轻度石漠化,这一结果可能是由于无石漠化和潜在石漠化区的立地条件优于轻度石漠化和中度石漠化,无石漠化和潜在石漠化的木本植物分布较多且平均冠幅较大,草本植物层光照明显小于轻度石漠化和中度石漠化,导致草本植物生长受限。轻度、中度石漠化的植物种群密度显著高于无、潜在石漠化,这一结果应是由以下两个原因造成:(1)轻度、中度石漠化环境木本植物明显少于无和潜在石漠化环境,但草本植物物种明显比无和潜在石漠化环境丰富,导致整个植物群落物种数并不比无和潜在石漠化环境少。(2)研究区轻中度石漠化环境实施了石

漠化治理等大量的植被恢复保护工程措施,可能增加了石漠化环境植物物种数量,导致轻度、中度石漠化环境的植物种群密度高于无和潜在石漠化。

本研究中,不同等级石漠化环境植物物种组成存在明显差异。沿无石漠化、潜在石漠化、轻度石漠化、中度石漠化干扰强度递增梯度,木本植物物种种类越来越简单,优势种的重要值比例越来越高,植物多样性指数呈现了显著的变化,证实了人为干扰严重破坏了物种组成从而直接影响植物群落演替进程的观点(盛茂银等,2015;Sheng et al,2016)。本研究结果显示,不同等级石漠化环境,除多样性指数外,丰富度指数、均匀度指数和优势度指数均存在显著性差异,表明喀斯特生态系统经人类活动影响叠加后,植被群落结构和物种多样性的自然规律受到明显影响。本研究结果进一步显示,随着石漠化恶化程度增加,丰富度指数和均匀度指数呈现先降低后增加的变化趋势,而优势度指数未显示与石漠化等级演替存在明显的耦合关系,表明植物多样性丰富度指数与均匀度指数应该是评价喀斯特石漠化植物群落对石漠化演变响应的重要指标。本研究中,中度石漠化植物群落均匀度指数和丰富度指数显著高于潜在和轻度石漠化植物群落。这与前人研究结果不一致(盛茂银等,2015;Sheng et al,2016)。这应是该研究区中度石漠化环境草本植物群落较丰富和近年来该区域开展了较多的人工造林生态恢复措施的结果。与西南喀斯特石漠化其他区域的植被群落和物种多样性研究比较发现(吴克华等,2007;李瑞等,2016),不同地貌类型(喀斯特高原盆地、喀斯特高原峡谷和喀斯特高原山地)的喀斯特石漠化植物群落物种多样性指数无明显差别,显示石漠化生境已成为影响植物群落和物种多样性的主导性因素,高于地貌等其它环境因素对植物群落和物种多样性的影响;本研究的喀斯特高原盆地石漠化生态系统植物群落均匀度指数明显高于其他两种地貌类型,进一步证实了本研究区自20世纪末开展了生态保护和恢复治理工程,特别是2006年来,大量实施的石漠化治理工程措施,使研究区生态系统受人为扰动降低、植被恢复稳定、均

均匀度升高;丰富度指数比较表明,本研究的喀斯特高原盆地石漠化生态系统植物群落丰富度指数大于喀斯特高原峡谷类型,而小于喀斯特高原山地类型。这与本研究区生境优于花江喀斯特峡谷石漠化生态系统,而差于黔西喀斯特山地石漠化生态系统一致,也进一步证实了丰富度指数是可以作为反映喀斯特石漠化生态系统植物群落生境优劣的一项重要指标。

3.3 喀斯特高原盆地石漠化植被恢复的理论意义和实践指导价值

喀斯特石漠化是以自然或人工植被的退化为先导,不同等级石漠化生态重建的关键是恢复植被,提高土地的生产力(宋同清等,2010)。人工植被恢复能否成功的关键是适生物种的筛选和应用。本研究中,喀斯特高原盆地石漠化生态系统物种丰富度低、植被群落简单,石漠化生境对植物生长、分布具有显著的胁迫。喀斯特高原盆地石漠化环境植物既要有石生性、喜钙性和耐旱性的特点,又必须具有发达而强壮的根系才能扎根和生长,这一结果在喀斯特高原盆地石漠化植被生态系统恢复重建中具有重要的指导意义。本研究结果显示,菊科、禾本科和蔷薇科等类群物种具备上述生理特征,在研究区有较广的分布,而且生长良好,显示了对喀斯特高原盆地石漠化生境较强的适应能力(刘玉国等,2011;盛茂银等,2015;李瑞等,2016)。系该类型区石漠化植被恢复和重建的适宜物种,是今后该类型区石漠化人工植被恢复工程的植物物种材料。本研究结果也显示,即便是石漠化生态系统的适生物种,其在不同等级石漠化生境中的适应性也具有明显的差异。例如,研究区蔷薇科植物在潜在、轻度石漠化环境有较多种属的分布,而在较强烈石漠化生境中分布的种属数量明显下降。因此,在石漠化治理植被人工修复选择物种的过程中,不仅要筛选适应石漠化环境的物种,还应针对不同等级石漠化环境筛选适应性先锋物种,方能达到石漠化治理植被修复的预期目标。此外,由于无、潜在石漠化整体生境较好,其草本层植物易受到木本层植物的遮光作用而生长不佳,所以在无、潜在石漠化环境进行植被恢复与重建过程中应选择耐阴草本植物作

为其林下植物;中度石漠化生境石沟、石缝处的土壤养分较高,可以适当人工植造一些适生木本植物,如蔷薇科、小檗科等类群植物进行植被恢复。

喀斯特脆弱生态系统的退化是以强烈的人类干扰为驱动力、以植被减少为诱因、以土地生产力退化为本质、以出现类似荒漠化景观为标志的复合过程(盛茂银等,2015)。石漠化环境植被群落简单、多样性和结构性指标均很低。稳定性与多样性假说理论认为,荒漠植被群落由于缺乏冗余物种,因而稳定性较差,生态功能主要由优势种或建群种来实施,其他物种数量较少。所以,在石漠化治理中,除了注重选择适生乡土物种进行植被恢复外,还要尽可能地降低人类活动的干预,保障植被群落向正向演替。本研究中,在缺乏人为干扰的情况下,随着年份增加,研究区植物群落高度、平均地径、灌木层生物量、种群密度、多样性指数和均匀度指数都显示增加的趋势,说明封山育林等封禁治理措施是石漠化植被恢复的一个重要的措施。因此,对于无干扰的原生性较强的植被应该保持现状,顺其自然发展;已受干扰的石漠化生态系统,必须增加植物群落物种数,特别注意引进一些顶级种或次顶级种;次生林区要适当进行修剪,保持合理的密度,有利于有性繁殖更新链尽快恢复和林木的快速生长,促进物种组成分布渐趋均匀,多样性趋向合理化,实现植物群落的迅速恢复与形成。该研究结果对整个西南喀斯特石漠化治理工程都具有明显的实践应用意义。

参考文献:

- GAO GL, DENG ZM, XIONG KN, et al, 2003. The call of karst and the hope-Guizhou karst ecological environment construction and sustainable development [M]. Guiyang: Guizhou Science and Technology Press: 1-7. [高贵龙, 邓自民, 熊康宁, 等, 2003. 喀斯特的呼唤与希望—贵州喀斯特生态环境建设与可持续发展 [M]. 贵阳: 贵州科技出版社: 1-7.]
- HOU MF, SHEN QG, QIN HN, 2011. Species diversity characters of original karst forest communities in Maolan, Guizhou, China [J]. J Guangxi Norm Univ (Nat Sci Ed), 29(1): 60-65. [侯满福, 沈庆庚, 覃海宁, 2011. 贵州茂兰喀斯特原生性森林群落物种多样性特征 [J]. 广西师范大学学报(自然科学版), 29(1): 60-65.]

- LAN SA, SONG M, ZENG FP, et al, 2016. Altitudinal pattern of woody plant species diversity in the karst forest in Mulun, China [J]. *Acta Ecol Sin*, 36(22): 7374-7383. [兰斯安, 宋敏, 曾馥平, 等, 2016. 木论喀斯特森林木本植物多样性垂直格局 [J], *生态学报*, 36(22): 7374-7383.]
- LI C, XIONG KN, WU GM, et al, 2012. Response of plant diversity to the rehabilitation for rocky desertification in karst mountainous areas: A case study of the Dingtan catchment of Huajiang demonstration area in Guizhou [J]. *Trop Geogr*, 32(5): 487-493. [李晨, 熊康宁, 吴光梅, 等, 2012. 岩溶山区石漠化生态治理的植物多样性动态响应—以贵州省花江示范区顶坛小流域为例 [J]. *热带地理*, 32(5): 487-493.]
- LI R, WANG LJ, SHENG MY, et al, 2016. Plant species diversity and its relationship with soil properties in karst rocky desertification succession [J]. *Res Soil Water Conserv*, 23(5): 111-119. [李瑞, 王霖娇, 盛茂银, 等, 2016. 喀斯特石漠化演替中植物多样性及其与土壤理化性质的关系 [J]. *水土保持研究*, 23(5): 111-119.]
- LI S, REN HD, XUE L, et al, 2013. The relationship between soil characteristics and community structure in different vegetation restoration in Guangxi karst region [J]. *Adv Mat Res*, 726: 4172-4176.
- LIU YG, LIU CC, WEI YF, et al, 2011. Species composition and community structure at different vegetation successional stages in Puding, Guizhou Province, China [J]. *Chin J Plant Ecol*, 35(10): 1009-1018. [刘玉国, 刘长成, 魏雅芬, 等, 2011. 贵州省普定县不同植被演替阶段的物种组成与群落结构特征 [J]. *植物生态学报*, 35(10): 1009-1018.]
- MA KP, HUANG JH, YU SL, et al, 1995. Plant community diversity in Dongling Mountain, Beijing, China II. Species richness, evenness and species diversities [J]. *Acta Ecol Sin*, 15(3): 268-277. [马克平, 黄建辉, 于顺利, 等, 1995. 北京东灵山地区植物群落多样性的研究II丰富度、均匀度和物种多样性指数 [J]. *生态学报*, 15(3): 268-277.]
- NICOTRA AB, CHAZDON RL, IRIARTE SVB, 2008. Spatial heterogeneity of light and woody seedling regeneration in tropical wet forest [J]. *Ecology*, 80(6): 1908-1926.
- NIU CJ, LOU AR, SUN RY, et al, 2007. Basic ecology [M]. Beijing: High Education Press. [牛翠娟, 娄安如, 孙儒泳, 等, 2007. 基础生态学 [M]. 北京: 高等教育出版社.]
- QI LH, PENG ZH, ZHANG XD, et al, 2007. Species diversity and biomass allocation of vegetation restoration communities on degraded lands [J]. *Chin J Ecol*, 26(11): 1697-1702. [漆良华, 彭镇华, 张旭东, 等, 2007. 退化土地植被恢复群落物种多样性与生物量分配格局 [J]. *生态学杂志*, 26(11): 1697-1702.]
- REN H, 2005. A review on the studies of desertification process and restoration mechanism of karst rocky ecosystem [J]. *Trop Geogr*, 25(3): 195-200. [任海, 2005. 喀斯特山地生态系统石漠化过程及其恢复研究综述 [J]. *热带地理*, 25(3): 195-200.]
- SHEN YX, LIU WY, LI YH, et al, 2005. Community ecology study on karst semi-humid evergreen broad-leaved forest at the central part of Yunnan [J]. *Guihaia*, 25(4): 321-326. [沈有信, 刘文耀, 李玉辉, 等, 2005. 滇中喀斯特山地半湿润常绿阔叶林的群落生态学研究 [J]. *广西植物*, 25(4): 321-326.]
- SHENG MY, LIU Y, XIONG KN, 2013. Response of soil physical-chemical properties to rocky desertification succession in South China Karst [J]. *Acta Ecol Sin*, 33(19): 6303-6313. [盛茂银, 刘洋, 熊康宁, 2013. 中国南方喀斯特石漠化演替过程中土壤理化性质的响应 [J]. *生态学报*, 33(19): 6303-6313.]
- SHENG MY, XIONG KN, CUI GY, et al, 2015. Plant diversity and soil physical-chemical properties in karst rocky desertification ecosystem of Guizhou, China [J]. *Acta Ecol Sin*, 35(2): 434-448. [盛茂银, 熊康宁, 崔高仰, 等, 2015. 贵州喀斯特石漠化地区植物多样性与土壤理化性质 [J]. *生态学报*, 35(2): 434-448.]
- SHENG MY, XIONG KN, WANG LJ, et al, 2016. Response of soil physical and chemical properties to rocky desertification succession in South China Karst [J]. *Carbon Evap*, 33(19): 1-14.
- SONG TQ, PENG WX, ZENG FP, et al, 2010. Community composition and biodiversity characteristic of forest in karst cluster-peak-depression region [J]. *Biodivers Sci*, 18(4): 355-364. [宋同清, 彭晚霞, 曾馥平, 等, 2010. 喀斯特峰丛洼地不同类型森林群落的组成与生物多样性特征 [J]. *生物多样性*, 18(4): 355-364.]
- SU WC, ZHU WX, TENG JZ, 2004. Eco-controlling models of rocky desertification in karst gorge region of Xingbei Town in Guizhou Province and its effects [J]. *Ecol Environ*, 13(1): 57-60. [苏维词, 朱文孝, 滕建珍, 2004. 喀斯特峡谷石漠化地区生态重建模式及其效应 [J]. *生态环境*, 13(1): 57-60.]
- SU YQ, XUE YG, FAN BB, et al, 2016. Plant community structure and species diversity in Liuxing Tiankeng of Guangxi [J]. *Acta Bot Boreal-Occident Sin*, 36(11): 2300-2306. [苏宇乔, 薛跃规, 范蓓蓓, 等, 2016. 广西流星天坑植物群落结构与多样性 [J]. *西北植物学报*, 36(11): 2300-2306.]
- WANG GM, YE B, 2017. Floristic composition and diversity of typical plant community in Zhoushan Archipelago, East China [J]. *Chin J Ecol*, 36(2): 349-358. [王国明, 叶波, 2017. 舟山群岛典型植物群落物种组成及多样性 [J]. *生态学杂志*, 36(2): 349-358.]
- WANG SJ, ZHANG DF, LI RL, 2002. Mechanism of rocky desertification in the karst mountain areas of Guizhou Province, Southwest China [J]. *Int Rev Environ Strateg*, 3(1): 123-135.
- WANG SX, 2013. Spatiotemporal patterns and processes of species diversity in Ziwuling plant community of the Loess Plat-

- eau [D]. Xi'an: Shaanxi Normal University. [王世雄, 2013. 黄土高原子午岭植物群落物种多样性的时空格局与过程 [D]. 西安: 陕西师范大学.]
- WEN L, SONG TQ, DU H, et al, 2015. The succession characteristics and its driving mechanism of plant community in karst region, southwest China [J]. *Acta Ecol Sin*, 35(17): 5822-5833. [文丽, 宋同清, 杜虎, 等, 2015. 中国西南喀斯特植物群落演替特征及驱动机制 [J]. *生态学报*, 35(17): 5822-5833.]
- WHITMORE TC, 1996. A review of some aspects of tropical rain forest seedling ecology with suggestions for further enquiry [M]//SWAINE MD. *The ecology of tropical forest tree seedlings*. Paris: Parthenon Publishing Group: 3-40.
- WU KH, XIONG KN, RONG L, et al, 2007. Characteristics of the process of vegetation restoration under different rocky desertification degrees by comprehensive treatment-A case study of the Huajiang gorge area, Guizhou Province [J]. *Earth Environ*, 35(4): 327-335. [吴克华, 熊康宁, 容丽, 等, 2007. 不同等级石漠化综合治理的植被恢复过程特征—以贵州省花江峡谷为例 [J]. *地球与环境*, 35(4): 327-335.]
- WU LS, CAO FX, PENG JQ, et al, 2016. Plant community and species diversity in rocky desert areas of Southern Hunan [J]. *J Zhejiang A & F Univ*, 33(2): 239-246. [吴林世, 曹福祥, 彭继庆, 等, 2016. 湘南石漠化地区植物群落物种多样性 [J]. *浙江农林大学学报*, 33(2): 239-246.]
- XIONG KN, CHEN YB, CHEN H, 2011. *Dian Shi Cheng Jin—Control techniques and pattern of Guizhou stony desertification* [M]. Guiyang: Guizhou Science and Technology Press: 125-139. [熊康宁, 陈永毕, 陈浒, 2011. 点石成金——贵州石漠化治理技术与模式 [M]. 贵阳: 贵州科技出版社: 125-139.]
- XIONG KN, LI P, ZHOU ZF, 2002. Remote sensing of karst stony desertification-A typical researches of GIS/Taking Guizhou Province as an example [M]. Beijing: Geology Publishing House: 134-137. [熊康宁, 黎平, 周忠发, 2002. 喀斯特石漠化的遥感—GIS 典型研究—以贵州省为例 [M]. 北京: 地质出版社: 134-137.]
- XU EQ, ZHANG HQ, LI MX, 2013. Mining spatial information to investigate the evolution of karst rocky desertification and its human driving forces in Changshun, China [J]. *Sci Total Environ*, 458-460(3): 419-426.
- YU LF, ZHU SQ, YE JZ, et al, 2002. Dynamics of a degraded karst forest in the process of natural restoration [J]. *Sci Silv Sin*, 38(1): 1-7. [喻理飞, 朱守谦, 叶镜中, 等, 2002. 退化喀斯特森林自然恢复过程中群落动态研究 [J]. *林业科学*, 38(1): 1-7.]
- YU WL, DONG D, NI J, 2010. Comparisons of biomass and net primary productivity of karst and non-karst forests in mountainous areas, Southwestern China [J]. *J Subtrop Res Environ*, 5(2): 25-30. [于维莲, 董丹, 倪健, 2010. 中国西南山地喀斯特与非喀斯特森林的生物量与生产力比较 [J]. *亚热带资源与环境学报*, 5(2): 25-30.]
- ZENG XQ, LIU BY, LIU YN, et al, 2008. Soil depth distribution characteristics on the lithoidal mountainous slope of northern China: A case study of Miyun County, Beijing [J]. *Geogr Res*, 27(6): 1281-1289. [曾宪勤, 刘宝元, 刘瑛娜, 等, 2008. 北方石质山区坡面土壤厚度分布特征——以北京市密云县为例 [J]. *地理研究*, 27(6): 1281-1289.]
- ZHANG CQ, WANG PC, LONG CL, et al, 2015. Species composition and biodiversity characteristics in peak cluster-depressions differing in rock desertification of a karst area in Guizhou [J]. *J SW Univ (Nat Sci Ed)*, 37(6): 48-53. [张承琴, 王普昶, 龙翠玲, 等, 2015. 贵州喀斯特峰丛洼地不同石漠化等级植物群落物种组成和多样性特征 [J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 37(6): 48-53.]
- ZHANG M, CHEN SR, 2015. Study on the plant diversity of vegetation under different rocky desertification degrees in Ziyun County [J]. *Grassl Turf*, 35(1): 78-83. [张敏, 陈世容, 2015. 紫云县不同程度石漠化区域植物多样性研究 [J]. *草原与草坪*, 35(1): 78-83.]
- ZHANG W, ZHANG JL, ZHOU YF, et al, 2011. The plant community structure & similarity trait of the karst mountain grassland [J]. *J Ecol Environ*, 20(5): 843-848. [张文, 张建利, 周玉锋, 等, 2011. 喀斯特山地草地植物群落结构与相似性特征 [J]. *生态环境学报*, 20(5): 843-848.]
- ZHANG YL, LI ZY, YANG J, et al, 2013. Community structure and species diversity of urban green space in Hangzhou, China [J]. *J NE For Univ*, 41(11): 25-30. [张艳丽, 李智勇, 杨军, 等, 2013. 杭州城市绿地群落结构及植物多样性 [J]. *东北林业大学学报*, 41(11): 25-30.]
- ZHOU FJ, DING FJ, YANG CH, et al, 2012. Community structure and plant diversity of tourist attractions in Maolan Nature Reservation [J]. *Guizhou Agric Sci*, 40(2): 8-12. [周凤娇, 丁访军, 杨成华, 等, 2012. 茂兰自然保护区旅游景点植物群落结构及多样性 [J]. *贵州农业科学*, 40(2): 8-12.]