

DOI: 10.5846/stxb201303220488

盛茂银,熊康宁,崔高仰,刘洋.贵州喀斯特石漠化地区植物多样性与土壤理化性质.生态学报,2015,35(2):434-448.

Sheng M Y, Xiong K N, Cui G Y, Liu Y. Plant diversity and soil physical-chemical properties in karst rocky desertification ecosystem of Guizhou, China. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(2): 434-448.

贵州喀斯特石漠化地区植物多样性与土壤理化性质

盛茂银^{1, 2}, 熊康宁^{1, 2, *}, 崔高仰¹, 刘 洋¹

1. 贵州师范大学中国南方喀斯特研究院, 贵阳 550001

2. 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:以贵州典型喀斯特石漠化生态系统环境为研究对象,运用野外取样调查和实验室检测分析方法,研究不同等级石漠化环境植物多样性和土壤理化性质特征及其相关性;运用空间替代时间方法,探讨石漠化演替过程中植物多样性和土壤理化性质的响应,旨在为贵州乃至整个中国西南喀斯特森林生态保护和石漠化生态系统恢复重建提供理论支撑。结果表明:1)石漠化环境植物群落组成简单,物种丰富度也很低,且随着石漠化程度增加,植被物种组成呈递减趋势;不同等级石漠化环境植物多样性具有显著差异,均匀度指数变化与石漠化等级演替明显耦合,显示了随石漠化程度增加而减小的变化趋势。2)不同等级石漠化环境土壤理化性质存在显著差异,随着石漠化程度增加,土壤理化性质显示了先退化后改善的响应过程。土壤有机质、氮素、毛管持水量、容重和孔隙度与植物多样性具有明显的相关性,在改善土壤理化性质和促进植物多样性恢复方面起着关键作用。3)主成分分析表明,土壤有机质、氮素、钾素、持水状况、孔隙度和植物多样性均匀度指数等是基于土壤理化性质和植物多样性评价石漠化程度的关键指标。基于上述结果,进一步阐述了石漠化演替过程中植物多样性和土壤理化性质的变化规律和响应机制。研究结果对我国西南喀斯特森林生态保护和石漠化生态系统恢复重建具有一定的理论意义和实践指导价值。

关键词:喀斯特;石漠化;植物多样性;土壤理化性质;演变规律

Plant diversity and soil physical-chemical properties in karst rocky desertification ecosystem of Guizhou, China

SHENG Maoyin^{1, 2}, XIONG Kangning^{1, 2, *}, CUI Gaoyang¹, LIU Yang¹

1 Institute of South China Karst, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China

2 State Key Laboratory Incubation Base for Karst Mountain Ecology Environment of Guizhou Province, Guiyang 550001, China

Abstract: Karst rocky desertification has been an important ecological issue hindering the economy and society development of South China Karst region, and the control of rocky desertification has been clearly listed in the national projects of economy and society development. But there are highly short of plant diversity and soil science researches in karst rocky desertification ecosystem, and the successions of plant diversity and soil physical-chemical properties are still unclear in the process of rocky desertification, all which hardly hinders the control of rocky desertification well work.

Based on these problems, in this study, firstly, three typical rocky desertification regions, that is, Yachi, Hongfenghu, and Huajiang of Guizhou Province, representing three different typical karst landforms of plateau mountain, plateau basin, and plateau gorge, respectively, were selected as experiment areas, and 45 sample plots with area of 20 m × 20 m, respectively, were set up for the 5 typical degrees of rocky desertification surrounding, that is, nil, potential, low, middle, and high, in these three experiment areas. Then, the plant diversity and soil physical-chemical properties were surveyed and analyzed by methods of ecological survey, chemical determination, and mathematical statistics. Results show

基金项目:国家“十二五”科技支撑计划重大课题(2011BAC09B01);贵州师范大学博士科研启动基金(2012)

收稿日期:2013-03-22; 网络出版日期:2014-03-25

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: shmoy@163.com

that 1) the vegetation is very simple with extreme low richness in rocky desertification surroundings, and with the increased degree of rocky desertification, the plant diversity appear remarkable change, for example, species is more few, importance value of dominant species is more high, and structure of plant community and ecological niche is more confusion. 2) There are significance differences of soil physical-chemical properties between different degrees of rocky desertification, and there is remarkable correlation between soil physical-chemical properties and plant diversity in rocky desertification ecosystem. 3) Principal component analysis show that the evenness index of plant diversity together with its correlative soil physical-chemical factors can represent the degradation degree of karst ecosystem. Results have important values in the protection of karst forest ecosystem and the control of rocky desertification.

Key Words: Karst; rocky desertification; plant diversity; soil physical-chemical properties; succession

石漠化是指在脆弱喀斯特生态环境下人类不合理的社会经济活动,造成人地矛盾突出、植被破坏、水土流失、岩石逐渐裸露、土地生产力衰退甚至丧失,地表呈现类似于荒漠化景观的演变过程或结果^[1-4]。我国西南喀斯特地区位于世界三大连片喀斯特发育区之一的东亚片区中心,面积约 54 万 km²。目前居住着 1 亿多人口、48 个少数民族^[2],贫困人口相对集中,人地矛盾非常突出,坡地植被一旦破坏,土壤侵蚀作用加剧,导致薄土层全部流失,造成严重的石漠化,水分、养分调蓄能力迅速降低^[5-6]。石漠化已经成为制约我国西南喀斯特地区区域经济社会发展的一个重大生态问题^[7-9],石漠化治理已经成为我国社会经济建设中的一项重要内容。但目前喀斯特石漠化恢复生态学理论研究远远落后于石漠化治理实践^[10-12],石漠化生态系统恢复重建严重缺乏相关理论研究的科学支撑^[13-15],导致石漠化治理成效不明显,存在石漠化治理后的生态系统结构简单、稳定性差、抵抗力弱,治理成果难以维系等一系列问题^[2, 16-17]。

物种多样性是生物多样性在物种水平上的表现形式,可表征生物群落的结构复杂性,体现群落的结构类型、组织水平、发展阶段、稳定程度和生境水平上的表现形式,是生物多样性的重要有机组成部分,是生态学领域的研究热点^[18],同时物种多样性的恢复也是植被恢复过程中最重要的特征之一^[19]。而土壤是陆地生态系统的重要组成部分,是生态系统诸多生态过程的载体,是植物群落更新演替过程中不可或缺的研究内容^[10]。通过对特定环境条件下生态系统演替过程中土壤理化性质变化的研究,将有助于认识生态系统演变过程中地上与地下相互作用关系及机理,进而为实现人工调控森林更新演替的进程提供科学依据^[12, 20]。但到目前为止,尽管对喀斯特生态系统单一生态过程的研究较深入^[21],但对喀斯特生态系统植物多样性和土壤理化性质缺乏深入研究,其时空分异及其对石漠化演替过程的响应尚无研究^[22];石漠化环境经过人工更新演替后,植物多样性和土壤理化性质特征及变化趋势如何,人工植被演替又怎样影响地下土壤的演变,以及构建怎样的森林植被才有利于该区域土壤性质的改善等问题,尚缺乏研究。为此,本研究以贵州典型喀斯特石漠化环境为研究对象,研究不同等级石漠化环境的植物多样性和土壤理化性质特征及其两者之间的相关性,探讨石漠化过程中植物多样性和土壤理化性质的变化规律及其响应机制,以期对贵州乃至中国西南喀斯特森林生态保护和石漠化生态系统恢复重建提供理论支撑。

1 研究区概况与方法

1.1 研究区概况

研究选择了贵州喀斯特 3 个典型石漠化区域作为研究区,分别代表了贵州喀斯特石漠化地区不同的气候、地形地貌、植被区划和土壤条件等状况(图 1)。

研究区 I 位于贵州省毕节市鸭池镇东南 13 km 处,属长江流域乌江水系白浦河支流区。以喀斯特高原山地地貌类型为主,地势起伏大,海拔为 1742—1400 m。该流域年均降雨量 863 mm,年最大降水量 995 mm,年最小降水量 618 mm。降雨量主要分布在 7—9 月,占全年总降雨的 52%。岩石以碳酸盐类的石灰岩为主,有部分侏罗纪紫色砂页岩、页岩分布。土壤以黄壤土及紫砂土为主。植被为亚热带常绿落叶针阔混交林,原生

植被基本上被破坏,现以次生林为主。野生植被是以窄叶火棘(*Pyracantha angustifolia*)、刺梨(*Rosa roxbunghii*)、救军粮(*Pyracantha fortuneana*)、铁线莲(*Clematis florida*)等为主的藤、刺、灌丛,以及零星分布的青冈(*Cyclobalanopsis glauca*)、马尾松(*Pinus massoniana*)、光皮桦(*Betula luminifera*)为主。

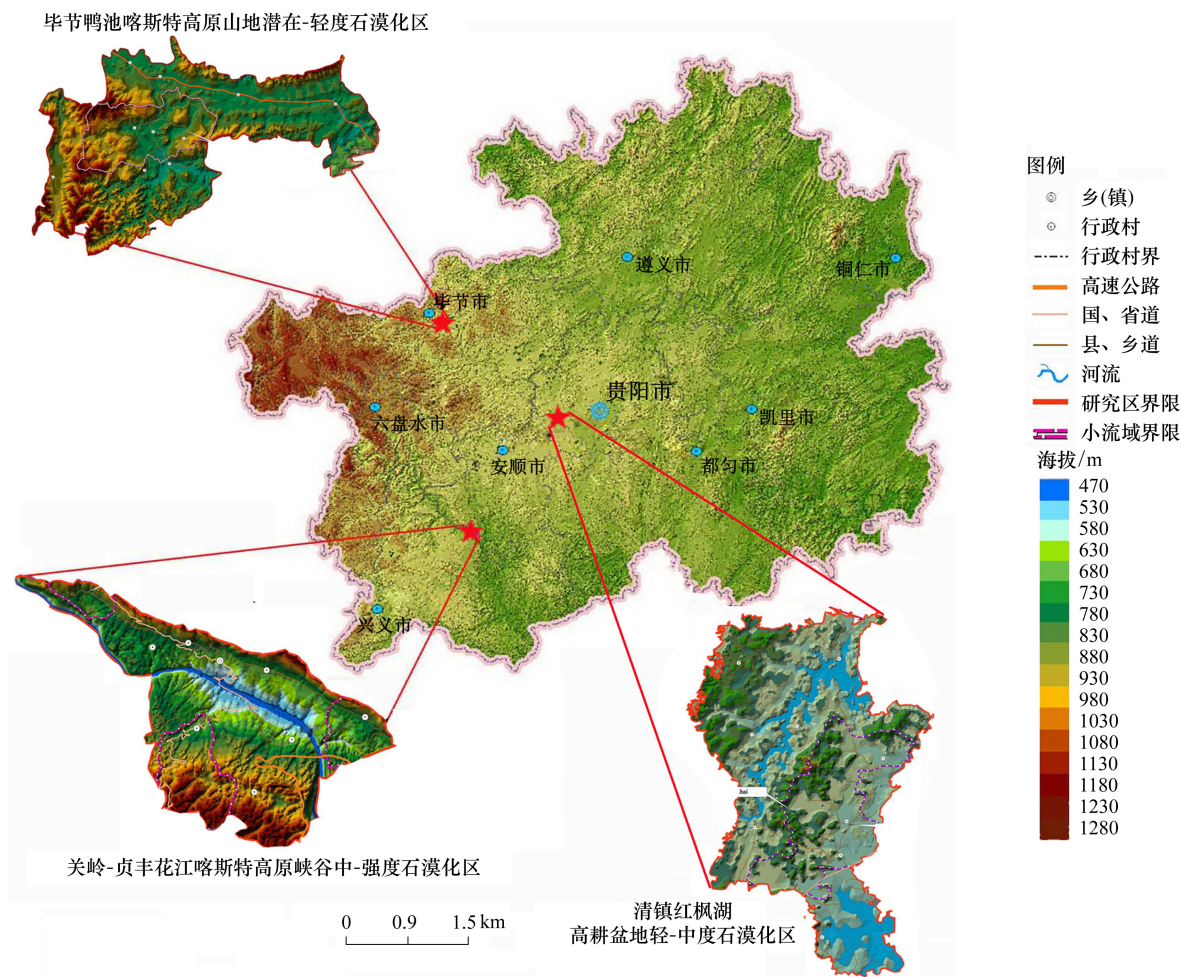


图1 研究区位置及其概况

Fig.1 Location and basic information of experiment sites in this study

研究区Ⅱ位于贵州省清镇市红枫湖镇,涉及簸箩村王家寨组,距县城12 km,属长江流域乌江水系麦翁河支流区。地貌类型为典型的喀斯特高原盆地,坝地中央坡度较缓,流域内地势平缓,海拔1271—1451 m。该流域年均降雨量1215 mm,降雨量主要分布在4—8月,占全年总降雨的75%。岩石多属三叠系的白云岩、泥质白云岩及页岩。土壤以黄壤、黄色石灰土为主。自然植被在区域中所占比重较小,其中常见乔木主要以柏木为主,灌木层多为典型石灰岩有刺灌丛,以金佛山荚蒾(*Viburnum chinshanense*)、救军粮、野蔷薇(*Rosa multiflora*)、悬钩子(*Rubus corchorifolius*)、亮叶鼠李(*Rhamnus hemsleyana*)等为主,草本层常见种类有白茅(*Imperata cylindrica*)、五节芒(*Miscanthus floridulu*)、芒(*Miscanthus sinensis*)、荇草(*Arthraxon hispidus*)、铁线莲等。

研究区Ⅲ位于贵州省安顺市北盘江花江河段峡谷两岸,地貌类型分为高原区和峡谷区两大单元,流域内主要有5种地貌组合形态,4种为喀斯特地貌,海拔450—1450 m之间,相对高差为1000 m。该流域年均降雨量1100 mm,降雨量主要分布在5—10月,占全年总降雨的83%。岩石多属三叠系的白云岩、泥质白云岩及页岩。土壤以黄壤、黄色石灰土为主。植被为亚热带常绿落叶针阔混交林,原生植被基本上被破坏,现以次生林为主。野生植被是以窄叶火棘、刺梨、救军粮、铁线莲等为主的藤、刺、灌丛,以及零星分布的青冈、马尾松、光

皮桦为主。

1.2 研究方法

1.2.1 样方设置

在对研究区详细踏查的基础上,选取石漠化演替过程中 5 个典型阶段为研究对象,分别为无石漠化、潜在石漠化、轻度石漠化、中度石漠化和强度石漠化,石漠化等级划分参照熊康宁等的方法^[16]。针对这 5 个石漠化等级生态环境,在 3 个研究区共设立了 45 个研究样方,每个样方的面积为 20 m×20 m,样方的详细情况见表 1。

表 1 研究区基础信息及样方设置

Table 1 Basic information of experiment sites and sample plots set in the study

研究区 Experiment sites	位置 Location	中心点坐标 Latitude and longitude of centre	海拔 Altitude/m	地貌 Landform	土壤类型 Soil type	石漠化等级 Degree of rocky desertification	岩石裸露率 Percentage of exposed rock/%	样方数(编号) Sum (serial number) of square
I	贵州毕节市 撒拉溪	27°15.08'N 105°21.263'E	1400—1742	喀斯特高原 山地	黄壤、黄色 石灰土	强度	30—35	3(I 1—3)
						中度	20—29	3(I 4—6)
						轻度	0—5	3(I 7—9)
						潜在	0—5	3(I 10—12)
						无	0	3(I 13—15)
II	贵州清镇市 红枫湖	26°30.961'N 106°20.328'E	1271—1451	喀斯特高原 盆地	黄壤、黄色 石灰土	强度	30—35	3(II 1—3)
						中度	20—29	3(II 4—6)
						轻度	0—5	3(II 7—9)
						潜在	0—5	3(II 10—12)
						无	0	3(II 13—15)
III	贵州安顺市 花江	25°39.40'N 105°39.042'E	450—1450	喀斯特高原 峡谷	黄壤、黄色 石灰土	强度	30—35	3(III 1—3)
						中度	20—29	3(III 4—6)
						轻度	0—5	3(III 7—9)
						潜在	0—5	3(III 10—12)
						无	0	3(III 13—15)

1.2.2 植物多样性分析

2012 年 8 月和 2013 年 1 月分别测定了 45 个样方植物群落的密度(株/m²)、平均冠幅(m²/株)、盖度(% ,即所有林木树冠的椭圆形面积之和占地面面积的比例)、平均胸径(cm/株)、平均高度(m/株)、地上部分生物量^[23]等指标计算群落多样性。多样性测度指标有:(1)丰富度, $R = S$,(2)多样性 Shannon-Wiener 指数, $H = - \sum_{i=1}^s (Pi \ln Pi)$,(3)均匀度 Pielou 指数, $E = H/\ln S$,(4)Simpson 优势度指数, $D = \sum_{i=1}^s Pi^2$,式中 S 为群落中的总种数, Pi 为种 i 的个体数占群落中总个体数的比例,即 $Pi = n_i/N$, n_i 为种 i 的个体数, N 为观察到的个体数总数。

1.2.3 土壤样品的采集及其理化性质分析

(1)土壤样品的采集

在各样地中心按蛇形方式选 3 个采样点,各点间距在 5 m 之内。2012 年 8 月和 2013 年 1 月分别在各样点用环刀(0—15 cm)取样 3 次重复,均匀混合组成待测土样。石漠化区域土壤很薄,部分仅有 15 cm 左右,因此以 0—15 cm 土壤层中作为研究对象。

(2)土壤物理性质测定

容重、田间持水量、自然含水量和毛管持水量测定采用环刀法;总孔隙度用 $p_t = 93.947 - 32.995 \times b$ 来计

算, b 为容重, p_t 为总孔隙度; 毛管孔隙度测定采用环刀法; 非毛管孔隙度用 $p_o = p_t - p_c$ 来计算, p_o 为非毛管孔隙度, p_c 为毛管孔隙度; 渗透特性测定采用双环渗透法。以上分析方法见森林土壤分析方法^[23]。

(3) 土壤化学性质测定

pH 值采用 2.5:1 的水土比, 用电位计法测定; 有机质采用硫酸重铬酸钾氧化为容量法测定; 全 N 采用硫酸钾为硫酸铜为硒粉消煮, 定氮仪自动分析法测定; 水解 N 采用碱解扩散法测定; 全 P 采用硫酸为高氯酸消煮为钼锑抗比色法测定; 有效 P 采用碳酸氢钠浸提为钼锑抗比色法测定; 全 K 采用氢氟酸为高氯酸消煮火焰光度计法测定; 速效 K 采用中性乙酸铵提取为火焰光度计法测定; 土壤呼吸采用气室法进行测定。以上分析方法见土壤农业化学分析方法^[24]。

1.2.4 数据处理与分析

采用 Excel 软件进行绘图, 利用 SPSS16.0 软件进行方差分析、 t 检验、多重比较 (Duncan 检验)、相关性分析和主成分分析等统计分析^[25]。

2 结果分析

2.1 不同等级石漠化环境植被物种组成及植物多样性

2.1.1 物种组成

植被物种调查结果显示 (表 2), 石漠化环境植被物种组成简单, 且随着石漠化程度加深, 植被物种组成呈递减趋势, 石漠化程度最高的花江 (研究区 III), 植被群落最简单, 草本层只有 8 科 12 属 13 种, 木本层只有 10 科 13 属 13 种。喀斯特石漠化环境植被物种的丰富度也很低, 绝大多数物种均是 1 科 1 属 1 种 1 生活型, 仅有菊科 (Compositae)、蔷薇科 (Rosaceae)、禾本科 (Gramineae)、忍冬科 (Caprifoliaceae)、桑科 (Moraceae)、大戟科 (Euphorbiaceae)、鼠李科 (Rhamnaceae) 等分布有多属多种多生活型, 显示这些类群对石漠化环境具有较好的适应性。其中, 蔷薇科物种在潜在、轻度石漠化环境有较多属、种和生活型的分布, 而在强度石漠化环境中分布急剧下降, 显示了同一物种对不同等级石漠化环境的适应性具有明显差异。物种重要值研究显示, 不同等级石漠化环境植物群落的建群种和优势种也存在明显差异。在潜在-轻度石漠化环境中, 芒 (*Saccharum arundinaceum*)、刺槐 (*Robinia pseudoacacia*)、女贞 (*Ligustrum lucidum*)、牛尾蒿 (*Artemisia dubia*) 等物种是植物群落的优势种或建群种; 在轻-中度石漠化环境中, 植物群落的优势种或建群种是芒、五节芒 (*Miscanthus floridulus*)、狗尾草 (*Setaria viridis*)、井栏边草 (*Pteris multifida*)、方茎草 (*Leptorhabdos parviflora*)、球核莢蒾 (*Viburnum propinquum*)、滇鼠刺 (*Itea yunnanensis*) 等物种; 在中-强度石漠化环境中, 植物群落的优势种或建群种为狗尾草、荩草 (*Arthraxon hispidus*)、构树 (*Broussonetia papyrifera*)、金银花 (*Lonicera japonica*)、贵州悬竹 (*Ampelocalamus calcareous*) 等物种。

2.1.2 植物多样性

研究结果表明, 喀斯特石漠化环境植物多样性的 4 种指数均偏低 (表 3), 显示了喀斯特石漠化植物生态系统已遭破坏, 恢复演替处于一个较低的阶段。研究结果也表明, 不同等级石漠化环境的植物多样性 4 种指数均具有显著差异: ①无石漠化环境均匀度指数显著大于潜在石漠化, 潜在石漠化显著大于轻度、中度和强度石漠化; ②无石漠化与轻度石漠化环境丰富度指数显著大于潜在石漠化; ③无石漠化、潜在石漠化和轻度石漠化环境多样性指数显著小于强度石漠化, 且无石漠化、潜在石漠化和轻度石漠化之间无显著差异; ④潜在石漠化环境优势度指数显著大于其它石漠化环境。可见, 石漠化环境植物多样性 4 种指数中, 仅有均匀度指数变化与石漠化等级演替明显耦合, 显示了随石漠化程度增加而减小的变化趋势。

2.1.3 季节波动

研究结果显示 (表 4), 喀斯特石漠化环境植物多样性的 4 种多样性指数, 不管是均匀度指数、丰富度指数, 还是多样性指数、优势度指数在不同的季节 (夏季和冬季) 均没有显著的差异。

表 2 不同等级石漠化环境植被群落物种统计
Table 2 Species of vegetation community of different degrees of karst rocky desertification surroundings

科名 Family	属名 Genus	种名 Species	重要值 Important value			
			潜在-轻度石漠化 (研究区 I) Potential-low degree rocky desertification (Experiment site I)	轻-中度石漠化 (研究区 II) Low-middle degree rocky desertification (Experiment site II)	中-强度石漠化 (研究区 III) Middle-high degree rocky desertification (Experiment site III)	
禾本科 Gramineae	芒属 <i>Miscanthus</i>	芒 <i>Saccharum arundinaceum</i> Retz.	30.67	40.25	—	
		五节芒 <i>Miscanthus floridulus</i> (Lab.) Warb. ex Schum. et Laut.	—	35.19	—	
	狗尾草属 <i>Setaria</i>	狗尾草 <i>Setaria viridis</i> (L.) Beauv.	—	22.36	40.21	
	大明竹属 <i>Pleioblastus</i>	苦竹 <i>Pleioblastus amarus</i> (Keng) keng	—	—	23.35	
	荩草属 <i>Arthraxon</i>	荩草 <i>Arthraxon hispidus</i> (Thunb.) Makino	—	—	31.13	
菊科 Compositae	蒿属 <i>Artemisia</i>	牛尾蒿 <i>Artemisia dubia</i> Wall. ex Bess.	18.95	5.37	—	
		矮丛光蒿 <i>Artemisia disjuncta</i> Krasch.	2.49	—	—	
	千里光属 <i>Senecio</i>	青蒿 <i>Artemisia carniifolia</i> Buch.-Ham. ex Roxb.	—	15.21	—	
		千里光 <i>Senecio scandens</i> Buch.-Ham. ex D. Don	2.20	—	—	
		苣荬菜 <i>Sonchus arvensis</i> L.	—	3.58	3.89	
豆科 Leguminosae	泽兰属 <i>Eupatorium</i>	紫茎泽兰 <i>Eupatorium odoratum</i> L.	—	—	5.19	
	紫菀属 <i>Aster</i>	紫菀 <i>Aster tataricus</i> L. f.	—	—	3.89	
	车轴草属 <i>Trifolium</i>	白车轴草 <i>Trifolium repens</i> L.	4.89	—	—	
	凤尾蕨科	井栏边草 <i>Pteris multifida</i> Poir.	0.91	22.36	15.57	
		蜈蚣草 <i>Pteris vittata</i> L.	5.84	25.05	23.35	
Ranunculaceae	银莲花属 <i>Anemone</i>	野棉花 <i>Anemone vitifolia</i> Buch.-Ham.	0.91	6.26	—	
	铁线莲属 <i>Clematis</i>	粗齿铁线莲 <i>Clematis argenticulida</i> (Levl. et Vant.) W. T. Wang	—	—	7.78	
	莎草科 Cyperaceae	羊须草 <i>Carex callitrichos</i> V. Krecz.	9.08	19.68	—	
		细果薹草 <i>Carex stenocarpa</i> Turcz. ex V. Krecz.	—	16.10	—	
	石竹科	繁缕属 <i>Stellaria</i>	繁缕 <i>Stellaria media</i> (L.) Cyr.	3.48	—	—
鹅肠菜属 <i>Myosoton</i>		牛繁缕 <i>Myosoton aquaticum</i> (L.) Moench	—	3.58	—	
乌毛蕨科		狗脊属 <i>Woodwardia</i>	狗脊 <i>Woodwardia japonica</i> (L. f.) Sm.	4.15	—	—
		乌毛蕨属 <i>Blechnum</i>	乌毛蕨 <i>Blechnum orientale</i> L.	—	—	11.67
玄参科		方茎草属 <i>Leptorhabdos</i>	方茎草 <i>Leptorhabdos parviflora</i> (Benth.) Benth.	—	43.83	—
	来江藤属 <i>Brandisia</i>	来江藤 <i>Brandisia hancei</i> Hook. f.	—	2.68	—	
	蕨科 Pteridiaceae	食蕨 <i>Pteridium esculentum</i> (Forst.) Cokayne	2.24	15.21	—	
		贯众属 <i>Cyrtomium</i>	贯众 <i>Cyrtomium fortunei</i> J. Sm.	4.19	—	—

续表

科名 Family	属名 Genus	种名 Species	重要值 Important value		
			潜在-轻度石漠化 (研究区 I) Potential-low degree rocky desertification (Experiment site I)	轻-中度石漠化 (研究区 II) Low-middle degree rocky desertification (Experiment site II)	中-强度石漠化 (研究区 III) Middle-high degree rocky desertification (Experiment site III)
百合科 Liliaceae	百合属 <i>Lilium</i>	野百合 <i>Lilium brownii</i> F. E. Brown ex Mielez	—	3.58	—
陵齿蕨科 Lindsaeaceae	乌蕨属 <i>Stenoloma</i>	乌蕨 <i>Stenoloma chusanum</i> Ching	1.95	14.31	—
水龙骨科 Polypodiaceae	石韦属 <i>Pyrosia</i>	石韦 <i>Pyrosia lingua</i> (Thunb.) Farwell	2.45	—	—
铁线蕨科 Adiantaceae	铁线蕨属 <i>Adiantum</i>	铁线蕨 <i>Adiantum capillus-veneris</i> L.	2.57	—	10.38
蔷薇科 Rosaceae	蔷薇属 <i>Rosa</i>	悬钩子蔷薇 <i>Rosa rubus Lévl.</i> et Vant.	2.32	—	—
海金沙科 Lygodiaceae	海金沙属 <i>Lygodium</i>	海金沙 <i>Lygodium japonicum</i> (Thunb.) Sw.	—	—	2.59
伞形科 Umbelliferae	胡萝卜属 <i>Daucus</i>	野胡萝卜 <i>Daucus carota</i> L.	—	2.68	—
木通科 Lardizabalaceae	八月瓜属 <i>Holboellia</i>	八月瓜 <i>Holboellia latifolia</i> Wall.	—	5.37	—
酢浆草科 Oxalidaceae	酢浆草属 <i>Oxalis</i>	酢浆草 <i>Oxalis corniculata</i> L.	—	—	7.78
木本层 Woody layer					
蔷薇科 Rosaceae	悬钩子属 <i>Rubus</i>	粉枝莓 <i>Rubus biflorus</i> Buch.-Ham. ex Smith	6.87	—	—
		山莓 <i>Rubus corchorifolius</i> L. f.	8.01	—	—
	火棘属 <i>Pyracantha</i>	火棘 <i>Pyracantha fortuneana</i> (Maxim.) Li	8.01	6.91	—
	栒子属 <i>Cotoneaster</i>	钝叶栒子 <i>Cotoneaster hebeophyllus</i> Diels	11.45	19.58	—
	蔷薇属 <i>Rosa</i>	小果蔷薇 <i>Rosa cymosa</i> Tratt.	—	10.36	—
		七姊妹 <i>Rosa multiflora</i> Thunb. var. <i>carnea</i> Thory	—	3.45	—
小檗科	小檗属 <i>Berberis</i>	日本小檗 <i>Berberis thunbergii</i> DC.	4.58	—	—
Berberidaceae	十大功劳属 <i>Mahonia</i>	十大功劳 <i>Mahonia fortunei</i> (Lindl.) Fedde	1.20	—	—
桑科 Moraceae	榕属 <i>Ficus</i>	地果 <i>Ficus tikoua</i> Bur.	2.29	1.15	—
		斜叶榕 <i>Ficus tinctoria</i> Forst	—	—	5.30
	构属 <i>Broussonetia</i>	构树 <i>Broussonetia papyrifera</i> (L.) L'Hér. ex Vent.	—	—	20.88
大戟科	野桐属 <i>Mallotus</i>	崖豆藤野桐 <i>Mallotus millietii</i> Levl.	4.58	—	—
Euphorbiaceae		石岩枫 <i>Mallotus repandus</i> (Willd.) Muell. Arg.	—	—	8.83
	油桐属 <i>Vernicia</i>	油桐 <i>Vernicia fordii</i> (Hemsl.) Airy Shaw	—	—	7.07
	山麻杆属 <i>Alchornea</i>	红背山麻杆 <i>Alchornea trewioides</i> (Benth.) Muell. Arg.	—	—	2.17
藤黄科 Guttiferae	金丝桃属 <i>Hypericum</i>	金丝桃 <i>Hypericum monogynum</i> L.	2.29	—	—
		金丝梅 <i>Hypericum patulum</i> Thunb. ex Murray	—	3.45	—
豆科 Leguminosae	刺槐属 <i>Robinia</i>	刺槐 <i>Robinia pseudacacia</i> Linn.	25.19	—	—
	胡枝子属 <i>Lespedeza</i>	美丽胡枝子 <i>Lespedeza formosa</i> (Vog.) Koehne	—	1.15	—

续表

科名 Family	属名 Genus	种名 Species	重要值 Important value		
			潜在-轻度石漠化 (研究区 I) Potential-low degree rocky desertification (Experiment site I)	轻-中度石漠化 (研究区 II) Low-middle degree rocky desertification (Experiment site II)	中-强度石漠化 (研究区 III) Middle-high degree rocky desertification (Experiment site III)
忍冬科 Caprifoliaceae	荚蒾属 <i>Viburnum</i>	球核荚蒾 <i>Viburnum propinquum</i> Hemsl. 珍珠荚蒾(变种) <i>Viburnum foetidum</i> var. <i>ceanothoides</i> (C. H. Wright) Hand.-Mazz. 金佛山荚蒾 <i>Viburnum chinshanense</i> Graebn.	— — —	31.09 3.45 5.76	— — —
	忍冬属 <i>Lonicera</i>	金银花 <i>Lonicera japonica</i> Thunb.	—	—	18.80
鼠李科 Rhamnaceae	雀梅藤属 <i>Sageretia</i>	雀梅藤 <i>Sageretia thea</i> (Osbeck) Johnst.	—	3.45	—
	勾儿茶属 <i>Berchemia</i>	勾儿茶 <i>Berchemia sinica</i> Schneid.	—	2.3	—
木犀科 Oleaceae	鼠李属 <i>Rhamnus</i>	鼠李 <i>Rhamnus davurica</i> Pall.	—	—	8.51
	女贞属 <i>Ligustrum</i>	女贞 <i>Ligustrum lucidum</i> Ait.	20.61	—	—
	松属 <i>Pinus</i>	马尾松 <i>Pinus massoniana</i> Lamb.	4.58	—	—
	铁仔属 <i>Myrsine</i>	铁仔 <i>Myrsine africana</i> Linn.	13.74	14.97	—
	马桑属 <i>Coriaria</i>	马桑 <i>Coriaria nepalensis</i> Wall.	3.43	2.3	—
	柏木属 <i>Cupressus</i>	柏木 <i>Cupressus funebris</i> Endl.	—	2.3	—
	朴属 <i>Celtis</i>	朴树 <i>Celtis sinensis</i> Pers.	3.43	—	—
	花椒属 <i>Zanthoxylum</i>	花椒 <i>Zanthoxylum bungeanum</i> Maxim.	6.87	1.15	—
	杨属 <i>Populus</i>	毛白杨 <i>Populus tomentosa</i> Carr.	1.14	—	—
	榛属 <i>Corylus</i>	榛 <i>Corylus heterophylla</i> Fisch.	2.29	—	—
	栎属 <i>Quercus</i>	槲栎 <i>Quercus aliena</i> Bl.	6.87	—	—
	木姜子属 <i>Litsea</i>	木姜子 <i>Litsea pungens</i> Hemsl.	—	3.45	—
五加科 Araliaceae	常春藤属 <i>Hedera</i>	洋常春藤 <i>Hedera helix</i> Linn.	—	2.3	—
	胡颓子属 <i>Elaeagnus</i>	木半夏 <i>Elaeagnus multiflora</i> Thunb.	—	4.61	—
棕榈科 Palmae	棕榈属 <i>Trachycarpus</i>	棕榈 <i>Trachycarpus fortunei</i> (Hook.) H. Wendl.	—	1.15	—
	鼠刺属 <i>Itea</i>	滇鼠刺 <i>Itea yunnanensis</i> Franch.	—	20.73	—
虎耳草科 Saxifragaceae	臭椿属 <i>Ailanthus</i>	臭椿 <i>Ailanthus altissima</i> (Mill.) Swingle	—	—	5.30
苦木科 Simaroubaceae	悬竹属 <i>impelocalamus</i>	贵州悬竹 <i>Ampelocalamus calcaricus</i> C. D. Chu et C. S. Chao	—	—	23.69
禾本科 Gramineae	黄连木属 <i>Pistacia</i>	清香木 <i>Pistacia weinmannifolia</i> J. Poisson ex Franch.	—	—	10.60
漆树科 Anacardiaceae	栾树属 <i>Koelreuteria</i>	栾树 <i>Koelreuteria paniculata</i> Laxm.	—	—	5.30
无患子科 Sapindaceae	浆果楝属 <i>Cipadessa</i>	灰毛浆果楝 <i>Cipadessa cinerascens</i> (Pellegr.) Hand.-Mazz.	—	—	9.87
楝科 Meliaceae	茄属 <i>Solanum</i>	假烟叶树 <i>Solanum verbascifolium</i> L.	—	—	3.53

表 3 不同等级石漠化环境植物多样性指数

Table 3 Plant diversity indices of different degrees of rocky desertification surroundings

石漠化等级 Degrees of rocky desertification	均匀度指数 Evenness index	丰富度指数 Richness index	多样性指数 Shannon-Wiener index	优势度指数 Dominance index	<i>F</i>
无 Nil	2.34±0.35a	12.65±0.63a	2.26±0.63ab	0.28±0.09b	
潜在 Potential	1.33±0.26b	6.53±0.35b	1.82±0.52a	0.58±0.15a	
轻度 Low	0.38±0.12c	12.17±0.28a	2.48±0.67ab	0.32±0.08b	* *
中度 Middle	0.42±0.11c	10.75±1.02ab	2.91±0.57bc	0.17±0.05b	
强度 High	0.75±0.13c	9.26±0.67ab	3.28±0.74c	0.13±0.05b	

具有相同字母表示无显著差异, 无相同字母表示具有显著差异

表 4 石漠化环境不同季节土壤理化性质及植物多样性比较(*t* 检验)Table 4 Comparisons of plant diversity and physical-chemical properties of rocky desertification surroundings between summer (August) and winter (January) (*t* test)

大类 Properties	具体指标 Factors	夏季(8月) Summer (August)	冬季(1月) Winter (January)	<i>t</i>
植物多样性指数 Indexes of plant diversity	均匀度指数 Evenness index	1.23±0.17	1.23±0.17	0.01
	丰富度指数 Richness index	9.45±0.95	10.25±1.04	-0.58
	多样性指数 Shannon-Wiener index	2.35±0.16	2.39±0.16	-0.20
	优势度指数 Dominance index	0.35±0.05	0.35±0.05	-0.04
土壤物理性质 Soil physical properties	容重 Bulk density / (g/cm ³)	1.16±0.03	1.24±0.02	-1.96
	毛管孔隙度 Capillary porosity /%	39.70±1.23	33.88±0.72	4.09 **
	非毛管孔隙度 Non-capillary porosity /%	17.27±1.38	19.52±0.88	-1.38
	总孔隙度 Total porosity /%	57.24±0.98	53.30±0.82	3.09 *
	自然含水量 Natural moisture content /%	23.48±1.41	28.48±1.23	-2.68 **
	田间含水量 Field moisture content /%	31.86±1.13	29.37±1.06	1.61
	毛管含水量 Capillary moisture content /%	40.13±1.19	35.95±1.41	2.26 *
	上层饱和渗透率 Upper strata saturated permeability / (mm/min)	10.85±1.57	10.75±1.34	0.05
	下层饱和渗透率 Lower strata saturated permeability / (mm/min)	6.81±1.39	6.72±1.30	0.05
土壤化学性质 Soil chemical properties	pH 值 pH value	6.99±0.15	6.99±0.16	0.01
	有机质 Organic matter content / (mg/kg)	43.08±3.25	46.21±3.12	-0.69
	全氮 Total nitrogen content / (g/kg)	2.52±0.20	2.63±0.20	-0.38
	全磷 Total phosphorus content / (g/kg)	0.74±0.05	0.72±0.04	0.26
	全钾 Total potassium content / (g/kg)	1.69±0.16	2.51±0.27	-2.55 *
	水解氮 Hydrolysis nitrogen content / (mg/g)	174.39±15.99	167.33±13.67	0.33
	有效磷 Available phosphorus content / (mg/kg)	3.94±0.52	5.77±0.69	-0.08 *
	速效钾 Available potassium content / (mg/kg)	95.41±3.75	107.45±5.34	-1.85

*, ** 分别表示在 $\alpha = 0.05$ 和 0.01 水平上的显著性

2.2 不同等级石漠化环境土壤理化性质

2.2.1 土壤物理性质

研究结果表明(表 5), 土壤容重、毛管孔隙度、总孔隙度、田间持水量、毛管持水量等 5 种土壤物理性质指标在不同等级石漠化环境土壤中具有显著地差异: ①潜在石漠化环境土壤容重显著大于中度和强度石漠化, 并随着石漠化等级增加, 土壤容重呈现先增加后减小的变化趋势。②潜在石漠化的土壤总孔隙度显著小于中度石漠化, 而潜在石漠化的毛管孔隙度显著小于强度石漠化; 且随着石漠化等级增加, 土壤总孔隙度和毛管孔隙度均呈现先减小后增加的变化趋势。③潜在石漠化的土壤田间含水量显著小于强度石漠化, 潜在和轻度石漠化毛管含水量显著小于强度石漠化; 且随着石漠化等级增加, 土壤田间持水量和毛管持水量也呈现先减小后增加的变化趋势。研究结果显示了喀斯特石漠化环境土壤物理性质并不是随着石漠化程度增加而一直退化, 而是一个先退化后改善的变化过程。

表 5 不同等级石漠化环境土壤物理性质比较

Table 5 Comparisons of soil physical properties among different degrees of rocky desertification surroundings

石漠化等级 Degrees of rocky desertification	容重 Bulk density/ (g/cm ³)	毛管孔隙度 Capillary porosity/%	非毛管孔隙度 Non-capillary porosity/%	总孔隙度 Total porosity/%	自然含水量 Natural moisture content/%
无 Nil	1.16±0.11ab	38.13±0.78ab	18.67±0.31a	56.81±2.11ab	28.57±1.11a
潜在 Potential	1.28±0.12a	33.71±0.91a	18.92±0.24a	52.56±1.71a	23.90±0.61a
轻度 Low	1.18±0.12ab	36.35±1.11ab	18.84±0.67a	55.18±2.01ab	24.55±0.87a
中度 Middle	1.15±0.13b	38.96±0.88ab	17.69±0.54a	57.48±1.31b	27.25±1.08a
强度 High	1.13±0.10b	40.63±1.12b	16.40±0.51a	56.78±1.21ab	26.04±0.71a
石漠化等级 Degrees of rocky desertification	田间含水量 Field moisture content/%	毛管含水量 Capillary moisture content/%	上层渗漏率 Upper strata saturated permeability/ (mm/mim)	下层渗漏率 Lower strata saturated permeability/ (mm/mim)	F
无 Nil	33.17±1.13ab	38.94±1.31ab	11.00±1.81a	3.74±0.41a	* *
潜在 Potential	28.12±0.91a	35.09±1.52a	8.91±0.79a	6.96±0.78a	
轻度 Low	29.10±0.78ab	36.96±1.41a	8.36±1.23a	10.33±1.23a	
中度 Middle	30.65±1.32ab	39.09±1.76ab	15.67±1.31a	8.80±0.71a	
强度 High	34.42±1.25b	45.06±2.01b	12.34±0.91a	5.33±0.86a	

2.2.2 土壤化学性质

研究结果显示(表 6), 土壤 pH 值、有机质、水解氮、有效磷、全钾与土壤呼吸等 6 种土壤化学性质指标在不同等级石漠化环境土壤具有显著地差异: ①无石漠化环境土壤 pH 值显著小于潜在、轻度、中度和强度石漠化, 但强度石漠化和无石漠化一样, 土壤 pH 值小于 7, 其余均大于 7; ②无石漠化环境有机质显著大于潜在石漠化, 而与轻度、中度和强度石漠化无显著差异; ③潜在石漠化环境土壤水解氮显著小于无石漠化、轻度和中度石漠化; 潜在石漠化环境土壤有效磷显著大于无石漠化和强度石漠化, 而潜在石漠化环境土壤全钾显著大于轻度、中度和强度石漠化; ④无石漠化环境土壤呼吸显著大于潜在、轻度、中度和强度石漠化。可见, 随着石漠化等级增加, 喀斯特石漠化环境土壤化学性质大部分因子演变也是一个先退化后改善的变化过程。

表 6 不同等级石漠化环境土壤化学性质比较

Table 6 Comparisons of soil chemical properties among different degrees of rocky desertification surroundings

石漠化等级 Degrees of rocky desertification	pH 值 pH value	有机质 Organic matter content/(mg/kg)	全氮 Total nitrogen content/(g/kg)	水解氮 Hydrolysis nitrogen content/(mg/g)	全磷 Total phosphorus content/(g/kg)
无 Nil	6.18±0.15a	52.74±1.24a	2.90±0.35a	201.15±10.09ac	0.64±0.02a
潜在 Potential	7.19±0.23b	35.24±1.54b	2.10±0.24a	122.91±8.90b	0.76±0.04a
轻度 Low	7.49±0.27b	47.48±1.32ab	2.88±0.21a	191.33±8.29ab	0.82±0.02a
中度 Middle	7.46±0.18b	46.48±1.89ab	2.65±0.56a	222.95±9.46c	0.74±0.03a
强度 High	6.96±0.16b	45.44±1.67ab	2.60±0.34a	138.46±11.12ab	0.71±0.03a
石漠化等级 Degrees of rocky desertification	有效磷 Available phosphorus content/(mg/kg)	全钾 Total potassium content/(g/kg)	速效钾 Available potassium content/(mg/kg)	土壤呼吸 Soil respiration/ (CO ₂ mg g ⁻¹ h ⁻¹)	F
无 Nil	3.35±0.23a	3.07±0.45a	110.13±9.01a	0.31±0.03a	* *
潜在 Potential	6.76±0.21b	2.11±0.46ab	106.12±7.98a	0.12±0.02b	
轻度 Low	5.69±0.34ab	1.65±0.57b	92.03±10.01a	0.13±0.01b	
中度 Middle	3.94±0.55ab	1.47±0.49b	96.03±6.98a	0.06±0.01b	
强度 High	3.43±0.34a	1.48±0.23b	90.81±9.07a	0.05±0.01b	

2.2.3 季节波动

研究结果显示(表4),在不同季节(夏季和冬季),喀斯特石漠化环境土壤总孔隙度、毛管持水量、全钾和有效磷存在显著的差异,毛管孔隙度和毛管含水量存在极显著的差异:①夏季的土壤总孔隙度和毛管持水量显著的大于冬季;②夏季的土壤全钾和有效磷显著的小于冬季;③夏季的土壤毛管孔隙度极显著的大于冬季,而夏季的土壤自然含水量极显著的小于冬季。

2.3 喀斯特石漠化环境植物多样性与土壤理化性质的相关性

研究结果表明(表7),喀斯特石漠化环境植物多样性与土壤理化性质之间存在明显的相关性:①丰富度指数与容重呈极显著的负相关、与总孔隙度、田间含水量、毛管含水量、上层饱和渗透率、有机质、全氮、全磷和水解氮呈极显著的正相关、与pH值、速效钾和土壤呼吸呈显著的正相关;②多样性指数与容重呈极显著的负相关,与总孔隙度、田间含水量、毛管含水量、pH值、有机质、全氮和水解氮呈极显著的正相关,与有效磷和速效钾呈显著的正相关;③均匀度指数与pH值和有效磷呈极显著的负相关,与全磷呈显著的负相关,与全钾呈极显著的正相关,与土壤呼吸呈显著的正相关;④优势度指数与毛管孔隙度呈极显著的负相关,与田间持水量、pH值、全氮、全磷和水解氮呈显著的负相关,与下层饱和渗透率呈极显著的正相关,与非毛管孔隙度呈显著的正相关。可见,喀斯特石漠化环境土壤理化性质的变化极易影响植物多样性的特征。

表7 石漠化环境土壤理化因子与植物多样性之间的相关性

Table 7 Correlation of plant diversity and soil physical-chemical factors in rocky desertification surroundings

土壤理化因子 Soil physical-chemical factors	丰富度指数 Richness index	多样性指数 Shannon-Wiener index	均匀度指数 Evenness index	优势度指数 Dominance index
容重 Bulk density/(g/cm ³)	-0.454 **	-0.408 **	-0.013	0.174
毛管孔隙度 Capillary porosity /%	0.157	0.211	-0.114	-0.335 **
非毛管孔隙度 Non-capillary porosity /%	0.136	0.043	0.134	0.251 *
总孔隙度 Total porosity /%	0.346 **	0.311 **	0.009	-0.104
自然含水量 Natural moisture content /%	0.179	-0.014	0.152	0.052
田间含水量 Field moisture content /%	0.518 **	0.516 **	0.170	-0.266 *
毛管含水量 Capillary moisture content /%	0.499 **	0.532 **	-0.001	-0.193
上层饱和渗透率 Upper strata saturated permeability/(mm/mim)	0.365 **	0.214	-0.063	0.170
下层饱和渗透率 Lower strata saturated permeability/(mm/mim)	0.223	-0.008	-0.171	0.359 **
pH值 pH value	0.248 *	0.398 **	-0.541 **	-0.284 *
有机质 Organic matter content(mg/kg)	0.635 **	0.349 **	0.143	-0.092
全氮 Total nitrogen content/(g/kg)	0.719 **	0.572 **	-0.088	-0.262 *
全磷 Total phosphorus content/(g/kg)	0.306 **	0.213	-0.340 *	-0.240 *
全钾 Total potassium content/(g/kg)	-0.018	-0.199	0.396 **	0.175
水解氮 Hydrolysis nitrogen content/(mg/g)	0.759 **	0.385 **	-0.011	-0.226 *
有效磷 Available phosphorus content/(mg/kg)	0.092	0.247 *	-0.309 **	-0.085
速效钾 Available potassium content/(mg/kg)	0.260 *	0.253 *	0.127	0.015
土壤呼吸 Soil respiration/(CO ₂ mg g ⁻¹ h ⁻¹)	0.405 *	-0.107	0.327 *	-0.029

2.4 基于植物多样性和土壤理化性质的石漠化主成分分析

基于植物多样性和土壤理化性质 22 个指标的石漠化主成分分析表明(表8),主成分1的贡献率为 60.40%,主成分2的贡献率为 20.89%,累计贡献率已达 81.29%,基本上保留了 22 个指标评价石漠化特征的绝大部分信息,因此选取这 2 个主成分作为评价石漠化特征主成分分析的依据。主成分1中,有机质、均匀度、全氮、全钾、多样性、水解氮、速效钾的权重系数较大,均超过了 0.900,表明主成分1主要反映土壤有机质、氮素、钾素和植物多样性的均匀度指数、多样性指数表征喀斯特石漠化特征的信息。主成分2中,pH值、毛管

孔隙度、非毛管孔隙度、下层饱和渗透率的权重系数较大,表明主成分 2 主要反映了土壤 pH 值、孔隙度和渗透性表征喀斯特石漠化的信息。

表 8 基于植物多样性和土壤理化性质的喀斯特石漠化主成分分析

Table 8 Principal component analysis of rocky desertification based on plant diversity and soil physical-chemical properties

特征类别 Factors	成分 Components	
	1	2
有机质 Organic matter content	0.985	-0.112
均匀度 Evenness index	0.964	0.239
全氮 Total nitrogen content	0.958	-0.181
全钾 Total potassium content	0.957	0.242
多样性 Shannon-Wiener index	0.950	-0.223
水解氮 Hydrolysis nitrogen content	0.946	-0.324
速效钾 Available potassium content	0.938	0.252
丰富度 Richness index	0.893	0.191
田间持水量 Field moisture content	0.892	0.341
土壤呼吸 Soil respiration	0.862	0.194
自然含水量 Natural moisture content	0.832	-0.315
全磷 Total phosphorus content	0.851	-0.144
毛管含水量 Capillary moisture content	0.794	-0.343
上层饱和渗透率 Upper strata saturated permeability	0.696	0.382
容重 Bulk density	-0.641	-0.230
下层饱和渗透率 Lower strata saturated permeability	-0.641	-0.716
有效磷 Available phosphorus content	0.592	0.601
优势度 Dominance index	-0.555	0.606
毛管孔隙度 Capillary porosity	0.545	-0.817
非毛管孔隙度 Non-capillary porosity	-0.435	0.720
总孔隙度 Total porosity	-0.169	-0.606
pH 值 pH value	-0.130	0.904
特征根 Eigenvalue	13.289	4.617
贡献率 Percent /%	60.406	20.987
累积贡献率 Cumulative /%	60.406	81.392

以第一主成分值为横坐标,第二主成分值为纵坐标,将 22 个指标与 5 种典型等级石漠化作散点图(图 2)。结果显示,植物多样性的均匀度指数和丰富度指数与土壤有效磷、上层饱和渗透率、田间持水量、全钾、速效钾、土壤呼吸明显相关,为表征无石漠化的重要因子;植物多样性优势度指数、土壤 pH 值、非毛管孔隙度与潜在和轻度石漠化关系紧密;植物多样性多样性指数、土壤总孔隙度和下层饱和渗透率与中度石漠化关系紧密;土壤全磷、有机质、全氮、容重、自然含水量、水解氮、毛管持水量明显相关,为表征强度石漠化的重要因子。

3 讨论与结论

3.1 石漠化演变过程中土壤理化性质的响应

土壤是在气候、植被、地形、母质等因子综合作用下形成的,并随着植被演替的进行总是在不断地发生变化^[26]。在一定程度上,植物群落的正向演替是土壤养分不断积累、物理性能不断改善的过程,而植物群落的逆向演替是土壤不断退化的过程^[26]。研究表明,不同等级石漠化环境土壤全氮、全磷、有效钾等理化因子无明显差异,显示石漠化环境土壤受碳酸盐岩母岩影响明显。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^[20]。

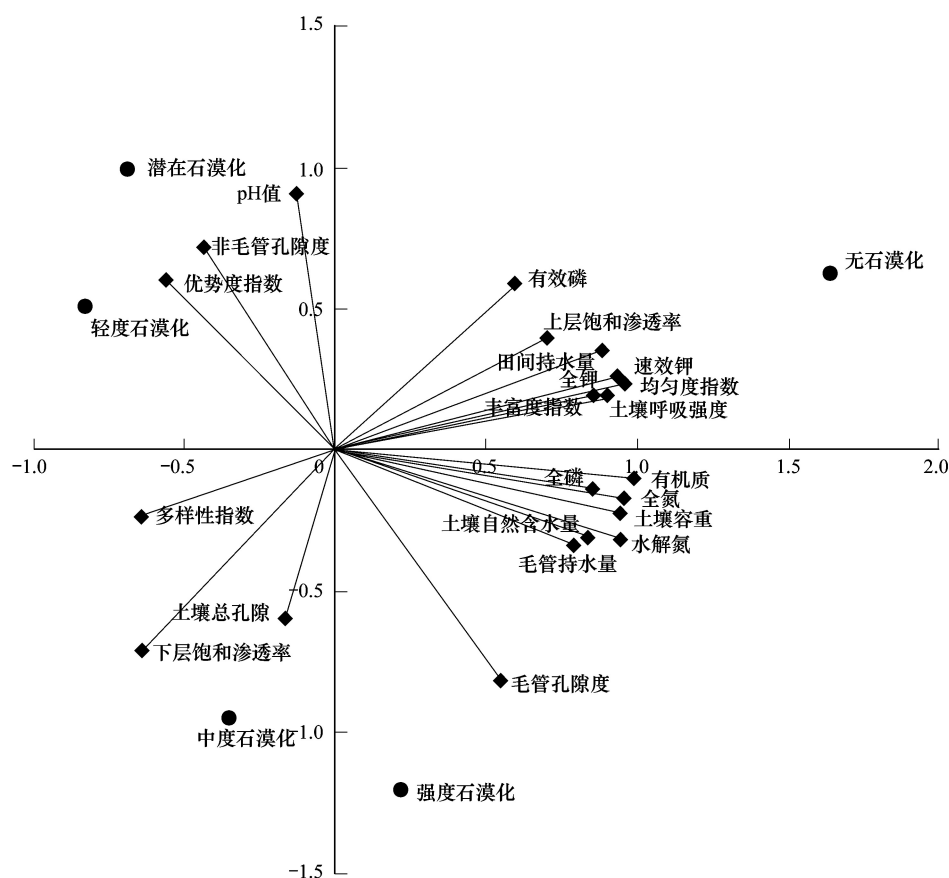


图2 喀斯特石漠化主成分分析散点图(x 轴为第一主成分值, y 轴为第二主成分值)

Fig.2 Scatter diagram of principal component analysis for karst rocky desertification (x : axis is value of component 1 and y : axis, component 2)

长期以来,人们一直认为随着石漠化程度增加,土壤退化程度亦是随之增加,强度石漠化环境的土壤退化最严重^[1, 27-28]。然而,研究结果显示,喀斯特石漠化环境土壤不管是物理性质还是化学性质的演变均不是随着石漠化等级的增加而一直退化,而是一个先退化后逐渐改善的过程。究其原因,这应该是石漠化环境水土流失和裸露岩石土壤养分聚集效应共同作用的结果。随着石漠化程度增加,裸岩聚集效应逐渐增强,土壤养分输入增加,而随着石漠化程度增加,可流失土壤减少,水土流失作用减弱,相应土壤养分流失减弱,这两个过程的共同作用致使退化的土壤逐渐得到改善。

本研究结果也显示,石漠化环境土壤演变过程中,土壤有机质、氮素、容重和持水状况等是其关键因子。因此,石漠化演变过程中土壤理化性质的响应应是这样一个过程:当无石漠化环境森林植被毁坏,土壤养分流失随着水土流失作用增强而增加,加之植被凋落物有机质输入减少,土壤容重增加、氮素和持水减少,土壤退化。随着石漠化等级不断增加,裸露岩石聚集效应逐渐明显,汇集大气沉降养分和岩溶产物,增加了土壤有机物和氮素的输入,同时随着石漠化程度增加,可流失的土壤越来越少,水土流失作用越来越弱,土壤养分流失的越来越少,致使土壤养分和物理性能逐渐得到了改善。

3.2 喀斯特石漠化环境植物多样性特征及其演变

喀斯特石漠化生态系统植被群落简单,中强度石漠化环境植物群落草本层只有 8 科 12 属 13 种,木本层只有 10 科 13 属 13 种,且大多数为 1 科 1 属 1 种,丰富度极低,显示喀斯特石漠化环境对其分布植物具有显著的胁迫。这与喀斯特石漠化环境岩石裸露率高,土层浅薄,土壤稀少而干燥的自然条件有关。喀斯特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。研究结果显示,菊科、蔷薇科、禾本科、忍冬科、桑科、大戟科、鼠李科等在喀斯特石漠化环境分布有多属多种,显示这些类群对石漠化环境的具有较强的适应性,系石漠化环境植被群落的适生种、群落优势种与建群种。可见,喀

斯特石漠化环境植被群落结构有别于常规地带性分布^[29],不仅物种种类丰富度偏低,而且适生种、群落优势种与建群种也有别于常规的北半球亚热带类群特征^[29-30],极具特殊性。

研究结果显示,不同等级石漠化环境植被群落组成存在明显差异。沿无石漠化、潜在石漠化、轻度石漠化、中度石漠化、强度石漠化干扰递增梯度,植物多样性呈现了显著的变化,种类越来越简单,常绿物种的比例逐渐减少,生活型更加单一化,优势种的重要值比例越来越高,1科1属1种1生活型的比例减少,物种组成分布渐趋混乱,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^[14-15]。研究结果也表明,不同等级石漠化环境植物群落的丰富度指数、多样性指数和优势度指数变化均与石漠化等级演替无明显耦合关系,这应是人类活动干扰作用的结果,显示自然状态经人类活动叠加后,植被恢复的自然规律受到干扰。均匀度指数变化与石漠化程度演替存在明显耦合关系,随着石漠化等级增加,均匀度指数呈现了逐渐减低的趋势,显示植物多样性均匀度指数应该是评价喀斯特石漠化植物群落的重要依据。

3.3 喀斯特石漠化退化生态系统恢复重建

喀斯特石漠化生态系统植被群落简单,丰富度极低,喀斯特石漠化环境对其植物分布具有显著的胁迫,喀斯特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,这一结果在石漠化植被生态系统恢复重建中具有重要指导意义。菊科、蔷薇科、禾本科、忍冬科、大戟科等在石漠化环境中分布有多属多种,显示这些类群对石漠化环境的具有较强的适应性,为石漠化治理植被修复技术应用、先锋物种的选择提供了重要的参考。其中,蔷薇科植物在潜在、轻度石漠化环境有较多种属的分布,而在强度石漠化环境中分布的种属数量明显下降,显示石漠化环境适应性物种在不同等级石漠化环境的适应性具有显著的差异。因此,在石漠化治理植被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预期目标。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^[11],石漠化环境植被群落多样性和结构性指标低,稳定性差,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,应补充演替后期的繁殖体,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。

人们一直认为喀斯特石漠化生态系统土壤退化随石漠化程度增加而增强,强度石漠化环境土壤退化最严重^[1, 27-28]。而本研究显示,喀斯特石漠化生态系统土壤理化性质演变并非如此,而是随着石漠化程度增加先退化后改善的一个过程。强度石漠化和无石漠化土壤条件明显好于其他等级石漠化环境,潜在和轻度石漠化环境土壤条件反而是最差的。在石漠化治理领域,长期以来,人们一直认为强度石漠化植被恢复措施只能是封山育林,人工种植措施是不可能成功的^[31],甚至是在一些地方石漠化治理规程中也是这样总结的^[2]。然而,本研究结果不支持这一观点,强度石漠化土壤条件优于潜在-轻度石漠化,完全应该实施人工造林修复石漠化。此外,强度石漠化环境种植皇竹草(*Pennisetum hybridum*)、金银花(*Lonicera Japonica*)等对水肥有较高需求的物种一直存在很大争议,部分观点认为强度石漠化环境土壤不可能支撑这些物种的生长,而本研究结果显示强度石漠化环境土壤条件可以支撑皇竹草、金银花等物种的种植,并且这一论断已经被石漠化治理实践检验证实^[2]。

参考文献(References):

- [1] Legrand H E. Hydrological and ecological problems of karst regions: Hydrological actions on limestone regions cause distinctive ecological problems. Science, 1973, 179(4076): 859-864.
- [2] 熊康宁,陈永毕,陈沛.点石成金——贵州石漠化治理技术与模式.贵阳:贵州科技出版社,2011:125-139.
- [3] 郑度.中国生态地理区域系统研究.北京:商务印书馆,2008:327-339.
- [4] 张信宝,王世杰,曹建华,王克林,孟天友,白晓永.西南喀斯特山地水土流失特点及有关石漠化的几个科学问题.中国岩溶,2010,29(3):274-279.

- [5] 王世杰. 喀斯特石漠化的成因与防治 // 李喜先. 21 世纪 100 个交叉科学难题. 北京: 科学出版社, 2005: 320-326.
- [6] 王世杰, 季宏兵, 欧阳自远, 周德全, 郑乐平, 黎廷宇. 碳酸盐岩风化成土作用的初步研究. 中国科学(D 辑), 1999, 29(5): 441-449.
- [7] Wang S J, Zhang D F, Li R L. Mechanism of rocky desertification in the karst mountain areas of Guizhou province, southwest China. *International Review for Environmental Strategies*, 2002, 3(1): 123-135.
- [8] Sweeting M M. Karst in China, Its Geomorphology and Environment. Berlin: Springer-Verlag, 1995: 112-118.
- [9] Li Y B, Shao J A, Yang H, Bai X Y. The relations between land use and karst rocky desertification in a typical karst area, China. *Environmental Geology*, 2009, 57(3): 621-627.
- [10] 蔡运龙. 中国西南岩溶石山贫困地区的生态重建. 地球科学进展, 1996, 11(6): 602-606.
- [11] 郭柯, 刘长城, 董鸣. 我国西南喀斯特植物生态适应性及石漠化治理. 植物生态学报, 2011, 35(10): 991-999.
- [12] Kobza R M, Trexler J C, Loftus W F, Perry S A. Community structure of fishes inhabiting aquatic refuges in a threatened karst wetland and its implications for ecosystem management. *Biological Conservation*, 2004, 116(2): 153-165.
- [13] 朱守谦. 喀斯特森林生态研究(Ⅲ). 贵阳: 贵州科技出版社, 2003: 172-179.
- [14] Midgley G F. Biodiversity and ecosystem function. *Science*, 2012, 335(6065): 174-175.
- [15] Graham-Rowe D. Biodiversity: endangered and in demand. *Nature*, 2011, 480(7378): S101-S103.
- [16] 熊康宁, 黎平, 周忠发. 喀斯特石漠化的遥感——GIS 典型研究: 以贵州省为例. 北京: 地质出版社, 2002: 134-137.
- [17] Du Y X, Pan G X, Li L Q, Hu Z L, Wang X Z. Leaf N/P ratio and nutrient reuse between dominant species and stands: predicting phosphorus deficiencies in karst ecosystems, southwestern China. *Environmental Earth Sciences*, 2011, 64(2): 299-309.
- [18] 漆良华, 彭镇华, 张旭东, 周金星, 蔡春菊, 王昭艳. 退化土地植被恢复群落物种多样性与生物量分配格局. 生态学杂志, 2007, 26(11): 1697-1702.
- [19] 王倩, 艾应伟, 裴娟, 刘好, 李伟, 答竹君, 郭培俊. 遂渝铁路边坡草本植物多样性季节动态和空间分布特征. 生态学报, 2010, 30(24): 6892-6900.
- [20] 魏强, 凌雷, 柴春山, 张广忠, 闫沛斌, 陶继新, 薛睿. 甘肃兴隆山森林演替过程中的土壤理化性质. 生态学报, 2012, 32(15): 4700-4713.
- [21] Zhang X B, Bai X Y, He X B. Soil creeping in the weathering crust of carbonate rocks and underground soil losses in the karst mountain areas of southwest China. *Carbonates and Evaporites*, 2011, 26(2): 149-153.
- [22] 刘丛强, 郎赞超, 李思亮, 朴何春, 涂成龙, 刘涛泽, 张伟, 朱书法. 喀斯特生态系统生物地球化学过程与物质循环研究: 重要性、现状与趋势. 地学前沿, 2009, 16(6): 1-12.
- [23] 马雪华. 森林生态系统定位研究方法. 北京: 中国科学技术出版社, 1994.
- [24] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
- [25] 杜荣骞. 生物统计学(第三版). 北京: 高等教育出版社, 2009: 25-28, 123-145.
- [26] 康冰, 刘世荣, 蔡道雄, 卢立华, 何日明, 高妍夏, 迪玮峙. 南亚热带不同植被恢复模式下土壤理化性质. 应用生态学报, 2010, 21(10): 2479-2486.
- [27] 罗光杰, 李阳兵, 王世杰, 程安云, 丹文丽. 岩溶山区景观多样性变化的生态学意义对比——以贵州四个典型地区为例. 生态学报, 2011, 31(14): 3883-3889.
- [28] 刘方, 王世杰, 刘元生, 何腾兵, 罗海波, 龙健. 喀斯特石漠化过程土壤质量变化及生态环境影响评价. 生态学报, 2005, 25(3): 639-644.
- [29] 傅伯杰, 刘国华, 陈利顶, 马克明, 李俊然. 中国生态区划方案. 生态学报, 2001, 21(1): 1-6.
- [30] 姚长宏, 蒋忠诚, 袁道先. 西南岩溶地区植被喀斯特效应. 地球学报, 2001, 22(2): 159-164.
- [31] 喻理飞, 朱守谦, 叶镜中, 魏鲁明, 陈正仁. 退化喀斯特森林自然恢复过程中群落动态研究. 林业科学, 2002, 38(1): 1-7.