

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

李 瑞^{1,2}, 王霖娇^{1,4}, 盛茂银^{1,3,4}, 郭 杰^{1,4}

(1. 贵州师范大学 喀斯特研究院, 贵阳 550001; 2. 贵州省水土保持监测站, 贵阳 550002; 3. 国家喀斯特石漠化治理工程技术研究中心, 贵阳 550001; 4. 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:为探明西南喀斯特石漠化演替过程中植物多样性演变规律、土壤理化性质的变化趋势以及土壤理化性质对植物多样性演变的影响,选取西南典型石漠化区贵州黔西县猴场为研究区,采用野外样方调查和室内试验分析方法,运用方差分析、多重比较、相关性分析等数理统计手段,研究了喀斯特石漠化不同演替阶段植物群落物种多样性、土壤理化特性以及二者的内在关系。结果显示:石漠化环境植被物种组成简单,植物多样性的 4 种指数均偏低,均匀度指数、多样性指数变化与石漠化等级演替有明显耦合关系;土壤理化性质在不同等级石漠化环境土壤中也具有显著差异,且随着石漠化等级的增加呈现先退化后逐渐改善的演变趋势;喀斯特石漠化土壤理化性质与植物多样性指数具有明显的相关性,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。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明显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; 演替

中图分类号:Q948; S153

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2016)05-0111-09

Plant Species Diversity and Its Relationship with Soil Properties in Karst Rocky Desertification Succession

LI Rui^{1,2}, WANG Linjiao^{1,4}, SHENG Maoyin^{1,3,4}, GUO Jie^{1,4}

(1. Karst Research Institute, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China; 2. Guizhou Provincial Monitoring Station of Soil and Water Conservation, Guiyang 550002, China; 3. National Engineering Research Center for Karst Rocky Desertification Control, Guiyang 550001, China; 4. State Key Laboratory Incubation Base for Karst Mountain Ecology Environment of Guizhou Province, Guiyang 550001, China)

Abstract: The objectives of the study were to explore the transformation law of plant species diversity and soil physical and chemical properties and their relationship in the karst rocky desertification ecosystem of South-west China. The representative karst rocky desertification ecosystem, that is, Houchang at Qianxi County of Guizhou Province, was selected as experiment site. Based on the field investigation and laboratory analysis, the plant diversity, soil physical and chemical properties and their correlativity in the succession of karst rocky desertification were studied by the method of ANOVA, multiple comparisons, correlation analysis, and so on. Results show that the vegetation of karst rocky desertification ecosystem is very simple, the four indexes of plant diversity all are low, and the evenness and diversity indexes are significantly related with the succession of rocky desertification. There are significant differences of soil physical and chemical properties between different degrees of rocky desertification ecosystem, and with the increased degree of rocky desertification, most of soil physical and chemical factors decreased firstly and then increased. Soil physical and chemical properties are obviously related with plant diversity indexes. The change of soil physical and chemical properties can remarkably influence the characteristics of plant diversity in karst rocky desertification ecosystem. The results have important values for the protection of karst forest ecosystem and the control of rocky desertification.

收稿日期:2015-10-13

修回日期:2015-10-23

资助项目:贵州省社会发展攻关计划课题(黔科合 SY 字[2014]3036 号);国家水利部公益性行业科研专项经费项目(201401050);贵州省水利科技经费项目(KT201409);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)

第一作者:李瑞(1979—),男,贵州盘县人,博士,研究员,主要从事水土保持研究。E-mail:245543287@qq.com

通信作者:盛茂银(1980—),男,安徽和县人,博士,教授,主要从事喀斯特石漠化治理研究。E-mail:shmoy@163.com

Keywords: karst; rocky desertification; plant diversity; soil physical and chemical properties; succession

喀斯特石漠化是在喀斯特地区脆弱生态环境下,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,地表呈现石质荒漠景观的演变过程或结果^[1-3]。石漠化一般包括无石漠化、潜在石漠化、轻度石漠化、中度石漠化、强度石漠化和极强度石漠化6个等级^[3]。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^[3],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^[4-5]。喀斯特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^[6-8],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^[9-11],尤其是石漠化生态系统植被演替物种多样性的恢复重建与稳定维系缺乏相关理论研究的科学支撑^[12-14]。

植被/土壤系统是不可分割的整体^[15],其相互作用机理是控制生态系统过程的重要机制,也是石漠化区水土流失治理的重要路径之一^[9]。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。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^[9]。土壤是植物群落更新演替过程中不可或缺的研究内容^[9],土壤理化性质是土壤养分的重要体现,是植物生长繁殖的重要支撑。因此研究植物多样性与土壤理化性质的关系具有重要意义,尤其是针对喀斯特石漠化生态系统植被恢复,认识两者的内在联系机理,为石漠化植被人工恢复提供科学依据显得尤为重要。Gentry^[16]及 Gartlan 等^[17]研究显示土壤中P、Mg、K的水平与热带植物群落物种多样性存在显著的相关关系;国内学者王琳^[18]、杨小波^[19]等研究显示,土壤有机质、全氮和速效磷与物种多样性有显著相关性,王凯博等^[20]研究表明0—20cm土层土壤的全氮和有机质与物种的多样性指数呈显著正相关,而王顺忠等^[21]研究显示物种多样性与土壤盐分关系密切,而与土壤全氮和有机质等相关性较弱。尽管植物多样性与土壤理化性质相关性已在其他生态系统开展了一些研究^[22],但针对喀斯特石漠化退化生态系统基本未见报道。本研究以中国西南典型喀斯特石漠化生态系统为研究对象,研究其植被演替过程中物

种多样性变化及其与土壤理化指标的相关性分析,以揭示喀斯特石漠化地区植被演替过程中物种多样性变化规律及其与土壤因子的动态关系,为西南喀斯特石漠化植物恢复与生态重建提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

贵州喀斯特是中国西南喀斯特的中心,位于世界三大连片喀斯特发育区之一的东亚片区中心,石漠化现象严重、典型。本研究所在区域贵州省黔西县猴场村为典型的贵州喀斯特高原山地石漠化地区(26°58′—26°52′N, 105°58′—106°2′E),属亚热带温暖湿润大陆性季风气候区,平均气温14.2℃。研究区距县城市区30km,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,最高海拔1540m,最低海拔1300m,高差为240m。该流域年均降雨量1087.5mm,年最大降水量1195mm,年最小降水量718mm。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。受成土母质影响,土壤以黄壤土及紫砂土为主,在洼地和平地有水源的地方有零星水稻土分布,坡耕地以黄色石灰土属的岩泥土,灌草丛为黑灰色石灰土。以农田植被为主,其中旱地植被占有较大优势,旱地植被夏秋季节以玉米为主,冬春季节闲置或栽种小麦。自然植被在小区中所占比重较小,植被为亚热带常绿落叶阔混交林,原生植被基本上被破坏,现以次生林为主。其中常见乔木主要以青冈(*Cyclobalanopsis glauca*)、马尾松(*Pinus massoniana*)、光皮桦(*Betula luminifera*)、柏木(*Cupressus funebris*)为主,灌木层多为典型石灰岩有刺灌丛,以金佛山荚蒾(*Viburnum chinshanense*)、窄叶火棘(*Pyracantha angustifolia*)、刺梨(*Rosa roxbunghii*)、火棘(*Pyracantha fortuneana*)、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*)、蔺草(*Arthraxon hispidus*)、铁线莲(*Clematis florida*)等。

1.2 石漠化演替阶段确定

基于喀斯特生态系统退化梯度,将石漠化划分为无石漠化、潜在石漠化、轻度石漠化、中度石漠化、强度石漠化与极强度石漠化5个等级,具体划分标准参照熊康宁等^[12]的划分方法,略有改动,具体见表1和图1。

表 1 喀斯特地区石漠化演替分级标准

石漠化等级	样地岩石裸露率/%	样地植被±土被覆盖率/%	参考指标
无石漠化	<20	>80	坡度≤15°的非梯土化旱坡地、田间坝子等,生态环境良好,林灌草植被浓密,无水土流失或水土流失不明显;宜农、林、牧地
潜在石漠化	20~30	80~70	坡度>15°的非梯土化旱坡地、草地等,林灌草植被稀疏,成土条件好但水土流失明显;有岩石裸露的趋势
轻度石漠化	31~50	69~50	岩石开始裸露,土壤侵蚀明显,植被结构低、以稀疏的灌草丛为主,或人工旱地植被
中度石漠化	51~70	49~30	石质荒漠化加剧,土壤侵蚀严重,土层浅薄,多为石质坡耕地和稀疏灌丛草坡
强度石漠化	>70	<130	石质荒漠化强烈,基本无土可流,多为即将丧失农作价值的难利用地



注:A 无石漠化,B 潜在石漠化,C 轻度石漠化,D 中度石漠化,E 强度石漠化。

图 1 喀斯特石漠化 5 个典型演替阶段景观

1.3 植被调查

在对研究区详细踏查的基础上,针对 5 个石漠化典型演替阶段(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)分别设立 6 个重复固定标准地(每个标准地面积为 20 m×20 m),共建立 30 个固定标准地。所有的固定标准地除石漠化演替阶段不同外,其他的因子都大致一致,土壤是同质的,均为黄色石灰土。分别在 2015 年春季(5 月下旬)和夏季(7 月下旬)在每个固定标准地内进行林木生长量调查,调查因子有树高、胸径和冠幅等。林下植被多样性调查每个标准地中的植物种类、高度、多度、盖度等,由此计算出每个物种的重要值。具体方法见喻理飞^[23]、王庆锁^[24]等。

1.4 多样性指数计算

多样性指数的计算方法参见参考文献[25—26]。丰富度指数(单位面积上物种数,采样标准地面积为 20 m×20 m):

$$R=S$$
 (1)

多样性指数采用 Shannon-Wiener 指数计算:

$$H=-\sum_{i=1}^S P_i \ln P_i$$
 (2)

均匀度指数采用 Pielou 指数:

$$E=\frac{H}{\ln S}$$
 (3)

优势度指数采用 Simpson 指数:

$$D=\sum_{i=1}^S P_i^2$$
 (4)

式中:S 为物种数目;P_i 为种 i 的重要值。

1.5 土壤样品采集及分析方法

在标准地中心按蛇形方式选 3 个采样点,各点间距在 5 m 之内。分别在各样点用环刀(0—15 cm)(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)取样 3 次重复,均匀混合组成待测土样,带回实验室分析各项土壤理化指标。物理因子有土壤容重、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、土壤总孔隙度、土壤自然含水量、田间持水量、毛管持水量、上层饱和渗透率、下层饱和渗透率 9 项指标;土壤化学性质有 pH 值、速效钾、全钾、有效磷、全磷、土壤有机质、土壤水解氮、土壤全氮、土壤呼吸强度 9 项指标。土壤理化性质测试分析参照盛茂银等^[27]的方法及其相应规程的国标。

1.6 数据处理与分析

采用 Excel 软件进行绘图,利用 SPSS 16.0 统计分析软件对不同石漠化演替阶段群落土壤理化性质进行 One-Way ANOVA 方差分析,并采用 LSD 法进行多重比较,同时用相关性分析方法研究不同演替阶段植被物种多样性指数与土壤理化性质之间的关系^[28]。

2 结果与分析

2.1 喀斯特石漠化生态系统林草植被结构组成

对在研究区设立的 30 个 20 m×20 m 标准地植物物种进行了详细的野外调查,具体见表 2。由调查结果可见,石漠化环境植物物种组成简单,草本层只有

20 科 31 属 36 种,木本层只有 29 科 40 属 47 种;且随着石漠化程度加深,植被物种组成呈递减趋势。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,蔷薇科植物在潜在、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,显示了蔷薇科植物对石漠化演化等级具有明显的指示意义,同时也说明了同一植物物种对不同等级石漠化环境的适应性具有明显差异。

表 2 研究区石漠化环境植被物种调查统计

科名	属名	种名
		草本层
	芒属 <i>Miscanthus</i>	芒
		五节芒
禾本科 Gramineae	狗尾草属 <i>Setaria</i>	狗尾草
	大明竹属 <i>Pleioblastus</i>	苦竹 <i>Pleioblastus amarus</i> (Keng) Keng f.
	荩草属 <i>Arthraxon</i>	荩草 <i>Arthraxon hispidus</i> (Thunb.) Makino
	甘蔗属 <i>Saccharum</i>	斑茅
		牛尾蒿
	蒿属 <i>Artemisia</i>	矮丛光蒿 <i>Artemisia disjuncta</i> Krasch.
		青蒿 <i>Artemisia carvifolia</i> Buch.-Ham. ex Roxb.
菊科 Compositae	千里光属 <i>Senecio</i>	千里光 <i>Senecio scandens</i> Buch.-Ham. ex D. Don
	苦苣菜属 <i>Sonchus</i>	苣荬菜 <i>Sonchus arvensis</i> L.
	泽兰属 <i>Eupatorium</i>	紫茎泽兰 <i>Eupatorium adenophorum</i> Spreng.
	紫菀属 <i>Aster</i>	紫菀 <i>Aster tataricus</i> L. f.
豆科 Leguminosae	车轴草属 <i>Trifolium</i>	白车轴草 <i>Trifolium repens</i> L.
凤尾蕨科 Pteridaceae	凤尾蕨属 <i>Pteris</i>	井栏边草
		蜈蚣草 <i>Pteris vittata</i> L.
毛茛科 Ranunculaceae	银莲花属 <i>Anemone</i>	野棉花 <i>Anemone vitifolia</i> Buch.-Ham.
	铁线莲属 <i>Clematis</i>	粗齿铁线莲 <i>Clematis argentea</i> (L.) W. T. Wang
莎草科 Cyperaceae	薹草属 <i>Carex</i>	羊须草 <i>Carex callitrichos</i> V. Krecz
		细果薹草 <i>Carex stenocarpa</i> Turcz ex V. Krecz
石竹科 Caryophyllaceae	繁缕属 <i>Stellaria</i>	繁缕 <i>Stellaria media</i> (L.) Villars
	鹅肠菜属 <i>Myosoton</i>	鹅肠菜 <i>Myosoton aquaticum</i> (L.) Moench
乌毛蕨科 Blechnaceae	狗脊属 <i>Woodwardia</i>	狗脊 <i>Woodwardia japonica</i> (L. f.) Sm.
	乌毛蕨属 <i>Blechnum</i>	乌毛蕨 <i>Blechnum orientale</i> L.
玄参科 Scrophulariaceae	方茎草属 <i>Leptorhabdos</i>	方茎草
	来江藤属 <i>Brandisia</i>	来江藤 <i>Brandisia hancei</i> Hook. f.
蕨科 Pteridiaceae	蕨属 <i>Pteridium</i>	食蕨 <i>Pteridium esculentum</i> (Forst.) Cokayne
鳞毛蕨科 Dryopteridaceae	贯众属 <i>Cyrtomium</i>	贯众 <i>Cyrtomium fortunei</i> J. Sm.
百合科 Liliaceae	百合属 <i>Lilium</i>	野百合 <i>Lilium brownii</i> F. E. Brown ex Mieliez
陵齿蕨科 Lindsaeaceae	乌蕨属 <i>Stenoloma</i>	乌蕨 <i>Stenoloma chusanum</i> Ching
水龙骨科 Polypodiaceae	石韦属 <i>Pyrrosia</i>	石韦 <i>Pyrrosia lingua</i> (Thunb.) Farwell
铁线蕨科 Adiantaceae	铁线蕨属 <i>Adiantum</i>	铁线蕨 <i>Adiantum capillus-veneris</i> L.
蔷薇科 Rosaceae	蔷薇属 <i>Rosa</i>	悬钩子蔷薇 <i>Rosa rubus</i> Lév. et Vant.
海金沙科 Lygodiaceae	海金沙属 <i>Lygodium</i>	海金沙 <i>Lygodium japonicum</i> (Thunb.) Sw.

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存在明显差异。在研究区潜在—轻度石漠化环境中,斑茅(*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、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、刺梨、火棘、构树(*Broussonetia papyrifera*)、贵州悬竹(*Ampelocalamus calcareous*)等物种。

续表 2

科名	属名	种名
伞形科 Umbelliferae	胡萝卜属 <i>Daucus</i>	野胡萝卜 <i>Daucus carota</i> L.
木通科 Lardizabalaceae	八月瓜属 <i>Holboellia</i>	八月瓜 <i>Holboellia latifolia</i> Wall.
酢浆草科 Oxalidaceae	酢浆草属 <i>Oxalis</i>	酢浆草 <i>Oxalis corniculata</i> L.
		木本层
	悬钩子属 <i>Rubus</i>	粉枝莓 <i>Rubus biflorus</i> Buch. -Ham. ex Smith 山莓 <i>Rubus corchorifolius</i> L. f.
蔷薇科 Rosaceae	火棘属 <i>Pyracantha</i>	火棘 窄叶火棘
	栒子属 <i>Cotoneaster</i>	钝叶栒子 <i>Cotoneaster hebeophyllus</i> Diels
	蔷薇属 <i>Rosa</i>	小果蔷薇 <i>Rosa cymosa</i> Tratt. 七姊妹 <i>Rosa multiflora</i> Thunb. var. <i>carnea</i> Thory
小檗科 Berberidaceae	小檗属 <i>Berberis</i>	日本小檗 <i>Berberis thunbergii</i> DC.
	十大功劳属 <i>Mahonia</i>	十大功劳 <i>Mahonia fortunei</i> (Lindl.) Fedde
桑科 Moraceae	榕属 <i>Ficus</i>	地果 <i>Ficus tikoua</i> Bur. 斜叶榕 <i>Ficus tinctoria</i> Forst. f.
	构属 <i>Broussonetia</i>	构树
	野桐属 <i>Mallotus</i>	崖豆藤野桐 <i>Mallotus millietii</i> Lév. 石岩枫 <i>Mallotus repandus</i> (Willd) Muell. Arg.
大戟科 Euphorbiaceae	油桐属 <i>Vernicia</i>	油桐 <i>Vernicia fordii</i> (Hemsl.) Airy-Shaw
	山麻杆属 <i>Alchornea</i>	红背山麻杆 <i>Alchornea trewioides</i> (Benth.) Muell. Arg.
藤黄科 Guttiferae	金丝桃属 <i>Hypericum</i>	金丝桃 <i>Hypericum monogynum</i> L. 金丝梅 <i>Hypericum patulum</i> Thunb. ex Murray
豆科 Leguminosae	刺槐属 <i>Robinia</i>	刺槐
	胡枝子属 <i>Lespedeza</i>	美丽胡枝子 <i>Lespedeza formosa</i> (Vog.) Koehne
		球核荚蒾
忍冬科 Caprifoliaceae	荚蒾属 <i>Viburnum</i>	珍珠荚蒾(变种) <i>Viburnum foetidum</i> Wall. var. <i>ceanothoides</i> (C. H. Wright) Hand. -Mazz. 金佛山荚蒾
	忍冬属 <i>Lonicera</i>	忍冬(金银花) <i>Lonicera japonica</i> Thunb.
	雀梅藤属 <i>Sageretia</i>	雀梅藤 <i>Sageretia thea</i> (Osbeck) Johnston.
鼠李科 Rhamnaceae	勾儿茶属 <i>Berchemia</i>	勾儿茶 <i>Berchemia sinica</i> Schneid.
	鼠李属 <i>Rhamnus</i>	鼠李 <i>Rhamnus davurica</i> Pall.
木犀科 Oleaceae	女贞属 <i>Ligustrum</i>	女贞
松科 Pinaceae	松属 <i>Pinus</i>	马尾松
紫金牛科 Myrsinaceae	铁仔属 <i>Myrsine</i>	铁仔 <i>Myrsine africana</i> L.
马桑科 Coriariaceae	马桑属 <i>Coriaria</i>	马桑 <i>Coriaria nepalensis</i> Wall.
柏科 Cupressaceae	柏木属 <i>Cupressus</i>	柏木
榆科 Ulmaceae	朴属 <i>Celtis</i>	朴树 <i>Celtis sinensis</i> Pers.
芸香科 Rutaceae	花椒属 <i>Zanthoxylum</i>	花椒 <i>Zanthoxylum bungeanum</i> Maxim.
杨柳科 Salicaceae	杨属 <i>Populus</i>	毛白杨 <i>Populus tomentosa</i> Carr.
桦木科 Betulaceae	榛属 <i>Corylus</i>	榛 <i>Corylus heterophylla</i> Fisch. ex Trautv.
壳斗科 Fagaceae	栎属 <i>Quercus</i>	槲栎 <i>Quercus aliena</i> Blume
樟科 Lauraceae	木姜子属 <i>Litsea</i>	木姜子 <i>Litsea pungens</i> Hemsl.
五加科 Araliaceae	常春藤属 <i>Hedera</i>	洋常春藤 <i>Hedera helix</i> L.
胡颓子科 Elaeagnaceae	胡颓子属 <i>Elaeagnus</i>	木半夏 <i>Elaeagnus multiflora</i> Thunb.
棕榈科 Palmae	棕榈属 <i>Trachycarpus</i>	棕榈 <i>Trachycarpus fortunei</i> (Hook.) H. Wendl.
虎耳草科 Saxifragaceae	鼠刺属 <i>Itea</i>	滇鼠刺
苦木科 Simaroubaceae	臭椿属 <i>Ailanthus</i>	臭椿 <i>Ailanthus altissima</i> (Mill.) Swingle
禾本科 Gramineae	悬竹属 <i>mpelocalamus</i>	贵州悬竹
漆树科 Anacardiaceae	黄连木属 <i>Pistacia</i>	清香木 <i>Pistacia weinmannifolia</i> J. Poisson ex Franch.
无患子科 Sapindaceae	栾树属 <i>Koelreuteria</i>	栾树 <i>Koelreuteria paniculata</i> Laxm.
楝科 Meliaceae	浆果楝属 <i>Cipadessa</i>	灰毛浆果楝 <i>Cipadessa cinerascens</i> (Pell.) Hand. -Mazz.
茄科 Solanaceae	茄属 <i>Solanum</i>	假烟叶树 <i>Solanum verbascifolium</i> L.

2.2 不同石漠化演替阶段的植被物种多样性分析

研究结果表明,研究区喀斯特石漠化环境植物多样性的 4 种指数均偏低(表 3):均匀度指数为 0.35~2.31,丰富度指数为 6.63~12.45,多样性指数为 1.79~3.12,优势度指数为 0.12~0.53,显示了该区域环境植物生态系统已遭破坏,演替处于一个较低的阶段。不同等级石漠化环境植物多样性 4 种指数的 *F* 检验和多重比较(表 3)显示,在不同等级石漠化环境中的植物多样性指数具有显著的差异,针对具体 4 种指数可得到以下结果:(1) 均匀度指数:无石漠化环境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) 丰富度指数:无石漠化与轻度石漠化环境显著大于潜在石漠化;(3) 多样性指数:无石漠化、潜在石漠化和轻度石漠化环境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) 优势度指数:潜在石漠化环境显著大于其他等级石漠化环境。石漠化环境植物多样性 4 种指数中,均匀度指数、多样性指数变化与石漠化等级演替有耦合关系,均匀度指数随着石漠化程度增加呈现出逐渐减小的变化趋势,而多样性指数随着石漠化程度增加呈现出先减小后增加的变化趋势。

表 3 研究区不同等级石漠化环境植物多样性指数

石漠化等级	均匀度指数	丰富度指数	多样性指数	优势度指数	<i>F</i> 检验
无	2.31±0.15a	12.45±0.58a	2.24±0.61ab	0.26±0.06b	
潜在	1.30±0.23b	6.63±0.32b	1.79±0.35a	0.53±0.11a	
轻度	0.35±0.18c	12.25±0.18a	2.36±0.28ab	0.30±0.02b	**
中度	0.43±0.13c	10.61±0.82ab	2.89±0.37bc	0.17±0.05b	
强度	0.78±0.23c	9.38±0.25ab	3.12±0.81c	0.12±0.3b	

注: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,**表示存在极显著差异(*p*<0.01);下表同。

2.3 喀斯特石漠化环境土壤理化性质分析

本研究对喀斯特石漠化环境土壤理化性质研究表明,不管是土壤物理性质还是化学性质在石漠化演替不同演替阶段都发生了明显的变化(表 4—5)。从表 4 可以看出,土壤容重(1.13~1.26 g/cm³)、毛管孔隙度(33.51%~39.89%)、总孔隙度(53.17%~57.35%)、田间持水量(28.35%~34.18%)、毛管持水量(35.78%~45.32%)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差异。潜在石漠化环境土壤容重(1.26 g/cm³)显著大于中度(1.14 g/cm³)和强度石漠化(1.13 g/cm³),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。潜在石漠化的毛管孔隙度(33.51%)显著小于强度石漠化(39.89%),潜在石漠化的土壤总孔隙度(53.17%)显著小于中度石漠化(57.35%),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。潜在石漠化的土壤田间含水量(28.35%)显著小于强度石漠化(34.18%),潜在和轻度石漠化毛管含水量(35.78%和 37.04%)显著小于强度石漠化(45.32%),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。

从表 5 可以看出,土壤 pH 值(6.35~7.51)、有机质(36.45~53.75 mg/kg)、水解氮(168.54~215.69 mg/g)、有效磷(3.29~6.56 mg/kg)、全钾(1.41~3.21

g/kg)与土壤呼吸(0.11~0.36 mg/kg)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。无石漠化环境土壤 pH 值(6.35)显著小于潜在(7.23)、轻度(7.53)、中度(7.51)和强度石漠化(6.86),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;无石漠化环境有机质(53.75 mg/kg)显著大于潜在石漠化(36.45 mg/kg),而与轻度(46.69 mg/kg)、中度(47.52 mg/kg)和强度石漠化(47.65 mg/kg)无显著差异;潜在石漠化环境土壤水解氮(123.35 mg/g)显著小于无石漠化(205.16 mg/g)、轻度(198.38 mg/g)和中度石漠化(215.69 mg/g);潜在石漠化环境土壤有效磷(6.56 mg/kg)显著大于无石漠化(3.29 mg/kg)和强度石漠化(3.37 mg/kg),而无石漠化环境土壤全钾(3.29 g/kg)显著大于轻度(1.76 g/kg)、中度(1.41 g/kg)和强度石漠化(1.45 g/kg);无石漠化环境土壤呼吸(0.36)显著大于潜在(0.18)、轻度(0.21)、中度(0.08)和强度石漠化(0.11)。从研究结果可见,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。

2.4 喀斯特石漠化环境群落物种多样性指数与土壤理化因子相关性分析

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。本研究为探究喀斯特石漠化环境土壤对植被演替的影响,开展了土壤理化性质与植物多样性之间相关性分析,结果显示喀斯特石漠化

土壤理化性质与植物多样性指数具有明显的相关性(表 6)。丰富度指数与土壤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;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;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;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极易影响植物多样性的特征。

表 4 研究区不同等级石漠化环境土壤物理性质比较

石漠化等级	容重/ (g·cm ⁻³)	毛管 孔隙度/%	非毛管 孔隙度/%	总孔 隙度/%	自然 含水量/%	田间 含水量/%	毛管 含水量/%	上层渗漏率/ (mm·min ⁻¹)	下层渗漏率/ (mm·min ⁻¹)	F 检验
无	1.13±0.13ab	38.03±0.65ab	17.17±0.25a	57.02±2.35ab	29.01±0.96a	32.19±1.18ab	38.13±0.98ab	11.09±1.84a	5.69±0.52a	
潜在	1.26±0.10a	33.51±0.89a	17.32±0.29a	53.17±1.18a	25.36±0.59a	28.35±0.88a	35.78±1.32a	9.01±1.21a	7.05±0.65a	
轻度	1.15±0.11ab	36.45±1.03ab	17.25±0.48a	55.29±1.95ab	25.31±0.72a	29.25±0.84ab	37.04±1.11a	8.83±0.69a	9.98±1.03a	**
中度	1.14±0.11b	39.02±0.79ab	16.79±0.45a	57.35±1.51b	28.05±0.98a	31.32±1.22b	40.11±1.58ab	12.36±0.89a	8.75±0.75a	
强度	1.13±0.08b	39.89±1.01b	16.69±0.42a	57.05±1.18ab	28.09±0.78a	34.18±0.61b	45.32±2.05b	12.89±1.01a	5.35±0.68a	

表 5 研究区不同等级石漠化环境土壤化学性质比较

石漠化等级	pH 值	有机质/ (mg·kg ⁻¹)	全氮/ (g·kg ⁻¹)	水解氮/ (mg·g ⁻¹)	全磷/ (g·kg ⁻¹)	有效磷/ (mg·kg ⁻¹)	全钾/ (g·kg ⁻¹)	速效钾/ (mg·kg ⁻¹)	土壤呼吸 CO ₂ / (mg·g ⁻¹ ·h ⁻¹)	F 检验
无	6.35±0.20a	53.75±1.13a	2.91±0.32a	205.16±9.56ac	0.68±0.03a	3.29±0.22a	3.21±0.40a	105.12±8.56a	0.36±0.01a	
潜在	7.23±0.21b	36.45±1.38b	2.25±0.26a	123.35±9.06b	0.75±0.06a	6.56±0.19b	2.85±0.41ab	101.25±6.89a	0.18±0.02b	
轻度	7.53±0.17b	46.69±1.22ab	2.76±0.20a	198.38±8.56ac	0.80±0.04a	5.32±0.31ab	1.76±0.36b	96.39±9.61a	0.21±0.01b	**
中度	7.51±0.20b	47.52±1.79ab	2.78±0.50a	215.69±9.51c	0.78±0.05a	3.89±0.25ab	1.41±0.26b	95.89±7.31a	0.08±0.01b	
强度	6.86±0.15b	47.65±1.37ab	2.85±0.41a	168.54±10.25ab	0.69±0.06a	3.37±0.36a	1.45±0.20b	91.08±8.15a	0.11±0.01b	

表 6 石漠化环境土壤理化因子与植物多样性之间的相关性

项目	丰富度指数	多样性指数	均匀度指数	优势度指数
容重	-0.421**	-0.389**	-0.011	0.114
毛管孔隙度	0.164	0.194	-0.109	-0.368**
非毛管孔隙度	0.156	0.089	0.112	0.274*
总孔隙度	0.381**	0.299**	0.011	-0.108
自然含水量	0.191	-0.016	0.167	0.059
田间含水量	0.501**	0.506**	0.168	-0.245*
毛管含水量	0.509**	0.495**	-0.009	-0.179
上层饱和渗透率	0.384**	0.211	-0.061	0.089
下层饱和渗透率	0.201	-0.015	-0.164	0.394**
pH 值	0.251*	0.411**	-0.536**	-0.275*
有机质	0.594**	0.394**	0.110	-0.079
全氮	0.694**	0.589**	-0.116	-0.285*
全磷	0.405**	0.195	-0.259*	-0.254*
全钾	-0.151	-0.178	0.405**	0.164
水解氮	0.708**	0.405**	-0.164	-0.259*
有效磷	0.109	0.264*	-0.356**	-0.076
速效钾	0.291*	0.276*	0.119	0.056
土壤呼吸	0.399*	-0.129	0.319*	-0.055

注:* 表示存在显著相关($p<0.05$),** 表示存在极显著相关($p<0.01$)。

3 讨论与结论

3.1 喀斯特石漠化环境植被结构及其物种多样性对石漠化演替的响应

研究显示,喀斯特石漠化生态系统植被非常简单,在研究区设立的 30 个 20 m×20 m 标准地调查结果显示,草本层只有 20 科 31 属 36 种,木本层只有 29 科 40 属 47 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植物分布具有显著的胁迫。这些物种由于石漠化环境景观异质性强,岩石裸露率高,土层浅薄,土壤稀少而干燥,绝大多数具有石生性、喜钙性和耐旱性的特点,具有发达而强壮的根系,因此植被结构有别于常规地带性分布,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,这与前人的研究一致^[29-30]。在这些种类中,仅有菊科、蔷薇科、禾本科、忍冬科、大戟科等分布有多属多种,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。研究结果也显示,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,需要针对不同等级石漠化环境筛选适应性先锋物种,方能科学治理石漠化。

前人在其他地带生态系统的植被演替研究指出:在群落演替的早期,随着演替进程,物种多样性增加;在群落演替的后期,当群落中出现非常强的优势种时,多样性会降低;群落中物种多样性最大值可能出现在演替的中后期^[17-20]。文丽等^[29]研究了整个西南喀斯特区域尺度的植被演替特征及驱动机制,而喀斯特石漠化生态系统小尺度的植物群落演替一直缺乏深入系统研究,导致石漠化生态系统恢复实践一直无植物演替内在规律研究支撑^[23,31]。本研究针对这一现状,对典型喀斯特石漠化过程植被演替规律开展了研究探索。结果显示,沿石漠化干扰递增梯度,植物多样性呈现了显著的变化,在不同等级石漠化环境中的植物多样性的均匀度、丰富度、多样性和优势度等4种指数均具有显著的差异。尤其是均匀度指数、多样性指数变化与石漠化等级演替有明显耦合关系,均匀度指数随石漠化程度增加显示了逐渐减小的变化趋势,而多样性指数随着石漠化程度增加呈现先减小后增加的变化趋势。

3.2 喀斯特石漠化土壤理化性质对植物多样性演变的影响

植物多样性与土壤理化性质内在联系机理一直是恢复生态学研究的重要内容。Gentry^[16]及 Gartlan^[17], Zuber^[32]等研究显示土壤中 P, Mg, K 的水平与热带植物群落物种多样性存在显著的相关关系;王琳等^[18]和杨小波等^[19]研究显示,土壤有机质、全氮和速效磷与物种多样性有显著相关性;王凯博等^[20]研究表明 0—20 cm 土层土壤的全氮和有机质与物种的多样性指数呈显著正相关;王顺忠等^[21]等研究显示物种多样性与土壤盐分关系密切,而与土壤全氮和有机质等相关性较弱;张喜等^[9]研究了喀斯特天然林植物多样性指数和土壤理化指标的相关性。但迄今为止,具体针对中国西南喀斯特石漠化生态系统植物物种多样性与土壤理化性质关系的研究一直未见系统报道。本研究基于针对这一问题,系统开展喀斯特石漠化土壤理化性质与植物多样性指数相关性研究。研究结果显示,喀斯特石漠化土壤理化性质与植物多样性指数具有明显的相关性,丰富度指数与土壤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;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;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;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。研究结果为进一步探明植物物种多样性与土壤理化性质的内在机理提供了重要依据。

本研究结果还显示,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,这与盛茂银等^[27]的研究结果一致,支持盛茂银等提出的石漠化环境裸露岩石对土壤养分的聚集学说和石漠化演变过程中土壤理化性质的响应机制。喀斯特石漠化环境土壤养分随着石漠化等级的增加,呈现先退化后逐渐改善的过程,强度石漠化土壤养分往往好于潜在、轻度石漠化,这一结果对喀斯特石漠化治理具有重要意义。

参考文献:

- [1] LeGrand H E. Hydrological and ecological problems of Karst regions hydrological actions on limestone regions cause distinctive ecological problems[J]. Science, 1973, 179(4076):859-864.
- [2] 张信宝,王世杰,曹建华,等. 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[J]. 中国岩溶, 2010,29(3):274-279.
- [3] 熊康宁,陈永毕,陈浒. 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,2011.
- [4] Xu E, Zhang H, Li M. Mining spatial information to investigate the evolution of karst rocky desertification and its human driving forces in Changshun, China[J]. Science of the Total Environment, 2013,458/460(3):419-426.
- [5] 王世杰,季宏兵. 碳酸盐岩风化成土作用的初步研究[J]. 中国科学:D辑,1999,29(5):441-449.
- [6] Sweeting M M. Karst in China:Its Geomorphology and Environment[M]. Berlin:Springer Science & Business Media, 1995.
- [7] de Carvalho F, Godoy E L, Lisboa F J G, et al. Relationship between physical and chemical soil attributes and plant species diversity in tropical mountain ecosystems from Brazil[J]. Journal of Mountain Science, 2014,11(4):875-883.
- [8] Li Y, Shao J, Yang H, et al. The relations between land use and karst rocky desertification in a typical karst area, China[J]. Environmental Geology, 2009,57(3):621-627.

- [9] 张喜,朱军,崔迎春,等. 火烧对黔中喀斯特山地马尾松林土壤理化性质的影响[J]. 生态学报,2011,31(19):5809-5817.
- [10] Kobza R M, Trexler J C, Loftus W F, et al. Community structure of fishes inhabiting aquatic refuges in a threatened Karst wetland and its implications for ecosystem management [J]. Biological Conservation, 2004,116(2):153-165.
- [11] 魏强,凌雷,柴春山,等. 甘肃兴隆山森林演替过程中的土壤理化性质[J]. 生态学报,2012,32(15):4700-4713.
- [12] 熊康宁,黎平,周忠发,等. 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,2002.
- [13] 刘丛强,郎赞超,李思亮,等. 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[J]. 地学前缘,2009,16(6):1-12.
- [14] Zhang X, Bai X, He X. Soil creeping in the weathering crust of carbonate rocks and underground soil losses in the karst mountain areas of southwest China[J]. Carbonates and Evaporites, 2011,26(2):149-153.
- [15] 邵水仙,董智,李红丽,等. 不同造林模式对退化石灰岩山地土壤理化性质及水文效应的影响[J]. 水土保持学报,2015,29(1):263-267.
- [16] Gentry A H. Changes in plant community diversity and floristic composition on environmental and geographical gradients[J]. Annals of the Missouri Botanical Garden, 1988,75(1):1-34.
- [17] Gartlan J S, Newbery D M C, Thomas D W, et al. The influence of topography and soil phosphorus on the vegetation of Korup Forest Reserve, Cameroun [J]. Vegetatio, 1986,65(3):131-148.
- [18] 王琳,张金屯,上官铁梁,等. 历山山地草甸的物种多样性及其与土壤理化性质的关系[J]. 应用与环境生物学报,2004,10(1):18-22.
- [19] 杨小波,张桃林,吴庆书. 海南琼北地区不同植被类型物种多样性与土壤肥力的关系[J]. 生态学报,2002,22(2):190-196.
- [20] 王凯博,陈美玲,秦娟,等. 子午岭植被自然演替中植物多样性变化及其与土壤理化性质的关系[J]. 西北植物学报,2007,27(10):2089-2096.
- [21] 王顺忠,陈桂琛,柏玉平,等. 青海湖鸟岛地区植物群落物种多样性与土壤环境因子的关系[J]. 应用生态学报,2015,16(1):186-188.
- [22] 刘鸿雁,黄建国. 缙云山森林群落次生演替中土壤理化性质的动态变化[J]. 应用生态学报,2005,16(11):2041-2046.
- [23] 喻理飞,朱守谦,叶镜中,等. 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,2002,38(1):1-7.
- [24] 王庆锁,李博. 鄂尔多斯沙地油蒿群落生物量初步研究[J]. 植物生态学报,1994,18(4):347-353.
- [25] 马克平,黄建辉,于顺利. 北京东灵山地区植物群落多样性的研究[J]. 生态学报,1995,15(3):268-277.
- [26] 杜虎,彭晚霞,宋同清,等. 桂北喀斯特峰丛洼地植物群落特征及其与土壤的耦合关系[J]. 植物生态学报,2013,37(3):197-208.
- [27] 盛茂银,刘洋,熊康宁. 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,2013,33(19):6303-6313.
- [28] 杜荣骞. 生物统计学[M]. 北京:高等教育出版社,2008.
- [29] 文丽,宋同清,杜虎,等. 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,2015,35(17):5822-5833.
- [30] 罗光杰,李阳兵,王世杰,等. 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[J]. 生态学报,2011,31(14):3882-3889.
- [31] Du Y, Pan G, Li L, et al. Leaf N/P ratio and nutrient reuse between dominant species and stands: predicting phosphorus deficiencies in Karst ecosystems, southwestern China [J]. Environmental Earth Sciences, 2011,64(2):299-309.
- [32] Zuber S M, Behnke G D, Nafziger E D, et al. Crop rotation and tillage effects on soil physical and chemical properties in Illinois[J]. Agronomy Journal, 2015,107(3):971-978.

~~~~~  
(上接第110页)

- [14] 尧水红. 干湿交替强度对旱地土壤结构形成及水稻秸秆分解过程的相互作用的影响[D]. 南京:南京农业大学,2005.
- [15] 曹立为. 耕层深度及土壤容重大豆生长发育和产量的影响[D]. 北京:东北农业大学,2015.
- [16] 彭舜磊,由文辉,沈会涛. 植被群落演替对土壤饱和导水率的影响[J]. 农业工程学报,2010(11):78-84.
- [17] 汪三树,史东梅,蒋光毅,等. 紫色丘陵区坡耕地生物埂的土壤结构稳定性与抗蚀性分析[J]. 水土保持学报,2012,26(6):31-35.
- [18] 李玲玲,黄高宝,张仁陟,等. 不同保护性耕作措施对旱作农田土壤水分的影响[J]. 生态学报,2005,25(9):2326-2332.