

DOI: 10.5846/stxb201710181875

申家琛, 张朝晖, 王智慧. 石漠化程度对苔藓植物多样性及其结皮土壤化学性质的影响. 生态学报, 2018, 38(17): - - .

Shen J C, Zhang Z H, Wang Z H. The effects of rocky desertification degree on bryophyte diversity and soil chemical properties of crusts. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(17): - - .

石漠化程度对苔藓植物多样性及其结皮土壤化学性质的影响

申家琛¹, 张朝晖^{1,2,*}, 王智慧³

1 贵州师范大学贵州省山地环境信息系统与生态环境保护重点实验室, 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

3 贵州师范大学生命科学学院, 贵阳 550001

摘要:以研究区域不同石漠化等级为代表,分析苔藓多样性特征及其结皮土壤化学性质变化规律,探索其对石漠化进程的响应机制。结果显示:(1)苔藓物种多样性:含苔藓 14 科 29 属 84 种,其中苔类 2 科 2 属 2 种;(2)多样性指数表现为:重度石漠化阶段>中度石漠化>轻度石漠化>极重度石漠化>无石漠化;其均匀度为:中度石漠化阶段>轻度石漠化>重度石漠化>极重度石漠化>无石漠化;(3)随着石漠化程度加剧,苔藓群落组成中混合群落比重下降而纯群落比重上升;群落生活型则呈现交织型递减而从集型递增的规律。(4)结皮土壤中全氮、全磷和微生物量碳随石漠化加剧均呈递减趋势。(5)通过 Partial RDA 分析发现密枝青藓(*Brachythecium amnicolum*)、褶叶藓(*Palamocladium nilgheriense*)和美灰藓(*Eurohypnum leptothallum*)等可用于石漠化生态修复。石漠化程度对苔藓多样性影响不显著,但对其群落特征和生活型影响显著。因此可以结合苔藓群落和生活型特征监测石漠化,同时也可使用苔藓作为先锋植物引进用于石漠化早期修复。

关键词:石漠化;苔藓植物;多样性;土壤化学性质

The effects of rocky desertification degree on bryophyte diversity and soil chemical properties of crusts

SHEN Jiachen¹, ZHANG Zhaohui^{1,2,*}, WANG Zhihui³

1 Key Laboratory for Information System of Mountainous Area and Protection of Ecological Environment of Guizhou Province, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China

2 State Key Lab Incubation Base for karst Mountain Ecology Environment of Guizhou Province, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China

3 School of Life Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China

Abstract: Rocky desertification is one of the most serious economic and ecological problems encountered in the development of southwestern China. Understanding the characteristics of bryophyte diversity and soil chemical properties in different stages of rocky desertification, together with their response mechanisms to rocky desertification, is of vital importance in limiting further species loss and in the selection of species suitable for restoration and regeneration. Bryophyte species diversity, evenness, species richness, life forms, community characteristics and soil chemical properties were investigated in areas with differing levels of rocky desertification in Karst Park, Guiyang, Guizhou Province, China. Eighty-four bryophyte taxa from 29 genera and 14 families, were found in the study area; with the exception of 2 liverwort taxa from 2 genera and 2 families, all were mosses. The degree of rocky desertification in the study area was classified into five levels: nil-slight-moderate-severe-extreme. The order of species diversity of bryophytes in each of these categories was: severe (i.e. most species) > moderate > slight > extreme > nil (i.e. least number of species); the order of evenness index was determined as: moderate > slight > severe > extreme > nil. As the degree of rocky desertification increased, there was a corresponding decrease in the proportion of multi-species bryophyte communities and an increase in the proportion of single

基金项目:国家自然科学基金项目(31160042;31760050;31760043);贵州省国际科技合作项目(黔科合外 G 字 2013-7016 号)

收稿日期:2017-10-18; 网络出版日期:2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: academiclife@126.com

species communities. Wefts and turfs were the most commonly occurring life forms; with increasing rocky desertification, there was a corresponding increase in the proportion of turfs. Total nitrogen, total phosphorus, and microbial biomass carbon in the underlying soil, were markedly affected by rocky desertification, and decreased as the degree of rocky desertification increased. Partial redundancy analysis determined that three bryophyte taxa, *Brachythecium amnicolum*, *Palamocladium nilgheriense*, and *Eurohypnum leptothallum*, are suitable species for use in ecological restoration of areas affected by rocky desertification. The degree of rocky desertification did not significantly influence bryophyte diversity, but it did significantly affect community characteristics and life forms. Thus, monitoring changes in rocky desertification is possible by using characteristics of bryophyte communities and life forms. Suitable bryophytes can also be used as pioneer species for the restoration and recovery of areas of rocky desertification.

Key Words: rocky desertification; bryophytes; diversity; soil chemical properties

喀斯特土地石漠化指的是在湿润气候条件下,受喀斯特自然作用及人类不合理活动的干扰,导致地表土层流失,基岩大面积裸露,土地生产力衰退甚至丧失,地表呈现类似于荒漠化景观的现象^[1-3]。贵州省是全国石漠化面积最大、等级最齐、程度最深且危害最重的省份,故石漠化治理一直是该省重点项目和工程^[4]。目前石漠化修复主要为种植林草植被、生态林和发展草地畜牧业^[2],这种治理模式下常因不能形成稳定的生态结构与功能而发生退化^[5]。

喀斯特石漠化地区对植物种类成分有强烈的选择性(如耐旱性、石生性),苔藓植物是分布广泛的先锋植物,对恶劣环境耐受性强,在生物结皮层和群落演替过程中起着重要作用^[6]。苔藓在石漠化恢复过程中主要的作用体现在:①苔藓生命活动所需水源完全来依赖雨水或空气中水分,在降雨过程中能快速补充所需水分来面对喀斯特地区的临时干旱^[7];②易附着于岩石表面生长,分泌的酸性代谢物可加速岩面溶蚀形成土壤^[8];③苔藓可蓄积空气和降水中粉尘、颗粒物,并与植物体紧密丛集的残体结合在一块,逐渐形成薄层土壤;④苔藓可通过毛细管作用减少土壤水分中的有机质、氮、磷、钾等矿质元素的流失,有助于保持土壤肥力^[9-11]。但是,目前国内并未见石漠化程度对苔藓多样性及其土壤结皮的影响的报道。本文选取了贵阳喀斯特公园 5 块典型的不同等级石漠化区域的苔藓植物,利用空间代替时间,对其多样性指数,均匀度指数及土壤结皮的化学性质进行研究,探索苔藓生态特征及其结皮土壤化学性质对石漠化进程的响应,为石漠化预防和修复积累基础数据和理论。

1 材料和方法

1.1 研究区域概况

贵阳喀斯特公园位于贵阳市观山湖区城市中心(106°37′54.49″E—106.36°91.06″E, 26°37′08.76″N—26°37′16.14″),占地约 30 hm²,海拔 1285 m,属于亚热带湿润温和型气候,年平均气温 14.9℃,年降水量 1100—1200 mm^[12]。区域内为碳酸盐岩,石芽广布,水土流失严重,植被退化,呈现类似荒漠的现象,是典型的城市石漠化现象。研究区域内乔木主要为:猴樟 *Cinnamomum bodinieri*,女贞 *Ligustrum lucidum*,小叶杨 *Populus simonii*;灌木主要为:南天竹 *Nandina domestica*,皱叶荚蒾 *Viburnum rhytidophyllum*,胡颓子 *Elaeagnus pungens*;草本植物主要为:紫毛千里光 *Senecio villiferus*,黄鹌菜 *Youngia japonica*,云南莎草 *Cyperus duclouxii*,狗牙根 *Cynodon dactylon*,小飞蓬 *Conyza canadensis* 等。

1.2 样地选择

2015 年 9 月至 2016 年 10 月先后 5 次对公园内石漠化区域观测和样品采集,并根据国家林业标准 LY/T1840-2009 进行石漠化等级划分和石漠化评分^[13]。按石漠化等级(无石漠化、轻度、中度、重度和极重度)设 5 个样地,按照蛇形采样法每样地设 5 个样点,每个样点设 5 个样方(样方大小为 10 cm×10 cm),共采集苔藓群落样本 150 份,结皮土壤样本 165 份(裸露土壤 15 份)。现场测量海拔和经纬度(GPS eTrex20)、环境温湿度(群落上方 3cm 处使用温湿度仪 AR847+测量)、光照度(照度计 AR823)、坡度(SYNTEK)并详细记录每份

标本的采集编号、生境等信息。温、湿度和光照度的监测时段为每日 8:00—18:00,每次测量间隔 1 h,共监测 7 d。结皮土壤和苔藓标本置于封口袋中运回实验室。土壤过 2 mm 筛去除大颗粒石子和植物体后放在 4℃ 的冰箱中保存。各样地信息见表 1。

表 1 样地概况

Table 1 Survey of sample plots

石漠化等级 Rocky desertification grade	经度 Longitude	纬度 Latitude	坡向 Slope	海拔 Altitude/m	石漠化评分 Rocky desertification score
无 Nil	E106°36'45.5"	N26°37'10.8"	N80°	1258—1289	30.0
轻度 Slight	E106°36'44.8"	N26°37'7.6"	N341°	1271—1290	43.2
中度 Moderate	E106°36'55.3"	N26°37'9.1"	N42°	1264—1284	53.8
重度 Severe	E106°36'56.5"	N26°37'14.6"	N118°	1260—1290	64.0
极重度 Extreme	E106°36'47.8"	N26°37'14.9"	N160°	1264—1290	75.4

1.3 苔藓植物的鉴定

使用 HWG-1 型双筒解剖镜以及 XSZ-107TS 型光学显微镜,根据《中国苔藓志》(2—9 卷)、《云南植物志》(18—19 卷)等分类资料进行标本鉴定^[14-23]。

1.4 植物多样性计算

生态重要值(M)体现了物种在群落中的重要性。生态重要值计算公式为:

$$M = \frac{(C + F)}{200} \quad (1)$$

式中, M 为苔藓植物生态重要值, C 为相对盖度; F 为相对频度。

采用 Shannon-Wiener 多样性指数(H)及 Pielou 均匀度指数(E)进行物多样性的评价。Shannon-Wiener 多样性指数 H :

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

式中, P_i 为群落中第 i 物种的重要值。

Pielou 均匀度指数 E :

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

式中, H 为物种多样性指数; S 为物种数

1.5 土壤化学性质测定

土壤 pH 值采用 2.5:1 的水土比,用电位计法测定;全 N 用半微量凯氏定氮法;全 P 用钼锑抗比色法 Cary100Bio 紫外分光光度计测定;全 K 用火焰光度计 Rayleigh WFX-210 测定;微生物量碳采用氯仿熏蒸浸提法,使用 Elementar various TOC 分析仪测定。

1.6 数据处理与分析

采用 Excel 进行数据统计,SPSS 21.0 软件进行方差分析、t 检验、多重比较(Duncan 检验)、相关性分析;Origin 9.0 绘图,Canoco 进行冗余分析。

2 结果与分析

2.1 石漠区域苔藓物种多样性

石漠区共发现苔藓植物 14 科 29 属 84 种,其中苔类 2 科 2 属 2 种(表 2),藓类占优势。其具体分布为:(1)无石漠化区 6 科 9 属 17 种,优势科为:羽藓科 Thuidiaceae 和青藓科 Brachytheciaceae;优势种($M > 0.037$)为:

表 2 苔藓植物在不同石漠化区域分布

科 Families	属 Genera	物种 Taxa	生态重要值 Ecological importance value				
			无石漠化 Nil	轻度石漠化 Slight	中度石漠化 Moderate	重度石漠化 Severe	极重度石漠化 Extreme
薄罗藓科 Leskeaceae	褶藓属 <i>Okamuraea</i>	长枝褶藓 <i>Okamuraea hakoniensis</i>	—	—	0.025	—	—
		长尖扭口藓 <i>Barbula ditrichoides</i>	—	—	0.017	0.017	—
丛藓科 Pottiaceae	扭口藓属 <i>Barbula</i>	长肋扭口藓 <i>Barbula longicostata</i>	—	—	—	0.023	—
		反叶扭口藓 <i>Barbula reflexa</i>	—	—	—	0.014	—
		狭叶扭口藓 <i>Barbula subcontorta</i>	—	—	—	—	0.018
		尖叶扭口藓 <i>Barbula constricta</i>	—	—	0.025	—	—
		剑叶扭口藓 <i>Barbula rufidula</i>	—	—	—	0.022	0.107
		红扭口藓 <i>Barbula asperifolia</i>	—	0.023	—	—	—
		卷叶石灰藓 <i>Hydrogonium amplexifolium</i>	—	—	—	—	0.041
		花状湿地藓 <i>Hyophila rosea</i>	—	—	0.017	—	0.019
		仰叶藓 <i>Reimersia inconspicua</i>	—	0.017	—	—	—
		东亚小石藓 <i>Weisia exserta</i>	—	—	—	0.012	0.019
地钱科 Marchantiaceae	地钱属 <i>Marchantia</i>	小口小石藓 <i>Weisia microstoma</i>	—	0.015	—	—	—
		拟阔叶小石藓 <i>Weisia platyphylloides</i>	—	0.020	0.025	—	—
		小石藓原变种 <i>Weisia controversa</i> var. <i>contraversa</i>	—	—	—	—	0.017
		粗裂地钱风兜亚种 <i>Marchantia paleacea</i> Fuernr. Subsp. <i>diptera</i>	—	—	0.021	—	—
		鳞叶凤尾藓 <i>Fissidens taxifolius</i>	—	—	0.021	—	—
		羽叶凤尾藓 <i>Fissidens plagiochloides</i>	—	—	0.022	—	—
		暗色凤尾藓 <i>Fissidens obscurite</i>	—	—	—	0.014	—
		美灰藓 <i>Eurohypnum leptothallum</i>	—	0.106	0.038	0.076	0.107
		华中毛灰藓 <i>Homomallium plagiangium</i>	—	0.028	—	—	—
		灰藓科 Hypnaceae	灰藓属 <i>Hypnum</i>	云南毛灰藓 <i>Homomallium yunnanense</i>	—	—	—
卷叶灰藓 <i>Hypnum revolutum</i>	—			0.029	—	—	—
大灰藓 <i>Hypnum plumaeforme</i>	0.035			—	—	—	—
平锦藓 <i>Platygyrium repens</i>	—			—	0.032	—	—
东亚金灰藓 <i>Pylaisiella brotheri</i>	—			—	0.025	—	—
弯枝金灰藓 <i>Pylaisiella curtiramea</i>	—			0.015	—	—	—
金灰藓 <i>Pylaisiella polyantha</i>	—			—	0.030	—	—
尖叶绢藓 <i>Entodon acutifolius</i>	0.027			—	—	0.043	—
云南绢藓 <i>Entodon yunnanensis</i>	—			—	0.020	—	—

续表

科 Families	属 Genera	物种 Taxa	生态重要值 Ecological importance value				
			无石漠化 Nil	轻度石漠化 Slight	中度石漠化 Moderate	重度石漠化 Severe	极重度石漠化 Extreme
		异枝绢藓 <i>Entodon divergens</i>	—	—	—	—	0.039
		广叶绢藓 <i>Entodon flavescens</i>	0.038	—	—	—	—
		亚美绢藓原变种 <i>Entodon sullivantii</i> var. <i>versicolor</i>	0.033	—	—	—	—
	赤齿藓属 <i>Erythrodonium</i>	穗枝赤齿藓 <i>Erythrodonium julaceum</i>	0.040	0.051	0.025	—	0.042
孔雀藓科 Hypopterygiaceae	孔雀藓属 <i>Hypopterygium</i>	东亚孔雀藓 <i>Hypopterygium japonicum</i>	—	—	—	0.012	—
裂叶苔科 Lophoziaaceae	裂叶苔属 <i>Lophozia</i>	方叶裂叶苔 <i>Lophozia bantriensis</i>	—	—	—	0.019	—
棉藓科 Plagiotheciaceae	棉藓属 <i>Plagiothecium</i>	棉藓原变种 <i>Plagiothecium denticulatum</i> var. <i>denticulatum</i>	—	—	0.037	—	—
牛舌藓科 Anomodontaceae	牛舌藓属 <i>Anomodom</i>	小牛舌藓全缘亚种 <i>Anomodom Fuernr. subsp. Minor integerrimus</i>	—	—	0.022	—	—
青藓科 Brachytheciaceae	青藓属 <i>Brachythecium</i>	灰白青藓 <i>Brachythecium albicans</i>	0.027	—	—	—	—
		密枝青藓 <i>Brachythecium aminicolum</i>	—	0.020	0.030	0.032	—
		多褶青藓 <i>Brachythecium buchananii</i>	0.027	—	—	0.024	—
		尖叶青藓 <i>Brachythecium coreanum</i>	—	0.031	0.021	—	—
		宽叶青藓 <i>Brachythecium curtum</i>	—	—	0.020	—	—
		石地青藓 <i>Brachythecium glareosum</i>	—	0.032	—	—	—
		皱叶青藓 <i>Brachythecium kuroshicum</i>	—	0.025	—	0.024	—
		柔叶青藓 <i>Brachythecium moritense</i>	—	0.025	—	—	—
		野口青藓 <i>Brachythecium noguchii</i>	0.027	—	—	—	—
		悬垂青藓 <i>Brachythecium pendulum</i>	—	0.037	—	—	—
		小青藓 <i>Brachythecium perminusculum</i>	—	0.036	—	0.031	0.028
		扁枝青藓 <i>Brachythecium planiusculum</i>	0.036	0.092	—	0.026	—
		羽枝青藓 <i>Brachythecium plumosum</i>	—	0.036	—	0.046	—
		青藓 <i>Brachythecium pulchellum</i>	—	0.046	—	—	—
		长叶青藓 <i>Brachythecium rotaceanum</i>	—	—	—	0.031	—
		卵叶青藓 <i>Brachythecium rutabulum</i>	—	—	0.030	—	—
		褶叶青藓 <i>Brachythecium salebrosum</i>	—	—	—	0.035	—
		绿枝青藓 <i>Brachythecium viridifolium</i>	—	0.044	—	0.043	—
	美喙藓属 <i>Eurhynchium</i>	宽叶美喙藓 <i>Eurhynchium hians</i>	—	—	—	0.017	—
		尖叶美喙藓 <i>Eurhynchium eustegium</i>	—	—	0.032	—	—
		疏网美喙藓 <i>Eurhynchium laxirete</i>	—	—	0.025	0.022	—
	褶叶藓属 <i>Palamocladium</i>	深绿褶叶藓属 <i>Palamocladium euchlorom</i>	—	0.034	—	—	—
		褶叶藓 <i>Palamocladium nilgheriense</i>	—	—	0.038	0.024	—

续表

科 Families	属 Genera	物种 Taxa	生态重要值 Ecological importance value				
			无石漠化 Nil	轻度石漠化 Slight	中度石漠化 Moderate	重度石漠化 Severe	极重度石漠化 Extreme
提灯藓科 Mniaceae	长喙藓属 <i>Rhynchostegium</i>	缩叶长喙藓 <i>Rhynchostegium contractum</i>	—	0.053	—	—	—
		狭叶长喙藓 <i>Rhynchostegium fauriei</i>	—	0.015	—	0.035	—
		卵叶长喙藓 <i>Rhynchostegium ovalifolium</i>	—	—	0.0536	—	—
		水生长喙藓 <i>Rhynchostegium riparioides</i>	—	0.036	—	—	—
		美丽长喙藓 <i>Rhynchostegium subspectiosum</i>	—	—	0.016	—	—
		匍灯藓 <i>Plagiomnium cuspidatum</i>	0.028	—	0.037	0.013	—
		皱叶麻羽藓 <i>Claopodium rugulosifolium</i>	—	—	—	0.032	—
		多疣细羽藓 <i>Cyrtlo-hypnum pygmaeum</i>	0.145	—	0.021	0.019	—
		绿羽藓 <i>Thuidium assimile</i>	0.032	—	—	—	—
		短肋羽藓 <i>Thuidium kanedae</i>	0.027	—	—	—	—
羽藓科 Thuidiaceae	短月藓属 <i>Brachymenium</i>	短肋羽藓 <i>Thuidium submicropteris</i>	—	—	—	0.0137	—
		纤枝短月藓 <i>Brachymenium exile</i>	—	0.024	—	0.012	—
		多枝短月藓 <i>Brachymenium leptophyllum</i>	—	—	—	—	0.021
		砂生短月藓 <i>Brachymenium muricola</i>	—	0.022	—	—	0.045
		丛生短月藓 <i>Brachymenium pendulum</i>	—	—	—	—	0.033
		猴网真藓 <i>Bryum algoiticum</i>	—	0.021	—	—	0.035
		银叶真藓 <i>Bryum argentum</i>	—	—	—	0.045	0.033
		比拉真藓 <i>Bryum billurderi</i>	—	—	—	—	0.017
		丛生真藓 <i>Bryum caespiticianum</i>	—	—	—	0.011	0.027
		双色真藓 <i>Bryum dichotomum</i>	—	—	—	—	0.039
羽藓科 Thuidiaceae	真藓属 <i>Bryum</i>	刺叶真藓 <i>Bryum lonchocaulon</i>	—	0.016	—	—	—
		近高山真藓 <i>Bryum paradoxum</i>	—	—	—	—	0.021
		弯叶真藓 <i>Bryum recurvulum</i>	0.032	—	—	—	—

美灰藓 *Eurohypnum leptothallum*, 广叶绢藓 *Entodon flavescens*, 扁枝青藓 *Brachythecium planiusculum*, 多疣细羽藓 *Cyrtohypnum pygmaeum*。(2)轻度石漠化区 5 科 10 属 26 种, 优势科为: 丛藓科 Pottiaceae、青藓科、灰藓科 Hypnaceae、真藓科 Bryaceae; 优势种为: 美灰藓, 穗枝赤齿藓 *Erythrodonium julaceum*, 扁枝青藓 *Brachythecium planiusculum*, 青藓 *Brachythecium pulchellum*, 绿枝青藓 *Brachythecium viridefactum*, 缩叶长喙藓 *Rhynchostegium contractum*。(3)中度石漠化区 11 科 19 属 27 种, 优势科为: 丛藓科、青藓科、灰藓科; 优势种为: 美灰藓、褶叶藓 *Palamocladium nilgheriense*、卵叶长喙藓 *Rhynchostegium ovalifolium*;(4)重度石漠化 11 科 18 属 31 种, 优势科为: 丛藓科、青藓科、灰藓科、真藓科; 优势种为: 美灰藓、尖叶绢藓 *Entodon acutifolius*、羽枝青藓 *Brachythecium plumosum*、绿枝青藓、银叶真藓 *Bryum argenteum*。(5)极重度石漠化区 5 科 10 属 19 种, 优势科为: 丛藓科和真藓科; 优势种为卷叶石灰藓 *Hydrogonium amplexifolium*、异枝绢藓 *Entodon divergens*、砂生短月藓 *Brachymenium muricola*。其中青藓科、丛藓科和真藓科植物优势明显, 分别占研究区域内总物种数的 33.3%, 17.9% 和 14.3%。

在各石漠化阶段苔藓物种多样性指数差异显著 ($P < 0.05$) (如表 3)。伴随石漠化加剧苔藓物种多样性指数呈先上升后下降的趋势(图 1), 由大到小依次是: 重度石漠化 (27.36 ± 0.75) > 中度石漠化 (25.01 ± 0.58) > 轻度石漠化 (23.30 ± 0.49) > 极重度石漠化 (15.79 ± 0.21) > 无石漠化 (13.89 ± 0.51)。

随石漠化加剧苔藓均匀度指数与物种多样性指数变化趋势耦合。其均匀度由大到小依次是: 中度石漠化 (0.98 ± 0.02) > 轻度石漠化 (0.97 ± 0.01) > 重度石漠化 (0.96 ± 0.01) > 极重度石漠化 (0.94 ± 0.01) > 无石漠化 (0.93 ± 0.01)

表 3 不同石漠化阶段苔藓植物多样性

Table 3 Diversity of bryophytes in different rocky desertification stages

指数 Index	无石漠化 Nil	轻度石漠化 Slight	中度石漠化 Moderate	重度石漠化 Severe	极重度石漠化 Extreme
丰富度 Richness	17	26	27	31	19
均匀度 Evenness	$0.937 \pm 0.010c$	$0.976 \pm 0.013a$	$0.981 \pm 0.018a$	$0.964 \pm 0.012ab$	$0.946 \pm 0.013bc$
多样性 Diversity	$13.887 \pm 0.512e$	$23.297 \pm 0.490c$	$25.012 \pm 0.584b$	$27.355 \pm 0.753a$	$15.791 \pm 0.216d$

表中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 ($P < 0.05$)

2.2 石漠化对苔藓植物群落和生活型的影响

调查发现, 在石漠化区域苔藓纯群落占优势(图 2)。无石漠化阶段混合群落占比 60%, 伴随石漠化程度加深, 混合群落占比递减, 纯群落递增, 在极度石漠化地区混合群落不及 20%。

苔藓生活型参照 Magdefrau K. 的划分标准^[24]。区域内苔藓生活型为交织型、丛集型和平铺型三类(图 2)。平铺型对干旱的石漠环境耐受性弱故分布较少^[24]。随着石漠化等级的加深, 交织型占比缩减而丛集型大幅增加。

2.3 不同石漠区苔藓结皮土壤化学性质

苔藓结皮土壤中全氮(TN)、全磷(TN)和微生物量碳(MBC)浓度均显著高于裸露土壤(图 3), 且不同等级石漠区结皮土壤差异显著 ($P < 0.05$) (表 4): 无石漠化明显高于有石漠化阶段, 尤其是从无石漠化到轻度石漠化阶段降幅显著。此外, 苔藓结皮土壤中的 pH 值随石漠化加剧而增高导致石漠化土壤偏碱性。

苔藓混合群落结皮土壤中 TN、TP 和 MBC 显著高于 ($P < 0.05$) 纯群落结皮土壤(图 3), pH 值的变化则相反。

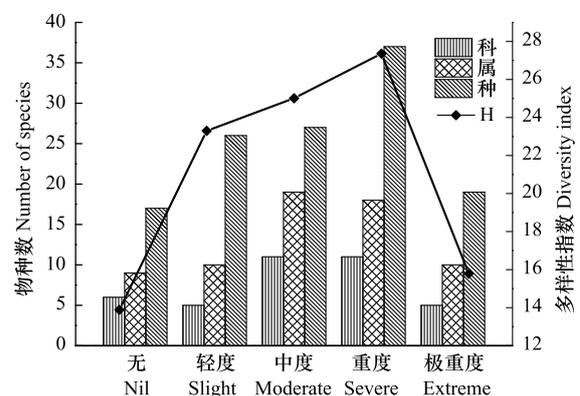


图 1 不同石漠区苔藓植物物种分布

Fig.1 Species distribution of bryophytes in different rocky desertification areas

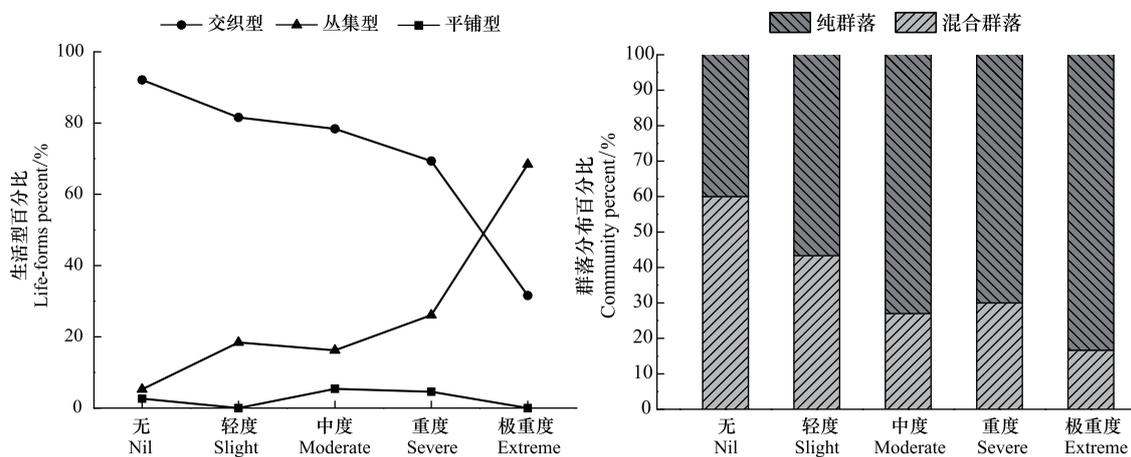


图2 苔藓植物群落和生活型分布特征

Fig.2 Distribution characteristics of bryophyte communities and life-forms

表4 不同石漠化环境下苔藓植物的土壤化学性质比较

Table 4 Comparisons of soil chemical properties of bryophytes among different degrees of rocky desertification surroundings

石漠化等级 Rocky desertification degree	群落 Community	全氮 Total nitrogen/ (g/kg)	全磷 Total phosphorus/ (g/kg)	全钾 Total potassium/ (g/kg)	微生物量碳 Microbial biomass carbon / (g/kg)	pH
无 Nil	S	0.434±0.012f	0.060±0.013e	1.913±0.014ab	253.552±10.531b	7.42±0.01e
	M	1.768±0.197a	0.242±0.031a	1.870±0.030bc	327.633±15.498a	7.17±0.01g
轻度 Slight	S	0.281±0.01g	0.056±0.003e	1.911±0.021ab	197.664±10.282cd	7.41±0.01e
	M	1.314±0.01b	0.093±0.014cd	1.921±0.013a	209.084±5.521c	7.19±0.02f
中度 Moderate	S	0.498±0.024f	0.064±0.014e	1.844±0.0187c	189.637±15.324cde	7.5±0.02d
	M	1.104±0.153c	0.104±0.019bc	1.728±0.059d	193.909±20.629cd	7.42±0.01e
重度 Severe	S	0.438±0.014f	0.053±0.014e	1.856±0.34c	169.253±12.556ef	7.57±0.03b
	M	0.934±0.033d	0.114±0.014bc	1.843±0.23c	182.866±6.757de	7.43±0.01e
极重度 Extreme	S	0.441±0.010f	0.072±0.011de	1.931±0.013a	162.745±15.737f	7.82±0.02a
	M	0.747±0.019e	0.114±0.012b	1.914±0.014ab	179.689±10.355ef	7.56±0.01c

S: 纯群落, Single community; M: 混合群落, Mixed community; 表中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 ($P < 0.05$)

2.4 苔藓植物群落和生活型与土壤化学性质相关性分析

研究结果显示苔藓植物的生活型及群落特征和其结皮土壤化学性质存在相关性(表5)。混合群落占比与TN、MBC显著正相关($R < 0.05$),与石漠化评分呈极显著负相关($R < 0.01$)。纯群落与TN、MBC显著负相关,与石漠化评分呈极显著正相关;交织型占比与TN呈显著正相关,与石漠化评分显著负相关。丛集型与TN呈显著负相关,与石漠化评分呈显著正相关。说明苔藓植物的群落特征和生活型分布特征可以表征石漠化状况;TN、MBC与石漠化评分都存在显著正相关的关系,说明土壤中TN、MBC可以敏感地指示土壤质量变化。

2.5 物种、环境因子和土壤养分间的偏冗余分析(partial RDA)

本文采用偏冗余分析方法揭示石漠区苔藓物种、环境因子和土壤养分间的相互关系。纯群落更直接反映植物体对环境因子的适应性以及对土壤中营养物质的累积作用,因此生态重要值选取18个纯群落为研究对象。通过Partial RDA分析,得到土壤养分、环境因子和物种的二维排序图(图4)。其中蓝色实心箭头表示环境变量,红色空心箭头表示土壤养分指标变量,星号表示不同物种;各箭头之间的夹角代表变量之间的相关性,夹角余弦值为两变量间的相关性系数;物种垂直投影与箭头延长线上,投影点的相对位置代表物种在某环境变量或土壤养分变量的最适值(箭头方向代表正方向);物种间的直线距离越小代表物种对环境的适应能

力和对土壤养分贮存能力越相近。

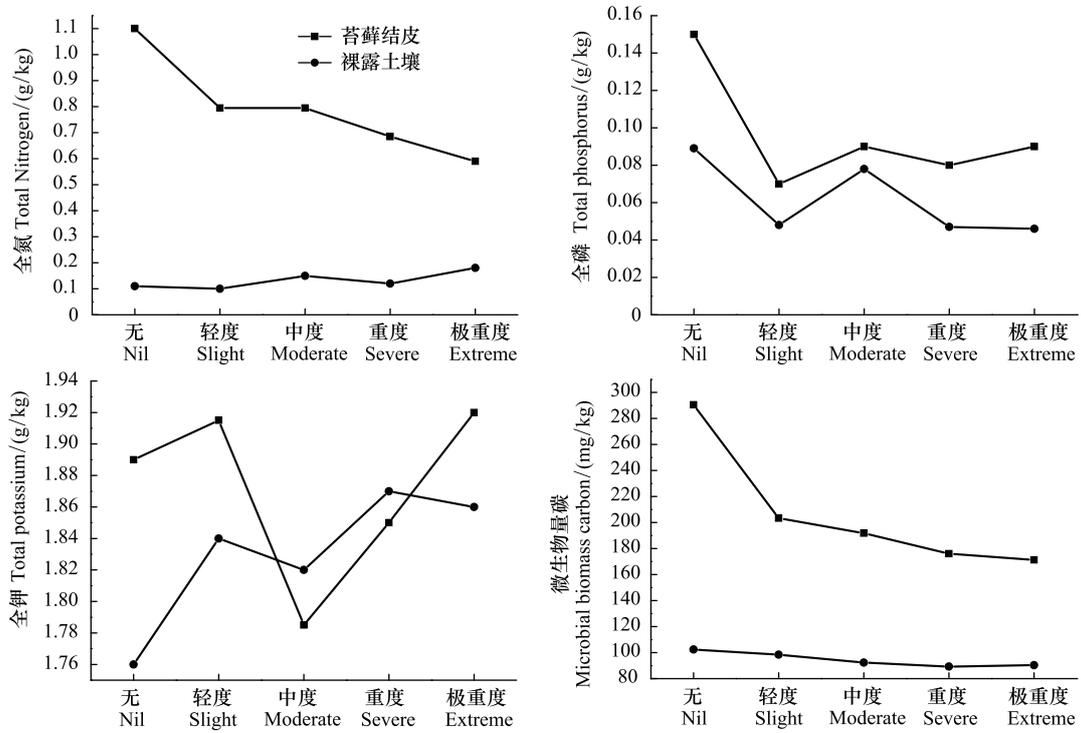


图 3 不同等级石漠化下苔藓植物的土壤化学性质比较

Fig.3 Comparisons of soil chemical properties of bryophytes among different degrees of rocky desertification surroundings

表 5 相关性分析

Table 5 Correlation analysis

土壤因子 Soil factor	石漠化评分 Score	混合群落 Mixed-species community	纯群落 Single-species community	交织型 Wefts	丛集型 Turfs
TN	-0.946 **	0.930 *	-0.930 *	0.823 *	-0.803 *
TP	-0.589	0.655	-0.655	0.372	-0.367
TK	-0.018	0.195	-0.195	-0.319	0.400
MBC	-0.884 *	0.920 *	-0.920 *	0.679	-0.648
石漠化评分 Score	1.000	-0.956 **	0.956 **	-0.902 *	0.867 *

** : $R < 0.01$; * : $R < 0.05$; TN: 全氮, Total nitrogen; TP: 全磷, Total phosphorus; TK: 全钾, Total potassium; MBC: 微生物量碳 Microbial biomass carbon

第一排序轴和第二排序轴的特征值分别为 0.725 和 0.266, 分别解释了 72.5% 和 26.6% 的物种对土壤和环境适应特征, 累计解释量为 99.1%, 反映了环境—土壤—物种的大部分信息。RDA 分析显示光照、湿度、pH、TK 和 MBC 是影响物种分布的主要因子。对恶劣环境耐受性强的物种位于第一轴序正半轴, 反之则分布于排序轴负半轴。pH、坡度、温度和光照与 TK、TP 和 MBC 分别分布于第一轴序正负两个半轴, 说明干旱环境对养分积累有明显胁迫。剑叶扭口藓和银叶真藓能适应极为恶劣的生存环境; 而密枝青藓、褶叶藓和美灰藓对恶劣环境耐受性强且养分固定作用强, 更适宜应用于石漠化修复。

3 讨论

3.1 石漠化对苔藓植物多样性的影响

随石漠化程度加剧苔藓植物的多样性呈现先升后降的趋势。随石漠化程度的加剧, 土壤水分、养分流失

特地区临时干旱^[26]。研究表明苔藓叶片疣状突起是苔藓植物适应干旱环境进化而形成的,有贮存水分、反射太阳辐射的作用^[31-32]。据统计,36.2%丛集型藓类细胞具疣,充分说明丛集型苔藓的耐旱性^[24],故在极度石漠化地区真藓科植物和丛藓科植物成为该区域的优势类群。

3.3 石漠化对苔藓结皮土壤的影响

苔藓结皮土壤中 TN、TP 和 MBC 受石漠化过程胁迫明显;其中 TN 和 MBC 与石漠化评分显著正相关,可作为表征土壤—石漠化关系的敏感性指示因子。石漠区水土大量流失是导致 TN、TP 等营养元素下降,土壤退化的重要因素^[33]。生态环境恶化,植被减少,土壤微生物数量在阳光直射下急剧下降,对土壤中碳输出减弱^[34-35],故 MBC 随石漠化大幅下降。

TK 随石漠化加剧呈先下降后上升的趋势,其原因可能是:(1)石漠化前期植被土壤粘土种类丰富,在苔藓假根、根系微生物及粘土的作用下促进钾的固定^[36];(2)随着石漠化加深水土流失严重导致 K 大量流失,但仍然有部分营养元素(包括 K)聚集于生命力顽强的苔藓层下为石漠化自然恢复提供可能^[1];(3)土壤 K 的固定常因土壤的干燥和 pH 的升高而加强,与本研究中 pH 变化趋势耦合^[37-38]。

3.4 石漠化地区环境因子、土壤养分和物种分布关系的探讨

偏冗余分析能有效地对多个因子进行统计检验,并确定影响物种分布的具最大解释能力的最小变量组^[39]。在 Partial RDA 分析中发现环境是影响苔藓空间分布和土壤肥力差异的重要因子。干旱、强光、高温、偏碱性的环境对苔藓植物的分布和土壤养分的积累有明显的抑制作用。从图 4 中可以看出物种数、土壤养分和湿度呈正相关关系,三者可能相互依存,苔藓通过空气和降水获取物质能量大量生长,在固定土壤的同时也可以有效地减少土壤中养分的流失。丛生短月藓、双色真藓对干旱环境敏感,其结皮土壤下聚集大量养分。剑叶扭口藓和银叶真藓对干旱环境的耐受性强,可作为重度石漠化地区的指示物种。

3.5 喀斯特地区石漠化预防和修复

本研究认为石漠化生态恢复工作中物种选择不应局限于维管植物。国内石漠化修复多采用“一刀切”式的以种植乔木为主的生态林和经果林^[40],治理效果不明显,反而造成植被系统稳定性差,易退化和易遭受病虫害的结果^[11]。苔藓相对于维管植物有以下优点:1)受石漠化环境胁迫不明显;2)更易于附着于直立石壁上,依靠其自身的吸水、保水机制为岩面带来水分^[8];3)可通过对岩面的溶蚀及对空气中灰尘和沙粒贮存形成土壤,有利于其他生物殖居和养分的积累^[9],从而降低岩石裸露率。建议在石漠化修复初期采用苔藓修复裸露基岩,再依据物种演替生态规律,利用苔藓和维管植物相结合并逐渐向顶级群落过渡的修复方式,最终形成稳定的生态环境而达到石漠化治理的目的。

本研究发现:密枝青藓、褶叶藓和美灰藓等物种均具备适应干旱环境并能够有效保持土壤肥力的功能。可以考虑将以上三种苔藓经大规模培育后,作为先锋种用于石漠化裸岩的早期修复。

4 结论

贵阳喀斯特公园石漠化区域苔藓植物共 14 科 29 属 84 种,其中苔类 2 科 2 属 2 种。苔藓植物受石漠化过程胁迫较小,其多样性呈先升后降的趋势。苔藓物种多样性指数表现为:重度石漠化(27.36 ± 0.75) > 中度石漠化(25.01 ± 0.58) > 轻度石漠化(23.30 ± 0.49) > 极重度石漠化(15.79 ± 0.21) > 无石漠化(13.89 ± 0.51);其均匀度表现为:中度石漠化(0.98 ± 0.02) > 轻度石漠化(0.97 ± 0.01) > 重度石漠化(0.96 ± 0.01) > 极重度石漠化(0.94 ± 0.01) > 无石漠化(0.93 ± 0.01)

其群落和生活型特征可以敏感地指示石漠化地区环境变化。结皮土壤 TN、TP 和 MBC 等养分受石漠化胁迫明显,其中 TN 和 MBC 与石漠化评分显著正相关,是指示土壤质量变化的敏感性指标。苔藓植物可以显著提高土壤肥力,密枝青藓、褶叶藓和美灰藓等三种苔藓对石漠化环境有较强的适应能力,且能有效地固定土壤养分,可作为先锋植物应用于石漠化生态修复。

致谢:感谢刘润、李泽科、王玮在样品采集和实验中的协助,感谢 Alison Downing 对本文的宝贵建议。

参考文献 (References):

- [1] 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.
- [2] 苏维词. 喀斯特土地石漠化类型划分及其生态治理模式探讨. 中国土地科学, 2008, 22(4): 32-37.
- [3] 张显强,张来,何跃军,冯晓英,孙敏. 喀斯特石漠结皮细尖鳞叶藓的吸水机制及耐旱适应性. 生态学报, 2010, 30(12): 3108-3116.
- [4] Pan F J, Zhang W, Liu S J, Li D J, Wang K L. Leaf N:P stoichiometry across plant functional groups in the karst region of southwestern China. *Trees*, 2015, 29(3): 883-892.
- [5] 张军以,戴明宏,王腊春,苏维词,曹立国. 西南喀斯特石漠化治理植物选择与生态适应性. 地球与环境, 2015, 43(3): 269-278.
- [6] Vitt D H. Patterns of growth of the drought tolerant moss, *racomitrium microcarpon*, over a Three Year Period. *Lindbergia*, 1989, 15(6): 181-187.
- [7] Liu R X, Wang Z H, Zhang Z H. Ecological characteristics of bryophyte communities from karst rock desertification peak cluster in Zhenfeng of Guizhou province. *Bulletin of Botanical Research*, 2009, 29(6): 734-741.
- [8] 张朝晖,艾伦·培特客斯. 法国阿尔卑斯山脉(Mt. Alps, France)钙华苔藓植物区系及其喀斯特沉积研究//中国植物学会七十五周年年会论文摘要汇编(1933-2008). 兰州:中国植物学会, 2008.
- [9] Guo S L, Cao T. Distribution patterns of ground moss species and its relationships with environmental factors in Changbai Mountain, Northeast China. *Acta Botanica Sinica*, 2001, 43(6): 631-643.
- [10] Veste M. The importance of biological soil crusts for rehabilitation of degraded arid and semi-arid ecosystems. *Science of Soil & Water Conservation*, 2005, 3(4): 42-47.
- [11] 李军峰,王智慧,张朝晖. 喀斯特石漠化山区苔藓多样性及水土保持研究. 环境科学研究, 2013, 26(7): 759-764.
- [12] 何玉龙,黄建菲,吉廷艳. 贵阳降雪和凝冻天气的大气层结特征. 贵州气象, 2007, 31(4): 12-13.
- [13] 国家林业局. LY/T1840-2009 喀斯特石漠化地区植被恢复技术规程. 北京:中国标准出版社, 2009: 1-12.
- [14] 中国科学院昆明植物研究所. 云南植物志 第 18 卷. 北京:科学出版社, 2002: 75-463.
- [15] 中国科学院昆明植物研究所. 云南植物志 第 19 卷. 北京:科学出版社, 2005: 1-346.
- [16] 中国科学院中国孢子植物志编辑委员会. 中国苔藓志 第二卷 凤尾藓目 丛藓目. 北京:科学出版社, 1996: 1-260.
- [17] 中国科学院中国孢子植物志编辑委员会. 中国苔藓志 第三卷 紫萁藓目 葫芦藓目 四齿藓目. 北京:科学出版社, 2000: 45-189.
- [18] 黎兴江. 中国苔藓志 第 4 卷 真藓目. 北京:科学出版社, 2006: 1-160.
- [19] 吴鹏程,贾渝. 中国苔藓志 第五卷 变齿藓目. 北京:科学出版社, 2011: 116-154.
- [20] 中国科学院中国孢子植物志编辑委员会. 中国苔藓志 第六卷 油藓目 灰藓目. 北京:科学出版社, 2002: 49-268.
- [21] 中国科学院中国孢子植物志编辑委员会. 中国苔藓志 第八卷 灰藓目 烟杆藓目 金发藓目 藻苔目. 北京:科学出版社, 2004: 88-261.
- [22] 中国科学院中国孢子植物志编辑委员会. 中国苔藓志 第九卷 藻苔目 类苔目 叶苔目. 北京:科学出版社, 2003: 185-221.
- [23] 中国科学院中国孢子植物志编辑委员会. 中国苔藓志 第七卷 灰藓目. 北京:科学出版社, 2005: 82-272.
- [24] Magdefrau K. Life-forms of Bryophytes. *Bryophyte Ecology*, 1982: 45-58.
- [25] Frey W, Kürschner H. Lebensstrategien von terrestrischen Bryophyten in der udäischen Wüste; Life Strategies of Terrestrial Bryophytes in the Judean Desert. *Plant Biology*, 1991, 104(3): 172-182.
- [26] 张显强,曾建军,谌金吾,罗正伟,孙敏. 石漠化干旱环境中石生藓类水分吸收特征及其结构适应性. 生态学报, 2012, 32(12): 3902-3911.
- [27] 郑敬刚,张志山,冯丽,何明珠,李新荣. 饱和流沙和苔藓结皮在蒸发过程中的水分特征研究. 中国沙漠, 2007, 27(2): 234-238.
- [28] Higginbottom T P, Symeonakis E. Assessing land degradation and desertification using vegetation index data: current frameworks and future directions. *Remote Sensing*, 2014, 6(10): 9552-9575.
- [29] Wessels K J, Bergh F V D, Scholes R J. Limits to detectability of land degradation by trend analysis of vegetation index data. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 125(1): 10-22.
- [30] Wang S Q, Zhang Z H, Wang Z H. Bryophyte communities as biomonitors of environmental factors in the Goujiang karst bauxite, southwestern China. *Science of the Total Environment*, 2015, 538: 270-278.
- [31] Mueller D M J, Clarke G C S, Duckett J G. Bryophyte systematics. *Bryologist*, 1981, 84(2): 449-449.
- [32] Wagner S, Bader M Y, Zotz G. Physiological Ecology of Tropical Bryophytes. *Photosynthesis in Bryophytes and Early Land Plants*, Netherlands: Springer, 2014: 269-289.
- [33] 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.

- [34] Rutigliano F A, Ascoli R D, Virzo D S A. Soil microbial metabolism and nutrient status in a Mediterranean area as affected by plant cover. *Soil Biology & Biochemistry*, 2004, 36(11): 1719-1729.
- [35] 杨宁, 邹冬生, 杨满元, 付美云, 雷玉兰, 林仲桂, 赵林峰. 衡阳紫色土丘陵坡地恢复过程中土壤微生物生物量与土壤养分演变. *林业科学*, 2014, 50(12): 144-150.
- [36] 杜振宇, 王清华, 刘方春, 马丙尧. 腐殖酸对钾在褐土中迁移和转化的影响. *土壤*, 2012, 44(5): 822-826.
- [37] Godzhamanov A B. Effect of irrigation on the transformation of potassium in soil. *Doklady*, 1974: 12-17.
- [38] 胡国松, 曹志洪, 周秀如, 李仲林, 张新. 烤烟根际土壤中钾素及微素行为的研究. *中国烟草学报*, 1993, 1(1): 1-11.
- [39] 杜雯. 古尔班通古特沙漠梭梭肥岛的空间特征及成因分析[D]. 乌鲁木齐: 中国科学院新疆生态与地理研究所, 2008: 4-7.
- [40] 李彬. 西南岩溶区石漠化防治现状及对策. *国土资源科技管理*, 2002, 19(4): 1-4.