

鄂北不同程度石漠化环境植物多样性与土壤物理性质

杨佳伟¹, 刘学全¹, 彭晓宏¹, 王 明², 郑兰英¹, 刘 仕², 罗智勇²

(1.湖北省林业科学研究院, 武汉 430000; 2.南漳县林业局, 湖北 襄阳 441500)

摘 要:为了探析鄂北石漠化地区植被与土壤相关性,为区域石漠化综合治理提供参考,以鄂北岩溶石漠化生态系统为对象,采用野外定点样地监测调查及室内分析相结合的方法,研究了区域性不同程度石漠化环境中植物多样性与土壤物理性质及相关性。结果表明:鄂北岩溶石漠化地区植被结构简单,群落空间结构、植物组成、植物多样性随石漠化程度增强而递减,强度石漠化植物仅有 13 科 18 属 18 种;石漠化程度越高,植物形态特征越相近,以铁仔、黄栌及忍冬科、豆科的带刺植被为主;石漠化土壤物理结构随石漠化等级呈退化趋势,而持水性能则是先退化后趋于稳定;环境土壤的容重、干密度、孔隙度与植物多样性显著相关,其中非毛管孔隙度同丰富度、植物多样性呈显著正相关,均匀度指数与毛管孔隙度呈显著正相关;总孔隙度、均匀度、多样性、丰富度、毛管孔隙度是基于植物多样性和土壤物理性质评价石漠化的关键指标。

关键词:鄂北石漠化; 群落结构; α 多样性; β 多样性; 土壤物理性质

中图分类号:Q948.1; S714.7

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)06-0100-07

Plant Diversity and Soil Physical Properties in Different Degree of Rocky Desertification in Northern Hubei Province

YANG Jiawei¹, LIU Xuequan¹, PENG Xiaohong¹, WANG Ming²,
ZHENG Lanying¹, LIU Shi², LUO Zhiyong²

(1.Hubei Academy of Forestry, Wuhan 430000, China; 2.Nanzhang Forestry Bureau, Xiangyang, Hubei 441500, China)

Abstract: In order to explore the correlation between vegetation and soil in the rocky desertification area of Northern Hubei Province, and provide reference for the comprehensive management of rocky desertification, we took the karst rocky desertification ecosystem in northern Hubei Province as the example, and investigated the plant diversity and soil physical properties and their correlation in different degree of regional rocky desertification environment by the method of sampling field site monitoring and indoor analysis. The vegetation structure in the karst rocky desertification area in northern Hubei is simple, and the spatial structure, plant composition and plant diversity of the community decrease with the increase of the degree of rocky desertification. The intensity is only 13 families, 18 genera and 18 species. The morphological characteristics of plants are closer when the degree of rocky desertification is higher. The main types of vegetation are *Myrsine africana*, *Cotinus coggygia*, Caprifoliaceae and Leguminosae with thorns. The physical structure of rocky desertification soil tends to be degraded with the degree of rocky desertification, while the water holding capacity tends to be stable after degradation. The bulk density, dry density and porosity of soil are significantly correlated with plant diversity, among which non capillary porosity is positively correlated with richness and plant diversity, and evenness index is positively correlated with capillary porosity. The total porosity, evenness, diversity, richness and capillary porosity are the key indicators to evaluate rocky desertification based on plant diversity and soil physical properties.

Keywords: rocky desertification in northern Hubei Province; community structure; α diversity; β diversity; soil physical properties

收稿日期:2020-01-03

修回日期:2020-01-31

资助项目:国家林业和草原局委托项目“湖北省南漳县石漠化样地调查和工程效益监测”(2019062046);湖北省大巴山森林生态定位观测站运行经费

第一作者:杨佳伟(1990—),男,重庆忠县人,硕士,研究实习员,主要从事石漠化生态修复研究。E-mail:java_young@126.com

通信作者:刘学全(1966—),男,湖北黄梅人,学士,研究员,主要从事退化森林生态修复研究。E-mail:798461429@qq.com

石漠化是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^[1-2]。石漠化是我国三大生态灾害之一,是制约着我国喀斯特地区区域经济社会发展的一个重大生态问题^[3]。

岩溶石漠化地区人地矛盾突出,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],显著表现在植物多样性降低和森林生态系统生态服务功能退化^[5]。退化后的岩溶森林生态系统生产力下降,生物多样性减少,调节气候、涵养水分和防风固沙的作用减弱,加剧水土流失、荒漠化等生态问题发生程度^[6]。岩溶区物种多样性是在物种水平上的直接表现形式^[7],土壤是陆地生态系统大部分生态过程的载体,亦是植物群落演替过程中不可或缺的内容^[8],对生态系统演替过程中土壤物理性质变化的研究,将有助于认识演变过程中植被与土壤相互作用关系^[9],为实现人工调控森林更新演替提供支撑。

目前国内学者在石漠化方面研究主要集中在区域植被结构^[10-11]、土壤侵蚀与地下产流产沙^[12]、林分更新^[13]、流域综合治理^[14]等方面,且试验区多位于西南岩溶高原及峰丛洼地区,湖北省内岩溶槽谷石漠化区研究相对较少。本文立足鄂北岩溶石漠化区,以采样野外定点样地监测调查及室内分析相结合的方法研究鄂北不同程度石漠化环境中植物多样性特征与土壤物理性质,以期为区域石漠化综合治理提供参考。

1 研究区概况与方法

1.1 研究区概况

鄂北是湖北省岩溶石漠化集中连片区,本研究选择了鄂北襄阳南漳县石漠化区域作为研究区,代表了鄂北低山丘陵岩溶石漠化区气候、地形地貌、植被及土壤条件等状况。

南漳县地处荆山山脉东麓,是鄂西山区向汉水中游平原过渡的地带,地理坐标为 $111^{\circ}26'$ — $112^{\circ}9'E$, $31^{\circ}13'$ — $32^{\circ}1'N$,属北亚热带季风气候,年平均气温 $11^{\circ}C$,属长江水系,年降雨量为 $830\sim 950\text{ mm}$ 。南部地区以三叠系砂岩、页岩、碳酸盐类灰岩为主,土壤以黄壤、棕红色黏土、水稻土为主,北部区域以砂岩、砂砾岩、石灰岩为主,土壤以黄褐土、黄棕壤、水稻土为主。研究区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。主要大乔木有马尾松(*Pinus massoniana*)、柏木(*Cupressus fune-*

bris)、黄连木(*Pistacia chinensis*)、喜树(*Camptotheca acuminata*)、榔榆(*Ulmus parvifolia*)、拐枣(*Hovenia acerba*)等,灌木层多为典型石灰岩有刺灌丛及部分栓皮栎灌丛,草本层常见种类有茅叶荩草(*Arthraxon prionodes*)、薤白(*Allium macrostemon*)、络石(*Trachelospermum jasminoides*)、茜草(*Rubia cordifolia*)等。

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4个典型石漠化程度为研究对象,分别为潜在石漠化、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^[15]的方法。针对4个典型的石漠化程度类型分别设置3块重复固定样地(样地规格 $20\text{ m}\times 20\text{ m}$),共建立12个固定样地。试验地在南漳县位置见图1,样地详细情况见表1。



图1 试验地位置及其地形概况

2019年6月,在生长旺盛期采集数据。按照方精云等^[16]的研究建议,每个样地内进行物种全面调查,灌木层调查在中部 $10\text{ m}\times 10\text{ m}$ 样方四角和中心位置设置5个 $2\text{ m}\times 2\text{ m}$ 小样方,草本层设置5个 $1\text{ m}\times 1\text{ m}$ 小样方。植被调查:乔木层统计每株名称、胸径、高度和冠幅;灌木层统计每株名称、基径、高度;草本植物统计名称、株数、平均高度和盖度。

1.2.2 植物多样性调查 根据样地调查数据,分析群落个体数及其组成成分的种群数量、相对多度和重要值等特征。多样性指标一般包括 α 多样性和 β 多样性^[17-18]。 α 多样性表示群落中所含物种的多少,即物种丰富度(species richness),以及群落中各个种的相对密度,即物种均匀度(species evenness)。 β 多样性则表示物种沿环境梯度所发生替代的程度或物种变化的速率。不同群落或某一环境梯度上不同样方之间的共有种越少, β 多样性越大。相关计算公式如下:

表 1 试验区基本情况及样地概况

样地 类型	地理 坐标	海拔/ m	岩溶 地貌	土壤 类型	基岩 裸露率/%	植被+土被 覆盖率/%	植被 类型	典型 植被
潜在石漠化	111°51′53″E 31°54′26″N	195~210	岩溶槽谷	黄褐土	20~30	80~70	次生乔木林	化香树、黄连木、柏木、铁箍散、白茅、络石、茜草
轻度石漠化	111°52′14″E 31°54′43″N	202~240	岩溶槽谷	黄褐土	31~50	69~50	次生乔木林	化香树、黄连木、马尾松、箬竹、络石、茜草、铁箍散、麦冬
中度石漠化	111°39′48″E 31°27′34″N	424~435	岩溶槽谷	黄壤、黄色石灰土	51~70	49~30	次生灌木林	黄栌、栓皮栎、铁仔、马尾松、白茅、薹白、木蓝
强度石漠化	111°39′43″E 31°27′33″N	405~427	岩溶槽谷	黄壤、黄色石灰土	>70	<30	次生灌木林	铁仔、黄栌、白刺花、烟管芙莲、勾儿茶、白茅、薹白、探春花

(1) 重要值(IV)

$$IV=(M+F+A)/3 \tag{1}$$

式中: M 为相对多度(%), $M=100\times$ 某个种的株数/所有种的总株数; F 为相对频度(%), $F=100\times$ 某个种在统计样方中出现的次数/所有种出现的总次数; A 为相对优势度(%), $A=100\times$ 某个种的胸高断面积/所有种的胸高断面积。在灌木群落中用相对盖度替代相对优势度,在草本群落中用物种的平均高度替代优势度。

(2) 物种丰富度(S)

$$S=\text{出现在样方内的物种数} \tag{2}$$

(3) α 多样性^[19]

Shannon-Wiener 指数: $H'=-\sum_{i=1}^S(P_i\ln P_i)$ (3)

Pielou 指数(均匀度指数): $E=H'/\ln S$ (4)

Simpson 指数(优势度指数): $P=1-\sum_{i=1}^SP_i^2$ (5)

式中: P_i 为种 i 的相对优势度(相对胸高断面积)或重要值(IV)。

(4) β 多样性^[15]

Sørensen 指数: $SI=\frac{2c}{a+b}$ (6)

Jaccard 指数: $C_j=\frac{c}{a+b-c}$ (7)

Cody 指数: $\beta_c=\frac{g(H)+l(H)}{2}=\frac{a+b-2c}{2}$ (8)

式中: a 和 b 分别为两样方的物种数; c 为两样方的共有物种数; $g(H)$ 为沿生境梯度 H 增加的物种数; $l(H)$ 为沿生境梯度 H 失去的物种数。

Sørensen 指数和 Jaccard 指数反映群落或样方间物种组成的相似性;Cody 指数则反映样方物种组成沿环境梯度的替代速率。

1.2.3 土壤样品采集与物理性质分析 (1) 土壤样品采集。在各样地内 S 型选择 3 个样点采集土壤,相邻样点间隔保证大于 5 m,部分区域(中度、强度石漠化)由于基岩裸露适当调整取样位置。石漠化区土层

较薄,分 3 层采集土样(0—10 cm,10—20 cm,20—30 cm)。田间取样,室内分析。

(2) 土壤物理性质分析。根据森林土壤分析方法,采用环刀法测定土壤容重、自然含水量、毛管孔隙度、总孔隙度、非毛管孔隙度、田间持水量和毛管持水量。

1.2.4 数据分析 采用 Excel 软件进行数理统计、绘图,利用 SPSS 20.0 软件进行方差分析、 t 检验、相关性分析和主成分分析等统计分析^[20]。

2 结果与分析

2.1 不同石漠化程度植物组成及多样性

2.1.1 植被结构 植物群落调查结果(表 2)显示,岩溶石漠化地区植被结构简单,并且在不同程度石漠化环境中其主要植被类型及物种呈现出较大差异。潜在、轻度石漠化程度以乔木层建群,灌草相对丰富,而中度和强度石漠化样地植被以灌木、草本为主,少有乔木种且生长力低下。随石漠化程度加重,植物丰富度逐级递减,特别是强度石漠化区域植物结构最为简单,草本层物种组成仅有 3 科 5 属 5 种,木本层组成仅 10 科 10 属 10 种。

岩溶石漠化环境植被丰富度较低,大部分物种均为 1 科 1 属 1 种。漆树科(Anacardiaceae)、菊科(Asteraceae)、大麻科(Cannabaceae)、忍冬科(Caprifoliaceae)、柏科(Cupressaceae)、禾本科(Gramineae)、豆科(Leguminosae)、鼠李科(Rhamnaceae)等科分布有多种生活型,这部分植物对石漠化环境有较高的适应性,其中以禾本科植物最为突出,在中度、强度石漠化样地中有较多分布。鼠李科、无患子科(Sapindaceae)、榆科(Ulmaceae)、大麻科(Cannabaceae)、樟科(Lauraceae)物种在潜在、轻度石漠化环境中分布较多,而在中度、强度石漠化区域则没有其生活型存在,表明同一物种对不同石漠化程度生境有不同程度的响应,在各类环境中建群种和优势种存在着明显差异。

表 2 不同程度石漠化类型植物群落物种统计表

科名	属名	种名	重要值			
			潜在	轻度	中度	强度
草本层						
百合科 Liliaceae	沿阶草属 <i>Ophiopogon</i>	麦冬 <i>Ophiopogon japonicus</i>	8.3	12.5		
禾本科 Gramineae	白茅属 <i>Imperata</i>	白茅 <i>Imperata cylindrica</i>	12.3		28.1	33.4
禾本科 Gramineae	芒属 <i>Miscanthus</i>	五节芒 <i>Miscanthus floridulus</i>			6.2	
禾本科 Gramineae	草沙蚕属 <i>Tripogon</i>	中华草沙蚕 <i>Tripogon chinensis</i>				14.3
禾本科 Gramineae	荩草属 <i>Arthraxon</i>	矛叶荩草 <i>Arthraxon prionodes</i>			9.9	11.3
禾本科 Gramineae	金发草属 <i>Pogonatherum</i>	金丝草 <i>Pogonatherum crinitum</i>			7.0	
夹竹桃科 Apocynaceae	络石属 <i>Trachelospermum</i>	络石 <i>Trachelospermum jasminoides</i>	11.4	17.4		
菊科 Asteraceae	艾纳香属 <i>Blumea</i>	柔毛艾纳香 <i>Blumea axillaris</i>	8.6		4.9	
菊科 Asteraceae	马兰属 <i>Kalimeris</i>	山马兰 <i>Kalimeris lautureana</i>	9.5			
木犀科 Oleaceae	素馨属 <i>Jasminum</i>	探春花 <i>Jasminum floridum</i>	6.9	10.3		15.4
茜草科 Rubiaceae	茜草属 <i>Rubia</i>	茜草 <i>Rubia cordifolia</i>	11.3	17.0		
忍冬科 Caprifoliaceae	忍冬属 <i>Lonicera</i>	金银花 <i>Lonicera japonica</i>	5.0	7.6		
石蒜科 Amaryllidaceae	葱属 <i>Allium</i>	薤白 <i>Allium macrostemon</i>	5.3	8	29.4	25.6
五味子科 Schisandraceae	五味子属 <i>Schisandra</i>	铁箍散 <i>Schisandra propinqua</i>	17.9	27.2		
豆科 Leguminosae	木蓝属 <i>Indigofera</i>	木蓝 <i>Indigofera tinctoria</i>	3.5		14.5	
木本层						
禾本科 Gramineae	箬竹属 <i>Indocalamus</i>	箬竹 <i>Indocalamus tessellatus</i>	8.8	6.7		
唇形科 Lamiaceae	牡荆属 <i>Vitex</i>	黄荆 <i>Vitex negundo</i>	3.7	5.5	2.7	5.2
大麻科 Cannabaceae	朴属 <i>Celtis</i>	紫弹树 <i>Celtis biondii</i>	4.3	2.8		
大麻科 Cannabaceae	青檀属 <i>Pteroceltis</i>	青檀 <i>Pteroceltis tatarinowii</i>		2.2		
豆科 Leguminosae	槐属 <i>Sophora</i>	白刺花 <i>Sophora davidii</i>			6.7	10.7
豆科 Leguminosae	云实属 <i>Caesalpinia</i>	云实 <i>Caesalpinia decapetala</i>			3.5	
壳斗科 Fagaceae	栎属 <i>Quercus</i>	栓皮栎 <i>Quercus variabilis</i>			14.5	3.8
蓝果树科 Nyssaceae	喜树属 <i>Camptotheca</i>	喜树 <i>Camptotheca acuminata</i>	2.5	6.1		
蔷薇科 Rosaceae	李属 <i>Prunus</i>	李 <i>Prunus salicina</i>	1.4			
山茱萸科 Cornaceae	八角枫属 <i>Alangium</i>	八角枫 <i>Alangium chinense</i>	5.7	3.9		
松科 Pinaceae	松属 <i>Pinus</i>	马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	6.6	7.2	11.7	
无患子科 Sapindaceae	槭属 <i>Acer</i>	三角槭 <i>Acer buergerianum</i>	1.7	4.9		
柏科 Cupressaceae	柏木属 <i>Cupressus</i>	柏木 <i>Cupressus funebris</i>	8.2	4.5		
柏科 Cupressaceae	刺柏属 <i>Juniperus</i>	刺柏 <i>Juniperus formosana</i>		3.4	5.6	4.1
紫金牛科 Myrsinaceae	铁仔属 <i>Myrsine</i>	铁仔 <i>Myrsine africana</i>	4.0	5.1	10.1	21.1
冬青科 Aquifoliaceae	冬青属 <i>Ilex</i>	刺叶冬青 <i>Ilex bioritsensis</i>			8.9	
胡桃科 Juglandaceae	化香树属 <i>Platycarya</i>	化香树 <i>Platycarya strobilacea</i>	15.1	18.5		2.5
马桑科 Coriariaceae	马桑属 <i>Coriaria</i>	马桑 <i>Coriaria nepalensis</i>			4.4	
漆树科 Anacardiaceae	黄栌属 <i>Cotinus</i>	黄栌 <i>Cotinus coggygria</i>			15.6	17.6
漆树科 Anacardiaceae	黄连木属 <i>Pistacia</i>	黄连木 <i>Pistacia chinensis</i>	17.6	14.8	2.4	
蔷薇科 Rosaceae	火棘属 <i>Pyracantha</i>	火棘 <i>Pyracantha fortuneana</i>				9.8
忍冬科 Caprifoliaceae	荚蒾属 <i>Viburnum</i>	烟管荚蒾 <i>Viburnum utile</i>	1.9		6.7	12.5
鼠李科 Rhamnaceae	勾儿茶属 <i>Berchemia</i>	勾儿茶 <i>Berchemia sinica</i>	4.1		7.2	12.7
鼠李科 Rhamnaceae	枳椇属 <i>Hovenia</i>	枳椇 <i>Hovenia acerba</i>	3.5	7.7		
榆科 Ulmaceae	榆属 <i>Ulmus</i>	榔榆 <i>Ulmus parvifolia</i>	5.3	3.4		
樟科 Lauraceae	山胡椒属 <i>Lindera</i>	山胡椒 <i>Lindera glauca</i>	5.6	3.3		

2.1.2 α生物多样性

研究结果显示,鄂北石漠化环境中植物多样性的指数均偏低(表 3),表明岩溶石漠化植物生态系统已遭破坏,恢复演替处于一个较低水平。从表中可以看出,不同石漠化等级环境中植物多

样性指数均呈现出显著差异性:(1) 石漠化地区植物丰富度随石漠化程度加深而逐级降低,潜在石漠化显著大于轻度、中度和强度石漠化;(2) 潜在石漠化环境生物多样性显著大于石漠化区域,而轻度石漠化环

境又显著大于中度、强度石漠化;(3) 群落中物种个体数越接近,则均匀度就越大,潜在和轻度石漠化环境中均匀度指数较高,而强度石漠化则显著低于前者;(4) 本研究用优势度公式为 Simpson 指数的补数公式,即反映种群分散度,数值越大,生物在群落中

越分散,单个物种优势度则越小,由表 3 可知,强度石漠化条件下单个植物种类在群落中优势度突出,与其他程度石漠化环境有显著差异。可见,4 种多样性指数均与石漠化等级有显著相关性,整体呈现随石漠化程度增加而减小的变化趋势。

表 3 不同程度石漠化类型植物多样性指数

石漠化等级	丰富度(S)	Shannon-Wiener 多样性指数(H')	Pielou 均匀度指数(E)	Simpson 优势度指数(P)
潜在	28	3.14±0.08a	0.82±0.03a	0.93±0.04a
轻度	23	2.91±0.14b	0.87±0.09a	0.87±0.02a
中度	19	2.69±0.12bc	0.81±0.09ab	0.90±0.05a
强度	15	2.52±0.25c	0.76±0.14b	0.69±0.10b

注:具有相同字母表示无显著差异,无相同字母表示有显著差异,下表同。

根据实地调查结果与分析,石漠化样地木本植物群落物种丰富度及群落多样性都随着石漠化程度加深而下降,重度石漠化样地时群落物种丰富度及多样性指数都到达最低值。调查样地中,在其中一块重度石漠化样地,样地内仅有 4 株小乔木及少量灌木,土地荒凉,植物存量少,恢复困难。草本植物变化趋势与木本植物相似,种类单一,以耐旱、耐贫瘠物种为主。如若石漠化趋势不能得到有效抑制,将导致土地利用率大幅降低,人地矛盾愈加突出,群落多样性下降,形成不可逆生态灾害。

2.1.3 β 生物多样性 β 多样性是对物种沿环境梯度替代过程的一种度量,是沿着某一环境梯度物种替代的程度或速率以及物种周转率^[21]。通常 β 多样性被表示为群落间相似性指数或是同一地理区域内不同生境中生物物种的周转率,不同生境间或某一生境梯度上不同地段间生物种类组成的相似性越低,β 生物多样性越高。

从图 2,表 4 可以看出:(1) 潜在和轻度石漠化程度、中度和强度石漠化程度环境中物种组成的相似性较高。Sørensen 指数和 Jaccard 指数最大值分别为 0.82,0.70,说明潜在和轻度石漠化两个环境中物种种类及组成有高相似性,中度和强度石漠化也具有相同规律。而 Sørensen 指数和 Jaccard 指数强度石漠化与潜在、轻度石漠化程度比对中变小,说明随石漠化严重程度的增加而共有物种数、相似性系数呈现减小的趋势。(2) Cody 指数是二元属性的相异性指数,其值越大,则表示群落的相似性越小。轻度—中度、轻度—强度的 Cody 指数最大,分别为 15.0,14.0,可见在不同石漠化环境中物种更替速度持续增加,到强度时达到最大;中度—强度石漠化过程中 Cody 指数较小,是由于石漠化恶劣到一定程度后,其群落内部物种数量已经十分稀少,残留下来的都是耐干旱、耐瘠薄、生存能力强的植物,能被群落自然剔除的物种存量较少,故此阶段的更替速率反而出现了一个下

降的过程。

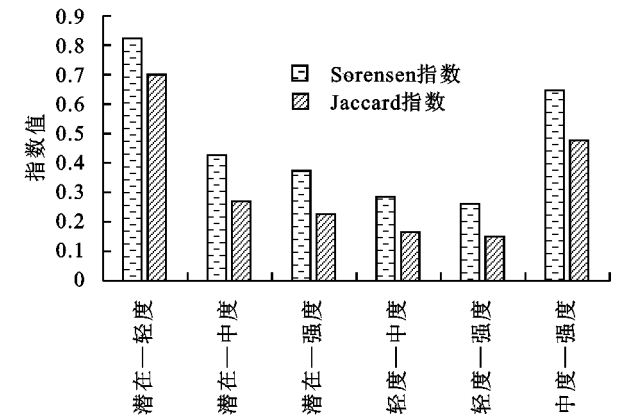


图 2 不同程度石漠化类型群落间 β 多样性指数比较

表 4 不同程度石漠化类型群落间 Cody 指数半矩阵

石漠化程度	轻度	中度	强度
潜在	4.5	13.5	13.5
轻度		15.0	14.0
中度			6.0

2.2 不同石漠化程度土壤物理性质

土壤物理性质研究结果(表 5)表明,土壤容重、土壤干密度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、总孔隙度、自然含水率、田间持水量、毛管持水量等土壤物理性质指标在鄂北地区不同等级石漠化环境土壤中有着显著差异。主要体现在:(1) 强度石漠化环境下土壤容重显著大于轻度和中度石漠化,达到了 1.42 g/cm³,并随着石漠化等级增加,土壤容重呈现逐渐增大的变化趋势。(2) 干密度指的是土的孔隙中完全没有水时的密度,是评定土体紧密程度的标准,本研究中强度石漠化环境中土壤干密度显著大于其他等级的石漠化环境,达到了 1.49 g/cm³,而潜在、轻度、中度石漠化土壤的干密度无显著差异性。(3) 毛管孔隙能借用毛管引力将水分保持在土壤中,所持水分为有效水,能被根系所吸收。轻度石漠化环境中土壤毛管孔隙度较高,达到 49.08%,其次分别为潜在石漠化和中度石漠化,强度石漠化等级中的土壤毛

管孔隙度最低。毛管孔隙度结合毛管持水量则可以间接反映出不同强度石漠化等级环境中土壤的紧实程度和土壤持有植被可吸收有效水分的能力,总体而言潜在和轻度石漠化环境由于生态系统植被较为丰富,土壤根系及微生物含量高,土壤有效持水

量较高。(4) 田间持水量是土壤不受地下水影响所能保持水量的最大值,中度石漠化的土壤田间持水量显著高于强度、轻度和潜在石漠化,且随着石漠化程度增加田间持水量和毛管持水量也呈现出先增加后减小的变化趋势。

表 5 不同程度石漠化类型土壤物理性质比较

石漠化等级	容重/ (g·cm ⁻³)	土壤干密度/ (g·cm ⁻³)	毛管孔隙度/%	非毛管孔隙度/%	总孔隙度/%	自然含水率/%	田间持水量/%	毛管持水量/%
潜在	1.34±0.08b	1.39±0.11b	45.09±3.89b	6.28±2.66a	51.37±1.84a	19.87±2.42c	24.88±3.82c	33.10±2.96b
轻度	1.32±0.11c	1.38±0.10b	49.08±2.55a	4.08±2.44b	53.16±1.28a	20.41±0.65bc	25.65±1.02c	37.19±2.83a
中度	1.34±0.08bc	1.38±0.14b	44.85±2.51b	1.29±0.82c	46.15±2.21b	25.34±1.78a	34.08±3.01a	35.08±3.31ab
强度	1.42±0.07a	1.49±0.06a	42.84±2.03b	1.16±0.45c	44.00±2.41b	22.44±1.20b	28.96±2.00b	30.30±2.85c

研究结果显示了鄂北岩溶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,而是在土壤结构方面呈现逐渐紧实,在持水量方面则是先增加后减小的趋势。

2.3 植物多样性与土壤物理性质分析

2.3.1 α多样性与物理性质相关性 研究结果(表 6)表明,鄂北岩溶石漠化环境中土壤物理性质与植物多样性因子存在相关性。(1) 物种丰富度与非毛

管孔隙度呈显著正相关($p<0.05$)。(2) Shannon-Wiener 多样性指数与非毛管孔隙度呈显著正相关。(3) Pielou 均匀度指数与毛管孔隙度呈显著正相关,与土壤容重呈不显著负相关。(4) Simpson 优势度指数与土壤干密度呈显著负相关,与土壤容重呈不显著负相关。可见,鄂北岩溶石漠化地区环境土壤的容重、干密度、孔隙度与区域植物多样性在一定程度上显著相关。

表 6 岩溶石漠化环境土壤物理性质与植物多样性相关性

土壤理化因子	丰富度	Shannon-Wiener 指数	Pielou 均匀度指数	Simpson 优势度指数
容重	-0.555	-0.544	-0.924	-0.816
土壤干密度	-0.482	-0.464	-0.834	-0.956 *
毛管孔隙度	0.495	0.508	0.974 *	0.511
非毛管孔隙度	0.961 *	0.971 *	0.559	0.623
总孔隙度	0.848	0.862	0.910	0.666
自然含水率	-0.663	-0.695	-0.415	-0.132
田间持水量	-0.642	-0.674	-0.403	-0.105
毛管持水量	0.412	0.408	0.930	0.671

注:* 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

2.3.2 基于植物多样性与土壤物理性质的主成分分析 基于植物 α多样性与土壤物理性质的主成分分析表(表 7)看出,主成分 1 的贡献率为 65.933%,主成分 2 的贡献率为 25.159%,累积贡献率达到 91.092%,基本保留了试验样地植物多样性指标和土壤物理性质指标的绝大部分信息,因此可以选取这两个主成分作为试验区主成分分析指标。

在主成分 1 中,总孔隙度、均匀度、多样性、丰富度、毛管孔隙度的权重值较高,均超过 0.300,说明主成分 1 主要反映了土壤总孔隙度、毛管孔隙度和植物均匀度、多样性、丰富度的值表征岩溶石漠化特征。主成分 2 中,田间持水量、自然含水率、干密度、毛管持水量因子的权重值较高,均大于 0.200,说明成分 2 主要反映出土壤田间持水量、自然含水率、干密度、毛管持水量因子的值表征石漠化特征。

表 7 基于植物 α多样性与土壤物理性质的主成分分析

特征类别	成分	
	1	2
总孔隙度	0.347	-0.056
均匀度	0.332	0.090
多样性	0.313	-0.124
丰富度	0.312	-0.115
毛管孔隙度	0.301	0.091
容重	-0.298	-0.194
优势度	0.288	0.093
非毛管孔隙度	0.287	-0.195
毛管持水量	0.276	0.210
干密度	-0.265	-0.233
自然含水率	-0.207	0.273
田间持水量	-0.201	0.275
初始特征值/%	7.912	3.019
贡献率/%	65.933	25.159
累积贡献率/%	65.933	91.092

3 讨论与结论

3.1 植被结构及多样性对石漠化程度的响应

从本文试验样地调查分析情况看,鄂北岩溶石漠化地区植被结构简单,中度、强度石漠化区乔木相对较少,以灌木林为主,而轻度石漠化区域物种丰富度较非岩溶地区乔木林地也有较大差距。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^[22]。随着石漠化程度加深,物种丰富度逐级降低,植物多样性演替趋势亦然,而单个物种优势度则是由于丰富度较少反倒越来越突出,中、强度石漠化的建群种在群落中生态影响力强于潜在和轻度石漠化。石漠化程度越高,植物形态特征越相近,本文研究区域铁仔、黄枹大量分布,忍冬科、豆科带刺灌木重要值较高,此类植物叶片革制或部分叶片木质化,较耐旱耐贫瘠,且在一定程度上能够避免野兽啃食,对群落繁衍生息有极大帮助。由此可见,石漠化地区植被群落结构明显有别于常规地带性植被分布^[23]。

鄂北岩溶石漠化地区不同程度石漠化环境中植物群落的丰富度、多样性指数同石漠化程度有着高度的耦合性,符合生态系统自然修复规律。由此得出,植物群落丰富度、多样性指数是评价石漠化区植物多样性评价的主要因子。

3.2 不同程度石漠化土壤物理性质的响应

土壤是地质、气候、植被等多种因素综合作用下形成的,并随着时间推移而不断变化^[14]。本研究结果显示,鄂北石漠化区域土壤容重、土壤干密度大体上随石漠化级别逐渐增大,强度石漠化达到最大,是由于石漠化区岩石的“二元三维^[24]”结构,地表流失、地下漏失,土壤养分流失严重,且植被枯落物少,养分循环周期长,留存下来的土壤容重增加、干密度大。现场调查时发现中、强度石漠化土壤质地粘重、土体紧实,与数据分析结果相符。

土壤物理性质在不同石漠化程度的变化趋势,应该是石漠化环境水土流失和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,水土流失作用减弱,相应土壤养分流失减少,同时由于植被多样性及植被结构的退化、建群种叶片木质化凋落物减少导致系统养分循环减弱,两个过程共同作用使得土壤退化呈现出逐渐趋于稳定的状态。

植物多样性和土壤物理性质的相关性分析结果显示,鄂北岩溶石漠化地区土壤的容重、干密度、孔隙度同环境植物多样性有显著相关性,土壤通透性较好的区域植物多样性均有较好的反馈,主要表现在物种

丰富度、Shannon-Wiener 多样性指数与非毛管孔隙度呈显著正相,均匀度指数与毛管孔隙度呈显著正相关,与土壤容重呈不显著负相关。原因是植物多样性影响土壤物理性质还是土壤物理性质决定植物多样性本文尚不能得出结论,因此石漠化区生态系统修复不单单只是考虑植物修复种类,应当结合土壤物理性质及生态化学计量特征综合考虑。

3.3 石漠化退化生态系统重建

研究结果同其他学者^[4]得出结论一致,认为石漠化环境植被群落结构性和多样性指标低,稳定性差。因此,原生性较强且人为干扰较弱群落应该保持现状,加强封禁管护,顺其自然发展;已受干扰的石漠化生态系统,合理评估林分天然更新及土壤种子库萌发能力,适当补充群落顶级或次顶级物种,同时加强人工促进天然更新能力,待生态系统稳固后则进行封禁管理。针对强度石漠化生态系统,现有的大部分研究成果均认为应当封禁管理,减少人为扰动,本文研究显示鄂北地区强度石漠化土壤物理性质较差、林分更新能力不足,是否可通过措施来改善表层土壤物理条件,并人为创造林分更新条件,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将是笔者下阶段探索的工作。

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] 宋同清,彭晚霞,杜虎,等.中国西南喀斯特石漠化时空演变特征、发生机制与调控对策[J].生态学报,2014,34(18):5328-5341.
- [3] Li Y B, Shao J A, 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.
- [4] 彭旭东,戴全厚,李昌兰.中国西南喀斯特坡地水土流失/漏失过程与机理研究进展[J].水土保持学报,2017, 31(5):1-8.
- [5] 岳坤前.中国南方典型石漠化区地下水水土流失防治技术初步研究与示范[D].贵阳:贵州师范大学,2016.
- [6] 徐欢,李美丽,梁海斌,等.退化森林生态系统评价指标体系研究进展[J].生态学报,2018,38(24):9034-9042.
- [7] 陶晶.云南哈巴雪山自然保护区生物多样性及保护研究[D].北京:中国林业科学研究院,2010.
- [8] 张玉娟.典型草原退化演替中植被—土壤特征变化及化感影响机制研究[D].北京:中国农业大学,2015.

- 的研究进展[J].农业工程学报,2016,32(6):1-10.
- [15] Adolwa I S, Schwarze S, Buerkert A. Impacts of integrated soil fertility management on yield and household income: The case of Tamale (Ghana) and Kakamega (Kenya)[J]. Ecological Economics, 2019,161:186-192.
- [16] Tian Z, Kool D, Ren T, et al. Approaches for estimating unsaturated soil hydraulic conductivities at various bulk densities with the extended Mualem-van Genuchten model[J]. Journal of Hydrology, 2019,572:719-731.
- [17] 张英虎,牛健植,朱蔚利,等.森林生态系统林木根系对优先流的影响[J].生态学报,2015,35(6):1788-1797.
- [18] 吕刚,傅昕阳,李叶鑫,等.露天煤矿排土场不同复垦植被土壤大孔隙特征[J].煤炭学报,2018,43(2):529-539.
- [19] Carrière S D, St-Paul N K M, Cakpo C B, et al. The role of deep vadose zone water in tree transpiration during drought periods in karst settings-Insights from isotopic tracing and leaf water potential[J]. Science of the Total Environment, 2019, 699,DOI:10.1016/j.scitotenv.2019.134332.
- [20] 曾强,徐则民,官琦,等.不同植被条件下斜坡土体大孔隙特征分析[J].岩石力学与工程学报,2016,35(S1):3343-3352.
- [21] 燕辉,刘广全,李红生.青杨人工林根系生物量、表面积和根长密度变化[J].应用生态学报,2010,21(11):2763-2768.
- [22] 陈硕芃,王韶仲,王政权,等.密度结构对大青川红松人工林细根生物量与根长密度的影响[J].森林工程,2013,29(4):1-7.
- [23] Green R D, Askew G P. Observations on the biological development of macropores in soils of Romney Marsh [J]. Journal of Soil Science, 1965,16(2):342-344.
- [24] Murphy C P, Banfield C F. Pore space variability in a sub-surface horizon of two soils[J]. Journal of Soil Science, 1978,29(2):156-166.
- [25] Ren L, Nest T V, Ruyschaert G, et al. Short-term effects of cover crops and tillage methods on soil physical properties and maize growth in a sandy loam soil [J]. Soil and Tillage Research, 2019,192:76-86.
- [26] 吴国鹏,谌文武,崔凯,等.冻融和干湿作用下表生板岩的劣化行为与机制[J].中南大学学报:自然科学版,2019,50(6):1392-1402.
- [27] Bogner C, Baltasar T Y W, Lange H. Characterising flow patterns in soils by feature extraction and multiple consensus clustering[J]. Ecological Informatics, 2013, 15:44-52.
- [28] 陈晓冰,张洪江,李世友,等.紫色砂岩区不同植被类型土壤优先流特征及其影响因素[J].中国水土保持科学,2014,12(6):42-49.
- [29] 孙龙,张洪江,程金花,等.柑橘林地优先路径分布及其影响因素[J].东北林业大学学报,2013,41(2):65-69.
- [30] 董宾芳.黄土丘陵区林地植物根系与土壤优势流关系研究[D].重庆:西南大学,2007.



(上接第 106 页)

- [9] 吕春花.黄土高原子午岭地区土壤质量对植被恢复过程的响应[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2009.
- [10] 赵清贺,徐珊珊,马丽娇,等.北江干流河岸带不同植被类型植物物种多样性分析[J].水土保持研究,2017,24(5):215-221.
- [11] 董旭杰,彭继庆,曹福祥,等.湘中、湘南石漠化地区植物多样性研究[J].中南林业科技大学学报,2015,35(12):102-107.
- [12] 严友进,戴全厚,伏文兵,等.喀斯特坡地裸露心土层产流产沙模拟研究[J].土壤学报,2017,54(3):545-557.
- [13] 郭红艳,万龙,唐夫凯,等.岩溶石漠化区植被恢复重建技术探讨[J].中国水土保持,2016(3):34-37,73.
- [14] 肖杰,熊康宁,顾再柯,等.喀斯特石漠化治理区土壤养分综合评价与对比:以贵州朝营和顶坛小流域为例[J].水土保持研究,2018,25(2):293-299.
- [15] 熊康宁.喀斯特石漠化的遥感:GIS 典型研究[M].北京:地质出版社,2002.
- [16] 方精云,王襄平,沈泽昊,等.植物群落清查的主要内容和规范[J].生物多样性,2009,17(6):533-548.
- [17] Whittaker R H. Evolution and measurement of species diversity[J]. Taxon, 1972,21(2/3),213-251.
- [18] Veech J A, Summerville K S, Crist T O, et al. The additive partitioning of species diversity: recent revival of an old idea[J]. Oikos, 2002,99(1),3-9.
- [19] Magurran A E. Ecological Diversity and Its Measurement[M]. New Jersey, USA: Princeton University Press, 1988.
- [20] 杜荣骞.生物统计学[M].3 版.北京:高等教育出版社,2009.
- [21] 李奇,朱建华,肖文发.生物多样性与生态系统服务:关系、权衡与管理[J].生态学报,2019,39(8):2655-2666.
- [22] 兰斯安,宋敏,曾馥平,等.木论喀斯特森林木本植物多样性垂直格局[J].生态学报,2016,36(22):7374-7383.
- [23] 黄宗胜,喻理飞,符裕红,等.退化喀斯特森林植被自然恢复中土壤有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 值特征[J].土壤学报,2015,52(2):345-354.
- [24] 戴全厚,严友进.西南喀斯特石漠化与水土流失研究进展[J].水土保持学报,2018,32(2):1-10.