

网络出版时间:2020-06-01 10:45 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2020.12.012
网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.s.20200529.0830.012.html>

黔西南石漠化演变过程中植被与土壤物理特征

文林琴, 栗忠飞, 黎明钰, 王兴永, 叶纬平

(西南林业大学 生态与环境学院, 云南 昆明 650224)

【摘 要】 【目的】研究石漠化区域植被群落及土壤物理特征,为石漠化脆弱生态环境综合治理及植被恢复重建提供重要依据。【方法】在黔西南石漠化典型区域,选取重度、中度、轻度 and 无石漠化 4 个等级的样地,测定样地中植被盖度与生物量,计算植物群落的生物多样性指数(多样性指数、丰富度指数、均匀度指数、优势度指数);采集 0~10,10~20,20~30 cm 土层的土样,测定土壤体积质量、含水量、田间持水量、毛管持水量、总孔隙度、毛管孔隙度;最后分析了 6 个土壤物理指标与植被盖度、生物量和生物多样性指数的相关性。【结果】1)随着石漠化程度的改善,草本生物量下降,灌木及乔木生物量均显著上升,植被总生物量和盖度均显著上升。2)随石漠化程度的改善,物种多样性指数、丰富度指数和均匀度指数均总体上升,其中无石漠化样地以上 3 个指标分别为 2.26,10.50 和 1.01,显著高于其他等级石漠化样地($P<0.05$);而重度石漠化样地优势度指数达 0.39,显著高于其他等级石漠化样地($P<0.05$)。3)随着石漠化程度的改善,土壤含水量、毛管持水量、田间持水量、土壤总孔隙度和毛管孔隙度平均值均增加,而土壤体积质量则下降。4)相关性分析结果表明,植被生物量、盖度分别与土壤体积质量呈显著和极显著负相关关系,与土壤含水量、毛管持水量、田间持水量、总孔隙度和毛管孔隙度均呈显著或极显著正相关关系。多样性指数、均匀度指数与土壤体积质量呈显著的负相关关系($P<0.05$),与田间持水量和总孔隙度呈显著的正相关关系($P<0.05$),与土壤含水量呈极显著的正相关关系($P<0.01$);优势度指数仅与毛管孔隙度呈显著的正相关关系($P<0.05$);而丰富度指数与各土壤物理指标间均无显著相关关系。【结论】贵州省黔西南州石漠化演变过程中,植被、土壤物理特征均产生了显著改变,地表植被的演进对土壤物理特性产生了较为明显的促进作用。

【关键词】 石漠化;植被群落;土壤物理特征;演变过程;黔西南

【中图分类号】 S154.4 【文献标志码】 A 【文章编号】 1671-9387(2020)12-0097-10

Characteristics of vegetation and soil physical properties in evolution processes of rocky desertification in Southwest Guizhou

WEN Linqin, LI Zhongfei, LI Mingyu, WANG Xingyong, YE Weiping

(College of Ecology and Environment, Southwest Forestry University, Kunming, Yunnan 650224, China)

Abstract: 【Objective】 The characteristics of vegetation and soil physical properties in rocky desertification areas were studied to provide basis for comprehensive management of fragile ecological environment and vegetation restoration and reconstruction. 【Method】 Four grades of severe, medium, slight and no rock desertification were selected in the typical rocky desertification area in southwest Guizhou. The vegetation coverage, biomass, biodiversity indexes (Shannon-Wiener index, richness index, evenness index and dominance index), and soil physical properties (soil water content, soil bulk density, field water capacity, capillary water holding capacity, total porosity, and capillary porosity in layers of 0—10, 10—20 and 20—30 cm) were measured respectively. Also, the correlations between soil physical properties and vegetation charac-

【收稿日期】 2019-12-03
【基金项目】 生态环境部生态保护红线专项;国家自然科学基金项目(21360122);国家重点研发计划项目(2016YFC0500205)
【作者简介】 文林琴(1993—),女,云南昭通人,在读硕士,主要从事环境生态学研究。E-mail:1398851903@qq.com
【通信作者】 栗忠飞(1976—),男,内蒙古乌海人,副教授,博士,硕士生导师,主要从事环境生态学研究。
E-mail:lizhongfei2016@163.com

teristics were analyzed. 【Result】 1) With the improvement of rocky desertification, biomass of surface herbage vegetation decreased, while biomass of shrubs and trees increased significantly and total biomass and vegetation coverage increased significantly. 2) Shannon-Wiener index, richness index and evenness index all increased, and reached to 2.26, 10.50 and 1.01 in no rocky desertification sample plots and were significantly higher than those at other grades ($P < 0.05$). While the dominance index was highest on severe rocky desertification sample plots ($P < 0.05$), which reached to 0.39. 3) The soil water content, capillary water capacity, field water capacity, total soil porosity and capillary porosity increased with the improvement of rocky desertification, while soil density decreased. 4) The results of correlation analysis showed that vegetation biomass and coverage had significant negative correlation with soil bulk density, and significant positive correlation with soil water content, capillary water capacity, field water capacity, total porosity and capillary porosity. Shannon-Wiener index and evenness index had significant negative correlation with soil bulk density ($P < 0.05$), significant positive correlation with field capacity and total porosity ($P < 0.05$), and extremely significant positive correlation with soil water content ($P < 0.01$). Dominance index had significant positive correlation with capillary porosity ($P < 0.05$). However, there was no significant correlation between richness index and soil physical properties. 【Conclusion】 The characteristics of vegetation and soil physical properties improved significantly in the process of rocky desertification evolution in Southwest Guizhou. The evolution of above-ground vegetation played significant role in promoting soil characteristics.

Key words: rocky desertification; vegetation community; soil physical characteristics; evolution process; Southwest Guizhou

石漠化是在热带、亚热带脆弱喀斯特环境下,受人类不合理干扰和破坏而造成的土壤严重侵蚀、基岩大面积裸露、土地生产力严重下降、地表出现类似荒漠景观的土地退化过程^[1]。在喀斯特地区水土流失使土壤肥力下降,养分流失,石漠化加重,最终使土地资源不能被利用^[2],严重影响了区域生态系统的安全^[3]。石漠化是我国西南喀斯特地区的一个重大生态问题,已严重制约其经济社会发展,而石漠化治理是我国社会经济建设中的一项重要内容^[4]。近年来,在喀斯特石漠化地区已实施了大量的综合治理工程,植被逐渐恢复,土壤物理特征得到了改变^[5]。因此,研究喀斯特区域石漠化演变过程中植被和土壤的变化规律与响应机制,可以及时掌握植被特征和土壤性质在不同石漠化等级环境中的变化规律,也为进一步开展石漠化脆弱生态环境综合治理提供科学依据和实践指导。

目前,一些学者对石漠化地区的植被和土壤进行了较多研究,并取得了一系列相关成果^[6-20],但多数研究集中在贵州省西北部区域内开展,很少涉及到黔西南州的研究,而黔西南州石漠化总体上呈现类型多样、面积大、范围广、程度重、治理难和石漠化仍在扩大等特点^[21]。目前,在黔西南州开展的相关研究主要包括石漠化区不同生态恢复模式土壤质量

评价^[22]、不同等级石漠化对土壤性质的响应^[23-24]、石漠化环境植被群落的变化^[25]等方面。这一系列研究尚未涉及植被群落生物量的变化,同时也缺乏植被与土壤物理特征间协同变化相关性的研究,因此仍然非常缺乏植被及土壤物理特征等方面的量化的数据支撑^[26-27],难以深入揭示石漠化综合治理的演变过程^[28-29],使得石漠化治理成效不明显,石漠化治理后存在生态系统结构与功能简单、稳定性差等问题^[30]。

贵州省是世界上岩溶地貌发育最典型的地区之一,是石漠化分布面积全国最大、类型最全、形成最强烈的高原山区^[31],而黔西南州是贵州省石漠化等级程度最严重、代表性最强、综合治理任务最艰巨的地区^[21,32]。本研究在贵州省黔西南州区域内,选取 4 个不同石漠化等级样地,从植被与土壤两个特征要素,分析石漠化过程的演变规律,为进一步开展石漠化区域生态监测及效益评价提供科学依据,为贵州省乃至西南地区生态保护和石漠化综合治理中的植被恢复重建提供理论支撑。

1 研究区概况

黔西南州地处滇黔桂三省(区)结合部,贵州省西南隅、云贵高原东南端($104^{\circ}35' - 106^{\circ}32' E$,

24°38′—26°11′N)。地貌类型属于典型的低纬度高海拔岩溶峡谷和峰丛洼地^[33],平均海拔 2 207.2 m。属亚热带季风湿润气候区,雨量充沛,雨热同期,年平均气温 13.8~19.4℃,年平均降水量 1 352.8 mm。区域内主要为红壤、黄壤、黄棕壤;主要植被类型为亚热带常绿阔叶林、亚热带落叶阔叶林、亚热带常绿与落叶阔叶混交林等。

2 研究方法

2.1 石漠化等级划分与样地的设置

2.1.1 石漠化等级的划分 结合野外样地调查,参照贵州省第二次石漠化监测细则的等级划分标准^[31],以及国家林业局制定的《岩溶地区石漠化监测技术规定(2011 年修订)》分类标准^[34]可知,研究区石漠化可划分为重度(Ⅳ)、中度(Ⅲ)、轻度(Ⅱ)和无石漠化(Ⅰ)4 个等级,在每个等级选择具代表性的 3 个样地(100 m×100 m),共计 12 个样地,样地主要分布在黔西南州兴义市、兴仁市、安龙县、贞丰县、望谟县及册亨县等地区。

2.1.2 样地概况 在研究区,无石漠化等级样地植被主要为乔灌木以及乔草复合型群落类型,轻度石

漠化等级样地以乔草群落为主,而中度和重度石漠化样地多为灌木植被群落,零星分布有乔木植被。无石漠化等级上,乔木优势物种有油杉(*Keteleeria fortunei*)、马尾松(*Pinus massoniana*)、槲栎(*Quercus aliena*)等,灌木优势种有豆梨(*Pyrus calleryana*)、女贞(*Ligustrum lucidum*)等,草本优势物种有芒(*Saccharum arundinaceum*)、牛尾蒿(*Artemisia dubia*)等。轻度石漠化等级样地乔木优势种为柏树(*Cupressus funebris*)、槲栎(*Q. aliena*)等,草本优势种有砂仁(*Amomum villosum*)、斑茅(*Saccharum arundinaceum*)、青蒿(*Artemisia carvifolia*)等。中度石漠化等级样地灌木优势种主要有车桑子(*Dodonaea viscosa*)和马缨丹(*Lantana camara*),草本优势种有五节芒(*Miscanthus floridulus*)、狗尾草(*Setaria viridis*)、芒萁(*Dicranopteris dichotoma*)等。重度石漠化等级样地灌木优势种主要为花椒(*Zanthoxylum bungeanum*),草本优势种有荩草(*Arthraxon hispidus*)、丝茅(*Imperata koenigii*)、乌毛蕨(*Blechnum orientale*)、芒萁(*Dicranopteris dichotoma*)等(表 1)。

表 1 黔西南州各等级石漠化样地的基本状况
Table 1 Distribution of sample plots in different rocky desertification grades in Southwest Guizhou

等级 Degree	群落类型 Community Type	样地位置 Site of Sample	优势种 Dominant Species
无石漠化(Ⅰ) No rock desertification	乔灌木 Tree, shrub and herb 乔草 Tree and herb	贞丰县 Zhenfeng 安龙县 Anlong 兴义市 Xingyi	油杉、马尾松、槲栎、豆梨、女贞、芒、牛尾蒿 <i>K. fortunei</i> , <i>P. massoniana</i> , <i>Q. aliena</i> , <i>P. calleryana</i> , <i>L. lucidum</i> , <i>S. arundinaceum</i> , <i>A. dubia</i>
轻度石漠化(Ⅱ) Slight rock desertification(Ⅱ)	乔草 Tree and herb	贞丰县 Zhenfeng 望谟县 Wangmo 兴仁市 Xingren	柏树、槲栎、砂仁、斑茅、青蒿 <i>C. funebris</i> , <i>Q. aliena</i> , <i>A. villosum</i> , <i>S. arundinaceum</i> , <i>A. carvifolia</i>
中度石漠化(Ⅲ) Medium rock desertification(Ⅲ)	乔草 Tree and herb 灌木 Shrub and herb	贞丰县 Zhenfeng 安龙县 Anlong 册亨县 Ceheng	车桑子、马缨丹、五节芒、狗尾草、芒萁 <i>D. viscosa</i> , <i>L. camara</i> , <i>M. floridulus</i> , <i>S. viridis</i> , <i>D. dichotoma</i>
重度石漠化(Ⅳ) Severe rock desertification(Ⅳ)	乔灌木 Tree, shrub and herb 灌木 Shrub and herb	贞丰县 Zhenfeng 兴仁市 Xingren 兴义市 Xingyi	花椒、荩草、丝茅、乌毛蕨、芒萁 <i>Z. bungeanum</i> , <i>A. hispidus</i> , <i>I. koenigii</i> , <i>B. orientale</i> , <i>D. dichotoma</i>

2.1.3 样地植被调查 于 2018 年 8 月,在选定的每个样地上,设置乔木(10 m×10 m)、灌木(5 m×5 m)、草本(1 m×1 m)样方各 3 个,调查记录样方植被盖度、生物量、物种、数量等。

(1)植被盖度与生物量。目视估测法记录乔木、灌木、草本样方植被盖度。草本生物量采用收割法测定,于 80℃下烘干 48 h 后称质量。灌木生物量依据灌木植株大小,按比例收割部分后,烘干后称质量计算。乔木生物量,调查乔木树种名称、胸径及树高,依据乔木生物量模型^[35]计算获得。

(2)生物多样性指数计算。基于上述样方调查,分别计算植被群落的 Shannon-Wiener 多样性指数

(以下简称多样性指数, H)、Pielou 均匀度指数(以下简称均匀度指数, E)、Patrick 丰富度指数(以下简称丰富度指数, R)和 Simpson 优势度指数(以下简称优势度指数, D)^[36-39],具体计算公式如下:

多样性指数: $H = - \sum_{i=1}^S (p_i \ln p_i)$,
均匀度指数: $E = H / \ln S$,
丰富度指数: $R = S$,
优势度指数: $D = 1 - \sum_{i=1}^S p_i^2$ 。

式中: S 为群落中物种总数; p_i 为物种 i 的个体总数占样方群落中总个体数的比例,即 $p_i = n_i / N$,其中 n_i 为物种 i 的个体总数, N 为群落中的个体总数。

2.1.4 土壤样品的采集及其物理性状测定 在上述设置的每个样地上,挖取一个 30 cm 深的土壤剖面,分别用环刀和铝盒采集 0~10,10~20,20~30 cm 土层的土样,每层采集 3 个样品,同时用布袋在每层采集一份混合样品,带回实验室后测定土样的体积质量、土壤含水量、田间持水量、毛管持水量、总孔隙度和毛管孔隙度,以上指标测定方法见文献[40]。

2.2 数据处理与分析

数据应用 SPSS 25.0 软件进行单因素方差分析(One-Way ANOVA)和皮尔逊(Pearson)相关性分析。

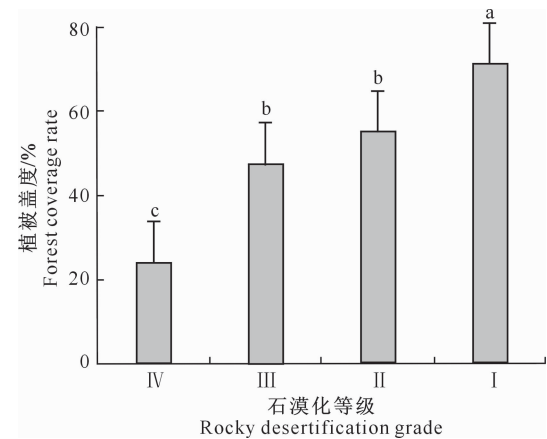
3 结果与分析

3.1 黔西南州不同等级石漠化样地的植被特征

3.1.1 植被盖度和生物量 图 1 显示,随着石漠化状况的改善,植被盖度增加。重度石漠化样地植被盖度为 23.8%,显著低于其他等级($P<0.05$);无石漠化等级样地植被盖度最高,达到 71.3%。

表 2 显示,草本生物量随着石漠化状况的改善而下降,而灌木、乔木和总生物量正好呈现相反变化特征。在无石漠化样地中,乔木生物量达到了 59.93

kg/m²,而在重度石漠化样地中仅为 4.87 kg/m²。重度石漠化样地中植被总生物量为 6.05 kg/m²,明显低于其他等级;无石漠化样地中植被总生物量较高,达到了 62.44 kg/m²。



图柱上标不同小写字母表示不同等级石漠化样地间差异显著($P<0.05$)。下图同
Different lowercase letters represent significant difference at $P<0.05$ level between different levels of rocky desertification. The same below

图 1 黔西南州不同等级石漠化样地的植被盖度
Fig. 1 Vegetation coverage of different rocky desertification grades in Southwest Guizhou

Table 2 Vegetation biomass of different rocky desertification grades in Southwest Guizhou kg/m ²				
石漠化等级 Degree of rocky desertification	生物量 Biomass			
	乔木 Arbor	灌木 Shrub	草本 Herb	总生物量 Total biomass
I	59.93±8.93 a	2.45±0.15 a	0.06±0.01 b	62.44±5.49 a
II	32.05±5.29 b	0.00	0.08±0.01 b	32.13±2.61 b
III	17.70±0.84 c	0.26±0.01 b	0.11±0.04 ab	18.08±2.19 c
IV	4.87±1.95 d	0.84±0.93 b	0.34±0.07 a	6.05±1.59 d

注:同列数据后标不同小写字母表示不同等级石漠化样地间差异显著($P<0.05$)。
Note: Different lowercase letters represent significant difference at $P<0.05$ level between different levels of rocky desertification.

3.1.2 生物多样性指数 图 2 显示,各等级石漠化样地植被群落的 H' 和 R' 分别为 1.54~2.26 和 5.50~10.50,随石漠化程度的改善呈现先增加后减小再增加的变化趋势。其中,无石漠化样地植被群落 H' 和 R' 分别达到 2.26 和 10.50,显著高于其他等级石漠化样地($P<0.05$)。

随石漠化程度的改善, E' 上升,无石漠化和轻度石漠化样地植被群落 E' 分别达到 1.01 和 0.98,显著高于中度和重度石漠化样地(图 2)。

不同等级石漠化样地 D' 为 0.31~0.39,其中,重度石漠化样地的 D' 达到 0.39,显著高于其他等级样地,其次是无石漠化样地(0.36),中度与轻度石漠化样地间差异不显著,均为 0.31,说明植被群落物种数量分布在重度石漠化环境最不均匀(图 2)。

3.2 黔西南州不同等级石漠化样地的土壤物理特征

表 3 显示,随石漠化程度的改善,土壤含水量、毛管持水量、田间持水量、总孔隙度和毛管孔隙度均呈现上升趋势,与重度石漠化样地相比,无石漠化样地以上指标平均值分别上升了 16.9%,21.5%,18.0%,9.2%和 5.5%。其中无石漠化样地土壤含水量显著大于中度和重度石漠化样地,无石漠化和轻度石漠化样地的毛管持水量和总孔隙度显著大于重度石漠化样地,无石漠化样地的田间持水量和毛管孔隙度显著大于重度石漠化样地($P<0.05$)。土壤体积质量随石漠化程度的改善而下降,其中重度石漠化样地的体积质量平均值为 1.31 g/cm³,显著高于其他石漠化等级样地($P<0.05$)。

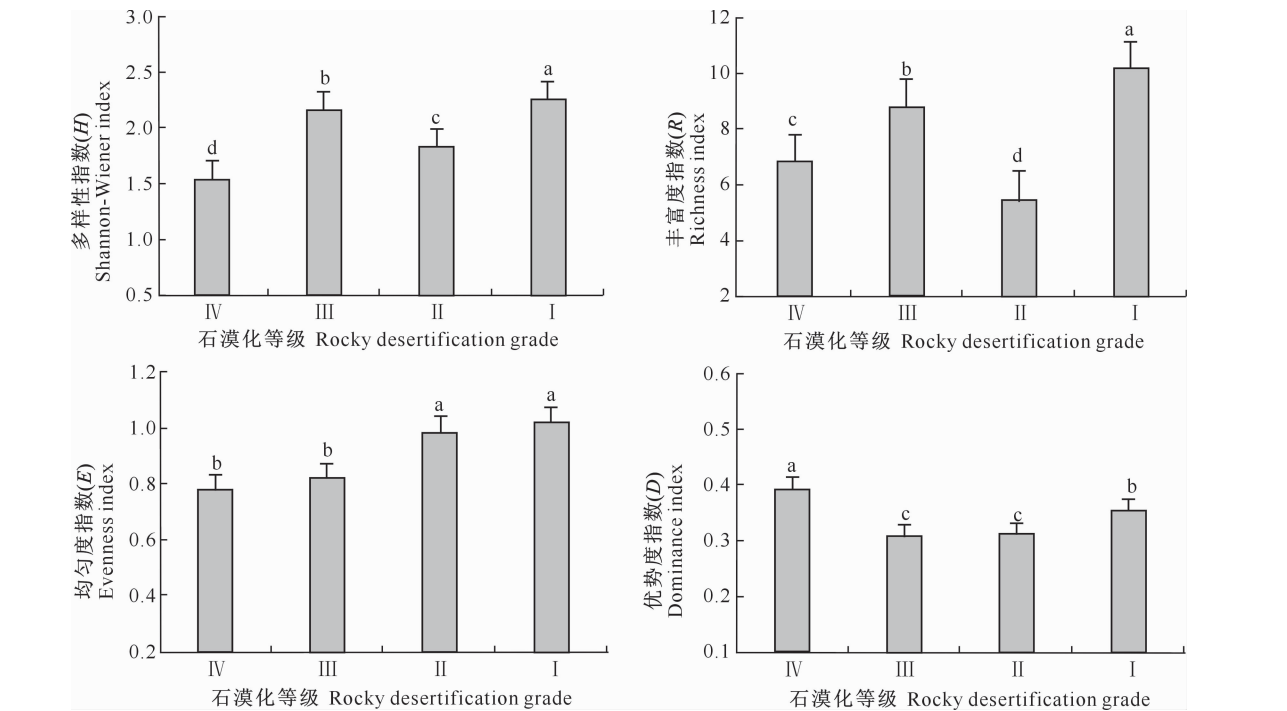


图 2 黔西南州不同等级石漠化样地的植被群落的物种多样性指数

Fig. 2 Species diversity index of vegetation community of different rocky desertification grades in Southwest Guizhou

表 3 黔西南州不同等级石漠化样地土壤物理性质的比较

Table 3 Comparison of soil physical properties among different degrees of rocky desertification surroundings in Southwest Guizhou					
指标 Index	土层/cm Soil layers	石漠化等级 Degree of rocky desertification			
		I	II	III	IV
体积质量/(g·cm ⁻³) Soil bulk density	0~10	1.15±0.01 b	1.18±0.05 b	1.25±0.02 a	1.29±0.06 a
	10~20	1.21±0.11 b	1.23±0.02 b	1.25±0.10 ab	1.28±0.08 a
	20~30	1.23±0.02 b	1.28±0.11 ab	1.28±0.04 ab	1.38±0.06 a
	平均值 Mean	1.20±0.08 b	1.23±0.13 b	1.26±0.07 b	1.31±0.10 a
土壤含水量/% Soil water content	0~10	28.99±2.68 a	27.32±1.13 ab	23.21±2.08 b	22.41±0.15 b
	10~20	26.29±2.09 a	24.75±0.48 b	23.34±1.54 b	22.49±2.02 b
	20~30	24.35±2.48 a	23.56±0.96 b	23.48±0.27 b	23.21±1.64 b
	平均值 Mean	26.54±3.38 a	25.21±1.98 ab	23.35±1.88 b	22.70±1.24 b
毛管持水量/% Capillary capacity	0~10	41.51±3.46 ab	46.11±2.13 a	38.64±3.28 ab	33.24±1.63 b
	10~20	41.21±5.31 a	32.12±3.23 b	42.12±1.77 a	30.23±3.56 b
	20~30	32.76±7.74 b	36.48±5.52 a	29.84±2.51 b	29.73±0.68 b
	平均值 Mean	38.50±2.05 a	38.24±1.81 a	36.87±1.68 ab	31.07±0.89 b
田间持水量/% Field capacity	0~10	36.32±3.40 b	41.04±2.22 a	37.16±2.96 b	34.32±1.65 c
	10~20	36.96±4.73 ab	36.13±3.91 ab	37.06±1.09 a	31.84±3.68 b
	20~30	29.81±3.20 a	26.64±4.63 b	26.47±2.43 b	24.94±1.92 c
	平均值 Mean	35.83±7.89 a	34.93±7.92 ab	33.90±6.41 ab	30.36±3.34 b
总孔隙度/% Total porosity	0~10	56.57±0.39 a	56.21±2.04 a	53.01±0.83 b	51.17±2.12 bc
	10~20	54.45±4.15 a	53.05±0.01 ab	52.94±3.60 ab	49.88±5.16 b
	20~30	53.49±0.61 a	53.24±3.98 a	51.57±1.49 b	49.54±4.80 b
	平均值 Mean	54.84±3.01 a	54.17±5.03 a	52.51±2.62 ab	50.20±3.91 b
毛管孔隙度/% Capillary porosity	0~10	46.61±4.32 a	46.41±4.49 a	45.10±0.08 ab	44.24±0.19 b
	10~20	40.51±1.43 ab	38.56±5.08 b	43.66±5.17 a	43.07±3.22 a
	20~30	39.11±2.12 a	39.85±2.07 a	33.88±3.53 b	32.27±2.73 b
	平均值 Mean	42.07±1.95 a	41.61±1.03 ab	40.88±2.54 ab	39.86±1.30 b

注:同行数据后标不同小写字母表示不同等级石漠化样地间差异显著(P<0.05)。
Note: Different lowercase letters represent significant difference at P<0.05 level between different levels of rocky desertification.

表 3 显示,在同一等级的石漠化样地中,随着土层深度的增加,土壤含水量、毛管持水量、田间持水量、总孔隙度和毛管孔隙度总体呈下降趋势;而土壤体积质量呈相反变化趋势,即总体呈增加趋势。

3.3 黔西南州不同等级石漠化样地土壤物理特征与植被参数间的相关性

表 4 显示,植被生物量与土壤体积质量呈显著的负相关关系($P<0.05$),与土壤含水量和毛管持水量、田间持水量、总孔隙度和毛管孔隙度呈显著或极显著的正相关关系。植被盖度与土壤体积质量呈

极显著负相关关系($P<0.01$),与土壤含水量、毛管孔隙度、毛管持水量、田间持水量和总孔隙度呈显著或极显著正相关关系。

表 4 还显示,生物多样性指数中,多样性指数、均匀度指数与土壤体积质量均呈显著的负相关关系($P<0.05$),与田间持水量和总孔隙度呈显著的正相关关系($P<0.05$),与土壤含水量呈极显著的正相关关系($P<0.01$)(表 3)。优势度指数仅与毛管孔隙度呈显著的正相关关系($P<0.05$),而丰富度指数与各土壤物理特征间均无显著的相关关系。

表 4 黔西南州不同等级石漠化样地土壤物理特征与植被参数间的相关性

Table 4 Correlation between soil physical characteristics and vegetation parameters in Southwest Guizhou

指标 Index	植被生物量 Vegetation biomass	植被盖度 Vegetation coverage	多样性指数 Shannon-Wiener index	优势度指数 Dominance index	丰富度指数 Richness index	均匀度指数 Evenness index
土壤含水量 Soil moisture content	0.924 **	0.821 *	0.497 **	0.338	0.510	0.846 **
土壤体积质量 Soil bulk density	-0.770 *	-0.924 **	-0.763 *	0.155	-0.554	-0.700 *
毛管持水量 Capillary moisture content	0.801 **	0.834 **	0.623	0.295	0.562	0.718 *
田间持水量 Field moisture content	0.764 *	0.838 **	0.689 *	0.166	0.567	0.726 *
总孔隙度 Total porosity	0.770 *	0.924 **	0.763 *	-0.155	0.554	0.700 *
毛管孔隙度 Capillary porosity	0.679 *	0.609 *	0.492	0.382 *	0.467	0.761 *

注: * 表示显著相关($P<0.05$), ** 表示极显著相关($P<0.01$)。
Note: * means significant correlation ($P<0.05$), ** means significant correlation ($P<0.01$).

4 讨 论

4.1 不同等级石漠化样地的植被特征及其响应

石漠化的发生是以植被破坏为先导,主要表现为植物种类和数量减少,生物量和植被覆盖度降低,群落结构趋向单一^[7]。本研究中,随着石漠化程度的改善,植被生物量和植被盖度均明显增加。这是由于近年来,贵州省黔西南州大力实施封山育林、人工造林等综合治理措施,同时配套小型水利水保工程等石漠化综合治理工程,故植被生长状况呈现持续向好特征^[41-42]。本研究中,随着石漠化程度的改善,群落乔木、灌木物种增加,森林郁闭度提高,致使地表草本植被生长受到抑制,故草本生物量和盖度均出现了下降。然而草本植被的下降,在一定程度上并不完全有利于石漠化地表土壤特征的改善。因此,在石漠化治理过程中,维持一定的森林郁闭度及地表草本植被的覆盖度,更有利于石漠化的综合治理。

4.2 不同等级石漠化样地的物种多样性特征

物种多样性是衡量植被群落结构与功能复杂性的重要指标,植被演替过程中物种多样性的变化反

映了植被的恢复程度^[43]。物种多样性指数能够定量地反映生物群落内物种多样性程度,丰富度指数能反映了群落中物种数目的多寡^[44];优势度指数值越大,表示优势物种越小,奇异度越高;而均匀度指数反映群落中物种分布的均匀程度^[39]。本研究中,各等级石漠化样地 4 个植被群落多样性指数总体上均偏低。其中,物种多样性和丰富度指数随石漠化程度的改善呈先增加后减小再增加的变化特征,这与李瑞等^[13]和温培才等^[15]的研究结果较为一致。一方面是因为随着石漠化综合治理工程的推进,植被群落正向演替,物种多样性增加,而在群落演替的后期,受优势种增加的影响,多样性指数反而会降低^[45];另一方面,中度石漠化样地多为灌草地,有利于草本植被生长,故草本层多样性较高,而轻度石漠化样地为次生乔木林,乔木层郁闭度高,限制了地表草本的生长。

本研究中,中度和轻度石漠化样地植被群落优势度指数均最小,重度石漠化样地最大。这是由于重度石漠化地区岩石裸露率高,土层浅薄,土壤稀少而干燥,绝大多数植被难以适生^[46],故其物种单一,优势度较明显^[32]。本研究中,植被群落均匀度指数

随石漠化程度的改善而增加,与盛茂银等^[8]和李瑞等^[13]的研究结果较为一致。表明随着石漠化程度的改善,植被群落分布越来越均匀。

4.3 不同等级石漠化样地的土壤物理特征及其响应

土壤体积质量与土壤孔隙度、黏粒含量、结构状况等均密切相关^[47-48]。本研究中,土壤体积质量随着石漠化程度的改善而下降。一般而言,石漠化强度越大,土壤有机质含量越低^[49],粗粒含量越高,细小颗粒含量越低^[10],随着石漠化程度的改善,土壤有机质和细小颗粒含量增加,土壤质地变得疏松,故土壤体积质量降低。可知改良土壤体积质量是改善石漠化地区土壤结构的一个关键问题。

土壤孔隙度是反映土壤通透性的重要指标^[50],直接影响土壤中的水分状况和通气透水性^[51]。土壤含水量的多少,会影响土壤的适耕性和植物的生长发育^[52]。本研究中,土壤孔隙度、土壤含水量、田间持水量、毛管持水量均随石漠化程度的改善而上升,这与前人研究结果^[23,53]类似。贵州省在石漠化综合治理过程中,对无石漠化和轻度石漠化地区进行了“坡改梯”工程^[32],使得地表径流对土壤冲刷能力降低,土壤保水能力增加,从而使以上土壤物理特征得到了改善。

4.4 喀斯特石漠化样地土壤物理特征与植被参数之间的相关性

植被和土壤系统是不可分割的整体,其相互作用是维持生态系统平衡的重要机理,也是石漠化综合治理的重要路径之一^[54]。在一定程度上,植物群落的正向演替是土壤物理性能不断改善、养分不断积累的过程^[50]。本研究中,植物群落的植被生物量、盖度、多样性指数、均匀度指数与土壤体积质量呈显著或极显著负相关关系,与土壤含水量、毛管持水量、田间持水量、总孔隙度、毛管孔隙度呈显著或极显著正相关关系,说明随着石漠化程度的改善,不但植物群落的结构和功能发生了改善,而且土壤环境因子也得到不断改善。植被的正向演替在促进群落物种多样性增加的同时,也改善了植被赖以生存的土壤环境^[55]。

石漠化严重的土壤环境对其植被物种的分布具有显著的胁迫作用^[8,13],本研究中,从石漠化样地植被优势种可以看出,绝大多数物种所属科属较为单一,且同一物种对不同石漠化程度的适应性也具有明显差异,只有少数根系发达、耐干旱瘠薄的物种对石漠化环境有较强的适应性,例如常作为石漠化综

合治理植被恢复的先锋物种刺槐(*Robinia pseud-oacacia*)、清香木(*Pistacia weinmannifolia*)、车桑子等^[56]。因此,在石漠化治理过程中,应根据不同石漠化程度土壤性质的差异,严格遵循“生态优先、因地制宜”的原则,选取不同植物物种组合,尽可能地选择耐干旱瘠薄、喜钙、喜光、岩生、速生、适应范围广的乔木、灌木和草本作为先锋物种,快速提高植被群落的稳定性和物种多样性。

5 结 论

随石漠化程度的改善,黔西南州地表植被生物量和植被盖度均明显增加,但随着森林郁闭度的提高,草本生物量和盖度反而下降,因此在石漠化治理过程中,维持一定的乔木冠层郁闭度的抚育管理尤为重要。石漠化环境中植被群落多样性偏低,说明石漠化环境生态系统稳定性较差,因此在石漠化治理中,保持原生性较强的植被,引进更多的适生物种,促进物种组成均匀分布,提高物种多样性是促进植被恢复的关键途径之一。土壤物理特性与植被参数高度相关,地表植被的演进对土壤属性的改善具有显著的促进作用,表明在贵州省石漠化治理过程中,乡土适生植被群落的发展对石漠化土壤环境也起到了同步增效的作用,在整个生态系统各要素间表现出协同一致的石漠化治理成效。

志谢:感谢黔西南州兴义市、贞丰县、望谟县、兴仁市及安龙县林业与草原局、生态环境局在调研期间给予的支持!

[参考文献]

[1] 李阳兵,侯建筠,谢德体. 中国西南岩溶生态研究进展 [J]. 地理科学,2002,22(3):365-370.
Li Y B,Hou J J,Xie D T. The recent development of research on karst ecology in Southwest China [J]. Scientia Geographica Sinica,2002,22(3):365-370.

[2] 袁 春,周常萍,童立强,等. 贵州土地石漠化的形成原因及其治理对策 [J]. 现代地质,2003(2):181-185.
Yuan C,Zhou C P,Tong L Q,et al. The causes and tackle countermeasures of land rocky-desertification in Guizhou Province [J]. Geoscience,2003(2):181-185.

[3] 但新球,贺东北,吴协保,等. 中国岩溶地区生态特征与石漠化危害探讨 [J]. 中南林业调查规划,2018,37(1):62-66.
Dan X Q,He D B,Wu X B,et al. Ecological characteristics of karst areas in china and the hazard of rocky desertification [J]. Central South Forest Inventory and Planning,2018,37(1):62-66.

[4] 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.
- [5] 龙 健, 李 娟, 汪境仁, 等. 典型喀斯特地区石漠化演变过程对土壤质量性状的影响 [J]. *水土保持学报*, 2006(2): 77-81.
Long J, Li J, Wang J R, et al. Effects on soil quality properties in process of karst rocky desertification [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006(2): 77-81.
- [6] 司 彬, 姚小华, 任华东, 等. 滇东喀斯特植被恢复演替过程中物种多样性研究 [J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2009, 31(1): 132-139.
Si B, Yao X H, Ren H D, et al. Species diversity in the process of vegetation succession in the karst area in eastern Yunnan [J]. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2009, 31(1): 132-139.
- [7] 黄金国, 魏兴琥, 王兮之, 等. 粤北典型岩溶区石漠化过程中植被退化对土壤有机质和养分含量的影响 [J]. *中国土壤与肥料*, 2014(1): 15-18.
Huang J G, Wei X H, Wang X Z, et al. Effect of vegetation degradation on soil organic matter and nutrient in process of rocky desertification in typical karst area of Northern Guangdong [J]. *Soil and Fertilizer in China*, 2014(1): 15-18.
- [8] 盛茂银, 熊康宁, 崔高仰, 等. 贵州喀斯特石漠化地区植物多样性与土壤理化性质 [J]. *生态学报*, 2015, 35(2): 434-448.
Sheng M Y, Xiong K N, Cui G Y, et al. Plant diversity and soil physical-chemical properties in karst rocky desertification ecosystem of Guizhou, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(2): 434-448.
- [9] 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.
Sheng M Y, Liu Y, Xiong K N. Response of soil physical-chemical properties to rocky desertification succession in South China Karst [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(19): 6303-6313.
- [10] 景宜然, 邓湘雯, 邓东华, 等. 湘西南不同石漠化程度土壤理化性质及相关性分析 [J]. *水土保持学报*, 2016, 30(1): 189-195.
Jing Y R, Deng X W, Deng D H, et al. Soil properties and their correlations under different grades of rocky desertification ecosystems in southwest Hunan, China [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(1): 189-195.
- [11] 崔高仰, 容 丽, 李晓东, 等. 喀斯特高原峡谷石漠化治理过程中土壤理化性质的变化 [J]. *生态学杂志*, 2017, 36(5): 1188-1197.
Cui G Y, Rong L, Li X D, et al. Changes of soil physicochemical properties during rocky desertification control in karst mountain-canyon region [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, 36(5): 1188-1197.
- [12] 王金乐, 林昌虎, 何腾兵, 等. 贵州西部石漠化地区不同生态模式土壤理化指标的变异 [J]. *贵州农业科学*, 2012, 40(6): 131-133.
Wang J L, Lin C H, He T B, et al. Research on the variation of edaphic physicochemical indexes of western rocky desertification region under different ecological styles in Guizhou [J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2012, 40(6): 131-133.
- [13] 李 瑞, 王霖娇, 盛茂银, 等. 喀斯特石漠化演替中植物多样性及其与土壤理化性质的关系 [J]. *水土保持研究*, 2016, 23(5): 111-119.
Li R, Wang L J, Sheng M Y, et al. Plant species diversity and its relationship with soil properties in karst rocky desertification succession [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016, 23(5): 111-119.
- [14] 汪 攀, 王霖娇, 盛茂银. 西南喀斯特石漠化生态系统植物多样性、土壤生态化学计量特征及其相关性分析 [J]. *南方农业学报*, 2018, 49(10): 1959-1969.
Wang P, Wang L J, Mao S Y. Plant diversity, ecological stoichiometry characteristics of soils and their correlation of the karst rocky desertification ecosystem in Southwestern China [J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2018, 49(10): 1959-1969.
- [15] 温培才, 王霖娇, 盛茂银. 西南喀斯特高原峡谷石漠化生态系统植物群落特征及其与土壤理化性质的关系 [J]. *四川农业大学学报*, 2018, 36(2): 175-184.
Wen P C, Wang L J, Sheng M Y. Characteristics of plant community and its relationships with soil physico-chemical properties in the rocky desertification ecosystem of karst plateau canyon, Southwest China [J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2018, 36(2): 175-184.
- [16] 尹 辉. 我国西南典型喀斯特峰丛洼地土壤理化特征研究 [D]. 北京: 中国地质科学院, 2012.
Yin H. Research on soil physical and chemical properties in typical karst cluster-peak depression areas of Southwest China [D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2012.
- [17] 王霖娇, 李 瑞, 盛茂银. 典型喀斯特石漠化生态系统土壤有机碳时空分布格局及其与环境的相关性 [J]. *生态学报*, 2017, 37(5): 1367-1378.
Wang L J, Li R, Sheng M Y. Distribution of soil organic carbon related to environmental factors in typical rocky desertification ecosystems [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(5): 1367-1378.
- [18] 魏 媛, 吴长勇, 孙 云, 等. 不同树种配置模式对喀斯特山地土壤理化性质的影响 [J]. *贵州农业科学*, 2014, 42(9): 81-85.
Wei Y, Wu C Y, Sun Y, et al. Effects of different configuration modes of tree species on physical and chemical properties of soil in karst mountainous area [J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2014, 42(9): 81-85.
- [19] 卢晓强, 杨万霞, 奚月明, 等. 喀斯特地区不同植被恢复类型对土壤化学及微生物生物量的影响 [J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2015, 39(5): 73-80.
Lu X Q, Yang W X, Xi Y M, et al. Effects of different vegetation recovery types on soil chemical and microbial biomass properties in Maolan Karst region [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2015, 39(5): 73-80.
- [20] 罗东辉, 夏 婧, 袁婧薇, 等. 我国西南山地喀斯特植被的根系生物量初探 [J]. *植物生态学报*, 2010, 34(5): 611-618.
Luo D H, Xia J, Yuan J W, et al. Root biomass of karst vegetation in a mountainous area of Southwestern China [J]. *Chi-*

- nese Journal of Plant Ecology, 2010, 34(5): 611-618.
- [21] 常 金. 黔西南州岩溶地区石漠化综合治理措施及问题分析 [J]. 农家参谋, 2018(14): 238.
- Chang J. Comprehensive control measures and problem analysis of rocky desertification in karst area of Southwest Guizhou [J]. The Farmers Consultant, 2018(14): 238.
- [22] 孙 建, 刘子琦, 朱大运, 等. 石漠化治理区不同生态恢复模式土壤质量评价 [J]. 水土保持研究, 2019, 26(5): 222-228.
- Sun J, Liu Z Q, Zhu D Y, et al. Evaluation on soil qualities of different ecological restoration models in rocky desertification control area [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(5): 222-228.
- [23] 颜 萍, 熊康宁, 王恒松, 等. 喀斯特地区不同等级石漠化对土壤性质的响应 [J]. 南方农业学报, 2016, 47(4): 557-563.
- Yan P, Xion K N, Wang H S, et al. Response of soil properties to different grades of rocky desertification in karst area [J]. Journal of Southern Agriculture, 2016, 47(4): 557-563.
- [24] 舒 田, 熊康宁, 陈丽莎, 等. 石漠化治理土壤有机质和全氮含量的变异特征 [J]. 西南农业学报, 2019, 32(6): 1323-1329.
- Shu T, Xiong K N, Chen L S, et al. Variation characteristics of soil organic matter and total nitrogen under rocky desertification control [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2019, 32(6): 1323-1329.
- [25] 古书鸿, 谷晓平, 严小冬, 等. 贵州喀斯特石漠化植被群落调查及其成因探讨 [J]. 贵州气象, 2008(1): 9-11.
- Gu S H, Gu X P, Yan X D, et al. Investigation of vegetation communities in karst rocky desertification in Guizhou and discussion on their causes [J]. Journal of Guizhou Meteorology, 2008(1): 9-11.
- [26] Duncan G R. Biodiversity: endangered and in demand [J]. Nature, 2011, 480(7378): S101.
- [27] Midgley G F. Biodiversity and ecosystem function [J]. Science, 2012, 335(6065): 174-175.
- [28] 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 [J]. 植物生态学报, 2011, 35(10): 991-999.
- Guo K, Liu C C, Dong M. Ecological adaptation of plants and control of rocky-desertification on karst region of Southwest China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2011, 35(10): 991-999.
- [29] 熊康宁, 陈永毕, 陈 沂. 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: 125-139.
- Xiong K N, Chen Y B, Chen H. Gold formation from spot stone: technology and model of stone desertification control in Guizhou [M]. Guiyang: Guizhou Science and Technology Publishing House, 2011: 125-139.
- [30] Du Y X, Pan G X, Li L Q, 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.
- [31] 贵州省林业厅. 贵州省石漠化状况公报 [N]. 贵州日报, 2012-06-27(10).
- Guizhou Provincial Forestry Department. Bulletin on the status of rocky desertification in Guizhou Province [N]. Guizhou Daily, 2012-06-27(10).
- [32] 杜文鹏, 闫慧敏, 甄 霖, 等. 西南岩溶地区石漠化综合治理研究 [J]. 生态学报, 2019, 39(16): 5798-5808.
- Du W P, Yan H M, Zhen L, et al. The experience and practice of desertification control in karst region of Southwest China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(16): 5798-5808.
- [33] 袁道先. 西南岩溶石山地区重大环境地质问题及对策研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- Yuan D X. Major environmental geological problems and countermeasures in karst mountain area of Southwest China [M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [34] 但新球, 屠志方, 李梦先, 等. 岩溶地区石漠化现状分析: 待续 [J]. 中南林业调查规划, 2013, 32(1): 59-62.
- Dan X Q, Tu Z F, Li M X, et al. The analysis of present situation of rocky desertification in karst areas [J]. Central South Forest Inventory and Planning, 2013, 32(1): 59-62.
- [35] 罗云建, 王效科, 逯 非. 中国主要林木生物量模型手册 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2015.
- Luo Y J, Wang X K, Lu F. Comprehensive database of biomass regressions for China's tree species [M]. Beijing: China Forestry Press, 2015.
- [36] Whittaker R H. Evolution and measurement of species diversity [J]. Taxon, 1972, 21(2/3): 213-251.
- [37] Pielou E C. Ecological diversity [M]. New York: John Wiley & Sons, 1975.
- [38] 张金屯. 植被数量生态学方法 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1995.
- Zhang J T. Methods in vegetation quantitative ecology [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 1995.
- [39] 栗忠飞, 高吉喜. 生物多样性评估方法的综述与评价 [J]. 中国发展, 2018, 18(2): 1-13.
- Li Z F, Gao J X. A review on assessment methods of biodiversity [J]. China Development, 2018, 18(2): 1-13.
- [40] 马雪华. 森林生态系统定位研究方法 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1994.
- Ma X H. Methodological guidelines for forest ecosystem location research [M]. Beijing: Chinese Science and Technology Press, 1994.
- [41] 吴 鹏, 朱 军, 崔迎春, 等. 喀斯特地区石漠化综合治理生态效益指标体系构建及评价: 以杠寨小流域为例 [J]. 中南林业科技大学学报, 2014, 34(10): 95-101, 106.
- Wu P, Zhu J, Cui Y C, et al. Construction of eco-efficiency index system for preventing and controlling rocky desertification in Gangzhai karst small watershed, Kaiyang, Guizhou and system evaluation [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2014, 34(10): 95-101, 106.
- [42] 肖 华, 熊康宁, 张 浩, 等. 喀斯特石漠化治理模式研究进展 [J]. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(S1): 330-334.
- Xiao H, Xiong K N, Zhang H, et al. Research progress for karst rocky desertification control models [J]. China Population, Resources and Environment, 2014, 24(S1): 330-334.

- [43] 郭道宇,张金屯,宫辉力,等. 安太堡矿区复垦地植被恢复过程多样性变化 [J]. 生态学报,2005(4):763-770.
Guo X Y,Zhang J T,Gong H L,et al. Analysis of changes of the species diversity in the process of vegetation restoration in Antaibao mining field,China [J]. Acta Ecologica Sinica,2005 (4):763-770.
- [44] 钱迎倩,马克平. 生物多样性研究的原理与方法 [M]. 北京: 中国科学技术出版社,1994.
Qian Y Q,Ma K P. Principles and methodologies of biodiversity studies [M]. Beijing: China Science and Technology Press,1994.
- [45] 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 (10):2089-2096.
Wang K B,Chen M L,Qin J,et al. Plant species diversity and the relation with soil properties in natural succession process in Ziwuling area [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica,2007(10):2089-2096.
- [46] 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.
Wen L,Song T Q,Du H,et al. The succession characteristics and its driving mechanism of plant community in karst region, Southwest China [J]. Acta Ecologica Sinica,2015,35(17): 5822-5833.
- [47] 黄 馨,刘君昂,周国英,等. 降香黄檀不同混交模式土壤肥力的比较研究 [J]. 土壤通报,2014,45(5):1130-1136.
Huang X,Liu J A,Zhou G Y,et al. Comparative research on soil fertility in different mixed models of *Dalbergia odorifera* T. Chen [J]. Chinese Journal of Soil Science,2014,45(5): 1130-1136.
- [48] 邓羽松,丁树文,蔡崇法,等. 鄂东南崩岗洪积扇土壤物理性质空间分异特征 [J]. 中国农业科学,2014,47(24):4850-4857.
Deng Y S,Ding S W,Cai C F,et al. Spatial distribution of the collapsing alluvial soil physical properties in Southeastern Hubei [J]. Scientia Agricultura Sinica,2014,47(24):4850-4857.
- [49] 李开萍,刘子琦,李 渊,等. 贵州毕节地区不同石漠化程度土壤理化性质特征 [J]. 水土保持学报,2017,31(4):205-210.
Li K P,Liu Z Q,Li Y,et al. Physicochemical properties of soil in different rocky desertification in Bijie area of Guizhou,China [J]. Journal of Soil and Water Conservation,2017,31(4): 205-210.
- [50] 康 冰,刘世荣,蔡道雄,等. 南亚热带不同植被恢复模式下土壤理化性质 [J]. 应用生态学报,2010,21(10):2479-2486.
Kang B,Liu S R,Cai D X,et al. Soil physical and chemical characteristics under different vegetation restoration patterns in China south subtropical area [J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2010,21(10):2479-2486.
- [51] 刘月秀,李 银,曹福亮. 广东桉树林土壤物理性质及其影响因素分析 [J]. 林业科技开发,2012,26(4):13-18.
Liu Y X,Li Y,Cao F L. Soil physical properties and their influencing factors under *Eucalyptus* plantations in Guangdong Province [J]. China Forestry Science and Technology,2012, 26(4):13-18.
- [52] 曹志洪,周健民. 中国土壤质量 [M]. 北京: 科学出版社, 2008.
Cao Z H,Zhou J M. Soil quality in China [M]. Beijing: Science Press,2008.
- [53] 陈洪云. 喀斯特石漠化综合治理生态监测与效益评价 [D]. 贵阳: 贵州师范大学,2007.
Chen H Y. Ecological monitor and benefit evaluation of the integrated management in the karst rocky desertification regions [D]. Guiyang:Guizhou Normal University,2007.
- [54] 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.
Zhang X,Zhu J,Cui Y C,et al. Influence of fire on a *Pinus massoniana* soil in a karst mountain area at the center of Guizhou Province,China [J]. Acta Ecologica Sinica,2011,31 (19):5809-5817.
- [55] Tilman D,Wedin D,Knops J. Productivity and sustainability influenced by biodiversity in grassland ecosystems [J]. Nature,1996,379(6567):718-720.
- [56] 国家林业局防治荒漠化管理中心,国家林业局中南林业调查规划设计院. 石漠化综合治理模式 [M]. 北京: 中国林业出版社,2012.
Desertification Management Center of State Forestry Administration,Central South Forestry Survey and Design Institute of State Forestry Administration. Rocky desertification comprehensive management mode [M]. Beijing: China Agriculture Press,2012.