

DOI: 10.20103/j.stxb.202403090477

张梅,陈冷澜,赵紫晴,王黎颖,刘玉国,丁玉雄,刘发万,周金星,万龙,普文富,张黄俊.石漠化区人工植被模式对生物多样性和土壤理化性质影响.生态学报,2025,45(13): - .

Zhang M, Chen L L, Zhao Z Q, Wang L Y, Liu Y G, Ding Y X, Liu F W, Zhou J X, Wan L, Pu W F, Zhang H J. Effects of artificial vegetation modes on biodiversity and soil physicochemical properties in rocky desertification areas. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(13): - .

石漠化区人工植被模式对生物多样性和土壤理化性质影响

张梅^{1,2}, 陈冷澜¹, 赵紫晴³, 王黎颖², 刘玉国³, 丁玉雄², 刘发万⁴, 周金星¹, 万龙^{1,*}, 普文富², 张黄俊⁵

1 云南建水荒漠生态系统国家定位观测研究站, 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083

2 建水县林业和草原科技推广站, 建水 654399

3 中国林业科学研究院生态保护与修复研究所, 北京 100091

4 建水县国有林场, 建水 654399

5 建水县退耕还林工作领导小组办公室, 建水 654399

摘要:喀斯特断陷盆地区地处滇东-攀西一带,严重的石漠化问题导致生态环境脆弱,成为当前急需解决的生态挑战。而植被恢复是石漠化地区综合治理的重要途径,因此,聚焦于云南省建水县石漠化区,以4种不同的人工植被模式(阔叶林、针叶林、针阔混交林、灌木林)以及草地对照作为研究对象,通过植被群落和土壤调查,深入探究了不同人工植被模式对生物多样性、土壤理化性质以及化学计量特征的影响。研究结果显示,在不同的人工植被模式下,共计调查到39种被子植物,分属于21科35属。相较于灌木林和草地,阔叶林、针叶林和针阔混交林的物种丰富度显著提高,主要体现在草本植物物种的显著增加($P < 0.05$)。人工植被模式有助于提升石漠化区植物群落的生物多样性,其中以阔叶林模式的乔木生物多样性最高,灌木林生物多样性以阔叶林模式和针叶林模式为最高,而草本植物多样性以针阔混交林模式为较高。此外,灌木林的土壤全氮(TN)和全磷(TP)含量均低于乔木林,灌木林的植被恢复对土壤养分没有显著影响($P > 0.05$),且对土壤TP含量有不利影响。经过4年的乔木林人工植被恢复,土壤有机质的变化显著,阔叶林的土壤有机质含量显著高于其他模式($P < 0.05$),针阔混交林则显著提升了土壤TN含量($P < 0.05$),而阔叶林则显著提升了土壤TP含量($P < 0.05$)。在阔叶林、针叶林和针阔混交林中,C/N化学计量比有所降低,而C/P在针阔混交林模式下则有所下降,这有利于微生物的分解过程。本研究为石漠化区的植被恢复提供了重要的参考,为喀斯特地区的生态恢复与石漠化治理提供了对策与建议。

关键词:植被恢复;生物多样性;土壤理化性质;化学计量比;喀斯特断陷盆地

Effects of artificial vegetation modes on biodiversity and soil physicochemical properties in rocky desertification areas

ZHANG Mei^{1,2}, CHEN Linglan¹, ZHAO Ziqing³, WANG Liying², LIU Yuguo³, DING Yuxiong², LIU Fawan⁴, ZHOU Jinxing¹, WAN Long^{1,*}, PU Wenfu², ZHANG Huangjun⁵

1 Jianshui Research Station, School of soil and water conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2 Jianshui Forestry and Grassland Technology Extension Station, Jianshui 654399, China

3 Institute of Ecological Protection and Conservation, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

4 State-owned Forest Farm of Jianshui County, Jianshui 654399, China

基金项目:国家自然科学基金(42371066/31700640);国家重点研发计划课题(2022YFF1302901/2016YFC0502504)

收稿日期:2024-03-09; **网络出版日期:**2025-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wanlong255@sina.com

5 Office of the Leading Group for Returning Farmland to Forests in Jianshui County, Jianshui 654399, China

Abstract: Situated in the eastern Yunnan-Panxi belt, the karstic graben basin area is confronted with an acutely fragile ecological environment as a consequence of severe rocky desertification, emerging as an ecological challenge that demands immediate resolution. Vegetation restoration is a crucial measure for the comprehensive management of rocky desertification regions. This research centers on the rocky desertification zone in Jianshui County, Yunnan Province. Four distinct artificial vegetation models, namely broadleaf forest, coniferous forest, mixed coniferous-broadleaf forest, and shrubland, along with a natural grassland serving as a control, are taken as the research subjects. Through comprehensive vegetation community surveys and in-depth soil investigations, this study delves into the impacts of these different artificial vegetation models on biodiversity, soil physicochemical properties, and stoichiometric characteristics. The findings reveal that, across the various artificial vegetation models, a total of 39 angiosperm species, classified into 21 families and 35 genera, were identified. In comparison to shrublands and grasslands, broadleaf forests, coniferous forests, and mixed coniferous-broadleaf forests manifested a notably higher species richness. This increase was mainly embodied in the significant augmentation of herbaceous plant species ($P < 0.05$). The artificial vegetation models effectively contribute to the enhancement of plant community biodiversity in the rocky desertification area. Specifically, the broadleaf forest model demonstrated the highest tree biodiversity. For shrubland biodiversity, the broadleaf forest and coniferous forest models ranked the highest, while the mixed coniferous-broadleaf forest model presented relatively higher herbaceous plant diversity. Regarding soil properties, the soil total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) contents in shrublands were lower than those in arbor-dominated forests. The vegetation restoration in shrublands exerted no significant influence on soil nutrients ($P > 0.05$) and even had an adverse effect on soil TP content. After four years of arbor forest artificial vegetation restoration, significant changes occurred in soil organic matter. The soil organic matter content in broadleaf forests was remarkably higher than that in other models ($P < 0.05$). The mixed coniferous-broadleaf forests significantly increased the soil TN content ($P < 0.05$), and broadleaf forests significantly elevated the soil TP content ($P < 0.05$). Moreover, in broadleaf, coniferous, and mixed coniferous-broadleaf forests, the C/N stoichiometric ratio decreased. In the mixed coniferous-broadleaf forest model, the C/P ratio declined as well, which was conducive to the microbial decomposition process. In conclusion, this study offers valuable insights for the vegetation restoration in rocky desertification areas and provides practical countermeasures and suggestions for ecological restoration and rocky desertification management in karst regions. It emphasizes the significance of choosing appropriate artificial vegetation models to promote ecological recovery and sustainable development in these ecologically vulnerable areas.

Key Words: vegetation restoration; biodiversity; physical and chemical materials of soil; stoichiometry; karst graben basin area

喀斯特断陷盆地是岩溶地区土地退化的极端形式,因其对环境改变反应灵敏及生态稳定性差^[1],成为我国西南地区生态环境最脆弱的地区之一。该区季节性干旱严重,地形条件复杂^[2],岩溶发育强烈,碳酸盐岩分布面积大^[3],石漠化严重且分布范围广^[4],面临着植被退化及水土流失等生态问题^[5-6],也面临着经济和社会的双重制约^[7-8]。

植被恢复是石漠化地区综合治理的最重要途径之一,也是石漠化地区生态系统重建最直接的方式^[9]。近年来,喀斯特生态系统生态恢复对植物群落生物多样性影响有大量研究。研究表明,喀斯特区域植被恢复对提高生物多样性有重要作用,是促进植物群落演替的重要方式^[10-11]。气候因子、土壤质地、人类活动、水分有效性、土壤养分和社会经济条件是影响石漠化地区治理效果的主要因素^[12]。而合理的植被恢复能有效改善生态系统土壤结构、提高土壤生产力。针对石漠化区植被恢复对土壤质量影响的大量研究,发现无论是人工恢复或是自然恢复,土壤理化性质均有不同程度提高^[13-15]。如曾馥平等对桂西北人工造林方式和自然恢

复模式进行了生态效益评价,发现随着经营年限增加,能明显提高土壤肥力、生物生产力^[16]。但不同类型植被对土壤有不同程度的影响,如在贵州喀斯特山区研究表明,乔木林土壤有机质和全氮含量显著高于灌丛地和荒草地^[15]。

近年来,喀斯特断陷盆地持续开展石漠化治理工程,大规模的植被恢复在促进群落演替、改善土壤质量也起到重要作用^[17]。然而植被类型对土壤理化性质的影响在不同研究尺度下不尽相似,并且由于干旱气候限制,植被恢复成效较其他地区仍然较慢,针对喀斯特断陷盆地的不同人工植被模式的研究还有待于丰富。因此,探究不同人工植被模式下的土壤质量,不同人工植被模式对区域植被恢复的促进作用,对评判植被恢复成功与否具有重要意义。为此,本文以不同人工植被模式为研究对象,研究不同人工植被模式下的物种组成、生物多样性、土壤理化性质和化学计量特征,以期得到能够丰富植物多样性和改善土壤质量的植被混交方式,为喀斯特断陷盆地区植被恢复和石漠化治理提供重要参考。

1 研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于云南省红河哈尼族彝族自治州建水县面甸镇闫把寺石漠化治理综合示范区(23°41'E, 105°56'N),海拔 167—2474m(图 1),南亚热带季风气候,年平均气温 18.5℃,年平均降水量 805mm,年蒸发量 2296mm,无霜期 307d, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的活动积温 6532.98℃。该示范区处于典型喀斯特断陷盆地区,成土母质以石灰岩为主。地势北高南低,山地和盆地相间分布。土壤以红壤为主,有少量水稻土发育。

本研究共设置 4 种人工植被模式和一组对照,选择坡度相近(10° — 15°),距离相近的区域开展植被恢复。人工植被树种于 2016 年 7 月种植,阔叶林样地造林树种以白枪杆(*Fraxinus malacophylla*)为主,针叶林以马尾松(*Pinus massoniana*)为主,针阔混交林以白枪杆、马尾松、冬樱花(*Prunus cerasoides*)为主,灌木林以白刺花(*Sophora davidii*)为主。种植 4 年后,2020 年 7 月进行不同人工植被的样地植被和土壤调查。每种模式选择 3 个重复样地,样地分别记录为:阔叶林、针叶林、针阔混交林、灌木林、草地对照。其中研究区样地基本概况如表 1 所示。

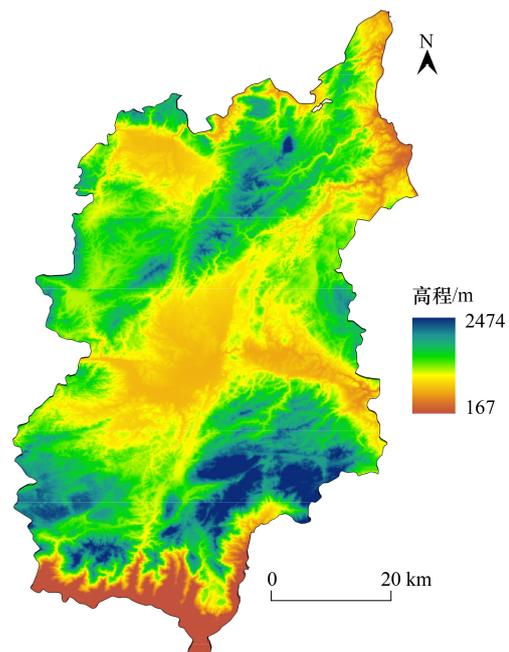


图 1 研究区概况

Fig.1 Overview of the research area

表 1 研究区样地基本概况

Table 1 Basic overview of the study area sample plots

人工植被模式 Artificial vegetation modes	样地面积/(m×m) Sample area	植被类型 Vegetation types	人工造林树种 Afforestation tree species
阔叶林 Broadleaf forest	20×20	灌丛	人工种植-白枪杆
针叶林 Coniferous forest	20×20	灌丛	人工种植-马尾松
针阔混交林 Mixed coniferous-broadleaf forest	20×20	灌丛	人工种植-马尾松、白枪杆、冬樱花
灌木林 Shrubland	10×10	灌丛	人工种植-白刺花
草地对照 Grassland	5×5	草地	人工种植-少量马尾松

1.2 样地设置与样品采集

在坡位、坡向、坡度及海拔相近的针叶林、阔叶林、针阔混交林样地内分别设置 3 个 20m×20m 样地,灌丛

样地内设置 3 个 10m×10m 样地,草本对照内设置 3 个 5m×5m 样地,总共 15 个样地,并按“S”型法对 0—10cm、10—20cm、20—30cm 共 3 个垂直深度土层分别进行 3 点取样。环刀和铝盒用于物理性质测定,土壤样品带回实验室晒干、研磨、过筛后待用。

在上述每个样地内设置 5m×5m 样方,对其中出现的所有乔木树种进行记录。每个样地内沿对角线选取 5m×5m 的灌木样方,每个样地内同时设置 3 个 1m×1m 的草本小样方,对其中出现的所有灌木和草本进行记录。乔木调查指标包括:物种名、胸径、树高、冠幅等;灌木指标包括:种类、高度、株数、基茎、冠幅等;草本调查指标包括:种类、多度、平均高度、平均冠幅、种盖度、样方总盖度等。

1.3 土壤指标测定

土壤物理指标测定主要利用环刀和铝盒处理计算,指标主要包含:土壤容重、孔隙度和持水量等。

土壤化学指标测定主要涉及:土壤(pH)测定采用电位法;土壤全氮(TN)测定采用凯氏定氮法;全磷(TP)测定采用氢氧化钠碱熔-钼锑抗比色法^[18];土壤有机质(OM)采用重铬酸钾氧化——油浴加热法等^[19]。

1.4 数据处理与分析

1.4.1 生物多样性分析:

物种多样性一定程度上可以表征植物群落的物种组成及分布。本研究主要选用群落的丰富度、Shannon-Wiener 多样性指数(H')、Simpson 优势度指数(D)、Pielou 均匀度指数(E)讨论群落的物种多样性,其中群落的物种丰富度以物种数(S)来反映,其它指数的计算公式如下:

$$H' = - \sum_{i=1}^S (p_i \ln p_i) \quad (1)$$

$$D = 1 - \sum_{i=1}^S p_i^2 \quad (2)$$

$$E = \frac{H}{H_{\max}} \quad (3)$$

式中, p_i 表示个体属于第 i 个种的概率, S 为物种种数, H 为世纪观察的物种多样性指数, H_{\max} 为最大的物种多样性指数, $H_{\max} = \ln S$ 。

1.4.2 数据分析:

本研究数据采用 SPSS 进行数据统计学分析,其中主要包括单因素方差分析(One-way ANOVA)和多重比较(LSD 法)进行差异性分析,来比较不同数据之间的差异;采用 Origin 2021 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 石漠化治理不同人工植被模式下植被生物多样性特征

2.1.1 不同人工植被模式下植物物种组成

根据 APG IV 系统,本研究共计被子植物 39 种,隶属 21 科 35 属。乔木树种共计 7 种,隶属 5 科 6 属,灌木树种共计 8 种,隶属 6 科 8 属,草本共计 24 种,隶属 12 科 21 属。调查发现,乔木林模式主要为新增造林树种为主,以及样地造林前已存在的少量马尾松、湿地松(*Pinus elliottii*)等树种,尚未自然更新。灌木林模式未调查到乔木,优势灌木种为笪子梢(*Campylotropis macrocarpa*)、车桑子(*Dodonaea viscosa*)、白刺花;芸香草(*Cymbopogon distans*)为主要草本优势种。不同人工植被模式下,植物丰富度存在一定差异,如表 2 所示,物种以草本层最丰富,且不同模式草本层丰富度差异明显,乔木林的种植显著增加了草本层物种丰富度。5 种类型物种丰富度均表现为草本>灌木>乔木。

2.1.2 不同人工植被模式下植被生物多样性

在同一人工植被模式下(图 2),不同生活型的 Shannon Wiener H' 和 Simpson D 生物多样性均表现为乔木层<灌木层<草本层,均匀度指数 Pielou E 中表现为灌木层>草本层>乔木层,其中灌木林中灌木略低于草本。

就不同人工植被模式而言(图 2),乔木生物多样性以阔叶林最多,(H')指数和(D)指数较高,针阔混交林次之,针叶林较低,均略低于草地对照组。如图 2 所示,乔木均匀度指数(E)均略低于草地对照。乔木层生物多样性差异性显著。灌木层中阔叶林和针叶林的(H')指数均高于草地对照,阔叶林(H')指数差异性显著。阔叶林、针叶林、针阔混交林(D)指数均高于草地对照组,阔叶林差异性显著。除针阔混交林(E)指数略高于草地对照,其他人工植被模式均略低于草地对照。草地生物多样性中(H')指数和(D)指数均高于草地对照,针阔混交林最高,且针叶林>阔叶林>灌木林,阔叶林(H')指数分别和灌木林和草地对照差异性显著。不同人工植被模式下(E)指数均略低于草地对照,均差异性显著,并且灌木林>针阔混交林>针叶林>阔叶林。

表 2 云南断陷盆地不同人工植被林的物种组成

Table 2 Species composition of different artificial vegetation in Yunnan karst graben basi

人工植被模式 Artificial vegetation modes	乔木层 Arborous layer			灌木层 Shrub layer			草本层 Herb layer			总计 Total		
	科	属	种	科	属	种	科	属	种	科	属	种
	Family	Genus	Species	Family	Genus	Species	Family	Genus	Species	Family	Genus	Species
阔叶林 Broadleaf forest	3	4	5	5	7	7	7	11	12	13	22	23
针叶林 Coniferous forest	5	5	6	5	6	6	9	15	17	16	26	28
针阔混交林 Mixed coniferous-broadleaf forest	4	4	5	2	3	3	7	13	16	11	20	24
灌木林 Shrubland	—	—	—	1	2	2	4	8	9	5	10	11
草地对照 Grassland	3	3	3	2	2	2	3	5	7	7	10	12

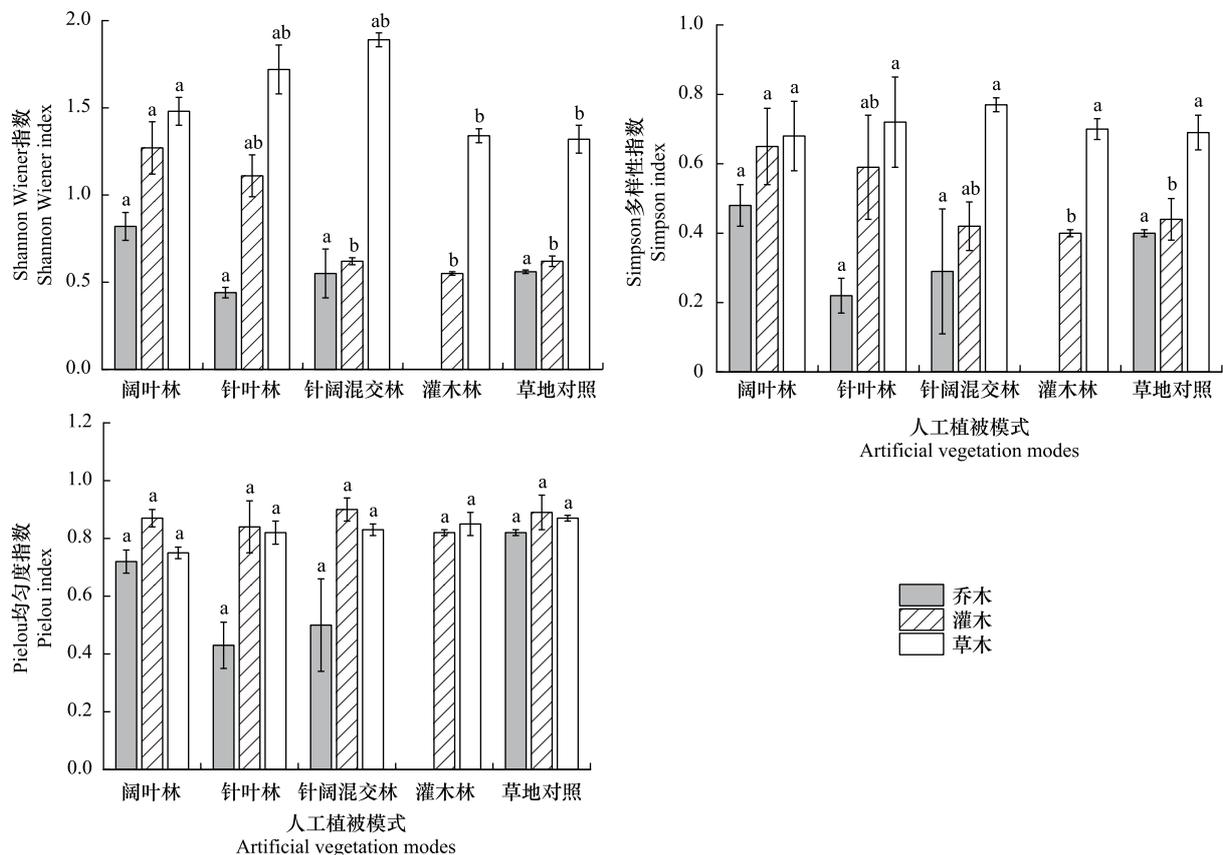


图 2 不同人工植被模式下不同生活型的生物多样性比较

Fig.2 Comparison of biodiversity of different life forms under different artificial vegetation modes

不同小写字母表示不同人工植被模式下各指数差异性显著($P<0.05$)

2.2 石漠化治理不同人工植被模式下土壤理化特征

2.2.1 不同人工植被模式土壤物理性质特征

对比不同人工植被模式的人工林土壤物理性质,结果如表3。同一土层下针阔混交林的土壤毛管持水量和饱和含水量最高,持水性能最好,在20—30cm层饱和含水量差异性显著。在0—10cm表层土中毛管持水量表现为针阔混交林>灌木林>针叶林>阔叶林>草地对照,进行不同混交林模式种植有助于提高土壤持水性,但饱和含水量草地对照>针阔混交林>灌木林>针叶林>阔叶林,土壤饱和含水量有所下降。在20—30cm深层土壤中毛管持水量和饱和含水量均表现为针阔混交林>灌木林>针叶林>草地对照>阔叶林,不同人工植被模式有利于提高土壤持水性。同一人工植被模式下对比不同土壤深度物理性质发现,20—30cm土层持水性能最好,20—30cm土层土壤持水性能较差。

表3 不同人工植被模式下土壤物理性质比较

Table 3 Comparison of soil physical properties under different artificial vegetation modes

人工植被模式 Artificial vegetation modes	毛管持水量/g Capillary water capacity			饱和含水量/g Saturated water content		
	0—10cm	10—20cm	20—30cm	0—10cm	10—20cm	20—30cm
	阔叶林 Broadleaf forest	156.62±3.10b	153.44±2.57a	158.36±1.49a	160.77±2.68a	157.82±4.61a
针叶林 Coniferous forest	159.63±2.79ab	154.84±1.70a	160.71±1.22a	163.26±2.33a	159.25±2.48a	166.99±2.29b
针阔混交林 Mixed coniferous-broadleaf forest	167.79±2.57a	171.17±4.24a	181.51±4.31a	168.59±3.33a	174.28±2.72a	183.19±3.65a
灌木林 Shrubland	161.67±5.83ab	161.57±9.48a	162.93±8.38a	164.23±4.23a	161.72±9.65a	168.04±5.85b
草地对照 Grassland	157.20±2.16ab	165.33±5.76a	158.55±1.39a	173.73±1.89a	166.55±5.99a	162.19±2.57b

2.2.2 不同人工植被模式下土壤化学性质组成

不同土壤深度下,阔叶林和针叶林模式的土壤有机质含量均高于其他人工植被模式和草地对照,其中阔叶林和针叶林模式与草地对照表现显著性差异,而针阔混交林和灌木林模式与草地对照差异性不显著(图3)。在0—30cm土壤剖面中,5种样地总体表现出随着土层深度的加深土壤有机质含量逐渐降低的趋势。5种样地中,0—10cm表层土壤有机质含量表现为阔叶林>针叶林>草地对照>针阔混交林>灌木林,10—20cm和20—30cm土层均表现为阔叶林>针叶林>灌木林>草地对照>针阔混交林(图3)。

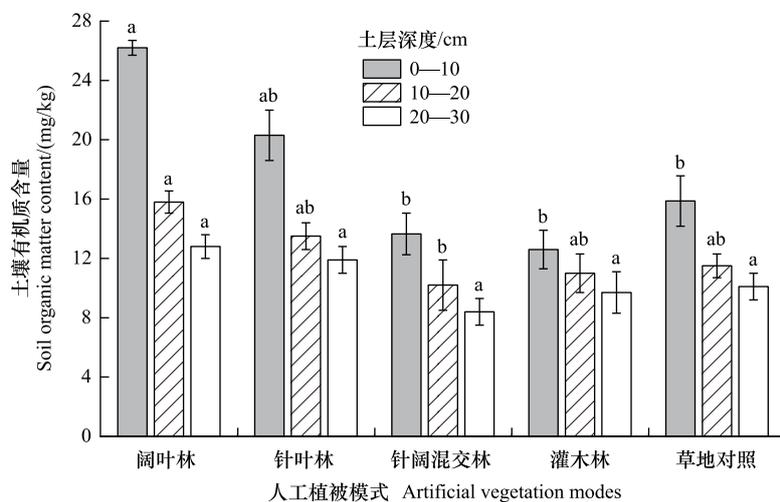


图3 不同人工恢复模式土壤有机质养分状况比较

Fig.3 Comparison of soil organic matter nutrient status in different artificial vegetation modes

不同小写字母表示不同人工植被模式下土壤有机质差异性显著 ($P < 0.05$)

如图4,阔叶林模式土壤全氮(TN)含量显著高于其他人工植被模式和草地对照。5种模式中,0—10cm

土层和 20—30cm 土层中 TN 表现为:阔叶林>针叶林>草地对照>针阔混交林>灌木林,10—20cm 土层中灌木林模式 TN 含量高于针阔混交林模式。针阔混交林和灌木林模式 TN 含量均略低于草地对照组,不利于石漠化区土壤 TN 的保持。3 种土层深度中,除针叶林模式外其他模式土壤 TN 含量表现为 0—10cm>10—20cm>20—30cm。对比有机质和 TN,土壤全磷 (TP) 表现出不同结果 (图 5)。针阔混交林模式中 0—10cm 土层 TP 显著高于其他模式和草地对照。0—10cm 土层中 TP 含量表现为阔叶林>针阔混交林>草地对照>针叶林>灌木林,20—30cm 土层中表现为阔叶林>针叶林>针阔混交林>草地对照>灌木林。3 种土层深度下,阔叶林和针叶林模式中的土壤 TP 含量表现为 0—10cm>20—30cm>10—20cm,针阔混交林、灌木林和草地对照中土壤 TP 含量随深度增加递减。

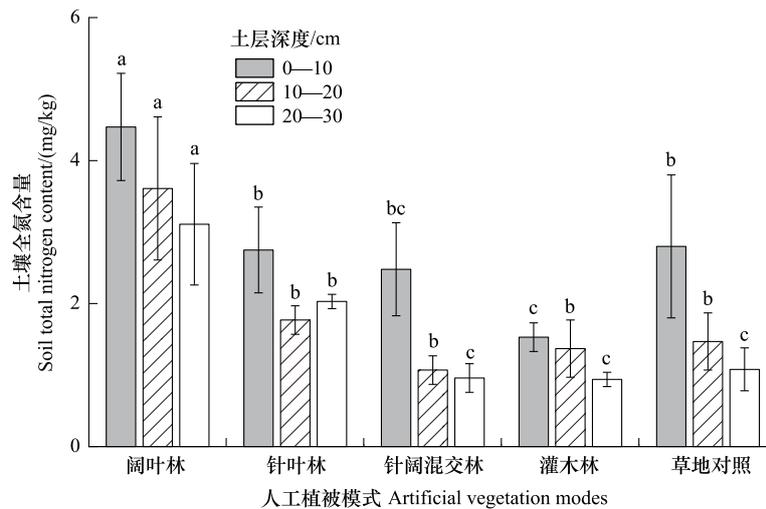


图 4 不同人工植被模式土壤全氮 TN (Total Nitrogen) 养分状况比较

Fig.4 Comparison of soil total nitrogen (TN) nutrient status under different artificial vegetation modes

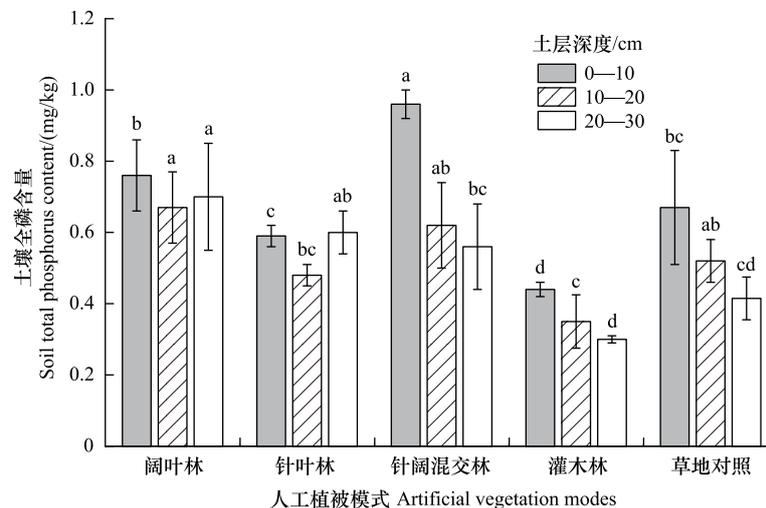


图 5 不同人工植被模式土壤全磷 TP (Total Phosphorus) 养分状况比较

Fig.5 Comparison of soil total phosphorus (TP) nutrient status under different artificial vegetation modes

不同小写字母表示不同人工植被模式下土壤全氮、全磷差异性显著 ($P < 0.05$)

2.3 不同人工植被模式下土壤化学计量特征

对比 5 种样地,土壤 C/N 在灌木林模式下有所提高,而在阔叶林、针叶林和针阔混交林模式下降低 (图 6)。相比其他人工植被模式,阔叶林和针叶林在 10—20cm 表土和 20—30cm 深层土内有显著性差异。在 0—10cm 土层中 C/N 表现为灌木林>针叶林>草地对照>阔叶林>针阔混交林,在 10—20cm 内灌木林>针阔

混交林>草地对照>针叶林>阔叶林,在 20—30cm 深层中灌木林>草地对照>针阔混交林>针叶林>阔叶林。

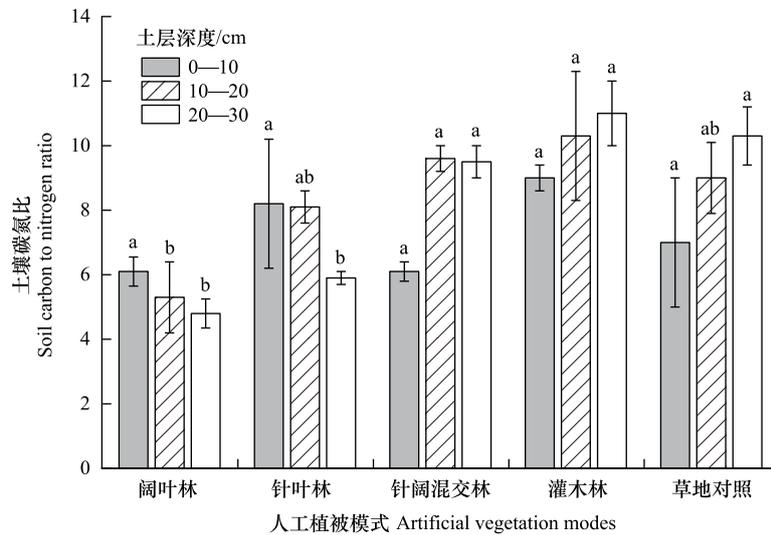


图 6 不同人工植被模式土壤 C/N 对比

Fig.6 Comparison of soil C/N under different artificial vegetation modes

不同小写字母表示不同人工植被模式下土壤 C/N 差异性显著 ($P < 0.05$)

由图 7,对比 5 种样地,阔叶林、针叶林及灌木林模式有效提高了该地区土壤 C/P,而针阔混交林模式降低了土壤 C/P,其中在 0—10cm 土层和 20—30cm 土层内差异性显著。在 0—10cm 土层中 C/P 表现为阔叶林>针叶林>灌木林>草地对照>针阔混交林,在 10—20cm 土层内表现为灌木林>针叶林>阔叶林>草地对照>针阔混交林,在 20—30cm 土层中表现为灌木林>草地对照>针叶林>阔叶林>针阔混交林。

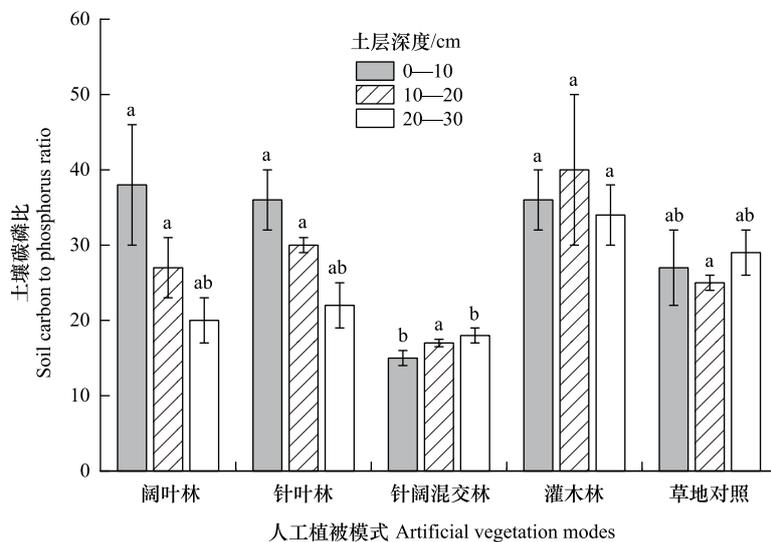


图 7 不同人工植被恢复模式土壤 C/P 对比

Fig.7 Comparison of soil C/P under different artificial vegetation modes

不同小写字母表示不同人工植被模式下土壤 C/P 差异性显著 ($P < 0.05$)

3 讨论

3.1 不同人工植被模式下土壤理化性质

本研究对土壤毛管持水量和饱和含水量进行了比较,研究发现在建水岩溶断陷盆地通过马尾松、白枪杆、

冬樱花针阔叶混交的模式可以更好提高土壤的持水性和保水性,人工植被模式提高了土壤水分的利用率。岩溶区地表生境缺水,易流失,利用人工植被模式提高土壤持水性和水分利用效率对生态系统维持有重要意义^[20-21]。徐春燕等^[22]在贺兰山荒漠草原的研究中发现在不同植被恢复模式下土壤有机质含量明显高于裸地有机质含量,但不同植被类型下有机质含量不同。不同人工植被模式下改变了土壤结构和立地植被的特征,进而影响凋落物性质和土壤微生物的变化,阔叶林积累更多凋落物且分解速度和腐殖质化过程较快,使得有机质含量迅速提升^[23]。同时,阔叶林凋落物分解也显著提升了 TP 含量。喀斯特植被恢复的重要特征是受土壤磷(P)限制^[24],有研究表明,植被恢复初期,植物生长从土壤中吸收的养分大于养分归还量,导致土壤 P 有所下降。本研究也发现 P 元素仅在凋落物分解迅速的阔叶林模式有所提升^[25]。针阔混交林提升土壤 TN 含量最显著,植物群落中土壤 N 除了由凋落物的分解获取,植物固氮和大气氮沉降累积也是重要来源^[26]。针阔混交模式引起大气氮沉降、固氮植物和凋落物分解的共同变化,使土壤 TN 含量提升。然而,研究发现灌木林模式相较草地对照有机质、土壤 TN 和 TP 均未有显著提升,表明短期内灌木林凋落物分解产生的养分不足以改善土壤。但是从长期的植被恢复效果看,很多研究表明,在喀斯特区灌木林对土壤养分含量也有一定的提升^[27]。

3.2 不同人工植被模式下土壤化学计量特征

土壤化学计量是评价土壤质量和养分状况的一个重要指标,即 C、N、P 之比^[28]。土壤 C/N 是反映土壤量与质的灵敏指标^[29],揭示土壤中 C 和 N 转化之间的一种密切关系。由于处在恢复初期,土壤腐殖质较少,本研究中不同人工植被模式下土壤 C/N 总体上低于中国土壤 C/N 的平均值(10—12)^[30]。通过不同人工植被模式,土壤上层 C/N 逐渐呈现出上升的趋势,说明腐殖质在土壤上层富集,有机 C 含量升高。阔叶林和针叶林模式土壤 C/N 有显著减少趋势,说明这两种模式增加了土壤微生物活性。本研究中不同人工植被模式下土壤 C/P 总体上低于中国土壤 C/P 的平均值(105)^[31]。5 中样地中,土壤 C/P 在阔叶林和针叶林模式下得到了提升,但在针阔混交林模式中显著下降。这可能是因为在岩溶区主要土壤类型为石灰岩发育土壤,富含钙,Ca 极易与难溶性无机 P 生成 $Ca_{10}P$ 沉淀,使 P 不易于淋失^[32],土壤 TP 注积效应^[33]明显。针阔混交林模式下土壤 TP 的增加导致 C/P 显著下降,较低的 C:P 有利于有机质分解中养分的释放,提高磷的有效性^[34],从而提高了微生物活性。

1.103.3 不同人工植被模式下植被生物多样性

植物物种多样性反映了植物的丰富度和均匀度,表征植物群落结构的复杂性,其与植物群落结构及林分发展及稳定程度有关^[35],物种多样性提升是植被恢复过程中重要的目标之一^[36]。比较不同人工植被模式对生物多样性的影响,发现人工乔木林植被混交模式有利于提高石漠化区植物群落生物多样性,通过人工种植马尾松、白枪杆、白刺花等多种耐旱植物的人工乔木植被模式发现,该区域物种组成及生物多样性得到了最明显提高。乔木生长可使样地内光、热和水分等生境异质性增强^[37],而不同人工植被模式,土壤 TN、TP 等养分发生变化,是引起草本生物多样性发展变化的重要原因^[38]。而通过混交种植灌木白刺花进行灌木林恢复的方法,有机质未显著增加,C/N 提高不利于微生物活性增强,对植被生物多样性影响均不显著。因此,建议可通过乔木、灌木的人工植被混交模式,改变区域植物群落内垂直结构,增强区域内生境异质性,从而丰富石漠化区生物多样性。

4 结论

不同人工植被模式下,阔叶林、针叶林和针阔叶混交林模式相比灌木林模式和草地对照,物种丰富度更高,草本植物物种丰富度显著提升,灌木林模式植物物种数量与草本对照一致;人工乔木林植被混交模式有利于石漠化区植物群落生物多样性的提高。比较不同人工植被模式,灌木林模式土壤持水性能更好,但土壤养分含量较低;同一土层下,针阔混交林模式持水性能更好,其余人工植被模式下土壤物理性质交叉变化。人工植被模式下恢复 4 年后,土壤有机质变化明显,阔叶林模式表层土壤有机质含量显著高于其他模式;而土壤养

分含量变化相对较小,阔叶林模式中土壤 TN 含量显著高于其他模式,针阔混交林模式中土壤 TP 显著高于其他模式,C/N 在阔叶林、针叶林和针阔混交林植被混交模式下有所降低,在灌木林模式下有所提高,C/P 在针阔混交林植被混交模式下显著下降。

参考文献 (References):

- [1] 郑全胜, 查钱慧, 冯汉华, 周命义. 广东石漠化综合治理模式. 林业与环境科学, 2022, 38(S1): 17-21.
- [2] 刘泽东. 广西河池地区岩溶石漠化遥感特征测度方法研究. 国土资源导刊, 2018, 15(1): 80-85.
- [3] 李阳兵, 侯建筠, 谢德体. 中国西南岩溶生态研究进展. 地理科学, 2002, 22(3): 365-370.
- [4] 彭旭东, 戴全厚. 西南石漠化区地表侵蚀/地下漏失的侵蚀环境特征. 中国水土保持科学, 2023, 21(4): 150-158.
- [5] Guo F, Jiang G H, Yuan D X, Polk J S. Evolution of major environmental geological problems in Karst areas of Southwestern China. Environmental Earth Sciences, 2013, 69(7): 2427-2435.
- [6] 杜文鹏, 闫慧敏, 甄霖, 胡云锋. 西南岩溶地区石漠化综合治理研究. 生态学报, 2019, 39(16): 5798-5808.
- [7] Bai X Y, Wang S J, Xiong K N. Assessing spatial-temporal evolution processes of Karst rocky desertification land: indications for restoration strategies. Land Degradation & Development, 2013, 24(1): 47-56.
- [8] Li Y, Bai X Y, Zhou Y C, Qin L Y, Tian X, Tian Y C, Li P L. Spatial-temporal evolution of soil erosion in a typical mountainous Karst basin in SW China, based on GIS and RUSLE. Arabian Journal for Science and Engineering, 2016, 41(1): 209-221.
- [9] 胡建忠. 西部地区植被建设的主要途径探讨. 水土保持学报, 2003, 17(3): 121-123.
- [10] 文丽, 宋同清, 杜虎, 王克林, 彭晚霞, 曾馥平, 曾昭霞, 何铁光. 中国西南喀斯特植物群落演替特征及驱动机制. 生态学报, 2015, 35(17): 5822-5833.
- [11] 吴林世, 曹福祥, 彭继庆, 曹基武, 徐永福, 董旭杰, 胥雯. 湘南石漠化地区植物群落物种多样性. 浙江农林大学学报, 2016, 33(2): 239-246.
- [12] 张雪梅, 王克林, 岳跃民, 童晓伟, 廖楚杰, 张明阳, 姜岩. 生态工程背景下西南喀斯特植被变化主导因素及其空间非平稳性. 生态学报, 2017, 37(12): 4008-4018.
- [13] 龙健, 李娟, 邓启琼, 李阳兵, 熊康宁. 贵州喀斯特山区石漠化土壤理化性质及分形特征研究. 土壤通报, 2006, 37(4): 635-639.
- [14] 刘成刚. 喀斯特山地不同人工林土壤特性综合评价[D]. 南京: 南京林业大学, 2011.
- [15] 李菲, 李娟, 龙健, 廖洪凯, 刘灵飞, 张文娟. 典型喀斯特山区植被类型对土壤有机碳、氮的影响. 生态学杂志, 2015, 34(12): 3374-3381.
- [16] 曾馥平, 王克林. 桂西北喀斯特地区 6 种退耕还林(草)模式的效应. 农村生态环境, 2005, 21(2): 18-22.
- [17] 哈文秀, 肖桂英, 曹建华, 刘玉国, 崔明, 周金星. 喀斯特断陷盆地地区不同恢复阶段群落物种组成与多样性特征. 生态学杂志, 2020, 39(1): 36-45.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版). 北京: 中国农业出版社
- [19] 中华人民共和国农业部. 土壤检测 第 6 部分: 土壤有机质的测定: NY/T 1121.6—2006.
- [20] 梁轩, 汪智军, 袁道先, 杨平恒, 贺秋芳. 岩溶区不同植被下土壤水溶解无机碳含量及其稳定碳同位素组成特征. 生态学报, 2013, 33(10): 3031-3038.
- [21] Cai L L, Xiong K N, Li Y, Liu Z Q, Zhu D Y, Liang H, Mu Y T, Chen Y. Coexisting plants restored in karst desertification areas cope with drought by changing water uptake patterns and improving water use efficiency. Journal of Hydrology, 2025, 654132813-132813.
- [22] 徐春燕, 王涛, 贾晨波, 郭洋, 苏建宇. 贺兰山东麓荒漠植物对土壤化学性质和酶活性的影响. 生态环境学报, 2020, 29(12): 2346-2354.
- [23] 田晓莹. 亚热带四种森林凋落物分解过程中土壤动物与微生物的影响[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2020.
- [24] Wang G L, Fahey T J, Xue S, Liu F. Root morphology and architecture respond to N addition in *Pinus tabulaeformis*, West China. Oecologia, 2013, 171(2): 583-590.
- [25] Tian H Q, Chen G S, Zhang C, Melillo J M, Hall C A S. Pattern and variation of C: N: P ratios in China's soils: a synthesis of observational data. Biogeochemistry, 2010, 98(1): 139-151.
- [26] 哈文秀. 云南喀斯特断陷盆地地区不同恢复年限植被与土壤特征研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
- [27] 唐祎欣, 张伟, 吴汉卿, 胡培雷, 肖丹, 王克林. 植被恢复对西南喀斯特地区土壤气候韧性的提升作用. 生态学报, 2023, 43(20): 8430-8441.
- [28] Witzgall K, Vidal A, Schubert D I, Höschel C, Schweizer S A, Buegger F, Pouteau V, Chenu C, Mueller C W. Particulate organic matter as a functional soil component for persistent soil organic carbon. Nature Communications, 2021, 12(1): 4115.
- [29] 庞圣江, 张培, 贾宏炎, 杨保国, 陈健波, 郭东强. 不同造林模式对桉树人工林林下植物物种多样性的影响. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2020, 48(9): 44-52.
- [30] 王绍强, 于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征. 生态学报, 2008, 28(8): 3937-3947.
- [31] 孙超. 基于生态化学计量学的草地退化研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012.
- [32] 张素霞. 黄土高原坡地不同土地利用方式下土壤剖面磷素分布及其有效性研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2008.
- [33] 俞月凤, 何铁光, 宋同清, 李丽娟, 韦彩会, 蒙炎成, 唐红琴, 李忠义, 李婷婷, 胡芳. 桂西北喀斯特地区石灰土养分空间变异特征. 生态学报, 2018, 38(8): 2906-2914.
- [34] 王建林, 钟志明, 王忠红, 余成群, 沈振西, 张宪洲, 胡兴祥, 大次卓嘎. 青藏高原高寒草原生态系统土壤碳磷比的分布特征. 草业学报, 2014, 23(2): 9-19.
- [35] 茹文明, 张金屯, 张峰, 张桂萍, 刘瑞祥. 历山森林群落物种多样性与群落结构研究. 应用生态学报, 2006, 17(4): 561-566.
- [36] 张喜, 朱军, 崔迎春, 霍达, 王莉莉, 吴鹏, 陈骏, 潘德权, 杨春华. 火烧对黔中喀斯特山地马尾松林土壤理化性质的影响. 生态学报, 2011, 31(19): 5809-5817.
- [37] Haghverdi K, Kooch Y. Effects of diversity of tree species on nutrient cycling and soil-related processes. Catena, 2019, 178: 335-344.
- [38] 罗毓明. 我国南方四种人工林林下植物多样性及物种共存机制研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2021.