

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.04.010.

张水琳, 马丽娜, 王妍, 等. 断陷盆地不同石漠化生态修复类型下土壤碳氮磷化学计量及酶活性特征[J]. 水土保持研究, 2023, 30(4): 69-74.

ZHANG Shuilin, MA Lina, WANG Yan, et al. Characteristics of Soil Carbon, Nitrogen and Phosphorus Stoichiometry and Enzyme Activity Under Different Ecological Restoration Types of Rocky Desertification in Fault Basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(4): 69-74.

断陷盆地不同石漠化生态修复类型下 土壤碳氮磷化学计量及酶活性特征

张水琳¹, 马丽娜¹, 王妍^{1,2}, 李成荣¹, 刀明宽¹, 刘云根¹

(1.西南林业大学 生态与环境学院, 昆明 650224; 2.西南林业大学 石漠化研究院, 昆明 650224)

摘 要:[目的]揭示断陷盆地石漠化生态修复区土壤养分、酶活性特征,筛选修复效果较好的模式,为石漠化修复治理提供科技支撑。[方法]以典型断陷盆地云南省建水县为研究区,探究 4 种植被修复类型(云南松+银木荷人工混交林、柏木+银木荷人工混交林、干香柏人工纯林、自然植被恢复样地)的土壤碳、氮、磷含量和化学计量特征及酶活性特征(淀粉酶、脱氢酶、葡萄糖苷酶、酸性磷酸酶、FDA 水解酶、脲酶)。[结果]土壤有机碳、全氮、全磷平均质量分数分别为 25.81, 1.89, 0.41 g/kg, 有机碳、全氮含量均为自然植被恢复下最高,全磷含量为干香柏纯林下最高;自然植被恢复下土壤 C:P 与 N:P 最高, C:N 最高的为柏木+银木荷混交林。土壤淀粉酶活性为干香柏人工纯林最高,自然恢复植被恢复下最低,其余酶活性均为自然植被恢复下最高。相关性分析表明,土壤有机碳、全氮、全磷、pH 值会对土壤酶活性产生影响,且冗余分析结果显示影响土壤酶活性的最主要养分因子为全氮,解释了 72.3% 的土壤酶活性变异。[结论]不同植被修复模式下土壤养分及酶活性特征不同,经 18 a 植被修复后,自然植被恢复和干香柏人工纯林两种修复模式下土壤养分条件较好,是该地区较为合适的植被修复类型。

关键词:石漠化; 化学计量特征; 酶活性; 断陷盆地; 生态修复

中图分类号:S714.2

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2023)04-0069-06

Characteristics of Soil Carbon, Nitrogen and Phosphorus Stoichiometry and Enzyme Activity Under Different Ecological Restoration Types of Rocky Desertification in Fault Basin

ZHANG Shuilin¹, MA Lina¹, WANG Yan^{1,2}, LI Chengrong¹, DAO Mingkuan¹, LIU Yungen¹

(1.College of Ecology and Environment, Southwest Forestry University, Kunming 650224,

China; 2.Institute of Rocky Desertification, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China)

Abstract:[Objective] The characteristics of soil nutrients and enzyme activities in the rocky desertification ecological restoration area of the fault basin were revealed, and the model with better restoration effect was screened to provide scientific and technological support for the restoration and treatment of rocky desertification. [Methods] The soil carbon, nitrogen and phosphorus contents and stoichiometric characteristics and enzyme activity characteristics (amylase, dehydrogenase, glucosidase, acid phosphatase, FDA hydrolase, urease) of four vegetation restoration types (*Pinus yunnanensis* + *Schima argentea* artificial mixed forest, *Cupressus funebris* Endl. + *Schima argentea* artificial mixed forest, *Copressus duclouxiana* artificial pure forest, natural vegetation restoration sample plots) were investigated in the study area of Jianshui County, Yunnan Province, a typical faulted basin. [Results] The average contents of soil organic carbon, total nitrogen and total phosphorus were 25.81 g/kg, 1.89 g/kg and 0.41 g/kg, respectively. The contents of organic

收稿日期:2022-04-13

修回日期:2022-05-23

资助项目:云南省科技计划面上项目“典型苔藓植物对石漠化地区高钙环境的适应机制及生态修复意义”(202001AT070115)

第一作者:张水琳(1997—),女,云南宣威人,硕士研究生,研究方向为石漠化治理。E-mail:1770728218@qq.com

通信作者:王妍(1980—),女,河北承德人,博士,副教授,主要从事脆弱生态系统恢复研究。E-mail:wycyf@126.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

carbon and total nitrogen were the highest under natural vegetation restoration, and the content of total phosphorus was the highest under dry cedar pure forest. Under natural vegetation restoration, soil C : P and N : P were the highest, and C : N was the highest in the *Cupressus funebris* Endl. + *Schima argentea* artificial mixed forest. Soil enzyme activity was different under different vegetation restoration. Soil amylase activity was highest in *Copressus duclouxiana* artificial pure forest, lowest in natural vegetation restoration, its enzyme activity was the highest under natural vegetation restoration. Correlation analysis showed that soil organic carbon, total nitrogen, total phosphorus and pH value had effects on soil enzyme activity. Redundancy analysis showed that the main nutrient factor affecting soil enzyme activity was total nitrogen, which explained 72.3% of soil enzyme activity variation. [Conclusion] The characteristics of soil nutrients and enzyme activities were different under different vegetation restoration modes. After 18 years of vegetation restoration, the soil nutrient conditions were better under the two restoration modes of natural vegetation restoration and dry cedar artificial pure forest, which were more suitable for vegetation restoration in this area.

Keywords: rocky desertification; stoichiometric characteristics; enzyme activity; fault basin; ecological restoration

植被恢复是石漠化治理的重要途径,前人通过对喜钙耐旱植物筛选、快繁及特色经济林复合系统进行研究^[1],采取不同治理措施,达到适生植被培育和石漠化治理的目的。有学者^[2]对石漠化生态修复效果进行了评价,如对云南蒙自万寿菊(*Tagetes erecta* L.)、石榴(*Punica granatum* L.)、石榴+草+羊、玉米(*Zea mays* L.)种植4种模式进行比较,分析不同模式的生态和经济效益。当前,石漠化治理效果评价主要集中于生态效益、经济效益和社会效益等方面,因缺乏科学完善的评价指标体系,难以客观全面地评价不同生态修复模式^[3]。如基于大尺度的石漠化修复评价,由于缺乏对优势树种的野外监测数据,对其进行模型估算和效益评价时存在精度不高的问题;微观层次多聚焦于植物群落特征,如植物多度、覆盖度以及物种多样性等^[4],缺乏石漠化土壤养分监测数据。如何实现植被环境改善与土壤微环境的同步、如何综合评价石漠化治理的生态环境效应是当前研究的难点^[5-7]。

生态化学计量主要用于研究植被、凋落物以及土壤的营养元素在循环过程中的平衡和耦合关系^[8],以便了解石漠化治理中养分循环、丰缺以及限制情况,从而采取措施提高植被恢复效率^[9-10];土壤酶是指土壤中具有催化功能的一类生物活性物质的总称,主要来源于土壤微生物的活动、植物根系的分泌物和动植物残体的分解过程,对土壤环境变化敏感,是土壤生物生化过程的动力^[11-12]。

位于滇东—攀西及贵州西部的喀斯特断陷盆地^[13],由于特殊的盆—山地地形反差,存在季节性干旱、生态稳定性差、植被破坏严重等问题,周边斜坡地带是石漠化高发区,加剧石漠化治理的难度。目前针对断陷盆地石漠化生态修复区的土壤养分状况和酶

活性特征研究较少,本文以典型岩溶断陷盆地建水县的4种植被生态修复类型为研究对象,通过探究土壤养分生态化学计量和酶活性特征,评估该生态修复区自进行修复以来的生态修复成效,为石漠化地区生态修复提供参考。

1 材料与方法

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,是国家实施石漠化综合治理工程的重点区域。地理位置为北纬23°12'42"—24°10'32",东经102°33'18"—103°11'42",海拔213~2497 m。属南亚热带季风气候,降水集中于5—10月,年平均降雨量805 mm,年平均气温19.8℃,分布有建水、曲江两大断陷盆地。土壤主要为红壤、赤红壤、石灰土,植被为亚热带常绿落叶针阔混交林。作为石漠化综合治理重点县,采取了人工造林、封山育林等林草植被措施进行石漠化治理,根据植被修复模式主要划分为纯生态林、混交生态林、经济林3种模式,经过18 a的人工植被和自然恢复,该典型断陷盆地石漠化生态修复区生态环境明显改善。

1.2 研究方法

1.2.1 样地布设与样品采集 样品采集时间为2020年5月,根据野外踏查选择4种植被修复类型进行土壤样品采集,将4种植被修复类型分别标记为YD₁(云南松+银木荷人工混交林)、YD₂(柏木+银木荷人工混交林)、YD₃(干香柏人工纯林)、YD₄(自然植被恢复样地)。每种植被修复类型布设20 m×20 m的样地5个,每个样地按照S型布点设置5个1 m×1 m的采样点,去除枯枝落叶后采集表层(0—

20 cm)原状土壤样品,装入密封袋带回实验室自然风干,将 5 个点的土样混合均匀,取一定量风干土样研磨,过 0.25 mm 筛用于测定土壤有机质、全氮、全磷、酶活性等指标。样地基本情况见表 1。

表 1 样地基本信息

样地	海拔/m	pH 值	经度(E)	纬度(N)	土壤类型	主要植被
YD ₁	1599	5.60	102°46'25"	23°42'10"	赤红壤	云南松(<i>Pinus yunnanensis</i>)、银木荷(<i>Schima argentea</i>)、华西小石积(<i>Osteomeles schwerinae</i>)、杜鹃(<i>Rhododendron simsii</i>)、剑麻(<i>Agave sisalana</i>)、紫茎泽兰(<i>Ageratina adenophora</i>)
YD ₂	1597	5.42	102°46'26"	23°41'56"	赤红壤	柏木(<i>Cupressus funebris</i> Endl.)、银木荷(<i>Schima argentea</i>)、沙针(<i>Osyris lanceolate</i>)、华西小石积(<i>Osteomeles schwerinae</i>)、扭黄茅(<i>Heteropogon contort</i>)
YD ₃	1561	5.82	102°46'39"	23°40'48"	赤红壤	干香柏(<i>Copressus duclouxiana</i>)、车桑子(<i>Dodonaea viscosa</i>)、铁仔(<i>Myrsine africana</i>)、沙针(<i>Osyris lanceolate</i>)、华西小石积(<i>Osteomeles schwerinae</i>)
YD ₄	1490	7.24	102°47'13"	23°39'54"	紫色红壤	剑麻(<i>Agave sisalana</i>)、假虎刺(<i>Carissa spinarum</i>)、车桑子(<i>Dodonaea viscosa</i>)、铁仔(<i>Myrsine africana</i>)、紫苜蓿(<i>Medicago sativa</i> L.)

1.2.2 样品处理与分析 土壤理化性质测定参照土壤农化分析方法^[14],土壤有机碳采用重铬酸钾外加热法,全氮采用凯氏定氮法,全磷采用钼锑抗比色法,根据所获得数据计算元素化学计量比,土壤 pH 值采用电极法(水土比为 2.5 : 1);土壤酶活性测定参照关松荫^[11],其中脱氢酶活性采用三苯基四氮唑氯化物(TTC)比色法;淀粉酶活性采用 3,5-二硝基水杨酸比色法;土壤酸性磷酸酶活性、β-葡萄糖苷酶活性采用硝基苯底物比色法;FDA 水解酶活性采用荧光素比色法;脲酶活性采用靛酚蓝比色法^[15]。

1.3 数据处理与分析

运用 Excel 2019 对数据进行初步整理;SPSS 26.0 进行单因素方差分析、Duncan 多重比较分析和 Person 相关性分析;Canoco 5.0 进行冗余分析;Origin 进行制图。

2 结果与分析

2.1 不同生态修复类型土壤养分特征

2.1.1 土壤碳、氮、磷含量 由表 2 可知,土壤有机碳平均质量分数为 14.82~38.25 g/kg,变化特征为自然植被恢复样地(YD₄)>干香柏人工纯林(YD₃)>柏木+银木荷人工混交林(YD₂)>云南松+银木荷人工混

交林(YD₁),4 种植被类型下的土壤有机碳含量差异显著。土壤全氮平均质量分数为 1.15~2.91 g/kg,变化特征为自然植被恢复样地(YD₄)>干香柏人工纯林(YD₃)>柏木+银木荷人工混交林(YD₂)>云南松+银木荷人工混交林(YD₁),其中 YD₁、YD₂ 与 YD₃、YD₄ 全氮含量差异显著。土壤全磷平均质量分数为 0.22~0.72 g/kg,变化特征为干香柏人工纯林(YD₃)>自然植被恢复样地(YD₄)>云南松+银木荷人工混交林(YD₁)=柏木+银木荷人工混交林(YD₂),其中 YD₁ 和 YD₂ 与 YD₃、YD₄ 全磷含量差异显著。

2.1.2 土壤碳、氮、磷化学计量特征 由表 2 可知,C : N,C : P,N : P 的变化范围为 12.90~14.90,45.03~82.50,3.18~6.27。C : N 的变化特征为柏木+银木荷人工混交林(YD₂)>干香柏人工纯林(YD₃)>自然植被恢复样地(YD₄)>云南松+银木荷人工混交林(YD₁),其中 YD₁、YD₄ 与柏 YD₂、YD₃ 的 C : N 差异显著。C : P,N : P 变化特征均为自然植被恢复样地(YD₄)>柏木+银木荷人工混交林(YD₂)>云南松+银木荷人工混交林(YD₁)>干香柏人工纯林(YD₃),C : P 在 4 种植被类型下差异显著,YD₁、YD₂ 与 YD₃、YD₄ 的 N : P 差异显著。

表 2 不同生态修复类型土壤碳、氮、磷生态化学计量特征

指标	YD ₁	YD ₂	YD ₃	YD ₄
SOC/(g · kg ⁻¹)	14.82±0.30d	17.70±0.02c	32.45±0.04b	38.25±0.02a
TN/(g · kg ⁻¹)	1.15±0.01c	1.19±0.04c	2.29±0.00b	2.91±0.01a
TP/(g · kg ⁻¹)	0.22±0.01c	0.22±0.01c	0.72±0.01a	0.46±0.01b
C : N	12.90±0.10c	14.90±0.47a	14.16±0.03b	13.16±0.07c
C : P	66.84±0.47c	78.84±1.97b	45.03±0.66d	82.50±2.09a
N : P	5.18±0.08b	5.30±0.30b	3.18±0.04c	6.27±0.19a

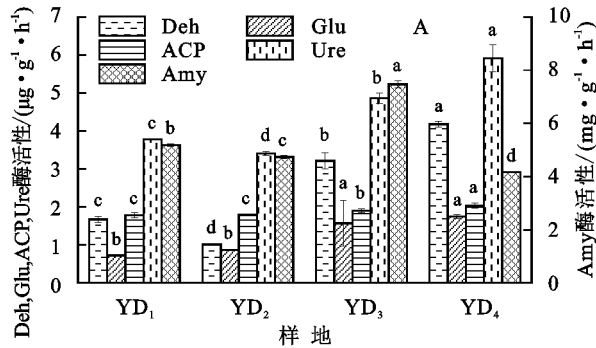
注:同行不同小写字母表示不同植被修复下差异显著(p<0.05)。

2.2 不同生态修复类型土壤酶活性特征

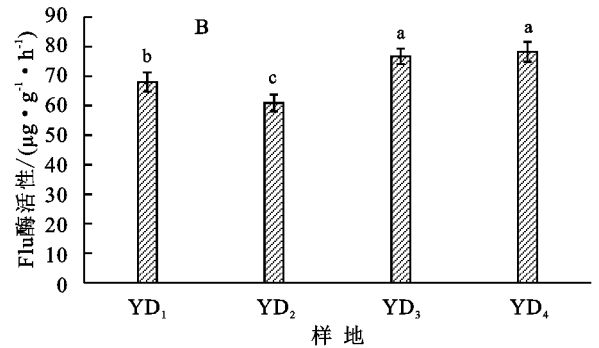
如图 1 所示,淀粉酶(Amy)活性为 4.16~7.47 mg/(g · h),变化特征为干香柏人工纯林(YD₃)>云南松+银木荷人工混交林(YD₁)>柏木+银木荷人工混交林

(YD₂)>自然植被恢复样地(YD₄),在 4 种植被类型下土壤淀粉酶活性差异显著。脱氢酶(Deh)活性为 1.01~4.18 μg/(g · h),变化特征为 YD₄>YD₃>YD₁>YD₂,4 种植被类型下土壤脱氢酶活性差异显著。β-葡萄糖苷酶

(Glu)活性为 0.72~1.75 $\mu\text{g}/(\text{g} \cdot \text{h})$,变化特征为 $\text{YD}_4 > \text{YD}_3 > \text{YD}_2 > \text{YD}_1$,其中, YD_1, YD_2 与 YD_3, YD_4 的葡萄糖苷酶活性差异显著。酸性磷酸酶(ACP)的活性为 1.78~2.04 $\mu\text{g}/(\text{g} \cdot \text{h})$,变化特征为 $\text{YD}_4 > \text{YD}_3 > \text{YD}_2 > \text{YD}_1$, YD_1, YD_2 与 YD_3, YD_4 的酸性磷酸酶活性差异显著。



FDA 水解酶(Flu)活性为 60.89~78.20 $\mu\text{g}/(\text{g} \cdot \text{h})$,变化特征为 $\text{YD}_4 > \text{YD}_3 > \text{YD}_1 > \text{YD}_2$, YD_3 和 YD_4 与 YD_1, YD_2 的 FDA 水解酶活性差异显著。脲酶(Ure)活性为 3.41~5.91 $\mu\text{g}/(\text{g} \cdot \text{h})$,变化特征为 $\text{YD}_4 > \text{YD}_3 > \text{YD}_1 > \text{YD}_2$,4 种植被类型下土壤脲酶活性差异显著。



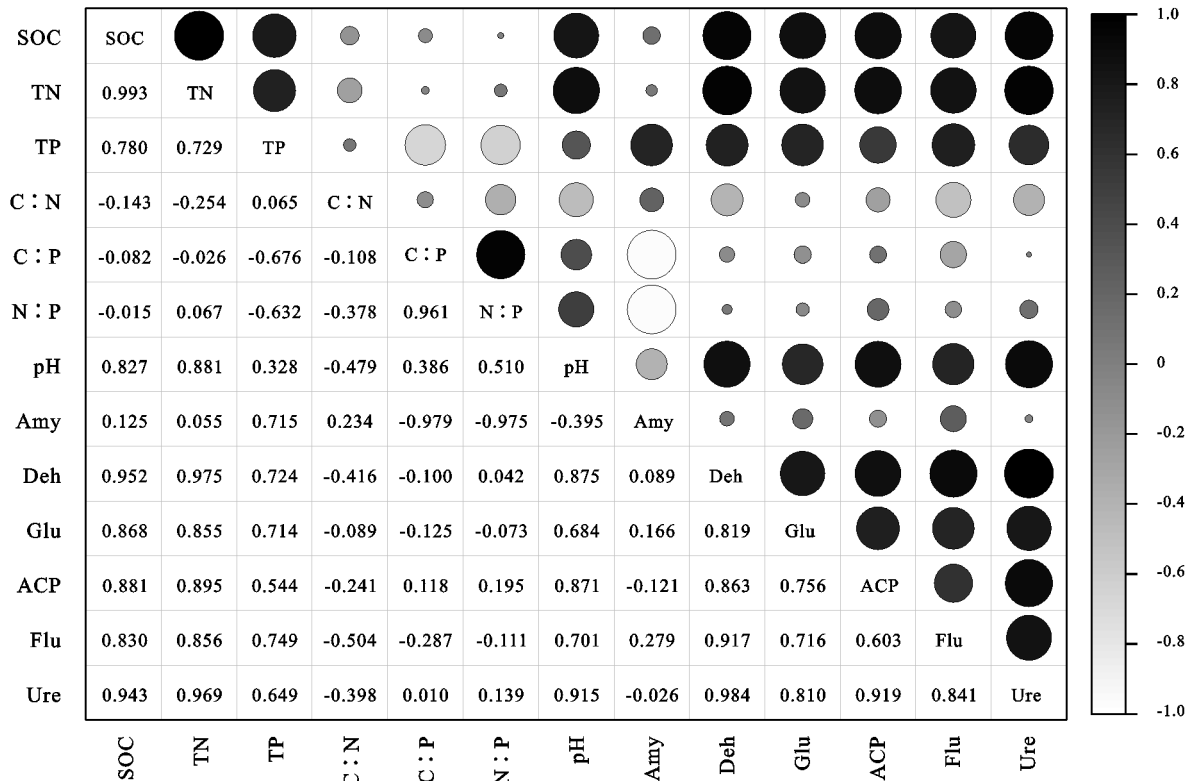
注:不同小写字母表示不同植被修复下土壤酶活性差异显著($p < 0.05$)。

图 1 不同生态修复类型下土壤酶活性

2.3 土壤养分因子与酶活性相关分析

对土壤养分因子和酶活性进行相关性分析(图 2)。结果表明,有机碳、全氮与脱氢酶、 β -葡萄糖苷酶、酸性磷酸酶、FDA 水解酶、脲酶极显著正相关;全磷与淀粉酶、脱氢酶、 β -葡萄糖苷酶、FDA 水解酶极显著正相关;pH 值与脱氢酶、酸性磷酸酶、脲酶极显著正相关;碳磷比、氮磷比与淀粉酶极显著负相关;碳氮比与酶活性无显著相关关系。根据冗余分析结果(图 3),第二排序轴解释量为 99.26%,能够很好地说明

明有机碳、全氮、pH 值与酶活性的关系。根据 RDA 排序图中土壤养分因子与酶夹角的大小可以看出土壤养分因子对酶活性的影响。其中,酸性磷酸酶、脲酶、脱氢酶、 β -葡萄糖苷酶、FDA 水解酶与有机碳、全氮、pH 值呈正相关,而与碳氮比、碳磷比、氮磷比呈负相关;全磷与淀粉酶、FDA 水解酶呈正相关。对土壤养分因子进行前向选择,各因子对酶活性影响的贡献率如表 3 所示,其中全氮贡献率高达 73.1%,说明该研究区内,酶活性很大程度受全氮含量影响。



注:图中颜色越深,表明相关性越强($p < 0.05$)。

图 2 土壤生态化学计量特征与酶活性相关分析

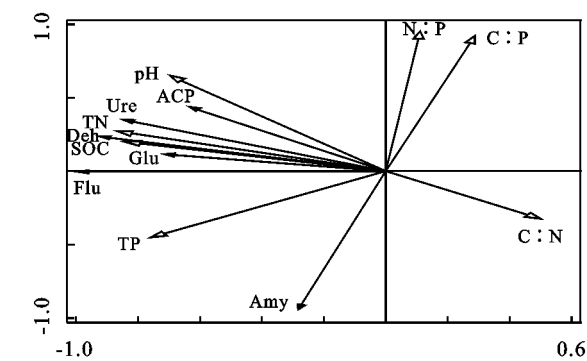


图 3 环境因子与土壤酶活性 RDA 分析

表 3 土壤养分因子解释量及显著性检验

土壤养分因子	解释量/ %	贡献率/ %	近似 F 检验	p
TN	72.3	73.1	26.1	0.002
N : P	10.4	10.5	10.1	0.018
C : P	9.1	9.2	4.4	0.054
TP	3.9	3.9	6.2	0.036
C : N	2.3	2.4	6.9	0.04
SOC	0.6	0.7	2.3	0.168
pH	0.2	0.2	0.8	0.454

3 讨论

3.1 生态修复类型对土壤养分含量的影响

土壤是植被生存的载体,石漠化植被修复效果可以通过土壤养分变化得以表达。不同植被类型下调落物的储量、分解速率不同^[16],导致不同植被下养分含量差异。课题组前期研究表明,研究区土壤碳、氮含量受土壤团聚体和植被类型影响^[17],土壤团聚体的形成过程在不断的积累土壤碳,4种植被修复类型中,自然植被修复样地有机碳和全氮含量最高,一是因为植被以草本和灌木为主,凋落物相对较多且易分解,二是在石漠化地区,土壤养分含量有限,很难为乔木下层植被提供养分。土壤碳氮含量与凋落物本身的性质有关,如叶片厚度、硬度、是否有蜡质层等^[18],凋落物质地较硬,会延缓分解速率和影响分解菌的着生,从而影响土壤养分含量,研究区内银木荷长势差、叶厚革质,难分解。云南松枯落物含有难分解成分,如木质素、蜡质等^[19],此外,在云南农村地区,有把云南松叶用作引火材料和粪材的传统,人为活动也是造成养分差异的原因。

石漠化地区磷主要来源于岩石风化,但易受降雨冲刷和淋溶而流失^[20],该研究中干香柏人工纯林修复下土壤磷含量最高,可能是由于干香柏根系发达,其侧根、细根能在石缝中延伸,吸收更多的磷,除此之外,乔木的林冠还可以减少降雨的击溅,从而减少土壤中磷的损失。根据野外采样观察发现,研究区内各样地林分密度不同,密度越大,对养分的需求越高,能从土壤中吸收更多的养分。该研究中,人工纯林和自然植被恢复样地土壤养分含量较高,与杨宁等^[21]的研究结果混交林的营养元素含量更高不一致,这可能

与石漠化地区特殊的水土条件有关。

3.2 生态修复类型对土壤化学计量特征的影响

石漠化地区养分循环与转化的核心即土壤碳、氮、磷 3 种养分的平衡,土壤养分化学计量比能够反映三者间的关系^[8],植被类型不同会导致土壤养分化学计量比产生差异。C : N 可以用于衡量土壤肥力水平和各营养元素的平衡关系,我国土壤 C : N 的平均值处于 10.0~12.0^[22],研究区土壤 C : N 均值为 13.78,高于全国平均水平,较高的 C : N 说明研究区内土壤有机质分解及矿化速率较慢,有利于土壤养分的积累。该区域 C : N 与全氮含量表现为负相关关系,一定程度上说明了该石漠化地区氮素的缺乏。

C : P 可用于衡量微生物对磷元素的吸收和转化潜力^[23],本试验中,C : P 均值为 68.3,高于全国平均值 61^[20],说明研究区域内磷元素的利用率及有效性较低,同时也会对微生物的分解作用造成不同程度的影响,自然植被恢复样地的 C : P 最高,说明了该石漠化地区自然植被的磷有效性最低,其原因可能是磷来源稳定,加上该区域无人工施肥,从而导致 C : P 值较高。N : P 可用于土壤养分限制条件的预测和土壤氮饱和和状况的判断^[23]。有研究表明,植被类型对 N : P 影响显著^[17],本试验中,N : P 均值为 4.98,低于全国平均值 5.2^[20],说明该区域植被生长限制因素为氮素,也印证了该区域氮素的缺乏。

3.3 生态修复类型对土壤酶活性变化特征的影响

土壤酶可用于衡量土壤质量状况,与有机碳、全氮、全磷等土壤养分状况密切相关,此外,还与植被特征、土壤微生物、土壤动物类群、数量和多样性以及酶本身性质有关^[24]。地上植被会影响土壤微生物活动,是因为不同植被的土壤养分保持能力不一样^[25],进而影响土壤养分含量及酶活性。本研究中,干香柏人工纯林淀粉酶活性最高,淀粉酶可以水解土壤中的淀粉,增加土壤中易溶性有机养分,对土壤中碳的循环具有重要意义^[26],土壤中碳含量越低,说明植物吸收利用的碳越多,碳循环效率越高,根据相关性分析表明淀粉酶活性与全磷含量极显著正相关,主要是由于干香柏根系发达,吸收的磷较多,提高了淀粉酶活性。 β -葡萄糖苷酶、酸性磷酸酶、脲酶活性变化一致,均为自然植被恢复样地活性最高,脲酶、酸性磷酸酶还能促进氮磷的转化。有研究表明,脲酶、酸性磷酸酶活性与蚯蚓排泄物有关^[27],有机质是影响土壤微生物和土壤动物生物量的主要因素,在石漠化缺水条件下,并不会存在大量土壤动物,相比于乔木,草灌能够生长在岩石缝隙,改善土壤环境,为土壤动物营造适宜的生存环境,FDA 水解酶、脱氢酶的活性均为自然植被修复下最高,可能与微生物生物量及活动能力有关。

4 结论

(1) 研究区不同植被修复类型下土壤养分含量、土壤养分化学计量比差异显著。自然植被修复下土壤 C、N 含量最高,其次为干香柏人工纯林,P 含量最高的为干香柏人工纯林,其次为自然植被修复样地,全磷含量为干香柏纯林下最高;自然植被恢复下土壤 C:P 与 N:P 最高,C:N 最高的为柏木+银木荷混交林,较高的 C:N 和较低的 N:P 说明了该区氮素的缺乏。综合来看,自然植被修复和干香柏人工纯林两种修复模式下土壤养分条件较好。

(2) 研究区不同植被修复类型下土壤酶活性差异显著,淀粉酶活性以干香柏人工纯林最高,自然恢复植被样地最低,其余酶活性均是自然植被恢复样地最高。

(3) 相关性分析结果表明,有机碳、全氮、全磷、pH 值是影响土壤酶活性的主要因素。其中,全氮是影响土壤酶活性的主要因素,同时也是研究区土壤质量的限制因子。

参考文献:

- [1] 曹建华,邓艳,杨慧,等.喀斯特断陷盆地石漠化演变及治理技术与示范[J].生态学报,2016,36(22):7103-7108.
- [2] 邹志刚,张浩,曾昭霞,等.云南断陷盆地喀斯特 4 种典型种植模式的能值分析[J].应用生态学报,2018,29(8):2641-2650.
- [3] 丁新辉,刘孝盈,刘广全.基于改进 TOPSIS 法的南方岩溶区石漠化生态治理模式评价[J].泥沙研究,2021,46(2):54-58,20.
- [4] 伏文兵,严友进,李华林,等.岩溶槽谷石漠化综合治理区治理生态效益评价[J].西南大学学报:自然科学版,2021,43(7):146-156.
- [5] 许尔琪.基于 CiteSpace 的喀斯特石漠化国际研究进展[J].中国岩溶,2021,40(4):728-738.
- [6] Jiang Z, Lian Y, Qin X, et al. Rocky desertification in Southwest China: impacts, causes, and restoration[J]. Earth-Science Reviews, 2014,132:1-12.
- [7] Liu Y, Huang X, Yang H, et al. Environmental effects of land-use/cover change caused by urbanization and policies in Southwest China Karst area: A case study of Guiyang[J]. Habitat International, 2014,44:339-348.
- [8] 汪攀.喀斯特石漠化生态系统土壤 C、N、P 生态化学计量学特征及其环境影响因子研究[D].贵阳:贵州师范大学,2019.
- [9] 刘娜,喻理飞,赵庆,等.喀斯特高原石漠化区次生林叶片-枯落物-土壤连续体碳氮磷生态化学计量特征[J].应用与环境生物学报,2020,26(3):681-688.
- [10] Fan H, Wu J, Liu W, et al. Linkages of plant and soil C:N:P stoichiometry and their relationships to forest growth in subtropical plantations [J]. Plant and Soil, 2015,392(1):127-138.
- [11] 关松荫.土壤酶及其研究法[M].北京:农业出版社,1986.
- [12] Badiane N N Y, Chotte J L, Pate E, et al. Use of soil enzyme activities to monitor soil quality in natural and improved fallows in semi-arid tropical regions [J]. Applied Soil Ecology, 2001,18(3):229-238.
- [13] 王宇,张华,张贵,等.喀斯特断陷盆地环境地质分区及功能[J].中国岩溶,2017,36(3):283-295.
- [14] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3 版.北京:农业出版社,2000.
- [15] Kandeler E, Getber H. Short-term assay of soil urease activity using determination of ammonium[J]. Biology and Fertility of Soils, 1988,6(1):68-72.
- [16] 陈玉平,吴佳斌,张曼,等.枯落物处理对森林土壤碳氮转化过程影响研究综述[J].亚热带资源与环境学报,2012,7(2):84-94.
- [17] 吴丽芳,王妍,刘云根,等.岩溶石漠化区人工植被类型对土壤团聚体生态化学计量特征的影响[J].东北林业大学学报,2021,49(6):63-69.
- [18] 曾锋,邱治军,许秀玉,等.森林凋落物分解研究进展[J].生态环境学报,2010,19(1):239-243.
- [19] 陈培云,范毅,何停,等.滇东岩溶高原不同恢复阶段云南松林叶片-枯落物-土壤碳氮磷化学计量特征[J].应用与环境生物学报,2022,28(6):1549-1556.
- [20] Tian H, Chen G, Zhang C, et al. Pattern and variation of C:N:P ratios in China's soils: a synthesis of observational data[J]. Biogeochemistry, 2010,98:139-151.
- [21] 杨宁,邹冬生,杨满元,等.衡阳紫色土丘陵坡地不同植被恢复阶段土壤微生物群落多样性的变化[J].林业科学,2016,52(8):146-156.
- [22] 殷全玉,许希希,孟晓楠,等.不同炭化温度生物质炭对不同质地植烟土壤铵态氮含量的影响[J].南京农业大学学报,2018,41(5):881-887.
- [23] 何高迅,王越,彭淑娴,等.滇中退化山地不同植被恢复下土壤碳氮磷储量与生态化学计量特征[J].生态学报,2020,40(13):4425-4435.
- [24] 杨万勤,钟章成,陶建平,等.缙云山森林土壤酶活性与植物多样性的关系[J].林业科学,2001,37(4):124-128.
- [25] 赵朝辉.湘西南石漠化治理模式对土壤微生物量和酶活性的影响[D].长沙:中南林业科技大学,2012.
- [26] 孙文颖,马维伟,李广,等.琼海湿地植被退化过程中土壤蔗糖酶和淀粉酶活性的动态特征[J].草地学报,2019,27(1):88-96.
- [27] Park S C, Smith T J, Bisesi M S, et al. Activities of phosphomonoesterase from *Lumbricus terrestris* [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1992,24:873-876.