

贵州省铝土矿山植被恢复短期土壤有机碳变化驱动因素

周娜娜¹, 罗帮林², 冯娅瑛¹, 曾睿菠¹, 韩珍¹

(1. 贵州大学林学院, 贵州 550025; 2. 西南大学资源环境学院, 重庆 400716)

摘要: [目的] 探究植被恢复短期内矿区土壤有机碳变化规律及驱动因素, 以期为快速提高矿区土壤有机碳提供理论依据。[方法] 以贵州省典型铝土矿区为研究区, 分析植被恢复短期内(恢复年限为当年、1 a、2 a、3 a)土壤环境、有机碳及其活性有机碳组分(颗粒有机碳 POC、易氧化有机碳 ROC、轻组分有机碳 LFOC)、碳库管理指数(CPMI)及驱动土壤有机碳及其活性有机碳组分变化的因子。[结果] 1) 铝土矿区土壤有机碳含量低, 为 13.781~24.566 g/kg, 易氧化有机碳占总有机碳比例随着恢复年限增加而增大; 2) 与恢复当年相比, 植被恢复短期显著提高碳库管理指数, 具体数值大小为 3 a(39.46) > 1 a(38.88) > 2 a(32.26) > 当年(16.65); 3) 冗余分析结果显示, 土壤 pH 和细菌群落丰富度对有机碳及其活性有机碳组分含量的解释量分别达到 40.2% 和 22.8%。[结论] 铝土矿区植被恢复短期内易氧化有机碳是土壤碳库的重要指标, 植被恢复短期提高碳库管理指数, 影响土壤有机碳及其活性有机碳组分含量变化的主要因子为 pH 和细菌丰富度。

关键词: 植被恢复; 土壤有机碳; 活性有机碳组分; 碳库管理指数

中图分类号: S154.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)03-0215-09

Driving Factors of Short-term Changes in Soil Organic Carbon during Vegetation Restoration in Bauxite Mines in Guizhou Province

ZHOU Nana¹, LUO Banglin², FENG Yaying¹, ZENG Ruibo¹, HAN Zhen¹

(1. College of Forestry, Guizhou University, Guizhou 550025, China; 2. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China)

Abstract: [Objective] To explore the changes in soil organic matter in the short term during vegetation restoration in bauxite mining areas and their driving factors, in order to provide basic data for rapidly increasing soil organic carbon in mining areas. [Methods] Taking a typical bauxite mining area in Guizhou Province as the research area, we analyzed soil environment, soil organic carbon and its active organic carbon components (particulate organic carbon, POC; readily oxidizable organic carbon, ROC; light fraction organic carbon, LFOC), carbon pool management index (CPMI), and the factors driving changes in soil organic carbon and its active components during the short term of vegetation restoration (recovery years include the current year, 1 year, 2 years and 3 years). [Results] 1) Soil organic carbon content in the bauxite mining area was low, ranging from 13.781 to 24.566 g/kg, with the proportion of readily oxidizable organic carbon to total organic carbon increasing with the recovery years. 2) Compared to the current year of recovery, short-term vegetation restoration significantly increased the carbon pool management index, with specific values ranked in the order of 3 years (39.46) > 1 year (38.88) > 2 years (32.26) > current year (16.65). 3) Redundancy analysis showed that soil pH and bacterial community richness explained 40.2% and 22.8% of the variation in the content of organic carbon and its active organic carbon components, respectively. [Conclusion] During the short term of vegetation restoration in bauxite

收稿日期: 2024-11-14

修回日期: 2024-12-31

录用日期: 2025-01-02

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-03-10

资助项目: 国家自然科学基金项目(42467043); 贵州省教育厅高等学校科学研究项目(青年项目)(黔教技[2022]112号)

第一作者: 周娜娜(2001—), 女, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀及流域治理研究。E-mail: zhounn11@163.com

通信作者: 韩珍(1994—), 女, 博士, 副教授, 主要从事土壤侵蚀及流域治理研究。E-mail: zhan@gzu.edu.cn

<http://stbcbx.alljournal.com.cn>

mining areas, readily oxidizable organic carbon is an important indicator of soil carbon pool, short-term vegetation restoration has increased the carbon pool management index, and the main factors influencing changes in soil organic carbon and its active organic carbon components are pH and bacterial richness.

Keywords: vegetation restoration; soil organic carbon; active organic carbon components; carbon pool management index

Received: 2024-11-14

Revised: 2024-12-31

Accepted: 2025-01-02

Online(www.cnki.net): 2025-03-10

矿产资源开发对我国经济建设和社会发展起到重要的支撑作用,然而矿山开采过程会造成地表景观破坏、土壤退化与污染、生物多样性丧失和生态系统崩溃^[1]。植被恢复作为矿区生态修复当中的有效手段,可以改善土壤结构,提高土壤肥力,改善生物多样性^[2]。有机碳(SOC)作为土壤性质的重要组成部分,是土壤物质中较活跃的部分^[3],不仅能够改善土壤质量,也可以提供各种营养元素供植物生长,探讨矿山植被恢复过程中土壤有机碳变化对矿区植被后期管理和改善土壤碳库质量具有重要的理论意义。

土壤有机碳的数量和质量动态最初主要是通过其活性部分的变化表现出来,尽管其占全碳的比例很小,但能及时反映土壤碳库的微小变化,较总有机碳更敏感,在土壤碳库平衡中发挥重要作用^[4]。以往研究^[5]表明,植被恢复措施能有效提高有机碳质量分数,且有利于土壤活性有机碳组分增加,但是不同的植被类型可能呈现不同的效果,比如,沙柳和樟子松在植被恢复中可以增加土壤有机碳质量分数^[6],人工种草措施反而降低土壤总有机碳和储量,以及土壤有机碳各组分质量分数^[7]。植被建植种类及其配置的不同导致凋落物数量、分解速率及土壤环境不同,从而对土壤碳产生影响^[8],特别是活性碳组分存在差异。土壤环境变化中,微生物作为土壤中的重要生物成分,其变化速度快,能够快速适应矿区复杂的环境变化,是矿区土壤修复中起关键作用的指标。土壤微生物在土壤有机碳的转化中发挥着重要的作用,作为土壤碳循环的主要驱动者^[9],其群落结构和功能的改变对土壤有机碳的质量分数产生影响^[10]。

一般来说,植被恢复手段中自然恢复相较于人工恢复效果更好,但是矿区土壤条件较差,人工建植比自然恢复更有利于矿区的生态修复^[11]。土壤固碳能力在植被长时间恢复后已经逐渐趋于稳定,难以通过人工措施来进一步改善^[12]。贵州省具有丰富的铝土矿产资源,对于该省经济发展十分重要,鉴于此,本研究以贵州省典型铝土矿区为研究区,分析植被恢复短期内土壤环境、土壤有机碳及其活性有机碳组分变化和土壤碳库管理指数,进一步探究土壤

环境对于土壤有机碳及其组分质量分数变化影响的驱动因素,对制定快速提高矿区土壤有机碳措施具有重要理论意义,为提出有效管理措施、推动矿区生态修复工作提供数据基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于贵州省清镇市(26°42′30″~26°43′05″N, 106°27′14″~106°28′07″E),属于典型北亚热带季风湿润气候区(图1)。雨量充沛,年平均气温 14.1℃,极端最高气温 34.5℃,极端最低气温 8.6℃。最热月 7 月平均气温 22.7℃,最冷月 1 月平均气温 4.1℃,气温年较差为 18.6℃。地势东南、西南高,海拔 1 200~1 400 m。土壤质地主要为黄壤土, pH 6.8~7.1。刺槐具有耐贫瘠和抗旱能力强的特点,可以改变土壤酸碱性提高土壤养分,是矿区修复的理想树种,因此,研究区所选用的修复树种为刺槐。

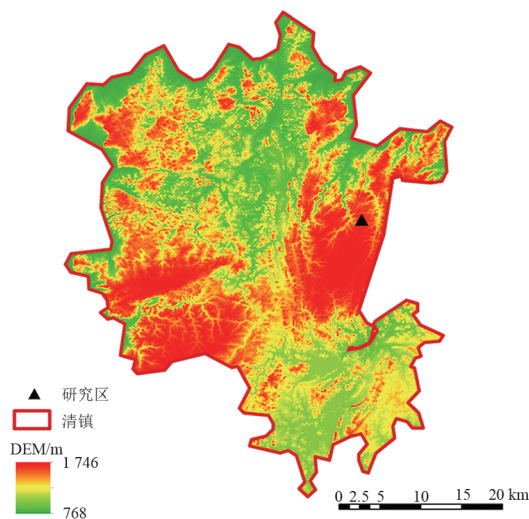


图1 研究区概况

Fig. 1 Overview of the study area

1.2 样品采集

于 2023 年 4 月在贵州省清镇市铝土矿区进行采样,选择植被恢复当年(0 a)、恢复 1 a、恢复 2 a、恢复 3 a 和未采矿区(CK)5 个样地的土壤作为研究对象,并以人工植被一致性为原则,采用空间替代时间法^[13]。按五点法在每个样地随机采集 0~10 cm 表土约 200 g,混合为 1 000 g 混合土样,每个年限类型设 3

个重复。现场剔除植物根系、砾石等,一部分带回实验室进行风干后,过 2 mm 筛备用,另一部分新鲜土样无菌采样后,密封保存直接装入泡沫箱冷藏密封邮寄至上海美吉生物云公司进行测序。

1.3 土壤样品测定

土壤样品基本理化性质的测定参照《土壤农化分析》^[14]:电位测定法(水土比 2.5:1)测定土壤 pH,烘干法测定土壤水分体积分数,重铬酸钾加热法测定土壤有机碳,微量凯氏定氮法测定全氮。土壤微生物多样性采用高通量测序和荧光定量 PCR 技术,基于所得到的 OTU 序列进行 α 多样性指数的计算。

土壤 SOC 分别采用物理分组法和化学分组法进行分类。物理分组法根据土壤粒级大小将 SOC 分成颗粒有机碳(POC)和矿物态有机碳(MOC)2 个组分;根据密度大小将 SOC 分成轻组分有机碳(LFOC)和重组分有机碳(HFOC)2 个组分。POC 的测定采用六偏磷酸钠分散法^[15],LFOC 的测定采用 NaI 密度分离法^[16]。化学分组根据能否被 333 mmol/L KMnO₄氧化分成易氧化有机碳(ROC)和惰性有机碳(DOC)2 个组分,ROC 的测定采用 KMnO₄氧化法^[17]。MOC、HFOC、DOC 质量分数均采用差减法计算。

1.4 碳库管理指数

碳库管理指数(CPMI)指土壤有机碳与对照土壤有机碳的比值乘以土壤有机碳的活度指数^[17]。CPMI 是土壤管理措施引起土壤有机碳变化的指标,是土壤碳质量分数变化的系统的、敏感的监测方法,能够全面、动态反映外界因素对土壤有机碳数量及质量的影响。

$$CPI = SOC/SOC_0 \tag{1}$$

$$A = ROC/DOC \tag{2}$$

$$AI = A/A_0 \tag{3}$$

$$CPMI = CPI \times AI \times 100 \tag{4}$$

式中:CPI 为碳库指数;SOC 为土壤有机碳,g/kg;SOC₀为参考土壤有机碳,g/kg;A 为碳库活度;ROC 为土壤易氧化有机碳,g/kg;DOC 为土壤惰性碳,g/kg;AI 为碳库活度指数;A₀为参考土壤活度;CPMI 为碳库管理指数。

1.5 统计分析

利用 SPSS 26.0 软件进行统计分析,采用单因素方差(ANOVA)和多重比较(LSD)分析不同恢复年限环境因子、土壤有机碳组分及土壤碳库管理指数差异性,采用 R 语言进行微生物多样性的计算。文中所有图件的绘制采用 Origin Pro 2024 软件,采用 Canoco 5 软件进行冗余分析(RDA)。

2 结果与分析

2.1 土壤环境因子

本研究选取土壤基本理化性质部分指标及微生物群落的物种丰富度和多样性来表征土壤环境。不同样地土壤的基本理化性质指标见表 1。5 个样地土壤酸碱性均呈弱酸性,pH 为 6.360~6.730,表现为显著性差异。1 a 和 2 a 样地土壤含水率与其余 3 个样地之间存在显著差异($p<0.05$),土壤含水率表现为 CK>3 a>0 a>1 a>2 a,并且矿区的整体含水率均较低。CK 的 SOC 值最大,为 38.347,且与 0 a、1 a、2 a、3 a 具有显著差异。TN 质量分数随恢复年限的增加呈上升趋势,但远小于 CK 的 TN 质量分数,说明 TN 的恢复可能需要更长的年限才能产生明显差异。CK 的土壤水分体积分数、有机碳、TN 均最高,说明相比恢复后的土壤,CK 土壤质量更好。

表 1 不同植被恢复年限土壤理化性质

Table 1 Physicochemical properties of soils under different vegetation restoration durations					
恢复年限/a	pH	土壤含水率/%	土壤有机碳/(g·kg ⁻¹)	土壤总氮/(g·kg ⁻¹)	碳氮比(C:N)
0	6.360±0.001e	0.163±0.015a	20.172±1.598bc	0.759±0.035b	24.254±1.489
1	6.653±0.003b	0.087±0.024b	24.566±3.459b	0.742±0.043b	17.548±3.707
2	6.730±0a	0.080±0.009b	13.781±1.830c	0.736±0.044b	18.617±3.107
3	6.620±0.001c	0.176±0.005a	16.577±1.112bc	0.975±0.250b	32.885±6.256
CK	6.407±0.002d	0.189±0.022a	38.347±1.830a	1.581±0.073a	26.637±2.277

注:表中数据为平均值±标准差(n=3);同列不同小写字母表示不同处理单因素方差分析和 LSD 检验在 5% 水平上显著性差异($p<0.05$)。下同。

选代表物种丰富度的 Chao1 指数和代表物种多样性的 Shannon 指数来表征微生物 α 多样性,不同植被恢复年限土壤微生物种丰富度及多样性变化见表 2。由表 2 可知,土壤细菌 Chao1 丰富度指数和 Shannon 多样性指数随恢复年限的增加表现为先减少再增加后减少趋势。植被恢复当年土壤细菌丰富

度及多样性为最大,恢复 1 a 的土壤细菌丰富度及多样性最小。土壤真菌 Chao1 丰富度指数和 Shannon 多样性指数随植被恢复年限的增加呈下降趋势,植被恢复当年土壤真菌丰富度及多样性最大,CK 土壤真菌丰富度和多样性最小,植被恢复当年相比 CK 丰富度和多样性分别增加 149% 和 102%。

结果显示,恢复当年的 α 多样性最大,可能是由其扰动程度大造成的,而1、2、3 a的微生物群落 α 多样性值更加接近CK,说明植被恢复年限的增加对于其扰动程度大造成的,而1、2、3 a的微生物群落 α 微生物群落有所影响。

表 2 不同植被恢复年限土壤细菌和真菌物种丰富度及多样性

恢复年限/a	土壤细菌		土壤真菌	
	Chao1 丰富度指数	Shannon 多样性指数	Chao1 丰富度指数	Shannon 多样性指数
0	3 244.70±313.94a	6.14±0.15a	1 316.87±205.96a	5.10±0.36a
1	1 800.84±581.69c	4.77±0.92b	815.13±127.77b	4.03±0.26b
2	2 854.34±520.56c	6.09±0.22a	839.73±270.00b	3.67±0.70b
3	2 525.17±33.18b	5.81±0.13a	846.00±213.03b	3.57±0.78b
CK	2 445.77±149.52b	5.97±0.07a	528.91±271.15b	2.52±0.93c

注:表中数据为平均值±标准差,n=5。

2.2 土壤有机碳组分

由图2可知,随着植被恢复年限增加,POC质量分数呈先增加再减少趋势,表现为CK(17.9 g/kg)>2 a(16.2 g/kg)>1 a(11.7 g/kg)>3 a(11.5 g/kg)>0 a(8.38 g/kg)。POC质量分数占比随植被恢复年限的增加呈

波动趋势,其中2 a的POC质量分数占比最高,为65%,1 a的POC质量分数占比最低,为15%。植被恢复1、2、3 a中土壤POC质量分数高于0 a的POC质量分数,但未随植被恢复年限的增加而增加,说明短期植被恢复年限与POC质量分数间关联性较弱。

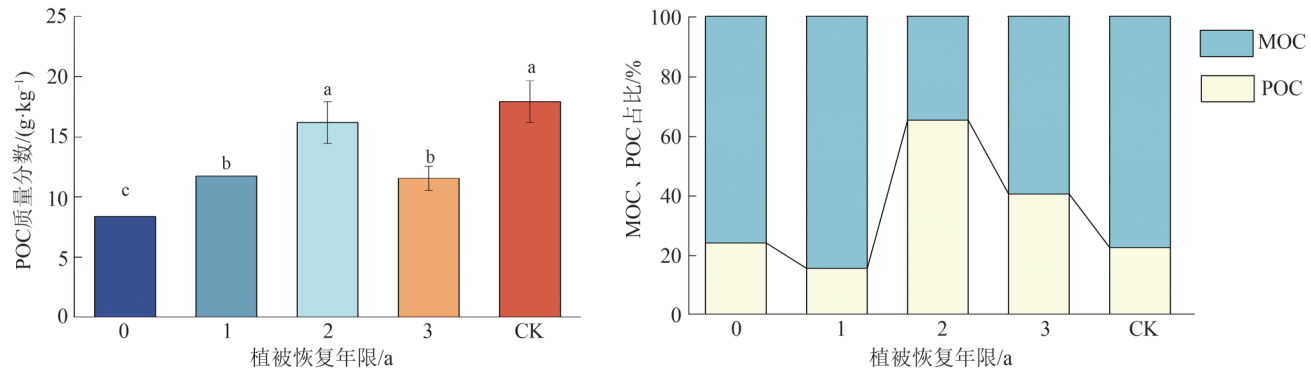


图 2 不同植被恢复年限 POC 质量分数及 POC 和 MOC 占总有机碳比变化

Fig. 2 POC content and changes in the ratio of POC and MOC to total organic carbon in soils under different vegetation restoration durations

由图3可知,ROC质量分数在不同植被恢复年限间无显著性差异,CK土壤的ROC质量分数远高于植被恢复的4个样地,且具有显著差异($p<0.05$)。随着植被恢复年限增加,ROC质量分数表现为升高再降低再升高趋势,恢复1 a的ROC质量分数最高,

为5.57 g/kg,恢复3 a与0 a相比,质量分数增加190%。在所有样地中,土壤ROC的占比均偏低,为13%~32%。随着植被恢复年限增加,ROC占比表现为增大,且在恢复2 a、3 a与CK相近,说明短期植被恢复年限与ROC间有较强关联性。

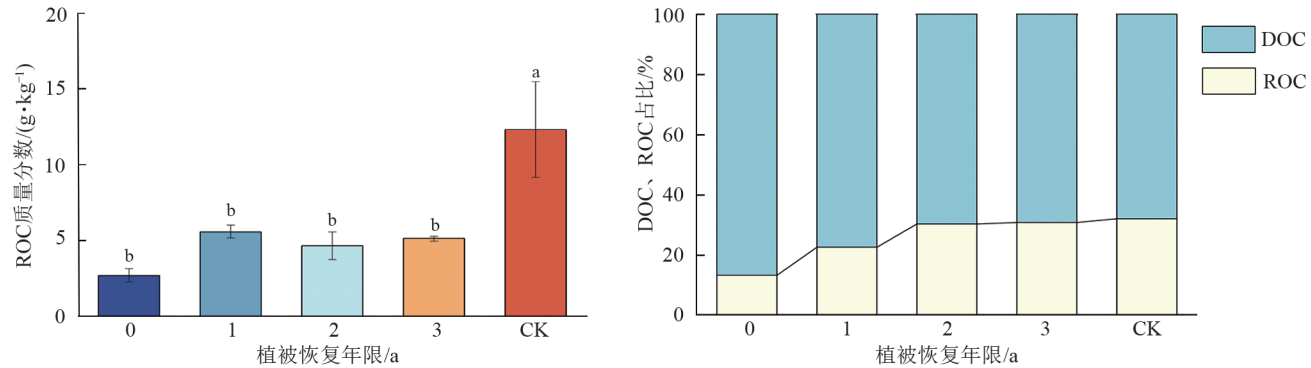


图 3 不同植被恢复年限 ROC 质量分数及 ROC 和 DOC 占总有机碳比变化

Fig. 3 ROC content and changes in the ratio of ROC and DOC to total organic carbon in soils under different vegetation restoration durations

由图4可知,LFOC质量分数在不同恢复年限未表现出显著差异($p>0.05$),随着植被恢复年限增加呈先增加后降低再增加趋势,在恢复3a出现最大值,为0.17 g/kg,在恢复2a出现最小值,为0.02 g/kg,CK的LFOC质量分数为0.08 g/kg。

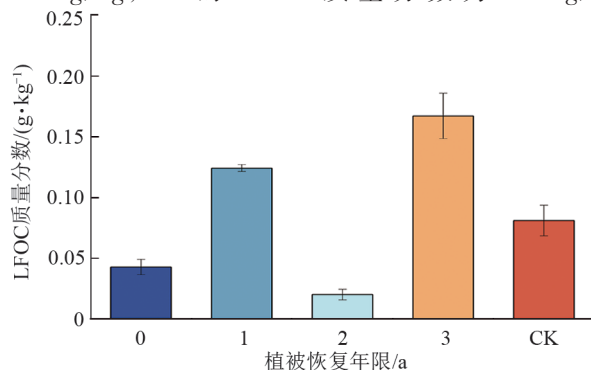
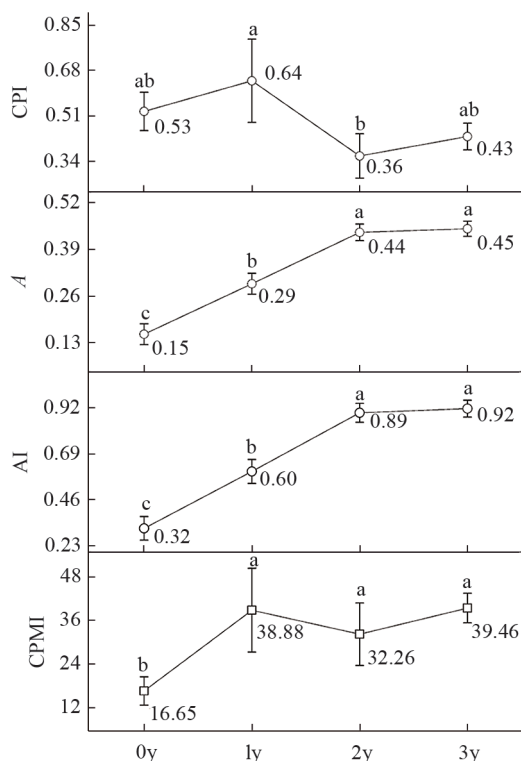


图4 不同植被恢复年限LFOC质量分数及LFOC和HFOC占总有机碳比变化

Fig. 4 LFOC content and changes in the ratio of LFOC and HFOC to total organic carbon in soils under different vegetation restoration durations

2.3 土壤碳库管理指数

由图5可知,碳库指数CPI表现为随植被恢复年限的增加呈先变大后变小趋势,且恢复1与2、3a间具有显著差异($p<0.05$)。



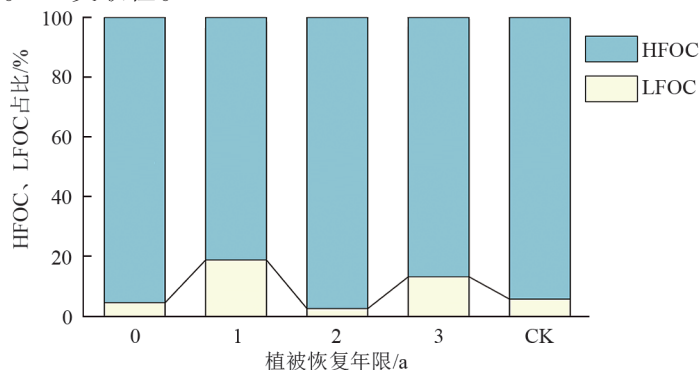
注:CPI为碳库指数;A为碳库活性;AI为碳库活性指数;CPMI为碳库管理指数。

图5 不同植被恢复年限碳库管理指数变化

Fig.5 Changes in carbon pool management index for different vegetation restoration durations

碳库活性A和碳库活性指数AI表现为相同趋势,即随着植被恢复年限增加,碳库活性A增大,碳库活

LFOC质量分数占比2%~19%,占总有机碳比例随着植被恢复年限增加呈先升高再降低再升高趋势,最大值出现在恢复1a,为19%。矿区植被恢复过程中LFOC质量分数均较低,且与植被恢复年限无关联性。



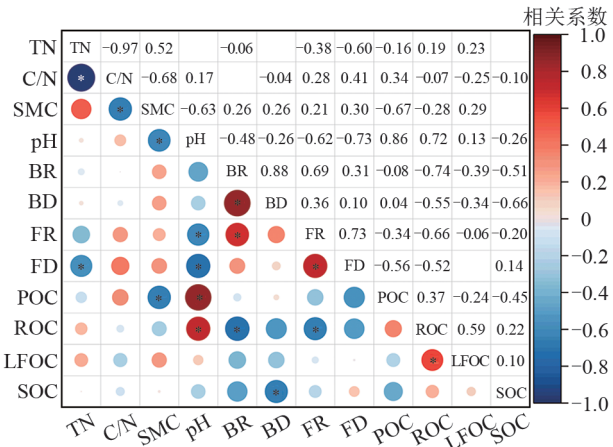
度指数AI进一步增大,恢复2、3a后,与恢复0、1a间具有显著差异($p<0.05$)。碳库管理指数CPMI随植被恢复年限的增加有所变大,由16.65增大到39.46,恢复0a与恢复1、2、3a具有显著差异($p<0.05$)。碳库指数结果说明,在矿区短期植被恢复过程中,一定程度上可以提升活性有机碳质量分数,改善有机碳库质量。

2.4 土壤有机碳及其组分变化的驱动因子分析

由图6可知,SMC与pH和POC呈显著负相关($p<0.05$);pH与FR呈显著负相关($p<0.05$),与POC呈显著正相关($p<0.05$);C/N与SMC呈显著负相关($p<0.05$);BR与ROC呈显著负相关($p<0.05$);BD与ROC和LFOC呈负相关;FD与POC呈负相关。同时可以看出,SOC与ROC、LFOC呈正相关,与POC呈负相关;ROC与LFOC呈显著正相关($p<0.05$)。结果表明,植被恢复过程中与土壤碳组分显著相关的环境因子为pH、BR和BD,pH影响POC、ROC,BR影响ROC,BD影响SOC,LFOC与土壤理化因子均无相关性。

选取pH、TN、SMC、C/N、BR、BD、FR、FD 8个土壤环境因子对土壤有机碳及其各组分冗余分析的差异性解释量。环境因子在前2个排序轴累计解释土壤有机碳及其各组分特征的72.54%,且对二者关系的累计解释量达98.81%,因此冗余分析的前2个排序轴可以很好地反映土壤有机碳及其各组分质量分数积累与土壤理化因子的关系(表3)。对前2个排序轴进行作图获得冗余分析排序图(图7)可知,pH和BR的箭头连线较长,2个土壤环境因子对土壤有机碳及其各组分的质量分数存在显著影响。pH因子与有机碳组分之间的夹角

均 $<90^{\circ}$,表明pH对有机碳组分均表现为正相关。BR因子与第Ⅰ轴的夹角较小,表明BR因子与有机碳及其相关组分之间的相关性较高。



注: SOC 为土壤有机碳; TN 为全氮; C/N 为碳氮比; SMC 为土壤含水率; pH 为酸碱度; BR 为细菌丰富度 Bacterial richness; BD 为细菌多样性 Bacterial diversity; FR 为真菌丰富度 Fungal richness; FD 为真菌多样性 Fungal diversity; POC 为颗粒有机碳; ROC 为易氧化有机碳; LFOC 为轻组分有机碳; SOC 为有机碳; *表示 $p\leq 0.05$ 。下同。

图 6 土壤有机碳及各组分质量分数与土壤环境因子相关性
Fig.6 Correlations between the contents of soil organic carbon and its components with soil environmental factors

表 3 土壤有机碳及其各组分的解释变量冗余分析

项目	第Ⅰ轴	第Ⅱ轴	第Ⅲ轴	第Ⅳ轴
特征值	0.463 8	0.261 6	0.130 4	0.016 3
有机碳及各组分累计解释量	46.380 0	72.540 0	85.590 0	87.210 0
有机碳及各组分-环境因子相关性	0.988 1	0.881 8	0.875 5	0.942 8
有机碳及各组分-环境因子累计解释量	53.190 0	83.180 0	98.130 0	100.000 0

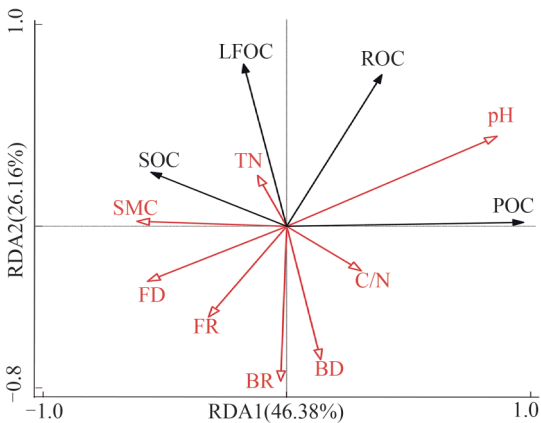


图 7 冗余分析排序
Fig. 7 Redundancy analysis ordination plot

由表 4 可知,pH 和 BR 的影响均达到极显著水平($p<0.01$),FR、TN、FD、SMC 均无显著性影响。环境因子的重要性排序依次为 $pH>BR>SMC>FR>BD>C/N>TN>FD$,且 pH 和 BR 对于有机碳及其各组分质量分数的解释量分别达到 40.2% 和 22.8%,远高于其他因子,证明其在矿区植被恢复中是影响土壤有机碳及其活性有机碳的主要因子。

表 4 土壤环境因子的重要性排序和显著性检验结果

Table 4 Ranking of importance and significance test results of soil environmental factors				
指标	重要性排序	解释量	F	p
pH	1	40.2	6.7	0.004
BR	2	22.8	5.6	0.008
SMC	3	7.4	2.0	0.176
FR	4	5.3	1.5	0.272
BD	5	2.6	0.7	0.510
C/N	6	3.1	0.8	0.476
TN	7	5.3	1.6	0.262
FD	8	0.5	0.1	0.946

3 讨论

3.1 植被恢复短期内土壤有机碳及碳库管理指数变化

本研究表明,植被恢复初期土壤有机碳质量分数均较低,是因为铝土矿区土壤质量差,经采矿活动中机械压实破坏土壤团聚体,进而影响土壤有机碳的转化及矿化^[18]。铝土矿区土壤中较高的铝抑制植物根系的生长及对水分和养分的吸收^[19],植被生长效果较差,凋落物来源较少,在短期内恢复有机碳质量分数的波动变化。

POC 和 LFOC 质量分数与人为活动的关系密切,而矿区开采过程中遵循的是边开采边恢复原则,导致已经实施植被恢复的区域仍存在较大的人为干扰,从而出现 POC 和 LFOC 与恢复年限关系较弱的现象。

铝土矿区植被恢复短期内对于不同的有机碳组分表现出不同的影响作用。有研究^[20]表明,易氧化有机碳组分及占总有机碳比例随着恢复年限的增加而变大,提高土壤有机碳的活性程度,是由于 ROC 易被氧化活性高,周转时间较短,且容易被微生物矿化,能够敏感反映出有机碳早期的变化,因此,短期恢复年限与 ROC 具有较强关联。A、AI、CPI 和 CPMI 均能反映土壤有机碳库的质量,可以用来衡量土地利用方式的科学性,其值越大,表示土壤碳库质量越高。本研究表明,短期植被恢复过程中随着植被恢复年限的增加提高 A、AI、CPMI,表明其可改善土壤质量,随着植被恢复年限的增加土壤碳库质量越好^[21]。

3.2 植被恢复短期内环境因子对土壤有机碳及其组分影响

pH对土壤有机碳具有重要意义,前人^[22]研究指出,人为活动引起土壤pH降低,减少土壤微生物活性,不利于土壤中惰性有机碳和土壤有机碳库的积累。本研究为铝土矿区人为干扰程度大,同样引起pH的改变,已有研究^[23]表明,当pH为6~8时增强微生物活性,本研究中土壤pH为6.36~6.73,表明其可以提高微生物活性,从而与土壤活性有机碳组分呈正相关。也有研究^[24]表明,随着恢复年限的增加,pH不再是矿区植被恢复主要影响因素,pH的大小同样影响铝土矿区中Al离子活性^[19],从而影响植物生长,影响土壤有机碳质量分数。因此,在矿区的短期植被恢复管理中可以考虑通过调节pH,以便快速达到生态修复的效果。

随着植被恢复过程的推移,资源异质性减弱导致微生物多样性减少,但土壤微生物多样性本身可以影响活性碳组分来源,从而调节土壤有机碳质量分数^[25]。同时矿区土壤养分贫瘠,一定程度上抑制微生物的活性,减缓土壤有机质的分解,进而影响土壤有机碳的固定和积累,因此微生物的物种丰富度也是植被恢复短期内有机碳及其组分变化的关键因子。通常较高的碳氮比说明土壤中可利用的碳元素越多,对土壤有机碳降解的作用越强烈,越不利于土壤有机碳的累积^[26]。与本研究结果不同,碳氮比虽然可以影响微生物的代谢活动,但不同类型的微生物对于土壤有机碳的积累具有不同影响。本研究尚未明确短期植被恢复中起主导作用的微生物种类,因此碳氮比与有机碳变化之间的关系较弱,在未来也可以进一步加强对微生物群落关键物种的研究。铝土矿区具有重金属污染严重的特点,近年来微生物剂开始广泛应用在减轻矿区污染的工作中,例如,芽孢杆菌类微生物具有解磷、固氮及增加有机质的作用,能够快速提供植物生长所需的营养元素,促进植物生长,因此,探究铝土矿区短期植被恢复中可以考虑添加芽孢杆菌类微生物^[27],在改善土壤性质提高有机碳的同时也能够减轻矿区污染。

土壤含水率有利于土壤中有机物质的保持,促使土壤有机碳和易氧化碳的积累^[28],本研究位于铝土矿区,其土壤含水率较低,无法满足土壤的基本水分需求,难以进一步对有机碳发挥积极作用^[29],矿区植被修复过程中同样需要注意土壤水分的及时增加。本研究选取的恢复树种为刺槐,刺槐属豆科植物,可

以利用根部根瘤菌固氮^[30],随着植被恢复年限增加,植物根系越发达,且根系横向生长更加能够适应矿区土壤结构差的特点,进而引起土壤TN质量分数增加。但与原始土壤性质相比,因为建植的植被主要是吸收土壤中的大量养分来维持自身生长发育,且土壤氮取决于生物量的积累和土壤有机质分解的强度,因此,恢复后土壤与原始地土壤中TN质量分数差距较大^[31],从而导致在短期植被恢复当中TN质量分数对于有机碳的影响较小。

4 结论

1) ROC占总有机碳比例随着恢复年限增加而增大,在铝土矿区植被恢复短期内ROC是土壤碳库的重要指标。

2) 与恢复当年相比,恢复1、2、3 a显著提高碳库活性,并且显著增大碳库管理指数,表明在铝土矿区采取刺槐进行生态修复,短期内可以改善土壤碳库质量。

3) 冗余分析表明,土壤pH和细菌群落丰富度对矿山土壤有机碳及其组分质量分数变化的解释率分别为40.2%和22.8%,在铝土矿区植被恢复早期管理中为改善土壤有机碳,考虑调节土壤pH及使用改良菌剂调节土壤细菌群落。

参考文献:

- [1] DOBSON A P, BRADSHAW A D, BAKER A J M. Hopes for the future: Restoration ecology and conservation biology[J]. Science, 1997, 277(5325): 515-522.
- [2] 李晋川,王翔,岳建英,等. 安太堡露天矿植被恢复过程中土壤生态肥力评价[J]. 水土保持研究, 2015, 22(1): 66-71.
LI J C, WANG X, YUE J Y, et al. Evaluation on soil ecologic fertility during vegetation succession in Antaibao open pit[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015, 22(1): 66-71.
- [3] LAL R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. Science, 2004, 304(5677): 1623-1627.
- [4] 刘荣杰,吴亚丛,张英,等. 中国北亚热带天然次生林与杉木人工林土壤活性有机碳库的比较[J]. 植物生态学报, 2012, 36(5): 431-437.
LIU R J, WU Y C, ZHANG Y, et al. Comparison of soil labile organic carbon in Chinese fir plantations and natural secondary forests in north subtropical areas of China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2012, 36(5): 431-437.
- [5] 赵元,张伟,胡培雷,等. 桂西北喀斯特峰丛洼地不同植被恢复方式下土壤有机碳组分变化特征[J]. 生态学报, 2021, 41(21): 8535-8544.

- ZHAO Y, ZHANG W, HU P L, et al. Responses of soil organic carbon fractions to different vegetation restoration in a typical karst depression [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(21): 8535-8544.
- [6] 王德富, 董凌勃, 李澳, 等. 毛乌素沙地不同植被恢复类型的土壤碳水效应[J]. *水土保持学报*, 2024, 38(3): 101-110.
- WANG D F, DONG L B, LI A, et al. Soil organic carbon and moisture effects of different vegetation restoration types in the Mu us sandy land [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(3): 101-110.
- [7] 张穗粒, 盛茂银, 王霖娇, 等. 西南喀斯特长期植被修复对土壤有机碳组分的影响[J]. *生态学报*, 2023, 43(20): 8476-8492.
- ZHANG S L, SHENG M Y, WANG L J, et al. Effects of long term vegetation restorations on soil organic carbon fractions in the karst rocky desertification ecosystem, southwest China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(20): 8476-8492.
- [8] FANG X, ZHAO L, ZHOU G Y, et al. Increased litter input increases litter decomposition and soil respiration but has minor effects on soil organic carbon in subtropical forests [J]. *Plant and Soil*, 2015, 392(1): 139-153.
- [9] CONANT R T, STEINWEG J M, HADDIX M L, et al. Experimental warming shows that decomposition temperature sensitivity increases with soil organic matter recalcitrance [J]. *Ecology*, 2008, 89(9): 2384-2391.
- [10] FONTAINE S, MARIOTTI A, ABBADIE L. The priming effect of organic matter: A question of microbial competition? [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, 35(6): 837-843.
- [11] 张进德, 郝富瑞. 我国废弃矿山生态修复研究[J]. *生态学报*, 2020, 40(21): 7921-7930.
- ZHANG J D, XI F R. Study on ecological restoration of abandoned mines in China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(21): 7921-7930.
- [12] 张子鸣, 郝琰存. 坡向对公路边坡土壤有机碳恢复的短期影响[J/OL]. *中国水土保持科学(中英文)*, 2024: 1-12. (2024-05-07). [http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx? filename=STBC20240430001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ](http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=STBC20240430001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ).
- ZHANG Z M, HAO G C. Short-term effect of slope direction on soil organic carbon recovery of highway slope [J/OL]. *China Industrial Economics*, 2024: 1-12. (2024-05-07). <http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx? filename=STBC20240430001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- [13] 李启艳, 翁炳霖, 李宗勋, 等. 稀土矿废弃地植被恢复过程中土壤微生物演变[J]. *中国环境科学*, 2019, 39(10): 4360-4368.
- LI Q Y, WENG B L, LI Z X, et al. Soil physicochemical characteristics and microbial evolution during vegetation restoration in ionic rare earth ore heap leaching waste land [J]. *China Environmental Science*, 2019, 39(10): 4360-4368.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [15] CAMBARDELLA C A, ELLIOTT E T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56(3): 777-783.
- [16] JANZEN H H, CAMPBELL C A, BRANDT S A, et al. Light-fraction organic matter in soils from long-term crop rotations [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56(6): 1799-1806.
- [17] BLAIR G J, LEFROY R, LISLE L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems [J]. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1995, 46(7): e1459.
- [18] 李博, 王金满, 王洪丹, 等. 煤矿区土壤有机碳含量测算与影响因素研究进展[J]. *土壤*, 2016, 48(3): 434-441.
- LI B, WANG J M, WANG H D, et al. Progress on measurement and factors of soil organic carbon in mineral area [J]. *Soils*, 2016, 48(3): 434-441.
- [19] HORST W J, WANG Y X, ETICHA D. The role of the root apoplast in aluminium-induced inhibition of root elongation and in aluminium resistance of plants: A review [J]. *Annals of Botany*, 2010, 106(1): 185-197.
- [20] 王一诺, 徐志伟, 王升忠. 白江河天然和排水泥炭沼泽土壤活性有机碳组分含量及其影响因素研究[J]. *湿地科学*, 2021, 19(6): 691-701.
- WANG Y N, XU Z W, WANG S Z. Concentrations of active organic carbon components in soils in Baijianghe natural and drained peat bogs and their influencing factors [J]. *Wetland Science*, 2021, 19(6): 691-701.
- [21] 黄元元, 曲来叶, 曲秀春, 等. 镜泊湖岩溶地不同植被类型土壤微生物群落特征[J]. *生态学报*, 2012, 32(9): 2827-2836.
- HUANG Y Y, QU L Y, QU X C, et al. Soil microbial community characteristics under different vegetation types at the Holocene-basalt Platform, Jingpo Lake area, northeast China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(9): 2827-2836.
- [22] 陈坚淇, 贾亚男, 贺秋芳, 等. 不同土地利用方式对岩溶区土壤有机碳组分稳定性的影响[J]. *环境科学*, 2024,

- 45(1):335-342.
- CHEN J Q, JIA Y N, HE Q F, et al. Effect of land use on the stability of soil organic carbon in a karst region [J]. Environmental Science, 2024, 45 (1) : 335-342.
- [23] GRYBOS M, DAVRANCHE M, GRUAU G, et al. Increasing pH drives organic matter solubilization from wetland soils under reducing conditions [J]. Geoderma, 2009, 154(1/2):13-19.
- [24] XU C, KUANG S P, HE L, et al. Effects of changing restoration years on soil nutrient traits and plant community diversity in a phosphate mining area [J]. Forests, 2023, 14(7):e1468.
- [25] FINN D, KOPITKE P M, DENNIS P G, et al. Microbial energy and matter transformation in agricultural soils [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2017, 111:176-192.
- [26] 袁继红,任琼,周莉荫,等.鄱阳湖湿地不同环境条件土壤有机碳组分特征及其影响因素[J].生态学杂志, 2023, 42(6):1323-1329.
- YUAN J H, REN Q, ZHOU L Y, et al. Characteristics and influencing factors of soil organic carbon components under different environmental conditions in Poyang Lake wetland [J]. Chinese Journal of Ecology, 2023, 42 (6) : 1323-1329.
- [27] 陈进斌,李林,陈建宏,等.矿山生态修复中微生物技术的应用[J].能源与环境, 2020(4):102-103.
- CHEN J B, LI L, CHEN J H, et al. Application of microbial technology in mine ecological restoration [J]. Energy and Environment, 2020(4):102-103.
- [28] 朱浩宇,王子芳,陆畅,等.缙云山5种植被下土壤活性有机碳及碳库变化特征[J].土壤, 2021, 53(2):354-360.
- ZHU H Y, WANG Z F, LU C, et al. Variation characteristics of soil active organic carbon and carbon pools under five vegetation types in Jinyun Mountain [J]. Soils, 2021, 53(2):354-360.
- [29] 赵敏.喀斯特区不同植被类型对土壤有机碳及其活性组分的影响[D].贵阳:贵州大学, 2023.
- ZHAO M. Effects of different vegetation types on soil organic carbon and its active components in karst area [D]. Guiyang: Guizhou University, 2023.
- [30] ZHANG X X, WANG L J, ZHOU W X, et al. Changes in litter traits induced by vegetation restoration accelerate litter decomposition in *Robinia pseudoacacia* plantations [J]. Land Degradation and Development, 2022, 33(1):179-192.
- [31] EZEOKOLI O T, BEZUIDENHOUT C C, MABOETA M S, et al. Structural and functional differentiation of bacterial communities in post-coal mining reclamation soils of South Africa: Bioindicators of soil ecosystem restoration [J]. Scientific Reports, 2020, 10(1):e1759.
- (上接第214页)
- [29] 段绪萌,韩美,孔祥伦,等.退耕还林(草)工程前后黄河流域生态系统碳储量时空演变与模拟预测[J].环境科学, 2024, 45(10):5943-5956.
- DUAN X M, HAN M, KONG X L, et al. Spatiotemporal evolution and simulation prediction of ecosystem carbon storage in the Yellow River Basin before and after the grain for green project [J]. Environmental Science, 2024, 45(10):5943-5956.
- [30] 金海珍,于德永,郝蕊芳,等.科尔沁沙地关键生态系统服务的约束关系分析[J].生态学报, 2021, 41(18):7249-7259.
- JIN H Z, YU D Y, HAO R F, et al. Analysis of constraint relationship among key ecosystem services in the Horqin Sandy Land [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(18):7249-7259.