

# 资源型城市采煤沉陷区不同人工植被对土壤养分、酶活性及有机碳库组分的影响——以安徽省淮南市为例

蒋志洋<sup>1</sup>,周育智<sup>1\*</sup>,陈道坤<sup>1,2</sup>,黄美琴<sup>1</sup>

(1. 安徽理工大学地球与环境学院,安徽 淮南 232001;2. 中国地质调查局西安矿产资源调查中心,陕西 西安 710100)

**摘要:**【目的】探讨淮南采煤沉陷区种植不同人工植被下土壤养分、酶活性及有机碳库组分的含量,为该地区选择适宜的人工植被类型、改善矿区复垦土壤质量提供参考。【方法】选取未改造地、人工草地、石楠林地、水杉林地、刺槐林地、刺槐—侧柏混交林地6种人工类型样地为研究对象,研究土壤养分、酶活性及有机碳库组分含量差异及相关性。【结果】种植人工植被有效降低了土壤pH值;人工植被地的土壤有机质、全氮、碱解氮、全磷、有效磷含量均显著高于未改造地,而全钾及速效钾含量低于未改造地。除过氧化氢酶以外,其余4种酶活性在未改造地中均处于最低水平。刺槐—侧柏混交林土壤脲酶、多酚氧化酶、蔗糖酶含量均高于其他人工植被。不同类型人工植被土壤酶活性之间也存在着显著差异。除过氧化氢酶以外,其余4种酶活性与土壤养分之间相关性显著。各人工植被均不同程度提高了土壤有机碳库各组分含量,刺槐—侧柏混交林的总有机碳量与可溶性有机碳量均高于其余5种类型样地,刺槐林土壤易氧化有机碳的含量在所有类型样地中达到最高水平,水杉林土壤微生物量碳的含量在所有类型样地中达到最高水平。相关性分析结果表明,土壤有机碳库组分含量与土壤酶活性之间存在显著相关性。冗余分析结果表明,土壤有机质、全氮、全钾、速效钾是土壤酶活性重要的影响因素,能解释酶活性变异的66.04%。【结论】种植人工植被改善了复垦矿区土壤质量,提高了土壤有机碳库组分的含量。土壤酶活性显著影响土壤养分及有机碳库,可以用来表征淮南采煤沉陷区土壤肥力质量及有机碳固持能力。刺槐—侧柏人工混交林模式对土壤肥力、固碳能力提升效果更显著,对矿区土壤整体质量和生态环境有明显的改良作用。

**关键词:**采煤沉陷区;人工植被;土壤养分;土壤酶活性;土壤有机碳库

**中图分类号:**S731 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-5500(2024)05-0072-10

**DOI:**10.13817/j.cnki.cyycp.2024.05.008



淮南矿区作为中国的大型煤矿基地之一,处于高

潜水位地区,煤矿资源储量丰富,为淮南乃至长三角地区的经济发展做出了很大贡献。然而,常年的开采活动造成的矿区塌陷加剧了该地区植被损伤和生态环境恶化,使得原有土壤肥力质量受损<sup>[1]</sup>。种植人工植被是恢复塌陷矿区土壤质量及生态环境的重要途径之一<sup>[2]</sup>,人工植被的种植可以有效改良土壤结构、提高土壤肥力及增加土壤微生物的多样性<sup>[3]</sup>。因此,对复垦矿区人工植被修复下的土壤性质进行研究十分有必要。

**收稿日期:**2023-05-28;**修回日期:**2023-09-09

**基金资助:**国家自然科学基金项目(41572333);安徽省重点研究与开发项目(S202104a06020064);淮南关闭矿井地质生态环境评价及综合治理项目(HNKY-PG-WT-2021-260)

**作者简介:**蒋志洋(1996-),男,安徽淮南人,硕士研究生。

E-mail:1597247713@qq.com

\*通信作者。E-mail:zhouyuzhi1218@126.com

土壤作为矿区复垦后的生态系统的重要成分,也是生态系统中能量流动、物质循环及生命活动的关键性载体<sup>[4]</sup>。土壤养分是衡量土壤肥力及生产力的主要标志,其含量影响着植被的生长发育<sup>[5]</sup>。土壤酶作为一种可以促进土壤有机碳与养分转化的生物活化剂<sup>[6]</sup>,其活性大小反应了土壤生态系统的各类生物化学循环过程的强弱<sup>[7]</sup>。土壤质量恢复效果与土壤肥力的优劣一般可以由脲酶、蔗糖酶、多酚氧化酶、过氧化氢酶与碱性磷酸酶在一定程度上表征<sup>[8]</sup>。土壤养分与土壤酶活性相互影响,土壤酶活性直接来源于土壤微生物和植被根系,其活动能力受土壤养分调控<sup>[9]</sup>。研究表明,土壤养分与土壤酶活性相关性显著<sup>[10]</sup>,也有研究得出相反的结论<sup>[11]</sup>。因此,探讨不同人工植被土壤养分与土壤酶之间的关系,对于选取不同类型植被修复矿区土壤具有一定的实际意义<sup>[12]</sup>。土壤有机碳库的变化能显著影响大气中CO<sub>2</sub>的波动,进而对全球的气候产生影响<sup>[13]</sup>。土壤有机碳含量往往不能很好地反映土壤有机碳库的动态变化<sup>[14]</sup>;而活性有机碳作为对土壤生态系统中动植物的影响较高的有机碳,与土壤养分及其物理性状都有密不可分的关联<sup>[15]</sup>,通常可以将它作为评价土壤有机碳库的重要指标<sup>[16]</sup>,土壤活性有机碳又能细分为可溶性有机碳、易氧化有机碳和微生物量碳<sup>[14,17]</sup>,它们能在不同维度上反映出土壤有机碳库的变化特征。有研究表明贵州高原草海湿地土壤碳库储量的损失可能与部分土壤酶活性有关<sup>[18]</sup>。还有研究得出土壤脲酶、蔗糖酶和过氧化氢酶活性可以作为指示土壤有机碳含量的指标<sup>[19]</sup>。因此,研究淮南“九龙岗一大通”采煤沉陷区土壤有机碳库组分与酶活性之间的关系对于认识该采煤沉陷区植被修复下土壤质量变化及效果评价具有指导意义。淮南“九龙岗一大通”采煤沉陷区由于曾经受采煤影响,导致其生态环境脆弱,土壤质量不断恶化。随着种植人工林对该废弃矿区的修复,以及矿区内生态公园的建立,矿区生态环境得到极大改善。近年来,有关淮南采煤沉陷区的修复研究大多都体现在复垦土壤肥力质量以及重金属分布特征及危害防治等方面<sup>[20-22]</sup>,而对不同人工植被修复下的土壤养分、酶活性和有机碳组分相关问题却鲜有报道。本研究以修复后的淮南“九龙岗一大通”采煤沉陷区中人工种植

的草地、石楠(*photinia serrulata*)林、水杉(*metasequoia*)林、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)林和刺槐—侧柏(*Platycladus orientalis*)混交林作为研究对象,通过测定不同植被修复方式下土壤养分、酶活性和有机碳库组分等含量,分析不同植被修复下土壤养分、酶活性和有机碳库组分之间的分布特征与相关关系,进一步揭示不同人工植被修复对土壤质量和有机碳库组分的影响,为淮南采煤沉陷区生态修复提供科学依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区概况

研究区为淮南“九龙岗一大通”采煤沉陷区(32°62'63" N~32°62'61" N, 117°02'87" E~117°04'22" ),南依舜耕山,北与林场路和老城区相连,东至合阜铁路,西临淮舜南路,用地南北宽0.9~2.0 km,东西长8.4 km,206国道贯穿塌陷区南北,与合徐高速相连。矿区地势呈现南高北低的走向,海拔20~300 m,处于淮河平原与江淮丘陵的交界地。由于该矿区生态修复作为中国大陆首个利用国际金融组织贷款对采煤沉陷区进行综合治理的项目,淮南市政府与淮南市矿业集团一直把该项目作为淮南市及国内其他同类型采煤沉陷区的生态修复示范性样本。矿区属季风暖温带半湿润气候,气候特征为春温多变,夏雨集中,秋高气爽,冬季干冷,季风显著,四季分明。多年平均气温15.5℃年平均气温通常偏高,温暖湿润,年均无霜期224 d,年平均降水量928 mm,季节性降水分布不均,年均日照2 609.9 h,每年主导风向为东南风。土壤类型大部分为黄棕壤,局部有砂姜黑土<sup>[23]</sup>。

### 1.2 样地设置与样品采集

于2022年11月对淮南“九龙岗一大通”复垦矿区进行探查,选择海拔坡度及坡向等基本条件一致的样地,样地的坡度、海拔等参数借助奥维互动地图软件获得,通过样带法计算林分样地的郁闭度和密度(表1)。于刺槐—侧柏混交林、刺槐林、水杉林、石楠林、人工草地及裸地中分别设置5个样地,每个样地间距约100 m,共计30个样地。其中,分别在刺槐—侧柏混交林、刺槐林和水杉林样地设置20 m×20 m的样方,在石楠林样地内设置10 m×10 m的样方,在人工草地及裸地内设置5 m×5 m的样方,每块样方按对角

线法取5个采样点。每个采样点的采集深度为0~20 cm的表层土样,去除土壤所含根系、碎石等杂质后充分混合,把采集后的土壤样品放入自封袋带回实验室处理。带回的土壤一部分进行风干处理,过2 mm

或0.149 mm筛,对过筛后的土样混合均匀后,用于测定土壤化学性质;另一部分过1 mm筛保存于4℃冰箱中用于测定土壤酶活性,每个样品设5组重复。

表1 样地基本信息

Table 1 Basic information of sample land

植被类型	坡度/°	海拔/m	土壤类型	郁闭度(盖度)/%	林分密度/ (株·hm <sup>-2</sup> )	林下主要植被
未改造地	10~12	38.31	典型黄棕壤	—	—	三叶草、黄花菜、野胡萝卜草
人工草地	10~12	33.38	典型黄棕壤	90	—	人工黑麦草
石楠林地	11~12	35.47	典型黄棕壤	95	4 000~7 800	三叶草、绿豆、麦冬
水杉林地	11~13	36.33	典型黄棕壤	80	1 200~1 700	三叶草、白茅、野胡萝卜草
刺槐林地	10~12	34.24	典型黄棕壤	85	500~1 900	黄花菜、狗牙根、茅草
刺槐—侧柏混交林地	10~12	33.96	典型黄棕壤	87	660~1 650	三叶草、野胡萝卜草、黑麦草

### 1.3 测定方法

土壤化学指标与有机碳库指标测定参考鲍士旦<sup>[24]</sup>的方法,土壤pH值使用pH计测定(水土比为2.5:1),土壤有机碳(TOC)含量采用重铬酸钾外加热法,土壤有机质(OM)含量根据有机碳乘以系数1.724计算得到。土壤全氮(TN)含量采用半微量凯氏定氮法,土壤全磷(TP)含量采用钼锑抗比色法测定,土壤速效磷(AP)含量采用碳酸氢钠浸提—钼锑抗分光光度法,土壤全钾(TK)含量采用氢氧化钠碱熔—火焰光度法测定,土壤速效钾(AK)含量采用原子吸收分光光度法。可溶性有机碳(DOC)用去离子水浸提法,用总有机碳分析仪(TOC—VCPH/CPN Analyzer, Shimadzu, 日本)测定,通过浸提液中总碳浓度和无机碳浓度的差值计算土壤DOC含量<sup>[25]</sup>。易氧化有机碳(EOC)含量采用高锰酸钾氧化法测定<sup>[26]</sup>,微生物量碳(MBC)含量采用氯仿熏蒸浸提法测定。

土壤酶活性指标参考关松荫<sup>[27]</sup>的《土壤酶及其研究法》,土壤脲酶采用尿素残留法,蔗糖酶采用3,5-二硝基水杨酸比色法,过氧化氢酶采用高锰酸钾滴定法,多酚氧化酶采用碘量滴定法,碱性磷酸酶测定采用磷酸苯二钠比色法。

### 1.4 数据处理

试验数据采用Excel 2016软件处理,数据显著性统计分析和Pearson相关性分析用SPSS Statistics 22.0进行分析,制图使用Origin 2021完成。采用

Canoco 5.0对土壤养分含量、土壤酶活性和土壤固碳特征的相关性进行冗余分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同种类人工植被土壤养分特征

所有样地中,水杉林土壤的pH为酸性(6.01),其余类型人工植被土壤pH呈弱碱性(6.5~8.01),pH值大小排序为:未改造地>人工草地>刺槐林>刺槐—侧柏混交林>石楠林>水杉林,其中水杉林样地的pH值显著低于其余类型样地( $P<0.05$ ),而未造林地的pH值显著高于其余类型样地。4种林地与人工草地土壤有机质、碱解氮、有效磷含量显著高于未造林地。其中,有机质、碱解氮、有效磷的大小顺序为:刺槐—侧柏混交林>刺槐林>水杉林>石楠林>人工草地>未改造地。刺槐—侧柏混交林、水杉林、人工草地土壤有机质含量差异显著( $P<0.05$ );刺槐—侧柏混交林、水杉林、石楠林、人工草地的土壤碱解氮含量之间差异显著( $P<0.05$ );刺槐—侧柏混交林在土壤有效磷含量上显著高于其余人工林样地。所有样地土壤全氮含量大小顺序为:刺槐—侧柏混交林>刺槐林>石楠林>水杉林>人工草地>未改造地。其中,刺槐—侧柏混交林土壤全氮含量显著高于其余类型样地,刺槐林与人工草地、未造林地之间也差异显著( $P<0.05$ )。所有样地土壤全钾、速效钾的含量大小

排序为未改造地>石楠林>水杉林>人工草地>刺槐林>刺槐一侧柏混交林。其中,刺槐一侧柏混交林、刺槐林、未改造地的土壤全钾含量差异显著( $P<0.05$ ),刺槐一侧柏混交林与石楠林、未改造地的土壤

速效钾含量差异显著( $P<0.05$ )。总体上看,刺槐一侧柏混交林土壤养分含量最为丰富,其次为刺槐林、石楠林、水杉林、人工草地,未改造地养分含量最低(表2)。

表2 各类型人工植被土壤养分含量

Table 2 Soil nutrient content of various types of artificial vegetation

人工植被类型	pH	OM/(g·kg <sup>-1</sup> )	TN/(g·kg <sup>-1</sup> )	HN/(mg·kg <sup>-1</sup> )	TP/(g·kg <sup>-1</sup> )	AP/(mg·kg <sup>-1</sup> )	TK/(g·kg <sup>-1</sup> )	AK/(mg·kg <sup>-1</sup> )
CK	8.01±0.09 <sup>a</sup>	21.65±2.32 <sup>c</sup>	2.13±0.21 <sup>c</sup>	198.39±13.93 <sup>d</sup>	0.30±0.03 <sup>c</sup>	1.48±0.22 <sup>a</sup>	6.24±0.19 <sup>a</sup>	192.06±8.46 <sup>a</sup>
AG	6.84±0.24 <sup>b</sup>	26.33±2.01 <sup>d</sup>	2.25±0.20 <sup>c</sup>	208.85±12.01 <sup>cd</sup>	0.31±0.03 <sup>c</sup>	1.71±0.10 <sup>cd</sup>	5.84±0.18 <sup>bc</sup>	173.01±9.22 <sup>ab</sup>
MB	6.50±0.23 <sup>b</sup>	29.48±1.92 <sup>cd</sup>	2.38±0.19 <sup>bc</sup>	235.98±15.43 <sup>bc</sup>	0.32±0.03 <sup>c</sup>	1.74±0.07 <sup>cd</sup>	6.04±0.28 <sup>ab</sup>	187.39±20.15 <sup>a</sup>
DR	6.01±0.32 <sup>c</sup>	31.83±2.12 <sup>bc</sup>	2.33±0.25 <sup>bc</sup>	235.16±27.48 <sup>bc</sup>	0.39±0.02 <sup>ab</sup>	1.92±0.08 <sup>bc</sup>	5.92±0.15 <sup>abc</sup>	172.29±19.17 <sup>ab</sup>
RP	6.64±0.22 <sup>b</sup>	35.06±2.14 <sup>ab</sup>	2.75±0.28 <sup>b</sup>	246.66±22.83 <sup>ab</sup>	0.36±0.02 <sup>b</sup>	2.04±0.13 <sup>b</sup>	5.63±0.29 <sup>c</sup>	175.86±18.65 <sup>ab</sup>
RP-PO	6.62±0.28 <sup>b</sup>	37.76±2.22 <sup>a</sup>	3.16±0.27 <sup>a</sup>	267.29±14.77 <sup>a</sup>	0.43±0.03 <sup>a</sup>	2.63±0.35 <sup>a</sup>	5.01±0.15 <sup>d</sup>	159.47±21.16 <sup>b</sup>

注:CK为未改造地;AG为人工草地;MB为石楠林;DR为水杉林;RP为刺槐林;RP-PO为刺槐一侧柏混交林。OM、TN、HN、TP、AP、TK、AK分别代表有机质、全氮、碱解氮、全磷、有效磷、全钾、速效钾。同列数据后不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ ),下同。

## 2.2 不同种类人工植被土壤酶活性特征

不同样地中土壤脲酶、多酚氧化酶、蔗糖酶活性大小均为:刺槐一侧柏混交林>刺槐林>水杉林>石楠林>人工草地>未改造地。其中刺槐一侧柏混交林与未造林地在脲酶含量差异显著( $P<0.05$ ),所有类型样地在多酚氧化酶含量上均差异显著( $P<0.05$ ),刺槐一侧柏混交林土壤蔗糖酶含量显著高于石楠林、人工草地与未造林地,未改造地土壤蔗糖酶含量显著低于刺槐一侧柏混交林、刺槐林、水杉林与石楠林。土壤碱性磷酸酶活性大小为:刺槐一侧柏混交林=水杉林>刺槐林>石楠林>人工草地>未改造地;其中刺槐一侧柏混交林、水杉林与人工草地之间存在显著差异,未改造地的碱性磷酸酶活性显著低

于其余5种类型样地。所有类型样地中,过氧化氢酶活性大小顺序为:石楠林>刺槐林>人工草地>水杉林>未改造地>刺槐一侧柏混交林,且各类型土壤样地之间均无显著性差异。综上,除过氧化氢酶以外,其余4种酶活性均在刺槐一侧柏混交林样地土壤中最高(表3)。

## 2.3 土壤养分与土壤酶活性相关性分析

以5个酶活性指标作为响应变量,以8个土壤化学指标作为解释变量来进行冗余分析。第一轴与第二轴的特征值分别为57.66%和8.39%(图1),共解释了土壤酶活性变异程度的66.04%。在土壤养分对土壤酶活性的解释率中,有机质、全氮、全钾、速效钾解释率相对较高,分别为55.9%、6.3%、2.7%、2.4%

表3 各类型人工植被土壤酶活性

Table 3 Statistics of soil enzyme activities of various types of artificial vegetation

人工植被类型	URE/(mg·g <sup>-1</sup> )	PPO/(mg·g <sup>-1</sup> )	INV/(mg·g <sup>-1</sup> )	ALP/(mg·g <sup>-1</sup> )	CAT/(mL·g <sup>-1</sup> )
CK	0.72±0.05 <sup>c</sup>	4.02±0.15 <sup>c</sup>	38.49±5.95 <sup>d</sup>	0.34±0.04 <sup>c</sup>	7.48±0.76 <sup>a</sup>
AG	0.78±0.06 <sup>bc</sup>	4.38±0.21 <sup>d</sup>	43.60±5.18 <sup>cd</sup>	0.41±0.05 <sup>b</sup>	7.80±0.26 <sup>a</sup>
MB	0.82±0.06 <sup>abc</sup>	4.45±0.11 <sup>d</sup>	50.01±6.26 <sup>bc</sup>	0.46±0.04 <sup>ab</sup>	8.21±0.78 <sup>a</sup>
DR	0.83±0.06 <sup>ab</sup>	4.89±0.09 <sup>c</sup>	55.39±6.08 <sup>ab</sup>	0.48±0.03 <sup>a</sup>	7.54±0.35 <sup>a</sup>
RP	0.85±0.05 <sup>ab</sup>	5.19±0.23 <sup>b</sup>	56.77±5.17 <sup>ab</sup>	0.47±0.03 <sup>ab</sup>	8.04±0.36 <sup>a</sup>
RP-PO	0.90±0.05 <sup>a</sup>	5.86±0.15 <sup>a</sup>	59.55±2.64 <sup>a</sup>	0.48±0.03 <sup>a</sup>	7.34±0.64 <sup>a</sup>

注:URE代表脲酶,PPO代表多酚氧化酶,INV代表蔗糖酶,ALP代表碱性磷酸酶,CAT代表过氧化氢酶。

(图2),说明这4个养分指标是对土壤酶活性最主要的影响因子,且效应程度依次降低。

土壤脲酶主要受土壤全氮、碱解氮、有机质影响,且呈极显著正相关( $P<0.01$ ),与pH值呈负相关,与全钾、速效钾相关性不显著。土壤多酚氧化酶受有机质、全钾、速效磷、全氮、全磷、碱解氮影响极大,且与全钾呈显著负相关,与其余呈极显著正相关。土壤蔗糖酶活性受有机质影响最大,与pH呈显著负相关,与全氮、碱解氮、全磷、速效磷呈显著负相关。土壤碱性磷酸酶与有机质呈极显著正相关,与pH值呈显著负相关,与全氮、碱解氮、全磷、速效磷呈显著正相关。土壤过氧化氢酶与土壤各养分指标之间并无相关性(图3)。

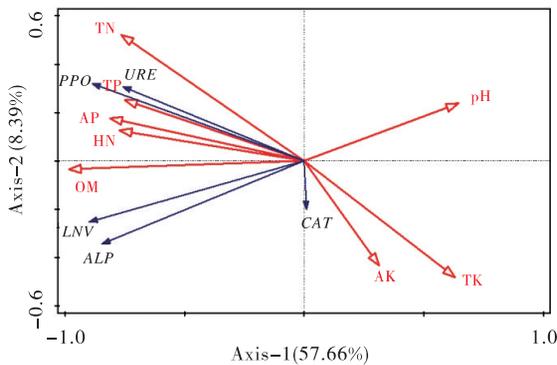


图1 土壤养分与酶活性相关性冗余分析图

Fig. 1 Redundancy analysis of correlation between soil nutrients and enzyme activity

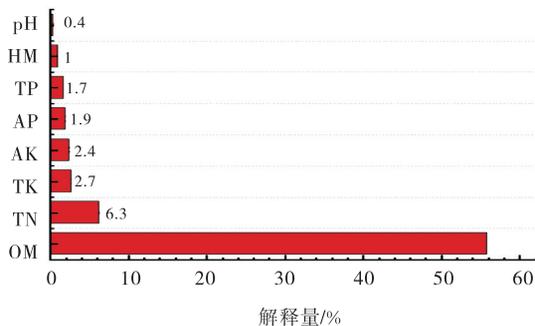
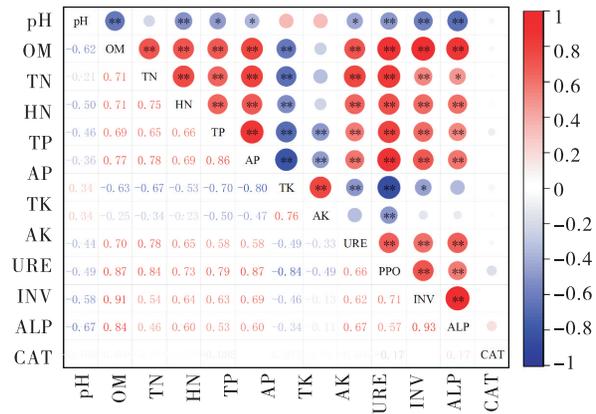


图2 冗余分析各变量解释

Fig. 2 Explanation of redundancy analysis variables

### 2.4 不同人工植被土壤有机碳库特征分析

为更好地反映各类型样地中土壤有机碳及活性有机碳的含量及特征,对各样点有机碳库指标进行显著性差异分析(表4)。土壤总有机碳、可溶性有机碳含量大小顺序均为:刺槐一侧柏混交林>刺槐林>水杉林>石楠林>人工草地>未改造地。其中,5种人工植被土壤总有机碳含量均显著高于未改造地( $P<$



\*  $P\leq 0.05$  \*\*  $P\leq 0.01$

图3 土壤养分与土壤酶活性相关性

Fig. 3 Heat map of the correlation between soil nutrients and soil enzyme activity

0.05),5种人工植被之间也差异显著;刺槐一侧柏混交林可溶性有机碳含量显著高于其余4种人工植被。土壤易氧化有机碳含量大小顺序为:刺槐林>刺槐一侧柏混交林>水杉林>石楠林>人工草地>未改造地。其中,未改造地土壤易氧化有机碳含量显著低于其他5种人工植被,人工草地土壤易氧化有机碳含量显著低于其余4种林地。土壤微生物量碳含量大小顺序为:水杉林>人工草地>刺槐一侧柏混交林>刺槐林>石楠林>未改造地。未改造地土壤微生物碳含量显著低于其他5种人工植被( $P<0.05$ )。

### 2.5 土壤酶活性与有机碳组分相关性分析

土壤总有机碳和活性有机碳(可溶性有机碳、易氧化有机碳、微生物量碳)含量均与脲酶、多酚氧化酶、蔗糖酶、碱性磷酸酶活性呈显著正相关;可溶性有机碳受多酚氧化酶影响最大;易氧化有机碳受蔗糖酶、碱性磷酸酶影响最大;微生物量碳主要受多酚氧化酶与碱性磷酸酶影响。土壤所有碳库指标与过氧化氢酶之间相关性不显著(图4)。

## 3 讨论

### 3.1 不同人工植被土壤养分差异性原因

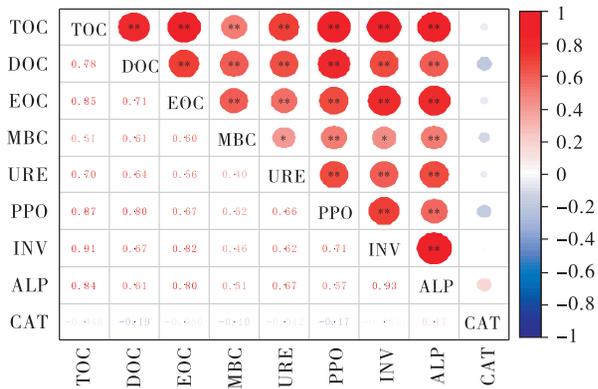
人工植被恢复是采煤塌陷区土壤质量与生态环境修复的重要手段之一。有研究表明,种植人工林对于复垦矿区土壤养分含量的提高起到显著的作用<sup>[28]</sup>,人工混交林往往对土壤养分含量的改善程度高于人工纯林<sup>[29-30]</sup>,这与本研究结果一致。但李哈<sup>[31]</sup>通过对不同植被修复下的露天煤矿排土场土壤研究发现,刺槐纯林土壤有机质、全钾和有效磷等养分含量高于混

表 4 各类型人工植被土壤有机碳库指标差异性统计

Table 4 Differences in soil organic carbon pool indicators of different types of artificial vegetation

植被类型	TOC	DOC	EOC	MBC
CK	12.56±1.34 <sup>d</sup>	25.24±2.27 <sup>c</sup>	2.17±0.21 <sup>c</sup>	199.02±11.46 <sup>d</sup>
AG	15.27±1.16 <sup>c</sup>	29.85±3.64 <sup>b</sup>	2.55±0.21 <sup>b</sup>	278.89±14.54 <sup>ab</sup>
MB	17.10±1.11 <sup>b</sup>	30.12±2.06 <sup>b</sup>	2.67±0.10 <sup>ab</sup>	242.74±8.47 <sup>c</sup>
DR	18.47±1.23 <sup>b</sup>	32.07±2.29 <sup>b</sup>	2.76±0.15 <sup>ab</sup>	293.45±10.02 <sup>a</sup>
RP	20.33±1.24 <sup>a</sup>	32.19±1.94 <sup>b</sup>	2.89±0.13 <sup>a</sup>	253.59±5.96 <sup>c</sup>
RP-PO	21.9±1.29 <sup>a</sup>	36.79±2.73 <sup>a</sup>	2.87±0.10 <sup>a</sup>	273.06±15.79 <sup>b</sup>

注: TOC 为总有机碳, DOC 为可溶性有机碳, EOC 为易氧化有机碳, MBC 为微生物量碳。



\* P≤0.05 \*\* P≤0.01

图 4 土壤酶活性与土壤有机碳库指标相关性热图

Fig. 4 Heat map of correlation between soil enzyme activity and soil organic carbon pool indicators

交林,原因可能是不同研究中混交林所选取的树种或混交比例不同。相比其他树种混交,本研究所选取的刺槐—侧柏混交林中的植物凋落物残体更为丰富,其凋落物所降解出的碳氮磷等元素更容易被积累。而刺槐属豆科植物,有着良好的固碳作用,侧柏属常绿乔木,其自身固碳能力较强,这都对刺槐—侧柏混交林土壤养分的积累有积极的作用。另外,本研究发现人工草地与人工林的 pH 值均小于未改造地,这可能是人工造林会产生枯枝落叶进入地表,导致土壤淋溶作用加强,土壤 pH 值随之减小<sup>[32]</sup>。同时,人工草地与人工林地的有机质、全氮、碱解氮、全磷、速磷含量均高于未造林地,而全钾与速效钾含量却与之相反。造成以上原因可能如下:1)未改造地土壤长期遭受侵蚀风化从而水土流失较大,而人工林地较好地改善了土壤条件,提高其抗侵蚀能力,植物根系活动频繁,能更好保持土壤养分,减少了氮磷等养分流失;2)人工林产生的落叶在表层土壤中被转化为腐殖质或腐殖酸,

进而增加了土壤有机质与氮素的含量;3)植物根系分泌物可解析土壤颗粒中磷素<sup>[33]</sup>,这明显提高土壤磷元素的含量;4)研究区人工林的生长发育对土壤钾素的需求量较高,从而导致人工林地中钾素含量略微较低的现象。此外,本研究还发现石楠灌木林的有机质、氮素和磷素的含量均低于其余 3 种乔木林地,这与部分学者研究结果不一致,比如王凯博等<sup>[34]</sup>通过不同人工植被对黄土丘陵区土壤修复发现:人工灌木林土壤有机质、全氮和全磷含量高于人工乔木林,原因可能是不同研究区气候条件存在差异、选用的植被对外部生长环境适应性不同,从而导致研究结果的不同。

### 3.2 不同人工植被土壤酶活性差异

土壤酶是土壤养分转化和物质循环的重要参与者<sup>[35]</sup>,反映土壤养分特征与土壤养分转化进程,有学者证实了淮南采煤塌陷区土壤酶活性对土壤肥力有显著影响<sup>[36]</sup>,很多学者使用土壤酶活性指标来表示矿区复垦土壤肥力状况<sup>[37-39]</sup>,因而可成为土壤肥力水平的良好标志。本研究表明,人工草地与人工林的种植对土壤酶活性都产生了不同的提升效果,说明淮南“九大”采煤沉陷区土地通过人工植被修复后可显著提升土壤酶活性,进而改善土壤质量水平。Gong 等<sup>[40]</sup>研究表明不同土地利用类型(草地、森林等)显著影响蔗糖酶、脲酶、碱性磷酸酶和过氧化氢酶活性。不同林种树木能通过各自的凋落物及根系的分泌物对土壤酶活性产生影响<sup>[41]</sup>。本研究发现,5 种人工植被的土壤酶活性之间也存在显著差异,其中,刺槐—侧柏混交林土壤中脲酶、蔗糖酶、碱性磷酸酶含量均高于其余 4 种人工植被,刺槐—侧柏混交林土壤中多酚氧化酶含量显著高于其余 4 种人工植被。李华等<sup>[42]</sup>

研究发现,刺槐—侧柏混交林相比刺槐纯林而言,混交林对地下空间的利用更加充分;混交林可使土壤颗粒细化,改善土壤肥力质量,提高土壤酶活性。也有研究显示<sup>[43]</sup>,针阔混交林相比针叶纯林和阔叶纯林,其土壤酶活性更高,这是因为针阔混交林具有更佳的土壤含水量与更快分解枯枝落叶的速率。

不同类型人工植被影响土壤酶活性的原因可能是:1)不同植被类型土壤由于土壤水分含量、真菌种类以及微生物群落的不同会影响酶活性的强弱<sup>[44]</sup>;2)不同人工植被因凋落物的种类、大小、数目及根系分泌物的不同而导致土壤酶活性存在差异<sup>[45]</sup>。

### 3.3 土壤养分与酶活性关系

土壤养分与土壤酶活性的相关程度可以很好地反映土壤肥力质量,本研究通过5种人工植被类型和未改造地土壤养分和酶活性的相关性分析可得,土壤脲酶、多酚氧化酶、蔗糖酶、磷酸酶均与土壤氮素、磷素、有机质含量呈显著正相关,与钾素含量、pH值呈负相关,这与其他文献研究结果大体一致<sup>[46-49]</sup>,说明酶活性的提高可以促进氮磷钾等营养物质的循环与转化<sup>[50]</sup>,然而过高的钾素含量会使土壤板结,也会抑制微生物分泌土壤酶。过氧化氢酶与不同养分之间无显著相关性,可能是过氧化氢酶存在形态较为稳定,不易受到其他元素影响。这与有些研究结果不一致<sup>[51]</sup>,这可能是不同研究区的土壤酸碱度及土壤类型差异导致。综合来看,土壤酶活性与土壤养分含量相关性很高,但在不同植被类型土地中,酶活性与不同养分的相关性也有较大差异,这是由于不同林地的土壤环境不同所造成。根据本研究分析,土壤酶活性由于和土壤养分存在较大相关性,因此可以在一定程度上用土壤酶活性程度来表征土壤肥力质量的高低。

### 3.4 不同人工植被有机碳库组分差异性

本研究中,刺槐—侧柏混交林总有机碳含量与可溶性有机碳含量高于其余类型样地,可能的原因有:1)混交林凋落物的质量种类均高于纯林,这会使土壤表层有机碳量明显增加,会产生更多的有机碳源;2)混交林的氮素、磷素含量明显高于纯林与人工草地,而氮磷等养分元素又是土壤有机质变化的主要影响因素;3)由于混交林植物残体的数量种类不同,会改变微生物群落种类与微生物活性<sup>[52]</sup>,也会导致可溶性有机碳含量增加。水杉林土壤微生物量碳含量显著高于其余类型样地,原因可能为:相比其他类型人工

植被,人工水杉林的种植显著降低了研究区土壤pH值,pH会改变土壤重金属活性,也影响固碳菌群落的基因和结构组成<sup>[53]</sup>。pH是调节微生物群落结构的最重要参数<sup>[54]</sup>。

### 3.5 酶活性与土壤有机碳库关系

通过对研究区不同类型植被土壤有机碳库与酶活性相关性分析结果表明,土壤有机碳、活性有机碳与土壤酶活性之间显著相关,其中多酚氧化酶对土壤总有机碳和可溶性氧化酶影响较大;这与有些文献的研究结果大致一样。王一诺等<sup>[55]</sup>发现多酚氧化酶活性对土壤活性有机碳组分有很大的影响,且与可溶性有机碳含量呈显著正相关。崔东等<sup>[56]</sup>研究发现土壤蔗糖酶、脲酶活性是影响土壤活性有机碳含量变化的重要因素。土壤酶活性大小影响土壤有机碳库的主要原因可能为:土壤酶作为生物活化剂,可将一些大分子的有机物转化为微生物生命活动时所需的营养物质,微生物活动的增强也能进一步促使土壤活性有机碳含量增加<sup>[57]</sup>。这也证明了酶活性是土壤碳库变化的重要影响因子。

## 4 结论

种植不同类型的人工植被均可以提高淮南采煤复垦区表层土壤养分、酶活性及有机碳库含量。不同类型人工植被的土壤养分、酶活性及有机碳库组分含量的影响也存在差异。总体上,刺槐—侧柏混交林土壤养分含量最高,其余3种人工林次之,再次之是人工草地,未改造地最低。在种植人工植被的土壤中,氮素、磷素含量均得到提升,土壤pH值相比未改造地却明显降低。除过氧化氢酶外,5种人工植被的4种酶活性均高于未改造地。土壤酶活性与土壤养分、土壤有机碳库组分关系密切,说明随着人工植被对复垦矿区土壤的修复,土壤养分、酶活性和有机碳固持能力均得以提升。

相比种植纯林,通过种植刺槐—侧柏针阔混交林可以更有效地提高淮南采煤沉陷区土壤质量和土壤固碳能力,促进复垦矿区生态环境绿色健康发展。

### 参考文献:

- [1] 孙乐乐,查建军,马志帅,等.不同作物对采煤复垦区表层土壤养分及酶活性的影响[J].西南农业学报,2019,32(9):2085-2089.
- [2] 杨鑫光,李希来,王克宙,等.煤矸石山生态恢复的主要路

- 径[J]. 生态学报, 2022, 42(19): 7740—7751.
- [3] 毕银丽, 郭晨, 王坤, 等. 煤矿区复垦土壤的生物改良研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(4): 52—59.
- [4] 赵鹏, 史兴萍, 尚卿, 等. 矿区复垦地土壤改良研究进展[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(1): 1—14.
- [5] 刘芬, 王帆, 王玉安, 等. 杏园长期自然生草对土壤养分及酶活性的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2023, 58(3): 190—197.
- [6] Avazpoor Z, Moradi M, Basiri R, *et al.* Soil enzyme activity variations in riparian forests in relation to plant species and soil depth[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2019, 12(23): 1—9.
- [7] Mooshammer M, Hofhansl F, Frank A H, *et al.* Decoupling of microbial carbon, nitrogen, and phosphorus cycling in response to extreme temperature events[J]. *Science Advances*, 2017, 3(5): e1602781.
- [8] 曲云柯. 盐碱农田土壤酶活性和微生物代谢多样性对碳组分变化的综合作用研究[D]. 长春: 吉林大学, 2022.
- [9] 胡亚杰, 韦建玉, 张纪利等. 枯草芽孢杆菌对植烟土壤养分含量与酶活性的影响[J]. 作物研究, 2019, 33(6): 561—566.
- [10] 魏加弟, 宋晓宏, 席冬梅. 人工草地土壤质量及土壤酶活性对利用年限的响应[J]. 草原与草坪, 2022, 42(5): 120—125.
- [11] 曹慧, 孙辉, 杨浩等. 土壤酶活性及其对土壤质量的指示研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2003(1): 105—109.
- [12] Ma Y H, Fu S L, Zhang X P, *et al.* Intercropping improves soil nutrient availability, soil enzyme activity and tea quantity and quality[J]. *Applied Soil Ecology*, 2017, 119: 171—178.
- [13] Chen L F, He Z B, Zhu X, *et al.* Impacts of afforestation on plant diversity, soil properties, and soil organic carbon storage in a semi-arid grassland of northwestern China[J]. *Catena*, 2016, 147: 300—307.
- [14] 杜振宇, 董海凤, 井大炜, 等. 黄河三角洲长期人工林地对土壤有机碳库的影响[J]. 水土保持通报, 2016, 36(5): 56—61.
- [15] 殷有, 刘源跃, 井艳丽, 等. 辽东山区三种典型林型土壤有机碳及其组分含量[J]. 生态学杂志, 2018, 37(7): 2100—2106.
- [16] 朱玉帆, 刘伟超, 李佳欣, 等. 黄土丘陵区人工刺槐林土壤有机碳矿化特征及其与有机碳组分的关系[J]. 环境科学, 2023, 44(1): 444—451.
- [17] Ottoy S, Vos B D, Sindayihebura A, *et al.* Assessing soil organic carbon stocks under current and potential forest cover using digital soil mapping and spatial generalisation[J]. *Ecological Indicators*, 2017, 77: 139—150.
- [18] 夏品华, 喻理飞, 寇永珍, 等. 贵州高原草海湿地土壤有机碳分布特征及其与酶活性的关系[J]. 环境科学学报, 2017, 37(4): 1479—1485.
- [19] 杜俊龙, 孙霞, 李志军, 等. 典型干旱荒漠区枣园土壤有机碳与土壤酶活性变化及相关性研究——以新疆麦盖提县为例[J]. 陕西农业科学, 2016, 62(5): 1—5+14.
- [20] 李阳, 郑刘根, 程桦, 等. 采煤沉陷区表层土壤氮、磷和有机质分布特征及相关性分析[J]. 环境污染与防治, 2015, 37(10): 52—57.
- [21] 杨涛, 陈欣悦, 刘旭, 等. 淮南潘集采煤沉陷区土壤及煤矸石镉环境地球化学特征[J]. 煤田地质与勘探, 2018, 46(S1): 1—5.
- [22] 李兵, 陈晨, 安世凯, 等. 淮南潘谢采煤沉陷区水生态环境评价与功能区划[J]. 中国煤炭地质, 2020, 32(3): 15—20.
- [23] 陈永春. 淮南大通煤矿资源枯竭矿区生态修复技术研究[D]. 合肥: 安徽大学, 2018.
- [24] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 495.
- [25] 孙超峰, 宋立全, 臧淑英, 等. 大兴安岭秋季冻结期土壤水热变化对多年冻土泥炭地可溶性有机碳的影响[J]. 冰川冻土, 2022, 44(2): 402—414.
- [26] Blair G J, Lefroy R D B, 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): 1459—1466.
- [27] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- [28] 刘瑞轩, 姚远, 张胜. 人工林对土壤碳和养分的影响: 以西藏人工林为例(英文)[J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2023, 14(1): 57—66.
- [29] 王小燕, 薛杨, 宿少锋, 等. 木麻黄纯林及其混交林对土壤剖面理化性质的影响[J]. 广西植物, 2022, 42(8): 1315—1324.
- [30] 王龙凤, 赵丽宏, 肖伟伟, 等. 阔叶树种混交对红松人工林土壤养分的影响[J]. 东北林业大学学报, 2022, 50(4): 27—31+54.

- [31] 李晗,吕刚,李叶鑫,等. 露天煤矿排土场不同植被恢复模式土壤养分和酶活性的差异性[J]. 生态学杂志, 2022,41(5):919-924.
- [32] 张珊,田晓娟,顾振东等. 甘肃亚高山不同海拔梯度云杉人工林土壤理化性质研究[J]. 甘肃农业大学学报, 2021,56(6):111-118.
- [33] 谭许脉. 马尾松/格木异龄混交改造对根际和非根际土壤磷组分的影响及其潜在调控机制[D]. 南京:广西大学,2022.
- [34] 王凯博,时伟宇,上官周平. 黄土丘陵区天然和人工植被类型对土壤理化性质的影响[J]. 农业工程学报,2012, 28(15):80-86.
- [35] Zeng QC, Chen Z, Tan WF. Plant litter quality regulates soil eco-enzymatic stoichiometry and microbial nutrient limitation in a citrus orchard [J]. Plant Soil, 2021, 466: 179-191.
- [36] 崔鲁楠,王宁,李玉成,等. 淮南煤矿塌陷区不同塌陷类型土壤理化性质及其酶活性比较[J]. 水土保持研究, 2016,23(5):90-94.
- [37] 王帅兵,孟会生,武欣,等. 不同形态氮肥配施固氮菌对复垦土壤酶活性及氮素形态的影响[J]. 灌溉排水学报, 2022,41(11):45-49
- [38] 游萍,肖群英,薛晓辉,等. 不同植被对煤矿复垦区域土壤真菌多样性和酶活性的影响[J]. 热带作物学报, 2022,43(10):2167-2179.
- [39] 王晋龙,孙崇凤,程永钢,等. 不同绿肥对复垦地土壤化学性状及酶活性的影响[J]. 中国土壤与肥料,2022,305 (9):85-93.
- [40] Gong J, Hou W, Liu J, *et al.* Effects of different land use types and soil depths on soil mineral elements, soil enzyme activity, and fungal community in karst area of Southwest China[J]. International journal of environmental research and public health, 2022, 19(5): 3120.
- [41] 许宇星. 不同经营措施下桉树人工林土壤肥力质量演变及代谢产物特征研究[D]. 长沙:中南林业科技大学, 2022.
- [42] 李华. 黄土丘陵沟壑区刺槐侧柏混交林土壤固碳能力研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2021.
- [43] 戴凌,黄志宏,文丽. 长沙市不同森林类型土壤养分含量与土壤酶活性[J]. 中南林业科技大学学报,2014, 34 (6):100-105.
- [44] 陶吉杨,谭军利,郑飞龙,等. 宁南山区植被恢复模式对土壤主要酶活性、微生物多样性及土壤养分的影响[J]. 干旱地区农业研究,2022,40(3):207-217.
- [45] 包寒阳,李杨,邓先智,等. 根系分泌物和凋落物对高寒沙化草地土壤微生物的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2023,29(3):546-553.
- [46] 季琳琳,陈素传,吴志辉,等. 生草对山核桃林地土壤养分及土壤酶活性的影响[J]. 经济林研究,2022,40(1): 19-25+44.
- [47] 忙顺兰,罗晓蔓,丁贵杰. 马尾松幼苗根系分泌物对土壤酶活性和养分的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2021,41(12):53-59.
- [48] 王玲,赵广亮,周红娟,等. 华北地区油松人工林林分密度对土壤化学性质和酶活性的影响[J]. 中南林业科技大学学报,2020,40(12):9-16+33.
- [49] 陈佳,段文标,曲美学,等. 云冷杉红松林掘根倒木及其微立地对凋落叶分解速率及养分释放的影响[J]. 生态学报,2021,41(24):9749-9759.
- [50] 莫雪,陈斐杰,游冲,等. 黄河三角洲不同植物群落土壤酶活性特征及影响因子分析[J]. 环境科学,2020,41 (2):895-904.
- [51] 陶吉杨,谭军利,郑飞龙,等. 宁南山区植被恢复模式对土壤主要酶活性、微生物多样性及土壤养分的影响[J]. 干旱地区农业研究,2022,40(3):207-217.
- [52] 林鑫宇,惠昊,王亚茹,等. 不同林分类型下土壤活性有机碳含量和分布特征[J]. 安徽农业大学学报,2021,48 (3):437-443.
- [53] 张双双,靳振江,贾远航,等. 岩溶地区不同土地利用方式土壤固碳细菌群落结构特征[J]. 环境科学,2019,40 (1):412-420.
- [54] 马静,董文雪,朱燕峰,等. 东部平原矿区复垦对土壤微生物固碳潜力的影响[J]. 煤炭学报,2022,47(3): 1306-1317.
- [55] 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.
- [56] 崔东,闫俊杰,刘海军,等. 伊犁河谷不同类型湿地土壤活性有机碳组分及其含量差异[J]. 生态学杂志,2019, 38(7):2087-2093.
- [57] 王斐,马锐豪,夏开,等. 森林转换对土壤活性有机碳组分的影响[J]. 水土保持研究,2023,30(1):233-240.

# Effects of different artificial vegetation on soil nutrients, enzyme activities and organic carbon pool components in coal mining subsidence areas of resource-depleted cities: A case study of Huainan City, Anhui Province

JIANG Zhi-yang<sup>1</sup>, ZHOU Yu-zhi<sup>1\*</sup>, CHENG Dao-kun<sup>1,2</sup>, HUANG Mei-qin<sup>1</sup>

(1. School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2. Xi'an Center of Mineral Resources Survey, China Geological Survey, Xian 710100, China)

**Abstract:** [Objective] The effects of different artificial vegetation on soil nutrients, enzyme activity and organic carbon pool components in Huainan coal mining subsidence areas were investigated to provide references for selecting suitable vegetation types and improving soil quality in mine reclamation in this area. [Method] Six artificial types of sample plots, namely unmodified land (bare land), artificial grassland, heathland, Metasequoia woodland, acacia woodland and acacia—sidebark mixed woodland, were selected to study the differences and correlations of soil nutrients, enzyme activities and organic carbon pool components. [Result] The experiments showed the following results. Planting artificial vegetation effectively reduced the soil pH value. The contents of soil organic matter, total nitrogen, alkaline nitrogen, total phosphorus, and available phosphorus in artificial vegetation land were significantly higher than those in unmodified land, while the contents of total potassium and available potassium were lower than those in unmodified land. Except for catalase, the activities of the other four enzymes were at the lowest level in the unmodified land. The soil urease, polyphenol oxidase, and sucrase contents in the mixed forest of Robinia pseudoacacia and Platycladus orientalis were higher than those of other artificial vegetation. There were also significant differences in soil enzyme activities among different types of artificial vegetation. Except for catalase, there was a significant correlation between the activities of the other four enzymes and soil nutrients. Each artificial vegetation increased the content of each component of soil organic carbon pool to varying degrees. The Total organic carbon and soluble organic carbon of the mixed Robinia—Platycladus forest were higher than those of the other five types of sample plots. The content of soil readily oxidized organic carbon of Robinia pseudoacacia forest reached the highest level in all types of sample plots, and the content of soil microbial biomass carbon of Metasequoia glyptostroboides forest reached the highest level in all types of sample plots. The correlation analysis results indicated that there was a significant correlation between the content of soil organic carbon pool components and soil enzyme activity. The results of redundancy analysis showed that soil organic matter, total nitrogen, total potassium, and available potassium were important influencing factors for soil enzyme activity, accounting for 66.04% of the variation in enzyme activity. [Conclusion] Artificial vegetation improved soil quality and increased the content of soil organic carbon pool components in reclaimed mining areas. Soil enzyme activity significantly affected soil nutrients and organic carbon pool, which could be used to characterize the quality of soil fertility and the ability of organic carbon fixation in Huainan coal mining subsidence area. The artificial mixed forest model of Robinia pseudoacacia and Platycladus orientalis had a more significant effect on improving soil fertility and carbon fixation capacity, and had a significant improvement effect on the overall quality of soil and ecological environment in the mining area.

**Key words:** coal mining subsidence area; artificial vegetation; soil nutrients; soil enzyme activity; soil organic carbon pool