

# 植被复垦对露天煤矿排土场土壤化学及生物学特性的影响

孙梦媛, 刘景辉, 米俊珍, 李俊伟

(内蒙古农业大学, 呼和浩特 010019)

**摘要:** 为探讨农牧交错带煤矿排土场不同植被复垦模式对土壤肥力的影响, 以黑岱沟露天煤矿排土场不同植被类型(山杏+苜蓿(A1)、杨树+苜蓿(A2)、杨树+沙棘(A3)、杨树+披肩草+苜蓿(A4)、未复垦(CK))土壤为研究对象, 通过简单相关分析和通径分析研究浅层(0—20 cm)土壤化学性质和酶活性与土壤微生物量间的相关关系, 揭示不同植被复垦下土壤微生物量差异的驱动因子, 并采用土壤恢复指数(RI)评价不同植被复垦对露天煤矿排土场土壤质量的影响。结果表明:(1)与未复垦(CK)相比, 不同植被复垦样地土壤有机质含量、碱解氮含量、土壤酶活性和微生物量均显著增加( $p < 0.05$ ), 但 pH 无明显变化规律且差异不显著( $p > 0.05$ ), 并且 0—10 cm 明显高于 10—20 cm 土层。(2)土壤微生物量碳、氮与土壤酶活性和有机质含量呈显著或极显著正相关关系, 与 pH 和有效磷含量则均未表现出相关性。由于土壤微生物量碳和氮对有机质含量和蔗糖酶活性变化比较敏感, 因此对土壤性质变化具有指示作用。(3)不同植被复垦土壤恢复指数在 0—10, 10—20 cm 土层分别表现为  $A3 > A2 > A4 > A1$  和  $A3 > A2 > A1 > A4$ 。因此, 杨树+沙棘(A3)和杨树+苜蓿(A2)复垦方式对矿区排土场土壤质量的改善较好。

**关键词:** 土壤恢复指数; 通径分析; 土壤微生物量; 土壤酶活性

**中图分类号:** S153.6; F301.24

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-2242(2019)04-0206-07

**DOI:** 10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.04.029

## Effect of Vegetation Restoration on Soil Chemical Biological Properties in the Opencast Coal Mine

SUN Mengyuan, LIU Jinghui, MI Junzhen, LI Junwei

(Agricultural College, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010019)

**Abstract:** In order to explore the influence of different vegetation restoration patterns on soil fertility in the coal mine dump of ecotone between agriculture and pasture, five vegetation types, *Prunus armeniaca* + *Alfafa* (A1), *Poplar* + *Alfafa* (A2), *Poplar* + *Seabuckthorn* (A3), *Poplar* + *Elymus nutans* + *Alfafa* (A4), Abandoned land (CK), were selected as research samples in Heidaigou Opencast Coal Mine. We mainly analyzed soil basic chemical properties, enzymes activities and microbial biomass with the method of their relations using correlation analysis and path analysis hoping to uncover the driving factors of the differences between soil microbial biomass under different vegetation restoration. The effect of different vegetation restoration on soil quality of Opencast Coal Mine was evaluated by soil reclamation index (RI). The results showed that: (1) Compared with the abandoned land (CK), soil organic matter, alkali solution nitrogen content, soil microbial biomass and soil enzymes activities were significantly increased ( $p < 0.05$ ), but soil pH had no obvious change and no significant difference ( $p > 0.05$ ) under different vegetation restoration. Soil organic matter, alkali solution nitrogen content, soil microbial biomass and soil enzymes activities decreased from 0—10 cm to 10—20 cm soil layer. (2) The content of soil microbial biomass carbon and nitrogen were significantly correlated with enzymes activities and organic matter content. Soil microbial biomass carbon and nitrogen were sensitive to the changes of soil organic matter content and enzymes activities which could be used as microbial indicators for changes in soil quality. (3) The soil recovery index in 0—10 cm and 10—20 cm layers under different vegetation restoration were  $A3 > A2 > A4 > A1$  and  $A3 > A2 > A1 > A4$  respectively.

收稿日期: 2019-03-19

资助项目: 神华集团科技创新项目(SH-ZY-05-04)

第一作者: 孙梦媛(1992—), 女, 河南伊川人, 博士研究生, 主要从事作物栽培学与耕作学研究。E-mail: 13789411831@163.com

通信作者: 刘景辉(1965—), 男, 内蒙古奈曼旗人, 教授, 博士生导师, 主要从事耕作制度与农业生态系统研究。E-mail: caullh@163.com

Therefore, the reclamation mode of *Poplar* + *Seabuckthorn* (A3) and *Poplar* + *alfalfa* (A2) improved the soil quality of the coal mine dump.

**Keywords:** soil reclamation index; path analysis; soil microbial biomass; soil enzymes activities

煤炭作为我国的主体能源,在为经济社会发展和人民生活水平提供能源的同时,也带来了一系列的生态环境问题<sup>[1]</sup>。煤炭的开采分为露天开采和井工开采,二者均对土壤和植被造成严重毁损,露天开采的方式尤为严重<sup>[2]</sup>。加之中国露天煤矿大多地处北方干旱、半干旱生态脆弱的农牧交错区,典型代表黑岱沟露天煤矿。露天煤矿通过采挖和填土进行开采,形成大量排土场,扰乱土层,导致地表植被消失,土壤养分贫瘠<sup>[3]</sup>。不仅引发了水土流失、土地沙化、盐渍化等的发生<sup>[1]</sup>,还降低了土壤酶活性<sup>[4]</sup>,对周边生态环境造成极其严重的破坏。因此,从区域可持续发展的角度出发,加强矿区的生态恢复和环境保护,特别是形成合理的植被复垦技术,对促进区域生态环境与社会经济的可持续发展具有重要的战略意义<sup>[5]</sup>。植被复垦是修复损毁土地和防止生态环境进一步恶化的有效途径<sup>[6]</sup>,植被的重建过程不仅可以提高土壤肥力,同时对土壤中微生物种类的增加也有一定的促进作用,但复垦初期植物种类及配置方式的选择是难点。

土壤有机质是土壤质量评价的重要指标,对土壤肥力和退化生态系统的恢复有很好的表征作用。碱解氮主要来源于土壤有机质的分解,能够较为灵敏地反映土壤氮素动态变化与供氮水平<sup>[7]</sup>。土壤 pH 是土壤酸碱度强度的指标,它决定和影响土壤元素和养分的存在状态、转化和有效性<sup>[8]</sup>。土壤微生物量不仅可以反映土壤微生物总量,也可表征土壤中 C、N 等营养元素的贮存量和循环程度<sup>[9]</sup>;同时,土壤微生物量碳、氮的转化速率较快,可直接或间接反映土壤肥力和土壤环境的变化,作为土壤肥力的重要生物学指标。土壤酶是一类具有蛋白质性质的生物催化剂,在土壤物质循环和能量转化过程中起着重要作用,对不同措施引起的土壤质量改变反映敏感,是评价土壤质量的一个重要指标。土壤酶和微生物均可调节土壤的生物过程,参与土壤有机物质和氮的分解及转化,两者具有一定的相关关系。因此,研究植被复垦下排土场的土壤有机质、碱解氮、有效磷、pH、微生物量碳和氮及酶活性特征对于评价排土场土壤质量具有重要价值。但从微生物学的角度研究露天煤矿植被复垦的报道较少,本研究通过不同植被复垦对土壤化学及生物学特性的影响,利用通径分析更为精确详细地分析排土场土壤微生物量碳、氮与化学性质和酶活性间的相关关系,揭示其变化规律,并采用土壤质量恢复指数(RI)对不同植被复垦条件下的土壤质量进行

评价,为今后矿区复垦植被选择和土壤肥力恢复提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

黑岱沟露天煤矿是我国 20 世纪 90 年代建设的四大露天矿之一,位于鄂尔多斯市准格尔旗东部(39°43′—39°49′N,111°13′—111°20′E),处在生态脆弱的北方农牧交错带,矿区地貌为典型的黄土丘陵沟壑区,总占地面积 65.46 km<sup>2</sup>,海拔 1 025~1 302 m,属中温带半干旱大陆性气候,年均气温 7.2 °C,极端最高气温 38.3 °C,极端最低气温 -30.9 °C,年平均气温 7 °C,降水量约 400 mm,多集中于 7,8,9 月,多以暴雨形式出现;年蒸发量 2 082.2 mm;无霜期 125~150 d;日照时间 3 119.3 h。矿区土壤主要为黄绵土,微碱性,肥力低下,地表沟壑纵横,植被稀疏,水土流失、风蚀沙化极为严重<sup>[5]</sup>。

矿区自 1989 年开工建设,期间共用包括草地、耕地、荒地 10.79 km<sup>2</sup>,包括东排土场 2.10 km<sup>2</sup>,西排土场 1.70 km<sup>2</sup>,北排土场 1.98 km<sup>2</sup>,工业广场 2.60 km<sup>2</sup>,内排土场 55.60 km<sup>2</sup>,阴湾排土场 1.52 km<sup>2</sup>;并从 1992 年开始土地复垦工程,所有排土场固体废弃物复垦都采用未经熟化的深层黄土,北排土场于 1995 年开始复垦,东排土场于 1998 年开始复垦,土层厚度约 2.3 m<sup>[10]</sup>。

### 1.2 样地概况与土壤样品采集

2018 年 9 月选择黑岱沟露天煤矿 2 个排土场(东排土场和北排土场)复垦 20 年的 A1(山杏+苜蓿)、A2(杨树+苜蓿)、A3(杨树+沙棘)、A4(杨树+披肩草+苜蓿)4 种人工植被,未复垦的荒地(CK)作为对照,5 个样地进行取样,A3(杨树+沙棘)样地位于东排土场,CK 取自东排土场和北排土场外围未复垦荒地,具体撂荒年限未知,其余样地均位于北排土场。采样方法每种林地类型随机选取 3 块样地,每块设置 1 个 20 m×20 m 样方,每块样方按“S”形取 5 个点,用直径为 3 cm 的土钻采集 0—10,10—20 cm 土层土壤样品,分别混匀取混合样,取回土壤鲜样一部分过 2 mm 筛,4 °C 保存用于测定微生物量碳、氮,另一部分风干研磨过 2 mm 筛后供土壤酶活性与理化性质测定。

### 1.3 测定指标与方法

土壤有机质含量采用重铬酸钾容量法—外加热法测定;碱解氮含量采用碱解扩散法测定;有效磷含

量采用碳酸氢钠法测定; pH 采用电位法<sup>[11]</sup>测定; 土壤微生物量碳采用熏蒸提取—容量分析法测定; 土壤微生物量氮采用熏蒸提取—茚三酮比色法测定; 脲酶活性采用靛酚比色法测定; 过氧化氢酶活性采用高锰酸钾滴定法测定; 蔗糖酶活性采用 3,5-二硝基水杨酸比色法<sup>[12]</sup>测定。

#### 1.4 土壤质量评价

1.4.1 评价指标选取 土壤质量评价选用 pH、有效磷、碱解氮、有机质、蔗糖酶、脲酶、过氧化氢酶、微生物量碳和微生物量氮 9 个指标。土壤 pH 是土壤酸碱度强度的指标, 它决定和影响土壤元素和养分的存在状态、转化和有效性<sup>[8]</sup>。土壤有机质占土壤总量的很少一部分, 但是在土壤肥力、环境保护、农业可持续利用等方面都发挥着重要的作用。土壤碱解氮是反映土壤供氮能力的一个重要指标, 主要来源于土壤有机质的分解, 能反映出近期内土壤氮素的供应状况<sup>[7]</sup>。土壤酶活性的高低可以直接或间接反映土壤肥力和土壤健康程度, 因此可以作为土壤质量评价的生物学指标。土壤微生物量反映土壤微生物新陈代谢的强度, 是表征土壤碳库和氮库的重要指标<sup>[13]</sup>, 也是评价土壤质量的敏感指标。所以研究土壤酶活性、土壤微生物量碳、氮及其土壤有机质、碱解氮、有效磷和 pH 等表征土壤质量的敏感指标有助于对矿区排土场的土壤质量做出更系统的评价, 也能及时反映不同植被复垦模式下的土壤质量的差异, 为更好地恢复矿区排土场的土壤质量筛选合适的植被配置模式提供理论依据。

1.4.2 评价方法 以未复垦的荒地对照样地为基准, 假设其他复垦方式都是由基准样地转变而来, 计

算公式为:

$$RI = [(P_1 - P_1')/P_1' + (P_2 - P_2')/P_2' + \dots + (P_n - P_n')/P_n'] \times 100\% / n$$

式中:  $RI$  为土壤恢复指数;  $P_1', P_2', \dots, P_n'$  为基准土地下的土壤属性;  $P_1, P_2, \dots, P_n$  为人工植被复垦方式下土壤属性;  $n$  为所有参评指标<sup>[14]</sup>。

#### 1.5 数据样地

试验数据采用 Excel 2007 软件整理, 用 SAS 9.0 软件进行样地间差异显著性,  $P < 0.05$  方差分析, 用 SPSS 17.0 软件进行通径分析, 并用 Origin 8.0 软件作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 植被复垦对土壤化学性质的影响

不同植物因生长差异对土壤性质影响不同(表 1)。0—10 cm 土层土壤有机质含量 A1 样地显著低于其他样地, 且 A2、A3 和 A4 之间差异不显著, 在 10—20 cm 土层 A1 与 A4 样地之间差异不显著, 但仍显著低于 A2 和 A3 样地。不同植被复垦样地土壤有机质含量整体呈现  $A2 > A3 > A4 > A1$ , 随土层深度增加而减少。不同植被复垦样地有效磷含量在 0—10 cm 土层为 A3(4.29 mg/kg) 最高, A4(3.97 mg/kg) 次之, A1(3.46 mg/kg) 最小, 10—20 cm 土层有效磷含量变化同 0—10 cm 相似, 整体表现为  $A3 > A2 > A1 > A4$ 。不同植被复垦样地均显著提高土壤碱解氮含量, 在 0—10 cm 土层土壤碱解氮含量表现为 A3 最大, 且 A3 和 A4 之间差异不显著, 10—20 cm 土层 A1 和 A2 之间差异不显著。各样地土壤 pH 均呈弱碱性, 0—10, 10—20 cm 土层均以 A2 样地土壤 pH 最低, 但各样地差异不显著, 且均随土层深度增加而增加。

表 1 植被复垦下土壤化学性质的变化

土层深度/cm	样地	有机质/ (g · kg <sup>-1</sup> )	有效磷/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	碱解氮/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	pH
0—10	CK	6.40 ± 0.78c	5.07 ± 0.11a	31.34 ± 1.71d	8.21 ± 0.31a
	A1	9.89 ± 0.31b	3.46 ± 0.15d	40.33 ± 1.4c	8.22 ± 0.45a
	A2	11.86 ± 0.33a	3.64 ± 0.10d	44.41 ± 2.14b	8.08 ± 0.28a
	A3	11.27 ± 0.29a	4.29 ± 0.11b	50.10 ± 1.33a	8.16 ± 0.39a
	A4	11.11 ± 0.14a	3.97 ± 0.12c	47.26 ± 1.64ab	8.11 ± 0.27a
10—20	CK	4.52 ± 0.35c	3.72 ± 0.18a	17.33 ± 0.69d	8.27 ± 0.33a
	A1	6.16 ± 0.63b	2.32 ± 0.11c	26.33 ± 1.22b	8.32 ± 0.33a
	A2	7.04 ± 0.30a	2.34 ± 0.09c	25.48 ± 1.79b	8.24 ± 0.38a
	A3	7.14 ± 0.34a	2.73 ± 0.10b	29.03 ± 1.89a	8.34 ± 0.59a
	A4	6.57 ± 0.39ab	2.08 ± 0.14d	21.33 ± 1.39c	8.28 ± 0.36a

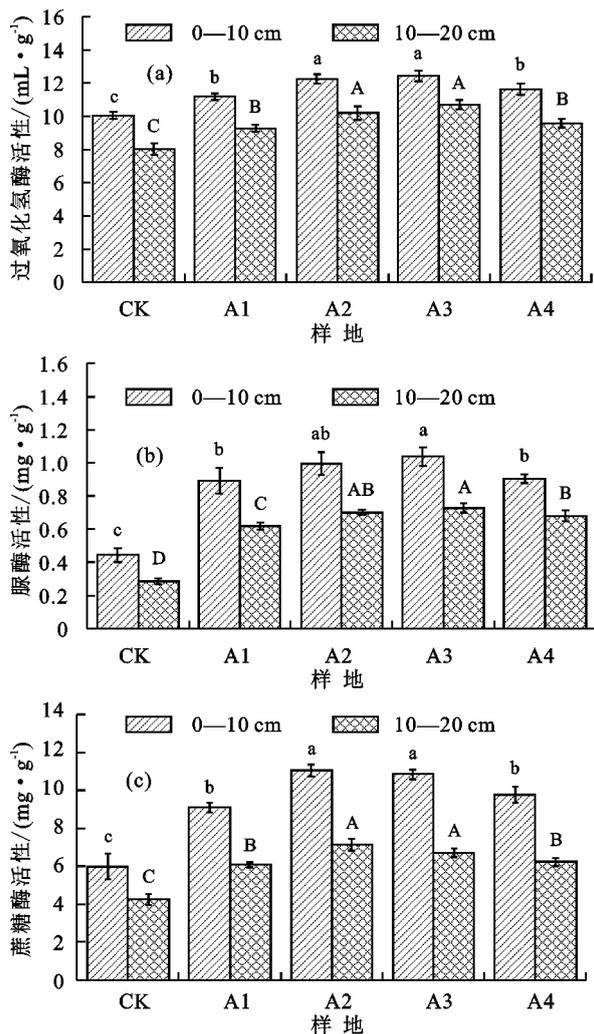
注: 表中数据为平均值 ± 标准差; 同列相同土层不同字母表示不同样地间差异性显著 ( $P < 0.05$ )。下同。

### 2.2 植被复垦对土壤酶活性影响

不同植被复垦样地对过氧化氢酶、蔗糖酶和脲酶活性的影响均随土层深度增加呈降低趋势(图 1)。不同植被复垦样地土壤过氧化氢酶活性在 0—10,

10—20 cm 土层规律一致, 土壤过氧化氢酶活性变化范围分别为 11.20~12.43, 9.27~10.71 mL/g, 从大到小依次为  $A3 > A2 > A4 > A1$ , 均以 A2 和 A3 样地含量高, 相互间无显著差异, 但均显著高于 A1 和 A4

样地(图 1a)。不同植被复垦样地间 0—10, 10—20 cm 土层土壤脲酶活性与过氧化氢酶活性表现相同, 土壤脲酶活性变化范围分别为 0.89~1.04, 0.62~0.73 mg/g, A3 样地均显著高于 A1 和 A4 样地, 与 A2 样地无显著差异(图 1b)。不同植被复垦样地间 0—10, 10—20 cm 土壤蔗糖酶活性变化范围分别为 9.12~11.06, 6.08~7.14 mg/g, 从大到小依次为 A2>A3>A4>A1, A2 与 A3 样地无显著差异, 且显著高于 A1 和 A4 样地(图 1c)。



注:不同小写字母和大写字母分别代表 0—10 cm 和 10—20 cm 土层不同样地数据差异显著( $P<0.05$ )。

图 1 植被复垦对土壤酶活性的影响

### 2.3 植被复垦对土壤微生物量碳和氮的影响

从表 2 可知,不同植被复垦土壤微生物量碳呈现出一致性规律,大致表现为 A2>A3>A1>A4, 0—10, 10—20 cm 土层不同植被复垦土壤微生物量碳含量变化范围为 153.96~194.74, 127.89~139.70 mg/kg, 均以 A2 样地含量最高。0—10, 10—20 cm 土层不同植被复垦土壤微生物量氮含量变化范围为 19.17~23.61, 10.35~13.22 mg/kg。不同植被复垦 0—10 cm 土层土壤微生物量碳/微生物量氮各样地间无显著差异,

10—20 cm 土层 A2 样地和 A4 样地差异不显著, 但均显著高于 A3 样地。

表 2 植被复垦下土壤微生物量碳和氮的变化

土层深度/cm	样地	微生物量碳/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	微生物量氮/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	微生物量碳/ 微生物量氮
0—10	CK	132.63±23.41c	14.04±2.42c	9.59±1.13a
	A1	153.96±20.06bc	19.70±0.99ab	7.84±1.27a
	A2	194.74±14.05a	23.61±1.93a	8.29±0.92a
	A3	181.22±12.62ab	22.68±1.63ab	8.02±0.89a
	A4	168.94±15.71ab	19.17±3.35b	8.90±0.85a
10—20	CK	106.36±10.80b	8.77±1.17c	12.39±1.47ab
	A1	127.89±18.57ab	11.68±0.50ab	10.99±1.16bc
	A2	139.70±22.54a	10.54±0.23bc	13.29±0.73a
	A3	133.00±12.28ab	13.22±2.71a	10.53±0.92c
A4	135.60±18.79ab	10.35±0.98bc	13.07±0.55a	

### 2.4 土壤微生物量与土壤化学性质和酶活性之间的相关性分析和通径分析

土壤微生物量与土壤化学性质和酶活性进行相关性分析和通径分析(表 3)。土壤微生物量碳与过氧化氢酶和脲酶活性呈显著正相关, 与有机质和蔗糖酶活性呈极显著正相关, 与 pH、碱解氮和有效磷无显著相关。土壤微生物量氮与有机质、碱解氮、过氧化氢酶、脲酶和蔗糖酶活性呈显著正相关, 与 pH 和有效磷均未表现出相关性。由于土壤微生物量与土壤酶活性和土壤化学性质之间相互影响, 关系复杂, 本研究进一步做了通径分析以说明它们之间的复杂关系。土壤微生物量碳的影响因素主要是蔗糖酶活性, 土壤有机质主要是通过蔗糖酶活性起作用, 可能是因为在土壤生态系统中, 微生物量碳是土壤碳素储存库, 是土壤有机碳最为活跃的组分, 而蔗糖酶与土壤有机质分解过程及微生物数量密切相关, 蔗糖酶的酶促产物葡萄糖是微生物直接的营养源, 且两者均在土壤碳循环中起着重要的调节作用, 土壤微生物量碳与蔗糖酶活性存在显著相关性。脲酶活性受其他因素影响作用被削弱, 碱解氮主要通过土壤蔗糖酶和过氧化氢酶起间接作用。土壤过氧化氢酶、碱解氮、pH、脲酶、蔗糖酶和有机质对土壤微生物量氮的直接影响均较大, 但土壤 pH 与微生物量氮相关性受其他因素影响被削弱。从土壤化学性质和土壤酶活性对土壤微生物量碳、氮的间接通径系数合计来看, 对土壤微生物量碳有较大影响的因素依次为有机质、蔗糖酶活性和碱解氮; 对土壤微生物量氮有较大影响的为有机质、脲酶、蔗糖酶和碱解氮。可见, 各种土壤因子不仅直接影响土壤微生物量碳和氮的大小, 还通过相互之间的作用间接调控土壤微生物量碳和氮。

表 3 土壤微生物量与化学性质和酶活性之间相关分析和通径分析

因变量	自变量	相关系数	pH	有机质	碱解氮	有效磷	过氧化氢酶	脲酶	蔗糖酶	间接通径
			X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	系数合计
微生物量碳 Y1	X1	-0.5801	<u>-0.213</u>	0.106	-0.010	-0.025	-0.064	0.075	-0.367	-0.285
	X2	0.9736*	0.092	<u>-0.246</u>	0.081	-0.068	0.191	-0.262	0.885	0.920
	X3	0.8591	0.025	-0.229	<u>0.087</u>	-0.056	0.193	-0.255	0.830	0.507
	X4	-0.7298	0.064	0.199	-0.058	<u>0.084</u>	-0.124	0.218	-0.698	-0.400
	X5	0.9422*	0.068	-0.235	0.084	-0.052	<u>0.200</u>	-0.252	0.863	0.476
	X6	0.9310*	0.060	-0.243	0.084	-0.069	0.190	<u>-0.265</u>	0.876	0.898
	X7	0.9795**	0.088	-0.244	0.081	-0.066	0.194	-0.260	<u>0.892</u>	-0.208
微生物量氮 Y2	X1	-0.1145	<u>0.208</u>	0.077	-0.035	0.025	-0.156	-0.057	-0.080	-0.226
	X2	0.8862*	-0.090	<u>-0.178</u>	0.277	0.068	0.466	0.200	0.193	1.115
	X3	0.9332*	-0.024	-0.166	<u>0.298</u>	0.056	0.472	0.196	0.181	0.714
	X4	-0.6378	-0.062	0.144	-0.199	<u>-0.084</u>	-0.303	-0.167	-0.152	-0.739
	X5	0.9459*	-0.066	-0.170	0.287	0.052	<u>0.489</u>	0.193	0.188	0.484
	X6	0.9189*	-0.059	-0.176	0.287	0.069	0.465	<u>0.203</u>	0.190	0.777
	X7	0.9277*	-0.086	-0.177	0.277	0.066	0.473	0.199	<u>0.194</u>	0.753

注: \* 表示  $P < 0.05$  显著相关; \*\* 表示  $P < 0.01$  显著相关, 带下划线的数据表示直接通径系数, 其余表示间接通径系数。

## 2.5 土壤质量评价

通过表 1 可知, 各样地土壤 pH 没有显著差异, 因此将土壤 pH 这个指标剔除, 保留有效磷、碱解氮、有机质、蔗糖酶、脲酶、微生物量碳和微生物量氮 8 个指标进行土壤恢复指数计算(表 4)。与未复垦 CK 相比较, 不同植被复垦方式对矿区排土场均有改善作用。不同植被复垦方式土壤恢复指数在 0—10, 10—20 cm 土层分别表现为  $A3 > A2 > A4 > A1$  和  $A3 > A2 > A1 > A4$ , 表明杨树+沙棘(A3)和杨树+苜蓿(A2)复垦方式对矿区排土场土壤质量的改善较好。杨树林是黄土高原地区植被恢复和重建的主要人工林之一, 苜蓿是重要豆科草本植物, 沙棘具有较好的固氮作用, 且具有较多的根系, 有较强的适应性和抗逆性, 并在矿场排土场得到大面积栽植, 说明杨树林和豆科植物为主混合复垦方式能明显改善研究区的土壤质量。

表 4 不同植被复垦样地的土壤恢复指数(RI)

土层深度/cm	A1	A2	A3	A4	CK
0—10	0.34	0.56	0.57	0.44	0
10—20	0.35	0.45	0.53	0.34	0

## 3 讨论

植被恢复是改善生态环境、提高土壤质量, 以及对排土场土壤进行熟化恢复的有效措施, 不同植被配置模式恢复效果不同<sup>[15]</sup>, 相比未进行植被建设的新排土场裸地, 植被重建显著改善了土壤酶活性和理化性质<sup>[16]</sup>。本研究中, 以 A2(杨树+苜蓿)和 A3(杨树+沙棘)土壤有机质含量最高, 究其原因可能是苜蓿和

沙棘为固氮植物, 因此土壤中碳氮含量较高, 这与梁爱华等<sup>[17]</sup>对纸坊沟流域退化土壤碳氮关系对植被恢复的时空响应中, 表明苜蓿与其他植被恢复相比显著增加了土壤有机碳和总氮的含量, 且增加了其有效性的结果相似。胡宜刚等<sup>[18]</sup>对修复近 20 年的黑岱沟露天煤矿排土场 5 种不同人工植被配置模式的土壤养分恢复状况进行评价, 结果表明, 排土场土壤养分含量受植被配置类型的影响显著, 混播有豆科牧草的纯草本进行土壤修复的首选植被配置模式。另外, 本研究发现, 0—10 cm 有机质和碱解氮含量明显高于 10—20 cm, 即植被恢复使增加的有机质主要向土壤表层积聚, 该结果与 Wang 等<sup>[19]</sup>的研究结果一致, 可能是土壤中植被根系和植被的枯枝落叶更多集中在 0—10 cm 土层, 增加了土壤中腐殖质, 尤其是表层碳氮肥力较未复垦土壤得到一定恢复。土壤中磷素也是植物生长不可缺少元素, 土壤中有效磷含量取决于初始分布和施入的肥料, 长期不施肥使得土壤中磷素难以得到补充, 同时复垦植被不断吸收携出土壤中无机磷进行吸收利用, 导致各样地有效磷含量均处于较低水平。本研究可知, CK 有效磷含量较高, 但是由于土样取自东排土场与北排土场外围撂荒地, 具体撂荒年限未知, 因此本研究不对 CK 进行探讨, 仅深入探讨 4 种人工植被复垦样地, 结果表明 A3(杨树+沙棘)有效磷含量较高, 可能是沙棘属非豆科固 N 植物, 需 P 量较少, 因此沙棘能很好适应缺 N 缺 P 的土壤, 并为乔木生长提供水肥条件<sup>[20]</sup>。植被复垦对土壤 pH 无明显规律影响, 经过 20 年复垦, 各样地 pH 已达到一个稳定状态, 不同样地土壤 pH 间无显著差异。

土壤酶活性不仅能反映土壤的地力水平,还与植物生长状态、种类等密切相关。不同植被恢复方式下植物凋落物、微生物、根系及其分泌物不同,这些作为土壤酶的重要来源,必造成土壤酶活性的差异。植被复垦首先通过促进土壤有机质的积累,改善土壤理化状况,为酶类提供丰富的碳源;其次,植被复垦促进了植物根系的聚集,而根系代谢可释放大量酶类,从而提高土壤酶活性。本研究发现,不同样地土壤酶活性均呈现出0—10 cm高于10—20 cm土层,A3(杨树+沙棘)样地土壤酶活性最高,其次为A2(杨树+苜蓿),A3样地与A2样地无显著差异,且显著高于其他样地(图1),因苜蓿和沙棘均具有固氮作用且种植年限长,植被产生大量的凋落物和分泌物,以及通过根部根瘤的固氮作用,固定空气中的氮元素,促进了植物生长和根系代谢,从而提高了土壤酶活性。邱莉萍等<sup>[21]</sup>研究发现,不同复垦方式下土壤蔗糖酶和脲酶活性在土壤剖面中表现为表层0—10 cm活性高于10—20 cm,与本研究结果一致。

土壤微生物量反映了土壤微生物新陈代谢的强度,是表征土壤碳库和氮库的重要指标,对土壤碳和氮的供应、循环与转化具有重要作用<sup>[13]</sup>。微生物量碳在土壤全碳中所占比例很小,但它是土壤养分转化的活性源或库,是土壤有机质中的活性部分,是组成土壤腐殖质的重要碳源,可反映土壤有效养分状况和生物活性的变化。0—10 cm土层不同植被复垦土壤微生物量碳和氮均以A2(杨树+苜蓿)样地含量最高,10—20 cm土层土壤微生物量碳以A2(杨树+苜蓿)样地含量最高,而微生物量氮以A3(杨树+沙棘)样地含量最高。这可能是因为在草本植物当季生物量大,导致表层凋落物相对于沙棘而言较多,从而有机质含量高(表1),因而微生物量碳氮含量高。

土壤微生物是土壤生态系统的重要组成部分,是土壤有机质和土壤养分转化和循环的主要推动力,并参与腐殖质形成等生化过程,在土壤生态系统中起着重要的作用。本研究中,土壤微生物量碳与过氧化氢酶和脲酶活性呈显著正相关,与有机质和蔗糖酶活性呈极显著正相关,与pH、碱解氮和有效磷无显著相关。土壤微生物量氮与有机质、碱解氮、过氧化氢酶、脲酶和蔗糖酶活性呈显著正相关,与pH和有效磷均未表现出相关性。毕江涛等<sup>[22]</sup>研究表明,在退化土壤的环境条件中土壤酶与土壤性质、土壤微生物量均成正相关的关系,与本研究结果相似。胡尧等<sup>[23]</sup>通过对岷江流域不同土地利用方式对土壤有机碳组分及酶活性的影响表明,土壤微生物量碳与土壤蔗糖

酶、脱氢酶、脲酶和磷酸酶活性均呈显著或极显著的相关( $P < 0.05$ ,  $P < 0.01$ ),说明土壤微生物量碳仍是有效养分的主要来源。有机质含量、蔗糖酶活性和碱解氮含量的增加促进了土壤微生物量碳和氮含量的增加,可能是由于植被复垦显著增加了土壤有机质和碱解氮含量(表1),有益于土壤微生物量碳和氮在土壤中生化反应能力的发挥。可见,各种土壤因子不仅直接影响土壤微生物量碳和氮的大小,还通过相互之间的作用间接调控土壤微生物量碳和氮。

土壤微生物量可表征生态系统的稳定性,土壤酶可以反映土壤微生物的总体活性,两者易受环境中化学、生物及物理等因素的影响,对人为因素和自然引起的变化特别敏感,是反映土壤质量的敏感指标。土壤有机质含量的高低对生态修复的效果有显著的指示作用。排土场不同植被类型下,植被的凋落物和根系状态不同,从而造成其相应的土壤质量特征有一定程度的区别。通过引入土壤恢复指数(RI)的计算公式,计算出研究区不同复垦方式下土壤恢复指数,不同植被复垦方式土壤恢复指数在0—10,10—20 cm土层均以杨树+沙棘(A3)和杨树+苜蓿(A2)效果最优,表明对矿区进行植被建植和生态修复时,从土壤修复、养分改良效果角度考虑,应优先选择以沙棘为主的豆科落叶灌木,以及以苜蓿等为主的豆科草本植物的混交植被配置模式,对矿区排土场土壤质量的改善效果较好,这与马佳慧<sup>[24]</sup>对黑岱沟矿区排土场植被恢复对复垦土壤性质影响研究的结论一致。

## 4 结论

不同植被复垦均提高了土壤有机质和碱解氮含量且差异显著( $P < 0.05$ );土壤pH无明显变化规律且差异不显著( $P > 0.05$ );A3(杨树+沙棘)样地土壤有效磷含量显著高于其他复垦样地( $P < 0.05$ )。不同植被复垦下土壤微生物量碳和氮变化规律与土壤酶活性相似,均以A2(杨树+苜蓿)和A3(杨树+沙棘)含量最高。不同植被复垦下土壤有机质、碱解氮、有效磷、微生物量碳、氮含量和酶活性均表现为0—10 cm土层高于10—20 cm土层。

相关性分析和通径分析表明,土壤微生物量碳、氮与土壤酶活性和有机质呈显著或极显著正相关,与pH和有效磷均未表现出相关性。土壤微生物量碳和氮对有机质含量和蔗糖酶活性变化比较敏感,对土壤性质变化具有指示作用。

不同植被复垦方式土壤恢复指数在0—10,10—20 cm土层分别表现为A3>A2>A4>A1和A3>A2>A1>A4,表明杨树+沙棘(A3)和杨树+苜蓿

(A2)复垦方式对矿区排土场土壤质量的改善较好,说明杨树林和豆科植物为主混合复垦方式能明显改善研究区的土壤质量。

#### 参考文献:

- [1] 吴钢,魏东,周政达,等.我国大型煤炭基地建设的生态恢复技术研究综述[J].生态学报,2014,34(11):2812-2820.
- [2] 杨勤学,赵冰清,郭东罡.中国北方露天煤矿区植被恢复研究进展[J].生态学杂志,2015,34(4):1152-1157.
- [3] 马从安,才庆祥,王启瑞,等.露天煤矿排土场土壤质地和肥力的分析与评价[J].煤炭工程,2008(5):77-79.
- [4] 张丽娟,王海邻,胡斌,等.煤矿塌陷区土壤酶活性与养分分布及相关研究:以焦作韩王庄矿塌陷区为例[J].环境科学与管理,2007,32(1):126-129.
- [5] 赵洋,张鹏,胡宜刚,等.黑岱沟露天煤矿排土场不同植被配置对生物土壤结皮拓殖和发育的影响[J].生态学杂志,2014,33(2):269-275.
- [6] Haigh M J, Gentcheva-Kostadinova S. Ecological erosion control on coal-spoil banks: An evaluation[J]. Ecological Engineering, 2002, 18(3):371-377.
- [7] 马云波,牛聪傑,许中旗.不同造林模式对铁尾矿地土壤性质的影响[J].水土保持学报,2015,29(3):242-248.
- [8] 樊文华,李惠峰,白中科.黄土区大型露天煤矿不同复垦模式和年限下土壤肥力的变化[J].山西农业大学学报,2006,26(4):313-316.
- [9] 曹志平,胡诚,叶钟年,等.不同土壤培肥措施对华北高产农田土壤微生物生物量碳的影响[J].生态学报,2006,26(5):1486-1493.
- [10] 方瑛,马任甜,安韶山,等.黑岱沟露天煤矿排土场不同植被复垦土壤酶活性及理化性质研究[J].环境科学,2016,37(3):1121-1127.
- [11] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2000:22-81.
- [12] 关松荫.土壤酶及其研究法[M].北京:农业出版社,1986:274-323.
- [13] 张洋,倪九派,周川,等.三峡库区紫色土旱坡地桑树配置模式对土壤微生物生物量碳氮的影响[J].中国生态农业学报,2014,22(7):766-773.
- [14] Adejuwon J O, Ekanade O. A comparison of soil properties under different land use types in a part of the Nigerian cocoa belt[J]. Catena, 1988, 15(3/4):319-331.
- [15] 张雅楠.黑岱沟排土场复垦地植被类型及土壤理化性质的研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2013.
- [16] 张鹏,赵洋,黄磊,等.植被重建对露天煤矿排土场土壤酶活性的影响[J].生态学报,2016,36(9):2715-2723.
- [17] 梁爱华,韩新辉,张扬,等.纸坊沟流域退化土壤碳氮关系对植被恢复的时空响应[J].草地学报,2013,21(5):842-849.
- [18] 胡宜刚,张鹏,赵洋,等.植被配置对黑岱沟露天煤矿区土壤养分恢复的影响[J].草业科学,2015,32(10):1561-1568.
- [19] Wang Z, Liu G B, Xu M X, et al. Temporal and spatial variations in soil organic carbon sequestration following revegetation in the hilly Loess Plateau, China[J]. Catena, 2012, 99:26-33.
- [20] 孙泰森,白中科.黄河中游地域露天煤矿排土场复垦方式特殊性的探讨[J].山西农业大学学报,2000,20(4):383-385.
- [21] 邱莉萍,张兴昌.子午岭不同土地利用方式对土壤性质的影响[J].自然资源学报,2006,21(6):965-971.
- [22] 毕江涛,贺达汉,黄泽勇,等.退化生态系统植被恢复过程中土壤微生物群落活性响应[J].水土保持学报,2008,22(4):195-200.
- [23] 胡尧,李懿,侯雨乐.岷江流域不同土地利用方式对土壤有机碳组分及酶活性的影响[J].生态环境学报,2018,27(9):1617-1624.
- [24] 马佳慧.黑岱沟矿区排土场植被恢复对复垦土壤性质影响[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2015.
- [17] 车小力,王文龙,郭军权,等.上方来水来沙对浅沟侵蚀产沙及水动力参数的影响[J].中国水土保持科学,2011,9(3):26-31.
- [18] 邓利强,王文龙,郭军权,等.黄土丘陵区耕作对浅沟侵蚀影响的对比研究[J].水土保持学报,2013,27(5):32-36.
- [19] 张天宇.垄作耕地浅沟深度的测量和换算[J].中国水土保持科学,2016,14(5):138-144.
- [20] 董月群,雷廷武,张晴雯,等.集中水流冲刷条件下浅沟径流流速特征研究[J].农业机械学报,2013,5(44):96-100.
- [21] 张科利,唐克丽,王斌科.黄土高原坡面浅沟侵蚀特征值的研究[J].水土保持学报,1991,5(2):8-13.

(上接第 92 页)