

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

方瑛¹, 马任甜¹, 安韶山^{1, 2*}, 赵俊峰¹, 肖礼¹

(1. 西北农林科技大学资源环境学院 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100)

摘要: 以黑岱沟露天煤矿排土场不同植被恢复方式下复垦土壤为研究对象, 主要分析了沙棘、紫穗槐、杨树和沙棘杨树混交林以及玉米这 5 种人工植被下土壤的基本理化性质和蔗糖酶、脲酶、碱性磷酸酶这 3 种水解酶的活性, 并通过简单相关分析和通径分析研究了土壤基本理化性质与酶活性之间的相关关系, 揭示了不同植被恢复下土壤酶活性差异的驱动因子, 为该区复垦植物的选择及复垦效果评价提供科学合理的建议与参考。结果表明: ①5 种人工植被恢复下排土场土壤基本理化性质得到改善, 土壤酶活性有一定提高, 但仍未达到天然草地的水平; ②沙棘的有机碳和全氮含量最接近草地, 达到草地的 54.22% 和 70.00%, 且其容重比最大容重紫穗槐的低 17.09%, 表现出复垦优势; 与沙棘林相比, 杨树林的土壤有机碳和全氮比沙棘分别低 35.64% 和 32.14%, 容重比沙棘林高 16.79%; ③不同植被间土壤碱性磷酸酶活性差异不大, 而土壤脲酶活性能更敏感地反映不同植被恢复对土壤性质的影响。④排土场复垦土壤有机碳和全氮含量的提高, 是排土场肥力恢复和生物活性提高的主要原因。

关键词: 黑岱沟露天煤矿; 植被恢复方式; 土壤酶活性; 通径分析; 杨树; 沙棘

中图分类号: X171.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)03-1121-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.03.043

Heidaigou Opencast Coal Mine: Soil Enzyme Activities and Soil Physical and Chemical Properties Under Different Vegetation Restoration

FANG Ying¹, MA Ren-tian¹, AN Shao-shan^{1, 2*}, ZHAO Jun-feng¹, XIAO Li¹

(1. College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: Choosing the soils under different vegetation recovery of Heidaigou dump as the research objects, we mainly analyzed their basic physical and chemical properties and enzyme activities with the method of Analysis of Variance as well as their relations using Pearson correlation analysis and path analysis hoping to uncover the driving factors of the differences between soil enzyme activities under different vegetation restoration, and provide scientific suggestions for the plant selection as well as make a better evaluation to the reclamation effect. The results showed that: ① Although the artificial vegetation restoration improved the basic physical and chemical properties of the soils while increasing their enzyme activities to a certain extent, the soil conditions still did not reach the level of the natural grassland; ② Contents of soil organic carbon (SOC) and soil total nitrogen (TN) of the seabuckthorns were the nearest to those of the grassland, which reached 54.22% and 70.00% of those of the grassland. In addition, the soil bulk density of the seabuckthorns stand was 17.09% lower than the maximum value of the amorphia fructosa land. The SOC and TN contents as well as the bulk density showed that seabuckthorns had advantages as the species for land reclamation of this dump; Compared with the seabuckthorn, the pure poplar forest had lower contents of SOC and TN respectively by 35.64% and 32.14% and displayed a 16.79% higher value of soil bulk density; ③ The activities of alkaline phosphatase under different types of vegetation rehabilitation had little variation. But soil urease activities was more sensitive to reflect the effects of vegetation restoration on soil properties; ④ Elevation of the SOC and TN turned out to be the main cause for soil fertility restoration and increased biological activities of the dump.

Key words: Heidaigou opencast coal mine; vegetation restoration; soil enzyme activities; path analysis; poplar; seabuckthorn

矿区排土场的土地复垦和生态重建工作是近年来众多学者研究的重点之一。植被恢复被认为是改善矿区生态环境现状的最主要也是最有效的方式, 它不仅改善矿区的生态景观, 增加其物种多样性, 同时通过凋落物及根系输入, 可有效改善复垦土壤生态环境, 加速土壤的肥力恢复^[1, 2]。但复垦初期植物种类及配置方式的选择是难点。黑岱沟露天煤矿位

于我国优质煤炭资源富集区鄂尔多斯市, 总占地面积 65.46 km², 是我国 20 世纪 90 年代建设的四大露

收稿日期: 2015-05-20; 修订日期: 2015-10-20

基金项目: 中国科学院西部行动计划项目(KZCX2-XB3-13); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2011JM5011); 教育部新世纪优秀人才计划项目(NCET-2-0479)

作者简介: 方瑛(1993~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤与植物相互作用机制, E-mail: 15091586741@163.com

* 通讯联系人, E-mail: shan@ms.iswc.ac.cn

天矿之一,加上处在生态脆弱的北方农牧交错带,矿区煤炭开采造成的生态环境恶化和土地资源耗竭问题尤其突出,因而引起政府和企业的的高度重视,也成为众多研究者的试验区.针对该矿区土壤复垦植物的选择及植被恢复效果,已有不少学者做过研究和评价工作.张雅楠^[3]认为木本植被对土壤结构的改善作用好于草本,乔灌混交林效果最好;杨树+沙棘及草本的混交样地土壤综合评价价值高于杨树纯林样地和杨树+油松样地.姚敏娟^[4]的研究表明油松+沙棘+草配置和单一草本配置这两种配置类型比较适合黑岱沟露天煤矿排土场的植被恢复;而无论是人工种植的杨树还是原生杨树还是杨树混交配置,土壤肥力、土壤水分盈亏状况和土壤水分的有效性都很差.马建军等^[5,6]的研究表明不同生态修复模式的恢复效果依次为:沙棘林>纯杨林(人工)>杨林(原生)>杨+沙棘.可见研究结果不尽一致.此外,这些工作主要集中在不同植被恢复方式下土壤理化性质与生物多样性的研究上,而对不同植被恢复方式下土壤酶活性的研究较少.土壤酶作为土壤组成的微量成分之一,不仅可催化反应土壤发生发育、肥力形成等诸多过程,其活性表征了土壤的生物活性,对土壤生态修复过程中土壤性质的早期变化更具敏感性^[7],且测定方法简便,可作为评判土壤肥力的辅助指标^[8,9].鉴于此,本文对黑岱沟排土场不同植被恢复下土壤酶活性和土壤理化性质进行研究,并利用通径分析更为精确详细地分析排土场土壤酶活性与理化性质间的相关关系,以揭示不同植被恢复下土壤酶活性差异的驱动因子,以期为该区复垦植物的选择及复垦效果评价提供科学合理的建议与参考.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黑岱沟露天煤矿位于鄂尔多斯市准格尔旗东部,地处黄河西岸黄土高原北部,为山西、陕西、内蒙古三省交界处黄土高原地区.地理坐标为东经 $111^{\circ}13' \sim 111^{\circ}20'$,北纬 $39^{\circ}43' \sim 39^{\circ}49'$,海拔在 $1\,025 \sim 1\,302$ m之间.矿区气候属于中温带半干旱大陆性气候,年平均气温 $5.3 \sim 7.6^{\circ}\text{C}$.年降水量为 $231.0 \sim 459.5$ mm,多集中在7~9月,约占全年降水量的60%~70%,年蒸发量为 $1\,824.7 \sim 2\,896.1$ mm.日照 $3\,119.3$ h.地貌为典型的黄土丘陵沟壑区,地带性植被属暖温带草原带,植被稀疏低矮,盖度一般在30%以下,天然森林已全遭破坏.土壤类

型主要为非地带性黄绵土,黄绵土土色浅,比热容小,土壤昼夜温度变幅大,呈微碱性,肥力低下.

矿区自1989年开工建设,期间共征用包括草地、耕地、荒地共 10.79 km²,各生产区总占地面积达 65.46 km²,包括东排土场 2.10 km²,西排土场 1.70 km²,北排土场 1.98 km²,工业广场 2.60 km²,内排土场 55.60 km²,阴湾排土场 1.52 km²;并从1992年开始了土地复垦工程,所有排土场固体废弃物复垦都采用未经熟化的深层黄土.本研究所选试验地东排土场于1997年开始复垦,土层厚度约 2.3 m,因排土车辆碾压土壤较紧密.其复垦方式是根据不同的立地条件布置相应的植被组合模式,台阶主要以土壤熟化为目的,以豆科类牧草、沙棘为主,坡面主要以防止水土流失为目标,以灌、草混交型为主,灌木主要有沙棘、柠条、紫穗槐等,牧草有沙打旺、苜蓿、草木樨、羊柴等禾本科草.

1.2 样品采集与分析

2013年9月在黑岱沟露天煤矿东排土场各平台选择相同复垦年限(均为16 a)下沙棘、紫穗槐、杨树和杨树沙棘混交林的典型样地及长期耕种的农地(玉米地),同时选取了未经人为破坏的原生草地作为对照,各样地信息如表1.每个样地设置3个样方,样方面积分别为:乔木样方 $20\text{ m} \times 20\text{ m}$,灌木和玉米地样方 $10\text{ m} \times 10\text{ m}$,草地样方 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$.在各样方中“S”形设置3个样点,采用多点混合取样法,按 $0 \sim 10$ cm, $10 \sim 20$ cm两层分别取混合样.所取土样风干过 2 mm 筛后供土壤酶活性与理化性质测试分析.

表1 样地基本信息

植被恢复方式	纬度	经度	海拔高度/m
草地	$39^{\circ}47'41.35''\text{N}$	$111^{\circ}17'14.86''\text{E}$	1278
玉米	$39^{\circ}47'56.39''\text{N}$	$111^{\circ}17'24.88''\text{E}$	1270
沙棘	$39^{\circ}47'15.04''\text{N}$	$111^{\circ}18'00.18''\text{E}$	1275
紫穗槐	$39^{\circ}47'27.55''\text{N}$	$111^{\circ}17'48.34''\text{E}$	1260
杨树	$39^{\circ}47'13.80''\text{N}$	$111^{\circ}17'58.78''\text{E}$	1273
杨树沙棘混交林	$39^{\circ}47'09.72''\text{N}$	$111^{\circ}17'19.47''\text{E}$	1251

土壤有机碳采用重铬酸钾-外加热法,土壤全氮采用凯氏定氮法(KYD-9830),土壤有效氮采用碱解扩散法,土壤速效磷采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法,土壤pH用DELTA320 pH计测定,土壤容重采用环刀法,土壤含水率采用 105°C 烘干法,以上方法均参考文献[10].土壤脲酶活性测定采用苯酚钠-次氯酸钠比色法,酶活性以 37°C 恒温培养24 h后1 g土壤中生成 NH_4^+-N 的mg数表示,蔗糖酶活性

测定用 3,5-二硝基水杨酸比色法,酶活性以 37℃ 恒温培养 24 h 后 1 g 土壤生成的葡萄糖 mg 数表示,碱性磷酸酶活性测定用磷酸苯二钠比色法,其活性以 37℃ 恒温培养 24 h 后 1 g 土壤中释放酚的 mg 数表示,酶活性测定均采用风干土,方法均参考文献 [11].

1.3 数据处理与作图

用 SPSS 19.0 对不同植被恢复方式下土壤酶活性与土壤基本理化性质进行方差分析(ANOVA)和 Duncan 多重比较,并检验两者间的相关性,作图采用 Excel 2003.

2 结果与分析

2.1 不同植被恢复下土壤理化性质特征

不同植物因生长习性差异对土壤性质有不同的影响. 有机碳 0~10 cm 和 10~20 cm 土层天然草地均显著大于其它人工植被,沙棘、杨树、紫穗槐和混交林之间差异不显著,玉米在 0~10 cm 土层与 4 种人工植被无显著差异,在 10~20 cm 土层显著大于 4 种人工植被(表 2). 全氮含量 0~10 cm 土层草地显著大于杨树、紫穗槐和混交林,但与沙棘和玉

米差异不显著,10~20 cm 土层草地显著大于玉米,玉米显著大于剩余植被. 5 种人工植被下的土壤有机碳、全氮含量整体呈现农地 > 灌木 > 乔木、随深度增加而减少的规律,而沙棘、杨树、紫穗槐和混交林之间差异均不显著. 草地的有机碳和全氮含量依次是沙棘、紫穗槐、混交林和杨树的 1.84、2.03、2.17、2.87 倍和 18.70、25.38、28.05、28.81 倍. 混交林的有机碳含量相比于杨树提高了 32.08%,而全氮含量略小于杨树. 速效磷含量在 0~10 cm 土层表现为沙棘最大,杨树其次,草地最小; 10~20 cm 土层草地显著低于玉米、沙棘和杨树,整体表现为玉米 > 沙棘 > 杨树 > 混交林 > 紫穗槐 > 草地,土层间变化无规律性. 土壤有效氮含量在 0~10 cm 土层表现为紫穗槐最大,杨树最小; 10~20 cm 土层玉米显著高于沙棘和混交林. 土壤 pH 以杨树和混交林最大,显著高于其余植被,而以沙棘最小. 容重值沙棘、玉米最小且沙棘显著小于杨树、紫穗槐和混交林. 土壤含水率 0~10 cm 土层和 10~20 cm 土层均表现为草地最大,杨树最小,混交林比杨树多 45.62%,呈现灌木 > 乔木的趋势. 土壤理化性质土层之间的差异以玉米和杨树最小,紫穗槐和草地最大.

表 2 不同植被恢复方式下土壤基本理化性质¹⁾

Table 2 Soil basic physicochemical properties under different vegetation types

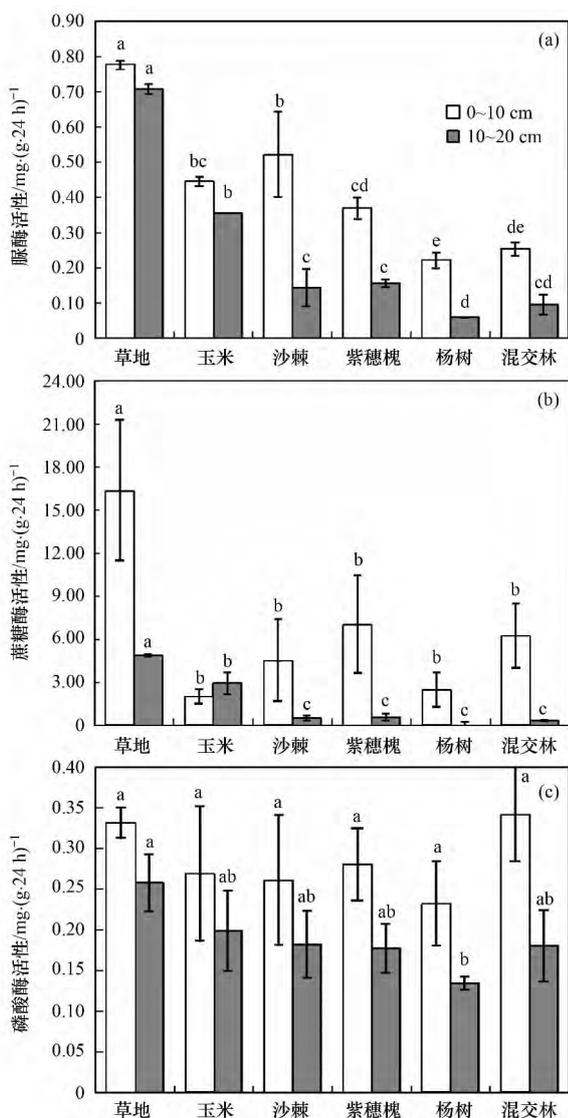
土层深度 /cm	植被类型	有机碳 /g·kg ⁻¹	全氮 /g·kg ⁻¹	速效磷 /mg·kg ⁻¹	有效氮 /mg·kg ⁻¹	pH	容重 /g·cm ⁻³	土壤含水率 /%
0~10	草地	6.99 ± 0.00 a	0.47 ± 0.04 a	1.85 ± 0.09 b	21.86 ± 4.21 ab	7.42 ± 0.06 b	1.30 ± 0.06 bc	9.87 ± 0.01 a
	玉米	3.30 ± 0.01 b	0.30 ± 0.04 ab	6.52 ± 0.47 a	20.28 ± 0.75 ab	7.37 ± 0.02 b	1.34 ± 0.06 bc	7.34 ± 0.00 bc
	沙棘	4.21 ± 0.29 b	0.39 ± 0.12 ab	6.96 ± 0.58 a	15.50 ± 4.77 b	7.28 ± 0.04 b	1.28 ± 0.02 c	6.46 ± 0.01 cd
	紫穗槐	3.59 ± 0.28 b	0.26 ± 0.07 b	2.31 ± 0.07 b	31.06 ± 11.55 a	7.39 ± 0.13 b	1.55 ± 0.09 a	8.28 ± 0.01 ab
	杨树	2.38 ± 0.02 b	0.22 ± 0.01 b	6.59 ± 2.08 a	14.23 ± 0.89 b	7.75 ± 0.03 a	1.47 ± 0.01 ab	3.13 ± 0.00 e
	混交林	3.30 ± 0.04 b	0.22 ± 0.01 b	2.83 ± 0.21 b	17.41 ± 2.91 ab	7.79 ± 0.09 a	1.47 ± 0.11 ab	4.84 ± 0.01 d
10~20	草地	3.67 ± 0.06 a	0.33 ± 0.02 a	1.18 ± 0.23 b	11.27 ± 2.35 b	7.40 ± 0.04 bc	1.42 ± 0.01 cd	10.28 ± 0.02 a
	玉米	3.00 ± 0.02 b	0.26 ± 0.02 b	7.48 ± 0.44 a	17.74 ± 0.62 a	7.35 ± 0.05 bc	1.38 ± 0.03 cd	10.85 ± 0.01 a
	沙棘	1.56 ± 0.04 c	0.18 ± 0.03 c	6.59 ± 0.19 a	8.65 ± 4.33 b	7.25 ± 0.04 c	1.33 ± 0.06 d	7.73 ± 0.01 ab
	紫穗槐	1.66 ± 0.05 c	0.16 ± 0.01 c	4.32 ± 0.55 ab	13.72 ± 1.60 ab	7.44 ± 0.10 b	1.60 ± 0.03 a	10.74 ± 0.00 a
	杨树	1.33 ± 0.06 c	0.16 ± 0.03 c	6.32 ± 4.21 a	11.71 ± 2.72 ab	7.64 ± 0.12 a	1.58 ± 0.04 ab	5.20 ± 0.03 b
	混交林	1.60 ± 0.05 c	0.15 ± 0.01 c	4.02 ± 0.10 ab	8.70 ± 0.49 b	7.80 ± 0.06 a	1.48 ± 0.08 bc	7.29 ± 0.01 ab

1) 同列相同土层不同字母表示不同植被间差异性显著 ($P < 0.05$)

2.2 不同植被恢复方式下土壤酶活性特征

植被恢复方式除沙棘外对 3 种土壤水解酶活性的影响在不同土层基本一致. 由图 1(a), 土壤脲酶活性在两土层上均表现为草地最大, 显著大于其余植被恢复方式, 杨树和混交林最小, 杨树显著低于沙棘、紫穗槐和玉米. 土层差异以沙棘最大, 草地最小. 由图 1(b), 同一植被恢复方式除玉米外土壤蔗

糖酶活性 10~20 cm 土层变异远小于 0~10 cm 土层. 土壤蔗糖酶活性表层和亚表层均以草地最大, 且显著大于其它植被. 沙棘、紫穗槐、杨树和混交林恢复下土壤蔗糖酶活性均无显著差异, 表明 4 种植物之间对排土场复垦土壤蔗糖酶活性的影响暂时无显著差异. 由图 1(c), 不同植被间土壤碱性磷酸酶活性 0~10 cm 土层差异均不显著, 10~20 cm 土层



相同土层不同字母表示不同植被间差异性显著 ($P < 0.05$)

图1 不同植被恢复方式下土壤酶活性变化

Fig. 1 Changes of soil enzyme activities under different vegetation types

草地显著大于杨树,其余互相之间无显著差异.表明植被恢复方式对土壤碱性磷酸酶活性无显著影响.0~10 cm 土层土壤碱性磷酸酶活性以沙棘、玉米地变异最大,草地最小;亚表层变异小于表层并以玉米地最大.脲酶受植被差异和土层差异的影响均显著,而蔗糖酶和磷酸酶受土层差异影响更显著.

2.3 土壤酶活性与基本理化性质的关系分析

对土壤酶活性与土壤各理化性质进行简单相关分析,结果见表3.由于土壤酶活性与土壤理化性质及各理化性质之间相互影响,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(见表4).结果表明0~10 cm 土层,土壤脲酶活性的影响因素主要是土壤含水率和有机碳,土壤全氮主要是通过有机碳和含水率对脲酶活性起作用,而有效氮受其他因素影响作用被削弱;10~20 cm 土层,土壤有机碳和全氮对脲酶活性影响最大,土壤含水率主要通过土壤有机碳和全氮起间接作用.对于土壤蔗糖酶,0~10 cm 土层上土壤全氮、速效磷、有效氮、pH 和容重对其直接影响都较大,但土壤有效氮、pH 和容重的直接作用受其他因素影响被削弱,而土壤有机碳和含水率主要通过土壤全氮对其起间接作用;土壤有机碳和全氮也是10~20 cm 土层土壤蔗糖酶最主要的影响因素.对于两个土层上的碱性磷酸酶,土壤有机碳和全氮是其活性的主要影响因素,同时速效磷的作用也较大.可见,各种土壤因子不仅直接影响土壤酶活性的大小,还通过相互之间的作用间接调控土壤酶活性.而且不同土层影响土壤酶活性的因素有所差别,这也导致3种水解酶活性的相关性不同.0~10 cm 土层脲酶与蔗糖酶活性显著相关,10~20 cm 土层脲酶与蔗糖酶、碱性磷酸酶呈极显著正相关,蔗糖酶和碱性磷酸酶显著相关.

表3 土壤酶活性与土壤理化性质之间的相关性分析¹⁾

Table 3 Correlation coefficients between soil enzyme activities and soil physicochemical properties

土层深度 /cm	项目	有机碳	全氮	速效磷	有效氮	pH	容重	含水率	蔗糖酶	磷酸酶
0~10	脲酶	0.882**	0.903**	-0.253	0.104	-0.620*	-0.641*	0.778**	0.698*	0.321
	蔗糖酶	0.875**	0.681*	-0.719**	0.384	-0.133	-0.070	0.646*		0.575
	磷酸酶	0.544	0.324	-0.450	0.220	0.116	0.078	0.273		
10~20	脲酶	0.952**	0.950**	-0.513	0.194	-0.386	-0.402	0.549	0.976**	0.735**
	蔗糖酶	0.967**	0.953**	-0.435	0.307	-0.373	-0.39	0.549		0.664*
	磷酸酶	0.678*	0.605*	-0.488	0.110	-0.335	-0.386	0.489		

1) * 为 $P < 0.05$, ** 为 $P < 0.01$

两土层土壤碱性磷酸酶活性的剩余决定系数都较大,达到0.5以上,说明对该酶活性有较大影响的因素还有没考虑到,对该酶活性影响因素的全面分析有待于进一步研究.

3 讨论

3.1 不同植被恢复方式对土壤理化性质的影响

碳、氮及磷含量是矿区排土场土壤形成的关键

表 4 土壤酶活性与土壤理化性质之间的通径系数¹⁾

Table 4 Path coefficients between soil physical and chemical properties and soil enzyme activities

因变量	土层深度 /cm	自变量	有机碳 x_1	全氮 x_2	速效磷 x_3	有效氮 x_4	pH x_5	容重 x_6	含水率 x_7	间接通径 系数合计
脲酶活性 y_1	0 ~ 10	x_1	<u>0.524</u>	0.002	-0.081	-0.170	0.033	-0.081	0.655	0.358
		x_2	0.475	<u>0.002</u>	-0.026	-0.060	0.045	-0.116	0.583	0.901
		x_3	-0.250	0.000	<u>0.170</u>	0.326	0.008	-0.070	-0.436	-0.423
		x_4	0.134	0.000	-0.083	<u>-0.667</u>	0.030	0.108	0.584	0.772
		x_5	-0.221	-0.001	-0.018	0.255	<u>-0.078</u>	0.103	-0.661	-0.542
		x_6	-0.192	-0.001	-0.054	-0.326	-0.037	<u>0.220</u>	-0.251	-0.861
		x_7	0.376	0.001	-0.081	-0.427	0.057	-0.061	<u>0.912</u>	-0.135
	10 ~ 20	x_1	<u>0.555</u>	0.340	0.071	-0.037	0.042	-0.018	-0.001	0.396
		x_2	0.536	<u>0.352</u>	0.061	-0.031	0.051	-0.018	-0.001	0.597
		x_3	-0.180	-0.099	<u>-0.218</u>	0.034	0.026	-0.007	0.001	-0.226
		x_4	0.214	0.112	-0.076	<u>-0.097</u>	0.038	0.004	-0.001	0.291
		x_5	-0.219	-0.167	0.052	0.034	<u>-0.107</u>	0.021	0.001	-0.278
		x_6	-0.252	-0.163	0.040	-0.010	-0.057	<u>0.040</u>	0.000	-0.442
		x_7	0.300	0.157	0.088	-0.034	0.045	-0.006	<u>-0.002</u>	0.550
蔗糖酶活性 y_2	0 ~ 10	x_1	<u>0.021</u>	0.692	0.196	0.184	-0.281	0.185	-0.121	0.855
		x_2	0.019	<u>0.764</u>	0.064	0.065	-0.389	0.265	-0.108	-0.084
		x_3	-0.010	-0.118	<u>-0.410</u>	-0.352	-0.071	0.161	0.080	-0.310
		x_4	0.005	0.069	0.200	<u>0.720</u>	-0.256	-0.247	-0.108	-0.336
		x_5	-0.009	-0.445	0.044	-0.276	<u>0.668</u>	-0.237	0.122	-0.801
		x_6	-0.008	-0.401	0.131	0.352	0.314	<u>-0.505</u>	0.046	0.435
		x_7	0.015	0.488	0.196	0.461	-0.484	0.139	<u>-0.168</u>	0.815
	10 ~ 20	x_1	<u>0.403</u>	0.451	0.063	0.029	-0.007	0.019	0.010	0.565
		x_2	0.389	<u>0.467</u>	0.055	0.024	-0.009	0.019	0.008	0.486
		x_3	-0.131	-0.131	<u>-0.195</u>	-0.026	-0.004	0.008	-0.008	-0.293
		x_4	0.156	0.149	-0.068	<u>0.075</u>	-0.006	-0.004	0.007	0.232
		x_5	-0.159	-0.222	0.047	-0.026	<u>0.018</u>	-0.022	-0.008	-0.391
		x_6	-0.183	-0.216	0.036	0.008	0.010	<u>-0.041</u>	-0.003	-0.348
		x_7	0.218	0.209	0.079	0.026	-0.008	0.006	<u>0.019</u>	0.530
磷酸酶活性 y_3	0 ~ 10	x_1	<u>1.746</u>	-0.898	-0.185	-0.026	-0.112	-0.107	0.126	-1.202
		x_2	1.582	<u>-0.991</u>	-0.060	-0.009	-0.155	-0.154	0.112	1.316
		x_3	-0.835	0.154	<u>0.388</u>	0.049	-0.029	-0.094	-0.084	-0.839
		x_4	0.445	-0.089	-0.190	<u>-0.100</u>	-0.102	0.143	0.113	0.320
		x_5	-0.735	0.577	-0.042	0.038	<u>0.267</u>	0.138	-0.128	-0.151
		x_6	-0.639	0.520	-0.124	-0.049	0.125	<u>0.293</u>	-0.048	-0.215
		x_7	1.254	-0.633	-0.185	-0.064	-0.194	-0.081	0.176	0.097
	10 ~ 20	x_1	<u>1.689</u>	-1.374	0.217	0.040	0.200	0.088	-0.181	-1.011
		x_2	1.630	<u>-1.424</u>	0.187	0.033	0.240	0.089	-0.150	2.030
		x_3	-0.549	0.400	<u>-0.667</u>	-0.036	0.121	0.035	0.135	0.107
		x_4	0.652	-0.453	-0.233	<u>0.104</u>	0.178	-0.020	-0.119	0.005
		x_5	-0.667	0.676	0.159	-0.037	<u>-0.506</u>	-0.103	0.142	0.172
		x_6	-0.767	0.658	0.122	0.011	-0.269	<u>-0.193</u>	0.051	-0.194
		x_7	0.912	-0.637	0.269	0.037	0.215	0.029	<u>-0.336</u>	0.825

1) 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

因素^[12]。而土壤中的碳、氮、磷与覆盖植被的生长及植物残体的矿化关系密切^[13~15]。覆盖植被的凋落物和根系分泌物为土壤提供有机质,使人工植被恢复下土壤的碳氮肥力尤其是表层碳氮肥力较未复垦土壤得到一定恢复。而土壤磷素主要来源于母质,其分布取决于初始分布;植物枯枝落叶分解和根系分泌物能促进难溶解磷的释放同时又通过根系

对土壤中无机磷进行吸收利用^[6,13],根系分布差异导致速效磷土层变化无规律。草地的生物量大,凋落物丰富,所以提供给土壤的有机质最多。并且草地经过多年对磷的吸收利用其磷素补充能力下降,故速效磷含量最低。干旱胁迫下沙棘对氮的吸收量较大、通过凋落归还较少但能形成根瘤进行自身固氮且固氮作用超过一般豆科作物,相对磷的吸收

较小而归还较大^[16,17]。这可能导致沙棘复垦下土壤全氮和速效磷含量都较高。由于沙棘是浅根系植物,根系发达而水平伸展能力强,故而能有效降低土壤容重。紫穗槐也具有自身固氮作用,通常为响应黄绵土低的供磷水平而维持较大的根系比例促进磷素吸收^[18],故而紫穗槐恢复下土壤速效磷含量低。玉米地由于人为耕作和施肥作用,碳氮磷肥力都优于其余人工植被恢复地。杨树在干旱半干旱地区的生长易受养分和水分胁迫,沙棘和杨树混交能显著改变林分内有机质降解和养分循环从而加速杨树生长提高林内生物量。具体途径可能是通过沙棘的根瘤固氮作用,凋落物品质的提高和养分循环速度的提高或者微环境的改善增加土壤氮素有效性以及其它养分的有效性^[19]。本研究中沙棘一定程度缓解了杨树的水分胁迫,促进了磷素吸收,增加了混交林内有机质并降低了土壤容重。很多学者^[6,20~22]将杨树林、沙棘林和杨树沙棘混交林对土壤含水量的影响进行对比研究,目前没有得出一致的结论,如对内蒙古中部地区杨树与沙棘混交林的研究^[21]显示无论是偏湿环境还是偏旱环境条件下,纯林土壤含水量均高于混交林,混交林消耗土壤水分的能力超过纯林,且在偏旱条件下,混交林的土壤含水量降低更甚。土壤含水率差异可能与不同杨树品种、种植密度、研究区的地理位置和气象条件有很大关系。含水率土层变化随深度增加而增加,与黑岱沟煤矿倒蒜沟排土场不同植被配置下5~9月土壤水分的研究结果相反^[4],可能是因为本研究采样时间为10月末,这一时期气温低、降水少而复垦土壤比热小、土温变化大,水分消耗大于补给,上层水分蒸发快。

5种人工植被中沙棘的碳氮磷肥力都相对高于其它植被,而容重以沙棘最小,表明沙棘作为该排土场复垦土壤的改良植物具有一定的优势;杨树林下土壤的碳氮含量和含水率相对低于其余植被,而容重仅次于紫穗槐,表现了杨树复垦土壤的劣势。

3.2 不同植被恢复方式对土壤酶活性的影响

土壤酶是土壤中活跃的有机成分,对土壤物质转化和能量流通过程起主要作用,同时土壤肥力反过来也制约土壤酶活性^[8,23]。通径分析结果表明0~10 cm土层3种土壤酶活性的影响因素较复杂,10~20 cm土层3种水解酶活性的影响因素较一致,但两土层上土壤有机碳和全氮都是主要影响因素。刘广深等^[24]对浙江5种土壤的分析结果也表明,土壤肥力尤其是有机质、全氮和全磷是制约3种水解酶的主要因素。周礼恺等^[25]认为土壤的异

质性决定了土壤酶的特殊性,这种特殊性不仅体现在酶种类上,也体现在酶数量上。矿区排土场复垦初具有相同的土壤背景,植被差异及人为活动导致了土壤的异质性。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^[26]。本研究中,在酶种类上酶活性差异体现为不同人工植被恢复下土壤脲酶活性变异最大,能更敏感地感知植被恢复对土壤性质的影响,而碱性磷酸酶变异最小。不同植被间土壤磷酸酶活性差异不大主要是因为矿区排土场有效磷主要来自难溶解磷的溶解释放,而来自凋落物中有机磷的矿化较少。同时研究测定土壤碱性磷酸酶活性时用的是风干土,这也可能低估了不同植被恢复方式间酶活性的差异。土壤酶数量的差异通过酶活性的空间分布差异体现。从水平分布来看,对黄土高原纸坊沟流域不同植物下土壤酶活性的研究显示^[27],沙棘根际土壤碳氮肥力低于紫穗槐,两者蔗糖酶和碱性磷酸酶活性无显著差异,但脲酶活性紫穗槐显著大于沙棘。本研究中沙棘和紫穗槐除脲酶0~10 cm土层沙棘显著大于紫穗槐,其余两种植被间差异均不显著。分析认为脲酶活性差异主要是因为0~10 cm土层沙棘林土壤有效氮和含水率显著低于紫穗槐,有效氮抑制了脲酶活性,且土壤脲酶活性受土壤水分影响显著。复垦土壤表层含有较多枯枝落叶和腐殖质,有机质和全氮等养分更多,利于微生物生长,再加之热量条件和通气状况的优势,使得不同植被下3种土壤酶活性除玉米的蔗糖酶活性外都随土层加深而降低,这则体现了酶垂直空间分布上的数量差异。

4 结论

(1) 植被恢复对该排土场复垦土壤的肥力恢复和酶活性提高有一定的作用但暂未达到天然草地的自然水平。

(2) 5种植被中沙棘作为该排土场复垦土壤的造林树种具有一定的优势,能提高土壤碳氮肥力并显著降低复垦土壤的容重。而杨树单作对土壤酶活性和理化性质的影响较弱,其作为矿区生态恢复树种有待进一步考察。

(3) 土壤酶活性随土层加深而减小,而且不同土层影响土壤酶活性的因素有所差别。土壤有机碳和全氮是影响10~20 cm土层土壤蔗糖酶、脲酶和碱性磷酸酶活性的主要因素,两者对0~10 cm土层3种水解酶的影响有所减弱。土壤脲酶能更敏感地

反映不同植被恢复对土壤性质的影响。但植被恢复对土壤碱性磷酸酶活性影响不大。

(4) 排土场复垦土壤有机碳和全氮含量的提高,是排土场肥力恢复和生物活性提高的主要原因。

致谢:感谢曾全超、董扬红、李娅芸、李鑫、牛丹、倪银霞等在采样和实验方面提供帮助!

参考文献:

- [1] 赵欣. 黑岱沟露天煤矿生态修复后的景观生态格局变化研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2013. 54-56.
- [2] 李保杰, 顾和和, 纪亚洲. 矿区土地复垦景观格局变化和生态效应[J]. 农业工程学报, 2012, 28(3): 251-256.
- [3] 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. 47-48.
- [4] 姚敏娟. 黑岱沟露天矿排土场不同植被配置对土壤养分和土壤水分影响研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2007. 31-34.
- [5] 马建军. 黄土高原丘陵沟壑区露天煤矿生态修复及其生态效应研究——以黑岱沟露天煤矿为例[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2007. 108-109.
- [6] 马建军, 李青丰, 张树礼. 沙棘与不同类型植被配置下土壤微生物、养分特征及相关性研究[J]. 干旱区资源与环境, 2007, 21(6): 163-167.
- [7] 秦纪洪, 张文宣, 王琴, 等. 亚高山森林土壤酶活性的温度敏感性特征[J]. 土壤学报, 2013, 50(6): 1241-1245.
- [8] Burke D J, Weintraub M N, Hewins C R, et al. Relationship between soil enzyme activities, nutrient cycling and soil fungal communities in a northern hardwood forest [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2011, 43(4): 795-803.
- [9] 王翔, 李晋川, 岳建英, 等. 安太堡露天矿复垦地不同人工植被恢复下的土壤酶活性和肥力比较[J]. 环境科学, 2013, 34(9): 3601-3606.
- [10] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000. 22-81.
- [11] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986. 274-339.
- [12] Šourková M, Frouz J, Šantrůčková H. Accumulation of carbon, nitrogen and phosphorus during soil formation on alder spoil heaps after brown-coal mining, near Sokolov (Czech Republic) [J]. Geoderma, 2005, 124(1-2): 203-214.
- [13] Lorenz K, Lal R. Stabilization of organic carbon in chemically separated pools in reclaimed coal mine soils in Ohio [J]. Geoderma, 2007, 141(3-4): 294-301.
- [14] 陈刚才, 甘露, 王仕禄, 等. 土壤中元素磷的地球化学[J]. 地质地球化学, 2001, 29(2): 78-81.
- [15] 贾晓红, 李新荣, 李元寿. 干旱沙区植被恢复中土壤碳氮变化规律[J]. 植物生态学报, 2007, 31(1): 66-74.
- [16] 刘增文, 王佑民. 沙棘群落内部的营养元素累积和循环[J]. 陕西林业科技, 1989, (4): 17-23.
- [17] 杜建云, 石娟华, 王岩, 等. 铁尾矿区沙棘-桑树人工混交林的养分分配状况[J]. 蚕业科学, 2012, 38(3): 389-396.
- [18] 张东梅, 宋鑫, 张丽静, 等. 不同供磷水平对紫穗槐生长及根系形态的影响[J]. 草业科学, 2014, 31(9): 1767-1773.
- [19] Liu S R. Effects of seabuckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.) on nutrient distribution and biological cycling of poplar plantations in dry subhumid area of China [J]. Acta Ecologica Sinica, 1999, 19(4): 534-542.
- [20] 赵广东, 刘世荣, 贾瑞, 等. 沙棘对辽宁西部杨树人工林土壤水分动态变化的影响研究[J]. 水土保持学报, 2004, 18(5): 112-114.
- [21] 郭惠清, 岳海军. 内蒙古中部地区杨树与沙棘混交林的研究[J]. 内蒙古林学院学报(自然科学版), 1999, 21(1): 38-41.
- [22] 杨建伟, 韩蕊莲, 魏宇昆, 等. 不同土壤水分状况对杨树、沙棘水分关系及生长的影响[J]. 西北植物学报, 2002, 22(3): 579-586.
- [23] 朱美玲, 贡璐, 张龙龙. 塔里木河上游典型绿洲土壤酶活性与环境因子相关分析[J]. 环境科学, 2015, 36(7): 2678-2685.
- [24] 刘广深, 徐冬梅, 许中坚, 等. 用途径分析法研究土壤水解酶活性与土壤性质的关系[J]. 土壤学报, 2003, 40(5): 756-762.
- [25] 周礼恺, 张志明, 曹承绵. 土壤酶活性的总体在评价土壤肥力水平中的作用[J]. 土壤学报, 1983, 20(4): 413-417.
- [26] 杨佳佳. 延河流域植被类型对土壤酶活性和土壤碳氮形态的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014. 36-40.
- [27] 李静, 蔚晓燕, 唐明. 黄土高原纸坊沟流域不同植物对土壤微生物生物量和土壤酶活性的影响[J]. 西北植物学报, 2013, 33(2): 387-393.