

DOI: 10.5846/stxb201309222330

李君剑, 严俊霞, 李洪建. 矿区不同复垦措施对土壤碳矿化和酶活性的影响. 生态学报, 2015, 35(12): 4178-4185.

Li J J, Yan J X, Li H J. Effects of different reclaimed measures on soil carbon mineralization and enzyme actives in mining areas. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(12): 4178-4185.

矿区不同复垦措施对土壤碳矿化和酶活性的影响

李君剑, 严俊霞, 李洪建*

山西大学黄土高原研究所, 太原 030006

摘要: 矿区废弃地生态退化形势严峻, 生态修复已成为矿区可持续发展的主要措施, 目前关于矿区复垦后土壤碳矿化和酶活性变化的研究较少。以山西省孝义市露天矿区复垦区为研究对象, 植被恢复类型包括了百脉根、苜蓿、油松和柳树-圆柏混交林, 并对其分别进行不施肥(对照)、无机肥、复合肥和有机肥处理, 从而研究植被类型与施肥方式对矿区土壤碳矿化和酶活性的影响。结果表明, 乔本比草本恢复类型的土壤有机碳矿化潜势大, 不同施肥条件的土壤有机碳矿化潜势和累积量趋势基本为: 对照 < 无机肥 < 复合肥 < 有机肥; 4 种土壤酶活性因植被恢复类型和施肥处理的不同而差异显著, 不同土壤酶与降解特性不同的有机碳间相关性有所不同。土壤碳矿化累积量和酶活性均受植被恢复类型、施肥处理及两者交互作用的显著影响, 因此对复垦措施敏感的土壤有机碳矿化和酶活性可作为评价复垦措施的指标。

关键词: 矿区复垦; 植被修复方式; 肥料处理; 土壤有机碳矿化; 土壤酶

Effects of different reclaimed measures on soil carbon mineralization and enzyme actives in mining areas

LI Junjian, YAN Junxia, LI Hongjian*

Institute of Loess Plateau, Shanxi University, Taiyuan 030006, China

Abstract: Ecological degradation in the mining areas are greatly aggravated in recent decades. Ecological restoration has become the primary measure for the sustainable development, especially in Shanxi Province where mine industry has been one of the pillar industries. Therefore, regulations were initiated to reclaim abandoned coal mining areas for agriculture and forestry in 2006. The vegetation and soil physicochemical characteristics are often considered as the basic knowledge for assessing the effects of mining reclaimed measures. However, soil carbon dynamics and enzyme activities still remain poorly understood. In this paper, we tested the effects of different regeneration scenarios and fertilizer treatments on soil organic carbon mineralization and enzyme actives in reclaimed opencast mining areas. Ecological reconstruction was initiated on the abandoned land in Xiaoyi mining area under four regeneration scenarios including *Lotus corniculatus*, *Medicago sativa* grasslands, *Pinus tabulaeformis* plantation, and *Salix matsudana*-*Sabina chinensis* mixed forest treated by different fertilizations including no, inorganic, organic and combination of inorganic and organic fertilizer added to soils. We analyzed the effects of regeneration scenarios and fertilizer treatments on soil organic carbon dynamics and enzyme actives, and the relationships between soil enzyme actives and different active carbon through quantitative ecology method. The major findings of the dissertation are as follows: (1) Soil organic carbon mineralization potential and cumulative carbon from herb regenerations were lower than from tree ones. Under same regeneration scenario, the order of soil organic carbon mineralization potential was no < inorganic fertilizer < inorganic + organic fertilizer < organic fertilizer. Especially, the

基金项目: 国家自然科学基金(41271530, 41201374)

收稿日期: 2013-09-22; 网络出版日期: 2014-07-02

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hongli@sxu.edu.cn

positive effects of organic fertilizer were obvious. In addition, soil carbon-cumulative mineralization was also stimulated by fertilizer treatments. (2) The feedbacks to the regeneration scenarios and fertilizer treatments from different enzymes actives were different. There were the contrary responds to fertilizer treatments between herb and tree scenarios. Except for phlyphenol oxidase, the effects of fertilizer treatments on soil enzyme activities were positive in most cases. (3) The relationships between soil enzyme activities and carbon varied due to enzyme types and carbon activity. Positively significant correlation was demonstrated on soil sucrase and dehydrogenase ($P < 0.05$), however, negative correlations were shown between soil urease and oxidase ($P < 0.05$) / phlyphenol ($P < 0.05$). (4) The effects of regeneration scenarios, fertilizer treatments and their mutual actions on soil carbon-cumulative mineralization and enzyme activities were at the 0.01 levels, except that the effect of fertilizer treatments on soil phlyphenol oxidase was at the 0.05 level. Soil carbon-cumulative mineralization and enzyme activities were more sensitive to fertilizer treatments and regeneration-fertilizer interaction than soil pH, bulk density, organic carbon and nitrogen. Therefore, the sensitive diversity indices of soil carbon-cumulative mineralization and enzyme activities could be as good indictors to assess the effects of mining reclamation measures.

Key Words: reclaimed mining area; regeneration scenarios; fertilizer treatments; soil carbon mineralization; soil enzyme activities

山西是主要的采煤大省,煤炭分布面积占全省总面积的 36.5%,采煤破坏土地总面积 $1.15 \times 10^5 \text{ hm}^2$,尚未治理的 806 hm^2 ,占 89.2%^[1]。矿山开采活动对矿区土壤造成了严重破坏,主要表现为土壤有机质含量和肥力降低,理化和生物特性变差,土壤团聚体遭受严重破坏^[2]。矿区复垦可固定流失碳和减缓二氧化碳释放,复垦初期 20—30 a 间,土壤 0—15 cm 层有机碳固定速率较快,一般来说在草地复垦中土壤有机碳固定速率较快,而林地固定速率较低^[3]。目前,关于山西省矿区复垦措施对植被群落演替影响的研究表明,相对于单一人工配置群落,多样人工配置群落促进群落正向演替方向发展更为明显,人工修复和自然修复只在恢复初期群落演替存在差异性^[4-5],因植被恢复类型和恢复年限土壤有机质含量会有显著变化^[6]。土壤有机碳动态变化和酶类是反映土壤有机碳转化过程特征的敏感指标^[7],而目前对可及时反映土壤质量变化的土壤碳矿化特征和酶活性的研究较少。

本研究在山西孝义露天矿区的不同植被修复方式和施肥处理的复垦地采集土壤样品,对样地土壤碳矿化和酶活性进行测定,分析植被恢复类型和施肥处理对碳矿化和酶活性的影响,以及土壤酶活与土壤不同活性有机质间相关性,旨在揭示不同复垦措施对土壤质量的影响,其结果将为矿区废弃地生态恢复模式筛选和恢复效果评价提供科学指标。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于吕梁山脉东翼低山丘陵地带,构造剥蚀剧烈,大体西高东低,地表黄土覆盖,沟谷切割土梁冲沟发育。位于 $37^\circ 09.4' \text{ N}$ 和 $111^\circ 31.1' \text{ E}$,海拔 995 m。属于暖湿带大陆性气候。年均气温 10.1° C ,气温月际变化大,最冷月为 1 月,平均温度为 -5.6° C ,最高月在 7 月平均温度为 23.7° C ,极端高温可达 39.5° C ,极端低温为 -22.9° C 。年平均降水量 486 mm,降水主要集中在 7—9 月。全年平均无霜期 190 d,霜冻期为 10 月上旬至次年 4 月中旬。石灰岩和砂页岩是该区的主要成土母质,机械组成主要是粉砂,排水和耕性条件良好,地下水位为 5—6 m,无盐渍化现象,土壤类型为淋溶褐土。

本研究包括 4 个样地均是露天开采后,2009 年矿区覆土,分别播种百脉根 (*Lotus corniculatus*) (播种量为 5 kg/hm^2)、紫花苜蓿 (*Medicago sativa*) (播种量为 10 kg/hm^2)、栽植油松林 (*Pinus tabulaeformis*) (苗龄为 5 a,间距为 $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$) 和柳树-圆柏混交林 (*Salix matsudana* Koidz-*Sabina chinensis*) (柳树和圆柏的苗龄分别为 7 和 5 a,间距为 $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$)。对不同植被类型复垦地分别进行不同施肥处理,包括不施用任何肥料的对照,施

用 750 kg/hm² 无机肥 (N:P₂O₅ = 18:12)、45 m³/hm² 有机肥 (OR, N:1.7%, 有机质:24.1%)、复合肥 (IO, 375 kg/hm² 无机肥 + 22.5 m³/hm² 有机肥) 处理。乔本林样地设置为 10 m × 10 m, 草地样地设置为 2 m × 4 m, 每个处理 3 个重复, 不同处理之间有 2 m 隔离区。

1.2 样品采集

2011 年 7 月在百脉根、苜蓿、油松林和混交林复垦区不同施肥处理的样地分别采样, 用土钻采用多点混合土样样品处理法, 去除地表植被和覆盖物, 每个处理的 3 个重复小区分别随机取 6 个样点挖穴 (0—10 cm) 并混匀。一部分带回实验室自然风干, 研磨过 2 mm 的筛以备用; 另一部分用于 4 °C 保存用于土壤有机碳矿化和酶活性的测定。

1.3 样品分析

土壤容重 (BD) 采用环刀法; pH 值采用 1:5 土和水溶液测定; 土壤有机碳 (OC) 采用重铬酸钾氧化法; 总氮 (TN) 采用凯氏定氮法^[8]。进行土壤活性碳采用 Rovira 和 Vallejo 酸水解法, 依次加入 2.5 mol/L 和 13 mol/L H₂SO₄ 进行依次酸解并离心, 酸解液体分别通过重铬酸钾氧化法测定碳含量, 被低和高浓度 H₂SO₄ 酸解并浸提出土壤有机碳分别为活性碳 1 和活性碳 2 (LC1 和 LC2)^[9], 难降解碳为有机碳与活性碳 1 和 2 间差值。土壤有机碳矿化用实验室土壤培养法测定, 在 25 °C 恒温下培养 36 d, 分别于 2、4、6、8、15、22、29 和 36 d 用 HCl 滴定吸收液 NaOH, 从而计算土壤碳矿化速率^[10]。土壤多酚氧化酶活性采用邻苯三酚比色法; 土壤蔗糖酶活性采用 3,5-二硝基水杨酸比色法; 土壤脲酶活性采用靛酚蓝比色法; 土壤脱氢酶活性采用 2,3,5-氯化三苯基四氮唑比色法^[11]。

1.4 数据分析

土壤有机碳矿化主要是活性有机碳分解, 所以应用一阶动态方程 $C_t = C_p(1 - e^{-kt})$ 分析不同处理下土壤有机碳矿化动态, 式中 C_p 表示土壤有机碳矿化势, k 表示有机碳矿化常数, C_t 表示 t 天时累积土壤有机碳矿化量, t 表示天数。

不同植被修复类型和施肥处理对土壤理化性质、碳矿化累积量和酶活影响, 在 SPSS 中进行 Two-way analysis of variance 分析; 土壤酶活性和有机质及微生物丰度间相关性进行 Pearson 相关性分析。

2 结果

2.1 土壤理化性质

从表 1 可看出复垦地的土壤 pH 值呈碱性, 施肥后会使得土壤 pH 值显著减低。土壤容重除在苜蓿样地中, 施肥均对其没有显著的影响; 对照和有机肥处理下, 植被对土壤容重影响较大。各样地土壤有机碳和总氮基本上由于施肥而增加, 尤其是有机肥处理显著高于对照样地; 除混合肥处理下, 其它相同施肥条件下油松林土壤有机碳会显著低于其它植被修复类型。相同施肥处理时, 植被修复方式显著影响土壤总氮。土壤活性碳库 1 和 2 主要受不同植被恢复类型的显著影响, 而施肥对其影响并不显著。植被恢复类型和施肥处理间交互作用对土壤 pH 值、容重和活性碳并无显著影响, 而显著影响土壤有机碳和总氮含量 ($P < 0.05$)。

2.2 土壤有机碳矿化累积量

土壤有机碳矿化累积量随培养时间变化趋势见图 1, 除苜蓿样地土壤有机碳矿化累积量最低值出现在无机肥样地外, 其它植被恢复类型下对照样地的碳矿化累积量为最低, 有机肥样地的碳矿化累积量保持最高。施肥处理在草本和乔木恢复类型对碳矿化累积量的影响有所差异, 草本恢复类型下有机肥处理显著高于对照和无机肥样地碳矿化累积量, 油松林下对照显著低于施肥样地碳矿化累积量, 混交林中有有机肥显著高于其它样地碳矿化累积量。相同施肥条件下, 草本低于乔木恢复类型的碳矿化累积量。植被恢复类型和施肥处理间交互作用显著影响碳矿化累积量 ($P < 0.01$)。

从表 2 中也可看出, 土壤有机碳矿化累积量与培养天数之间的一阶动态方程的拟合系数均达到了极显著相关水平 ($P < 0.001$)。相同植被恢复方式下, 土壤有机碳矿化强势最大值均出现在有机肥处理样地; 而相同

施肥处理条件下,乔本高于草本恢复方式下土壤碳矿化潜势,有机肥处理时尤为显著。草本恢复方式下,土壤碳矿化潜势在无机肥与复合肥处理间差别较大,在有机肥和复合肥间差别较小,而乔本恢复方式下,无机肥与复合肥间土壤碳矿化潜势差别较小,而有机肥与复合肥处理间差别较大。

表 1 植被恢复类型和施肥处理下土壤理化性质和有机碳组成

Table 1 Soil physiochemical characteristics and organic carbon composition under different regeneration scenarios and fertilizer treatments							
植被 Vegetation	施肥 Fertilizer	pH	容重 Bulk density/ (g/cm ³)	有机碳 Organic carbon/ (g/kg)	氮 Total nitrogen/ (g/kg)	活性碳 1 Labile Carbon 1/ (g/kg)	活性碳 2 Labile Carbon 2/ (g/kg)
百脉根 <i>L. corniculatus</i>	对照	7.96 ±0.01 bA	1.20±0.04aB	2.61±0.13aB	0.33±0.01aA	1.15±0.19aB	0.36±0.25aA
	无机肥	7.87 ±0.03 aA	1.23±0.04aA	2.49±0.23aAB	0.37±0.02aB	1.47±0.24aB	0.42±0.16aA
	复合肥	7.92 ±0.04 abA	1.25±0.02aA	2.18±0.40aB	0.34±0.01aB	1.15±0.18aB	0.15±0.09aA
	有机肥	7.89 ±0.02 aA	1.16±0.08aA	3.22±0.19bC	0.43±0.02bB	1.28±0.29aB	0.47±0.24aA
苜蓿 <i>M. sativa</i>	对照	8.01 ±0.06 aA	1.01±0.05aA	2.29±0.28abB	0.35±0.01aA	0.58±0.19aA	0.44±0.09aA
	无机肥	7.93 ±0.04 aAB	1.14±0.11abA	2.14±1.06abAB	0.29±0.01aA	0.70±0.10aA	0.35±0.05aA
	复合肥	8.05 ±0.17 aA	1.32±0.09cA	1.29±0.03aA	0.25±0.01aA	0.45±0.06aA	0.31±0.10aAB
	有机肥	8.06 ±0.28 aA	1.26±0.05bcAB	2.61±0.23bAB	0.46±0.04bB	0.67±0.10aA	0.49±0.09aA
油松林 <i>P. tabulaeformis</i>	对照	7.95 ±0.01 bA	1.35±0.04aC	1.68±0.23aA	0.34±0.04aA	0.69±0.19aA	0.27±0.09aA
	无机肥	7.87 ±0.06 aA	1.27±0.02aA	1.68±0.13aA	0.36±0.03aB	0.50±0.19aA	0.54±0.16aA
	复合肥	7.88 ±0.01 aA	1.33±0.17aA	1.86±0.08abB	0.35±0.02aB	0.70±0.19aA	0.50±0.18aB
	有机肥	7.91 ±0.02 abA	1.34±0.06aB	2.21±0.27bA	0.36±0.04aA	0.77±0.11aA	0.48±0.09aA
混交林 Mixed forest	对照	8.24 ±0.11 bB	1.17±0.07aB	2.73±0.34aB	0.33±0.00aA	0.72±0.13aA	0.89±0.16aB
	无机肥	7.97 ±0.03 aB	1.29±0.18aA	3.09±0.27abB	0.52±0.03bC	0.84±0.15aA	1.11±0.10aB
	复合肥	7.91 ±0.10 aA	1.26±0.06aA	3.56±0.15bC	0.36±0.02aB	1.07±0.11aB	1.15±0.23aC
	有机肥	8.03 ±0.04 aA	1.27±0.08aAB	3.10±0.42abB	0.31±0.02aA	0.94±0.11aA	0.95±0.10aB

数值为平均值±标准偏差,不同小写字母表示相同植被下不同肥料处理间在 0.05 水平上差异显著;不同大写字母表示相同肥料处理下不同植被之间 0.05 水平上差异显著

表 2 不同植被恢复和施肥处理下土壤有机碳矿化动态

Table 2 Soil organic carbon mineralization dynamics under different regeneration scenarios and fertilizer treatments					
植被 Vegetation	施肥 Fertilizer	C_p	k	R^2	P
百脉根 <i>L. corniculatus</i> ,	对照	33.9809	0.0837	0.9937	<0.001
	无机肥	37.7180	0.0708	0.9789	<0.001
	复合肥	42.6910	0.0702	0.9799	<0.001
	有机肥	42.5551	0.0767	0.9805	<0.001
苜蓿 <i>M. sativa</i>	对照	40.1474	0.0774	0.9784	<0.001
	无机肥	35.3712	0.0815	0.9866	<0.001
	复合肥	44.9824	0.0714	0.9856	<0.001
	有机肥	45.9742	0.0663	0.9861	<0.001
油松林 <i>P. tabulaeformis</i>	对照	47.7406	0.0615	0.9829	<0.001
	无机肥	60.3403	0.0534	0.9833	<0.001
	复合肥	61.6312	0.0561	0.9824	<0.001
	有机肥	68.2653	0.0501	0.9900	<0.001
混交林 Mixed forest	对照	43.9511	0.0606	0.9858	<0.001
	无机肥	44.8260	0.0748	0.9879	<0.001
	复合肥	53.4164	0.0676	0.9847	<0.001
	有机肥	77.9699	0.0641	0.9952	<0.001

C_p : 土壤有机碳矿化势 Soil organic carbon mineralization potential, k : 有机碳矿化常数 Mineralization coefficient, R^2 : 决定系数 Determination coefficients, P : 显著性水平 Significant level

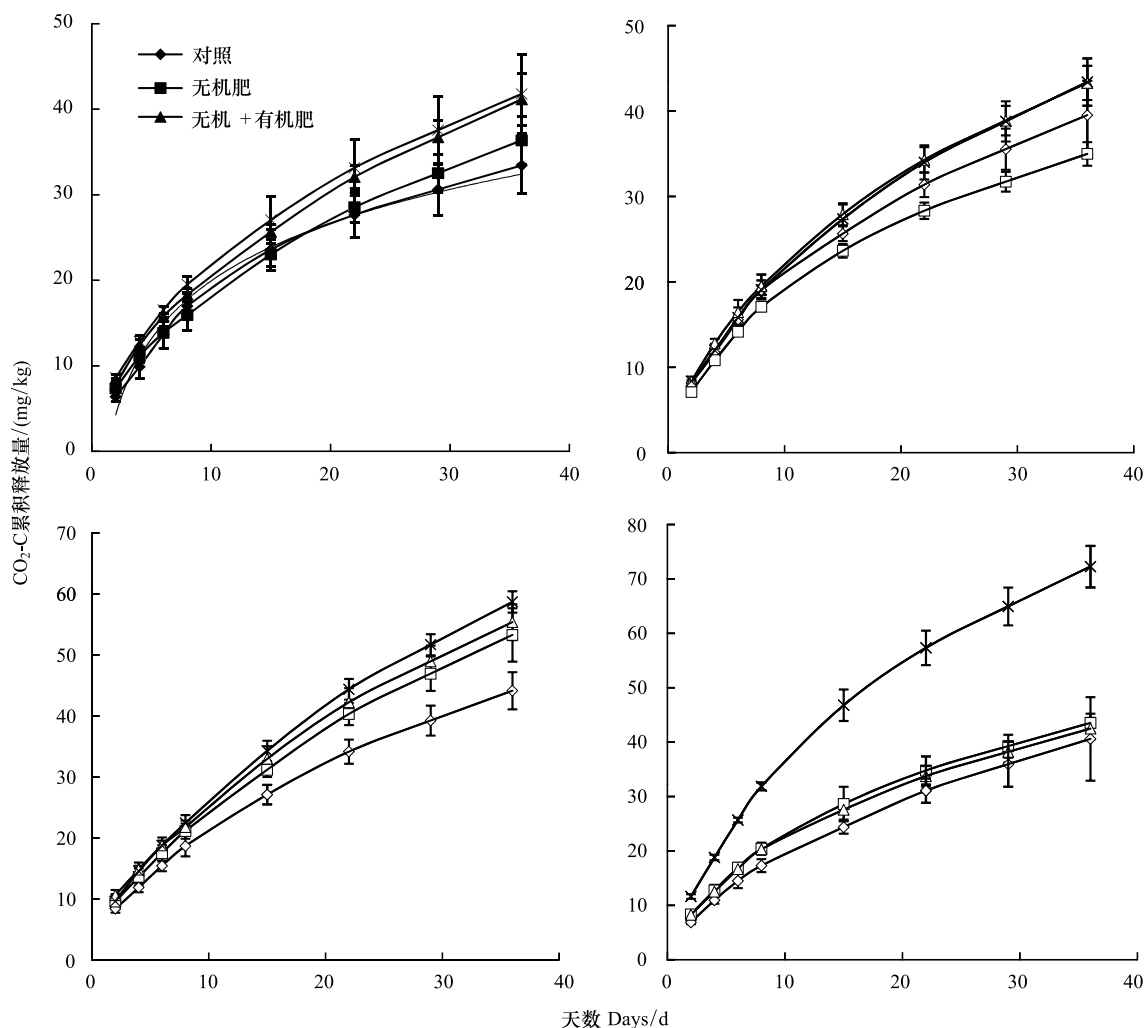


图1 不同植被恢复和施肥处理下土壤有机碳矿化累积释放量

Fig.1 Soil cumulative carbon mineralization dynamics under different regeneration scenarios and fertilizer treatments

2.3 土壤酶活性

不同植被修复类型和施肥处理对于土壤蔗糖酶、多酚氧化酶、脱氢酶和脲酶活性影响见图2。从图2中,可看出不同土壤酶对植被恢复类型和施肥处理的响应并不一致。土壤蔗糖酶活性在草本恢复样地中会因有机肥施用而显著提高,而复合肥对其影响不显著,而乔木恢复样地中,3种施肥处理均显著提高蔗糖酶活性;对照样地中,草本显著高于乔木的土壤蔗糖酶活性,而复合肥处理的不同植被恢复类型间呈相反趋势。草本样地中,施用无机肥或有机肥均显著地促进了土壤多酚氧化酶活性,而乔木样地中施肥显著抑制多酚氧化酶活性;相同施肥处理条件下,乔木显著高于草本样地的多酚氧化酶活性。对土壤脱氢酶,只有复合肥的影响效应在4种植被修复方式均呈显著效应,而其它施肥处理方式因植被恢复类型不同对脱氢酶影响而不同;照和无机肥样地中,不同植被恢复类型间脱氢酶活性差异较小,复合肥和有机肥的施用后,各植被恢复类型间脱氢酶差异性增加。草本样地中施肥对脲酶活性的效应并不一致,而在乔木样地中3种施肥均显著促进脲酶活性;相同施肥处理条件下,草本显著高于乔木样地脲酶活性。另外,除施肥对土壤多酚氧化酶活性影响水平为 $P < 0.05$,其余土壤酶活性受植被恢复类型、施肥处理及其交互作用的影响均达到了极显著水平($P < 0.01$)。

表3是对土壤酶活性与土壤不同活性有机碳间相关性分析,蔗糖酶与脱氢酶之间呈显著正相关($P < 0.05$),而脲酶与蔗糖酶和多酚氧化酶间呈显著的负相关。4种酶活性和土壤有机质均不相关,蔗糖酶、多酚氧化酶和脲酶分别与碳1和2及难降解碳显著相关,其中多酚氧化酶与活性碳2间相关系数最大为0.591,相

关水平为 0.01。

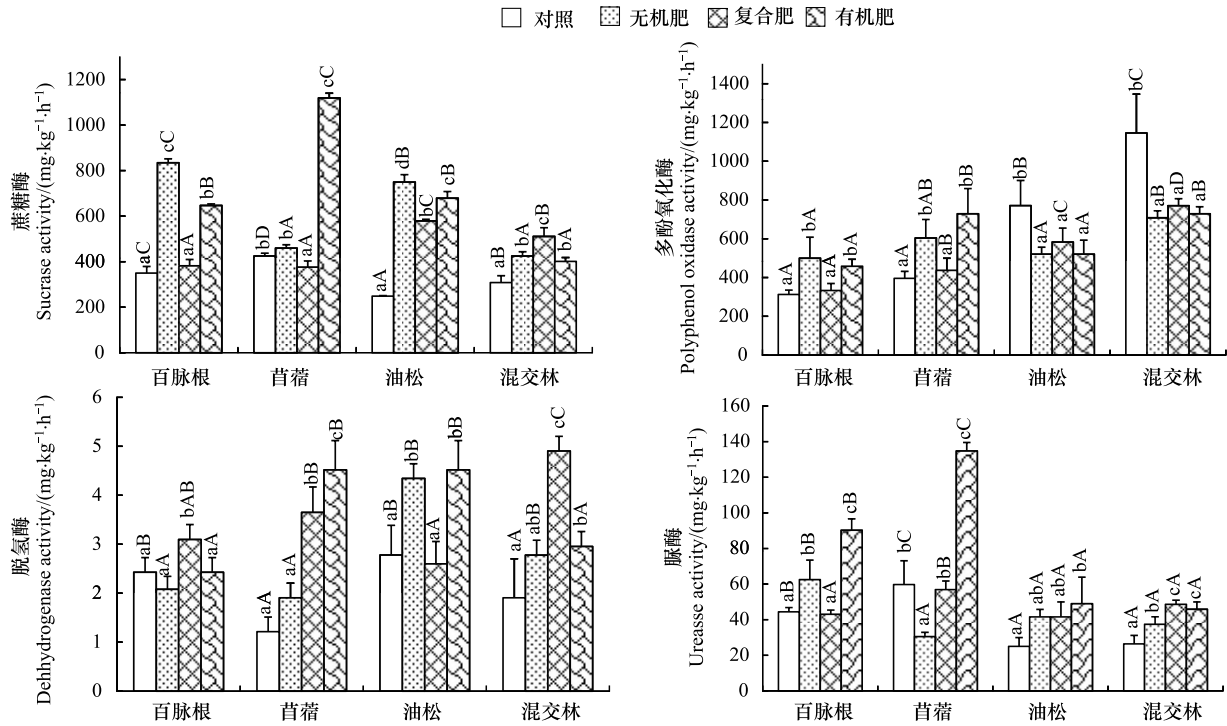


图 2 不同植被修复类型和肥料处理下土壤酶活性
Fig.2 Soil enzyme activities in different regeneration scenarios and fertilizer treatments

表 3 土壤酶活性与不同活性有机碳的相关检验

土壤酶和有机碳 Soil enzyme and organic carbon	蔗糖酶 Invertase	多酚氧化酶 Polyphenol oxidase	脱氢酶 Dehydrogenase	脲酶 Urease
多酚氧化酶 Polyphenol oxidase	-0.208			
脱氢酶 Dehydrogenase	0.331 *	0.183		
脲酶 Urease	-0.303 *	-0.339 *	0.139	
有机碳 Organic carbon	-0.228	0.241	0.135	0.253
活性碳 1 Liable carbon1	0.353 *	-0.258	-0.103	0.223
活性碳 2 Liable carbon 2	-0.211	0.591 **	0.269	-0.155
难降解碳 Recalcitrant carbon	-0.175	0.188	-0.017	0.452 **

* 相关水平为 0.05 (双尾); * * 相关水平为 0.01 (双尾)

3 讨论

不同植被恢复类型和施肥处理主要是通过对土壤有机碳含量和组分的影响,进而影响土壤碳矿化分解速率^[12-13],植被对土壤碳影响主要取决于根系产量、转化率、分泌物和菌根量等^[14]。本研究发现植被恢复类型会显著影响不同活性有机碳含量(表 1),同时也影响土壤碳矿化累积量和潜势,乔本比草本恢复类型的土壤碳矿化累积量和潜势大(图 1 和表 2),这可能主要是由于草本和乔木生长所需水分差异,以及不同植被覆盖度影响土壤水热平衡,研究表明黄土高原区土壤温度和水分是土壤有机碳矿化的主要影响因子^[15];另外植被恢复类型影响土壤碳矿化可能是由于枯落物输入、根系分泌物和深度不同,土壤碳输入量和分配比例不同,导致土壤碳矿化潜势有所差异。

土壤改良剂可通过直接和间接效应,增加土壤养分、固化有毒金属、改善土壤结构和土壤水分环境^[3],因

此也可影响土壤碳矿化,本文中也发现复合肥和有机肥可显著提高土壤碳矿化速率以及潜势(图1和表2)。影响土壤碳矿化的另一主要因素是土壤结构,团聚体结构阻止土壤酶与有机碳的接触,在本研究中也发现土壤容重分别与土壤碳矿潜势($r=0.509, P<0.05, n=16$)和分解系数($r=-0.578, P<0.05, n=16$)分别呈显著正负相关。有机质组成会影响土壤碳矿化潜势在其它研究中也有所报道,如土壤碳矿化累积量因残落物组成和频次的不同有所差异^[13]。Dendooven 等^[16]发现无机肥料样地土壤碳矿化速率高于未施用肥料,同时比施用农家肥样地中约低3倍。

土壤微生物通过释放于环境中的酶,介导有机质的降解和碳氮磷等营养的吸收同化^[17]。在本文的研究中发现乔木和草本群落的土壤酶活性差异较大(图2),这种差异可能主要是由于豆科草本植物和乔木的根系微生物区系的差异性,该推断在关于本试验区不同复垦措施对土壤微生物群系研究中得到了证实,植被类型影响了土壤微生物 rRNA 基因丰度和多样性^[18],其中真菌 18S rRNA 丰度与蔗糖酶、脱氢酶和脲酶均显著相关。在关于植被类型对土壤酶活性影响的研究中,室内栽培的阔叶树种和野外不同植被恢复方式均可显著影响土壤酶活性^[19-20]。

本文中施肥显著影响土壤酶活性,其中有机肥对土壤酶活性影响尤为显著(图2),这主要是由于有机肥的施用增加了土壤有机质,从而增加了土壤微生物的碳源,促进微生物的增殖,刺激酶活性的提高,在该研究样地中已证明有机肥处理下土壤微生物的丰度和多样性指数均有所提高^[18]。另外,有机肥不仅可作为土壤酶的底物诱导酶活性,同时有机肥中携带微生物和酶,从而可增加土壤酶活性^[21]。不同土壤酶活性对植被复垦方式和肥料处理反馈并不一致,这可能与植被和肥料对土壤有机质的影响有关(表1),不同酶与不同活性有机碳间的相关性并不一致(表3)。另外,脱氢酶为胞内酶,多酚氧化酶和脲酶为胞外酶,胞内酶和胞外酶对环境变化的反馈并不一致^[22-23],因此本研究中不同土壤酶活性对植被恢复类型和施肥处理的反馈存在差异。

植被和施肥交互作用对土壤 pH 值、容重以及活性碳均无显著影响,对土壤有机碳和氮有显著影响($P<0.05$),而可极显著影响土壤有机碳矿化累积量和酶活性($P<0.01$),可见土壤碳矿化和酶活性可更敏感地指示复垦措施,是评价土壤质量变化的良好指标,其它研究中也类似报道^[24-26]。

参考文献(References):

- [1] 蔡登谷. 关于山西矿区复垦的考察报告. 林业经济, 2008, (4): 36-38.
- [2] Kundu N K, Ghose M K. Soil profile characteristic in Rajmahal Coalfield area. Indian Journal of Soil and Water Conservation, 1997, 25: 28-32.
- [3] Ussiri D A N, Lal R. Carbon sequestration in reclaimed minesoils. Critical Reviews in Plant Sciences, 2005, 24(3): 151-165.
- [4] 许建伟, 李晋川, 白中科, 岳建英, 韩静. 黄土区大型露天矿复垦地土壤对植物多样性的影响研究——以平朔安太堡露天矿排土场为例. 山西农业科学, 2010, 38(4): 48-51.
- [5] Heneghan L, Miller S P, Baer S, Callahan M A, Montgomery J, Pavao-Zuckerman M, Rhoades C C, Richardson S. Integrating soil ecological knowledge into restoration management. Restoration Ecology, 2008, 16(4): 608-617.
- [6] Li S Q, Yang B S, Wu D M. Community succession analysis of naturally colonized plants on coal gob piles in Shanxi Mining Areas, China. Water Air and Soil Pollution, 2008, 193(1/4): 211-228.
- [7] 沈芳芳, 袁颖红, 樊后保, 刘文飞, 刘苑秋. 氮沉降对杉木人工林土壤有机碳矿化和土壤酶活性的影响. 生态学报, 2012, 32(2): 517-527.
- [8] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [9] Rovira P, Vallejo V R. Labile and recalcitrant pools of carbon and nitrogen in organic matter decomposing at different depths in soil: an acid hydrolysis approach. Geoderma, 2002, 107(1/2): 109-141.
- [10] Núñez S, Martínez-Yrizar A, Búrquez A, García-Oliva F. Carbon mineralization in the southern Sonoran desert. Acta Oecologica, 2001, 22(5/6): 269-276.
- [11] 关松荫. 土壤酶及其研究法. 北京: 农业出版社, 1986.
- [12] Chatterjee A, Vance G F, Pendall E, Stahl P D. Timber harvesting alters soil carbon mineralization and microbial community structure in coniferous forests. Soil Biology and Biochemistry, 2008, 40(7): 1901-1907.

- [13] 王意锟, 方升佐, 田野, 唐罗忠. 残落物添加对农林复合系统土壤有机碳矿化和土壤微生物量的影响. 生态学报, 2012, 32(22): 7239-7246.
- [14] Balesdent J, Balabane M. Major contribution of roots to soil carbon storage inferred from maize cultivated soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 1996, 28(9): 1261-1263.
- [15] Li H J, Yan J X, Yue X F, Wang M B. Significance of soil temperature and moisture for soil respiration in a Chinese mountain area. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148(3): 490-503.
- [16] Dendooven L, Murphy E, Powlson D S. Failure to simulate C and N mineralization in soil using biomass C-To-N ratios as measured by the fumigation extraction method. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(5): 659-668.
- [17] Carcia C, Hernandez T. Biological and biochemical indicators in derelict soils subject to erosion. *Soil Biology and Biochemistry*, 1997, 29(2): 171-177.
- [18] Li J J, Zheng Y M, Yan J X, Li H J, Wang X, Ding G W, He J Z, Ding G W. Effects of different regeneration scenarios and fertilizer treatments on soil microbial ecology in reclaimed opencast mining areas on the Loess Plateau China. *PLoS ONE*, 2013, 8(5): e63275.
- [19] 邢肖毅, 黄懿梅, 黄海波, 安韶山, 刘栋. 黄土丘陵区子午岭不同植物群落下土壤氮素及相关酶活性的特征. 生态学报, 2012, 32(5): 1403-1411.
- [20] 朱凡, 田大伦, 闫文德, 王光军, 梁小翠, 郑威. 四种绿化树种土壤酶活性对不同浓度多环芳烃的响应. 生态学报, 2008, 28(9): 4195-4202.
- [21] 马晓霞, 王莲莲, 黎青慧, 李花, 张树兰, 孙本华, 杨学云. 长期施肥对玉米生育期土壤微生物量碳氮及酶活性的影响. 生态学报, 2012, 32(17): 5502-5511.
- [22] Yeates G W, Orchard V A, Speir T W, Hunt J L, Hermans M C C. Impact of pasture contamination by copper, chromium, arsenic timber preservative on soil biological activity. *Biology and Fertility of Soils*, 1994, 18(3): 200-208.
- [23] Doran J W, Zeiss M R. Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. *Applied Soil Ecology*, 2000, 15(1): 3-11.
- [24] 罗友进, 魏朝富, 李渝, 任镇江, 廖和平. 土地利用对石漠化地区土壤团聚体有机碳分布及保护的影响. 生态学报, 2011, 31(1): 257-266.
- [25] 龙健, 黄昌勇, 滕应, 姚槐应. 矿区废弃地土壤微生物及其生化活性. 生态学报, 2003, 23(3): 496-503.
- [26] Hinojosa M B, Carreira J A, García-Rufz R, Dick R P. Soil moisture pre-treatment effects on enzyme activities as indicators of heavy metal-contaminated and reclaimed soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36(10): 1559-1568.