

风化煤施用对复垦土壤理化性质酶活性及植被恢复的影响研究

武瑞平, 李 华, 曹 鹏

(山西大学环境与资源学院, 山西 太原 030006)

摘 要:针对黄土高原气候特征以及露天矿区复垦土壤存在的土壤土体松散、抗蚀能力弱、有机质含量低、养分贫乏等问题,利用风化煤为修复介质,通过室内模拟分析试验,研究了种植不同品种紫花苜蓿后,冻融交替作用和水分状况对矿区复垦土壤理化性质、酶活性及植被恢复的影响。结果表明,合理施用风化煤对露天煤矿复垦土壤物理、化学、生物学性质有明显的改良效果。各个指标间存在显著的相关性,有机质含量的提高能够促进其他物理、化学、生物学指标的改善,团聚体百分含量最大达到 95.80%,较对照增加 1.20%;脲酶活性最高达到 0.181 ($\text{NH}_4\text{-N mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24\text{ h}^{-1}$),较对照增加 88%。土壤水分状况对复垦土壤性质影响显著,含水量 10%处理的土壤水稳性团聚体百分含量显著高于含水量 5%和 15%的处理,适当的水分条件,对改良效果有明显的促进作用。经历冻融交替作用后,施用风化煤对紫花苜蓿种植区土壤的理化性质、酶活性均有显著的良性影响。研究结果显示施用风化煤可有效促进矿区土壤的结构改良及生态重建。

关键词:风化煤;矿区土地复垦;土壤理化性质;酶活性;紫花苜蓿

中图分类号:X171.4 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2009)09-1855-07

Amelioration of Weathered Coal on Soil Physical, Chemical Properties and Enzyme Activities with Vegetation Restoration

WU Rui-ping, LI Hua, CAO Peng

(College of Environment and Resources, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract: Pingshuo open-pit mine is located in the eastern part of the Loess Plateau, the northern district of Shuozhou City, Shanxi Province. Problems of reclaimed soil exist in the Loess Plateau opencast mine area such as bad soil structure, weak resistance capability, lower soil organic matter content and poor soil nutrient and so on owing to mining activities' damage. And taking into account the specific climate characteristics of the Loess Plateau: large temperature difference, and rainfall scarce, effect of weathered coal on soil physical, chemical properties and enzyme activities with vegetation restoration under freezing-thawing process and water content were studied by lab simulation tests. Results indicated: a reasonable use of weathered coal on the open-cut coal mine reclaimed soil could significantly improve soil physical, chemical, and biological properties, and the various indicators of experimental measured were markedly inter-related each other, the increase of organic matter content improved the soil physical, chemical, biological properties. The maximum of weight percent of soil aggregates was up to 95.80%, which was 1.20% higher than the contrast; and maximum of urease activity was 0.181 ($\text{NH}_4\text{-N mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24\text{ h}^{-1}$), which increased 88% than the contrast. Soil moisture conditions significantly affected the soil properties, weight percent of soil water-stable aggregate, which water content was 10%, was clearly higher than that water content was 5% or 15%. Appropriate water content played an obvious promotion role in mine area soil restoration. The application of weathered coal could significantly better physical and chemical properties, enzyme activities of soil under alternating freezing-thawing process. Results showed that application of weathered coal on mine area soil was effective in accelerating improved soil structure and ecological reconstruction.

Keywords: weathered coal; mine land restoration; soil physical and chemical properties; enzyme activities; alfalfa (*Medicago sativa*)

收稿日期:2008-12-31

基金项目:国家自然科学基金(40501071)

作者简介:武瑞平(1982—),女,山西中阳县人,硕士研究生,主要研究方向为环境污染治理。E-mail:wuruiplingsxu@163.com

通讯作者:李 华 E-mail:lihua@sxu.edu.cn

矿山开采对土地造成大规模的破坏,直接摧毁地表土层和植被,从而引起土地和植被的破坏。煤炭开采过程中产生的粉尘污染物通过自降和降水淋溶等途径进入土壤环境,从物理、化学和物理化学等方面影响周围土壤的孔隙度、团粒结构、酸碱度、土壤肥力及微量元素含量等。风化煤作为煤矿生产的废煤,广泛存在于煤矿区,由于受长期风化作用的影响,风化煤含氧量高,发热量低。但它含有丰富的再生腐植酸类物质和多种活性基团,如羧基、羟基、酚羟基醌基等,因而具有吸附、络合和交换等性能,是一种良好的天然吸附剂。研究表明,风化煤施用对黄土区煤矿土地复垦有显著效果^[1]。考虑到该地区特定的气候条件,土壤会遭受一系列冻融交替和水分变化过程,并且气候条件作为一项不可忽视的重要条件,对复垦效果以及复垦植被恢复有显著影响,冻融交替作为一种由气候造成的作用于土壤的非生物应力,对土壤的化学性质、物理性质和生物性质都会产生直接影响。

本文针对黄土高原露天煤矿区不同气候、水分特征及复垦要求,提出相应的改良措施,研究施用风化煤对矿区土壤理化性质、酶活性及植被恢复的影响,为风化煤应用于黄土高原露天煤矿土地复垦及植被恢复提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况及供试材料

平朔露天矿区地处黄土高原东部、山西省北部朔州市平鲁区境内,东经 112°10′~113°30′,北纬 39°23′~39°37′。该区属典型的温带半干旱大陆性季风气候区,年平均气温 4.8~7.8℃,极端最高气温 37.9℃,极端最低气温-32.4℃,日温差为 18~25℃,年最高、最低温差可达 61.8℃。无霜期约为 115~130 d。年平均降雨量 428.2~449.0 mm,最高年降水 757.4 mm,最低年降水 195.6 mm。年均蒸发量为 1 786.6~2 598.0 mm,超

过降水量的 4 倍。矿区地貌属缓坡丘陵区,黄土广布、植被稀少,水蚀、风蚀并重。主要地带性土壤为栗钙土与栗褐土的过渡带,自然植被属干草原植被类型^[2]。

供试土壤和风化煤均取自山西平朔露天矿区。其背景值如表 1、表 2 所示;供试植物为多年生的豆科草本植物紫花苜蓿(*Medicago sativa*)——阿尔冈金、艾菲尼特。

1.2 试验设计

供试土壤 36 份各 6 kg 置于塑料盆中,按研究方案(表 3)中设置的有机质含量施用风化煤,加水使含水量达到 10%、15%、20%,密封培养,定期通过重量法向土壤补给水分,以保证试验期间含水量恒定,试验设 12 个处理,3 次重复,经 4 个月培养期后将其均分为两份,分别种植两种不同品种的紫花苜蓿:阿尔冈金、艾菲尼特。种植两个月后,取土壤以-15℃冻 24 h,室温融 24 h 为一冻融交替周期^[3],冻融 3 次后,风干、过筛备用。

1.3 试验方法和数据分析

采用干筛法测土壤团聚体;净水法测水稳性团聚体;重铬酸钾容量法测有机质^[4-5];电位法测 pH 值;氯化铵-乙酸铵法测阳离子交换量^[4-6];半微量凯氏法测全氮;碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测速效磷;火焰光度计法测速效钾^[7];高锰酸钾滴定法测过氧化氢酶活性;比色法测蔗糖酶活性;比色法测脲酶活性^[8]。数据分析采用 Excel 2003 和 SPSS13.0。

表 3 研究方案

Table 3 Experimental design

序号 Sequence number	风干土/kg	风化煤/kg	有机质含量/%
1	6.0	0.00	0.0
2	6.0	0.06	0.5
3	6.0	0.12	1.0
4	6.0	0.18	1.5

表 1 试验材料背景值——化学指标

Table 1 Chemical indices of samples

样品 Samples	pH(H ₂ O)	腐植酸/%	有机质/%	阳离子交换量/cmol·kg ⁻¹	全氮/g·kg ⁻¹	速效磷/mg·kg ⁻¹	速效钾/mg·kg ⁻¹
矿区土壤 mined soil	8.60	0.04	0.32	1.58	0.02	3.93	60.1
风化煤 weathered coal	6.16	44.64	56.2	—	2.91	痕量	69.5

表 2 试验材料背景值——物理和生物指标

Table 2 Physical and biological indices of samples

样品 Samples	团聚体/%	水稳性团聚/%	密度/g·cm ⁻³	过氧化氢酶/ 0.1 mol·L ⁻¹ KMnO ₄ mL·g ⁻¹	脲酶/NH ₄ -N mg·g ⁻¹ ·24 h ⁻¹	蔗糖酶/葡萄糖, mg·g ⁻¹ ·24 h ⁻¹
矿区土壤 mined soil	7.58	0	3.01	0.03	0.05	0.08

2 结果与分析

2.1 物理指标

主要为各级团聚体和水稳性团聚体质量百分含量。

冻融交替及水分变化对不同风化煤施用量下复垦土壤团聚体质量百分含量的影响如图 1 所示。由图 1 可知,经历冻融交替过程之后,随着有机质含量和水分含量的提高,土壤各级团聚体质量百分含量显著增加,紫花苜蓿(艾菲尼特)种植区土壤的团聚体百分含量最大可达 95.80%,这与 Singer^[9]、Taskin 等^[3]的研究结果一致。施加适量的风化煤可使土壤有机质含量有所增加,而土壤有机质与团聚体之间存在密切的相关关系,是土壤团聚体的主要粘结剂,能帮助土壤形成团粒结构^[1]。因此,通过施用风化煤提高有机质含量,调节复垦区土壤水分含量,是提高土壤团聚体百分含量,进而改善土壤结构的有效措施。

冻融交替及水分变化对不同风化煤施用量下复垦土壤水稳性团聚体质量百分含量的影响如图 2 所示。结果显示,经历冻融作用后,随着有机质含量及土壤含水量的提高,种植紫花苜蓿(阿尔冈金)的土壤,水稳性团聚体显著增加 ($P<0.05$)。有机质含量相同时,含水量 10%处理的土壤水稳性团聚体百分含量值显著高于含水量 5%和 15%的处理。

2.2 化学指标

2.2.1 土壤有机质

土壤有机质既是植物有机营养和矿质营养的源

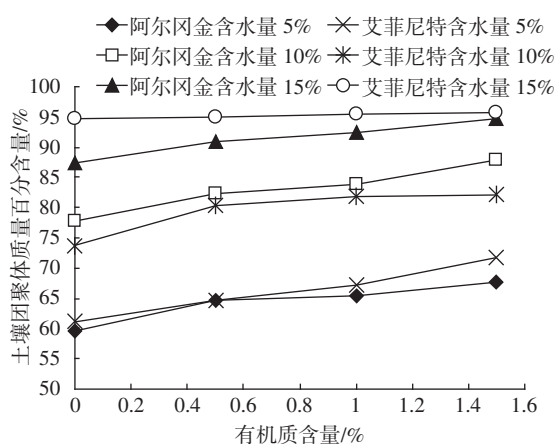


图 1 冻融交替及水分对不同风化煤施用量下复垦土壤团聚体质量百分含量的影响

Figure 1 Effect of freezing-thawing and water content with different weight of weathered coal on weight percent of restored soil aggregates

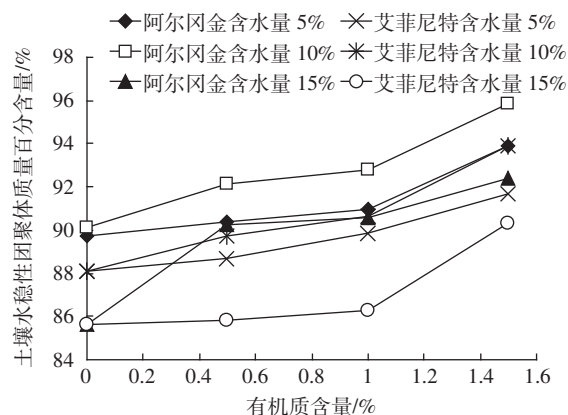


图 2 冻融交替及水分对不同风化煤施用量下复垦土壤水稳性团聚体质量百分含量的影响

Figure 2 Effect of freezing-thawing and water content with different weight of weathered coal on weight percent of restored soil water-stable aggregates

泉,又是形成土壤结构的有机胶结剂^[1]。采煤活动使得矿区土壤结构受到破坏,养分不多且流失加速,总体状况是有机质不足。由表 4 可知:经历冻融作用后,土壤有机质含量随着土壤水分含量的增加显著增加,土壤水分是左右土壤中好气或嫌气微生物活动,以及土壤有机质消耗与积累矛盾的一个重要因素,所以水分对土壤中有机质累积有重要影响,通常,在可比条件下,有机质随水分的影响而增加;种植紫花苜蓿(阿尔

表 4 冻融交替及水分对不同风化煤施用量下复垦土壤有机质的影响 (%)

Table 4 Effect of freezing-thawing and water content with different weight of weathered coal on restored soil organic matter (%)

有机质含量/%	含水量/%	紫花苜蓿品种	
		阿尔冈金	艾菲尼特
0.0	5	0.35±0.00c*	0.31±0.00c
	10	0.36±0.00b*	0.33±0.00b
	15	0.38±0.00a*	0.38±0.00a
0.5	5	0.96±0.00c*	0.94±0.00c
	10	1.06±0.00b*	1.00±0.00b
	15	1.30±0.00a*	1.06±0.00a
1.0	5	2.04±0.01c*	1.68±0.00c
	10	2.22±0.00b*	1.84±0.00b
	15	2.49±0.00a*	2.07±0.01a
1.5	5	2.73±0.00c*	2.69±0.00c
	10	2.88±0.01b*	2.82±0.00b
	15	3.27±0.01a*	3.25±0.01a

注:结果为 3 个重复($n=3$)的平均值,记为平均值 $\pm$ SE,同一列标记相同字母的平均值之间没有显著差异($P>0.05$),下同。

* 表示相同有机质和含水量处理种植不同品种紫花苜蓿土壤有机质,具有显著差异($P<0.05$)。

冈金)处理的土壤有机质含量高,较试验设计中各处理设置的有机质含量增加了 82%~160%,这些有机质来源于风化煤的施用、紫花苜蓿的根系或土壤中动物微生物的遗体。

2.2.2 土壤 pH 值

冻融交替及水分变化对不同风化煤施用量下复垦土壤 pH 值的影响如表 5 所示。由表 5 可知:随着有机质含量的增加,土壤 pH 值降低,这是因为有机质分解或植物固氮会增加土壤酸度;相同有机质含量处理时,水分含量的增加,使得穿流土壤的水将碱性元素钙、镁等淋洗出去,因此土壤酸度增高,pH 值降低;种植不同品种紫花苜蓿的处理,土壤 pH 值差异显著 ($P<0.05$),当有机质含量 1.5%,含水量 15%时,种植紫花苜蓿(阿尔冈金)的土壤 pH 值降低到 8.33,较对照降低了 0.08。

表 5 冻融交替及水分对不同风化煤施用量下复垦土壤 pH 值的影响
Table 5 Effect of freezing-thawing and water content with different weight of weathered coal on restored soil pH

有机质含量/%	含水量/%	紫花苜蓿品种	
		阿尔冈金	艾菲尼特
0.0	5	8.51±0.01a*	8.53±0.02a
	10	8.47±0.00b*	8.51±0.00b
	15	8.41±0.00c*	8.48±0.01c
0.5	5	8.49±0.00a*	8.55±0.01a
	10	8.38±0.01b*	8.50±0.01b
	15	8.31±0.01c*	8.50±0.01c
1.0	5	8.46±0.01a*	8.50±0.01a
	10	8.45±0.00b*	8.49±0.01b
	15	8.44±0.01c	8.43±0.01c*
1.5	5	8.41±0.01a*	8.44±0.01a
	10	8.34±0.01b*	8.43±0.01b
	15	8.33±0.01c*	8.36±0.01c

* 表示相同有机质和含水量处理种植不同品种紫花苜蓿土壤 pH 值,具有显著差异($P<0.05$)。

2.2.3 土壤阳离子交换量(CEC)

阳离子交换量(CEC)的大小是衡量土壤保肥能力的主要指标,是判断土壤肥力和合理施肥的重要依据之一。一般认为 CEC 低于 $10\text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的土壤保肥能力差,土壤肥力低。冻融交替及水分变化对不同风化煤施用量下复垦土壤 CEC 的影响,由表 6 可知,随着有机质含量提高,土壤 CEC 显著提高。当有机质含量相同时,随含水量提高,土壤 CEC 均呈先下降后上升趋势;种植紫花苜蓿(阿尔冈金)土壤 CEC 较大。土壤 CEC 与土壤质地、土壤 pH 值、土壤胶体的比表面

表 6 冻融交替及水分对不同风化煤施用量下复垦土壤阳离子交换量(CEC)的影响($\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$)
Table 6 Effect of freezing-thawing and water content with different weight of weathered coal on restored soil CEC($\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$)

有机质含量/%	含水量/%	紫花苜蓿品种	
		阿尔冈金	艾菲尼特
0.0	5	8.23±0.06b*	8.04±0.02b
	10	7.66±0.06c	7.94±0.04c*
	15	8.23±0.05a*	8.16±0.05a
0.5	5	9.48±0.07b*	9.18±0.04b
	10	9.44±0.04c*	8.48±0.05c
	15	10.57±0.04a*	9.79±0.02a
1.0	5	10.94±0.01b*	10.32±0.04b
	10	10.49±0.07c*	10.15±0.03c
	15	11.13±0.10a*	10.52±0.03a
1.5	5	11.47±0.03b*	10.98±0.04b
	10	10.82±0.06c*	10.68±0.04c
	15	11.78±0.03a*	11.29±0.02a

* 表示相同有机质和含水量处理种植不同品种紫花苜蓿土壤阳离子交换量,具有显著差异($P<0.05$)。

积和表面电荷有关,腐殖质含量较高的土壤阳离子交换量较大^[9],当有机质含量为 1.5%、含水量为 15%时,种植紫花苜蓿(阿尔冈金)的土壤 CEC 达到最大值 $11.78\text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$,较对照增加了 43%。可见,适量增加水分,提高有机质含量可有效提高土壤 CEC,改善其保肥、供肥能力和酸碱缓冲能力。

2.2.4 土壤养分

由于矿区土地受到破坏,其土壤结构很差,土壤养分本来就不多且流失加速,有机质不足,严重缺磷缺氮。土壤有机质是土壤养分的主要来源和衡量土壤肥力高低的重要指标,土壤氮、磷、钾是植物生长不可缺少的营养元素,它们在土壤肥力中起重要作用。对一般耕地土壤而言,土壤全氮含量与有机质呈正相关,土壤磷、钾含量也通常随有机质含量和熟化程度的提高而提高。

由图 3~图 5 可知,经历冻融交替过程之后,随着有机质含量的提高,土壤养分全氮、速效磷、速效钾含量均显著增加。有机质含量相同时,随水分含量的提高,土壤全氮含量呈先降低后上升的趋势,当有机质含量为 1.5%,含水量为 15%时,种植紫花苜蓿(阿尔冈金)的土壤全氮含量为 $0.36\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,较对照增加 38%。研究表明,植被状况、气候、土壤质地等因素对土壤氮素有一定影响^[10],适量的增加水分,提高有机质含量可有效提高土壤全氮含量,改善土壤保肥、供肥能力。土壤速效磷含量随含水量的增加呈先上升后

下降趋势,种植紫花苜蓿(阿尔冈金)的土壤,含水量为10%时,改良效果较好,这是由于磷是易溶于水的元素,水分过多会造成磷元素随着水分的下渗而流失。另外,土壤酸碱度也是影响有效磷的重要因子。土壤速效钾含量随含水量的提高而增加,对于不同品种的紫花苜蓿,以种植紫花苜蓿(艾菲尼特)处理的土壤速效钾含量提高显著,最大值达到 $117.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

2.3 生物学指标

土壤酶是土壤的重要组成成分之一,土壤中所有生物化学过程之所以能够持续进行是依靠土壤酶作为动力的。土壤酶与土壤生物、土壤理化性质和环境条件密切相关,是表征土壤肥力的重要指标之一。

冻融交替及水分变化对不同风化煤施用量下复垦土壤酶活性的影响如图6~图8所示。结果表明,增

加有机质的含量,可以明显提高土壤过氧化氢酶、蔗糖酶和脲酶活性;当有机质含量相同时,随含水量的增加,过氧化氢酶活性先降低后升高,脲酶活性则先升高后降低,而蔗糖酶活性一直升高。有机质含量为1.5%,含水量为15%时,土壤过氧化氢酶活性达到最大值 $0.52 (0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ KMnO}_4 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1})$;种植不同品种的紫花苜蓿,存在显著性差异,总体上表现为种植紫花苜蓿(阿尔冈金)的土壤过氧化氢酶活性较高。研究表明,冻融交替会降低土壤中细菌数目^[11-12],可能会造成土壤中过氧化氢酶活性降低,这说明冻融交替作用对土壤的生物学性质能产生直接作用,低温尤其是寒冷的冲击可在土壤微生物中引发一系列生理反应。脲酶活性最强为 $0.181 (\text{NH}_4\text{-N} \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot 24 \text{ h}^{-1})$,较对照增加了88%。脲酶活性的变化与土壤氮素状况及土壤理

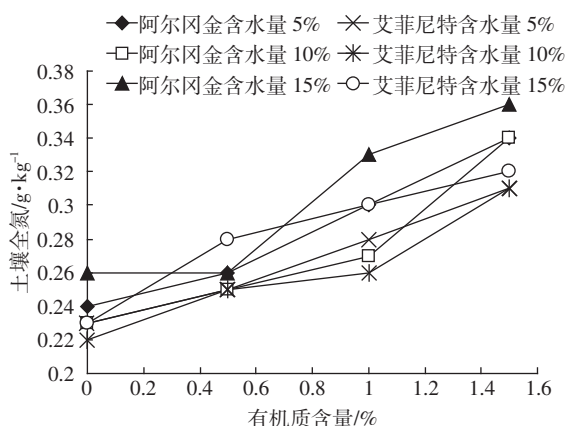


图3 冻融交替及水分对不同风化煤施用量下复垦土壤全氮的影响

Figure 3 Effect of freezing-thawing and water content with different weight of weathered coal on restored soil total N

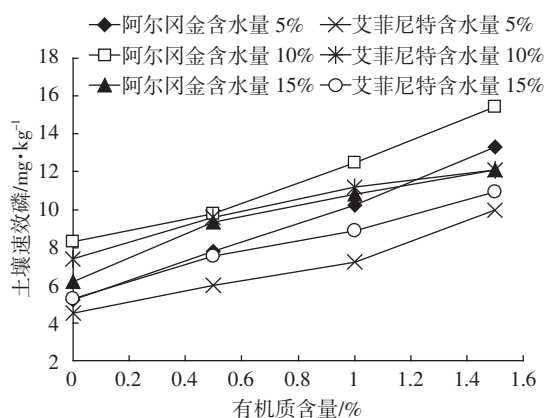


图4 冻融交替及水分对不同风化煤施用量下复垦土壤速效磷的影响

Figure 4 Effect of freezing-thawing and water content with different weight of weathered coal on restored soil available P

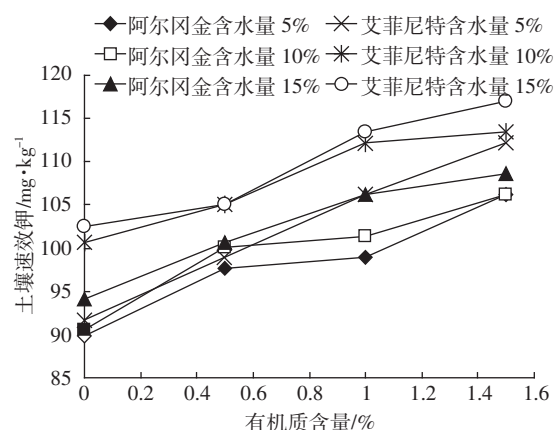


图5 冻融交替及水分对不同风化煤施用量下复垦土壤速效钾的影响

Figure 5 Effect of freezing-thawing and water content with different weight of weathered coal on restored soil available K

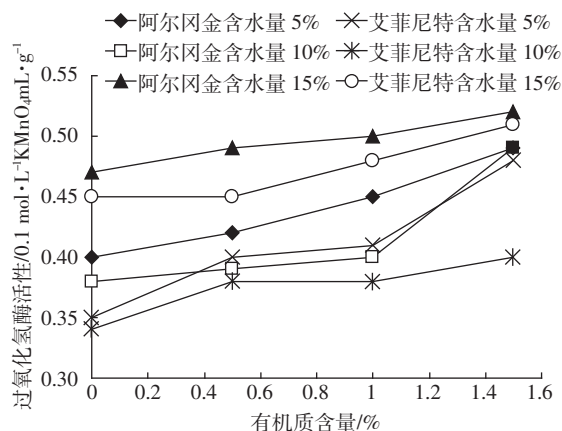


图6 冻融交替及水分对不同风化煤施用量下复垦土壤过氧化氢酶活性的影响

Figure 6 Effect of freezing-thawing and water content with different weight of weathered coal on restored soil catalase activity

化性状有关,水分含量是影响脲酶活性的重要因素之一。脲酶活性的显著提高有利于土壤有机态氮向有效氮的转化,提高土壤氮素供应水平^[13],有利于矿区复垦土壤植被恢复,并对评价土壤肥力水平有重要意义^[14]。在本研究中,紫花苜蓿(阿尔冈金)表现为更适用于存在冻融交替现象地区的植被恢复,可见,适当的选择复垦植被和水分条件可有效促进土壤酶活性的提高。

2.4 相关性分析

对所测定的 11 项土壤理化及生物学指标之间的相关性进行分析(表 7),结果表明,水稳性团聚体除与土壤团聚体、过氧化氢酶、脲酶活性之外的其他各指标间均存在极显著或显著相关性;过氧化氢酶除与水稳性团聚体、速效磷、脲酶活性之外的其他各指标

间均存在极显著或显著相关性;速效钾与除蔗糖酶活性之外的其他各指标间均存在极显著或显著相关性;蔗糖酶与除全氮、速效钾、脲酶活性之外的其他各指标间均存在极显著或显著相关性;有机质、pH 值、CEC 与其余各指标间均存在极显著或显著相关性。

采用逐步回归法对 11 项指标之间的相关性进行线性拟合,结果表明:pH 值和水稳性团聚体对土壤团聚体影响较大,有机质、速效磷、蔗糖酶、过氧化氢酶、全氮、脲酶对土壤团聚体影响较小;速效磷和土壤团聚体对水稳性团聚体影响较大,pH 值对水稳性团聚体影响较小;全氮对有机质含量影响较大,速效磷、速效钾对有机质影响较小;土壤团聚体对 pH 值影响较大,土壤水稳性团聚体对 pH 值影响较小;有机质含

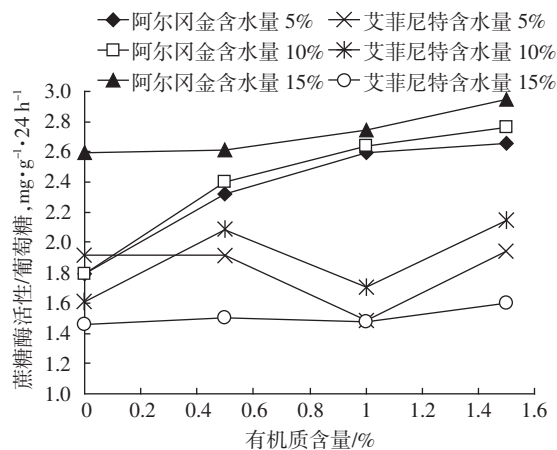


图 7 冻融交替及水分对不同风化煤施用量下复垦土壤蔗糖酶活性的影响

Figure 7 Effect of freezing-thawing and water content with different weight of weathered coal on restored soil invertase activity

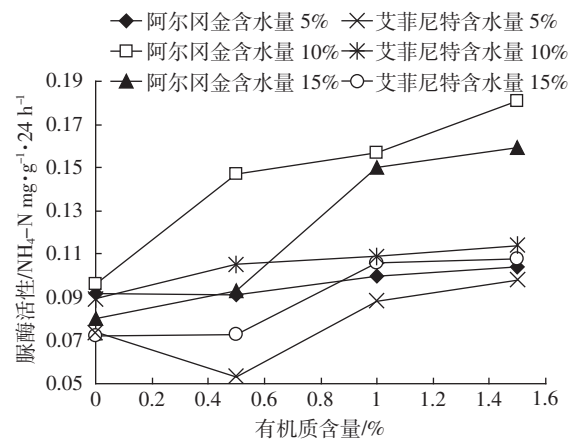


图 8 冻融交替及水分对不同风化煤施用量下复垦土壤脲酶活性的影响

Figure 8 Effect of freezing-thawing and water content with different weight of weathered coal on restored soil urease activity

表 7 土壤理化及生物学指标之间的相关性

Table 7 Correlation of soil physical, chemical and biological indices

项目	团聚体	水稳性团聚体	有机质	pH	CEC	全氮	速效磷	速效钾	过氧化氢酶	蔗糖酶	脲酶
团聚体	1										
水稳性团聚体	-0.143	1									
有机质	0.325**	0.635**	1								
pH	-0.549**	-0.480**	-0.573**	1							
CEC	0.295*	0.595**	0.935**	-0.545**	1						
全氮	0.244*	0.388**	0.856**	-0.444**	0.776**	1					
速效磷	0.328**	0.778**	0.833**	-0.640**	0.797**	0.557**	1				
速效钾	0.447**	0.260*	0.731**	-0.332**	0.683**	0.901**	0.555**	1			
过氧化氢酶	0.455**	-0.413	0.272*	-0.253*	0.283*	0.334**	0.080	0.275*	1		
蔗糖酶	-0.239*	0.696**	0.355**	-0.354**	0.408**	0.060	0.527**	-0.166	-0.106**	1	
脲酶	0.377**	0.155	0.553**	-0.238*	0.505**	0.638**	0.454**	0.650**	0.123	-0.144	1

注:“*”表示相关性显著,“**”表示相关性极显著。

量对 CEC 影响较小; 有机质和速效磷对全氮影响较大, 脲酶活性对土壤全氮影响较小; 水稳性团聚体、土壤团聚体对速效磷影响较大, 过氧化氢酶和蔗糖酶对速效磷影响较小; 有机质和蔗糖酶对速效钾影响较大, 全氮和脲酶对速效钾影响较小; 土壤团聚体、全氮、脲酶、水稳性团聚体对过氧化氢酶影响较小; CEC、全氮对蔗糖酶影响较大, 水稳性团聚体、速效钾、土壤团聚体对蔗糖酶影响较小; 速效钾和全氮对脲酶影响较小。

3 结论

(1) 合理施用风化煤对露天煤矿复垦土壤物理、化学、生物学性质有明显的改良效果, 土壤团聚体、有机质、土壤养分及酶活性等均随风化煤施用量的增加而显著增加, 团聚体百分含量最大达到 95.80%。

(2) 土壤水分状况对于改良露天煤矿复垦土壤性质影响显著, 不同水平间存在显著性差异; 含水量 10% 处理的土壤水稳性团聚体百分含量显著高于含水量 5% 和 15% 的处理; 适当的水分条件, 对改良效果有明显的促进作用, 应着重加以考虑。

(3) 紫花苜蓿适合于黄土区露天矿复垦土壤植被恢复, 种植不同品种的紫花苜蓿处理间改良效果差异显著。种植紫花苜蓿(阿尔冈金)的处理, 土壤水稳性团聚体、有机质、pH 值、阳离子交换量(CEC)、土壤全氮、速效磷、过氧化氢酶、蔗糖酶、脲酶活性, 改良效果较好。

(4) 冻融交替过程对土壤团聚体、有机质、CEC、土壤全氮、速效磷、速效钾、过氧化氢酶、蔗糖酶、脲酶活性均影响显著, 反映出黄土高原特定的气候条件下, 风化煤施用是一种有效的改良措施。

(5) 对测定的 11 项土壤理化及生物学指标之间的相关性进行分析, 结果表明, 各个实验测定指标间存在显著的相关性, 有机质含量的提高能够促进其他物理、化学、生物学指标的改善, 进一步说明了风化煤在露天煤矿复垦土壤改良中的重要效果及可行性。

参考文献:

- [1] 李 华, 李永青, 沈成斌, 等. 风化煤施用对黄土高原露天煤矿区复垦土壤理化性质的影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(5): 1752-1756.
- [2] 王改玲, 白中科, 郝明德. 平朔安太堡露天矿排土场土壤种子库研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(6): 178-180.
- [3] Oztas T, Fayetorbay F. Effect of freezing and thawing processes on soil aggregate stability[J]. *Catena*, 2003, 52: 1-8.
- [4] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科技出版社, 1978: 132-142, 146-153, 514-518.
- [5] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999: 27-28, 266-269.
- [6] 曹 鹏, 李 华, 李永青, 等. 两种测定风化煤与土壤腐植酸含量方法的比较[J]. 中国农学通报, 2007, 23(1): 277-279.
- [7] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 42-49, 81-83, 106-108.
- [8] 关松荫, 等. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986: 274-276.
- [9] Singer M J, Southard R J, Warrington D J, et al. Stability of synthetic sand clay aggregates after wetting and drying cycles [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1992, 56: 1843-1848.
- [10] 文 倩, 关 欣. 土壤团聚体形成的研究进展[J]. 干旱区研究, 2004, 21(4): 434-438.
- [11] Soulides D A, Allison F E. Effect of drying and freezing soils on carbon dioxide production[J]. *Soil Science*, 1961, 91: 291-298.
- [12] Skogland T, Lomeland S, Goksoyr J. Respiratory burst after freezing and thawing of soil: experiments with soil bacteria [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, 20: 851-856.
- [13] 张为政. 作物茬口对土壤酶活性和微生物的影响[J]. 土壤肥料, 1999, 3(5): 12-14.
- [14] 彭正萍, 门明新, 薛宝民, 等. 腐植酸复合肥对土壤养分转化和土壤酶活性的影响[J]. 河北农业大学学报, 2005, 28(4): 1-4.