

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

崔鲁楠¹, 王 宁¹, 李玉成¹, 程 桦¹, 郑刘根¹, 柳炳俊²

(1. 安徽大学 资源与环境工程学院, 合肥 230601; 2. 煤矿生态环境保护国家工程实验室, 安徽 淮南 232001)

摘 要:采集淮南煤矿塌陷区 3 种塌陷类型——非稳沉区、稳沉区和修复区, 分析了其各层土壤的理化性质及酶活性, 综合评价了 3 种不同塌陷类型土壤生态肥力。结果表明: 塌陷区在由非稳沉区变为稳沉区的过程中, 土壤的物理性能、土壤养分、酶活性总体呈下降趋势; 以土壤理化性质和酶活性权重计算土壤综合肥力指标值 (IFI) 和土壤酶指数 (I_{SE}), 结果均显示 IFI 与 I_{SE} 值非稳沉区最高, 修复区较稳沉区有所提高, 土壤生物学肥力具有随土壤层次深度增加而下降的变化特点; 脲酶和蔗糖酶与土壤各理化性质均呈现极显著相关性, 表明脲酶和蔗糖酶可以作为评估煤矿塌陷区土壤肥力变化的有效性指标。

关键词:煤矿塌陷区; 塌陷类型; 土壤酶活性; 土壤生态肥力

中图分类号: S153. 6; S154. 2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-3409(2016)05-0090-05

Comparison of Soil Physical and Chemical Properties and Soil Enzyme Activities in Different Types of Subsidence in Huainan Mining Subsidence Area

CUI Lunan¹, WANG Ning¹, LI Yucheng¹, CHENG Hua¹, ZHENG Liugen¹, LIU Bingjun²

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Anhui University, Hefei 230601, China;
2. National Engineering Laboratory of Ecological Environment Protection in Coal Mine, Huainan, Anhui 232001, China)

Abstract: Three types of subsidence from coal mine subsidence in Huainan City were selected for evaluation, including unstable subsidence area, stable subsidence area and restoration area. The soil physical chemical properties and soil enzyme of the soil layers were analyzed. The results showed that the soil physical properties, the soil nutrient and the soil enzyme decreased during the process of the change of unstable subsidence area into stable subsidence area. It was found that the unstable subsidence area had the highest integrated fertility index (IFI) and soil enzyme index values (I_{SE}) and the integrated fertility index and soil enzymes index values of the restoration area was higher than the stable subsidence area. The soil biological fertility decreased with the increase of soil depth. Urease and invertase were highly obviously correlated with soil physical and chemical properties, suggesting that urease and invertase could be used as feasible indicators to assess change of soil nutrients in coal mining subsidence area.

Keywords: mining subsidence; subsidence types; soil enzyme; soil biological fertility

煤炭是我国主要能源之一, 占一次性能源使用量的 75% 左右^[1]。采煤塌陷导致地表产生大量裂缝、裂隙^[2], 进而诱发地质、土壤、水分等诸要素的响应^[3], 这些影响主要体现在对土壤的理化性质和生物特性上。土壤酶活性是土壤生物活性的总体现, 反映了土壤的综合肥力特征及土壤养分转化过程, 所以它可以作为衡量土壤肥力水平高低的较好指标, 对于土壤生态系统的维持和生产力的恢复具有重要意义。目前, 很多学者使用土壤酶活性变化来指示植被恢复过程中土壤质量状况, 并证实土壤酶可以用来表征煤矿区土壤复垦质量^[4-5]。对于淮南煤矿复垦区土壤质量变化已有不少学者进行研究, 但对淮南煤矿塌陷区不同塌陷类型土壤酶活性变化及相关联肥力评价的研究较少, 尤其是以土壤养分和土壤酶活性来作为土

壤生物学肥力评价指标。土壤生态肥力是指在一定的环境条件下,土壤及其生物群落(微生物、动物与植物根系)之间长期协同进化、相互适应、相互作用而表现出的一种和谐共融特性,以及在该特性状态下土壤保证植物生长所需物质与能量的可获得性和可持续的一种功能与能力^[6]。根据淮南煤矿采煤塌陷区煤矿塌陷的分布特征及对地面的破坏程度不同,大致可将塌陷区分为稳沉区、非稳沉区。稳沉区主要指地下煤已采完,地表塌陷已稳定;非稳沉区主要指第一水平或第二水平煤层正在采动,地表处于塌陷中;而目前淮南采煤塌陷区 80%是非稳沉区^[7]。因此对于煤矿塌陷区特别是非稳沉区的生态修复越来越受到人们的关注。

本文以淮南煤矿塌陷区的土壤为研究对象,通过测定和分析不同塌陷类型土壤酶活性及部分理化性质,从土壤酶学角度结合土壤生物学肥力对淮南煤矿不同塌陷类型土壤质量进行评价,为矿区的土地资源保护与生态重建提供科学依据。

1 研究区概况

淮南矿区地处安徽省中部,淮河的中游,处于暖温和亚热带过渡地带,年降水量 893.4mm,年平均气温 16.6℃,其煤炭总储量占华东地区煤炭储量的 45%,据统计,淮南矿区自 1949 年以来,形成采煤塌陷区面积超过 6 700 hm²^[8]。其中后湖塌陷区与创大生态园位于潘集泥河塌陷区,深度 1~5 m,未稳沉;创大生态园采用挖深垫浅的方式进行修复,矸石堆表面覆土,种植树木、农作物或蔬菜,覆土为黄棕壤,表面覆土厚度为 20~40 cm;谢家集塌陷区主要是城西湖,深度 5~20 m,稳沉。本文所选择的 2 种塌陷类型及修复区的样地均选择在塌陷水域旁,坡面坡度平缓,地表径流对各地的影响无差异;气候、气温及降水等因素对 3 个样地的影响可以认为没有差异,这样便于对不同塌陷类型土壤的分析结果进行对比及判断。

2 试验材料与方法

2.1 样品采集与处理

采集了淮南煤矿塌陷区 2 种塌陷过程非稳沉区(后湖塌陷区,FWC),稳沉区(谢家集塌陷区,WC)和修复区(创大生态园,XF)作为对照,2014 年 11 月现场采样,记录采样区植被情况等,根据不同的塌陷类型共选定 17 个土壤样点,每个样点剖面均按 0—10,10—20,20—30 cm 分层采样,共采集土壤样品 51 个。采集各层土样均 1 kg 放入自封袋内。样品带回实验室,拣去其中石块、植物根系及杂物,经冷冻干燥

后按照四分法分别过 20,60,100 目尼龙筛,装入自封袋并置于干燥器内避光保存。

2.2 测定方法

2.2.1 土壤理化性质测定 土壤 pH 测定用酸度计;土壤粒径用粒度分析仪^[8](型号:LS13320ALM);土壤 C,N 含量用元素分析仪^[9];土壤有机质用烧失量法^[10];全磷用 NaOH 熔融—钼锑抗比色法;全钾用 NaOH 熔融—等离子体光谱法;碱解性氮用碱解—扩散法;速效磷用碳酸氢钠浸提(1:20)—钼锑抗比色法。

2.2.2 土壤酶活性的测定 蔗糖酶的测定采用 3,5-二硝基水杨酸比色法,活性以葡萄糖[mg/(g·h)]表示;脲酶的测定采用苯酚钠比色法,活性以 NH₄⁺-N[mg/(g·h)]表示;过氧化氢酶的测定采用高锰酸钾滴定法,活性以 0.02 mol/L KMnO₄[ml/(g·h)]表示;脱氢酶的测定采用 TTC 比色法,活性以 Triphenylformazan(TPF) [mg/(g·h)]表示^[11]。

土壤样品的测定过程通过平行三样、空白样和土壤标样进行质量控制,土壤标准品的回收率控制在 80%~120%,土壤有效成分指标测定的标准物质为辽宁棕壤 GBW07412a(ASA-1a),试验试剂均为优级纯。试验用水为去离子水。试验数据处理与图表分析用 Origin 8.1,用 SPSS 19 进行相关性分析。

表 1 采样区基本情况

样地	地理位置	位置	土壤性质	植被类型
非稳沉区	32°49′20.16″N, 116°50′33.33″E	坡面	黄棕壤	草本
修复区	32°48′59.82″N, 116°48′17.46″E	坡面	黄棕壤	小灌木和草本
稳沉区	32°37′21.72″N, 116°53′22.92″E	坡面	黄棕壤	裸地

2.3 土壤酶指数

土壤中酶种类繁多,且每一种酶在土壤中发挥着不同的作用,单一的酶类在反映土壤酶的变化存在较大的片面性,为了全面揭示煤矿塌陷区不同塌陷类型土壤酶活性的变化规律,在各种土壤酶的基础上,进一步采用加权和法计算土壤酶指数(soil enzymes index, I_{SE})^[12]。

2.4 土壤生物学肥力的评价

应用多元统计分析方法,以各主成分特征值贡献率为权重,加权计算各样地土壤生物学肥力指标值(IFI),以评价各区土壤的生物肥力特征。将 pH、全氮、全磷、全钾、碱解性氮、速效磷、有机质、C/N、蔗糖酶、脲酶、过氧化氢酶、脱氢酶数据进行标准化处理后,经过主成分分析,得到变量,计算得分系数,进而依据 IFI 公式得出不同样地的 IFI 值^[13-15]。

3 结果与分析

3.1 土壤基本理化性质

相关研究表明:土壤机械组成的改变使土壤的物理性能发生变化,在一定程度上说,土壤的形成就是黏粒的形成与机械组成的变化^[16]。从表 2 可以看出,研究区 0—30 cm 深度内的土壤主要由粉粒和砂粒组成,而黏粒所占比例最少。非稳沉区土壤从上层到下层黏粒比例有所增高,黏粒所占比例:非稳沉区>稳沉区>修复区。这可能是由于在煤矿开采过程中引起的塌陷改变了原有土层结构,使得土壤垂直裂隙增大,从而使耕作层土壤中的细小颗粒在地表径流的作用下沿地裂缝流失,使得塌陷区物理性黏粒减少,从而使非稳沉区的土壤黏粒要大于稳沉区。研究区土壤 pH 差异性较大,非稳沉区土壤呈弱酸性,稳

沉区与修复区呈弱碱性,并且各区土壤随着土层加深,pH 值增加。氮素是影响土壤肥力的重要指标^[17],不同塌陷类型土壤全氮含量显著不同,0—10 cm 土层非稳沉区全氮含量最高,显著高于稳沉区与修复区,10—20,20—30 cm 土层也表现出相似的规律,且速效磷含量与全氮表现为相同的趋势。土壤碱解性氮较能反映出近期土壤内氮素的供应情况,研究区各塌陷类型土壤碱解性氮差异性显著,尤其是非稳沉区各层土壤碱解性氮明显高于稳沉区,且修复区的碱解性氮含量要高于稳沉区,且有机质含量与碱解性氮表现为相同的趋势,此外,研究区各类型土壤的全磷、全钾差异性较小。从表 3 可以看出,研究区土壤有机质与土壤 pH、土层深度呈极显著负相关,与含水率、碱解性氮、总氮、总钾呈极显著正相关,表明有机质与氮极显著相关并影响碳、氮的平衡。

表 2 淮南矿区不同塌陷类型土壤基本理化性质

沉陷 类型	土层/ cm	土壤质地			全氮/ (g·kg ⁻¹)	全磷/ (g·kg ⁻¹)	全钾/ (g·kg ⁻¹)	碱解性氮/ (mg·kg ⁻¹)	速效磷/ (mg·kg ⁻¹)	有机质/%	C/N	pH 值
		砂粒/%	粉粒/%	黏粒/%								
非稳沉区 (FWC)	0—10	36.36±0.23cd	49.25±0.45d	14.41±0.03a	3.32±0.02a	0.36±0.04a	15.84±2.04a	129.93±2.79a	24.27±1.82a	5.07±0.64a	3.03±0.85a	5.9±0.45c
	10—20	37.49±0.13c	48.36±0.41e	14.14±0.12ab	3.11±0.05a	0.33±0.03a	14.37±1.62a	88.27±1.31b	22.01±1.11a	4.41±0.37b	2.22±1.02b	6.3±0.63b
	20—30	35.02±0.76d	49.28±0.34d	15.32±0.07a	2.65±0.05b	0.34±0.05a	11.47±0.59b	54.10±3.41c	14.40±1.49b	3.53±0.26c	1.49±0.80c	6.9±0.34a
修复区 (XF)	0—10	43.65±0.81a	46.47±0.49f	9.87±0.45c	2.58±0.11b	0.36±0.02a	13.19±1.74ab	28.32±7.89cd	14.15±1.03b	2.82±0.17d	1.31±0.46c	7.8±0.48a
	10—20	41.48±0.26b	49.34±0.41de	9.02±0.51c	2.33±0.21b	0.35±0.12a	14.32±1.89ab	30.46±5.98cd	14.14±1.45b	2.81±0.30d	1.32±1.05c	8.2±0.09a
	20—30	40.67±0.31b	48.93±0.98de	9.64±0.04c	2.36±0.12b	0.30±0.06a	13.93±2.29ab	23.25±8.77d	11.46±1.97b	2.54±0.06d	1.21±0.12c	8.1±0.05a
稳沉区 (WC)	0—10	34.48±0.64d	52.85±0.34b	12.77±0.23b	2.45±0.26b	0.31±0.01a	14.72±2.51a	28.37±1.47cd	14.64±3.28ab	2.92±0.19d	1.56±0.51c	7.5±0.26a
	10—20	31.19±0.71e	55.73±0.45a	13.09±0.15b	2.43±0.06b	0.30±0.03a	13.83±1.82ab	23.03±2.75d	19.31±1.48ab	2.38±0.84d	1.42±0.18c	7.5±0.17a
	20—30	37.07±0.35c	50.25±0.76c	12.67±0.31b	2.51±0.01b	0.29±0.11a	13.17±3.19ab	20.93±1.27d	18.01±2.32ab	2.42±0.16d	1.07±0.07c	7.6±1.27a

注:砂粒(0.02~2 mm),粉粒(0.02~0.002 mm),黏粒(<0.002 mm);相同字母表示不同类型不同层次同一指标无显著性差异($p<0.05$)。

表 3 土壤有机质与理化性质的相关性

土壤性质	pH 值	含水率	土层深度	碱解性氮	速效磷	总磷	总氮	总钾	碳氮比
有机质	-0.800**	0.527**	-0.368*	0.883**	0.310	0.142	0.771**	0.324*	0.639**

注:*表示在 0.05 水平上显著相关;**表示在 0.01 水平上显著相关。

3.2 土壤酶活性

研究区土壤酶活性变化趋势见图 1,可以看出,煤矿在由非稳沉区变为稳沉区的过程中,土壤蔗糖酶活性呈现逐渐下降的趋势,而复垦区土壤蔗糖酶活性较稳沉区有所提高,在 0—10 cm 非稳沉区蔗糖酶活性最高,达到 7.66 mg/(g·h),而稳沉区与非稳沉区相比,其蔗糖酶活性降低了 48%,并差异显著;修复区较稳沉区其蔗糖酶活性提高了 36%,表明对塌陷区进行复垦,在一定程度上土壤蔗糖酶活性有所提高。此外,随着土层的加深,土壤蔗糖酶活性呈现逐渐降低的趋势,且各区不同土层的土壤蔗糖酶活性表现出相似的规律。研究区土壤脲酶、过氧化氢酶和脱氢酶活性在各区不同层次的变化特征基本与土壤蔗糖酶一致,表现为非稳沉区>修复区>稳沉区,酶活性随着土层加深而降低,这可能是由于稳沉区较非稳

沉区塌陷时间长,土壤质量严重退化,生态条件逐渐恶化,导致土壤酶活性逐渐降低。

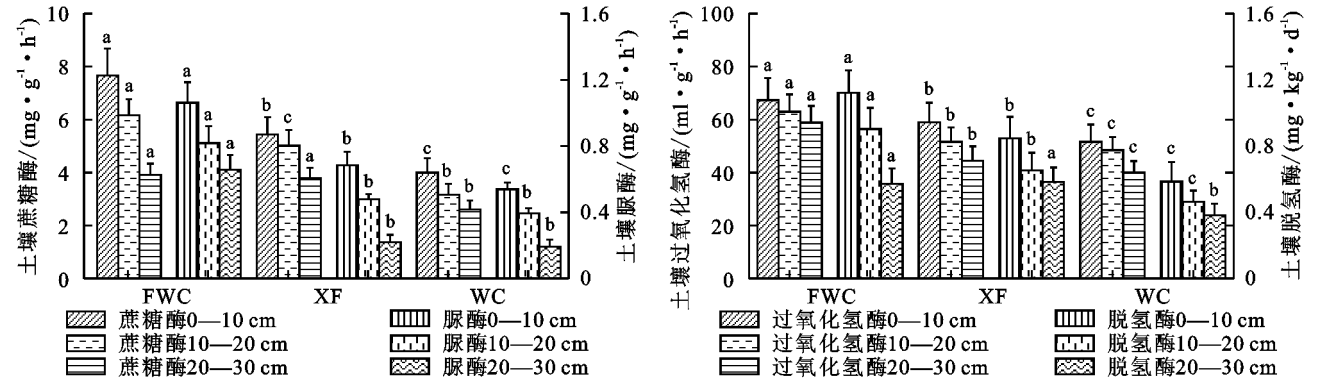
土壤酶活性的高低不仅表明土壤的养分状况,而且在一定程度上反映土壤微生物的活动状况,其中脱氢酶活性被认为能够较全面地反映土壤微生物特性,是土壤微生物生物活性的一个较好指标^[18]。与稳沉区裸地相比,修复区的土壤的蔗糖酶、脲酶、过氧化氢酶、脱氢酶活性均有提高,分别为前者的 1.35~1.59,1.14~1.27,1.06~1.14,1.41~1.53 倍,这是由于修复区经过复垦,坡面种植草本与小灌木,能够缓解水土流失的现象,土壤表层凋落物量增加,土壤养分逐渐积累,使土壤微生物数量增加,土壤酶活性较稳沉区得到了一定程度的提高。

3.3 土壤酶活性与土壤物理性质的相关性

由表 4 可知,pH 值与所测定的几种酶活性之间呈

现极显著的负相关,表明了随着土壤 pH 值的增高,酶活性呈现下降的趋势;土壤理化性质各个指标(包括全氮、全钾、碱解性氮、速效磷、有机质、碳氮比)与土壤蔗糖酶、脲酶、过氧化氢酶、脱氢酶都呈现极显著正相关;尤其是碱解性氮、有机质与蔗糖酶、脲酶、过氧化氢酶相关性系数较高,从侧面说明了土壤养分状况改善与土壤酶活性

增加之间的关系,也说明土壤酶活性与土壤生物学肥力有关并且可以作为衡量土壤生物学性状高低的指标之一,但不同塌陷类型土壤酶活性的差异可能还与不同植物根系所产生的各种酶的数量及植物群落对土壤动物和土壤微生物群落影响有关,这是因为土壤酶主要来自于土壤植物根系、土壤动物以及土壤微生物^[19]。



注:相同字母表示不同类型同一种酶无显著性差异($p<0.05$)。

图 1 煤矿塌陷区不同塌陷类型土壤酶活性

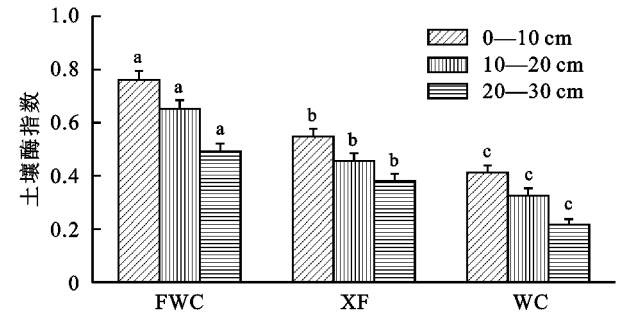
表 4 土壤酶活性与土壤理化性质的相关性

项目	pH 值	全氮	全磷	全钾	碱解性氮	速效磷	有机质	碳氮比
蔗糖酶	-0.450**	0.439**	0.186	0.412**	0.600**	0.279**	0.608**	0.480**
脲酶	-0.591**	0.515**	0.208*	0.300**	0.699**	0.302**	0.697**	0.513**
过氧化氢酶	-0.635**	0.336**	0.169	0.284**	0.511**	0.258**	0.547**	0.520**
脱氢酶	-0.429**	0.430**	0.189	0.442**	0.584**	0.273**	0.585**	0.487**

注:*表示在 0.05 水平上显著相关;**表示在 0.01 水平上显著相关。

3.4 土壤酶指数

使用土壤酶指数(I_{SE})作为酶因子的综合作用表征,使酶活性的变化能够客观全面的表达,从而克服不同种类酶活性在土壤质量改变中的片面性,从图 2 可以看出,土壤酶指数(I_{SE})在各区之间明显不同,并显著差异。其中 0—10 cm 非稳沉区土壤最高,达到 0.76,其次为修复区,稳沉区最低;垂直方向上,各区土壤土层自上而下土壤酶活性逐渐降低。



注:相同字母表示不同类型同一层次无显著性差异($p<0.05$)。

图 2 不同塌陷类型土壤酶活性指数(I_{SE})

3.5 土壤综合肥力指标值

土壤养分含量和土壤酶活性是反映土壤养分供应能力的重要指标,但土壤总体肥力水平取决于各项肥力指标的平衡,以土壤理化性质和酶活性指标计算

IFI。从图 3 可以看出,各区土壤剖面不同土壤层次的土壤综合肥力具有明显的层次性差异,均表现为 0—10 cm 层>10—20 cm 层>20—30 cm 层的特点,表明各区土壤综合肥力随土层层次加深而下降。而不同塌陷类型土壤综合肥力指标表现为非稳沉区>修复区>稳沉区。这是由于稳沉区相对于非稳沉区,土壤塌陷严重,植被稀少,水土流失严重,生态条件恶劣,生物与土壤间物质和能量交换能力减弱,自肥能力低,故土壤综合肥力 IFI 值下降显著;而修复区相对于稳沉区,经过一定植物修复,林(草)生长速度加快,光照、土壤水分条件得到一定程度的改善,土壤养分逐渐积累,同时土壤酶活性与微生物数量得到一定程度的恢复,故其土壤综合肥力 IFI 值较稳沉区有所提高。

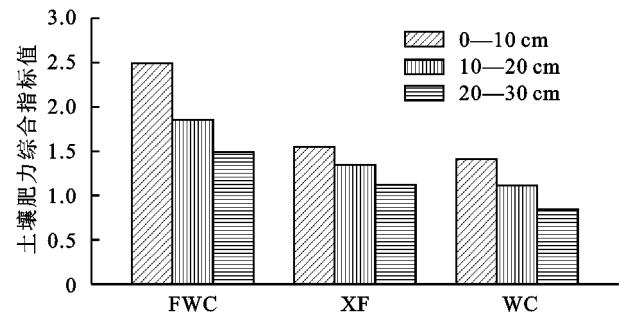


图 3 不同塌陷类型土壤肥力综合指标值 (IFI)

4 结论

淮南煤矿塌陷区在由非稳沉区转变为稳沉区的过程中,土壤质量呈现下降的趋势;对塌陷区进行复垦与植物修复对土壤质量改善有一定作用;通过对不同塌陷类型土壤的理化性质指标与酶活性综合比较,非稳沉区相关指标要优于修复区,修复区要优于稳沉区;从土壤综合肥力指标值(IFI)评价得分值来看,非稳沉区的土壤综合肥力最好,全氮、全钾、碱解性氮、速效磷、有机质、蔗糖酶、脲酶、过氧化氢酶、脱氢酶等可以作为塌陷区土壤生态肥力评价的科学指标,由于土壤脲酶和蔗糖酶与土壤理化性质及其他酶活性指标具有较好的相关性,土壤脲酶和蔗糖酶可以作为评估煤矿塌陷区土壤肥力变化的有效性指标。

参考文献:

- [1] 栗丽,王曰鑫,王卫斌. 采煤塌陷对黄土丘陵区坡耕地土壤理化性质的影响[J]. 土壤通报,2010(5):1237-1240.
- [2] 张建锋,张旭东,周金星,等. 世界盐碱地资源及其改良利用的基本措施[J]. 水土保持研究,2006,12(6):28-30.
- [3] 张振石. 哲里木盟盐渍土类型、利用现状及改良利用对策[J]. 土壤通报,2000,31(5):203-204.
- [4] Song Y, Song C, Yang G, et al. Changes in labile organic carbon fractions and soil enzyme activities after marshland reclamation and restoration in the Sanjiang Plain in Northeast China[J]. Environmental Management,2012,50(3):418-426.
- [5] Liu C, Xu J M, Ding N F, et al. The effect of long-term reclamation on enzyme activities and microbial community structure of saline soil at Shangyu, China[J]. Environmental Earth Sciences,2013,69(1):151-159.
- [6] 张宏刚. 对淮南采煤沉陷区治理若干问题的探讨[C]//重庆市科学技术协会. 中国南方十六省(市、区)水产学

会渔业学术论坛第二十六次学术交流大会论文集(上册). 重庆,2010.

- [7] 李晋川,王翔,岳建英,等. 安太堡露天矿植被恢复过程中土壤生态肥力评价[J]. 水土保持研究,2015,22(1):66-71.
- [8] Miller B A, Schaetzl R J. Precision of soil particle size analysis using laser diffractometry[J]. Soil Science Society of America Journal,2012,76(5):1719-1727.
- [9] 于兆水,胡外英,张勤. 多目标地球化学调查土壤样品中氮和碳的快速测定[J]. 岩矿测试,2007,26(3):235-237.
- [10] 钱宝,刘凌,肖潇. 土壤有机质测定方法对比分析[J]. 河海大学学报:自然科学版,2011,39(1):34-38.
- [11] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京:农业出版社,1986.
- [12] 魏振荣,刘国彬,薛莲,等. 黄土丘陵区人工灌木林土壤酶特征[J]. 中国水土保持科学,2010,8(6):86-92.
- [13] 吴玉红,田霄鸿,同延安,等. 基于主成分分析的土壤肥力综合指数评价[J]. 生态学杂志,2010(1):173-180.
- [14] 魏媛,喻理飞,张金池,等. 退化喀斯特植被恢复过程中土壤生态肥力质量评价:以贵州花江喀斯特峡谷地区为例[J]. 中国岩溶,2009,28(1):61-67.
- [15] 李晋川,王翔,岳建英,等. 安太堡露天矿植被恢复过程中土壤生态肥力评价[J]. 水土保持研究,2015,22(1):66-71.
- [16] 栗丽,王曰鑫,王卫斌. 采煤塌陷对黄土丘陵区坡耕地土壤理化性质的影响[J]. 土壤通报,2010(5):1237-1240.
- [17] 雍太文,杨文钰,向达兵,等. 不同种植模式对土壤氮素转化及酶活性的影响[J]. 应用生态学报,2011,22(12):3227-3235.
- [18] 孙庆业,任冠举,杨林章,等. 自然植物群落对铜尾矿废弃地土壤酶活性的影响[J]. 土壤学报,2005,42(1):37-43.
- [19] Aon M A, Colaneri A C. II. Temporal and spatial evolution of enzymatic activities and physico-chemical properties in an agricultural soil[J]. Applied Soil Ecology,2001,18(3):255-270.

(上接第89页)

- [18] 顾美英,刘洪亮,李志强,等. 新疆连作棉田施用生物炭对土壤养分及微生物群落多样性的影响[J]. 中国农业科学,2014,47(20):4128-4138.
- [19] Lehmann J, Gaunt J, Rondon M. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems: a review[J]. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 2006,11(2):395-419.
- [20] Dempster D N, Gleeson D B, Solaiman Z M, et al. Decreased soil microbial biomass and nitrogen mineralisation with Eucalyptus biochar addition to a coarse textured soil

[J]. Plant and Soil, 2012,354(1/2):311-324.

- [21] 孙永明,李钟平,黄齐,等. 施用生物黑炭对红壤旱地理化性状及玉米生长的影响[J]. 中国农学通报,2014,30(27):127-131.
- [22] 刘志华,李晓梅,姜振峰,等. 生物黑炭与化肥配施对大豆根际氮素转化相关功能菌的影响[J]. 东北农业大学学报,2014,45(8):11-19.
- [23] 肖辉,潘洁,程文娟,等. 生物黑炭对日光温室土壤硝态氮动态变化的影响[J]. 中国土壤与肥料,2014(2):12-16.
- [24] 刘志华,孟颖,姜振峰,等. 生物黑炭对黑土根际氮素转化相关功能菌的影响[J]. 大豆科学,2014,33(4):528-533.