

焦作矿区土地退化成因分析

聂小军, 胡斌, 赵同谦

(河南理工大学 资环学院, 河南 焦作 454003)

摘要: 根据焦作矿区土地破坏现状, 探讨了焦作矿区土地退化的3大主要成因, 即开采沉陷、煤矸石堆积、土壤压实。分别选取有代表性的矿区, 采集土样并测定它们的理化性质。结果表明: ① 开采沉陷产生的地表起伏、裂缝是该区土壤理化质量退化的影响因素; 沉陷坡上土壤含水量、体积质量、有机质及全氮含量沿向下坡方向增大, 表现出明显的土壤侵蚀特征。裂隙造成了沉陷区水土及养分的流失。② 矸石堆附近土壤已受到 Zn, Cd, Pb, Cu 的严重污染, 造成了土壤微生物质量下降。③ 压实区土壤体积质量明显增大, 导致土壤丧失可耕性。

关键词: 焦作矿区; 土地退化; 开采沉陷; 土壤质量; 土壤侵蚀

中图分类号: X 53 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-9787(2009)05-0658-07

Analysis of reasons of land degradation in JiaoZuo mine area

NIE Xiao-jun, HU Bin, ZHAO Tong-qian

(Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, Henan, China)

Abstract: Based on the actuality of land demolition in Jiaozuo mine area, ground subsidence, coal gangue accumulation and soil compaction, which are regarded as the three main reasons of land degradation, are discussed in this paper. Representative mine areas are selected to collect soil samples. The soil physical-chemical and microbial properties are measured. The results show that the undulation and fissures induced by ground subsidence mainly affect the soil physical and chemical properties in subsidence areas. Down the subsidence slope, soil water content, volume weight, OM and total N concentrations increase, which shows obvious feature of soil erosion. Fissures result in the losses of soil, water and nutrients in subsidence areas. Nearby coal-spoil heaps, the soils have been seriously polluted by Zn, Cd and Pb, which induce the decline of biomass in soil microbial quality. In compaction areas, the soil volume weight significantly increases, resulting in the soils without arability.

Key words: mine area; land degradation; mining subsidence; soil quality; soil erosion

0 引言

煤炭开采导致矿区土地资源破坏及生态环境恶化。由于采矿活动导致的矿区地表的破坏、煤矸石堆积及煤矸石淋溶液中重金属的污染、酸性污染物沉降使得矿区土壤表土常常缺失、温度波动大、PH值较低, 土壤结构及理化性质发生较大的变化, 土壤肥力下降和土地生产力降低, 最终造成矿区生物多样性降低、功能衰退。目前, 对于矿区土地退化成因的研究主要集中于沉陷矿区土地质量变化

收稿日期: 2009-03-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(0311061700); 河南省自然科学基金资助项目(0411050700)。

作者简介: 聂小军(1977-), 男, 山西曲沃人, 博士, 副教授, 从事土壤环境与土地管理教学与研究工作。

E-mail: niexj2005@126.com

方面^[1-7],而矿区煤矸石压占引起的土壤重金属污染、采矿作业过程中的土壤压实问题作为矿区土地退化的成因很少被研究.本文针对焦作矿区土地破坏现状,综合矿区开采沉陷、煤矸石压占、机械压实三个方面去探讨焦作矿区土地退化成因,以期为该矿区今后的矿区土地生态重建提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

焦作市位于中纬度地带华北平原的西部,太行山南麓.该地属于暖温带半干旱大陆季风气候,雨热同期,多年平均降水量为695.7 mm.矿区位于焦作市区范围内,从20世纪初开始规模开发,现有13对生产矿井,年产原煤420多万t.几十年来,煤炭开采促进了焦作市的经济和社会发展.同时,由于地下采煤引起的地表沉陷和煤矸石堆积,又破坏和占用了大量土地,污染了生态环境,也严重影响着本地农民的生产和生活.随着地下开采的继续进行,地表沉陷范围不断扩大,对土地资源和生态环境的破坏日益严重.焦作矿区地下开采破坏的土地可分为开采沉陷地、矸石山堆积占地、矿山开采机械压实地三大类.根据岩层移动的边界角确定各沉陷盆地的边界,采用网格法量算和塌陷盆地面积,矿区塌陷盆地总体积为9089万 m^3 ^[8].目前,焦作市区的人均耕地面积为0.018 hm^2 ,远低于人均0.091 hm^2 的全国平均水平.土地的大面积沉陷将使本地区的人地矛盾越来越突出,成为制约其经济和社会可持续发展的一个重要因素.焦作矿区共有20多余座矸石山,占地面积为44.2 hm^2 ,矸石山总体积为613万 m^3 .矸石山中赋存的重金属元素经淋溶、风化,迁移至周围矿区土壤中,使之受到不同程度的污染.在煤炭的运输与矸石的转运、存放过程中,由于重型机械的压实,原本耕性良好的农田不得不弃耕.

1.2 研究方法

选择焦作矿区有代表性的开采沉陷区、煤矸石堆积区、土壤压实区作为探讨矿区土地退化的样地,采集这些样地的土壤表层(0~25 cm)的理化、微生物特性样并实验测定.开采沉陷区土样按网格法采集,煤矸石堆积区土样按蛇形布点法采集,压实区土样按梅花形布点法采集.待测土样分析测定方法为:土壤质量含水量-经典烘干法,土壤容重-环刀法,土壤有机质-重铬酸钾容量法,土壤全氮-凯氏定氮法,土壤重金属含量-原子吸收分光光度法,土壤细菌、放线菌、真菌数量-平板稀释法,土壤脲酶活性-苯酚钠比色法.图表绘制与数据分析分别采用EXCEL与SPASS统计分析软件.

2 结果与分析

2.1 开采沉陷

开采沉陷造成的土地退化主要表现为沉陷产生的地表起伏、裂隙对土壤理化性质的影响.

2.1.1 地表变化对土壤理化性质的影响

开采沉陷使原本平整的地表起伏,产生坡地与一系列不规则的下沉盆地.焦作矿区沉陷地坡度大概在 $\leq 10^\circ$ 左右,其中坡度以 8° 、坡长以100~200 m居多.这些陡长坡坡地的出现导致其土壤水分、养分等理化质量明显的下降与空间分布的不均衡.以马村矿区一有代表性的沉陷盆地(沉陷盆地坡度为 8° ,坡长为100 m)为例,我们能看出土壤理化性质的这种明显变化.所选沉陷盆地土壤理化性质如下表(表1).与对照CK相比,沉陷区土壤表层的水分、有机质、全氮质量分数显著降低($p < 0.05$),这表明开采沉陷造成了土壤水分特性、肥力的下降及土壤紧实度的增大.沿向下坡方向,坡地土壤表层水分、有机质、全氮质量分数均逐渐增大(图1、图2、图3),这表明沉陷坡的上坡水分亏损、养分流失严重,下坡位置水分、养分富集现象明显.表层土壤容重在坡面上的变化规律与水分、养分的变化相似,即沿向下坡方向,容重增大(图4).沉陷区坡地这些土壤理化特性的空间变化规律暗示着明显的土壤侵蚀特征.径流侵蚀造成了坡地的上坡方向土壤水分与养分向下坡位置运移,最终导致下坡位置土壤的水分与养分质量分数均高于上坡位置.在水土流失的过程中,水蚀对上坡方向土壤细颗粒的分选性搬运导致下坡位置土壤孔隙被这些受搬运的细颗粒不断填充,最终使得

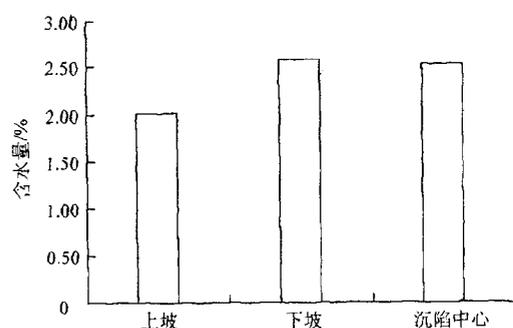


图1 沉陷盆地表层土壤含水量的空间变化

Fig.1 Spatial variation of water content in topsoil layer across a subsidence basin

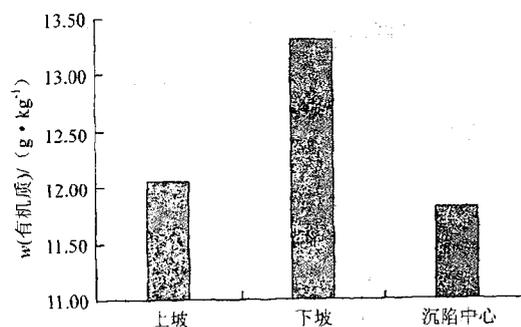


图2 沉陷盆地表层土壤有机质质量分数的空间变化

Fig.2 Spatial variation of OM content in topsoil layer across a subsidence basin

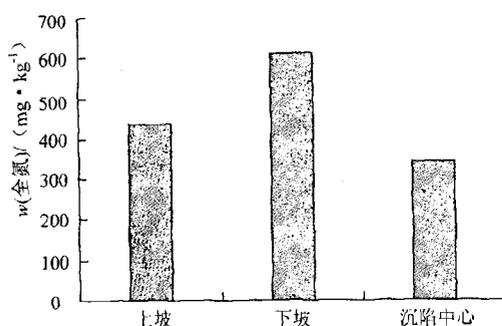


图3 沉陷盆地表层土壤全氮质量分数的空间变化

Fig.3 Spatial variation of total N content in topsoil layer across a subsidence basin

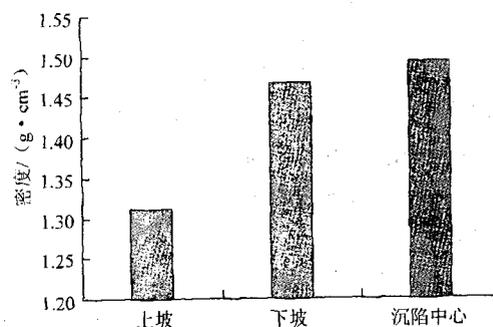


图4 沉陷盆地表层土壤密度的空间变化

Fig.4 Spatial variation of density in topsoil layer across a subsidence basin

下坡位置土体紧实, 另外耕地在下沉过程的沉实作用也是下坡容重增大的一个原因。

表1 沉陷区土壤表层(0~25 cm)理化性质

Tab.1 The physical and chemical properties of topsoil layer (0~25 cm) in a subsidence basin

	坡位	质量含水量/%	密度/(g·cm ⁻³)	w(有机质)/(g·kg ⁻¹)	w(全氮)/(mg·kg ⁻¹)
东坡	上坡	2.53	1.35	11.48	468.72
	下坡	2.58	1.43	13.90	598.92
西坡	上坡	2.19	1.33	15.47	494.76
	下坡	2.70	1.49	15.96	520.8
南坡	上坡	1.90	1.24	11.85	371.07
	下坡	2.50	1.48	13.49	611.94
北坡	上坡	1.43	1.33	9.42	426.04
	下坡	2.51	1.47	9.83	729.12
沉陷中心		2.53	1.49	11.81	342.68
CK		4.13	1.25	20.43	880.12

坡度与坡长是改变径流冲刷能力的2个最重要的因子。一般来说, 在小于25°的坡地上, 坡度越大, 坡长越长, 径流量越大, 冲刷能力也越大, 水土流失与土壤的养分流失越严重。水土流失研究^[9,21]表明, 在相同的降水、土质、植被覆盖及生产管理条件下, 流失强度随地形坡度的增加呈幂

函数增大. 刘秉正等 (1990)^[9] 得出农地水土流失量 M 与坡度 S 有如下关系:

$$M_s = 30S^{1.6} \quad (S \geq 20^\circ),$$

$$M_w = 1955S^{1.1} \quad (S < 20^\circ),$$

式中: M_s , M_w 分别为土壤侵蚀模数, $t \cdot km^{-2}$; 和径流模数 $m^3 \cdot km^{-2}$; S 为坡度.

王百强和刘国彬等^[10] 提出, 坡地土壤钾素的流失强度与坡长呈指数关系, 模型表达式为

$$N_L = a \cdot \exp(bx),$$

式中: N_L 为土壤养分流失强度, $kg \cdot km^{-2}$; a , b 为系数; x 为坡长, m .

因此, 焦作矿区这种陡长坡的普遍存在造成的水分、养分等土壤理化质量退化将日趋严重.

2.1.2 裂隙对土壤理化性质的影响

大气降水在土壤中的入渗能力主要取决于土壤的导水率和水压梯度, 其中土壤导水率由土壤包气带的岩土结构决定, 而水压梯度则决定于降雨的大小. 矿区沉陷土壤垂向裂隙的发育, 破坏了包气带的岩土结构, 改变了降水对土壤的补给过程与方式, 增加了水分入渗通道和蒸发面积. 与非沉陷区相比, 当降水量较小时, 由于塌陷区土壤尤其是上层土壤含水量较小, 降水首先要补充上层土壤水分亏损, 因而沉陷区的入渗深度要小于非沉陷区; 当降水量较大时, 除了充分补给沉陷区上层土壤的水分亏损外, 降水经岩土垂向裂隙迅速向下流入矿井坑道, 给地下采煤造成了巨大损失. 在焦作矿区, 素有“天下多少雨, 井排多少雨”之说. 因此在降水量大时, 矿区土壤入渗深度大于非沉陷区, 降水入渗方式也由非沉陷区的活塞式入渗转向捷径式入渗为主. 沉陷土壤垂向裂隙的发育也增加了土壤物质特别是土壤养分流失的风险. 从图1-图4中, 我们可以看出, 沉陷中心(沉陷盆地中海拔最低的位置)的土壤水分低于沉陷坡的下坡、有机质与全氮含量均明显低于沉陷坡的上、下坡两个位置, 土壤容重明显大于沉陷坡. 这是因为沉陷中心存在许多裂隙, 裂隙导致了水土及养分的流失, 因此可以说, 裂隙是沉陷区土壤景观物质流输出的一个重要途径, 也是导致景观物流循环不平衡的一个重要原因.

另外, 岩土裂隙的发育, 增加了土壤水的蒸发面积, 致使近地表土壤水分不断降低; 土壤中许多营养元素沿着裂缝渗漏, 导致近地表土壤养分不断地减少. 沉陷区岩土裂隙的发育也加大了土壤内部的水汽向大气扩散的强度. 裂隙的产生, 使得毛细现象难以进行, 土壤返湿困难, 加之地表风速对土壤水分的挟持, 土壤裂隙扩散到大气中的水分就越多, 使得土壤湿度大幅下降, 导致农作物减产. 焦作矿区沉陷盆地的裂隙宽度为1~50 mm, 最大裂隙宽度为200 mm. 沉陷区内局部地块呈条带状下陷, 中心地带形成沉陷漏斗. 同样以我们所选取的这个沉陷盆地为例, 从图5中我们可以看出裂隙对土壤垂向坡面水分与养分分布的影响. 土壤含水量随土壤垂向深度呈现逐渐减小的趋势, 表明因有裂隙的存在, 水分沿裂隙渗漏. 有机质含量随着土壤深度的加深先是减小后增大, 表明因有裂隙的存在, 养分在近地表5~20 cm向下渗漏, 致使20~40 cm的土壤有机质质量分数增大.

2.2 煤矸石堆积

矸石长期堆积而风化、淋溶导致矸石堆附近土壤重金属 Zn, Mn, Cr, Cd, Cu, Pb 等的富集与污染. 对焦作中马村矿、朱村矿及韩王矿矸石堆附近土壤重金属污染研究表明, 这3个矿区矸石堆附近土壤已受到 Zn, Cd, Pb, Cu 的严重污染. 其中土壤受重金属 Zn, Cd 污染比较严重但不普遍, 受 Pb, Cu 污染普遍. 焦作市中马村矿与朱村矿及韩王矿矸石堆附近土壤重金属质量分数状况见表2、3、4.

表2 焦作市中马村矿煤矸石堆附近土壤重金属

Tab.2 Contents of soil heavy metals nearby coal mine - spoil heaps in ZhongMaCun mine

	质量分数/($mg \cdot kg^{-1}$)					
	Cd	Cr	Zn	Mn	Pb	Cu
背景值*	0.07	63.80	60.10	543.00	19.60	19.70
含量区间	0~4.8	37.3~50.2	0~5435.0	370.0~617.0	5.6~148.4	11.5~87.0
平均值	0.6	44.3	793.7	528.0	35.9	31.1

续表

	质量分数/(mg·kg ⁻¹)					
	Cd	Cr	Zn	Mn	Pb	Cu
标准差	1.2	4.0	1547	54.8	29.1	10.0
检出率/%	30	100	40	100	100	100
超标倍数	7.6	-	12.2	-	0.8	0.6

“*”：河南省背景值；“-”：未超标。

表3 焦作市朱村矿煤矸石堆附近土壤重金属含量

Tab.3 Contents of soil heavy metals nearby coal mine - spoil heaps in ZhuCun mine

	质量分数/(mg·kg ⁻¹)					
	Cd	Cr	Zn	Mn	Pb	Cu
背景值	0.07	63.80	60.10	543.00	19.60	19.70
含量区间	0~3.5	20.3~59.5	0~1621	224.0~606.0	0~37.0	7.6~32.8
平均值	0.1	44.1	119	484	21.6	23.5
标准差	0.5	9.3	325	81	11.9	5.5
检出率/%	12	100	38	100	85.7	100
超标倍数	0.4	-	1.0	-	0.1	0.2

表4 焦作市韩王矿煤矸石堆附近土壤重金属含量

Tab.4 Contents of soil heavy metals nearby coal mine - spoil heaps in HanWang mine

	质量分数/(mg·kg ⁻¹)				
	Cd	Zn	Mn	Pb	Cu
背景值	0.07	60.10	543.0	19.60	19.70
含量区间	0.02~0.64	174~233	381~454	0.7~127.4	16.9~112.6
平均值	0.25	220.4	417	70.8	24.0
标准差	0.19	11.40	20.80	37.60	17.0
检出率/%	57	90	100	87	100
超标倍数	2.6	2.7	-	2.6	0.2

煤矸石堆中的重金属在雨水的淋溶作用下,以水溶态形式进入附近土壤,毒害土壤微生物并抑制了土壤酶活性,使得土壤中的有机质难以矿化成植物所需的养分进而抑制农作物生长.我们对焦作市韩王矿煤矸石堆附近土壤重金属与土壤微生物质量间关系的研究表明,这些煤矸石堆附近受重金属污染的土壤细菌、真菌、放线菌数量显著低出对照(未受重金属污染的土壤)的1~2个数量级(数据未列出),土壤脲酶活性也显著低于对照($p < 0.05$)(数据未列出).相关分析表明,Pb, Cu, Zn分别与土壤脲酶活性极显著负相关($p < 0.001$),相关系数相应地为 $r = 0.98, 0.93, 0.98$,这表明随着土壤中重金属含量的增加,土壤脲酶活性将降低.我们的这些发现一致于前人的研究.在这些研究中,Brookes P. C.等^[11]报道重金属对土壤的微生物量有很大的抑制作用.龙健,滕应等^[12]报道,由于重金属的污染,矿区土壤微生物参数发生了明显的改变,微生物呼吸速率减弱,生物量降低,酶活性受到抑制,尤以脱氢酶、脲酶、磷酸酶最为敏感.杨志新、刘树庆等^[13]报道了重金属Cd, Zn, Pb的复合污染对土壤酶活性有明显的抑制效应.

2.3 土壤压实

矿区土壤压实是一个非常常见的问题.经压实的复垦土壤即使大量施用化肥,也达不到预期的增产效果.土壤压实是一个两步过程^[14]:第一步是土壤结构的破坏,其结构单元分裂成小碎块;第二

步是较小的碎块被紧密地挤进空隙,从而将它们塞紧。土壤压实后,其孔隙度降低,大孔隙比例失调,通气渗水性差;地势较高处易引起径流侵蚀和干旱,低处则易积水,使通气状况进一步恶化;过度压实的矿区土壤还加大了根系穿透阻力,阻碍了土壤中养分、水分和空气的传输,而这些都是作物生长的必要因素。其结果往往是矿区土壤质量较差,导致作物减产。

2.3.1 土壤压实对土壤物理特性的影响

压实对反映土壤紧实度的物理特性—容重—影响最为突出。土壤因容重增大,往往缺少合适的、连续的大孔隙网孔来提供水的流动、空气的渗透和根系的延伸,从而限制了植物的生长。Gill^[15]说明了压实对粘壤土孔隙的影响,随着土壤的容重从 $1.3 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 增至 $1.8 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,孔隙率则从 30% 减至 40%,不利于作物根系的通气性。

土壤压实会影响到土壤中水分的状况。表层土壤的压实对入渗起了决定性作用,成为水分入渗的限制层。大孔隙的减少降低了土壤的通气性和入渗性能,而小孔隙的减少增加了表层土壤的吸水能力,水分不易向下运动,减少了入渗量^[16]。过度压实的土壤不仅保水能力低,有效水分含量低,特别是田间持水量低,而且渗透率也低。由于减小下渗能力,从而增加了径流,降低了土壤的蓄水量。Powell 等^[17]提供了复垦土壤层的容重和持水能力的的数据,容重和持水量之间存在着逆关系。过度压实的土壤经常会处于干旱状态,不够理想的水分分布使植物受到额外的应力,这对作物产量影响很大。以演马矿为例,不同压实情况下的土壤容重值如下图(图6)。从图6可以看出,煤矸石压实(矸压)、煤炭压实(煤压)、机械压实(机压)土壤表层(0~25 cm)容重均明显大于对照CK(耕作土)。一般来说,土壤耕作层容重为 $1.05 \sim 1.35 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 之间,底土和紧实的耕作层容重在 $1.35 \sim 1.55 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ^[18],位于这之间的土壤能够耕作。很显然,演马矿这几种压实的土地已丧失了可耕性。

2.3.2 压实对土壤养分的影响

土壤压实程度的变化会改变养分的有效利用率。这点可能是既有益处又有害处的。如果压实过于严重,则养分借助质流的移动便会减少。有机质矿化这类受气体和水分影响的化学反应,可能会受到不利的影响。许多土壤微生物具有活化土壤潜在养分,增加土壤养分有效性的特性^[19],而压实的土壤中微生物活动微弱,且大多数微生物类群的数量均低于未扰动的农业土壤^[20],这就极大地限制了土壤养分的吸收与活化。

3 结 论

开采沉陷、煤矸石堆积、土壤压实问题是焦作矿区土地退化的三大主要成因。塌陷盆地土壤含水量、容重、有机质含量沿向下坡方向增大,表明水分、物理性粘粒、养分受土壤侵蚀影响出现流失的规律。塌陷盆地中心裂隙的存在,导致土壤水分渗漏,土壤损失及养分流失。土壤水分含量随土壤垂向深度呈现逐渐减小的趋势,有机质表现出先减小后增大的趋势。

矸石堆积区,由于长期的淋溶、风化,土壤重金属 Zn, Cd, Pb, Cu 富集, Zn, Cd 严重超标。压实区,土壤耕作层容重在 $1.35 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 以上,使得土壤养分不能为植被吸收,使土壤丧失可耕性。

参考文献:

- [1] 张发旺,侯新伟,韩占涛,等.采煤沉陷对土壤质量的影响效应模式及保护技术[J].地理与地理信息科学,2003,19(3):67-70.
- [2] 聂振龙,张光辉,李金河.采矿沉陷作用对地表生态环境的影响[J].勘察科学技术,1998(4):15-20.
- [3] 张华,张甘霖.土壤质量指标和评价方法[J].土壤,2001(6):298-302.
- [4] 卞正富.矿区开采沉陷农用土地质量空间变化研究[J].中国矿业大学学报,2004,33(2):213-218.
- [5] 陈龙乾,邓喀中,赵志海,等.开采沉陷对耕地土壤物理特性影响的空间变化规律[J].煤炭学报,1999,24(6):586-590.
- [6] 陈龙乾,邓喀中,许善宽,等.开采沉陷对耕地土壤化学特性影响的空间变化规律[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1999,5(3):81-86.
- [7] 赵明鹏,张震斌,周立岱.阜新矿区地面沉陷灾害对土地生产力的影响[J].中国地质灾害与防治学报,2003(1):77-80.

- [8] 胡友健, 郭增长, 张凤举, 等. 焦作矿区塌陷土地复垦有关问题的研究 [J]. 焦作工学院学报, 1996, 15 (2): 9 - 13.
- [9] 刘秉正, 吴发启, 陈继明. 渭北高原水土流失对土壤肥力与生产力影响的初步研究 [J]. 中国科学院水利部西北水土保持研究所集刊, 1990 (12): 104 - 113.
- [10] 王百强, 刘国彬. 黄土丘陵区地形对坡地土壤养分流失的影响 [J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 5 (2): 18 - 22.
- [11] BROOKES P C, MCCRATH S P. Effects of metal toxicity on the soil microbial biomass [J]. Soil Science, 1984, 35: 341 - 379.
- [12] 龙健, 黄昌勇, 滕应, 等. 重金属污染矿区复垦土壤微生物生物量及酶活性的研究 [J]. 中国生态农业学报, 2004, 12 (3): 146 - 148.
- [13] 杨志新, 刘树庆. 重金属复合污染对土壤酶活性的影响 [J]. 环境科学学报, 2001, 21 (1): 60 - 64.
- [14] HORN R, DOMZAL H. Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and the environment [J]. Soil & Tillage Research, 1995, 35 (1/2): 23 - 36.
- [15] GILL W R. Soil compaction by traffic [J]. Agricultural Engineering, 1989, 40: 392 - 395.
- [16] YAO L, WILDDINF L P. Micro - morphological study of compacted mine soil in east Texas [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics, 1995, 32 (5): 219A.
- [17] POWELL J L, BAMHISEL R L, THOM W O. Reclamation of prime farmlands in Kentucky [J]. American Society for Surface Mining and Reclamation, 1985, 2: 1 - 5.
- [18] 朱祖祥. 土壤学 [M]. 北京: 农业出版社, 1983.
- [19] 毕银丽, 胡振琪. 微生物在复垦中的作用及其应用前景 [C] //中国土地学会土地复垦分会. 第六次全国土地复垦学术会议集. 北京, 1999: 250 - 258.
- [20] 胡振琪. 露天矿复垦土壤的研究现状 [J]. 农业环境保护, 1997, 16 (2): 90 - 92.
- [21] 靳长兴. 坡度在破面侵蚀中的作用 [J]. 地理研究, 1996, 15 (3): 57 - 62.

(责任编辑 宫福满)