

平顶山市煤矿塌陷区复垦土壤重金属分布及污染分析

王卓理¹, 马建华², 耿鹏旭¹, 谷 蕾²

(1.平顶山学院环境与地理科学系, 河南 平顶山 467000; 2.河南大学资源与环境研究所, 河南 开封 475004)

摘要:采集了河南省平顶山煤矿塌陷区复垦地 5 个点位的土壤样品,采用 HCl-HNO₃-HF-HClO₄ 全分解的方法对土壤样品进行处理,用原子吸收分光光度法测定了镉、铅、铜、锌、镍和总铬的含量,根据内梅罗指数法对土壤重金属污染进行了评价,同时对塌陷地和附近正常农田土壤中重金属元素的含量也进行了分析测定。结果表明,复垦土壤的镉、铜和锌含量高于对照土壤,重金属垂直分布无确定规律。复垦土壤大部分样点的总铬和镉的污染分指数大于 1.0,发生了不同程度的污染;铅、铜、锌和镍的污染分指数小于 1.0,未发生污染。复垦土壤的重金属综合污染指数均大于 1.0,发生轻度至重度污染。对照样也发生了不同程度的污染,但污染程度小于复垦土壤。“挖深垫浅式”复垦土壤的最大污染因子是镉,“充填式”复垦土壤和对照土壤的最大污染因子是铬。随着“挖深垫浅式”复垦时间的增长,土壤污染程度有减轻的趋势。

关键词:煤矿塌陷区;复垦土地;重金属污染;平顶山市

中图分类号:X53 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2009)04-0668-05

Heavy Metals Distribution and Pollution of the Reclaimed Soil in Subsidence Area of Pingdingshan City Coal Mine

WANG Zhuo-li¹, MA Jian-hua², GENG Peng-xu¹, GU Lei²

(1.Department of Environment and Geography, Pingdingshan University, Pingdingshan 467000, China; 2.Institute of Resources and Environmental Science, Henan University, Kaifeng 475004, China)

Abstract: Heavy metal pollution in reclaimed soil in Pingdingshan coal mine was investigated. Soil samples of 5 sites were collected and treated with HCl-HNO₃-HF-HClO₄, then the contents of Pb, Cd, Cu, Zn, Ni and Cr were determined by atomic absorption spectrophotometry, heavy metal pollution in soil was evaluated with Nemero Index, and the contents of heavy metals in subsided land and normal cultivated soil were also determined. The results showed that the content of such heavy metals as Cr, Cu and Zn in reclaimed soil exceeded the reference soil and the vertical distribution of heavy metals had no regular rules. It was concluded that as the single pollution index of general Cr and Cd in the reclaimed soil was above 1.0, which represented a pollution of different degrees. As the single pollution index of Ni, Pb, Cu and Zn was bellow 1.0, which stood for no pollution. However, the comprehensive pollution index of heavy metals in the reclaimed soil was averagely above 1.0, which indicated that a light pollution or heavy pollution happened. There was a pollution of different degrees happening to the reference soil samples, but the pollution degree was bellow the reclaimed soil. The heavy metal contamination of the reclaimed soil of “deep digging and shallow filling” was Cd, and the heavy metal contamination of the reclaimed soil of “filling type” and the reference soil mostly was Cr. With the increase of the reclaimed time of “deep digging and shallow filling”, the degree of the polluted soil may tend to lighten.

Keywords: subsidence coal mine area; land reclamation; heavy metal pollution; Pingdingshan City

煤矿塌陷区土地治理和复垦工作一直是国内外土地科学的研究重点之一^[1-3]。目前,我国矿区复垦土地以农业利用为主^[4],开展了复垦土壤性质、质量

演变、生态恢复、肥力评价及复垦地规划等方面的研究^[2-8],近年来对复垦土壤的重金属污染研究引起了学者的重视^[9-10],但国内外这方面的研究较少^[11-12]。土壤重金属是影响土壤质量的重要限制因素,而且与人体健康密切相关^[13],因此开展煤矿塌陷区复垦土壤的重金属分布及污染评价具有重要意义,可为今后土地复垦工作提供参考和有益借鉴。本文选择平顶山市煤矿塌陷区(以下简称塌陷区)复垦土壤为例,在野外调查采样和室内重金属分析的基础上,对复垦土壤重

收稿日期:2008-06-23

基金项目:河南省重点科技攻关项目(72102150029);平顶山学院“生态地理学”重点学科和“低山丘陵生态环境与生态修复”重点实验室资助项目

作者简介:王卓理(1966—),女,河南省禹州市人,硕士,副教授,主要研究方向为自然地理学、土壤环境。

通讯作者:马建华 E-mail:mjh@henu.edu.cn

金属污染状况进行分析与评价。

1 材料与方法

1.1 土壤样品的采集与处理

供试土样为塌陷区复垦土壤、未复垦土壤及其周围农田土壤。复垦土壤采自挖深垫浅和充填两种复垦地。挖深垫浅式复垦是将积水沉陷区下沉较大的区域再挖深,形成水塘,用于养鱼、栽藕或蓄水灌溉,再用挖出的泥土垫高开采下沉较小地区,达到自然标高,按设计的农田标高进行土地平整,最后建设整个复垦区的排灌沟渠、道路、防护林等农田体系。充填复垦是先将表层 1 m 厚的土壤剥离,利用矿区内的煤矸石等固体废弃物回填开采沉陷区,将剥离的土壤覆在其上,形成覆土层,供试的充填复垦覆土厚度约 61 cm。2007 年 2—3 月,在平顶山市八矿塌陷复垦区(挖深垫浅式复垦)复垦 11 a、6 a、4 a 和 2 a 的典型地块上布设采样点 4 个(P1,P2,P3,P4),在七矿复垦区(充填式复垦)复垦 8 a 的地块布设采样点 1 个(P5)(因没有其他复垦年份的地块),在塌陷区未复垦地上布设采样点 2 个(T1,T2),在复垦区附近正常农田上布设对照样点 2 个(D1,D2)(图 1)。在每个采样点上,挖掘土壤剖面 1 个,剖面深度根据具体情况而定,挖至下部的母质层或地下水出露的深度,充填复垦采样点挖至充填物层。P1 挖至 100 cm,P2 挖至 85 cm,P3 挖至 80 cm,P4 挖至 100 cm,P5 挖至 100 cm(61 cm 以下为充填物层),T1 挖至 40 cm,T2 挖至 100 cm,D1 和 D2 挖至 100 cm。其中 P2、P3、T1、T2 均挖至地下水出露的深度。在土壤剖面挖好以后,根据土壤形态特征以及堆积和混合物质的特性综合考虑划分土壤层次,划分 3~4 层。挖深垫浅式复垦土壤各剖面最下层为暗棕色的由于长期积水形成的淤泥层。分层采集土壤分析样品 1 kg 左右,同时在剖面点周围采集土壤表层混合样品 1 个。土壤混合样品按“蛇形布点法”随机采集表层(0~15 cm)子样 20 个,然后将其充分混

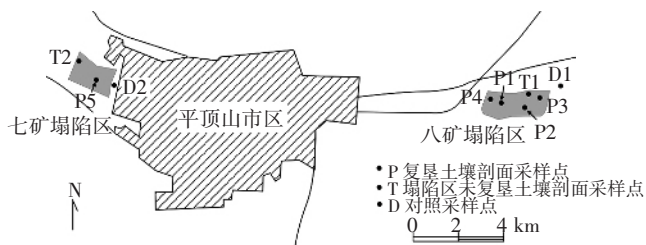


图 1 采样点分布图

Figure 1 Location of the sample sites

合,按“四分法”舍弃多余样品,最后保留 1 kg 分析样品。本研究共采集土壤样品 37 个和充填式复垦土壤的充填物样品 1 个。

在实验室,先挑出样品中的大石块和植物残体,在室温下自然风干。然后将其磨碎,全部通过 2 mm 尼龙筛,混匀。再从 2 mm 样品中随机多点取样 5 g 左右,用玛瑙研钵研细,全部通过 0.149 mm 尼龙筛,混匀备用。

1.2 测试方法

采用盐酸-硝酸-氢氟酸-高氯酸全分解的方法消解土壤样品。土壤铜、锌、镍和总铬用 AAS 法(火焰原子分光光度法)测定,土壤铅和镉用 F-AAS 法(石墨炉火焰原子分光光度法)测定。仪器为日本岛津 AA—6601F 型原子吸收光谱仪。在测定过程中,所有样品均由空白样、二次平行样和加标回收率进行质量控制。二次平行样的相对偏差均小于 5%,样品加标回收率在 95.4%~104.1%之间。

2 结果分析与讨论

2.1 重金属含量特征

各采样点土壤表层混合样重金属含量见表 1。

表 1 土壤表层混合样重金属含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Table 1 The content of heavy metals of mixed samples in surface soil($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

区域	样品号	Cd	Pb	Cu	Zn	Ni	Cr
复垦区	P1	1.15	78.31	29.68	54.68	12.18	365.01
	P2	1.06	104.21	55.64	53.23	9.41	389.09
	P3	3.12	41.92	42.29	50.24	19.68	698.32
	P4	1.02	45.15	45.01	28.81	15.12	763.40
	P5	0.14	36.30	22.32	12.64	39.92	754.69
	平均	1.30	61.18	38.99	39.92	19.26	594.10
未复垦区	T1	1.97	53.56	47.91	129.73	38.38	720.57
	T2	0.54	68.35	39.91	3.43	73.21	449.00
	平均	1.26	60.96	43.91	66.58	55.80	584.79
对照区	D1	0.99	66.85	17.26	34.00	13.29	711.58
	D2	0.61	112.12	29.57	16.01	49.65	446.06
	平均	0.80	89.49	23.42	25.01	31.47	578.82

由表 1 可以看出:(1)除个别样点外,复垦土壤随着复垦利用时间的增加,土壤铅和锌的含量有逐渐增加的趋势,而铜和铬的含量则有减少的趋势。(2)复垦土壤镉、铅、铜和总铬含量与未复垦土壤差别不大,而锌、镍含量低于未复垦土壤。(3)对照土壤镉、铜和锌含量低于复垦土壤和未复垦土壤;铅含量高于复垦土壤

和未复垦土壤;镍含量高于复垦土壤,而低于未复垦土壤;总铬含量与复垦土壤和未复垦土壤差别不大。

塌陷区未复垦土壤在塌陷之前,与对照土壤相同;塌陷之后,地势低洼,通过地表径流输入的重金属物质较多,因此 T1 的多数重金属含量高于对照土壤。复垦土壤多是经过“挖深垫浅”工程措施复垦的,表层物料来源是塌陷区未复垦土壤,因此一些重金属(如镉、铅、铜和总铬)的含量与未复垦土壤相当。复垦土壤地势抬高,经过各种耕作措施以后,随着耕作时间增加,有些重金属如总铬、铜含量减少,而铅、锌的含量有所增加。

充填复垦土壤 61 cm 以下为充填物,充填物为煤矸石、生活垃圾等固体废弃物。经测定,充填物中镉、铅、铜、锌、镍和铬的含量分别为 1.04、22.24、25.10、40.72、83.27 和 493.27 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,镉、铜、锌和镍的含量均大于其上覆土层的含量,对复垦土壤有二次污染的可能。今后在复垦时应避免使用生活垃圾,并对充填物料进行重金属等污染物质的测定。

与《中国土壤元素背景值(河南潮土类)》($\text{Cd}=0.1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $\text{Pb}=21.9\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $\text{Cu}=24.1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $\text{Zn}=71.1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $\text{Ni}=29.6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $\text{Cr}=66.6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[4]相比,对照土壤中的镉、铅和总铬含量远高于背景值,这可能与矿区含有重金属的大气干沉降以及化肥和农药使用有关。

2.2 土壤重金属垂直分布

图 2 反映了不同采样区域土壤剖面的重金属垂直分布情况,其中复垦土壤以“挖深垫浅式”复垦 11 a 的剖面(P1)为例,未复垦土壤以剖面 T2 为例,对照土壤剖面以 D1 为例。由于土壤镉和总铬的含量相差数百倍,很难在图上同时将其反映出来,故图 2 仅反映了各类型剖面锌、铅、镍和铜的垂直分布。由图 2 可

以看出,复垦土壤重金属垂直分布杂乱。铅在剖面表层较高,中部减少,在底部急剧升高;锌在剖面中部含量较高,在底部又升高;镍在表层较高,向下缓慢减少。而未复垦土壤和对照土壤的重金属垂直分布规律性较强,铅、镍和铜表现为表层含量较高,中部减少,再向下又升高;锌含量在表层最高,向下逐渐减少。

复垦土壤是经过人工堆垫或填充外来物质后形成的,原始的土壤层次被打乱,因此复垦土壤重金属垂直分布无确定规律。挖深垫浅式复垦土壤地下水位较浅,在 0.8~1.2 m 之间(对照土壤地下水位为 4~5 m,塌陷区未复垦土壤 T1、T2 为 0.3~1 m),各剖面最下层均为暗棕色的由于长期积水形成的淤泥层,在复垦前为塌陷较深的积水区,通过地表径流输入的重金属物质较多,所以有些重金属在剖面底部较高。而对照土壤的重金属来源主要是化肥和农药的使用以及大气干沉降,所以重金属在土壤表层富集较多,下层较少,重金属垂直分布规律性明显。

2.3 土壤重金属污染评价

2.3.1 评价方法

采用内梅罗综合污染指数法^[15]对土壤进行重金属污染评价。综合污染指数和污染分担率的计算公式如下:

$$P_N = \sqrt{\frac{1}{2} [\text{average}(\frac{C_{ji}}{C_{0i}})^2 + \max(\frac{C_{ji}}{C_{0i}})^2]}$$

$$N_{ij}(\%) = (P_{ij} / \sum_{n=1}^n P_{ij}) \times 100$$

式中: C_{ji} 为 j 采样点重金属 i 的实测含量, C_{0i} 为重金属 i 的评价标准,两者之比即为 j 采样点重金属 i 的污染分指数(P_{ji}); P_N 为 j 采样点的重金属综合污染指数; N_{ij} 为 j 剖面重金属 i 的污染分担率。

考虑到复垦土壤现为农业生产用地,大部分土壤

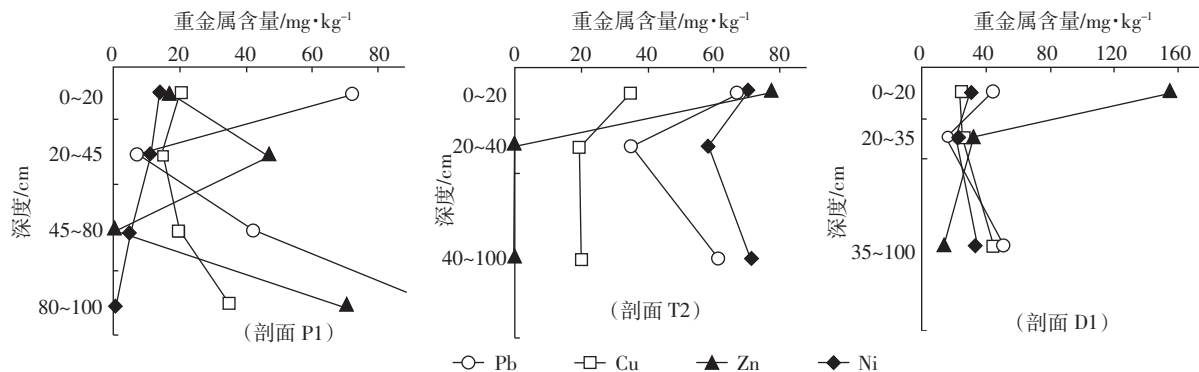


图 2 典型剖面重金属垂直分布

Figure 2 The vertical distribution of heavy metals of typical sections

的 pH 值在 7.5 以上,故采用国家二级标准($\text{pH}>7$)进行评价^[16]($C_{\text{Cd}}\leq 0.6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $C_{\text{Pb}}\leq 350\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $C_{\text{Cu}}\leq 100\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $C_{\text{Zn}}\leq 300\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $C_{\text{Ni}}\leq 60\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $C_{\text{Cr}}\leq 250\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)。土壤污染程度分级采用《土壤监测技术规范》^[15]中的标准($P_{\text{N}}\leq 0.7$ 为安全, $0.7<P_{\text{N}}\leq 1$ 为警戒线, $1<P_{\text{N}}\leq 2$ 为轻污染, $2<P_{\text{N}}\leq 3$ 为中污染, $P_{\text{N}}>3$ 为重污染)。

2.3.2 结果分析

按照上述评价方法对各采样点表层混合样重金属污染状况进行了评价,结果见表 2。从表 2 可以看出,不管是复垦土壤、未复垦土壤还是对照土壤, P_{Cd} 均大于 1,除个别样点(P5 和 T2)外 P_{Cu} 也大于 1,发生了不同程度的污染;除 T2 的 P_{Ni} 外,其他重金属的 P_i 均小于 1,未发生污染。复垦土壤铬和镉的污染分指数>未复垦土壤>对照土壤,未复垦土壤铜和镍的污染分指数>复垦土壤>对照土壤,对照样铅和锌的污染分指数>未复垦土壤>复垦土壤。

复垦土壤各个重金属污染分担率的大小顺序是 $\text{Cr}>\text{Cd}>\text{Cu}>\text{Ni}>\text{Pb}>\text{Zn}$,铬和镉是主要污染元素。其中“挖深垫浅式”复垦土壤的最大污染因子是镉,其次是铬;而“充填式”复垦土壤、未复垦土壤和对照土壤的最大污染因子是铬,其次是镉。

各采样点土壤重金属综合污染指数均大于 1,且复垦土壤>未复垦土壤>对照土壤。复垦土壤重金属综合污染指数变化在 1.35~4.06 之间,平均为 2.31,总体来说污染较严重。挖深垫浅式复垦 2 a(P4)为中度污染,复垦 4 a(P3)为重度污染,复垦 8、11 a(P2, P1)

为轻度污染。随着“挖深垫浅式”复垦时间的增长,外源重金属向土壤深处移动,或者被作物吸收而移出土壤,污染程度有逐渐减轻的趋势。未复垦土壤的平均综合污染指数为 2.06,污染程度小于复垦土壤。对照土壤的平均综合污染指数为 1.74,也发生污染,但污染程度最轻。对照土壤发生重金属污染与矿区大气干沉降以及农药和化肥施用有关^[17-18]。

塌陷区及其周围土壤均发生不同程度的重金属污染的事实应引起高度重视,因为土壤中的生物有效态重金属可以进入植物体,富集在植物可食部分,从而对人体健康造成危害。今后要加强土壤和作物中的重金属含量动态监测,适当改变土地利用方式,探讨土壤重金属污染修复的理论与方法。

3 结 论

(1)复垦土壤受外源性物质影响强烈,重金属含量沿剖面垂直分布复杂多样,无确定规律。塌陷区未复垦土壤和对照土壤重金属含量表层较高,中部减少,再向下又有升高的趋势。

(2)研究区复垦、未复垦和正常农田土壤均发生了镉和铬污染,其他重金属的污染分指数小于 1,基本没有发生污染。复垦土壤重金属污染比较严重,“挖深垫浅式”复垦土壤的最大污染因子是镉,其次是铬;“充填式”复垦土壤的最大污染因子是铬,其次是镉。对照土壤因矿区大气干沉降以及农药和化肥施用,也发生了重金属污染,但受污染程度小于复垦土壤,最大污染因子是铬,其次是镉。

表 2 土壤表层混合样重金属污染指数、分担率及其污染等级

Table 2 The polluted index, sharing rate and pollution degree of heavy metals of mixed samples in surface soil

区域	样品	P_i 和 $N/\%$						P_{N}	污染等级
		Cd	Pb	Cu	Zn	Ni	Cr		
复垦区	P1	1.91/44.65	0.22/5.24	0.30/6.94	0.18/4.26	0.20/4.75	1.46/34.16	1.44	轻
	P2	1.76/39.08	0.30/6.61	0.56/12.35	0.18/3.94	0.16/3.48	1.56/34.54	1.35	轻
	P3	5.20/57.58	0.12/1.34	0.42/4.68	0.17/1.85	0.33/3.63	2.79/30.92	4.06	重
	P4	1.70/29.87	0.13/2.27	0.45/7.93	0.10/1.69	0.25/4.44	3.05/53.80	2.39	中
	P5	0.23/5.53	0.10/2.42	0.22/5.20	0.04/0.98	0.67/15.51	3.02/70.36	2.32	中
	平均	2.16/35.34	0.17/3.59	0.39/7.42	0.13/2.54	0.32/6.36	2.38/44.76	2.31	中
未复垦区	T1	3.28/41.68	0.15/1.95	0.48/6.09	0.43/5.50	0.64/8.13	2.88/36.65	2.66	中
	T2	0.90/20.04	0.20/4.31	0.40/8.81	0.01/0.25	1.22/26.94	1.80/39.65	1.45	轻
	平均	2.09/30.86	0.18/3.13	0.44/7.45	0.22/2.88	0.93/17.54	2.34/38.15	2.06	中
对照区	D1	1.66/31.92	0.19/3.65	0.17/3.27	0.22/4.23	0.11/2.12	2.85/54.81	2.11	中
	D2	1.02/23.72	0.32/7.44	0.30/6.98	0.83/19.30	0.05/1.16	1.78/41.40	1.36	轻
	平均	1.34/27.82	0.26/5.55	0.24/5.13	0.53/11.77	0.08/1.64	2.32/48.11	1.74	轻

注:表中数据格式是“重金属单项污染分指数/污染分担率”。

(3)随着“挖深垫浅式”复垦时间的增长,土壤重金属污染程度有减轻的趋势。

(4)今后要加强对充填式和挖深垫浅式复垦土壤中重金属含量变化及土壤剖面中重金属的迁移机制的研究,加强土壤和作物中的重金属含量动态监测,探讨土壤重金属污染修复的理论与方法。

参考文献:

- [1] 胡振琪, 魏忠义. 煤矿区采动与复垦土壤存在的问题与对策[J]. 环境保护, 2003, 17(3): 3-7, 10.
HU Zhen-qi, WEI Zhong-yi. Problems and countermeasures of coal-mining and reclaimed soil[J]. *Energy Environmental Protection*, 2003, 17(3): 3-7, 10.
- [2] 于君宝, 王金达, 刘景双, 等. 矿山复垦土壤营养元素时空变化研究[J]. 土壤, 2002, 39(5): 750-753.
YU Jun-bao, WANG Jin-da, LIU Jing-shuang, et al. Temporal-spatial variation in nutrient element content in overlaying soil of reclaimed coal mine area[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(5): 750-753.
- [3] 孙泰森, 师学义, 杨玉敏, 等. 五阳矿区采煤塌陷地复垦土壤的质量变化研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(4): 35-37.
SUN Tai-sen, SHI Xue-yi, YANG Yu-min, et al. Changes of reclaimed soil quality on subsided land resulting from coal-mine at wuyang area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, 17(4): 35-37.
- [4] 卞正富. 国内外煤矿区土地复垦研究综述[J]. 中国土地科学, 2000, 14(1): 6-11.
BIAN Zheng-fu. Research overview on land reclamation in coal mine area[J]. *China Land Science*, 2000, 14(1): 6-11.
- [5] 常秋玲, 康鸳鸯. 河南采煤塌陷区土地复垦与生态恢复浅析[J]. 中国矿业, 2006, 15(11): 43-45.
CHANG Qiu-ling, KANG Yuan-yang. Meaning of land reclamation and ecological restoration in coal-mine subsidence area of Henan Province[J]. *China Mining Magazine*, 2006, 15(11): 43-45.
- [6] 张合兵, 靳海亮, 常玉光. 矿区土地复垦中的环境质量评价[J]. 黑龙江工程学院学报, 2001, 15(4): 33-35.
ZHANG He-bing, JIN Hai-liang, CHANG Yu-guang. Assessment of environmental quality in land reclamation of the mining areas[J]. *Journal of Heilongjiang Institute of Technology*, 2001, 15(4): 33-35.
- [7] 秦俊梅, 白中科, 李俊杰, 等. 矿区复垦土壤环境质量剖面变化特征研究——以平朔露天矿区为例[J]. 山西农业大学学报, 2006, 26(1): 101-105.
QIN Jun-mei, BAI Zhong-ke, LI Jun-jie, et al. Research on change characteristic of environmental quantity in reclaimed soil profile in mine area——taking pingshuo opencast mine as a example[J]. *Journal of Shanxi Agricultural University*, 2006, 26(1): 101-105.
- [8] 王慎敏, 金晓斌, 周寅康, 等. 基于GIS的采煤塌陷区土地复垦项目规划设计研究[J]. 地理科学, 2008, 28(2): 195-199.
WANG Shen-min, JIN Xiao-bin, ZHOU Yin-kang, et al. Planning and designing of reclamation project in mining subsided land based GIS[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2008, 28(2): 195-199.
- [9] 胡振琪, 魏忠义, 秦萍. 塌陷地粉煤灰充填复垦土壤的污染性分析[J]. 中国环境科学, 2004, 24(3): 311-315.
HU Zhen-qi, WEI Zhong-yi, QIN Ping. Contamination character analysis of filling reclaimed soil with fly ash in subsided land[J]. *China Environmental Science*, 2004, 24(3): 311-315.
- [10] 董霁红, 卞正富, 王贺封. 矿山充填复垦地重金属含量对比研究[J]. 中国矿业大学学报, 2007, 36(4): 531-536.
DONG Ji-hong, BIAN Zheng-fu, WANG He-feng. Comparison of heavy metal contents between different reclaimed soils and the control soil[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2007, 36(4): 531-536.
- [11] Boularbah A, Schwartz C, Bitton G, et al. Heavy metal contamination from mining sites in South Morocco: 2. assessment of metal accumulation and toxicity in plants[J]. *Chemosphere*, 2006, 63(5): 811-817.
- [12] Hinojosa M Belén a, Carreira José A a, Roberto García-Ruíza, et al. Soil moisture pre-treatment effects on enzyme activities as indicators of heavy metal-contaminated and reclaimed soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36(10): 1559-1568.
- [13] 龙新宪, 杨肖娥, 倪吾钟. 重金属污染土壤修复技术研究的现状与展望[J]. 应用生态学报, 2002, 13(6): 757-762.
LONG Xin-xian, YANG Xiao-e, NI Wu-zhong. Current situation and prospect on remediation of soils contaminated by heavy metals[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(6): 757-762.
- [14] 国家环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990: 93-256.
China National Environmental Monitoring Center. The background concentrations of soil elements in China[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990: 93-256.
- [15] 国家环境保护局. HJ/T 16—2004 土壤环境监测技术规范[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2004.
National Environmental Protection Bureau of China. HJ/T 16—2004 The technical specification for environmental monitoring[S]. Beijing: Environmental Sciences Press of China, 2004.
- [16] 国家环境保护局. 土壤环境质量标准 (GB15618—1995)[S]. 北京: 中国标准出版社, 1995.
National Environmental Protection Bureau of China. Environmental quality standard for soils GB15618—1995[S]. Beijing: Standards Press of China, 1995.
- [17] 赖木收, 杨忠芳, 王洪翠, 等. 太原盆地农田区大气降尘对土壤重金属元素积累的影响及其来源探讨[J]. 地质通报, 2008, 27(2): 240-245.
LAI Mu-shou, YANG Zhong-fang, WANG Hong-cui, et al. Effects of atmospheric fallouts on heavy metal elements accumulation in soils in farm land areas in the Taiyuan basin, China and sources of fallouts[J]. *Geological Bulletin of China*, 2008, 27(2): 240-245.
- [18] 崔德杰, 张玉龙. 土壤重金属污染现状与修复技术研究进展[J]. 土壤通报, 2004, 35(3): 366-370.
CUI De-jie, ZHANG Yu-long. Current situation of soil contamination by heavy metals and research advances on the remediation techniques[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2004, 35(3): 366-370.