

# 基于内梅罗指数法的复垦村庄土壤重金属污染评价及空间分布

杨玉敏<sup>1</sup>, 师学义<sup>2</sup>, 张琛<sup>2</sup>

(1. 山西省国土资源调查规划院, 太原 030024; 2. 中国地质大学(北京) 土地科学技术学院, 北京 100083)

**摘要:**以复垦村庄——山西省泽州县西部压煤搬迁村庄为研究区, 采集和测定了村庄内 18 个样点中 Hg, As, Pb, Cd, Cr 的重金属含量, 并通过内梅罗指数法对重金属污染程度进行评价和空间分析。研究表明: 西部村中土壤的重金属综合污染程度达到了中度污染程度, 其中 Hg 元素污染程度最高; 0—20 cm 土壤中重金属污染程度要高于 20—40 cm 土壤; 研究区耕地处重金属污染程度较轻, 而土路处由于交通运输及人类活动从而导致重金属污染程度较高, 对于宅基地区域, 重金属污染程度较高区域都分布在修建年代不久的宅基地所在位置, 研究结果可为开展村庄复垦重金属治理提供一定借鉴。

**关键词:**复垦村庄; 重金属污染; 内梅罗指数法; 空间分析

中图分类号: X53

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2016)04-0338-06

## Spatial Distribution and Evaluation of Heavy Metal Pollution of Reclaiming Village Based on Nemerow Integrated Pollution Index Method

YANG Yumin<sup>1</sup>, SHI Xueyi<sup>2</sup>, ZHANG Chen<sup>2</sup>

(1. Academy of Land Resources in Survey & Plan of Shanxi Province, Taiyuan 030024, China;

2. College of Land Science and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Selecting Xigao village in Zezhou County of Shanxi Province as the research area, we collected 18 soil samples in the village, determined heavy metal content, and carried out the evaluation of heavy metal pollution based on Nemerow integrated pollution index method and spatial analysis of heavy metal distribution. The results demonstrated as follows. The integrated soil heavy metal pollution of Xigao village was at the moderate risk level, the integrated pollution level of soil in 0—20 cm layer was higher than that in the 20—40 cm layer, the heavy metal pollution in arable land area was slight, while it was high in the road area because of transportation and human interventions, in addition, for the residential area, the area where level of heavy metal pollution was high, and located in the newly construction area. The results could provide some references for controlling heavy metal pollution in the reclamation work of the village.

**Keywords:** reclaiming village; heavy metal pollution; Nemerow integrated pollution index method; spatial analysis

我国黄土高原区煤炭基地作为重要的能源基地, 为促进区域经济的发展与城市化的进程起着巨大的推动作用。与此同时, 大规模的煤炭开采也带来了许多土地塌陷、地下水枯竭等生态环境问题, 导致许多村庄土地被或即将被废弃。受到增减挂钩政策、地区生态文明建设的共同影响, 开展黄土区煤炭基地村庄的土地复垦成为补充耕地、改善土壤环境的有效手段。复垦后村庄土壤的理化性质对于复垦后耕地的生产能力具有重要影响, 而土壤重金属含量超标导致

的重金属污染具有潜伏性、长期性和不可逆性<sup>[1]</sup>, 且重金属通过食物链的生物作用, 容易被吸收与富集, 从而对身体健康造成威胁与影响<sup>[2-4]</sup>。因此对复垦村庄的土壤重金属含量及空间分布情况进行评价与研究对指导复垦后重金属污染治理具有重要的意义。

目前, 对于土壤重金属评价的研究, 有大量的学者进行了大量的探讨。针对城市的重金属污染问题, Gale 等人在以美国密苏里州为研究区域, 探讨了城市中铅冶炼厂生产导致的重金属污染对周围的土壤以及

植物的影响,李科等以太原市为研究区,对城市中的主要的7种重金属含量及分布进行评价,结果表明,太原市土壤重金属污染主要来源于工业区的废物排放<sup>[5]</sup>。在农田方面,有学者从农田中重金属污染程度、重金属元素在土壤中的形态和空间分布规律以及对于土壤中污染的修复等进行了很多的探讨<sup>[6-7]</sup>;在矿区重金属的研究方面,王珍等以安徽省淮南市大通煤矿为例,探讨了不同重填模式下不同位置的土壤重金属含量,得出研究区不同区域污染程度不一<sup>[8]</sup>。所采用的研究方法上,常用的方法有单因子指数法,潜在生态危害指数法<sup>[9]</sup>,内梅罗指数法<sup>[10]</sup>,地质累积指数法<sup>[11]</sup>,物元分析法<sup>[12]</sup>,集对分析与三角模糊数耦合模型<sup>[13]</sup>。可以看出,目前针对复垦村庄土壤重金属空间分布及评价研究较少,需要进一步展开研究。

本文选取山西省泽州县西部村为研究区域,基于内梅罗指数法,对复垦村庄土壤中的重金属含量进行评价,旨在综合全面地反映出土壤中重金属污染空间分布差异规律及综合污染程度,为提升复垦后耕地质量以及对重金属污染进行治理提供科学依据。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 研究区概况

山西省晋城市西部村地处泽州县巴公镇,距离泽州城北25 km,位于东经112°50′55″—112°53′03″,北纬35°39′20″—35°41′09″,处于山西煤炭运销集团永丰煤业有限公司开采区范围内。西部村总体地势呈东西北高,中部、南部较低,属暖温带大陆性季风气候区。土壤类型主要为褐土,土层较为深厚,土壤质地偏粘并且土壤熟化度高。村内的交通条件良好,土地总面积为35.706 2 hm<sup>2</sup>。但村庄分布分散,且压占了大量的煤炭资源,对该村庄进行搬迁复垦具有重要意义。

### 1.2 土壤样品采集

结合研究区实际情况,选取汞、砷、铅、镉和铬五种重金属元素作为评价指标。采样点的布设采用网格法,按照每2 hm<sup>2</sup>布设一个样点的原则,共设立了18个采样点覆盖村庄的全部。并且每个采样点按照0—20 cm和20—40 cm两种深度分层进行采样。

### 1.3 土壤样品测定

将采样后的土样混合,通过风干、去杂、过筛后用玛瑙研钵磨成粉末,再进行重金属元素的测定。对于As的测定,采用的是二乙基二硫代氨基甲酸银分光光度法,利用冷原子吸收分光光度法对Hg元素进行测定,通过火焰原子吸收分光光度法测定Cr,利用KI-MIBK法对Pb和Cd的含量进行测定。测试的土壤各样点重金属含量水平具体见表1。

## 1.4 评价标准与方法

1.4.1 评价标准 在以往重金属评价的研究中,研究区土壤背景值或者国家土壤环境质量二级标准均可以作为评价标准。在本研究中,西部村大部分土地将被复垦利用为耕地,因此对土地的质量要求较高。另外,不同类型的土壤中某一种元素的背景值可能存在很大的差异,因此,在选择评价标准时,应该选择同一地区同一或者相近类型的土壤中元素的平均含量作为评价标准。因此,本次研究选择西部村所在地的山西省土壤背景值<sup>[14]</sup>作为评价标准。

1.4.2 评价方法 本次研究采用内梅罗综合指数法对复垦村庄土壤重金属进行评价,内梅罗指数法可以综合地反映出不同污染物在土壤中的污染程度,并可以计算得到各单个污染物的污染指数,适合对土壤重金属这类联合污染进行综合评价。具体的计算公式如下:

$$P_i = C_i/S_i \quad (1)$$

$$P_N = [(P_{\text{aver}}^2 + P_{\text{max}}^2)/2]^{0.5} \quad (2)$$

式中: $P_i$ 表示表示土壤重金属元素*i*的单因子污染指数; $C_i$ 表示元素*i*的实测值mg/kg; $S_i$ 表示为元素*i*计算时的评价标准值; $P_N$ 表示重金属的综合污染指数; $P_{\text{aver}}$ 表示所有重金属污染指数的平均值; $P_{\text{max}}$ 则表示所有重金属污染指数的中最大值。当 $P_N < 0.7$ 时,显示污染等级为清洁;当 $0.7 \leq P_N < 1$ 时,显示污染等级为警戒;当 $1 \leq P_N < 2$ 时,显示污染等级为轻度污染;当 $2 \leq P_N < 3$ 时,显示污染等级为中度污染;当 $3 \leq P_N$ 时,显示污染等级为重度污染<sup>[15-16]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 复垦村庄土壤重金属含量统计性描述

本研究分别对西部村不同采样深度复垦土壤中5种重金属元素的含量通过SPSS软件进行统计分析,具体的统计性描述结果见表2。

从表2的结果显示来看,在0—20 cm土层中,5种重金属的测定值范围分别为:铬39.09~58.73 mg/kg;镉0.03~0.22 mg/kg;砷13.50~15.82 mg/kg;汞0.04~0.19 mg/kg;铅28.45~48.45 mg/kg;变异系数从大到小依次为:镉>汞>铅>铬>砷。20—40 cm土层中,5种重金属的测定值范围分别为:铬32.96~56.03 mg/kg;镉0.02~0.29 mg/kg;砷13.51~15.70 mg/kg;汞0.04~0.18 mg/kg;铅26.99~47.53 mg/kg;变异系数从大到小依次为:镉>汞>铅>铬>砷。此外可以看出在这两层土壤中,汞和铬的偏度系数和峰度系数都较大,表明此次试验测得的这两种重金属含量可能存在一定的异常值,其余重金属元素的含量基本符合正态分布。

表 1 不同样点土壤重金属浓度

编号	土地类型	采样深度/cm	重金属元素质量分数/(mg·kg <sup>-1</sup> )				
			Hg	As	Pb	Cd	Cr
1 号	耕地	0—20	0.04	15.82	32.54	0.03	45.10
		20—40	0.05	13.51	31.80	0.06	44.11
2 号	耕地	0—20	0.08	15.14	44.98	0.11	58.73
		20—40	0.04	13.91	31.40	0.05	35.35
3 号	土路	0—20	0.12	14.51	36.62	0.06	40.08
		20—40	0.06	14.61	38.45	0.06	39.86
4 号	土路	0—20	0.15	14.51	46.75	0.12	45.03
		20—40	0.05	14.41	37.06	0.12	42.14
5 号	土路	0—20	0.05	15.64	32.04	0.10	39.09
		20—40	0.04	14.98	36.25	0.07	48.41
6 号	土路	0—20	0.06	13.84	48.45	0.11	53.25
		20—40	0.08	15.29	36.30	0.08	46.47
7 号	宅基地	0—20	0.09	14.64	34.31	0.08	46.09
		20—40	0.11	14.87	35.93	0.07	45.56
8 号	宅基地	0—20	0.17	15.14	48.33	0.17	50.51
		20—40	0.09	13.98	35.93	0.11	45.02
9 号	宅基地	0—20	0.11	15.32	28.94	0.08	48.64
		20—40	0.07	14.78	39.64	0.06	47.98
10 号	宅基地	0—20	0.05	15.14	41.80	0.06	44.11
		20—40	0.08	14.41	46.75	0.10	53.25
11 号	宅基地	0—20	0.06	16.8	32.54	0.05	55.10
		20—40	0.05	15.7	30.87	0.13	41.62
12 号	宅基地	0—20	0.04	13.5	31.80	0.06	54.11
		20—40	0.04	13.8	31.93	0.09	43.90
13 号	宅基地	0—20	0.05	13.9	29.82	0.07	32.96
		20—40	0.07	15.1	44.98	0.21	58.73
14 号	宅基地	0—20	0.04	14.9	31.40	0.05	49.35
		20—40	0.05	13.9	29.82	0.07	32.96
15 号	宅基地	0—20	0.05	14.6	28.45	0.06	40.08
		20—40	0.04	15.4	26.99	0.02	40.39
16 号	宅基地	0—20	0.19	14.5	36.62	0.06	39.86
		20—40	0.05	14.2	27.52	0.10	43.28
17 号	宅基地	0—20	0.15	14.5	46.75	0.12	45.03
		20—40	0.18	13.8	47.53	0.03	39.55
18 号	宅基地	0—20	0.08	14.4	37.26	0.22	42.14
		20—40	0.04	14.1	33.27	0.29	45.72

表 2 复垦村庄土壤重金属含量的描述性统计特征

采样深度/cm	项目	Hg	As	Pb	Cd	Cr
0—20	平均值/(mg·kg <sup>-1</sup> )	0.09	14.78	38.03	0.10	47.50
	最大值/(mg·kg <sup>-1</sup> )	0.19	15.82	48.45	0.22	58.73
	最小值/(mg·kg <sup>-1</sup> )	0.04	13.50	28.45	0.03	39.09
	标准差	0.05	0.66	7.07	0.06	6.42
	变异系数(CV)	0.56	0.05	0.19	0.59	0.14
	峰度	—0.53	—0.53	—1.55	0.49	—0.95
	偏度	0.88	—0.13	0.28	1.07	0.42
	平均值/(mg·kg <sup>-1</sup> )	0.07	14.48	35.49	0.09	43.98
	最大值/(mg·kg <sup>-1</sup> )	0.18	15.70	47.53	0.29	56.03
	最小值/(mg·kg <sup>-1</sup> )	0.04	13.51	26.99	0.02	32.96
>20—40	标准差	0.04	0.63	5.81	0.06	5.61
	变异系数(CV)	0.54	0.04	0.16	0.65	0.13
	峰度	6.52	—0.90	0.07	9.00	0.66
	偏度	2.37	0.35	0.64	2.62	0.20

2.2 复垦村庄土壤重金属污染评价

土壤中各种重金属的污染系数以及综合污染程度,并对及结果进行统计分析,具体结果见表 3—5。

表 3 复垦土壤重金属的污染系数及综合污染程度

编号	采样 深度/cm	重金属单污染指数 $P_i$					综合污染 程度 $P_n$	综合污染 等级
		Hg	As	Pb	Cd	Cr		
1 号	0—20	1.74	1.74	2.31	0.29	0.82	1.90	轻度污染
	20—40	2.17	1.48	2.26	0.59	0.80	1.90	轻度污染
2 号	0—20	3.48	1.66	3.19	1.08	1.06	2.87	中度污染
	20—40	1.74	1.53	2.23	0.49	0.64	1.83	轻度污染
3 号	0—20	5.22	1.59	2.60	0.59	0.72	3.99	重度污染
	20—40	2.61	1.61	2.73	0.59	0.72	2.25	中度污染
4 号	0—20	6.52	1.59	3.32	1.18	0.81	4.99	重度污染
	20—40	2.17	1.58	2.63	1.18	0.76	2.20	中度污染
5 号	0—20	2.17	1.72	2.27	0.98	0.71	1.95	轻度污染
	20—40	1.74	1.65	2.57	0.69	0.88	2.11	中度污染
6 号	0—20	2.61	1.52	3.44	1.08	0.96	2.78	中度污染
	20—40	3.48	1.68	2.57	0.78	0.84	2.79	中度污染
7 号	0—20	3.91	1.61	2.43	0.78	0.83	3.08	重度污染
	20—40	4.78	1.63	2.55	0.69	0.82	3.69	重度污染
8 号	0—20	7.39	1.66	3.43	1.67	0.91	5.64	重度污染
	20—40	3.91	1.54	2.55	1.08	0.81	3.10	重度污染
9 号	0—20	4.78	1.68	2.05	0.78	0.88	3.68	重度污染
	20—40	3.04	1.62	2.81	0.59	0.87	2.50	中度污染
10 号	0—20	2.17	1.66	2.96	0.59	0.80	2.39	中度污染
	20—40	3.48	1.58	3.32	0.98	0.96	2.86	中度污染
11 号	0—20	2.61	1.85	2.31	0.49	1.00	2.18	中度污染
	20—40	2.17	1.73	2.19	1.27	0.75	1.93	轻度污染
12 号	0—20	1.74	1.48	2.26	0.59	0.98	1.88	轻度污染
	20—40	1.74	1.52	2.26	0.88	0.79	1.90	轻度污染
13 号	0—20	2.17	1.53	2.11	0.69	0.60	1.84	轻度污染
	20—40	3.04	1.66	3.19	2.06	1.06	2.74	中度污染
14 号	0—20	1.74	1.64	2.23	0.49	0.89	1.86	轻度污染
	20—40	2.17	1.53	2.11	0.69	0.60	1.84	轻度污染
15 号	0—20	2.17	1.60	2.02	0.59	0.72	1.84	轻度污染
	20—40	1.74	1.69	1.91	0.20	0.73	1.62	轻度污染
16 号	0—20	8.26	1.59	2.60	0.59	0.72	6.16	重度污染
	20—40	2.17	1.56	1.95	0.98	0.78	1.86	轻度污染
17 号	0—20	6.52	1.59	3.32	1.18	0.81	4.99	重度污染
	20—40	7.83	1.52	3.37	0.29	0.72	5.86	重度污染
18 号	0—20	3.48	1.58	2.64	2.16	0.76	2.88	中度污染
	20—40	1.74	1.55	2.36	2.84	0.83	2.40	中度污染

表 4 不同元素的综合污染程度					
重金属元素	Hg	As	Pb	Cd	Cr
污染程度范围	1.74~8.26	1.48~1.85	1.91~3.44	0.20~2.84	0.60~1.06
污染程度均值	3.35	1.61	2.58	0.91	0.82

表 5 不同深度下土壤重金属综合污染程度及评价等级			
采样 深度/cm	综合污染 程度范围	综合污染 程度均值	污染 等级
0—20	1.84~6.16	3.16	重度污染
20—40	1.62~5.86	2.52	中度污染

从表 3 的结果中可以看出,煤炭基地复垦村庄西部村中土壤的综合污染程度介于 1.62~6.16,平均值为 2.84,在总体上处于中度污染程度,其中有 13 个样本处于轻度污染等级,占样本总数的 36.11%,13 个样本处于中度污染等级,占样本总数的 36.11%,10 个样本达到了

重度污染等级,占样本总数的 27.78%。

从不同元素的污染情况角度来看,表 4 的结果显示出各个重金属因子污染指数范围,Hg 为 1.74~8.26,As 为 1.48~1.85,Pb 为 1.91~3.44,Cd 为 0.20~2.84,Cr 为 0.60~1.06;对于平均污染系数,Hg 为 3.35,As 为 1.61,Pb 为 2.58,Cd 为 0.91,Cr 为 0.82。从而可以得出,Hg 元素处于较高污染水平,为研究区主要污染物,而 Cd 与 Cr 元素相对污染程度较低。

从表 5 中可以看到,0—20 cm 土层中土壤的综合污染程度在 1.84~6.16,平均值为 3.16,在总体达到了重度污染等级;而 20—40 cm 土层土壤的综合污染程度在 1.62~5.86,平均值 2.52,属于中等污染等级。因此可以看出,从综合污染程度的范围以及平均值的角度来看,复垦村庄中 0—20 cm 土层的污染程度要高于 20—40 cm 土层,土壤的重金属污染程度随着土层深度的增加而增加。

2.3 复垦村庄土壤重金属污染空间分布分析

为了探寻复垦村庄土壤重金属污染的空间分布规律,分别将 0—20 cm 层次土壤与 20—40 cm 土壤的污染评价结果与西部村居民点建设历史情况相结合展开分析,以期探寻复垦村庄重金属空间分布差异规律,具体结果详见表 6。

表 6 西部村 0—20 cm,20—40 cm 土壤重金属综合污染程度空间分布

点位	综合污染等级 (0—20 cm)	综合污染等级 (20—40 cm)	所在地类
1	轻度污染	轻度污染	耕地
2	中度污染	轻度污染	耕地
3	重度污染	中度污染	土路
4	重度污染	中度污染	土路
5	轻度污染	中度污染	土路
6	中度污染	中度污染	土路
7	重度污染	重度污染	50—90 年代建筑宅基地
8	重度污染	重度污染	90 年代建筑宅基地
9	中度污染	中度污染	50—90 年代建筑宅基地
10	中度污染	中度污染	50—90 年代建筑宅基地
11	轻度污染	轻度污染	50—90 年代建筑宅基地
12	轻度污染	轻度污染	50 年代前建筑宅基地
13	中度污染	中度污染	50 年代前建筑宅基地
14	轻度污染	轻度污染	50 年代前建筑宅基地
15	轻度污染	轻度污染	90 年代建筑宅基地
16	轻度污染	轻度污染	50—90 年代建筑宅基地
17	重度污染	重度污染	90 年代建筑宅基地
18	中度污染	中度污染	50—90 年代建筑宅基地

结合表 6 进行分析,可以发现耕地所在区域内,即样点 1,样点 2,0—20 cm 和 20—40 cm 两种土层上的土壤重金属污染程度均较低,该样点处原土地

类型为耕地,经过长期的耕种与管理,所以该处土壤重金属污染程度较低。对于在村庄土路上所选择的样点 3,4,5,其所在处 0—20 cm 和 20—40 cm 的土壤中,重金属污染程度则相对较高,可能是由于道路上汽车轮胎磨损、汽车尾气排放等交通运输活动以及当地居民在行走时所乱扔的垃圾有很大关系。而对宅基地范围内所选择的样点分析来看,高值区主要分布在 1990 年以后所建造的宅基地区域内,而次高值区多分布在 1950—1990 年期间所建造的宅基地范围内,而 1950 年以前所建的宅基地区域内土壤重金属污染程度较低,这可能是因为西部村中 1950 年以前的房屋以及一小部分 1950—1990 年的房屋无人居住且离开采区较远,受人为因素影响较小以及采矿带来的粉尘等污染离这些区域距离较远,其所在地的土壤中重金属含量较低。而对于复垦村庄中 1950—1990 年的房屋绝大多数房屋以及 1990 年以后修建的房屋所在区域,由于该部分区域人口较多,日常生活中产生大量的如电池这种垃圾与生活废水,造成区域重金属富集,从而造成了土壤重金属污染程度较高。另外,这部分区域离采矿区距离较近,采矿中所产生的如煤矸石等各种固体废弃物以及工业废水,容易造成面源污染导致该部分区域累积了大量的重金属元素,从而引发重金属污染程度很高。

3 结论与讨论

本研究基于内梅罗指数法,以复垦村庄山西省西部村为例,选取 Pb,Hg,Cr,Cd,As 五种重金属元素作为评价指标,从村域尺度上全面地评价了村庄土壤重金属的污染状况,并在此基础上对研究区域内土壤污染程度空间分布规律进行了全面的分析。可以看出,西部村中土壤的重金属综合污染程度达到了中度污染,其中 Hg 元素污染程度最高,在进行村庄复垦时应该有针对性的进行治理,如利用超累积植物进行重金属元素提取<sup>[17]</sup>。此外,从复垦村庄重金属垂直方向分布来看,0—20 cm 的土壤重金属含量要高于 20—40 cm 土壤,表层土壤的重金属污染问题更为严重。另外从水平空间分布来看,研究区耕地处重金属污染程度较轻,而土路处由于交通运输及人类活动从而导致重金属污染程度较高。对于研究区宅基地区域,重金属污染程度较高区域都分布在修建年代不久的宅基地所在处,主要与这部分区域受人为生活及采矿活动干扰影响相对更大。

针对复垦村庄西部村土壤重金属污染,可采取物理化学、植物修复等方式进行修复。比如陈怀满,郑春等通过研究指出,使用固化剂石灰石可以提高土壤

中 PH 含量,使土壤中的 Hg, Cd 重金属离子形成氢氧化物或盐类沉淀<sup>[18]</sup>,郝汉舟、靳孟贵等人得出结论使用沸石作为修复材料,可以通过物理吸附作用将土壤中的 Pb, Cd 吸附到表面,从而达到修复的目的<sup>[19]</sup>。田吉林等通过研究大米草的抗汞性的强弱,发现大米草的抗汞性较强,可以有效的吸收有机汞元素<sup>[20]</sup>;同时,利用鼠类、蚯蚓等低等动物,也可以达到吸收重金属的效果;在复垦中可以利用此特性,可以在一定程度上达到降低土壤中的 Hg 污染程度的目的,以修复土壤<sup>[21]</sup>。对于复垦村庄中土壤重金属修复,应选用科学合适的方法,达到修复的目的。

内梅罗指数法被广泛应用于重金属污染评价中<sup>[22-24]</sup>。本文所采用的内梅罗指数法不仅全面的展示出了复垦村庄重金属综合污染程度,并且也能够有效地揭示单个重金属元素的污染程度。本研究所得的结果也与张琛等通过利用潜在生态危害指数法得到的结果与规律相一致<sup>[25]</sup>,证明利用内梅罗指数法进行复垦村庄重金属污染评价是可行有效的。

同时本研究也存在着不足与需要改进的地方。当中由于时间、采样点难度较大等限制,此次研究以网格法只布设了 18 个采样点,采样点数量偏少,由此可能会造成西部村土壤重金属综合污染程度的不完善,且难以有效的模拟出研究区土壤重金属空间分异规律。此外,本次研究以山西省土壤重金属背景值作为评价标准,不同研究区域的土壤质量状况和自然条件差异显著,因此在接下来的研究中应对研究区周围耕地的环境状况进行实际调查,选择未受污染的地块进行重金属含量测定,将其作为背景值,从而使评价结果更加科学准确。

#### 参考文献:

- [1] 王振中,张友梅,邓继福,等. 重金属在土壤生态系统中的富集及毒性效应[J]. 应用生态学报,2006,17(10): 1948-1952.
- [2] 孙贤斌,李玉成. 基于 GIS 的淮南煤矿废弃地土壤重金属污染生态风险评价[J]. 安全与环境学报,2015,15(2):348-352.
- [3] 许柏宁,王鹏,王建壹,等. 北京某环路两侧土壤重金属污染风险评价[J]. 环境化学,2014,33(12):2152-2161.
- [4] 高奇,师学义,李牧,等. 复垦村庄土壤重金属污染损失评价[J]. 水土保持学报,2014,28(2):204-209.
- [5] 李科,丁晴晴,傅珊. 太原市土壤重金属污染空间分布及评价[J]. 环境化学,2015,34(4):772-778.
- [6] 陈同斌,郑袁明,陈煌,等. 北京市不同土地利用类型的土壤砷含量的特征[J]. 地理研究,2005,24(2):229-235.
- [7] 陈玉东,王火焰,周健民,等. 黑龙江省海伦市农田土壤重金

属分布特征及污染评价[J]. 土壤,2012,44(4):613-620.

- [8] 王珍,王宁,李玉成,等. 煤矿塌陷区不同充填模式土壤特征及修复评价[J]. 水土保持通报,2014,34(5):170-175.
- [9] 李一蒙,马建华,刘德新,等. 开封城市土壤重金属污染及潜在生态风险评价[J]. 环境科学,2015,36(3):1037-1044.
- [10] 李其林,黄岫,重庆市近郊区蔬菜地土壤重金属含量变化及污染情况[J]. 土壤通报. 2002,33(3):158-160.
- [11] 韩平,王纪华,冯晓元,等. 北京顺义区土壤重金属污染生态风险评估研究[J]. 农业环境科学学报,2015,34(1):103-109.
- [12] 刘维明,王晓飞,魏萌萌,等. 基于物元分析法的农田土壤重金属污染评价[J]. 浙江农业学报,2015,27(2):249-253.
- [13] 葛康,汪明武,陈光怡. 基于集对分析与三角模糊数耦合的土壤重金属污染评价模型[J]. 土壤,2011,43(2):216-220.
- [14] 史崇文. 山西省土壤环境背景值[M]. 北京:农业出版社,1992.
- [15] 郭伟,赵仁鑫,张君,等. 内蒙古包头铁矿区土壤重金属污染特征及其评价[J]. 环境科学,2011,32(10):3099-3105.
- [16] 祝遵凌,崔利杰,王飒. 路基边坡土壤重金属污染特征及评价[J]. 水土保持研究,2012,19(6):127-130.
- [17] 刘小梅,吴启堂,李秉滔. 超富集植物治理重金属污染土壤研究进展[J]. 农业环境科学学报,2003,22(5):636-640.
- [18] 陈怀满,郑春荣,涂从,等. 中国土壤重金属污染现状与防治对策[J]. AMIO:人类环境杂志,1999,28(2):120-134,207.
- [19] 郝汉舟,陈同斌,靳孟贵,等. 重金属污染土壤稳定固化修复技术[J]. 应用生态学报,2011,22(3):816-824.
- [20] 田吉林,诸海焘,杨玉爱,等. 大米草对有机汞的耐性、吸收及转化[J]. 植物生理与分子生物学学报,2004,30(5):577-582.
- [21] 赵美微,塔莉,李萍. 土壤重金属污染及其预防、修复研究[J]. 环境科学,2007,32(6):70-72.
- [22] 张舒婷,李晓燕,陈朋. 城市不同功能区地表灰尘重金属时空动态变化[J]. 安全与环境学报,2015,15(2):307-312.
- [23] 李姗姗,曹广超,石平超,等. 青岛城区土壤重金属元素空间分布及其现状评价[J]. 生态与农村环境学报,2015(1):112-117.
- [24] 赵慧敏,高凌颜,刘敏超. 天沙河沉积物中重金属污染特征与生态风险评价[J]. 长江流域资源与环境,2013,22(3):337-342.
- [25] 张琛,师学义,马桦薇,等. 煤炭基地复垦村庄土壤重金属污染生态风险评价[J]. 水土保持研究,2014,21(5):277-284.