

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2018.0161

辛佳桢, 李明秋, 马守臣, 等. 南水北调中线工程焦作段滨河地带土壤重金属污染风险评价[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(6): 109-118. XIN J H, LI M Q, MA S C, et al. Risk assessment of heavy metal pollution in riverside soil of Jiaozuo segment in the Middle Route of South to North Water Transfer Project[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(6): 109-118. (in Chinese)

# 南水北调中线工程焦作段滨河地带 土壤重金属污染风险评价

辛佳桢<sup>1</sup>, 李明秋<sup>1</sup>, 马守臣<sup>1</sup>, 张雄坤<sup>1</sup>, 胡文智<sup>1</sup>, 孙 瑞<sup>2</sup>, 段佩玲<sup>2</sup>

(1. 河南理工大学 测绘与国土信息工程学院, 河南 焦作 454000; 2. 郑州铁路职业技术学院 药理学系, 郑州 450052)

**摘要:**以南水北调中线工程焦作段为研究区,通过野外调查和室内分析的方法,采集总干渠流经的农业区、市区、工矿区的滨河地带土壤样本,分别测定重金属 Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Hg、Pb 的质量分数,利用单因子污染指数法、Nemerow 内梅罗污染指数法和 Hakanson 综合潜在生态风险指数评价研究区的重金属污染状况及其潜在生态风险。结果表明,与《土壤环境质量标准》中的 0 级标准( $pH > 7.5$ )相比,主要重金属污染风险元素为 Cd。农业区、市区、工矿区的内梅罗污染指数分别为 37.56、36.65、37.98,且均处于重度污染水平。三个区段的综合潜在风险指数分别为 41.823 39、18.973 18、19.659 09,均具有很强的生态风险。综合分析表明,南水北调焦作段总干渠依次流经的农业区、市区、工矿区滨河地带均受到不同程度的土壤重金属污染,以工矿区污染最为严重,对干渠的水质安全造成极大威胁,该研究结果对南水北调焦作段水质安全防护及滨河地带土壤污染治理具有重要意义。

**关键词:** 南水北调工程; 中线工程; 滨河地带; 土壤污染; 风险评价

中图分类号: X825 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Risk assessment of heavy metal pollution in riverside soil of Jiaozuo segment in the Middle Route of South to North Water Transfer Project

XIN Jiahui<sup>1</sup>, LI Mingqiu<sup>1</sup>, MA Shouchen<sup>1</sup>, ZHANG Xiongkun<sup>1</sup>, HU Wenzhi<sup>1</sup>, SUN Rui<sup>2</sup>, DUAN Peiling<sup>2</sup>

(1. College of Surveying and Land Information Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;

2. Department of Pharmacy, Zhengzhou Railway Vocational & Technical College, Zhengzhou 450052, China)

**Abstract:** Taking Jiaozuo segment in the Middle Route of South to North Water Transfer Project as the study area, using field investigation and experimental analysis, we collected soil samples from the industrial and mining area, urban area, and agricultural area along the main canal, measured the content of heavy metals (Cr, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Hg, and Pb) in the soil and evaluated the condition of heavy metal pollution and its potential ecological risks using the single factor pollution index, Nemerow pollution index, and Hakanson comprehensive potential ecological risk index. The results showed that, according to the Grade 0 criteria of the Standard for Soil Quality ( $pH > 7.5$ ), the main heavy metal pollution risk element was Cd. The Nemerow pollution index of the agricultural area, urban area, and industrial mining area was 37.56, 36.65, and 37.98, respectively, all reaching severe pollution level. The comprehensive potential risk index of the three areas was 41.823 39, 18.973 18, and 19.659 09, respectively, all posing high ecologi

收稿日期: 2018-04-28 修回日期: 2018-07-07 网络出版时间: 2018-08-19

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20180816.1821.004.html>

基金项目: 河南省科技攻关项目(162102110169); 河南理工大学创新型科研团队资助(B2017-16); 河南省高校教师科技创新团队(18IRTSTHN008)

Funds: Henan Science and Technology Project (162102110169); Henan Polytechnic University Innovative Research Team Funding (B2017-16); University Teachers Science and Technology Innovation Team of Henan Province (18IRTSTHN008)

作者简介: 辛佳桢(1994), 女, 河南郑州人, 主要从事土地资源与信息技术方面研究。E-mail: xinjiahui05@163.com

通讯作者: 李明秋(1965), 男, 河南焦作人, 教授, 博士, 主要从事土地管理和土地经济研究。E-mail: mingqiuli@sohu.com

cal risks. The analysis results showed that the soil of the agricultural area, urban area, and industrial mining area along the main canal are all contaminated by heavy metals to different degrees. The industrial mining area has the most serious pollution, which posed a great threat to the water quality safety of the canal. The above results are of important significance to water quality protection and soil pollution control in the riverside area of Jiaozuo segment of the South to North Water Transfer Project.

**Key words:** South to North Water Transfer Project; Middle Route Project; riverside zone; soil pollution; risk assessment

为了解决我国北方水资源严重短缺的问题, 国家启动了南水北调重大基础战略性工程。国务院在落实科学发展观中明确提出将“南水北调水源地及沿线”作为水污染防治和国家用水安全的重要组成部分。但是在长距离输水过程中, 南水北调滨河地带的环境污染问题对水质安全造成重大威胁, 因此, 对南水北调输水工程周边区域实施环境污染监测并进行评价, 及时发现问题并解决问题, 对于保障南水北调一汪清水永续北上至关重要<sup>[1]</sup>。在众多污染因素中, 重金属是主要污染类型之一, 其中, 土壤承担着环境中大约 90% 的重金属污染物<sup>[2-3]</sup>。由于重金属不能被土壤微生物分解, 易于在土壤中积累, 破坏土壤的生态结构和功能, 从而影响植物的生长发育, 并通过食物链在动物、人体内富集, 严重危害生命健康<sup>[4-6]</sup>。

焦作市是南水北调中线工程总干渠唯一从中心城区穿越的城市。同时, 焦作市是以矿业而兴的城市, 煤炭开采历史悠久, 此外还有铁、铜、锌等矿产资源。在矿产资源的开发和利用过程中, 矿区废弃物如矿渣、煤矸石长期随意堆放, 极易对周围环境造成污染。众多研究表明, 矿区废弃物煤矸石中含有大量的重金属元素, 在长期堆放过程中极易经雨水及风力作用, 迁移至周边土壤、水体、大气中, 从而对区域环境造成重金属污染<sup>[7-9]</sup>。近年来, 河流重金属污染评价一直是国内外研究的热点, 关于南水北调的污染评价虽有一些研究, 但大多是针对河段底泥和水质的污染研究<sup>[10-11]</sup>, 还有对干渠两侧浅层地下水的污染评价<sup>[12-13]</sup>, 以及某河段滨河地带单个土地类型的污染研究<sup>[14]</sup>, 缺乏对南水北调滨河地带土壤污染的整体性研究, 南水北调作为国家重大的水利战略工程, 其滨河地带的土壤环境质量与南水北调的水质安全保障息息相关, 因此, 对其沿岸的土壤污染风险进行评价尤为重要。本研究以南水北调中线工程焦作段为研究对象, 将流经区域按照不同的土地利用类型分为农业区、市区、工矿区三个研究区段, 分别对三个研究区段土壤中的重金属元素 Pb、Cu、Zn、Cr、Cd、Hg、Ni 和 As 的含量进行测定, 并对重金属污染状况进行评价。评价结果对南水北调滨河地带土壤污染治理及水质安全防护

具有重要意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

焦作市位于河南省西北部, 太行山南麓, 地理坐标在  $113^{\circ}4' - 113^{\circ}26'E$ ,  $35^{\circ}10' - 35^{\circ}21'N$  之间。南水北调中线工程焦作段起始于焦作市温县北冷乡北张羌村, 向东北穿越焦作市城区, 止于焦作市修武县方庄镇丁村, 全长 84.15 km, 干渠由西到东依次经过农业区、市区和工矿区。本研究通过分析焦作市的区位特征、土地利用类型及污染源类型, 将南水北调工程穿过焦作市的区段分为农业区 ( $F_i$ )、市区 ( $C_i$ )、工矿区 ( $M_i$ ) 三个部分, 分别对其进行研究。

### 1.2 样品采集与测定

根据农业区、市区和工矿区的地形地貌特征、土地利用类型及植被类型, 以距离南水北调工程干渠两侧沿线 100 m 为缓冲区进行勘察布点, 分别对三个研究区进行取样, 用五点取样法采集 0~20 cm 表层土, 每个点位重复 3 次且分别检测取平均值, 其中市区和农业区各取 6 个点位, 工矿区取 5 个点位, 并用 GPS 记录采样点坐标 (图 1)。土样采集后置于室温下通风阴干, 用木棒压碎大的土块, 并去除岩石块、植物根等杂物。风干后充分研磨过 2 mm (20 目) 的尼龙筛, 混合均匀并放入自封袋密封保存, 记录样品号待测。

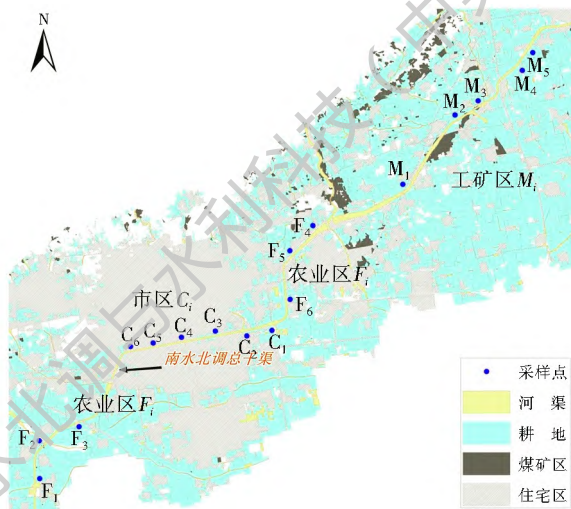


图 1 研究区采样点分布

Fig. 1 The locations of soil sampling points in the study area

取干燥后的土壤样品,经  $\text{HCl-HNO}_3\text{-HF-HClO}_4$  进行消化处理,用体积比为 1:1 的  $\text{HCl}$  水溶液溶解定容,采用火焰原子吸收分光光度法测定  $\text{Cr}$ 、 $\text{Ni}$ 、 $\text{Cu}$ 、 $\text{Zn}$  的含量;采用石墨炉原子吸收分光光度法测定  $\text{Cd}$ 、 $\text{Pb}$  的含量以及用原子荧光光度计测定  $\text{As}$ 、 $\text{Hg}$  的含量,测定过程中加入国家标准参比物质土壤样品(GB W08303)进行质量控制,各元素测定值的误差均在国家标准物质的允许范围内;土壤  $\text{PH}$  值按水土比 1:2.5 比例混合、搅拌、静置,  $\text{pH}$  计测定。

### 1.3 评价方法

本文采用单因子污染指数法和 Nemerow 内梅罗污染指数法进行土壤环境质量评价<sup>[15]</sup>,以 Harkanson 潜在生态风险指数法评价土壤重金属的潜在生态风险等级<sup>[16]</sup>。

单因子污染指数法,计算公式如下:

$$P_i = \frac{C_i}{S_i} \quad (1)$$

式中:  $P_i$  为重金属  $i$  的单项污染指数;  $C_i$  为重金属  $i$  的实测值;  $S_i$  为重金属  $i$  的评价标准,由国家《土壤环境质量标准》(GB 15618-2008)中的二级限量值( $\text{pH}$  值 > 7.5)(表 1)确定<sup>[17]</sup>。

表 1 重金属的二级标准、背景值和毒性系数

Tab. 1 Grade II criterion, background value, and toxic coefficient of different heavy metals

元素	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Hg	Pb
二级标准/ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	250	100	100	300	25	0.8	1.5	80
河南省土壤背景 值/( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	63.2	27.4	20	62.5	9.8	0.065	0.025	22.3
毒性系数 $T_i^j$	2	5	5	1	10	30	40	5

其评价标准见表 2。

表 2 单因子指数评价分级标准

Tab. 2 Grading standards of single factor index evaluation

污染指数 $P_i$	$\leq 1$	$1 < P_i \leq 2$	$2 < P_i \leq 3$	$> 3$
污染等级	未污染	轻度污染	中度污染	重度污染

内梅罗污染指数法,计算公式如下:

$$P_{\text{综}} = \sqrt{\frac{(C_i/S_i)_{\text{max}}^2 + (C_i/S_i)_{\text{av}}^2}{2}} \quad (2)$$

式中:  $P_{\text{综}}$  为当地的综合污染指数;  $(C_i/S_i)_{\text{max}}$  为土壤污染物中污染指数最大值;  $(C_i/S_i)_{\text{av}}$  为土壤污染物中污染指数平均值。其评价标准见表 3<sup>[18]</sup>。

潜在生态风险指数法,计算公式如下:

$$C_f^j = \frac{C_i}{C_n} \quad (3)$$

$$E_r^i = T_r^i \times C_f^j \quad (4)$$

$$RI = \sum_{i=1}^m E_r^i \quad (5)$$

式中:  $C_i$  为单项污染系数,为重金属  $i$  的实测值;  $C_n^i$  为重金属  $i$  的标准值,以河南省土壤背景值作为标准值(表 1);  $E_r^i$  为重金属  $i$  的单项潜在生态风险指数;  $T_r^i$  是重金属  $i$  的毒性系数(表 1);  $RI$  为多种元素综合潜在生态风险指数<sup>[8,9]</sup>。其评价标准见表 4<sup>[20]</sup>。

表 3 土壤重金属污染评价分级标准

Tab. 3 Grading standards of soil heavy-metal pollution evaluation

等级划分	综合污染指数	污染等级
1	$P_{\text{综}} \leq 0.7$	安全
2	$0.7 < P_{\text{综}} \leq 1$	警戒线
3	$1 < P_{\text{综}} \leq 2$	轻度污染
4	$2 < P_{\text{综}} \leq 3$	中度污染
5	$P_{\text{综}} > 3$	重度污染

表 4 潜在生态风险指数评价标准

Tab. 4 Evaluation standards of potential ecological risk index

风险等级	轻微 风险	中等 风险	较强 风险	很强 风险	极强烈 风险
$E_r^j$	$\leq 40$	$< 40 \sim 80$	$< 80 \sim 160$	$< 160 \sim 320$	$< 320$
$RI$	$\leq 150$	$< 150 \sim 300$	$< 300 \sim 600$	$< 600$	-

## 2 结果与分析

### 2.1 研究区土壤重金属污染元素分布特征

如表 5 所示,在农业区滨河地带土壤中  $\text{Cr}$ 、 $\text{Ni}$ 、 $\text{Cu}$ 、 $\text{Zn}$ 、 $\text{As}$ 、 $\text{Cd}$ 、 $\text{Hg}$ 、 $\text{Pb}$  八种元素的平均含量分别为 121.88、44.78、39.74、83.13、42.14、33.17  $\text{mg}/\text{kg}$ ,是河南省土壤背景值的 1.93、1.63、1.95、1.20、1.33、646.15、560.1.49 倍;市区滨河地带土壤中,除  $\text{Hg}$  未能检测出有效数据外,  $\text{Cr}$ 、 $\text{Ni}$ 、 $\text{Cu}$ 、 $\text{Zn}$ 、 $\text{As}$ 、 $\text{Cd}$ 、 $\text{Pb}$  七种元素的平均含量分别为 110.11、47.84、48.34、130.05、14.61、41.39、33  $\text{mg}/\text{kg}$ ,是河南省土壤背景值的 1.74、1.75、2.42、2.08、1.49、630.77、1.76 倍;工矿区滨河地带土壤中,除  $\text{Hg}$  未能检测出有效数据外,  $\text{Cr}$ 、 $\text{Ni}$ 、 $\text{Cu}$ 、 $\text{Zn}$ 、 $\text{As}$ 、 $\text{Cd}$ 、 $\text{Pb}$  七种元素的平均含量分别为 119.33、43.27、37.67、84.07、13.20、42.50、34.8  $\text{mg}/\text{kg}$ ,是河南省土壤背景值的 1.89、1.58、1.88、1.35、1.35、653.85、1.56 倍。

变异系数( $C_v$ )反映了总体样本中各采样点的平均变异程度,一般认为变异系数的大小反映了样品受人为影响的程度,变异系数越高说明受到人为活动的干扰作用越明显。 $C_v < 10\%$  代表弱变异,  $10\% < C_v < 30\%$  代表中等变异,  $C_v > 30\%$  代表高度

变异<sup>[21]</sup>。由对三个研究区的各重金属的变异系数计算可知, 农业区滨河土壤中 Cd、Cr、Hg 的变异系数分别为 50.53%、47.8%、37.27%, 属于高度变异, Zn、Ni、Pb 的变异系数分别为 13.6%、11.99%、10.04%, 属于中等变异; As、Cu 的变异系数分别为 13.6%、11.99%, 属于弱变异。市区滨河土壤中 Zn、Pb、Cd 的变异系数分别为 69.84%、50.56%、

37.27%, 属于高度变异; Cu、Cr、Ni 的变异系数分别为 29.10%、11.65%、10.14%, 属于中等变异; As 的变异系数为 6.90%, 属于弱变异。工矿区滨河土壤中 Cr、Cd 的变异系数分别为 49.59%、49.13%, 属于高度变异; Zn、As、Pb 的变异系数分别为 27.82%、14.08%、1.68%, 属于中等变异; Ni、Cu 的变异系数分别为 7.60%、9.92%, 属于弱变异。

表 5 不同土地类型土壤重金属含量

Tab. 5 Soil heavy metal content in different land types

采样区段	采样点	重金属含量 Heavy metal contents/(mg·kg <sup>-1</sup> )							
		Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Hg	Pb
农业区 F <sub>i</sub>	F <sub>1</sub>	ND	37.67	38.67	62.67	13.33	48	ND	31
	F <sub>2</sub>	128	50	33.33	62.33	11.33	40	ND	27.67
	F <sub>3</sub>	108	51.33	36.33	73	12	38	ND	32.33
	F <sub>4</sub>	ND	40	39.67	76.67	13	ND	14	38
	F <sub>5</sub>	113.5	41	45.33	85.33	15.33	ND	ND	34.33
	F <sub>6</sub>	138	48.67	40.67	89	13	ND	ND	35.67
	平均值	121.88	44.78	39.00	74.83	13.00	42.00	14.00	33.17
变异系数 C <sub>V</sub> (%)	47.80	11.99	9.52	13.60	9.59	50.53	37.27	10.04	
市区 C <sub>i</sub>	C <sub>1</sub>	110	52.67	39.67	75	15.33	ND	ND	21.67
	C <sub>2</sub>	106	48.67	36	77.33	13	ND	ND	26.67
	C <sub>3</sub>	110	47.67	41	76.33	14	41	ND	28
	C <sub>4</sub>	134.67	39.67	54.67	324	14	ND	ND	57.33
	C <sub>5</sub>	91	44.33	77	150.33	15.67	ND	ND	75.33
	C <sub>6</sub>	109	54	41.67	77.33	15.67	ND	ND	27
	平均值	110.11	47.84	48.34	130.05	14.61	41.00	0.00	39.33
变异系数 C <sub>V</sub> (%)	11.65	10.14	29.10	69.84	6.90	37.27	0.00	50.56	
工矿区 M <sub>i</sub>	M <sub>1</sub>	134	40.67	37.67	124	12.67	ND	ND	36.33
	M <sub>2</sub>	119	46.33	40	90.67	13.33	ND	ND	29.67
	M <sub>3</sub>	ND	47.67	43.33	84.33	16.67	ND	ND	41.67
	M <sub>4</sub>	ND	42.67	34	61.67	11.33	40	ND	34
	M <sub>5</sub>	105	39	33.33	59.67	12	45	ND	32.33
	平均值	119.33	43.27	37.67	84.07	13.20	42.50	0.00	34.80
变异系数 C <sub>V</sub> (%)	49.59	7.60	9.92	27.82	14.08	49.13	0.00	11.68	

注: ND 表示无有效数据

## 2.2 研究区土壤重金属污染评价

采用单因子污染指数法对研究区重金属污染状况进行评价, 评价结果见表 6, 在农业区滨河土壤中, F<sub>1</sub>、F<sub>2</sub>、F<sub>3</sub> 的 Cd 元素污染指数分别为 60、50、47.50, F<sub>1</sub> 的 Hg 元素污染指数为 9.33, 达到了严重污染水平, 其余 Cr、Ni、Cu、Zn、As、Pb 六种元素的污染指数均未达到污染标准, 处于未污染状态; 在市区滨河土壤中, C<sub>3</sub> 的 Cd 元素污染指数为 136.67, 达到重度污染水平; C<sub>4</sub> 的 Zn 元素污染指数为 1.08, 属于轻度污染, 其余 Hg、Cr、Ni、Cu、Zn、As、

Pb 七种元素的污染指数均未达到污染标准; 在工矿区滨河土壤中, M<sub>4</sub>、M<sub>5</sub> 的 Cd 元素污染指数分别为 50、56.25, 达到重度污染水平, 其余 Hg、Cr、Ni、Cu、Zn、As、Pb 七种元素的污染指数均未达到污染标准, 处于未污染状态。

综合污染指数反映了 8 种重金属元素在三个研究区的综合污染状况, 综合污染指数法不仅考虑了各种污染物的平均污染水平, 还能反映污染最严重的污染物给环境造成的危害<sup>[22]</sup>。采用内梅罗综合污染指数评价方法的评价结果如表 6 所示, 农业区

中  $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$ 、 $F_4$  的内梅罗污染指数分别为 43.05、35.75、33.96、6.73，均处于重度污染水平； $F_5$ 、 $F_6$  的内梅罗污染指数分别为 0.53、0.50，属于安全范围

表 6 不同区域土壤重金属污染指数

Tab. 6 Heavy metal pollution index of soil in different areas

采样区段	单因子污染指数 $P_i$									内梅罗污染指数 $P_{综}$
	元素	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Hg	Pb	
农业区 $F_i$	$F_1$	ND	0.38	0.39	0.21	0.53	60.00	ND	0.39	43.05
	污染等级	/	未污染	未污染	未污染	未污染	重度污染	/	未污染	重度污染
	$F_2$	0.51	0.50	0.33	0.21	0.45	50.00	ND	0.35	35.75
	污染等级	未污染	未污染	未污染	未污染	未污染	重度污染	/	未污染	重度污染
	$F_3$	0.43	0.51	0.36	0.24	0.48	47.50	ND	0.40	33.96
	污染等级	未污染	未污染	未污染	未污染	未污染	重度污染	/	未污染	重度污染
	$F_4$	ND	0.40	0.40	0.26	0.52	ND	9.33	0.48	6.73
	污染等级	/	未污染	未污染	未污染	未污染	/	重度污染	未污染	重度污染
	$F_5$	0.45	0.41	0.45	0.28	0.61	ND	ND	0.43	0.53
	污染等级	未污染	未污染	未污染	未污染	未污染	/	/	未污染	安全
	$F_6$	0.55	0.49	0.41	0.30	0.52	ND	ND	0.45	0.50
	污染等级	未污染	未污染	未污染	未污染	未污染	/	/	未污染	安全
平均值	0.49	0.45	0.39	0.25	0.52	52.50	9.33	0.41	37.56	
污染等级	未污染	未污染	未污染	未污染	未污染	重度污染	重度污染	未污染	重度污染	
市区 $C_i$	$C_1$	0.44	0.53	0.40	0.25	0.61	ND	ND	0.27	0.52
	污染等级	未污染	未污染	未污染	未污染	未污染	/	/	未污染	安全
	$C_2$	0.42	0.49	0.36	0.26	0.52	ND	ND	0.33	0.46
	污染等级	未污染	未污染	未污染	未污染	未污染	/	/	未污染	安全
	$C_3$	0.44	0.48	0.41	0.25	0.56	51.25	ND	0.35	36.64
	污染等级	未污染	未污染	未污染	未污染	未污染	重度污染	/	未污染	重度污染
	$C_4$	0.54	0.40	0.55	1.08	0.56	ND	ND	0.72	0.89
	污染等级	未污染	未污染	未污染	轻度污染	未污染	/	/	未污染	警戒线
$C_5$	0.36	0.44	0.77	0.50	0.63	ND	ND	0.94	0.79	
污染等级	未污染	未污染	未污染	未污染	未污染	/	/	未污染	警戒线	
$C_6$	0.44	0.54	0.42	0.26	0.63	ND	ND	0.34	0.54	
污染等级	未污染	未污染	未污染	未污染	未污染	/	/	未污染	安全	
平均值	0.44	0.48	0.48	0.43	0.58	51.25	ND	0.49	36.65	
污染等级	未污染	未污染	未污染	未污染	未污染	重度污染	/	未污染	重度污染	
工矿区 $M_i$	$M_1$	0.54	0.41	0.38	0.41	0.51	ND	ND	0.45	0.49
	污染等级	未污染	未污染	未污染	未污染	未污染	/	/	未污染	安全
	$M_2$	0.48	0.46	0.40	0.30	0.53	ND	ND	0.37	0.48
	污染等级	未污染	未污染	未污染	未污染	未污染	/	/	未污染	安全
	$M_3$	ND	0.48	0.43	0.28	0.67	ND	ND	0.52	0.58
	污染等级	/	未污染	未污染	未污染	未污染	/	/	未污染	安全
	$M_4$	ND	0.43	0.34	0.21	0.45	50.00	ND	0.43	35.88
	污染等级	/	未污染	未污染	未污染	未污染	重度污染	/	未污染	重度污染
$M_5$	0.42	0.39	0.33	0.20	0.48	56.25	ND	0.40	40.21	
污染等级	未污染	未污染	未污染	未污染	未污染	重度污染	/	未污染	重度污染	
平均值	0.48	0.43	0.38	0.28	0.53	53.13	ND	0.44	37.98	
污染等级	未污染	未污染	未污染	未污染	未污染	重度污染	/	未污染	重度污染	

注: ND 表示无有效数据。

0.46, 均处于安全范围内; C<sub>3</sub> 点内梅罗污染指数为 36.64, 属于重度污染; C<sub>4</sub> 和 C<sub>5</sub> 内梅罗污染指数分别为 0.89、0.79, 处于警戒线水平。工矿区中 M<sub>1</sub>、M<sub>2</sub>、M<sub>3</sub> 的内梅罗污染指数分别为 0.49、0.48、0.58, 均处于安全范围内; M<sub>4</sub>、M<sub>5</sub> 的内梅罗污染指数分别为 35.88、40.21, 属于严重污染。计算各点位的内梅罗污染指数得出, 滨河土壤重金属的内梅罗污染指数范围在 0.46~43.05 之间, 17 个点位中安全、警戒线、轻度污染、中度污染和重度污染所占比率分别为 47.05%、11.76%、0、0、41.18%, 大部分受污染点位处于警戒线或重度污染水平, 污染点的具体分布情况见图 2。综合三个研究区段的评价结果, 农业区、市区、工矿区三个研究区段滨河土壤的平均综合污染指数分别为 37.56、36.65、37.98, 污染程度依次为工矿区 > 农业区 > 市区, 均达到了重度污染水平。

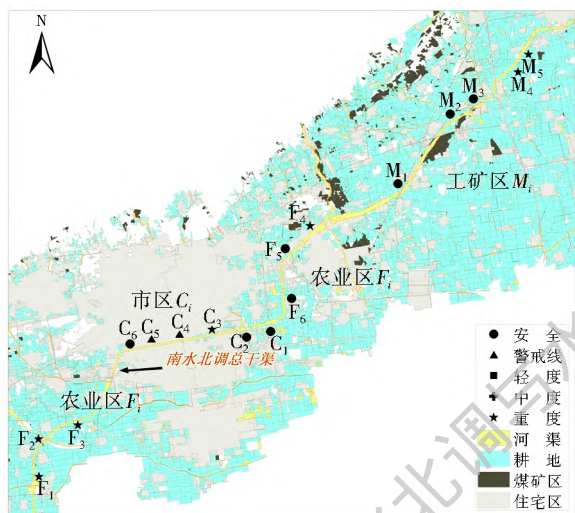


图 2 研究区污染等级分布

Fig. 2 The distribution of pollution levels in the study area

### 2.3 研究区土壤重金属生态风险评价

生态风险评价可以确定生态效应与风险污染源之间的关系, 从而判断有害物质对生态系统中的生物产生显著性危害的概率, 是对可能产生的负面生态效应进行评价的过程<sup>[21]</sup>。潜在生态风险指数法综合考虑了研究区域对重金属污染的敏感度和区域背景值的差异, 重金属元素的毒性以及在沉积物中普遍的迁移转化规律, 避免了异源污染和区域差异的影响<sup>[23]</sup>。

采用单项潜在生态风险指数评价的结果见表 7, 在农业区土壤中, F<sub>1</sub>、F<sub>2</sub>、F<sub>3</sub> 的 Cd 元素平均潜在风险指数分别为 22 153.85、18 461.54、17 538.46, F<sub>4</sub> 点位的 Hg 元素潜在风险指数高达 22 400, 处于极强烈风险水平, 其余元素的单项潜在生态风险指

数显示均处于轻微风险水平, 重金属潜在生态风险指数依次为 Hg > Cd > As > Pb > Cu > Ni > Cr > Zn; 在市区滨河土壤中, 仅有 C<sub>3</sub> 的 Cd 元素潜在风险指数为 18 923.08, 达到极强烈风险水平, 其余元素的单项污染风险指数均处于轻微风险水平, 重金属潜在生态风险指数依次为 Cd > As > Cu > Pb > Ni > Cr > Zn; 在工矿区滨河土壤中, M<sub>4</sub>、M<sub>5</sub> 点位 Cd 元素的潜在风险指数分别为 18 461.54、20 769.23, 达到极强烈风险水平, 其余元素的单项污染风险指数均处于轻微风险水平, 重金属潜在生态风险指数依次为 Cd > As > Cu > Ni > Pb > Cr > Zn。采用综合潜在风险指数评价的评价结果见表 7, 市区、工矿区、农业区的滨河地带污染风险等级逐渐加剧, 三类研究区域的平均综合潜在风险指数分别为 18 973.18、19 659.09、41 828.29, 均具有很强的生态风险。

### 3 讨论

在市区、农业区、工矿区的滨河土壤重金属污染元素中, Cd 元素为最严重的污染物, 其平均值 (42 mg/kg) 是二级标准 (0.8 mg/kg) 和河南省土壤背景值 (0.065 mg/kg) 的 52.5、646 倍, 考虑其 Cd 元素的毒性系数影响, 导致三个区段的土壤重度污染, 且加重了滨河地带潜在生态风险。工矿区污染点集中在中州铝厂与南水北调交汇处以及北孟村与白庄村之间, 该区段是焦作市工矿企业尤其是煤矿较为集中的区域。关于煤矿区土壤重金属污染已有许多研究, 从鑫等<sup>[24]</sup>对煤矸石山周边土壤分析表明, 土壤中 Pb、Cu、Cr 和 Ni 含量的平均值均高于土壤背景值; 马骅等<sup>[25]</sup>研究发现煤矸石周边土壤中 Cd、Pb 和 Zn 污染程度最严重; 马守臣等<sup>[26]</sup>对焦作矿区农田土壤研究发现, 矿井水浇灌农田土壤中 Zn 和 Cd 达到中度污染水平, 煤矸石污染农田土壤中 Zn、Cr 和 Cd 达到轻度污染水平。可见, 长期煤炭开采使矿区周围形成大量煤矸石堆, 以及矿井废水不合理排放使用都对矿区周边治理环境造成严重的污染。

农业区污染点大多集中在河流交汇处, 其主要原因是焦作市的河流大多为工矿企业的排污渠道, 工矿企业排放的含有超标重金属的污水经过排污河渠的途中渗入地下水, 再通过农业灌溉进入土壤, 导致农业区的土壤存在极高的重金属污染风险。于树宾等<sup>[14]</sup>通过对南水北调焦作段典型区浅层地下水污染研究发现, 研究区浅层地下水重金属污染严重。此外, 重金属元素是肥料中报道最多的污染物质, 其中品位较差的磷矿粉和过磷酸钙中含有微量的 Cd、As<sup>[27]</sup>。因此, 在农业区由于生产过程中大量使用化

肥农药也加重了农田土壤重金属污染。

长期“三废”排放,土壤重金属污染地段主要分布于

市区滨河土壤重金属污染主要来源工矿企业的 有建筑垃圾堆积物、生活垃圾污水排放处。由于焦

表7 不同区域土壤潜在生态风险指数

Tab.7 Potential ecological risk index of soil in different areas

采样区段	单项潜在风险指数 $E_i^r$									综合潜在 风险指数 $RI$
	元素	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Hg	Pb	
农业区 $F_i$	$F_1$	ND	6.87	9.67	1.00	13.61	22 153.85	ND	6.95	22 191.95
	风险等级	/	轻微	轻微	轻微	轻微	极强	/	轻微	很强
	$F_2$	4.05	9.12	8.33	1.00	11.56	18 461.54	ND	6.20	18 501.81
	风险等级	轻微	轻微	轻微	轻微	轻微	极强	/	轻微	很强
	$F_3$	3.42	9.37	9.08	1.17	12.24	17 538.46	ND	7.25	17 580.99
	风险等级	轻微	轻微	轻微	轻微	轻微	极强	/	轻微	很强
	$F_4$	ND	7.30	9.92	1.23	13.27	ND	22 400.00	8.52	22 440.23
	风险等级	/	轻微	轻微	轻微	轻微	/	极强	轻微	很强
	$F_5$	3.59	7.48	11.33	1.37	15.65	ND	ND	7.70	47.12
	风险等级	轻微	轻微	轻微	轻微	轻微	/	/	轻微	轻微
	$F_6$	4.37	8.88	10.17	1.42	13.27	ND	ND	8.00	46.10
	风险等级	轻微	轻微	轻微	轻微	轻微	/	/	轻微	轻微
均值	3.86	3.27	9.75	1.20	13.26	19 384.62	22 400.00	7.44	41 823.29	
风险等级	轻微	轻微	轻微	轻微	轻微	极强	极强	轻微	很强	
市区 $C_i$	$C_1$	3.48	9.61	9.92	1.20	15.65	ND	ND	4.86	44.71
	风险等级	轻微	轻微	轻微	轻微	轻微	/	/	轻微	轻微
	$C_2$	3.35	8.88	9.00	1.24	13.27	ND	ND	5.98	41.72
	风险等级	轻微	轻微	轻微	轻微	轻微	/	/	轻微	轻微
	$C_3$	3.48	8.70	10.25	1.22	14.29	18 923.08	ND	6.28	18 967.29
	风险等级	轻微	轻微	轻微	轻微	轻微	极强	/	轻微	很强
	$C_4$	4.26	7.24	13.67	5.18	14.29	ND	ND	12.86	57.49
风险等级	轻微	轻微	轻微	轻微	轻微	/	/	轻微	轻微	
$C_5$	2.88	8.09	19.25	2.41	15.99	ND	ND	16.89	65.50	
风险等级	轻微	轻微	轻微	轻微	轻微	/	/	轻微	轻微	
$C_6$	3.45	9.85	10.42	1.24	15.99	ND	ND	6.05	47.00	
风险等级	轻微	轻微	轻微	轻微	轻微	/	/	轻微	轻微	
均值	3.48	8.73	12.08	2.08	14.91	18 923.077	ND	8.82	18 973.18	
风险等级	轻微	轻微	轻微	轻微	轻微	极强	/	轻微	很强	
工矿区 $M_i$	$M_1$	4.24	7.42	9.42	1.98	12.93	ND	ND	8.15	44.13
	风险等级	轻微	轻微	轻微	轻微	轻微	/	/	轻微	轻微
	$M_2$	3.77	8.45	10.00	1.45	13.61	ND	ND	6.65	43.93
	风险等级	轻微	轻微	轻微	轻微	轻微	/	/	轻微	轻微
	$M_3$	ND	8.70	10.83	1.35	17.01	ND	ND	9.34	47.23
	风险等级	/	轻微	轻微	轻微	轻微	/	/	轻微	轻微
	$M_4$	ND	7.79	8.50	0.99	11.56	18 461.54	ND	7.62	18 498.00
风险等级	/	轻微	轻微	轻微	轻微	极强	/	轻微	很强	
$M_5$	3.32	7.12	8.33	0.95	12.24	20 769.23	ND	7.25	20 808.45	
风险等级	轻微	轻微	轻微	轻微	轻微	极强	/	轻微	很强	
均值	3.78	7.90	9.42	1.35	13.47	19 615.385	ND	7.80	19 659.09	
风险等级	轻微	轻微	轻微	轻微	轻微	极强	/	轻微	很强	

注: ND 表示无有效数据

作市干渠周边分布有火电厂、化工厂等企业,长期“三废”排放会对周围土壤造成环境污染。李艳利等<sup>[28]</sup>人对焦作市城区土壤中Cr、Cu、Cd、Pb共4种重金属的空间变异结构和分布格局进行了分析,结果表明Cr、Cd污染较为严重;另外,在南水北调施工过程中由于村庄拆迁,生活垃圾、建筑垃圾处置不科学或者未及时处理从而对滨河地段土壤造成一定程度的污染。郭彦海等<sup>[29]</sup>对生活垃圾焚烧厂周边表层土壤样品研究表明垃圾焚烧厂周边土壤处于中等生态风险水平,其中Cd贡献率高达79.63%;银燕春等<sup>[30]</sup>对成都市区、城郊和农村三区生活垃圾的重金属污染特性和来源研究发现Cd、Cu、Zn和Pb主要源于尘土和塑料和包装纸。

调查结果显示,虽然农业区中仅在F4点位中检测到Hg元素(9.33 mg/kg),但却是二级标准(1.5 mg/kg)和河南省土壤背景值(0.025 mg/kg)的6.22、373.2倍,导致Hg的单因子污染指数和单项潜在风险指数分别为9.33、22.400,属于重度污染并存在极强烈生态风险。市区滨河土壤中C<sub>4</sub>的Zn元素(324 mg/kg),是二级标准(300 mg/kg)和河南省土壤背景值(62.5 mg/kg)的1.08、5.18倍,属于轻度污染且处于轻微风险水平。由于其侧重点不同,重金属的污染程度和潜在生态风险结果往往存在差异,污染指数评价主要用于反映单个重金属元素和研究区的整体污染程度,而潜在生态风险评价引入了重金属元素的毒性响应系数,使其更侧重于毒理方面<sup>[31]</sup>。从评价结果来看,而Zn的毒性系数为1,则潜在生态风险较低。Hg的毒性系数为40,则潜在生态风险强烈,由于重金属Hg对人体危害十分严重,因此仍需予以重视。此外,市区中C<sub>4</sub>点位的Zn元素变异系数(69.84%)为三个研究区八种元素的最高值,虽然主要原因可能是受到研究区范围大小和采样点位置的影响,但众多研究较为一致认为Zn元素主要来源于土壤母质<sup>[31]</sup>,不会对土壤造成污染。

总之,本研究表明部分重金属已经对滨河地带土壤造成一定程度的污染风险,如果不及时采取措施,不仅对土壤环境、植被健康产生影响,也对南水北调的水质安全造成极大地威胁,从而影响到生态环境和人类健康。结合现场调查结果显示,在农业区的跨渠公路桥、工矿区企业与南水北调交汇处,以及南水北调与排污河流临近区域的土壤面临着较高的重金属潜在生态风险,对区域生态环境以及干渠水质带来安全隐患。因此,可以根据不同土地类型土壤的重金属含量与分布差异,对研究区开展土壤重金属污染分区治理,以降低滨河地带土壤重金属

污染对输水工程的污染风险。

## 4 结论

通过对南水北调滨河地带土壤进行调查采样,测定土壤中8种重金属元素的含量,对其进行重金属污染特征分析、综合污染评价、生态风险评估,得出以下结论。

(1)南水北调中线工程焦作段滨河地带土壤中主要重金属污染风险元素为Cd。在农业区段,重金属污染指数依次为Cd>Hg>As>Cr>Ni>Pb>Cu>Zn;在市区段,重金属污染指数依次为Cd>As>Pb>Ni=Cu>Cr>Zn;在工矿区段,重金属按污染指数依次为Cd>As>Cr>Pb>Ni>Cu>Zn。

(2)在农业区段,潜在生态风险指数依次为Hg>Cd>As>Pb>Cu>Ni>Cr>Zn;在市区段,潜在生态风险指数依次为Cd>As>Cu>Pb>Ni>Cr>Zn;在工矿区段,重金属潜在生态风险指数依次为Cd>As>Cu>Ni>Pb>Cr>Zn。

(3)综合三个研究区段的评价结果,污染程度依次为工矿区>农业区>市区,且均处于重度污染水平;潜在生态风险等级依次为农业区>工矿区>市区,且均具有很强的生态风险。

### 参考文献(References):

- [1] 刘远书,高文文,侯坤,等.南水北调中线水源区生态环境变化分析研究[J].长江流域资源与环境,2015,24(3):440-446. (LIU Y S, GAO W W, HOU K, et al. Analysis of ecological environment change on watershed of the middle route of south north water diversion project [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, 24(3): 440-446. (in Chinese)) DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201503013.
- [2] 潘攀,郝晓伟,雷鸣.土壤-植物体系中农药和重金属污染研究现状及展望[J].农业环境科学学报,2011,30(12):2389-2398. (PAN P, HAO X W, LEI M. Proceedings and prospects of pesticides and heavy metals contamination in Soil-Plant system [J]. Journal of Agro Environment Science, 2011, 30(12): 2389-2398. (in Chinese))
- [3] 顾继光,周启星,王新.土壤重金属污染的治理途径及其研究进展[J].应用基础与工程科学学报,2003,11(2):143-151. (GU J G, ZHOU Q X, WANG X. Reused path of heavy metal pollution in soils and its research advance [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2003, 11(2): 143-151. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1005-0930.2003.02.005.
- [4] 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. (XU B N, WANG P, WANG J Y, et al. Evaluation of heavy metal pollution in the soil sampled from a ring road in Beijing [J]. Environmental Chemistry, 2014, 33(12): 2152-2161. (in Chinese)) DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2014.12.016.



- [5] 柴世伟,温琰茂,张亚雷,等.广州市郊区农业土壤重金属污染评价分析[J].环境科学研究,2006,19(4):138-142.(CHAI S W, WEN Y M, ZHANG Y L, et al. Evaluation on the pollution of agricultural soil heavy metal in Guangzhou city[J]. Research of Environmental Sciences, 2006, 19(4): 138-142. (in Chinese) DOI: 10.3321/j.issn:100F6929.2006.04.027.
- [6] 王立硕,毕见霖,王馨慧,等.非常规水源补给城市河流表层沉积物重金属污染及风险评价[J].环境科学学报,2015,35(3):903-910.(WANG L S, BI J L, WANG X H, et al. Characteristics and ecological risk assessment of heavy metal pollution in unconventional supply urban river[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35(3): 903-910. (in Chinese) DOI: 10.13671/j. hjkxxb. 2014. 0822.
- [7] 张锂,韩国才,陈慧,等.黄土高原煤矿区煤矸石中重金属对土壤污染的研究[J].煤炭学报,2008,33(10):114F-1146.(ZHANG L, HAN G C, CHEN H, et al. Study on heavy metal contaminants in soil come from coal mining spoil in the Loess plateau[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(10): 114F-1146. (in Chinese) DOI: 10.3321/j.issn:0253-9993.2008.10.013.
- [8] ANGELAKISA A, BONTOU XC B. Waste water reclamation and reuse in Europe countries[J]. Water Policy, 2001(3):47-59. DOI: 10.1016/S1366-7017(00)00028-3.
- [9] CHENG J L, SHI Z, ZHU Y W. Assessment and mapping of environmental quality in agricultural soils of Zhejiang Province, China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2007(19):50-54. DOI: 10.1016/S100F0742(07)60008-4.
- [10] 谭炳卿,杨智,沈哲松,等.南水北调东线工程底泥污染物对水质的影响评价[J].环境科学研究,2003(4):1-4.(TAN B Q, YANG Z, SHEN Z S, et al. Impact assessment of pollutants in sediments on the water quality for East Route Project of South to North Water Transfer[J]. Research of Environmental Sciences, 2003(4): 1-4. (in Chinese) DOI: 10.3321/j.issn:100F6929.2003.04.001.
- [11] 王立明,林超,刘德文.南水北调东线一期工程黄河以北段底泥重金属污染及其潜在生态危害评价[J].南水北调与水利科技,2008(3):5-8.(WANG L M, LIN C, LIU D W. Pollution and potential EcR Risk assessment of heavy metals in Sediment of Northward of Yellow River in the Eastern Route of South to North Water Transfer Project[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2008(3): 5-8. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1672-1683.2008.03.002.
- [12] 于树宾,马振民,张慧申.南水北调中线焦作典型区浅层地下水污染特征[J].济南大学学报(自然科学版),2012(1):91-95.(YU S B, MA Z M, ZHANG H S. Study on pollutant characteristic of groundwater pollution in Jiaozuo site of the Middle South to north Water Diversion Project[J]. Journal of University of Jinan(Science and Technology), 2012(1): 9F-95. (in Chinese) DOI: 10.7632/J. ISSN: 167F-3559.2012.01.020.
- [13] 高安虎,王明玉,王慧芳.南水北调中线总干渠焦作段两侧地下水六价铬污染风险研究[J].中国科学院大学学报,2013,30(6):763-769.(GAO A H, WANG M Y, WANG H F. Risk investigation of groundwater contamination of hexavalent chromium in Jiaozuo part of the Middle Route of South to North Water Transfer Project[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2013, 30(6): 763-769. ((in Chinese)) DOI: 10.7523/j.issn:2095-6134.2013.06.008.
- [14] 汪军,苗良,李书海,等.南水北调东线引水工程山东境内农田土壤重金属元素现状评价[J].山东农业大学学报(自然科学版),2004(1):59-64.(WANG J, MIAO L, LI S H, et al. The heavy metal elements present evaluate of field soil for Shandong province of eastern line project of Water Allocating from South to North[J]. Journal of Shandong Agricultural University(Natural Science Edition), 2004(1): 59-64. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1000-2324.2004.01.014.
- [15] HJ/T 166-2004, 土壤环境监测技术规范[S].(HJ/T 166-2004, The technical specification for soil environmental monitoring[S]. (in Chinese))
- [16] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sediment logical approach[J]. Water Res, 1980, 14(8):975-1001. DOI: 10.1016/0043-1354(80)90143-8.
- [17] 张怀志,冀宏杰,徐爱国,等.潍坊市菜地重金属调查与环境风险评价研究[J].生态环境学报,2017,26(12):2154-2160.(ZHANG H Z, JI H J, XU A G, et al. Investigation and environmental risk assessment of heavy metal elements in vegetable farmland of Weifang City[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2017, 26(12): 2154-2160. (in Chinese) DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2017.12.021.
- [18] 李静,俞天明,周洁,等.铅锌矿区及周边土壤镉、锌、铜的污染健康风险评价[J].环境科学,2008,29(8):2327-2330.(LI J, YU T M, ZHOU J, et al. Assessment of health risk for mined soils based on critical thresholds for Lead, Zinc, Cadmium and Copper[J]. Environmental Science, 2008, 29(8): 2327-2330. (in Chinese) DOI: 10.13227/j. hjkx. 2008.08.043.
- [19] XU Z Q, NI S J, TUO X G, et al. Calculation of heavy metals' toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index[J]. Environmental Science & Technology, 2008, 31(2): 112-115. DOI: 10.19672/j.cnki.1003-6504.2008.02.030.
- [20] 雷鸣,曾敏,郑袁明,等.湖南采矿区和冶炼区水稻土重金属污染及其潜在风险[J].环境科学学报,2008,28(6):1212-1220.(LEI M, ZENG M, ZHENG Y M, et al. Heavy metals pollution and potential ecological risk in paddy soils around mine areas and smelting areas in Hunan province[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2008, 28(6): 1212-1220. (in Chinese) DOI: 10.13671/j. hjkx xb. 2008.06.028.
- [21] 罗成科,毕江涛,肖国举,等.宁东基地不同工业园区周边土壤重金属污染特征及其评价[J].生态环境学报,2017,26(7):122F-1227.(LUO C K, BI J T, XIAO G J, et al. Pollution characteristics and assessment of heavy metals in soil of different industry zones of Ningdong Base in Ningxia, China[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2017, 26(7): 122F-1227. (in Chinese) DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2017.07.019.
- [22] 毛小荃,倪晋仁.生态风险评价研究述评[J].北京大学学报(自然科学版),2005,41(4):646-654.(MAO X Q, NI J R. Recent Progress of Ecological Risk Assessment[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2005, 41(4): 646-654. (in Chinese) DOI: 10.3321/j.issn:0479-8023.2005.04.020.

- [23] 李如忠, 徐晶晶, 姜艳敏, 等. 铜陵市惠溪河滨岸带土壤重金属形态分布及风险评估[J]. 环境科学研究, 2013, 26(1): 88-96. (LI R Z, XU J J, JIANG Y M, et al. Fraction distribution and ecological risk assessment of soil heavy metals in the riparian zone of Huixi stream in Tongling City[J]. Research of Environmental Sciences, 2013, 26(1): 88-96. (in Chinese)) DOI: 10.13198/j.res.2013.01.92.lirzh.014.
- [24] 丛鑫, 张佰溪, 胡峰, 等. 矿业城市煤矸石山周边土壤重金属分布特征与影响因素研究[J]. 生态环境学报, 2017, 26(3): 479-485. (CONG X, ZHANG R X, HU F, et al. Distribution characteristics and influence factors of heavy metals in soils around coal waste piles nearby mining city[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2017, 26(3): 479-485. (in Chinese)) DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2017.03.017.
- [25] 马骅, 任明强, 赵宾. 露天煤矸石堆放对下游农田土壤重金属的污染分析[J]. 煤炭加工与综合利用, 2016(3): 74-79. (MA H, REN M Q, ZHAO B. Analysis of open pit coal gangue pollution of soil heavy metals in the downstream farmland[J]. Coal Processing & Comprehensive Utilization, 2016(3): 74-79. (in Chinese)) DOI: 10.16200/j.cnki.11-2627/td.2016.03.025.
- [26] 马守臣, 邵云, 杨金芳, 等. 矿粮复合区土壤-作物系统重金属污染风险性评价[J]. 生态环境学报, 2012, 21(5): 937-941. (MA S C, SHAO Y, YANG J F, et al. Risk assessment of heavy metal contamination in soil-plant system of the overlapped areas of crop and mineral production[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2012, 21(5): 937-941. (in Chinese)) DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2012.05.031.
- [27] WILLIAMS C, DAVID D. The effect of superphosphate on the cadmium content of soils and plants[J]. Aust J Soil Res, 1973, 11: 43-56. DOI: 10.1071/SR9730043.
- [28] 李艳利, 肖春燕, 王守全, 等. 焦作市城区土壤重金属空间变异特征及污染评价[J]. 水土保持通报, 2014, 34(3): 271-276. (LI Y L, XIAO C Y, WANG S Q, et al. Spatial Variability and Evaluation of Soil Heavy Metal Pollution in Jiaozuo City[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2014, 34(3): 271-276. (in Chinese)) DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2014.03.054.
- [29] 郭彦海, 孙许超, 张士兵, 等. 上海某生活垃圾焚烧厂周边土壤重金属污染特征、来源分析及潜在生态风险评价[J]. 环境科学, 2017, 38(12): 5262-5271. (GUO Y H, SUN X C, ZHANG S B, et al. Pollution Characteristics, Source Analysis and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soils Surrounding a Municipal Solid Waste Incineration Plant in Shanghai[J]. Environmental Science, 2017, 38(12): 5262-5271. (in Chinese)) DOI: 10.13227/j.hjck.201704113.
- [30] 银燕春, 王莉淋, 肖鸿, 等. 成都市区、城郊和农村生活垃圾重金属污染特性及来源[J]. 环境工程学报, 2015, 9(1): 392-400. (YIN Y C, WANG L L, XIAO H, et al. Characteristics and sources of heavy metal pollution in urban, suburban and rural domestic waste of Chengdu[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, 9(1): 392-400. (in Chinese)) DOI: 10.12030/j.cjee.20150165.
- [31] 刘芳, 塔西甫拉提·特依拜, 依力亚斯江·努尔麦麦提, 等. 准东露天煤田周边土壤重金属污染及潜在生态风险[J]. 生态环境学报, 2015, 24(8): 1388-1393. (LIU F, TASHPOLAT T, IL-YAS N, et al. Pollution and Potential Ecological Risk of Soil Heavy Metals Around the Coalfield of East Junggar Basin[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, 24(8): 1388-1393. (in Chinese)) DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2015.08.020.

(上接第 108 页)

- [20] 刘倩, 雷婷, 李明慧, 等. 基于 ISM 的工程项目投标决策影响因素分析[J]. 重庆建筑, 2015(2): 54-57. (LIU J, LEI T, LIM H, et al. Analysis of influencing factors of project bidding decision based on ISM[J]. Chongqing Building, 2015(2): 54-57. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1671-9107.2015.02.054.
- [21] 刘贵文, 杜惠妹, 但依然, 等. 基于 ISM 的城市更新项目风险因素关系研究[J]. 建筑经济, 2018(2): 89-95. (LIU G W, DU H S, DAN Y R, et al. Research on the relationship between the risk factors of urban renewal projects based on ISM[J]. Construction Economy, 2018(2): 89-95. (in Chinese)) DOI: 10.14181/j.cnki.1002-851x.201802089.
- [22] 周炜, 赵挺生, 徐树铭, 等. 基于 DEMATEL 和 ISM 的建筑工程工人安全行为影响因素建模[J]. 土木工程与管理学报, 2017(6): 126-132. (ZHOU W, ZHAO T S, XU S M, et al. Model of influence factors for worker safety behavior based on DEMATEL and ISM[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2017(6): 126-132. (in Chinese))
- [23] 孙艺榛, 郑军. 基于 ISM 模型的山东省农村生活环境污染影响因素分析[J]. 农业资源与环境学报, 2017, (6): 576-581. (SUN Y Z, ZHENG J. Analysis of influencing factors of rural living environment pollution in Shandong Province based on ISM model[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2017(6): 576-581. (in Chinese)) DOI: 10.13254/j.jare.2017.0182.
- [24] 王宏兵, 郑雪筠, 李海峰. 基于距离熵优化 HMM-ISM 的大型水电项目建设期风险评价模型研究[J]. 水力发电, 2017(10): 87-93, 98. (WANG H B, ZHENG X Y, LI H F. Research on risk assessment model for large scale hydropower project during construction period based on HMM-ISM optimized by distance entropy[J]. Water Power, 2017(10): 87-93, 98. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.0559-9342.2017.10.022.
- [25] 廖伟逸, 袁辉, 王凤山. 基于解释结构模型的公路隧道口部滑塌影响因素分析[J]. 安全与环境工程, 2017(6): 134-138. (LIAO W Y, YUAN H, WANG F S. Analysis on influencing factors of landslide at the highway tunnel entrance based on ISM[J]. Safety and Environmental Engineering, 2017(6): 134-138. (in Chinese)) DOI: 10.13578/j.cnki.issn.1671-1556.2017.06.022.