

梁雅雅, 易筱筠, 党志, 等. 某铅锌尾矿库周边农田土壤重金属污染状况及风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(1): 103–110.

LIANG Ya-ya, YI Xiao-yun, DANG Zhi, et al. Pollution and risk assessment of heavy metals in agricultural soils around a Pb-Zn tailing pond[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(1): 103–110.

某铅锌尾矿库周边农田土壤重金属污染状况及风险评价

梁雅雅¹, 易筱筠^{1,2*}, 党志^{1,2}, 王琴¹, 高双全¹, 唐婕¹, 张政芳¹

(1. 华南理工大学环境与能源学院, 广州 510006; 2. 工业聚集区污染控制与生态修复教育部重点实验室, 广州 510006)

摘要:为研究广东省某铅锌尾矿库周边农田土壤重金属污染状况及评价重金属污染对农田土壤的风险, 测试分析了土壤中重金属元素 Pb、Zn、Cu、Cr、Cd、Ni 和 As 的含量, 并采用内梅罗综合污染指数法、潜在生态危害指数法和模糊综合评价法 3 种评价方法对土壤重金属污染进行风险评价。结果表明, 稻田土壤中的重金属含量高于蔬菜地土壤, 部分土壤样品中的 Pb、Zn、Cu、Cd、Ni、As 含量已超过土壤环境质量标准二级标准值, Cr 含量均未超标, 重金属超标率顺序为: Cd>Zn>As>Pb>Ni>Cu。相关性分析表明农田土壤中各重金属含量之间都有极显著的相关性, 主成分分析表明 Pb、Zn、Cu、Cd、As 是当地农田土壤环境质量的主要影响因子。3 种评价方法的结果存在差异, 内梅罗综合污染指数法和模糊综合评价法的结果显示农田土壤重金属污染处于重度污染程度; 而潜在生态危害指数法评价结果表明土壤重金属污染处于中等潜在生态危害程度。根据分析和评价结果认为农田土壤受到多种重金属的复合污染, 其中 Cd 污染最严重, 重金属对农田存在某种程度的风险, 评价方法各有其侧重点, 人们在评价重金属污染土壤时要根据评价目的选择合适的评估方法。

关键词: 铅锌尾矿库; 农田土壤; 重金属污染; 内梅罗综合污染指数法; 潜在生态危害指数法; 模糊综合评价法

中图分类号: X825 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2019)01-0103-08 doi:10.11654/jaes.2018-0252

Pollution and risk assessment of heavy metals in agricultural soils around a Pb-Zn tailing pond

LIANG Ya-ya¹, YI Xiao-yun^{1,2*}, DANG Zhi^{1,2}, WANG Qin¹, GAO Shuang-quan¹, TANG Jie¹, ZHANG Zheng-fang¹

(1. School of Environment and Energy, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. The Key Lab of Pollution Control and Ecosystem Restoration in Industry Clusters, Ministry of Education, Guangzhou 510006, China)

Abstract: In order to study the heavy metal pollution of agricultural soils surrounding a Pb-Zn tailing pond in Guangdong Province and evaluate the risk of heavy metals to the agricultural soils, the contents of Pb, Zn, Cu, Cr, Cd, Ni, and As in the soils were analyzed. The risk of heavy metals to the agricultural soils was assessed via three methods: the Nemerow index method, potential ecological risk index method, and fuzzy comprehensive evaluation method. Results showed that the contents of heavy metals in paddy soils were higher than those in vegetable plantation soils. The contents of Pb, Zn, Cu, Cd, Ni, and As in some soil samples were higher than the criteria of environmental quality standards for agricultural soils, whereas the Cr contents were lower than the critical level. The exceeded rate decreased in the order of Cd>Zn>As>Pb>Ni>Cu. Correlation analysis showed that extremely significant correlations existed among heavy metal contents in the soils, and principal component analysis showed that Pb, Zn, Cu, Cd, and As were dominant factors of soil environmental quality in the study areas. Based on the three evaluation methods, we concluded that the results of the Nemerow index method and fuzzy comprehensive evaluation method showed that the soils were in the degree of heavy pollution, whereas the potential ecological risk index showed that the soils were classified as moderate potential ecological risk. According to the analysis of contents and risk assessment of heavy metals in contaminated soil, the farmland soil was contaminated by a variety of heavy metals, with Cd pollution the most serious. There was some degree of heavy metal risk to the farmland soil. Each evaluation method has its advantages. The appropriate method for evaluating heavy metal pollution of

收稿日期: 2018-02-27 录用日期: 2018-04-27

作者简介: 梁雅雅(1993—), 女, 河南商丘人, 硕士研究生, 从事重金属污染风险评价研究。E-mail: Liangyayalh@163.com

*通信作者: 易筱筠 E-mail: xyyi@scut.edu.cn

基金项目: 公益性行业科研专项基金(201509037)

Project supported: The Special Scientific Research Fund of Public Welfare Profession of China(201509037)

soil should be carefully chosen based on the evaluation purpose.

Keywords: Pb-Zn tailing pond; agricultural soil; heavy metal pollution; Nemerow index method; potential ecological risk index method; fuzzy comprehensive evaluation

随着我国对矿产品的需求日益增加,矿产资源的开发在推动我国经济发展的同时,也带来了比较严峻的环境问题。矿业开采的过程中形成了大量尾矿库,不仅占用了大量土地资源,也对矿山及周围环境造成了严重的生态破坏和环境污染^[1-3]。由于采矿废水和选矿废液的直接排放以及废石和尾矿等固体废弃物的堆放和淋滤,使矿区周围土壤富集大量的重金属。重金属可以从土壤中迁移到生态系统的其他组成部分,如地下水和农作物中,并通过食物链危害到人体健康^[4-6]。因此,有必要对尾矿库周围土壤的重金属污染程度进行评价。

目前土壤重金属污染评价方法很多,主要有单因子污染指数法、地累积指数法^[7]、污染负荷指数法、内梅罗综合污染指数法、潜在生态危害指数法、灰色关联分析法^[8]和结合模糊数学理论产生的模糊综合评价法等,其中,内梅罗综合污染指数法能够反映多种污染物对环境的作用,但是无法反映污染物对作物的毒害差异^[9];而潜在生态危害指数法则综合考虑了重金属的毒性、迁移转化规律和评价区域对重金属污染的敏感性,但无法反映重金属间毒性加权或拮抗作用^[10];模糊综合评价法能对呈现模糊性的资料作出比较科学、合理、贴近实际的量化评价,但不易操作,对指标权重的确定主观性较强^[11]。本文在调查和分析广东省某铅锌尾矿库周边土壤重金属含量的基础上,采用内梅罗综合污染指数法、潜在生态危害指数法和模糊综合评价法来评价重金属污染对研究区域农田土壤带来的风险,可以给该矿区的污染现状一个更全面的描述,并通过分析不同评价方法的侧重点,使人们根据评价目的的不同选择合适的方法,为重金属污染农田的安全利用和整治提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 样品的采集与分析

铅锌尾矿库位于广东省梅州市梅县丙村镇,尾矿库区为韩江流域的上游,水系呈树枝状分布,矿区东南方向有一条梅江,为常年流水的河流,除此之外都是小溪,主要供居民灌溉和饮用,库区下游250 m内有居民6户,有大面积农田。由于该尾矿库已经闭库多年,库区地表水来源主要为大气降水,小溪上游汇

聚的泉水,溪水常年有水流,雨季时水量会骤增,库区下游有滤水池,该尾矿库分别于2014年7月“苏力”台风强降雨期间和2015年5月除险整治施工期间堆积坝出现过两次局部范围垮塌,造成下游滤水池有大量尾砂淤积,库内积水经地表径流或排洪系统流向滤水池并流向下游小溪,小溪水主要用来灌溉库区下游农田土壤。下游农田土壤如果受到重金属污染,重金属可能会迁移到农作物中并通过食物链危害到居民的健康。因此对尾矿库下游农田土壤的重金属污染状况进行调查和分析显得尤为重要。

样品取自铅锌尾矿库下游农田,主要沿尾矿出水的受纳溪水进行农田土壤采集,共采集土样58个,包括29个稻田土壤和29个蔬菜地土壤,采样点分布图见图1。每个土样采用梅花点采样法将几个点位的土样混合成一个样,采集土样时,剔除土壤中大粒径石砾、杂草、植物根系等杂物,取0~20 cm表层土壤装入聚乙烯薄膜封口袋中做好标记带回实验室。将采集的土壤样品置于干燥通风处自然晾干,然后磨碎过100目筛,用于土壤中重金属元素总量的分析^[12]。土壤pH值测定时将水、土以体积比为2.5:1混合后用pHS-3C型酸度计测定^[13];土壤有机质(OM)采用重铬酸钾容量法-外加热法测定^[14]。土壤重金属全量采用HCl-HNO₃-HClO₄-HF混合酸消解法在石墨消解仪(DS-360)中消解^[12],消解过程中每个土样做3个平行样并加入空白样和国家标准物质(GBW07405)进行质量控制。消解后的样品采用ICP-OES(Agilent, Santa Clara, CA, USA)测定Pb、Zn、Cu、Cr、Cd、Ni和As的含量,部分样品中的Cd含量采用ICP-MS(Agilent, Santa Clara, CA, USA)检测。

数据统计采用统计软件SPSS 22.0进行相关性分析和主成分分析,相关性分析使用Person相关分析, $P < 0.05$ 为显著相关, $P < 0.01$ 为极显著相关。

1.2 评价标准与评价方法

1.2.1 评价标准

根据《土壤环境质量标准》(GB 15618—2018)中的分级和分类原则,农田土壤执行二级标准,并按照pH值范围和土壤采样地分别执行不同标准值^[15]。

1.2.2 评价方法

(1)单因子污染指数法和内梅罗综合污染指数法

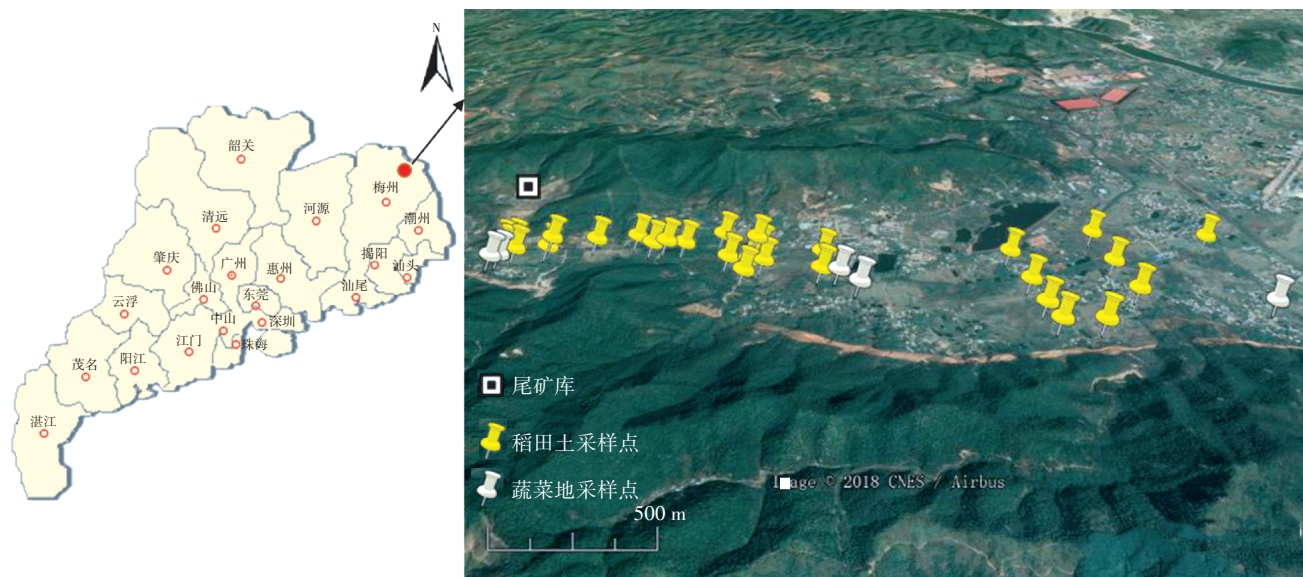


图1 研究区位置及采样点分布图

Figure 1 Position in the study area and the sampling point distribution

单因子污染指数法是以污染物的环境质量标准为基准的一种评价方法,该方法针对单一重金属污染因子进行评价,不能反映多个污染因子导致的整体污染水平^[16],该方法是其他评价方法的基础。单因子污染指数是污染物的实测浓度与其对应评价标准的比值。

当土壤同时被多种重金属污染时,需要将单因子污染指数按一定方法综合运用进行评价。内梅罗综合污染指数法就是将单因子污染指数的平均值和最大值归纳到一起进行综合污染评价的方法^[17-19]。内梅罗综合污染指数为 P_N ,表达式为:

$$P_N = \sqrt{\frac{(C_i/S_i)_{\max}^2 + (C_i/S_i)_{\text{ave}}^2}{2}}$$

式中: P_N 为土壤综合污染指数; $(C_i/S_i)_{\text{ave}}$ 为各污染物的指数平均值; $(C_i/S_i)_{\max}$ 为所有污染物的污染指数最大值。当 $P_N \leq 0.7$ 为非污染; $0.7 < P_N \leq 1$ 为警戒线; $1 < P_N \leq 2$ 为轻度污染; $2 < P_N \leq 3$ 为中度污染; $P_N > 3$ 为重度污染。

(2) 潜在生态危害指数法

潜在生态危害指数法是1980年瑞典科学家Hakanson从沉积学角度提出的评价重金属污染程度和潜在生态危害的一种方法^[20]。这种方法除了考虑重金属的含量之外,还将重金属的生态效应、环境效应和毒理学联系在了一起,采用具有可比的、等价指数分级法进行评价^[21]。土壤中重金属潜在生态危害指数为 RI ,表达式为:

$$RI = \sum E_i^p$$

$$E_i^p = T_i^p \times P_i$$

式中: RI 为潜在生态风险指数; E_i^p 为重金属元素 i 的潜在生态风险因子; P_i 为金属元素 i 的单因子污染指数; T_i^p 为重金属 i 的毒性响应系数,评价依据采用Hakanson制定的标准化重金属毒性系数,各重金属毒性系数分别为 $Zn=1$ 、 $Pb=Cu=Ni=5$ 、 $Cr=2$ 、 $Cd=30$ 、 $As=10$ 。当 $RI < 150$,表示低度的潜在生态风险; $150 \leq RI < 300$,表示中等程度的潜在生态风险; $300 \leq RI < 600$,表示重度的生态风险; $RI \geq 600$,表示严重的潜在生态风险。

(3) 模糊综合评价法

模糊综合评价法是将模糊理论和层次分析法相结合的一种评价方法,利用层次分析法确定评价指标的权重之后,再利用模糊数学的理论建立隶属度函数和模糊评价矩阵,经过一系列的矩阵运算就可以得出不同条件下系统的运行状况的等级和得分,最后经过分析比较得出最终评价结果。模糊综合评价法实际上是一个模糊变换,评价的步骤主要包括构建评价目标的因素集、建立评价集、确定隶属度函数、确定权重和模糊综合评价^[22-23]。

2 结果与讨论

2.1 土壤重金属含量特征

研究区域土壤pH值范围为4.7~7.5,其中31个点点位的样品 $pH < 6.5$,27个点点位的样品 pH 在6.5~7.5之间。土壤有机质含量范围为2.1%~8.7%,有机质含量均值为4.2%。所调查土壤中,稻田土壤的重金属元

素平均含量均高于蔬菜地土壤(表1)。与《土壤环境质量标准》(GB 15618—2018)Ⅱ级标准值比较,所有点位的Cr元素均未超标,Pb、Zn、Cu、Cd、Ni和As在土壤样品中都有一定程度的超标。对于pH<6.5的点位,Pb、Zn、Cu、Cd、Ni和As的点位超标率分别为25.8%、67.7%、19.4%、77.4%、16.1%和45.2%,对于pH在6.5~7.5之间的点位,Pb、Zn、Cu、Cd、Ni和As的点位超标率分别为11.1%、48.2%、11.1%、100%、11.1%和48.2%。稻田土壤中Pb、Zn、Cu、Cd、Ni和As的点位超标率分别为27.6%、89.7%、20.7%、100.0%、24.1%和82.8%,蔬菜地土壤相应的超标率分别为10.3%、27.6%、10.3%、75.9%、3.5%和10.3%。稻田土壤中各重金属的超标率比蔬菜地土壤的大。在所有土壤样品中各重金属点位超标率的顺序为: Cd>Zn>As>Pb>Cu>Ni>Cr,表明本研究区域土壤中存在不同程度的Pb、Zn、Cu、Cd、Ni、As累积现象。

变异系数的大小反映各样点重金属含量分布的差异大小,变异系数的大小与人类活动有关,变异系数 $CV \leq 10\%$,表示弱变异性; $10\% < CV < 100\%$,表示中等变异性; $CV \geq 100\%$,表示强变异性^[24]。由表1可知,稻田土壤中各重金属的变异系数在10%~100%之间,属于中等变异程度。蔬菜地土壤中除了Cu和Ni的变异系数在10%~100%内,属于中等变异程度之外,其他重金属含量的变异系数都大于100%,属于强变异程度。蔬菜地土壤的重金属含量变异系数大于稻田土壤,表明蔬菜地土壤受人为活动的影响更为显著。

2.2 土壤重金属元素相关性和主成分分析

重金属元素之间的相关性程度可以反映出重金

属的来源是否相同,它们之间存在相关性说明它们的来源可能相同,否则来源可能不同^[25]。利用SPSS对土壤重金属全量的相关分析表明(表2),7种重金属含量之间相关性都达到了极显著水平($P < 0.01$),说明这些重金属具有较好的同源性,由于铅锌尾矿库渗漏的水流入下游用来灌溉农田的小溪,猜测研究区域农田土壤中的这7种重金属可能来自于上游铅锌尾矿库。

主成分分析是将土壤中污染物重金属的信息进行集中和提取,从而确认重金属污染来源的一种方法^[26-27]。从表3可以看出,第1、2主成分的特征值占了总方差百分比的累计贡献率的88.433%。前两个主成分已经对7种元素所包含的大部分土壤重金属信息进行了概括。其中第一主成分因子包括Pb、Zn、Cu、Cd和As,第二主成分包括Cr和Ni。主成分分析的结果表明重金属Pb、Zn、Cu、Cd、As的输入对当地农田土壤环境质量的影响高于重金属Cr和Ni,是当地农田土壤环境质量的主要影响因子,与土壤中各重金属点位超标率顺序的结果(Cd>Zn>As>Pb>Cu>Ni>Cr)相佐证。

2.3 农田土壤重金属污染评价

采用下面几种方法分别对pH<6.5和6.5<pH<7.5的土壤重金属污染进行评价。

2.3.1 单项污染指数法和内梅罗综合污染指标法评价

从各重金属的单项污染指数平均值来看(表4),两个pH值范围土壤中的Pb、Cu、Cr和Ni的平均污染指数小于1,处于无污染级别,而Cd、Zn和As的污染指数平均值都大于1,Zn和As处于轻污染级别,Cd的污染程度达到了重污染级别,各重金属的单项污染指

表1 土壤中重金属含量
Table 1 Heavy metal contents in soils

土壤采样地	重金属	最小值/mg·kg ⁻¹	最大值/mg·kg ⁻¹	平均值/mg·kg ⁻¹	标准差/mg·kg ⁻¹	变异系数
稻田土壤	Pb	59.62	992.58	245.60	200.06	0.81
	Zn	70.36	1 362.18	491.05	319.68	0.65
	Cu	10.54	101.48	35.59	23.39	0.66
	Cr	29.66	97.74	59.78	19.38	0.32
	Cd	0.61	7.49	2.55	1.64	0.64
	Ni	3.12	135.39	37.12	29.67	0.80
	As	10.53	156.62	54.76	32.81	0.60
蔬菜地土壤	Pb	29.85	1 118.98	138.16	210.39	1.52
	Zn	45.89	2 847.48	321.77	547.59	1.70
	Cu	9.76	98.01	27.35	19.68	0.72
	Cr	12.34	77.33	30.55	17.14	1.83
	Cd	0.11	16.69	1.77	3.24	1.83
	Ni	3.47	55.59	11.74	10.88	0.93
	As	6.36	189.85	25.18	33.42	1.33

表2 土壤中重金属全量相关性分析
Table 2 Correlation coefficients of heavy metal contents in soil

元素	Pb	Zn	Cu	Cr	Cd	Ni	As
Pb	1						
Zn	0.854**	1					
Cu	0.774**	0.733**	1				
Cr	0.851**	0.711**	0.615**	1			
Cd	0.855**	0.938**	0.740**	0.720**	1		
Ni	0.837**	0.876**	0.604**	0.821**	0.797**	1	
As	0.823**	0.792**	0.715**	0.760**	0.852**	0.729**	1

表3 土壤中重金属主成分因子
Table 3 Principal component fator of heavy metal elements in soil

项目	主成分因子	
	1	2
Pb	0.946	-0.206
Zn	0.940	-0.215
Cu	0.895	-0.051
Cr	0.713	0.599
Cd	0.916	-0.309
Ni	0.744	0.521
As	0.940	-0.094
贡献率%	76.630	11.803
累积贡献率%	76.630	88.433

数平均值的大小为: Cd>Zn>As>Pb>Ni>Cu>Cr。内梅罗综合污染指数显示 pH<6.5 和 6.5<pH<7.5 的土壤均属于重度污染级别,研究区域土壤样点的总体内梅罗综合污染指数为 5.30,属于重度污染级别。经过计算研究区域各采样点的内梅罗综合污染指数,可以得出研究区域土壤样品中属于安全、轻度污染、中度污染和重度污染的比例分别为 12.07%、10.34%、20.69% 和 56.90%,各污染等级所占比例大小顺序为:重度污染>中度污染>安全>轻度污染,达到污染级别的土壤样点占 87.93%。

2.3.2 潜在生态危害指数法

运用潜在生态危害指数评价重金属污染程度,结

果见表 5。Pb、Zn、Cu、Cr、Ni 和 As 的潜在生态风险因子都小于 40,生态风险程度处于轻微级别,Cd 的生态风险程度为很强,可见 Cd 的污染最为明显。潜在生态危害指数法显示 pH<6.5 和 6.5<pH<7.5 的土壤均属于中度生态风险程度,研究区域所有样点的土壤重金属潜在生态危害指数为 252.70,属于中度生态风险程度。所采集土壤样品属于轻微、中等、强、很强和极强的生态风险程度的比例分别为 43.10%、32.76%、17.24%、5.17% 和 1.72%,各生态风险等级所占比例大小顺序为:轻微>中等>强>很强>极强。

2.3.3 模糊综合评价法

(1)评价因素集及评价集的确定

本研究中选取 Pb、Zn、Cu、Cr、Cd、Ni、As 7 种重金属作为评价因素集的评价因子,即因素集为 $U=\{Pb, Zn, Cu, Cr, Cd, Ni, As\}$ 。参考《土壤环境质量标准》(GB 15618—2018)及重金属污染的相关研究^[15,28-30],将土壤重金属污染等级划分为 5 个等级,即Ⅰ级(清洁),Ⅱ级(尚清洁),Ⅲ级(轻污染),Ⅳ级(中污染),Ⅴ级(重污染),研究区域土壤重金属污染的评价集为 $V=\{清洁, 尚清洁, 轻污染, 中污染, 重污染\}$,分级标准见表 6。

(2)隶属度函数的确定

通过研究区域土壤重金属浓度及隶属度函数的计算公式可以确定隶属度,从而分别建立 pH<6.5 和 6.5<pH<7.5 的土壤重金属元素污染程度模糊关系矩

表4 土壤中重金属单项污染指数及内梅罗综合污染指数
Table 4 Single pollution index and Nemerow index of heavy metal in soil

重金属	土壤 pH 范围	Pb	Zn	Cu	Cr	Cd	Ni	As
单项污染指数平均值	pH<6.5	0.74	1.82	0.65	0.23	5.78	0.68	1.22
	6.5<pH<7.5	0.67	1.82	0.30	0.17	8.83	0.45	1.55
内梅罗综合污染指数	pH<6.5				4.24			
	6.5<pH<7.5				6.40			
污染级别	pH<6.5				重度污染			
	6.5<pH<7.5				重度污染			

表5 土壤中重金属潜在生态危害指数
Table 5 Potential ecological risk index of heavy metal in soil

重金属	土壤pH范围	Pb	Zn	Cu	Cr	Cd	Ni	As
生态风险因子	pH<6.5	3.69	1.82	3.23	0.45	173.4	3.38	12.2
	6.5<pH<7.5	3.34	1.82	1.52	0.34	264.8	2.23	15.5
潜在生态危害指数	pH<6.5	198.18						
	6.5<pH<7.5	289.60						
污染级别	pH<6.5	中等						
	6.5<pH<7.5	中等						

表6 评价目标的评价集(mg·kg⁻¹)
Table 6 Evaluation set of evaluation objectives(mg·kg⁻¹)

等级	Pb	Zn	Cu	Cr	Cd	Ni	As	污染程度
I	35	100	35	90	0.2	40	15	清洁
II	250	200	50	250	0.3	45	20	尚清洁
III	300	250	100	300	0.4	50	25	轻污染
IV	350	300	200	350	0.6	60	30	中污染
V	500	500	400	400	1.0	200	40	重污染

阵R,分别为:

$$R = \begin{bmatrix} 0.3 & 0.7 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.68 & 0.32 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.18 & 0.82 \end{bmatrix}$$
和

$$R = \begin{bmatrix} 0.23 & 0.77 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.23 & 0.77 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(3)确定权重集

采用超标倍数法来确定权重,根据权重计算公式确定权重集A,对于pH<6.5的土壤,其权重集A={0.08,0.18,0.03,0.02,0.45,0.04,0.19};对于6.5<pH<7.5的土壤,其权重集A={0.07,0.17,0.02,0.01,0.54,0.03,0.16}。

(4)模糊综合评价

将A和R集合代入土壤污染程度综合评价集B=A×R中,得到模糊综合评价集B,对于pH<6.5的土壤,其评价集B={0.11,0.06,0,0.16,0.67};对于6.5<pH<7.5的土壤,其权重集B={0.07,0.05,0,0.04,0.83}。因此,对于pH<6.5和6.5<pH<7.5的土壤,其重污染的隶属度分别为0.67和0.83,根据最大隶属度原则可以判

断该区域土壤环境重金属污染均属于V级,即重度污染。

2.3.4 几种评价方法的比较

研究区域pH<6.5和6.5<pH<7.5的土壤重金属污染评价结果比较一致,对比内梅罗综合污染指数法、潜在生态危害指数法和模糊综合评价法的评价结果,单项污染指数显示Pb、Cu、Cr和Ni为无污染级别,Zn和As处于轻污染级别,Cd的污染最严重,为重污染级别。内梅罗综合污染指数法的评价结果显示,达到重金属污染水平的土壤样点占87.93%,综合评价结果认为,研究区域土壤中的重金属污染达到重度污染等级;潜在生态危害指数法评价结果显示,Cd的生态风险较为突出,属于极强生态风险等级,Pb、Zn、Cu、Cr、Ni、As的生态风险为轻微等级,研究区域土壤重金属污染属于中度生态风险等级;模糊综合评价法评价结果显示,研究区域土壤重金属污染等级为重度污染。就本研究来说,利用内梅罗指数法和模糊综合评价法来评价该铅锌尾矿库周围的农田土壤重金属污染,其结果要严重于采用潜在生态危害指数法的评价。

可见,3种方法评价的污染程度不同,分析原因,内梅罗综合污染指数法引入最大的单因子污染指数,突出了污染指数最大的污染物对环境的影响和贡献作用,这是造成内梅罗指数法评价结果比潜在生态危害指数法更严重的原因。其次,较低的毒性响应系数可能是潜在生态危害指数法评价等级低于内梅罗污

染指数法和模糊综合评价法的一个原因^[31]。从3种方法评价的结果可以判断研究区域农田受到多种重金属的复合污染,重金属对农田土壤存在某种程度的风险。3种评价方法各有其侧重点和合理性,潜在生态危害指数法考虑了重金属的毒性作用,侧重于评价重金属对环境的潜在风险^[32]。内梅罗指数法既可以反映单个元素的污染程度又可以评价多个元素对土壤的综合作用^[33]。模糊综合评价法可以客观地反映各污染因子共同作用下的土壤环境状况而不能评价单个元素的污染程度,当评价因子较多时模糊综合评价过程较繁琐^[34]。采用哪一种评价方法进行合理评价,需要根据评价目的的不同进行选择。

3 结论

(1)与《土壤环境质量标准》(GB 15618—2018)Ⅱ级标准值相比,铅锌尾矿库周围农田土壤中Pb、Zn、Cu、Cd、Ni、As含量有不同程度超标,Cr含量均未超标,重金属超标率顺序为: Cd>Zn>As>Pb>Cu>Ni>Cr。尾矿库周围农田土壤中的7种重金属含量之间均有极显著相关性,主成分分析结果表明农田土壤中的Pb、Zn、Cu、Cd、As是当地农田土壤环境质量的主要影响因子。

(2)内梅罗指数法、潜在生态危害指数法和模糊综合评价法的评价结果有所差异,3种方法各有侧重点及各具合理性,在对土壤重金属污染进行评价时,应根据评价目的选择合适的评价方法。评价土壤重金属对周边环境的潜在风险时可使用潜在生态危害指数法,评价多个元素对环境的综合作用时可采用内梅罗综合污染指数法和模糊综合评价法,但是当评价因子较多时模糊综合评价法的过程较为复杂,既想评价单个元素的风险又想评价多个元素的综合风险时可以选择内梅罗指数法。

(3)该铅锌尾矿库周边农田受到多种重金属的复合污染,其中Cd污染最严重,重金属对农田存在某种程度的风险,为避免重金属元素通过食物链进入人体,应该将农田土壤修复整治之后再发展农业。

参考文献:

- [1] 梁小丽. 浅谈尾矿库环境污染隐患及防治对策[J]. 环境科学导刊, 2011, 30(3): 71-73.
LIANG Xiao-li. Brief talk on environmental risk of tailings reservoir and countermeasures[J]. *Environmental Science Survey*, 2011, 30(3): 71-73.
- [2] 张淑会, 薛向欣, 刘 然, 等. 尾矿综合利用现状及展望[J]. 矿冶

- 工程, 2005, 25(3): 44-47.
ZHANG Shu-hui, XUE Xiang-xin, LIU Ran, et al. Current situation and prospect of the comprehensive utilization of mining tailings[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2005, 25(3): 44-47.
- [3] 吴德礼, 朱申红, 王 铮. 国内外矿山尾矿综合利用现状与思考[J]. 青岛建筑工程学院学报, 2001, 22(4): 84-87.
WU De-li, ZHU Shen-hong, WANG Zheng. Status quo and suggestions on comprehensively utilizing mining tailings at home and abroad [J]. *Journal of Qingdao Institute of Architecture and Engineering*, 2001, 22(4): 84-87.
- [4] 刘敬勇. 矿区土壤重金属污染及生态修复[J]. 中国矿业, 2006, 15(12): 66-69.
LIU Jing-yong. Heavy metal pollution and ecological remediation of soils in mining area[J]. *China Mining*, 2006, 15(12): 66-69.
- [5] 杨金浩. 铅锌尾矿库环境现状及综合治理对策[J]. 南方农机, 2015, 46(11): 78-80.
YANG Jin-hao. Environmental status and comprehensive control measures of Pb-Zn tailing pond[J]. *Southern Agricultural Machinery*, 2015, 46(11): 78-80.
- [6] Li Z, Ma Z, van der Kuip T J, et al. A review of soil heavy metal pollution from mines in China: Pollution and health risk assessment[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 468-469: 843-853.
- [7] 彭 景, 李泽琴, 侯家渝. 地积累指数法及生态危害指数评价法在土壤重金属污染中的应用及探讨[J]. 广东微量元素科学, 2007, 14(8): 13-17.
PENG Jing, LI Ze-qin, HOU Jia-yu. Application and discussion of geo-accumulation index and ecological risk index in soil heavy metal pollution[J]. *Guangdong Trace Elements Science*, 2007, 14(8): 13-17.
- [8] 祝培甜, 赵中秋, 陈 勇, 等. 江苏省某镇土壤重金属污染评价[J]. 环境工程学报, 2017, 11(4): 2535-2541.
ZHU Pei-tian, ZHAO Zhong-qiu, CHEN Yong, et al. Evaluation of soil heavy metals pollution in a town, Jiangsu Province[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2017, 11(4): 2535-2541.
- [9] 陆泗进, 何立环, 王业耀. 湖南省桂阳县某铅锌矿周边农田土壤重金属污染及生态风险评价[J]. 环境化学, 2015, 34(3): 591-592.
LU Si-jin, HE Li-huan, WANG Ye-yao. Pollution and ecological risk assessment of heavy metals in agricultural soil around a Pb-Zn tailing pond in Guiyang, Hunan Province[J]. *Environmental Chemistry*, 2015, 34(3): 591-592.
- [10] 刘 玥. 寺沟铅锌矿区土壤重金属污染评价研究[J]. 中国西部科技, 2008, 33(7): 22-23.
LIU Yue. Study on soil heavy metal pollution in Sigou coal mine area [J]. *Science and Technology of West China*, 2008, 33(7): 22-23.
- [11] 窦 磊, 周永章, 王旭日, 等. 针对土壤重金属污染评价的模糊数学模型的改进及应用[J]. 土壤通报, 2007, 38(1): 101-105.
DOU Lei, ZHOU Yong-zhang, WANG Xu-ri, et al. Improvement and application of a fuzzy mathematical model for assessment of heavy metal pollution in soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, 38(1): 101-105.
- [12] 中华人民共和国环境保护部. HJ/T 166—2004 土壤环境监测技术规范[S]. 北京: 中国环境出版社, 2004.
Ministry of Environmental Protection. HJ/T 166—2004 Technical specification for soil environmental monitoring[S]. Beijing: China Environmental Press, 2004.
- [13] Xiao R, Wang S, Li R H, et al. Soil heavy metal contamination and health risks associated with artisanal gold mining in Tongguan, Shaanxi, China[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2017,

- 141:17-24.
- [14] 中华人民共和国农业部. NY/T 1121.6—2006 土壤检测第6部分: 土壤有机质的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
Ministry of Agriculture of PRC. NY/T 1121.6—2006 Soil testing part 6: Method for determination of soil organic matter[S]. Beijing: China Standards Press, 2006.
- [15] 中华人民共和国环境保护部. GB 15618—2018 土壤环境质量标准[S]. 北京: 中国环境出版社, 2018.
Ministry of Environmental Protection. GB 15618—2018 Environmental quality standard for soils[S]. Beijing: China Environmental Press, 2018.
- [16] 施 择, 孙 鑫, 宁 平, 等. 云南新平铜尾矿库周边土壤重金属污染评价[J]. 矿冶, 2014, 23(4): 92-96.
SHI Ze, SUN Xin, NING Ping, et al. Assessment of heavy metals pollution in soil in copper tailing dam region of Xinping, Yunnan Province[J]. *Mining and Metallurgy*, 2014, 23(4): 92-96.
- [17] 邓 琴, 吴 迪, 秦樊鑫, 等. 铅锌矿区土壤重金属含量的调查与评价[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2010, 28(3): 34-37.
DENG Qin, WU Di, QIN Fan-xin, et al. Survey and evaluation of heavy metal contents in Pb-Zn area[J]. *Journal of Guizhou Normal University(Natural Sciences)*, 2010, 28(3): 34-37.
- [18] 郑佳佳, 姜 晓, 张晓军. 广东大宝山矿区周围土壤重金属污染状况评价[J]. 环境科学与技术, 2008, 31(11): 137-139.
ZHENG Jia-jia, JIANG Xiao, ZHANG Xiao-jun. Pollution assessment of heavy metals in soil around Dabaoshan polymetallic ore deposit[J]. *Environmental Science and Technology*, 2008, 31(11): 137-139.
- [19] 罗 浪, 刘明学, 董发勤, 等. 某多金属矿周围牧区土壤重金属形态及环境风险评测[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(8): 1523-1531.
LUO Lang, LIU Ming-xue, DONG Fa-qin, et al. Speciation distribution characteristics of heavy metals in soil of multi-metal mining pastoral area and pollution assessment[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(8): 1523-1531.
- [20] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, 14(8): 975-1001.
- [21] El Azhari A, Rhoujjati A, El Hachimi M L, et al. Pollution and ecological risk assessment of heavy metals in the soil-plant system and the sediment-water column around a former Pb/Zn-mining area in NE Morocco[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2017, 144(05): 464-474.
- [22] 薛 英, 王让会, 张慧芝, 等. 塔里木河干流生态风险评价[J]. 干旱区研究, 2008, 25(4): 562-567.
XUE Ying, WANG Rang-hui, ZHANG Hui-zhi, et al. Ecological risk assessment of ecosystems in the mainstream area of the Tarim river[J]. *Arid Zone Research*, 2008, 25(4): 562-567.
- [23] 杨西飞, 周涛发, 张 鑫, 等. 基于 Matlab-FIS 的土壤中重金属污染模糊综合评价[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2007, 30(10): 1245-1249.
YANG Xi-fei, ZHOU Tao-fa, ZHANG Xin, et al. Fuzzy comprehensive assessment of heavy metals in soil based on MATLAB-FIS[J]. *Journal of Hefei University of Technology(Natural Sciences)*, 2007, 30(10): 1245-1249.
- [24] 高灯州, 闵庆文, 陈桂香, 等. 联合梯田农业文化遗产稻田土壤养分空间变异特征[J]. 生态学报, 2016, 36(21): 6951-6959.
GAO Deng-zhou, MIN Qing-wen, CHEN Gui-xiang, et al. Spatial variability of soil nutrients in the agricultural heritage systems of Lian-he terraced fields[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(21): 6951-6959.
- [25] 刘 伟, 刘汉湖, 邱 超, 等. 徐州市三环南路沿线土壤重金属污染及相关性分析[J]. 环境科学与管理, 2012, 37(10): 67-70.
LIU Wei, LIU Han-hu, QIU Chao, et al. Analysis on pollution and correlation of heavy metals in soil along third ring south road in Xuzhou City[J]. *Environmental Science and Management*, 2012, 37(10): 67-70.
- [26] Zhu G, Guo Q, Xiao H, et al. Multivariate statistical and lead isotopic analyses approach to identify heavy metal sources in topsoil from the industrial zone of Beijing Capital Iron and Steel Factory[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(17): 14877-14888.
- [27] Lu A, Wang J, Qin X, et al. Multivariate and geostatistical analyses of the spatial distribution and origin of heavy metals in the agricultural soils in Shunyi, Beijing, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2012, 425(1): 66-74.
- [28] 付善明, 肖 方, 宿文姬, 等. 基于模糊数学的广东大宝山矿横石河下游土壤重金属元素污染评价[J]. 地质通报, 2014, 33(8): 1140-1146.
FU Shan-ming, XIAO Fang, SU Wen-ji, et al. The evaluation of heavy metals pollution in soils of the lower reaches of the Hengshi River within the Dabaoshan mining area based on fuzzy mathematics[J]. *Geological Bulletin of China*, 2014, 33(8): 1140-1146.
- [29] 陈桂忠. 模糊综合分析在场地土壤重金属评价中的应用[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(4): 140-143.
CHEN Gui-zhong. Fuzzy comprehensive assessment of heavy metal pollution[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2015, 42(4): 140-143.
- [30] 李梦红, 张晓君, 卢 杰. 模糊综合评价在农田重金属污染评价中的应用[J]. 西南农业学报, 2010, 42(5): 1581-1585.
LI Meng-hong, ZHANG Xiao-jun, LU Jie. Application of fuzzy comprehensive assessment in pollution assessment of heavy metal in farmland soil[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2010, 42(5): 1581-1585.
- [31] 钱庆腾, 方淑波, 乔亚军, 等. 盐城海岸带土壤重金属污染风险评价比较研究[J]. 环境污染与防治, 2016, 38(12): 43-48.
QIAN Qing-teng, FANG Shu-bo, QIAO Ya-jun, et al. Comparison of soil heavy metals pollution assessment result of Yancheng coastal zone[J]. *Environmental Pollution and Prevention*, 2016, 38(12): 43-48.
- [32] 王 斐, 黄益宗, 王小玲, 等. 江西钨矿周边土壤重金属生态风险评价: 不同评价方法的比较[J]. 环境化学, 2015, 34(2): 225-233.
WANG Fei, HUANG Yi-zong, WANG Xiao-ling, et al. Ecological risk assessment of heavy metals in surrounding soils of tungsten ores: Comparison of different evaluation methods[J]. *Environmental Chemistry*, 2015, 34(2): 225-233.
- [33] 李朝奎, 王利东, 李 吟, 等. 土壤重金属污染评价方法研究进展[J]. 矿产与地质, 2011, 25(2): 172-176.
LI Chao-kui, WANG Li-dong, LI Yin, et al. Progress on evaluation method of soil heavy metal contamination[J]. *Mineral Resources and Geology*, 2011, 25(2): 172-176.
- [34] 张金婷, 孙 华. 内梅罗指数法和模糊综合评价法在土壤重金属污染评价应用中的差异分析[J]. 环境监测管理与技术, 2016, 28(4): 27-31.
ZHANG Jin-ting, SUN Hua. Differences of Nemerow index method and fuzzy comprehensive evaluation method in evaluation heavy metal pollution in soil[J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2016, 28(4): 27-31.