

应用三种方法评价湖南省郴州市东河流域耕地土壤环境质量

王小凤^{1a,2}, 兰文波^{1a,2}, 肖启蓬^{1a}, 蒙艳斌^{1b}, 邱彬³, 李泽燕^{1a}, 贺莉萍^{1a,2}

1. 湘南学院 a. 公共卫生学院 b. 基础医学院, 湖南 郴州 423000
2. 郴州市重金属污染健康风险评估技术研发中心, 湖南 郴州 423000
3. 郴州市疾病预防控制中心, 湖南 郴州 423000



DOI 10.11836/JEOM21429

摘要:

[背景] 耕地土壤重金属污染影响作物产量和品质, 影响地下水质量、生态安全以及人体健康。

[目的] 分析湖南省郴州市东河流域耕地土壤重金属元素铬(Cr)、铜(Cu)、锌(Zn)、砷(As)、镉(Cd)和铅(Pb)的污染状况, 评价耕地土壤环境质量。

[方法] 采集郴州市东河流域耕地土壤 16 份, 采用电感耦合等离子质谱法测定各采样位点中 Cr、Cu、Zn、As、Cd 和 Pb 的含量。选用内梅罗综合污染指数法(评价指标包括内梅罗综合污染指数和单项污染指数)、地质累积指数法和潜在生态风险指数法方法评价土壤环境质量。

[结果] 研究区域耕地土壤样品中 Cr、Cu、Zn、As、Cd 和 Pb 的平均含量分别为 58.25、49.50、273.88、137.76、2.92 和 672.29 mg·kg⁻¹, Cu、Zn、As、Cd 和 Pb 平均值均超过了湖南省土壤元素背景值。土壤 As、Cd、Pb 和 Zn 的内梅罗单项污染指数分别为 4.40、9.74、5.85、1.15, As 和 Pb 的污染位点分别达到 93.75%和 81.25%; 土壤 As、Cd、Pb 和 Zn 的地质累积指数分别为 2.11、3.71、2.97、0.58, 土壤处于 Cd 偏强污染, As 和 Pb 中度污染, Zn 轻度污染; 土壤 Cr、Cu、Zn、As、Pb 和 Cd 的潜在生态危害指数分别为 1.63、9.07、2.90、87.75、113.18 和 695.76, Cd 有 81.25%位点呈现偏强污染及以上污染程度, 62.50%的位点 Pb 污染等级在中度污染及以上等级。内梅罗综合污染指数为 7.72, 综合潜在生态风险指数为 910.29, 整体表现为重度污染和强生态风险。

[结论] 不同评价方法评价结果存在一定差异。湖南省郴州市东河流域耕地土壤重金属污染程度高, Cd、As 和 Pb 为主要污染元素。

关键词: 矿区; 重金属; 土壤环境质量; 评价方法

Evaluation of soil environmental quality of cultivated land in the Donghe River Basin of Chenzhou City, Hunan Province by three methods WANG Xiaofeng^{1a,2}, LAN Wenbo^{1a,2}, XIAO Qipeng^{1a}, MENG Yanbin^{1b}, QIU Bin³, LI Zeyan^{1a}, HE Liping^{1a,2} (1. a.School of Public Health b.School of Basic Medical Science, Xiangnan University, Chenzhou, Hunan 423000, China; 2. Chenzhou City Heavy Metal Pollution Health Risk Assessment Technology Research and Development Center, Chenzhou, Hunan 423000, China; 3. Chenzhou Center for Disease Control and Prevention, Chenzhou, Hunan 423000, China)

Abstract:

[Background] Heavy metal pollution in cultivated land will affect crop yield and quality, as well as groundwater quality, ecological security, and human health.

[Objective] To analyze the pollution status of heavy metal elements such as chromium (Cr), copper (Cu), zinc (Zn), arsenic (As), cadmium (Cd), and lead (Pb) in cultivated soils of the Donghe River Basin in Chenzhou City, and to evaluate the environmental quality of local cultivated soil.

[Methods] A total of 16 samples of cultivated soil from the Donghe River Basin in Chenzhou City were collected, and the contents of Cr, Cu, Zn, As, Cd, and Pb in the samples were determined by inductively coupled plasma mass spectrometry. The Nemerow comprehensive pollution index method (the evaluation indicators included both Nemerow comprehensive pollution index and single pollution index), the geological accumulation index method, and the potential ecological risk index method were used to evaluate the soil environmental quality.

基金项目

湖南省卫健委科研计划课题项目(C2016046); 湖南省教育厅科学研究项目(21B0754)

作者简介

王小凤(1988—), 女, 硕士, 讲师;
E-mail: wangxf20161123@126.com

通信作者

贺莉萍, E-mail: hlipingm@163.com

伦理审批 不需要

利益冲突 无申报

收稿日期 2021-09-12

录用日期 2022-02-17

文章编号 2095-9982(2022)06-0684-06

中图分类号 R124

文献标志码 A

补充材料

www.jeom.org/article/cn/10.11836/JEOM21429

引用

王小凤, 兰文波, 肖启蓬, 等. 应用三种方法评价湖南省郴州市东河流域耕地土壤环境质量 [J]. 环境与职业医学, 2022, 39(6): 684-689.

本文链接

www.jeom.org/article/cn/10.11836/JEOM21429

Funding

This study was funded.

Correspondence to

HE Liping, E-mail: hlipingm@163.com

Ethics approval Not required

Competing interests None declared

Received 2021-09-12

Accepted 2022-02-17

Supplemental material

www.jeom.org/article/en/10.11836/JEOM21429

To cite

WANG Xiaofeng, LAN Wenbo, XIAO Qipeng, et al. Evaluation of soil environmental quality of cultivated land in the Donghe River Basin of Chenzhou City, Hunan Province by three methods[J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine, 2022, 39(6): 684-689.

Link to this article

www.jeom.org/article/en/10.11836/JEOM21429

[Results] The average levels of Cr, Cu, Zn, As, Cd, and Pb in the soil samples in the study area were 58.25, 49.50, 273.88, 137.76, 2.92, and 672.29 mg·kg⁻¹, respectively. The average values of Cu, Zn, As, Cd, and Pb were all exceeded the background values of soil elements in Hunan Province. The single pollution indices of As, Cd, Pb, and Zn in soil were 4.40, 9.74, 5.85, and 1.15 respectively. The contamination of As and Pb reached 93.75% and 81.25% respectively. The geological accumulation indices of soil As, Cd, Pb, and Zn were 2.11, 3.71, 2.97, and 0.58, respectively, which showed heavy Cd pollution, moderate As and Pb pollution, and slight Zn pollution. The potential ecological hazard indices of soil Cr, Cu, Zn, As, Pb, and Cd were 1.63, 9.07, 2.90, 87.75, 113.18, and 695.76. 81.25% of Cd samples showed heavy pollution and above, and 62.50% of Pb samples had moderate pollution and above. The Nemerow comprehensive pollution index was 7.72, which belonged to heavy pollution; and the comprehensive potential ecological risk index was 910.29, which belonged to high ecological risk.

[Conclusion] There are certain differences in the results of different evaluation methods. The cultivated soils of the Donghe River Basin in Chenzhou City, is seriously polluted by heavy metals, and Cd, As, and Pb are the main polluting elements.

Keywords: mining area; heavy metal; soil environmental quality; evaluation method

土壤是人类赖以生存的基本环境,耕地土壤重金属污染不仅影响作物产量和品质,还会影响地下水质量、生态安全,此外耕地中重金属还可被农作物吸收富集,经食物链进入机体并富集,引发免疫力下降、心理障碍、生长迟缓等,危害身体健康^[1]。采矿是耕地土壤重金属的重要来源,矿产冶炼产生的废气、废水、废渣会在地表径流、风、雨水淋滤等作用下扩散迁移进入土壤中,导致周边及其流域的耕地土壤重金属污染^[2]。因此,开展矿区流域耕地土壤重金属环境质量评价,对重金属污染防治和保障农产品食用安全具有重要意义。

目前用于土壤重金属评价的方法较多^[3-6],不同评价方法侧重点不同,每种方法均存在一定的针对性和局限性。内梅罗综合污染指数法可计算得到各个污染物的污染指数,该方法同时引入最大值评价总体污染水平,更符合现实中风险评级受最严重污染元素主导的实际,结果更具有警示意义^[7];地质累积指数法考虑了人为污染和土壤环境背景值,也考虑了自然成岩作用引起土壤背景值的变动,是区分人为活动影响的重要参数^[8];潜在生态风险指数法将重金属的生态效应、含量以及毒理学和环境效应联系到一起,在重金属污染评价中有广泛的应用^[9]。

东河位于湖南省郴州市东部,流经该市7个乡镇,是流经区域内工农业生产和农业用土壤灌溉的主要水源。该河上游是世界闻名的有色金属矿蕴藏地带,某尾矿库曾发生倒塌,大量尾砂进入河流^[10]。尽管政府和企业采取了大量的整治行动,但是直到现在东河中下游河段监测资料显示重金属超标现象仍然存在。鉴于此,本研究以东河流域耕地土壤为研究对象,在调查重金属含量和分布的基础上,采用内梅罗综合污染指数法、地质累积指数法和潜在生态风险指数法对土壤重金属污染进行风险评价,并对评价结果进行比

较分析,旨在充分了解该流域农田土壤的污染现状、风险程度,以期为流域耕地管理及土壤重金属污染治理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究对象

参照 HJ 740—2015《尾矿库环境风险评估技术导则(试行)》中环境风险受体调查评估范围要求,本研究将研究区域选定在从倒塌的尾矿库开始沿东河下游 10 km 内及其两岸 2 km 内,研究对象为区域内表层耕地土壤。

1.2 样品采集、处理与分析

土壤样品的采集时间为 2017 年 2 月,按水流方向,沿河两岸根据地形地貌、土地利用现状共设定 16 个采样区,每个采样区约 200 m×200 m,通过全球定位系统精准定位,确定每个采样区中心位点经纬度,采样区中心位点分布见补充材料图 S1。所采集样品均为混合样,采样时,每个采样区根据实际情况设定 2~3 个分采样区,每个分采样区采用双对角线五点法等量采集 0~20 cm 土层样品,最终将每个分采样区采集的样品混合得一个采样区的样品,共采集混合样品 16 个。

土壤样品自然风干后经木槌充分敲碎并过 100 目(孔径 0.150 mm)尼龙筛备用待测。准确称取样品 0.2~0.3 g(精确至 0.001 g)于聚乙烯微波消解罐中,用少量超纯水润湿,加入 6 mL 硝酸和 2 mL 氢氟酸,充分混匀,置于室温冷消化 0.5 h,采用微波消解仪(MARS6,美国培安科技公司)进行微波消解处理;消解后,采用电感耦合等离子体质谱法对铬(Cr)、铜(Cu)、锌(Zn)、砷(As)、镉(Cd)和铅(Pb)六种重金属的总量进行测定,仪器为 Nexion 350x 电感耦合等离子体质谱仪(美国珀金埃尔默)。采用电位法测定土壤 pH 值,仪器为

FE20 酸度计(中国上海梅特勒—托利多)。

1.3 评价方法

1.3.1 内梅罗综合污染指数法 内梅罗综合污染指数的计算公式如式(1):

$$P_{\text{综}} = \sqrt{\frac{(\bar{P}_i)^2 + (P_{\text{max}})^2}{2}} \quad (1)$$

式(1)中: $P_{\text{综}}$ 为土壤内梅罗综合污染指数, P_{max} 为污染土壤中重金属的最大单项污染指数, \bar{P}_i 为污染土壤中重金属的单项污染指数的平均值。 \bar{P}_i 的计算公式如式(2):

$$\bar{P}_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (C_i/S_i) \quad (2)$$

式(2)中: P_i 为土壤中各重金属的单项污染指数, C_i 为土壤中各重金属元素的实测值 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), S_i 为各重金属元素的标准参考值 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 本研究采用 GB 15618—2018《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》规定的风险筛选值。根据 P_i 可以将土壤分为四个等级: $P_i \leq 1$ 为清洁, $1 < P_i \leq 2$ 为轻度污染, $2 < P_i \leq 3$ 为中度污染, $P_i > 3$ 为重度污染; 根据 $P_{\text{综}}$ 可以将土壤分为五个等级: $P_{\text{综}} \leq 0.7$ 为清洁, $0.7 < P_{\text{综}} \leq 1$ 为警戒线, $1 < P_{\text{综}} \leq 2$ 为轻度污染, $2 < P_{\text{综}} \leq 3$ 为中度污染, $P_{\text{综}} > 3$ 为重度污染。

1.3.2 地质累积指数法 德国科学家 Muller 在 20 世纪 60 年代提出了地质累积指数法, 其计算公式见式(3):

$$I_{\text{geo}} = \log_2 \frac{C_i}{1.5B_i} \quad (3)$$

式(3)中: I_{geo} 为地质累积指数, C_i 为样品中元素 i 的实测值 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), B_i 为元素 i 的地球化学背景值 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 本研究采用《中国土壤元素背景值》中湖南省的土壤(A层)环境背景值^[11], 1.5 为修正系数。根据地质累积指数可将污染分为 0~6 共七个等级, 分级标准见表 1^[12]。

表 1 地质累积指数 (I_{geo}) 分级标准

Table 1 Classification criteria for geo-accumulation index

等级	I_{geo}	污染程度
0	≤ 0	无污染
1	0~1	轻度污染
2	1~2	偏中度污染
3	2~3	中度污染
4	3~4	偏强污染
5	4~5	强污染
6	≥ 5	极强污染

1.3.3 潜在生态风险指数法 该指数是由 Hakanson 于 1980 年提出, 其计算公式见式(4):

$$RI = \sum_{i=1}^m E_r^i = \sum_{i=1}^m \frac{T_r^i \cdot C_s^i}{C_m^i} \quad (4)$$

式(4)中: RI 为某一点位重金属综合潜在生态风险指数; E_r^i 为第 i 种重金属潜在生态危害系数; T_r^i 为第 i 种重金属毒性系数, Cr、Cu、Zn、As、Cd 和 Pb 的 T_r^i 分别为 2、5、1、10、30 和 5^[13]; C_s^i 为重金属 i 含量实测值; C_m^i 为重金属 i 的参照含量, 本研究采用湖南省土壤环境背景值^[11]。根据 E_r^i 和 RI 值的大小, 可将评价对象的生态风险进行分级: $E_r^i < 40$ 或 $RI < 150$ 为低风险; $40 \leq E_r^i < 80$ 或 $150 \leq RI < 300$ 为中度风险; $80 \leq E_r^i < 160$ 或 $300 \leq RI < 600$ 为较强风险; $160 \leq E_r^i < 320$ 或 $RI \geq 600$ 为强风险; $E_r^i \geq 320$ 为极强风险^[14]。

1.4 数据分析处理

本研究采用 Excel 2010 和 SPSS 19.0 进行数据处理分析, 采用 Pearson 相关性分析探索土壤重金属含量相关性。检验水准 $\alpha=0.05$ 。

2 结果

2.1 重金属含量特征及相关性

研究区域内耕地土壤样品 pH 平均值为 6.60, pH 6.5~7.5 的位点占 62.50%, 研究区域土壤以弱酸性为主。由表 2 可知, 研究区域耕地土壤样品中 Cu、Zn、As、Cd 和 Pb 平均值均超过了湖南省土壤元素背景值, Cd 和 Pb 分别超标 22.2 倍和 21.6 倍, Cd 的最小值已超出了风险筛选值。除 Cr 以外, 其余五种重金属元素含量的变异系数范围高达 60.79%~110.97%。

表 2 研究区域耕地土壤重金属含量

Table 2 Levels of heavy metals in arable soils in the study area

元素	含量/ $(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$			标准偏差	变异系数/%	湖南土壤背景值/ $(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	风险筛选值/ $(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	风险管控值/ $(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$
	最大	最小	平均					
Cr	108.86	35.49	58.25	20.17	34.63	71.4	150 ^a /200 ^b	850 ^c /1 000 ^d
Cu	175.86	16.74	49.50	45.33	91.56	27.3	50 ^a /100 ^b	—
Zn	811.04	98.01	273.88	213.18	77.84	94.4	200 ^a /250 ^b	—
As	423.75	29.62	137.76	115.93	84.15	15.7	40 ^a /30 ^b	150 ^c /120 ^d
Cd	7.18	0.95	2.92	1.78	60.79	0.126	0.3 ^a /0.3 ^b	2.0 ^c /3.0 ^d
Pb	2 381.18	64.61	672.29	746.06	110.97	29.7	90 ^a /120 ^b	500 ^c /700 ^d

[注] a、b 分别表示 GB 15618—2018《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》规定的 $5.5 < \text{pH} \leq 6.5$ 、 $6.5 < \text{pH} \leq 7.5$ 的风险筛选值。c、d 分别表示 GB 15618—2018《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》规定的 $5.5 < \text{pH} \leq 6.5$ 、 $6.5 < \text{pH} \leq 7.5$ 的风险管控值。“—”表示无此值。

Pearson 相关性分析显示, Cu 含量与 Zn、As、Pb 含量, Zn 含量与 Cu、As、Cd、Pb 含量, As 含量与 Cu、

Zn、Cd、Pb 含量, Cd 含量与 Zn、As、Pb 含量均呈正相关(均 $P < 0.05$)。结果见表 3。

表 3 研究区域耕地土壤中不同元素间相关关系(r)

Table 3 Correlation between different elements in arable soils in the study area (r)

元素	Cr	Cu	Zn	As	Cd	Pb
Cr	1	-0.158	-0.146	-0.014	-0.218	-0.016
Cu		1	0.667*	0.587*	0.416	0.732*
Zn			1	0.781*	0.798*	0.846*
As				1	0.622*	0.864*
Cd					1	0.503*
Pb						1

[注]*: $P < 0.05$ 。

2.2 重金属污染评价

2.2.1 内梅罗综合污染指数法评价结果 由表 4 可知, 内梅罗单项污染指数的平均值 $Cd > Pb > As > Zn > Cu > Cr$, 所有位点均无 Cr 污染, 但 Cd 均为重度污染, As 和 Pb 的污染位点分别达到 93.75%和 81.25%; 内梅罗综合污染指数平均值为 7.72, 耕地土壤呈重度污染。

表 4 研究区域耕地土壤内梅罗综合污染指数评价结果

Table 4 Nemerow comprehensive pollution indexes for arable soils in the study area

评价指数	最大值	最小值	平均值	污染等级位点占比/%		
				轻度污染	中度污染	重度污染
单项污染指数						
Cr	0.73	0.20	0.33	0.00	0.00	0.00
Cu	1.76	0.17	0.56	13.50	0.00	0.00
Zn	3.24	0.42	1.15	31.25	6.25	6.25
As	14.13	0.74	4.40	31.25	13.50	50.00
Cd	23.94	3.17	9.74	0.00	0.00	100.00
Pb	19.84	0.54	5.85	18.75	0.00	62.50
综合污染指数	17.46	2.38	7.72	0.00	6.25	93.75

2.2.2 地质累积指数法评价结果 由表 5 可知: 各重金属平均地质累积指数排序为 $Cd > Pb > As > Zn > Cu > Cr$, Cr、Zn 和 Cu 均以无污染为主, Cd 有 81.25%位点呈现偏强污染及以上污染程度, As 中度污染及以上污染等级位点占 50.00%, 62.50%的位点 Pb 污染等级在中度污染及以上等级。

2.2.3 潜在生态风险指数法评价结果 由表 6 可知: 所有位点 Cr、Cu 和 Zn 全处于轻度的潜在生态危害水平, Cd 处于潜在生态危害风险强或极强水平, As 处于强和极强潜在生态危害水平的分别占 31.25%、12.50%, Pb 有 37.50%处于潜在生态危害风险较强及以上风险等级; 综合潜在生态风险指数平均值为 910.29。

表 5 研究区域耕地土壤地质累积指数评价结果

Table 5 Geo-accumulation indexes for arable soils in the study area

元素	I_{geo} 平均值	污染等级位点占比/%						
		无污染	轻度污染	偏中度污染	中度污染	偏强污染	强污染	极强污染
Cr	-0.95	93.75	6.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cu	-0.11	62.50	25.00	6.25	6.25	0.00	0.00	0.00
Zn	0.58	43.75	12.50	31.25	12.50	0.00	0.00	0.00
As	2.11	0.00	18.75	31.25	25.00	18.75	6.25	0.00
Cd	3.71	0.00	0.00	0.00	18.75	43.75	31.25	6.25
Pb	2.97	0.00	12.50	25.00	6.25	25.00	6.25	25.00

表 6 研究区域耕地土壤潜在生态风险指数评价结果

Table 6 Potential ecological risk indexes for arable soils in the study area

元素	潜在生态危害系数 E_i^d			风险等级位点占比/%				
	最大值	最小值	平均值	低风险	中风险	较强风险	强风险	极强风险
Cr	3.05	0.99	1.63	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cu	32.21	3.07	9.07	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Zn	8.59	1.04	2.90	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00
As	269.91	18.87	87.75	31.25	25.00	31.25	12.50	0.00
Cd	1709.90	226.08	695.76	0.00	0.00	0.00	18.75	81.25
Pb	400.87	10.88	113.18	37.50	25.00	12.50	12.50	12.50
Ri	1998.13	286.76	910.29	0.00	6.25	37.50	56.25	0.00

2.3 不同评价方法的比较

不同位点表层土壤中六种重金属元素单项污染指数、地质累积指数和潜在生态危害指数的均值及污染评级如表 7 所示。三种评价方法对 Cr、Cu 和 Cd 的污染程度评价较为一致, Cr、Cu 为无污染/低风险程度, Cd 污染程度/潜在生态风险高; 对 Zn、As 和 Pb 的污染程度评价差异较大。

表 7 研究区域耕地土壤六种重金属元素在不同评价方法中的污染评级

Table 7 Pollution ratings of six heavy metals by three evaluation methods

元素	单项污染指数		地质累积指数			潜在生态危害指数			
	指数	污染等级	相对污染等级	指数	污染等级	相对污染等级	指数	风险等级	相对污染等级
Cr	0.33	清洁	1/4	-0.95	无污染	1/7	1.63	低风险	1/5
Cu	0.56	清洁	1/4	-0.11	无污染	1/7	9.07	低风险	1/5
Zn	1.15	轻度污染	2/4	0.58	轻度污染	2/7	2.90	低风险	1/5
As	4.40	重度污染	4/4	2.11	中度污染	4/7	87.75	强风险	4/5
Cd	9.74	重度污染	4/4	3.71	偏强污染	5/7	695.76	极强风险	5/5
Pb	5.85	重度污染	4/4	2.97	中度污染	4/7	113.18	强风险	4/5

3 讨论

土壤元素背景值是指未受或少受人类活动特别是人为污染影响的土壤环境本身的化学元素组成及

其含量,通常作为土壤是否已受到污染的参照标准;土壤污染风险筛选值则是判断农用地土壤中污染物含量对农产品质量安全、农作物生长或土壤生态环境是否造成风险的基准值;土壤污染风险管制值是土壤是否要采取管控措施的基准。本研究显示,郴州市东河流域耕地土壤中 Cu、Zn、As、Cd 和 Pb 平均值均超过了湖南省土壤元素背景值,所有位点土壤 Cd 含量均超出农用地土壤污染风险筛选值,部分土壤 As、Cd 和 Pb 超出农用地土壤污染风险管制值,说明研究区域耕地土壤已受到人为因素污染。变异系数常用于表征土壤重金属元素在空间上的变异及分散程度,变异系数值越大,表明可能受人类活动的影响越大,变异系数 > 50% 表明局部存在点源污染,由外源物质进入所致^[15]。本次调查中重金属元素除 Cr 外,变异系数均 > 50%,表明研究区域受人类活动影响强烈。相关性分析显示,Cd、Pb、As、Zn、Cu 之间呈正相关,存在共同变化的趋势,说明这些重金属可能来自同一污染源。受矿业活动的影响,工业活动可能是耕地土壤重金属的主要来源^[16]。

本研究中单项污染指数法、地质累积指数法和潜在生态危害风险指数法的主要污染重金属因子均指向 Cd、Pb 和 As,评价结果具有一定的一致性;但在污染等级评定上存在差异,相比于地质累积指数法,单项污染指数法和潜在生态危害指数法评价结果风险偏大。究其原因:一是评价标准(背景值)选取不同,单项污染指数法选择土壤重金属污染风险筛选值,而其他方法选择的是湖南省的背景值;二是地质累积指数法主要考虑了外源性重金属的聚集程度,而潜在生态危害指数法在此基础上还考虑了不同重金属的毒性系数影响^[17]。

内梅罗综合污染指数法和潜在生态风险指数法整体评价结果相似,内梅罗综合污染指数评价结果为重度污染,潜在生态风险指数法评价结果为强生态风险,不同的是内梅罗综合污染指数表明 93.75% 的位点重度污染,潜在生态风险指数法显示强生态风险位点为 56.25%,存在差异的原因可能是内梅罗综合指数法主要考虑重金属含量,易受到某种重金属元素最大含量的影响^[18],而潜在生态风险指数法将土壤重金属含量与毒理学效应联系起来进行综合评价。

不同评价方法评价结果存在一定差异,但综合评价结果可以认为研究区域耕地土壤重金属污染程度高,受人为活动影响大,Cd、As 和 Pb 为主要污染元素。研究显示多种蔬菜对土壤中 As、Cd、Pb、Cu 和 Zn 等

重金属有富集作用^[19-20],因此食用研究区域自产蔬菜引起人体健康问题的可能性较高,建议对整个研究区域的农用地土壤采取农艺调控、替代种植等安全利用措施,减轻农作物重金属污染的风险。

重金属毒性及对环境的影响与其形态分布密不可分,一定条件下土壤重金属形态之间的相互转化会产生环境污染,甚至直接影响到重金属的毒性以及在自然界中的迁移过程^[21]。本研究仅检测分析了耕地土壤中 Cr、Cu、Zn、As、Cd、Pb 六种重金属,且仅考虑了重金属总量,因此研究结果尚不能全面、精确反映研究区域耕地土壤重金属污染水平及环境质量。在未来条件成熟时,将在增加重金属指标的基础上,结合重金属总量和形态分布特征,对矿区流域农田土壤重金属污染程度进行更合理全面的评价。

综上,湖南省郴州市东河流域耕地土壤重金属污染程度高,主要污染元素为 Cd、Pb 和 As,须采取相关风险管控和污染源管理措施;不同评价指标侧重方向不同,在开展评价时,应结合实际评价地区的情况、评价的目的,再选择使用不同的评价方法。

(志谢:感谢郴州市疾病预防控制中心检验科工作人员对于此项研究的支持,感谢胡维等同志对本研究提出的宝贵建议与意见。)

参考文献

- [1] 麦尔哈巴·图尔贡, 麦麦提吐尔逊·艾则孜, 王维维. 吐鲁番盆地葡萄园土壤重金属污染及其潜在健康风险[J]. 环境与职业医学, 2020, 37(6): 558-565.
TURHUN M, EZIZ M, WANG W W. Contamination and potential health risk of heavy metals in vineyard soil in Turpan Basin[J]. J Environ Occup Med, 2020, 37(6): 558-565.
- [2] JOHNSON DB, HALLBERG KB. Acid mine drainage remediation options: a review[J]. Sci Total Environ, 2005, 338(1/2): 3-14.
- [3] KIM BS M, ANGELI JL F, FERREIRA PA L, et al. Critical evaluation of different methods to calculate the Geoaccumulation Index for environmental studies: a new approach for Baixada Santista - Southeastern Brazil[J]. Mar Pollut Bull, 2018, 127: 548-552.
- [4] TEH TL, RAHMAN NN NA, SHAHADAT M, et al. A comparative study of metal contamination in soil using the borehole method[J]. Environ Monit Assess, 2016, 188(7): 404.
- [5] EDIAGBONYA TF, AJAYI S. Risk assessment and elemental quantification of anthropogenic activities in soil[J]. Environ Geochem Health, 2021, 43(12): 4891-4904.
- [6] WU J, LU J, LI L, et al. Pollution, ecological-health risks, and sources of heavy metals in soil of the northeastern Qinghai-Tibet Plateau[J]. Chemosphere, 2018, 201: 234-242.
- [7] 何东进, 谭勇, 廖小娟, 等. 闽东滨海湿地重金属生态风险评价方法选择与比较研究[J]. 福建林学院学报, 2014, 34(2): 97-103.
HE DJ, TAN Y, LIAO XJ, et al. Selection and comparison of different

- methods for ecological risk assessment of heavy metals in the sediments of coastal wetlands, the east Fujian, China[J]. *J Fujian Coll For*, 2014, 34(2): 97-103.
- [8] 纪冬丽, 曾琬晴, 张新波, 等. 天津近郊农田土壤重金属风险评价及空间主成分分析[J]. *环境化学*, 2019, 38(9): 1955-1965.
- JI D L, ZENG W Q, ZHANG X B, et al. Ecological risk assessment and principal component analysis of heavy metals in suburban farmland soils of Tianjin[J]. *Environ Chem*, 2019, 38(9): 1955-1965.
- [9] 余嘉衍, 李冰玉, 周一敏, 等. 湖南省某矿遗址周围农业土壤重金属污染及风险评价[J]. *环境化学*, 2020, 39(4): 1024-1030.
- YU J Y, LI B Y, ZHOU Y M, et al. Pollution and risk assessment of heavy metal in agricultural soil around an abandon mine site in Hunan province[J]. *Environ Chem*, 2020, 39(4): 1024-1030.
- [10] 曾清如, 杨仁斌, 铁柏青, 等. 郴县东西河流域重金属污染农田的防治技术和生态利用模式[J]. *农业环境保护*, 2002, 21(5): 428-431.
- ZENG Q R, YANG R B, TIE B Q, et al. Control of pollution of heavy metals on farmland by ecological engineering in East and West valley in Chen County[J]. *Agro-Environ Prot*, 2002, 21(5): 428-431.
- [11] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990: 330-379.
- China National Environmental Monitoring Centre. Background value of soil elements in China[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990: 330-379.
- [12] WILLIAMS J A, ANTOINE J. Evaluation of the elemental pollution status of Jamaican surface sediments using enrichment factor, geoaccumulation index, ecological risk and potential ecological risk index[J]. *Mar Pollut Bull*, 2020, 157: 111288.
- [13] CHENG X, DANEK T, DROZDOVA J, et al. Soil heavy metal pollution and risk assessment associated with the Zn-Pb mining region in Yunnan, Southwest China[J]. *Environ Monit Assess*, 2018, 190(4): 194.
- [14] ZHOU J, FENG K, PEI Z, et al. Multivariate analysis combined with GIS to source identification of heavy metals in soils around an abandoned industrial area, Eastern China[J]. *Ecotoxicology*, 2016, 25(2): 380-388.
- [15] 雷国建, 陈志良, 刘千钧, 等. 广州郊区土壤重金属污染程度及潜在生态危害评价[J]. *中国环境科学*, 2013, 33(S1): 49-53.
- LEI G J, CHEN Z L, LIU Q J, et al. The assessments of polluted degree and potential ecological hazards of heavy metals in suburban soil of Guangzhou city[J]. *Chin Environl Sci*, 2013, 33(S1): 49-53.
- [16] 韩亚芬, 李琦, 黄淑玲. 宿州煤矿区大气降尘重金属的污染评价及来源解析[J]. *河北北方学院学报(自然科学版)*, 2015, 31(6): 33-37.
- HAN Y F, LI Q, HUANG S L. Pollution assessment and source analysis of heavy metals in atmospheric deposition in Suzhou coal mine area[J]. *J Hebei North Univ (Nat Sci Ed)*, 2015, 31(6): 33-37.
- [17] 陈文德, 朱坤, 姚文文, 等. 云南雪鸡坪铜矿区土壤重金属污染评价[J]. *高原科学研究*, 2021, 5(2): 5-12,26.
- CHEN W D, ZHU K, YAO W W, et al. Evaluation of heavy metal pollution in Soil of Xuejiping copper mine area in Yunnan province[J]. *Plateau Sci Res*, 2021, 5(2): 5-12,26.
- [18] 陈泽华, 焦思, 余爱华, 等. 土壤重金属污染评价方法探析——以南京市为例[J]. *森林工程*, 2020, 36(3): 28-36.
- CHEN Z H, JIAO S, YU A H, et al. Analysis on evaluation methods of heavy metal pollution in soil — Taking Nanjing as an example[J]. *For Eng*, 2020, 36(3): 28-36.
- [19] 赵亚玲. 土壤蔬菜中铅镉污染评价与富集特征研究[J]. *蔬菜*, 2018(12): 60-64.
- ZHAO Y L. Evaluation and enrichment of lead and cadmium pollution in soil vegetables[J]. *Vegetables*, 2018(12): 60-64.
- [20] KHAN S, REHMAN S, KHAN A Z, et al. Soil and vegetables enrichment with heavy metals from geological sources in Gilgit, northern Pakistan[J]. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2010, 73(7): 1820-1827.
- [21] 朱侠. 铅锌矿区及农田土壤中重金属的化学形态与生物有效性研究[D]. 烟台: 中国科学院大学(中国科学院烟台海岸带研究所), 2019.
- ZHU X. Chemical speciation and bioavailability of heavy metals in soils of lead-zinc mining area and farmland[D]. Yantai: Yantai Institute of Coastal Zone Research(Chinese Academy of Sciences), 2019.

(英文编辑: 汪源; 责任编辑: 王晓宇)