

DOI:10.7524/j.issn.0254-6108.2020051503

任加国, 王越, 师华定, 等. 乐安河流域农用地表层土壤重金属污染评价及来源分析[J]. 环境化学, 2021, 40(9): 2658-2666.

REN Jiaguo, WANG Yue, SHI Huading, et al. Evaluation and source analysis of heavy metal pollution of surface soil in agricultural land of Le'an River basin[J]. Environmental Chemistry, 2021, 40 (9): 2658-2666.

乐安河流域农用地表层土壤重金属污染评价及来源分析*

任加国¹ 王越^{1,2,3} 师华定^{2,3}** 刘孝阳^{2,3}

(1. 山东科技大学地球科学与工程学院, 青岛, 266590; 2. 土壤与农业农村生态环境监管技术中心, 北京, 100012;
3. 中国环境科学研究院土壤与固体废物环境研究所, 北京, 100012)

摘要 为探究乐安河流域农用地土壤重金属污染状况及污染来源, 采用潜在生态风险指数法对流域内的Cd、Hg、As、Pb、Cr、Cu、Zn、Ni等8种重金属元素含量进行评价, 并通过主成分分析及单因素方差分析来判断8种重金属污染的来源. 结果表明, 研究区内Cd含量超筛选值的点位占比为63.32%, 污染情况较为严重, Cu含量超筛选值的点位占比为15.16%, 存在轻微污染, 其余6种元素超筛选值点位占比均小于4%, 基本无污染; 研究区内的Cd属于强生态危害, Hg属于中等生态危害, 其余6种元素均属于轻微生态危害. 8种元素综合后属于中等生态危害; 研究区内农用地表层土壤中8种重金属元素的全部信息可由3个主成分来反映, 所代表的实际意义按贡献率排序分别是有色金属冶炼活动、有色金属矿采选、工业活动产生的废水; 研究区内Cd、Pb污染的主要来源为有色金属冶炼活动; Hg污染的主要来源为污水处理厂的工业废水处理活动; As污染的主要来源为土砂石和有色金属矿产的采选活动; Cr、Ni污染的主要来源为生活垃圾填埋焚烧和有色金属矿采选活动; 各企业和设施周边的Cu、Zn含量无明显差别, 故暂无法将Cu、Zn的主要来源具体到某一类企业或设施.

关键词 乐安河流域, 重金属污染, 潜在生态风险评价, 主成分分析.

Evaluation and source analysis of heavy metal pollution of surface soil in agricultural land of Le'an River basin

REN Jiaguo¹ WANG Yue^{1,2,3} SHI Huading^{2,3}** LIU Xiaoyang^{2,3}

(1. College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, 266590, China;
2. Technical Centre for Soil, Agricultural and Rural Ecology and Environment, Ministry of Ecology and Environment, Beijing, 100012, China; 3. Institute of Soil and Solid Waste Environment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing, 100012, China)

Abstract In order to investigate the status and sources of heavy metal contamination in agricultural land in the Le'an River Basin, the Potential Ecological Risk Index was applied to evaluate the content of 8 kinds of heavy metal elements, i.e. Cd, Hg, As, Pb, Cr, Cu, Zn and Ni, in the Basin, and the sources of such 8 kinds of heavy metal contamination were judged by means of Principal Component Analysis and one-way ANOVA. The results showed that in the study area, the percentage of sites with Cd content exceeding the risk screening values was 63.32% with more serious contamination, the percentage of sites with Cu content exceeding the risk screening values was 15.16% with minor

2020年5月15日收稿(Received: May 15, 2020).

* 山东省自然科学基金(ZR2017MD009)和国家重点研发计划(2018YFF0213401, 2018YFC1800203)资助.

Supported by Shandong Provincial Natural Science Foundation (ZR2017MD009) and National Key R&D Program of China (2018YFF0213401, 2018YFC1800203).

** 通讯联系人 **Corresponding author**, Tel: 18611739102, E-mail: shihd@creas.org.cn

contamination, and the percentage of sites of other 6 elements exceeding risk screening values was less than 4% basically without contamination. In the study area, Cd brought strong ecological hazards, Hg brought moderate ecological hazards and the other 6 elements all brought minor ecological hazards. Upon comprehensive evaluation, such 8 elements were considered to bring moderate ecological hazards. The full information on such 8 heavy metal elements in the agricultural land surface soil in the study area could be reflected by 3 principal components, and the physical significance represented was ranked in order of contribution by the contamination on the agricultural land surface soil from non-ferrous metal smelting, non-ferrous metal ore mining and selection and industrial wastewater, respectively. And in the area, the main sources of Cd and Pb contamination were non-ferrous metal smelting activities, the main sources of Hg contamination were industrial wastewater treatment activities of sewage treatment plants, the main sources of As contamination were soil, sand and gravel and the ore mining and selection activities of non-ferrous metal minerals, the main sources of Cr and Ni contamination were domestic landfill incineration and non-ferrous metal ore mining and selection activities, and the content of Cu and Zn in the vicinity of enterprises and facilities did not differ significantly, so it was temporarily impossible to specify the main sources of Cu and Zn to a particular type of enterprise or facility.

Keywords Le'an River basin, heavy metal pollution, potential ecological risk index, PCA.

随着工业的迅速发展,工业活动对周边环境的污染日渐加重,尤其是造成了农用地土壤中的重金属元素逐渐累积形成污染,通过食物链对人体健康造成了威胁。2018年8月,生态环境部发布的《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)^[1]开始实施,初步针对 Cd、Hg、As、Pb、Cr、Cu、Zn、Ni、BAP、六六六、DDT 等污染物提出了对应的风险管控阈值,给农用地土壤重金属污染评价提供了一个可行的标准,对农用地重金属污染的定量评价变得更精确、合理。目前,国内外针对乐安河流域重金属污染的研究多集中在水体^[2-6]、沉积物^[4-7]和水生动植物^[3,8-9],少有对流域内土壤重金属污染的评价;现有研究表明,乐安河流域内的土壤存在一定程度的重金属污染,其中整体的 Cd 污染最为普遍^[10],部分地区的 Cu、Pb 污染也较为明显^[11],这主要与各有色金属矿的开采、冶炼和排污密切相关。李娇等^[12]运用 PFM 模型及地统计法对乐安河上中游的土壤重金属来源进行了解析,提出有色金属矿采选和冶炼企业是研究区内重金属污染的主要来源,但并未将流域内的其他类型的企业和设施纳入分析。

本文测定了乐安河流域农用地表层土壤中 8 中重金属元素的含量,并运用潜在生态指数法评价了其污染状况,在此基础上通过主成分分析和单因素方差分析对流域内农用地表层土壤重金属元素的来源进行了探讨,可将污染来源精确到研究区内的各类企业和设施,为该流域土壤重金属污染防治提供了参考。

1 材料与方法(Materials and methods)

1.1 点位布设及样品采集

乐安河位于我国江西省东北部,是饶河的支流,发源自婺源,自东向西流入鄱阳湖。流域地处江西省有色金属产区,有色金属及稀土矿产资源丰富,有色金属冶炼行业发达。乐安河流域也是江西省的重要粮食产区,流域内人口众多且密集,农业发达。

本次采样时间为 2018 年 5 月至 8 月,范围为乐安河干流两岸 20 km 范围内的农用地,采样点位分布见图 1。采样时将地块划分成若干个 20 m × 20 m 的网格,采用双对角线法使用木铲在每个网格内采集深度为 0—20 cm 的表层土壤,五点均采集 500 g 土壤,混匀后共 2500 g 作为表层土壤样品。采集完成的样品经风干、研磨、过筛等制备过程后,放入干净的自封袋中密封保存待检测。

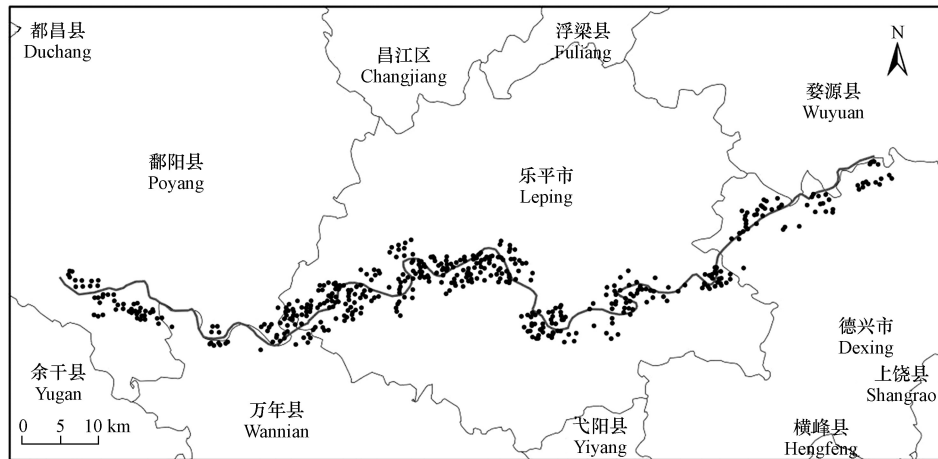


图 1 采样点位分布图

Fig.1 Sampling point position

1.2 样品检测方法

由于本次样点分布在农用地上,因此根据《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618-2018)中的规范对样品进行分析测定.采用石墨炉原子吸收分光光度法^[13]测定样品中Cd的含量,原子荧光光谱法^[14]测定样品中Hg和As的含量,X射线荧光光谱法^[15]测定样品中Pb、Cr的含量,火焰原子吸收分光光度法^[16]测定样品中Cu、Zn、Ni的含量.为了确保实验数据的准确性,本次研究采用标准参考土样(GSS-4)作为质量保证和质量控制参照,确保标准偏差在5%以内.

1.3 评价方法

(1) 潜在生态风险指数

采用潜在生态风险指数法^[17]对流域内8种重金属污染情况进行评价,公式如下:

$$RI = \sum E_r^i,$$

$$E_r^i = T_r^i \times C_f^i,$$

$$C_f^i = C_{\text{表层}}^i / C_n^i,$$

式中, C_f^i 为单项污染系数; $C_{\text{表层}}^i$ 为表层土壤重金属实测值; C_n^i 为参比值; E_r^i 为潜在生态风险单项系数; T_r^i 为毒性系数; RI 为潜在生态风险指数. C_n^i 采用江西省表层土壤重金属背景值^[18], T_r^i 为重金属毒性系数, 本文参照 Hakanson 的研究^[19] 选取对应重金属的毒性系数, 分别为 Cd = 30, Hg = 40, As = 10, Pb = Cu = Ni = 5, Cr = 2, Zn = 1. E_r^i 与 RI 的分级标准见表 1.

表 1 E_r^i 及 RI 分级标准Table 1 grading standard of E_r^i and RI

E_r^i	生态风险程度 Degree of ecological risk	RI	生态风险程度 Degree of ecological risk
≤40	轻微生态危害	≤150	轻微生态危害
40—79	中等生态危害	150—299	中等生态危害
80—159	强生态危害	300—600	强生态危害
160—320	很强生态危害	>600	极强生态危害
>320	极强生态危害		

(2) 主成分分析

本次研究运用 SPSS 软件进行主成分分析^[20]. 首先从 Arcgis 中将 8 种元素的含量数据导出为 Excel 表格, 再将表格导入 SPSS 中进行“分析-降维-因子分析”, 将 8 种元素含量添加为变量后, 即可进行主成分分析, 得到结果. 筛选初始特征值大于 1 的成分作为本次研究的主成分, 再根据不同主成分在各重金属元素上的因子载荷数值大小确定各重金属元素的主要来源是哪一个特征值, 最后根据各主成分与各重金属元素的关系来探讨各主成分代表的实际意义.

(3) 单因素方差分析

本次研究运用 SPSS 和 Excel 进行单因素方差分析^[21]。首先根据现场探勘和资料收集确定布设点位 3 km 范围内的企业和设施, 统计这些企业和设施周边 3 km 范围内的各元素含量, 然后将这些信息从 arcgis 中导出为 Excel 表格, 再将表格导入 SPSS 中进行“分析-比较均值-单因素 ANOVA”, 将八种元素含量添加为因变量, 企业和设施类别添加为因子, 即可进行单因素方差分析, 得到不同因子影响下各重金元素含量的差异显著性, 并在 Excel 表格中形成差异显著性柱状图。

2 结果与讨论 (Results and discussion)

2.1 流域内土壤重金属元素含量及污染情况

本次调查共检测了 488 个表层土壤样品中的 8 种重金属元素, 检测结果见表 1, 对应《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618-2018)规定的筛选值(以下简称筛选值)和江西省表层土壤背景值(以下简称背景值)见表 2。流域内 Cd 元素的含量平均值为 $0.44 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 高于对应的筛选值($0.30 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)和背景值($0.10 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 这表明流域内存在一定的 Cd 污染情况。其余 7 种元素含量平均值均远低于筛选值, 这表明 Hg、As、Pb、Cr、Cu、Zn、Ni 等 7 种元素基本不存在污染情况, 但均高于对应背景值, 这表明流域内这 7 种元素的含量也受到了人为活动的影响。

表 2 8 种重金属元素的含量统计($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Table 2 Content statistics of eight elements

元素 Elements	最小值 Minimum value	中位值 Median value	最大值 Maximum value	平均值 Mean	筛选值 Filter value	背景值 Background values
Cd	0.04	0.28	11.50	0.44	0.30	0.10
Hg	0.03	0.11	1.06	0.13	0.50	0.08
As	2.16	9.92	168.00	12.21	30	10.40
Pb	11.50	39.60	364.00	44.52	80	32.10
Cr	24.50	69.15	521.00	72.50	250	48
Cu	13.40	35.81	956.00	48.86	50	20.80
Zn	42.90	101.00	528.00	106.86	200	69
Ni	11.20	27.05	93.10	28.56	60	19

按照《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618-2018)的标准将流域内点位分为优先保护类(无污染)、安全利用类(轻微污染)和严格管控类(严重污染)3类, 各重金属元素对应点位数量及占比见图 2。有 40.37% 的点位表层土壤 Cd 含量超标, 包括 36.68% 的安全利用类和 3.69% 的严格管控类, 是 8 种重金属元素中污染情况最严重的; 其次是 Cu, 有 15.16% 的点位表层土壤 Cu 超标, 但均为安全利用类, 所以 Cu 污染较为轻微; 其余 6 种元素的超标点位占比均低于 4%, 基本没有污染。

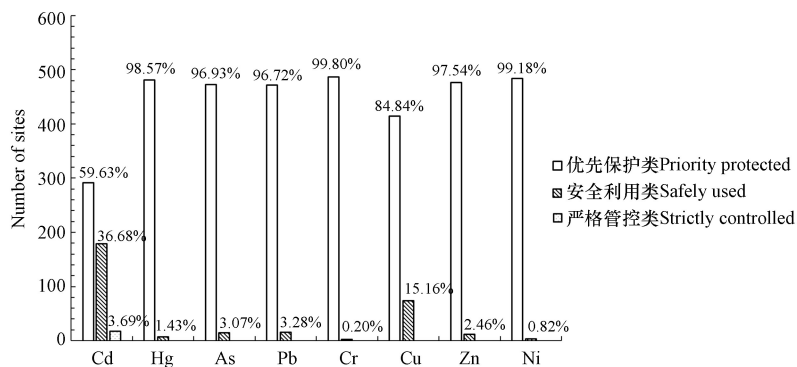


图 2 8 种重金属元素的质量分类

Fig.2 The quality of eight heavy metal elements

潜在生态风险评价结果见表 3. Cd 的潜在生态风险指数最大, 为 132, 属于强生态危害, Hg 的潜在生态风险指数也较大, 为 65.20, 属于中等生态危害, 其余 6 种元素的潜在生态风险指数均属于轻微生态危害. 8 种元素的潜在生态风险综合指数为 234.99, 属中等生态危害, 其潜在生态风险综合指数过高主要是因为 Cd 的潜在生态风险指数过高, Hg 的影响次之, 因此研究区内 Cd、Hg 元素的含量需要引起一定的注意.

表 3 八种元素潜在生态风险评价结果统计

Table 3 Statistics on potential ecological risk assessment results of eight elements

元素 Elements	E_i^r	生态风险程度 Degree of ecological risk	RI	生态风险程度 Degree of ecological risk
Cd	132	强生态危害		
Hg	65.20	中等生态危害		
As	11.70	轻微生态危害		
Pb	6.95	轻微生态危害		
Cr	3.02	轻微生态危害	234.99	中等生态危害
Cu	7.05	轻微生态危害		
Zn	1.55	轻微生态危害		
Ni	7.52	轻微生态危害		

2.2 运用主成分分析法判断污染的主要来源

采用主成分分析法^[22]对流域内农用地表层土壤重金属污染来源进行分析.

首先通过 SPSS 软件对流域内表层土壤样品中各污染物进行因子分析, 得出相关指标. 结果显示, Bartlett 球度检验相伴概率为 0, 小于显著性水平 0.05, 这表明本研究所涉及的数据适合作因子分析; 8 种重金属元素含量的公因子方差均大于 0.5, 这表明提取的主成分对于原始变量的解释程度比较高. 主成分分析的主要结果见表 4.

表 4 主成分分析主要计算结果

Table 4 The main calculation results of PCA

主成分 Principal components	特征值 Eigenvalues	贡献率 Contribution rate	累计贡献率 Cumulative contribution rate	Cd	Hg	As	Pb	Cr	Cu	Zn	Ni
第一主成分	3.672	45.90%	45.90%	0.605	0.406	0.81	0.75	0.406	0.815	0.868	0.583
第二主成分	1.593	19.92%	65.82%	-0.486	-0.074	-0.013	-0.4	0.793	-0.159	0.018	0.733
第三主成分	1.169	14.60%	80.42%	-0.496	0.674	0.359	-0.419	-0.248	0.279	0.017	-0.155

从表 4 可以看出, 通过主成分分析计算, 表层土壤中 8 种污染物的全部信息可由前 3 个主成分反映 86.48%, 因此对前 3 个主成分进行分析就可以反映出全部数据的绝大部分信息.

第一主成分的贡献率为 45.90%, 特点表现为因子变量在 Cd、As、Pb、Cu、Zn 的含量上有较高的正载荷. 由李娇等的研究^[12]可知, 铜矿冶炼是 Cd 的主要来源, 铅锌矿冶炼 Pb、Zn 的主要来源, 金矿选冶是 As 的主要污染来源, 铜矿选冶是 Cu 的主要污染来源. 因此, 第一主成分所代表的实际意义是有色金属冶炼活动. 由表 5 可知, Cd、As、Pb、Cu、Zn 间存在较为显著的相关性, 其中 Cd 与 Pb 之间的相关性(0.816)最显著, 这表明绝大部分的 Cd、Pb 污染来自第一主成分, As、Cu、Zn 与 Cd 的相关性相对较小, 这表明 As、Cu、Zn 的污染除第一主成分外可能有其他来源.

第二主成分的贡献率是 19.92%, 特点表现为因子变量在 Cr、Ni 的含量上有较高的正载荷. 由陆金等的研究^[23]可知, 有色金属矿采选是 Cr、Ni 的主要污染来源. 因此, 第二主成分所代表的实际意义是有色金属矿采选. 由表 5 可知, Cr 与 Ni 间的相关性(0.762)最为显著, 与 As 也存在一定的相关性; Ni 与 As、Pb、Cu、Zn 均存在较为显著的相关性, 这表明大部分的 Cr、Ni 污染来自第二主成分, 小部分的 Cr、Ni 污染来自第一主成分.

表 5 各重金属元素间 Person 相关系数

Table 5 Person correlation coefficients of Heavy metal elements

元素Elements	Cd	Hg	As	Pb	Cr	Cu	Zn	Ni
Cd	1							
Hg	0.110*	1						
As	0.285**	0.426**	1					
Pb	0.816**	0.119**	0.468**	1				
Cr	0.047	0.039	0.229**	0.112*	1			
Cu	0.357**	0.309**	0.780**	0.487**	0.121**	1		
Zn	0.427**	0.294**	0.593**	0.598**	0.261**	0.728**	1	
Ni	0.084	0.103*	0.384**	0.207**	0.762**	0.270**	0.540**	1

*表示在0.05水平(双侧)上显著相关;**表示在0.01水平(双侧)上显著相关。

* indicates a significant correlation at the 0.05 level (both sides); ** indicates a significant correlation at the 0.01 level (both sides).

第三主成分的贡献率是 14.60%, 特点表现为因子变量在 Hg 的含量上有较高的正载荷. 由雷凌明等的研究^[24]可知, 工业废水是 Hg 的主要来源. 因此, 第三主成分所代表的实际意义是工业活动产生的废水. 由表 5 可知, Hg 与 As、Pb、Cu、Zn 均存在较为显著的相关性, 这表明大部分的 Hg 污染来自第三主成分, 小部分的 Hg 污染来自第一主成分.

图 3 为各污染物的二维因子载荷情况, 可以通过各元素之间的离散程度看出流域内表层土壤中重金属的 3 个主要来源, 即有色金属冶炼活动、有色金属矿采选、工业活动产生的废水.

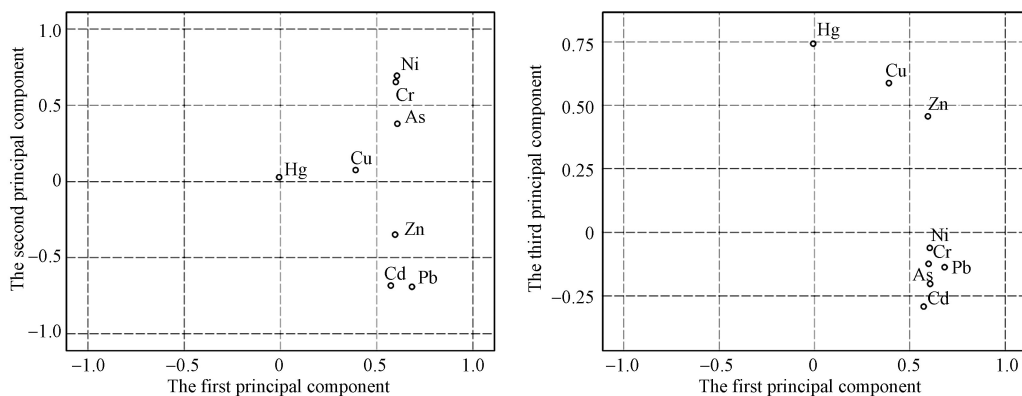


图 3 8 种重金属元素的二维因子载荷

Fig.3 Three-dimensional and two-dimensional factor loads of eight heavy metal elements

2.3 运用单因素方差分析确定污染的具体来源

本次研究筛选了布设点位 3 km 范围内的企业或设施共 10 个, 其中包括综合工业区 2 个, 化学原料及制品制造企业 1 个, 生活垃圾填埋场 1 个, 土砂石开采企业 1 个, 污水处理厂 1 个, 有色金属矿采选企业 2 个, 有色金属冶炼及延压企业 2 个. 方差分析结果见图 4.

从各元素在不同企业和设施周边的含量差异可看出:

(1) Cd、Pb 在有色金属冶炼及延压企业周边的含量明显较其他 6 类企业和设施周边高, 这表明研究区内 Cd、Pb 污染的来源为有色金属冶炼活动;

(2) Hg 在污水处理厂周边的含量明显较其他 6 类企业和设施周边高, 这表明研究区内 Hg 污染的主要来源为污水处理厂内的工业废水. 此外综合工业区、化学原料及产品制造企业和生活垃圾填埋场周边的 Hg 含量相对较其他 3 类企业周边高, 这表明有部分的 Hg 污染来自综合工业区、化学原料及产品制造企业和生活垃圾填埋场.

(3) As 在土砂石开采企业和有色金属矿采选企业周边的含量明显较其他 5 类企业和设施周边高, 这表明研究区内 As 污染的主要来源为土砂石和有色金属矿的开采活动. 此外生活垃圾填埋场和有色金属冶炼及延压企业周边的 As 含量相对较其他 3 类企业周边高, 这表明有部分 As 污染来自生活垃

圾填埋场和有色金属冶炼及延压企业;

(4)Cr、Ni 在生活垃圾填埋场和有色金属矿采选企业周边的含量明显较其他 5 类企业和设施周边高, 这表明研究区内 Cr、Ni 污染的主要来源为生活垃圾填埋场的垃圾填埋焚烧和有色金属矿的采选活动;

(5)Cu、Zn 在 7 类企业或设施周边的含量无明显差异且含量均较低, 这表明研究区内的 Cu、Zn 污染程度很轻微且没有明显的来源.

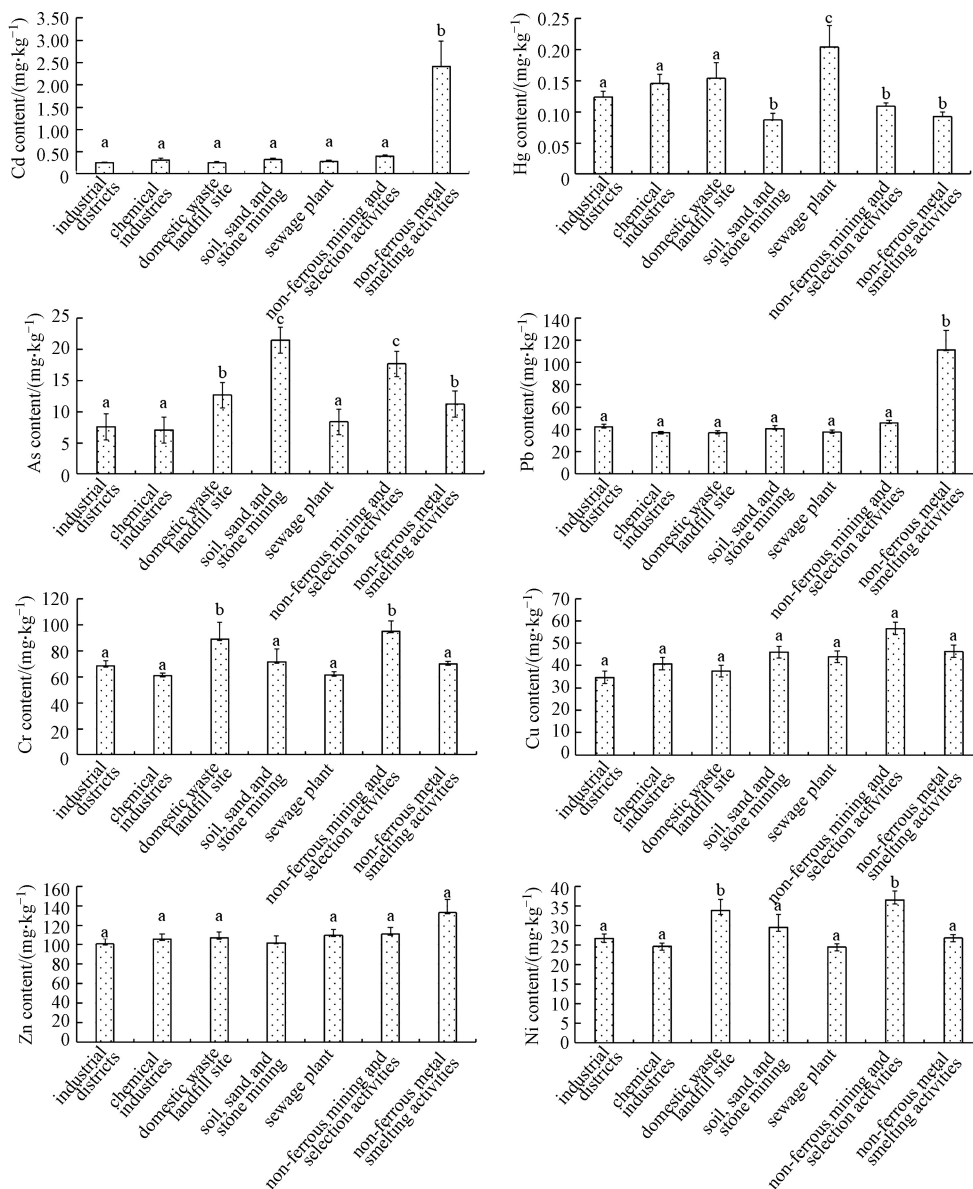


图 4 单因素方差分析结果

Fig.4 Results of one-way ANOVA

3 结论(Conclusion)

(1)流域内农用地表层土壤样品的检测和分析表明, 流域内 Cd 的污染较为严重, 平均含量为 $0.44 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 有 40.37% 的点位表层土壤 Cd 含量超过筛选值; Cu 也存在轻微污染, 有 15.16% 的点位表层土壤 Cu 含量超过筛选值; Hg、As、Pb、Cr、Zn、Ni 等重金属元素含量超筛选值的点位占比均不超过 4%, 基本没有污染情况;

(2)潜在生态风险评价结果显示, Cd 属于强生态危害, Hg 属于中等生态危害, 其余 6 种元素均属于轻微生态危害, 8 种元素综合后属于中等生态危害;

(3)主成分分析表明,流域内农用地表层土壤中 8 种重金属元素的全部信息可由 3 个主成分来反映,贡献率分别为 45.90%、19.92%、14.60%,合计 86.48%。其中,Cd、As、Pb、Cu、Zn 主要受第一主成分的影响,Cr、Ni 主要受第二主成分的影响,Hg 主要受第三主成分的影响;初步判断出第一、二、三主成分所代表的实际意义分别是有色金属冶炼活动、有色金属矿采选、工业活动产生的废水。

(4)单因素方差分析结果显示,研究区内 Cd、Pb 污染的主要来源为有色金属冶炼活动;Hg 污染的主要来源为污水处理厂的工业废水处理活动;As 污染的主要来源为土砂石和有色金属矿产的采选活动;Cr、Ni 污染的主要来源为生活垃圾填埋焚烧和有色金属矿采选活动;各企业和设施周边的 Cu、Zn 含量无明显差别,故无法将 Cu、Zn 的主要来源具体到某一类企业或设施。

(5)研究区内的重金属污染主要来源于 Cd、Hg 也有一定的生态危害,建议对有色金属冶炼企业进行监管,确保生产过程和废水处理符合规范;对于安全利用类点位所在农用地,建议退耕还林还草,不再种植食用农作物;对于严格管控类点位所在农用地,建议暂停利用直到修复治理完成。

参考文献 (References)

- [1] 于洋,刘文清,许人骥,等.典型地区农用地污染调查及风险管控标准探讨[J].中国环境监测,2019,35(3):1-7.
YU Y, LIU W Q, XU R Q, et al. Investigation of agricultural land pollution in typical areas and discussion on risk control standards [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2019, 35(3): 1-7 (in Chinese).
- [2] 弓晓峰,陈春丽,周文斌,等.鄱阳湖底泥中重金属污染现状评价[J].环境科学,2006,27(4):126-130.
GONG X F, CHEN C L, ZHOU W B, et al. Assessment on heavy metal pollution in the sediment of Poyang Lake [J]. *Environmental Science*, 2006, 27(4): 126-130 (in Chinese).
- [3] 弓晓峰,黄志中,张静,等.鄱阳湖湿地重金属形态分布及植物富集研究[J].环境科学研究,2006,19(3):34-40.
GONG X F, HUANG Z Z, ZHANG J, et al. Study on the speciation distributing and the plants enrichment of heavy metal in the wetland of poyang lake [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2006, 19(3): 34-40 (in Chinese).
- [4] 匡荟芬,胡春华,孙丽丽,等.鄱阳湖鱼类重金属积累特征及其健康风险评价[J].南昌大学学报(理科版),2018,42(6):578-583.
KUANG Y F, HU C H, SUN L L, et al. Accumulation characteristics and health risk assessment of heavy metals in fish species from poyang lake [J]. *Journal of Nanchang University(Natural Science)*, 2018, 42(6): 578-583 (in Chinese).
- [5] XIAO H Y, ZHOU W B, WU D S, et al. Heavy metal contamination in sediments and floodplain topsoils of the Lean River catchment, China [J]. *Soil & Sediment Contamination*, 2011, 20(7): 810-823.
- [6] 张莉,袁丽娟,张大文,等.鄱阳湖丰水期悬浮颗粒物重金属的空间分布格局[J].环境化学,2017,36(10):2219-2226.
ZHANG L, YUAN W J, ZHANG D W, et al. Spatial variation of heavy metals in suspended particulate matters of Poyang Lake [J]. *Environmental Chemistry*, 2017, 36(10): 2219-2226 (in Chinese).
- [7] 王金保,闫伟伟,谢婷.鄱阳湖流域乐安河重金属污染水平[J].湖泊科学,2007,19(4):67-73.
WAN J B, YAN W W, XIE T, et al. Research on heavy metals pollution status of Le'an River, Lake Poyang Basin [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2007, 19(4): 67-73 (in Chinese).
- [8] 简敏菲,游海,倪才英.鄱阳湖饶河段重金属污染水平与迁移特性[J].湖泊科学,2006,18(2):127-133.
JIAN M F, YOU H, NI C Y, et al. Characteristics of heavy metals contaminant status and migration in Raohe River of Lake Poyang [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2006, 18(2): 127-133 (in Chinese).
- [9] 吕兰军.鄱阳湖重金属污染现状调查与分析[J].人民长江,1994(4):32-38.
LV L J. Investigation and analysis of the current status of heavy metal pollution in Poyang Lake [J]. *Yangtze River*, 1994(4): 32-38 (in Chinese).
- [10] 高小琴.乐安河兰村洲段土壤重金属污染状况分析[J].安徽农业科学,2006,34(20):5309-5310.
GAO X Q. Analysis of the soil polluted with heavy metal in lancunzhou riverside of Lean River [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2006, 34(20): 5309-5310 (in Chinese).
- [11] 兰泽英,刘洋.乐安河流域土壤重金属含量高光谱间接反演模型及其空间分布特征研究[J].地理与地理信息科学,2015,031(3):26-31, cover 2.
LAN Z Y, LIU Y. Research on indirect hyperspectral estimating model and the spatial distribution characteristics of heavy metal contents in basin soil of Lean River [J]. *Geography and Geo-information Science*, 2015, 031(3): 26-31, cover 2 (in Chinese).
- [12] 李娇,滕彦国,吴劲,等.基于PMF模型及地统计法的乐安河中上游地区土壤重金属来源解析[J].环境科学研究,2019,32(6):984-992.
LI J, TENG Y G, WU J, et al. Source apportionment of soil heavy metal in the middle and upper reaches of le'an river

- based on pmf model and geostatistics [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, 32(6): 984-992(in Chinese).
- [13] 邹军军, 刘毅, 李中华. 惠州市部分农村环境土壤重金属Pb、Cd、Cr污染状况的调查分析 [J]. *公共卫生与预防医学*, 2018, 29(5): 39-42.
- WU J J, LIU Y, LI Z H. Investigation and analysis of heavy metal Pb, Cd and Cr pollution in some rural environmental soils in Huizhou city [J]. *Journal of Public Health and Preventive Medicine*, 2018, 29(5): 39-42(in Chinese).
- [14] 罗治定, 陈庆芝, 金倩, 等. 预还原氢化物发生-原子荧光光谱法快速测定化探样品中的As、Sb、Bi、Hg [J]. *中国无机分析化学*, 2018, 8(2): 17-21.
- LUO Z D, CHEN Q Z, JIN Q, et al. Quick determination of As, Sb, Bi, Hg in geochemical samples by prereduction hydride generation-atomic fluorescence spectrometry [J]. *Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry | Chin J Inorg Anal Chem*, 2018, 8(2): 17-21(in Chinese).
- [15] 高捷, 盛成, 朱月琴, 等. 悬浮液进样-全反射X射线荧光光谱法测定食品中的多无机元素 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2020, 40(3): 945-949.
- GAO J, SHENG C, ZHU Y Q, et al. Inorganic multi-element analysis of foodstuff by means of low power total reflection X-Ray fluorescence spectrometry using suspension sampling [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2020, 40(3): 945-949(in Chinese).
- [16] 高巍. 火焰原子吸收分光光度法测定矿石中的铜、铅、锌、钴、镍的含量 [J]. *世界有色金属*, 2019(4): 182-183.
- GAO W. Determination of copper, lead, zinc, cobalt and nickel in ore by flame atomic absorption spectrophotometry [J]. *World Nonferrous Metal*, 2019(4): 182-183(in Chinese).
- [17] 储金宇, 张金萍, 周晓红, 等. 镇江市古运河河岸沉积物重金属分布特征及潜在生态风险评价 [J]. *环境化学*, 2015, 34(4): 763-771.
- CHU J Y, ZHANG J P, ZHOU X H, et al. Distribution characteristics and ecological risk evaluation of heavy metals in riverside sediments of Zhenjiang Canal [J]. *Environmental Chemistry*, 2015, 34(4): 763-771(in Chinese).
- [18] 何纪力, 徐光炎. 江西省土壤环境背景值研究[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2006: 34.
- HE J L, XU G Y. Research on soil environmental background value of jiangxi province[M]. Beijing: China Environmental Press, 2006: 34(in Chinese).
- [19] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sediment ecological approach [J]. *Water Research*, 1980, 14(8): 975-1001.
- [20] 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]. *Environmental Chemistry*, 2019, 38(9): 1955-1965(in Chinese).
- [21] 孔畅, 杨林生, 李海蓉, 等. 内蒙古某饮水型砷中毒病区人群体内砷蓄积与砷代谢的年内变化特征 [J]. *环境化学*, 2018, 37(11): 2335-2341.
- KONG C, YANG L S, LI H R, et al. Annual variations of arsenic accumulation and metabolism in the inhabitants of drinking-water type endemic arsenism area, Inner Mongolia [J]. *Environmental Chemistry*, 2018, 37(11): 2335-2341(in Chinese).
- [22] 李玉, 俞志明, 宋秀贤. 运用主成分分析(PCA)评价海洋沉积物中重金属污染来源 [J]. *环境科学*, 2006, 27(1): 139-1430.
- LI Y, YU Z M, SONG X X. Application of principal component analysis(pca) for the estimation of source of heavy metal contamination in marine sediments [J]. *Environmental science*, 2006, 27(1): 139-1430(in Chinese).
- [23] 陆金, 赵兴青. 铜陵狮子山矿区土壤重金属污染特征及生态风险评价 [J]. *环境化学*, 2017, 36(9): 1958-1967.
- LU J, ZHAO X Q. Characteristics and ecological soil by heavy metals in risk assessment of polluted Shizishan, Tongling [J]. *Environmental Chemistry*, 2017, 36(9): 1958-1967(in Chinese).
- [24] 雷凌明, 喻大松, 陈玉鹏, 等. 陕西泾惠渠灌区土壤重金属空间分布特征及来源 [J]. *农业工程学报*, 2014, 30(6): 88-96.
- LEI L M, YU D S, CHEN Y P, et al. Spatial distribution and sources of heavy metals in soils of Jinghui Irrigated Area of Shaanxi, China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(6): 88-96(in Chinese).