

贾莉, 孙建平, 何小青, 等. 农用地土壤重金属污染特征及其生态风险评价——以池州市某典型农用地为例[J]. 沈阳农业大学学报, 2024, 55(4): 435-445.

JIA Li, SUN Jianping, HE Xiaoqing, et al. Soil heavy metal pollution characteristics and ecological risk assessment - A case study of a typical agricultural land in Chizhou City[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2024, 55(4): 435-445.

农用地土壤重金属污染特征及其生态风险评价 ——以池州市某典型农用地为例

贾莉^a, 孙建平^b, 何小青^a, 刘赵文^a, 潘文武^a

(池州学院 a. 材料与工程学院, b. 地理与规划学院, 安徽池州 247000)

摘要:为探讨某农用地土壤重金属污染及生态风险情况,采集池州市某典型农用地表层土壤样品,分析Cd、As、Ni、Hg、Pb、Cr、Cu、Zn共8种重金属的含量,并采用单因子指数法、内梅罗综合污染指数法和潜在生态危害指数法对该农田土壤重金属污染进行生态风险评价。结果表明: Cd、As、Ni、Hg、Pb、Cr、Cu、Zn的平均含量分别为0.71, 25.80, 33.31, 0.23, 33.17, 46.59, 37.15, 130.28 mg·kg⁻¹,其中,Cd、As、Ni等含量均有不同程度地超过国家标准规定的筛选值;而且除Cr外其他重金属平均值和中值均超过背景值。各重金属元素的单因子评价污染指数平均值依次为Cd>As>Cu>Hg>Ni>Zn>Cr>Pb,且Cd单项指数平均值为轻度污染等级,其他重金属为无污染等级,表层土壤样品中优先保护类、安全利用类的占比分别为15% (6/40)、85% (34/40),各点污染在可控等级范围;内梅罗综合污染评价安全、警戒线、轻度、中度和重度污染的等级的比例分别为7.5%、15%、45%、30%和2.5%,综合指数平均值为1.77,超过警戒线级别,属轻度污染等级,其中,Cd是最主要影响元素,与单因子评价结果一致;8种重金属元素的单因子潜在生态风险指数(single factor ecological risk index)大小依次为Hg>Cd>As>Cu>Ni>Pb>Cr>Zn,土壤中重金属综合潜在生态风险(potential ecological risk index)平均值为194.73,为中等生态风险等级,其中,Cd是研究区污染风险最高的重金属元素,Hg是潜在生态风险高的重金属,需加强对Cd、Hg的风险管控。该区域农田土壤存在酸化趋势,是重金属累积的重要因素,其他人类活动增加了重金属积累的风险,需强化对该土壤有效的安全利用措施。

关键词:农用地; 重金属污染; 污染特征; 生态风险评价

中图分类号: X53

文章编号: 1000-1700(2024)04-0435-11

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Soil Heavy Metal Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment — A Case Study of a Typical Agricultural Land in Chizhou City

JIA Li^a, SUN Jianping^b, HE Xiaoqing^a, LIU Zhaowen^a, PAN Wenwu^a

(a. School of Materials and Environmental Engineering, b. School of Geography and Planning, Chizhou University, Chizhou Anhui 247000, China)

Abstract: In order to investigate the soil heavy metal pollution and ecological risk of a certain agricultural land, surface soil samples of a typical agricultural land in Chizhou City were collected and analyzed for the content of 8 heavy metals, Cd, As, Ni, Hg, Pb, Cr, Cu and Zn. The ecological risk of heavy metal pollution was evaluated by single factor index method, Nemerow comprehensive pollution index method and potential ecological hazard index method. The results show that: The average contents of Cd, As, Ni, Hg, Pb, Cr, Cu and Zn were 0.71, 25.80, 33.31, 0.23, 33.17, 46.59, 37.15 and 130.28 mg·kg⁻¹, respectively. The contents of Cd, As and Ni all exceeded the screening values stipulated by national standards to varying

收稿日期: 2024-03-24

基金项目: 安徽省教育厅科研重点项目(KJ2021A1132, KJ2019A0865); 安徽省社会科学创新项目(2020CX060); 安徽省大学生创新创业训练计划项目(S202211306100)

第一作者: 贾莉(1979-), 女, 硕士, 教授, 从事环境污染防治研究, E-mail: benbenjiali79@163.com

degrees. In addition, the average and median values of other heavy metals exceeded the background values except Cr. The average value of single factor evaluation pollution index of each heavy metal element is $Cd > As > Cu > Hg > Ni > Zn > Cr > Pb$, and the average value of single index of Cd is light pollution level, and other heavy metals are pollution-free level. In the surface soil samples, the proportion of priority protection and safe utilization were 15% (6 / 40) and 85% (34 / 40), respectively, and the pollution at each point was in the controllable range. The proportions of safety, warning line, light, moderate and severe pollution levels in Nemero's comprehensive pollution evaluation were 7.5%, 15%, 45%, 30% and 2.5%, respectively. The average composite index was 1.77, exceeding the warning line level and belonging to the mild pollution level. Cd was the most important influencing element, which was consistent with the results of single factor evaluation. The single factor potential ecological risk (Ei) index of the eight heavy metals was $Hg > Cd > As > Cu > Ni > Pb > Cr > Zn$, and the average comprehensive potential ecological risk (RI) of heavy metals in soil was 194.73, indicating a moderate ecological risk level. Among them, Cd was the heavy metal element with the highest pollution risk in the study area. Hg is a heavy metal with high potential ecological risk, so it is necessary to strengthen the risk control of Cd and Hg. The acidification trend of farmland soil in this region is an important factor in the accumulation of heavy metals. Other human activities increase the risk of heavy metal accumulation, so it is necessary to strengthen the measures for the safe utilization of the soil effects.

Key words: agricultural land; heavy metal pollution; pollution characteristics; evaluation of ecological risk

土壤是地球表层最活跃的部分,是人类赖以生存与发展极其重要的物质基础,尤其农用地土壤一旦污染,对生态环境、人体健康、食品安全及农业可持续发展造成长期的影响。有研究表明,我国城市、城郊和农村均存在不同程度的农田重金属污染问题,涉及全国83.9%的省份和22.5%的地级市^[1]。为切实加强土壤污染防治,国务院于2016年5月31日发布了《土壤污染防治行动计划》(简称“土十条”)。各省市也相继出台土壤污染防治工作方案,对受污染耕地提出明确防治要求。土壤重金属污染问题受到越来越多的关注,其污染和分布特征及评价成为环境科学研究的热点问题^[2-3]。随着土壤环境问题严重性的持续暴露,也开展了不少土壤重金属溯源^[4-6]和风险评估^[7-8]方面的研究。较多方法与模型应用于重金属溯源分析,如多元统计中的主成分和因子分析、地统计模型、受体模型、正定因子分析模型等^[9-10];风险评估多采用潜在生态风险指数,更多应用于农用地、矿区土壤重金属评价^[11-12]。我国矿山开发、工业污染,以及化肥农药的过量使用,使得农用土壤人为富集特征凸显,尤其是在矿山周边和市郊^[13-14]。农田土壤面临重金属的严重威胁,与人体健康密切相关的农田土壤重金属污染和农作物安全也成为关注的重点^[15-16]。

安徽池州市贵池区由于矿山开发,河道污水灌溉,及较高的土壤重金属本底值等因素,土壤污染总体状况堪忧,部分农田土壤重金属污染状况严重,尤其是镉污染较为突出^[17]。重金属污染不仅会影响土壤生物的生长发育,而且重金属元素还会通过食物链以及皮肤接触等方式在人体中积累,严重威胁人体健康^[18]。本研究以池州市某典型农田土壤为研究对象,系统分析土壤中Cd、Cr、Zn、Ni、As、Cu、Hg、Pb等重金属的浓度分布,并对农田土壤重金属进行生态风险评估,了解该农田土壤的污染现状、风险程度,以期同类型农田土壤重金属污染的防治提供重要信息和科学依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

安徽省池州市位于长江中下游南岸,地处东经116°38'~108°05',北纬29°33'~30°51'。贵池区为市辖区,地势南高北低,南部为中低山地,中部多丘陵,北部为沿江洲圩区,呈阶梯形分布。气候属温暖湿润的亚热带季风气候,气温温和,季风明显,雨量充沛,光照比较充足、植物生长期长。矿产资源比较丰富,种类多,已发现矿种有40多种,有探明储量的矿产32种。矿山有300多处,矿山开采导致了大量重金属的排放和污染。研究区农田土壤主要种植有小麦和水稻等经济作物,其上游建有铜金属矿产资源开采项目,开采历史较久;在2010年规范化生产之前,铜矿的不规范的开采和矿区不完善

的环保措施对周边土壤及地表水造成了一定的污染。并且农田灌溉水主要来源于周边地表水,常年污水灌溉加剧了农田土壤重金属污染风险。

1.2 样品的采集

调查区域农田面积约40 hm²,结合地表径流、当地常年主导风向、地形地势、不同作物的施肥影响、矿山开发等因素综合考虑布点;布点和采样采用相关规范和技术规定^[19-22],共设置农田土壤表层混合样品采样点40个,采样深度为0~20 cm耕作层土壤,采集样品40个;并且在40个采样点中选取5个代表样点进行剖面采样,取样深度为40~60 cm,每剖面采集1个,共5个样品;每个采样点均采用梅花法采混合样,用四分法去除多余土壤至2.0 kg,用专用采样袋进行编码装土壤样品,密封保存,记录采样时间、地点等参数,进行样点的定位。各点位见图1。



图1 土壤采样点分布图

Figure 1 Distribution map of soil sampling points

1.3 样品的处理和测定方法

土壤样品带回实验室自然风干,先手选去除杂物,为避免交叉污染,制样所用工具在处理每一份样品后擦抹干净,且避免接触金属器皿,样品处理过程中编码始终保持一致。较大的土块用木锤敲打破碎,然后过2 mm的尼龙筛进行筛分,混合后取1/4用于测定pH值,余下用玛瑙研钵进行研磨用于测定重金属的含量。土壤样品pH值采用电位法(HJ926-2018)^[23]测定,As和Hg含量采用微波消解/原子荧光法(HJ 680-2013)^[24]测定,Pb和Cd含量采用石墨炉原子吸收分光光度法(GB/T 17141-1997)^[25]测定,Cu和Zn含量采用火焰原子吸收分光光度法(GB/T 17138-1997)^[26]测定,Ni和Cr含量采用火焰原子吸收分光光度法(GB/T 17139-1997、HJ491-2009)^[27-28]测定。

1.4 数据处理

采用Excel对重金属的浓度特征进行统计分析;利用SPSS 19.0软件进行样本的检验分析,采用AriGIS 10.7直观展示采样点与重金属污染的空间分布特征。

1.5 评价标准和方法

1.5.1 评价标准 采用《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB15618-2018)^[29]标准进行农用地的风险管理与控制,项目区耕地类型主要为旱地和水田轮作,其风险筛选值见表1。

表1 农用地土壤重金属环境评价标准

Table 1 Environmental evaluation criteria for heavy metals in agricultural soil

污染物项目 ^{①②} Pollutant item		风险筛选值/(mg·kg ⁻¹) Risk screening value				风险管制值/(mg·kg ⁻¹) Risk control value			
		pH≤5.5	5.5<pH≤6.5	6.5<pH≤7.5	pH>7.5	pH≤5.5	5.5<pH≤6.5	6.5<pH≤7.5	pH>7.5
镉(Cd)	水田 Paddy field	0.3	0.4	0.6	0.8	1.5	2	3	4
	其他 Others	0.3	0.3	0.3	0.6				
汞(Hg)	水田 Paddy field	0.5	0.5	0.6	1	2	2.5	4	6
	其他 Others	1.3	1.8	2.4	3.4				
铅(Pb)	水田 Paddy field	80	100	140	240	400	500	700	1 000
	其他 Others	70	90	120	170				
砷(As)	水田 Paddy field	30	30	25	20	200	150	120	100
	其他 Others	40	40	30	25				
铬(Cr)	水田 Paddy field	250	250	300	350	800	850	1 000	1 300
	其他 Others	150	150	200	250				
铜(Cu)	果园 Orchard	150	150	200	200	-	-	-	-
	其他 Others	50	50	100	100				
锌(Zn)	-	200	200	250	300	-	-	-	-
镍(Ni)	-	60	70	100	190	-	-	-	-

注:① 重金属和类金属砷均按元素总量计;② 对于水旱轮作地,采用其中较严格的风险筛选值。

Notes: ① Heavy metals and metal-like arsenic are calculated according to the total amount of elements. ② Stricter risk screening values were used for irrigated and upland crop rotation.

1.5.2 评价方法 采用单因子污染指数法、内梅罗综合指数法和潜在生态风险指数法分别进行评价。单因子污染指数法能直观反映污染和超标情况,是最常用的评价方法^[30]。采样点存在一项污染物或某一项重金属污染较为突出的情况,适合采用单因子污染指数法直观表达。内梅罗综合指数是一种兼顾最高值和平均值的计权型多因子环境质量指数^[31],能够较为全面地反映土壤中各重金属污染的平均污染水平,并强调主导因子的污染影响,可和单因子评价法一起印证分析突出的重金属污染。潜在生态风险指数法既考虑土壤中重金属浓度,又考虑多种重金属的综合作用、污染程度和毒性水平等因素,侧重于重金属毒性在土壤和沉积物中的普遍迁移转化规律和评价区域对重金属污染的敏感^[32],在土壤重金属评价中应用也较为广泛。前两种方法用于分析突出的重金属污染,最后一种方法侧重分析潜在的重金属污染。

(1)单因子污染指数法。

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

式中: P_i 为土壤中重金属*i*的单因子污染指数; C_i 为土壤中重金属*i*的监测值,单位与 S_i 保持一致; S_i 为土壤重金属*i*的评价标准。

根据《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB15618-2018)^[29]中的筛选值 S_i 和管制值 G_i ,以及《农用地土壤环境风险评价技术规定(试行)》(环办土壤函[2018]1479号)的相关规定,对农用地土壤利用等级进行划分,见表2。

表2 单因子土壤污染环境风险和利用等级划分

Table 2 Single factor soil pollution environmental risk and utilization grade division

污染物 ^③ 含量 Content of pollutants	风险 Risk	质量分类 Quality classification	污染物 ^④ 含量 Content of pollutants	风险 Risk	质量分类 Quality classification
$C_i \leq S_i$	无风险或风险可忽略 No risk or negligible risk	优先保护类 I Priority protection I	$C_i \leq S_i$	无风险或风险可忽略 No risk or negligible risk	优先保护类 I Priority protection I
$S_i < C_i \leq G_i$	污染风险可控 Controllable risk	安全利用类 II Safety utilization II	$C_i > S_i$	有污染风险 Risk	安全利用类 II Safety utilization II
$C_i > G_i$	污染风险较大 High risk	严格管控类 III Strict control III			

注:③包括Cd、Hg、As、Pb、Cr;④包括Cu、Ni、Zn。

Notes: ③ Including Cd, Hg, As, Pb and Cr. ④ Including Cu, Ni and Zn.

(2)内梅罗综合指数法。

$$P_n = \sqrt{\frac{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i\right)^2 + [(P_i)_{\max}]^2}{2}} \quad (2)$$

式中: P_n 为内梅罗综合污染指数; P_i 为土壤中重金属*i*的单因子污染指数; $(P_i)_{\max}$ 为土壤中各重金属中单因子污染指数中的最大值; n 为测定的重金属种类数。内梅罗综合指数法污染分级见表3。

(3)潜在生态风险指数法。

$$E_i = T_r^i \times (C_i / C_n^i) \quad (3)$$

$$R_i = \sum_{i=1}^n T_r^i \times (C_i / C_n^i) \quad (4)$$

式中: E_i 为单因子潜在风险指数; R_i 为综合潜在生态风险指数; T_r^i 为*i*元素的毒性系数,取值采用徐争启等^[33]研究结果; C_i 为土壤中重金属*i*的监测值; C_n^i 为土壤中重金属*i*的自然背景值。

上述3种评价方法污染等级划分见表3。

2 结果与分析

2.1 农用地土壤pH值

该农田土壤的表层pH值为6.07~6.85,均低于7.00,部分点位土壤pH值小于6.50,其中,处于5.50

表3 土壤重金属污染评价方法的污染等级划分^[5,16,18]

Table 3 Classification of pollution levels for soil heavy metal pollution evaluation methods

单因子污染指数法 P_i Single factor pollution index method	内梅罗综合指数法 P_n Nemero composite index method	潜在生态风险指数法 Potential ecological risk index method					
		单因子生态风险指数 E_i Single factor ecological risk index		综合潜在生态风险指数 R_i Comprehensive potential ecological risk index			
$P_i \leq 1$	无污染 No pollution	$P_n \leq 0.7$	安全 Safe	$E_i < 40$	轻微 Slight	$RI < 150$	低生态风险 Low risk
$1 < P_i \leq 2$	轻度污染 Slight pollution	$0.7 < P_n \leq 1$	警戒线 Cordon	$40 \leq E_i < 80$	中等 Medium	$150 \leq RI < 300$	中生态风险 Medium risk
$2 < P_i \leq 3$	轻度污染 Mild pollution	$1 < P_n \leq 2$	轻度污染 Mild pollution	$80 \leq E_i < 160$	强 Strong	$300 \leq RI < 600$	较高生态风险 High risk
$3 < P_i \leq 5$	中度污染 Moderate pollution	$2 < P_n \leq 3$	中度污染 Moderate pollution	$160 \leq E_i < 320$	很强 Quite strong	$RI \geq 600$	高生态风险 Extreme risk
$P_i > 5$	重度污染 Moderate pollution	$P_n > 3$	重度污染 Moderate pollution	$E_i \geq 320$	极强 Extremely		

$< \text{pH} \leq 6.50$ 和 $6.50 < \text{pH} \leq 7.50$ 的点位个数分别为 25 和 15, 所占比例为 62.5% 和 37.5%, 频率分布图见图 2。5 个土壤剖面采样点位的土壤 pH 值的平均值、中位数均为 6.40~6.80。通过 SPSS 19.0 软件进行独立样本 t 检验显示调查区域 0~20 cm 和 40~60 cm 的土壤样品的 pH 值在 $p=0.05$ 水平下有显著性差异, 且 0~20 cm 土壤样品的 pH 值的平均值、中位数小于 40~60 cm 的土壤样品的 pH 值平均值、中位数。土壤剖面 pH 值垂直变化见图 3。综上分析区域表层土壤呈酸性, 存在酸化的趋势, 加剧了重金属的积累。

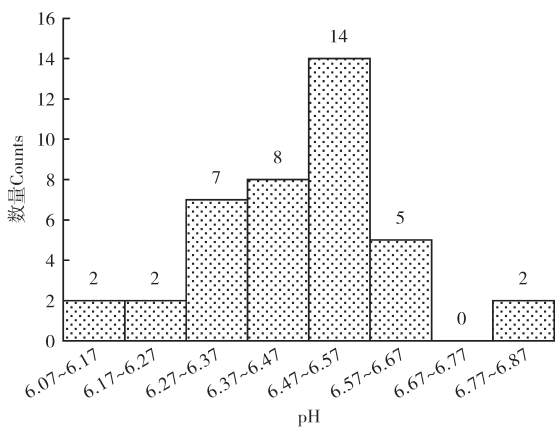


图2 表层土壤pH值频率分布

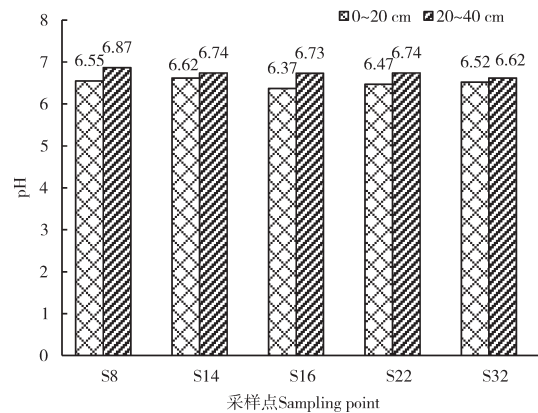


图3 土壤剖面pH值垂直变化

Figure 2 Frequency distribution of pH value in topsoil

Figure 3 Vertical variation of pH value in soil profile

2.2 土壤重金属浓度分布特征

40 个点位表层土壤的重金属浓度统计结果见表 4。Cd、As、Ni、Hg、Pb、Cr、Cu、Zn 平均含量分别为 0.71, 25.80, 33.31, 0.23, 33.17, 46.59, 37.15, 130.28 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其平均值除 As 在 pH 值大于 6.50 有轻微超标风险筛选值, 但在管控值之内, 其他重金属的平均值和各点监测值均在《土壤污染风险管控标准农用地土壤污染分先筛选值和管制》(GB15618-2018)^[29] 风险筛选值内, 总体重金属污染程度介于风险筛选值和风险管制值之间。Cd、As、Ni 这 3 种重金属在表层土壤样品中的浓度的最大值为分别为 2.12 (S27 点位), 51.70 (S19 点位), 75.4 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (S16 点位), 其含量依据 GB15618-2018 标准^[29], 均有不同程度的超标现象, Cd 的超标率高达 80%, 其中中重度超标率为 17.5%, As 为轻度和轻微超标, 极个别农田土壤存在 Ni 污染, 研究区农田土壤存在 Cd 和 As 的污染问题, Cd 污染最为严重。

除 Cr 外, 其他重金属平均值和中值均超过基准值和背景值, 8 种重金属的变异系数为 0.07~0.60, 变异程度为 $\text{Cr} > \text{Ni} > \text{Cd} > \text{Hg} > \text{As} > \text{Pb} > \text{Cu} > \text{Zn}$ 。其中 Cr、Ni、Cd、Hg 的变异系数超过 0.30, 属于强变异(变异值 < 0.10 为弱变异, $0.10 \sim 0.30$ 为中等变异, > 0.30 为强变异^[36]), 说明这些重金属浓度空间分布不均匀, 尤其是 Cr、Ni、Cd 存在点源污染的风险, 受人为活动的影响较大。研究区上游建有铜金属矿产资源开采

表4 研究区域表层土壤重金属浓度

Table 4 Heavy metal concentration in surface soil of the study area

重金属 Heavy metal	最大值/(mg·kg ⁻¹) Maximum	最小值/(mg·kg ⁻¹) Minimum	平均值/(mg·kg ⁻¹) Average	中值/(mg·kg ⁻¹) Median	基准值/(mg·kg ⁻¹) Baseline	背景值/(mg·kg ⁻¹) Background	毒害系数 Coefficient of poison	标准偏差 Standard deviation	变异系数 Coefficient of variation	衬度系数 Coefficients of the liner
Cd	2.12	0.14	0.71	0.76	0.23	0.40	30	0.34	0.48	1.74
As	51.70	13.70	25.80	25.40	14.30	13.50	10	6.76	0.26	0.94
Ni	75.40	7.70	33.31	31.80	35.20	29.70	5	16.22	0.49	0.84
Hg	0.44	0.13	0.23	0.21	0.06	0.09	40	0.07	0.32	1.50
Pb	43.50	10.20	33.17	33.95	28.70	36.50	5	6.99	0.21	1.27
Cr	124.00	10.30	46.59	39.15	85.90	61.00	2	27.85	0.60	0.71
Cu	47.00	22.60	37.15	38.95	30.00	28.50	6	6.79	0.18	0.95
Zn	149.00	108.00	130.28	130.50	86.50	88.10	5	9.54	0.07	1.02

项目,农用地利用河流和灌溉渠,矿山活动与资源利用等人为活动可引起灌溉水、区域大气降尘Cd、As等金属含量明显升高,并以大气沉降和地表径流的方式进入下游表土中,表层土壤中重金属Cd和As受上游地区的影响。

2.3 农用地土壤环境风险评价

2.3.1 单因子评价 评价标准依据为《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB15618-2018)^[29],各项重金属元素单因子评价统计结果见表5。污染指数平均值从大到小依次为Cd>As>Cu>Hg>Ni>Zn>Cr>Pb,其中,Cd单项指数平均值属于轻度污染等级,其他重金属单项指数平均值属于无污染等级。表层土壤样品Cd的点位超标率达到80.00% (32/40),轻微、轻度、中度,以及重度样品数占总样品数的比例分别为5% (2/40)、57.5% (23/40)、15% (6/40)和2.5% (1/40),最大超标倍数为6.07。表层土壤样品As点位超标率达到35.00% (14/40),其中,轻微和轻度样品数占总样品数的比例分别为32.50% (13/40)和2.50% (1/40),最大超标倍数为1.07。表层土壤样品中Ni的点位超标率为2.50% (1/40),为轻微超标,超标倍数为0.08,土壤重金属Hg、Pb、Cr、Cu、Zn的含量均未超标。

表5 研究区土壤中单因子评价结果

Table 5 Single factor evaluation results of soil in the study area

重金属 Heavy metal	最大值/(mg·kg ⁻¹) Maximum	最小值/(mg·kg ⁻¹) Minimum	平均值/(mg·kg ⁻¹) Average	中值/(mg·kg ⁻¹) Median	标准偏差 Standard deviation	变异系数 Coefficient of variation	总超率/% Total rate of super	安全利用水平占比/% Proportion of safety utilization level	
								优先利用类 Priority class	安全保护类 Security protection class
Cd	7.07	0.46	2.36	2.54	1.13	0.48	80.00	20	80
As	2.07	0.47	0.93	0.89	0.28	0.30	35.00	65	35
Ni	1.08	0.09	0.42	0.39	0.22	0.52	2.50	97.5	2.5
Hg	0.88	0.24	0.43	0.38	0.14	0.33	0.00	100	0
Pb	0.48	0.09	0.34	0.35	0.09	0.27	0.00	100	0
Cr	0.83	0.07	0.29	0.21	0.19	0.66	0.00	100	0
Cu	0.91	0.24	0.61	0.61	0.22	0.36	0.00	100	0
Zn	0.75	0.43	0.60	0.62	0.08	0.13	0.00	100	0

研究区土壤重金属Cd和As超标分布情况见图4。由图4可知,研究区Cd污染较为严重,已造成局部地区土壤重金属环境污染,应采取土壤修复措施防止污染风险扩散;除Cd外,其他重金属元素对土壤综合污染贡献不明显,仅个别点位重金属的单因子指数较高。

表层土壤样品中Cd优先保护类、安全利用类的占比分别为20% (8/40)和80% (32/40);As优先保护类、安全利用类的占比分别为65% (26/40)和35% (14/40);Ni优先保护类、安全利用类的占比分别为97.5% (39/40)和2.5% (1/40);而Hg、Pb、Cr、Cu、Zn的土壤环境质量均为优先保护类。按表层土壤重金属类别最差的因子确定点位综合评价结果显示,表层土壤样品中优先保护类、安全利用类的占比分别为15% (6/40)和85% (34/40),并且各点均属于土壤无污染或土壤风险污染可控的等级范围。

2.3.2 内梅罗综合污染评价 农田土壤各采样点内梅罗综合污染分布见图5。分析发现,研究区土壤各点位安全、警戒线、轻度、中度和重度污染样点的比例分别为7.5%、15%、45%、30%和2.5%,各点的综

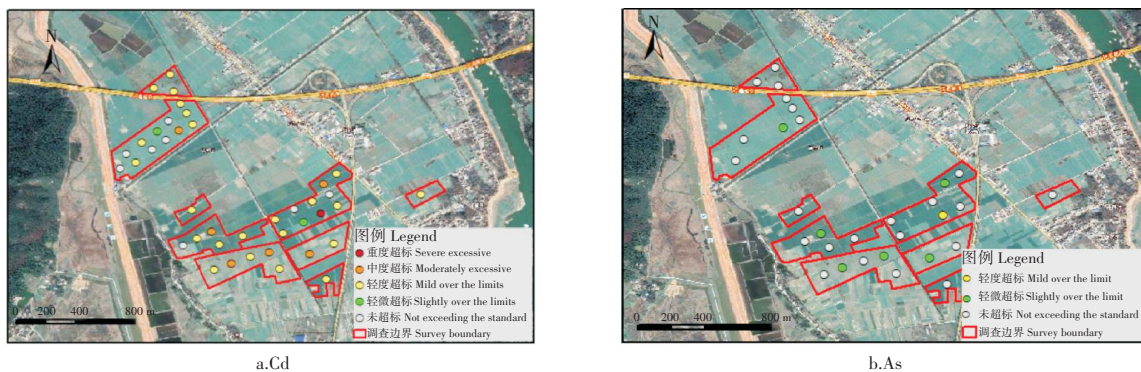


图4 农用地土壤重金属超标程度分布

Figure 4 Distribution of excessive degree of heavy metals in the study area

合污染指数多在2上下,属于轻度和重度污染水平;内梅罗综合指数平均值为1.77,超过了警戒线级别,属轻度污染等级;最高点为S27其污染指数高达5.07,属重度污染水平,同时该点也是Cd超标倍数最大的点。由图4和图5可知,Cd的单因子指数和内梅罗综合评价结果高度一致,并且轻度、中度、重度污染区域包含在Cd的轻度、中度、重度污染区域内。由单因子和内梅罗综合评价结果可知重金属Cd是造成该研究区土壤污染的最主要的重金属元素。

2.3.3 潜在生态风险评价 由表6可知,研究区表层土壤中8种重金属元素的单因子潜在生态风险指数(E_i)大小依次为Hg>Cd>As>Cu>Ni>Pb>Cr>Zn,其中Hg的潜在生态风险指数范围为57.78~196.00,以强风险等级为主;而中等风险、强风险、很强风险的占比分别为32.5% (13/40)、60% (24/40)和7.5% (3/40)。Cd的 E_i 指数范围为10.27~157.82,并以中等风险等级为主,其与强风险的占比分别为72.5% (29/40)、2.5% (1/40),见图6。其他重金属 E_i 均小于40,处于低生态风险水平。分析结果表明,各重金属元素中Hg的潜在生态危害最大,其次为Cd元素。虽然Hg的各点监测浓度均未超过筛选值,但其相对于土壤背景值较大,各点监测值和背景值比值平均为2.56,而其危害系数在8个重金属中最高,因此,应加强研究区土壤Hg的风险管控,重视潜在的生态风险。



图5 研究区各采样点内梅罗综合污染分布

Figure 5 Nemero comprehensive pollution distribution of the each sampling site in the study area

表6 研究区土壤潜在生态风险评价

Table 6 Assessment of potential ecological risk of soil in the study area

项目 Project	单因子潜在生态风险指数(E_i) Single factor potential ecological risk index								综合潜在生态风险指数(R_i) Comprehensive potential ecological risk index
	Cd	Hg	Pb	As	Cr	Cu	Zn	Ni	
最大值 Maximum value	157.82	196.00	5.96	38.30	4.07	10.57	1.69	12.69	276.32
最小值 Minimum value	10.27	57.78	1.40	10.15	0.34	4.76	1.23	1.30	118.58
均值 Mean value	52.65	102.00	4.54	19.11	1.53	7.82	1.48	5.61	194.73
风险级别 Risk level	中等 Intermediate	强 Strong	轻微 Slight	轻微 Slight	轻微 Slight	轻微 Slight	轻微 Slight	轻微 Slight	中等 Intermediate

衬度系数在一定程度上代表了表层土壤中元素的富集程度^[18]。本研究中,Hg和Cd的衬度系数分别为1.50和1.74(表4),说明这两种重金属在土壤表层中富集明显,受人类活动影响大。图7为两种重金属在土壤表层(0~20 cm)和剖面层(40~60 cm)浓度特征,除S8点位外,其余点位的Hg和Cd表层含量相对剖面层明显增高,说明可能受到矿山开采、种植等人类活动的影响,表层土壤中重金属Cd、Hg有一定的累积。

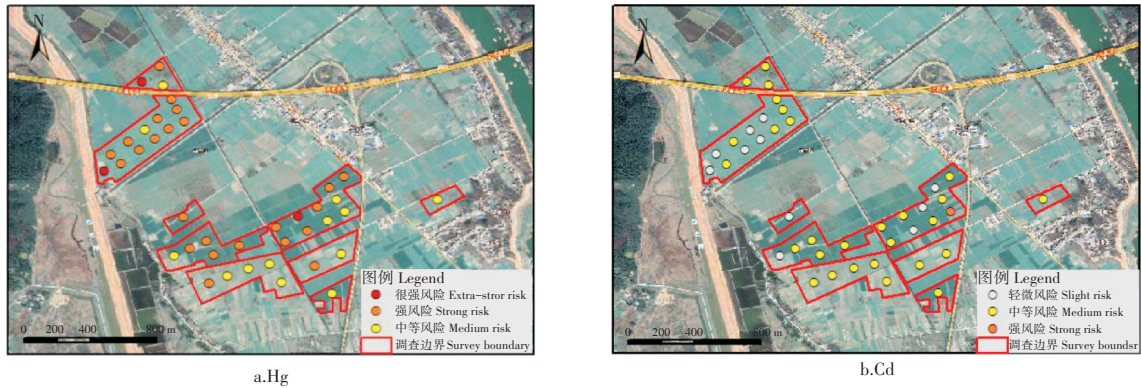


图6 重金属Hg和Cd单因子潜在风险分布

Figure 6 Single factor potential risk distribution of heavy metals Hg and Cd in the study area

同时,研究区表层土壤重金属的综合潜在生态风险(R_i)平均值为194.73,为中等生态风险等级。土壤各重金属对 R_i 贡献程度依次为 $Hg > Cd > As > Cu > Ni > Pb > Cr > Zn$,贡献率分别为52.4%、27.0%、9.8%、4.0%、2.9%、2.3%、0.8%和0.7%。各点位低、中等潜在生态风险程度的比例分别为17.5% (7/40)和82.5% (33/40),整体上处于低等和中等程度的潜在生态风险,各点位潜在生态风险分布见图8。根据单因子和内梅罗综合评价结果可知,应加强对Cd的监测和污染控制,Cd是研究区污染程度最高的重金属元素,Hg是潜在生态风险最高的元素,虽然Hg含量较低,污染风险较小,但是生态风险大,需加强对Hg的潜在生态风险管控。

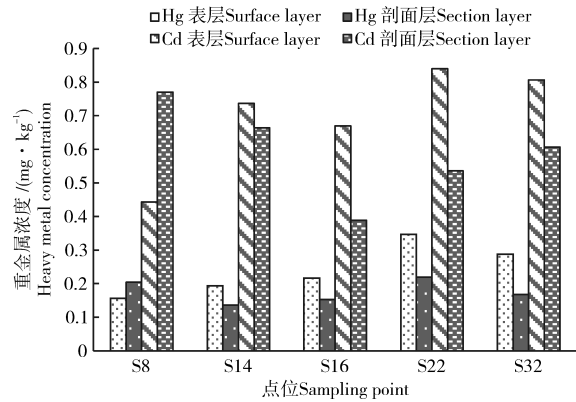


图7 研究区Hg和Cd表层与剖面层含量对比

Figure 7 Comparison of surface and profile layers of Hg and Cd in the study area

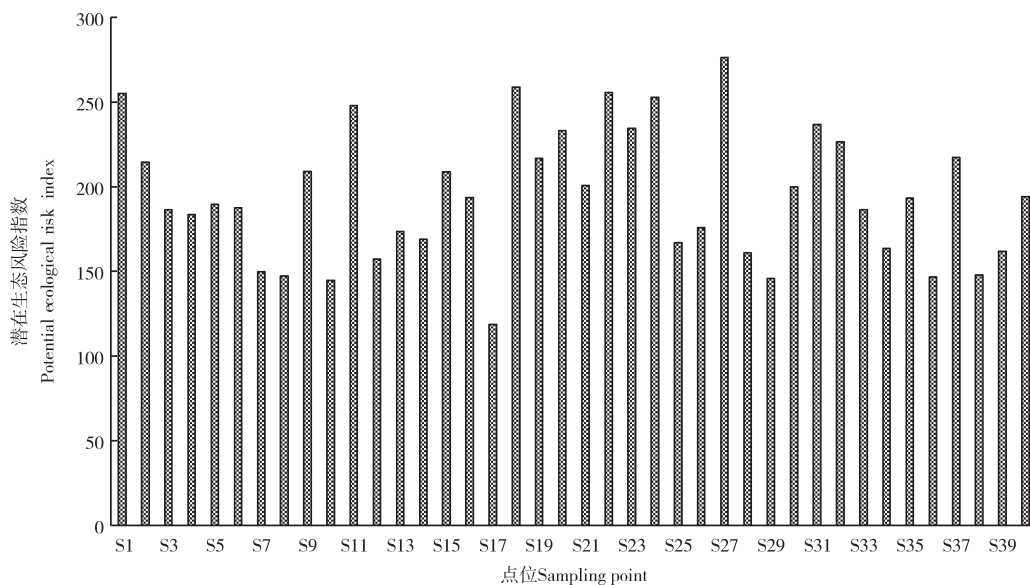


图8 采样点潜在生态风险分布

Figure 8 Distribution of potential ecological risks in each sampling site

2.4 土壤重金属污染原因初步分析

2.4.1 开矿废水的影响 矿产开采是造成土壤重金属污染的主要原因之一,其中以有色金属矿产开采和冶炼过程造成的污染较为突出^[37-38]。该农用地上游有铜山矿业公司,其铜矿的开采历史较长,开矿过程中排放的生产废水pH值较低,每年洪涝季节,铜山矿的地表水流经长林河,倒灌到独山河,导致该农灌灌溉水造成污染,经对灌溉渠水进行监测发现:灌溉水样品中Ni、Cr、Cd、As的检出率为100%,Cu、Zn在灌溉水中的检出率较低,为33%,Cd的最大值为 $5.59 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,As的最大值为 $7.89 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,Ni的最大值为 $5.95 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,受重金属污染的灌溉水污染土壤,造成土壤重金属的积累。

2.4.2 酸性降雨的影响 自然条件下土壤淋溶作用会导致交换性盐基阳离子淋失^[39]。池州市年降水量较多,多年平均降雨量为150~170 cm,大量雨水的淋溶作用使易溶盐的盐基离子减少,进而被氢离子取代,致使土壤pH值偏低。另外,在2016年之前池州市连续多年均为酸雨城市,其中,2013年为安徽省酸雨频率最高的城市,达到85.5%,为较重酸雨城市,同时,2009年酸雨频率高达98.6%^[40]。长期的酸性降雨,对地表水和土壤pH值产生了明显的影响,是导致土壤pH值降低的原因之一。土壤pH值是土壤环境质量标准值的重要参数,可以影响土壤重金属的赋存形态、吸附解吸和迁移转化^[41]等环境生物地球化学行为,而且pH值的降低也会激活土壤中重金属元素的活性,加速重金属积累。

2.4.3 农业活动的影响 研究表明,长期施用化肥会导致土壤pH值下降^[42-43]。调查发现研究区域对化肥的合理和减量施用水平较低。长期以来,农户基本是采用磷酸一铵(磷酸二铵)和矿质磷肥。虽然近年来逐步使用复合肥,但是有机肥的施用率依旧较低,化肥长期施用是造成土壤中重金属含量的升高的一个因素。

3 讨论与结论

该农田土壤重金属在土壤表层的积累,主要受上游地区的影响。研究区上游建有铜金属矿产资源开采项目,农用地利用河流和灌溉渠,矿山活动与资源利用等人为活动可以灌溉水、区域大气降尘和地表径流等方式使重金属在下游表层土壤积累。一些学者的研究结果也佐证这一说法^[8,44-45]。该农田土壤的Hg和Cd富集明显,除地球化学特征影响,更表明受人类活动影响较大,这与前人对池州地区土壤重金属化学特征、土壤重金属生态风险评价,以及对安徽江淮地区土壤重金属地球化学特征的研究结果基本一致,认为工农业生产及生活排污加剧表层土壤中Hg、Cd等累积,两者对研究区农田土壤的生态风险贡献高^[17,34-35]。

表层土壤中8种重金属Cd、As、Ni、Hg、Pb、Cr、Cu和Zn的平均含量分别为0.71, 25.80, 33.31, 0.23, 33.17, 46.59, 37.15, 130.28 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,其中,除Cr外其他重金属平均值和中值均超过背景值,而且Cd、As、Ni的含量均有不同程度的超标现象,Cd的污染最为严重,且该区域农田土壤存在酸化的趋势,加剧了重金属的污染。

各重金属元素单因子污染指数平均值从大到小依次为Cd>As>Cu>Hg>Ni>Zn>Cr>Pb,其中,Cd为轻度污染等级。内梅罗综合污染评价安全、警戒线、轻度、中度和重度污染的等级的比例分别为7.5%、15%、45%、30%和2.5%,介于轻度和重度污染水平,土壤重金属内梅罗综合指数平均值为1.77,超过了警戒线级别,属轻度污染等级。

8种重金属元素的单因子潜在生态风险(E_i)指数大小依次为Hg>Cd>As>Cu>Ni>Pb>Cr>Zn,其中,各重金属元素中Hg潜在生态危害最大,其次为Cd元素。表层土壤中重金属综合潜在生态风险(RI)平均值为194.73,为中等生态风险等级。该农用地土壤重金属污染需要引起关注,尤其需加强对Cd和Hg的风险管控。

参考文献:

- [1] 徐建明,何丽芝,唐先进,等.中国重金属污染耕地土壤安全利用存在问题与建议[J].土壤学报,2023,60(5):1289-1296.
- [2] 施姜丹,吴杨洋,黄蕾.中国表层土壤中重金属时空分布特征及影响因素研究——基于文献计量分析[J].环境生态学,2022,4(5):1-7.

- [3] 陈文轩,李茜,王珍,等.中国农田土壤重金属空间分布特征及污染评价[J].环境科学,2020,41(6):2822-2833.
- [4] DONG B,ZHANG R Z,GAN Y D,et al.Multiple methods for the identification of heavy metal sources in cropland soils from a resource-based region[J].The Science of the Total Environment,2019,651(Pt2):3127-3138.
- [5] 蒋璇,熊晶,吴亦潇,等.湖北省农田土壤重金属来源解析与质量评价[J].环境科学与技术,2019,42(12):211-217.
- [6] 赵靓,梁云平,陈倩,等.中国北方某市城市绿地土壤重金属空间分布特征、污染评价及来源解析[J].环境科学,2020,41(12):5552-5561.
- [7] 张富贵,彭敏,王惠艳,等.基于乡镇尺度的西南重金属高背景区土壤重金属生态风险评价[J].环境科学,2020,41(9):4197-4209.
- [8] 韦壮绵,陈华清,张煜,等.湘南柿竹园东河流域农田土壤重金属污染特征及风险评价[J].环境化学,2020,39(10):2753-2764.
- [9] 林婉晴,赵志钢,杨帆,等.非磷系吸附剂对废水中铜离子的高选择性去除作用[J].大连工业大学学报,2022,41(1):27-30.
- [10] 柴磊,王新,马良,等.基于PMF模型的兰州耕地土壤重金属来源解析[J].中国环境科学,2020,40(9):3919-3929.
- [11] 陈佳林,李仁英,谢晓金,等.南京市绿地土壤重金属分布特征及其污染评价[J].环境科学,2021,42(2):909-916.
- [12] 郑影怡,刘杰,蒋萍萍,等.河池市某废弃冶炼厂周边农田土壤重金属污染特征及风险评价[J].环境工程,2021,39(5):238-245.
- [13] 马杰,刘萍,刘今朝,等.重庆市煤矸山周边农用地土壤重金属污染评价和定量溯源解析[J].环境科学,2022,43(12):5698-5709.
- [14] 李丁,王济,宣斌,等.贵阳南部近郊蔬菜重金属污染状况及健康风险评估[J].环境污染与防治,2019,41(11):1362-1367,1373.
- [15] 张又文,韩建华,涂棋,等.天津市郊农田土壤重金属积累特征及评价[J].生态与农村环境学报,2019,35(11):1445-1452.
- [16] 张爱玲,孙泽飞,赵健,等.荧光碳量子点对印染废水中镉离子的快速检测[J].沈阳工业大学学报,2022,44(6):631-635.
- [17] 冯宪明,周金喜,王邻睦,等.含油污泥热化学清洗剂研究进展[J].辽宁石油化工大学学报,2023,43(5):7-13.
- [18] 宋波,杨子杰,张霞,等.广西西江流域土壤镉含量特征及风险评估[J].环境科学,2018,39(4):1888-1900.
- [19] 国家环境保护总局.土壤环境监测技术规范:HJ/T 166—2004[S].北京:中国环境科学出版社,2004.
- [20] 中华人民共和国农业部.农田土壤环境质量监测技术规范:NY/T 395—2012[S].北京:中国农业出版社,2012.
- [21] 中华人民共和国环境保护部.场地环境调查技术导则:HJ 25.1—2014[S].北京:中国环境科学出版社,2014.
- [22] 中华人民共和国环境保护部.场地环境监测技术导则:HJ 25.2—2014[S].北京:中国环境科学出版社,2014.
- [23] 生态环境部.土壤pH值的测定 点位法HJ926—2018[S].北京:中国环境出版社,2018.
- [24] 中华人民共和国环境保护部.土壤和沉积物 汞、砷、硒、铋、锑的测定 微波消解/原子荧光法:HJ 680—2013[S].北京:中国环境科学出版社,2014.
- [25] 国家环境保护总局.土壤质量 铅、镉的测定 石墨炉原子吸收分光光度法:GB/T 17141—1997[S].北京:中国环境科学出版社,1997.
- [26] 国家环境保护总局.土壤质量 铜、锌的测定 火焰原子吸收分光光度法:GB/T 17138—1997[S].北京:中国环境科学出版社,1997.
- [27] 国家环境保护总局.土壤质量 镍的测定 火焰原子吸收分光光度法:GB/T 17139—1997[S].北京:中国环境科学出版社,1997.
- [28] 国家环境保护总局.土壤质量 总铬的测定 火焰原子吸收分光光度法:GB/T 17137—1997[S].北京:中国环境科学出版社,1997.
- [29] 生态环境部,国家市场监督管理总局.土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准:GB 15618—2018[S].北京:中国标准出版社,2018.
- [30] 刘强,吴奇,吴灿,等.南京八卦洲农用地表层土壤重金属分布特征及风险评价[J].环境保护科学,2020,46(2):127-136.
- [31] 张成丽,李霜,雷雨辰,等.开封某农田土壤重金属和微塑料空间分布及生态风险[J].沈阳农业大学学报,2023,54

(6):693-701.

- [32] 何如海,薛中俊,刘娜,等.两种土地利用方式下土壤重金属污染特征与评价[J].长江流域资源与环境,2020,29(8):1858-1864.
- [33] 徐争启,倪师军,庑先国,等.潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J].环境科学与技术,2008,31(2):112-115.
- [34] 郭炳跃,祁超,梁胜跃,等.安徽池州地区土壤地球化学特征与污染评价[J].地质学刊,2019,43(4):652-660.
- [35] 陈兴仁,陈富荣,贾十军,等.安徽省江淮流域土壤地球化学基准值与背景值研究[J].中国地质,2012,39(2):302-310.
- [36] 张敬雅,李湘凌,章凌曦,等.安徽庐江县砖桥潜在富硒土壤重金属元素空间变异与来源[J].环境科学研究,2019,32(9):1594-1603.
- [37] 夏毅民,郑刘根,邱征,等.铜陵某富硫尾矿库周边土壤重金属污染特征及风险评价[J].环境污染与防治,2020,42(4):493-499.
- [38] 史国武.有色金属尾矿库对周边土壤环境污染特征评价及治理[J].山西冶金,2020,43(3):89-91.
- [39] 黄至颖,刘鸿雁,冉晓追,等.贵州省土壤pH时空变化趋势分析[J].山地农业生物学报,2020,39(4):21-29.
- [40] 安徽省生态环境保护厅.安徽省环境质量公报(2010-2019)[EB/OL].<https://sthjt.ah.gov.cn>.
- [41] 林小兵,张秋梅,周利军,等.不同母质发育及pH的农田土壤重金属含量差异[J].环境生态学,2021,3(1):83-88.
- [42] 李娟,张立成,章明清,等.长期施用尿素降低赤红壤旱地耕层pH的特征与预测[J].植物营养与肥料学报,2022,28(12):2161-2171.
- [43] 唐贤,梁丰,徐明岗,等.长期施用化肥对农田土壤pH影响的整合分析[J].吉林农业大学学报,2020,42(3):316-321.
- [44] 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.
- [45] 何卫平,梅金华,李剑.湘南柿竹园矿区尾矿库尾矿重金属含量特征及环境影响浅析[J].国土资源导刊,2016,13(3):22-26.

[责任编辑 李薇]