

# 鄱阳湖西南边缘农田土壤重金属污染特征及环境现状

刘佳伟<sup>a</sup>,杨明生<sup>a,b</sup>,段磊光<sup>a</sup>,冯斐<sup>a,b</sup>

(南昌大学 a.资源环境与化工学院;b.鄱阳湖环境与资源利用教育部重点实验室,南昌 330031)

**摘要:**采集鄱阳湖西南边缘地带农田土壤,分析重金属 Pb,Zn,As,Cr 和 Cu 含量,探讨鄱阳湖边缘农田土壤重金属间的关系,评价其环境质量现状.重金属间相关性分析表明,鄱阳湖边缘农田土壤重金属具有不同的源性,Pb 和 Zn 相关系数为 0.960,具有良好的相关性,以异地源为主,由流域内赣江水系携带进入土壤;而 As,Cu 和 Cr 之间相关性系数分别为 0.690、0.640 和 0.850,具有相关性,以原地源为主,由当地农业活动进入土壤.单因子指数显示,研究区重金属元素 Pb,Zn,As,Cr 和 Cu 质量含量超背景值比例分别为 25%、50%、25%、17%、58%,显示明显的人类活动影响.Cu,Zn 和 As 的内梅罗综合指数分别为 1.52、1.09 和 1.08,属轻度污染,Pb 和 Cr 为 0.76 和 0.85,达到警戒水平,研究区内梅罗综合指数为 1.31,显示轻度污染,综合潜在生态风险指数  $R_1$  值为 21.25,为轻微危害等级.

**关键词:**鄱阳湖边缘;农田土壤;重金属

**中图分类号:**X53

**文献标志码:**A

土壤是人类赖以生存的物质基础,土壤发育需要经历漫长的地质过程,而工农业生产引入大量的污染物质却能使土壤环境质量迅速恶化<sup>[1]</sup>.土壤重金属污染是目前我国土壤的重要环境问题<sup>[2]</sup>,耕地土壤质量不容乐观<sup>[3-5]</sup>,由耕作土壤导致的农产品重金属污染风险加大<sup>[6]</sup>.

鄱阳湖及其流域的土壤重金属污染已经引起广泛关注<sup>[7-8]</sup>,鄱阳湖平原农田土壤 Hg,As,Pb,Cd,Cu,Cr,Zn 的平均含量超过区域背景值,Cr,Cu,Cd 累积富集严重,鄱阳湖区土壤重金属污染较轻,周围县市污染较严重,部分农田土壤的重金属污染已经威胁到农作物产量和质量<sup>[9-10]</sup>.鄱阳湖流域内矿产资源丰富,采矿活动产生的重金属通过河流迁移进入土壤,入湖支流乐安江受大型铜矿开采影响,矿集区下游河流沉积物及其沿程农田土壤重金属污染接近警戒线<sup>[11]</sup>.鄱阳湖农家菜地土壤也存在重金属的轻微污染,临近工业较发达地区的农家菜地重金属生态风险大,而工业落后地区则相对较小,工业发展对土壤重金属污染影响较大<sup>[12]</sup>.湖泊作为流域汇聚地,常形成土壤肥沃的大平原,成为人类高度聚集区域<sup>[13]</sup>,鄱阳湖作为长江中下游最大的淡水湖泊,盆地肥沃的冲积平原成为我国重要的水稻粮食生产基地,其土壤环境受到社会各界高度关注,以前对鄱阳湖土壤重金属方面的研究均选择大区域或分散点<sup>[9-12]</sup>,而湖泊-陆地接壤地带是湖泊生态环境的敏感区,该区域内的陆源物质对湖泊沉积和水体环境均有重要影响,但鄱阳湖湖泊-陆地接壤地带土壤重金属方面的研究未见报道.因此,本文将研究鄱阳湖湖泊-陆地接壤地带农田土壤重金属,选择鄱阳湖西南部边缘地带典型耕地,采集耕作层土壤,分析其重金属间的相互关系,多指标评价重金属污染现状,为鄱阳湖周边耕作土壤及湖泊生态环境保护提供可靠的科学资料.

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集

鄱阳湖边缘地带西南部由防洪大堤分开为湖面与农田,该防洪大堤为防百年一遇洪水修建,堤坝内侧农田受鄱阳湖流域赣江水系控制,赣江起源瑞金,流经赣州、吉安、南昌后,分为北支、中支和南支,最终进入鄱阳

收稿日期:2020-10-14;修回日期:2021-03-23.

基金项目:国家自然科学基金(41561045)

作者简介:刘佳伟(1994-),男,江西永丰人,南昌大学硕士研究生,主要从事土壤环境研究,E-mail:1443159090@qq.com.

通信作者:杨明生(1976-),男,江西瑞金人,南昌大学副教授,主要从事鄱阳湖生态环境研究,E-mail:yangmsh@ncu.edu.cn.

湖.样品采集区域种植水稻,一年两季.由2019年12月采集堤坝内侧的耕作区棕黄色水稻土壤,共设12个采样点(图1),每个采样点地块约100 m×100 m,地块距堤坝大于200 m,确保样品未受堤坝土壤的影响.对角线法采集0~20 cm深的耕作层土壤样品共5个,样品运回实验室后迅速通风风干,除去植物残体后,各采样点5个样品取等质量混匀,研磨至100目(0.149 mm)待测.

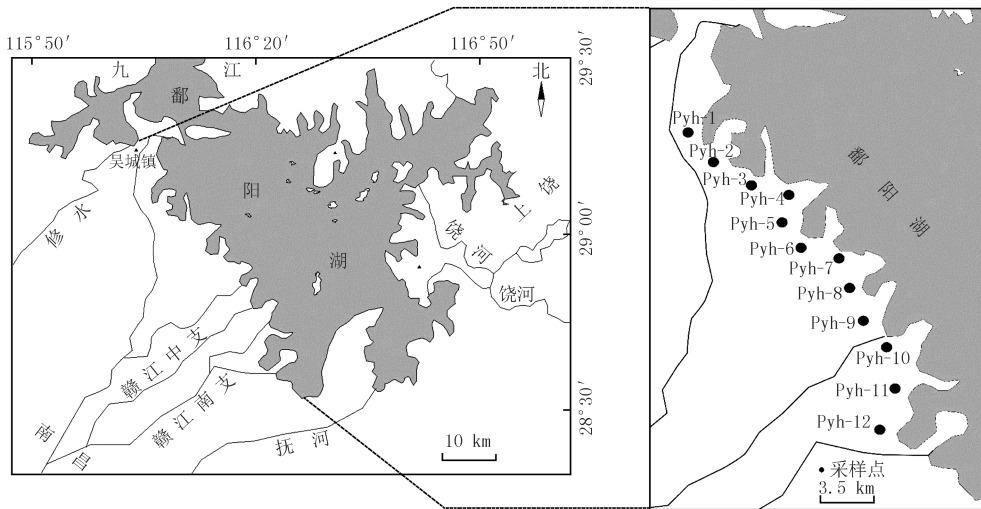


图1 采样点分布图

Fig.1 Spatial distribution of sampling site

## 1.2 实验方法

待测样品由  $\text{HNO}_3$ — $\text{HF}$ — $\text{HClO}_4$  三酸消解法消解<sup>[14]</sup>,称取0.5 g待测土样于聚四氟乙烯烧杯,加入少许去离子水湿润,加入浓  $\text{HNO}_3$  15 mL,电热板缓慢加热分解,回流,蒸至近干;稍冷后加入  $\text{HNO}_3$  和  $\text{HClO}_4$  (体积比1:4),加热继续分解,蒸至近干;稍冷后反复加入5 mL  $\text{HF}$  和2 mL  $\text{HClO}_4$ ,蒸至近干,样品蒸至近白色,定容至50 mL待测. As的测定用王水消解,原子荧光法(AFS)分析(GB/T 22105—2008), Cr, Cu, Pb, Zn采用高分辨率电感耦合等离子体原子发射光谱法(HR-ICP-AES)分析.质量控制采用GSS-14标准物质进行加标回收, Cr, Cu, Pb, Zn和As的回收率分别为95.4%~103.2%、96.6%~102.5%、95.3%~103.7%、93.4%~98.3%和91.1%~97.9%,满足质量控制要求.为保证仪器分析的可靠性,每个样品仪器分析3次,各重金属元素测定结果相对标准偏差小于5%.

## 2 结果讨论

### 2.1 土壤重金属含量

鄱阳湖边缘典型农田土壤类型均为黄棕壤,重金属Pb, Zn, As, Cr, Cu的含量分别为18.0~35.0  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 33.0~87.0  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 7.0~13.0  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 22.0~48.0  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 17.0~27.0  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (表1),对比环鄱阳湖农田土壤背景值,样品的超标率分别为25%、50%、25%、17%、58%,重金属Cu的平均含量为环鄱阳湖区农田土壤背景值的1.34倍,显示人类活动已经引起土壤重金属累积效应.比较《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018),重金属Pb, Zn, As, Cr, Cu含量均未超出风险筛选值和管制值,研究区土壤尚未受到重金属污染.研究区农田土壤Pb, Zn和Cu的含量明显低于受大型铜矿影响的鄱阳湖流域乐安河下游农田重金属含量<sup>[11]</sup>, Cu作为乐安河重金属污染的特征元素,在其下游农田土壤的平均含量为52.2  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,为研究区的2.34倍.因此,研究区土壤的重金属Cu并非受矿区影响,变异系数揭示了研究区土壤重金属的空间分布,反映区域内的人类活动差异特征,变异系数(CV) > 36%为高度变异, 36% ≥ CV > 15%为中等变异, CV ≤ 15%为弱变异<sup>[15]</sup>,研究区Pb, Zn, As, Cr的变异系数介于15%至36%之间,属于中等变异特征, Cu的变异系数为5%,属于弱变异特征,研究区为典型的水稻种植地,农药化肥等物资的使用在空间上变化相对较小,导致重金属空间变异相对较小.

表 1 重金属含量和描述性统计

Tab. 1 Contents and summary statistics of heavy metals

采样点及相关参数	Pb	Zn	As	Cr	Cu	采样点及相关参数	Pb	Zn	As	Cr	Cu
Pyh-1/(mg·kg <sup>-1</sup> )	34.0	81.0	9.6	31.0	25.0	Pyh-11/(mg·kg <sup>-1</sup> )	27.0	67.0	11.0	38.0	23.0
Pyh-2/(mg·kg <sup>-1</sup> )	24.0	59.0	7.2	22.0	18.0	Pyh-12/(mg·kg <sup>-1</sup> )	18.0	50.0	10.0	48.0	25.0
Pyh-3/(mg·kg <sup>-1</sup> )	30.0	72.0	7.6	27.0	20.0	平均值/(mg·kg <sup>-1</sup> )	27.3	66.3	9.3	33.6	22.3
Pyh-4/(mg·kg <sup>-1</sup> )	29.0	73.0	10.0	27.0	20.0	最大值/(mg·kg <sup>-1</sup> )	35.0	87.0	13.0	48.0	27.0
Pyh-5/(mg·kg <sup>-1</sup> )	33.0	84.0	10.0	33.0	25.0	最小值/(mg·kg <sup>-1</sup> )	18.0	33.0	7.0	22.0	17.0
Pyh-6/(mg·kg <sup>-1</sup> )	29.0	66.0	7.7	28.0	19.0	标准差/(mg·kg <sup>-1</sup> )	5.7	15.5	1.9	8.1	1.0
Pyh-7/(mg·kg <sup>-1</sup> )	35.0	87.0	11.0	36.0	27.0	变异系数/%	21	23	20	24	5
Pyh-8/(mg·kg <sup>-1</sup> )	28.0	70.0	8.0	29.0	22.0	土壤背景值 <sup>[9]</sup> /(mg·kg <sup>-1</sup> )	32.1	69.0	10.4	48.0	20.8
Pyh-9/(mg·kg <sup>-1</sup> )	18.0	33.0	7.0	36.0	17.0	风险筛选值 <sup>1</sup> /(mg·kg <sup>-1</sup> )	140	250	25	300	100
Pyh-10/(mg·kg <sup>-1</sup> )	23.0	54.0	13.0	48.0	27.0	风险管制值 <sup>2</sup> /(mg·kg <sup>-1</sup> )	700	—	120	1 000	—

注:1.《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018,农用地土壤污染风险筛选值,pH 6.5~7.5);

2.《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018,农用地土壤污染风险管制值,pH 6.5~7.5).

## 2.2 重金属相关性

在同一区域内,重金属污染的途径可以是单一的,也可能是多途径的,但对于相同来源的重金属污染,其土壤重金属元素间往往存在一定的相关性,因此,土壤重金属间的相关性程度反映污染源属性<sup>[16]</sup>.鄱阳湖边缘典型农田土壤重金属间的 Pearson 相关性分析显示见表 2,重金属 Pb 和 Zn 的相关系数  $r=0.960$ ,大于  $r_{0.01}=0.708$  和  $r_{0.05}=0.576$  相关系数值,表明 Pb 和 Zn 在  $\alpha=0.05$  和  $\alpha=0.01$  置信水平上二者存在非常好的相关关系,Pb 和 Zn 具有相同的源属性.Pb 和 As,Cr,Cu 的相关系数分别为 0.150、-0.450、0.330,小

于  $r_{0.01}=0.708$  和  $r_{0.05}=0.576$  相关系数值,表明 Pb 与 As,Cr,Cu 在  $\alpha=0.05$  和  $\alpha=0.01$  均不存在相关关系,Pb 与 As,Cr,Cu 的源属性不同,Zn 和 As,Cr,Cu 的相关系数分别为 0.250、-0.360、0.440,低于置信水平  $\alpha=0.05$  和  $\alpha=0.01$  要求达到的相关系数值,显示 Zn 与 As,Cr,Cu 具有不同源属性.As,Cr 和 Cu 之间的相关性系数分别为 0.690、0.640 和 0.850,As 和 Cu 的相关系数数值为 0.850,大于  $r_{0.01}=0.708$  和  $r_{0.05}=0.576$  相关系数值,在  $\alpha=0.05$  和  $\alpha=0.01$  置信水平上均存在良好的相关性,Cr 与 As 和 Cr 与 Cu 的相关系数数值为 0.690 和 0.640,大于  $r_{0.05}=0.576$  相关系数值,显示在  $\alpha=0.05$  置信水平上具有相关性.由此,研究区水稻土壤的重金属存在两种不同的来源,Pb 和 Zn 来源相同,而 As,Cr 和 Cu 为另一来源.

## 2.3 鄱阳湖边缘典型农田土壤重金属环境评价

### 2.3.1 单因子指数评价

单因子指数法是常用的土壤、大气和水的重金属污染评价方法,能够直观地反映某一元素相对于背景值的变化情况,计算式为:  $P_i = C_i/B_i$  ( $P_i$  为土壤重金属元素  $i$  的污染指数; $C_i$  为实测值; $B_i$  为背景值).当  $P_i \leq 1$  时,土壤未受污染, $P_i > 1$  时,土壤受到人为污染,且  $P_i$  值越大,污染越严重,指数等级划分见表 3.研究区土壤重金属元素 Pb,Zn,As,Cr 和 Cu 的单因子指数值分别为 0.56~1.09、0.48~1.26、0.67~1.25、0.46~1.02 和 0.82~1.30,单因子指数值超背景率分别为 25%、50%、25%、17% 和 58%(表 4),表明 Pb,Zn,As,Cr 和 Cu 含量在研究区均出现了超背景值的情况,人类活动已使得部分采样点的重金属含量呈增大趋势.单因子指数均值反映各元素的区域整体情况,Pb,Zn,As,Cr 和 Cu 指数均值分别为 0.85、0.96、0.90、0.70 和 1.07,其中 Cu 的指数均值大于 1,表明人类活动已使得 Cu 含量在研究区域整体水平上的偏高,研究区水

表 2 土壤重金属间的相关系数( $n=12$ )Tab. 2 Relationships between soil heavy metals( $n=12$ )

	Pb	Zn	As	Cr	Cu
Pb	1.000				
Zn	0.960**	1.000			
As	0.150	0.250	1.000		
Cr	-0.450	-0.360	0.690*	1.000	
Cu	0.330	0.440	0.850**	0.640*	1.000

注: \*\* 表示  $p < 0.01$ , \* 表示  $p < 0.05$ .

稻土壤的单因子指数由大到小依次为 Cu,Zn,As,Pb,Cr.

表 3 不同评价指数污染等级划分标准

Tab. 3 Standards for classification of pollution index

单因子指数		内梅罗综合指数		潜在生态危害指数		
$P_i$	污染程度	$P_N$	污染程度	$E_i^i$	$R_1$	风险程度
$P_i \leq 1$	无污染	$P_N \leq 0.7$	清洁	$E_i^i \leq 40$	$R_1 \leq 150$	轻微危害
$1 < P_i \leq 2$	轻微污染	$0.7 < P_N \leq 1$	警戒	$40 < E_i^i \leq 80$	$150 < R_1 \leq 300$	中等危害
$2 < P_i \leq 3$	轻度污染	$1 < P_N \leq 2$	轻度污染	$80 < E_i^i \leq 160$	$300 < R_1 \leq 600$	强危害
$3 < P_i \leq 5$	中度污染	$2 < P_N \leq 3$	中度污染	$160 < E_i^i \leq 320$	$R_1 > 600$	很强危害
$P_i > 5$	重度污染	$P_N > 3$	重度污染	$E_i^i > 320$		极强危害

2.3.2 内梅罗综合指数评价

内梅罗综合指数既反映研究指标的平均水平,突出极值的影响,又能避免加权法过程中的主观权系数的影响,克服均值法中各种污染平均分担的缺陷<sup>[17]</sup>,计算式为: $P_{综} = \{[(C_i/S_i)_{max}^2 + (C_i/S_i)_{ave}^2]/2\}^{1/2}$ , ( $P_{综}$  为综合污染指数值;  $C_i$  为实测值;  $S_i$  为限量标准值或背景值). 研究区重金属元素 Pb, Zn, As, Cr 和 Cu 的内梅罗综合指数值为 0.76、1.09、1.08、0.85 和 1.52(表 5),对比内梅罗综合指数分类标准(表 3),重金属元素 Cu, Zn 和 As 的污染程度为轻度污染, Pb 和 Cr 达到警戒水平,区域内梅罗综合指数值为 1.31,为轻度污染.杀虫剂和除草剂常含有 As,作为毒害性较大的元素,在农用制剂中已禁止多年,但以前的使用已导致在土壤中积累.此外,农用有机肥和化肥的使用也可导致土壤 As 含量增大<sup>[18]</sup>.内梅罗综合指数显示,

相对于鄱阳湖平原农田土壤的背景值而言,人类活动已使得鄱阳湖边缘农田土壤 Cu, Zn 和 As 元素达到轻度污染.研究区为高强度水稻种植地,需要大量使用杀虫剂、除草剂、化肥和其他农用制剂,土壤 As 污染具有明显的农业源特征,因此,需要在农业活动中关注重金属对土壤的污染.

2.3.3 潜在生态风险评价

1980 年瑞典学者 HAKANSON 提出潜在生态风险指数<sup>[19]</sup>,指数计算公式: $E_r^i = T_r^i \times C_i/C_b^i, R_1 = \sum_{i=1}^n E_r^i$ , (式中: $E_r^i$  为土壤重金属  $i$  的潜在生态风险指数,  $C_i$  为实测值,  $C_b^i$  为背景值,  $T_r^i$  为毒性响应系数,推荐值: Zn 为 1, Cr 为 2, Cu 为 Pb 为 5, As 为 10<sup>[20]</sup>,  $R_1$  为沉积物中多种重金属元素的综合潜在生态风险指数),指数污染等级划分见表 3.鄱阳湖边缘农田土壤 Pb, Zn, As, Cr 和 Cu 的  $E_r^i$  值分别为 2.64~4.2、0.31~0.97、6.73~10.57、1.5~3.41 和 4.08~8.41(表 6),5 种重金属元素的  $E_r^i$  均值( $\bar{E}_r^i$ )由

表 4 农田土壤单因子指数值

Tab. 4 Evaluation results of single factor index of soil heavy metals

元素	$P_i$	$\bar{P}_i$	超背景率	综合指数值
Pb	0.56~1.09	0.85	25%	0.90
Zn	0.48~1.26	0.96	50%	
As	0.67~1.25	0.90	25%	
Cr	0.46~1.02	0.70	17%	
Cu	0.82~1.30	1.07	58%	

表 5 农田土壤重金属内梅罗综合指数

Tab. 5 Nemerow comprehensive index evaluation results

重金属元素	Cu	Pb	Cr	Zn	As
元素内梅罗指数	1.52	0.76	0.85	1.09	1.08
污染程度	轻度污染	警戒	警戒	轻度污染	轻度污染
区域内梅罗指数	1.31				
污染程度	轻度污染				

表 6 农田土壤重金属潜在生态危害指数

Tab. 6 Potential ecological risk indices of soil heavy metals

元素	$E_r^i$	$\bar{E}_r^i$	$R_1$
Pb	2.64~4.2	3.36	21.25
Zn	0.31~0.97	0.57	
As	6.73~10.57	9.12	
Cr	1.5~3.41	2.39	
Cu	4.08~8.41	6.4	



大到小依次为 As(9.12), Cu(6.4), Pb(3.36), Cr(2.39), Zn(0.57), 均小于 40, 显示研究区 Pb, Zn, As, Cr 和 Cu 元素的潜在生态风险为轻微危害水平. 研究区综合潜在生态风险指数  $R_1$  值为 21.25, 小于 150, 重金属元素的综合潜在生态风险等级为轻微危害.

### 2.3.4 3种评价方法比较

单因子指数较直观地反映研究区某一元素的污染情况, 由指数值可以判断出土壤环境的主要污染因子, 使用起来简单明了. 然而, 环境是一个复杂的体系, 环境污染是由多个因子相互作用导致的一个综合结果, 鄱阳湖边缘农田作为一个受外界和区内双重影响的对象(即受赣江水系携带和区内人类活动的双重作用), 影响土壤环境质量的重金属元素较多, 显然仅以某一元素作为评价因子存在一定缺陷. 单因子评价结果显示, 只有 Cu 的评价指数均值微弱大于 1, 显示存在偏离背景值情况, 其他各元素的评价指数值均小于 1, 由各元素单因子指数均值计算得到的综合指数值为 0.90, 小于 1, 显示各重金属元素组合的整体效果上并未偏离土壤背景值, 即赣江携带和区内人类活动对农田土壤重金属没有产生明显影响. 然而, 内梅罗综合指数既反映了各元素均值, 又反映了极值影响, 指数值揭示出 Cu, Zn 和 As 为轻度污染, Pb 和 Cr 达到警戒水平, 区域内梅罗综合指数大于 1, 揭示整体上的污染水平为轻度污染(相对于背景值), 潜在生态风险指数揭示研究区农田重金属元素为轻微危害, 内梅罗综合指数和潜在生态风险指数较好地反映了鄱阳湖边缘水稻土壤的重金属污染状况. 对区域土壤重金属环境质量的综合评价, 单因子指数使用各样品均值或各样品均匀混合分析结果, 均会消除极值的影响, 建议使用内梅罗综合指数和潜在生态风险指数作为评价指标.

## 3 结 论

鄱阳湖边缘典型农田土壤 Pb, Zn, As, Cr 和 Cu 的重金属质量含量样品超标率为 17%~58%, Cu 的质量含量为背景值的 1.34 倍, 各重金属含量的空间变异较小, 重金属 Pb, Zn 和 As, Cr, Cu 具有不同的源属性. 重金属 Pb 和 Cr 污染程度为警戒, Cu, Zn 和 As 为轻度污染, 区域土壤环境质量综合评价为轻度污染, 潜在生态风险等级为轻微危害, 需要关注重金属对土壤环境质量的影响.

## 参 考 文 献

- [1] 陈世宝, 王萌, 李杉杉, 等. 中国农田土壤重金属污染防治现状与问题思考[J]. 地学前缘, 2019, 26(6): 35-41.  
CHEN S B, WANG M, LI S S, et al. Current status of and discussion on farmland heavy metal pollution prevention in China[J]. Earth Science Frontiers, 2019, 26(6): 35-41.
- [2] 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.  
CHEN W X, LI Q, WANG Z, et al. Spatial distribution characteristics and pollution evaluation of heavy metals in arable land soil of China [J]. Environmental Science, 2020, 41(6): 2822-2833.
- [3] 滑小赞, 程滨, 赵瑞芬, 等. 太原市农田土壤重金属污染评价与空间分布特征[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(3): 101-109.  
HUA X Z, CHENG B, ZHAO R F, et al. Pollution Assessment and Spatial Distribution of Heavy Metals in the Farmland Soils of Taiyuan City[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(3): 101-109.
- [4] 张鑫, 张敏, 任伊凡, 等. 某废弃厂房和建筑用地表层土壤中重金属的健康风险初探[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2018, 46(6): 54-60.  
ZHANG X, ZHANG M, REN Y F, et al. A preliminary study on health risk of heavy metals in surface soil of an abandoned factory and construction land[J]. Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition), 2018, 46(6): 54-60.
- [5] HUANG Y, WANG L Y, WANG W J, et al. Current status of agricultural soil pollution by heavy metals in China: A meta-analysis[J]. Science of The Total Environment, 2019, 651(2): 3034-3042.
- [6] MA J, CAI H M, HE C W, et al. A hemicellulose-bound form of silicon inhibits cadmium ion uptake in rice(Oryza sativa) cells[J]. The New Phytologist, 2015, 206(3): 1063-1074.
- [7] DAI L J, WANG L Q, Li L F, et al. Multivariate geostatistical analysis and source identification of heavy metals in the sediment of Poyang Lake in China[J]. Science of the Total Environment, 2018, 621: 1433-1444.
- [8] JIANG Y F, GUO X. Multivariate and geostatistical analyses of heavy metal pollution from different sources among farmlands in the Poyang Lake region, China[J]. Journal of Soils and Sediments, 2019, 19(5): 2472-2484.
- [9] 赵杰, 罗志军, 赵越, 等. 环鄱阳湖区农田土壤重金属空间分布及污染评价[J]. 环境科学学报, 2018, 38(6): 2475-2485.  
ZHAO J, LUO Z J, ZHAO Y, et al. Spatial distribution and pollution assessment of heavy metals in farmland soils in Poyang Lake area

- [J].Acta Scientiae Circumstantiae,2018,38(6):2475-2485.
- [10] 余慧敏,郭熙,鄱阳湖平原区农田土壤重金属 Cd、Hg 空间特征及潜在风险影响因素探析[J].核农学报,2020,34(8):1785-1795.  
YU H M, GUO X. Spatial variation in cadmium and mercury and factors influencing their potential ecological risks in farmland soil in Poyang lake plain, China[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2020, 34(8): 1785-1795.
- [11] 王爱云,李瑞萍,倪善芹.江西乐安江流域稻田土重金属累积变化与德兴矿集区关系[J].地质通报,2014,33(8):1213-1219.  
WANG A Y, LI R P, NI S Q. Relationship between heavy metal accumulation of rice field top soils along the Le'an River and the Dexing ore concentration area, northeast Jiangxi Province[J]. Geological Bulletin of China, 2014, 33(8): 1213-1219.
- [12] 胡春华,蒋建华,周文斌.环鄱阳湖区农家菜地土壤重金属风险评价及来源分析[J].地理科学,2012,32(6):771-776.  
HU C H, JIANG J H, ZHOU W B. Risk evaluation and sources analysis of heavy metals in vegetable field soil of rural area around Poyang lake[J]. Scientia Geographica Sinica, 2012, 32(6): 771-776.
- [13] 徐伟平,李佩瑶.洞庭湖区经济与环境的演替轨迹及成因分析[J].生态经济,2015(12):49-53.  
XU W P, LI P Y. Analysis of succession path and causes between economy and environment in the areas of dongting lake[J]. Ecological Economy, 2015(12): 49-53.
- [14] CHEN H Y, TENG Y G, LI J, et al. Source apportionment of trace metals in river sediments: a comparison of three methods[J]. Environmental Pollution, 2016, 211: 28-37.
- [15] WILDING L P. Spatial variability its documentation: Accommodation and implication to soil surveys[C]. Wageningen: soil spatial variability, 1985: 166-194.
- [16] GAILEY F A, LLOYD O L L. Grass and surface soils as monitors of atmospheric metal pollution in Central Scotland[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 1985, 24(1): 1-18.
- [17] 周国华,刘占元.区域土壤环境地球化学研究:异常成因判别·环境质量·污染程度评价的思路与方法[J].物探与化探,2003,27(3):223-226.  
ZHOU G H, LIU Z Y. The methods for soil geochemical quality assessment—the application of soil regional geochemical mapping data[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2003, 27(3): 223-226.
- [18] 曾希柏,苏世鸣,吴翠霞,等.农田土壤中砷的来源及调控研究与展望[J].中国农业科技导报,2014,16(2):85-91.  
ZENG X B, SU S M, WU C X, et al. Research and prospect of arsenic source and its regulation in arable land soil[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2014, 16(2): 85-91.
- [19] HAKANSON L. An ecological risk for aquatic pollution control: A sedimentological approach[J]. Water Research, 1980, 14(8): 975-1001.
- [20] 徐争启,倪师军,虞先国,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.  
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.

## Pollution characteristics of heavy metals in farmland soil on the southwest edge of Poyang Lake and its environmental evaluation

Liu Jiawei<sup>a</sup>, Yang Mingsheng<sup>a,b</sup>, Duan Leiguang<sup>a</sup>, Feng Fei<sup>a,b</sup>

(a. School of Resources Environmental & Chemical Engineering; b. Key Laboratory of Poyang Lake Environment and Resource Utilization, Ministry of Education, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

**Abstract:** On basis of the contents of Pb, Zn, As, Cr and Cu in the farmland soil collected on the southwest edge of Poyang Lake, the relationship between heavy metals in the farmland soil of Poyang Lake margin was discussed and the environmental quality status was also evaluated. The correlation analysis shows that the heavy metals of the farmland have different sources and that the correlation coefficient of Pb and Zn is 0.960. It reveals that the heavy metals are probably derived from other places of the Ganjiang River. The correlation coefficients between As, Cu and Cr are 0.690, 0.640 and 0.850, respectively, it implies in-situ sources where heavy metals were from local agricultural pollution. The single factor index shows that their metal contents are greater than background value, the proportions of samples whose Pb, Zn, As, Cr and Cu are 25%, 50%, 25%, 17% and 58% respectively, which indicates the significant human activities. The Nemerow composite index of Cu, Zn and As are 1.52, 1.09 and 1.08 respectively, showing a mild pollution in Poyang Lake, while the Pb and Cr are 0.76 and 0.85, which is over the warning levels. The Nemerow composite index of the study area is 1.31, indicating a mild pollution, and the  $R_1$  value of the comprehensive potential ecological risk index being 21.25, which reaches the minor hazard level.

**Keywords:** edge of Poyang Lake; farmland soil; heavy metals

[责任编辑 赵晓华 陈留院]