



# 洞庭湖湿地周围表层土壤 重金属污染及其人体健康风险评价

施宸皓<sup>1,2</sup>, 王云燕<sup>1</sup>, 柴立元<sup>1</sup>, 刘佳玉<sup>3</sup>

1. 中南大学 冶金与环境学院, 长沙 410083;
2. 核工业北京地质研究院, 北京 100029;
3. 徐州市环境保护科学研究所, 徐州 221006)

**摘要:** 为了查明洞庭湖湿地周围表层土壤重金属污染及其对人体健康的风险, 选择 2016~2018 年洞庭湖区域周围 10 个土壤采样点, 共采集了表层土壤(0~30 m)样品 100 份, 分析了其中的重金属含量、分布, 并采用地累积指数法( $I_{geo}$ )、内梅罗指数法( $N_i$ )和土壤健康风险评价法等方法进行了风险评价。结果表明: 土壤样品中 Pb、Cd、Hg、As 和 Cu 5 种重金属元素的平均浓度分别为 53.33、1.62、0.27、26.8 和 37.72 mg/kg, 高于研究区域土壤环境背景值。其中 Cd、As 的平均浓度, 西洞庭湖、南洞庭湖和东洞庭湖 Cd 的浓度和南洞庭湖 As 的浓度均高于《土壤环境质量标准》(GB 15618—2018)中农用地土壤污染风险筛选值的标准。Cd、Hg、As 和 Cu 的最大污染值在南洞庭湖, Pb 的最大污染值在东洞庭湖。地累积指数法( $I_{geo}$ )研究表明, 三年时间里, Cd 处于重度污染水平, Pb、Hg、As 处于无污染到中度污染水平。内梅罗指数法( $N_i$ )研究表明, 三年时间里, 西洞庭湖、南洞庭湖和东洞庭湖都处于轻度污染水平。运用土壤健康风险评价体系中的无意吸食、皮肤接触、呼吸接触 3 种暴露因素对人体健康风险的评估表明: 每百万人口中, 平均有 13 个成年人和 8 个儿童具有癌症风险。研究结果为洞庭湖湿地土壤污染的来源和特征提供参考和建议。

**关键词:** 洞庭湖; 土壤; 重金属; 污染; 人体健康风险评价

文章编号: 1004-0609(2020)-01-0150-12

中图分类号: X820.4

文献标志码: A

洞庭湖是我国第二大淡水湖, 是长江流域重要的调蓄性湖泊<sup>[1-4]</sup>。自 2014 年国务院批复《洞庭湖生态经济区规划》以来, 湖南、湖北两省及国务院有关部门积极推进洞庭湖水环境治理, 取得了一定成效。但受发展阶段和发展方式制约, 以及近年来入湖江河水文节律的变化, 面临部分地区供水保障能力不强、水体污染形势严峻、生态系统退化等问题, 总体水质为 IV 类<sup>[5-7]</sup>。2018 年 12 月 6 日, 国家七部门印发《洞庭湖水环境综合治理规划》, 是未来一个时期指导洞庭湖水环境综合治理的基本依据。

湖南是有色金属之乡, 洞庭湖水系最大的河流湘江水环境以重金属污染为典型特征<sup>[8-9]</sup>。洞庭湖湿地常年受到来自入湖河流湘江等水体的影响存在严重的重金属污染<sup>[10-12]</sup>。近段时间以来, 随着媒体对采矿、冶炼、加工等活动导致部分重金属进入大气、水、土壤中引起重金属污染的事件频频曝光后, 人们越来越关

注洞庭湖区因重金属污染而带来的农产品质量问题<sup>[13-15]</sup>。被重金属污染的耕地不仅通过食物链对人体健康造成严重危害, 还会给生态环境造成严重破坏<sup>[16-17]</sup>。土壤是用来分析农田重金属污染大小的重要参照, 研究土壤中的重金属含量分布、生态风险和和健康风险对防控耕地等重金属污染有着极其重要的意义<sup>[18-19]</sup>。

目前, 对洞庭湖重金属复合污染方面的研究多集中在沉积物、水质、农田和植被等方面, 如祝慧娜等<sup>[20]</sup>利用区间排序法对评价得到的风险结果进行比较, 建立了基于区间排序法的湖泊沉积物重金属生态风险分析模型, 并与区间隶属度方法的评价结果进行对比。秦迪岚等<sup>[21]</sup>对洞庭湖水环境污染状况评价与时空变化规律分析的基础上, 探讨了洞庭湖的特征污染物及主要来源。武深树等<sup>[22]</sup>采用排泄系数估算法测算了洞庭湖区畜禽粪便产生量, 并对不同农地畜禽粪便

基金项目: 国家重点研发计划重点专项课题(2018YFC1801805); 湖南省重点研发计划项目(2018SK2043)

收稿日期: 2019-02-22; 修订日期: 2019-11-08

通信作者: 王云燕, 教授, 博士; 电话: 0731-88830511; E-mail: wyy@csu.edu.cn

承载量和畜禽粪便污染风险进行了评估。孙海燕等<sup>[23]</sup>研究了 Hg、Cu、Zn、Pb、Cd 和 Cr 等土壤和植被重金属含量分布特征, 并分析了土壤和植被重金属含量的关系。现阶段研究洞庭湖湿地表层污染物重金属生态风险较多, 但对健康风险研究较少。

本文作者以洞庭湖湿地为研究区域, 对 2016~2018 三年时间里周围土壤中的 Pb、Cd、Hg、As、Cu 重金属元素, 采用地累积指数法( $I_{geo}$ )、内梅罗指数法( $N_i$ )和土壤健康风险评估法进行风险评估, 旨在查明该湿地周围土壤中的 Pb、Cd、Hg、As 和 Cu 重金属元素的污染特征, 为洞庭湖湿地土壤污染的来源和诊断提供参考和建议。

## 1 实验

### 1.1 研究区域概况

洞庭湖湿地位于长江中下游荆江段南侧, 湖南省境内。纬度介于  $28^{\circ}44' \sim 29^{\circ}38'N$  之间, 经度介于  $111^{\circ}53' \sim 113^{\circ}05'E$  之间, 海拔高度 25~35m 之间。属于亚热带季风气候, 春季多雨, 秋季多旱, 冬季严寒。年平均气温为  $16 \sim 20^{\circ}C$ , 平均降水量在 1237~1354 mm 之间, 以沉积物和潮土为主。洞庭湖的农业作物主要以种植水稻为主, 同时兼顾油菜和棉花。其非淹水期在 9 月至次年 4 月之间, 并在次年的 3 月至 4 月间开始农业生产活动。本文研究区域位于西洞庭湖、南洞庭湖、东洞庭湖等 3 个湿地区域周围的农田, 具体见图 1。

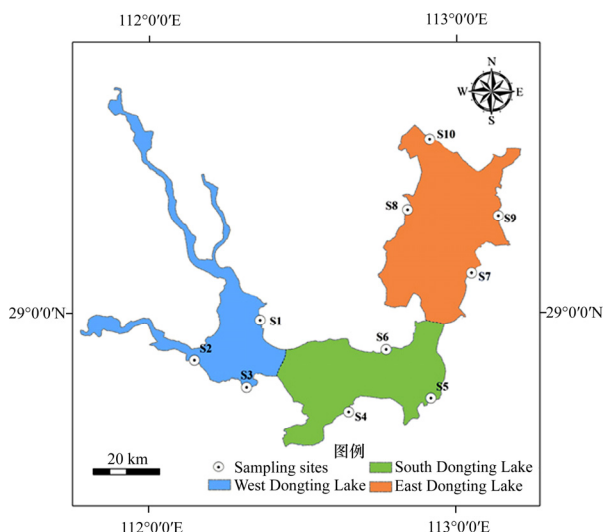


图 1 洞庭湖湿地周围土壤研究区域和采样点

Fig. 1 Study area and sampling sites of surface soils around Dongting Lake Wetland

### 1.2 样品采集及分析

2016~2018 年的春季枯水期, 在洞庭湖区域周围选择了 10 个点, 共采集了 100 份表层土壤(0~30 m), 其中每个采样点采集了 10 个平行样品。其中, S1、S2、S3 点位于西洞庭湖, S4、S5、S6 点位于南洞庭湖, S7、S8、S9、S10 点位于东洞庭湖。运用全球定位系统(GPS)记录采样点的地理位置。所有的土壤样品均用聚乙烯袋封装, 贴好标签, 注明采样点的编号、位置、采样时间等信息, 并送回实验室冷藏。

样品在干燥的环境里风化 30 d 后, 剔除土壤中的杂质, 送入烘箱进行烘干至质量恒定, 研磨处理后过  $74 \mu m$  的筛子。准确称取 0.1 g 预处理的样品置入聚四氟乙烯容器中, 分别加入 3 mL 的  $HNO_3$ 、1 mL 的 HCl 和 1 mL 的 HF, 然后使用美国 CEM 公司生产的密闭微波化学反应系统, 即 MARS5 型微波消煮仪, 进行消化溶解。微波消解参数为功率 1600 W,  $120^{\circ}C$ , 保持 2 min;  $150^{\circ}C$ , 保持 10 min;  $180^{\circ}C$ , 保持 20 min。消解完毕后, 用  $150^{\circ}C$  驱赶残酸至剩余少许, 转移至 10 mL 量瓶中, 用 1%(体积分数)硝酸溶液洗涤消解罐, 合并至量瓶中, 并稀释至刻度, 混匀备用。检测方法参照《电感耦合等离子体质谱分析方法通则》(DZ/T 0223—2001)和《土壤中总汞、总砷、总铅的测定》(GB/T 22105—2008)的标准, Pb、Cd 和 Cu 等 3 个重金属元素使用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MAS)进行分析, 使用的是 NEXION 350X 型电感耦合等离子体质谱仪。Hg 和 As 等两个重金属元素采用原子荧光光谱法(AFS)进行分析, 使用的是 AFS-9700 全自动注射泵原子荧光光度计。Pb、Cd 和 Cu 的测定下限浓度分别是 0.36、0.2 和  $0.32 \mu g/L$ , Hg 和 As 的测定下限浓度分别是 0.16 和  $1.2 \mu g/L$ 。

土壤成分分析的质量控制采用了中国地质调查局青岛海洋地质研究所(GBW07345)的标准, 每次测定都选用了实验组和空白对照组。其中实验组用 10%的重复率进行了所有样品的精度分析, 重复样品的分析误差小于 5%。分析的结果满足《土壤环境监测技术规范》(HJ/T 166—2004)的质量控制要求。

### 1.3 地累积指数( $I_{geo}$ )

地累积指数法( $I_{geo}$ )是德国科学家穆勒于 1969 年提出的<sup>[24-26]</sup>, 用于评价土壤重金属污染的地理化学指标。其不仅要考虑到自然过程中成岩作用的影响, 也要考虑到人为活动的影响。计算公式如下:

$$I_{geo} = \log_2(C_n / 1.5B_n) \quad (1)$$

式中:  $C_n$  是测定的第  $n$  种元素的浓度, mg/kg;  $B_n$  是

第  $n$  种元素的地理化学背景值, mg/kg。对不同元素的地球化学背景值使用了 1.5 的倍数。根据 1988 年湖南省土壤环境背景值, 洞庭湖湿地土壤中的重金属浓度的背景值被用作计算  $B_n$ (表 5)。 $I_{\text{geo}}$  等级划分见表 1。

表 1 土壤中重金属  $I_{\text{geo}}$  的等级划分

$I_{\text{geo}}$	Risk level
<0	Unpolluted
0-1	Unpolluted to moderately polluted
1-2	Moderately polluted
2-3	Moderately to strongly polluted
>3	Strongly polluted

#### 1.4 内梅罗指数法( $N_I$ )

由于单因子评价难以表达污染物的整体水平, 因此常采用综合评价多种污染因子的指数法评价。内梅罗指数法( $N_I$ )是当前国内外进行综合污染指数评价最常用的方法之一<sup>[27-28]</sup>, 评价公式为

$$P_n = \frac{C_n}{C_0} \quad (2)$$

$$P_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P(n) \quad (3)$$

$$N_I = \sqrt{[P_a^2 + P_{\max,n}^2 / 2]} \quad (4)$$

式中:  $P_n$  是重金属  $n$  的污染指数;  $C_n$  为  $n$  的实测质量分数, mg/kg;  $C_0$  为  $n$  的质量分数标准值, mg/kg, 即《土壤环境质量标准》(GB 15618—2018)的农用地土壤风险筛选值;  $P_a$  为土壤样品中各个重金属的环境污染指数平均值;  $N_I$  为土壤综合污染指数;  $P_{\max,n}$  为土壤样品中单项重金属  $i$  的最大环境污染指数。 $N_I$  等级划分见表 2。

表 2 土壤中的重金属  $N_I$  的等级划分

$N_I$	Risk level
<0.7	Unpolluted
0.7-1	Unpolluted to slightly polluted
1-2	Slightly polluted
2-3	Moderately polluted
>3	Strongly polluted

#### 1.5 土壤健康风险评估法

美国土壤健康风险评估体系是用于评估土壤重金属对人体健康的风险<sup>[29-31]</sup>。其中, 无意吸食暴露、皮肤接触暴露和呼吸吸入暴露等是土壤重金属元素进入人体的重要途径。本文采用 3 种暴露途径对洞庭湖湿地及周围表层土壤的日平均暴露量进行计算, 评价模型包括非致癌风险模型和致癌风险模型。计算公式如下:

$$A_{\text{ing}} = \frac{Cx_8x_7x_9x_6x_2}{x_1x_{14}} \quad (4)$$

$$A_{\text{derm}} = \frac{Cx_3x_4x_5x_7x_6x_2}{x_1x_{14}} \quad (5)$$

$$A_{\text{inh}} = \frac{Cx_{10}x_{11}x_{12}x_{13}x_7x_6x_2}{x_1x_{14}} \quad (6)$$

$$H = \sum_{i=1}^n Q_i = \sum_{i=1}^n \frac{A_{(i)}}{D_{(i)}} \quad (7)$$

$$R_T = \sum R_i = \sum (A_{(i)}S_i) \quad (8)$$

式中:  $C$  为土壤重金属暴露含量, mg/kg;  $A$  为日平均暴露量, mg/kg。  $x_1 \sim x_{14}$  等其他参数根据 USEPA 统计资料中的暴露模型适合的评价参数(见表 3)。 $Q$  为单个污染物非致癌指数,  $H$  为总非致癌危害指数,  $D$  为暴露途径的非致癌参考剂量。若  $H < 1$  时, 风险较小或可以忽略。 $H \geq 1$  时, 存在非致癌风险。 $R_i$  为单个污染物的致癌指数,  $R_T$  为总致癌风险。 $S_i$  为单个致癌物质的风险系数。USEPA 在国家风险计划中规定  $1 \times 10^{-6}$  为最大可接受致癌风险。3 种暴露模型参数见表 3, 各重金属健康风险评估风险斜率系数和参考剂量见表 4。

## 2 结果与讨论

### 2.1 研究区域土壤重金属元素污染现状

表 5 和 6 所列分别为三年间研究区域表层土壤中 Pb、Cd、Hg、As 和 Cu 等重金属元素的平均含量, 西洞庭湖、南洞庭湖、东洞庭湖等三年间 3 个区域重金属元素的平均含量和研究区域土壤环境背景值。结果表明, 三年间研究区域中 Pb、Cd、Hg、As 和 Cu 等重金属元素的平均浓度分别为 53.33、1.62、0.27、26.8 和 37.72 mg/kg。其中, Cd、As 的浓度高于研究区域土壤环境背景值和《土壤环境质量标准》(GB 15618—2018)的农用地土壤风险筛选值, Pb、Hg、Cu 的浓度

高于研究区域土壤环境背景值。Cd、Hg 等浓度由大到小依次为 2018、2017、2016; Pb 浓度由大到小依次为 2016、2017、2018。As 和 Cu 浓度由大到小分别为 2018、2016、2017 和 2017、2018、2016, 表明 Cd、Hg 和 As 在 2018 年处于污染的最高值, 2016 年 Pb 处于污染的最高值, 2017 年 Cu 处于污染的最高值, 而 Cd、Hg 的污染一直处于持续增长的趋势。此外, 西洞庭湖和东洞庭湖的 Cd, 南洞庭湖的 Cd 和 As 都高于研究区域土壤环境背景值和《土壤环境质量标准》(GB 15618—2018)的农用地土壤风险筛选值。三年中西洞庭湖的 Cd 呈现持续增长的趋势, Pb、As 呈现持续下降的趋势, Hg、Cu 在 2017 年最高。南洞庭湖的 Pb、Cd、Hg、As 和 Cu 皆出现持续增长的趋势。东洞

庭湖除 Pb 呈现持续下降的趋势外, 其他元素虽在 2017 年有所回落, 但在 2018 年再次出现增大的势头。同时, 三年间整个洞庭湖(包括西洞庭湖、南洞庭湖、东洞庭湖)的 5 种重金属元素的总平均浓度分别为 52.72、1.68、0.28、27.15、37.8 mg/kg。其中 Cd、As 和 Cu 等浓度在 3 个区域内由大到小依次为南洞庭湖、东洞庭湖、西洞庭湖, Pb 浓度由大到小依次为东洞庭湖、南洞庭湖、西洞庭湖, Hg 浓度由大到小依次为南洞庭湖、西洞庭湖、东洞庭湖。表明南洞庭湖 Cd、Hg、As 和 Cu 的污染最大, 东洞庭湖的 Pb 的污染最大, 南洞庭湖和东洞庭湖是重金属污染的重点区域。

课题组前期相关研究<sup>[39-42]</sup>采用地累积指数( $I_{geo}$ )和潜在生态风险指数( $R$ )评价湘江表层土壤中重金属

表 3 暴露评价模型参数<sup>[32-34]</sup>

Table 3 Parameters for exposure model<sup>[32-34]</sup>

Exposure assessment parameter	Physical meaning and unit	Parameter	
		Adult	Children
$x_1$	Average mass/kg	62.5	16
$x_2$	Exposure duration/a	30	10
$x_3$	Exposed skin area/( $\text{cm}^2 \cdot \text{d}^{-1}$ )	5700	2800
$x_4$	Skin adherence factor/( $\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ )	0.07	0.2
$x_5$	Dimensionless dermal absorption factor	0.09	0.001
$x_6$	Exposed frequency/( $\text{d} \cdot \text{a}^{-1}$ )	365	365
$x_7$	Conversion factor/( $\text{kg} \cdot \text{mg}^{-1}$ )	$10^{-6}$	$10^{-6}$
$x_8$	Soil rate/( $\text{mg} \cdot \text{d}^{-1}$ )	100	200
$x_9$	Fraction	1	1
$x_{10}$	Inhalable particle concentration/( $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	0.3	0.3
$x_{11}$	Inhaling air per minute/( $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ )	18.2	8.7
$x_{12}$	Proportion soil particles in body retention/%	0.75	0.75
$x_{13}$	Proportion of soil particles in air/%	0.5	0.5
$x_{14}$	Average time/d	$70 \times 365^{1)}$ $x_2 \times 365^{2)}$	$70 \times 365^{1)}$ $x_2 \times 365^{2)}$

1) Carcinogenic effect; 2) Non-carcinogenic effect

表 4 各重金属健康风险评估风险斜率系数和参考剂量<sup>[35-37]</sup>

Table 4 Risk slopes and reference doses for health risk assessment on heavy metals<sup>[35-37]</sup>

Element	Skin		Smoke		Breath	
	Risk slope factor	Reference dose	Risk slope factor	Reference dose	Risk slope factor	Reference dose
Pb	—	$1.4 \times 10^{-1}$	—	$1.4 \times 10^{-1}$	—	$3.5 \times 10^{-3}$
Cd	6.1	—	6.1	—	6.1	—
Hg	—	$3 \times 10^{-4}$	—	$3 \times 10^{-4}$	—	$8.57 \times 10^{-5}$
As	1.5	—	1.5	—	1.5	—
Cu	—	$3.7 \times 10^{-2}$	—	$3.7 \times 10^{-2}$	—	$4 \times 10^{-2}$

表5 三年间研究区域重金属元素的浓度统计值

Table 5 Concentration summary statistics of heavy metals in study area for three years

Year	Data	Concentration/(mg·kg <sup>-1</sup> )				
		Pb	Cd	Hg	As	Cu
2016	Minimum	33.97	0.02	0.05	10.79	19.76
	Maximum	117.62	4.07	0.46	59.26	60.32
	Mean	56.91	0.94	0.23	27.94	35.49
	Standard deviation	24.57	1.22	0.15	17.08	11.71
	Coefficient of variation/%	0.43	1.29	0.65	0.61	0.33
2017	Minimum	20.41	0.22	0.05	13.37	21.84
	Maximum	86.62	7.17	0.76	87.39	73.74
	Mean	56.00	1.43	0.27	24.49	39.75
	Standard deviation	27.96	2.07	0.20	22.27	14.73
	Coefficient of variation/%	0.50	1.45	0.75	0.91	0.37
2018	Minimum	16.47	0.07	0.11	10.86	18.62
	Maximum	93.20	7.65	0.88	69.22	57.00
	Mean	47.10	2.50	0.30	27.98	37.92
	Standard deviation	26.38	2.54	0.23	20.28	13.07
	Coefficient of variation/%	0.56	1.02	0.75	0.73	0.35
Mean of three years		53.33	1.62	0.27	26.80	37.72
Soil environmental background values in study area <sup>[38]</sup>		27.00	0.09	0.10	14.00	26.00
Environmental quality standard for soils (GB 15618—2018)		140.00	0.60	0.60	25.00	100.00

表6 三年间3个区域重金属元素的浓度统计值

Table 6 Concentration summary statistics of heavy metals in three areas for three years

Year	Zone	Concentration/(mg·kg <sup>-1</sup> )				
		Pb	Cd	Hg	As	Cu
2016	West Dongting lake	34.94	0.25	0.19	16.53	28.32
2017		28.12	1.03	0.32	14.83	34.56
2018		23.29	1.61	0.28	14.76	31.44
Mean of three years		28.78	0.97	0.26	15.37	31.44
2016	South Dongting lake	58.95	1.08	0.28	38.18	36.37
2017		65.45	2.65	0.38	42.67	48.15
2018		66.92	5.06	0.45	46.49	50.51
Mean of three years		63.78	2.93	0.37	42.45	45.01
2016	East Dongting lake	71.85	1.36	0.21	28.81	40.20
2017		69.82	0.80	0.15	18.11	37.34
2018		50.09	1.24	0.20	24.01	33.33
Mean of three years		63.92	1.13	0.19	23.65	36.96
Mean of three years in three areas		52.72	1.68	0.28	27.15	37.80
Soil environmental background values in study area <sup>[38]</sup>		27.00	0.09	0.10	14.00	26.00
Environmental quality standard for soils (GB 15618—2018)		140.00	0.60	0.60	25.00	100.00

污染状况和潜在的生态风险, 结果表明土壤样品中重金属的平均浓度由大到小依次为 Zn、Pb、Cu、As、Cd。I<sub>geo</sub> 和 RI 揭示了 Cd、Pb、Zn 和 Cu 等是造成了严重污染的重要元素, 对湘江造成了极高的潜在生态风险。运用 Pearson 相关系数分析(PCC)、主成分分析(PCA)和层次聚类分析(HCA)表明, Cd、Pb、Zn 和 Cu 可能来源于采矿和冶炼工业。

### 2.2 研究区域土壤重金属生态污染风险

5 种重金属元素 Pb、Cd、Hg、As 和 Cu 的评价结

果见图 2 和 3。地累积指数 I<sub>geo</sub> 的计算结果表明, 各元素污染水平由高至低分别是 Cd、Hg、Pb、As 和 Cu。其中, 2016 年的 Cd 处于中度污染到重度污染水平, 2017 年和 2018 年的 Cd 处于重度污染水平。三年中 Cd 处于重度污染水平, Pb、Hg、As 处于无污染到中度污染水平, 其中 Hg 在 2018 年处于中度污染水平。Cu 在三年里没有重金属污染的风险。地累积指数法 I<sub>geo</sub> 同时显示三年的 Cd、Hg 等重金属的污染风险由大到小依次为 2018 年、2017 年、2016 年, As 的污染风险由大到小依次为 2017 年、2016 年、

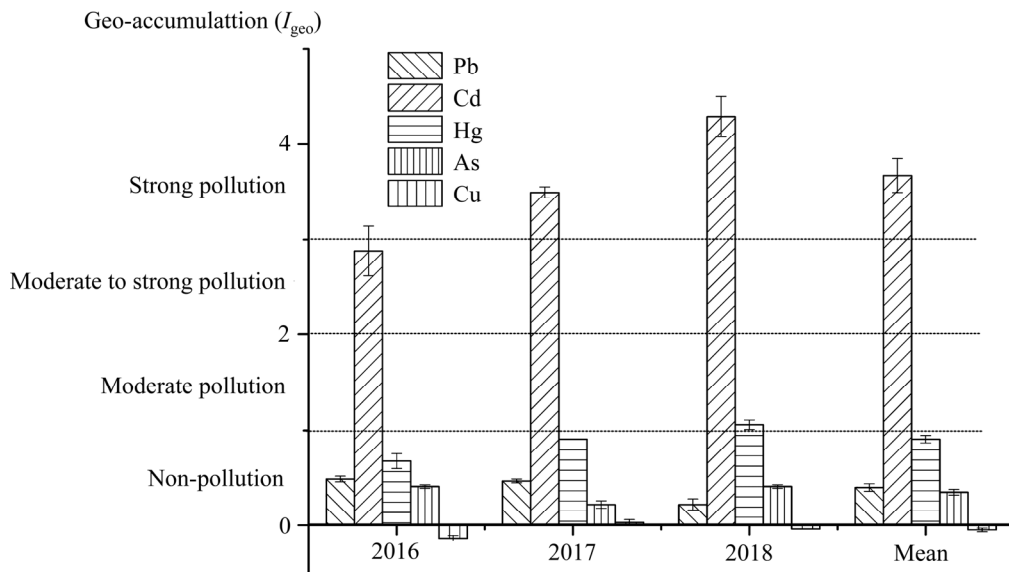


图 2 洞庭湖湿地周围三年的重金属地累积指数(I<sub>geo</sub>)表示

Fig. 2 Geo-accumulation index (I<sub>geo</sub>) of heavy metals around Dongting Lake Wetland for three years

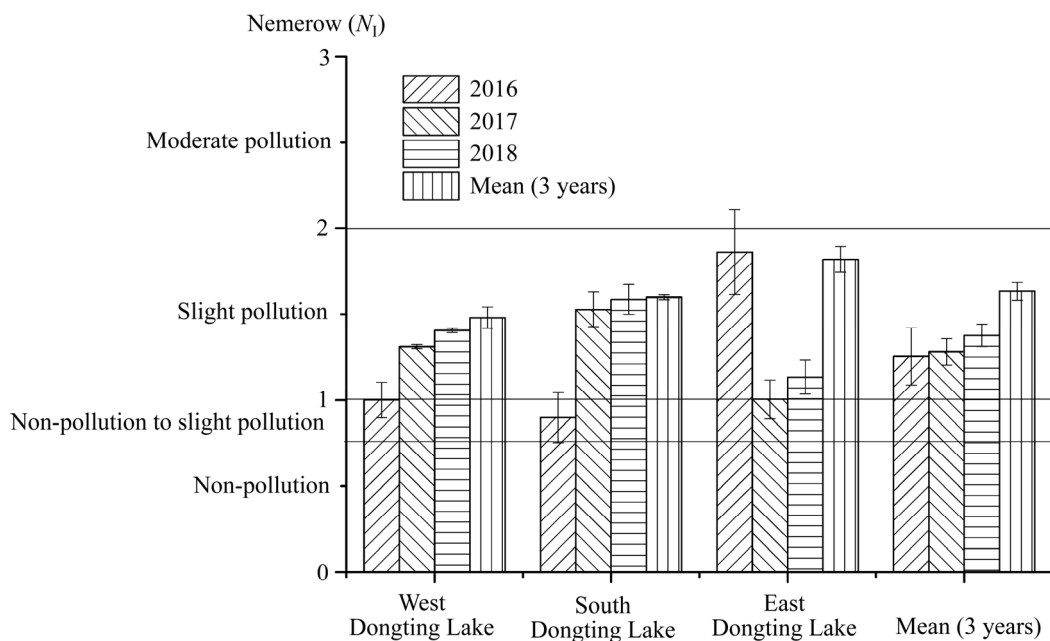


图 3 三年 3 个区域周围的重金属内梅罗指数(N<sub>i</sub>)表示

Fig. 3 Nemerow index (N<sub>i</sub>) of heavy metals around in the three areas for three years

2018年, Pb的重金属风险由大到小依次为2016年、2017年、2018年。表明2018年Cd、Hg等重金属风险为三年持续上升状态。As等重金属风险较2015年有一定程度的增加。Pb的重金属风险为三年持续下降状态, 但仍然没有达到无污染的水平。

内梅罗指数法 $N_1$ 的计算结果表明, 其平均值由大到小依次为东洞庭湖、南洞庭湖、西洞庭湖, 2016~2017的由大到小依次为东洞庭湖、南洞庭湖、西洞庭湖, 2018年的由大到小依次为西洞庭湖、东洞庭湖、南洞庭湖。三年时间里东洞庭湖、南洞庭湖和西洞庭湖的总平均值都处于轻度污染水平, 其中, 西洞庭湖和南洞庭湖的重金属风险为三年持续上升状态, 特别是南洞庭湖从2016年的无污染到轻度污染水平已上升至2018年的轻度污染水平, 潜在的风险隐患不容小视。东洞庭湖虽在2017年已降低至接近轻度污染的最低值, 但在2018年又继续呈现上升趋势, 没有达到无污染的水平。

洞庭湖湿地周围土壤存在重金属含量超标的情况, 与其流域土壤重金属污染特征相符, 即表现为以Cd为主的多种重金属混合污染。Cd、Pb、As、Hg和Cu的来源可能来自工业废水的排放、尾矿的倾倒、燃煤的排放以及金属加工、电镀等工业的运行, 通过大

气沉降、农业活动和河流输送而流入湿地, 最终导致洞庭湖湿地周围呈现重金属的复合污染。这与XU等<sup>[43]</sup>对洞庭湖4条主要支流的表层土壤中金属Zn、Hg、Cu、As、Cd、Pb的空间分布、来源和潜在的生态风险研究结果一致。

### 2.3 研究区域土壤重金属元素人体健康风险

三年的Pb、Cd、Hg、As和Cu等重金属元素的人体健康风险评价见表7和表8。3种暴露途径下对成人和儿童的非致癌风险由大到小依次分别为Cu、Pb、Hg和Cu、Hg、Pb, 对成人和儿童的致癌风险大小一致, 由大到小依次为As、Cd。

研究结果说明, 土壤重金属对成人和儿童的非致癌风险系数大小为 $Q_{\text{breath}} > Q_{\text{skin}} > Q_{\text{smoke}}$ , 对成人的致癌风险系数大小为 $R_{\text{skin}} > R_{\text{breath}} > R_{\text{smoke}}$ , 对儿童的致癌风险系数大小为 $R_{\text{smoke}} > R_{\text{breath}} > R_{\text{skin}}$ 。3种暴露风险对成人和儿童的总非致癌风险值分别为 $5.02 \times 10^{-2}$ 和 $9.38 \times 10^{-2}$ , 研究区域非致癌风险指数虽低于 $H \geq 1$ 的标准, 但是并非远小于1, 因此对其非致癌性仍不可忽略。3种暴露风险对成人和儿童的总致癌风险值分别为 $13.03 \times 10^{-6}$ 和 $8.97 \times 10^{-6}$ , 远远高于 $1 \times 10^{-6}$ 的标准, 说明每百万人口中将平均增加13个成年人癌症

表7 2016年~2018年土壤重金属对成人和儿童的非致癌风险系数

Table 7 Indexes of non-carcinogenic risk on soil heavy metals for adults and children in 2016–2018

Exposure risk	Index of non-carcinogenic risk												Total
	Pb				Hg				Cu				
	2016	2017	2018	Mean	2016	2017	2018	Mean	2016	2017	2018	Mean	
$Q_{\text{smoke(adult)}}$	$6.50 \times 10^{-9}$	$6.40 \times 10^{-9}$	$5.38 \times 10^{-9}$	$6.09 \times 10^{-9}$	$1.21 \times 10^{-8}$	$1.45 \times 10^{-8}$	$1.60 \times 10^{-8}$	$1.42 \times 10^{-8}$	$1.54 \times 10^{-8}$	$1.70 \times 10^{-8}$	$1.64 \times 10^{-8}$	$1.63 \times 10^{-8}$	$8.27 \times 10^{-7}$
$Q_{\text{skin(adult)}}$	$2.34 \times 10^{-3}$	$2.30 \times 10^{-3}$	$3.36 \times 10^{-3}$	$2.67 \times 10^{-3}$	$4.35 \times 10^{-3}$	$5.20 \times 10^{-3}$	$5.76 \times 10^{-3}$	$5.10 \times 10^{-3}$	$5.51 \times 10^{-3}$	$6.17 \times 10^{-3}$	$5.89 \times 10^{-3}$	$5.86 \times 10^{-3}$	$1.37 \times 10^{-2}$
$Q_{\text{breath(adult)}}$	$5.33 \times 10^{-3}$	$5.24 \times 10^{-3}$	$4.41 \times 10^{-3}$	$4.99 \times 10^{-3}$	$8.60 \times 10^{-4}$	$1.04 \times 10^{-3}$	$1.15 \times 10^{-3}$	$1.02 \times 10^{-3}$	$2.91 \times 10^{-2}$	$3.26 \times 10^{-2}$	$3.11 \times 10^{-2}$	$3.09 \times 10^{-2}$	$3.71 \times 10^{-2}$
$H_{\text{adult}}$	$7.67 \times 10^{-3}$	$7.54 \times 10^{-3}$	$6.03 \times 10^{-3}$	$7.08 \times 10^{-3}$	$5.21 \times 10^{-3}$	$6.24 \times 10^{-3}$	$6.91 \times 10^{-3}$	$6.12 \times 10^{-3}$	$3.46 \times 10^{-2}$	$3.88 \times 10^{-2}$	$3.70 \times 10^{-2}$	$3.68 \times 10^{-2}$	$5.02 \times 10^{-2}$
$Q_{\text{smoke(child)}}$	$5.08 \times 10^{-8}$	$5.0 \times 10^{-8}$	$4.21 \times 10^{-8}$	$4.76 \times 10^{-8}$	$9.47 \times 10^{-8}$	$0.11 \times 10^{-6}$	$0.13 \times 10^{-6}$	$0.11 \times 10^{-6}$	$1.02 \times 10^{-8}$	$1.15 \times 10^{-8}$	$1.09 \times 10^{-8}$	$1.09 \times 10^{-8}$	$2.73 \times 10^{-6}$
$Q_{\text{skin(child)}}$	$1.42 \times 10^{-2}$	$1.40 \times 10^{-2}$	$1.18 \times 10^{-2}$	$1.33 \times 10^{-2}$	$2.65 \times 10^{-2}$	$3.17 \times 10^{-2}$	$3.51 \times 10^{-2}$	$3.11 \times 10^{-2}$	$3.36 \times 10^{-4}$	$3.76 \times 10^{-4}$	$3.59 \times 10^{-4}$	$3.57 \times 10^{-4}$	$4.49 \times 10^{-2}$
$Q_{\text{breath(child)}}$	$9.95 \times 10^{-3}$	$9.79 \times 10^{-3}$	$8.23 \times 10^{-3}$	$9.32 \times 10^{-3}$	$1.62 \times 10^{-3}$	$1.94 \times 10^{-3}$	$2.15 \times 10^{-3}$	$1.90 \times 10^{-3}$	$5.43 \times 10^{-2}$	$6.08 \times 10^{-2}$	$5.80 \times 10^{-2}$	$5.77 \times 10^{-2}$	$6.92 \times 10^{-2}$
$H_{\text{child}}$	$2.42 \times 10^{-2}$	$2.38 \times 10^{-2}$	$2.0 \times 10^{-3}$	$2.27 \times 10^{-3}$	$2.81 \times 10^{-3}$	$3.36 \times 10^{-2}$	$3.70 \times 10^{-2}$	$3.29 \times 10^{-2}$	$5.46 \times 10^{-2}$	$6.12 \times 10^{-2}$	$5.84 \times 10^{-2}$	$5.81 \times 10^{-2}$	$9.38 \times 10^{-2}$

表8 2016年~2018年土壤重金属对成人和儿童的致癌风险系数

Table 8 Indexes of carcinogenic risk on soil heavy metals for adults and children in 2016–2018

Exposure risk	Index of carcinogenic risk								Total
	Cd				As				
	2016	2017	2018	Mean	2016	2017	2018	Mean	
$R_{\text{Smoke(adult)}}$	$3.95 \times 10^{-11}$	$5.96 \times 10^{-11}$	$1.04 \times 10^{-10}$	$6.78 \times 10^{-11}$	$2.87 \times 10^{-10}$	$2.52 \times 10^{-10}$	$2.88 \times 10^{-10}$	$2.76 \times 10^{-10}$	$3.44 \times 10^{-10}$
$R_{\text{Skin(adult)}}$	$1.42 \times 10^{-6}$	$2.14 \times 10^{-6}$	$3.75 \times 10^{-6}$	$2.44 \times 10^{-6}$	$10.31 \times 10^{-6}$	$9.05 \times 10^{-6}$	$10.34 \times 10^{-6}$	$9.90 \times 10^{-6}$	$12.34 \times 10^{-6}$
$R_{\text{Breath(adult)}}$	$8.08 \times 10^{-8}$	$1.22 \times 10^{-7}$	$2.14 \times 10^{-7}$	$1.39 \times 10^{-7}$	$5.88 \times 10^{-7}$	$5.16 \times 10^{-7}$	$5.89 \times 10^{-7}$	$5.64 \times 10^{-7}$	$7.03 \times 10^{-7}$
$R_{\text{T, adult}}$	$1.50 \times 10^{-6}$	$2.26 \times 10^{-6}$	$3.96 \times 10^{-6}$	$2.57 \times 10^{-6}$	$10.90 \times 10^{-6}$	$9.57 \times 10^{-6}$	$10.93 \times 10^{-6}$	$10.46 \times 10^{-6}$	$13.03 \times 10^{-6}$
$R_{\text{Smoke(child)}}$	$1.03 \times 10^{-4}$	$1.55 \times 10^{-4}$	$2.72 \times 10^{-4}$	$1.77 \times 10^{-4}$	$7.48 \times 10^{-4}$	$6.56 \times 10^{-4}$	$7.50 \times 10^{-4}$	$7.18 \times 10^{-4}$	$8.95 \times 10^{-4}$
$R_{\text{Skin(child)}}$	$2.88 \times 10^{-8}$	$4.35 \times 10^{-8}$	$7.61 \times 10^{-8}$	$4.95 \times 10^{-8}$	$2.10 \times 10^{-7}$	$1.84 \times 10^{-7}$	$2.10 \times 10^{-7}$	$2.0 \times 10^{-7}$	$2.50 \times 10^{-7}$
$R_{\text{Breath(child)}}$	$5.88 \times 10^{-7}$	$5.16 \times 10^{-7}$	$5.89 \times 10^{-7}$	$5.64 \times 10^{-7}$	$3.66 \times 10^{-7}$	$3.21 \times 10^{-7}$	$3.67 \times 10^{-7}$	$3.51 \times 10^{-7}$	$9.15 \times 10^{-7}$
$R_{\text{T, child}}$	$1.04 \times 10^{-4}$	$1.56 \times 10^{-4}$	$2.73 \times 10^{-4}$	$1.78 \times 10^{-4}$	$7.49 \times 10^{-4}$	$6.57 \times 10^{-4}$	$7.51 \times 10^{-4}$	$7.19 \times 10^{-4}$	$8.97 \times 10^{-4}$

患者和 8 个儿童癌症患者。儿童的非致癌风险是成人的 1.87 倍, 成人的致癌风险是儿童的 1.45 倍, 两者因土壤摄入而带来的健康风险不容小视。根据其他文献的介绍<sup>[44-46]</sup>, 鄱阳湖流域 2012 年的非致癌风险指数集中在  $10^{-11} \sim 10^{-10} \text{ a}^{-1}$ , 即每一亿人口中受到健康危害的人数不到一人, 而致癌风险指数的最大值为  $8.07 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$ , 即每百万人口中受到健康危害的人数超过 80 人。太湖流域 2009 年的非致癌风险指数最高为  $17 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$ , 非致癌性可忽略不计。而致癌风险指数最高达到  $1.7 \times 10^{-4} \text{ a}^{-1}$ , 意味着每百万人口中受到健康危害的超过 170 人。2016 年巢湖流域非致癌风险指数集中  $10^{-10} \sim 10^{-9} \text{ a}^{-1}$ , 但致癌风险指数最高达到  $3.46 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$ , 即每百万人口中受到健康危害的超过 34 人。通过对比可以发现, 虽然洞庭湖流域仍然存在着较高的潜在人体健康风险, 但经过近年来湖南省对其流域生态环境综合治理之后效果比较显著, 其健康风险值大小已低于鄱阳湖、太湖和巢湖等国内淡水湖泊。

本文采用呼吸、皮肤、吸食暴露 3 种健康评价方法进行了对比, 分析表明致癌元素 As、Cd 的吸食暴露和皮肤暴露分别是儿童和成人面临健康风险的重要渠道, 非致癌元素 Pb、Hg、Cu 的呼吸暴露是成人和儿童面临健康风险的重要来源, 而 Cu 的存在非致癌风险比 Pb 还要大, As 和 Cu 分别是致癌风险和非致

癌风险的最大贡献者。与 ZENG 等<sup>[47]</sup>通过健康风险指数的计算所得砷(As)是慢性风险的主要贡献者, 是导致致癌性的最重要污染物一致。儿童的口腔摄入是砷污染主要暴露途径。依靠湘江地表水饮用和生活的个人, 可能因接触混合微量元素而面临综合健康风险。

制定污染控制和管理战略, 必须综合考虑整个洞庭湖流域, 优化相应城市的产业结构, 以满足洞庭湖湿地系统, 人类健康保护和未来环境修复的需要。研究区域应加大对工业废水、燃煤排放的控制力度, 减少河流的污染, 合理发展采矿工业和冶金工业, 在污染的区域可采取生物、吸附或化学的方法稳定 Cd、Hg、Pb、As 和 Cu 等重金属元素, 以降低金属生物利用度。

### 3 结论

1) 土壤中 Pb、Cd、Hg、As 和 Cu 的浓度均高于研究区域土壤环境背景值, 其中 Cd、As 的浓度还高于《土壤环境质量标准》(GB 15618—2018)中农用地土壤污染风险筛选值。三年中, Cd、Hg 的污染处于持续增长的趋势。Pb 的污染处于持续下降的趋势, 但仍然没有达到标准。西洞庭湖、东洞庭湖和南洞庭湖的 Cd 和南洞庭湖的 As 均高于研究区域土壤环境背景



值和《土壤环境质量标准》(GB 15618—2018)的农用地土壤风险筛选值, Cd、Hg、As 和 Cu 的最大污染值在南洞庭湖, Pb 的最大污染值在东洞庭湖, 表明南洞庭湖和东洞庭湖是重金属污染的重点区域。

2) 地累积指数  $I_{geo}$  的分析表明各元素污染水平由大到小依次为 Cd、Hg、Pb、As、Cu。除 Cu 以外, 三年中 Pb、Cd、Hg、As 均处于无污染到中度污染水平以上, Cd 处于重度污染风险水平。内梅罗指数法( $N_i$ )的分析表明三年 3 个区域的风险由大到小依次为东洞庭湖、南洞庭湖、西洞庭湖, 三年中东洞庭湖、南洞庭湖和西洞庭湖都处于轻度污染水平。

3) 采用呼吸、皮肤、吸食暴露三种健康评价方法的对比研究表明, 无意吸食、皮肤接触、呼吸接触等途径下对成人和儿童的致癌风险大小由大到小依次均为 As、Cd, Cd、As 元素对成人和儿童的致癌风险系数均高于最大可接受风险。对成人和儿童的非致癌风险由大到小依次分别为 Cu、Pb、Hg 和 Cu、Hg、Pb, 所有的非致癌元素的健康风险指数均小于 1。3 种土壤健康风险方法研究结果同时显示, 每百万人口中平均有 13 个成年人和 8 个儿童具有癌症风险。成人和儿童的致癌风险系数大小分别为  $R_{skin} > R_{breath} > R_{smoke}$ ,  $R_{smoke} > R_{breath} > R_{skin}$ 。

4) 在洞庭湖湿地周围土壤重金属污染防治中, 应优化产业结构, 强化河流排放污染控制力度, 从源头控制 Cd、Hg 的输入以减少重金属积累。建议该湿地周围农业基地使用深层地下水或引灌清洁地表水, 以减少土壤污染对人群健康的威胁。

## REFERENCES

- [1] HUANG Dan-lian, ZENG Guang-ming, FENG Chong-ling, HU Shuang, JIANG Xiao-yun, TANG Lin, SU Feng-feng, ZHANG Yu, ZENG Wei, LIU Hong-liang. Degradation of lead-contaminated lignocellulosic waste by *Phanerochaete chrysosporium* and the reduction of lead toxicity[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 42(13): 4946–4951.
- [2] TANG Lin, ZENG Guang-ming, SHEN Guo-li, LI Yuan-ping, ZHANG Yi, HUANG Dan-lian. Rapid detection of picloram in agricultural field samples using a disposable immunomembrane-based electrochemical sensor[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 42(4): 1207–1212.
- [3] ZHANG Chang, NIE Shuang, LIANG Jie, ZENG Guang-ming, WU Hai-peng, HUA Shan-shan, LIU Jia-yu, YUAN Yu-jie, XIAO Hai-bing, DENG Lin-jing, XIANG Hong-yu. Effects of heavy metals and soil physicochemical properties on wetland soil microbial biomass and bacterial community structure[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 557/558: 785–790.
- [4] LIANG Jie, LIU Jia-yu, YUAN Xing-zhong, ZENG Guang-ming, YUAN Yu-jie, WU Hai-peng, LI Fei. A method for heavy metal exposure risk assessment to migratory herbivorous birds and identification of priority pollutants/areas in wetlands[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(12): 11806–11813.
- [5] ZHENG Na, WANG Qi-chao, ZHENG Dong-mei. Health risk of Hg, Pb, Cd, Zn, and Cu to the inhabitants around Huludao Zinc Plant in China via consumption of vegetables[J]. *Science of the Total Environment*, 2007, 383(1/3): 81–89.
- [6] LI Zhi-yuan, MA Zong-wei, KUIJP T J, YUAN Zeng-wei, HUANG Lei. 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] GUPTA S K, ANSARI F A, NASR M, CHABUKDHARA M, BUX F. Multivariate analysis and health risk assessment of heavy metal contents in foodstuffs of Durban, South Africa[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2018, 190(3): 151.
- [8] LIU Hui, ZHANG Ke-jing, CHAI Li-yuan, YANG Zhi-hui, YUAN Wei-chun, LIAO Qi, LI Huan, LIU Yi. A comparative evaluation of different sediment quality guidelines for metal and metalloid pollution in the Xiangjiang River, Hunan, China[J]. *Environmental Contamination Toxicology*, 2017, 73(4): 593–606.
- [9] SUN Guo-xin, WANG Xin-jun, HU Qin-hong. Using stable lead isotopes to trace heavy metal contamination sources in sediments of Xiangjiang and Lishui Rivers in China[J]. *Environmental Pollution*, 2011, 159: 3406–3410.
- [10] LIANG Jie, LIU Jia-yu, YUAN Xing-zhong, ZENG Guang-ming, LAI Xu, LI Xiao-dong, WU Hai-peng, YUAN Yu-jie, LI Fei. Spatial and temporal variation of heavy metal risk and source in sediments of Dongting Lake wetland, mid-south China[J]. *Journal of Environmental Science and Health (Part A)*, 2015, 50(1): 100–108.
- [11] DU Yan, HU Xue-feng, WU Xiao-hong, SHU Ying, JIANG Ying, YAN Xiao-juan. Affects of mining activities on Cd pollution to the paddy soils and rice grain in Hunan province, Central South China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2013, 185(12): 9843–9856.
- [12] LIU Jia-yu, LIANG Jie, YUAN Xing-zhong, ZENG Guang-ming, YUAN Yu-jie, WU Hai-peng, HUANG Xiao-long, LIU Jun-feng, HUA Shan-shan, LI Fei, LI

- Xiao-dong. An integrated model for assessing heavy metal exposure risk to migratory birds in wetland ecosystem: A case study in Dongting Lake Wetland, China[J]. *Chemosphere*, 2015, 135: 14–19.
- [13] LI Fei, HUANG Jin-hui, ZENG Guang-ming, YUAN Xingzhong, LI Xiao-dong, LIANG Jie, WANG Xiao-yu, TANG Xiao-jiao, BAI Bing. Spatial risk assessment and sources identification of heavy metals in surface sediments from the Dongting Lake, Middle China[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2013, 132: 75–83.
- [14] WANG Ling-qing, LIANG Tao, ZHONG Bu-qing, LI Ke-xin, ZHANG Qian, ZHANG Chao-sheng. Study on Nitrogen Dynamics at the Sediment–Water Interface of Dongting Lake, China[J]. *Aquatic Geochemistry*, 2014, 20(5): 501–517.
- [15] ZHANG Ying, LIU Chao-ming, LIU Xue-jun, XU Wen, ZHANG Wen. Atmospheric nitrogen deposition around the Dongting Lake, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2019, 207: 197–204.
- [16] TORRENT L, MARGUI E, QUERALT I, HIDALGO M, IGLESIAS M. Interaction of silver nanoparticles with mediterranean agricultural soils: Lab-controlled adsorption and desorption studies[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2019, 83(3): 205–216.
- [17] ZHU Hui-na, YUAN Xing-zhong, ZENG Guang-ming, JIANG Min, LIANG Jie, ZHANG Chang, YIN Juan, HUANG Hua-jun, LIU Zhi-feng, JIANG Hong-wei. Ecological risk assessment of heavy metals in sediments of Xiawan Port based on modified potential ecological risk index[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society China*, 2012, 22(6): 1470–1477.
- [18] MOSHIRI F, EBRAHIMI H, ARDAKANI M R, REJALI F. Biogeochemical distribution of Pb and Zn forms in two calcareous soils affected by mycorrhizal symbiosis and alfalfa rhizosphere[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 179, 241–248.
- [19] ZHAO Hua-rong, XIA Bei-cheng, FAN Chen, ZHAO Peng, SHEN Shi-li. Human health risk from soil heavy metal contamination under different land uses near Dabaoshan Mine, Southern China[J]. *Science of the Total Environment*, 2012, 417/418: 45–54.
- [20] 祝慧娜, 李莹, 梁婕, 刘永德, 尹娟. 基于区间数排序法的洞庭湖沉积物重金属生态风险分析[J]. *环境工程*, 2014, 32(2): 114–117.
- ZHU Hui-na, LI Ying, LIANG Jie, LIU Yong-de, YIN Juan. Ecological risk assessment of heavy metals in sediments of Dongting Lake based on ranking-method of interval numbers[J]. *Environmental Engineering*, 2014, 32(2): 114–117.
- [21] 秦迪岚, 罗岳平, 黄哲, 胡军, 樊娟, 廖岳华. 洞庭湖水环境污染状况与来源分析[J]. *环境科学与技术*, 2012, 8: 199–204.
- QIN Di-lan, LUO Yue-ping, HUANG Zhe, HU Jun, FAN Juan, LIAO Yue-hua. Pollution status and source analysis of water environment in Dongting Lake[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 8: 199–204.
- [22] 武深树, 谭美英, 黄璜, 龙岳林, 朱好, 甘德欣. 湖南洞庭湖区农地畜禽粪便承载量估算及其风险评估[J]. *中国生态农业学报*, 2009, 17(6): 1245–1251.
- WU Shen-shu, TAN Mei-ying, HUANG Huang, LONG Yue-lin, ZHU hao, GAN De-xin. Loading capacity estimation and risk assessment of livestock manure in cultivated lands around Dongting Lake[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2009, 17(6): 1245–1251.
- [23] 孙海燕, 万书波, 李林, 刘登望. 洞庭湖芦苇湿地不同水期土壤—植被重金属分布特征[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(5): 289–293.
- SUN Hai-yan, WAN Shu-bo, LI Lin, LIU Deng-wang. Distribution of heavy metals in soil and plant of reed wetland in the Dongting Lake of China during different seasons[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(5): 289–293.
- [24] CEVIK F, GOKSU M Z, DERICI O B, FINDIK O. An assessment of metal pollution in surface sediments of Seyhan dam by using enrichment factor, geoaccumulation index and statistical analyses[J]. *Environmental Monitoring & Assessment*, 2009, 152(1/4): 309–317.
- [25] FU Jie, ZHAO Chang-po, LUO Yu-peng, LIU Chun-sheng, KYZAS G Z, LUO Yin, ZHAO Dong-ye, AN Shu-qing, ZHU Hai-liang. Heavy metals in surface sediments of the Jialu River, China: Their relations to environmental factors[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2014, 270(3): 102–109.
- [26] HARIS H, LOOI L J, ARIS A Z, MOKHTAR N F, AYOB N A, YUSOFF F M, SALLEH A B, PRAVEENA S M. Geo-accumulation index and contamination factors of heavy metals (Zn and Pb) in urban river sediment[J]. *Environmental Geochemistry & Health*, 2017, 4: 1–13.
- [27] XIONG Jian-hua, ZHAO Tian-yu, CHENG Hao, LI Shi-long, WANG Shuang-fei, CHEN Guo-ning. The assessment on the heavy metal pollution and health risks in the Liujiang River under the Xijiang River region[J]. *Desalination and Water Treatment*, 2019, 149: 315–322.
- [28] YAN Feng, NIU Zhi-guang. Evaluation model of major heavy metals pollution factors in coastal waters and sediments[J]. *Desalination and Water Treatment*, 2019, 149: 335–340.

- [29] WU Shan, PENG Si-qing, ZHANG Xue-xia, WU Dui-lin, LUO Wei, ZHANG Tian-bin, ZHOU Shun-gui, YANG Guo-yi, WAN Hong-fu, WU Le-qin. Levels and health risk assessments of heavy metals in urban soils in Dongguan, China[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2015, 148: 71–78.
- [30] LI Zhi-yuan, MA Zong-wei, KUIJP T J, YUAN Zeng-wei, HUANG Lei. 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.
- [31] HUANG Jin-hui, LIU Wen-chu, ZENG Guang-ming, Li Fei, HUANG Xiao-long, GU Yan-ling, SHI Li-xiu, SHI Ya-hui, WAN Jia. An exploration of spatial human health risk assessment of soil toxic metals under different land uses using sequential indicator simulation[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2016, 129: 199–209.
- [32] 安婧, 宫晓双, 陈宏伟, 魏树和. 沈抚灌区农田土壤重金属污染时空变化特征及生态健康风险评价[J]. *农业环境科学学报*, 2016, 35(1): 37–44.  
AN Jing, GONG Xiao-shuang, CHEN Hong-wei, WEI Shu-he. Temporal and spatial characteristics and health risk assessment of heavy metal pollution in soils of Shenfu irrigation area[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(1): 37–44.
- [33] 董婷, 李天晰, 赵秀阁, 曹素珍, 王贝贝, 马瑾, 段小丽. 某焦化厂周边大气 PM<sub>10</sub> 重金属来源及健康风险评价[J]. *环境科学*, 2014, 35(4): 90–93.  
DONG Ting, LI Tian-xi, ZHAO Xiu-ge, CAO Su-zhen, WANG Bei-bei, MA Jin, DUAN Xiao-li. Source and health risk assessment of heavy metals in ambient air PM<sub>10</sub> from one coking plant[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(4): 90–93.
- [34] 李静, 俞天明, 周洁, 谢正苗. 铅锌矿区及周边土壤铅、锌、镉、铜的污染健康风险[J]. *环境科学*, 2008, 29(8): 1238–1244.  
LI Jin, YU Tian-ming, ZHOU Jie, XIE Zhen-miao. Assessment of health risk for mined soils based on critical thresholds for lead, zinc, cadmium and copper[J]. *Environmental Science*, 2008, 29(8): 1238–1244.
- [35] 王兰化, 李明明, 张莺, 马武明, 崔凯鹏, 王志强. 华北地区某蔬菜基地土壤重金属污染特征及健康风险评价[J]. *地球学报*, 2014, 35(2): 191–196.  
WANG Lan-hua, LI Ming-ming, ZHANG Yuan, MA Wu-ming, CUI Kai-peng, WANG Zhi-qiang. Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in soil of a vegetable base in North China[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2014, 35(2): 191–196.
- [36] SUBHANI M, MUSTAFA I, ALAMDAR A, KATSOYIANNIS L, ALI N, HUANG Qing-yu, PENG Si-yuan, SHEN He-qing, EQANI S A. Arsenic levels from different land-use settings in Pakistan: Bio-accumulation and estimation of potential human health risk via dust exposure[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2015, 115: 187–194.
- [37] KE Shen, CHENG Xi-yu, ZHANG Ni, HU Hong-gang, YAN Qiong, HOU Ling-ling, SUN Xin, CHEN Zhi-nan. Cadmium contamination of rice from various polluted areas of China and its potential risks to human health[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015, 187(7): 3–11.
- [38] 潘佑民, 杨国志, 等. 湖南土壤背景值及研究方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1988: 159–275.  
PAN You-ming, YANG Guo-zhi. Soil background value in Hunan and study methods[M]. Beijing: Chinese Environmental Science Press, 1988: 159–275.
- [39] CHAI Li-yuan, LI Huan, YANG Zhi-hui, MIN Xiao-bo, LIAO Qi, LIU Yi, MEN Shu-hui, YAN Ya-nan, XU Ji-xin. Heavy metals and metalloids in the surface sediments of the Xiangjiang River, Hunan, China: distribution, contamination, and ecological risk assessment[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(1): 874–885.
- [40] HUANG Bo, GUO Zhao-hui, TU Wei-jia, PENG Chi, XIAO Xi-yuan, ZENG Peng, LIU Ya-nan, WANG Ming-wei, XIONG Jian. Geochemistry and ecological risk of metal(loid)s in overbank sediments near an abandoned lead/zinc mine in Central South China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2018, 77(3): 68–81.
- [41] XUE Sheng-guo, SHI Li-zheng, WU Chuan, WU Hui, QIN Yan-yan, PAN Wei-song, HARTLEY W, CUI Meng-qian. Cadmium, lead, and arsenic contamination in paddy soils of a mining area and their exposure effects on human HEPG2 and keratinocyte cell-lines[J]. *Environmental Research*, 2017, 156: 23–30.
- [42] FEI Jiang-chi, MIN Xiao-bo, WANG Zhen-xing, PANG Zhi-hua, LIANG Yan-jie, KE Yong. Health and ecological risk assessment of heavy metals pollution in an antimony mining region: A case study from South China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 35(24): 27573–27586.
- [43] XU Jin-ying, CHEN Yu-wei, ZHENG Li-lin, LIU Bao-gui, LIU Jin-fu, WANG Xiao-long. Assessment of heavy metal pollution in the sediments of the main tributaries of Dongting Lake, China[J]. *Water*, 2018, 229(8): 272–288.
- [44] 胡春华, 周鹏, 黄萍, 杜洁, 周文斌. 鄱阳湖流域溶解态重金属行为特征及健康风险[J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31(5): 1009–1014.  
HU Chun-hua, ZHOU Peng, HUANG Ping, DU Jie, ZHOU

- Wen-bin. Behavior characteristics of dissolved heavy metals and health risks assessment from Poyang Lake Basin, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(5): 1009–1014.
- [45] 范清华, 黎刚, 王备新, 陈媛, 魏房忠. 太湖饮用水源地水环境健康风险评估[J]. *中国环境监测*, 2012, 28(1): 6–9.
- FAN Qin-hua, LI Gang, WANG Bei-xing, CHEN Yuan, WEI FANG-zhong. Environmental health risk assessment of drinking water source of Taihu Lake[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2012, 28(1): 6–9.
- [46] 施阳. 巢湖表层水体中砷及重金属分布特征、风险评估和来源[D]. 合肥: 安徽医科大学, 2018: 22–26.
- SHI Yang. Contamination characteristics, ecological risk assessment and sources of arsenic and heavy metals in surface water from Lake Chaohu[D]. Hefei: Anhui Medical University, 2018: 22–26.
- [47] ZENG Xiao-xia, LIU Yun-guo, YOU Shao-hong, ZENG Guang-ming, TAN Xiao-fei, HU Xin-jiang, HU Xi, HUANG Lei, LI Fei. Spatial distribution, health risk assessment and statistical source identification of the trace elements in surface water from the Xiangjiang River, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22(12): 9400–9410.

## Assessment of heavy metal and human health risk in surface soils around Dongting Lake wetland, China

SHI Chen-hao<sup>1,2</sup>, WANG Yun-yan<sup>1</sup>, CHAI Li-yuan<sup>1</sup>, LIU Jia-yu<sup>3</sup>

(1. School of Metallurgy and Environment, Central South University, Changsha 410083, China;

2. Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China;

3. Xuzhou Institute of Environmental Protection Science, Xuzhou 221006, China)

**Abstract:** In order to find out the pollution of heavy metals in surface soil around Dongting Lake wetland and its risk to human health, 10 soil sampling sites around Dongting Lake area were selected in this study from 2016 to 2018. 100 surface soil samples (0–30 m) were collected. The content and distribution of heavy metals were analyzed, and the methods of geo-accumulation index ( $I_{geo}$ ), nemerow index ( $N_f$ ) and soil health risk assessment were used for risk assessment. The results show that the average concentrations of Pb, Cd, Hg, As and Cu in soil samples are 53.33, 1.62, 0.27, 26.8 and 37.72 mg/kg, respectively, which are higher than the background values of soil environment in the study area. Among them, the average concentrations of Cd and As, the concentrations of Cd in West Dongting Lake, South Dongting Lake and East Dongting Lake and the concentrations of As in South Dongting Lake are all higher than the criteria for screening the risk of agricultural land soil pollution in “Soil Environmental Quality Standard” (GB 15618—2018). The maximum pollution values of Cd, Hg, As and Cu are in South Dongting Lake, while the maximum pollution values of Pb are in East Dongting Lake. The study of geo-accumulation index ( $I_{geo}$ ) show that Cd is at the level of serious pollution, and Pb, Hg and As are at the level of non-pollution to moderate pollution in three years. The nemerow index ( $N_f$ ) study shows that, in three years, West Dongting Lake, South Dongting Lake and East Dongting Lake are at slight pollution level. The assessment of human health risks using the three exposure factors of unintentional smoking, skin contact and breath contact in the soil health risk assessment system shows that the average of 13 adults and 8 children per million population are at risk of cancer. The results provide reference and suggestions for the sources and characteristics of soil pollution in Dongting Lake wetland.

**Key words:** Dongting Lake; soil; heavy metal; pollution; human health risk assessment

**Foundation item:** Project(2018YFC1801805) supported by the National Basic Research Development Program of China; Project(2018SK2043) supported by the Key Program of Research and Development of Hunan Province, China

**Received date:** 2019-02-22; **Accepted date:** 2019-11-08

**Corresponding author:** WANG Yun-yan; Tel: +86-731-88830511; E-mail: wyy@csu.edu.cn

(编辑 李艳红)