#### DOI: 10.5846/stxb202008112087

杨帆,袁隆湖,黎一夫,何丹丹,刘旭冉,王冬波.湖南省主要水系底泥重金属污染特征及其生态风险评价.生态学报,2022,42(5):1934-1946. Yang F, Yuan L H, Li Y F, He D D, Liu X R, Wang D B.Pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in sediments of main water systems in Hunan Province.Acta Ecologica Sinica,2022,42(5):1934-1946.

# 湖南省主要水系底泥重金属污染特征及其生态风险 评价

杨 帆1,袁隆湖2,黎一夫2,何丹丹2,刘旭冉2,王冬波2,\*

1 湖南省交通科学研究院有限公司,长沙 410015 2 湖南大学环境科学与工程学院,长沙 410082

摘要:为全面了解湖南省主要水系底泥中重金属含量及其潜在生态风险,在湖南省内的湘、资、沅、澧以及洞庭湖5个主要水系 共采集了75个位点的底泥样品,分析了重金属元素含量和来源分布特征,并采用地累积指数法、内梅罗指数法和潜在生态风险 指数法对其污染程度和潜在生态风险进行评价。结果表明,As、Cd、Cr、Cu、Mn、Pb和Zn的平均含量分别为32.87、7.59、78.09、 70.69、1182.60、85.64 mg/kg和482.44 mg/kg。湘江和洞庭湖的污染相对严重,底泥中重金属含量明显高于资江、沅江和澧水;相 关性分析表明多种重金属具有相同污染来源;地累积指数评价结果显示,湖南省主要水系底泥中Cd为重污染水平,Zn为中度 污染,Cu、Mn和Pb均为轻度污染,而As和Cr污染程度为清洁;内梅罗指数法评价结果表明,除Cr为轻度污染外,湖南省主要 水系底泥中其他6种重金属污染均为重污染级别;潜在生态风险评价结果显示,湖南省总体潜在生态风险属于中等级别,各水 系潜在生态风险大小顺序为洞庭湖>资江>湘江>澧水>沅江,重金属Cd的潜在生态风险级别为很强,其他重金属元素都属于轻 微级别。

关键词:湖南省;底泥;重金属污染;地累积指数;内梅罗指数;潜在生态风险

# Pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in sediments of main water systems in Hunan Province

YANG Fan<sup>1</sup>, YUAN Longhu<sup>2</sup>, LI Yifu<sup>2</sup>, HE Dandan<sup>2</sup>, LIU Xuran<sup>2</sup>, WANG Dongbo<sup>2,\*</sup>

1 Hunan Communications Research Institute Company Limited, Changsha 410015, China

2 College of Environment Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China

Abstract: In order to fully understand the content of heavy metals in the sediments of the main water systems in Hunan Province and their potential ecological risks, 75 sediment samples were collected from five major water systems and analyzed. The correlation of the contents of various heavy metals in the sediments of the main water systems in Hunan Province was analyzed. Based on the sampling test results, the along the river distribution of heavy metals in the sediments of four rivers in Hunan Province was also analyzed. Through the content analysis of the Cd and Mn along the river, it was found that the change of Mn content along the river was similar to that of Cd, and the peak value of heavy metal content had an important relationship with the drainage enterprises, heavy pollution industrial parks and estuary siltation. The pollution degree and potential ecological risk were evaluated by the geo-accumulation index method, Nemerow index method and potential ecological risk index method. The results showed that the average contents of As, Cd, Cr, Cu, Mn, Pb and Zn were 32.87, 7.59, 78.09, 70.69, 1182.60, 85.64 and 482.44 mg/kg, respectively. The pollution of Xiangjiang River and

收稿日期:2020-08-11; 网络出版日期:2021-11-17

基金项目:湖南省科技重大专项项目(2018SK1010);国家自然科学青年基金项目(5200063)

<sup>\*</sup> 通讯作者 Corresponding author.E-mail: dongbowang@ hnu.edu.cn

Dongting Lake was relatively serious, and the content of heavy metals in the sediments was significantly higher than that of Zijiang, Yuanjiang and Lishui River. Correlation analysis showed that multiple heavy metals had the same pollution source. The evaluation results of the geoaccumulation index showed that the pollution level of Cd wss severe, level of Zn was moderate, level of Cu, Mn, and Pb were all mild, while the pollution levels of As and Cr were clean in the sediments of the main water systems in Hunan Province. The Nemero index evaluation results showed that, except for the light pollution of Cr, the other six heavy metal pollution in the sediments of the main water systems in Hunan Province were the severe levels. The potential ecological risk assessment results showed that the overall potential ecological risk of Hunan Province belonged to the medium level. The order of the potential ecological risk of each water system was Dongting Lake> Zijiang River > Xiangjiang River>Lishui River>Yuanjiang River. The potential ecological risk level of Cd was very severe and the level of other heavy metal elements were mild.

Key Words: Hunan Province; sediment; heavy metal pollution; geoaccumulation index; Nemero index; potential ecological risk

沉积物作为水体生态系统的重要组成部分,在维持水体生态循环和物质交换中发挥着重要作用<sup>[1-2]</sup>。随 着现代工业和冶金业的迅速发展,大量含重金属的废水排放到河流和湖泊中,对水体生态系统的安全构成严 重威胁<sup>[3-4]</sup>。进入水环境的重金属大部分会转移至悬浮物和沉积物中,当水环境发生变化时,蓄积在沉积物 中的重金属可能会释放出来,造成二次污染,对水体生态系统和人类健康产生直接或间接的危害<sup>[5]</sup>。沉积物 作为水环境中重金属的主要蓄积库,可以反映水体受重金属污染的情况<sup>[6-8]</sup>。

湖南省水系发达,江河湖库众多。而作为著名的"有色金属之乡",湖南省内遍布采矿、冶金和化工等企业和工厂,由于生产过程中含重金属的废水、废渣未经处理直接排放,使湖南省内各水系受到严重的重金属污染<sup>[5,9-12]</sup>。总的来看,湖南省水系底泥污染的主要重金属元素有 Cd、Zn、Pb、Cu、As、Hg 等,其中 Cd 污染尤为严重<sup>[13-15]</sup>。许友泽等<sup>[16]</sup>采用改进潜在生态危害指数法<sup>[17]</sup>对湘江全流域重点污染断面底泥进行了调查和研究,研究结果显示:湘江底泥中 Cd 和 Mn 的污染最为严重,生态危害也最高。樊娟等<sup>[18]</sup>对洞庭湖各河流入湖口和各子湖区(段)表层底泥中的重金属元素进行了含量分析,结果显示 Pb、Cu、Zn、As、Hg 的含量均属于国家土壤质量二级标准,而所有样点中 Cd 的含量都超过了国家土壤质量三级标准限值。从多种重金属的潜在生态危害指数计算结果看,西洞庭湖的重金属污染潜在生态风险分级为"极高",南洞庭湖、东洞庭湖重金属的潜在生态风险级别为"高"。这说明洞庭湖各个湖区底泥中重金属污染对生态环境的潜在危害处于高风险状态。近年来,国家和地方对湖南省水环境整治力度不断增大,底泥疏浚作为改善水环境的重要手段之一,对水体污染有一定的控制效果<sup>[4,19]</sup>。但疏浚底泥含有包括重金属在内的众多污染物,不利于环保处置和资源化利用。而此前针对底泥污染的研究多集中在单一河流或河段,缺乏对湖南省整体污染情况的分析。因此,有必要对湖南省底泥中重金属污染进行全面评价。

本文首次以湖南全省水系为研究对象,分析湘、资、沅、澧四条河流以及洞庭湖底泥中重金属污染情况,研 究重金属分布规律,探讨重金属污染源,以地累积指数法和内梅罗指数法评价重金属污染程度,以潜在生态风 险指数法评价湖南省底泥中重金属的生态风险,为湖南省水体重金属污染防治及疏浚底泥资源化利用提供参 考依据。

#### 1 实验方法

#### 1.1 样品采集

底泥样品采集的时间是 2019 年 9 至 11 月,为能较好地测定湖南省主要水系底泥的污染情况,同时考虑 到底泥样品采集的目标可达性、代表性及经济性三大基本原则在湖南省 5 个主要水系共采集了 75 个位点的 表面沉积物样品,其中湘江 30 个,资江 11 个,沅江 17 个,澧水 11 个,洞庭湖 6 个。采样点分布如图 1 所示。 采集的底泥样品分别装入聚乙烯袋中,标注编号、密封保存,在避光条件下运送至实验室。将取回后的部分样品放在阴凉通风口处自然风干,除去土样中石子和动植物残体等异物,用玛瑙棒磨碎,过100目(孔径0.149 mm)尼龙筛, 混匀。之后进行分析测试。

#### 1.2 样品测试与分析

底泥样品经 HF-HNO<sub>3</sub>-HClO<sub>4</sub>酸溶法消解,称取 0.05 g 沉积样品于 PTFE 消解罐内胆中,加入 1.5 mL 氢氟酸和 0.5 mL硝酸,将内胆密封后置于铁质罐套内,放入 150℃烘 箱中加热 12 h。冷却后取出消解罐内胆并加入 0.25 mL 高 氯酸,在 150℃电热板上蒸至近干。之后加入 2 mL 超纯水 和 1 mL 硝酸,密封后装入铁质罐套内再次于 150℃烘箱中 加热 12 h。冷却后取出消解罐内胆,使用超纯水定容至 50 mL,摇匀并过 0.22 μm 滤膜,滤液放入 4℃冰箱中待测。所 有样品均同时测定沉积物标准品用于质量控制。采用等 离子光谱法对 7 种重金属元素(As、Cd、Cr、Cu、Mn、Pb 和 Zn)含量进行测定。







A1…A3 表示湘江采样点; B1…B11 表示资江采样点; C1… C17 表示沅江采样点; D1…D11 表示澧水采样点; E1…E5 表 示洞庭湖采样点

#### 1.3 重金属污染程度评价方法

地累积指数法(*I*<sub>geo</sub>)是目前用于评价河流沉积物重金属污染程度的常用方法之一,该指数充分考虑了自然地质过程中元素背景值和人类活动对重金属污染的影响,是区分人为活动影响的重要参数<sup>[1,10,20]</sup>。其计算公式为:

$$I_{\text{geo}} = \log_2 \left[ \frac{C^i}{K \times B_i} \right] \tag{1}$$

式中,  $C^i$ 为底泥中重金属 i 的实测值;  $B_i$ 为重金属 i 的地球化学背景值, 为客观评价重金属富集程度, 除 As 选 用地球化学背景值外, 其他元素均选用湖南省表层沉积物元素背景值<sup>[10,21]</sup>,  $B_{As}$ 为 12.9 mg/kg,  $B_{Ca}$ 为 0.2 mg/kg,  $B_{Ca}$ 为 1.5 mg/kg,  $B_{Ca}$ 为 26 mg/kg,  $B_{Mn}$ 为 459 mg/kg,  $B_{Pb}$ 为 35 mg/kg,  $B_{Zn}$ 为 94 mg/kg。 K 为修正区域造岩运 动引起的背景值差异而设置的参数, 一般取 1.5<sup>[22]</sup>。根据地累积指数  $I_{geo}$ 污染程度分级(表 1), 地累积指数越 大, 表示沉积物中重金属污染程度越严重。

内梅罗指数法可以全面反映各重金属对土壤的不同作用,突出高浓度重金属对环境质量的影响。内梅罗 污染指数的计算公式为:

$$P_i = C^i / S_i \tag{2}$$

$$P_{\text{sch}} = \sqrt{\frac{(P_i^2 + P_{i\max}^2)}{2}}$$
(3)

式中, *P<sub>i</sub>* 是重金属*i* 的单项污染指数; *C<sup>i</sup>* 为底泥中重金属*i* 的实测值; *S<sub>i</sub>* 是重金属*i* 的环境标准值,本研究选取地球化学元素背景值以及湖南省表层沉积物元素背景值作为标准值<sup>[10,21]</sup>, *P<sub>综合</sub>* 是重金属*i* 的综合污染指数, *P<sub>i</sub>* 是重金属*i* 的单项污染指数平均值; *P<sub>imax</sub>*是重金属*i* 的最大单项污染指数。内梅罗污染指数评价标准见表 2。其中轻度污染是指污染物对环境影响程度较小,中度污染表示污染物对环境有中等程度的影响,而重污染表示污染物环境产生严重的冲击。

1.4 重金属潜在生态风险评价方法

采用 Hakanson 潜在生态风险指数法评价湖南省底泥中重金属的潜在生态风险<sup>[23]</sup>。该方法综合考虑了 重金属的生态效应,环境效益和毒理效应<sup>[24]</sup>。其计算公式为: 

| Table 1         Pollution degree classification of the geoaccumulation index I geo |                       |                          |  |                       |                          |  |  |  |  |  |
|--|-----------------------|--------------------------|--|-----------------------|--------------------------|--|--|--|--|--|
| I <sub>geo</sub> 范围<br>Range of I <sub>geo</sub>                                   | 级数<br>Pollution level | 污染程度<br>Pollution degree | I <sub>geo</sub> 范围<br>Range of I <sub>geo</sub> | 级数<br>Pollution level | 污染程度<br>Pollution degree |  |  |  |  |  |
| $I_{\rm geo} \leq 0$   | 0                     | 清洁                       | 3< <i>I</i> <sub>geo</sub> ≤4                    | 4                     | 偏重污染                     |  |  |  |  |  |
| $0 < I_{\text{geo}} \leq 1$  | 1                     | 轻度污染                     | $4 < I_{\text{geo}} \leq 5$                      | 5                     | 重污染                      |  |  |  |  |  |
| $1 < I_{\text{geo}} \leq 2$  | 2                     | 偏中度污染                    | $I_{\rm geo}$ >5                                 | 6                     | 严重污染                     |  |  |  |  |  |
| $2 < I_{\text{geo}} \leq 3$  | 3                     | 中度污染                     |  |                       |                          |  |  |  |  |  |

表 2 内梅罗综合污染指数指数的等级划分

| Table 2 | Classification | of Nemeiro | Comprehensive | Pollution | Index |
|---------|----------------|------------|---------------|-----------|-------|
| Table 2 | Classification | of remeno  | comprenensive | 1 onution | muca  |

| $P_{ m schole{charge}}$ 范围<br>Range of $P_{ m schole{charge}}$ | 级数<br>Pollution level | 污染程度<br>Pollution degree | $P_{ m \&chic}$ 范围<br>Range of $P_{ m @chic}$ | 级数<br>Pollution level | 污染程度<br>Pollution degree |
|--|-----------------------|--------------------------|---|-----------------------|--------------------------|
| $P_{ m sch} \leq 0.7$  | 1                     | 清洁(安全)                   | $2.0 \leq P_{$ 综合} \leq 3.0                   | 4                     | 中度污染                     |
| $0.7 \leq P_{\text{sch}} \leq 1$                               | 2                     | 尚清洁(警戒线)                 | $P_{ m sch} \ge 3.0$                          | 5                     | 重污染                      |
| $1.0 ≤ P_{\text{sch}} ≤ 2.0$                                   | 3                     | 轻度污染                     |   |                       |                          |

$$E_r^i = T_r^i \times \left(\frac{C^i}{C_n^i}\right) \tag{4}$$

$$RI = \sum E_r^i \tag{5}$$

式中, E<sup>i</sup>, 为第 *i* 种重金属元素的潜在生态风险系数, T<sup>i</sup>, 为第 *i* 种重金属元素的相关毒性响应系数,各重金属 T<sup>i</sup>, 值的大小根据相关文献得到<sup>[22-25]</sup>, Cd、As、Cu、Pb、Cr、Mn 和 Zn 的毒性响应系数分别为 30、10、5、5、2、1 和 1。 C<sup>i</sup> 为底泥中第 *i* 种重金属含量的实测值, C<sup>i</sup><sub>n</sub> 为第 *i* 种重金属的背景值,本研究采用工业化前底泥中重金属最 高背景值以及湖南省表层沉积物元素背景值<sup>[10,21]</sup>。*RI* 是综合潜在风险指数。重金属潜在生态风险系数 E<sup>i</sup><sub>r</sub> 和综合潜在风险指数 *RI* 的级别划分见表 3, 生态风险系数和指数越大, 说明沉积物中的重金属对周围生态环 境产生生态危害的可能性就越大<sup>[20]</sup>。

表 3 重金属潜在生态风险系数 E<sup>i</sup> 和综合潜在风险指数 RI 的级别划分

| Table 3 | Classification of | of the potential | ecological risk | coefficient | of heavy | metals $E_r^i$ | and the | comprehensive | potential risk | index <i>RI</i> |
|---------|-------------------|------------------|-----------------|-------------|----------|----------------|---------|---------------|----------------|-----------------|
|---------|-------------------|------------------|-----------------|-------------|----------|----------------|---------|---------------|----------------|-----------------|

| RI 范围<br>Range of RI   | $E_r^i$ 范围<br>Range of $E_r^i$ | 危害程度<br>Degree of potential<br>ecological risk | <i>RI</i> 范围<br>Range of <i>RI</i> | $E_r^i$ 范围<br>Range of $E_r^i$ | 危害程度<br>Degree of potential<br>ecological risk |
|------------------------|--------------------------------|--|------------------------------------|--------------------------------|--|
| <i>RI</i> <150         | $E_{r}^{i} < 40$               | 轻微   | <i>RI</i> >600                     | $160 \le E_r^i < 320$          | 很强   |
| $150 \leq RI < 300$    | $40 \le E_r^i < 80$            | 中等   |                                    | $E_r^i > 320$                  | 极强   |
| $300 \leq RI \leq 600$ | $80 \leq E_r^i < 160$          | 强  |                                    |                                |  |

#### 2 结果与分析

## 2.1 湖南省主要水系底泥重金属含量与相关性分析

根据重金属含量测试结果,湖南省主要水系底泥中7种典型重金属As、Cd、Cr、Cu、Mn、Pb和Zn的平均含量分别为32.87、7.59、78.09、70.69、1182.60、85.64和482.44 mg/kg。与湖南省表层沉积物重金属元素背景值相比较,重金属Cd和Mn每个采样点的含量都超标,重金属As超标率为70.67%,Cr超标率为60%,Cu、Pb和Zn超标率分别为94.67%、98.67%和98.67。

表 4 为湖南省主要水系底泥中重金属的相关系数, Mn 与 As、Cr、Pb 在 0.05 水平上呈现弱正相关性; As 和 Cd、Pb 在 0.01 水平上呈现中等程度相关, Zn 和 Cr、Cu、Pb 在 0.01 水平上呈现中等程度正相关。根据湘江 底泥中重金属的相关系数(表 5), As 和 Cd、Cu; Cu 和 Pb; Zn 和 Pb 在 0.01 水平上呈现中等程度正相关, Cu 和

Zn 在 0.01 水平上呈现强正相关。这说明湘江底泥中 Cu 和 Zn 可能为同源污染,据李军等<sup>[21]</sup>对湘江长株潭段 底泥中重金属的研究,大型冶炼厂及化工厂的排污是这两种重金属污染的重要来源。根据资江底泥中重金属 的相关系数(表 6),其中 Cu 和 Zn 在 0.01 水平上呈现强正相关,这说明资江江底泥中 Cu 和 Zn 可能为同源污 染。根据沅江底泥中重金属的相关系数(表 7),Cd 与 Mn、Pb、Zn;Cr 与 Pb、Zn;As 与 Pb;Mn 与 Zn;Pb 与 Zn 在 0.01 水平上呈现强正相关。根据澧水底泥中重金属的相关系数(表 8),As 和 Zn 在 0.01 水平上呈现极强 正相关,由于砷广泛存在于铅锌冶炼的各个环节<sup>[26]</sup>,澧水上游的铅锌矿及冶炼企业可能是 As 和 Zn 的主要污 染源。根据洞庭湖底泥中重金属的相关系数(表 9),在 0.05 水平上,As 和 Cd;Cd 和 Pb;Cr 和 Cu、Mn 呈现极 强正相关,表明各组重金属具有相同污染来源或产生了复合污染,且受沉积作用的影响呈现较为相似的分布 特征。

表4 湖南省主要水系底泥重金属相关系数 (Pearson 相关性) Table 4 Correlation coefficients of heavy metals in sediments of main water systems in Hunan Province 相关系数 砷 As 镉 Cd 铬 Cr 铜 Cu 锰 Mn 铂 Pb 锌 Zn Correlation coefficient 砷 As 1 镉 Cd 0.420 \*\* 1 铬 Cr -0.0350.127 1 铜 Cu 0.308 \*\* 0.350 \*\* 1 0.173 锰 Mn 0.239\* 0.247 0.228 \* 0.027 1 铂 Pb 0.473 \*\* 0.324 \*\* 0.180 0.196 0.271 \* 1 0.329 \*\* 锌 Zn 0.182 0.433 \*\* 0.419 \*\* 0.105 0.466 \*\* 1

\*表示在 0.05 水平上显著相关; \* \*表示在 0.01 水平上极显著相关

| 表 5 | 湘江底泥重金属相关系数( | Pearson | 相关性 |
|-----|--------------|---------|-----|
|-----|--------------|---------|-----|

| Table 5 Correlation coefficients of heavy metals in sediments of Alangjiang River |          |        |         |          |        |          |      |  |  |  |
|---|----------|--------|---------|----------|--------|----------|------|--|--|--|
| 相关系数<br>Correlation coefficient   | 砷 As     | 镉 Cd   | 铬 Cr    | 铜 Cu     | 锰 Mn   | 铂 Pb     | 锌 Zn |  |  |  |
| 砷 As  | 1        |        |         |          |        |          |      |  |  |  |
| 镉 Cd  | 0.516 ** | 1      |         |          |        |          |      |  |  |  |
| 铬 Cr  | -0.077   | -0.061 | 1       |          |        |          |      |  |  |  |
| 铜 Cu  | 0.464 ** | 0.245  | 0.377 * | 1        |        |          |      |  |  |  |
| 锰 Mn  | 0.115    | 0.252  | 0.306   | 0.070    | 1      |          |      |  |  |  |
| 铂 Pb  | 0.304    | 0.313  | 0.115   | 0.592 ** | -0.011 | 1        |      |  |  |  |
| 锌 Zn  | -0.007   | -0.004 | 0.460 * | 0.620 ** | -0.172 | 0.562 ** | 1    |  |  |  |

表 6 资江底泥重金属相关系数 (Pearson 相关性)

|                                 | Table 6 | Table 6         Correlation coefficients of heavy metals in sediments of Zijiang River |        |          |       |       |      |  |  |  |  |
|---------------------------------|---------|--|--------|----------|-------|-------|------|--|--|--|--|
| 相关系数<br>Correlation coefficient | 砷 As    | 镉 Cd   | 铬 Cr   | 铜 Cu     | 锰 Mn  | 铂 Pb  | 锌 Zn |  |  |  |  |
| 砷 As                            | 1       |  |        |          |       |       |      |  |  |  |  |
| 镉 Cd                            | 0.454   | 1  |        |          |       |       |      |  |  |  |  |
| 铬 Cr                            | -0.297  | -0.076   | 1      |          |       |       |      |  |  |  |  |
| 铜 Cu                            | -0.024  | 0.402  | 0.293  | 1        |       |       |      |  |  |  |  |
| 锰 Mn                            | 0.369   | 0.176  | -0.123 | 0.208    | 1     |       |      |  |  |  |  |
| 铂 Pb                            | -0.314  | -0.160   | 0.428  | 0.212    | 0.422 | 1     |      |  |  |  |  |
| 锌 Zn                            | 0.014   | 0.579  | 0.001  | 0.751 ** | 0.422 | 0.343 | 1    |  |  |  |  |

| Table 7         Correlation coefficients of heavy metals in sediments of Yuanjiang River |          |          |          |         |          |          |      |  |  |  |  |
|--|----------|----------|----------|---------|----------|----------|------|--|--|--|--|
| 相关系数<br>Correlation coefficient  | 砷 As     | 镉 Cd     | 铬 Cr     | 铜 Cu    | 锰 Mn     | 铂 Pb     | 锌 Zn |  |  |  |  |
| 砷 As   | 1        |          |          |         |          |          |      |  |  |  |  |
| 镉 Cd   | 0.473    | 1        |          |         |          |          |      |  |  |  |  |
| 铬 Cr   | 0.376    | 0.468    | 1        |         |          |          |      |  |  |  |  |
| 铜 Cu   | 0.409    | 0.529 *  | 0.434    | 1       |          |          |      |  |  |  |  |
| 锰 Mn   | 0.097    | 0.707 ** | 0.492*   | 0.495 * | 1        |          |      |  |  |  |  |
| 铂 Pb   | 0.742 ** | 0.639 ** | 0.616 ** | 0.603 * | 0.542 *  | 1        |      |  |  |  |  |
| 锌 Zn   | 0.599 *  | 0.780 ** | 0.729 ** | 0.597 * | 0.616 ** | 0.746 ** | 1    |  |  |  |  |

表7 沅江底泥重金属相关系数(Pearson 相关性)

表8 澧水底泥重金属相关系数 (Pearson 相关性)

|                                 | Table 8         Correlation coefficients of heavy metals in sediments of Lishui River |         |       |       |         |       |      |  |  |  |  |
|---------------------------------|---|---------|-------|-------|---------|-------|------|--|--|--|--|
| 相关系数<br>Correlation coefficient | 砷 As  | 镉 Cd    | 铬 Cr  | 铜 Cu  | 锰 Mn    | 铂 Pb  | 锌 Zn |  |  |  |  |
| 砷 As                            | 1   |         |       |       |         |       |      |  |  |  |  |
| 镉 Cd                            | 0.702 *   | 1       |       |       |         |       |      |  |  |  |  |
| 铬 Cr                            | 0.053   | 0.208   | 1     |       |         |       |      |  |  |  |  |
| 铜 Cu                            | 0.227   | 0.096   | 0.227 | 1     |         |       |      |  |  |  |  |
| 锰 Mn                            | 0.193   | 0.638 * | 0.046 | 0.233 | 1       |       |      |  |  |  |  |
| 铂 Pb                            | 0.156   | 0.478   | 0.482 | 0.413 | 0.660 * | 1     |      |  |  |  |  |
| 锌 Zn                            | 0.821 **  | 0.702 * | 0.328 | 0.178 | 0.176   | 0.028 | 1    |  |  |  |  |

表9 洞庭湖底泥重金属相关系数 (Pearson 相关性)

. .

| Table 9 Correlation coefficients of neavy metals in sediments of Dongting Lake |        |         |         |                |       |        |      |  |  |  |  |
|--|--------|---------|---------|----------------|-------|--------|------|--|--|--|--|
| 相关系数<br>Correlation coefficient  | 砷 As   | 镉 Cd    | 铬 Cr    | 铜 Cu           | 锰 Mn  | 铂 Pb   | 锌 Zn |  |  |  |  |
| 砷 As   | 1      |         |         |                |       |        |      |  |  |  |  |
| 镉 Cd   | 0.912* | 1       |         |                |       |        |      |  |  |  |  |
| 铬 Cr   | 0.517  | 0.617   | 1       |                |       |        |      |  |  |  |  |
| 铜 Cu   | 0.189  | 0.432   | 0.901 * | 1              |       |        |      |  |  |  |  |
| 锰 Mn   | 0.356  | 0.441   | 0.902 * | $0.878$ $^{*}$ | 1     |        |      |  |  |  |  |
| 铂 Pb   | 0.769  | 0.863 * | 0.555   | 0.364          | 0.215 | 1      |      |  |  |  |  |
| 锌 Zn   | 0.418  | 0.211   | 0.564   | 0.320          | 0.669 | -0.053 | 1    |  |  |  |  |

#### 2.2 湖南省主要水系底泥重金属含量沿程分布

重金属含量在不同河段沉积物中空间分布的差异,与河段流域人类活动形式及产业分布有很大的关 系<sup>[27]</sup>。鉴于湖南省四条河流(湘江、资江、沅江、澧水)底泥中重金属 Cd 和 Mn 的采样超标率均为 100%,因此 对重金属 Cd 和 Mn 的含量在四条河流中的沿程分布情况进行研究,分析重金属污染的主要富集点以及富集 原因。

湘江共设 30 个采样点,从 A1(萍洲岛)到 A30(湘江汇入口)。湘江底泥中重金属 Cd 含量变化范围是 1.00—17.75 mg/kg,均值是 7.30 mg/kg,最高值是最低值的 17.75 倍,最高值出现在 A4(祁水下游入河口),最 低值出现在 A11(衡阳耒水)。除最高值外, Cd 含量在 A7—A10 段和 A13—A16 段出现连续高峰值, 这些河段 都是工业园集中段。湘江底泥中 Mn 含量的变化范围是 641.93—5890.00 mg/kg,均值是 1509.36 mg/kg。除 最高值 A2(长丰工业园)外,只在 A13(新衡泵工业园)出现了小幅峰值。上述情况说明湘江底泥中 Cd 和 Mn 的污染较为集中,且主要来源于工业园区的排放。刘锦军[28]对湘江底泥中重金属含量的沿程分布的研究也

1939

表明湘江底泥中 Mn 污染与湘江流域的排污企业和涉重污染工业园区有重要关系。

资江共设 11 个采样点,从 B1(繁荣村)到 B11(黄口潭)。资江底泥中重金属 Cd 含量的变化范围是 1.75—45.25 mg/kg,均值是 8.54 mg/kg,最高值是最低值的 25.9 倍,落差较大。从图 2 中可以看到,资江底泥 中 Cd 含量的沿程分布除最高值外无较大起伏,最高值是 B9(益阳市李家洲),位于益阳市长春工业园附近, 长春工业园重点致力于纺织品精、深加工产业,而纺织产品生产制造过程中产生的 Cd 可能是该河段底泥中 Cd 含量异常之高的原因<sup>[29]</sup>。资江底泥中重金属 Mn 含量的变化范围是 460.25—1479.00 mg/kg,均值是 873.61 mg/kg。Mn 的含量在 B4(敷溪)和 B11(黄口潭)出现明显峰值,黄口潭村是资江汇入洞庭湖处,上游 污染物在此处底泥中淤积,造成 Mn 含量的陡然升高。

沅江共设 17 个采样点,从 C1(辰水)到 C17(沅江汇入口)。沅江底泥中重金属 Cd 含量的变化范围是 1.25—17.50 mg/kg,均值是 4.53 mg/kg,最高值是最低值的 14 倍。Cd 的含量在 C3(武溪)和 C17(沅江汇入 口)出现明显峰值。武溪位于沅江和武水的交汇处,沅江汇入口为沅江汇入洞庭湖处,都易发生污染物的淤 积。沅江底泥中重金属 Mn 含量的变化范围是 497.00—2479.75 mg/kg,均值是 1105.03 mg/kg,最高值是最低 值的 5 倍。从图 2 可以看出,沅江底泥中 Mn 含量的沿程变化与 Cd 相似,说明沅江底泥中 Mn 和 Cd 的污染可 能存在一定的相关性。方小红等<sup>[30]</sup>对沅江入湖底泥中重金属进行分析发现底泥中重金属 Cd 显著富集,重金 属 Mn 中等程度富集,这与本研究的结论一致,表明沅江入湖处底泥中重金属 Cd 和 Mn 的富集。

澧水共设 11 个采样点,从 D1(渫水)到 D11(澧水汇入口)。澧水底泥中重金属 Cd 含量的变化范围是 1.60—13.05 mg/kg,均值是 4.71 mg/kg,最高值是最低值的 8.16 倍。明显峰值出现在 D4(涔水)和 D11(澧水 汇入口)。澧水底泥中重金属 Mn 含量的变化范围是 577.00—1911.70 mg/kg,均值是 1078.80 mg/kg,最高值 是最低值的 3.3 倍。在 D11(澧水汇入口)出现明显峰值。曾等志<sup>[31]</sup>对澧水入洞庭湖段底泥中重金属含量进 行分析测定,结果表明澧水入湖段底泥中重金属 Cd 污染程度最严重,且主要来自于工矿排放等人为带入,而 重金属 Mn 主要来自于流域基岩的自然风化、侵蚀等地表作用。



图 2 湖南省主要河流底泥重金属含量沿程分布

Fig.2 The distribution of heavy metals in sediments of major rivers in Hunan Province

2.3 湖南省底泥重金属污染程度评价

2.3.1 地累积指数法

湖南省底泥中重金属的地累积指数计算结果如表 10 所示。比较全省重金属的平均 I<sub>geo</sub>值,除重金属 As 和 Cr 污染程度为清洁(I<sub>geo</sub><0)外,Cd、Cu、Mn、Pb、Zn 的污染程度各不相同,其总体污染程度依次为:Cd>Zn>

Cu>Mn>Pb。其中 Cd 为 5 级重污染, Zn 为 2 级偏中度污染, Cu、Mn 和 Pb 均为 1 级轻度污染。单就湘江来 看,和刘锦军<sup>[28]</sup>在2016年针对湘江底泥中重金属的地累积指数评价结果相比,本研究中7种重金属的平均 I<sub>sea</sub>值均有所升高,表明湘江底泥重金属的污染程度进一步加重,所以对湘江底泥中重金属的监测和控制也必 须引起重视。

为分析湖南省主要水系重金属的复合污染情况,将7种重金属 I<sub>geo</sub>值的总和设为 I<sub>tot</sub>,即综合地累积指 数<sup>[20]</sup>。如表 10 所示,湖南省主要水系底泥中重金属的综合地累积指数 I<sub>10</sub>为 6.92,根据计算出的综合地累积 指数值,湖南省主要水系底泥中重金属的复合污染状况评价结果为:洞庭湖>湘江>资江>澧水>沅江,洞庭湖 的重金属复合污染情况最严重。与冷阳等<sup>[10]</sup>在 2017 年对洞庭湖底泥中重金属的调查结果相比, Cr 的平均 Ieeo值有所下降,而As、Cd、Cu、Pb的平均Ieeo值都有不同程度的升高。洞庭湖作为典型的过水吞吐型湖泊,接 纳湘、资、沅、澧四水来水来沙,任一河流的污染加剧势必会引起洞庭湖污染状况的改变,有关部门需加强对洞 庭湖入湖口的环境管理和污染治理力度。

|                  | Table 10 | Heavy | netal geoaccun | nulation ind | ex of sedimer | it in Hunan I | Province $(I_{\text{geo}})$ | ,)    |       |
|------------------|----------|-------|----------------|--------------|---------------|---------------|-----------------------------|-------|-------|
| 水系               |          |       |                |              | $I_{ m geo}$  |               |                             |       | I     |
| Water system     |          | As    | Cd             | Cr           | Cu            | Mn            | Pb                          | Zn    | I tot |
| 湘江               | 最大值      | 4.07  | 5.89           | 0.56         | 1.97          | 3.10          | 2.42                        | 2.83  |       |
| Xiangjiang River | 最小值      | -1.81 | 1.74           | -1.94        | -1.20         | -0.10         | -0.08                       | -0.13 |       |
|                  | 平均值      | 1.03  | 4.18           | -0.60        | 0.41          | 0.97          | 1.04                        | 1.51  | 8.53  |
| 资江               | 最大值      | 1.70  | 7.24           | 0.55         | 2.67          | 1.10          | 0.77                        | 2.51  |       |
| Zijiang River    | 最小值      | -4.35 | 2.54           | -1.28        | -0.13         | -0.58         | -0.23                       | 0.34  |       |
|                  | 平均值      | -0.64 | 4.11           | -0.45        | 1.21          | 0.27          | 0.18                        | 1.22  | 5.89  |
| 沅江               | 最大值      | 2.47  | 5.87           | 0.02         | 1.34          | 1.85          | 1.74                        | 2.84  |       |
| Yuanjiang River  | 最小值      | -5.43 | 2.06           | -1.37        | -0.61         | -0.47         | -0.30                       | 0.20  |       |
|                  | 平均值      | -0.79 | 3.46           | -0.60        | 0.53          | 0.57          | 0.36                        | 1.09  | 4.63  |
| 澧水               | 最大值      | 1.06  | 5.44           | 0.00         | 1.63          | 1.47          | 1.40                        | 2.63  |       |
| Lishui River     | 最小值      | -7.01 | 2.42           | -1.19        | 0.22          | -0.25         | -0.84                       | 0.21  |       |
|                  | 平均值      | -1.15 | 3.66           | -0.34        | 0.78          | 0.59          | 0.43                        | 1.59  | 5.56  |
| 洞庭湖              | 最大值      | 2.55  | 7.15           | 0.19         | 1.42          | 1.64          | 1.76                        | 2.73  |       |
| Dongting Lake    | 最小值      | -0.55 | 3.32           | -0.59        | -0.22         | 0.20          | 0.39                        | 0.86  |       |
|                  | 平均值      | 1.11  | 4.80           | -0.23        | 0.45          | 0.89          | 0.90                        | 2.07  | 9.99  |
| 湖南省              | 最大值      | 4.07  | 7.24           | 0.56         | 2.67          | 3.10          | 2.42                        | 2.84  |       |
| Hunan Province   | 最小值      | -7.01 | 1.74           | -1.94        | -1.20         | -0.58         | -0.84                       | -0.13 |       |
|                  | 平均值      | -0.09 | 4.04           | -0.44        | 0.67          | 0.66          | 0.58                        | 1.50  | 6.92  |

表 10 湖南省底泥重金属地累积指数 $(I_{geo})$ 

地累积指数 Geoaccumulation index  $(I_{geo})$ ,综合地累积指数 Total geoaccumulation index  $(I_{tot})$ 

#### 2.3.2 内梅罗指数法

湖南省底泥中重金属内梅罗综合污染指数评价结果如表 11 所示。除 Cr 为轻度污染外,湖南省底泥中其 他6种重金属污染的内梅罗综合指数均超过3,为重污染级别。湘江、沅江、洞庭湖底泥重金属污染程度与湖 南省总体情况类似,除Cr为轻度污染外,其他6种重金属均为重污染。资江底泥中重金属As、Cd、Cu和Zn 的污染程度为重污染,Cr为轻度污染,Mn和Pb为中度污染。澧水底泥中重金属Cd、Cu、Mn、Pb和Zn的污染 程度均为重污染, As 属于中度污染, 而 Cr 属于轻度污染。内梅罗指数法结果表明, 湖南省底泥中7种重金属 有6种为重污染,严重超过了地累积指数法的评价结果。由于内梅罗指数法突出了高浓度的重金属对环境质 量的影响和作用,在本研究中,工厂排污口以及工业园区附近采样点的重金属浓度值较高,这些高浓度的重金 属影响被人为放大了,使得大部分重金属内梅罗综合污染指数的评价结果为重污染级别,这说明这些采样点 的高浓度重金属污染对水系整体环境的影响不容忽视,需引起注意。

|                  | Table 11         Nemeiro Index of Heavy Metals in Sediment in Hunan Province |       |        |      |       |       |      |       |  |  |
|------------------|--|-------|--------|------|-------|-------|------|-------|--|--|
| 水系               |  |       |        |      | $P_i$ |       |      |       |  |  |
| Water system     | _  | As    | Cd     | Cr   | Cu    | Mn    | Pb   | Zn    |  |  |
| 湘江               | 最大值  | 25.21 | 88.75  | 2.22 | 5.89  | 12.83 | 8.02 | 10.65 |  |  |
| Xiangjiang River | 平均值  | 4.36  | 36.50  | 1.05 | 2.33  | 3.29  | 3.30 | 5.24  |  |  |
|                  | $P_{ m $arepsilon character}$  | 18.09 | 67.85  | 1.73 | 4.48  | 9.37  | 6.13 | 8.39  |  |  |
| 资江               | 最大值  | 4.88  | 226.25 | 2.20 | 9.53  | 3.22  | 2.56 | 8.54  |  |  |
| Zijiang River    | 平均值  | 1.56  | 42.71  | 1.16 | 4.06  | 1.90  | 1.73 | 4.10  |  |  |
|                  | $P_{ m \sc ch}$  | 3.63  | 162.81 | 1.76 | 7.32  | 2.65  | 2.19 | 6.70  |  |  |
| 沅江               | 最大值  | 8.33  | 87.50  | 1.53 | 3.80  | 5.40  | 5.02 | 10.77 |  |  |
| Yuanjiang River  | 平均值  | 1.71  | 22.64  | 1.03 | 2.31  | 2.41  | 2.05 | 3.86  |  |  |
|                  | $P_{ m sch}$   | 6.01  | 63.91  | 1.30 | 3.14  | 4.18  | 3.83 | 8.08  |  |  |
| 澧水               | 最大值  | 3.13  | 65.25  | 1.50 | 4.65  | 4.16  | 3.97 | 9.27  |  |  |
| Lishui River     | 平均值  | 1.18  | 23.55  | 1.21 | 2.69  | 2.35  | 2.19 | 5.38  |  |  |
|                  | $P_{ m sch}$   | 2.37  | 49.05  | 1.36 | 3.80  | 3.38  | 3.20 | 7.58  |  |  |
| 洞庭湖              | 最大值  | 8.76  | 212.50 | 1.71 | 4.01  | 4.68  | 5.06 | 9.93  |  |  |
| Dongting Lake    | 平均值  | 3.93  | 64.27  | 1.30 | 2.21  | 2.93  | 2.97 | 7.07  |  |  |
|                  | $P_{ m sch}$   | 6.79  | 156.98 | 1.52 | 3.24  | 3.91  | 4.15 | 8.62  |  |  |
| 湖南省              | 最大值  | 25.21 | 226.25 | 2.22 | 9.53  | 12.83 | 8.02 | 10.77 |  |  |
| Hunan Province   | 平均值  | 2.55  | 37.93  | 1.15 | 2.72  | 2.58  | 2.45 | 5.13  |  |  |
|                  | $P_{ m  m  m  m  m  m  m  ho}$   | 17.92 | 162.22 | 1.77 | 7.01  | 9.25  | 5.93 | 8.44  |  |  |

单项污染指数 Pollution index ( $P_i$ );综合污染指数 Comprehensive pollution index ( $P_{isc}$ )

### 2.4 湖南省底泥重金属潜在生态风险评价

湖南省底泥中重金属潜在生态风险系数 *E<sup>i</sup>*,和生态风险指数 *RI* 如表 12 所示。湖南省底泥中各重金属元素的潜在生态风险系数 *E<sup>i</sup>*,大小顺序为:Cd(227.61)>As(21.91)>Cu(7.07)>Pb(6.12)>Zn(5.13)>Mn(2.58)>

表 12 湖南省底泥中重金属潜在生态风险系数 E<sup>i</sup> 和生态风险指数 RI

| 水系               |     | $E_r^i$ |         |      |       |       |       |       | DI     |
|------------------|-----|---------|---------|------|-------|-------|-------|-------|--------|
| Water system     |     | As      | Cd      | Cr   | Cu    | Mn    | Pb    | Zn    | KI     |
| 湘江               | 最大值 | 216.83  | 532.50  | 3.35 | 15.33 | 12.83 | 20.04 | 10.65 |        |
| Xiangjiang River | 最小值 | 0.00    | 30.00   | 0.59 | 1.70  | 1.40  | 3.54  | 1.37  |        |
|                  | 平均值 | 37.48   | 218.97  | 1.58 | 6.05  | 3.29  | 8.25  | 5.24  | 280.86 |
| 资江               | 最大值 | 42.00   | 1357.50 | 3.32 | 24.77 | 3.22  | 6.41  | 8.54  |        |
| Zijiang River    | 最小值 | 0.63    | 52.50   | 0.93 | 3.58  | 1.00  | 3.20  | 1.89  |        |
|                  | 平均值 | 13.44   | 256.28  | 1.75 | 10.56 | 1.90  | 4.33  | 4.10  | 292.37 |
| 沅江               | 最大值 | 71.66   | 525.00  | 2.31 | 9.88  | 5.40  | 12.55 | 10.77 |        |
| Yuanjiang River  | 最小值 | 0.30    | 37.50   | 0.88 | 2.55  | 1.08  | 3.04  | 1.72  |        |
|                  | 平均值 | 14.73   | 135.83  | 1.56 | 6.01  | 2.41  | 5.11  | 3.86  | 169.51 |
| 澧水               | 最大值 | 26.95   | 391.50  | 2.26 | 12.10 | 4.16  | 9.92  | 9.27  |        |
| Lishui River     | 最小值 | 0.00    | 48.00   | 0.99 | 4.54  | 1.26  | 2.10  | 1.74  |        |
|                  | 平均值 | 10.14   | 141.33  | 1.82 | 6.99  | 2.35  | 5.46  | 5.38  | 173.48 |
| 洞庭湖              | 最大值 | 75.33   | 1275.00 | 2.58 | 10.42 | 4.68  | 12.66 | 9.93  |        |
| Dongting Lake    | 最小值 | 8.83    | 90.00   | 1.51 | 3.36  | 1.73  | 4.93  | 2.72  |        |
|                  | 平均值 | 33.77   | 385.64  | 1.96 | 5.74  | 2.93  | 7.43  | 7.07  | 444.54 |
| 湖南省              | 最大值 | 216.83  | 1357.50 | 3.35 | 24.77 | 12.83 | 20.04 | 10.77 |        |
| Hunan Province   | 最小值 | 0.00    | 30.00   | 0.59 | 1.70  | 1.00  | 2.10  | 1.37  |        |
|                  | 平均值 | 21.91   | 227.61  | 1.74 | 7.07  | 2.58  | 6.12  | 5.13  | 272.15 |

潜在生态风险系数 Potential ecological risk coefficient ( $E_r^i$ );潜在生态风险指数 Potential ecological risk index (RI)

Cr(1.74)。其中,除了 Cd 的潜在生态风险级别为很强,其他重金属元素都属于轻微级别。可以看到,Cd 的 E<sup>i</sup>, 值最高且明显高于其他重金属元素的 E<sup>i</sup>,值,这一结果与重金属污染程度的评价结果相似,一方面是由于 Cd 的含量超标严重,另一方面由于潜在生态风险评价考虑了重金属的毒性效应,而 Cd 由于其在沉积物中的吸 附方式以及 Cd 本身较强的化学活性,导致 Cd 的毒性响应系数是几种重金属元素中最大的。Cd 的最大 E<sup>i</sup>,值 出现在资江 B9(李家洲),说明这一区域存在着极高的重金属暴露风险,值得重点关注。从潜在生态风险指数 *RI* 来看,湖南省主要水系的潜在生态风险大小顺序为:洞庭湖(444.54)>资江(292.37)>湘江(280.86)>澧水 (173.48)>沅江(169.51)。其中洞庭湖属于强潜在生态风险级别,资江,湘江,澧水和沅江都属于中等潜在生 态风险级别。Chai 等在 2016 年<sup>[32]</sup>对湘江底泥重金属的潜在生态风险进行评价后发现,Cd 的潜在生态风险 为极强,As、Cr、Cu、Mn、Zn 和 Pb 的潜在生态风险为轻微,这一结果与本研究对湘江底泥的评价相似。有研究 表明<sup>[33—34]</sup>,长期开采和冶炼有色重金属是造成 Cd 严重潜在生态风险的主要原因。

湖南省总体潜在生态风险指数 RI 值为 272.15,属于中等潜在生态风险级别。各重金属元素和各水系对 湖南省总体潜在生态风险指数 RI 的贡献率如图 3 所示。很明显重金属 Cd 对湖南省总体潜在生态风险指数 RI 的值贡献最大,是重金属中最主要的潜在生态风险来源。从各水系贡献来看,洞庭湖对 RI 值的贡献最为 主要,湘江和资江次之,沅江和澧水贡献较小。



图 3 各重金属元素和主要水系对湖南省总体潜在生态风险指数 RI 的贡献率 Fig.3 The contribution of each heavy metal element and main watershed to the overall potential ecological risk index RI of Hunan Province

#### 3 结论

本文基于湖南省湘资沅澧及洞庭湖五个主要水系底泥中重金属污染现状的调查监测,对各种重金属的含量、相关性、沿程分布、污染程度及生态风险进行分析。结果表明,重金属 Cd 和 Mn 在每个采样点的含量都超过了湖南省表层沉积物重金属元素背景值,污染相对严重;多种重金属具有相同污染来源或产生了复合污染,呈现较为相似的分布特征;地累积指数评价结果显示,湖南省主要水系底泥中 Cd 为重污染水平,Zn 为中度污染,Cu、Mn 和 Pb 均为轻度污染,而 As 和 Cr 污染程度为清洁;内梅罗指数法评价结果表明,除 Cr 为轻度污染 外,湖南省主要水系底泥中其他 6 种重金属污染均为重污染级别;潜在生态风险评价结果显示,湖南省总体潜在生态风险属于中等级别。重金属 Cd 的潜在生态风险级别为很强,其他重金属元素都属于轻微级别。此外,本研究中地累积指数法和内梅罗指数法对重金属污染程度的评价存在较大差异,在后续研究中应结合更多的评价方法得出客观准确的结论。

#### 参考文献(References):

- [1] 刘俊,朱允华,胡劲松,彭国文,谢红艳,李志良,彭翠英.湘江中游江段沉积物重金属污染特征及生态风险评价.生态与农村环境学报,2017,33(2):135-141.
- [2] Islam S, Hossain B, Matin A, Sarker S I. Assessment of heavy metal pollution, distribution and source apportionment in the sediment from Feni River estuary, Bangladesh. Chemosphere, 2018, 202: 25-32.
- [3] 魏伟伟,李春华,叶春,侯雪超,王昊.基于底泥重金属污染及生态风险评价的星云湖疏浚深度判定.环境工程技术学报,2020,10(3): 385-391.
- [4] 毛志刚,谷孝鸿,陆小明,曾庆飞,谷先坤,李旭光.太湖东部不同类型湖区疏浚后沉积物重金属污染及潜在生态风险评价.环境科学,

2014, 35(1): 186-193.

- [5] 连花,郭晶,黄代中,李芬芳,田琪,龚正.洞庭湖表层沉积物中重金属变化趋势及风险评估.环境科学研究,2019,32(1):126-134.
- [6] 弓晓峰, 陈春丽, 周文斌, 简敏菲, 张振辉. 鄱阳湖底泥中重金属污染现状评价. 环境科学, 2006, 27(4): 732-736.
- [7] 朱程,马陶武,周科,刘佳,彭巾英,任博.湘西河流表层沉积物重金属污染特征及其潜在生态毒性风险.生态学报,2010,30(15): 3982-3993.
- [8] 宁建凤, 邹献中, 杨少海, 陈勇, 巫金龙, 孙丽丽. 广东大中型水库底泥重金属含量特征及潜在生态风险评价. 生态学报, 2009, 29 (11): 6059-6067.
- [9] 郭晶,李利强,黄代中,卢少勇,黄艳芳,王琦,田琪.洞庭湖表层水和底泥中重金属污染状况及其变化趋势.环境科学研究,2016,29 (1):44-51.
- [10] 冷阳, 汪金成, 李炜钦, 杨朝云, 钱宝, 邹振华. 洞庭湖区重金属分布特征及潜在生态风险评价. 人民长江, 2018, 49(21): 13-19
- [11] 陈一清,黄钟霆,毕军平,易敏,黄河仙.湘江干流沉积物中铅和镉的污染特征与评价.中国环境监测,2014,30(2):62-66.
- [12] 王川. 霞湾港重金属污染底泥的污染特征及其固化稳定化技术研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2013.
- [13] Fang X H, Peng B, Wang X, Song Z L, Zhou D X, Wang Q, Qin Z L, Tan C Y. Distribution, contamination and source identification of heavy metals in bed sediments from the lower reaches of the Xiangjiang River in Hunan province, China. The Science of the total environment, 2019, 689: 557-570.
- [14] 田琪, 张光贵, 谢意南, 莫永涛. 洞庭湖主要人湖口表层沉积物重金属分布特征与生态风险评价. 生态毒理学报, 2017, 12(2): 191-200.
- [15] 王鸣宇,张雷,秦延文,李发生,贾静,曹伟,郑丙辉.湘江表层沉积物重金属的赋存形态及其环境影响因子分析.环境科学学报,2011, 31(11):2447-2458.
- [16] 许友泽,刘锦军,成应向,戴友芝,付广义.湘江底泥重金属污染特征与生态风险评价.环境化学,2016,35(1):189-198.
- [17] Zhu H N, Yuan X Z, Zeng G M, Jiang M, Liang J, Zhang C, Yin J, Huang H J, Liu Z F, Jiang H W. Ecological risk assessment of heavy metals in sediments of Xiawan Port based on modified potential ecological risk index. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(6): 1470-1477.
- [18] 樊娟,吴文晖,胡树林,潘海婷,廖岳华.洞庭湖表层底泥重金属污染及其生态风险评价.四川环境,2018,37(4):162-168.
- [19] 郭赟,黄晓峰,李海妮,邱伟建.城市河道环保疏浚与水利疏浚效果研究——以无锡市梁塘河薛家浜为例.环境工程技术学报,2020,10 (3):400-405.
- [20] 王勤,彭渤,方小红,周东晓,覃智莲,邬思成,赵亚方,刘静,陈丹婷.湘江长沙段沉积物重金属污染特征及其评价.环境化学,2020, 39(4):999-1011.
- [21] 李军. 湘江长株潭段底泥重金属污染分析与评价[D]. 长沙: 湖南大学, 2008.
- [22] Zhang L L, Lv J G. Ecological risk assessment of the metallic pollution in the soil and sediment in Tingjiang basin. Environmental Earth Sciences, 2015, 73(4): 1799-1803.
- [23] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach. Water Research, 1980, 14(8): 975-1001.
- [24] Xia P H, Ma L, Sun R G, Yang Y, Tang X C, Yan D B, Lin T, Zhang Y T, Yi Y. Evaluation of potential ecological risk, possible sources and controlling factors of heavy metals in surface sediment of Caohai Wetland, China. Science of the Total Environment, 2020, 740: 140231.
- [25] 朱余银, 戴塔根, 吴堑虹. 湘江长株潭段底泥重金属污染现状评价. 中南大学学报: 自然科学版, 2012, 43(9): 3710-3717.
- [26] 卢文鹏,李瑞冰,马雁鸿,李衍林,裴启飞,杨大锦. 砷在铅锌冶炼过程中的排放和处置方法. 有色矿冶, 2020, 36(3): 32-35.
- [27] 李洋,陈卫锋,魏然,杨柳明,彭园珍,倪进治.闽江福州段沉积物中重金属的分布特征及其毒性和生态风险评价.环境科学学报, 2016,36(5):1792-1799.
- [28] 刘锦军. 湘江底泥重金属污染特征研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2016.
- [29] 田泽君,李一,徐平华,王来力. 纺织工业优先管控重金属污染物筛选. 纺织导报, 2019, (3): 71-73.
- [30] 方小红,彭渤,张坤,杨梓璇,肖瑶,谢伟城,颜川云,谢依婷,谭长银,万大娟,王欣. 沅江入湖河床沉积物重金属污染演化地球化学 分析.环境科学学报,2018,38(7):2586-2598.
- [31] 曾等志,彭渤,张坤,方小红,谭长银,匡晓亮,吴蓓娟,涂湘林. 澧水入湖河床沉积物重金属污染特征及评价. 环境科学学报, 2017, 37 (9): 3480-3488.
- [32] Chai L Y, Li H, Yang Z H, Min X B, Liao Q, Liu Y, Men S H, Yan Y N, Xu J X. Heavy metals and metalloids in the surface sediments of the Xiangjiang River, Hunan, China: distribution, contamination, and ecological risk assessment. Environmental Science and Pollution Research, 2017, 24(1): 874-885.
- [33] Mao L J, Mo D W, Guo Y Y, Fu Q, Yang J H, Jia Y F. Multivariate analysis of heavy metals in surface sediments from lower reaches of the Xiangjiang River, southern China. Environmental Earth Sciences, 2013, 69(3): 765-771.
- [34] Zhu J Y, Zhang J X, Li Q, Han T, Xie J P, Hu Y H, Chai L Y. Phylogenetic analysis of bacterial community composition in sediment contaminated with multiple heavy metals from the Xiangjiang River in China. Marine Pollution Bulletin, 2013, 70(1/2): 134-139.

| 附表 1 湖南省主要水系底泥中重金属含量 $/(mg/kg)$ |                   |   |              |        |        |         |                |         |  |  |
|---------------------------------|-------------------|---|--------------|--------|--------|---------|----------------|---------|--|--|
|                                 | Attached Table 1  | Attached Table 1 Heavy metal content in sediments of main water systems in Hunan Province |              |        |        |         |                |         |  |  |
| 水系                              | 采样点               |   |              |        |        |         |                |         |  |  |
| Water system                    | Sampling<br>point | As  | Cd           | Cr     | Cu     | Mn      | Pb             | Zn      |  |  |
| 相江                              | A1                | 32.60   | 6.93         | 50.76  | 28.87  | 641.93  | 125.03         | 277.65  |  |  |
| Xiangjiang River                | A2                | 18.45   | 7.75         | 109.75 | 50.25  | 5890.00 | 112.00         | 315.50  |  |  |
|                                 | A3                | 5.53  | 2.25         | 50.75  | 35.61  | 1913.75 | 78.00          | 152.25  |  |  |
|                                 | A4                | 65.00   | 17.75        | 100.50 | 70.50  | 1138.00 | 130.75         | 671.00  |  |  |
|                                 | A5                | 12.00   | 3.68         | 47.75  | 17.00  | 1457.13 | 49.50          | 164.75  |  |  |
|                                 | A6                | 0.00  | 1.25         | 61.25  | 28.00  | 1193.50 | 70.50          | 92.14   |  |  |
|                                 | A7                | 58.90   | 11.13        | 49.21  | 84.52  | 1515.75 | 143.11         | 556.20  |  |  |
|                                 | A8                | 60.65   | 14.50        | 55.75  | 77.00  | 2062.50 | 93.25          | 296.25  |  |  |
|                                 | A9                | 104.30  | 9.25         | 106.77 | 68.29  | 1881.50 | 108.25         | 356.50  |  |  |
|                                 | A10               | 325.25  | 11.50        | 50.50  | 121.75 | 1459.50 | 164.25         | 429.25  |  |  |
|                                 | A11               | 12.10   | 1.00         | 56.50  | 24.00  | 1168.50 | 84.75          | 139.50  |  |  |
|                                 | A12               | 36.50   | 3.50         | 57.25  | 32.00  | 873 75  | 97.25          | 218.75  |  |  |
|                                 | A13               | 167.90  | 10.50        | 61.00  | 79.45  | 2552.50 | 110.75         | 303.50  |  |  |
|                                 | A14               | 88 75   | 15.00        | 69.75  | 52.00  | 1931.25 | 111.75         | 390.25  |  |  |
|                                 | A15               | 47.55   | 8 25         | 26.56  | 34.07  | 815 75  | 73.25          | 224.00  |  |  |
|                                 | A16               | 83.25   | 12.25        | 54.75  | 17 75  | 1764.00 | 110.25         | 319.00  |  |  |
|                                 | A17               | 34 75   | 12.25        | 59.00  | 26.25  | 1126.00 | 76.00          | 210.25  |  |  |
|                                 | A17               | 24.75   | 4.75<br>2.40 | 95.00  | 20.23  | 120.00  | 70.00<br>86.10 | 219.23  |  |  |
|                                 | A10               | 24.20   | 17.50        | 56 75  | 09.05  | 1701.00 | 214 50         | 770 75  |  |  |
|                                 | A19               | 74.45   | 5.25         | 50.75  | 90.70  | 1058.00 | 214.30         | 211.00  |  |  |
|                                 | A20               | 20.30   | 3.23         | 00.00  | 21.50  | 1038.00 | 120.52         | 211.00  |  |  |
|                                 | A21               | 50.17   | 1.00         | 80.55  | 45.07  | 1212.40 | 130.32         | 820.31  |  |  |
|                                 | A22               | 43.54   | 3.80         | 93.33  | 153.26 | 1030.50 | 145.00         | 907.43  |  |  |
|                                 | A23               | 31.54   | 1.61         | 150.86 | 106.34 | 1463.55 | 118.05         | 817.66  |  |  |
|                                 | A24               | 25.36   | 3.89         | 63.02  | 80.89  | 669.45  | 280.55         | 1000.65 |  |  |
|                                 | A25               | 20.11   | 4.00         | 55.75  | 35.78  | 998.80  | 79.25          | 770.35  |  |  |
|                                 | A26               | 77.51   | 6.56         | 98.55  | 87.56  | 1717.82 | 157.45         | 992.29  |  |  |
|                                 | A27               | 28.54   | 4.55         | 70.38  | 95.82  | 967.70  | 125.90         | 895.24  |  |  |
|                                 | A28               | 17.00   | 3.50         | 71.00  | 29.50  | 782.75  | 88.75          | 213.25  |  |  |
|                                 | A29               | 98.25   | 16.00        | 86.00  | 60.50  | 1993.00 | 148.50         | 452.25  |  |  |
|                                 | A30               | 35.88   | 7.67         | 87.62  | 32.03  | 918.79  | 72.90          | 900.51  |  |  |
|                                 | 平均值               | 56.22   | 7.30         | 71.12  | 60.49  | 1509.36 | 115.50         | 492.71  |  |  |
| 资江                              | B1                | 7.75  | 5.85         | 98.75  | 180.50 | 877.00  | 71.25          | 399.10  |  |  |
| ijiang River                    | B2                | 5.05  | 10.97        | 89.75  | 247.70 | 825.35  | 59.25          | 803.15  |  |  |
|                                 | В3                | 0.95  | 2.75         | 74.00  | 73.15  | 520.25  | 66.75          | 217.75  |  |  |
|                                 | B4                | 63.00   | 4.75         | 60.00  | 106.00 | 1253.25 | 56.00          | 239.50  |  |  |
|                                 | В5                | 12.75   | 1.90         | 149.50 | 85.50  | 634.50  | 66.50          | 198.50  |  |  |
|                                 | B6                | 6.00  | 3.75         | 51.75  | 48.60  | 935.65  | 46.70          | 239.50  |  |  |
|                                 | B7                | 23.50   | 8.00         | 78.25  | 73.10  | 909.50  | 47.50          | 197.00  |  |  |
|                                 | B8                | 15.75   | 1.75         | 73.00  | 35.75  | 747.25  | 64.25          | 178.00  |  |  |
|                                 | В9                | 47.75   | 45.25        | 72.25  | 152.50 | 967.75  | 54.50          | 720.25  |  |  |
|                                 | B10               | 26.00   | 3.25         | 42.00  | 53.50  | 460.25  | 44.75          | 317.00  |  |  |
|                                 | B11               | 13.25   | 5.75         | 76.75  | 105.75 | 1479.00 | 89.75          | 731.25  |  |  |
|                                 | 平均值               | 20.16   | 8.54         | 78.73  | 105.64 | 873.61  | 60.65          | 385.55  |  |  |
| 元江                              | C1                | 28.21   | 2.50         | 103.74 | 76.45  | 826.35  | 71.40          | 790.81  |  |  |
| /uanjiang River                 | C2                | 5.20  | 1.75         | 90.75  | 32.60  | 1140.30 | 71.75          | 325.00  |  |  |
|                                 | С3                | 8.50  | 17.50        | 91.05  | 89.60  | 2479.75 | 89.50          | 879.85  |  |  |
|                                 | C4                | 2.50  | 1.25         | 45.50  | 37 75  | 1115.75 | 42 50          | 260 75  |  |  |

| 1 | 9 | 4 | 6 |
|---|---|---|---|
|---|---|---|---|

生 态 学 报

| 续表                    |                          |        |       |        |        |         |        |         |
|-----------------------|--------------------------|--------|-------|--------|--------|---------|--------|---------|
| 水系<br>Water system    | 采样点<br>Sampling<br>point | As     | Cd    | Cr     | Cu     | Mn      | Pb     | Zn      |
|                       | C5                       | 27.50  | 4.75  | 70.75  | 25.50  | 671.75  | 49.50  | 226.00  |
|                       | C6                       | 31.75  | 5.00  | 58.25  | 60.00  | 566.50  | 52.00  | 207.50  |
|                       | C7                       | 0.45   | 2.25  | 85.25  | 55.65  | 1455.40 | 91.28  | 219.50  |
|                       | C8                       | 4.10   | 1.85  | 39.55  | 44.25  | 925.55  | 47.90  | 163.30  |
|                       | С9                       | 17.25  | 2.00  | 51.50  | 43.00  | 497.00  | 46.00  | 177.75  |
|                       | C10                      | 36.00  | 6.50  | 83.00  | 58.50  | 1102.25 | 82.00  | 432.75  |
|                       | C11                      | 1.20   | 5.50  | 66.68  | 66.05  | 885.14  | 68.50  | 268.00  |
|                       | C12                      | 26.30  | 2.50  | 47.50  | 45.75  | 750.75  | 59.50  | 161.50  |
|                       | C13                      | 6.00   | 1.90  | 50.75  | 83.50  | 996.75  | 59.75  | 196.75  |
|                       | C14                      | 10.25  | 1.50  | 61.75  | 62.25  | 1147.25 | 76.25  | 209.00  |
|                       | C15                      | 33.70  | 4.25  | 71.25  | 47.25  | 1414.25 | 66.25  | 391.25  |
|                       | C16                      | 29.25  | 2.50  | 81.50  | 94.00  | 1241.25 | 67.50  | 249.50  |
|                       | C17                      | 107.49 | 13.47 | 94.38  | 98.79  | 1569.54 | 175.75 | 1012.02 |
|                       | 平均值                      | 22.10  | 4.53  | 70.19  | 60.05  | 1105.03 | 71.61  | 363.01  |
| 澧水                    | D1                       | 25.50  | 3.00  | 76.75  | 60.50  | 577.00  | 70.00  | 366.00  |
| Lishui River          | D2                       | 24.38  | 4.04  | 81.95  | 68.56  | 942.80  | 71.25  | 720.84  |
|                       | D3                       | 3.45   | 3.71  | 74.75  | 61.50  | 1067.75 | 94.05  | 178.65  |
|                       | D4                       | 23.97  | 9.54  | 94.01  | 45.37  | 1006.48 | 57.20  | 871.81  |
|                       | D5                       | 0.00   | 5.25  | 82.00  | 56.00  | 1168.75 | 83.75  | 373.50  |
|                       | D6                       | 0.15   | 2.00  | 95.50  | 67.55  | 1061.25 | 90.25  | 218.00  |
|                       | D7                       | 17.49  | 2.98  | 84.31  | 45.37  | 915.15  | 40.10  | 730.86  |
|                       | D8                       | 5.30   | 1.60  | 44.60  | 58.35  | 1148.40 | 29.40  | 163.10  |
|                       | D9                       | 1.60   | 1.75  | 101.75 | 95.35  | 1182.25 | 103.25 | 296.30  |
|                       | D10                      | 25.02  | 4.90  | 83.42  | 120.98 | 885.32  | 63.40  | 793.26  |
|                       | D11                      | 40.42  | 13.05 | 84.19  | 89.10  | 1911.70 | 138.82 | 855.20  |
|                       | 平均值                      | 15.21  | 4.71  | 82.11  | 69.88  | 1078.80 | 76.50  | 506.14  |
| 洞庭湖                   | E1                       | 113.00 | 42.50 | 104.00 | 69.75  | 1559.50 | 177.25 | 684.00  |
| Dongting Lake         | E2                       | 31.50  | 3.00  | 77.50  | 40.00  | 792.75  | 119.75 | 322.50  |
|                       | E3                       | 48.40  | 8.40  | 85.97  | 48.98  | 1233.72 | 84.95  | 933.66  |
|                       | E4                       | 40.44  | 13.25 | 116.17 | 104.21 | 2148.30 | 103.66 | 890.35  |
|                       | E5                       | 57.31  | 5.98  | 78.36  | 33.58  | 1341.12 | 68.96  | 903.08  |
|                       | E6                       | 13.25  | 4.00  | 67.75  | 48.00  | 1001.75 | 69.25  | 255.25  |
|                       | 平均值                      | 50.65  | 12.85 | 88.29  | 57.42  | 1346.19 | 103.97 | 664.81  |
| 湖南省<br>Hunan province | 平均值                      | 32.87  | 7.59  | 78.09  | 70.69  | 1182.60 | 85.64  | 482.44  |