

大湾区不同河流沉积物中重金属污染特征研究

刘艺斯¹ 雷列辉¹ 潘永亮¹ 王建国¹ 彭芸²

1. 珠江水利委员会珠江水利科学研究院, 中国·广东 广州 510610

2. 贵州省水利科学研究院, 中国·贵州 贵阳 550002

摘要: 本研究针对大湾区不同类型城市河流沉积物中的重金属污染特征及其差异进行了深入分析。研究选取了低水位运行河涌、感潮河道和联围内河涌三种类型的河涌, 测定了沉积物样品中的 Cu、Zn、Cr、Ni、Pb、Cd、As、Hg 等重金属含量, 评估了重金属污染的程度和风险。研究发现, 所有类型的河流沉积物中重金属浓度普遍超出广州市土壤环境背景值, 重金属污染程度从低到高依次为低水位运行河涌、感潮河道和联围内河涌。感潮河道中 Cd、Cu 和 As 浓度最高, 而联围内河涌中 Zn、Cr、Ni、Pb 和 Hg 浓度最高。

关键词: 城市河流沉积物; 重金属污染; 大湾区; 污染特征; 生态风险评价

Research on the Characteristics of Heavy Metal Pollution in Sediments of Different Rivers in the Greater Bay Area

Yisi Liu¹ Lehui Lei¹ Yongliang Pan¹ Jianguo Wang¹ Yun Peng²

1. The Pearl River Water Conservancy Commission the Pearl River River Water Conservancy Research Institute, Guangzhou, Guangdong, 510610, China

2. The Guizhou Water Conservancy Research Institute, Guiyang, Guizhou, 550002, China

Abstract: This study conducted an in-depth analysis of the characteristics and differences of heavy metal pollution in river sediments of different types of cities in the Greater Bay Area. The study selected three types of river channels: low water level running river channels, tidal channels, and enclosed river channels. The content of heavy metals such as Cu, Zn, Cr, Ni, Pb, Cd, As, and Hg in sediment samples was measured, and the degree and risk of heavy metal pollution were evaluated. Research has found that the concentration of heavy metals in sediments of all types of rivers generally exceeds the soil environmental background values in Guangzhou. The degree of heavy metal pollution is ranked from low to high in the following order: low water level running river channels, tidal channels, and enclosed river channels. The concentrations of Cd, Cu, and As are highest in tidal rivers, while the concentrations of Zn, Cr, Ni, Pb, and Hg are highest in the surrounding river channels.

Keywords: urban river sediment; heavy metal pollution; greater bay area; pollution characteristics; ecological risk assessment

0 前言

河流沉积物是河流生态系统的重要组成部分, 相比水体而言, 进入河涌的重金属大部分会在沉积物中富集^[1], 当水环境改变时, 沉积物中的重金属又会向水体中释放, 对水体及水生生物造成污染影响^[2], 也会通过食物和皮肤接触等方式对人体及其他生物产生毒害作用, 引起健康风险, 所以沉积物的重金属污染程度更能体现出河流生态系统的污染水平。河流沉积物常见的重金属有 Cu、Zn、Cr、Ni、Pb、Cd、As、Hg 等, 超过一定浓度的重金属会危害人类健康, 进入环境中则会形成重金属污染^[3]。大湾区典型河涌类型有低水位运行河涌、感潮河道及联围内河涌等, 不同类型河涌的水文特征、氧化还原条件及底质类型等因素会不同程度的影响沉积物中重金属浓度及风险。

本研究通过对大湾区不同类型城市河流沉积物的重金属污染研究, 了解河流沉积物中重金属的含量分布特征, 并

对河流沉积物重金属进行生态风险评价, 分析不同类型城市河流沉积物中重金属的污染特征差异。

1 材料与方法

1.1 研究河涌类型概况及背景

研究选取大湾区三种类型河涌, 包括低水位运行河涌 (Low-water-level, 简称 LW)、感潮河道 (Tidal waterways, 简称 TW)、联围内河涌 (Enclosed rivers, 简称 ER)。每种类型河涌分别选取三条河涌作为代表, 河涌概况如表 1 所示。

1.2 样品采集及测定

采用柱状采泥器分别在每条河流不同深度 (0~2cm、4~6cm、8~10cm、15~20cm 和 25~30cm) 的 3 个采样点采集沉积物样品, 每个样点采集三个沉积物柱, 将同一深度的沉积物样品合并为一个样品, 共采集 135 份沉积物样品。去除沉积物中石块塑料纸等杂物, 自然风干后用玛瑙研钵研磨处理, 全部过 100 目筛后保存。

表 1 河涌概况

类型	河涌	区域	点位名称	底泥颜色	长度 (km)
自 2018 年以来采用低水位运行技术治理的河涌	车陂涌	广州天河区	S1~S3	黄黑	2.8
	沙河涌	广州市区东部	S4~S6	黄	2.9
	大陵河	广州花都区	S7~S9	黄	5.71
感潮河道	二沙涌	广州越秀区	S10~S12	黑	4.64
	石井河	广州白云区	S13~S15	浅黄	19.44
	黄埔涌	广州海珠区	S16~S18	浅黑	7.8
联围内河涌	番村涌	佛山禅城区	S19~S21	浅黄	0.144
	田心涌	佛山禅城区	S22~S24	黑	0.6
	沙岗涌	佛山禅城区	S25~S27	浅黑	0.5

沉积物经混酸 (HNO₃-HClO₄-HF) 消解后采用 ICP-AES 按照 SL394.1—2007 测定 Cu、Zn、Cr、Ni; 经混酸 (HNO₃-HClO₄-HF) 消解后采用石墨炉 AAS 按照 GB/T 17141—1997 测定 Pb、Cd; 采用硝酸-盐酸混合试剂消解后采用特制汞空心阴极灯按照 GB/T 22015.1—2008 测定 Hg; 加热消解后采取特制砷空心阴极灯按照 GB/T 22015.2—2008 测定 As。

1.3 重金属污染评价方法

本研究采用地累积指数法、重金属单一污染指数 (C_f^i)、单一污染物潜在生态风险指数 (E_r^i)、潜在生态风险指数 (RI) 对沉积物重金属含量及分布特征进行分析评价。

地累积指数法^[4]是利用重金属含量与该重金属元素土壤地球化学含量背景值的关系,对三种类型河涌沉积物中重金属污染程度进行评价,其计算公式为:

$$I_{geo} = \log_2 \left[\frac{C_i}{1.5B_i} \right]$$

式中, I_{geo} 为地累积指数, C_i 为沉积物重金属实测值, B_i 为广东省土壤重金属地球化学背景值。 I_{geo} 值表示重金属的污染程度,分为七个等级, $I_{geo} \leq 0$ 为无污染, $0 < I_{geo} \leq 1$ 为轻度污染, $1 < I_{geo} \leq 2$ 为轻~中污染, $2 < I_{geo} \leq 3$ 为中度污染, $3 < I_{geo} \leq 4$ 为中~强度污染, $4 < I_{geo} \leq 5$ 为强污染, $I_{geo} > 5$ 为极强污染。

采用单一污染物潜在生态风险指数法对三种类型河涌沉积物中重金属的潜在生态风险进行评价,其计算公式为:

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

式中, E_r^i 为单一污染物潜在生态风险指数, T_r^i 为重金属毒性响应参数, Cu、Zn、Cr、Ni、Pb、Cd、As、Hg 的重金属毒性响应参数分别为 5、1、2、5、5、30、10、40, C_f^i 为单一重金属污染指数。单一污染物潜在生态风险指数等级划分标准为: $E_r^i < 40$ 为低风险, $40 \leq E_r^i < 80$ 为中风险, $80 \leq E_r^i < 160$ 为重风险, $160 \leq E_r^i < 320$ 为严重风险, $E_r^i \geq 320$ 为极严重风险。

采用潜在生态风险指数^[5]对区域多个重金属的潜在风险进行评价,其计算公式为:

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i$$

式中, RI 为重金属综合潜在生态风险指数, E_r^i 为单一污染物潜在生态风险指数。潜在生态风险指数的等级划分

标准为: $RI < 150$ 为低风险, $150 \leq RI < 300$ 为中风险, $300 \leq RI < 600$ 为重风险, $600 \leq RI < 1200$ 为严重风险, $RI \geq 1200$ 为极严重风险。

2 结果与分析

2.1 大湾区不同类型城市河流沉积物中的重金属含量及分布特征

低水位运行河涌中 Cu、Zn、Cr、Ni、Pb、Cd、As、Hg 的含量范围分别为 10~298mg/kg、55~713mg/kg、24.2~245mg/kg、6.79~77.6mg/kg、16.4~137mg/kg、0.03~1.2mg/kg、3.79~50.1mg/kg、0.05~1.5mg/kg, 平均浓度分别为 70.82mg/kg、214.61mg/kg、87.77mg/kg、27.11mg/kg、40.88mg/kg、0.36mg/kg、20.35mg/kg、0.33mg/kg, 均超过了广州市土壤地球化学背景值, 分别为背景值的 3.2、3.0、2.0、1.7、0.9、2.4、2.5、2.2 倍。各重金属整体分布趋势相似。

感潮河道 Cu、Zn、Cr、Ni、Pb、Cd、As、Hg 的含量范围分别为 71~414mg/kg、107~1586mg/kg、83.6~606mg/kg、34.8~146mg/kg、0.3~3.34mg/kg、15.1~44.6mg/kg、0.18~2.15mg/kg, 平均浓度分别为 185.38mg/kg、514.43mg/kg、172.54mg/kg、74.40mg/kg、88.84mg/kg、1.38mg/kg、28.84mg/kg、0.83mg/kg, 均超过了广州市土壤地球化学背景值, 分别为背景值的 8.4、7.2、3.9、4.7、1.9、9.2、2.1、5.6 倍。

联围内河涌 Cu、Zn、Cr、Ni、Pb、Cd、As、Hg 的含量范围分别为 41.7~386mg/kg、153~1970mg/kg、56.5~1135mg/kg、18~296mg/kg、31.6~211mg/kg、0.02~2.99mg/kg、13.8~34.2mg/kg、0.35~3.99mg/kg, 平均浓度分别为 177.5mg/kg、1052.51mg/kg、380.28mg/kg、98.26mg/kg、119.22mg/kg、1.22mg/kg、26.07mg/kg、1.17mg/kg, 均超过了广州市土壤地球化学背景值, 分别为背景值的 8.1、14.8、8.6、6.1、2.5、8.1、1.9、8.0 倍。

整体上来看三种类型河涌沉积物重金属浓度差异显著, 八种重金属含量均呈现联围内河涌沉积物>感潮河道沉积物>低水位运行河涌沉积物的趋势, 其中 Zn、Ni、Pb 及 Hg 在三种类型河涌沉积物重金属含量均差异显著; 低水位运行河涌沉积物各重金属含量均显著低于联围内河涌沉积物。李明等^[6]研究发现低水位运行的城市河流生态修复理念, 可以从根本上解决河涌底泥黑臭问题。胡晓张等^[7]研究发现, 联围内河涌往往水系不通, 水体更新慢, 污染物更易富集。本研究检测结果与上述研究结论较为相符。

2.2 大湾区不同类型城市河流沉积物重金属污染风险评价

①地累积指数。低水位运行河涌的地累积指数范围在 -2.91~3.17, 感潮河道的地累积指数范围在 -1.86~3.90, 联围内河涌的地累积指数范围在 -3.49~4.21, 最高点出现在 S10 号点位 4~6cm 层 Zn 元素。总体上来看, 各重金属的地累积指数大小为 $Zn > Cu > Cd > Hg > Cr > Ni > As > Pb$, 其中 Cu、Zn、Cr、Ni、Pb、As、Hg 重金属地累积指数最低点均出现在低水位运行河涌, Zn、Cr、Ni、Pb、Hg 重金属地累积指数的最高点均出现在联围内河涌。三种类型河涌重金属的地累积指数大小为联围内河涌>感潮河道>低水位运行河涌, 其中低水位运行河涌 50% 表现为无污染, 其余为较轻程度的污染, 整体污染程度较低; 感潮河道中约 86% 表现为轻、中度污染, 联围内河涌中 47% 表现为轻、中度污染, 45% 表现为中、强度污染, 还有少部分为强、极强污染, 整体污染较为严重。②单一污染物潜在生态风险指数 (Eir)。低水位运行河涌样品的单一污染物潜在生态风险指数范围在 0.77~408.16, 感潮河道的单一污染物潜在生态风险指数范围在 1.51~668, 联围内河涌的单一污染物潜在生态风险指数范围在 2.15~1085.71。各重金属的单一潜在生态风险指数为 $Hg > Cd > Cu > Ni > As > Cr > Pb > Zn$, Hg 和 Cd 平均达到严重风险水平, 部分达到极严重风险, 其余重金属均为低风险, 个别点位达到中风险水平; 三种类型单一潜在生态风险指数为联围内河涌>感潮河道>低水位运行河涌。③潜在生态风险指数 (RI)。低水位运行河涌 51% 为低风险, 15% 中风险和 29% 高风险及小部分很高风险; 感潮河道仅 11% 为中风险, 45% 为高风险, 其余全部为很高风险及以上; 联围内河涌除 5% 为中风险, 38% 为高风险, 53% 为很高风险, 4% 为极高风险。潜在生态风险指数大小为联围内河涌>感潮河道>低水位河涌, 低水位运行河涌的潜在生态风险指数显著低于感潮河道及联围内河涌。其中潜在生态风险指数最大值为 1660.68, 属于极严重潜在生态风险水平, 出现在联围内河涌 S23 点位 25~30cm 层, 最小值为 41.48, 出现在低水位河涌 S1 点位 25~30cm 层。

3 讨论

三种类型城市河流中几乎所有点位的沉积物的重金属浓度都不同程度地超出了广州市土壤环境背景值, 特别是 Zn 和 Hg 在个别点位超出 27.7 倍和 27.1 倍。三种不同类型河涌中, 超土壤环境背景值的程度大小为低水位运行河涌<感潮河道<联围内河涌。重金属元素 Cd、Cu 和 As 浓度最高点位出现在感潮河道, Zn、Cr、Ni、Pb 和 Hg 浓度最高出现在联围内河涌。地累积指数法评价得出重金属污染程度为 $Zn > Cu > Cd > Hg > Cr > Ni > As > Pb$, 该方法利用重金属的实测值与土壤环境背景值之间的关系进行评价, 仅体现出底泥中重金属的富集程度^[8]。单一污染物潜在生态风险指数法评价结果为 $Hg > Cd > Cu > Ni > As > Cr > Pb > Zn$, 该结果与胡祖武等^[9]对广州市石井河底泥污染研究中潜在生态风险指数结果较为一致。此方法将毒性响应参数考虑在内, 反映出重金属元素对环境的生态风险影响。潜在生态风险指数法得出三种类型河涌沉积物的风险程度为低水位运行河涌<感潮河道<联围内河涌。

4 结论

本研究通过对大湾区三种类型城市河流沉积物重金属元素 Cu、Zn、Cr、Ni、Pb、Cd、As、Hg 污染特征及差异研究, 分析重金属含量分布特征; 利用地累积指数、单一污染物潜在生态风险指数、潜在生态风险指数等对三种类型城市河涌重金属污染进行分析评价。

以车陂涌、沙河涌和大凌河为代表的低水位运行河涌重金属含量和污染程度相对较低, 其中 Zn、Cr、Ni 和 Cu 污染程度稍高。以二沙涌、石井河、黄埔涌为代表的感潮河道重金属含量相对较高, 各点位超土壤环境背景值比例高达 80% 以上; 以番村涌、田心涌和沙岗涌为代表的联围内河涌重金属含量比较高, 污染较为严重, 各点位超土壤环境背景值比例高达 98%。从地累积指数可以看出低水位运行河涌 75% 以上为中低污染, 且部分点位无污染; 感潮河道 86% 为轻中度污染, 约有 10 个点位达到中~强度污染; 联围内河涌中一半点位以上为中强度污染。大湾区整体污染水平为 $Zn > Cu > Cd > Hg > Cr > Ni > As > Pb$, 联围内河涌>感潮河道>低水位运行河涌。从单一污染物潜在生态风险指数和潜在生态风险指数可以看出重金属除 Hg 和 Cd 平均达到严重风险水平, 部分达到极严重风险外, 其余重金属均为低风险水平。低水位运行河涌约 50% 点位 RI 值<150, 没有造成生态风险; 感潮河道 56% 点位为中高风险, 其余风险水平在很高风险及以上; 联围内河涌 57% 为很高、极高风险, 其余点位风险水平为中低风险。生态风险水平为联围内河涌>感潮河道>低水位运行河涌。

参考文献:

- [1] 李越.南四湖流域典型入湖河流营养元素与重金属污染特征研究[D].济南:济南大学,2021.
- [2] 周芬琦.安徽庐江钟山尾矿区河流沉积物重金属污染及生态风险评价[D].合肥:安徽大学,2020.
- [3] 李文,刘静东.瓯江流域沉积物重金属污染分布特征、污染程度和来源分析[J].信阳师范学院学报(自然科学版),2023,36(2):274-9.
- [4] MULLER G. Index of Geoaccumulation in Sediments of the Rhine River[J]. GeoJournal,1969,2(3):109-18.
- [5] HAKANSON L. An Ecological Risk Index for Aquatic Pollution Control - A Sedimentological Approach[J].1980.
- [6] 李明,陈文龙,吴琼.广州市城市河流低水位运行生态修复理念与实践[J].中国水利,2023(9):31-5.
- [7] 胡晓张,李庆敏,刘丙军,等.珠江三角洲河网区闸泵群分区分级调度结构研究[J].人民珠江,2020,41(5):96-100+7.
- [8] 丁玮.湘江株洲段底泥重金属分布特征及污染评价[D].湘潭:湖南科技大学,2019.
- [9] 胡祖武.广州市石井河底泥重金属污染及底泥氧化处理研究[D].广州:暨南大学,2007.

基金项目: 贵州省水利科技经费项目, 河湖健康评价生物完整性指标体系研究——以赤水河为例 (项目号 KT202204); 水利部重大科技项目, 粤港澳大湾区河道底泥治理关键技术及示范 (项目号 SKS-2022064); 贵州省水利科技经费项目, 基于环境 DNA 宏条形码技术的赤水河贵州段鱼类资源调查研究 (项目号 KT202319)。