

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2023.09.013

胡建美, 游宇, 宋忱馨, 等. 沱江内江段支流底泥重金属污染及生态风险 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2023, 45(9): 132-141.

沱江内江段支流底泥重金属污染及生态风险

胡建美^{1,3}, 游宇², 宋忱馨², 蔡然¹,
王贵强², 王哲⁴, 李宏⁵

1. 北京首创生态环保集团股份有限公司, 北京 100044;
2. 四川水汇生态环境治理有限公司, 四川 内江 641000;
3. 北京首创生态环保集团股份有限公司 水汇智造分公司, 北京 100044;
4. 西安理工大学/省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 西安 710048;
5. 重庆大学/三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045

摘要: 支流底泥重金属可能是沱江重金属的重要来源, 但目前关于典型重金属在沱江支流的研究较少。因此, 考察了沱江内江段 3 条典型支流——玉带溪、寿溪河和黑沱河底泥中重金属的质量分数和分布特征, 并对其来源和生态风险进行了分析和评价。结果表明, 底泥中 8 种重金属(Cu, Pb, Ni, Cr, Zn, Cd, As 和 Hg)均有检出, 但仅部分点位的 Cd 质量分数超标。玉带溪底泥中 Cd 质量分数的最大值为 4.16 mg/kg, 为国家标准中管控值和筛选值的 1.04 和 13.87 倍。垂向分布特征表明, 玉带溪和黑沱河的重金属污染为近期形成, 而寿溪河则存在历史性污染。相关分析和主成分分析发现底泥中 Cd 与总氮及有机质密切相关, 可能与渔业养殖活动有关。地累积指数表明部分点位 Cd 强富集; 潜在生态风险指数指出, 部分点位的强潜在生态风险主要由底泥中 Cd 和 Hg 引发。

关 键 词: 沱江; 内江; 支流; 底泥; 重金属; 生态风险

中图分类号: X52 **文献标志码:** A

文章编号: 1673-9868(2023)09-0132-10

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Distribution Characters and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediment of Typical Tributaries of Tuojiang River (Neijiang Reach)

HU Jianmei^{1,3}, YOU Yu², SONG Chenxin²,
CAI Ran¹, WANG Guiqiang², WANG Zhe⁴, LI Hong⁵

收稿日期: 2022-10-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(51909210); 住房与城乡建设部软科学研究项目(R20200074); 北京首创生态环保股份有限公司内部课题(SCST202010).

作者简介: 胡建美, 硕士, 工程师, 主要从事流域水环境综合治理研究.

1. Beijing Capital Eco-Environment Protection Group Co. Ltd., Beijing 100044, China;
2. Sichuan Shuihui Eco-Environmental Management Co. Ltd., Neijiang Sichuan 641000, China;
3. Shuihui Intelligent Manufacturing Co. Ltd., Beijing Capital Eco-Environment Protection Group Co. Ltd., Beijing 100044, China;
4. State Key Laboratory of Ecological Water Resources in Northwest Arid Zone, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;
5. Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Eco-Environment, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, China

Abstract: Heavy metal in the tributaries of the Tuojiang River may be the primary source of the accumulation of heavy metal in the main stream, while little is available concerning the distribution of the heavy metals in its tributaries. This study intended to investigate the distribution of heavy metals in the sediment of 3 typical tributaries of Tuojiang River (Neijiang reach), i. e., Yudai River, Shouxi River and Heituo River, and identify their source and evaluate their ecological risk. The results showed that Cu, Pb, Ni, Cr, Zn, Cd, As and Hg were found in the 3 tributaries, but only the concentrations of Cd in some sites exceeded the threshold. The maximum Cd concentration in the sediment of Yudai River was 4.16 mg/kg, which was 1.04 and 13.87 folds of the screening value and control value of the national standard, respectively. The vertical distribution character of heavy metals indicated that the heavy metal pollution in the sediment of Yudai River and Heituo River was accumulated due to the anthropogenic activities in recent years, while heavy metal in Shouxi River was identified to be historical sources. Correlation analysis and principal component analysis showed that Cd in sediment was related to total nitrogen and organic matter, therefore, Cd pollution might be related to aquaculture activities. The geo-accumulation index showed that Cd was strongly accumulated in some sites, and the potential ecological risk index indicated that the ecological risk of some sampling site was mainly caused by Cd and Hg in the sediment.

Key words: Tuojiang River; Neijiang; tributary; sediment; heavy metals; ecological risk

底泥是水生态系统的重要组成部分, 在水环境的物质归趋和能量转化过程中扮演着重要的角色^[1]。重金属等污染物进入水体后会以吸附、络合等方式沉积进入底泥, 而在底泥-水界面环境因子抑或是水动力条件发生变化时, 又会重新释放进入上覆水体。因此, 对污染物来说, 底泥是“源”也是“汇”^[2]。释放进入水体的重金属, 将以食物链的形式在生物体内富集、传播, 最终对水生态和人类健康造成影响^[3]。因此, 底泥重金属分布特征和风险的研究对于水生态系统健康评估有重要的意义。

沱江是长江上游最重要的支流, 发源于川西北九顶山南麓, 流经四川多市并汇入长江。沱江流域是四川省人口最稠密、经济最活跃的地区之一。近年来, 沱江水质污染较重, 已经成为了长江上游污染最严重的区域之一^[4], 此外沱江流域还多次发生重大污染事故^[5], 严重影响了“长江大保护”国家战略的实施。

内江市位于沱江中游, 是成渝城市群的重要节点, 也是沱江流域城镇化速度最为迅猛的地区之一。近年来, 沱江流域内江段污染负荷不断增大, 污染负荷类型正由单一的农村面源向复合污染源转变^[6]。此外, 沱江内江段还存在重金属污染问题, 陈嘉洛等^[7]监测发现, 沱江水中 Cu 和 Zn 的质量浓度在内江市市球溪河国考断面出现峰值, 分别达到 12.33 μg/L 和 15.57 μg/L; 李佳宣等^[8]研究发现, 沱江上游干流底泥中 Cd 和 Pb 的质量分数峰值分别为 3.63 mg/kg 和 58 mg/kg, 已达到轻微-中等生态风险; 时瑶等^[9]和许伟^[10]分别发现沱江干流岸边土壤存在 Pb 和 Cd 富集现象, 可能形成面源污染, 威胁沱江水质。

沱江内江段有众多支流, 其流量受降雨影响呈现明显的季节变化^[11], 这些支流在沱江点源和面源污染负荷的形成和输移中起着重要的作用^[12]。然而, 目前针对沱江水环境质量和底泥污染的研究集中在干流,

对支流的关注十分有限。因此,本研究选取了沱江内江城区段 3 条典型支流——玉带溪、寿溪河和黑沱河,考察了其底泥污染分布特征并分析其来源,再对重金属污染的生态风险进行评价。研究结果将深化对沱江内江段的水环境演变规律的认知,并为区域水环境治理提供参考。

1 实验方法

1.1 研究区特征和采样

分别选取了内江 3 处典型黑臭水体的玉带溪、寿溪河和黑沱河作为研究对象。其中,玉带溪位于内江市老城区和城乡接合部,寿溪河位于内江经济开发区,而黑沱河位于内江市郊区椑木镇。上述河流流域城镇化差异较为明显。寿溪河和黑沱河直接流入沱江,玉带溪由南支、北支汇流而成,汇流后变为暗涵最终汇入沱江。

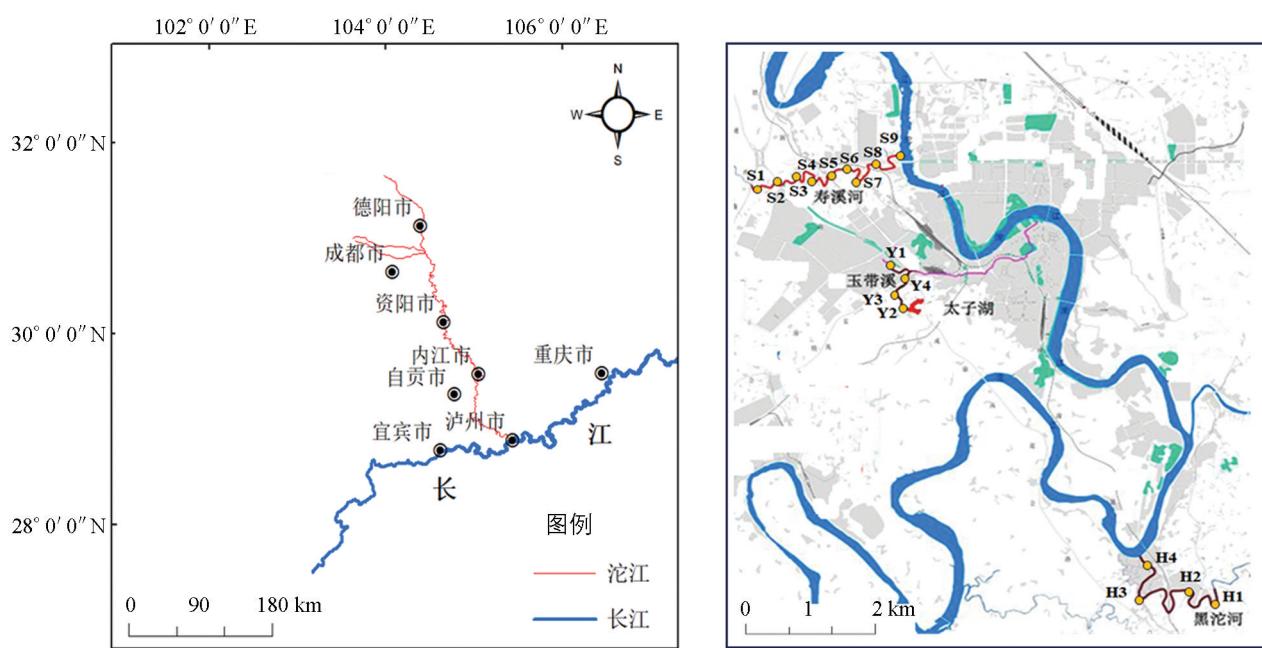
在玉带溪、寿溪河和黑沱河中分别布置了 4, 9, 4 个采样点,采样点分别如图 1 所示。寿溪河和黑沱河中采样点按照从上游到下游的顺序编号为 S1 到 S9, H1 到 H4。玉带溪南北支汇流后的暗涵不在本次调查和后续治理范围内,因此采样点主要布设在南北支流上,北支采样点编号 Y1 点、南支采样点从上游太子湖到下游汇流点分别编号 Y2 到 Y4 点。采用彼得森抓斗式采样器(取表层沉积物)和柱状采样器(取 0~60 cm 沉积物)进行采样。采样时间为 2021 年 11 月。

1.2 测试方法

将底泥风干、消解后使用电感耦合等离子发射光谱(ICP-OES, 美国 Agilent 7500cx 型)测定底泥中 8 种典型重金属(Cu, Pb, Ni, Cr, Zn, Cd, As 和 Hg)的质量分数。此外,还测定了总氮、总磷和有机质质量分数。总氮、总磷采取碱性过硫酸钾消解法测定,有机质采取重铬酸钾法测定。

1.3 数据统计分析方法

数据的相关分析和主成分分析采用 SPSS 软件进行,相关分析采用 Pearson 相关分析法。



审图号: GS(2022)4306 号。

图 1 沱江流域概况(左)和内江段典型支流底泥采样点位示意(右)

1.4 污染评价方法

1) 地质累计指数法

地质累计指数的具体计算方法如下^[13]:

$$I_{\text{geo}} = \log_2 [C_i / (1.5 \cdot B_i)] \quad (1)$$

式中: I_{geo} 为地质累积指数; C_i 为重金属 i 的实测值, mg/kg; B_i 为重金属 i 的地球化学背景值, mg/kg, 本研究参考使用四川省土壤背景值(表 1). 地质累积指数评价体系的划分标准见文献[13]. 具体来说, $I_{\text{geo}} \leq 0$ 时, 无富集, 污染程度为无污染; $0 < I_{\text{geo}} \leq 1$ 时, 轻微富集, 污染程度为轻微污染; $1 < I_{\text{geo}} \leq 2$ 时, 中度富集, 污染程度为中度污染; $2 < I_{\text{geo}} \leq 3$ 时, 中强富集, 污染程度为中强污染; $3 < I_{\text{geo}} \leq 4$ 时, 强富集, 污染程度为强污染; $4 < I_{\text{geo}} \leq 5$ 时, 较强富集, 污染程度为较强污染; $I_{\text{geo}} > 5$ 时, 极强富集, 污染程度为极强污染.

表 1 四川省土壤重金属背景值和毒性响应系数^[14]

种类	Cu	Pb	Cd	As	Hg	Ni	Cr	Zn
背景质量分数/(mg·kg ⁻¹)	28.1	30.32	0.25	9.11	0.08	33.53	78.03	82.22
毒性响应系数	5	5	30	10	40	5	2	1

2) 潜在生态风险指数法

采用 Hakanson 提出的潜在生态风险指数法进行评价, 该方法考虑重金属的毒性敏感性, 较为全面地评价了潜在生态影响^[9, 15]. 具体计算方法如下:

$$C_f^i = \frac{C_s^i}{C_n^i} \quad (2)$$

$$E_r^i = T_r^i \cdot C_f^i \quad (3)$$

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i \quad (4)$$

式中: C_f^i 为重金属 i 相对参比值的污染系数; C_s^i 为重金属 i 的实测质量分数, mg/kg; C_n^i 为重金属 i 参比值, 选择四川省土壤重金属背景值(表 1); E_r^i 为重金属 i 的潜在生态危害系数; T_r^i 为重金属的毒性响应系数(表 1); RI 为多种重金属潜在风险指数. 重金属潜在风险指数的划分标准见文献[15]. 具体来说, 潜在生态风险指数 $E_r^i < 40$ 时, 污染程度为轻微; $40 \leq E_r^i < 80$ 时, 污染程度为中等; $80 \leq E_r^i < 160$ 时, 污染程度为强; $160 \leq E_r^i < 320$ 时, 污染程度为很强; $E_r^i \geq 320$ 时, 污染程度为极强. 综合潜在生态风险指数 $RI < 150$ 时, 污染程度为轻微; $150 \leq RI < 300$, 污染程度为中等; $300 \leq RI < 600$, 污染程度为强; $RI \geq 600$, 污染程度为很强.

2 结果

2.1 底泥重金属污染空间分布特征

3 条河道表层底泥中 8 种重金属均有检出. 重金属平均质量分数从大到小分别为: Zn, Cr, Pb, Cu, Ni, As, Cd, Hg(玉带溪); Zn, Cr, Ni, Cu, Pb, As, Cd, Hg(寿溪河); Zn, Cr, Ni, Pb, Cu, As, Cd, Hg(黑沱河). 从平均质量分数角度来说, 玉带溪表层底泥中重金属 Cd 的质量分数明显高于其他 2 条河流; 对于重金属 Pb 和 Ni 来说, 玉带溪、黑沱河底泥的质量分数明显高于寿溪河.

从图 2 可看出, 3 条河道表层底泥中除了 Cr 和 As, 其他重金属均出现了质量分数在部分点位超过背景值的情况. 当然, 由于重金属背景值存在高度时空异质性, 本研究采用的四川省土壤重金属背景值并不一定能完全地反映研究区域的实际本底情况. 因此需要进一步调查对基于生态毒理学的土壤环境质量标准确定超标的重金属种类. 对照《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(GB 15618-2018)》(以下简称《标准》), 只有 Cd 超过风险筛选值. 具体来说, 玉带溪中 Y3 和 Y4 点位的 Cd 质量分数达到了 1.11 mg/kg 和 4.16 mg/kg, 达到四川省土壤背景值的 4.44 倍和 16.64 倍, 为《标准》中的风险筛选值的 3.7 倍和 13.87 倍, Y4 点位 Cd 质量分数为风险管控值(4.0 mg/kg), 呈现严重富集. 除此之外, 寿溪河的 S1 点位和黑沱河的 H1 点位 Cd 质量分数也超过了《标准》中的风险筛选值. 可以看出, 玉带溪底泥重金属超标问题主要存在于玉带溪南侧支流, 而寿溪河和黑沱河底泥重金属超标问题主要存在于其源头地区.

从表 2 可以看出, 3 条典型支流, 特别是玉带溪底泥中 Cd 的质量分数远高于近 10 年来在沱江干流和其他支流的监测结果。支流底泥中较高质量分数的 Cd 可能成为威胁沱江干流生态安全的潜在原因。

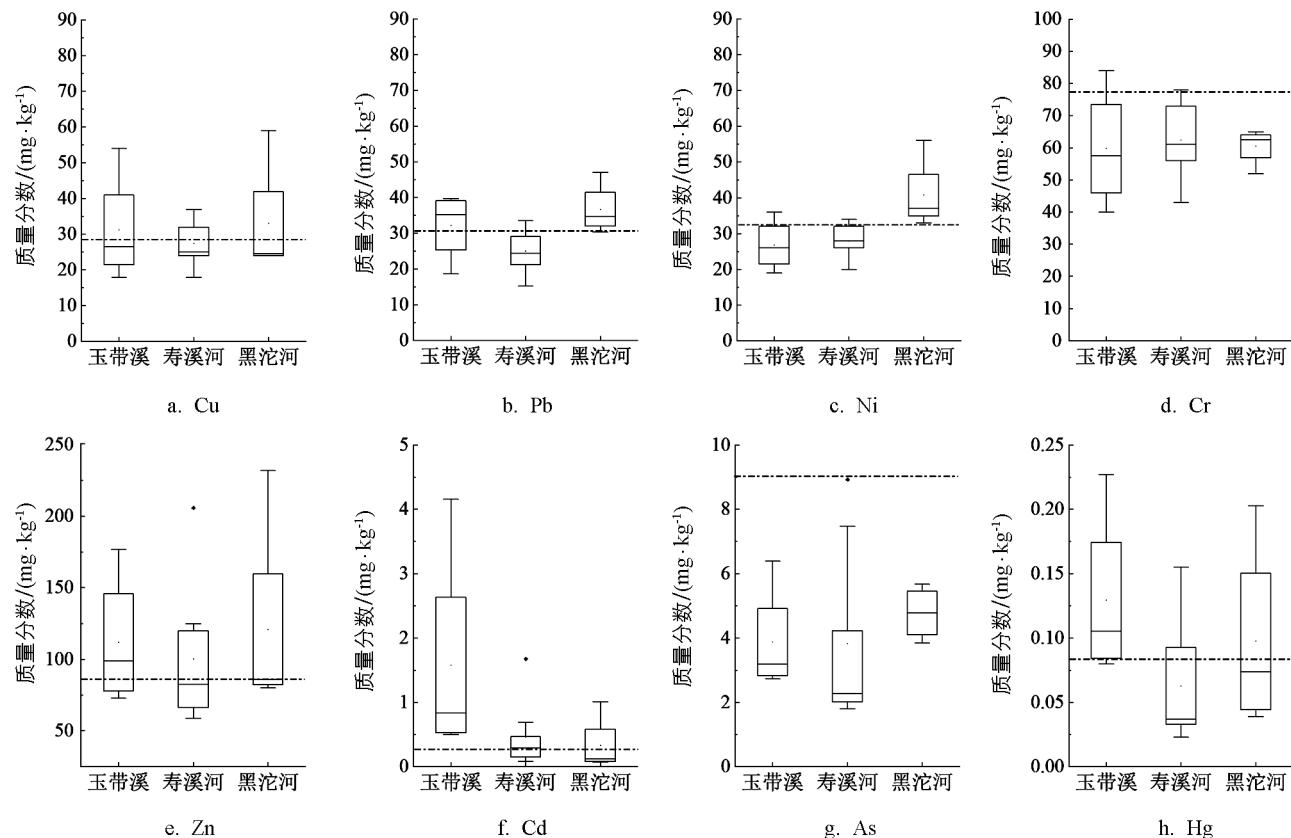


图 2 黑臭河道底泥中重金属质量分数(图中虚线为四川省背景值)

表 2 沱江内江段典型支流底泥中 Cd 质量分数与前人报道结果的对比

取样点	时间	最大值	最小值	平均值	参考文献
沱江中游(简阳段)	2010			4.5	[16]
沱江下游(内江段)				未检出	
石亭江	2010	6.42	0.19	0.99	[8]
绵远河		2.15	0.31	0.79	
沱江上游(金堂段)		3.63	0.74	1.48	
石亭江	2016	1.37	0.29	0.66	[17]
绵远河		1.88	0.16	0.48	
沱江上游(金堂段)		0.4	0.32	0.36	
玉带溪	2018	4.16	0.21	1.8	本研究
寿溪河		1.68	0.07	0.51	
黑沱河		1.01	0.07	0.41	

2.2 底泥重金属污染的垂向分布特征

选择玉带溪 Y4、寿溪河 S1 和黑沱河 H1 这 3 个 Cd 污染最为严重的点位作为代表, 取底泥样芯, 分析了底泥中重金属的垂直分布特征, 结果如图 3 所示。对于玉带溪, Cd 和 Hg 在表层出现质量分数峰值, Cu, As 和 Zn 在底泥深度 10 cm 处出现峰值, Ni 和 Cr 在 45 cm 处出现质量分数峰值。对于寿溪河, 几乎所有的重金属质量分数随深度变化都呈现了一致规律, 即在 45 cm 深度处出现了极值。对黑沱河, Cd, Hg 和 Zn 的质量分数极值出现在底泥表层, 而 Cu, Pb, As 和 Ni 的质量分数极值出现在深度 20 cm 处。

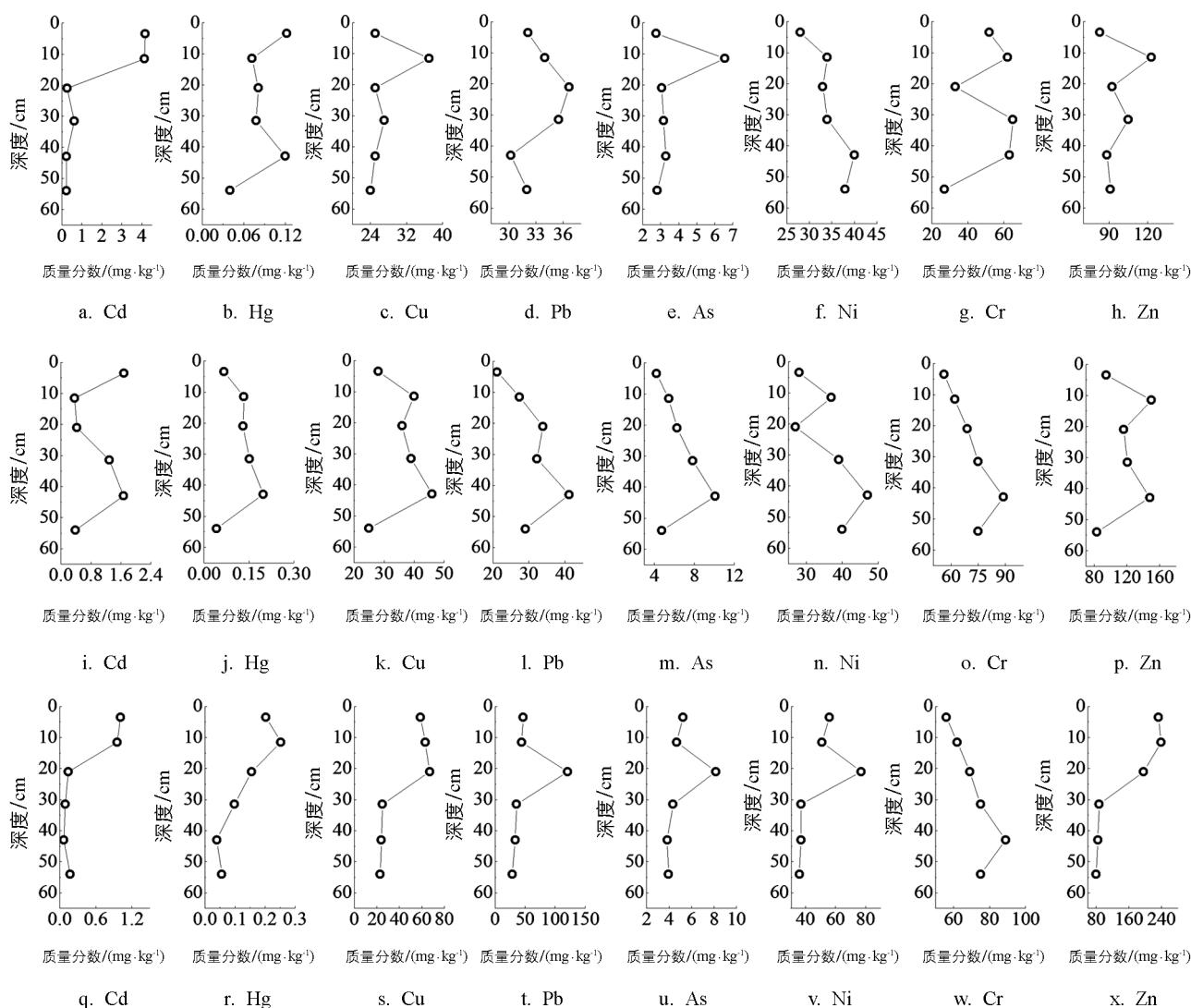


图3 玉带溪(上)、寿溪河(中)和黑沱河(下)典型断面底泥重金属垂直分布特征

对于超标重金属 Cd 来说, 玉带溪 Y4 点位和黑沱河 H1 点位其质量分数峰值均出现在表层, 而寿溪河则出现在 45 cm 深处。根据底泥中重金属污染分布的垂直特征, 可以重建重金属沉积的历史过程, 进而对污染的形成时间进行推测^[18]。本研究中涉及的 3 条河流并未开展过沉积学研究, 因此无法进行准确的沉积历史反演, 但从图 3 中重金属质量分数的垂直分布规律可以推测, 玉带溪和黑沱河的重金属污染形成时间应该距今较近, 而寿溪河的重金属污染属于历史性污染。

2.3 污染物相关性和主成分分析

相关分析是解析污染物来源的重要方法, 相关性越高, 污染物的来源途径越接近^[9, 15]。对 3 条河道表层底泥(0~2 cm)中不同重金属及总氮、总磷、有机质的质量分数进行 Pearson 相关分析, 结果如表 3 所示。对底泥中重金属之间的相关性进行分析发现, 重金属 Cu, Hg 和 Zn 两两之间相关关系极有统计学意义($p < 0.01$), As 和 Cr 相关关系有统计学意义($p < 0.05$), Hg 和 Zn 相关关系也有统计学意义($p < 0.05$)。对营养盐、有机质与重金属进行相关分析表明, Cd 与总氮、有机质相关关系有统计学意义, 而总磷和 Hg 相关关系有统计学意义。以上结果表明, 作为主要质量分数超标的重金属, Cd 与其他重金属不具有同源性。

表 3 底泥中有机质、营养盐和重金属相关分析

	Cu	Pb	Cd	As	Hg	Ni	Cr	Zn	TP	TN	OM
Cu	I	0.012	0.357	-0.072	0.659**	0.38	0.174	0.692**	0.278	0.002	-0.024
Pb		1	-0.316	0.218	0.052		0.262	0.461	0.253	-0.069	0.108
Cd			1	-0.329	0.387		0.068	-0.0404	0.227	-0.084	0.521*
As				1	0.168		0.139	0.568*	0.507	0.244	-0.251
Hg					1		0.116	0.077	0.618*	0.52*	0.436
Ni						1		0.18	0.136	-0.035	0.096
Cr							1	0.509	0.324	-0.293	-0.387
Zn								1	0.26	0.22	0.13
TP									1	0.152	0.152
TN										1	0.955**
OM											1

注: 图中 ** 为极有统计学意义($p<0.01$), * 为有统计学意义($p<0.05$), TP 为总磷, TN 为总氮, OM 为有机质, 下同.

利用主成分分析法对营养盐和重金属的来源进行了进一步解析(表 4), 发现大于 1 的特征根有 3 个, 其累计方差为 72.07%, 说明这 3 个主成分可以代表绝大部分污染物的信息. 主成分 1 和主成分 2 的方差贡献率均在 30% 左右. 在主成分 1 中, Cu, As, Cr 和 Zn 均具有较高的正荷载; 在主成分 2 中, Cd, Hg, TN 和 OM 具有较高的正荷载. 这说明 Cd 和 Hg 与上述几种重金属具有不同的来源, 且与有机污染的输入有密切的关系^[13].

表 4 变量主成分分析的荷载和贡献率

污染物	成分 1	成分 2	成分 3
Cu	0.65	0.34	-0.06
Pb	0.56	-0.06	0.70
Cd	-0.37	0.67	0.01
As	0.70	-0.16	-0.25
Hg	0.44	0.72	-0.29
Ni	0.39	-0.09	0.79
Cr	0.86	-0.19	0.01
Zn	0.71	0.50	-0.08
TP	0.45	0.36	-0.39
TN	-0.19	0.86	0.35
OM	-0.35	0.87	0.20
方差贡献率/%	30.17	27.51	14.39
方差累积贡献率/%	30.17	57.68	72.07

2.4 重金属生态风险评价

2.4.1 地质累积指数评价

3 条河流表层底泥的地质累积指数(I_{geo})计算结果如图 4 所示. 根据 I_{geo} 的计算结果, 沱江内江段 3 条典型支流表层底泥中重金属富集情况可以分为 3 种. 重金属 Cr 和 As 整体无富集现象; 重金属 Cu, Pb, Ni, Zn 和 Hg 呈现轻微富集; 重金属 Cd 在部分点位出现了强富集现象. 每一种重金属在不同河流的富集情况也有所区别. 对于重金属 Cd, 玉带溪的富集情况明显超过其他 2 条河流, I_{geo} 平均值达到了 1.51, 为中度富集水平, 其他 2 条河流中虽然也有部分点位富集水平较高, 但是整体上处于轻微富集或无富集水平.

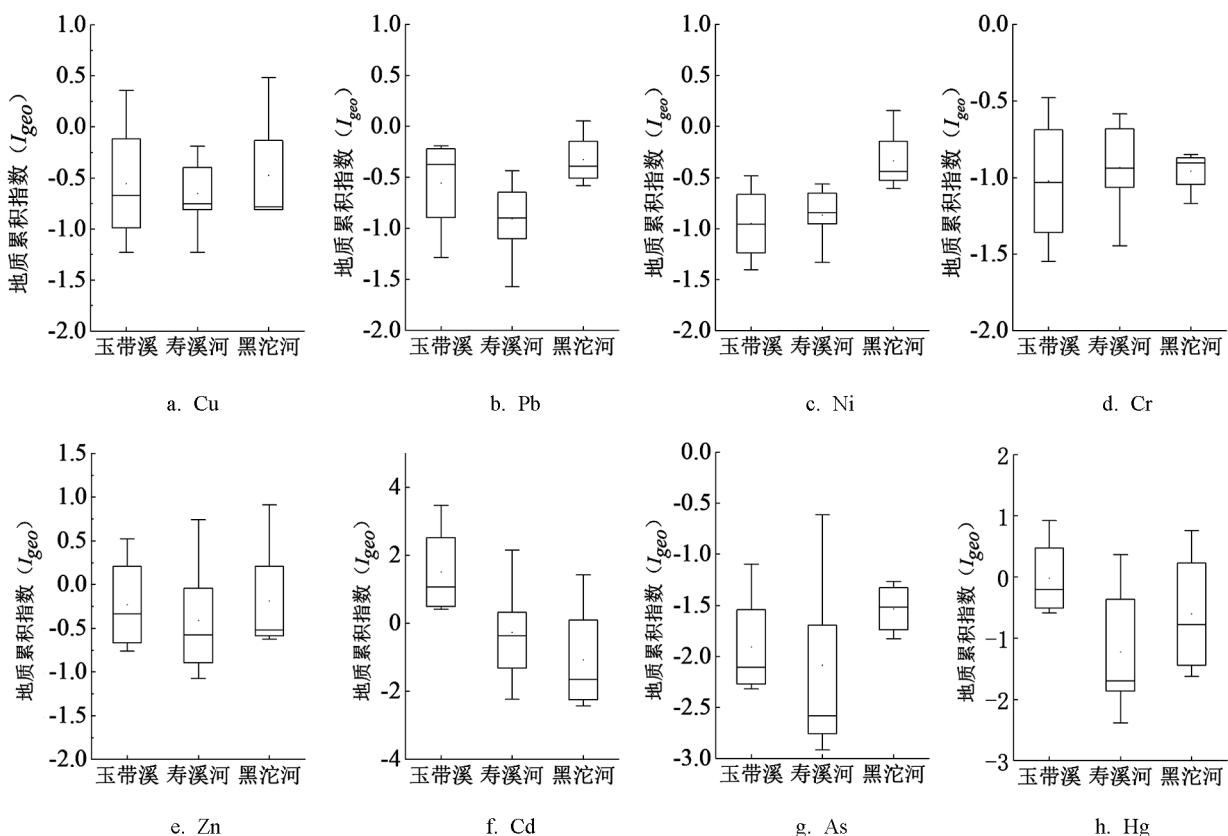


图 4 表层底泥地质累积指数

2.4.2 重金属潜在生态风险评价

底泥重金属污染潜在生态风险指数的计算结果如图 5 所示。单个重金属潜在生态风险指数只有 Cd 和 Hg 较高, 平均值分别达到 83.58 和 43.32; 其他各点位重金属的潜在生态风险指数均小于 10。这 2 种重金属质量分数虽然较低, 但是毒性响应系数较高, 因此具有较强的潜在生态风险。具体来说, 对于 Cd, 玉带溪 Y3 点位和寿溪河 S1 点位的 E_r 值为 499.20 和 201.60, 具有极强和很强的潜在生态风险; 玉带溪 Y4 点位、寿溪河 S4 点位和黑沱河 H1 点位的 E_r 值在 80~160 之间, 具有强潜在生态风险; 从 E_r 平均值来说, 玉带溪远大于其他 2 条河流。对于 Hg, 玉带溪 Y4 点位和黑沱河 H1 点位 Cd 和 Hg 的 E_r 值均超过 80, 具有强潜在生态风险。

多种重金属潜在生态风险指数 RI 值大于 300 的点位共有 2 处, 分别是玉带溪 Y3 点位和寿溪河 S1 点位, 属于强潜在生态风险区; RI 值在 150~300 的点位是玉带溪 Y4 点位, 属于中等潜在生态风险区; 其余点位属于轻微潜在生态风险区^[9, 15]。不同重金属对潜在生态风险指数的贡献有所差异。绝大多数点位 Cd 的 E_r 对 RI 的贡献值最大, 平均占比达到 43%, Hg 的 E_r 对 RI 的贡献值平均占比达到 33%, 两者 E_r 之

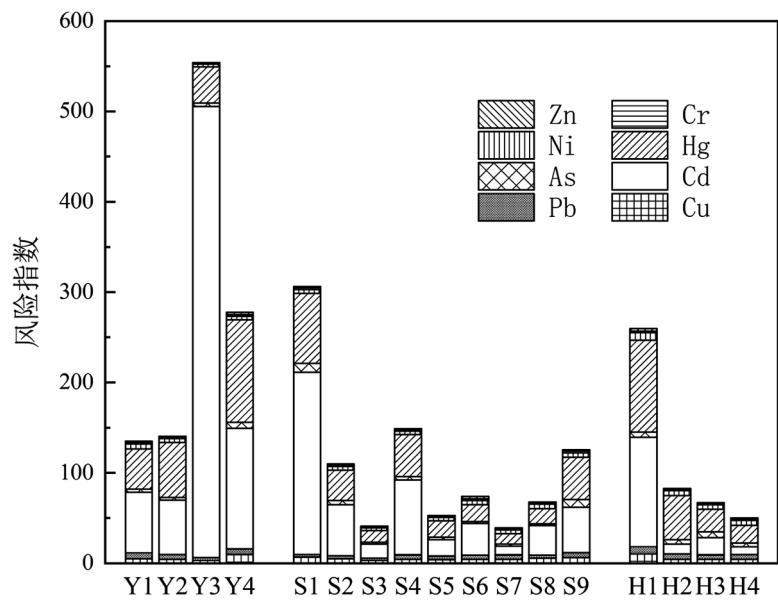


图 5 不同点位重金属潜在生态风险指数

和占到 RI 值的 77% 以上。

3 讨论

人类活动所引发的底泥中重金属污染的累积具有明显的空间异质性。因此，在图 2 的结果中可以看到，3 条河道中几乎所有的重金属质量分数均呈现出明显波动现象。底泥中质量分数超出《标准》中风险管控值的重金属仅有 Cd 一种，而通过相关分析和主成分分析可以发现它与其他重金属具有不同的来源。Cd 污染主要源自于农业化肥的使用、化石燃料的燃烧以及冶金、电镀等工业行业^[19]。本研究中，底泥中 Cd 和 Hg 质量分数与有机质 OM 以及总氮 TN 有关。前期踏勘表明，底泥中 Cd 质量分数较高的玉带溪两岸以及寿溪河和黑沱河源头区渔业养殖活动发达。鱼类养殖过程中，饵料和渔药中有少量重金属 Cu-Zn 添加剂，以促进鱼类生长并提高其免疫力。然而，加工水平较差的饵料中也会含有 Cd, Hg 等其他伴生重金属，最终以粪便和残饵的形式进入养殖池塘的底泥^[20-21]。渔业养殖活动造成的池塘底泥中 Cd 重金属污染现象已经多有报道^[22-24]。鱼塘的换水、雨季鱼塘形成的面源污染会将重金属进一步带入河道中^[25]。因此，渔业养殖可能是玉带溪表层底泥 Cd 富集的重要原因。

从多种重金属污染物潜在生态风险指数的平均值来看，玉带溪的 RI 值远大于寿溪河和黑沱河。这可能与 3 条河流的区位特征有关。玉带溪所在的市中区为内江市传统的主城区，建成历史较长，流域内有汽车修理、兽药加工等工业企业，同时还有大量的生活污水直排。此外，河道附近的内宜高速也带来了大量的交通面源污染。这些污染负荷与上述的渔业养殖污染负荷共同造成了玉带溪较为严重的重金属污染问题。而寿溪河和黑沱河流域分别是内江市高新区和东兴区椑木镇所在地，城镇化历史较短，配套的污染控制措施较好，因此总体上污染程度较轻。然而，值得注意的是，黑沱河 H1 断面、寿溪河 S1 和 S4 断面也存在一定程度的重金属富集现象，可能与这一区域的工农业活动有关。此外，尽管寿溪河的表层底泥重金属污染程度轻于玉带溪，其深层底泥中却存在不同程度的重金属富集现象，随着环境变化有可能向表层迁移。

本研究结果表明，沱江内江段典型支流底泥中存在不同程度的重金属污染问题。这些重金属在支流水流冲刷或是沱江干流回水的作用下，很可能出现较强的重金属释放现象，亟待引起重视。针对重金属污染底泥，应结合内江市当地实际情况采取有效措施降低其生态风险，进一步保障沱江内江段的水生态系统稳定与健康。

4 结论

沱江内江段 3 条典型支流底泥中，8 种重金属均存在不同程度的富集现象，部分点位 Cd 的质量分数超过了国家标准的风险筛选值和管控值。相关分析和主成分分析发现，底泥中 Cd 与有机质和总氮密切相关，具有同源性，可能与渔业养殖活动有关。地质累积指数表明，玉带溪底泥中 Cd 存在中度富集；潜在生态风险指数表明，玉带溪南支、寿溪河和黑沱河上游部分点位具有强潜在风险，Cd 和 Hg 对潜在生态风险指数的贡献最大，两者之和达到了 77% 以上。

参考文献：

- [1] 范成新, 钟继承, 张路, 等. 湖泊底泥环保疏浚决策研究进展与展望 [J]. 湖泊科学, 2020, 32(5): 1254-1277.
- [2] DIETRICH M, AYERS J. Geochemical Partitioning and Possible Heavy Metal(Loid) Bioaccumulation within Aquaculture Shrimp Ponds [J]. Science of the Total Environment, 2021, 788(20): 147777.
- [3] 陈芬, 余高, 侯建伟, 等. 矿渣运输道路两侧农田土壤重金属风险评价 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2020, 42(11): 9-21.
- [4] 秦延文, 马迎群, 温泉, 等. 沱江流域总磷污染负荷、成因及控制对策研究 [J]. 环境科学与管理, 2020, 45(2): 20-25.
- [5] 贾滨洋, 张伟, 张峰瑜. 严重污染事故后河流的生态恢复——以沱江为例 [J]. 环境科学导刊, 2008, 27(5): 35-40.

- [6] 肖宇婷, 谌书, 樊敏. 沱江流域污染负荷时空变化特征研究 [J]. 环境科学学报, 2021, 41(5): 1981-1995.
- [7] 陈嘉洛, 魏晓, 汪涛. 沱江流域地表水中重金属含量分布及风险评价 [J]. 湖北农业科学, 2022, 61(5): 76-82, 86.
- [8] 李佳宣, 施泽明, 郑林, 等. 沱江流域水系沉积物重金属的潜在生态风险评价 [J]. 地球与环境, 2010, 38(4): 481-487.
- [9] 时瑶, 马迎群, 赵艳民, 等. 沱江干流岸边土壤营养盐和重金属分布特征 [J]. 环境科学与技术, 2020, 43(S2): 65-73.
- [10] 许伟. 内江市沱江乡土地生态地球化学特征 [D]. 成都: 成都理工大学, 2011.
- [11] 税永红, 卢永洪, 罗靖, 等. 沱江流域冬春交替期水质评价及差异分析 [J]. 长江科学院院报, 2021, 39(4): 56-62.
- [12] 余真真, 朱海, 毛颂平, 等. 黄河干支流交汇河段污染物传输模拟研究 [J]. 人民黄河, 2022, 44(4): 100-106.
- [13] 张茜, 冯民权, 郝晓燕. 漳泽水库沉积物重金属污染特征与生态风险评价 [J]. 环境工程, 2019, 37(1): 11-17.
- [14] 黄蕾, 王鹃, 彭培好, 等. 内江市双桥乡土壤重金属含量及风险评价 [J]. 物探化探计算技术, 2011, 33(4): 450-454, 349.
- [15] 杨兰琴, 胡明, 王培京, 等. 北京市中坝河底泥污染特征及生态风险评价 [J]. 环境科学学报, 2021, 41(1): 181-189.
- [16] 吴怡, 邓天龙, 徐青, 等. 沱江流域 Pb、Cd 的环境污染化学行为研究 [J]. 广东微量元素科学, 2010, 17(9): 22-28.
- [17] 林清, 施泽明, 王新宇. 沱江流域上游水系沉积物重金属元素空间分布特征及环境质量评价 [J]. 四川环境, 2016, 35(4): 29-35.
- [18] 高进长, 唐强, 龙翼, 等. 长寿湖水库沉积物中重金属来源及生态风险评价 [J]. 人民长江, 2020, 51(4): 20-25.
- [19] 冯丽涵, 李萧萧, 李凌. 香樟与地被植物配植对其生长和富集 Cd 的影响 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2020, 45(3): 95-100.
- [20] FAN Y F, CHEN X L, CHEN Z B, et al. Pollution Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in Surface Sediments of Luoyuan Bay, Fujian [J]. Environmental Research, 2022, 203: 111911.
- [21] CHEN Y Q, YU W J, ZHENG R Y, et al. Magnetic Activated Carbon (MAC) Mitigates Contaminant Bioavailability in Farm Pond Sediment and Dietary Risks in Aquaculture Products [J]. Science of the Total Environment, 2020, 736(20): 139185.
- [22] 施沁璇, 孙博怿, 胡晓波, 等. 水生植物对养殖池塘重金属污染底泥的修复作用 [J]. 安全与环境学报, 2018, 18(5): 1956-1962.
- [23] 赵汉取, 韦肖杭, 王俊, 等. 浙北地区养殖池塘表层沉积物重金属潜在生态风险评价 [J]. 安全与环境学报, 2014, 14(2): 225-229.
- [24] 訾鑫源, 张鸣, 谷孝鸿, 等. 洪泽湖围栏养殖对表层沉积物重金属含量影响与生态风险评价 [J]. 环境科学, 2021, 42(11): 5355-5363.
- [25] 张振宇, 代俊峰, 谢晓琳, 等. 漓江上游金龟河试验区氮磷浓度时空差异性分析 [J]. 中国农村水利水电, 2021(7): 101-106, 112.

责任编辑 包颖
崔玉洁