

doi: 10.12029/gc20220331001

金阳, 姜月华, 周权平, 王晓龙, 张鸿, 梅世嘉, 陈孜, 杨海, 吕劲松, 侯莉莉, 齐秋菊, 贾正阳, 杨辉. 2024. 长江下游干流沉积物重金属特征及生态风险评价[J]. 中国地质, 51(1): 276–289.

Jin Yang, Jiang Yuehua, Zhou Quanping, Wang Xiaolong, Zhang Hong, Mei Shijia, Chen Zi, Yang Hai, Lü Jinsong, Hou Lili, Qi Qiuju, Jia Zhengyang, Yang Hui. 2024. Characteristics and ecological risk assessment of sedimentary heavy metals from the Lower Mainstream of Yangtze River[J]. Geology in China, 51(1): 276–289(in Chinese with English abstract).

长江下游干流沉积物重金属特征及生态风险评价

金阳^{1,2,3}, 姜月华^{1,2,3}, 周权平^{2,3}, 王晓龙⁴, 张鸿^{2,3}, 梅世嘉^{2,3}, 陈孜^{2,3},
杨海^{2,3}, 吕劲松^{2,3}, 侯莉莉^{2,3}, 齐秋菊^{2,3}, 贾正阳^{2,3}, 杨辉^{2,3}

(1. 中国地质科学院, 北京 100037; 2. 中国地质调查局南京地质调查中心 江苏南京 210016; 3. 自然资源部流域地质过程重点实验室, 江苏南京 210016; 4. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 江苏南京 210008)

摘要:【研究目的】长江下游干流沿岸分布众多取水口, 为保障用水安全和生态环境健康, 亟需了解近岸沉积物中重金属相关现状。【研究方法】调查过程中自上而下分左右岸共采集沉积物样品 85 组, 利用描述统计分析重金属含量特征, 综合相关性分析和主成分分析探讨重金属来源, 采用地累积指数法、污染负荷法分析重金属污染程度, 并评估其潜在生态风险。【研究结果】平均含量由高至低为 Zn>Cr>Cu>Ni>Pb>As>Cd; 上游至下游, Cu、Zn、Cr、Ni 呈小幅波动增加趋势, As、Pb 呈小幅波动下降趋势, Cd 呈较大波动下降趋势; Cd 的污染程度最重, 主要来源于农业生产等人类活动, 1~4 级污染分别占比 1.18%、1.18%、18.82% 和 34.12%, Cr 和 Ni 为无污染, 主要是工业生产源和地球化学自然源; 中等污染程度 ($1 \leq PLI_{point} < 2$) 的样点占比 34.18%, 潜在生态风险指数 (RI) 为 19.48~388.62, 轻微潜在生态风险、中等潜在生态风险、强潜在生态风险和极强潜在生态风险占比分别为 38.82%、42.35%、17.65% 和 1.18%。【结论】长江下游干流沉积物中重金属含量较低, 流域整体处于轻微—中等风险的无污染状态 ($PLI_{area} < 1$), 右岸重金属平均含量、污染程度和潜在生态风险均普遍高于左岸。

关键词: 重金属; 来源; 污染程度; 生态风险; 水文地质调查工程; 长江下游

创新点: (1) 样品采集、数据分析兼顾上下游和左右岸, 对长江下游干流进行了整体调查和综合分析; (2) 利用地累积法和污染负荷法评价重金属污染程度, 评估其潜在生态风险, 探讨了污染程度和生态风险的不完全对应关系。

中图分类号: X522; X826 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2024)01-0276-14

Characteristics and ecological risk assessment of sedimentary heavy metals from the Lower Mainstream of Yangtze River

JIN Yang^{1,2,3}, JIANG Yuehua^{1,2,3}, ZHOU Quanping^{2,3}, WANG Xiaolong⁴, ZHANG Hong^{2,3},
MEI Shijia^{2,3}, CHEN Zi^{2,3}, YANG Hai^{2,3}, LÜ Jinsong^{2,3}, HOU Lili^{2,3},
QI Qiuju^{2,3}, JIA Zhengyang^{2,3}, YANG Hui^{2,3}

收稿日期: 2022-03-31; 改回日期: 2022-10-24

基金项目: 中国地质调查局长江经济带地质资源环境综合调查工程(0531)、长江经济带地质资源环境综合评价项目(DD20190260)和长江经济带暨长三角一体化发展区资源环境承载力监测评价项目(DD20221728)联合资助。

作者简介: 金阳, 男, 1990 年生, 博士生, 工程师, 主要从事环境地质和水文地质研究工作; E-mail: sdjdxjy@163.com。

通讯作者: 杨辉, 男, 1981 年生, 高级工程师, 主要从事环境地质和水文地质研究工作; E-mail: yhui@mail.cgs.gov.cn。

(1. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, Jiangsu, China; 3. Key Laboratory of Watershed Eco-Geological Processes, Ministry of Natural Resources, Nanjing 210016, Jiangsu, China; 4. Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, Jiangsu, China)

Abstract: This paper is the result of hydrogeological survey engineering.

[Objective] There are numerous water-intakes along the mainstream of the Yangtze River downstream, in order to ensure water safety and eco-environmental health, relevant situation of heavy metals in the nearshore sediment need to be studied urgently.

[Methods] A total of 85 sediment samples were collected on both left and right banks from the upstream to the downstream with the investigation. Descriptive statistics analysis was used to show the characteristics of heavy metals. Correlational analysis and principal component analysis (PCA) were applied to study the sources of heavy metals. Geoaccumulation index and pollution load index were used to analyze the pollution levels, and the potential ecological risk of heavy metals were evaluated by the methods of potential ecological risk assessment index. **[Results]** The order of average content from high to low is $Zn > Cr > Cu > Ni > Pb > As > Cd$. From the upstream to the downstream, Cu, Zn, Cr, Ni had a small fluctuating but increasing trend, while As and Pb had a small fluctuating but decreasing trend, Cd showed decreasing trend with an obvious fluctuation. The most polluted one is Cd among seven heavy metals, which were mainly from human activities, such as agriculture. Cd accounted for 1.18%, 1.18%, 18.82% and 34.12% from polluted Class 1 to 4, respectively. Cr and Ni were non-pollution class, which mainly from industries and geochemical natural source. 34.18% of all sampling sites were in moderate pollution ($1 \leq PLI_{point} < 2$). RI was ranged from 19.48 to 388.62, and the proportions of slight potential ecological risk, medium potential ecological risk, strong potential ecological risk and extremely strong potential ecological risk were 38.82%, 42.35%, 17.65% and 1.18%, respectively. **[Conclusions]** Contents of all heavy metals in mainstream sediment of the Yangtze River downstream were at a lower level. The catchment were overall at non-pollution state ($PLI_{area} < 1$) with slight to moderate ecological risk. The average contents, pollution levels and potential ecological risks of heavy metals on the right bank were all higher than those on the left bank.

Key words: heavy metal; source; pollution level; ecological risk; hydrogeological survey engineering; the Yangtze River downstream

Highlights: (1) Upstream to downstream and both the left bank and the right bank were considered during samples collection and data analysis, so integrated survey and comprehensive analysis were studied for the downstream of the Yangtze River; (2) Geoaccumulation index and pollution load index were used to analyze the pollution levels and the potential ecological risk index was applied to evaluate the potential ecological risk, the relationship of incomplete correspondence between pollution level and ecological risk was discussed.

About the first author: JIN Yang, male, born in 1990, doctor candidate, engineer, mainly engaged in the research of environmental geology and hydrogeology; E-mail: sdjdxjy@163.com.

About the corresponding author: YANG Hui, male, born in 1981, senior engineer, engaged in the research of environmental geology and hydrogeology; E-mail: yhui@mail.cgs.gov.cn.

Fund support: Supported by the project of China Geological Survey “Comprehensive Geological Environment Survey Project of the Yangtze River Economic Belt” (No. 0531), “Comprehensive Evaluation of Geological Resources and Environment of the Yangtze River Economic Belt” (No. DD20190260) and “Monitor and Evaluation of Resource Environmental Bear Capacity of the Yangtze River Economic Belt (Yangtze River Delta Integrated Development Zone)” (No. DD20221728).

1 引 言

重金属作为主要环境污染物之一,广泛存在于沉积物、地表水等各种介质中,具有毒性大、难降解、持久性、易富集等特征。沉积物是河流生态系统的重要组成部分,不仅是生物所需营养物质的“粮库”,也是重金属等污染物的吸附贮藏地(翟婉

盈等, 2017; 方志青等, 2018)。河底沉积物受环境变化或外界扰动影响,沉淀的重金属会通过溶解、离子交换、解吸等物理化学作用重返地表水体,若通过食物链进入人体,累积到一定浓度会对人体肝、肾、消化系统和神经系统等造成损伤(Wcislo et al., 2002; Li et al., 2017),严重威胁人体健康,对周围环境造成不可逆转的危害(黄宏伟等, 2021)。因

此, 河流沉积物重金属污染备受关注(柳青青等, 2012; Ke et al., 2017; Zhang et al., 2018; Ye et al., 2019; 张倩等, 2021; 刘敏等, 2021; Jaskuła and Sojka, 2022; Ali et al., 2022; 刘艳等, 2022)。

长江作为世界第三大河、中国第一大河, 是沿岸城镇重要的饮用水源和贯穿东西的黄金水道, 同时也是社会经济发展的重要动力, 在我国社会经济发展全局和区域发展总体格局中具有重要战略地位(段学军等, 2019; 姜月华等, 2021)。近年来, 随着《长江保护法》等一系列保护措施的制定实行, 长江水质明显改善, 但重金属污染仍不容小觑(Yin et al., 2015; 马超等, 2018)。长江下游地区由于工农业发达、人口密度大, 更易产生重金属污染, 且危害程度和生态风险更高, 典型区不同来源的沉积物中重金属特征及生态风险评估表明危害程度依次为港口源>工业源>矿山源>市政源(单丽丽等, 2008), 长江下游(南京—上海段)沉积物中 Cd、Pb 释放行为受 pH 影响显著(王亚平等, 2012)。张志永等(2021)针对长江中上游表层沉积物重金属形态分布特征及风险评价开展了研究, Guo et al.(2012)研究了长江三峡下游悬浮物中重金属季节变化特征, 但专门针对长江下游干流沉积物重金属的整体性调查鲜有报道。本文聚焦流域尺度, 通过研究区上下游、左右岸综合对比, 分析长江下游干流沉积物中 Cr、As、Cd、Ni、Pb、Zn、Cu 等 7 种重金属的含量和空间分布特征及其来源, 评估生态风险, 以期为长江流域重金属污染防治、用水安全保障和生态风险管控提供参考依据。

2 研究区概况

长江西起青藏高原, 东至中国东海, 总长 6397 km, 流域面积约 180 万 km²。流量为 29400 m³/a, 泥沙量 500 Mt/a(徐金英等, 2021)。综合考虑地形地貌、气候气象和地质构造等因素(Zhao et al., 2021), 通常以湖北宜昌和江西湖口为界, 将长江划分为上、中、下游三段, 其中, 上游山丘众多, 中游水网密布, 下游以河漫滩平原为主。本次研究区位于长江下游(图 1), 全长约 930 km, 流域面积 12 万 km²(董耀华和汪秀丽, 2017), 地处亚热带季风气候区, 夏季湿热, 冬季干冷, 年平均气温 15~20℃, 年平均降雨量 1100 mm 左右(李静等, 2020; 黄长生等, 2021; 张鸿等, 2022)。长江下游水系的主要支流有华阳

河、皖河、水阳江、青弋江、漳河水系、滁河、巢湖水系、太湖水系及黄浦江。

长江下游区域出露地层比较齐全, 太古界、元古界、中生界和新生界均有出露, 岩浆岩以花岗岩为主, 沉积岩主要为灰岩和砂岩, 变质岩以片麻岩为主。花岗岩主要分布于大别山区和皖南山区, 灰岩主要分布于皖南山地, 砂岩遍及低山丘陵地带, 片麻岩主要分布在大别山区, 黏土、亚黏土、亚砂土等第四系主要分布在长江下游平原和三角洲地区。主要地质构造单元是扬子准地台, 位于淮扬地盾与江南古陆之间的狭长地带, 沿江地区成土母质分属于两大类型, 一是海积冲积亚砂土, 占绝大部分; 二是少量潟湖堆积亚黏土。

3 材料与方 法

3.1 样品采集与测试

沿长江下游滨江区域, 自上游至下游共采集近岸水下表层沉积物样品 85 个(图 1), 其中, 左岸 38 个, 右岸 47 个。采样深度为水底 0~20 cm, 沉积物重 500~800 g。采集过程中用木勺刮取沉积物并装入聚丙烯保鲜盒中密封保存, 记录采样点周边岸线利用类型及生态环境情况, 并用 Garmin 手持 GPS 定位。沉积物样品室内常温阴干后, 去除其中 2 mm 以上的石块、植物根系等杂质, 均匀混合后经玛瑙研钵磨细过 0.15 mm 尼龙筛, 保存待测。取适量样品放入消解容器中, 采用硝酸-氢氟酸-高氯酸(HNO₃-HF-HClO₄)进行消解, 采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)检测 Cu、Pb、Cr、Zn、Cd、Ni, 采用 AFS 9600 原子荧光光谱仪检测 As。利用平行样、空白样进行质量控制, 测定相对误差(RE)均<±5%, 结果满足质量要求。

3.2 地累积指数法

地累积指数法由德国科学家 Müller(1969)提出, 考虑了人为污染因素、环境地球化学背景值及自然成岩作用对背景值的影响, 可以直观地给出重金属污染级别, 是反映沉积物中重金属富集程度的常用指标, 目前在国内外沉积物重金属污染评价中应用广泛(李娟娟等, 2006; 范拴喜等, 2010), 计算公示如下:

$$I_{\text{geo}} = \log_2 \frac{C_n}{k \times B_n} \quad (1)$$

式中, I_{geo} 是地累积指数; C_n 是重金属在沉积物

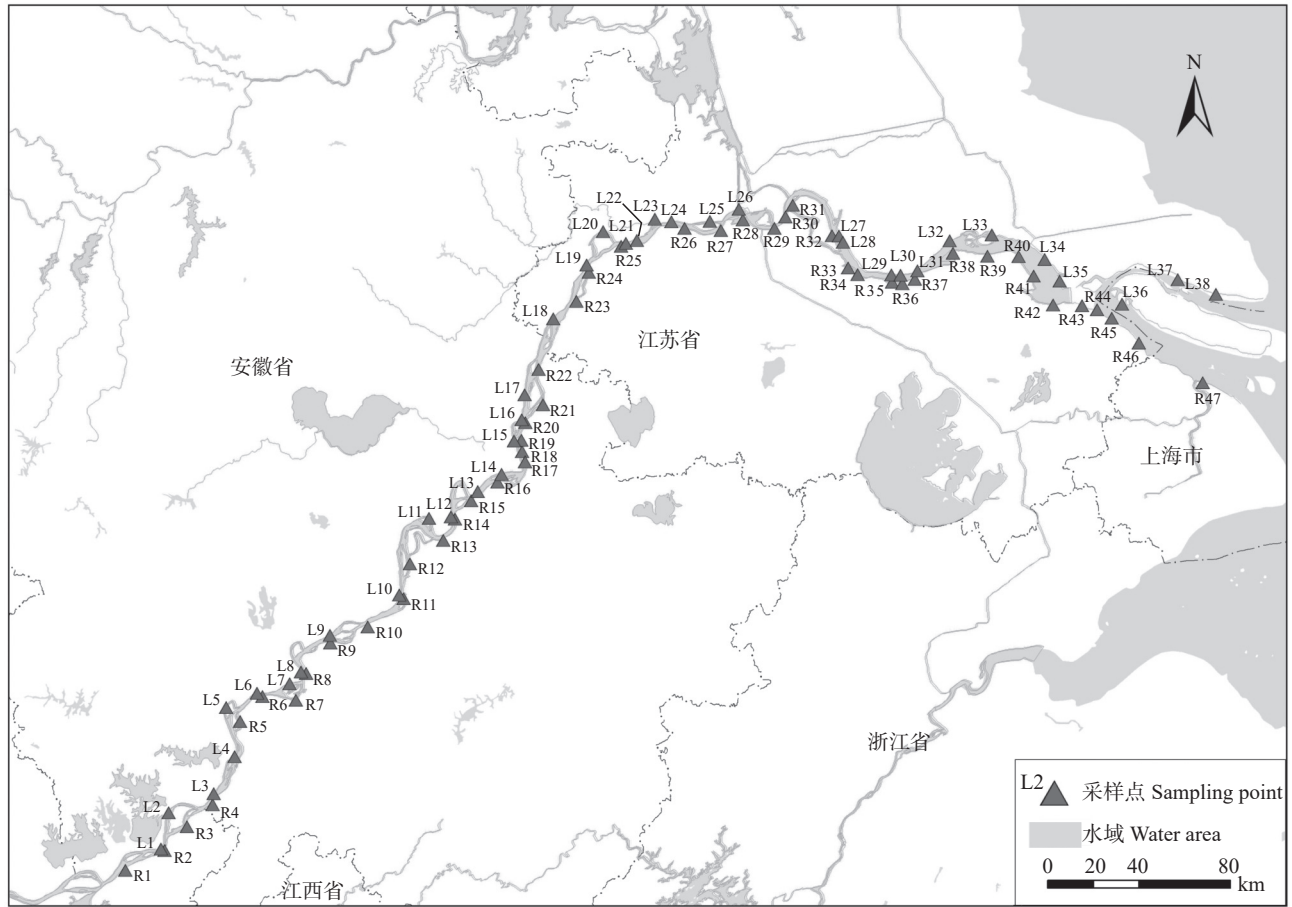


图 1 研究区范围及采样点示意图
Fig.1 Location of study area and distribution of samples

中的实测含量值; k 为考虑各地岩石差异可能引起背景值变动而设置的系数, 一般取 1.5, 表征沉积特征、岩石地质及其他影响。 B_n 是沉积物中重金属的地球化学背景值。地累积指数分级与污染程度之间的关系见表 1。

3.3 重金属污染负荷法

污染负荷指数法(Pollution Load Index, PLI)由 Tomlinson et al.(1980)学者提出, 研究区参评的重金属共同参与计算求取 PLI 值, 有利于直观反映多种重金属对环境污染的贡献及其时空变化趋势(吕达等, 2007; 王婕等, 2013), 在区域性或流域污染研究中应用效果良好, 污染负荷指数法一般划分为 4 个等级(表 2)。计算公示如下:

$$CF_i = \frac{C_0^i}{C_n^i} \quad (2)$$

$$PLI = \sqrt[n]{CF_1 \times CF_2 \times \dots \times CF_n} \quad (3)$$

$$PLI_{(zone/area)} = \sqrt[m]{PLI_1 \times PLI_2 \times \dots \times PLI_m} \quad (4)$$

式中, CF_i 为重金属 i 的污染指数; C_0^i 为样品中重金属 i 的实测含量值, mg/kg; C_n^i 为重金属 i 的含量背景值, mg/kg; PLI 为某点的污染负荷指数; n 为参评的重金属种类数; $PLI_{(zone/area)}$ 为某区域或某流域的污染负荷指数; m 为采样点的个数。

3.4 潜在生态风险评价法

潜在生态风险评价法由瑞典科学家 Hakanson (1980)年提出。该方法引入潜在生态风险指数(RI), 考虑了重金属的毒性响应参数、环境效应和生态效应, 能综合反映重金属对生态的风险程度及各类重金属的贡献率, 在沉积物重金属环境质量和生态风险评价中广泛应用(代杰瑞等, 2018; 李莘等, 2018; 鲍丽然等, 2020)。计算公式如下:

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \times C_r^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \times \frac{C_0^i}{C_n^i} \quad (5)$$

表1 地累积指数污染程度划分标准

Table 1 Standard of contamination levels by geoaccumulation index

I_{geo}	<0	0~1	1~2	2~3	3~4	4~5	≥ 5
污染等级	0	1	2	3	4	5	6
污染程度	无污染	无污染—中度污染	中度污染	中度污染—强污染	强污染	强污染—极强污染	极强污染

表2 污染负荷指数等级划分标准

Table 2 Standard of contamination levels by pollution load index

PLI	<1	1~2	2~3	≥ 3
污染等级	0	I	II	III
污染程度	无污染	中等污染	强污染	极强污染

表3 重金属背景值和毒性响应参数

Table 3 Background contents and toxicity response parameters of heavy metals

指标值	Zn	Cr	Ni	Cu	As	Cd	Pb
背景值	144	84.71	68	57.04	15	0.45	26.9
T_r^i	1	2	5	5	10	30	5

注：重金属背景值参考(王岚等, 2012)，毒性响应参数参考(Hakanson, 1980; 徐争启等, 2008; 马建华等, 2020)。

式中, C_0 、 C_n 含义同上文; T_r^i 为各类重金属的毒性响应参数(表3); E_r^i 为单类重金属的潜在生态风险系数; RI 为综合潜在生态危害指数, 大小与重金属种类和毒性响应参数有关, 种类越多, 毒性越强, 则 RI 值越大, 所以用该方法开展潜在生态风险评价时, 需要根据参评种类和数量对其进行调整, 本文参考相关研究(Hakanson, 1980; 马建华等, 2011, 2020; 李一蒙等, 2015; 易雨君等, 2019), 针对性调整了分级阈值(表4)。

3.5 数据处理与分析

所有数据均基于 Microsoft Excel 2013 进行整理, 利用 ArcGIS 10.4 绘制采样点分布图和重金属含量空间分布特征图, 利用 Origin 2018 绘制箱型图, 利用 IBM SPSS 25.0 对数据进行描述性统计分析、相关性分析和主成分分析。

4 分析与结果

4.1 沉积物重金属含量特征

研究区沉积物中各重金属含量平均值由小到大依次为 $Cd < As < Pb < Ni < Cu < Cr < Zn$, 各重金属平均含量与前人研究相近(图2), Pb、Cd 的平均含量高于其背景值, 分别为背景值的 1.17 倍和 2.18 倍, 其余 5 种重金属的平均含量均低于其背景值, 重金属 Ni 的含量均低于背景值。含量变化范围最大的是 Zn(43~319 mg/kg)。与国内其他主要

表4 生态风险评价指标和分级标准

Table 4 Ecological risk assessment indicators and classification criteria

E_r^i	单因子生态风险程度	RI (Hakanson, 1980)	RI (本文)	潜在生态风险程度
$E_r^i < 30$	轻微	$RI < 150$	$RI < 65$	轻微
$30 \leq E_r^i < 60$	中等	$150 \leq RI < 300$	$65 \leq RI < 130$	中等
$60 \leq E_r^i < 120$	强	$300 \leq RI < 600$	$130 \leq RI < 260$	强
$120 \leq E_r^i < 240$	很强	$RI \geq 600$	$RI \geq 260$	极强
$E_r^i \geq 240$	极强			

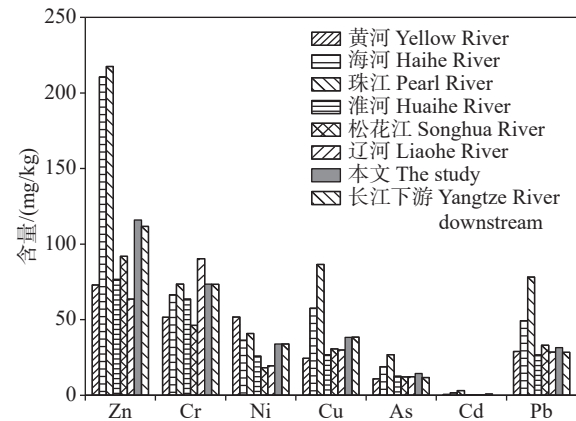


图2 国内主要流域沉积物重金属平均含量对比图
Fig.2 Comparative of heavy metal average contents in sediments of main watershed in China

水系沉积物重金属含量相比(图2), 研究区沉积物 Zn、Cu、As、Pb、Cd 含量低于珠江和海河, Cr 含量低于珠江和辽河, Ni 含量低于黄河、珠江和海河。与 20 世纪 90 年代长江沉积物中重金属含量相比(臧小平等, 1992), 本研究中 As、Zn、Cd 的平均含量均大于其最高值含量, 说明这 3 种重金属存在累积现象。

变异系数(C_v)表示变量变幅和稳定性特征, 变量变幅越小, 稳定性越强, C_v 值越小, 反之亦然(孙岐发等, 2022; 金阳等, 2022), 沉积物重金属在空间上的离散程度可通过变异系数反映(赵秀芳等, 2020)。研究区沉积物重金属变异程度由大到小依次为 $Cd > Cu > As > Pb > Zn > Ni > Cr$, 属于中等变异(表5)。

表 5 研究区沉积物重金属含量特征值 (n=85) (mg/kg)

重金属	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数/%	20世纪90年代长江沉积物	背景值
Cr	49.70	104.00	73.60	11.20	15.21	47.00~99.00	84.71
Ni	19.60	56.80	33.97	6.54	19.24	22.40~44.70	68
As	6.30	36.30	14.41	5.31	36.86	5.69~9.60	15
Pb	13.20	90.40	31.56	10.86	34.42	17.10~33.50	26.9
Zn	43.00	319.00	115.91	39.34	33.94	36.75~107.00	144
Cu	8.90	180.00	38.38	20.28	52.84	15.40~67.10	57.04
Cd	0.12	5.52	0.98	0.82	83.49	0.13~0.44	0.45

沉积物中 7 种重金属含量平均值普遍高于中位数(图 3), 表明 85 个沉积物样品中低浓度数量占优势。异常值均表现为异常高值, Cd、Zn 分别有 3 处高异常点位, 占比 3.53%; Ni、Cu、Pb 分别有 2 处高异常点位, 占比 2.35%, As 有 1 处高异常点位, 占比 1.18%, 分析过程中需重点关注此类采样点。

4.2 沉积物重金属空间分布特征

研究区沉积物重金属含量空间分布显示(图 4): 自上游至下游, As、Pb 整体呈小幅波动下降趋势, 高含量多分布在研究区中上游; Cd 含量呈现较大波动下降趋势, 研究区下游工业发达区含量反而低; Cu、Zn、Cr、Ni 含量呈小幅波动增加趋势, Cu 和 Zn 在整个干流区污染程度较高, Cr 和 Ni 高含量多分布在研究区中游和长江口。

左右岸对比发现, 右岸重金属平均含量普遍高于左岸, 但 As、Cu、Cr、Ni 含量的最大值出现在左岸。Zn 和 Pb、Cr 和 Ni 的含量具有相似的变化趋势线, 推测相关性较大, 可能具有相似的来源。

4.3 重金属污染评价

利用地累积指数法(I_{geo})评估长江下游干流沉

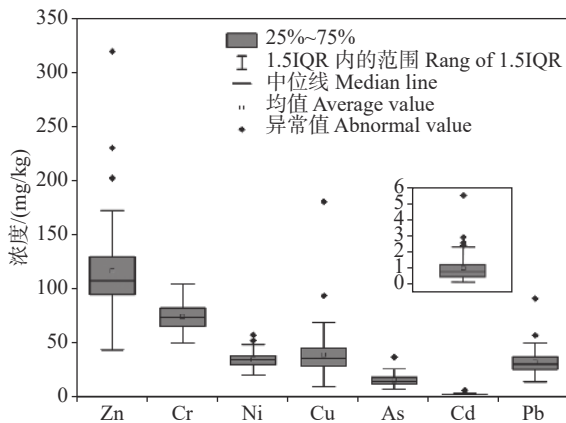


图 3 重金属含量箱型图
Fig.3 Boxplot of heavy metals contents

积物重金属污染情况。由图 5 可知, Cd 的污染程度较其他重金属严重, 污染样品占比 55.30%, 强污染(4 级)、中度污染—强污染(3 级)、中度污染(2 级)和无污染—中度污染(1 级)分别占比 1.18%、1.18%、18.82% 和 34.12%; Pb 和 Cu 污染程度次之, 其中, Pb 中度污染(2 级)和无污染—中度污染(1 级)分别占比 1.18% 和 16.47%, Cu 中度污染(2 级)和无污染—中度污染(1 级)占比均为 1.18%; As 和 Zn 为无污染—中度污染(1 级), 比例分别为 7.06% 和 2.35%; Cr 和 Ni 均为无污染(0 级)。

通过污染负荷法(PLI)对研究区沉积物重金属污染情况进行评估, 长江下游干流 PLI_{area} 值为 0.80, 说明整体处于无污染(0 级)状态, 但图 6 显示局部采样点 PLI_{point} 值介于 1~2, 占比 34.18%, 属于中等污染(I 级)状态, 且右岸污染程度比左岸严重(25:4), 需引起重视。

5 讨论

5.1 沉积物重金属来源解析

相关性分析能衡量两个变量之间的密切程度, 相似的来源会导致重金属之间存在一定关联, 是初步了解重金属之间来源相同与否的有效工具(郭杰等, 2021)。利用 IBM SPSS 25 计算研究区沉积物重金属 Pearson 相关性, 结果表明, Zn 与 Cu、As、Pb 显著正相关($P < 0.01$), 相关系数分别为 0.522、0.453、0.614, 说明关系密切; Cr 和 Ni 显著正相关($P < 0.01$), 相关系数为 0.811(> 0.7), 说明相关性非常紧密, 可能具有同源性或经历相同路径(Ma et al., 2016)。Cd 与 As 相关系数为 0.493, 二者可能存在一定联系(表 6)。

主成分分析法(Principal Component Analysis, PCA)常用来判定沉积物中重金属来源, 本文利用专业软件 IBM SPSS Statics 25 对沉积物中 7 种重金

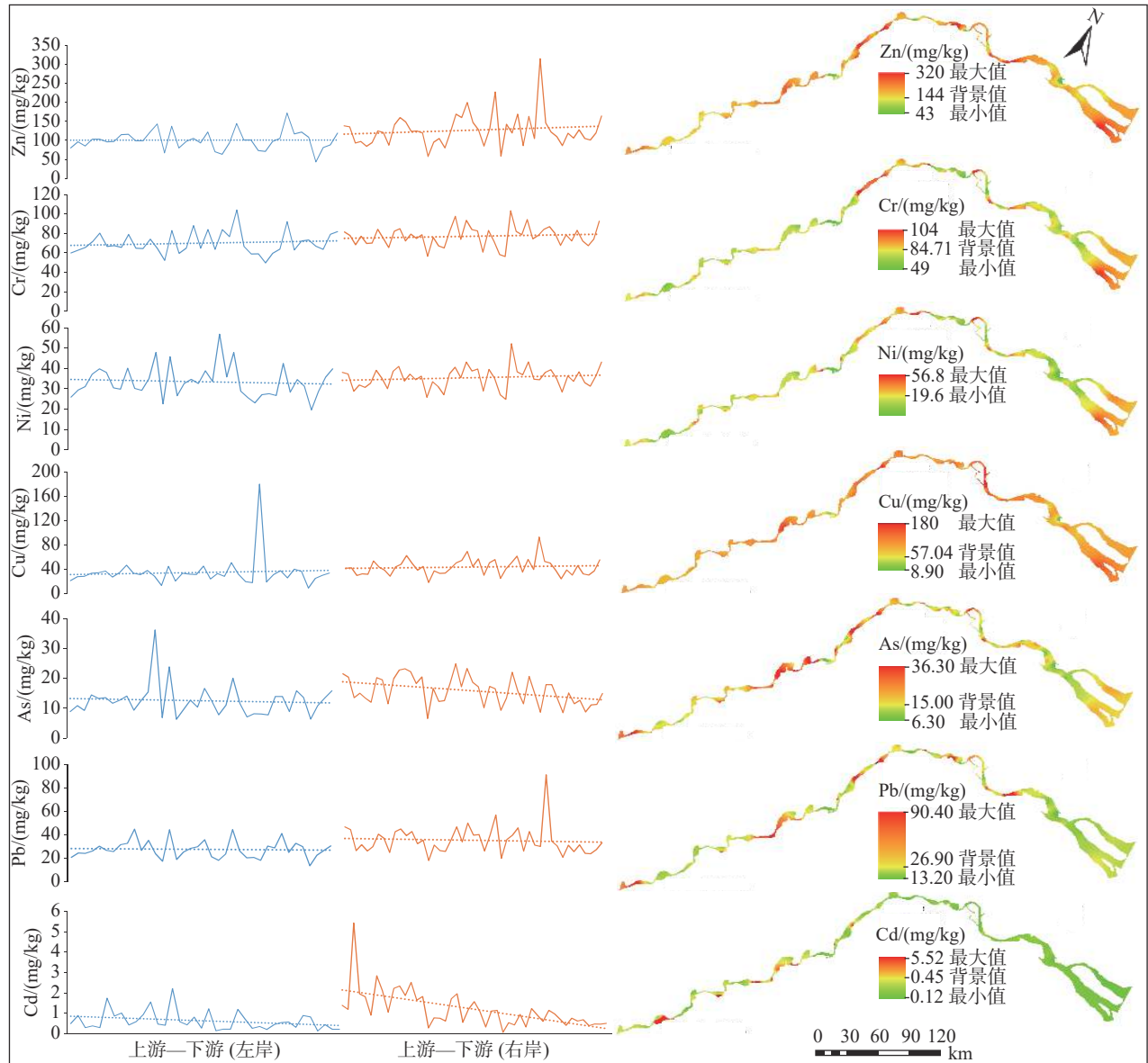


图4 沉积物重金属空间分布图
Fig.4 Spatial distribution of heavy metals in sediment

属进行基于主成分法的因子分析, KMO 和 Bartlett 球形度检验结果分别为 0.732 (> 0.7) 和 0.000 (< 0.05), 因子分析适用于本次研究 (Wang et al., 2017)。为更好地解析各因子的实际含义, 对各因子用最大方差法进行旋转, 得出旋转后的成分矩阵 (表 7)。研究区 7 种重金属共提取了 3 个主成分, 揭示了研究区沉积物中 80.165% 的影响因子, 主成分 1、主成分 2 和主成分 3 分别揭示了总因子的 52.269%、14.451% 和 13.445%, 有效反映了原始数据的大部分信息。

Cu、Zn、As、Pb 是主成分 1 上具有较高正载荷的重金属, 相关性显著, 且都具有相对较高的变异系数 (表 5), 表明具有相似的来源或受到相近作用影响。一方面, 长江沿岸受阶梯地貌分布影响, 大中城市及工农业发展主要集中于长江中下游地区 (Zhang et al., 2018), 研究区 (特别是上海、苏南地区), 工业密集, 人口稠密, 交通发达, 汽车轮胎磨损和尾气排放是环境中 Zn、Cu 和 Pb 的重要来源之一 (于瑞莲等, 2013; Tian et al., 2015; Singh et al., 2018); 农药和杀虫剂中也含有 Zn、Pb 和 Cu (Jørgensen et al., 2005; Shomar, 2006; 张莉等, 2014)。另一方面,

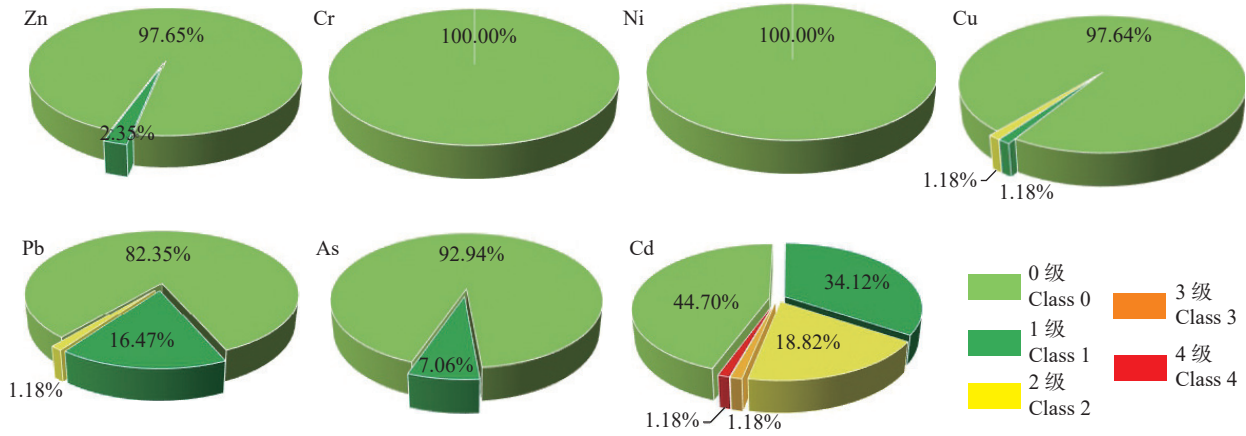


图 5 重金属地累积指数等级占比图
Fig.5 Proportions of geoaccumulation levels of each heavy metal

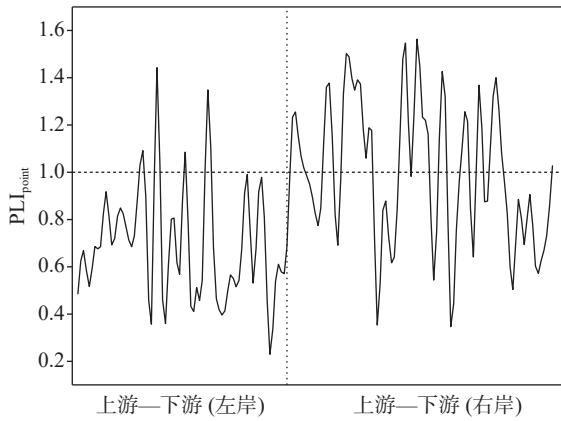


图 6 各采样点污染负荷指数沿程变化图
Fig.6 Variation of pollution load index along the sampling sites
多金属矿、煤、铝土矿、碳酸盐岩和玄武岩等岩石矿产中重金属随矿物的风化分解而释放出来,以无机络合物、悬浮态、吸附态以及部分离子态形式迁移,矿产资源的开采、冶炼和尾矿废水排放是 As 和 Cu 的重要来源(王岚等, 2012; 易雨君等, 2019)。研究区 As 含量最大值位于铜陵矿区顺安河入江口的下游地区,推测与悬浮物被长江水流裹

挟至下游地区富集有关。航运船只燃料的使用和“跑冒滴漏”也是 As 的来源之一(曹胜伟等, 2022)。因此, Cu、Zn、As、Pb 具有多源性,主成分 1 表征与人类活动相关的交通源、农业源和工矿源等复合来源。

主成分 2 在 Cr、Ni 具有较高的正载荷,变异系数低于主成分 1 中 Cu、Zn、As、Pb,相关性非常显著(0.811)。沉积物中 Cr 含量与母岩 Cr 含量有关,岩石含 Cr 量随岩石基性程度的升高而升高,从超基性、基性、中性到酸性岩石, Cr 含量从 2000 mg/kg、200 mg/kg、50 mg/kg 到 25 mg/kg,在表层地球化学中, Cr、Ni 都为亲铁元素(周艳等, 2018), Cr、Ni 被大气降水和地表水裹挟汇入长江发生沉积作用,同时,农业活动中化肥农药的使用对 Cr、Ni 影响小于土壤本底值(李春芳等, 2017),研究区 Cr、Ni 含量与背景值相近,说明岩土风化和大气沉降等自然源是其来源之一(Wang et al., 2015; Ke et al., 2017),与 Hu et al.(2013)研究认为 Cr、Ni 与天然矿物风化密切相关的结论一致。以冶金、电镀等

表 6 沉积物重金属相关性分析

Table 6 Pearson correlation of heavy metals in sediment

重金属	Zn	Cr	Ni	Cu	As	Cd	Pb
Zn	1						
Cr	0.522**	1					
Ni	0.423**	0.811**	1				
Cu	0.453**	0.222*	0.262*	1			
As	0.499**	0.594**	0.632**	0.235*	1		
Cd	0.251*	0.287**	0.149	0.098	0.493**	1	
Pb	0.614**	0.585**	0.447**	0.302**	0.601**	0.394**	1

注: **在0.01级别(双尾), 相关性显著; *在0.05级别(双尾), 相关性显著。

表 7 沉积物重金属主成分分析结果
Table 7 PCA results of heavy metals in sediments

重金属	主成分		
	1	2	3
Zn	0.680	0.412	0.276
Cr	0.169	0.891	0.187
Ni	0.146	0.932	0.017
Cu	0.914	0.057	-0.018
As	0.584	0.242	0.554
Cd	0.06	0.028	0.939
Pb	0.508	0.491	0.423
特征根	3.659	1.012	0.941
方差贡献率/%	52.269	14.451	13.445
累积贡献率/%	51.428	66.720	80.165

注：使用凯撒正态化最大方差法对因子载荷进行旋转。

行业为主的城市废水排放(Tam and Yao, 1998)和煤炭等化石燃料的燃烧(林承奇等, 2020)也是 Cr 的重要来源。因此,主成分 2 表征工业来源和以地球化学为主的自然来源。

主成分 3 在 Cd 的载荷最大,而且高含量主要分布在研究区上游段(图 4),与传统认为苏南地区等下游段电镀业发达而导致 Cd 污染严重的结论不太一致,推测与产业结构布局转移和下游段地市管控严格等有关,如上海奉贤严禁小化工及涉重金属排放等环境劣势企业落户,并开展严格督查。Cd 一般可作为农药和化肥施用等农业活动的标识性元素(Condrón and Goh, 1989; Filzek et al., 2004),沉积物中的 Cd 含量与全磷含量有着显著相关性,在磷矿中含有痕量的 Cd(Loska and Wiechula, 2003),杀虫剂和磷肥过量施用可能导致环境中 Cd 累积(Maanan et al., 2015; Wang et al., 2015; Zhang et al., 2016)。研究区 Cd 含量普遍高于背景值,且不同区域波动大,可能与城市生活污水排放有关(曹胜伟等, 2022)。有研究表明,河流底泥与悬浮物对水中的 Cd 有很强的吸附作用,底泥对 Cd 的浓集系数为 5000~50000,腐殖质对 Cd 的浓集系数远大于 SiO₂ 和高岭石对 Cd 的浓集系数,是水中 Cd 离子的主要吸附剂,长江下游各支流悬浮物及对应点沉积物 Cd 含量均明显大于干流,特别是铜陵地区的顺安河及其支流新桥河和普济河中悬浮物和沉积物中 Cd 含量极高。主成分 3 表征以农业和矿业为主的人为活动来源。

5.2 潜在生态风险评价

潜在生态风险评价结果(图 7)显示,研究区沉积物重金属潜在生态风险 RI 介于 19.48~388.62,

轻微潜在生态风险、中等潜在生态风险、强潜在生态风险和极强潜在生态风险占比分别为 38.82%、42.35%、17.65% 和 1.18%,各重金属对 RI 的贡献率依次为 Cd> As> Pb> Ni> Cu> Cr> Zn。轻微潜在生态风险、中等潜在生态风险主要分布在长江干流南京—上海段,强潜在风险主要分布在东至—马鞍山段及南京附近,主要原因是重金属 Cr 的毒性响应参数远大于其他重金属,芜湖—南京、铜陵—贵池、九江—瑞昌、庐江—枞阳以及安庆地区等 5 个长江下游主要矿集区开采过程中造成重金属 Cd 含量的增加,而研究区下游南京—上海段工业发达区产生的其他重金属毒性响应参数较小。

右岸潜在生态风险明显高于左岸,中等及以上风险的点位数量分别为 38 处和 14 处,与前文污染负荷评价(PLI_{point})中右岸污染程度比左岸严重相一致。左岸强潜在生态风险区位于安庆市和裕溪口附近,右岸强潜在生态风险多分布在江西和安徽段,特别是铜陵—马鞍山段,主要与矿业开采和工业“三废”不合理排放有关。

重金属的单指标潜在风险指数(图 8)表明,Cd 处于中等风险($30 \leq E_i < 60$)和强风险($60 \leq E_i < 120$),其余 6 种重金属均处于轻微风险($E_i < 30$),这一结果与前文地累积指数评价 Cd 的污染程度最严重相似。右岸每种重金属平均潜在风险均超过左岸。

重金属污染程度与潜在生态风险之间存在一定关联,二者整体表现为正反馈效应,即污染程度越大,潜在生态风险越大,如地累积指数评价 Cd 污染最严重(图 5)与潜在生态风险中 Cd 贡献度最大(图 7)相一致,污染负荷评价各点污染程度与各点潜在生态风险程度基本一致(图 9)。但值得注意的是,地累积指数评价 Cu、Ni 为无污染(图 5),但二者仍存在轻微潜在生态风险(图 8),图 9 中存在“PLI 为无污染,RI 为中等风险”和“PLI 为中等污染,RI 为轻微风险”等污染程度与潜在生态风险等级之间不完全对应关系,初步认为主要原因有三:一是潜在生态风险评价中毒理学参数权重过大,二是沉积物重金属背景值的选取不同,三是潜在生态风险分级的 RI 阈值不同(李一蒙等, 2015; 易雨君等, 2019; 马建华等, 2020)。本次研究区跨度大,且研究细化程度不够,如未考虑多种重金属之间拮抗

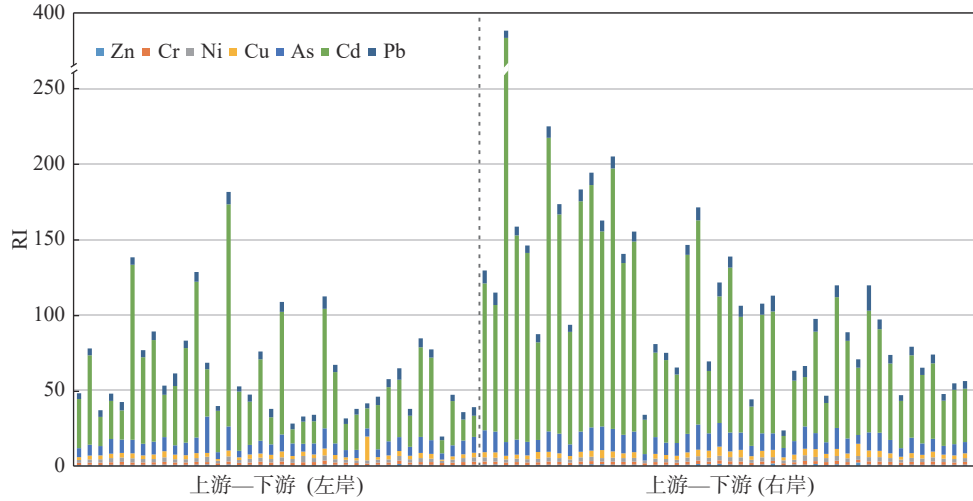


图 7 潜在生态风险(RI)及各重金属贡献度
Fig.7 Potential ecological risk (RI) and contribution of each heavy metal

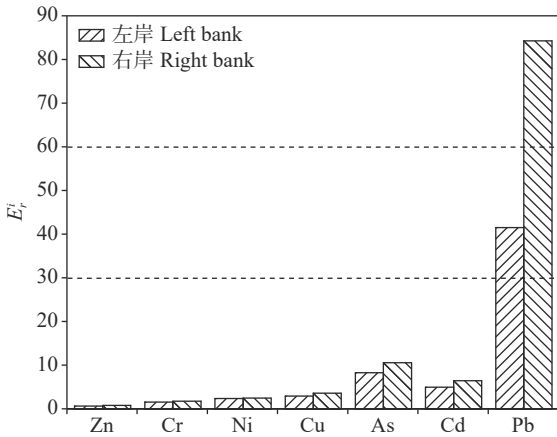


图 8 左右岸重金属单指标潜在生态风险(E_r^i)对比图
Fig.8 Comparison diagram of single index potential ecological risk (E_r^i) between left and right bank

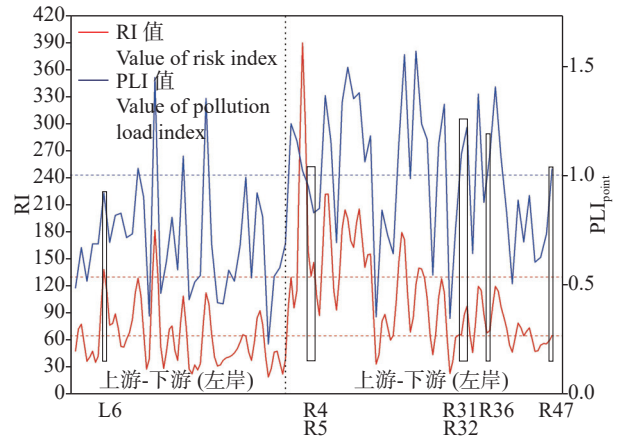


图 9 潜在生态风险(RI 值)与污染程度(PLI 值)关系
Fig.9 Relationship between potential ecological risk (RI) and pollution level (PLI)

或协同等复杂作用、沉积环境理化性质对重金属形态(叶宏萌等, 2012)及释放迁移等影响(王亚平等, 2012), 可能导致生态风险与实际情况存在一定偏差。

6 结 论

(1) 长江下游干流沉积物中重金属含量较低, 7 种重金属中仅 Pb 和 Cd 的平均含量高于其背景值, As、Zn、Cd 较 20 世纪 90 年代有明显累积现象。

(2) 自上游至下游, Cd 含量呈现较大波动下降趋势, As、Pb 含量整体呈小幅波动下降趋势, Cu、Zn、Cr、Ni 含量呈小幅波动增加趋势; 右岸重金属平均含量普遍高于左岸, 但左岸分布 As、Cu、Cr、

Ni 的最大含量。

(3) Cu、Zn、As、Pb 相关性显著, 主要来源于交通源、农业源和工矿源为主的复合人类活动, Cr、Ni 相关性非常显著, 受地球化学影响明显, 主要来源于工业活动和岩土矿物风化; Cd 则主要来源于农业活动中杀虫剂和磷肥的使用, 未表现出明显的工业来源。

(4) 长江下游干流区域整体处于无污染状态, 但局部地段表现为中等污染, 右岸污染程度明显重于左岸。Cd 的污染程度最严重, Pb、Zn、Cu 次之, As 和 Zn 为无污染—中度污染, Cr 和 Ni 为无污染。沉积物重金属的潜在生态风险等级主要为轻

微、中等和强, Cd 对潜在生态风险的贡献度最大, 右岸潜在生态风险明显高于左岸, 综合更多影响因素的风险评价有待进一步研究。

致谢: 论文审稿过程中匿名专家及编辑老师提出建设性的修改意见, 对提升论文质量起到了十分重要作用, 在此一并表示诚挚的感谢; 感谢许老师对英文内容的指导和修改。

References

- Ali M M, Rahman S, Islam M S, Rakib M R J, Hossen S, Rahman M Z, Kormoker T, Idris A M, Phoungthong K. 2022. Distribution of heavy metals in water and sediment of an urban river in a developing country: A probabilistic risk assessment[J]. *International Journal of Sediment Research*, 37(2): 173–187.
- Bao Liran, Deng Hai, Jia Zhongmin, Li Yu, Dong Jinxiu, Yan Mingshu, Zhang Fenglei. 2020. Ecological and health risk assessment of heavy metals in farmland soil in northwest Xiushan, Chongqing[J]. *Geology in China*, 47(6): 1625–1636 (in Chinese with English abstract).
- Cao Shengwei, Liu Chunlei, Li Yasong, Li Jing, Hao Qichen, Gao Jie, Dong Yan, Lu Chenming. 2022. Sources and ecological risk of heavy metals in the sediments of offshore area in Quanzhou Bay, Fujian Province[J]. *Geology in China*, 49(5): 1481–1496 (in Chinese with English abstract).
- Condon L, Goh K. 1989. Effects of long-term phosphatic fertiliser applications on amounts and forms of phosphorus in soils under irrigated pasture in New Zealand[J]. *Journal of Soil Science*, 40: 383–395.
- Dai Jierui, Pang Xugui, Song Jianhua, Dong Jian, Hu Xueping, Li Xiaopeng. 2018. A study of geochemical characteristics and ecological risk of elements in soil of urban and suburban areas of Zibo City, Shandong Province[J]. *Geology in China*, 45(3): 617–627 (in Chinese with English abstract).
- Dong Yaohua, Wang Xiuli. 2017. Method of river segmentation with five subzones and its application to the Changjiang River segmentation[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 34(6): 1–6 (in Chinese with English abstract).
- Duan Xuejun, Wang Xiaolong, Xu Xibao, Huang Qun, Xiao Fei. 2019. Major problems and countermeasures of ecological protection on the waterfront resources along the Yangtze River[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 28(11): 2641–2648 (in Chinese with English abstract).
- Fan Shuanxi, Gan Zhuoting, Li Meijuan, Zhang Zhangquan, Zhou Qi. 2010. Progress of assessment methods of heavy metal pollution in soil[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 26(17): 310–315 (in Chinese with English abstract).
- Fang Zhiqing, Chen Qiuyu, Yin Deliang, Wang Zhikang, Sun Tao, Wang Yongmin, Xie Deti, Wang Dingyong. 2018. Distribution characteristics and risk assessment of heavy metals in the sediments of the estuary of the tributaries in the Three Gorges Reservoir, SW China[J]. *Environmental Science*, 39(6): 2607–2614 (in Chinese with English abstract).
- Filzek P D B, Spurgeon D J, Broll G, Svendsen C, Hankard P K, Kammenga J E, Donker M H, Weeks J M. 2004. Pedological characterisation of sites along a transect from a primary cadmium/lead/zinc smelting works[J]. *Ecotoxicology*, 13(8): 725–737.
- Guo Hua, Hu Qi, Zhang Qi, Feng Song. 2012. Effects of the three gorges dam on Yangtze river flow and river interaction with Poyang Lake, China: 2003–2008[J]. *Journal of Hydrology*, 416: 19–7.
- Guo Jie, Wang Ke, Yu Qi, Duan Xinbin, Liu Shaoping, Chen Daqing. 2021. Pollution characteristics of the heavy metals and their potential ecological risk assessment in nearshore sediments of the middle reaches of the Yangtze River[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 41(11): 4625–4636 (in Chinese with English abstract).
- Hakanson L. 1980. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach[J]. *Water Research*, 14(8): 975–1001.
- Hu Y, Liu X, Bai J, Shi H K, Zeng E Y, Cheng H. 2013. Assessing heavy metal pollution in the surface soils of a region that had undergone three decades of intense industrialization and urbanization[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 20(9): 6150–6159.
- Huang Changsheng, Zhou Yun, Zhang Shengnan, Wang Jietao, Liu Fengmei, Gong Chong, Yi Chengyun, Li Long, Zhou Hong, Wei Liangshuai, Pan Xiaodong, Shao Changsheng, Li Yiyong, Han Wenjing, Yin Zhibin, Li Xiaozhe. 2021. Groundwater resources in the Yangtze River Basin and its current development and utilization[J]. *Geology in China*, 48(4): 979–1000 (in Chinese with English abstract).
- Huang Hongwei, Xiao He, Wang Dunqiu, Xi Beidou, Sun Xiaojie, Li Jieyue, Li Xiangkui. 2021. Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in the water of Lijiang River Basin [J]. *Environmental Science*, 42(4): 1714–1723 (in Chinese with English abstract).
- Jaskula J, Sojka M. 2022. Assessment of spatial distribution of sediment contamination with heavy metals in the two biggest rivers in Poland[J]. *Catena*, 211: 105959.
- Jiang Yuehua, Ni Huayong, Zhou Quanping, Cheng Zhiyan, Duan Xuejun, Zhu Zhimin, Wu Jichun, Ren Haiyan, Fan Chenzi, Yang Jinwei, Chen Chao, Hu Jian, Wang Xiaolong, Jiang Xiaye, Liu Yongbing, Yang Hai, Guo Wei, Feng Naiqi, Wei Guangqing, Jin Yang, Yang Hui, Liu Lin, Mei Shijia, Zhang Hong, Chen Pengjun, Yuan Jihai, Qi Qiuju, Lü Jinsong, Gu Xuan, Liu Peng. 2021. Key technologies of ecological restoration demonstration in the yangtze river economic zone and their application[J]. *Geology in China*, 48(5): 1305–1333 (in Chinese with English abstract).
- Jin Yang, Jiang Yuehua, Dong Xianzhe, Yang Guoqiang, Liu Hongying, Lei Changzheng, Zhou Quanping, Zhang Hong, Mei Shijia, Yang Hui, Lü Jinsong, Li Yun. 2022. Chemical characteristics and eco-environmental effect of groundwater in Ningbo Plain, Zhejiang Province[J]. *Geology in China*, 48(5): 1305–1333 (in Chinese with English abstract).
- Jørgensen N, Laursen J, Viksna A, Pind N, Holm P E. 2005. Multi-elemental EDXRF mapping of polluted soil from former horticultural land[J]. *Environment International*, 31(1): 43–52.
- Ke X, Gui S F, Huang H, Zhang H J, Wang C Y, Guo W. 2017. Ecological risk assessment and source identification for heavy metals in surface sediment from the Liaohe River protected area, China[J]. *Chemosphere*, 175: 473–481.

- Li Chunfang, Wang Fei, Cao Wentao, Pan Jian, Lü Jianshu, Wu Quanyuan. 2017. Source analysis, spatial distribution and pollution assessment of heavy metals in sewage irrigation area farmland soils of Longkou City[J]. *Environmental Science*, 38(3): 1018–1027 (in Chinese with English abstract).
- Li H H, Chen L J, Yu L, Guo Z H, Shan C Q, Lin J Q, Gu Y G, Yang Z B, Yang Y X, Shao J R, Zhu X M, Cheng Z. 2017. Pollution characteristics and risk assessment of human exposure to oral bioaccessibility of heavy metals via urban street dusts from different functional areas in Chengdu, China[J]. *Science of the Total Environment*, 586: 1076–1084.
- Li Jing, Wu Huawu, Zhou Yongqiang, Zhao Zhonghua, Wang Xiaolong, Cai Yongjiu, He Bin, Chen Wen, Sun Wei. 2020. Variations of stable oxygen and deuterium isotopes in river and lake waters during flooding season along the middle and lower reaches of the Yangtze River Regions[J]. *Environmental Science*, 41(3): 1176–1183 (in Chinese with English abstract).
- Li Juanjuan, Ma Jintao, Chu Xiujuan, Wang Shaobo, Wu Heng, Wang Zhaohong. 2006. Application of index of geo-accumulation and enrichment factor in safety assessment of heavy-metal contamination in soil of copper refining[J]. *China Safety Science Journal*, 16(12):135–139, 170 (in Chinese with English abstract).
- Li Ping, Huang Yong, Lin Yun, Hua Peixue, Yuan Guoli. 2018. Distribution, source identification and risk assessment of heavy metals in topsoil of Huairou District in Beijing[J]. *Geoscience*, 32(1): 86–94 (in Chinese with English abstract).
- Li Yimeng, Ma Jianhua, Liu Dexin, Sun Yanli, Chen Yanfang. 2015. Assessment of heavy metal pollution and potential ecological risks of urban soils in Kaifeng City, China[J]. *Environmental Science*, 36(3): 1037–1044 (in Chinese with English abstract).
- Lin Chengqi, Chen Fenghua, Hu Gongren, Yu Ruilian, Huang Huabin. 2020. Source apportionment of heavy metals in surface sediments of the Jiulong River estuary based on positive matrix factorization[J]. *Earth and Environment*, 48(4): 42–50 (in Chinese with English abstract).
- Liu Min, Deng Wei, Zhao Liangyuan, Hu Yuan, Huang Huawei, Gao Fei. 2021. Distribution characteristics and sources of heavy metals in surface sediments and bank soils of major rivers in source region of Yangtze River[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 38(7): 143–149, 154 (in Chinese with English abstract).
- Liu Qingqing, Yang Zhongfang, Zhou Guohua, Xia Xueqi, Hou Qingye, Yu Tao, Zhai Daxing. 2012. Distribution, sources and impact factors of arsenic in the major rivers of Eastern China[J]. *Geoscience*, 26(1): 114–124 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yan, Su Huai, Li Weikang, Dong Ming. 2022. Distribution characteristics and ecological risk assessment of heavy metal pollution in floodplain sediments of Xiaojiang River basin in Dongchuan[J]. *Journal of Southwest Forestry University*, 42(4): 96–105 (in Chinese with English abstract).
- Loska K, Wiechula D. 2003. Application of principal component analysis for the estimation of source of heavy metal contamination in surface sediments from the Rybnik Reservoir[J]. *Chemosphere*, 51(8): 723–733.
- Lü Da, Zheng Xiangmin, Zhou Liwen, Lü Jinmei, Wang Yongjie. 2007. Magnetic diagnosis of heavy metal pollution in sediments of Chongming Wetland[J]. *Research of Environmental Sciences*, 20(6): 38–43 (in Chinese with English abstract).
- Ma Chao, Gu Yansheng, Liu Chungen, Zuo Zufa. 2018. Characteristics of Holocene phytolith assemblage in the southeast of Poyang Lake and its paleoenvironmental implications[J]. *East China Geology*, 39(3): 187–193 (in Chinese with English abstract).
- Ma Jianhua, Han Changxu, Jiang Yuling. 2020. Some problems in the application of potential ecological risk index[J]. *Geographical Research*, 39(6): 1233–1241 (in Chinese with English abstract).
- Ma Jianhua, Wang Xiaoyun, Hou Qian, Duan Haijing. 2011. Pollution and potential ecological risk of heavy metals in surface dust on urban kindergartens[J]. *Geographical Research*, 30(3): 486–495 (in Chinese with English abstract).
- Ma L, Yang Z G, Li L, Wang L. 2016. Source identification and risk assessment of heavy metal contaminations in urban soils of Changsha, a mine-impacted city in Southern China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(17): 17058–17066.
- Maanan M, Saddik M, Maanan M, Chaibi M, Assobhei O, Zourarah B. 2015. Environmental and ecological risk assessment of heavy metals in sediments of Nador lagoon, Morocco[J]. *Ecological Indicators*, 48: 616–626.
- Müller G. 1969. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. *GeoJournal*, 2(3): 108–118.
- Shan Lili, Yuan Xuyin, Mao Changping, Ji Junfeng. 2008. Characteristics of heavy metals in sediments from different sources and their ecological risks in the downstream of the Yangtze River[J]. *Environmental Science*, 29: 2399–2404 (in Chinese with English abstract).
- Shomar B. 2006. Trace elements in major solid-pesticides used in the Gaza Strip[J]. *Chemosphere*, 65(5): 898–905.
- Singh D V, Bhat J I A, Bhat R A, Dervash M A, Ganei S A. 2018. Vehicular stress a cause for heavy metal accumulation and change in physico-chemical characteristics of road side soils in Pahalgam[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190(6): 1–10.
- Sun Qifa, Sun Zhuoan, Jia Lingang, Tian Hui, Guo Xiaodong, Li Xuguang, Zhu Wei. 2022. Characteristics of groundwater quality in Changchun New District and its evaluation on ecological health[J]. *Geology in China*, 49(3): 834–848 (in Chinese with English abstract).
- Tam N, Yao M. 1998. Normalisation and heavy metal contamination in mangrove sediments[J]. *Science of the Total Environment*, 216 (1/2): 33–39.
- Tian H, Zhu C, Gao J, Cheng K, Hao M J, Wang K, Hua S B, Wang Y, Zhou J R. 2015. Quantitative assessment of atmospheric emissions of toxic heavy metals from anthropogenic sources in China: Historical trend, spatial distribution, uncertainties, and control policies[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15(17): 10127–10147.
- Tomlinson D L, Wilson J G, Harris C R, Jeffrey D W. 1980. Problems in the assessment of heavy-metal levels in estuaries and the formation of a pollution index[J]. *Helgolander Marine Research*, 33(1): 566–575.
- Wang Jie, Liu Guijian, Fang Ting, Yuan Zijiao. 2013. Assessment of pollution characteristics of heavy metals in the sediments of Huaihe River (Anhui Section) by pollution load index[J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 42(2): 97–103 (in Chinese with English abstract).

- Wang J, Liu G J, Liu H Q, Lam P K S. 2017. Multivariate statistical evaluation of dissolved trace elements and a water quality assessment in the middle reaches of Huaihe River, Anhui, China[J]. *Science of the Total Environment*, 583: 421–431.
- Wang Lan, Wang Yaping, Xu Chunxue, An Ziyi. 2012. Pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in the surface sediments of the Yangtze River[J]. *Environmental Science*, 33(8): 2599–2606 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yaping, Wang Lan, Xu Chunxue, Ji Junfeng, Wang Suming. 2012. The influence of pH on the release behavior of heavy metal elements Cd and Pb in the sediments of the lower reaches of the Yangtze River[J]. *Geological Bulletin of China*, 31(4): 594–600 (in Chinese with English abstract).
- Wang Y Q, Yang L Y, Kong L H, Liu E F, Wang L F, Zhu J R. 2015. Spatial distribution, ecological risk assessment and source identification for heavy metals in surface sediments from Dongping Lake, Shandong, East China[J]. *Catena*, 125: 200–205.
- Weislo E, Ioven D, Rafal K, Szdzej J. 2002. Human health risk assessment case study: an abandoned metal smelter site in Poland[J]. *Chemosphere*, 47(5):507–515.
- Xu Jinying, Zou Hui, Wang Jingbo, Guo Yufei, Wang Xiaolong. 2021. Pollution status and potential sources of main heavy metals in the main stream of the Yangtze River[J]. *East China Geology*, 42(1): 21–28 (in Chinese with English abstract).
- Xu Zhengqi, Ni Shijun, Tuo Guoxian, Zhang Chengjiang. 2008. Calculation of heavy metals' toxicity coefficient in the evaluation of pollution ecological risk index[J]. *Environmental Science & Technology*, 31(2):112–115(in Chinese with English abstract).
- Ye C, Butler O M, Du M, Liu W Z, Zhang Q F. 2019. Spatio-temporal dynamics, drivers and potential sources of heavy metal pollution in riparian soils along a 600 kilometre stream gradient in Central China[J]. *Science of the Total Environment*, 651: 1935–1945.
- Ye Hongmeng, Yuan Xuyin, Zhao Jing. 2012. Spatial migration and environmental effects of heavy metals in river sediments from in the Tongling mining area, Anhui Province[J]. *Environmental Science*, 32(10): 1853–1859 (in Chinese with English abstract).
- Yi Yujun, Wang Wenjun, Song Jie. 2019. Pollution characteristics, potential ecological risk assessment and source analysis of heavy metals of sediment in the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 50(2): 1–7 (in Chinese with English abstract).
- Yin S, Feng C H, Li Y Y, Yin L F, Shen Z Y. 2015. Heavy metal pollution in the surface water of the Yangtze Estuary: A 5-year follow-up study[J]. *Chemosphere*, 138: 718–725.
- Yu Ruilian, Hu Gongren, Zheng Zhimin, Lin Chengqi. 2013. Composition variations and sources of Pb isotopes in the intertidal core sediment from Luoyang estuary of Quanzhou Bay[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 33(6): 1756–1762 (in Chinese with English abstract).
- Zang Xiaoping, Guo Liping, Chen Hongzhang, Ma Ling, Liu Yanan. 1992. A preliminary study on the background values and pollution status of twelve metal elements in the bottom sediments of the main stream of Yangtze River[J]. *Environmental Monitoring in China*, 84(4): 18–20 (in Chinese with English abstract).
- Zhai Wanying, Ouyang Xuejiao, Zhou Wewi, Yu Da, Zheng Hongyan. 2017. Spatial distribution and risk assessment of heavy metals in the nearshore sediments in main stream of Yangtze River[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 37(11): 4195–4201 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Hong, Zhou Quanping, Jiang Yuehua, Jin Yang, Yang Guoqiang, Gu Xuan, Mei Shijia, Wang Xiaolong. 2022. Hydrochemical origins and weathering-controlled CO₂ consumption rates in the mainstream of the Yangtze River[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 49: 30–40 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Li, Qi Shihua, Qu Chengkai, Liu Hongxia, Chen Wenwen, Li Feng, Hu Ting, Huang Huanfang. 2014. Distribution, source and health risk assessment of heavy metals in the water of Jiulong River, Fujian[J]. *China Environmental Science*, 34: 2133–2139 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qian, Liu Xiangwei, Shui Yong, Wang Ting. 2021. Distribution of heavy metals in the upstream of Yellow River and ecological risk assessment[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 57(2): 333–340 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Z X, Lu Y, Li H P, Tu Y, Liu B Y, Yang Z G. 2018. Assessment of heavy metal contamination, distribution and source identification in the sediments from the Zijiang River, China[J]. *Science of the Total Environment*, 645(15): 235–243.
- Zhang Z Y, Li J Y, Mamat Z, Ye Q F. 2016. Sources identification and pollution evaluation of heavy metals in the surface sediments of Bortala River, Northwest China[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 126: 94–101.
- Zhang Zhiyong, Wan Chengyan, Hu Hongqing, Yang Zhihua, Yuan Yujie, Zhu Wen. 2023. Spatial distribution and risk assessment of heavy metals in surface sediments from the middle and upper reaches of the Yangtze River[J]. *Environmental Science*, 44(2):770–780 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Xiufang, Zhang Yongshuai, Feng Aiping, Wang Yixuan, Xia Lixian, Wang Honglei, Du Wei. 2020. Geochemical characteristics and environmental assessment of heavy metal elements in agricultural soil of Anqiu area, Shangdong Province[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 44(6): 1446–1454 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Z H, Gong X H, Zhang L, Jin M, Wang X L. 2021. Riverine transport and water-sediment exchange of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) along the middle-lower Yangtze River, China[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 403: 123973.
- Zhou Yan, Chen Qiang, Deng Shaopo, Wan Jinzhong, Zhang Shengtian, Long Tao, Li Qun, Lin Yusuo, Wu Yunjin. 2018. Principal component analysis and ecological risk assessment of heavy metals in farmland soils around a Pb-Zn mine in southwestern, China[J]. *Environmental Science*, 39(6): 2884–2892 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 鲍丽然, 邓海, 贾中民, 李瑜, 董金秀, 严明书, 张风雷. 2020. 重庆秀山西北部农田土壤重金属生态健康风险评估[J]. *中国地质*, 47(6): 1625–1636.
- 曹胜伟, 刘春雷, 李亚松, 李静, 郝奇琛, 高婕, 董岩, 陆晨明. 2022. 福建泉州湾近岸海域沉积物重金属来源分析与生态风险评估[J]. *中国地质*, 49(5): 1481–1496.
- 代杰瑞, 庞绪贵, 宋建华, 董建, 胡雪平, 李肖鹏. 2018. 山东淄博城市和近郊土壤元素地球化学特征及生态风险研究[J]. *中国地质*,

- 45(3): 617-627.
- 董耀华, 汪秀丽. 2017. 河流 5 区分段方法与长江干流分段实践[J]. 长江科学院院报, 34(6): 1-6.
- 段学军, 王晓龙, 徐昔保, 黄群, 肖飞. 2019. 长江岸线生态保护的重大问题及对策建议[J]. 长江流域资源与环境, 28(11): 2641-2648.
- 范拴喜, 甘卓亭, 李美娟, 张掌权, 周旗. 2010. 土壤重金属污染评价方法进展[J]. 中国农学通报, 26(17): 310-315.
- 方志青, 陈秋禹, 尹德良, 王志康, 孙涛, 王永敏, 谢德体, 王定勇. 2018. 三峡库区支流河口沉积物重金属分布特征及风险评价[J]. 环境科学, 39(6): 2607-2614.
- 郭杰, 王珂, 于琪, 段辛斌, 刘绍平, 陈大庆. 2021. 长江中游近岸表层沉积物重金属污染特征分析及风险评估[J]. 环境科学学报, 41(11): 4625-4636.
- 黄长生, 周耘, 张胜男, 王节涛, 刘凤梅, 龚冲, 易秤云, 李龙, 周宏, 魏良帅, 潘晓东, 邵长生, 黎义勇, 韩文静, 尹志彬, 李晓哲. 2021. 长江流域地下水资源特征与开发利用现状[J]. 中国地质, 48(4): 979-1000.
- 黄宏伟, 肖河, 王敦球, 席北斗, 孙晓杰, 李洁月, 李向奎. 2021. 漓河流域水体中重金属污染特征及健康风险评价[J]. 中国地质, 42(4): 1714-1723.
- 姜月华, 倪化勇, 周权平, 程知言, 段学军, 朱志敏, 吴吉春, 任海彦, 范晨子, 杨晋炜, 陈超, 胡建, 王晓龙, 姜夏烨, 刘永兵, 杨海, 郭威, 冯乃琦, 魏广庆, 金阳, 杨辉, 刘林, 梅世嘉, 张鸿, 陈澎军, 袁继海, 齐秋菊, 吕劲松, 顾轩, 刘鹏. 2021. 长江经济带生态修复示范关键技术及其应用[J]. 中国地质, 48(5): 1305-1333.
- 金阳, 姜月华, 董贤哲, 杨国强, 刘红樱, 雷长征, 周权平, 张鸿, 梅世嘉, 杨辉, 吕劲松, 李云. 2022. 浙江宁波平原地下水水化学特征及其生态环境效应[J]. 中国地质, 49(5): 1527-1542.
- 李春芳, 王菲, 曹文涛, 潘健, 吕建树, 吴泉源. 2017. 龙口市污水灌溉区农田重金属来源、空间分布及污染评价[J]. 环境科学, 38(3): 1018-1027.
- 李静, 吴华武, 周永强, 赵中华, 王晓龙, 蔡永久, 贺斌, 陈雯, 孙伟. 2020. 长江中下游地区丰水期河、湖水氢氧同位素组成特征[J]. 环境科学, 41(3): 1176-1183.
- 李娟娟, 马金涛, 楚秀娟, 王少博, 吴珩, 王兆红. 2006. 应用地累积指数法和富集因子法对铜矿区土壤重金属污染的安全评价[J]. 中国安全科学学报, 16(12): 135-139, 170.
- 李苹, 黄勇, 林赞, 华培学, 袁国礼. 2018. 北京市怀柔区土壤重金属的分布特征、来源分析及风险评价[J]. 现代地质, 32(1): 86-94.
- 李一蒙, 马建华, 刘德新, 孙艳丽, 陈彦芳. 2015. 开封城市土壤重金属污染及潜在生态风险评价[J]. 环境科学, 36(3): 1037-1044.
- 林承奇, 陈枫桦, 胡恭任, 于瑞莲, 黄华斌. 2020. 基于 PMF 模型解析九龙江河口表层沉积物重金属来源[J]. 地球与环境, 48(4): 42-50.
- 刘敏, 邓玮, 赵良元, 胡园, 黄华伟, 高菲. 2021. 长江源区主要河流表层沉积物及沿岸土壤重金属分布特征及来源[J]. 长江科学院院报, 38(7): 143-149, 154.
- 刘艳, 苏怀, 李伟康, 董铭. 2022. 东川小江流域河漫滩沉积物重金属污染分布特征及生态风险评价[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 42(4): 96-105.
- 柳青青, 杨忠芳, 周国华, 夏学齐, 侯青叶, 余涛, 翟大兴. 2012. 中国东部主要入海河流 As 元素分布、来源及影响因素分析[J]. 现代地质, 26(1): 114-124.
- 吕达, 郑祥民, 周立旻, 吕金妹, 王永杰. 2007. 崇明东滩湿地沉积物重金属污染的磁诊断[J]. 环境科学研究, 20(6): 38-43.
- 马超, 顾延生, 刘春根, 左祖发. 2018. 鄱阳湖东南部地区全新统植硅体组合特征与古环境分析[J]. 华东地质, 39(3): 187-193.
- 马建华, 韩昌序, 姜玉玲. 2020. 潜在生态风险指数法应用中的一些问题[J]. 地理研究, 39(6): 1233-1241.
- 马建华, 王晓云, 侯千, 段海静. 2011. 某城市幼儿园地表灰尘重金属污染及潜在生态风险[J]. 地理研究, 30(3): 486-495.
- 单丽丽, 袁旭音, 茅昌平, 季峻峰. 2008. 长江下游不同源沉积物中重金属特征及生态风险[J]. 环境科学, 29(9): 2399-2404.
- 孙岐发, 孙苗桢, 贾林刚, 田辉, 郭晓东, 李旭光, 朱巍. 2022. 长春新区地下水水质特征及其对生态健康的评价[J]. 中国地质, 49(3): 834-848.
- 王婕, 刘桂建, 方婷, 袁自娇. 2013. 基于污染负荷指数法评价淮河(安徽段)底泥中重金属污染研究[J]. 中国科学技术大学学报, 43(2): 97-103.
- 王岚, 王亚平, 许春雪, 安子怡. 2012. 长江水系表层沉积物重金属污染特征及生态风险性评价[J]. 环境科学, 33(8): 2599-2606.
- 王亚平, 王岚, 许春雪, 季俊峰, 王苏明. 2012. pH 对长江下游沉积物中重金属元素 Cd, Pb 释放行为的影响[J]. 地质通报, 31(4): 594-600.
- 徐金英, 邹辉, 王经波, 郭宇菲, 王晓龙. 2021. 长江干流主要重金属污染状况及其来源解析[J]. 华东地质, 42(1): 21-28.
- 徐争启, 倪师军, 虞先国, 张成江. 2008. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. 环境科学与技术, 31(2): 112-115.
- 叶宏萌, 袁旭音, 赵静. 2012. 铜陵矿区河流沉积物重金属的迁移及环境效应[J]. 中国环境科学, 32(10): 1853-1859.
- 易雨君, 王文君, 宋劼. 2019. 长江中下游底泥重金属污染特征, 潜在生态风险评价及来源分析[J]. 水利水电技术, 50(2): 1-7.
- 于瑞莲, 胡恭任, 郑志敏, 林承奇. 2013. 泉州湾洛阳江河口潮间带柱状沉积物铅同位素组成的变化与来源[J]. 环境科学学报, 33(6): 1756-1762.
- 臧小平, 郭利平, 陈宏章, 马伶, 刘亚男. 1992. 长江干流水底沉积物中十二种金属元素的背景值及污染状况的初步探讨[J]. 中国环境监测, 84(4): 18-20.
- 翟婉盈, 欧阳雪姣, 周伟, 余达, 郑红艳. 2017. 长江干流近岸沉积物重金属的空间分布及风险评估[J]. 环境科学学报, 37(11): 4195-4201.
- 张鸿, 周权平, 姜月华, 金阳, 杨国强, 顾轩, 梅世嘉, 王晓龙. 2022. 长江干流水化学成因与风化过程 CO₂ 消耗通量解析[J]. 水文地质工程地质, 49(1): 30-40.
- 张莉, 祁士华, 瞿程凯, 刘红霞, 陈文文, 李丰, 胡婷, 黄焕芳. 2014. 福建九龙江流域重金属分布来源及健康风险评价[J]. 中国环境科学, 34(8): 2133-2139.
- 张倩, 刘湘伟, 税勇, 王婷. 2021. 黄河上游重金属元素分布特征及生态风险评价[J]. 北京大学学报(自然科学版), 57(2): 333-340.
- 张志永, 万成炎, 胡红青, 杨中华, 袁玉洁, 朱稳. 2021. 长江中上游表层沉积物重金属形态分布特征及风险评[J]. 环境科学, 44(2): 770-780.
- 赵秀芳, 张永帅, 冯爱平, 王艺璇, 夏立献, 王宏雷, 杜伟. 2020. 山东省安丘地区农业土壤重金属元素地球化学特征及环境评价[J]. 物探与化探, 44(6): 1446-1454.
- 周艳, 陈樯, 邓绍坡, 万金忠, 张胜田, 龙涛, 李群, 林玉锁, 吴运金. 2018. 矿区农田土壤重金属空间主成分分析及生态风险评价[J]. 环境科学, 39(6): 2884-2892.