

DOI: 10.16788/j.hddz.32-1865/P.2021.01.003

引用格式:徐金英,邹辉,王经波,等. 长江干流主要重金属污染状况及其来源解析[J]. 华东地质, 2021, 42(1): 21-28.

长江干流主要重金属污染状况及其来源解析

徐金英¹, 邹辉², 王经波^{2, 3}, 郭宇菲^{2, 3}, 王晓龙²

(1. 南昌大学资源环境与化工学院, 鄱阳湖环境与资源利用教育部重点实验室, 江西 南昌 330031;

2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 中国科学院流域地理学重点实验室, 江苏 南京 210008;

3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 沿长江干流从上游至下游采集 84 个点位样品, 分析其表层水体重金属污染状况及可能来源。研究结果显示, 长江干流重金属空间变化差异性明显: 从上游至下游, 长江干流 Cu、Zn、Al 浓度变化不明显, Mn 和 Ni 浓度呈波动上升趋势, Cd 和 Pb 浓度呈波动上升下降趋势。与已有研究相比, 长江干流水体重金属污染呈不断增加趋势, 人类活动对其影响明显。单因子污染评价显示, 长江水体污染较轻, 且对周边居民不存在致癌和非致癌健康风险。污染物来源解析显示, Cd、Pb、Ni 可能主要来源于工业废气及废水; Al、Mn 可能主要来源于自然过程及矿产开采; Cu 可能主要来源于农业活动和矿产开采; Zn 可能主要是农业和工业废水的混合来源。长江干流水体重金属污染不断加重的趋势需要引起关注。

关键词: 长江干流; 重金属; 污染; 来源解析; 地表水

中图分类号: X131.2

文献标识码: A

文章编号: 2096-1871(2021)01-021-08

重金属具有毒性、难降解性和传递性, 一旦进入环境会对生态系统安全及人类健康产生严重危害^[1]。因此, 不同环境介质重金属污染状况及其来源成为备受关注的科学问题^[2-4]。河流作为地表水体的重要组成部分, 其在涵养水源、调蓄洪水、维护生物多样性等方面发挥重要作用。近些年来, 随着人类生产及生活活动干扰的不断加剧, 河流重金属污染日益严重^[5-7]。进入河流的重金属会沿着食物链传递, 最终影响生物有机体安全及人类健康^[7]。因此, 有必要开展相关研究, 分析河流重金属污染及其来源, 为后期河流重金属污染的治理工作提供参考。

长江是世界第三大河流、中国第一大河流, 不仅是长江沿岸重要的饮用水源, 也是沿岸城市和社会经济发展的强大动力。近些年来, 周边社会经济发展伴随着大量含重金属的污染物排放, 如工业发

展和煤矿开采产生的污水有 80% 未经处理就倾倒入长江, 导致长江水体重金属污染不断加重^[8-11]。目前, 对长江水体重金属污染的研究大多集中于长江支流水体或长江干流部分河段^[12-14], 对长江干流水体整体污染的研究较少。本文对长江上游、中游和下游水体重金属污染状况进行综合分析, 以期“长江大保护”的顺利推进提供理论支撑。

1 研究区概况及研究方法

1.1 研究区概况

长江横跨中国西部、中部和东部, 西起青藏高原, 向东于上海汇入东海, 全长 6 397 km, 流域面积近 $180 \times 10^4 \text{ km}^2$, 流量为 $29\ 400 \text{ m}^3/\text{a}$, 泥沙量为 500 Mt/a ^[15]。自西向东, 长江可分为上游、中游和下游 3 段, 分界点分别为宜昌市和湖口县。

* 收稿日期: 2020-11-04 修订日期: 2021-01-05 责任编辑: 谭桂丽

基金项目: 国家自然科学基金 (编号: 41971147)、中国地质调查局“长江经济带地质资源环境综合评价 (编号: DD20190260)”项目联合资助。

第一作者简介: 徐金英, 1991 年生, 女, 助理研究员, 主要从事湿地污染生态学研究。Email: xujy2020@ncu.edu.cn。

通信作者简介: 王晓龙, 1977 年生, 男, 副研究员, 主要从事湿地生态学研究。Email: wangxl@niglas.ac.cn。

1.2 样品采集与处理分析

2018年4月,沿长江干流自上游至下游采集84个表层水样(图1)。水样放置在500 ml的聚乙烯容器中,低温运回实验室处理。将水样经 $0.45\ \mu\text{m}$ Whatman 滤膜过滤,然后用 HNO_3 酸化至pH

值 <2 ,之后在 $4\ ^\circ\text{C}$ 条件下保存。用电感耦合等离子体质谱分析法(ICP-MS, 7700x, NYSE:美国)测定水样中Mn、Ni、Cu、Zn、Cd、Pb、Al的浓度。测定过程中,设定空白、重复样品和标准参考物质以保证测定质量^[16]。

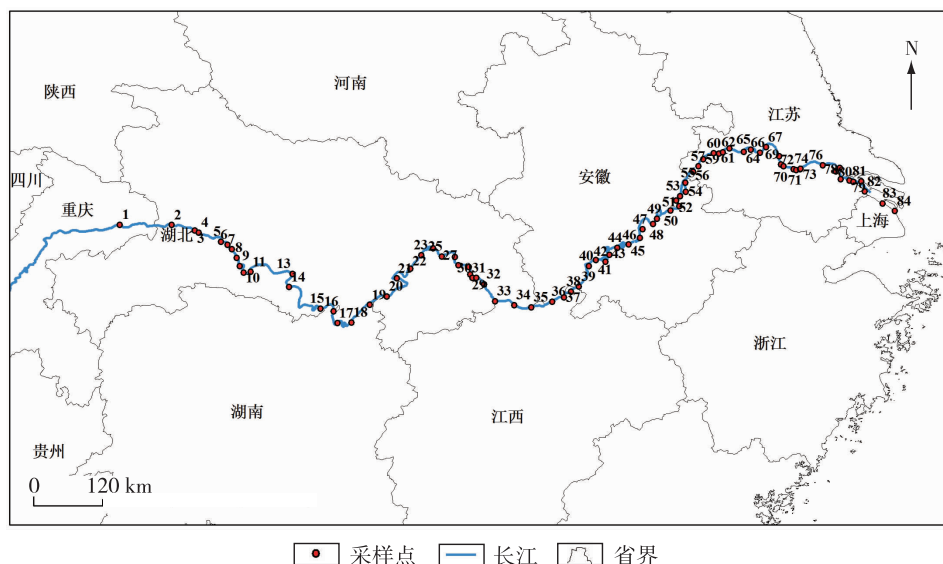


图1 研究区采样点位置示意图

Fig. 1 Sampling sites of the study area

1.3 分析方法

(1)污染评价法。采用单因子污染评价法分析水体各重金属污染状况,单因子污染指数(P_i)计算公式为

$$P_i = \frac{C_i}{S_i}, \quad (1)$$

式中: C_i 为实测重金属 i 的浓度, $\mu\text{g/L}$; S_i 为重金属 i 的背景浓度, $\mu\text{g/L}$; $P_i > 1$ 表示存在污染。

(2)健康风险评价法。对水体重金属致癌和非致癌健康风险进行评价,直接摄入、皮肤接触是水体重金属影响人体健康最主要的两种方式,通过以上两种方式进入人体的重金属剂量可通过以下公式计算。

$$ADD_{\text{ingestion}} = \frac{C_w \times IR \times ABS_{\text{GI}} \times EF \times ED}{BW \times AT}, \quad (2)$$

$$ADD_{\text{dermal}} = \frac{C_w \times K_p \times SA \times ED \times EF \times ET \times 10^{-3}}{BW \times AT}, \quad (3)$$

式中: ADD 为每天直接摄入的平均剂量($ADD_{\text{ingestion}}$)与每日皮肤接触吸收的剂量(ADD_{dermal}), $\mu\text{g/kg/d}$; BW 是人体重量,70 kg; EF 为

暴露频率,350天/a; ED 为暴露持续年,30年; IR 为摄入速率,2 L/d; ABS_{GI} 为肠胃吸收因子; C_w 为水体中重金属平均浓度, $\mu\text{g/L}$; SA 为暴露皮肤面积,18 000 cm^2 ; K_p 为在水体中皮肤渗透系数, cm/h ; ET 为每天暴露时长,0.58 h/d; AT 为平均时间,10 950 d。

危害商(HQ)反映潜在非致癌风险,通过直接摄入或皮肤接触摄入量(ADD)与对应参考剂量(RfD)比值之和得到(公式4)。 $HQ > 1$ 说明重金属可能对人体产生不利影响,需进一步研究。

$$HQ = \frac{ADD}{RfD}, \quad (4)$$

$$RfD_{\text{dermal}} = RfD_{\text{ingestion}} \times ABS_{\text{GI}}. \quad (5)$$

重金属致癌风险(CR)计算如公式(6)、公式(7)和公式(8)所示。美国国家环保局推荐, CR 值为 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 是可以接受的, CR 值 $> 10^{-4}$ 可能产生致癌风险。

$$CRI = ADD_{\text{ingestion}} \times CSF_{\text{ingestion}}, \quad (6)$$

$$CRD = ADD_{\text{dermal}} \times CSF_{\text{dermal}}, \quad (7)$$

$$CR = CRI + CRD. \quad (8)$$

计算过程所需其他参数如表1所示。

表 1 健康风险计算过程所需参数
Table 1 Parameters required for the health risk computation process

重金属元素	ABS_{GI}	K_p	$RfD_{ingestion}/(\mu\text{g}/\text{kg}/\text{d})$	$RfD_{dermal}/(\mu\text{g}/\text{kg}/\text{d})$	$CSF_{ingestion}/(\text{mg}/\text{kg}/\text{d})^{-1}$	$CSF_{dermal}/(\text{mg}/\text{kg}/\text{d})^{-1}$
Mn	0.04	0.001	24	0.96		
Cu	0.3	0.001	40	12		
Zn	0.2	0.000 6	300	60		
Cd	0.05	0.001	0.5	0.025	6.1	6 100
Pb	0.3	0.000 1	1.4	0.42	0.5	500
Al	1	0.001	1 000	1 000		
Ni	0.04	0.000 2	20	0.8		

(3)来源解析方法。通过相关分析法和主成分分析法对长江水体重金属进行来源分析。

2 研究结果

2.1 重金属空间分布特征

图 2 显示研究区重金属的空间分布特征。Cu、Zn、Al 从上游至下游浓度变化不明显,在个别点位

浓度明显较高,如 Cu 在 34 号点位浓度明显较高(浓度为 281 $\mu\text{g}/\text{L}$),Zn 在 49 号、81 号、72 号点位浓度明显较高(浓度分别为 481 $\mu\text{g}/\text{L}$ 、277 $\mu\text{g}/\text{L}$ 、243 $\mu\text{g}/\text{L}$),Al 在 84 号、81 号点位浓度明显较高(浓度分别为 264 $\mu\text{g}/\text{L}$ 、114 $\mu\text{g}/\text{L}$)。Mn 和 Ni 浓度从上游至下游呈波动上升的趋势,Cd、Pb 呈大幅度波动上升下降的趋势。

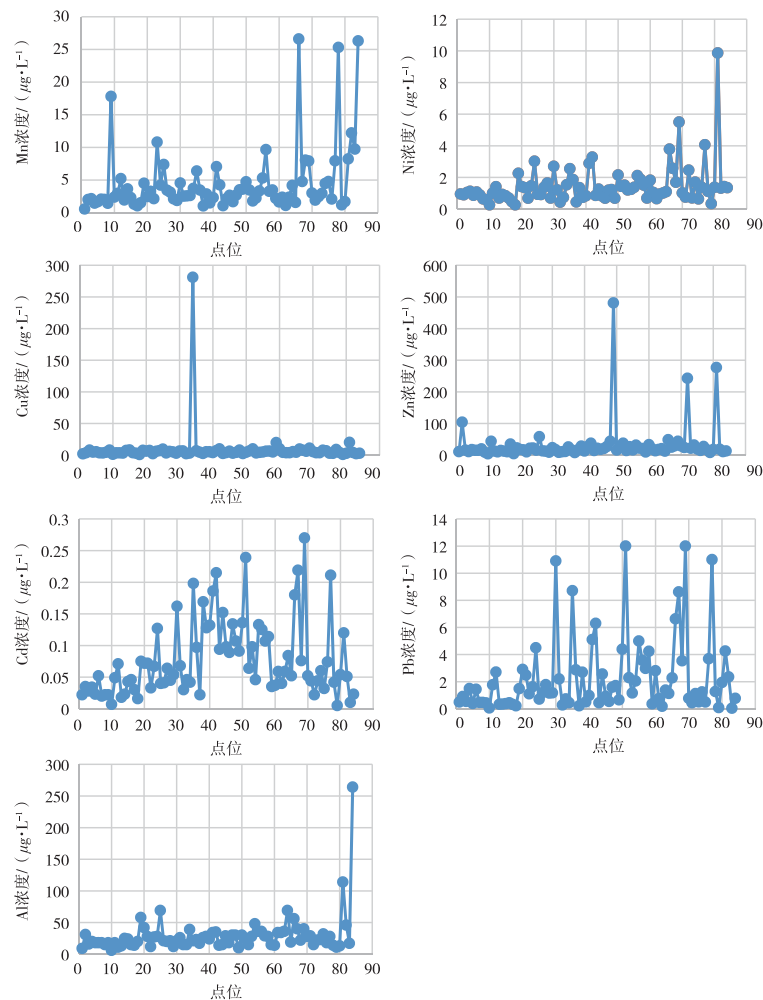


图 2 重金属空间分布特征
Fig. 2 Spatial distribution characteristics of heavy metals

2.2 重金属污染评价

将研究区重金属平均浓度与其他研究或标准进行比较(表2)。结果显示:2018年,长江干流水体 Ni、Cu、Zn、Cd、Pb 浓度明显高于 2008 年^[17],且长江干流 Cu、Zn、Cd、Pb 浓度明显高于珠江^[18]和太湖^[19],Ni、Cu、Zn、

Pb 浓度明显高于鄱阳湖^[20]。长江干流重金属浓度没有超过中国饮用水标准^[21]、美国饮用水标准^[23]和世界卫生组织饮用水标准^[22]。对长江干流水体重金属进行污染评价(图3),结果显示:重金属在绝大部分点位 P_i 值均 <1 ,仅 Al 在 84 号点位 P_i 值明显 >1 。

表2 长江干流重金属平均浓度与其他研究及标准对比结果

Table 2 Comparison of average concentration of heavy metals in the main stream of the Yangtze River compared with other studies and standards

对比项目	重金属含量/($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)						
	Mn	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb	Al
长江(2018)	4.46	1.46	8.7	32.28	0.08	2.27	29.1
长江(2008) ^[17]	—	0.5	1.9	1.5	0.024	0.078	—
珠江 ^[18]	—	1.89	1.09	3.61	0.04	0.08	—
太湖 ^[19]	—	—	3.21	10.96	0.019	0.07	—
鄱阳湖 ^[20]	62.68	1.15	0.81	3.01	0.1	0.3	63.08
中国饮用水标准 ^[21]	100	20	1 000	1 000	5	10	200
WHO ^[22]	100	70	2 000	—	3	10	200
US EPA ^[23]	—	—	1 300	—	5	15	—

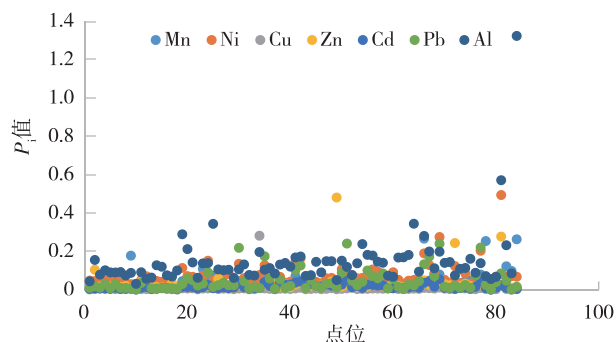


图3 长江干流水体重金属污染单因子指数评价结果

Fig. 3 Evaluation of single factor pollution assessment of heavy metals in the main stream of Yangtze River

2.3 重金属健康风险评价

长江干流水体重金属非致癌健康风险评价结果如图4所示。所有重金属的 HQ 值及 HI 值均明显 <1 ,说明所有重金属均不会对人体产生非致癌健康风险,重金属中 Pb 的 HQ 值明显最高。长江干流水体重金属致癌健康风险评价结果如图5所示,所有重金属 CR 值均明显 $<10^{-4}$ 。

2.4 重金属来源分析

表3为研究区重金属之间的相互关系。Ni 与 Mn、Zn、Cd、Pb、Al 呈显著正相关($r = 0.287 -$

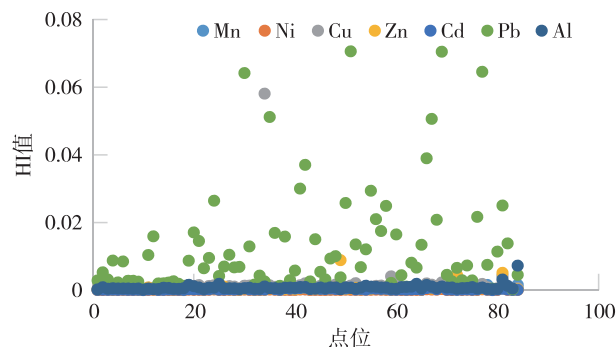


图4 长江干流水体重金属非致癌健康风险评价结果

Fig. 4 Non-carcinogenic health risk assessment of heavy metals in the main stream of Yangtze River

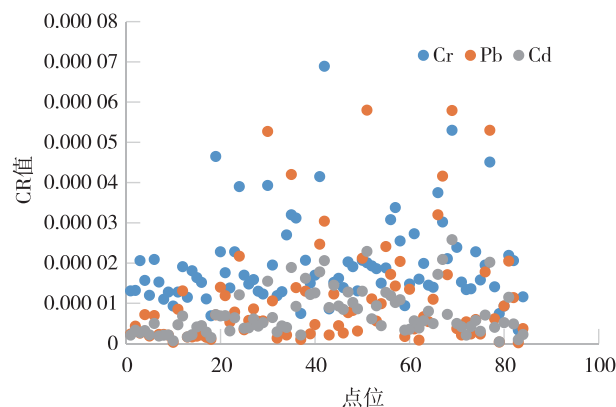


图5 长江干流水体重金属致癌健康风险评价结果

Fig. 5 Carcinogenic health risk assessment of heavy metals in the main stream of Yangtze River

0.608, $p < 0.01$), Mn 与 Al 呈显著正相关 ($r = 0.542, p < 0.01$), Cd 与 Pb 呈显著正相关 ($r = 0.855, p < 0.01$)。

开展主成分分析以追溯重金属来源,表 4 为特征值 > 1 的主成分。可以将重金属分为 4 个主成

分,其解释了方差的 86.92%,第一、二、三、四主成分的方差解释率分别为 37.13%、20.26%、15.21%、14.32%。Ni、Cd 和 Pb 在第一主成分载荷明显较高,Mn 和 Al 在第二主成分载荷明显较高,而 Zn、Cu 分别在第三、四主成分载荷较高。

表 3 重金属相关性分析结果
Table 3 Correlation analysis of heavy metals

	Mn	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb	Al
Mn	1.000						
Ni	0.287 **	1.000					
Cu	0.003	0.075	1.000				
Zn	0.025	0.350 **	-0.020	1.000			
Cd	0.147	0.562 **	-0.028	0.076	1.000		
Pb	0.210	0.608 **	-0.034	0.024	0.855 **	1.000	
Al	0.542 **	0.324 **	0.057	0.071	0.071	0.069	1.000

注:**表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

表 4 重金属来源主成分分析结果

Table 4 Principal component analysis results of heavy metal sources

重金属及参数	主成分			
	1	2	3	4
Mn	0.145	0.860	-0.045	-0.043
Ni	0.691	0.313	0.441	0.118
Cu	-0.010	0.017	-0.013	0.996
Zn	0.034	0.005	0.973	-0.026
Cd	0.941	0.017	0.008	-0.030
Pb	0.956	0.064	-0.038	-0.035
Al	0.020	0.880	0.095	0.065
特征值	2.599	1.419	1.064	1.003
方差解释/%	37.129	20.264	15.206	14.322
累积解释/%	37.129	57.393	72.599	86.921

3 讨论

根据重金属不同,重金属浓度的空间分布特征也不相同。长江干流一些重金属(Mn、Ni)浓度呈自上游至下游增加的趋势,这与长江中下游地区与长江相连接的湖泊河流水质不断恶化的现状相一致^[24-25]。由于自上游至下游阶梯地貌的分布,大中城市以及工农业的发展主要集中于长江中下游地区^[16],导致中下游特别是河口地区重金属污染最严重^[26]。三峡大坝的建立使沿河口地区再悬浮加重,

增加河口水体重金属浓度^[27-28]。

本次研究中有些重金属(Cu、Zn、Al)浓度空间差异性不明显,可能是因为其自然来源和农业来源。其在某些点位浓度较高,可能受其他人类活动影响,如 Cu 在 34 号点位浓度较高,可能受德兴铜矿影响^[29]。Cd 和 Pb 沿长江的波动变化可能受沿长江分布的点源污染影响。

随着世界范围内水体污染不断加重^[30-32],世界卫生组织、美国、中国和其他国家政府组织发布了一系列标准,保护水体免于进一步污染,确保水资源安全^[21-23]。本次研究的重金属没有超过世界卫生组织、美国和中国饮用水标准,说明长江干流水体重金属污染不严重,与已有研究相一致^[17]。本次研究重金属较低的 P_i 值也说明长江水体较轻程度污染,水流的稀释作用可能是缓解长江水体重金属污染的重要原因^[33]。研究发现,长江干流重金属浓度明显高于过往关于长江水体研究成果^[16],表明人类活动对长江水体的干扰不断加剧^[34-35]。

长江干流水体 Ni、Cu、Zn、Cd、Pb 浓度呈逐年增加的趋势,说明人类活动对其影响越来越大。Cd、Pb、Ni 属于第一主成分,且其相互之间特别是 Cd 和 Pb 之间呈显著正相关,说明长江干流 Cd、Pb、Ni 具有同源性。Cd、Pb 上升下降的波动趋势说明面源污染对重金属具有影响。已有研究结果^[8, 36-37]显示,大气沉降是水体 Pb 的主要来源,Cd

是长江沿岸排放工业废水、废气的重要组成部分^[38]。可见,工业污染可能是Cd、Pb、Ni的主要来源。Al、Mn呈显著正相关,属于第二主成分,说明其具有同源性。研究^[35, 39-40]表明,环境中Al、Mn主要来源于自然过程,如岩石风化、成土过程等。长江流域是我国锰资源的主要来源,锰矿的开采可能是铝、锰资源的主要来源之一。因此,水体Al、Mn可能主要来源于自然过程及矿产开采。Cu一般来源于农业活动,其较稳定的空间变化趋势可验证这一点。Cu在下游一些点位(如34号)浓度较高,可能受矿区开采的影响。因此,长江干流水体Cu可能是农业活动和矿产开采来源。除农业来源外,Zn也是长江沿途工业废水的重要组成部分,是农业和工业废水的混合来源。

由于河流在饮用水供应方面具有重要作用,已有研究分析水体重金属的健康风险^[41-43]。本次研究表明,长江干流重金属HQ值均明显 <1 ,表明其对人体产生的非致癌危害很小。已有研究^[13, 44]显示长江主干和分支重金属的非致癌健康风险也很低。同时,长江致癌重金属Cr、Pb和Cd的CR值也明显小 $<10^{-4}$,说明其致癌可能性很小。可见,虽然长江水体受到重金属污染,但其污染程度较轻,对人体的健康风险很低。

4 结论及建议

(1)长江干流从上游至下游,Cu、Zn、Al浓度变化不明显,Mn和Ni浓度呈波动上升趋势,Cd和Pb浓度呈波动上升下降的趋势。

(2)与已有研究相比,长江干流水体重金属污染呈不断增加的趋势,人类活动对其影响明显。单因子污染评价显示,长江水体污染较轻,且对周边居民不存在致癌和非致癌健康风险。

(3)Cd、Pb、Ni可能主要来源于工业废气、废水;Al、Mn可能主要来源于自然过程及矿产开采;Cu可能主要来源于农业活动和矿产开采;Zn可能主要是农业和工业废水的混合来源。

人类活动对长江干流水体重金属污染的影响呈日益增加。应采取相关措施,从源头治理,将工农业及矿产资源开采等活动产生的污染物经处理达标后再排放,严惩污染物乱排放行为。内源控制,沉积物是长江水体重金属的重要来源,加强沉积物重金属迁移转化研究,为内源控制提供依据。

参考文献

- [1] XU J Y, ZHENG L L, XU L G, et al. Uptake and allocation of selected metals by dominant vegetation in Poyang Lake wetland: From rhizosphere to plant tissues[J]. Catena, 2020, 189(9): 104477.
- [2] SHIM M J, CAI Y, GUO L, et al. Floodplain effects on the transport of dissolved and colloidal trace elements in the East Pearl River, Mississippi [J]. Hydrological Processes, 2017, 31(5): 1086-1099.
- [3] CANPOLAT Ö, VAROL M, OKAN Ö Ö, et al. A comparison of trace element concentrations in surface and deep water of the Keban Dam Lake (Turkey) and associated health risk assessment[J]. Environmental Research, 2020, 190: 110012.
- [4] LI X, HUANG S, MCBRIDE M B. Rhizosphere effect on Pb solubility and phytoavailability in Pb-contaminated soils [J]. Environmental Pollution, 2021, 268: 115840.
- [5] VAROL M. Dissolved heavy metal concentrations of the Kralkızı, Dicle and Batman dam reservoirs in the Tigris River basin, Turkey[J]. Chemosphere, 2013, 93(6): 954-962.
- [6] LIN H Y, SUN T, XUE S F, et al. Heavy metal spatial variation, bioaccumulation, and risk assessment of *Zostera japonica* habitat in the Yellow River Estuary, China[J]. Science of the Total Environment, 2016, 541(15): 415-443.
- [7] LI Y Z, ZHOU Q Q, REN B, et al. Trends and health risks of dissolved heavy metal pollution in global river and lake water from 1970 to 2017[J]. Reviews of Environmental Contamination and Toxicology, 2020, 251: 1-24.
- [8] SUN X S, FAN D J, LIU M, et al. Source identification, geochemical normalization and influence factors of heavy metals in Yangtze River Estuary sediment[J]. Environmental Pollution, 2018, 241: 938-949.
- [9] YI Y J, YANG Z F, ZHANG S H. Ecological risk assessment of heavy metals in sediment and human health risk assessment of heavy metals in fishes in the middle and lower reaches of the Yangtze River basin[J]. Environmental Pollution, 2011, 159(10): 2575-2585.
- [10] 王运, 邹勇军, 王鹤, 等. 江西信丰油山地区土壤硒及重金属元素地球化学特征[J]. 华东地质, 2019, 40(2): 152-160.
- [11] 马超, 顾延生, 刘春根, 等. 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, 2018,

- 39(3): 187-193.
- [12] YIN S, FENG C H, Li Y Y, et al. Heavy metal pollution in the surface water of the Yangtze Estuary: A 5-year follow-up study [J]. *Chemosphere*, 2015, 138: 718-725.
- [13] 王丹. 长江上游(宜宾至泸州段)毒害污染物分布特征及风险评价[D]. 邯郸:河北工程大学, 2016.
- [14] GAO Q, LI Y, CHENG Q Y, et al. Analysis and assessment of the nutrients, biochemical indexes and heavy metals in the Three Gorges Reservoir, China, from 2008 to 2013 [J]. *Water Research*, 2016, 92: 262-274.
- [15] 徐金英, 蔡永久, 赵中华, 等. 长江干流滨江水体As空间梯度变化与健康风险评价[J]. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(11): 175-181.
- [16] ZHANG Z X, LU Y, LI H P, et al. Assessment of heavy metal contamination, distribution and source identification in the sediments from the Zijiang River, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 645: 235-243.
- [17] MULLER B, BERG M, ZHI P Y, et al. How polluted is the Yangtze river? Water quality downstream from the Three Gorges Dam [J]. *Science of the Total Environment*. 2008, 402(2/3): 232-247.
- [18] GENG J J, WANG Y P, LUO H J. Distribution, sources, and fluxes of heavy metals in the Pearl River Delta, South China [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2015, 101(2): 914-921.
- [19] 方斌斌, 于洋, 姜伟立, 等. 太湖流域水体和沉积物重金属时空分布特征及潜在生态风险评价[J]. *生态与农村环境学报*, 2017, 33(3): 215-224.
- [20] ZHANG D W, WEI Y H, ZHANG L, et al. Distribution of heavy metals in water, suspended particulate matter and sediment of Poyang Lake, China [J]. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2012, 21(7): 1910-1919.
- [21] 中华人民共和国卫生部. GB5749—2006 生活饮用水卫生标准[S]. 2006.
- [22] WHO. Guidelines for drinking-water quality, 4th ed [S]. 2011.
- [23] USEPA. Risk assessment guidance for Superfund volume I: Human health evaluation manual (Part F, Supplemental guidance for inhalation risk assessment) [S]. 2009.
- [24] 刘耀驰, 高栗, 李志光, 等. 湘江重金属污染现状、污染原因分析与对策探讨[J]. *环境保护科学*, 2010, 36(4): 26-29.
- [25] 曾凡萍, 刘澍, 肖化云, 等. 饶河入鄱阳湖口处沉积物中重金属的含量及空间变化[J]. *环境科技*, 2010, 23(5): 51-54.
- [26] WANG J W, LIU R M, WANG H T, et al. Identification and apportionment of hazardous elements in the sediments in the Yangtze River estuary [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22(24): 20215-20225.
- [27] JIAO N Z, ZHANG Y, ZENG Y H, et al. Ecological anomalies in the East China Sea: Impacts of the Three Gorges Dam? [J]. *Water Research*, 2007, 41(6): 1287-1293.
- [28] ZHU H, BING H J, WU Y H, et al. The spatial and vertical distribution of heavy metal contamination in sediments of the Three Gorges Reservoir determined by anti-seasonal flow regulation [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 664(10): 79-88.
- [29] 简敏菲, 杨叶萍, 余厚平, 等. 德兴铜矿区优势物种苎麻(*Boehmeria nivea*)对重金属的富集与积累特性[J]. *生态与农村环境学报*, 2016, 32(3): 486-491.
- [30] NAZEER S, HASHMI M Z, MALIK R N. Heavy metals distribution, risk assessment and water quality characterization by water quality index of the River Soan, Pakistan [J]. *Ecological Indicators*, 2014, 43: 262-270.
- [31] YIN J J, LIU Q, WANG L, et al. The distribution and risk assessment of heavy metals in water, sediments, and fish of Chaohu Lake, China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2018, 77(3): 1-12.
- [32] PANDEY L K, PARK J, SON D H, et al. Assessment of metal contamination in water and sediments from major rivers in South Korea from 2008 to 2015 [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 651: 323-333.
- [33] 水利部长江水利委员会. 长江泥沙公报[M]. 武汉:长江出版社, 2018.
- [34] HUANG J C, ZHANG Y J, ARHONDITSIS G B, et al. How successful are the restoration efforts of China's lakes and reservoirs? [J]. *Environment International*, 2019, 123: 96-103.
- [35] LI S Y, ZHANG Q F. Spatial characterization of dissolved trace elements and heavy metals in the upper Han River (China) using multivariate statistical techniques [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 176(1/3): 579-588.
- [36] FRANCO-URIA A, LOPEZ-MATEO C, ROCA E, et al. Source identification of heavy metals in pastureland by multivariate analysis in NW Spain [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 165(1/3): 1008-1015.
- [37] CHEN B, LIU J, HU L M, et al. Spatio-temporal distribution and sources of Pb identified by stable iso-

- topic ratios in sediments from the Yangtze River Estuary and adjacent areas [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 580: 936-945.
- [38] 王岚. 长江水系及流域典型土壤中 Cd 等重金属元素的环境地球化学行为研究[D]. 北京: 中国地质科学院, 2010.
- [39] GIRI S, SINGH A K. Risk assessment, statistical source identification and seasonal fluctuation of dissolved metals in the Subarnarekha River, India [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2014, 265: 305-314.
- [40] XIAO J, WANG L Q, DENG L, et al. Characteristics, sources, water quality and health risk assessment of trace elements in river water and well water in the Chinese Loess Plateau [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 650: 2004-2012.
- [41] 张莉, 祁士华, 瞿程凯, 等. 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*, 2014, 34(8): 2133-2139.
- [42] NAWAB J, KHAN S, WANG X P. Ecological and health risk assessment of potentially toxic elements in the major rivers of Pakistan: General population vs. Fishermen [J]. *Chemosphere*, 2018, 202: 154-164.
- [43] ZHAO M M, CHEN Y P, XUE L G, et al. Greater health risk in wet season than in dry season in the Yellow River of the Lanzhou region [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 644: 873-883.
- [44] ZHANG H, JIANG Y H, WANG M, et al. Spatial characterization, risk assessment, and statistical source identification of the dissolved trace elements in the Ganjiang River-feeding tributary of the Poyang Lake, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(3): 2890-2903.

Pollution status and potential sources of main heavy metals in the main stream of the Yangtze River

XU Jinying¹, ZOU Hui², WANG Jingbo^{2,3}, GUO Yufei^{2,3}, WANG Xiaolong²

(1. *Key Laboratory of Poyang Lake Environment and Resource Utilization of Ministry of Education and School of Resources, Environmental & Chemical Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, Jiangxi, China*;

2. *Key Laboratory of Watershed Geographic Sciences, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, Jiangsu, China*;

3. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: In this study, we analyzed the pollution status and potential sources of heavy metals in the surface water of the main stream of Yangtze River. The results showed that the spatial distribution of metal concentrations from upstream to downstream of Yangtze River was significantly different, Cu, Zn and Al concentrations did not change significantly, Mn and Ni concentrations increased with fluctuation, while Cd and Pb concentrations increased and decreased with fluctuation. Heavy metal concentrations in the main stream of the Yangtze River increased compared with existing studies, which indicated the influence of human activities. However, the single-factor pollution evaluation showed that metals lightly polluted Yangtze River water and caused no carcinogenic and non-carcinogenic health risks to surrounding residents. The source analysis indicated that Cd, Pb and Ni may mainly be from industrial waste gas and wastewater, Al and Mn may be mainly derived from natural processes and mineral mining, Cu may be mainly derived from agricultural activities and mineral mining, Zn may mainly come from agriculture and industrial wastewater. Attention should be paid to the growing metal pollution of the main stream of Yangtze River because of anthropogenic activities.

Key words: main stream of the Yangtze River; heavy metal; pollution; source analysis; surface water