

DOI:10.7524/j.issn.0254-6108.2021052401

黄楚珊, 张倩, 唐夫凯, 等. 江西陡水水库水环境重金属时空分布特征及生态风险评价[J]. 环境化学, 2022, 41(9): 2919-2930.

HUANG Chushan, ZHANG Qian, TANG Fukai, et al. Profiles of heavy metals pollution and potential influence to aquatic environment of Doushui Reservoir from Jiangxi Province[J]. Environmental Chemistry, 2022, 41 (9): 2919-2930.

江西陡水水库水环境重金属时空分布特征及生态风险评价^{*}

黄楚珊^{1,3} 张倩^{1,3} 唐夫凯² 张丽娟^{1,3} 于云江^{1,3} 周可新² 胡国成^{1,3 **}

(1. 生态环境部华南环境科学研究所, 环境健康研究中心, 广州, 510655; 2. 生态环境部南京环境科学研究所, 南京, 210042; 3. 国家环境保护环境污染健康风险评价重点实验室, 广州, 510655)

摘要 本研究采用电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS) 分析江西陡水水库表层水体及沉积物中 Cu、Zn、As、Hg、Pb 和 Cd 的含量水平, 利用内梅罗综合污染指数评价法、地累积指数评价法、潜在生态风险指数法等方法对污染程度和生态风险进行评价。结果表明, 陡水水库表层水体中 Cu、Zn、As、Hg、Pb 和 Cd 的浓度范围分别为 0.10—9.24、nd—96.48、0.06—16.8、nd—0.64、nd—8.46、0.004—0.37 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。陡水水库沉积物中 Cu、Zn、As、Hg、Pb 和 Cd 的含量水平分别为 (190.59 ± 45.95)、(426.70 ± 144.65)、(201.43 ± 175.79)、(26.49 ± 23.23)、(103.75 ± 30.88)、(6.38 ± 5.42) $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 其中 Cu、Zn、As 和 Pb 的最高浓度分别达到了江西省赣州市土壤背景值的 11.82、9.13、53.87、2.94 倍。综合污染指数评价法表明, 陡水水库表层水体受到重金属污染, 其中 DS5 为重度污染, DS3 和 DS4 为轻度污染, 主要污染物质为 Hg; 地累积指数评价法表明, 陡水水库沉积物中 As 污染较重, 其次为 Cu 和 Zn; 潜在生态风险指数法表明, DS3 和 DS5 重金属具有很强生态危害, As 为主要贡献因子; 生物毒性不利影响评价表明, DS3 和 DS5 重金属发生生物毒性影响的可能性为 75%—81%。因此, 在陡水水库重金属治理中要加强对 Hg 和 As 的防控。

关键词 陡水水库, 水环境, 重金属, 时空分布, 生态风险。

Profiles of heavy metals pollution and potential influence to aquatic environment of Doushui Reservoir from Jiangxi Province

HUANG Chushan^{1,3} ZHANG Qian^{1,3} TANG Fukai² ZHANG Lijuan^{1,3} YU Yunjiang^{1,3}
ZHOU Kexin² HU Guocheng^{1,3 **}

(1. South China Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Guangzhou, 510655, China;
2. Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Nanjing, 210042, China; 3. State Environmental Protection Key Laboratory of Environmental Pollution Health Risk Assessment, Guangzhou, 510655, China)

Abstract Inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) was used to qualify and quantify six commonly monitored heavy metals, Cu, Zn, As, Hg, Pb and Cd, in surface waters and sediments, at Doushui Reservoir from Jiangxi Province, China. Contamination degree and ecological risk of the heavy metals to aquatic ecosystem was further evaluated by comprehensive environmental pollution index (CEPI), geo-accumulation index (Igeo), potential ecological risk index (ERI) and so on. The results showed that concentrations of Cu, Zn, As, Hg, Pb and Cb in the surface waters ranged

2021 年 5 月 24 日收稿(Received: May 24, 2021).

* 国家重点研发计划课题 (2018YFC1801505) 和广州市科技计划项目 (201804010193) 资助。

Supported by the National Key Research and Development Program of China (2018YFC1801505) and Science and Technology Program of Guangzhou, China (201804010193).

** 通信联系人 Corresponding author, Tel: 18902269816, E-mail: huguocheng@scies.org

at 0.10—9.24, not detected (nd)—96.48, 0.06—16.8, nd—0.64, nd—8.46 and 0.004—0.37 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively. Concentrations (mean \pm standard deviation) of Cu, Zn, As, Hg, Pb and Cd in the sediments were at (190.59 \pm 45.95), (426.70 \pm 144.65), (201.43 \pm 175.79), (26.49 \pm 23.23), (103.75 \pm 30.88) and (6.38 \pm 5.42) $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectively. The maximum concentrations of Cu, Zn, As and Pb in the sediments were 11.82, 9.13, 53.87 and 2.94 times, respectively, of the soil background values of those metals in Ganzhou City, Jiangxi Province. CEPI evaluation indicated that the surface water at DS5 was the most heavily polluted site especially by Hg whereas results from Igeo demonstrated that the sediments were mainly polluted by As, followed by Cu and Zn. The ERI assessment indicated that sites of DS3 and DS5 suffered a higher risk driven by the heavy metals with As as the main contributor. The adverse biological effects (ABE) data pointed out that the probability of toxic effects posed by the heavy metals ranged from 75% to 81% at the sites of DS3 and DS5. Therefore, aquatic contaminations of Hg and As in Doushui Reservoir deserved more attention for their further control and regulation.

Keywords Doushui Reservoir, aquatic environment, heavy metal, temporal and spatial distribution, ecological risk.

重金属作为一种持久性污染物,具有难降解、易积累、毒性大等特性,可通过大气干湿沉降、污水排放及面源污染等途径进入环境^[1-5]。环境中排放的重金属进入水体后,易通过生物积累和生物放大进入人体,从而危害人群健康^[6]。因此有必要研究水环境系统水体和沉积物中重金属的污染特征及潜在生态风险。水库作为重要的淡水资源,在农业灌溉、区域防洪、饮用水供给以及水电清洁能源等方面都扮演着重要的角色^[7-8]。随着社会经济的发展,水库水环境重金属污染问题日益突出,对水库生态环境安全提出了挑战。有研究表明,三峡水库、丹江口水库及山美水库等表层沉积物都呈现一定程度的Cd和Pb污染,处于较高的生态风险等级^[9-13]。

陡水水库位于江西省赣州市,横跨崇义县和上犹县,是一座以发电为主,结合渔业、航运、林业、城市供水、旅游等综合开发利用的大型水利工程^[14]。有研究表明,崇义县矿产资源丰富,具有铜、铅、钨、钼等金属矿,但因历史上生产工艺落后,矿石回采率及选矿回收率不足八成,利用率仅为50%,加上多年的无序开采,矿区周围水质已被严重污染^[15]。目前针对陡水水库水质方面的调查较少^[14],尤其缺乏对整个库区重金属污染水平的研究。

本文以江西省赣州市陡水水库为研究对象,通过分析水库表层水体及沉积物中Cu、Zn、As、Hg、Pb和Cd等重金属的污染特征,阐述其时空分布特征及污染来源,评估重金属污染对生态环境的潜在风险,为水库水环境的综合治理提供科学指导和理论依据。

1 材料与方法 (Materials and methods)

1.1 研究区域概况

陡水水库建于1957年,距赣州市中心城区70 km,是一座重要的大型调节水库,库区人口达10万人之多。库区水域面积达3100万m²,蓄水量8 \times 10⁸ m³,森林面积2.27 \times 10⁸ m²。

该研究基于陡水水库地形及周边人口、农田和工矿企业分布的情况共设置7个采样点,见表1及图1。2018年2—11月,每月上旬在陡水水库采集水库表层水样,利用重力式抓斗采泥器采集水库表层沉积物样品,并使用便携式水质分析仪现场测定水体温度、pH及电导率。采集的水样装入500 mL聚乙烯塑料瓶中,并加入1:1的硝酸调至pH值小于2.0,沉积物装入聚丙烯密封袋中,样品置于4℃保温箱中冷藏送至实验室分析。

表 1 采样点信息

Table 1 Sampling point information

编号 Number	采样点 Sampling site	电导率/($\mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$) Electrical conductivity	水温/℃ Temperature	pH	经度(E) Longitude (E)	纬度(N) Latitude (N)	水深/m Depth
DS1	过埠大桥	60.4—117.3	6.1—21.7	7.0—9.6	114.215692	25.758442	0.5
DS2	水口码头	69.2—111.0	6.9—23.0	6.3—9.4	114.276335	25.759198	20.3
DS3	社官弯	70.7—112.4	6.2—23.0	5.7—9.8	114.271984	25.829949	11.8
DS4	泥坑	70.7—105.2	6.1—21.9	6.1—9.3	114.307384	25.805980	22.1
DS5	半坑口	92.6—168.0	6.4—22.4	5.8—9.6	114.354313	25.821869	31.5
DS6	树木园	88.6—140.0	6.6—21.4	6.2—9.2	114.370391	25.845120	40.0
DS7	蛇坑子湾	62.8—105.1	6.4—22.1	7.2—9.5	114.285652	25.792450	10.5

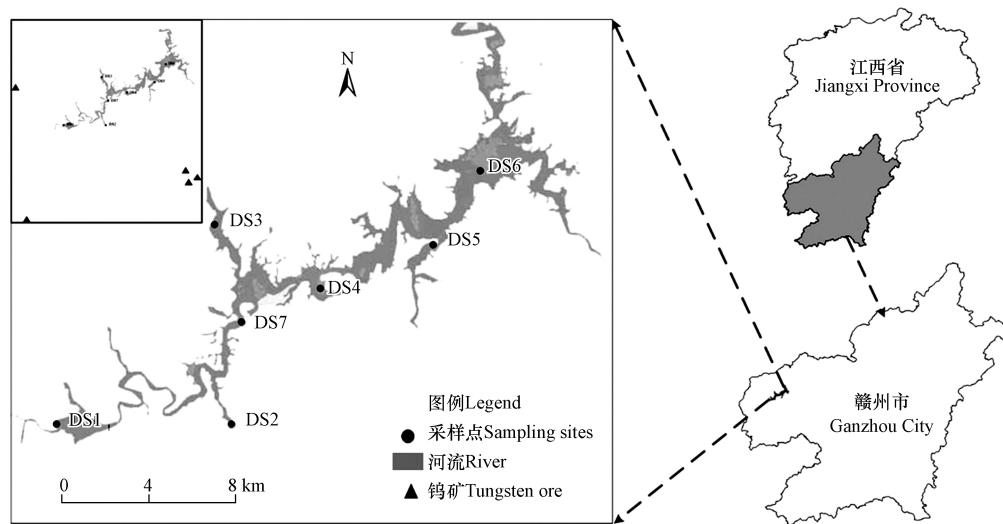


图 1 陡水水库采样点分布图

Fig.1 Distribution map of the sampling point of the steep water reservoir

1.2 样品的处理与分析

采集的水样运至实验室后,过 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 水系微孔滤膜,用硝酸酸化,王水消解。沉积物被剔除杂质后,研磨过100目筛,用 $\text{HNO}_3\text{-HF-HClO}_4$ 消解。采用Agilen700X电感耦合等离子体质谱仪分析表层水和沉积物样品中Cu、Zn、As、Hg、Pb和Cd的含量。实验过程中使用的玻璃及聚丙烯容器均用15%硝酸溶液浸泡48 h;采用加标回收法,每隔10个样品添加2个有证标准物质(GBW-10020),设置10%的平行样。各元素的加标回收率范围为88.73%—108.41%,符合质量控制要求。

1.3 评价方法

1.3.1 地表水中重金属污染评价方法

(1) 单因子指数法

单因子指数法是将某种污染物实测浓度与该种污染物的评价标准进行比较,以确定水质类别的方法^[16],单因子污染指数(P_i)计算公式为:

$$P_i = C_i / S_i \quad (1)$$

式中, C_i 为水质指标 i 的实测浓度; S_i 为水质指标 i 的评价标准值,本次研究参考《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)Ⅲ类水质标准进行评价。

(2) 内梅罗综合指数法

内梅罗综合指数法^[17]是利用各污染因子的相对污染指数来评价水体的污染程度。内梅罗污染指数(P)计算公式为:

$$P = \sqrt{\frac{P_{i\max}^2 + P_{iave}^2}{2}} \quad (2)$$

$$P_{i\max} = \max P_i \quad (3)$$

$$P_{i\text{ave}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i \quad (4)$$

式中, $P_{i\max}$ 为单因子污染指数最大值, $P_{i\text{ave}}$ 为各项单因子污染指数平均值, n 为元素个数。内梅罗污染指数分级如表 2 所示。

表 2 重金属内梅罗污染指数分级

Table 2 Pollution index and classification of heavy metal Nemero

水质综合污染等级 Comprehensive pollution grade	I	II	III	IV	V
水质综合污染指数 Pollution index	$P \leq 0.7$	$0.7 < P \leq 1.0$	$1.0 < P \leq 2.0$	$2.0 < P \leq 3.0$	$P > 3.0$
污染程度 Degree of pollution	清洁 Clean	尚清洁 Slightly clean	轻污染 Light pollution	中污染 Medium pollution	重污染 Severe pollution

1.3.2 沉积物中重金属污染评价方法

(1) 地积累指数法

地积累指数法^[18]是国内外广泛应用的沉积物重金属污染评价方法之一, 其计算公式为:

$$I_{\text{geo}} = \log_2 \left(\frac{C_n}{k \cdot B_n} \right) \quad (5)$$

式中, I_{geo} 为地积累指数; B_n 为当地沉积物元素 n 的背景值 (本文选取江西省赣州市土壤背景值^[19]: Cu 为 $20.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Zn 为 $68.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, As 为 $8.32 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Hg 为 $75 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Cd 为 $157 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Pb 为 $51.65 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); C_n 为元素 n 在待测沉积物中的实际含量; k 为成岩作用引起的背景值波动参数, 本研究取 1.5. 地积累指数分级如表 3 所示。

表 3 沉积物中重金属地积累指数分级

Table 3 Geological Accumulation Index and Classification of Heavy Metals in Sediments

I_{geo}	$I_{\text{geo}} < 0$	$0 \leq I_{\text{geo}} < 1$	$1 \leq I_{\text{geo}} < 2$	$2 \leq I_{\text{geo}} < 3$	$3 \leq I_{\text{geo}} < 4$	$4 \leq I_{\text{geo}} < 5$	$I_{\text{geo}} > 5$
级别 Grade	0	1	2	3	4	5	6
污染程度 Degree of pollution	清洁 Clean	轻度污染 Slight pollution	偏中污染 Slightly medium pollution	中度污染 Medium pollution	偏重污染 Slightly heavy pollution	重度污染 Heavy pollution	严重污染 Severe pollution

(2) 潜在生态危害指数法

潜在生态危害指数法^[20]既可以对单项重金属生态风险进行评价, 又可以对多项重金属综合生态风险进行评价, 其计算公式为:

E_r (单项重金属潜在生态危害指数):

$$E_r^i = T_r^i \frac{C_i}{S_i} \quad (6)$$

RI(潜在生态风险指数):

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i \quad (7)$$

式中, E_r^i 为重金属 i 的潜在生态指数, T_r^i 为重金属元素 i 的毒性系数。各元素的毒性系数: Cu 为 5, Zn 为 1, As 为 10, Hg 为 40, Cd 为 30, Pb 为 5. 沉积物中重金属 E_r^i 和 RI 的分级标准如表 4 所示。

表 4 沉积物中重金属 E_r^i 和 RI 的分级标准

Table 4 Classification of E_r^i and RI for heavy metals in sediments

E_r^i	$E_r^i < 40$	$40 \leq E_r^i < 80$	$80 \leq E_r^i < 160$	$160 \leq E_r^i < 320$	$E_r^i \geq 320$
RI	$RI < 150$	$150 \leq RI < 300$	$300 \leq RI < 600$	$RI \geq 600$	
潜在生态危害程度 Degree of ecological hazard	轻微 Mild	中等 Moderate	较强 Strong	很强 Very strong	极强 Extremely strong

(3) 生物毒性不利影响评价

生物毒性不利影响评价由 Ingersoll 等^[21]提出, 用于评价沉积物中重金属的混合生物效应。其计算

公式为:

$$mPEC-Q = \sum_{i=1}^n (C_i/PEC_i)/n \quad (8)$$

式中, C_i 为沉积物中重金属 i 的实测浓度 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); PEC_i 为重金属 i 可能效应浓度; n 代表重金属种类。将单个重金属含量与相应的阈值效应浓度 (TEC) 和可能效应浓度 (PEC) 进行对比, 若低于 TEC 表明生态毒性不可发生; 若高于 PEC 则表明生态毒性会频繁发生^[22]。重金属 Cu、Zn、As、Hg、Cd 和 Pb 的 TEC 值^[23] 分别为 31.6、121、9.79、0.18、0.99 和 35.8, PEC 值^[23] 分别为 149、459、33、1.06、4.98 和 128, 沉积物对生物毒性不利影响评价分级见表 5。

表 5 沉积物生物毒性不利影响评价分级标准

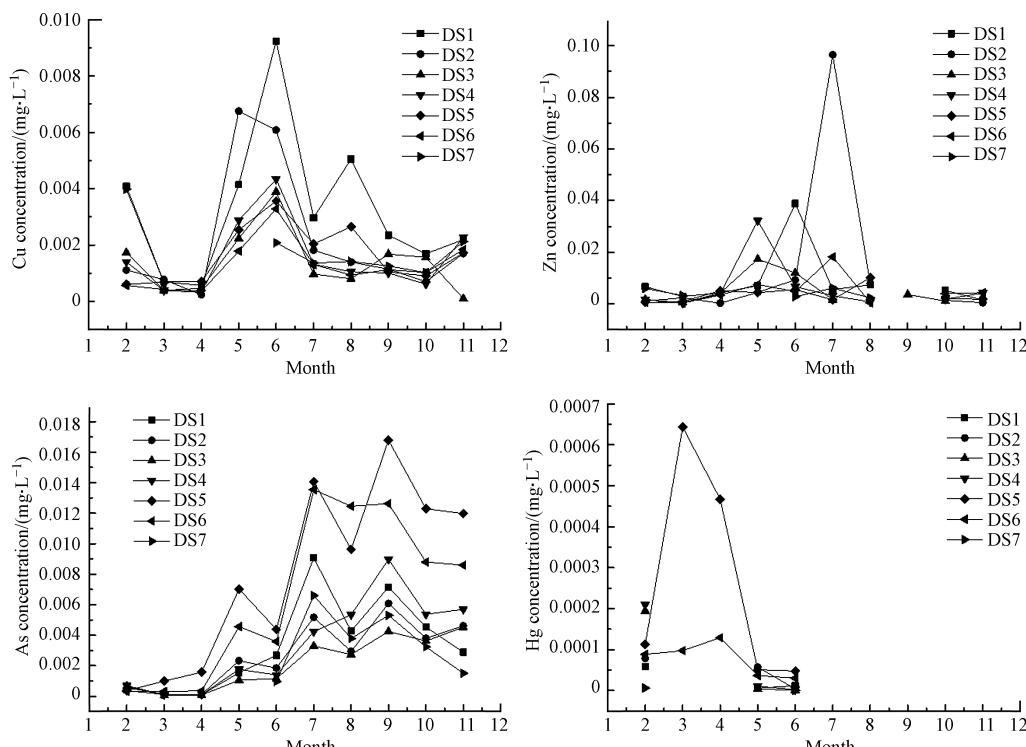
Table 5 Adverse effects evaluation and grading standards for sediment biotoxicity

$mPEC-Q$	$mPEC-Q \leq 0.1$	$0.1 < mPEC-Q \leq 1$	$1 < mPEC-Q \leq 5$	$mPEC-Q > 5$
发生生物毒性不利影响的可能性	$PTP < 14\%$	$15\% < PTP \leq 29\%$	$33\% < PTP \leq 58\%$	$75\% < PTP \leq 81\%$

2 结果与讨论 (Results and discussion)

2.1 陡水水库水体中重金属含量及时空分布特征

陡水水库表层水体中重金属浓度水平如图 2 所示, Cu、As 和 Cd 元素在表层水体中均有检出, 其浓度范围分别为 0.10—9.24、0.06—16.8、0.004—0.37 $\mu\text{g L}^{-1}$; Zn、Hg 和 Pb 的浓度范围分别为 nd—96.48、nd—0.64、nd—8.46 $\mu\text{g L}^{-1}$, 其中 Hg 在 7—11 月的水库表层水体中均未检出。从全年来看, 表层水体重金属含量分布存在季节差异, 其中 As、Cd 和 Pb 浓度在秋季最高, Cu 和 Zn 浓度在夏季最高。从空间分布来看(见表 6), 表层水体重金属含量自南向北波动较大, 其中 Zn、As 和 Hg 浓度呈现先升后降的趋势, 而 Cu、Cd 和 Pb 浓度则呈现明显下降趋势。水库表层水体中 Cu、Zn、As、Cd 和 Pb 的浓度均低于《地表水环境质量标准》(GB3838-2002) 中的Ⅲ类标准, 而 Hg 在 DS3、DS4、DS5 和 DS6 出现不同程度的超标, 且主要集中在 2—4 月份, 此时水库水位较低, 污染物易聚集而造成水体污染。陡水水库表层水体中 Hg 的含量在不同季节表现出明显的差异性, 可能源于矿山开采、大气沉降及污染废水排放等人为污染源。



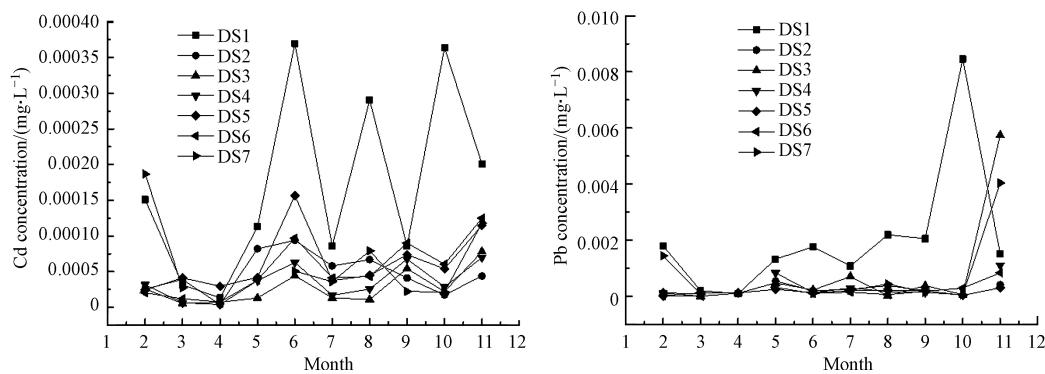


图2 陡水水库表层水体中重金属月份分布

Fig.2 Seasonal distribution of dissolved heavy metals in the surface water of Doushui Reservoir

表6 不同采样点水样中重金属元素含量 (μg·L⁻¹)Table 6 Heavy metal elements in water samples at different sampling points (μg·L⁻¹)

编号 Number	项目 Project	Cu	Zn	As	Hg	Cd	Pb
DS1	范围	0.57—9.24	nd—38.85	0.10—9.08	nd—0.06	0.01—0.37	0.09—8.46
	平均值	3.30	8.82	3.30	0.03	0.17	2.05
	标准偏差	2.42	10.78	2.86	0.02	0.12	2.24
DS2	范围	0.24—6.75	nd—96.48	0.13—6.08	nd—0.08	0.004—0.09	nd—0.54
	平均值	2.17	13.74	2.74	0.05	0.05	0.27
	标准偏差	2.17	29.41	2.05	0.03	0.03	0.14
DS3	范围	0.10—3.89	nd—17.31	0.06—4.53	nd—0.19	0.01—0.08	0.01—5.74
	平均值	1.38	5.25	2.14	0.07	0.03	0.78
	标准偏差	1.06	5.71	1.64	0.09	0.02	1.67
DS4	范围	0.32—4.34	nd—32.21	0.10—8.97	nd—0.21	0.004—0.07	nd—1.10
	平均值	1.56	6.05	3.37	0.07	0.04	0.40
	标准偏差	1.20	9.43	2.84	0.10	0.02	0.37
DS5	范围	0.60—3.56	nd—10.20	0.38—16.79	nd—0.64	0.02—0.16	0.02—0.30
	平均值	1.65	3.56	7.91	0.26	0.06	0.16
	标准偏差	0.97	2.91	5.60	0.24	0.04	0.09
DS6	范围	0.36—3.28	nd—18.18	0.32—13.55	nd—0.13	0.01—0.13	nd—0.84
	平均值	1.27	4.85	6.52	0.08	0.05	0.22
	标准偏差	0.83	5.22	5.08	0.04	0.04	0.24
DS7	范围	0.67—3.98	nd—6.12	0.13—6.61	nd—0.01	0.02—0.19	0.05—4.04
	平均值	1.74	3.93	2.77	0.004	0.07	0.81
	标准偏差	0.96	1.51	2.21	0.003	0.05	1.29
地表水环境质量标准 (GB3838-2002, III类)		1000	1000	50	0.1	5	50

为探索陡水水库表层水体中重金属的主要来源,本研究采用主成分分析法对检出的6种重金属进行来源解析(Kaiser-Meyer-Olkin值为0.732),结果如图3所示。陡水水库表层水体中6种重金属可归纳为2个主成分,累积方差贡献率达到71.13%。从载荷系数来看,主成分1(PC1)主要由Cu、Cd和Pb这3种元素构成,其最高浓度均出现在DS1,大江流域于DS1处汇入陡水水库,流域周边的钨矿和稀土矿开采导致的河流污染,通过流域传送汇聚至DS1,因此可推断PC1源于陡水水库上游的矿山开采。主成分2(PC2)主要由As构成,其最高浓度出现在DS5,该点位离省道较近,其重金属污染可能源于采矿运输扬尘,因此可推断PC2由交通运输等人为活动所致。

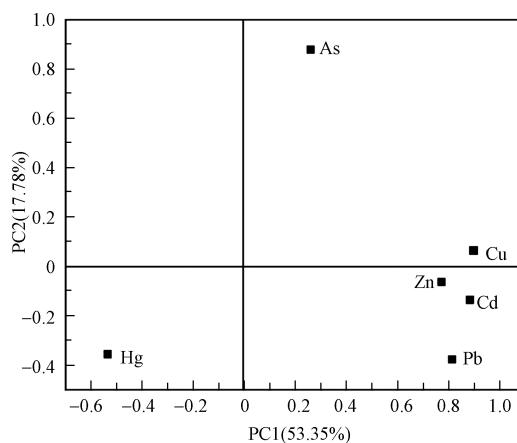


图3 陡水水库表层水体中重金属主成分分析图

Fig.3 Principal components analysis diagram of heavy metals in the surface water of Doushui Reservoir

2.2 陡水水库表层沉积物中重金属含量及空间分布

陡水水库各采样点沉积物中重金属的含量水平如表7所示。各采样点沉积物中Zn的浓度水平最高,Hg和Cd的浓度水平较低,其中DS2和DS4沉积物中重金属浓度从大到小依次为:Zn>Cu>As>Pb>Hg>Cd;DS3和DS5沉积物中重金属浓度从大到小依次为:Zn>As>Cu>Pb>Hg>Cd;DS6和DS7沉积物中重金属浓度从大到小依次为:Zn>Cu>Pb>As>Hg>Cd。与江西省赣州市土壤背景值相比,陡水水库沉积物中Hg和Cd的浓度均低于当地土壤背景值,说明沉积物中Hg和Cd主要来源于成土母质,受地球化学成因的影响较大^[24-25]。而Cu、Zn、As和Pb这4种元素分别超过当地土壤背景值的5.19—10.82倍、1.90—8.13倍、3.00—52.87倍和0.23—1.94倍,说明上述4种元素在沉积物中有明显的累积现象,反映了人为活动导致的环境污染。陡水水库附近工业企业较少,矿产资源多年的无序开采,已然造成周围水质的严重污染。有研究表明,崇义县最主要的矿产资源为钨锡矿,其主要伴生金属包括Cu、Pb和Zn等,且伴生金属的总储量大于钨矿总储量(比例为1.1:1)。因此陡水水库沉积物中超标重金属主要源于矿产资源的开采。

表7 不同采样点沉积物中重金属元素含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)**Table 7** Heavy metal elements in sediment samples at different sampling points ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

编号 Number	Cu	Zn	As	Hg	Cd	Pb
DS2	128.09 (5.19)	197.72 (1.90)	71.79 (7.63)	10.94 (0)	2.61 (0)	63.47 (0.23)
DS3	244.63 (10.82)	593.70 (7.72)	448.21 (52.87)	50.91 (0)	10.58 (0)	151.70 (1.94)
DS4	230.50 (10.14)	409.25 (5.01)	123.12 (13.80)	12.43 (0)	2.77 (0)	112.86 (1.19)
DS5	230.29 (10.13)	621.44 (8.13)	446.28 (52.64)	66.40 (0)	16.67 (0)	128.88 (1.50)
DS6	163.48 (6.90)	355.78 (4.22)	33.26 (3.00)	7.51 (0)	2.27 (0)	72.65 (0.41)
DS7	146.56 (6.08)	382.34 (4.61)	85.95 (9.33)	10.74 (0)	3.39 (0)	92.95 (0.80)
平均值	190.59	426.70	201.43	26.49	6.38	103.75
北运河沙河水库 ^[26]	40.65	125.78	35.75	—	—	24.55
贵州啊哈水库 ^[27]	75.03	217.50	54.58	—	1.43	28.45
嘉陵江亭子口水库 ^[28]	63.84	140.77	—	—	1.42	96.79
梅江清凉山水库 ^[29]	17.83	143.78	—	—	0.93	105.08
上海青草沙水库 ^[30]	33.20	78.12	18.29	0.03	0.12	35.04
Hoedong reservoir, Korea (韩国) ^[31]	29.90	172.40	—	—	2.80	71.20
Maqalika Reservoir, Maseru (马塞卢) ^[32]	—	78.33	2.40	—	—	0.29
Al-Najaf sea depression reservoir, Iraq (伊拉克) ^[33]	—	177.63	—	—	0.06	18.16

注:括号内数值为沉积物超过当地土壤背景值的超标倍数。

Notes: The values in brackets were the exceed multiple of concentrations in sediment samples, comparing with the values of the local soil background in Ganzhou City, Jiangxi Province.

与国内外其他水库的沉积物相比,江西陡水水库沉积物中 Cu、Zn、As、Hg 和 Cd 的平均浓度均高于韩国、马塞卢、伊拉克及国内部分水库, Pb 的平均浓度低于梅江清凉山水库而高于其他研究区域。总体而言,陡水水库沉积物中重金属的浓度处于较高水平。对陡水水库沉积物中重金属进行相关性分析,结果见表 8。Pb 与 Zn、As 呈极显著相关 ($P < 0.01$), 表明其人为源与地球化学行为的相似性。Zn 与 As、Hg、Cd 呈显著相关 ($P < 0.05$), Pb 与 Cu、Cd 呈显著相关 ($P < 0.05$), Cd 与 Hg 呈显著相关 ($P < 0.05$), 说明其可能具有相似的来源、迁移和沉积过程。

表 8 沉积物中重金属元素的相关性系数
Table 8 Correlation coefficient of heavy metal elements in sediments

	Cu	Zn	As	Hg	Cd	Pb
Cu	1.000					
Zn	0.771	1.000				
As	0.771	0.886*	1.000			
Hg	0.600	0.829*	0.886*	1.000		
Cd	0.486	0.886*	0.886*	0.829*	1.000	
Pb	0.886*	0.943**	0.943**	0.771	0.829*	1.000

注: * .在0.05水平(双侧)上显著相关, ** .在0.01水平(双侧)上显著相关。

Notes: * Significant correlation at the 0.05 level (both sides), **. Significant correlation at the 0.01 level (both sides).

2.3 陡水水库水环境重金属污染评价

2.3.1 陡水水库表层水体综合污染指数评价

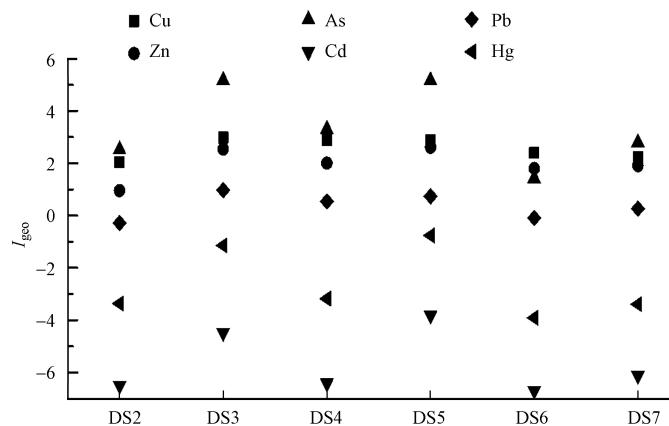
陡水水库各采样点中重金属的单因子污染指数 P_i 和内梅罗综合污染指数 P 见表 9。与地表水环境质量 III 类标准相比, DS3—DS6 表层水中 Hg 的 $P_{i\max}$ 值均大于 1, 而其余重金属的 P_i 值均小于 1, 说明陡水水库水体存在 Hg 污染。内梅罗综合污染指数表明, DS3—DS5 表层水重金属的 P 值均大于 1, 其中 DS5 为重度污染, 其余为轻度污染。DS5 离省道较近, 其重金属污染可能源于采矿运输扬尘。

表 9 陡水水库地表水污染统计表
Table 9 Statistics on surface water pollution of the steep water reservoir

编号 Number	采样点 Sampling site	P_i						P
		Cu	Zn	As	Hg	Cd	Pb	
DS1	过埠大桥	0.0006—0.0092	nd—0.04	0.002—0.182	nd—0.6	0.002—0.074	0.002—0.169	0.428
DS2	水口码头	0.0002—0.0068	nd—0.10	0.003—0.122	nd—0.8	0.001—0.018	nd—0.011	0.570
DS3	社官弯	0.0001—0.0039	nd—0.02	0.001—0.091	nd—1.9	0.002—0.016	0.0002—0.115	1.347
DS4	泥坑	0.0003—0.0043	nd—0.03	0.002—0.179	nd—2.1	0.001—0.014	nd—0.022	1.488
DS5	半坑口	0.0006—0.0036	nd—0.01	0.008—0.336	nd—6.4	0.004—0.032	0.0004—0.006	4.537
DS6	树木园	0.0004—0.0033	nd—0.02	0.006—0.271	nd—1.3	0.002—0.026	nd—0.017	0.926
DS7	蛇坑子湾	0.0007—0.0040	nd—0.01	0.003—0.132	nd—0.1	0.004—0.038	0.001—0.081	0.095

2.3.2 陡水水库表层沉积物地累积指数评价

地累积指数评价结果见图 4, 陡水水库沉积物中除 Cd 和 Hg 外, 其他元素均呈现不同程度的污染。DS2—DS5 和 DS7 沉积物中重金属污染程度从大到小依次为: As>Cu>Zn>Pb>Hg>Cd; DS6 沉积物中重金属污染程度从大到小依次为: Cu>Zn>As>Pb>Hg>Cd。陡水水库沉积物中 As 的污染较重, 呈现偏中度-严重污染; 其次为 Cu 和 Zn, Cu 呈中度污染, Zn 呈轻度-中度污染; Pb 在 DS2 和 DS6 沉积物中呈清洁状态, 而在其他点位呈轻度污染。从沉积物受污染程度上看, DS3 和 DS5 污染最重, 可能源于居民生活排放、矿业开采及交通运输等人为活动; 而 DS2 和 DS6 污染程度较轻, 其中 DS2 为渔业捕捞码头, DS6 离森林较近, 其受矿业开采的影响相对较小。

图 4 沉积物中重金属的 I_{geo} 值Fig.4 I_{geo} value of heavy metals in sediments

2.3.3 陡水水库表层沉积物潜在生态危害指数法

陡水水库表层沉积物潜在生态危害指数如图 5 所示, DS2、DS4 和 DS7 各重金属潜在生态危害指数从大到小依次为: As>Cu>Pb>Hg>Zn>Cd; DS3 和 DS5 各重金属潜在生态危害指数从大到小依次为: As> Cu> Hg> Pb> Zn> Cd; DS6 各重金属潜在生态危害指数从大到小依次为: As>Cu>Pb>Zn>Hg>Cd. 其中, As 是最主要生态风险贡献因子, 在 DS3 和 DS5 表现为“极强生态危害”, 在 DS2、DS4 和 DS7 表现为“较强生态危害”, 在 DS6 表现为“轻微生态危害”. Cu 的生态危害程度次之, 在 DS3、DS4 和 DS5 表现为“中等生态危害”, 其余表现为“轻微生态危害”. 其他 4 种元素的 E_r 值均小于 40, 表现为“轻微生态危害”. 潜在生态风险指数结果表明, DS3 和 DS5 的 RI 值均高于 600, 属于“很强生态危害”; DS4 和 DS7 重金属潜在生态危害程度属于“中等生态危害”; 而 DS2 和 DS6 呈现“轻微生态危害”.

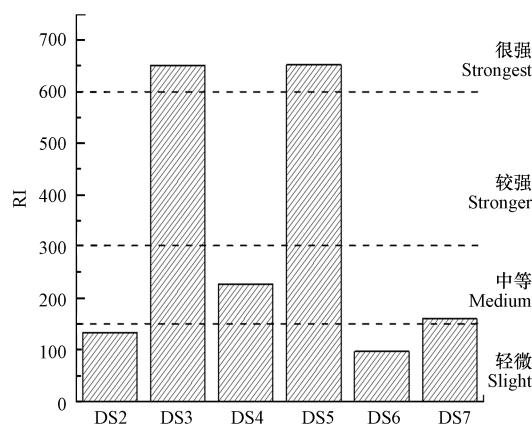


图 5 沉积物中重金属的 RI 值

Fig.5 The RI values of heavy metals in sediments

2.3.4 生物毒性不利影响评价

沉积物中 DS3 和 DS5 的 mPEC-Q 值均大于 5, 表明其发生生物毒性影响的可能性为 75%—81%. 其余 4 个调查点位的 mPEC-Q 值均介于 1—5 之间, 表明其发生生物毒性不利影响的可能性为 33%—58%. 沉积物中重金属的生物毒性不利影响评价与地累积指数和潜在生态危害指数具有较高一致性.

由于不同评价方法考虑的影响因素不同, 其评价结果侧重点也有所不同. 地累积指数法侧重单一重金属在各调查点位的超标情况. 潜在生态指数法综合考虑重金属毒性和浓度, 反映单一重金属生态影响的同时体现多种重金属的综合潜在生态风险, 但会忽略多种重金属复合污染时金属间的协同影响^[34—36]. 生态毒性不利影响评价反映重金属的相互作用, 评价数值与相应沉积物毒性发生率高度相关^[37—38]. 总体而言, 3 种评价结果具有较高一致性, I_{geo} 和 RI 均显示 As 为主要风险元素, DS3 和 DS5 污

染最严重。

3 结论 (Conclusion)

(1) 陡水水库表层水体中除部分点位(DS3—DS6)存在Hg超标外,其他点位均达到《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)Ⅲ类标准限值。DS5表层水污染程度较高,可能源于采矿及运输扬尘,其次为DS3和DS4,水质呈轻度污染。

(2) 陡水水库沉积物中As、Cu和Zn污染较重,其中As为主要污染因子,可能源于矿产开采及农业面源排放;Hg和Cd含量水平低于当地土壤背景值。DS3、DS4和DS5沉积物中重金属含量较高。

(3) 地累积污染指数、潜在生态风险指数及生态毒性不利影响评价均表明陡水水库DS3和DS5沉积物污染较严重,具有很强生态危害,发生生物毒性影响的可能性为75%—81%。

参考文献 (References)

- [1] SINGH U K, KUMAR B. Pathways of heavy metals contamination and associated human health risk in Ajay River basin, India [J]. *Chemosphere*, 2017, 174: 183-199.
- [2] 汤洁, 韩维峥, 李娜, 等. 哈尔滨市城区大气重金属沉降特征和来源研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2011, 31(11): 3087-3091.
TANG J, HAN W Z, LI N, et al. Multivariate analysis of heavy metal element concentrations in atmospheric deposition in Harbin city, northeast China [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, 31(11): 3087-3091 (in Chinese).
- [3] 李小虎, 汤中立, 初凤友. 白银矿山水体和沉积物中重金属及其化学形态分布特征 [J]. *地球与环境*, 2008, 36(3): 218-224.
LI X H, TANG Z L, CHU F Y. Analysis on speciation and transportation of heavy metals in water and sediment in Baiyin mine [J]. *Earth and Environment*, 2008, 36(3): 218-224 (in Chinese).
- [4] 廖柏寒, 曾敏, 郭朝晖, 等. 模拟酸雨下自然红壤与污染红壤中Cd, Cu, Zn的释放特征 [J]. *环境化学*, 2009, 28(3): 343-349.
LIAO B H, ZENG M, GUO Z H, et al. Release characteristics of Cd, Cu and Zn from the natural and contaminated red soils under simulated acid rain [J]. *Environmental Chemistry*, 2009, 28(3): 343-349 (in Chinese).
- [5] 旷攀, 李秋华, 金爽, 等. 贵州高原普定水库水环境重金属的时空分布特征及风险评价 [J]. *环境科学研究*, 2021, 34(3): 576-588.
KUANG P, LI Q H, JIN S, et al. Spatial and temporal distribution of heavy metals in water environment of Puding Reservoir in Guizhou Province and risk assessment [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2021, 34(3): 576-588.
- [6] 石志芳. 太湖沉积物中重金属污染特征及生态风险评价 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010.
SHI Z F. The characteristics of pollution and ecological risk assessment of heavy metals in sediments of Taihu lake [D]. Yangling, China: Northwest A & F University, 2010 (in Chinese).
- [7] 李佳璐, 姜霞, 王书航, 等. 丹江口水库沉积物重金属形态分布特征及其迁移能力 [J]. *中国环境科学*, 2016, 36(4): 1207-1217.
LI J L, JIANG X, WANG S H, et al. Heavy metal in sediment of Danjiangkou Reservoir: chemical speciation and mobility [J]. *China Environmental Science*, 2016, 36(4): 1207-1217 (in Chinese).
- [8] 李晋鹏, 成登苗, 赵爱东, 等. 澜沧江梯级水电坝库区沉积物重金属和营养盐污染特征及评价 [J]. *环境科学学报*, 2019, 39(8): 2791-2799.
LI J P, CHENG D M, ZHAO A D, et al. The characteristics and the assessment of heavy metal and nutrient pollution in sediments of cascading hydropower dams in Lancang River [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, 39(8): 2791-2799 (in Chinese).
- [9] 张文慧, 许秋瑾, 胡小贞, 等. 山美水库沉积物重金属污染状况及风险评价 [J]. *环境科学研究*, 2016, 29(7): 1006-1013.
ZHANG W H, XU Q J, HU X Z, et al. Pollution and potential ecological risks of heavy metals in sediment of Shanmei Reservoir [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016, 29(7): 1006-1013 (in Chinese).
- [10] 王闯, 单保庆, 唐文忠, 等. 官厅水库主要入库河流(洋河)表层沉积物重金属污染特征及风险水平 [J]. *环境科学学报*, 2017, 37(5): 1632-1640.
WANG C, SHAN B Q, TANG W Z, et al. Pollution and ecological risk of heavy metals in surface sediments from input river (Yang River) of Guanting Reservoir [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, 37(5): 1632-1640 (in Chinese).
- [11] 张伯镇, 王丹, 张洪, 等. 官厅水库沉积物重金属沉积通量及沉积物记录的生态风险变化规律 [J]. *环境科学学报*, 2016, 36(2): 458-465.
ZHANG B Z, WANG D, ZHANG H, et al. The flux of sedimentary heavy metals and variation of ecological risks recorded by

- sediments from Guanting Reservoir [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36(2): 458-465(in Chinese).
- [12] 李冰, 王亚, 郑钊, 等. 丹江口水库调水前后表层沉积物营养盐和重金属时空变化 [J]. *环境科学*, 2018, 39(8): 3591-3600.
- LI B, WANG Y, ZHENG Z, et al. Temporal and spatial changes in sediment nutrients and heavy metals of the Danjiangkou Reservoir before and after water division of the mid-route project [J]. *Environmental Science*, 2018, 39(8): 3591-3600(in Chinese).
- [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.
- ZHANG Q, FENG M Q, HAO X Y. Pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in the sediments of Zhangze Reservoir [J]. *Environmental Engineering*, 2019, 37(1): 11-17(in Chinese).
- [14] 曾明显, 曾泽国, 曾学平, 等. 陡水水库吻鮈虎鱼栖息环境及其优势种群形成原因的初步调查与分析 [J]. *江西水产科技*, 2017(3): 9-12.
- ZENG M Y, ZENG Z G, ZENG X P, et al. Preliminary investigation and analysis of formation reasons on habitat environment and dominant population of *Scyphus chinensis* in Doushui Reservoir [J]. *Jiangxi Fisheries Science and Technology*, 2017(3): 9-12(in Chinese).
- [15] 江玮. 基于生态环境敏感性评价的生态功能分区研究——以崇义县为例 [D]. 赣州: 江西理工大学, 2013.
- JIANG W. Ecological function zoning based on ecological environment sensitivity—a case study of Chongyi County [D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2013.
- [16] 叶素桃, 张思佳, 彭亚绵, 等. 单因子指数法在土壤重金属污染模型的应用研究 [J]. *数学学习与研究*, 2016(11): 141.
- YE S T, ZHANG S J, PENG Y M, et al. Application of single factor index method on heavy metal pollution model in soil [J]. *Mathematics Study and Research*, 2016(11): 141(in Chinese).
- [17] XIE L, ZHU W J, ZHANG J T, et al. Evaluation of heavy metal pollution in the soil of brownfield based on improved Nemero index method[C]//中国土壤学会土壤环境专业委员会第二十次会议暨农田土壤污染与修复研讨会.
- [18] 王倩倩, 王伟伟, 侯迎迎, 等. 改进的地累积指数法在重金属生态风险评价中的应用 [J]. *天津师范大学学报(自然科学版)*, 2018, 38(5): 47-51.
- WANG Q Q, WANG Z W, HOU Y Y, et al. Application of improved geo-accumulative index method in the ecological assessment of heavy metals [J]. *Journal of Tianjin Normal University (Natural Science Edition)*, 2018, 38(5): 47-51(in Chinese).
- [19] 邹勇军, 胡小姐, 汪成斌, 等. 江西省赣县沙地土壤重金属的来源及环境等级评价 [J]. *中国煤炭地质*, 2018, 30(11): 66-73.
- ZOU Y J, HU X J, WANG C B, et al. Study on soil heavy metal source and environmental grade assessment in Shadi Township, Ganxian County, Jiangxi Province [J]. *Coal Geology of China*, 2018, 30(11): 66-73(in Chinese).
- [20] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach [J]. *Water Research*, 1980, 14(8): 975-1001.
- [21] INGERSOLL C G, MACDONALD D D, WANG N, et al. Predictions of sediment toxicity using consensus-based freshwater sediment quality guidelines [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2001, 41(1): 8-21.
- [22] LACEY E M, KING J W, QUINN J G, et al. Sediment quality in Burlington harbor, lake Champlain, U. S. A. [J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2001, 126(1-2): 97-120.
- [23] 边博, 周燕, 张琴. 太湖西岸河网沉积物中重金属污染特征及风险评价 [J]. *环境科学*, 2017, 38(4): 1442-1450.
- BIAN B, ZHOU Y, ZHANG Q. Pollution characteristics and risk assessment of heavy metals from river network sediment in western area of Taihu Lake [J]. *Environmental Science*, 2017, 38(4): 1442-1450(in Chinese).
- [24] MEENA N K, PRAKASAM M, BHUSHAN R, et al. Last-five-decade heavy metal pollution records from the Rewalsar Lake, Himachal Pradesh, India [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2017, 76(1): 1-10.
- [25] 郭云, 陈都, 王铭, 等. 阿哈水库沉积物中重金属分布特征及潜在生态风险评价 [J]. *水生态学杂志*, 2018, 39(4): 24-30.
- GUO Y, CHEN D, WANG M, et al. Distribution and ecological hazard risk assessment of heavy metals in the sediment of Aha Reservoir [J]. *Journal of Hydroecology*, 2018, 39(4): 24-30(in Chinese).
- [26] 杨颖, 孙文, 刘吉宝, 等. 北运河流域沙河水库沉积物重金属分布及生态风险评估 [J]. *环境科学学报*, 2021, 41(1): 217-227.
- YANG Y, SUN W, LIU J B, et al. Distribution and ecological risk assessment of heavy metals in sediments of Shahe Reservoir in Northern Canal Basin [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, 41(1): 217-227(in Chinese).
- [27] 张伟, 张丽丽. 贵州阿哈水库不同季节水体及沉积物重金属分布特征及其污染评价 [J]. *生态学杂志*, 2021, 40(6): 1753-1765.
- ZHANG W, ZHANG L L. Distribution characteristics and pollution assessment of heavy metals in water and sediments of different seasons in Aha Reservoir of Guizhou[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 40(6): 1753-1765.
- [28] 可华明, 杨清伟, 刘守江, 等. 嘉陵江亭子口水库沉积物重金属分布特征及风险评价 [J]. *安全与环境学报*, 2020, 20(6): 2389-2397.
- KE H M, YANG Q W, LIU S J, et al. Distribution of the heavy metal contaminants and the corresponding eco-hazard risk assessment in

the sediment of Tingzikou Reservoir of Jialing River [J]. Journal of Safety and Environment, 2020, 20(6): 2389-2397(in Chinese).

- [29] 江涛, 林伟稳, 曹英杰, 等. 梅江流域清凉山水库沉积物重金属污染、生态风险评价及来源解析 [J]. 环境科学, 2020, 41(12): 5410-5418.

JIANG T, LIN W W, CAO Y J, et al. Pollution and ecological risk assessment and source apportionment of heavy metals in sediments of Qingliangshan Reservoir in the Meijiang Basin [J]. Environmental Science, 2020, 41(12): 5410-5418(in Chinese).

- [30] 朱宜平, 李小飞, 梁霞. 上海青草沙水库表层沉积物重金属含量水平及其生态风险评价 [J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2021(2): 54-62.

ZHU Y P, LI X F, LIANG X. Content and ecological risk assessment of heavy metals in the surface sediments of Qingcaosha Reservoir in Shanghai [J]. Journal of East China Normal University (Natural Science), 2021(2): 54-62(in Chinese).

- [31] LEE P K, KANG M J, YU S, et al. Enrichment and geochemical mobility of heavy metals in bottom sediment of the Hoedong reservoir, Korea and their source apportionment [J]. *Chemosphere*, 2017, 184: 74-85.

- [32] GWIMBI P, KOTELO T, SELIMO M J. Heavy metal concentrations in sediments and *Cyprinus carpio* from Maqalika Reservoir –Maseru, Lesotho: An analysis of potential health risks to Fish consumers [J]. *Toxicology Reports*, 2020, 7: 475-479.

- [33] HUSSEIN A M, JABBAR D N, ALI A R. Spatial distribution and evaluation of heavy metals in surface sediments of the Al-Najaf sea depression reservoir, Iraq [J]. *Alexandria Engineering Journal*, 2020, 59(6): 5197-5206.

- [34] CHEN C X, ZHENG B H, JIANG X, et al. Spatial distribution and pollution assessment of mercury in sediments of Lake Taihu, China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2013, 25(2): 316-325.

- [35] 陈明, 蔡青云, 徐慧, 等. 水体沉积物重金属污染风险评价研究进展 [J]. 生态环境学报, 2015, 24(6): 1069-1074.
CHEN M, CAI Q Y, XU H, et al. Research progress of risk assessment of heavy metals pollution in water body sediments [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, 24(6): 1069-1074(in Chinese).

- [36] EL-SAYED S A, MOUSSA E M M, EL-SABAGH M E I. Evaluation of heavy metal content in Qaroun Lake, El-Fayoum, Egypt. Part I: Bottom sediments [J]. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 2015, 8(3): 276-285.

- [37] LI C, SONG C W, YIN Y Y, et al. Spatial distribution and risk assessment of heavy metals in sediments of Shuangtaizi estuary, China [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2015, 98(1-2): 358-364.

- [38] YU G B, LIU Y, YU S, et al. Inconsistency and comprehensiveness of risk assessments for heavy metals in urban surface sediments [J]. *Chemosphere*, 2011, 85(6): 1080-1087.