

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221363

# 花溪水库底泥重金属含量分布与生态风险评估

杨燕妮<sup>1a</sup>, 王中美<sup>1b</sup>, 周向阳<sup>1b</sup>, 杜延远<sup>2</sup>, 李 鑫<sup>2</sup>

(1. 贵州大学 a. 喀斯特地质资源与环境教育部重点实验室; b. 资源与环境工程学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 六盘水市规划设计研究院有限责任公司, 贵州 六盘水 553001)

**摘要:** 花溪水库为典型的岩溶山区水库, 为贵阳市重要的水源地, 为查清花溪水库底泥重金属分布状况, 在2个横断面上共采集21组底泥样品, 利用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定Cr、Cu、Zn、As、Cd、Pb等重金属元素的含量, 分析其在横断面上的分布特征及含量水平, 同时采用潜在生态风险评估法和地积累评价法进行生态风险评估, 系统分析了水库2个不同断面的重金属污染程度。结果表明, 入库断面重金属含量水平较低且低于背景值, 其浓度顺序为Zn>Cr>Cu>As>Pb>Cd; 重金属含量具有随离岸距离增加而减少的规律, 主要是受周边农业活动影响所致; 开阔断面重金属含量水平较低, 浓度顺序为Zn>Cr>Cu>Pb>As>Cd; 重金属含量具有自左岸向右岸递增的规律, 主要与河流流速及底泥颗粒大小有关; 水库底泥重金属污染为轻度污染, 且入库断面污染程度右岸>左岸>河心, 开阔断面各重金属污染程度从左岸至右岸逐渐增高。

**关键词:** 花溪水库; 底泥; 重金属; 分布特征; 生态风险评估

**中图分类号:** TV697.3; X53; X820.4

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-7709(2023)02-0045-04

## 1 概况

花溪水库位于贵州省贵阳市、南明河上游花溪河段, 属乌江水系, 下流离花溪3 km, 距贵阳市市区20 km。花溪水库为一级水源保护区, 库容约为 $3 \times 10^7 \text{ m}^3$ , 坝址以上流域面积 $325 \text{ km}^2$ , 多年平均流量 $6.3 \text{ m}^3/\text{s}$ , 流域多年平均降雨量 $1090 \text{ mm}$ 。水库周边和汇水区域范围出露地层主要为三叠系下统大冶组( $T_1d^1$ )、三叠系下统安顺组( $T_1a^1$ ), 岩性主要为灰岩、砂页岩夹灰岩、泥质白云岩, 因处于岩溶地带土壤较薄, 主要为黄壤、石灰土、紫色土、水稻土, 土壤颗粒细小, 粘性较强, 对重金属有较大的吸附性。花溪水库主要河流包括冷饭河和车田河等, 周边人口约4万人, 农业人口3万人, 周边污染源主要来自农业及畜牧业, 据统计, 农用化肥施用量约7000 t, 水库库区牲畜污水排放量约 $2.54 \times 10^4 \text{ m}^3$ [1]。徐信等[2]发现2012年花溪水库重金属含量超标; ZHOU X等[3]确定花溪水库底泥中重金属含量分布存在空

间差异。花溪水库作为花溪区的主要水源地, 其水质对当地具有极其重要的影响。因此, 本文采用花溪水库底泥样品, 测定Cr、Cu、Zn、As、Cd、Pb等重金属的含量, 分析重金属含量在横断面上的分布特征及形成原因, 最后利用潜在风险指数法与地积累指数法进行生态风险评估, 结果对水库重金属污染治理、防控具有重要意义, 也可水库综合管理提供科学依据。

## 2 样品采集

### 2.1 取样点布设

通过对花溪水库库区进行实地调查, 在镇山村段入库、开阔2个断面布设取样点, 采用抓斗式底泥采样器, 对水库表层底泥及岸边土壤进行采样, 所采样本为0~5 cm表层水库底泥与岸边土壤, 每种样品质量约300~1000 g, 并记录取样点海拔、经纬坐标、水深及水库周围情况。采样点分布情况见图1, 采样点水深情况见图2。

### 2.2 样品测定及数据处理

**收稿日期:** 2022-07-04, **修回日期:** 2022-08-09

**基金项目:** 2022年度贵州省省级教改项目; 贵州省科技支撑项目([2019]2875号); 黔科合平台人才项目([2018]5781-45)

**作者简介:** 杨燕妮(1995-), 女, 硕士研究生, 研究方向为岩溶水文地质, E-mail: 2446195562@qq.com

**通讯作者:** 王中美(1975-), 女, 博士、副教授, 研究方向为岩溶水文地质与岩溶水环境, E-mail: 891342472@qq.com

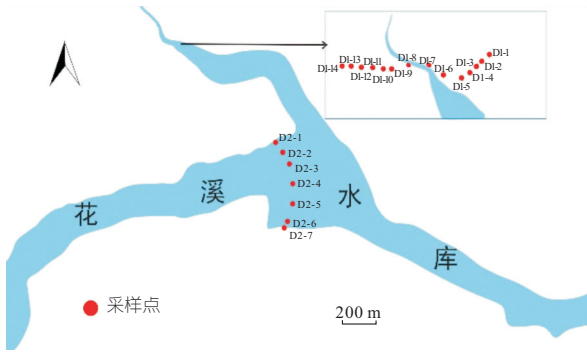


图 1 花溪水库采样点分布

Fig. 1 Distribution of sampling site of Huaxi Reservoir

属含量的同时，还将重金属的生态效应、环境效应与毒理学联系在一起，可体现重金属的相对贡献、地理空间差异，确定特定重金属元素对环境的危害程度，计算公式为：

$$C_r^i = C_i / C_n^i \quad (1)$$

$$E_r^i = T_r^i C_r^i \quad (2)$$

$$R_1 = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n T_r^i C_i \quad (3)$$

式中， $C_r^i$  为金属元素  $i$  的污染系数； $C_i$  为实测重金属  $i$  质量分数，mg/kg； $C_n^i$  为所测金属元素背景值； $E_r^i$  为金属元素  $i$  潜在生态风险因子； $T_r^i$  为金属元素  $i$  的生物毒性系数； $R_1$  为多种重金属的潜在生态风险指数。

根据  $E_r^i$ 、 $R_1$  值对污染强度进行定量分级，见表 1。

表 1 潜在生态风险系数  $E_r^i$  及生态风险指数  $R_1$  危害等级

Tab. 1 Relationship between  $E_r^i$ ,  $R_1$  and pollution degree

潜在生态风险因子	潜在生态风险指数	生态风险程度
$E_r^i < 40$	$R_1 < 150$	轻微
$40 \leq E_r^i < 80$	$150 \leq R_1 < 300$	中等
$80 \leq E_r^i < 160$	$300 \leq R_1 < 600$	较强
$160 \leq E_r^i < 320$	$R_1 \geq 600$	很强
$E_r^i \geq 320$		极强

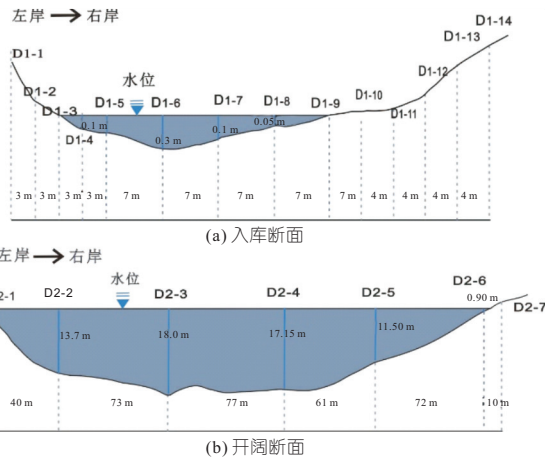


图 2 采样点剖面示意图

Fig. 2 Schematic diagram of cross section of sampling point

重金属测定方法依照《土壤和沉积物 金属元素总量的消解 微波消解法(HJ832-2017)》<sup>[4]</sup>进行。将样品自然风干，除去样品中的碎石杂物，用玛瑙研钵研磨，过 100 目尼龙筛。称取 0.1 g 样品放入消解罐，依次加入 6 mL 硝酸、2 mL 盐酸、2 mL 氢氟酸(均为优级纯)，随后进行微波消解，消解结束冷却后进行赶酸，蒸至粘稠状，取下冷却；用去离子水润洗消解罐 2~3 遍，并转移至试管中，最后用去离子水定容至 50 mL，静置、取上清液备测，配置中设置 3 个空白样，最后利用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定重金属含量。重金属含量原始数据用 ICP-MS 和自带软件进行处理，数据统计分析和图表绘制采用 Origin、CorelDraw、excel。

### 3 研究方法

#### 3.1 潜在生态风险指数法

潜在生态危害指数法<sup>[5]</sup>(PERI)根据重金属性质及其环境行为特点，从沉积学角度出发，评价土壤或沉积物中重金属污染。该方法在考虑重金

#### 3.2 地积累指数法

地积累指数法<sup>[5]</sup>综合考虑了人为因素、环境地球化学重金属背景含量、自然成岩作用过程引起的背景值变动，其计算公式为：

$$L_{geo} = \text{Log}_2 [C_n / (k B_n)] \quad (4)$$

式中， $L_{geo}$  为地积累指数； $C_n$  为重金属元素  $n$  在沉积物中的实测含量，mg · kg/L； $B_n$  为沉积物中该元素的地球化学背景值； $k$  为因成岩作用引起重金属背景值最小变异而设定的常数，取 1.5。

地积累指数法评价重金属污染程度分级见表 2。

表 2 地积累指数  $L_{geo}$  值分级

Tab. 2 Classification of geo-accumulation index and pollution degree

数值范围	分级	污染程度	数值范围	分级	污染程度
$L_{geo} \leq 0$	0	无污染	$2 < L_{geo} \leq 3$	3	中等—强
$0 < L_{geo} \leq 1$	1	轻微	$3 < L_{geo} \leq 4$	4	强
$1 < L_{geo} \leq 2$	2	中等	$4 < L_{geo} \leq 5$	5	强—极强

### 4 结果与分析

#### 4.1 花溪水库底泥重金属含量分布特征

背景值选用贵州省土壤重金属背景值<sup>[6]</sup>(表 3)，花溪水库重金属含量统计见表 4。

表 3 贵州省土壤重金属背景值含量及毒性系数

Tab. 3 Background value of heavy metals in soils of Guizhou Province and toxicity coefficient of heavy metal

重金属	背景值/(mg·kg <sup>-1</sup> )	毒性系数
Cr	95.90	2
Cu	32.00	5
Zn	99.50	1
As	20.00	10
Cd	0.66	30
Pb	35.20	5

表 4 花溪水库底泥重金属含量及统计参数

Tab. 4 Heavy metals content and statistical parameters of sediments in Huaxi Reservoir mg/kg

采样点及统计参数	Cr	Cu	Zn	As	Cd	Pb
D <sub>1-1</sub>	60.80	59.24	82.90	15.96	0.58	21.57
D <sub>1-2</sub>	35.01	32.18	47.90	5.00	0.27	11.02
D <sub>1-3</sub>	31.21	37.66	71.15	14.26	0.37	14.37
D <sub>1-4</sub>	18.60	24.23	53.70	5.58	0.23	9.09
D <sub>1-5</sub>	16.31	19.81	45.93	3.13	0.22	6.74
D <sub>1-6</sub>	18.72	23.74	54.40	5.50	0.24	8.47
D <sub>1-7</sub>	13.84	19.00	49.00	3.78	0.19	7.29
D <sub>1-8</sub>	32.13	42.72	116.65	17.73	0.54	19.03
D <sub>1-9</sub>	48.12	53.89	146.70	23.19	0.71	23.99
D <sub>1-10</sub>	9.43	13.54	36.59	0	0.65	14.04
D <sub>1-11</sub>	12.92	19.93	55.60	3.78	0.20	9.06
D <sub>1-12</sub>	14.87	20.43	47.97	2.94	0.18	8.17
D <sub>1-13</sub>	46.71	50.74	118.55	16.58	0.69	23.23
D <sub>1-14</sub>	84.20	83.09	125.75	26.23	0.82	26.21
均值	31.63	35.73	75.20	10.26	0.42	14.45
标准差	20.94	19.28	34.99	8.16	0.22	6.73
变异系数/%	66.19	53.95	46.53	79.53	52.24	46.36
平均富集系数	0.33	1.12	0.94	0.76	0.51	0.41
D <sub>2-1</sub>	18.96	16.47	35.64	9.50	0.19	10.50
D <sub>2-2</sub>	10.67	9.84	20.55	2.07	0.11	6.04
D <sub>2-3</sub>	50.40	40.78	93.85	22.23	0.59	25.29
D <sub>2-4</sub>	30.97	23.73	52.70	17.97	0.34	15.97
D <sub>2-5</sub>	29.61	24.11	52.15	16.06	0.38	15.33
D <sub>2-6</sub>	55.50	58.44	88.30	22.08	0.49	22.35
D <sub>2-7</sub>	74.50	66.14	89.70	23.75	0.45	28.07
均值	38.66	34.22	61.84	16.24	0.36	38.66
标准差	20.77	9.00	26.91	7.33	0.16	20.77
变异系数/%	53.72	58.14	43.52	45.11	42.78	41.92
平均富集系数	0.36	1.21	0.62	0.81	0.61	0.36

由表 4 可知,底泥重金属含量水平较低,只有个别采样点超出相应背景值;入库断面浓度顺序为 Zn>Cr>Cu>As>Pb>Cd,开阔断面浓度顺序为 Zn>Cr>Cu>Pb>As>Cd;从富集系数来看,两断面除了 Cu 高于 1,存在富集,其余重金属均不存在富集,变异系数能反映污染物的空间分布情况<sup>[7]</sup>,变异系数越大污染物分布越不均匀,水库底泥实测六种重金属元素的变异系数范围为

41.92%~79.53%,属于中等变异。开阔断面变异系数顺序为 Cu>Cr>As>Zn>Cd>Pb,入库断面变异系数顺序为 As>Cr>Cu>Cd>Pb>Zn。入库断面 As 变异系数最大,高达 79.53%,开阔断面 Cu 变异系数最大,为 58.14%。各重金属空间分布存在不均匀性,尤其是 As,离散程度较大。总体来说,花溪水库底泥中重金属污染情况较轻,存在局部污染,底泥中重金属主要来源于农业及周边城镇生产活动及岸边岩石风化。

对比徐信等<sup>[2]</sup>2012 年对花溪水库底泥重金属含量的研究结果、研究区土壤重金属含量背景值<sup>[7]</sup>与本文的结果,可知 2012 年除了 Cr、Cd,其他几种重金属含量均超出相应背景值,本文结果中除了 Cu,其余几种重金属均低于相应背景值。对比 2012 年,本文所测重金属均有不同程度的降低,且降幅较大,特别是 Cr、Pb、Cu,降幅趋于 60%。根据走访调查得知,2016 年曾对水库底泥进行过清淤,说明清淤对治理重金属效果明显,通过清淤能有效去除水库底泥污染,从而改善水质<sup>[8]</sup>。

底泥中重金属的分布受 pH 值、水动力、粒度大小、水温等多种因素综合影响<sup>[9]</sup>。入库断面各重金属最高含量值均在右岸 D<sub>1-14</sub>,最低值基本集中于库中心点 D<sub>1-10</sub>,最高值为最低值的 3~9 倍。入库断面重金属含量随距岸边距离的增加而降低,与刘红磊等<sup>[10]</sup>的研究结果相似。岸边土壤重金属含量高于中心底泥重金属含量,而 D<sub>1-8</sub>、D<sub>1-9</sub> 中间这两点含量较高,原因是这两个点有水流动,但水深仅为 0.01~0.05 m,水动力很弱,水中携带的细粒重金属易沉积并富集于底泥中,右岸重金属较高且高于相应背景值的主要原因为邻近镇山村,人类活动较多,生活污水的排放及其他活动导致重金属在右岸富集,造成右岸重金属高于左岸。开阔断面重金属含量分布呈自左岸向右岸逐渐增高的趋势,最高值集中出现在右岸,各重金属在 D<sub>2-2</sub> 含量最低,最高值约为最低值的 4~11 倍。D<sub>2-3</sub> 含量较高的原因为在此处下垫面呈凹状,重金属更易沉积于此;右岸含量较高原因是右岸为凸岸,河流凹岸、凸岸水动力特征存在差异,往往在凹岸侵蚀、凸岸堆积,沉积物的堆积使凸岸重金属含量比直道高,且右岸流速比左岸小、底泥颗粒细、吸附能力大,所以右岸重金属含量明显高于左岸。重金属在花溪水库空间差异较明显,重金属分布特征受周边城镇居民活动、农业活动及水流等多种因素影响。

#### 4.2 重金属生态风险评估

利用潜在生态风险指数法可了解所测重金属

在研究区域的整体风险程度,利用地积累指数法可在定量评价重金属的同时能在一定程度反映出研究区的地质环境和受人类活动污染的情况。

潜在生态风险指数法和地积累指数法评价结果见表 5。由表 5 可知:①潜在生态风险指数法评价结果。21 个采样点单个重金属  $E_r^i$  值均小于 40,范围在 0~37.27,由大到小顺序为  $Cd > As > Cu > Pb > Cr > Zn$ ;  $R_1$  值的范围为 8.75~69.68,为低风险,入库附近断面岸边、河心区潜在风险相对较大,在开阔断面上,风险系数从左岸至右岸逐渐升高,开阔断面潜在风险系数平均值比入库附近大。结果表明,花溪水库底泥中 Cd 的风险系数最大,污染程度最高,说明 Cd 对水库存在一定的威胁。②地积累指数法评价结果。重金属  $L_{geo}$  值在水库开阔断面与入库断面的大小排序一致,依次为  $Cu > Zn > Cd > As > Pb > Cr$ ,  $L_{geo}$  值均未超过 1,表明水库底泥重金属污染风险较轻;其中 Cu 为主要污染物,在入库附近断面  $D_{1-1}$ 、 $D_{1-9}$ 、 $D_{1-13}$ 、 $D_{1-4}$  及开阔断面右岸  $D_{2-6}$ 、 $D_{2-7}$  处 Cu 元素均存在轻度污染,整体上入库附近与开阔断面污染程度相当。

表 5 花溪水库底泥重金属潜在生态危害系数和指数

Tab. 5 Potential ecological risk factor and index of heavy metals in sediment of Huaxi Reservoir

采样点	入库断面	均值	开阔断面	均值
$E_r^i$ (Cr)	0.20~1.76	0.66	0.22~1.55	0.81
$E_r^i$ (Cu)	2.12~12.98	5.58	1.54~10.33	5.35
$E_r^i$ (Zn)	0.14~0.84	0.36	0.10~0.66	0.34
$E_r^i$ (As)	0.00~13.12	5.13	1.04~11.88	8.12
$E_r^i$ (Cd)	8.18~37.12	19.12	5.00~20.45	16.56
$E_r^i$ (Pd)	1.04~3.72	2.05	0.86~3.99	2.51
$R_1$	14.52~69.68	32.91	8.75~48.87	33.68
危害程度	轻微	轻微	轻微	轻微
$L_{geo}$ (Cr)	-0.77~-3.93	-2.48	-3.75~-0.95	-2.43
$L_{geo}$ (Cu)	-1.83~+0.79	0.62	-2.29~+0.46	0.64
$L_{geo}$ (Zn)	-2.03~-0.02	-1.13	-2.86~-0.73	-1.18
$L_{geo}$ (As)	-3.26~-0.00	-1.73	-3.86~-0.34	-1.64
$L_{geo}$ (Cd)	-2.38~-0.27	-1.45	-3.17~-0.75	-1.48
$L_{geo}$ (Pd)	-2.86~-1.01	-2.03	-3.13~-0.91	-1.98
危害程度	轻微	轻微	轻微	轻微

由两种生态风险评估结果可知,花溪水库底泥重金属的生态风险程度较低。重金属轻度污染的原因可能为肥料、农药的使用、分散式牧畜及生活污水的排放所致,虽然水库底泥重金属含量整

体不高,但也要重视,尤其注意农业及牧畜业等人类生产活动对水库底泥生态环境的影响。

### 5 结论

a. 入库断面底泥重金属元素含量水平较低,浓度顺序为  $Zn > Cr > Cu > As > Pb > Cd$ ,重金属含量随距离岸边距离增加而减少;开阔断面底泥重金属元素含量水平较低,浓度顺序为  $Zn > Cr > Cu > Pb > As > Cd$ ,重金属分布自左岸向右岸逐渐增加。

b. 花溪水库底泥重金属污染程度较低,水库整体处于清洁—轻度污染状态,Cd、Cu、As 仍会对水环境造成一定的风险。

### 参考文献:

- [1] 代凯鸥,丁坚平,曹兴民. 基于溪水库纳污能力的分析[J]. 黑龙江水利科技,2010,38(1):150-152.
- [2] 徐信,支崇远,陈玲. 花溪水库表层沉积物重金属污染及潜在生态风险评价[J]. 中国环境监测,2012,28(7):76-78.
- [3] ZHOU X, ZHOU K, LIU R, et al. Significant decrease in heavy metals in surface sediment after ten-year sustainable development in Huaxi Reservoir located in Guiyang, Southwestern China[J]. Int. J. Environ. Res. Public. Health., 2021, 18 (14): 7684.
- [4] 环境保护部. 土壤和沉积物 金属元素总量的消解微波消解法: HJ832-2017[S]. 北京: 中国环境出版社, 2017.
- [5] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sedimentological approach[J]. Water research, 1980, 14(8):975-1001.
- [6] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [7] 黄惠,张永波. 山底河流域重金属污染特征分析[J]. 水电能源科学, 2020, 38(7):49-52.
- [8] 张亚,余灿,杨璐瑶,等. 遵义市中心城区河道底泥污染评价及底泥清淤方案[J]. 水电能源科学, 2019, 37(12):37-40.
- [9] 刘敏,邓玮,赵良元,等. 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, 2021, 38(7):143-149, 154.
- [10] 刘红磊,尹澄清,唐运平. 太湖梅梁湾岸边带底泥中重金属的形态与分布[J]. 中国环境科学, 2010, 30(3):389-394.

