

孙丞帅, 张艳, 魏平堂, 等. 大理洱海流域河道水系沉积物中的重金属污染特征与风险评估及源解析[J]. 净水技术, 2025, 44(10): 159–170.
SUN C S, ZHANG Y, WEI P T, et al. Characteristics, risk assessment and source apportionment for heavy metals pollution in sediments of river systems in Erhai Lake Basin in Dali[J]. Water Purification Technology, 2025, 44(10): 159–170.

大理洱海流域河道水系沉积物中的重金属污染特征与风险评估及源解析

孙丞帅¹, 张艳^{1,*}, 魏平堂², 罗文萍¹

(1. 昆明理工大学有色金属矿产地质调查中心西南地质调查所, 云南昆明 650093; 2. 中国冶金地质总局昆明地质勘察院, 云南昆明 650024)

摘要 【目的】 本文为揭示洱海流域地表水与沉积物重金属污染特征及其潜在风险。【方法】 本文以洱海流域主要河流及其表层沉积物为研究对象, 考察分析了相关河流和沉积物中砷(As)、汞(Hg)、镉(Cd)、铬(Cr)、铅(Pb)、镍(Ni)、铜(Cu)和锌(Zn)重金属的含量特征。研究采用单因子指数法、地累积指数法和潜在生态风险指数法评估了河流及沉积物中重金属污染程度及潜在生态风险, 同时, 运用多元统计学方法分析了污染物的来源。【结果】 ①洱海流域水系中重金属含量低于《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中Ⅱ类水标准, 单因子指数分析表明相关水系处于无污染状态; ②沉积物中 As、Hg、Pb、Cd、Cu、Zn、Ni、Cr 8 种元素平均质量分数分别为 10.15、0.12、43.18、0.70、50.68、144.31、54.58、103.27 mg/kg, 变异程度为 Cd>Hg>As>Pb>Ni>Cu>Cr>Zn; ③沉积物中 8 种重金属的地质累积指数表明, Hg 和 Cd 均处于清洁状态, As、Pb、Cr 在少数样点处于轻度污染状态, Cu、Zn、Ni 为首要污染重金属, 单一重金属潜在生态风险与综合潜在生态危害均属于轻微生态危害; ④洱海河流表层沉积物中 As、Pb、Cd 和 Zn 主要是人类生活和交通复合污染源等人为来源, Cu、Ni、Cr 主要受自然来源影响, Hg 主要来源于工业活动。【结论】 洱海流域地表水与沉积物污染程度基本处于无污染至轻度污染状态, 整体受污情况良好, 洱海是比较清洁湖泊。

关键词 洱海 沉积物 重金属 污染评价 源解析

中图分类号: TU992 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2025)10-0159-12

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.10.017

Characteristics, Risk Assessment and Source Apportionment for Heavy Metals Pollution in Sediments of River Systems in Erhai Lake Basin in Dali

SUN Chengshuai¹, ZHANG Yan^{1,*}, WEI Pingtang², LUO Wenping¹

(1. Kunming University of Science and Technology, Southwest of Geological Survey, Geological Survey Center for Non-Ferrous Mineral Resources, Kunming 650093, China;

2. Kunming Geological Prospecting Institute, China Metallurgical Geological Bureau, Kunming 650024, China)

Abstract [Objective] This paper is to reveal the characteristics and potential risks of heavy metal pollution in surface water and sediments in the Erhai Lake Basin. [Methods] This paper focused on the major rivers and their overlying surface sediments in the basin. The content characteristics of heavy metals such as arsenic (As), mercury (Hg), cadmium (Cd), chromium (Cr), lead (Pb), nickel (Ni), copper (Cu), and zinc (Zn) in the relevant rivers and sediments were investigated and analyzed. Using the single-factor index method, geoaccumulation index method, and potential ecological risk index method, the pollution degrees and potential ecological risks of heavy metals in rivers and sediments were evaluated. Additionally, multivariate statistical methods were employed to analyze the sources of pollutants. [Results] ① The concentrations of heavy metals in the water system of the Erhai Lake

[收稿日期] 2024-01-04

[基金项目] 云南省万人计划“青年拔尖人才”(YNWR-QNBJ-2019-157); 中国冶金地质总局科技创新项目(CMGB202005)

[作者简介] 孙丞帅(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为水文地质与工程地质, E-mail: 2669128549@qq.com。

[通信作者] 张艳, 女, 教授, 研究方向为地球化学, E-mail: 78598874@qq.com。

Basin were lower than the class II water standard specified in the *Environmental Quality Standards for Surface Water* (GB 3838—2002). Single-factor index analysis suggested that the relevant water systems were in a pollution-free state, indicating relatively clean rivers. Following the implementation of various protection measures, the water quality in the Erhai Lake Basin had improved. ② The average concentrations of As, Hg, Pb, Cd, Cu, Zn, Ni, and Cr in the sediments were 10.15, 0.12, 43.18, 0.70, 50.68, 144.31, 54.58 mg/kg, and 103.27 mg/kg, respectively. The degree of variation followed the order of Cd > Hg > As > Pb > Ni > Cu > Cr > Zn. ③ The geoaccumulation index of the eight heavy metals in the sediments indicated that Hg and Cd were in a clean state, while As, Pb, and Cr were in a state of mild pollution at a few sampling points. Cu, Zn, and Ni were the primary pollutants. Both the potential ecological risk of individual heavy metals and the comprehensive potential ecological hazard in the sediments were categorized as minor ecological hazards. ④ The sources of As, Pb, Cd, and Zn in the surface sediments of rivers in the Erhai Lake Basin were primarily anthropogenic, including combined sources from human life and transportation. Cu, Ni, and Cr were mainly influenced by natural sources, while Hg was primarily derived from industrial activities. [Conclusion] The pollution levels of surface water and sediment in the Erhai Lake watershed are predominantly classified as non-polluted to lightly polluted, indicating a good overall contamination status. Thus, Erhai Lake can be considered a relatively clean lake.

Keywords Erhai Lake sediment heavy metal pollution evaluation source apportionment

从 20 世纪开始,重金属污染问题一直存在,这已经引起了世界范围的广泛关注^[1]。全球河流和湖泊水体中的重金属平均浓度普遍高于 20 世纪世界卫生组织和美国环境保护局公布的标准重金属浓度阈值^[2]。我国多个江河湖库的水体和沉积物均受到不同程度的重金属污染,如长江、鄱阳湖、洞庭湖等,现已超过 80% 的江河湖库存在重金属污染^[3-4]。在水体中,重金属可以富集在水生生物体内,影响动植物生长,对河湖等水生态系统造成不良影响,还可以通过食物网进入人体,对人类产生极大危害^[5-6]。因此,研究水体和沉积物中的重金属污染状况、评价生态风险及解析污染来源,对河流湖泊的污染治理有重要意义。目前,国内外对河流和沉积物中的重金属进行了大量研究,发现不同地域重金属的污染程度、污染来源各有不同。例如,Chan 等^[7]对利亚里河进行污染评价和潜在健康风险评估,铬(Cr)、铜(Cu)、汞(Hg)、镍(Ni)、铅(Pb)等远超巴基斯坦关于海水重金属允许浓度的质量标准,对人体健康风险较大。Shang 等^[8]对中国北黄海南部表层沉积物的污染情况进行了评估并分析污染来源,发现 Cu 和 Cr 污染程度较低,来源主要为自然过程;锌(Zn)和镉(Cd)呈中度污染,来源为自然过程和人类活动;Pb、Hg 来源于水上交通和工业。高振等^[9]对湘江流域长沙段沉积物中的重金属污染状况和来源进行研究,发现沉积物中重金属铁(Fe)、锰(Mn)、Zn 平均浓度最高,Cr 与工业废水排放有关,Mn、Zn、砷(As)与锌矿和锰矿开采有关,Fe、Cu、Ni 可能来源于自然存在。

经济高速发展导致人类活动对自然环境影响不断加剧,洱海经历了从贫营养湖泊到中营养湖泊的演变过程^[10]。洱海水质不断下降,制约区域社会经济发展,与此同时,洱海重金属污染与富营养化过程呈现同步趋势^[11]。以往洱海的水质及沉积物的研究多集中于有机质、总磷(TP)、总氮(TN)、营养盐释放特征^[12]、污染评价^[13-14]、时空变化规律^[15]、氮磷干湿沉降^[16]等,对水体和沉积物中的重金属污染情况的研究鲜有涉及。废水排放是洱海面临的最大污染问题之一,废水中重金属和有机物等有害物质排入流域水系,会转移至沉积物中^[17]。洱海流域农业生产活动频繁,污染物可通过降水冲蚀、地表径流、土壤渗滤的方式造成水体污染。因此,查明洱海重金属污染状况,治理洱海污染迫在眉睫^[18]。本研究对洱海周边河流和表层沉积物中的重金属元素 As、Hg、Cd、Cr、Pb、Ni、Cu、Zn 进行了测定,分析污染特征,对洱海流域生态环境质量及水质变化趋势作出科学客观评价与预判,为开展污染治理提供理论依据。

1 研究区域与方法

1.1 研究区域概况

洱海流域位于云南省大理市和洱源县 2 个县级行政区内,流域面积为 2 607.75 km²^[19],南北长为 42.53 km,最大湖宽为 9.19 km,最窄处仅为 2.55 km。当湖面高程在 1 966 m 时,湖面面积为 252 km²,蓄水量为 29.59 × 10⁸ m³^[20]。洱海位于 100°5′E ~ 100°17′E, 25°35′N ~ 25°58′N,面积为 251 km²,平均深度为 10.5 m。洱海流域内汇入中心湖泊的各类

支线河流以聚集的方式流入,共计 117 条大小支流河溪,这些河流的水量根据地理位置分布,北有弥苴河、罗时江、永安江,西有苍山十八溪,南有波罗江。

1.2 样品采集与测定

入湖河流是指在一定区域的狭长流域内频繁或间歇地流动,在地表水和地下水的补给下最终流入湖泊的水流^[21]。因此,根据洱海流域水系分布情况,在 2021 年 12 月,按照《地表水和污水监测技术规范》(HJ/T 91—2002)相关规定在洱海周边河流(图 1)开展地表水采样工作。采用直立式有机玻璃采样器采集 250 mL 水样,采集的水样为水面下 0.5 m 处的瞬时水样,装入聚乙烯塑料瓶带回实验室,共计采集地表水样品 11 件。沉积物采样点位通常为水质采样垂线的正下方,采用管式采样器采集表层沉积物样品 11 件,在采样过程中确保所采集的样品为非扰动样,随后将多个采样点的样品混合均匀,并装入密封的聚乙烯塑料袋中带回实验室进行后续分析。样品需在避光条件下自然风干,然后去除杂质并细磨,研磨后的土样通过孔径为 0.15 mm

的尼龙筛,处理好的样品需要装瓶密封保存。

本研究主要对地表水和沉积物样品中 As、Hg、Cd、Cr、Pb、Ni、Cu、Zn 这 8 种重金属的含量进行分析测定。水样中的重金属 Cd、Cr、Pb、Ni、Cu、Zn 采用《水质 65 种元素的测定 电感耦合等离子体质谱法》(HJ 700—2014)测定,As 和 Hg 采用《水质 汞、砷、硒、铋和锑的测定 原子荧光法》(HJ 694—2014)测定。沉积物样品中的 Hg、As 采用《土壤质量 总汞、总砷、总铅的测定 原子荧光法 第 1 部分:土壤中总汞的测定》(GB/T 22105.1—2008)、《土壤质量 总汞、总砷、总铅的测定 原子荧光法 第 2 部分:土壤中总砷的测定》(GB/T 22105.2—2008)测定,Cd、Ni、Pb、Cu 采用电感耦合等离子质谱法(ICP-MS)测定,Cr、Zn 采用电感耦合等离子质谱法(ICP-AES)测定,样品重金属含量最低检出限如表 1 所示。为保证试验的准确性,水样和沉积物样品采样时各设置 2 个平行样,测量分析的相对标准偏差均保持在 10% 以内。沉积物样品用水系沉积物标准物 GBW-07310 进行质量控制,各金属分析误差控制在 5% 以内,地表水样品采用重复方法空白、加标空白和加标样品进行质量控制,测定误差控制在 10% 以内,所有样品测定结果符合质控要求。样品中所有元素的分析测定均在中国冶金地质总局昆明地质勘察院环境科技有限公司完成。

表 1 样品检出限

Tab. 1 Detection Limits of Samples

检测项目	沉积物样品检出限/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	地表水样品检出限/ ($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)
As	0.04	0.12
Hg	0.002	0.04
Cd	0.10	0.05
Cr	0.50	0.11
Pb	2.00	0.09
Ni	0.30	0.06
Cu	0.60	0.08
Zn	1.20	0.67

1.3 分析方法

1.3.1 单因子指数法

采用单因子指数法可以了解水体中单一重金属污染状况,能有效规避确定指标权重的主观性,使评价结果客观可靠^[22-23]。单因子污染指数^[24]如式(1)。

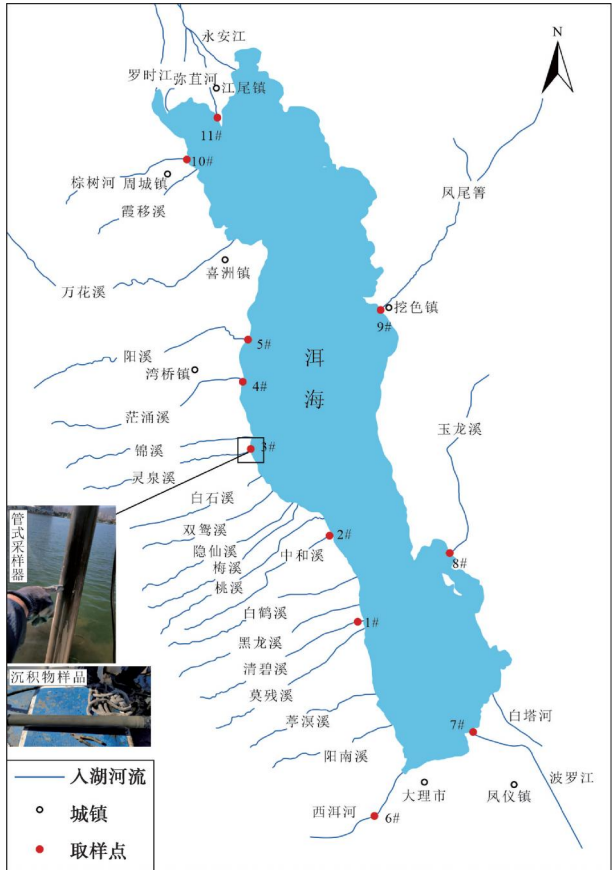


图 1 采样点位置

Fig. 1 Location of Sampling Points

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

其中: P_i ——水体中重金属 i 的单因子污染指数;

C_i ——水体中重金属 i 的实测值, mg/kg;

S_i ——重金属 i 的评价标准值^[24], mg/kg。

根据《云南省大理白族自治州洱海保护管理条例》,洱海湖区及主要入湖河道水质按照《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)^[25] II 类水标准进行保护,因此,采用 II 类标准限值作为评价标准进行评价。《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中未对重金属 Ni 设置标准,故 Ni 的评价标准采用《海水水质标准》(GB 3097—1997)^[26] 二类海水水质标准,污染等级划分如表 2 所示。

表 2 单因子指数污染状况等级划分^[24]

Tab. 2 Classification of Pollution Status Based on Single-Factor Index Grading^[24]

P_i	污染等级
$P_i \leq 1$	无污染
$1 < P_i \leq 2$	轻度污染
$2 < P_i \leq 3$	中度污染
$P_i > 3$	重度污染

1.3.2 地累积指数法

地质累积指数法是一种研究水体中沉积物重金属元素污染的定量化指标,近年来通常被用于评估沉积物重金属元素的污染程度^[27-28],适用于单一重金属污染评价^[29],由德国沉积学学者 Muller^[30]提出,设为 I_{geo} 为地质累积指数^[31],计算如式(2)。

$$I_{\text{geo}} = \log_2 [C'_n / (k \times B_n)] \quad (2)$$

其中: I_{geo} ——某样点地质累积指数;

C'_n ——沉积物中重金属 n 的质量分数, mg/kg;

k ——修正指数,一般取 1.5;

B_n ——重金属 n 的环境背景值, mg/kg。

本文选用我国南方水系沉积物背景值作为洱海流域沉积物环境背景值。 I_{geo} 越高,重金属的污染程度越严重,地质累积指数划分为 7 个级别,如表 3^[32] 所示。

1.3.3 潜在生态风险指数法

潜在生态风险指数法是一种用于评估沉积物中

表 3 地质累积指数污染等级表^[32]

Tab. 3 Pollution Level of Geological Accumulation Index^[32]

I_{geo}	污染级别	污染程度
< 0	0	清洁
$0 \sim 1$	1	轻度污染
$1 \sim 2$	2	偏中度污染
$2 \sim 3$	3	中度污染
$3 \sim 4$	4	偏重污染
$4 \sim 5$	5	重度污染
> 5	6	严重污染

重金属生态危害的评价方法^[23,33]。相比于其他指数,该方法更关注重金属的毒性及其潜在生态危害,综合重金属种类、含量、毒理效应和生物有效性各种性质,被广泛应用于沉积物污染评价^[32,34],计算如式(3)~式(5)。

$$R_{\text{RI}} = \sum_{i=1}^n E_{i,r} \quad (3)$$

$$E_{i,r} = T_{i,r} C_{i,f} \quad (4)$$

$$C_{i,f} = C_{i,\text{实测}} / C_{i,n} \quad (5)$$

其中: R_{RI} ——采样点沉积物中多种重金属的综合潜在生态危害指数,分为 4 级,如表 4 所示;

$E_{i,r}$ ——重金属 i 的潜在生态危害系数,分为 5 级,如表 4 所示;

$T_{i,r}$ ——重金属 i 的毒性响应系数,As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn、Hg 的毒性响应系数为 10、30、2、5、5、5、1、40;

$C_{i,f}$ ——重金属 i 的污染系数;

$C_{i,\text{实测}}$ ——重金属 i 的实测质量分数, mg/kg;

$C_{i,n}$ ——重金属 i 的环境背景值,本研究参考中国南方水系沉积物背景值, mg/kg。

表 4 重金属潜在生态风险等级

Tab. 4 Potential Ecological Risk Levels for Heavy Metals

分类	危害等级	分类	危害等级
$E_{i,r} < 40$	轻微生态危害	$R_{\text{RI}} < 150$	轻微生态危害
$40 \leq E_{i,r} < 80$	中等生态危害	$150 \leq R_{\text{RI}} < 300$	中等生态危害
$80 \leq E_{i,r} < 160$	强生态危害	$300 \leq R_{\text{RI}} < 600$	强生态危害
$160 \leq E_{i,r} < 320$	很强生态危害	$R_{\text{RI}} \geq 600$	很强生态危害
$E_{i,r} \geq 320$	极强生态危害		

2 结果与分析

2.1 水体重金属状况分析

本研究所采 11 个水样中重金属 Hg、Cd 均未达到最低检测限, Pb 仅有 5# 点位测得质量浓度为 0.09 $\mu\text{g/L}$, 其余点位均未达到最低检测限, 表明该 3 种重金属在洱海流域水系中含量极少, 因此, 只对 As、Cu、Zn、Ni、Cr 5 个重金属进行分析, 统计结果如表 5 所示。洱海流域不同取样点的重金属含量最大值均低于《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) 的 II 类水标准, 11 个样点的单因子指数值表明洱海

流域地表水处于无污染状态。洱海流域水系地表水无污染的主要原因是 2015 年以后大理州政府采取诸多保护措施对洱海进行污染整治, 实施了一系列治理工程, 洱海流域水质不断得到改善^[35]。河流中的重金属经沉淀、络合、吸附等作用可以富集在沉积物中, 研究^[36-37]表明, 泥沙对水体中的重金属具有较强的吸附能力, 从而可以降低水体中重金属含量, 推测洱海周边地表水中的重金属有一部分吸附沉淀在下覆沉积物中, 水体中的重金属含量减少, 这是洱海流域水系地表水无污染的次要原因。

表 5 洱海流域水系地表水重金属含量及单因素分析统计

Tab. 5 Statistics of Heavy Metals Content and Univariate Analysis of Surface Water in Erhai Lake Basin

指标	As	Cu	Zn	Ni	Cr
最大值/ $(\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$	4.88	1.80	1.72	2.09	2.31
最小值/ $(\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$	0.20	0.20	0.67	0.24	0.32
平均值/ $(\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$	1.61	0.79	1.16	0.63	0.65
P_i^*	11	11	11	11	11
II 类水标准值/ $(\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$	50.00	1 000.00	1 000.00	10.00	50.00

注: * 表示 11 个点位中重金属含量单因子指数值 ≤ 1 的个数。

2.2 沉积物重金属含量特征

研究对洱海流域水系沉积物中 As、Hg、Pb、Cd、Cu、Zn、Ni、Cr 8 种重金属元素含量进行检测, 其平均质量分数分别是 10.15、0.12、43.18、0.70、50.68、144.31、54.58、103.27 mg/kg (表 6)。洱海地处云南, 因此, 选用云南省表层土土壤重金属背景值和我国南方水系沉积物背景值作为洱海水系沉积物背景值^[38-39]。通过对洱海周边地表水沉积物中的重金属进行检测, 发现有 7 种重金属的平均浓度超过云

南省土壤背景值。其中 Hg 的含量超出标准的比例高达 81.82%, 其最高浓度达到自然背景值的 20.73 倍; Pb 超标率为 63.64%, 最高浓度是背景值的 2.42 倍; Cd 的超标比例为 100%, 浓度是背景值的 1.92~31.63 倍; Cu 超出标准的比例为 81.82%, 最高浓度是背景值的 2.43 倍; Zn 超出标准的比例为 100%, 浓度是背景值的 1.06~2.97 倍; Ni 超标率为 90.90%, 最大值是背景值的 2.66 倍; Cr 超标率为 90.90%, 最大值是背景值的 2.60 倍。

表 6 洱海流域水系沉积物重金属含量统计

Tab. 6 Statistics of Heavy Metals in Sediments in Erhai River Basin

指标	As	Hg	Pb	Cd	Cu	Zn	Ni	Cr
最大值/ $(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	30.50	0.31	87.00	3.29	81.60	239.00	88.90	150.00
最小值/ $(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	1.69	0.01	21.00	0.20	26.20	85.40	28.50	52.40
平均值/ $(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	10.15	0.12	43.18	0.70	50.68	144.31	54.58	103.27
标准差	9.02	0.11	16.95	0.86	16.44	40.77	17.93	30.37
变异系数	89%	90%	39%	122%	32%	28%	33%	29%
云南省土壤背景值/ $(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	10.80	0.02	36.00	0.11	33.60	80.50	33.40	57.60
我国南方水系沉积物背景值/ $(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	13.10	75.00	32.30	230.00	25.00	81.00	29.00	67.00

相关研究^[32,40]表明, 当沉积物中重金属的变异系数超过 20% 时, 表明重金属含量变化主要由人类

活动造成。洱海入湖河流水系沉积物 As、Hg、Pb、Cd、Cu、Zn、Ni、Cr 的变异系数分别是 89%、90%、

39%、122%、32%、28%、33%、29%, 变异程度为 $Cd > Hg > As > Pb > Ni > Cu > Cr > Zn$ 。其中, 变异程度为强变异的是 As、Hg、Pb、Cd, 其变异系数均大于 36%, Cu、Zn、Ni、Cr 的变异系数为 28%~33%, 变异程度为中等变异。

与国内其他水系沉积物重金属含量相比(表 7), As 的含量与其他水系沉积物相差不大, 远低于阳宗海, 但接近我国南方水系沉积物背景值, 表明洱海水系沉积物中 As 富集程度不高。重金属 Hg 的含量是泗河、珠江水系 4 倍, 但远低于背景值。重金属 Pb 的含量高于泗河、东江、太湖、阳宗海, 同时也

高于水系沉积物背景值, 因此需考虑治理重金属 Pb 污染。重金属 Cd、Cu 的含量低于同在云南的滇池外海和阳宗海, 高于泗河、珠江水系、太湖流域和鄱阳湖等省外水系沉积物。由于 Cd 的含量远低于背景值, 现阶段以监测为主。Cu 的含量是背景值的 2 倍, 表明在云南水系沉积物中 Cu 元素的浓度可能普遍较高。重金属 Zn 的含量高于珠江水系和鄱阳湖, 与其他水系相差不大, 与背景值相比较, 其浓度均高于背景值, 平均浓度是背景值的 1.78 倍。重金属 Ni 和 Cr 的含量均高于其他水系, 分别是背景值的 1.88 倍和 1.54 倍, 因此需要引起重视。

表 7 典型水系沉积物重金属含量(单位:mg/kg)

Tab. 7 Heavy Metals Content in Sediments of Typical River Systems (Unit: mg/kg)

研究区	As	Hg	Pb	Cd	Cu	Zn	Ni	Cr
本研究区	10.15	0.12	43.18	0.70	50.68	144.31	54.58	103.27
泗河 ^[41]	4.95	0.03	23.02	0.17	24.22	115.78	26.98	64.66
滇池外海 ^[42]	27.93	/	64.18	1.30	71.65	185.61	36.92	65.08
珠江水系东江 ^[43]	9.60	0.03	34.60	0.13	25.00	62.10	17.60	29.00
太湖流域 ^[44]	13.34	0.12	37.00	0.48	44.71	163.62	45.50	102.46
阳宗海 ^[45]	146.20	/	40.00	1.47	60.70	136.00	32.80	56.20
鄱阳湖 ^[46]	15.74	/	67.17	0.52	30.92	80.28	24.74	69.03

2.3 洱海水系沉积物重金属地质累积指数

洱海水系沉积物重金属地质累积指数统计结果如图 2 所示, 沉积物重金属地质累积指数从清洁到偏中度污染, 其中 As 在 6#、7#点位为轻度污染, 其余位置表现为清洁; Hg、Cd 在所有点位表现为清洁; Pb 在 6#、7#、10#点位表现为轻度污染, 其余位置表现为清洁; Cu 在 8#点位表现为偏中度污染, 在 1#、3#、11#点位表现为清洁, 其余点位表现为轻度污染; Zn 在 2#、4#、5#表现为无污染, 其余点位表现为轻度污染; Ni 在 8#点位表现为偏中度污染, 在 1#、2#、3#点位表现为清洁, 其余点位表现为轻度污染; Cr 在 4#、7#、8#、9#、10#点位表现为轻度污染, 其余位置表现为清洁。6#、7#点位分别有 5 种、6 种重金属污染存在, 这 2 个取样点靠近大理下关, 下关是工业城市, 人口聚集, 城市化水平较高, 紧邻洱海^[47], 因此, 人类活动可能导致 6#、7#取样点重金属污染较为严重。

综合来看, 在 11 个样点沉积物重金属中, Cu、Zn、Ni 为首要污染重金属, 11 个点位有 8 个点位处于污染状态, 需要重点关注。在少数点位 As、Pb、Cr

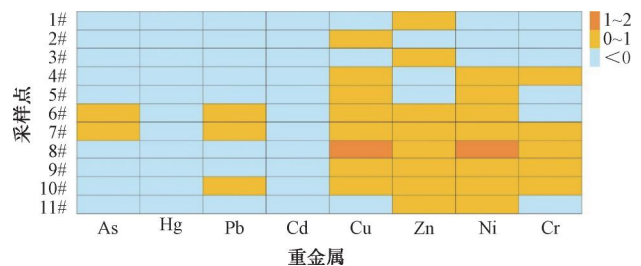


图 2 水系沉积物重金属的地累积指数

Fig. 2 Ground Accumulation Index for Heavy Metals in Rivers Sediments

呈现出轻度污染, 现阶段 Hg 和 Cd 尚未出现污染迹象, 但由于重金属具有不断累积的特点^[23], 仍需进行重金属监测工作。

2.4 洱海水系沉积物重金属潜在生态风险指数

依照式(3)~式(5)计算 8 种重金属的潜在生态风险指数, 计算结果如表 8 所示。洱海流域 11 个沉积物样品的单一重金属潜在生态风险指数均低于 40, 属于轻微生态危害, 平均值依次为 $Cu > Ni > As > Pb > Cr > Zn > Cd > Hg$, 分别是 10.14、9.41、7.75、6.68、3.08、1.78、0.09、0.06。11 个采样点沉积物综合潜

在生态危害指数均低于 150, 为 20.70~65.27, 属于轻微生态危害, 表明 8 种重金属元素对洱海水系生态环境影响较小。对重金属潜在生态危害贡献率分析表明, Cu、Ni、As、Pb 4 个重金属贡献率之和远大于 Hg,

Cd、Zn、Cr, 合计贡献了 87%, Cu 是贡献率最高的元素 (占 26.00%), 其次是 Ni、As、Pb (分别占 24.00%、20.00%、17.00%), 然后是 Cr、Zn (分别占 8.00%、5.00%), Hg、Cd 贡献率最小, 仅占 0.16%、0.24%。

表 8 水系沉积物重金属潜在生态危害系数及综合潜在生态危害指数
Tab. 8 Potential Ecological Hazard Indices of Heavy Metals in River Sediments and Comprehensive Potential Ecological Hazard Indices

项目	$E_{i,r}$								R_{RI}
	As	Hg	Pb	Cd	Cu	Zn	Ni	Cr	
1#	2.24	0.02	5.11	0.03	5.24	1.58	4.91	1.56	20.70
2#	2.73	0.17	7.28	0.03	10.98	1.31	6.33	2.14	30.96
3#	1.46	0.06	6.35	0.10	6.88	2.14	6.53	2.59	26.10
4#	2.14	0.01	3.25	0.03	9.98	1.05	9.38	3.22	29.06
5#	5.79	0.05	6.50	0.04	8.04	1.31	10.60	2.95	35.28
6#	17.02	0.16	8.36	0.07	9.28	2.19	7.50	2.41	47.00
7#	23.28	0.12	13.47	0.43	11.60	2.95	9.78	3.64	65.27
8#	8.85	0.03	6.81	0.05	16.32	1.85	15.33	4.48	53.72
9#	12.37	0.04	4.33	0.15	12.78	1.96	13.57	4.39	49.59
10#	8.09	0.02	7.74	0.05	14.14	1.75	11.95	4.00	47.75
11#	1.29	0.01	4.33	0.03	6.26	1.51	7.64	2.52	23.59
平均值	7.75	0.06	6.68	0.09	10.14	1.78	9.41	3.08	39.00
贡献率	20.00%	0.16%	17.00%	0.24%	26.00%	5.00%	24.00%	8.00%	/

2.5 表层沉积物重金属来源解析

由图 3 可知, 洱海水系沉积物重金属含量之间存在正相关关系, 达到显著水平 ($P<0.05$), 表明元素间一般具有同源关系或复合污染。使用主成分分析来解析洱海水系表层沉积物重金属成分, 分析结果表明, KMO 值为 0.617, 高于 0.50; Bartlett 球形度检验相伴概率为 0.000, 表明本研究采集的数据适合作主成分分析。

主成分分析结果如表 9 所示, 共提取 3 个主成分, 累计方差为 92.883%。因子 1 中主要负荷元素为 As、Pb、Cd 和 Zn, 相关性分析结果显示 4 个重金属元素之间呈显著相关, 化学燃料的燃烧会导致 As 污染^[48-49], Pb 污染来源主要有生活污水和交通排放, 如轮胎磨损和汽油的燃烧等都会导致 Pb 污染^[49-50]。Cd 是农药化肥的标志性元素, 残留的农药和化肥在降水和径流冲刷作用下, 可以进入流域聚集与沉积物中^[51]。沉积物中 Zn 的来源与交通排放、刹车装置、汽车轮胎磨损密切相关^[49], 此次取样点基本分布在人类活动较为频繁的区域, 洱海作为

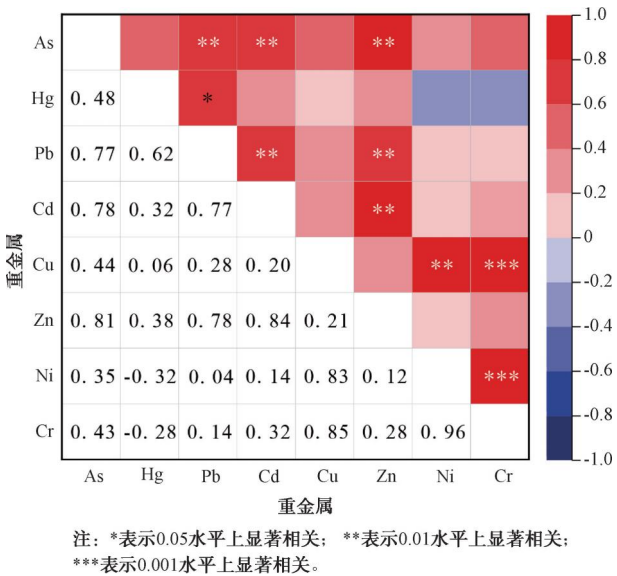


图 3 研究区水系沉积物重金属相关系数

Fig. 3 Correlation Coefficient of Heavy Metals in Rivers Sediments in the Study Area

著名旅游景点, 流域周围人群聚集度较高, 因此, 因子 1 代表人类生活和交通复合污染源。

表 9 研究区水系沉积物重金属含量成分矩阵
Tab. 9 Compositional Matrix of Heavy Metals Content in Rivers Sediments of the Study Area

元素	因子 1	因子 2	因子 3
As	0.814	0.346	0.317
Hg	0.305	-0.173	0.918
Pb	0.800	0.077	0.476
Cd	0.950	0.094	0.028
Cu	0.099	0.944	0.226
Zn	0.937	0.082	0.113
Ni	0.073	0.960	-0.199
Cr	0.239	0.935	-0.230
特征值	4.098	2.570	0.763
方差贡献率	51.228%	32.119%	9.536%
累计方差	51.228%	83.347%	92.883%

因子 2 中主要负荷元素为 Cu、Ni 和 Cr, 方差贡献率为 32.119%, 且 Cu、Ni 和 Cr 之间呈极显著正相关。3 个元素变异系数较低, 分布较均匀, Cu、Cr 和 Ni 同为亲铁元素, 易与土壤内氧化物结合, 与成土母质关系密切。云南峨眉山玄武岩和碳酸盐岩分布区是典型地质高背景区, 玄武岩分布区明显富集 Cu、Cd、Zn、Cr, 碳酸盐岩分布区具有较高的 Cr、Cu、Zn、Cd、Ni 等环境风险^[52], 洱海北部主要分布玄武岩、东部和南部主要分布碳酸盐岩, 岩石、土壤中的元素通过岩石风化及雨水冲刷等作用, 进入水系沉积物中。周艳等^[53]对西南某铅锌矿区的研究也发现 Cu、Ni 和 Cr 这 3 种元素被分在一个主成分, 并且主要来源于成土母质, 因此, 将因子 2 定义为自然源。

因子 3 中主要负荷元素为 Hg, 方差贡献率为 9.536%。Hg 与其他重金属元素之间无显著相关性, 表明其有单独来源, 变异系数结果表明 Hg 属于强变异, 受人为影响较大, 然而 Hg 的地累积指数和潜在生态风险指数的结果显示污染程度为无污染, 表明水系沉积物中 Hg 的存在主要是人为导致的, 但人为只输入极小部分, 并未产生实质性后果。前人研究^[51,54]表明, Hg 来源有化石燃烧, 塑料、电池、电子等工业的排放^[55], 其随大气沉降和地表径流作用进入水体沉积物中富集。大理州现有一国家级经济技术开发区, 所在企业主要涉及有色金属矿采选、有色金属冶炼、化学原料及化学制品制造和金属冶炼与压延行业, 这些企业生产活动可产生 Hg, 但随

着洱海污染治理工作的推进, 其排放量逐渐减少, 因此, 将因子 3 定义为工业源。

3 结论

1) 洱海流域水系地表水重金属 As、Cu、Zn、Ni、Cr 含量均低于《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) 的 II 类水标准, 单因子指数值表明洱海流域地表水处于无污染状态, 是比较清洁的河流, 在采取诸多保护措施后, 洱海流域水质得到改善。

2) 沉积物中 As 的平均含量未超过云南省土壤背景值, Pb 含量的最大值为背景值的 2.42 倍, Hg 含量的最大值为背景值的 20.73 倍, Cd 含量是背景值的 1.92~31.63 倍, Cu 含量的最大值是背景值的 2.43 倍, Zn 含量是背景值的 1.06~2.97 倍; Ni 含量的最大值是背景值的 2.66 倍; Cr 含量的最大值是背景值的 2.60 倍。变异程度是 Cd>Hg>As>Pb>Ni>Cu>Cr>Zn, As、Hg、Pb、Cd 为强变异, Ni、Cu、Cr、Zn 为中等变异。

3) 8 种重金属的地质累积指数表明, 所有样点 Hg 和 Cd 均处于清洁状态, As、Pb、Cr 在少数点位处于轻度污染状态。Cu、Zn、Ni 为首要污染重金属, 11 个点位有 8 个点位处于污染状态, 需要重点关注。沉积物单一重金属潜在生态风险指数平均值为 Cu>Ni>As>Pb>Cr>Zn>Cd>Hg, 分别是 10.14、9.41、7.75、6.68、3.08、1.78、0.09、0.06, 属于轻微生态危害, 11 个样点的综合潜在生态危害指数均低于 150, 属于轻微生态危害。

4) 通过相关性分析推断 As、Pb、Cd 和 Zn 来源相似, Cu、Ni、Cr 来源相似, Hg 有其单独来源。主成分分析的结果表明: As、Pb、Cd 和 Zn 污染来源为人类生活和交通复合污染源; Cr、Cu、Ni 污染来源为自然源; Hg 污染来源为工业源。

参考文献

- [1] 卢洪斌, 卢少勇, 李响, 等. 长江中游典型湖泊沉积物重金属分布特征、生态风险评估及溯源[J]. 环境科学, 2023, 45(3): 1-33.
- LU H B, LU S Y, LI X, et al. Distribution characteristics, ecological risk assessment and traceability of heavy metals in sediments of typical lakes in the middle reaches of the Yangtze River[J]. Environmental Sciences, 2023, 45(3): 1-33.
- [2] 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, 2019, 251: 1–24. DOI: 10.1007/398_2019_27.
- [3] LU H W, YU S. Spatio-temporal variational characteristics analysis of heavy metals pollution in water of the typical northern rivers, China[J]. Journal of Hydrology, 2018, 559: 787–793. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2018.02.081.
- [4] 王志刚, 詹华明, 徐力刚, 等. 鄱阳湖入长江口流域水体重金属分布特征及人体健康风险评价[J]. 长江流域资源与环境, 2023, 32(6): 1281–1290.
- WANG Z G, ZHAN H M, XU L G, et al. Distribution of heavy metal and human health risk assessment of water bodies in the basin of Poyang Lake into the Yangtze River [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2023, 32(6): 1281–1290.
- [5] KHAN M H R, LIU J, LIU S, et al. Anthropogenic effect on heavy metal contents in surface sediments of the Bengal Basin river system, Bangladesh [J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2020, 27 (16): 19688 – 19702.
- [6] 蔡於杞, 毛龙江, 邹春辉, 等. 盐城新洋港河表层沉积物重金属污染评价与源解析[J]. 海洋地质前沿, 2023, 39(5): 33–42.
- CAI Y Q, MAO L J, ZOU C H, et al. Pollution assessment and source tracking of heavy metals in surface sediments of Xinyanggang River [J]. Marine Geology Frontiers, 2023, 39 (5): 33–42.
- [7] CHAN M W H, HASAN K A, BALHAZAR-SILVA D, et al. Evaluation of heavy metal pollutants in salt and seawater under the influence of the Lyari River and potential health risk assessment[J]. Marine Pollution Bulletin, 2021, 166: 112215. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2021.112215.
- [8] SHANG W, YANG M S, HAN Z, et al. Distribution, contamination assessment, and sources of heavy metals in surface sediments from the south of the North Yellow Sea, China[J]. Marine Pollution Bulletin, 2023, 196: 115577. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2023.115577.
- [9] 高振, 王晨楚, 张新蕾, 等. 湘江流域长沙段沉积物中重金属污染及来源[J]. 烟台大学学报(自然科学与工程版), 2023, 36(1): 119–126.
- GAO Z, WANG C C, ZHANG X L, et al. Pollution and sources of heavy metals in sediments of Changsha section of Xiangjiang River [J]. Journal of Yantai University (Natural Science and Engineering Edition), 2023, 36(1): 119–126.
- [10] 高思佳, 侯泽英, 吴越, 等. 近 50 a 洱海水环境演变特征及其主要驱动因素[J]. 湖泊科学, 2023, 35(4): 1296–1306.
- GAO S J, HOU Z Y, WU Y, et al. Trend and driving factors of water environment change in Lake Erhai in the last 50 years [J]. Journal of Lake Sciences, 2023, 35(4): 1296–1306.
- [11] 许燕红, 何毓新, 孙永革, 等. 云南洱海近 180 年的重金属污染历史记录及其和湖泊富营养化的联系[C]//杭州:中国矿物岩石地球化学学会第 17 届学术年会论文摘要集, 2019.
- XU Y H, HE Y X, SUN Y G, et al. The historical record of heavy metal pollution in Erhai Lake in Yunnan Province in the past 180 years and its relationship with lake eutrophication[C]// Hangzhou: Abstracts of the 17th Academic Annual Conference of the Chinese Society of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2019.
- [12] 奚满松, 黄明雨. 洱海沉积物特征及其对上覆水的影响[J]. 环境科学导刊, 2023, 42(3): 5–8, 20.
- XI M S, HUANG M Y. Sediment characteristics of Erhai Lake and its impact on overlying water [J]. Environmental Science Survey, 2023, 42(3): 5–8, 20.
- [13] 石宏博, 黄玥, 李杰, 等. 洱海水质评价及污染物来源分析[J]. 水电能源科学, 2021, 39(10): 72–75.
- SHI H B, HUANG Y, LI J, et al. Water quality evaluation and source analysis of pollutants of the Erhai Lake [J]. Water Resources and Power, 2021, 39(10): 72–75.
- [14] 苏倩, 徐红枫, 刘云根, 等. 洱海北部上游不同修复类型湿地氮磷分布及污染风险评价[J]. 环境污染与防治, 2022, 44(5): 612–617.
- SU Q, XU H F, LIU Y G, et al. Distribution of nitrogen and phosphorus and pollution risk assessment of different remediation type wetlands in the upper reaches of Erhai Lake [J]. Environmental Pollution & Control, 2022, 44(5): 612–617.
- [15] 张浩霞. 1985—2019 年洱海总氮时空变化规律分析[J]. 环境科学导刊, 2020, 39(6): 4–10.
- ZHANG H X. Analysis of temporal and spatial variation of total nitrogen in Erhai Lake from 1985 to 2019 [J]. Environmental Science Survey, 2020, 39(6): 4–10.
- [16] 黄明雨. 洱海大气氮磷干沉降特征及其影响因素[J]. 环境科学与技术, 2023, 46(1): 33–38.
- HUANG M Y. Characteristics of atmospheric nitrogen and phosphorus dry deposition in Erhai Lake and its influencing factors [J]. Environmental Science & Technology, 2023, 46 (1): 33–38.
- [17] 唐运萍, 隋世燕, 刘卫红, 等. 洱海底泥重金属污染及富营养化的特征分析与评价[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2023, 48(6): 133–142.
- TANG Y P, SUI S Y, LIU W H, et al. Analysis and evaluation of heavy metal pollution and eutrophication of sediment in Erhai Lake [J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2023, 48 (6): 133 – 142.
- [18] 李建军, 李玉庆. 农田面源污染现状及研究进展[J]. 中国科技信息, 2017(19): 65–67.
- LI J J, LI Y Q. Current situation and research progress of farmland non-point source pollution [J]. China Science and Technology Information, 2017(19): 65–67.
- [19] 董亚坤, 郭羽鑫, 吴碧兰, 等. 基于土地利用动态变化的洱海流域上游生态系统服务价值分析[J]. 水生态学杂志,

- 2023, 44(1): 16-24.
- DONG Y K, GUO Y X, WU B L, et al. Analysis of ecosystem service values in the upper Erhai Lake basin based on dynamic changes in land-use [J]. *Journal of Hydroecology*, 2023, 44(1): 16-24.
- [20] 林芸, 唐亚松, 刘刚, 等. 洱海流域水资源量变化趋势分析[J]. *云南水力发电*, 2018, 34(6): 4-7.
- LIN Y, TANG Y S, LIU G, et al. Analysis of the change trend of water resources in Erhai Basin [J]. *Yunnan Water Power*, 2018, 34(6): 4-7.
- [21] 黄明雨. 环洱海主要入湖河流水质特征及入湖污染负荷估算[J]. *人民长江*, 2022, 53(1): 61-66.
- HUANG M Y. Water quality characteristics and pollution load estimation of main inflow rivers around Erhai Lake [J]. *Yangtze River*, 2022, 53(1): 61-66.
- [22] 辛惠娟, 苏思霖, 周添红, 等. 基于不同评价方法的玛曲县饮用水水源地水质研究[J]. *给水排水*, 2023, 59(s1): 212-217, 223.
- XIN H J, SU S L, ZHOU T H, et al. Study on water quality of drinking water source in Maqu county based on different evaluation methods [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2023, 59(s1): 212-217, 223.
- [23] 吴素霞, 谢新宇, 范海荣, 等. 河北昌黎县主要入海口水体与沉积物中重金属污染分析[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2023, 31(7): 1145-1154.
- WU S X, XIE X Y, FAN H R, et al. Heavy metal pollution in the water and sediment of main estuaries into the sea in Changli County, Hebei Province [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2023, 31(7): 1145-1154.
- [24] 曹郁, 赵文伟, 伍婧怡, 等. 盐城新洋港河流表层沉积物重金属污染评价[J]. *亚热带资源与环境学报*, 2020, 15(3): 39-46.
- CAO Y, ZHAO W W, WU J Y, et al. Assessment of heavy metal pollution in surface sediments of Xinyanggang River in Yancheng City [J]. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 2020, 15(3): 39-46.
- [25] 国家环境保护总局, 国家质量监督检验检疫总局. 地表水环境质量标准: GB 3838—2002[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- State Environmental Protection Administration of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Environmental quality standards for surface water: GB 3838—2002[S]. Beijing: Standard Press of China, 2002.
- [26] 国家环境保护局. 海水水质标准: GB 3097—1997[S]. 北京: 中国标准出版社, 1997.
- National Environmental Protection Agency of the People's Republic of China. Sea water quality standard: GB 3097—1997[S]. Beijing: Standard Press of China, 1997.
- [27] 周翔, 刘晴, 吴痕. 江苏启东近岸海域沉积物重金属分布特征及其潜在生态风险评价[J]. *南京师范大学学报(工程技术版)*, 2023, 23(2): 62-68.
- ZHOU X, LIU Q, WU H. Distribution characteristics and potential ecological risk assessment of heavy metals in coastal sediments of Qidong, Jiangsu Province [J]. *Journal of Nanjing Normal University (Engineering Technology Edition)*, 2023, 23(2): 62-68.
- [28] ZHAO Y F, XU M, LIU Q, et al. Study of heavy metal pollution, ecological risk and source apportionment in the surface water and sediments of the Jiangsu coastal region, China: A case study of the Sheyang Estuary [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2018, 137: 601-609. DOI: 10.1016/j.marpollbul.2018.10.044.
- [29] 陈霞, 彭子凌, 周显, 等. 咸宁市水库淤积物品质特性及资源化利用[J]. *长江科学院院报*, 2021, 38(12): 33-38, 45.
- CHEN X, PENG Z L, ZHOU X, et al. Quality characteristics and resource utilization of reservoir sediments in Xianning City [J]. *Journal of Changjiang River Scientific Research Institute*, 2021, 38(12): 33-38, 45.
- [30] MULLER G. Index of geoaccumulation in sediment of the Rhine River [J]. *Geojournal*, 1969(2): 108-118.
- [31] BUCCOLIERI A, BUCCOLIERI G, CARDELLICCHIO N, et al. Heavy metals in marine sediments of Taranto Gulf (Ionian Sea, Southern Italy) [J]. *Marine Chemistry*, 2006, 99(1/2/3/4): 227-235. DOI: 10.1016/j.marchem.2005.09.009.
- [32] 岑言霸, 苏斌, 陈越豪, 等. 滇池东大河湿地沉积物重金属空间分异特征及生态风险评价[J]. *环境化学*, 2023, 42(4): 1313-1324.
- CEN Y B, SU B, CHEN Y H, et al. Spatial distribution and ecological risk assessment of heavy metals in sediments of Dongda River wetland in Dianchi Lake [J]. *Environmental Chemistry*, 2023, 42(4): 1313-1324.
- [33] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control a sedimentological approach [J]. *Nonferrous Metals (Mining Section)*, 1980, 14(8): 975-1001.
- [34] 闫晓露, 孙才志, 胡远满, 等. 围垦对辽东湾北部滨海湿地土壤重金属含量的影响及生态风险评价[J]. *生态学报*, 2021, 41(3): 1055-1067.
- YAN X L, SUN C Z, HU Y M, et al. Effect of reclamation on soil heavy metal content of coastal wetland and ecological risk assessment in Northern Liaodong Bay, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(3): 1055-1067.
- [35] 姚冬琴. 云南大理: 久久为功, 以革命性举措打赢洱海保护治理攻坚战[J]. *中国经济周刊*, 2019(5): 94-97.
- YAO D Q. Yunnan Dali: Long-term efforts to win the battle of Erhai Lake protection and governance with revolutionary measures [J]. *China Economic Weekly*, 2019(5): 94-97.
- [36] 夏波, 梁严威, 黄筱云, 等. 波流作用下泥沙悬浮释放污染

- 物的数值分析[J]. 中国环境科学, 2022, 42(9): 4217–4225.
- XIA B, LIANG Y W, HUANG X Y, et al. Numerical analysis of sediment suspension and contaminant release under the action of waves and currents[J]. *China Environmental Science*, 2022, 42(9): 4217–4225.
- [37] 易升泽, 王明超, 董晏良. 茅洲河清淤后底泥重金属污染特征及风险评价[J]. 水资源开发与管理, 2023, 9(12): 26–34.
- YI S Z, WANG M C, DONG Y L. Characteristics and risk assessment of heavy metal pollution in sediments after dredging in Maozhou River [J]. *Water Resources Development and Management*, 2023, 9(12): 26–34.
- [38] 程志中, 谢学锦, 潘含江, 等. 中国南方地区水系沉积物中元素丰度[J]. 地学前缘, 2011, 18(5): 289–295.
- CHENG Z Z, XIE X J, PAN H J, et al. Abundance of elements in stream sediment in south China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2011, 18(5): 289–295.
- [39] 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: 330–381.
- China Environmental Monitoring Station. Background value of soil elements in China [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990: 330–381.
- [40] LIU Y Z, ENGEL B A, COLLINGSWORTH P D, et al. Optimal implementation of green infrastructure practices to minimize influences of land use change and climate change on hydrology and water quality: Case study in Spy Run Creek watershed, Indiana[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 601/602: 1400–1411. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.06.015.
- [41] 李越, 杨丽原, 张游, 等. 南四湖典型入湖河流沉积物重金属污染特征与风险评价研究[J]. 生态科学, 2021, 40(1): 71–81.
- LI Y, YANG L Y, ZHANG Y, et al. Pollution characteristics and risk assessment of heavy metals in sediments of typical inflow rivers of Nansi Lake[J]. *Ecological Science*, 2021, 40(1): 71–81.
- [42] 王萧, 于真真, 吕国锋, 等. 滇池外海表层沉积物重金属赋存形态及污染评价[J]. 环境污染与防治, 2022, 44(9): 1234–1240.
- WANG X, YU Z Z, LÜ G F, et al. Chemical fractionation and pollution assessment of heavy metals in surface sediment of Waihai area of Dianchi Lake [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2022, 44(9): 1234–1240.
- [43] 韦彬, 侯青叶, 唐志敏, 等. 珠江水系沉积物重金属元素背景值估算及污染特征分析[J]. 现代地质, 2019, 33(2): 293–304.
- WEI B, HOU Q Y, TANG Z M, et al. Estimation of background values and contamination characteristics of heavy metals in sediments of the Pearl River, China [J]. *Geoscience*, 2019, 33(2): 293–304.
- [44] 张杰, 郭西亚, 曾野, 等. 太湖流域河流沉积物重金属分布及污染评估[J]. 环境科学, 2019, 40(5): 2202–2210.
- ZHANG J, GUO X Y, ZENG Y, et al. Spatial distribution and pollution assessment of heavy metals in river sediments from Lake Taihu Basin [J]. *Environmental Science*, 2019, 40(5): 2202–2210.
- [45] 蔡艳洁, 张恩楼, 刘恩峰, 等. 云南阳宗海沉积物重金属污染时空特征及潜在生态风险[J]. 湖泊科学, 2017, 29(5): 1121–1133.
- CAI Y J, ZHANG E L, LIU E F, et al. Spatio-temporal characteristics of heavy metal pollution and potential ecological risk in the sediments of Lake Yangzonghai, Yunnan Province [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2017, 29(5): 1121–1133.
- [46] 张大文, 罗林广, 张莉, 等. 鄱阳湖表层沉积物中砷及重金属赋存形态及其潜在生态风险[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(8): 1132–1138.
- ZHANG D W, LUO L G, ZHANG L, et al. Speciation and potential ecological risk of arsenic and heavy metals in surface sediments of Poyang Lake[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2014, 23(8): 1132–1138.
- [47] 陈旭, 刘志琦, 张继兰. 基于 GIS 网络分析的避灾绿地布局优化研究—以大理市下关和经开区为例[J]. 绿色科技, 2023, 25(17): 27–31, 140.
- CHEN X, LIU Z Q, ZHANG J L. Research on optimization of disaster avoidance green space layout based on GIS network analysis—Taking Xiaguan and Jinkai Zone of Dali City as an Example [J]. *Journal of Green Science and Technology*, 2023, 25(17): 27–31, 140.
- [48] 林曼利, 胡振琪, 彭位华, 等. 安徽铜陵典型矿区周边土壤重金属污染评价及来源解析[J]. 环境科学, 2024, 45(9): 5494–5505.
- LIN M L, HU Z Q, PENG W H, et al. Pollution assessment and source apportionment of heavy metals in the surrounding soil of typical mining areas in Tongling, Anhui Province [J]. *Environmental Science*, 2024, 45(9): 5494–5505.
- [49] 苏海民, 孙朋, 张勇. 宿州市沱河城市景观河流重金属富集及污染评价[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2021, 49(2): 118–124.
- SU H M, SUN P, ZHANG Y. Enrichment and contamination evaluation of heavy metal of urban landscape river of Tuo River in Suzhou city [J]. *Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition)*, 2021, 49(2): 118–124.
- [50] 张超, 贺峰, 王姊煜, 等. 秦岭典型钼矿区农田土壤和作物重金属污染特征、来源解析及健康风险评价[J]. 环境科学, 2024, 45(9): 5526–5537.
- ZHANG C, HE F, WANG Z Y, et al. Pollution characteristics, source analysis, and health risk assessment of heavy metals in soil and crops in a typical molybdenum mining area of Qinling

- Mountains [J]. *Environmental Science*, 2024, 45(9): 5526–5537.
- [51] 陈小霞, 张敏, 李蓓, 等. 广东茂名主要水系表层沉积物重金属风险评估及源解析[J]. *环境科学*, 2023, 44(3): 1397–1406.
- CHEN X X, ZHANG M, LI B, et al. Risk assessment and source analysis of heavy metal pollution in surface sediments from major river systems in Maoming City, Guangdong Province [J]. *Environmental Sciences*, 2023, 44(3): 1397–1406.
- [52] 肖高强, 陈杰, 白兵, 等. 云南典型地质高背景区土壤重金属含量特征及污染风险评价[J]. *地质与勘探*, 2021, 57(5): 1077–1086.
- XIAO G Q, CHEN J, BAI B, et al. Content characteristics and risk assessment of heavy metals in soil of typical high geological background areas, Yunnan Province [J]. *Geology and Exploration*, 2021, 57(5): 1077–1086.
- [53] 周艳, 陈楠, 邓绍坡, 等. 西南某铅锌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*, 2018, 39(6): 2884–2892.
- ZHOU Y, CHEN Q, DENG S P, et al. Principal component analysis and ecological risk assessment of heavy metals in farmland soils around a Pb-Zn mine in southwestern China [J]. *Environmental Science*, 2018, 39(6): 2884–2892.
- [54] 林承奇, 陈枫桦, 胡恭任, 等. 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*, 2020, 48(4): 443–451.
- LIN C Q, CHEN F H, HU G R, et al. Source apportionment of heavy metals in surface sediments of the Jiulong River estuary based on positive matrix factorization [J]. *Earth and Environment*, 2020, 48(4): 443–451.
- [55] 项立辉, 王艳芬, 姜辞冬, 等. 江苏中部潮间带表层沉积物重金属分布、来源及污染评价[J]. *海洋地质前沿*, 2024, 40(8): 42–52.
- XIANG L H, WANG Y F, JIANG C D, et al. Heavy metal contamination in surface sediments of intertidal zone in central Jiangsu Province: Distribution, source, and assessment [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2024, 40(8): 42–52.
- (上接第 47 页)
- [43] 刘琰. 双极膜电渗析-树脂吸附组合工艺处理水杨酸生产废水[D]. 南京: 东南大学, 2022.
- LIU Y. Treatment of salicylic acid production wastewater by a coupled bipolar-membrane electrodialysis and resin adsorption process [D]. Nanjing: Southeast University, 2022.
- [44] 郝亚超, 张成凯, 李亚宁, 等. 树脂耦合电渗析脱除 MDEA 废液中热稳定盐试验[J]. *工业水处理*, 2020, 40(12): 49–53.
- HAO Y C, ZHANG C K, LI Y N, et al. Experimental study on removal of heat-stable salts from MDEA waste liquid by resin-coupled electrodialysis [J]. *Industrial Water Treatment*, 2020, 40(12): 49–53.
- [45] GUO X B, CHEN J H, WANG X S, et al. Sustainable ammonia recovery from low strength wastewater by the integrated ion exchange and bipolar membrane electrodialysis with membrane contactor system [J]. *Separation and Purification Technology*, 2023, 305: 122429. DOI: 10.1016/j.seppur.2022.122429.
- [46] EL-AOUNI N, DAGDAG O, HALDHAR R, et al. One-pot synthesis of epoxy resin composite: Thermal, rheological and Monte Carlo investigations [J]. *Iranian Polymer Journal*, 2024, 33(4): 435–445.
- [47] KORKUT B, TARÇIN B, ATALI P Y, et al. Introduction of a new classification for resin composites with enhanced color adjustment potential [J]. *Current Oral Health Reports*, 2023, 10(4): 223–232.
- [48] 黄俊亮, 刘成, 邱超, 等. 离子交换生物脱氮组合工艺去除饮用水中硝酸盐[J]. *环境工程学报*, 2021, 15(6): 1894–1904.
- HUANG J L, LIU C, QIU C, et al. Nitrate removal from drinking water by an ion exchange-biological denitrification combined process [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2021, 15(6): 1894–1904.
- [49] 倪涛. 离子交换/生物脱氮组合工艺对硝酸盐氮的脱除研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2010.
- NI T. Research on nitrate-nitrogen removal by combined ion exchange/biological denitrification process [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2010.
- [50] DONG H, CHEN H, SHEPSKO C, et al. Resilient nitrate removal by a biological nitrate-selective ion exchange (BIO-NIX) process [J]. *ACS ES&T Water*, 2023, 3(9): 2989–2995.
- [51] SHARMA C, PATADIA R, THAKUR B, et al. Trace detection of La(III), Ce(III), Ce(IV), Nd(III), and Gd(III) using 2,8,14,20-tetramethyl-5,7-dinitro calix [4] resorcinarene polyhydroxamic acid by solid-phase extraction and separation [J]. *Reactive and Functional Polymers*, 2023, 190: 105642. DOI: 10.1016/j.reactfunctpolym.2023.105642.