

doi:10.16112/j.cnki.53-1223/n.202510090001

引用格式:李凯,和卫明,赵红艳,等.基于多种方法综合评估洱海沉积物重金属污染特征及生态风险[J].昆明理工大学学报(自然科学版),2026,51(1):146-161.

Citation:LI Kai, HE Weiming, ZHAO Hongyan, et al. Comprehensive Assessment of Heavy Metal Pollution Characteristics and Ecological Risks in Erhai Lake Sediments Using Multiple Methods[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science), 2026, 51(1): 146-161.

基于多种方法综合评估洱海沉积物重金属污染特征及生态风险

李凯¹,和卫明¹,赵红艳¹,吴越²,黎明月²,侯泽英^{2*}

(1. 云南省水文水资源局大理分局, 云南大理 671000; 2. 中国环境科学研究院 湖泊生态环境研究所, 北京 100012)

摘要:为探明大理洱海沉积物重金属的污染情况及生态风险,在洱海湖区代表性区域设置7个采样点,于2015—2018年共采集25组表层样品,2021—2024年共采集84组分层样品。采用火焰原子吸收分光光度法对铜(Cu)、锌(Zn)、铅(Pb)、镍(Ni)、铬(Cr)、镉(Cd)6种重金属进行检测,采用氢化物发生-原子荧光分光光度法对砷(As)、汞(Hg)两种重金属进行检测;并运用地累积指数法、单因子指数法、污染负荷指数法和内梅罗综合污染指数法对洱海沉积物中重金属的污染现状进行综合评价,并运用潜在生态风险指数初步评估其生态风险。结果表明:重金属Hg和Cd为洱海湖区主要的污染因子,洱海沉积物大部分重金属(Cr、Ni、Cu、Zn、As、Pb)的单因子潜在风险为低风险,但Hg和Cd的潜在风险可达较高风险及以上,综合潜在生态风险基本处于中风险和较高风险,部分年份可上升至极高风险,应给予重点关注。

关键词:洱海;沉积物;重金属;污染特征;生态风险

中图分类号:X824 文献标识码:A 文章编号:1007-855X(2026)01-0146-16

Comprehensive Assessment of Heavy Metal Pollution Characteristics and Ecological Risks in Erhai Lake Sediments Using Multiple Methods

LI Kai¹, HE Weiming¹, ZHAO Hongyan¹, WU Yue², LI Mingyue², HOU Zeying^{2*}

(1. Dali Branch Center of Yunnan Provincial Water Environment Monitoring Center, Dali 671000, Yunnan, China;

2. Institute of Lake Ecology and Environment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: To investigate the pollution status and ecological risks of heavy metals in the sediments of Lake Erhai in Dali, 7 representative sampling sites were set up across the lake area. A total of 25 surface sediment samples were collected during the period from 2015 to 2018, while 84 layered sediment samples were obtained between 2021 and 2024. Six heavy metals, namely copper (Cu), zinc (Zn), lead (Pb), nickel (Ni), chromium (Cr) and cadmium (Cd), were analyzed using flame atomic absorption spectrophotometry (FAAS). In contrast, arsenic (As) and mercury (Hg) were determined by hydride generation atomic fluorescence spectrophotometry (HG-AFS). The pollution status of heavy metals in the sediments was comprehensively evaluated by adopting

收稿日期:2025-10-09. 基金项目:中国环境科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务专项(2025YSKY-04).

作者简介:李凯(1989-),男,工程师.主要研究方向:水质监测与分析评价. E-mail:29679836@qq.com

通信作者:侯泽英(1991-),男,工程师.主要研究方向:湖泊治理与保护,水质监测与分析评价.

E-mail:305557265@qq.com

multiple methods, including the geo-accumulation index method, single-factor pollution index method, pollution load index method and Nemerow comprehensive pollution index method. Meanwhile, the potential ecological risk index method was employed to preliminarily assess the corresponding ecological risks. The results demonstrated that Hg and Cd were identified as the primary heavy metal pollutants in Lake Erhai, most heavy metals (Cr, Ni, Cu, Zn, As, Pb) were found to pose a low potential ecological risk. However, Hg and Cd exhibited a high or even higher potential ecological risk. Collectively, the comprehensive potential ecological risk of heavy metals in the sediments of Lake Erhai was generally at moderate to relative high levels, and it could escalate to very high levels in certain years, which merits focused attention.

Keywords: Erhai Lake; sediments; heavy metals; pollution characteristics; ecological risk

0 引言

重金属是典型的累积型污染物,具有分布广泛、不易降解和高毒性等特征^[1-2],对生态环境和人体健康具有较高的危害.湖泊沉积物是重金属分布和累积的重要区域,重金属在沉积物中随着环境的变化会出现一系列的累积、转化和迁移^[3],从而进入水体.高浓度的重金属会严重影响水质及危害水生动植物^[4-5],可引发区域污染与生态风险.

对沉积物重金属污染进行评价已经成为评价水环境质量的一个重要指标^[6],多种评价指数被应用于沉积物重金属评价^[7-8].地累积指数(Geo-accumulation Index, I_{geo})被广泛运用于湖泊沉积物重金属污染程度评价^[6,9-13];栗浩亮等^[14]将单因子污染指数(Single Factor Pollution Index, P_i)应用于某校园人工湖泊沉积物重金属研究,指出 Cu 达中度污染状态,其他重金属处于轻微污染或者清洁状态;黄强等^[1]、朱佳琪等^[15]在对沉积物重金属污染程度的评价中引入了污染负荷指数(Pollution Load Index, PLI)法;黄强等^[1]运用地累积指数法、潜在生态风险指数评价(Potential Ecological Risk Index)法和污染负荷指数法评估了涪江(绵阳段)沉积物重金属的污染程度及潜在风险,结果显示涪江(绵阳段)不同断面不同重金属污染程度有所差异,其中, Hg 和 Cd 元素的潜在生态风险较其余元素较高;朱佳琪等^[15]综合采用污染负荷指数法和潜在生态风险指数法分析了江西省某城市湖泊沉积物污染情况,识别了主要污染重金属为 Hg 和 Cd.内梅罗综合污染指数(Nemerow Comprehensive Pollution Index, P_n)法既能兼顾所有的评价因子,又能突出主要污染物^[16-18],如张晶等^[16]应用内梅罗综合污染指数法对某清淤河道底泥重金属污染现状进行评价,结果显示该方法具有更严格、分级更精确的优势.为了弥补单一评价方法的不足,宜采用地累积指数法、单因子污染指数法、污染负荷指数法、内梅罗综合污染指数法等对多种评价方法对湖区沉积物重金属污染现状进行综合评估,并运用潜在风险指数对其进行生态风险分析^[15,19-21].多种方法的综合运用能更全面地反映沉积物重金属的污染状况,可为研究区水生态的保护和治理提供更准确的理论支撑.

洱海是云南九大高原湖泊之一,作为大理市主要的饮用水源地,对洱海的保护和治理不仅具有重要的生态意义,更是整个大理州经济社会可持续发展的基础.然而,近年来随着环湖旅游业的快速发展和能源消耗的高位运行,洱海水环境的保护面临严重挑战^[22-24].学者们围绕洱海水环境问题开展了诸多的研究,这些研究主要关注洱海水环境现状^[25-26]、水体营养状态^[27-30]以及流域面源污染评价^[31-32]等,而针对洱海湖区沉积物重金属污染状况及潜在风险调查研究却鲜有涉及^[13],这在一定程度上制约了重金属污染管控策略的有效实施.因此,明确洱海沉积物重金属的污染状况及生态风险,对科学制定洱海水污染防治策略、提升水环境质量具有重要现实意义.

研究选取洱海作为研究对象,分析了 2015—2018 年洱海表层和 2021—2024 年洱海不同深度沉积物中铬(Cr)、镍(Ni)、铜(Cu)、锌(Zn)、砷(As)、镉(Cd)、铅(Pb)、汞(Hg)8 种重金属浓度变化特征,并综合运用地累积指数法、单因子污染指数法、污染负荷指数法、内梅罗综合污染指数法和潜在风险指数,评估了洱海沉积物重金属污染状况和潜在生态风险,以期为洱海开展重金属污染防控及水环境质量管理提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

洱海位于中国云南省大理白族自治州境内,是云南省第二大高原淡水湖泊,属澜沧江-湄公河水系的内陆断陷湖泊.该湖形成于冰河时代末期,湖面面积 252 km²,流域面积 2 565 km²,南北长 42.5 km,东西平均宽 6.3 km,湖岸线长约 129.0 km,最大水深 20.7 m,平均水深 10.5 m,最深处位于中部挖色湖心区域.湖区属中亚热带高原季风气候区,年平均气温 15.1 ℃,干湿季分明,降雨主要集中在 6—9 月,湖面终年不结冰,独特的气候条件为污染物迁移转化提供了特定环境背景.

1.2 数据来源及样品采集

采样点位布设于洱海全湖代表性区域,共计 7 个监测点位(见图 1),其中采样点桃园、双廊位于洱海北部,采样点湖心、海印、才村位于洱海中部,采样点海东、团山位于洱海南部.

样品采集于 2015—2018 年和 2021—2024 年,分别在每年枯水期(1—3 月)和丰水期(7—9 月)各采集一次.其中,2015—2018 年主要采集表层沉积物(0~10 cm),获取样品 56 组;2021—2024 年主要研究污染垂向分布,增设分层采样,采集表层(0~10 cm)、中层(10~20 cm)和底层(20~30 cm)样品,获取样品 84 组.采样器具选用管式沉积物采样器,适用于洱海大部分水域的沉积物采样.采样前,采样器需用 10% 盐酸溶液浸泡清洗,再用去离子水反复冲洗,避免引入二次污染.采集的样品装入密封袋中密封并于保温箱中保存,运送至实验室进行分析.

1.3 样品测定

1.3.1 样品预处理

将沉积物样品转移至洗净晾干的搪瓷盘内,去除混杂于其中的各类泥沙、石块、植物残渣、碎屑等,置于阴凉通风处自然风干.将风干样品使用玛瑙研钵或陶瓷研磨机研磨处理后,过 100 目尼龙筛,确保样品均匀,提高样品的代表性.收集处理后的土样妥善保存至实验分析.

1.3.2 样品测试分析

准确称取 0.3 g 沉积物样品,加 10 mL(1+1)王水,在沸水浴中加热消解 2 h,用氢化物发生-原子荧光分光光度法对 As、Hg 进行测定.

准确称取 0.4 g 沉积物样品,用少量超纯水润湿后加浓盐酸 5 mL,于通风橱内石墨电热消解仪上 100 ℃ 加热 45 min,加入 9 mL 浓硝酸加热 30 min,加入 5 mL 氢氟酸加热 30 min,稍冷,加入 1 mL 高氯酸,加盖 120 ℃ 加热 3 h;开盖,150 ℃ 加热至冒白烟,加热时需摇动消解管.若消解管内壁有黑色碳化物,加入 0.5 mL 高氯酸加盖继续加热至黑色碳化物消失,开盖,160 ℃ 加热赶酸至内容物呈不流动的液珠状.加入 3 mL 硝酸溶液,温

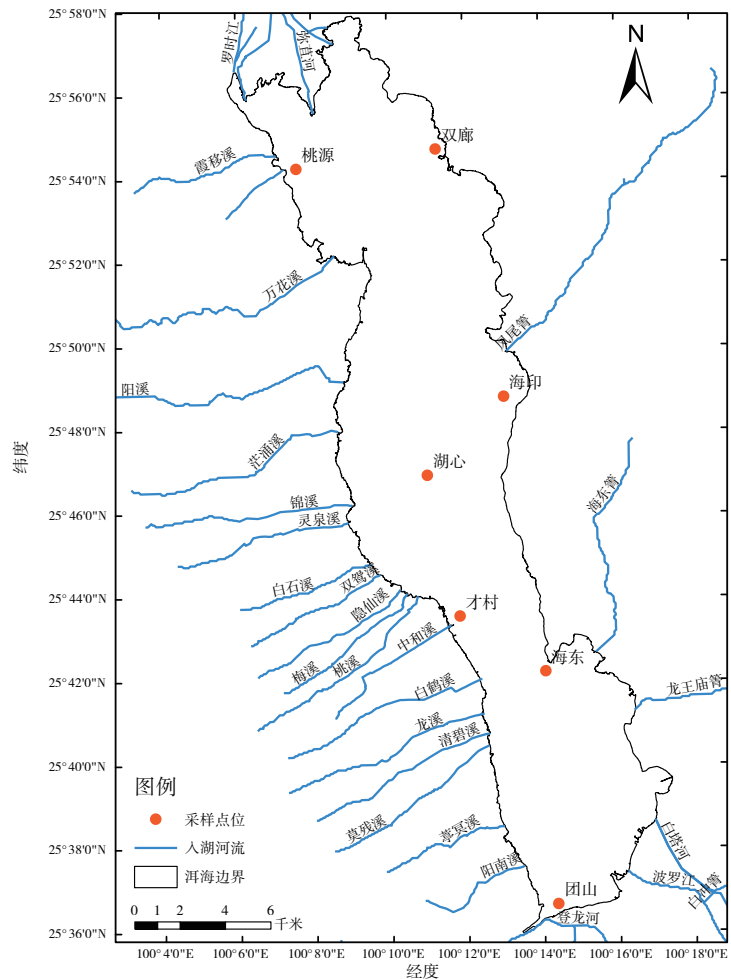


图 1 洱海沉积物重金属调查采样点位
Fig. 1 Sampling points for heavy metal investigation in Erhai Lake sediments

热溶解可溶性残渣, 全量转移至 25 mL 容量瓶中, 用(1+99)硝酸溶液定容至标线, 以供用火焰原子吸收分光光度法对 Cu、Zn、Pb、Ni、Cr、Cd 元素进行测定。

1.4 评价方法

1.4.1 地累积指数法

地累积指数法是评价沉积物或土壤中重金属污染程度的常用方法之一^[33], 计算方法见公式(1)。该方法主要通过比较当前重金属含量与背景值的差异来评估污染程度, 适用于区域性污染程度的初步比较。

$$I_{\text{geo}} = \log_2 \left[\frac{C_n}{k \cdot B_n} \right] \quad (1)$$

式中: I_{geo} 为地累积指数; C_n 为样品中元素 n 的实测浓度, mg/kg; B_n 为元素 n 的背景值(通常采用全球页岩平均含量、当地工业化前沉积物背景值或区域土壤背景值), 本研究采用《云南省土壤环境背景值》中的值作为参考^[34]; k 为修正系数, 通常取 1.5^[33], 用于校正各地背景值可能存在的自然变异, 使评价结果更能体现人类污染的影响。评价分级见表 1。

1.4.2 单因子污染指数法

单因子污染指数法是最直接、最基础的评价方法, 是综合污染评价的基础^[35-36], 计算方法见公式(2)。通过具体实测浓度和背景值的比值来量化污染程度, 可对单一污染物进行独立评价, 但无法反映多种污染物共同作用下的整体环境质量或综合生态效应。

$$P_i = \frac{C_i}{S_i} \quad (2)$$

式中: P_i 为单因子污染指数; C_i 为第 i 种污染物的环境浓度, mg/kg; S_i 为第 i 种污染物的环境本底浓度, mg/kg。评价分级见表 2。

1.4.3 污染负荷指数法

污染负荷指数是一种简洁、直观的评价指标, 计算方法见公式(3)。该方法用于快速评估一个站点或区域的整体污染水平, 并比较不同区域之间污染程度的相对大小^[37-38]。

$$PLI = \sqrt[n]{CF_1 \times CF_2 \times CF_3 \times \cdots \times CF_n} \quad (3)$$

式中: PLI 为该点的污染负荷指数; CF_i 为第 1 到 n 种污染物的污染系数(也称为单因子污染指数 P_i), 其计算见公式(2); n 为参与评价的污染物种类数量。评价分级见表 3。

1.4.4 内梅罗综合污染指数法

内梅罗综合污染指数突出了污染最严重的因子对整体环境质量的影响, 计算方法见公式(4)。

该方法避免了因平均效应而掩盖重点环境问题^[16,39]。几种重金属污染评价方法的比较见表 4。

$$P_n = \sqrt{\frac{(P_{i,\text{max}})^2 + (\bar{P}_i)^2}{2}} \quad (4)$$

式中: P_n 为内梅罗综合污染指数; $P_{i,\text{max}}$ 为所有污染物中最大的单因子污染指数值; \bar{P}_i 为所有参与评价的污染物的单因子污染指数的平均值。评价分级见表 5。

表 1 地累积指数评价分级

Tab. 1 Classification of degree by I_{geo}

I_{geo}	污染等级	污染程度评价
$I_{\text{geo}} \leq 0$	0	无污染
$0 < I_{\text{geo}} \leq 1$	1	无污染到中度污染
$1 < I_{\text{geo}} \leq 2$	2	中度污染
$2 < I_{\text{geo}} \leq 3$	3	中度污染到强污染
$3 < I_{\text{geo}} \leq 4$	4	强污染
$4 < I_{\text{geo}} \leq 5$	5	强污染到极强污染
$I_{\text{geo}} > 5$	6	极强污染

表 2 单因子污染指数评价分级

Tab. 2 Classification of degree by P_i

P_i	污染等级	污染程度评价
$P_i \leq 1$	I	无污染
$1 < P_i \leq 2$	II	轻度污染
$2 < P_i \leq 3$	III	中度污染
$P_i > 3$	IV	重度污染

表 3 污染负荷指数评价分级

Tab. 3 Classification of degree by PLI

PLI	污染等级	污染程度评价
$PLI \leq 1$	I	无污染
$1 < PLI \leq 2$	II	中度污染
$2 < PLI \leq 3$	III	重度污染
$PLI > 3$	IV	极重污染

表 4 重金属污染评价方法比较

Tab. 4 Comparison of evaluation methods for heavy metal pollution

项目	地累积指数法	单因子污染指数法	污染负荷指数法	内梅罗综合污染指数法
优点	单一重金属污染 敏感度高	计算极简,可判定单个因子 是否超标及超标倍数	结果简洁直观,适合空间 对比和时间趋势分析	识别首要环境因子, 能有效避免评价结果 被“平均化”
缺点	仅适用于单因子评价,无法 综合评价多元素污染状况	无综合污染表征能力	掩盖主要污染因子 不涉及毒性研究	可能过度放大单个因 子的影响,导致评价 结果略显“偏激”

1.4.5 潜在生态风险评价

潜在生态风险评价核心优势在于同时考虑了重金属的浓度、毒性、生态效应以及环境对污染的敏感性^[6,8,40]. 计算过程包括单因子潜在风险系数和综合潜在生态风险指数两部分. 计算单因子潜在风险系数的方法见公式(5).

$$E_r^i = T_r^i \times C_f^i \quad (5)$$

式中: E_r^i 为单因子潜在风险系数; T_r^i 为重金属 i 的毒性响应系数; C_f^i 为单因子污染系数(也称为单因子污染指数 P_i),其计算方法为公式(2). 单因子潜在风险系数评价分级见表 6, 重金属毒性响应系数见表 7.

表 5 内梅罗综合污染指数评价分级

Tab. 5 Classification of degree by P_n

P_n	污染等级	污染程度评价
$P_n \leq 0.7$	I	清洁
$0.7 < P_n \leq 1.0$	II	尚清洁
$1.0 < P_n \leq 2.0$	III	轻度污染
$2.0 < P_n \leq 3.0$	IV	中度污染
$P_n > 3.0$	V	重度污染

表 6 单因子潜在风险系数评价分级

Tab. 6 Classification of degree by E_r^i

风险系数(E_r^i)	风险等级	潜在生态风险程度
$E_r^i < 40$	轻度	低风险
$40 \leq E_r^i < 80$	轻度	中等风险
$80 \leq E_r^i < 160$	中度	较高风险
$160 \leq E_r^i < 320$	重度	高风险
$E_r^i \geq 320$	极其严重	极高风险

表 7 重金属毒性响应系数

Tab. 7 Heavy metal toxicity response coefficients

项目	Cd	Hg	As	Pb	Cu	Cr	Zn
T_r^i	30	40	10	5	5	2	1

计算综合潜在生态风险指数(RI)的方法见公式(6):

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i \quad (6)$$

式中: RI 为综合潜在生态风险指数,是所有单一重金属生态风险系数的加和,综合潜在生态风险评价分级见表 8.

表 8 综合潜在生态风险指数评价分级

Tab. 8 Classification of degree by RI

RI	风险等级	综合潜在生态风险程度
$RI < 150$	低风险	低
$150 \leq RI < 300$	中风险	中等
$300 \leq RI < 600$	较高风险	较高
$RI \geq 600$	极高风险	很高

1.5 质量控制

样品采集时,同一采样点至少采集平行样 3 份. 采样器具每完成一个点位的采样后均进行清洗,防止交叉污染. 实验室分析时,随机选取 5% 的样品进行实验室内的重复前处理与分析作为实验室平行样;在每批次分析中,加入国家有证标准物质,要求测定值在标准物质证书给出的不确定度范围内.

研究采用内标法或外标法对重金属进行定量检测分析,每次采集的水样进行分析时均设置实验室空白样、实验室平行样及有证标样等质控措施,其中,实验室空白样未检出目标物,有证标样均在给定误差范围内,平行样的相对偏差在 5% 以下,标准曲线相关系数 $R \geq 0.999$,8 种重金属的方法检出限为 0.01 ~ 0.50 g/kg,定量限为 0.03 ~ 1.50 $\mu\text{g}/\text{kg}$,样品加标平均回收率为 85% ~ 115%,满足痕量分析要求.

1.6 数据处理

采用 Microsoft Excel 2021 进行数据处理,采用 IBM SPSS Statistics 26.0 进行数据统计分析,采用单因素方差分析(ANOVA)比较沉积物重金属在不同分层及不同区域上的差异,采用 OriginPro 2021 软件绘图,实现数据可视化。

2 结果与分析

2.1 沉积物重金属浓度变化特征

2.1.1 表层沉积物重金属浓度统计

研究区表层沉积物重金属浓度统计结果如图2所示。从图2(a)看浓度变化,洱海表层沉积物重金属 Cd、Hg、As、Cu、Pb、Cr、Zn 和 Ni 的浓度均值分别为 0.86 mg/kg、0.41 mg/kg、23.51 mg/kg、91.46 mg/kg、45.32 mg/kg、132.06 mg/kg、130.06 mg/kg、83.61 mg/kg,浓度均值大小呈现 Cr > Zn > Cu > Ni > Pb > As > Cd > Hg 分布。其中,Cr 和 Zn 表现出较高的浓度均值,超过了 130 mg/kg;Hg 和 Cd 浓度均值较小,低于 1 mg/kg,其余 4 种重金属(Cu、Ni、Pb、As)浓度均值范围为 23.51 mg/kg ~ 91.46 mg/kg,表明重金属浓度在洱海表层沉积物中差异较大。

从图2(b)看年际变化,Hg、Cd 和 As 近年来(2015—2018 年,2021—2024 年)浓度均值皆维持在较低水平。Pb、Cu、Ni、Cr 和 Zn 浓度均值则表现出明显的年际变化特征。具体而言,Pb 和 Cr 浓度均值大致呈“先升后降再升”的趋势,Cr 在 2015—2016 年上升较快,2016 年浓度均值达 150.80 mg/kg,而最高值出现在 2022 年(197.57 mg/kg);Pb 在 2016—2018 年浓度上升较快,2018 年浓度均值最高(76.00 mg/kg)。Cu、Ni 和 Zn 浓度均值年际变化特征较为相似,大致表现出“先降后升再降”的趋势,2015 年这 3 种重金属均达到浓度均值最高值。

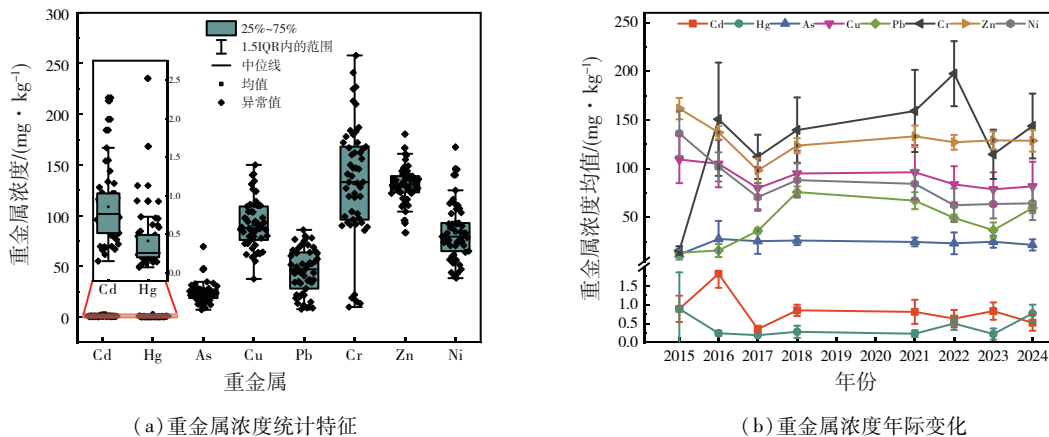


图2 2015—2024 年洱海表层沉积物重金属浓度统计

Fig. 2 Statistical data of heavy metal concentrations in the surface sediments of Erhai Lake from 2015 to 2024

2.1.2 柱状沉积物重金属浓度统计

研究区柱状沉积物重金属浓度结果分布如图3所示。由图3(a)可知,2021—2024 年,洱海表层重金属 Cd 和 Cu 在表层(0 ~ 10 cm)和底层(20 ~ 30 cm)浓度均值存在显著差异(*代表 $P < 0.05$,下同),其余 6 种重金属(As、Cr、Hg、Ni、Pb、Zn)浓度均值在不同层间无显著差异。从年际变化进行分析,图3(b)、图3(c)和图3(d)显示,相同种类的重金属在不同深度的浓度均值变化大致相同:2021—2024 年,除 Cr 在表层(0 ~ 10 cm)、中层(10 ~ 20 cm)和底层(20 ~ 30 cm)表现出较大幅度的“先升后降再升”的特征外,其余 7 种重金属浓度均值在不同深度层基本表现为缓升缓降的变化趋势。此外,除 2023 年,浓度均值 Zn > Cr 外,2021—2024 年,8 种重金属的浓度均值大小在 3 个不同深度层均表现出 Cr > Zn > Cu > Ni > Pb > As > Cd > Hg 的趋势。

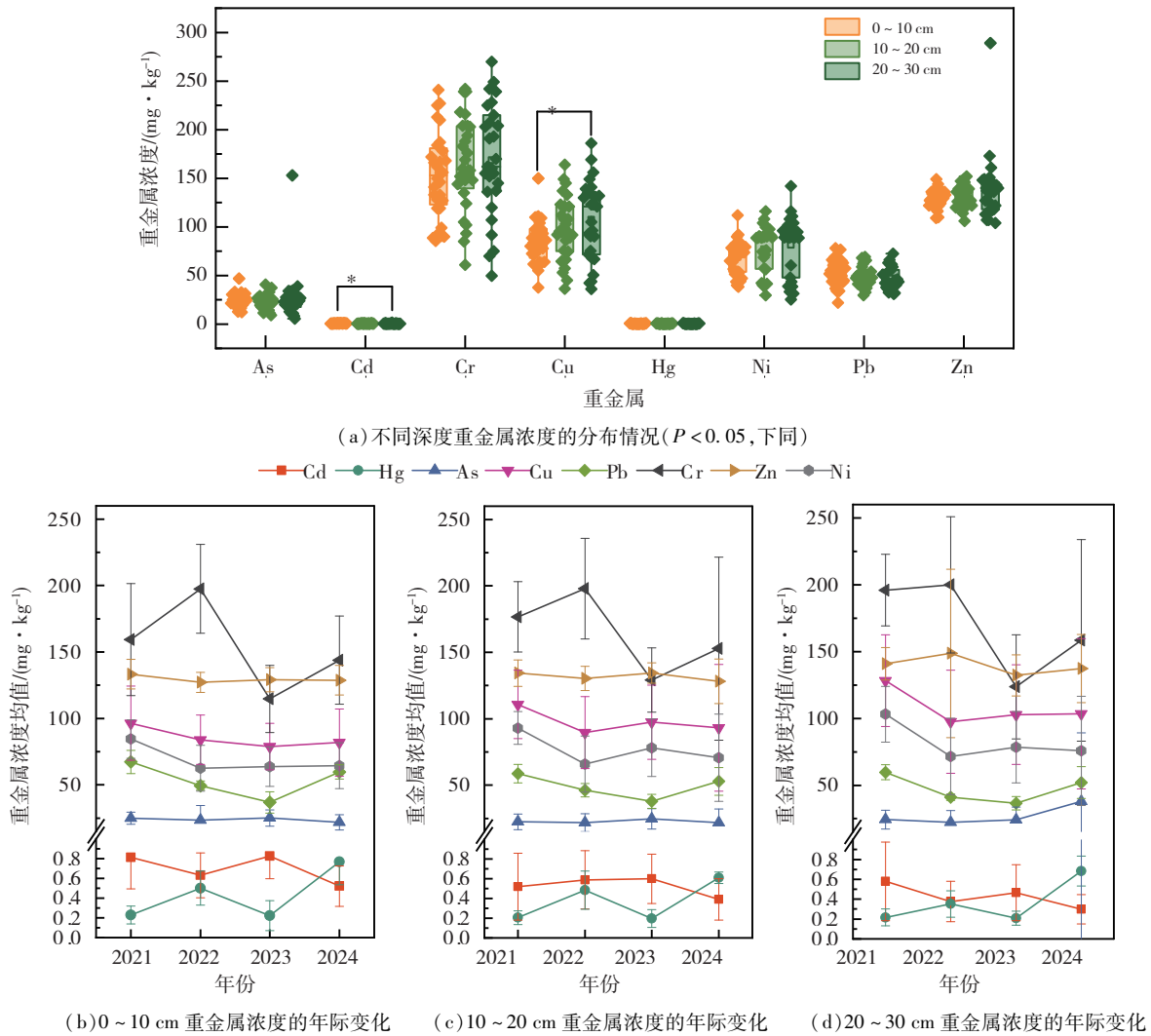


图 3 2021—2024 年沉积物重金属分层浓度

Fig. 3 Sediment heavy metal stratified concentrations from 2021 to 2024

2.2 环境质量现状评价

2.2.1 地累积指数评价

研究区沉积物重金属地累积指数计算结果如图 4 所示,2015—2018 年及 2021—2024 年沉积物重金属 I_{geo} 较大的重金属元素为 Hg 和 Cd,详见图 4(a). 从年际变化分析,2015 年沉积物重金属的 I_{geo} 均值排序从大到小为 $Hg > Cd > Ni > Cu > Zn > As > Pb > Cr$,2024 年变为 $Hg > Cd > Cr > Cu > Ni > Zn > Pb > As$,详见图 4(b). 如图 5 所示,通过比较 2015 年和 2024 年沉积物污染等级可以更明显看出这一趋势:2015 年各重金属元素“无污染”的平均占比为 39.6%,到 2024 年这一比例上升至 49.4%. 其中,2015 年 Hg 的污染等级有 34% 的占比处于“偏重度污染”及以上,到 2024 年仍有 19% 的占比处于“偏重度污染”,表明 Hg 是污染程度较高的重金属元素.

2.2.2 单因子污染指数评价

洱海重金属单因子污染指数评价结果如图 6(a) 和 6(b) 所示,Hg 和 Cd 的 P_i 均值较大,表明 Hg 和 Cd 在洱海表层沉积物中污染最为严重. 从年际变化进行分析,Hg 的 P_i 最大值为 33.16,Cd 的 P_i 最大值为 14.19,其他重金属单因子污染指数从 2015—2024 年基本保持稳定、处于较低水平.

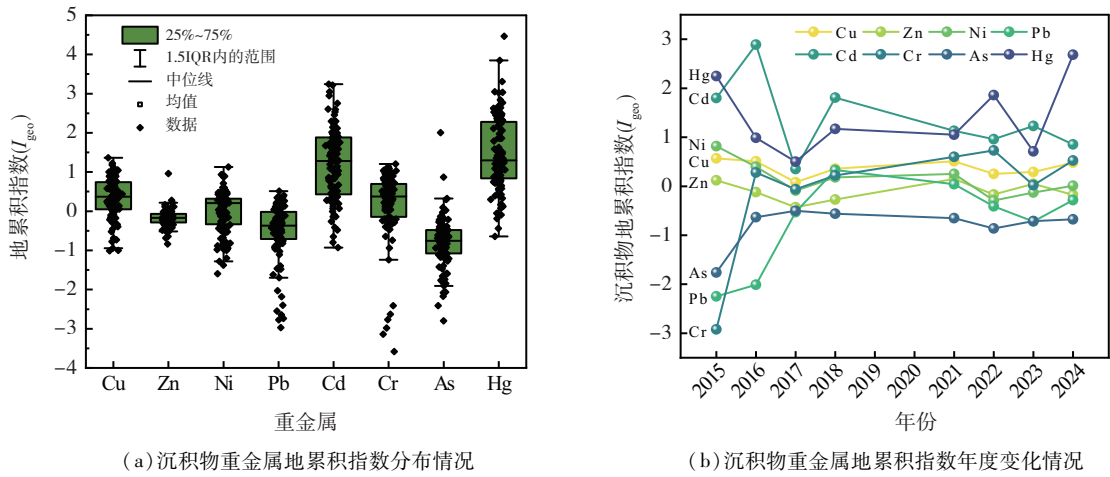


图 4 2015—2024 年洱海沉积物重金属地累积指数评价结果

Fig. 4 Evaluation results of heavy metal geo-accumulation Index of Erhai Lake sediments from 2015 to 2024

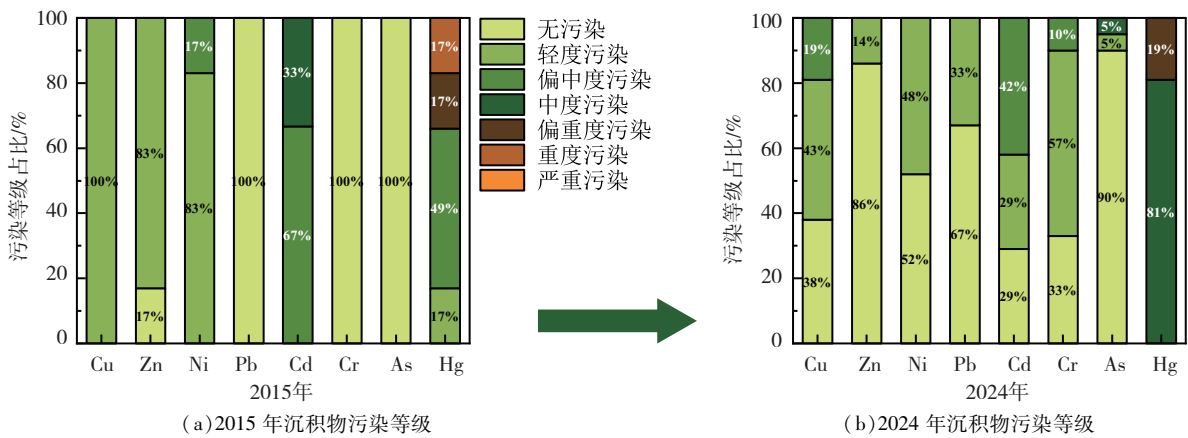


图 5 2015 年和 2024 年洱海沉积物污染等级比较

Fig. 5 Comparison of sediment pollution levels in Erhai Lake between 2015 and 2024

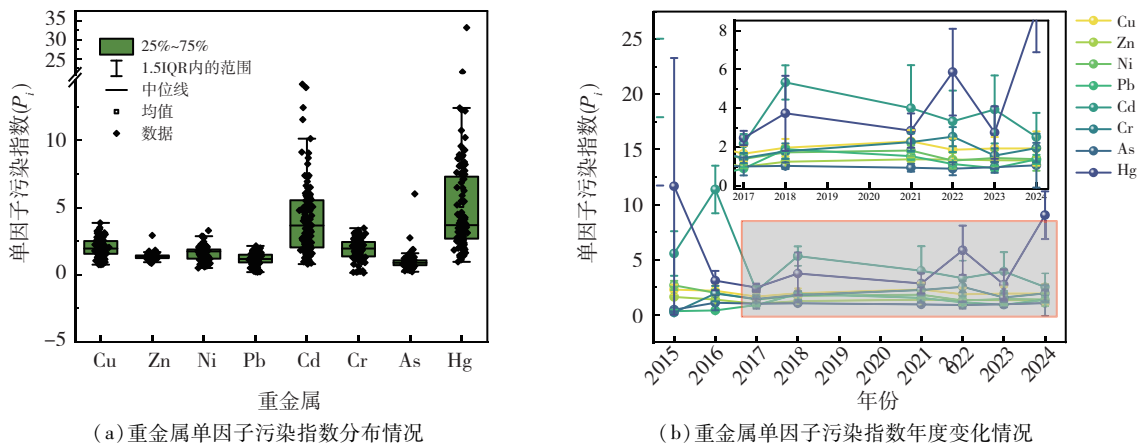


图 6 2015—2024 年洱海重金属单因子污染指数评价结果

Fig. 6 Evaluation results of single-factor pollution index of heavy metals in Erhai Lake and its interannual variation from 2015 to 2024

从空间分布看(见图 7),洱海北部、南部、中部的 P_i 均值除重金属 As、Cu 和 Hg 外,其余重金属在区域上的评价结果无显著差异.其中,污染严重的重金属 Cd 和 Hg 在区域分布上存在不同: Cd 在湖泊不同区域的 P_i 均值无明显差异;而 Hg 在中部湖区的 P_i (6.98) 明显高于北部湖区 P_i (3.57) 和南部湖区 P_i (4.28),存在显著差异.

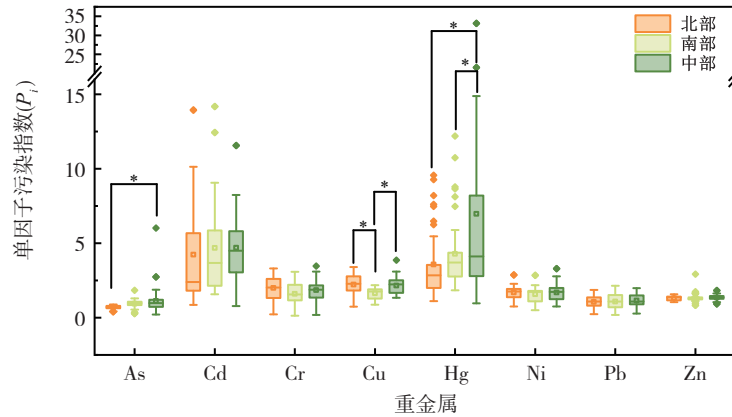


图 7 洱海不同区域单因子污染指数评价结果

Fig. 7 Evaluation results of single-factor pollution indices in different areas of Erhai Lake

2.2.3 污染负荷指数评价

研究区沉积物重金属污染负荷指数计算结果如图 8 所示:2015—2018 年及 2021—2024 年表层沉积物重金属 PLI 的均值范围为 1.38~1.94,总体处于中等污染水平.从年际变化进行分析,2015—2018 年表层沉积物的重金属 PLI 波动较大,最大值出现在 2018 年.2021—2024 年对沉积物进行分层调查可知,表层(0~10 cm)的 PLI 均值略高于中层(10~20 cm)和底层(20~30 cm),但均处于中等污染水平且无显著差异.

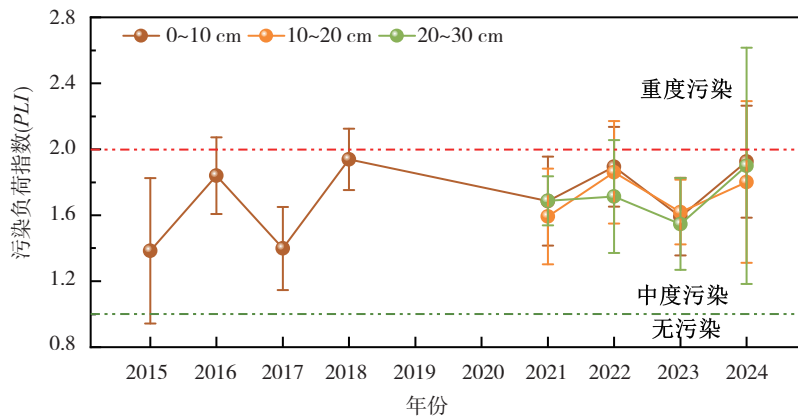


图 8 2015—2024 年沉积物重金属污染负荷情况

Fig. 8 Heavy metal pollution load of sediment from 2015 to 2024

2.2.4 内梅罗综合污染指数评价

采用内梅罗综合污染指数对洱海沉积物重金属污染进行评价,结果如图 9 所示:2015—2024 年,Hg、Cd 和 Cu 3 种重金属在大多数年份的调查中属于重污染水平,年份占比为分别为 87.5%、87.5% 和 75.0%,其 P_n 均值分别 9.16、6.36 和 3.68.其余重金属在调查期内的 P_n 污染程度评价分级为轻度污染和中度污染,并在 2015—2023 年保持相对稳定.2024 年,所有重金属的 P_n 值出现明显上升,按照 P_n 分级,除 Zn($P_n=2.19$)和 Pb($P_n=2.26$)外,其余重金属 P_n 均处于重度污染.2015—2024 年洱海沉积物重金属污染水平主要受 Hg、Cd 和 Cu 影响,其中 Hg 的贡献最大.

2.2.5 潜在生态风险指数评价

图 10 展示了洱海沉积物重金属 E_i^p 的结果, E_i^p 均值从大到小的排序为 Hg > Cd > Cu > As > Ni > Pb >

Cr > Zn, Hg 和 Cd 的 E_i^i 数值大部分处于较高风险及以上等级,甚至有相当部分数值处于极高风险,需引起重视,其余重金属大部分数值处于低风险水平。

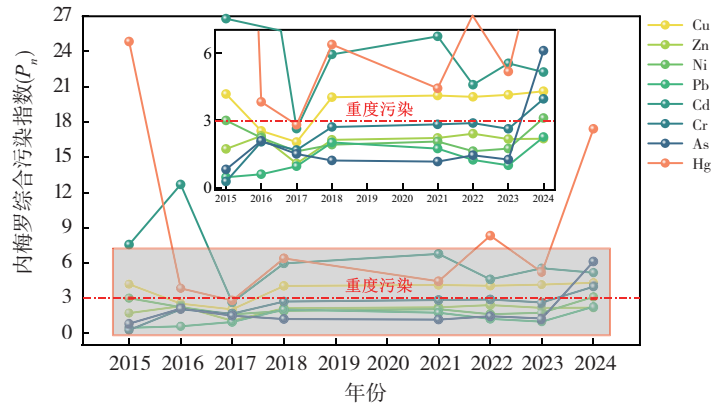
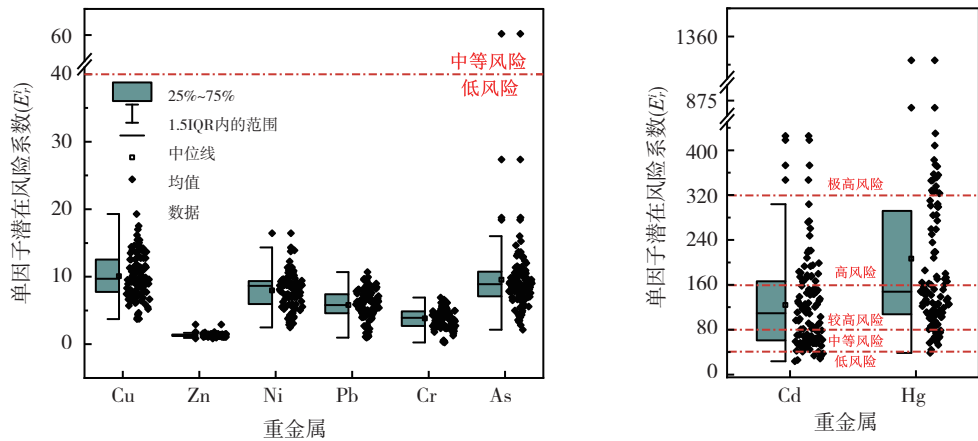


图 9 2015—2024 年洱海沉积物重金属内梅罗综合污染指数

Fig. 9 Nemerow comprehensive pollution index of heavy metals in Erhai Lake sediments from 2015 to 2024



(a) 6 种重金属单因子潜在风险系数分布情况

(b) Cd 和 Hg 单因子潜在风险系数分布情况

图 10 洱海沉积物单因子潜在风险系数比较

Fig. 10 Comparison of single-factor potential ecological risk coefficients of heavy metals in Erhai Lake sediments

如图 11(a) 所示, 2015 年, 洱海沉积物 8 种重金属的 RI 均值达到 666.18, 评价分级处于“极高风险”。此后的调查年份中, 2017、2021 和 2023 年为“中风险”, 2016、2018、2022 和 2024 年为“较高风险”。如图 11(b) 所示, 从不同年份的综合潜在生态风险等级占比来看, 评级为“极高风险”的点位在 2015 年占比最大 (33.33%)、2016 年已降为 14.29%、2022 年降至 4.76%, 2017 年、2018 年、2021 年和 2023 年没有此类型风险点位; 但 2024 年“极高风险”占比再次上升至 19.05%, “较高风险”占比也接近 81%, 说明 2023—2024 年, 洱海沉积物重金属含量出现一定程度的增加, 因此, 应持续监测洱海水环境和沉积物中重金属的浓度, 并及时评估其生态风险。

3 讨论

3.1 洱海沉积物重金属污染评价结果比较

本研究采用地累积指数、单因子污染指数、污染负荷指数及内梅罗综合污染指数对洱海表层沉积物重金属进行综合评价, 结果详见表 9。结合前文结果可知, Hg 和 Cd 是洱海表层沉积物主要污染因子, 究其原因与该区域较高的背景值及人为活动输入综合作用有关^[41]。地累积指数和单因子污染指数法计算简便, 并可直接进行比较, 识别主要污染因子。但是前者使用区域地球化学背景值作为基准^[12-13]; 后者使用污染物的评价标准值作为基准, 可在不同研究区进行比较。两者结合使用对环境因子进行评价时, 可讨论自然

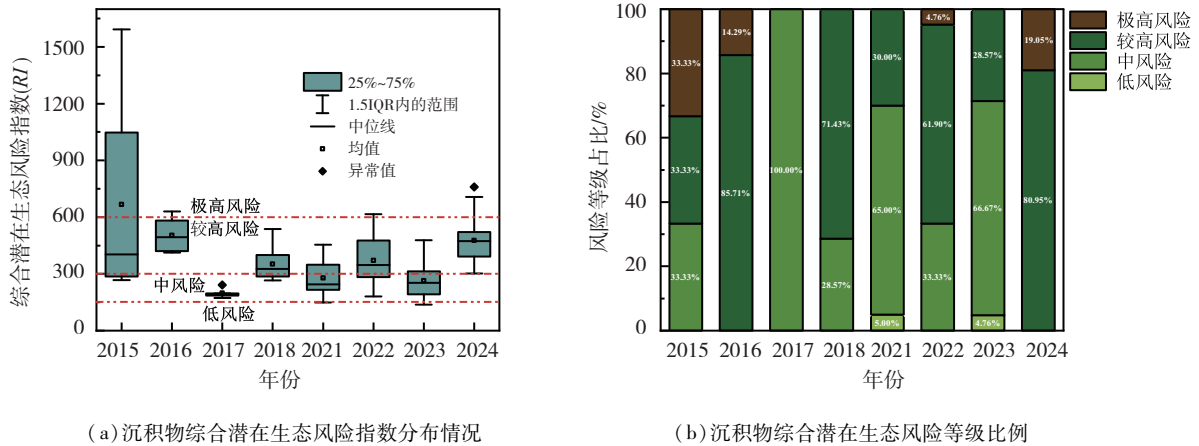


图 11 洱海沉积物综合潜在生态风险指数及沉积物综合潜在生态风险等级比例

Fig. 11 Comprehensive potential ecological risk index of Erhai Lake sediments and its classification proportions

污染源和人为污染源的共同作用. 基于单因子污染指数评价的结果, 污染负荷指数和内梅罗综合污染指数可以反映研究区域的总体污染水平; 污染负荷评价在一定程度上会降低环境污染程度, 但是可以更清晰地表达时间和空间上的差异^[1]. 而采用内梅罗综合污染指数更容易反映出环境的综合污染程度(重度污染), 同时内梅罗综合污染指数还可以识别主要的污染因子, 进行风险预警和重点管理, 对环境保护决策具有重要作用^[17]. 二者结合既反映了研究区域重金属污染的整体水平, 又达到了污染预警的目的^[42].

表 9 洱海沉积物重金属污染评价结果比较

Tab. 9 Comparison of evaluation results of heavy metal pollution in Erhai Lake sediments

评价方法	评价结果	主要重金属	等级
地累积指数法	Hg > Cd > Cr > Cu > Ni > Zn > Pb > As	Cd, Hg	—
单因子污染指数法	Hg > Cd > Cu > Cr > Ni > Zn > Pb > As	Cd, Hg	—
污染负荷指数法	表层 > 底层	—	无污染 - 中度污染
内梅罗综合污染指数法	—	Cd, Hg	重污染

3.2 高原湖泊沉积物潜在生态风险评价比较

由表 10 可知, 2015—2018 年以及 2021—2024 年, 洱海表层沉积物重金属 E_r^i 均值范围为 117.97 ~ 466.40, 评价结果为“较高风险”至“极高风险”, 其中 Hg 和 Cd 的 E_r^i 均值较高, 分别为 466.40、430.98. RI 均值范围为 197.70 ~ 666.18, 评价结果为“中风险”及以上. 经以上对比分析, 可见洱海沉积物重金属生态风险较高.

表 10 洱海沉积物重金属潜在生态风险评价结果

Tab. 10 Evaluation results of potential risks of heavy metals in the sediments of Erhai Lake

年份	重金属	E_r^i 均值	评价结果	RI 均值	评价结果
2015 年	Hg	466.40	极高风险	666.18	极高风险
2016 年	Cd	430.98	极高风险	504.46	高风险
2017 年	Hg	98.84	较高风险	197.70	中风险
2018 年	Cd	159.78	较高风险	325.56	高风险
2021 年	Cd	120.08	较高风险	277.87	中风险
2022 年	Hg	234.33	高风险	371.00	高风险
2023 年	Cd	117.97	较高风险	263.98	中风险
2024 年	Hg	361.63	极高风险	476.57	高风险

为了解高原湖泊洱海沉积物重金属潜在风险情况,将洱海与部分高原湖泊进行比较,结果如表 11 所示.本研究(2015—2018 年,2021—2024 年)期间,影响较大的重金属为 Hg 和 Cd,研究区域 RI 均值上限接近 760,绝大部分区域处于“中风险”或“高风险”;而在 2021 年有研究报道洱海潜在生态风险指数较大的重金属为 Hg 和 Cd,其 RI 值为 3.96 ~ 330.73^[13],显示评价结果为“中风险”,本研究结果与其相比有所升高.表 11 中可见,研究区 Hg 和 Cd 为沉积物污染的主要重金属,高于滇池、程海、星云湖、异龙湖和阳宗海,仅次于 1995—2001 年的滇池草海,表明洱海湖区重金属 Hg 和 Cd 的潜在风险处于较高水平,其最大风险值得重点关注.另外,在表 11 所列的高原湖泊中,Hg 和 Cd 的评价结果大多为中等风险到高风险,表明 Hg 和 Cd 是云南高原湖泊污染中较为普遍的生态风险因子.

表 11 云南高原湖泊沉积物主要重金属潜在风险比较

Tab. 11 Comparison of potential risks of main heavy metals in sediments of plateau lakes in Yunnan

湖泊	时间	主要重金属	RI	评价结果	资料来源
洱海	2015—2018 年 2021—2024 年	Hg、Cd	39 ~ 760	96% 中高风险	本研究
云南某湖	2013—2018 年	Hg	> 300	高风险	文献[7]
滇池	2016—2020 年	Hg、Cd、Cu	339 ~ 446	高风险	文献[10]
滇池	2013 年	Cd	—	中等风险	文献[11]
洱海	2021 年	Hg、Cd	3.96 ~ 330.73	中风险	文献[13]
程海	2012—2014 年	Hg、Cd	156 ~ 204	中等风险	文献[21]
抚仙湖	2012 年、2015 年	Hg、Cd	248	中等风险	文献[39]
滇池	草海 外海	Cd	> 581 65 ~ 189	高风险 低风险	文献[43]
滇池	草海 外海	Cd	861.3 236.4	高风险 中等	文献[44]
抚仙湖	2007 年	As	—	中等风险	文献[45]
星云湖	2017 年	As、Pb、Zn	28 ~ 54	低风险	文献[46]
异龙湖	2015 年	Cd	138 ~ 305	中等风险	文献[47]
阳宗海	2014 年	Cd、As、	53 ~ 493	中高风险	文献[48]
泸沽湖	2010 年	Cu、Cr、Pb	—	—	文献[49]

4 结论

从污染程度、空间分布、时间演变及生态风险等多个维度对洱海沉积物重金属污染特征进行了全面评价,并与其他云南高原湖泊进行了对比分析,多种方法相互印证,表明洱海沉积物重金属污染问题需引起高度重视.主要结论如下:

1) 洱海沉积物重金属污染以 Hg 和 Cd 为主,污染程度明显高于其他重金属(Cu、Zn、Cr、Ni、Pb、As),是洱海沉积物重金属污染防控的重点对象.

2) 除 Hg、As 和 Cu 外,洱海沉积物重金属污染在空间上差异不大.垂向分布上,表层沉积物污染负荷略高于中层和底层.

3) 研究时段内,洱海生态风险总体呈下降趋势,说明污染控制措施初见成效,但生态风险在 2024 年快速上升应引起相关部门的重视,对洱海湖区重金属的监测需持续进行.

参考文献:

- [1] 黄强,王秀丽,宋鹏程,等. 涪江绵阳段表层沉积物重金属污染特征及风险评价[J]. 中国环境监测,2024,40(3):165-180.
HUANG Q,WANG X L,SONG P C,et al. Pollution characteristics and risk assessment of heavy metals in surface sediment from Mianyang segment of the Fujiang River[J]. Environmental Monitoring in China, 2024, 40(3):165-180.
- [2] 刘霄,黄张根,卢洪斌. 2003—2021年洞庭湖沉积物中重金属时空分布特征及生态风险评价[J]. 生态毒理学报,2025,20(2):281-296.
LIU X,HUANG Z G,LU H B. Spatiotemporal distribution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in Dongting Lake sediments from 2003 to 2021[J]. Asian Journal of Ecotoxicology,2025,20(2):281-296.
- [3] 于万辉,王俊杰,臧淑英. 松嫩平原湖泊底泥重金属空间变异特征及其风险评价[J]. 地理科学,2012,32(8):1000-1005.
YU W H,WANG J J,ZANG S Y. The spatial variability characteristics and potential ecological risk assessment of heavy metals of lake sediments in the Songnen Plain[J]. Scientia Geographica Sinica, 2012, 32(8):1000-1005.
- [4] 刘泽碧,窦筱艳,毛旭锋,等. 青海湖流域沉积物重金属生态风险评价及来源解析[J]. 环境工程学报,2025,19(5):1061-1073.
LIU Z B,DOU X Y,MAO X F,et al. Ecological risk assessment and source analysis of heavy metals in sediments of Qinghai Lake Basin[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2025, 19(5): 1061-1073.
- [5] 孙家高,光霞,苗安洋,等. 莱州湾表层沉积物重金属分布特征及生态风险评价[J/OL]. 海洋湖沼通报(中英文),2025,1-11.
SUN J G, GUANG X, MIAO A Y, et al. Spatial distribution of heavy metals in the surface sediments of the Laizhou Bay and their ecological risk assessment [J/OL]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2025,1-11.
- [6] 宗维,李煜,毛启曦,等. 湖北省漳河水库沉积物重金属分布特征及生态风险评价[J]. 长江流域资源与环境,2024,33(12):2688-2698.
ZONG W,LI Y,MAO Q X,et al. Spatial distribution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in sediments of Zhanghe Reservoir[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2024, 33 (12):2688-2698.
- [7] 解兴春,白梅,李应飞,等. 底泥重金属污染评价方法对比分析——以云南某地河流、湖泊为例[J]. 环境科学导刊,2022,41(2):79-85+89.
XIE X C,BAI M,LI Y F,et al. Comparison and analysis of evaluation methods for heavy metal pollution of sediments: A case study for the rivers and the lakes of a county in Yunnan Province[J]. Environmental Science Survey,2022,41(2):79-85+89.
- [8] 黄鹤飞,施泽明,熊超,等. 湖泊沉积物中重金属污染评价及生物修复方法的研究进展[J]. 科技信息,2013(8):137.
- [9] 栾约生,张为,石纲,等. 湖北鄂州城市湖泊底泥重金属空间分布特征与污染评价[J]. 长江科学院院报,2020,37(1):30-36+83.
LUAN Y S,ZHANG W,SHI G,et al. Spatial distribution and pollution evaluation of heavy metals in a lake sediment in Ezhou City of Hubei Province[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2020,37(1):30-36+83.
- [10] 张国涵,解倩,闫琨,等. “十三五”期间滇池外海底泥重金属污染特征分析及生态风险评价[J]. 水土保持学报,2023,37(3):240-247.
ZHANG G H,XIE Q,YAN K,et al. Pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in sediments of Dianchi outer lake during the ‘13th Five-Year Plan period’ [J]. Journal of Soil and Water Conservation,2023,37(3):240-247.
- [11] 施鸿昊,焦聪聪,曾巾,等. 滇池沉积物中重金属垂向分布及污染评价[J]. 人民长江,2019,50(10):42-49.
SHI H H,JIAO C C,ZENG J,et al. Vertical distribution and pollution assessment of heavy metals in sediment of Dianchi Lake [J]. Yangtze River,2019,50(10):42-49.
- [12] 李晓铭,赵世民,王道玮,等. 滇池表层沉积物中重金属污染特征及评价[J]. 地球与环境,2013,41(6):647-655.
LI X M,ZHAO S M,WANG D W,et al. Study on the pollution characteristics of heavy metals in surface sediments of Dianchi Lake[J]. Earth and Environment,2013,41(6):647-655.
- [13] 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), 2023,48(6):133-142.
- [14] 栗浩亮,徐继伟,王传澍,等. 校园人工湖泊表层沉积物重金属分布特征及生态风险评价[J]. 环境污染与防治,2024,46(11):1639-1647.
- LI H L,XU J W,WANG C S,et al. Distribution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments of campus artificial lakes[J]. Environmental Pollution and Control, 2024, 46(11): 1639-1647.
- [15] 朱佳琪,杨珣. 城市湖泊底泥重金属污染状况及其评价[J]. 当代化工研究,2023(6):1-5.
- ZHU J Q,YANG X. Heavy metal pollution in sediment of urban lakes and its evaluation[J]. Modern Chemical Research, 2023(6):1-5.
- [16] 张晶,邬立,冯晓琳. 内梅罗综合指数法在河道底泥重金属污染评价中的应用与研究[J]. 地下水,2023,45(5):113-116.
- ZHANG J,WU L,FENG X L. Application and study of nemero composite index method in assessment of heavy metal pollution in river sediment[J]. Ground Water,2023,45(5):113-116.
- [17] 刘衍君,汤庆新,白振华,等. 基于地质累积与内梅罗指数的耕地重金属污染研究[J]. 中国农学通报,2009,25(20):174-178.
- LIU Y J,TANG Q X,BAI Z H,et al. The research of heavy metals pollution in soil based on the connection of geoaccumulation index and nemero index[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,2009,25(20):174-178.
- [18] 张闯,王苒,孙勇刚,等. 衡水湖底泥重金属元素分布特征及污染评价[J]. 能源与环保,2024,46(1):64-68+75.
- ZHANG C,WANG R,SUN Y G,et al. Distribution characteristics of heavy metal elements and pollution evaluation of sediment in Hengshui Lake[J]. China Energy and Environmental Protection, 2024, 46(1): 64-68+75.
- [19] 王永豪,李骁勇,邱建贺,等. 城市湖泊底泥污染分析及生态风险评价——以沅江市中心城区为例[J]. 环境生态学,2023,5(2):75-80.
- WANG Y H,LI X Y,LIU J H,et al. Pollution analysis and ecological risk assessment of urban lake sediments—Taking Yuanjiang Downtown as an example[J]. Environmental Ecology,2023,5(2):75-80.
- [20] 刘俊廷,潘红捷,赵锁志,等. 内蒙古乌梁素海底泥重金属元素污染评价[J]. 地质与资源,2010,19(4):325-329.
- LIU J T,PAN H J,ZHAO S Z,et al. Assessment for the heavy metal pollution in the sediments of Wuliangshuhai lake,Inner Mongolia[J]. Geology and Resources,2010,19(4):325-329.
- [21] 于真真,刘恩峰,张恩楼,等. 程海沉积物重金属时空变化及人为污染与潜在生态风险[J]. 环境科学,2017,38(10):4169-4177.
- YU Z Z,LIU E F,ZHANG E L,et al. Spatio-temporal variations,contamination and potential ecological risk of heavy metals in the sediments of Chenghai Lake[J]. Environmental Science,2017,38(10):4169-4177.
- [22] 杨萍萍,朱江,杨晓雪,等. 洱海流域水生态监测评价发展与展望[J]. 四川环境,2023,42(3):237-242.
- YANG P P,ZHU J,YANG X X,et al. Progress and prospect of water ecological monitoring and assessment of Erhai Lake[J]. Sichuan Environment,2023,42(3):237-242.
- [23] 周正道,李云霞. 洱海流域水资源现状与保护对策探讨[J]. 海河水利,2025(5):15-18+31.
- ZHOU Z D,LI Y X. Current status and protection strategies of water resources in the Erhai Lake Basin[J]. Haihe Water Resources,2025(5):15-18+31.
- [24] 和仕华. 基于湖泊形态及水文特征的洱海最低生态水位确定[J]. 人民珠江,2023,44(S1):171-176.
- HE S H. Determination of minimum ecological water level in Erhai Lake based on lake morphology and hydrological characteristics[J]. Pearl River,2023,44(S1):171-176.
- [25] 杨凤娥,周字能,杨萍萍. 2021—2022年洱海水环境现状研究[J]. 环境科学导刊,2024,43(5):58-60+71.
- YANG F E,ZHOU Z N,YANG P P. Study on the status of the water quality of Erhai Lake during the period from 2021 to 2022[J]. Environmental Science Survey,2024,43(5):58-60+71.
- [26] 马巍,周云,苏建广,等. 洱海水动力特性与入湖污染物迁移扩散规律研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2021,19(3):281-289.
- MA W,ZHOU Y,SU J G,et al. Study on the hydrodynamic characteristics and transporation and diffusion of pollutants in Er-

- hai Lake[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2021, 19(3): 281 - 289.
- [27] 华兆晖,李锐,杨智,等. 2017—2022年洱海水体营养状态的时空变化趋势及其成因分析[J]. 湖泊科学, 2024, 36(6): 1639 - 1649.
- HUA Z H, LI R, YANG Z, et al. The spatiotemporal variation and potential causes for the nutrient status of water in Lake Erhai from 2017 to 2022[J]. Journal of Lake Sciences, 2024, 36(6): 1639 - 1649.
- [28] 奚满松,沙凤兮,刘艳萍,等. 2015—2019洱海COD变化特征及影响因素研究[J]. 环境科学导刊, 2024, 43(1): 1 - 7 + 21.
- XI M S, SHA F X, LIU Y P, et al. Research on the variation characteristics and influencing factors of COD in Erhai Lake in 2015—2019[J]. Environmental Science Survey, 2024, 43(1): 1 - 7 + 21.
- [29] 周字能. 洱海溶解氧、五日生化需氧量变化趋势及影响因素分析[J]. 环境科学导刊, 2021, 40(1): 25 - 29.
- ZHOU Z N. Analysis on the change trend and influencing factors of dissolved oxygen and five - day biochemical oxygen demand in Erhai Lake[J]. Environmental Science Survey, 2021, 40(1): 25 - 29.
- [30] 黄明雨. 洱海水体总有机碳与化学需氧量的相关性探讨[J]. 绿色科技, 2020, 22(14): 131 - 134.
- HUANG M Y. Discussion on the correlation between total organic carbon and chemical oxygen demand of Erhai Lake[J]. Journal of Green Science and Technology, 2020, 22(14): 131 - 134.
- [31] 李凤香. 洱海面源污染治理现状及对策[J]. 环境科学导刊, 2008, 27(S1): 82 - 84.
- LI F X. Present situation of treatment of non - point source pollution and countermeasures in Erhai Lake[J]. Environmental Science Survey, 2008, 27(S1): 82 - 84.
- [32] 王昭祥,王婷婷. 洱海面源污染分级调蓄处理技术方案探讨[J]. 市政技术, 2021, 39(1): 119 - 121.
- WANG Z X, WANG T T. Discussion on the technical scheme of classified regulation of non - point Source Pollution in Erhai Lake[J]. Municipal Engineering Technology, 2021, 39(1): 119 - 121.
- [33] 尚英男,倪师军,张成江,等. 应用地质累积指数评价成都市河流表层沉积物重金属污染[J]. 广东微量元素科学, 2005, 12(10): 12 - 16.
- SHANG Y N, NI S J, ZHANG C J, et al. Application of index of geoaccumulation ($I_{(geo)}$) for evaluation of pollution of heavy metals in surface sediments from rivers in Chengdu[J]. Guangdong Trace Elements Science, 2005, 12(10): 12 - 16.
- [34] 国家环境保护局. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990: 220 - 401.
- [35] 费利东,张婷,王艳芬,等. 土壤重金属污染多种评价方法对比研究——以南京市龙潭沿江地区为例[J]. 有色金属(矿山部分), 2023, 75(4): 142 - 149 + 160.
- FEI L D, ZHANG T, WANG Y F, et al. Contrastive studies of various soil heavy metal pollution methods: A case study in riverside area in Longtan, Nanjing[J]. Nonferrous Metals (Mine Section), 2023, 75(4): 142 - 149 + 160.
- [36] 王海波. 几种河流水质评价方法的比较分析[J]. 黑龙江科技信息, 2011(27): 198 + 197.
- [37] 王婕,刘桂建,方婷,等. 基于污染负荷指数法评价淮河(安徽段)底泥中重金属污染研究[J]. 中国科学技术大学学报, 2013, 43(2): 97 - 103.
- WANG J, LIU G J, FANG T, et al. Assessment of pollution characteristics of heavy metals in the sediments of Huaihe River (Anhui Section) by pollution load index[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2013, 43(2): 97 - 103.
- [38] 徐争启,倪师军,张成江,等. 应用污染负荷指数法评价攀枝花地区金沙江水系沉积物中的重金属[J]. 四川环境, 2004, 23(3): 64 - 67.
- XU Z Q, NI S J, ZHANG C J, et al. Assessment on heavy metals in the sediments of Jinsha River in Panzhihua area by pollution load index[J]. Sichuan Environment, 2004, 23(3): 64 - 67.
- [39] 关伯仁. 评内梅罗的污染指数[J]. 环境科学, 1979(4): 67 - 71.
- [40] 白广一,赵克良,刘恩峰,等. 抚仙湖沉积物重金属累积特征与风险评价[J]. 中国环境科学, 2023, 43(7): 3625 - 3633.
- BAI G Y, ZHAO K L, LIU E F, et al. Accumulation characteristics and risk assessment of heavy metals in sediments of Fuxian Lake[J]. China Environmental Science, 2023, 43(7): 3625 - 3633.
- [41] 聂小力,阎欣,吴丰,等. 典型红壤区不同用地类型土壤重金属污染水平分析及生态风险评价[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2025, 33(11): 2139 - 2152.

- NIE X L, YAN X, WU F, et al. Soil heavy metal pollution levels and ecological risk under different land use types in a typical red soil region[J]. *Chinese Journal of Eco - Agriculture*, 2025, 33(11): 2139 - 2152.
- [42] 张娜, 崔娇梅, 孙晶, 等. 土壤重金属污染评价方法对比研究[J]. *绿色科技*, 2022, 24(8): 151 - 155.
ZHANG N, CUI J M, SUN J, et al. Comparative study on evaluation methods of soil heavy metal pollution[J]. *Journal of Green Science and Technology*, 2022, 24(8): 151 - 155.
- [43] 字润祥, 李振宇, 王向宇. 滇池表层底泥中重金属分布特征及污染评价层次分析法[J]. *昆明理工大学学报(自然科学版)*, 2020, 45(3): 93 - 97 + 99 - 101.
ZI R X, LI Z Y, WANG X Y. Distribution and pollution assessment of heavy metals in sediments of Dianchi Lake[J]. *Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science)*, 2020, 45(3): 93 - 97 + 99 - 101.
- [44] 李贝, 道金荣, 朱润云, 等. 滇池重金属污染的分布、积累和风险评估[J]. *环境化学*, 2021, 40(6): 1808 - 1818.
LI B, DAO J R, ZHU R Y, et al. Distribution, accumulation and risk assessment of heavy metal pollution in Dianchi Lake[J]. *Environmental Chemistry*, 2021, 40(6): 1808 - 1818.
- [45] 王小雷, 杨浩, 顾祝军, 等. 抚仙湖沉积物重金属垂向分布及潜在生态风险评价[J]. *地球与环境*, 2014, 42(6): 764 - 772.
WANG X L, YANG H, GU Z J, et al. Vertical distribution and potential ecological risk assessment of heavy metals in sediment cores of Lake Fuxian[J]. *Earth and Environment*, 2014, 42(6): 764 - 772.
- [46] 魏伟伟, 李春华, 叶春, 等. 基于底泥重金属污染及生态风险评价的星云湖疏浚深度判定[J]. *环境工程技术学报*, 2020, 10(3): 385 - 391.
WEI W W, LI C H, YE C, et al. Determination of dredging depth of Xingyun Lake based on heavy metal pollution and ecological risk assessment of sediment[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2020, 10(3): 385 - 391.
- [47] 李小林, 刘恩峰, 于真真, 等. 异龙湖沉积物重金属人为污染与潜在生态风险[J]. *环境科学*, 2019, 40(2): 614 - 624.
LI X L, LIU E F, YU Z Z, et al. Contamination and potential ecological risk assessment of heavy metals in the sediments of Yilong Lake, southwest China[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(2): 614 - 624.
- [48] 蔡艳洁, 张恩楼, 刘恩峰, 等. 云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.
- [49] 古正刚, 吴敏, 卫蓉, 等. 泸沽湖表层沉积物中重金属污染特征[J]. *环境科学与技术*, 2014, 37(11): 111 - 115 + 136.
GU Z G, WU M, WEI R, et al. Characteristics of heavy metal pollution in top - layer sediment of Lugu Lake[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 37(11): 111 - 115 + 136.

(编辑:李媛)