

文进心,高春亮,成艾颖,等. 可鲁克湖-托素湖表层沉积物中重金属元素的赋存形态、风险评价及其来源解析[J]. 盐湖研究, 2026, 34(2): 22-31.
Wen J X, Gao C L, Cheng A Y, et al. Study on the occurrence characteristics, bioavailability, ecological risk and sources apportionment of heavy metals from surface sediments in Keluke-Tuosu lakes[J]. Journal of Salt Lake Research, 2026, 34(2): 22-31.
DOI: 10.3724/j.yhyj.2025074
CSTR: 32273.14.j.yhyj.2025074

可鲁克湖-托素湖表层沉积物中重金属元素的赋存形态、风险评价及其来源解析

文进心^{1,2,3}, 高春亮^{1,2*}, 成艾颖^{1,2}, 李鸿宇^{1,2,3}, 王晨宇^{1,2,3}, 魏海成^{1,2},
闫秀云¹, 晁娜^{1,2,3}, 董博^{1,2,3}, 安海西⁴

(1. 中国科学院青海盐湖研究所, 盐湖资源绿色高值利用重点实验室, 青海 西宁 810008;
2. 青海省盐湖地质与环境重点实验室, 青海 西宁 810008; 3. 中国科学院大学, 北京 100049;
4. 海西蒙古族藏族自治州林业和草原局, 青海 德令哈 817099)

摘要: 依托柴达木盆地东北部封闭型湖泊可鲁克湖和托素湖33个表层沉积物样品, 并基于 Tessier 连续提取法, 结合 ICP-MS 分析、 RAC 、 RSP 、 PLI 、 I_{geo} 评价法和 PCA 等技术手段, 对重金属元素 Cd、Cr、Cu、Pb、Zn、Hg、As 和 Mn 的浓度、化学赋存形态、生物有效性、可能生态风险以及来源开展了针对性研究。结果表明, 重金属元素的平均浓度由高到低依次为 Mn (779.53 mg/kg) > Zn (133.63 mg/kg) > Cr (89.69 mg/kg) > Cu (38.51 mg/kg) > As (29.80 mg/kg) > Pb (30.49 mg/kg) > Cd (0.34 mg/kg) > Hg (0.10 mg/kg), 且在空间分布上呈现不均匀分布特征。重金属元素 Cr、Cu、Zn、Hg 和 As 主要以残渣态为优势形态; Cd 主要以铁锰氧化物结合态和残渣态为优势形态; Pb 和 Mn 则主要以残渣态和铁锰氧化物结合态为优势形态; 8 种重金属元素均以碳酸盐结合态和离子交换态为劣势形态。 RAC 和 RSP 评价结果表明 Cd 的生物有效性最高, 其余 7 种重金属元素的生物有效性则相对较低。 PLI 和 I_{geo} 评价结果显示可鲁克湖-托素湖处于中度污染状态, Hg 为重要的贡献元素。PCA 结果表明, 主成分 F1 可以表征流域内铅锌矿/铜矿开采冶炼活动的人为输入及其伴生 Hg 的还原迁移行为; 次成分 F2 揭示沉积物-水界面氧化还原条件驱动下的自然过程, 并叠加了 Hg 的大气沉降效应。因此, 研究区内重金属物源受控于矿业活动和自然地球化学过程的协同驱动, 亟须关注 Cd 的活性释放风险和 Hg 的跨境迁移效应。

关键词: 表层沉积物; 重金属元素; 赋存形态; 可鲁克湖; 托素湖; 来源解析

中图分类号: P595; X825

文献标志码: A

文章编号: 1008-858X(2026)02-0022-10

素有“世界第三极”之称的青藏高原, 因其生态与环境系统独特而敏感, 各类环境因子维持着脆弱的动态平衡^[1]。然而, 伴随区域经济的快速发展, 工业化、城镇化进程的深入以及旅游业的迅速崛起, 人类活动的日益增加已成为深刻塑造青藏高原生态环境格局的关键因素^[2,3]。ZHANG 等^[4]研究发现青藏铁路运输显著提升了沿线表层土壤中 Zn、Cd 和 Pb 的含量水平, 德令哈区段成为铁路影响下的重金属污染严重区。WU 等^[5]研究发现青藏高原东北部表层土壤中重金属含量水平处于中度污染, Hg 污染最

为严重, 并且主要为工业污染。尤其是在前期研究发现在青藏高原地区不同环境载体(譬如沉积物、土壤和水体)中已经存在不同程度的重金属污染^[4-17]。

柴达木盆地地处青藏高原东北部, 作为具有重要战略地位的资源富集区域, 其生态安全面临着严峻挑战^[13]。本区域环境压力日益增大, 其成因主要包括: 矿产资源的开发利用、工业企业的飞速扩张、交通源的尾气排放以及农业生产中农药、化肥和各类化学产品的广泛使用^[12,18-20]。在水生生态系统中, 湖水中的重金属含量会随季节、水文等产生波动, 无

收稿日期: 2025-09-10; 修回日期: 2025-10-20

基金项目: 青海省应用基础研究项目(2022-ZJ-732); 青海省“昆仑英才·高端创新创业人才”计划项目(QHKLYC-GDCXCXY-2022-163); 中国科学院西部之光“西部青年学者”项目(XBZGLZB2022027); 中国科学院青海盐湖研究所基础研究青年创新交叉团队基金(islJCTD-2022-1)

作者简介: 文进心(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 湖泊沉积物中的重金属元素地球化学研究。Email: 15928244749@163.com。

通信作者: 高春亮(1983—), 男, 副研究员, 主要从事湖泊沉积与环境变化研究。Email: chunlianggao@isl.ac.cn。

论其重金属以何种形态存在,其最终的归宿大多是通过沉降作用进入沉积物,故沉积物中的重金属含量和形态,在很大程度上反映了从上覆水体中沉降下来的累积量。因此,沉积物作为环境载体既是重金属污染物的重要“汇”,同时也是潜在的二次“源”^[21]。而湖泊沉积物中重金属元素的赋存形态对其生物有效性、迁移转化行为、毒性效应以及潜在的环境风险具有决定性影响。

巴音河流域作为柴达木循环经济试验区供水资源的重要河流,其湿地及其尾间可鲁克湖、托素湖和尕斯库勒湖构成了独特的生态环境系统。他们是流域内生物多样性维持的重要栖息地,其环境质量关乎区域生态安全与可持续发展。前期针对可鲁克湖-托素湖研究工作主要聚焦在古气候、古环境的演化和重建及其水文、地质过程等方面^[22-30]。而作者团队的前期研究工作初步表明,表层沉积物中的Pb、Cr、Cu和Zn污染相对较轻,但Cd污染程度较重,受人类活动影响较大^[17,31]。然而,针对表层沉积物中重金属元素的化学赋存形态特征、生物有效性以及污染源解析等关键科学问题的系统研究工作欠缺。鉴于此,本研究拟报道柴达木盆地可鲁克湖-托素湖表层沉积物中8种典型重金属元素Cd、Cr、Cu、Pb、Zn、Hg、As和Mn浓度的测定结果,并基于 Tessier 连续提取法、地质积累指数法、污染负荷指数法、风险评估编码法、次生相与原生相分布比值法、主成分分析和相关性分析,旨在阐明重金属元素在双湖区空间分布特征,揭示其化学赋存形态特征,定量评估其生物有

效性和污染水平,并解析其物质来源。研究结果可以提升对可鲁克湖-托素湖环境现状的全面认知,并有效地进行生态风险科学管控。

1 研究区概况

可鲁克湖(37°14'N~37°20'N, 96°50'E~96°56'E)和托素湖(37°04'N~37°13'N, 96°50'E~97°03'E)位于青藏高原东北部柴达木盆地东北缘的德令哈市,整体地势由西北向东南倾斜,平均海拔约为2 800 m。研究区位于西风环流带内,亚洲季风气候和西风气候的交汇处^[22,23,32],属典型的高原荒漠-半荒漠干旱气候。两湖是巴音河尾间的姊妹湖,构成巴音河下游重要的闭流-终端湖复合系统。可鲁克湖位于上游,为淡水湖,是柴达木盆地东部重要的淡水湖泊之一,平均水深5 m,最大水深约8 m,湖盆面积约56.7 km²^[17]。托素湖位于可鲁克湖下游约6 km处,为咸水湖,平均水深22 m,最大水深30 m,湖盆面积约180 km²,湖水主要通过地下水及其地表浩楞河与可鲁克湖相连,两者共同构成了天然湿地与内陆湖泊生态系统[图1(a)]。研究区作为柴达木循环经济试验区重要的水源供给地和生态屏障,周边分布农垦区、牧区和新兴城镇^[20]。湖区地貌以戈壁、风积沙丘以及盐碱滩地为主。受控于盆地构造演化,湖区属于新生代断陷盆地,第四纪疏松沉积物广泛发育^[33]。可鲁克湖湖滨湿地相对发育,而托素湖则受强烈的风化作用和蒸发浓缩过程影响显著^[34,35]。

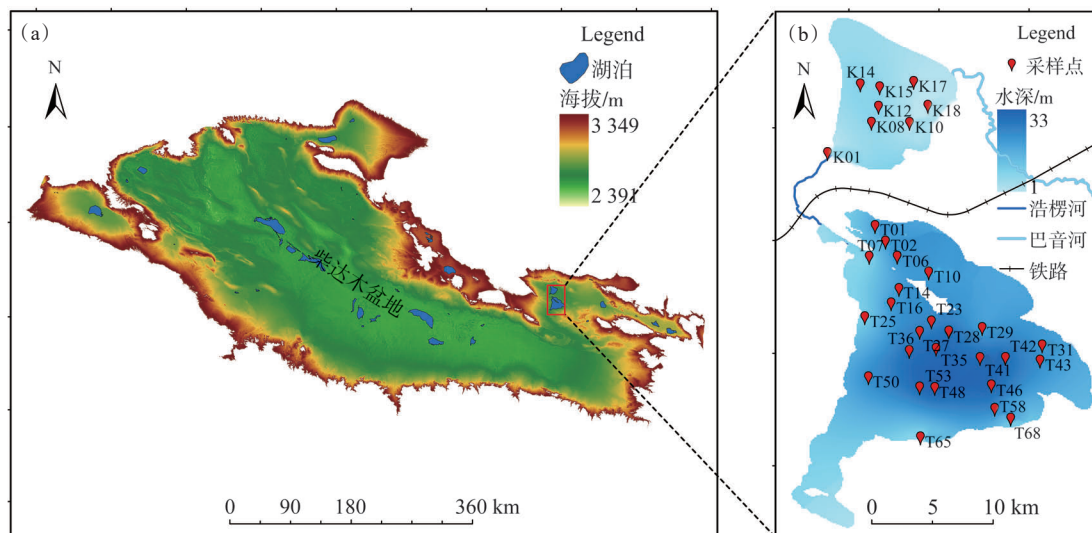


图1 研究区地理位置及其采样点示意图

Fig. 1 The geographic location of Lake Keluke and Tuosu in Qaidam Basin as well as the sampling sites

2 样品与方法

2.1 样品采集

2023年6月,作者团队对柴达木盆地可鲁克湖-托素湖开展了野外实地科考与采样工作,利用HY.ETC-200型表泥采样器采集表层沉积物样品,采样厚度为1~3 cm,采集的样品封装并带回实验室后保存在4℃的冷藏室中备用。最后,我们在可鲁克湖-托素湖东部、西部、南部、北部以及中心地带精选33个表层沉积物样品用于开展分析研究,采样点如图1(b)所示。

2.2 分析方法

2.2.1 重金属元素浓度测定

称取2.00 g在60℃烘干至恒重的沉积物样品,研磨并过100目筛,于微波消解罐中加入10 mL王水(HCL:HNO₃ = 3:1),120℃预消解30 min后进行微波消解,具体的实验操作步骤详见参考文献[12, 19]。然后,利用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS, 型号:Agilent7900)测定重金属元素Cd、Cr、Cu、Pb、Zn、Hg、As和Mn浓度。质量控制标准样品采用国家标准参比土样品(GSS1-GSS8),分析误差为±5%。重金属元素含量分析测试工作由南京研科检测技术有限公司协助完成。

2.2.2 重金属化学形态提取

采用Tessier连续提取法^[36]对表层沉积物中的重金属元素开展了化学形态分析,包括离子交换态(F1)、碳酸盐结合态(F2)、铁锰氧化物结合态(F3)、有机结合态(F4)和残渣态(F5)。在分析过程中所用的聚乙烯和玻璃容器均在14%的硝酸溶液中浸泡24 h以上,并用二次去离子水冲洗后低温烘干。Tessier连续提取法的具体实验步骤详见参考文献[36]。最后,利用ICP-MS测定重金属元素Cd、Cr、Cu、Pb、Zn、Hg、As和Mn浓度。化学形态分析测试工作由南京研科检测技术有限公司协助完成。

针对重金属元素化学形态分析的质量控制,除了通过测定空白样品和平行样品外,主要采用回收率(REC)对实验结果进行检验,计算公式如下:

$$REC(\%) = \frac{F1 + F2 + F3 + F4 + F5}{Total} \times 100 \quad (1)$$

式中,F1为离子交换态;F2为碳酸盐结合态;F3为铁锰氧化物结合态;F4为有机结合态;F5为残渣态;Total为重金属元素总量。测试结果显示33个样品的回收率基本在85%~130%范围内,表明Tessier连

续提取法准确度较高,提取效果较为理想。

2.3 评价方法与标准

2.3.1 地质积累指数法

地质积累指数法(I_{geo})可以用来定量评估湖泊沉积物中重金属的污染程度和污染等级^[37]。 I_{geo} 计算表达式为:

$$I_{geo} = \log_2 \left(\frac{C_n}{1.5B_n} \right) \quad (2)$$

式中, C_n 为表层沉积物样品中的元素实测浓度值; B_n 为元素的全球页岩背景值或区域背景值;系数1.5是考虑到成岩作用可能引起背景值变动而赋予的一个常数。

2.3.2 污染负荷指数法

污染负荷指数法(PLI)能够体现重金属污染的空间变化趋势及其对污染的贡献^[38, 39]。PLI计算表达式为:

$$P_{ij} = C_{ij}/B_i \quad (3)$$

$$PLI_j = \sqrt[m]{P_{1j} \times P_{2j} \times \dots \times P_{mj}} \quad (4)$$

$$PLI_{zone} = \sqrt[n]{PLI_1 \times PLI_2 \times \dots \times PLI_n} \quad (5)$$

式中, P_{ij} 为重金属*i*在*j*点的污染系数; C_{ij} 为重金属*i*在*j*点的实测浓度; B_i 为重金属*i*的地球化学背景值; PLI_j 为*j*点的污染负荷指数; PLI_{zone} 为某一区域(流域)的污染负荷指数; m 为参加评价的重金属总数; n 为采样点个数。 I_{geo} 和PLI污染强度分级标准见表1。

表1 I_{geo} 和PLI的阈值区间以及污染强度分级标准
Table 1 I_{geo} and PLI threshold ranges and pollution intensity classification standards

I_{geo}	污染程度	PLI	污染程度
≤ 0	无污染	≤ 1	无污染
0~1	轻度污染	1~2	中度污染
1~2	偏中度污染	2~3	重度污染
2~3	中度污染	> 3	极强污染
3~4	偏重度污染		
4~5	重度污染		
> 5	严重污染		

2.3.3 风险评估编码法

风险评估编码法(RAC)仅从重金属元素化学形态的活性与生物有效性考虑,仍需要综合运用多种评价方法来评估重金属元素的浓度及其毒性效应,计算公式如下:

$$RAC = \frac{F1 + F2}{F1 + F2 + F3 + F4 + F5} \times 100\% \quad (6)$$

式中, $F1$ 为离子交换态; $F2$ 为碳酸盐结合态; $F3$ 为铁锰氧化物结合态; $F4$ 为有机结合态; $F5$ 为残渣态。此外,依据 RAC 值可以将重金属元素风险水平划分为 5 个等级^[40]。

2.3.4 次生相与原生相分布比值法

次生相与原生相分布比值法(RSP)侧重于评价重金属污染物释放的可能性,次生相是指除残渣态以外的其他形态,原生相是指残渣态,计算公式如下:

$$RSP = \frac{F1 + F2 + F3 + F4}{F5} \quad (7)$$

式中, $F1$ 为离子交换态; $F2$ 为碳酸盐结合态; $F3$ 为铁锰氧化物结合态; $F4$ 为有机结合态; $F5$ 为残渣态。此外,依据 RSP 值可以将污染程度划分为 4 个等级^[41]。

3 结果与讨论

3.1 重金属元素的空间分布特征

可鲁克湖-托素湖表层沉积物中的重金属元素 Cd、Cr、Cu、Pb、Zn、Hg、As 和 Mn 浓度分别在 0.11 ~ 1.06 mg/kg、55.54 ~ 141.96 mg/kg、16.67 ~ 54.56 mg/kg、11.36 ~ 51.21 mg/kg、60.78 ~ 213.08 mg/kg、0.04 ~ 0.28 mg/kg、6.67 ~ 53.41 mg/kg 和 458.45 ~ 1 141.07 mg/kg 之间变化,平均浓度分别为 0.34 mg/kg、89.69 mg/kg、38.51 mg/kg、30.49 mg/kg、133.63 mg/kg、0.10 mg/kg、29.80 mg/kg 和 779.53 mg/kg,变异系数分别为 56.27%、18.81%、27.58%、31.48%、26.58%、58.37%、40.87% 和 23.10%,因此各重金属元素平均含量从大到小依次为:Mn > Zn > Cr > Cu > As > Pb > Cd > Hg (表 2)。需要指出的是,在托素湖采样点 T53、T48 和 T28 处,除 Hg 元素外,其余重金属浓度同步出现高值,由此我们推断托素湖中部、北部和南部为重金属元素的主要沉降富集地带。在托素湖采样点 T50、T31、T43 以及可鲁克湖的采样点处,大部分重金属浓度同步出现低值,由此我们推断托素湖东部、西部以及整个可鲁克湖为重金属元素相对贫乏地带。此外,除 Hg 外,其他 7 种重金属元素在托素湖表层沉积物中的含量明显高于可鲁克湖,造成这种现象的可能原因一方面是因为可鲁克湖周边湿地对重金属元素具有一定的过滤和拦截作用^[17],致使可鲁克湖表层沉积物中的重金属元素含量较低;另一方面托素湖作为最终端封闭内湖,可鲁克湖湖水中的重金属元素可以通过浩楞河(图 1b)带到托素湖中并最终沉积。因此,可鲁克湖-托素湖表层沉积物中重金属

表 2 可鲁克湖-托素湖表层沉积物中 8 种重金属元素的描述性统计结果

Table 2 Descriptive statistics of heavy metals from the surface sediments in Lake Keluke and Tuosu

	mg·kg ⁻¹							
重金属	Cd	Cr	Cu	Pb	Zn	Hg	As	Mn
最小值	0.11	55.54	16.67	11.36	60.78	0.04	6.67	458.45
最大值	1.06	141.96	54.56	51.20	213.08	0.28	53.41	1141.07
平均数	0.34	89.69	38.51	30.49	133.63	0.10	29.80	779.53
CV/%	56.27	18.81	27.58	31.48	26.58	58.37	40.87	23.10
富集系数	2.48	1.28	1.73	1.46	1.66	5.00	2.13	1.34
青海土壤背景值	0.14	70.10	22.20	20.90	80.30	0.02	14.00	580.00
中国土壤背景值	0.10	61.00	22.60	26.00	74.30	0.07	11.20	583.00

元素在空间上呈现显著的不均匀分布特征,这与同为巴音河尾间湖的尕斯库勒湖极为相似^[12,19]。

需要注意的是,背景值的选取会直接影响到对重金属元素污染程度的判断和评价,一般采用区域土壤或地壳中重金属元素浓度作为背景值^[17,42],本研究采用青海省土壤元素背景值作为参照标准^[42]。从 8 种重金属元素平均浓度与背景值对比可知,Cd、Cr、Cu、Pb、Zn、Hg、As 和 Mn 的平均浓度已远超背景值,其富集系数分别达到 2.48、1.28、1.73、1.46、1.66、5.0、2.13 和 1.34,其中 Cd 和 As 的累积程度尤为突出(图 2)。此外,与青藏高原其他典型湖泊相比,湖泊表层沉积物中均存在不同程度的重金属累积,特别是西藏地区羊卓雍错、空母错和色林错等湖泊表层沉积物中 Hg 和 As 的平均浓度较高^[43,44],这充分表明随着工业化、城市化和旅游业的快速发展,中国西部偏远高山湖泊受到人类活动的影响日益凸显。然而,青海湖表层沉积物中的重金属浓度却相对较低^[45],仍需要引起足够的重视。

3.2 重金属元素的赋存形态分布特征

可鲁克湖-托素湖表层沉积物中的重金属元素 Cr、Cu、Zn、Hg 和 As 主要以残渣态为优势形态,其平均浓度分别为 84.70 mg/kg、25.70 mg/kg、108.20 mg/kg、65.50 μg/kg 和 17.51 mg/kg,分别占其总量的 94.4%、66.6%、81.0%、66.0% 和 58.8%。Cr 化学形态排序依次为:残渣态(94.4%)>有机结合态(3.0%)>铁锰氧化物结合态(2.0%)>碳酸盐结合态(0.4%)>离子交换态(0.1%);Cu 化学形态排序依次为:残渣态(66.6%)>有机结合态(26.1%)>铁锰氧化物结合态(5.1%)>离子交换态(1.6%)>碳酸盐结合态(0.6%);Zn 化学形

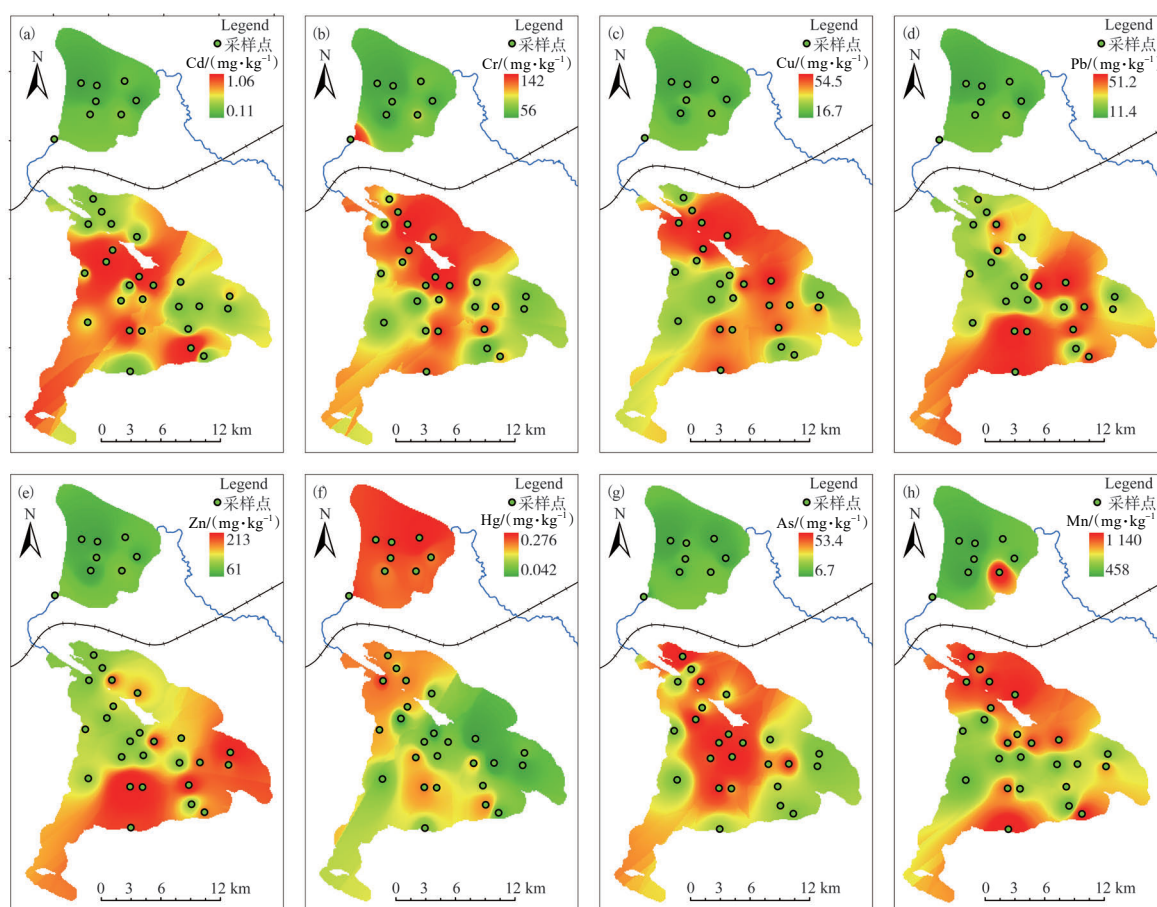


图2 可鲁克湖-托素湖表层沉积物中8种重金属元素浓度的空间分布图

Fig. 2 Spatial distribution map of heavy metals from the surface sediments in Lake Keluke and Tuosu

态排序依次为:残渣态(81.0%)>有机结合态(9.5%)>铁锰氧化物结合态(8.1%)>碳酸盐结合态(1.3%)>离子交换态(0.2%);Hg化学形态排序依次为:残渣态(66.0%)>有机结合态(16.0%)>铁锰氧化物结合态(8.7%)>离子交换态(5.7%)>碳酸盐结合态(3.6%);As化学形态排序依次为:残渣态(58.8%)>铁锰氧化物结合态(24.6%)>有机结合态(14.4%)>离子交换态(1.2%)>碳酸盐结合态(1.0%)。

Pb和Mn主要以残渣态为优势形态,其平均浓度分别为14.63 mg/kg和345.37 mg/kg;铁锰氧化物结合态以及有机结合态次之。Pb化学形态排序依次为:残渣态(48.0%)>铁锰氧化物结合态(37.5%)>有机结合态(12.7%)>碳酸盐结合态(1.8%)>离子交换态(0.1%);Mn化学形态排序依次为:残渣态(44.3%)>铁锰氧化物结合态(36.9%)>有机结合态(11.9%)>碳酸盐结合态(6.4%)>离子交换态(0.4%)。

Cd主要以铁锰氧化物结合态为优势形态,其平均浓度为125.48 $\mu\text{g/kg}$;残渣态和有机结合态次之。

Cd化学形态排序依次为:铁锰氧化物结合态(37.0%)>残渣态(30.8%)>有机结合态(23.3%)>碳酸盐结合态(5.4%)>离子交换态(3.5%)。

综上所述,可鲁克湖-托素湖表层沉积物中的重金属元素Cr、Cu、Zn、Hg和As主要以残渣态为优势形态,Pb和Mn呈现出以残渣态和铁锰氧化物结合态为优势形态的复合模式,Cd则呈现出以铁锰氧化物结合态和残渣态为优势形态的复合模式;8种重金属元素均以碳酸盐结合态和离子交换态为劣势形态(图3)。最后,通过对比尕斯库勒湖表层沉积物重金属元素化学赋存形态数据发现,双湖区Cd的铁锰氧化物结合态占比(37.0%)显著低于尕斯库勒湖(59.0%),但残渣态占比(30.8%)却几乎是尕斯库勒湖的2倍(15.7%),这印证了重金属元素化学形态分布具有局域性特征,并反映出湖泊沉积环境的元素地球化学过程存在一定的差异性^[12,19]。

3.3 重金属元素的生物有效性评价

由表3和4可见,双湖区表层沉积物中重金属元素RAC风险评价的污染程度依次为Cd>Mn>As>

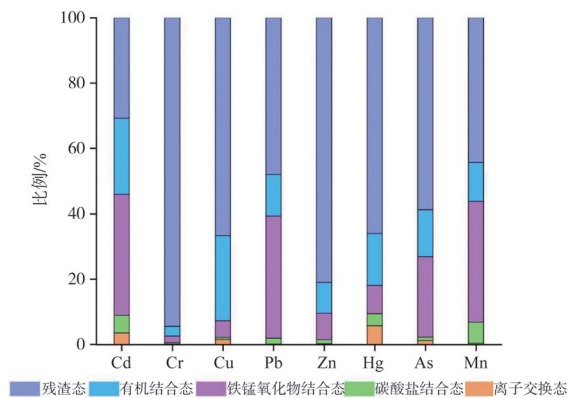


图3 可鲁克湖-托素湖表层沉积物中8种重金属元素的Tessier形态特征分布图

Fig. 3 Plots of Tessier speciation of heavy metals from the surface sediments in Lake Keluke and Tuosu

Cu > Hg> Zn > Pb > Cr,而RSP风险评价的污染程度则是Cd > Mn > Pb > As > Hg> Cu > Zn = Cr。上述评价结果的差异性主要在于重金属元素的潜在活性组分(铁锰氧化物结合态+有机结合态)占比。这是因为潜在活性组分占比越大,RAC值越小,RSP值就越大。上述8种重金属元素的RAC值主要在1%~10%之间,存在一定程度的富集现象。73%的Cd元素RSP值>3,且主要以铁锰氧化物结合态为优势形态,富集程度和生物有效性相对较高,属于潜在高风险元素。除Cd元素外,其他7种重金属元素的RSP值主要在0~2之间,生物有效性相对较低。尤其是Cr

元素,RAC值和RSP值都较低,生物有效性最低。虽然,上述8种重金属元素的活性组分(离子交换态+碳酸盐结合态)整体占比较小,但其潜在的生态风险较高,并且Cd元素具有毒性强、易迁移和高生物富集等特点,应引起足够的重视。此外,同时利用RAC和RSP评价法可以深入探讨重金属元素化学形态分布的生态环境意义,更为合理地评价其生物有效性。需要指出的是,不同类型的湖泊(开放型/封闭型淡水湖、封闭型咸水湖)其自身理化性质(湖水pH值、表层底泥TOC含量等)不同,前期研究发现湖水pH值以及表层底泥TOC含量对重金属元素的化学形态影响差异较大^[46, 47]。

3.4 重金属元素的污染评价及其来源解析

全流域处于中度污染水平(PLI = 1.80),所有采样点的PLI值大于1.0,其中有13个采样点(39%)的PLI值大于2.0,达到重度污染水平。此外,我们利用I_{geo}法互补性分析发现I_{geo}(Cd)、I_{geo}(Cr)、I_{geo}(Cu)、I_{geo}(Pb)、I_{geo}(Zn)、I_{geo}(As)和I_{geo}(Mn)值基本在-1~1之间,双湖区整体上处于无污染和轻度污染状态。需要指出的是,I_{geo}(Hg)均值达到了1.47,处于偏中度污染水平,Cr、Pb和Mn处于无污染水平,而Cd、Cu、Zn和As处于无污染和轻度污染水平,这印证了整个双湖流域的PLI值处于中度污染水平主要是由于Hg的贡献(图4)。

表3 可鲁克湖-托素湖表层沉积物中8种重金属元素的RAC值与污染程度评价

Table 3 <i>RAC</i> values and pollution levels of heavy metals from the surface sediments in Lake Keluke and Tuosu										
重金属元素	<i>RAC</i> ≤ 1%		1% < <i>RAC</i> ≤ 10%		10% < <i>RAC</i> ≤ 30%		30% < <i>RAC</i> ≤ 50%		<i>RAC</i> > 50%	
	数量/个	占比/%	数量/个	占比/%	数量/个	占比/%	数量/个	占比/%	数量/个	占比/%
Cd	2	6	22	67	1	3	6	18	2	6
Cr	25	76	8	24	0	0	0	0	0	0
Cu	4	12	28	85	1	3	0	0	0	0
Pb	25	76	2	6	6	18	0	0	0	0
Zn	20	61	13	39	0	0	0	0	0	0
Hg	0	0	24	73	9	27	0	0	0	0
As	2	6	29	88	2	6	0	0	0	0
Mn	20	61	5	15	4	12	4	12	0	0
污染程度	无		轻度污染		中度污染		重度污染		极严重污染	

表4 可鲁克湖-托素湖表层沉积物中8种重金属元素的RSP值与污染程度评价

Table 4 RSP values and pollution levels of heavy metals from the surface sediments in Lake Keluke and Tuosu								
重金属元素	RSP ≤ 1		1 < RSP ≤ 2		2 < RSP ≤ 3		RSP > 3	
	数量/个	占比/%	数量/个	占比/%	数量/个	占比/%	数量/个	占比/%
Cd	4	12	1	3	4	12	24	73
Cr	33	100	0	0	0	0	0	0
Cu	30	91	3	9	0	0	0	0
Pb	10	30	19	58	4	12	0	0
Zn	33	100	0	0	0	0	0	0
Hg	28	85	3	9	2	6	0	0
As	26	79	7	21	0	0	0	0
Mn	8	24	24	73	1	3	0	0
污染程度	无		轻度污染		中度污染		重度污染	

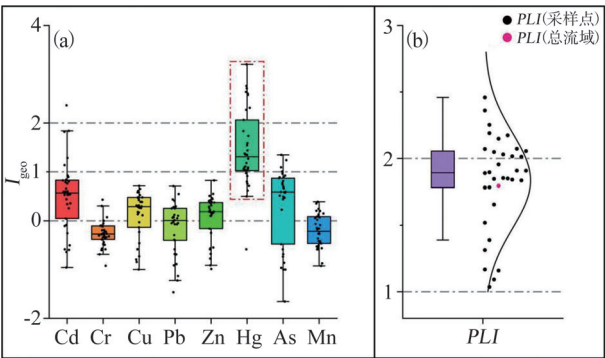


图4 可鲁克湖-托素湖表层沉积物中重金属元素的 I_{geo} 与PLI污染评价示意图

Fig. 4 Plots of I_{geo} and PLI pollution evaluation of heavy metals from the surface sediments in Lake Keluke and Tuosu

另外,为全面了解可鲁克湖-托素湖表层沉积物中的重金属污染水平,我们绘制了PLI和 I_{geo} (Hg)值空间分布图(图5)。由图5(a)可知,托素湖重金属污染总体上低于可鲁克湖,且托素湖北部和南部污染程度较高。由图5(b)可知,Hg污染程度较高的区域主要是可鲁克湖及其托素湖与可鲁克湖的入湖处。造成这种结果的原因可能是可鲁克湖本身属于淡水湖,硫酸盐还原菌将 Hg^{2+} 转化为甲基汞,易于在生物中富集;同时,东部巴音河的输入及其西部农业区含Hg杀菌剂的使用可能也会增加Hg输入^[48,49]。

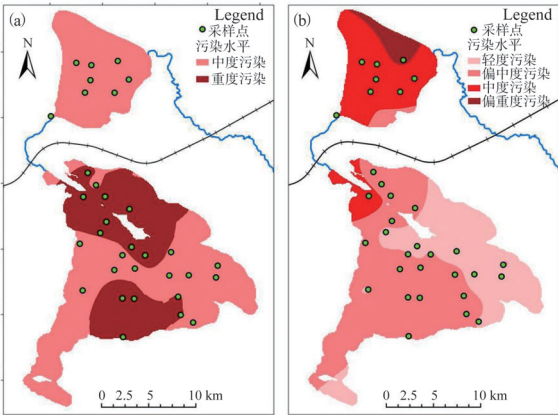


图5 可鲁克湖-托素湖表层沉积物中重金属元素的PLI(a)和 I_{geo} (Hg)(b)污染评价空间分布图

Fig. 5 Spatial distribution map about PLI (a) and I_{geo} (Hg) (b) pollution evaluation of Lake Keluke and Tuosu

最后,为深入探讨可鲁克湖-托素湖表层沉积物中重金属元素的物质来源,开展了Barlett球形度检验和KMO度量值检验。数据结果表明显著性检验为0.00(< 0.05)以及KMO值为0.864(> 0.6),我们可以进行主成分分析。关于特征值大于1的成分,提取到了2个主成分,其贡献率分别为62.6%和

14.0%,总贡献率达76.6%,能够解释重金属元素的大部分来源。与此同时,本研究对8种重金属元素进行了相关性分析(图6),发现除了Hg元素外,其余7种重金属呈显著正相关($P \leq 0.05$),因此推断重金属元素Cd、Cr、Cu、Pb、Zn、As和Mn可能有共同的来源;而Hg与其余5种重金属元素表现出显著负相关($P \leq 0.05$),推断Hg可能有单独的物质来源。

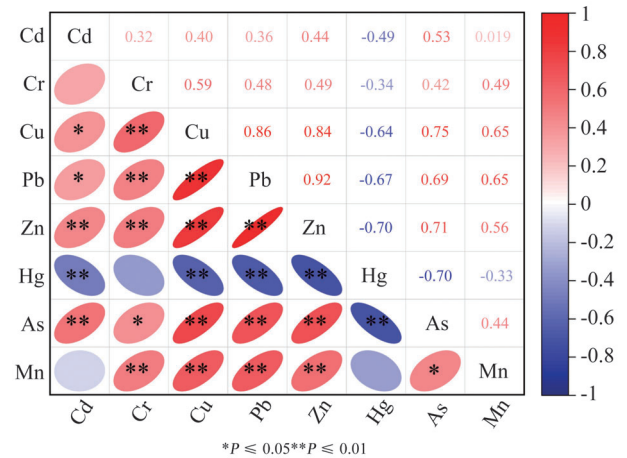


图6 可鲁克湖-托素湖表层沉积物中8种重金属元素的相关性分析示意图

Fig. 6 Correlation analysis of heavy metals from the surface sediments in Lake Keluke and Tuosu

由表5和图7可知,F1载荷高(> 0.6)的重金属元素为Cr、Cu、Pb、Zn、As和Mn,且他们之间的相关性显著;尤其Cu、Pb、Zn和As是铅锌矿/铜矿开采冶炼的标志性组合,而Cr和Mn的同步富集指示了采矿废渣的风化输入;Hg的高负载荷(-0.784)则指示了矿区还原环境下汞的挥发或甲基化迁移行为,进一步佐证了工业源主导特征^[50],并通过大气沉降作用及其地表径流输送到湖泊中,表征为人为源占主

表5 可鲁克湖-托素湖表层沉积物中8种重金属元素的主成分分析矩阵

Table 5 Principal component analysis matrix of heavy metals from the surface sediments in Lake Keluke and Tuosu		
重金属元素	F1	F2
Cd	0.537	-0.704
Cr	0.636	0.220
Cu	0.926	0.129
Pb	0.918	0.143
Zn	0.921	0.008
Hg	-0.784	0.315
As	0.842	-0.221
Mn	0.664	0.623
初始特征值	5.007	1.117
方差贡献率/%	62.6	14.0

导作用。F2(方差贡献率为 14.0%)主要以 Mn 的显著正载荷(0.623)和 Cd 的强负载荷(-0.704)为显著特征,揭示出两者受氧化还原条件调控的拮抗关系,即氧化环境中 Mn^{3+}/Mn^{4+} 氧化物沉淀吸附固定 Cd,而还原条件促使 Mn 溶解并释放活性 Cd^[51, 52]。该分异机制结合 Hg 微弱正载荷(0.315)的大气沉降信号,表明 F2 主要表征自然地球化学过程驱动。综上所述,研究区重金属污染来源受控于矿业活动(F1)和自然地球化学过程主导的混合源(F2)。

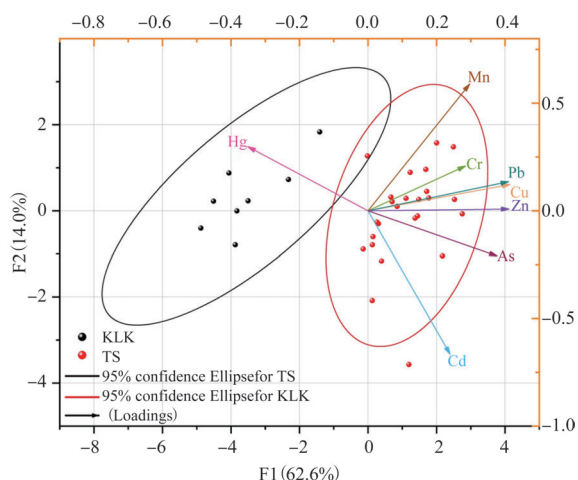


图7 可鲁克湖-托素湖表层沉积物中8种重金属元素的主成分分析示意图

Fig. 7 Principal component analysis of heavy metals from the surface sediments in Lake Keluke and Tuosu

4 结论和建议

(1) 研究区湖泊表层沉积物中重金属元素 Cd、Cr、Cu、Pb、Zn、Hg、As 和 Mn 的平均浓度值分别为 0.34 mg/kg、89.69 mg/kg、38.51 mg/kg、30.49 mg/kg、133.63 mg/kg、0.10 mg/kg、29.80 mg/kg 和 779.53 mg/kg, 其富集系数分别为 2.48、1.28、1.73、1.46、1.66、5.00、2.13 和 1.34, 已超过青海省表层土壤背景值和中国土壤背景值, 表明上述 8 种重金属元素在双湖区存在一定的累积, 且在空间上呈现出显著的不均匀分布特征。

(2) 重金属元素 Cr、Cu、Zn、Hg 和 As 主要以残渣态为优势形态, Pb 和 Mn 呈现残渣态和铁锰氧化物结合态为优势形态的复合模式, Cd 则以铁锰氧化物结合态和残渣态为优势形态的复合模式; 所有重金属元素均以碳酸盐结合态和离子交换态为劣势赋存形态。Cd 的生物有效性最高, Cr 的生物有效性最低。

(3) PLI 和 I_{geo} 评价结果表明可鲁克湖-托素湖处于中度污染状态, Hg 为重要的污染贡献元素。研究

区内重金属元素来源受控于矿业活动(主控源)以及自然地球化学过程(次控源)的协同驱动。

(4) 污染防治建议: 严格监管流域内铅锌矿或铜矿的开采冶炼, 并优先削减 Cd 的输入排放以及 Hg 的大气沉降, 譬如安装小型大气质量监测仪器设备; 优化托素湖水资源管理, 定期开展水质检测; 强化巴音河入湖口及其湿地保护和恢复, 增强其对陆源重金属元素的拦截吸附功能。

参考文献

- [1] DAI L J, WANG L Q, LIANG T, *et al.* Geostatistical analyses and co-occurrence correlations of heavy metals distribution with various types of land use within a watershed in eastern Qinghai-Tibet Plateau, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 653: 849-859.
- [2] LI C L, ZHU L P, MA Q F, *et al.* Relationship between human activities and environmental changes in the southern Tibetan Plateau since the Little Ice Age [J]. *Science of The Total Environment*, 2024, 943: 173741.
- [3] LATIF A, ILYAS S, ZHANG Y J, *et al.* Review on global change status and its impacts on the Tibetan Plateau Environment [J]. *Journal of Plant Ecology*, 2019, 12(6): 917-930.
- [4] ZHANG H, WANG Z F, ZHANG Y L, *et al.* The effects of the Qinghai-Tibet railway on heavy metals enrichment in Soils [J]. *Science of The Total Environment*, 2012, 439: 240-248.
- [5] WU J, LU J, LI L M, *et al.* Pollution, ecological-health risks, and sources of heavy metals in soil of the northeastern Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Chemosphere*, 2018, 201: 234-242.
- [6] DU H L, WANG J S, WANG Y, *et al.* Contamination characteristics, source analysis, and spatial prediction of soil heavy metal concentrations on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2023, 23(5): 2202-2215.
- [7] GONG C, TAN C H, DONG H, *et al.* Spatial distribution characteristics of soil heavy metals in Sabao Chaqu watershed of Tuotuo river, Qinghai-Tibet Plateau based on geographic detector [J]. *Scientific Reports*, 2024, 14(1): 9204.
- [8] WEI P R, SHAO T J, WANG R J, *et al.* A study on heavy metals in the surface soil of the region around the Qinghai Lake in Tibet Plateau: pollution risk evaluation and pollution source analysis [J]. *Water*, 2020, 12(11): 3277.
- [9] HAN S Q, DAI L, LIU Q Y, *et al.* Investigating the environmental capacity of soil heavy metals and its determinants in agro-pastoral regions of the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2024, 46(10): 407.
- [10] ZHANG T, WANG P, WANG M G, *et al.* Spatial distribution, source identification, and risk assessment of heavy metals in riparian soils of the Tibetan Plateau [J]. *Environmental Research*, 2023, 237: 116977.
- [11] 杜昊霖, 王莺, 王劲松, 等. 青藏高原典型流域土壤重金属分布特征及其生态风险评价 [J]. *环境科学*, 2021, 42(9): 4422-4431.
- [12] 高春亮, 文进心, 成艾颖, 等. 尕斯库勒湖表层沉积物中重金属元素的赋存形态特征与生物有效性评价 [JOL]. *盐湖研究*, 1-9 [2025-09-06]. <https://link.cnki.net/urlid/63.1026.P.20250317.1735.004>.
- [13] GABRIELLI P, WEGNER A, SdeziERRA-HERNÁNDEZ, M R, *et al.* Early atmospheric contamination on the top of the Himalayas

- since the onset of the European Industrial Revolution[J]. *Proceedings National Academy of Science*, 2020, 117:3967-3973.
- [14] HE H F, WEI H C, WANG Y, *et al.* Geochemical and statistical analyses of trace elements in lake sediments from Qaidam Basin, Qinghai-Tibet Plateau: distribution characteristics and source apportionment[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19:2341.
 - [15] WANG W J, JI X W, ABAKUMOV E, *et al.* Assessing sources and distribution of heavy metals in environmental media of the Tibetan Plateau: a critical review[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2022, 10:874635.
 - [16] CAI N, WANG X P, WANG W L, *et al.* Accumulation, ecological health risks, and source identification of potentially toxic elements in river sediments of the Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2024, 182: 703-718.
 - [17] CHENG A Y, ZUO Y P, GAO C L, *et al.* Potentially toxic elements of lake and wetland in Northeastern Qinghai-Tibet Plateau: distribution, potential sources and risk assessment[J]. *Ecological Indicators*, 2024, 166: 112427.
 - [18] 朱海霞, 赵素平, 李金凤, 等. 柴达木盆地南部大气降尘重金属来源及其生态风险评估[J/OL]. *环境工程学报*, 1-17[2025-09-06]. <https://link.cnki.net/urlid/11.5591.X.20250806.1552.002>.
 - [19] 高春亮, 文进心, 成艾颖, 等. 青海德令哈尕斯库勒湖表层沉积物中汞和砷的赋存特征、生物有效性及其风险评价[J/OL]. *地质通报*, 1-19[2025-09-06]. <https://link.cnki.net/urlid/11.4648.P.20250414.1935.004>.
 - [20] 高春亮, 余俊清, 闵秀云, 等. 大柴旦盐湖表层底泥重金属污染及其风险性评价[J]. *盐湖研究*, 2020, 28(1):96-104.
 - [21] LI D P, YU R D, CHEN J, *et al.* Ecological risk of heavy metals in lake sediments of China: a national-scale integrated analysis[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 334: 130206.
 - [22] SONG G, WANG H L, SHI L F. Climate evolution since 9.32 cal ka BP in Keluke Lake, northeastern Qaidam Basin, China[J]. *Journal of Arid Environments*, 2020, 178: 104149.
 - [23] 余英浩, 金映豫, 徐德克, 等. 青海可鲁克湖孢粉记录的 14 cal. ka B.P. 以来植被和气候演化历史[J]. *第四纪研究*, 2021, 41(5): 1229-1243.
 - [24] 李鸿宇, 魏海成, 成艾颖, 等. 柴达木盆地可鲁克湖沉积物表层花粉散布规律及其对区域植被的指示意义[J]. *盐湖研究*, 2024, 32(1):66-75.
 - [25] 宋高, 丁涛, 马宏涛. 柴达木盆地托素湖现生 *Eucypris mareotica* 壳体微量元素环境指示意义研究[J]. *地球学报*, 2024, 45(5): 706-714.
 - [26] LI X Z, ZHOU X, LIU W G, *et al.* Carbon and oxygen isotopic records from Lake Tuosu over the last 120 years in the Qaidam Basin, Northwestern China: the implications for paleoenvironmental reconstruction[J]. *Global and Planetary Change*, 2016, 141: 54-62.
 - [27] LI H Y, WEI H C, WANG C Y, *et al.* Pollen sedimentary dynamics and hydroclimatic implications in the largest lake system in Qaidam Basin, northeastern Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2025, 675: 113115.
 - [28] FAN Q S, MA H Z, CAO G C, *et al.* Geomorphic and chronometric evidence for high lake level history in Gahai Lake and Toson Lake of north-eastern Qaidam Basin, north-eastern Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Journal of Quaternary Science*, 2012, 27(8):819-827.
 - [29] WANG W W, JIANG X, ZHENG B H, *et al.* Composition, mineralization potential and release risk of nitrogen in the sediments of Keluke Lake, a Tibetan Plateau freshwater lake in China[J]. *Royal Society Open Science*, 2018, 5(9): 180612.
 - [30] ZHAO Y, YU Z C, CHEN F H, *et al.* Holocene vegetation and climate history at Hurlig Lake in the Qaidam Basin, northwest China[J]. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 2007, 145(3-4): 275-288.
 - [31] 成艾颖, 余俊清, 高春亮, 等. 托素湖沉积物中重金属元素及地球化学特征研究[J]. *盐湖研究*, 2016, 24(3): 1-7.
 - [32] 孙季晖, 于一雷, 马牧源, 等. 可鲁克湖-托素湖流域水化学和同位素特征研究[J]. *环境科学与技术*, 2023, 46(8): 1-14.
 - [33] 王永贵, 李义民, 陈宗颜, 等. 柴达木盆地第四纪沉积环境演化[J]. *水文地质工程地质*, 2009, 36(1): 128-132.
 - [34] 李冬丽, 贺海波, 张雪程, 等. 柴达木盆地东北部巴音河小流域水化学特征及来源[J]. *地球科学与环境学报*, 2023, 45(3): 749-759.
 - [35] TESSIER A P, CAMPBELL P G C, BISSON M X. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals[J]. *Analytical chemistry*, 1979, 51: 844-851.
 - [36] 李雷明. 青藏高原东北部土壤痕量元素环境地球化学行为[D]. 西宁: 中国科学院青海盐湖研究所, 2020.
 - [37] MULLER G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. *Geojournal*, 1969, 2(108): 108-118.
 - [38] 杨安, 王艺涵, 胡健, 等. 青藏高原表土重金属污染评价与来源解析[J]. *环境科学*, 2020, 41(2): 886-894.
 - [39] TOMLINSON D L, WILSON J G, HARRIS C R, *et al.* Problems in the assessment of heavy-metal levels in estuaries and the formation of a pollution index[J]. *Helgoländer meeresuntersuchungen*, 1980, 33: 566-575.
 - [40] DUODU G O, GOONETILLEKE A, AYOKO G A. Potential bioavailability assessment, source apportionment and ecological risk of heavy metals in the sediment of Brisbane River estuary, Australia[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, 117: 523-531.
 - [41] 邓凯文, 安永龙, 黄勇. 金矿区周边桃园土壤重金属赋存特征、生物有效性及来源分析[J]. *环境科学与技术*, 2024, 47(9): 149-157.
 - [42] GAO C L, YU J Q, MIN X Y, *et al.* Heavy metal concentrations in sediments from Xingyun lake, southwestern China: implications for environmental changes and human activities[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2018, 77(19): 666.
 - [43] 魏复盛, 陈静生, 吴燕玉, 等. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
 - [44] 臧泉, 陈鲁, 杨玉义, 等. 城市化对湖泊表层沉积物重金属污染的影响: 高原湖泊和城市湖泊重金属生态风险比较[J]. *环境科学与技术*, 2020, 43(10): 43-50.
 - [45] LI Z, FU Z H, WANG S H, *et al.* Spatial distribution, ecological risk, and human health assessment of heavy metals in lake surface sections—a case study of Qinghai Lake, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30: 5137-5149.
 - [46] GU Z G, WU M, LI K, *et al.* Variation of heavy metal speciation during the pyrolysis of sediment collected from the Dianchi Lake, China[J]. *Arabian Journal of Chemistry*, 2017, 10: 2196-2204.
 - [47] 叶宏萌, 李国平, 郑茂钟, 等. 武夷山五夫荷塘底泥重金属赋存特征及其生物有效性[J]. *热带作物学报*, 2018, 39(6): 1235-1240.
 - [48] AOMINE S, KAWASAKI H, Inoue K. Retention of mercury by soils[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1967, 13(6): 187-188.
 - [49] ELFVING D C, WILSON K R, EBEL Jr J G, *et al.* Downward migration of mercury in an old orchard sandy soil[J]. *Chemosphere*, 1995, 31(3): 2897-2900.

- [50] COMPEAU G, BARTHA R. Methylation and demethylation of mercury under controlled redox, pH and salinity conditions[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1984, 48 (6): 1203-1207.
- [51] XIE F Y, LI X Q, YANG Q X, *et al.* Mobilization of heavy metals from floodplain sediments of the Yellow River during redox fluctuations[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2025, 150: 432-439.
- [52] WANG Y Q, ZHONG Z X, PAN B C, *et al.* The role of intrinsic polyvalent Mn and lattice oxygen in the activity of manganese oxides towards organic contaminant degradation[J]. *Separation and Purification Technology*, 2025, 354: 128870.

Study on the Occurrence Characteristics, Bioavailability, Ecological Risk and Sources Apportionment of Heavy Metals from Surface Sediments in Keluke-Tuosu Lakes

WEN Jinxin^{1,2,3}, GAO Chunliang^{1,2*}, CHENG Aiyang^{1,2}, LI Hongyu^{1,2,3}, WANG Chenyu^{1,2,3}, WEI Haicheng^{1,2}, MIN Xiuyun¹, CHAO Na^{1,2,3}, DONG Bo^{1,2,3}, AN Haixi⁴

(1. Key Laboratory of Green and High-end Utilization of Salt Lake Resources, Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xining, 810008, China; 2. Qinghai Provincial Key Laboratory of Geology and Environment of Salt Lake, Xining, 810008, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China; 4. Forestry and Grassland Bureau of Haixi Mongolian and Tibetan Autonomous Prefecture, Delingha, 817099, China)

Abstract: This study focused on the 33 surface sediment samples from terminal lakes of Keluke and Tuosu in the northeastern Qaidam Basin, based on the Tessier continuous extraction combined with ICP-MS analysis, *RAC*, *RSP*, *PLI*, I_{geo} and PCA methods, a systematic analysis was conducted on the concentrations, chemical speciation, bioavailability, potential ecological risks and sources of heavy metals including Cd, Cr, Cu, Pb, Zn, Hg, As and Mn. The results showed that the average concentrations of heavy metals followed the decreasing order: Mn (779.53 mg/kg) > Zn (133.63 mg/kg) > Cr (89.69 mg/kg) > Cu (38.51 mg/kg) > As (29.80 mg/kg) > Pb (30.49 mg/kg) > Cd (0.34 mg/kg) > Hg (0.10 mg/kg), showing the significant spatial heterogeneity. Elements Cr, Cu, Zn, Hg and As were dominated by the residual fraction, Cd was primarily presented in the Fe-Mn oxide-bound fraction and the residual fraction, Pb and Mn exhibited a combined speciation pattern with residual and Fe-Mn oxide-bound fractions, and all the heavy metals were in the disadvantageous forms of carbonate bound and ion exchanged fractions. *RAC* and *RSP* results confirmed Cd had the highest bioavailability, while other heavy metals showed relatively low bioavailability. The *PLI* and I_{geo} values indicated a moderate pollution level in the study area, with Hg identified as the important contaminant. The PCA results revealed that the first principal component (F1) represented anthropogenic inputs from lead-zinc ore or copper ore in the catchment as well as the associated Hg reduction-migration processes, while the secondary component (F2) reflected the natural geochemical processes driven by redox conditions at the sediment-water interface, coupled with atmospheric Hg deposition. The sources of heavy metals were jointly controlled by mining activities and natural geochemical processes in Lake Keluke and Tuosu, necessitating urgent attention to the potential risk of Cd mobilization and the cross-border transportation effects of Hg.

Key words: Surface sediments; Heavy metals; Occurrence forms; Lake Keluke; Lake Tuosu; Source apportionment