

董博,成艾颖,文进心,等. 格尔木河流域不同盐度湖泊表层沉积物粒度与重金属元素的特征及其环境指示意义[J]. 盐湖研究,2026,34(2):32-41.
Dong B, Cheng A Y, Wen J X, et al. Characteristics of grain size and heavy metal elements in surface sediments of lakes with different salinities in the Golmud river basin and their environmental indications[J]. Journal of Salt Lake Research, 2026, 34(2): 32-41.
DOI: 10.3724/j.yhyj.2025078
CSTR: 32273.14.j.yhyj.2025078

格尔木河流域不同盐度湖泊表层沉积物粒度与重金属元素的特征及其环境指示意义

董 博^{1,2,3}, 成艾颖^{1,2*}, 文进心^{1,2,3}, 李鸿宇^{1,2,3}, 薛红盼^{1,2},
王 顺^{1,2}, 高春亮^{1,2}, 魏海成^{1,2*}

(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)

摘 要:柴达木盆地作为青藏高原东北缘典型的封闭性山间断陷盆地,其湖泊生态系统对全球气候变化与人类活动响应敏感,是研究环境变化和沉积过程的理想区域。文章以柴达木盆地格尔木河流域上游的黑海湖泊与尾间的察尔汗盐湖的表层沉积物为研究对象,通过粒度与重金属(Cd、Cr、Cu、Pb、Zn、As、Mn)含量分析,运用潜在生态污染指数法,揭示了沉积物粒度特征与重金属的空间分布规律及其环境指示意义。结果表明,察尔汗盐湖以中-粗粉砂和细粉砂为主,粉砂合计占比超过66%,粒度分布呈斑块状,相对均匀,反映出稳定、低能的沉积环境;黑海湖泊则以砂粒和细粉砂为主,黏土含量较高,各粒级极差大,呈“北高南低”连续分布,指示水动力条件较强、分选较差。黑海湖泊中Cr、Cu、Pb、Zn、As的平均含量高于察尔汗盐湖,表现出强烈的空间异质性。潜在生态风险指数结果表明,研究区域处于低富集和未污染状态,生态风险轻微,其中Cd和As属于关键风险元素。此外,察尔汗盐湖与黑海湖泊表层沉积物粒度显著影响重金属元素的分布,影响程度依次为:黏土>中粗粉砂>砂>细粉砂,黏土是重金属富集的主要载体。该研究为理解干旱区湖泊-盐湖生态系统的沉积过程、环境污染特征及生态风险评估提供了科学依据。

关键词:格尔木河;表层沉积物;粒度分析;重金属元素

中图分类号: P512.2; X52

文献标志码: A

文章编号: 1008-858X(2026)02-0032-10

青藏高原作为“亚洲水塔”,其湖泊与盐湖沉积体系不仅记录了区域气候与环境变化的连续信息,还对全球气候变化和亚洲季风系统演变具有重要的指示意义^[1,2],也是人类活动的敏感区域^[3-7]。湖泊沉积物是地球历史的“天然档案”,在环境过程中发挥着不可替代的作用。粒度是沉积物的基本属性之一,其分布特征受搬运距离、搬运机制及沉积介质能量条件等多种因素控制^[3,4,8-10]。粒度参数在环境研究中常作为重要的代用指标,被广泛应用于识别沉积环境、追溯物源以及反演古气候演化过程^[11-14]。该指标已在沙地、黄土、古土壤及深海沉积等多种地质载体中取得显著应用成效^[5-7,15]。研究表明,柴达木

盆地不同区域的沙丘沉积物表现出显著的空间差异^[6,15-18],西北部的长垄状雅丹沉积物以粉砂和砂粒为主,分选性较差,粒度频率曲线多呈宽窄不一的单峰或双峰分布;而西南缘沙丘区表层沉积物则以细砂和中砂为主要组分,分选性较好,粒度分布多为单峰或双峰型;东缘风蚀坑及东北部沙丘沉积物以细砂和中砂为主,分选性从较差至极好均有分布,粒度频率曲线普遍呈现多峰特征;中部的巨型沙波纹走廊与微床面形态走廊分别以砾石与极细砂、极粗砂与细砂为主要粒级,粒度分布呈双峰或三峰型,分选性较差至极差。沉积物粒度特征是揭示沉积动力过程,重建近现代环境变化及评估生态风险的核心手段之一^[19-22]。

收稿日期:2025-09-22;修回日期:2025-09-25

基金项目:青海省科技计划项目(2024-ZJ-736);中国科学院青海盐湖研究所基础研究青年跨学科团队(isIJCTD-2022-1)

作者简介:董博(2001—),男,硕士,研究方向:湖泊沉积与环境变化。Email: dongbo23@mails.ucas.ac.cn。

通信作者:成艾颖(1983—),女,博士,副研究员,硕士生导师,主要从事青藏高原湖泊沉积环境及现代环境过程的研究。Email: aycheng@isl.ac.cn。

魏海成(1983—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事青藏高原第四纪盐湖成盐演化过程及其古气候约束机制方面的研究。
Email: hcwei@isl.ac.cn。

由于青藏高原独特的地理位置,工业化水平较低,人类活动相对缺乏,近些年来,随着气候环境的变化、自然资源的开发、交通与旅游业的不断发展、人口的增加以及周边宗教活动日益活跃,该区域生态系统正面临多种环境威胁^[1,2,8-10],包括新型污染物、微塑料和重金属等^[23-28]。青藏高原的重金属污染呈现显著的空间异质性和来源差异^[29-32]。其中,Cd污染最为突出,其含量普遍超过区域背景值2倍,显示出强烈的人为累积特征^[33]。在高原东部某工业区,不同土地利用类型下的土壤重金属含量均高于背景值,其中Cd的平均含量超过背景值的3倍,进一步表明该元素的污染具有广泛性和高累积性^[34]。对果洛地区土壤元素的研究表明,As、Ca和S表现出较高的空间变异性,其分布受地质背景与放牧活动共同影响,揭示了自然成土过程与人类活动在元素分布中的复合作用^[35]。基于青海湖沉积岩芯的重金属沉积历史分析表明,Cr、Cu和Ni主要来自自然风化过程,而Cd、Pb和Zn自1980年起则显著受到工业化和交通排放等人为活动的影响,反映出人类活动对重金属输入的贡献自20世纪后期逐渐增强^[36]。青藏高原的重金属研究虽在近年取得显著进展,但仍存在不足,如空间覆盖不均、特殊湖泊类型研究薄弱和分析单一等。表层沉积物中粒度与重金属的结合能促进研究多维度交叉和技术融合创新。前人研究表明沉积物中重金属的含量与粒度组成之间存在显著的相关性,细颗粒组分(如粉砂和黏土)对重金属具有较强的富集作用^[37-39]。这主要归因于粒度对颗粒物比表面积直接影响:粒径越小,比表面积越大,表面活性位点也相应增多,从而增强了颗粒物对重金属的物理吸附与化学吸附能力。虽然沉积物粒度与重金属的环境指示研究已在全球多个湖泊系统开展^[40-42],但是在柴达木盆地这类典型干旱区封闭湖泊系统中,在不同生态系统类型对比的视角下,开展相关研究对于揭示区域环境演变规律和评估人为活动影响具有重要的科学价值。

柴达木盆地的格尔木河流域作为盆地内最大的内陆流域之一,其上游承接昆仑山冰川融水,下游串联湖泊、河流与盐湖。该流域不仅保障了区域生态稳定,更是我国战略性矿产资源富集区,尤其是察尔汗盐湖区,流域环境研究是资源开发与生态保护平衡的核心支撑。本文以格尔木河流域不同类型湖泊的表层沉积物为研究对象,结合粒度特征与重金属元素分析,旨在达到以下目标:分析表层沉积物的粒

度组成与参数特征,揭示流域湖泊沉积动力环境的空间差异;测定沉积物中典型重金属元素(Cd、Cr、Cu、Pb、Zn、As、Mn)的含量,阐明其空间分布规律;探讨粒度参数与重金属含量的相关性,揭示粒度对重金属的影响;评估其生态风险,并结合粒度指示的沉积环境变化,阐明二者的环境指示意义,为格尔木河流域生态环境保护与可持续发展提供科学依据,为理解气候变化对于干旱区湖泊系统的影响提供物理证据。

1 研究区域概况与分析方法

1.1 研究区域

柴达木盆地位于青海省西北部,处于青藏高原东北缘,其东北侧毗邻祁连山脉,西北缘倚靠阿尔金山脉,西南至昆仑山脉,四周群山环抱,构成一个典型的封闭型山间断陷盆地^[43]。盆地里的格尔木河发源于南部昆仑山,以昆仑山冰雪融水和大气降水为主要补给来源,径流汇集形成昆仑河与雪水河,两河交汇后形成格尔木河干流,最终注入察尔汗盐湖区。本研究以柴达木盆地格尔木河流域为研究区域,选取其中两个代表性湖泊生态系统黑海湖泊与察尔汗盐湖作为研究对象。黑海湖泊位于格尔木河流域上游昆仑山腹地,湖区接受大气降水和地表径流补给。察尔汗盐湖位于格尔木河流域尾部,是中国最大的盐湖,以其巨量的钾、镁、锂等盐类矿产资源而闻名。黑海湖泊与察尔汗盐湖虽同处柴达木盆地,分别代表了自然演化主导和人类活动强烈干预下的两种典型湖泊类型,其演化阶段、水化学性质及受人类扰动程度存在显著差异,为研究不同环境背景下沉积物粒度特征与重金属分布的耦合关系提供了理想样本。

1.2 样品采集

2024年8月,本研究使用重力抓斗采样器在黑海湖泊采集了18个表层沉积物样品(采样深度为0~20 cm);随后于2025年1月,在察尔汗盐湖区采集了21个表层沉积物样品(采样深度为0~20 cm)。两次野外工作共计获得39件样品(图1b、c)。

1.3 粒度和重金属元素分析方法

采用马尔文 Mastersizer 2000 激光粒度仪进行粒度分析,该仪器的检测范围为0.02~2 000 μm 。样品前处理过程如下:(1)对样品过筛,去除植物根系及

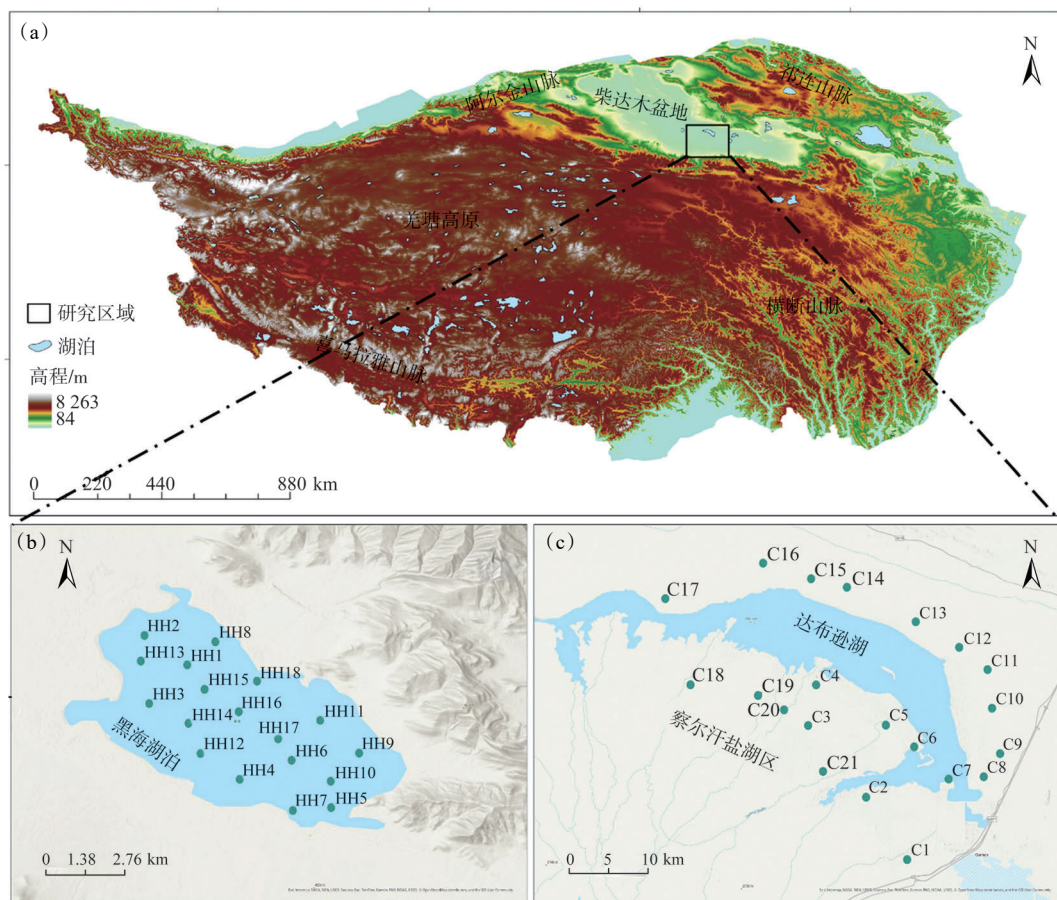


图1 研究区概况及采样点位置(a)青藏高原概况图,(b)黑海湖泊采样点,(c)察尔汗盐湖区采样点

Fig. 1 Overview of the study area and locations of sampling sites (a) Overview map of the Qinghai-Xizang Plateau, (b) Sampling sites in the Black Sea lakes, (c) Sampling sites in the Charkhan Salt Lake area

粒径大于 2 mm 的碎石,根据样品的颗粒粗细程度、碳酸钙和有机质含量,称取 0.2 ~ 0.3 g 代表性松散样品置于烧杯中。(2) 去除有机质:向烧杯中加入 10 mL 30% H_2O_2 溶液,将烧杯置于通风橱内的电热板上加热,使其缓慢充分反应,直至溶液澄清且无细小气泡产生。(3) 去除碳酸盐:加入 10 mL HCl 溶液,继续加热反应至无明显气泡产生。(4) 洗酸操作:向烧杯中注满蒸馏水,将其移至实验台静置约 12 h,之后用橡胶管抽吸去除上清液,直至剩余约 20 mL 溶液。(5) 向预处理完成的每份样品溶液加入 10% 的分散剂溶液(NaPO_3)₆,并进行超声分散和振荡处理,目的是分散黏土颗粒聚集体^[44]。为确保结果稳定,每件样品测量三次并间隔 30 s,这些测量的平均值作为最终的粒度分布结果。

重金属元素分析:首先对采集的样品进行冷冻干燥-研磨-过筛-称样;然后用高氯酸、硝酸、氢氟酸和盐酸消解后,用稀盐酸定容;再用电感耦合等离子体原子发射光谱法(ICP-AES, Agilent, 5110)进行分

析。若 Bi/Hg/Mo/Ag/W 较高,需要做相应稀释,再用电感耦合等离子体质谱(Agilent, 7900)分析,分析精密度控制相对偏差(RD)%和准确度控制相对误差(RE)%均小于 10%。重金属元素的分析均采用国家标准物质 GBW07309(GSD-9, 湖泊沉积物)作为标准参考物质。每批次样品(每 10 个样品)插入一个标准物质和一个重复样以监控分析精度与准确度。实验采用插入监控物质(空白样、重复样和标准物质)并使用相同或不同方法进行重复检测,提高分析的精确度和准确度。分析结果显示,标准物质的测定值与推荐值的相对标准偏差(RSD)均小于 5%,重复样品的相对偏差均低于 10%,表明本研究数据准确可靠。

1.4 潜在生态风险指数(RI)

潜在生态风险指数法是一种综合评价环境中重金属污染对生态系统可能造成潜在风险的评价方法^[45-47]。主要用于对沉积物中多种重金属的生态风险进行系统评估。潜在生态风险指数 E_i^r 计算公式见(1)~(3)^[48]。

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

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

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i \quad (3)$$

式中: C_i 为沉积物中重金属*i*含量,mg/kg; C_n^i 为沉积物中重金属*i*的背景值(本研究参考青海省土壤元素背景值^[49]),mg/kg; C_r^i 为沉积物中重金属*i*的富集系数; T_r^i 为沉积物中重金属*i*的毒性系数^[50]; E_r^i 为沉积物中重金属*i*的潜在生态风险指数; RI 为沉积物中多种重金属的综合潜在生态风险指数。潜在生态风险指数的评价结果可分为五个等级^[48]:低风险($RI < 150$),表示生态系统基本未受干扰;中等风险($150 \leq RI < 300$),表示生态系统可能受到轻微影响,需加强监测;较高风险($300 \leq RI < 600$),表示生态系统已受到明显损害,需采取干预措施;高风险($RI \geq 600$),表示生态风险极高,亟须实施治理与修复行动。

2 结果与讨论

2.1 粒度数据结果与分析

使用 QGrain 0.2.4^[51]来分析黑海湖泊和察尔汗盐湖表层沉积物的碎屑组分和粒度参数。根据 Udden-Wentworth 标准^[52-54],将粒度分为四类:黏土($< 4 \mu\text{m}$)、细粉砂($4 \sim 16 \mu\text{m}$)、中粗粉砂($16 \sim 63 \mu\text{m}$)和砂($> 63 \mu\text{m}$)。

2.1.1 粒度组成

根据表层沉积物粒度组成数据(表1),黑海湖泊与察尔汗盐湖在碎屑组分的空间分布上既表现出一定的共性,也存在显著差异。两者均包含黏土、细粉砂、中-粗粉砂和砂粒四级组分,反映其沉积环境具有多物源和复杂沉积过程。同时,砂粒含量在两地均呈现出极大的变幅(黑海湖泊为 0.37%~62.74%,察尔汗为 0.73%~67.83%),表明局部高能环境与整体低能环境并存,空间异质性显著。然而,其主导沉积组分及分布特征有所不同,黑海湖泊以砂粒(平均为 28.50%)和细粉砂(平均为 27.52%)为主,黏土含量较高(平均为 22.36%),各组分极差较大,说明水动力

条件较强且沉积环境分选较差;而察尔汗盐湖则以中粗粉砂(平均为 34.67%)和细粉砂(平均为 32.21%)为主导,黏土平均含量较低(16.84%),粉砂类组分合计占比超过 66%,粒度分布相对均匀,反映其沉积环境更为稳定。

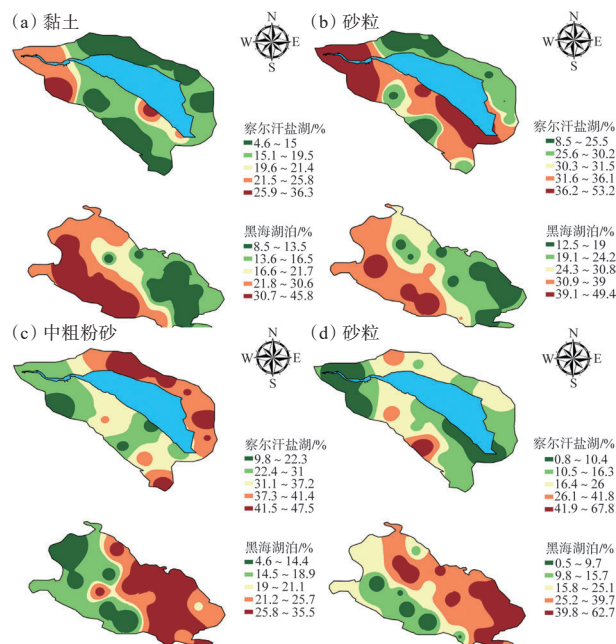


图2 黑海湖泊和察尔汗盐湖表层沉积物中颗粒组分的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of particulate fractions in surface sediments of the Black Sea lakes and Charkhan Salt Lake

如图2所示,察尔汗盐湖与黑海湖泊的各粒级空间分布呈现显著差异。黏土在察尔汗盐湖含量普遍较低(4.6%~36.3%),其高值区呈斑块状分布于湖心偏东和西北部区域,显示局部静水沉积,黑海湖泊黏土含量较高(8.5%~45.8%),高值区连续分布于西北部和中部深水区,显示稳定的深水沉降环境;细粉砂在察尔汗盐湖中的含量为 8.5%~53.2%,其高值区呈斑块状分布于湖区西部及湖区中心,指示了较强水动力条件下的局部沉积,低值区呈带状分布于湖区北部和南部。黑海湖泊细粉砂含量整体较低(12.5%~49.4%),高值区主要分布于湖泊西侧,呈现“西部高、东部低”的格局;中-粗粉砂在察尔汗盐湖中含量范围为 9.8%~47.5%,高值区集中分布于湖区北部及东南部,呈连续片状展布,显示出较强且持续的水动力输送过程,低值区则零星散布于湖区边缘。黑海湖泊中-粗粉砂含量介于 4.6%~35.5%之间,高值区呈连续斑块状分布于湖区东部,指示近源粗颗粒输入,低值区分布于湖区西部;砂粒在察尔汗盐湖

表1 表层沉积样品的粒度组成

Table 1 Particle size composition of surface-deposited samples %

类别	黑海湖泊			察尔汗盐湖		
	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
黏土	45.77	8.36	22.36	36.32	4.49	16.84
细粉砂	49.38	12.38	27.52	53.24	8.39	32.21
中-粗粉砂	35.55	4.48	21.62	47.55	9.71	34.67
砂粒	62.74	0.37	28.50	67.83	0.73	28.50

中含量变化范围极大(0.8%~67.8%),高值区主要分布于湖区中部,显示出强水动力环境的主导作用;低值区分布于湖区西北侧及东南侧。黑海湖泊砂粒含量为0.5%~62.7%,高值区主要分布于湖区东部,低值区连续广布于湖泊西南侧。

基于表层沉积物粒度数据及空间分布图,黑海湖泊与察尔汗盐湖的沉积物组成及其空间分布特征反映出显著的环境异同,其粒度组成与空间格局受控于不同的水动力机制与盆地背景。总体来看,察尔汗盐湖砂粒含量较高,粒度偏粗,细粉砂与中-粗粉砂平均含量合计超过66%,显示出低能沉积环境的主导地位;黑海湖泊以黏土和细粉砂为主,粒度整体较细,黑海湖泊虽也以细粉砂为主要组分,但砂粒平均含量较高(28.50%),黏土比例也高于察尔汗,整体指示沉积动力条件更强且多变。两者在水动力条件和沉积环境方面存在较大差异。

2.1.2 粒度参数的空间分布

表层沉积物的颗粒大小对沉积物的物质来源,沉积环境和输送机制具有一定的指示意义^[55-57]。研究区黑海湖泊和察尔汗盐湖表层沉积物的粒度参数平均粒度、分选系数、偏度和峰度的空间分布如图3所示。

察尔汗盐湖与黑海湖泊均存在明显的空间变异,反映两者在沉积动力与物源机制上既有共性也有差异。察尔汗盐湖平均粒径变化范围较大(8.4~157.3 μm),整体以中粗颗粒为主,细颗粒区(8.4~25.3 μm)分布于西北和东南部,粗颗粒区(85.7~157.3 μm)集中于格尔木河下游冲积扇前缘与盐湖区交互地带,指示强水动力和侵蚀搬运作用。黑海湖泊平均粒径范围较小(6.4~104.5 μm),细颗粒主要分布于西南部,反映低能环境;粗颗粒集中于东南部,显示波浪或沿岸流的筛选与富集作用。与察尔汗盐湖相比,黑海整体粒径偏细、分布连续,沉积环境更稳定,水动力强度适中且均匀。察尔汗盐湖和黑海湖泊均呈现出从湖缘至动力中心颗粒逐渐变粗的趋势,体现水动力分异对沉积组成的控制(图3a)。

察尔汗盐湖分选系数介于10.5~166.1之间,分选较差,尤以中部沉积中心及河口区为主。黑海湖泊分选系数范围为7.3~278.9,分选极差,高值区集中于东南部。察尔汗盐湖和黑海湖泊均符合强动态沉积环境特征,分选性与水动力强度具有明显的耦合关系(图3b)。

偏度(S_k)均为正值,反映沉积物以粗颗粒为主。察尔汗盐湖偏度值跨度大(1.2~6),低值出现在周边

弱动力区,高值集中于中部,显示强动力导致粗颗粒富集与分选差。黑海偏度介于0.7~7.8之间,整体正偏,高值区位于东南和西南部,指示强动力环境。察尔汗盐湖偏度变幅大、分带明显,反映更复杂的动力背景和河流输入影响;黑海湖泊偏度分布较均匀,水动力格局一致(图3c)。

两湖峰度(K_G)均具高值,反映物源集中和分选较差。察尔汗盐湖峰度范围为3.7~87.9,空间异质性强,低值区指示多物源混合或动力波动,高值区集中于中部及河湖交互带,反映物源集中、动力强烈、粒度分布尖锐。黑海湖泊峰度范围为2.9~80.4,多数区域属中高值,物源一致、分选中等偏差;东南部出现峰值,显示出极尖锐的粒度分布,可能受强波浪或沿岸流控制(图3d)。

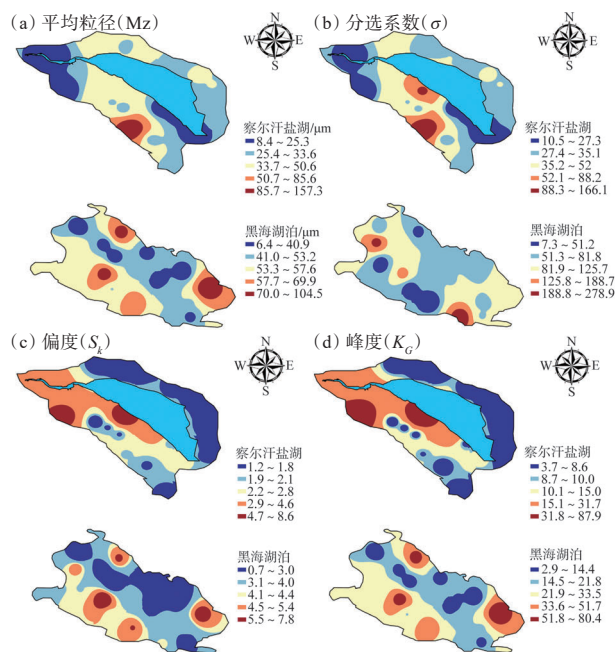


图3 察尔汗盐湖和黑海湖泊表层沉积物粒度参数的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of surface sediment grain size parameters in Charkhan Salt Lake and Black Sea lakes

对研究区内察尔汗盐湖与黑海湖泊的偏度(S_k)与峰度(K_G)指标进行对比分析,可以看出二者在空间分布上表现出较强的相似性,共同揭示了沉积动力环境与物源供给的整体特征与局部差异(图3c、d)。从空间分布格局来看,两湖区偏度与峰度的高值区均集中分布于水动力较强的区域。察尔汗盐湖的高偏度与高峰度值主要出现在盐湖中部及河湖入口附近,表明这些区域沉积物以粗颗粒为主,分选较差,物源输入相对集中,反映了较强的水流或风动力作用。同样,黑海湖泊的高值区也多位于东南部等高

能环境区,说明该处粗颗粒组分富集,进一步印证了较强水动力筛选与相对稳定物源供给的共同影响。在数值特征方面,两湖的偏度与峰度均表现出较大的变幅,其中察尔汗盐湖的偏度与峰度极差均较大,说明其沉积过程受到更为复杂的动力-物源耦合作用控制;黑海湖泊尽管整体也呈现高值特征,但其偏度与峰度数值分布相对连续,空间变异性略低于察尔汗盐湖,反映该湖沉积环境具有相对一致的中高能背景。偏度与峰度在空间分布上的一致性,说明研究区内沉积物的粒度分布形态不仅普遍呈正偏(粗偏),意味着沉积物不仅以粗颗粒组分为主,同时具有较差的分选性和集中的物源输入特征。这种偏度和峰度关联性显著的空间格局,共同指向两个湖泊均以中高能沉积环境为主,局部存在强动力作用带,体现了沉积过程对水动力条件的良好响应。

2.2 重金属元素分析

察尔汗盐湖与黑海湖泊表层沉积物中含有Cd、Cr、Cu、Pb、Zn、As、Mn七种重金属元素。在含量特征上,两者存在差异:察尔汗盐湖的Cd、Mn平均含量略高于黑海湖泊;而黑海湖泊的Cr、Cu、Pb、Zn、As平均含量更高。从极值看,黑海湖泊各重金属最大值普遍更高(暗示局部可能受点源污染或异常富

集),最小值普遍更低;察尔汗盐湖整体含量范围更集中。在空间分布均匀性(变异系数)方面,黑海湖泊所有重金属变异系数均超50%(尤其As、Cu、Cr),分布极度不均(空间异质性强),与点源污染输入、复杂水动力及人类活动干扰相关;察尔汗盐湖各元素变异系数多在20%~40%,分布较均匀。此外,察尔汗盐湖与黑海湖泊沉积物中Cd、Cr、Pb、Zn和Mn的平均含量均低于青海省土壤背景值;然而,Cu和As的表现存在空间差异,其在黑海湖泊中的平均含量超出背景值,但在察尔汗盐湖中则低于背景值(表2和图4)。

表2 研究区黑海湖泊和察尔汗盐湖的表层沉积物重金属元素含量

Table 2 Heavy metal elements content in surface sediments of Black Sea lakes and Charkhan Salt Lake in the study area $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

	Cd	Cr	Cu	Pb	Zn	As	Mn
最大值	0.11	84.00	58.90	24.30	112.00	40.30	784.00
黑海 最小值	<0.02	7.00	5.70	2.50	14.00	3.90	115.00
湖泊 平均值	0.07	44.06	24.36	13.22	60.67	15.46	454.17
变异系数	34.51	60.64	73.49	55.18	56.71	78.93	51.25
最大值	0.16	48.00	50.90	19.00	92.00	22.90	631.00
察尔汗 最小值	0.03	18.00	10.80	3.40	25.00	6.00	179.00
盐湖 平均值	0.09	35.95	21.43	11.76	57.43	13.14	474.67
变异系数	37.45	20.58	40.56	31.73	24.35	35.58	21.48
青海省土壤背景值 ^[58]	0.137	70.1	22.2	20.9	80.3	14	580

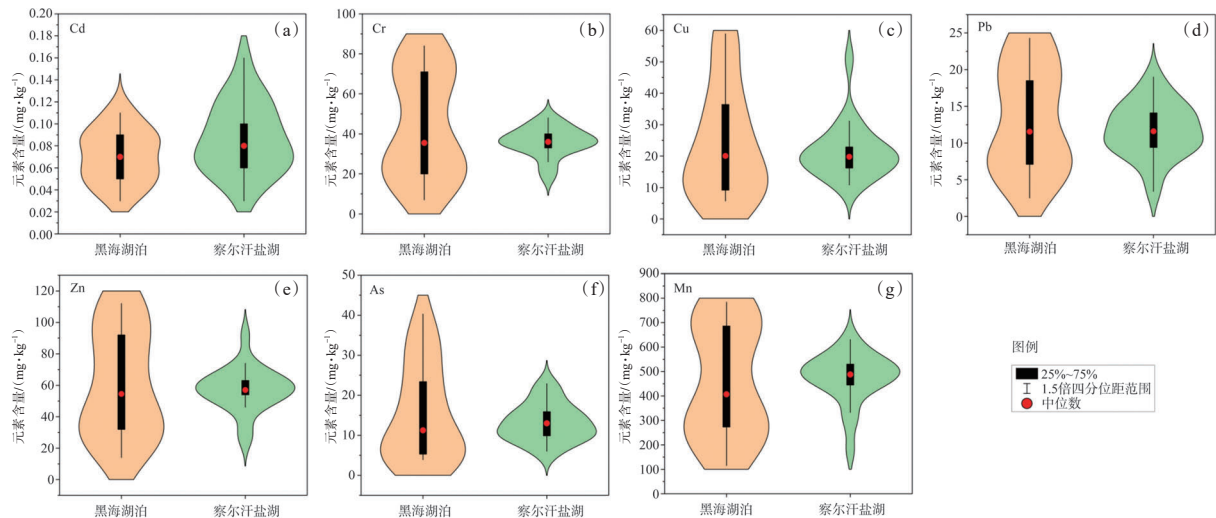


图4 研究区黑海湖泊和察尔汗盐湖重金属元素含量分布特征

Fig. 4 Characteristics of distribution of heavy metal elements content in Black Sea lakes and Charkhan Salt Lake in the study area

2.3 重金属元素含量与粒度特征

对研究区沉积物中重金属元素(Cd、Cr、Cu、Pb、Zn、As、Mn)含量与沉积物粒度粒径(黏土、细粉砂、

中粗粉砂和砂)进行了 Mantel 检验交互式相关性热图分析(图5)。沉积物中黏土组分是重金属富集的主要载体,重金属元素(Cd、Cr、Cu、Pb、Zn、As、Mn)均与黏土含量呈较强的正相关关系,这主要归因于

黏土矿物具有较大的比表面积和较强的吸附能力^[59,60]。此外,有研究表明黑海湖泊和察尔汗盐湖区的表层沉积物中含有有机质和铁锰氧化物^[61-63]。与其他重金属元素相比,Cu元素与黏土组分的相关性相对较弱,这可能与Cu更易与有机质结合并富集有关^[64,65]。细粉砂组分对Cd、As和Mn元素表现出一定的吸附性,而Cr、Cu、Pb和Zn元素与细粉砂的Mantel检验相关性不显著($p > 0.05$)。其中,Cr的价态决定其迁移-富集行为,Cr(III)易与有机质结合或形成氢氧化物沉淀,而Cr(VI)则以含氧酸根阴离子的形式存在,与沉积物颗粒之间的静电排斥作用使其迁移性较高,从而二者的关联性较弱^[66];Cu和Pb极易与有机质发生络合作用,形成稳定的有机-金属络合物,从而掩盖了粒度效应^[65];Zn的迁移性受pH值影响较大,且在富铁锰氧化物条件下易通过共沉淀或特异性吸附被固定^[67]。中粗粉砂与Cd的相关性不显著($p > 0.05$),但与其他重金属元素均存在显著相关性,这可能与Cd在沉积物中的赋存机理有关^[66]。砂组分与各重金属元素的Mantel检验显著性水平平均小于0.05,表明其与重金属分布亦存在较小的关联性。综上所述,沉积物中重金属的分布显著受粒度组成控制,其中黏土含量的影响最为突出,中粗粉砂和砂组分次之,而细粉砂的影响相对最小。这一认识对于理解重金属在沉积环境中的迁移-富集行为及污染风险评估具有重要的科学意义。

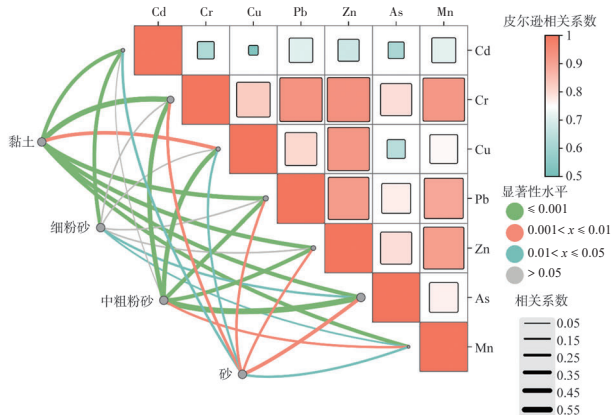


图5 重金属元素含量与粒度粒径交互式相关性热图

Fig. 5 Thermogram of interactive correlation between heavy metal content and particle size

2.4 潜在生态风险指数(RI)污染评价

黑海湖泊和察尔汗盐湖区的 E_r^i 值均小于40,污染程度为轻微危害,且 E_r^i 值在各研究区大小排序为察尔汗盐湖区 > 黑海湖泊。从总体风险结构来看,

察尔汗盐湖表现出更高的综合潜在生态风险水平。其中,Cd在察尔汗盐湖中的风险最为突出,显示其为该区域最主要的生态风险因子,Cu、Pb、As也贡献了显著风险,相比之下,黑海湖泊中除Cd和As具有一定风险外,其他元素如Mn、Cr、Cu、Pb、Zn的风险指数均处于较低水平,整体风险结构较为均衡。从元素分布特征来看,Cd和As在察尔汗盐湖和黑海湖泊均属于关键风险元素,表明其具有广泛的环境迁移性和生态毒性(图6)。值得注意的是,粒度分析表明Cd和As均表现出细颗粒物更为富集,这一发现与前人大量研究结论一致,Cd²⁺易于通过离子交换等作用被吸附在黏土矿物表面^[68,69],而As则主要通过吸附在细颗粒表面的铁锰氧化物发生专性吸附或共沉淀而富集^[70,71],有研究进一步指出,粒度效应是控制沉积物中重金属分布的关键因素,尤其是对Cd和As的控制作用最为显著^[72]。察尔汗盐湖人类工业活动影响更为强烈,加之细颗粒沉积物对重金属的富集作用,导致其具有更高的综合生态风险,而黑海湖泊受人为干扰较小,整体风险水平较低,元素分布也更为均衡。

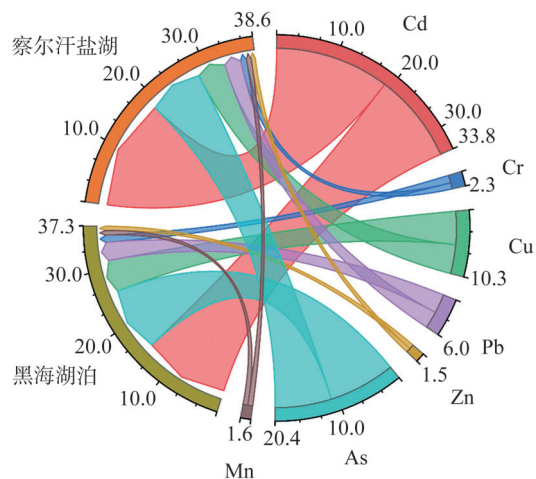


图6 研究区潜在生态风险指数 E_r^i 分布图

Fig. 6 Chord plot of the distribution of potential ecological risk index E_r^i in the study area

3 结论

(1) 察尔汗盐湖以中-粗粉砂和细粉砂为主,粒度分布相对均匀,粉砂合计占比超过66%,指示一个更为稳定、低能的沉积环境;而黑海湖泊则以砂粒和细粉砂为主导,黏土含量较高,各组分极差大,体现出较强且多变的水动力条件及较差的分选作用。粒度空间分布进一步表明,察尔汗盐湖黏土呈斑块状

分布,反映局部静水沉积;黑海湖泊黏土则连续分布于北部深水区,呈现“北高南低”的格局,显示其稳定的深水沉降环境。

(2) 通过对察尔汗盐湖与黑海湖泊表层沉积物粒度参数(平均粒径、分选系数、偏度和峰度)的系统对比,研究区域均表现出较强的水动力环境特征和显著的沉积空间异质性,但受控于不同的动力-物源机制,其中察尔汗盐湖沉积环境动力更强、变幅更大、物源更复杂;黑海湖泊则整体处于中高能环境且空间分布较为均一。

(3) 察尔汗盐湖与黑海湖泊表层沉积物粒径显著影响重金属分布,影响程度依次为:黏土>中粗粉砂>砂>细粉砂,黏土组分是重金属富集的主要载体,重金属元素均与其呈较强正相关,这主要源于黏土矿物较大的比表面积和强吸附能力。潜在生态风险指数(E_{ri}^p)结果分析表明,研究区域整体污染水平处于低富集和未受污染状态,其中Cd和As在察尔汗盐湖和黑海湖泊均属于关键风险元素,表明其具有广泛的环境迁移性和生态毒性。

参考文献

- [1] SU Q, SHAHAB A, HUANG L, *et al.* Heavy metals in surface sediment of plateau lakes in Tibet, China: Occurrence, risk assessment, and potential sources[J]. *Toxics*, 2023, 11(10): 804.
- [2] WANG J, GE J, YANG X, *et al.* Distribution and ecological risk assessment of heavy metals in sediments of Dajihu Lake Wetland in Shennongjia, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30(10): 25999-26011.
- [3] 刘增琦, 于禄鹏, 安萍, 等. 柴达木盆地夏日哈河中游古洪水沉积物的粒度特征[J]. *临沂大学学报*, 2019, 41(6): 76-86.
- [4] 丁召静. 柴达木盆地雅丹释光年代学及其环境意义[D]. 武汉: 中国地质大学, 2020.
- [5] 丁宗艳. 柴达木盆地托素湖不同位置岩芯沉积物指标对比及其环境意义[D]. 兰州: 兰州大学, 2020.
- [6] 田敏, 钱广强, 杨转玲, 等. 柴达木盆地东北部哈勒腾河流域风成沉积物粒度特征与空间差异[J]. *中国沙漠*, 2020, 40(2): 68-78.
- [7] 张潇, 严平, 袁文杰, 等. 柴达木盆地南缘河岸沙丘沉积模式及其环境意义——以托拉海河下游为例[J]. *干旱区资源与环境*, 2025, 39(7): 104-118.
- [8] DAI L, WANG L, 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.
- [9] ZHANG Z, ZHENG D, XUE Z, *et al.* Identification of anthropogenic contributions to heavy metals in wetland soils of the Karuola Glacier in the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Ecological Indicators*, 2019, 98: 678-685.
- [10] GUO B, LIU Y, ZHANG F, *et al.* Heavy metals in the surface sediments of lakes on the Tibetan Plateau, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(4): 3695-3707.
- [11] 曲政. 沉积物粒度数据表征方法的研究[J]. *中国粉体技术*, 2001, (4): 24-31.
- [12] 宋洁, 春喜, 白雪梅, 等. 中国沙漠粒度分析研究综述[J]. *中国沙漠*, 2016, 36(3): 597-603.
- [13] STUUT J B W, PRINS M A, SCHNEIDER R R, *et al.* A 300-kyr record of aridity and wind strength in southwestern Africa: inferences from grain-size distributions of sediments on Walvis Ridge, SE Atlantic[J]. *Marine Geology*, 2002, 180(1/4): 221-233.
- [14] PARRIS A S, BIERMAN P R, NOREN A J, *et al.* Holocene paleostorms identified by particle size signatures in lake sediments from the northeastern United States[J]. *Journal of Paleolimnology*, 2010, 43(1): 29-49.
- [15] 邵学敏, 董治宝, 段争虎, 等. 柴达木盆地西北部长垄状雅丹沉积物粒度特征[J]. *中国沙漠*, 2019, 39(2): 79-85.
- [16] 王萌, 邵学敏, 屈欣, 等. 柴达木盆地西南缘沙丘沉积物粒度特征及其沉积环境[J]. *水土保持通报*, 2022, 42(5): 57-64+72.
- [17] 王利杰, 肖锋军, 董治宝, 等. 柴达木盆地巨型沙波纹条带表层沉积物粒度和地球化学元素组成特征[J]. *干旱区地理*, 2023, 46(11): 1826-1835.
- [18] 徐汝汝, 安庆, 赵启, 等. 柴达木盆地东缘风蚀坑不同位置风成沉积物粒度特征分析[J]. *成都师范学院学报*, 2019, 35(9): 91-97.
- [19] 胡梦珺, 白清竹, 许澳康, 等. 共和盆地茫拉剖面沉积物粒度端元特征与末次盛冰期以来环境演化[J]. *中国沙漠*, 2025, (6): 1-10.
- [20] 李思瑶, 蒙仲举. 风水交互作用下乌兰布和沙漠东缘地表沉积物粒度特征[J]. *水土保持学报*, 2025, 39(4): 139-147.
- [21] 刘军, 王海兵, 左合君, 等. 巴丹吉林沙漠外围戈壁沉积物粒度特征及沉积环境[J]. *中国沙漠*, 2025, (5): 1-6.
- [22] 潘邵敏, 安凯旋, 胡逸豪, 等. 柴达木盆地大红沟剖面新生代沉积物粒度特征及其沉积相意义[J]. *高校地质学报*, 2025, 31(3): 324-334.
- [23] 柴磊, 王小萍. 青藏高原持久性有机污染物研究现状与展望[J]. *地球科学进展*, 2022, 37(2): 187-201.
- [24] 陈瑞芝, 罗犀. 塑料来袭——青藏高原的塑料污染[J]. *大自然*, 2024, (3): 58-61.
- [25] 赵斌, 卢少勇, 周志明, 等. 基于meta分析的高原湖泊典型新污染物赋存特征及风险评估[J]. *玉溪师范学院学报*, 2024, 40(3): 33-42.
- [26] 黄楠. 青藏高原东北部耕地土壤微塑料的分布特征、生态风险及影响因素[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2025.
- [27] 陈霞, 刘亮, 王彦瑜, 等. 青藏高原东缘海东市表土重金属污染特征及源解析[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2026, 50(1): 112-120.
- [28] 刘小莉, 高文华, 魏婷, 等. 青藏高原地表土壤重金属元素组成分布特征及其对周边冰川区重金属沉降的物源示踪意义[J/OL]. *中国环境科学*: 1-16. <https://doi.org/10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20231130.002>.
- [29] 王艺涵. 青藏高原土壤重金属分布特征、来源及生态风险评估[D]. 天津: 天津师范大学, 2018.
- [30] 周毛措, 胡樱, 安红婧, 等. 青藏高原重金属污染风险研究现状及展望[J]. *环境生态学*, 2022, 4(10): 47-50.

- [31] LIU Y, ZHANG Y, KANG S, *et al.* Characteristics of heavy metal elements deposited on glaciers in the southeastern Tibetan Plateau [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2017, 39 (6): 1200-1211.
- [32] LIU X, GAO W, WEI T, *et al.* Distribution and source of heavy metals in Tibetan Plateau topsoil: New insight into the influence of long-range transported sources to the surrounding glaciers [J]. *Environmental Pollution*, 2024, 346: 123498.
- [33] 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.
- [34] GAO H R, GONG J, YANG J X, *et al.* Heavy metal pollution and ecological risk under different land use types: Based on the similarity of pollution sources and comparing the results of three evaluation models [J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2023, 37(10): 3893-3913.
- [35] YAO T, WANG W, YANG W, *et al.* Imbalance of the Asian Water Tower characterized by glacier and snow melt [J]. *Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis*, 2024, 20(6): 689-698.
- [36] LI S Y, SUN W W, CHEN R, *et al.* A historical record of trace metal deposition in northeastern Qinghai-Tibetan Plateau for the last two centuries [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29(17): 24716-24725.
- [37] THUY H T T, TOBSCHALL H J, AN P V. Trace elements distributions in aquatic sediments of Danang-Hoian area, Vietnam [J]. *Environmental Geology*, 2000, 39(7): 733-740.
- [38] 杜德文, 孟宪伟, 程振波, 等. 黄海沉积物地球化学的粒度效应 [J]. *海洋科学进展*, 2003, (1): 78-82.
- [39] CHENG A, ZUO Y, GAO C, *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.
- [40] SINOLUNGAN M T M, SOEROTO B, KONDO F, *et al.* The geochemical characteristics of sediment in Tondano Lake, Indonesia: heavy metals and organic matter contents, and grain size distribution [J]. *Paddy and Water Environment*, 2008, 6 (3): 341-348.
- [41] JUN S, 신 경 용. A Study on grain size dependency of selected heavy metals in the surface sediment of lake paldang [J]. *Journal of Environmental Health Sciences*, 2012, 38(5): 424-430.
- [42] LI Y, MEI L, ZHOU S, *et al.* Analysis of historical sources of heavy metals in lake taihu based on the positive matrix factorization model [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018, 15(7): 1540.
- [43] 陈亮, 张西营, 唐启亮, 等. 柴达木盆地表土重金属污染与来源分析 [J]. *环境科学*, 2021, 42(10): 4880-4888.
- [44] WUNNEMANN B, YAN D, HU S, *et al.* Seasonal variations in surface processes and hydroclimate on an alpine lake, NE Tibetan Plateau [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2023, 300: 107876.
- [45] 吉瑞, 梁彩飞, 姚德. 内蒙古某重工业区分区土壤重金属潜在生态风险评价 [J]. *西部资源*, 2025, (4): 67-71.
- [46] 范拴喜, 甘卓亭, 李美娟, 等. 土壤重金属污染评价方法进展 [J]. *中国农学通报*, 2010, 26(17): 310-315.
- [47] 马攀华. 云南省土壤污染聚类及背景值相关分析系统的设计与实现 [D]. 昆明: 云南大学, 2012.
- [48] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution-control-a sedimentological approach [J]. *Water Research*, 1980, 14(8): 975-1001.
- [49] CHEN J, WEI F, ZHENG C, *et al.* Background concentrations of elements in soils of China [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1991, 57(1): 699-712.
- [50] 徐争启, 倪师军, 庾先国, 等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算 [J]. *环境科学与技术*, 2008, (2): 112-115.
- [51] LIU Y, LIU X, SUN Y. QGrain: An open-source and easy-to-use software for the comprehensive analysis of grain size distributions [J]. *Sedimentary Geology*, 2021, 423: 105980.
- [52] UDDEN J A. Mechanical composition of clastic sediments [J]. *Bulletin of the Geological Society of America*, 1914, 25: 655-744.
- [53] WENTWORTH C K. A scale of grade and class terms for clastic sediments [J]. *Journal of Geology*, 1922, 30(5): 377-392.
- [54] MING G, ZHOU W, WANG H, *et al.* Grain size variation in two lakes from margin of Asian Summer Monsoon and its paleoclimate implications [J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2021, 567: 110295.
- [55] GUO X, WANG W, WANG G, *et al.* Within-Lake distributions of grain-size components and environmental implications based on the survey of lake surface sediment of Chinese monsoon marginal area [J]. *Geographical Research*, 2016, 35(4): 677-691.
- [56] SUN D H, BLOEMENDAL J, REA D K, *et al.* Grain-Size distribution function of polymodal sediments in hydraulic and aeolian environments, and numerical partitioning of the sedimentary components [J]. *Sedimentary Geology*, 2002, 152(3/4): 263-277.
- [57] 肖舜, 陈发虎, 强明瑞, 等. 青海苏干湖表层沉积物粒度分布模式与大气粉尘记录 [J]. *地理学报*, 2007, (11): 1153-1164.
- [58] WEI, F, CHEN, J, WU, Y. Background values of soil elements in China. China environmental [M]. Science Press, Beijing, China. 1990.
- [59] UDDIN M K. A review on the adsorption of heavy metals by clay minerals, with special focus on the past decade [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, 308: 438-462.
- [60] NOVIKAU R, LUJANIENE G. Adsorption behaviour of pollutants: Heavy metals, radionuclides, organic pollutants, on clays and their minerals (raw, modified and treated): A review [J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 309: 114685.
- [61] 杨宁宁. 察尔汗盐湖周边风沙沉积物粒度和重矿物特征 [D]. 西安: 陕西师范大学, 2012.
- [62] 邸迎伟. 东昆仑黑海湖泊沉积物物质组分特征及其环境信息初探 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2013.
- [63] 周连福. 晚更新世以来藏北高原黑海湖泊沉积环境演化过程研究 [D]. 南京: 南京大学, 2014.
- [64] TESSIER A, CAMPBELL P G C, BISSON M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace-metals [J]. *Analytical Chemistry*, 1979, 51(7): 844-851.
- [65] PEJMAN A, BIDHENDI G N, ARDESTANI M, *et al.* A new index for assessing heavy metals contamination in sediments: A case study [J]. *Ecological Indicators*, 2015, 58: 365-373.
- [66] RICHARD F C, BOURG A C M. Aqueous geochemistry of

- chromium-a review[J]. *Water Research*, 1991, 25(7): 807-816.
- [67] APPEL C, MA L. Concentration, pH, and surface charge effects on cadmium and lead sorption in three tropical soils[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2002, 31(2): 581-589.
- [68] LI F, HUANG J, ZENG G, *et al.* Spatial risk assessment and sources identification of heavy metals in surface sediments from the Dongting Lake, Middle China[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2013, 132: 75-83.
- [69] WANG Y, YANG L, KONG L, *et al.* Spatial distribution, ecological risk assessment and source identification for heavy metals in surface sediments from Dongping Lake, Shandong, East China[J]. *Catena*, 2015, 125: 200-205.
- [70] SAHUQUILLO A, RIGOL A, RAURET G. Overview of the use of leaching/extraction tests for risk assessment of trace metals in contaminated soils and sediments[J]. *Trac-Trends in Analytical Chemistry*, 2003, 22(3): 152-159.
- [71] ZHAO Q, WANG Y, CAO Y, *et al.* Potential health risks of heavy metals in cultivated topsoil and grain, including correlations with human primary liver, lung and gastric cancer, in Anhui province, Eastern China[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 470: 340-347.
- [72] ZHANG C, YU Z G, ZENG G M, *et al.* Effects of sediment geochemical properties on heavy metal bioavailability[J]. *Environment International*, 2014, 73: 270-281.

Characteristics of Grain Size and Heavy Metal Elements in Surface Sediments of Lakes with Different Salinities in the Golmud River Basin and Their Environmental Indications

DONG Bo^{1,2,3}, CHENG Aiyong^{1,2*}, WEN Jinxin^{1,2,3}, LI Hongyu^{1,2,3}, XUE Hongpan^{1,2},
WANG Shun^{1,2}, GAO Chunliang^{1,2}, WEI Haicheng^{1,2*}

(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 Lakes, Xining, 810008, China*;
3. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China*)

Abstracts: As a typical closed intermountain fault basin on the northeastern margin of the Qinghai-Xizang Plateau, the lake ecosystems in the Qaidam Basin are sensitive to global climate change and human activities, making it an ideal area to study environmental changes and sedimentation processes. In this study, the surface sediments of the Heihai Lake and the Charkhan Salt Lake in the upper part of the Golmud River Basin in the Qaidam Basin were analyzed for particle size and heavy metal content, and the spatial distribution of heavy metals and their significance in the environment were revealed by the Potential Ecological Pollution Index (PEPI) method. The results showed that the Charkhan Salt Lake was dominated by medium-coarse chalk and fine chalk, with the total proportion of chalk exceeding 66%, and the particle size distribution was patchy and relatively uniform, reflecting a stable and low-energy depositional environment; the Heihai Lake was dominated by sand and fine chalk, with high clay content and large extreme difference between the grain sizes, and the distribution was continuous with the 'high in the north and low in the south', which indicated that the hydrodynamic conditions were strong and the sorting of heavy metals were not as important as they should be. The hydrodynamic conditions are stronger and the sorting is poorer. The average contents of Cr, Cu, Pb, Zn and As in the Heihai Lake were higher than those in the Charkhan Salt Lake, showing strong spatial heterogeneity. The results of the potential ecological risk index showed that the study area was in a low-enriched and uncontaminated state, and the ecological risk was slight, of which Cd and As were the key risk elements. In addition, the surface sediment grain size of Charkhan Salt Lake and Heihai Lake significantly affected the distribution of heavy metals in the following order: clay > medium-coarse silt > sand > fine silt, and clay was the main carrier of heavy metal enrichment. This study provides a scientific basis for understanding the depositional process, environmental pollution characteristics and ecological risk assessment of lake-salt lake ecosystems in arid regions.

Key words: Golmud River; Surface sediments; Particle size analysis; Heavy metal elements