

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[J]. 盐湖研究, 2025, 33(6): 81-89.

Gao C L, Wen J X, Cheng A Y, et al. Study on the occurrence characteristics and bioavailability of heavy metals from the surface sediments in Lake Gasikule[J]. Journal of Salt Lake Research, 2025, 33(6): 81-89.

DOI: 10.3724/j.yhj.2025006

CSTR: 32273.14.j.yhj.2025006

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

高春亮^{1,2}, 文进心^{1,2,3}, 成艾颖^{1,2}, 李鸿宇^{1,2,3}, 魏海成^{1,2}, 闵秀云¹, 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: 为了识别内陆封闭型湖泊表层沉积物中重金属元素Pb、Zn、Cu、Cd、Cr的赋存形态特征与生物有效性, 我们选取柴达木盆地尕斯库勒湖作为研究对象, 采集并精选了20件表层沉积物样品。研究基于Tessier连续提取法结合ICP-MS测定了上述5种重金属元素的赋存形态, 并利用风险评价编码法和次生相与原生相分布比值法对研究区内重金属元素的生物有效性进行了评价。研究表明, Pb、Zn、Cu、Cd和Cr元素的平均含量值分别为35.30 mg/kg、146.15 mg/kg、44.68 mg/kg、0.35 mg/kg和103.47 mg/kg, 富集系数分别为1.69、1.82、2.01、2.50和1.48, 并且在空间上呈现不均匀分布特征。Pb、Zn、Cu和Cr元素主要以残渣态为优势形态, 分别占其总量的51.54%、80.98%、73.00%和92.02%; Cd主要以铁锰氧化物结合态为优势形态, 占其总量的58.99%。Pb、Zn、Cu、Cd和Cr元素的劣势形态为碳酸盐结合态和离子交换态, 分别占其总量的0.05%和0.09%、0.26%和0.53%、0.34%和1.68%、0.50%和3.55%、0.05%和0.09%。RAC风险评价结果为Cu > Cd > Zn > Pb = Cr, 而RSP风险评价结果则是Cd > Pb > Cu > Zn = Cr。Pb、Zn、Cu以及Cr元素的生物有效性相对较低, 而Cd元素的生物有效性则相对较高。虽然活性组分占比较小, 但其潜在的生态风险较高, 尤其Cd元素, 应引起足够的重视。

关键词: 表层沉积物; 重金属元素; 赋存形态; 生物有效性; 尕斯库勒湖; 柴达木盆地

中图分类号: P595; X825

文献标志码: A

文章编号: 1008-858X(2025)06-0081-09

青藏高原被誉为“世界第三极”, 区内各种环境因子处于较为脆弱的平衡态^[1]。近年来, 伴随经济的快速发展和工业化、城镇化的快速推进以及旅游业的崛起, 青藏高原地区受人类活动的剧烈影响日益凸显。Zhang等^[2]研究发现青藏铁路运输对土壤中的Zn、Cd和Pb含量有显著影响, 而受青藏铁路影响的德令哈地区是重金属污染最严重的区段。Wang等^[3]研究发现青海湖流域土壤中Cu、Zn元素不足而Pb元素富集, 并分析得出土壤元素主要来源于自然环境, 但人为因素也影响了表土层中的元素含量。此外, 国内外不同学者研究发现青藏高原沉积物、土壤和水体等不同环境载体中存在多种重金属元素不同程度污染的现象^[4-20]。柴达木盆地作为

青海省一个巨大的“聚宝盆”, 矿产资源的大量开发利用, 工业企业的迅猛发展, 机动车辆尾气的排放, 以及各种化学产品、农药和化肥的广泛使用, 使得该区域水体、土壤、沉积物环境安全问题日益突出。尤其是沉积物中重金属元素的污染特性、迁移转化规律、毒性以及可能产生的危害不仅与其总量有关, 更大程度上取决于重金属元素的赋存化学形态。因此, 研究重金属元素的赋存形态对于了解其来源、迁移转化规律和生物有效性等方面具有重要的实际意义和理论价值。

德令哈巴音河流域作为柴达木循环经济试验区的重要河流, 流域湿地及其终端可鲁克湖、托素湖和尕斯库勒湖构成了独特的生态环境系统。可鲁克湖及其周

收稿日期: 2025-01-17; 修回日期: 2025-02-19

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(高春亮); 第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0805)

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

边湿地表层沉积物中的重金属元素地球化学特征研究表明,Pb、Cr、Cu和Zn污染程度相对较轻,Cd污染程度较为严重且由人类活动所致^[20]。尕斯库勒湖作为一个内陆干旱-半干旱区的封闭型湖泊,前期研究工作主要聚焦在古气候、古环境的演化和重建^[21-27]等方面,而针对湖泊表层沉积物中重金属元素的赋存形态及其生物有效性评价相关研究工作几乎没有开展。因此,本文报道了柴达木盆地尕斯库勒湖表层沉积物中重金属元素Pb、Zn、Cu、Cd、Cr浓度的测定结果,旨在阐明其空间分布特征与赋存形态特征,定量评价研究区内上述5种重金属元素的生物有效性。最后,与我国典型湖泊表层沉积物中重金属元素Pb、Zn、Cu、Cd、Cr的平均含量进行对比分析,以期为青藏高原环境质量的综合评价和治理提供基础科学依据。

1 研究区概况

尕斯库勒湖(37°08'N,97°33'E)位于柴达木盆地东北缘的德令哈次级盆地内,属于巴音河流域的尾间湖(图1)。巴音河是柴达木盆地第四大内陆河,发源于祁连山支脉野牛脊山南麓,源头海拔为5 000 m^[26]。尕斯库勒湖盆为新生代沉降盆地,盆内有冲积、湖积粉砂黏土以及含盐淤泥覆盖,湖表有薄层石盐沉积;边缘为冲积、洪积平原,形成砂砾石和平坦戈壁沉积,接近湖滨为盐碱沼泽沉积^[28]。

尕斯库勒湖为典型的内陆封闭型咸水湖,湖泊呈椭圆形,湖面海拔约为2 894 m,湖区总面积约为35 km²,平均水深为8 m,最大水深为15 m,湖区东北部和南部有湿地分布[图1(b)]。湖区位于西风环流带内,亚洲季风气候和西风气候的交汇处^[29]。干旱少雨,年均温度为4℃,年降水量为80 mm,年蒸发量高达2 000 mm^[20,22],属于典型的荒漠-半荒漠干旱气候。无常年性河流入湖,尕斯库勒湖水位和水化学的变化受控于周围众多山前冲积扇季节性地表径流和地下潜流补给[图1(a)],湖水pH值为8.28,矿化度为90.6 g/L^[30]。

2 样品与方法

2.1 样品采集

2023年6月,研究团队对尕斯库勒湖开展了野外实地考察与采样工作,表层沉积物样品利用HY. ETC-200型采泥采样器采集,采样厚度为1~5 cm,所有采集

的样品封装带回实验室后保存在4℃的冷藏室中备用。在本研究中,为了更好地呈现重金属元素Pb、Zn、Cu、Cd、Cr在尕斯库勒湖区不同地带的空间分布特征,我们在湖区东部、西部、南部、北部以及中心地带精选湖泊表层样品20个,采样点如图1(b)所示。

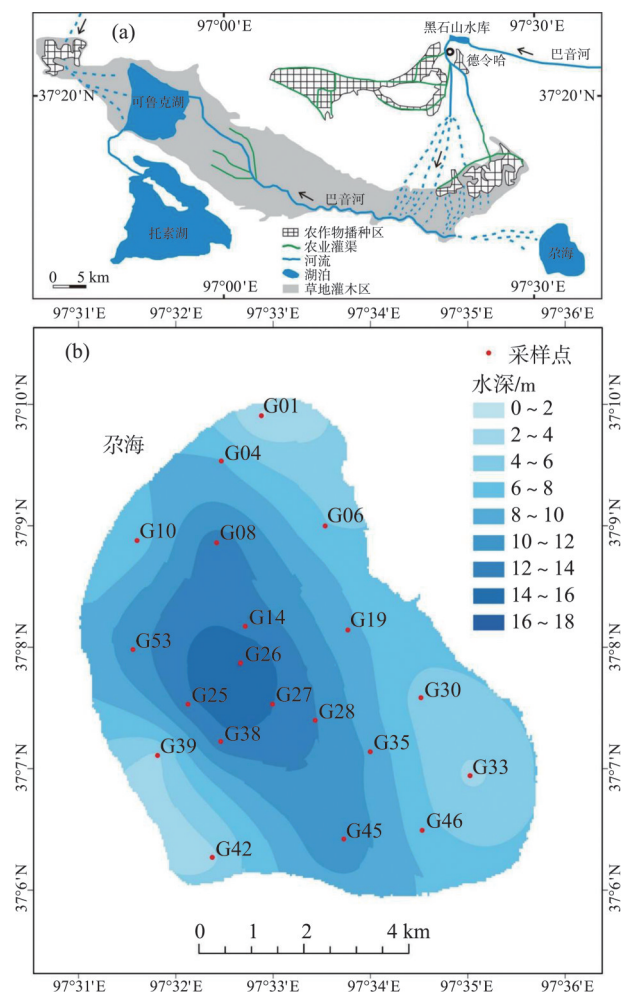


图1 (a) 柴达木盆地巴音河流域及其终端尾间湖的地理位置示意图;(b) 尕斯库勒湖表层沉积物采样点分布示意图,其中等值线是指水体深度

Fig. 1 (a) The location of Bayin River and terminal lakes in Qaidam Basin; (b) The distribution of surface sediment sampling sites in Lake Gahai, the contour line refers to the depth of water body

2.2 分析方法

2.2.1 重金属元素含量测定

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,120℃预消解30 min后进行微波消解。首先是130℃升温5 min,稳定时间3 min;其次是150℃升温3 min,稳定时间10 min;再次是180℃升温

3 min, 稳定时间 30 min。待冷却至 60 °C, 转移至 25 mL 比色管中使用去离子水定容至 25 mL, 最后利用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS, 仪器型号: Agilent7900)测定重金属元素 Cd、Cr、Cu、Pb、Zn 含量。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%。表层沉积物中的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^[31]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。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。

Tessier 连续提取法简要如下: 分别以氯化镁、醋酸钠、盐酸羟胺、醋酸、过氧化氢为提取剂提取离子交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态、有机结合态, 制备各形态分析液。取适量提取上述各形态后的残渣, 用盐酸、硝酸、高氯酸、氢氟酸处理后制备残留态分析液。Tessier 连续提取法的具体实验步骤详见参考文献^[32]。最后, 利用 ICP-MS 测定重金属元素 Cd、Cr、Cu、Pb、Zn 含量。

2.3 评价方法与标准

2.3.1 风险评估编码法

在风险评估编码法(RAC)中, 重金属元素的离子交换态和碳酸盐结合态可作为有效部分, 通过计算其与重金属元素各形态含量总和的比值来进行风险水平评价。然而, 此种评价方法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含量及其毒性效应, 计算公式如下:

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

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。此外, 根据 RAC 值可以将重金属元素风险水平划分为 5 个等级^[33]。

2.3.2 次生相与原生相分布比值法

此种方法考虑了沉积物中重金属元素不同赋存形态的迁移能力、生态风险和生物毒性差异, 侧重于

评价重金属污染物释放的可能性。其中, 次生相是指除残渣态以外的其他形态, 原生相是指残渣态。RSP 值越大, 表明外源重金属元素的富集程度就越强, 计算公式如下:

$$RSP = \frac{F1 + F2 + F3 + F4}{F5} \quad (2)$$

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, 根据 RSP 值可以将污染程度划分为 4 个等级^[34]。

3 结果与讨论

3.1 重金属元素的空间分布特征

由图 2 可知, 尕海湖泊表层沉积物中的重金属元素 Pb、Zn、Cu、Cd 和 Cr 含量分别在 9.63 ~ 48.12 mg/kg、45.45 ~ 170.12 mg/kg、11.35 ~ 52.25 mg/kg、0.19 ~ 0.48 mg/kg 和 38.41 ~ 125.56 mg/kg 之间变化, 其平均含量分别为 35.30 mg/kg、146.15 mg/kg、44.68 mg/kg、0.35 mg/kg 和 103.47 mg/kg, 因此各重金属元素含量从大到小依次为: Zn > Cr > Cu > Pb > Cd。需要指出的是, 在采样点 14[#]、26[#]、30[#]、38[#]、46[#]和 53[#]处, 5 种重金属元素含量几乎同步出现峰值, 由此可以认为湖区中部和东南部为重金属元素 Pb、Zn、Cu、Cd 和 Cr 的一个沉降富集地带。在采样点 01[#]处, 5 种重金属元素含量同步出现低值, 由此可以认为湖区北部为重金属元素 Pb、Zn、Cu、Cd 和 Cr 的一个相对贫乏地带。因此, 尕海湖泊表层沉积物中的重金属元素 Pb、Zn、Cu、Cd 和 Cr 含量在空间上呈现不均匀分布特征。

需要强调的是, 背景值的选取会直接影响对重金属元素污染程度的判断和评价, 区域土壤或地壳中金属元素含量常被作为背景值^[19,20]。尕海表层沉积物中重金属元素 Pb、Zn、Cu、Cd 和 Cr 的背景值采用青海省表层土壤元素背景值^[35], 从 5 种重金属元素含量平均值与背景值及富集系数^[36]对比分析可知, Pb、Zn、Cu、Cd 和 Cr 的平均含量值远高于背景值, 富集系数分别为 1.69、1.82、2.01、2.50 和 1.48。由表 1 可知, Pb、Zn、Cu、Cd 和 Cr 平均含量值已经超过中国土壤背景值。由此可以推断出, 尕海湖泊表层底泥的质量已经开始出现退化或恶化, 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

从图 3 可以看出, 重金属元素 Pb 主要以残渣态

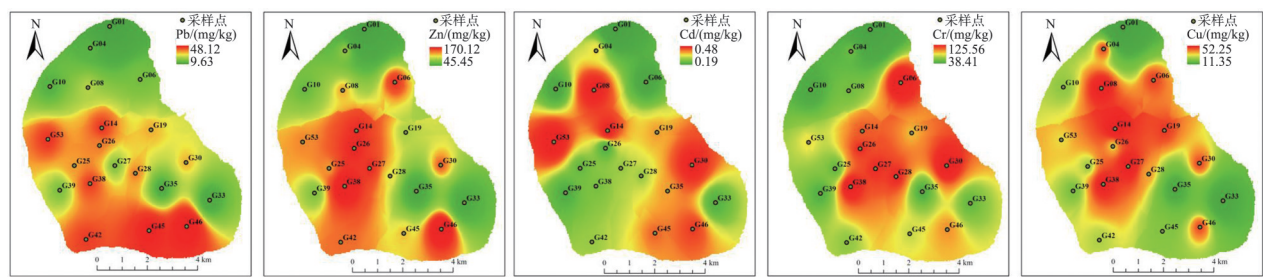


图2 尕海湖泊表层沉积物中的重金属元素Pb、Zn、Cd、Cr和Cu含量空间分布图

Fig. 2 Spatial distribution characteristics of heavy metal Pb, Zn, Cd, Cr and Cu contents from the surface sediments in Lake Gahai

表1 尕海湖泊表层沉积物中重金属元素Pb、Zn、Cu、Cd和Cr的平均含量和富集系数

Table 1 The mean contents and enrichment factors of heavy metal Pb, Zn, Cu, Cd and Cr from surface sediments in Lake Gahai

重金属元素	平均值/(mg·kg ⁻¹)	富集系数	青海省表层土壤 背景值/(mg·kg ⁻¹)	中国土壤 背景值/(mg·g ⁻¹)	农用地土壤污染风险筛选值/(mg·kg ⁻¹) GB 15618-2018(pH > 7.5)
Pb	35.30	1.69	20.90	26.00	170.00
Zn	146.15	1.82	80.30	74.20	300.00
Cu	44.68	2.01	22.20	22.60	100.00
Cd	0.35	2.50	0.14	0.10	0.60
Cr	103.47	1.48	70.10	61.00	250.00

和铁锰氧化物结合态为优势形态,其平均含量分别为 18.19 mg/kg 和 15.17 mg/kg, 分别占其总量的 51.54% 和 42.96%;离子交换态、碳酸盐结合态和有机结合态 Pb 平均含量分别为 0.03 mg/kg、0.02 mg/kg 和 1.89 mg/kg, 分别占其总量的 0.09%、0.05% 和 5.36%, 占比相对较低。因此,尕海湖泊表层沉积物中 Pb 元素各形态组分占比依次为残渣态>铁锰氧化物结合态>有机结合态>离子交换态>碳酸盐结合态。

重金属元素 Zn、Cu 和 Cr 主要以残渣态为优势形态,其平均含量分别为 118.35 mg/kg、32.62 mg/kg 和 95.21 mg/kg, 分别占其总量的 80.98%、73.00% 和 92.02%;离子交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态和有机结合态 Zn、Cu 和 Cr 平均含量分别为 0.78 mg/kg、0.38 mg/kg、18.32 mg/kg、8.33 mg/kg, 0.75 mg/kg、0.15 mg/kg、5.44 mg/kg、5.72 mg/kg 以及 0.10 mg/kg、0.05 mg/kg、3.99 mg/kg、4.12 mg/kg, 分别占其总量的 0.53%、0.26%、12.53%、5.70%、1.68%、0.34%、12.18%、12.80% 以及 0.09%、0.05%、3.86%、3.98%, 占比相对较低。由此可见,尕海湖泊表层沉积物中 Zn 元素各形态组分占比依次为残渣态>铁锰氧化物结合态>有机结合态>离子交换态>碳酸盐结合态;Cu 元素各形态组分占比依次为残渣态>有机结合态>铁锰氧化物结合态>离子交换态>碳酸盐结合态;Cr 元素各形态组分占比依次为残渣态>有机结合态>铁锰氧化物结合态>离子交换态>碳酸盐结合态。

重金属元素 Cd 主要以铁锰氧化物结合态为优势形态,其平均含量为 206.47 μg/kg, 占其总量的

58.99%;离子交换态、碳酸盐结合态、有机结合态和残渣态 Cd 平均含量分别为 12.44 μg/kg、1.73 μg/kg、74.48 μg/kg 和 54.88 μg/kg, 分别占其总量的 3.55%、0.50%、21.28% 和 15.68%, 占比相对较低。因此,尕海湖泊表层沉积物中 Cd 元素各形态组分占比依次为铁锰氧化物结合态>有机结合态>残渣态>离子交换态>碳酸盐结合态。

由此可以看出,重金属元素 Pb、Zn、Cu 和 Cr 主要以残渣态为优势形态,Cd 主要以铁锰氧化物结合态为优势形态;而劣势形态全部为碳酸盐结合态和离子交换态(图 3)。然而,我们通过对比分析同一流

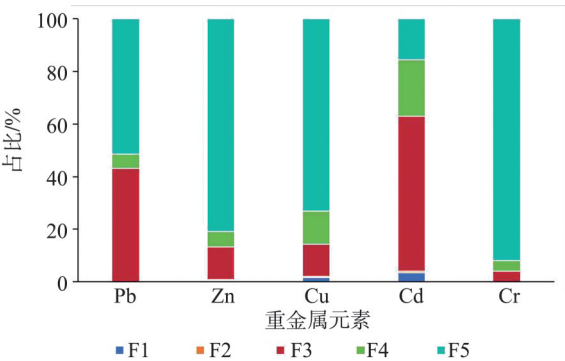


图3 尕海湖泊表层沉积物中重金属元素Pb、Zn、Cu、Cd和Cr不同赋存形态的占比示意图,其中F1为离子交换态,F2为碳酸盐结合态,F3为铁锰氧化物结合态,F4为有机结合态以及F5为残渣态

Fig. 3 Proportion plots of the different occurrence form of heavy metal Pb, Zn, Cu, Cd and Cr from the surface sediments in Lake Gahai, F1, F2, F3, F4 and F5 represents the ion exchange state, carbonate bound state, iron manganese oxide bound state, organic bound state and residual state, respectively

域内可鲁克湖、托素湖表层沉积物中重金属元素的形态组分发现,上述3个不同湖泊中重金属元素Pb、Zn、Cu、Cd和Cr的优势形态和劣势形态存在着较大差异,这也表明湖泊沉积物中重金属元素的形态组分具有局域性特征。

3.3 重金属元素的生物有效性评价

我们对尕斯库勒湖20个表层沉积物样品中Pb、Zn、Cu、Cd和Cr元素的RAC值和RSP值进行了统计和评价。由表2和表3可见,尕斯库勒湖表层沉积物中重金属元素RAC风险评价的污染程度依次为Cu>Cd>Zn>Pb=Cr,而RSP风险评价的污染程度则是Cd>Pb>Cu>Zn=Cr。由此可见,上述两种评价结果存在着一定的差异性,而这种差异性主要在于5种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。潜在活性组分占比越大,RAC值越小,而RSP值就越大。上述5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。90%的Cd元素RSP值>3,并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。除了Cd元素外,其他4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5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,但是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,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含量等等)不同,已有研究发现,湖水pH值和表层底泥TOC含量对重金属元素的化学形态影响差异较大^[37, 38]。这表明多种评价方法相互补充和验证才能获得更为科学合理的结论。

表2 尕斯库勒湖表层沉积物中Pb、Zn、Cu、Cd和Cr元素的RAC值与污染程度评价

Table 2 RAC values and pollution level of Pb, Zn, Cu, Cd and Cr from surface sediments in Lake Gahai

重金属元素	RAC≤1%		1%<RAC≤10%		10%<RAC≤30%		30%<RAC≤50%		RAC>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/%
Pb	20	100	0	0	0	0	0	0	0	0
Zn	13	65	7	35	0	0	0	0	0	0
Cu	1	5	18	90	1	5	0	0	0	0
Cd	1	5	19	95	0	0	0	0	0	0
Cr	20	100	0	0	0	0	0	0	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3 尕斯库勒湖表层沉积物中Pb、Zn、Cu、Cd和Cr元素的RSP值与污染程度评价

Table 3 RSP values and pollution level of Pb, Zn, Cu, Cd and Cr from surface sediments in Lake Gahai

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/%
Pb	12	60	8	40	0	0	0	0
Zn	20	100	0	0	0	0	0	0
Cu	19	95	1	5	0	0	0	0
Cd	0	0	1	5	1	5	18	90
Cr	20	100	0	0	0	0	0	0
污染程度	无		轻度污染		中度污染		重度污染	

3.4 中国典型湖泊表层沉积物中的重金属元素含量对比

由表4可知,东北平原和山地湖区、东部平原湖区、云贵高原湖区、青藏高原湖区以及内蒙古-新疆湖区内典型湖泊表层沉积物中Pb元素的含量平均值分别在19.09~28.98 mg/kg(ave. 24.83 mg/kg)、16.71~43.70 mg/kg(ave. 32.38 mg/kg)、25.00~89.40 mg/kg(ave. 55.20 mg/kg)、16.32~45.73 mg/kg(ave. 29.68 mg/kg)、13.23~39.57 mg/kg(ave. 22.55 mg/kg)之间变化,因

此各湖区表层沉积物中Pb元素平均含量从大到小依次为:云贵高原湖区>东部平原湖区>青藏高原湖区>东北平原和山地湖区>内蒙古-新疆湖区。

东北平原和山地湖区、东部平原湖区、云贵高原湖区、青藏高原湖区以及内蒙古-新疆湖区内典型湖泊表层沉积物中Zn元素的含量平均值分别在47.17~126.25 mg/kg(ave. 80.75 mg/kg)、44.04~183.00 mg/kg(ave. 112.64 mg/kg)、109.00~195.00 mg/kg(ave. 149.79 mg/kg)、33.35~146.15 mg/kg(ave. 75.24 mg/kg)、

51.09 ~ 114.59 mg/kg(ave. 73.01 mg/kg)之间变化,因此各湖区表层沉积物中 Zn 元素平均含量从大到小依次为:云贵高原湖区 > 东部平原湖区 > 东北平原和山地湖区 > 青藏高原湖区 > 内蒙古-新疆湖区。

东北平原和山地湖区、东部平原湖区、云贵高原湖区、青藏高原湖区以及内蒙古-新疆湖区内典型湖泊表层沉积物中 Cu 元素的含量平均值分别在 11.80 ~ 32.45 mg/kg (ave. 24.32 mg/kg)、24.11 ~ 45.00 mg/kg (ave. 33.00 mg/kg)、58.50 ~ 109.00 mg/kg(ave. 80.09 mg/kg)、5.78 ~ 44.68 mg/kg (ave. 25.31 mg/kg)、10.60 ~ 39.89 mg/kg(ave. 25.39 mg/kg)之间变化,因此各湖区表层沉积物中 Cu 元素平均含量从大到小依次为:云贵高原湖区 > 东部平原湖区 > 内蒙古-新疆湖区 > 青藏高原湖区 > 东北平原和山地湖区。

东北平原和山地湖区、东部平原湖区、云贵高原湖区、青藏高原湖区以及内蒙古-新疆湖区内典型湖泊表层沉积物中 Cd 元素的含量平均值分别在 0.13 ~ 0.26 mg/kg(ave. 0.19 mg/kg)、0.14 ~ 2.96 mg/kg(ave. 1.03 mg/kg)、0.41 ~ 8.00 mg/kg (ave. 2.58 mg/kg)、0.00 ~ 0.35 mg/kg(ave. 0.14 mg/kg)、0.08 ~ 0.41 mg/kg (ave. 0.18 mg/kg)之间变化,因此各湖区表层沉积物中 Cd 元素平均含量从大到小依次为:云贵高原湖区 > 东部平原湖区 > 东北平原和山地湖区 > 内蒙古-新疆湖区 > 青藏高原湖区。

东北平原和山地湖区、东部平原湖区、云贵高原湖区、青藏高原湖区以及内蒙古-新疆湖区内典型湖泊表层沉积物中 Cr 元素的含量平均值分别在 57.60 ~ 92.07 mg/kg(ave. 75.19 mg/kg)、27.39 ~ 115.52 mg/kg (ave.73.95mg/kg)、81.70~176.00 mg/kg(ave.111.48mg/kg)、43.13 ~ 103.47 mg/kg (ave. 61.30 mg/kg)、27.30 ~ 51.49 mg/kg(ave. 39.66 mg/kg)之间变化,因此各湖区表层沉积物中 Cr 元素平均含量从大到小依次为:云贵高原湖区 > 东北平原和山地湖区 > 东部平原湖区 > 青藏高原湖区 > 内蒙古-新疆湖区。

由此可见,我国典型湖泊表层沉积物中 Pb、Zn、Cu、Cd 和 Cr 元素含量平均值呈现出一定的区域差异性。整体上来看,云贵高原湖区和东部平原湖区内湖泊表层沉积物中重金属元素 Pb、Zn、Cu、Cd 和 Cr 含量较高,污染程度较为严重;而内蒙古-新疆湖区和青藏高原湖区内表层沉积物中重金属元素 Pb、Zn、Cu、Cd 和 Cr 含量较低,污染程度较轻。然而,重金属元素 Pb、Zn、Cu、Cd 和 Cr 含量平均值的最高值分别出现在星云湖、滇池、泸沽湖和星云湖的湖泊表层沉积物中,青藏高原湖区的尕斯库勒湖和羊卓雍错表层沉积物中重金属元素 Pb、Zn、Cu、Cd 和 Cr 含量平均值也相对较高(表4),这充分说明随着经济的快速发展和工业化、城镇化进程的快速推进以及旅游业的

表4 我国典型湖泊表层沉积物中重金属元素的含量平均值
Table 4 The average content of heavy metal Pb, Zn, Cu, Cd and Cr from the surface sediments of typical lakes in China

地理区域	湖泊名称	Pb	Zn	Cu	Cd	Cr	数据来源
东北平原和山地湖区	镜泊湖	28.98	126.25	32.45	0.26	90.78	[39,40]
	兴凯湖	19.09	47.17	11.80	0.13	60.31	[41]
	查干湖	26.56	66.83	20.73	0.20	57.60	[42]
	五大连池	24.70	82.73	32.28	0.16	92.07	[39,43]
东部平原湖区	巢湖	16.71	44.04	28.62	0.14	27.39	[44]
	太湖	32.27	102.99	33.18	0.45	80.13	[45]
	洪泽湖	27.87	79.07	24.11	0.22	82.00	[46]
	鄱阳湖	43.70	183.00	45.00	1.36	64.70	[47,48]
	洞庭湖	41.33	154.12	34.09	2.96	115.52	[49,50]
	抚仙湖	54.30	132.70	71.60	0.89	104.40	[51,52]
云贵高原湖区	星云湖	89.40	161.20	81.60	8.00	99.90	[51,53]
	滇池	65.70	195.00	84.90	1.07	81.70	[54]
	洱海	47.40	109.00	63.10	1.10	103.80	[55]
	泸沽湖	25.00	120.00	109.00	0.41	176.00	[56,57]
	红枫湖	35.90	141.00	91.90	0.77	88.00	[58]
	草海	68.69	189.66	58.50	5.83	126.53	[59]
青藏高原湖区	青海湖	21.37	68.94	21.65	0.18	43.13	[39,60]
	尕斯库勒湖	35.30	146.15	44.68	0.35	103.47	本研究
	羊卓雍错	45.73	52.53	29.12	0.04	49.09	[61]
	色林错	16.32	33.35	5.78	0.00	49.52	[61]
内蒙古-新疆湖区	呼伦湖	22.34	68.80	23.44	0.41	36.37	[62]
	岱海	20.88	70.77	31.36	0.12	36.74	[63]
	博斯腾湖	16.71	51.09	21.64	0.14	46.40	[39,64]
	乌伦古湖	13.23	59.81	10.60	0.08	27.30	[65]
	艾比湖	39.57	114.59	39.89	0.17	51.49	[66]

崛起,我国西部和西南部偏远高山地区受人类活动的剧烈影响日益凸显。

4 结 论

(1) 研究区内湖泊表层沉积物中重金属元素 Pb、Zn、Cu、Cd 和 Cr 的平均含量值分别为 35.30 mg/kg、146.15 mg/kg、44.68 mg/kg、0.35 mg/kg 和 103.47 mg/kg,富集系数分别为 1.69、1.82、2.01、2.50 和 1.48,已经超过青海省表层土壤背景值和中国土壤背景值,表明上述 5 种重金属元素在尕斯库勒湖区存在一定的累积。此外,尕斯库勒湖区中部和东南部区域为重金属元素的沉降富集地带,而北部区域则为相对贫乏地带,重金属元素在空间上呈现不均匀分布特征。

(2) 重金属元素 Pb、Zn、Cu 和 Cr 主要以残渣态为优势形态,Cd 主要以铁锰氧化物结合态为优势形态;而劣势形态为碳酸盐结合态和离子交换态。湖泊表层沉积物中重金属元素的形态组分具有局域性特征。虽然上述 5 种重金属元素的活性组分占比较小,但是其潜在的生态风险较高,人类活动的加剧对湖泊生态环境的影响日益凸显,尤其是 Cd 元素应引起足够的重视。

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] Zhang F, Yan X D, Zeng C, *et al.* Influence of traffic activity on heavy metal concentrations of roadside farmland soil in mountainous areas [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2012, 9: 1715-1731.
- [3] Wang P, Cao J J, Han Y M, *et al.* Elemental distribution in the topsoil of the Lake Qinghai catchment, NE Tibetan Plateau, and the implications for weathering in semi-arid areas [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2015, 152: 1-9.
- [4] Huang X, Sillanpää M, Duo B, *et al.* Water quality in the Tibetan Plateau: Metal contents of four selected rivers [J]. *Environmental Pollution*, 2008, 156: 270-277.
- [5] Huang X, Sillanpää M, Gjessing E T, *et al.* Water quality in the Tibetan Plateau: Major ions and trace elements in the headwaters of four major Asian rivers [J]. *Science of the Total Environment*, 2009, 407: 6242-6254.
- [6] Huang J, Kang S C, Zhang Q G, *et al.* Wet deposition of mercury at a remote site in the Tibetan Plateau: Concentrations, speciation, and fluxes [J]. *Atmospheric Environment*, 2012, 62: 540-550.
- [7] Cong Z Y, Kang S C, Zhang Y L, *et al.* Atmospheric wet deposition of trace elements to central Tibetan Plateau [J]. *Applied Geochemistry*, 2010, 25: 1415-1421.
- [8] Cong Z Y, Kang S C, Zhang Y L, *et al.* New insights into trace element wet deposition in the Himalayas: amounts, seasonal patterns, and implications [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22: 2735-2744.
- [9] Bing H J, Wu Y H, Zhou J, *et al.* Atmospheric deposition of lead in remote high mountain of eastern Tibetan Plateau, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, 99: 425-435.
- [10] Zhang H, Shan B Q, Ao L, *et al.* Past atmospheric trace metal deposition in a remote lake (Lake Ngoring) at the headwater areas of Yellow River, Tibetan Plateau [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 72: 399-406.
- [11] Li C D, Zhang Q G, Kang S C, *et al.* Distribution and enrichment of mercury in Tibetan lake waters and their relations with the natural environment [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22: 12490-12500.
- [12] Falandysz J, Saba M, Liu H G, *et al.* Mercury in forest mushrooms and topsoil from the Yunnan highlands and the subalpine region of the Minya Konka summit in the Eastern Tibetan Plateau [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23: 23730-23741.
- [13] Wu J, Duan D P, Lu J, *et al.* Inorganic pollution around the Qinghai-Tibet Plateau: an overview of the current observations [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 550: 628-636.
- [14] Wu J, Lu J, Luo Y M, *et al.* An overview on the organic pollution around the Qinghai-Tibet plateau: The thought-provoking situation [J]. *Environment International*, 2016, 97: 264-272.
- [15] Wei T, Dong Z W, Kang S C, *et al.* Atmospheric deposition and contamination of trace elements in snowpacks of mountain glaciers in the northeastern Tibetan Plateau [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 689: 754-764.
- [16] Gabrielli P, Wegner A, Sierra-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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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-Xizang Plateau, China [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2024, 182: 703-718.
- [20] Cheng A Y, Zuo Y P, Gao C L, *et al.* Potentially toxic elements of lake and wetland in Northeastern Qinghai-Xizang Plateau: Distribution, potential sources and risk assessment [J]. *Ecological Indicators*, 2024, 166: 112427.
- [21] 曹广超, 马海州, 陈忠, 等. 尕斯库勒湖 DG03 孔元素地球化学特征及其环境意义 [J]. *盐湖研究*, 2008, 16(2): 13-18.
- [22] Zhao Y, Yu Z C, Chen F H, *et al.* Sensitive response of desert

- vegetation to moisture change based on a near-annual resolution pollen record from Gahai Lake in the Qaidam Basin, northwest China[J]. *Global and Planetary Change*, 2008, 62: 107-114.
- [23] 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: 819-827.
- [24] Li X Z, Liu W G, Xu L M. Stable oxygen isotope of ostracods in recent sediments of Lake Gahai in the Qaidam Basin, northwest China: The implications for paleoclimatic reconstruction[J]. *Global and Planetary Change*, 2012, 94-95: 13-19.
- [25] He Y X, Zheng Y W, Pan A D, *et al.* Biomarker-based reconstructions of Holocene lake-level changes at Lake Gahai on the northeastern Tibetan Plateau[J]. *The Holocene*, 2014, 24: 405-412.
- [26] 陈豆, 马雪洋, 张玉枝, 等. 柴达木盆地东部尕斯库勒湖短钻岩芯记录过去近400 a区域环境变化[J]. *湖泊科学*, 2015, 27(4): 735-744.
- [27] Zhou S, Zhang J W, Cheng B, *et al.* Holocene pollen record from Lake Gahai, NE Tibetan Plateau and its implications for quantitative reconstruction of regional precipitation[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2024, 326: 108504.
- [28] 陈忠, 马海州, 曹广超, 等. 柴达木盆地尕斯库勒湖冰消期晚期以来的气候环境演变[J]. *地球化学*, 2007, 36(6): 633-637.
- [29] 郭小燕. 季风边缘区尕斯库勒湖记录的全新世气候变化[D]. 兰州: 兰州大学, 2012.
- [30] 曹广超. 柴达木盆地尕斯库勒湖芯DG03孔记录的古环境变化研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2008.
- [31] 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.
- [32] 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]. 北京: 中国科学院大学, 2020.
- [33] 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.
- [34] 邓凯文, 安永龙, 黄勇. 金矿区周边桃园地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.
- [35] 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.
- [36] 杨丽原, 沈吉, 张祖陆, 等. 南四湖表层底泥重金属污染及其风险性评价[J]. *湖泊科学*, 2003, 15(3): 252-256.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] Guo W, Huo S L, Xi B D, *et al.* Heavy metal contamination in sediments from typical lakes in the five geographic regions of China: distribution, bioavailability, and risk[J]. *Ecological Engineering*, 2015, 81: 243-255.
- [40] 王晓君, 刘玉青, 余中盛. 镜泊湖沉积物中重金属的研究[J]. *环境科学丛刊*, 1990, 11(1): 46-51.
- [41] Jiang M Y, Wang Q C, Tian X, *et al.* Spatiotemporal variation and ecological risk assessment of sediment heavy metals in two hydrologically connected lakes[J]. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2022, 10: 1005194.
- [42] Liu P F, Zheng C J, Wen M L, *et al.* Ecological risk assessment and contamination history of heavy metals in the sediments of Chagan Lake, northeast China[J]. *Water*, 2021, 13: 894.
- [43] 曾颖, 杨臣, 李月兴, 等. 五大连池火山堰塞湖表层沉积物中重金属的分布特征及生态风险评价[J]. *黑龙江科学*, 2017, 8(21): 13-15.
- [44] Hu C L, Hu T, Liang L. Spatial variation and potential ecological risk assessment of trace elements in the sediments of Chaohu Lake in China[J]. *Journal of freshwater ecology*, 2024, 39: 2294129.
- [45] 陈珏, 支鸣强, 朱德龙, 等. 太湖沉积物营养物及重金属污染分布特征及风险评估[J]. *中国环境科学*, 2024, 44(3): 1457-1465.
- [46] Wei J H, Hu K Y, Xu J Q, *et al.* Determining heavy metal pollution in sediments from the largest impounded lake in the eastern route of China's South-to-North Water Diversion Project: Ecological risks, sources, and implications for lake management[J]. *Environmental Research*, 2022, 214: 114118.
- [47] Wang M L, Zhou W T, Liu H L. Pollution characteristics, risk assessment and source identification of heavy metals in surface sediments from the cage fish farm of Poyang Lake, China[J]. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 2024, 1-13.
- [48] 刘佳伟, 杨明生. 鄱阳湖流域重金属污染评价与分析[J]. *环境污染与防治*, 2022 44(1): 99-103.
- [49] Yin X Y, Yan G H, Wang X, *et al.* Trends and risk assessment of heavy metals in the surface sediments of river-connected lakes: A case study of Dongting Lake[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2024, 209: 117181.
- [50] Yuan Y, Liu B L, Liu H. Spatial distribution and source identification for heavy metals in surface sediments of East Dongting Lake, China[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12: 7940.
- [51] Wang X L, Jiang Q F, Zhao Z H, *et al.* Comparison of spatiotemporal burial and contamination of heavy metals in core sediments of two plateau lakes with contrasting environments: Implication for anthropogenic-driven processes[J]. *Environmental Monitoring Assessment*, 2023, 195: 1178.
- [52] 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.
- [53] 夏建东, 朱韻洁, 高亚萍, 等. 基于双模型的星云湖沉积物重金属溯源及风险评价[J]. *环境科学研究*, 2020, 33(9): 2103-2109.
- [54] Li X L, Liu E F, Zhang E L, *et al.* Spatio-temporal variations of sedimentary metals in a large suburban lake in southwest China and the implications for anthropogenic processes[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 707: 135650.
- [55] Lin Q, Liu E F, Zhang E L, *et al.* Spatial distribution, contamination and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments of Erhai Lake, a large eutrophic plateau lake in southwest China[J]. *Catena*, 2016, 145: 193-203.
- [56] Liu Y, Chen C H, Yang S. Assessment of anthropogenic impact versus climate change on the succession of the diatom community in Lugu Lake (Yunnan-Guizhou Plateau, China) using the sedimentary record of geochemical elements[J]. *Water*, 2019, 11: 655.
- [57] Lin Q, Liu E F, Zhang E L, *et al.* Reconstruction of atmospheric trace metals pollution in Southwest China using sediments from

- a large and deep alpine lake: Historical trends, sources and sediment focusing [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2018, 613-614: 331-341.
- [58] Hu J W, Liu F, Huang X F, *et al.* Potential ecological risk assessment of heavy metals in sediments from Hongfeng Lake, China [J]. *Advanced Materials Research*, 2010, 113-116: 1591-1596.
- [59] Lin S X, Liu X L, Zhang Z L, *et al.* Speciation characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in sediments from Caohai Lake, Guizhou Province [J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2022, 36: 3929-3944.
- [60] 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.
- [61] 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.
- [62] Liu T, Zhang D S, Yue W F, *et al.* Heavy metals in sediments of Hulun Lake in Inner Mongolia: Spatial-temporal distributions, contamination assessment and source apportionment [J]. *Water*, 2023, 15: 1329.
- [63] 赵巍峰, 赵茜宇, 张艺, 等. 岱海沉积物污染特征及生态风险评估 [J]. *内蒙古石油化工*, 2021, 47(11): 74-82+121.
- [64] 刘文, 吉力力·阿不都外力, 马龙. 博斯腾湖表层沉积物元素地球化学特征及重金属污染评价 [J]. *地球环境学报*, 2019, 10(2): 128-140.
- [65] Liu F Y, He S H, Tong Y B, *et al.* Pollution characteristics and risk assessment of heavy metals in the water and surface sediments of Wulungu Lake, Xinjiang China [J]. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 2022, 32: 85-104.
- [66] Abuduwaili J, Zhang Z Y, Jiang F Q. Assessment of the distribution, sources and potential ecological risk of heavy metals in the dry surface sediment of Aibi Lake in northwest China [J]. *PLoS ONE*, 2015, 10(3): e0120001.

Study on the Occurrence Characteristics and Bioavailability of Heavy Metals from the Surface Sediments in Lake Gahai

GAO Chunliang^{1,2}, WEN Jinxin^{1,2,3}, CHENG Aiying^{1,2}, LI Hongyu^{1,2,3},
WEI Haicheng^{1,2}, MIN Xiuyun¹, 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: In order to identify the occurrence form characteristics and bioavailability of Pb, Zn, Cu, Cd and Cr from surface sediments in inland enclosed lakes, we collected and selected 20 surface sediment samples from Lake Gahai in Qaidam Basin as the study object. Based on the Tessier continuous extraction as well as ICP-MS methods, the occurrence forms of Pb, Zn, Cu, Cd and Cr were determined, and the bioavailability of heavy metals mentioned-above was evaluated by RAC and RSP methods. The results showed that the average content of Pb, Zn, Cu, Cd and Cr were 35.30 mg/kg, 146.15 mg/kg, 44.68 mg/kg, 0.35 mg/kg and 103.47 mg/kg, respectively. The enrichment coefficients were 1.69, 1.82, 2.01, 2.50 and 1.48, respectively, showing an uneven spatial distribution characteristics. Elements Pb, Zn, Cu and Cr were predominantly presented in the residual fraction, accounting for 51.54%, 80.98%, 73.00% and 92.02% of the total amounts, respectively. Cd was predominantly presented in the Fe-Mn oxide fraction, accounting for 58.99% of its total amount. The disadvantaged forms of Pb, Zn, Cu, Cd and Cr were carbonate and ion exchanged fractions, accounting for 0.05% and 0.09%, 0.26% and 0.53%, 0.34% and 1.68%, 0.50% and 3.55%, 0.05% and 0.09% of the total amounts, respectively. The RAC risk assessment results suggested Cu > Cd > Zn > Pb = Cr, while the RSP risk assessment results indicated Cd > Pb > Cu > Zn = Cr. The bioavailability of Pb, Zn, Cu and Cr was relatively low, while the bioavailability of Cd was relatively high. Although the proportion of active components was relatively small, the potential ecological risks were high, especially Cd.

Key words: Surface sediments; Heavy metal elements; Occurrence form; Bioavailability; Lake Gahai; Qaidam Basin