

大柴旦盐湖表层底泥重金属污染及其风险性评价

高春亮^{1,2}, 余俊清^{1,2}, 闵秀云¹, 王德荣¹, 成艾颖^{1,2}, 张丽莎^{1,2}

(1. 中国科学院青海盐湖研究所, 中国科学院盐湖资源综合高效利用重点实验室, 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)

摘要:通过对大柴旦湖区东南部表层底泥中的重金属(Cr、Cu、Pb、Zn、As、Co、Ni 和 Mn)研究分析,揭示出湖区不同地带的重金属污染物在空间分布上呈现不均匀特征。基于富集因子法(EF)、地质积累指数法(I_{geo})以及潜在生态风险指数法(RI)对大柴旦盐湖底泥中的重金属污染程度进行了量化评定。研究表明,大柴旦湖区东南部表层底泥中的重金属元素的平均富集程度依次为 $EF(As) > EF(Mn) > EF(Cu) > EF(Zn) > EF(Pb) > EF(Cr) > EF(Ni) > EF(Co)$;表层底泥中重金属污染主要以砷为主,为湖区生态风险指数增高的主要因子。综合来看,大柴旦湖区东南部表层底泥中的重金属污染程度整体上处于轻微状态,但随着周边地区人类活动的加剧,人为自然排放将成为大柴旦湖区表层底泥中重金属的主要物质来源,需要加以重视。

关键词:大柴旦盐湖;表层底泥;重金属污染;富集因子法;地质积累指数;潜在生态风险指数

中图分类号:P343.3;X524

文献标识码:A

文章编号:1008-858X(2020)01-0096-09

湖泊作为流域侵蚀物质的主要蓄积场所,汇集了大量重金属污染物,绝大多数进入湖泊后被水体中的悬浮颗粒吸附,并最终沉降于湖泊表层底泥中^[1]。长期富集于沉积物中的重金属很难被生物体降解,达到一定浓度就会产生毒理效应,从而对湖泊生态环境构成威胁^[2]。同时,重金属作为典型的潜在生态风险污染物,当外界条件适宜时,累积于沉积物中的重金属又会被重新释放到上覆水体中,从而对水体造成“二次污染”^[3-4]。需要指出的是,沉积物中重金属浓度分布具有明显的规律性,因此可以把底泥视为水环境中重金属污染程度的“指示剂”^[5],使得基于湖泊底泥评价人类活动对环境产生的影响成为可能。

大柴旦盐湖在柴达木盆地中以蕴藏硼矿资源而闻名,相关研究工作主要针对各类硼矿体的分

布特征、物质来源以及形成机理等^[6-9]。针对大柴旦盐湖表层底泥重金属含量变化及其风险性评价,以及与人类活动关系的相关研究工作几乎没有开展,尚未见到任何有关的工作进展和成果报道。为了对大柴旦盐湖常年水体底部表层底泥中重金属含量变化开展较为详尽的研究,2015年以来笔者在大柴旦盐湖多次考察和取样,并开展了相关的研究工作。本文拟报道位于该盐湖东南部表层底泥重金属浓度的测定结果,旨在阐明该湖区重金属污染物的分布特征及其物质来源,并区分其中的人为污染组分。最后基于富集因子法(EF)、地质积累指数法(I_{geo})和潜在生态风险指数法(RI)对其重金属污染程度进行量化评定,以期当地相关环境保护政策和法规的制定提供参考数据资料。

收稿日期:2018-06-18;修回日期:2018-09-10

基金项目:国家自然科学基金项目(41501052, U1407206, 41471013);青海省自然科学基金项目(2016-ZJ-736)

作者简介:高春亮(1983-),男,博士,副研究员,主要研究方向为湖泊沉积与环境变化。Email: chunlianggao@isl.ac.cn; gaochunliang2007@163.com。

通信作者:余俊清(1954-),男,博士,研究员,博导,主要从事地球化学、第四纪地质、湖泊沉积与环境变化研究。Email: junqyu@isl.ac.cn。

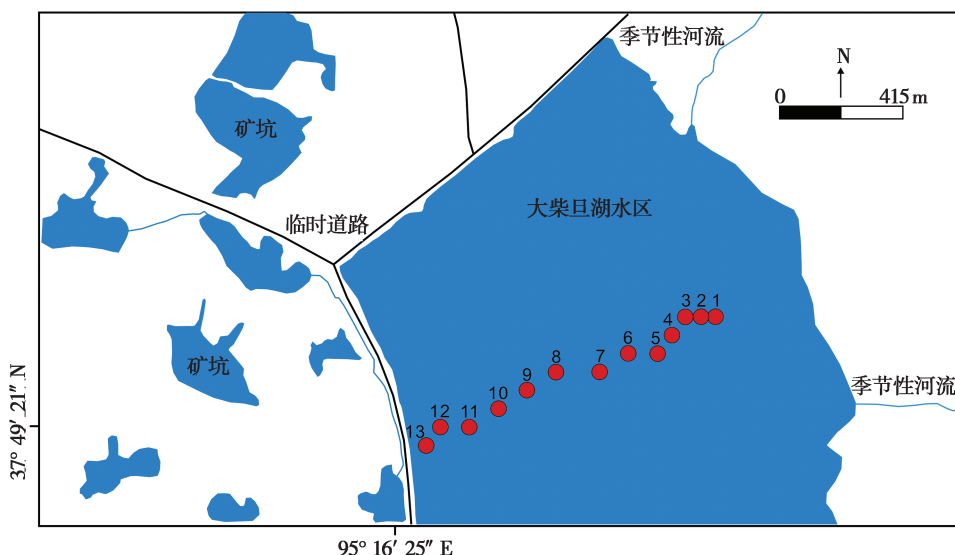


图1 大柴旦湖区东南部表层底泥采样点示意图

Fig. 1 The sampling sites of surface sediment in the southeastern Da Qaidam Salt Lake

1 材料与方法

1.1 样品采集

首先,采样点位于大柴旦湖区东南部,选择在2条季节性河流的中间位置,采样点1#距两侧河流入湖口的空间距离控制在500 m左右。其次,采样点远离污染源,现场调研未发现湖区附近存有固定污染源。此外,靠近河流入湖口处采样点间距较小,平均间距在50 m左右,在远离河流入湖口处间距较大,平均间距在100 m左右。表层底泥样品利用HY. ETC-200型污泥采样器采集,具体采样点分布如图1所示。现场采集表层底泥样品13个,厚度为1~3 cm。采集的样品封装带回实验室后保存在4℃的冷藏室中备用。

1.2 实验分析

本文采用荷兰帕纳科公司Axios型X射线荧光光谱仪对沉积物样品的元素含量进行分析测试,各常量元素分析误差小于5%。本次测试选用GBW07301~GBW07314等14个水系沉积物成分分析标准物质,GBW07401~GBW07408和GBW07423~GBW074230等16个土壤成分标准物质作为标准参考物质,利用仪器测量的各元素的荧光强度与标准物质的元素标准值(其标准值可从国

家标准物质证书上查询)建立标准工作曲线。

采用粉末压片法制备样品。将沉积物样品置于105℃的烘箱中烘2 h,用玛瑙研钵研磨过200目筛;分别称取样品4.00 g(精确到0.01 g),装入模具摊平,用硼酸垫底镶边,在30 t压力下保压1 min;制成试样直径为32 mm和镶边外径为40 mm的圆片。样品制备完成后,贴标签,保存在干燥器中待测。标准样品和被测样品采用相同的制样方法。X射线荧光光谱的分析测试工作在中国科学院青海盐湖研究所分析测试中心完成。

1.3 重金属污染与生态风险评价方法

为能够定量评价大柴旦盐湖表层底泥中重金属污染程度和潜在生态危害性,本研究采用富集因子法(EF)、地质积累指数法(I_{geo})以及潜在生态风险指数法(RI)三种评价方法进行大柴旦盐湖表层底泥中重金属综合污染评价。

1) 富集因子法

基于Ergin等人^[10]提出的富集因子法(EF),计算公式如下:

$$EF = \frac{\left(\frac{Me}{Al}\right)_{\text{样品}}}{\left(\frac{Me}{Al}\right)_{\text{背景}}} \quad (1)$$

式中, $(Me/Al)_{\text{样品}}$ 为表层底泥样品中被测元素与铝元素(Al)的比值; $(Me/Al)_{\text{背景}}$ 为元素地球化学背景值与铝元素(Al)的比值。

2)地质积累指数法

地质积累指数(I_{geo})最早由德国学者 Müller 提出,是利用重金属实测浓度值和背景值的关系确定重金属污染程度的参数^[11],计算公式如下:

$$I_{geo} = \text{Log}_2\left(\frac{C_n}{1.5B_n}\right) \tag{2}$$

式中, C_n 为表层底泥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者区域背景值;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。

3)潜在生态风险指数法

潜在生态风险指数法(RI)是由瑞典科学家 Håkanson^[12]提出,计算方法如下:

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \times C_f^i = \sum_{i=1}^n T_r^i C_d^i / C_n^i \tag{3}$$

式中, RI 为潜在生态风险指数; E_r^i 为重金属 i 的潜在生态风险指数; T_r^i 为重金属 i 的毒性响应系数,Cr、Cu、Pb、Zn 和 As 的毒性响应系数分别为 2、5、5、1 和 10^[13]; C_f^i 为重金属 i 的污染系数; C_d^i 为表层底泥中重金属 i 的实测值; C_n^i 为相应重金属 i 的背景参考值。需要特别指出的是,本研究所选取的重金属元素(Cr、Cu、Pb、Zn 和 As)少于 Håkanson 提出的 8 种,故需要对所测的重金属的 E_r^i 和 RI 值进行调整。

根据 Håkanson 提出的方法,结合大柴旦湖区表层底泥中重金属污染物的种类和数量,以及参考其他学者的研究结果^[5],重新定义后的 5 种重金属元素 E_r^i 、 RI 值以及 I_{geo} 污染强度分级标准见表 1。

表 1 E_r^i 、 RI 、 I_{geo} 的阈值区间以及污染强度分级标准

Table 1 The threshold values and classification criteria of E_r^i , RI and I_{geo}

E_r^i	单因子污染物 生态风险程度	RI	潜在生态风险程度	I_{geo}	污染程度
				≤0	无污染
<30	轻度生态污染	<40	无污染	0~1	轻度污染
30~60	中度生态污染	40~120	轻度污染	1~2	偏中度污染
60~120	偏重生态污染	120~240	中度污染	2~3	中度污染
120~240	重度生态污染	240~400	重度污染	3~4	偏重污染
≥240	严重生态污染	≥400	严重污染	4~5	重度污染
				>5	严重污染

2 结果与讨论

2.1 重金属元素分布特征与人类扰动

大柴旦湖区东南部表层底泥中重金属(Cr、Cu、Pb、Zn、As、Co、Ni 和 Mn)的浓度和空间分布特征如图 2 所示。重金属 Cr、Cu、Pb 和 Zn 的浓度变化规律较为相似,从湖岸边往里整体上呈现逐渐降低的变化趋势。需要指出的是,在取样点 11[#]处,Cr、Cu、Pb 和 Zn 的浓度同步出现峰值,可以认为该区域为此 4 种重金属元素的一个沉降富集中心。As 浓度变化规律较为独特,从湖岸边往里呈现先降后升再降的变化趋势。Co、Ni 和 Mn 的浓度变化规律较为相似,从湖岸边往里整体呈现逐渐上升的变化趋势。由此可以看出,大柴旦

湖区表层底泥中的重金属浓度在空间分布上呈现不均匀特征。

在本研究中,重金属元素背景值采用大柴旦湖底沉积剖面 DCD03 底部土黄色泥质沉积物的地球化学基础资料,从湖区东南部表层底泥中重金属浓度的平均值与背景值的对比,以及富集系数(重金属实测值与背景值比值)可以看出,除了元素 Co,其它重金属 Cr、Cu、Pb、Zn、As、Ni 和 Mn 的平均浓度值高于背景值(表 2)。此外,Mn 平均浓度最高,达到 675.12 mg·kg⁻¹,富集系数为 1.38;其它重金属平均浓度依次为 Zn>Cr>Ni>Cu>Pb>As>Co。可以看出,大柴旦湖区东南部表层底泥的质量已经开始出现退化或恶化;但表层底泥中所有 8 种重金属浓度均没有超过国家环境土壤质量标准值(GB15618-2009)。

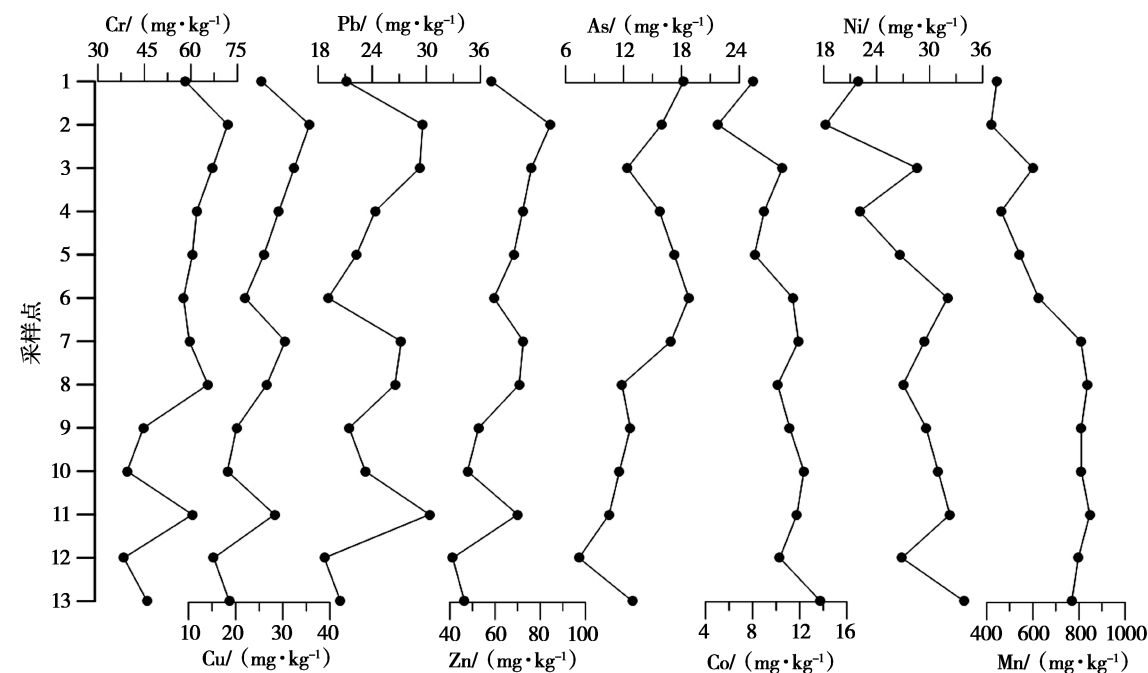


图 2 大柴旦湖区表层底泥中重金属浓度空间分布图

Fig. 2 The distributions of heavy metal concentration from surface sediments in Da Qaidam Salt Lake

表 2 大柴旦湖区东南部表层底泥中重金属的平均浓度和富集系数

Table 2 The mean concentrations and enrichment factors of heavy metal

from surface sediments in the southeastern Da Qaidam Salt Lake

mg/kg

重金属元素	平均值	富集系数	元素背景值	国家环境土壤质量标准值 GB15618-2009 (pH>7.5)
Cr	56.22	1.19	47.17	250~350
Cu	25.29	1.27	19.87	100~200
Pb	24.13	1.19	20.36	600
Zn	63.09	1.26	50.15	300
As	14.01	2.06	6.79	20
Co	10.27	0.80	12.87	40
Ni	27.64	1.11	24.99	90
Mn	675.12	1.38	490.80	—

需要指出的是,背景值的选取直接影响到重金属污染程度的判别^[14],区域土壤或者地壳中金属元素含量常被作为背景值^[15],但由于基岩与土壤类型的差异,湖泊等较小的水体单元沉积物重金属背景与区域土壤或者地壳中金属元素含量可能明显不同。因此,湖泊沉积物重金属污染评价采用历史沉积物作为背景更为合适^[16]。为了进一步降低空间异质性对金属污染评价的影响,本研究采用大柴旦湖底沉积剖面 DCD03 底部土黄

色泥质沉积物中重金属元素测试值作为背景值。此外,本研究采用富集因子法(EF)作为评价人类活动对表层沉积物中重金属的贡献,并选取 Al 元素作为表层底泥中重金属浓度的校正元素;选取的重金属(Cr、Cu、Pb、Zn、As、Co、Ni 和 Mn)背景值见表 2,Al 元素背景值为 $66970.59\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。需要说明的是,这种评价标准是基于 EF 值的大小。若 EF 值在 $0.5\sim1.5$ 之间(即 $0.5\leq EF\leq 1.5$),说明微量金属元素可能全部来自地壳物质

或者自然风化过程^[17]。然而,若 EF 值大于 1.5, 指示很大一部分微量金属元素来自于非地壳物质或者非自然风化过程,说明这部分微量金属元素由其它物质来源提供,譬如点源污染、非点源污染以及生物区系^[17-18]。

由图 3 可以看出, $EF(\text{Cr})$ 值在 0.96 ~ 1.17 之间, $EF(\text{Cu})$ 值在 0.97 ~ 1.33 之间, $EF(\text{Pb})$ 值在 0.83 ~ 1.45 之间, $EF(\text{Zn})$ 值在 1.02 ~ 1.25 之间, $EF(\text{As})$ 值在 1.23 ~ 2.43 之间, $EF(\text{Co})$ 值在 0.29 ~ 1.29 之间, $EF(\text{Ni})$ 值在 0.54 ~ 1.63 之间,以及 $EF(\text{Mn})$ 值在 0.63 ~ 2.16 之间。此外,8 种表层底泥重金属 (Cr、Cu、Pb、Zn、As、Co、Ni 和 Mn) 的 EF 平均值分别为 1.07、1.13、1.08、1.12、1.87、0.76、1.04 和 1.31。因此,大柴旦湖区东南

部表层沉积物中重金属元素的平均富集程度依次为 $EF(\text{As}) > EF(\text{Mn}) > EF(\text{Cu}) > EF(\text{Zn}) > EF(\text{Pb}) > EF(\text{Cr}) > EF(\text{Ni}) > EF(\text{Co})$ 。从上述数据可以看出,只有 $EF(\text{As})$ 的平均值大于 1.5 (即 $EF > 1.5$),说明很大一部分 As 元素来源于点源污染、非点源污染以及生物区系。个别取样点中 Ni 和 Mn 元素的 EF 值大于 1.5 (即 $EF > 1.5$),指示部分 Ni 和 Mn 元素来源于点源污染、非点源污染以及生物区系。另外, $EF(\text{Cr})$ 、 $EF(\text{Cu})$ 、 $EF(\text{Pb})$ 、 $EF(\text{Zn})$ 和 $EF(\text{Co})$ 的平均值在 0.5 ~ 1.5 之间 (即 $0.5 \leq EF \leq 1.5$),说明这 5 种重金属元素可能全部来自地壳物质或者自然风化过程。

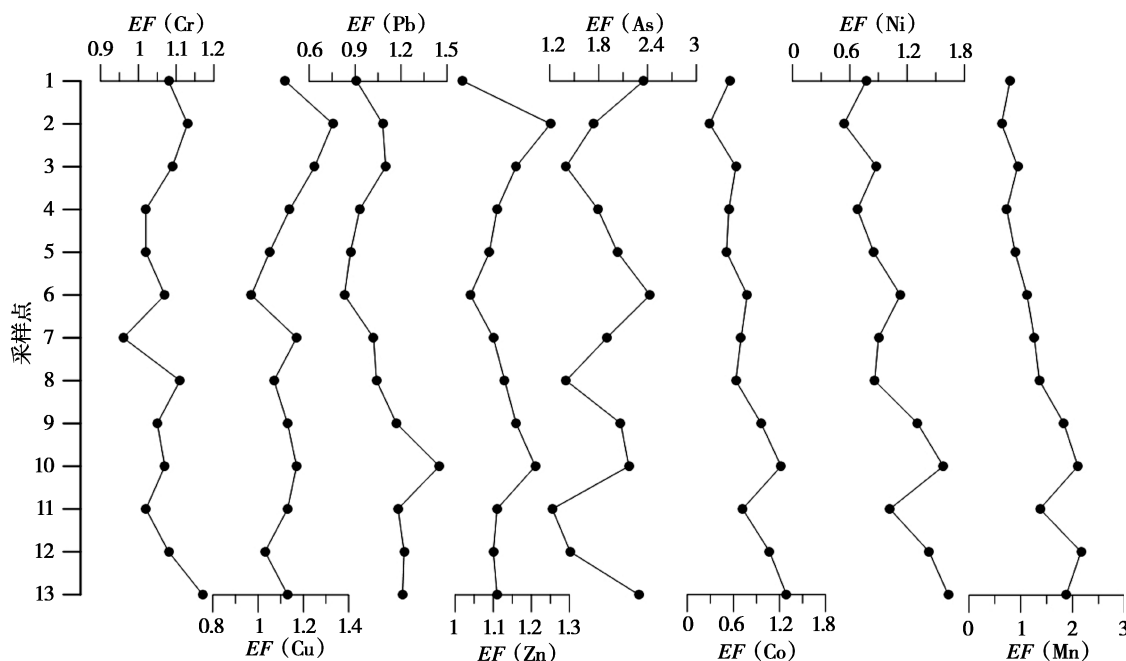


图 3 大柴旦湖区表层底泥中重金属的 EF 值分布图

Fig. 3 The enrichment factors of heavy metal from surface sediments in Da Qaidam Salt Lake

前期研究发现,冶金、发电和工业锅炉产生 As 元素最多,并且可以通过灰尘污染周边的土壤和河流^[19];含 As 农药和化肥的使用,也会对 As 污染有一定的贡献^[19]。我们研究发现北麓温泉沟热泉水/温泉水中含有一定数量的 As 元素,最终汇入大柴旦湖盆而产生一定的贡献量。母质基岩,动植物残体腐烂,煤炭和石油产品燃烧,含 Ni 元素的大气颗粒物沉降,以及采矿冶金等产生的废气废水排放都是 Ni 元素的主要来源^[20]。相关性分析结果显示,As 元素与 Mn 元素呈现显著负

相关,而与 Ni 元素显著不相关;Mn 元素与 Ni 元素呈现显著正相关(表 3)。综上所述,大柴旦湖区东南部表层底泥中重金属的来源主要有两种:流域侵蚀的造岩矿物元素以及人类活动产生的重金属污染。在出现人类活动以前,流域内造岩矿物的自然侵蚀是湖泊沉积物中重金属富集和累积的主要因素;出现人类活动以后,随着周边地区人类活动的加剧,人为非自然排放成为大柴旦盐湖底泥中重金属的主要物质来源。

表 3 大柴旦湖区东南部表层底泥中重金属的皮尔森相关系数矩阵

Table 3 Pearson correlation coefficient matrix for heavy metals from surface sediments in the southeastern Da Qaidam Salt Lake

	Cr	Cu	Pb	Zn	As	Co	Ni	Mn
Cr	1.000							
Cu	0.932 **	1.000						
Pb	0.691 **	0.826 **	1.000					
Zn	0.953 **	0.978 **	0.811 **	1.000				
As	0.485	0.411	-0.073	0.405	1.000			
Co	-0.582 *	-0.564 *	-0.234	-0.562 *	-0.368	1.000		
Ni	-0.488	-0.520	-0.199	-0.483	-0.310	0.933 **	1.000	
Mn	-0.543	-0.508	-0.034	-0.460	-0.652 *	0.785 **	0.763 **	1.000

** 和 * 分别表示 $p < 0.01$ 和 $p < 0.05$

2.2 重金属污染风险性评价

基于计算公式(2)得出的地质积累指数(I_{geo})分析结果如图4所示。由图4可以看出, I_{geo} (Cr)值在-0.88~0.02之间, I_{geo} (Cu)值在-0.96~0.26之间, I_{geo} (Pb)值在-0.71~-0.01之间, I_{geo} (Zn)值在-0.87~0.17之间, I_{geo} (As)值在-0.46~0.88之间, I_{geo} (Co)值在-1.94~-0.49之间, I_{geo} (Ni)值在-1.04~-0.15

之间,以及 I_{geo} (Mn)值在-0.81~0.18之间。此外,8种表层底泥重金属(Cr、Cu、Pb、Zn、As、Co、Ni和Mn)的 I_{geo} 平均值分别为-0.36、-0.28、-0.36、-0.28、0.42、-0.95、-0.46和-0.17。可以看出,大柴旦湖区东南部表层沉积物中As元素污染程度最大,除采样点12以外,其余各采样点均处于轻微污染状态;重金属元素Mn、Zn、Cu和Cr在表层底泥个别点位处于轻微污染状态;而重金属元素Pb、Co和Ni处于无污染状态。

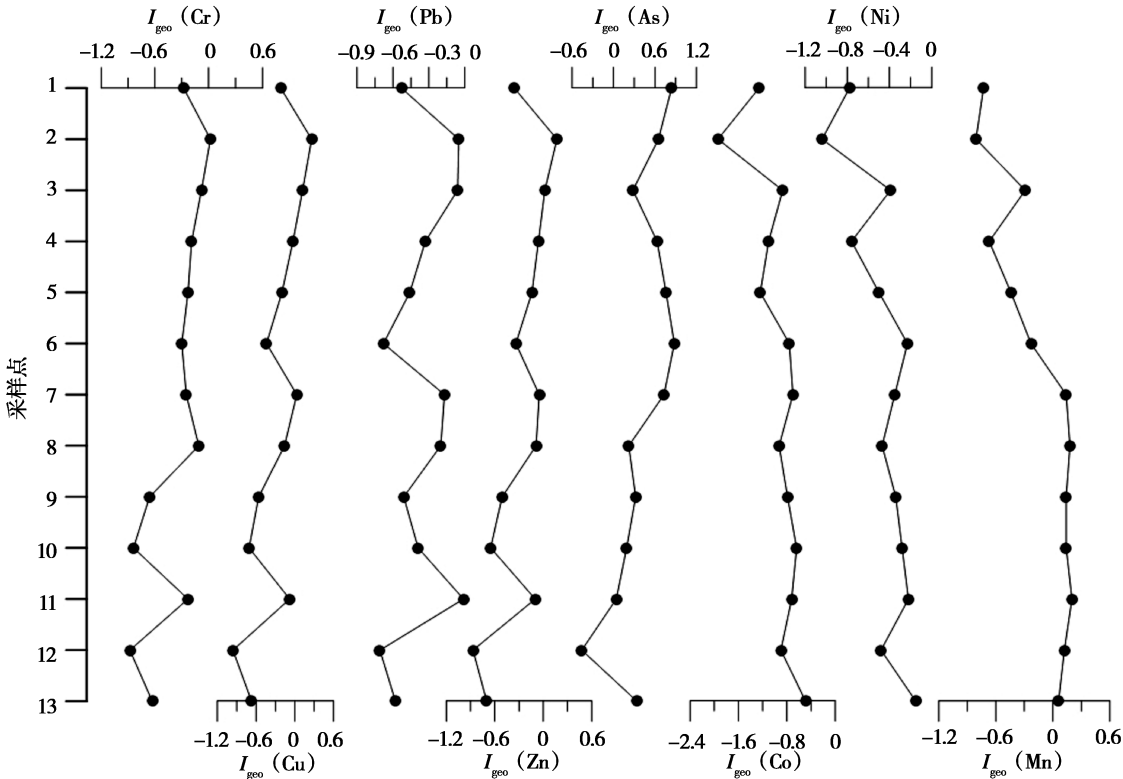


图 4 大柴旦湖区东南部表层底泥中重金属的 I_{geo} 值分布图

Fig. 4 The I_{geo} values of heavy metal from surface sediments in the southeastern Da Qaidam Salt Lake

另外,基于计算公式(3)得出的潜在生态风险指数(RI)分析结果如表 4 所示。由表 4 可以看出,重金属 Cr、Cu、Pb、Zn 和 As 的单一元素潜在生态风险指数 E_r^i 均小于 30,属于低生态风险元素。值得一提的是,As 元素的潜在生态风险指数 E_r^i 最高,为高生态风险元素,也是生态风险指数增高的主要因子。由此可以推断,大柴旦湖区东

南部表层底泥环境中重金属污染主要以 As 为主。 RI 结果显示,大柴旦湖区东南部近岸区域处于轻微污染状态,应引起足够的重视。通过对比 I_{geo} 和 RI 两种定量评价结果发现,大柴旦湖区东南部表层底泥中重金属污染的总体趋势基本一致,说明多方法的结合使用达到了相互补充和验证的目的。

表 4 大柴旦湖区表层底泥中重金属(Cr、Cu、Pb、Zn 和 As)的潜在生态风险指数
Table 4 The potential ecological risk indices of heavy metals(Cr, Cu, Pb, Zn, and As) from surface sediments in Da Qaidam Salt Lake

采样点	E_r^i (Cr)	E_r^i (Cu)	E_r^i (Pb)	E_r^i (Zn)	E_r^i (As)	RI	污染程度
1	2.47	6.43	5.20	1.17	26.85	42.12	轻微污染
2	3.05	8.98	7.27	1.69	23.48	44.47	轻微污染
3	2.84	8.16	7.18	1.52	18.25	37.95	无污染
4	2.62	7.34	5.97	1.44	23.17	40.54	轻微污染
5	2.56	6.55	5.47	1.36	25.43	41.37	轻微污染
6	2.44	5.54	4.70	1.19	27.64	41.51	轻微污染
7	2.52	7.68	6.68	1.45	24.92	43.25	轻微污染
8	2.78	6.69	6.51	1.41	17.44	34.83	无污染
9	1.89	5.08	5.27	1.05	18.72	32.01	无污染
10	1.67	4.60	5.70	0.95	17.05	29.97	无污染
11	2.56	7.12	7.45	1.40	15.46	33.99	无污染
12	1.63	3.86	4.59	0.82	10.87	21.77	无污染
13	1.94	4.70	5.03	0.93	19.03	31.63	无污染

3 结 论

大柴旦湖区东南部表层底泥中的重金属浓度在空间分布上呈现不均匀特征,底泥质量开始出现退化或恶化现象。表层底泥中 As 元素的生态风险指数远高于其它元素,是大柴旦湖区生态风险指数增高的主要因子,需要特别关注 As 元素对湖泊生态环境的影响,减少人类活动中重金属污染物的排放量。根据地质积累指数法以及潜在生态风险指数法综合分析,大柴旦湖区重金属污染程度整体上处于轻微状态。然而,随着周边地区

人类活动的加剧,人为非自然排放将成为大柴旦盐湖底泥中重金属的主要物质来源,应引起足够重视。

致谢:洪荣昌博士参加野外采样工作,审稿专家及编辑部老师对论文提出建设性修改意见,在此一并致以诚挚谢意。

参考文献:

[1] 毛志刚,谷孝鸿,陆小明,等. 太湖东部不同类型湖区疏浚后沉积物重金属污染及潜在生态风险评价[J]. 环境科学, 2014,35(1):186-193.
[2] Chen C Y, Stemberger R S, Klaue B, et al. Accumulation of

- heavy metals in food web components across a gradient of lakes [J]. *Limnology and Oceanography*, 2000, 45 (7): 1525 – 1536.
- [3] Jara – Marini M E, Soto – Jiménez M F, Pérez – Osuna F. Bulk and bioavailable heavy metals (Cd, Cu, Pb, and Zn) in surface sediments from Mazatlán Harbor (SE Gulf of California) [J]. *Bulletin of environmental contamination and toxicology*, 2008, 80 (2): 150 – 153.
- [4] Bing H J, Wu Y H, Liu E F, *et al.* Assessment of heavy metal enrichment and its human impact in lacustrine sediments from four lakes in the mid-low reaches of the Yangtze River, China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2013, 25 (7): 1300 – 1309.
- [5] 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.
- [6] 高春亮, 张丽莎, 余俊清, 等. 大柴旦盐湖卤水演变及环境变化的矿物学记录[J]. *地球化学*, 2011, 40 (2): 156 – 162.
- [7] 高春亮, 余俊清, 闵秀云, 等. 大柴旦盐湖化学沉积特征及其控制因素[J]. *盐湖研究*, 2015, 23 (1): 22 – 29.
- [8] 高春亮, 余俊清, 闵秀云, 等. 柴达木盆地大柴旦硼矿床地质特征及成矿机理[J]. *地质学报*, 2015, 89 (3): 659 – 670.
- [9] Gao C, Yu J, Min X, *et al.* The sedimentary evolution of Da Qaidam Salt Lake in Qaidam Basin, northern Tibetan Plateau; implications for hydro-climate change and the formation of pinnoite deposit [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2019, 78: 463.
- [10] Ergin M, Saydam C, Baştürk Ö, *et al.* Heavy metal concentrations in surface sediments from the two coastal inlets (Golden Horn Estuary and Izmit Bay) of the northeastern Sea of Marmara [J]. *Chemical Geology*, 1991, 91: 269 – 285.
- [11] Müller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River [J]. *Geojournal*, 1969, 2: 108 – 118.
- [12] Håkanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sedimentological approach [J]. *Water Research*, 1980, 14 (8): 975 – 1001.
- [13] 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, 31 (2): 112 – 115.
- [14] Dung T, Cappuyns V, Swennen R, *et al.* From geochemical background determination to pollution assessment of heavy metals in sediments and soils [J]. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 2013, 12 (4): 335 – 353.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] Zhang J, Liu C L. Riverine composition and estuarine geochemistry of particulate metals in China – weathering features, anthropogenic impact and chemical fluxes [J]. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 2002, 54: 1051 – 1070.
- [18] Klerks P L, Levinton J S. Rapid evolution of metal resistance in a benthic oligochaete inhabiting a metal-polluted site [J]. *Biology Bulletin*, 1989, 176: 135 – 141.
- [19] 李艳红, 王茂林, 周晓岚, 等. 鄱阳湖流域砷的理化特性及来源分析[J]. *南昌大学学报(理科版)*, 2015, 39 (3): 280 – 285, 295.
- [20] 雷停, 孙传敏. 重金属镍的土壤污染及迁移转化[J]. *地球科学进展*, 2012, 27 (S1): 359 – 361.

Distribution and Ecological Risk Assessment for Heavy Metals in Surface Sediments of Da Qaidam Salt Lake

GAO Chun-liang^{1,2}, YU Jun-qing^{1,2}, MIN Xiu-yun¹,
WANG De-rong¹, CHENG Ai-ying^{1,2}, ZHANG Li-sha^{1,2}

(1. *Key Laboratory of Comprehensive and Highly Efficient 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*)

Abstract: The paper focused on heavy metal concentrations (Cr, Cu, Pb, Zn, As, Co, Ni, and Mn) from surface sediments in the southeastern Da Qaidam Salt Lake. Based on the pressed powder pellet method and X-ray fluorescence spectrometry analysis, as well as three quantitative assessment methods such as the enrichment factors (EF), geoaccumulation index (I_{geo}), and the potential ecological risk index (RI), the possible sources and pollution level of heavy metals were studied. The results showed that spatial distributions of heavy metal concentration were indicative of nonuniform characteristics in different zones of Da Qaidam Salt Lake, the average enrichment level of heavy metals from sediments followed the order: $EF(As) > EF(Mn) > EF(Cu) > EF(Zn) > EF(Pb) > EF(Cr) > EF(Ni) > EF(Co)$, and the main heavy metal pollution was arsenic pollution. In general, the status of heavy metal pollution in Da Qaidam Salt Lake was not strong, but anthropogenic emissions would become the main sources of heavy metal from surface sediments in Da Qaidam Salt Lake along with the frequent and strong human activities in surrounding region.

Key words: Da Qaidam Salt Lake; Surface sediment; Heavy metal pollution; Enrichment factor; Geoaccumulation index; Potential ecological risk index