

托素湖沉积物中重金属元素及地球化学特征研究

成艾颖^{1,2}, 余俊清^{1,2}, 高春亮^{1,2}, 洪荣昌^{1,2,3}, 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; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 对托素湖沉积岩芯上部沉积物的重金属元素 Cr、Cd、Cu、Zn 和 Pb 的含量进行分析测试。精确测得沉积物中 Cr、Cd、Cu、Zn 和 Pb 的平均浓度分别为 $32.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $2.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $19.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $188.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $32.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。与区域背景值和标准值相比, 托素湖沉积物样品中 Cd 和 Zn 都偏高。研究表明, 除了 Cd 污染程度比较严重, 托素湖当前的 Cr、Cu、Zn 和 Pb 污染程度相对较轻。各元素经 Ti 校正后的分析结果显示, 重金属元素含量在沉积剖面的 10 cm 处出现波动性增大的明显转折, 表明托素湖沉积物中 Cd、Cr、Cu、Zn 和 Pb 主要来源于流域侵蚀的造岩矿物元素, Cd 污染可能源于人为活动。

关键词: 托素湖; 重金属元素; 污染程度; 地球化学特征

中图分类号: P595

文献标识码: A

文章编号: 1008-858X(2016)03-0001-07

高原封闭、半封闭型湖泊是气候和环境演化的敏感指示器, 其沉积物记录具有连续性、敏感性和高分辨率特点。高原湖泊沉积记录在恢复和重塑各种短尺度的气候和环境演化系列上, 具有其它自然历史记录无法代替的优势, 尤其在揭示近代环境污染历史方面更有独到之处。湖泊沉积物作为环境物质输送的宿体, 汇集了流域侵蚀、大气沉降及人为释放等多种来源的环境物质。以湖泊沉积物微量重金属记录恢复和重建区域性或全球性代表环境污染历史, 是湖泊沉积记录研究的一个主要方向^[1-3]。

重金属是具有潜在危害的重要污染物, 与其它污染物质不同, 其威胁在于它不能被微生物所分解, 相反它可在生物体内富集, 成为持久性污染物。通过各种途径进入水体的重金属绝大部分被悬浮颗粒吸附, 并经历水动力作用的搬运过程, 当其负荷量超过搬运能量时, 便逐步

沉积下来。重金属并不会永远固定在沉积物中, 它们可以通过一系列化学和生物过程在沉积物中循环并且回到水中。许多学者认为, 沉积物中的重金属蓄积量也可反映沉积物对上覆水体影响的持久能力, 水体沉积物是水体中重金属污染物的载体和指示剂^[4-11]。因此, 研究沉积物中的重金属含量分布对于了解重金属对水质的影响具有重要的现实意义。

湖泊沉积物柱状样品包含着人类文明时期及之前的湖泊及其集水区变化过程的信息, 可以提供必要的背景值, 并可取得金属污染历史发展过程的资料。研究重金属在柱状样品的垂直分布, 可以指示工业化开始以来人为活动的影响。沉积物成为重金属积累的“化学档案”, 它可以在解决源与汇的重金属污染方面提供有价值的信息^[12-14]。由于重金属在环境中的富集可能来源于人为活动和自然过程, 因此人为

收稿日期: 2015-12-15; 修回日期: 2016-01-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(41401059, 40871008); 青海省自然科学基金青年项目(2014-ZJ-930Q); 中国科学院青海盐湖研究所青年引导基金项目及中国科学院“西部之光”西部博士资助项目

作者简介: 成艾颖(1983-), 女, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为环境地球化学。Email: aycheng@isl.ac.cn。

活动对环境的影响也能通过分析湖泊沉积物得以重建。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

托素湖位于青藏高原柴达木盆地的东北部,距海西蒙古族藏族自治州首府德令哈市约

50 km,是德令哈盆地流域内的一个中型咸水湖泊,属于巴音河流域的尾间湖。由于托素湖位于柴达木盆地德令哈次级盆地最低处,其封闭型、半咸水和适中的面积等特征决定了该湖对应于周围环境及沉积物中元素地球化学特征具有重要的指示意义。对托素湖沉积物重金属元素的研究选取 Ts4 Core 岩芯柱的表层样为研究对象(图1),评估了有关的环境特征,为该流域整体环境评估提供了基础数据。

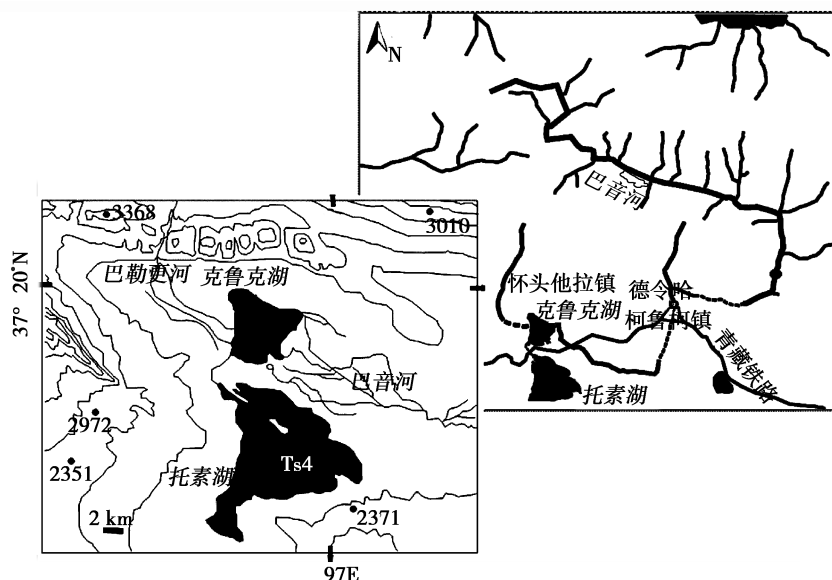


图1 巴音河流域图

Fig. 1 The drawing of Bayin river

1.2 样品采集

2009年9月在托素湖钻取钻孔岩芯,对沉积物—水界面未受扰动、上覆水体清澈透明的Ts4 Core 岩芯柱上部19 cm 进行研究。对于元素分析,取0.25 g 托素湖沉积干样品,通过添加5:5:5:1:1的硝酸+盐酸+氢氟酸+高氯酸+双氧水的消解体系对样品进行前处理,使用电感耦合等离子体原子发射光谱法(ICP-AES)分析Cd、Cr、Cu、Pb、Zn 重金属元素。

2 结果与分析

2.1 重金属元素浓度值

从沉积岩芯中所获得的重金属元素的浓度

剖面垂直变化(图2),Cu、Cd、Cr、Pb 和 Zn 元素的平均浓度分别为 $19.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $2.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $32.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $32.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $188.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,变异系数分别为7.9%、5.5%、8%、5.4%和2.8%。元素的变化可以分为3部分:0~4 cm,4.5~10 cm 和10.5~19 cm。镉元素垂直变化基本保持不变,在这3段的平均值都接近 $2.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (表1)。而铜、镉、铬、铅和锌元素在4.5~10 cm 的平均浓度值都小于总体平均值,但在此阶段波动比较大;0~4 cm 和10.5~19 cm 的元素平均浓度值大于整个曲线的平均浓度值(铅在0~4 cm 的平均值偏小)。

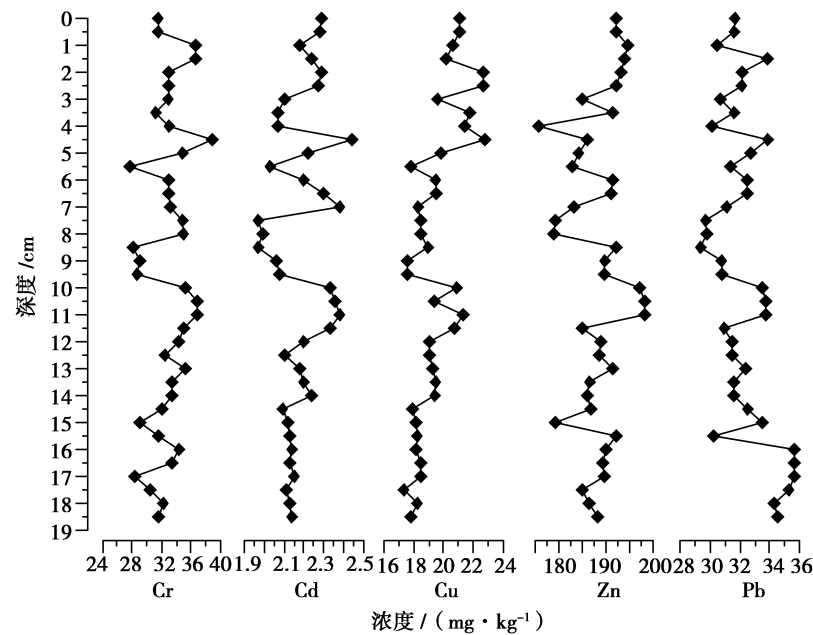


图 2 各重金属元素浓度变化曲线图

Fig. 2 The concentration change of each heavy metal element

表 1 托素湖重金属浓度平均值的对比

浓 度	Cr	Cd	Cu	Zn	Pb
平均值	32.9	2.2	19.5	188.5	32.3
0 ~ 4 cm	33.2	2.2	21.2	189.5	31.6
4.5 ~ 10 cm	32.6	2.16	19.2	187.1	31.5
10.5 ~ 19 cm	33	2.18	18.9	188.7	33.2

2.2 重金属元素浓度与自然背景值和其它河流钻孔的比较

相比此前在其它地区的沉积物中重金属元素的浓度,在托素湖沉积物中铜、铬和铅浓度相对较低,在托素湖沉积物中铜、铬和铅浓度低于其它大型工业化城镇地区的湖泊,如洪泽湖、泉州湾和苏黎世湖等^[15-22]。但是,镉和锌明显高于

这些湖区的重金属浓度。相比大陆上部地层(UCC),在托素湖沉积物中重金属铜、锌、铅和镉元素的平均值分别为 1.4(19.5)、3.6(188.5)、1.9(32.3)和 22(2.2)倍高。对比海洋沉积物质量标准(CSBTS,2002),镉要高 4.4 倍,最大浓度视为“远远超出”;锌元素为 1.26 倍;铬、铜和铅为“没有超出”(表 2)。

表 2 岩芯重金属浓度与其它流域钻孔的对比

位 置	Cd	Cu	Cr	Pb	Zn	参考文献
托素湖	2.2	19.7	33.1	31.8	188.7	本文
洪泽湖	0.1 ± 0.02	75 ± 5	25 ± 3	25 ± 3	61 ± 5	Chi, <i>et al.</i> ,2007
泉州湾	0.59	71.4	82.0	67.7	179.6	Yu, <i>et al.</i> ,2008
苏黎世湖	2.1	48.9	—	94.4	220	Von Gunten, <i>et al.</i> ,1997
洛克纳迦山	0.3 ~ 1.9	8 ~ 25	—	100 ~ 360	39 ~ 180	Yang, <i>et al.</i> ,2002
UCC	0.10	14.3	—	17	52	Wedepohl,1995
中国海洋沉积物质量标准	0.5	35.0	80.0	60.0	150.0	CSBTS,2002

3 讨 论

3.1 托素湖沉积物中重金属元素污染评价

地积累指数法主要是针对沉积物中重金属的全量进行评价,评价的重点在于单个元素。对于分析数据较少,或仅分析重金属元素而言,该方法为首选方法,因为它方便易行,分析结果直观;经过国内外学者大量应用,亦证实该方法不失为一种评价沉积物污染的好方法。该评价方法考虑了沉积成岩作用等自然地质过程造成的背景值的影响,也充分注意了人为活动对重金属污染的影响,因此该指数不仅反映了重金属分布的自然变化特征,而且可以判别人为活动对环境的影响,是区分人为活动影响的重要参数。

地积累指数 (Index of Geoaccumulation) 通常称为 Muller 指数,是 20 世纪 60 年代晚期在欧洲发展起来的广泛用于研究沉积物中重金属污染程度的定量指标^[23],其表达式如下,

$$I_{geo} = \log_2(C_n/k \times B_n)。$$

式中, I_{geo} 为地积累指数; C_n 为岩芯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; k 是由于考虑到成岩作用可能引起背景值的变动而赋予的一个常数(一般取 1.5)。

地积累指数共分为 7 级,0 ~ 6 级表示污染程度由无至极强(表 3)。

表 3 Muller 污染指数分级

Table 3 Geoaccumulation index (I_{geo}) in relation to pollution intensity after Muller

I_{geo} 分级	I_{geo}	污染程度
0	<0	清洁
1	0 ~ 1	轻度污染
2	1 ~ 2	偏中度污染
3	2 ~ 3	中度污染
4	3 ~ 4	偏重污染
5	4 ~ 5	重度污染
6	>5	严重污染

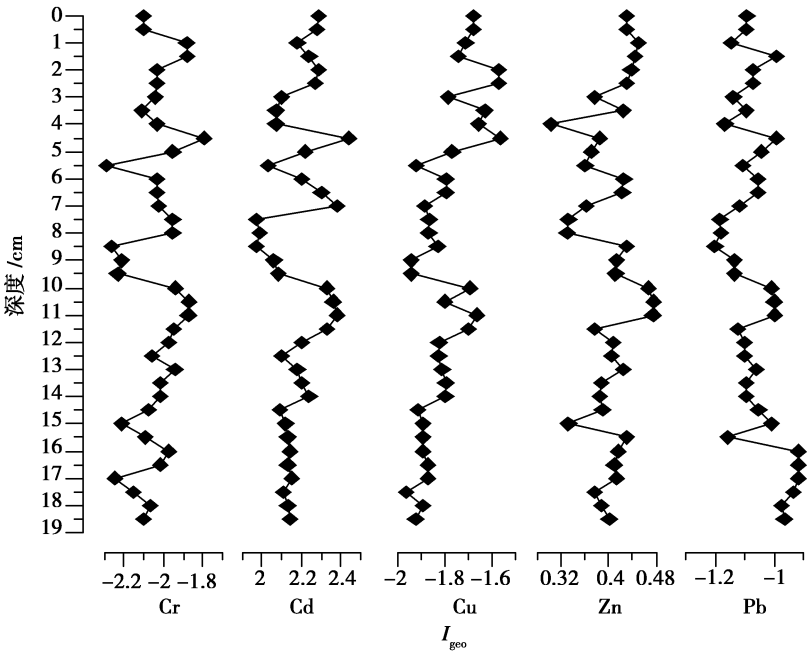


图 3 各金属元素的污染指数曲线图
Fig. 3 The geo-accumulation index of heavy metal

从图3可以看出,托素湖沉积物中Cr、Cd、Cu、Zn和Pb元素的 I_{geo} 指数值基本以10 cm处为分界点,10 cm之下其值较小且变幅微弱,而10 cm以上的部分呈现出变幅略微增加的状态。分析结果表明,按照Muller污染指数分级,Cr、Cu和Pb的 I_{geo} 指数都在0以下,属于清洁;Zn元素的 I_{geo} 指数值在0~1之间,属于轻度污染范畴;Cd的 I_{geo} 指数数值在2~3,属于中度污染范畴。Cd元素在托素湖沉积物中富集的现象,可能是与Cd元素本身的性质及区域地质条件有关。因为Cd元素一般在较弱的水动力环境中富集,颗粒迁移能力较弱,其主要为“吸附—清扫型”元素,由于吸附或清扫作用而迅速随各种颗粒物质沉积、聚集到沉积物中,导致沉积物中Cd元素的含量较高。另一方面,相关资料表明,在巴音河流域的上游段有锌铅矿的存在,对Cd元素的富集有一定的影响。Pb元素极小的轻度污染可能与部分Pb以大气传播为途径有关,加之随着汽车工业的发展,Pb含量的积累还可能与人为活动使用含铅汽油有关。

3.2 托素湖沉积物中重金属元素的地球化学特征

一般来说,湖泊沉积物中重金属有两个主要的来源。一是从流域本身而来的自然来源,主要为地质风化作用;另一个是人为的污染物,这些污染物进入水环境的主要途径包括人为活动直接排放、大气沉降、地表径流和城市暴雨径流等^[24-26]。为了补偿矿物学和粒度变化的重金属差异,常见的方法是选取来源比较广泛并且受人为活动影响较小的元素对沉积物重金属元素浓度进行校正,从而有效减小沉积物由于自然原因引起的重金属含量的波动。

为了区分托素湖湖泊沉积物成岩作用的和人为起源的重金属元素来源,本文选取Ti作为重金属含量校正元素。选择Ti而不是其它保守元素,如铁或锆的原因是,Ti是一个保守的(非常不溶性)元素,广泛分布于地壳岩石中,属于惰性元素,其表生效应是稳定的,受化学风化作用的影响较小。托素湖沉积物中重金属的浓度用Ti校正后的结果如图4所示。

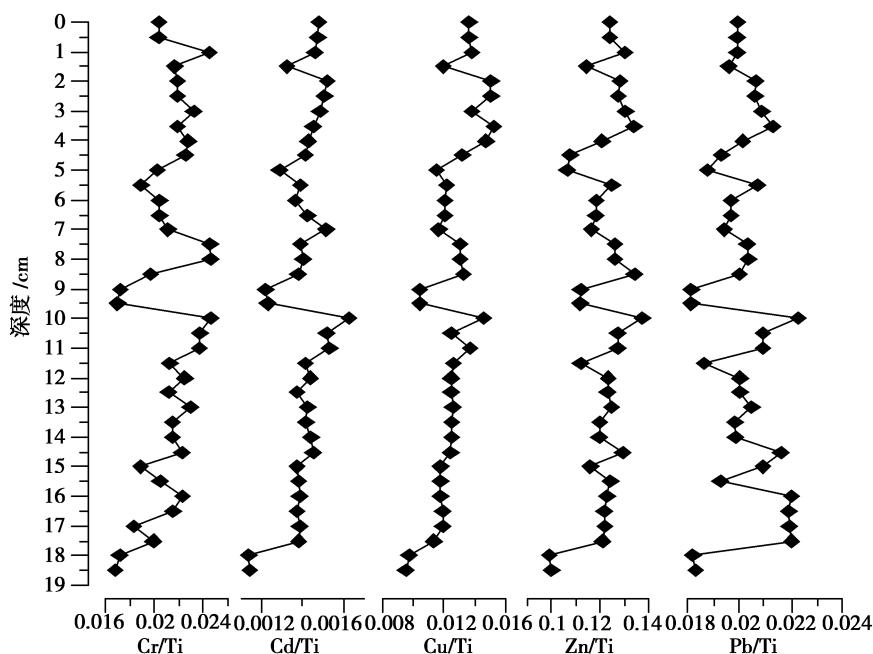


图4 Ti校正后沉积岩芯重金属垂直分布图

Fig. 4 Titanium-normalized profiles of Cr, Cd, Cu, Zn and Pb

各重金属元素(El)进行 El/Ti 校正后,剖面沿着整个岩芯在 10 cm 处有明显的转折,曲线整体并没有逐渐增加的趋势,而是波动比较大,这表明托素湖沉积物中 Cr、Cd、Cu、Zn 和 Pb 重金属元素同时来源于流域侵蚀的造岩矿物元素以及人为活动产生的重金属污染。重金属在湖泊沉积物中的聚集与周边地区人为活动有关,其垂向变化反应了沿岸周边地区人为活动与自然环境相互作用的历史。10 cm 以下的部分,流域内造岩矿物的自然侵蚀是湖泊沉积物中重金属积累的主要因素;10 cm 以上部分,随着周边地区人为活动的加剧,人为非自然排放成为托素湖重金属的重要来源。

4 结 论

1)托素湖岩芯沉积物中,重金属元素 Cr、Cd、Cu、Zn 和 Pb 的平均浓度分别为 $32.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $2.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $19.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $188.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $32.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。元素的平均值与页岩背景值、中国海洋沉积物质量(CS-BTS)、中国水系沉积物均值相比,托素湖沉积物样品中 Cd 和 Zn 都存在偏高的现象。沉积物 Cd 含量高出 3~7 倍,Zn 含量高出 0.3~1.5 倍,其余各元素的含量均在背景值和标准值范围内。但相比其它地区沉积物中重金属元素的浓度,托素湖沉积物中 Cu、Cr 和 Pb 浓度相对较低,于其它大型工业化城镇地区的湖泊,如洪泽湖、泉州湾和苏黎世湖,但 Cd 和 Zn 明显高于这些湖泊。

2)用地积累指数法对托素湖重金属污染进行评价表明,Cr、Cu 和 Pb 的 I_{geo} 指数都在 0 以下,属于清洁;Zn 元素的 I_{geo} 指数值在 0~1 之间,属于轻度污染范畴;Cd 的 I_{geo} 指数值在 2~3,属于中度污染范畴。从评定结果来看,托素湖当前的 Cr、Cu、Zn 和 Pb 重金属污染程度还相对较轻,而 Cd 重金属的污染程度比较严重。

3)托素湖沉积物中各重金属(El)进行 El/Ti 校正后,剖面沿着整个岩芯在 10 cm 处有明显的转折,但曲线整体并没有逐渐增加的趋势,而是波动比较大,这表明托素湖沉积物中铜、

镉、铬、铅和锌重金属同时来源于流域侵蚀的造岩矿物元素以及人为活动产生的重金属污染。

参考文献:

- [1] 韩美,李艳红,张维英,等. 中国湖泊与环境演变研究的回顾与展望[J]. 地球科学进展, 2003, 22(2): 125 - 132.
- [2] 黄秉维,郑度,赵名茶. 现代自然地理[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 74 - 194.
- [3] 吉磊. 中国过去 2000 年湖泊沉积记录的高分辨率研究: 现状与问题[J]. 地球科学进展, 1995, 10(2): 169 - 175.
- [4] 姚志刚,鲍征宇,高璞. 湖泊沉积物中重金属的环境地球化学[J]. 地质通报, 2005, 24(10-11): 997 - 1001.
- [5] 陈敬安,万国江,黄荣贵. 洱海沉积物重金属地球化学相及其污染历史研究[J]. 地质地球化学, 1998, 26(2): 1 - 8.
- [6] 田林锋,胡继伟,秦樊鑫,等. 红枫湖沉积物重金属元素地球化学特征及风险评价[J]. 环境化学, 2011, 30(9): 1590 - 1598.
- [7] 季斌,杭小帅,梁斌,等. 湖泊沉积物重金属污染研究进展[J]. 污染防治技术, 2013, 26(5): 33 - 40.
- [8] 冀永般,王雪,曾巾,等. 南京市湖泊沉积物中重金属垂直分布及污染状况评价[J]. 环境科学与技术, 2012, 35(12): 230 - 233.
- [9] 唐阵武,程家丽,岳勇,等. 武汉典型湖泊沉积物中重金属累积特征及其环境风险[J]. 湖泊科学, 2009, 21(1): 61 - 68.
- [10] 陈静生. 沉积物重金属污染研究中的若干问题[J]. 环境科学丛刊, 1983, 4(8): 1 - 2.
- [11] 范成新,朱育新,吉志军,等. 太湖宜溧河水系沉积物的重金属污染特征[J]. 湖泊科学, 2002, 14(3): 234 - 241.
- [12] 李淑媛,刘国贤,苗丰民. 渤海沉积物中重金属分布及环境背景值[J]. 中国环境科学, 1991, 14(5): 370 - 376.
- [13] 文湘华. 水体沉积物重金属质量基准研究[J]. 环境化学, 1993, 12(5): 334 - 341.
- [14] 夏鹏,孟宪伟,丰爱平,等. 沉积物中重金属区域背景的构建—以广西潮间带为例[J]. 海洋通报, 2012, 31(5): 539 - 546.
- [15] Dai J C, Song J M, Li X G, et al. Environmental changes reflected by sedimentary geochemistry in recent hundred years of Jiaozhou Bay, North China[J]. Environmental Pollution, 2007, 145: 656 - 667.
- [16] Ip C C M, Li X D, Zhang G, et al. Over one hundred years of trace metal fluxes in the sediments of the Pearl River Estuary, South China[J]. Environmental Pollution, 2004, 132: 157 - 172.
- [17] Yu R L, Yuan X, Zhao Y H, et al. Heavy metal pollution

- in intertidal sediments from Quanzhou Bay, China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2008, 20(6):664–669.
- [18] Wedepohl K H. The composition of the continental crust[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1995, 59(7):1217–1232.
- [19] Yang H, Rose N L, Battarbee R W. Distribution of some trace metals in Lochnagar, a Scottish mountain lake ecosystem and its catchment[J]. Science of the Total Environment, 2002, 285(1–3):197–208.
- [20] Von Gunten H R, Sturm M, Moser R N. 200-year record of metals in lake sediments and natural background concentrations[J]. Environ. Sci. Technol., 1997, 31, 2193–2197.
- [21] Audry S, Schafer J, Blanc G, *et al.* Fifty-year sedimentary record of heavy metal pollution (Cd, Zn, Cu, Pb) in the Lot River reservoirs (France) [J]. Environmental Pollution, 2004, 132(3):413–426.
- [22] Tam U N F Y, Yao M W Y. Normalisation and heavy metal contamination in mangrove sediments[J]. The Science of the Total Environment, 1988, 216:33–39.
- [23] Forstner U, Wittmann G T W. Metal Pollution in the aquatic environment[J]. Berlin: Springer-Verlag, 1981:110–196.
- [24] 张于平, 瞿文川. 太湖沉积物中重金属的测定及环境意义[J]. 岩矿测试, 2001, 20(1):34–36.
- [25] 关友义, 王永, 姚培毅, 等. 内蒙古克什克腾旗浩来呼热古湖泊全新世以来的环境演变[J]. 地质通报, 2010, 29(6):891–900.
- [26] 李瑞瑞, 王安建, 曹殿华, 等. 滇西泚江沉积物剖面重金属元素分布特征[J]. 地质通报, 2010, 29(9):1383–1390.

Heavy Metal Elemental and Geochemical Study in the Sediments from Toson Lake

CHENG Ai-ying^{1,2}, YU Jun-qing^{1,2}, GAO Chun-ling^{1,2},
HONG Rong-chang^{1,2,3}, 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. Key Laboratory of Salt Lake Geology and Environment of Qinghai Province,

Xining, 810008, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences,

Beijing, 100049, China)

Abstract: For the first time, the content of heavy metal element Cr, Cd, Cu, Zn and Pb is tested in the upper lake sediment of Toson Lake. It has been determined that the average concentrations of Cr, Cd, Cu, Zn, and Pb in the sediments are $32.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $2.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $19.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $188.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $32.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ respectively. Compared with the regional background values, Cd and Zn concentrations in the sediments are relatively higher. The results show that in addition to relatively serious Cd pollution, the Toson Lake sediments are polluted slightly by Cr, Cu, Zn and Pb. Through the analysis of the elements after Ti correction, the results show that the contents of heavy metal elements apparently turn increased volatility in 10 cm sedimentary section. It indicates that Cr, Cu, Zn and Pb in Toson Lake mainly come from the watershed of elements in rocks and minerals, and Cd pollution could be attributed to human activities.

Key words: Toson lake; Heavy metal; Pollution level; Geochemical characteristics