

贵州草海沉积物重金属时空分布特征 与生态风险评价

宋以龙^{1,2} 曾艳^{1*} 杨海全^{1,2} 陈敬安¹ 丁薇³ 王敬富¹ 计永雪^{1,2} 董泽琴⁴

(¹中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081; ²中国科学院大学, 北京 100049; ³贵州大学资源与环境工程学院, 贵阳 550025; ⁴贵州省环境科学研究设计院, 贵阳 550081)

摘要 在草海选取代表性点位采集表层沉积物和沉积物柱芯, 测定沉积物 Cr、Ni、Cd、Co、Pb、Zn 和 Sb 等重金属含量, 研究草海沉积物重金属时空变化特征、来源及潜在生态危害。结果表明: 草海表层沉积物中 Cd、Pb、Zn 和 Sb 在湖泊北部、湖心及西南湖区含量较高, 且由北向南方向呈扇形分布, 主要来源于周边矿产资源的开发; Cr、Ni 和 Co 在湖泊最西端区域含量较高, 主要受城镇生产生活污水排放影响; 草海沉积物中 Cd 和 Sb 污染最严重, 其地质累积指数分别为 1.50~4.62(平均值 3.10) 和 1.63~3.45(平均值 2.61); 潜在生态危害指数显示, 草海沉积物 Cd 的生态风险较高, 且湖心区域最严重。草海沉积物柱芯中重金属的垂直剖面分布正好对应了草海流域的矿产开采历史。尽管流域矿产资源开采活动已经停止, 但以往矿产资源开采及冶炼过程中产生的重金属仍是目前草海重金属污染的主要来源。因此, 应制定合理措施, 严格控制重金属污染来源, 并建立有效的沉积物重金属污染治理措施, 恢复草海生态环境。

关键词 草海; 沉积物; 重金属; 地质累积指数; 潜在生态风险

Spatiotemporal distribution and potential ecological risk assessment of heavy metals in the sediments of Lake Caohai, Guizhou, China. SONG Yi-long^{1,2}, ZENG Yan^{1*}, YANG Hai-quan^{1,2}, CHEN Jing-an¹, DING Wei³, WANG Jing-fu¹, JI Yong-xue^{1,2}, DONG Ze-qin⁴ (¹State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China; ²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; ³College of Resource and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China; ⁴Guizhou Academy of Environmental Science and Designing, Guiyang 550081, China).

Abstract: A total of 19 surface sediments and 5 sediment cores were collected at typical sites in Lake Caohai, located in Guizhou Province. The spatiotemporal distribution and sources of seven heavy metals (Cr, Ni, Cd, Co, Pb, Zn and Sb) in the sediments were investigated, and the potential ecological risks of those heavy metals were assessed. The results showed that the concentrations of Cd, Pb, Zn and Sb in the surface sediments were relatively higher in the north, central and southwest areas of the lake; these pollutants mainly resulted from the mineral exploitation in the catchment. The concentrations of Cr, Ni and Co were relatively higher in the most west area, mainly due to urban sewage discharge (westernmost areas). Based on the geoaccumulation index (I_{geo}), Cd and Sb were obviously enriched in the sediments of Lake Caohai. The potential ecological risk of Cd was higher in the lake sediments, especially in the sediments from the central part of the lake. The profiles of the variations of heavy metals contents in the sediment cores corresponded well to the history of the mineral exploitation in the catchment of Lake Caohai. Although the mineral exploitation was ended, its remaining problems are still the main cause of

国家科技支撑计划项目(2011BAC02B02)和贵州省重大科技计划项目(黔科合重大专项字[2012]6014号)资助。

收稿日期: 2015-11-10 接受日期: 2016-04-06

* 通讯作者 E-mail: zengyan@mail.gyig.ac.cn

heavy metal pollution in Caohai Lake. Therefore, it is necessary to adopt reasonable methods to strictly control the heavy metal pollution and to establish suitable measures to effectively treat the heavy metal pollution, recovering the ecological environment of Lake Caohai.

Key words: Lake Caohai; sediment; heavy metals; geoaccumulation index; potential ecological risk.

20世纪以来,大规模的采矿、金属冶炼、汽车尾气排放等活动向环境中释放了大量重金属污染物。这些污染物通过大气沉降、地表径流等进入湖泊后,大部分会吸附于悬浮物表面或沉降到沉积物中。因此,湖泊沉积物是重金属蓄积的主要环境介质(Léopold *et al.*, 2012; Gao *et al.*, 2012; Yuan *et al.*, 2014)。当湖泊水体出现扰动或环境条件发生变化时,如pH值或氧化还原条件发生变化时,沉积物中蓄积的重金属可能会再次释放进入水体,造成二次污染(Jiang *et al.*, 2012; 张华俊等, 2012; 张磊等, 2014)。重金属在环境中不能降解,且具有生物累积性,一旦被动植物吸收,还会通过食物链最终影响人体健康(张家春等, 2014; Apeti *et al.*, 2015)。因此,湖泊沉积物重金属污染研究越来越引起人们的重视。刘成等(2014)研究了巢湖重污染汇流湾区沉积物中重金属污染,对其分布、累计特征以及生态风险进行评估,结果显示,巢湖重污染汇流湾区沉积物属于Cd和Hg污染型,亟需控制流域内这两类污染物;秦延文等(2012)对太湖表层沉积物重金属的形态进行了研究,发现可提取态重金属含量较高;李宝等(2008)对滇池福宝湾沉积物-水界面微量重金属的扩散通量进行了估算,发现沉积物-水界面处的重金属浓度明显高于孔隙水中的浓度;杜臣昌等(2012)对巢湖沉积物中重金属的富集以及污染原因进行研究,指出湖泊沉积物重金属污染与人为活动密切相关。大量研究表明,与人类活动密切相关的河湖沉积物均受到不同程度的重金属污染,且呈现出逐步加重的趋势,在局部区域重金属污染甚至已对生态系统造成严重危害(朱光旭等, 2013)。

近年来,贵州草海周边进入城镇化快速发展时期,工业废水和生活污水的大量排放使得沉积物中重金属含量不断增加。钱晓莉等(2009)研究发现,草海沉积物中已经出现汞污染;林绍霞等(2012)和张清海等(2013)对草海表层沉积物的重金属污染特征进行了研究,并对其生态风险进行了初步评估。然而,目前对草海沉积物主要重金属的时空分布特征及其生态危害仍缺乏系统研究。因此,此次研究

选取草海代表性点位采集表层沉积物,并在典型湖区采集沉积物柱芯,系统研究了草海沉积物Cr、Ni、Cd、Co、Pb、Zn和Sb等重金属的时空分布特征与潜在生态危害,旨在为草海湿地环境保护与污染治理提供科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

草海位于贵州西北部毕节市威宁彝族回族苗族自治县县城西南隅,是贵州省内最大的天然岩溶堰塞湖泊,属于国家级自然保护区。保护区面积96 km²,水域面积25 km²,海拔2200 m。气候以亚热带半湿润气候为主,光照充足,湖区水源补给主要为大气降水,每年5—10月为丰水期(占全年降水的88%),11月—翌年4月为枯水期,全湖平均水深2 m,最深处可达5 m(张张海等, 2007)。

1.2 样品的采集与分析

在草海全湖共布设19个采样点(图1),于2012年10月用彼得森抓斗采样器采集表层沉积物,并在典型湖区(15—19号点)利用自制重力采样器采集沉积物柱芯。将柱芯按2 cm间隔分样并装于50 mL离心管中。所有沉积物样品均低温保存,带回实验室后离心并冷冻干燥处理。干燥好的样品除去砂砾、动植物残体,取一定量的样品用玛瑙研钵研磨,过筛(200目)后于自封袋中密封保存。

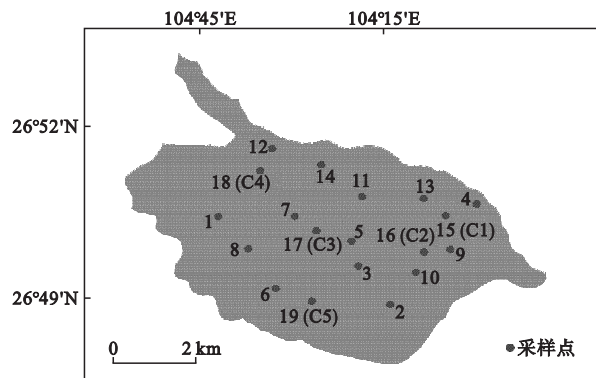


图1 草海采样点分布示意图

Fig.1 Location of sampling sites in Lake Caohai

称取处理好的样品 50 mg 放置于 Teflon 罐中, 加入 0.8 mL 浓 HF 和 1 mL 浓 HNO₃(亚沸蒸馏) 后放置于钢罐中, 于烘箱中高温(180~190 °C) 密闭消解 24~30 h, 直至溶液清亮, 彻底消解, 再放置于电热板上 140 °C 条件下蒸干, 然后加入少许硝酸(<1 mL) 并蒸干。将蒸干后的样品加入 1 mL Rh 内标、2 mL 硝酸和 3 mL 超纯水, 密封后放置于烘箱内 140 °C 条件下加热 4~5 h, 冷却后用超纯水定容到 100 mL, 采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS, ELAN DRC-e 型) 测定其重金属含量(王庚等, 2011; 张钊等, 2011; 叶华香等, 2013)。在分析过程中对部分样品进行了平行测定, 且以土壤标准样品 GSS1 为质控标准, 测定相对误差小于 5%。

1.3 评价方法

1.3.1 地质累积指数法 地质累积指数法又称为 Müller 指数, 是德国科学家 Müller 于 1979 年提出的一种评价水环境沉积物中重金属污染程度的定量指标(Müller, 1979; 李志萍等, 2012; 张琪等, 2012)。其公式为:

$$I_{geo} = \log_2 \left(\frac{C_n}{kB_n} \right)$$

式中, C_n 为元素 n 在沉积物中的含量, B_n 为沉积物中该元素的地球化学背景值, k 为考虑各地岩石差异而可能会引起的背景值的变动而取的系数(一般取值为 1.5)。

1.3.2 潜在生态危害指数法 潜在生态危害指数法是瑞典著名地球化学家 Hakanson 提出的用于评价重金属污染程度的方法, 也是目前常用的评价方法之一(Hakanson, 1980; 邴海健等, 2010; 郭笑笑等, 2011; 王爱军等, 2011)。潜在生态危害指数法的重点之一是给出毒性系数, 根据重金属性质及环境行为特点, 对土壤或沉积物中重金属污染进行评价。

表 1 地质累积指数与污染程度分级
Table 1 Geoaccumulation index (I_{geo}) and classification of pollution level

I _{geo}	等级	污染程度
<0	0	无污染
0~1	1	无污染~中度污染
1~2	2	中度污染
2~3	3	中度污染~重度污染
3~4	4	重度污染
4~5	5	重度污染~极强污染
>5	6	极强污染

引自张琪等(2012)。

表 2 潜在生态危害系数和危害指数与污染程度的关系
Table 2 The relationship between E_rⁱ, RI and degree of contamination

E _r ⁱ	污染程度	RI	污染程度
E _r ⁱ < 40	轻微生态危害	RI < 150	轻微生态危害
40 ≤ E _r ⁱ < 80	中等生态危害	150 ≤ RI < 300	中等生态危害
80 ≤ E _r ⁱ < 160	强生态危害	300 ≤ RI < 600	强生态危害
160 ≤ E _r ⁱ < 320	很强生态危害	RI ≥ 600	很强生态危害
E _r ⁱ ≥ 320	极强生态危害		

引自郭笑笑等(2011)。

该方法不仅考虑重金属含量, 而且将重金属的生态效应、环境效应与毒理学联系在一起, 采取具有可比性、等价属性指数分级法进行评价。其公式为:

$$RI = \sum_{i=1}^m E_r^i = \sum_{i=1}^m T_f^i \times C_f^i = \sum_{i=1}^m T_f^i \times \frac{C_s^i}{C_n^i}$$

式中: C_sⁱ 为表层重金属 i 的实测含量; C_nⁱ 为重金属 i 的评价参比值(对于沉积物来说, 一般采用本区域的土壤背景值); C_fⁱ 为重金属 i 的富集系数; T_fⁱ 为重金属 i 毒性响应系数, 反映其毒性水平和生物对其污染的敏感程度; E_rⁱ 为某区域沉积物中重金属 i 的潜在生态危害系数; RI 为某区域沉积物中多种重金属的潜在生态危害指数。

2 结果与分析

2.1 草海表层沉积物重金属含量及分布特征

Cd、Pb、Zn 和 Sb 的平均含量远超过贵州省土壤元素背景值(表 3)。Cd 含量范围为 2.80~24.36 mg·kg⁻¹, 平均值为 10.33±6.40 mg·kg⁻¹, 是背景值的 15.7 倍; Pb 和 Zn 的含量范围分别为 17.5~120 mg·kg⁻¹(平均值为 67.7±31.9 mg·kg⁻¹) 和 133~585 mg·kg⁻¹(平均值为 316±147 mg·kg⁻¹); Sb 含量分布在 0.51~1.80 mg·kg⁻¹(平均值为 1.05±0.30

表 3 草海表层沉积物重金属含量及贵州省土壤元素背景值
Table 3 Contents of heavy metals in the surface sediments of Lake Caohai and background values of soil heavy metals in Guizhou Province

重金属元素	草海重金属含量平均值 (mg·kg ⁻¹)	贵州省土壤元素背景值 (mg·kg ⁻¹)
Cr	39.8±36.0	95.9
Ni	30.4±39.1	39.1
Cd	10.33±6.40	0.659
Co	4.48±1.80	19.2
Pb	67.7±31.9	35.2
Zn	315.6±147.3	99.5
Sb	1.05±0.30	0.11

贵州省土壤元素背景值引自张清海等(2013)。

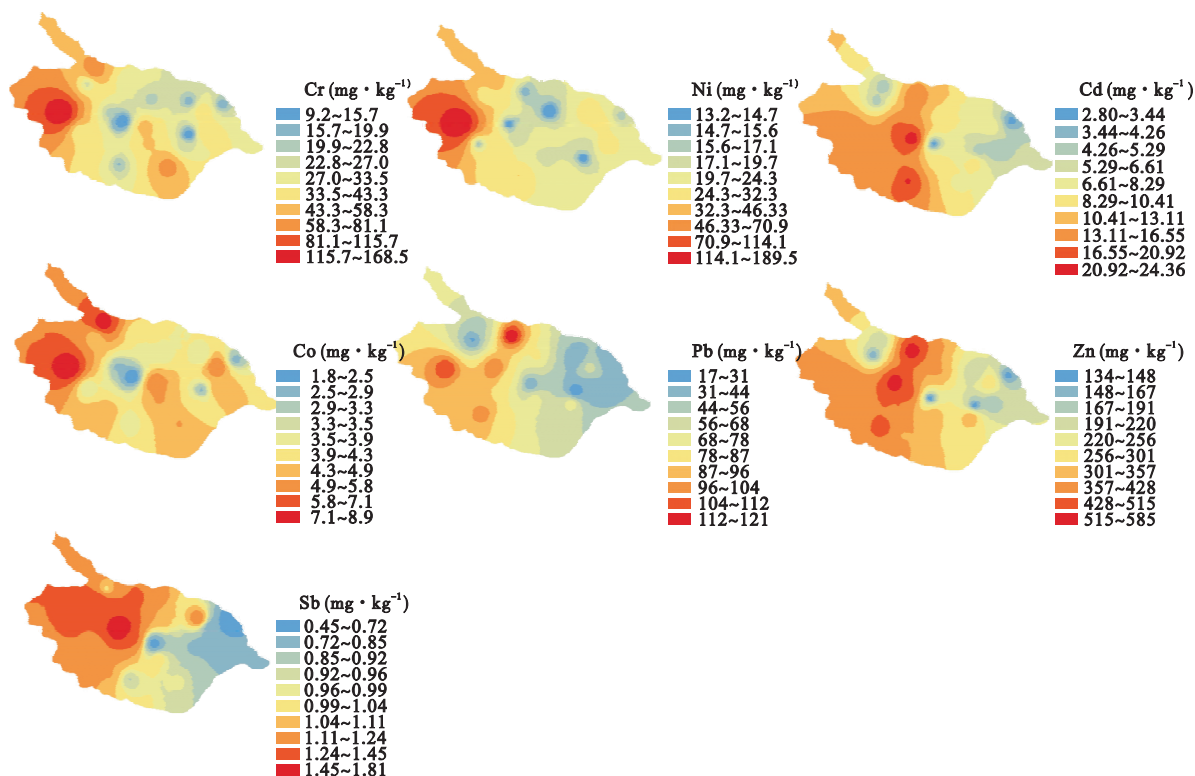


图 2 草海表层沉积物重金属浓度分布图
Fig.2 Distribution of heavy metals in the surface sediments of Lake Caohai

mg · kg⁻¹) 其中 7 号点是背景值的 16 倍; Cr 和 Ni 的含量较低, 仅位于西北部的 1 号点超过了贵州省土壤元素背景值, 其他采样点则均低于背景值。草海表层沉积物中 Co 的含量也低于贵州省土壤元素背景值(表 3)。

草海沉积物 7 种重金属含量的分布特征存在明显差异。其中, 北湖、湖心以及西南湖区 Cd、Pb 和 Zn 等 3 种重金属含量较高, 分布特征较为相似, 由北向西南方向呈扇形分布; 而 Sb 在西部湖区含量较高; Cr 和 Ni 仅在草海最西端区域含量稍高; 草海沉积物 Co 含量总体较低, 但其在西端湖区的含量明显高于其他区域(图 2)。

2.2 草海表层沉积物污染评价

由表 4 可知, 草海表层沉积物的地质累积指数分级从 0~5 不等。除 1 号点处 Cr 和 Ni 出现轻度污染外, 草海表层沉积物 Cr、Ni 和 Co 的地质累积指数均接近 0, 属于无污染级别; Pb 和 Zn 的地质累积指数分级大多位于 1~2, 属于中等污染; 地质累积指数研究结果显示, Cd 和 Sb 污染最严重, 其指数范围分别为 1.50~4.62(平均值 3.10) 和 1.63~3.45(平均值 2.61), 其污染等级大多处于 3~5, 属于强污染程度,

部分点位甚至达到极严重污染程度。

根据 19 个采样点重金属的平均生态风险系数 E_r^i , 草海表层沉积物中重金属的潜在生态风险为 Cd>Sb>Pb>Ni>Zn>Co>Cr, 其中 Cd 与 Sb 对潜在生态风险指数的贡献分别达到 79.80% 和 16.16%, 是草海重金属潜在生态危害的主要影响因子。

根据潜在生态风险系数 E_r^i 、潜在生态危害指数 RI(图 3) 与污染程度的关系(表 2), 在 Cd 和 Sb 高贡献的条件下, 7 个采样点(1 号、6 号、7 号、8 号、14 号、17 号和 19 号, 大部分位于西部湖区)的 RI 超过了 600, 具有很强的潜在生态危害; 8 个采样点(2 号、3 号、10 号、11 号、12 号、13 号、15 号和 18 号,

表 4 草海 19 个采样点表层沉积物的地积累指数分级
Table 4 Classification of pollution indexes of the surface sediments from 19 sites in Lake Caohai

元素	19 个采样点 I_{geo} 分级范围	平均值
Cr	0~1	0
Ni	0~2	0
Cd	2~5	4
Co	0	0
Pb	0~2	1
Zn	0~2	1
Sb	2~4	3

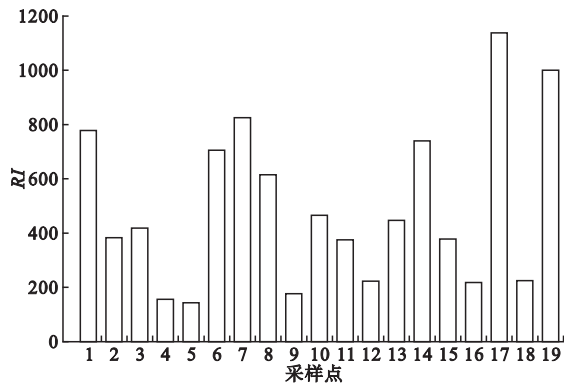


图3 草海19个采样点表层沉积物的潜在生态风险指数
Fig.3 Ecological risk indexes of surface sediments from 19 sites in Lake Caohai

大部分位于东部湖区)的RI位于300~600,具有强潜在生态危害;4个采样点(4号、5号、9号和16号)的RI在150~300,具有中等潜在生态危害。

通过对比研究发现,地质累积指数法和潜在生态危害指数法的评价结果较为一致,均表明草海表层沉积物重金属污染较严重。同时,研究显示,重金属污染给草海湿地生态带来了不同程度的潜

表6 特征值和累计贡献率
Table 6 Characteristic value and accumulative contribution

因子	初始特征值			提取平方和载入			旋转平方和载入		
	合计	方差的%	累积%	合计	方差的%	累积%	合计	方差的%	累积%
1	3.790	54.140	54.140	3.790	54.140	54.140	3.774	53.920	53.920
2	2.669	38.123	92.263	2.669	38.123	92.263	2.684	38.343	92.263
3	0.271	3.874	96.138						
4	0.218	3.114	99.252						
5	0.032	0.458	99.709						
6	0.014	0.193	99.902						
7	0.007	0.098	100.000						

因子分析的主要目的是将具有相近因子荷载的各个变量置于一个公因子之下,正交方差最大旋转使每一个主因子只与最少个数的变量有相关关系,

表7 旋转前后因子载荷矩阵
Table 7 Factor loading matrix before rotation and after rotation

指标	旋转前		旋转后	
	1	2	1	2
Cr	0.173	0.971	0.058	0.985
Ni	0.284	0.909	0.176	0.936
Cd	0.986	-0.062	0.986	0.054
Co	-0.065	0.918	-0.172	0.904
Pb	0.980	-0.035	0.977	0.080
Zn	0.968	-0.217	0.987	-0.102
Sb	0.898	-0.068	0.900	0.038

在生态危害,其中Cd和Sb污染及潜在生态危害最严重。

2.3 草海表层沉积物重金属因子分析

由表5可见,Cr、Ni和Co之间表现出显著的正相关关系,Sb、Cd、Pb和Zn之间表现出显著的正相关关系,反映出这2组重金属可能分别具有相同的成因或共同的来源。相关系数矩阵计算得到的因子特征值和累计贡献率表明(表6),第1主因子和第2主因子提供了92%以上的源信息。因此,提取2个最重要的公因子F1和F2。

表5 草海表层沉积物7种重金属相关性矩阵
Table 5 Correlation matrix of 7 heavy metals in surface sediments of Lake Caohai

	Cr	Ni	Cd	Co	Pb	Zn	Sb
Cr	1	0.896**	-0.023	0.862**	0.266	0.062	0.030
Ni		1	0.174	0.666**	0.274	0.112	0.130
Cd			1	-0.261	0.760**	0.828**	0.538*
Co				1	0.078	-0.140	-0.130
Pb					1	0.961**	0.535*
Zn						1	0.618**
Sb							1

n=19; ** P<0.01; * P<0.05.

而使足够多的因子负荷均很小,以便对因子的意义做出更合理的解释(管后春等,2013)。

2.3.1 F1因子 F1因子的方差贡献占总方差贡献的54%,远高于其他因子,是控制草海表层沉积物重金属来源及分布的最重要因子。同时从表7可以看出,旋转前后因子载荷的变量结果相差不大,变量与某一个因子的联系系数(载荷)绝对值越大,则该因子与变量关系越近,表明F1因子主要控制Cd、Pb、Zn和Sb的分布。

综合分析区域地质矿产分布特征发现,草海西部及南部发育有重要的黔西北铅锌矿,是威宁钒铅锌矿和赤铁矿的主要分布区域之一(王东,2009)。镉是一种重要的分散元素,主要以类质同象替代的

形式赋存在闪锌矿和方铅矿的矿物晶格中,在表生地球化学过程中亦可以与铅锌等金属同时被活化迁移(周家喜等,2009);而锑则易吸附于赤铁矿等铁氧化物表面而与之共同迁移(张道勇等,2010)。从20世纪中期开始,草海周围铅锌矿大规模开采,由于技术限制,矿产的不完全开采导致Cd、Pb、Zn和Sb等重金属在地表累积(陈修康等,2012),且草海周围地势是三面高一面低(西、南和东高,北低)(刘佳,2012),这些重金属在大气降水的淋溶以及地表径流的搬运作用下向湖心方向汇集,最终贮存于沉积物中。

结合草海表层沉积物重金属含量分布图(图2),发现Cd、Pb和Zn 3种重金属的含量分布较为相似,含量高值集中在北湖、湖心以及西南湖区,由北向西南方向呈扇形分布;Sb的含量高值也主要分布在湖心及西部湖区。因而,草海周边的铅锌矿、赤铁矿等矿产开采是草海沉积物Cd、Pb、Zn和Sb的主要来源,故F1因子为矿产开采。

2.3.2 F2因子 F2因子的方差贡献占总方差贡献的38%,也是控制草海沉积物重金属来源及分布的重要因子。旋转前后因子的变化表明,F2对Cr、Ni和Co的分布具有重要影响。

金属加工、电镀、制革等行业产生的废水、废气是Cr、Ni和Co等污染物的最主要来源(刘海珍,2009)。威宁县城坐落于草海分水岭之上,由于城镇基础设施落后,县城约1/3的生产、生活污水未经处理直接排入草海(陶思明,1999)。除此之外,坐落于威宁北部的新城正在建设中,新城中大量相关企业入驻,新城污水处理设施的不健全导致产生的大量废水无法得到有效处理就直接排放。Cr、Ni和Co同为亲铁元素,具有极为相似的地球化学行为,在表生地球化学过程中通常可以共同迁移。因此,城市的生产生活污水可能也是草海湖区重金属污染的重要来源之一。

草海表层沉积物重金属含量分布图显示,Cr和Ni的主要污染区域位于草海最西端湖区,Co的高值也出现在最西端湖区,毗邻威宁城区。综上所述,推断城镇生产生活污水是Cr、Ni和Co的主要污染源。因此,F2因子为城镇生产生活污水排放。

2.4 草海沉积物重金属污染历史

高原封闭、半封闭湖泊的沉积记录具有连续性、敏感性和高分辨率的特点,在揭示近代环境污染历史方面具有独特优势(陈敬安等,1998)。因此,沉

积物柱芯重金属剖面特征研究可以清晰还原湖泊重金属污染历史。

本研究对草海不同湖区的5根沉积物柱芯进行了重金属剖面特征分析,结果表明,沉积物柱芯中污染较严重的4种重金属依然为Cd、Sb、Zn和Pb。同一沉积物柱芯中Cd、Sb、Zn和Pb等含量变化趋势大致相同,进一步证明了4种重金属的同源性(图4)。尽管由于不同点位沉积速率存在差异,不同柱芯中重金属含量变化发生的深度不同,但是5根沉积物柱芯重金属含量变化均呈现出相似的变化趋势,即柱芯底部含量较低、柱芯中部至近表层含量逐渐升高、近表层至表层含量逐渐降低的趋势。朱正杰等(2014)对草海湖心区沉积物进行了定年,得到的沉积速率为 $0.28\text{ cm}\cdot\text{a}^{-1}$ 。C3柱芯的采样位置与朱正杰等(2014)定年所用柱芯采样位置较为接近,因此本研究利用此沉积物速率对C3柱芯重金属的累积历史进行了分析。Cd、Sb、Zn和Pb 4种重金属含量升高发生在约10 cm深度,对应的时间为1980年左右;从峰值开始降低发生的深度约为3 cm,对应的时间为2002年左右,正好呼应了草海流域的矿产开采历史。20世纪初期,贵州毕节地区铅锌矿开采与冶炼开始兴起;90年代到21世纪初期,迅猛发展;之后逐步被限制,截止2006年土法炼锌被彻底取缔,反映出草海流域矿产开采对湖泊中重金属含量具有显著影响。

沉积物柱芯研究结果显示,草海流域土法炼锌被取缔后,沉积物中Cd、Sb、Zn和Pb 4种重金属的蓄积量显著降低。但是对表层沉积物的污染状况评价表明,Cd、Sb和Pb仍具有较强的潜在生态危害性(图3),表明冶炼矿渣及矿山附近被污染土壤的淋滤释放等矿产资源开采的遗留问题是目前草海重金属污染的最主要来源。

3 结论

草海重金属主要来源于周边矿产资源不合理开发和城镇生产生活污水排放。铅锌矿等矿产开采活动主要控制表层沉积物Cd、Pb、Zn和Sb的分布,含量较高值出现在北湖、湖心以及西南湖,由北向西南方向呈扇形分布;而Cr、Ni和Co则主要受城镇生产生活污水排放的影响,最西端湖区含量较高。地质累积指数和潜在生态危害指数的综合分析表明,Cd、Sb、Pb和Zn污染较严重,其中Cd和Sb污染最严重,已达到较强的潜在生态危害程度。

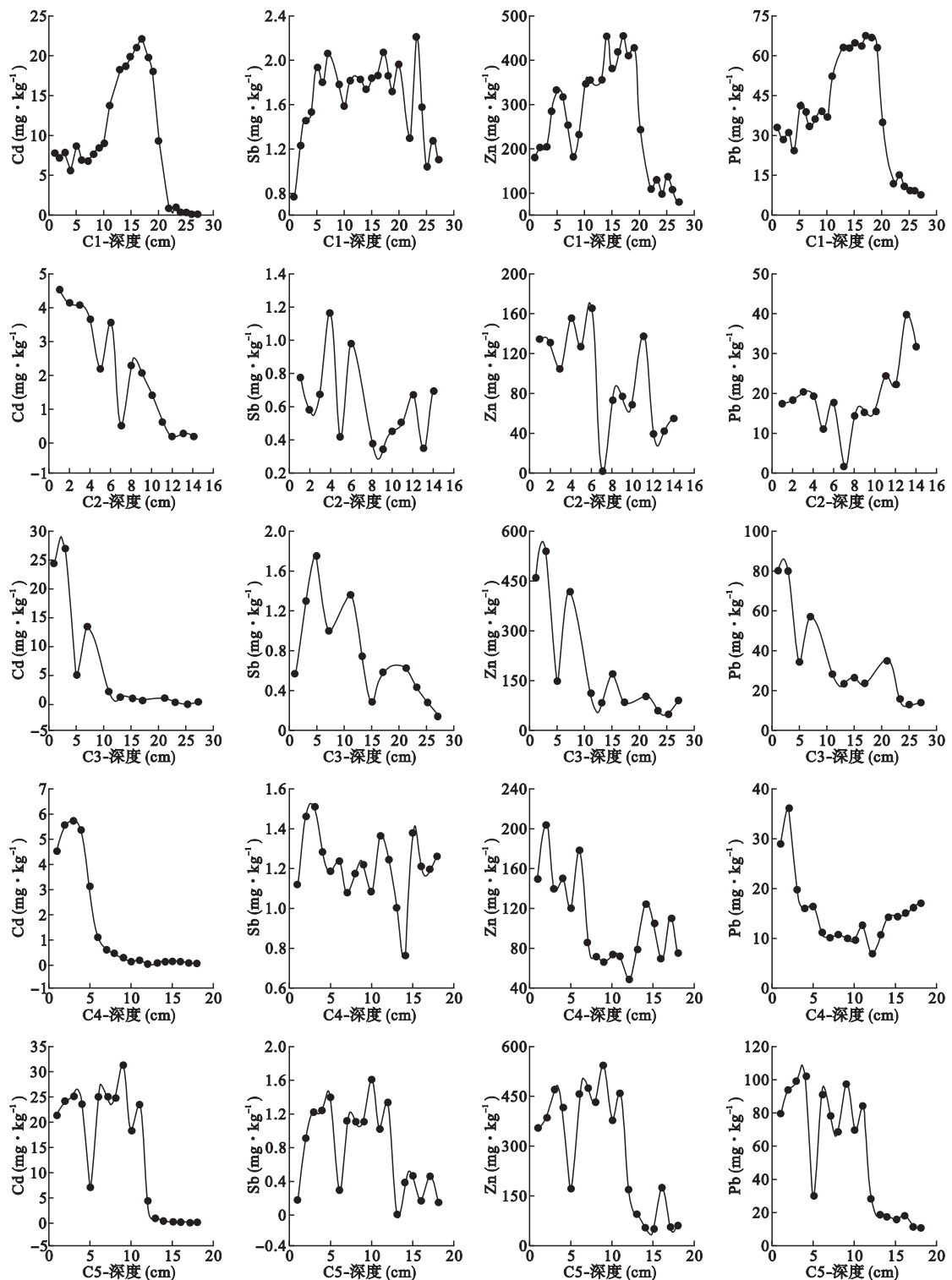


图4 草海沉积物柱芯重金属 Cd、Sb、Zn 和 Pb 含量剖面分布
 Fig.4 The vertical profiles of heavy metals of sediments in Lake Caohai

草海沉积物柱芯中重金属的剖面分布特征正好对应了草海流域的矿产开采历史。伴随着流域矿产资源开采活动的取消,沉积物中 Cd、Sb、Zn 和 Pb 等

4 种重金属的蓄积量显著降低,但仍具有较强的潜在生态危害性,表明矿产资源开采的遗留问题是目前草海沉积物重金属污染的最主要来源。因此,应

结合实际,制定合理的治理措施,截断重金属污染来源,并研究建立有效的沉积物重金属污染控制措施,恢复草海良好生态环境。

参考文献

- 邴海健,吴艳宏,刘恩峰,等. 2010. 长江中下游不同湖泊沉积物中重金属污染物的累积及其潜在生态风险评价. *湖泊科学*, **22**(5): 675-683.
- 陈敬安,万国江,黄荣贵. 1998. 洱海沉积物重金属地球化学相及其污染历史研究. *地质地球化学*, **26**(2): 1-8.
- 陈修康,张华俊,顾继光,等. 2012. 惠州市3座供水水库沉积物重金属污染特征. *应用生态学报*, **23**(5): 1254-1262.
- 杜臣昌,刘恩峰,羊向东,等. 2012. 巢湖沉积物重金属富集特征与人为污染评价. *湖泊科学*, **24**(1): 59-66.
- 管后春,李运怀,彭苗枝,等. 2013. 黄山城市土壤重金属污染及其潜在生态风险评价. *中国地质*, **40**(6): 1949-1958.
- 郭笑笑,刘丛强,朱兆洲,等. 2011. 土壤重金属污染评价方法. *生态学杂志*, **30**(5): 889-896.
- 李宝,丁士明,范成新,等. 2008. 滇池福保湾沉积物-水界面微量重金属扩散通量估算. *环境化学*, **27**(6): 114-120.
- 李志萍,马超振,李珊珊,等. 2012. 太子河沉积物重金属污染地积累指数法评价. *长江科学院院报*, **29**(10): 37-40.
- 林绍霞,张清海,郭媛,等. 2012. 贵州草海沉积物重金属污染特征及潜在生态风险分析. *农业环境科学学报*, **31**(11): 2236-2241.
- 刘成,邵世光,范成新,等. 2014. 巢湖重污染汇流湾区沉积物重金属污染特征及风险评价. *中国环境科学*, **34**(4): 1031-1037.
- 刘佳. 2012. 草海高原湖泊湿地生态安全评价研究(硕士学位论文). 重庆: 重庆师范大学.
- 刘海珍. 2009. 重金属污染物在常规过滤工艺的净化模型研究(硕士学位论文). 太原: 太原理工大学.
- 钱晓莉,冯新斌,闭向阳,等. 2009. 贵州草海沉积物汞的含量和分布特征初步研究. *西南大学学报: 自然科学版*, **31**(1): 32-36.
- 秦延文,张雷,袁丙辉,等. 2012. 太湖表层沉积物重金属赋存形态分析及污染特征. *环境科学*, **33**(12): 4291-4299.
- 陶思明. 1999. 草海保护区的压力和可持续管理. *环境保护*, (1): 25-28.
- 王东. 2009. 威宁小寨-耿家屯地区铅锌矿成矿规律及成矿预测(硕士学位论文). 贵州: 贵州大学.
- 王庚,彭婧,史红星,等. 2011. 电感耦合等离子体质谱同时测定沉积物中12种重金属元素. *环境化学*, **30**(11): 1944-1948.
- 王爱军,叶翔,李团结. 2011. 近百年来珠江口淇澳岛滨海湿地沉积物重金属累积及生态危害评价. *环境科学*, **32**(5): 1306-1314.
- 叶华香,臧淑英,张丽娟,等. 2013. 扎龙湿地沉积物重金属空间分布特征及其潜在生态风险评价. *环境科学*, **34**(4): 1333-1339.
- 张磊,宋柳霆,郑晓笛,等. 2014. 溶解有机质与铁氧化物相互作用过程对重金属再迁移的影响. *生态学杂志*, **33**(8): 2193-2198.
- 张琪,刘媛媛,陈敏,等. 2012. 应用地积累指数法评价南通市内河沉积物中重金属污染. *干旱环境监测*, **26**(1): 28-31.
- 张钊,白向玉,周磊. 2011. 地积累指数法和潜在生态危害指数法在污泥重金属污染中的应用 // 2011 中国环境科学学会学术年会论文集(第2卷). 乌鲁木齐: 中国环境科学出版社: 1832-1836.
- 张道勇,潘响亮,慕桂金. 2010. 水、土环境中的锑(Sb)污染及其对植物和微生物的生态毒理效应研究进展. *应用与生物环境学报*, **16**(6): 891-894.
- 张华海,李明晶,姚松林. 2007. 草海研究. 贵阳: 贵州科技出版社.
- 张华俊,陈修康,韩博平,等. 2012. 鹤地水库沉积物营养盐及重金属分布和污染特征分析. *环境科学*, **33**(4): 1167-1175.
- 张家春,林昌虎,林绍霞,等. 2014. 贵州草海流域不同功能区土壤-植物系统重金属迁移与富集特征. *水土保持学报*, **28**(2): 169-174.
- 张清海,林昌虎,谭红,等. 2013. 草海典型高原湿地表层沉积物重金属的积累、分布与污染评价. *环境科学*, **34**(3): 1055-1061.
- 周家喜,黄智龙,周国富,等. 2009. 贵州天桥铅锌矿床分散元素赋存状态及规律. *矿物学报*, **29**(4): 471-480.
- 朱光旭,郭庆军,陈同斌,等. 2013. 北京市南沙河沉积物重金属污染特征及风险评价. *生态学杂志*, **32**(8): 2148-2153.
- 朱正杰,陈敬安,曾艳. 2014. 草海地区过去500年来古温度重建: 来自沉积物纤维素结合碳酸盐氧同位素的证据. *中国科学: 地球科学*, **44**(2): 250-258.
- Apeti DA, Hartwell IS. 2015. Baseline assessment of heavy metal concentrations in surficial sediment from Kachemak Bay, Alaska. *Environmental Monitoring and Assessment*, **187**: 4106-4106.
- Gao X, Chen CT. 2012. Heavy metal pollution status in surface sediments of the coastal Bohai Bay. *Water Research*, **46**: 1-11.
- Hakanson L. 1980. An ecology risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach. *Water Research*, **14**: 975-1001.
- Jiang X, Wang W, Wang S, et al. 2012. Initial identification of heavy metals contamination in Taihu Lake, a eutrophic lake in China. *Journal of Environmental Sciences*, **24**: 1539-1548.
- Léopold EN, Baussand P, Emmanuel EG. 2012. Heavy metals accumulation in sediment cores of the Municipal Lake of Yaounde, Cameroon. *Global Journal of Environmental Research*, **6**: 100-110.
- Müller G. 1979. Schwermetalle in den Sedimenten des Rheins-Veränderungen seit 1971. *Umschau*, **79**: 778-783.
- Yuan X, Zhang L, Li J, et al. 2014. Sediment properties and heavy metal pollution assessment in the river, estuary and lake environments of a fluvial plain, China. *Catena*, **119**: 52-60.

作者简介 宋以龙,男,1990年生,硕士研究生,研究方向为环境地球化学。E-mail: songyilong@vip.skleg.cn
责任编辑 魏中青