

抚仙湖沉积物重金属时空变化与人为污染评价*

燕婷^{1,2}, 刘恩峰^{1**}, 张恩楼¹, 李艳玲¹, 沈吉¹

(1: 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008)

(2: 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 分析了抚仙湖表层沉积物及沉积短岩芯中 10 种金属元素含量, 结合沉积年代学, 定量研究了 Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 的污染特征及时空变化规律; 参考沉积物质量基准与潜在生态风险指数法探讨了表层沉积物重金属的潜在生态风险。结果表明, 表层沉积物中重金属含量具有一定的空间差异性, 近岸地区重金属含量总体上高于湖心区; Pb、Zn 含量自 1980s 中期以来逐渐增加, 而 Cr、Cu、Ni 含量呈下降趋势。重金属富集系数与聚类分析结果表明, 抚仙湖沉积物主要重金属污染元素为 Pb、Zn, 污染开始于 1980s 中期, 并逐渐加重。表层沉积物中 Pb、Zn 富集系数分别为 1.6~4.1 和 1.4~2.6, 已达到弱-中等污染程度, 北部湖区污染程度略高于南部湖区; 除此之外, 北部湖区近岸区域 Cr 污染程度也略高于其他湖区。除了大气沉降来源之外, 抚仙湖沉积物重金属污染还可能与入湖河流输入有关。单因子生态风险指数表明, 表层沉积物中 Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 具有较低的潜在生态风险; 而综合潜在生态风险指数表明, 表层沉积物中重金属具有中等程度的潜在生态风险, 这与根据沉积物质量基准所获得的评价结果一致。

关键词: 抚仙湖; 沉积物; 重金属; 污染; 时空特征; 潜在生态风险

The spatio-temporal variations of heavy metals in the sediment of Lake Fuxian and the contamination assessment

YAN Ting^{1,2}, LIU Enfeng^{1**}, ZHANG Enlou¹, LI Yanling¹ & SHEN Ji¹

(1: *State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P.R.China*)

(2: *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P.R.China*)

Abstract: Concentrations of metals in the surface and core sediments of Lake Fuxian were determined. The spatio-temporal features of contaminations Cr, Cu, Ni, Pb and Zn were discussed, referencing to the enrichment factor method and the chronology of the sediment core. Potential eco-risks of the heavy metals in the surface sediments were discussed on base of combining the potential ecological risk index and sediment quality guideline assessments. The results showed that metal concentrations exhibited some spatial variations with general higher concentrations in the near shore area than in the lake center. Concentrations of Pb and Zn have increased typically since the mid-1980s, whereas concentrations of Cr, Cu and Ni have decreased. Pb and Zn should be influenced by human contamination as indicated by the hierarchical analysis and the enrichment factors. The metal contamination began at the mid-1980s and showed an increasing trend. Enrichment factors of Pb were between 1.6–4.1 and Zn between 1.4–2.6 in the surface sediments, reflecting minimal to moderate contamination levels, where the values were decreased from the north lake to the south. Moreover, the sediment in the near shore region of the north lake was also contaminated with Cr. The riverine input should be also a reason for the heavy metal contaminations in the sediment of Lake Fuxian, additionally the atmospheric deposition. Metals Cr, Cu, Ni, Pb and Zn in the surface sediments may have low potential eco-risk estimated on the potential ecological risk factor. However, the metals may be of a moderate potential eco-risk according to the potential ecological risk index, which is consistent with that from a baseline of the sediment quality assessment.

* 国家重点基础研究发展计划“973”项目(2012CB956100)、国家自然科学基金项目(41271214)和中国科学院南京地理与湖泊研究所青年科学家小组项目(NIGLAS2011KXJ02)联合资助。2015-02-05 收稿; 2015-04-21 收修改稿。燕婷(1989~), 女, 硕士研究生; E-mail: yanting4022@126.com.

** 通信作者; E-mail: eflu@niglas.ac.cn.

Keywords: Lake Fuxian; sediment; heavy metal; contamination; spatio-temporal variations; potential eco-risk

重金属是水体沉积物的重要组成成分,由于其难降解性、生物累积性和食物链放大等生态环境效应,成为湖泊等水体环境中备受关注的污染物之一^[1-2]。以各种途径进入湖泊中的重金属通过吸附、络合、螯合等方式与悬浮颗粒物结合并埋藏于沉积物中,因此沉积物蕴含了湖泊与流域环境质量变化的丰富信息^[3]。沉积物中的部分重金属在水土界面环境条件发生变化时可发生“活化”,形成二次污染^[4];沉积物中的重金属还可以通过生物富集和放大作用对生态系统构成威胁^[1,5]。因此,沉积物重金属富集状况是湖泊环境质量健康与否的一个重要指标。

湖泊沉积物中自然与人为污染来源的重金属往往叠加在一起,为定量评价沉积物重金属污染程度,国内外众多学者提出了多种评价方法,其中地累积指数法与富集系数法应用较为广泛^[6-9]。相对于地累积指数法,富集系数方法对沉积物中重金属变化的粒度效应进行了有效的校正,重金属污染定量结果更为准确^[8-9]。此外,聚类分析方法能够帮助我们辨识沉积物中重金属的亲密程度以及来源,也是重金属污染研究中常用的方法之一^[10]。除了重金属污染之外,重金属潜在生态危害也是沉积物质量研究的重点。但由于沉积物中重金属化学行为的复杂性以及沉积环境条件的差异,迄今为止国际上尚无普适性的沉积物重金属潜在生态风险评价标准。沉积物质量基准以及瑞典科学家 Håkanson 提出的潜在生态危害评价法^[11-12],在沉积物重金属潜在生态危害研究中应用较为广泛。

重金属污染是我国湖泊面临的主要环境问题之一,不仅东部经济发达地区的太湖、巢湖、鄱阳湖等大型浅水湖泊存在重金属污染^[5,13-14],西南地区的滇池、阳宗海、红枫湖等湖泊也已受到不同程度的重金属污染影响^[15-17]。虽然抚仙湖流域经济发展相对较为落后,但曾海鳌等^[6]和王小雷等^[7]的研究表明,抚仙湖沉积物也存在一定程度的重金属污染。抚仙湖沉积物以粘土与细粉砂为主,但粒度组成仍存在一定程度的时空差异^[18-19]。由于已有研究在沉积物重金属背景值选取及沉积物粒度效应校正等方面的局限性,在抚仙湖沉积物重金属人为污染定量评价方面还存在一定不足。表层沉积物是重金属发生二次释放的主要来源^[4],同时也是底栖动物的主要栖息地,与湖泊生态环境具有更为密切的联系^[20],而目前对抚仙湖表层沉积物重金属污染状况及潜在生态危害还缺乏全面的了解。本文通过对抚仙湖沉积岩芯及表层沉积物中重金属含量的分析,结合沉积年代学以及重金属富集系数方法,系统研究重金属污染特征及其时空变化规律;参考沉积物质量基准与 Håkanson 提出的潜在生态风险指数法探讨表层沉积物中重金属的潜在生态风险,以期对抚仙湖环境保护提供科学参考。

1 研究区概况

抚仙湖位于云南省中部,是我国第二大深水湖泊,属云南省玉溪市辖区。湖泊面积 212 km²,最大水深 155 m,平均水深 89.6 m,平均容量 189×10⁸ m³^[21]。抚仙湖为半封闭的山间盆地型淡水湖,湖水主要依靠降水及地表径流补给,主要入湖河流有尖山河、东大河、西大河和梁王河等,湖水通过东岸海口河排入南盘江^[21]。抚仙湖具有饮用水源、渔业、工农业用水、旅游等功能,是当地经济发展的重要基础。抚仙湖流域内工业发展相对滞后,目前基本形成以农业为主、磷化工为支柱的产业格局^[22-23]。1980s 以来,随着流域经济的发展,大量污染物通过地表径流等方式进入抚仙湖^[23],湖泊水环境质量逐渐下降,水体 TN、COD_{Mn}、Chl.a 浓度等指标逐渐升高^[24],水体透明度下降^[24-25],抚仙湖由贫营养型逐渐演变为贫-中营养型湖泊^[25-26]。已有研究主要关注于抚仙湖水体营养状况及生态环境变化,对沉积物重金属污染研究较为薄弱^[6-7]。

2 材料与方法

2.1 样品采集

2012 年 3 月,使用奥地利产 UWITEC 重力采样器在抚仙湖南部湖区水深 80 m 处采集了长约 28 cm 柱状沉积岩芯,沉积岩芯以 1 cm 为间隔分样;采用 UWITEC 重力采样器于 2005 年采集表层(0~1 cm)沉积物 21 个,所有样品均装入聚乙烯自封袋中密封保存。采样点采用全球定位系统(GPS)定位,样点布设如图 1 所示。

2.2 分析方法

沉积岩芯样品冷冻干燥后,²¹⁰Pb_{tot}、²²⁶Ra 及 ¹³⁷Cs 活度采用美国 EG & G Ortec 公司生产的高纯锗井型探

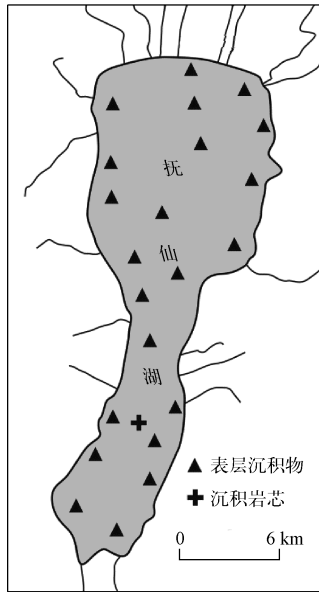


图1 抚仙湖表层沉积物及沉积岩芯采样点位置

Fig.1 Sampling sites of the surface sediments and sediment core in the Lake Fuxian

测器 (HPGe GWL-120-15) 测定, 根据 Appleby 等的计算方法获得²¹⁰Pb_{ex} 活度^[27]. ¹³⁷Cs 和²²⁶Ra 标准样品由中国原子能科学研究院提供, ²¹⁰Pb 标准样品由英国利物浦大学做对比标准, 测试误差小于 10%.

表层沉积物及沉积岩芯样品冷冻干燥、研磨后, 经 HCl-HNO₃-HF 完全消解后, 采用美国 Leeman Labs Profile 电感耦合等离子体原子发射光谱仪 (ICP-AES) 测定金属元素 (Al、Fe、Ti、V、Co、Cr、Ni、Cu、Pb、Zn) 含量. 分析过程中采用标准参考物质 GBW07358 (GSD-15) 进行精度比对, 各元素的最大误差均小于 7%.

2.3 重金属污染与潜在生态风险评价方法

沉积物中 Al、Fe、Ti 等金属元素以流域自然来源为主, 其含量指示了流域物源区土壤与岩石碎屑成分供给的变化; 与 Fe 相比, Al、Ti 地球化学性质更为稳定, 通常作为参比元素用于重金属富集系数 (EF) 计算^[8-9]. Boës 等^[28] 的研究表明, 单一元素校正存在一定的不确定性. 为降低单一元素校正的误差, 本文选取 Al、Ti 共同作为参比元素, 目标元素 M 经地球化学校正后的 EF 计算公式为:

$$EF = [(M/Ti)_{\text{样品}} / (M/Ti)_{\text{背景}} + (M/Al)_{\text{样品}} / (M/Al)_{\text{背景}}] / 2 \quad (1)$$

背景值的选取直接影响到 EF 值大小, 区域土壤或地壳中金属元素平均值常被用来作为背景^[7]. 研究表明, 在进行湖泊等较小水体单元沉积物重金属污染评价时, 历史沉积物更为合适^[8]. 根据沉积岩芯测年结果及抚仙湖流域经济发展的特点, 本文采用沉积岩芯底部 3 个样品 (相当于 1760—1800 年) 中金属含量平均值作为参考背景 (表 2).

Håkanson 提出的单项重金属 *i* 的潜在生态风险指数 Er^i 的计算公式为^[12]:

$$Er^i = Tr^i \cdot C_i^j \quad (2)$$

式中, Tr^i 为重金属 *i* 的毒性响应系数, 反映重金属的毒性水平, Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 的毒性响应系数分别为 20、5、5、5、1^[12]; C_i^j 为重金属污染系数, 即式 (1) 中的 EF, 单项重金属潜在生态风险等级划分见表 1^[12].

多项金属的综合潜在生态风险指数 RI 为单项金属潜在生态风险指数之和^[12], 即:

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

Håkanson 提出的重金属综合潜在生态风险划分标准是基于 As、Hg、Cd、Cr、Cu、Pb、Zn 和 PCB 8 种元素的 RI 值^[12, 29], 本文只分析了 Cr、Cu、Pb、Zn 和 Ni 5 种元素, 采用 Håkanson 提出的原有 RI 等级划分, 会低估重金属的综合潜在生态风险. 参考 Zhang 等^[29] 的方法, 根据所分析的 5 种重金属的毒性系数与 8 种元素毒性系数的比值, 对重金属综合潜在生态风险指数阈值进行调整, 结果见表 1.

表 1 单因子生态风险指数、综合潜在生态风险指数及调整的分级标准

Tab.1 Classification of the potential ecological risk factor (Er), the potential ecological risk index (RI) and the risk degrees

单因子污染物潜在生态风险指数 (Er)	单因子污染物生态风险等级	综合潜在生态风险指数 (RI)	综合潜在生态风险等级
$Er < 40$	低	$RI < 35$	低
$40 \leq Er < 80$	中	$35 \leq RI < 70$	中
$80 \leq Er < 160$	较重	$70 \leq RI < 140$	重
$160 \leq Er < 320$	重	$RI \geq 140$	严重
$Er \geq 320$	严重		

我国在沉积物质量基准研究方面起步较晚,由于沉积物中金属污染物化学行为的复杂性,国外已有的沉积物质量基准中重金属含量阈值存在一定差异.MacDonald 等在综合已有沉积物质量基准以及统计学和毒性实验结果验证的基础上,建立了普适的淡水水体沉积物重金属质量基准(Consensus-Based SQGs, CBS-QGs)^[11],对沉积物中 Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 毒性具有较高的辨识准确性(90%)^[11].CBSQGs 包括阈值效应含量(threshold effect concentration, TEC)和可能效应含量(probable effect concentration, PEC),不同阈值反映了重金属产生生物毒性的概率.若沉积物金属含量低于 TEC,则该金属不会对底栖生物产生毒性效应;若沉积物某金属含量高于 PEC,则该金属会产生毒性;如果金属含量在 TEC 和 PEC 之间,则可能产生毒性效应^[11].

2.4 数据处理

沉积物中金属元素聚类分析采用 IBM SPSS statistics 19 统计软件,表层沉积物重金属浓度与富集系数空间分析采用 Suffer 8.0 软件,采用克里格插值方法.

3 结果与讨论

3.1 沉积岩芯年代序列

沉积岩芯中¹³⁷Cs、²¹⁰Pb_{ex}活度与 Liu 等^[30]2005 年在同一位置采集的沉积岩芯结果相似,沉积岩芯 6.5 cm 处¹³⁷Cs 存在显著的 1963 年全球核爆试验大气沉降峰值^[27].²¹⁰Pb_{ex}活度随深度增加呈指数降低($R^2 = 0.78$).沉积岩芯中¹³⁷Cs 与²¹⁰Pb 变化特征指示了较为稳定的沉积序列.采用复合模式(composite model)建立沉积岩芯的年代序列^[27,31],年代结果见图 2.沉积岩芯 24~28 cm 年代采用沉积岩芯 22~24 cm 平均沉积速率外推,所得沉积岩芯底部年代为 1760 年左右.

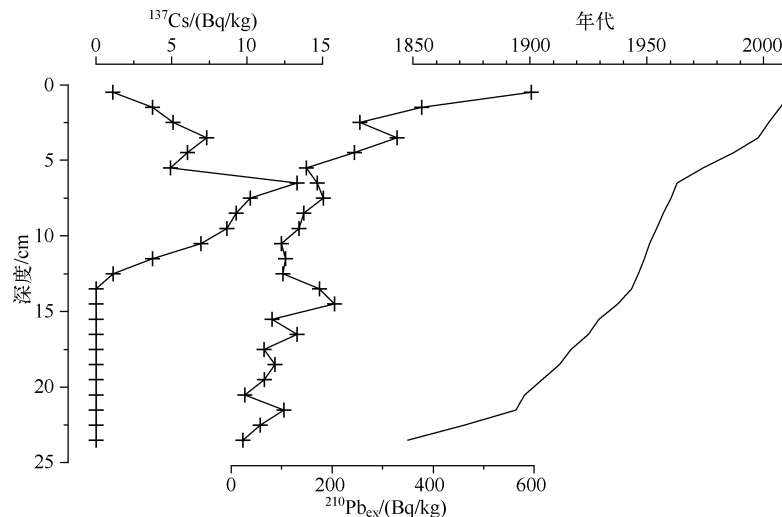


图 2 沉积岩芯¹³⁷Cs、²¹⁰Pb_{ex}活度及年代—深度关系

Fig.2 Vertical distributions of ¹³⁷Cs and ²¹⁰Pb_{ex} in the sediment core and the age-depth relations

3.2 沉积物重金属含量与污染评价

抚仙湖表层沉积物及沉积岩芯中金属元素含量变化较大(表 2).表层沉积物与沉积岩芯中 10 种金属元素具有相似的组合特征,均可划分为 2 组,第 I 组元素包括 Al、Fe、Ti、V、Co、Cr、Cu 和 Ni,第 II 组元素由 Pb 和 Zn 组成(图 3).表层沉积物两组元素在近岸湖区含量较高(图 4);沉积岩芯中第 I 组元素总体呈逐渐降低趋势,而 Pb 与 Zn 自 1980s 中期以来逐渐增加(图 5),这与王小雷等的研究相似^[7].沉积物中 Al、Fe、Ti 等铝硅酸盐类元素主要为流域自然来源,其含量通常与沉积物粒度等因素有关^[28];而 Pb、Zn 与其他金属具有不同的组合特征,说明除了流域自然来源之外,还可能受到人为污染的影响.

表 2 抚仙湖沉积物金属元素含量及沉积物质量基准值

Tab.2 Descriptive statistics of the metals in the sediments of Lake Fuxian and the consensus-based sediment quality guidelines

		Al/ (mg/g)	Fe/ (mg/g)	Ti/ (mg/g)	Cr/ (mg/kg)	Cu/ (mg/kg)	Ni/ (mg/kg)	Pb/ (mg/kg)	Zn/ (mg/kg)
表层沉积物	最大值	86.1	61.6	11.0	152	102	56	121	197
	最小值	69.3	43.8	5.0	73	42	35	49	141
	均值	75.6	52.2	7.3	89	74	42	75	175
沉积岩芯	最大值	91.1	68.0	14.0	102	130	73	86	198
	最小值	71.8	52.3	7.0	80	75	40	39	108
	均值	86.0	57.8	10.1	93	94	49	48	125
背景值		89.1	60.9	11.1	93	103	50	44	118
沉积物质量基准	TEC	—	—	—	43	32	23	36	121
	PEC	—	—	—	111	149	49	128	459

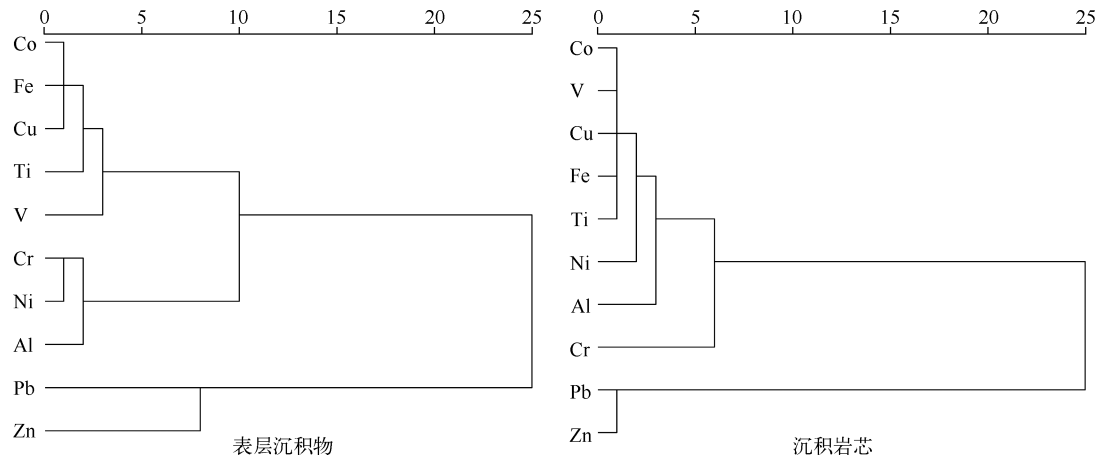


图 3 抚仙湖表层沉积物及沉积岩芯元素 R 型聚类分析结果

Fig.3 Hierarchical analysis of metals in the surface and core sediments from Lake Fuxian

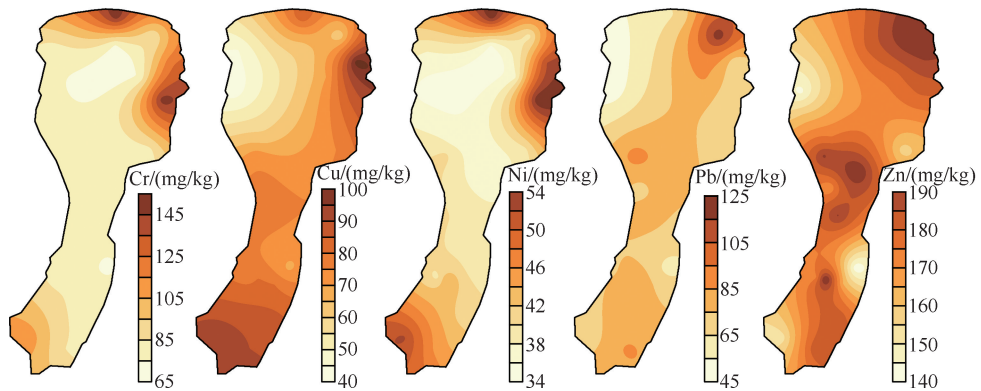


图 4 抚仙湖表层沉积物重金属含量等值线图

Fig.4 Concentrations of heavy metals in surface sediments from Lake Fuxian

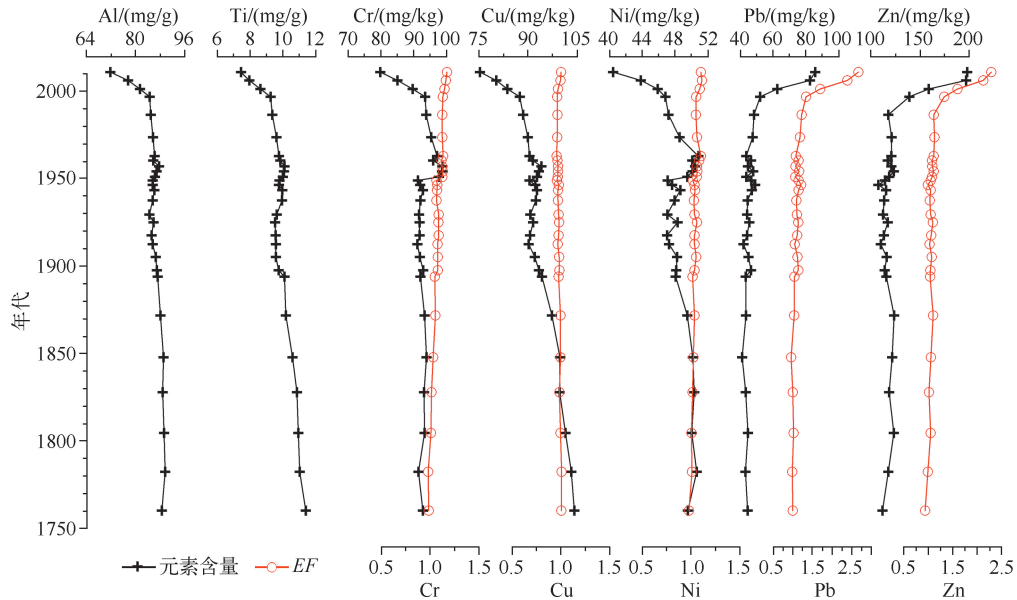


图 5 抚仙湖沉积岩芯金属元素含量及 EF 值的变化

Fig.5 Concentrations and EF values of metals in the sediment core from Lake Fuxian

表层沉积物中 Cr、Cu、Ni 的 EF 值分别为 1.1~2.1、0.7~1.1、1.0~1.4, 其中 Cr 的 EF 值在北部靠近澄江县的湖区以及北部湖区东部区域略高; Pb、Zn 的 EF 值分别为 1.6~4.1、1.4~2.6, 明显高于其他金属元素(图 6)。沉积岩芯中 Cr、Cu、Ni 的 EF 值变化较为稳定, 为 1.0~1.2; Pb、Zn 的 EF 值分别为 1.0~2.7、0.9~2.3, 1985 年之前较为稳定(接近于 1), 而 1985 年以来其 EF 值明显增加(图 5)。沉积物中金属元素含量除了人为污染影响之外, 还与粒度组成等沉积物的变化有关, 经惰性元素校正后、采用历史沉积物作为背景值, 抚仙湖沉积岩芯中 Cr、Cu、Ni 具有较为稳定的 EF 值, 说明近 200 年尤其是 1980s 以来沉积物中 Cr、Cu、Ni 含量的降低主要与有机质含量增加或沉积物粒度变粗有关^[30]; 而 1985 年以来 Pb、Zn 富集系数快速增加可能指示了人为污染的影响, 这与聚类分析结果一致。

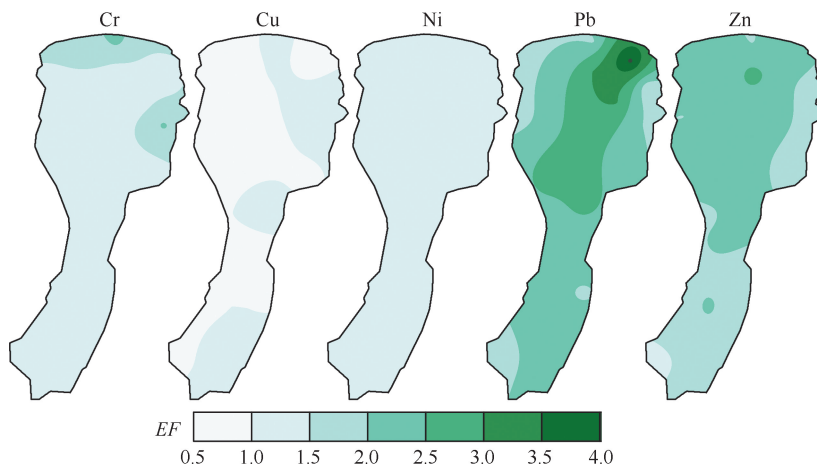


图 6 抚仙湖表层沉积物重金属的 EF 值

Fig.6 EF values of metals in the surface sediments from Lake Fuxian

理论上, $EF > 1$ 即可认为沉积物中重金属受到人为污染的影响, 但考虑到参比元素校正的误差及不确定

性^[28],参考 Co、V 等金属元素的 EF 变化,认为 $EF > 1.1$ 可表示沉积物中重金属受到人为污染的影响^[32].参考 Sutherland 根据沉积物重金属 EF 划分的污染等级^[33],抚仙湖表层沉积物及沉积岩芯中 Cu、Ni 为无污染至弱污染等级;而 Cr 受到一定程度人为污染的影响,尤其是北部湖区部分近岸区域,但仍属于弱污染等级.表层沉积物中 Pb、Zn 属于弱-中等污染水平,北部湖区污染程度显著高于南部湖区;表层沉积物中平均有 51% (33%~73%) 的 Pb、45% (20%~57%) 的 Zn 来自人为污染贡献.时间上,抚仙湖沉积物重金属污染开始于 1980s 中期,近 10 年来人为 Pb、Zn 沉积通量为 55 和 119 $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,人为污染贡献量已接近其自然分量 (60、162 $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$).沉积岩芯记录的抚仙湖重金属污染历史与流域工业经济快速发展的特点完全吻合,也与西南地区的阳宗海^[16]、红枫湖^[15]等湖泊重金属污染历史过程较为一致,反映了西南地区经济发展导致的重金属污染在时间上具有很强的一致性.Zhao 等^[15]和 Zhang 等^[16]的研究表明,大气沉降是西南地区湖泊重金属污染的主要输入途径,主要来源于有色金属冶炼释放.虽然目前尚无抚仙湖主要入湖河流重金属污染状况资料,但根据表层沉积物重金属富集系数变化规律,我们认为抚仙湖沉积物 Pb、Zn 污染除了大气沉降之外,还可能与入湖河流输入有关,来源于毗邻的城镇及工矿区废水排放;北部湖区近岸地区 Cr 污染主要与入湖河流输入有关,可能来源于毗邻地区工业废水排放.

3.3 沉积物重金属潜在生态风险

抚仙湖表层沉积物中重金属的 Er 值依次为: $\text{Cr} > \text{Pb} > \text{Ni} > \text{Cu} > \text{Zn}$.除了个别样点 Cr 之外,其余重金属 Er 值均小于 40,属于低生态风险程度(图 7),这与王小雷等的研究结果一致^[7],Cr 相对较高的生态风险与其较高的生态毒性有关^[12].抚仙湖表层沉积物 6 种重金属的 RI 值为 43~66(图 7),根据生态风险阈值标准(表 1),表层沉积物重金属具有中等程度的潜在生态风险,且生态风险总体由北部湖区向南部湖区降低,这与北部湖区污染程度相对较高有关.

抚仙湖表层沉积物几乎所有采样点中重金属含量均介于 TEC 与 PEC 值之间(表 2,图 4),说明绝大部分湖区重金属具有发生生态毒性效应的可能性,北部湖区部分近岸区域 Cr 含量超过了 PEC 值(图 4),发生潜在生态风险的概率较高.根据综合生态风险指数与沉积物质量基准评价得到抚仙湖表层沉积物中重金属的潜在生态风险结果基本一致,但均高于重金属的单项生态风险.

沉积物重金属质量基准考虑了重金属含量、毒性效应以及环境因子等^[11],而重金属生态风险指数不仅与重金属含量与毒性效应有关,还受到重金属背景的影响^[12].基于单项生态风险评价结果得到的重金属潜在生态风险偏低,可能与抚仙湖较高的重金属背景值有关.总体而言,抚仙湖表层沉积物中 Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 具有中-低程度的潜在生态风险.虽然 Zn、Pb 污染程度相对较高,但由于其较低的生态毒性^[12],潜在生态风险相对较低;而 Cr 由于其较高的生态毒性,虽然其污染程度较低,其潜在生态风险明显大于其他重金属.

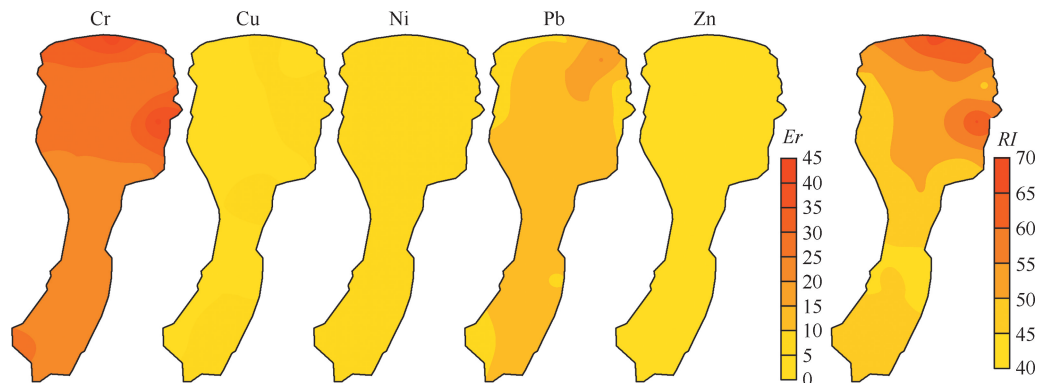


图 7 抚仙湖表层沉积物重金属单项生态风险指数及综合潜在生态风险指数

Fig.7 Spatial features of the potential ecological risk factor and the potential ecological risk index of metals in the surface sediments from Lake Fuxian

4 结论

抚仙湖表层沉积物中金属元素含量总体表现为近岸湖区高于湖心区,北部湖区高于南部湖区。除 Pb、Zn 之外,其余重金属含量近 200 年来总体呈逐渐降低趋势;而 1980s 中期以来,Pb 与 Zn 含量快速增加。重金属富集系数与聚类分析结果较好地反映了其人为污染特征,抚仙湖沉积物中主要重金属污染元素为 Pb、Zn,污染开始于 1980s 中期,其中表层沉积物为弱—中等程度污染;Ni、Cu 基本未受人为污染的影响,而北部湖区近岸地区 Cr 受一定程度人为污染的影响。除了大气沉降之外,径流输入也是抚仙湖重金属污染的主要输入途径。总体而言,抚仙湖表层沉积物中 Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 具有中—低程度的潜在生态风险,风险程度北部湖区高于南部湖区。

致谢:肖霞云副研究员、蒋庆丰副教授、纪明博士等协助完成野外采样,朱育新副研究员与蔡艳杰协助完成金属元素测定、夏威夷高级工程师完成沉积岩芯年代测定,在此深表感谢。

5 参考文献

- [1] Vicente-Martorell JJ, Galindo-Riaño MD, García-Vargas M *et al.* Bioavailability of heavy metals monitoring water, sediments and fish species from a polluted estuary. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **162**(2/3): 823-836.
- [2] Stankovic S, Kalaba P, Stankovic AR. Biota as toxic metal indicators. *Environmental Chemistry Letters*, 2014, **12**(1): 63-84.
- [3] Heim S, Schwarzbauer J. Pollution history revealed by sedimentary records; a review. *Environmental Chemistry Letters*, 2013, **11**(3): 255-270.
- [4] Chon HS, Ohandja DG, Voulvoulis N. The role of sediments as a source of metals in river catchments. *Chemosphere*, 2012, **88**(10): 1250-1256.
- [5] Yin H, Cai Y, Duan H *et al.* Use of DGT and conventional methods to predict sediment metal bioavailability to a field inhabitant freshwater snail (*Bellamya aeruginosa*) from Chinese eutrophic lakes. *Journal of Hazardous Materials*, 2014, **264**: 184-194.
- [6] 曾海鳌, 吴敬禄. 近 50 年来抚仙湖重金属污染的沉积记录. 第四纪研究, 2007, **27**(1): 128-132.
- [7] 王小雷, 杨 浩, 顾祝军等. 抚仙湖沉积物重金属垂向分布及潜在生态风险评价. 地球与环境, 2014, **42**(6): 764-772.
- [8] Liu EF, Shen J, Yang XD *et al.* Spatial distribution and human contamination quantification of trace metals and phosphorus in the sediments of Chaohu Lake, a eutrophic shallow lake, China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2012, **184**(4): 2105-2118.
- [9] Dung TTT, Cappuyns V, Swennen R *et al.* From geochemical background determination to pollution assessment of heavy metals in sediments and soils. *Reviews in Environmental Science and Bio-Technology*, 2013, **12**(4): 335-353.
- [10] Yalcin MG, Simsek G, Ocak SB *et al.* Multivariate statistics and heavy metals contamination in beach sediments from the Sakarya Canyon, Turkey. *Asian Journal of Chemistry*, 2013, **25**(4): 2059-2066.
- [11] MacDonald DD, Ingersoll CG, Berger TA. Development and evaluation of consensus-based sediment quality guidelines for freshwater ecosystems. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2000, **39**(1): 20-31.
- [12] Håkanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sedimentological approach. *Water Research*, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [13] 张 杰, 陈 熙, 刘倩纯等. 鄱阳湖主要入湖口重金属的分布及潜在风险评价. 长江流域资源与环境, 2014, **23**(1): 95-100.
- [14] Zeng J, Yang LY, Chen XF *et al.* Spatial distribution and seasonal variation of heavy metals in water and sediments of Taihu Lake. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2012, **21**(5): 1489-1496.
- [15] Zhao ZQ, Liu CQ, Zhang W *et al.* Historical lead pollution in the central region of Guizhou province, China: A record of lead stable isotopes of lake sediments. *Applied Geochemistry*, 2011, **26**: S267-S270.
- [16] Zhang EL, Liu EF, Shen J *et al.* One century sedimentary record of Lead and Zinc pollution in Yangzong Lake, a highland lake in southwestern China. *Journal of Environmental Sciences*, 2012, **24**(7): 1189-1196.
- [17] 李晓铭, 赵世民, 王道玮等. 滇池表层沉积物中重金属污染特征及评价. 地球与环境, 2013, **41**(6): 647-655.

- [18] 王小雷, 杨浩, 赵其国等. 云南抚仙湖近现代环境变化的沉积物粒度记录. 沉积学报, 2010, 28(4): 776-782.
- [19] 龚 墀, 张立仁. 抚仙湖沉积物粒度特征. 沉积学报, 1983, 1(1): 50-62.
- [20] Sany SBT, Hashim R, Rezayi M *et al.* A review of strategies to monitor water and sediment quality for a sustainability assessment of marine environment. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, 21(2): 813-833.
- [21] 王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志. 北京: 科学出版社, 1998.
- [22] 宋媛媛, 冯慕华, 苏争光等. 抚仙湖不同来源沉积物磷形态垂向分布特征. 环境科学学报, 2013, 33(9): 2579-2589.
- [23] 玉溪市环境保护局. 抚仙湖流域水污染综合防治“十一五”规划. 玉溪市环境保护局, 2006.
- [24] 高 伟, 陈 岩, 徐 敏等. 抚仙湖水质变化(1980—2011年)趋势与驱动力分析. 湖泊科学, 2013, 25(5): 635-642. DOI 10. 18307/2013. 0503.
- [25] 潘继征, 熊 飞, 李文朝等. 云南抚仙湖透明度的时空变化及影响因子分析. 湖泊科学, 2008, 20(5): 681-686. DOI 10. 18307/2008. 0519.
- [26] Smith VH, Tilman GD, Nekola JC. Eutrophication: impacts of excess nutrient inputs on freshwater, marine, and terrestrial ecosystems. *Environmental Pollution*, 1999, 100(1/2/3): 179-196.
- [27] Appleby PG. Chronostratigraphic techniques in recent sediments. In: Last WM, Smol JP eds. Tracking environmental change using lake sediments. Dordrecht: Springer Netherlands, 2001: 171-203.
- [28] Boës X, Rydberg J, Martinez-Cortizas A *et al.* Evaluation of conservative lithogenic elements (Ti, Zr, Al, and Rb) to study anthropogenic element enrichments in lake sediments. *Journal of Paleolimnology*, 2011, 46(1): 75-87.
- [29] Zhang J, Deng H, Wang D *et al.* Toxic heavy metal contamination and risk assessment of street dust in small towns of Shanghai suburban area, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, 20(1): 323-332.
- [30] Liu G, Liu Z, Li Y *et al.* Effects of fish introduction and eutrophication on the cladoceran community in Lake Fuxian, a deep oligotrophic lake in southwest China. *Journal of Paleolimnology*, 2009, 42(3): 427-435.
- [31] 刘恩峰, 薛 滨, 羊向东等. 基于²¹⁰Pb与¹³⁷Cs分布的近代沉积物定年方法——以巢湖、太白湖为例. 海洋地质与第四纪地质, 2009, 29(6): 89-94.
- [32] 杜臣昌, 刘恩峰, 羊向东等. 巢湖沉积物重金属富集特征与人为污染评价. 湖泊科学, 2012, 24(1): 59-66. DOI 10. 18307/2012. 0108.
- [33] Sutherland RA. Bed sediment-associated trace metals in an urban stream, Oahu, Hawaii. *Environmental Geology*, 2000, 39(6): 611-627.