

环巢湖流域表层沉积物重金属赋存特征及潜在生态风险评价

孔明¹,彭福全¹,张毅敏¹,尹洪斌²,刘庄¹,晁建颖^{1*}(1.环境保护部南京环境科学研究所,江苏 南京 210042; 2.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,江苏 南京 210008)

摘要:以环巢湖流域表层沉积物为对象,对8种重金属(Cd、Cr、Cu、Zn、Ni、Pb、As和Hg)总量及形态进行分析并运用潜在风险指数法对重金属的生态风险进行了评价。结果表明,环巢湖流域表层沉积物中重金属元素Cd、Cr、Ni、Cu、Zn、Pb、As和Hg的总量总体呈现为南淝河-十五里河水系含量高,其次是裕溪河及支流,其他5条水系的重金属含量相对较低。BCR形态分析表明,重金属元素Hg、Cr、Ni和Cu主要以残渣态存在(分别占总量的77.56%、64.83%、56.52%和48.93%),Cd的可提取态含量比例最高(89.22%),其次为Zn、Pb和As(70.35%,69.50%和63.70%)。潜在生态风险危害指数(RI)表明,Cu、Zn、Pb、Cr、Ni和As均为低污染等级,Cd为较重污染等级,Hg为重污染等级,7个水系的重金属潜在生态风险指数排序为:南淝河-十五里河>裕溪河>柘皋河>杭埠河-丰乐河>派河>白石山河>兆河,重潜在风险和严重潜在风险的区域主要分布在南淝河-十五里河水系以及裕溪河水系,因此,今后对巢湖流域进行重金属整治时可着重考虑针对这两条水系的Cd和Hg元素的重点治理。

关键词:环巢湖流域;沉积物;重金属;形态分析;风险评价

中图分类号: X254 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2015)06-1863-09

Occurrence characteristic and potential risk assessment of heavy metals in surface sediments of Circum-Chaohu Basin. KONG Ming¹, PENG Fu-quan¹, ZHANG Yi-min¹, YIN Hong-bin², LIU Zhuang¹, CHAO Jian-ying^{1*} (1.Nanjing Institute of Environmental Science, Ministry of Environmental Protection, Nanjing 210042, China; 2.State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China). *China Environmental Science*, 2015,35(6): 1864~1872

Abstract: Surface sediment samples were taken from Chaohu Basin, total and fractions of eight heavy metals (Cd, Cr, Cu, Zn, Ni and Pb) were studied. The pollution of heavy metals were evaluated by the potential ecological risk index (RI). Heavy metal distribution of surface sediment indicated the highest degree of contamination in Nanfei-Shiwuli River, followed by Yuxi river and its tributaries, finally the other 5 rivers. Fractions of heavy metals analysis showed that Hg, Cr, Ni and Cu existed mainly in residual fractions (77.56%, 64.83%, 56.52% and 48.93%), and extractable fraction was dominant for Cd (89.22%), followed by Zn, Pb and As (70.35%, 69.50% and 63.70%). Potential ecological risk assessment showed that Cu, Zn, Pb, Cr, Ni and As had low pollution level, Cd had a higher pollution level and Hg had heavily pollution level, the potential ecological risk of heavy metals was in the descending order of Nanfei-Shiwuli river>Yuxi river>Zhengao river>Hangbu-Fengle river>Pai river>Baishishan river>Zhao river. The risk assessment code showed that Cd had very high risk level, Zn had high risk level, Cu and Ti were between low risk and medium risk level, Pb was between no risk and low risk level, Cr posed no risk. Therefore, emergent management measures must be taken to control pollution of Cd and Hg in Nanfei River and Yuxi River.

Key words: Circum-Chaohu Basin; sediment; heavy metals; fraction analysis; risk assessment

河流沉积物作为水体生态环境的重要组成部分,一方面,可以吸附大量外源污染物,降低水质污染程度,另一方面,当沉积物-水界面的理化条件发生改变(pH值、氧化还原电位和温度等),污染物会重新释放出来,影响上覆水体的水质,

收稿日期: 2014-11-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41371479);国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07501-002-008,2014ZX07101-011);江苏省自然科学基金(BK2011081)

* 责任作者,助理研究员, njauchao@163.com

并通过生物富集、食物链放大等过程对生态系统构成直接或间接的威胁^[1-3]。沉积物既是重金属污染物的蓄积库,又是对水质及生物有潜在影响的次生污染源。因此,了解河流沉积物中重金属的污染状况以及对环境的生态风险评价非常必要。

重金属在沉积物中具有多种赋存形态,不同形态的重金属表现出不同的生物毒性与迁移特征,判断沉积物中重金属的毒性响应以及生态风险更大程度上取决于其赋存形态^[1]。关于沉积物重金属形态分析,应用较广的形态分级方法有 Tessier 等^[2]提出的 5 步提取法和欧共体标准局 (European Communities Bureau of Reference) 提出的 BCR 形态分析法^[3],BCR 法由于其操作简单,具有较好的重现性和稳定性,因此广泛应用于重

金属形态的分析^[4-6]。

目前,国内外对巢湖沉积物重金属的研究主要集中于重金属总量的空间分布及重金属形态的分析^[7-9],缺乏与巢湖生态环境密切相关的入湖河流沉积物重金属的相关报道。本文通过从流域层面对巢湖周边主要河流的表层沉积物 8 种重金属元素(Cd、Cr、Cu、Zn、Pb、Ni、As 和 Hg)的含量进行了测定,分析了其空间分布特征,采用 BCR 形态分析法分析了重金属元素的形态赋存特征,并用潜在生态风险评价法评价了环巢湖水系的重金属生态风险,旨在为合理预防和治理巢湖及流域重金属污染提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

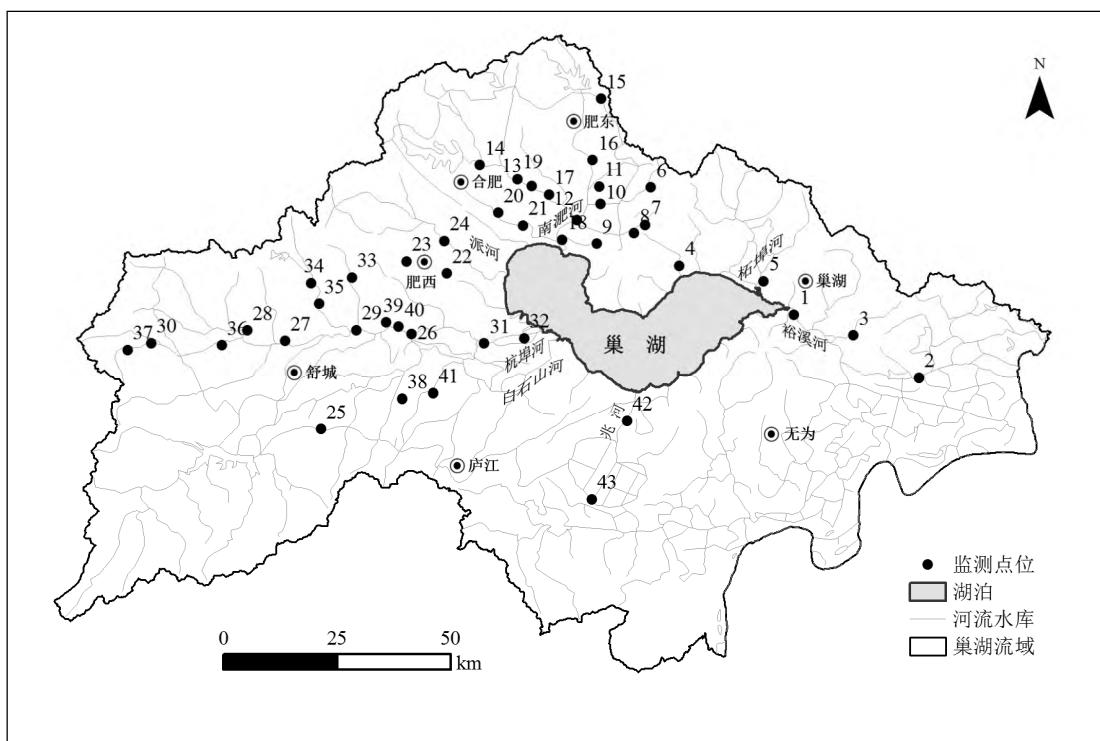


图 1 环巢湖流域采样点示意

Fig.1 Location of sampling sites in Circum-Chaohu Basin

巢湖流域位于安徽省中部,江淮丘陵之间,其流域总面积 13350km²。巢湖流域地势西高东低,中间低洼平坦,有低山、丘陵、平原等地貌

类型,水系呈放射状,主要有南淝河-十五里河、杭埠河-丰乐河、派河、白石山河、兆河、裕溪河和柘皋河等主要环湖河流,组成了巢湖流域的七条水系,湖水经裕溪河入长江^[10].从水体污染物含量和入湖污染物量的分配而言,巢湖流域西北部河流污染程度和入湖量要明显高于东半湖,其中污染最严重的几条河流为巢湖西北部入湖的南淝河-十五里河,水质为劣V类^[11],其水污染源结构相比其他河流更加复杂,主要包括农业面源、污水厂尾水、城镇地表径流及工业点源等.

1.2 样品采集及样品处理

于2013年8月,借助GPS全球卫星定位系统,采用彼得森采样器采集巢湖流域河流表层沉积物样品,本次采样对环巢湖主要河流布设了43个采样点(图1),将采集的表层沉积物样品用木勺取顶部表层沉积物,混合均匀后装入聚乙烯自封袋中密封,低温保存送回实验室于-20℃条件下冷冻保存,经FD-1A-50型冷冻干燥机冷冻干燥处理,研磨并过200目筛,然后保存于封口袋中,置于干燥器中备用.

1.3 分析方法

环巢湖流域的43个点的沉积物样品用于分析重金属总量,选取环湖河流中靠近巢湖湖区的7个点位(1、5、12、24、31、41和42)分析其重金属形态.采用BCR法,将重金属形态分为可交换态及碳酸盐结合态,即弱酸提取态(F1);Fe/Mn氧化物结合态,即可还原态(F2);有机物及硫化物结合态,即可氧化态(F3)和残渣态(F4),F1、F2和F3统称为可提取态^[12].重金属元素含量利用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS,Agilent 7700cx型)测定.Hg的测定使用Hydra-c型全自动测汞仪.为保证分析的准确性,同步分析了由国家地质实验测试中心生产的湖底沉积物顺序提取微量元素标准物质(GBW07436),各重金属元素不同形态回收率在95.7%~115.2%范围内,符合美国EPA标准要求的80%~120%的范围.

1.4 数据处理方法

所有样品分析均重复进行3次,以提高精确

度和减小随机误差,试验结果取平均值.实验数据采用采用Origin 8.0、SPSS 16.0和Arc GIS 9.3进行分析.

2 结果与讨论

2.1 表层沉积物重金属分布特征

表层沉积物重金属在巢湖流域的分布具有较大的空间差异性,如图2所示,8种重金属Cd、Cr、Cu、Zn、Pb、Ni、As和Hg含量分布总体表现为南淝河-十五里河水系含量高,其次是裕溪河及支流,杭埠河-丰乐河水系、柘皋河水系、白石山水系以及兆河水系的重金属含量相对较低.这与杜臣昌等^[13]认为巢湖各主要入湖河流河口表层沉积物中除了南淝河、柘皋河与裕溪河之外,派河、白石山河、杭埠河等基本无重金属人为污染的结果基本是一致的.整个巢湖流域前述8种重金属平均含量分别为0.5,66.1,60.1,292.5,36.6,28.5,14.9,0.2mg/kg,分别是中国土壤环境背景值^[14]的5.4,1.0,2.9,4.7,1.4,1.0,1.7和5.1倍.8种重金属最大值基本出现在南淝河-十五里河水系,这是由于南淝河-十五里河水系流域靠近合肥市,大量的工业废水和生活污水排入河道^[15-17],进入水体的重金属污染物绝大部分易于由水相转入悬浮物,随着悬浮物的沉降进入沉积物中,导致该区域沉积物中重金属含量较高;柘皋河水系沉积物中的Cr、Cu、As和Ni的含量较高,这是由于柘皋河是巢湖的主要支流之一,沿河城镇污水未经处理而大量排放,造成河流水质污染严重^[18];因兆河流域内以农村居民点为主,较小的工业和生活废水排放,使该地区水质一直保持较清洁水平.

重金属元素含量的相关性分析结果如表1所示,Cr,Ni,Cd和Pb之间存在较高程度的相关性($P<0.01$),表明4种重金属具有相似的污染来源,Hg和Zn两种重金属元素与其他金属元素间的相关关系较弱,这说明元素Hg和Zn在沉积物中的累积不仅与污染来源有关,还受到其他多因素的影响,如元素自身的物理化学特性、沉积物粒度、有机质的成分及与其它元素间存在竞争吸附等^[19],有待进一步研究.

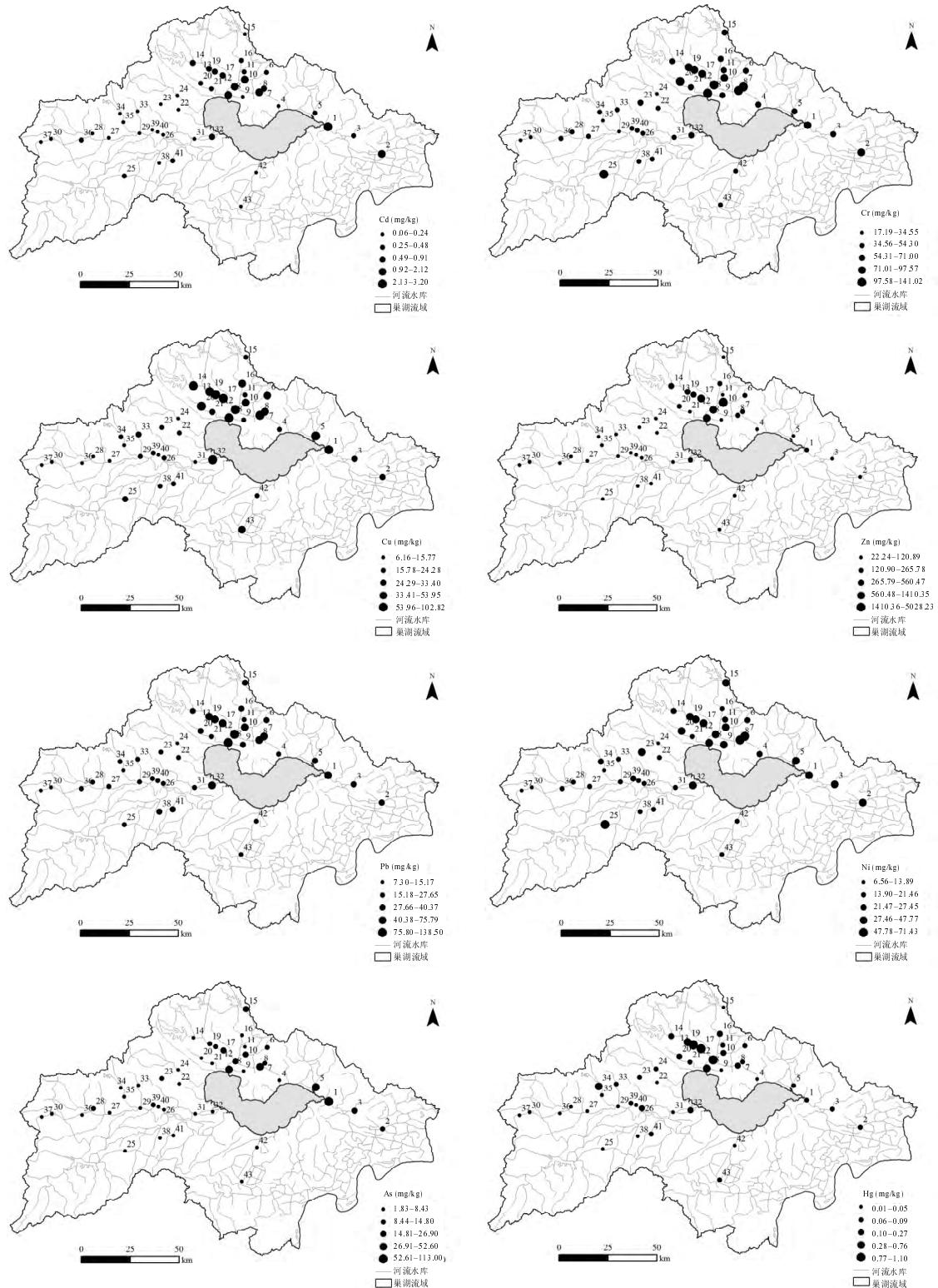


图 2 表层沉积物重金属含量分布特征

Fig.2 Spatial distribution of heavy metals in the sediments

表 1 表层沉积物中重金属元素含量的相关性分析
Table 1 Correlations of heavy metals in surface sediments

重金属	Cr	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb	Hg	As
Cr	1.000	0.920 ^{**}	0.117	0.261	0.424 ^{**}	0.613 ^{**}	0.473 [*]	0.267
Ni		1.000	0.196	0.149	0.369 ^{**}	0.398 ^{**}	0.213	0.239
Cu			1.000	0.088	0.406 ^{**}	0.466 ^{**}	0.213	0.504 ^{**}
Zn				1.000	0.334 [*]	0.392 [*]	0.178	0.184
Cd					1.000	0.557 ^{**}	0.308 [*]	0.714 ^{**}
Pb						1.000	0.278	0.536 ^{**}
Hg							1.000	0.179
As								1.000

注: **相关系数在0.01水平上显著, *相关系数在0.05水平上显著

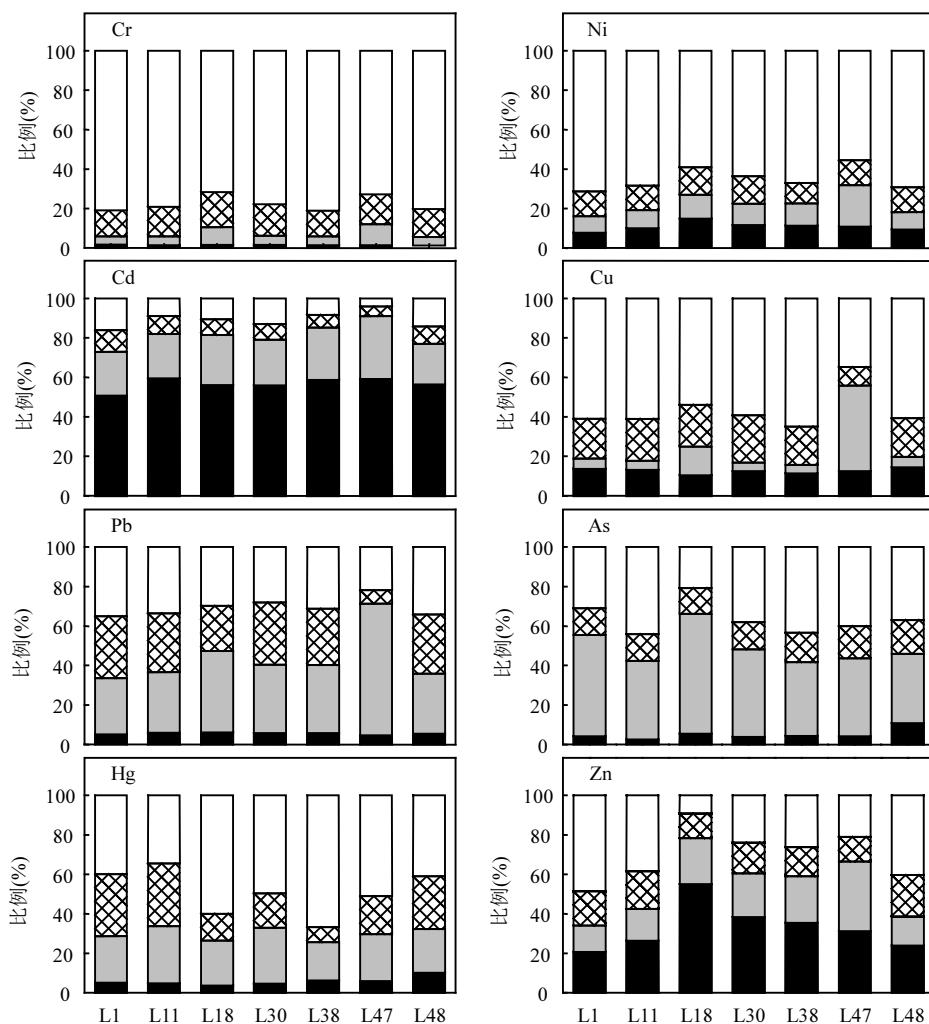


图 3 表层沉积物重金属形态分布特征

Fig.3 Distribution characteristics of heavy metals forms in surface sediment

■弱酸溶解态 ■可还原态 ■可氧化态 ■残渣态

2.2 重金属形态分布特征

环巢湖流域表层沉积物重金属形态分布如图3所示,8种重金属元素中Cd的可提取态含量比例最高,其含量百分比在83.39%~95.84%之间,平均含量百分比为89.22%,研究认为可提取态占总量比例越高,重金属越易释放造成二次污染^[20],在可提取态中,F1态为其主要赋存形态,平均含量可达56.75%,此种形态在环境中的迁移性较强,可直接被生物利用,且对pH值的敏感度较高,在酸性条件下容易释放,进而对环境和生物易产生危害^[21].除Cd元素外,Zn、Pb和As三种金属元素也具有较高的可提取态含量百分比,平均含量百分比分别为70.35%、69.50%和63.70%,在可提取态中,Zn的F1态最高,其含量百分比为33.07%,仅次于Cd,这表明Zn同样具有较高的二次释放潜力.Pb的可提取态中以F2态和F3态为主,两者含量百分比占总量63.84%,相关研究表明Pb与沉积物中Fe/Mn氧化物及有机质具有较强的结合能力^[22~24],这与本研究的结果一致.重金属元素Hg、Cr、Ni和Cu主要以残渣态存在,平均含量占总量的比值分别为77.56%、64.83%和56.52%和48.93%.研究认为残渣态重金属离子易结合在土壤硅铝酸盐矿物晶格中,性质较为稳定,在一般情况下难以释放^[1,3,25],对沉积物中重金属的迁移和生物可利用性贡献小,这在一定程度上也增强了重金属在流域空间分布的差异性.

2.3 沉积物重金属潜生态危害评价

2.3.1 评价方法 潜在生态风险指数(RI)法由瑞典科学家Hakanson^[26]在1980年提出,是利用沉积学原理评价重金属污染状况以及对生物的影响,该方法综合考虑重金属的毒性在沉积物中的普遍的迁移转化规律和评价区域对重金属污染的敏感性,以及重金属区域背景值的差异^[27~29].潜在生态风险指数法的计算公式如下:

$$E_r^i = T_r^i \times C_f^i; (C_f^i = C_D^i / C_R^i) \quad (1)$$

$$RI = \sum_{i=1}^m E_r^i \quad (2)$$

式中: E_r^i 为单一重金属潜在风险指数; T_r^i 为重金属毒性响应系数,反映重金属的毒性水平及生物

对重金属污染的敏感程度,Cu、Zn、Pb、Cr、Ni、Cd、As和Hg的毒性响应系数(T_r^i)分别为5、1、5、2、5、30、10和40; C_f^i 为单一重金属污染指数; C_D^i 为重金属实测值; C_R^i 为重金属*i*的评价参考值,本文使用安徽省土壤重金属背景值^[14].根据RI的不同,将潜在生态风险划分为四种不同等级^[28],具体见表2.

表2 单项及综合潜在生态风险评价指数与分级标准

Table 2 Individual and general indices and grades of potential ecological risk assessment

E_r^i	单项污染物 生态风险等级	综合潜在 生态风险等级	
		RI	综合潜在 生态风险等级
$E_r^i < 40$	低	RI < 135	低
$40 \leq E_r^i < 80$	中	$135 \leq RI < 265$	中等
$80 \leq E_r^i < 160$	较重	$265 \leq RI < 525$	重
$160 \leq E_r^i < 320$	重	$RI \geq 525$	严重
$320 \leq E_r^i$	严重		

表3 单项潜在生态风险指数及风险分级

Table 3 Individual indice and grades of potential ecological risk assessment

项目	E_r^i							
	Cr	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb	As	Hg
最大值	4.24	11.99	25.20	81.10	990.13	26.03	125.56	1336.64
最小值	0.52	1.10	1.51	0.36	19.53	1.37	2.03	13.62
平均值	1.98	4.62	9.87	4.98	152.94	6.74	15.14	213.67
E_r^i 等级	低	低	低	低	较重	低	低	重

2.3.2 评价结果 巢湖流域沉积物中重金属元素的单项潜在风险指数如表3所示,重金属Cu、Zn、Pb、Cr、Ni和As均为低污染等级,Cd为较重污染等级,Hg为重污染等级.因此,对Cd和Hg的单项潜在风险指数进行进一步空间分析,结果如图4所示,单项潜在生态风险指数 $E_r(Cd)$ 和 $E_r(Hg)$ 具有显著的空间差异性, $E_r(Cd)$ 的范围在19.53~990.13之间,最大值出现在裕溪河水系, $E_r(Hg)$ 的范围在13.62~1336.64之间,最大值出现在南淝河水系,这与Cd和Hg元素含量的空间分布特征一致.结合重金属形态分析(图3),Cd元素在环境中主要以弱酸溶解态形态存在,而此种形态,在环境条件发生改变时,重金属易发生释放,从而对环境

和生物造成危害。因此,在对巢湖流域进行重金属整治时可着重考虑针对 Cd 和 Hg 污染的治理工作,以消除两种金属的生态威胁。

巢湖流域表层沉积物重金属潜在危害评价结果如图 5 所示,潜在风险指数 RI 在 46.58~1696.53 范围,其中,34.9% 处于轻微污染,25.6% 处于中度污染,11.6% 处于重污染,27.9% 处于严

重污染。7 个水系的重金属潜在生态风险指数排序为:南淝河-十五里河>裕溪河>柘皋河>杭埠河-丰乐河>派河>白石山河>兆河。重潜在风险和严重潜在风险的区域主要分布在南淝河-十五里河水系以及裕溪河水系,因此,以上两条水系应作为今后巢湖流域重金属污染防治的重点区域。

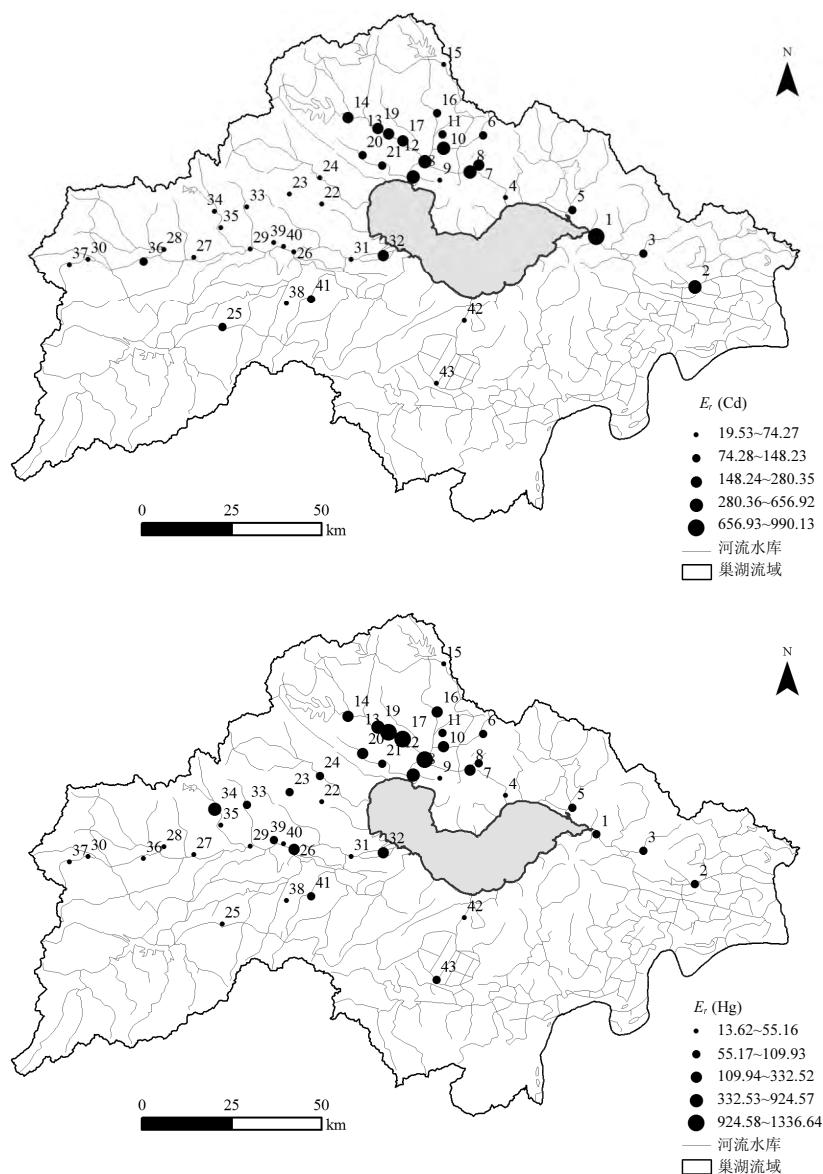


图 4 巢湖流域表层沉积物 $E_r(\text{Cd})$ 和 $E_r(\text{Hg})$ 的空间分布
Fig.4 Spatial distribution of $E_r(\text{Cd})$ and $E_r(\text{Hg})$ in the surface sediments

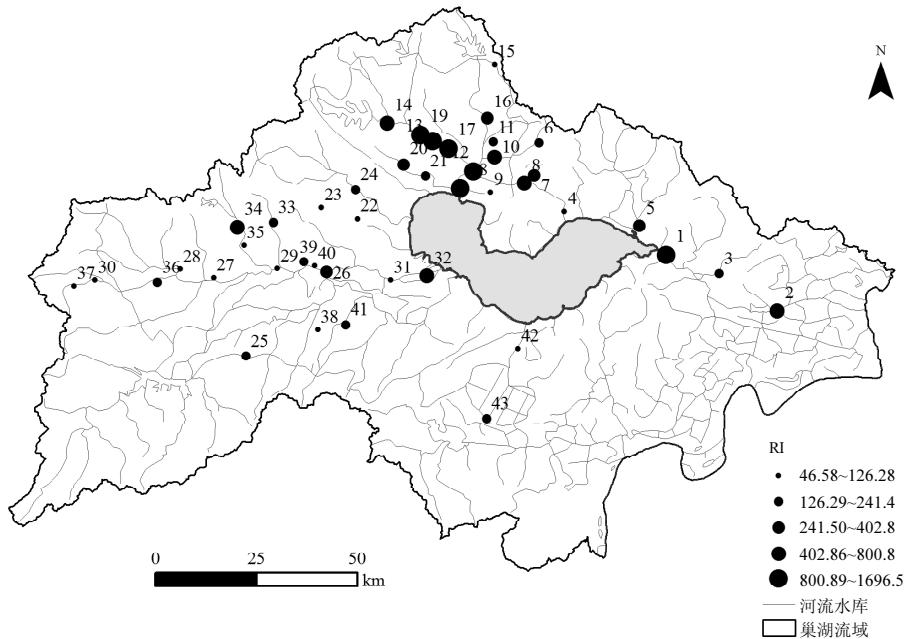


图5 表层沉积物潜在生态风险指数

Fig.5 The potential ecological risk index(RI) of heavy metals in the surface sediments

3 结论

3.1 环巢湖流域表层沉积物中重金属元素 Cd、Cr、Ni、Cu、Zn、Pb、As 和 Hg 的总量总体呈现布总体表现为南淝河-十五里河水系含量高，其次是裕溪河及支流，另外 5 条水系的重金属含量相对较低。

3.2 重金属形态分析表明，8 种重金属元素中 Cd 的可提取态含量比例最高，其次为 Zn、Pb 和 As，Hg、Cr、Ni 和 Cu 主要以残渣态存在，因此，Cd、Zn、Pb 和 As 的生物有效性比较高，潜在生态危害比较大。

3.3 潜在生态风险评价结果表明，重金属 Cu、Zn、Pb、Cr、Ni 和 As 均为低污染等级，Cd 为较重污染等级，Hg 为重污染等级。7 个水系的重金属潜在生态风险指数排序为：南淝河-十五里河>裕溪河>柘皋河>杭埠河-丰乐河>派河>白石山河>兆河，重潜在风险和严重潜在风险的区域主要分布在南淝河-十五里河水系以及裕溪河水系。

参考文献：

- [1] Yang Z F, Wang Y, Shen Z Y, et al. Distribution and speciation of

heavy metals in sediments from the mainstream, tributaries, and lakes of the Yangtze river catchment of Wuhan, China [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009,166(2):1186~1194.

- [2] Tessier A, Campbell P G, Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals [J]. Analytical Chemistry, 1979,51(7):844~851.
- [3] Ure A M, Quevauviller Ph, Muntan H, et al. Speciation of heavy metals in soils and sediments. An account of the improvement and harmonization of extraction techniques undertaken under the auspices of the BCR of the commission of the European Communities [J]. International Journal of Environmental Analytical Chemistry, 1993,51(1~4):135~151.
- [4] Yuan C G, Shi J B, He B, et al. Speciation of heavy metals in marine sediments from the East China Sea by ICP-MS with sequential extraction [J]. Environment International, 2004,30(6):769~783.
- [5] Chen M, Li X M, Yang Q, et al. Total concentrations and speciation of heavy metals in municipal sludge from Changsha, Zhuzhou and Xiangtan in middle-South Region of China [J]. Journal of Hazardous Materials, 2008,160(2):324~329.
- [6] Tokalioglu S, Kartal S, Gultekin A. Investigation of heavy-metal uptake by vegetables growing in contaminated soils using the modified BCR sequential extraction method [J]. International Journal of Environment Analytical Chemistry, 2006,86(6):417~430.
- [7] 郑志侠,潘成荣,丁凡.巢湖表层沉积物中重金属的分布及污

- 染评价 [J]. 农业环境科学学报, 2011,30(1):161–165.
- [8] 余秀娟, 霍守亮, 昝逢宇, 等. 巢湖表层沉积物中重金属的分布特征及其污染评价 [J]. 环境工程学报, 2013,7(2):439–450.
- [9] 徐圣友, 叶琳琳, 朱 燕, 等. 巢湖沉积物中重金属的 Bcr 形态分析 [J]. 环境科学与技术, 2008,31(9):20–23.
- [10] 王书航, 姜 霞, 金相灿. 巢湖入湖河流分类及污染特征分析 [J]. 环境科学, 2011,32(10):2834–2839.
- [11] 刘 妮, 孔繁翔, 蔡元峰, 等. 巢湖四条入湖河流硝态氮污染来源的氮稳定同位素解析 [J]. 湖泊科学, 2012,24(6):952–956.
- [12] 刘恩峰, 沈 吉, 朱育新. 重金属元素 BCR 提取法及在太湖沉积物研究中的应用 [J]. 环境科学研究, 2005,18(2):57–60.
- [13] 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 [J]. 中国环境科学, 2012,24(1):59–66.
- [14] Tang W Z, Shan B Q, Zhang H, et al. Heavy metal sources and associated risk in response to agricultural intensification in the estuarine sediments of Chaohu Lake Valley, East China [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010,176(1):945–951.
- [15] Li R, Shu K, Luo Y Y, et al. Assessment of heavy metal pollution in estuarine surface sediments of Tangxi River in Chaohu Lake Basin [J]. Chinese Geographical Science, 2010,20(1):9–17.
- [16] Liu E F, Shen J, Yang X D, et al. Spatial distribution and human contamination quantification of trace metals and phosphorus in the sediments of Chaohu Lake, a eutrophic shallow lake, China [J]. Environmental Monitoring Assessment, 2012,184(4):2105–2118.
- [17] Yi Y J, Yang Z F, Zhang S H. Ecological risk assessment of heavy metals in sediment and human health risk assessment of heavy metals in fishes in the middle and lower reaches of the Yangtze River Basin [J]. Environmental Pollution, 2011,159(10):2575–2585.
- [18] 李国莲. 巢湖污染物赋存、来源及风险评价研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2012.
- [19] 贾铁飞, 张卫国, 俞立中. 1860s 以来巢湖沉积物金属元素富集特点及其对人类活动的指示意义 [J]. 地理研究, 2009,(5):1217–1226.
- [20] 王鸣宇, 张 雷, 秦延文, 等. 湘江表层沉积物重金属的赋存形态及其环境影响因子分析 [J]. 环境科学学报, 2011,31(11):2447–2458.
- [21] 方盛荣, 徐 颖, 魏晓云, 等. 典型城市污染水体沉积物中重金属形态分布和相关性 [J]. 生态环境学报, 2009,18(6):2066–2070.
- [22] 冯素萍, 鞠 莉, 沈 永, 等. 沉积物中重金属形态分析方法研究进展 [J]. 化学分析计量, 2006,15(4):72–74.
- [23] Galán E, Gómez-Ariza J, González I, et al. Heavy metal partitioning in river sediments severely polluted by acid mine drainage in the Iberian Pyrite Belt [J]. Applied Geochemistry, 2003,18(3):409–421.
- [24] 陈 浩, 李升峰. 巢湖表层沉积物中重金属总量及形态分析 [J]. 河南科学, 2007,25(2):303–307.
- [25] Teasdale P R, Apte S C, Ford P W, et al. Geochemical cycling and speciation of copper in waters and sediments of Macquarie Harbour, Western Tasmania [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2003,57(3):475–487.
- [26] Hakanson L. An Ecological Risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach [J]. Water Research, 1980, 14(8):975–1001.
- [27] Zhang R, Zhou L, Zhang F, et al. Heavy Metal Pollution and Assessment in the Tidal Flat Sediments of Haizhou Bay, China [J]. Marine Pollution Bulletin, 2013,74(1):403–412.
- [28] 余 辉, 余建平. 洪泽湖表层沉积物重金属分布特征及其风险评价 [J]. 环境科学, 2011,32(2):437–444.
- [29] 冯慕华, 龙江平, 喻 龙, 等. 辽东湾东部浅水区沉积物中重金属潜在生态评价 [J]. 海洋科学, 2003,27(3):52–56.

作者简介: 孔 明(1987–),男,山东枣庄人,环保部南京环境科学研究所,硕士研究生,主要从事湖泊底泥污染控制研究.发表论文 6 篇.