



文章栏目：河湖库环保清淤工程关键技术和典型案例专题

DOI 10.12030/j.cjee.202309045 中图分类号 X522 文献标识码 A

荣楠, 郭灿斌, 王文静, 等. 长江中域网湖沉积物重金属污染特征与生态风险评价[J]. 环境工程学报, 2023, 17(12): 3859-3869. [RONG Nan, GUO Canbin, WANG Wenjing, et al. Pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in sediments of the Wanghu Lake from the middle reaches of the Yangtze River[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2023, 17(12): 3859-3869.]

长江中域网湖沉积物重金属污染特征与生态风险评价

荣楠^{1,2,3}, 郭灿斌^{1,2,4}, 王文静^{1,2,4}, 周道坤^{1,2,4}, 刘晓伟^{1,2,4}, 卢文洲^{1,2,4}

1. 生态环境部华南环境科学研究所, 广州 510530; 2. 国家环境保护水环境模拟与污染控制重点实验室, 广州 510530; 3. 中国科学院生态环境研究中心环境水质学国家重点实验室, 北京 100085; 4. 广东省水与大气污染防治重点实验室, 广州 510530

摘要 湖北网湖位于长江中游, 与长江干流相通, 研究其沉积物中重金属分布特征及生态风险评价对长江经济带水质安全和水污染治理具有重要的意义。分析了网湖 20 个样点 0-25 cm 深度沉积物中 As、Hg、Cu、Zn、Cd、Pb、Cr 等 7 种重金属的质量分数和空间分布特征, 利用相关分析和主成分分析探讨了表层沉积物中重金属的来源, 并利用地累积指数法、潜在生态风险指数法和一致性沉积物质量基准进行重金属污染评价。结果表明: As、Hg、Cu、Zn、Cd、Pb、Cr 等 7 种重金属的平均质量分数分别为 37.5、0.137、108、123、0.283、37.8、108 mg·kg⁻¹。与长江流域其他重要湖泊如巢湖、太湖等相比, 网湖沉积物重金属含量处于较高水平。Pearson 相关性分析表明, As、Zn、Cd 两两之间呈极显著正相关 ($p < 0.01$), 这说明其具有同源性, 分析主要来自于农业源; Cu 和 Pb 之间也呈极显著正相关 ($p < 0.01$), 分析主要来源于交通运输污染源。重金属污染评价结果表明, 沉积物整体受到极严重的重金属污染和很强的潜在生态危害, 入湖区附近相对较严重, 需及时防控和治理。一致性沉积物质量基准评价结果显示, Zn、Cd、Hg 和 Pb 引发生物毒性的概率低于 25%, As、Cu 和 Cr 有 25%~75% 的概率产生有害生物效应。

关键词 网湖; 沉积物; 重金属; 污染评价; 有害生物效应

重金属具有难降解、易积累、毒性大的特性, 有可通过食物链对生物体的健康产生危害的风险^[1-3]。重金属的重要归宿之一是通过地表径流、污水排放、大气沉降等途径进入河流、湖泊及沿海海域等水体, 并随悬浮颗粒沉积^[4-6]。因此, 沉积物作为重金属的重要蓄积库, 能较好地反映水体受重金属污染的状况。沉积物中的重金属可通过界面过程转移到悬浮颗粒和周围水体中, 对水体进行二次污染^[7]。人为源的重金属在沉积物中主要以吸附与络合等方式与黏土及有机质等结合, 具有较高的生物可给性, 会通过生物富集和放大作用对水生生态系统产生更高的危害^[8]。因此, 研究沉积物中重金属的含量分布、来源及潜在生态风险, 对沉积物质量评估和水体生态环境保护具有重要意义。

网湖位于湖北省阳新县, 是湖北省人民政府批准的省级自然保护区, 被列入《国际重要湿地名录》, 也被列入《长江经济带生态环境保护规划》中水质较好湖泊名单, 属于重点保护对象。网湖位于富河流域下游、阳新县主城区下游, 是流域污染物的汇入方向和最终出口, 对网湖水质存在一定的不利影响。网湖又是与长江干流相通的湖泊, 在枯水期通过半壁山闸人为地将湖水引入长江, 兼具防洪调蓄的重要功能, 其生态环境对长江水生生态健康意义重大。由于网湖周边投肥养殖较普遍, 各种污染物历史富集较多, 导致网湖水质

收稿日期: 2023-09-12; 录用日期: 2023-10-21

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务专项 (PM-zx703-202305-268, PM-zx703-202002-025); 国家自然科学基金资助项目 (21707040)

第一作者: 荣楠 (1986—), 女, 博士, 高级工程师, rongnan@scies.org; 通信作者: 周道坤 (1992—), 男, 硕士, 工程师, zhoudaokun@scies.org

在2014年开始恶化至劣V类(主要超标指标为总磷),水生态安全受到威胁。

目前,针对网湖生态环境质量调查与评价的研究较少,2009—2013年开始有针对网湖沉积物的研究,主要集中在沉积环境与营养元素方面^[9-11]。虽然近年来国内在长江中下游地区开展了较多湖泊沉积物重金属空间分布、来源解析、生态风险评价等方面的研究^[12-16],但对网湖的研究十分有限。王明学等^[17]于1996年分析了网湖表层沉积物中Mn、Cu、Zn、Cr的含量,Mn和Zn的平均质量分数分别为3 590和444.4 mg·kg⁻¹,Cu与Cr的平均质量分数高于洞庭湖水系相应元素。史小丽等^[18]应用地累积指数和潜在生态风险指数评价了2007年之前的一百多年内网湖沉积物重金属的污染特征,总体上污染较轻,重金属生态风险主要来自于Pb和Cu,2007年潜在生态风险指数RI为40.83,生态风险较小。受数据时效性的影响,前人研究已不足以反映网湖的实际情况。

本研究通过调查分析网湖表层和不同深度沉积物中As、Hg、Cu、Zn、Cd、Pb、Cr等7种重金属质量分数,阐明其空间分布特征,判断其主要来源,综合运用地累积指数法、潜在生态风险指数法和一致性沉积物质量基准法评价重金属的生态风险和生物毒性效应,以为网湖开展重金属风险防控、水生态保护与环境规划管理等工作提供科学依据,也可为全面了解长江经济带湖泊的重金属污染态势提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

湖北网湖省级湿地自然保护区(115°14'00"E~115°25'42"E, 29°45'11"N~29°56'38"N)位于黄石市阳新县长江中游南岸,富水河下游,主要由网湖、朱婆湖、宝塔湖、下羊湖、绒湖、赛桥湖等大片低洼湖泊组成的浅水型湖泊湿地,属内陆湿地和水域生态系统类型的自然保护区。网湖是阳新县境内最大的淡水湖,为阳新县“百湖之王”,流域面积329.56 km²。按天然分水,隶属富河水系,直接接受双港、长乐源、龙口源、冷水源、木石港等来水。网湖总面积7265 hm²,为保护区的核心区之一。主要河流为富河、双港、长乐源。网湖气候属北中亚热带大陆性季风气候,雨量充沛,年平均气温16.9℃,年平均日照时数1 860—1 990 h,相对湿度62%~82%,年平均降水量为1 385.2 mm。每年夏季,网湖受长江涨水,富河洪水的顶托或倒灌和降水内渍,网湖地区的沟渠河道便和湖区连成一片汪洋,面积可达6 801.5 hm²(水深1~3 m)。据阳新县水文站测定,网湖最高水位为22.5 m,最低水位为13.2 m,平均水位15.5 m,平均水深3.5 m。而在秋、冬及早春枯水季节,随着湖水排放,部分地方露出地表,水面约3 800 hm²(水深0.5~3 m),占平水期湖水面积的74%,其余部分则形成了大片的泥泞沼泽草甸,构成了浅湖—沼泽—草甸、丘陵相连续的湿地生态系统。根据《湖北省地表水环境功能区划》(鄂政办发[2000]10号),网湖水环境功能区划为一般鱼类保护区,水质目标为Ⅲ类。目前网湖水质基本处于V类或劣V类,主要超标指标为总磷。

1.2 样品采集与分析

在网湖设置20个采样点(见图1),采样时间为2019年7月。使用自重力柱状采样器采集深度为0~25 cm的底泥,将底泥以5 cm间距进行分层,以0~5 cm的底泥均匀混合作为表层沉积物。底泥样品用自封袋密封封装,带回实验室后在室温下自然风干、研细,过100目尼龙筛后储存于新的自封袋中待测。按照标准方法,Cu、Zn、Pb、Cr采用火焰原子吸收分光光度法测定,Cd采用石墨炉原子吸收分光光度法测定,Hg和As采用原子荧光法测定。每个实验样品设置3个平行样,平行分析误差小于5%,结果取平均值。每批样品做2个实验室空白试样,测定结果均低于测定下限或方法检出限。Cu、Zn、Pb、Cr、Cd、Hg和As的检出限分别为1、0.5、0.1、5、0.01、0.002和0.01 mg·kg⁻¹。分析过程中采用沉积物标准样品GBW07423进行质量控制,各金属元素回收率为86.7%~106.8%。

1.3 重金属污染评价方法

1.3.1 地累积指数法

地累积指数法是研究湖泊或河流沉积物中重金属污染的定量指标方法, I_{geo} (地累积指数)可直观地判断重金属污染级别。地累积指数(I_{geo})的计算公式见式(1)。

$$I_{geo} = \log_2[C_n/1.5B_n] \quad (1)$$

式中: C_n 为元素 n 在沉积物中的实测质量分数, B_n 为该元素的地球化学背景值。长江流域水系沉积物中

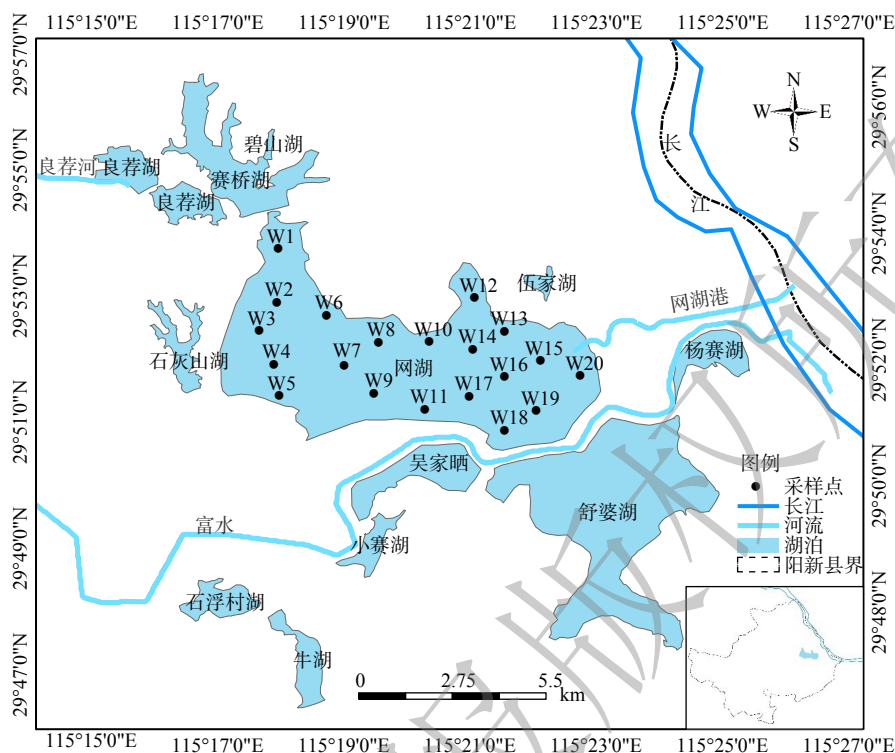


图 1 网湖采样点分布

Fig. 1 Sampling sites of the Wanghu Lake

As、Hg、Cu、Zn、Cd、Pb、Cr 的背景值分别为 7.60、0.034、21.50、73.60、0.15、21.40 和 52.30 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ [19]。I_{geo} 与重金属的污染程度关系见表 1，I_{tot} 为某样点各重金属 I_{geo} 值之和。

1.3.2 潜在生态风险指数法

潜在生态风险指数法是一种评价重金属污染及生态危害的方法[20]。潜在生态危害指数 (E_r^i) 是描述某一种重金属从低到高 5 个变化等级的值，潜在生态危害指数 (RI) 是描述多个重金属危害系数的综合，分级标准见表 2。潜在生态风险指数 (RI) 的计算公式见式 (2)。

$$RI = \sum E_r^i = \sum T_r^i \times (C_s^i / C_n^i) \quad (2)$$

式中：RI 为沉积物中多种重金属潜在生态危害指数； E_r^i 为重金属 i 的危害系数； T_r^i 为重金属 i 的毒性相应系数，其中 Cu、Zn、Pb、Cd、Cr、Hg、As 的 T_r^i 值分别为 5、1、5、30、2、40、10。 C_s^i 为重金属浓度实测值， C_n^i 为该元素的地球化学背景值，此处选取长江流域水系沉积物重金属背景值[19]。

1.3.3 一致性沉积物质量基准法

一致性沉积物质量基准法 (consensus-based

表 1 地累积指数 I_{geo} 与污染程度分级

Table 1 The geo-accumulation index and classification of pollution degree

I _{geo}	污染程度	污染级别
≤0	无污染	0
0~1	轻度-中等污染	1
1~2	中等污染	2
2~3	中等-强污染	3
3~4	强污染	4
4~5	强-极严重污染	5
5~10	极严重污染	6

表 2 E_rⁱ、RI 与潜在生态危害程度分级标准

Table 2 Grade standards of potential ecological risk coefficients (E_r^i), risk indices (RI) and potential ecological risk degree

单个重金属潜在生态风险指数 E_r^i	单因子污染物生态风险程度	多种重金属潜在生态风险指数 RI	总的潜在生态风险程度
$E_r^i < 40$	轻微	RI < 150	轻微
$40 \leq E_r^i < 80$	中等	$150 \leq RI < 300$	中等
$80 \leq E_r^i < 160$	强	$300 \leq RI < 600$	强
$160 \leq E_r^i < 320$	很强	$600 \leq RI < 1200$	很强
$320 \leq E_r^i$	极强	RI ≥ 1200	极强

sediment quality guidelines, CBSQGs) 是预测沉积物生物毒性风险的重要评价方法^[21]。CBSQGs 包括阈值效应含量 (threshold effect concentration, TEC) 和可能效应含量 (probable effect concentration, PEC)。当沉积物中重金属质量分数低于 TEC 时, 毒性发生概率通常低于 25%, 可认为其不会产生有害生物效应; 当重金属质量分数高于 PEC 时, 毒性发生的概率通常高于 75%, 有害生物效应发生的可能性较大。重金属一致性沉积物基准值见表 3 所示。

1.3.4 数据来源与分析

阳新县及汇水区范围内人口与经济数据来自于《黄石统计年鉴》(2011—2018) 和《阳新县国民经济和社会发展统计公报》(2010—2017 年); 实验数据的前期处理使用 Excel 软件; 相关性分析和主成份分析使用 SPSS 19 软件; 图形的绘制使用 Origin 8.5 软件; 采样点分布图和含量空间分布图的绘制使用 ArcGIS 10.1 软件。

2 结果与讨论

2.1 重金属空间分布特征

2.1.1 表层沉积物重金属分布特征

网湖表层沉积物中重金属的含量统计分析见表 4。As、Hg、Cu、Zn、Cd、Pb、Cr 等 7 种重金属元素质量分数均高于长江流域水系沉积物背景值, 平均质量分数分别是背景值的 4.9 倍、4 倍、5 倍、1.7 倍、1.9 倍、1.8 倍和 2.1 倍。7 种重金属的变异系数大小顺序为: Hg>Cd>Pb>Zn>As>Cu>Cr, 变异系数越大表明离散程度越大。由 WILDING^[23] 对变异系数的分类可知, Hg 属于高度变异, 这说明 Hg 在沉积物中的空间分布不均匀, 可能受到区域高地球化学背景或人为活动的影响。Cd、Pb、Zn 为中等变异性, As、Cu、Cr 为弱变异性。

表 4 网湖表层沉积物重金属质量分数统计

Table 4 The statistical characteristics of heavy metals in surface sediments of the Wanghu Lake

项目	最小值/(mg·kg ⁻¹)	最大值/(mg·kg ⁻¹)	平均值/(mg·kg ⁻¹)	标准偏差	变异系数	长江流域水系沉积物背景值 ^[19] /(mg·kg ⁻¹)
As	28.2	48.3	37.5	5.6	14.9%	7.6
Hg	0.08	0.25	0.137	0.053	38.5%	0.034
Cu	85.8	129	108	13.6	12.6%	21.5
Zn	99.6	159	123	18.6	15.1%	73.6
Cd	0.19	0.52	0.283	0.084	29.5%	0.15
Pb	20.2	47.9	37.8	9.83	26%	21.4
Cr	86.6	133	108	12.6	11.6%	52.3

与长江流域其他湖泊沉积物重金属质量分数对比(表 5), 网湖的 As 和 Cu 质量分数均高于其他 6 个湖泊, Hg 质量分数仅低于洞庭湖, Zn 质量分数仅低于阳澄湖, 与梁子湖相当; Pb 质量分数仅低于鄱阳湖, 与和洞庭湖相当; Cr 质量分数仅低于梁子湖。太湖和巢湖是我国重点治理湖泊, 而网湖沉积物重金属质量分数远高于太湖和巢湖。除 Cd、Pb 和 Zn 外, 网湖沉积物中 As、Hg、Cu 和 Cr 的平均质量分数均高于长江沉积物质量分数。目前, 网湖的水体环境存在严重的污染风险。尽管 2009—2011 年已开始实施网湖湿地保护与恢复工程, 但是未开展过针对底泥污染状况的调查与治理, 重金属在底泥中长期累积导致质量分数较高。由于枯水期人为地将网湖湖水引入长江, 网湖携带的颗粒物可能引起长江沉积物源发生改变, 应引起关注。

表 3 重金属一致性沉积物基准值^[22]

Table 3 CBSQGs of heavy metals

重金属	CBSQGs/(mg·kg ⁻¹)	
	TEC	PEC
As	16.1	54.3
Hg	0.18	0.66
Cu	38.2	214.6
Zn	153.5	396.2
Cd	1.04	5.76
Pb	53	296
Cr	78.3	268.5

表 5 网湖沉积物重金属含量与其他湖泊沉积物重金属含量对比

Table 5 Comparison of heavy metals in surface sediments of the Wanghu Lake and other lakes

湖泊	表层沉积物重金属平均含量/(mg·kg ⁻¹)							数据来源
	As	Hg	Cu	Zn	Cd	Pb	Cr	
网湖	37.5	0.140	108	123	0.283	37.8	108	本研究
巢湖	4.46	0.041	19.1	54.8	0.124	21.9	57.3	[24]
太湖	10.6	0.045	26.0	71.3	0.089	25.7	85.7	[24]
鄱阳湖	13.8	0.080	30.5	97.1	0.278	40.6	65.0	[24]
梁子湖	35.0	未检测	50.0	124	0.800	29.0	115	[25]
洞庭湖	17.1	0.300	30.6	95.9	1.26	37.1	103	[26]
阳澄湖	15.9	0.090	66.5	187	0.450	34.0	101	[27]
长江	25.0	未检测	82.0	174	2.46	60.0	90.0	[28]

对网湖表层沉积物重金属的空间分布状况进行 IDW 反距离权重插值计算, 结果见图 2。7 种重金属元素在沉积物中的空间分布有所差异。As 在湖心区的质量分数较高; 西北部湖区和东部湖区 Hg 的质量分数比湖心区高; 东部湖湾区和湖心区的 Cu 质量分数较高; Zn 从西北部湖湾区向湖心区和东部湖区呈现逐渐降低的趋势; Cd 从西北部湖湾区向湖心区呈现逐渐降低的趋势, 至东部湖区又略有升高; Pb 在西北部湖区的质量分数最高, 向湖心区和东部湖区呈现逐渐降低的趋势; Cr 从北部湖区向湖心区和南部湖区呈现逐渐升高的趋势。重金属具有附着悬浮颗粒物的物理特性, 悬浮颗粒物的迁移性和易沉降性使得重金属在水系中适合的区域进行沉积, 因而在沉积物中的分布具有差异性。Zn、Cd、Pb 在西北部湖湾区和西部湖区的质量分数较高, 该区域是富河、赛桥湖等水体入网湖的主要受水区, 受来水水质影响较大。阳新县矿产资源丰富^[18], 且一些矿产的分布距离富河较近, 重金属随水体流入网湖, 受水动力影响在入湖区附近随颗粒物沉淀而富集在底泥中。

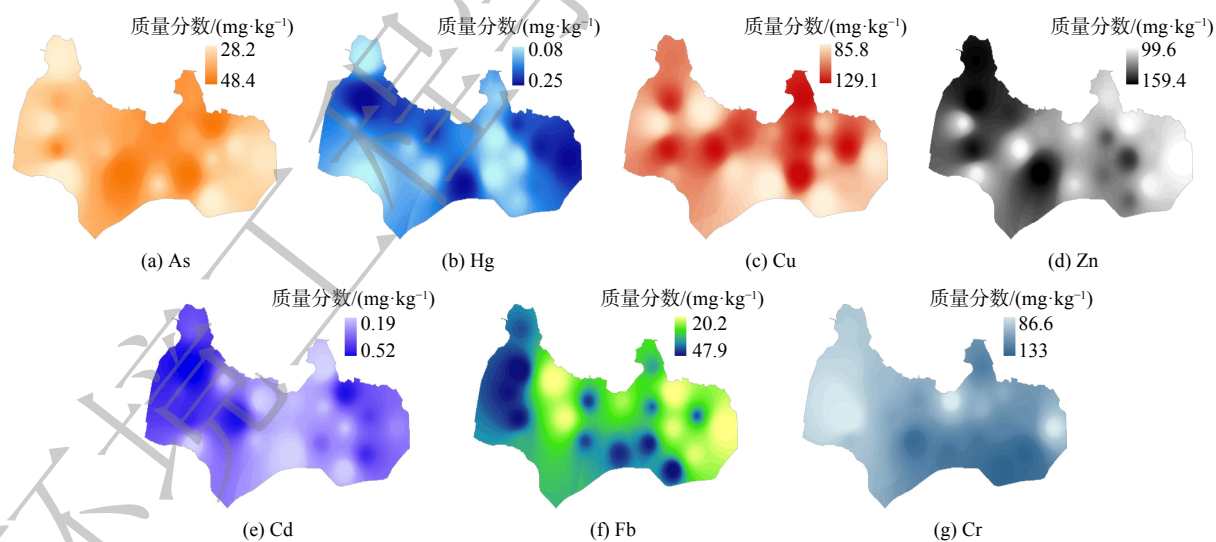
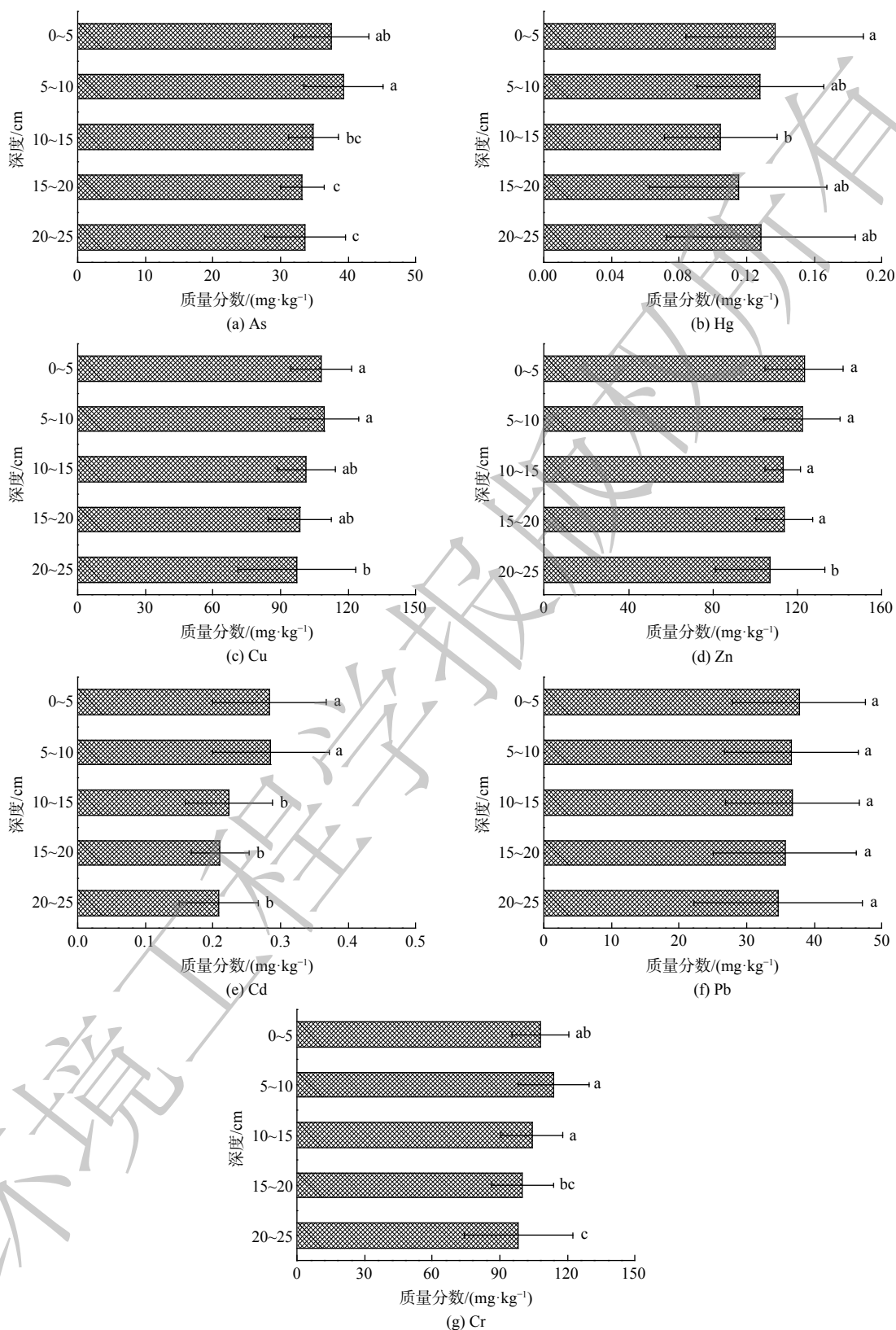


图 2 网湖表层沉积物重金属空间分布图

Fig. 2 Distribution characteristics of heavy metals in surface sediments of the Wanghu Lake

2.1.2 重金属垂向分布特征

重金属的垂向分布反映了重金属污染的历史记录, 也在一定程度上反映了湖泊自然环境的变化及不同时期人类活动强度和生产生活方式对湖泊产生的影响。对网湖不同深度底泥中的重金属含量进行统计分析(图 3), 各种重金属质量分数在 0~10 cm 深度均出现明显富集, 10 cm 以下 Hg 的平均质量分数随深度增加



注：不同小写字母表示差异显著 ($p < 0.05$)；误差棒为标准偏差。

图3 网湖沉积物重金属垂直分布

Fig. 3 Vertical distribution of heavy metals in sediments of the Wanghu Lake

逐渐升高，其他重金属元素则呈现随深度增加而逐渐降低的分布趋势。显著性分析显示，7 种重金属在第一层和第二层之间均无显著性差异；As 和 Cd 在第二层和第三层之间均有显著性差异；除 Cr 外，其他重金属在 10~25 cm 深度各层沉积物中的含量无显著性差异；As、Cu、Zn、Cd 和 Cr 在第一层和第五层之间均有显著性差异。

史小丽等^[29]采用放射性核素²¹⁰Pb 和¹³⁷Cs 计年法测定了百年来网湖沉积物的年代序列，计算了网湖的沉积速率，结果表明 80 年代中期以后网湖平均沉积速率约为 $0.56 \text{ cm}\cdot\text{a}^{-1}$ 。该测年结果与易朝路等^[30]得到的网湖沉积年代较一致，认为测年结果可信度较好。根据这一沉积速率，第一层 (0~5 cm) 沉积物形成的时间大概为 2019—2011 年，第二层 (5~10 cm) 的形成时间为 2011—2003 年，第三层 (10~15 cm) 的形成时间为 2003—1995 年，第四层 (15~20 cm) 的形成时间为 1995—1987 年，第五层 (20~25 cm) 的形成时间为 1987—1979 年。因此，从总量来看，近 40 年来网湖的重金属污染有加重趋势，但是不同年代间重金属含量的变化不显著。20 世纪 50 年代至 2017 年间不同深度沉积物中 Cu、Zn、Pb、Cr 的平均质量分数分别为 50.6、128.9、38.5、97.1 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[18]。本研究中近 40 年来不同深度沉积物中 Cu、Zn、Pb、Cr 的平均质量分数分别为 103、116、36.1、105 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，Cu 和 Cr 的平均质量分数上升，Zn 和 Pb 的平均质量分数下降。第一层沉积物重金属质量分数的增加与近十年长江中下游地区经济发展及人口增长有关。2010—2018 年，阳新县年均人口增长率为 10.48%，近五年网湖汇水区范围内常住人口的年均增长率为 51.08%。2010—2018 年阳新县经济一直保持中高速增长态势，年均增速为 9.5%，农林牧渔增加值年均增长率为 13.8%。人口与经济的快速增长给网湖的生态环境带来较大压力。此外，湖泊流域耕种面积的扩大、化肥的大量使用、污水排放入湖、湖区过量养殖等都会造成沉积物中重金属元素的累积。

2.2 重金属来源解析

2.2.1 相关性分析

相关性分析被广泛用于重金属来源分析，若重金属元素之间呈显著或极显著相关，可推测它们具有同源性或伴生污染^[31]。对网湖沉积物重金属含量进行 Pearson 相关性分析，结果见表 6 显示，As、Zn、Cd 两两之间均呈极显著正相关 ($p<0.01$)，这说明其可能具有同源性或存在伴生污染。Pb 和 Cu、Pb 和 Zn 之间分别呈极显著正相关 ($p<0.01$) 和显著正相关 ($p<0.05$)。Hg 和 Cr 与其他重金属之间均不具有相关性，这说明 Hg 和 Cr 可能受其他特殊来源的影响。

表 6 网湖表层沉积物重金属之间的相关系数

Table 6 Correlation coefficients between heavy metals in surface sediments of the Wanghu Lake

	As	Hg	Cu	Zn	Cd	Pb	Cr
As	1.000	0.149	0.105	0.387**	0.314**	0.035	0.187
Hg		1.000	-0.194	-0.096	0.103	-0.157	0.159
Cu			1.000	0.180	0.162	0.308**	-0.145
Zn				1.000	0.332**	0.232*	0.078
Cd					1.000	0.018	0.062
Pb						1.000	-0.252*
Cr							1.000

注：*表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关；**表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

2.2.2 主成分分析

湖泊沉积物中重金属的污染来源非常广泛，大致可分为工业源、农业源、大气沉降等^[32]。为进一步揭示网湖沉积物中重金属的来源，对所有重金属数据进行主成份分析。KMO 检验和 Bartlett 球度检验的值分别为 0.612 和 0.000。指定提取特征值大于 0.8 的因子，可提取 3 个主成分，共解释了 62.6% 的总方差(见表 7)。根据主成分载荷值(表 8)，第 1 主成分主要包括 As、Zn、Cd，第 2 主成份主要包括 Cu、Pb，第 3 主成份主要包括 Hg。Zn 和 Cd 是农田土壤重金属污染的主要贡献元素^[33]，化肥和农药的使用对湖泊沉积物 As、Zn、Cd 等污染具有较大贡献^[34-36]，因此第一主成份可代表农业源，这与网湖流域受农业面源污染和

表7 总方差解释

Table 7 The total variance explained

成份	初始特征值		
	合计	方差百分比	累积百分比
1	1.866	26.658%	26.658%
2	1.621	23.162%	49.821%
3	0.896	12.805%	62.626%
4	0.774	11.064%	73.690%
5	0.737	10.527%	84.217%
6	0.616	8.794%	93.010%
7	0.489	6.990%	100.000%

表8 旋转因子载荷矩阵

Table 8 The rotated factor load matrix

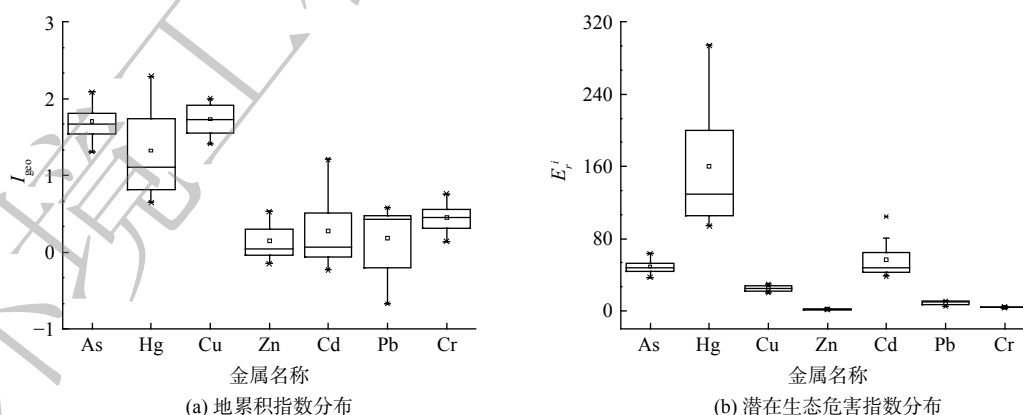
指标	主成份		
	1	2	3
As	0.762	-0.091	0.115
Hg	0.125	-0.147	0.906
Cu	0.293	0.563	-0.278
Zn	0.742	0.111	-0.287
Cd	0.680	0.113	0.225
Pb	0.153	0.720	-0.169
Cr	0.317	-0.765	-0.128

地表径流影响较大的特点一致。网湖及周边水体养殖过程中过量投饵投肥，也是重金属的重要来源之一。Pb 主要来源于机动车船燃油排放的含铅废气^[37]，Cu、Pb 具有同源性，故第二主成份可代表交通运输污染源。Hg 主要来自于工业废水、大气沉降等，网湖保护区周边工业污染少，工业源贡献较低，故第三主成份可代表大气污染源。

2.3 重金属污染评价

2.3.1 地累积指数和潜在生态风险指数评价

网湖表层沉积物重金属的地累积指数和潜在生态危害指数如图4所示。以全湖平均值比较重金属 I_{geo} 呈现 $Cu > As > Hg > Cr > Cd > Pb > Zn$ 的变化特征。Cu、As 和 Hg 为中等污染水平，Cd、Cr、Pb 和 Zn 为轻度-中等污染水平。在所有样本中，As 3 例、Hg 3 例、Cu 1 例为中等-强污染水平 (2.00~2.29)，占所有样点 7 种重金属 I_{geo} 的 5%；Cd 19 例、As 17 例、Hg 11 例、Cd 1 例为中等污染水平 (1.02~1.94)，占比 34.3%；Cr 20 例、Pb 14 例、Zn 14 例、Cd 14 例、Hg 6 例为轻度-中等污染水平 (0.018~0.97)，占比 48.6%；Pb 6 例、Zn 6 例、Cd 5 例为无污染，占比 12.1%。全湖 I_{tot} 平均值为 5.81，表明网湖沉积物整体上受到极严重的重金属污染。史小丽等^[28] 的研究表明 20 世纪 50 年代以后网湖沉积物中的重金属含量开始增加，Cu、Zn、Pb 在 20 世纪 60 年代后出现轻度污染，Cr 在 100 多年来为无污染。这表明近几十年来，网湖沉积物开始受到 Cr 污染，且已发展到轻度-中等污染水平；Cu 由轻度污染发展为中等污染，Zn 和 Pb 由轻度污染发展到轻度-中等污染。

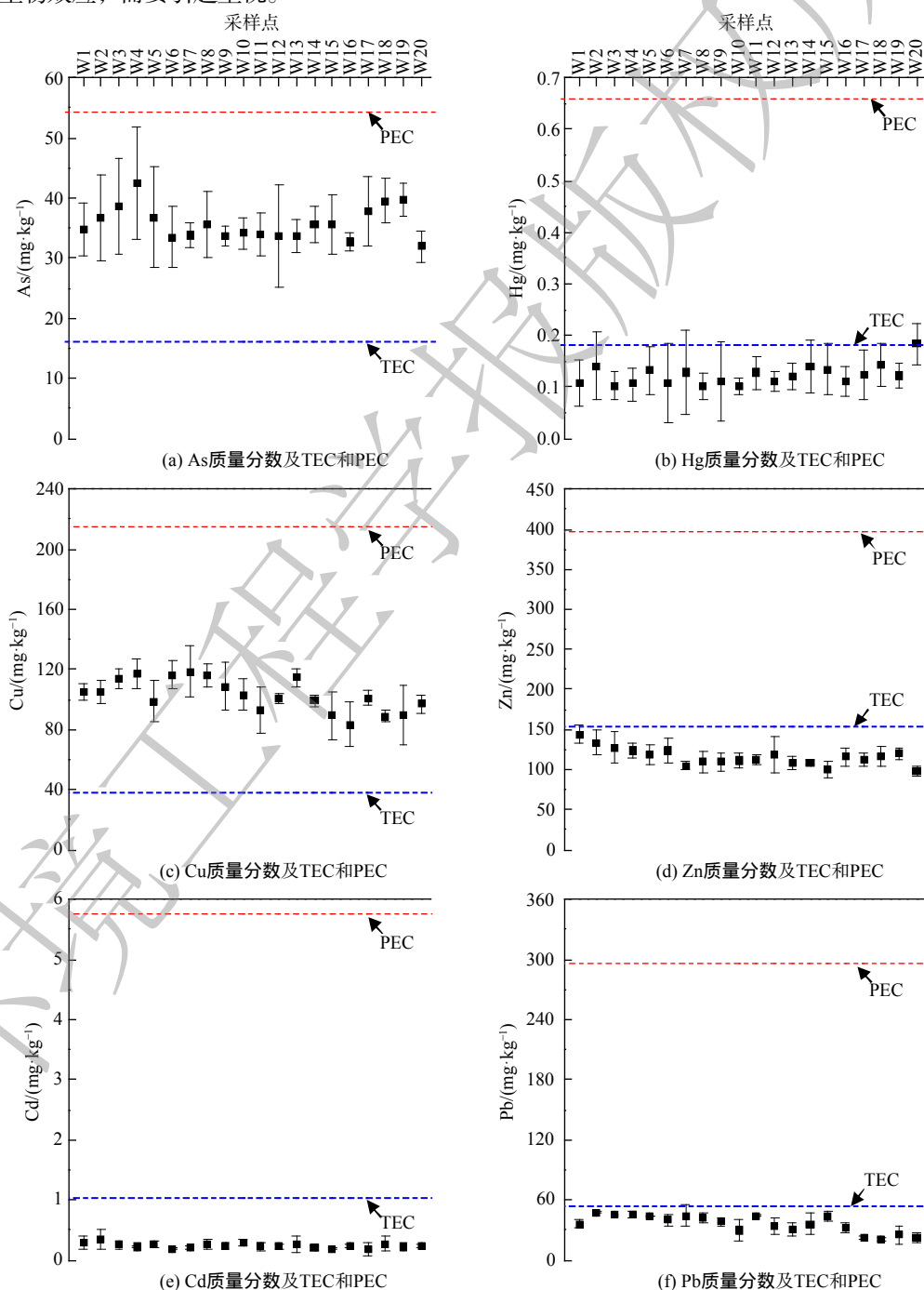
图4 网湖表层沉积物重金属 I_{geo} 与 E_r^i 箱线图Fig. 4 Box-Line diagram of heavy metals I_{geo} and E_r^i in surface sediments of the Wanghu Lake

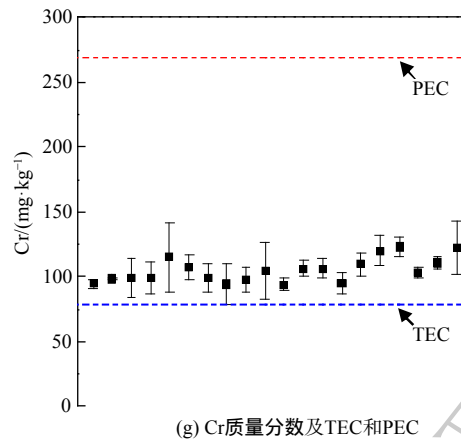
从单个重金属的污染指数 E_r^i 来看，Hg 的平均潜在生态危害程度相对较严重， E_r^i 平均值为 161；其次为 Cd 和 As，处于中等生态危害程度， E_r^i 平均值分别为 56.64 和 49.35；Cu、Pb、Cr 和 Zn 的污染程度相对较轻， E_r^i 平均值均小于 40，处于低生态风险水平。7 种重金属 E_r^i 均值呈现 $Hg > Cd > As > Cu > Pb > Cr > Zn$ 的

变化特征。从多种重金属潜在生态危害指数 RI 来评价, 全湖 RI 平均值为 306, 处于很强的潜在生态危害。各样点 RI 值中 Hg 的贡献比例最大, 这主要是由于网湖表层沉积物中 Hg 的总量高于背景值, 且 Hg 的毒性水平较高所致。

2.3.2 毒性效应预测

按照一致性沉积物质量基准对网湖各层沉积物的综合生物毒性风险进行了划分(图 5), 结果显示, 所有点位 7 种重金属含量均低于 PEC。Zn、Cd 和 Pb 在所有点位的平均质量分数均低于 TEC, Hg 仅有一个点位的平均质量分数高于 TEC, Zn、Cd、Pb 和 Hg 引发生物毒性的概率均低于 25%, 可认为不会产生有害生物效应。As、Cu 和 Cr 在所有点位的平均质量分数均处于 TEC 和 PEC 之间, 有 25%~75% 的概率引发毒性, 产生有害生物效应, 需要引起重视。





注: 各点数值表示不同层次沉积物中重金属质量分数的平均值±标准偏差。

图5 网湖沉积物重金属含量及沉积物质量基准阈值 (TEC 和 PEC)

Fig. 5 Comprehensive evaluation results of biotoxicity risk of heavy metals in sediments of different sampling sites

综上所述,地累积指数和潜在生态风险指数评价结果均显示网湖重金属综合污染很严重,具有很强的潜在生态危害。与历史调查结果^[17-18]相比,当前网湖重金属含量明显增加,污染程度加重。历史上由于人为干预,把网湖由与长江连通的敞水湖改造成了封闭型人工控制的养殖湖,过量投饵投肥养殖带来的重金属在底泥中逐年累积,加上人为活动的影响以及江湖分离,使得网湖水利交换不畅,导致重金属元素含量不断增加。与长江流域其他重要湖泊相比也表明,网湖底泥已受到重金属的严重污染。本文对网湖底泥重金属污染状况进行了补充研究,但水体的重金属污染状况研究仍存在空白,故有必要加强网湖水体中重金属的监测工作。网湖作为长江经济带重要的湿地保护区,在共抓大保护的战略导向下,其重金属污染问题需及时防控和治理,防范可能产生的生态危害。

3 结论

1) As、Hg、Cu、Zn、Cd、Pb、Cr等7种重金属的平均质量分数分别为37.5、0.137、108、123、0.283、37.8、108 mg·kg⁻¹,均高于长江流域水系沉积物背景值。与长江流域其他湖泊比较,网湖沉积物重金属质量分数处于较高水平。2) 7种重金属在表层沉积物中的空间分布具有差异性,整体来看西部湖区污染较重。在垂向分布上,0~10 cm深度内均出现明显富集,在10 cm以下呈现随深度增加而逐渐下降的分布趋势(Hg则相反)。3) 相关性分析和主成分分析显示,第一主成分As、Zn和Cd3种重金属来源相似,主要来自于农业源;第二主成分Cu和Pb具有同源性,主要来自于交通运输污染源;第三主成份Hg主要来自大气污染源。因此,网湖沉积物重金属受到较为严重的人为污染影响。4) 地累积指数和潜在生态危害指数评价显示,网湖沉积物整体受到极严重的重金属污染和很强的潜在生态危害。受水动力影响在入湖区附近表层沉积物重金属污染和潜在生态风险最高,需及时防控和治理。一致性沉积物质量基准评价结果显示,网湖发生重金属生物中毒的概率低于75%,但As、Cu和Cr有25%~75%的概率产生有害生物效应。

参考文献

- [1] 秦延文,张雷,郑丙辉,等.太湖表层沉积物重金属赋存形态分析及污染特征[J].环境科学,2012,33(12):4291-4299.
- [2] 林承奇,胡恭任,于瑞莲,等.九龙江表层沉积物重金属赋存形态及生态风险[J].环境科学,2017,38(3):1002-1009.
- [3] 蒋豫,吴召仕,赵中华,等.阳澄湖表层沉积物中氮磷及重金属的空间分布特征及污染评价[J].环境科学研究,2016,29(11):1590-1599.
- [4] 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.
- [5] HOU D, HE J, LV C W, et al. Distribution characteristics and potential ecological risk assessment of heavy metals (Cu, Pb, Zn, Cd) in water and sediments from Lake Dalinouer, China[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2013, 93: 135-144.
- [6] 李莹杰,张列宇,吴易雯,等.江苏省浅水湖泊表层沉积物重金属GIS空间分布及生态风险评价[J].环境科学,2016,37(4):1321-1329.
- [7] RAHMAN M S, SAHA N, MOLLA A H, et al. Assessment of anthropogenic influence on heavy metals contamination in the aquatic ecosystem components: water, sediment, and fish[J]. Soil and Sediment Contamination: An International Journal, 2014, 23(4): 353-373.
- [8] 燕婷,刘恩峰,张恩楼,等.抚仙湖沉积物重金属时空变化与人为污染评价[J].湖泊科学,2016,28(1):50-58.
- [9] 史小丽,秦伯强.长江中游网湖近代沉积环境演变及其对人类活动的响应[J].地理研究,2013,32(5):808-816.
- [10] 史小丽,秦伯强.近百年来长江中游网湖沉积物粒度特征及其环境意义[J].海洋地质与第四纪地质,2009,29(2):117-122.
- [11] 史小丽,秦伯强.长江中游网湖沉积物营养元素变化特征及其影响因素[J].地理科学,2010,30(5):766-771.
- [12] 姚志刚,鲍征宇,高璞.洞庭湖沉积物重金属环境地球化学[J].地球化学,2006(6):629-638.
- [13] 邴海健,吴艳宏,刘恩峰,等.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[J].湖泊科学,2010,22(5):675-683.
- [14] 祝云龙,姜加虎,黄群,等.东洞庭湖与大通湖水体沉积物和生物体中Cd Pb Hg As的含量分布及相互关系[J].农业环境科学学报,2008(4):1377-1384.
- [15] 张家泉,田倩,许大毛,等.大冶湖表层水和沉积物中重金属污染特征与风险评价[J].环境科学,2017,38(6):2355-2363.

- [16] 刘恩峰, 沈吉, 刘兴起, 等. 太湖沉积物重金属和营养盐变化特征及污染历史[J]. 中国科学 (D 辑:地球科学), 2005(S2): 73-80.
- [17] 王明学, 于建胜, 龚世园, 等. 网湖春季水质及底质状况的研究[J]. 淡水渔业, 1997(4): 7-10.
- [18] 史小丽, 秦伯强. 长江中游网湖沉积物重金属元素变化特征分析[J]. 第四纪研究, 2009, 29(1): 135-143.
- [19] 朱青青, 王中良. 中国主要水系沉积物中重金属分布特征及来源分析[J]. 地球与环境, 2012, 40(3): 12-20.
- [20] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sediment ecological approach[J]. *Water Research*, 1980, 14(8): 975-1001.
- [21] MACDONALD D D, INGERSOLL C G, BERGER T A. Development and evaluation of consensus-based sediment quality guidelines for freshwater ecosystems[J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2000, 39(1): 20-31.
- [22] APITZ S E, BARBANT A, BERNSTEIN A G, et al. The assessment of sediment screening risk in Venice Lagoon and other coastal areas using international sediment quality guidelines[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2007, 7(5): 326-341.
- [23] WILDING L P. Spatial variability: its documentation, accommodation and implication to soil survey[J]. *Spatial Variations*, 1985, 166-194.
- [24] 杨辉, 陈国光, 刘红樱, 等. 长江下游主要湖泊沉积物重金属污染及潜在生态风险评价[J]. 地球与环境, 2013, 41(2): 160-165.
- [25] 王丹, 孟鑫, 张洪, 等. 梁子湖沉积物重金属污染现状分析及风险评价[J]. 环境科学学报, 2016, 36(6): 1901-1909.
- [26] 高吉权, 朱姗姗, 刘鹏飞. 洞庭湖底泥沉积物重金属分布与生态风险评价[J]. 云南大学学报 (自然科学版), 2019, 41(4): 851-859.
- [27] 郭西亚, 高敏, 张杰, 等. 阳澄湖沉积物重金属空间分布及生物毒害特征[J]. 中国环境科学, 2019, 39(2): 802-811.
- [28] 王岚, 王亚平, 许春雪, 等. 长江水系表层沉积物重金属污染特征及生态风险性评价[J]. 环境科学, 2012, 33(8): 2599-2606.
- [29] 史小丽, 秦伯强. 湖北网湖¹³⁷Cs、²¹⁰Pb 计年与沉积速率研究[J]. 宁波大学学报 (理工版), 2008, 21(3): 418-422.
- [30] 易朝路, 吴显新, 刘会平, 等. 长江中游湖泊沉积微结构特征与沉积环境[J]. 沉积学报, 2002, 20(2): 293-302.
- [31] BASTAMI K D, NEYESTANI M R, SHEMIRANI F, et al. Heavy metal pollution assessment in relation to sediment properties in the coastal sediments of the southern Caspian Sea[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2015, 92(12): 237-243.
- [32] 李小林, 刘恩峰, 于真真, 等. 异龙湖沉积物重金属人为污染与潜在生态风险[J]. 环境科学, 2019, 40(2): 614-624.
- [33] LIN Q, LIU E F, ZHANG E L, et al. Reconstruction of atmospheric trace metals pollution in Southwest China using sediments from a large and deep alpine lake: historical trends, sources and sediment focusing[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 613-614: 331-341.
- [34] 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(1-3): 945-951.
- [35] 王铁宇, 吕永龙, 罗维, 等. 北京官厅水库周边土壤重金属与农药残留及风险分析[J]. 生态与农村环境学报, 2006, 22(4): 57-61.
- [36] URSZULA A K, EDELTRAUDA H R. Contaminated sediments as a potential source of Zn, Pb, and Cd for a river system in the historical metalliferous ore mining and smelting industry area of South Poland[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2009, 9(1): 13-22.
- [37] GRAY C W, MCLAREN R G, ROBERTS A H C, et al. The effect of long-term phosphatic fertiliser applications on the amounts and forms of cadmium in soils under pasture in New Zealand[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1999, 54(3): 267-277.

(责任编辑: 靳炜)

Pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in sediments of the Wanghu Lake from the middle reaches of the Yangtze River

RONG Nan^{1,2,3}, GUO Canbin^{1,2,4}, WANG Wenjing^{1,2,4}, ZHOU Daokun^{1,2,4,*}, LIU Xiaowei^{1,2,4}, LU Wenzhou^{1,2,4}

1. South China Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Guangzhou 510530, China; 2. State Environmental Protection Key Laboratory of Water Environmental Simulation and Pollution Control, Guangzhou 510530, China; 3. State Key Laboratory of Environmental Aquatic Chemistry, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 4. Guangdong Key Laboratory of Water and Air Pollution Control, Guangzhou 510530, China

*Corresponding author, E-mail: zhoudaokun@scies.org

Abstract The Wanghu Lake in Hubei Province is located in the middle reaches of the Yangtze River and is connected to the main stream of the Yangtze River. Studying the distribution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in sediments is of great significance to water quality safety and water pollution control in the Yangtze River Economic Belt. In this paper, the content and spatial distribution characteristics of seven heavy metals such as As, Hg, Cu, Zn, Cd, Pb and Cr in the 0~25 cm sediments from 20 sites of the Wanghu Lake were analyzed. The sources of heavy metals in surface sediments were analyzed by using correlation analysis and principal component analysis. Moreover, this study evaluated the sediment pollution characteristics by using the geo-accumulation index, potential ecological risk index and consensus-based sediment quality guidelines. The results showed that, the average contents of As, Hg, Cu, Zn, Cd, Pb, and Cr were 37.5 mg·kg⁻¹, 0.137 mg·kg⁻¹, 108 mg·kg⁻¹, 123 mg·kg⁻¹, 0.283 mg·kg⁻¹, 37.8 mg·kg⁻¹, and 108 mg·kg⁻¹, respectively. Compared with other important lakes in the Yangtze River basin, such as the Chaohu Lake and the Taihu Lake, the heavy metal content in the Wanghu lake was at a relatively high level. Pearson Correlation analysis showed that As, Zn and Cd had a significant positive correlation ($p < 0.01$), indicating that they were homologous and mainly derived from agricultural sources. A highly significant positive correlation ($p < 0.01$) was also observed between Cu and Pb, and they were mainly discharged from transportation pollution sources. The evaluation results showed that the Wanghu sediment was seriously polluted by heavy metals and had a strong potential ecological hazard, which is relatively serious near the afflux area and needs timely prevention and control. The consensus-based sediment quality guidelines evaluation showed that Zn, Cd, Hg, and Pb had less than 25% probability of causing biological toxicity. As, Cu, and Cr had 25% to 75% probability of causing harmful biological effects.

Keywords the Wanghu Lake; sediment; heavy metals; pollution evaluation; toxicity and harmful biological effects