

东平湖水体和沉积物重金属分布及风险评估

艾留唤, 马 秉, 邵世伟, 田 侠, 张 磊
(青岛农业大学资源与环境学院, 青岛 266109)

摘要: 为了解东平湖水体和沉积物中 Cr、Hg、Pb、Cd 和 As 5 种重金属的污染特征及空间分布, 评价其生态风险, 测定了水体和沉积物中 5 种重金属的含量, 通过相关性和主成分分析方法探究其重金属来源, 并利用潜在生态风险指数法评估了其生态风险。结果表明, 东平湖水体 Cr、Hg、Pb、Cd 和 As 的平均含量分别为 4.53、0.04、7.51、0.77 和 5.92 $\mu\text{g/L}$, 5 种重金属的含量均符合地表水中 III 类水标准。东平湖沉积物 Cr、Hg、Pb、Cd 和 As 的平均含量分别为 59.41、0.05、22.21、0.27 和 18.43 mg/kg , 分别是黄河沉积物背景值的 0.99、3.33、1.48、3.51 和 2.46 倍, 其中仍有少数点位 Cr 含量略高。相关性分析和主成分分析结果表明, 东平湖的重金属污染的主要来源是农业和工矿业。东平湖沉积物的潜在生态危害程度为中度水平, Hg、Cd 的贡献率比较高, 各重金属元素的潜在生态危害系数 (E_r^i) 均值大小排序为 $\text{Hg} > \text{Cd} > \text{As} > \text{Pb} > \text{Cr}$ 。南水北调工程有效地降低了东平湖水体和沉积物中的重金属含量。

关键词: 重金属; 空间分布; 溯源; 风险评估

中图分类号: X524

文献标志码: A

DOI: 10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.2022040016

Heavy metal distribution and risk assessment of Dongping Lake water bodies and sediments

AI Liuhuan, MA Bing, SHAO Shiwei, TIAN Xia, ZHANG Lei
(School of Environment and Science, Qingdao Agriculture University, Qingdao 266109, China)

Abstract: To understand the pollution characteristics and spatial distribution of five heavy metals, Cr, Hg, Pb, Cd and As, and their ecological risk assessments in the water bodies and sediments of Dongping Lake, the contents of the five heavy metals in the water and sediment were measured. Their sources were explored by using the correlation and principal component analysis, and their ecological risks were evaluated by using the potential ecological risk index method. The results showed that the average contents of Cr, Hg, Pb, Cd and As in Dongping Lake water were 4.53, 0.04, 7.51, 0.77 and 5.92 $\mu\text{g/L}$, respectively, and the contents of the five heavy metals met the standard of Class III water for surface water. The average contents of Cr, Hg, Pb, Cd and As in Dongping Lake sediments were 59.41, 0.05, 22.21, 0.27 and 18.43 mg/kg , which were 0.99, 3.33, 1.48, 3.51, and 2.46 times of the background values of Yellow River sediments respectively. And there were still a few points with slightly higher Cr contents. The results of correlation analysis and principal component analysis indicated that the main sources of heavy metal pollutions in Dongping Lake were agriculture and industrial as well as mining industries. The potential ecological hazard level of Dongping Lake sediments was moderate. The contribution of Hg and Cd was relatively high, and the mean value of the potential ecological hazard coefficient (E_r^i) of each heavy metal element was ranked as $\text{Hg} > \text{Cd} > \text{As} > \text{Pb} > \text{Cr}$. The South-North Water Transfer Project effectively reduced the heavy metal content in the water bodies and the sediments of Dongping Lake.

Keywords: heavy metals; spatial distribution; traceability; risk assessment

CLC number: X524

随着工业、农业和城市化的迅速发展, 各种污染物不断地进入各环境介质中, 严重威胁生态健

康^[1-3]。5 大重金属因其污染具有持久性、不可逆性、潜在毒性、生物富集和生物放大等特点而备受

收稿日期: 2022-04-05

录用日期: 2022-05-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41101094); 青岛市农业机械服务中心环境保护项目(6602420063)

作者简介: 艾留唤(1995-), 女, 硕士研究生。研究方向: 水环境重金属研究及风险评估。E-mail: 18211756563@163.com

通信作者: 张 磊(1976-), 女, 博士、副教授。研究方向: 污染物的生物地球化学循环研究及人体健康风险评估。

E-mail: zhanglei_lw@163.com

引用格式: 艾留唤, 马 秉, 邵世伟, 等. 东平湖水体和沉积物重金属分布及风险评估[J]. 环境保护科学, 2023, 49(2): 126-131.

关注,也是环境重点监控污染物^[4]。对于水环境而言,人为污染排放(废水、废气和固废等)和自然岩石风化等都是重金属进入水体的有效途径,一部分重金属经稀释后被水生生物吸收,随着食物链的生物放大作用,进入并蓄积于人体,存在“致畸、致癌、致突变”的风险^[5];另一部分重金属会随水体中的胶体粒子絮凝沉积到底泥中,在湖底形成高含量的“毒库”,是潜在的二次污染源^[6-7]。因此,水体和沉积物中的重金属含量是水环境安全性的重要检测指标^[8]。

“南水北调”作为世界上最大的水利工程,运行7年以来,累计向北方调水 $4.94 \times 10^{11} \text{ m}^3$,其中东平湖作为南水北调的东线工程调水流经的最后一个湖泊,调水量达 $9.331 \times 10^{10} \text{ m}^3$,占总调水量的18.89%^[9]。东平湖西部和南部主要为农田,东南部有电厂、机械制造厂、服装制造厂、印刷厂、畜禽养殖场和各种食品制造厂,周边的农业面源污染和工业废水排放都是东平湖水环境的潜在威胁^[10]。

以往的研究大都关注东平湖水体富营养化、藻类泛滥或水环境中单一部分重金属问题^[11-13],但对于在大型调水工程的背景下的东平湖水环境重金属的系统研究相对较少。该研究分析了东平湖水体和沉积物中5种重金属(Cr、Hg、Pb、Cd和As)的分布特征及其生态风险,探究工程调水前后湖泊重金属含量的变化,初步分析了东平湖重金属可能的污染来源,以期东平湖的污染防控和生态风险管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

东平湖(35°30'~36°20'N, 116°00'~116°30'E)是山东省第二大淡水湖,其位于中国山东省泰安市东平县,同时也是京杭大运河复航和南水北调东线工程的重要枢纽^[14]。东平湖底整体呈西北高,东南低的态势,总面积约为627 km²,蓄水总量为 $4 \times 10^9 \text{ m}^3$,年平均水深为2~4 m^[15]。东平湖分老湖区与新湖区两部分,老湖区在东北部,面积约为208 km²,常年蓄水,即一般所称的东平湖。新湖区在东南部,大部分为农耕地,是防御黄河特大洪水的分洪区。东平湖主要注入河流是大汶河,大汶河是黄河的支流,由东南部流经东平湖后再汇入黄河^[10],其采样点见图1。

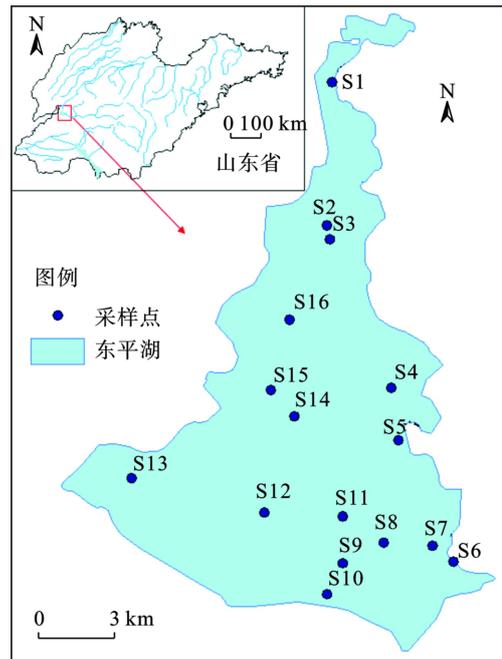


图1 东平湖位置及采样点分布

Fig. 1 Location of Dongping Lake and distribution of sampling points

1.2 样品采集与预处理

2019年12月,根据《水环境监测规范:SL219—98》中地表水采样点布设原则,在东平湖设置了16个采样点(图1中S1~S16)。采用有机玻璃采水器采集水样,保存于干净的聚乙烯瓶中;沉积物样品采用彼得逊采泥器采集并储存于聚乙烯袋内,每个采样点均采集3个平行样,现场混为1个样品,做好标签,冷藏运回实验室。

采用HNO₃-HCl混合酸对水样进行加热浓缩处理,采用HCl-HNO₃-HF-HClO₄混合酸对已风干、碎化和过筛的沉积物样品进行消解,所有样品均定容、保存于10 mL容量瓶中。样品中Cr、Pb、Cd和As元素均用ICP-MS(NexION 300X,美国)测定,Hg元素用冷原子吸收分光光度计(F732-V,上海华光)进行测定。

1.3 数据处理与质量控制

采样地点由GPS定位,数据利用Origin Pro 2021和ArcGIS 10.2进行绘图,Excel 2019进行绘表。所有试剂均为优级纯,器皿均用30%的稀硝酸浸泡24 h。测定过程中均有空白样品和50%的平行样品,同时水样利用标准溶液、沉积物利用土壤标准物质(GBW07401a)进行标定,回收率为90%~106%。

1.4 潜在生态风险评估

潜在生态风险指数法由瑞典学者HAKANSON^[16]

提出,将沉积物中的重金属潜在生态危害程度分为 5 个等级,见表 1。

表 1 沉积物中重金属潜在生态危害程度
Table 1 Potential ecological hazard level of heavy metals in sediments

潜在生态危害系数(E_r^i)	潜在生态危害指数(RI)	潜在生态危害程度
<40	<150	轻度
[40,80)	[150,300)	中度
[80,160)	[300,600)	强度
[160,320)	≥ 600	很强
≥ 320	-	极度

目前被广泛应用于评估沉积物被重金属污染的程度^[6,17-19],见式(1~2):

$$E_r^i = T_r^i \times C_f^i / C_s^i \quad (1)$$

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

式中: C_f^i 是单一元素含量,mg/kg; C_s^i 是元素背景值(黄河沉积物的背景值“Cr=60 mg/kg, Hg=0.015 mg/kg, Pb=15 mg/kg, Cd=0.077 mg/kg, As=7.5 mg/kg”)^[10]; T_r^i 是每种金属的生物毒性因子(Cd=30, Pb=5, Cr=2, As=10, Hg=40)^[20]; E_r^i 是单个金属的生态风险系数;RI 是 E_r^i 的总和——潜在生态风险指数。

2 结果与讨论

2.1 重金属含量水平

东平湖水体和沉积物重金属污染水平 东平湖在 2013 年 12 月“南水北调”工程通水^[21]前后水体和沉积物中重金属含量数据的对比,见表 2。

表 2 东平湖水体和沉积物通水前后的重金属含量

Table 2 Heavy metal content of Dongping Lake water bodies and sediments before and after water circulation

重金属	水体/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$						沉积物/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$			
	采样时间2012-06		采样时间2012-09		采样时间2019-12		采样时间2012-07		采样时间2019-12	
	范围	均值	范围	均值	范围	均值	范围	均值	范围	均值
Cr	10.00 ~ 16.00*	12.75*	10.00*	10.0*	2.14 ~ 7.00	4.53	67.20 ~ 102.80	89.30	43.84 ~ 68.71	59.41
Hg	0.10 ~ 0.17	0.12	0.10	0.1	0.01 ~ 0.09	0.04	0.03 ~ 0.07	0.06	0.03 ~ 0.07	0.05
Pb	10.00	10.00	10.00	10.0	4.32 ~ 12.30	7.51	29.20 ~ 41.30	35.50	17.34 ~ 27.21	22.21
Cd	0.10 ~ 1.00	0.78	1.00	1.0	0.19 ~ 1.65	0.77	0.22 ~ 0.35	0.29	0.08 ~ 0.72	0.27
As	10.00	10.00	10.00	10.0	2.22 ~ 15.25	5.92	19.20 ~ 38.50	25.30	15.04 ~ 21.47	18.43
参考文献	[22]				本研究		[10]		本研究	

注:“*”为 Cr^{6+} 。

东平湖表层水体平均含量表现为 Pb(7.51 $\mu\text{g/L}$) > As(5.92 $\mu\text{g/L}$) > Cr(4.53 $\mu\text{g/L}$) > Cd(0.77 $\mu\text{g/L}$) > Hg(0.04 $\mu\text{g/L}$), 5 种重金属的含量均达到了《中国地表水 III 类水的标准: GB 3838—2002》; 2012 年 7 月东平湖表层沉积物 Cr(89.30 mg/kg) > Pb(35.50 mg/kg) > As(25.30 mg/kg) > Cd(0.29 mg/kg) > Hg(0.06 mg/kg), 分别是黄河沉积物背景值的 1.49、2.37、3.37、3.77 和 4 倍但在 2019 年 12 月 Cr(59.41 mg/kg) > Pb(22.21 mg/kg) > As(18.43 mg/kg) > Cd(0.27 mg/kg) > Hg(0.05 mg/kg), 仅是黄河沉积物背景值的 0.99、1.48、2.46、3.51 和 3.33 倍。总的来说, 通水后水体和沉积物中 5 种重金属含量均有所下降, 但出现重金属(如 Cd、水体中 Pb 和 As) 的浓度范围均有所

增大的情况。分析其主要原因有以下几方面: 其一, 在工程通水前, 大汶河地处东平湖的入湖口, 其周边的工矿业活动较为频繁, 且长期以来大汶河水、东平湖水较为平稳, 河底、湖底沉积物未发生较大扰动, 致使沉积物中 5 种重金属含量呈现出较黄河背景值高或略低的情况; 另一方面, 通水后的工程调水对沉积物与水体造成了较大扰动和稀释, 利于污染物质的扩散, 而东平县对全域农业源的治理和对工业及矿业点源的集中治理, 进一步降低了周边污染源的排放; 此外, “水十条”、“土十条”等相关法律法规的颁布、高能耗高污染排放的产业结构整顿以及东平湖生态修复工程等生态环保措施的进一步落实, 进一步提高了流域生态环境质量。

2.2 水体和沉积物中重金属空间分布

东平湖水体(第一行)和沉积物(第二行)中重

金属的反距离权重空间分布,颜色愈红,重金属含量愈高,见图 2。

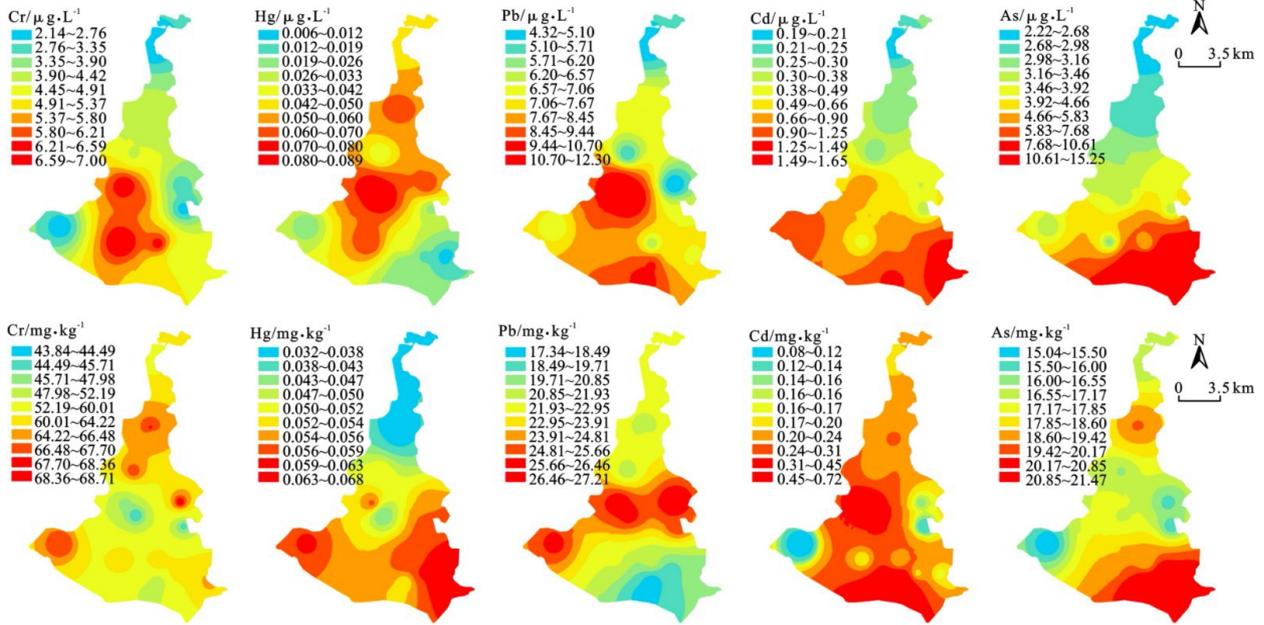


图 2 东平湖水体和沉积物中重金属的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of heavy metals in water bodies and sediments of Dongping Lake

图 2 看出,东平湖表层水体中,点位 S11、S12、S14 和 S15 Cr 含量、点位 S2~S4、S12、S14 和 S15 Hg 含量、点位 S9、S10、S14 和 S15 Pb 含量、点位 S6~S10 Cd、As 含量均相对较高。东平湖沉积物中,点位 S2~S4、S6、S13 和 S16 Cr 含量、点位 S5~S8、S11 和 S13 Hg 含量、点位 S4、S5 和 S13~S15 Pb 含量、点位 S9、S10 Cd 含量、点位 S2、S6~S10 As 含量均相对较高。东平湖重金属的空间分布特征表现为:水体和沉积物中的重金属最高值点位主要集中在 S6~S10、S13~S15。结合东平湖周边土地使用、建厂状况分析,点位 S6~S10 位于经济南、新

泰和泰安等地的东平湖唯一入湖支流大汶河入湖口附近,点位 S9、S10 附近有畜禽养殖场,点位 S13~S15 附近有肥料厂和大量的农田种植,所以农业面源污染、畜禽粪便、工业废水和生活污水等人为污染源污染物通过大汶河汇入东平湖,造成污染物的积累,这与 WANG et al^[10]对东平湖沉积物的研究结果一致。

2.3 东平湖重金属的相关性和来源分析

东平湖水体和沉积物中重金属的 Correlation

分析,见图 3。

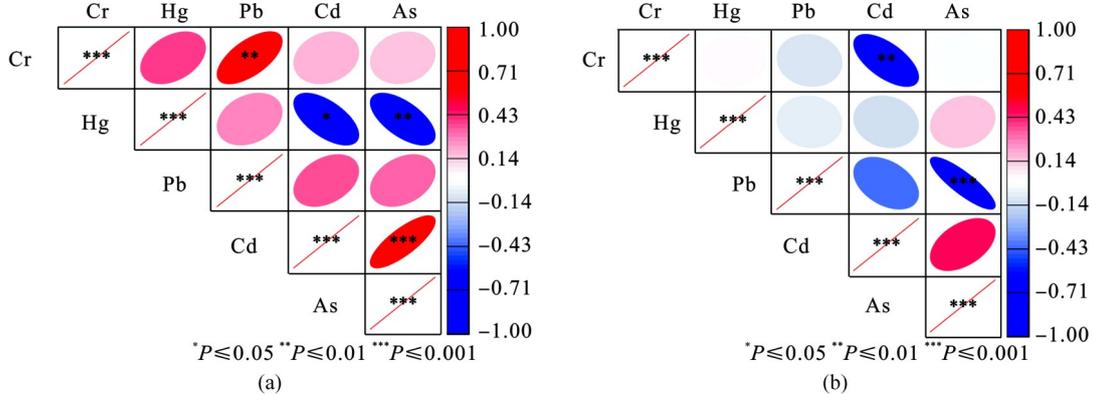


图 3 东平湖水体 (a) 和沉积物 (b) 中各重金属之间的相关性

Fig. 3 Correlation between heavy metals in water bodies (a) and sediments (b) of Dongping Lake

水体重金属相关性分析结果表明,Cd-As 呈极显著 ($P \leq 0.001$) 正相关,Pb-Cr 呈现出非常显著

($P \leq 0.01$) 正相关,即水体中的 Cd-As、Pb-Cr 具有相同的来源。Hg-Cd、Hg-As 呈显著 ($P \leq 0.05$) 负相

关,即水体中 Hg 与 Cd、As 的来源不同。沉积物中 Cr-Cd、As-Pb 之间呈显著($P \leq 0.05$)负相关,其他重金属间相关性较差或不具备相关性,即沉积物中的重金属之间的来源差异较大。分析发现,沉积物与水体中重金属的同源性状况并不统一。这与沉积物中重金属的长期积累性有关,导致沉积物中重金属含量变化具有明显的滞后性。而在长的时间尺度上也可以发现,“南水北调”及其相关配套的生态工程与政策的落实后的重金属含量明显降低。这表明我们在水环境监测中在重视水体重金属含量的同时,同样也不能忽视沉积物重金属含量变化及其赋存状况。

采用主成分分析(PCA)对东平湖水体和沉积物的重金属残留含量进行了分析,见表 3。

表 3 东平湖水体和沉积物的主成分分析
Table 3 Principal component analysis for water bodies and sediments of Dongping Lake

元素	水体		沉积物	
	PC1	PC2	PC1	PC2
Cr	0.24	0.86	-0.36	0.83
Hg	-0.66	0.70	0.06	0.42
Pb	0.43	0.80	-0.85	-0.43
Cd	0.94	-0.03	0.78	-0.53
As	0.94	-0.07	0.89	0.36
方差百分比/%	48.78	37.58	44.99	29.13
累积贡献率/%	48.78	86.36	44.99	74.12

探讨了重金属的可能污染源。在此之前为保证数据的可靠性与代表性,进行了 KMO 和 Bartlett 球面检验。KMO 统计值分别为 0.606 和 0.513, Bartlett 球面检验显著性概率为 0.000 和 0.001,为进一步分析提供了依据。结果显示,水体的 2 个主成分因子的累积贡献率为 86.36%,其中第一主成分(PC1)占总方差的 48.78%,对 Cd 和 As 具有很强的正载荷。第二主成分(PC2)占总方差的 37.58%,对 Pb、Cr 和 Hg 具有很强的正载荷。沉积物的 2 个主成分因子的累积贡献率为 74.12%,其中第一主成分(PC1)占总方差的 44.99%,与水体相同,对 Cd 和 As 具有很强的正载荷, Cr 在第二主成分(PC2)有较强的正载荷。研究表明, Cd 主要来自农业中磷肥的过量施用^[23]; As 主要来源于矿产冶炼和含砷化学品(除草剂、杀虫剂等)^[24]; Cr 主要来源于地质因素以及冶金、电镀等制造业^[25]; Hg 主要来源

于燃煤^[26]; Pb 主要来源于汽车尾气的排放^[25]。因此,第一主成分主要为农业面源污染与矿区污水排放,第二主成分为传统燃煤等高能耗、高污染工业废水、废气排放和交通运输气体排放。因此,结合相关系数和 PCA 结果可知,东平湖重金属污染源主要是湖区西部和南部的农业面源、东部的工业、矿业污染以及交通运输尾气排放。

2.4 潜在生态风险评估

东平湖沉积物重金属的潜在生态危害系数(E_r^i)和潜在生态危害指数(RI)结果,见表 4。各重金属元素的 E_r^i 均值大小为 Hg(139.83)>Cd(104.37)>As(24.57)>Pb(7.40)>Cr(1.98)。对照沉积物中重金属潜在生态危害程度标准(表 1)可知,东平湖沉积物所有采样点位的 Cr、As 和 Pb 的 E_r^i 均小于 40,属于轻度污染范畴;所有采样点位 Hg 含量均高于黄河沉积物背景值,且生物毒性系数较高,其生态风险处于强度和极强水平,表明 Hg 是东平湖沉积物重金属生态风险的主要贡献者;除点位 S9、S10 和 S15 Cd 的 E_r^i 属于很强的污染水平外,其他点位 Cd 的 E_r^i 均属于强度污染水平。根据东平湖沉积物的 RI 结果显示,点位 S9、S10 和 S15 的潜在生态危害程度属于强度水平,其他点位的潜在生态危害程度属于中度水平。点位 S6~S10 和 S15 处的 RI 较高,主要原因可能是受畜禽养殖场和大汶河流域内的工矿企业的废水、沿线城市的生活污水排放中的重金属通过各种途径进入东平湖的影响。Hg 和 Cd 因其具有高致癌风险性,贡献率较其他重金属高,分别为 50.2% 和 37.5%。

表 4 东平湖沉积物的潜在生态危害系数(E_r^i)和潜在生态危害指数(RI)

Table 4 Potential ecological hazard coefficient (E_r^i) and potential ecological hazard index (RI) of sediments of Dongping Lake

项目	E_r^i					RI
	Cr	Hg	Pb	Cd	As	
最大值	2.29	181.33	9.07	279.35	28.62	456.78
最小值	1.46	85.33	5.78	31.56	20.05	190.36
平均值	1.98	139.83	7.40	104.37	24.57	278.16
对 RI 贡献率/%	0.70	50.20	2.60	37.50	8.80	100.00

3 结论

(1) 东平湖水体的 5 种重金属(Cr、Hg、Pb、

Cd 和 As) 含量均达到《地表水环境质量标准 GB 3838—2002》的 III 类标准。与黄河流域沉积物背景值相比, 东平湖沉积物 Cr、Hg、Pb、Cd 和 As 的平均含量是背景值的 0.99、3.33、1.48、3.51 和 2.46 倍, 其中仍有少数点位 Cr 含量略高。

(2) 与东平湖南水北调工程调水前水体和沉积物中的重金属含量相比, 5 种重金属的含量都有了明显的降低, 说明南水北调工程的实施提升了沿线河湖水环境质量。

(3) 相关性分析和主成分分析表明, 流域内农业活动是 Cd 的主要来源, 矿产冶炼和农业因素是 As 的主要来源, 燃煤、工业制造和交通分别是 Hg、Cr 和 Pb 的主要来源。东平湖各重金属污染程度表现为 Hg>Cd>As>Cr>Pb。整个东平湖的平均 RI 值为 278.16, 属于中度生态风险水平。

参考文献

- [1] QIN G W, NIU Z D, YU J D, et al. Soil heavy metal pollution and food safety in China: Effects, sources and removing technology[J]. *Chemosphere*, 2021, 267: 129205.
- [2] GITHAIGA K B, NJUGUNA S M, GITURU R W, et al. Water quality assessment, multivariate analysis and human health risks of heavy metals in eight major lakes in Kenya[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 297: 113410.
- [3] CUI L, WANG X, LI J, et al. Ecological and health risk assessments and water quality criteria of heavy metals in the Haihe River[J]. *Environment Pollution*, 2021, 290: 117971.
- [4] 李道金, 朱润, 等. 滇池重金属污染的分布、积累和风险评估[J]. *环境化学*, 2021, 40(6): 1808—1818.
- [5] NIU Y, JIANG X, WANG K, et al. Meta analysis of heavy metal pollution and sources in surface sediments of Lake Taihu, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 700: 134509.
- [6] LI F, HUANG J H, ZENG G M, et al. Spatial risk assessment and sources identification of heavy metals in surface sediments from the Dongting Lake, Middle China[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2013, 132: 75—83.
- [7] LI R, TANG X Q, GUO W J, et al. Spatiotemporal distribution dynamics of heavy metals in water, sediment, and zoobenthos in mainstream sections of the middle and lower Changjiang River[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 714: 136779.
- [8] 阳金, 张彦, 祝凌燕. 中国七大水系沉积物中典型重金属生态风险评估[J]. *环境科学研究*, 2017, 30(3): 423—432.
- [9] GUO C B, CHEN Y S, XIA W T, et al. Eutrophication and heavy metal pollution patterns in the water supplying lakes of China's South-to-North water diversion project[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 711: 134543.
- [10] WANG Y Q, YANG L Y, KONG L H, et al. Spatial distribution, ecological risk assessment and source identification for heavy metals in surface sediments from Dongping Lake, Shandong, east China[J]. *Catena*, 2015, 125: 200—205.
- [11] 薛迪, 解军, 周建仁, 等. 南水北调东线湖泊杆藻属分布特征及其与环境因子的关系[J]. *环境科学研究*, 2016, 29(11): 1600—1607.
- [12] 张菊, 陈明文, 鲁长娟, 等. 东平湖表层沉积物重金属形态分布特征及环境风险评价[J]. *生态环境学报*, 2017, 26(5): 850—856.
- [13] 陈豪, 徐洪增, 路民, 等. 东平湖水体营养化状况综合评价[J]. *人民黄河*, 2022, 44(1): 83—88.
- [14] TIAN C, LU X T, PEI H Y, et al. Seasonal dynamics of phytoplankton and its relationship with the environmental factors in Dongping Lake, China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2013, 185(3): 2627—2645.
- [15] CHEN S Y, CHEN Y Y, LIU J Z, et al. Vertical variation of phosphorus forms in core sediments from Dongping Lake, China[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2011, 10: 1797—1801.
- [16] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, 14(8): 975—1001.
- [17] LI D P, YU R D, CHEN J, et al. Ecological risk of heavy metals in lake sediments of China: A national-scale integrated analysis[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 334: 130206.
- [18] 浦江, 张翠萍, 刘淑娟, 等. 杞麓湖径流区不同湿地沉积物重金属污染特征及潜在生态风险评估[J]. *农业资源与环境学报*, 2021, 38(5): 755—763.
- [19] 张坤, 杨霞, 吴雅霁, 等. 湘江株洲-湘潭-长沙段河床沉积物重金属污染特征及生态风险评估[J]. *农业资源与环境学报*, 2015, 32(1): 60—65.
- [20] 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.
- [21] ZHAO Z H, GONG X H, DING Q Q, et al. Environmental implications from the priority pollutants screening in impoundment reservoir along the eastern route of China's South-to-North water diversion project[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 794: 148700.
- [22] 胡尊芳. 南水北调东线工程对东平湖水环境的影响[J]. *山东国土资源*, 2017, 33(10): 46—51.
- [23] ZHANG H X, HUO S L, YEAGER K M, et al. Accumulation of arsenic, mercury and heavy metals in lacustrine sediment in relation to eutrophication: Impacts of sources and climate change[J]. *Ecological Indicators*, 2018, 93: 771—780.
- [24] 王萍, 王世亮, 刘少卿, 等. 砷的发生、形态、污染源及地球化学循环[J]. *环境科学与技术*, 2010, 33(7): 90—97.
- [25] SHI W C, LI T, FENG Y, et al. Source apportionment and risk assessment for available occurrence forms of heavy metals in Dongdahe wetland sediments, southwest of China[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 815: 152837.
- [26] 张磊, 王起超, 李志博, 等. 中国城市汞污染及防治对策[J]. *生态环境*, 2004, 13(3): 410—413.