

刘利,张嘉雯,陈奋飞,等.衡水湖底泥重金属污染特征及生态风险评价[J].环境工程技术学报,2020,10(2):205-211.

LIU L,ZHANG J W,CHEN F F, et al. Pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in the sediment of Hengshui Lake[J]. Journal of Environmental Engineering Technology,2020,10(2):205-211.

衡水湖底泥重金属污染特征及生态风险评价

刘利¹,张嘉雯^{1,2},陈奋飞³,盛晟³,田自强²,王俭^{1*}

1. 辽宁大学环境学院

2. 中国环境科学研究院水环境管理研究室

3. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司

摘要 在衡水湖设置了11个采样点,分析底泥中重金属Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Pb、Mn、Co、Sb、Tl的浓度,运用地累积指数法、潜在生态风险指数法对重金属污染程度进行评价,采用SPSS软件进行Pearson相关性分析。结果表明:除Cd和Co外,衡水湖底泥中其他重金属浓度平均值均低于河北省A层土壤背景值,其中Cr、Ni、Cu、Zn、As和Pb浓度在各采样点均低于GB 15618—2018《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》中农用地土壤风险筛选值,Sb、Co浓度在各采样点均低于GB 36600—2018《土壤环境质量建设用地土壤污染风险管控标准(试行)》中建设用地土壤风险管制值,Cd浓度有8个采样点超过GB 15618—2018的农用地土壤风险筛选值,1个采样点高于GB 36600—2018的建设用地土壤风险管制值;地累积指数法评价结果表明,底泥中Cd总体为偏中度污染,Co总体为轻度污染,而Cr、Ni、Cu、Zn、As、Pb、Mn、Sb和Tl可视为无污染;潜在生态风险指数评价结果表明,衡水湖底泥中重金属RI平均值为270.79,属于中等生态危害,底泥中各重金属对衡水湖生态风险贡献率为Cd >> Co > As > Sb ≈ Pb > Cu > Ni > Cr > Mn ≈ Zn,其中Cd对RI的贡献率高达91%,是主要的污染因子,Cd污染可能是引黄河水入湖和人类活动等原因造成的。

关键词 衡水湖;重金属;分布特征;地累积指数;潜在生态风险指数

中图分类号:X524 文章编号:1674-991X(2020)02-0205-07 doi:10.12153/j.issn.1674-991X.20190126

Pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in the sediment of Hengshui Lake

LIU Li¹, ZHANG Jiawen^{1,2}, CHEN Fenfei³, SHENG Sheng³, TIAN Ziqiang², WANG Jian^{1*}

1. College of Environmental Sciences, Liaoning University

2. Water Environmental Management and Research Center, Chinese Research Academy of Environmental Sciences

3. POWERCHINA Huadong Engineering Co., Ltd.

Abstract Eleven sampling points were set in Hengshui Lake to analyze the concentration distribution of heavy metals including Cr, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Pb, Mn, Co, Sb and Tl in sediment. The degree of heavy metal pollution was evaluated by the method of geo-accumulation index and potential ecological risk assessment index. Pearson correlation analysis was conducted by SPSS. The results showed that the average concentrations of other heavy metals in the sediment of Hengshui Lake were lower than the background value of Layer A soil in Hebei Province except for Cd and Co. The concentrations of Cr, Ni, Cu, Zn, As and Pb at each sampling point were lower than the soil risk screening values of agricultural land in *Soil Environmental Quality, Agricultural Land Risk Control Standards for Soil Contamination (Trial)* (GB 15618-2018). Sb and Co were lower than the soil risk control values of construction land in *Soil Environmental Quality, Construction Land Risk Control Standards for Soil Contamination (Trial)* (GB 36600-2018). There were 8 sampling points of Cd whose concentration exceeded the agricultural land risk screening value of GB 15618-2018, and 1 point was higher than the construction land risk

收稿日期:2019-07-21

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2018ZX07111-001)

作者简介:刘利(1981—),男,讲师,博士,主要从事流域水环境治理技术研究,liul215@163.com

* 责任作者:王俭(1974—),男,教授,博士,主要从事流域水污染治理技术研究,lnuwangjian@163.com

control value of GB 36600-2018. The evaluation results of the geo-accumulation index method showed that Cd was generally moderately polluted, Co was generally mildly polluted, and the nine heavy metals of Cr, Ni, Cu, Zn, As, Pb, Mn, Sb and Tl could be regarded as non-polluted. The results of potential ecological risk index evaluation indicated that the impact degree of each pollutant on the ecological risk of Hengshui Lake was $Cd \gg Co > As > Sb \approx Pb > Cu > Ni > Cr > Mn \approx Zn$. The RI average value was 270.79, which was a medium ecological hazard. However, the contribution rate of Cd to RI was as high as 91%, which was the main pollution factor. Cd pollution was possibly caused by Yellow River water diversion into the lake and other human activities.

Key words Hengshui Lake; heavy metal; distribution characteristic; geo-accumulation; potential ecological risk index

重金属具有毒性强、易累积、不可降解等特性,是当前环境污染防治工作的重点之一^[1]。国家“十二五”“十三五”规划纲要中,明确指出了我国水环境中重金属污染问题的严重性,并提出加大重点区域、重点行业重金属污染防治的力度,这从一个层面说明了水环境中重金属污染治理的迫切性^[2]。底泥对重金属具有极强的累积作用,湖泊中重金属多通过各种生物和物理化学作用富集于底泥中,底泥中重金属浓度往往远高于水体;但随着上覆水环境条件的改变,累积在底泥中的重金属会释放进入水体,造成二次污染^[1,3,4]。底泥污染状况是衡量湖泊水环境质量状况的重要因素之一^[5-6],开展底泥中重金属污染特征及生态风险评价,对开展水环境中重金属内源污染释放研究具有重要的参考意义。

衡水湖位于河北省衡水市境内,是华北平原上第一个国家级湿地自然保护区,并被纳入联合国教科文组织中国人与生物圈保护区网络^[7]。衡水湖分为东、西 2 个湖,水面面积为 75 km²,最大蓄水量为 1.88 亿 m³^[8]。衡水湖水源主要来自西南部汇水、引蓄卫运河和黄河水。衡水湖是南水北调调蓄工程的枢纽,是南水北调中线工程丹江口—北京的必经之路^[9]。经过近年来的治理,衡水湖水质已得到明显改善,但由于历史上污染较重,底泥中存在重金属富集风险。关于衡水湖底泥中重金属污染特征与生态风险方面的系统研究较为鲜见,难以良好支撑当前衡水湖的生态环境保护 and 风险管控要求^[10]。笔者对衡水湖底泥中重金属浓度进行分析,运用地累积指数法和潜在生态风险指数法评价底泥中重金属污染状况,以为衡水湖重金属污染的有效控制和科学管理提供依据,同时也为衡水湖生态环境保护及风险管控提供参考。

1 材料与方法

1.1 采样点设置及样品采集

根据衡水湖的地理位置特点,在衡水湖湖区设

置了 11 个采样点(图 1),分别为大赵闸(S1)、南李庄村(S2)、大湖心(S3)、顺民庄(S4)、王口闸(S5)、梅花岛(S6)、道安寺(S7)、前冢村(S8)、小湖王口闸(S9)、小湖心(S10)和小湖碧水湾酒店(S11)附近水域。用抓斗式采泥器采集表层(0~10 cm)底泥,密封保存于聚乙烯塑料袋中,低温储存运回实验室。

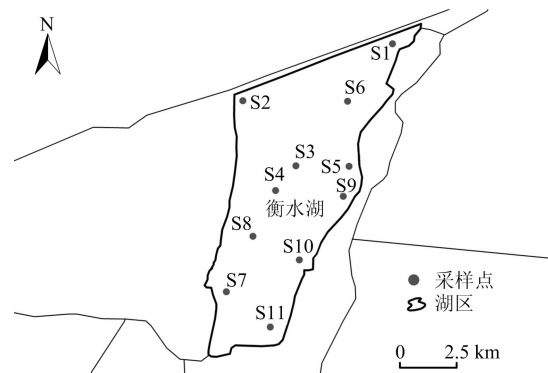


图 1 衡水湖底泥采样点示意

Fig. 1 Map of sediment sampling sites in Hengshui Lake

1.2 样品处理及测试

将底泥样品冷冻并经真空冷冻干燥机处理,除去其中的沙石、动植物碎片等后混合均匀。样品用玛瑙研钵研磨后过 100 目尼龙筛,装入聚乙烯塑料自封袋,放入冰箱中于 -4 °C 保存备用。

采用微波消解法彻底消解底泥样品,稀释后采用电感耦合等离子体-质谱(ICP-MS)仪测定消解液中重金属浓度。其中,用王水(浓盐酸与浓硝酸体积比 3:1)回流提取法测定 As、Cu、Pb、Cd、Cr、Mn、Zn、Ni、Co 和 Tl 浓度^[11],采用 H₂SO₄-HNO₃-KMnO₄ 消解法测定 Hg 浓度^[12],用 HCl-HNO₃ 消解法测定 Sb 浓度^[13]。

1.3 评价方法

1.3.1 地累积指数法

地累积指数(index of geo-accumulation, I_{geo})法由德国学者 Muller 于 1969 年提出^[14],是目前应用较广泛的水体、底泥中重金属污染的评价方法。 I_{geo}

计算公式为:

$$I_{\text{geo}} = \log_2(C_i/kB_i) \quad (1)$$

式中: C_i 为底泥中第 i 种重金属的浓度, mg/kg; B_i 为第 i 种重金属的地球化学背景值, 本研究采用河北省 A 层土壤背景值^[15] 作为参比值; k 用于校正区域背景值差异, 一般取 1.5。根据 I_{geo} 将重金属污染程度分为 7 级(表 1)。

表 1 I_{geo} 与底泥污染程度分级

Table 1 I_{geo} and classification of sediment pollution degree

项目	I_{geo}						
	≤ 0	0~1	1~2	2~3	3~4	4~5	>5
等级	0	1	2	3	4	5	6
污染程度	无污染	轻度	偏中度	中度	偏重度	严重	极重

1.3.2 潜在生态风险指数法

地累积指数法侧重于地质背景的影响而未考虑重金属污染对生物的毒害^[16]。采用瑞典学者 Hakanson 于 1980 年提出的潜在生态风险指数法^[17], 对衡水湖底泥中重金属污染造成的生态风险进行评价。该方法根据重金属的特点及对水体产生的影响, 综合且定量地划分重金属潜在生态风险程度^[18]。其计算公式为:

$$RI = \sum_{i=1}^m E_r^i = \sum_{i=1}^m T_r^i \times C_i/C_i^n \quad (2)$$

式中: RI 为底泥中多种重金属潜在生态风险指数; C_i^n 为第 i 种重金属浓度参比值, mg/kg, 本研究以河北省 A 层土壤背景值^[15] 作为各重金属浓度的参比值; T_r^i 为第 i 种重金属的毒性系数; E_r^i 为第 i 种重金属的潜在生态风险系数。Hakanson 提出了以下重金属的毒性系数: Cu 为 5, Pb 为 5, Zn 为 1, Cd 为 30, Cr 为 2, As 为 10, Ni 为 2。在 Hakanson 的基础上, 徐争启等^[19] 提出了其他几种重金属的毒性系数: Mn 为 1, Co 为 5, Sb 为 40。由于无相关参考文献提出 Tl 的毒性系数, 故不对其进行潜在生态风险指数评价。 E_r^i 、 RI 与底泥中重金属污染程度的关系如表 2 所示。

表 2 重金属潜在生态风险指数等级划分

Table 2 Grading of potential ecological risk indices of heavy metals

E_r^i	污染等级	RI	生态危害等级
<40	低	<150	轻度
40~80	中	150~300	中等
80~160	较重	300~600	强
160~320	重	≥ 600	很强
≥ 320	严重		

1.4 数据统计分析

试验数据均采用 Excel 软件进行处理, 采用 SPSS 20.0 软件进行 Pearson 相关性分析, 采用 Origin 8.5 软件进行图表制作。

2 结果与讨论

2.1 底泥中重金属浓度分布特征

衡水湖底泥中重金属浓度如表 3 所示。由表 3 可知, 底泥中 Cr 浓度为 24.70~88.80 mg/kg, 低于 GB 15618—2018《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》^[20] 中农用地土壤风险筛选值; Ni 浓度为 15.70~28.80 mg/kg, 低于农用地土壤风险筛选值; Cu 浓度为 3.46~13.30 mg/kg, 其中 S1~S3 和 S11 采样点浓度低于检出限, 其他采样点浓度低于农用地土壤污染风险筛选值; Zn 浓度为 29.10~87.20 mg/kg, 低于农用地土壤污染风险筛选值; As 浓度为 6.10~11.70 mg/kg, 低于农用地土壤污染风险筛选值; Cd 浓度为 0.09~2.23 mg/kg, 其中 S5、S7、S8 采样点低于农用地土壤污染风险筛选值, S1、S3、S4、S6、S9~S11 采样点高于农用地土壤污染风险筛选值但低于风险管制值, S2 采样点高于农用地土壤污染风险管制值但低于 GB 36600—2018《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准(试行)》^[21] 中建设用地土壤污染风险筛选值; Pb 浓度为 8.07~28.90 mg/kg, 低于农用地土壤污染风险筛选值; Hg 浓度在各采样点均低于检出限, 因此后续不对 Hg 浓度进行分析。由于 GB 15618—2018 中无 Sb 和 Co 浓度相关的标准, 所以采用 GB 36600—2018 对 Sb 和 Co 浓度进行分析: Sb 浓度为 0.020~0.458 mg/kg, 低于建设用地土壤污染风险筛选值; Co 浓度为 7.39~25.70 mg/kg, 其中在 S1、S2、S5 和 S8 采样点低于建设用地土壤污染风险筛选值, 在 S3、S4、S6、S7、S9~S11 采样点高于建设用地土壤污染风险筛选值, 但低于建设用地土壤污染风险管制值。在上述 2 个标准中均未有 Mn 和 Tl 浓度的相关要求, 因此采用河北省 A 层土壤背景值进行分析: Mn 浓度为 334~524 mg/kg, 在各采样点均低于土壤背景值; Tl 浓度为 0.280~0.562 mg/kg, 在 S1~S5 采样点高于土壤背景值, 在其他采样点低于土壤背景值。

采用河北省 A 层土壤背景值评价底泥中 12 种重金属污染情况, Cr、Ni、Cu、Zn、As、Pb、Mn、Sb 和 Tl 浓度平均值低于土壤背景值, Cd 和 Co 浓度平均值分别为土壤背景值的 8.19 倍和 1.63 倍, 表明衡水湖底泥中 Cd 和 Co 污染较严重, 尤其是 Cd 污染应引起重视。

表 3 衡水湖底泥中重金属浓度

Table 3 Heavy metals concentrations of sediment in Hengshui Lake

采样点	mg/kg											
	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb	Mn	Hg	Co	Sb	Tl
S1	40.50	28.80	<0.50	60.30	8.57	0.78	19.40	514	<0.005	7.39	0.135	0.407
S2	34.50	28.50	<0.50	60.80	8.29	2.23	19.80	482	<0.005	17.90	0.080	0.562
S3	34.20	20.00	<0.50	61.40	11.00	0.51	15.70	493	<0.005	22.70	0.115	0.423
S4	31.40	20.50	13.30	53.10	8.29	1.00	18.30	486	<0.005	23.20	0.458	0.401
S5	35.50	23.70	4.69	51.70	8.92	0.21	28.90	491	<0.005	17.10	0.059	0.390
S6	26.60	19.50	3.46	29.10	6.35	0.47	8.07	353	<0.005	23.00	0.020	0.326
S7	24.70	16.60	7.01	49.90	6.10	0.09	9.25	334	<0.005	20.60	0.014	0.289
S8	36.50	15.70	11.70	54.40	9.13	0.23	14.90	435	<0.005	19.10	0.025	0.280
S9	49.40	20.00	4.46	57.10	8.70	1.44	14.90	505	<0.005	22.50	0.203	0.340
S10	88.80	22.80	4.64	87.20	11.70	1.10	21.50	524	<0.005	23.50	0.139	0.336
S11	54.50	24.30	<0.50	60.70	11.60	0.45	17.20	515	<0.005	25.70	0.074	0.362
平均值	41.51	21.85	7.04	56.88	8.97	0.77	17.08	467	<0.005	20.24	0.120	0.370
背景值 ¹⁾	68.30	30.80	21.80	78.40	13.60	0.094	21.50	608	0.036	12.40	1.220	0.447

1) 河北省 A 层土壤背景值^[15]。

2.2 地累积指数污染评价

衡水湖底泥中重金属 I_{geo} 计算结果如表 4 所示。由表 4 可见,各采样点 Cr、Ni、Cu、Zn、As、Pb、Mn、Sb 和 Tl 这 9 种重金属的 I_{geo} 均小于 0, 可视为无污染; Cd 的 I_{geo} 较大, 污染最为严重, 总体为偏中度污染, 其中在 S1、S4 和 S10 采样点达到中度污染, 在 S2 和 S9 采样点甚至达到偏重度污染; Co 总体为轻度污

染, 其中在 S1、S2 和 S5 采样点可视为无污染。可见, Cd 和 Co 是衡水湖底泥中主要富集的重金属元素。对衡水湖进行拦闸, 除引黄河水入湖补水以外, 并无其他河流流入^[22]。据报道^[23-26], Cd 是黄河水中的主要污染因子, 衡水湖的 Cd 污染可能是黄河水引入所致; 衡水湖底泥中 Co 污染分布较均匀, 可能与衡水湖周边的人类活动相关。

表 4 衡水湖各采样点底泥中重金属 I_{geo} 与污染等级Table 4 I_{geo} and grades of I_{geo} of heavy metals in sediment at sampling points of Hengshui Lake

采样点	Cr		Ni		Cu		Zn		As	
	I_{geo}	等级	I_{geo}	等级	I_{geo}	等级	I_{geo}	等级	I_{geo}	等级
S1	-1.34	0	-0.68	0			-0.96	0	-1.25	0
S2	-1.57	0	-0.70	0			-0.95	0	-1.30	0
S3	-1.58	0	-1.21	0			-0.94	0	-0.89	0
S4	-1.71	0	-1.17	0	-1.30	0	-1.15	0	-1.30	0
S5	-1.53	0	-0.96	0	-2.80	0	-1.19	0	-1.19	0
S6	-1.95	0	-1.24	0	-3.24	0	-2.01	0	-1.68	0
S7	-2.05	0	-1.48	0	-2.22	0	-1.24	0	-1.74	0
S8	-1.49	0	-1.56	0	-1.48	0	-1.11	0	-1.16	0
S9	-1.05	0	-1.21	0	-2.87	0	-1.04	0	-1.23	0
S10	-0.21	0	-1.02	0	-2.81	0	-0.43	0	-0.80	0
S11	-0.91	0	-0.93	0			-0.95	0	-0.81	0
平均值	-1.40	0	-1.10	0	-2.39	0	-1.09	0	-1.21	0

(续表 4)

采样点	Cd		Pb		Mn		Co		Sb		Tl	
	I_{geo}	等级	I_{geo}	等级	I_{geo}	等级	I_{geo}	等级	I_{geo}	等级	I_{geo}	等级
S1	2.47	3	-0.73	0	-0.83	0	-1.33	0	-3.76	0	-0.72	0
S2	3.98	4	-0.70	0	-0.92	0	-0.06	0	-4.52	0	-0.25	0
S3	1.85	2	-1.04	0	-0.89	0	0.29	1	-4.00	0	-0.66	0
S4	2.83	3	-0.82	0	-0.90	0	0.32	1	-2.00	0	-0.74	0
S5	0.57	1	-0.16	0	-0.89	0	-0.12	0	-4.95	0	-0.78	0
S6	1.74	2	-2.00	0	-1.37	0	0.31	1	-6.52	0	-1.04	0
S7	-0.65	0	-1.80	0	-1.45	0	0.15	1	-7.03	0	-1.21	0
S8	0.71	1	-1.11	0	-1.07	0	0.04	1	-6.19	0	-1.26	0
S9	3.35	4	-1.11	0	-0.85	0	0.27	1	-3.17	0	-0.98	0
S10	2.96	3	-0.58	0	-0.80	0	0.34	1	-3.72	0	-1.00	0
S11	1.67	2	-0.91	0	-0.82	0	0.47	1	-4.63	0	-0.89	0
平均值	1.95	2	-1.00	0	-0.98	0	0.06	1	-3.93	0	-0.87	0

2.3 重金属潜在生态风险评价

衡水湖各采样点底泥中重金属 E_r^i 和 RI 如表 5 所示。由表 5 可知,从 E_r^i 来看,衡水湖底泥中 Cd 污染最为严重,除在 S5、S7、S8 采样点为低或中污染外,在其他采样点均为较重或重污染,在 S2、S9、S10 采样点甚至达到了严重污染,而底泥中其他重金属元素均为低污染等级。衡水湖底泥中重金属 RI 为 48.26~734.05,在各采样点均存在生态危害,其中在 S5、S7、S8 采样点为轻度生态危害,在 S1、S3、S6 和 S11 采样点为中等生态危害,在 S4、S9 和 S10 采样点为强生态危害,在 S2 采样点为很强生态危害。

10 种重金属元素的生态风险贡献率为: Cd >> Co > As > Sb ≈ Pb > Cu > Ni > Cr > Mn ≈ Zn, 其中 91.18% 的生态风险由 Cd 所贡献,其次为 Co(3.01%) 和 As(2.44%)。

已有研究表明,Cd 几乎对所有水生生物都具有毒性^[27];Co 是植物生长必需的微量元素,但浓度过高时会使植物受到毒害作用^[28];As 对人体有致癌作用。由于水生生物无法主动离开水体,所以 Cd、Co 和 As 会在水体中通过食物链富集,最终影响人类健康。因此,衡水湖底泥中这 3 种重金属的污染应引起重视。

表 5 衡水湖底泥中重金属 E_r^i 和 RI

Table 5 Potential ecological risk coefficients (E_r^i) and risk indices (RI) of heavy metals in sediments of Hengshui Lake

采样点	E_r^i										RI
	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb	Mn	Co	Sb	
S1	1.19	1.87		0.77	6.30	248.94	4.51	0.85	2.98	4.43	276.40
S2	1.01	1.85		0.78	6.10	711.70	4.60	0.79	7.22	2.62	734.05
S3	1.00	1.30		0.78	8.09	162.77	3.65	0.81	9.15	3.78	187.56
S4	0.92	1.33	3.05	0.68	6.10	319.45	4.26	0.80	9.35	15.02	345.63
S5	1.04	1.54	1.08	0.66	6.56	67.02	6.72	0.81	6.90	1.93	92.32
S6	0.78	1.27	0.79	0.37	4.67	150.00	1.88	0.58	9.27	0.66	169.61
S7	0.72	1.08	1.61	0.64	4.49	28.72	2.15	0.55	8.30	0.46	48.26
S8	1.07	1.02	2.68	0.69	6.71	73.40	3.47	0.72	7.70	0.82	97.47
S9	1.45	1.30	1.02	0.73	6.40	459.57	3.47	0.83	9.07	6.66	483.84
S10	2.60	1.48	1.06	1.11	8.60	351.06	5.00	0.86	9.48	4.56	381.26
S11	1.59	1.58		0.77	8.53	143.62	4.00	0.85	10.36	2.43	171.30
平均值	1.22	1.42	1.61	0.73	6.59	246.91	3.97	0.77	8.16	3.94	270.79
对 RI 贡献率/%	0.45	0.52	0.60	0.27	2.44	91.18	1.47	0.28	3.01	1.49	100

2.4 底泥中重金属浓度相关性分析

通过对底泥中重金属浓度进行相关性分析可大致了解底泥中重金属的来源^[29],衡水湖底泥中重金属浓度 Pearson 相关性分析结果见表 6。由表 6 可知,底泥中 Cr-Zn (0.831)、Ni-Tl (0.755)、Zn-As (0.762) 和 Mn-As (0.784) 呈极显著相关 ($P < 0.01$), Cr-As (0.730)、Ni-Cu (-0.653)、Zn-Mn (0.701)、Cd-Tl (0.704) 和 Pb-Mn (0.731) 呈显著相关 ($P < 0.05$),而 Sb 及 Co 与其他重金属之间无相关性。Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Pb、Mn、Tl 浓度之间均存在相关性,说明这 9 种重金属污染具有一定的

同源性或相同的地球化学过程。衡水湖周边无重工业,但居民较多,人口密度较大^[30],人类活动对衡水湖的影响日益加大,衡水湖底泥中重金属污染可能是由于历史上湖周居民生活污水及农田地表径流排入湖造成的。此外,历史上冀州市的生活污水和工业废水未经处理后排入衡水湖,曾是衡水湖最大的污染源^[31],重金属排入衡水湖后在底泥中积累,这也可能是造成衡水湖底泥中重金属污染的主要原因之一。Cd 的污染可能是由近年来定期的引黄河水入湖和湖区周边人类活动共同造成的。

表 6 衡水湖底泥中重金属浓度相关性

Table 6 Correlations of heavy metals in sediment of Hengshui Lake

重金属	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb	Mn	Co	Sb	Tl
Cr	1										
Ni	0.232	1									
Cu	-0.162	-0.653*	1								
Zn	0.831**	0.330	-0.169	1							
As	0.730*	0.245	-0.288	0.762**	1						
Cd	0.244	0.543	-0.247	0.345	0.074	1					
Pb	0.365	0.578	-0.110	0.502	0.484	0.197	1				
Mn	0.598	0.595	-0.288	0.701*	0.784**	0.425	0.731*	1			
Co	0.224	-0.507	0.207	0.010	0.258	-0.043	-0.308	-0.118	1		
Sb	0.086	0.075	0.417	0.180	0.104	0.354	0.202	0.430	0.138	1	
Tl	-0.120	0.755**	-0.484	0.173	0.115	0.704*	0.437	0.437	-0.266	0.209	1

注: ** 表示 $P < 0.01$, 为极显著相关; * 表示 $P < 0.05$, 为显著相关。

3 结论

(1) 衡水湖底泥 11 个采样点中,除 Cd 和 Co 外,其他 9 种重金属 (Cr、Ni、Cu、Zn、As、Pb、Mn、Sb 和 Tl) 浓度平均值均低于河北省 A 层土壤背景值; Cr、Ni、Cu、Zn、As 和 Pb 浓度在各采样点均低于 GB 15618—2018 农用地土壤污染风险筛选值,而 Cd 浓度有 8 个采样点高于农用地土壤污染风险筛选值,其中 S2 采样点高于农用地土壤污染风险管制值; Sb 浓度在各采样点均低于 GB 36600—2018 建设用地土壤污染风险筛选值,Co 浓度虽有部分采样点高于建设用地土壤污染风险筛选值,但均未高于建设用地土壤污染风险管制值。

(2) 地累积指数污染与潜在生态风险评价结果表明,衡水湖底泥主要受重金属 Cd 和 Co 污染,其中 Cd 总体为偏中度污染,Co 总体为轻度污染;底泥中重金属 RI 为 48.26 ~ 734.05,在各采样点均存在生态危害,总体为中等生态危害。衡水湖底泥中重金属污染可能与历史上湖周人类生活污水和工业废水排入湖并在底泥中逐年累积及引黄河水入湖有

关,二者叠加造成了 Cd 较严重的污染。应当加强对 Cd 的入湖污染控制及其在底泥中累积污染的治理,同时对 Co 等重金属污染的治理也不容忽视。

参考文献

- [1] 郭晶,李利强,黄代中,等. 洞庭湖表层水和底泥中重金属污染状况及其变化趋势[J]. 环境科学研究,2016,29(1): 44-51.
GUO J, LI L Q, HUANG D Z, et al. Assessment of heavy metal pollution in surface water and sediment of Dongting Lake[J]. Research of Environmental Sciences, 2016, 29(1): 44-51.
- [2] 张清华,韦永着,曹建华,等. 柳江流域饮用水源地重金属污染与健康风险评价[J]. 环境科学,2018,39(4): 1598-1607.
ZHANG Q H, WEI Y Z, CAO J H, et al. Heavy metal pollution of the drinking water sources in the Liujiang River Basin, and related health risk assessments [J]. Environmental Science, 2018, 39(4): 1598-1607.
- [3] BILALI L E, RASMUSSEN P E, HALL G E M, et al. Role of sediment composition in trace metal distribution in lake sediments [J]. Applied Geochemistry, 2002, 17: 1171-1181.
- [4] ROTHWELL J J, EVANS M G, ALLOTT T E H. Sediment-water interactions in an eroded and heavy metal contaminated peatland catchment, Southern Pennines, UK [J]. Water, Air and Soil Pollution: Focus, 2006, 6(5/6): 669-676.
- [5] 许振成,杨晓云,温勇,等. 北江中上游底泥重金属污染及其

- 潜在生态危害评价[J]. 环境科学, 2009, 30(11): 3262-3268.
XU Z C, YANG X Y, WEN Y, et al. Evaluation of the heavy metals contamination and its potential ecological risk of the sediments in Beijiang River's upper and middle reaches [J]. Environmental Science, 2009, 30(11): 3262-3268.
- [6] SIN S N, CHUA H, LO W, et al. Assessment of heavy metal cations in sediments of Shing Mun River, Hong Kong [J]. Environment International, 2001, 26(5): 297-301.
- [7] 李春晖, 郑小康, 崔嵬, 等. 衡水湖流域生态系统健康评价[J]. 地理研究, 2008(3): 565-573.
LI C H, ZHENG X K, CUI W, et al. Watershed eco-health assessment of Hengshui Lake [J]. Geographical Research, 2008(3): 565-573.
- [8] LIANG C, LI X W, ZHUGE H J. The analysis and evaluation of wetland restoration scenarios in the Hengshui Lake National Nature Reserve, Hebei, China [J]. Advanced Materials Research, 2013, 864/865/866/867: 1121-1127.
- [9] 张曼胤, 崔丽娟, 盛连喜, 等. 衡水湖湿地底泥重金属污染及潜在生态风险评价[J]. 湿地科学, 2007(4): 362-369.
ZHANG M Y, CUI L J, SHENG L X, et al. Pollution and ecological risk assessment of heavy metals in the Hengshuihu Wetland [J]. Wetland Science, 2007(4): 362-369.
- [10] 衡水市城市总体规划: 2016—2030年[R]. 石家庄: 河北省城乡规划设计研究院, 2016.
- [11] 环境保护部. 土壤和沉积物 12 种金属元素的测定 王水提取-电感耦合等离子体质谱法: HJ 803—2016 [S]. 北京: 中国环境出版社, 2016.
- [12] 国家环境保护总局. 土壤质量 总汞的测定 冷原子吸收分光光度法: GB/T 17136—1997 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1997.
- [13] 国家环境保护总局. 危险废物鉴别标准 浸出毒性鉴别: GB 5085.3—2007 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2007.
- [14] MULLER G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River [J]. GeoJournal, 1969, 2(3): 109-118.
- [15] 中国环境检测总站. 中国土壤元素背景值 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [16] 弓晓峰, 陈春丽, 周文斌, 等. 鄱阳湖底泥中重金属污染现状评价[J]. 环境科学, 2006, 27(4): 732-736.
GONG X F, CHEN C L, ZHOU W B, et al. Assessment on heavy metal pollution in the sediment of Poyang Lake [J]. Environmental Science, 2006, 27(4): 732-736.
- [17] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sedimentological approach [J]. Water Research, 1980, 14: 975-1001.
- [18] 高秋生, 田自强, 焦立新, 等. 白洋淀重金属污染特征与生态风险评价[J]. 环境工程技术学报, 2019, 9(1): 66-75.
GAO Q S, TIAN Z Q, JIAO L X, et al. Pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in Baiyangdian Lake [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2019, 9(1): 66-75.
- [19] 徐争启, 倪师军, 虞先国, 等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. 环境科学与技术, 2008(2): 112-115.
XU Z Q, NI S J, TUO X G, et al. Calculation of heavy metals' toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index [J]. Environmental Science & Technology, 2008(2): 112-115.
- [20] 生态环境部. 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行): GB 15618—2018 [S]. 北京: 中国环境出版社, 2018.
- [21] 生态环境部. 土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准(试行): GB 36600—2018 [S]. 北京: 中国环境出版社, 2018.
- [22] 张浩, 卢超. 引黄调水对衡水湖湿地水质水量影响研究[J]. 人民黄河, 2012, 34(10): 86-88.
ZHANG H, HU C. Study on the impact of water quality and quantity of Hengshui Lake wetland after water diversion from the Yellow River [J]. Yellow River, 2012, 34(10): 86-88.
- [23] 李华栋, 宋颖, 王倩倩, 等. 黄河山东段水体重金属特征及生态风险评价[J]. 人民黄河, 2019, 41(4): 51-57.
LI H D, SONG Y, WANG Q Q, et al. Contents and ecological risk assessment of heavy metals in Shandong section of the Yellow River [J]. Yellow River, 2019, 41(4): 51-57.
- [24] MA X L, ZUO H, TIAN M J, et al. Assessment of heavy metals contamination in sediments from three adjacent regions of the Yellow River using metal chemical fractions and multivariate analysis techniques [J]. Chemosphere, 2015, 144: 64-72.
- [25] 宋颖, 李华栋, 时文博, 等. 黄河三角洲湿地重金属污染生态风险评价[J]. 环境保护科学, 2018, 44(5): 118-122.
SONG Y, LI H D, SHI W B, et al. Ecological risk assessment of heavy metals in the wetland of the Yellow River Delta [J]. Environmental Protection Science, 2018, 44(5): 118-122.
- [26] 阳金希, 张彦峰, 祝凌燕. 中国七大水系底泥中典型重金属生态风险评估[J]. 环境科学研究, 2017, 30(3): 423-432.
YANG J X, ZHANG Y F, ZHU L Y. Pollution and risk assessment of typical heavy metals in river sediments of seven major watersheds in China [J]. Research of Environmental Sciences, 2017, 30(3): 423-432.
- [27] 张秋卓, 魏琰, 戴炜, 等. 水生植物与微生物对含镉水体修复效果的比较[J]. 环境科学与技术, 2018, 41(增刊1): 166-171.
ZHANG Q Z, WEI Y, DAI W, et al. Comparison of cadmium remediation in water body by representative aquatic plant and microbe [J]. Environmental Science & Technology, 2018, 41(Suppl 1): 166-171.
- [28] 谢洪科, 邹朝晖, 彭选明, 等. 重金属钴污染土壤的修复研究进展[J]. 现代农业科技, 2013(7): 222-223.
XIE H K, ZOU Z H, PENG X M, et al. Research progress on remediation of heavy metal polluted soil by cobalt [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2013(7): 222-223.
- [29] 张文慧, 许秋瑾, 胡小贞, 等. 山美水库底泥重金属污染状况及风险评价[J]. 环境科学研究, 2016, 29(7): 1006-1013.
ZHANG W H, XU Q J, HU X Z, et al. Pollution and potential ecological risks of heavy metals in sediment of Shanmei Reservoir [J]. Research of Environmental Sciences, 2016, 29(7): 1006-1013.
- [30] 王乃姗, 张曼胤, 崔丽娟, 等. 河北衡水湖湿地汞污染现状及生态风险评价[J]. 环境科学, 2016, 37(5): 1754-1762.
WANG N S, ZHANG M Y, CUI L J, et al. Contamination and ecological risk assessment of mercury in Hengshuihu Wetland, Hebei Province [J]. Environmental Science, 2016, 37(5): 1754-1762.
- [31] 刘振杰. 河北衡水湖湿地水环境分析及综合防治对策 [D]. 北京: 中国农业大学, 2005. ◇