

金山湖水体重金属污染物现状调查及其评价

周晓红^{1*}, 文淳子¹, 刘丹¹, 马志良²

(1. 江苏大学环境与安全工程学院, 江苏 镇江 212013;
2. 镇江市京口区水利局, 江苏 镇江 212013)

摘要: 对镇江市金山湖 18 个采样点的水体 As、Pb、Cu、Zn、Cr 以及 Cd 元素含量进行为期 1 年的监测, 并通过单因子以及内梅罗综合指数, 对金山湖水体重金属风险进行综合评价。结果表明: (1) 金山湖 18 个采样点水体 As、Pb、Cu、Zn、Cr 以及 Cd 元素含量平均值分别为 6.02、2.15、3.45、6.42、1.57 和 1.05 $\mu\text{g/L}$ 。6 种重金属平均值均小于地表水环境质量的三类标准。此外, 金山湖水体中 As 元素含量小于太湖水体, 但高于其他湖泊; Pb、Zn 元素含量小于文献报道的其他湖泊水体。Cu 与 Cd 元素则介于文献报道的其他湖泊水体重金属含量之间。方差分析结果表明, Cu 和 Cd 元素含量在 4 个季节具有显著的差异 ($P < 0.01$), 而其余重金属元素含量在 4 个季节无显著差异, 表明季节对金山湖水体 Cu 和 Cd 元素影响较大, 而其他元素含量受季节影响较小。(2) 对金山湖水体重金属进行单因子评价结果表明, 金山湖水体 18 个采样点 As、Pb、Cu、Zn、Cr 以及 Cd 元素的单因子指数值均在 0.7 以下, 表明水体尚未受到以上 6 种金属元素的影响, 总体均表现为清洁状态。(3) 内梅罗综合指数值表现为 $\text{As} > \text{Pb} > \text{Cr} > \text{Cd} > \text{Zn} > \text{Cu}$ 。从空间角度来看, 18 个采样点的内梅罗综合指数值均小于 0.7, 表明金山湖水水质较为优良, 基本不受重金属污染的影响, 这与单因子评价结果一致。以上调查及评价结果可为金山湖水体重金属的防治提供基础资料和数据支撑。

关键词: 重金属; 水体; 金山湖; 单因子指数; 内梅罗指数

中图分类号: X522 文献标识码: B 文章编号: 1007-7839 (2019) 03-0021-09

Investigation and evaluation on heavy metal pollutants in Jinshan Lake

ZHOU Xiaohong^{1*}, WEN Chunzi¹, LIU Dan¹, MA Zhiliang²

(1. School of Environmental and Safety Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Jiangsu;
2. Jingkou District Water Conservancy Bureau of Zhenjiang, Zhenjiang 212013, Jiangsu)

Abstract: The contents of As, Pb, Cu, Zn, Cr and Cd in 18 sampling sites of Jinshan Lake in Zhenjiang City were monitored for one year, and the risk of heavy metals in Jinshan Lake was evaluated comprehensively by single factor index and Nemerow composite index. The results showed that: (1) The average contents of As, Pb, Cu, Zn, Cr and Cd in 18 sampling sites of Jinshan Lake were 6.02, 2.15, 3.45, 6.42, 1.57 and 1.05 $\mu\text{g/L}$, respectively. The average values of six heavy metals were all lower than the Class three of surface water environmental quality standards. In addition, the content of As in Jinshan Lake was lower than that in Taihu Lake, but higher than that in other lakes; the content of Pb and Zn in Jinshan Lake was lower than that in other lakes reported in literature. The contents of Cu and Cd were

收稿日期: 2018-09-20

基金项目: 江苏省水利科技项目 (2016150)

作者简介: 周晓红 (1981—), 女, 博士, 副教授, 主要从事环境生态修复与生态工程方面的研究工作。

between those of other lakes reported in the literature. The results of variance analysis showed that the contents of Cu and Cd had significant difference in the four seasons ($P < 0.01$), while the contents of other heavy metals had no significant difference in the four seasons, indicating that the season had a greater impact on the contents of Cu and Cd in Jinshan Lake waters, while the other elements were less affected by the seasons. (2) The single factor evaluation results of heavy metals in Jinshan Lake water showed that the single factor index values of As, Pb, Cu, Zn, Cr and Cd in 18 sampling sites were all below 0.7, indicating that the water body had not been affected by the above six metal elements, and the water body was generally in a clean state. (3) The value of Nemerow composite index was $As > Pb > Cr > Cd > Zn > Cu$. From the spatial point of view, the Nemerow composite index values of 18 sampling points were less than 0.7, which indicated that the water quality of Jinshan Lake was better and was not affected by heavy metal pollution, which was consistent with the results of single factor evaluation. The above investigation and evaluation results could provide basic information and data support for the prevention and control of heavy metals in Jinshan Lake.

Key words: heavy metal; water body; Jinshan Lake; index of single factor; Nemerow index

重金属是水体主要的稳固持久性无机有毒物质污染物之一^[1-2], 主要包括 As、Pb、Cd、Cr、Cu、Zn 等, 其污染源主要为大气沉降、生活污水、地表径流等多个方面^[3-4]。由于重金属在水体中不能被微生物降解, 只能在上覆水、沉积物以及生物体之间进行不同价态的迁移转化, 受重金属污染的水体, 往往会对水生生物以及微生物群落结构产生不良影响, 从而影响水环境生态系统结构和功能的稳定性, 降低水生态系统的生物多样性^[5-6], 亦会通过生物富集以及食物链的传递最终对人类的健康产生危害, 严重地威胁居民的身体健康。因此, 水体重金属污染已成为全球性的环境热点问题。

金山湖(32°13'4.652" ~ 32°14'35.79"、东经 119°25'5.711" ~ 119°29'48.049")位于江苏省镇江市北部, 是镇江市金山、焦山、北固山“三山”名胜景区的核心所在, 该地区属亚热带湿润气候, 年平均气温 15.6℃, 年均降水量约 1088.2 mm。是镇江城市“南山北水”战略、北部滨水区建设的亮点工程。金山湖是典型的闸坝型水体, 分别在湖泊东西两侧的焦山南和引航道建设了水利调度枢纽工程, 通过闸坝将长江水引入金山湖, 并通过下游东侧出口回流长江, 实现金山湖水位的调控, 整个湖区东西方向长约 4 km, 南北宽约 2 km, 丰水期面积约 8.8 km², 占镇江市城市地表水面积的 80% 以上^[7]。金山湖作为镇江市水量最大的城市湖泊, 亦是城市的应急水源地, 其水质好坏是影响城市用水安全的重要因素之一。因此保护金山湖水质, 加强金山湖水环境生态系统的稳定就显得尤为重

要和紧迫。

基于此, 本论文以典型的城市景观湖泊—镇江市金山湖为研究对象, 通过对金山湖水体进行为期 1 年的野外调查, 获得金山湖水体主要重金属元素含量的动态变化规律, 并对重金属的生态风险进行单因子和综合评价, 阐明金山湖水体重金属的污染现状, 从而为金山湖水环境的保护提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 水样采集与测定

综合考虑金山湖的水域面积、湖岸线形态、溢流污染排污口、闸坝控制的水动力条件等特征, 在整个湖区共设 18 个采样点(图 1), 采样过程中使用集思宝 G310 型手持 GPS 定位系统进行定位, 采样点位地理坐标介于北纬 32°13'4.652" ~ 32°14'35.79"、东经 119°25'5.711" ~ 119°29'48.049" 之间。

于 2016 年 4 月(春季)、7 月(夏季)、10 月(秋季)以及 2017 年 1 月(冬季), 分别对金山湖水体进行采样。采样过程为: 通过 2 L 的有机玻璃水样采集器采集金山湖 18 个点位的表层水样(距水面下 25 ~ 30 cm 处), 各采样点分别采集水样 3 个, 记为 3 次重复。采样的水样迅速带回实验室后立刻进行硝酸调 pH 值, 并经 0.45 μm 醋酸纤维滤膜过滤, 4℃条件下保存, 用于测定水体重金属含量。

通过电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP spectrometer)(VISTA-MPX, 澳大利亚瓦里安有限公司)测定水体中 Cu、As、Cr、Pb、Cd、Zn 等元

素的含量。所有测定均由空白样和加标回收样进行质量控制,加标回收率均在90%~110%范围内。

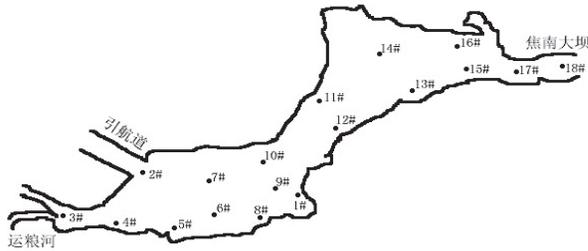


图1 采样点示意图

1.2 数据计算

(1) 单因子指数评价法

水体重金属污染物的单因子污染指数(P_i)计算方法如公式(1)所示:

$$P_i = \frac{C_i}{S_i} \quad (1)$$

其中, P_i 为第*i*种重金属元素的污染指数; C_i 为水体重金属含量实测值($\mu\text{g/L}$); S_i 为地表水环境质量标准值($\mu\text{g/L}$) (一般取国家三级标准:GB3838-2002)。单因子指数污染等级分为5个等级,具体的分级标准见表1所示^[8]。

表1 单因子指数污染等级划分标准

等级	污染指数	污染评价
1	$P_i < 0.7$	清洁(安全)
2	$0.7 < P_i < 1.0$	尚清洁(警戒线)
3	$1.0 < P_i < 2.0$	轻度污染
4	$2.0 < P_i < 3.0$	中度污染
5	$P_i > 3.0$	重度污染

(2) 内梅罗综合指数评价法

采用内梅罗综合指数(P_z)对水体重金属污染

状态进行综合评价,具体的计算方法见公式(2):

$$P_z = \sqrt{\frac{(\bar{P}_i)^2 + (P_{\max})^2}{2}} \quad (2)$$

式中, P_z 为内梅罗综合指数; \bar{P}_i 为内水环境中所有单因子污染指数的平均值; P_{\max} 为水环境中所有重金属中的最大污染指数;

其中,水体重金属内梅罗综合指数的分级标准见表2所示^[8-11]。

1.3 统计分析

数据统计采用SPSS软件进行Pearson相关性分析,所有的图表采用Microsoft Office Excel。

2 结果与讨论

2.1 金山湖水体重金属含量统计结果分析

金山湖18个采样点水体重金属含量统计结果如表3所示。由表可知,As、Pb、Cu、Zn、Cr以及Cd元素含量分别介于1.07~12.88,0.22~4.91,1.60~6.17,2.26~14.88,0.91~3.04,0.70~1.41 $\mu\text{g/L}$,其平均值分别为6.02、2.15、3.45、6.42、1.57和1.05 $\mu\text{g/L}$ 。与《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)相比,As、Pb、Cu、Zn、Cr以及Cd元素平均值以及最大值均小于地表水环境质量标准的三类标准。进一步,与国内其他湖泊水体重金属调查值相对比可知(表4)^[12-19],镇江市金山湖水体中As元素含量小于太湖水体,但高于其他湖泊;Pb、Zn元素含量小于调查的湖泊水体。Cu与Cd元素则介于调查湖泊水体重金属含量之间。

从季节来看,As元素平均值表现为秋>春>夏>冬;Pb元素平均值表现为:冬>夏>春>秋;Cu元素平均值表现为秋>春>冬>夏;Zn元素平均值表现为秋>冬>春>夏;Cr元素平均值表现

表2 重金属污染程度及潜在生态危害等级划分标准

等级	内梅罗综合指数	污染程度	危害程度
1	$P_z < 0.7$	清洁	水质优良,无污染
2	$0.7 < P_z < 1.0$	轻度污染	水质较好,几乎无污染现象
3	$1.0 < P_z < 2.0$	污染	部分污染指标超标但不严重
4	$2.0 < P_z < 3.0$	重度污染	水体中度污染
5	$P_z > 3.0$	严重污染	污染指标严重超标,危害水体环境

表3 金山湖水体重金属含量统计以及地表水环境质量标准 ($\mu\text{g/L}$)

项目	As	Pb	Cu	Zn	Cr	Cd
平均值	6.02 ± 1.41	2.15 ± 0.33	3.45 ± 1.35	6.42 ± 0.76	1.57 ± 0.22	1.05 ± 0.12
最小值	1.07 ± 0.40	0.22 ± 0.32	1.60 ± 0.46	2.26 ± 1.50	0.91 ± 0.36	0.70 ± 0.17
最大值	12.88 ± 3.74	4.91 ± 1.11	6.17 ± 2.54	14.88 ± 2.24	3.04 ± 0.87	1.41 ± 0.32
标准差	3.76 ± 0.97	1.37 ± 0.35	1.26 ± 0.69	3.72 ± 1.33	0.58 ± 0.24	0.20 ± 0.10
CV (%)	63.51 ± 12.82	63.63 ± 13.20	35.96 ± 11.75	56.72 ± 15.61	36.49 ± 13.97	18.21 ± 7.66
地表水环境质量标准	50.00	50.00	1000.00	1000.00	50.00	50.00

表4 国内其他城市湖泊水体重金属含量调查值

地区	As	Pb	Cu	Zn	Cr	Cd
南京玄武湖 (mg/L)	/	/	/	0.007	/	0.040
太湖 ($\mu\text{g/L}$)	10.40	3.84	3.84	/	/	1.03
溧湖 ($\mu\text{g/L}$)	2.61	6.71	12.80	/	/	0.75
洪泽湖 ($\mu\text{g/L}$)	1.77	3.70	4.99	/	/	1.44
高宝邵伯湖 ($\mu\text{g/L}$)	1.68	3.27	4.26	/	/	1.19
骆马湖 ($\mu\text{g/L}$)	1.15	8.54	3.73	/	/	0.23
巢湖湖区 (mg/L)	/	0.0040	0.0039	/	0.0331	0.008
珠江河口 ($\mu\text{g/L}$)	/	8.46	4.17	29.7	3.29	0.18
太湖流域 ($\mu\text{g/L}$)	3.63	/	4.27	18.11	1.26	/
鄱阳湖 ($\mu\text{g/L}$)	/	4.75	41.66	72.87	/	0.11
长春南湖 ($\mu\text{g/L}$)	2.787	0.069	7.463	24.607	3.190	0.014
贵州红枫湖 ($\mu\text{g/L}$)	/	4.63	1.24	33.1	/	0.11

为冬>秋>夏>冬; Cd元素平均值表现为秋>夏>冬>春。方差分析结果表明(表5), Cu和Cd元素含量在4个季节具有显著的差异($P < 0.01$), 而其余元素含量在4个季节无显著差异($P > 0.05$), 表明季节对金山湖水体Cu和Cd元素影响较大, 而对其余4种元素的影响较小。宋美英^[15]对珠江水体重金属的季节变化研究结果表明, 重金属Cr、Pb、Cd在冬秋两季含量高于其他2季, 其主要原因是受到降雨量的影响。对于本文研究而言, 金山湖是典型的闸坝型水体, 湖泊水量受闸坝控制, 故受季节及其降雨量的影响较小。

先前研究发现, 变异系数(CV)可用来反映

数据的离散程度, 同时可反映该元素受人为因素的影响程度^[20]。根据Wilding^[21]的结果, 变异系数可分为高度变异($CV > 36\%$), 中等变异($16\% < CV < 36\%$)和低等变异($CV < 16\%$)。由表1可知, As、Pb、Zn和Cr元素的变异系数值均超过36%, 尤其是As和Pb元素, 其变异系数分别为63.51%和63.63%, 属于高度变异, 而Cd元素的变异系数值介于18.21%, 属于中等变异, 表明金山湖水体As、Pb、Zn和Cr元素的分布不均匀, 受人为因素影响程度较大, 而Cd元素的变异较小。

此外, 6种重金属在金山湖空间分布上的分布规律见图2所示, 其中, As元素在4个季节的最

表5 金山湖水体重金属元素含量方差分析表

元素	差异源	季节						空间					
		SS	df	MS	F	P-value	F crit	SS	df	MS	F	P-value	F crit
As	组间	107.68	3	35.89	2.42	0.07	2.74	198.18	17	11.66	0.68	0.80	1.82
	组内	1009.95	68	14.85				919.45	54	17.03			
	总计	1117.63	71					1117.63	71				
Pb	组间	6.05	3	2.02	1.03	0.39	2.74	52.17	17	3.07	1.90	0.04	1.82
	组内	133.17	68	1.96				87.05	54	1.61			
	总计	139.22	71					139.22	71				
Cu	组间	98.51	3	32.84	16.81	0.00	2.74	31.15	17	1.83	0.49	0.94	1.82
	组内	132.84	68	1.95				200.20	54	3.71			
	总计	231.35	71					231.35	71				
Zn	组间	31.37	3	10.46	0.69	0.56	2.74	281.13	17	16.54	1.14	0.34	1.82
	组内	1030.39	68	15.15				780.63	54	14.46			
	总计	1061.75	71					1061.75	71				
Cr	组间	2.66	3	0.89	2.35	0.08	2.74	7.02	17	0.41	1.05	0.42	1.82
	组内	25.61	68	0.38				21.25	54	0.39			
	总计	28.27	71					28.27	71				
Cd	组间	0.81	3	0.27	5.78	0.00	2.74	0.58	17	0.03	0.54	0.92	1.82
	组内	3.17	68	0.05				3.40	54	0.06			
	总计	28.27	71					3.98	71				

高值分别出现在 #14(春季)、#16(夏季)、#16(秋季)和 #2(冬季), 方差分析结果表明, As 元素含量在空间上无显著差异 ($P > 0.05$); Pb 元素在 4 个季节的最高值分别出现在 #6(春季)、#11(夏季)、#11(秋季)和 #12(冬季); Cu 元素在 4 个季节的最高值分别出现在 #18(春季)、#16(夏季)、#11(秋季)和 #14(冬季); Zn 元素在 4 个季节的最高值分别出现在 #17(春季)、#4(夏季)、#7(秋季)和 #18(冬季); Cr 元素在 4 个季节的最高值分别出现在 #18(春季)、#16(夏季)、#17(秋季)和 #6(冬季); Cd 元素在 4 个季节的最高值分别出现在 #1(春季)、#12(夏季)、#16(秋季)和 #6(冬季); 由重金属元素的空间分布来看, 最高值在 #16 采样点出现频率最高, 为 20.83%, 其次为 #6, #11 和 #18, 出现频率均为 12.5%, 这与各采样

点所在位置及其人为活动等影响有密切关系人为影响有关, 其中 #16 采样点位于镇江市焦山脚下, 受游客影响较大。而 #6 样点位于春江潮广场与解放路泵站之间, 可能受到溢流污染的影响, #11 样点位于金山湖北码头, 码头游船、快艇在此停靠; #18 样点则位于焦南坝入江口附近, 该点位除了受人为影响之外, 也处于整个湖区的下游方向。进一步, 方差分析结果表明, Pb 元素含量在空间分布上具有显著差异 ($P < 0.05$), 而 As、Cu、Zn、Cr 以及 Cd 元素含量在空间上则无显著差异 ($P > 0.05$) (表 5)。

2.2 金山湖水体重金属的单因子评价

对金山湖水体重金属进行单因子评价, 结果如表 6 和图 3 所示。其中, 水体中 As 对水生生物具有很大的毒性, 尤其是三价 As 化合物的毒性更

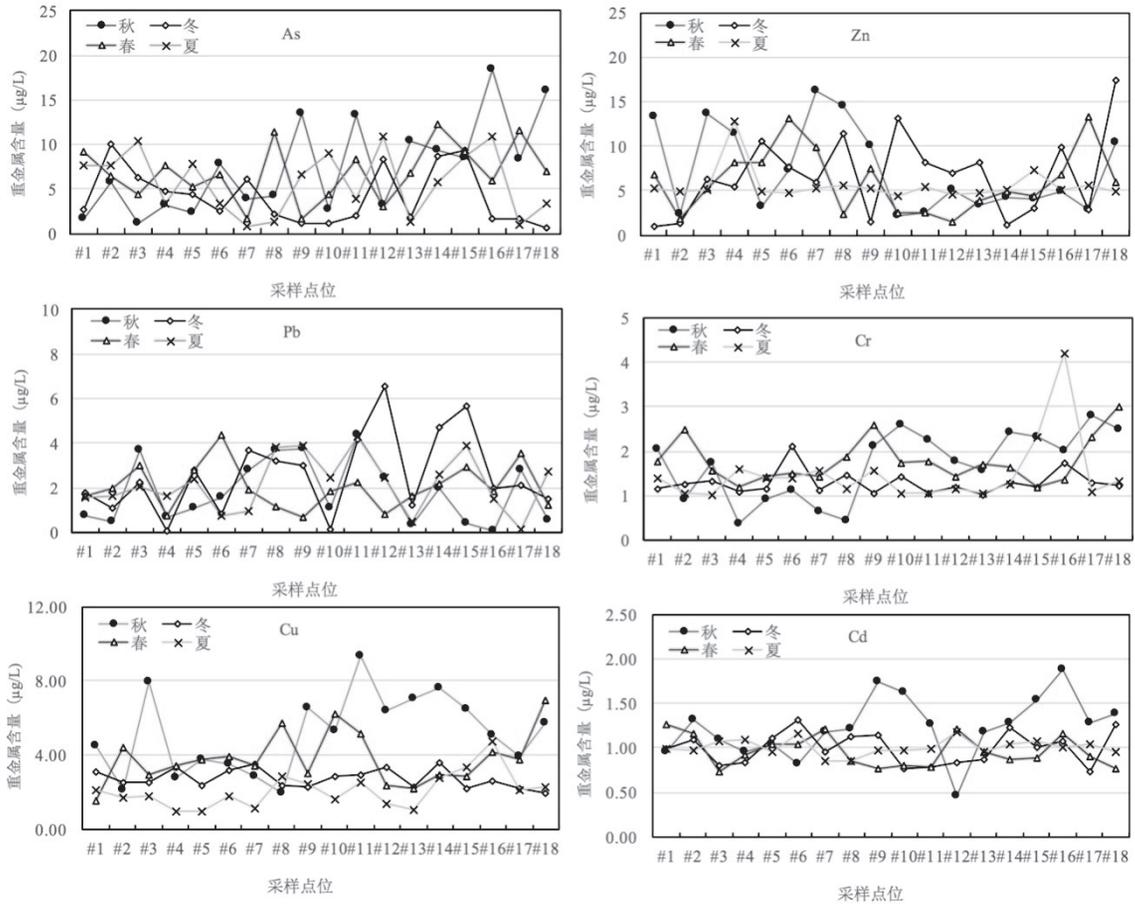


图2 金山湖水体重金属含量变化

强,尚若水中As含量超标,将对水生生态系统造成极大的威胁。从金山湖As元素的单因子评价结果可知,18个采样点的单因子污染指数值均在0.7以下,其中最小值为0.014,最高值为0.367,表明金山湖水体尚未受到As元素的影响,总体表现为清洁状态。对于Pb元素而言,单因子污染指数的四个季节平均值分别为0.036(秋季)、0.052(冬季)、0.040(春季)、0.044(夏季),分别基于0.001~0.087、0.001~0.131、0.014~0.088、0.003~0.086,18个采样点样点的单因子平均值亦均在0.7以下,表明金山湖水体尚未受到Pb元素的影响,总体表现为清洁状态。此外,Cu、Zn、Cr和Cd元素的单因子指数值均小于0.7,表明金山湖水体尚未受到以上元素的影响,总体均表现为清洁状态。

2.3 金山湖水体重金属的内梅罗综合指数评价

对金山湖水体重金属进行内梅罗综合指数的评价,结果如图4、5所示。其中,18个采样点的内梅罗综合指数值介于0.07~0.19之间,平均值为0.13,所有采样点的内梅罗综合指数均低于0.7。对于各重金属元素而言,内梅罗综合指数平均值

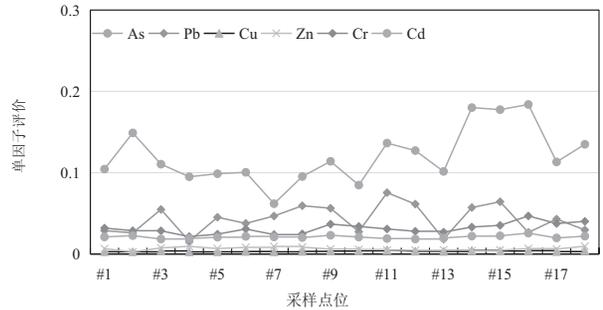


图3 水体重金属的单因子评价

表现为As>Pb>Cr>Cd>Zn>Cu,但各元素的内梅罗指数介于0.006~0.22之间,其值同样低于0.7。内梅罗综合指数值结果表明,金山湖水水质较为优良,基本不受重金属污染的影响。

2.4 金山湖水体重金属相关性分析

水体重金属含量受到人为活动的综合影响^[22],当来源相同或相似时,重金属元素之间往往存在一定的相关性,因此,重金属之间的相关性分析往往被用来判断重金属的来源,如果元素间存在显著或极显著的相关关系,则表明元素之间具有同源关系^[23-24]。金山湖水体4个季节的重金属含

表 6 金山湖水体重金属单因子评价结果统计分析

元素		春	夏	秋	冬
As	平均值	0.136	0.115	0.148	0.083
	最小值	0.032	0.017	0.023	0.014
	最大值	0.245	0.219	0.367	0.201
Pb	平均值	0.040	0.044	0.036	0.052
	最小值	0.014	0.003	0.001	0.001
	最大值	0.088	0.086	0.087	0.131
Cu	平均值	0.004	0.002	0.005	0.003
	最小值	0.002	0.001	0.002	0.002
	最大值	0.007	0.005	0.009	0.004
Zn	平均值	0.006	0.006	0.007	0.007
	最小值	0.002	0.004	0.002	0.001
	最大值	0.013	0.013	0.016	0.017
Cr	平均值	0.036	0.030	0.034	0.026
	最小值	0.024	0.021	0.007	0.021
	最大值	0.060	0.084	0.056	0.042
Cd	平均值	0.140	0.110	0.150	0.080
	最小值	0.030	0.020	0.020	0.010
	最大值	0.240	0.220	0.370	0.200

量相关性分析结果如表 7 ~ 10 所示, 由表可见, 4 个季节中, 18 个点位所取水样, 各重金属元素间均无显著的相关关系 ($P > 0.05$), 表明水体中 6 种重金属的来源各不相同。

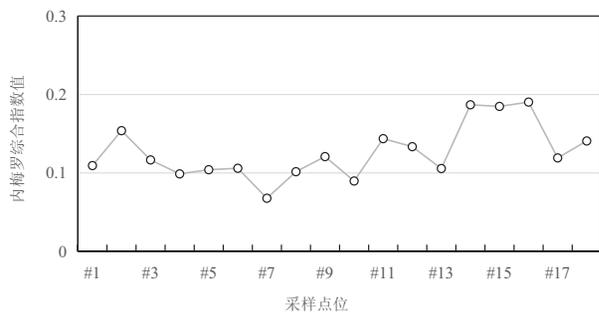


图 4 金山湖各采样点水体重金属的内梅罗综合指数值

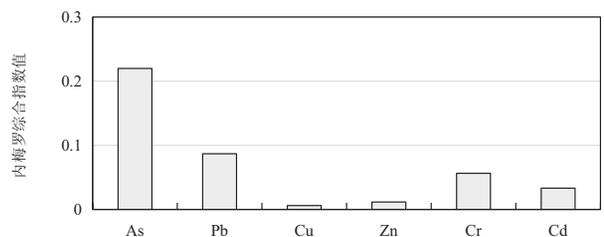


图 5 金山湖水体不同重金属元素的内梅罗综合指数值

3 结论

通过对金山湖 18 的采样点 1 年内 4 个季节的样品采集、元素测定以及数据分析, 发现金山湖水体重金属元素含量低于国际大地表水环境指标标准的三类标准。单因子及内梅罗综合指数评价结

表7 金山湖水体重金属各元素间的相关性分析(春季)

	As	Pb	Cu	Zn	Cr	Cd
As	1					
Pb	0.239	1.000				
Cu	0.072	-0.070	1.000			
Zn	0.016	0.521	-0.177	1.000		
Cr	0.026	-0.213	0.433	-0.035	1.000	
Cd	-0.195	-0.030	-0.424	0.128	-0.306	1.000

表8 金山湖水体重金属各元素间的相关性分析(夏季)

	As	Pb	Cu	Zn	Cr	Cd
As	1					
Pb	0.248	1.000				
Cu	0.282	0.359	1.000			
Zn	-0.188	0.026	-0.124	1.000		
Cr	0.360	-0.023	0.714	0.124	1.000	
Cd	0.393	-0.156	-0.030	0.236	0.073	1.000

表9 金山湖水体重金属各元素间的相关性分析(秋季)

	As	Pb	Cu	Zn	Cr	Cd
As	1					
Pb	-0.096	1				
Cu	0.352	0.274	1			
Zn	-0.276	0.293	-0.285	1		
Cr	0.436	0.012	0.653	-0.433	1	
Cd	0.599	-0.122	0.130	-0.187	0.405	1

表10 金山湖水体重金属各元素间的相关性分析(冬季)

	As	Pb	Cu	Zn	Cr	Cd
As	1					
Pb	0.497	1.000				
Cu	0.329	0.169	1.000			
Zn	-0.506	-0.246	-0.301	1.000		
Cr	-0.157	-0.261	0.109	0.213	1.000	
Cd	0.004	-0.011	-0.069	0.094	0.419	1.000

果均表明,金山湖水体尚未受到 As、Pb、Cu、Zn、Cr 以及 Cd 各金属元素的影响,水体总体表现为清洁状态。

参考文献:

- [1] 刘晖,张昭,李伟.梁子湖水体和底泥中微量元素及重金属的空间分布格局及污染评价[J].长江流域资源与环境,2011,20(Z1):105-111.
- [2] Arnason J G, Fletcher B A. A 40 year record of Cd, Hg, Pb, and U deposition in sediments of Patroon Reservoir, Albany County, NY, USA[J]. Environmental Pollution, 2003, 123:383-391.
- [3] Demirak A, Yilmaz F, Levent T A, et al., Heavy metals in water, sediment and tissues of *Leuciscuscephalus* from a stream in southwestern Turkey[J]. Chemosphere, 2006, 63:1 451-1 458.
- [4] Yangang H, Rose N L, Battarbee R W. Distribution of some trace metals in Lochnagar, a Scottish mountain lake ecosystem and its catchment[J]. Science of the Total Environment, 2002, 285:197-208.
- [5] Reza R, Singh G. Assessment of heavy metal contamination and its indexing approach for river water[J]. International Journal of Environment Science and Technology, 2010, 7(4):785-793.
- [6] Li S, Xu Z, Cheng X, et al. Dissolved trace elements and heavy metals in the Danjiangkou Reservoir, China[J]. Environmental Geology, 2008b, 55:977-983.
- [7] 周晓红,刘龙梅,陈曦,等.金山湖闸坝型水体表层沉积物重金属分布特征及生态风险评价[J].环境科学,2014,35(11):4127-4134.
- [8] 陈军.安徽省淮南潘一矿采煤塌陷区水体重金属污染案例分析与评价[D].南京:南京大学,2017.
- [9] 陈旭华.用尼梅罗(Nemerow)污染指数评价地表水营养状况的探讨[J].安全与环境学报,2003,3(2):24-26.
- [10] 王铁宇,汪景宽,周敏,等.黑土重金属元素局地分异及环境风险[J].农业环境科学学报,2004,23(2):272-276.
- [11] 单监利,周泽明,潘敏,等.西溪湿地沉积物重金属时空分布特征及污染评价[J].杭州师范大学学报(自然科学版)2013,12(2):161-167.
- [12] 李晓晨,赵丽,王超.玄武湖上覆水间隙水和沉积物中重金属的分布研究[J].环境科学与技术,2008,31(5):4-6.
- [13] 王伟,樊祥科,黄春贵,等.江苏省五大湖泊水体重金属的监测与比较分析[J].湖泊科学,2016,28(3):494-501.
- [14] 程杰.巢湖水体重金属污染评价及水中重金属污染的植物修复研究[D].合肥:安徽农业大学,2008.
- [15] 宋美英.珠江河口水体沉积物中重金属的分布特征及风险评估[D].广州:暨南大学,2014.
- [16] 方斌斌,于洋,姜伟立,等.太湖流域水体和沉积物重金属时空分布特征及潜在生态风险评价[J].生态与农村环境学报,2017,33(3):215-224.
- [17] 刘倩纯,胡维,葛刚,等.鄱阳湖枯水期水体营养浓度及重金属含量分布研究[J].长江流域资源与环境,2012,21(10):1230-1235.
- [18] 张伟娜,陈继龙.长春市南湖水体中重金属元素分布特征[J].吉林师范大学学报(自然科学版):2013,2:54-58.
- [19] 田林锋,胡继伟,秦樊鑫,等.重金属元素在贵州红枫湖水体中的分布特征[J].中国环境科学,2011,31(3):481-489.
- [20] 郭彦海,孙许超,张士兵,等.上海某生活垃圾焚烧厂周边土壤重金属污染特征、来源分析及潜在生态风险评估[J].环境科学,2017,38(12):5262-5271.
- [21] Wilding L P. Spatial variability: its documentation, accommodation and implication to soil surveys. In: Nielsen D R, Bouma J (Eds.). Soil spatial variability[M]. Wageningen: PUDOC publishers. 1985. 166-194.
- [22] 张倩,陈宗娟,彭昌盛,等.大港工业区土壤重金属污染及生态风险评估[J].环境科学,2015,36(11):4232-4240.
- [23] Guo G H, Wu F C, Xie F Z, et al., Spatial distribution and pollution assessment of heavy metals in urban soils from southwest China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2012, 24(3):410-418.
- [24] 邹曦,郑志伟,张志永,等.三峡水库小江流域消落区土壤重金属时空分布与来源分析[J].水生生态学杂志,2012,33(4):33-39.