

焦岗湖水环境重金属分布及健康风险评估

司家济,高良敏*,解志林

(安徽理工大学地球与环境学院,安徽 淮南 232001)

摘要:在焦岗湖湖体布设13个采样点,测定水体7种元素含量,利用主成分分析和因子分析探究其分布特征,并基于水环境健康风险评估模型对7种元素存在的健康风险进行评价。结果表明,焦岗湖水体中7种元素测定值符合《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)标准要求;元素Pb、Cr、As、Mn、Cd来源于人为污染,Ni、Cu来源于自然资源;焦岗湖水体入湖口存在总健康风险,而单一重金属不存在健康风险,总健康风险值整体呈现西半湖高于东半湖的趋势。

关键词:重金属;水环境;健康风险评估;焦岗湖

中图分类号:X820.4

文献标志码:B

文章编号:1006-2009(2019)03-0041-04

Distribution and Health Risk Assessment of Heavy Metals in the Water Environment of Jiaogang Lake

SI Jia-ji, GAO Liang-ming*, XIE Zhi-lin

(College of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China)

Abstract: The concentration of seven elements from thirteen sampling points in Jiaogang Lake were determined, the distribution characteristics were studied by principal component analysis and factor analysis methods, and the health risks of these elements were evaluated based on the water environment health risk assessment model. The results showed that the concentration of these elements in Jiaogang Lake met the requirements of Environmental Quality Standard for Surface Water (GB 3838—2002). Pb, Cr, As, Mn and Cd were derived from man-made pollution. Ni and Cu were from nature resource. There was total health risk in the inlet of Jiaogang Lake, while no health risk existed in single heavy metal. The total health risk in the west-half of the lake was higher than that in the east-half.

Key words: Heavy metals; Water environment; Health risk assessment; Jiaogang Lake

重金属污染难以被生物降解,具有毒性、隐蔽性等特点^[1],通过食物链富集其毒性不断增加^[2],能通过饮水、吸入、皮肤接触等多途径进入人体内,且大部分重金属具有致癌性^[3],当其含量超过一定剂量会严重危害人体健康^[4],重金属污染严重会导致较高的致癌风险^[5-6]。目前,已有学者研究焦岗湖流域土壤重金属^[7],而焦岗湖水体重金属的研究尚缺,由于焦岗湖是毛集实验区的备用饮用水源,其水质状况将关系到周边地区居民的身体健康。今对焦岗湖水体重金属含量进行监测,利用主成分分析和因子分析探究其水体重金属分布特征,并采用美国国家环保署(USEPA)推荐的水环境健康风险评估模型对水体重金属开展健康风险评估,

以为焦岗湖备用饮用水源地的保护和管理提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

焦岗湖位于 E116°34' ~ E116°39', N32°35' ~ N32°37' 范围内,地跨安徽淮南市西南部毛集综合

收稿日期:2018-04-10;修订日期:2019-03-01

基金项目:中央引导地方专项资金科技惠民“淮河焦岗湖沟渠入湖水体污染源控制技术集成与示范”基金资助项目(206080802D119)

作者简介:司家济(1994—),男,安徽巢湖人,在读研究生,研究方向为水污染处理。

*通信作者:高良敏 E-mail: gaolmin@163.com

实验区与阜阳市颍上县,流域面积 497 km²[8],上游入湖河流有丁家沟,下游由便民沟元新闻与淮河水系连通[9]。该湖东西长约 15 km,南北宽约 5 km[10],湖区面积 53.28 km²,控制水位 18.2 m,正常年平均水深 1.8 m~2.2 m,汛期最大水深 5.8 m~6.2 m,是集灌溉、养殖、旅游、调蓄洪水等功能于一体的潜水性淡水湖泊[11]。

1.2 样品采集与分析

2017年1月在焦岗湖东、西湖区分别布设8个和5个采样点,点位分布见图1。焦岗湖水体流向由西向东,按湖体水流方向及人工航道布设点位,其中点位W1、W3和W4位于湖体入水口,点位E5和E6为湖体出水口,使用GPS定位。在每个采样点水面以下0.5 m处用聚乙烯塑料瓶采集水样500 mL,样品采集、保存和运输均按照《湖泊和水库采样技术指导》(GB/T 14581—2002)进行。

使用电感耦合等离子体质谱仪(珀金埃尔默公司,NexION 300型系列),并依据《生活饮用水标准检验方法 金属指标》(GB/T 5750.6—2006)测定Cd、Ni、Pb、As、Cr、Mn和Cu的含量。

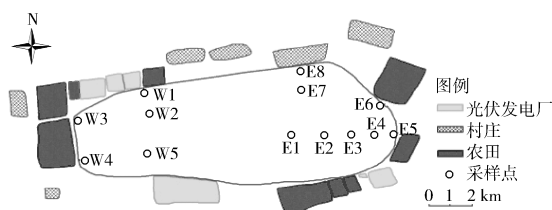


图1 焦岗湖水体采样点分布

Fig.1 Distribution of sampling sites in Jiaogang Lake

1.3 水环境健康风险评价模型

水环境健康风险评价模型的研究对象分为化学致癌物和非化学致癌物,模型中人均寿命取值为75 a,成人每日饮用水取值为2.2 L。

化学致癌物健康风险评价模型计算公式为:

$$R_i^c = [1 - \exp(-D_i q_i)]/T \quad (1)$$

$$D_i = Q \times C_i / 65 \quad (2)$$

式中: R_i^c 为致癌物通过饮水途径产生的平均个人年致癌风险, a^{-1} ; D_i 为致癌物*i*通过饮水途径的单位日均暴露剂量, $mg/(kg \cdot d)$; q_i 为致癌物*i*通过饮水途径的致癌强度系数, $(kg \cdot d)/mg$; T 为人均预期寿命,a; Q 为成人每日平均饮水量, L/d ; C_i 为致癌物*i*的质量浓度, mg/L ;65为人均体重,kg。

非化学致癌物健康风险评价模型计算公式为:

$$R_j^n = D_j \times 10^{-6} / (RfD_j \times T) \quad (3)$$

式中: R_j^n 为非致癌物*j*通过饮水途径产生的平均个人年风险, a^{-1} ; D_j 为非致癌物*j*通过饮水途径的单位体重日均暴露剂量, $mg/(kg \cdot d)$; RfD_j 为非致癌物*j*通过饮水途径的日均参考剂量, $mg/(kg \cdot d)$ 。

各类有毒污染物通过不同的机理对人体产生危害,并不是独立作用,而是通过相加、协同、拮抗关系等作用对人体产生危害[12],研究过程复杂。今假设各重金属污染物对人体健康产生危害的作用是独立的,符合相加累积效应[13]。因此,水环境健康风险评价中总健康风险 R_w 可表示为:

$$R^n = \sum_{j=1}^m R_j^n, R^c = \sum_{i=1}^n R_i^c, R_w = R^n + R^c \quad (4)$$

1.4 健康风险评价参数

根据国际癌症研究机构(IARC)、世界卫生组织(WHO)及USEPA的《超级基金公众健康评价手册》[14]进行致癌物质分类和相关参数的确定。文中涉及的7种元素均具有非致癌风险,同时,Cr、Cd和As也具有致癌风险,致癌强度系数和非致癌物质参考剂量见参考文献[15]。目前,我国对于健康风险评价未提出具体限值,文中参考国外相关机构推荐的健康风险评价限值[16],选择国际辐射防护委员会(ICRP)[17]规定的最大可接受风险 $5 \times 10^{-5} a^{-1}$ 为评价依据,对焦岗湖水环境重金属的健康风险进行初步评估。

2 结果与讨论

2.1 水体重金属质量浓度分布

焦岗湖水体7种元素测定结果见表1。由表1可知,焦岗湖水环境中Cr、Cu、As、Cd、Pb测定值均符合《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)(以下简称《标准》)Ⅲ类标准,Ni、Mn测定值分别符合集中式生活饮用水地表水源地特定项目和补充项目标准限值。

图2为焦岗湖水体中元素质量浓度分布。由图2可见,水体中元素质量浓度高值区多出现在采样点W1和W4,整体呈现湖边大于湖中的趋势。其中点位W1和W4处于入湖口,焦岗湖周边分布众多农田,化肥和农药的使用会导致重金属累积,在降雨的驱动下通过径流等方式流入焦岗湖,对焦岗湖水体重金属含量产生影响,可见焦岗湖水体重金属受到的人为影响主要为农业生产活动。

表 1 焦岗湖水体中元素测定结果 $\mu\text{g/L}$

Table 1 Test results of elements in the water of Jiaogang Lake $\mu\text{g/L}$

元素	范围	平均值	标准差	标准限值
Cd	0.001 ~ 0.036	0.012	0.009	5
Ni	4.06 ~ 8.58	5.08	1.24	20
Pb	0.056 ~ 0.352	0.160	0.113	50
As	3.10 ~ 4.25	3.63	0.47	50
Cr	0.73 ~ 1.50	1.07	0.24	50
Mn	1.92 ~ 13.4	5.98	3.62	100
Cu	1.87 ~ 6.76	3.11	1.33	1 000

表 2 焦岗湖水体中元素主成分分析

Table 2 Principal component analysis of elements in the water of Jiaogang Lake

项目	主成分 F1	主成分 F2
Pb	0.971	0.076
Cr	0.930	0.162
As	0.851	-0.222
Mn	0.808	0.015
Cd	0.750	-0.319
Ni	0.249	0.895
Cu	0.212	-0.519
特征值	3.855	1.254
贡献率/%	55.073	17.913
累计贡献率/%	55.073	72.986

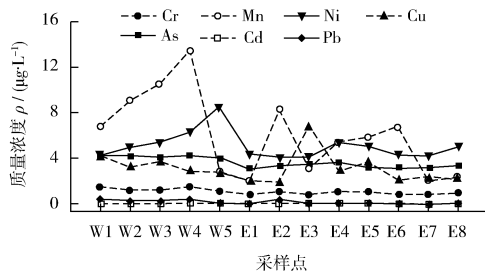


图 2 焦岗湖水体中元素质量浓度分布

Fig. 2 Distribution of heavy metal contents in the water of Jiaogang Lake

2.2 水体重金属质量来源解析

利用 SPSS 22.0 统计软件对 7 种元素进行皮尔逊相关性分析。结果表明, Mn、As、Cd、Pb 与 Cr 呈极显著正相关, 相关系数分别为 0.751、0.893、0.684、0.813; As、Pb 与 Mn 呈极显著正相关, 相关系数分别为 0.655、0.723; As、Cd 与 Pb 呈显著相关, 相关系数分别为 0.680、0.584。其中 As、Pb 与 Cr 的相关系数超过 0.800, 表明焦岗湖水体中部分元素具有同源性。

为分析元素间的关系, 对各元素作标准化处理后进行聚类分析, 结果显示, 7 种元素被分为两类: 第一类包括 Pb、Cr、As、Mn 和 Cd; 第二类包括 Ni、Cu。运用主成分分析和因子分析, 其中 KMO > 0.5, 巴特利球形检验 $P < 0$, 分析结果见表 2。由表 2 可知, 第一主成分 F1 特征值为 3.855, 第二主成分 F2 特征值为 1.254, 特征值均 > 1, 主成分 F1、F2 贡献率分别为 55.073%、17.913%, 累计贡献率为 72.986%, 可以代表该 7 种元素的基本信息。

主成分 F1 包括 Pb、Cr、As、Mn、Cd, 有高正载荷率。研究区周边以农业生产为主, 农药、化肥使用量高, 而我国使用的磷肥和微量元素肥料中 Pb、Cr、As 和 Cd 的含量普遍较高^[18], 其是导致焦岗湖

水体中存在 Pb、Cr、As 和 Cd 的主要原因。研究区 Mn 含量存在明显差异, 且 Mn 多用于合金材料、干电池中, 推测工业生产活动可能是水体锰的主要来源^[19], 据此主成分 F1 主要为人为污染来源。

主成分 F2 包括 Ni、Cu。淮南市煤炭资源丰富, 煤中硫化物矿物分布有黄铁矿^[20], 其主要成分为 FeS_2 , Ni 具有类质同像性, 常代替 Fe^[21], 形成 $\text{FeS}_2 - \text{NiS}_2$ 系列, 经过风化、径流等作用, 导致水体中含有重金属 Ni。郭旻欣^[22] 利用半变异函数发现淮南矿区土壤中重金属 Cu 的空间变异与土壤形成的内在因素有关。本研究区 Cu 的含量较低, 推测研究区重金属 Cu 主要为自然资源, 据此主成分 F2 主要来源于自然资源。

2.3 水体重金属健康风险评价

运用水环境健康风险评价模型计算焦岗湖水体中重金属致癌风险和非致癌风险, 结果表明, 元素 Cr、As、Cd 通过饮水途径引起的致癌风险值分别为 $1.382 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1} \sim 2.824 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$ 、 $2.106 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1} \sim 2.909 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$ 、 $2.840 \times 10^{-9} \text{ a}^{-1} \sim 1.024 \times 10^{-7} \text{ a}^{-1}$ 。根据 ICRP 规定的最大可接受风险水平 $5 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$, 焦岗湖水体中 Cd 不存在致癌风险, Cr、As 引起的健康风险值最大值达到 $2.824 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$ 、 $2.909 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$ (见图 3), 未超过最大可接受风险水平 $5 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$, 不存在致癌风险。Cr、As 引起的致癌风险值比 Cd 引起的致癌风险值大两三个数量级, 其中 Cr、As 所引起致癌风险占总致癌风险的 99%, 为该区域主要致癌风险元素。焦岗湖水体中重金属所引起的非致癌风险值为 $10^{-13} \text{ a}^{-1} \sim 10^{-10} \text{ a}^{-1}$, 远低于最大可接受风险水平 $5 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$, 即焦岗湖水体重金属不存在非致癌风险。

以重金属间协同作用为研究前提, 根据公式

(4) 计算焦岗湖水体重金属所产生的最大健康风险, 计算结果见图3。由图3可见, 焦岗湖水体重金属通过饮水途径引起的总健康风险值为 $3.490 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1} \sim 5.737 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$, 点位 W1、W2、W3、W4 总健康风险值分别为 $5.709 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$ 、 $5.160 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$ 、 $5.218 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$ 、 $5.737 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$, 均超过最大可接受风险水平 $5 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$, 存在健康风险。其中, 点位 W1—W5 总健康风险值呈现出高于 E1—E8 的趋势, W1—W5 分布在西半湖, E1—E8 分布在东半湖, 整体上呈现出西半湖高于东半湖的趋势。

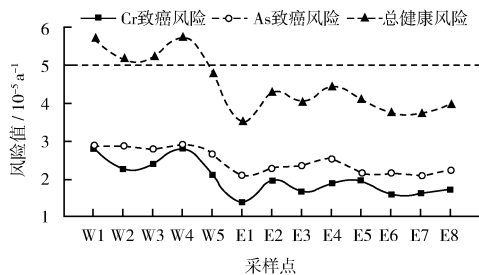


图3 焦岗湖水体重金属健康风险值

Fig.3 Health risk value of elements in the water of Jiaogang Lake

3 结论

(1) 焦岗湖水体中 Cr、Cu、As、Cd、Pb 的测定值均符合《标准》Ⅲ类标准, Ni 的含量符合集中式生活饮用水地表水源地特定项目标准限值, Mn 的含量符合集中式生活饮用水地表水源地补充项目标准限值。

(2) 7 种元素根据其来源共分为两类: 第一类元素 Pb、Cr、As、Mn、Cd 主要为人为污染源; 第二类元素 Ni、Cu 主要为地球化学来源。

(3) 总健康风险值整体呈现出西半湖大于东半湖的趋势, 其中 Cr 和 As 通过饮水途径引起的致癌风险明显高于 Cd, 占总致癌风险的 99%, 为该区域主要致癌风险元素, 今后须重点关注 Cr 和 As 的污染问题。此次分析及评价为该区域水环境重金属初步研究, 从产生总健康风险最大的角度出发, 需要对焦岗湖水体重金属采取一定的预防措施, 以期维护焦岗湖良好水质。

[参考文献]

[1] PEKEY H, KARAKAŞ D, BAKOĞLU M. Source apportionment of trace metals in surface waters of a polluted stream using multivariate statistical analyses [J]. Marine Pollution Bulletin, 2004, 49(9-10): 809-818.

[2] KAR D, SUR P, MANDAI S K, et al. Assessment of heavy metal pollution in surface water [J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2008, 5(1): 119-124.

[3] YANG Y Y, WEI L F, CUI L L, et al. Profiles and risk assessment of heavy metals in Great Rift Lakes, Kenya [J]. Clean-Soil Air Water, 2017, 45(3): 28-29.

[4] 张莉, 祁士华, 瞿程凯, 等. 福建九龙江流域重金属分布来源及健康风险评价 [J]. 中国环境科学, 2014, 34(8): 2133-2139.

[5] MILOVANOVIC M. Water quality assessment and determination of pollution sources along the Axios/Vardar River, Southeastern Europe [J]. Desalination, 2007, 231(1-3): 159-173.

[6] 程鹏, 李叙勇. 洋河流域不同时空水体重金属污染及健康风险评价 [J]. 环境工程学报, 2017, 11(8): 4513-4519.

[7] 陈飘雪, 王变, 孙庆业. 焦岗湖及入湖河流表层沉积物重金属潜在生态风险评价 [J]. 湿地科学, 2016, 14(1): 37-43.

[8] 杨阳, 蔡怡敏, 白艳莹, 等. 焦岗湖湿地土地利用格局演变及区域可持续性评价 [J]. 环境科学, 2015, 36(6): 2320-2326.

[9] 张毅敏, 石效卷, 彭福全, 等. 水质较好湖泊生态保护对策分析——以安徽焦岗湖为例 [J]. 环境保护, 2016, 44(18): 28-31.

[10] 徐梅. 华阳湖湖群和焦岗湖的后生浮游动物群落结构研究 [D]. 合肥: 安徽大学, 2016.

[11] 王变, 陈飘雪, 韦绪好, 等. 淮河流域焦岗湖水水质参数时空变化及影响因素 [J]. 湖泊科学, 2016, 28(3): 520-527.

[12] 李本云, 吴攀, 张翅鹏, 等. 黔中水利枢纽工程平寨水库集水流域溶解态重金属特征及健康风险评价 [J]. 安全与环境学报, 2013, 13(3): 122-127.

[13] 倪彬, 王洪波, 李旭东, 等. 湖泊饮用水源地水环境健康风险评价 [J]. 环境科学研究, 2010, 23(1): 74-79.

[14] USEPA. Supplement risk assessment Part 1. Guidance for public health risk assessment [S]. Washington D. C.: USEPA, 1989.

[15] US Environment Protection Agency. Superfund public health evaluation manual [R]. Washington D. C.: USEPA, 1986.

[16] 李丽娜. 上海市多介质环境中持久性毒害污染物的健康风险评价 [D]. 上海: 华东师范大学, 2007.

[17] US Environment Protection Agency. Available information on assessment exposure from pesticides in food [R]. Washington D. C.: US Environmental Protection Agency Office of Pesticide Programs, 2000: 1-14.

[18] 闫湘, 王旭, 李秀英, 等. 我国水溶肥料中重金属含量、来源及安全现状 [J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(1): 8-18.

[19] 杨永亮, 吴学丽, 路国慧, 等. 沈阳河流和沿岸地区环境多介质中锰的分布及生态风险评价 [J]. 生态学杂志, 2010, 29(8): 1605-1611.

[20] 陈萍, 姜冬冬. 淮南煤中矿物特征与成因分析 [J]. 安徽理工大学学报(自然科学版), 2012, 32(3): 1-6, 49.

[21] 王秀红, 黄涛, 黄菲, 等. 天然黄铁矿光吸收特征 [J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(9): 2508-2511.

[22] 郭旻欣. 基于 GIS 的淮南矿区土壤 Cu、Ni、As、Zn 和 Cr 元素空间分布特征及来源分析 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2016.

本栏目编辑 谢咏梅