

DOI:10.7524/j.issn.0254-6108.2022062204

刘娜, 刘俐, 王遵尧, 等. COVID-19 对太湖重金属污染及水生生态风险的影响[J]. 环境化学, 2024, 43(1): 240-249.

LIU Na, LIU Li, WANG Zunyao, et al. Impact of COVID-19 on pollution and aquatic ecological risk of heavy metal in Tai Lake[J]. Environmental Chemistry, 2024, 43 (1): 240-249.

## COVID-19 对太湖重金属污染及水生生态风险的影响\*

刘娜<sup>1</sup> 刘俐<sup>1</sup> 王遵尧<sup>1</sup> 刘红玲<sup>1,2</sup>\*\*

(1. 南京大学环境学院, 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 南京, 210023; 2. 江苏省生态环境保护化学品安全与健康风险研究重点实验室, 南京, 210023)

**摘要** 自 COVID-19 爆发以来, 人类生活和经济受到很大负面影响, 但同时疫情期间自然环境得到一定改善. 为探究 COVID-19 管控对太湖重金属污染和水生生态风险的影响, 将疫情期间 (2021.6—2021.7) 和爆发前 (2019.9—2020.1) 太湖重金属污染和水生生态风险进行对比分析, 并通过 PCA-APCS-MLR (主成分-绝对主因子分析-多元线性回归受体模型) 对重金属进行定量源解析. 结果表明, 疫情期间太湖重金属污染水平和对水生生物的生态风险皆显著降低, 降幅分别为 39.9%—92.8% 和 0.19%—87.66%. 整体水质优良比例提升了 33.65%. 重金属中受影响最大的元素为铜和铬. 定量源解析结果表明, 工业源对铜和铬的贡献率分别为 79.75% 和 84.26%, 疫情期间工业活动的减少是太湖重金属污染和生态风险降低的主要原因. 为更好地管控太湖重金属污染和保护太湖水生生物, 建议优先监管太湖周边电镀、冶炼和化学三大工业企业铜和铬的排放.

**关键词** 太湖, 内梅罗指数法, 联合概率法, 定量源解析, PCA-APCS-MLR 模型.

## Impact of COVID-19 on pollution and aquatic ecological risk of heavy metal in Tai Lake

LIU Na<sup>1</sup> LIU Li<sup>1</sup> WANG Zunyao<sup>1</sup> LIU Hongling<sup>1,2</sup>\*\*

(1. School of the Environment, Nanjing University, Nanjing, 210023, China; 2. Jiangsu Province Ecology and Environment Protection Key Laboratory of Chemical Safety and Health Risk, Nanjing, 210023, China)

**Abstract** There has been a great negative impact on human life and economy with the outbreak of COVID-19, while the ecological environment has been improved. In order to explore the impact of COVID-19 control on heavy metal pollution and aquatic ecological in Tai Lake concretely, the difference of water quality and aquatic ecological risk of heavy metal between 2021.6—2021.7 and 2019.9—2020.1 were compared and analyzed. PCA-APCS-MLR model was further used to analyze the quantitative source of heavy metals. It clearly showed that the pollution and the ecological risks to aquatic organisms of heavy metals in Tai Lake were significantly reduced by 39.9%—92.8% and 0.19%—87.66% during the epidemic period, respectively. The proportion of excellent water quality increased by 33.65%. Copper and chromium were the most affected elements, and the contribution rates of industrial sources to copper and chromium were 79.75% and 84.26%, respectively, as the reduction of industrial activities was the main reason for the reduction of heavy metal pollution and

2022年6月22日收稿(Received: June 22, 2022).

\* 国家自然科学基金(22176095)和国家科技重大专项(2018ZX07208001)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (22176095) and Major National Science and Technology Projects of China (2018ZX07208001).

\*\* 通信联系人 Corresponding author, E-mail: hlliu@nju.edu.cn

ecological risk in Tai Lake. To better control heavy metal pollution and protect aquatic organisms, The discharge of copper and chromium from electroplating, smelting and chemical enterprises around Tai lake should be managed first.

**Keywords** Tai Lake, Nemero index method, joint probability curve method, quantitative source analysis, PCA-APCS-MLR model.

自 COVID-19 爆发,多个国家和地区的人口活动大幅降低<sup>[1-2]</sup>,农业、工业等经济活动明显减少<sup>[3-5]</sup>,人类生活和社会经济受到负面影响.但从自然环境角度看,疫情管控也带来一定的积极影响,如已有研究表明,空气污染在疫情管控期间显著下降,野生动物的活动范围相对扩大<sup>[6-8]</sup>.目前疫情对环境的影响研究主要集中于大气环境方面,对水环境的影响研究还较为缺乏.

太湖作为长江三角洲的中心地带,人口和经济发展迅速,大量工业农业和生活废水排入水体,导致太湖水体重金属含量不断升高,水环境受到不良影响<sup>[9-11]</sup>.同时,水生生物对重金属敏感度高<sup>[12]</sup>,其中铜、锌、铅、镉、铬为太湖主要的重金属污染物<sup>[13-14]</sup>,对太湖水生生物健康存在较大的潜在危害<sup>[15-17]</sup>.为探究 COVID-19 管控对重金属污染下的太湖水质及水生生态风险的影响,针对太湖水体中 5 种主要重金属元素(铜、锌、铅、镉、铬),利用内梅罗指数法和联合概率法(Joint probability curve, JPC)评价重金属污染下的太湖水质及重金属的水生生态风险,并进行疫情爆发前和疫情期间的对比分析.通过 PCA-APCS-MLR 模型定量解析重金属来源,结合太湖周边经济活动变化,分析 COVID-19 管控引发的人类活动变化对太湖水环境的影响,以期对太湖重金属污染监管和水生生物的保护提供支撑.

## 1 材料和方法 (Materials and methods)

### 1.1 水样采集和测定

太湖横跨江浙两省.根据江苏省针对疫情一级响应(2020.1.24)<sup>[18]</sup>和应急响应启动时间(2021.7.21)<sup>[19]</sup>,本研究分为疫情爆发前(2019.9—2020.1)和疫情管控期间(2021.6—2021.7)两个时段进行分析.分别于 2019.9—2020.1 和 2021.6—2021.7 对太湖水生态功能区的 52 个代表性点位(图 1(a)) 和 8 个重污染区的代表性点位(图 1(b)),根据 HJ/T 91<sup>[20]</sup>和 HJ 495<sup>[21]</sup>的相关规定进行水样采集,经 0.45 μm 水性微孔滤膜过滤,滤液中加入适量硝酸使硝酸含量达 1% 作为测定水样.采用电感耦合等离子体质谱(ICP-MS(NexION 300X))根据《水质 65 种元素的测定电感耦合等离子体质谱法》标准<sup>[22]</sup>测定太湖 5 种重金属的离子浓度.

### 1.2 水质评价

内梅罗指数法可指示水质并识别污染关键因子<sup>[23-24]</sup>,且对太湖水质评价具有良好的适用性<sup>[25]</sup>.采用内梅罗指数法对 COVID-19 爆发前和疫情管控期间的太湖水质进行评价,计算方法如式(1)—(2).式中, $I_i$ 为重金属  $i$  的污染指数, $S$ 为重金属的综合污染指数, $I_{i,max}$ 为最大重金属污染指数, $C_i$ 为重金属环境浓度( $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ), $C_{0i}$ 为评价标准值( $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ), $k$ 为重金属元素数量.

$$I_i = \frac{C_i}{C_{0i}} \quad (1)$$

$$S = \sqrt{\frac{(I_{i,max})^2 + (\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k I_i)^2}{2}} \quad (2)$$

基于内梅罗污染等级划分原则<sup>[24]</sup>,考虑地表水环境质量(GB3838—2002)中化合物指标共 18 项<sup>[26]</sup>.本研究赋予 5 种目标金属指数 3 倍权重,以期更准确地反映太湖水质.最终水质评级原则为: $S \times 3 < 0.80$ ,优良; $0.80 \leq S \times 3 < 2.50$ ,良好; $2.50 \leq S \times 3 < 4.25$ ,较好; $4.25 \leq S \times 3 < 7.20$ ,较差; $S \times 3 \geq 7.20$ ,极差.

### 1.3 水生生态风险评价

联合概率法(Joint probability curve, JPC)结合化合物环境暴露水平和毒性,反映暴露浓度超过影响生物毒性值的概率<sup>[27]</sup>.利用 JPC 法,将太湖重金属的生态风险表征为“产生 5% 水生生物长期不良效应

的环境浓度概率”。重金属慢性毒性数据来源为美国环保署(U.S. EPA)的 ECOTOX 数据库(<http://cfpub.epa.gov/ecotox/>)和 CNKI 数据库(<http://www.cnki.net/>), 数据筛选原则如下: (1)生物毒性测试符合国标<sup>[28]</sup>或 OECD<sup>[29]</sup> 及 U.S. EPA 的标准; (2)测试的暴露介质为淡水, 测试地点为实验室, 毒性数据包含明确毒性终点、暴露时间及暴露方式; (3)优先选择 NOEC 作为毒性终点, 其次考虑 LOEC、NOEL、LOEL 或 MATC. 毒性指标选择短生命周期生物 >4 d, 长生命周期生物 >7 d 的亚致死效应以及 >21 d 的致死效应, 优先选择标准方法获得的大型蚤 21 d 毒性数据<sup>[30]</sup>.

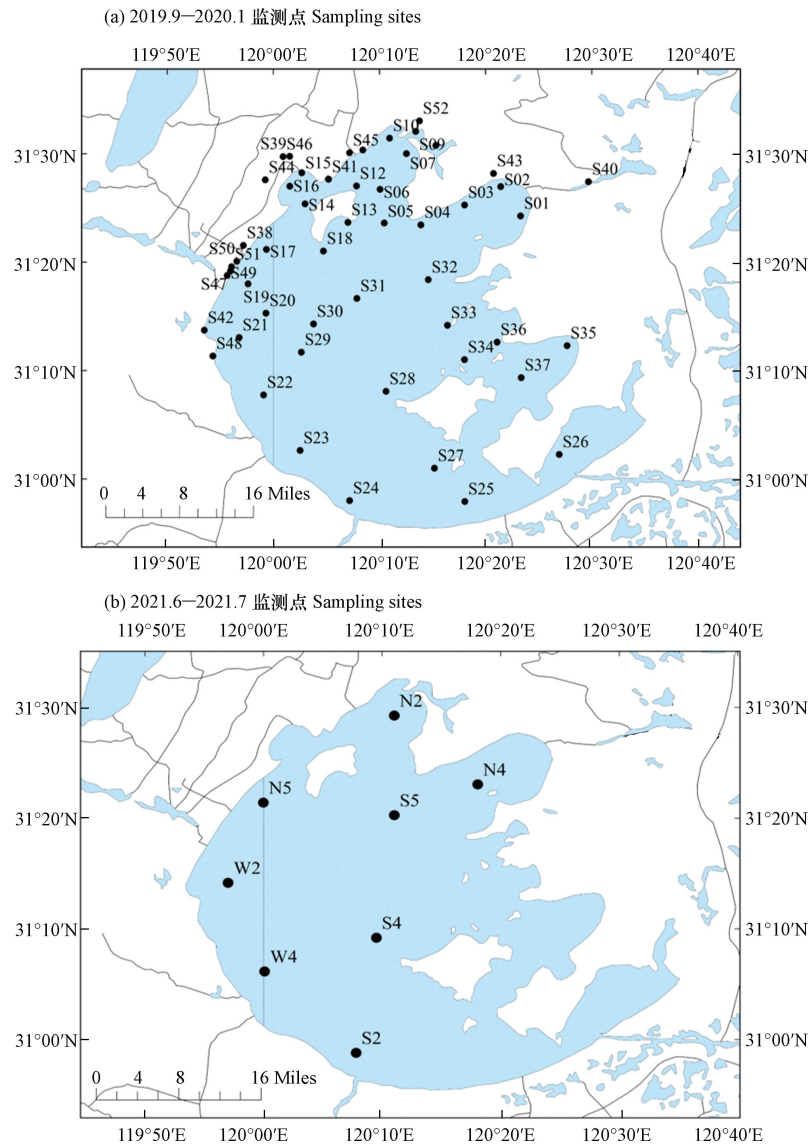


图 1 太湖重金属采样点分布

Fig.1 Distribution of heavy metal sampling sites in Tai Lake

#### 1.4 定量源解析

PCA-APCS-MLR 受体模型由 Thurston 和 Spengler 提出<sup>[31]</sup>, 在定量解析化合物污染源的研究中有较好的应用<sup>[32]</sup>. 首先通过相关性和主成分分析(principal component analysis, PCA)定性分析各重金属来源, 进一步利用 APCS-MLR 进行定量源解析, 结合 COVID-19 期间太湖周边主要经济活动的变化, 分析人类活动变化对太湖水体重金属污染的影响. 定量源解析步骤如下. 式(3)—(4)中,  $\bar{C}_i$  和  $\sigma_i$  分别为重金属  $i$  的平均浓度和标准偏差,  $C_i$  为重金属  $i$  的实测浓度,  $b_{0i}$  为多元线性回归常数项,  $k_{ip}$  为因子  $p$  对重金属  $i$  的多元线性回归系数, APCS <sub>$p$</sub>  为因子  $p$  的绝对主因子得分.

(1)引入浓度为 0 的样本, 根据式(3)对重金属浓度进行标准化.

$$Z_{0i} = \frac{0 - \bar{C}_i}{\sigma_i} \quad (3)$$

(2) 由 PCA 分析得到的主因子得分减去  $Z_{0i}$ , 得出各重金属的绝对主因子得分 APCS. 分别以 APCS 和重金属浓度作为自变量和因变量进行多元线性回归分析, 最终通过回归系数计算得到主因子相应的污染源对重金属的平均贡献率<sup>[33]</sup>. 为避免负值对贡献率的误导, 均取绝对值.

$$C_i = b_{0i} + \sum_{p=1}^p (k_{ip} \times \text{APCS}_p) \quad (4)$$

## 1.5 统计分析

采用 Graphpad Prism 8 绘制小提琴图和 JPC 曲线, 以  $R^2$  评价拟合优度. 相关性分析和 PCA-APCS-MLR 采用 Microsoft Office Excel 2019 及 IBM SPSS Statistic 25.0 进行统计分析. 采用 Kolmogorov-Smirnov 对慢性毒性数据进行正态性检验, 运用 Graphpad Prism 8 中配对样本  $T$  检验方法进行差异显著性分析.

# 2 结果与讨论 (Results and discussion)

## 2.1 太湖水质对比分析

太湖 5 种主要重金属离子测定的标准曲线  $R^2 > 0.99$ , 检出限为  $0.01\text{—}0.31 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , 重复样品的标准偏差  $\text{RSD} < 5.0\%$ , 回收率为  $92.5\%\text{—}110.1\%$ , 本方法具有较好的准确性和稳定性. 结果如图 2 所示, 锌、铜和铬的污染浓度最高. 相较疫情爆发前, 疫情期间 5 种重金属的污染水平皆显著下降,  $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Zn}^{2+}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Cd}^{2+}$  和  $\text{Cr}^{6+}$  的全湖平均浓度分别下降了  $81.8\%$ 、 $56.4\%$ 、 $39.9\%$ 、 $44.5\%$  和  $92.8\%$ , 铜和铬污染的降低程度最大.

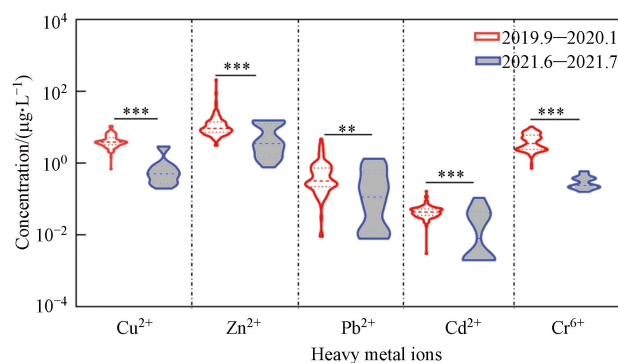


图 2 疫情前和疫情期间太湖重金属离子浓度

Fig.2 Concentrations of heavy metal ions in Tai Lake before and during the COVID-19 epidemic

为分析太湖水质相对变化并考虑太湖水生生物的安全, 本文采用水体污染控制与治理科技重大专项“太湖流域水环境管理技术集成与业务化运行”项目“太湖保护水生生物水质标准制定与应用”(2018ZX07208001)的标准推荐值. 水质评价结果如图 3 所示. COVID-19 爆发前太湖水质优良、良好、较好、较差和极差的点位分别占全湖的  $3.85\%$ 、 $88.46\%$ 、 $3.85\%$ 、 $1.92\%$  和  $1.92\%$ . 其中 S20 等区域处水质最差, 西北部及沿岸为太湖重金属污染最严重区域, 与 Jiang 等研究结果类似<sup>[34-35]</sup>. 由图 3(b)可知, 疫情期间太湖水质均改善至优良或良好, 水质优良的比例提升了  $33.65\%$ , 尤其对于太湖西北部靠岸重金属污染严重水域, 如 S20 及附近水质极差区域对应管控期间点位 W2 所代表的区域处, 其 5 种重金属含量分别下降了  $66.76\%$ 、 $87.98\%$ 、 $32.21\%$ 、 $33.58\%$  和  $93.27\%$ , 平均重金属污染度下降了  $63.36\%$ . 水质显著提升. 不同重金属元素对太湖整体重金属污染的相对贡献度变化如图 4 所示, 铜和锌对太湖整体重金属污染的贡献度高于其他重金属, 相比疫情前, 疫情期间铜和铬的相对污染贡献度显著降低.

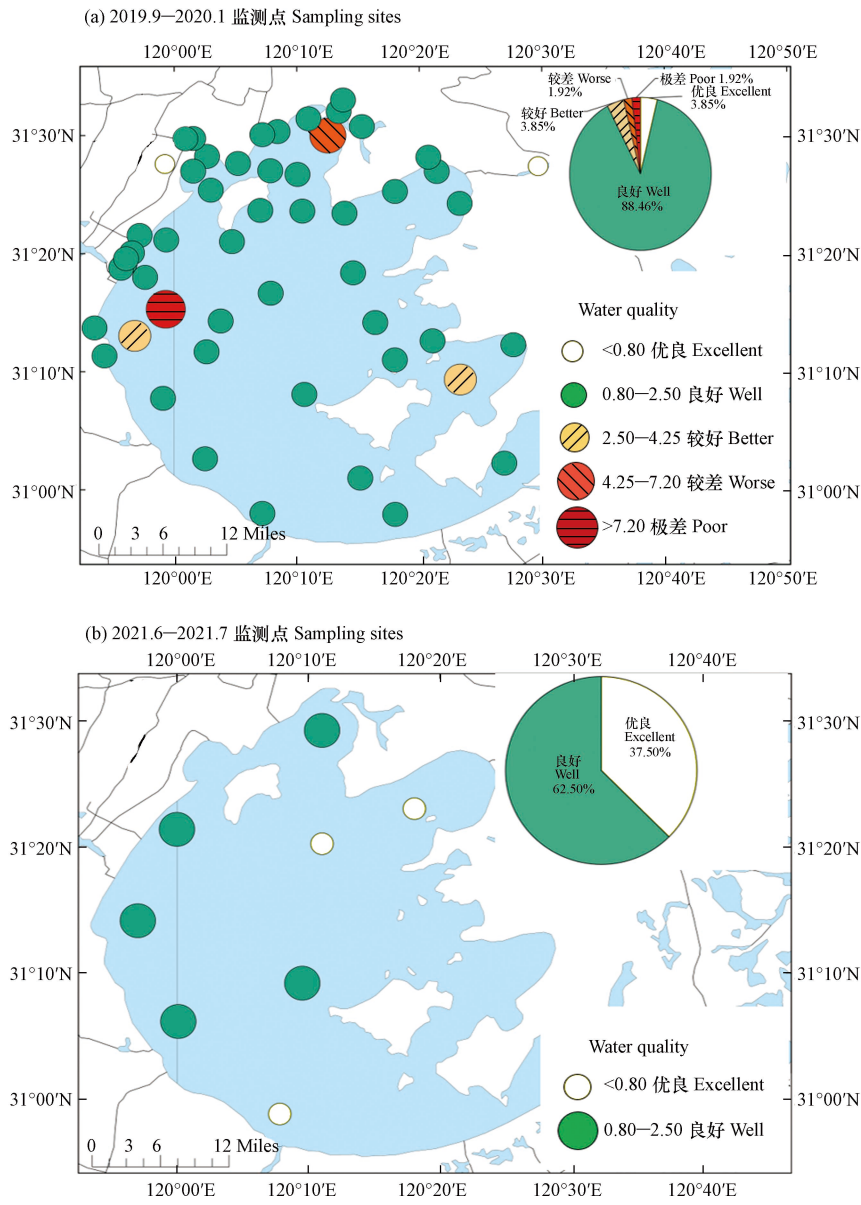


图3 太湖水质评价结果  
(a.2019.9—2020.1; b.2021.6—2021.7)

Fig.3 Results of water quality assessment of Tai Lake

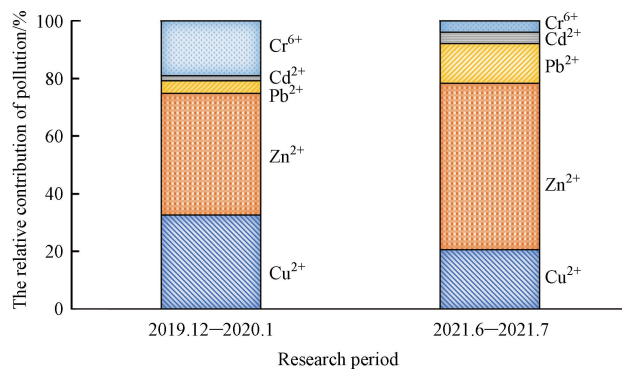


图4 各元素对太湖总体重金属污染的相对贡献度

Fig.4 The relative contribution of each element to the overall heavy metal pollution in Tai Lake

2.2 太湖重金属的水生生态风险

最终搜集  $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Zn}^{2+}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Cd}^{2+}$ 和  $\text{Cr}^{6+}$ 的慢性毒性数据分别包括水生生物 14 种(5 门 9 科)、10 种(4 门 7 科)、9 种(4 门 7 科)、14 种(4 门 10 科)和 10 种(3 门 7 科). 结合环境浓度, 重金属的联合概率

曲线见图 5。与 COVID-19 爆发前相比, 疫情期间太湖重金属对水生生物的生态风险明显降低。太湖水体中  $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Zn}^{2+}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Cd}^{2+}$  和  $\text{Cr}^{6+}$  对 5% 水生生物产生长期不良效应的环境浓度概率分别降低了 87.66%、7.12%、12.01%、0.19% 和 15.07%, 其中铜和铬的水生生态风险降低程度最大。

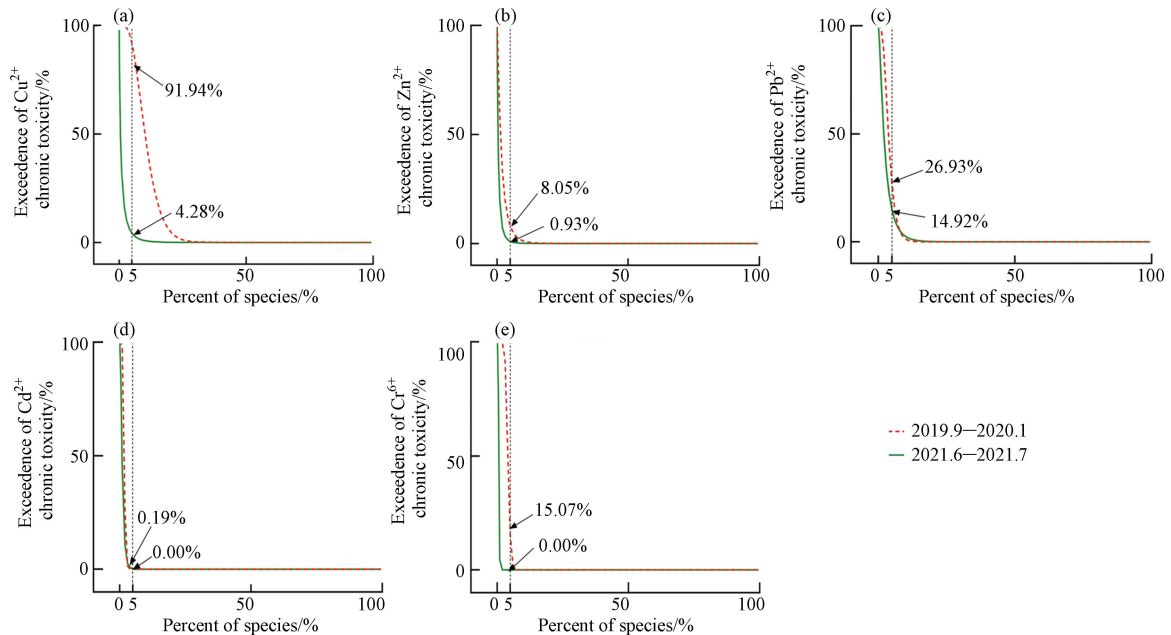


图 5 太湖重金属的水生生态风险 (a.  $\text{Cu}^{2+}$ , b.  $\text{Zn}^{2+}$ , c.  $\text{Pb}^{2+}$ , d.  $\text{Cd}^{2+}$ , e.  $\text{Cr}^{6+}$ )

Fig.5 Aquatic ecological risks of heavy metals in Tai Lake (a.  $\text{Cu}^{2+}$ , b.  $\text{Zn}^{2+}$ , c.  $\text{Pb}^{2+}$ , d.  $\text{Cd}^{2+}$ , e.  $\text{Cr}^{6+}$ )

相比 COVID-19 爆发前, 疫情管控期间太湖重金属污染以及对水生生物的风险皆显著降低。除疫情管控这个主要的外部因素外, 不同季节采样的太湖水位、水量等内在因素也会影响太湖重金属污染状况。因此, 对 2019.9—2020.1 和 2021.6—2021.7 两个研究时段的太湖水情进行数据调研并比较分析, 数据来源于“水利部太湖流域管理局”。结果如下: 2021.6—2021.7 期间太湖平均水位为 3.58 m, 相较于 2019.9—2020.1 期间的 3.36 m, 偏高 0.22 m。从蓄水量看, 与 2019.9—2020.1 期间月均全湖蓄水量的 52.38 亿  $\text{m}^3$  相比, 2021.6—2021.7 期间为 53.19 亿  $\text{m}^3$ , 增加 0.81 亿  $\text{m}^3$ , 对重金属浓度稀释了 0.015 倍, 即水量的影响可能造成重金属的平均浓度降低为原来的 1.55%, 相对实际降低水平 (39.9%—92.8%) 幅度较小。可见, 水情的变化对太湖重金属污染水平的影响较小, 而疫情的人为管控则是太湖重金属污染和生态风险降低的主导因素。

## 2.3 太湖重金属污染源定量解析

### 2.3.1 污染源定性识别

#### (1) 相关性分析

由 Pearson 相关性分析 (表 1) 可知, 铜-铬相关系数为 0.814, 存在极强相关关系 ( $R^2 > 0.6$ ,  $P < 0.01$ ), 镉与铜、锌和铅存在较强相关关系, 相关系数分别为 0.344、0.332 和 0.334 ( $R^2 > 0.3$ ,  $P < 0.01$ ); 铜和锌相关系数为 0.234, 相关关系较弱 ( $R^2 > 0.2$ ,  $P < 0.05$ ); 除镉外, 铅与其他 3 种金属元素 (铜、锌和铬) 相关关系极弱, 相关系数分别为 0.028、0.060 和 -0.086 ( $R^2 < 0.3$ ,  $P > 0.05$ )。因此, 推测太湖铜和铬来源相同或相似; 镉、铜、锌的污染源存在交叉关系; 铅和镉存在交叉源; 铅和铜、铬及锌污染源不同且无交叉源。

表 1 重金属元素相关性矩阵

Table 1 Correlation matrix of heavy metal elements

金属元素 Heavy metal	铜 Cu	锌 Zn	铅 Pb	镉 Cd	铬 Cr
铜	1**				
锌	0.234*	1**			
铅	0.028	0.060	1**		
镉	0.344**	0.332**	0.334**	1**	
铬	0.814**	0.244*	-0.086	0.188	1**

\*\* $P < 0.01$ , \* $P < 0.05$ .

## (2) PCA 分析

由 Bartlett 球度检验为 0.000 (<0.05), KMO 值为 0.540 (>0.5), 数据可进行 PCA 分析, 太湖 5 种重金属的 PCA 分析结果见表 2. F1、F2 和 F3 主因子对整体解释度为 85.792%. 第一主成分 F1 方差贡献率为 42.942%, 其中铜和铬载荷最高, 分别为 0.882 和 0.828. 太湖铜主要来自化工厂生产、金属冶炼等产生的工业废弃物<sup>[36-37]</sup>, 铜和铬来源相似, 因此将因子 F1 识别为工业源. 第二主成分 F2 方差贡献率为 25.864%, 铅和镉载荷最高, 分别为 0.803 和 0.574. 第三主成分 F3 方差贡献率为 16.986%, 铅载荷最高, 为 0.419. 航运排放的废气经大气沉降是太湖中铅的重要来源<sup>[38]</sup>, 太湖流域农业生产活动发达, 镉主要来自尿素、磷肥等农业源<sup>[39-40]</sup>, 锌和镉受农业和工业共同影响且锌主要来自农业. 由相关性分析可知, 铅和镉存在交叉源同时与其他 3 种金属元素来源不同, 因此综合分析将 F2 和 F3 分别识别为农业源和交通源.

表 2 主成分分析结果

Table 2 The results of principal component analysis

	F1	F2	F3
铜	0.882	-0.275	0.248
锌	0.540	0.231	-0.763
铅	0.164	0.803	0.419
镉	0.604	0.574	-0.030
铬	0.828	-0.436	0.171
初始特征值	2.147	1.293	0.849
方差贡献率/%	42.942	25.864	16.986
累积贡献率/%	42.942	68.806	85.792

## 2.3.2 污染源定量解析

PCA-APCS-MLR 受体模型定量解析太湖重金属污染源的结果见表 3. 模型的预测值与观测值之比在 0.996—1 之间, 模型分析结果的可靠性高. 由工业、农业和交通三种污染源对太湖水体各金属元素的贡献率可知, 工业源对铜和铬的贡献率最高, 分别为 79.75% 和 84.26%, 其它来源对铜和铬污染贡献率低于 20%; 农业源是太湖锌的主要来源, 贡献度为 85.93%, 10.63% 和 3.44% 的锌则分别来自工业源和交通源; 交通排放对铅的贡献度为 85.74%, 远高于其它来源; 镉主要来自农业源(48.68%)和交通源(33.15%).

表 3 重金属来源贡献度分析

Table 3 Contribution of heavy metals sources in Tai Lake

重金属 Heavy mental	贡献率F1/% Contribution rate F1	贡献率F2/% Contribution rate F2	贡献率F3/% Contribution rate F3	观测值(O) Observed value (O)	预测值(E) Estimated value (O)	E/O	R <sup>2</sup>
铜	79.75	10.54	9.71	3.855	3.839	0.996	0.92
锌	10.63	85.93	3.44	13.166	13.155	0.999	0.93
铅	7.37	6.89	85.74	0.465	0.466	0.997	0.85
镉	18.17	48.68	33.15	0.044	0.044	1.000	0.70
铬	84.26	5.60	10.14	3.764	3.743	1.000	0.90
来源	工业	农业	交通				

综合分析可知, 5 种重金属中铜和铬的污染水平和生态风险降低最明显, 为受疫情管控影响最大的元素. 且工业源对铜和铬的贡献率分别为 79.75% 和 84.26%, 太湖铜和铬的工业源主要为电镀、冶炼、颜料和合金制造业. 由此推测疫情管控期间工业重金属排放的减少可能是导致太湖重金属污染水平和生态风险降低的主要因素.

据国家统计局统计, 2020 年 1 至 8 月份全国规模以上工业企业的利润同比下降 4.40%, 2020 年全

国工业产能利用率(实际产出与生产能力的比率)同比下降了 2.10%。作为长三角中心地带,太湖流域人口和经济发展迅速,受疫情影响也较大。2015—2020 年太湖流域不同功能用水量以及江浙两省的三产业产值如图 6 所示。2015—2018 年间,太湖流域农业、工业和生活用水量波动平稳,而疫情爆发后,工业用水出现明显减少。根据太湖横跨的江苏和浙江两省的三产业产值统计结果,相比 2019 年疫情爆发前,疫情管控期间江浙两省的第二产业(工业和建筑业)和第三产业(服务业)的增速减小,其中第二产业受影响尤为突出,出现下降趋势。可见,疫情管控期间太湖周边经济活动有所减少,其中工业活动受影响最大,与上文推测一致。另一方面,2019 至 2020 年,江苏省农业耕地面积由 408.97 万公顷降低至 404.41 万公顷,农用化肥使用量由 286.2 万吨下降为 280.8 万吨,降幅低于 2%,且农业用水和生产在疫情爆发前后的波动较小。从社会因素看,可能是因为农业作为我国支柱产业,受疫情管控的影响较小。从太湖重金属污染角度分析,镉主要为农业源,因此 COVID-19 爆发前后太湖镉的污染状况一定程度上可反映重金属农业源的变化。由上文可知,太湖镉在疫情管控期间其水生生态风险下降了 0.19%,为 5 种重金属中受影响最小的元素。根据定量源解析,48.68% 的镉来于农业污染源,因此农业源的下降使太湖镉的水生生态风险降低了 0.09%。可见,太湖水体重金属的农业源在疫情管控期间略有降低,工业源则是影响重金属污染和水生生态风险的主要因素,与 Niu 等分析结果一致<sup>[14]</sup>。

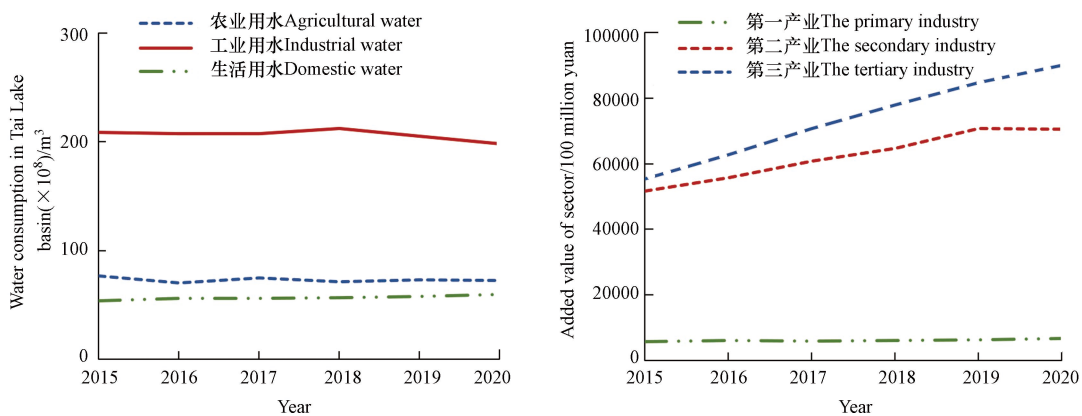


图 6 太湖周边产业变化

(数据来源:水利部太湖流域管理局(<http://www.tba.gov.cn/>)和《中国统计年鉴》(2016—2021 年))

Fig.6 Changes in the industries around Tai Lake

(Data source: Taihu Basin Administration, Ministry of Water Resources (<http://www.tba.gov.cn/>) and “China Statistical Yearbook” (2016—2021))

据南京市生态环境局(<http://hbj.nanjing.gov.cn/>)统计,太湖流域纺织、化学、钢铁、电镀、造纸和食品六大工业行业规模以上企业共 3288 家,其中 402 家金属电镀行业、97 家钢铁冶炼和 341 家化学行业每年采用直接排入河湖等水环境的工业废水量分别为 2059.11、6033.19、10664.24 万吨,是太湖铜和铬污染的最主要的工业来源。因此,为防治太湖重金属的污染以及降低太湖水生生物受重金属影响的风险,建议根据保护水生生物的水质标准,优先监管太湖周边电镀、冶炼和化学三大工业企业铜和铬的排放。

### 3 结论 (Conclusion)

(1) 太湖水体中  $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Zn}^{2+}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Cd}^{2+}$  和  $\text{Cr}^{6+}$  浓度在疫情管控期间均显著下降,下降范围为 39.9%—92.8%,其中  $\text{Cu}^{2+}$  和  $\text{Cr}^{6+}$  的下降最明显,与疫情前相比分别下降了 81.8% 和 92.8%。太湖西北部沿岸为重金属污染严重区域。相较疫情爆发前,疫情期间太湖水质提升至优良和良好水平,整体水质优良比例提升了 33.65%,尤其对于重污染区,水质得到显著改善。

(2) 疫情期间太湖 5 种重金属对水生生物的生态风险下降了 0.19%—87.66%,其中降低最显著的为  $\text{Cu}^{2+}$  (87.66%) 和  $\text{Cr}^{6+}$  (15.07%)。

(3) PCA-APCS-MLR 定量源解析结果表明,太湖铜的 79.75%、10.54 和 9.71%; 锌的 10.63%、



85.93% 和 3.44%; 铅的 7.37%、6.89% 和 85.74%; 镉的 18.17%、48.68% 和 33.15%; 铬的 84.26%、5.60% 和 10.14% 分别来自工业、农业和交通污染源。

(4)太湖主要重金属中,铜和铬为受疫情管控影响最大的元素,且分别有 79.75% 和 84.26% 的铜和铬来自工业源,工业源在太湖重金属污染中占主导地位。COVID-19 管控引起的工业活动的减少,是导致太湖重金属污染及水生生态风险降低的主要因素。建议根据保护水生生物的水质标准,优先监管太湖周边电镀、冶炼和化学三大工业企业铜和铬的排放,以更好地防治太湖重金属污染和保护太湖的水生生物。

**致谢:** 感谢地理湖泊海洋研究所张民研究员协助第二批太湖样的采集。

#### 参考文献 (References)

- [ 1 ] FATMI M R. COVID-19 impact on urban mobility [J]. *Journal of Urban Management*, 2020, 9(3): 270-275.
- [ 2 ] WIJNGAARDS I, del POZO CRUZ B, GEBEL K, et al. Exercise frequency during the COVID-19 pandemic: A longitudinal probability survey of the US population [J]. *Preventive Medicine Reports*, 2022, 25: 101680.
- [ 3 ] FERREIRA J P, RAMOS P, BARATA E, et al. The impact of COVID-19 on global value chains: Disruption in nonessential goods production [J]. *Regional Science Policy & Practice*, 2021, 13: 32-54.
- [ 4 ] SICHE R. What is the impact of COVID-19 disease on agriculture? [J]. *Scientia Agropecuaria*, 2020, 11(1): 3-6.
- [ 5 ] TAN L, WU X H, GUO J, et al. Assessing the impacts of COVID-19 on the industrial sectors and economy of China [J]. *Risk Analysis*, 2022, 42(1): 21-39.
- [ 6 ] AMNUAYLOJAROEN T, PARASIN N. The association between COVID-19, air pollution, and climate change [J]. *Frontiers in Public Health*, 2021, 9: 662499.
- [ 7 ] SHAKIL M H, MUNIM Z H, TASNIA M, et al. COVID-19 and the environment: A critical review and research agenda [J]. *The Science of the Total Environment*, 2020, 745: 141022.
- [ 8 ] WANG Q, SU M. A preliminary assessment of the impact of COVID-19 on environment - A case study of China [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 728: 138915.
- [ 9 ] 孙金华, 倪深海, 颜志俊. 人类活动对太湖地区水环境演变的影响研究 [J]. *水资源与水工程学报*, 2006, 17(1): 7-10.  
SUN J H, NI S H, YAN Z J. Study on effect of human activities on water environment evolution in Taihu Lake region [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2006, 17(1): 7-10 (in Chinese).
- [ 10 ] LI Y, ZHOU S L, ZHU Q, et al. One-century sedimentary record of heavy metal pollution in western Taihu Lake, China [J]. *Environmental Pollution*, 2018, 240: 709-716.
- [ 11 ] LIU H, FANG Z, MENG Y, et al. Water quality assessment around Lake Taihu [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, 29(11): 2262-2269.
- [ 12 ] ZHENG X, ZANG W C, YAN Z G, et al. Species sensitivity analysis of heavy metals to freshwater organisms [J]. *Ecotoxicology (London, England)*, 2015, 24(7/8): 1621-1631.
- [ 13 ] 焦伟, 卢少勇, 李光德, 等. 环太湖主要进出河流重金属污染及其生态风险评估 [J]. *应用与环境生物学报*, 2010, 16(4): 577-580.  
JIAO W, LU S Y, LI G D, et al. Heavy metal pollution of main inflow and outflow rivers around the Taihu Lake and assessment of its potential ecological risk [J]. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2010, 16(4): 577-580 (in Chinese).
- [ 14 ] 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.
- [ 15 ] PADRILAH S N, SABULLAH M K, ABD SHUKOR M Y, et al. Toxicity effects of fish histopathology on copper accumulation [J]. *Pertanika Journal of Tropical Agricultural Science*, 2018, 41(2): 519-540.
- [ 16 ] DONG L L, WANG H X, WANG Y, et al. Effects of Cd<sup>2+</sup> and Pb<sup>2+</sup> on growth and photosynthesis of two freshwater algae species [J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2022, 31(3): 2059-2068.
- [ 17 ] SHAHJAHAN M, TASILMA K, RAHMAN M S, et al. Effects of heavy metals on fish physiology - A review [J]. *Chemosphere*, 2022, 300: 134519.
- [ 18 ] 李佳婧, 张宁, 包咏菲, 等. 众志成城: 江苏打响疫情防控阻击战 [J]. *群众*, 2020(3): 4-7.  
LI J J, ZHANG N, BAO Y F, et al. United as one: The battle against the epidemic begins in Jiangsu Province [J]. *Masses*, 2020(3): 4-7 (in Chinese).
- [ 19 ] 张旻. “多援一”远程支援: 探出政府热线应急响应新路 [J]. *群众*, 2021(22): 34-36.  
ZHANG M. "More help one" remote support: Exploring a new way for government hotline emergency response [J]. *Masses*, 2021(22): 34-36 (in Chinese).
- [ 20 ] HJ/T 91—2002. 地表水和污水监测技术规范 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2005.  
HJ/T 91—2002. Technical specifications requirements for monitoring of surface water and waste water [S]. Beijing:

- China Environment Science Press, 2005 (in Chinese).
- [21] 环境保护部. 水质 采样方案设计技术规定: HJ 495—2009[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2010.  
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Water quality Technical regulation on the design of sampling programmes: HJ 495—2009[S]. Beijing: China Environment Science Press, 2010 (in Chinese).
- [22] BS EN ISO 17294-2—2003. 水质. 电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)的应用. 62种元素的测定[S].  
BS EN ISO 17294-2—2003. Water quality - application of inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) - Determination of 62 elements[S] (in Chinese).
- [23] 罗芳, 伍国荣, 王冲, 等. 内梅罗污染指数法和单因子评价法在水质评价中的应用[J]. *环境与可持续发展*, 2016, 41(5): 87-89.  
LUO F, WU G R, WANG C, et al. Application of Nemerow pollution index method and Single factor evaluation method in water quality evaluation [J]. *Environment and Sustainable Development*, 2016, 41(5): 87-89 (in Chinese).
- [24] 程继雄, 程胜高, 张炜. 地下水质量评价常用方法的对比分析[J]. *安全与环境工程*, 2008, 15(2): 23-25.  
CHENG J X, CHENG S G, ZHANG W. Comparison and analysis on common methods of groundwater quality assessment [J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2008, 15(2): 23-25 (in Chinese).
- [25] 徐彬, 林灿尧, 毛新伟. 内梅罗水污染指数法在太湖水质评价中的适用性分析[J]. *水资源保护*, 2014, 30(2): 38-40.  
XU B, LIN C Y, MAO X W. Analysis of applicability of Nemerow pollution index to evaluation of water quality of Taihu Lake [J]. *Water Resources Protection*, 2014, 30(2): 38-40 (in Chinese).
- [26] 国家环境保护总局, 国家质量监督检验检疫总局. 地表水环境质量标准: GB 3838—2002[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.  
State Environmental Protection Administration of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Environmental quality standards for surface water: GB 3838—2002[S]. Beijing: China Environment Science Press, 2002 (in Chinese).
- [27] 何佳, 时迪, 王贝贝, 等. 10种典型重金属在八大流域的生态风险及水质标准评价[J]. *中国环境科学*, 2019, 39(7): 2970-2982.  
HE J, SHI D, WANG B B, et al. Ecological risk assessment and water quality standard evaluation of 10 typical metals in eight basins in China [J]. *China Environmental Science*, 2019, 39(7): 2970-2982 (in Chinese).
- [28] 环境保护部. 水质 物质对淡水鱼(斑马鱼)急性毒性测定方法: GB/T 13267—1991[S]. 1992.  
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Water quality-Determination of the acute toxicity of substances to a freshwater fish. (Brachydanio rerio Hamilton-Buchanan): GB/T 13267—1991[S]. 1992 (in Chinese).
- [29] OECD. OECD guideline for testing of chemicals-Daphnia sp. , acute immobilisation test . Guideline[R]. Paris, France: OECD Environment Directorate, 2004.
- [30] EPA U. S. Guidelines for deriving numerical national water quality criteria for the protection of aquatic organisms and their uses[R]. Washington DC: National Technical Information Service, 1985.
- [31] THURSTON G D, SPENGLER J D. A quantitative assessment of source contributions to inhalable particulate matter pollution in metropolitan Boston [J]. *Atmospheric Environment (1967)*, 1985, 19(1): 9-25.
- [32] GUAN Q Y, WANG F F, XU C Q, et al. Source apportionment of heavy metals in agricultural soil based on PMF: A case study in Hexi Corridor, northwest China [J]. *Chemosphere*, 2018, 193: 189-197.
- [33] CHENG G W, WANG M J, CHEN Y, et al. Source apportionment of water pollutants in the upstream of Yangtze River using APCS-MLR [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2020, 42(11): 3795-3810.
- [34] JIANG X, WANG W W, WANG S H, et al. Initial identification of heavy metals contamination in Taihu Lake, a eutrophic lake in China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2012, 24(9): 1539-1548.
- [35] ZHAN Y, JIANG X, CHEN C, et al. Spatial distribution characteristics and pollution assessment of heavy metals in sediments from the southwestern part of Taihu Lake [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2011, 24(4): 363-370.
- [36] 姜会敏, 郑显鹏, 李文. 中国主要湖泊重金属来源及生态风险评估[J]. *中国人口·资源与环境*, 2018, 28(S1): 108-112.  
JIANG H M, ZHENG X P, LI W. Source and risk assessment of heavy metal in sediment of China [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2018, 28(Sup 1): 108-112 (in Chinese).
- [37] ZHANG J, GUO X Y, ZENG Y, et al. Spatial distribution and pollution assessment of heavy metals in river sediments from lake Taihu Basin [J]. *Environmental Science*, 2019, 40(5): 2202-2210.
- [38] 任杰, 白莉, 李军, 等. 太湖表层沉积物重金属污染评价与来源分析[J]. *地球与环境*, 2021(4): 416-427.  
REN J, BAI L, LI J, et al. Pollution evaluation and source apportionment of heavy metals in surface sediments of the Taihu Lake [J]. *Earth and Environment*, 2021(4): 416-427 (in Chinese).
- [39] 陆沈钧, 姚俊, 曹翔. 浅析太湖流域农业面源污染现状、成因及对策[J]. *水利发展研究*, 2020, 20(2): 40-44,53.  
LU S J, YAO J, CAO X. The present situation, causes and countermeasures of agricultural non-point source pollution in Taihu Lake Basin were analyzed [J]. *Water Resources Development Research*, 2020, 20(2): 40-44,53 (in Chinese).
- [40] 李想, 江雪昕, 高红菊. 太湖流域土壤重金属污染评价与来源分析[J]. *农业机械学报*, 2017, 48(S1): 247-253.  
LI X, JIANG X X, GAO H J. Pollution assessment and source analysis of soil heavy metals in Taihu Lake Basin [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(Sup 1): 247-253 (in Chinese).