

城市富营养化湖泊水质对降雨的响应——以武汉东湖为例

胡胜华¹, 李鑫², 李小辉², 孙紫童³, 周汉娥³, 熊雄², 吴辰熙²

(1. 武汉市桥梁工程有限公司, 武汉 430071; 2. 中国科学院水生生物研究所, 武汉 430072;

3. 武汉航发瑞华生态科技有限公司, 武汉 430063)

摘要:降雨是湖泊营养盐输入的重要途径,为了摸清降雨前后城市湖泊水质变化特征,选择典型城市富营养化湖泊武汉东湖为研究对象,在全湖布设 27 个样点,于 2021 年 9 至 10 月期间采集表层沉积物样品,并对期间降雨前后 11 个水质指标进行监测,识别表层沉积物氮磷污染现状与降雨前后东湖水质变化特征,利用线性回归、主成分分析等方法分析造成降雨前后水质差异的原因。结果表明,武汉东湖表层沉积物全氮、总磷平均含量分别为 4 065、683 mg/kg,总体处于重度污染水平。与雨前相比,雨后表层水体浊度、总磷、溶解性总磷、活性磷酸盐显著升高($P<0.05$),溶解氧、pH、硝态氮显著降低($P<0.05$),但总氮和溶解性总氮无显著性差异($P>0.05$)。雨后水体磷素的增加可能是由地表径流携带的面源污染物和径流引起沉积物内源磷释放所致,导致雨后总氮含量无明显变化的原因可能是反硝化作用。同时降雨径流携带的有机污染物加剧了微生物对溶解氧的消耗,有机质被分解为有机酸,这也是导致 pH 下降的重要原因之一。此外降雨能引起光强减弱,溶解氧和 pH 的降低可能与浮游藻类的光合作用受到抑制相关。

关键词:城市湖泊;东湖;表层沉积物;降雨;水质差异

中图分类号:X824

文献标志码:A

文章编号:1000-2367(2025)03-0050-08

湖泊具有水源供应、调节径流、沟通航运、提供动植物繁衍栖息地和改善生态环境等多种重要功能^[1]。由于气候变化和生产活动,湖泊水质不断恶化,生物类群受到了极大影响^[2]。《2022 年中国生态环境状况公报》显示,全国 210 个重要湖库有 26.2% 水质为Ⅳ~劣Ⅴ类^[3]。与深水湖泊相比,浅水湖泊环境容量小,更易受到人类活动、风浪扰动和降雨的影响,从而引起生物多样性降低、富营养化等多种环境问题^[4-5]。

降雨是城市湖泊氮、磷污染的重要来源之一。一方面由于燃煤、工业生产、机动车尾气排放等人类活动,大气中的污染物含量较高,雨水会携带这些污染物进入水体^[6];另一方面城市街道、屋顶等不透水表面较多,明显的降雨过程会形成地表径流,蓄积在表面的污染物会随地表径流经下水道管网进入水体^[7]。王琳芳等^[8]对徐州市 2021 至 2023 年的 12 场典型降雨的地表径流水质进行分析,发现氮元素严重超标,若任意排放,会影响城市水生态环境质量。尹珩等^[9]在武汉市东湖进行地表径流监测,发现低强度降雨和高强度降雨地表径流总磷(total phosphorus, TP)质量浓度分别为 0.74~1.59 mg/L、0.95~5.82 mg/L,湖泊 TP 质量浓度变化强度与湿沉降 TP 通量紧密相关。万帆等^[10]在武汉市开展地表径流面源污染特征研究,选取了道路、绿地和屋面 3 种下垫面,发现降雨初期,道路下垫面化学需氧量、氨氮、TP 质量浓度分别可达 115.3、4.12、0.55 mg/L。由此可见,如果雨水和地表径流直接进入湖泊,则会对水环境产生不利影响。

收稿日期:2023-12-19; **修回日期:**2024-02-26。

基金项目:国家自然科学基金(52070190);武汉市市政建设集团有限公司科技计划(wszy202014)。

作者简介:胡胜华(1978—),男,湖北武汉人,武汉市桥梁工程有限公司高级工程师,博士,研究方向为水环境治理与生态修复, E-mail:otto2003@126.com。

通信作者:李鑫, E-mail:lix@ihb.ac.cn。

引用本文:胡胜华,李鑫,李小辉,等.城市富营养化湖泊水质对降雨的响应——以武汉东湖为例[J].河南师范大学学报(自然科学版),2025,53(3):50-57.(Hu Shenghua, Li Xin, Li Xiaohui, et al. Response of water quality of urban eutrophic lakes to rainfall: a case study of Wuhan East Lake[J]. Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition), 2025, 53(3): 50-57. DOI:10.16366/j.cnki.1000-2367.2023.12.19.0001.)

已有多个学者就水质对降雨的响应开展了研究.钱华等^[11]发现雨后巢湖入湖河流南淝河与杭埠河水质突发性下降,氮磷营养盐升高.周波等^[12]发现随着降雨强度的增加,辽河流域的氮素含量呈现先增加后减少的趋势.刘文强等^[13]发现赣江南昌段周坊国考断面水质超标的现象多发生在强降雨后,尤其枯水期发生强降雨后,水质参数明显上升.降雨可能通过影响地表径流和沉积物内源营养盐释放来影响水体营养盐含量.以上研究详细分析了水质和降雨特征的关系,但未能同时探讨降雨时内源性营养盐释放对水体营养盐的影响.

东湖位于武汉市东南部,是长江中下游具有代表性的半封闭型浅水湖泊,也是我国最大城市湖泊之一.近年来,随着旅游景区开发、城市建设规模扩大、人口密度增加,东湖水系连通条件较差,底泥污染严重,水质亟需改善^[14-15].2021 年 8 月底的东湖蓝藻水华事件很可能与持续的高温天气、缓慢的湖流速度和较高的水体营养盐含量相关^[16].本研究以武汉东湖作为研究区域,在全湖布设 27 个样点,于 2021 年 9 至 10 月采集表层沉积物,测定其总氮(total nitrogen, TN)、TP 含量,分析营养元素分布特征和污染程度;期间分别监测两次降雨前和降雨后的水质,并采用线性回归和主成分分析等方法,揭示水质变化特征,探究水质差异原因.一方面可以填补降雨引起东湖水质变化规律空白,同时为汛期保障东湖水质质量提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

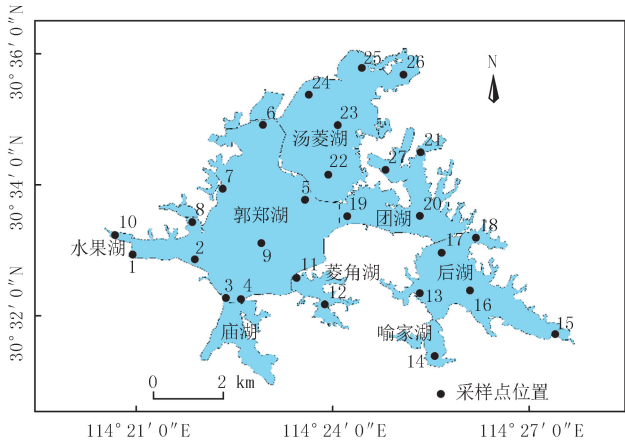
武汉东湖(30°28′~30°37′N,114°19′~114°31′E)位于武汉市东南部,水域面积 33.75 km²,平均水深 3 m,是我国最大城中湖泊之一.湖区地形为残丘性河湖冲积平原,处于北亚热带季风性湿润气候内,具有雨水充沛、日照充足、四季分明、夏季酷热、冬季寒冷等特点,多年平均无霜期 245 d,平均气温 16.7 °C,年均降雨量 1 180 mm,4~7 月份降水量占全年的 60%.武汉东湖因筑坝修路被分为了郭郑湖、汤菱湖、团湖、后湖、庙湖、菱角湖、喻家湖、水果湖、天鹅湖、小潭湖和筲箕湖等 11 个子湖.选取了水果湖、庙湖、郭郑湖、菱角湖、汤菱湖、团湖、后湖、喻家湖等 8 个湖区为研究对象,面积约占水域总面积的 80%以上.

1.2 样品采集

于 2021 年 9 月 23 日(雨前)、9 月 29 日(雨后第 1 天)、10 月 11 日(雨后第 1 天)、10 月 25 日(雨前)分别进行了 4 次采样,10 月 11 日和 10 月 25 日的采样调查并非针对同一场降雨.样点分布如图 1 所示.在每个样点采集水样时,在水面以下 50 cm 处采集 3 个平行样本,充分混合后,装入 1 000 mL 高密度聚乙烯瓶中.期间使用彼得森采泥器在采水样的地点采集表层沉积物(0~20 cm),将样本转移至自封袋中保存.采集的水样带回实验室后立即放入 4 °C 冰箱保存,24 h 内进行分析测试.泥样带回实验室后进行冷冻干燥,并研磨过筛(沉积物全氮:60 目土壤筛;沉积物总磷:100 目土壤筛).

1.3 检测方法

水温(water temperature, WT)、pH、溶解氧(dissolved oxygen, DO)、电导率(electrical conductivity, EC)由多参数水质测定分析仪(Hach HQ40d Mutli)现场测定,浊度(turbidity, TUR)由便携式浊度仪(Hach 2100Q)进行测定.TN 和溶解性总氮(dissolved total nitrogen, DTN)按照碱性过硫酸钾氧化-紫外分光光度



注:审图号为鄂S(2024)008,底图无修改.

图1 武汉东湖水域划分和采样点设置示意图

Fig.1 Water area division and sampling points setting of Wuhan East Lake

法(GB 11894—89)进行测定;硝态氮(nitrate nitrogen,NO₃-N)按照紫外分光光度法(HJ/T 346—2007)进行测定;TP、溶解性总磷(dissolved total phosphorus,DTP)和活性磷酸盐(soluble phosphate,SRP)按照钼酸铵分光光度法(GB 11893—89)进行测定.沉积物全氮(total nitrogen in sediments,STN)和总磷(total phosphorus in sediments,STP)分别按照凯氏法(HJ 717—2014)和碱熔-钼锑抗分光光度法(HJ 632—2011)测定.

1.4 沉积物污染评价方法

采用综合污染指数法评估东湖表层沉积物污染状况,计算公式为: $S_i = \frac{C_i}{C_0}$, $FF = \sqrt{\frac{F^2 + F_{\max}^2}{2}}$. S_i 为单项污染指数; C_i 为评价因子*i*的实测值; C_0 为评价因子的*i*的评价标准值, S_{STN} 的 C_0 取 550 mg/kg, S_{STP} 的 C_0 取 600 mg/kg; F 为*n*项污染指数平均值; $F_{\max}$ 为最大单项污染指数; FF 为综合污染指数.沉积物综合污染指数评价标准见附表 S1^[17].

1.5 统计分析

使用 ArcGIS 10.2 制作采样点分布图,利用反向距离分析法对表层沉积物中氮、磷含量进行空间特征分析,绘制 STN、STP 含量空间分布图.在 Excel 2019 中,采样双尾 *t* 检验分析降雨前后湖泊水质因子差异,统计检验的显著性水平为 $P<0.05$.在 GraphPad 8.0 中进行线性拟合,分析表层沉积物中总磷对降雨前后水体总磷的影响.使用 SIMCA 14.1 进行主成分分析,识别降雨前后影响湖泊水质状况的关键指标.箱线图和主成分分析图均在 Origin 2018 中完成.

2 结 果

2.1 武汉东湖表层沉积物氮磷含量

由图 2 可知,STN、STP 质量含量范围分别为 2 128~5 404 mg/kg、316~2 608 mg/kg,平均值分别为 4 065、683 mg/kg.STN 质量含量较高的区域集中在庙湖、汤菱湖、团湖、后湖,分别对应采样点 3、24~26、19~20、16~18,STN 质量含量均高于 4 800 mg/kg.高 STP 质量含量区域集中在水果湖、喻家湖,分别对应样点 10、14,STP 质量含量分别为 2 608、1 249mg/kg.根据附表 S1 和 S2,可判断东湖表层沉积物全氮总体处于中度污染水平,总磷总体处于重度污染水平.全湖表层沉积物综合污染指数范围为 3.45~7.94,所有样点均处于重度污染水平.

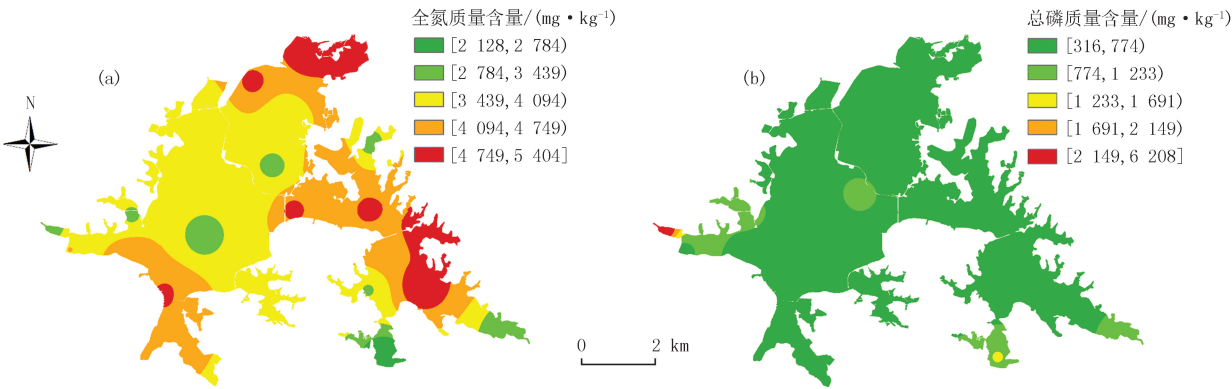


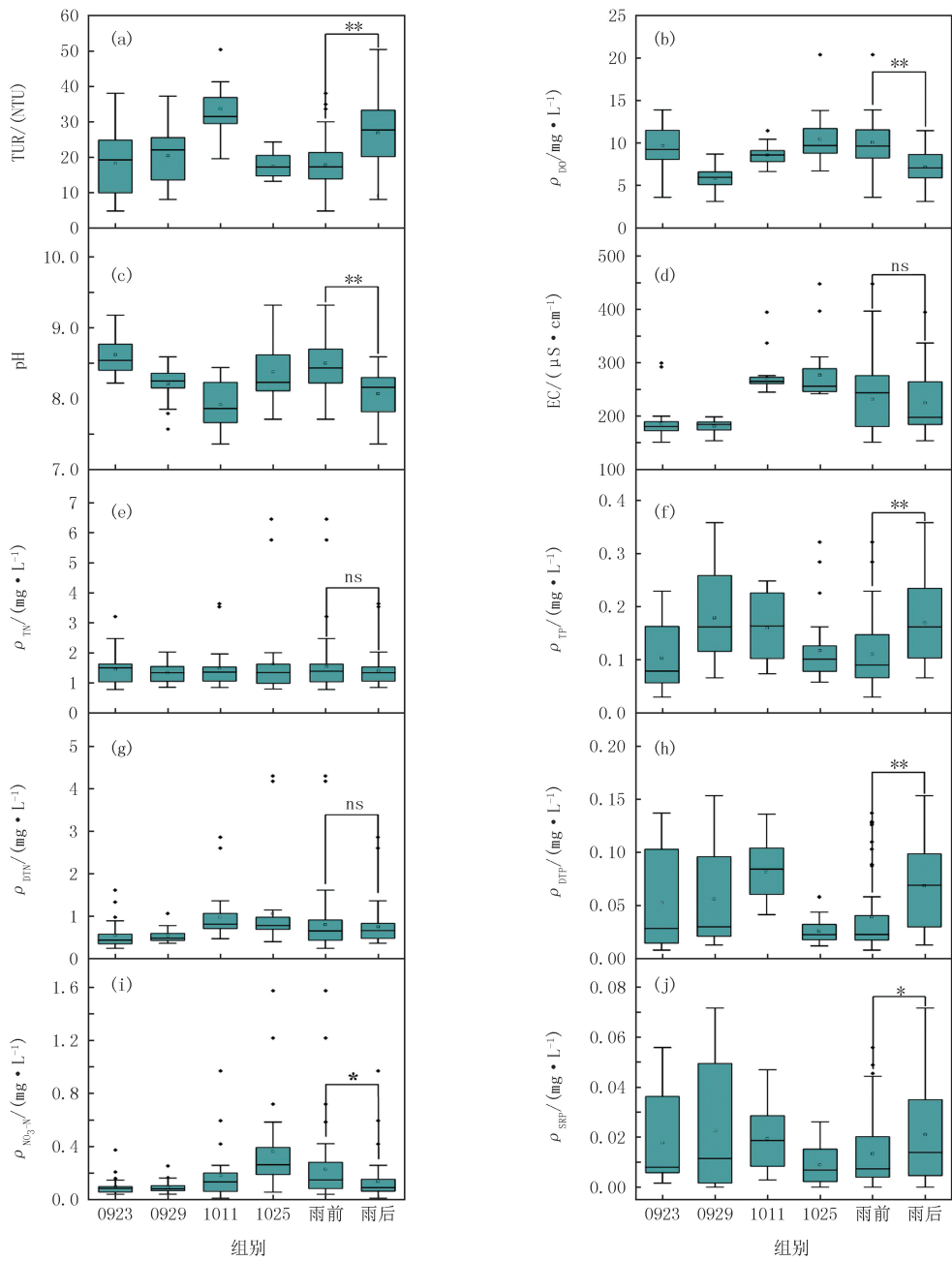
图2 武汉东湖表层沉积物氮磷空间分布
Fig.2 Spatial distribution of nitrogen and phosphorus in surface sediments of Wuhan East Lake

2.2 降雨前后武汉东湖水化学参数和氮磷浓度变化特征

由图 3((a)~(d))可知,雨前,东湖表层水体 TUR、DO、pH、EC 分别为 4.80~38.04 NTU、3.61~20.40 mg/L、7.71~9.32、151~448 μS/cm,雨后分别为 8.06~50.40 NTU、3.12~11.45 mg/L、7.36~8.59、154~395 μS/cm.与雨前相比,雨后表层水体 TUR 显著升高($P<0.05$),DO 和 pH 显著降低($P<0.05$),EC

无显著性差异($P>0.05$).

由图 3((e)~(j))可知,雨前,东湖表层水体 TN、DTN、NO₃-N、TP、DTP、SRP 质量浓度范围为 0.79~6.45、0.25~4.30、0.04~1.57、0.03~0.32、0.008~0.137、0~0.056 mg/L,雨后分别为 0.85~3.64、0.36~2.86、0.01~0.97、0.07~0.36、0.013~0.153、0~0.071 mg/L.雨后表层水体 TP、DTP、SRP 质量浓度较雨前显著升高($P<0.05$),但 NO₃-N 质量浓度显著降低($P<0.05$),TN 和 DTN 无显著性差异($P>0.05$).



*和**分别代表两组间具有显著性差异($P<0.05$)和极显著性差异($P<0.01$), ns表示无差异.

图3 降雨前后武汉东湖表层水体水质变化

Fig.3 Changes of surface water quality in Wuhan East Lake before and after rainfall

2.3 降雨前后武汉东湖表层水体总磷浓度对沉积物总磷的响应

根据上述结果,武汉东湖 STP 污染程度较 STN 高,且降雨前后水体 TP 质量浓度差异明显($P<0.05$),但 TN 质量浓度无显著差异($P>0.05$).大气沉降是营养盐进入水体的重要途径之一.调查期间磷干沉降平均速率为 0.008 mg/(m²·d),1 年干沉降对东湖磷质量浓度的贡献为 0.000 8 mg/L(远低于水体总磷质量

浓度);降水中总磷平均质量浓度为 0.007 mg/L(远低于水体总磷质量浓度),因此干湿沉降对东湖水体磷的贡献基本可以忽略.历史上东湖污染严重,大量污染物在沉积物中积累,内源污染可能对东湖水质产生重要影响.采用一元线性回归模型分析降雨前后水体总磷质量浓度对武汉东湖表层沉积物总磷的响应.由图 4 可知,水体总磷和沉积物总磷正相关,且雨后水体总磷质量浓度受沉积物总磷的影响更大($P<0.000\ 1$).

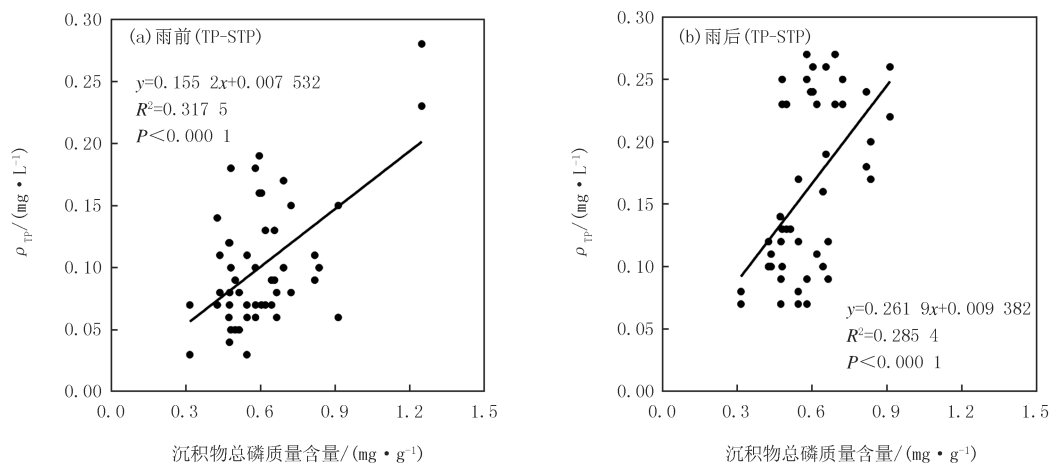


图4 武汉东湖表层水体总磷对沉积物总磷的响应

Fig.4 Response of total phosphorus in surface water to total phosphorus in sediments of Wuhan East Lake

2.4 降雨前后武汉东湖水质因子的主成分分析

主成分 1 和主成分 2 的解释率分别为 35.9% 和 27.5%, 累计解释率为 63.5%. 主成分 1 主要与 TN、DTN、NO₃-N、EC、WT 等理化指标和氮元素指标相关性较高. 主成分 2 主要与 TP、DTP、SRP、TUR、DO、pH 等理化指标和磷元素指标相关性高. 雨前样点在 PCA 图上较为分散, 样点间水环境特征差异较大; 雨后样点在 PCA 图上较为集中, 样点间水环境特征差异较小, 影响雨后水质状况的指标主要为 TP、DTP、SRP、TUR(图 5).

3 讨 论

3.1 武汉东湖表层沉积物氮磷分布特征分析

此次调查结果显示, 武汉东湖表层沉积物氮磷含量处于重度污染水平. 受长期沿湖排污影响, 加之水体流动性较差, 污染物不易扩散, 污染物沉积造成东湖底泥污染严重^[18]. 有研究报道东湖内源污染对氨氮、TN 和 TP 等负荷的贡献比例基本超过 30%^[19]. 此次调查也发现表层水体总磷与沉积物总磷正相关, 且雨后水体总磷质量浓度较雨前受沉积物总磷的影响更大. 因此底泥内源性磷释放对东湖水质的影响不容忽视.

在空间上, 汤菱湖、团湖、后湖表层沉积物中全氮含量较高, 水果湖和喻家湖表层沉积物中总磷含量较高. 武汉市近城区相对主城区建设用地较

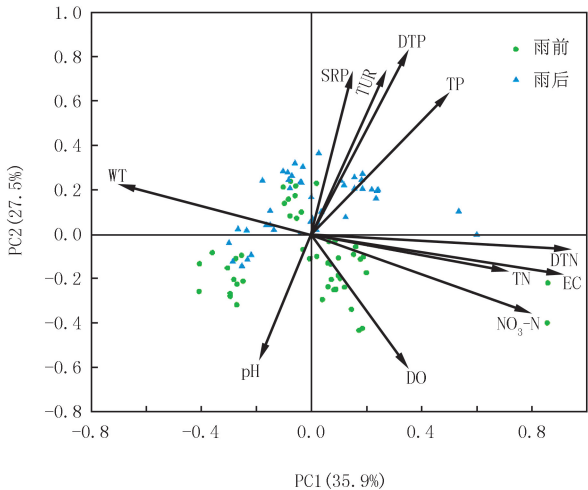


图5 降雨前后武汉东湖水环境指标主成分分析

Fig.5 Principal component analysis of water environment indexes of Wuhan East Lake before and after rainfall

少,农用地较多,不同土地利用类型与湖泊沉积物各指标有一定的相关性^[20].汤菱湖(农业用地:1.84 km²,居住用地:0.34 km²)、团湖(农业用地:1.98 km²,居住用地:0.27 km²)和后湖(农业用地:9.53 km²,居住用地:1.62 km²)湖区农业用地较多,以传统农耕为主,精耕细作,过量的化肥残留在土壤中,经浇水灌溉和雨水冲刷进入水体,加重水体营养盐负荷.水果湖(农业用地:0.00 km²,居住用地:1.05 km²)和喻家湖(农业用地:0.50 km²,居住用地:2.09 km²)居住用地较多,污染来源更多地来自于生活污水排放^[21].此外,城市建设中会增加多种街道、屋顶等不透水表面,蓄积在表面的污染物可以通过雨水冲刷进入水体,进而影响地表径流.因此污染来源的差异可能是导致东湖表层沉积物氮磷含量空间差异的重要原因.

3.2 降雨前后东湖水质因子差异分析

降雨引起底泥再悬浮且地表径流携带了大量颗粒物入湖,因此降雨后表层水体 TUR 显著升高($P<0.05$),这与前人研究一致^[22].对于 DO 和 pH,雨后 DO 含量和 pH 相比雨前显著降低($P<0.05$).一般情况下,雨前水环境较为稳定,受外界干扰较小,微生物通过呼吸作用平稳降解水体中的有机物,部分细菌通过硝化和反硝化过程降解水中的含氮化合物.这些过程需要消耗水中 DO.随着降雨的发生,地表径流携带有机物和营养盐入湖,湖泊内源性营养盐向水体释放.这些营养物质促进了微生物的繁殖.在微生物的作用下,有机质被分解为有机酸,从而导致水体 DO 含量降低,pH 下降^[23].此外相关研究报道,降雨可能减弱水下光强,抑制浮游藻类的光合作用,在降低 DO 含量的同时,使得水体碳酸盐平衡 $\text{CO}_3^{2-} + \text{H}^+ \rightleftharpoons \text{HCO}_3^-$ 左移,水体中 H^+ 增加,水体 pH 降低^[24].本研究还发现雨后表层水体 TP、DTP、SRP 显著升高($P<0.05$),但 TN、DTN 质量浓度与雨前相比无明显差异($P>0.05$).降雨是水循环过程中的重要组成部分,具有冲刷和稀释的作用,当径流中的污染物含量高于湖泊水体,径流增加了水体负荷,反之能起到稀释水体污染物浓度的作用.雨后表层水体磷素的增加可能是由地表径流携带的面源污染物入湖和沉积物内源磷释放所致^[25].氮的转化途径较多,降雨径流和内源释放输入氮负荷的同时,反硝化作用能去除氮,因此雨后水体 TN 无明显变化,这与前人的研究一致^[11].

主成分分析结果表明,雨后样点水环境特征差异较小,这与降雨过程相关;雨前样点水环境异质性较高,可能是入湖污染物来源和含量差异所致.此外 TP、DTP、SRP、TUR 等 4 个水质指标表现出较强的正相关关系,以上 4 个水质指标同时也是影响雨后水质质量的关键因子.这也进一步表明降雨引起的底泥再悬浮和地表径流携带的颗粒物很可能是导致雨后水体磷素增加的重要原因,降低水体悬浮颗粒物浓度可能是控制雨后东湖水体磷含量的有效途径.

4 结 论

1)东湖表层沉积物的全氮总体处于中度污染水平,全氮含量较高的区域集中在庙湖、汤菱湖、团湖和后湖;总磷总体处于重度污染水平,高总磷含量区域集中在水果湖、喻家湖.

2)与雨前相比,雨后表层水体 TUR、TP、DTP、SRP 显著升高($P<0.05$), $\text{NO}_3\text{-N}$ 、DO 和 pH 显著降低($P<0.05$),TN 和 DTN 无显著性差异($P>0.05$).此外雨后水体总磷质量浓度较雨前受沉积物总磷的影响更大($P<0.000\ 1$).

3)受降雨和地表径流影响,雨后样点水环境特征差异较小,TP、DTP、SRP、TUR 是影响水质质量的关键指标.

附录见电子版(DOI:10.16366/j.cnki.1000-2367.2023.12.19.0001).

参 考 文 献

- [1] 杨桂山,马荣华,张路,等.中国湖泊现状及面临的重大问题与保护策略[J].湖泊科学,2010,22(6):799-810.
YANG G S,MA R H,ZHANG L,et al.Lake status,major problems and protection strategy in China[J].Journal of Lake Sciences,2010,22(6):799-810.
- [2] 史小丽,杨瑾晟,陈开宁,等.湖泊蓝藻水华防控方法综述[J].湖泊科学,2022,34(2):349-375.
SHI X L,YANG J S,CHEN K N,et al.Review on the control and mitigation strategies of lake cyanobacterial blooms[J].Journal of Lake

- Sciences, 2022, 34(2): 349-375.
- [3] 生态环境部. 2022 年中国生态环境状况公报[EB/OL]. [2023-05-30]. https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202305/content_6883708.htm.
- [4] XU H, QIN B Q, PAERL H W, et al. Environmental controls of harmful cyanobacterial blooms in Chinese inland waters[J]. Harmful Algae, 2021, 110: 102127.
- [5] 伍名群, 简永远, 杨江, 等. 贵州省黔东南州城市湖库型饮用水源氮磷污染特征及富营养化风险评价[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2024, 42(1): 55-67.
- WU M Q, JIAN Y Y, YANG J, et al. Nitrogen and phosphorus pollution characteristics and eutrophication risk assessment of urban lake reservoir type drinking water sources in Qiongzhusi Prefecture, Guizhou Province[J]. Journal of Guizhou Normal University(Natural Sciences), 2024, 42(1): 55-67.
- [6] SONG W, LIU X Y, HU C C, et al. Important contributions of non-fossil fuel nitrogen oxides emissions[J]. Nature Communications, 2021, 12: 243.
- [7] 宋高飞, 朱宇轩, 米武娟, 等. 武汉市湖泊浮游动物群落特征及其影响因素[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2022, 50(3): 135-142.
- SONG G F, ZHU Y X, MI W J, et al. Characteristics of zooplankton community and their influencing factors in lakes of Wuhan[J]. Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition), 2022, 50(3): 135-142.
- [8] 王琳芳, 李慧娟, 梁森, 等. 徐州市城市降雨地表径流污染特征分析[J]. 江苏建筑职业技术学院学报, 2023, 23(3): 32-36.
- WANG L F, LI H X, LIANG S, et al. Analysis of pollution characteristics of urban rainfall surface runoff in Xuzhou City[J]. Journal of Jiangsu Vocational Institute of Architectural Technology, 2023, 23(3): 32-36.
- [9] 尹珩, 周超群, 郭文思, 等. 城市湖泊总磷对干湿沉降和地表径流污染的响应研究[J]. 环境污染与防治, 2023, 45(1): 14-18.
- YIN H, ZHOU C Q, GUO W S, et al. The response of urban lake total phosphorus to dry-wet depositions and surface runoff pollution[J]. Environmental Pollution & Control, 2023, 45(1): 14-18.
- [10] 万帆, 甄伟, 吴海涛, 等. 城市地表径流面源污染分析研究: 以武汉市典型下垫面为例[J]. 工业安全与环保, 2022, 48(1): 70-74.
- WAN F, ZHEN W, WU H T, et al. Analysis and research on urban surface runoff non-point source pollution: a case study on typical underlying surfaces in Wuhan[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2022, 48(1): 70-74.
- [11] 钱华, 钱圆, 高芮. 巢湖入湖河流不同污染物对降雨的响应关系分析[J]. 水资源开发与管理, 2023, 9(12): 46-53.
- QIAN H, QIAN Y, GAO R. Analysis of the response relationship between different pollutants in Chaohu Lake inflowing rivers and rainfall[J]. Water Resources Development and Management, 2023, 9(12): 46-53.
- [12] 周波, 李晓光, 童思陈, 等. 辽河流域氮素时空分布及其对土地利用和降雨的响应[J]. 环境科学, 2024, 45(4): 2373-2384.
- ZHOU B, LI X G, TONG S C, et al. Spatial and temporal distribution of nitrogen in the Liaohe River Basin and its responses to land use and rainfall[J]. Environmental Science, 2024, 45(4): 2373-2384.
- [13] 刘文强, 郁达伟, 李昆, 等. 降雨特征对河流断面不同水期的水质影响分析: 以赣江南昌段为例[J]. 环境工程, 2023, 41(8): 91-99.
- LIU W Q, YU D W, LI K, et al. Effects of rainfall characteristics on River Water quality in different water periods: a case study of Nanchang section in the Ganjiang River[J]. Environmental Engineering, 2023, 41(8): 91-99.
- [14] LIU M X, YANG Y Y, YUN X Y, et al. Distribution and ecological assessment of heavy metals in surface sediments of the East Lake, China[J]. Ecotoxicology, 2014, 23(1): 92-101.
- [15] DING L, CHEN K L, CHENG S G, et al. Water ecological carrying capacity of urban lakes in the context of rapid urbanization: a case study of East Lake in Wuhan[J]. Physics And Chemistry Earth, Parts A/B/C, 2015, 89/90: 104-113.
- [16] 谢平, 陈隽, 刘佳睿. 非经典生物操纵驱动从水华向非水华的稳态转化: 来自武汉东湖的全湖验证实验[J]. 湖泊科学, 2023, 35(1): 1-11.
- XIE P, CHEN J, LIU J R. A regime shift from cyanobacterial steady state to non-cyanobacterial one by using non-traditional biomanipulation: a whole lake testing experiment in Lake Donghu, Wuhan[J]. Journal of Lake Sciences, 2023, 35(1): 1-11.
- [17] 万杨, 周小峰, 叶小凡, 等. 浙江省温岭湖漫水库沉积物中营养盐分布及风险评价[J]. 环境化学, 2023, 42(12): 4392-4403.
- WANG Y, ZHOU X F, YE X F, et al. Distribution and risk assessment of nutrients in sediments of Human Reservoir in Wenling City, Zhejiang Province[J]. Environmental Chemistry, 2023, 42(12): 4392-4403.
- [18] 罗明科. 长江中游湖泊柱状沉积物的垂直污染特征[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2016.
- LUO M K. Vertical pollution characteristics of columnar sediments in lakes in the middle reaches of the Yangtze River[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2016.
- [19] 桂梓玲, 彭军, 岳克栋, 等. 大型城市浅水湖泊水环境综合治理: 以武汉东湖为例[J]. 人民长江, 2023, 54(12): 24-33.
- GUAN Z L, PENG J, YUE K D, et al. Analysis on the experience in comprehensive water environment treatment of the large shallow urban lake: Taking East Lake in Wuhan as an example[J]. Yangtze River, 2023, 54(12): 24-33.
- [20] 霍雯蓉, 许峰, 王文荟, 等. 武汉城区湖泊水质时空差异及其与污染源的空间关联分析[J]. 安全与环境工程, 2022, 29(2): 132-140.
- HUO W R, XU F, WANG W H, et al. Analysis of spatial and temporal differences of lake water quality and its spatial correlation with pollution sources in Wuhan city[J]. Safety and Environmental Engineering, 2022, 29(2): 132-140.
- [21] 郭雪蕊. 基于水动力学的武汉市东湖水质模拟[D]. 西安: 西安理工大学, 2018.

GUO X R. Water quality simulation of east lake in Wuhan based on hydrodynamics[D]. Xian: Xian University of Technology, 2018.

[22] 辛苑, 卢铁东, 申佩弘, 等. 强降雨对沙河水库的水质及其藻类群落结构的影响[J]. 环境科学学报, 2022, 42(3): 6-19.

XIN Y, LU T D, SHEN P H, et al. Effects of heavy rainfall on water quality and algal community structure in Shahe Reservoir[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022, 42(3): 6-19.

[23] 张彦, 邹磊, 梁志杰, 等. 暴雨前后河南北部河流水质分异特征及其污染源解析[J]. 环境科学, 2022, 43(5): 2537-2547.

ZHANG Y, ZOU L, LIANG Z J, et al. Differential characteristics and source identification of water quality of the rivers in northern Henan before and after rainstorm[J]. Environmental Science, 2022, 43(5): 2537-2547.

[24] 李飞鹏, 陈蒙蒙, 贾玉宝, 等. 气象因素对封闭浅水湖泊浮游藻类生长和分布影响[J]. 水生态学杂志, 2019, 40(5): 55-62.

LI F P, CHEN M M, JIA Y B, et al. Effects of meteorological factors on growth and distribution of phytoplankton in an enclosed shallow lake[J]. Journal of Hydroecology, 2019, 40(5): 55-62.

[25] 陈焰, 夏瑞, 曾思栋, 等. 城市河流水体污染变化特征及其对降雨的响应关系: 以新凤河流域为例[J]. 中国农村水利水电, 2022(11): 153-158.

CHEN Y, XIA R, ZENG S D, et al. Variation characteristics of water pollution and its response to rainfall in urban rivers: a case study of Xinfeng River Basin[J]. China Rural Water and Hydropower, 2022(11): 153-158.

Response of water quality of urban eutrophic lakes to rainfall: a case study of Wuhan East Lake

Hu Shenghua¹, Li Xin², Li Xiaohui², Sun Zitong³, Zhou Han'e³, Xiong Xiong², Wu Chenxi²

(1. Wuhan Bridge Engineering Co., Ltd., Wuhan 430071, China; 2. Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China; 3. Wuhan Hangfa Ruihua Ecological Technology Co., Ltd., Wuhan 430063, China)

Abstract: Rainfall is an important way for lake nutrient input. In order to find out the characteristics of water quality changes of urban lakes before and after rainfall, Wuhan East Lake, a typical urban eutrophic lake, was selected as the research object. 27 sampling points were set up in the whole lake. Surface sediment samples were collected, and 11 water quality indicators were monitored before and after rainfalls from September to October 2021. The status of nitrogen and phosphorus pollution in surface sediments and the characteristics of water quality changes in Wuhan East Lake before and after rainfall were identified. The causes of the differences in water quality before and after rainfall were analyzed by linear regression and principal component analysis. The results showed that the average contents of total nitrogen and total phosphorus in the surface sediments of Wuhan East Lake were 4 065 mg/kg and 683 mg/kg, respectively, which were generally at a severe pollution level. Compared with before rain, the turbidity, total phosphorus, dissolved total phosphorus and active phosphate in the surface water increased significantly after rain ($P < 0.05$), and dissolved oxygen, pH and nitrate nitrogen decreased significantly ($P < 0.05$), but there was no significant difference in total nitrogen and dissolved total nitrogen ($P > 0.05$). The increase of phosphorus in surface water after rainfall might be caused by non-point source pollutants carried by surface runoff and the release of endogenous phosphorus in sediments caused by runoff. The reason for no significant change in total nitrogen content after rain might be denitrification. At the same time, the organic pollutants carried by rainfall runoff aggravated the consumption of dissolved oxygen by microorganisms, and organic matter was decomposed into organic acids, which was also one of the important reasons for the decrease of pH. In addition, rainfall could cause the decrease of light intensity, and the decrease of dissolved oxygen and pH might be related to the inhibition of photosynthesis of phytoplankton.

Keywords: urban lake; East Lake; surface sediments; rainfall; water quality differences

[责任编辑 刘洋 赵晓华]

表 S1 沉积物综合污染指数评价标准

Tab. S1 Evaluation standard of sediment comprehensive pollution index

S_{STN}	S_{STP}	FF	等级
<1.0	<0.5	<1.0	清洁
1.0~1.5	0.5~1.0	1.0~1.5	轻度污染
>1.5~2.0	>1.0~1.5	>1.5~2.0	中度污染
>2.0	>1.5	>2.0	重度污染

表 S2 武汉东湖表层沉积物污染指数

Tab. S2 Pollution index of surface sediments in Wuhan East Lake

类别	S_{STN}	S_{STP}	FF
最小值	0.53	3.87	3.45
最大值	4.35	9.83	7.94
平均值	1.14	7.39	6.04
标准差	0.71	1.61	1.22
污染等级	中度	重度	重度