

长江中下游典型沿江城市内湖沉积物氮磷及有机质分布特征识别与溯源解析*

杨紫瑄¹, 陈 庠², 李一平^{1**}, 王 煜¹, 朱晓琳³, 鲍航通¹, 潘泓哲¹, 章双双¹, 严春敏¹

(1: 河海大学环境学院, 浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 南京 210098)

(2: 南京市江宁区水务局, 南京 211100)

(3: 河海大学设计研究院有限公司, 南京 210098)

摘 要: 湖泊沉积物参与水体元素循环重要环节, 是目前水体富营养化的治理难点之一。为揭示城市内湖沉积物 TN、TP 和 OM 污染特征及来源, 并为水环境综合治理的环境效应评估提供新溯源视角, 采集并测定了长江中下游典型沿江城市黄冈市遗爱湖 25 个点位沉积物柱状样中的 TN、TP 和 OM 含量, 监测湖泊 9 个点位与排口溢流污水水质, 解析湖泊水质与沉积物 N、P 和 OM 空间分布特征, 采用综合污染指数法定量评估沉积物 TN、TP 和 OM 污染风险, 利用聚类分析和化学计量特征相结合的手段对湖泊沉积物 N、P 和 OM 的来源进行定性识别和定量解析。结果表明: 水平分布上, 沉积物 TN、TP 和 OM 含量范围分别在 940~3677 mg·kg⁻¹、323~1667 mg·kg⁻¹ 和 1.03%~7.44%, 空间分布差异大, 且 TN、TP 和 OM 高值区集中在湖泊沿岸及排口附近。垂向上总体表现为表层>中、底层, 表层沉积物中 TN、TP 和 OM 的含量范围分别在 920~4450 mg·kg⁻¹、208~1970 mg·kg⁻¹、2.05~7.48%之间, 表层 TP 含量较中国东部浅水湖泊平均值处于较高水平, 与国内沉积物污染严重的湖泊水平相近。综合污染指数法显示表层沉积物 TP 污染严重, 76%的湖区 TP 处于中度及重度污染状态, TN 污染和综合污染程度较低。聚类分析-化学计量特征结果表明, 溢流污染累积处沉积物 C/N 为 11, 遗爱湖表层沉积物 C/N 值为 10.67, C/P 值在 20.16~190.97 之间, 约 44%的 OM 来源来自藻类死亡后分解释放, 同时受 20%溢流排放和 36%面源污染的共同影响, TP 主要来自面源污染、其次是溢流污水, TN 的来源与 OM 相似。

关键词: 城市内湖; 沉积物; 营养物质; 聚类分析; 化学计量特征; 综合污染指数法

Identification and traceability analysis of the distribution characteristics of nitrogen, phosphorus and organic matter in lake sediments in typical cities of middle-lower reaches of the Yangtze River*

YANG Zixuan¹, CHEN Xiang², LI Yiping^{1**}, WANG Yu¹, ZHU Xiaoling³, BAO Hangtong¹, PAN Hongzhe¹, ZHANG Shuangshuang¹ & YAN Chunmin¹

(1. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China)

(2. Nanjing Jiangning District Water Affairs Bureau, Nanjing 211100, China)

(3. Hohai University Design & Research Institute Co., Ltd, Nanjing 210098, China)

Abstract: Lake sediments play a crucial role in the elemental cycling of water bodies and represent one of the current challenges in managing eutrophication. To uncover the pollution characteristics and sources of total nitrogen (TN), total phosphorus (TP),

* 2024-11-05 收稿; 2025-01-13 收修改稿

国家重点研发计划项目 (2023YFC3208904、2023YFC3208900) 联合资助

**通信作者; E-mail: liyiping@hhu.edu.cn

and organic matter (OM) in the sediments of urban lakes and provide a new **traceability** perspective for assessing the environmental effects of comprehensive water environment management, this study collected and measured TN, TP, and OM contents in sediment points from 25 sites in Lake Yiai, Huanggang City. Water quality at nine lake sampling points and at CSO (Combined Sewer Overflow) Outlet was monitored. Analyze the spatial distribution characteristics of TN, TP, and OM in lake water and sediment. The comprehensive pollution index method was employed to quantitatively assess the pollution risks of TN, TP, and OM in the sediments. Cluster analysis combined with stoichiometric characteristics was used to qualitatively identify and quantitatively analyze the sources of N, P, and OM in lake sediments. The results indicate that: 1) There were spatial differences in the distribution of TN, TP and OM in sediments. The horizontal distribution of TN, TP and OM contents ranged from 940~3677, 323~1667 mg·kg⁻¹ and 1.03%~7.44%, the high-concentration sites of TN, TP, and OM are concentrated along the lake shores and near the discharge outlets. Vertically, the overall trend shows that the surface layer has higher concentrations than the middle and bottom layers. Specifically, the content ranges of TN, TP, and OM in the surface sediments are 920~4450 mg·kg⁻¹, 208~1970 mg·kg⁻¹ and 2.05~7.48%, respectively. 2) The TP content of surface sediments was higher than the average value of shallow lakes in eastern China, and is similar to the level of lakes with serious sediment pollution in China. The comprehensive pollution index method revealed severe TP pollution in the surface sediments, with 52% of the lake area experiencing moderate to severe TP pollution, while TN pollution and overall pollution levels were relatively low. 3) The results of cluster analysis combined with stoichiometric characteristics showed that the C/N ratio in sediments at locations with CSO (Combined Sewer Overflow) pollution was 11, and the C/N ratio in the surface sediments of Lake Yiai was 10.67, with C/P values ranging from 20.16 to 190.97. Approximately 44% of OM originated from the decomposition of algae after their death, while 20% was influenced by overflow discharges and 36% by diffuse pollution. TP primarily came from diffuse pollution, followed by overflow sewage, while the sources of TN were similar to those of OM.

Keywords: Lake Yiai; Eutrophication; Sediment; Nutrients; Overflow; Pollution evaluation

沉积物是湖泊生态系统的重要组成部分，不仅是湖泊水体污染物质(包括 N、P 和 OM)经沉积、吸附等作用后的汇，也是在一定条件下矿化释放大量污染物的源，此过程会不断消耗水中的溶解氧，对水体造成二次伤害^[1~3]。湖泊沉积物中的 N、P 作为重要营养元素，是水生生态系统初级生产的限制因素^[4]，也是水体富营养化的关键限制因子。沉积物 N、P 主要来源于水体中颗粒有机物的沉降累积，沉积物中累积的 N 和 P 易受物理化学因素变化和水动力扰动的影响，二次释放并导致水体富营养化，且在外源污染已被控制时，水体依旧存在富营养化现象^[5]。湖泊沉积物中 OM 受其自身组分影响可矿化为 CO₂、CH₄ 或埋藏在湖泊沉积物中，参与湖泊碳循环的重要环节^[6]。同时沉积物 OM 消耗大量溶解氧，并释放大量的 N、P、S 等营养盐^[7]，影响水体富营养化的发生^[8]。可见，沉积物中 N、P 和 OM 累积危害湖泊生态系统，追溯沉积物中 TN、TP 和 OM 的来源可以为湖泊富营养化的源头管控提供科学依据。

现有关于沉积物中 TN、TP 和 OM 的溯源研究多集中在多学科交叉下新溯源技术的研发和利用，如利用稳定同位素($\delta^{13}C$ 和 $\delta^{15}N$)和生物标记物解析污染物来源。冀文豪等人^[9]在长江中游浅水湖泊采用稳定同位素探究 TOC 和氮素的来源，张永东等人^[10]利用脂肪烃生物标记物定位长江下游浅水湖泊表层沉积物 OM 的来源和成分，袁和中等人^[11]利用碱性磷酸酶活性(APA)识别高富营养化湖泊沉积物有机磷来源。实际分析中，利用化学计量特征(C/N 值和 C/P 值)溯源目前使用广泛的快捷方法，但 C/N 和 C/P 缺乏数理统计结果作为支撑。

遗爱湖水域面积较小，湖泊完全位于湖北省黄冈市建成区内，其湖泊岸线被密集且高度城镇化的建筑群落环绕，集城市景观、休闲娱乐和生态保护作用于一体，是长江中游典型城市内湖^[12-13]。遗爱湖相对封闭，湖区无其他河道汇入，污染入湖方式较为单一，受人类活动干扰较大。近年来遗爱湖区域内生活污水、工业废水总量迅速增加，长期渔业养殖等不合理的开发利用以及环湖多处排口污水的汇入，导致遗爱湖富营养化严重。现有关于长江中下游城市内湖沉积物中 TN、TP 和 OM 分布和溯源的研究，大多仅针对表层沉积物现状进行分析。如刘海^[14]测定了霍邱县城城东湖与城西湖表层沉积物中营养盐含量，利用 C/N 和 C/P 分析其污染水平和来源，但对湖泊沉积物纵向含量分布并未展开研究。周峰^[15]采集了武

汉市龙阳湖和墨水湖两个城市湖泊多点表层沉积物中 TN、TP 和重金属, 并对其生态风险进行评价, 但未深入展开污染溯源。

为全面解析典型城市内湖沉积物 TN、TP 和 OM 分布规律与污染程度, 量化城市内湖沉积物污染来源, 本文以遗爱湖为研究区域, 开展全湖沉积物 TP、TN 和 OM 空间分布特征研究, 对比评价 TN、TP 和 OM 污染水平, 结合常规水质监测数据, 通过聚类分析与化学计量特征相结合的方法定量探讨沉积物 TN、TP 和 OM 来源, 以期为城市内湖富营养化的污染源头控制与治理提供科学数据支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

遗爱湖地处长江中游湖北省黄冈市, 位于东经 114°53'7"~114°55'18", 北纬 30°25'47"~30°27'39"之间, 居长江经济带中游北岸, 为长江中下游沿江平原湖泊。遗爱湖地区多为低山丘陵、湖泊、沼泽地, 属亚热带大陆性季风气候。年平均气温 15.8 °C~17.1 °C, 年平均降雨量 1316.9 mm, 年平均风速 7.8 m/s。常年水位 18.01 m, 平均水深 2.5 m, 平均湖容量为 430 万 m³, 水域面积为 3.16 km²[16]。

遗爱湖是黄冈市城市内湖, 划分为东、西湖两个湖区, 由于湖岸曲折、湖水表层流速仅为 5-10 cm/s, 两个湖区仅通过宽为 6 m 的渠道连通。遗爱湖无河道汇入, 沿湖共 6 个在用排口, 湖泊整体相对封闭, 湖泊主要来水为自然降雨、地表径流、城市截流式合流制污水和地下水补给等, 湖水的输出主要为蒸发、城市和渔业用水。

遗爱湖部分水域水体呈现淡绿色, 根据常规水质监测数据发现湖泊大部分水体 N、P 浓度均超过浅水富营养化湖泊水华爆发阈值(TN 为 0.8 mg·L⁻¹, TP 为 0.05 mg·L⁻¹)[17], 也高于太湖蓝藻水华爆发的 TP 和 TN 控制阈值(TN 为 1.71~1.72 mg·L⁻¹, TP 为 0.05~0.06 mg·L⁻¹)[18]和典型城市内湖武汉南湖水华爆发的临界条件(TN>0.725 mg·L⁻¹, TP>0.146 mg·L⁻¹)[19], 同时湖泊综合营养状态(TLI)[20-21]频繁超过富营养阈值(TLI=50), 存在水华爆发风险。

1.2 样品采集及处理分析

鉴于遗爱湖周边地形地貌基本一致, 综合考虑遗爱湖空间分区、沿湖排污口分布和水体流向等因素, 在遗爱湖湖区内共布设 26 个采样点(图 1), 其中 C1 和 C2 分别为西湖和东湖湖心, ZY、BHY、HGYS、DPWT、YL 分别位于 ZY、BHY、HGYS、DPWT 和 YL 排口下游约 35m 处, LXQ-1 和 LXQ-2 分别为 LXQ 排口上游和下游点位, P1~P17 是根据空间关系布置的加密采样点位。

野外沉积物采样时间在 2023 年 4 月, 采样点为 C1、C2、ZY、BHY、HGYS、DPWT、LXQ-1、LXQ-2 和 P1~P17 共 25 个点位, 使用柱状底泥采样器采集分层泥样, 采集时沉积物柱状样保持垂直, 采集的柱状样每柱深度约 2m, 用配套塞子按照柱状泥样厚度 0~20cm(表层)、20~170cm(中层)和 170~190cm(底层)的分层将沉积物从底部缓缓推出并切割, 用聚乙烯密封袋包装泥样, 使用双层袋子加固, 避光冷藏并及时送回实验室检测。0~20cm 沉积物不仅包括当地土壤母质中的化学元素背景含量, 也包括近年人类活动带来的外源化学物质; 而 170~190cm 沉积物较少受到人类活动的影响, 与当地土壤母质的化学元素背景含量相近[22]。主要测定项目为总氮(TN)、总磷(TP)和有机质(OM)含量, 分别采用凯氏法(HJ717-2014)[23]、碱熔-钼锑抗分光光度法(HJ632-2011)[24]和重铬酸钾容量法测定[25]。

湖泊水质野外采样频率为 2022 年 12 月至 2023 年 12 月期间每月一次, 采样点位为 YL、ZY、BHY、DPWT、HGYS、LXQ-1 和 LXQ-2 共 7 个溢流排口附近点位、C1 西湖湖心和 C2 东湖湖心。利用采水器在每个采样点采集表层 30cm~50cm 的水样并保存于 500ml 采样瓶中, 避光冷藏并于当天运回实验室。

选取 2023 年某次降雨量为 12mm 的降雨事件数据, 此次降雨事件下 6 个排口均存在溢流现象, 使用带刻度的桶采集湖泊与溢流期间各排口水样, 并用 500ml 采样瓶收集水样, 水样收集后立即冷藏保存, 次日进行水质分析。水样测定指标为 TP、TN 等指标, 实验分析方法均参考《水与废水监测分析方法》[26](第四版)和 GB11893-89 国家标准[27]。

1.3 沉积物污染水平评价方法

对于沉积物中的营养盐污染, 国内外尚未建立统一的沉积物营养盐污染评价的标准和方法, 目前常

用的沉积物状况评价方法有富集系数法、有机指数法和污染指数法^[14,15]等，其中富集系数法常用于沉积物中重金属的评价、有机指数法仅计算沉积物中的有机物污染情况，而综合污染指数法能够用TP和TN两个指标较为全面且简便地计算、对比和综合评价沉积物污染情况，因此本研究采用综合污染指数法对沉积物中N、P的污染状况进行评价。

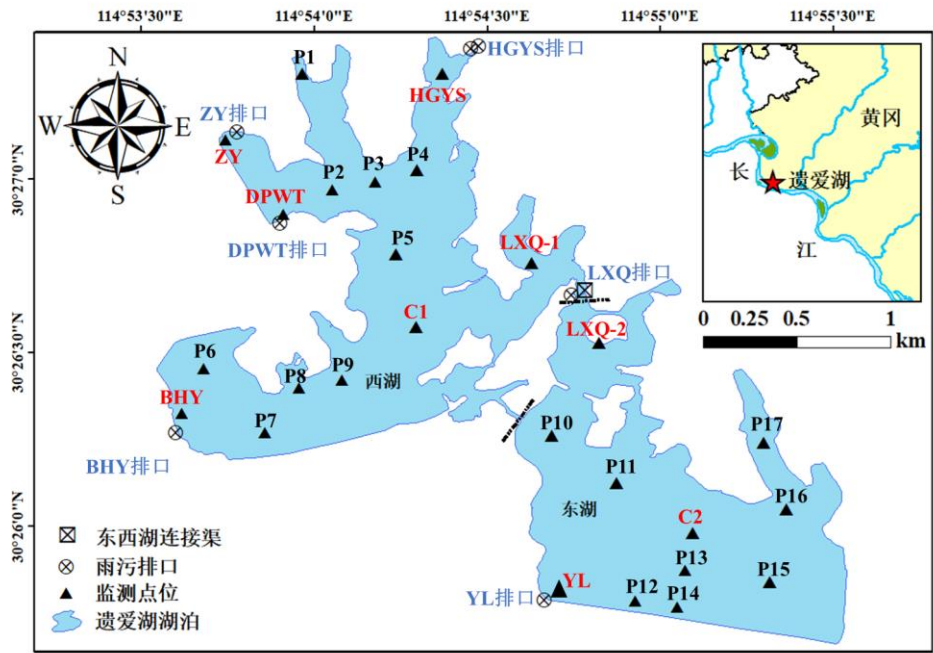


图 1 采样点位示意图

Fig. 1 Location of the sampling sites in study area

采用综合污染指数法^[14]评价沉积物TN、TP污染程度，由单项污染指数公式计算综合污染指数(FF)。根据评价标准(见表 1)，进行综合污染程度分级^[14]。

污染指数计算公式如下：

$$S_i = \frac{C_i}{C_s} \tag{1}$$

$$FF = \sqrt{\frac{F^2 + F_{max}^2}{2}} \tag{2}$$

式中， S_i 为单项评价指数， C_i 为评价因子i的实测含量； C_s 为评价因子i的标准含量，目前国家尚未针对沉积物制定TN、TP的评价标准，本文以遗爱湖2023年底层沉积物中TN、TP的均值作为基准值，TN的 C_s 取1500 mg·kg⁻¹，TP的 C_s 取630 mg·kg⁻¹；FF为综合污染指数；F为2项评价因子的评价指数平均值(S_{TN} 和 S_{TP} 的平均值)； F_{max} 为最大单项评价指数(S_{TN} 和 S_{TP} 的最大值)。

表 1 沉积物污染指数评价标准

Table 1 Standard of comprehensive pollution index in sediments

等级	污染指数	污染程度
I	<0.5	清洁
II	0.5~1.0	轻度污染
III	1.0~1.5	中度污染
IV	≥1.5	重度污染

1.4 数据处理

用 Excel2021 软件完成沉积物营养盐和水质数据的基础处理，如计算平均值、最小值、最大值等描述性数据；采用 SPSS21 软件对遗爱湖全湖沉积物之间、排口处沉积物-排口下游湖泊水质-溢流污水之间的 TN、TP 和 OM 含量进行 Pearson 相关性分析；使用 Origin 软件绘制水体、沉积物指标的柱状图、箱型图、散点图和基于欧几里得(Euclidean)距离的系统聚类分析图。沉积物指标进行系统聚类分析前，需要标准化处理指标，然后对标准化后的数据进行系统聚类分析；利用 ArcGIS10.5 软件中地统计分析功能，对全湖表层沉积物的 C/N 值和 C/P 值进行反距离加权插值计算并绘图。

2 结果与讨论

2.1 湖泊水质与溢流排口水质分布规律

遗爱湖水质监测结果见图 2 和图 3。湖泊水质 TP 浓度范围为 0.04~0.12 mg·L⁻¹，TN 浓度范围在 1.00~2.15 mg·L⁻¹，COD_{Mn}（高锰酸盐指数）浓度范围在 3.75~5.92 mg·L⁻¹。水质监测结果显示遗爱湖水体 TN、TP、NH₃-N 和 COD_{Mn} 超标严重，且位于合流制溢流(CSO)排口上游的 LXQ-1 点位的 TN、TP、NH₃-N 和 COD_{Mn} 等均处于较低水平。在汛期降雨的稀释作用下，湖泊 TN、NH₃-N 等指标优于非汛期。遗爱湖 COD_{Mn}、溶解氧和 Chl-a 在汛期水质更差，汛期遗爱湖 Chl-a 含量显著增加(P < 0.05)，溶解氧含量显著降低(P < 0.01)，湖泊富营养化风险升高。

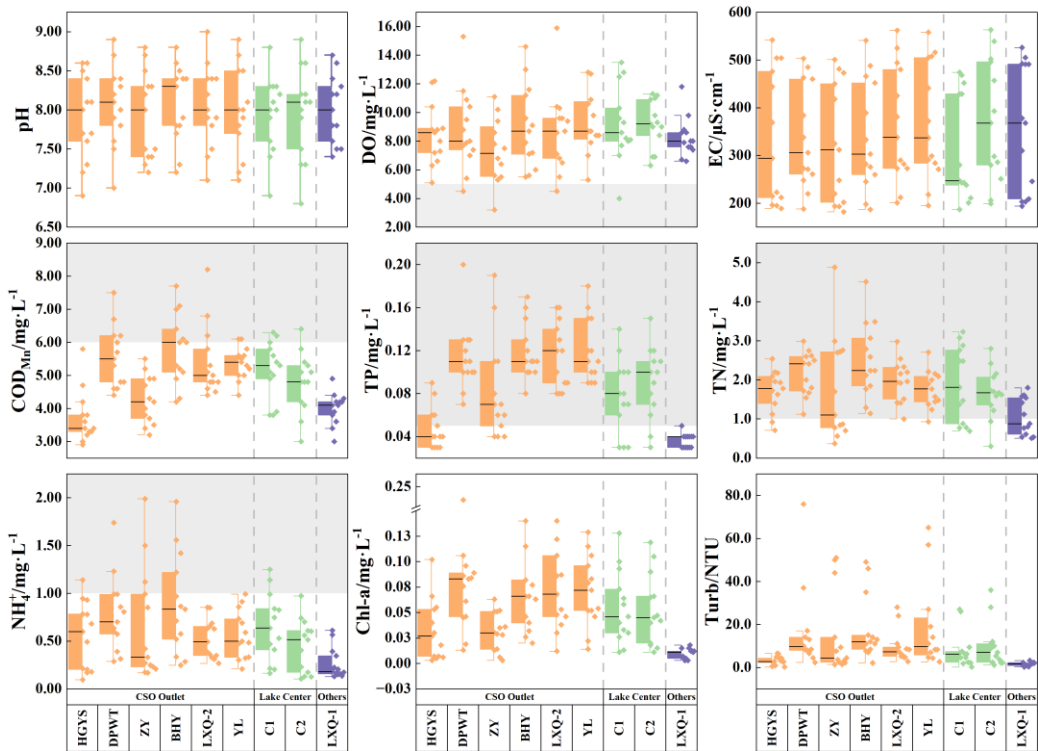


图 2 遗爱湖水质水平分布(灰色为未达到地表水Ⅲ类标准的范围)

Fig 2 The horizontal distribution of water quality in Lake Yiai(The gray areas represent the scope where the water quality does not meet the Grade III standards for surface water)

遗爱湖流域的排水体制为截流式合流制，排污口前设置分流井以减少溢流污染带来的冲击。在降雨量为 12 mm 的中雨事件下，沿湖排口均出现溢流现象。降雨溢流期间 6 个排口水质差异较大（表 2），TP 浓度在 0.52~1.04 mg·L⁻¹ 之间波动、TN 浓度在 7.14~13.54 mg·L⁻¹ 之间波动、COD_{Cr} 浓度在 33.55~46.78

mg·L⁻¹ 之间波动、NH₃-N 浓度在 6.13~10.76 mg·L⁻¹ 之间波动、SS 浓度在 21.00~87.75 mg·L⁻¹ 之间波动，其中 BHY 排口的 TP 的浓度可达 1.04 mg·L⁻¹，HGYS 排口的 TN 浓度可达 13.54 mg·L⁻¹。BHY 和 HGYS 排口溢流期间水质 N、P 浓度最高，ZY、LXQ 排口的浓度最低。计算该场次降雨下排污口溢流的 TP、TN 负荷分别为 30.83、364.08 kg。

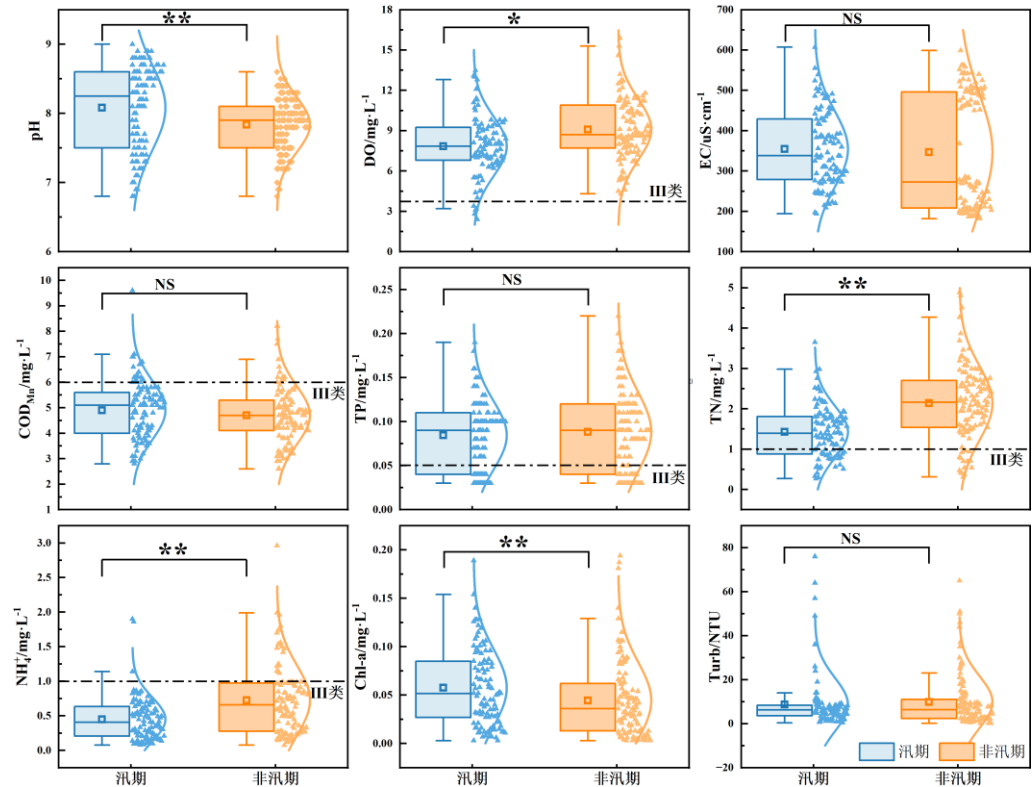


图 3 遗爱湖水质时间分布特征

Fig 3 Temporal Distribution Characteristics of Water Quality in Lake Yiai

表 2 遗爱湖及沿湖排口溢流污水水量水质特征

Table 2 Average nutrient content of surface sediments from different lakes

采样点	溢流量/t	TP/ mg·L ⁻¹	NH ₃ -N/ mg·L ⁻¹	TN/ mg·L ⁻¹	COD _{Cr} / mg·L ⁻¹	SS/ mg·L ⁻¹
YL	12351	0.65	6.13	7.14	34.00	21.00
BHY	6634	1.04	10.67	11.13	40.00	24.00
ZY	6448	0.52	4.75	5.34	35.36	29.55
溢流排口						
DPWT	2851	0.84	8.85	9.54	38.00	31.00
HGYS	4536	0.95	10.76	13.54	33.55	21.55
LXQ	4349	0.83	6.19	9.06	46.78	87.75
均值	6864	0.86	8.73	10.13	38.28	35.81

2.2 湖泊沉积物 TN、TP 和 OM 空间分布特征

遗爱湖沉积物中 TP、TN 和 OM 含量分布如图 4 所示。从水平空间分布上看，遗爱湖沉积物 TN、TP 和 OM 均处于较高水平，其均值分别为 1939 mg·kg⁻¹ 和 821 mg·kg⁻¹ 和 3.46%。沉积物 TN 含量范围在 940~3677 mg·kg⁻¹ 之间，变异系数为 33%；TP 含量范围在 323~1667 mg·kg⁻¹ 之间，变异系数为 35%；OM 含量范围在 1.03%~7.44% 之间，变异系数为 38%。东、西湖沉积物 N、P 和 OM 分布不均，西湖 TN(1948

mg·kg⁻¹)和 OM(3.58%)含量均值高于东湖的 TN(1928 mg·kg⁻¹)和 OM(3.31%)含量,东湖 TP(897 mg·kg⁻¹)含量高于西湖(762 mg·kg⁻¹)。

全湖沉积物 N、P 和 OM 含量最大值均在 BHY 点位,最小值均在 HGYS 点位。位于排口上游的 LXQ-1 表层沉积物 TN、TP 和 OM 含量明显低于下游,排口下游 LXQ-2、P10 和 P11 表层沉积物 TN、TP 和 OM 含量呈沿程降低的趋势,即 LXQ-2>P10>P11>LXQ-1,说明污水排放影响下游沉积物 TN、TP 和 OM 分布,且主要水源为降雨的水体在干旱天气中流速较慢,营养物质在聚集和沉淀过程中会逐渐累积;湖心区远离岸边受面源影响较小,西湖湖心 C1 的 TN、TP 和 OM 水平始终高于东湖湖心 C2,遗爱湖西湖排口分布密集,东湖排口分布较少,表明排口排污带来的扰动能够持续向下游影响;HGYS 点位附近种植大量水生植物以建设湖滨生态缓冲带,其沉积物中 TN、TP 和 OM 的含量在全湖沉积物柱状样中处于较低水平,且在 12mm 降雨事件中 HGYS 排口溢流浓度较其他排口低。对于溢流浓度较高的 BHY 排口,其下游的 P7、P9 处已建设生态缓冲带,但沉积物含量处于中等水平,说明生态缓冲带的污染削减能力有限,无法彻底去除溢流污水带来的影响。

从垂向空间分布上看,沉积物中 N、P 营养盐浓度主要呈现从湖泊水-沉积物交界处自上而下均呈下降趋势,即沉积物中 TN、TP 和 OM 主要集中在表层,表层沉积物中 TN、TP 和 OM 的含量范围分别在 920~4450 mg·kg⁻¹、208~1970 mg·kg⁻¹、2.05~7.48%。与国内多个湖泊沉积物的垂向分布特征相似,均为表层含量大于中层和底层。遗爱湖底层沉积物较少受人类活动影响,其化学元素含量与黄冈当地土壤母质接近。与遗爱湖底层沉积物 TP(629.0 mg·kg⁻¹)和 TN(1511.3 mg·kg⁻¹)含量相比,表层沉积物 TP、TN 含量约为底层沉积物的 1.55 倍和 1.49 倍,说明近年来遗爱湖流域城市发展迅速,居住人口密集,污水排污和城市面源污染导致湖泊表层沉积物 N、P 累积严重。与武汉南湖、东湖子湖(郭郑湖、庙湖)^[28]、广州天河湖^[29]和九江市某典型城市内湖^[30]沉积物 TN、TP 和 OM 呈现一致的垂向富集特征,这可能是因为外源营养盐的输入和藻类增殖为表层沉积物带来大量不易被生物利用的自生钙磷 Ca-P,导致表层沉积物 P 富集^[29],另一方面沉积物中 P 会受地球化学作用而向表层迁移^[28]。郝文超等人^[31]在室内试验中观察到,表层沉积物在氧化过程形成不溶于水的氧化层,这种氧化层在阻止沉积物中的 P 向水体释放的同时也会吸附水体中的可溶性磷结合阴离子,进一步增加了沉积物表层中的 TP 含量^[32]。随着沉积物深度的增加,底层环境趋向于还原,促使了反硝化作用的进行,沉积物中的 N 元素转化为 N₂ 等气体逸散在大气中。

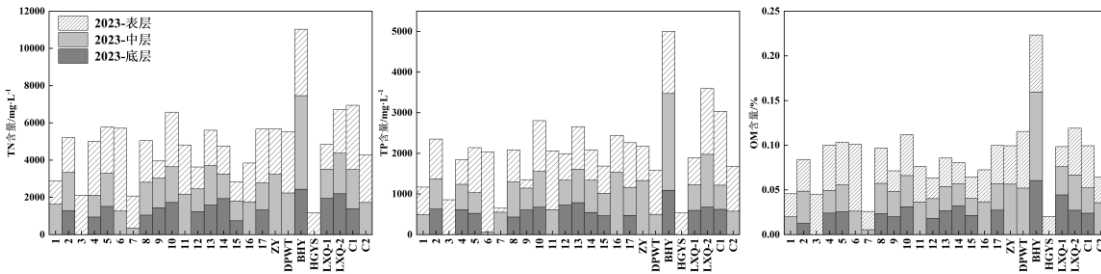


图 4 各点位沉积物中 TP、TN 和 OM 含量的空间分布

Fig 4 Spatial distribution of TP, TN and OM content of the sediments

2.3 湖泊表层沉积物 TN、TP 和 OM 污染评价

根据2.2可知遗爱湖各层沉积物的TN、TP和OM在沉积物表层富集,故对遗爱湖表层沉积物进行污染评价。与国内不同湖泊的表层沉积物TP、TN和OM含量相比(见表3),遗爱湖表层沉积物TP含量普遍较高,均值与同市湖泊龙感湖相近,略低于污染严重的武汉龙阳湖、墨水湖、南湖,但明显高于其他大型湖泊,同时显著高于中国东部浅水湖泊平均水平(TP为454.51mg·kg⁻¹~459.03mg·kg⁻¹)^[33]; TN和OM含量与其他地区相当,处于中等水平。遗爱湖受城市建设影响和闸控作用,水动力条件较弱,对比水域面积较大的湖泊,水体冲刷^[34-35]对沉积物影响较小,表层沉积物中污染物较少通过沉积物-水界面释放至水体,因此相对于太湖、洞庭湖等大型湖泊,水动力条件较弱的城市内湖沉积物污染情况更严重。同时大型湖泊行船频率更高,船行波对沉积物产生了较大扰动,表层沉积物具有更高的释放风险^[36]。

对比我国城市土壤基准值, 遗爱湖表层沉积物TN和TP含量远高于武汉市土壤基准值^[22], TP和TN分别达到1.71倍和1.08倍; 与全国土壤N和P基准值^[22]相比, 遗爱湖表层沉积物TN和TP也处于较高水平, 分别为2.10倍和1.16倍。对比结果表明, 遗爱湖表层沉积物具有P富集的特点。总体上, TP污染是遗爱湖区域的典型环境问题, 也是湖北省以及长江经济带水环境隐患的主要因素, 目前生态环境部已明确将TP确认为长江流域的首要污染物。

表 3 国内不同湖泊表层沉积物 TN、TP 和 OM 平均含量对比

Table 3 Average nutrient content of surface sediments from different lakes

湖泊	类型 ^[13]	水面面积/km ²	所在地区	TP/mg·kg ⁻¹	TN/mg·kg ⁻¹	OM/%	数据来源
遗爱湖	城市内湖	3.16	黄冈	973.1	2246.8	3.89	/
龙阳湖	城市内湖	1.69	武汉	1275.1	553.3	2.36	周峰 ^[15]
墨水湖	城市内湖	3.64	武汉	1661.5	559.4	2.58	周峰 ^[15]
南湖	城市内湖	7.67	武汉	1711.8	3972.1	6.58	魏明荣 ^[37]
龙感湖	城郊内湖	313	黄冈	770.0	3140.0	7.57	陈晓飞 ^[38]
黄大湖	城郊湖泊	299	安庆	652.0	2016.0	8.60	马金玉 ^[39]
石臼湖	城郊湖泊	215	南京	585.0	776.0	3.03	李志清 ^[40]
巢湖	城市湖泊	770	安徽	651.0	1794.0	5.86	苗慧 ^[41]
洞庭湖	城市湖泊	2625	湘鄂	624.0	1054.0	2.24	李芬芳 ^[42]
太湖	城市湖泊	2445	江浙	423.2	1027.5	1.71	张杰 ^[43]

遗爱湖表层各点位的污染指数结果如图 5 所示。综合污染程度与 TN 污染程度均较低, 综合污染指数 FF 在 0.49~2.40 之间, 其中 60% 的点位处于清洁和轻度污染状态, TN 污染指数 S_{TN} 在 0.56~2.38 之间, 与综合污染指数的结果相似; TP 污染程度较高, S_{TP} 在 0.68~2.57 之间, 有 76% 的点位处于中度污染和重度污染状态, 且部分点位虽处于较轻污染状态, 但污染水平处于较高值。总而言之, TP 的污染相对较严重。

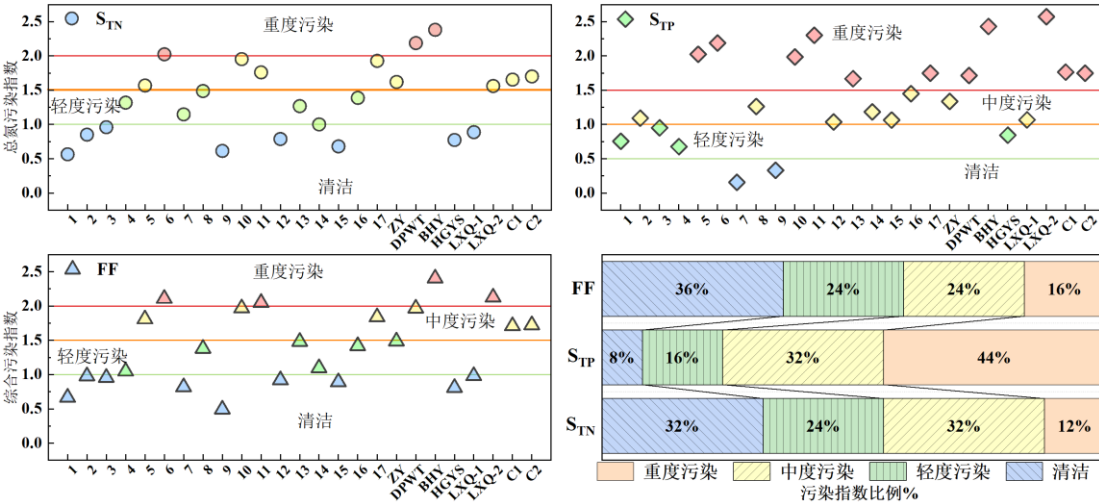


图 5 表层沉积物污染程度分布

Fig 5 Distribution of pollution levels in surface sediments

2.4 湖泊表层沉积物 TN、TP 和 OM 溯源分析

2.4.1 相关性分析 通过沉积物与水体 TN、TP 和 OM 间相关性分析可以推测其的来源, 元素含量之间相关性越高, 其来源越相近。表 4 显示全湖沉积物的 TN、TP 和 OM 两两之间在 $P < 0.01$ 水平上显著正相关), 说明整体上遗爱湖 TP、TN 和 OM 之间具有相似的污染来源, 或者其在湖体中的迁移转化过程

具有一定相似性^[41]。

表 4 遗爱湖水体、沉积物及溢流污水间相关性

Table 4 Correlation between water bodies, sediments and overflow sewage in Lake Yiai

相关性		全湖沉积物			排口处表层沉积物			排口处湖泊水质			溢流污水水质		
		OM	TN	TP	OM	TN	TP	COD _{Mn}	TN	TP	COD _{Cr}	TN	TP
全湖/排口处 表层沉积物	OM	—	0.95**	0.80**	—	0.97**	0.78	0.95*	0.81	0.97**	0.55	-0.31	0.12
	TN		—	0.85**		—	0.66	0.89*	0.80	0.87	0.34	-0.29	0.12
	TP			—			—	0.86	0.68	0.87	0.91*	-0.14	0.28

**在 0.01 级别（双尾）相关性显著；*在 0.05 级别（双尾）相关性显著；表中仅全湖沉积物之间做相关系分析时，行标题表示全湖沉积物，其他分析情况均表示排口处表层沉积物。

2.4.2 聚类分析 为进一步探究人类活动对表层沉积物 TN、TP 和 OM 分布的影响，对遗爱湖 25 个沉积物柱状样的表层 TN、TP 和 OM 含量进行 Q 型聚类分析。25 个点位进行系统聚类后可分成 3 个组别(图 6)，其中组 1 包括 BHY 排口、DPWT 排口和排口下游的 P5、P6。BHY 和 DPWT 点位长期受到排口溢流污水输入的影响，污染累积严重，而 P5、P6 点位分别位于排口下游的湖心区和湖湾区，水动力较弱，水体流动性不强，污染物易聚积，表明该组表层沉积物 TN、TP 和 OM 污染主要来源于溢流污染输入影响下污染的累积；组 2 包括 ZY 排口及其下游点位、LXQ 排口及其下游点位、湖心 C1、C2、P8、P16 和 P17。ZY 与 LXQ 排口、湖心 C1、C2 等点位均未在排口周围布设生态缓冲带或种植沉水植物，且整体上距离排口较远，说明该组代表受人类活动影响较小的情况；组 3 包括 YL 排口下游点位、HGYS、LXQ-1 和 P1、P7、P9。HGYS、P7、P9、P14 和 P15 点位均有布设生态缓冲带，P1 和 LXQ-1 虽上游无排污口，但采样点位靠近岸边，污染来源以城市面源污染入湖或水生植物残体为主。

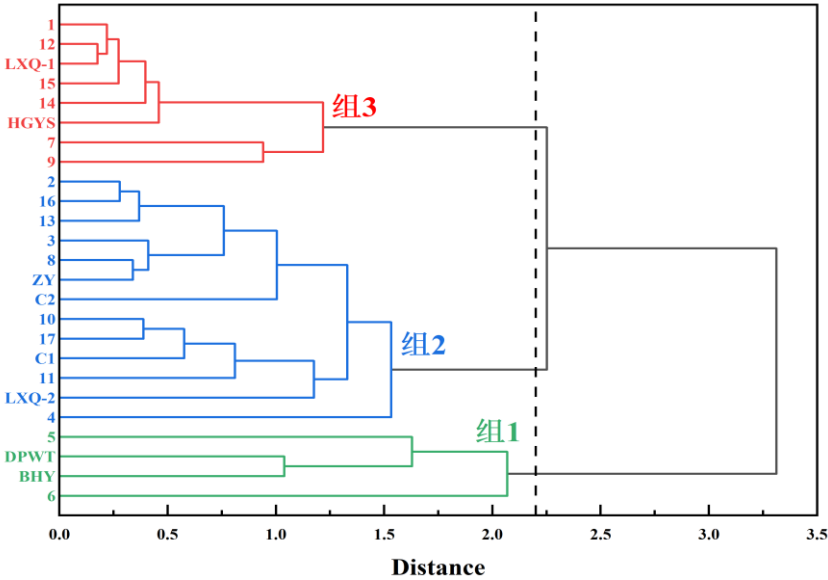


图 6 基于表层沉积物 TN、TP 和 OM 含量的遗爱湖聚类分析

Fig 6 The hierarchical cluster analysis of Lake Yiai based in the TN, TP and organic matter content in surface sediment

2.4.3 C、N、P 化学计量特征分析 沉积物具有相对稳定的生态化学计量比^[44],但水文过程、植物群落类型和环境变化等多种因素密切影响着 C、N、P 元素的平衡关系^[45]。从生物沉积角度来看，湖泊沉积物不同来源通常具有不同的 C/N 值，一般有纤维束植物碎屑的 C/N 值大于 20，无纤维束植物的 C/N 值为 4~12，浮游动物 C/N 值小于 7，浮游植物 C/N 值为 6~14，沉水植物 C/N 值为 13.2~18.6，藻类 C/N 值为

4~10。沉积物 C/N > 10 时认为其中有机物主要来自陆源输入, C/N < 10 时有机物主要来自内源释放, C/N 为 10 时内、外源有机物基本达到平衡状态^[44]。因此, C/N 可以用来区分湖泊沉积物中 OM 的来源。遗爱湖表层沉积物中 C/N 值变幅为 4.80~16.41, 平均值为 10.67, 全湖约 56% 的湖区沉积物 C/N 大于 10, 说明遗爱湖内源释放与外源输入对表层沉积物的 OM 累积贡献相近。

表层沉积物 C/N 值高值区主要分布在遗爱湖沿岸与湖汊区, 受湖体水动力特征和人类影响较大。湖泊主要水源为降雨, 晴天水动力滞缓, 污染入湖后易累积。雨天溢流排口释放大量高浓度污水, 这些污染物主要源自管道内部长期积累的沉积物^[49], 排放后 COD_{Cr} 与 SS 等污染物受自身重力作用快速沉降^[48], 易累积在沿岸排口附近。南昌城市内湖象湖和前湖^[51]受纳大量市政污水、工业废水且湖泊水源不足, 沉积物 C/N 值同样均处于较高水平, 平均值分别为 15.94 和 15.96。霍邱县城西湖和城东湖^[14]C/N 高值区位于湖泊水动力条件差、换水周期长的城西湖西北部。城东湖西南部陆源 OM 进入湖区后无法迅速分解且难以迁移, 造成局部 C/N 值较高, 对于相对封闭的城市湖泊, 点源或局部排污对沉积物 TP 含量的影响非常显著^[29]。遗爱湖表层沉积物 C/N 值低值区位于西湖湖心 C1(4.8)、东湖湖心 C2(7.55)等点位, 且沉积物 C/N 低值均处于湖泊藻类 C/N 值(4~10)内, 说明 C/N 值低值区 OM 更多源于藻类分解后的内源释放^[47]。

C/P 值是反映沉积物中 TOC 和磷化合物分解速率的重要指标^[53], 前人研究表明沉积物 C/P 值较高的区域可能存在严重的排污问题或水生生物死亡、分解现象^[52,53], 植物调亡会导致生物中的 P 快速分解释放, 尤其是活性较高的 Fe/Al-P 和 OP^[42,43]。遗爱湖表层沉积物 C/P 值在 20.16~190.97 之间, 平均值为 62.12, 西湖 C/P 均值(71.77)高于东湖 C/P 均值(47.65), 变异系数达 58%。点位 P7 种植大量水生植物以构建生态缓冲带, 其 C/P 为全湖最高值 190.97, 与前人在挺水区沉积物^[54]观察所得 C/P 值(222.19)相近。与中国表层土壤^[55]C/P 值(136.0)相比, 遗爱湖 C/P 值(62.12)远小于全国平均水平, 仅为全国表层土壤水平的 46%, 遗爱湖 C/N 值(10.67)同样小于中国表层土壤(14.4), 表明和中国表层土壤相比, 遗爱湖表层沉积物具有富 P、N 而少 C 的特点。

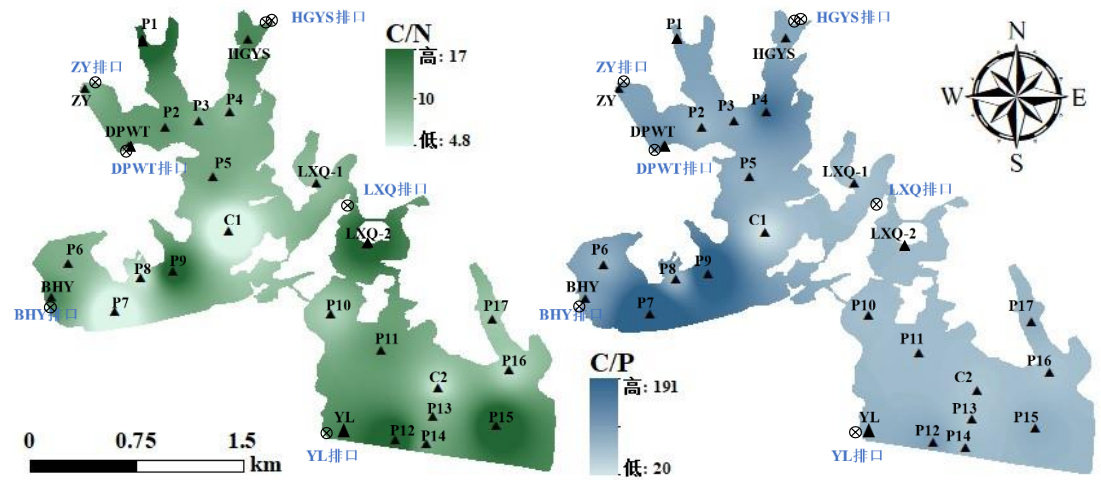


图 7 表层沉积物的 C/N、C/P 空间分布特征

Fig 7 Surface spatial distribution characteristics of sediment C/N ratio and C/P ratio

根据聚类结果所划分的组 1、组 2 和组 3, 其 C/N 值分别为 11.01、9.41 和 12.55, C/P 值分别为 60.28、49.41 和 83.70。代表溢流污染的组 1(C/N = 11.01)和沿湖排口(平均 C/N = 12.03)大于全湖平均 C/N 值(10.67), 说明溢流污染导致排口及其下游弱水动力区 OM 累积。组 1 的 C/P(60.28)处于较高水平, 且与沿湖排口下游 C/P(61.35)相近, 表明 TP 累积同样受溢流污染影响; 代表内源释放的组 2 其 C/N 为 9.41, 且大部分点位 C/N 值与湖泊藻类 C/N 值(4~10)结果一致, 说明组 2 的表层沉积物 OM 主要来源于藻类分解后的内源释放; 组 3 受城市面源入湖污染和水生植物残体影响(C/N = 12.55, C/P = 83.70), 其 C、N、

P 化学计量特征值在 3 组间均为最高。组 3 点位主要分布在遗爱湖沿岸, C/N 和 C/P 值远高于西湖湖心 C1(C/N=4.8)和东湖湖心 C2(C/N=7.55), 说明大量面源污染进入水体无法迅速分解和生态缓冲带中的水生植物残体共同累积在湖泊沿岸。组 3 的 C/P (83.70)高于组 1(C/P = 60.28), 说明面源污染对沉积物 TP 累积的影响大于溢流污染。

聚类分析结果与化学计量特征的定性识别结果一致, 由分析结果可知, 溢流污染、面源污染和内源释放是遗爱湖表层沉积物中 TN、TP 和 OM 的主要贡献者。TP 主要来自面源污染、其次是溢流污水; TN 的来源与 OM 相似, 根据遗爱湖沿岸排口分布与生态建设区划定定量分析 OM 源自约 36%的面源污染和沿岸生态缓冲带植物残体、20%溢流污染和 44%藻类死亡后分解释放, 内源释放是沉积物 OM 污染的主要来源。

遗爱湖不同区域污染产生的原因各异, 其中溢流污染累积区主要集中在排口下游, 结合遗爱湖流域排水体制, 可结合水质、液位、降雨量等指标提高分流井的溢流闸开启阈值, 进一步降低溢流入河污染负荷。同时在 BHY 等沉积物重度和中度污染点, 采取生态清淤措施; 城市面源污染与水生植物残体区主要分布在湖岸, 建议选取再力花、梭鱼草、鸢尾等本土耐污植物, 构建生态缓冲带; 沉积物内源释放问题主要发生在远离边岸的湖泊敞水区, 需采取有效措施减小遗爱湖换水周期, 并通过种植密刺苦草、轮叶黑藻等本土沉水植物, 构建沉水植物群落。在敞水区沉水植物群落构建工程实施中, 建议实行生态分区方式, 即在植被生长初期, 设置生态网膜, 拦截鱼类并转移底栖鱼类至其他湖区。后期根据植物生长状况定期养护, 清除植物残体与生长过剩植物。对于遗爱湖等封闭型城市内湖而言, 湖泊水动力条件差, 水环境容量较小, 排口点源和城市面源向湖泊输入大量生活生产污染物, 污染物易累积, 因此对于城市内湖的沉积物污染削减需要综合控源截污、内源治理、生态修复、活水保质和长效管控措施, 以实现水生态系统健康。

3 结论

(1)沉积物 TN、TP 和 OM 分布规律具有空间差异性。水平分布上 TN、TP、OM 高含量区多位于排口分布密集的西湖区, 溢流排放与水生植物死亡等变化造成了沉积物 TN、TP 和 OM 的富集。垂向上受水体扰动、城市化进程与氧化还原的影响, 沉积物 TN、TP 和 OM 含量总体表现为表层>中、底层。

(2)与长江中下游湖泊相比, 遗爱湖表层沉积物 TN 和 OM 含量处于中等水平; TP 含量较高, 与其他城市内湖 TP 水平相近, 且高于大型浅水湖泊。综合污染指数法结果显示表层沉积物 TP 污染严重, 76%的湖区 TP 处于中度及重度污染状态, 部分清洁或轻度污染湖区的评估指标也处于较高水平。

(3)表层沉积物 TN、TP 和 OM 分布受溢流排放、面源污染和内源释放影响。TP 主要来自面源污染、其次是溢流污水; TN 的来源与 OM 相似, OM 源自约 36%的面源污染和沿岸生态缓冲带植物残体、20%溢流污染和 44%藻类死亡后分解释放, 内源释放是沉积物 OM 污染的主要来源。基于聚类分析识别, 溢流污染累积下沉积物 C/N 值为 11.01。

(4)遗爱湖表层沉积物污染成因多样, 建议提高沿湖排口溢流阈值以减少入湖污染负荷; 针对沉积物污染严重区域实施生态清淤工程; 结合本土耐污植物, 在湖岸和敞水区构建生态缓冲带与沉水植物群落, 并定期清除植物残体与生长过剩植物, 通过综合施策, 逐步恢复流域生态环境健康。

致谢: 本实验野外采集泥样的工作由江苏省智能环境治理实验基地无锡子基地协助完成, 在此表示感谢。

4 参考文献

- [1]. 李乾岗,田颖,刘玲等.水体中沉积物氮和磷的释放机制及其影响因素研究进展.湿地科学, 2022, 20(01):94-103. Li QG, Tian Y, Liu L, et al. Research progress on the release mechanism of nitrogen and phosphorus from sediments in water bodies and their influencing factors. Wetland Science, 2022, 20(01):94-103.
- [2]. 姜霞,王秋娟,王书航等.太湖沉积物氮磷吸附/解吸特征分析.环境科学,2011,32(05):1285-1291. Jiang X, Wang Q J, Wang S H, et al. Characteristic Analysis of the Adsorption/Desorption of Nitrogen and Phosphorus in the Sediments of Taihu Lake. Environmental Science, 2011,32(5):1285-1291, DOI:10.13227/j.hjkk.2011.05.027.
- [3]. 刘哲哲,倪兆奎,刘思儒等.湖泊沉积物有机磷释放动力学特征及水质风险.环境科学, 2022, 43(06):3058-3065. Liu Z Z, Ni Z K, Liu S R, et al. Kinetic Release Characteristics of Organic Phosphorus of Sediment-water and Water Quality Risks. Environmental Science, 2022, 43(6): 3058-3065

- [4]. Yan Y, Bo G, Hong H, *et al.* Nitrogen and phosphorus in sediments in China: A national-scale assessment and review. *Science of The Total Environment*. Volume 576,2017,Pages 840-849,DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.10.136.
- [5]. Xu D, Chen Y F, Ding S M, *et al.* Diffusive gradients in thin films technique equipped with a mixed binding gel for simultaneous measurements of dissolved reactive phosphorus and dissolved iron. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(18): 10477-10484.
- [6]. Huang, C., Yao, L., Zhang, Y., Huang, T., Zhang, M., Zhu, A., Yang, H., 2017. Spatial and temporal variation in autochthonous and allochthonous contributors to increased organic carbon and nitrogen burial in a plateau lake. *Science of the Total Environment* 603 – 604, 390 – 400.
- [7]. Shen Q S, Liu C, ZHOU Q L, *et al.* Effects of physical and chemical characteristics of surface sediments in the formation of shallow lake algae-induced black bloom . *Journal of Environmental Sciences*, 2013, 25(12): 2353-2360. doi: 10.1016/S1001-0742(12)60325-8.
- [8]. Zhang Y, Song C L, Ji L, *et al.* Cause and effect of N/P ratio decline with eutrophication aggravation in shallow lakes . *Science of the Total Environment*, 2018, 627: 1294-1302. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.01.327.
- [9]. 王从锋, 胡子龙, 杨正健, 丹勇, 赵萍, 郝文超, 聂小芬, 聂睿, 徐刘得, 刘德富. 基于碳氮同位素的澜沧江水库 TOC 来源差异性分析. *环境科学*, 2019, 40(7): 3039-3048.
- Wang C F, Hu Z L, Yang Z J, DAN Yong, *et al.* Analysis of Total Organic Carbon Source Differences Between New and Old Cascade Reservoirs using Carbon and Nitrogen Isotopes. *Environmental Science*, 2019, 40(7): 3039-3048.
- [10]. Zhang Y D, Su Y L, *et al.* Aliphatic hydrocarbon biomarkers as indicators of organic matter source and composition in surface sediments from shallow lakes along the lower Yangtze River, Eastern China. *Organic Geochemistry*. Volume 122, 2018, Pages 29-40.DOI: 10.1016/j.orggeochem.2018.04.009.
- [11]. Yuan H Z, Yuan Q H, *et al.* Biotic regulation of phoD-encoding gene bacteria on organic phosphorus mineralization in lacustrine sediments with distinct trophic levels. *Water Research*. Volume 260,2024,121980. DOI: 10.1016/j.watres.2024.121980.
- [12]. Schueler, T., & Simpson, J. (2001). Introduction: Why urban lakes are different. *Watershed Protection Techniques, Suppl. SPECIAL ISSUE: Urban Lake Management*, 3(4), 747-750.
- [13]. Song, C., Jiang, X., Fan, C. *et al.* High-resolution circa-2020 map of urban lakes in China. *Sci Data* 9, 747 (2022).
- [14]. 刘海,赵国红.霍邱县城湖泊沉积物营养盐分布及污染评价.环境科学,2023,44(05):2583-2591.
- Liu H, Zhao G H. Distribution and Pollution Assessment of Nutrients in the Surface Sediments of Lake in Huoqiu County. *Environmental Science*, 2023, 44(5): 2583-2591.
- [15]. 周峰,李朋,邢新丽等.武汉城市湖泊沉积物氮、磷和重金属分布特征及生态风险评价——以龙阳湖、墨水湖为例[J/OL]. *中国环境科学*:1-8[2023-07-19].
- Zhou F, Li P, Xing X L, *et al.* Distribution characteristics and ecological risk assessment of nitrogen, phosphorus and heavy metals in sediments in urban lakes in Wuhan: A case study of Longyang Lake and Ink Lake[J/OL]. *CHINA ENVIRONMENTAL SCIENCE*:1-8[2023-07-19].
- [16]. 鄂政办发[2012]81号 省人民政府办公厅关于公布全省第一批湖泊保护名录的通知.
- [17]. Xu H, Paerl HW, Qin B *et al.* Determining critical nutrient thresholds needed to control harmful cyanobacterial blooms in eutrophic Lake Taihu, China. *Environment Science & Technology*, 2015, 49, 1051–1059.
- [18]. 曹晶,田泽斌,储昭升,等.太湖蓝藻水华暴发的氮磷控制阈值分析.湖泊科学,2022,34(04):1075-1089.
- Cao Jing,Tian Zebin,Chu Zhaozheng,Niu Yuan,Zheng Binghui.Nitrogen and phosphorus control thresholds of cyanobacterial blooms in Lake Taihu. *J. Lake Sci.*2022,34(4):1075-1089. DOI:10.18307/2022.0403
- [19]. 刘振旗,李建,江善虎,等.武汉南湖水华生消关键因子识别及临界值.水电能源科学,2023,41(12):41-44. DOI:10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20230325.
- Liu Z Q, Li J, Jiang S H, *et al.* Identification of Key Factors and Critical Values for Production and Elimination of Water Bloom in Wuhan South Lake.. *Water Resources and Power*, 2023,41(12):41-44.
- [20]. 宋子豪, 邹伟, 桂智凡, 许海, 蔡永久, 我国常用湖泊营养状态指数研究进展与展望. *湖泊科学*, 2024, 36(4): 987-1000. DOI: 10.18307/2024.0401.
- Song Zihao, Zou Wei, Gui Zhifan, Xu Hai, Cai Yongjiu. Common-used trophic level index in Chinese lakes: Progress and prospects. *Journal of Lake Sciences*, 2024, 36(4): 987-1000. DOI: 10.18307/2024.0401
- [21]. 华兆晖, 李锐, 杨智, 文紫豪, 单航, 丑庆川, 张霄林, 曹特, 2017—2022 年洱海水体营养状态的时空变化趋势及其成因分析. *湖泊科学*, 2024, 36(6): 1639-1649. DOI: 10.18307/2024.0611.
- Hua Z H, Li R, Yang Z, *et al.* The spatiotemporal variation and potential causes for the nutrient status of water in Lake Erhai from 2017 to 2022. *Journal of Lake Sciences*, 2024, 36(6): 1639-1649. DOI: 10.18307/2024.0611.
- [22]. 成杭新,李括,李敏,杨柯,刘飞,成晓梦等.中国城市土壤化学元素的背景值与基准值.地学前缘,2014(03):265-306.
- Cheng H X, Li K, Li M, *et al.* Geochemical background and baseline value of chemical elements in urban soil in China. *Earth Science Frontiers*, 2014(03):265-306.
- [23]. HJ717-2014,土壤质量 全氮的测定 凯氏法.
- [24]. HJ632-2011,土壤 总磷的测定 碱熔-钼锑抗分光光度法.
- [25]. 全国土壤污染状况调查样品分析测试技术规定.国家环境保护总局,2006.107-227.
- [26]. 国家环保总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法. 第 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 38-47.
- [27]. GB11893-89,水质 总磷的测定 钼酸铵分光光度法.
- [28]. 周帆琦,沙茜,张维昊,詹颖菲,何君,杨弯弯,韩峰.武汉东湖和南湖沉积物中磷形态分布特征与相关分析.湖泊科学,2014,26(3):401-409. DOI:10.18307/2014.0310
- Zhou F Q, Sha Q, *et al.* Distribution and correlation analysis of phosphorus fractions in the sediments from the Lake Nanhu and Lake Donghu in Wuhan. *J. Lake Sci.*2014,26(3):401-409. DOI:10.18307/2014.0310
- [29]. 唐梦瑶,周雯,乔永民,等.广州市主要湖泊沉积物磷的赋存形态.水生态学杂志,2023,44(02):54-63.DOI:10.15928/j.1674-3075.202111300399.
- Tang M Y, Zhou W, Qiao Y M, *et al.* Phosphorus Speciation in Sediments of Major Lakes in Guangzhou City. *Journal of Hydroecology*.

2023, 44(2): 54-63. doi: 10.15928/j.1674-3075.202111300399

[30]. 廖文成,熊振楠,江成,等.富营养化城市内湖沉积物营养盐组成特征及污染风险分析.环境污染与防治,2024,46(09): 1280-1286+1294.

Liao CW, Xiong Z N, Jiang C, et al. Analysis of Nutrient Composition Characteristics and Pollution Risk of Sediments in Eutrophic Urban Lakes . *Environmental Pollution and Control*. 2024,46(09): 1280-1286+1294.

[31]. 郝文超,王从锋,杨正健等.氧化还原循环过程中沉积物磷的形态及迁移转化规律.环境科学,2019,40(2): 640-648
Hao W C, Wang C F, Yang Z J, et al. Speciation and Transformation of Phosphorus in Sediments During the Redox Cycle. *Environmental Science*, 2019, 40(2): 640-648.

[32]. 余景芝,王 烜,蔡剑英,等.水动力条件对浅水湖泊沉积物氮磷释放的影响 . 中国环境科学, 2023,43(8):4219-4228.
Yu J Z, Wang X, Cai J Y, et al. Effects of hydrodynamic conditions on nitrogen and phosphorus release from sediments in shallow lakes. *CHINA ENVIRONMENTAL SCIENCE*, 2023, 43(8): 4219-4228.

[33]. 王健,张靖天,符逢宇等.中国东部浅水湖泊沉积物总氮总磷基准阈值研究.生态环境学报, 2014,23(06):992-999.
Wang J, Zhang J T, Zan F Y, et al. Baseline Threshold Study of Total Nitrogen and Total Phosphorus in Sediments from Shallow Lake Lakes in Eastern China. *Journal of Ecology and Environmental Sciences*, 2014,23(06):992-999.

[34]. 赵子豪.洞庭湖水文条件变化对水华发生风险影响模拟研究[学位论文].南昌大学,2022.

[35]. 朱广伟,秦伯强,张路,等.太湖底泥悬浮中营养盐释放的波浪水槽试验.湖泊科学,2005,(01):61-68.

Zhu G W, Qin B Q, Zhang L, et al. Wave Effects on Nutrient Release of Sediments from Lake Taihu by Flume Experiments. *J. Lake Sci.*2005,17(1):61-68. DOI:10.18307/2005.0110

[36]. Hofmann H, Lorke A, Peeters F. The relative importance of wind and ship waves in the littoral zone of a large lake. *Limnology and Oceanography*, 2008, 53: 368-380.

[37]. 魏明蓉,姜应和,张华等.南湖表层沉积物中有机质、氮和磷的污染现状与评价.安徽农业科学,2010, 38(4):2004-2005+2024.

[38]. 陈晓飞,秦双,何乾坤等.龙感湖沉积物营养盐及有机质分布特征与评价.环境科学与技术, 2022, 45(03):81-86.

Chen X F, Qin S, He Q K, et al. Distribution Characteristics and Assessment of Nutrient Salts and Organic Matter in Sediments of Longgan Lake . *Environmental Science and Technology*, 2022, 45(03):81-86.

[39]. 马金玉,王文才,罗千里等.黄大湖沉积物营养盐分布及来源解析.环境工程技术学报,2021,11(04):678-685. doi: 10.12153/j.issn.1674-991X.20200257

[40]. 李志清,吴苏舒,诸晓华等.石臼湖表层沉积物营养盐与重金属分布及污染评价.水资源保护, 2020, 36(02):73-78.

Li Z Q, Wu S S, Zhu X H, et al. Distribution of nutrients and heavy metals in surface sediments of Shijiu Lake and its pollution assessment. *Water Resources Protection*,2020,36(2):73-78..

[41]. 苗慧,沈峥,蒋豫等.巢湖表层沉积物氮、磷、有机质的分布及污染评价.生态环境学报, 2017, 26(12):2120-2125.

Miao H, Shen Z, Jiang Y, et al. Distribution and Pollution Assessment of Nitrogen, Phosphorus, and Organic Matter in Surface Sediments of Chaohu Lake . *Ecology and Environment Sciences*, 2017, 26(12):2120-2125.

[42]. 李芬芳,黄代中,连花等.洞庭湖及其入湖口表层沉积物氮、磷、有机质的分布及污染评价.生态环境学报, 2018, 27(12):2307-2313.

Li F F, Huang D Z, Distribution and Pollution Assessment of Nitrogen, Phosphorus, and Organic Matter in Surface Sediments of Dongting Lake and Its Inlets . *Ecology and Environmental Sciences*, 2018, 27(12):2307-2313.

[43]. 张杰,汪院生,郭西亚等.草型湖区沉积物营养盐分布与污染评价.环境科学,2019,40(10):4497-4504.

ZHANG Jie, WANG Yuan-sheng, GUO Xi-ya, ZHU Jin-ge, DENG Jian-cai. Distribution and Pollution Assessment of Nutrients in the Surface Sediments of a Macrophyte-Dominated Zone in Lake Taihu. *Environmental Science*, 2019, 40(10): 4497-4504.

[44]. YANG Y H, LUO Y Q. Carbon: nitrogen stoichiometry in forest ecosystems during stand development . *Global Ecology & Biogeography*, 2011, 20(2):354-361

[45]. 王骋雯,张勇,张家鑫,等. 再生水补给下湿地沉积物中营养盐空间分布特征. 环境工程, 2023, 41(1): 87-92,104.

Wang C W, Zhang Y, Zhang J X, et al. SPATIAL DISTRIBUTION OF SEDIMENT NUTRIENTS IN A WETLAND WITH RECLAIMED WATER SUPPLEMENT. *ENVIRONMENTAL ENGINEERING* , 2023, 41(1): 87-92,104.

[46]. 刘伟,褚一凡,谭启洋,等.鄱阳湖西侧周边农村水塘夏季表层沉积物氮、磷、有机质分布特征及评价.湖泊科学,2023,35(01):192-202.

Liu W, Chu Y F, Tan Q Y, et.al. Distributional characteristics and evaluation of nitrogen, phosphorus and organic matter in the surface sediments of rural ponds around the western part of Lake Poyang in summer. *J. Lake Sci.*2023,35(1):192-202. DOI:10.18307/2023.0113

[47]. 杨海全,陈敬安,宋以龙,等.草海沉积物有机质空间分布与来源识别.绵阳师范学院学报,2017,36(08):1-9.DOI: 10.16276/j.cnki.cn51-1670/g.2017.08.001.

Yang H Q, Chen J A, et al. Spatial Distribution and Source Identification of Organic Matter in Sediments of Caohai Lake . *Journal of Mianyang Teachers' College*, 2017,36(08):1-9.DOI: 10.16276/j.cnki.cn51-1670/g.2017.08.001.

[48]. Liu, E., Shen, J., Zhang, E. et al. A geochemical record of recent anthropogenic nutrient loading and enhanced productivity in Lake Nansihu, China. *J Paleolimnol* 44, 15 – 24 (2010).

[49]. 房金秀,谢文霞,朱玉玺等.合流制面源污染传输过程与污染源解析.环境科学,2019,40(6):2705-2714.DOI:10.13227/j.hjkk.201812073.

FANG Jin-xiu, XIE Wen-xia, ZHU Yu-xi,et al. Pollutant Transport Analysis and Source Apportionment of the Entire Non-point Source Pollution Process in Combined Sewer Systems. *Environmental Science*, 2019, 40(6): 2705-2714.

[50]. 尚宇,周毅,廖安意,等.雨水管道沉积物沉淀特性及主要污染物含量分布.环境科学,2018,39(08):3696-3703.DOI:10.13227/j.hjkk.201709085.

SHANG Yu, ZHOU Yi, LIAO An-y et al. Sedimentation Characteristics and Pollutant Content Distribution of Storm Drainage Sediments. *Environmental Science*, 2018, 39(8): 3696-3703.

[51]. 郭奔.南昌市象湖、前湖沉积物氮、磷形态分布及其污染评价[学位论文].南昌大学,2024.

[52]. 黄威,靳郑海,涂成琪等.城市河网区河流沉积物磷形态分布特征及释放贡献.环境科学学报,2022, 42(12):171-185.

Huang W, Jin Z H, Tu C Q, et.al. Morphological distribution characteristics and release contribution of phosphorus from river sediments in urban river network area. *Journal of Environmental Science*, 2022, 42(12):171-185. DOI: 10.13671/j.hjkkxb.2022.0130.

- [53]. Missimer, T. M., Thomas, S., & Rosen, B. H.. Legacy Phosphorus in Lake Okeechobee (Florida, USA) Sediments: A Review and New Perspective. *Water*, 2020, 13(1), 39. doi:10.3390/w13010039.
- [54]. 尹德超,王雨山,祁晓凡,等.白洋淀湿地不同植物群落区表层沉积物碳氮磷化学计量特征.湖泊科学,2022,34(02):506-516. Yin Dechao, Wang Yushan, Qi Xiaofan, et al. Stoichiometric characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus in surface sediments of different plant communities in Lake Baiyangdian wetland. *J. Lake Sci.*2022,34(2):506-516. DOI:10.18307/2022. 0212.
- [55]. Tian, H., Chen, G., Zhang, C. et al. Pattern and variation of C:N:P ratios in China's soils: a synthesis of observational data. *Biogeochemistry* 98, 139-151 (2010).DOI: 10.1007/s10533-009-9382-0