

基于长时间序列洪湖总磷变化及关键驱动因子分析

武柯宏*, 陈颖姝, 杨 卫, 周小荃

湖北省水利水电规划勘测设计院有限公司, 湖北 武汉

收稿日期: 2026年7月8日; 录用日期: 2026年8月18日; 发布日期: 2026年8月26日

摘 要

基于2016~2025年洪湖总磷浓度监测数据, 综合评价洪湖总磷浓度年际时空变化特征, 运用Pearson相关分析研究总磷浓度与水位和生态补水量的相关程度, 探究影响洪湖总磷变化的关键水文驱动因子。结果表明: (1) 2016~2025年洪湖总磷总体呈现恶化趋势, 受洪湖退垸还湖的影响, 2020年后洪湖总磷浓度明显上升; (2) 2016年~2025年洪湖总磷浓度与生态补水量呈显著负相关性, 与湖泊水位不存在显著的相关性, 生态补水量是影响洪湖总磷浓度变化的一个关键性驱动因子。

关键词

洪湖, 总磷, 水位, 生态补水量, 相关性分析

Analysis of Total Phosphorus Variation and Its Key Driving Factors in Honghu Lake Based on Long-Term Time Series

Kehong Wu*, Yingshu Chen, Wei Yang, Xiaoquan Zhou

Hubei Water Resources and Hydropower Planning, Survey and Design Institute Co., Ltd., Wuhan Hubei

Received: July 8, 2026; accepted: August 18, 2026; published: August 26, 2026

Abstract

Based on monitoring data of total phosphorus (TP) concentration in Honghu Lake from 2016 to 2025, a comprehensive evaluation was conducted on the interannual spatiotemporal variation

*通讯作者。

文章引用: 武柯宏, 陈颖姝, 杨卫, 周小荃. 基于长时间序列洪湖总磷变化及关键驱动因子分析[J]. 环境保护前沿, 2026, 16(8): 1412-1420. DOI: 10.12677/aep.2026.168142

characteristics of TP concentration. Pearson correlation analysis was applied to examine the correlations between TP concentration and water level as well as ecological water supplement volume, aiming to identify the key hydrological driving factors affecting TP changes in Honghu Lake. The results showed that: (1) From 2016 to 2025, the overall TP concentration in Honghu Lake exhibited a deteriorating trend, and influenced by the project of returning polders to the lake, the TP concentration increased significantly after 2020; (2) During 2016~2025, the TP concentration was significantly negatively correlated with ecological water supplement volume, while no significant correlation was found with lake water level, indicating that ecological water supplement volume is a key driving factor for the variation of TP concentration in Honghu Lake.

Keywords

Honghu Lake, TP, Water Level, Ecological Replenishment Volume, Correlation Analysis

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

洪湖位于四湖流域的下区，长江与东荆河间的洼地中，涉及洪湖市与监利市，是湖北省第一大湖泊，中国第七大淡水湖[1]。洪湖是国家级自然保护区和国际重要湿地，是江汉平原重要的调蓄湖泊和生态屏障，保护价值十分突出。

自 2017 年 4 月以来，中央环保督察组 4 次向湖北指出洪湖水问题，但洪湖水环境和水生态下滑的趋势并未得到遏制，水质逐渐下降至V类，其中总磷作为主要超标因子，已成为洪湖生态环境改善的最大限制性因素。关于洪湖总磷特征及其释放原因分析，国内学者开展了富有成效的研究，如刘昔、厉恩华等对洪湖湿地生态系统稳态转换关键驱动因子阈值进行研究，表明总磷是洪湖湿地生态系统稳态转换的关键驱动因子[2]；周汉娥、陈晓飞等对洪湖营养盐时空分布特征进行研究，结果表明总磷空间分布特征，西北部 > 东北部 > 南部[3]；郑煌、杨丹等分析了洪湖沉积物中不同形态磷含量，结果表明有机磷(OP)是总磷(TP)的主要成分，沉积物中不同形态的磷与洪湖地区人类活动指标(人口、粮食产量、化肥使用量和围网养殖规模)呈正相关[4]。当前国内外学者对洪湖总磷的研究主要集中在释放机理与生态驱动机制等方面，缺少对水文水动力条件的考虑。水文水动力条件是湖泊生态系统的重要驱动因子和控制因素，水位变化是驱动氮磷等营养盐迁移转化的重要因子[5][6]；生态补水可以增加水体的流动性，提升湖泊的水质，改善水生态环境[7]；生态补水量与总磷和综合营养状态指数呈负相关，是影响湖泊水体营养化的另一个关键性驱动因子[8]；张冰辉、肖新综，韩晓东等研究了南水北调东线一期工程调水前后水体的水质变化情况，结果表明调水后，高邮湖因水浅导致水力扰动加剧，总磷浓度激增 77.8%，而深水型湖泊(如南四湖)因水流滞留时间延长，磷的沉降与吸附过程增强，总磷浓度下降[9]；张洪，薛雪等研究了鄱阳湖水位波动及其驱动下沉积物中磷的释放过程，结果表明鄱阳湖水体中 TP 浓度与周期性变化的水位密切相关[10]。因此，研究长时间序列下洪湖总磷浓度与水位、生态补水量的关系，厘清湖泊总磷浓度长期演变规律，对于洪湖环境保护工作具有重要的支撑作用。

本研究基于洪湖 2016 年至 2025 年逐月总磷指标监测数据、洪湖水位数据和新堤排水闸补水数据，采用 ArcGIS 克里金插值法，探讨洪湖总磷时空变化特征，并就总磷浓度与水位和生态补水量的关系运用皮尔逊相关分析法进行分析，以为洪湖总磷浓度进一步改善提供科学指导。

2. 研究区域概况及数据来源

洪湖位于湖北省中南部、荆州市东部，地处四湖下区，紧依长江与洞庭湖隔江相望，水域襟连监利、洪湖两市。洪湖地理范围为东经 113°12'30"~113°29'15"，北纬 29°41'40"~29°58'02"，湖泊水面中心坐标为东经 113°20'13"，北纬 29°51'20"。东西长约 28 km，南北宽约 44.6 km，堤岸线周长 104.5 km，围堤内面积 444.14 km²。洪湖现建有大型通江节制闸两座，一座是新滩口节制闸，它的主要任务是通过河道为洪湖排涝；一座是新堤排水闸，主要功能是抢排四湖流域涝水，运用闸口调度水资源、调节水生态、恢复物种多样性^[11]，洪湖历次灌江纳苗和生态补水，均是依托新堤排水闸进行。

洪湖水域共设置 8 个常规水质监测点(见图 1)，其中国控监测点 4 个，分别为湖心 A、排水闸、湖心 B 和杨柴湖；省控监测点 4 个，分别为蓝田、小港、下新河和桐梓湖。监测指标为《地表水环境质量标准》(GB3838—2002)¹基本项目中除水温、总氮、粪大肠菌群以外的 21 项指标，以及营养状态评价参数叶绿素 a、总磷、总氮、透明度和高锰酸盐指数。

洪湖 2016 年至 2025 年逐月总磷指标监测数据来自于湖北省生态环境厅；洪湖 2016 年至 2025 年逐日水位数据来自湖北省水利厅；洪湖 2016 年以来新堤排水闸逐月补水量数据来自荆州市水利局。

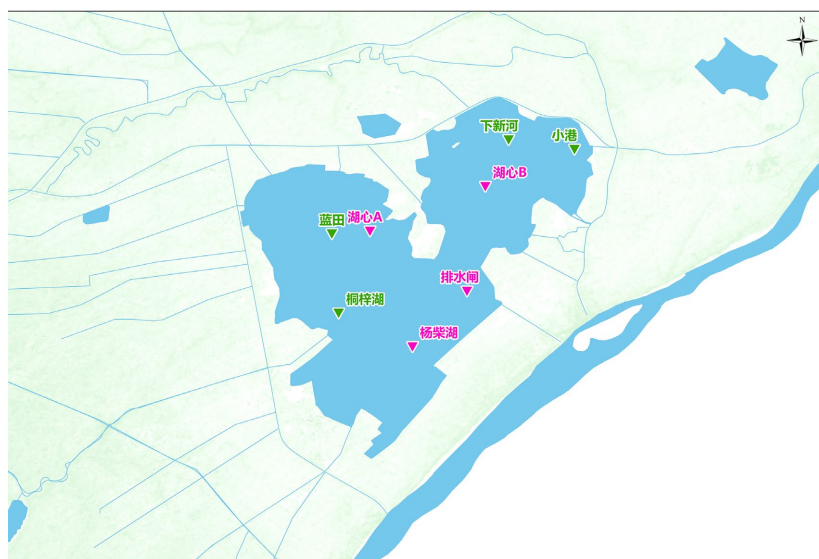


Figure 1. Schematic diagram of water quality monitoring points in Honghu Lake
图 1. 洪湖水质监测点位示意图

3. 研究方法

皮尔逊相关性分析(Pearson Correlation Analysis)，又称为皮尔逊积差相关系数分析，是一种用于衡量两个定量变量之间线性相关程度的统计方法。皮尔逊相关系数，又称积差相关系数，是表达两变量线性相关程度及方向的统计指标。样本相关系数 r 的计算公式：

$$r = \frac{\sum (X - \bar{X})(Y - \bar{Y})}{\sqrt{\sum (X - \bar{X})^2 \sum (Y - \bar{Y})^2}} \quad (1)$$

r 是一个无量纲的统计指标，其取值范围为 $-1 \leq r \leq 1$ 。相关系数小于 0 为负相关，大于 0 为正相关，等于 0 表示不存在相关。相关系数的绝对值越大，表示两变量间的相关程度越密切。

¹https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bzwb/shjbh/shjzlbz/200206/t20020601_66497.htm

样本相关系数 r 是总体相关系数 ρ 的估计值，与其他统计量一样，相关系数也有抽样误差。即使从一个相关系数 $\rho = 0$ 的总体中随机抽样，样本相关系数也往往不等于 0。因此，在算得样本相关系数后，不能仅根据 r 的大小对两变量间是否有关系做出判断，需进一步检验 r 是否来自 $\rho = 0$ 的总体。相关系数的假设检验用 t 检验，计算公式为：

$$t = \frac{|r|}{S_r} = \frac{|r|}{\sqrt{\frac{1-r^2}{n-2}}} \tag{2}$$

计算得到 t 值后，结合自由度 $v = n - 2$ ，查询临界值表，获得代表显著性水平的 p 值。 p 值取值范围为 $0 < p < 1$ ， p 值越小意味着相关性结果显著性水平越高。

r 值、 p 值取值范围与相关性、显著性对应关系见表 1 和表 2。

Table 1. Correspondence between r -value and correlation/significance

表 1. r 值与相关性、显著性的对应关系

r 值范围	相关程度	相关方向
$0.5 < r < 1$	强相关	正向
$0.3 \leq r \leq 0.5$	中度相关	正向
$0 < r < 0.3$	弱相关	正向
0	不相关	无
$-0.3 < r < 0$	弱相关	负向
$-0.5 \leq r \leq -0.3$	中度相关	负向
$-1 < r < -0.5$	强相关	负向

Table 2. Correspondence between p -value and correlation/significance

表 2. p 值与相关性、显著性的对应关系

p 值范围	显著性水平
$p < 0.01$	极为显著
$0.01 \leq p \leq 0.05$	显著
$0.05 < p$	不显著

4. 结果与分析

(1) 洪湖总磷变化情况及其分布特征

选取洪湖 2016 年 1 月至 2025 年 5 月逐月总磷指标监测数据，对洪湖总磷浓度变化过程进行分析(图 2)；2016~2025 年总磷浓度总体呈现恶化趋势，2020 年以前全湖平均总磷浓度多为 IV 类，少数时段达到 III 类，2020 年以后全湖平均总磷浓度多处于 V 类，主要原因可能是 2019 年 7 月洪湖启动大范围退垸还湖工作[12]，大规模的围垸破除施工不可避免地对水体产生强烈扰动，导致洪湖的水质和水生态变化[13]；两期退垸还湖工程共拆除围垸约 86.71 km²，增加的敞水面导致风浪、底层鱼类对沉积物扰动增大，洪湖水质和水生态发生变化；同时围垸内积累的养殖污染在退垸过程中也会对湖区水生态环境造成直接影响[14] [15]，故退垸后洪湖总磷浓度升高。

2021 年后洪湖总磷浓度明显上升，为了更加清晰地分析磷的空间变化过程，在 ArcGIS 中使用克里金插值法绘制 2022 年~2025 年洪湖总磷浓度分布图(图 3)。

从空间上看，洪湖总磷整体呈现从西北区域四湖总干渠入湖口向东南方向递减的趋势，主要原因可

能为四湖总干渠承接了上游大量生活污水和农业废水，总磷负荷大，有研究表明四湖总干渠的来水磷负荷占入湖磷污染物总负荷的 63% [3]。此外洪湖作为一个半封闭型湖泊，上游污染来水停留时间较长，污染物易于沉积到湖泊底部[16]，造成蓝田区域沉积物磷富集。

从时间上看，2022 年全湖总磷平均浓度为 0.117 mg/L，湖心 A、蓝田、湖心 B、杨柴湖 4 个点的平均浓度均超过 0.10 mg/L；2023 年全湖总磷平均浓度降为 0.109 mg/L，湖心 A、蓝田、湖心 B、杨柴湖 4 个点平均浓度仍超 0.10 mg/L；2024 年全湖总磷平均浓度降为 0.106 mg/L，而平均浓度超 0.10 mg/L 的点位减少为湖心 A、蓝田、湖心 B 三处；2025 年全湖总磷平均浓度为 0.108 mg/L，浓度超 0.10 mg/L 的点位变为蓝田、下新河与桐梓湖；且总磷浓度较高水域从湖心 A、蓝田和湖心 B，变为蓝田水域。主要原因可能是 2022 年~2025 年洪湖市水利局均实施优化调度，提高了新堤排水闸生态补水的规模，新增入湖水量使洪湖南侧区域水体流速增大，水动力及水循环条件得到改善，同时对水体中总磷起到物理稀释、营养物传输、生物净化等作用[17]，降低了洪湖内沿南侧区域水体中总磷浓度。

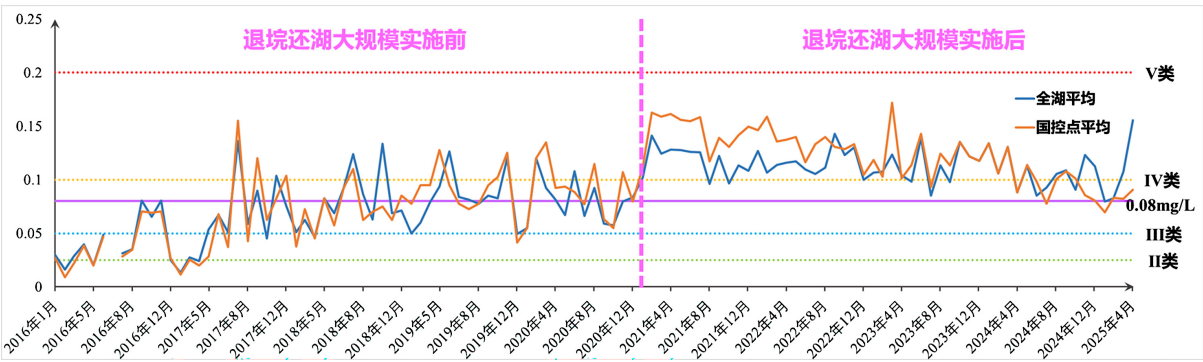


Figure 2. Total phosphorus concentration variation curve in Honghu from January 2016 to May 2025
图 2. 洪湖 2016 年 1 月~2025 年 5 月总磷浓度变化过程线

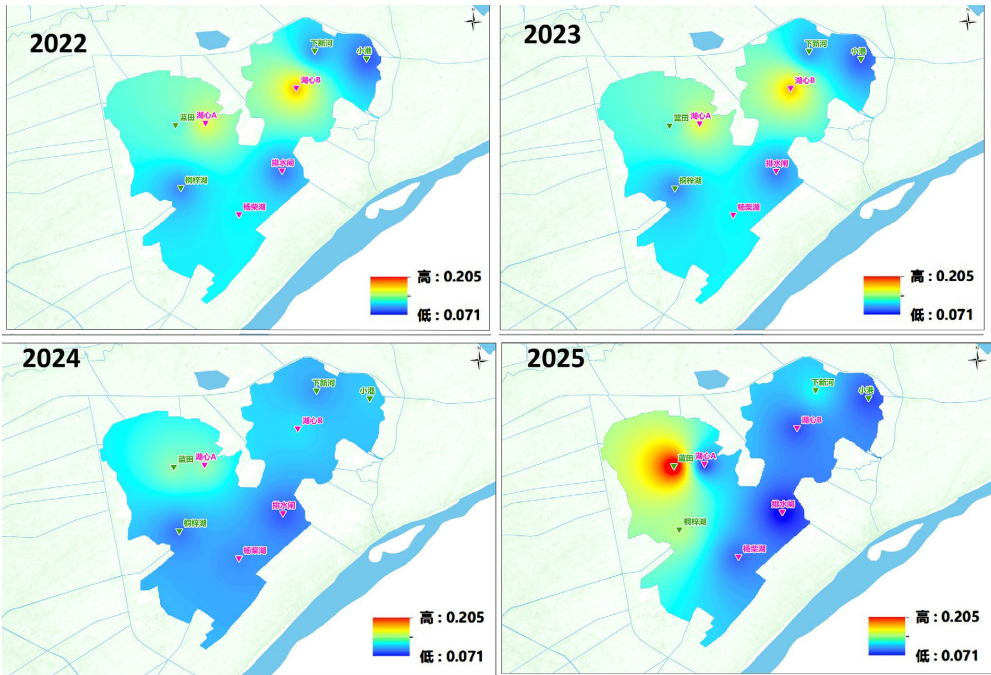


Figure 3. Distribution of total phosphorus concentration in Honghu Lake
图 3. 洪湖总磷浓度分布图

(2) 相关性分析

1) 总磷浓度 - 水位相关性分析

水位变化是驱动湖泊沉积物中氮磷等营养盐迁移转化的重要因子[6]，水位变化导致的沉降和内源循环的变化会影响湖库总磷浓度。

根据 2016 年~2025 年总磷监测数据，对洪湖水位与全湖平均总磷浓度进行皮尔逊相关性分析，结果见表 3。结合图 4 洪湖总磷浓度与水位变化过程，可知退垸还湖前总磷浓度与水位呈显著正相关关系，退垸还湖后以及全时段来看总磷浓度与水位均不存在显著相关性。可能的原因是：磷的主要来源为地表径流和大气中含磷物质的直接沉降，以及内源循环[18]，外源输入是湖库总磷浓度变化的重要原因，退垸前湖泊外部条件相对稳定，总磷污染大部分随外部来水入湖，因此呈现出来水增多、湖泊水位升高、总磷浓度相应升高的规律；退垸后受人类活动的干扰，湖泊内部原圩垸底泥中的总磷大量释放，但外源输入总磷受流域截污控污力度加强和长江总磷浓度显著下降等影响减少，原本的协同输入关系解耦，水位与总磷浓度之间的相关性由显著正相关转变为不相关。

Table 3. Results of correlation analysis between total phosphorus concentration and water level
表 3. 总磷浓度与水位相关性分析结果

分析时段	相关系数 r	显著性水平 p	相关性结论
退垸还湖前 (2016 年 1 月~2020 年 12 月)	0.32	0.028	显著正相关性
退垸还湖后 (2021 年 1 月~2025 年 4 月)	-0.096	0.52	无显著相关性
全时段 (2016 年 1 月~2025 年 4 月)	0.0078	0.96	无显著相关性

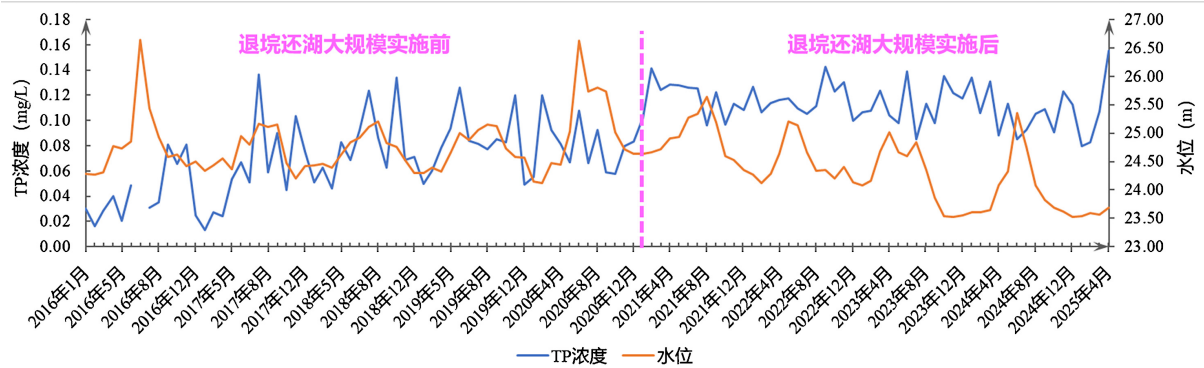


Figure 4. Total phosphorus concentration-water level long-term variation process curve
图 4. 总磷浓度 - 水位长序列变化过程线

2) 总磷浓度 - 生态补水量相关性分析

生态补水对湖泊水环境质量具有一定的影响作用，生态补水不仅可以加大水体流速，改善区域水动力及水循环条件，促进湖体内水质的物理、生物、化学净化作用，提升湖体的自净能力[19]，还可以提高污染物稀释与输移能力，降低局部生态风险。

根据 2016 年~2025 年总磷监测数据，对洪湖新堤排水闸生态补水量与全湖平均总磷浓度进行皮尔逊相关性分析，结果见表 4。结合图 5 洪湖总磷浓度与生态补水量变化过程，可知洪湖总磷浓度与新堤排水闸生态补水量存在显著的负相关性，即洪湖总磷浓度在新堤排水闸生态补水后存在下降趋势，并且总磷浓度随着补水量的增大而减小，证明引长江优质水源对洪湖实施生态补水对于湖泊水质改善存在一定的效果。

Table 4. Correlation analysis results of total phosphorus concentration and ecological water replenishment
表 4. 总磷浓度与生态补水量相关性分析结果

分析时段	相关系数 r	显著性水平 p	相关性结论
全时段 (2016 年 1 月~2025 年 4 月)	-0.44	0.001	显著负相关性

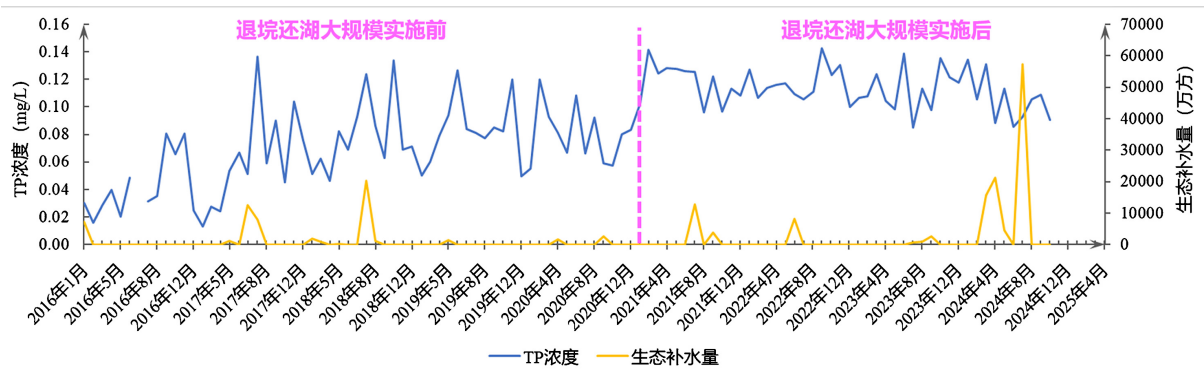


Figure 5. Long-term variation curve of total phosphorus concentration and ecological water replenishment
图 5. 总磷浓度 - 生态补水量长序列变化过程线

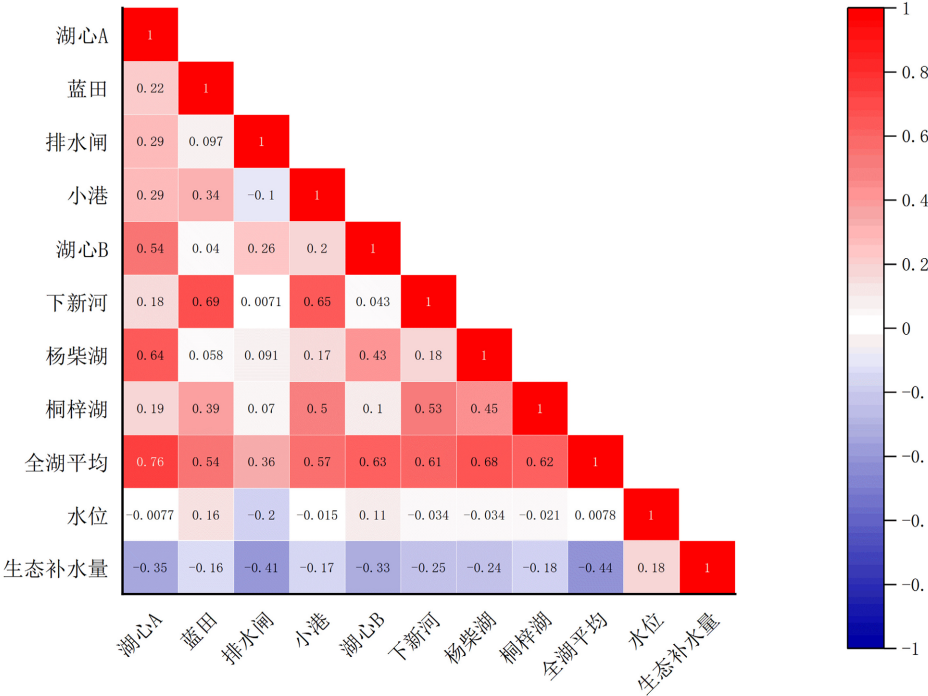


Figure 6. Correlation coefficients between total phosphorus concentration at each monitoring point and water level and ecological water replenishment
图 6. 各监测点总磷浓度与水位和生态补水量相关系数关系

3) 综合相关性分析

将洪湖 8 个水质监测点总磷浓度和全湖平均总磷浓度指标值与水位、生态补水量进行相关性分析，结果见图 6。洪湖排水闸、湖心 A、湖心 B 及全湖平均总磷浓度与生态补水量呈显著负相关($p < 0.05$)，相关系数小于 0 ($r < 0$)。说明随着生态补水量的增大，排水闸、湖心 A、湖心 B 及全湖平均总磷浓度随之减小。

5. 结论

(1) 从时间上看, 洪湖总磷在过去近 10 年间总体存在升高趋势, 退垸还湖一定程度上减少了长期以来洪湖围垸养殖等人为干预造成的污染, 但围垸拆除实施中, 湖区原有的“磷动态平衡”被打破, 积累的生态压力释放, 而新的生态平衡形成需要一个过渡期, 因此洪湖总磷浓度会出现升高的情况。从空间上看, 洪湖总磷浓度整体呈现从西北区域四湖总干渠入湖口向东南方向递减的趋势。

(2) 根据皮尔逊相关性分析, 2016 年 1 月~2025 年 4 月洪湖总磷浓度与生态补水量呈显著负相关性, 与湖泊水位不存在显著的相关性。从空间上来看, 和新堤排水闸补水口距离相对较近的排水闸、湖心 A 及湖心 B 总磷浓度与新堤排水闸生态补水量存在较为显著的负相关关系。随着长江降磷行动的开展, 长江荆州段各国控断面总磷浓度已出现显著下降, 基本低于洪湖总磷 0.08 mg/L 的水质管理目标, 部分时段达到湖泊Ⅲ类水质管理目标, 建议在此基础上适时开展生态补水、改善湖泊生态环境质量。

(3) 洪湖为典型的半封闭性浅水湖泊, 湖泊通过少量河道与长江、四湖总干渠和洪排河等河流连通, 且受闸坝调控, 水位相对稳定, 变化幅度小, 上游来水进入后停留时间较长, 污染物易在湖内累积, 故湖泊总磷浓度与湖泊水位不存在显著的相关性。与鄱阳湖等通江湖泊“高水是湖、低水似河”独特的丰枯水文节律相比, 破解洪湖总磷超标难题, 关键在于流域综合治理与人工生态补水有机融合, 构建“控源截污-内源削减-生态调控-长效管护”的全链条治理体系。

基金项目

国家重点研发计划课题、长江中下游平原河网区水动力优化再构与自然动能高效利用(2022YFC3202605)。

参考文献

- [1] Zhang, T., Ban, X., Wang, X., Cai, X., Li, E., Wang, Z., *et al.* (2017) Analysis of Nutrient Transport and Ecological Response in Honghu Lake, China by Using a Mathematical Model. *Science of the Total Environment*, **575**, 418-428. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.188>
- [2] 刘昔, 厉恩华, 徐杰, 邓兆林, 等. 洪湖湿地生态系统演变及稳态转换关键驱动因子阈值研究[J]. 湖泊科学, 2025, 35(3): 934-940.
- [3] 周汉娥, 陈晓飞, 何鑫, 宁增平, 吴辰熙. 洪湖营养盐时空分布特征及成因分析[J]. 地球与环境, 2021, 49(1): 9-17.
- [4] 郑煌, 杨丹, 金梦云, 胡天鹏, 邢新丽. 洪湖沉积柱中磷形态的垂直分布及指示意义[J]. 中国环境科学, 2017, 37(4): 1540-1547.
- [5] 胡茂林, 吴志强, 刘引兰. 鄱阳湖湖口水位特征及其对水环境的影响[J]. 水生态学杂志, 2010, 3(1): 1-6.
- [6] 刘聚涛, 温春云, 韩柳, 戴国飞, 等. 2012-2017 年鄱阳湖水位变化与氮磷响应特征研究[J]. 环境污染与防治, 2020, 42(10): 1274-1279.
- [7] 孔范龙, 都敏, 徐丽华, 等. 富营养化水体的营养盐限制性研究综述[J]. 地球环境学报, 2016, 7(2): 121-129.
- [8] 刘莹慧, 卢俊平, 赵胜男, 史小红, 孙标, 等. 基于长时间序列乌梁素海水环境变化趋势及生态补水等关键驱动因子分析(2011-2020 年) [J]. 湖泊科学, 2023, 35(6): 1939-1948.
- [9] 张冰辉, 肖新宗, 韩晓东, 袁思光, 等. 南水北调东线一期工程调水前后水体水质时空变化特征[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2026, 62(2): 346-358.
- [10] 张洪, 薛雪, 郁达伟, 等. 鄱阳湖水位对沉积物磷释放的影响及总磷考核建议[J]. 人民长江, 2023, 54(1): 46-52.
- [11] 王学雷, 任宪友. 基于洪湖湿地恢复的灌江纳苗可行性分析研究[J]. 水利规划与设计, 2005(2): 52-55.
- [12] 昆明勘测设计研究院有限公司. 湖北洪湖国家级自然保护区退垸还湖(还湿)总体规划(2018-2022). 昆明: 昆明勘测设计研究院有限公司, 2017.
- [13] 汪静娴, 孟玉生, 逢勇, 等. 阳澄西湖围堰施工中悬浮物输移扩散数值模拟[J]. 水资源保护, 2021, 37(3): 108-114.

-
- [14] Wang, C., Li, E.H., Zhang, L., Wei, H., Zhang, L. and Wang, Z. (2023) Long-Term Succession Characteristics and Driving Factors of Zooplankton Communities in a Typical Subtropical Shallow Lake, Central China. *Environmental Science and Pollution Research*, **30**, 49435-49449. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-25782-3>
- [15] Ni, Z.F., Wu, X.C., Li, L.F., Lv, Z., Zhang, Z., Hao, A., *et al.* (2018) Pollution Control and in Situ Bioremediation for Lake Aquaculture Using an Ecological Dam. *Journal of Cleaner Production*, **172**, 2256-2265. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.185>
- [16] 张潇文, 彭雪, 邓兆林, 葛芳杰, 等. 2019-2023 年洪湖水生态环境时空变化特征及原因分析[J]. 湖泊科学, 2025, 37(2): 496-507.
- [17] Wan, F., Zhang, F., Zheng, X.K. and Xiao, L. (2022) Study on Ecological Water Demand and Ecological Water Supplement in Wuliangsu Lake. *Water*, **14**, Article 1262. <https://doi.org/10.3390/w14081262>
- [18] 张建林, 张曼, 肖利娟, 等. 流溪河水库丰水年与枯水年营养盐动态的比较分析[J]. 生态科学, 2012, 31(3): 259-266.
- [19] 张运林, 秦伯强, 朱广伟, 等. 论湖泊重要性及我国湖泊面临的主要生态环境问题[J]. 科学通报, 2022, 67(30): 3503-3519.