

王楠,刘春,王文才,等.引江济淮影响下菜子湖关键水质因子动态特征[J].环境科学与技术,2026,49(9):74–82. Wang Nan, Liu Chun, Wang Wencai, et al. Dynamic characteristics of key water quality factors in Caizi Lake under the influence of the Yangtze-to-Huaihe Water Diversion Project[J]. Environmental Science & Technology, 2026, 49(9): 74–82.

引江济淮影响下菜子湖关键水质因子动态特征

王楠¹, 刘春¹, 王文才², 范中亚²,
蒋锦刚³, 安乐生^{1*}

(1. 安庆师范大学皖江流域水环境保护与污染控制安徽省教育厅重点实验室, 安徽 安庆 246133;

2. 生态环境部华南环境科学研究所, 广东 广州 510655;

3. 中国科学院合肥物质科学研究院, 安徽 合肥 230031)

摘要:为了研究菜子湖水质状况、变化趋势,以及引江济淮工程运行初期对湖泊水质尤其是菜子湖国控断面的影响,文章根据湖区2019年1月–2025年4月逐日水位和水质在线数据及人工采测的月度水质数据,结合相关时段湖区通航、遥感影像等资料,分析了不同时间尺度下湖泊水质达标情况及其关键因子的变化特征,探究了引江济淮工程在水位调控、航道运行等方面对湖泊水质关键因子的影响。结果表明:近年来,菜子湖因低水位下的TP波动而难以实现稳定达标,且TP浓度在枯水期2–4月受大风扰动常见3–4次规律性起伏。引江济淮工程试运行后,2022年和2023年菜子湖枯水期因蓄水TP浓度较低(分别为0.047、0.040 mg/L),2024年因开闸泄水短时间内TP出现显著反弹而超标。湖区通航主要影响白兔湖及菜子湖中北部,其对菜子湖国控断面TP浓度的近似贡献为0.007–0.033 mg/L。引江济淮工程现状引调水规模小,较菜子湖而言,“高磷”的江水入湖对水质影响尚不显著。未来,通航量增大、大规模调水等对菜子湖水质的影响需要持续跟踪研究,应开展生态调度以避免湖泊长期低水位运行等导致TP大幅波动。

关键词:引江济淮; 浅水湖泊; 水位; 水质; 总磷; 菜子湖

中图分类号:X143 **文献标志码:**A **doi:**10.19672/j.cnki.1003-6504.1917.25.338 **文章编号:**1003-6504(2026)09-0074-09

Dynamic Characteristics of Key Water Quality Factors in Caizi Lake under the Influence of the Yangtze-to-Huaihe Water Diversion Project

WANG Nan¹, LIU Chun¹, WANG Wencai², FAN Zhongya²,
JIANG Jingang³, AN Lesheng^{1*}

(1. Anhui Provincial Key Laboratory of Water Environment Protection and Pollution Control in Anhui Section of the Yangtze River Basin, Anqing Normal University, Anqing 246133, China;

2. South China Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Guangzhou 510655, China;

3. Hefei Institute of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: To understand the water quality changes in Caizi Lake, particularly at the national monitoring site, under the influence of the Yangtze-to-Huaihe Water Diversion Project (YHWD), this study analyzed daily online data on water levels and quality from January 2019 to April 2025, alongside manually collected monthly water quality data. The analysis focused on assessing compliance with water quality standards in the lake across different time scales and examining the dynamic characteristics of key influencing factors. Additionally, it investigated the impact of YHWD on key factors of lake water quality in water level regulation and channel operation. Results indicated that in recent years, the Lake has faced challenges in meeting established water quality standards due to fluctuations in total phosphorus (TP) concentrations at low water levels. From February to April, wind disturbances have led to recurring peaks in TP concentration ranging from 3 to 4 occurrences. Following the trial operation of YHWD, TP concentrations during the dry season were notably low for both 2022 and 2023 (0.047 and 0.040 mg/L respectively), however, a temporary spike above standard levels was observed in 2024 due to sluice releases. Navigation activities primarily impacted Baitu Lake and northern sections of Caizi Lake, contributing an increase of approximately 0.007 to 0.033 mg/L to TP concentration at the national monitoring site. Currently, the scale of water diversion

associated with YHWD remains relatively small. Compared with Caizi Lake, a small amount of “high phosphorus” river water entering the lake has no significant impact on the water quality. In the future, continuous monitoring of water quality is essential due to increased navigation and large-scale water diversion. Ecological regulation is necessary to prevent significant TP fluctuations due to prolonged low water levels in lakes.

Key words: Yangtze-to-Huaihe Water Diversion Project; shallow lake; water level; water quality; total phosphorus (TP); Caizi Lake

湖泊是水资源的重要载体,是江河水系和生态系统的重要组成部分,在洪水调蓄、供水保障、生物多样性保护等方面具有不可替代的作用^[1]。长江中下游地区湖泊众多,约占全国湖泊总面积的1/3,是我国淡水湿地集中分布和全球生态保护的重要区域^[2]。长江中下游沿江湖泊平均水深不足4m,枯水期水深普遍在1~2 m,属浅水型湖泊,这些湖泊历史上多与长江自然连通^[3,4]。因闸坝与圩垸等建设及工业发展,长江中下游的江湖关系、湖泊面积、水文情势、水生态环境形势一度出现恶化^[5]。近年来,随着湖泊保护与治理投入的不断加大,长江中下游湖泊面积萎缩、数量减少得到遏制,水质整体持续改善,湖泊生态系统逐步恢复^[6]。然而,沿江浅水湖泊普遍面临沉水植物消亡、TP不稳定达标、局部富营养化等问题^[7,8]。

目前,鄱阳湖、洞庭湖、巢湖、太湖等长江中下游湖泊水质均难达到三类标准(0.05 mg/L),部分沿江湖泊TP浓度较高,为水华发生提供了关键的营养条件^[5,9]。考虑沉水植物是水质“净化器”,也是维持湖泊清水态的重要指标^[10],近年来,沿江湖泊试点开展苦草(*Vallisneria spiralis*)、菹草(*Potamogeton crispus*)、狐尾藻(*Myriophyllum verticillatum* L.)等沉水植物恢复工程以恢复“水下森林”并达到生态控磷,但湖泊水深、风浪、鱼类等生境条件改善难度大,实施效果整体欠佳^[11-13]。在全球干旱变得越来越频繁、持续时间更长且更为严重的背景下,2022年以来包括太湖、巢湖在内的部分湖泊甚至湖库型水源地出现蓝藻水华反弹现象,长江中下游沿江湖泊正面临生态退化风险^[14-16]。

菜子湖是长江中下游典型的闸控浅水湖泊,除存在该地区常见的水生态环境问题外,还受到引江济淮工程菜子湖线建设与运行影响。大型跨流域调水工程因投资巨大、影响深远而备受关注。南水北调对南四湖、东平湖、丹江口水库等受水区生源物质组成^[17,18]、营养状态^[19]以及藻类^[20]、沉水植物^[21,22]、浮游植物及大型底栖动物^[23]种群生长与分布影响较大。王宗志等^[24]、谭浪等^[25]认为调水后客水高磷降低了南四湖上覆水的N/P比,补充了藻类生长所需的磷并引起藻密度上升。引江济太对贡湖、太湖的水体交换、营养盐输入等均存在影响^[26,27],且河流输入湖泊的磷主

要是 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 和颗粒态磷^[28]。引江济淮工程对菜子湖影响同样受到关注。刘学文等^[29]基于1956~2018年湖泊水位分析出菜子湖候鸟越冬期水位变化速率的均值为-0.009 m/d。王晓媛等^[30]、朱秀迪等^[31]、Zhu等^[32]认为菜子湖区越冬水鸟生境距离泥滩和草本沼泽越近、植物覆盖度越高,越冬水鸟生境的适宜性水平越高。Li等^[33]认为引江济淮引起的菜子湖冬季水位抬升,将使得54.3%的草地和60.5%的泥滩地丧失。王钟等^[34]基于EFDC模型预测出风场及输水主要改变菜子湖东部和南部湖区流场,且枯水季调水有利于上述两个湖区水体交换。

目前,引江济淮工程对菜子湖影响研究多关注工程运行后对湖泊水位、候鸟生境影响评估等,尚缺乏工程运行后水位调控、调水、通航等多重因素对湖泊水质的跟踪研究和系统分析。鉴于菜子湖水生态环境的敏感性和复杂性,本研究聚焦引江济淮工程运行初期对菜子湖主要水质指标的影响,揭示湖泊水质关键因子及其变化特征,明确水位升降状况及其与水质波动关系,识别湖区通航对水质关键因子的贡献,以期为菜子湖水水质稳定达标及引江济淮菜子湖线高质量运行提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

菜子湖位于安徽省安庆市桐城市与铜陵市枞阳县交界处,是大型引调水引江济淮工程重要调蓄湖泊,兼具防洪、灌溉、通航、生态等功能。流域范围介于30°36′~31°16′N,112°16′~116°25′E之间,东西方向最大长度79 km,南北最大宽度74 km。湖泊总水面面积为242.9 km²(相应水位为15.1 m),总容积为16.1亿m³,多年平均降雨量为1 389.1 mm。菜子湖是安庆沿江湿地省级自然保护区的重要组成部分,是白头鹤、东方白鹤等候鸟重要的迁徙停歇地、越冬地,设有2个国家湿地公园和1个国家水产种质资源保护区^[3]。

枞阳引江枢纽是引江济淮工程菜巢线的起点,长江水在此被提升经长河入菜子湖调蓄后北上。菜子湖湖区航道长27.2 km,设计水深3.2 m,底宽90 m,距离菜子湖国考断面1.1 km(图1)。2022年10月,引江

济淮工程菜巢线全线通水,2023年9月菜子湖线航道开始试运行。为降低航运对菜子湖湿地及候鸟生存环境的影响,湖区航道执行冬候鸟越冬期(11月1日-次年3月31日)禁航。

TSM浓度空间分布,分析其时空特征以间接识别出通航对湖泊的扰动及影响范围。具体公式为:

$$TSM = -424.4 \times \frac{(B5 - B4)}{B5 + B4} - 20.226 \quad (1)$$

式中,B5表示近红外波段,B4表示红波段。

考虑影响因素多、野外实测难度大,结合菜子湖高、中、低3种水位情形,筛选出水位相近且无大风强对流天气干扰的持续时段,对通航与未通航条件下TP浓度逐日数据进行比对,以定量估算湖区通航对菜子湖国考断面TP浓度的贡献。

2 结果与分析

2.1 湖泊水质状况及动态特征

2021-2024年,菜子湖主要水质指标DO、高锰酸盐指数、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN、TP浓度变化范围分别为6.8~12.4、2.5~5.3、0.02~0.23、0.31~3.43、0.024~0.080 mg/L,SD在5~110 cm,其中DO、高锰酸盐指数、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 等稳定满足Ⅲ类标准。TN、TP浓度多年均值分别为0.91、0.046 mg/L,也满足Ⅲ类水标准,但月超标现象较为常见。从水文期来看,枯水期、涨水期、丰水期、退水期TN浓度均值分别为0.91、0.74、0.64、1.47 mg/L,TP浓度对应为0.051、0.043、0.041、0.045 mg/L,可见TN、TP超标主要出现在退水期和枯水期(图2)。因现阶段TN不纳入生态环境部门水质考核,TP成为菜子湖水质定类因子。

进一步来看,2019-2024年菜子湖逐年TP浓度均值分别为0.048、0.038、0.046、0.041、0.042、0.060 mg/L,2024年未满足Ⅲ类水标准。从TP逐月数据来看(图3),各年均存在超标现象,其中超标3次及以上的有2019-2021、2024年,而2022、2023年均仅1次超标。图3显示,枯水期超标主要出现在2-4月,12月和1月相对较好。逐日监测数据可见(图4),2022年和2023年枯水期TP波动较其他年份小。近年来,菜子湖TP浓度在各年份枯水期均会出现3~4次较大的波动,时间较为集中,主要在上一年12月中下旬、次年2月中下旬、3月下旬及4月中下旬。

2.2 湖泊水位与水体TP关系

菜子湖水位年内呈单峰变化且波动幅度较大,呈现出明显的洪-枯季节性交替。1989-2024年,枯水期、涨水期、丰水期、退水期平均水位分别为9.94、10.50、12.89、10.83 m。丰、枯水期平均水位相差2.95 m,水位高低起伏对菜子湖TP和浊度的影响显著(图5)。湖区TP浓度与水位具有一定的相关性,尤其是枯水期更为明显($y = -0.276x + 0.355$, $R^2 = 0.33$,图6)。枯水期湖泊水位低,浊度和TP浓度在高值区起伏波动;5-6月湖泊水位开始上涨,浊度和TP浓度开始下降;7-9月

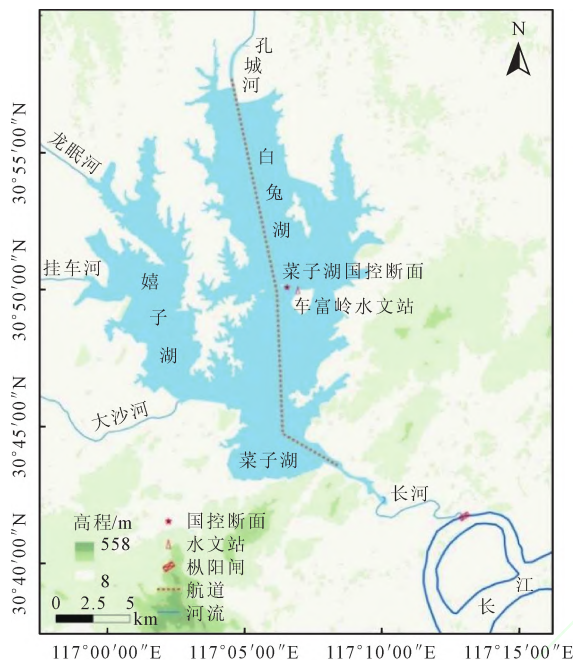


图1 研究区示意图

Fig.1 Schematic diagram of the study area

1.2 数据来源及研究方法

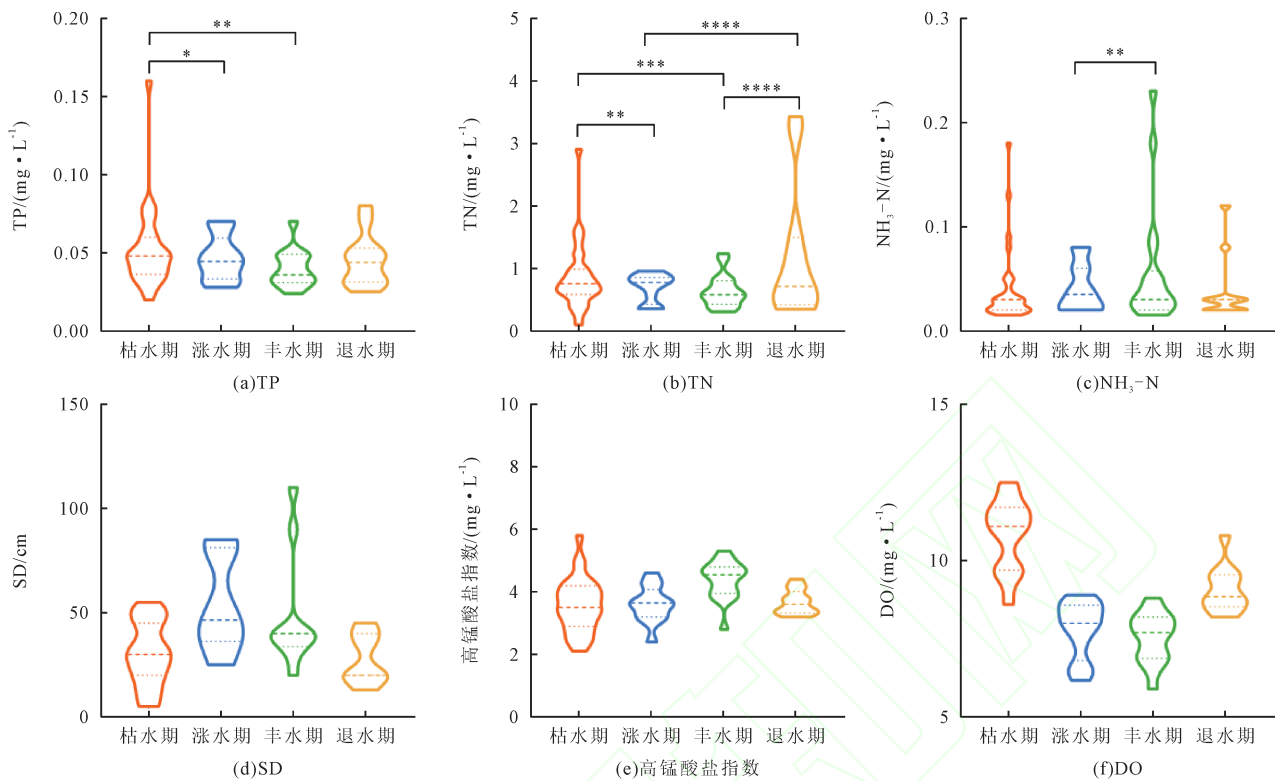
1.2.1 数据来源

菜子湖月水质数据来源于湖泊国控断面2019-2024年人工监测数据,包括TP、TN、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、高锰酸盐指数、DO、透明度(secchi depth, SD)、浊度等参数,日均水质数据来源于该国控断面自动站2019年12月1日-2025年4月30日在线监测数据。水文数据来自湖区车富岭水文站2019-2024年逐日水位降雨数据。通航数据包括2023-2024年湖区船舶通行数据及相关时段区域Landsat 8影像。

1.2.2 研究方法

利用小提琴图等对菜子湖月水质数据进行统计,分析不同时间尺度下湖泊水质达标情况及其关键因子,揭示主要污染指标变化动态,尤其是枯水期不利时段波动特征。其次,鉴于水位对湖泊的重要性,分析水位对关键水质因子的影响及二者相关性,在此基础上,探讨引江济淮枞阳闸水位调控对菜子湖TP、浊度的影响时段与程度。

选取菜子湖航道运行前后3幅(2022年11月、2023年4月、2023年11月)分辨率为30 m的Landsat 8影像,利用ENVI对影像进行大气校正、几何校正后,结合国控断面等湖区总悬浮物(total suspended matter, TSM)实测数据与对应影像波段构建反演模型^[35,36],经精度验证后,将模型(式(1))应用于多时相遥感影像,反演湖泊



注：不同水期间的横线标注为组间差异显著性检验结果，其中*表示 $p<0.05$ ，差异显著；**表示 $p<0.01$ ，差异高度显著；***表示 $p<0.001$ ，差异极高度显著；****表示 $p<0.0001$ ，差异极其显著；无标注表示差异不显著($p\geq0.05$)。

图2 各水文期主要水质指标变化
Fig.2 Variations of main water quality parameters across different hydrological periods

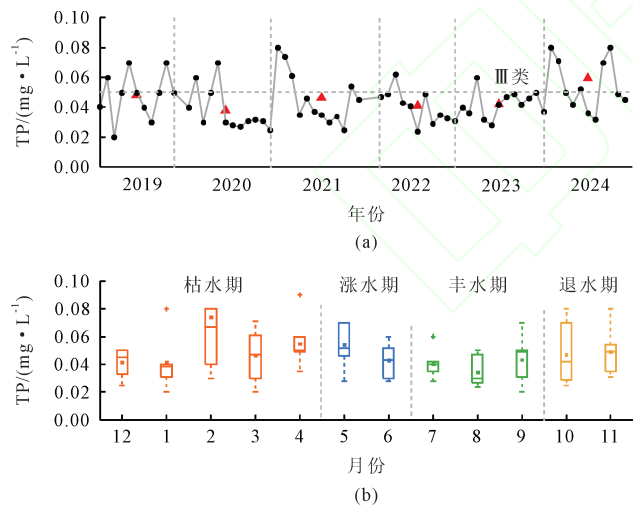


图3 2019年以来菜子湖国考断面TP浓度变化
Fig.3 The variation of TP concentration at the national monitoring section of Caizi Lake since 2019

主汛期水位偏高，浊度和TP浓度处于全年低值状态且较为稳定；退水期水位明显下降，浊度和TP浓度有所上升，但水质大幅波动较少。

2021年、2022年7-9月(丰水期)菜子湖水位分别为12.95、11.81 m，TP浓度分别为0.035、0.045 mg/L；2021年12月-2022年4月、2022年12月-2023年4月，菜子湖水位分别为10.68、11.41 m，TP浓度分别为0.065、0.035 mg/L。可见，菜子湖因丰枯水位变化导致TP浓度存在差异。值得一提的是，因2022年10月引江济

淮工程菜巢线建成通水及此后枞阳闸控制泄放水，2022年12月-2024年1月期间的枯水期湖泊水位均较历史同期明显偏高，菜子湖水质自动站TP日均达标率显著上升。

2.3 湖区通航对水体TP贡献

基于影像反演的TSM空间分布一定程度上能够反映通航对湖区水体的扰动。2023年11月2日通航结束2 d后，菜子湖中北部、白兔湖中南部水域TSM明显高于其他湖区，突出表现在湖区航道中北段，对车富岭西侧菜子湖国考断面所在水域也有明显影响(图7)。与未通航时段比较，2022年同期嬉子湖及白兔湖中北部，菜子湖南部TSM明显高于其他湖区；2023年4月菜子湖中北部、白兔湖南部、嬉子湖中南部水域TSM总体低于其他湖区，且湖中心TSM明显低于湖滨区。可见，通航对湖区扰动较为明显，会造成沉积物再悬浮间接影响水体TP(菜子湖全年TP浓度与浊度具有较显著的正相关， $y=0.0003x+0.0308$ ， $R^2=0.45$)，其扰动程度受航道水深等因素影响。

图8清晰显示在水位相近、无大风强对流天气干扰的连续性时段，菜子湖高、中、低3种水位情景下，湖区通航与非通航条件下TP浓度的显著差异(图8)，2023年9月23日-10月3日通航期间(12.27~12.77 m)，菜子湖TP浓度均值为0.048 mg/L，2021年末通航期

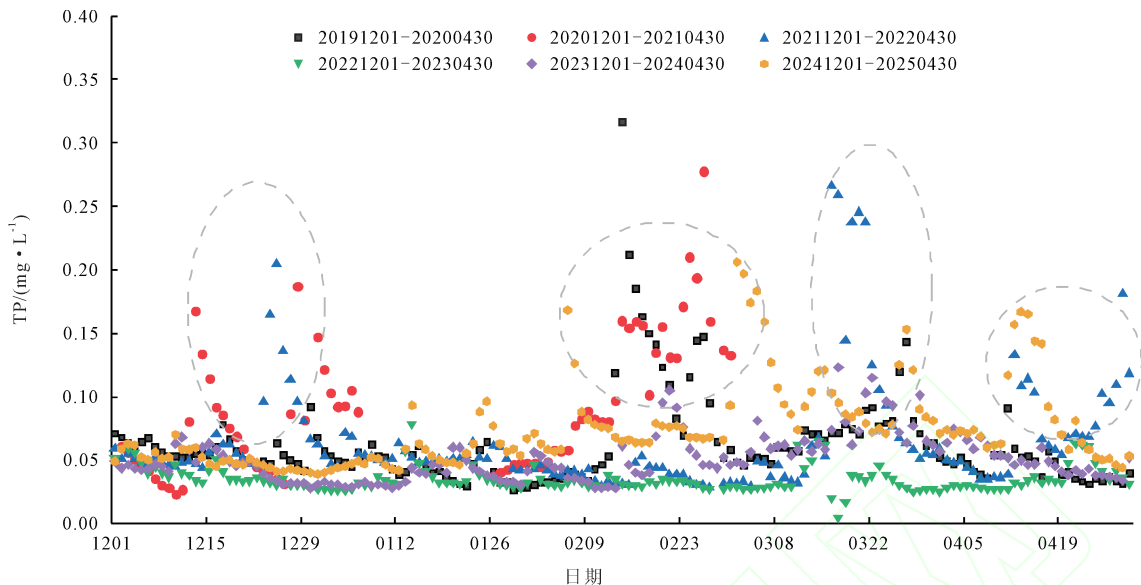


图4 不同年份枯水期菜子湖TP波动对比
Fig.4 Comparison of TP fluctuations in the dry season of Caizi Lake in different years

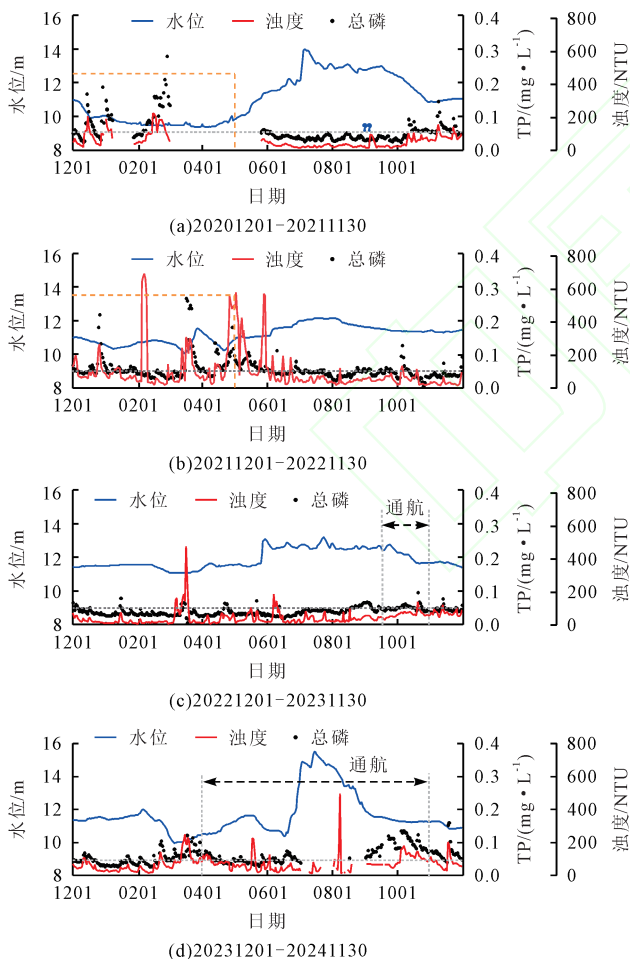


图5 近年来菜子湖逐日水位及TP浓度、浊度变化
Fig.5 The changes in water level, TP concentration and turbidity of Caizi Lake in recent years

间TP浓度均值为0.031mg/L(图8(a));2024年5月9日-21日(15日和16日大风天气影响不考虑)通航期间(11.46~11.64 m),菜子湖TP浓度均值为0.040 mg/L,2023年同期未通航期间TP浓度均值为0.033 mg/L

(图8(b));2024年10月17日-10月27日通航期间(10.98~11.58 m),菜子湖TP浓度均值为0.092 mg/L,2021年未通航期间TP浓度均值为0.059 mg/L(图8(c))。初步判定,通航对菜子湖国考断面TP浓度的贡献值可能在0.007~0.033 mg/L。

3 讨论

3.1 水位是影响菜子湖水质的关键因素

在引江济淮工程实施前的相当长时间内,菜子湖水位丰升枯降,导致丰水期TP浓度低,枯水期TP浓度波动较大。这一现象在长江中下游沿江浅水湖泊较为常见。鄱阳湖、洞庭湖因年内丰枯水位变化出现“河湖相”转换并由此产生河相水质和湖相水质,湖相下湖泊的水环境容量大,能够有效降解污染物^[37,38]。AN等^[39]总结出龙感湖枯水期TP浓度较丰水期高0.037 mg/L。范中亚等^[40]观测出枯水期沉积物内源磷动态释放量占全年释放量的比例在80%左右。

可见,浅水湖泊低水位给TP浓度带来多方面的复杂影响。首先,湖泊水位降低,蓄水量减少,水体自净能力减弱,TP容纳量锐减。其次,浅水湖泊枯水期水位低,区域冬季寒潮多发并伴随大风天气,风浪扰动易引起表层沉积物再悬浮及内源磷动态释放,甚至诱发大型浅水湖泊内源磷暴发性释放^[41]。再次,枯水期湖泊水位持续较低,水体SD变差,影响水生生物生长和繁殖,进而削弱水体生物净化能力^[42]。

2022年10月菜子湖线全线通水后至2024年2月,湖区因新闸建成蓄水,水位基本维持在11.5 m以上,枯水期TP较工程未实施前同期浓度均值下降0.015 mg/L。2024年2-3月、2024年5月,为扩大越冬

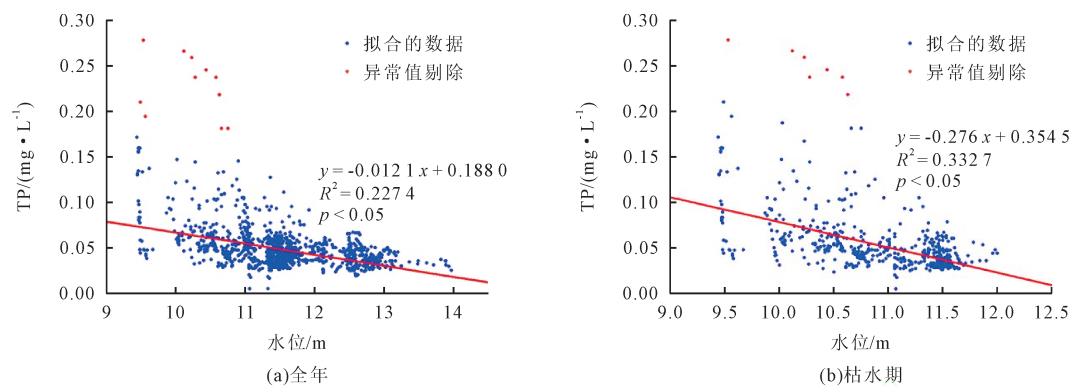


图6 菜子湖TP与水位拟合结果
Fig.6 The fitting result of TP concentration and water level in Caizi Lake

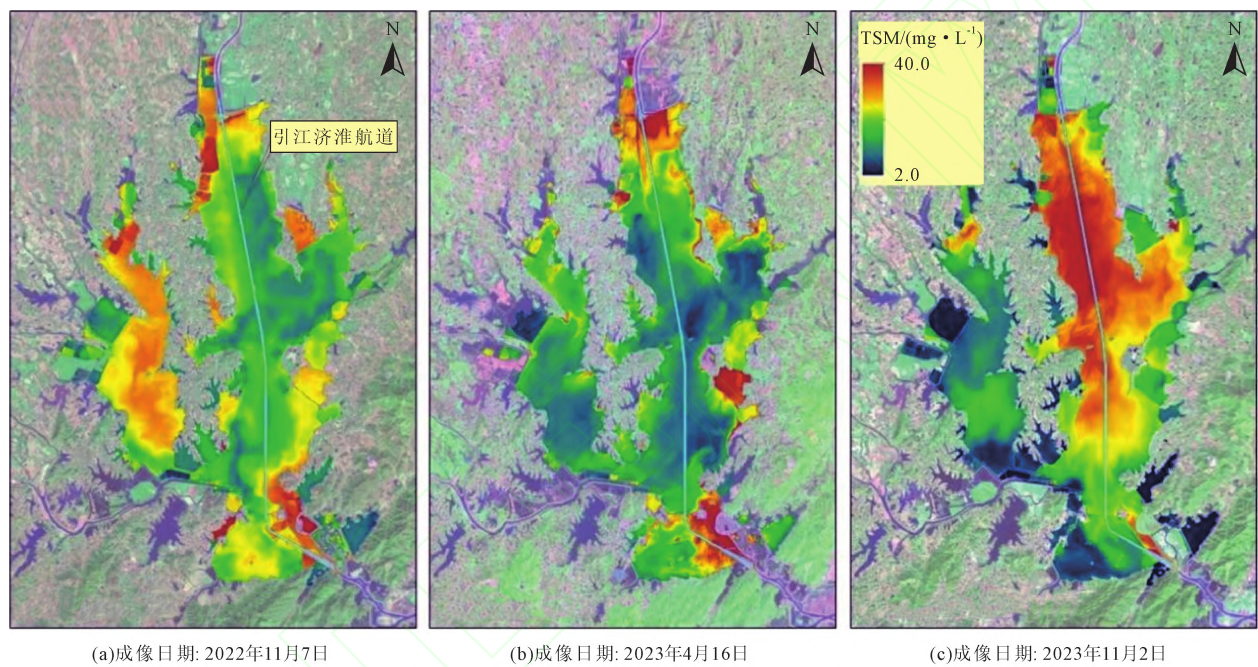


图7 2023年试通航前后TSM遥感反演结果
Fig.7 Remote sensing inversion results of total suspended matter (TSM) before and after the trial navigation in 2023

候鸟期栖息地、缓解淮河流域持续旱情,菜子湖短期内水位下降1~2 m,TP随即出现明显超标。菜子湖属于典型的沿江浅水湖泊,目前湖区沉水植物基本消亡,因而引江济淮枞阳枢纽调控对湖泊水质至关重要。

当前,菜子湖TP因枯水期沉积物再悬浮、引江济淮工程调蓄等难以稳定达标。近年来,长江中下游旱涝急转、汛期返枯现象频发,2022年和2025年均出现枯水期提前并延长^[4,14],进一步加剧了菜子湖水质改善难度。Cai等^[43]证实夏季极端高温可促进水生生物的活动,降低了沉积物对磷固定并导致磷释放。为此,充分发挥引江济淮工程枞阳引江枢纽(节制闸及泵站)及菜子湖的调蓄作用,通过构建人工湿地等措施以保障候鸟栖息地,适当抬高非汛期尤其是枯水期湖泊水位,对湖泊水生态环境改善具有积极作用^[44]。

3.2 引江济淮工程对湖泊影响需持续关注

除了水位对菜子湖水质影响显著,通航及引调水

对水质具有叠加影响。2023年、2024年湖区过船分别为1 126、2 368艘,均以下行空载船舶为主(占96.7%),其影响范围通过遥感反演可基本识别(图7)。受航道水深、航行轨迹等影响,通航对湖泊TP的净贡献难以精准定量。李剑超等^[45]发现螺旋桨距河床底面的深度、螺旋桨射流出口流速、螺旋桨直径对底部流速的分布影响显著。胡旭跃等^[46]研究得出在河道平均水深远大于航道的标准水深的情况下,船舶正常航行在该段河流时底泥难以起动和再悬浮。当前,菜子湖夜航与重载船舶在运行前期较少,通航对湖泊水质的影响尚未全部显现。未来航道运输量增大直至达到设计负荷过程中,船舶对水体扰动及水质的影响还需动态监测。

2022年、2023年引江济淮工程菜子湖线均有一次短期连续调水(12 d、6 d),引水量分别为1.45亿 m³、0.3亿 m³,小规模引调水对湖泊水质的影响较小(图9)。其中,2022年调水前后,国控点TP浓度从0.031 mg/L

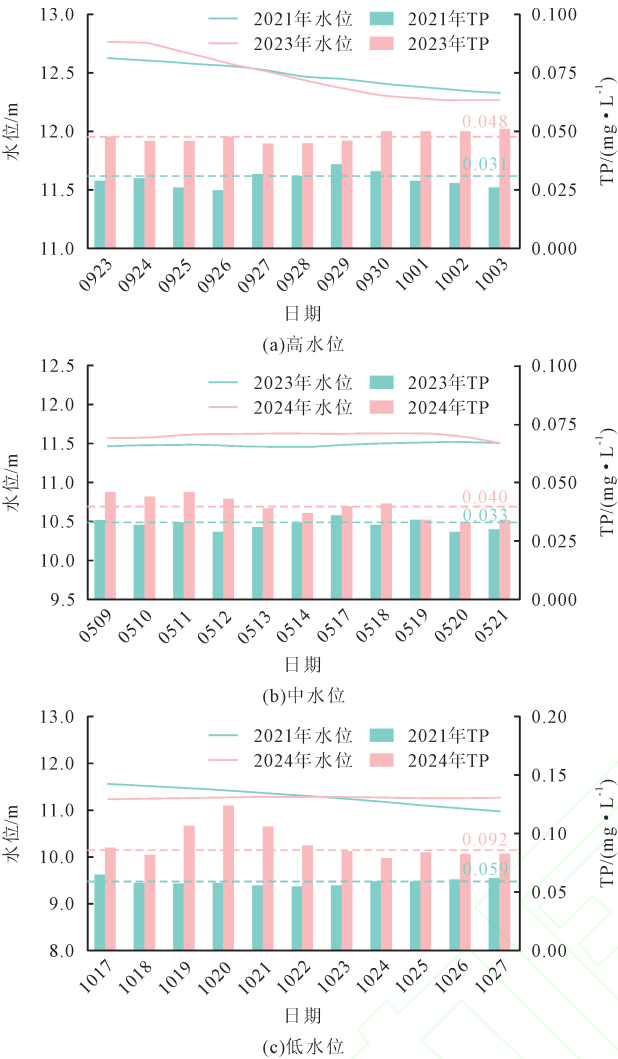


图8 不同水位条件下试通航与未通航TP浓度比较
Fig.8 Comparison of TP concentration under different water levels between trial navigation and non-navigation conditions

升至0.039 mg/L,2023年因湖区降水,TP浓度先降后升,水质变化微弱。2021年以来,距离引江济淮工程枞阳枢纽最近的长江干流前江口国考断面TP年均浓度均高于菜子湖国考断面TP年均浓度。如2023年前江口国考断面TP年均浓度为0.069 mg/L,高于菜子湖国考断面TP 0.040 mg/L的年均浓度。后期稳定调水将导致高磷的江水更新甚至彻底更换低磷的湖水,势必对湖区水质尤其是TP造成较大影响。引江济淮二

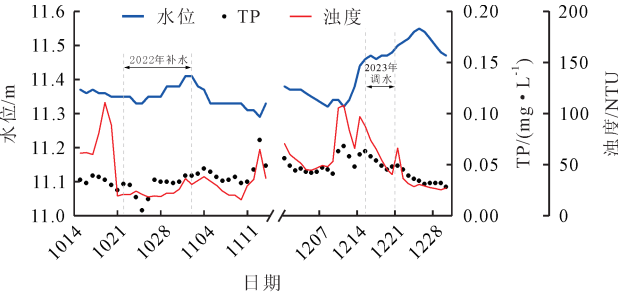


图9 2022年应急补水和2023年试调水期间菜子湖水质
Fig.9 Water quality at national monitoring section in the lake during the emergency water replenishment in 2022 and the trial water diversion in 2023

期饮用水源工程建成投用后,其干旱调度、生态补水、水源引水效益充分发挥情况下,大规模引调水对湖泊TP的影响需要跟踪关注。

4 结论

(1)2019~2024年,菜子湖TP在各年份枯水期均会出现3~4次较大的波动,集中于12月中下旬、2月中下旬、3月下旬及4月中下旬。其中2024年TP平均浓度为0.060 mg/L,未达Ⅲ类水标准,TP成为影响菜子湖水质达标的关键因子。

(2)枯水期低水位易造成TP波动,该时段湖泊水位与TP较全年具有更强的相关性($y=-0.276x+0.355$, $R^2=0.33$)。2022~2023年,引江济淮工程枞阳闸建成蓄水,湖泊TP浓度显著降低,其中2022、2023年枯水期TP浓度分别为0.047、0.040 mg/L;2024年2~3月开闸放水,水位降低2.03 m,TP浓度迅速抬升并超标,2月、3月TP浓度分别为0.080、0.071 mg/L。

(3)通航对湖区的影响主要在白兔湖及菜子湖中北部,其对菜子湖国考断面TP浓度的贡献值为0.007~0.033 mg/L。目前引江济淮工程引调水规模小,高磷江水对湖泊水质的影响尚不明显。未来干旱调水、生态补水、水源引水效益充分发挥情况下,大规模持续性引调水对湖泊TP的影响需要密切关注。

[参考文献]

[1] 张甘霖,谷孝鸿,赵涛,等. 中国湖泊生态环境变化与保护对策[J]. 中国科学院院刊, 2023,38(3):358-364.
[2] 姚仕明,王洪杨,刘玉娇,等. 长江流域河湖近期演变与保护研究进展[J]. 中国防汛抗旱, 2023,33(9).
[3] An L S, Liao K H, Zhu L, et al. Influence of river-lake isolation on the water level variations of Caizi Lake, lower reach of the Yangtze River[J]. Journal of Geographical Sciences, 2021,31(4):551-564.
[4] Wang S M, Qin B Q, Wen B Q, et al. Climate change influences on algal bloom intensity in lakes in the Yangtze River Basin, China from 1985 to 2022[J]. Journal of Hazardous Materials, 2025,495:139027.
[5] 刘录三,黄国鲜,王璠,等. 长江流域水生态环境安全主要问题、形势与对策[J]. 环境科学研究, 2020,33(5):1081-1090. Liu Lusan, Huang Guoxian, Wang Fan, et al. Main problems, situation and countermeasures of water eco-environment security in the Yangtze River Basin[J]. Research of Environmental Sciences, 2020,33(5):1081-1090.
[6] Wang J D, Sheng Y W, Tong T S D. Monitoring decadal lake dynamics across the Yangtze Basin downstream of Three Gorges Dam[J]. Remote Sensing of Environment, 2014,152: 251-269.
[7] 季鹏飞,许海,詹旭,等. 长江中下游湖泊水体氮磷比时空变

化特征及其影响因素[J]. 环境科学, 2020,41(9):4030–4041.

Ji Pengfei, Xu Hai, Zhan Xu, et al. Spatial-temporal variations and driving of nitrogen and phosphorus ratios in lakes in the middle and lower reaches of Yangtze River[J]. Environmental Science, 2020,41(9):4030–4041.

[8] 任鹏,范中亚,杨忠勇,等. 沿江城市中小型闸控通江湖泊总磷变化特征及成因分析:以安庆市石塘湖为例[J]. 湖泊科学, 2023,35(4):1359–1369.

Ren Peng, Fan Zhongya, Yang Zhongyong, et al. Variation characteristics and causes of total phosphorus in small and medium-sized gate-controlled lakes along the Yangtze River: a case study of Lake Shitang in Anqing City[J]. Journal of Lake Sciences, 2023,35(4):1359–1369.

[9] Zou W, Zhu G W, Cai Y J, et al. Relationships between nutrient, chlorophyll *a* and Secchi depth in lakes of the Chinese Eastern Plains ecoregion: implications for eutrophication management[J]. Journal of Environmental Management, 2020,260:109923.

[10] Luo J H, Duan H T, Xu Y, et al. Global trends and regime state shifts of lacustrine aquatic vegetation[J]. The Innovation, 2025,6(3):100784.

[11] Li Y, Wang L G, Chao C X, et al. Submerged macrophytes successfully restored a subtropical aquacultural lake by controlling its internal phosphorus loading[J]. Environmental Pollution, 2021,268:115949.

[12] Chao C X, Wang L G, Li Y, et al. Response of sediment and water microbial communities to submerged vegetations restoration in a shallow eutrophic lake[J]. Science of the Total Environment, 2021,801:149701.

[13] 唱彤,郦建强,陈文学,等. 湖泊生态系统修复理论与技术研究进展[J]. 水科学进展, 2024,35(6):1005–1020.

Chang Tong, Li Jianqiang, Chen Wenxue, et al. Research progress in theories and approaches for lake ecosystem restoration[J]. Advances in Water Science, 2024, 35(6): 1005–1020.

[14] Chen J, Li Y L, Shu L C, et al. The influence of the 2022 extreme drought on groundwater hydrodynamics in the floodplain wetland of Poyang Lake using a modeling assessment [J]. Journal of Hydrology, 2023,626:130194.

[15] Xu G D, Wu Y L, Liu S L, et al. How 2022 extreme drought influences the spatiotemporal variations of terrestrial water storage in the Yangtze River Catchment: insights from GRACE-based drought severity index and in-situ measurements[J]. Journal of Hydrology, 2023,626:130245.

[16] Chen M H, Zeng S D, Jiang B, et al. The comprehensive evaluation of how water level fluctuation and temperature change affect vegetation cover variations at a lake of ecological importance (Poyang Lake), China[J]. Ecological Indicators, 2023,148:110041.

[17] 史振铜,程吉林,杨树滩,等. 南水北调东线江苏段库群水资源优化调度方法研究[J]. 灌溉排水学报, 2015,34(4):14–18.

[18] 李冰,王亚,郑钊,等. 丹江口水库调水前后表层沉积物营养盐和重金属时空变化[J]. 环境科学, 2018,39(8):3591–3600.

[19] 李琦,张秋英,张依章,等. 河流型湖泊水质指标现状与成因分析:以东平湖为例[J]. 环境科学学报, 2022,42(8):304–313.

Li Qi, Zhang Qiuying, Zhang Yizhang, et al. Status and cause analysis of water quality indexes in river-type lake: a case study of Dongping Lake[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022,42(8):304–313.

[20] 韦洁琳,崔玉静,李亦真,等. 南水北调东线山东境内调蓄湖库蓝藻种群分布特征及环境驱动因子[J]. 环境科学, 2023, 44(11):6137–6148.

Wei Jielin, Cui Yujing, Li Yizhen, et al. Distribution characteristics and environmental driving factors of cyanobacteria community in impounded lakes and reservoirs in Shandong on the east route of South-to-North Water Diversion Project [J]. Environmental Science, 2023,44(11):6137–6148.

[21] 朱天顺,王丽虹,何亮,等. 调蓄河湖群菹草(*Potamogeton crispus* L.)功能性状特征及其与环境因子的关系[J]. 生态学报, 2020,40(6):1990–1998.

Zhu Tianshun, Wang Lihong, He Liang, et al. Characteristics of functional traits of *Potamogeton crispus* L. and their relationships with environmental factors in the channel river and impounded lakes[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020,40(6): 1990–1998.

[22] 张一泉,王卫星,次珍,等. 南四湖菹草生长周期对内源磷释放的影响[J]. 环境科学学报, 2024,44(8):370–382.

Zhang Yiquan, Wang Weixing, Ci Zhen, et al. The effect of growth cycle of *Potamogeton crispus* on internal phosphorus release in Nansihu Lake[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2024,44(8):370–382.

[23] 李庆,王国强,谢刚,等. 水文脉冲影响下南四湖浮游植物和大型底栖动物群落的不同变化特征[J]. 北京师范大学学报:自然科学版, 2020,56(3):454–461.

[24] 王宗志,白莹,杜慧华,等. 调水影响下湖泊流域水资源多尺度演变与安全调控[J]. 中国水利, 2024(13):27–33.

Wang Zongzhi, Bai Ying, Du Huihua, et al. Multi-scale evolution and safety regulation of water resources in lake watershed under water diversion influence[J]. China Water Resources, 2024(13):27–33.

[25] 谭浪,王宗志,白莹,等. 调水前后南四湖藻密度及水环境要素变化特征[J]. 湖泊科学, 2022,34(6):1804–1815.

Tan Lang, Wang Zongzhi, Bai Ying, et al. Variation characteristics of algae density and water environment factors in Lake Nansi before and after division of the water transfer[J]. Journal of Lake Sciences, 2022,34(6):1804–1815.

[26] 胥瑞晨,逢勇,胡祉冰,等. “引江济太”工程对太湖水体交换的影响研究[J]. 中国环境科学, 2020,40(1):375–382.

Xu Ruichen, Pang Yong, Hu Zhibing, et al. Influence study about water exchange on Taihu Lake based on the “Water

- Diversion Project from the Yangtze River to Taihu Lake (WDYT)" [J]. *China Environmental Science*, 2020, 40(1): 375–382.
- [27] 刘臻婧,肖启涛,胡正华,等. 引江济太对太湖贡湖湾氧化亚氮通量的影响[J]. *中国环境科学*, 2020,40(12):5229–5236.
- Liu Zhenjing, Xiao Qitao, Hu Zhenghua, et al. Effects of water diversion from Yangtze River to Lake Taihu on N_2O flux in Gonghu Bay, Lake Taihu[J]. *China Environmental Science*, 2020,40(12):5229–5236.
- [28] 潘晓雪,马迎群,秦延文,等. “引江济太”过程中长江—望虞河—贡湖氮、磷输入特征研究[J]. *环境科学*, 2015,36(8): 2800–2808.
- Pan Xiaoxue, Ma Yingqun, Qin Yanwen, et al. Nutrients input characteristics of the Yangtze River and Wangyu River during the “water transfers on Lake Taihu from the Yangtze River”[J]. *Environmental Science*, 2015,36(8):2800–2808.
- [29] 刘学文,李红清,杨真群,等. 基于长时间序列水位数据的长江下游莱子湖候鸟越冬期水位特征[J]. *湖泊科学*, 2019,31(6):1662–1669.
- Liu Xuewen, Li Hongqing, Yang Yinqun, et al. Water level characteristics of Lake Caizi, lower reaches of the Yangtze River during wintering period based on long-term hydrological alteration[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2019,31(6):1662–1669.
- [30] 王晓媛,江波,田志福,等. 冬季安徽莱子湖水位变化对主要湿地类型及冬候鸟生境的影响[J]. *湖泊科学*, 2018,30(6): 1636–1645.
- Wang Xiaoyuan, Jiang Bo, Tian Zhifu, et al. Impact of water level changes in Lake Caizi (Anhui Province) on main wetland types and wintering bird habitat during wintering period[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2018,30(6):1636–1645.
- [31] 朱秀迪,成波,李红清,等. 基于最大熵模型的莱子湖区越冬水鸟生境适宜性评价[J]. *湿地科学*, 2023,21(4):524–532.
- Zhu Xiudi, Cheng Bo, Li Hongqing, et al. Evaluation of suitability for wintering waterbird habitat in Caizi Lake area based on maximum entropy model[J]. *Wetland Science*, 2023,21(4):524–532.
- [32] Zhu X D, Cheng B, Li H Q, et al. Deteriorating wintertime habitat conditions for waterfowls in Caizi Lake, China: drivers and adaptive measures[J]. *Science of the Total Environment*, 2024,953:176020.
- [33] Li C L, Li H F, Zhang Y, et al. Predicting hydrological impacts of the Yangtze-to-Huaihe Water Diversion Project on habitat availability for wintering waterbirds at Caizi Lake[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019,249:109251.
- [34] 王钟,范中亚,杨忠勇,等. “引江济淮”工程对安徽莱子湖水龄分布的影响[J]. *湖泊科学*, 2018,30(6):1576–1586.
- Wang Zhong, Fan Zhongya, Yang Zhongyong, et al. Effects of Water Diversion Project from the Yangtze River to Huaihe River on the water age distribution of Lake Caizi, Anhui Province[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2018,30(6): 1576–1586.
- [35] 梁虹,谢健,王平,等. 基于HY-1C和Landsat 8数据珠江口海域悬浮物遥感反演[J]. *海洋开发与管理*, 2025,42(3):88–95.
- Luan Hong, Xie Jian, Wang Ping, et al. Remote sensing retrieval of suspended matter in the Pearl River Estuary based on HY-1C and Landsat 8 data[J]. *Ocean Development and Management*, 2025,42(3):88–95.
- [36] 孙凤琴,徐涵秋,施婷婷,等. 开发建设对敖江水质浊度影响的遥感监测[J]. *地球信息科学学报*, 2018,20(11):1679–1686.
- Sun Fengqin, Xu Hanqiu, Shi Tingting, et al. Remote sensing of regional construction practice induced water turbidity changes in Aojiang River[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2018,20(11):1679–1686.
- [37] Chen H X, Jin G Q, Tang H W, et al. Spatiotemporal variations of water levels and river-lake interaction in Poyang Lake Basin under the extreme drought[J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2025,57:102165.
- [38] Geng M M, Wang K L, Yang N, et al. Is water quality better in wet years or dry years in river-connected lakes – a case study from Dongting Lake, China[J]. *Environmental Pollution*, 2021,290:118115.
- [39] An L S, Liu C, Fan Z Y, et al. Effects of water level variations on the water quality of Huayang Lakes, China[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2025,35(1):173–188.
- [40] 范中亚,王文才,蒋锦刚,等. 华阳湖群沉积物内源磷释放风险及控制策略[J]. *环境科学研究*, 2020,33(5):1170–1178.
- [41] Wu T F, Qin B Q, Zhu G W, et al. Modeling of turbidity dynamics caused by wind-induced waves and current in Taihu Lake[J]. *International Journal of Sediment Research*, 2013, 28(2):139–148.
- [42] Zhou J, Han X X, Qin B Q, et al. Responses of alkaline phosphatase activity to wind-driven waves in a large, shallow lake: implications for phosphorus availability and algal blooms[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2021,99:143–150.
- [43] Cai Y W, Wang H X, Zhang T X, et al. Seasonal variation regulate the endogenous phosphorus release in sediments of Shijiu Lake via water-level fluctuation[J]. *Environmental Research*, 2023,238:117247.
- [44] Song Z H, Zhu G W, Zhu M Y, et al. Limiting factors on aquatic ecological health of Caizi Lake, a Changjiang River-isolated shallow lake: implications for lake restoration[J]. *Journal of Oceanology and Limnology*, 2025, 43(6): 1923–1937.
- [45] 李剑超,胡仁志,王波,等. 船舶螺旋桨射流扰动下的污染底泥起悬研究[J]. *环境科学与技术*, 2005,28(2):6–8.
- [46] 胡旭跃,余志,万家高,等. 船舶螺旋桨射流对湘江河床底泥扰动影响分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2015,24(11):1929–1934.