

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2023.03.005

调水期风场对淮河入江水道浅水湖泊水动力水质的影响研究

饶贵康^{1,2}, 王玲玲^{1,2}, 徐 津^{1,2}, 胡礼涵^{1,2}, 徐鹏程^{1,2}, 唐洪武^{1,2}

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 为研究调水期风场对淮河入江水道高邮湖、邵伯湖输水流场的影响, 采用 MIKE21 Flow Model 建立研究区域的二维风生流数值模型, 在盛行风场作用下分析两湖泊的水动力变化与水质更新规律。结果表明: 风荷载作用下, 高邮湖内形成了多个形态迥异的风生环流, 环流的流向、形状与风场的风向密切相关; 新民滩控制线的上下级湖面是风涌增减水作用显著的区域, 风速越高水位变幅越大, 该水位变幅可能导致高邮泵站设计扬程与调水动力不足; 风场的剪切拖曳作用对湖区水体与长江水体的更新置换规律也有影响, 顺风条件下湖区水体水质的更新速度与程度显著提高, 而逆风条件下水体更新强度则明显下降。

关键词: 南水北调; 浅水湖泊; 风生流; 风涌水; 水体置换

中图分类号: P343

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2023)03-0031-07

Study on the effect of wind field on hydrodynamic water quality of shallow lakes in Huaihe River watercourse entering Yangtze River during the water diversion period

RAO Guikang^{1,2}, WANG Lingling^{1,2}, XU Jin^{1,2}, HU Lihan^{1,2}, XU Pengcheng^{1,2}, TANG Hongwu^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to study the effect of wind fields during the water diversion period on the water transmission fields of Gaoyou Lake and Shaobo Lake in the inlet waterway of the Huaihe River, a two-dimensional wind flow numerical model of the study area was established by MIKE21 Flow Model, and the hydrodynamic changes and water quality renewal laws of the two lakes were analyzed under the action of prevailing wind fields. The results show that under the action of wind load, wind circulations of different structure are formed in Gaoyou Lake, and the flow direction and shape of the circulation are affected by the wind direction of the wind field; the upper and lower lakes of the Xinmintan control line are more significant areas of wind surge, and the higher the wind speed, the greater the water level variation, which may lead to a low design head of the pumping station project and insufficient water transfer power; the shear and drag effect of the wind field also has an impact on the renewal and replacement law of the water bodies in the lake area and the Yangtze River, and the renewal speed and degree of the water quality in the lake area are significantly improved under downwind conditions. Under headwind conditions, the degree of renewal of water quality in the lake area is decreased significantly.

Key words: South-to-North Water Diversion; shallow lake; wind-driven current; wind-driven surge; water body renewal

我国平原河网地区地势低洼, 浅水湖泊分布众多^[1-2], 大多兼有防洪供水、生态修复、灌溉航运等功能, 同时还具有平原水库的调蓄功效。风场是影响浅水湖泊湖流运动、泥沙冲淤、污染物输移的主要动力之一^[3-5], 对塑造大型浅水湖泊水动力场的形态和结构有重要作用, 因此研究浅水湖泊的风生流问题对于湖泊资源的开发利用与保护具有重要意义。

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFC3202605); 中央高校基本科研业务费专项(B200204044); 中国长江三峡集团有限公司科研项目(202003251); 江苏省水利科技项目(2021001)

作者简介: 饶贵康(1996—), 男, 硕士研究生, 主要从事水力学数值模拟研究。E-mail: 3541884208@qq.com

通信作者: 王玲玲(1966—), 女, 教授, 博士, 主要从事水力学数值模拟研究。E-mail: wanglingling@hhu.edu.cn

引用本文: 饶贵康, 王玲玲, 徐津, 等. 调水期风场对淮河入江水道浅水湖泊水动力水质的影响研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(3): 31-37.

RAO Guikang, WANG Lingling, XU Jin, et al. Study on the effect of wind field on hydrodynamic water quality of shallow lakes in Huaihe River watercourse entering Yangtze River during the water diversion period[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2023, 51(3): 31-37.

目前湖泊风生流研究主要有现场观测、实验室物理模型以及数值模拟等方法。数值模拟由于可以全方位、高效率地模拟湖泊水动力在不同水文、气象和地形要素驱动下的时空演化特征,现已成为风生流研究的重要手段^[3]。许旭峰等^[6]采用平面二维数学模型,研究了太湖夏季盛行风对湖区水位、流速以及流态的影响;党晚婷^[7]采用平面二维水动力水质模型,研究了风力驱动下不同形态的封闭湖湾与湖区水体置换能力的响应关系;陈志琦等^[8]为准确分析罗源湾水体的交换周期以及纳潮量的大小,数值计算中施加了当地风荷载对湖湾流场的影响;乌景秀等^[9]通过对比风向、湖泊地形、补水量等因素对静水湖泊水流流态的影响,提出了改善湖泊动力环境的调控方案;Liu等^[10]基于二维水流-污染物耦合数值模型,分析了风场驱动下太湖环流及污染物的输移过程;Jalil等^[11]通过模拟风场引起的水动力变化对浅水湖泊水流结构及沉积物再悬浮的影响,揭示了风荷载在沉积物再悬浮中的作用机制;舒叶华等^[12]利用水质模型,模拟了风生流驱动下太湖湖区污染物的输移规律,指出环流结构是导致太湖北部湖湾污染物长期聚集的主要原因。

前人的研究成果主要集中在探讨风场对湖流结构及污染物输移特性的影响方面,而风场对调蓄湖泊沿线引调水工程设计运行影响方面的研究成果少有报道。高邮湖、邵伯湖位于淮河入江水道中段^[13],是南水北调后续工程两个重要的调蓄湖泊。按照规划的要求,南水北调后续工程运行时,两湖的湖流流向将由原来的由北向南改为由南向北,两湖的淮河水质将被长江水质置换。由于高邮湖、邵伯湖是典型的浅水湖泊,风生流对湖区流场以及水体置换作用不容忽视,风涌增减水作用还可能影响两湖之间抽水泵站提水功能的发挥。鉴于此,本文以高邮湖、邵伯湖为研究对象,建立二维水动力水质模型,分析风场与调水动力共同作用下两湖的流场特征以及物质输移规律,研究成果可为工程方案的设计优化、湖区水质水生态的保护提供参考。

1 研究区域概况

高邮湖、邵伯湖位于苏皖两省交界处,是淮河入江水道上重要的蓄洪湖泊和行洪通道。两湖属于过水型湖泊,水域总面积分别约760.67 km²和98 km²,平均水深约1.44 m和1.1 m,周围地形以平原为主,常年主导风向为东南风^[14-16],冬季会刮西北风和东北风,平均风速约3.6 m/s。湖区内滩地密布,水利工程众多,其中新民滩的7个漫水闸与高程较高的滩地组成了新民滩控制线,为两湖的分界线(图1)。南水北调后续工程规划的全湖方案将在湖区开展抽槽工程,抽槽底宽邵伯湖段为300 m,高邮湖段为200 m。两湖有多个湿地及生态保护区,输水槽道设计线位避开了这些生态敏感区域。拟建的高邮泵站紧邻新民滩控制线的西岸堤防,共安装8台机组,设计扬程1.3 m。调水期间,高邮泵站在保证邵伯湖生态水位的条件下,抽引370 m³/s流量进入高邮湖。

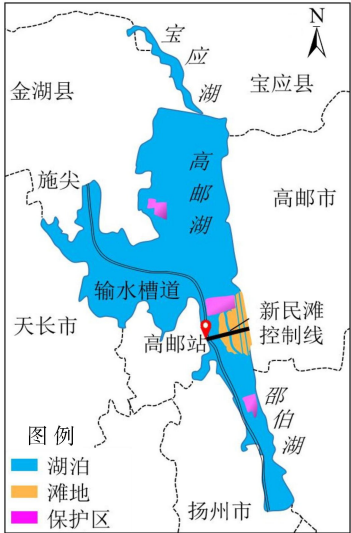


图1 研究区域范围

Fig.1 Locations of study area

2 模型建立

2.1 模型原理

MIKE21 模型有稳定、快速、可靠的运行特点,其计算原理是利用以单元为中心的有限体积法对水流连续方程和动量方程进行离散求解,可模拟各种作用力下二维自由表面流的水位及流速变化,对浅水湖泊风生流的模拟效果较好,在太湖、巢湖、洪泽湖等流域已有诸多应用。综合考虑模型适用性、现有资料情况,采用该模型建立高邮湖、邵伯湖二维水动力水质模型。

2.1.1 水动力模型基本原理

水深平均二维水动力控制方程由连续性方程(式(1))和动量方程(式(2))组成。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}}{\partial y} = hS \quad h\bar{u} = \int_{-d}^{\eta} u dz \quad h\bar{v} = \int_{-d}^{\eta} v dz \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial h\bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial y} - f\bar{v}h + gh\frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{h\partial p_a}{\rho_0\partial x} + \frac{gh^2}{2\rho_0}\frac{\partial \rho}{\partial x} - \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} + \\ \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} + \frac{1}{\rho_0}\left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y}\right) - \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xx}) - \frac{\partial}{\partial y}(hT_{xy}) - hu_sS = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial h\bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{v}^2}{\partial y} + \frac{\partial h\bar{uv}}{\partial x} - f\bar{u}h + gh\frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{h\partial p_a}{\rho_0\partial y} + \frac{gh^2}{2\rho_0}\frac{\partial \rho}{\partial y} - \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} + \\ \frac{\tau_{by}}{\rho_0} + \frac{1}{\rho_0}\left(\frac{\partial s_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial y}\right) - \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xy}) - \frac{\partial}{\partial y}(hT_{yy}) - hv_sS = 0 \end{aligned} \tag{3}$$

式中: t 为时间; x,y,z 为笛卡尔坐标; g 为重力加速度; h 为总水深; η 为自由水面高程; d 为静止水深; u,v 为 x,y 方向上的流速分量; f 为科氏力参数; ρ 为水的密度; p_a 为当地大气压强; ρ_0 为水的相对密度; τ_{sx},τ_{sy} 为风场摩擦力在 x,y 方向上的分量; τ_{hx},τ_{hy} 为河床摩擦力在 x,y 方向的分量; $s_{xx},s_{xy},s_{yy},s_{yx}$ 为辐射应力分量; $T_{xx},T_{xy},T_{yy},T_{yx}$ 为水平黏滞应力项; S 为点源流量大小; u_s,v_s 为源汇项水流流速。

2.1.2 水质模型基本原理

水质指标控制方程为对流扩散方程,考虑源项与降解过程:

$$\frac{\partial(hC)}{\partial t} + \frac{\partial(huC)}{\partial x} + \frac{\partial(hvC)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x}(D_xh\frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(D_yh\frac{\partial C}{\partial y}) - K_chC + S_a \tag{4}$$

式中: C 为垂线平均浓度; D_x,D_y 为 x,y 方向的扩散系数; K_c 为综合降解系数; S_a 为源汇项。

2.2 模型范围及网格划分

模型采用两湖最新的实测地形资料,利用 AutoCAD 提取高程点并生成用于模拟的地形文件。模型范围包括高邮湖区、邵伯湖区、新民滩滩地与邵伯湖群滩。输水槽道采用四边形网格模拟,其余区域采用三角形网格,在湖区出入口、输水槽道以及滩地区域进行局部加密,空间步长 10~500 m。计算节点共 7 715 个,计算单元 11 158 个,网格剖分示意图如图 2 所示。

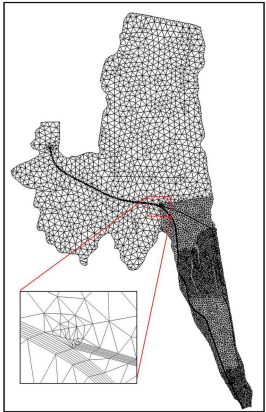


图 2 二维模型网格划分
Fig.2 Mesh division of two-dimensional model

2.3 参数选取与边界设置

为满足模型稳定与计算精度要求,同时受限于柯朗条件^[17],模型计算的时间步长取 120 s;干湿边界的水深系数分别取模型中的默认参数:干水深 $h_{dry} = 0.005\text{ m}$,淹没水深 $h_{flood} = 0.05\text{ m}$,湿水深 $h_{wet} = 0.1\text{ m}$;风阻力系数依据风速值的大小由模型自动插值计算;涡黏系数取 0.28。水质模块的参数主要包括综合降解系数与扩散系数,根据前人的相关研究^[18-20],高邮湖、邵伯湖总磷的降解系数可取 0.04 d^{-1} ,扩散系数^[21]取 1。

模型的边界条件分别设置于邵伯湖南端和高邮湖的出湖口(施尖)。调水时邵伯湖南端为模型的入流边界,给定调水流量为 $370\text{ m}^3/\text{s}$;高邮湖的出湖口(施尖)为模型的出流边界,给定设计水位 5.13 m;两湖间高邮泵站的调水作用概化为模型的内边界,给定设计调水流量 $370\text{ m}^3/\text{s}$ 。上述水位流量数据均来源于工程设计单位提供的资料。

3 模型率定

2007 年淮河流域自北向南大部分地区先后降暴雨到大暴雨,降雨过程历时长、范围广,为缓解淮河中游的防洪压力,入江水道沿线水闸全开泄水。由于该次洪水来流量大,洪峰期水位变化明显,适合作为数学模型的率定资料。选取 2007 年 7 月 9 日至 8 月 30 日入江水道实测的洪水过程对模型进行率定,最终确定高邮湖、邵伯湖的糙率分别为 0.021、0.027。湖区内两个水位站点高邮(高)与六闸的水位验证结果如图 3 所示,由图可知模型计算的水位过程与实测过程吻合较好,纳什效率系数分别达到了

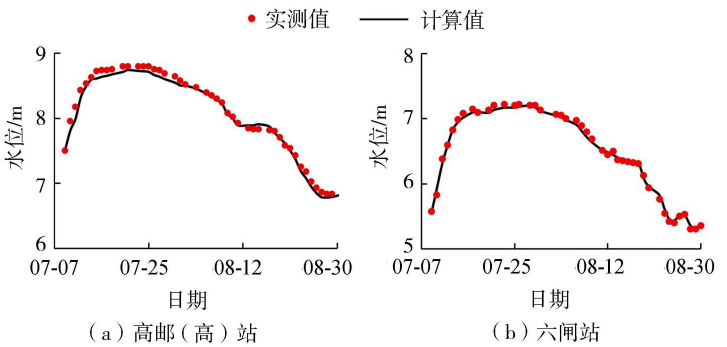


图 3 水位验证结果

Fig.3 Calibration result of water level

0.971、0.988,峰值水位误差小于 3%,表明所建模型精度较高,糙率取值合理,可用于后续调水工程的研究。

4 计算工况及结果分析

高邮湖、邵伯湖具有水深浅、湖面宽等特点,受外界因素影响水动力过程复杂多变。风是影响浅水湖泊湖流运动的主要驱动力之一。为研究盛行风在调水期对高邮湖、邵伯湖输水水流场的影响,选用东南风、西北风、东北风 3 个盛行方向的定常风进行数值试验,风速值取为该地区多年平均风速 3.6 m/s,同时考虑风速增高至 7.2 m/s 时的影响,工况设置见表 1,计算时初始条件分别给定为高邮湖、邵伯湖的设计输水水位 5.13 m 与 4.13 m。

4.1 风场作用对湖区流场的影响

图 4 是 7 种风况下高邮湖、邵伯湖的风生流场图,图中黑色直线表示新民滩控制线。由图 4 可知,无风时高邮湖、邵伯湖仅受泵站调水动力的影响,水流从邵伯湖南端入湖后一路向北流动,整个过程并未产生环流或漩涡等水动力现象,湖区流态稳定。

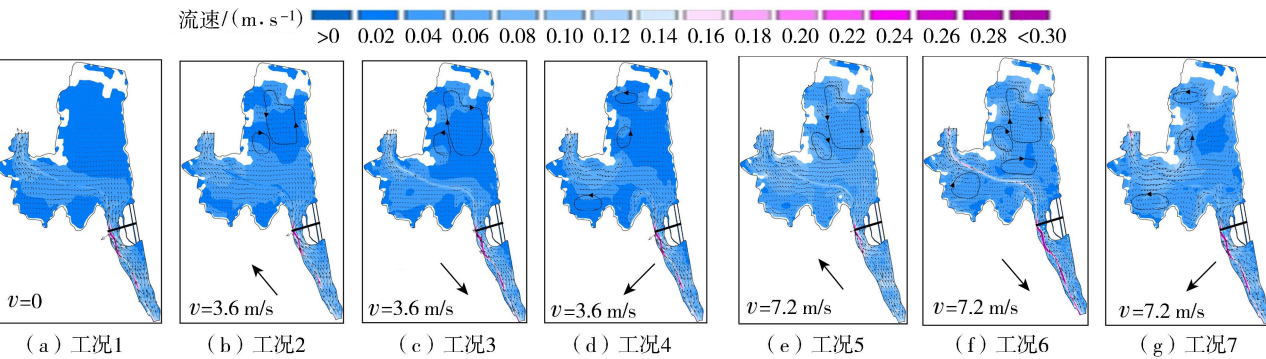


图 4 不同风况下两湖区输水流场

Fig.4 Flow fields of water transfer in the two lakes under different wind conditions

当受风场影响时,不同风况下湖区北部会形成不同结构的风生环流,环流的流向、形状与风场风向相关。随着风速增大,两湖的水动力强度提升,流速增幅为 0.01 ~ 0.06 m/s,但流场的总体形态改变不大,仅西北风作用时高邮湖出现环流增多的现象。对比风场作用前后两湖区的流场,可以发现风荷载对高邮湖的影响程度明显强于邵伯湖。由于邵伯湖为典型的河道型湖泊,狭长的湖泊地形削弱了风对湖面的剪切拖曳作用;而高邮湖具有平面尺度大、湖区水深浅等特点,水动力较弱的水域极易受风荷载的影响,因此湖区北部流场复杂多变,在调水期可能会对湖区的物质运输与水质更新造成影响。

4.2 风场作用对高邮泵站枢纽运行水位的影响

风涌增减水现象是指风生湖流向前运动时,若遇障碍物阻挡会在迎风岸引起水位抬高、背风岸引起水位下降的现象。由于高邮站连同新民滩控制线将高邮湖和邵伯湖隔离成上下两个梯级湖泊,阻挡了风生流的前行方向,导致高邮站的上下游易发风涌增减水现象,影响泵站工程的正常运行。

为研究调水期风荷载对高邮湖、邵伯湖水位的影响,绘制工况 2 ~ 7 与工况 1 的水位差等值线如图 5 所示。由图 5 可知,风场作用会引起两湖区的水位变化,沿吹程方向水位差呈梯级分布。东南风时,由于新民滩控制线阻挡了风生流的前行方向,水流会在邵伯湖一侧形成水位壅高,高邮湖一侧形成水位下降,且风速越高水位变幅越大;西北风时两湖区的水位差分布同东南风相似,但趋势相反,即靠近新民滩一侧高邮湖水位壅高,而邵伯湖一侧水位则下降;东北风作用时整个湖面向西南侧倾斜,两湖区的迎风岸水位壅高,而背风岸水位下降。

6 个工况的计算结果表明,新民滩控制线的附近湖面是风涌水现象最为显著的区域,风速越高该区域的水位变幅越大,上下级湖面的水位差最大可超过 0.2 m。倘若高邮泵站在设计之初没有考虑风涌水的影响,可能导致设计扬程偏低,调水动力不足。此外,湖区水位过低也可能影响泵站取水口的取水效果。因此,建于湖泊沿岸的泵站工程、取水工程等水利设施,在规划建设时有必要考虑风涌水的影响,避免湖区水位变化过大而影响工程的正常运行。

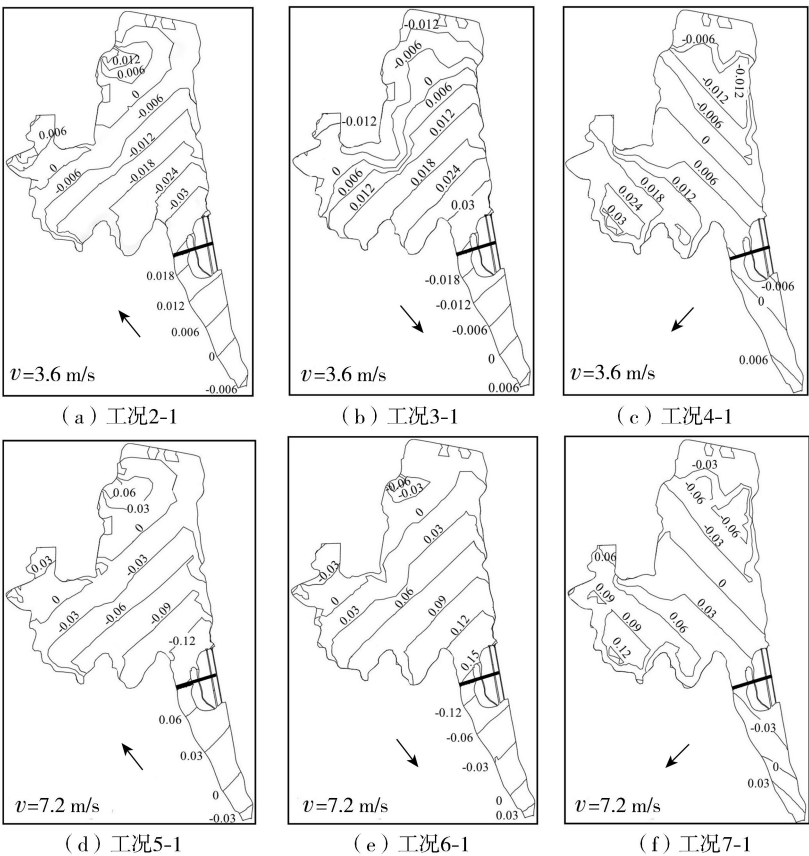


图 5 两湖区水位差等值线(单位:m)

Fig. 5 Contour plot of water level difference between the two lakes(unit:m)

4.3 风场作用对两湖区水体更新的影响

污染物输移扩散与水体的更新置换是南水北调后续工程水质水生态研究的一项重要内容。长时间的输水过程中,湖泊水体将与长江水体发生融合、置换,从而引起湖区水质的变化。

以高邮湖、邵伯湖的污染物总氮为研究对象,分析调水期不同风场对两湖区水质分布与水体交换能力的影响。根据 2019 年中国科学院南京地理与湖泊研究所的现场实测,高邮湖总氮质量浓度在 0.85 ~ 2.09 mg/L 之间,高浓度水域集中在湖区的西南区域;邵伯湖总氮质量浓度在 1.15 ~ 1.48 mg/L 之间;长江干流的三江营站点总氮质量浓度为 2 mg/L 左右,高于两湖。因此从总氮来看,两湖水质优于长江水质。

根据实测资料,设定模型计算时高邮湖与邵伯湖的总氮初始质量浓度如图 6 所示,图中 A、B、C、D 是 4 个水质监测点。模拟时邵伯湖南部边界的总氮入流质量浓度设定为 2 mg/L。经计算,当在无风条件下(工况 1)调水约 90 d,4 个监测点的总氮质量浓度基本稳定并保持不变,如图 7 所示。

为了研究风荷载对两湖区水体更新置换的影响,图 8 比较了不同风况下两湖区调水 90 d 后总氮质量浓度分布结果。由图 8 可知,无风条件下,两湖大部分区域的总氮质量浓度已基本升至调水浓度,其中高邮湖、邵伯湖生态保护区均被长江水体置换,仅高

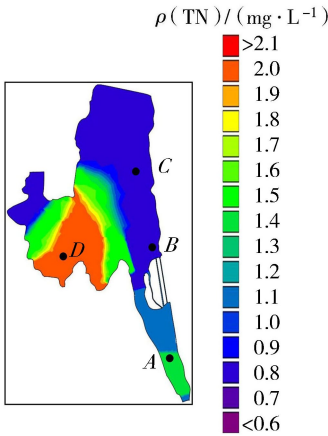


图 6 高邮湖、邵伯湖总氮初始质量浓度

Fig. 6 Initial concentration distribution of total nitrogen

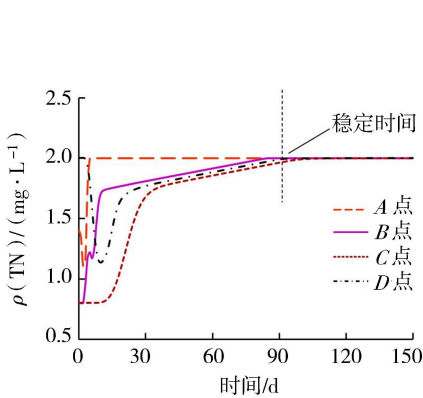


图 7 无风条件下 4 个水质监测点的总氮质量浓度变化

Fig. 7 Total nitrogen concentration variation of 4 water quality monitoring points under windless conditions

邮湖北端及湖区西南侧水力较弱的区域总氮质量浓度还维持初始较低值。当风向为东南风时(图8(b)(e)),两湖水体的置换程度明显提高,高邮湖北部原本难以更新的水域在东南风的驱动下也基本置换为长江水体。相比于无风工况,东南风的作用能够显著提升湖区内污染物的输移能力。而当湖区受冬季西北风影响时(图8(c)(f)),由于风向与调水流向相反,逆风作用使调水水体难以运动至湖区北部,加之湖区北部形成的风生环流在很大程度上抑制了两种水体间的融合交换,因此输水过程中该水域的总氮质量浓度始终较低,水体更新程度弱。东北风也属于逆风类工况(图8(d)(g)),调水期高邮湖的水体更新同样受阻,但相比于西北风其影响程度相对较低,水体更新有所增强。

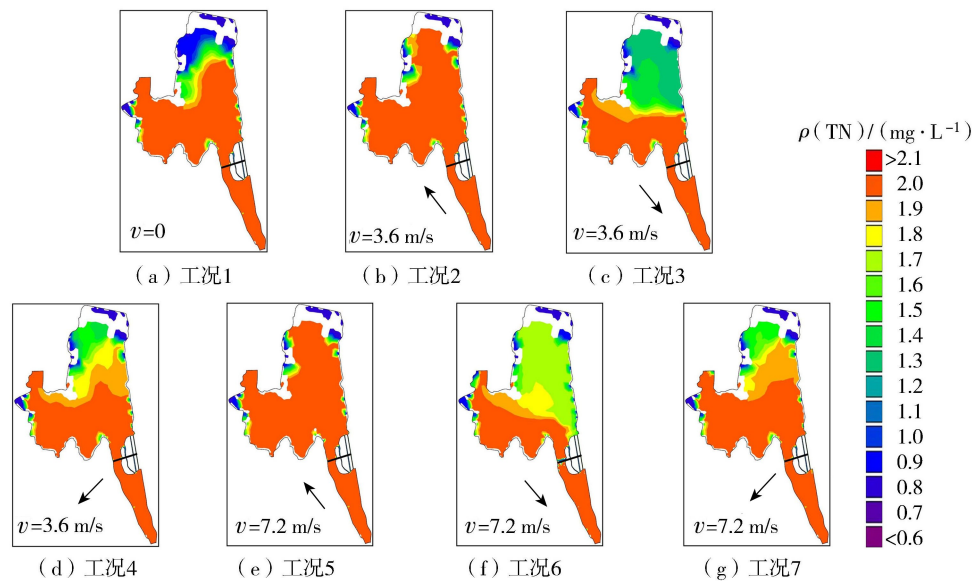


图8 调水第90 d时两湖总氮质量浓度分布

Fig.8 Distribution of total nitrogen concentration in two lakes on the 90th day of water transfer

上述分析表明,调水期风场是影响淮河入江水道高邮湖水体更新与水质分布的重要因素,风场条件不同,湖区内总氮等污染物的输移扩散规律也不同。此外,模拟结果还表明:高邮湖、邵伯湖生态保护区在调水时大部分区域会被长江水体置换,水质的改变可能影响原有的水生态环境,不利于保护区内水生生物的生长,有必要采取相关的应对保护措施,如加强保护区内的水质监测和管理、设置有效隔离带、建立人工湿地、利用水生植物的自然净化作用降低来流水体的污染物含量等。

5 结 论

- a. 高邮湖是风场作用的敏感区域,在风力驱动下湖区将形成不同结构的风生环流,环流的流向、形状由风场风向决定;邵伯湖由于平面尺度较小,风荷载不会对湖区的流场结构产生过大的影响。
- b. 风场作用会引起湖区迎风岸水位抬高、背风岸水位下降,新民滩控制线的上下级湖面是风涌增减水最为显著的区域,本文研究工况下水位差最大可超过0.2 m。由于风荷载对浅水湖泊的水位影响较大,因此沿岸岸修建的泵站工程、取水工程等水利设施,在规划建设时有必要考虑当地风场的影响,以免湖区水位变化过大而影响涉水工程的正常运行。
- c. 风场是影响淮河入江水道高邮湖水体更新和水质分布的重要因素:当风场风向与调水方向同向时,高邮湖水体的置换程度会显著提高;而当两者逆向时,湖区水体的置换程度将显著下降。
- d. 由于输水过程中高邮湖、邵伯湖的生态保护区大部分区域水体将被长江水体置换,水质的改变可能影响原有的水生态环境,不利于保护区水生生物的生长,应采取适当的保护措施。

参考文献:

[1] 高丽莎,高程程,汪涛. 基于精细化河网水动力模型的长宁区除涝能力评估[J]. 水资源保护,2021,37(5):62-67. (GAO Lisha,GAO Chengcheng,WANG Tao. Assessment of waterlogging control capacity in Changning District based on refined river network hydrodynamic model[J]. Water Resources Protection,2021,37(5):62-67. (in Chinese))

- [2] 闫毓,袁赛瑜,唐洪武,等. 上海蕴南水利控制片河网水动力再造[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(4):329-334. (YAN Yu, YUAN Saiyu, TANG Hongwu, et al. Hydrodynamic reconstruction of Wennan river network in Shanghai City[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2021,49(4):329-334. (in Chinese))
- [3] 彭兆亮,汪院生,胡维平,等. 洪泽湖风生流对风场和水位变化响应特征[J]. 湖泊科学,2021,33(6):1925-1939. (PENG Zhaoliang, WANG Yuansheng, HU Weiping, et al. Response of wind-driven circulation to wind field and water level variations in Lake Hongze[J]. Journal of Lake Sciences,2021,33(6):1925-1939. (in Chinese))
- [4] 王建威,李一平,罗淑葱,等. 太湖风生流垂向切变规律的原位观测[J]. 水资源保护,2016,32(6):98-103. (WANG Jianwei, LI Yiping, LUO Liancong, et al. Field observation of vertical shear of wind-driven current in Taihu Lake[J]. Water Resources Protection,2016,32(6):98-103. (in Chinese))
- [5] 周杰源,沈永明,王金华. 太湖夏季环流成因的数值研究[J]. 海洋与湖沼,2013,44(5):1130-1137. (ZHOU Jieyuan, SHEN Yongming, WANG Jinhua, et al. Response of wind-driven circulation to wind field and water level variations in Lake Hongze[J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica,2013,44(5):1130-1137. (in Chinese))
- [6] 许旭峰,刘青泉. 太湖风生流特征的数值模拟研究[J]. 水动力学研究与进展:A辑,2009,24(4):512-518. (XU Xufeng, LIU Qingquan. Numerical study on the characteristics of wind-induced current in Taihu Lake[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics,2009,24(4):512-518. (in Chinese))
- [7] 党晚婷. 不同形态湖湾风生流平面二维数值模拟及水体交换能力研究[D]. 武汉:长江科学院,2019.
- [8] 陈志琦,逢勇,张倩,等. 基于水动力数值模拟的罗源湾水体交换周期及纳潮量计算[J]. 水资源保护,2022,38(3):125-130. (CHEN Zhiqi, PANG Yong, ZHANG Qian, et al. Calculation of water body exchange period and tidal prism in Luoyuan Bay based on hydrodynamic simulation[J]. Water Resources Protection,2022,38(3):125-130. (in Chinese))
- [9] 乌景秀,范子武,张铭,等. 浅水湖泊风生流强度数值模拟及工程应用[J]. 水电能源科学,2014,32(9):119-122. (WU Jingxiu, FAN Ziwu, ZHANG Ming, et al. Numerical simulation of shallow-water lake wind-induced current and its engineering application[J]. Water Resources and Power,2014,32(9):119-122. (in Chinese))
- [10] LIU Xiaodong, LI Lingqi, WANG Peng, et al. Numerical simulation of wind-driven circulation and pollutant transport in Taihu Lake based on a quadtree grid[J]. Water Science and Engineering,2019,12(2):108-114.
- [11] JALIL A, LI Yiping, ZHANG Ke, et al. Wind-induced hydrodynamic changes impact on sediment resuspension for large, shallow Lake Taihu, China[J]. International Journal of Sediment Research,2019,34(3):205-215.
- [12] 舒叶华,高晨晨. 太湖风生流及污染物输移扩散数值模拟[J]. 水资源保护,2021,37(2):121-127. (SHU Yehua, GAO Chenchen. Numerical simulation of wind-driven current and pollutant transport and diffusion in Taihu Lake[J]. Water Resources Protection,2021,37(2):121-127. (in Chinese))
- [13] 吴小伟,刘平. 扬州境内湖泊浮游植物群落结构及其与环境因子的关系[J]. 水资源保护,2015,31(5):47-52. (WU Xiaowei, LIU Ping. Phytoplankton community structure and its relationship with environmental factors in lakes in Yangzhou[J]. Water Resources Protection,2015,31(5):47-52. (in Chinese))
- [14] 管玉莹,虞功亮,韩睿明,等. 近30年来高邮湖(含邵伯湖)自然水域面积变化及其影响因素[J]. 环境科学研究,2019,32(12):2057-2064. (GUAN Yuying, YU Gongliang, HAN Ruiming, et al. Changes in water area of Gaoyou Lake (including Shaobo Lake) and the influencing factors in the past 30 years[J]. Research of Environmental Sciences,2019,32(12):2057-2064. (in Chinese))
- [15] 李增福. 江苏省南水北调受水区水文模型研究[D]. 南京:南京大学,2011.
- [16] 张敏,陆丽莉,郭军,等. 江苏省宝应湖地区排涝能力分析[J]. 江苏水利,2009(9):27-28. (ZHANG Min, LU Lili, GUO Jun, et al. Analysis of drainage capacity in Baoying Lake area of Jiangsu Province[J]. Jiangsu Water Resources,2009(9):27-28. (in Chinese))
- [17] 黄鑫,秦国锐,罗秋实,等. 感潮河段平面二维非恒定水流模型深化研究[J]. 水利水电技术,2015,46(4):130-133. (HUANG Xin, QING Guorui, LUO Qiushi, et al. Deepened study on two-dimensional unsteady flow model for tidal river reach[J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2015,46(4):130-133. (in Chinese))
- [18] 孙卫红,韩龙喜. 基于水量水质模型的高邮湖控制断面污染源解析[J]. 环境保护科学,2019,45(5):52-57. (SUN Weihong, HAN Longxi. Pollution source appointment for the control section in Gaoyou Lake based on water quantity and water quality mode[J]. Environmental Protection Science,2019,45(5):52-57. (in Chinese))
- [19] 张萍,黄锦辉,孙翀,等. 基于水质目标可达的入太湖湖体污染物削减方案研究[J]. 水利水电技术,2016,47(11):99-102. (ZHANG Ping, HUANG Jinhui, SUN Chong, et al. Water quality target reachability-based study on scheme for reduction of pollutants into Taihu Lake[J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2016,47(11):99-102. (in Chinese))
- [20] 冯帅,李叙勇,邓建才. 太湖流域上游河网污染物降解系数研究[J]. 环境科学学报,2016,36(9):3127-3136. (FENG Shuai, LI Xuyong, DENG Jiancai. A study on degradation coefficients of pollutants in the upstream river network of the Lake Taihu Basin[J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2016,36(9):3127-3136. (in Chinese))
- [21] 郭晓明,乔明. MIKE21 模型在排污口地表水影响预测方面的应用[J]. 四川环境,2021,40(3):117-123. (GUO Xiaoming, QIAO Ming. Application of MIKE21 model in prediction of environmental impact of sewage outlet on surface water[J]. Sichuan Environment,2021,40(3):117-123. (in Chinese))