

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.04.003

洪泽湖换水能力的时空分布特征

薛联青^{1,2}, 沈海岑¹, 张敏³, 汪露³

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 皖江工学院水利工程学院, 安徽 马鞍山 243000;

3. 江苏省洪泽湖管理委员会办公室, 江苏 淮安 223100)

摘要:为研究洪泽湖换水能力的时空分布特征, 基于 MIKE21 建立洪泽湖二维水动力模型, 模拟分析了洪泽湖不同湖区的换水周期; 考虑洪泽湖的流场呈现风生流和吞吐流双重特点, 分析了不同季节和不同风场条件下换水周期的空间变化特征。结果表明: 洪泽湖换水周期空间异质性明显, 从南到北梯度递增, 冬季和春季全湖平均换水周期较长, 分别为 75 d 和 60 d, 秋季和夏季的全湖平均换水周期较短, 分别为 49 d 和 31 d; 实际风场对洪泽湖的换水能力起到正向作用, 东南风对洪泽湖的换水能力起正向作用, 东北风对洪泽湖的换水能力起到抑制作用。

关键词: 换水周期; 流场; 水动力模型; 洪泽湖

中图分类号: TV213.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2022)04-0013-08

Spatial and temporal distribution characteristics of water exchange capacity in Hongze Lake // XUE Lianqing^{1,2}, SHEN Haicen¹, ZHANG Min³, WANG Lu³ (1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. School of Hydraulic Engineering, Wanjiang University of Technology, Maanshan 243000, China; 3. Hongze Lake Management Committee of Jiangsu Province, Huai'an 223100, China)

Abstract: In order to study the temporal and spatial distribution characteristics of water exchange capacity of Hongze Lake, a two-dimensional hydrodynamic model of Hongze Lake was established based on MIKE21, and the water exchange cycles in different lake areas of Hongze Lake were simulated and analyzed. Considering the dual characteristics of wind-driven flow and throughput flow in the flow field of Hongze Lake, the spatial variation characteristics of water exchange period in different seasons and different wind fields were analyzed. The results show that the spatial heterogeneity of water exchange period in Hongze Lake is obvious, increasing from south to north. The average water change cycle of the whole lake is longer in winter and spring, which are 75 d and 60 d respectively, and shorter in autumn and summer, which are 49 d and 31 d respectively. The actual wind field has a positive effect on the water exchange capacity of Hongze Lake, the southeast wind has a positive effect on the water exchange capacity of Hongze Lake, and the northeast wind has an inhibitory effect on the water exchange capacity of Hongze Lake.

Key words: water changing cycle; flow field; hydrodynamic model; Hongze Lake

洪泽湖是淮河流域重要的调蓄湖泊, 淮河下游地区重要的水源地, 同时也是南水北调东线工程的主要调节湖泊^[1-2]。随着区域人类活动加剧, 洪泽湖面临着自由水面面积缩减、局部富营养化、植被覆盖度降低等多重环境问题^[3-8]。湖泊的换水周期决定着输移容量和水环境容量, 是判断湖泊污染物输移能力的重要指标^[9]。风场和吞吐流对浅水湖泊的水体交换过程有重要影响^[10], 洪泽湖的湖面宽阔, 风场和吞吐流共同塑造其流场形态^[11], 从而对

洪泽湖污染物的扩散、迁移产生影响。因此探究不同风场和不同季节来水条件下洪泽湖换水周期的时空分布, 有利于识别水动力因素对污染物运移的影响^[12]。

国内外众多学者对湖库、海湾等水体换水能力开展了研究。Cucco 等^[13]构建了威尼斯潟湖二维水动力模型, 通过潟湖内释放的被动示踪剂的残差函数来确定水体停留时间; Bocaniov 等^[14]利用三维水动力-富营养化模型计算了 3 种水体传输时间, 研

究发现营养盐损失率与所有运输时间尺度指标均呈统计学显著相关;李云良等^[15]基于对流扩散理论计算不同季节鄱阳湖的换水周期和传输时间,研究发现季节水情对换水周期有较大影响;胥瑞晨等^[16]研究得出水龄和水体停留时间存在 63% 的比例关系,并计算出太湖在不同风场条件下不同方位湖区的水体交换率和半交换周期;陶磊等^[17]基于欧拉观点建立了渤海湾水龄计算模型,分析了潮汐和季风两个因素对渤海湾水体交换的影响。目前,对洪泽湖水体交换能力的研究仅停留在定量计算阶段^[18],缺少对水体交换驱动机理的研究。本文基于 MIKE21 建立洪泽湖二维水动力模型,模拟计算洪泽湖不同湖区的换水周期,考虑洪泽湖的流场呈现风生流和吞吐流双重特点,分析不同季节和不同风场条件下换水周期的空间变化特征,从流场的角度分析水体交换的驱动机理,可为洪泽湖的水环境治理提供科学依据。

1 研究区概况

洪泽湖的多年平均水位(蒋坝站)为 12.55 m,平均水深 1.9 m,最大水深 4.5 m。多年平均入湖水量为 342 亿 m^3 ,入湖河流主要分布在湖泊西岸和南岸,包括淮河干流、怀洪新河、徐洪河、濉河、新汴河、老濉河和老汴河(图 1),其中,淮河干流每年入湖水量超过 70%。多年平均出湖水量为 313 亿 m^3 ,出湖河道为二河、入江水道和苏北灌溉总渠,其中,入江水道为主要出湖河道,控制工程为三河闸,出湖水量占总量的 60%~70%。洪泽湖的不同湖区呈现不同的流场形态,流场形态对大型过水性湖泊的污染物运移方式有重要影响^[19],不同湖区的水质状况差别较大,结合湖泊特点将洪泽湖划分为成子湖区、二

河区、临淮区、老子山区、三河区、中心湖区和溧河洼区 7 个湖区,如图 1 所示。

2 研究方法

2.1 水动力模型原理

MIKE21 水动力模型基于 Navier-Stokes 方程,并遵从 Boussinesq 假定。二维非恒定流浅水方程为

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}}{\partial y} = hS \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial h\bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial y} = & f\bar{v}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial P_a}{\partial x} - \\ & \frac{g}{2\rho_0} \frac{h^2}{\partial x} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{lx}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) + \\ & \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (hT_{xy}) + hu_s S \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial h\bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}^2}{\partial y} = & -f\bar{u}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial P_a}{\partial y} - \\ & \frac{g}{2\rho_0} \frac{h^2}{\partial y} \frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{ly}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial S_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) + \\ & \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y} (hT_{yy}) + hv_s S \end{aligned} \quad (3)$$

其中

$$T_{xx} = 2A \frac{\partial \bar{u}}{\partial x}$$

$$T_{xy} = A \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right) \quad T_{yy} = 2A \frac{\partial \bar{v}}{\partial y}$$

式中: h 为总水头; η 为河底高程; d 为静止水深; t 为时间; x, y, z 为笛卡尔坐标系坐标; $\bar{u}, \bar{v}$ 为某点在 x, y 方向上的平均流速; S 为源汇项; g 为重力加速度; ρ, ρ_0 分别为水的密度和相对密度; P_a 为当地大气压强; f 为科氏力参数; $S_{xx}, S_{xy}, S_{yx}, S_{yy}$ 为辐射应力分量; $\tau_{sx}, \tau_{lx}, \tau_{sy}, \tau_{ly}$ 为黏滞应力项; T_{xx}, T_{xy}, T_{yy} 为侧向应力项; u_s, v_s 为源汇项流速分量; A 为断面面积。

2.2 水动力模型建立及验证

采用洪泽湖 2019 年 90 m × 90 m 的 DEM 数据,结合实测水深资料,在 MIKE 模型中进行修正,得到湖底高程数据,利用 Mesh Generator 工具将湖区划分为 19475 个非结构三角形网格,共计 10888 个节点。将洪泽湖的主要入湖口和出湖口作为开边界,综合考虑洪泽湖水系特征,入湖河道选择淮河干流(包括池河)、怀洪新河、新汴河、濉河和汴河,出湖河道选择三河、二河、苏北灌溉总渠和徐洪河。上边界(入湖边界)输入实测流量数据,下边界(出湖边界)输入实测水位数据。采用 2016 年的实测水位数据对模型进行验证,模拟时段为 2016 年 1 月 1 日 8:00 至 2016 年 12 月 31 日 8:00。初始水位设为 2015 年 12 月 31 日蒋坝站水位 13.12 m,初始流速

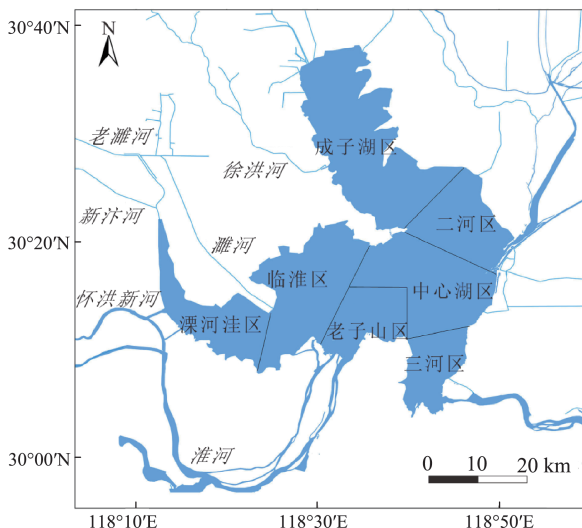


图 1 洪泽湖分区及水系分布

Fig. 1 Division and water system distribution of Hongze Lake

设为 $0 \text{ m}^3/\text{s}$, 最小时间步长设为 1 s 。根据洪泽湖实际情况, 设定干水深为 0.006 m , 湿水深为 0.1 m , 淹没水深为 0.05 m 。主要参数设置为: 曼宁系数 $45 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ 、CFL 数 0.8 、涡黏系数 0.28 。验证结果见图 2, 计算求得尚咀、老子山、高良涧闸和蒋坝 4 个验证点的 Nash 系数分别为 0.9886 、 0.9902 、 0.9953 和 0.9884 , 满足模拟的精度要求。

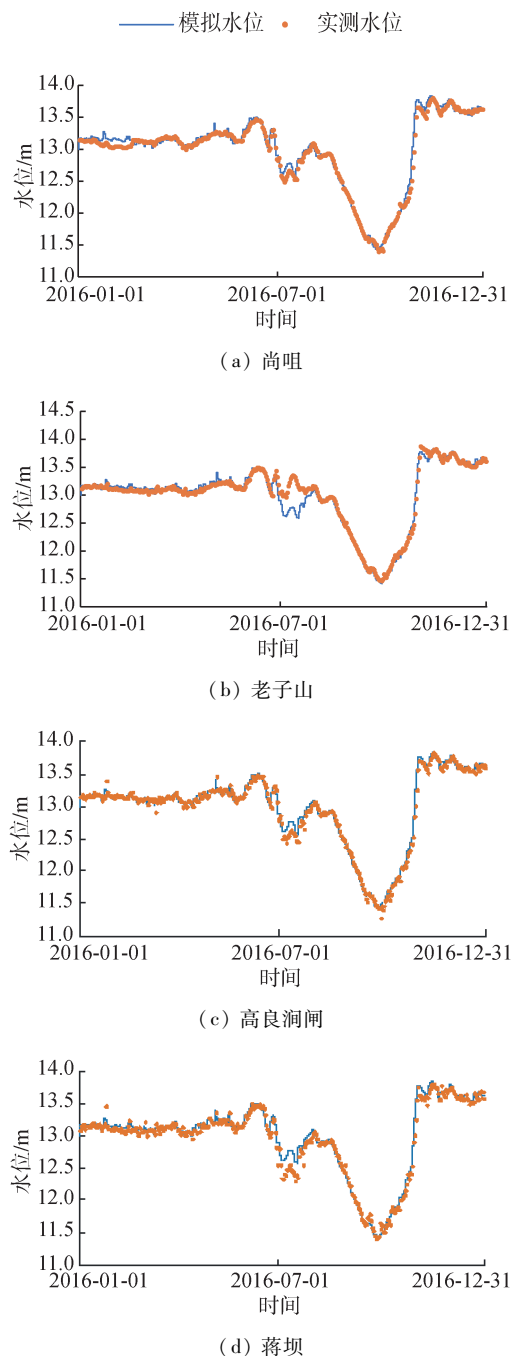


图 2 模型验证结果

Fig. 2 Results of model validation

2.3 换水周期计算原理

很多学者从不同角度定义湖库的水体交换能力, 比如水龄、示踪剂传输时间、换水周期等^[20-22]。湖泊换水周期是评价水体中由对流扩散导致的物质

交换速率的常用概念, 本文根据湖泊特点, 选择湖泊换水周期来定量研究洪泽湖的水体交换能力。在湖泊中投入不可降解的示踪剂, 假设示踪剂浓度变化呈现指数规律衰减^[23], 则湖泊平均换水周期计算公式为

$$\tau = \int_0^{\infty} r_t dt \quad (4)$$

$$\text{其中 } r_t = \frac{\rho_t}{\rho_0} \quad \rho_t = \rho_0' e^{-t/\tau}$$

式中: τ 为湖体平均换水周期; r_t 为 t 时刻示踪剂质量浓度与初始时刻质量浓度之比; ρ_t 为 t 时刻示踪剂质量浓度; ρ_0' 为初始时刻示踪剂质量浓度。

由于现实中物质浓度不可能降为 0, 当 $t = \tau$ 时, 示踪剂浓度降为初始浓度的 e^{-1} 或 37% ^[24], 定义示踪剂浓度衰减至初始浓度的 37% 所需的时间为换水周期。计算换水周期时, 将初始示踪剂空间质量浓度场设为 1 mg/L , 入湖口质量浓度设为 0 mg/L , 出湖口设为自由出流, 通过编写 Python3.9 代码读取每个非结构网格点质量浓度降解为 0.37 mg/L 的时刻, 用空间连接功能导入到 ArcGIS10.5 中, 生成湖泊换水周期的空间分布, 并通过分区进行区域空间统计, 计算出各个湖区的平均换水周期。

2.4 模拟情景设置

水文和风场条件是研究浅水湖泊水体交换过程的基础^[25]。为研究不同季节、风向对洪泽湖水体交换能力以及污染物运移的影响, 设置几种数值模拟情景(表 1), 模拟时间均为 365 d , 即 1 个水文年。情景 1 模拟 2013—2019 年平均来水、气象条件下的换水周期, 将示踪剂(初始浓度场)的投放时间设定为 1 月 1 日、4 月 1 日、7 月 1 日和 10 月 1 日, 表征洪泽湖春、夏、秋和冬季的换水能力^[17]。情景 2 设定实际风场、无风和典型主导风场为 1.88 m/s 的东南风与东北风, 模拟不同风场条件对湖泊各区域换水周期的影响。

3 结果与分析

3.1 换水周期时空分布规律

图 3 为不同季节换水周期空间分布, 图 4 为各湖区不同季节的换水周期。由图 3、图 4 可见, 洪泽湖换水周期空间异质性明显, 整体呈现出南部湖区水体更新时间快、北部湖区水体更新时间慢的特点, 换水周期从南到北的梯度变化, 主要与洪泽湖的水文情势密切相关, 淮河干流入流超过入湖流量的 70% , 且从南部老子山处入湖, 故淮河上游的入流增强了南部湖区的水体交换能力。

表 1 模拟情景设置

Tab.1 Settings of simulation scenario

名称	序号	入湖流量	风场	模拟时间
情景 1	①	2013—2019 年多年平均流量	多年平均风场	01-01—12-31
	②	2013—2019 年多年平均流量	多年平均风场	04-01—次年 03-31
	③	2013—2019 年多年平均流量	多年平均风场	07-01—次年 06-30
	④	2013—2019 年多年平均流量	多年平均风场	10-01—次年 09-30
情景 2	①	2019 年实际流量	实际风场	2019-01-01—2019-12-31
	②	2019 年实际流量	无风	2019-01-01—2019-12-31
	③	2019 年实际流量	1.88 m/s 东南风	2019-01-01—2019-12-31
	④	2019 年实际流量	1.88 m/s 东北风	2019-01-01—2019-12-31

冬、春两季全湖平均换水周期较长,分别为 75 d 和 60 d,秋、夏两季的全湖平均换水周期较短,分别为 49 d 和 31 d。冬、春两季的换水周期空间分布相似,淮河入湖口(老子山区)湖泊换水能力较强,换水周期约为 10 d,呈现从淮河入湖区到二河、三河出湖区递增的特点,三河区 and 中心湖区的换水周期均值为 45 d 左右,二河区的均值为 83 d 左右,出湖口

局部水流交换较快,在 10 d 以内。成子湖区的换水能力最弱,湖水流动缓慢,均值为 157 d 左右,成子湖区最北部的换水周期最长,达 250 d。西部湖区溧河洼区和临淮区在冬季的换水周期均值分别为 80 d 和 46 d,春季较冬季换水能力增强,换水周期分别缩短了 31.25% 和 37.5%。

夏季属于丰水期,淮河干流入湖流量占全年的 40% 左右,上游大量来水导致全湖水体更新能力显著增强,换水周期均值为 31 d,比冬季和春季减少了近 50%,南部湖区均值小于 10 d。其中溧河洼区、中心湖区、临淮区和三河区水体更新能力较春季改善显著,换水周期均从 30 ~ 60 d 减少为 10 d 左右,东部沿岸为 10 ~ 20 d;二河区换水能力较弱,为 30 d 左右,但较春季和冬季减少了 63%;成子湖区的换水周期均值为 103 d,湖区最北端的换水周期长达 239 d,但总体来说,均值较其他季节减少了 34.8%,其中,徐洪河入湖口的换水周期小于 10 d,成子湖区南部沿岸小于 90 d,中心区域为 90 ~ 150 d。

秋季为退水期,全湖的换水周期均值为 49 d,较夏季增加了 18 d。老子山和溧河洼湖区的换水周期总体仍在 10 d 以内,三河区、临淮区和中心湖区总体为 10 ~ 20 d,二河区为 46 d,较夏季增加了 16 d。成子湖区换水周期分布的空间异质性明显,南部徐洪河入湖口换水周期在 10 d 以内,该区域面积较夏季增大,最北部的换水周期较其他季节明显增加,最长达 298 d,超过 200 d 的湖泊面积较其他季节显著增加,这可能是由于南水北调东线工程运行之后,徐洪河作为南水北调东线的复线河道,承担抽调洪泽湖水向北送的重要任务,上半年在抽调水的过程中,徐洪河口都是水流出湖状态,根据多年平均流量显示,7 月开始徐洪河入湖口水流由出湖转变为入湖,且 10 月后入湖流量增加,达 $100 \text{ m}^3/\text{s}$,由于徐洪河湖区整体流速较缓,且风生流在成子湖区有显著作用,常出现风生环流,因此夏季、秋季在徐洪河入湖口形成换水周期小于 10 d 的条带,成子湖北部区域受环流影响较大,换水周期仍较长,超过 200 d。

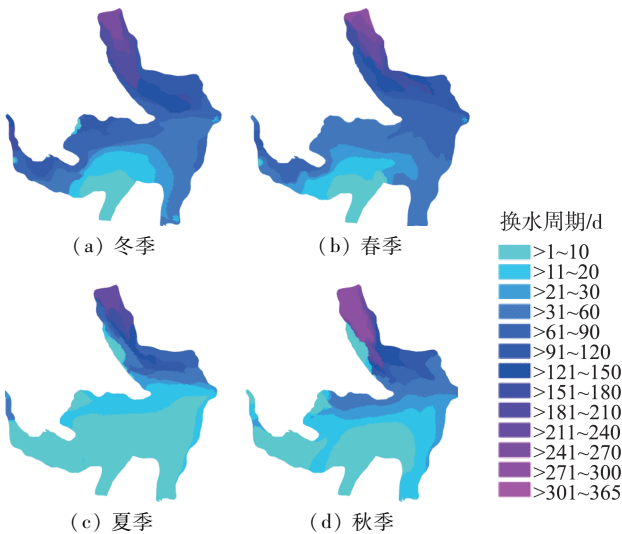


图 3 不同季节换水周期的空间分布

Fig.3 Spatial distribution of water exchange cycle in different seasons

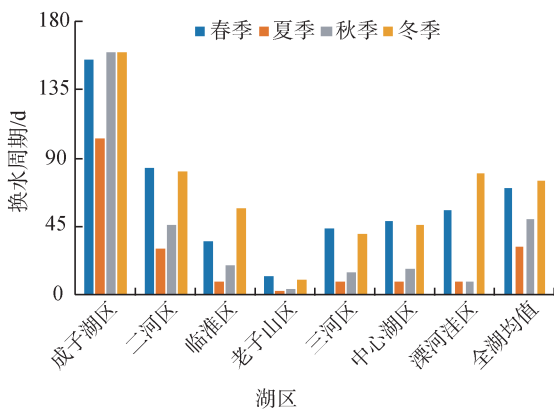


图 4 各湖区不同季节的换水周期

Fig.4 Water exchange cycle in different seasons in each lake area

3.2 换水周期对风场的响应

风场对换水周期的空间分布会产生一定的影响^[26-27],图5为不同风场作用下的换水周期,图6为各湖区不同风场作用下的换水周期。由图5、图6可见,换水周期总体呈现从东北到西南递减的特征,对比实际风场和无风时洪泽湖换水周期的空间变化,可验证风场是影响洪泽湖污染物运移的重要驱动力。对比 $1.88 \text{ m}^2/\text{s}$ 的东南风和东北风作用下的换水周期分布,可以看出不同的风向使得换水周期发生相应变化。

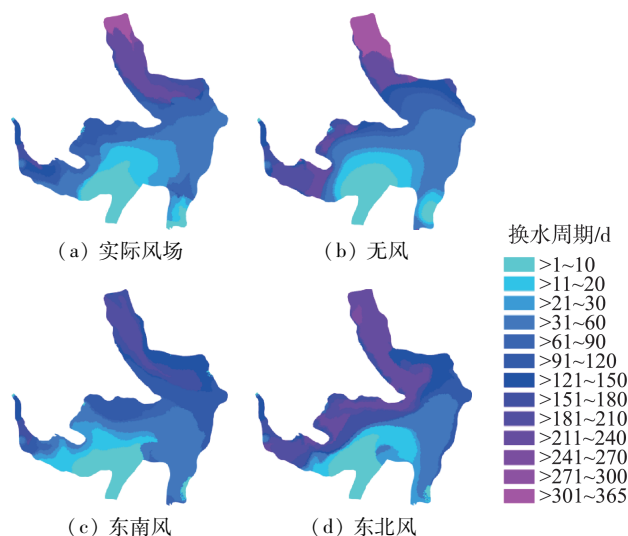


图5 不同风场作用下的换水周期

Fig.5 Water exchange cycle under different wind fields

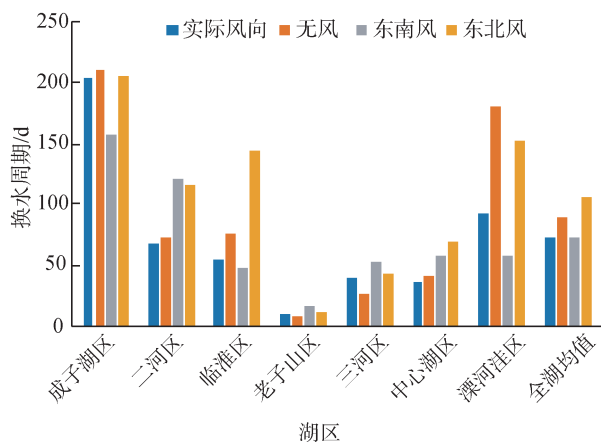


图6 各湖区不同风场作用下的换水周期

Fig.6 Water exchange cycle under different wind fields in each lake area

总体来看,实际风场作用下,湖泊换水周期的均值为72 d,比无风时减少了16 d,说明实际风场对洪泽湖的换水能力起到正向作用,风生流可以促进污染物的运移扩散。风场对洪泽湖区换水周期空间分布影响最大的是溧河洼区,在实际风向作用下,其换水周期均值为92 d,比无风时减少了89 d,说明实际风场加速了溧河洼区的水体流动,增强了该区域污

染物的稀释能力。临淮区的平均换水周期为55 d,减少了21 d,临淮区和溧河洼区均位于湖西,可以看出在无风条件即仅受吞吐流作用时,湖泊水体整体向东南、东北方向流动。中心湖区、二河区和成子湖区的平均换水周期在实际风场的作用下分别为36 d、67 d和204 d,仅分别减少了5 d、5 d和7 d,而三河区和老子山区为40 d和10 d,增加了14 d和2 d,说明东北部湖区的换水能力受风场的改善效果较小,主要进湖、出湖区域的换水能力略微减弱,其中,老子山区受风场的影响最小,说明该区域的水体更新主要受吞吐流的影响。

在东南风的作用下,湖泊换水周期的均值为73 d,比无风时减少了15 d,说明东南风对洪泽湖的换水能力起到正向作用,东南风可以促进污染物的运移扩散,从而加强了污染物的稀释能力。受东南风影响最大的区域是溧河洼区,其换水周期均值为58 d,比无风时减少了123 d,说明东南风加速了溧河洼区的水体流动,增强了该区域污染物的稀释能力,同属西部湖区的临淮区为48 d,减少了28 d,换水能力也明显增强。东南风也显著改善了成子湖区的平均换水能力,其换水周期为158 d,较无风时减少了53 d,最高值为193 d,较无风状态减少了47.1%。成子湖区流速缓慢,污染物容易在此聚集,受吞吐流影响较弱,所以湖流主要受风场影响,东南风加速了成子湖区的水体更新。东南风对其他湖区的换水能力产生了减弱的作用,其中,受影响最大的是二河区,其换水周期均值为121 d,较无风时增加了49 d。其次是三河区,换水周期均值从26 d增加到52 d,换水能力减弱了50%,中心湖区的换水周期也增加了17 d,由41 d增加到58 d。同时,老子山区的均值也由8 d增加到16 d,老子山区的淮河入湖区域的换水周期仍然为1~10 d,而其东部靠近三河区的区域换水周期最高值为58 d,导致均值增加了8 d。东南部湖区换水能力普遍减弱,可能是由于东南风的影响,淮河干流由老子山进入湖区后向三河区流动的水流受到阻碍,水体向东北方向流动的趋势增强,加强了东北部水体污染物浓度的稀释能力。

在东北风的作用下,湖泊换水周期的均值为106 d,比无风时增加了18 d,说明东北风对洪泽湖的换水能力起到抑制作用,东北风减缓了污染物的运移扩散速率,从而减弱了污染物的稀释能力,同时,各个湖区换水周期的整体梯度性分布特征明显,呈现东北高值,西南低值的局面。受东北风影响最大的是临淮区,其换水周期均值为145 d,比无风时增加了69 d,湖泊在无风状态下,受吞吐流的影响,淮河干流入湖流向临淮区,东北风起到抑制作用,减弱

了临淮区对污染物的稀释能力。二河区的换水能力也显著减弱,其平均换水周期由 76 d 增加到 145 d;中心湖区从 41 d 增加到 69 d;三河区从 26 d 增加到 43 d。东北风仅对成子湖区的水体更新起到正向作用,但对成子湖区平均换水能力的改善效果较小,成子湖区的换水周期均值为 205 d,较无风时仅减少了 2.8%;对换水周期最高值所在点位的水体改善效果较好,无风时,成子湖区最北边的水体交换周期接近 365 d,东北风作用下最高值为 246 d,减少了 32.6%。东北风也降低了溧河洼区的换水周期,溧河洼区的换水周期为 152 d,较无风时减少了 16%。东北风对老子山区的影响较小,其平均换水周期由 8 d 增加到 11 d,进一步验证了老子山湖区的换水能力主要受吞吐流影响。

3.3 典型湖区流场特征

风场、吞吐流以及湖泊形态影响洪泽湖流场的结构,流场结构对大型浅水湖泊的污染物运移过程和水体更新能力都会产生重要影响^[28-29]。选取换水周期最短的老子山区以及换水周期最长的成子湖

区为典型湖区,从流场的角度分析洪泽湖换水周期时空变化的机理。

老子山区的流场主要受淮河干流的入流影响,由图 7 可见,较枯月份淮河干流流量约为 400 m³/s,老子山区的流速为 0.024 ~ 0.048 m/s,较丰月份淮河干流流量约为 1 500 m³/s,老子山区的流速为 0.09 ~ 0.195 m/s。在枯水期,来水较少,流速较慢,老子山区水质变化受外界输入的影响减弱,受水体自净的影响增强,而在丰水期,流速提高了 2 倍,外界输入对老子山区水质变化的贡献度提高至 90%。在来水较丰时期,淮河干流入湖流量大,导致老子山区水体流速加快,从而加快污染物的稀释,提高湖泊的换水能力。淮河干流的水质状况是影响老子山区水质的重要因素,但由于水体流速快,水质变化受底泥释放的影响较小,营养盐不易聚集,局部富营养化的风险较低。

由前文计算结果可知,成子湖区的换水周期大部分区域均超过 150 d,模拟得到丰、枯来水条件下成子湖区的流场如图 8 所示。由图 8 可见,来水较

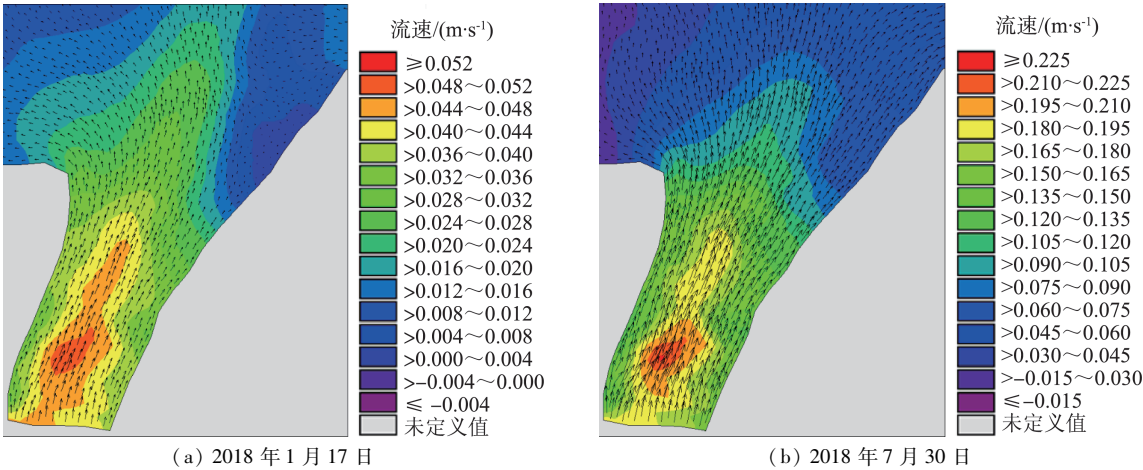


图 7 老子山区流场分布
Fig. 7 Flow field distribution of Laozishan area

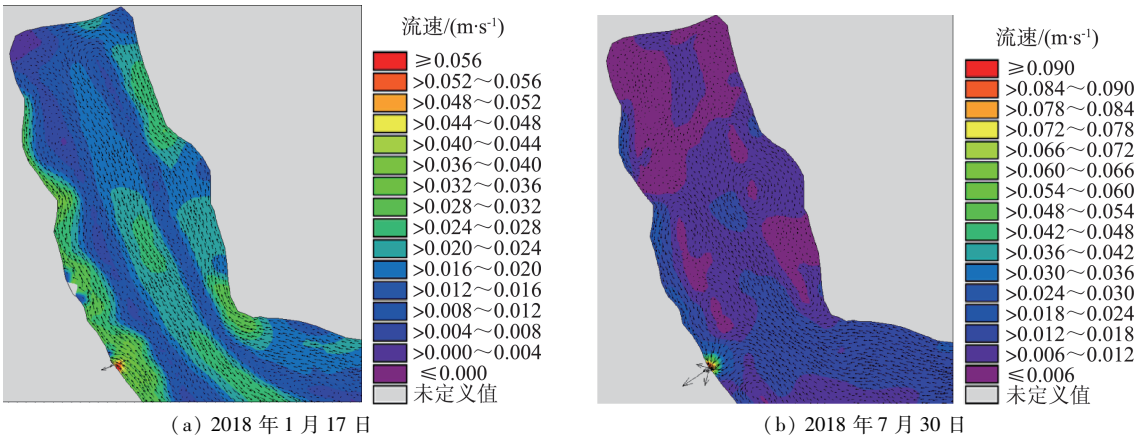


图 8 成子湖区流场分布
Fig. 8 Flow field distribution of Chengzihu area

少时,成子湖区大部分区域的流速为 $0.005 \sim 0.03 \text{ m/s}$,流速缓慢,受吞吐流影响较弱,主要受风场影响,局部呈现逆向环流;来水较丰时期,成子湖区流速略微加快,大部分区域流速为 $0.012 \sim 0.04 \text{ m/s}$,仍然存在局部逆向环流。说明无论是丰水期还是枯水期,成子湖区受吞吐流的影响较小,流速缓慢,造成成子湖区的换水周期超过 100 d,最北部湖区超过 200 d。由于水流交换过缓,可以推测出外界输入污染负荷对成子湖区水质变化的影响较小;同时,流速缓慢的水动力条件下,水体中的氮磷营养盐主要呈现溶解态,浓度高、水流缓慢且气候适宜的条件下,藻类易繁殖和停留,湖泊有较高的水华风险,高浓度营养盐也加剧底泥释放的风险。

4 结 论

a. 洪泽湖换水周期空间异质性明显,整体呈现出南部湖区水体更新快、北部湖区水体更新慢的特点,换水周期从南到北的梯度变化,主要与洪泽湖的水文情势密切相关。老子山区流场主要受吞吐流影响,换水能力较强,换水周期约为 10 d 左右;成子湖区流速缓慢,流场主要受风场影响,局部呈现逆向环流,换水能力最弱,换水周期超过 100 d。

b. 冬季和春季全湖平均换水周期较长,分别为 75 d 和 60 d,秋季和夏季的全湖平均换水周期较短,分别为 49 d 和 31 d。溧河洼区和临淮区春季较冬季换水能力增强,换水周期分别缩短了 31.25% 和 37.5%。夏季南部湖区的均值小于 10 d,受来水量影响,溧河洼区、中心湖区、临淮区 and 三河区水体更新能力改善显著。

c. 实际风场对洪泽湖的换水能力起到正向作用,无风时湖泊水体整体向东南、东北方向流动,换水周期均值为 72 d,比无风时减少 16 d。风场影响最大的是溧河洼区,比无风时减少 89 d,老子山区的水体更新受风场的影响最小。东南风对洪泽湖的换水能力起正向作用,比无风时减少 15 d;主要影响溧河洼区,比无风时减少 123 d;东北风对洪泽湖的换水能力起到抑制作用,比无风时增加 18 d;主要影响临淮区,比无风时增加 69 d。

参考文献:

[1] 施玥,王沛芳,胡斌,等. 太湖和洪泽湖天然有机质与重金属结合特性研究[J]. 水资源保护,2019,35(5):86-94. (SHI Yue, WANG Peifang, HU Bin, et al. Study on binding characteristics of natural organic matter and heavy metals in Taihu Lake and Hongze Lake [J]. Water Resources Protection,2019,35(5):86-94. (in Chinese))

[2] 王霞,沈红军,刘雷,等. 洪泽湖水水质特征分析及评价[J]. 环境与发展,2019,31(9):11-13. (WANG Xia, SHEN Hongjun, LIU Lei, et al. Analysis and assessment on water quality of Hongze Lake [J]. Environment and Development,2019,31(9):11-13. (in Chinese))

[3] 龙昊宇,翁白莎,黄彬彬,等. 1984—2017 年洪泽湖湿地植被覆盖度变化及对水位的响应[J]. 水生态学杂志,2020,41(5):98-106. (LONG Haoyu, WENG Baisha, HUANG Binbin, et al. Response of vegetation coverage to varying hydrological conditions in Hongze Lake Wetland, 1984-2017 [J]. Journal of Hydroecology, 2020, 41(5): 98-106. (in Chinese))

[4] WU Y, RONG D, XU Y, et al. Statistical assessment of water quality issues in Hongze Lake, China, related to the operation of a water diversion project [J]. Sustainability, 2018,10(6):1885.

[5] 李颖,张祯,程建华,等. 2012—2018 年洪泽湖水质时空变化与原因分析[J]. 湖泊科学,2021,33(3):715-726. (LI Ying, ZHANG Zhen, CHENG Jianhua, et al. Water quality change and driving forces of Lake Hongze from 2012 to 2018 [J]. Journal of Lake Sciences, 2021, 33(3):715-726. (in Chinese))

[6] 李吉平,徐勇峰,陈子鹏,等. 洪泽湖地区麦稻两熟农田和杨树林地氮磷径流流失特征研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2019,43(1):98-104. (LI Jiping, XU Yongfeng, CHEN Zipeng, et al. Characteristics of nitrogen and phosphorus runoff of wheat-rice double cropping field and poplar forest land in intersection area of Hongze Lake [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2019, 43(1):98-104. (in Chinese))

[7] 吴天浩,刘劲松,邓建明,等. 大型过水性湖泊:洪泽湖浮游植物群落结构及其水质生物评价[J]. 湖泊科学,2019,31(2):440-448. (WU Tianhao, LIU Jingsong, DENG Jianming, et al. Community structure of phytoplankton and bioassessment of water quality in a large water-carrying lake, Lake Hongze [J]. Journal of Lake Sciences, 2019, 31(2):440-448. (in Chinese))

[8] 林鹏,陈启慧,李琼芳,等. 环太湖各水资源分区入出湖水量及贡献分析[J]. 水资源保护,2021,37(3):66-73. (LIN Peng, CHEN Qihui, LI Qiongfang, et al. Analysis on inflow and outflow of water resources zones around Taihu Lake and its contribution [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(3):66-73. (in Chinese))

[9] 王洗民,翟淑华,张红举,等. 基于水质改善目标的太湖适宜换水周期分析[J]. 湖泊科学,2017,29(1):9-21. (WANG Xianmin, ZHAI Shuhua, ZHANG Hongju, et al. Research on appropriate hydraulic retention time on basis of water quality improvement of Lake Taihu [J]. Journal of Lake Sciences, 2017, 29(1):9-21. (in Chinese))

[10] 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. (WANG Jingxian, MENG Yusheng, PANG Yong, et al. Numerical simulation of suspended solids transport and diffusion in cofferdam construction of the West of Yangcheng Lake[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(3): 108-114. (in Chinese))
- [11] 刘翊竣, 徐国宾. 风场和吞吐流对洪泽湖流场的影响分析[J]. 水资源与水工程学报, 2020, 31(2): 174-178. (LIU Yijun, XU Guobin. Effects of wind field and throughput flow on the flow field of Hongze Lake[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2020, 31(2): 174-178. (in Chinese))
- [12] 王钟, 范中亚, 杨忠勇, 等. “引江济淮”工程对安徽菜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. (in Chinese))
- [13] CUCCO A, UMGIESSER G. Modeling the Venice Lagoon residence time[J]. Ecological Modelling, 2006, 193(1/2): 34-51.
- [14] BOCANIOV S A, SCAVIA D. Nutrient loss rates in relation to transport time scales in a large shallow lake (Lake St. Clair, USA-Canada): insights from a three-dimensional model[J]. Water Resources Research, 2018, 54(6): 3825-3840.
- [15] 李云良, 姚静, 李梦凡, 等. 鄱阳湖换水周期与示踪剂传输时间特征的数值模拟[J]. 湖泊科学, 2017, 29(1): 32-42. (LI Yunliang, YAO Jing, LI Mengfan, et al. Numerical simulations of residence time and tracer travel time in Lake Poyang[J]. Journal of Lake Sciences, 2017, 29(1): 32-42. (in Chinese))
- [16] 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 the Taihu Lake based on the “water diversion project from the Yangtze River to the Taihu Lake (WDYT)” [J]. China Environmental Science, 2020, 40(1): 375-382. (in Chinese))
- [17] 陶磊, 孙健, 刘海英, 等. 潮汐和季风作用下渤海湾水交换研究[J]. 水力发电学报, 2020, 39(5): 99-107. (TAO Lei, SUN Jian, LIU Haiying, et al. Study on water exchange in Bohai Bay under effects of tides and seasonal winds[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2020, 39(5): 99-107. (in Chinese))
- [18] 倪晋, 虞邦义, 周贺, 等. 洪泽湖水体更新频率的初步分析[C]//第四届中国湖泊论坛论文集. 合肥: 中国湖泊论坛, 2014: 312-315.
- [19] MUNAR A M, CAVALCANTI J R, BRAVO J M, et al. Coupling large-scale hydrological and hydrodynamic modeling: toward a better comprehension of watershed-shallow lake processes [J]. Journal of hydrology (Amsterdam), 2018, 564: 424-441.
- [20] BLAISE S, DE BRYE B, DE BRAUWERE A, et al. Capturing the residence time boundary layer: application to the Scheldt Estuary [J]. Ocean Dynamics, 2010, 60(3): 535-554.
- [21] VAN C P, BRYE D B, BRAUWERE D A, et al. Numerical simulation of water renewal timescales in the Mahakam Delta, Indonesia [J]. Water (Basel), 2020, 12(4): w12041017.
- [22] HUGUET J, BRENON I, COULOMBIER T. Characterisation of the water renewal in a macro-tidal marina using several transport timescales [J]. Water, 2019, 11(10): w11102050.
- [23] 唐继张, 周维博, 安宝军, 等. 基于 MIKE21 的西安昆明池(试验段)换水能力特征研究[J]. 水资源与水工程学报, 2020, 31(1): 58-63. (TANG Jizhang, ZHOU WeiBo, AN Baojun, et al. Research on characteristics of water change capability of Kunming Lake (test section) in Xi'an based on the MIKE 21 model[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2020, 31(1): 58-63. (in Chinese))
- [24] 胥瑞晨, 逢勇, 胡祉冰, 等. 太湖水龄与水力停留时间关系及参数敏感性[J]. 水资源保护, 2020, 36(3): 34-39. (XU Ruichen, PANG Yong, HU Zhibing, et al. Relationship between water age and hydraulic residence time in Taihu Lake and parameter sensitivity[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(3): 34-39. (in Chinese))
- [25] PENG F, LI K, LIANG R, et al. Shallow lake water exchange process before and after water diversion projects as affected by wind field [J]. Journal of Hydrology, 2021, 592: 125-785.
- [26] 熊雄. 基于 EFDC 的鄱阳湖水动力研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2014.
- [27] 李金华, 李一平, 唐春燕, 等. “引江济星”工程及风场环境影响广东肇庆星湖水龄分布特征[J]. 湖泊科学, 2021, 33(2): 449-461. (LI Jinhua, LI Yiping, TANG Chunyan, et al. Water age distribution characteristics of Lake Star (Zhaoqing, Guangdong) influenced by the Water Diversion Project and wind field [J]. Journal of Lake Sciences, 2021, 33(2): 449-461. (in Chinese))
- [28] 吴婷. 杭州湾水龄和滞留时间特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- [29] 张怡辉, 胡维平, 彭兆亮, 等. 洪泽湖湖流空间特征的实测研究[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2020, 35(4): 541-549. (ZHANG Yihui, HU Weiping, PENG Zhaoliang, et al. Practical measure research on the spatial characteristics of lake currents in Lake Hongze [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2020, 35(4): 541-549. (in Chinese))

(收稿日期: 2021-05-24 编辑: 王芳)