

# 浅水湖泊风生流特征模拟研究

薛宗璞<sup>1</sup>, 吕 艺<sup>2</sup>, 施 维<sup>3</sup>, 金丽君<sup>3</sup>, 朱 伟<sup>2</sup>

(1. 河海大学 水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学 环境学院, 江苏 南京 210098;  
3. 南京恒创智云计算科技有限公司, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 由于浅水湖泊宽深比较大, 可使用数值模拟的手段结合现场实测数据研究其风生流特征。为使水动力模型更好地模拟浅水湖泊的风生流特征, 在 $\sigma$ 坐标系下建立浅水湖泊的三维水动力模型, 结合太湖相关数据进行模型的验证研究, 以反映浅水湖泊的风生流特征。

**关键词:** 浅水湖泊; 风生流; 水动力模型; 数值模拟

**中图分类号:** [TV11] **文献标识码:** B **文章编号:** 1007-7839(2023)12-0010-0004

## Simulation study of wind-driven current characteristics in shallow lakes

XUE Zongpu<sup>1</sup>, LV Yi<sup>2</sup>, SHI Wei<sup>3</sup>, JIN Lijun<sup>3</sup>, ZHU Wei<sup>2</sup>

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;  
2. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China;  
3. Nanjing SUSINNOVATION Cloud Co., Ltd., Nanjing 210098, China)

**Abstract:** Due to the huge width-to-depth ratio of shallow lakes, it is good to use numerical simulation in combination with measured data to study the wind-driven current characteristics of shallow lakes. In order to make the hydrodynamic model better simulate the wind-driven current characteristics of the shallow lake, a three-dimensional hydrodynamic model of the shallow lake is established under the  $\sigma$  coordinate system, and the model is verified by combining the relevant data of Taihu Lake to reflect the wind-driven current characteristics of the shallow lake.

**Key words:** shallow lake; wind-driven current; hydrodynamic modeling; numerical simulation

## 1 概 述

在大型浅水湖泊中, 风生流是主要的流态, 对湖泊的紊流动能、表层流速及流向都有重要影响<sup>[1]</sup>, 相关研究发现由于风场的不稳定, 浅水湖泊的流场也有复杂的变化。如1998年在太湖梅梁湾内布置了14个测点, 使用三维超声波流速仪测量后, 发现

太湖梅梁湾内的流向不稳定, 变化的剧烈程度比调查期间风向的变化更剧烈<sup>[2]</sup>。2015年在太湖湖区布置了6个测点, 使用声学多普勒流速仪分6层对太湖的动力场进行了观测, 也发现太湖的水平流向不稳定, 接近水面的流场变化比较剧烈<sup>[3]</sup>。2017年在太湖竺山湾布置了1个测点, 将声学多普勒流速仪倒置在湖底, 首次观测到了最接近水面的太湖流

收稿日期: 2023-08-16

基金项目: 江苏省水利科技项目(2021009); 江苏省研究生培养创新工程研究生科研创新计划(B200203049)

作者简介: 薛宗璞(1993—), 男, 博士研究生, 研究方向为生态水文学。E-mail: xzp\_hhu@163.com

场,太湖的水平流场数据非常复杂,较难梳理出清晰的水平流规律<sup>[4]</sup>。相关研究表明,由于浅水湖泊巨大的宽深比和不稳定的风场,基于现场实测来推演其整体运动规律存在一定困难,可使用数值模拟手段结合现场实测数据来研究浅水湖泊的风生流特征。

随着海洋学和海洋水动力学模型的发展,海洋的水动力学模型及其相应的 Navier-Stokes 方程开始被移植到浅水湖泊水动力模型中<sup>[5]</sup>,也有相关研究建立了太湖水流与悬沙输运的三维水动力模型<sup>[6]</sup>。梁瑞驹等<sup>[7]</sup>假定湖水等密度分布,并假定垂向服从静水压力分布,用笛卡尔坐标系下的三维水流方程来描述湖泊风生流的三维流动,建立了太湖的三维水动力模型,模拟稳定风场下太湖的流场结构。但是相关浅水湖泊的水动力三维模型未能很好地解决网格的垂向划分,特别是存在浅水区网格层数少、深水区网格层数多以及网格整体畸变率较高等问题<sup>[8]</sup>。因此,本研究通过在 $\sigma$ 坐标系下建立浅水湖泊的三维水动力模型,使用大量实测数据进行模型的验证,尽量准确地反映浅水湖泊在实际风场下的风生流特征。

## 2 研究区域和模型构建

### 2.1 研究区域

本研究建立的三维水动力子模型经纬度坐标系选取 WGS84 坐标系,投影带坐标系选取北京 1954 坐标系,中央经线为 120°E。模拟区域在水平上划分为 19 885 个三角形网格,网格大小范围为 0.08~0.14 km<sup>2</sup>。模拟区域的湖底高程根据湖内点位数据进行插值,使用 8 个实测点的水动力数据和 2 个水文站的逐日水位数据进行模型的验证,并设置了 3 个点位分析模型中表层流场的变化。本研究参照了太湖的 9 个湖区(竺山湖、梅梁湖、贡湖、湖心区北、湖心区南、西部沿岸区、南部沿岸区、东部沿岸区、东太湖)划分。

### 2.2 控制方程

在三维水动力模拟中将垂向上水柱分为 3 个区域:一是顶部,该区域的水流运动主要受风应力驱动;二是垂直水柱中部以上的传递区,该区域的水流运动主要受水的黏度和水位、风场变化引起的压力梯度力所产生的传递风应力共同驱动;三是底部,该区域的水流运动主要受压力梯度力和底部摩擦力控制<sup>[5]</sup>。

本研究建立的三维水动力模型垂向采用 $\sigma$ 坐

标,均分为 10 层,表面的节点表示水面,水深一半的单元节点表示中层,水层底部单元节点表示底部,以  $x, y, z$  代表正东方、正北方和正上方。在近年的浅水湖泊三维水动力模拟中,通常在垂向采用 $\sigma$ 坐标系<sup>[9]</sup>,可以更好地解决网格畸变的问题。

在 $\sigma$ 坐标系下,风应力的模拟控制方程<sup>[10]</sup>为

$$\vec{\tau}_s = \rho_a c_d |\vec{u}_w| \vec{u}_w \quad (1)$$

式中: $\vec{\tau}_s$ 为风应力的矢量; $\rho_a$ 为空气的密度; $c_d$ 为风应力拖曳系数; $|\vec{u}_w|$ 为风速矢量的模; $\vec{u}_w$ 为水面以上 10 m 处的风速。

### 2.3 边界条件

本研究所建立的三维水动力子模型的边界条件是基于 2017 年太湖水文、气象数据,水量边界条件为 2017 年各河道逐月出入湖的流量,模型中的风场为 2017 年逐小时变化的风速、风向。模拟区域与湖岸设置为陆地,与湖岸接触的水流速变设为 0。由于初始的湖泊运动状态会对后续的计算结果产生影响,本研究采用热启动的方法,预先以静止状态开始,使用 2017 年全年的水文、风力条件进行整年度的计算,以预计估算的水位及初始矢量结果作为初始状态,再进行 1 次模拟太湖 2017 年水动力特征的计算。

### 2.4 模型验证

#### 2.4.1 水位验证

实测的水位数据来自太湖望亭、西山水文站,模拟的水位数据来自本研究建立的三维水动力子模型输入 2017 年的太湖水文、气象数据后所得结果,对验证指标准确性的分析通常使用纳什系数<sup>[11]</sup>。结果表明,望亭水文站实测与模拟水位的纳什系数是 0.88,西山水文站实测与模拟水位的纳什系数是 0.90,可以认为对出入湖流量的模拟是比较准确的。

#### 2.4.2 水动力验证

对于风作用产生的紊流,模拟中由于流速大小、方向都随风发生不断的变化,因此针对紊流强弱采用紊流动能验证太湖动力学特征。实测的紊流动能数据来自太湖竺山湾、贡湖湾、梅梁湾、湖心北的 8 个野外观测点,模拟的紊流动能数据来自本研究建立的三维水动力子模型,输入 2017 年的太湖水文、气象数据后在相同位置所输出的结果。对验证指标准确性的分析使用纳什系数,结果表明,8 个测点在 3 个方向紊流动能的纳什系数都大于 0.50,可认为对太湖紊流模拟具有一定的准确性。

### 3 模拟结果分析

#### 3.1 流场的稳定性

太湖四季表层流向存在明显变化,四季盛行风存在明显差异,因此表层流场也有明显差异,不同湖区表层流场流速和流向在季节内也存在较大变化。总体而言,3个测点四季的常见流向仍然是自东向西,与吞吐流方向相反,从四季变化来看,3个测点的常见流向为自西向东偏转,这与盛行风方向的季节变化一致。说明太湖表层的水平流场存在显著的追随风场而变化的特征,表层的流场与盛行风向相似的流向会较多地出现。

太湖流场主要受风的影响,从速度方向来看,表层流向与风向相似,与吞吐流不同,说明在全年大部分时间,表层速度方向是风向决定的。在湖泊的深度和表面积合适的情况下,湖泊会存在温跃层<sup>[10]</sup>。存在温跃层的湖泊在垂向上通常会有温度流或密度流,随着温跃层的规律变化,往往能够形成稳定的流场<sup>[11]</sup>。对太湖水温的现场测量研究表明,太湖水存在明显的水温分层<sup>[12]</sup>,因此太湖的水温垂向差异难以形成太湖稳定的流场。吞吐流也可以形成稳定的流场,由于太湖主要入湖河道在西北部,主要出湖河道在东南部,因此在无风的情况下会出现自西向东稳定的吞吐流流场,由于自身变化较大,也较难形成稳定的风生流流场。

#### 3.2 流场的垂向差异

尽管选取时间段内的风场是春季盛行风主导,表层的流向仍然不稳定,中部和底部流向也与表层有较大的不同,底层的流场与无风时一致,是由西北至东南,表现出明显的吞吐流特征。从速度大小的垂向差异来看,实际风场下速度大小垂向衰减比较大,尤其是垂向的 $z$ 方向衰减明显。由相关计算可得,表层的 $x$ 方向速度平均是中层的5.5倍,是底层的8.6倍;表层的 $y$ 方向速度平均是中层的5.6倍,是底层的7.8倍;表层的 $z$ 方向速度平均是中层的4.6倍,是底层的15.1倍。

通过现场调查发现,太湖的表层流速远大于中底层流速,并且不同区域的野外调查都发现表层的流场方向与底层也存在很大差异<sup>[13]</sup>。在实际风场下,对太湖流场的模拟也发现了同样的规律。这说明速度大小的垂向差异主要是由风引起的,表层受到风的直接驱动,而底层主要受吞吐流和风生流的补偿流影响,因此表层和底层速度大小存在巨大的差距。在大型浅水湖泊中,这是湖流受风影响后常

见的动力学特征。由于风和水的动量交换,水面至水底的速度大小在沿程下降。

#### 3.3 垂向紊流动能与风场的关系

从全年不同情景的垂向紊流动能来看,实际风场下的垂向紊流动能大于无风情景下的垂向紊流动能。从垂向紊流动能的垂向差异来看,实际风场下的垂向紊流动能出现了明显的差异。由各湖区垂向紊流动能与风速的响应关系可知,各湖区的三层垂向紊流动能均与风速显著正相关。

表达风主导下的变化流场,可以通过描述湖泊垂向紊流动能的方式。从该指标与主导因素风的关系来看,垂向紊流动能与风速的大小有显著的正相关关系,可以根据风速大小的变化直接判断湖泊流场的紊流程度。从紊流动能的意义来看,它不仅是速度变化的方差,也能描述流场紊动的强弱,兼具统计学和水力学的应用意义。垂向紊流动能可以作为预测水华生消的重要指标,在湖泊治理上有重要参考作用,因此可作为湖泊监测的指示性指标。

### 4 结 语

本研究建立了 $\sigma$ 坐标系下的浅水湖泊水动力模型,经研究表明,太湖的流场有显著的垂向差异,速度大小在垂向上衰减,流场方向在表层和底层不同。这主要是因为太湖的表层流动主要受风驱动,中底层是风生流补偿流造成的反向流,从水面至水底的速度大小也因风与水的动量交换沿程下降。太湖的实际风场使得稳定的流场较难保持,流速大小和流速方向是由风主导的,垂向紊流动能均与风速大小显著正相关,因此风势对流场有主导性影响。表达风主导下的变化流场,可以通过描述湖泊垂向紊流动能的方式,从紊流动能的意义来看不仅是速度变化的方差,也能描述流场紊动的强弱,兼具统计学和水力学的应用意义。

#### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 秦伯强.太湖梅梁湾水动力及相关过程的研究[J].湖泊科学,2000,12(4):8.
- [3] 丁文浩,秦伯强,吴挺峰,等.夏季风下的太湖风场-流场野外观测研究[J].河海大学学报(自然科学版),2020,48(2):7.
- [4] CHEN H, ZHU W, WANG R, et al. Rapid horizontal accumulation and bloom formation of the cyanobacterium



- Microcystis under wind stress[J]. *Hydrobiologia*, 2022.
- [5] HU W. A review of the models for Lake Taihu and their application in lake environmental management[J]. *Ecological Modelling*, 2016(319):9–20.
- [6] JIAO C M. A three-dimensional model of hydrodynamics and suspended sediment in Lake Taihu, China[D]. Beijing, Chinese Academy of Sciences, 1986.
- [7] 梁瑞驹, 仲金华. 太湖风生流的三维数值模拟[J]. *湖泊科学*, 1994, 6(4):9.
- [8] 崔璨, 董增川, 罗赟, 等. 基于水文水动力模型的洪泽湖汛末蓄水策略智能优化设计[J]. *水资源保护*, 2023, 39(4):143–151.
- [9] FENG T C, WANG P, WANG J, et al. How physiological and physical processes contribute to the phenology of cyanobacterial blooms in large shallow lakes: A new Euler-Lagrangian coupled model[J]. *Water Research*, 2018(140):34–43.
- [10] LARGE W G, POND P. Open ocean momentum flux measurements in moderate to strong winds[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1981, 11(3):324–336.
- [11] ROUSSO B Z, BERTONE E, STEWART R, et al. A systematic literature review of forecasting and predictive models for cyanobacteria blooms in freshwater lakes[J]. *Water Research*, 2020(182):1159.
- [12] PARISOPOULOS G A, MALAKOU M, GIAMOURI M. Evaluation of lake level control using objective indicators: The scenario of Micro Prespa[J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 367(2):86–92.
- [13] 龚发露, 王裕成, 兰佳, 等. 千岛湖极端水位变化对温跃层的影响[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(5):33–40.
- [14] KOPPEL D. On the stability of flow of a thermally stratified fluid under the action of gravity[J]. *Journal of Mathematical Physics*, 1964, 5(7):963–982.
- [15] 纪道斌, 成再强, 龙良红, 等. 三峡水库不同运行期库首水温分层特性及生态效应[J]. *水资源保护*, 2022, 38(3):34–42.
- [16] 张玉超, 钱新, 钱瑜, 等. 太湖水温分层现象的监测与分析[J]. *环境科学与管理*, 2008, 33(6):5.
- [17] 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):7.

(上接第9页)

## 4 结 语

本文以刘老涧新闸为研究对象,通过对闸门进行有限元静力计算,分析了闸门的面板、主横梁、边梁、纵梁、底梁及次梁的应力分布,基于模态分析探究了闸门的自振特性,主要结论如下:

(1)边梁、纵梁、底梁及次梁的最大正应力、切应力及折算应力均满足应力要求。闸门最大正应力为33.3 MPa,位于主横梁跨中后翼缘,主横梁的最大切应力位于主梁两端与边梁交接的腹板处。

(2)7.5 m水头下闸门的第2、3、4、5阶自振频率相较于闸门在无水工况下的自振频率均有所不同程度的下降,因此,水体与闸门之间的流固耦合作用对闸门资者特性的影响不容忽视。

## 参考文献:

- [1] 张亮, 徐强, 严根华, 等. 大型液压启闭下卧式弧形闸门流激振动及抗振优化研究[J]. *水利与建筑工程学报*, 2023, 21(2):13–19, 67.
- [2] 王惠芝, 陈慧楠. 平面钢闸门变形及力学特性影响研究[J]. *水利科技与经济*, 2023, 29(4):59–62, 66.
- [3] 蒋涛, 薛海朋, 刘斌, 等. 闸门有限元静力计算及振动特性分析[J]. *江苏水利*, 2022(7):62–65.
- [4] 陶小平, 应国华, 严根华, 等. 大跨度浮体门动力稳定及流激振动试验研究[J]. *水利与建筑工程学报*, 2022, 20(6):7–14.
- [5] 彭思贤, 赵兰浩, 毛佳. 大宽高比弧形钢闸门流激振动数值分析[J]. *水利水电科技进展*, 2022, 42(3):90–96.