

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221146

夏季典型风场下引江济太工程对贡湖湾水动力特征的影响

王文康^{1,2}, 徐世凯^{1,2}, 赵金箫^{1,2}, 丁文浩^{1,2}, 王 勇^{1,2}

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2. 水利部太湖流域水治理重点实验室, 江苏 无锡 214131)

摘要: 为探究引江济太工程对贡湖湾水动力特征的影响规律,以贡湖湾为例,基于太湖风生流物理模型分析了夏季典型风场下不同风速和望虞河引水流量作用时对贡湖湾的水动力特征影响范围和湾内垂向流速、平面环流分布的影响规律。结果表明,望虞河引水流量的变化对贡湖湾水动力特征的影响范围主要在近区和中区,对大太湖影响较小;引江济太工程的实施能显著改变近区和中区内望虞河出口轴线上的垂向流速分布特征,但对交界断面处垂向流速分布特征无影响;贡湖湾内平面环流特征受风速和引水流量的共同影响,风速和引水流量的变化对平面环流的面积、位置和形状影响显著。研究结果可为评价引江济太工程对贡湖湾水环境的影响提供水动力方面的理论支撑。

关键词: 引江济太工程; 贡湖湾; 风生流; 水动力; 物理模型

中图分类号: TV131.61; P343.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)03-0023-04

1 引言

引江济太工程的实施有效增加了枯水期进入太湖及河网的优质水资源量,为太湖水源地及太浦河正常供水创造了条件,满足了航运等用水需求,保障了秋冬季节供水安全^[1]。贡湖湾是引江济太工程的主要受水区,水动力特征受引江济太工程影响最大^[2]。水动力作用是研究湖体底泥再悬浮、藻华生长和物质输移扩散的重要因子^[3],目前,关于调水引流和湖泊水动力作用的研究众多,王震^[4]基于 FVCOM 模型模拟引江济太背景下贡湖湾的水动力特征,揭示了贡湖湾的水动力特征随着流量、风速、风向等因子的改变有不同响应;吕永政等^[5]在研究风生流对贡湖湾水环境影响过程中指出湖流结构受风生流影响明显;LI YIPING 等^[6]通过建立 EFDC 环境动力学模型,引入水龄概念研究引江济太工程对湖泊中溶解物质迁移的影响,得出引江济太最经济流量为 100 m³/s。鉴于,本文基于太湖风生流物理模型研究了夏季典型风场下不同风速和望虞河引水流量条件对贡湖湾水动力特征的影响范围,以及对垂向

流速和平面环流的影响规律,以期更好地解释引江济太工程实施对贡湖湾水动力特征的影响机理。

2 研究方法

2.1 太湖风生流物理模型

太湖风生流物理模型平面尺寸为 140 m × 140 m,水平比尺为 1:500,垂直比尺为 1:10,模型遵循重力相似准则,流量比尺、流速比尺、时间比尺、糙率比尺、风速比尺分别为 15 811.39、3.26、158.11、0.21、0.42。模型模拟范围包括太湖湖区、23 条主要出入湖河流河口及 49 座岛屿,模型采用接力式风生系统模拟自然风场,共布置 28 个送风断面,相邻断面间距为 5 m,送风断面覆盖整个模型湖区,见图 1。该风生系统各断面间风场连续性强,可模拟东南和西北两个方向均匀风场。

2.2 太湖风生流物理模型验证

2.2.1 验证点位

为验证太湖模型与原型水动力条件相似,在原型与模型上选取相对应的点位,测量在相同工况作用下风场、流场的相似性,试验共选取 3 个测

收稿日期: 2022-05-30, **修回日期:** 2022-07-10

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(Y122013, Y121007, Y118011, Y119013, Y119014, Y120014);江苏省水利科技项目(2018001)

作者简介: 王文康(1997-),男,硕士研究生,研究方向为水力学及河流动力学, E-mail: wkwang_student@163.com

通讯作者: 徐世凯(1966-),男,博士、教授级高级工程师,研究方向为环境水力学, E-mail: skxu@nhri.cn

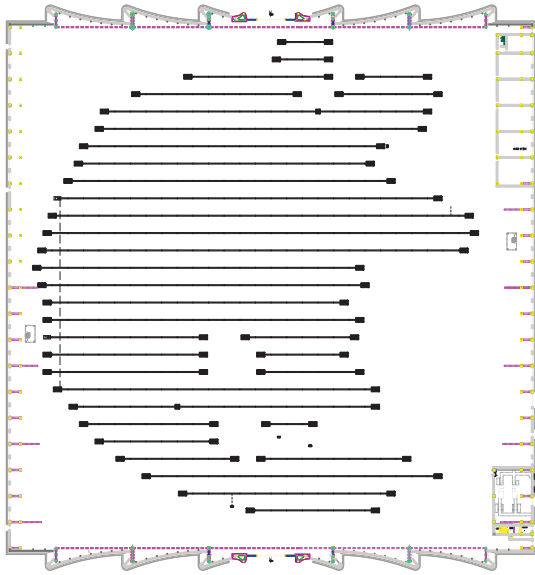


图 1 风生系统示意图

Fig. 1 Diagram of the wind-driven system

量点位,见图 1。

2.2.2 测量方法

(1) 风场观测。原型风场观测仪器使用 WXT520 便携式气象站,风速量程为 0~60 m/s,测量精度为 ±3% F·S,仪器输出的风场数据为 5 min 内的平均风场结果。气象站架设于水面以上 5 m。后续分析使用的风速均为转化至水面 10 m 处的标准风速 w_{10} ,转化方法为:

$$w_{10} = w_{\text{measured}} \left[\frac{\ln(10/z_0)}{\ln(z/z_0)} \right] \quad (1)$$

式中, w_{measured} 为仪器实际观测的风速; z_0 为水体表面粗糙度,取 $z_0 = 0.001 \text{ m}$; z 为仪器架设高度,取 $z = 5 \text{ m}$ 。

模型风场观测采用 NH145G 热线式风速仪,风速量程为 0~30 m/s,在 20 °C,一个标准大气压下测量精度为 ±4% F·S,仪器输出结果为 5 min 内平均风速。

(2) 流场观测。原型流场观测采用声学多普勒流速剖面仪 (ADCP),仪器测量精度为 ±1%,测量盲区为 30 cm,测量间距为 40 cm,采样频率为 30 min/次。模型流速测量采用声学多普勒点式流速仪 (ADV),量程选择 0~0.3 m/s,测量精度为 ±1 mm/s,测量频率为 30 s/次。

2.2.3 验证结果

(1) 风场验证。原型观测时间为 2017 年 9 月 7 日~10 月 31 日,共 55 d,寻找原型中持续时间较长(至少 24 h),风向较为稳定的东南风场,得到有 3 d 的风场符合验证要求,其风速与风向统计结果见表 1。这 3 d 的日平均风向均接近东南风向 135°,最大偏差仅 8°,可认为与模型风向一致。

表 1 稳定东南风风场日平均值

Tab. 1 Daily average value of stable southeast wind field in three days

日期	日平均风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	日平均风向/(°)
2017-09-24	5.3	134
2017-09-30	8.5	143
2017-10-09	6.0	141

(2) 流场验证。测量风速 5.3、6.0、8.5 m/s 下模型与原型中 3 个对应点位处垂向流速,得到原型观测的垂向流速验证数据^{#1}点 1 组,^{#2}、^{#3}点各 3 组。结果表明,不同工况下模型与原型垂向流速相关性系数均大于 0.95,说明模型与原型流速观测结果吻合程度较高。

2.3 试验方案

以太湖风生流物理模型中贡湖湾为例,模拟 3、5、8 m/s 恒定东南风向,望虞河引水流量为 0、50、100 m^3/s 时引江济太水流对贡湖湾水力特征的影响范围和贡湖湾内流速垂向分布特征、平面环流分布特征。试验共设置了 9 个工况,见表 2,每个工况测点布置见图 2。试验采用电磁流量计和闸阀控制望虞河引水流量。采用声学多普勒点式流速仪 (ADV) 测量流速,量程选择 0~0.3 m/s,垂向流速测点布置见图 3。

表 2 引江济太工程试验方案设计

Tab. 2 Design of Yangtze River to Taihu Lake water diversion project

工 况	风速 /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	望虞河引水流量 /($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	工 况	风速 /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	望虞河引水流量 /($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)
1	3	0	6	5	100
2	3	50	7	8	0
3	3	100	8	8	50
4	5	0	9	8	100
5	5	50			

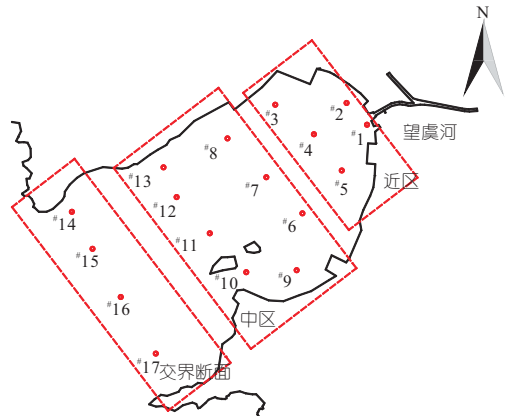


图 2 流速测点布置及分区

Fig. 2 Layout and distribution of velocity measuring points

3 结果与分析

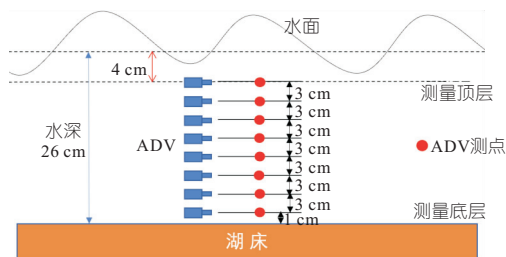


图 3 ADV 垂向流速测量图

Fig. 3 Diagram of vertical velocity measurement of ADV

3.1 引江济太水流对贡湖湾水动力影响范围

根据距望虞河口门的距离,将贡湖湾划分为近区、中区和交界断面 3 个分区,近区为贡湖湾内距望虞河口 0~8d (d 为望虞河出口直径) 的区域,中区为 8d~27d 区域,交界断面区域为 27d 至贡湖湾与大太湖交界处,见图 2。

通过各分区空间平均流速分析引江济太工程在贡湖湾内的影响范围,表 3 为不同工况下各分区的平均流速。由表 3 可知,不同风速下引江济太工程实施期间贡湖湾近区和中区平均流速随望虞河引水流量的增大,且有不同程度提升,且对近区影响程度大于对中区影响程度,相同风速条件下交界断面处水体平均流速在不同引水流量下变化幅度极小,可忽略不计。在风速 3 m/s 条件下望虞河以 50、100 m³/s 引水时近区内平均流速较无引水时分别提升 7%、15%,中区内平均流速较无引水时分别提升 6%、11%;在风速 5 m/s 条件下望虞河以 50、100 m³/s 引水时近区内平均流速较无引水时分别提升 13%、27%,中区内平均流速较无引水时分别提升 8%、9%;在风速 8 m/s 条件下望虞河以 50、100 m³/s 引水时近区内平均流速较无引水时分别提升 15%、24%,中区内平均流速较无引水时分别提升 9%、14%。由此可见,望虞河入湖水对贡湖湾内水动力条件影响范围有限,仅能到达贡湖湾中部区域,对大太湖水体水动力条件几乎无影响。

表 3 不同工况下各分区水体平均流速

Tab. 3 Average velocity of water bodies in different distributions under different conditions

风速 (m · s ⁻¹)	引水流量 (m ³ · s ⁻¹)	各分区平均流速/(cm · s ⁻¹)		
		近区	中区	交界断面
3	0	4.08	2.66	4.57
	50	4.36	2.83	4.58
	100	4.71	2.96	4.61
5	0	5.94	4.33	5.24
	50	6.84	4.72	5.29
	100	7.38	4.94	5.26
8	0	7.04	7.23	10.23
	50	7.95	8.22	10.28
	100	8.93	8.34	10.22

3.2 引江济太工程对贡湖湾垂向流速分布特征的影响

太湖为浅水型湖泊,其水体流动主要由风驱动,具有典型的风生流特征。选取贡湖湾内#1、#7、#16 共 3 个测点,对 5 m/s 风速下引江济太工程实施期间,贡湖湾内 3 个测点垂向流速分布特征展开分析,各点位不同工况下垂向流速变化特征、风场方向和望虞河出口方向见图 4,选定湖床底部为 y 方向坐标零点。

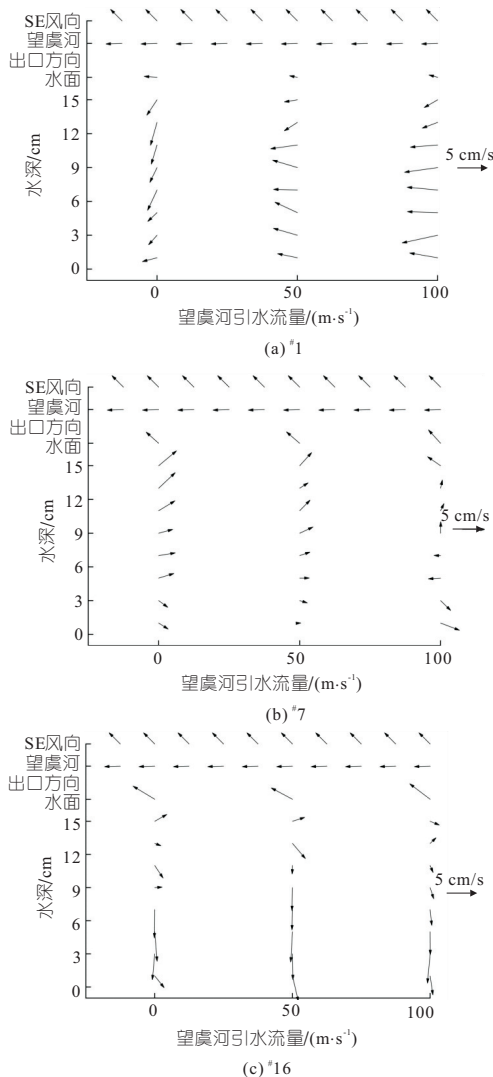


图 4 不同引水流量下垂向流速分布

Fig. 4 Vertical velocity distribution in different diversion flow

图 4(a)为望虞河出口处#1 测点在不同工况作用下垂向流速变化情况,其水流特征主要受望虞河引水流量的影响,在望虞河无引水条件下#1 测点位垂向上为流态均匀的贴岸流,流向与风向夹角约为 110°,平均流速为 5.32 cm/s;望虞河引水流量为 50、100 m³/s 时,该点位水流流态基本为沿望虞河方向的射流,其平均流速分别为 6.34、7.85 cm/s,水体流态受望虞河引水流量影

响显著；[#]7 测点位受到引江济太水流和风生流环流共同作用，其垂向流速分布特征受引水流量和风速的变化而改变，规律性不显著，见图 4(b)。[#]16 测点位于交界断面区内，其水体流动几乎不受引江济太水流的影响，垂向流速分布具有典型的风生流特征，即表层水体受风应力作用流向与风向基本一致，底层水体流向与风向相反，中间为过渡层，见图 4(c)。

3.3 引江济太工程对贡湖湾平面环流特征的影响

贡湖湾也是受蓝藻威胁的湖区之一，平面环流特征对藻华及污染物的输移扩散影响显著。在恒定东南风场作用下，风速和引水流量的变化对贡湖湾内平面环流的位置、形状和大小影响显著。仅在风速变化条件下，贡湖湾中部形成近似椭圆形的逆时针环流，但不同风速作用时，环流的面积略有不同。在引江济太期间随着望虞河水流的注入，贡湖湾内环流特征发生变化：贡湖湾湾内中部逆时针环流消失，东北部形成了不规则顺时针环流，但随着引水流量的改变，环流结构形态变化不大，见图 5(b)、(c)、(e)、(f)。在相同引水流量、不同风速条件作用下，风速的改变对环流面积的影响较大，对环流位置影响不明显，见图 5(b)、(c)、(e)、(f)。根据图 5 中平面环流位置可以看出在

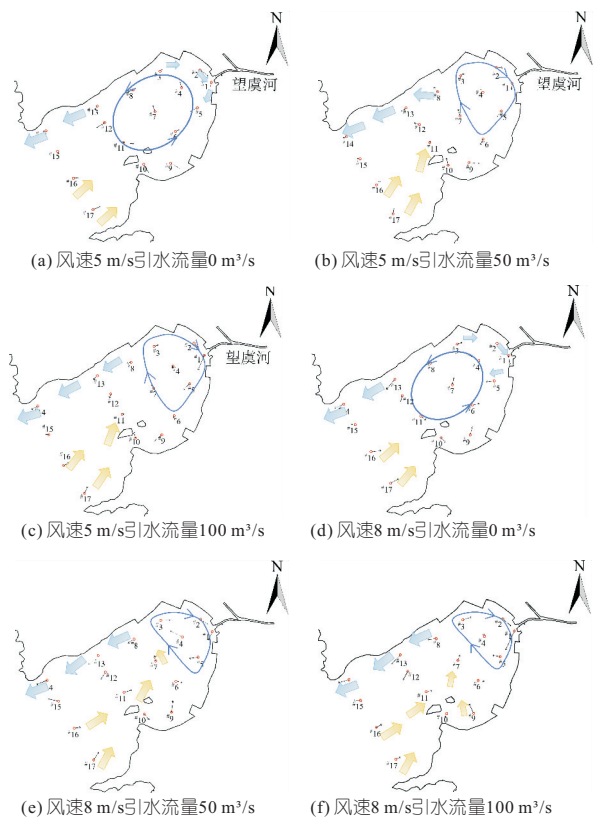


图 5 不同工况下贡湖湾环流分布

Fig. 5 Circulation distribution of Gonghu Bay in different working conditions

恒定东南风风速 5 m/s 条件下，引江济太水流在贡湖湾内影响范围可达到距望虞河口约 10d 的[#]7 测点附近；在恒定东南风 8 m/s 条件作用下约为距望虞河口 7d 左右的[#]4 测点附近。在贡湖湾与大太湖交界断面处，无论望虞河是否存在引水，贡湖湾出口断面附近的水流结构基本一致：北岸附近水流由贡湖湾流入大太湖，南岸附近形成由大太湖流入贡湖湾内的水流。

4 结论

a. 引江济太工程的实施对贡湖湾内水动力特征有一定程度影响，但其影响范围主要是贡湖湾内距望虞河口较近的近区、中区，对大太湖的水动力特征影响极小。

b. 贡湖湾内垂向流速分布特征受望虞河引水流量的改变而变化，贡湖湾内近区、中区流速垂向分布特征受望虞河引水的影响程度大，交界断面处无影响。

c. 贡湖湾内平面环流特征受风速和引水流量变化的共同影响，风速的改变影响平面环流的面积，在引江济太期间风速越大，平面环流的面积越小，流量的变化可改变平面环流的形状和位置，随着望虞河引水的注入，贡湖湾内平面环流由中部近似椭圆形逆时针环流变为东北部不规则的顺时针环流。

参考文献：

[1] JALIL ABDUL, 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.

[2] YOU BEN-SHENG, ZHONG JI-CHENG, FAN CHENG-XIN, et al. Effects of hydrodynamics processes on phosphorus fluxes from sediment in large, shallow Taihu Lake [J]. Journal of environmental sciences, 2007, 19(9): 1055-1060.

[3] 杨倩倩, 吴时强, 戴江玉, 等. 夏季短期调水对太湖贡湖湾湖区水质及藻类的影响 [J]. 湖泊科学, 2018, 30(1): 34-43.

[4] 王震. 引江济太背景下贡湖水动力场的数值模拟研究 [D]. 无锡: 江南大学, 2015.

[5] 吕永政, 李翠梅, 肖昭文. 风生流对贡湖湾水环境的影响过程模拟研究 [J]. 水电能源科学, 2022, 40(2): 39-42.

[6] LI YIPING, ACHARYA KUMUD, YU ZHONG-BO. Modeling impacts of Yangtze River water transfer on water ages in Lake Taihu, China [J]. Ecological engineering, 2011, 37(2): 325-334.

中的粗差和疑似粗差数据。

4 结 论

a. 针对大坝变形监测数据普遍存在粗差的问题,提出采用全卷积神经网络(FCN)对大量人工标记数据样本进行表征学习的方法实现监测数据粗差识别的智能模拟,在此基础上,利用Python和Tensorflow框架构建了变形监测数据粗差识别的FCN网络模型,并以人工标注数据集进行模型训练,模型准确率和召回率达到91%左右。

b. 利用训练好的模型并通过“投票法”开展某大坝变形监测数据粗差识别。结果表明,经训练的FCN模型能较准确地识别变形监测数据中的粗差数据。

参 考 文 献:

[1] 吴中如. 中国大坝的安全和管理[J]. 中国工程科学, 2000, 2(6): 36-39.

[2] 李啸啸,蒋敏,吴震宇,等. 大坝安全监测数据粗差

识别方法的比较与改进[J]. 中国农村水利水电, 2011(3):102-105,112.

[3] 吴中如. 水工建筑物安全监控理论及其应用[M]. 北京:高等教育出版社,2003.

[4] 刘千驹,陈代明,陈少勇,等. 小波理论在大坝安全监测数据粗差探测中的应用[J]. 西北水电,2020(增刊1):129-132.

[5] 吴雄伟,程伟平. 基于奇异值分解算法的大坝监测数据回归模型[J]. 水电自动化与大坝监测,2007, 31(3): 53-55.

[6] SCHMIDHUBER JÜRGEN. Deep learning in neural networks: An overview [J]. Neural networks, 2015, 61: 85-117.

[7] 王丽蓉,郑东健. 基于卷积神经网络的大坝安全监测数据异常识别[J]. 长江科学院院报,2021,38(1):72-77.

[8] LONG J, SHELHAMER E, DARRELL T. Fully convolutional networks for semantic segmentation [C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Boston, USA:IEEE,2015: 3431-3440.

Research on Gross Error Detecting Method of Monitored Dam Deformation Data Based on Fully Convolutional Networks

QI Zhi-yong¹, SUN Fu-ting^{2,3}, MAO Yan-pian¹, ZHOU Jian-bo², ZHANG Chun-hui¹, LI Qiu-yan¹

(1. China Yangtze Power Co., Ltd., Yichang 443002, China; 2. Large Dam Supervision Center, National Energy Administration of the People's Republic of China, Hangzhou 311122, China; 3. PowerChina Huadong Engineering Co., Ltd., Hangzhou 311122, China)

Abstract: Goss error detecting method of monitored dam deformation data is researched based on the fully convolutional neural networks(FCN). Firstly, the method of representation learning of artificially labeled data sets by FCN model was proposed to simulate engineers' experience. Secondly, the FCN model for gross error detection was built and artificially labeled data sets were used for model training. Finally, the trained FCN model was used for gross error detecting of monitored deformation data of a gravity dam. The results show that the gross error in monitored dam deformation data can be accurately obtained by the proposed method, which can improve efficiency of dam safety management.

Key words: monitoring; gross-error; FCN; dam safety; artificial intelligence

(上接第 26 页)

Influence of Project of Water Diversion from Yangtze River to Taihu Lake on Hydrodynamic Characteristics of Gonghu Bay Under Typical Wind Field in Summer

WANG Wen-kang^{1,2}, XU Shi-kai^{1,2}, ZHAO Jin-xiao^{1,2}, DING Wen-hao^{1,2}, WANG Yong^{1,2}

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Key Laboratory of Taihu Basin Water Management, Ministry of Water Resources, Wuxi 214131, China)

Abstract: Focusing on the influence of the project of water diversion from Yangtze River to Taihu Lake on the hydrodynamic characteristics of Gonghu Bay, the physical model of the wind-driven currents in Taihu Lake was used to analyze the influence on the hydrodynamic characteristics and the vertical flow velocity and planar circulation distribution in Gonghu Bay under the different wind speeds and different diversion flow of Wangyu River in the typical wind field in summer. The results indicate that the variation of Wangyu River diversion flow affects the hydrodynamic characteristics of Gonghu Bay mainly in the near and middle regions, but has little impact on Taihu Lake; The implementation of the water diversion project from Yangtze River to Taihu Lake significantly changes the vertical velocity distribution characteristics on the outlet axis of Wangyu River in the near and middle regions, but has no effect on the vertical velocity distribution characteristics at the junction section; The characteristics of the planar circulation in Gonghu Bay are affected by both wind speed and diversion flow, the changes of wind speed and diversion flow have a significant impact on the area, location and shape of the plane circulation. The research results can provide hydrodynamic theoretical support for evaluating the impact of the water diversion project from Yangtze River to Taihu Lake on the water environment of Gonghu Bay.

Key words: project of water diversion from Yangtze River to Taihu Lake; Gonghu Bay; wind-driven current; hydrodynamics; physical model