

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtj.20180019

王勇, 王华, 纪伟, 等. 风生流水动力特性试验研究[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(1): 122-126. WANG Y, WANG H, JI W, et al. Experimental study on hydrodynamic characteristics of wind driven flow[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(1): 122-126. (in Chinese)

# 风生流水动力特性试验研究

王勇<sup>1,2</sup>, 王华<sup>3</sup>, 纪伟<sup>4</sup>, 沙海飞<sup>1,2</sup>, 周杰<sup>1,2</sup>, 阮仕平<sup>1,2</sup>, 徐世凯<sup>1,2</sup>

(1. 南京水利科学研究院, 南京 210029; 2. 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098;  
3. 长江下游水文水资源勘测局, 南京 210011; 4. 徐州市水利建筑设计研究院, 江苏 徐州 221000)

**摘要:** 从以往对太湖和其他浅水湖泊的研究来看, 水流走向主要受湖泊表面的风向支配, 主要运动形式是由风驱动而形成的风生流。为了研究浅水湖泊风生流的基本特性, 构建了一套模拟风生流的水槽试验装置, 模拟了 15 m/s 风速下的风生流, 并采用高采样频率 PIV 系统对风生流水动力特性进行了精细的测量, 获得了风生流的垂向流场信息。试验表明该系统测量结果符合风生流的形成规律, 具有模拟风生流的能力。通过不同流程处、相同风速下风生流时均流场、水平流速、涡量、紊动切应力和紊动强度垂线分布的对比, 分析了风生流的水动力特性。风生流水槽试验的结果可以为今后进一步深入研究浅水湖泊风生流提供基础数据。

**关键词:** 风生流; 水槽试验; PIV; 水动力特性; 紊动特性

**中图分类号:** X143; P343 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2018)01-0122-05

## Experimental study on hydrodynamic characteristics of wind driven flow

WANG Yong<sup>1,2</sup>, WANG Hua<sup>3</sup>, JI Wei<sup>4</sup>, SHA Haifei<sup>1,2</sup>, ZHOU Jie<sup>1,2</sup>, RUAN Shiping<sup>1,2</sup>, XU Shikai<sup>1,2</sup>

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;

2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210098, China;

3. Hydrology and Water Resources Survey Bureau of the Lower Yangtze River Reaches, Nanjing 210011, China;

4. Xuzhou Water Conservancy Architectural Design and Research Institute, Xuzhou 221000, China)

**Abstract:** According to the previous research on Taihu Lake and other shallow lakes, the water movement is mainly affected by the direction of the wind. The form of the water movement is mainly the wind driven flow. In order to study the basic characteristics of the wind driven flow in shallow lakes, we established a flume experiment device to simulate the wind driven flow at the 15 m/s wind speed. The PIV system with high sampling frequency was used to measure the precise hydrodynamic characteristics of the wind driven flow, and obtained the vertical flow field information of the wind driven flow. The test showed that the measurement results of the system conformed to the formation law of wind driven flow, and has the ability to simulate the wind driven flow. By contrasting the vertical distribution of time averaged flow field, horizontal velocity, vortex, turbulent shear stress, and turbulent intensity at different distances at the same wind speed, we analyzed the hydrodynamic characteristics of the wind driven flow. The results of this experiment can provide basic data for the further study on the hydrodynamic characteristics of shallow lakes.

**Key words:** wind driven flow; flume experiment; PIV; hydrodynamic characteristics; turbulence characteristics

湖水运动是湖泊重要物理特性之一, 它直接关系到湖泊中物质、能量的输送与转换, 以及湖泊与外

收稿日期: 2017-06-09 修回日期: 2017-07-11 网络出版时间: 2017-12-21

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20171220.1406.010.html>

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0401504); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(Y115014; Y116005)

Funds: National Key Research and Development of China(2016YFC0401504); Special Funds for Basic Research and Business Expenses of Central Level Public Welfare Scientific Research Institutions (Y115014; Y116005)

作者简介: 王勇(1979-), 男, 安徽六安人, 高级工程师, 博士, 主要从事水工水力学和环境水力学方面研究。E-mail: wangyong@nhri.cn

界的物质和能量的交换与转移。对于如太湖这样的浅水湖泊,风的作用是湖流的主要驱动力之一,风生流是湖泊中一切物理因子变化的基本动力条件,也是引起湖泊环境变化的一个极其重要的营造力。风生流的形成、发展、运动形式直接关系到浅水湖泊湖区水流的运动、污染物的扩散迁移和湖区的水环境。因此,浅水湖泊风生流的研究具有重大的理论和实用意义。

数值模拟计算是常用的湖泊风生流研究方法。最早从事完整的湖泊风生流数值模拟的是 Simons<sup>[1]</sup>,他建立了二维安大略湖冬季风生环流的数学模型。Oonishi 和 Imasato<sup>[2]</sup>、Endoh<sup>[3]</sup> 对日本琵琶湖(Lake Biwa)进行了风生流计算。H. G. Ramming<sup>[4]</sup> 建立了北美艾利(Erie)湖和安大略(Ontario)湖的风生流数学模型。国内对风生流的研究始于20世纪80年代中期,王谦<sup>[5,6]</sup>用二维差分模式模拟了定常风作用下太湖风生流的各种特征。梁瑞驹<sup>[7]</sup>、逢勇<sup>[8]</sup>、孙卫红<sup>[9]</sup>、王惠中<sup>[10]</sup>、李一平<sup>[11-15]</sup>等建立了太湖的三维风生流数值模型。胡维平、秦伯强等<sup>[16-19]</sup>在风生流模拟的基础上,建立了太湖保守物质输移扩散三维数学模型。但数值模拟无法模拟数学方程尚不能描述的物理现象;难以处理小尺度紊动;数值模拟的可靠性、精度取决于数学方程的离散方法、误差截断及计算方法,处理不当将难以得出准确结果,甚至出现偏离物理现象的结果。

物理模型试验也是风生流的研究手段之一。Frederick 等<sup>[20]</sup>在室内的风洞水槽内对风生流水动力的主要要素进行了研究。但由于量测设备的原因,试验没有任何有关风生流紊动特性方面的成果。吕红民等<sup>[21-23]</sup>在青岛海洋大学物理海洋实验室研究了风浪水槽的风浪统计特征。刘晓庆等<sup>[24]</sup>在四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室进行了风生流的室内模拟试验。但风生流试验都受到了试验条件和测量系统的限制。

从以往研究来看,风生流研究需要把数值模拟和试验相结合。而风生流试验需要有大型的、有充分长度的风洞水槽才能获得稳定的风生流;风生流流速量级低,观测十分困难,如果采用接触式的测量又可能影响到流场,所以要采用非接触式的测量手段;要捕捉到风生流紊动特性等,还需要用高采样频率的测量仪器。

本文针对浅水湖泊风生流的基本特性,建立了长风洞的风生流水槽试验系统,采用非接触式、高采样频率的 PIV (Particle Image Velocimetry) 对风生流进行了试验研究,分析了风生流的紊动特性,为今

后进一步深入研究浅水湖泊风生流提供基础数据。

## 1 风生流水槽试验系统

风生流水槽试验系统主要由风道、水槽、风机和测量仪器组成。风生流水槽宽度为 1.0 m,深度为 1.2 m,总长为 42 m,为钢板和钢化玻璃混合结构。水槽底部距地面高度 1.5 m。风生流水槽结构设计图如图 1,风生流水槽系统如图 2。

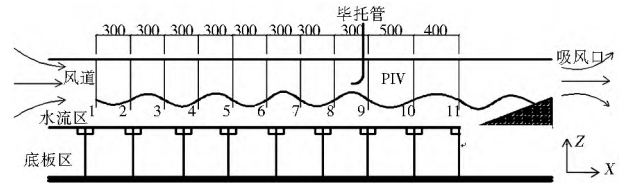


图 1 风生流水槽结构设计图

Fig. 1 The structural design drawing of wind-driven flow flume

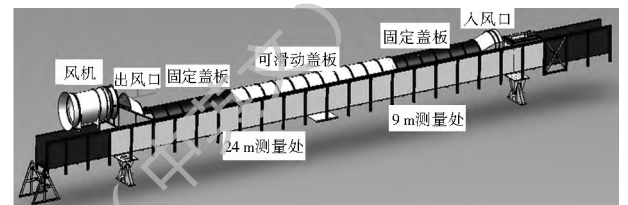


图 2 风生流水槽系统

Fig. 2 The flume system of wind-driven flow

在水槽尾部的正上方安置混流风机,通过软接头及调风阀、导风罩与水槽上方的弧形盖板进行连接,对水槽内部进行抽风,以达到试验要求的风速。风机出风采用直排的方式排放到实验室内。风机后安装连接软管,阻隔风机本身运行时产生的振动传到水槽的风罩板及其他部分。为了减小振动对水槽的影响,风机底部安装时配六个减震垫。风生流水槽上部加装了弧形顶盖板,使水槽内形成封闭风道。为了便于试验观察,在水槽中部设可移动的试验观测段,中部弧形盖板采用有机玻璃板,其底部通过直线滑动导轨固定在水槽上以能够进行滑动。通过试验,水槽内部的水面上方能形成最大 20 m/s 的人造风。

流场的测量采用 PIV,即粒子图像测速系统。PIV 测速系统由电源、同步发生器、激光器、CCD 相机、后处理软件组成,包括光路成像系统、图像记录系统和数字图像分析显示系统,它们分别通过粒子图像激光成像技术和数字图像自动判读技术加以实现。PIV 流速测量范围为 0.02~500.00 m/s。CCD 分辨率为 2048×2048 像素,最大采集速度为 120 帧/s。激光器的最大工作频率为 30 Hz,激光波长 532 nm,激光束直径为 5 mm,脉冲宽度为 3~5 ns。每个脉冲最大能量 200 mJ,两激光器脉冲时间间隔可以调整范围为 200~0.1 ns。示踪粒子粒径 8~12 μm。试验时

PIV 采集区域大小约为 30 cm × 20 cm。

## 2 风生流水动力特性试验

### 2.1 风生流试验参数

试验水深: 0.25 m。试验风速: 15 m/s。

PIV 测量断面为水槽中心。以  $x$  为水槽纵向, 正方向为风向, 水平流速为  $u$ ;  $y$  为水槽横向, 正方向符合右手定则, 横向流速为  $v$ ;  $z$  为水槽垂向, 正方向为竖直向上, 垂向流速为  $w$ ; 以水底 ( $z = 0$ ) 为坐标原点;  $h$  为试验水深。

$u'$  是沿流向  $x$  方向的脉动流速,  $v'$  是沿横向  $y$  方向的脉动流速,  $w'$  是沿垂向  $z$  方向的脉动流速。

$$\text{涡量: } \Omega = \frac{dw}{dx} - \frac{du}{dz} \quad (1)$$

$$\text{紊动切应力: } \overline{\tau} = -\rho \overline{u'w'} \quad (2)$$

$$\text{紊动强度: } e = \overline{u'^2 + v'^2 + w'^2} \quad (3)$$

### 2.2 风生流水槽试验成果分析

考虑到空气进入入风口后需要一段时间稳定, 而出风口处气流相对较乱, 选择水槽的中前部到中后部作为测量区域。但由于水槽中部的底板区域为不透光的钢材, PIV 的激光测量不能进行, 故选择分别用 PIV 测量了水槽中前部流程 9 m 处流场和水槽中后部流程 24 m 处流场, 对比了不同流程处风生流时均流场、水平流速、涡量、紊动切应力和紊动强度垂线分布的变化, 见图 3- 图 12。

风机开启一段时间后, 通过测量发现风速在全流程中都达到了稳态, 且风速在全流程和全断面中误差在 10% 以内。

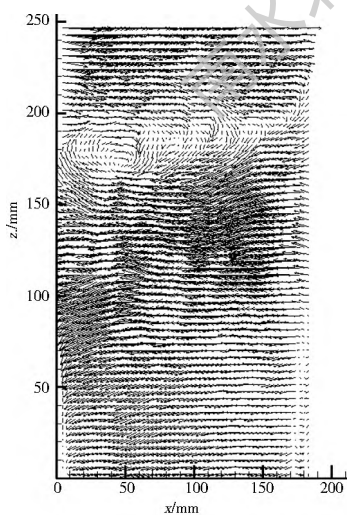


图 3 9 m 处时均流场

Fig. 3 Time averaged flow field at 9 m

由图 3- 图 6 可见, 不同流程处的时均流场和水平流速垂线分布都呈现风生流的特点, 即表面水体流速都是顺风向、为正的风生流, 而下部水体流速

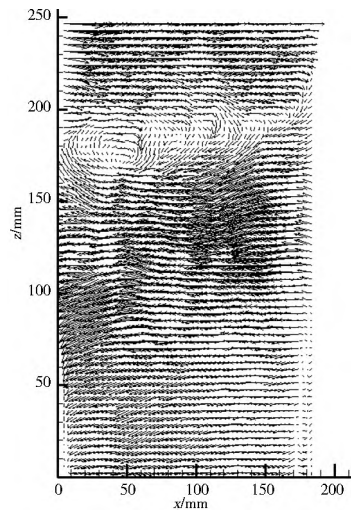


图 4 24 m 处时均流场

Fig. 4 Time averaged flow field at 24 m

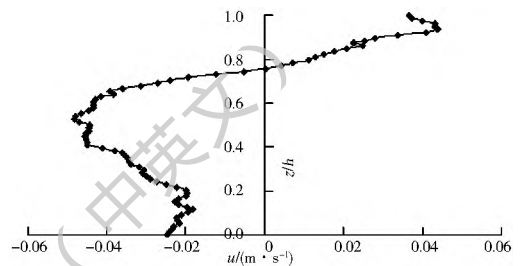


图 5 9 m 处水平流速垂线分布

Fig. 5 Vertical distribution of horizontal velocity at 9 m

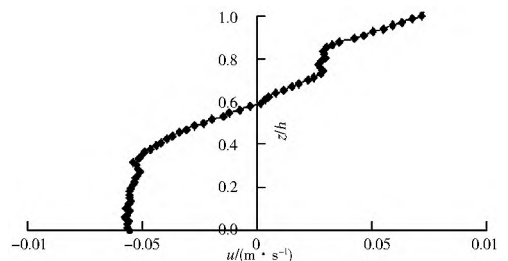


图 6 24 m 处水平流速垂线分布

Fig. 6 Vertical distribution of horizontal velocity at 24 m

则都是与风向相反、为负的补偿流。沿着整个水槽, 风生流的大尺度垂向环流结构是存在的。

随着流程增加, 风生流表面流和下部补偿流流速都有一定的增加, 流速为零的转流点位置下移。下部补偿流最大流速点位置也下移。

由涡量垂线分布图 7、图 8 可见, 在转流点附近由于流速梯度较大、剪切较强, 涡量较大, 转流点上

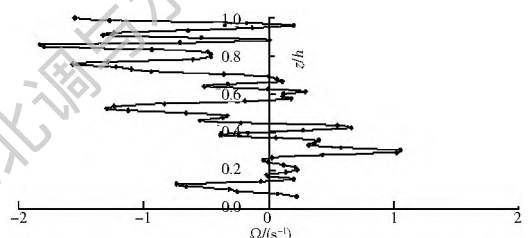


图 7 9 m 处涡量垂线分布

Fig. 7 Vertical distribution of vortex at 9 m

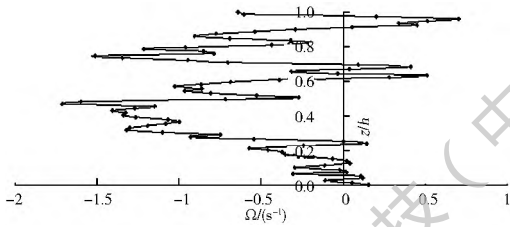


图 8 24 m 处涡量垂线分布

Fig. 8 Vertical distribution of vortex at 24 m

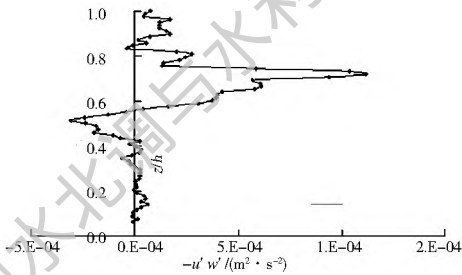


图 9 9 m 处紊动切应力垂线分布

Fig. 9 Vertical distribution of turbulent shear stress at 9 m

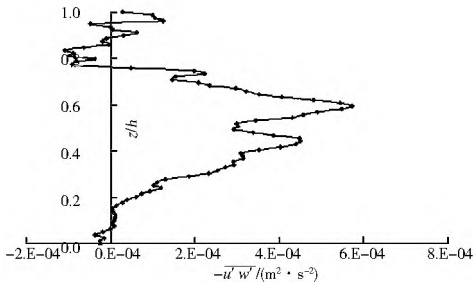


图 10 24 m 处紊动切应力垂线分布

Fig. 10 Vertical distribution of turbulent shear stress at 24 m

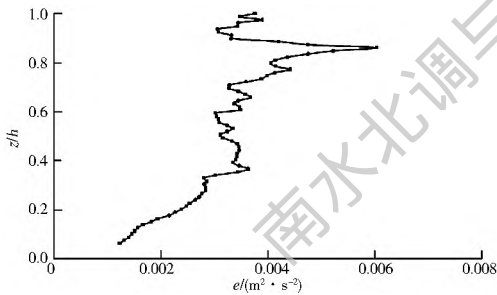


图 11 9 m 处紊动强度垂线分布

Fig. 11 Vertical distribution of turbulent intensity at 9 m

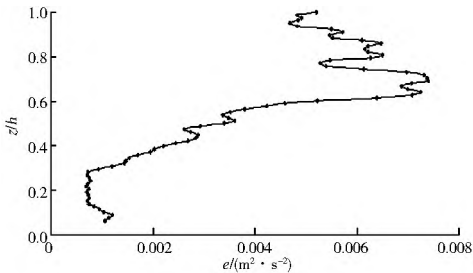


图 12 24 m 处紊动强度垂线分布

Fig. 12 Vertical distribution of turbulent intensity at 24 m

由紊动切应力垂线分布图 9、图 10 可见, 在流场中部紊动切应力会出现一个峰值。在流程 9 m 测量断面处, 紊动切应力峰值出现在  $z/h \approx 0.8$  处。在流程 24 m 测量断面处, 紊动切应力峰值出现在  $z/h \approx 0.6$  处。正是在转流点附近存在的大紊动切应力产生了水流较强剪切作用。与之相对应的是, 由于紊动切应力大, 能量耗散大, 紊动强度在此区域值也较大(图 11、图 12)。随着流程增加, 转流点下移, 紊动强的区域也随着下移。

### 3 结论

本文在湖泊风生流研究现状的基础上, 构建了一套模拟风生流的水槽试验装置, 模拟了 15 m/s 风速下的风生流, 并采用高采样频率 PIV 对风生流水动力特性进行了精细的测量, 获得了风生流的垂向流场信息, 研究了风生流的紊动特性。

风生流试验时均流场和水平流速分析表明, 表面水体流速都是顺风向、为正的风生流, 而下部水体流速则都是与风向相反、为负的补偿流。沿着整个水槽, 风生流的大尺度垂向环流结构是存在的。随着流程的增加, 风生流流速增加, 中部流速为零的转流点位置下移, 下部补偿流最大流速点位置也下移。在转流点附近由于流速梯度较大、剪切较强, 能量耗散大, 涡量、紊动切应力和紊动强度都较大。

### 参考文献(References):

- [1] SIMONST J. Development of three dimensional numerical models of the Great Lakes[J]. Ca Inlan Water Branch, Sci Ser, 1973 (12): 269.
- [2] OONISHI Y, IMASATO N. Study on the currents in Lake Biwa (III)[J]. Journal of the Oceanographical Society of Japan, 1979(9): 53-60.
- [3] ENDOH S. Diagnostic study on the vertical circulation and the maintenance mechanisms of the cyclonic gyre in Lake Biwa[J]. Journal of Geophysical Research, 1986, 9(C1): 869-876.
- [4] WALTER H G, CLIFFORD H, MORTIMER. Hydrodynamics of lakes[J]. Development in Water Science, 1979, 11.
- [5] 王谦谦. 太湖风成流的数值模拟[J]. 河海大学学报, 1987, 15(增刊 2): 11-18. (WANG Q Q. Numerical simulation of wind driven flow in Taihu[J]. Journal of Hohai University, 1987: 15(S2): 11-18. (in Chinese))
- [6] 王谦谦, 姜加虎, 濮培民. 太湖和太浦河口风成流、风涌水的数值模拟及单站验证[J]. 湖泊科学, 1992, 4(4): 1-7. (WANG Q Q, JIANG J H, PU P M. Numerical simulations and their verifications with one station data of wind driven surge and currents in Taihu Lake[J]. Journal of Lake Sciences, 1992, 4(4): 1-7. (in Chinese))
- [7] 梁瑞驹, 仲金华. 太湖风生流的三维数值模拟[J]. 湖泊科学,

下都出现涡量的峰值。随着流程增加, 转流点下移, 涡量峰值也随之下移。并且由于转流点上下流速方向相反, 大涡量区域的涡量方向是相反的。

- 1994, 6(4): 289-297. (LIANG R J, ZHONG J H. A three dimensional numerical simulation of wind driven water current in Taihu Lake[J]. Journal of Lake Science. 1994, 6(4): 289-297. (in Chinese))
- [8] 逢勇, 濮培民, 高光, 等. 非均匀风场作用下太湖风生流风涌水的数值模拟及验证[J]. 海洋湖沼通报, 1994, (4): 9-15. (PANG Y, PU P M, GAO G, et al. Numerical simulations and their verification with ununiform wind stress in Taihu Lake [J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 1994, (4): 9-15. (in Chinese))
- [9] 孙卫红. 太湖风生流及污染带模拟研究[D]. 南京: 河海大学, 2001. (SUN W H. Study on simulation of wind driven flow and pollution zone in Taihu Lake[D]. Nanjing: Hohai University, 2001. (in Chinese))
- [10] 王惠中, 宋志尧, 薛鸿超. 考虑垂直涡粘系数非均匀分布的太湖风生流准三维数值模型[J]. 湖泊科学, 2001, 13(3): 233-239. (WANG H Z, SONG Z Q, XUE H C. A quasi-3D numerical model of wind driven current in Taihu Lake considering the variation of vertical coefficient of eddy viscosity[J]. Journal of Lake Sciences, 2001, 13(3): 233-239. (in Chinese))
- [11] 李一平, 逢勇, 李兴平, 等. 太湖波浪数值模拟[J]. 湖泊科学, 2008, 20(1): 117-122. (LI Y P, PANG Y, LI X P, et al. Numerical modeling of waves in Lake Taihu[J]. Journal of Lake Sciences, 2008, 20(1): 117-122. (in Chinese))
- [12] 李一平, 逢勇, 罗淑葱. 波流作用下太湖水体悬浮物输运实验及模拟[J]. 水科学进展, 2009, 5(20): 701-706. (LI Y P, PANG Y, LUO L C. Experimental and numerical study on the transfer process of suspended matter in the interaction of wave and current in Taihu Lake[J]. Advances in Water Science, 2009, 5(20): 701-706. (in Chinese)) DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2009.05.013.
- [13] LI Y P, ACHARYA K, YU Z B. Modeling impacts of Yangtze River water transfer on water ages in Lake Taihu, China[J]. Ecological Engineering, 2011, 37: 325-334.
- [14] 李一平. 太湖水体透明度影响因子实验及模型研究[D]. 南京: 河海大学, 2006. (LI Y P. Study on the influence factors of transparency by experiment and numerical model in Lake Taihu[D]. Nanjing: Hohai University, 2006. (in Chinese))
- [15] PANG Y, LI Y P, LUO L C. Study on the simulation of transparency of Lake Taihu under different hydrodynamic conditions[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2005, 12: 145-156.
- [16] 胡维平, 濮培民, 秦伯强. 太湖水动力学三维数值试验研究(1) 风生流和风涌增减水的三维数值模拟[J]. 湖泊科学, 1998, 10(4): 15-25. (HU W P, PU P M, QIN B Q. A three dimensional numerical simulation on the dynamics in Taihu Lake (1): the water level and the current during the 9711 typhoon progress[J]. Journal of Lake Sciences, 1998, 10(4): 15-25. (in Chinese))
- [17] 胡维平, 濮培民, 秦伯强. 太湖水动力学三维数值试验研究(2) 典型风场风生流的数值计算[J]. 湖泊科学, 1998, 10(4): 26-33. (HU W P, PU P M, QIN B Q. A three dimensional numerical simulation on the dynamics in Taihu Lake (2): the typical wind driven flow and its divergence[J]. Journal of Lake Sciences, 1998, 10(4): 26-33. (in Chinese))
- [18] HU W P, JORGENSEN S E, ZHANG F. A vertical compressed three dimensional ecological model in Lake Taihu, China[J]. Ecological Modelling, 2006, 190(3-4): 367-398.
- [19] QIN B Q, HU W P, GAO G, et al. Dynamics of sediment re-suspension and the conceptual schema of nutrient release in the large shallow Lake Taihu, China[J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49(1): 54-64.
- [20] TANG F L W, WU J, CHANG C C C, et al. Wind induced water surface set up and drift currents[M]. Coastal Engineering, 1978, 84: 858.
- [21] 吕红民, 许金山. 大型风浪水槽风浪统计特征的测量和分析[J]. 青岛海洋大学学报, 1996, 26(4), 131-138. (LYU H M, XU J S, et al. Measurement and analysis of the statistical characteristics of wind waves in a large scale flume[J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 1996, 26(4): 131-138. (in Chinese))
- [22] 吕红民, 曹露洁, 许金山. 大型风浪水槽风速分布的测量和分析[J]. 青岛海洋大学学报, 1996, 26(1), 17-23. (LYU H M, CAO L J, XU J S. Measurement and analysis of the distribution characteristics of wind speed in a wind wave flume[J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 1996, 26(1): 17-23. (in Chinese))
- [23] 吕红民. 大型风浪水槽风浪成长的谱特征[J]. 青岛海洋大学学报, 1998, 28(1), 18-22. (LYU H M. Characters of wind wave development in a large wind wave tank[J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 1998, 28(1): 18-22. (in Chinese))
- [24] 刘晓庆, 李克锋, 彭永勤, 等. 风生流的室内模拟试验系统研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2011, 43(5): 83-88. (LIU X Q, LI K F, PENG Y Q, et al. Experimental system for the simulation of wind driven current[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2011, 43(5): 83-88. (in Chinese)) DOI: 10.15961/j.jsuese.2011.05.001.