

文章编号: 1000-4874(2009)-04-0512-07

## 太湖风生流特征的数值模拟研究\*

许旭峰, 刘青泉

(中国科学院力学研究所环境力学实验室, 北京 100190, Email: qqliu@imech.ac.cn)

**摘要:** 该文基于对太湖地形和水动力特征的分析, 建立了沿垂向平均的太湖二维浅水水动力学模型, 给出了模型参数和模型的数值求解方法。通过对太湖风生流的模拟, 分析了太湖风生环流的基本形态特征, 并得到了实测流场的良好验证。进一步对盛行风场下的太湖流场和水动力特征进行数值研究表明, 太湖风生流的形成主要由风场、湖泊边界及湖底地形决定; 得到了不同湖区的流动规律和水动力特征, 并揭示了不同湖区流动差异的形成原因。

**关键词:** 太湖; 风生流; 水动力特征; 数值模拟

**中图分类号:** X143, O242.1

**文献标识码:** A

## Numerical study on the characteristics of wind-induced current in Taihu Lake

XU Xu-feng, LIU Qing-quan

(Laboratory of Environmental Fluid Mechanics, Institute of Mechanics,  
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** In this paper, a depth-averaged two-dimensional hydrodynamic model for Taihu Lake was developed, and the some parameters and numerical approach of the model were given based on understanding the characteristics of landform and hydrodynamic of Taihu Lake. By numerical simulating, the basic modalities of the wind-induced current of Taihu Lake were analyzed, and the model was verified by comparing with data of the survey current. Further more, the performances of the wind-induced current and hydrodynamics of Taihu Lake in the prevailing wind were simulated, the results show that the wind-induced current in Taihu Lake is formed by the wind, the lake boundary and the landform of the lake bottom as well. There are obvious different laws of the current and hydrodynamics in different lake regions, and the reason caused the difference is analyzed with the fluid flow mechanism.

**Key words:** Taihu Lake; wind-induced current; hydrodynamics characteristics; numerical simulation

\* 收稿日期: 2008-05-25(2009-06-03 修改稿)

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(No. 10842001, No.10825211)

**作者简介:** 许旭峰(1984—),男,江苏省人,硕士研究生.

# 1 引言

太湖是一个典型的大型淡水湖泊, 为我国目前第三大淡水湖。由于地处长江三角洲, 周边经济发达, 工农业废水大量排入, 同时太湖水体流量小、流速慢、水体置换周期长, 自净化能力较差, 近年来富营养化程度不断加重, 已严重影响到湖区人们的日常生活。多年来国家一直重视对太湖水环境的控制和治理, 但是成效并不显著, 说明对太湖水动力特征和规律的认识仍不深入。因此, 进一步深入开展太湖的水动力特征研究具有重要的科学意义和实际应用价值。

湖泊水动力学特征是湖泊研究的重要方面, 其主要动力过程包括: 湖流、增减水、波浪、定振波以及内波等, 它们对水体中物质、能量传输及转化过程, 水气、水土界面的物质交换存在着直接和间接的影响, 是浅水湖泊水环境研究的基础。但湖泊水动力学研究中的困难主要是资料不易获得, 特别是对于大型湖泊, 大规模的同步观测非常困难。同时, 湖泊的动力因子主要包括风驱动力、湖岸喷射流、密度不均造成的重力流以及地球自转的科里奥利等, 如何分离这些动力因子造成的湖流与波动特征也比较困难。因此建立合理的数学模型进行数值模拟研究是揭示湖泊水动力物理规律的重要研究方法<sup>[1]</sup>。

太湖南北长 68.5 km, 东西平均宽 34 km, 最宽处 56 km, 湖底地形十分平坦, 平均坡度约  $0^{\circ}01'9.66''$ , 平均水深 1.9 m, 最大水深 3.3 m, 大部分水深处于 1.5~2.5 m 之间 (占总面积的 72.3%)。太湖没有深槽或凹陷, 也没有大规模的滩地, 属平原洼地型, 所以太湖是一个典型的大型浅水湖泊。因此太湖流场符合浅水环流的基本特点<sup>[2]</sup>, 大多采用沿垂向平均的二维浅水模型<sup>[3,4]</sup>, 该模型也广泛应用于其它湖泊河流的数值模拟中<sup>[5,6,7]</sup>。因此, 基于这些特点, 本文建立了太湖平面二维浅水动力学模型, 采用数值模拟试验方法, 对太湖风生流场的基本形态和形成过程进行比较分析, 探讨太湖流场的基本特征、规律及形成原因, 揭示不同湖区的流场特征及其存在差异的内在机理, 并为进一步对太湖水质研究提供依据和基础<sup>[8,9]</sup>。

# 2 太湖二维浅水动力学模型

## 2.1 控制方程

设由平均湖面算起的水位起伏为  $\xi(x, y, t)$ , 湖泊水流在  $x, y$  方向的速度分量  $u(x, y, t)$  和  $v(x, y, t)$ , 则考虑地球自转柯氏力和表面风应力的垂线平均二维浅水水动力控制方程为<sup>[10,11]</sup>:

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(Hu) + \frac{\partial}{\partial y}(Hv) = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - fv + g \frac{\partial \xi}{\partial x} - \varepsilon \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - \frac{1}{\rho H} (\tau_x^s - \tau_x^b) = 0 \tag{2}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + fu + g \frac{\partial \xi}{\partial y} - \varepsilon \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - \frac{1}{\rho H} (\tau_y^s - \tau_y^b) = 0 \tag{3}$$

其中:  $h(x, y)$  为平均湖面到湖底的深度;  $H(x, y) = h(x, y) + \xi(x, y)$  为实际水深。  $f$  为 Coriolis 参数,  $f = 2\omega \sin \varphi$  ( $\omega$  为地球自转角速度,  $\varphi$  为计算区域的纬度); 坐标  $x$  和  $y$  分别取正东和正北方向;  $g$  为重力加速度;  $\varepsilon$  为水平涡黏性系数;  $\tau_i^s$  为风应力, 可取下列经验公式计算,

$$\tau_x^s = C_0 \rho_a U^2 \cos \beta, \quad \tau_y^s = C_0 \rho_a U^2 \sin \beta$$

式中:  $C_0$  为风应力拖拽系数,  $\rho_a$  为大气密度,  $U$  为风速 (一般取水面上 10 米处的风速值),  $\beta$  为风向与  $x$  坐标的夹角;  $\tau_i^b$  是底部摩擦力, 可用下式计算:

$$\tau_i^b = \rho g u_i \sqrt{u^2 + v^2} / C^2$$

式中:  $C$  为 Chezy 系数。

## 2.2 参数选取与讨论

### (1) 柯氏力 $f = 2\omega \sin \varphi$

太湖为大型湖泊, 应该考虑地球自转的影响。一般取地球自转角速度  $\omega = 7.29 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$ , 计算纬度取太湖地区的平均纬度  $\varphi = 31^\circ$ 。

### (2) 风应力项

根据 Bengtsson(1973)的研究, 对于封闭性水域, 风应力拖拽系数平均值在 0.001 左右。Simons 等(1985)指出该系数随着风速的增大而增大。本文综合前人研究, 风应力拖拽系数取  $C_0 = 0.0013$  [4], 空气密度  $\rho_a = 1.293 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$ 。

### (3) 底部摩擦项

谢才 (Chezy) 系数常常被用来表征水底的粗糙度, 可用曼宁公式  $C = \frac{1}{n} H^{\frac{1}{6}}$  来求得。这里  $H$  可近似取计算域内的平均水深, 曼宁系数取值  $n=0.02$ 。

### (4) 涡黏性系数

涡黏性系数是表征湍流特性的一个重要参数, 与流动的紊动特性紧密相关。在数值计算中, 涡黏性系数同时可起到人工黏性的作用, 对数值计算起着稳定性作用 [10]。涡黏性系数取值差距很大, 从  $0.001 \text{ m}^2/\text{s}$  到  $100 \text{ m}^2/\text{s}$  都有人取。前人研究指出取得过高可能是因为计算稳定的需要, 但这歪曲了涡黏性系数的物理意义 [12]。本文根据前人研究太湖的成果以及模型的计算率定, 取值  $\varepsilon = 5 \text{ m}^2/\text{s}$ 。

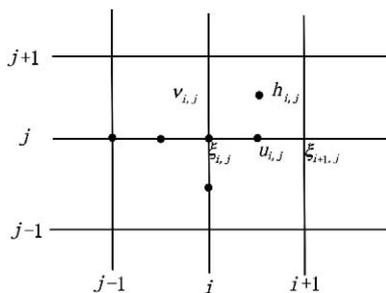


图1 交错网格图示意图

## 2.3 求解方法

目前求解二维浅水方程比较常用的有限差分方法是交替方向隐格式法, 简称 ADI 法 (Alternating Direction Implicit), 其思想是把未知数分解为沿  $x$  和  $y$  方向两组, 前半步先沿  $x$  向扫描全场求解, 后半步再沿  $y$  向扫描全场求解, 交替进行, 这样一点信息传遍全域只需要两遍迭代, 加速了迭代速度。

本文采用改进的全隐式 ADI 法 [12], 将一个时间步长分为两个半步长, 按三层格式进行计算。变量布置采用交错网格, 即为每一个变量建立一套不同的网格系统, 如图 1 所示。

在时间由  $n\Delta t$  到  $(n + \frac{1}{2})\Delta t$  的前半步, 用隐格式离散连续性方程和沿  $x$  方向的动量方程, 求解速度  $u^{n+1}$  和水位  $\xi^{n+\frac{1}{2}}$ ; 对时间由  $(n + \frac{1}{2})\Delta t$  到  $(n+1)\Delta t$  的后半步, 用隐格式离散连续性方程和沿  $y$  方向的动量方程, 求解速度  $v^{n+1}$  和水位  $\xi^{n+1}$ , 这样就求出了  $(n+1)\Delta t$  时刻的水流速度  $u$ 、 $v$  以及水位  $\xi$ 。这种方法比一般 ADI 法有所改进, 不再在每一步显示求解另一方向速度值, 模型计算分析表明, 该方法计算稳定性更好, 也更简洁。

按照上述的差分原理和网格布置来进行方程离散, 在前半步, 将连续性方程在  $(i, j)$  点处离散成如下形式:

$$A^* u_{i,j}^{n+1} + B^* \xi_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + C^* u_{i-1,j}^{n+1} = D^* \quad (6)$$

其中:

$$A^* = \frac{\Delta t}{2\Delta x} H_{i,j}$$

$$B^* = 1$$

$$C^* = -\frac{\Delta t}{2\Delta x} H_{i-1,j}$$

$$D^* = \xi_{i,j}^n - \frac{\Delta t}{2\Delta y} (H_{i,j}^* v_{i,j}^n - H_{i,j-1}^* v_{i,j-1}^n) \quad (7)$$

将  $x$  方向的动量方程在  $(i + \frac{1}{2}, j)$  点离散展开并整理得:

$$A \xi_{i+\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}} + B u_{i,j}^{n+1} + C \xi_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} = D \quad (8)$$

其中:

$$A = \frac{g\Delta t}{\Delta x}$$

$$\begin{aligned}
 B &= 1 + \frac{g \Delta t \sqrt{(u_{i,j}^n)^2 + (\bar{v}_{i,j}^n)^2}}{\text{Chezy}(i,j)^2 H_{i,j}} \\
 C &= -\frac{g \Delta t}{\Delta x} \\
 D &= u_{i,j}^n + \Delta t [f \cdot \bar{v}_{i,j}^n - u_{i,j}^n \cdot \text{signu} \cdot \frac{u_{i,j}^n - u_{i-\text{signu},j}^n}{\Delta x} - \\
 &\quad v_{i,j}^n \cdot \text{signv} \cdot \frac{u_{i,j}^n - u_{i,j-\text{signv}}^n}{\Delta y} + \varepsilon \cdot (\frac{u_{i+1,j}^n - 2u_{i,j}^n + u_{i-1,j}^n}{\Delta x^2} + \\
 &\quad \frac{u_{i,j+1}^n - 2u_{i,j}^n + u_{i,j-1}^n}{\Delta y^2}) + \frac{C_0 \rho_a U^2 \cos \beta}{\rho H_{i,j}}] \quad (9)
 \end{aligned}$$

$D$  式中的  $\text{signu}$ ,  $\text{signv}$  表征流速的方向, 流速大于 0 时为 1, 小于 0 时为 -1。

对离散方程采用追赶法求解三对角矩阵, 这样就完成了前一步长的计算, 得到  $x$  方向流速  $u_{i,j}^{n+1}$  和 水位  $\xi_{i,j}^{n+1/2}$ , 下一步长计算与前一步长类似, 分别对连续方程和  $y$  方向的动量方程离散, 求得  $v_{i,j}^{n+1}$  和  $\xi_{i,j}^{n+1}$ 。这里离散方程和计算过程略去。

### 3 模型的验证和太湖风生流基本特征

运用本文建立的太湖二维浅水动力学模型, 分别模拟计算不同风向下的太湖稳定风生流场, 风速取太湖地区常见风速 3 m/s。图 2 和图 3 分别为风速 3 m/s 的南风 and 北风作用下形成的太湖稳定流场, 分别与实测的环流场比较, 可以看出模拟结果清楚地反映了两种不同风作用下, 太湖的实际环流情况, 较好地验证了模型在模拟太湖水动力方面的适用性。

运用该模型, 对在 E、S、W、N、SE、SW、NE、NW 八种风向, 风速分别为 3 m/s、5 m/s、8 m/s 情况下的太湖风生流场进行了模拟计算, 结果显示太湖在不同风向下形成不同的环流系统。概括起来主要有三种类型: 逆时针环流型 (S、SW、W 风), 顺时针环流型 (N、NE、E 风), 插花型 (过渡型)

(SE、NW 风), 与前人的研究结果一致<sup>[13]</sup>。在 5 m/s 西南风和东南风情况下, 对风生流的形成过程模拟表明, 太湖风生流在形成过程中经过了几个明显的阶段: 一开始全湖流动都顺着风速方向, 这时候风

是唯一的驱动力, 其它力还没有起明显作用, 这一阶段大概持续 2 到 3 小时。之后进入一个过渡期, 主要出现了由于湖岸的阻挡而出现的沿岸流, 下游水位抬高引起压力梯度而出现的回流以及上游水位降低而出现的补偿流, 这一阶段大概持续 3 个小时。之后, 明显开始形成环流, 这时候风应力的作用已经不明显, 在压力梯度和底部拖拽力的共同作用下, 水浅处顺着风向流动, 水深处逆着风向流动, 形成了整体的环流, 并逐渐趋于稳定。这一过程大概在 5 个小时以上。根据对风生流形成过程的分析得知, 太湖风生流的形成主要由风场、湖泊边界及湖底地形决定。

### 4 盛行风场下太湖风生流的水动力特征

根据对太湖地区夏季风场的调研发现, 太湖夏季主要盛行南风、东南风、西南风, 尤其以南风为主。因此, 本文选取南风为模拟计算的主风向, 通过模拟不同风速下形成的太湖风生流场, 分析太湖不同湖区流速和 水位分布特征。图 4、图 5 分别为 5 m/s 和 10 m/s 南风情况下形成的太湖稳定流场模拟结果。可以看出, 太湖的环流特征主要取决于风向, 风速大小仅仅主要影响水流的流速, 几乎不影响环流的方向和基本特征。计算结果还显示, 各水域流速差异很大, 可达一个量级以上。东太湖, 贡湖湾, 竺山湖等湖湾由于相对封闭, 流速较小; 西山 (狭长水道) 流速较大, 并且存在明显的近岸流。

模拟结果表明太湖环流的流速值一般在厘米量级, 这与人模拟的结果相一致<sup>[4]</sup>, 但是总体比实测值偏小, 这可能是因为计算值是对整层的平均结果, 实测值则可能因为瞬时风、浪等的影响而偏大。根据对前人用二维模式和三维模式模拟太湖流场的结果比较显示<sup>[4,14,15]</sup>, 三维模式计算出的流速值明显比二维模式大, 三维模式更符合实际, 但是二维模式还是能够较好地反映太湖的水动力特征, 而且也能够很好模拟长时间尺度的物质输运, 所以二维模式依然具有很好的实用价值。

从南向北选取太湖 7 个主要位置点 (1 大钱, 2 东太湖, 3 西山, 4 漫山, 5 焦山, 6 拖山, 7 梅园) 的水位, 绘制如图 6。可以看出在太湖迎风和背风面, 沿岸出现了明显的风涌增减水现象, 并且随着风力的增大而增强。西山和漫山之间水位变化较小, 这是由于在南风的作用下, 过南北方向中点的垂直断面上水位变化最小。而由实际观测得到西山水位与太湖平均水位非常接近, 根据对太湖地形的观察发现, 西山大概位于西南-东北一线中点垂线部分, 而这正是太湖刮西南或东北风的情况时的水

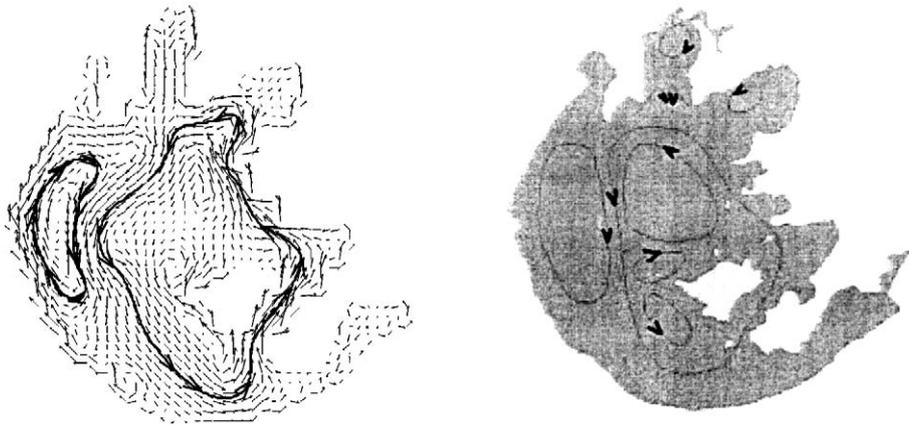


图2 南风 (3 m/s) 作用下的太湖风生流场 (左图为计算结果, 右图为实测结果)

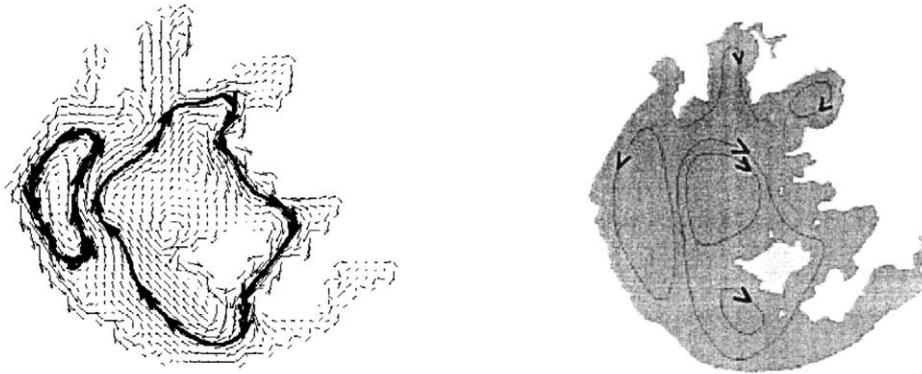


图3 北风 (3 m/s) 作用下的太湖风生流场 (左图为计算结果, 右图为实测结果)

位状况, 计算结果也证明了这一点, 由此我们可以得到太湖夏季南风多以偏西为主。



图4 5 m/s 南风情况下流场图

假定在 0 到 60 小时的时间内, 风向为南风, 风速从 2 m/s 变为 10 m/s, 再从 10 m/s 变为 2 m/s, 风速随时间匀速变化, 在 30 小时处达到最大值。计算各个测点的流速值和水位值。图 7 点绘了西山



图5 10 m/s 南风情况下流场图

(太湖东山与西山间的水道) 和拖山 (梅梁湾口) 两处的流速变化情况。模拟结果显示, 西山水流流速与风速近似呈正比关系, 流速最大值也出现在风速最大的时候, 而拖山水体流速的变化对风速的响应则要滞后的多, 其流速最大值要滞后几个小时 (约 7 小时) 才出现。这是由于西山水道水浅, 而且主要呈西南走向顺着南风的方向, 受风场的影响

非常大; 而拖山位于梅梁湾口, 处在南风的背风面, 当水体流速逐渐增加, 直至引起背风面的水位抬高, 才导致拖山水体流速的变大。说明在西山区域, 风生流明显, 而在拖山区域, 增涌水则是水体流动的主要驱动力。

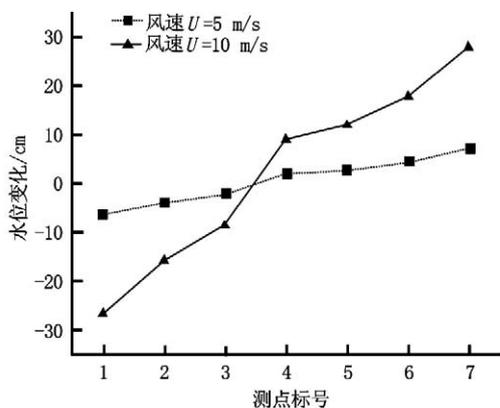


图6 南风情况下从南至北各主要点的水位情况

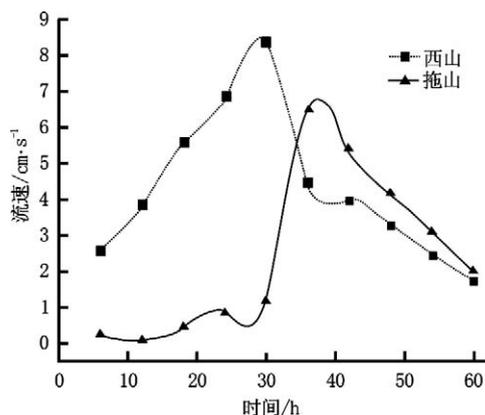


图7 风速逐渐变化情况下, 西山、托山的流速变化过程

## 5 结论

本文在分析太湖水动力和地形特征的基础上, 建立了适合太湖水动力的垂向平均二维浅水动力学模型, 通过对风生流稳定流场的模拟与实测流场比较, 表明该模型能够较好地模拟和反映太湖的风生流特征。运用该模型对太湖流场的特征和形成原因, 以及不同风况情况下的太湖水动力分布特征和规律进行了数值模拟研究, 得到如下主要结论:

(1) 在定常风作用下, 太湖风生流在风应力、压力梯度力和湖底拖拽力的作用下, 经过一系列复杂的不稳定的变化逐渐趋向稳定的风生流场, 太湖风生流的形成主要由风场、湖泊边界及湖底地形决

定。

(2) 太湖在不同风向下形成不同的环流系统, 并且主要有三种类型: 逆时针环流型 (S、SW、W 风), 顺时针环流型 (N、NE、E 风), 插花型 (过渡型) (SE、NW 风)。

(3) 流场形态与风速关系不大, 风速主要决定湖流速度的大小。由于湖岸和湖底地形的影响, 各湖区流速差异很大, 可达一个量级以上。东太湖, 贡湖湾, 竺山湖等湖湾流速较小; 西山区域流速较大, 并且存在明显的近岸流。

(4) 太湖迎风和背风沿岸出现了明显的风涌增减水现象, 并且随着风力的增大而增强。迎风面区域 (如东南风下的西山区域), 风生流明显; 背风面区域, 增涌水则是水体流动的主要驱动力。由风应力作用下的水位形成规律表明太湖夏季南风多以偏西为主。

## 参 考 文 献:

- [1] 秦伯强. 太湖水环境面临的主要问题、研究动态与初步进展[J]. 湖泊科学, 1998, 10(4):1-9.  
QIN Bo-qiang. A review and prospect about the aquatic environment studies in Taihu Lake[J]. Journal of Lake Sciences, 1998, 10(4):1-9.
- [2] 谭维炎. 计算浅水水动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998.  
TAN Wei-yan. Computational Shallow Water Hydrodynamics[M]. Tsinghua University Press, Beijing, 1998.
- [3] 逢勇, 濮培民, 等. 非均匀风场下太湖风成流风涌水的数值模拟及验证[J]. 海洋湖沼通报, 1994, 4: 9-15.  
PANG Yong, PU Pei-min. Numerical simulations and their verification with ununiform wind stress in Taihu Lake[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 1994, 4: 9-15.
- [4] 王谦谦, 姜加虎, 等. 太湖和大浦河口风成流、风涌水的数值模拟及其单站验证[J]. 湖泊科学, 1992, 4(4): 1-7.  
WANG Qian-qian, JIANG Jia-hu. 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.
- [5] SIMONS T. J. Development of numerical models of Lake Ontario[C]. Proc. Conf. Great Lakes Res. IAGLR, 1971, 14: 654-669.
- [6] 康玲, 王学立. 东湖水环境动力学特征研究[J]. 水电能源科学, 2007, 25(2): 14-15.

- KANG Ling, WANG Xue-li. Research on Donghu Lake environment hydrodynamics[J]. *Water Resources and Power*, 2007, 25(2): 14-15.
- [7] CROWDER D W, DIPLAS P. Using two-dimensional hydrodynamic models at scales of ecological importance[J]. *Journal of Hydrology*, 2000, 230: 172-191.
- [8] JI Yong, ZHANG Jie, YAO Qi. Analysis of water quality in shallow lakes with a two-dimensional flow-sediment model[J]. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, 2007, 19(4): 501-508.
- [9] LIU Xiao-bo, PENG Wen-qi, HE Guo-jian. A coupled model of hydrodynamics and water quality for Yuqiao Reservoir in Haihe River Basin[J]. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, 2008, 20(5): 574-582.
- [10] 张庭芳. 计算流体力学[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 2007.
- ZHANG Ting-fang. *Computational Fluid Dynamics*[M]. Dalian University of Technology Press, Dalian, 2007.
- [11] CHEN Zhi-he, FANG Hong-wei, LIU Bin. Numerical simulation of wind-induced motion in suspended sediment transport[J]. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, 2007, 19(6): 698-704.
- [12] MAA J P Y. An efficient horizontal two-dimensional hydrodynamic model[J]. *Coastal Engineering*, 1990, 14: 1-18.
- [13] 马生伟, 蔡启铭. 浅水湖泊风生流的迎风有限元数值模型研究[J]. *水科学进展*, 2000, 11(1): 70-75.
- MA Sheng-wei, CAI Qi-ming. Study on upwinding finite element numerical model for wind-driven current in shallow lakes[J]. *Advances in Water Science*, 2000, 11(1): 70-75.
- [14] 逢勇, 姚琪, 濮培民. 太湖地区大气-水环境的综合数值研究[M]. 北京: 气象出版社, 1998.
- PANG Yong, YAO Qi, PU Pei-min. *General Numerical Research on Atmosphere-Water Environment in Lake Taihu Area*[M]. Meteorological Press, Beijing, 1998.
- [15] 罗澈葱, 秦伯强. 基于三维浅水模式的太湖水动力数值试验—盛行风作用下的太湖流场特征[J]. *水动力学研究与进展, A辑*, 2003, 18(6): 686-691.
- LUO Lian-cong, QIN Bo-qiang. Numerical simulation based on a three-dimensional shallow-water hydrodynamic model in Lake Taihu-Current circulations in Lake Taihu with prevailing wind-forcing[J]. *Journal of Hydrodynamics, Ser. A*, 2003, 18(6): 686-691.