

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

王惠中 宋志尧 薛鸿超

(河海大学海岸及海洋工程研究所, 南京 210098)

提 要 本文在考虑垂直涡粘系数沿水深变化的基础上, 采用准三维风生环流数值模式对稳定和不稳定风场作用下的太湖流场进行模拟计算, 结果令人满意. 从模拟结果的比较中可以得出: 垂直涡粘系数沿水深变化对水位的计算影响不大, 但对流速的垂向分布和底床切应力的计算有较大影响. 因此, 考虑垂直涡粘系数沿水深变化的风生流准三维数值模型可较好地模拟太湖三维风生流场.

关键词 风生流 准三维数值模型 垂直涡粘系数 太湖

分类号 P343.3

近几年来, 随着太湖流域社会经济的迅速发展, 大量工业、农业、生活等产生的污水排入太湖, 致使太湖水质不断恶化, 湖泊水体富营养化加剧, 不断破坏着水体生态系统的平衡状态, 影响太湖地区社会经济可持续发展. 为保护太湖水环境, 弄清太湖水动力的机理, 迄今为止, 很多学者通过大量研究, 建立了多个太湖水动力数值模式^[1-5], 1998年胡维平^[4]对此进行了总结和简评, 并采用垂向伸缩变换的 σ 坐标对太湖的风生流和风涌增减水进行了三维数值模拟, 这对于弄清太湖湖流的成因, 了解太湖水动力的变化和保护太湖水环境是十分有意义的. 综观在太湖全水域建立的数值模式, 不难发现: (1) 计算网格较粗(最小网格尺度为1km), 无法反映其复杂的岸线变化和岛屿分布; (2) 垂直涡粘系数与水深变化无关, 简单地取为一个常值, 影响流速垂向分布的计算精度. 为此, 根据 Leendertes^[6]、Koutitas^[7]和韩国其^[8]的研究, 本文提出了一个准三维数值计算模式, 考虑了垂直涡粘系数沿水深的变化, 在太湖(图1)的应用计算采用了迄今最小的网格尺度(500m), 模拟结果令人满意.

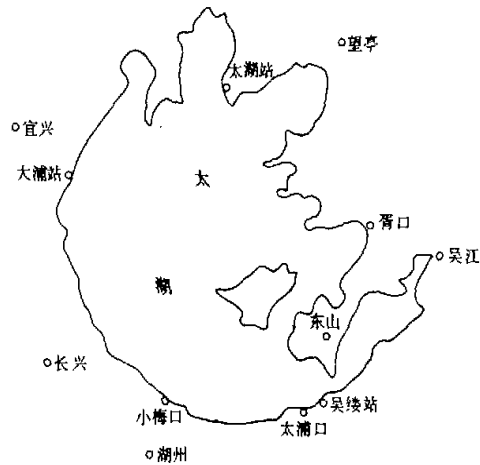


图1 太湖周围气象站分布

Fig. 1 Relevant meteorological stations around Taihu Lake

• 收稿日期: 2001-03-26; 收到修改稿日期: 2001-05-08. 王惠中, 男, 1963年生, 工程师.

1 准三维数值模式的建立

1.1 基本方程

假定湖水均匀不可压并且满足静压分布,则控制三维水流运动的基本方程沿水深积分,并应用表面和底部边界条件,可得深度平均方程:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial UD}{\partial x} + \frac{\partial VD}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{1}{D} \left(\frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\zeta} u^2 dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h}^{\zeta} uv dz \right) = fV - g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + A_H \nabla^2 U + \frac{\tau_{sx} - \tau_{bx}}{\rho D} \quad (2)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{1}{D} \left(\frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\zeta} uv dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h}^{\zeta} v^2 dz \right) = -fU - g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + A_H \nabla^2 V + \frac{\tau_{sy} - \tau_{by}}{\rho D} \quad (3)$$

式中, U 、 V 分别为 x 、 y 方向的深度平均水平流速分量; u 、 v 分别为 x 、 y 方向的水平流速分量; ζ 为水位; $D = h + \zeta$, h 为平均水深; f 为柯氏常数; ρ 为水密度; g 为重力加速度; A_H 为水平涡粘系数, ∇ 为水平梯度算子; τ_{sx} 、 τ_{sy} 分别为 x 、 y 方向的表面切应力, τ_{bx} 、 τ_{by} 分别为 x 、 y 方向的床面阻力。

根据 Koutitas 和韩国其的研究^[7,8],水平流速 u 、 v 的垂直分布可用下述二次多项式逼近:

$$u(z) = \frac{3}{2} \left(-U + \frac{1}{2} a_x \right) \left(\frac{z+h}{D} \right)^2 + 3 \left(U - \frac{1}{6} a_x \right) \left(\frac{z+h}{D} \right) \quad (4)$$

$$v(z) = \frac{3}{2} \left(-V + \frac{1}{2} a_y \right) \left(\frac{z+h}{D} \right)^2 + 3 \left(V - \frac{1}{6} a_y \right) \left(\frac{z+h}{D} \right) \quad (5)$$

式中, $a_x = \frac{\tau_{sx} D}{\rho r_s}$, $a_y = \frac{\tau_{sy} D}{\rho r_s}$, v_s 是表面垂向涡粘系数. 若 r_b 代表床面垂向涡粘系数, 则由此可进一步得到床面阻力的表达式

$$\tau_{bx} = \frac{3\rho r_b U}{D} - \frac{1}{2} \frac{r_b}{r_s} \tau_{sx}, \quad \tau_{by} = \frac{3\rho r_b V}{D} - \frac{1}{2} \frac{r_b}{r_s} \tau_{sy} \quad (6)$$

同时,假定垂向涡粘系数具有形式 $r(z) = F(z)D$, 则 $r_s = F(\zeta)D$, $r_b = F(-h)D$, 并对流项进行修正, 如对积分 $\int_{-h}^{\zeta} uv dz$ 有

$$\int_{-h}^{\zeta} uv dz = D \left[1.2UV + \frac{U}{40} \frac{\tau_{sy}}{\rho F(\zeta)} + \frac{V}{40} \frac{\tau_{sx}}{\rho F(\zeta)} + \frac{\tau_{sx} \tau_{sy}}{120 \rho^2 F^2(\zeta)} \right] \quad (7)$$

这样,沿垂向平均的动量方程可写成^[5]

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \alpha U \frac{\partial U}{\partial x} + \beta V \frac{\partial U}{\partial y} + m = fV - g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + A_H \nabla^2 U + \gamma \frac{\tau_{sx}}{\rho D} - \frac{3F(-h)U}{D} \quad (8)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \alpha V \frac{\partial V}{\partial x} + \beta V \frac{\partial V}{\partial y} + n = -fU - g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + A_H \nabla^2 V + \gamma \frac{\tau_{sy}}{\rho D} - \frac{3F(-h)V}{D} \quad (9)$$

其中, $\alpha = 1.2 + 0.025 a_x / U$, $\beta = 1.2 + 0.025 a_y / V$, $\gamma = 1 + 0.5 F(-h) / F(\zeta)$.

$$m = \frac{1}{120D} \left[-3(8U + a_x) \frac{\partial \zeta}{\partial t} + (3U + a_x) \left(\alpha_x \frac{\partial D}{\partial x} + a_y \frac{\partial D}{\partial y} \right) \right]$$

$$n = \frac{1}{120D} \left[-3(8V + a_y) \frac{\partial \zeta}{\partial t} + (3V + a_y) \left(\alpha_x \frac{\partial D}{\partial x} + a_y \frac{\partial D}{\partial y} \right) \right]$$

式(1)、(4)、(5)、(8)和(9)结合三维连续方程构成了风生环流准三维数学模型。

1.2 定解条件

初始条件:一般取初始流速和水位为零,即: $\zeta|_{t=0}=0, u|_{t=0}=0, v|_{t=0}=0$

边界条件:对湖泊风生环流的计算而言,湖面边界条件,即确定湖面的风作用力,一般通过湖面上方 10m 处的风速由经验公式给出:

$$\vec{\tau}_s = (\tau_{sx}, \tau_{sy}) = \rho_a C_f |\vec{W}_{10}| \vec{W}_{10} \quad (10)$$

其中, C_f 是湖面的拖曳系数, ρ_a 是空气密度, \vec{W}_{10} 为湖面上方 10m 处的风速. Wu^[10] 分析了众多的关于人工池、湖泊、海洋中的 C_f 值的研究结果, 得出了下列拟合公式:

$$C_f = (1.1 + 0.0536 W_{10}) \times 10^{-3}$$

湖底边界条件:

$$\vec{\tau}_b = (\tau_{bx}, \tau_{by}) = \rho \gamma_b \sqrt{u_b^2 + v_b^2} (u_b, v_b)$$

其中, γ_b (一般取 0.0025) 是湖底的拖曳系数, ρ 是湖水密度, u_b, v_b 为湖底流速.

陆边界:采用光滑边界条件($u_n=0, \frac{\partial u_t}{\partial n}=0$). 式中 u_n 为湖岸法向流速, u_t 为湖岸切向流速.

开边界: $\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial y} = 0$. 此外,对湖流中吞吐流比重较大的湖泊,还应考虑沿岸各入湖河流的进出流量.

1.3 差分离散和计算方法

采用交错网格技术布置各物理量,离散模型方程时,时间偏导数项用向前差分,对流项用特征线法差分,其余各项用中心差分,以保证差分方程的精度和计算的稳定.

计算方法采用改进型的 ADI 法^[11].

2 垂向涡粘系数的选取

垂向涡粘系数的选取是三维水动力数值模拟的关键,但现有的太湖风生流计算中几乎都取常数.从 Koutitas^[12] 的风生流试验可以看出,涡粘系数沿水深的变化很大,其值在底层仅是表层的 0.3 倍,将这一结果代入(6),所得的底部应力与表面风应力之比与 Baines 的实验结果较为一致^[13].对于二次多项式分布的准三维风生环流数值模型而言,需要已知垂向涡粘系数底层和表层的比值并确定其中的一个值.在本文计算中,当该比值为 1 时,模型回归为 Koutitas 的形式,即取常涡粘系数;而当该值小于 1 时,即认为是变涡粘系数.

3 太湖风生流场的数值模拟

为较全面反映太湖岸线曲折和提高模拟的精度,作者将太湖划分成步长为 500m 的正方形网格(图 1),时间步长取为 60s,水平涡粘扩散系数取为 $100\text{m}^2/\text{s}$,表面垂向涡粘系数取为 $6\text{cm}^2/\text{s}$,底部涡粘系数取为 $2\text{cm}^2/\text{s}$.本文的水面风场由简化模式给定,风速风向值根据环湖的宜兴、长兴、湖州、东山、吴江气象站及太湖观测站的值,用距离平方的倒数为权重进行加权平均获得(图 1).根据吴坚^[14]等人的研究,太湖吞吐流对整个湖面流的影响较小,故本文主要考虑风生流的作用.模型验证采用了 1997 年 8 月 15 日至 22 日的实测水位资料,这期间包含 18 至 20 日的 11 号台风及强降水过程,验证时考虑了期间太湖平均水位因降水引起的变化.验证

结果(图2)表明,本模式较好地展现了太湖水位对风应力的响应.此后,还模拟了8m/s的东南风持续作用下的流场分布,并就模式中垂向涡粘系数的不同分布形式对水位、流速和底床切应力结果的影响进行了分析比较.

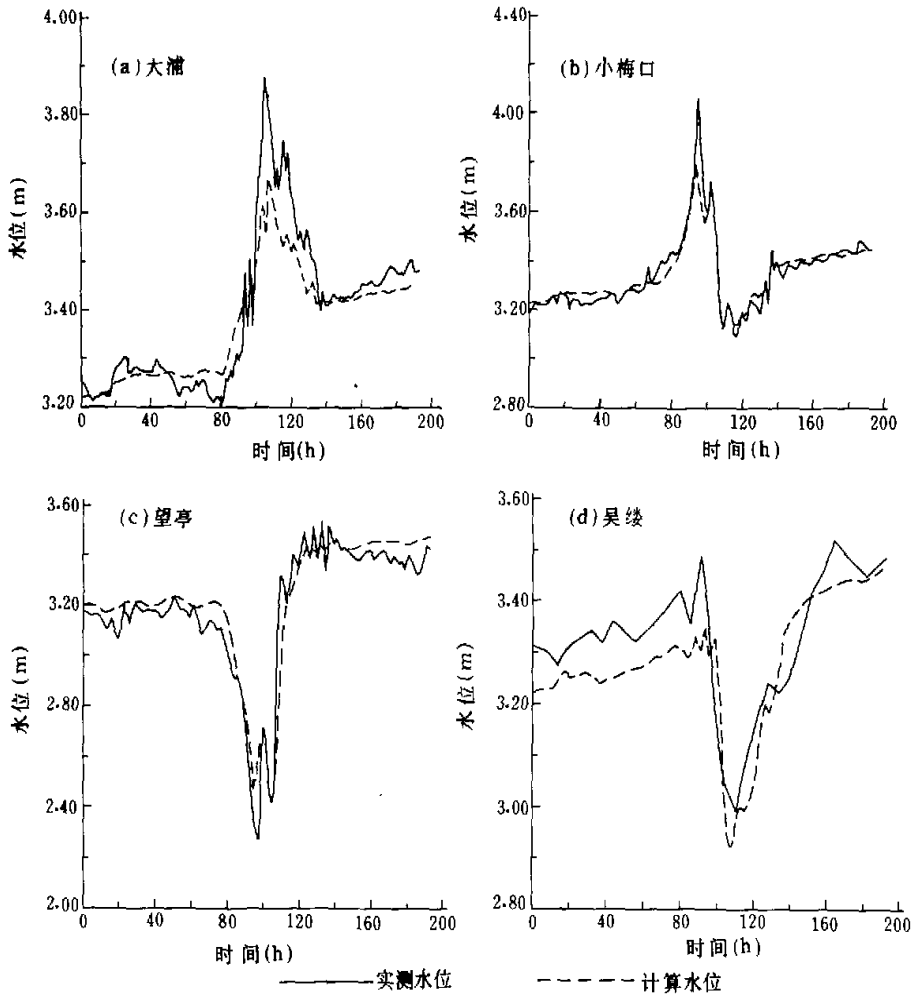


图2 台风作用下太湖站主要站实测和计算水位

Fig. 2 Observed and simulated water levels of main stations under conditions of typhoon

太湖在8m/s持续东南风作用下,在达到稳定流场后,其平均流速场分布与以往研究的结果基本一致(图3),但由于此次研究中采用了较细的网格,新发现在梅梁湖湾存在两个不同方向的环流.水平流速在垂直方向上为一典型的二次型曲线,而且水平流速的梯度变化在变涡粘系数时要小于常涡粘系数时(图4a,b),与此相应的底部切应力在常涡粘系数时要大于变涡粘系数时(图4c,d).说明取常涡粘系数实际上夸大了湖水流层间的切变作用和作用于湖底泥层的作用力.为了正确反映水流结构和流层间的切变作用,垂向涡粘系数选取应考虑垂向变化分布.

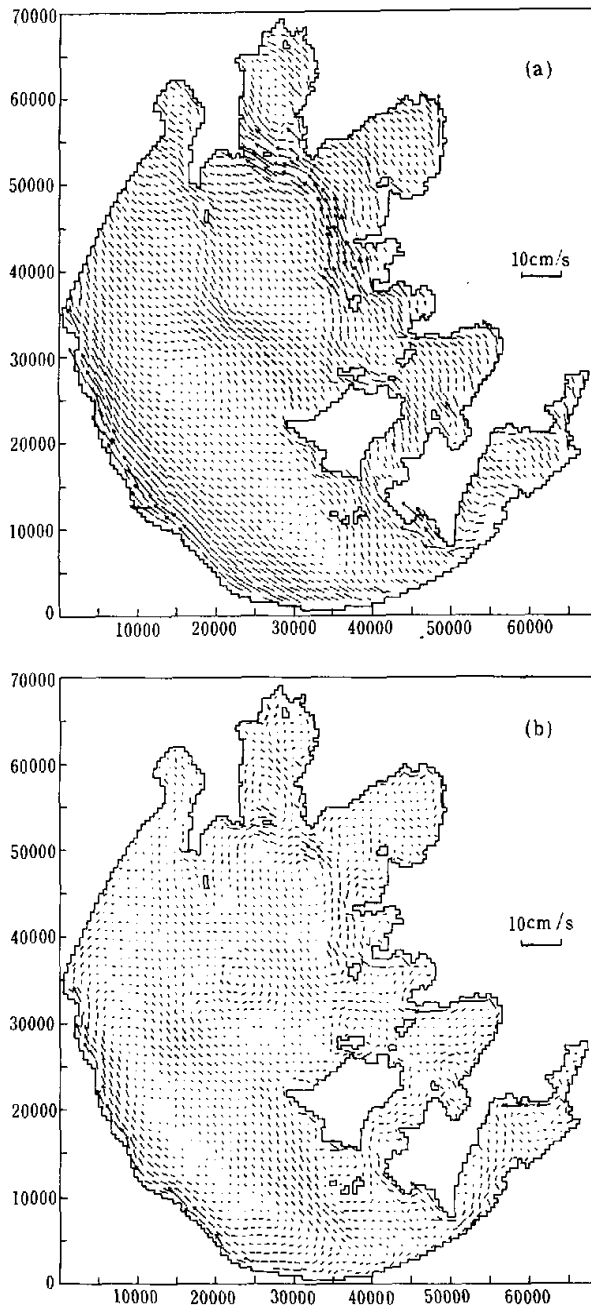


图3 风速为8m/s的SE风持续作用下太湖流场分布
(a)表层流场;(b)相对水深为0.4时层面流场

Fig. 3 Wind-driven currents under an 8m/s, SE wind in Taihu Lake

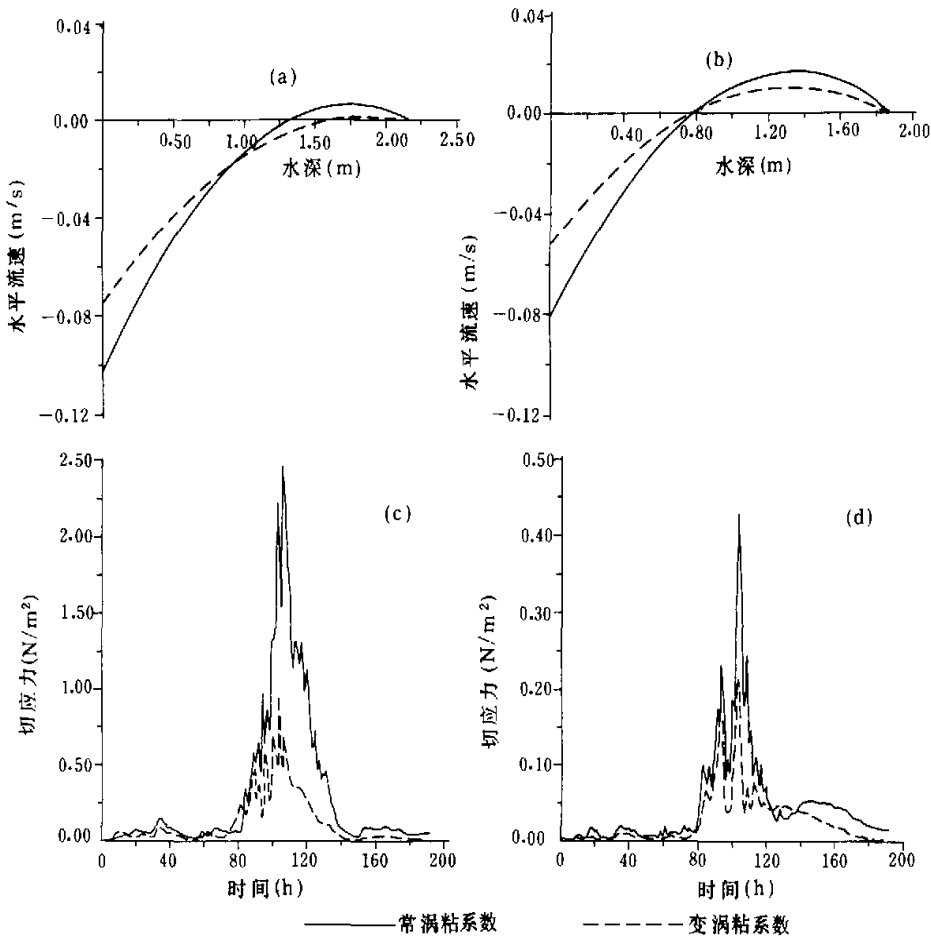


图4 不同涡粘系数时水平流速垂向分布(a,b)及主要站底部切变力过程线
(a)a点21;(b)b点88;(c)大浦站;(d)太浦口

Fig.4 Vertical profiles of horizontal velocities (a,b) and shearing stress processes of main stations (c,d) under different eddy coefficients

4 结论

(1)基于二次多项式分布的准三维风生环流数值模式既具有二维计算模式简便又实用的优点,又具有三维模式考虑水流在垂向分布的变化,这对太湖水质分布规律的研究有十分重要的意义.

(2)从计算结果的比较来看,变涡粘系数因考虑了涡粘系数沿垂向的变化,计算结果更好地考虑了水流指标沿垂向的变化情况.同时结果表明:垂向涡粘系数沿水深变化对于水位的计算影响不大,但对流速的垂向分布和底床切应力的计算有较大影响.

(3)太湖水流场在风作用下不仅形成水平环流,而且形成垂向的环流,这计算结果十分符合风生流形成规律.

参 考 文 献

- 1 王谦谦,濮培民,姜加虎. 太湖和太浦河口风成流、风涌水的数值模拟及单站验证. 湖泊科学, 1992, 4(1): 1-7
- 2 梁瑞驹, 仲金华. 太湖风生流的三维数值模拟. 湖泊科学, 1994, 6(4): 289-297
- 3 逢 勇, 濮培民. 大气-水耦合模式下太湖流场研究. 湖泊科学, 1996, 8(2): 97-102
- 4 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. 湖泊科学, 1998, 10(4): 17-25
- 5 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. 湖泊科学, 1998, 10(4): 26-34
- 6 Leendertse J J, *et al.* A Three Dimensional Model for Estuaries and Coastal Seas, Vol. I, Principles of computation, Rand Report R-141-OWRR, 1973.
- 7 Koutitas C. Mathematics model in coastal engineering, London: Pentech Press, 1988
- 8 韩国其等. 风生环流的准三维数值模拟. 河海大学学报, 1977, 17(3): 1-8
- 9 宋志尧. 湖泊风生环流准三维数值模式的改进. 河海大学学报, 2000, (增刊): 55-57
- 10 Wu J. Wind stress and surface roughness at air-sea interface. *J Geophys Res*, 1969, 74(2): 444-445
- 11 Maa J P Y. An efficient horizontal two-dimensional hydrodynamic model. *Coastal Engineering*, 1990, 14: 1-18
- 12 Koutitas C. Three-dimension models of coastal circulation, an engineering viewpoint. In: Heaps N S, ed. Three-dimensional Coastal Ocean Models, AGU. Washington D C, 1987
- 13 Baines W D, Knapp D J. Wind driven water current. *J Hydraulics*, 1965, 91(HY2): 205-221
- 14 吴 坚等. 琵琶湖、南湖、太湖的一个多层水动力学数值模式. 海洋湖沼通报, 1988, (2): 17-23

A Quasi-3D Numerical Model of Wind-Driven Current in Taihu Lake Considering the Variation of Vertical Coefficient of Eddy Viscosity

WANG Huizhong SONG Zhiyao XUE Hongchao

(The Institute of Coast and Ocean Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, P. R. China)

Abstract

Based on considering the variation of vertical coefficient from bottom to surface, a quasi-3D numerical model was put forward to calculate the wind-driven current, and was applied in Taihu Lake under steady and unsteady winds, respectively, the results were satisfactory. Comparitive studies showed that the influence of the variation of vertical coefficient of eddy viscosity along the water depth is little to the computation results of surface elevation, but it is great to the computation results of the velocity profile and the bed shear-stresses. Therefore, it is needed to consider the variation of vertical eddy viscosity coefficient to simulate the 3D wind-driven circulation in lakes for better simulation.

Key Words Wind-driven circulation; quasi-3D numerical model; vertical coefficient eddy viscosity; Taihu Lake