

# 大气-水耦合模式下三维太湖湖流场研究

逢 勇<sup>\*</sup> 濮培民

(中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

**提要** 利用太湖区域的大气边界层三维数值模式和三维水动力学数值模式, 采用气-水耦合方法, 对太湖的风生流特征进行了深入研究。结果表明, 太湖区域大气边界层风场具有明显的时空变化特征, 与均匀定常风作用下的太湖流场相比, 大气-水耦合模式下太湖流场变化较大, 形成稳定湖流场所需的时间也较长。三维模式计算出的流速值明显比二维模式大(表层约大一倍, 整层平均约大50%), 且与实际观测值符合较好。故即使对于像太湖这样的浅水湖泊, 三维水动力学模式的应用仍然是很必要的。模拟结果中还发现湖流的上下流矢有时出现非常大的切变, 甚至达到了180°。由于浅水湖中仍存在两个边界层(水-气和水-土), 故浅水湖中存在流矢的巨大切变是可能的。

**关键词** 气-水耦合模式 太湖 三维湖流场特征 数值模拟

## 1 前言

为了开发利用太湖资源和保护其生态环境, 深入研究太湖的物理环境是很有必要的。湖流是湖泊中诸量如悬移质、藻类等传播的物理背景条件, 故有必要进行深入研究, 而数值模拟则是一种有效的研究途径。关于定常均匀风场下太湖风成流的数值模拟工作前人已做过许多, 如王谦谦<sup>[1]</sup>、吴坚<sup>[2]</sup>等, 但实际风场并非定常均匀, 尤其对于太湖这样一个较大开敞水域(湖面面积2400km<sup>2</sup>), 风场变化还是很明显的。故有必要研究非均匀风场作用下太湖的湖流场。本文在前人工作的基础上<sup>[2~5]</sup>, 建立了太湖的三维水动力学模式, 通过和大气边界层三维数值模式的耦联, 对太湖湖流场的分布特征进行了研究。

## 2 大气边界层风场数值模拟

采用地形坐标  $z^* = \bar{s} \frac{z - z_G}{s - z_G}$ ,  $\bar{s}$  初始模式顶边界高度,  $z_G$  为地形高度。当考虑模式顶边界高度也随时空变化时, 控制方程组为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} = & -u \frac{\partial u}{\partial x} - v \frac{\partial u}{\partial y} - w^* \frac{\partial u}{\partial z^*} + f(v - v_k) - \theta \frac{\partial \pi}{\partial x} + g \left( \frac{z^* - \bar{s}}{\bar{s}} \right) \frac{\partial z_G}{\partial x} \\ & - g \left( \frac{z^*}{\bar{s}} \right) \frac{\partial \bar{s}}{\partial x} + \left( \frac{\bar{s}}{s - z_G} \right)^2 \frac{\partial}{\partial z^*} \left( K_z \frac{\partial u}{\partial z^*} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( K_H \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_H \frac{\partial u}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (1)$$

\* 现在工作单位: 河海大学水文与环境学院, 邮政编码: 210024。

收稿日期: 1995-01-11; 接受日期: 1995-09-05。

作者简介: 逢勇, 男, 1959年生, 讲师。1995年在中国科学院南京地理与湖泊研究所获博士学位。现主要从事水文数值模拟研究, 已发表论文数十篇。

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} = & -u \frac{\partial v}{\partial x} - v \frac{\partial v}{\partial y} - w^* \frac{\partial v}{\partial z^*} + f(u_g - u) - \theta \frac{\partial \pi}{\partial y} + g \left( \frac{z^* - \bar{s}}{\bar{s}} \right) \frac{\partial z_G}{\partial y} \\ & - g \left( \frac{z^*}{\bar{s}} \right) \frac{\partial s}{\partial y} + \left( \frac{\bar{s}}{s - z_G} \right)^2 \frac{\partial}{\partial z^*} \left( K_z \frac{\partial v}{\partial z^*} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( K_H \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_H \frac{\partial v}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta}{\partial t} = & -u \frac{\partial \theta}{\partial x} - v \frac{\partial \theta}{\partial y} - w^* \frac{\partial \theta}{\partial z^*} + \left( \frac{\bar{s}}{s - z_G} \right) \frac{\partial}{\partial z^*} \left( K_\theta \frac{\partial \theta}{\partial z^*} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( K_H \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_H \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w^*}{\partial z^*} - \frac{1}{s - z_G} \left( u \frac{\partial z_G}{\partial x} + v \frac{\partial z_G}{\partial y} \right) + \frac{1}{s - z_G} \left( \frac{\partial s}{\partial t} + u \frac{\partial s}{\partial x} + v \frac{\partial s}{\partial y} \right) = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial \pi}{\partial z^*} = - \frac{s - z_G}{\bar{s}} \frac{g}{\theta} \quad (5)$$

$$w^* = \frac{\bar{s}}{s - z_G} w - \frac{z^*}{s - z_G} \left( \frac{\partial s}{\partial t} + u \frac{\partial s}{\partial x} + v \frac{\partial s}{\partial y} \right) + \frac{z^* - \bar{s}}{s - z_G} \left( u \frac{\partial z_G}{\partial x} + v \frac{\partial z_G}{\partial y} \right) \quad (6)$$

其中,  $u, v, w$  分别为  $x, y, z$  方向上的风速分量;  $w^*$  为转换坐标下垂直风速;  $\pi$  称为 Exner 函数,  $\pi = C_p \left( \frac{P}{P_0} \right)^{R/C_p}$ ;  $P_0$  是地面气压,  $P_0 = 1000 \text{ hPa}$ ;  $\theta$  为位温。

计算时水平网格点为  $30 \times 21$ , 格距为  $6 \text{ km}$ ; 在垂直方向上, 大气分成 15 层, 其高度分布是非均匀的, 分别为  $0 \text{ m}, 5 \text{ m}, 10 \text{ m}, 100 \text{ m}, 300 \text{ m}, 500 \text{ m}, 700 \text{ m}, 900 \text{ m}, 1200 \text{ m}, 1500 \text{ m}, 2000 \text{ m}, 3000 \text{ m}, 4000 \text{ m}, 5000 \text{ m}$  和  $6000 \text{ m}$ 。式(1)的具体求解方法见文献[6]。

模拟时的初始场按以下方法求取, 计算初始场的边界条件为:

$$\begin{aligned} (1) \text{ 上边界} \quad & u = u_g, \quad v = v_g, \quad \theta = \theta(\bar{s}) \\ & \pi = \theta(\bar{s}) - g \frac{s - \bar{s}}{\theta(\bar{s})} \end{aligned}$$

$$(2) \text{ 下边界} \quad u = 0, \quad v = 0, \quad w^* = 0, \quad \theta = 293 \text{ }^\circ\text{C}$$

初始风场为零, 初始位温呈水平均匀分布, 位温随高度增加而增加, 为稳定层结  $\partial \theta / \partial z = 0.3 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ m}$ ; 气压场由静力方程而得。取(a)  $u_g = 5.0 \text{ m/s}, v_g = 9.0 \text{ m/s}$  和(b)  $u_g = -5.0 \text{ m/s}, v_g = -9.0 \text{ m/s}$  两种情况分别进行模拟计算。

将上述条件代入(1)~(6)式积分 2h 后所得结果作为初始场, 再利用以上初始场进行模拟计算。从 06 时开始积分, 共积分 24h, 图 1 为(a)条件下的模拟结果, 从图 1 可见, 地面风场(10m)基本上为系统气流所控制, 由于处于气压场和风场的调整过程, 风场随时间出现右转, 这可以反映天气系统调整时的风场情况。分析气模式为(b)条件时模式运行的结果也可看出以上特征。另外, 当风进入湖面时呈现明显地加速过程, 这是由于湖陆粗糙度差异造成的。另外, 模式计算结果和实测资料进行了对比<sup>[6]</sup>, 表明模式对太湖流场分布具有一定的描述能力。

### 3 三维水动力学数值模式

#### 3.1 三维水动力学基本方程

设流体均匀不可压, 即水体密度是常值, 垂直方向上服从静水压力分布, 在笛卡尔直角坐标系中, 三维湖泊水动力学基本方程式为:

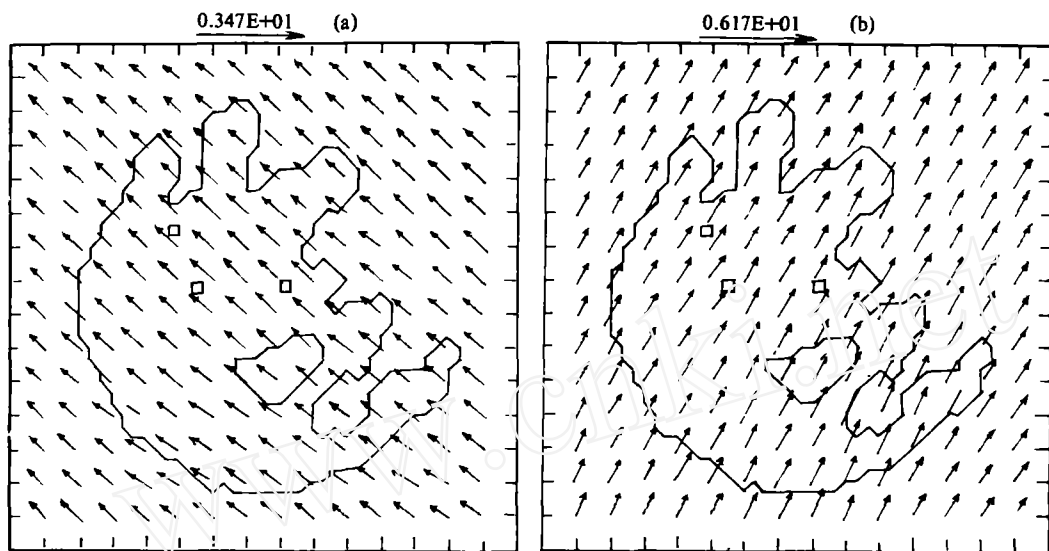


图1 在  $u_g=5.0\text{m/s}$ ,  $v_g=9.0\text{m/s}$  作用下,积分 2h(a)及积分 24h(b)后 10m 处的水平风场

Fig.1 Horizontal wind field at  $z^*=10\text{m}$  after simulating 2 hr(a), and 24 hr (b) respectively under the action of  $u_g=5.0\text{m/s}$ ,  $v_g=9.0\text{m/s}$

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial t} + Lu - fv &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + A_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + A_h \nabla^2 u \\ \frac{\partial v}{\partial t} + Lv + fu &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + A_v \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} + A_h \nabla^2 v \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} &= 0\end{aligned}$$

其中,算子  $L$  的定义为:

$$L = u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + w \frac{\partial}{\partial z}$$

又

$$P = \rho_w g(\eta + z)$$

方程中,  $u, v, w$  分别是  $x, y, z$  轴方向上的流速分量;  $\eta$  为垂直方向上湖面相对于平均水面的高度;  $A_v, A_h$  分别是垂直和水平的涡动粘滞系数。

### 3.2 边界条件

(1) 水面边界条件为:

$$\begin{aligned}w_s &= \left( w + u \frac{\partial \eta}{\partial x} + v \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) \Big|_{z=0} \\ -\rho A_v \left( \frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) &= (\tau_x^a, \tau_y^a) = C_D^a \rho_a \sqrt{v_x^2 + v_y^2} (v_x, v_y)\end{aligned}$$

式中,  $\tau_x^{(a)}, \tau_y^{(a)}$  为作用于湖面的风应力在  $x, y$  方向上的分量;  $v_x, v_y$  为风速在  $x, y$  方向上的分量;  $\rho_a$  为空气密度;  $C_D^a$  为风拖曳系数,  $C_D^a = 1.3 \times 10^{-3}$ ;  $w_s$  为湖面垂向流速。

(2) 湖底边界条件为:

$$w|_{z=H} = 0$$

$$-\rho A_v \left( \frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) = (\tau_x^{(b)}, \tau_y^{(b)}) = C_D^b \rho_w \sqrt{u^2 + v^2} (u, v)$$

式中,  $\tau_x^{(b)}$ 、 $\tau_y^{(b)}$  为底摩擦力在  $x$ 、 $y$  方向上的分量;  $C_D^b$  为湖底摩擦系数,  $C_D^b = 2.5 \times 10^{-3}$ [7];

(3) 侧边界条件: 在陆地闭边界上, 法向流速为零。

### 3.3 初始条件

$$\varphi|_{t=0} = 0$$

其中,  $\varphi$  为  $u$ 、 $v$ 、 $w$ 、 $\eta$ 。

本文的多层模式采用的是半隐式有限差分方案, 具体见文献[3]。

## 4 气-水耦合湖流场模拟结果

取气模式的运行结果(10m 风场)作用于湖面, 并假定初始时刻湖面是静止的, 没有扰动, 即  $u=v=w=0$ 。另外, 在模式计算时取  $A_t = 4 \text{ cm}^2/\text{s}$ ,  $A_h = 0.5 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{s}$ ; 水平网格距为  $\Delta x = \Delta y = 2 \text{ km}$ ;  $\Delta t = 120 \text{ s}$ 。计算中, 没有考虑湖流场对气流运动的影响。当取作用的气模式为(a)条件时得三维水动力学模式的运行结果为图2。图2a为积分2h的湖流模拟结果, 可见上层湖流基本上与风向一致, 下层出现了一定的补偿流; 积分12h后(图略), 上层围绕洞庭西山的正涡度分量增大, 但环流特征不明显, 下层则为补偿流; 积分24h后, 上层湖盆主体部分围绕洞庭西山有一明显的气旋式环流, 在几个湖湾处还有一些较小环流, 上下流矢具有明显切变。和实测结果[8,9]相比, 无论在流型和流速值上都和实测值符合较好。分析气模式为(b)条件时的结果, 可看出, 其基本特征类似于(a)条件的计算结果。当积分24h后, 湖区基本上形成了稳定的反气旋式环流场。

将三维模式的计算结果和二维模式的计算结果[10]相比较, 我们可以得到:

(1) 三维模式计算出的流速值明显比二维模式大。三维模式上层流速值比二维模式约大一倍, 下层流速值与二维模式基本相当, 故平均效果, 三维模式计算出的流速值比二维模式约大50%。这是由于二维模式是整层积分模式, 三维模式把上、下两层分开, 实质上是把性质不同的两个边界层分开, 故计算结果明显比二维模式大。和实测流场[8]的对比来看, 三维模式计算出的流速值较二维模式计算出的流速值更符合实际。

(2) 三维模式能揭示流场的内部结构, 如补偿流、上下流矢的切变等, 这一模拟结果也得到了观测事实的证实。这对于揭示湖中泥沙、藻类和物质的迁移和垂直交换规律具有不可缺少的作用。

## 5 结论

(1) 太湖区域大气边界层风场具有明显的时空变化特征, 故在研究太湖的风生湖流场时, 风场的时空变化要加以考虑。

(2) 与均匀定常风作用下的太湖流场相比, 大气-水耦合模式下太湖流场变化较大, 形成稳定湖流场所需的时间也较长。

(3) 三维模式计算出的流速值明显比二维模式大(表层约大一倍, 整层平均约大50%), 且与实际值符合较好。故即使对于像太湖这样大的浅水湖泊, 三维水动力学模式的应用仍然是很必要的。

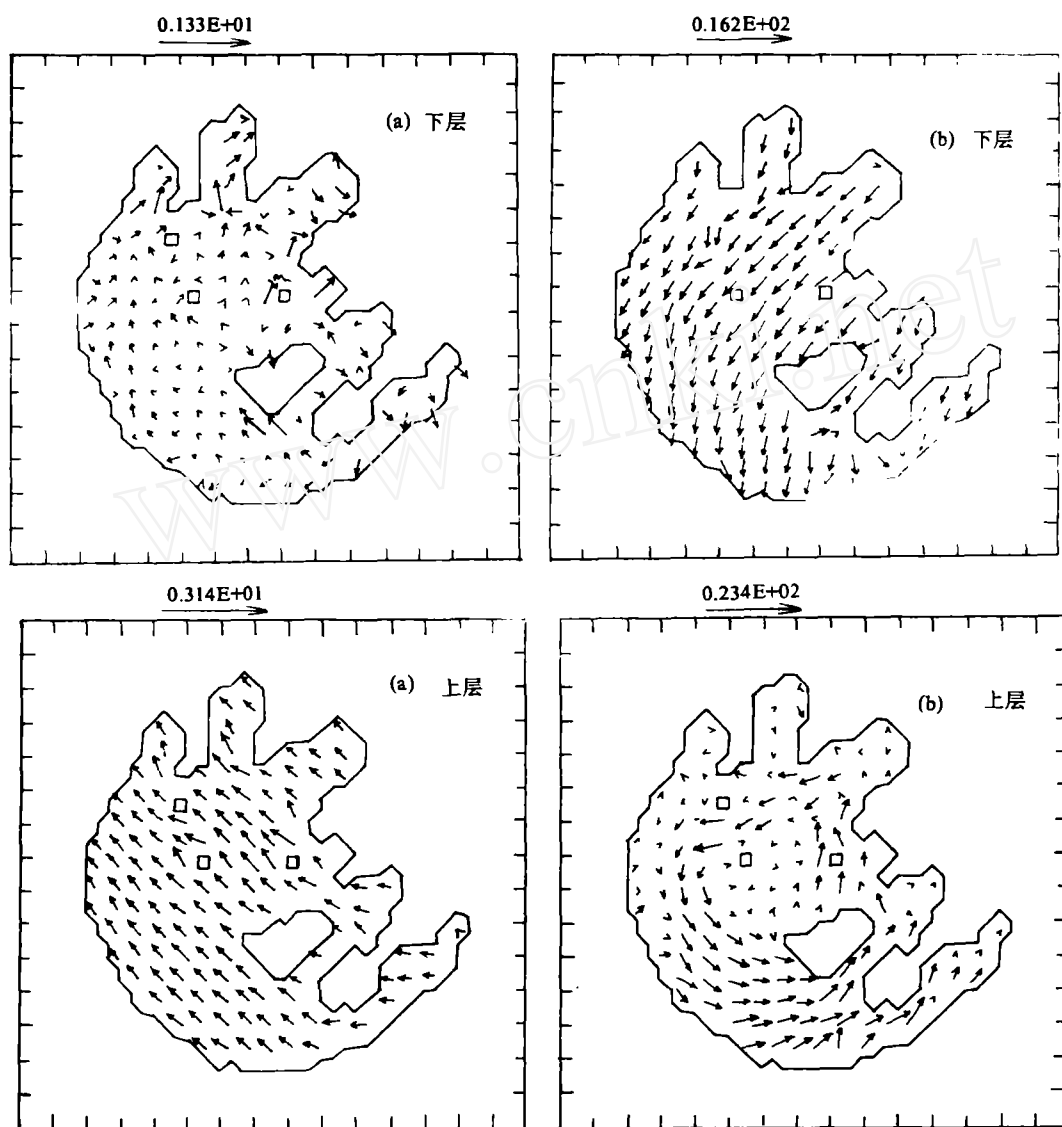


图2 在  $u_g=5.0\text{m/s}$ ,  $v_g=9.0\text{m/s}$  作用下三维水动力学模式计算湖流场

(a)积分 2h; (b)积分 24h

Fig. 2 Current field after simulating 2hr(a), and 24hr(b) respectively,

under the action of  $u_g=5.0\text{m/s}$ ,  $v_g=9.0\text{m/s}$

(4) 在三维水动力学模式的模拟结果中发现湖流的上下流矢有时出现非常大的切变, 甚至达到了  $180^\circ$ 。由于浅水湖中仍存在两个边界层(水-气和水-土), 故浅水湖中存在流矢的巨大切变是可能的。但由于观测难度较大, 实际中是否存在这种情况, 尚有待验证。

## 参 考 文 献

- 1 王谦谦. 太湖风成流的数值模拟. 河海大学学报, 1987, 2(增刊): 11~18
- 2 吴 坚. 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): 16~24
- 3 大西行雄. 昭和 52 年文部省科学研究基金资助专题研究中间报告书 I: 海洋环境保护的基础研究, 第 15 章
- 4 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其单站验证. 湖泊科学, 1992, 4(4): 1~7
- 5 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
- 6 逢 勇, 濮培民. 太湖区域三维湖陆风场数值模拟. 大气科学, 1995, 19(2): 243~251
- 7 逢 勇, 濮培民. 太湖水底摩擦系数的估算. 上海环境科学, 1995, 14(3): 34~35
- 8 中国科学院南京地理研究所. 太湖综合考察报告. 北京: 科学出版社, 1963
- 9 Pu Peimin, *et al.* Thermohydrodynamic characteristics of Tai Lake in China and their environmental effects. *Verh Internat Verein Limnol.* 1990, 24: 102~106
- 10 逢 勇, 濮培民等. 非均匀风场作用下太湖风生流、风涌水的数值模拟及验证. 海洋湖沼通报, 1994, (4): 9~15

## NUMERICAL STUDY OF WIND-DRIVEN CURRENT IN TAIHU LAKE WITH THE AIR-WATER COUPLING MODEL

Pang Yong      Pu Peimin

(Nanjing Institute of Geography & Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008)

### Abstract

The air-water coupling model including a three-dimensional atmospheric boundary layer and a three-dimensional hydrodynamic model is carried out to simulate the wind-driven current field in Taihu Lake. As compared with the results of the wind driven current under the action of uniform wind field in Taihu Lake, the results computed by the air-water coupling model appear unsteady. The current speed computed by the three-dimensional hydrodynamic model is higher than that computed by the two-dimensional model, and more coincident with the observed data. In addition, the current direction difference between upper and lower levels can be reflected by the three-dimensional model. Finally, it is concluded that the three-dimensional hydrodynamic model is better than the two-dimensional one in describing the wind-driven current in Taihu Lake.

**Key Words** Air-water coupling model, Taihu Lake, characteristics of wind-driven current, numerical simulation