

5-10

西山遮挡对滇池风生流影响的数值模拟<sup>p 343-3</sup>李术军 刘树坤<sup>✓</sup> 李锦秀

(中国水利水电科学研究院水力学研究所, 北京 100038)

P339

**提 要** 对于湖泊风生流的模拟, 湖面风场数据是决定精度高低的关键因素, 而湖泊周围的山地等复杂地势常常引起湖面风速风向的不均匀分布, 致使潮流流态因地形因素而变化较大. 本文建立了一个适合于湖泊区域的中小尺度三维过山气流数值模型, 用以计算受山体遮挡的风场参数, 结合沿水深平均的二维湖泊风生流数值模型模拟了实际地形条件下的滇池风生流, 并与均匀风作用下的潮流状态及人工构造风场作用下的风生流流态进行比较. 结果表明: 由气流模型获得符合湖区实际气象特点的局地风场后计算滇池风生流, 数值模拟结果更加准确、细致地反映出了滇池水体流动的总特征.

**关键词** 风场, 遮挡, 滇池, 风生流, 数值模拟, 湖泊

**分类号** P339, P343.3

滇池是云南省最大的高原淡水湖泊, 是维系昆明城市生态平衡的重要水源地. 近年来随着该地区社会经济的发展, 滇池水体受到了严重的污染, 环境状况日趋恶化, 水污染治理势在必行. 为了给滇池水质治理提供依据, 李锦秀等<sup>[1]</sup>采用数值方法对滇池风生流进行了模拟, 并对西山的遮挡影响进行了初步探讨. 研究发现: 湖面风应力按均匀风处理时模拟结果与1980年5月及1983年4月中国科学院南京地理与湖泊研究所对滇池进行的两次潮流实际测量结果偏差较大, 参照滇池地区的风力观测资料对湖面风速进行人工修正后, 风生流模拟精度明显提高. 但是人工构造湖面风场的方法通用性不够好且在湖面风风向变化较大时构造比较困难, 湖泊区域的风场, 尤其是大型湖泊上空的风场, 由于下垫面的不均匀性, 在局地地形的动力及热力影响<sup>[2]</sup>下, 会产生风向、风速的变化, 这又必将引起湖泊风生流流态的变化. 因此建立一个合适的微气象模型, 较为准确地反映湖面风场的变化, 无疑将会大大改善潮流模拟的精度. 为此, 本文建立了一个复杂地形下气流模拟的中小尺度准三维动力学模型, 对湖区风场进行三维数值模拟, 为潮流的模拟计算提供风应力边界资料, 使得潮流模拟更加准确.

## 1 过山气流的数值模拟

### 1.1 基本方程组

为了表现地形的作用, 采用地形追随坐标<sup>[3]</sup>:  $\bar{z} = H(Z - Z_g)/(H - Z_g)$ , 其中,  $H$  为模式顶部高度,  $Z_g$  为地面的相对高度,  $Z$  为相对垂直高度.

假定模式大气干燥、不可压缩、满足静力平衡, 忽略大气的辐射和凝结, 则在此坐标系下, 三维大气的动力过程可用下面的方程组描述:

\* 云南省地方自筹资金项目. 收稿日期: 1997-02-10; 收到修改稿日期: 1997-06-16. 李术军, 1970年生, 硕士.

$$\begin{aligned} \frac{du}{dt} &= -\theta \frac{\partial \pi}{\partial x} + g \frac{\bar{z} - H}{H} \frac{\partial Z_g}{\partial x} + f \cdot v + F_u \\ \frac{dv}{dt} &= -\theta \frac{\partial \pi}{\partial y} + g \frac{\bar{z} - H}{H} \frac{\partial Z_g}{\partial y} - f \cdot u + F_v \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial \bar{z}} - \frac{u}{H - Z_g} \frac{\partial Z_g}{\partial x} - \frac{v}{H - Z_g} \frac{\partial Z_g}{\partial y} &= 0 \\ \frac{d\theta}{dt} &= F_\theta \\ \frac{\partial \pi}{\partial \bar{z}} &= -\frac{H - Z_g}{H} \cdot \frac{g}{\theta} \end{aligned}$$

其中,  $u, v, w$  分别为  $x, y, z$  方向的风速;  $\bar{w}$  为  $(x, y, \bar{z})$  坐标系中  $\bar{z}$  方向的风速;  $f$  为柯氏力系数;  $\theta$  为位温;  $\pi = C_p(P/P_0)^{R/C_p}$  为表示气压的 Exner 函数,  $P_0 = 1000\text{hPa}$ ; 个别微商:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} &= \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial}{\partial \bar{z}} \\ \bar{w} &= \bar{w} \frac{H}{H - Z_g} + \frac{\bar{z} - H}{H - Z_g} \cdot u \frac{\partial Z_g}{\partial x} + \frac{\bar{z} - H}{H - Z_g} \cdot v \frac{\partial Z_g}{\partial y} \end{aligned}$$

其中,  $F_u, F_v, F_\theta$  分别为  $u, v, \theta$  的湍流扩散项

$$F_\phi = K_H \left( \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} \right) + \left( \frac{H}{H - Z_g} \right)^2 \frac{\partial}{\partial \bar{z}} \left( K_V \frac{\partial \Phi}{\partial \bar{z}} \right)$$

式中,  $K_H, K_V$  分别为水平和垂直扩散系数.

## 1.2 边界层参数化

水平扩散系数  $K_H$  取为常数  $K_H = 50.0\text{m}^2/\text{s}$ ; 垂直扩散系数  $K_V$  采用 Shir 和 Shieh<sup>[4]</sup> 的修正形式:  $K_V(z) = K_V(z_1) z/z_1 \exp[-\rho(z - z_1)/h]$ . 其中,  $z_1$  为地面风测站高度, 取为  $10.0\text{m}$ ;  $\rho$  是大气稳定度参数, 取  $\rho = 2.0$ ;  $h$  是混和层高度.

## 1.3 差分方案

本文采用显式有限差分方法求解. 垂向分为不等距的 15 层, 界面分别为  $0\text{m}, 5\text{m}, 10\text{m}, 30\text{m}, 60\text{m}, 100\text{m}, 150\text{m}, 200\text{m}, 300\text{m}, 600\text{m}, 1000\text{m}, 1400\text{m}, 1800\text{m}, 2200\text{m}, 2600\text{m}, 3000\text{m}$ . 水平方向采用交错网格, 取为等间距  $\Delta x = \Delta y = 1000\text{m}$ . 差分格式采用时间分裂法. 在基本方程组中, 非线性平流项采用修正的上游差分格式, 即迎风格式.

## 1.4 初始条件及边界条件

**1.4.1 初始条件** 初始风场、温度场水平均匀分布, 风速沿高度遵循幂指数定律<sup>[5]</sup>  $U = U_0 \cdot (\bar{z}/z_0)^{0.14}$ , 式中,  $U_0$  为离地面  $10\text{m}$  处的风速.

**1.4.2 边界条件** (1) 下边界 ( $\bar{z} = 0$ ) 处:  $u = v = \bar{w} = 0$ . (2) 上边界 ( $\bar{z} = H$ ) 处:  $\bar{w} = 0, \frac{\partial \pi}{\partial \bar{z}} = 0$ . 为避免波在上边界的反射, 模式顶部设立一个吸收层. (3) 侧边界处: 对入流边界, 取为定常流条件:  $\frac{\partial \phi}{\partial t} = 0$ ; 对出流边界, 采用辐射边界条件<sup>[6]</sup>:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + (u + c) \frac{\partial \phi}{\partial x} = 0; \quad \frac{\partial \phi}{\partial t} + (v + c) \frac{\partial \phi}{\partial y} = 0;$$

式中,  $\phi$  为变量  $u, v, \bar{w}$  或  $\theta$ ;  $u, v$  为垂直于边界的风速;  $c$  为重力内波速度.

### 1.5 模式验证

利用建立的过山气流数值模式,本文选取滇池地区一次具有代表性的典型风进行了实际模拟.昆明市气象局于1995年4-5月,在滇池周围增设了测风点,进行了为期一个月、记录间隔为1h的风向、风速监测.4月25日15:00,电线经过该地区,形成一次偏西风大风天气过程.这次大风受地形影响的状况,基本上反映了这个地区的地形影响,与历年来的气象特征相吻合,因此本文选取这次大风作为模型验证的依据.

根据模型的要求,选取滇池湖区 $40\text{km} \times 40\text{km}$ 的模拟区域,模型输入的实际地形是从1:200000地形图上读得并经过一定的平滑处理的,初始来流为地面以上10m高度处偏西风 $14.0\text{m/s}$ ,依据昆明地区的气温变化规律,平均温度垂直变化率 $\Gamma = -0.003\text{k/m}$ ,地表温度取 $294\text{K}$ .经过模式运行计算,各测风点模拟风向与实测风向基本一致,为偏西风,风速在量级及分布趋势上与相应位置的实测风速也比较一致(表1).

表1 1995年4月25日15:00各测站风速实测值及模拟值(风速单位:m/s)

Tab.1 Measured and simulated wind velocity at 15:00 on 1995-04-25

测站	昆明站	太华山	观音山	白鱼口	昆阳农场	呈贡站
实测	5.30	7.00	6.30	6.30	12.70	14.70
模拟	6.80	6.97	6.53	8.35	11.27	11.28

对模拟风场要素与实测风情资料进行对比分析,二者皆反映出滇池地区地面风场的大致特征:对于滇池地区的地形条件而言,在偏西风时,西山附近的西部湖面风速(观音山测站)较之于平坦开阔的湖区东部(呈贡测站)降低50%左右,而风向变化也不大.这说明了所建立的过山气流模型对地形对气流的影响作用具备一定的模拟能力.

## 2 实际地形条件下滇池风生流的数值模拟

利用前文建立的过山气流数学模型,结合在文献[1]中的垂向平均二维湖泊风生流数学模型,本文对滇池风生流进行了对比模拟试验.模型基本数据如下:平均温度垂直变化率 $\Gamma = -0.003\text{k/m}$ ,初始均匀来风为SE,风速 $4.2\text{m/s}$ ,基本糙率 $n = 0.002 - 0.0025$ ,风应力系数 $\gamma^2 = 1.3 \times 10^{-3}$ ,柯氏力系数 $f = 6.1 \times 10^{-3}\text{s}^{-1}$ .在1:50000的滇池水下地形图上用 $500\text{m} \times 500\text{m}$ 的矩形网格将滇池概化为1170个网格单元.

### 2.1 均匀风作用下的流场模拟计算

不考虑西山的遮挡影响,假定湖面风均匀分布,在西南风时模拟结果如图1(a)所示,可见外海存在两个环流,不同于实测的一个逆时针主导环流(见文献[1]中图3(a)),计算结果显然与实测结果有较大偏差.

### 2.2 人工修正的风场作用下的流场模拟计算

考虑到滇池西边西山对风场的影响,根据昆明市气象局提供的滇池周边六站风向、风速实测资料,对风场进行了人为的局部修正,用内插法在湖面上构造了非均匀风场.因各测风点的风向变化不大,在修正风场时,保持了风向为西南风不变,而仅改变风速的大小.东部及南部湖区因沿岸地势平坦开阔,风速取为相对初始均匀风不变的风速 $4.2\text{m/s}$ ;在西部湖区离西山 $5000\text{m}$ 的范围内风速相对于东部减少20%-50%.将修正后的风速数据作为湖流模型的输入

量,模拟结果如图 1(b)所示,可见东部湖流受相对较强的西南风作用而顺风流动,西部靠近西山的湖区风速小,加上湖体水量平衡作用,潮流逆风流动,其流态与滇池的实测基本特征相近,这说明了西山遮挡影响的明显存在及考虑西山遮挡作用后的湖流模拟的合理性。

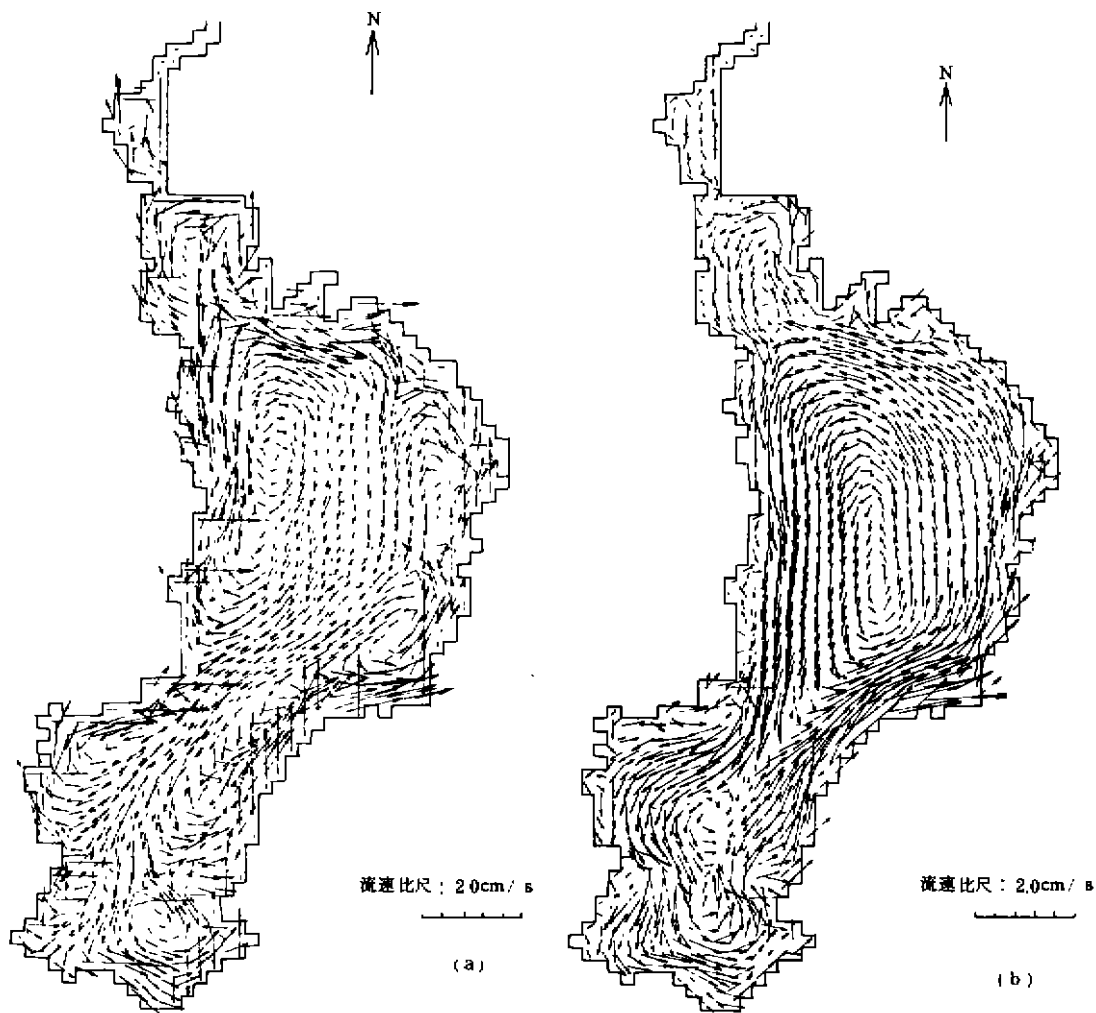


图 1 均匀风(a)和人工修正风场(b)作用下的滇池风生流流场(SW, 4.2m/s)

Fig. 1 Wind-driven flow field of Dianchi Lake under uniform wind (a) and artificially modified wind (b) separately (SW wind, 4.2m/s)

### 2.3 模拟风场作用下的滇池流场模拟计算

为更好地探讨西山遮挡对滇池湖流的影响状况,首先采用过山气流数值模型来模拟受湖周地形影响的风场.取 SW4.2m/s 作为风场模拟的来流风速,初始地表温度取为 20℃,则数值模拟的湖面风场见图 2(a).从风场的水平矢量图看出,湖区西部靠近西山 5000m 左右的范围内风速不同程度地降低,西边地形影响下的湖区西部风向也有一定程度的变化,这与实测风情

资料是符合的. 将模拟的风场作为湖流模型的输入量, 得到了如图 2(b)所示的滇池风生流流场. 模拟结果不仅揭示了滇池东部顺风流及西部补偿流共同形成外海逆时针大环流的总体流动特征, 符合实测结果反映出的滇池流态, 而且与图 1(b)所示的计算结果相比较, 模拟结果更明显的反映出了沿岸存在的补偿性局部小环流, 显得更为细致合理.

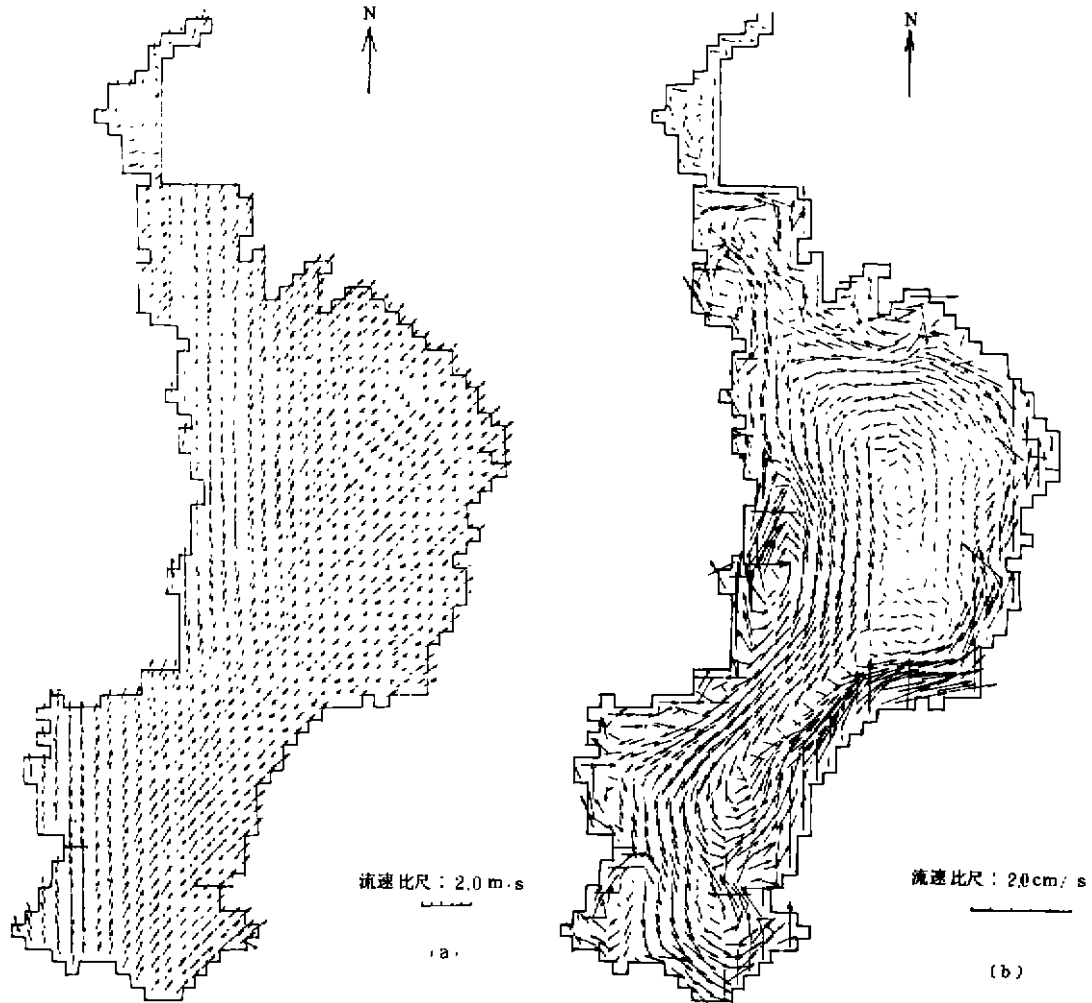


图 2 数值模拟的滇池湖面水平风矢量(a)和数值模拟风场作用下的风生流流场(b) (SW, 4.2m/s)

Fig 2 Simulated horizontal wind vectors above the surface of Dianchi Lake (a), and wind-driven flow field under computed wind (SW wind, 4.2m/s)

### 3 初步结论

通过上面的数值模拟, 对地形对滇池风生流的影响可以得出以下一些初步结论:

(1) 滇池周围的地形对其风生流的流态有着重要的影响.

(2) 滇池西岸起伏较大的地形的动力扰动引起盛行来风在湖面上东强西弱的不均匀分布, 这种不均匀的风场作用于湖泊水体, 是产生滇池整体反时针大环流的主要因素.

(3) 西山附近弱风带的存在导致滇池西岸补偿流流速明显大于东岸流速.

(4) 过山气流数值模型与湖泊风生流数值模型联合应用于滇池湖流的模拟, 能较为准确地反映出滇池水体的总体流动特性.

### 参 考 文 献

- 1 李锦秀, 刘树坤, 陈喜军. 山体遮挡对滇池风生流的影响初探. 湖泊科学, 1996, 8(4): 312 - 317
- 2 齐 瑛. 中尺度山地气候动力学. 北京: 科学出版社, 1993. 2 - 5
- 3 R A Pielke. 中尺度气象模拟(中译本). 北京: 气象出版社, 1990. 117 - 132
- 4 Shur C C, Shueh L J. A generalized urban air pollution model and its application to the study of SO<sub>2</sub> distributions in St Louis metropolitan area. *J Appl Meteor*, 1974, 13: 185 - 204
- 5 桑建国, 温市耕. 大气扩散的数值计算. 北京: 气象出版社, 1992. 82 - 88
- 6 Orlanski I. A simple boundary condition for unbounded hyperbolic flows. *J Comp Phys*, 1976, 21: 253 - 255

## Numerical Simulation of Influence of Hilly Relief on Wind-Driven Current in Dianchi Lake

Li Shujun    Liu Shukun    Li Jinxiu

(China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038)

### Abstract

When simulating the wind-driven flow of a lake, the wind field above the water surface is a key factor that influences the precision. The complicated terrains around a lake, such as mountains, often result in unsymmetrical distribution of wind velocity and direction above lake surface, so water flow pattern must be changed by the terrains. In this paper, a 3-D micro-meteorology model for lake scale is built up to compute local wind affected by the shelter of hilly terrains. Based on this, the flow pattern of Dianchi Lake under real terrain conditions is simulated with a 2-D wind-driven current model, and the flow pattern in this case is compared to the flow fields under uniform wind and artificially modified wind respectively. The result shows that if the wind-driven flow in Dianchi Lake is simulated after obtaining the local wind field according with real meteorological characters of lake area from the meteorology model, the simulation result can accurately reflect the general character of water movement in Dianchi Lake.

**Key Words** Wind field, shelter, Dianchi Lake, wind-driven current, numerical simulation