

# 山体遮挡对滇池风生流的影响初探

李锦秀 刘树坤 陈喜军 禹雪中

(中国水利水电科学研究院灾害与环境研究中心,北京 100044)

**提要** 用二维风生流数值模型模拟滇池湖流运动。滇池在主导风向西南风作用下,假定湖面风场是均匀的,数值模拟的湖流流态与实测湖流结果相差很大。而考虑山体遮挡影响,根据实测湖流期间现有的风情资料,在湖面上构造一非均匀风场,数值模拟结果与实测值基本一致。山体遮挡对滇池风生流的影响是不容忽视的。建议进一步进行湖流和湖面风向、风速监测,并建立过山气流数学模型,深入研究山体遮挡对湖泊风生流的影响。

**关键词** 滇池 风生流 数值模型

## 1 前言

对于大面积湖泊,风往往是引起湖流运动的主要动力。近几年来,国内外对湖泊风生流进行了很多研究,大部分是用数值模拟的手段,假定湖面受均匀风场作用,建立二维数值模型<sup>[1,5]</sup>和三维数值模型<sup>[3-5]</sup>。这些模型缺乏实测资料的校准。对湖周比较开阔,地形平缓的湖泊,假定湖面风场均匀分布是可行的,而滇池湖西岸是陡峭的西山,受山体遮挡,湖面的风场十分复杂。本文通过数值模拟和实测资料比较分析,初步探讨了山体遮挡对滇池风生流的影响,对今后的研究提出了初步的见解。

## 2 湖泊概况

滇池是我国著名的高原淡水湖泊,位于E102°36'~102°47',N24°40'~25°02',地处云南省昆明市南端。湖面积298km<sup>2</sup>,水深3~5m。湖泊南北长约40km,东西最宽处为12.5km,湖体呈弓形。位于湖西岸呈南北走向的西山普遍高出地面100~500m,地形陡峭;东岸为开阔的农田。滇池北部有一湖堤将其分隔为南北两部分,中间仅有一条航道相通。南部为滇池主体,称外海,面积287km<sup>2</sup>。北部称草海,面积11km<sup>2</sup>。主要入湖河流有盘龙江、宝象河等十多条。大一些的河流上游都建有水库,入湖流量不大。海口河为滇池的唯一出口,泄水能力很小,也为人工所控制。滇池实际上呈一半封闭型的湖泊(图1),湖流运动以风生流为主。滇池地处西南季风气候区,常年主导风向为西南风,多年平均风速2.2m/s。

## 3 数值模型

滇池属宽浅型湖泊,采用沿水深平均的平面二维非恒定流方程来描述湖流运动。

来稿日期:1995-07-31;接受日期:1995-11-08。

李锦秀,女,1965年生,工程师。1989年河海大学环境水利研究所硕士毕业,主要从事水环境保护研究,已发表“平原河网地区乡镇工业水污染控制规划”等论文。

### 3.1 基本方程

$$\begin{cases} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(u \cdot M) + \frac{\partial}{\partial y}(v \cdot M) = -g \cdot H \frac{\partial H}{\partial x} + f \cdot N + \frac{1}{\rho}(\tau_{x(s)} - \tau_{x(b)}) \\ \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(u \cdot N) + \frac{\partial}{\partial y}(v \cdot N) = -g \cdot H \frac{\partial H}{\partial y} - f \cdot M + \frac{1}{\rho}(\tau_{y(s)} - \tau_{y(b)}) \end{cases}$$

式中,  $H$  为水面相对高程;  $h$  为水深;  $h = H - z_b$ , 其中  $z_b$  为湖底相对高程;  $u, v$  为  $x, y$  方向的流速;  $M, N$  为  $x, y$  方向的单宽流量, 显然  $M = u \cdot h, N = v \cdot h$ ;  $f$  为柯氏力系数,  $f = 2 \cdot \omega \cdot \sin\varphi$ ,  $\omega$  为地球自转角速度,  $\varphi$  为湖泊所处纬度。  $\tau_{x(s)}, \tau_{y(s)}$  为  $x, y$  方向的表面风应力, 其中:

$$\tau_{x(s)} = C_D \cdot w \cdot w_x, \tau_{y(s)} = C_D \cdot w \cdot w_y$$

$C_D = \gamma_a^2 \cdot \rho_a$ ,  $\gamma_a$  为风应力系数,  $\rho_a$  为空气密度,  $w$  为离地面 10m 处风速,  $w_x, w_y$  为  $x, y$  方向的风速分量;  $\tau_{x(b)}, \tau_{y(b)}$  为湖底切应力。

$$\tau_{x(b)} = C_b \cdot \rho \cdot u \cdot \sqrt{u^2 + v^2},$$

$$\tau_{y(b)} = C_b \cdot \rho \cdot v \cdot \sqrt{u^2 + v^2}$$

$$C_b = \frac{1}{n} \cdot h^{\frac{1}{3}}, n \text{ 为糙率系数。}$$

计算采用中国水利水电科学研究院灾害与环境研究中心编制的二维程序, 该程序采用有限显式差分法对方程求解。时间和空间的网格点均交错布置。运动方程中的非线性项, 即  $u \cdot M, v \cdot M, u \cdot N, v \cdot N$  等项, 用迎风差分格式, 以求计算结果能更真实地反映水流涵流现象。

### 3.2 模型参数的确定

在 1:50000 的滇池水下地形图上用  $500 \times 500 \text{m}^2$  的正方形网格将滇池概化为 1170 个网格单元。整个计算区域除参加计算的 1170 个内部网格外, 尚需设立一圈边界网格。

基本参数: 糙率  $n = 0.02 \sim 0.025$ ; 风应力系数  $\gamma_a^2 = 1.3 \times 10^{-3}$ ; 柯氏力系数  $f = 6.1 \times 10^{-5} 1/s$ ; 时间步长  $dt = 20s$ 。

初始条件: 取给定湖区的初始水位  $H_0$ , 流场  $u = 0, v = 0$ 。

闭边界: 法向流速为 0。

由于进入滇池的河道流量都不大, 最大的盘龙江流量也小于  $120 \text{m}^3/s$ 。相对滇池这一水体, 对其风生流的模拟影响不大, 因而本文不考虑所有进出滇池的河道水流,  $x, y$  向边界均作为闭边界处理。



图 1 滇池水系及分区

Fig. 1 Sketch figure of water system of Dianchi Lake

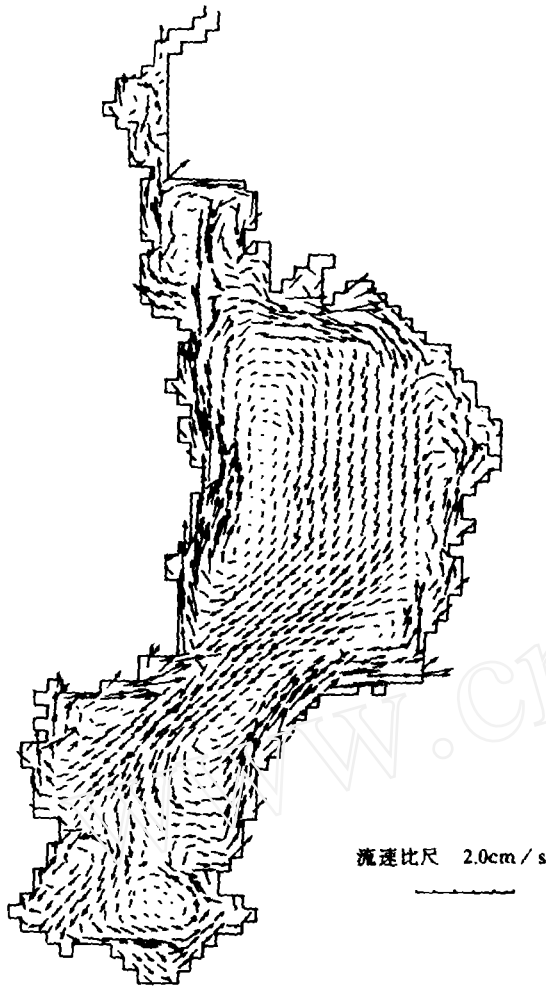


图2 数值模拟滇池风生流流场 水位:1886.8m  
均匀恒定西南风,风速3.8m/s

Fig.2 Computed flow field with steady  
and uniform SW wind field water  
level:1886.8m, wind speed:3.8m/s

在模型设计中,附加一水量平衡系数  $F$ 。

$$F = \frac{V_0}{V_t}$$

$V_0$  为初始时刻湖水容积,  $V_t$  为  $t$  时刻湖水容积。

计算过程中  $F=1$ , 说明计算是守恒的。

#### 4 山体遮挡对滇池风生流的影响

数值模拟结果表明,滇池湖流随不同风向、风力的作用,湖流流态变化很大。假定湖面在均匀西南风作用下,数值模拟湖流稳定后的流场如图2。湖岸边水较浅的地方水流流向与风向一致,湖中部较深的地方,形成一股逆风流动的补偿带,局部地方尚形成一些小环流。这一结果与圆形湖盆的解析解是一致的,说明数值模型结构是合理的,但与实测湖流形态误差很大。

云南省水文总站于1995年4月25日~4月28日对滇池在西南风作用下的湖流流向进行了监测,图3a、3b分别为在滇池相对水深0.1h和0.3h层处各测点实测湖流流向,两层结果均显示湖中部存在一明显的逆时针环流。分析数值模拟流场和实测流态不相符的原因,可以认为滇池西岸的山体遮挡必定对湖面风场分布产生影响,进而影响到风生湖流的分布。在数值模拟时,假定湖面风场均匀分布是不合理,必须加以修正。

为了对湖区风场进行分析,在1995年4月25日~4月28日测流期间,云南省气象局配合在湖周围布6个气象测站进行逐时的风向、风

速观测(自动记录仪观测离地面10m处的风速、风向)。测点位置见图3a中标记O处。统计得各测站的风向频率分布如图4(风向按16方位以线段的长度表示所占百分数的多少),每小时风速累计频率曲线如图5。由图4、5可见,各测站风向变化不大,均处在西南风方位,也是滇池典型风向。而各测站风速变化较大,地处开阔地带的呈贡站、昆阳农场站风速较大,普遍比西山附近的白鱼口、观音山等站风速大1.7~1.3倍。说明风受西山遮挡后,湖面上的风场分布确实是不均匀的,在遮挡区内湖面风速将减小,主风向基本不变。

根据现有实测风速、风向资料,笔者用内插法在湖面上构造了非均匀风场。风向为西南风,风速取平均值。令湖东部及东南部较开阔湖面风速等于4.2m/s,离西山5000m范围内逐渐减小风速,湖西岸的风速比东部湖区减小20%~50%。将这一风场分布输入湖流模型,

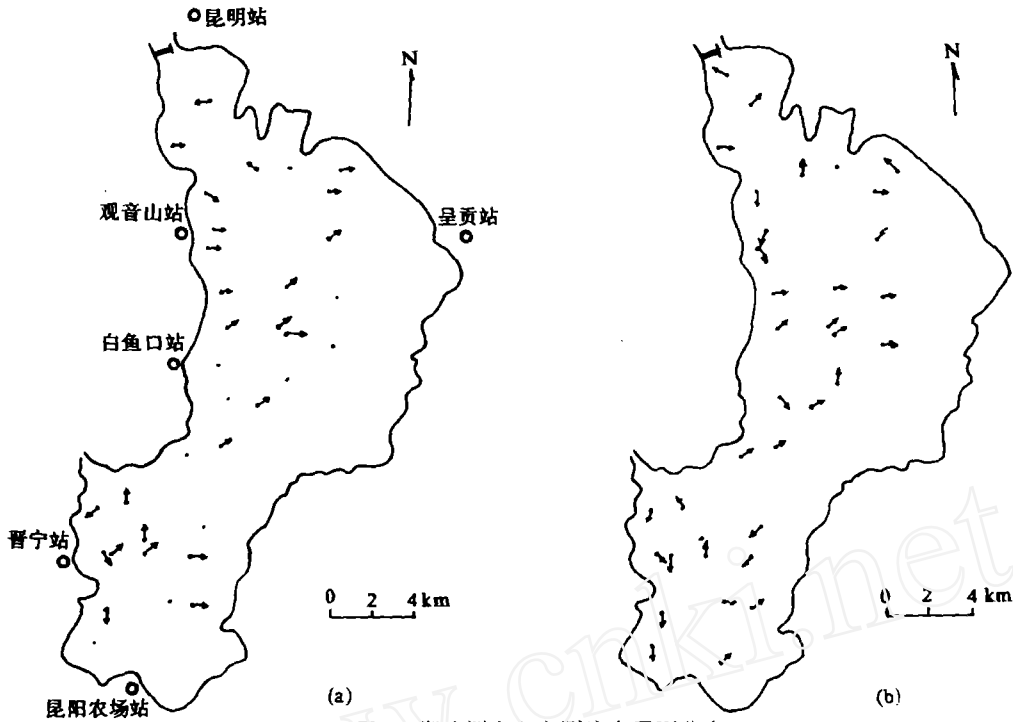


图3 湖流测点和实测流向平面分布  
a. (相对水深 0.1h) b. (相对水深 0.3h)

Fig. 3 Measured water flows

a. relative water depth, 0.1h b. relative water depth 0.3h

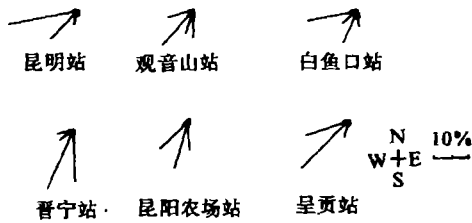


图4 4月25日、4月28日期间6个风测站的风向频率分布

Fig. 4 The frequency distribution of wind directions in every measured stations during period from April 25 to April 28, 1995

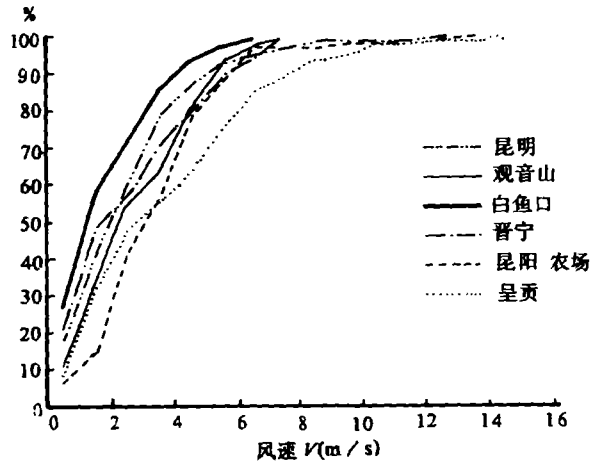


图5 各风测站4月25-28日期间每小时风速累积频率曲线

Fig. 5 The cumulative frequency curves of wind speed per hour in every measured stations during period from April 25 to April 28, 1995

数值模拟湖流稳定后的流场(图6),与实测流态较一致。说明数值模型还是可信的。



图6 数值模拟滇池风生流流场

水位:1886.8m

非均匀恒定风场,湖东南部风速4.2m/s

湖西岸风速减小20%~50%

Fig. 6 Computed flow field with steady

and noon-uniform SW wind field which

was artificially made up. water

level:1886.8m, average wind speed:3.8m/s.

比较两个湖流模拟结果图2(均匀风场)和图6(非均匀风场),湖面在均匀西南风作用下,湖东岸和西岸水较浅的地方,水流顺着风向流动,湖中部较深的地方,形成一股逆风流动的补偿带,因而在湖东部和西部形成两个相对的漩涡。而当考虑山体遮挡影响后,因湖面风场是非均匀的,东部湖区所受的风力比西部湖区强,导致湖东部水流因受较强西南风作用而顺着风向流动,又由于水量平衡作用,东部湖区较强的顺风流带带动西部水流产生逆风补偿流带,从而使滇池整体流态变为一个大的逆时针环流。由此可见,西山遮挡对滇池风生流的影响是十分显著的。

对于这种现象,国外学者进行过一定探索,如若佐等<sup>[4]</sup>中建立的三维湖泊风生流数学模型,假定均匀风场作用下的模拟结果表明,在水域开阔地带,模拟值和实测值较接近,而在受山体遮挡区域误差很大。但作者未进行进一步模拟。Falconer等<sup>[5]</sup>中,用二维水深平均湖泊风生流数值模拟,假定均匀风场模拟结果与实测值误差也很大。考虑山体遮挡,在遮挡区减小风应力20%~70%,再进行数值模拟的结果与实测值基本相吻。这也证实山体遮挡区,风速将减少,从而导致湖流形态的改变。和本文研究结果一致。

## 5 滇池湖流基本特征

滇池以风生流为主,由于风情不稳定,使得风生流变得十分复杂。但在特定的条件下,所形成的湖流,具有相对的稳定性。本文讨论滇池在主导风向西南风条件下,湖流的基本特征。

考虑西山遮挡影响,滇池在西南风作用下风生流的数值模拟结果如图6(湖面平均风速为3.8m/s)。主流是一个逆时针大环流,沿岸局部地方

存在一些小环流。湖东部受较强西南风作用,直接产生顺风向流动带,湖西部因西山遮挡,风力减弱,形成一股逆风补偿流带。沿湖西南岸存在一些窄条形较弱的顺时针涡旋。湖中部区域的东北部宝象河入湖口附近,及草海西岸也出现小的顺时针涡旋。全湖平均流速为2.67cm/s。湖中部逆环流较强,大河和柴河入湖口附近流速最大,达6.8cm/s。草海内水流速度很小,平均流速仅为0.73cm/s,但与外海相接处流速也能达2.1cm/s,且由草海流入外

海。

若其它条件不变,加大湖面风速,平均风速由 3.8m/s 变为 6.8m/s。数值模拟湖流结果表明,湖流形态不变,平均流速由 2.67cm/s 增大到 6cm/s。湖面平均风速增大 1.79 倍,,而流速增大 2.25 倍。表明湖流随风力的增强,其流速增大更快。

## 6 结论

研究表明,进行滇池风生流数值模拟时,若假定湖面是均匀风场,数值模拟的湖流流场与实测湖流结果相差很大。而考虑山体遮挡区域风速将减少,在湖面上构造一非均匀风场后,数值模拟结果与实测值基本一致。山体遮挡对滇池风生流的影响是很大的。分析现有数值模拟结果(考虑非均匀风场)和实测湖流流向间尚有一定误差,原因可归纳为:①湖流流向监测历时 4 天,各测点的流向是非同步的,而实测的风速、风向一小时一次的瞬时值表明,风向、风速在一天内有一定的跳动性;②只在湖周围布 6 个风测站,不能充分反映湖面的风场变化,无法精确设定风受西山遮挡后的影响范围,数值模拟中仅根据这 6 个测站的风资料构造湖面上非均匀风场分布的依据不足,给数值模拟结果带来一定的误差。

为了深入研究山体遮挡对滇池风生流的影响,建议开展以下研究工作:

(1) 根据以往气象资料,选择相对稳定、有代表性的季节,在湖周边和湖面上多布几个测风站进行一定时期的风速、风向监测。同时布一些湖流监测点,尽可能取得湖流各测点同步测量资料,以便更好地校准湖流模型。

(2) 建立中尺度的三维过山气流模型。这也是空气动力学领域内一直令人感兴趣的研究课题。将气流模型和湖流模型联合求解,深入研究山体遮挡对湖泊风生流的影响。

## 参 考 文 献

- 1 吴坚、濮培民. 太湖水动力学的不规则网格有限差分数值模拟. 中国科学院南京地理与湖泊研究所集刊, 第 6 期, 1989
- 2 J. Jozsa, J. Sarkkula, R. Tamsalu, Calibration of modelled shallow lake flow using wind field modification, Conference Title: Proceedings of the 8th international conference on computational methods in water resources, 1990, 165~170
- 3 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
- 4 岩佐、井上、刘树坤等. 琵琶湖流水の三次元シミュレーション. 京都大学防灾年报, 1983, (26)
- 5 R. A. Falconer, D. G. George and P. Hall. Three-Dimensional numerical modelling of wind-driven circulation in a shallow homogeneous lake. Journal of Hydrology, 1991, 124: 59~79

## PRELIMINARY STUDY ON THE EFFECT OF MOUNTAIN SHELTERING ON THE WIND-DRIVEN WATER CURRENT IN DIANCHI LAKE

Li Jinxiu Liu Shukun Chen Xijun Yu Xuezhong

*(China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044)*

### Abstract

The currents in Dianchi lake were simulated by a two-dimension numerical model on wind-driven current. Numerical simulated flow field with uniform wind field and measured flows were not in agreement. Analysis of the measured winds data of the six stations around the shore of lake show that the wind directions in the six stations were not inconsistent, but the wind velocities in the zone sheltered by mountains along the west shore are 20%–50% lower than in the east shore of open water. It is evident that the wind field over lake is non-uniform due to the effect of mountain sheltering and needs to modify the wind input data in the model.

According to the wind data measured, in the case of west-south wind over lake, the non-uniform wind field was artificially constructed by reducing wind velocities over lake in the zone sheltered by mountain. Using this non-uniform wind field, numerical simulated flow field was fitting better the measured flows.

By comparing the numerical simulated results between using uniform wind field and non-uniform wind field, it is obvious that the effect of mountain sheltering on the water currents in Dianchi Lake can not be ignored. In the case of west-south wind over lake, the general flow pattern in Dianchi Lake is a large anticlockwise circulation, the water velocities are low about several centimetres per second.

**Key words** Dianchi Lake, wind-driven current, numerical simulation.