

太湖和大浦河口风成流、风涌水的
数值模拟及其单站验证王谦谦^① 姜加虎^② 濮培民^②

(中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

提要 介绍了太湖风成流和风涌水的数值模拟工作。使用两种不同水平分辨率的数值模式, 利用中日合作研究组在大浦河口实测的水位、湖流和风的资料对模拟结果进行了验证。结果指出, 模式对风涌水及流向有较好的预报能力, 流速的预报尚待进一步改进。

关键词 数值模拟 风涌水 风成流 太湖

中日太湖琵琶湖物理湖泊学合作研究组, 在 1986 年期间对太湖和大浦河口的风、水流和水位进行了连续观测, 本工作是配合这次野外观测, 利用数值模拟手段^[1,2], 建立两个不同水平分辨率的水动力学模型, 对风成流及风涌水等基本物理现象进行数值模拟, 并进一步用大浦河口实测到的湖流和水位, 设计两种不同风向的预报试验, 并对模拟结果进行了验证。

一、浅水波方程的数值模式

1. 基本方程

因太湖是一浅水湖泊, 为简单起见, 暂不考虑水密度的不均匀性, 从流体力学方程组出发, 经过简化处理, 可以推导出下列浅水波方程组:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} + fv + F_x - \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) + K_h \nabla^2 u \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} - fu + F_y - \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) + K_h \nabla^2 v \quad (2)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = -\nabla \cdot (\eta + h) \bar{V} \quad (3)$$

式中 $u(x, y, t)$, $v(x, y, t)$ 分别是湖流 \bar{V} 在 x, y 方向上的二个分量; $\eta(x, y, t)$ 为水面与平均湖面之差, 向上为正, 向下为负, 它反映了湖水位的变化; $h(x, y)$ 为平均湖深; F_x, F_y 是

① 现在南京气象学院工作。

② 张文华、吴坚、熊春萌、黄群、汪明谷等同志参加了资料的收集和整理工作。

摩擦力在 x, y 方向上的分量, 风应力就是通过该项起作用的; K_h 是水平扩散系数。在粗网格模式中只考虑了湖与气及湖与底之间的摩擦, 在细网格模式中还考虑了水平扩散项。湖气之间的阻尼系数取为 0.0013, 湖底的阻尼系数取为 0.0026, K_h 取为 $0.5 \times 10^5 \text{cm}^2/\text{s}$ 。

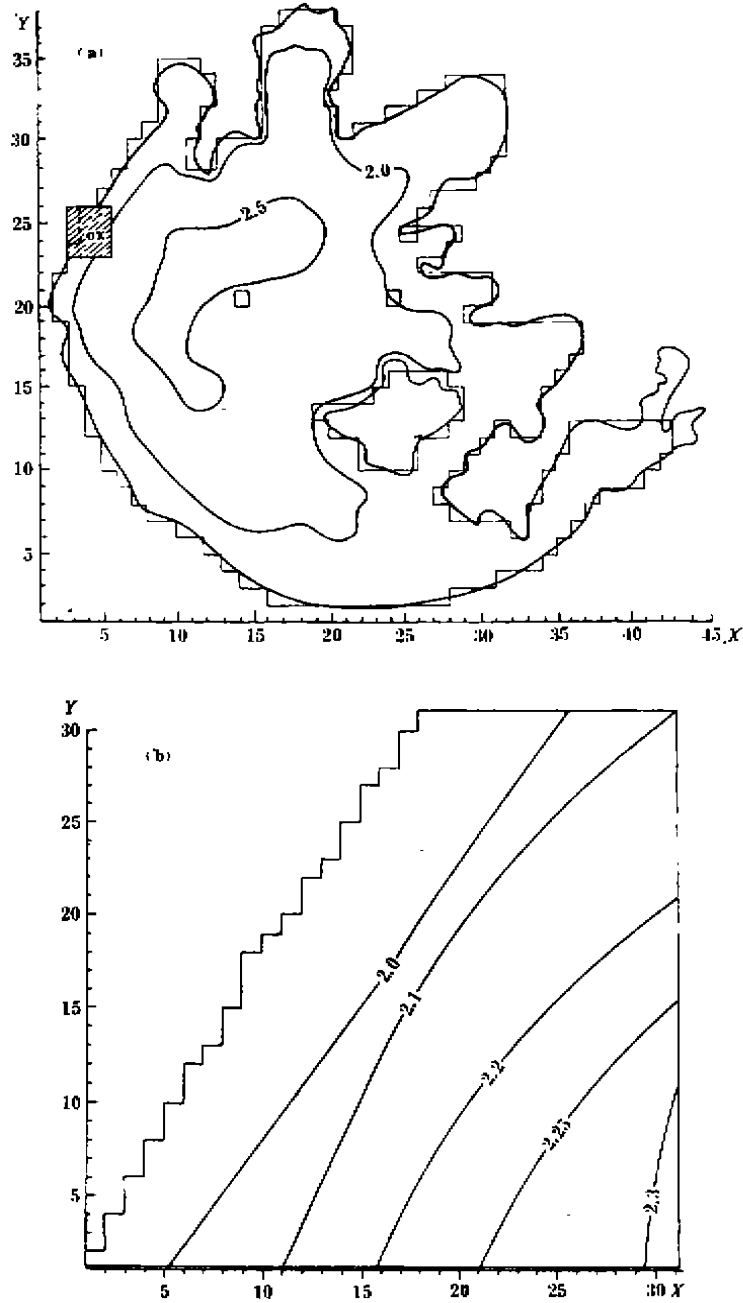


图 1 粗(a)、细(b)两种模式的网格系统(实线为湖深(m))

Fig. 1 The grid systems and the average depth in Taihu Lake(a) and Dapu river mouth area (b)

2. 水平网格系统和数值求解方法

(1) 水平坐标系统和空间差分格式

粗、细两种网格模式均是采用球面网格系统,即用经、纬度作为水平坐标(x 轴指向东, y 轴指向北),粗网格模式的格距为 $1' \times 1'$ (约为 $1.8\text{km} \times 1.8\text{km}$),模拟的范围为 45×39 个网格(见图1(a)).将太湖西部的大浦河口划出了 $5.5\text{km} \times 5.5\text{km}$ 见方的区域(图1(a)的阴影区)作为细网格模式的模拟范围,其网格距为 $0.1' \times 0.1'$ (约为 $180\text{m} \times 180\text{m}$),大浦河口区占据 31×31 个网格点的范围(见图1(b)).图1中的实线为等湖深线.两种模式的空间差分格式采用Winninghoff F. J和Arakawa设计的C型跳点格式^[3].

(2) 时间积分方案与边界处理方法

粗网格模式的时间步长取为 1min ,在 1h 的时间间隔内,采用 10min 欧拉后差, 50min 中央差交替进行的方法.积分过程中没有进行任何平滑处理.粗网格模式只有陆边界,边界上采用刚体边界条件,边界的内一圈采用了海绵边界条件.

细网格模式的时间步长取为 6s ,在 6min 内采用 1min 欧拉后差, 5min 中央差交替进行的方法,试验中考虑了水平扩散项.从图1(b)可见,它既有陆边界又有水边界,陆边界的处理与粗网格相同,水边界的处理采用嵌套方式与粗网格模式相连接.即水边界内四圈的值是由两部分组成,一部分是把粗网格计算到的最靠近细网格水边界的值进行时间、空间插值,另一部分为细网格模式计算得到的,再把这两者按一定的方式进行嵌套.

为简单起见,粗、细两种模式中均没有考虑陆边界的吞吐流.

二、数值模拟结果

计算程序的编写使用Fortran语言,计算在Vax-11/780机上进行,流失及水位变化曲线均用机器绘制.

由于缺乏模式分辨率所要求的实测风、流及水位的资料,为了验证模式的合理性,先采用理想风场做数值试验,从结果的量级及物理机制的合理性进行分析.

假定初始湖水是静止的,湖面是水平的,湖面的风速 \bar{V} 是定常而水平均匀的.设计了8个方位的风向,风速均为 10m/s .过去曾用粗网格模式计算了 30h ,其结果可见文^[2].同样,用NW风持续作用 10h ,细网格模式的模拟结果见图2,其中(a)、(b)分别为 1h 、 9h 的模拟结果.由图1(a)可见,细网格模式仅能反映粗网格模式的沿岸流情况.在图2(a)中的水边界处还可以看到两种网格衔接的痕迹,而 9h 的图上已很协调了.由图可见,细网格模式更细致地反映了沿岸流的变化特征.

三、预报试验及单站验证

选择1986年8月的两次典型的大风过程,用粗网格模式进行风涌水及风成流的预报试验,并检验数值模式的性能.因为这次观测中,大浦河口附近设置了流速仪及水位观测,更多格点上的值无法得知,因此,模式网格点上的初始流场和水位值如何确定是一重要的问题.

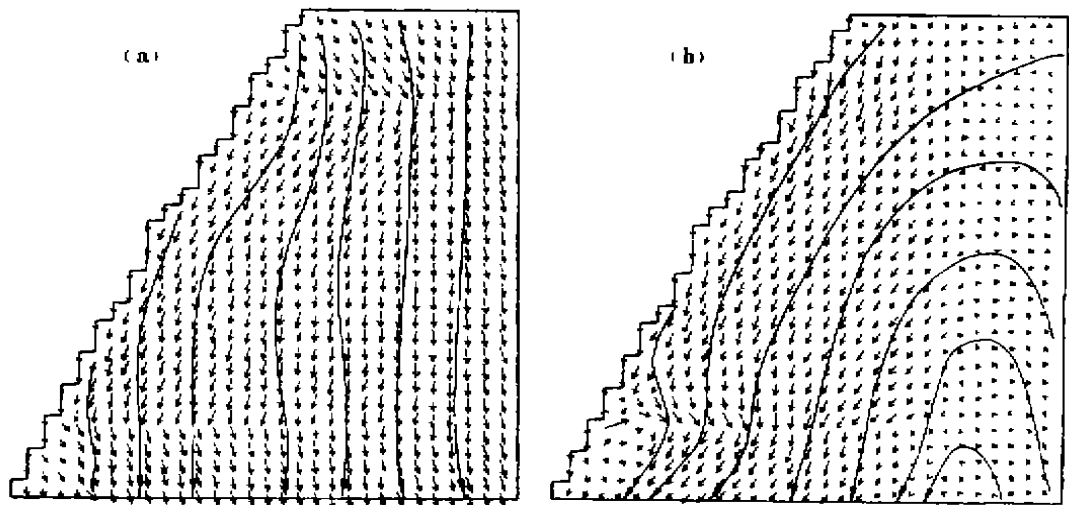


图 2 细网格模式 1h(a)和 9h(b)的模拟结果(NW 风作用)

Fig. 2 1h (a) and 9h (b) simulated results corresponding NW wind in the fine mesh model

在这次预报试验中,暂且把大浦站的实测风场作为整个太湖格点上的值,风场随时间的变化是用每小时的实测值插到每个时间步长上,而预报需要的潮流与水位的实测初始场,采用如下的方法得到:根据文^[2]的结果,从静止到稳定流出现一般需要 3—9h。因此,参考该两例前期的风场特征,如 8 月 14 日的 ESE 大风过程的前期,平均风速为 2m/s,平均风向为 SE;8 月 27 日的 WNW 大风过程的前期,平均风速为 3.5m/s,平均风向为 NW。从静止场开始,分别用它们前期的平均风场计算了 10 及 5h,将得到的第 10h 及第 5h 的结果作为初始场。

1. 8 月 14 日—8 月 16 日 ESE 大风过程

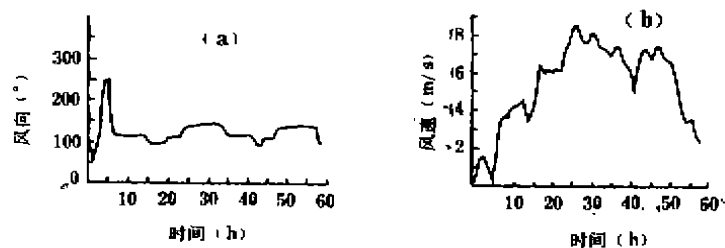


图 3 大浦站 8 月 14—16 日风向(a)和风速(b)

Fig. 3 Observed wind direction (a) and speed (b) at the Dapu station during Aug. 14—16

图 3 给出了 8 月 14 日 00:30—8 月 16 日 10:30 实测的风向(a)和风速(b)的时间变化。由图可见,在 60h 的时段内,风向比较稳定(维持在 120°附近),盛行 ESE 风,风速却有较大的变化,从 2m/s 陡增到 8m/s,其中大于 7m/s 以上的大风几乎维持了 24h。于 15 日下半夜开始又陡降到 2m/s 左右,仔细分析不难发现,在大风期间,风速有一次小的振荡。图 4 给

出大浦站实测的水位及湖流的 u 、 v 分量(用安置在平台附近的 Andraa 海流仪实测)。

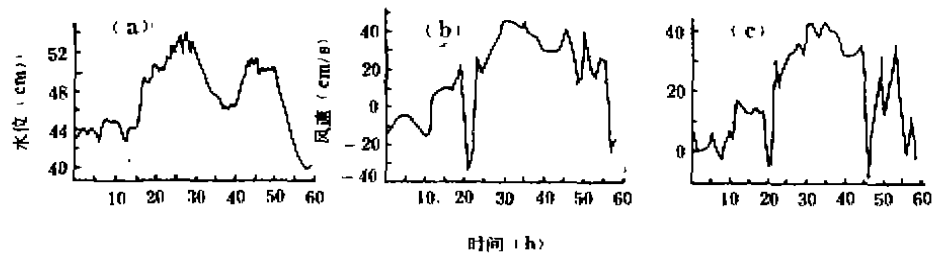


图 4 8月14—16日的大浦河口的水位(a)和潮流 u (b)、 v (c)分量

Fig. 4 Observed water level (a) and u (b), v (c) components of the water velocity are taken from the Andraa currentmeter during Aug. 14—16

将图 3、4 相比较,可以发现,伴随这次东南大风过程,大浦站水位有一次明显的增水过程,更有趣的是伴随风速的振荡,水位也有一次明显的振荡,其变化的最大振幅是 16cm,且与风具有同样的位相。流速也是随风的增大而增大,平均流速在 20cm/s,最大流速可达

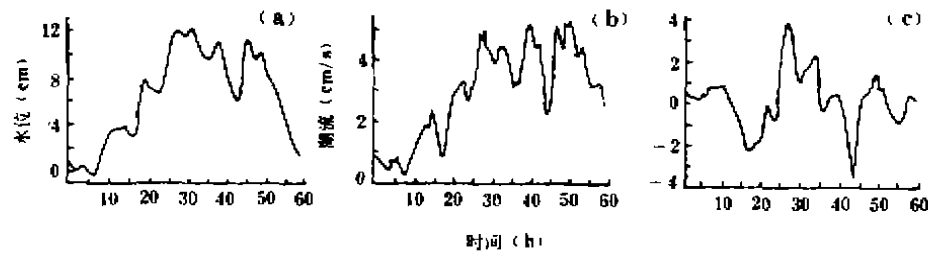


图 5 预报的 8月14日—16日大浦河口的水位(a)与潮流的 u (b)、 v (c)分量

Fig. 5 Forecasting water level (a), u (b) and v (c) components of the water velocity during 60 hours

80cm/s,在大风期间盛行 NE 流。图 5 为预报得到的水位和潮流值,把它们与图 4 相比可见,水位的预报无论是变化趋势还是振幅都相当成功。潮流的预报,大风期间也报出了 NE 流,流速随风的增大而增大的变化趋势也报得较好,但流速的量值却偏小了约一个量级,其可能原因将在后面讨论。

2. 8月27日—8月29日 WNW 大风过程

图 6 给出了 8月27日 00:30—29日 00:30 风向(a)和风速(b)的时间演变图,由图可见,48h 内风向很稳定,盛行 WNW 风(维持在 320°附近)。在这期间,风速也经历了由小到大,再由大到小的变化过程,从 4m/s 增大到 9.4m/s,其中大于 7m/s 以上的大风也维持

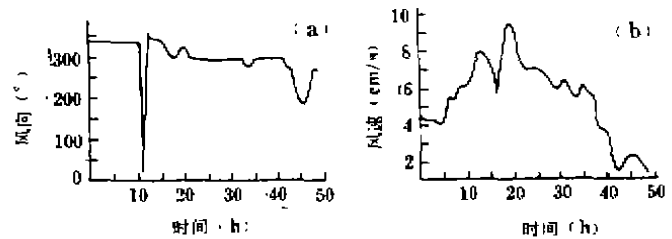


图 6 大浦站 8月27—29日风向(a)和风速(b)

Fig. 6 As in Fig. 3 except for Aug. 27—29

了近 12h,然后于 28日 12:00 以后迅速减小到 2m/s。图 7 分别是大浦站实测到的水位(a)、

流速的 u (b)、 v (c) 分量, 将图 6、7 相比较, 可以看出, 与这次西北大风过程相对应大浦站水位有一明显的减水过程, 其振幅可达 24cm。流速也有一从大到小的振荡过程, 大风期间的流速可达 20cm/s 以上, 流向是 NE 流和 SW 流交替出现, 但当风速大于 7m/s 时段内, 对应的潮流为 SW 或偏南流。图 8 给出预报得到的水位及潮流的 u 、 v 分量, 将它们与图 7 相比较, 不难发现, 在西北气流的驱动下, 水位的减水过程及振幅都预报得较为成功, 流速的变化趋势也预报出来了, 但数值仍偏小许多, 流向的预报尚可。

总之, 用单站实测的水位潮流对模式的性能检验表明, 模式对风涌水的预报是较好的, 对于流向的预报亦还可以, 至于流速偏小的原因, 将于下节给以讨论。

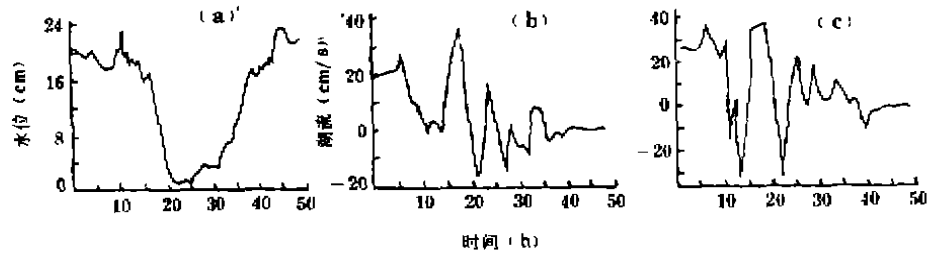


图 7 8月27—29日的大浦河口的水位(a)和潮流 u (b)、 v (c)分量

Fig. 7 As in Fig. 4 except for Aug. 27—29

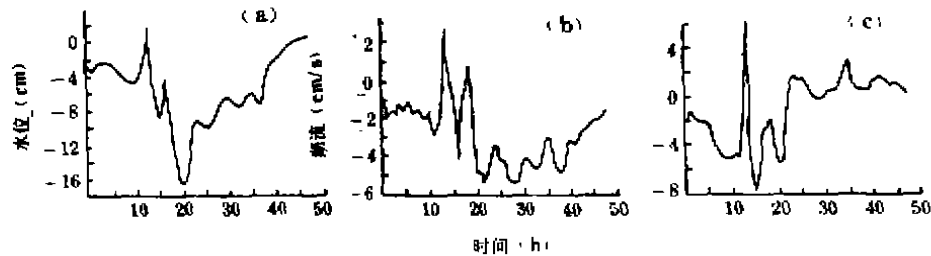


图 8 预报的 8月27—29日大浦河口的水位(a)和潮流的 u (b)、 v (c)分量

Fig. 8 As in Fig. 5 except for Aug. 27—29

四、讨 论

在粗网格的模式中嵌套一个细网格的模式可以更细致地描写所感兴趣地区的物理要素特征, 计算是经济的, 效果也是良好的。

用粗网格模式对两次大风过程的预报试验的结果分析得出, 模式对风涌水的预报是成功的, 对潮流的变化趋势及流向均有较好的预报能力, 模式存在的主要问题是流速的量值偏小, 造成的原因经初步分析可能有以下几点:

1. 实测的流是瞬时风对水体的作用,而预报使用的是 1h 的平均风速,显然没有包含更小尺度的作用。

2. 鉴于模式的垂直和水平分辨率,计算结果是代表整层的某一网格区域中的平均结果,而实测值则是某一层某一点的结果。

3. 实测流中存在模式中所不能描述的流,比如波流、吞吐流等等。

4. 用 Aandraa 海流仪测得的流速在浅水湖中由于波浪影响可能偏大。

总之,用这一简单的浅水波方程,能成功地模拟风成流和风涌水的基本物理特征。今后可用更丰富的实测资料,不断发展、完善该模式,使湖泊学的研究在分析实测资料的基础上,对其物理过程进行数值模拟,因为模拟的手段有助于认识现象的机制。因此,发展一个实用性更强的模式是湖泊学研究中一个重要的课题。

参 考 文 献

[1] Oonishi, Y and Imasoto, N. , *J. of the Ocean. , Soc. of Jan.* 1975, 312(2).

[2] 王谦谦. 太湖风成流的数值模拟. 河海大学学报, 1987, 增刊 2.

[3] Winnnghoff, F. J. , PH. D. Thesis, Dept. of Meteo. Univ. of California. Los Angels. 1968.

NUMERICAL SIMULATIONS AND THEIR VERIFICATIONS WITH ONE STATION DATA OF WIND-DRIVEN SURGE AND CURRENTS IN TAIHU LAKE

Wang Qianqian Jiang Jiahu Pu Peimin

(*Nanjing Institute of Geography and Limnology, Academia Sinica, Nanjing 210008*)

Abstract

Numerical simulations of the wind-driven currents and surge in Taihu Lake have been conducted. The models used in the study are composed of the hydro-dynamic ones with two different horizontal resolutions. The verification data are taken from on-the-spot observations on water level currents and winds at Dapu station during the Sino-Japan collaboration research. The simulative results show that this model is good at forecasting the wind-driven surge and current directions. Improvements are still required in the forecasts of current magnitudes.

Key words Numerical simulation, wind-driven surge and currents, Taihu lake