

太湖梅梁湾、贡湖套网格风生流数值模拟

李一平¹ 逢 勇¹ 张志毅² 相文宁² 田 娜² 庄 巍¹

(1. 河海大学环境科学与工程学院, 江苏 南京 210098 ;
2. 南京市规划设计研究院有限责任公司, 江苏 南京 210029)

摘要 对太湖梅梁湖、贡湖湖流进行套网格数值模拟。根据 1998 年 8 月太湖富营养化水质监测水文物理资料, 绘制出梅梁湖、贡湖各站点位置分布图和其流速大小和方向。模拟计算与实测结果吻合较好, 证明其套网格数值模型的建立是合理和有效的。分析结果表明, 太湖各水域流速相差很大, 近岸区域流速高于远岸区域, 存在明显的近岸流。但流速值不大, 即梅梁湖、贡湖和大太湖的水体交换量不大, 通过流场分布可初步判断污染物在水体中的扩散与迁移情况。

关键词 有限差分, 数值模拟, 套网格, 太湖, 湖流

中图分类号 TV13 ;O242.1 文献标识码 A 文章编号 1004-693X(2004)02-0019-03

本文利用太湖三维水量模型, 采用套网格方法, 对太湖梅梁湾、贡湖的湖流作出数值模拟。

由于太湖是大型的浅水湖泊, 在采用有限差分法计算时要将整个太湖划分成为很多的计算网格。在此情况下, 若将空间步长 Δx 取的较小, 则计算机需要很长的计算时间, 通常为十几小时或几十小时, 实用性太差; 若将 Δx 取的过大, 虽然能节约计算时间, 但又不能根据需要很好地反映太湖某些局部地区(如梅梁湖、贡湖等)详细的湖流场或浓度场, 给分析问题带来很大的不便。为了解决这一矛盾, 本文采用了套网格的数值模拟方法。所谓套网格方法^[1], 即将整个计算区域(本文中指大太湖)和局部特殊计算区域(本文中指梅梁湖、贡湖)采用不同的空间步长 Δx , 网格进行局部加密。

1 三维水量模型

1.1 三维水动力数值模拟控制方程组^[2,3]

太湖湖流形式主要有两种: 风生流及由于出入流引起的吞吐流。由于吞吐流对整个太湖湖面的流动影响较小^[4], 故本文在模拟中没有考虑太湖的边界流。

设湖水为均匀不可压流体, 垂直方向上服从静水压力分布。采用笛卡尔左手直角坐标系, 得其流体动力学方程为:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = f_v - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} +$$

$$A_h \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right] + A_z \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$$
$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -f_u - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} +$$
$$A_h \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right] + A_z \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}$$
$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$
$$p = \rho_w g (\eta + z)$$

式中: u, v, w 分别为 x, y, z 轴方向上的流速分量, cm/s ; η 为垂直方向上湖面相对于平均水面的高度, m ; ρ_w 为水的密度, kg/m^3 ; A_z, A_h 分别为垂直和水平涡动粘滞系数, cm^2/s ; f 为柯氏参数, $f = 7.23 \times 10^{-5}$; g 为重力加速度, m/s^2 ; p 为水的压强, Pa 。

1.2 求解方法

模型采用的是半隐式有限差分方案, u, v 定义在同一点上, 且定义在整数格点上, η, w 定义在半数格点上, 网格距在水平方向上是常数。在垂直方向上, 由于考虑湖底地形, 各层的分界面不是平面。各方程具体的差分形式在此不再详述。根据 1998 年的实测资料, 风速取为 5.0 m/s , 风向取为偏南风, 其他的边界条件和初始条件均取自 1998 年的实测资料。

1.3 定解条件

1.3.1 边界条件

本文先考虑所有进出太湖的河道水流, 在陆地闭边界上, 法向流速为零。

基金项目 江苏省自然科学基金(BK2002067), 国家自然科学基金(50239030)

作者简介 李一平(1978—), 男, 湖北荆州人, 博士研究生, 从事水环境规划与评价研究。

1.3.2 水面边界条件

$$W_s = \left(w + u \frac{\partial \eta}{\partial x} + v \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) \Big|_{z=0}$$
$$- \rho A_z \left(\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) = (\tau_x^a, \tau_y^a) = C_D^a \rho_a \sqrt{v_x^2 + v_y^2} (v_x, v_y)$$
式中: τ_x^a, τ_y^a 为作用于湖面的风应力在 x, y 方向上的分量, N/cm^2 ; v_x, v_y 为风速在 x, y 方向上的分量, m/s ; ρ_a 为空气密度, kg/m^3 ; C_D^a 为风拖拽系数, $C_D^a = 1.3 \times 10^{-3}$; W_s 为湖面垂向流速, cm/s 。

1.3.3 湖底边界条件

$$w \Big|_{z=H} = 0$$
$$- \rho A_z \left(\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) = (\tau_x^b, \tau_y^b) = C_D^b \rho_w \sqrt{u^2 + v^2} (u, v)$$
式中: τ_x^b, τ_y^b 为底摩擦力在 x, y 方向上的分量, N ; C_D^b 为湖底摩擦系数。

1.3.4 初始条件

取水位变幅和初始流速为零。

1.4 收敛条件

本文模型采用平均相对准则进行收敛判断(下同),在水量模型中,即为:

$$\frac{\sum_{i,j} |u_{i,j}^{n+1} - u_{i,j}^n|}{\sum_{i,j} |u_{i,j}^{n+1}|} < \epsilon$$

式中: u 是 i, j 网格点上 x 向流速与 y 向流速合成后的数值, 取 $\epsilon = 10^{-5}$ 。

2 典型风场作用下套网格梅梁湖、贡湖数值模拟

2.1 套网格中大、小网格的耦合关系

计算中取太湖大网格距 $\Delta x, \Delta y$ 均为 1000 m, 水平网格点为 81×81 个; 梅梁湖、贡湖的小网格距 $\Delta x, \Delta y$ 均为 500 m, 水平网格点为 93×55 个, 即将每个大网格在空间上细化为 4 个小网格, 时间步长 Δt 保持不变, 均取为 2 min。太湖大网格的布置和套网格的布置见图 1 2。本文中, 具体计算方法为先计算出整个太湖的流场, 再在梅梁湖、贡湖与太湖的交接处即水边界采用嵌套的方法, 计算出其流场, 然后对该流场进行时间和空间插值后作为计算梅梁湖流场的边界值。

2.2 模型校核^[5]

根据表 1 的 1998 年 8 月太湖富营养化水质监测水文物理资料, 太湖地区为偏南风, 风速为 5 m/s 左右。贡湖和梅梁湖的测站位置如图 3 所示。并假定初始时刻湖面是静止的, 没有扰动, 在模型计算时, 取 $A_z = 4 \text{ cm}^2/s, A_h = 0.5 \times 10^5 \text{ cm}^2/s$ 。

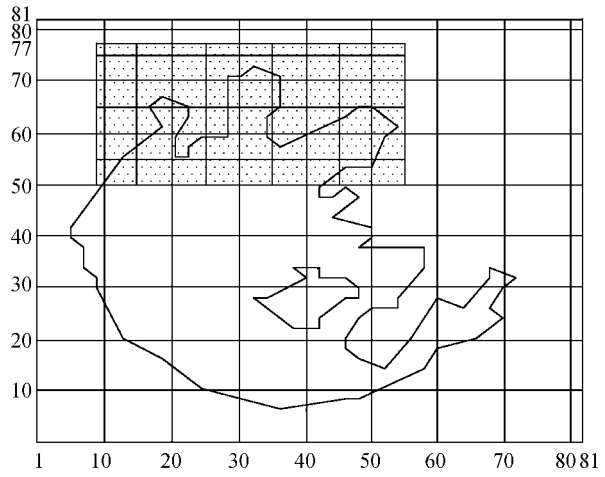


图 1 套网格布置

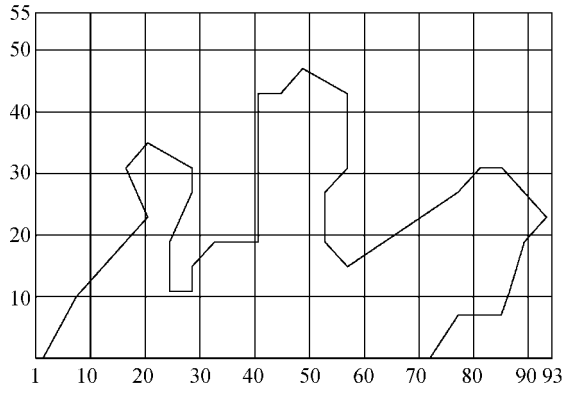


图 2 梅梁湖、贡湖网格布置

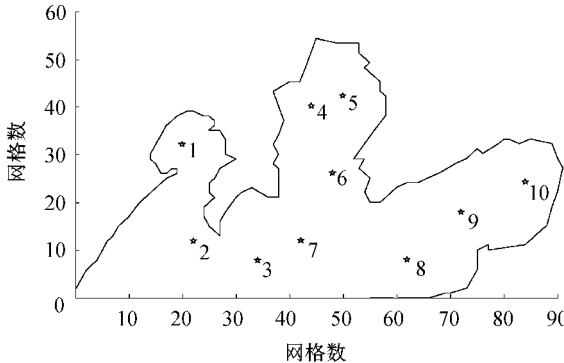


图 3 贡湖、梅梁湾监测点分布

表 1 1998 年 8 月太湖富营养化水质监测水文物理资料^[5]

点号	风速 ($m \cdot s^{-1}$)	风向	流速 ($cm \cdot s^{-1}$)	流向 ($^{\circ}$)
1	5.2	S	8.3	310
2	5.4	S	10.0	310
3	6.2	SSE	12.5	300
4	4.5	SSE	3.8	310
5	4.6	S	5.6	300
6	7.0	S	6.7	180
7	4.8	S	6.7	180
8	9.2	SSE	12.5	340
9	4.5	SSW	3.1	210
10	3.6	SSW	3.1	30

2.3 湖体流场模拟与分析

2.3.1 梅梁湖、贡湖实测湖流和计算湖流的比较

根据表 1 ,利用 Sufer 软件 ,编程绘制出梅梁湖和贡湖的测站点位置分布图(见图 3),然后绘制出各个站点的流速大小和方向(见图 4),根据图 4 测站点流速的分布情况可以看出 :在梅梁湖北部形成了明显的逆时针环流 ,在贡湖形成了规模较大的顺时针环流 ,在梅梁湖的西边也形成了一个顺时针环流。比较计算所得的梅梁湖和贡湖的流场 ,可以明显地看出 3 个规模较大的环流吻合得较好 ,只有梅梁湖南部的一个小型的顺时针环流模拟的略为模糊。但鉴于实际风场、流场难以同步观测 ,并且过程非常复杂 ,因而模拟结果难以在微观上与实测结果完全一一对应。总的来说 ,通过套网格计算出来的结果是合理的 ,有效的。

2.3.2 大太湖的计算湖流和套网格计算所得的梅梁湖、贡湖湖流比较

仔细比较整个太湖的计算湖流图(图 5)和梅梁湖、贡湖湖流图(图 6)可得 两者描述的湖流图形在结合部分是一致的 ,流速大小也相差无几。特别是在几个大的环流 ,以及流速大小的分布上 ,吻合得非常好。梅梁湖、贡湖湖流图就是太湖湖流相对应部分的局部放大 ,这样就为我们对太湖的局部作较精确的认识提供了很好的方法 这也正好体现了套网格的特点。

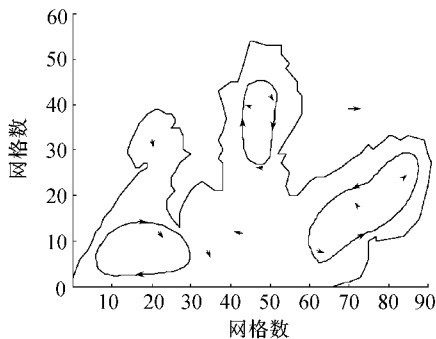


图 4 贡湖、梅梁湾实测流场

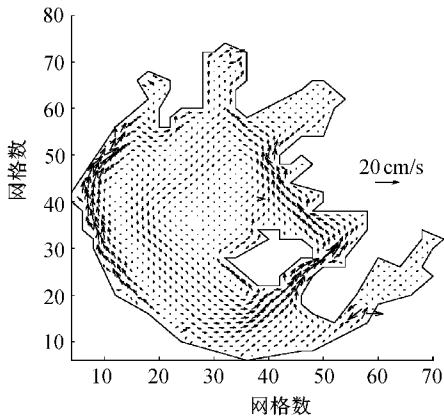


图 5 5 m/s 东南风持续作用下太湖稳定流场
(顺时针环流主导型)

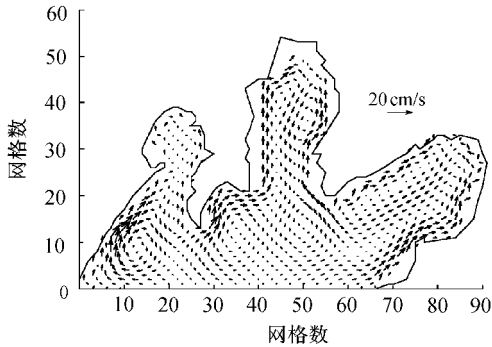


图 6 5 m/s 东南风持续作用下贡湖、梅梁湖稳定流场
(逆时针环流主导型)

2.3.3 模拟结果分析

本文模拟的结果表明 :太湖的流速分布不均匀 ,各个水域的流速相差很大 ,可达一个数量级以上。总的来讲 ,近岸区域的流速高于远岸区域 ,这在西岸表现的尤为明显 ,存在着十分明显的沿岸流。这可能与近岸的湖水较浅^[6]、风应力效应较为显著有关。通过图 4 还可以看出流速值一般都不大 ,这表明梅梁湖、贡湖和太湖的水体交换量不大 ,通过流场分布 ,我们还能初步判断出污染物质在水体中的扩散及迁移情况 ,为后续工作提供了数据和参考。

3 结 论

- a. 本文推导建立了适合于浅水湖泊湖流计算的三维水量数值模型 ,以及相应的套网格数值模型 ,计算结果与实测结果吻合得较好 ,这表明该模型的建立是合理的 ,有效的。
- b. 套网格模型可将大太湖的任何一个局部的流场放大 ,不仅节省了计算时间 ,还为分析太湖局部流场提供了行之有效的方法。
- c. 对太湖风生流的形态、特征有了较清楚的认识 ,主要表现在流速不均匀 ,环流形式与风向密切相关 ,并且风速是风生流大小的决定性因素。

参考文献 :

[1] 逢勇 ,姚琪 .太湖地区大气-水环境的综合数值研究 [M] .北京 :气象出版社 ,1998. 48 ~ 70 .
[2] 逢勇 ,濮培民 .太湖风生流三维数值模拟试验 [J] .地理学报 ,1996 ,51(4) :328 ~ 332 .
[3] 胡维平 ,濮培民 ,秦伯强 .太湖水动力学三维数值试验研究 [J] .湖泊科学 ,1998 ,10(4) :26 ~ 33 .
[4] 吴坚 .太湖水动力学数值模拟 [D] .南京 :中国科学院地理与湖泊研究所 ,1986 .
[5] 孙卫红 .太湖风生流及污染带模拟研究 [D] .南京 :河海大学 ,2001 .
[6] 马生伟 ,蔡启铭 .太湖风生流及其对总磷分布影响的数值研究 [A] .蔡启铭 .太湖环境生态研究 (一) [C] .北京 :气象出版社 ,1998. 169 ~ 177 .

(收稿日期 2002-10-12 编辑 高渭文)