

9-14

洪泽湖吞吐流二维数值模拟

p 343.3

姜加虎 黄群

(中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

A

摘要 吞吐流是湖泊中湖水运动的主要形式之一, 它通过水体交换, 进而对湖泊污染物质扩散、迁移、泥沙冲淤以及湖水浓度场的变化产生影响。根据洪泽湖的具体特点, 本文构造了一个二维开边界数值模式, 对洪泽湖吞吐淮河的特征进行数值实验, 研究其吞吐流过程。

关键词 吞吐流, 数值模拟, 洪泽湖

湖流, 湖泊

洪泽湖是我国五大淡水湖之一, 位于江苏省西北部, 淮河中游。自本世纪五十年代建库以来, 吞吐淮水, 成为淮河水系拦蓄调控淮水的中心枢纽。形似一只展翅飞翔的雄鹰(图1), 上承河南、安徽两省 $15.8 \times 10^4 \text{ km}^2$ 范围的来水, 在蓄水位 12.37m(废黄河口基面)时, 面积 1577.0 km^2 。淮河为洪泽湖的主要入湖河流, 占总入湖径流量的 87.3%; 三河和灌溉总渠为主要出湖河流, 分别占出湖径流量的 45.3% 和 29.5%。长期以来, 对于洪泽湖物理特性的研究十分薄弱, 尤其对其中湖流的研究就更少, 而其吞吐流的研究至今未见报道^[1]。本文试图通过建立洪泽湖吞吐流数值模式, 研究吞吐流特征, 并为进一步探讨入湖污染物的扩散、泥沙冲淤规律, 提供动力学条件。

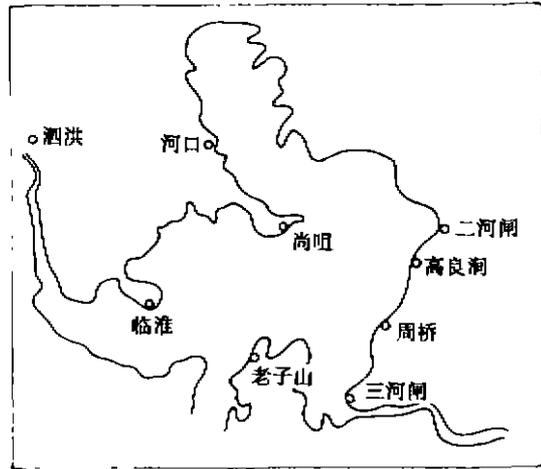


图1 洪泽湖形态及水位测站位置
Fig. 1 Sketch map of Hongze Lake and water level station sites

1 模式简介

考虑到洪泽湖为大型浅水湖泊, 湖水垂直混合剧烈的实际特点, 对完整的 $N-S$ 方程沿水深进行整层积分, 得洪泽湖吞吐流模式所采用的水动力学偏微分方程组^[2]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \eta}{\partial t} + \nabla \cdot (\eta + h) \vec{V} &= 0 \\ \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} - v \frac{\partial u}{\partial y} &= -g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \gamma_x \nabla^2 u + F_x + f_v \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} &= -g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \gamma_y \nabla^2 v + F_y - f_u \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

· 中国科学院重点课题“洪泽湖水势动态分析与水情预测研究”成果之一。
收稿日期: 1996-10-19; 收到修改稿日期: 1996-01-24。

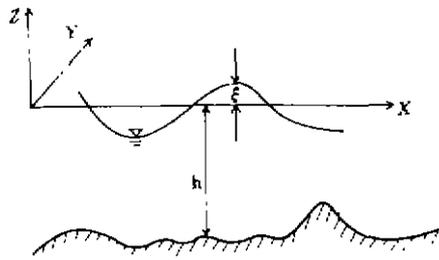


图2 数值模式坐标
Fig. 2 Coordination structure
of numerical model

其中, ∇ 为哈密顿算子, $\nabla = \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y}$, $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$. 直角坐标系和有关参量与变量配置由图2所示. x 轴正向为东, y 轴正向为北, z 轴铅直向上; u, v 为沿 x, y 轴方向在水深垂线上的平均流速, η 为湖面的波动高度; g 为重力加速度, f 为柯氏力参数 ($f = 2\omega \sin\varphi$, 其中 ω 为地球自转角速度, φ 为湖泊的当地纬度), γ_n 为水平粘性系数.

在方程组(1)的推导中还采用了下列的定义和定解条件:

(1) u, v 的定义式

$$(u, v) = \frac{1}{h + \eta} \int_0^{\eta} (\tilde{u}, \tilde{v}) dz \quad (2)$$

其中 \tilde{u}, \tilde{v} 为 $N-S$ 方程组中 x, y 轴方向上的流速分量.

(2) F_x, F_y 的定义式

$$(F_x, F_y) = \frac{1}{\rho_w(h + \eta)} (\tau_{wx} - \tau_{bx}, \tau_{wy} - \tau_{by}) \quad (3)$$

式中, τ_{wx}, τ_{wy} 为湖面 x, y 轴方向的风应力分量; τ_{bx}, τ_{by} 为湖底 x, y 轴方向的摩阻应力分量, 且

$$\left. \begin{aligned} (\tau_{wx}, \tau_{wy}) &= \rho_a C_D^a |\vec{W}| \vec{W} (\cos\theta, \sin\theta) \\ (\tau_{bx}, \tau_{by}) &= \rho_w C_D^b |\vec{V}| (u, v) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

其中, \vec{W} 为离湖面 10m 高处的风速矢量, C_D^a 为风曳力系数, ρ_a 为空气密度, θ 为风矢与 x 轴正向的夹角; ρ_w 为湖水密度, C_D^b 为湖底摩擦系数, \vec{V} 为流速矢量.

(3) 初始条件

$$\left. \begin{aligned} (u, v, \eta) &= \vec{0} \\ (\vec{V}|_{t=0})_{z=0} &= \vec{V}_R(t) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

(4) 边界条件

$$\text{湖面}(z=0) \quad -\rho_w A v \left(\frac{\partial \tilde{u}}{\partial z}, \frac{\partial \tilde{v}}{\partial z} \right) = (\tau_{wx}, \tau_{wy}) \quad (6)$$

$$\text{湖底}(z=-h) \quad \rho_w A v \left(\frac{\partial \tilde{u}}{\partial z}, \frac{\partial \tilde{v}}{\partial z} \right) = (\tau_{bx}, \tau_{by}) \quad (7)$$

$$\text{侧边界条件} \quad U_n|_l = 0, \dot{Q}|_{z=0} = \dot{Q}_R(t) \quad (8)$$

式中, U_n 为 \vec{V} 在湖岸法矢量方向的流速分量, $\dot{Q}_R(t)$ 为湖泊河口处的出入湖流量矢量.

1.1 差分方案

1.1.1 时间差分方案 模式的时间步长 Δt 取 1min, 在 1h 间隔内, 采用前 15min 欧拉后差, 后 45min 中央差交替进行的方法. 计算中没有进行任何平滑处理. 另外, 模式参数, f 取 $3.00 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, $\rho_a C_D^a$ 取 $1.56 \cdot 10^{-3}$; C_D^b 取 $2.6 \cdot 10^{-3}$; g 取 980 cm/s^2 , γ_n 取 $2.0 \cdot 10^5 \text{ cm}^2/\text{s}$, ρ_w 取 1 g/cm^3 .

1.1.2 空间差分方案 模式空间差分采用 Wunninghoff F. J. 和 Arakawa 设计的 C 型跳点格式, 并且其空间区域剖分, 采用规则正方形网格. 取 $\Delta x = \Delta y = 1.5 \times 10^6 \text{cm}$, 详见图 3.

1.1.3 程序设计 模式采用 FORTRAN-77 语言编制, 并在 DX/33-386 微型计算机上实施. 模拟计算时, 模式初始场的给定, 假定在 $t=0$ 的初始时刻, 湖泊水体处于相对静止状态, 即 $\vec{V} = \vec{0}$. 然后在出入湖河口同时作用定常出入湖流量, 即 $\vec{Q}_{in} = \vec{Q}_{out}$, 用此方式对洪泽湖的吞吐流过程进行模拟研究.

1.2 模式验证

由于洪泽湖吞吐流场的实测资料较少, 本文利用沿湖自记水位资料, 对若干水位测点进行水位拟合计算, 其部分验证结果由图 4 所示. 图中显示, 不同测点的水位模式计算结果与实测值基本吻合, 反映了实测水位的历时趋势, 表明模式设计合理, 其模拟结果可信.

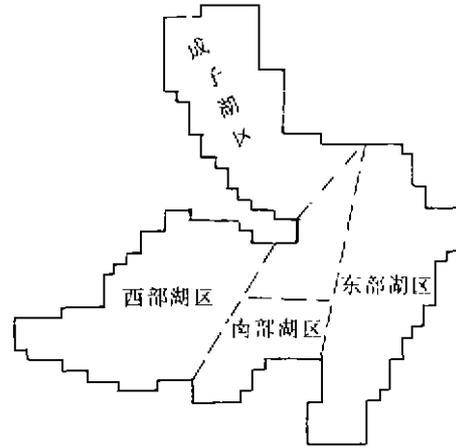


图 3 洪泽湖空间区域剖分图
Fig. 3 Horizontal mesh in space of Hongze Lake

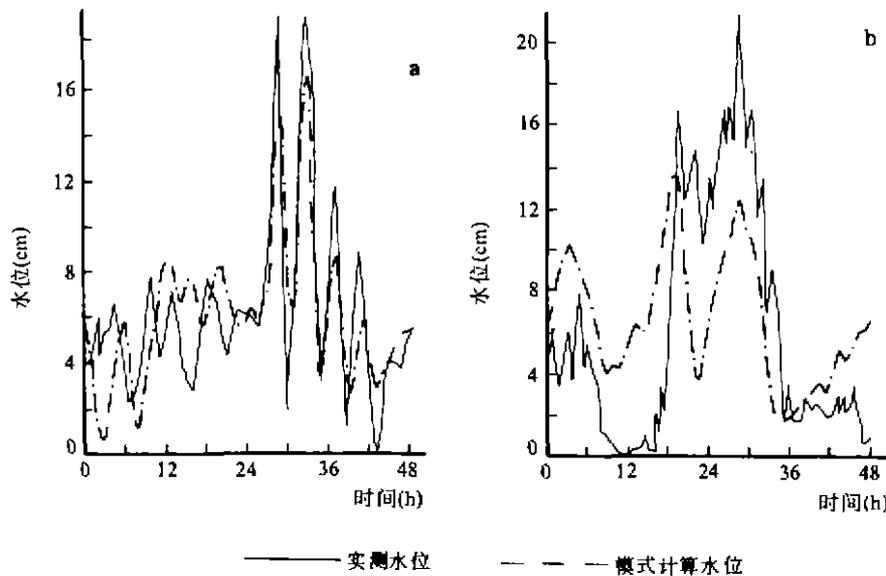


图 4 模式的水位验证结果

- (a) 三河闸测点 (1993. 4. 27-28), 风向 NN 转 ESE, 风速 1.17-8.00m/s;
三河闸出流 600m³/s, 高良涧出流 400m³/s, 二河闸关闭;
- (b) 周桥测点 (1992. 12. 9-10), 风向 W 转 WNW, 风速 0.85-10.87m/s;
三河闸出流 700m³/s, 高良涧出流 300m³/s, 二河闸出流 200m³/s

Fig. 4 The water level verification courses

(a) Sanbe Gate Station (Apr. 27 to 28, 1993); (b) Zhouqiao Station (Dec. 9 to 10, 1992)

2 计算结果分析

为研究洪泽湖的吞吐流过程,本文模式在可控条件下,对洪泽湖淮河入流、三河及灌溉总渠出流的不同组合形式分别进行模拟计算.图5(图中空间差分距离表示10cm/s流速)为淮河入流 $10\,000\text{m}^3/\text{s}$,三河出流 $10\,000\text{m}^3/\text{s}$ 情况下的洪泽湖0.25h、0.5h、0.75h、1.0h、2.0h和12.0h吞吐流流场模拟结果.

结果表明,洪泽湖在出入湖 $10\,000\text{m}^3/\text{s}$ 流量作用下,在0.75h以前,模拟流场表现为淮河入湖口、三河出湖口的扩散流流态,到0.75h左右时,两处河口的扩散流连成一体,而出现吞吐流与扩散流并存的形式,模式计算至1.0h时,扩散流开始波及溧河洼的湖西区,和高良涧至尚咀一线的湖北区,2.0h时开始影响成子湖区,12.0h时扩展至全湖,并且在成子湖区形成较弱的顺时针环流.在流场扩散过程中,逐步形成南部湖区绕老子山一线的沿岸高流速带,而这一带明显又是流速梯度最大的湖区,吞吐流流态作用较强.事实上,汛期伴随着淮河洪水入湖,三河闸则必然启闸放水,而洪水期淮河将挟带大量泥沙进入洪泽湖.这种水情组合在汛期为洪泽湖水情的基本特征,是洪泽湖经常存在的水情.根据前述洪泽湖吞吐流数值模拟结果推断,淮河入湖口的泥沙淤积,亦必然沿其吞吐流的主流线方向,即沿湖区南岸绕老子山一线向三河出湖口方向推进,并且入湖三角洲的发育亦必相应地沿此方向扩展.而三河河口附近湖区则以湖盆冲刷形式为主,具有向源冲刷的特性,成子湖区由于远离出入湖河口,受到洪泽湖吞吐流作用较弱.

由淮河入流 $10\,000\text{m}^3/\text{s}$,三河出流 $7\,000\text{m}^3/\text{s}$,灌溉总渠出流 $3\,000\text{m}^3/\text{s}$ 水情组合情况下的洪泽湖吞吐流模拟(图略)结果显示,与前述洪泽湖淮河入流 $10\,000\text{m}^3/\text{s}$,三河出流 $10\,000\text{m}^3/\text{s}$ 的吞吐流流场模拟结果相类似,所不同的是淮河入流的主流线有所变化,其主要特征是主流线北移,并且主流线的范围,即吞吐流高流带的范围有所扩大.因此,改变洪泽湖的出入流量组合形式与比例,可以改变洪泽湖的汛期湖流流型,并进一步可改变洪泽湖特别是淮河口湖区的泥沙淤积类型,以及河口三角洲的扩展方向.规划中的洪泽湖入海通道,即沿灌溉总渠一线的洪泽湖洪水入海工程,将明显改变洪水期洪泽湖出湖径流的组合关系,进而引起湖体泥沙冲刷关系的相应调整,并改变目前洪泽湖的湖盆演变形式.

通过对各种不同出入湖流量组合条件下的洪泽湖吞吐流流态的模拟分析,结果表明:

(1) 只要不改变出入湖流量的比例关系,仅改变其出入湖流量的量值,则不改变洪泽湖的吞吐流流型,并仅对开始一段时间内的吞吐流(或扩散流)波及湖区范围所需的时间,尤其是对河口扩散流的速度产生影响.例如,出入湖流量愈大,则影响至全湖所需的时间愈短,反之出入湖流量愈小,则影响至全湖所需的时间愈长.

(2) 改变出湖流量的组合关系,可改变洪泽湖吞吐流流型.例如,三河出湖流量与灌溉总渠出湖流量的比值愈大,则吞吐流主流线在南部近岸湖区显示愈明显,反之其比值愈小,则主流线北移的趋势愈明显.

综上所述,洪泽湖南部湖区,是受其吞吐流影响最大的湖区,也是流速及其梯度变化最大的湖区,该区换水周期短,湖水交换迅速、更新快,同时湖盆演变剧烈,具体表现为入湖口泥沙淤积量大,三角洲发育迅速.事实上,自本世纪五十年代以来,淮河入湖口的滩地以每年 $4\text{--}8\text{km}^2$ 速度发育,到1988年入湖三角洲在12.5m高程以上的面积已扩展到 108km^2 ;而出湖口

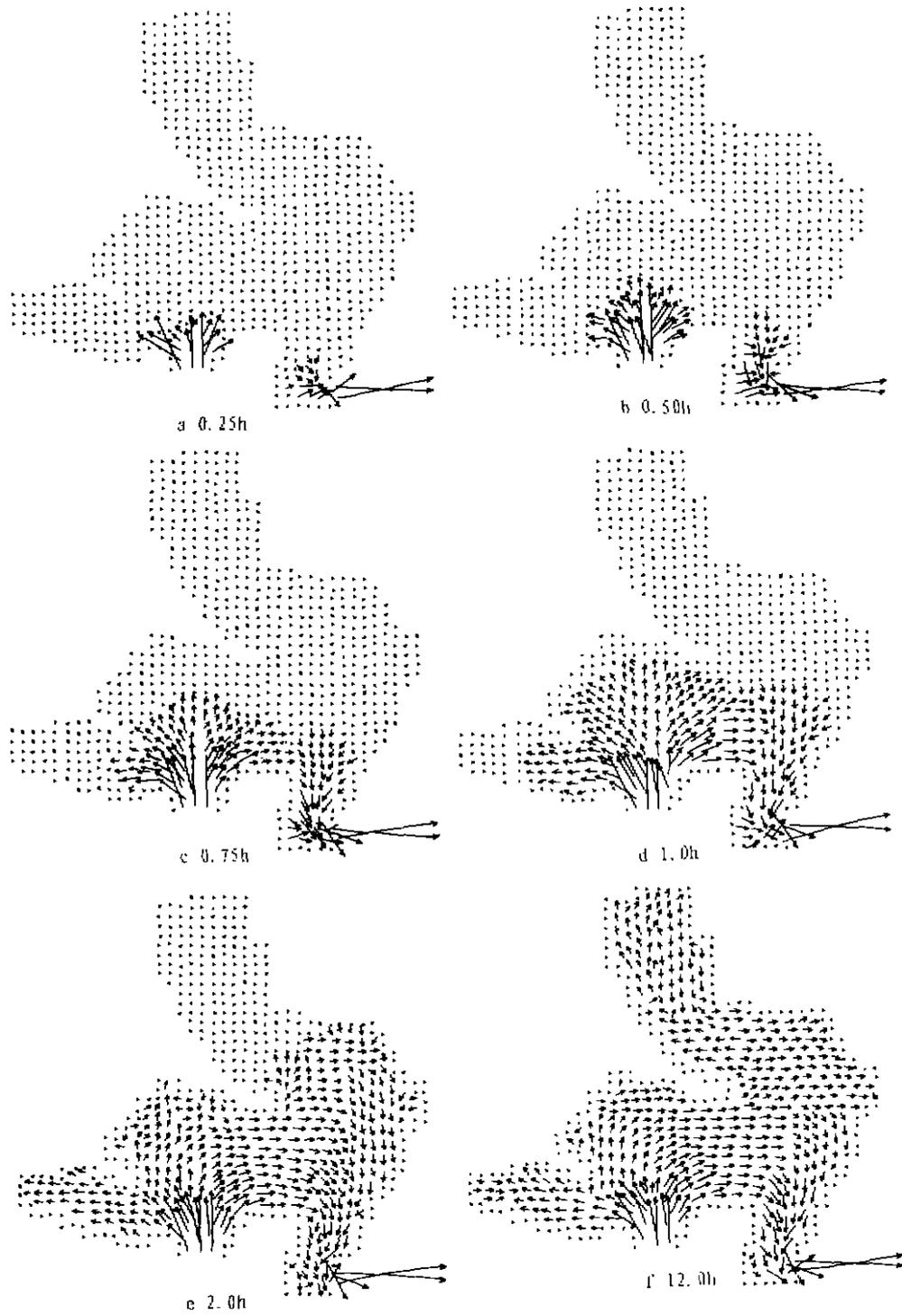


图5 淮河入流,三河出流各 $10\,000\text{m}^3/\text{s}$ 时洪泽湖模拟流场
 Fig. 5 Simulated water current in Hongze Lake under the case of $10\,000\text{m}^3/\text{s}$ inflow from the Huaihe River and $10\,000\text{m}^3/\text{s}$ outflow at Sanhe Gate

湖盆冲刷作用显著,例如三河闸上游湖区,由于出流冲刷作用,形成了洪泽湖最深的水域,成子湖区受到洪泽湖吞吐流影响最小,同时亦是受淮河污染物影响最小的湖区,但是,由于其水交换作用较弱,换水周期长,更新慢,该湖区若一旦受到污染,则恢复能力较低,这势必对滨湖工农业布局提出要求,因此是一个值得注意的问题。

3. 结语

本文给出了一个二维吞吐流数值模式,模拟了洪泽湖吞吐流流态,结果表明,吞吐流主要对洪泽湖南部湖区产生影响,吞吐流流型取决于淮河、三河及灌溉总渠出入湖流量的比例关系;在吞吐流作用初期,以河口扩散流形式向开敞湖区波及,波及速度取决于出入湖流量值的大小,在出入湖河口扩散流连成一体,湖流流态表现为吞吐流形式后,洪泽湖南部近岸湖区可形成淮河口绕老子山至三河口一线的高流速带,成子湖区受洪泽湖吞吐流影响最小,该湖区湖水更新慢,水交换弱,吞吐流的研究结果,为进一步探讨湖盆演变、淮河污染物在洪泽湖扩散、迁移及稀释等提供了动力学条件。

参 考 文 献

- 1 朱松东,安鸿身等著,洪泽湖,合肥:中国科学技术大学出版社,1995
- 2 孔德懋著,计算水力学理论与应用,南京:河海大学出版社,1998
- 3 王谦康,太湖风生流的数值模拟,河海大学学报(增刊),1987
- 4 王谦康,姜加虎,濮培民,太湖和大浦河口风成流、风涌水的数值模拟及其单站验证,湖泊科学,1992,4(1):1-7
- 5 吴一坚,大西行雄,熊谷道夫,琵琶南湖、太湖的一个多层水动力学数值模式,海洋湖沼通报,1988,(2)
- 6 梁瑞驹,钟金华,太湖风生流的三维数值模拟,湖泊科学,1994,6(1):259-297

A 2-DIMENSION NUMERICAL SIMULATION OF INFLOW/OUTFLOW IN HONGZE LAKE

Jiang Jialu

Huang Qun

Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008

Abstract

Inflow/outflow is one of the main styles of water currents in lakes, which affects pollutant diffusion and transportation, sand scouring and sediment, and lake density field variation through water exchanging. A numerical model of two-dimension and open-boundary is proposed in accordance with the features of Hongze Lake in this paper. The model is used to study the course of inflow/outflow, which is engaged in numerical experiment for the characteristics of Huaitie flow through the lake.

Key Words inflow/outflow, numerical simulation, Hongze Lake