

# 玄武湖风生流数值模拟研究

龚春生<sup>1</sup>, 姚琪<sup>1</sup>, 赵棣华<sup>2</sup>

(1. 河海大学环境科学与工程学院, 江苏 南京 210098 2. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210024)

**摘要:**应用浅水湖泊风生流计算的二维有限元数学模型,对玄武湖风生流进行了数值模拟,并研究了玄武湖 6 m/s 东南风风生流的历时变化特征及 4 m/s 6 种风向(E, W, S, N, ESE, WNW)下的稳定风生湖流特征.结果表明 6 m/s 风作用 1h 后在玄武湖开阔水域一般可形成稳定流场,稳定风生流场可以划分为逆时针环流主导型、顺时针环流主导型和过渡型 3 种类型;不同方位风场作用形成的稳定的风生流流态是不同的,对峙方位风场形成的风生流流型相似,流向相反.

**关键词:**玄武湖;风生流;数值模拟;伽辽金(Galerkin)有限元法;窄管效应

中图分类号:X524;TV131.2 文献标识码:A 文章编号:1000-1980(2005)01-0072-04

影响湖泊水动力过程的主要因素是风.由于风生流对湖泊中的物质交换和水体中的各种物质能量的传输及转化有重大影响,而且观测相对比较困难,因而目前人们主要通过数值模型来模拟湖泊风生流场,且取得了大量的研究成果.为了给玄武湖治污方案的实施提供科学依据,本文在前人工作的基础上,用平面二维有限元数学模型对玄武湖风生流进行了数值模拟,并对模拟结果进行了分析.

## 1 数学模型

### 1.1 控制方程组

玄武湖 10 m 水位时平均水深 1.43 m,湖面面积 3.7 km<sup>2</sup>,属典型平原浅水湖泊,因此其风生流的控制方程组可写为<sup>[1-5]</sup>

$$\begin{cases} \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial(h + \zeta)u}{\partial x} + \frac{\partial(h + \zeta)v}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \varepsilon \nabla^2 u + F_x + fv \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \varepsilon \nabla^2 v + F_y - fu \end{cases}$$

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

$$f = 2\omega \sin \varphi$$

式中: $F_x, F_y$ ——摩擦力在  $x, y$  方向的分量 ( $\tau_{wx}, \tau_{wy}$ ) ( $\tau_{bx}, \tau_{by}$ )—— $x, y$  方向的湖面风应力分量及湖底摩擦应力分量; $h$ ——平均水深; $\zeta$ ——水面高程与平均湖面高程之差; $u, v$ —— $x, y$  方向的流速分量; $\varepsilon$ ——水平涡黏性系数,取  $10 \text{ m}^2/\text{s}$ ; $g$ ——重力加速度; $f$ ——柯氏力参数; $\omega$ ——地球自转角速度,取  $7.29 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$ ; $\varphi$ ——纬度,取  $32^\circ$ ; $t$ ——时间.

### 1.2 定解条件

#### 1.2.1 初始条件

假定初始湖水是静止的,湖面是水平的,即初始条件为

$$\zeta(x, y) = u(x, y) = v(x, y) = 0$$

### 1.2.2 边界条件

由于玄武湖入湖河流流量不大且为人工控制,武庙闸、大树根闸泄水能力有限亦为人工控制,吞吐流影响范围较小,不考虑出入湖河流的影响,则侧边界条件为

$$v \cdot n \Big|_L = 0$$

式中:  $n$ ——固边界法方向矢量;  $L$ ——玄武湖湖岸线.

湖水表面边界( $\zeta = 0$ )条件为

$$\tau_{wx} = \rho_a C_D W_x \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \quad \tau_{wy} = \rho_a C_D W_y \sqrt{W_x^2 + W_y^2}$$

式中:  $\rho_a$ ——空气密度,取  $1.23 \text{ kg/m}^3$ ;  $C_D$ ——风剪切应力系数<sup>[6]</sup>,  $C_D = (1.1 + 0.0536W) \times 10^{-3}$ ;  $W_x, W_y$ ——湖表面 10 m 处沿  $x, y$  方向的风速,单位为  $\text{m/s}$ .

湖底表面边界( $\zeta = h$ )条件为

$$\tau_{bx} = \rho_w \lambda u \sqrt{u^2 + v^2} \quad \tau_{by} = \rho_w \lambda v \sqrt{u^2 + v^2}$$

$$\lambda = (h + \zeta)^{1/6} / n$$

式中:  $\rho_w$ ——水的密度;  $\lambda$ ——摩擦应力系数;  $n$ ——湖底粗糙系数,取 0.018.

### 1.3 模型求解

采用伽辽金(Galerkin)有限元法求解控制方程组,有限单元双二次插值、空间区域剖分 1688 个网格(其中三角形网格 302 个,四边形网格 1386 个),时间步长  $\Delta t = 1.0 \text{ min}$ .

## 2 风生流数值模拟

### 2.1 风生流历时变化流数值模拟

由于玄武湖湖区面积较小,不考虑风进入湖面产生的气旋式附加风场,取  $6 \text{ m/s}$  东南风为背景风,对湖区风生流进行数值模拟,结果如图 1 所示.由图 1 可见,风场作用初期,由于风力对湖水的拖曳作用占主导地位,风生流流速由零逐渐增加,开敞湖区湖流指向东南方向,之后由于风涌水形成的水位压强梯度力的逐渐加强,加之湖盆地形的制约作用,湖流流向逐渐偏转,北湖、西湖形成环流和逆风流动的补偿流.在风时 0.2 h 以内,受地形影响,在北湖、东南湖及西湖的交界处出现“窄管效应”,从而伴随高流速带的生成,湖区流场处于加速阶段.随着时间的延长,风涌水形成的水位压强梯度力逐渐减弱,高流速带逐渐减弱.受地形影响,东南湖湖心开始形成逆时针流场,模拟至 0.3 h 时,湖区开始形成逆时针环流.风的剪切应力、水位压强梯度力、柯氏力、底摩擦力等力达到平衡时,玄武湖在东南风持续作用下,形成稳定的风生流,流场比较均匀,流速一般在  $0.053 \text{ m/s}$  以内.为研究不同湖区水体交换情况,在北湖、东南湖、西湖水体交换处布设 1#、2#、3#、4#、5# 5 个过水断面(图 1),其不同时刻平均流速变化如图 2 所示.从图 2 可见,风生流初期,由于风应力的影响占优,北湖、东南湖、西湖三湖水体交换强烈,形成风涌水,表现为 1#、2#、3#、4#、5# 过水断面风生流流速的逐渐增加.各湖区风应力与风涌水形成的水位压强梯度力达到平衡时,过水断面风生流流速达到最大

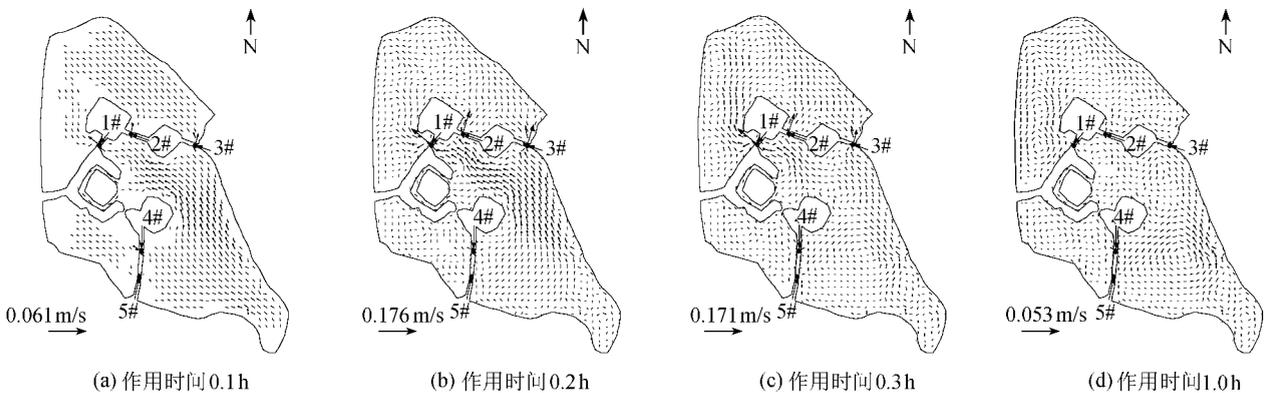


图 1 6 m/s 东南风不同作用时间下风生流流场

Fig. 1 Current fields at different time under action of SE wind of 6 m/s

值.受地形及风向的影响,过水断面风生流流速达到最大值的时刻不同.之后由于风涌水形成的水位压力减弱,补偿流的作用逐渐增强,北湖、东南湖水体交换逐渐减弱,东南湖、西湖水体交换逐渐增强,表现为1#、2#、3#过水断面风生流流速递减,4#、5#过水断面补偿流流速与风生流流速相互作用,呈现一定的波动性,各断面的平均流速随时间的变化呈现一定的相似性.由图2可知,北湖早于东南湖及西湖出现补偿流,且也先于此两湖到达稳定流态,在达到稳定态后,湖流流型(与东南湖及西湖相比)呈现出相对的独立性.

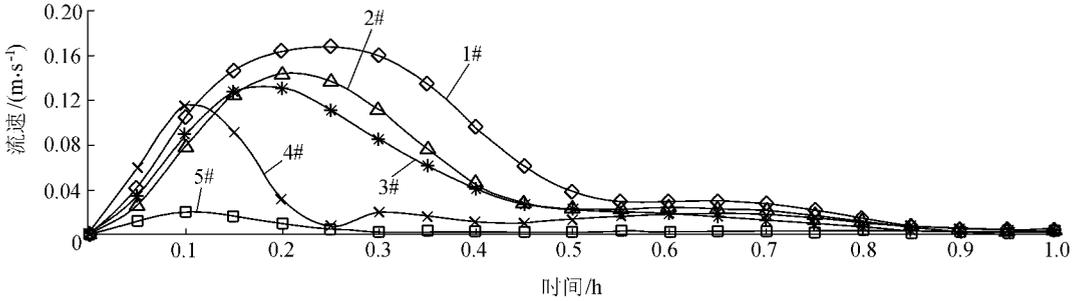


图2 过水断面不同时刻平均流速变化图

Fig.2 Mean velocity variation for different cross sections

### 2.2 稳定风生流数值模拟

取4m/s东(E)风、西(W)风、南(S)风、北(N)风、东南东(ESE)风、西北西(WNW)风为背景风,模拟了玄武湖稳定风生流流场,结果如图3所示.

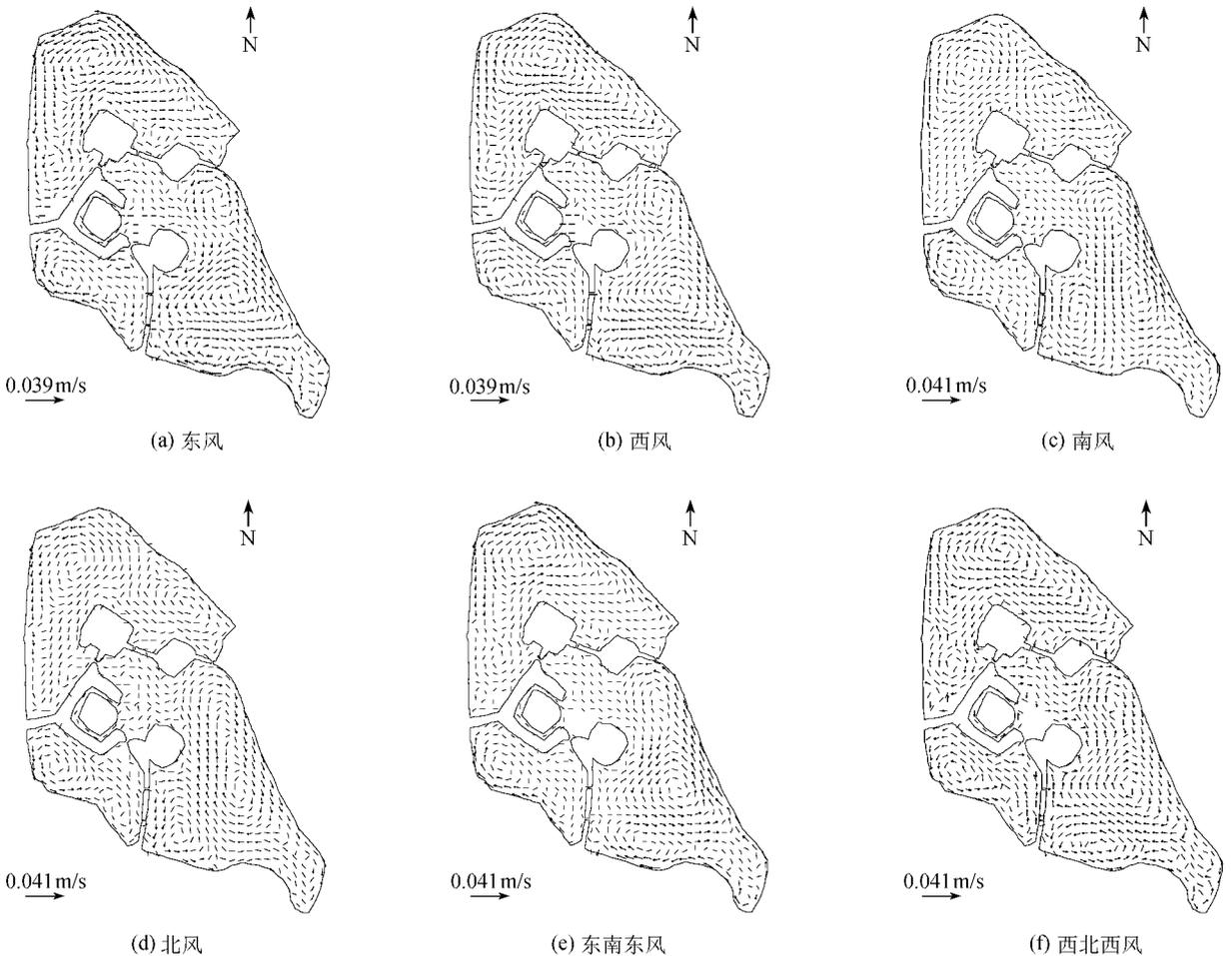


图3 风速4m/s不同风向下玄武湖风生流流场

Fig.3 Current fields of Xuanwu Lake under action of wind of 4 m/s in different directions

从图3可以看出:

a. 玄武湖稳定风生流主要由湖区环流构成,各水域流速差异不大.由于岸边界较光滑、平直,较易产生

较强的沿岸流。

b. 在东(E)风、东南东(ESE)风作用下,北湖形成以逆时针环流为主的风生环流流态;东南湖形成以逆时针环流为主的风生环流流态,局部地区形成顺时针流动的补偿环流;西南湖形成以顺时针环流为主的风生环流流态。西(W)风、西北西(WNW)作用下混合流场情况与此相反。在南(S)风作用下,北湖环流流态主要以顺、逆时针环流为主;东南湖形成以逆时针环流为主的风生环流流态,局部地区形成顺时针流动的补偿环流;西南湖形成以顺时针环流为主的风生环流流态,局部地区形成逆时针流动的补偿环流。北(W)风作用下混合流场情况与此相反。由此,根据环流的方向及范围,可将玄武湖环流流态分为 3 种类型:(a)对应于东(E)风、东南东(ESE)风的顺时针环流主导型流场,主要特征是玄武湖水体为较强的顺时针环流所控制,其范围也较大,而局部地区则形成逆时针补偿流,逆时针环流则相对较弱,范围较小;(b)对应于西(W)风、西北西(WNW)风的逆时针环流主导型流场,其主要特征与顺时针环流主导型流场相似,只是环流方向相反;(c)对应于南(S)风、北(N)风的过渡型流场,其主要特征为顺时针环流和逆时针环流都明显存在,但都不占明显优势,属上述两种类型的中间过渡。

c. 风生流场的形态由风向决定,不同方向风场作用形成的稳定的风生流流态也不相同。对峙方位风场形成的风生流流型相似,流向相反。

### 3 结 论

a. 风场作用初期,风生流流向指向顺风方向。6 m/s 风作用 1 h 后,在玄武湖开阔水域一般可形成稳定流场。在稳定状态、不同风向作用时,会形成不同的环流结构。

b. 风生流场的形态由风向决定,而与风速关系不大。不同方位风场作用形成的稳定的风生流流态也不相同。对峙方位风场形成的风生流流型相似,流向相反。

c. 玄武湖风生流场可以划分为逆时针环流主导型、顺时针环流主导型和过渡型 3 种。

#### 参考文献:

- [1] 姜加虎. 贡湖及其相关水域风生流模拟研究[J]. 海洋湖沼通报, 1997(4): 1—7.
- [2] 王谦谦, 姜加虎. 太湖和大浦河口风成流、风涌水的数值模拟及其单站验证[J]. 湖泊科学, 1992(4): 1—7.
- [3] 姜加虎, 黄群. 洪泽湖混合流数值模拟[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 1998, 13(2): 147—150.
- [4] 孙顺才, 黄漪平. 太湖[M]. 北京: 海洋出版社, 1993. 1—22.
- [5] 王谦谦. 太湖风成流的数值模拟[J]. 河海大学学报, 1987, 15(增刊2): 11—18.
- [6] HICKS B B, DRINKROW R L. Drag and bulk transfer coefficients associated with a shallow water surface[J]. Boundary-Layer Meteorology, 1974(1): 287—297.

## Numerical simulation of wind-driven current in Xuanwu Lake

GONG Chun-sheng<sup>1</sup>, YAO Qi<sup>1</sup>, ZHAO Di-hua<sup>2</sup>

(1. *Colleg of Environmental Science and Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China;*

*2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)*

**Abstract:** The 2-D Galerkin FEM model was used to simulate the wind-driven current in the Xuanwu Lake. The duration variation of the current field induced by SE wind of 6 m/s and the characteristics of stable flows under the action of wind of 4 m/s in 6 directions, including E, W, S, N, ESE, and WNW, were studied. The results show that the stable wind-driven current field occurs in open areas of the Xuanwu Lake after 1 hour action of wind of 6 m/s. The stable wind-driven current fields can be divided into three types, i. e. the clockwise circumfluence, the counterclockwise circumfluence, and the transient circumfluence. It is also indicted that the flow patterns induced by winds in different directions are different, and that wind fields in opposite directions result in current fields with similar flow patterns but in opposite directions.

**Key words:** Xuanwu Lake; wind-driven current; numerical simulation; Galerkin finite element method; narrow pipe effect