

EFDC 模型在三白荡二维水流 数值模拟中的应用

孙丽娜¹, 李一平², 张其成³, 陈 星³

(1. 南京市水资源管理中心, 江苏 南京 210008; 2. 河海大学 环境学院, 江苏 南京 210098;
3. 河海大学 水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 阐述环境流体动力学模型(EFDC)的基本原理, 结合苏州市吴江区三白荡的具体情况建立水流模型, 讨论模型参数的设计、预测方案的选取, 并对模拟结果做出具体的分析。分析结果显示, 模型对三白荡的水流模拟具有较强的实用性, 与实物资料吻合较好, 不仅反映了湖泊的水流联系情况, 而且显示了湖泊岸线受风浪侵蚀、出入湖水量分配情况。模型为湖泊岸线设计、环境容量研究、陆地污染物排放控制提供较强的技术支撑。此外, 模拟结果对研究太湖流域类似三白荡的浅水湖泊水动力过程具有较强的借鉴意义。

关键词: EFDC 模型; 浅水湖泊; 水流模拟; 太湖流域

中图分类号: TV212 **文献标识码:** B **文章编号:** 1007-7839(2021)03-0015-06

Application of EFDC model on two – dimensional numerical simulation of Sanbai Lake

SUN Lina¹, LI Yiping², ZHANG Qicheng³, CHEN Xing³

(1. *Nanjing Water Resources Management Center, Nanjing 210008, China;*
2. *College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China;*
3. *College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China*)

Abstract: The basic principle of environmental fluid dynamics model (EFDC) was expounded, and the flow model was established according to the specific situation of Sanbai Lake in Wujiang District of Suzhou City. The design of model parameters and selection of prediction scheme were discussed, and the simulation results were analyzed in detail. The analysis results showed that the model had a strong practicability in simulating the water flow of Sanbai Lake, and was in good agreement with the physical data, which not only reflected the connection of the water flow of the lake, but also showed the distribution of the water flow in and out of the lake under the erosion of the shoreline by the wind and waves. The model provides strong technical support for lake shoreline design, environmental capacity research and land pollutant emission control. In addition, the simulation results have strong reference significance for the study of hydrodynamic process of shallow lakes similar to Sanbai Lake in Taihu Basin.

Key words: EFDC model; shallow lakes; water flow simulation; Taihu Lake Basin

收稿日期: 2020-08-11

作者简介: 孙丽娜(1986—), 女, 工程师, 硕士, 主要从事生态水文与生态修复工作。E-mail: 595099185@qq.com

在城市湖泊的设计中,岸线的设计不仅影响到外界环境包括人类活动,污染源对湖泊的扰动程度,而且直接影响到湖体的水动力过程,进而影响污染物质在湖体内的迁移和扩散。故了解不同岸线形状下的湖泊水动力过程是湖泊规划设计的基础和前提。而湖泊水动力数值模拟则提供了一个便利的工具,本研究以吴江市三白荡为具体的研究实例,利用 EFDC 模型对三白荡现状岸线条件下的水流流场进行模拟,探寻合理的湖泊岸线设计方案,以有效减缓湖泊与陆地环境过于剧烈的物质和能量交换,为岸线的生态设计提供技术参考。

1 现状概况

三白荡位于太湖流域下游吴江市汾湖经济开发区的中心城区,是典型的城市型湖泊。现状湖泊面积 6.68 km²,岸线总长 19 km,湖底地形较为平坦,湖底平均高程 0.07 m(吴淞高程),平均水深仅 2.81 m,属浅水型湖泊,全年主导风向为东南风,夏季主导风向为东南风,冬季主导风向为西北风,多年平均风速为 3.9 m/s,水面阵风最大达到 8~9 级,风力较大,对河道湖泊岸线侵蚀作用明显。长期以来,受城市建设及历史围垦影响,岸线多被蚕食^[1],形态较为曲折,对外界环境的作用响应相对强烈,与外界物质与能量交换频繁^[2]。

2 EFDC 模型简介

EFDC (environmental fluid dynamic code) 是在美国国家环保署资助下由维吉尼亚海洋研究所根据多个数学模型集成开发研制的综合模型,被用于模拟水系统一维、二维和三维流场、物质输运(包括温度、盐度和泥沙的输运)、生态过程以及淡水入流等^[3-4]。EFDC 模型垂向上采用 σ 坐标变换,能较好地拟和近岸复杂的岸线和地形;采用 Gelperin 等^[5]修正的 Mellor-Yamada 2.5 阶湍流封闭模式较客观地提供垂向混合系数,避免其人为选取造成的误差。

本研究利用 EFDC 建立三白荡的二维水动力模型,对现状岸线下湖泊的流场进行模拟,研究结果可以为湖泊岸线的设计、改造提供基础支撑,并为同类湖泊提供参考。

模型中使用的动量方程、连续方程及状态方程^[6-8]如下:

$$\partial_t(m_x m_y H u) + \partial_x(m_y H u u) + \partial_y(m_x H v u) + \partial_z(m_x m_y w u) - f_e m_x m_y H v = -m_y H \partial_x(p + p_{atm} + \varphi) +$$

$$m_y(\partial_x z_b^* + z \partial_x H) \partial_z p + \partial_z \left(m_x m_y \frac{A_v}{H} \partial_z u \right) + \partial_x \left(\frac{m_x}{m_x} H A_H \partial_x u \right) + \partial_y \left(\frac{m_x}{m_y} H A_H \partial_y u \right) - m_x m_y c_p D_p (u^2 + v^2)^{1/2} u \quad (1)$$

$$\partial_t(m_x m_y H v) + \partial_x(m_y H u v) + \partial_y(m_x H v v) + \partial_z(m_x m_y w v) + f_e m_x m_y H u = -m_x H \partial_y(p + p_{atm} + \varphi) + m_x(\partial_y z_b^* + z \partial_y H) \partial_z p + \partial_z \left(m_x m_y \frac{A_v}{H} \partial_z v \right) + \partial_x \left(\frac{m_y}{m_x} H A_H \partial_x v \right) + \partial_y \left(\frac{m_x}{m_y} H A_H \partial_y v \right) - m_x m_y c_p D_p (u^2 + v^2)^{1/2} v \quad (2)$$

$$m_x m_y f_e = m_x m_y f - u \partial_y m_x + v \partial_x m_y \quad (3)$$

$$(\tau_{xz}, \tau_{yz}) = A_v H^{-1} \partial_z(u, v) \quad (4)$$

$$\partial_t(m_x m_y H) + \partial_x(m_y H u) + \partial_y(m_x H v) + \partial_z(m_x m_y w) = Q_H + \delta(0)(Q_{SS} + Q_{SW}) \quad (5)$$

$$\partial_z p = -gH(\rho - \rho_0)\rho_0^{-1} = -gHb, \rho = \rho(P, S, T) \quad (6)$$

式中: u, v, w 分别为边界拟合正交曲线坐标 x, y, z 方向上的速度分量; m_x, m_y 分别为度量张量对角元素的平方根, $m = m_x m_y$ 是度量张量行列式的平方根; A_v 为垂向紊动黏滞系数; f 为科里奥利系数; p 为压力; ρ 为密度; S 为盐度; T 为温度; Q_u, Q_v 为动量源汇项。本研究中盐度 S 为 0,并假设水为不可压缩流体,密度 ρ 和水温 T 为常量。

动量方程的垂向边界层考虑了水表面的风拖曳力和湖底的摩擦力。即河床剪切应力 τ_{xz} 和 τ_{yz} 取决于速度分量,可以根据二次阻力公式求得,具体方程为:

$$(\tau_{xz}, \tau_{yz}) = (\tau_{sx}, \tau_{sy}) = c_s \sqrt{U_w^2 + V_w^2} (U_w, V_w) \quad (7)$$

式中, U_w, V_w 分别为 x, y 方向在水表面 10 m 高处的分速。风拖曳系数求法如下:

$$c_s = 0.001 \frac{\rho_a}{\rho_w} (0.8 + 0.065 \sqrt{U_w^2 + V_w^2}) \quad (8)$$

式中, ρ_a, ρ_w 分别为空气和水的密度。湖底摩擦力的计算方法为:

$$(\tau_{xz}, \tau_{yz}) = (\tau_{bx}, \tau_{by}) = c_b \sqrt{u_1^2 + v_1^2} (u_1, v_1) \quad (9)$$

其中,下标 1 指底部的对应流速。底摩擦系数求取方程为:

$$c_b = \left(\frac{\kappa}{\ln(\Delta_1/2z_o)} \right)^2 \quad (10)$$

式中: κ 为卡门常数; Δ_1 底层的无量纲厚度; z_o 为无量纲的糙率高度,一般取值在 0.002~0.01 之间。

式(1)~(10)的数值解法采用有限差分格式,空间上采用二阶精度的中心差分格式,时间上采用二阶三次精度的内外模分离模式有限差分格式。使用质量守恒格式的干湿网格处理方法,更好地模拟湖流的漫滩过程,保证浅水区域计算结果的准确性。首先设置干湿临界水深,当水深小于临界值,则认为处于干点;同时设置判定开关,用于定时检查干湿状态。对于干点,则人为将单元通量设为0,湿点则正常运算。

3 模型构建

现状三白荡面积为 6.68 km²,其中岛屿面积 0.9 km²,岸线长度为 19 km。首先对该湖泊的边界及出入湖河道进行概化,然后利用湖泊岸线及岛屿边界生成网格,共有网格 11 302 个。本研究水平网格采用矩形正交坐标,网格距为 22.8 m,垂直方向网格距为 23.1 m。研究区域网格湖底高程及主要环湖河道(作为流量边界条件)示意图见图 1。

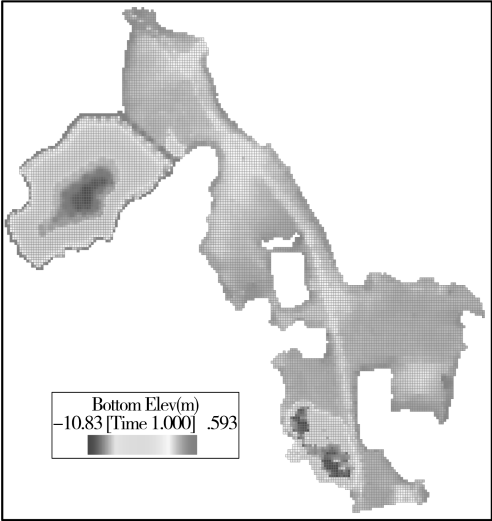


图1 三白荡网格湖底高程

4 模型参数设计

EFDC 具有很好的通用性,在水动力领域已具备相当强的模拟精度。一般情况下,EFDC 模型中的许多参数不需要修改。譬如 Mellor-Yamada 湍封闭参数在各个模型中是相同的。以下为主要调整的参数。

(1)湖底粗糙度 Z_0

湖底粗糙度 Z_0 是 EFDC 模型中常需调整的参数,其默认设置为 0.02 m。在本研究的湖流模型中,设置 $Z_0 > 0.03$ m 时,模型无法运行;设置 Z_0 在 0.03~0.02 m 时,模拟结果相对误差在 15%左

右;设置 Z_0 在 0.01~0.02 m 时,模型结果相对误差在 6%左右; Z_0 为 0.015 m 时,模拟结果和实测值符合较好。故本模型中 Z_0 取为 0.015 m。

(2)动边界干湿水深设定

固定边界模型的计算域边界随时间不发生变化,而动边界模型的计算域边界随水位涨落而变动,可以模拟湖泊水位的变化过程。可见动边界模型能详细的模拟三白荡水位的涨落过程,对后续研究近岸湖体污染物输运具有重要的应用价值。

根据比较,选择 0.1 m 作为干湿网格的临界水深。即当某网格水深大于 0.1 m 时,当作湿网格处理,进行正常的模拟计算;当水深小于 0.1 m 时,此网格作为干网格处理,不参与计算。

(3)其他参数

其他参数如时间步长、水平黏性系数、水平扩散系数、最小黏性系数等见表 1。

表1 三白荡水动力模型参数取值表

参数	描述	取值
$\Delta T(s)$	时间步长	4
$AHO(m^2 \cdot s^{-1})$	水平动能或物质扩散系数	1.0
AHD	无量纲水平扩散系数	0.2
$AVO(m^2 \cdot s^{-1})$	运动黏性系数背景值	0.001
$ABO(m^2 \cdot s^{-1})$	分子扩散系数背景值	1E-09
$AVMN(m^2 \cdot s^{-1})$	最小动能黏性系数	1E-04
$ABMN(m^2 \cdot s^{-1})$	最小黏性系数	1E-08
WSC	风遮挡系数	1.0

5 模型应用

(1)预测方案

模型预测条件为三白荡在规划岸线下在不同风向及风速下的流场模式,具体预测方案分为 6 种:

方案一:东南风,风速 3.9 m/s,现状出入湖流量;方案二:西北风,风速 3.9 m/s,现状出入湖流量;方案三:东南风,风速 10 m/s,现状出入湖流量;方案四:西北风,风速 10 m/s,现状出入湖流量;方案五:无风条件,现状出入湖流量;方案六:东南风,风速 10 m/s,无出入湖流量。

现状主要入湖河道及流量:牛长泾: 31.5 m³/s;杨荡港: 39.6 m³/s;莘塔港: 20.2 m³/s。现状主要出湖河道及流量:南庄荡: 61.2 m³/s;北窑港: 31.5 m³/s。

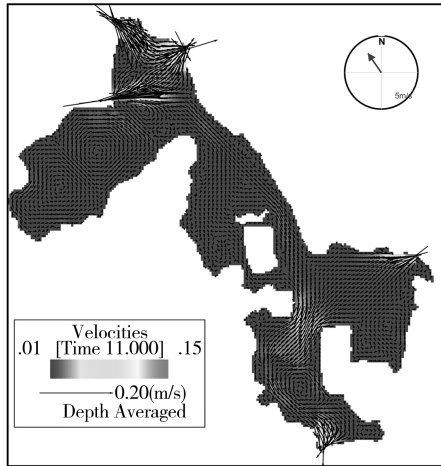
(2) 模型计算结果

通过对不同计算结果的分析比较,可知模型在 8 d 后能够计算稳定。图 2 为三白荡现状岸线条件下 6 种方案的流场模拟图。

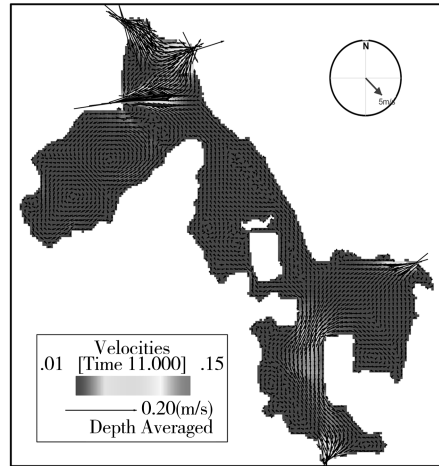
(3) 模拟成果分析

吴江市常年主导风向为东南风和西北风,多年平均风速为 3.9 m/s,湖面阵风最大达到 8~9 级。

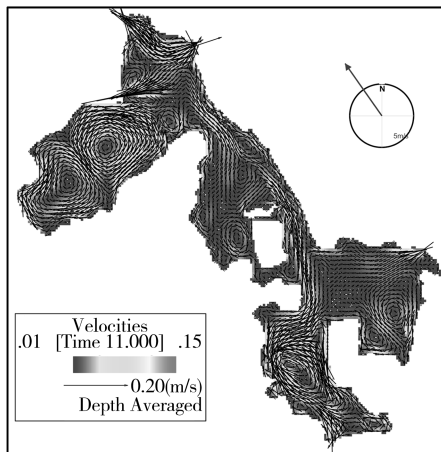
由方案 1 与方案 2 可以看出,在 3.9 m/s 的东南风和西北风作用下,在西北部 and 西南处形成微小环流,但与湖泊外界无水体交换现象。由方案 3 与方案 4 可以看出,在 10 m/s 的东南风和西北风作用下,湖泊西北处、西南处受风浪的冲刷强烈,形成明显的环流区,虽在局部水体交换强烈,但与其他水体联系较弱,污染物进入该区域,易发生富营养化



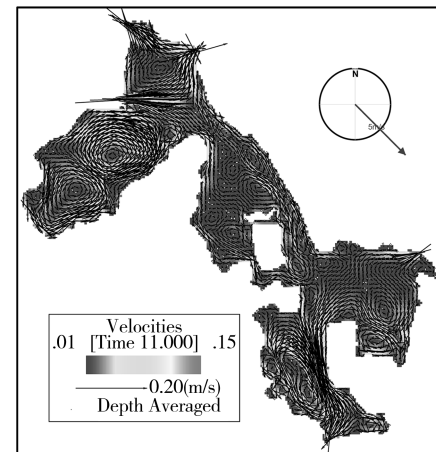
(a) 方案 1 东南风 3.9m/s 现状出入湖流下稳定流场



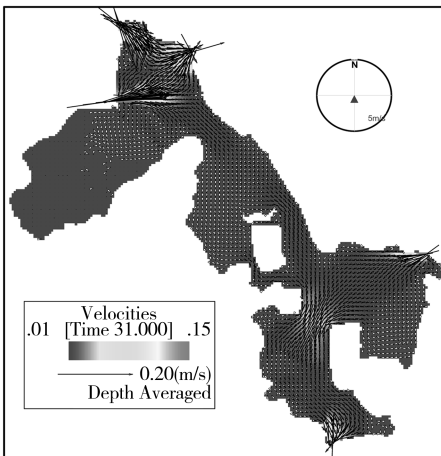
(b) 方案 2 西北风 3.9m/s 现状出入湖流稳定流场



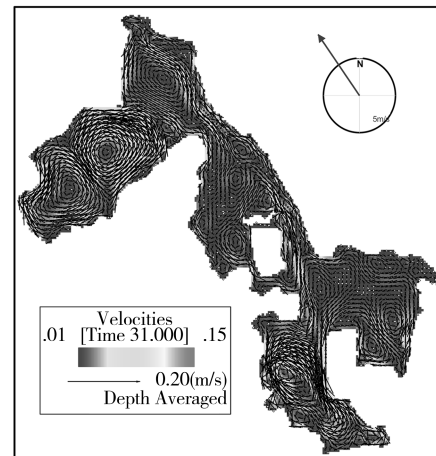
(c) 方案 3 东南风 10m/s 现状出入湖流下稳定流场



(d) 方案 4 西北风 10m/s 现状出入湖流下稳定流场



(e) 方案 5 无风现状出入湖流下稳定流场



(f) 方案 6 东南风无出入湖流下稳定流场

图 2 三白荡现状岸线条件下 6 种方案的流场模拟

现象。由方案5与方案6可以看出,较出入湖水体而言,风对三白荡的流场起主导作用,且方案5中在无风情况下水流流场较弱,在西北区基本无水体流动,水体联系较弱,为死水区。

6 湖泊形态调整后流场模拟及结果分析

根据现状流场模拟的结果分析后,为改善三白荡岸线冲刷及内外水体联系,规划调整三白荡的湖泊岸线形态;由于三白荡现状平均淤积深度为0.14 m,为保障三白荡及其周边的防汛安全,增加湖泊调蓄能力,规划对三白荡进行生态清淤,调整湖盆形态,局部地区疏浚深度0.5 m,见图3。模型参数及方案设计同现状形态,规划岸线流场模拟见图4,分析结果如下:

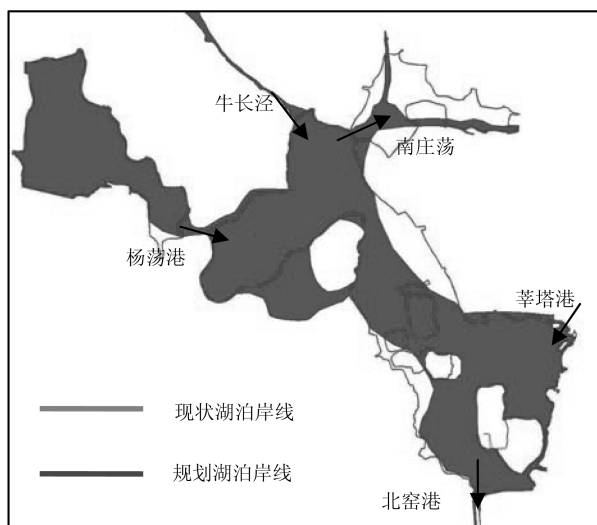
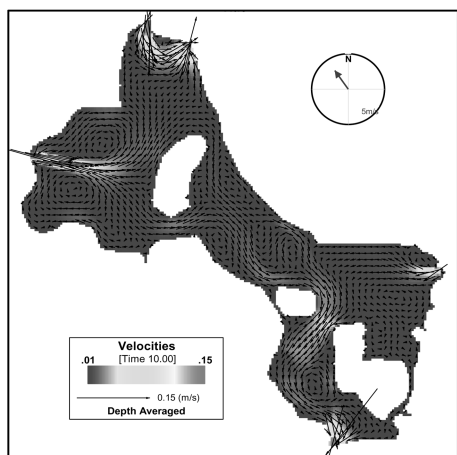


图3 三白荡现状与规划岸线形态示意图

(1)由方案1及方案2可看出,在平均风速为3.9 m/s,有出入湖流量情况下,湖泊的流场较为稳定和均匀。最为明显的是岸线调整过后,三白荡西



(a)方案1 东南风 3.9m/s 现状出入湖流下稳定流场

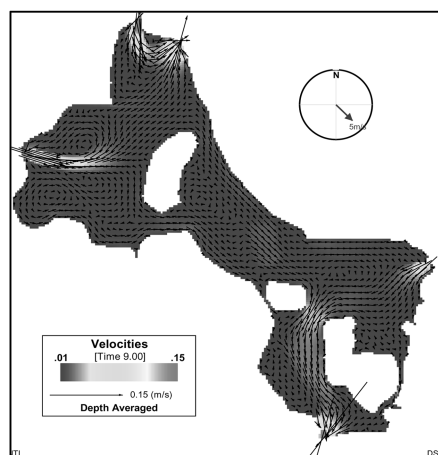
北部形成的环流与外部的水体产生水流联系。

(2)在风速加大后,如方案3和方案4所示,三白荡的流场强弱明显。在三白荡的入湖、出湖河道的河口处,流速均较大。由于湖泊内湖水流联系得到整体改善,在风速较大的情况下,对岸线容易形成冲刷,规划在生态护岸布设过程中,需要对这些岸线进行加固和保护。

(3)由方案3、4、6可以看出,湖泊在较大的风速影响下,湖内的整体水体水流联系较强。但是在岸线较为曲折的地区,分布着一些缓流区,这些缓流区在风速较小的情况下易形成死水区,规划中可通过生态工程的布设来改善本区内的水生态环境,加强对湖体重污染物的稀释和降解。

7 结 语

湖泊形态的设计必须从整体出发,通过全面的分析比较,最终选取最好的规划设计方案。一方面,三白荡在经过水流数值模拟后,可清晰的看到湖泊中的死水区,为研究三白荡及太湖流域中类似浅水湖泊的水动力过程及增强湖泊环境容量提供较强的理论支撑。另一方面,模拟结果显示,风生流对三白荡的流场起主导作用,根据流场图显示的岸线受侵蚀严重区域的分布情况,可通过加强生态护岸等措施加强对湖泊岸线的保护。此外,水流数值模拟不仅能够较好地模拟湖内水流联系、污染物迁移转化情况,而且还可以较好地模拟湖泊的出入湖水量分配情况,对于开展湖泊水资源保护工作具有较强的指导意义。但是实际的应用过程中,往往由于缺少入湖的径流资料、水位变动资料,水流模拟的仿真性值得进一步研究,所以在实际岸线湖盆形态规划设计中,需要水文、气象、城市规划等多部门间的合作。



(b)方案2 西北风 3.9m/s 现状出入湖流稳定流场

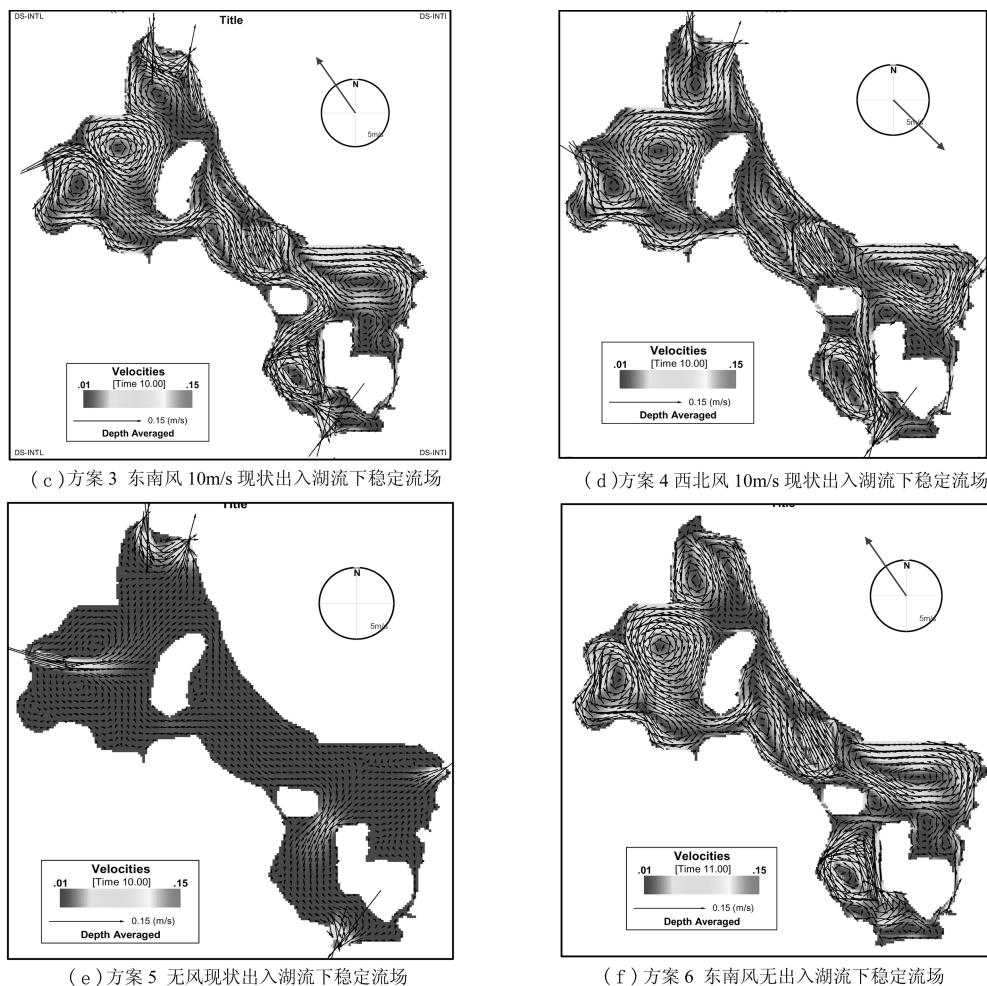


图 4 三白荡规划形态条件下 6 种方案的流场模拟

参考文献:

- [1] 戈礼宾. 浅谈宜兴市市管湖泊的保护与开发利用 [C]. 北京:中国水利学会, 2007.
- [2] 崔广柏, 刘凌, 姚琪, 等. 太湖流域富营养化控制机理研究 [M]. 北京:中国水利水电出版社, 2009.
- [3] 王翠, 孙英兰, 张学庆. 基于 EFDC 模型的胶州湾三维潮流数值模拟 [J]. 中国海洋大学学报, 2008, 38 (5):833-840.
- [4] HAMRICK J M. Application of the EFDC, environmental fluid dynamics computer code to SFWMD water conservation area 2A [R]. Williamsburg, Virginia: [s. n], 1994:126.
- [5] GALPERIN B, KANTHA L H, HASSID S, et al. A quasiequilibrium turbulent energy model for geophysical flows [J]. Atmospheric Sciences, 1988, 45(1):55-62.
- [6] JIN K R, HAMRICK J H, TODD T. Application of three dimensional hydrodynamic model for Lake Okeechobee [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000(126):758-771.
- [7] 孙英兰, 孙长青, 王学昌, 等. 青岛海湾大桥对胶州湾潮汐, 潮流及余环流的影响预测 [J]. 青岛海洋大学学报(自然科学版), 1994(S1):105-119.
- [8] 张萍峰, 景韶光, 黄凤岗. 滇池二维浅水湖泊风生流模型研究及结果显示 [J]. 系统仿真学报, 2002, 14 (5):554-555.