

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2021.02.019

太湖风生流及污染物输移扩散数值模拟

舒叶华^{1,2}, 高晨晨^{1,2}

(1. 上海市水利工程设计研究院有限公司, 上海 200061; 2. 上海滩涂海岸工程技术研究中心, 上海 200061)

摘要:建立高精度的太湖三维风生流数值模型和风生流-污染物耦合数值模型,分析了盛行风作用下的太湖风生流特征和风生流驱动下的太湖污染物输移特征。结果表明:稳定后的太湖风生流场,表层流速大于底层流速,表层流向基本上同风向一致,底层流向则与表层大致相反,具有补偿流的特征;风向能显著影响太湖风生流的形态和结构;在垂向扩散作用下,太湖污染物质量浓度沿水深方向上近似均匀分布;在定常风作用下,太湖北部的湖湾区出现多个小尺度闭合环流,不利于污染物的输移扩散,对太湖水环境会产生不利影响。

关键词:风生流;污染物;示踪剂;输移特征;盛行风;太湖

中图分类号:TV213.3;TV131.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2021)02-0121-07

Numerical simulation of wind-driven current and pollutant transport and diffusion in Taihu Lake//SHU Yehua^{1,2}, GAO Chenchen^{1,2} (1. Shanghai Water Engineering Design and Research Institute Co. Ltd., Shanghai 200061, China; 2. Shanghai Engineering Research Center of Coastal Zones, Shanghai 200061, China)

Abstract: A high-precision 3D numerical model of wind-driven current in Taihu Lake and a coupled numerical model of wind-driven current and pollutant were built. The characteristics of wind-driven current in Taihu Lake were analyzed under prevailing wind condition. Moreover, the characteristics of pollutant transport and diffusion driven by wind-driven current were studied. According to the results, when the wind driven current in Taihu Lake is stable, the surface velocity is significantly higher than the bottom velocity and the surface flow is almost the same as the wind direction while the bottom flow is roughly opposite to the wind direction, which shows the characteristic of compensation current. Wind direction can significantly affect the morphology and structure of the wind-driven current in Taihu Lake. The mass concentration of pollutant in Taihu Lake is approximately evenly distributed along the depth of water under vertical diffusion effect. Under constant wind, several small-scale closed circulations can be found in the bay area of northern Taihu Lake, which is not conducive to the transport and diffusion of pollutants and also has negative effects on the water environment of Taihu Lake.

Key words: wind-driven current; pollutant; tracer; transport characteristics; prevailing wind; Taihu Lake

湖流从成因上可分为重力流、密度流和风生流。平原地区的浅水湖泊,重力流和密度流微乎其微,风生流是湖流的主要形式^[1-3]。风生流是由湖面风场对湖泊表层水体的剪切、拖曳作用形成的流动,能显著影响浅水湖泊底泥再悬浮与污染物输移扩散,进而对湖泊水质产生重要影响^[4-8],因此研究浅水湖泊风生流及其驱动下的污染物输移扩散规律具有重要的科学意义。

太湖是我国五大淡水湖之一,水域面积宽广,但平均水深不到 2 m,是典型的大型浅水湖泊。迄今

为止,已有很多学者借助野外观测或数值模拟等手段对太湖风生流开展了研究,取得了不少有价值的成果。梁瑞驹等^[2]发现太湖风生流沿垂向和水平向均有较大变化,流向沿垂向和水平向也并不一致。逢勇等^[9]研究了湖底地形和不规则湖区边界对风生流场的影响。胡维平等^[10]基于三维数值模拟揭示了太湖风生流存在垂直切变,表层流向与风切应力方向偏角不大,底层湖流为补偿流。周杰源等^[3]提出太湖夏季环流产生的主要动力因子为风,风的大小直接影响平面环流流速的大小,风向结合地形

基金项目:上海市科学技术委员会科研项目(19DZ1201500)

作者简介:舒叶华(1974—),男,高级工程师,主要从事水利及海岸工程设计工作。E-mail: 825868559@qq.com

通信作者:高晨晨(1991—),男,工程师,硕士,主要从事水利及海岸工程设计工作。E-mail: ccgao1991@163.com

基本决定了环流的形态。王建威等^[11]基于原位观测数据,分析了太湖流场垂向分布特征,发现表层水体的流向与风向基本一致,其余各层流场与风场的对应关系并不明显,甚至出现完全反向的情况。Li等^[12]利用现场观测的风速和湖流资料,研究了风场对太湖不同水深处流场的影响。Luo等^[13]建立了太湖三维数值模型,发现在盛行风作用下湖区存在2个顺时针环流和2个逆时针环流。Liu等^[14]基于二维水流-污染物耦合数值模型,研究了风场驱动下的太湖环流及污染物迁移过程。Liu等^[15]认为风向和风速决定了太湖平面环流的方向、强度和位置,并采用示踪剂方法研究了定常风作用下不同位置的点源污染物泄露对太湖水质的影响。

以往对于太湖风生流及污染物输移扩散的数值模拟还存在一些不足,如模型区域采用矩形网格进行离散,无法很好地贴合太湖复杂的岸边界(边界呈现出锯齿状);网格精度较低,很多甚至是千米量级等,这些不足必然会影响到水流结构的计算精度。本文通过建立高精度的三维数值模型对太湖风生流及污染物输移扩散进行精细化的数值模拟,以期对太湖水污染治理和水资源调度提供参考。

1 研究区域概况

太湖位于长江三角洲南缘(北纬 30°55′40″~31°32′58″、东经 119°52′32″~120°36′10″),湖泊面积 2427.8 km²,实际水面面积 2338.1 km²,湖岸线总长 405 km。西侧与南侧湖岸线平顺、呈圆弧状,东侧与北侧湖岸线曲折、湾岬相间。太湖是典型的浅水湖泊,平均水深仅 1.89 m,最大水深不超过 3 m。湖底地形较为平坦,湖中无深槽,也无大片的湖滩,1 m 等深线靠近湖岸。环太湖现有出入湖河道 200 余条,其中入湖河道主要分布在湖区西部和西南部,出湖河道主要位于湖区东部。

本文结合河道流量特征、位置分布等信息,将环太湖口门概化为望亭、铜坑闸、胥口、瓜泾口、太浦闸、长兜港、长兴港、大港河、城东港、浯溪桥、百渎口、雅浦港、直湖港、梁溪河等 14 个,编号 1~14,具体布置见图 1。

根据太湖小雷山气象站(图 1)2007 年 12 月至 2008 年 11 月的逐时风资料,太湖湖面各月平均风速主要集中在 4~6 m/s,年平均风速约为 5 m/s。由图 2 可知,太湖地区盛行东南风(SE)和西北风(NW),频率分别为 12.5% 和 12.3%,其次为西北偏北风(NNW),频率为 11.7%。西南风(SW)、西南偏西风(W SW)和西风(W)发生的频率很低,均不超过 3%。

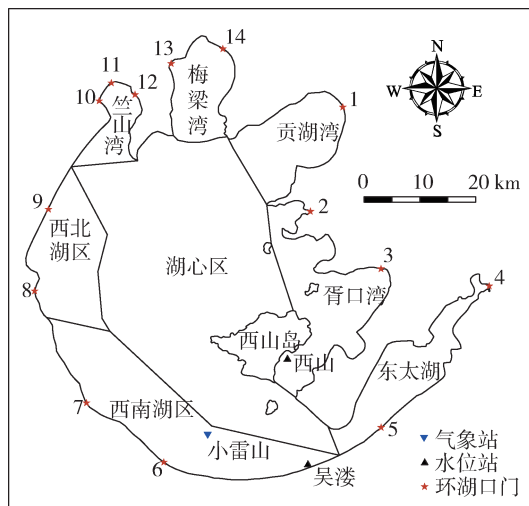


图 1 太湖分区及环湖主要口门分布

Fig. 1 The subzones of Taihu Lake and the main entrances around the lake

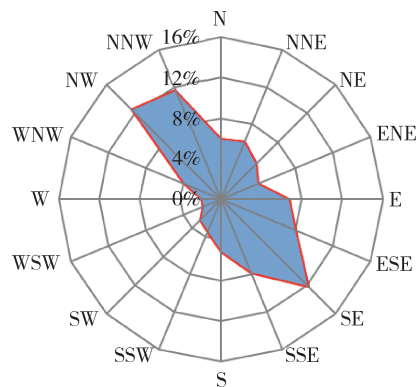


图 2 太湖湖面风向玫瑰图

Fig. 2 The wind-rose diagram of Taihu Lake

2 模型建立与验证

2.1 控制方程

模型采用三维不可压缩雷诺平均 Navier-Stokes 方程作为控制方程,服从 Boussinesq 假定和静水压力假定。采用交替方向隐式迭代法(ADI 算法)对控制方程进行差分离散求解。其连续性方程和两个水平向动量方程为

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = S \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_x}{\partial t} + \frac{\partial v_x^2}{\partial x} + \frac{\partial v_x v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_x v_z}{\partial z} = f v_y - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \\ \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial x} dz - \frac{1}{\rho_0 h} \left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) + \\ F_x + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_t \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) + v_{xs} S \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_y}{\partial t} + \frac{\partial v_y^2}{\partial y} + \frac{\partial v_x v_y}{\partial x} + \frac{\partial v_y v_z}{\partial z} = -f v_x - g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \\ \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial y} dz - \frac{1}{\rho_0 h} \left(\frac{\partial s_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial y} \right) + \end{aligned}$$

$$F_y + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_t \frac{\partial v}{\partial z} \right) + v_{ys} S \quad (3)$$

式中: v_x, v_y, v_z 分别为 x, y, z 方向的速度分量, m/s; v_{xs}, v_{ys} 分别为 x, y 方向的点源速度分量, m/s; η 为自由水面高程, m; h 为全水深, m; t 为时间, s; f 为柯氏力参数, s^{-1} ; g 为重力加速度, m/s^2 ; ρ 为水体密度, kg/m^3 ; ρ_0 为水体参考密度, kg/m^3 ; $s_{xx}, s_{xy}, s_{yx}, s_{yy}$ 为辐射应力张量分量, $kg/(m \cdot s^2)$; ν_t 为垂向紊动黏性系数, m^2/s ; p_a 为自由表面大气压, Pa; F_x, F_y 分别为 x, y 方向的水平应力; S 为源汇项。

2.2 模型区域和网格划分

模型计算范围为整个太湖湖区, 具体计算区域与网格划分如图 3 所示。由于东侧与北侧湖岸线较为曲折, 为使网格更好地贴合岸线, 采用三角形的非结构化网格对模型区域进行水平离散, 其中西侧与南侧岸线平顺处网格相对较大, 最大网格边长 1200 m; 对岬角及岛屿附近区域进行了网格加密处理, 最小网格边长约 60 m。平面上共划分了 23 827 个网格单元, 节点总数为 12 448 个。考虑到太湖为浅水湖泊, 为使模型垂向上也具有较高分辨率, 采用 Sigma 分层法将模型垂向均匀划分为 5 层, 即每一层的垂向网格边长都是该位置处总水深的 1/5。Sigma 分层法最大的优点是垂向分层数不受水深影响, 能够保证在浅水区也具有较高分辨率, 此外湖底和等 Sigma 面重合, 可以真实地反映湖底地形。

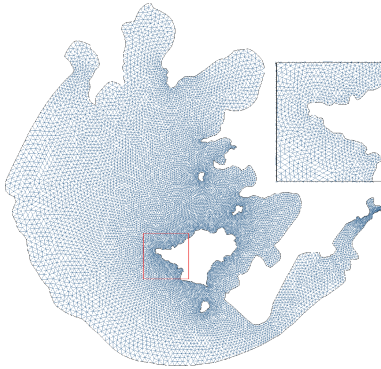


图 3 计算区域与网格

Fig. 3 The computation area and grid

2.3 模型参数设置

模型综合考虑重力、风力、底床摩擦力和柯氏力的作用, 其中表面风力 τ_s 、底床摩擦力 τ_b 和柯氏力 f 的计算公式分别为

$$\tau_s = \rho_a c_d |u_w| u_w \quad (4)$$

$$\tau_b = \rho |u_b| |u_b| / \left[\frac{1}{\kappa} \ln \left(30 \frac{\Delta z_b}{k_s} \right) \right]^2 \quad (5)$$

$$f = 2\omega \sin \varphi \quad (6)$$

式中: ρ_a 为空气密度, kg/m^3 ; c_d 为风拖曳系数, 根据计算率定; u_w 为湖面上方 10 m 高度处的风速, m/s; κ 为卡门常数, 取 0.4; k_s 为粗糙高度, 取 $0.01 m^{[10]}$; u_b 为湖床上方 Δz_b 处的水流流速; Δz_b 为施加边界条件的位置距湖床面的高度, m; ω 为地球自转角速度, 取 $7.29 \times 10^{-5} rad/s$; φ 为纬度值, 这里取太湖中心所在的北纬 31.2° 。模型垂向紊流采用标准 $k-\epsilon$ 模型计算, 水平向涡黏系数采用 Smagorinsky 亚网格模型计算, Smagorinsky 常数取 0.28。模型计算采用冷启动, 时间步长设置为在 0.01 ~ 30 s 之间自行调节, 以满足柯朗数稳定性条件。

由于环太湖各口门的空间尺度相对于整个太湖来说很小, 因此模型计算时, 将太湖视为一个四周封闭的水体, 各主要出入湖河道的流量分别按点汇和点源处理。

2.4 模型验证

2.4.1 水位验证

采用太湖西山站和吴淞站的实测水位资料对模型进行验证, 实测资料的时间跨度为 1 个月。各水位站位置见图 1, 水位验证过程如图 4 所示。验证结果表明, 水位计算值与实测值基本吻合, 模型精度满足要求。

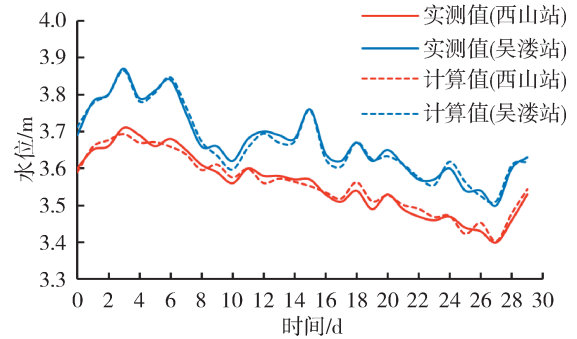


图 4 计算水位与实测水位的对比

Fig. 4 Comparison of the calculated and measured water levels

2.4.2 风生流验证

南京地理与湖泊研究所曾基于多年的现场观测资料, 总结了太湖在北风、西风、南风及东南风 4 种风场作用下形成的环流方向与平面形态。现以东南风作用下的风生流为模拟对象, 模型模拟时风速选择太湖地区的平均风速 5 m/s, 用上述建立的三维水流模型模拟太湖风生流流场, 并将模拟得到的垂向平均流场与南京地理与湖泊研究所的观测成果做对比, 结果如图 5 所示。可以看出, 模型模拟的垂向平均流场与南京地理与湖泊研究所实际观测的流场在流态上较为一致, 表明模型能够较好地模拟太湖的水流运动和流场结构。

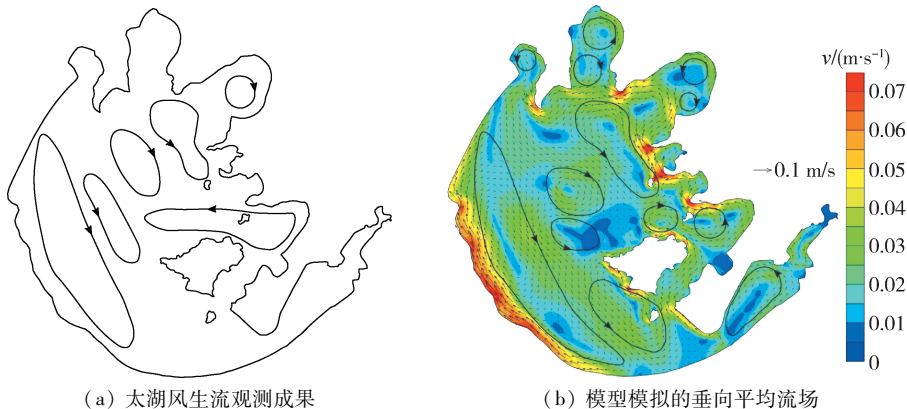


图5 东南风作用下的风生流验证

Fig. 5 Verification of wind-driven current under the southeast wind

3 结果与分析

3.1 盛行风作用下的太湖风生流特征

太湖流域夏季盛行东南风, 冬季盛行西北风^[16-17], 因此模型中选取东南和西北两个盛行风向的定常风进行数值试验, 风速值取太湖地区的平均风速 5 m/s。图 5(b) 和图 6 为 5 m/s 东南风作用下的风生流流场模拟结果。需要指出的是, 由于风向相反, 5 m/s 西北风作用下的垂向平均流场与各分层流场呈现跟东南风完全相反的水流形态和结构特征。

在 5 m/s 东南风作用下达达到稳定状态的垂向平均流场中(图 5(b)), 湖区西南部存在以大雷山为中心的大范围顺时针环流, 该环流途经大雷山东部向东南直至太湖南岸, 此后沿太湖西南侧岸线折向西北, 至兰右山后再转至大雷山北面形成闭合顺时针环流。太湖湖心区出现一正(顺时针)两反(逆时针)3 个环流, 其中顺时针环流以平台山为中心循环流动, 两个逆时针环流分别位于顺时针环流南侧和东北侧。此外, 在东太湖、胥口湾、贡湖湾以及梅梁湾、竺山湾等湖湾区域出现几个大小不等、方向不同的小尺度闭合环流。上述结果与王谦谦^[18]和胡维

平等^[19]的研究结果基本一致。

图 6 为 5 m/s 东南风作用下达达到稳定状态的分层流场。可以看出, 表层由于受到湖面风场的直接剪切和拖曳作用, 风生流流速较大, 大致在 0.005 ~ 0.100 m/s 之间, 其中西南沿岸以及岬角处流速较大, 湖心区流速相对较小, 风生流流向基本上与风向一致。底层除沿岸浅水区域以及湖湾内有局部环流存在外, 其余区域流向与表层大致相反, 表现为很明显的补偿流。受底部摩擦力影响, 底层流速较表层流速小, 在 0.005 ~ 0.060 m/s 之间。中层流态与底层基本类似, 但流速比底层略小。这是由于从湖面到湖底依次为风应力影响控制区、压强梯度力影响占优区以及底摩擦力影响控制区。表层水体处于风应力影响控制区, 受湖面风应力直接影响, 流速最大; 往下流速逐渐减小, 至风应力影响与压强梯度力影响相平衡时, 流速达到极小值; 再往下过渡到压强梯度力影响占优区, 流速逐渐增大, 至压强梯度力与底摩擦力影响平衡区出现流速的极大值; 底层水体处于底摩擦力影响控制区, 流速随水深的增加而逐渐减小^[19]。

对比图 5(b) 和图 6 可知, 垂向平均流场和分层流场存在显著差异, 因此在用平面二维模型研究浅

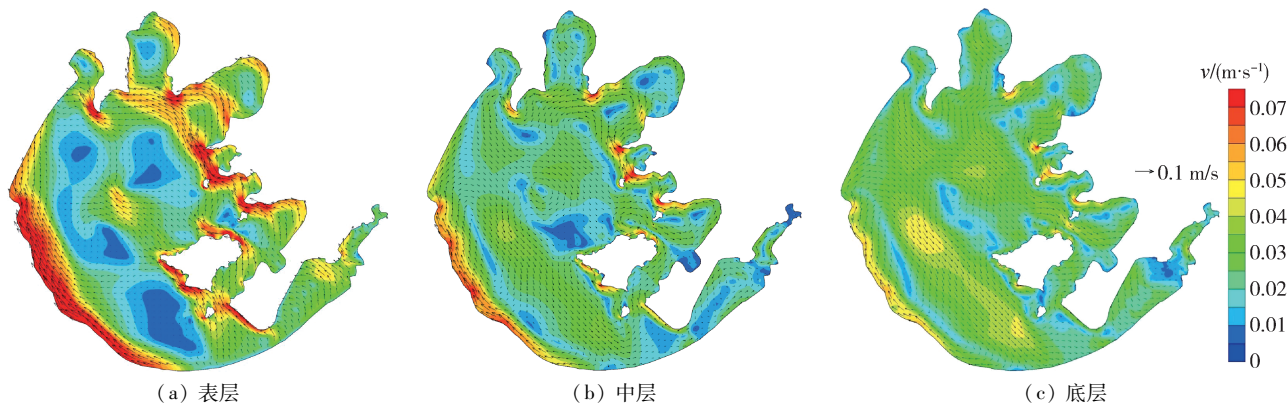


图6 5 m/s 东南风作用下的分层稳定流场

Fig. 6 Stratified and steady flow field under the southeast wind of 5 m/s

水湖泊风生流时,应充分认识到其在揭示流场垂直结构方面的不足。

3.2 太湖风生流驱动下的污染物输移扩散

污染物输移扩散规律研究是太湖水质水环境研究中的一项重要内容。考虑到太湖污染物输移扩散的复杂性,本文通过在一具有代表意义的入湖口释放保守示踪剂,模拟了太湖在 5 m/s 东南风作用下的污染物输移扩散情况,模拟总时长为 90 d。示踪剂释放点设置在“引江济太”工程^[20-22]的望虞河入湖口处(图 1 中的概化口门 1),引水流量设置为 100 m³/s,示踪剂释放速率为 5 kg/s,释放时间为模拟时间 90 d 中的前 30 d。

3.2.1 污染物质量浓度的垂向分布特性

虽然在定常风作用下,太湖流场呈现出明显的分层流动现象,但由于太湖为浅水湖泊,其垂向尺度远小于水平尺度,在垂向扩散作用下,污染物质量浓度沿水深方向近似均匀分布。图 7 为 5 m/s 东南风作用 30 d 后太湖表、中、底层的示踪剂质量浓度分布。可以看出,对于太湖这类浅水湖泊,由于垂向扩散比较强烈,污染物质量浓度并未呈现明显的分层现象,与杨益洪^[23]对西湖污染物浓度垂向分布特性的研究结果吻合。

3.2.2 污染物输移及平面分布特征

前述分析表明,风生流驱动下太湖污染物质量浓度在垂向上并未呈现明显的分层分布,因此以下在对太湖污染物输移及平面分布特征进行分析时示踪剂质量浓度场均取垂向平均的质量浓度场。

5 m/s 东南风作用下,示踪剂在不同时刻的质量浓度分布情况如图 8 所示。可以看出,10 d 时,自望虞河入湖的示踪剂在太湖东北部沿岸流作用下在贡湖湾北岸形成高浓度“污染带”。此后,由于受到梅梁湾内部两个小尺度环流的牵引影响,示踪剂一部分进入梅梁湾,另一部分则直接越过梅梁湾口进入

竺山湾。至 50 d 时,在以平台山为中心的顺时针环流带动下,示踪剂进入到湖心区,并最终在西南部顺时针大环流作用下对南太湖水质产生影响。从模拟开始后的第 30 天直至模拟结束,太湖北部湖湾区的“污染物”质量浓度始终较高,这是由于北部的湖湾区存在多个小尺度环流,给污染物的聚集提供了水动力条件。这也从一定程度上解释了夏季太湖蓝藻水华主要集中暴发在梅梁湾、竺山湾等北部湖湾区的原因。

4 结 论

a. 太湖风生流流态较为复杂,且流场存在明显的垂向分层。稳定后的风生流场表层流速较大,流向基本上同风向一致;底层流速较小,除沿岸浅水区域以及湖湾内有局部环流存在外,其余区域流向与表层大致相反,表现出补偿流的特征。

b. 西北风作用下的太湖风生流流场呈现跟东南风作用下完全相反的水流形态和结构特征。此外,风场驱动下的太湖垂向平均流场和分层流场存在显著差异,在用平面二维模型研究浅水湖泊风生流时,应充分认识到其在揭示流场垂直结构方面的不足。

c. 风场驱动下的太湖污染物输移规律体现出同其风生流特征的高度一致性。太湖为大型浅水湖泊,其垂向尺度远小于水平尺度,在垂向扩散作用下,污染物质量浓度沿水深方向近似呈均匀分布,并未呈现出垂向分层特征。

d. 太湖风生流流速较小,水动力条件较差,再加上在盛行风向的定常风作用下,湖区出现众多大小不一的环流结构,尤其是北部的湖湾区存在多个闭合环流,具备积聚污染物的水动力条件。这也是太湖蓝藻水华主要集中暴发在梅梁湾、竺山湾等北部湖湾区的一个重要原因。

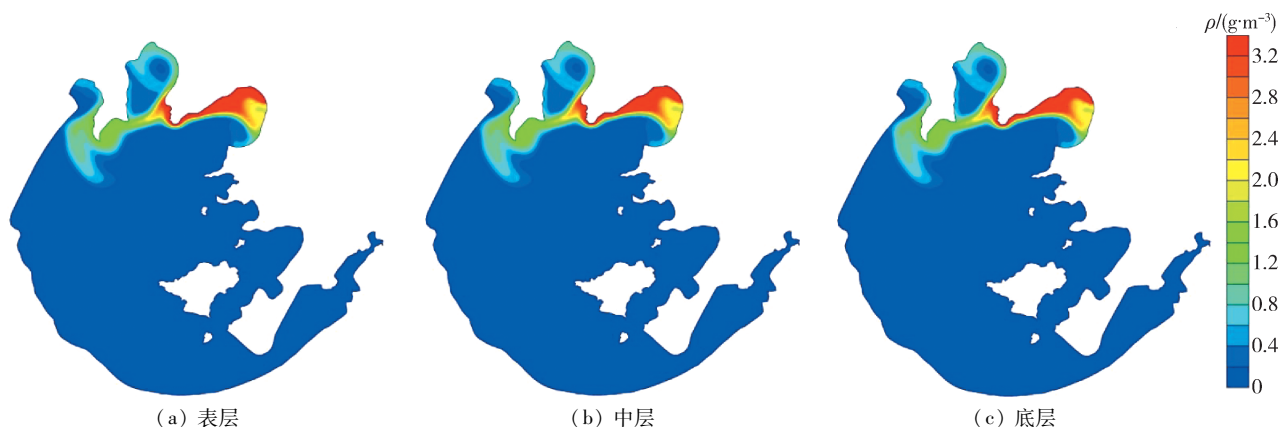


图 7 5 m/s 东南风作用 30 d 后示踪剂质量浓度垂向分布

Fig. 7 Vertical distribution of mass concentration of the tracer 30 days after the effect of southeast wind of 5 m/s

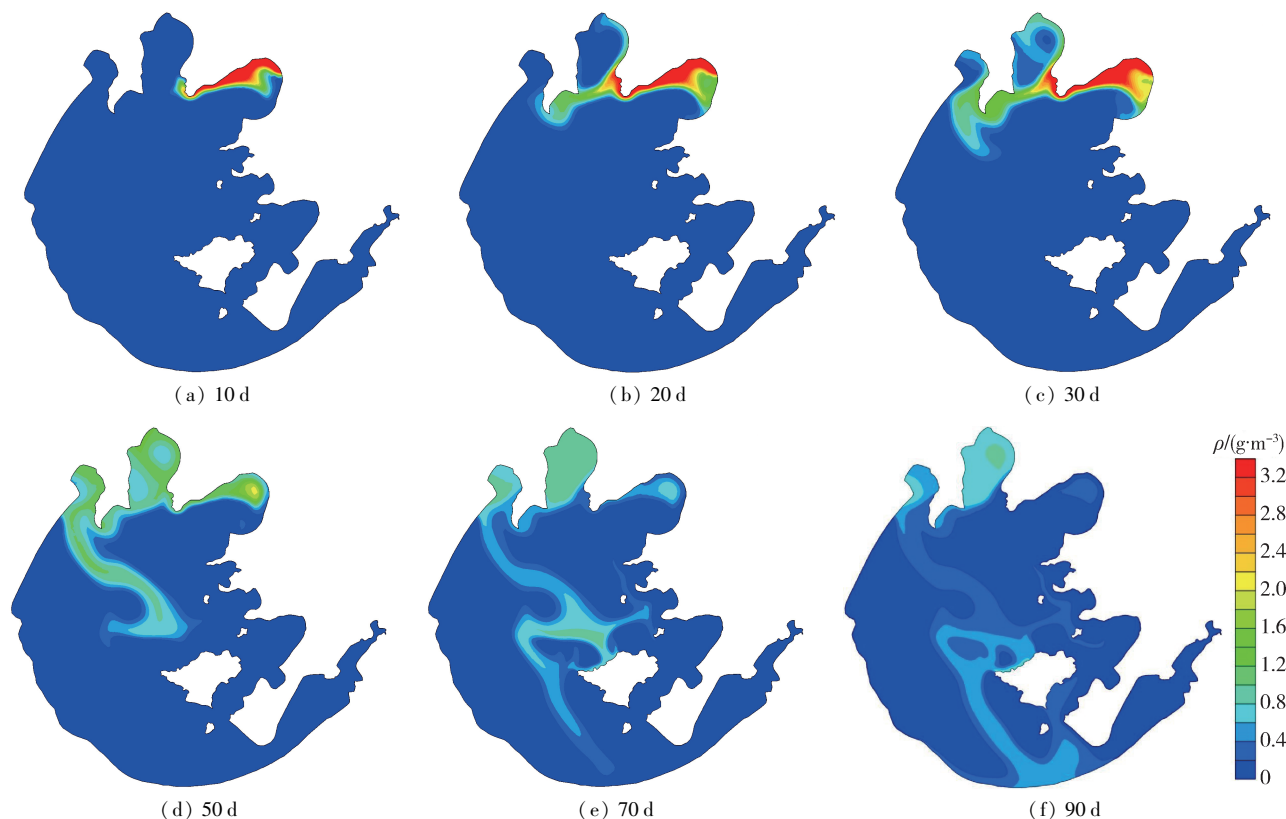


图8 5 m/s 东南风作用下的示踪剂质量浓度分布

Fig.8 Distribution of mass concentration of the tracer under the southeast wind of 5 m/s

参考文献:

- [1] 吴坚,大西行雄,熊谷道夫. 琵琶湖南湖、太湖的一个多层水动力学数值模式[J]. 海洋湖沼通报,1988(2):18-26. (WU Jian,YUKIO O,MICHIO K. A multi-level model of hydrodynamics of Taihu Lake and the Southern Basin of Lake Biwa [J]. Transactions of Oceanology and Limnology,1988(2):18-26. (in Chinese))
- [2] 梁瑞驹,仲金华. 太湖风生流的三维数值模拟[J]. 湖泊科学,1994,6(4):289-297. (LIANG Ruiju,ZHONG Jinhua. A three-dimensional numerical simulation of wind-driven water current in Taihu Lake[J]. Journal of Lake Sciences,1994,6(4):289-297. (in Chinese))
- [3] 周杰源,沈永明,王金华. 太湖夏季环流成因的数值研究[J]. 海洋与湖沼,2013,44(5):1130-1137. (ZHOU Jieyuan,SHEN Yongming,WANG Jinhua. Numerical simulation of summer circulation in Taihu Lake [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica,2013,44(5):1130-1137. (in Chinese))
- [4] 陈丽娜,韩龙喜. 扩散作用对静水湖泊水质浓度空间分布的影响[J]. 水资源保护,2008,24(1):20-22. (CHEN Lina,HAN Longxi. Influence of diffusion on spatial distribution of water quality concentration in stagnant lake [J]. Water Resources Protection,2008,24(1):20-22. (in Chinese))
- [5] 匡翠萍,邓凌,刘曙光,等. 应急调水对太湖北部污染物扩散的影响[J]. 同济大学学报(自然科学版),2011,39(3):395-400. (KUANG Cuiping,DENG Ling,LIU Shuguang,et al. Effect of emergent water diversion on diffusion of pollutant in northern Taihu Lake[J]. Journal of Tongji University(Natural Science),2011,39(3):395-400. (in Chinese))
- [6] 龚春生,姚琪,赵棣华,等. 浅水湖泊平面二维水流-水质-底泥污染模型研究[J]. 水科学进展,2006,7(4):496-501. (GONG Chunsheng,YAO Qi,ZHAO Dihua,et al. Plane 2D flow-water quality-sediment pollution couple model in shallow lake[J]. Advances in Water Science,2006,17(4):496-501. (in Chinese))
- [7] 华祖林,王苑. 水动力作用下河湖沉积物污染物释放研究进展[J]. 河海大学学报(自然科学版),2018,46(2):95-105. (HUA Zulin,WANG Yuan. Advance on the release of pollutants in river and lake sediments under hydrodynamic conditions[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2018,46(2):95-105. (in Chinese))
- [8] 汤露露,王鹏,姚琪. 太湖湖流、波浪、沉积物的三维数值模拟[J]. 水资源保护,2011,27(2):1-5. (TANG Lulu,WANG Peng,YAO Qi. Three-dimensional numerical simulation of current, waves and sediment transport in Taihu Lake [J]. Water Resources Protection,2011,27(2):1-5. (in Chinese))
- [9] 逢勇,濮培民. 太湖风生流三维数值模拟试验[J]. 地理学报,1996,63(4):322-328. (PANG Yong,PU Peimin. Numerical simulation of three-dimensional wind-driven current in Taihu Lake [J]. Acta Geographica Sinica,1996,63(4):322-328. (in Chinese))
- [10] 胡维平,濮培民,秦伯强. 太湖水动力学三维数值试验研究:1. 风生流和风涌增减水的三维数值模拟[J]. 湖泊科学,1998,10(4):17-25. (HU Weiping,PU Peimin,QIN Boqiang. A three-dimensional numerical simulation on the dynamics in Taihu Lake,China(I): the water level

- and the current during the 9711 typhoon process [J]. Journal of Lake Sciences, 1998, 10(4): 17-25. (in Chinese))
- [11] 王建威, 李一平, 罗澈葱, 等. 太湖风生流垂向切变规律的原位观测[J]. 水资源保护, 2016, 32(6): 98-103. (WANG Jianwei, LI Yiping, LUO Liancong, et al. Field observation of vertical shear of wind-driven current in Taihu Lake [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(6): 98-103. (in Chinese))
- [12] LI Y, JALIL A, DU W, et al. Wind induced reverse flow and vertical profile characteristics in a semi-enclosed bay of large shallow Lake Taihu, China [J]. Ecological Engineering, 2017, 102: 224-233.
- [13] LUO Liancong, QIN Boqiang. Three-dimensional numerical simulation of wind-induced circulation in Lake Taihu [J]. Journal of Hydrodynamics; Ser. B, 2004, 16(3): 341-349.
- [14] LIU Xiaodong, LI Lingqi, WANG Peng, et al. Numerical simulation of wind-driven circulation and pollutant transport in Taihu Lake based on a quadtree grid [J]. Water Science and Engineering, 2019, 12(2): 108-114.
- [15] LIU Sien, YE Qinghua, WU Shiqiang, et al. Horizontal circulation patterns in a large shallow lake: Taihu Lake, China [J/OL]. Water, 2018, 10(6): 792 [2020-03-10]. <https://doi.org/10.3390/w10060792>.
- [16] 罗澈葱, 秦伯强, 朱广伟. 太湖底泥蓄积量和可悬浮量的计算[J]. 海洋与湖沼, 2004, 35(6): 491-496. (LUO Liancong, QIN Boqiang, ZHU Guangwei. Calculation of total and resuspendable sediment volume in Lake Taihu [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2004, 35(6): 491-496. (in Chinese))
- [17] 王震, 吴挺峰, 邹华, 等. 太湖不同湖区风浪的季节变化特征[J]. 湖泊科学, 2016, 28(1): 217-224. (WANG Zhen, WU Tingfeng, ZOU Hua, et al. Changes in seasonal characteristics of wind and wave in different regions of Lake Taihu [J]. Journal of Lake Sciences, 2016, 28(1): 217-224. (in Chinese))
- [18] 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. (WANG Qianqian. Numerical simulation of wind-driven flow in Taihu [J]. Journal of Hohai University, 1987, 15(Sup2): 11-18. (in Chinese))
- [19] 胡维平, 濮培民, 秦伯强. 太湖水动力学三维数值试验研究: 2. 典型风场风生流的数值计算[J]. 湖泊科学, 1998, 10(4): 26-34. (HU Weiping, PU Peimin, QIN Boqiang. A three-dimensional numerical simulation on the dynamics in Taihu Lake, China (II): the typical wind-driven current and its divergence [J]. Journal of Lake Sciences, 1998, 10(4): 26-34. (in Chinese))
- [20] 杨倩倩, 吴时强, 戴江玉, 等. 夏季短期调水对太湖贡湖湾湖区水质及藻类的影响[J]. 湖泊科学, 2018, 30(1): 34-43. (YANG Qianqian, WU Shiqiang, DAI Jiangyu, et al. Effects of short-term water diversion in summer on water quality and algae in Gonghu Bay, Lake Taihu [J]. Journal of Lake Sciences, 2018, 30(1): 34-43. (in Chinese))
- [21] 张又, 刘凌, 姚秀岚, 等. “引江济太”调水中望虞河水质变化的规律[J]. 水资源保护, 2013, 29(2): 53-57. (ZHANG You, LIU Ling, YAO Xiulan, et al. Variation of water quality of Wangyu River during water diversion from Yangtze River to Taihu Lake [J]. Water Resources Protection, 2013, 29(2): 53-57. (in Chinese))
- [22] 王栋, 梁忠民, 常文娟, 等. 基于模糊集对分析的引江济太调水效益综合评价[J]. 水资源保护, 2017, 33(1): 35-40. (WANG Dong, LIANG Zhongmin, CHANG Wenjuan, et al. Comprehensive evaluation of benefit of water diversion from Yangtze River to Taihu Lake based on fuzzy set pair analysis [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(1): 35-40. (in Chinese))
- [23] 杨益洪. 西湖混合流三维数值模拟研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.

(收稿日期: 2020-03-17 编辑: 熊水斌)

· 征订启事 ·

中国精品科技期刊

中国科学引文数据库(CSCD)来源期刊 中文核心期刊

中国科技核心期刊 RCCSE 中国权威学术期刊

《水资源保护》征订启事

ISSN 1004-6933, CN 32-1356/TV

《水资源保护》是水利部主管、河海大学和中国水利学会环境水利专业委员会共同主办的科技期刊。针对我国水资源短缺、水污染严重、水环境恶化等突出问题, 探讨水资源保护工作中的基础研究、宏观管理及水环境治理、水生态修复等问题, 主要栏目有“特约专家论坛”“水资源”“水环境”“水生态”等。

《水资源保护》1985年创刊。经过30多年的努力, 《水资源保护》办刊成绩斐然, 目前是中国科学引文数据库(CSCD)来源期刊、中文核心期刊、中国科技核心期刊、RCCSE中国权威学术期刊、中国精品科技期刊、中国高校百佳科技期刊, 被美国化学文摘(CA)、波兰哥白尼索引(IC)数据库等收录。

《水资源保护》长期以来一直都是水利界和环保界备受关注的重点期刊, 是国内较有影响的水利期刊之一, 主要读者对象是全国从事与水资源保护工作有关的科技人员、管理人员以及大专院校师生。

《水资源保护》现为双月刊, 30元/册, 全年共计180元, 每逢单月20日出版。欲订购者, 请向当地邮局订购, 邮发代号: 28-298。

地址: 210098 南京市西康路1号 电话: (025) 83786642

电子信箱: bh1985@vip. 163. com; bh@hhu. edu. cn