



环境力学专题·论文

巢湖污染物输运特征及其受风力影响的数值研究

陈苑盈, 刘青泉*

中国科学院力学研究所, 流固耦合系统力学重点实验室, 北京 100190

*联系人, E-mail: qqliu@imech.ac.cn

收稿日期: 2015-04-24; 接受日期: 2015-07-07; 网络出版日期: 2015-08-31

中国科学院“百人计划”D 类资助项目

摘要 本文应用 FVCOM (Finite Volume Coastal Ocean Model) 模型, 采用示踪剂方法, 对不同风力条件下巢湖污染物输运过程进行数值模拟, 采用从西湖区进入东湖区的水量和 10% 浓度线以上湖区面积占总水面积的百分比等作为指示因素, 分析了巢湖污染物分布和输运扩散的基本特征, 揭示了太湖污染物不均匀分布的动力学机制. 在此基础上, 进一步分析了风力作用对污染物输运和东、西湖水量交换的影响规律, 揭示了风速与持续时间对物质输运过程的重要作用. 通过数值拟合, 给出了风力特征值及其表达式, 得到了风向、风速与东、西半湖水量交换之间的定量关系, 发展了一种基于风速特征值对巢湖污染物输运状况进行快速评估的近似方法. 结果显示, 提取的月风速特征值与该月的水量交换和污染物输运扩散变化趋势基本一致.

关键词 巢湖, 污染物输运, 风, 风生流, FVCOM 模型

PACS: 92.40.Qk, 47.85.-g, 47.85.Dh, 47.27.tb

doi: 10.1360/SSPMA2015-00187

巢湖是我国五大淡水湖之一, 位于长江中下游的安徽省境内, 东西长 54.5 km, 南北宽 21 km, 水域面积约 780 km², 平均水深 2.7 m, 通常以忠庙-姥山-齐头嘴为界将巢湖划分为东、西半湖(图 1 所示)^[1]. 东部与裕溪河连接处建有巢湖闸, 设计泄水流量 1370 m³/s. 巢湖主要环湖河流有 11 条, 其中杭埠-丰乐河、派河、南淝河、店埠河和白石天河等水量占径流总量的 90% 以上^[1]. 近 20 年来, 随着巢湖区域经济的快速发展, 大量污染物排入巢湖, 致使巢湖水质严重污染. 而且, 巢湖闸的修建使得湖区与长江的水体交换由建闸前的 $13.6 \times 10^8 \text{ m}^3$ 减少为现在的 $1.72 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[2].

天然吞吐流受到限制, 水量交换周期加长, 频繁出现水华, 成为我国富营养化最严重的湖泊之一.

许多学者对巢湖的水质污染状况、富营养化特征开展了不同程度的研究. 其中大多数研究基于对入湖河流及湖泊水质的监测数据, 分析给出了巢湖的水质和污染物分布状况. 如屠清瑛等^[1]通过分析监测数据, 认为入湖河流是巢湖营养盐的主要来源, 总磷占总来源的 68.5%, 总氮占 76.9%, 并绘制了巢湖富营养化程度分布图(图 2). 近年来, 一些学者对巢湖的污染物来源、富营养化特征, 以及水华爆发等进行了研究. 认为巢湖的主要污染源是处于劣 V 类水质

引用格式: 陈苑盈, 刘青泉. 巢湖污染物输运特征及其受风力影响的数值研究. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2015, 45: 104704

Chen Y Y, Liu Q Q. Numerical study on the transport process of Chaohu Lake and its relation with wind (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2015, 45: 104704, doi: 10.1360/SSPMA2015-00187

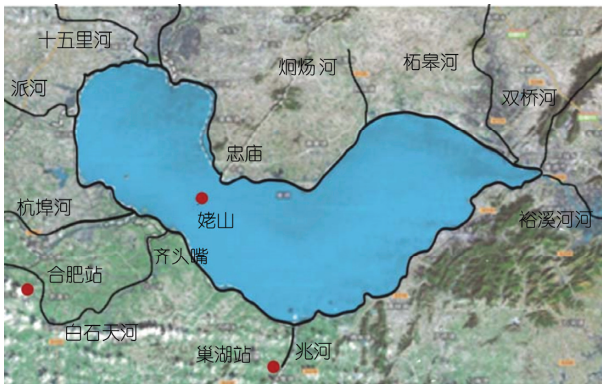


图 1 (网络版彩图)巢湖水系示意图

Figure 1 (Color online) Chaohu Lake and its tributaries.

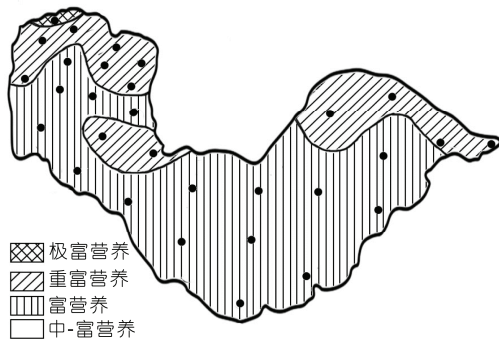


图 2 巢湖富营养化程度分布图

Figure 2 Distribution of eutrophication state in Chaohu Lake.

的五条河流: 十五里河、南淝河、店埠河、派河和双桥河^[3,4], 其中位于巢湖西湖区的南淝河、十五里河和派河是污染最严重的河流^[5]. 湖区营养盐分布呈现出显著的不均匀性, 东、西半湖差异很大, 东半湖水水质较好, 处于轻度富营养化, 而西半湖污染严重, 处于重度富营养化^[6,7]. 西半湖的水华现象比东半湖严重, 其中湖区西北角是水华爆发最严重的区域^[8-10]. 此外, 屠清瑛等^[1]运用二维物质输运数学模型, 对巢湖营养盐分布进行数值模拟, 得到总氮、总磷和叶绿素等在湖区分布的基本情况. 这些研究对巢湖水质和富营养化情况有了基本的认识, 但这些研究都比较粗略, 至今对巢湖污染物输运过程的细致研究还比较薄弱, 对污染物分布不均匀的形成机理和影响因素还不十分清楚, 有待于进一步深入细致的研究.

为此, 本文采用数值模拟方法, 对巢湖污染物输运过程进行细致的数值模拟, 探讨巢湖污染物输运的主要驱动因素和分布特征, 以及与风力作用的响

应关系, 以揭示巢湖污染物不均匀分布和富营养化的形成机理, 为合理控制和改善巢湖水质提供科学依据.

1 数值模型

本文采用 FVCOM(Finite Volume Coastal Ocean Model)模型对巢湖水动力和物质输运过程进行数值模拟. FVCOM 采用有限单元法和三角形网格, 能够保证物质的守恒和比较好地拟合不规则的边界, 它被成功应用于湖泊水动力和污染物输运研究^[11-13]. FVCOM 模型中的水流运动控制方程组为^[14]

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - fv \\ &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_m \frac{\partial u}{\partial z} \right) + F_u, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + fu \\ &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_m \frac{\partial v}{\partial z} \right) + F_v, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} = -\rho g, \quad (4)$$

式中, x, y, z 分别为指向东、北和垂向上的坐标; u, v, w 分别 x, y, z 方向的速度; P 是压强; ρ 是水密度; g 是重力加速度; f 柯氏力系数; K_m 是垂向涡黏系数.

模型计算中在垂向上采用 σ 坐标, 使得湖底地形能够平滑过渡, 其变换公式为

$$\sigma = \frac{z - \zeta}{h + \zeta} = \frac{z - \zeta}{H}, \quad (5)$$

式中, h 是平均水面深度, H 是总水深.

我们采用释放示踪剂的方法, 通过模拟示踪剂的扩散输运过程, 分析污染物的输运过程. σ 坐标下的对流扩散输运方程为^[14]

$$\begin{aligned} & \frac{\partial HC}{\partial t} + \frac{\partial HuC}{\partial x} + \frac{\partial HvC}{\partial y} + \frac{\partial \omega C}{\partial \sigma} \\ & - \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(K_h \frac{\partial C}{\partial \sigma} \right) - HF_c = HC_0(x, y, \sigma, t), \end{aligned} \quad (6)$$

式中, C 是污染物浓度, K_h 是扩散系数, F_c 是水平扩散项, C_0 为点源的浓度, 其定义为

$$C_0(x, y, \sigma, t) = \begin{cases} 1, & t_s \leq t \leq t_e; \sigma_k \leq \sigma \leq \sigma_{k+n}, \\ & x = \{x_i\}; y = \{y_i\}, \\ 0, & \end{cases} \quad (7)$$

其中 t_s 和 t_e 是示踪剂释放的开始和终结时间, σ_k 和 σ_{k+n} 是示踪剂释放的最上层和最下层的编号, x_i , y_i 是示踪剂的坐标位置.

我们曾应用 FVCOM 对巢湖的水动力过程进行了数值模拟研究, 模型的参数设置及流场模拟验证详见文献^[15]. 图 3 给出一个夏季盛行风(东南风)条件下巢湖流场的模拟结果. 可见, 东南风作用下, 全湖共形成 5 个环流, 分别在西湖区东北部 and 西南部, 忠庙-姥山一带, 兆河入湖口和柘皋河入湖口. 其中, 西湖区两个环流在西北部汇合形成一股较强水流流入东湖区. 这种复杂的水动力过程对湖区的污染物输运扩散过程具有重要的作用.

2 数值模拟结果

巢湖污染物主要来自于处于劣 V 类水质的十五里河、南淝河、店埠河、派河和双桥河等五条河流^[3,4]. 巢湖流场主要受风力驱动^[15], 其夏季主导风向为东南风, 冬季为东北风^[1]; 而且多数情况下, 巢湖闸关闭, 巢湖是以风生流为主的混合流场. 巢湖水华主要集中在夏季 6–11 月^[8], 因此, 夏季主导风向下水华污染物的分布, 尤其来自于西湖区的污染物输运过程, 对水华暴发具有重要的影响. 为此, 我们在西湖区北部四条重度污染河流入湖口处加入示踪剂, 模拟了巢湖闸关闭时, 污染物在东南风作用下的输运过程.

我们首先模拟了平均风速 2.7 m/s 的东南风条件下, 湖区污染物的扩散过程. 模拟中入口处示踪剂浓

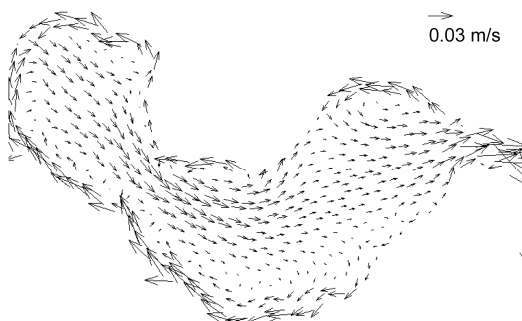


图 3 东南风作用下巢湖的典型流场

Figure 3 Typical flow field of Chaohu Lake under southeast wind.

度为 1, 湖区初始浓度为 0, 模拟计算时间为 2000 h (近 3 个月). 模型中的相关参数选取详见文献^[15]. 图 4 给出了湖区污染物垂向平均浓度随时间变化的模拟结果. 在 100 h 时, 污染物集中在入湖河口和西湖区西北角; 500 h 时污染物往更大范围输运扩散, 主要集中在西湖区西北部; 1000 h 时, 污染物从姥山以北进入东湖区; 1500 h 时, 污染物在西湖区西北部的浓度增加, 同时在东湖区忠庙姥山环流处形成聚集; 2000 h 时污染物分布已较为稳定, 主要在西湖区西北部和东湖区忠庙姥山一带形成较高浓度聚集. 模拟结果清楚地显示了集中在湖区西北角的入湖污染物, 在东南风引起的湖流作用下的输运扩散过程. 当污染物在湖区达到相对稳定分布时, 显示了明显的不均匀分布特征.

模拟结果与屠清瑛等^[1]根据实测资料绘制的巢湖营养类型分布图(图 2)符合一致. 综合实测数据和数值模拟结果, 可见, 巢湖的污染物分布呈现明显不均匀特征, 西湖区污染物聚集严重于东湖区, 西湖区最严重的聚集区域为西北部, 而东湖区严重聚集区域为忠庙-姥山一带.

显然, 这与巢湖的水动力过程密切相关(参见图 3 所示流场). 首先, 西湖区北部入湖口的污染物被西湖区沿岸水流输运并集聚在西北角, 而没有在十五里河、南淝河和派河等入湖区聚集. 随后环流合成的较强水流将污染物质从西北角经西湖区东岸, 从姥山以北带入东湖区. 靠近主流以北, 在忠庙一带存在一局部逆时针环流, 主流带来的污染物质进入环流系统, 由于环流系统的相对封闭性, 难以输运出去, 而在此处形成了较高浓度聚集. 西湖区的南部与兆河入湖区处均存在较大的顺时针环流, 同样形成相对封闭的系统; 但由于环流离主流流向较远, 污染物质难以进入, 因此西湖区与东湖区南部水体受到污染物质的影响很小. 可见, 正是由于巢湖的污染物主要来自于西北角入湖河流, 在复杂的湖流水动力作用下, 形成了特殊的输运过程和不均匀分布特征.

将计算模型在垂向上由上到下分为 5 层, 模拟计算了不同深度的污染物浓度分布. 图 5 显示了 2000 h 时垂向各层污染物浓度分布的模拟结果. 总体上看, 各层的污染物浓度分布基本一致, 说明对于巢湖这类浅水湖泊, 垂向尺度远小于水平尺度, 垂向扩散作用比较充分, 致使上下各层物质浓度相差较小. 仔细分析, 下层的浓度输运扩散范围比上层的略大. 这是

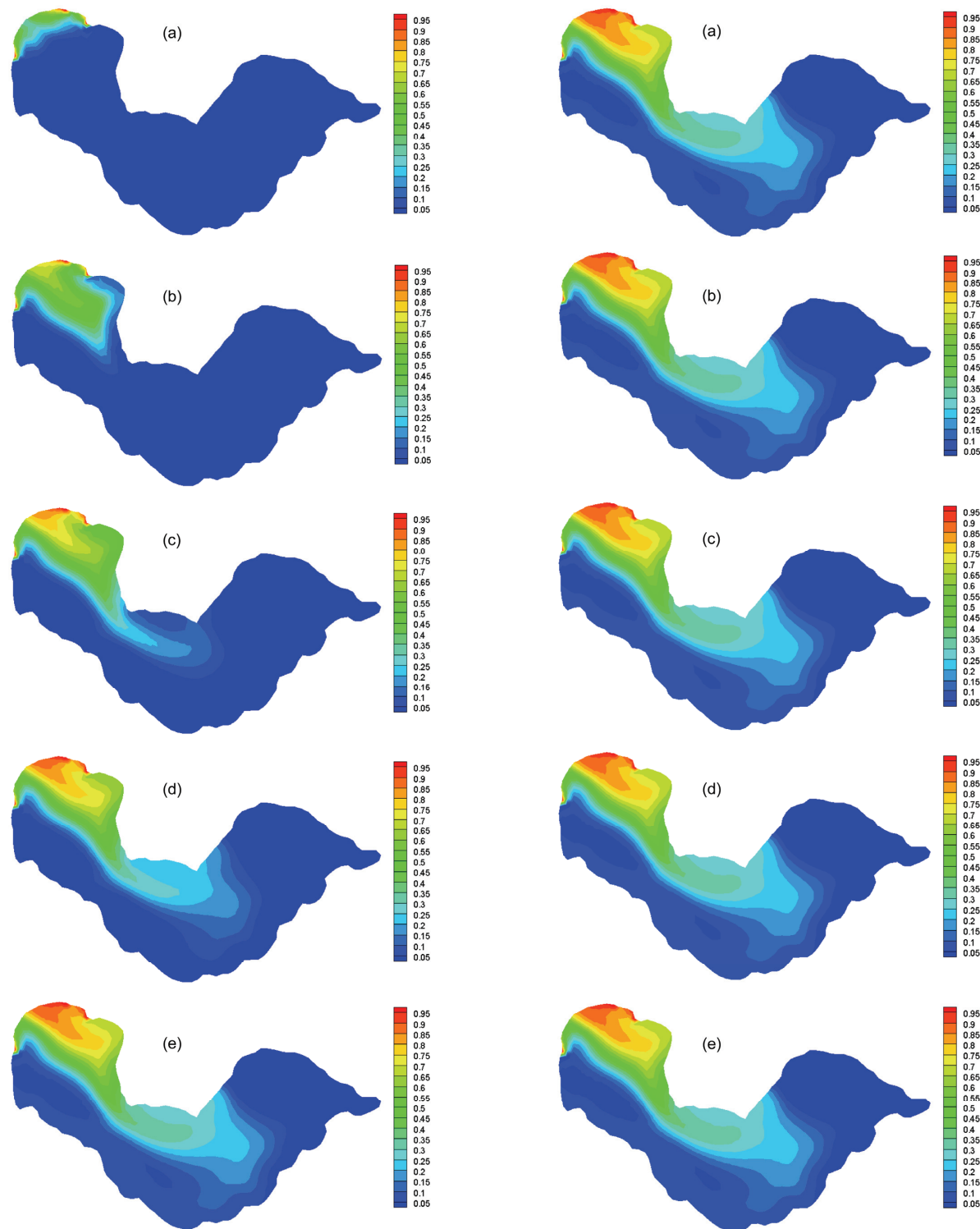


图 4 (网络版彩图)东南风作用下污染物垂线平均浓度分布变化. (a)–(e)分别为 $t=100, 500, 1000, 1500, 2000$ h 的结果

Figure 4 (Color online) Distribution of pollutant under southeast wind. (a)–(e) $t=100, 500, 1000, 1500, 2000$ h.

图 5 (网络版彩图)东南风持续作用 2000 h 不同深度污染物分布. (a)–(e)为垂向上由上到下 5 层不同深度的结果

Figure 5 (Color online) Distribution of pollutant in different depths under southeast wind (simulation for 2000 h).

由于在东南风作用下, 表层湖水顺风向流向东南, 不利于物质运输; 而下层补偿流流向西北, 有利于物质向东湖区的输送.

为了考察不同风向对污染物运输的影响, 仍采用在西湖区北部四条重度污染河流入湖口处加入示踪剂方法, 模拟同一风速, 不同风向下污染物在湖区的分布特征. 模拟中, 选用年平均风速 2.7 m/s , 入湖河口输入的污染物浓度为 1, 湖区初始浓度为 0.

图 6 给出了在 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ, 225^\circ, 270^\circ,$

315° 等 8 个不同风向作用下, 运输 2000 h 时污染物分布情况的模拟结果. 总体来说, 受地形和污染源的影响, 西湖区污染物聚集情况比东湖区严重, 但是, 不同风向下污染物运输的范围和浓度分布的差异很大. 在 $0^\circ, 135^\circ, 180^\circ$ 和 315° 这 4 个风向下, 污染物的运输扩散范围更大, 东湖区的西部湖水也受到影响. 在 $45^\circ, 90^\circ, 225^\circ$ 和 270° 这 4 个风向下污染物主要聚集在西湖区, 难以向东湖区运输. 可见, 风向对污染物的分布具有重要的影响, 风向不同, 污染物的运输过程和形

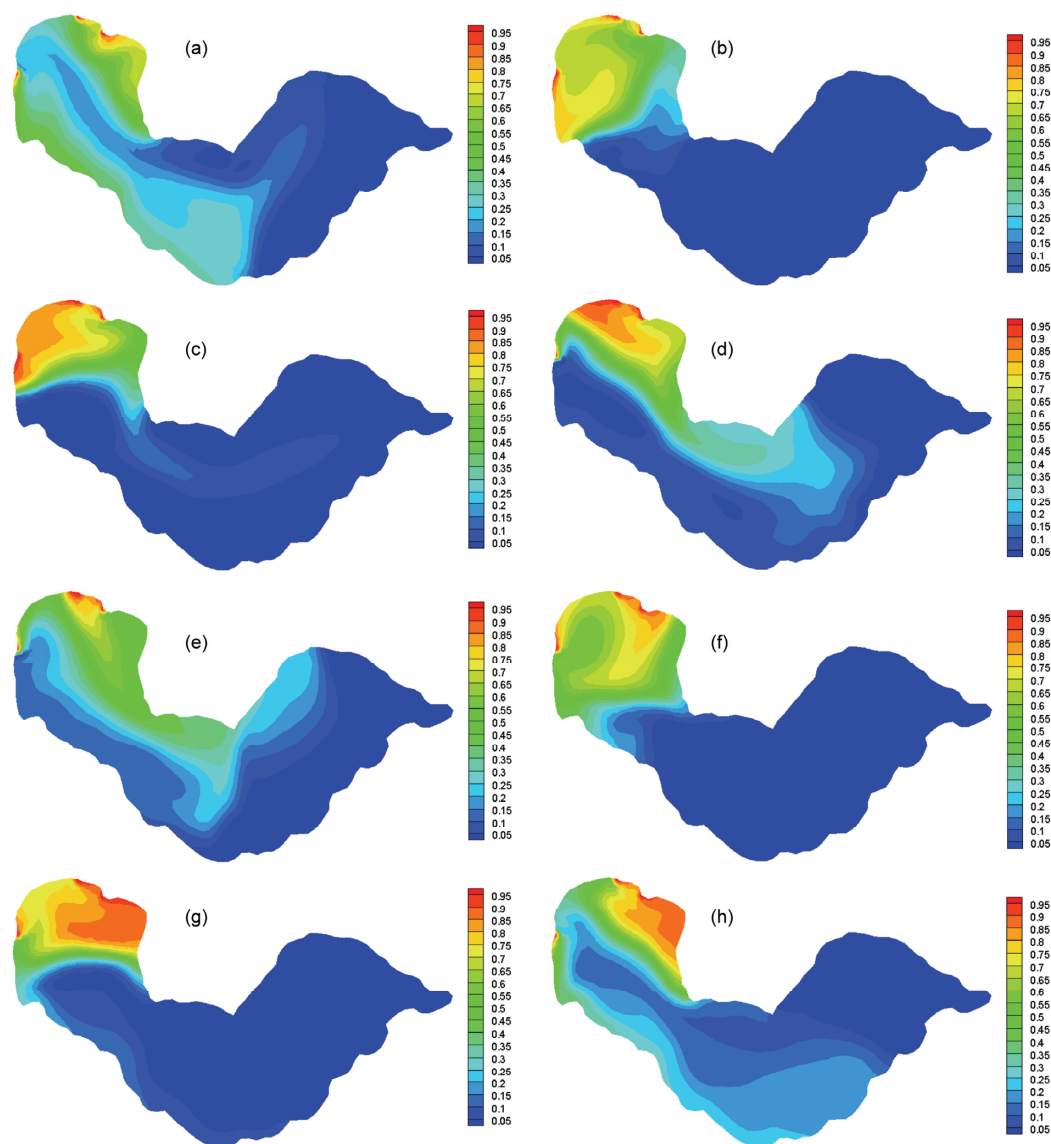


图 6 (网络版彩图)各风向下污染物浓度分布图. (a)–(h)分别为 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ, 225^\circ, 270^\circ, 315^\circ$, 8 个不同风向作用下的模拟结果

Figure 6 (Color online) Distribution of pollutant under different winds. (a)–(h) wind directions: $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ, 225^\circ, 270^\circ, 315^\circ$.

成的分布也不同.

3 分析与讨论

3.1 风向对东、西湖污染物交换的影响

模拟结果显示, 不同方向的风作用将导致不同的流动和污染物输运过程. 为了进一步分析风向对巢湖水量交换和物质输运的影响, 以姥山-忠庙-齐头嘴沿线为东、西湖交界线(图 1 示), 计算风速为 2.7 m/s, 不同风向条件下, 从西湖区流入东湖区的水量 Q , 同时, 通过计算污染物浓度处于 10% 浓度线以上湖区的水平面积占总水面积的百分比 λ , 以此来表达物质的输运扩散情况, 从而绘制出不同风向下物质输运扩散情况及东西湖水量交换情况, 如图 7 所示.

计算结果表明, 不同风向导致的东、西湖水量交换有很大的不同, 且水量交换情况受风向影响的规律非常明显. 东南和西北风向下水量交换量较大, 而东北和西南风向下水量交换量则很小. 物质输运情况与东西湖之间的水量交换情况类似. 西北-北风和东南-南风这两种风向有利于物质的输运扩散, 10% 浓度线以上湖区的水平面积达到 50% 以上. 而东北-东风和西南-西风风向则不利于物质的向外输运, 10% 浓度线以上湖区的水平面积在 30% 以下. 图 7 结果还显示, 污染物的输运扩散与东、西湖的水量交换有一定的相关性, 两者均在西北和东南风向下较为强烈, 在东北和西南风向下的表现较弱. 但是污染物输运扩散情况比水量交换情况更加复杂, 两者之间并不完全对应, 而是存在着一定的差异.

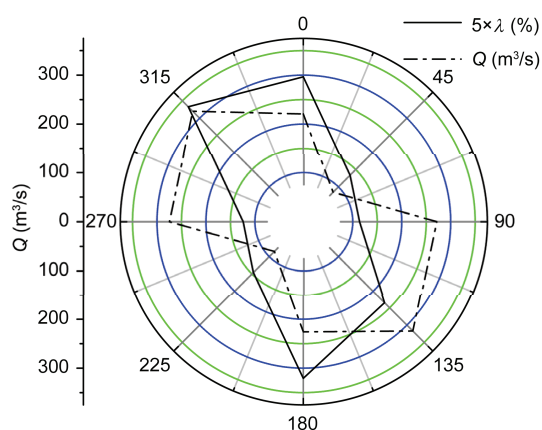


图 7 (网络版彩图)不同风向下物质输运扩散及东西湖水量交换情况对比

Figure 7 (Color online) Distribution of pollutant and water exchange among half lakes under different wind directions.

3.2 风速对污染物输运的影响

风速也是影响物质输运的一个重要因素. 优势风向主要反映特定区域地形对流动的影响; 而风速则直接影响水体流动的强弱, 进而影响物质的输送. 朱永春等人^[16]通过对太湖梅梁湾三维数值模拟实验证明, 当风向有利于污染物质扩散时, 大风速会促进物质向外输运扩散. 我们对巢湖不同风向下, 两个不同风速 4.1 m/s 和 2.7 m/s 条件下的物质输运进行模拟. 通过统计计算 2000 h 时, 污染物浓度处于 10% 浓度线以上湖区的水平面积占总水面积的百分比 λ , 得到结果如图 8 所示. 可见, 随着风速的增大, 污染输运过程随之增强, 特别是有利于物质输运的风向条件下, 风速的增大显著增强了污染物输运扩散过程.

风速的大小决定了污染物在风生流中的输运扩散速率, 然而, 污染物的输运扩散过程是一个随时间变化的过程, 因此, 污染物的输运扩散过程除了与风速大小有关外, 还与输运扩散时间有关. Kumar 等人^[17]曾针对有限长度一维平均流动情况, 从物质的对流扩散方程出发, 得到了浓度为 C_0 的点源污染物连续释放时浓度变化过程的解析解:

$$C(x, t) = C_0 \left\{ \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{x - u_a t}{2\sqrt{Dt}} \right) + \frac{1}{2} \exp \left(\frac{u_a x}{D} \right) \operatorname{erfc} \left(\frac{x + u_a t}{2\sqrt{Dt}} \right) + \frac{1}{2} \left[2 + \frac{u_a (2L - x)}{D} + \frac{u_a^2 T}{D} \right] \exp \left(\frac{u_a L}{D} \right) \times \operatorname{erfc} \left(\frac{(2L - x) + u_a t}{2\sqrt{Dt}} \right) - \left(\frac{u_a^2 T}{\pi D} \right)^{\frac{1}{2}} \times \exp \left[\frac{u_a L}{D} - \frac{(2L - x + u_a t)^2}{4Dt} \right] \right\}, \quad (8)$$

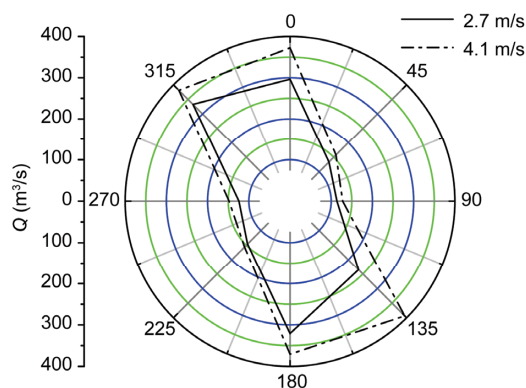


图 8 (网络版彩图)不同风速条件下的输运扩散情况对比

Figure 8 (Color online) Distribution of pollutant under different wind speeds.

式中, x 为流动方向, L 为 x 方向上的长度, 在 $x = L$ 处为固壁边界条件; C_0 为 $x = 0$ 处的点源浓度, H 是水深; C 是物质浓度; u_a 是 x 方向水流沿水深平均速度; D 为水平扩散系数.

考虑湖泊风生流情况, 水流速度 u_a 及水平扩散系数 D 与风速 W 直接相关. Verhagen^[18]曾针对风生流起主导作用的湖泊, 建立了分层三维风生流动模型, 详细讨论了上下层水流速度和水平扩散系数 D 与风速 W 的关系. 根据 Verhagen 分析, 我们可以近似认为水流的垂线平均流速与风速成正比关系, 即

$$u_a = \eta W \quad (\eta \text{ 为常数}), \quad (9)$$

而水流的水平扩散系数 $D \propto u_a l$ (l 为最大水平涡团的特征长度), 为此, 可假定

$$D = \gamma W \quad (\gamma \text{ 为常数}). \quad (10)$$

将流速 u_a 和水平扩散系数 D 代入式(8), 可得

$$\begin{aligned} C = C_0 & \left\{ \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{x - \eta W t}{2\sqrt{\gamma W t}} \right) + \frac{1}{2} \exp \left(\frac{\eta x}{\gamma} \right) \operatorname{erfc} \left(\frac{x + \eta W t}{2\sqrt{\gamma W t}} \right) \right. \\ & + \left[1 + \frac{\eta(2L - x) + \eta^2 W t}{2\gamma} \right] \exp \left(\frac{\eta L}{\gamma} \right) \\ & \times \operatorname{erfc} \left(\frac{(2L - x) + \eta W t}{2\sqrt{\gamma W t}} \right) - \left(\frac{\eta^2 W t}{\pi \gamma} \right)^{\frac{1}{2}} \\ & \left. \times \exp \left[\frac{\eta L}{\gamma} - \frac{(2L - x + \eta W t)^2}{4\gamma W t} \right] \right\}, \quad (11) \end{aligned}$$

即 $C = f(x, Wt)$.

从上式中可以看出, 风速大小与持续时间的乘积 Wt , 决定着物质的输运扩散过程. 也就是说, 风对污染物扩散的影响不仅与风速大小 W 相关, 还与风作用的持续时间直接相关.

上述结果是基于沿水深平均一维模型分析得到的, 在湖泊风生流场中是否也具有同样规律呢? 为此, 我们结合对巢湖流场和物质输运过程的数值模拟结果, 分析了污染物输运扩散与风速和持续作用时间的关系. 选择巢湖平均风速为 1.1, 2.7, 4.1 m/s 3 种风速, 分别对在东南风(夏季主导风)和东北风(冬季主导风)两种风向下的污染物输运扩散过程进行数值模拟. 采用 10% 浓度线以上的湖区面积百分比 λ 表达物质向外界输运扩散情况, 得到 λ 与风速大小和持续时间乘积 Wt 的关系, 如图 9 所示.

结果显示, 不论东南风还是东北风, 在 3 种风速

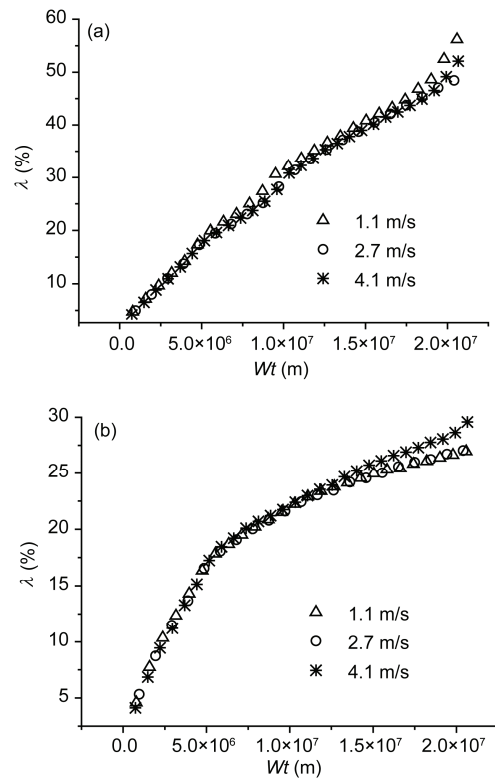


图 9 10% 浓度线以上的湖区面积百分比 λ 随风速大小与持续时间乘积 Wt 的变化图. (a) 东南风; (b) 东北风

Figure 9 Relationship of area with over 10% concentration (in percentage) and product of wind speed and duration time. (a) South-east wind; (b) northeast wind.

下, 10% 浓度线以上湖区面积比 λ 与风速和持续时间的乘积 Wt 都落在同一条线上. 说明在湖泊复杂风生流中, 物质的输运扩散同样取决于风速与持续时间的乘积. 即湖泊中物质的输运扩散不单纯与风速大小 W 相关, 而是由风速大小与持续时间的乘积 Wt 决定的. 它不仅表达了风速对污染物质输运扩散强度的影响, 而且考虑了物质扩散的时间过程.

在以往研究中, 风向与污染带之间关系主要在特定风速和特定作用时间条件下进行讨论^[19]. 也有学者基于对流扩散方程提出关联矩阵的概念来预测水质变化^[20], 但该方法也仅限于针对特定风速条件下的水量交换特征. 而从风速大小与持续时间乘积 Wt 的角度对物质输运扩散过程进行讨论, 则涵盖了各种风力下的一般物质交换规律, 能够更好地表征某个区域在特定风向条件或污染源下的物质输运扩散能力. 如图 9(a)和(b)分别表达了东南风和东北风作用下, 污染物输运的不同特点. 东南风作用下, 曲

线以大致不变的斜率一致上升; 而东北风作用下, 曲线开始以较大斜率增长, 到达 $Wt = 5.5 \times 10^7$ 左右以后, 增长速率变小, 增长趋于平缓. 正如前文中分析, 东南风有利于物质的输运扩散, 因此, 在模拟时间内, 污染物持续向东湖区扩散, 受影响面积不断增大. 而在东北风条件下, 由于西湖区西北部存在一较大环流^[15], 极大地阻碍了物质向外界的输送. 因此, 在模拟时间段内, 污染物的输运扩散接近该风向下扩散的最大能力, 之后增长趋于平缓. 清楚地揭示了不同情况下, 巢湖污染物输运扩散的能力和内在本质.

4 东西湖水交换及污染物输运近似评估

数值模拟结果表明, 风向和风速对巢湖东、西半湖的水量交换速率 Q 有重要的作用. 为了探求它们之间的关系, 我们根据数值模拟结果拟合了风向、风速与东、西湖单位时间交换水量的定量关系.

首先, 基于数值模拟结果, 对风向与水量交换速率之间的关系进行拟合, 结果如图 10 所示, 并得到拟合关系式如下所示, 相关系数为 0.96.

$$Q = |232.1 \times \sin(\theta - 45)| + 84.77. \quad (12)$$

其次, 对东南风向不同风速下流动进行模拟, 点绘风速与东西湖交换水量速率之间关系, 如图 11 所示. 可见水量交换速率与风速近似成线性正相关关系.

根据上述风向、风速与东西半湖水量交换率的关系, 提取风力作用的特征值 χ , 得到大小为 W , 方向为 θ 的风速特征值为

$$\chi = W \times |232.1 \times \sin(\theta - 45)| + 84.77. \quad (13)$$

根据上式对 2012 年姥山站整点实测风速进行统

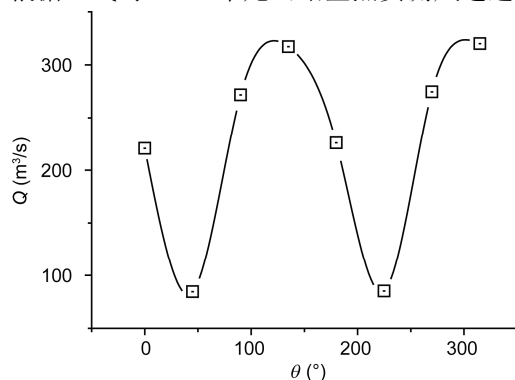


图 10 交换水量与风向之间的关系

Figure 10 Relationship of water exchange between half lakes and wind directions.

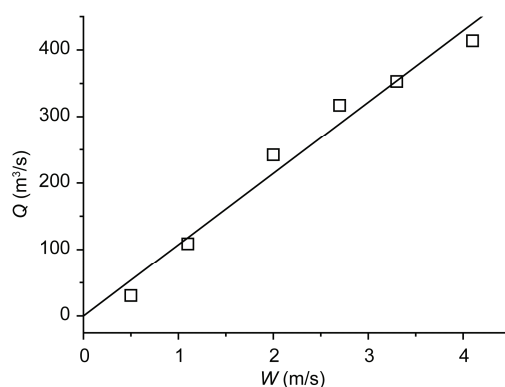


图 11 交换水量与风速之间的关系

Figure 11 Relationship of water exchange between half lakes and wind speeds.

计, 求和可得到各月的风速特征值; 并与数值模拟的各月交换水量和物质输运扩散情况进行对比. 但由于风特征值、东西湖交换水量, 以及污染物扩散面积百分比这 3 个参数的单位各不相同, 为了清楚表示并方便比较它们的变化趋势, 我们对统计结果进行归一化处理, 得到各变量的归一化参数 δ . 处理公式如下:

$$\delta = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}, \quad (14)$$

式中, X_i 为某变量中第 i 个数, X_{\max} 和 X_{\min} 分别为该变量的最大、最小值.

由此, 我们得到统计结果如图 12 所示. 提取的月风速特征值与该月的水量交换和污染物输运扩散变化趋势基本一致, 说明可以根据实测风速数据对

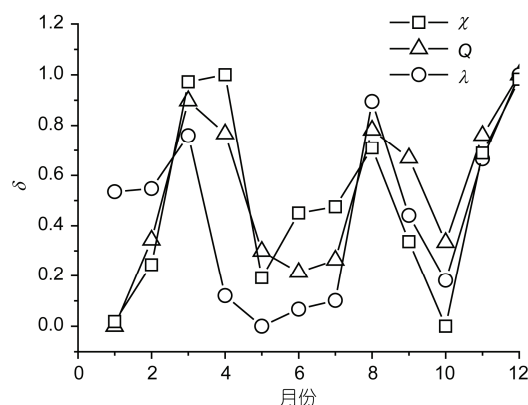


图 12 月风特征系数与当月水交换量和污染物输运扩散面积的关系

Figure 12 Relationship of monthly characteristic wind factor and monthly water exchange and pollutant transport.

巢湖当月的水交换和污染物输运扩散情况进行大致评估, 有助于快速掌握巢湖当月的水质状况.

5 结论

本文采用 FVCOM 模型, 对巢湖的污染物输运过程和分布特征进行了数值模拟研究, 并探讨了风力作用对污染物输运和东西湖水量交换的影响, 得到如下主要结论.

巢湖的主要污染源来自西湖区西北角的入湖河流, 污染物的输运扩散过程直接受湖泊复杂风生流动力学的的影响, 导致污染物浓度的水平分布呈现显著不均匀分布特征. 受西湖区复杂环流的影响, 西湖区污染明显严重于东湖区; 西湖区最严重的污染物聚集区域为西北部, 而东湖区污染物严重聚集区域为忠庙姥山一带.

巢湖湖流主要为风生流, 风向和风速对东西湖区的风生流场和水量交换及污染物输运具有显著影响.

西北和东南风向有利于物质输运, 而东北和西南风向则不利于物质输运. 风力对污染物扩散的影响不是单纯地与风速大小相关, 而是由风速大小与其持续时间决定的. 采用风速与持续时间乘积这一因子, 可更全面地揭示风生流引起的物质输运的本质过程和特定情况下物质扩散的能力.

基于数值模拟结果, 得到了巢湖风速和风向与东西半湖水量交换率之间的基本关系, 从实测风速数据中提取当月的风力作用特征值, 可对当月的水量交换和物质输运情况进行快速评估.

本文研究结果表明, 巢湖的风生环流直接决定着湖区的污染物输运过程, 如何根据巢湖的风生环流特征和不同的排放情况, 利用有利于污染物输运的风力条件, 并通过工程措施, 加强巢湖的水动力输运过程, 从而加速污染物输运交换过程, 从而制定巢湖水体环境治理策略, 减轻巢湖富营养化, 将是今后值得进一步深入研究的重要课题.

参考文献

- 屠清瑛. 巢湖: 富营养化研究. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1990
- Wang H K, Tang H B. Study of the effect of ecological diversions for Chao Lake to improve the rivers and lakes' exchange relations (in Chinese). *China Water Resour*, 2011, 23: 27–29 [王化可, 唐红兵. 巢湖生态引水对改善江湖交换关系的作用研究. *中国水利*, 2011, 23: 27–29]
- 合肥市环境保护局. 2012 年安徽省环境状况公报, 2012
- Chen Y Y, Liu Q Q. On the horizontal distribution of algal-bloom in Chaohu lake and its formation process. *Acta Mech Sin*, 2014, 30: 656–666
- 王书航. 巢湖水华时空分布特征及成因初步分析. 硕士学位论文. 合肥: 合肥工业大学, 2010.
- Wang C G, Cao Y, Wang H B. Analysis of eutrophication in the west part of Chaohu Lake (in Chinese). *J Anhui Agric Sci*, 2005, 33: 1475–1476 [王成贵, 曹勇, 汪海波. 巢湖西半湖水体富营养化污染状况及防治对策. *安徽农业科学*, 2005, 33: 1475–1476]
- Liu W. Eutrophication tendency and its prevention and control strategy in the east part of Chao Lake (in Chinese). *J Chaohu Coll*, 2008, 10: 100–103 [刘伟. 巢湖东半湖富营养状态变化趋势及防治对策. *巢湖学院学报*, 2008, 10: 100–103]
- 谢平. 翻阅巢湖的历史: 蓝藻, 富营养化及地质演化. 北京: 科学出版社, 2009
- 冯妍, 何彬方, 荀尚培, 等. 基于遥感监测的巢湖水华分布及暴发气象条件. 见: 第 27 届中国气象学会年会现代农业气象防灾减灾与粮食安全分会场论文集, 2010
- Zhang H, Huang Y. Character of algae bloom in Chaohu Lake base on NOAA/AVHRR (in Chinese). *China Environ Sci*, 2009, 29: 727–732 [张红, 黄勇. 基于 NOAA/AVHRR 卫星资料的巢湖水华规律分析. *中国环境科学*, 2009, 29: 727–732]
- Shore J A. Modelling the circulation and exchange of Kingston Basin and Lake Ontario with FVCOM. *Ocean Model*, 2009, 30: 106–114
- Bai X, Wang J, Schwab D J, et al. Modeling 1993–2008 climatology of seasonal general circulation and thermal structure in the Great Lakes using FVCOM. *Ocean Model*, 2013, 65: 40–63
- Pang Y, Zhuang W, Han T, et al. Experiment and model simulation of suspended solids in Taihu Lake under wind-wave disturbance. *Environ Sci*, 2008, 29: 2743–2748
- Chen C, Cowles G, Beardsley R. An Unstructured Grid, Finite-volume Coastal Ocean Model: FVCOM User Manual. SMASST/UMASSD, 2006
- 陈苑盈. 巢湖富营养化和水平分布不均匀特征及其形成机理研究. 硕士学位论文. 北京: 中国科学院大学, 2014

- 16 Zhu Y C, Cai Q M. Studies on a three-dimensional hydro-dynamic model for Meiliang Bay, Taihu Lake (I). Model description and result interpretation (in Chinese). *Ocean Limnol Sin*, 1998, 29: 79–85 [朱永春, 蔡启铭. 太湖梅梁湾三维水动力学研究: I. 模型的建立及结果分析. *海洋与湖沼*, 1998, 29: 79–85]
- 17 Kumar A, Jaiswal D K, Kumar N. Analytical solutions of one-dimensional advection-diffusion equation with variable coefficients in a finite domain. *J Earth Syst Sci*, 2009, 118: 539–549
- 18 Verhagen J H. Modeling phytoplankton patchiness under the influence of wind-driven currents in lakes. *Limnol Oceanogr*, 1994, 39: 1551–1565
- 19 洪晓瑜. 太湖水环境数学模型建立及排污总量控制研究. 硕士学位论文. 南京: 河海大学, 2005
- 20 孙健. 海湾、近岸海域水交换研究的关联矩阵方法及应用. 博士学位论文. 天津: 天津大学, 2007

Numerical study on the transport process of Chaohu Lake and its relation with wind

CHEN YuanYing & LIU QingQuan^{*}

*Laboratory for Mechanics in Fluid Solid Coupling System, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences,
Beijing 100190, China*

Transport process of Chaohu Lake is investigated numerically using FVCOM (Finite Volume Coastal Ocean Model) model and tracer tracking method. Simulations are done under different wind directions, and indicators as water exchange from western lake to eastern lake and the percentage of area with over 10% tracer concentration are used to express and analyze the basic characters of transport process, which reveal the dynamic mechanism of heterogeneity in the distribution of pollutant in the lake. Moreover, the role of wind in the process is further analyzed. The simulation results reveal that the transport process is determined by wind speed and its lasting time. The quantitatively relationships of wind direction, wind speed and water exchange volume of half lakes are also discussed, and the characteristic wind variable is put forward to express the relation. Based on the above analysis, a rapid evaluation method is used to indicate the pollutant distribution in the lake. Results show that the monthly characteristic wind value coordinate well with the monthly water exchange volume between half lakes and the lake area with higher pollutant concentration due to transport process.

Chaohu Lake, pollutant transport, wind, wind-driven current, FVCOM model

PACS: 92.40.Qk, 47.85.-g, 47.85.Dh, 47.27.tb

doi: 10.1360/SSPMA2015-00187