

象山港水交换能力研究

林忠洲¹, 严小军^{1*}, Lencart E Silva J D²

(1. 宁波大学 应用海洋生物技术教育部重点实验室, 浙江 宁波 315211;

2. 葡萄牙阿威罗大学 海洋环境研究中心, 葡萄牙 阿威罗 999022)

摘要: 为深入研究象山港水交换现状, 并为港区生态模型等后续研究提供数据, 运用 Delft3D 软件运行了一个已校准的水动力模型, 用模型输出的水位和流速数据分析象山港纳潮量和水流特征, 并用模型输出的盐度和示踪剂数据求得基于箱式模型的水更新时间及基于 Delft3D 示踪剂模型的水更新时间。结果表明: 港区平均纳潮量为 $1.32 \times 10^9 \text{ m}^3$, 大潮纳潮量为 $1.82 \times 10^9 \text{ m}^3$, 小潮纳潮量为 $0.82 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。箱式模型得出滞留系数为 0.9, 水更新时间约 13~21 d。Delft3D 示踪剂对流-扩散模型得出水更新时间约 4 个月, 置换 35% 的水体需 5 d, 置换 65% 的水体需 125 d, 置换 90% 的水体需 305 d; 示踪剂垂直混合充分, 水平差异显著, 口门区示踪剂平均滞留时间少于 10 d, 港中区约 170 d, 港顶区超过 250 d。因此象山港是口门水交换强烈, 但中顶部水交换很弱的港湾, 其排污口应设在西泽码头以东, 港顶应养殖大型海藻, 并控制鱼虾养殖规模以减轻富营养化。

关键词: 象山港; 纳潮量; 水交换; 滞留时间; Delft3D

中图分类号: Q948.8

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2014) 01-0001-07

象山港是浙江省主要的港口之一, 位于宁波镇海区梅山岛与象山县钱仓之间, 是一个东北-西南方向狭长的半封闭式港湾, 通过青龙门、双屿门、牛鼻山等诸水道与外海相连, 流域面积 1455 km^2 , 自港口到港顶全长约 62.8 km, 港内多数地区的宽度为 5~6 km, 平均水深 10 m 左右。象山港入港河川溪流众多, 遍布沿岸各处, 年平均径流量为 $1.3 \times 10^9 \text{ m}^3$, 其中 60% 的流量集中在 6~9 月。象山港总面积约 630 km^2 , 其中低潮位时的水域面积为 410 km^2 , 滩地面积为 220 km^2 , 港内滩地约占总面积的 34.9%^[1]。

象山港不但水产资源丰富, 临港工业发展也很迅速。但由于对水域生态的保护力度不足以及保护措施有限, 象山港生态退化较为严重^[1-3], 赤潮频发, 甚至出现罕见的冬季赤潮。弄清象山港水动力及水交换特点, 将为生态保护措施的制定提供理论依据, 使其能更好地实现可持续发展。

涉及象山港的研究很多, 早在 1985 年, 蔡伟章

等^[4]就对象山港的潮流成因进行了探讨, 提出港区存在港湾谐振潮, 浅水分潮共振明显, 港内滩地宽广、潮差大, 涨潮流时长于退潮流时, 涨潮流速小于落潮流速。1999 年, 董礼先等^[5-6]研究了象山港水交换能力, 提出置换口门处 90% 的湾内水耗时短于 5 d, 狭湾附近需要 15~65 d, 港顶区需要 80 d。此外, 朱军政等^[7-8]用 FVCOM 三维模式模拟了象山港的盐度变化, 吕庆华等^[1]研究了象山港的氮磷环流与泥沙输运, 朱艺峰等^[9]研究了象山港的生态分区, 蔡惠文等^[10]研究了象山港的养殖容量。2011 年, 冯德军等^[11]总结了象山港领域的研究, 提出整合物理海洋、海洋环境学、海洋生态学的三维海洋模式是未来趋势。

笔者使用一个已验证的象山港三维水动力数学模型(基于 Delft3D 模式, 由欧盟第六框架下的 SPEAR 项目资助完成^[12]), 通过模拟 2004 年全年象山港的潮流状况, 分析其纳潮量和水交换能力, 评估当前象山港的水动力特点。

收稿日期: 2013-01-12.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journal.lg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 海洋公益性行业科研专项(201105009-3); 宁波市海洋与渔业局项目(甬财政农(2010)808号)。

第一作者: 林忠洲(1987-), 男, 浙江绍兴人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 海洋生态学。E-mail: linzhongzhou@gmail.com

*通信作者: 严小军(1968-), 男, 江苏苏州人, 博士/研究员, 主要研究方向: 微型藻类的生物化学。E-mail: xiaojunyan@hotmail.com

1 计算区域及相关公式

1.1 计算区域

计算区域(图 1)包括佛渡水道、牛鼻山水道、象山港狭湾、西汊港、黄墩港和铁港, 水平方向采用非均匀的 174×61 边界拟合正交网格, 水平分辨率在 $250 \text{ m} \times 250 \text{ m}$ 左右, 垂直方向采用均匀分布的 10 层网格, 开边界使用 24 个分潮来驱动, 淡水汇入使用沿岸 10 个主要径流的全年数据. 水平涡流黏度 $1.0 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, 水平涡流扩散率 $1.0 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, 曼宁系数取 $0.026 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1/3}$, 垂向使用 Delft3D 内置的 $k-\varepsilon$ 紊流模型, 盐度、潮位和风力等内容配置详见文献[12], 使用冷启动 1 个月后的结果作为分析计算的起始条件.

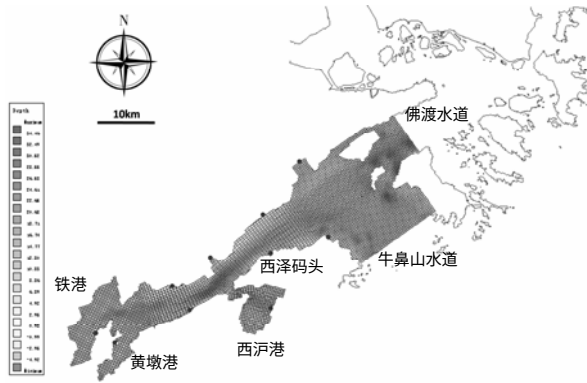


图 1 象山港建模区域

1.2 基本方程

Delft3D 三维水动力数学模型解三维非线性浅水方程中的水平动量方程和连续方程如下:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\omega}{d+\zeta} \cdot \frac{\partial u}{\partial \sigma} - f v = -\frac{1}{\rho} P_x + F_x + \frac{1}{(d+\zeta)^2} \cdot \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(v_v \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right), \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\omega}{d+\zeta} \cdot \frac{\partial v}{\partial \sigma} + f u = -\frac{1}{\rho} P_y + F_y + \frac{1}{(d+\zeta)^2} \cdot \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(v_v \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right), \quad (2)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial [(d+\zeta)U]}{\partial x} + \frac{\partial [(d+\zeta)V]}{\partial y} = S, \quad (3)$$

式中, u, v, ω 分别是 x, y, σ 方向上的流速; U, V 分别是 x, y 方向上的垂直平均流速; ζ 为自由水面至平均海平面距离; d 为平均深度; f 为科氏力系数. P_x, P_y 分别是 x, y 方向上压力梯度; F_x, F_y 分别为 x, y 方向上雷诺应力; S 为源汇项; ρ 是水密度,

为盐度的函数, 由状态方程算出. 垂直方向采用 σ 坐标, $\sigma = (z - \zeta) / (\zeta + d) = (z - \zeta) / H$, H 是总水深; 使床面上 $\sigma = -1$, 自由水面 $\sigma = 0$. 即在垂直平面上, σ 坐标是边界拟合. 垂向涡粘性系数 $v_v = v_t + v_{\text{mol}}$, v_{mol} 是分子粘性系数, 紊动粘性系数 $v_t = C_\mu k^2 / \varepsilon$, 从标准的双方程 $k-\varepsilon$ 紊流模型求得.

盐度及示踪剂浓度 C 由守恒式的输送方程求得:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial [(d+\zeta)C]}{\partial t} + \frac{\partial [(d+\zeta)uC]}{\partial x} + \frac{\partial [(d+\zeta)vC]}{\partial y} + \\ & \frac{\partial (\omega C)}{\partial \sigma} = (d+\zeta) \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_h \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_h \frac{\partial C}{\partial y} \right) \right] + \\ & \frac{1}{d+\zeta} \cdot \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(D_v \frac{\partial C}{\partial \sigma} \right) + S_c, \end{aligned} \quad (4)$$

式中, D_h 和 D_v 为水平和垂直扩散系数; S_c 为源汇项.

Delft3D 是一种采用交错网格、基于有限差分方法的数学模型, 水位和盐度点放在网单元中心, 流速放在网单元交点上, 使用 ADI 法求解三维浅水方程[13].

1.3 水体更新时间公式

盐度是象山港数值模拟中唯一能实测的保守性物质, 可从实测数据层面研究象山港的水交换能力. 水体更新时间以雨季(6~9 月包含了象山港年降水量的 60%以上)的计算结果为准, 旱季由于湾内与外海的盐度差太小, 不适合计算更新时间.

盐度箱式模型方程如下:

$$\frac{\partial S_b}{\partial t} = \frac{S_0 Q_t (1 - \beta) + S_b Q_t \beta - S_b (Q_t + Q_r)}{V + P}, \quad (5)$$

$$\tau = \frac{1}{\alpha} = \frac{V + P}{Q_t (1 - \beta) + Q_r}, \quad (6)$$

式中, S_b 为湾内平均盐度; S_0 为开边界处的盐度; Q_t 为平均潮流量 ($5.9 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$); Q_r 为平均径流量 ($75 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$); V 为象山港低潮时平均容积 ($6.32 \times 10^9 \text{ m}^3$); P 为象山港的平均纳潮量 ($1.32 \times 10^9 \text{ m}^3$); β 为滞留常数; τ 是水体更新时间, 即彻底更新一次港区水体所需要的时间. 详细推导见文献[14].

1.4 水体置换比例公式

水体置换比例公式参考罗峰等[15]的方法, 用保守示踪剂浓度的改变来计算港内海水被外海水置换的平均比率, 公式如下:

$$Z(t) = \frac{\sum_{i=1}^n A_i(t) \cdot H_{i0} C_{i0} - \sum_{i=1}^n A_i(t) \cdot H_i C_i(t)}{\sum_{i=1}^n A_i(t) \cdot H_{i0} C_{i0}}, \quad (7)$$

式中, H_0 和 C_0 分别为初始时刻的水深和示踪剂质量浓度; $A_i(t)$, $H_i(t)$ 和 $C_i(t)$ 分别为第 i 个计算网格 t 时刻对应的面积、水深和示踪剂质量浓度。

1.5 污染物滞留时间公式

滞留时间是指某微小水体单位通过出口离开系统所花费的时间, 靠近边界的水体单元耗时少, 而远离边界的水体单元耗时多, 因此较常用的是平均滞留时间, 即微小水体单位离开边界所需的平均历时, 其相关公式如下所示:

$$RT = \int_0^\infty \frac{R(t)}{R_0} dt = \int_0^\infty r(t) dt, \quad (8)$$

$$r(t) = \frac{R(t)}{R_0} = \beta e^{-k_1 t} + (1 - \beta) e^{-k_2 t}, \quad (9)$$

$$T_f = \frac{\beta}{k_1} + \frac{1 - \beta}{k_2}, \quad (10)$$

式中, RT 为平均滞留时间; $R(t)$ 为 t 时刻示踪剂的质量; R_0 为初始时刻示踪剂的质量; $r(t)$ 为剩余函数, 即 t 时刻示踪剂质量与初始时刻示踪剂质量的比, 通常用双指数衰减函数表示; β, k_1, k_2 可用最小二乘法拟合得到; T_f 是基于双指数衰减函数计算得到的平均滞留时间^[16]。

2 结果

2.1 纳潮量及潮流场时空分布

根据 Delft3D 水动力模型输出的水位数据, 得

出大潮期间, 高潮时容积为 $8.01 \times 10^9 \text{ m}^3$, 低潮时容积为 $6.19 \times 10^9 \text{ m}^3$, 纳潮量为 $1.82 \times 10^9 \text{ m}^3$; 小潮期间, 高潮时容积为 $7.27 \times 10^9 \text{ m}^3$, 低潮时容积为 $6.45 \times 10^9 \text{ m}^3$, 纳潮量为 $0.82 \times 10^9 \text{ m}^3$; 平均海面容积为 $6.98 \times 10^9 \text{ m}^3$, 平均纳潮量为 $1.32 \times 10^9 \text{ m}^3$. 大潮期的纳潮量是小潮期的 2.2 倍, 纳潮量与平均容积比值介于 0.12~0.26, 水交换主要靠大潮. 根据模型输出的潮流数据, 得出涨潮流向 SW 向, 水流呈漫滩状, 流速较缓; 落潮流向 NE 向, 滩水归槽入海, 流速较急, 落潮流速大于涨潮流速. 西泽码头附近的狭湾区域是象山港流速最急之处, 其表层涨潮流速约 $0.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 底层涨潮流速约 $0.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 其表层落潮流速约 $1.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 底层落潮流速约 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 2).

2.2 箱式模型水更新时间

先根据水动力模型输出的盐度数据得到象山港 6~9 月期间 11 个时刻的平均盐度作为观测值, 然后设置箱式模型的滞留系数 β , 根据港区初始的平均盐度和开边界外海水盐度由(5)式最终求得平均盐度的拟合曲线, 结果表明: 平均盐度观测值落在 β 为 0.88~0.93 的曲线之间 (图 3(a)), 且 β 为 0.9 时, 拟合曲线与观测值的离差平方和最小, 说明象山港滞留系数约为 0.9, 前 1 个潮周期中从港湾排出的潮水有 90% 会在后 1 个潮周期中再次输入港湾. 当 β 为 0.9 时, 由(6)式可知象山港整体水更新时间约为 15 d. 这是基于平均潮流量的结果, 而现实中

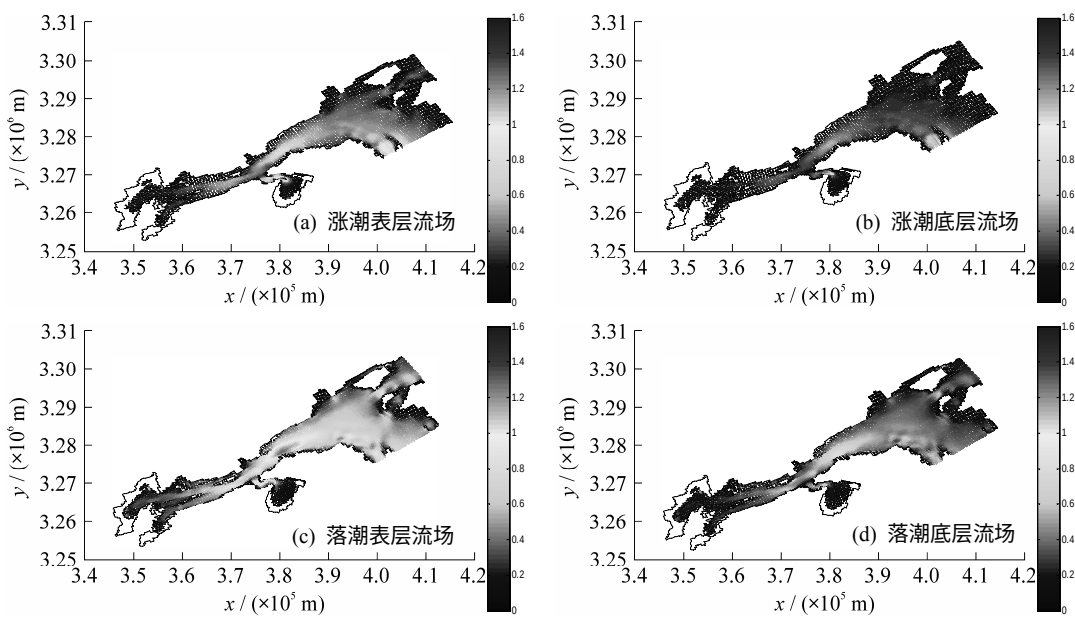


图2 涨、落潮表、底层流场分布

潮流状况时刻在变化,潮流量不同导致水更新时间也会有差异,从曲线拟合情况 β 介于0.88~0.93可见象山港整体水更新时间应介于13~21d.

图3(a)中,实线是滞留率为0.88时箱式模型模拟的平均盐度曲线,虚线是滞留率为0.93时的情况,黑点是基于Delft3D模型的平均盐度观测值.图3(b)中实线和虚线分别是滞留率为0.88和0.93时箱式模型示踪剂的衰减情况,当示踪剂浓度降为初始浓度的 $1/e$ 时,即完成1次彻底水更新.这里示踪剂初始浓度设为 $1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,则当浓度为 0.368

$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,其水体已彻底更新一遍,因此2个滞留率对应的水更新时间分别为13d和21d.

2.3 Delft3D 模型水更新时间

在不改变水动力条件下,设定湾内均匀分布初始浓度为 $1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的溶解态保守性物质,设定开边界入流浓度为 $0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.运行潮波模式至稳定后启动溶解态保守性物质的对流-扩散模式,并通过示踪剂浓度 C_t 计算港内各点水交换情况.自2004年1月1日0时起,模式运行366d.由Delft3D示踪剂模型结果可知,象山港的纵向混合较好,表、

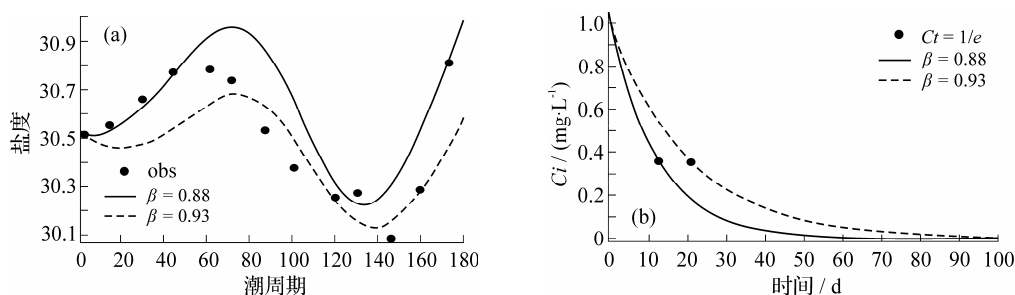


图3 水更新时间

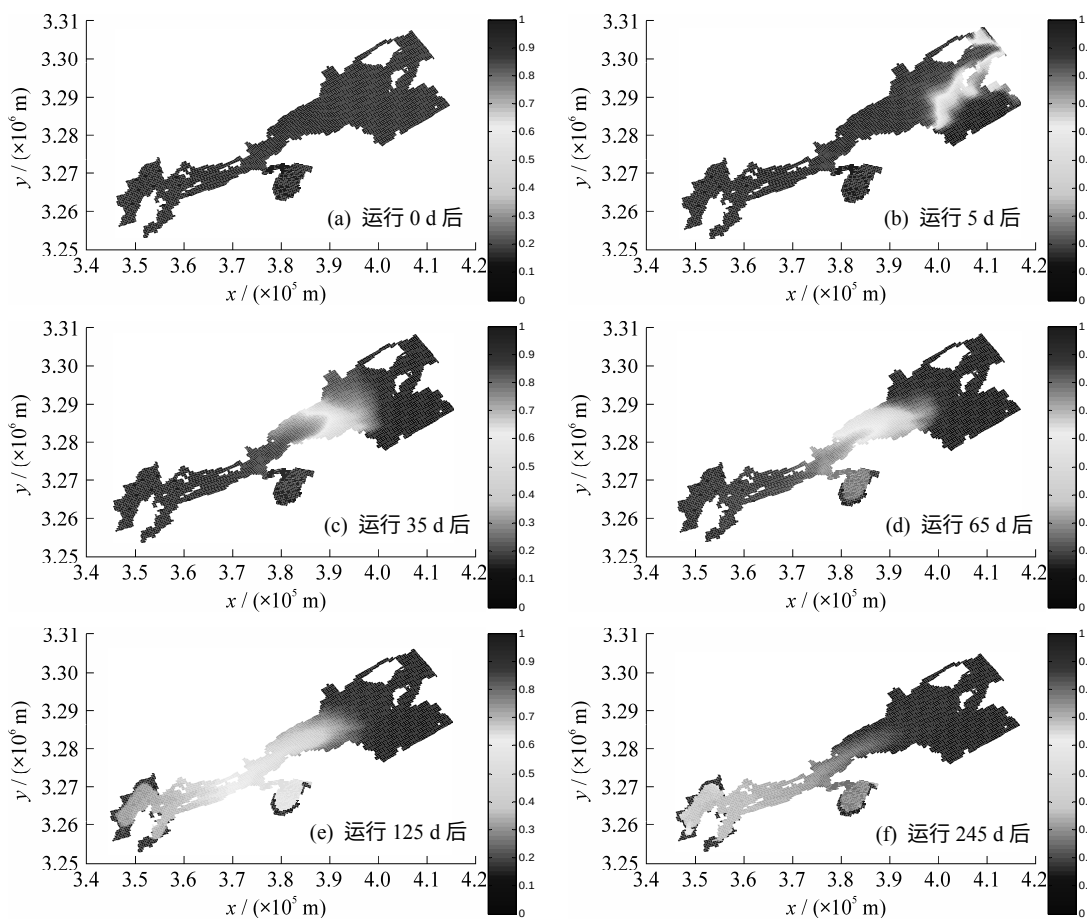


图4 水交换模拟运行过程的表层保守物质分布

底层示踪剂浓度分布差异很小, 因此图4仅分别给出了运行0, 5, 35, 65, 125, 245 d后表层保守性物质质量浓度的分布情况。

由图4可知, 牛鼻山水道是象山港水交换最主要渠道, 其次是佛渡水道, 而淡水汇入影响基本可忽略。若以示踪剂浓度达到初始浓度的 $1/e$ 所需的时间作为水更新时间(完成1次彻底水交换所需时间), 那么平均意义上讲, 象山港更新1次水体需要4个月, 但港顶、港中和口门差别很大, 口门区5 d内就能完成1次彻底的水交换, 西泽码头以东海域则需约35 d, 西泽码头以西15 km区域需要约120 d, 最顶端20 km海域(包含黄墩港、铁港)则需要240 d以上。西泽码头为中点的10 km范围是象山港水交换作用变化最大海域, 西端与东端虽然只差10 km, 但前者水更新时间却是后者4倍。根据模型导出的示踪剂浓度数据, 由(8)式可得海水的置换率如图5所示, 置换最初35%的海水仅须5 d, 然后置换速率突然变缓, 125 d后海水置换率才达到65%, 此段

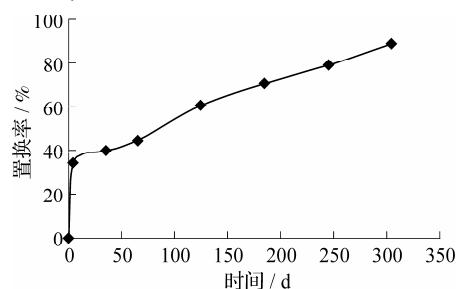


图5 象山港水体平均置换率

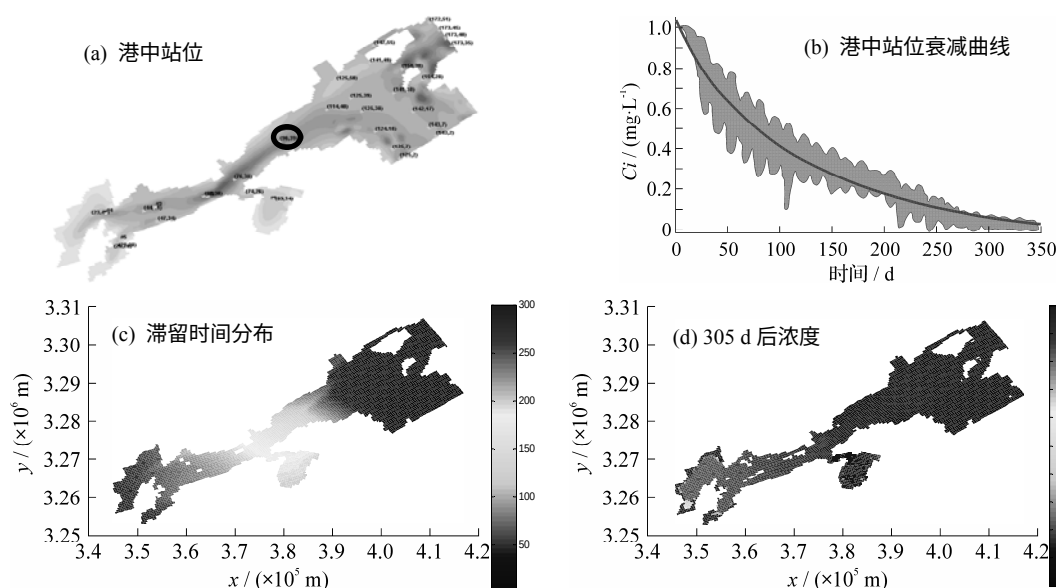


图6 污染物滞留时间

时期正好是在置换西泽码头西面的海水; 最后阶段海水置换速率有所回升, 等到305 d后海水置换率达到90%, 港顶区基本完成置换。

2.4 象山港污染物滞留时间

污染物滞留时间是根据水动力模型中32个观测点的数据计算得到, 以港中区(96,39)站位为例(图6(a)黑圈所示), 其保守污染物浓度衰减情况如图6(b)所示, 根据(9)式对其进行双指数衰减曲线拟合得 k_1 , k_2 和 β 值, 最后根据(10)式可得该站位的平均滞留时间为133 d。其它站位均可使用相同的做法算出平均滞留时间, 然后根据此32个站位数据, 插值得到象山港全区的平均滞留时间图(图6(c))。佛渡水道和牛鼻山水道所在的口门区其平均滞留时间均小于10 d; 从西泽码头所在的港中区开始, 平均滞留时间开始迅速延长, 西泽码头以西15 km的区域内, 平均滞留时间达到了170 d; 黄墩港、铁港所在的20 km港顶区, 平均滞留时间超过250 d。图6(d)为模拟305 d后象山港保守污染物表层的浓度分布, 港顶区浓度降为初始浓度的0.1倍以下, 港中区和港口区浓度基本为0, 此外近岸的部分浅滩区由于裸露在空气中的时间较多, 其污染物下降不明显。可见污染物在象山港中部和顶部的滞留时间较长, 特别是铁港和黄墩港区, 几乎要耗费近1年的时间才能彻底的消除污染物, 此外, 如果部分潮间带地区受到污染, 其净化时间会超过1年。

3 讨论

3.1 纳潮量及潮流场特点

象山港纳潮量在浙江省海湾中是偏小的,即使海湾面积比象山港小 100 km^2 的乐清湾,其大潮纳潮量也有 20 亿 m^3 [15,17],而象山港大潮纳潮量只有 18 亿 m^3 ,更不用说三门湾和杭州湾。从流速角度看,象山港大潮落潮平均流速为 $1.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,而杭州湾为 $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,三门湾为 $7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ [18],可见象山港流速明显小于周边海湾。此外象山港落潮流速接近涨潮流速的 2 倍也明显不同于周边的海湾,三门湾和乐清湾涨潮和落潮流速基本相同,这也是象山港不容易淤积的原因之一。从平均潮差角度看,象山港(3.18 m)要小于三门湾和乐清湾(均为 4 m) [18],这与象山港长达 60 km 的纵深和狭窄航道有关。总体而言,象山港水流平缓,滩涂广阔,航道很深,不易淤积,因此非常适合船舶停靠以及水产品的养殖。

3.2 水交换特点

箱式模型中象山港水更新时间约为 13~21 d,滞留率为 0.9,容积相仿的马普托港为 0.85 [14],两者相差不大,考虑到象山港航道比马普托港狭长许多,因此象山港的水交换能力并不弱。选用箱式模型是因为该模型能直接利用开边界的盐度数据,且不同于数值试验中设置开边界外保守示踪剂浓度为 0 的假设,因此某种意义上更接近真实情况。但箱式模型只能得到基于整体的水更新时间,无法评估港区特定区域的水交换能力,以象山港为例,因占总容量 1/3 的口门区水交换能力很强,不断被更新,导致其总体水交换能力较强,但这并不是说港中区和港顶区也拥有很强的水交换能力,要分析象山港内水交换细节需要其它模型的辅助。

Delft3D 中的示踪剂对流-扩散模型正好弥补了箱式模型的缺陷,模型显示象山港水交换能力垂直方向无显著差异,水平差异显著,港顶区的水更新时间比口门区长很多,港顶区污染物平均滞留时间达到 240 d,港中区为 170 d,口门区则小于 10 d。全港水体中,前 35%的水置换只需要 5 d,中间 30%的水置换需要 120 d,最后的 35%需要 120 d 以上。西泽码头以西 15 km 区域内的水交换作用最弱,耗时最长,该区域也是水交换能力变动最大的区域,该区域最西端的水更新时间约为最东端的 4

倍。象山港“港中有港”,航道狭长曲折是造成象山港中部和顶部区域水交换作用偏弱的主要原因。特别是西汊港,其弯道细窄但腹地较宽阔、滩涂丰富,导致其内海水的置换速率比较缓慢。

3.3 结论和展望

综合纳潮量、潮流及水交换特点可知,象山港是一个适合船舶停靠及水产养殖的深水良港,港顶和港中区的水交换能力较弱,港顶区的污染物需要将近 1 年的时间才能彻底排出象山港,因此在养殖水产动物时应配套养殖大型海藻,这样能更好地减轻富营养化压力。另一方面,口门区水交换能力很强,5 d 内就能完成 1 次彻底的水交换,因此企业排污口应尽量建在西泽码头以东区域,污水可在退潮时排出,以便将水体污染降至最低。

Delft3D 模型得出的大部分结论和象山港之前的研究结果是一致的,比如港中区的狭湾是水交换变动最大的区域、口门区水更新时间小于 5 d 等,但 Delft3D 模型显示港顶附近 90%水交换需要约 300 d,这比董礼先等 [5] 提出的 80 d 高很多。主要原因是: (1) 董礼先等使用了精度较低的(欧拉-拉格朗日)法以降低运算复杂度,当模拟时间跨度较大时,其累积误差会很大; (2) 二维模型无法直接研究垂向扩散情况,所以其将重力环余流和潮震荡的垂向剪切通过参数化方法包含在示踪剂扩散系数中(取扩散系数 $k = 200 \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$),因此该设定有较大时间局限性和随意性,并过度简化了三维扩散进程。这两个原因导致其模型在长时间跨度的模拟中误差较大,并且当扩散系数改变时原计算结果不再适用。近年来象山港发展很快,围垦很多,水动力情况明显改变,因此扩散系数很可能也发生了改变,因此董礼先等的某些结论可能已不再适用。

Delft3d 模型使用的是更为精确的基于 Navier-Stokes 方程的交替向量法,对垂向扩散作用也使用了更先进的 $k-\epsilon$ 紊流模型,此外开边界还输入了风力、盐度、淡水汇入等大量原始数据。这个完全的三维水动力模型由欧盟 SPEAR 项目资助并通过验收的模型,因此其结果至少在目前来看是可靠的。当然 Delft3d 模型误差也是不可避免,未来需引入更多基于其它软件的水动力模型,通过模型间相互比较以及实测数据检验来确定最有效的模型及参数,从而更精确地评估象山港水交换特点。

参考文献:

- [1] 吕华庆. 象山港营养盐和泥沙输运[M]. 北京: 海洋出版社, 2010.
- [2] 张丽旭, 蒋晓山, 蔡燕红, 等. 近4年来象山港赤潮监控区水质状况综合评价[J]. 海洋湖沼通报, 2007(4): 98-103.
- [3] 贝竹园. 象山港海域营养盐污染特征及多种富营养化评价方法的比较[D]. 上海: 华东师范大学, 2009.
- [4] 蔡伟章, 陈耕心, 丁锦仁. 象山港潮汐潮流特征及成因探讨[J]. 海洋通报, 1985(3):8-12.
- [5] 董礼先, 苏纪兰. 象山港水交换数值研究 II: 模型应用和水交换研究[J]. 海洋与湖沼, 1999(5):465-470.
- [6] 董礼先, 苏纪兰. 象山港水交换数值研究 I: 对流-扩散型的水交换模式[J]. 海洋与湖沼, 1999(4):410-415.
- [7] 朱军政, 曹颖. FVCOM 模型在象山港三维潮流盐度计算中的应用[J]. 海洋环境科学, 2010(6):899-903.
- [8] 朱军政. 象山港三维潮流特性的数值模拟[J]. 水力发电学报, 2009(3):145-151.
- [9] 朱艺峰, 施慧雄, 金成法, 等. 象山港海域水质时空格局的自组织特征映射神经网络识别[J]. 环境科学学报, 2012(5):215-225.
- [10] 蔡惠文, 孙英兰, 张学庆. 象山港网箱养殖对海域环境的影响及其养殖环境容量研究[J]. 环境污染治理技术与设备, 2006(11):71-76.
- [11] 冯德军, 吕华庆, 傅武伟, 等. 象山港水交换研究概述[J]. 中国水运, 2011(1):23-26.
- [12] Goede E D. Set-up and calibration of a hydrodynamic model for Huangdun Bay[R]. SPEAR Project, 2007.
- [13] Petit H. Delft3D user's manual[M]. Belgium: WL Delft Hydraulics, 2005.
- [14] Lencart J. Controls on exchange in a subtropical tidal embayment, Maputo Bay[D]. Cardiff: University of Wales, 2007.
- [15] 罗锋, 廖光洪, 杨成浩, 等. 乐清湾水交换特征研究[J]. 海洋学研究, 2011(2):79-88.
- [16] 匡翠萍, 李行伟, 刘曙光. 大规模围垦对香港维多利亚港水动力环流的影响[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2009(2):176-181.
- [17] Li Jia, Yao Yanming, Li Xiaoyan. Numerical analysis on water exchange and its response to the coastal engineering in the Yueqing Bay in China[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2008(Sup.1):60-73.
- [18] 杨东方, 高振会. 海湾生态学[M]. 广东: 中国教育文化出版社, 2006.

Study on the Features of Water Exchange in Xiangshan Bay

LIN Zhong-zhou¹, YAN Xiao-jun^{1*}, Lencart E Silva J D²

(1.Key Laboratory of Applied Marine Biotechnology of Ministry of Education, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2.Centre for Environment and Marine Studies, Aveiro University, Aveiro 999022, Portugal)

Abstract: In order to study the ability of the water exchange in Xiangshan Bay and yield the source data for the eco-model in the future, a calculated Delft3D hydrodynamic model is built. The data of water level and flow velocity produced by the model is used to analyze the tidal prism and flow characteristic of Xiangshan Bay. The data of salinity and tracer material produced by the model is used to investigate the flushing time of prism-model and that of tracer-model. The results show that the average tidal prism is $1.32 \times 10^9 \text{ m}^3$, while the tidal prism is $1.82 \times 10^9 \text{ m}^3$ during flood tide period and $0.82 \times 10^9 \text{ m}^3$ during ebb tide one. In prism model, the coefficient of retention is 0.9 and it takes about 13 to 21 days to refresh the whole water of the bay. In Delft3D tracer-model, it uses about 4 months to refresh the whole water of the bay; and exchanging 35% of the water needs 5days, while 65% needs 125 days and 90% needs more than 305 days. Conservative tracer is mixed well in vertical direction, so there is no obvious stratification. The average residence time of bay-mouth is less than 10 days, while it is about 170 days at the bay-middle (15km from the west of Xize wharf) and is above 250 days at the bay-head including Huangdun Bay and Tie Bay. Hence, the ability of water exchange in Xiangshan Bay is very strong at bay-mouth but weak at bay-head. The drainage outlets should be set at the east of Xize wharf, seaweeds should be cultivated and fish cages should be controlled to decrease the risk of eutrophication.

Key words: Xiangshan bay; tidal prism; water exchange; residence time; Delft3D

(责任编辑 章践立)