

湄洲湾潮流特性的数值研究

刘 浩¹, 潘伟然², 骆智斌², 石晓枫³

(1. 中国科学院烟台海岸带可持续发展研究所, 山东 烟台 264003;

2. 厦门大学海洋学系, 福建 厦门 361005; 3. 厦门大学环境科学研究中心, 福建 厦门 361005)

摘要: 本文运用一个含动边界的二维河口海岸动力模型模拟了湄洲湾潮汐潮流的基本特征, 模拟结果与实测数据吻合较好. 在此基础上估算了湄洲湾大、小潮过程的纳潮量, 并根据湾内保守示踪物的质量 (浓度) 随涨、落潮流周期性的变化, 进一步估算了湄洲湾的水交换周期, 其半交换和 80% 的交换周期分别为 5d 和 15d. 同时可以看出, 主航道深水区的水交换特性明显强于湾顶浅水区.

关键词: 湄洲湾; 模型; 潮汐潮流; 水交换

中图分类号: P 7

文献标识码: A

文章编号: 1000-8160 (2009) 01-0118-

05

湄洲湾位于台湾海峡西岸, 湾内已建有多个船坞码头, 构成了海上交通运输的重要枢纽. 此外, 三大石化基地——泉港、泉惠和东吴石化基地的规划和建设必将使湄洲湾在福建未来的区域经济发展中扮演重要角色. 另一方面, 这些港口和石化基地的建设发展又可能给当地的水环境资源造成潜在的危害. 因此了解湄洲湾的水动力特性对于灾害事故的预防治理具有重要意义. 本文正是基于这一目的, 决定采用数值模型的方法系统地了解湄洲湾的潮汐、潮流特性, 并对整个湾的纳潮量和水交换周期给出一个定量的估算.

图 1 给出了本文的研究区域. 该区域不仅包括了湄洲湾, 还包括了相邻的两个小湾——平海湾和大港. 图 1 中的 C1、F 和 C2 表示 3 个潮流测量站位, 用以模拟结果的验证. 图 1 中虚线为假定的湄洲湾的分界线, 用以估算湾内的纳潮量和水交换特性.

1 数值模型

1.1 模型介绍

本研究采用的水动力模型是由 Blumberg 和 Mellor 开发的三维斜压原始方程海流模型^[1]发展而来的, 适于河口及沿岸海域的水动力环境的模拟, 简称为 ECOM. 该模型基本特征如下: 水平和垂直方向分别采用正交曲线坐标系和随地形变化的 sigma 坐标系 (图 2); 自由表面可以模拟水位变化; 垂直和水平方向的混合扩散分别采用 2.5 阶的 Mellor-Yamada 湍流闭合模式和 Smagorinski 模式; 内外模态分别处理速度较慢的内重力波和速度较快的外重力波, 以提高整个模式计算效率等.

1.2 动边界的处理方法

ECOM 模型的一个显著特征就是在计算过程中所有网格点都被看作是湿点 (水点), 即便是干点 (陆地点) 也被赋予一个很小的水深 (小于实际的最小水深). 这样, 当每一时间步长的计算完成后再通过一个转换器 FSM (其值在干点处定义为 0, 湿点处定义为 1) 将干点处的计算结果转化为 0. 需要指出的是, 在 ECOM 模型中 FSM 的值是根据输入水深 H 确定的, 因此它只能确定固定边界的位置. 本研究在保留

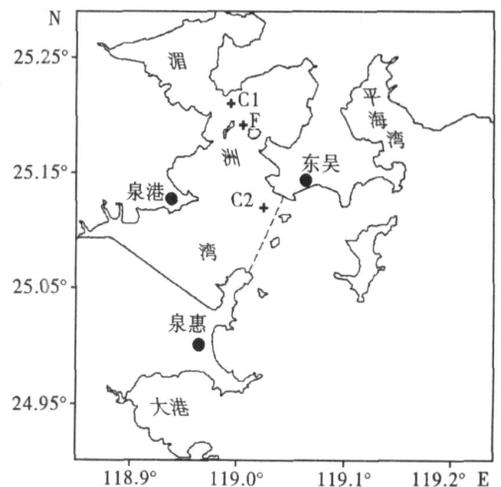


图 1 研究区域

Fig 1 Maps of regions in this study

收稿日期: 2007-12-17

基金项目: 中国科学院海洋环境与波动重点实验室开放研究基金资助项目 (KLOCAW0804); 中国博士后科学基金资助项目 (20060400737)

作者简介: 刘浩 (1972 ~), 男, 副研究员, 博士.

FSM的基础上另外定义了一个转换器 WDM,它的 0/1 值是根据瞬时水深 D 确定的,这里 $D = H + \eta$. 这样,当 $D \leq 0$ 时水点干出,当 $D \geq 0$ 时干点被淹没,其中 η 在本文中取为 0.1m ,与陆地水深取值一致. 根据图 2b 显示的各变量在网格上的分布特点,我们定义水平速度分量 U 处的水深为 D_u , V 处的水深为 D_v ,于是有:

$$D_u(i, j) = 0.5 \times [D(i-1, j) + D(i, j)] \tag{1}$$

$$D_v(i, j) = 0.5 \times [D(i, j-1) + D(i, j)] \tag{2}$$

这样,当落潮 D_u, D_v 小于 0 时,水点干出,对应的流速 u 和 v 就分别为 0, 涨潮 D_u, D_v 重新大于 0 时,对应的流速 u 和 v 通过动量方程进行计算.

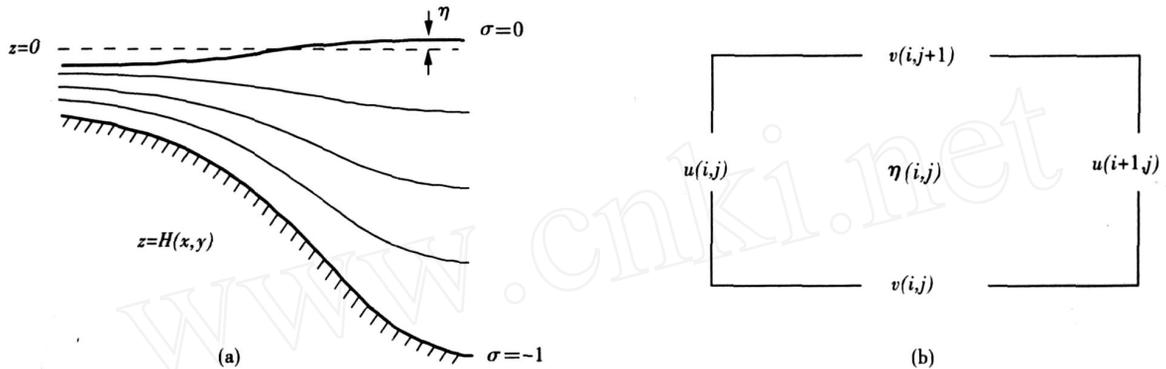


图 2 ECOM 模型采用的垂向 sigma 坐标系 (a) 和水平 Arakawa C 网格 (b)

Fig 2 Vertical sigma coordinates (a) and horizontal 'Arakawa C' grid (b) used by ECOM

本文采用的动边界的处理方法充分考虑了连续方程的质量守恒,并且具有简单易行的优点,已经应用于泉州湾潮滩干湿变化的研究^[2].

1.3 开边界条件及模型安排

如前所述,研究区域的固定陆地边界可由转换器 FSM 确定. 而在开边界采用的是简单的水位边界条件,即通过 7 个主要分潮—— $K_1, O_1, M_2, S_2, M_4, MS_4$ 和 M_6 的叠加来模拟潮汐通过开边界时的传播过程. 其表达式如下:

$$\eta = \sum f_i H_i \cos[\omega_i \cdot t + (\nu + u)_i - g_i] \tag{3}$$

式中, f_i 是交点因子, ν_i, u_i 分别是格林威治初始相位和交点订正角, ω_i 是潮汐角频率, g_i, H_i 分别是迟角和振幅, 下标 i 指示分潮. 开边界上的调和常数由平海和崇武两个验潮站的实测数据插值得到.

计算域网格精度为 0.003° . 为了满足 CFL 稳定条件, 外模态的时间步长取为 1.5s . 模型从静止状态进行冷启动, 在潮汐作用下模型运转 32d, 前 2d 的时间用以模型达到稳定状态, 之后 30d 的结果用于计算结果的分析.

2 模拟结果

2.1 模型验证

图 3 给出了 C1、C2 和 F 这 3 个船舶站位上模拟潮流和实测潮流的比较情况, 对应日期为 2003 年 3 月 20 日 10 时至 21 日 13 时. 由于 C2 站位仪器的原因, 有效数据是从 20 日 13 时开始记录的. 实测的垂向平均流速是根据工程手册推荐的六层加权平均法^[3]计算得到的.

图 3 显示湄洲湾的潮流具有典型的半日潮特征. 而且, 由于湄洲湾水道狭窄, 容易产生较大的潮流速度, 其中 F 站位的最大流速可以超过 1.2m/s . 从潮流流向看, F 和 C2 位于主航道, 潮流具有明显往复流特征. 而 C1 站位由于靠近陆地边界, 受到不规则海岸线以及浅水非线性耗散效应的影响, 因此涨落潮流显示出较为明显的不对称性. 进一步计算各个站点上潮流模拟值和观测值的均方根误差, 在去除个别奇异时刻的数值后得到如下结果: C1 点的流速误差为 7.1cm/s , 流向为 16.3° ; F 点流速为 8.8cm/s , 流向为 26.5° ; C2 点流速为 5.21cm/s , 流向为 21.8° . 通过比较可以发现潮流流速质量模拟较好, 流向模拟质量稍差. 这可能与我们在模型中没有考虑海面风浪作用有关. 另外, 船舶的移动也会影响潮流测量的质量, 垂向流速的计算方法也可能

是造成误差的原因之一. 尽管如此, 我们的计算结果基本反映了潮流周期变化的基本特征, 可以认为本文模型的计算结果是可靠的. 这就为定量估算湄洲湾水交换特性提供依据.

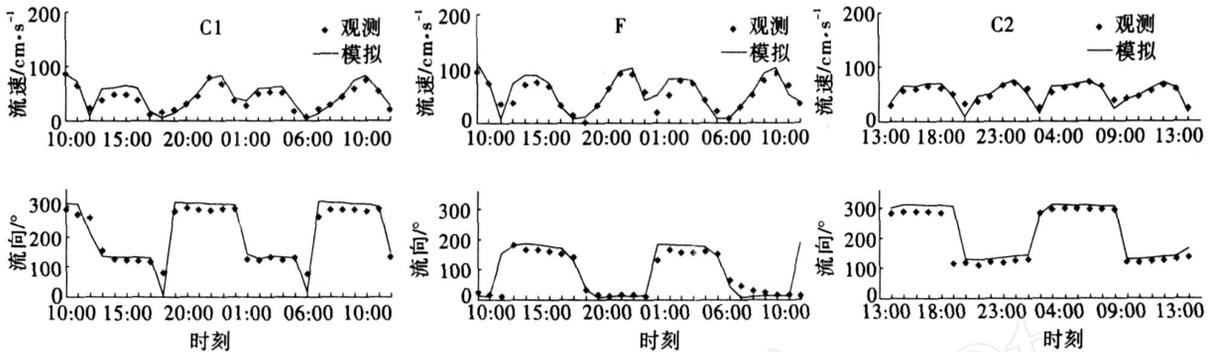


图 3 船舶站 C1、C2 和 F 垂向平均潮流的计算值与实测值的比较

Fig 3 Comparisons of observed and simulated tidal currents at C1, C2 and F stations

2.2 潮流特征

图 4 给出了 4 个特征时刻湄洲湾潮流矢量的分布特征. 由于湄洲湾水道狭窄, 因此容易产生较大的潮流流速, 而且基本都是往复流的性质. 计算结果显示: 在大生岛南侧主航道上最大涨潮流和落潮流流速均超过 1.00m/s, 最大可达 1.25m/s 这与在大潮时观测到的 1.40m/s 的平均潮流流速基本一致.

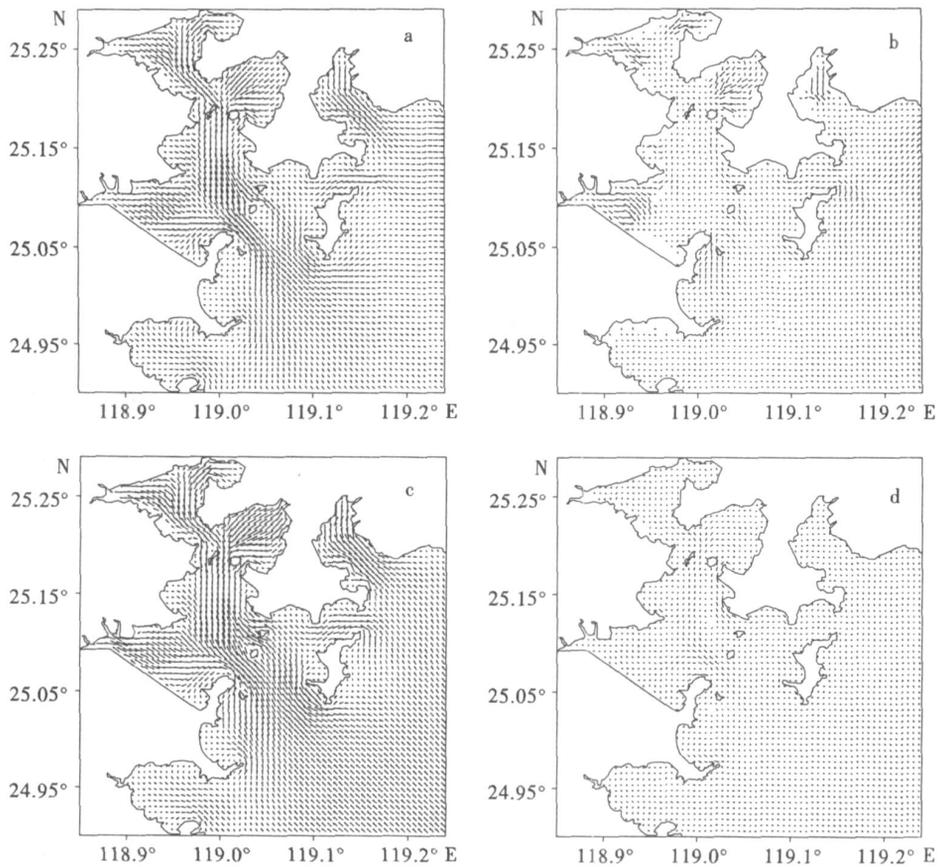


图 4 湄洲湾垂向平均潮流场在 4 个特征时刻的分布

Fig 4 Vector fields of the vertical mean currents at 4 tidal phases in Meizhou Bay
a 落急时, b 低潮时, c 涨急时, d 高潮时

比较图 4 中涨落潮流的情形可以看到,当潮波传入近岸浅滩时,由于海底的摩擦作用以及天文分潮的浅水非线性耗散作用,使得浅滩处的涨落潮流具有较强的不对称性,因此不可避免地影响着包括污染物在内的各种物质长期的输运过程.另外,图 4 还显示潮波在浅滩处的传播过程明显滞后于在主航道的传播过程.这显然也与海底的摩擦作用以及天文分潮在潮滩的非线性耗散作用密切相关.图 4c 显示的浅滩处的涨潮流流速明显大于图 4a 中的落潮流流速,因此那里形成的潮汐余流可能更有利于水中污染物向岸的堆积.这种情形在湄洲湾西南岸围田区的近岸水域表现得尤为明显.

另外,从图 4b 显示的低潮时的流速矢量分布特性还可以清楚看到:当水位降到最低时,湄洲湾、平海湾和大港的一些潮滩会暴露于水面之上,即周期性干出.这也说明了本文的动边界方法对于再现局地的水动力特性是行之有效的,从而为进一步用数值模型预报污染物的输运特性打下基础.

2.3 湄洲湾的纳潮量

纳潮量一般是指在任意一个潮周期从低潮时刻到高潮时刻累计通过湾口进入到湾内的新增潮水量.因此,纳潮量的大小直接决定了湾内污染物的稀释程度.图 5 给出了数值模拟得到的 F 站点 1 个月的水位变化过程.从中可以看到湄洲湾大潮时的潮差约为 6m,而小潮时的潮差不到 3m.这就决定了湄洲湾在不同的潮周期具有不同的纳潮量.根据本文的结果,湄洲湾大潮、平潮和小潮时的平均纳潮量分别为 12.97、8.55 和 6.0 亿 m^3 .这意味着大潮时的纳潮量约为小潮时的 2 倍.

3 水交换特性

本文选择保守物质作为示踪物,考察涨落潮流所引起的物质浓度变化规律,进而对深沪湾水交换特性做出定量估计.具体做法就是首先假定湾内(图 1 虚线以左海域)示踪物的初始浓度为 $1g/m^3$ (约为 1601t),同时湾外不存在示踪物.模型在潮汐强迫下运行 30d,湾内示踪物的浓度(质量)在湾外涨落潮水的稀释下而不断变化.另外,本文还假定示踪物是保守的,这是为了排除物质本身性质变化可能造成的质量(浓度)变化.

为了能够定量展示湄洲湾整体的水交换特性,图 6 给出了湾内示踪物稀释率的时间变化曲线.这里的稀释率定义为在某一特定时刻湾内现存示踪物的质量与初始质量(1601t)的比值.湾内现存示踪物的质量从长期看是逐渐减少的,但是随涨、落潮过程又呈周期变化.图 6 显示湾内示踪物的质量降为初始质量的一半的时间只需 3d(落潮).尽管之后涨潮过程又可将湾外的一部分示踪物带入湾内从而导致湾内示踪物的质量回复到初始质量的一半以上,但是在第 5 天以后湾内示踪物的质量再也不能恢复到上述数值.因此,可以认为 5d 是湄洲湾的半交换周期,意味着湾内有至少一半的海水在此期间完成更新.同理,根据图 6 我们还可进一步推断 15d 是湄洲湾的 80% 交换周期.

由于湾内各局地的水动力特性存在着明显的差异,这决定了各局地的半交换周期是不一样的.图 7 给出了湄洲湾各局地半交换周期的分布.由其可以看到:主航道的半交换周期不超过 3d 左右,说明这里的水交换过程非常强烈;而在湾顶和浅滩处,水交换过程相对较弱,不利于污染物的稀释或向湾外扩散.因此在排污口和污水处理厂的规划设计中必须考虑上述因素.

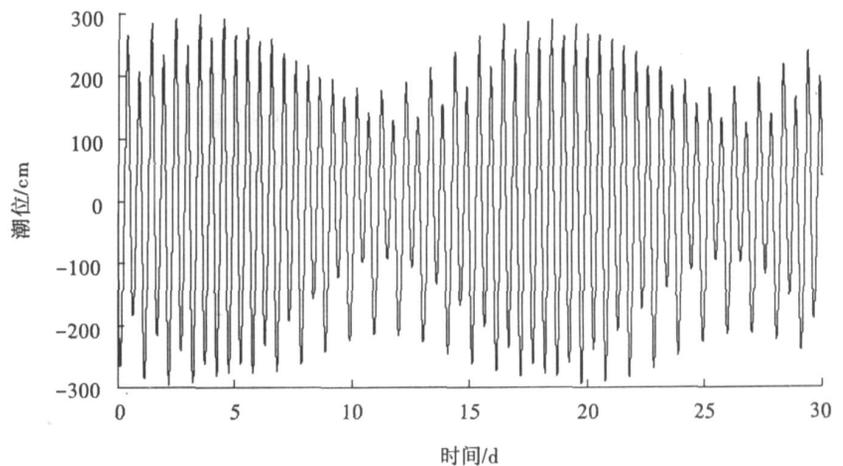


图 5 F 站点潮位的时间序列

Fig 5 Time series of tidal height at F station

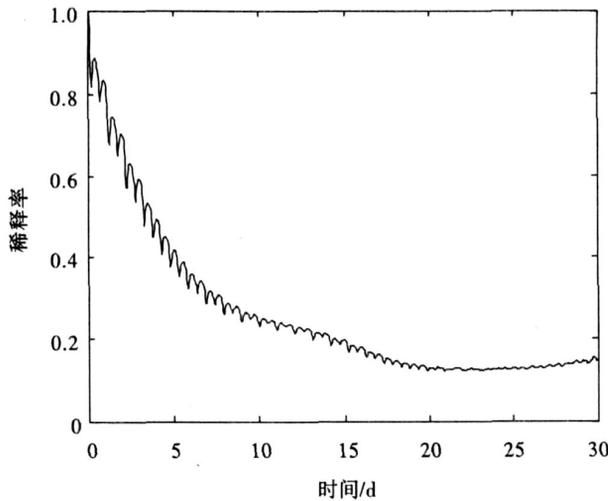


图6 保守示踪物稀释率的时间变化

Fig.6 Time series of dilution rate of conservative tracer

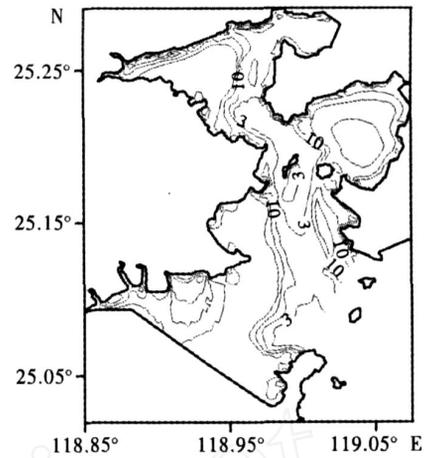


图7 湄洲湾半交换周期的分布 (等值线间隔 7d)

Fig.7 Distribution of half exchange period, CI is 7d

4 结论

本文使用一个二维河口海岸模型模拟了湄洲湾的潮汐潮流特性,模拟结果与实测结果吻合较好.在此基础上进一步估算了湄洲湾的纳潮量和水交换周期.湄洲湾大潮时的纳潮量约为小潮时的 2 倍,而半交换周期和 80% 的交换周期分别约为 5d 和 15d 另外,计算结果还显示:湄洲湾各局地之间的水交换特性存在着显著差异,主航道的水交换过程比较强烈,湾顶和浅滩处相对较弱.

参考文献:

- [1] Blumberg A F, Mellor G L. A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model[C]// Heaps N. Three-Dimensional Coastal Ocean Models Washington: American Geophysical Union, 1987: 208.
- [2] 刘浩,尹宝树.泉州湾潮汐、潮流及浅滩干湿变化的数值研究[J].水动力学研究与进展, 2006, 21(6): 693 ~ 699.
- [3] 郭文伟.水运工程测量手册[M].北京:人民交通出版社, 2001: 496 ~ 504.

Numerical study on the tidal regime in Meizhou Bay

LIU Hao¹, PAN Wei-ran², LUO Zhi-bin², SHI Xiao-feng³

(1. Yantai Institute of Coastal Zone Research for Sustainable Development, CAS, Yantai 264003, China;

2. Department of Oceanography, Xiamen University, Xiamen 361005, China; 3. Environmental Science Research Center, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: A 2-D estuarine coastal ocean model (ECOM) with moving boundary is used to reproduce the tidal regime in Meizhou Bay. It shows that simulation results agree well with the observations. Based on the validated simulations, the tidal prism and water exchange period are further estimated. With conservative tracer method, it is found that the half and 80% of water exchange period are 5 and 15 days, respectively. Additionally, the water exchange is strong in the sea-route, while it is relatively weak in the end of the bay or on tidal flats.

Key words: Meizhou Bay; numerical model; tides and tidal currents; water exchange

(责任编辑:郭水伙)