

# 廉州湾海域风暴潮漫滩模拟 The Simulation of Storm Surge Inundations of the Lianzhou Bay

翁美钦      夏华永      莫栋梁      郭芝兰  
Weng Meiqin   Xia Huayong   Mo Dongliang   Guo Zhilan

(广西海洋监测预报中心 北海市四川路 10 号 536000)

(Guangxi Marine Monitoring & Forecasting Center, 10 Sichuanlu, Beihai, Guangxi, 536000)

**摘要** 用 ADI 干湿网格法和引入辐射边界条件反应活动边界, 建立一个风暴潮漫滩模型。模型用于廉州湾海域漫滩模拟, 模拟过程中稳定性良好, 模型具有预报漫滩受灾范围的应用价值。

**关键词** 风暴潮漫滩 ADI 干湿网格法 辐射边界条件

中图法分类号 P 731.23

**Abstract** By using ADI dry-wet-grid method and radiation boundary condition, a numerical model of storm surge inundation is presented. The model is used to simulate the storm surge inundations of the Lianzhou Bay, the results show that the model has good stability and is applicable to forecasting flood areas.

**Key words** storm surge inundation, ADI dry-wet-grid method, radiation boundary condition

广西沿海滩涂宽阔, 大的风暴潮发生时, 漫滩淹没会造成沿海人民严重的财产损失, 因此, 预报风暴潮漫滩具有重要意义。

风暴潮漫滩数值计算的研究始于本世纪 70 年代, 近年来我国也开始了风暴潮漫滩的模拟工作, 其中孙文心、史峰岩的工作<sup>[1~3]</sup>较为突出。在现有的漫滩模型中, ADI 方法在交替方向采用隐式处理, 模型稳定性好, 在潮流运动和污染物扩散模拟中已被广泛证明具有较好的应用效果, 吴巍等人<sup>[4]</sup>采用 ADI 方法及动边界的干湿网格模式对渤海局部海域风暴潮漫滩进行数值计算, 获得了良好的应用效果。干湿网格法处理动边界十分简单, 该方法通过对计算点的“干”、“湿”判断确定计算域, 岸边界都假定为“瞬时垂直壁”, 计算过程与固定域的方法一致。鉴于 ADI 方法的稳定性及干湿网格法的简易性, 本模型也采用此方法。但“瞬时垂直壁”假定是不尽合理的, 在干湿网格模式的基础上, 本文方法中还引入辐射边界条件, 以更合理的反应活动边界。

## 1 风暴潮漫滩模型

### 1.1 基本方程组及差分格式

采用二维浅水全流方程组反应风暴潮流运动。建

立如下坐标系:  $xoy$  平面与平均海平面重合,  $x$  轴向东,  $y$  轴向北。在此坐标系下, 方程组可写为

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - fv = -g \frac{\partial z}{\partial x} + \frac{\tau_{ax}}{\rho h} - g \frac{u \sqrt{u^2 + v^2}}{c_s^2 h} \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + fu = -g \frac{\partial z}{\partial y} + \frac{\tau_{ay}}{\rho h} - g \frac{v \sqrt{u^2 + v^2}}{c_s^2 h} \quad (3)$$

式中,  $t$  为时间;  $z$  为水位;  $u, v$  分别为  $x, y$  方向水深平均的流速分量;  $h$  为海水深度;  $c_s$  为 Chezy 系数,  $c_s = \frac{1}{n}h^{1/6}$ ,  $n$  为海底粗糙度, 在廉州湾风暴潮模拟中,  $n$  取 0.02;  $\tau_{ax}, \tau_{ay}$  为海面风应力。

变量分布在 Arakawa C 网格上, 其相对位置见图 1。ADI 方法差分格式如下<sup>[4]</sup>:

为方便起见, 定义如下运算符:

$$F_{i,j}^n = F(i\Delta x, j\Delta y, n\Delta t)$$

$$i = 0, \pm \frac{1}{2}, \pm 1, \pm \frac{3}{2}, \dots; j = 0, \pm \frac{1}{2}, \pm 1, \pm \frac{3}{2}, \dots; n = 0, \frac{1}{2}, 1, \frac{3}{2}, 2, \dots;$$

$$F^x = \frac{1}{2}(F_{i,j} + F_{i+1,j}), \text{ 于 } (i + \frac{1}{2}, j);$$

$$F_y = \frac{1}{2}(F_{i,j} + F_{i,j+1}), \text{ 于 } (i, j + \frac{1}{2});$$

$$F_x = \frac{1}{\Delta x}(F_{i+1,j} - F_{i,j}), \text{ 于 } (i + \frac{1}{2}, j);$$

$$F_y = \frac{1}{\Delta y}(F_{i,j+1} - F_{i,j}), \text{ 于 } (i, j + \frac{1}{2});$$

$$F = \frac{1}{4}(F_{i,j} + F_{i+1,j} + F_{i,j+1} + F_{i+1,j+1}), \text{ 于 } (i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}).$$

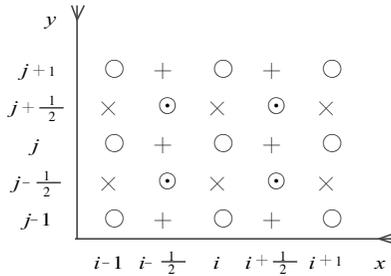


图1 变量布置图

Fig. 1 The locations of model variables

○: 水位  $z$  计算点 Points for calculating  $z$ ; +: 流速  $u$  计算点 Points for calculating  $u$ ; ×: 流速  $v$  计算点 Points for calculating  $v$ ; ⊙, ○: 水深  $h$  及高程  $z_b$  分布点 Points for  $h$  and  $z_b$ .

根据 ADI 方法的离散原则, 将方程组化成对应的差分形式。

a) 由  $n\Delta t \rightarrow (n + \frac{1}{2})\Delta t$

在  $(i, j)$ , 连续方程(1) 可离散为

$$z^{n+1/2} = z^n - \frac{1}{2} \Delta t \{ (z^x - z_b^x)^n u^{n+1/2} \}_x - \frac{1}{2} \Delta t \{ (z^y - z_b^y)^n v^n \}_y, \quad (4)$$

在  $(i + \frac{1}{2}, j)$ , 动量方程(2) 可离散为

$$u^{n+1/2} = u^n + \frac{1}{2} \Delta t f \bar{v}^n - \frac{1}{2} \Delta t u^{n+1/2} (u^x)_x^n - \frac{1}{2} \Delta t \bar{v}^n (u^y)_y^n - \frac{1}{2} \Delta t \tan(z^{n+1/2})_x + \frac{1}{2} \Delta t \frac{\tau_{ax}}{\rho h^y} - \frac{1}{2} \Delta t \tan \frac{u^n [(u^n)^2 + (\bar{v}^n)^2]^{1/2}}{(C_s^x)^2 h^y} \quad (5)$$

在  $(i, j + \frac{1}{2})$ , 动量方程(3) 可离散为

$$v^{n+1/2} = v^n - \frac{1}{2} \Delta t f \bar{u}^{n+1/2} - \frac{1}{2} \Delta t \bar{u}^{n+1/2} (v^x)_x^n - \frac{1}{2} \Delta t \bar{v}^{n+1/2} (v^y)_y^n - \frac{1}{2} \Delta t \tan(z^n)_y + \frac{1}{2} \Delta t \frac{\tau_{ay}}{\rho h^x} - \frac{1}{2} \Delta t \tan \frac{v^{n+1/2} [(\bar{u}^{n+1/2})^2 + (v^n)^2]^{1/2}}{(C_s^y)^2 h^x} \quad (6)$$

b) 由  $(n + \frac{1}{2})\Delta t \rightarrow (n + 1)\Delta t$

在  $(i, j)$ , 连续方程(1) 可离散为

$$z^{n+1} = z^{n+1/2} - \frac{1}{2} \Delta t \{ (z^x - z_b^x)^{n+1/2} u^{n+1/2} \}_x - \frac{1}{2} \Delta t \{ (z^y - z_b^y)^{n+1/2} v^{n+1} \}_y, \quad (7)$$

在  $(i, j + \frac{1}{2})$ , 动量方程(3) 可离散为

$$v^{n+1} = v^{n+1/2} - \frac{1}{2} \Delta t f \bar{u}^{n+1/2} - \frac{1}{2} \Delta t \bar{u}^{n+1/2} (v^x)_x^{n+1/2} - \frac{1}{2} \Delta t v^{n+1} (v^y)_y^{n+1/2} - \frac{1}{2} \Delta t \tan(z^{n+1})_y + \frac{1}{2} \Delta t \frac{\tau_{ay}}{\rho h^x} - \frac{1}{2} \Delta t \tan \frac{v^{n+1/2} [(\bar{u}^{n+1/2})^2 + (v^{n+1/2})^2]^{1/2}}{(C_s^y)^2 h^x} \quad (8)$$

在  $(i + \frac{1}{2}, j)$ , 动量方程(2) 可离散为

$$u^{n+1} = u^{n+1/2} + \frac{1}{2} \Delta t f \bar{v}^{n+1} - \frac{1}{2} \Delta t u^{n+1} (u^x)_x^{n+1/2} - \frac{1}{2} \Delta t v^{n+1} (u^y)_y^{n+1/2} - \frac{1}{2} \Delta t \tan(z^{n+1})_x + \frac{1}{2} \Delta t \frac{\tau_{ax}}{\rho h^y} - \frac{1}{2} \Delta t \tan \frac{u^{n+1} [(\bar{u}^{n+1/2})^2 + (v^{n+1})^2]^{1/2}}{(C_s^x)^2 h^y} \quad (9)$$

在以上的两组差分方程(4), (5), (6) 和(7), (8), (9) 中, 每组都是含有 3 个未知量  $z, u$  和  $v$  的方程组, 而每组的前两个方程分别组成  $z, u$  和  $z, v$  的隐式方程组, 每组的第 3 个方程分别是关于  $v$  和  $u$  的显式方程。因此, 模型的计算方法是用追赶法先行求解隐式方程组得到  $z, u$  (或  $z, v$ ), 然后直接求解  $v$  (或  $u$ )。

## 1.2 活动边界的处理

若采用干湿点判断法处理潮滩活动边界, 其过程如下: 在岸边界处, 将邻近计算点的水位等值外推, 根据潮滩“淹没”与“干出”过程同潮位变化的相关关系, 当  $h \leq 0$  时, 潮滩露出, 当  $h > 0$  时, 潮滩淹没。如果在某一时刻一节点干出, 那么将此节点从计算域中去掉, 同时, 将与此水位点相邻的流速节点设置为零流速; 如果某个水位点判断为淹没, 则将此点归入计算域。在判断中, 为了确保潮流方程不失去物理意义, 选取一个最小水深  $h_{\min}$  作为判定值, 若  $h \leq h_{\min}$ , 则认为节点干出, 本模型取  $h_{\min} = 0.5$  m。在滩涂宽阔的海域, 涨落潮过程中有较多的节点“淹没”或“干出”, 这种“边界的推移”会引入数值干扰, 为了避免连续引入干扰, 可隔数个时间步长才判断一次边界(但必须确保在这几个时间步长内水位的升降不超过  $h_{\min}$ )。此外, 为了减小误差传播, 本模型对计算结果作 5 点线性平滑。

由于干湿网格法假定岸边界为“瞬时垂直壁”(即岸边界法向流速为零), 在滩涂开阔的海区, 这种假定与风暴潮时的物理背景并不一致。为了克服“瞬时垂直壁”假定的缺点, 在模型中引入辐射边界条件<sup>3</sup>

$$u_n = \frac{\partial h}{\partial t} / \frac{\partial z_b}{\partial n} \quad (10)$$

式中,  $n$  表示岸边界法向,  $z_b$  表示海底地形,  $\partial z_b / \partial n$  即海底坡度,  $u_n$  为岸边界法向流速。引入辐射边界条

件之后,当某个水位点判断为“干出”时,其相邻的流速点并不设置为零流速,而是采用式(10)进行计算。有时,海滩平坦,底坡为零,在利用式(10)时,会引起计算错误,因此引入最小坡度,本模型中,最小坡度设置为计算域内零潮线到平均海平面之间的平均坡度。应用干湿网格法时,人为引起边界的不连续移动,引入计算误差,在运用式(10)时,规定  $u_n$  小于其相邻流速计算点的值。

## 2 廉州湾风暴潮漫滩数值模拟

廉州湾为北海与合浦所环抱,与南流江相接,滩涂较为宽阔,在广西沿海较有代表性,历史上曾多次受台风正面袭击。因此选择廉州湾作局部海域的漫滩模拟。

模拟区域为  $21^{\circ}26'20''N$  以北,  $108^{\circ}45'E$  以东海域(图2)。空间步长取  $1\ 000\ m$ ,时间步长为  $60\ s$ 。在开边界输入强迫水位值,边界水位值由北部湾三维风暴潮模型提供。为了探讨极浅水处风暴潮特征,分别进行8007号台风纯风暴潮和耦合潮位的漫滩模拟。

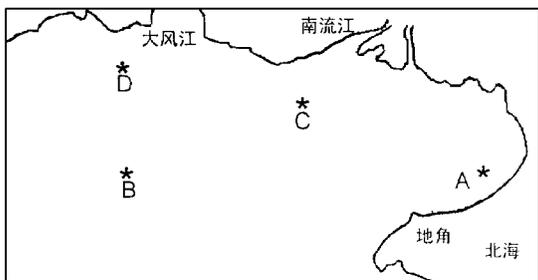


图2 廉州湾示意图

Fig. 2 The sketch of the Lianzhou Bay

计算结果表明,在湾内极浅水处,不同位置的水位过程线(图3)和北海站的潮位过程线相似,耦合增减水极值都略小于纯风暴潮增减水极值,在减水过程中的某些时刻及极值增水过后,两条曲线差别明显。在湾内北海附近的海域,由于地形特点,离岸风的交角较大,引起的减水也较大(图3a),在计算域西部区域,减水相对要小(图3b),相差大于  $50\ cm$ 。A、B两点(位置见图2)处的增水情况正好相反,但相差幅度不大。离岸越近,增减水也就越大,例如D点处的减水比B点处减水大  $15\ cm$ ,增水大  $6\ cm$ ,在开边界处,最大增水不大于  $90\ cm$ ,但岸边增水大于  $100\ cm$ 。在大风江口,由于地形的特殊性,最大增水达  $130\ cm$ ,而大区域模型却没法反应细微地形对风暴潮位的作用。因此,建立二维漫滩模型还是必要的。

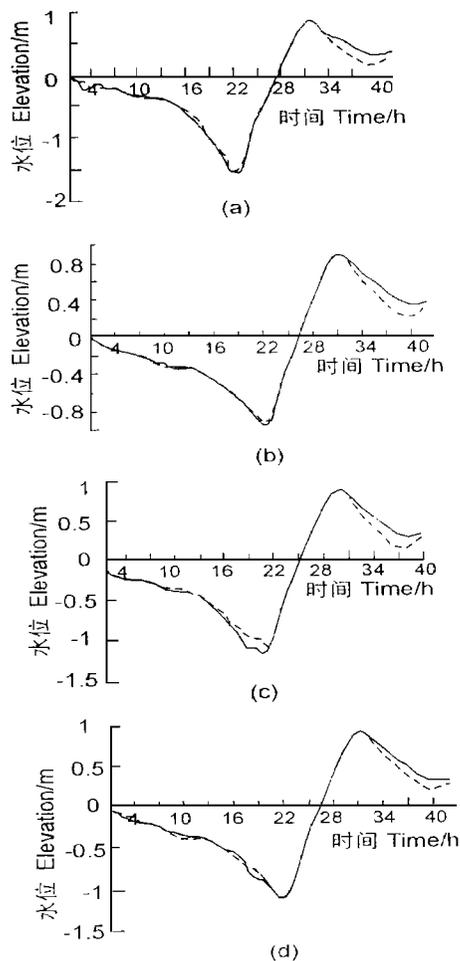


图3 风暴潮位过程线

Fig. 3 Time history of storm surges

—纯风暴潮 Tidal level lift by storm surge, - - - 耦合增水 Tidal level lift by both tide and storm surge. (a) A点 Point A; (b) B点 Point B; (c) C点 Point C; (d) D点 Point D.

为了解风暴潮流的漫滩过程,我们输出几个典型的流场。比较耦合潮流(图4)与纯风暴潮流(图5)可知,二者的流场比较接近,因此,近岸流场主要受风暴潮流支配,这是计算域离台风路径较近,受风应力作用较强的原因。在台风未进入北部湾之前,廉州湾受离岸风作用,且风向与岸线交角较大,潮流表现为离岸流(图4a,图5a),滩涂不断露出。台风中心进入北部湾后但还未过廉州湾所在的经度时,廉州湾海面的风向趋于与岸线平行,计算域的流态复杂(图4b,图5b),在近岸有沿岸流,且流速较大,在开边界处,则有离岸流存在,而此时的滩涂仍在不断露出。随着台风的进一步西行,在廉州湾海域,风向逐渐转为向岸风,潮流开始向岸流动,在北海附近,开边界处的向岸流最大,最大流速近  $1.0\ m/s$ (图4c,图5c),而在计算域的西部边界处,潮流始终有沿

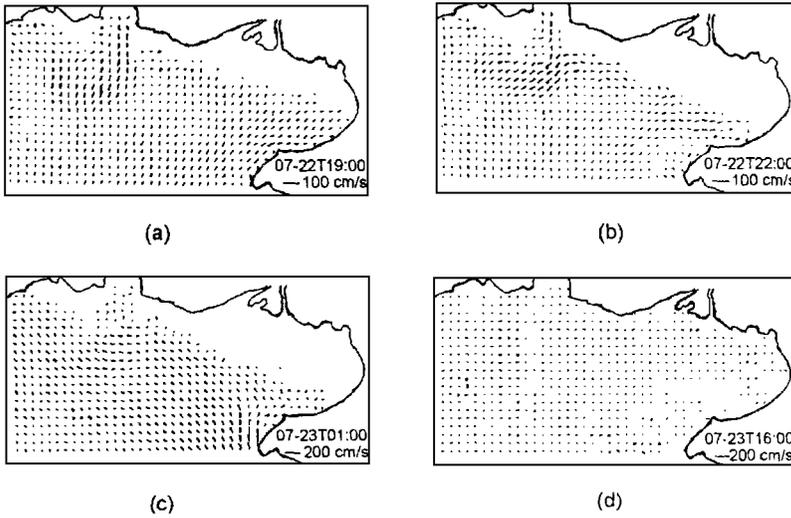


图4 耦合潮流

Fig. 4 Current fields by both tide and storm surge

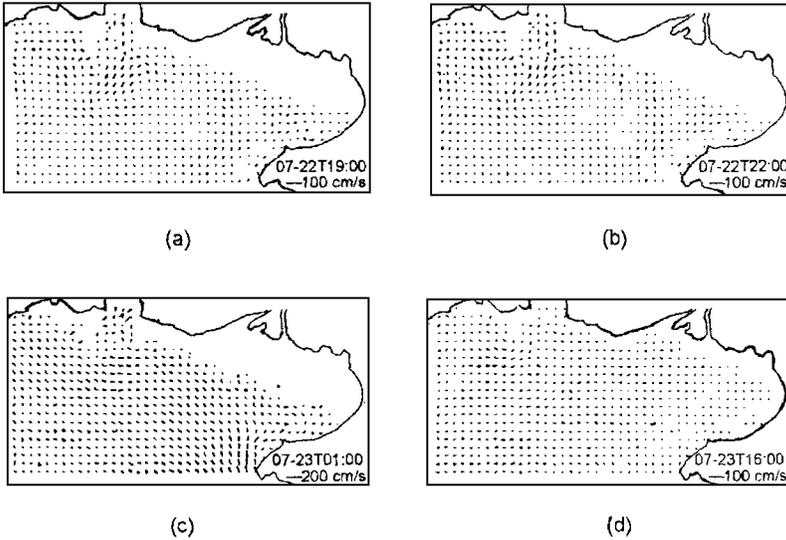


图5 纯风暴潮流

Fig. 5 Current field by storm surge

岸流和向岸流的双重趋势，潮位逐渐上升。当潮位达到最高时，廉州湾所有滩涂全部被淹没（图4d）。

### 3 结语

ADI干湿网格法在渤海局部海域的应用中<sup>[4]</sup>，当采用小网格（1/48经纬度）计算时，预报淹水面积相对误差为16.61%，其应用效果是良好的。在笔者的模拟中，由于缺乏漫滩范围的实测资料，无法得出淹没面积的相对误差，但本文模型引入了辐射边界条件，放弃了“瞬时垂直壁”假定，模型更能体现实际流体运动的物理过程，因此，本文模拟结果是合理的。

本文的模拟是试验性的，要做好风暴潮的漫滩预报，需要详尽的地形资料，及精细的网格，实用的预报模型还需要做进一步的工作。

### 参考文献

- 1 孙文心, 杨宗严, 史峰岩. 风暴潮漫滩数值预报模式分析与探讨. 青岛海洋大学学报, 1994, 24 (3): 293~300.
- 2 史峰岩, 孙文心. 渤海局部海域风暴潮漫滩的数值模拟. 海洋与湖沼, 1993, 24 (1): 16~23.
- 3 史峰岩, 孙文心. 极坐标变换变边界模型及其应用. 海洋与湖沼, 1995, 26 (4): 369~376.
- 4 吴 巍, 孙文心. 渤海局部海域风暴潮漫滩计算模式——ADI干湿网格模式在渤海局部海域风暴潮漫滩计算中的应用. 青岛海洋大学学报, 1995, 25 (2): 146~152.
- 5 曹祖德, 王桂芬. 波浪掀沙、潮流输沙的数值模拟. 海洋学报, 1993, 18 (1): 107~118.

(责任编辑: 邓大玉)