

防城港湾潮流数值模拟试验

李树华 陈文广 彭云胜 刘敬合 陈雄

(广西海洋研究所 北海 536000)

摘要 根据二维潮波基本方程,采用有限差分方法,计算了防城港湾的潮汐和潮流。由实测值与计算值的比较可知,该项计算结果较好,基本能揭示防城港湾的潮流运动规律。

关键词 潮流 数值模拟 防城港

防城港是广西的一个新建港口。港湾口门向南敞开,东有企沙半岛,西为白龙半岛,中部被NE—SW向的渔沥岛分隔成东西两部分。东部为暗埠口江水道,西部为防城港水道。近年来,随着港口的开发建设,港湾的环境污染问题显得越来越突出。为了掌握防城港湾流况的变化趋势及污染扩散规律,我们利用数值计算理论,模拟了该湾的潮流场和余流场。本文是污染扩散模拟研究中的一部分内容,我们还将在在此基础上,模拟油类在潮流和余流作用下的扩散规律,以便为决策部门对海湾环境保护及综合治理提供科学依据,并为海湾的物理自净能力和环境容量作出定量评价。

本文研究范围包括 $108^{\circ}13' \sim 108^{\circ}25'E$, $21^{\circ}30' \sim 21^{\circ}40'N$ 。具体网格布设见图1。

1 潮波基本方程组

1.1 潮波动力学方程

本模型采用笛卡尔直角坐标系, X轴和Y轴位于水平面上, Z轴垂直向上。二维非恒定流的基本控制方程取如下形式:

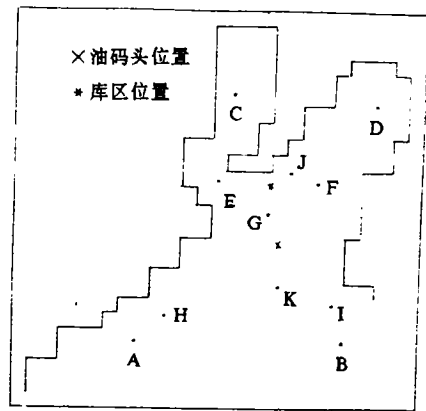
$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(Hu) + \frac{\partial}{\partial y}(Hv) = 0$$


图1 计算区域及网格编号

(1)

$$\frac{\partial u}{\partial t} + U \frac{\partial u}{\partial x} + V \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + Ru = 0$$

(2)

$$\frac{\partial v}{\partial t} + U \frac{\partial v}{\partial x} + V \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + Rv = 0$$

(3)

式中:

$$Ru = \frac{g}{c^2} \cdot \frac{(u^2 + v^2)^{1/2} \cdot u}{H} - fv$$

$$Rv = \frac{g}{c^2} \cdot \frac{(u^2 + v^2)^{1/2} \cdot v}{H} + fu$$

H 为自由表面到海底的深度; ζ 为未扰动海面起算的潮位高度; h 则为水深; t 为时间; 水平直角坐标轴 X 和 Y 分别指向东、北向; u 和 v 分别为 X 、 Y 方向上垂线平均流速分量; c 为 chezy 系数; f 为柯氏参数。

1.2 差分格式

首先把计算海区分为一列边长为 l 的正方形网格,取各节点坐标为 $X = ml, Y = nl (m, n = 0, 1, 2, \dots)$ 。利用一种阶梯式网格,分别计算 u, v 和 ζ 。其中,潮流 u, v 和潮位 ζ 是错开计算的,且相互之间相差半个时间步长 l 。它们的各点坐标分别为 $u[(2m+1)l, 2nl]$ 、 $v[(2ml, (2n+1)l]$ 以及 $\zeta(2ml, 2nl)$ 。

在潮波基本方程组中,以向前差商代替对时间的导数,以中间差商代替对空间的导数,把控制方程 (1~3) 转化为一种显式差分格式:

$$\begin{aligned} & \frac{\zeta_{2m,2n}^{2k+2} - \zeta_{2m,2n}^{2k}}{2\tau} + \frac{1}{2L} [(H_u)_{2m+1,2n}^{2k+1} - (H_v)_{2m-1,2n}^{2k+1}] + \frac{1}{2l} [(H_v)_{2m,2n+1}^{2k+1} - (H_v)_{2m,2n-1}^{2k+1}] = 0 \\ & \frac{U_{2m+1,2n}^{2k+1} - U_{2m+1,2n}^{2k-1}}{2\tau} + \frac{U_{2m+1,2n}^{2k-1}}{2l} (U_{2m+3,2n}^{2k-1} - U_{2m+1,2n}^{2k-1}) + \frac{V_{2m+1,2n}^{2k-1}}{2l} (U_{2m+1,2n+2}^{2k-1} - U_{2m+1,2n}^{2k-1}) \\ & + \frac{g}{2l} (\zeta_{2m+2,2n}^{2k} - \zeta_{2m,2n}^{2k}) + R_n^{2k-1} = 0 \\ & \frac{V_{2m,2n+1}^{2k+1} - V_{2m,2n+1}^{2k-1}}{2\tau} + \frac{U_{2m,2n+1}^{2k-1}}{2l} (V_{2m+2,2n+1}^{2k-1} - V_{2m,2n+1}^{2k-1}) + \frac{V_{2m,2n+1}^{2k-1}}{2l} (V_{2m,2n+3}^{2k-1} - V_{2m,2n+1}^{2k-1}) \\ & + \frac{g}{2l} (\zeta_{2m,2n+2}^{2k} - \zeta_{2m,2n}^{2k}) + R_v^{2k-1} = 0 \end{aligned}$$

式中

$$R_n^{2k-1} = \frac{g}{c^2} \cdot \frac{U_{2m+1,2n}^{2k-1}}{H} [(U^2)_{2m+1,2n}^{2k-1} + (\bar{V}^2)_{2m+1,2n}^{2k-1}]^{1/2}$$

$$R_v^{2k-1} = \frac{g}{c^2} \cdot \frac{V_{2m,2n+1}^{2k-1}}{H} [(\bar{u}^2)_{2m,2n+1}^{2k-1} + (V^2)_{2m,2n+1}^{2k-1}] + (V^2)_{2m,2n+1}^{2k-1}^{1/2}$$

由于本模式的 U 点和 V 点是交错计算的。因此,在计算柯氏力以及底摩擦效应时,与分速 U 对应的分速 V 以及与分速 V 对应的分速 U ,我们采用其相邻 4 个节点的算术平均值 \bar{U} 和 \bar{V} ,即:

$$\bar{u}_{2m,2n+1} = \frac{1}{4} (U_{2m+1,2n+2} + U_{2m-1,2n+2} + U_{2m+1,2n} + U_{2m-1,2n})$$

$$\bar{v}_{2m+1,2n} = \frac{1}{4} (V_{2m,2n+1} + V_{2m,2n-1} + V_{2m+2,2n+1} + V_{2m+2,2n-1})$$

1.3 边值及初值的处理

在计算水域与其它水域相通的开边界 Γ_1 (即湾口边界) 上,取流速 $\frac{\partial v}{\partial n} |_{\Gamma_1} = 0$,而潮位则取:

$$\zeta |_{\Gamma_1} = (H_{k_1} + H_{o_1}) \cos(\sigma t - \theta) \quad (4)$$

式中: H_{k_1} 及 H_{o_1} 分别为 k_1 及 o_1 分潮的振幅, σ 和 θ 则分别为 o_1 分潮的角速率及迟角。

在计算水域与陆地交界的闭边界 Γ_2 处,则取 $\vec{v} \cdot \vec{n} = 0$,其中 \vec{v} 为流速矢量, \vec{n} 为边界法矢量。

在实际计算上,湾口开边界的流速是采取向前差分而求得递推公式。而在闭边界上,潮位采取等变率外推的方法,流速则根据边界情况,为满足边界法向全流为零的条件,分两种情况进行处理:在非角点的边界,直接按等变率外推,不作任何修正;在角点边界上,先经过 45° 削平处理后,分不同形状角点而求得外推公式。

在初始时刻 ($t = 0$),除开边界上赋予强迫潮位外,假定整个流场均处于静止状态,即:

$$\zeta(x, y, 0) = 0 \quad (5)$$

$$u(x, y, 0) = 0 \quad (6)$$

$$v(x, y, 0) = 0 \quad (7)$$

上述假定,一般经过 2 小时的计算后,初值的偏差影响可基本消除。

1.4 有关参数的确定

本项计算中的有关参数主要是 chezy 系数,柯氏参数以及步长的选取,水深的处理等。

1.4.1 chezy 系数

chezy 系数是模型的一个主要系数, 它选取得当与否, 直接影响到模型的计算结果。根据以往的经验, chezy 系数按下式确定:

$$c = \frac{1}{n} H^{1/5}$$

式中, n 为海底床面糙率。考虑到防城港湾的海底地貌较为复杂, 既有浅滩, 也有潮沟, 沙波发育的形态和尺寸在其间的分布是不尽相同的。而且, 在不同的潮汐状态下, 其形状阻力也有所差异。因此, n 值并非一个常数。经过多方案试验比较, 对 n 值的选取分涨潮和落潮两种情况, 确定如下:

$$\begin{aligned} \text{涨潮时: } n &= \begin{cases} 0.027 & H < 1.5\text{m} \\ 0.017 + 0.015/H & H \geq 1.5\text{m} \end{cases} \\ \text{落潮时: } n &= \begin{cases} 0.025 & H < 1.5\text{m} \\ 0.015 + 0.015/H & H \geq 1.5\text{m} \end{cases} \end{aligned}$$

利用上式选取的 n 值, 基本符合防城港湾的床面糙率分布状况。通过上机试算, 计算结果与实际潮波吻合得较为理想。

1.4.2 步长

根据有关研究成果, 在忽略摩擦效应的情况下, 为了使计算达到稳定性要求, 时间步长 τ 和空间网格间距 l 以及计算海区最大水深 h 必须满足下列关系式:

$$\sqrt{2gn}/(l/\tau) < 1 \quad (9)$$

本计算区域最大水深为 15m。时间步长取 45s, 空间步长取 800m。把这些量值代入上式, 满足稳定性条件。如上所述, 稳定性判别条件是忽略了摩擦影响的情况下得出的, 对于考虑摩擦的情况, 由于摩擦效应使波动传播速度变慢, 因此, 上述稳定性的判别对方程 (1~3) 也必然成立, 故可认为本项的计算结果是稳定的收敛解。

1.4.3 柯氏参数

由于防城港湾面积较小, 因此, 我们把柯氏参量作为一个常数来处理, 即取地理纬度 $\varphi = 21^{\circ}35'$ 的固定值, 由此计算得柯氏参量 $f = 5.12 \times 10^{-5}/s$ 。

1.4.4 水深

本项计算的各节点水深, 按海图深度读取。为了不致使低潮时露底, 各网格点均布设在 2m 等深线以下。在实际计算过程中, 各节点的水深使用了平滑技术。即使用 5 点平滑算子进行平滑处理, 其公式为:

$$\bar{h}_{i,j} = (1 - \bar{s})h_{i,j} + \frac{\bar{s}}{4}(h_{i-1,j} + h_{i+1,j} + h_{i,j-1} + h_{i,j+1})$$

式中, \bar{s} 取 0.5。

2 计算值与实测值的比较

潮流数值模拟结果的优劣, 主要取决于计算的潮位和流场的变化过程是否与实测资料相符。为了使数学模型能较好地复演天然潮波, 我们反复修改边界网格及海区的 chezy 系数, 并且不断地把计算结果与实际潮汐过程比较, 直至把计算的潮位调试到与实际潮位过程十分相似为止。把各参数调试好了以后, 再继续计算。图 2 是计算的潮位与实测潮位的变化过程曲线。其中, 实测过程曲线是按式 (4) 求得的, 从图中可以看出, 计算的高潮高与实测的高潮高的绝对误差为 3.8cm, 而低潮高的误差则为 4.6cm。计算的高潮时间略比实测的高潮时间提

前8分钟,而低潮时间则稍微延后。从这里可以看出,本项计算结果与实测结果的拟合程度是十分良好的。

为了说明模型的计算效果及其稳定性,我们对湾中几个计算点各潮周期相应时刻的潮位进行了比较,结果见表1。从表中可看出,第I潮周期与第I潮周期之间的潮位误差较大,达4.3cm;第I潮周期与第II潮周期之间的误差最大为1.3cm;而第II潮周期与第IV潮周期之间的误差仅0.6cm。由此可知,本项计算的稳定性是良好的,且收敛快,第II潮周期开始就几乎达到了稳定。因此,第IV潮周期的计算结果可视为稳定的收敛解。

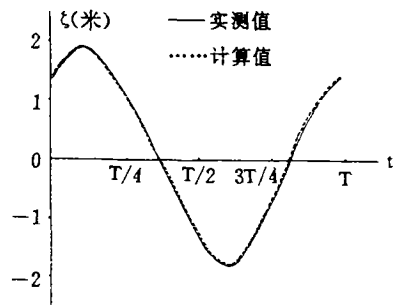


图2 计算的潮位与附近实测潮位的变化过程曲线

表1 湾内几个计算点各潮周期的 ξ 值比较 (单位: cm)

| 站号 | 潮周期 | T/25 | 3T/25 | 5T/25 | 7T/25 | 9T/25 | 11T/25 | 13T/25 | 15T/25 | 17T/25 | 19T/25 | 21T/25 | 23T/25 | T |
|----|-----|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|------|
| A | I | 142.2 | 180.3 | 168.5 | 110.2 | 39.8 | -20.3 | -93.4 | -161.2 | -180.3 | -160.4 | -108.5 | -10.8 | 69.7 |
| | II | 144.0 | 181.6 | 169.3 | 110.7 | 39.2 | -20.8 | -93.0 | -163.2 | -180.8 | -160.0 | -108.2 | -10.0 | 69.2 |
| | III | 142.8 | 181.5 | 169.4 | 110.9 | 39.4 | -20.5 | -93.2 | -164.1 | -180.5 | -160.3 | -108.4 | -10.3 | 69.3 |
| | IV | 142.2 | 181.4 | 169.3 | 110.7 | 39.6 | -20.5 | -93.1 | -164.6 | -180.1 | -160.3 | -108.4 | -10.3 | 69.2 |
| B | I | 141.1 | 180.9 | 169.7 | 110.4 | 40.2 | -20.9 | -92.3 | -163.2 | -181.0 | -160.1 | -108.7 | -10.5 | 69.2 |
| | II | 144.1 | 181.3 | 168.5 | 110.7 | 41.0 | -20.5 | -91.8 | -163.0 | -181.2 | -160.4 | -108.5 | -10.8 | 69.3 |
| | III | 142.8 | 181.5 | 168.6 | 110.8 | 40.8 | -20.0 | -92.1 | -163.1 | -181.3 | -160.2 | -108.9 | -10.6 | 69.3 |
| | IV | 142.2 | 181.4 | 168.5 | 110.6 | 40.7 | -20.2 | -92.1 | -163.1 | -181.4 | -160.2 | -108.9 | -10.6 | 69.3 |
| C | I | 139.4 | 179.8 | 167.9 | 112.1 | 39.5 | -19.4 | -91.9 | -159.5 | -182.4 | -162.3 | -104.9 | -12.2 | 67.8 |
| | II | 140.4 | 182.6 | 167.2 | 112.8 | 42.9 | -19.2 | -91.0 | -159.0 | -182.3 | -162.9 | -104.1 | -12.4 | 67.1 |
| | III | 139.8 | 182.0 | 167.0 | 112.7 | 42.6 | -19.4 | -90.5 | -159.3 | -182.4 | -162.9 | -104.3 | -12.5 | 67.4 |
| | IV | 140.3 | 182.1 | 167.6 | 113.1 | 42.5 | -19.4 | -90.5 | -159.2 | -182.1 | -162.3 | -104.4 | -12.5 | 67.3 |
| D | I | 138.6 | 178.9 | 167.2 | 113.0 | 43.1 | -19.2 | -89.4 | -159.6 | -182.3 | -162.4 | -104.1 | -11.9 | 67.3 |
| | II | 139.9 | 183.1 | 167.3 | 113.4 | 43.5 | -19.7 | -89.6 | -159.8 | -182.1 | -162.0 | -104.2 | -12.4 | 67.9 |
| | III | 140.7 | 182.9 | 167.5 | 113.7 | 44.6 | -19.2 | -89.4 | -159.8 | -182.3 | -162.1 | -104.0 | -12.8 | 67.5 |
| | IV | 139.8 | 182.7 | 167.4 | 113.9 | 44.7 | -19.1 | -89.5 | -159.8 | -182.2 | -162.3 | -104.3 | -12.7 | 67.3 |

3 计算结果分析

根据上面所建立的模型,对防城港湾的潮波系统进行了模拟计算。下面就该湾各时刻的潮流和潮余流作一简要叙述。

3.1 潮流场

由数值计算结果,分别绘制了T/4、T/2、3T/4和T时刻的流场图,具体见图3~6。

由图3可知,在T/4时刻,整个海湾均处于落潮期间,海面约位于半潮面附近。此时,湾

内落潮流速达最强。从流态分布来看，由于牛角沙浅滩的阻隔，港湾内截然分为两股水流，东部水道的暗埠口江一带，流向西南；而西部水道的龙孔敦附近，流向西南偏南，当水流绕过白沙历嘴后，流向东南偏南。最后，两股水流在牛角沙附近汇合，向南流出湾口。最大潮流位于暗埠口江水道及钓鱼台附近和防城港口门，流速均在 30cm/s 以上。

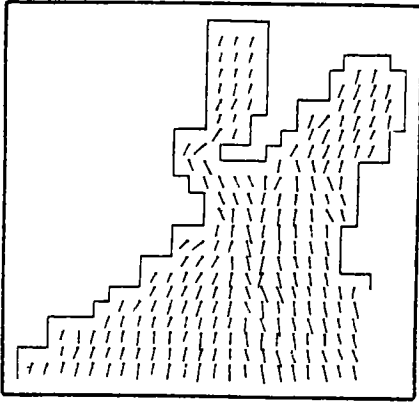


图 3 T/4 时刻潮流场

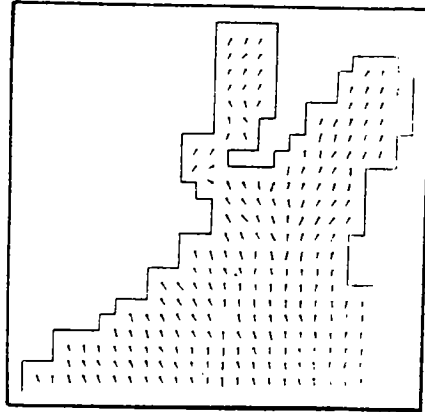


图 4 T/2 时刻潮流场

到 T/2 时刻，潮位将到达低潮阶段。此时，港湾内的流速较弱，且流向不稳定。在防城港口门附近，还出现了一些小涡流。整个湾内的流速在 8cm/s 左右。流向主要为西南至东南流（见图 4）。

从图 5 可以看出，低潮过后，潮位逐渐升高，潮流由落潮流逐渐转向涨潮流。至 3T/4 时刻，潮位将到达半潮面附近，涨潮流达到了最强。其流态的分布，与落潮流恰好相反。水流从湾口注入后，在钓鱼台附近分解为东西两股分支。这两股分支水流均沿潮沟流动。其中，东部主要为东北流，西部则为西北至东北流。其流速一般为 25cm/s，大者可达 38cm/s，比落潮流速稍小。

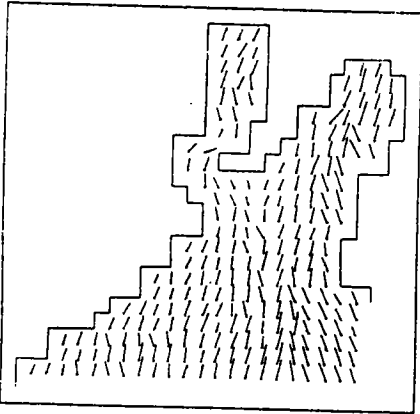


图 5 3T/4 时刻潮流场

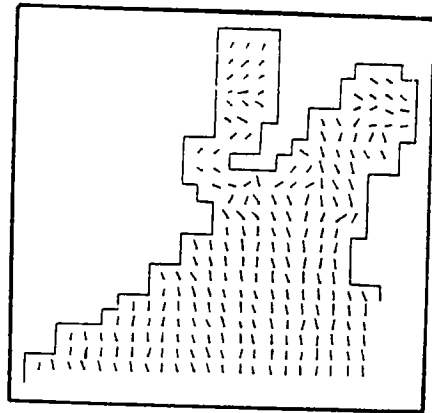


图 6 T 时刻潮流场

在 T 时刻，潮位将到达高潮，此时的流速较小，流向较为紊乱，在湾中出现了几处涡流区，比较明显的为防城港口门。龙孔敦以及暗埠口江水道附近。潮流速度一般为 6cm/s。流向在湾口主要为北向流（见图 6）。至此，整个海湾已完成了一个周期的潮波振动。

为了说明湾内潮流的转流方式及其潮流特征，我们在湾口以及防城港口门选取两个断面，绘制了潮流在一个潮周期的变化过程（见图 7）。从图中可以看出，防城港湾的潮流主要为往

复流，在主航道附近一般为正“8”字形或斜“8”字形的转流方式。潮流的旋转方向，主要为逆时针方向旋转，但在牛角沙浅滩附近，出现一个顺时针方向的旋转区域。

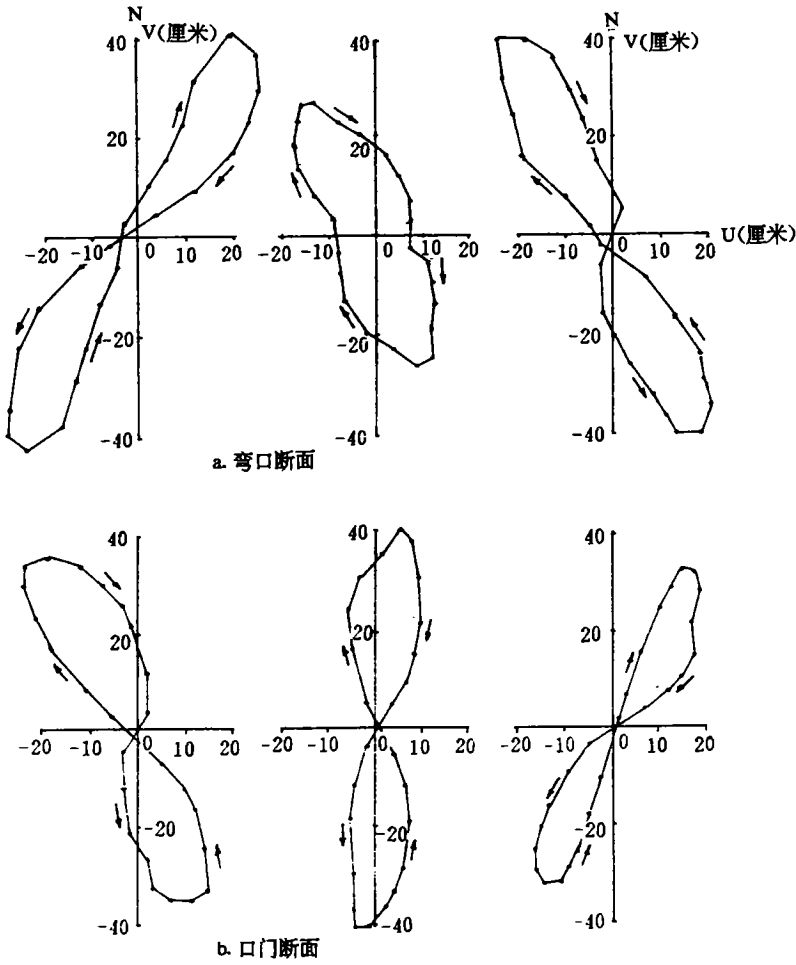


图7 断面潮流变化图

3.2 潮余流场

众所周知，潮余流是海湾中污染物搬运、稀释和扩散的主要因素，掌握潮余流的变化，对了解污染物扩散规律十分重要。计算结果表明，湾顶的潮余流场较为复杂，出现了4个涡旋区。其中，No. 1为顺时针方向涡旋，涡旋中心位于白沙沱嘴，即牛角沙浅滩上；No. 2涡旋位于潭头沿岸，为逆时针方向涡旋；No. 3则为顺时针方向涡旋，涡旋中心位于暗埠回江水道；No. 4位于龙孔墩附近，为顺时针方向涡旋，整个湾内的潮余流流速都较小，一般为1~3cm/s。最大达9cm/s。在湾口一带的潮余流流向，主要为北向流。从潮余流场来判断，它对污染物向湾外扩散是不利的（见图8）。

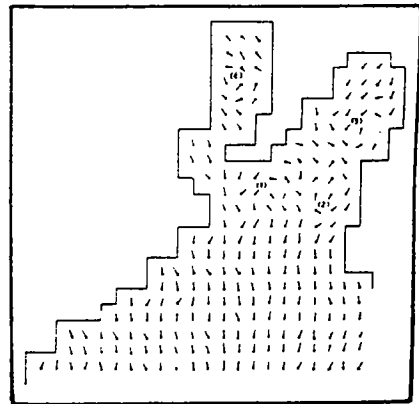


图8 潮余流场

4 结语

上述计算结果表明,由于受地形因素的影响,防城港湾的潮流比较复杂,是海湾污染物扩散的一个主导因素。同时,湾内的潮流变化也比较复杂,形成了4个小涡流。从而导致污染物扩散变化的复杂化。

在上述模拟基础上,根据潮流计算结果,即可对该湾的油类等污染物的扩散进行模拟预测,以便给防城港湾的水质控制提供理论基础。

参考文献

- 1 陈宗镛. 潮汐学. 北京: 科学出版社. 1980.
- 2 张存智. 渤海水质控制模型. 海洋环境科学. 1985, 4 (1): 1~10.
- 3 李树华等. 钦州湾潮流和污染物扩散的数值模型. 海洋环境科学. 1987, 6 (2): 30~37.

Numerical Modeling Experiment of the Tidal Current in the Bight of Fengcheng Harbour

Li Shuhua Chen Wenguang Peng Yunsheng Liu Jinghe Chen Xiong
(Guangxi Institute Oceanography, Beihai)

Abstract According to the two-dimensional tidal wave fundamental equation, the tides and tidal current in the bight of Fengcheng harbour were computed by using finite difference method. The results basically reveal the characteristics of motion of tidal current in the bight of Fengcheng harbour in view of the comparison between the measured values and the calculated values.

Key words tidal current, numerical simulation, Fengcheng harbour