

防城港口门外抛泥区潮流及质点轨迹模拟

Simulations of Tidal Currents and Particle Path at Spoil Site outside Fangcheng Harbor

李树华 夏华永
Li Shuhua Xia Huayong

(广西海洋监测预报中心 北海市四川路 536000)

(Guangxi Marine Monitoring & Forecasting Center, Siqianlu, Beihai, Guangxi, 536000, China)

摘要 模拟研究了防城港倾倒区潮流流场及质点的拉格朗日漂移,结果表明潮流动力场及倾倒点所选位置有利于保证航道的疏浚效果。

关键词 潮流 流场 拉格朗日漂移 质点轨迹

中图法分类号 P 731

Abstract The tidal currents and Lagrangian particle path at spoil site outside the Fangcheng Harbor are simulated. The results show that the tidal currents field and the selected position of spoil site are helpful for dredging the navigation channel at the Fangcheng Harbor.

Key words tidal currents, currents field, Lagrangian path, particle path

防城港倾倒区的主要倾倒物为港口航道疏浚所产生的泥沙,抛泥可随潮流输移,即使在泥沙沉积之后,仍可能因波浪掀沙而随潮流输运到其它位置,如果倾倒区位置不合理,抛泥又被输运到港口航道,达不到航道疏浚的目的。由于潮流是泥沙输移的主要动力因素,因此研究倾倒区潮流动力条件及水质点运动轨迹,可了解抛泥的输运方向,预测航道疏浚的效果。

1 潮流基本方程组

倾倒区及其附近水域水深不大于 25 m,水文要素的垂直变化较小,可用二维浅水方程组来反应潮流运动。方程如下:

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

$$\frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} - fhv = -gh \frac{\partial z}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} (Ah \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (Ah \frac{\partial u}{\partial y}) - g \frac{u \sqrt{u^2 + v^2}}{c^2}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial hv}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} + fhu = -gh \frac{\partial z}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} (Ah \frac{\partial v}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (Ah \frac{\partial v}{\partial y}) - g \frac{v \sqrt{u^2 + v^2}}{c^2}. \quad (3)$$

式中, t 为时间; x, y 分别为东向和北向的平面直角坐标; 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; g 为重力加速度,取值为 9.78

m^2/s ; f 为柯氏力系数; c 为 Chezy 系数, $c_s = \frac{1}{n} h^{1/6}$, n 为海底粗糙度; A 为水平摩擦系数。

在开边界处,给定水位 z ,并假定在外法线方向上, $\frac{\partial V_n}{\partial n} = 0$, V_n 为开边界法向速度, n 为外法线方向。在岸边界处,以折线代替边界曲线,并假定外法线方向的瞬时速度 V_n 为零。

模型的求解采用幂函数方案的有限体积控制法,用 SIMPLER 算法求解^[1]。

2 质点拉格朗日漂移^[2]

在初始时刻 $t = t_0$,位于初始位置 X_0 的标识质点,其拉格朗日速度与欧拉速度关系如下:

$$\vec{U}_L(\vec{X}_0, t) = U[Y(\vec{X}_0, t), t], \quad (4)$$

式中, $Y(\vec{X}_0, t)$ 是标识质点的运动轨迹,式(4)表明只有在 $Y(\vec{X}_0, t)$ 上, U_L 才能与 U 相等。 $Y(\vec{X}_0, t)$ 可由下式确定:

$$\vec{Y}(\vec{X}_0, t) = \vec{X}_0 + \int_{t_0}^t \vec{U}_L(\vec{X}_0, t') dt' \quad (5)$$

$$\text{或 } \vec{Y}(\vec{X}_0, t) = \vec{X}_0 + \int_{t_0}^t U[Y(\vec{X}_0, t'), t'] dt', \quad (6)$$

(5)式与(6)式为 Zimmernan 给出的拉格朗日场与欧拉场之间的变换关系。式中的积分沿质点运动的轨迹进行。于是,拉格朗日平均余流便是水质点在一个潮周期内的漂移距离除以潮周期:

$$\vec{U}_L(\vec{X}_0, t) = \frac{1}{T} [\vec{Y}(\vec{X}_0, t_0 + T) - \vec{Y}(\vec{X}_0, t_0)] =$$

$$\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} \vec{U}_L(X_0, t') dt' \quad (7)$$

为了在计算机上运算,将上述公式离散化,标识质点的拉格朗日漂移表示为

$$\begin{aligned} \vec{Y}_{n+1} &= \vec{Y}_n + \int_{t_0+n\Delta t}^{t_0+(n+1)\Delta t} \vec{U}_L(X_0, t') dt' \\ &= \vec{Y}_n + \int_{t_0+n\Delta t}^{t_0+(n+1)\Delta t} U[Y(X_0, t'), t'] dt', \end{aligned} \quad (8)$$

对于 $t = t_0$ 时刻于位置 X_0 的质点,经过 n 个时间步长后,在 $t = t_0 + (n+1)\Delta t$ 时刻,该质点应位于 Y_{n+1} ,

$$\vec{Y}_{n+1} = \vec{X}_0 + \sum_{i=0}^n \int_{t_0+i\Delta t}^{t_0+(i+1)\Delta t} U[Y(X_0, t'), t'] dt', \quad (9)$$

(9) 式中,

$$\int_{t_0+i\Delta t}^{t_0+(i+1)\Delta t} U[Y(X_0, t'), t'] dt' = \{ \vec{U}[Y(t_0, \Delta t), t_0 + \Delta t] + \frac{1}{2} \Delta t \left(\frac{d\vec{U}}{dt} \right)_{t_0 + \Delta t} \} \Delta t, \quad (10)$$

(10) 式中, $\frac{d\vec{U}}{dt}$ 是欧拉——拉格朗日变换中定义的实质导数。质点拉格朗日漂移轨迹由 (9) 式及 (10) 式计算得到。

3 计算结果分析

计算域为西起 $107^{\circ}56'E$, 东至 $108^{\circ}29'E$, 及 $21^{\circ}15'N$ 以北的水域 (图 1), 计算网格为 $1' \times 1'$, 海底地形从 1:20000 海图 (中国南海北部湾南康港至东兴港,

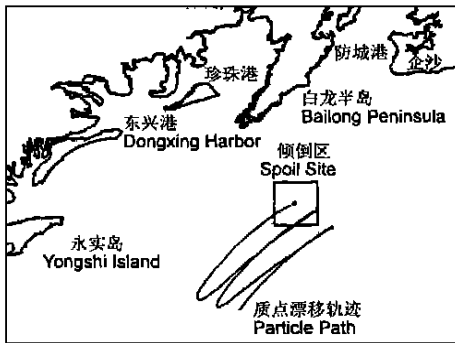


图 1 计算域
Fig. 1 The computation domain

1975年版)读出,时间步长为 $60s$ 。开边界水位由潮汐调和常数计算而得,共采用了 O_1, K_1, M_2, S_4 4 个分潮,在边界上的企沙 ($108^{\circ}29'E, 21^{\circ}35'N$) 及绿朱克山 ($107^{\circ}57'E, 21^{\circ}15'N$) 有调和常数,边界点 ($108^{\circ}29'E, 21^{\circ}15'N$) 由涠洲、企沙及绿朱克山 3 站的调和常数插值而得。边界水位可表示为

$$z = \sum_i f_i a_i \cos(k_i t - d_i - h_i), \quad (11)$$

式 (11) 中, a_i, k_i, h_i 分别为第 i 个分潮的振幅、角速度、

时角, f_i, d_i 分别为振幅订正系数及订正角。由调和常数计算的潮汐为 1999 年 1 月 1 日~4 日潮汐。海底粗糙度 n 取 0.022, 由于计算区域较小,各计算点的柯氏力系数 f 取相同的值,为 $5.1 \times 10^{-5} / s$ 。

图 2 为倾倒地潮位过程线 (1 日 4 点~2 日 5 点)。从图可知,在模拟时段内,倾倒地涨潮历时大于落潮历时,这与广西沿海的潮汐规律一致,潮差为 3.2 m, 大于白龙尾的平均潮差 (2.35 m), 而小于白龙尾的最大潮差 (5.05 m), 模拟结果代表倾倒地区在潮汐较大时的流况。图 3 图 4 图 5 图 6 分别为涨平、高潮、落平、低潮时的流场,模拟区域潮流为往复流,涨潮时流向大致为东北向,落潮时正好相反,落潮潮流大于涨潮流,涨急潮流比落急潮流小 $20 \text{ cm/s} \sim 25 \text{ cm/s}$ 。在高、低潮时,流况较为复杂,转潮流在岸边

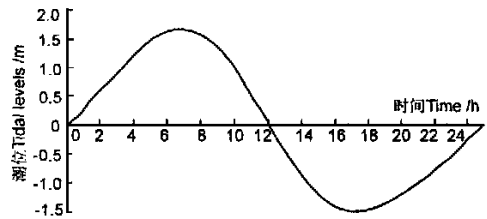


图 2 倾倒地 P 潮位过程线
Fig. 2 The time series of tidal levels at spoil site

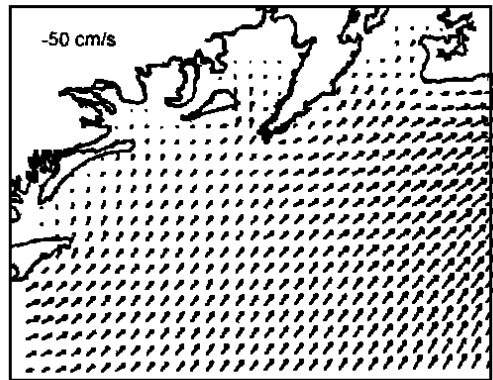


图 3 涨潮流场 (平潮)
Fig. 3 The current field of flood tide at MSL

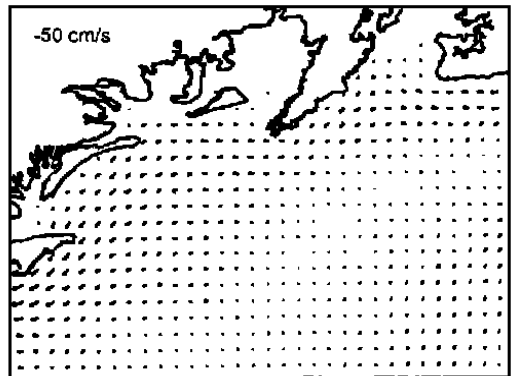


图 4 高潮流场
Fig. 4 The current field at high tide

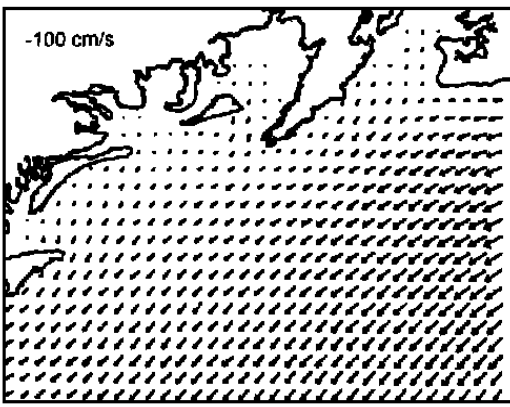


图5 落潮流场 (平潮)

Fig. 5 The currents field of ebb tide at MSL

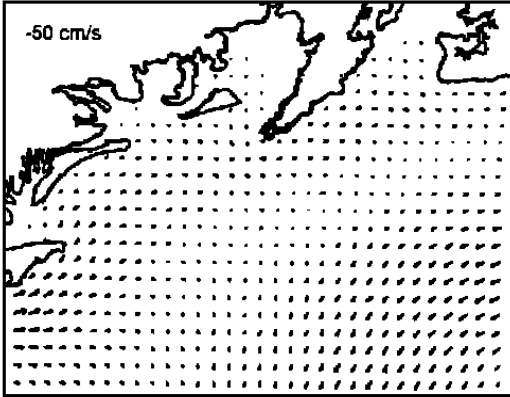


图6 低潮流场

Fig. 6 The currents field at low tide

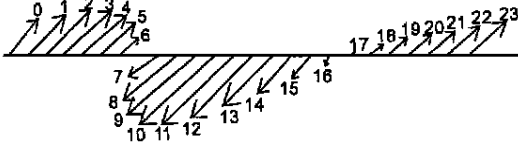


图7 倾倒处潮流流速矢量

Fig. 7 Current vectors at spoil site

较明显 图 7 为倾倒点流速矢量 (箭头为潮流方向, 长短为流速大小, 数字表示时间) 变化图, 从流速矢量可知, 落急流场出现在落平时刻, 而涨平流场却不是涨急流场, 涨急流场出现于潮位涨至高于平均海面约 1 m 时。

4 结语

倾倒点 P 于高潮时刻一水质点的漂移轨迹见图 1, 质点先随落潮流向西南向运动, 随着涨潮流又向东北向运动, 随潮汐涨落而如此反复, 但总的效果却是质点向外海运移。倾倒点于低潮时刻一水质点的漂移轨迹将质点先随涨潮流向东北向运动, 随着落潮流又向西南向运动, 随潮汐涨落而如此反复, 但总的效果也是质点向外海运移。倾倒区抛泥中粗沙会就地沉积, 对于较细的泥沙, 其沉积过程较长, 从质点运动的轨迹可知, 若在落潮时, 细沙随潮流流向西南向, 流向外海; 若在涨潮时, 细沙随潮流流向东北向, 但不会流入防城港内, 且沿途没沉积的泥沙又随潮流流向外海。倾倒区及其附近海域落潮流速大于涨潮流速, 这有利于潮流对细沙的冲刷, 并将其带进外海。综上所述, 将防城港疏浚泥沙抛入选定区域, 可确保疏浚效果, 不会导致疏浚泥沙重新淤积航道。

参考文献

- 1 帕坦卡 S V. 传热与流体流动的数值计算. 北京: 科学出版社, 1984.
- 2 张玉芬, 蔡思忠, 缪克义等. 大连港附近海域疏浚物倾倒区选划研究. 海洋通报, 1992, 11 (6).

(责任编辑: 黎贞崇)

(上接第 278 页 Continue from page 278)

经验算知, 以上三式的平均相对误差分别为 10.2%, 9.3% 和 10.1%。

5 结论

由于回弯的影响范围难以确定, 且所受的影响区也随位置而异, 因此采用由回弯影响而产生的混合扩散系数的增量和虚拟的影响区长度的相乘而成的组合变量 (DL) 来表达回弯的影响。在雷诺准数 $Re = 6300 \sim 25000$ 范围内, 不同形式回弯头的回弯混合扩散参数的关联式为:

半圆形回弯: $ud^2/IDL = 0.44 - 8.72 \times 10^{-5} Re + 5.15 \times 10^{-9} Re^2$;

正向斜接形回弯: $ud^2/IDL = 0.23 - 3.63 \times 10^{-5} Re$

+ $1.8 \times 10^{-9} Re^2$;

反向斜接形回弯: $ud^2/IDL = 0.17 - 2.62 \times 10^{-5} Re + 1.37 \times 10^{-9} Re^2$;

参考文献

- 1 李宽宏, 董毅宏. 垂直管道浸取器的流体力学研究 (1) 直管段的压力降. 化工学报, 1984, (4): 335-343.
- 2 李宽宏, 董毅宏, 刘 琨等. 垂直管道浸取器的流体力学研究 (2) 回弯头的压力降. 化学反应工程与工艺, 1985, (4): 37-44.
- 3 李宽宏, 黎铨海. 垂直管道浸取器的流体力学研究 (3) 斜接回弯头与单元压力降. 化学工程, 1987, (1): 29-32.
- 4 黄世钊, 涂江宁, 李宽宏. 垂直管道浸取器直管内单相流的流动模型. 广西科学, 1998, 5 (4): 273-275.
- 5 李珍华, 李宽宏. 用矩阵法处理非理想脉冲的应答曲线. 广西大学学报 (自然科学版), 1988, (3): 66-71.

(责任编辑: 蒋汉明)