

ECOMSED 三维悬沙扩散数值模型在凤城港航道清淤工程建设中的应用

匡华¹, 姜安刚², 匡良², 吴德星²

(1. 河源职业技术学院, 广东 河源 517000; 2. 中国海洋大学环境科学学院, 山东 青岛 266100)

摘要: 文章用 ECOMSED 三维近岸水动力泥沙数学模型对山东烟台凤城港附近海区的潮流场进行了较高分辨率数值模拟, 在此基础上进一步建立了凤城港航道清淤工程过程中三维悬沙输运-扩散数学模型。该模型以航道中心为悬沙线源, 根据工程过程中连续开挖的特点较好的引入泥沙输入源强, 准确地模拟了该航道中连续开挖 36 小时, 工程区域及其周围海域表、中和底层泥沙浓度分布特征及其随时间的变化规律。

关键词: ECOMSED 数学模型; 航道清淤; 泥沙模拟; 应用研究

中图分类号: O141.4

文献标识码: A

凤城港位于山东半岛南岸, 濒临黄海, 东北为乳山口, 西南为丁字河口, 是烟台市南部唯一的进出口岸。在凤城需要建设一长为 4585m 的航道, 需要对航道进行清淤, 挖掘加深。在此过程中, 会将海底泥沙搅动卷起, 导致海水局部泥沙浓度增大, 这一过程中泥沙如何随潮流扩散运移, 对周围海洋环境的影响如何。本文使用 ECOMSED 模型, 利用数值模拟方法, 对这一问题进行了探讨和研究。

1 潮流数值模型简介

ECOMSED^[1]是目前国际上最先进的三维近岸水动力泥沙数学模型之一, 由 Alan Blumberg 2002 年在三维水动力模型 ECOM 的基础上发展起来。该模式垂向采用坐标, 水平方向采用曲线正交坐标, 能较好地拟合近岸海域复杂的底地形和岸线, 保证近岸浅海区较高的网格分辨率。

1.1 流体动力学基本方程组^[2]

连续方程:

$$\nabla \cdot \bar{V} = \frac{\partial V}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \bar{V} \cdot \nabla U + W \frac{\partial U}{\partial z} - fV =$$

$$-\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_M \frac{\partial U}{\partial z} \right) + F_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \bar{V} \cdot \nabla V + W \frac{\partial V}{\partial z} - fU =$$

$$-\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_M \frac{\partial V}{\partial z} \right) + F_y \quad (3)$$

$$\rho g = -\frac{\partial p}{\partial z} \quad (4)$$

$$F_x = \frac{\partial}{\partial y} \left[2A_M \frac{\partial U}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[A_M \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right] \quad (5)$$

$$F_y = \frac{\partial}{\partial y} \left[2A_M \frac{\partial V}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[A_M \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right] \quad (6)$$

$$\sigma = \frac{z - \eta}{H + \eta} \quad (7)$$

式中, ρ_0 为标准密度; ρ 为海水密度; P 为压力; K_M 为垂向紊流混合涡动扩散率; f 为柯氏系数; \bar{V} 为水平流速矢量; W 为垂向流速; U, V 为对应于 x, y 轴的水平流速分量; t 为时间坐标; z 为在海水表面, $z = \eta(x, y, t)$, 在海底, $z = -H(x, y)$; g 为重力加速度; F_x, F_y , 为湍流扩散项。

方程的定解条件为:

初始条件: $t = 0$ 时,

$$u = u_0, v = v_0, \zeta = \zeta_0 \quad (8)$$

边界条件: 开边界,

$$\zeta = \zeta' \quad (9)$$

边界条件: 岸边界,

$$\vec{V} \cdot \vec{n} = 0 \tag{10}$$

沿岸移动, \vec{n} 为边界法线方向。

由方程(1) - 方程(10)构成了完整的三维海洋动力学闭合方程组。

1.2 模型配置情况

本文计算区域范围为图 1 所示海域, 其坐标范围为 $36^{\circ}08'N - 36^{\circ}45'N, 120^{\circ}36'E - 121^{\circ}39'E$ 。计算方法采用交错 C 网格的有限差分(半隐式)数值方法求解^[2]。为细致研究疏浚工程区域附近的悬沙运输扩散情况, 详细了解工程附近海域的潮流和施工期悬浮泥沙分布情况, 将工程海域(范围为图 1 中 D、E、F、G 四点及岸线围成的海域)进行网格加密。工程海域网格间距为 125m, 其他海域计算网格间距为 500m。

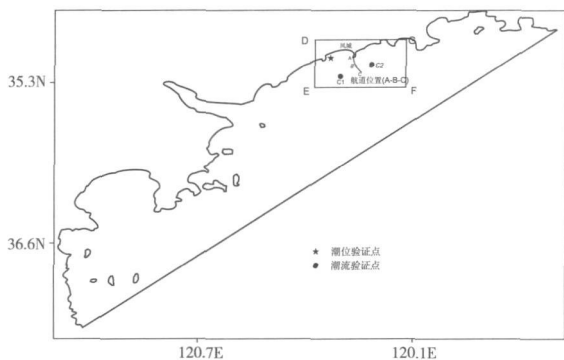


图 1 计算海域地形及验证点位置图

鉴于凤城港海域为正规半日潮, 开边界采用天文调和常数, 主要为 M2 分潮天文调和常数, 其中采用开边界两端点处 M2 调和常数, 其余各点采用线性插值得到。本计算域小于 $100^{\circ} \times 100km$, 温盐场基本为恒定场, 水深数据采用 2003 年新海图(海图号 12310)数据。ECOM-SED 网格主要为正交曲线网格, 本模型配置中水平方向采用正交网格, 垂向采用 σ_t 分 10 层^[3], 可以很好的拟合垂向地形, 如图 2 所示。

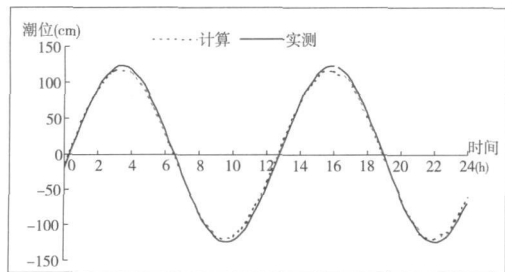


图 2 潮位验证曲线

2 潮汐潮流模型结果

2.1 潮流、潮位计算结果验证

利用 2009 年 12 月 14 日 - 15 日凤城港在 C1、C2 点

的潮流、潮位观测资料, 对模型结果分别进行了潮流潮位验证^[4], 验证结果如图 3 和图 4 所示。计算值和实测值符合良好, 其均方根误差分别为 9.2cm 和 10.5cm/s。模拟结果可信, 满足研究需要。

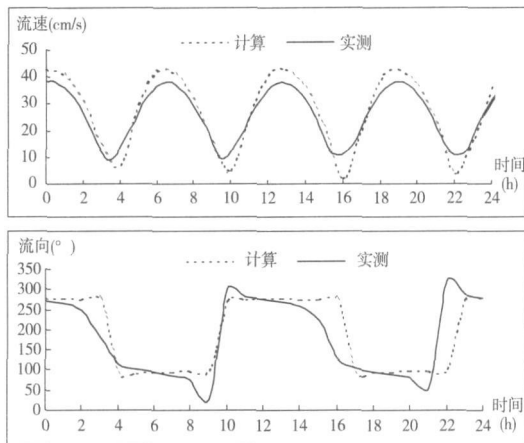


图 3 潮流验证曲线(C1 点)

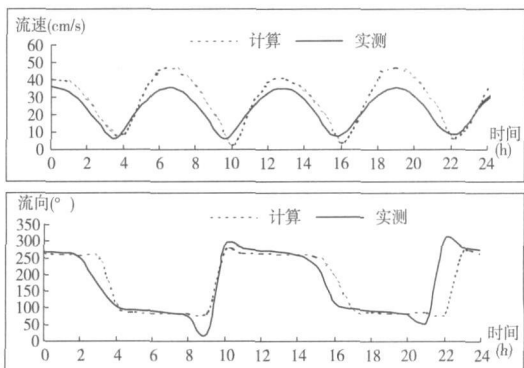


图 4 潮流验证曲线(C2 点)

2.2 潮流场模拟结果

根据改疏浚工程中给出的实际航道位置及竣工后的水深数据, 本文预测了工程建成后的海域流场。由模拟结果可以看出, 该海域工程后流场与工程前流场相比, 整体上变化不大, 仅在航道附近海域, 流场有较大的变化。图 5 和图 6 分别给出了工程后海域涨、落潮中间时刻的模拟潮流场。可以看出, 工程建成后, 离航道距离 1km 范围内潮流场方向变化较大, 流向变化值超过 10%, 流速变化在 5% 左右。离航道 3km 以外海域流速、流向变化值都较小(均小于 5%), 说明疏浚工程对外海潮流场影响较小。

3 泥沙运动模拟研究

3.1 泥沙运动方程^[5-6]

三维泥沙运输的平流扩散方程为:

$$\frac{\partial C_k}{\partial t} + \frac{\partial UC_k}{\partial x} + \frac{\partial VC_k}{\partial y} + \frac{\partial (W - W_{sk})C_k}{\partial z} =$$

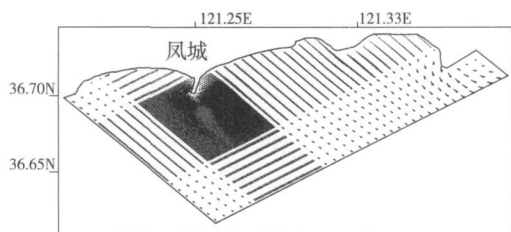


图 5 大海域计算潮流场(落潮中间时)

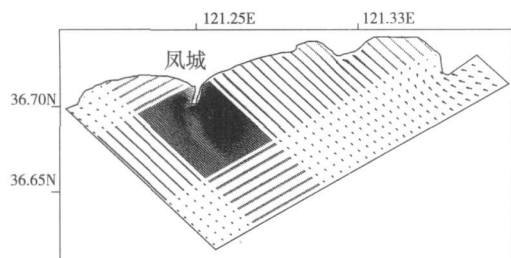


图 6 大海域计算潮流场(涨潮中间时)

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(A_H \frac{\partial c_k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_H \frac{\partial c_k}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_H \frac{\partial c_k}{\partial z} \right) \quad (11)$$

其中, k 为泥沙的分类 $k=1, 2$

边界条件:

$$K_H \frac{\partial c_k}{\partial z} = 0 \quad z \rightarrow \eta$$

$$K_H \frac{\partial c_k}{\partial z} = E_k - D_b \quad z \rightarrow -H \quad (12)$$

其中, C_k 为第 k 类泥沙的浓度, $k=1, 2$ 分别代表粘性泥沙和非粘性泥沙; u, v, w, A_H, K_H 意义同动力学模型, E_b, D_k 分别为泥沙的悬浮和沉降通量。

底部剪切力计算为:

$$\tau = \rho u_* \quad (13)$$

其中, ρ 为悬浮介质的密度; u_* 为剪切速度。

如果只考虑流的话, 剪切速度可以用 Prandtl- von Karman 速度场算法计算:

$$u_* = \frac{ku}{\ln \left(\frac{z}{z_0} \right)} \quad (14)$$

其中, $k=0.4$ 为 von Karman 常数; u 为近底合成速度; z 为最底层中心高度; z_0 为底粗糙率。

3.2 入海泥沙位置和源强

凤城港海域泥沙粒径为 50 微米左右, 主要为粘性泥沙。疏浚物是底泥与海水的混合物, 是航道开挖过程中最主要的污染物。航道建设采用的是抓斗式挖泥船, 疏浚过程中可造成水域泥沙悬浮, 根据徐明德研究成果^[7], 悬浮泥沙发生量约为抓泥量的 3% - 5%, 数值模拟时采用悬浮泥沙的最大发生率 5% 进行计算。本文取 5% 为悬浮泥沙产生率, 以此估计航道开挖时泥沙浓度。根据工程设计方案, 清淤航道长 4585m, 宽 250m。根据

疏浚工程的实施方案, 模型中采用的泥沙源强加入方案为面源连续加入方式^[3], 即假定 34 艘抓泥船同时作业, 根据航道上每个网格点水深和挖掘量, 控制作业时间计算出航道开挖时的源强为 338 688kg/day 源强位于挖掘点中心位置, 总共作业时间 36 小时, 模式共运行 5 天, 120 小时。

3.3 泥沙浓度分布模拟结果

从图 7 至图 9 可以看出泥沙浓度随潮流变化情况。在航道开挖过程中, 泥沙扩散主要集中在航道附近。泥沙浓度在潮流流速为零时即落潮中间时, 浓度最大。泥沙浓度在高潮时刻浓度最小, 其主要原因在于落潮中间时流速为零, 扩散速度急剧减小。从图 10 可以看出, 泥沙浓度在底层较表中层高, 其原因在于底层泥沙沉降速度比表中层高。

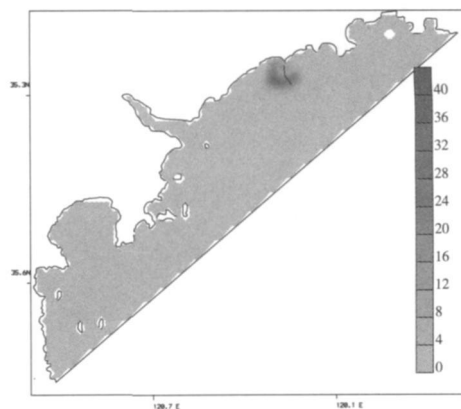


图 7 航道开挖完工后(36hr 涨潮中间时) 表层泥沙浓度分布

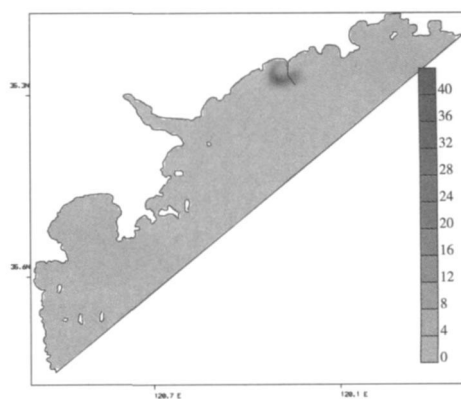


图 8 航道开挖完工后 6 小时(落潮中间时) 表层泥沙浓度分布

4 结束语

本文采用先进的三维泥沙模型 ECOM SED, 较好地模拟了凤城港航道清淤过程中, 泥沙浓度水平和垂向分布情况。

(1) 凤城港航道在采用面源开挖方式下, 一开始泥

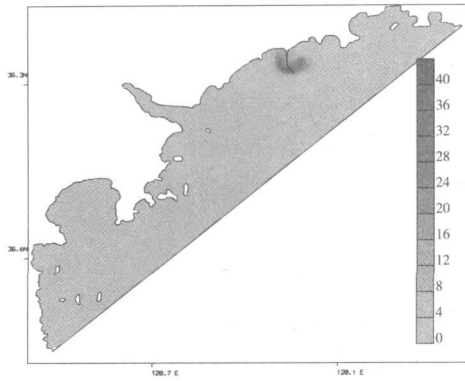


图9 航道开挖完工后3小时(高潮)
表层泥沙浓度分布

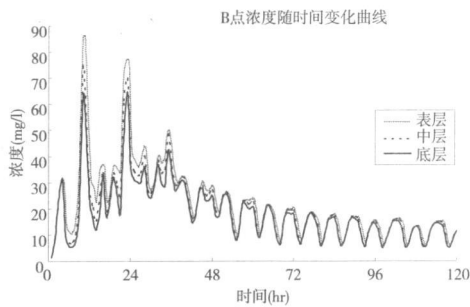


图10 (155,45)B点泥沙随时间变化曲线

沙浓度高值区基本分布在航道中心两侧。

(2) 随着清淤工程的进行,泥沙随着水动力场输移扩散,但是影响范围基本在航道 10km 半径区域内。

(3) 由于泥沙随水流的运动,航道中心浓度值在开

挖过程中较为稳定,最大中心浓度为 42 mg/L,因此说明凤城海域水体扩散自净能力较强,泥沙扩散速度较快且更均匀。

(4) 通过对 B点浓度随时间变化可以看出,航道中心点浓度在开挖时刻内基本保持上升趋势,在三个低潮时刻出现浓度峰值,36小时后,即开挖完毕,泥沙浓度逐渐降低至保持恒定。

参考文献:

- [1] Alan F Blumberg, R. B. ECOM SED Manual[M]. New York: Academic Press, 2002
- [2] 黄祖珂,黄磊.潮汐原理与计算[M].北京:高等教育出版社,2005
- [3] 匡华,匡良. ECOM SED 数学模型研究悬浮物对海洋环境影响[J].四川理工学院学报:自然科学版,2008,21(2): 47-50
- [4] Bagnold R A. The Size-Grading Of Sand By Wind[J]. ASCE, 2003, 12(8): 250-264
- [5] Ariathurai R, Korne R B. Finite Element Model For Cohesive Sediment Transport[J]. ASCE, 1976, 7(6): 323-338
- [6] Alan F Blumberg, Liaqat Ali Khan. Three Dimensional Hydrodynamic Model Of New York Harbor[M]. New York: Academic Press, 2005
- [7] 徐明德,姜安刚.关于胶州湾运输与疏浚物扩散研究展望[J].海洋湖沼,2001,19(3): 287-292

ECOMSED Math Model and Its Application in Fengcheng Ports Construction

KUANG Hua¹, LOU An-gang², KUANG Liang², WU De-xing²

(1 Heyuan Polytechnic College, Heyuan 517000, China)

2 China Ocean University Environment Science College, Qingdao 266100, China)

Abstract In this paper, ECOMSED math model is applied into high-resolution numerical simulations of flow field in sea area around Fengcheng ports. A sediment transportation math model for dredged sediment along ports routine is established based on the above. Then located the sediment sources along the ports construction routine, which was at the center of the ports grids, this model enabled us to more accurate simulate distribution characters of construction area and the surrounding area table middle bottom sediment concentration and its variation with time when the channel was given 36 hours of continuous excavation.

Key words ECOMSED math model; cohesive sediment; sediment simulation; applications