

海州湾海域三维潮流数值模拟

谢 飞¹, 逢 勇¹, 宋志尧²

(1. 河海大学环境科学与工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学海洋学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 基于三维河口、陆架、海洋模型(ECOM3D), 引入干湿网格法变动边界处理技术, 建立三维动边界潮流数值模型. 将该模型用于海州湾近岸海域三维潮流场模拟, 结果表明, 模型计算结果与实测值吻合良好, 较好地模拟出此海域 M₂ 分潮的潮流场时空分布特点: 大部分海域流速在 40 ~ 65 cm/s 之间, 垂直流速量级为 10⁻⁴ m/s, 最大垂直流速为 5.2 × 10⁻⁴ m/s.

关键词: ECOM3D; 三维潮流; 数值模拟; 海州湾

中图分类号: P731.23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-198X(2007)06-0718-04

海州湾属江苏省连云港市东部海域, 北起岚山头, 南至连云港外的东西连岛, 与黄海相通, 潮湾资源丰富, 海州湾渔场是江苏省四大渔场之一. 近年来随着经济的发展, 近海水环境污染问题已日益突出. 潮流是近岸海洋资源开发、海洋环境管理中首先要考虑的动力因素, 因此, 研究近岸海域潮流具有重要的意义.

海州湾海域处于 M₂ 分潮潮波腹腰区(M₂ 分潮无潮点位于 34°30'N, 120°10'E), 属于近海正规半日分潮海域. 对连云港局部海域的潮流场已经有过不少研究^[1-2], 均建立了有效的二维潮流数学模型. 华祖林等^[3]用有限体积法模拟了海州湾的潮流, 预测了污染物对海域的影响. 龚政等^[4]用 ADI 模式对海州湾水域的潮流及污染物扩散进行了数值模拟, 二者也均采用了深度平均二维模型. 本文采用三维河口、陆架、海洋(ECOM3D)模型, 引入干湿网格法变动边界处理技术, 对海州湾近岸海域潮流进行了三维数值模拟, 获得了 M₂ 分潮的潮流场时空分布特征, 计算结果与实测结果吻合良好, 可以为近岸污水排放、海洋环境管理提供参考.

1 潮流流场数值模拟

1.1 垂向 σ-水平向正交坐标系下三维潮波运动方程

三维潮波运动方程经 σ 坐标变化得到如下方程:

$$\left\{ \begin{aligned} & h_1 h_2 \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial h_2 U_1 D}{\partial \xi_1} + \frac{\partial h_1 U_2 D}{\partial \xi_2} + h_1 h_2 \frac{\partial \omega}{\partial \sigma} = 0 \\ & \frac{\partial h_1 h_2 D U_1}{\partial t} + \frac{\partial h_2 D U_1^2}{\partial \xi_1} + \frac{\partial h_1 D U_1 U_2}{\partial \xi_2} + h_1 h_2 \frac{\partial \omega U_1}{\partial \sigma} + D U_1 U_2 \frac{\partial h_1}{\partial \xi_2} - \\ & \quad D U_2^2 \frac{\partial h_2}{\partial \xi_1} - h_1 h_2 f D U_2 = -g D h_2 \frac{\partial \eta}{\partial \xi_1} - D \frac{h_2}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial \xi_2} + D \psi'_{11} \\ & \frac{\partial h_1 h_2 D U_2}{\partial t} + \frac{\partial h_2 D U_1 U_2}{\partial \xi_1} + \frac{\partial h_1 D U_2^2}{\partial \xi_2} + h_1 h_2 \frac{\partial \omega U_2}{\partial \sigma} + D U_1 U_2 \frac{\partial h_2}{\partial \xi_1} - \\ & \quad D U_1^2 \frac{\partial h_1}{\partial \xi_2} + h_1 h_2 f D U_1 = -g D h_1 \frac{\partial \eta}{\partial \xi_2} - D \frac{h_1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial \xi_2} + D \psi'_{22} \end{aligned} \right. \quad (1)$$

式中: U₁, U₂, ω——ξ₁, ξ₂, σ 方向的流速分量; η——潮位; D——全水深; f——柯氏力系数; h₁, h₂——拉梅系数; ρ₀——海水密度; t——时间; ψ'_{11}, ψ'_{22}, p 变量与文献[5]相同.

定解条件: 在海面 σ = 0, ω = 0, 在海底 σ = -1, ω = 0, 陆边界法向流速为零. **水界条件:** 输入外海强迫水位 η = η*. **初始条件:** U₁ = U₂ = ω = η = 0.

1.2 计算区域地形及网格布置

计算区域范围为西至连云港市陆边界、东至 119.65°E、北至 35.15°N、南至 34.65°N 开边界的一个约 44 km × 56 km 的近似矩形区域,水平方向采用正交曲线网格,网格共 100 × 120 = 12 000 个,网格间距约为 420 m,三维数模在垂向分为 6 层,水深数据取自海军司令部航保证部海图。

1.3 水界的输入

海州湾海域属正规的半日分潮海域,建立平均潮模型,水界可输入以下调和方程:

$$\zeta(t) = H_{M_2} \cos(\sigma_{M_2} t - g_{M_2}) \tag{2}$$

式中: ζ ——水位; H_{M_2} —— M_2 分潮调和常数振幅; σ_{M_2} —— M_2 分潮角度; g_{M_2} —— M_2 分潮调和常数位相; t ——时间。水界这些参数由东中国海模型计算结果进行线性插值求得^[6]。

1.4 参数取值

海底粗糙度 z_0 在潮流计算中通常取 0.002 ~ 0.01 m^[7],本文经调试取 0.0025 m。外模式时间步长取为 0.5 s,内、外模式时间步长比为 30 ~ 80^[8],本文经调试取 60。

2 计算结果验证

2.1 潮位验证

以连云港 1 号验潮站的潮位实测值来验证潮位计算的正确性,如图 1 所示。从图中可见,测点潮位最大误差不超过 4 cm,最大位相误差为 5°,表明计算值与实测值吻合良好。

2.2 潮流验证

图 2 为 1 号和 2 号测点实测和计算(表层)潮流玫瑰图,从图中可以看出 1 号和 2 号两个测点的主流方向、旋转方向和最大流速发生时刻与实测值基本一致,表明计算潮流和实测潮流吻合良好。

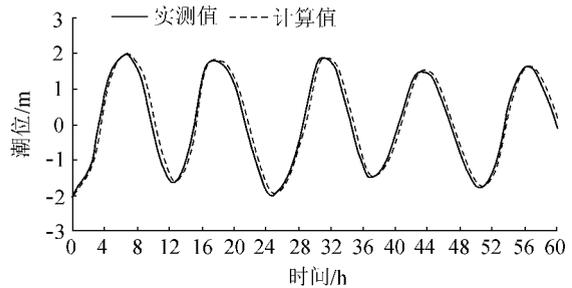


图 1 潮位验证曲线

Fig.1 Curve of tidal level validation

3 计算结果分析

3.1 潮波系统

图 3 为研究海域 M_2 分潮同潮时线和等振幅线,潮波由东北方向向西南方向传播,属于中国黄海反逆时针潮波系统。岚山头与连云港港口同潮时线相差 10°左右,即岚山头发生高潮的时间比连云港港口超前 20 min 左右。等振幅线由东向西逐渐增大,由外海的 190 cm 左右,到连云港西大堤附近增加到 205 cm 左右。

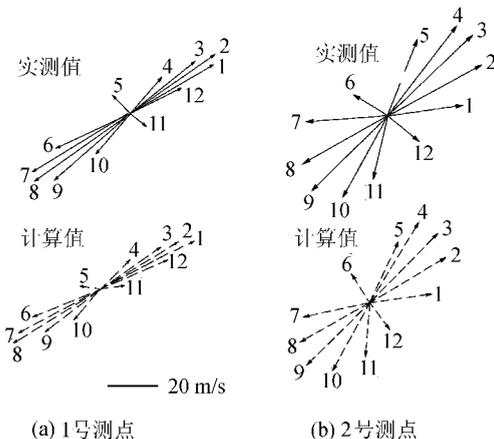


图 2 M_2 分潮流验证玫瑰图(表层)

Fig.2 Rose diagram for validation of tidal constituent M_2

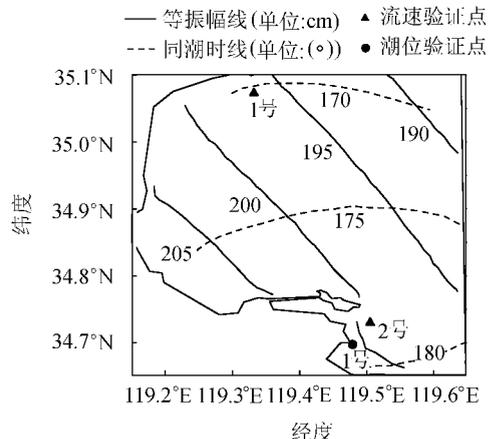


图 3 同潮时线和等振幅线

Fig.3 Cotidal line and iso-amplitude line

3.2 潮流结构分析

a. 水平分布特征. 图4和图5分别为研究海域计算表层潮流场和底层潮流场. 以连云港1号验潮站为参考站, 涨潮时, 整个海州湾海域为涨潮流, 外海潮波由东北方向往沿岸西南方向传播, 部分潮波进入连云港; 低潮时, 整个海州湾海域为落潮流, 潮波由西南方向往东北方向传播. 沿岸涨落潮形成往复流, 涨潮时流速略大于落潮时, 大部分海域流速在40~65 cm/s之间. 从图4中还可以看出, 在沿岸浅滩地区, 模型再现了涨落潮引起的浅滩的出露和淹没. 底层流场与表层流场结构类似, 只是量值比表层流场小.

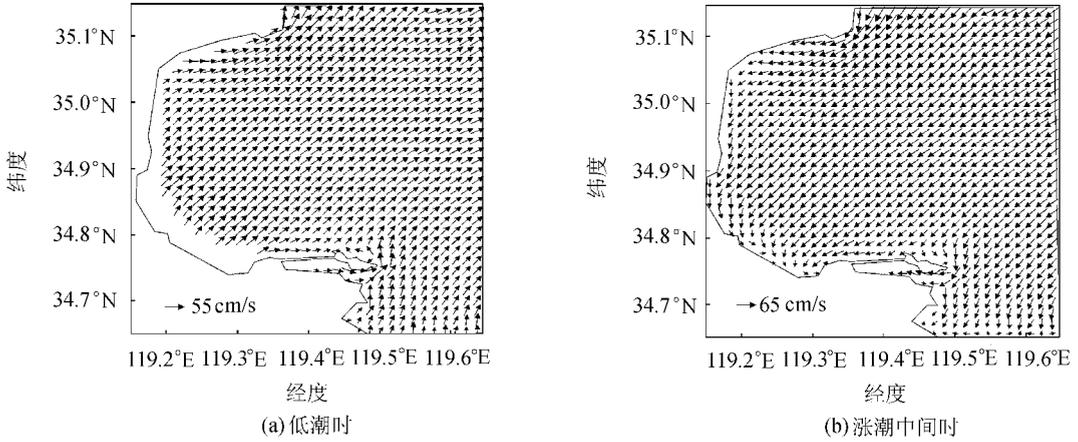


图4 计算表层潮流分布

Fig.4 Tidal current field of surface layer

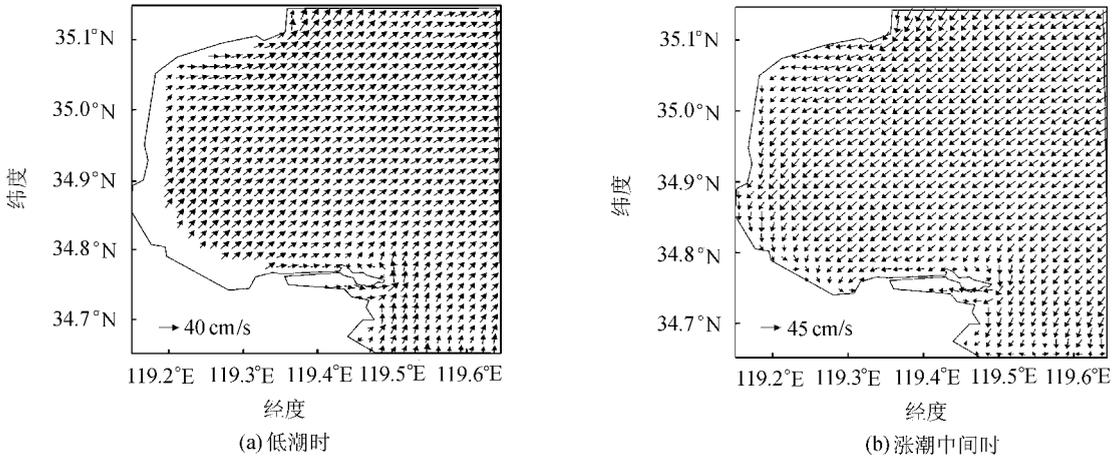


图5 计算底层潮流分布

Fig.5 Tidal current field of bottom layer

b. 垂直流速分布特征. 计算表明研究海域垂直流速量级为 10^{-4} m/s. 在近岸海域, 底层的垂直流速比表层的大一点, 表层最大垂直流速为 2.3×10^{-4} m/s, 底层最大垂直流速为 5.2×10^{-4} m/s, 出现在涨潮中间时. 这与海域地势起伏平缓、水深梯度不大是一致的.

3.3 欧拉余流

欧拉平均速度, 即 Euler 余流, 是指空间某一定点在一个潮周期内潮流速度的时间平均值, 它表示海水周期平均的迁移趋势.

海州湾海域地势起伏平缓, 余流分布也比较顺畅, 没有出现大的余流涡, 图6为此海域的 M_2 分潮表层欧拉余流分布, 从图中可以看出, 此海域余流方向为东南方向. 近岸的余流速度大于外海的余流速度, 数值大约为 3~6 cm/s, 东西连岛南部的余流要比北部的余流大.

4 结 论

a. 本文考虑到海州湾潮滩面积比较大的特点, 建立了海州湾三维动边界潮流数值模型, 以较高的分辨

率刻画了海州湾海域潮流流场分布,沿岸为往复流,其他海域为旋转流,数值计算结果与实测值吻合良好。

b. 海州湾及邻近海域属于中国黄海反时针潮波系统,岚山头与连云港潮时相差约 20 min,计算域东端与西端振幅相差 15 cm 左右。近岸的余流速度大于外海的余流速度,大部分海域流速在 40~65 cm/s 之间,垂直流速量级为 10^{-4} m/s,最大垂直流速为 5.2×10^{-4} m/s。

参考文献:

- [1] 赵士清,张镜潮.连云港潮流的数值模拟[C]//连云港建港指挥部.连云港回淤研究论文集.南京:河海大学出版社,1990:133-140.
- [2] 张二骏,张东生,高飞,等.连云港水域流场数值模拟[C]//连云港建港指挥部.连云港回淤研究论文集.南京:河海大学出版社,1990:141-153.
- [3] 华祖林,刘晓东,王童远,等.嵌套叉树网格的 FDS 数值模拟在近海水域污染混合区计算中的应用[J].水科学进展,2003,14(3):305-310.
- [4] 龚政,邵佳爱,张东生.陆源污染物对海州湾环境影响研究[J].河海大学学报:自然科学版,2002,30(4):5-8.
- [5] BLUMBERG A F, MELLOR G L. A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model: three-dimensional coastal ocean model[J]. N Heaps American Geophysical Union, 1987(12):1-16.
- [6] 贾建军,阎国年,宋志尧.中国东部边缘海潮波系统形成机制的模拟研究[J].海洋与湖沼,2000,31(2):159-167.
- [7] LEENDERTSE J J. A water quality simulation model for well-mixed estuaries and coastal sea[M]. New York: Principle of Computation, CA. Hand Corp, 1970:15-37.
- [8] EZER T, SRANGO H, SHCHEPETKIN A F. Developments in terrain-following ocean model: intercomparison of numerical aspects[J]. Ocean Modelling, 2002(4):249-267.

Three-dimensional numerical simulation of tidal current in offshore area of Haizhou Bay

XIE Fei¹, PANG Yong¹, SONG Zhi-yao²

(1. College of Environmental Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. College of Ocean, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on 3D estuary, coastal and ocean model (ECOM3D), a 3D tidal current model for moving boundaries was established by introduction of dry-wet network method for moving boundary treatment. The application of the model to 3D numerical simulation of tidal field for offshore area of Haizhou Bay shows that the calculated result of the model agrees well with the measured data, and that the model is successful in simulation of the temporal and spatial distribution of tidal field of tidal constituent M_2 of this area: the flow velocity in this area is 40-65 cm/s, the velocity in vertical direction is 10^{-4} m/s in the order of magnitude, and the maximum flow velocity in vertical direction is 5.2×10^{-4} m/s.

Key words: ECOM3D; 3D tidal current; numerical simulation; Haizhou Bay

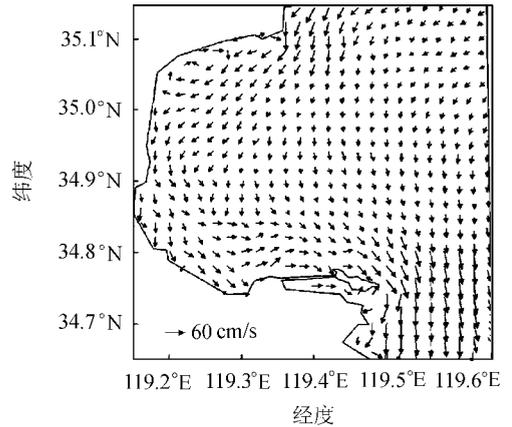


图6 表层计算欧拉余流场

Fig.6 Calculated result of Eulerian residual current of surface layer