

黄海辐射沙脊群海域水环境数值模拟研究

陶建峰 张长宽

(河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室、海洋学院 ,江苏 南京 210098)

摘要 :为了弄清黄海辐射沙脊群这一具有广阔潮间带典型海域的水动力及污染物扩散稀释情况 ,在该海域找到较为理想的污染物排放位置 ,采用沿深垂向平均二维数值模式对该海域的潮流场和物质扩散场进行了模拟 ,模拟过程中采用变网格技术和改进的“ 干湿法 ”处理动边界问题 .通过海域水体余流场和几个典型位置 Lagrange 水质点运动轨迹的计算 ,分析了余流场对污染物运移的影响 ,并得到了该海域较为理想的污染物排放位置 .

关键词 :黄海 ;辐射沙脊群 ;水环境 ;污染物扩散 ;拉格朗日余流 ;动边界

中图分类号 :X145 文献标识码 :A 文章编号 :1000-198X(2005)04- 0472-04

黄海海底辐射沙脊群是世界上特有的地貌形态 ,海底的沙脊与深槽相间 ,地形和水流情况异常复杂^[1] .迄今为止 ,对黄海辐射沙脊群海域的潮流场已有不少研究^[2-3] ,但对该海域的水环境研究相对较少 .本文通过数值模拟手段研究了黄海辐射沙脊群海域的水动力条件和随水污染物 (不包括重金属和浮污染物) 扩散稀释情况 ,并对海域水动力条件和污染物运移情况进行了分析 ,同时采用跟踪标识水质点的 Lagrange 方法计算 Lagrange 余流 ,进一步说明污染物质在受纳水体中的迁移过程 ,从而得到了该海域较为理想的污染物排放位置 .

1 数 学 模 型

由于该海域水深较小、流速垂向分布较均匀 ,因此采用沿水深平均的二维 ADI 模式^[4] ,并充分考虑黄海辐射沙脊群海域广阔潮滩地形特点 ,引入简单、灵活的干湿网格法变动边界处理技术和变网格技术 ,模拟包括潮间带在内的黄海辐射沙脊群海域的潮流场和污染物扩散场 .

1.1 基本方程

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial (HU)}{\partial x} + \frac{\partial (HV)}{\partial y} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial (HU)}{\partial t} + \frac{\partial (HUU)}{\partial x} + \frac{\partial (HUV)}{\partial y} = \frac{\tau_{sx} - \tau_{bx}}{\rho} - gH \frac{\partial (H + Z_b)}{\partial x} + fHV + A_h H \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right) \tag{2}$$

$$\frac{\partial (HV)}{\partial t} + \frac{\partial (HVV)}{\partial x} + \frac{\partial (HVV)}{\partial y} = \frac{\tau_{sy} - \tau_{by}}{\rho} - gH \frac{\partial (H + Z_b)}{\partial y} - fHU + A_h H \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right) \tag{3}$$

$$\frac{\partial (HC)}{\partial t} + \frac{\partial (HUC)}{\partial x} + \frac{\partial (HVC)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(HD_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(HD_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + S_C \tag{4}$$

上述方程中变量定义参见有关文献^① .本文 Manning 系数 $n = 0.020$;水平紊动黏性系数 $A_h = \epsilon (\Delta s)^{1/3}$, Δs 为网格步长 ,常数 ϵ 取 95 ;柯氏力系数 f 中 $\varphi = 32.5^\circ$;物质涡动扩散系数采用 Elder 公式 , $D_x = 5.9H |U| g^{1/2} C_1$, $D_y = 5.9H |V| g^{1/2} C_1$,其中 C_1 为 Chezy 系数 .为了计算方便 ,潮流场和物质扩散场同时计算 ,其时间步长均为 $\Delta t = 45\text{ s}$.方程采用控制体积法进行离散 ,时间采用向前差分格式 ,空间采用四边形交错网格 ,用 ADI 法求解 .

收稿日期 :2004-05-25
基金项目 :国家自然科学基金资助项目(50279007)
作者简介 :陶建峰 (1980—) ,男 ,浙江武义人 ,博士研究生 ,主要从事河口、海洋水环境研究 .
① LEENDERTSE J J . A water quality simulation model for well-mixed estuaries and coastal seas . Vol. I ,Principles of Computation ,Rand Corp Santa Monica ,Calif ,RM-6230-RC ,1970 .

1.2 模型概况

江苏海域受到东海前进潮波系统控制和黄海逆时针旋转潮波的影响,属于强潮流区^[1]。整个黄海辐射沙脊群分布于江苏中部近岸浅海区,黄海南陆架海域。本文模拟区域北起射阳河口北部的扁担港,南至长江口北部的连兴港,长达 285 km,东西范围为 120°20'E ~ 122°12'E,宽度横跨 180 km,包括整个黄海辐射沙脊群。由于受机时及内存的限制,为保证模拟精度,本文采用变网格技术,即整个辐射沙脊群海域采用 312.5 m × 369 m 的粗网格,而研究重点海域——南通海域用 62.5 m × 61.5 m 的细网格加密。在实施计算时,为了更真实地反映污染物在天然潮流场携带下的运移扩散,直接进行了 60 个潮周期的潮流和物质扩散场的模拟,污染物扩散浓度场已基本处于稳定状态。模型的水边界,由东中国海潮波数学模型^[5]根据浅水非线性波理论推算给出相应节点的值。

1.3 干湿网格法处理动边界技术

黄海辐射沙脊群海域地形异常复杂,随着潮位的涨落,潮滩和沙脊存在淹没和陆露交替的现象。模拟涨潮期间潮滩的淹没和落潮期间潮滩的干出,其原理较为简单,但试图通过数值方法加以实现,则有一定难度,处理不当易造成计算不稳定。本文采用简单、灵活的干湿网格法^[6]来处理动边界问题。

干湿法令干点的流速为零,模型计算域在每一个时间步长内都是变化的。在实际计算中,当水深 $H_{i,j} \leq 0$ 时,动量和连续方程失去物理意义。为此,引入标准水深 H_0 ($H_0 = 0.005\text{ m}$) 进行干湿判断:当 $H_{i,j} \leq H_0$ 时, (i, j) 单元为干单元。在求解 $n\Delta t \rightarrow (n + 1/2)\Delta t$ 时间层 x 向流速分量 U 时,若计算点 $(i + 1/2, j)$ 的水深分布满足 (a) $H_{i+1/2,j} > H_0, H_{i,j} > H_0, H_{i+1,j} > H_0$ (b) $H_{i+1/2,j} > H_0, H_{i,j} > H_0, H_{i+1,j} \leq H_0, \xi_{i,j} - \xi_{i+1,j} > 0$ (c) $H_{i+1/2,j} > H_0, H_{i,j} \leq H_0, H_{i+1,j} > H_0, \xi_{i+1,j} - \xi_{i,j} > 0$ 三个条件之一,则该点为湿点,按离散方程计算 $u_{i+1/2,j}$, 否则为干点,即令 $u_{i+1/2,j} = 0$ 。求解 $(n + 1/2)\Delta t \rightarrow (n + 1)\Delta t$ 时间层 y 向流速分量 v 时,计算点 $(i, j + 1/2)$ 的干湿可作类似判断。

1.4 水动力学模型的数值验证

为了检验二维干湿法动边界数学模型对黄海辐射沙脊群海域潮流场是否具有良好的重现性,分别对大潮和小潮进行了验证。大潮验证结果见图 1。水位验证点为图 2 中 A 点,流速验证点为图 2 中 B 点。从图 1 可以看出,计算值与实测值吻合得很好。

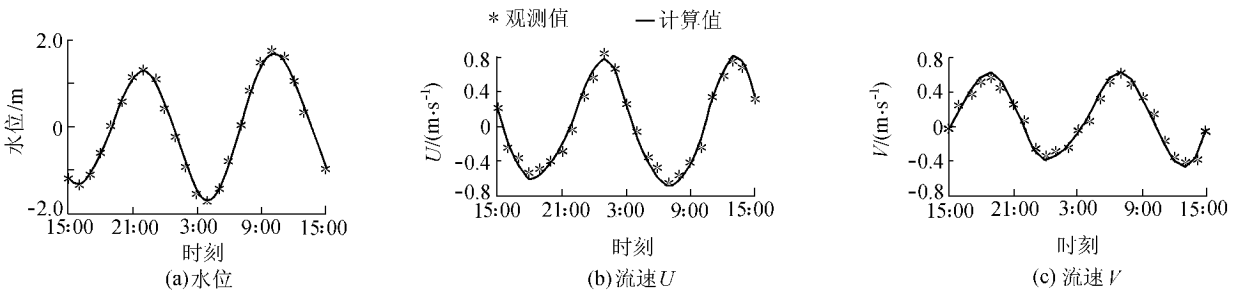


图 1 大潮验证结果
Fig.1 Verification results of spring tide

2 计算结果与分析

2.1 潮流场

黄海辐射沙脊群海域为正规半日潮流,受前进潮波控制和旋转潮波的影响,潮流为辐射状潮流,并以往复流为主,略带一点旋转流的性质。由于本文研究的重点海域为辐射沙脊群南部的南通海域,因此仅以南通海域为叙述对象。图 2 (a) (b) 分别是涨急、落急特征时刻南通海域的潮流场。从图 2 可以看出 (a) 由于受海底辐射状地形的影响,涨潮主流基本与深槽走向一致,深槽与浅滩之间出现流速切变现象。(b) 岸边和沙脊群的潮滩,随着水位的上升,会出现漫滩水流,随着水位的下降,会出现归槽流,即潮滩陆露成沙洲。(c) 深槽区的流速,由于涨潮漫滩、落潮归槽,落潮水流比涨潮水流流速大。(d) 在吕泗岸外小庙洪水道海域,涨潮流从外海以西北微偏北的方向涌入小庙洪南、北水道,直达遥望港,落潮流以相反方向回落;长沙港外西太阳沙海域,整个潮流以东西向的往复流为主,且略带一点旋转流,旋转流现象较小庙洪水道水域明显。

2.2 Lagrange 余流和水质点运动轨迹

潮流和潮余流对海湾即沿岸海域污染物质的迁移和分散起到了决定性的作用。排放到海水中的污染物

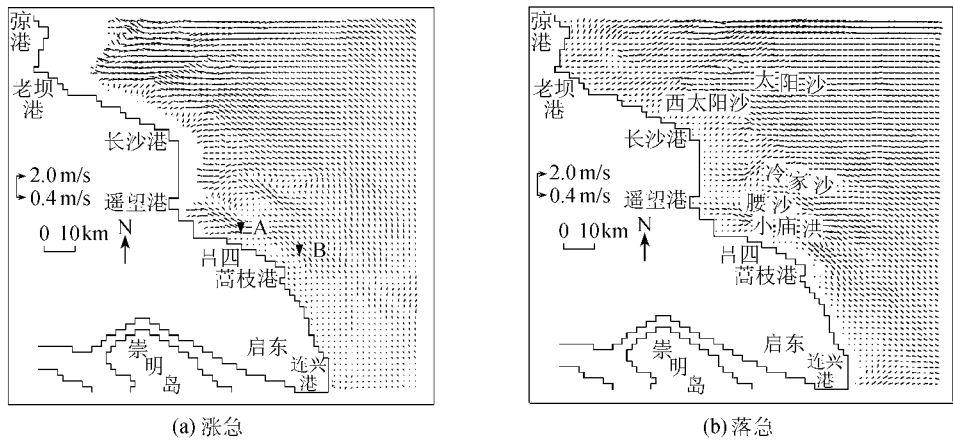


图 2 大潮流场

Fig.2 Spring flood and ebb flow fields

质的迁移,与海水质点的运动类似,具有Lagrange性质.因此,本文采用跟踪标识水质点的Lagrange方法^[7]来计算Lagrange余流,并通过计算结果来说明污染物质在受纳水体中的迁移过程,是合理和可行的.

Lagrange 余流既是释放空间坐标的函数,又是释放时刻的函数.研究表明,不同释放时刻的余流场在总体趋势上相近,只是在量值上略有差别.因此,本文以大潮涨急(图 3)时刻释放为例来分析 Lagrange 余流场.图 3 中近岸地带不存在余流区域为露滩的边界.另外,本文没有考虑波浪破碎所产生的沿岸流对污染物运移扩散的影响.由图 3 可以看出,西太阳沙海域余流场比较混乱,余流方向指向东北、北和西北方向.这不利于污染物质向外海的扩散,即指向岸边的余流会把污染物质带向滩地,从而对滩地养殖带来影响.从图 3 还可看出,小庙洪水道和蒿枝港外水域的余流指向东和东南方向,即指向外海,并且量值也较大.这有利于污染物质向外海的扩散.

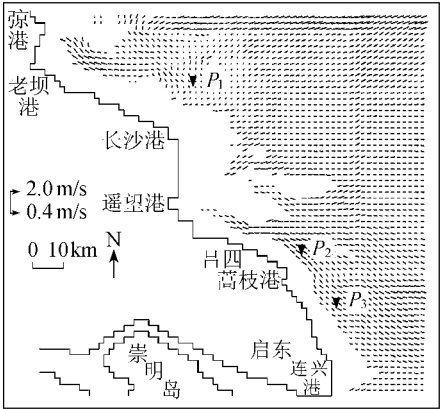


图 3 大潮余流场

Fig.3 Spring residual current field

从北向南依次选取 P_1 、 P_2 、 P_3 3 个典型位置,计算其在一个潮周期内的 Lagrange 轨迹,从而可以判断污染物的运移方向(图 4).坐标(0,0)表示释放质点的位置,另一端为周期末轨迹的终点,单位为 m,标识水质点在大潮落急时刻释放.由图 4 可以看出,3 个位置的质点在涨落潮往复流作用下运移轨迹较规则,净位移也较大, P_1 点为 5.61 km, P_2 点为 3.42 km, P_3 点为 2.35 km,但 3 个位置水质点的往复距离较远(均大于 4 km), P_1 点甚至达 9 km 之多.可见,污染物质运移方向总体上沿深槽主流方向指向外海,并具有较小的横向扩散作用,这非常有利于污染物质向外海运移.

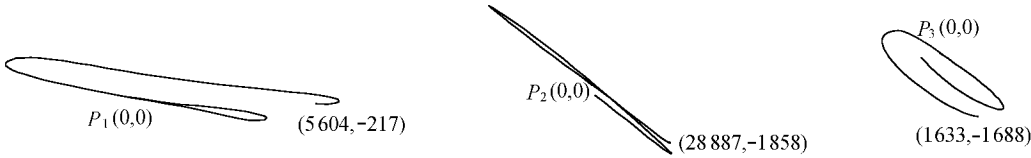


图 4 点 P_1 、 P_2 、 P_3 运动轨迹

Fig.4 Track of point P_1 、 P_2 and P_3

2.3 污染物扩散浓度场

本文对南通海域水力较强的蒿枝港外水域和长沙港外水域进行了物质扩散模拟.图 5 给出了蒿枝港排放和长沙港排放的污染物稀释度包络等值线分布(实际模拟时,两处排放是分开的).从图 5 可以看出:蒿枝港外稀释度 500 的等值线基本上沿 5.0 m 等深线扩展,呈 SE ~ NW 走向,1 000 等值线沿径向扩展最远达 25 km,横向最宽可达 8 km,但基本上不侵入海图水深 1 m 以浅的潮滩,且 1 000 等值包络线最南端离长江口北部的连兴港约 35 km;长沙港外稀释度 1 000 的等值线沿 ESE ~ WNW 径向扩展大于 20 km,纵向最宽约 6 km,并伸入海图水深 1 m 以浅滩地最远达 5 km.

总体上看,南通海域污染物质在潮流和潮余流作用下沿深槽主流方向向外海扩散,达标水稀释度为 1 000 的等值包络线范围较大,但稀释度为 200 的等值包络线的范围均小于 0.3 km²。图中未出现稀释度为 100 的等值包络线,说明稀释度为 100 的范围很小。由此可以认为,在南通海域排放污染物质不会对海域的水环境产生大的影响。但从图 3 可以看出,在长沙港外排放,因余流方向比较混乱,在潮余流作用下,部分污染物质将被带到滩地上,从而会对滩地养殖带来影响;而在蒿枝港外排放,污染物质基本上沿深槽运移,不会对滩地养殖带来影响。

3 结 语

- a. 干湿法在黄海辐射沙脊群海域污染物迁移扩散问题模拟中的应用成功,说明干湿法是一种处理具有广阔潮间带水域污染物迁移扩散问题的有效方法。
- b. 通过 Lagrange 余流场和 Lagrange 水质点运动轨迹的计算分析来研究污染物质在受纳水体中的迁移过程,是合理和可行的。
- c. 通过对南通海域不同位置排放的污染物的扩散模拟,得到了该海域较为理想的污染物排放位置。
- d. 本文未考虑波浪对黄海辐射沙脊群海域水动力条件和污染物运移扩散的作用。

参考文献：

[1] 王颖. 黄海陆架辐射沙脊群[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 12.

[2] 张东生, 张君伦, 张长宽, 等. 潮流塑造—风暴破坏—潮流恢复——试释黄海海底辐射沙脊群形成演变的动力机制[J]. 中国科学(D 辑), 1998, 28(5): 394—402.

[3] 宋志尧, 严以新, 薛鸿超, 等. 南黄海辐射沙洲形成发育水动力机制研究——Ⅱ. 潮流运动立面特征[J]. 中国科学(D 辑), 1998, 28(5): 411—417.

[4] 龚政, 张东生, 陈永平. 陆源污染物对连云港海域环境影响研究[J]. 海洋工程, 2002, 20(4): 72—77.

[5] 张东生, 张君伦. 黄海海底辐射沙洲区的 M₂ 潮流[J]. 河海大学学报, 1996, 24(5): 35—40.

[6] FLATHER R A, HEAPS N S. Tidal computations for Morecambe Bay[J]. Geophys J R Astr Soc, 1975, 42: 489—517.

[7] 俞光耀, 陈时俊. 胶州湾环流和污染扩散的数值模拟——Ⅲ. 胶州湾拉格朗日余流与污染物质的迁移[J]. 山东海洋学院学报, 1983, 13(1): 1—12.

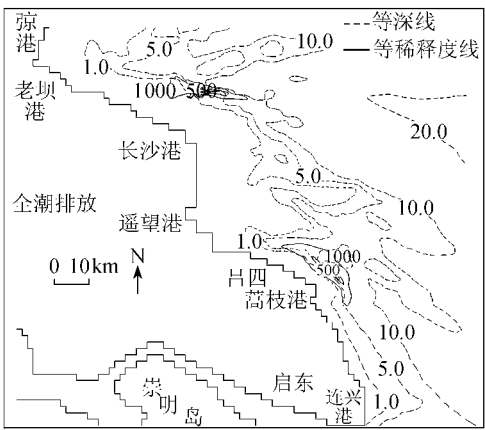
Numerical simulation of water environment for radial sandy ridge area of the Yellow Sea

TAO Jian-feng, ZHANG Chang-kuan

(Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, College of Ocean, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract :By use of the 2-D numerical model averaged in vertical direction, the numerical simulation was performed of the tidal current and pollutant diffusion in a typical sea area of radial sandy ridges with wide tidal range in the Yellow Sea to reveal the hydraulic condition and pollutant diffusion in this area, and further to find the perfect positions for pollutant discharge. In the study, the changed grid technology and the improved “dry-wet” method were also used to deal with the moving boundary. By calculation of the residual current field of the studied area and the track of Lagrange water particles at several typical positions, the effects of residual current field on pollutant diffusion were analyzed, and the perfect positions for pollutant discharge were obtained as well.

Key words :Yellow Sea; radial sandy ridge; water environment; pollutant diffusion; Lagrange residual current; moving boundary



图中为理论深度基面, 等深线单位为 m

图 5 稀释度包络线分布
Fig.5 Envelope for dilution distribution