

基于隐格式水动力模型的庄河养殖海域 污染物运动轨迹的数值模拟

乔洋¹, 许媛媛¹, 张明亮¹, 姜恒志², 王思源¹

(1. 大连海洋大学 海洋科技与环境学院, 辽宁 大连 116023; 2. 国家海洋环境监测中心, 辽宁 大连 116023)

摘要: 基于非结构四叉树矩形网格,建立了近岸海域深度平均二维隐格式水动力数学模型,通过耦合拉格朗日粒子追踪法和粒子云团随机走动原理计算水体污染物的运动轨迹。水动力数学模型采用有限体积方法离散方程,使用 Rhie - Chow 的动量插值方法对同位网格不合理的压力波加以抑制,并使用 SIMPLEC 程式导出水位校对方程。通过对“工”字型理想海湾的水动力、风与流共同作用下正方形海湾的油膜输移及扩散状况进行模拟验证后,将该模型应用于计算北黄海庄河养殖海域的水动力特性以及污染物在海中的输移过程和运动轨迹,最后给出该海域模拟期间的污染物运移规律。研究结果对庄河养殖海域的水环境管理有重要的意义。

关键词: 隐格式水动力模型; 粒子轨迹; 四叉树网格; 污染物运移; 庄河养殖海域

中图分类号: TV139.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2015)04-0073-07

Numerical simulation of movement track of pollutant for Zhuanghe breeding sea area based on implicit hydrodynamic model

QIAO Yang¹, XU Yuanyuan¹, ZHANG Mingliang¹, JIANG Hengzhi², WANG Siyuan¹

(1. School of Ocean Science and Environment, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China;

2. National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian 116023, China)

Abstract: Based on the unstructured quadtree rectangular grid, the paper built a depth-averaged 2D hydrodynamic model with implicit scheme. It calculated the movement track of pollutant of water body through Lagrangian method and random walk principle. The hydrodynamic model used the finite volume method and non-staggered system with the Rhie and Chow's interpolation to eliminate the checkerboard pressure problem. The SIMPLEC algorithm on non-staggered grid was used to derive the water level correction equation. The coupling model was tested by hydrodynamic of idealized estuary, oil slick transport under the effect of wind and flow. The mode was also used to calculate the hydrodynamic characteristics of north yellow sea Zhuanghe breeding waters and the transport process and trajectory of pollutant in sea. Finally, it gave the transport rule of contaminant in the simulated area. The research result has important significance for the water environment management of Zhuanghe breeding sea area.

Key words: implicit hydrodynamic model; particles trajectory; quadtree rectangular grid; pollutant transport; Zhuanghe breeding sea area

1 研究背景

近年来,由于庄河近海海域养殖业的迅速发展,近海滩涂贝类、对虾、人工流放增殖和浮筏养殖基地

逐年增多,养殖水域的投饵、施肥、药物使用等对近海水质影响日益显著,同时还有很多海洋建设工程对该海域水质也会产生长期影响。通过水体采样检测,庄河养殖海域已出现生物多样性减少等系列问

收稿日期:2015-03-10; 修回日期:2015-04-11

基金项目:大连市人民政府项目(2013J21DW009);辽宁省高等学校优秀人才成长计划项目(LJQ2013077);辽宁省自然科学基金优秀人才培育项目(2014020148);辽宁省首批博士后集聚工程项目(2011921018)

作者简介:乔洋(1989-),男,安徽阜南人,硕士研究生,主要从事海洋环境动力学方面的研究。

通讯作者:张明亮(1976-),男,黑龙江海林人,博士,副教授,主要从事海洋环境动力学方面的研究。

题,水体呈现富营养化趋势^[1]。潮汐潮流对人类在近岸的生产活动有着很大的影响,近岸水环境状况也和潮流有着重要的联系,因而了解以潮汐、潮流为主要影响因素的近岸水动力情况对近海水环境的治理有着重要的作用。一般研究海水的水动力过程主要包括两种方法:现场观测、数值模拟。现场观测昂贵、费时,且实测点有限,随着计算机和数值模拟技术的发展,采用海洋环境动力数学模型来研究海域的水动力和污染物迁移变化已越来越受关注。

近年来,国内外学者已做了诸多的相关研究,如 Pan 等^[2]建立了平面二维有限体积法的水流模型、传质模型和泥沙冲淤计算模型,模型采用三角形无结构网格,特别适用于需局部加密的区域和含诸多岛、汉道边界曲折复杂的计算域。Xia Junqiang 等^[3]采用三角形网格的有限体积模型计算了塞文河口潮汐项目建设对该海域潮汐特性的影响。Zhang Mingliang^[4]在非结构化二叉树网格的基础上构建了近海波流共同作用的数学模型。

上述数值模型在时间上均采用显格式,其时间步长受克朗条件限制,导致时间步长较小,影响计算效率。包芸^[5]基于有限体积法建立了二维河口海洋水沙数值计算模式(ccost-2d),该模型采用平面正交曲线网格,潮位计算类似于 ECOM 模型的半隐格式,分析了白藤堵海工程对珠江河口整个西四口门区域的整体动力响应。Kuang Cuiping 等^[6]提出了一个平面二维的波、流及泥沙耦合模型,其水动力模型是基于半隐的欧拉-拉格朗日法。另外,也有一些全隐格式的平面二维水动力模型得到发展和应用^[7-9]。对于海湾水体中污染物的输移特性可以通过拉格朗日粒子追踪法来计算,这种方法通过模拟水体中保守粒子的运动轨迹来分析水体之间的交换过程,能够直观地给出污染物质在水体中的运移轨迹、滞留时间等信息。如万由鹏等^[10]依据 EFDC 环境动力学模型,耦合拉格朗日粒子追踪技术,计算了深圳河不同水期条件对深圳湾污染物粒子运动轨迹的影响,韩松林等^[11]应用 FVCOM 模型计算和分析了狭长海湾象山港在不同驱动因素下余环流结构和污染物的运移特征。

庄河海域有多个养殖区域,主要是以底栖贝类养殖为主。这类底栖贝类生物在养殖的过程中会产生、排泄一定的氮磷污染物,进一步造成海域水体营养盐富集,形成富营养化。就目前而言,采用数学模型对该海域污染物运动特征的研究尚少,因而有必要对该海域污染物的扩散、输移特性进行研究。基

于此,本文提出一个多层二叉树网格下的有限体积隐格式水动力模型,并将该模型耦合拉格朗日粒子追踪法和粒子云团随机走动原理,进而对庄河养殖海域水动力及粒子运动轨迹进行数值模拟。

2 近岸海域二维数学模型

2.1 水动力基本方程

在笛卡尔直角坐标系下,近岸海域的二维水动力方程表述如下:

连续性方程:

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

动量运输方程:

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(huu)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = -gh \frac{\partial \eta}{\partial x} +$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_t h \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_t h \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{1}{\rho} (\tau_{wx} - \tau_{bx}) + f_c h v \quad (2)$$

$$\frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial(hvv)}{\partial y} = -gh \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_t h \frac{\partial v}{\partial x} \right) +$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_t h \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{1}{\rho} (\tau_{wy} - \tau_{by}) - f_c h u \quad (3)$$

式中: h 为水深; u 和 v 是深度平均流速在 x 和 y 方向的速度分量; g 为重力加速度; η 为自平均海面起算的海面高度; ν_t 为水平涡粘性系数; f_c 是科氏力因子; τ_{wx} 和 τ_{wy} 分别是 x 和 y 方向的水表面风应力; τ_{bx} 和 τ_{by} 分别为和速度相关的 x 和 y 方向的海床底部切应力。

2.2 湍流封闭模型

潮流涡粘性系数 ν_t 能够通过修订的混合长模型来计算:

$$\nu_t = \sqrt{(\alpha_0 u_* h)^2 + (l_h^2 |\bar{S}|)^2} \quad (4)$$

方程右端第一项和第二项分别考虑了海床底部切应力和水平速度梯度的影响。其中, α_0 是经验系数,一般情况下取值为 $\kappa/6$; κ 为卡门系数; u_* 是摩阻流速, $|\bar{S}| = [2(\partial u/\partial x)^2 + 2(\partial v/\partial y)^2 + (\partial u/\partial y + \partial v/\partial x)^2]^{1/2}$; l_h 为水平混合长度, $l_h = \kappa \min(c_m h, y)$; y 为近墙壁距离; c_m 是经验常数,取值范围为 0.3 ~ 1.2。

2.3 应力计算

对于大尺度的海域,科氏力的作用不容忽视,具体的科氏力参数计算表达如下式:

$$f_c = 2\Omega \sin(\varphi) \quad (5)$$

式中: Ω 是地球自转角频率; φ 为所在海域的纬度。

x 和 y 方向的水表面风应力能够通过下式计算:

图3给出了海湾内口门附近涨潮时刻计算的流场图,本文模型能够正确地计算出两个对称的涡,在粗网格和细网格的交界面,流速渐变光滑,没有波动现象出现,由于计算域严格对称,计算流场基本对称,模型得到的结果是合理可靠的。

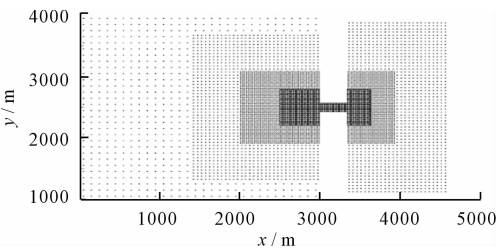
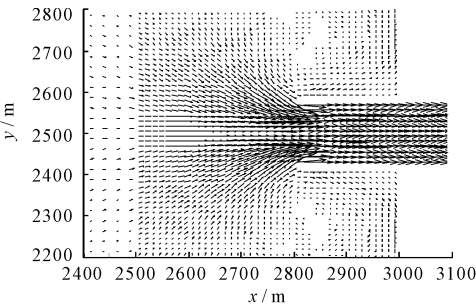


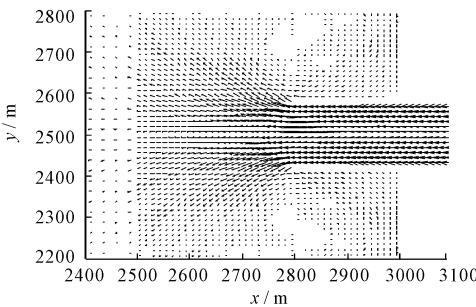
图2 理想海湾的网格示意图(圆点为网格中心)

3.2 风与流共同作用下理想海湾的油膜输移及扩散

为了验证拉格朗日粒子追踪模块的准确性,对风和海流联合作用下理想正方形港湾的油膜输移轨迹及扩散进行计算。海湾长 20 km,宽 20 km,四面均为开边界。海域的风速为 10 m/s,风向沿 y 轴正向。一个稳定的单向流沿 x 轴正向,流速为 0.3 m/s。



(a) 涨潮时的流场图



(b) 落潮时的流场图

图3 计算的涨潮、落潮时刻局部区域流场图

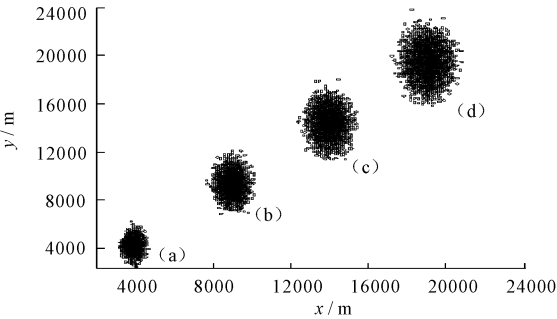


图4 不同时刻油膜输移及扩散情况

3.3 庄河海域污染物运动路径的数值模拟

北黄海庄河海域位于辽东半岛沿海,东邻丹东,西接大连,是一片典型的敞开性海域,拥有丰富的海洋资源,其水产养殖业在区域经济发展中占有重要地位。本文要研究的庄河海域潮流为不规则半日潮,其中 M2 分潮占主要成分,潮流呈往复流性质,并有 9 条入海河流:英那河、庄河、湖里河、板桥河、

在坐标点 $x = 2\,000\text{ m}$ 和 $y = 2\,000\text{ m}$ 处有一个溢油点,属于瞬时溢油,油粒子总数为 3 000 个。考虑海流和风力联合的作用,采用同时耦合拉格朗日粒子追踪法和粒子云团随机走动原理的污染物输运模型计算油膜随时间变化的输运和扩散情况。图 4 中(a)表示油膜投放 3.12 h 后输移及扩散情况,(b)表示油膜投放 7.80 h 后输移及扩散情况,(c)表示油膜投放 12.48 h 后输移及扩散的变化情况,(d)表示油膜投放 17.17 h 后输移及扩散的变化情况。通过观察油膜随时间的运动过程可以看出:油膜沿风力和海流的合力方向运动,油膜的大小随着时间的变化逐渐越来越大。该图清晰地呈现出油膜的动态输移及扩散过程,计算结果和 Tkalic 的模拟结果基本一致^[15],证明了本文拉格朗日粒子追踪模块的准确性。

地窖河、小寺河、寡妇河、半拉山河及小沙河,该养殖海域的具体计算范围见图 5。该海区包括多个岛屿(大、小长山岛、石城岛、大鹿岛、海洋岛、广鹿岛等),众多的岛屿分布使该海域的水流流态极其复杂。使用上述所构建的模型对其流态、水位等进行模拟,模拟时采用冷启动,将各个边界点的水位变化作为模型的驱动潮位,边界点的水位变化通过该处天文潮的迟角和振幅获得,主要包括 M2、S2、K1、O1 四个分潮,模型模拟时间步长为 1 800 s, x 和 y 方向的最小空间步长为 500 m。设置了 2 个潮位验证点:大鹿岛和小长山潮位观测站,2 个潮流观测点和 5 个释放粒子位置,具体见图 5。计算时间为 2011-08-16-08-31,包含一个大潮期和一个大潮期过程。

图 6 给出了大鹿岛和小长山岛模拟水位值和实测潮位的对比,通过对比发现,潮位整体拟合较好,在小潮期的潮位峰值出现约 0.3 m 偏差,但模拟得出的潮位峰值时刻和水位变化趋势与实测值保持一致。图 7 是站点 2 小潮期、大潮期计算与实测流速

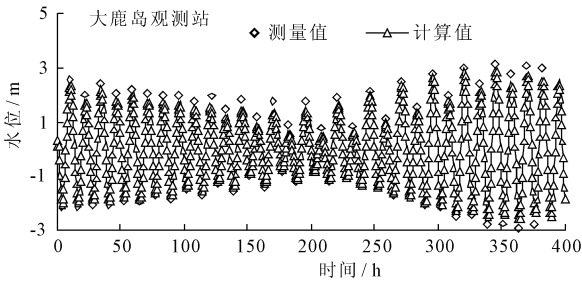
的对比图,在大、小潮期模拟的流速整体与测量流速吻合较好,仅大潮期存在个别点速度偏小;图 8 是站点 3 小潮期、大潮期模拟流速和实测值的对比图,在小潮、大潮期模拟流速与测量流速整体吻合较好。总体来说,两测量点的流速变化趋势与实测基本吻合,大潮期流速在 0.25 ~ 0.6 m/s 范围内变化,小潮期流速在 0.1 ~ 0.3 m/s 范围内波动。

图 9 为上述两站点模拟流向与实测流向的对比图,其计算的相位与实测结果有较好的相似性。通过上述的对比图可以看出,该隐格式水动力模型能较为准确地模拟出庄河海域的水位、流速变化趋势以及水流的流向。从图 10 庄河海域石城岛附近涨落潮的流场图来看,涨潮时,潮流从该区域的东北侧流进从西南侧流出,落潮时恰好相反,且潮流在遇到岛屿时出现绕流特性,水流产生两个分支绕过岛屿,在沿整体潮流方向岛屿前后侧均出现相对较小的流

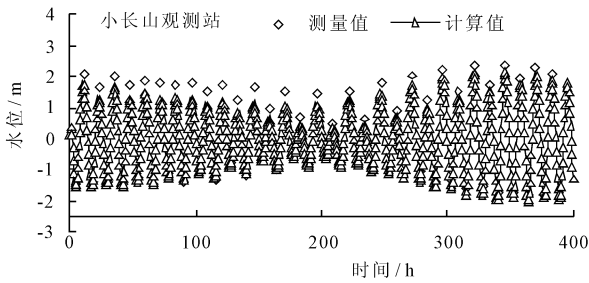
速。为了模拟庄河养殖海域水体污染物的运动轨迹,在计算域内 5 个不同的位置分别释放粒子(见图 11),由于采用冷启动,所以在水动力模拟 24 h 后,水流达到稳定状态时,开始投放粒子且一次投放,计算至最终模拟时间,每个位置投放 500 个粒子,5 个投放点共投放 2 500 个粒子。通过对模拟结果进行分析发现,1 号、2 号以及 3 号投放点 3 个粒子群质心的迁移轨迹基本相同,粒子群质心随涨、落潮做往复运动,都是从东南侧绕过石城岛,向东北



图 5 庄河计算海域示意图

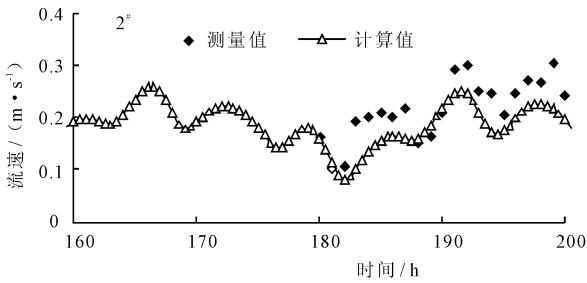


(a) 大鹿岛水位对比图

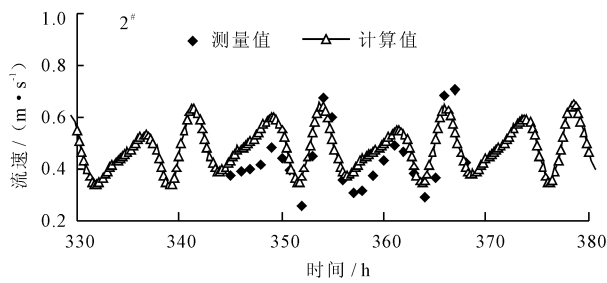


(b) 小长山水位对比图

图 6 大鹿岛和小长山岛计算和实测潮位对比

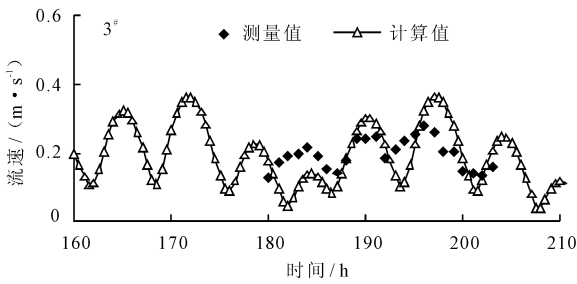


(a) 小潮流速对比图

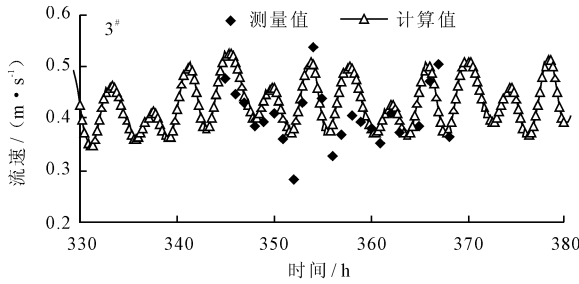


(b) 大潮流速对比图

图 7 小潮和大潮计算和实测流速对比(站点 2)



(a) 小潮流速对比图

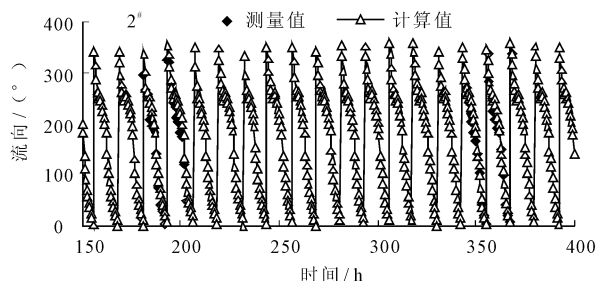


(b) 大潮流速对比图

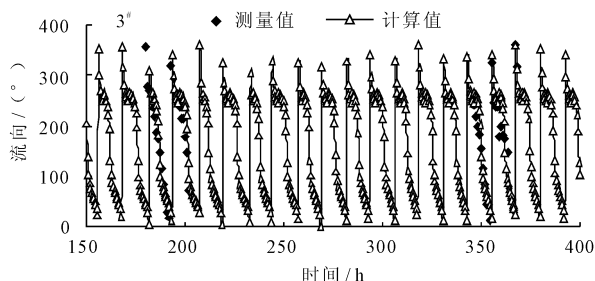
图 8 在小潮和大潮(站点 3)时计算流速和实测流速对比

方向迁移,在 14 d 里迁移了近 50 km,同样说明该处水体交换能力较强。4 号投放点的粒子群质心迁移距离较小,约 20 km,与 4 号投放点很近的 5 号投放点的粒子群几乎仅在附近区域做往复运动,说明石

城岛东北侧靠近岸线海域的水体交换能力较弱,也说明了该海域不同位置水体的交换能力存在很大差别。通过各个投放点的计算结果对比发现,在该海域即便位置相邻,其轨迹路径也可能大相径庭。

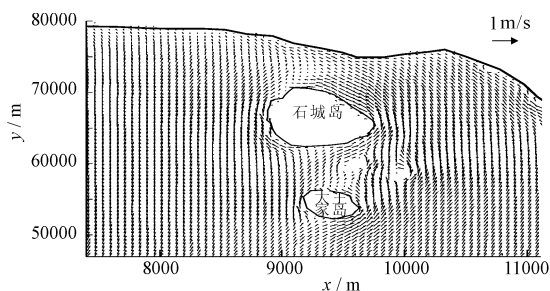


(a) 站点2流向对比图

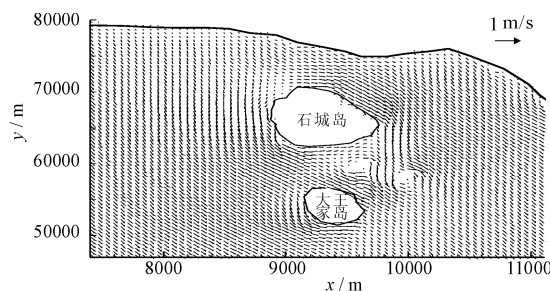


(b) 站点3流向对比图

图9 站点2、3流向计算值和实测值的对比



(a) 涨潮时潮流场



(b) 落潮时潮流场

图10 庄河海域石城岛附近涨落潮流场图

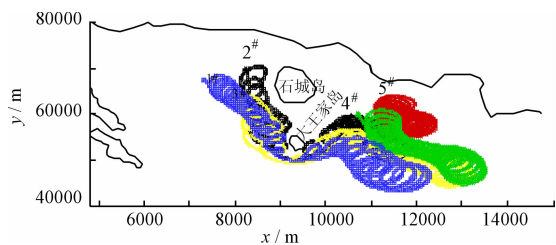


图11 在计算域内不同释放点的粒子追踪轨迹

4 结 语

本文提出了一个全隐格式的深度平均二维水动力模型,其采用二叉树网格的有限体积法离散方程,耦合拉格朗日粒子追踪法及粒子云团随机走动原理计算水体污染物的运动轨迹。隐格式水动力模型的时间步长不依赖于克朗数条件的限制,在庄河半日潮海域时间步长可达 1800 s。通过对理想海湾的水动力、风与水流共同作用下理想海湾的油膜输移、扩散以及庄河养殖海域的污染物运动轨迹模拟后发现,本文的模型能够较好地复演近岸海域的水动力和污染物运动轨迹。总的来说,庄河养殖海域涨潮时潮流从计算区域的东北侧流进从西南侧流出,退

潮时潮流从计算区域的西南侧流进从东北侧流出。潮流在遇到岛屿时出现绕流现象,水流绕过岛屿,沿岛屿前后侧潮流均出现相对较小的流速,个别位置出现涡流形态。石城岛附近不同位置水体的污染物运动轨迹以及迁移能力均存在较大差别,石城岛西南侧海域的水体交换能力较强,东北侧海域的水体交换能力相对较弱,整体上水体污染物向东侧移动。在充分考虑水体交换能力的基础上,计算结果可为该水产养殖区的水环境管理、评价提供建议和技术支持。

参考文献:

- [1] 袁秀堂,张升利,刘述锡,等. 庄河海域菲律宾蛤仔底播增殖区自身污染[J]. 应用生态学报, 2011, 22(3): 785 - 792.
- [2] Pan Cunhong, Huang Wenrui. Numerical modeling of suspended sediment transport affected by Tidal Bore in Qiantang Estuary [J]. Journal of Coastal Research, 2010, 26 (6): 1123 - 1132.
- [3] Xia Junqiang, Falconer R A, Lin Binliang. Impact of different tidal renewable energy projects on the hydrodynamic processes in the Severn Estuary, UK [J]. Ocean Model-

- ling, 2010, 32(1-2): 86-104.
- [4] Zhang Mingliang, Wu Weiming, Lin Lihua, et al. Coupling of wave and current numerical model with unstructured quadtree grid for nearshore coastal waters [J]. *Science China Technological Sciences*, 2012, 55(2): 568-580.
- [5] 包芸. 人类重大工程改变河口潮波传播方向引发的灾害与恢复 [J]. *中国科学(物理学、力学、天文学)*, 2014, 44(5): 531-538.
- [6] Kuang Cuiping, Chen Siyu, Zhang Yu, et al. A two-dimensional morphological model based on a next generation circulation solver I: Formulation and validation [J]. *Coastal Engineering*, 2012, 59(1): 1-13.
- [7] Wu Weiming, Sánchez A, Zhang Mingliang. An implicit 2-D shallow water flow model on unstructured quadtree rectangular mesh [J]. *Journal of Coastal Research*, 2011, 59(S1): 15-26.
- [8] 张明亮, Wu W M. 基于四叉树网格近海海域波浪、潮流相互作用的数学模型 [J]. *中国科学(物理学、力学、天文学)*, 2012, 42(3): 294-309.
- [9] Daoud A H, Rakha K A, Abul-azm A G. A two-dimensional finite volume hydrodynamic model for coastal areas: Model development and validation [J]. *Ocean Engineering*, 2008, 35(1): 150-164.
- [10] 万由鹏, 毛献忠, 朱佳. 深圳湾污染物平均输运时间数值研究 [J]. *水力发电学报*, 2014, 33(4): 149-155.
- [11] 韩松林, 梁书秀, 孙昭晨. 狭长海湾象山港三维污染物运移特征的数值模拟 [J]. *海洋通报*, 2014, 33(5): 511-518.
- [12] Chao Xiaobo, Shankar N J, Cheong H F. Two-and three-dimensional oil spill model for coastal waters [J]. *Ocean Engineering*, 2001, 28(12): 1557-1573.
- [13] Patankar S V. Numerical heat transfer and fluid flow [M]. New York: McGraw-Hill, 1980.
- [14] Saad Y. ILUT: a dual threshold incomplete LU factorization [J]. *Numerical Linear Algebra with Applications*, 1994, 1(4): 387-402.
- [15] Tkalic P, Huda M D K, Gin K Y H. A multiphase oil spill model [J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2003, 41(2): 115-125.

(上接第72页)

- [2] American Water Works Association, American Society of Civil Engineers. Water treatment plant design [M]. New York: McGraw Hill, 2005.
- [3] Jenkins M W, Tiwari S K, Darby J. Bacterial, viral and turbidity removal by intermittent slow sand filtration for household use in developing countries: Experimental investigation and modeling [J]. *Water research*, 2011, 45(18): 6227-6239.
- [4] Mark Sobsey, Christine E Stauber, Lisa Casanova, et al. Point of use household drinking water filtration: a practical, effective solution for providing sustained access to safe drinking water in the developing world [J]. *Environmental Science and Technology*, 2008, 42(12): 4261-4267.
- [5] Nakhla G, Farooq S. Simultaneous nitrification-denitrification in slow sand filters [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2003, 96(2-3): 291-303.
- [6] Malzer H J, Gimbel R. Protection layers for the extension of slow sand filter running times in wastewater reuse [J]. *Water Science and Technology: Water Supply*, 2006, 6(1): 105-111.
- [7] Aronino R, Dlugy C, Arkhangelsky E, et al. Removal of viruses from surface water and secondary effluents by sand filtration [J]. *Water Research*, 2009, 43(1): 87-96.
- [8] 刘杰, 曹相生, 孟雪征. 水温对慢滤池深度处理污水的性能影响 [J]. *环境工程学报*, 2010, 4(11): 2437-2440.
- [9] Xing Zheng, Ernst M, Jekel M. Pilot-scale investigation on the removal of organic foulants in secondary effluent by slow sand filtration prior to ultrafiltration [J]. *Water Research*, 2010, 44(10): 3203-3213.
- [10] 王永胜, 李培红. 慢滤水处理技术 [J]. *中国农村水利水电*, 2000(1): 57-58.
- [11] Sakamoto M. Primary production by phytoplankton community in some Japanese lakes and its dependence on lake depth [J]. *Archiv Fur Hydrobiologie*, 1966, 61: 1-28.