

基于 FBM 法追踪秦皇岛海域赤潮迁移扩散

匡翠萍¹, 谢华浪¹, 苏平², 顾杰^{3*}, 冒小丹¹ (1. 同济大学土木工程学院水利工程系, 上海 200092; 2. 广西壮族自治区交通规划勘察设计研究院, 广西 南宁 530029; 3. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306)

摘要: 在 Delft3D-FLOW 模型模拟水动力的基础上, 基于 FBM 粒子追踪法建立和验证赤潮迁移扩散模型。模拟了秦皇岛海域潮流和风生流, 分析了风生流对赤潮迁移扩散的作用, 对比分析了 FBM 法、拉格朗日法和常规布朗运动法在赤潮迁移扩散模拟中的特性, 测试了模型 Hurst 指数的敏感性并得出其在赤潮模拟中的合理取值范围。主要结论为: ①秦皇岛海域的赤潮主要随潮流的涨落而往复移动, 一个涨落潮周期内赤潮的净迁移距离较小; ②秦皇岛海域夏季潮流较弱, 但风对赤潮迁移具有一定影响, 易产生东北向风生流, 导致赤潮更易往东北方向迁移; ③Hurst 指数较明显地影响粒子云的扩散范围, Hurst 指数取 0.80 ± 0.03 能比较真实地模拟秦皇岛海域赤潮的迁移扩散; ④FBM 法可模拟赤潮的 non-Fickian 扩散现象, 使其模拟的粒子云扩散范围和分布形状明显优于拉格朗日法和常规布朗运动法。

关键词: 秦皇岛海域; FBM; 赤潮; 迁移扩散; 粒子追踪

中图分类号: X55, P76 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2016)08-2505-11

Tracking migration and diffusion of red tides in Qinhuangdao coastal water based on FBM method. KUANG Cui-ping¹, XIE Hua-lang¹, SU Ping², GU Jie^{3*}, MAO Xiao-dan¹ (1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai, 200092, China; 2. Guangxi Communications Planning Surveying and Designing Institute, Nanning, 530029, China; 3. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China). *China Environmental Science*, 2016, 36(8): 2505~2515

Abstract: Based on the hydrodynamic simulation by Delft3D-FLOW, the model of migration and diffusion of red tides, based on the FBM (Fractional Brownian Motion) particle tracking method, was established and validated. The flow and wind-driven current in Qinhuangdao coastal water were simulated, and the effects of wind-driven current in migration and diffusion of red tides were presented. The characteristics of the FBM method, Lagrange method and the conventional Brown method in simulating migration and diffusion of red tides were compared. The sensitivity of Hurst index in the model was analysed, and its reasonable range in simulation of migration and diffusion of red tides was obtained in Qinhuangdao coastal water. Main conclusions were: 1) red tides migrated in Qinhuangdao coastal water with reciprocating tidal currents, resulting in a small net migration distance of red tides during an entire flood and ebb period; 2) the tidal current in Qinhuangdao coastal water was weak in the summer, but the wind-driven current in the northeast direction resulted in the red tide being transported northeastwardly; 3) Hurst index could significantly affect the diffusion range of particle cloud, Hurst index in the range of 0.80 ± 0.03 could more accurately simulate migration and diffusion of red tides in Qinhuangdao coastal water; 4) FBM method could simulate the non-Fickian diffusion phenomenon of red tides, which made the diffusion range and shape of the particle clouds closer to the actual situation than those using the Lagrange method and the conventional Brown method.

Key words: Qinhuangdao coastal water; FBM; red tides; migration and diffusion; particle tracking

20 世纪 90 年代以来, 我国的赤潮数量逐年增加, 给人类社会造成的危害也日益加重, 赤潮生物种类增多, 导致有毒有害物种种类增加^[1-2]。1990~1999 年渤海海域共记录到的赤潮达 27 次, 赤潮累计面积 17530 km^2 。21 世纪以来, 渤海发生赤潮的频率和面积进一步扩大, 2000~2009 年赤

潮发生的次数高达 92 次, 累计赤潮面积达到 25800 km^2 ^[3]。

为模拟和预测污染物扩散, 研究者开发出大

收稿日期: 2016-01-22

基金项目: 国家海洋公益项目(201305003)

* 责任作者, 教授, jgu@shou.edu.cn

量的粒子追踪模型.目前,大多数的粒子追踪模型采用随机布朗运动来模拟湍流分布.这些模型假定粒子运动轨迹是间断性连续的,也就是说,粒子是随机分布的,但这种方法只能产生 Fickian 扩散,即粒子云团的方差随着时间线性增加.但 Okubo 和 Osborne 等^[4-6]在实际观测研究中发现,海上浮标很大范围内的轨迹为 non-Fickian 扩散,其云团方差随时间非线性增加.研究还表明湍流中粒子运动是连续的,并且粒子运动具有拉格朗日记忆,这对预测粒子后续运动方向起着重要作用.

FBM 粒子追踪模型中,粒子的运动具有连续性记忆,并能用于模拟流体中污染物的 non-Fickian 扩散现象^[7].Mandelbrot^[8]首先提出利用分数布朗运动随机分形函数来模拟粒子的连续运动.Addison 等^[9]将 FBM 粒子追踪模型与传统的高斯粒子追踪模型的模拟结果进行对比,发现前者在沿海地带的污染物扩散模拟中具有更好的效果.Qu 等^[10]采用 FBM 模型对英国 Northumbrian 海岸发生的溢油事故进行了模拟,与卫星监测资料的对比结果表明该方法与传统的粒子追踪模型相比具有更高的模拟精度.顾恩慧等^[11-12]采用分数布朗运动产生 non-Fickian 扩散来模拟油膜拓延,对乐清湾北港区溢油风险进行预测模拟,分析在潮流和风作用下油膜的漂移轨迹和对周围敏感区的影响.瞿波等^[13-14]介绍了简化的分数布朗运动以及利用 FBM 粒子追踪模型模拟污染物粒子云在沿海的扩散,从而成功地模拟了 non-Fickian 扩散,对海上污染物扩散规律进行了研究.Guo 等^[15]对 2005 年大连湾“Arteaga”溢油事故进行了模拟,并用卫星观测数据进行验证,发现 FBM 模型得到的结果比传统的扩散模型更加精确可靠.

FBM 粒子追踪法已在海上溢油和其他污染物的迁移扩散模拟中得到成功应用,因此将其应用于模拟赤潮的迁移扩散具有重要意义.本文在 Delft3D-FLOW 模型模拟水动力的基础上,基于 FBM 粒子追踪法建立和验证赤潮迁移扩散模型.忽略赤潮生消的影响,模拟了秦皇岛海域潮流和风生流,分析了风生流对赤潮迁移扩散的作用,对

比分析了 FBM 法、拉格朗日法和常规布朗运动法在赤潮迁移扩散模拟中的特性,测试了模型 Hurst 指数的敏感性并得出 Hurst 指数在赤潮模拟中的合理取值范围.

1 数学模型

1.1 水动力数学模型基本方程

Delft3D-FLOW 模型的基本方程为二维或三维的非线性浅水方程,采用浅水假定和布西奈斯克(Boussinesq)近似由不可压缩流体的三维 Navier-Stokes 方程推求得出.由于垂向加速度远远小于重力加速度,故在垂直方向上的动量方程中忽略了垂直加速度的影响,并由此推导出在静压假定下的水流方程^[16].平面二维水动力模型的基本方程为

1.1.1 连续方程

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial((d+\zeta)u\sqrt{G_{\eta\eta}})}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial((d+\zeta)v\sqrt{G_{\xi\xi}})}{\partial \eta} = (d+\zeta)Q \quad (1)$$

式中: ζ 为水位; d 为基准面下的深度,总水深 $H = d + \zeta$; u 、 v 分别表示水平方向上 ξ 和 η 向的流速分量; $G_{\xi\xi}$ 、 $G_{\eta\eta}$ 分别为正交曲线坐标系和 Cartesian 坐标系之间的转换系数; Q 为单位面积的源汇项.

1.1.2 动量方程 ξ 方向的动量方程

$$\begin{aligned} & \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \times \\ & \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} - \frac{v^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} - f_v \\ & = -\frac{1}{\rho_0 G_{\xi\xi}} P_\xi + F_\xi + M_\xi \end{aligned} \quad (2)$$

η 方向的动量方程

$$\begin{aligned} & \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \times \\ & \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} - \frac{u^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} + f_u \end{aligned}$$

$$= -\frac{1}{\rho_0 G_{\eta\eta}} P_{\eta} + F_{\eta} + M_{\eta} \quad (3)$$

式中: ξ 、 η 表示平面曲线坐标; $f = 2\Omega \sin \phi$, 为科氏力参数, 由地球自转角速度和纬度值决定; ρ_0 为水的密度; P_{ξ} 、 P_{η} 为压力梯度; F_{ξ} 、 F_{η} 表示水平雷诺应力的不平衡性; M_{ξ} 、 M_{η} 为外来源汇项引起的附加动量。

自由表面边界的风切应力大小由式(4)确定:

$$|\bar{\tau}_s| = \rho_a C_d U_{10}^2 \quad (4)$$

式中: ρ_a 为空气密度, U_{10} 为海平面上 10m 处的风速, 风拖曳力系数 $C_d = 0.00063 + 0.000066 U_{10}$ 。

1.2 FBM 粒子追踪模型

传统随机走动模型的随机步骤通常采用高斯概率分布(即布朗运动)来定义, 它的每一步统计是相互独立的, 因此只会产生菲克(Fickian)扩散^[9,17]。如果在粒子追踪模型中粒子数目足够多, 则粒子云的方差 σ_c^2 与扩散时间成正比^[18], 即

$$\sigma_c^2 = 2Dt \quad (5)$$

式中: D 是扩散系数, 由流体的温度、黏度和粒子的大小决定。因此, 在时间 $t_i = i\Delta t$ (i 为整数, Δt 为时间间隔)中可以产生每个空间方向上离散的布朗运动 $B(t_i)$, 也就是把高斯分布中的一系列随机步骤 $W(t_j)$ 相加:

$$B(t_i) = \sum_{j=1}^i W(t_j) \quad (6)$$

分数布朗运动也是由高斯白噪声相加产生的, 其定义为

$$B_H(t) = \frac{1}{\Gamma(H+1/2)} \int_{-\infty}^t (t-s)^{H-1/2} dB(s) \quad (7)$$

式中: $B_H(t)$ 为时间 t 时的分数布朗运动项, $B(s)$ 是一个高斯随机过程, H 为 Hurst 指数。

瞿波和 Paul S. Addison^[19]在 Mandelbrot 等^[20]最初对 FBM 定义的基础上, 提出了一个离散型模型:

$$B_H(i) - B_H(i-1) = \frac{1}{\Gamma(H+1/2)} \times \left\{ \sum_{j=i-M}^{i-2} [(i-j)^{H-1/2} - (i-j-1)^{H-1/2}] Z(j) + Z(i-1) \right\} \quad (8)$$

$$B_H(t_i) - B_H(0) = \sum_{i=1}^{t_i} [B_H(i) - B_H(i-1)] \quad (9)$$

式中: $B_H(t_i)$ 为在时间 t_i 处第 i 次离散地逼近分数布朗运动; Δt 为单位时间间隔; H 为 Hurst 指数; M 是为了逼近分数布朗运动而采用的有限记忆, 通常要比计算总步数要大得多, 这样 FBM 就有了相应的长期记忆; $Z(i)$ 为取样于高斯概率离散分布的随机步骤。

分形具有随机性, 但却具有部分与整体以某种方式相似的共同特征, 即自我相似性^[21-22]。分数布朗运动模型(FBM)中, 当 $H=0.5$ 时, 式(8)、式(9)就简化成式(6)(常规布朗运动); 当 $H>0.5$ 时为持续的 FBM, 它产生非菲克的类似于在湍流中的超扩散特性^[18], 通过 Hurst 指数来描述 FBM, 这种方法模拟的扩散范围会比菲克扩散的范围更大^[23]。Osborne 等^[5]的研究证明, 水体表面漂浮物的轨迹可以由持续的 FBM 来描述, 而且 Hurst 指数总是在 0.79 ± 0.07 的范围内。

许多研究表明^[24-28], 藻类在漂移过程中虽然会不断生长和消亡, 但它们基本是作为一个整体来运动的, 不会像营养盐扩散溶解到海水中, 因此可用粒子追踪方法来模拟赤潮路径。本模型把确定性方法和随机性方法进行有效结合, 对赤潮粒子用拉格朗日法建立其平流位移方程和用分形方法建立其扩散位移方程。那么, 任一粒子在 i 时刻的位移为

$$\Delta x(i) = U(i)\Delta t + \Delta B_x(i) \quad (10)$$

$$\Delta y(i) = V(i)\Delta t + \Delta B_y(i) \quad (11)$$

在 x 和 y 方向上每一步的扩散位移分别为 $\Delta B_x(i)$ 、 $\Delta B_y(i)$, 由式(10)、式(11)计算得到。当碰到边界时产生反射, 使得整个 FBM 轨迹的正负号改变, 这样就可以保持 FBM 的连续性, 记忆不会由此中断^[29]。因此, 式(8)、式(9)、式(10)、式(11)就构成了 FBM 粒子追踪模型^[30]。当忽略掉 $\Delta B_x(i)$ 、 $\Delta B_y(i)$, 则变成只考虑平流位移而忽略随机项的拉格朗日法。

2 数学模型建立与验证

秦皇岛海域岸线弯曲, 地形复杂, 为实现秦皇岛近岸海域与渤海其它地区海域的结合预报,

需建立双重嵌套模型.大模型覆盖整个渤海,东侧开边界为大连-烟台潮位边界,总面积约 84000km^2 ;小模型北起山海关以北,南至滦河口以南,岸线蜿蜒约 203km ,向海延伸 55km ,总面积

约 7520km^2 .大模型网格数为 391×469 个,空间步长约为 1km ;小模型网格数为 340×192 个,空间步长为 $200 \sim 400\text{m}$.图 1 为大、小模型具体位置与计算网格.

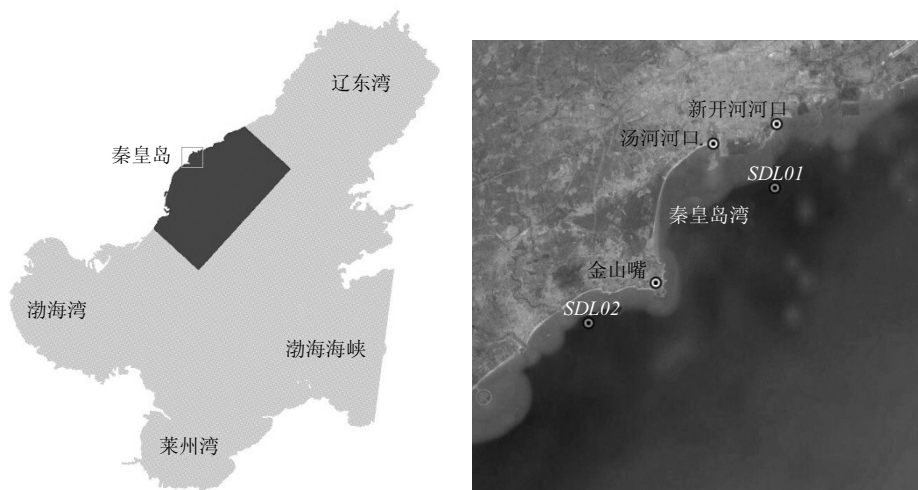


图 1 双重嵌套模型及区域地理位置示意

Fig.1 The double nested model and sketch map of regional geographical position

海域开边界采用潮位过程来控制.大模型以整个渤海岸线作为闭边界,东侧开边界为大连-烟台潮位边界;小模型的西边界、东边界和南边界三条开边界以及一条岸线闭边界,其潮位条件由大模型提供.侧向固边界采用不可滑移条件,即流速为零.水平紊动粘滞系数为 $15\text{m}^2/\text{s}$,曼宁系数根据底部泥沙粒径分布,取均值为 0.0135 ,时间步长取 1min .采用动边界处理滩地的干湿交换过程.

2.1 水动力模型验证

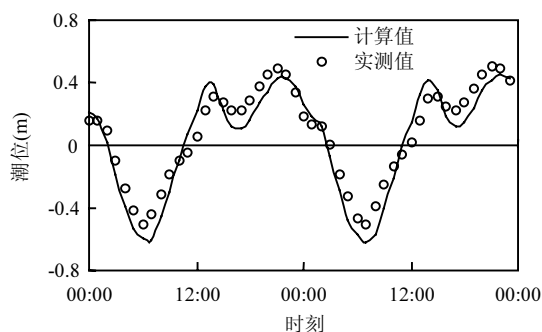


图 2 秦皇岛站潮位验证(2013 年 5 月 11~12 日)

Fig.2 Verification of tidal level at Qinhuangdao station (May 11~12, 2013)

水动力模型通过环渤海多个测站 2013 年 5 月大、小潮的潮位验证和流速流向验证,图 2~图 4 为部分水动力验证结果.可以看出,水动力模型的验证效果良好.其中,秦皇岛海域的流速较小,基本为 $0.1 \sim 0.4\text{m/s}$,且涨落潮流向大致相差 180° .

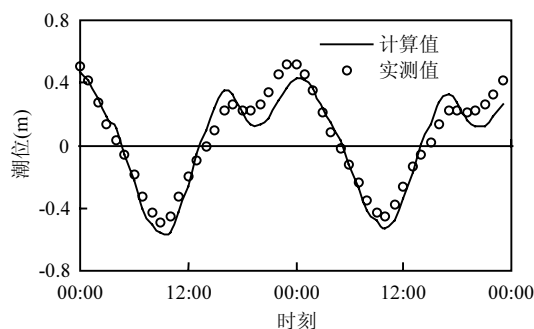


图 3 秦皇岛站潮位验证(2013 年 5 月 16~17 日)

Fig.3 Verification of tidal level at Qinhuangdao station (May 16~17, 2013)

采用百分比偏差率法^[31]对潮流模型进行效率评价,计算公式如下:

$$P = \frac{\sum_{i=1}^N |D - M|}{\sum_{i=1}^N |D|} \times 100 \quad (12)$$

式中： D 为实测值， M 为计算值， P 为标准化模型

误差系数。当 $P \leq 10$ 为极好； $>10 \sim 20$ 为非常好； $>20 \sim 40$ 为好； >40 为差。经计算可得潮位计算 P 值为 31.5，流速计算 P 值为 36.9，流向计算 P 值为 28.3，评价结果均为好。经验证可知，模型计算结果较为准确可靠。

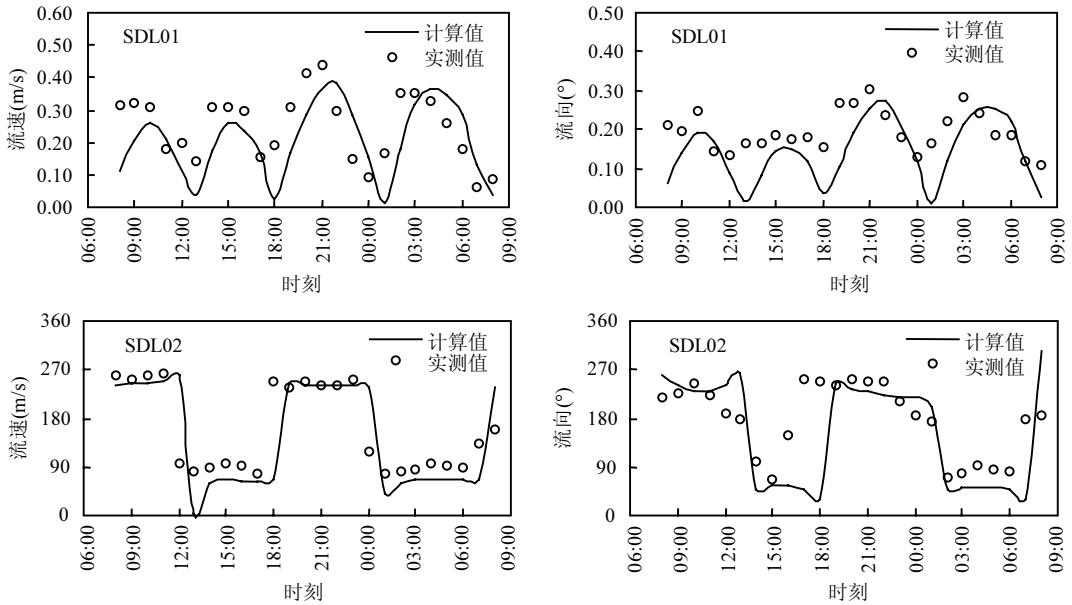


图 4 V01 和 V02 测站的潮流流速流向验证(2013 年 5 月 11 日)
Fig.4 Verification of flow velocity magnitude and direction at V01 and V02 (May 11~12, 2013)

2.2 赤潮模型验证

2012 年 5 月中下旬在秦皇岛北戴河近岸海域出现赤潮，自 5 月中旬开始，持续至 5 月下旬。图 5 为国家海洋环境监测中心提供的根据卫星图片所提取的赤潮分布范围变化过程。5 月 16 日

赤潮在金山嘴附近海域呈狭长带状分布；5 月 17 日赤潮从金山嘴附近海域往北移动进入秦皇岛湾，且赤潮范围迅速扩大；5 月 21 日，赤潮粒子继续往北移动至新开河口附近海域，且分布范围继续往外海方向扩散。

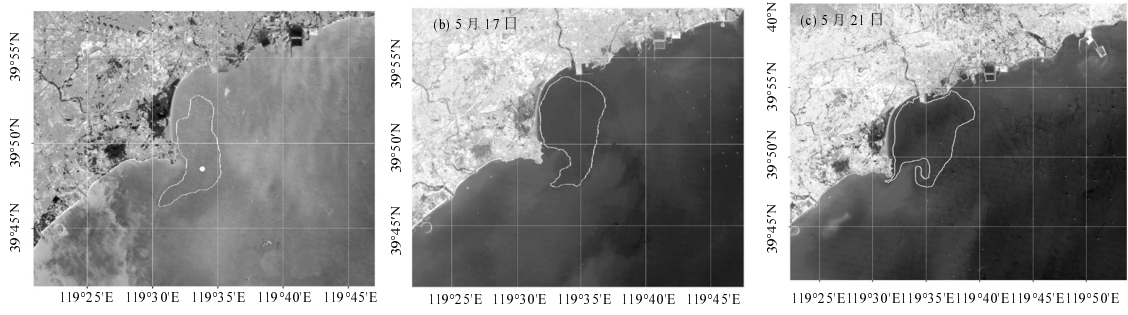


图 5 秦皇岛海域赤潮范围变化过程(2012 年 5 月 16~21 日)
Fig.5 The variation processes of red tide range in Qinhuangdao coastal water (May 16~21, 2012)

根据 Osborne 等^[5]的研究经验,FBM 模拟水体表面漂浮物的迁移扩散时 Hurst 指数总是在 0.79 ± 0.07 的范围内.故本文首先选取 Hurst 指数 $H=0.8$,释放粒子数为 1000 个,时间步长为 120s,在实时风况下对 2012 年 5 月 16 日~21 日秦皇岛赤潮事件进行模拟,图 6 为相应的模拟结果.其中,5 月 16 日为赤潮初始释放时间,赤潮模拟粒子

根据 5 月 16 日卫星图片显示的赤潮范围进行均匀分布.根据模拟结果,实时风况下,赤潮粒子于 5 月 17 日往北运移进入秦皇岛湾并分布于汤河河口至金山嘴海域一带;至 5 月 21 日,粒子云北端继续往北移动至新开河河口附近海域并往外海扩散.总体而言,赤潮粒子云的移动速度与扩散范围均与实际情况(图 5 所示)一致.

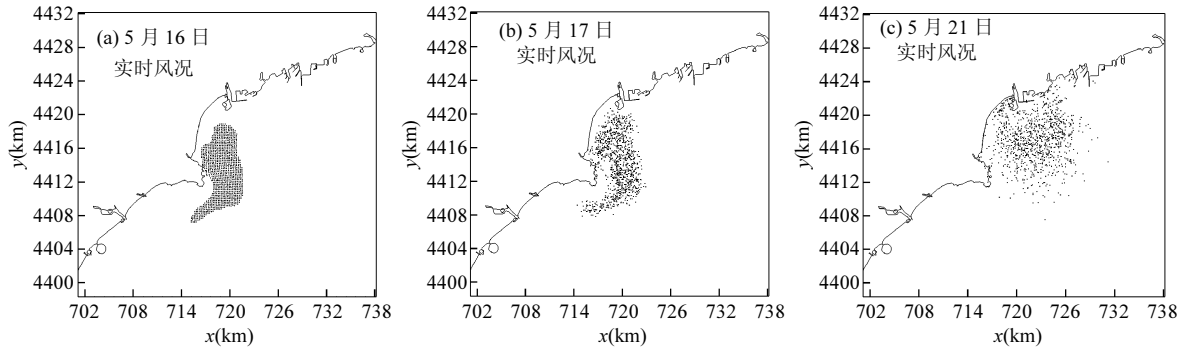


图 6 实时风况下的赤潮迁移扩散验证(2012 年 5 月 16~21 日)

Fig.6 Verification of migration and diffusion of red tide in real wind condition (May 16~21, 2012)

3 模拟与分析

潮方向指向西南,落潮方向指向东北;半日发生一次涨潮和一次落潮,涨、落潮平均流速均较小,并且差别不大,涨落潮最大流速在 $0.3\sim0.4\text{m/s}$ 之间.

3.1 潮流模拟分析

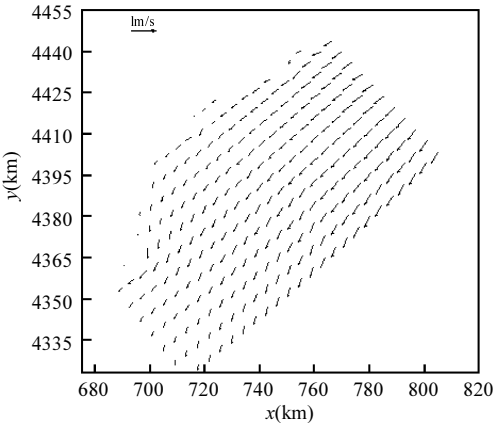


图 7 秦皇岛海域涨急流场

Fig.7 Maximum flood current field in Qinghuangdao coastal water

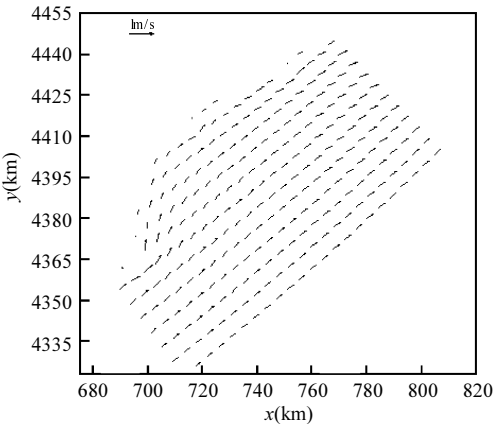


图 8 秦皇岛海域落急流场

Fig.8 Maximum ebb current field in Qinghuangdao coastal water

图 7 与图 8 分别为秦皇岛海域涨急与落急流场图.根据水动力模拟结果,秦皇岛海域的潮流呈明显的往复流运动特征,潮流方向为顺岸方向,涨

3.2 风对渤海潮流的影响分析

图 9 为 2012 年渤海全年风向频率玫瑰图与夏季风向频率玫瑰图.全年渤海风向主要为南北方向;

而在赤潮高发期的夏季风主要以南风 and 偏南风为主,S、SSE、SSW 和 SE 向出现频率最高,分别为 19.35%、16.62%、11.17%和 11.17%。夏季风速主要分布于 2~8m/s 之间,平均风速为 4.0m/s。图 10 为本次赤潮模拟期间风速风向过程,2012 年 5 月 16~21 日,风向变化较小,主要以南风为主,风速变化较大,最大风速为 9.25m/s,平均风速为 4.75m/s。

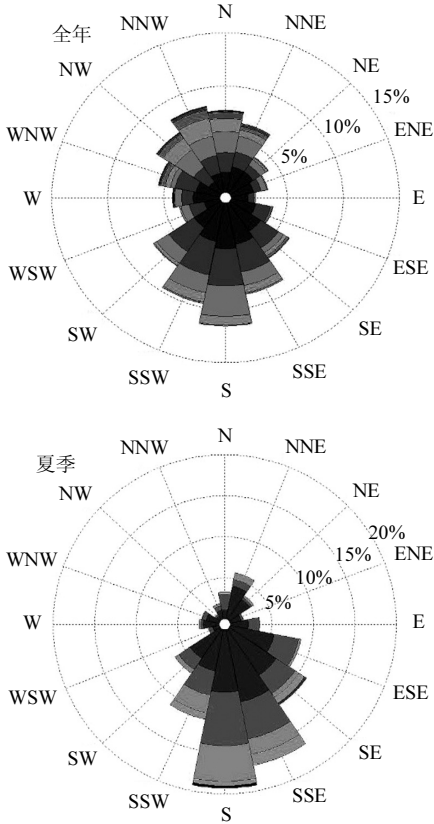


图 9 2012 年渤海全年、夏季风向频率玫瑰

Fig.9 The wind rose diagram of the Bohai sea in 2012 and the summer

选取具有代表性的 4m/s(夏季平均风速)恒定南风风况与实时风况分别进行模拟,研究渤海海域风生流的变化情况,并结合风生流分析风对赤潮迁移扩散的影响.为反映赤潮模拟期间风生流的总体概况,通过式(15)计算得出渤海海域与秦皇岛海域 2012 年 5 月 16 日至 5 月 21 日期间的时间平均风生流流场:

$$\Delta \bar{v} = \sum_{i=1}^n (\bar{v}_{\text{风}} - \bar{v}_{\text{无风}}) / n \quad (13)$$

式中: $\Delta \bar{v}$ 为风生流时段内平均流速; $\bar{v}_{\text{风}}$ 为有风情况下的流速; $\bar{v}_{\text{无风}}$ 为无风情况下的流速; $\bar{v}_{\text{风}} - \bar{v}_{\text{无风}}$ 即为风生流流速; n 为小时数。

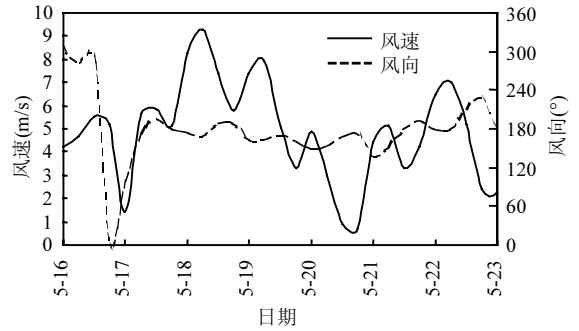


图 10 赤潮期间风速风向过程(2012 年 5 月 16~21 日)

Fig.10 The time history of wind speed and direction in the red tide period (May 16~21, 2012)

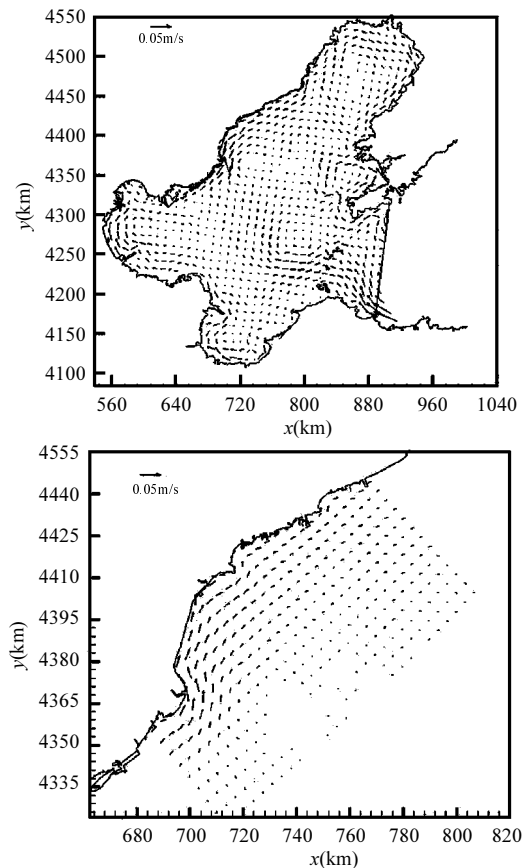


图 11 4m/s 恒定南风下 2012 年 5 月 16~21 日平均风生流流场

Fig.11 Time-averaged wind-driven current in 4m/s constant S wind condition during 16~21 May 2012

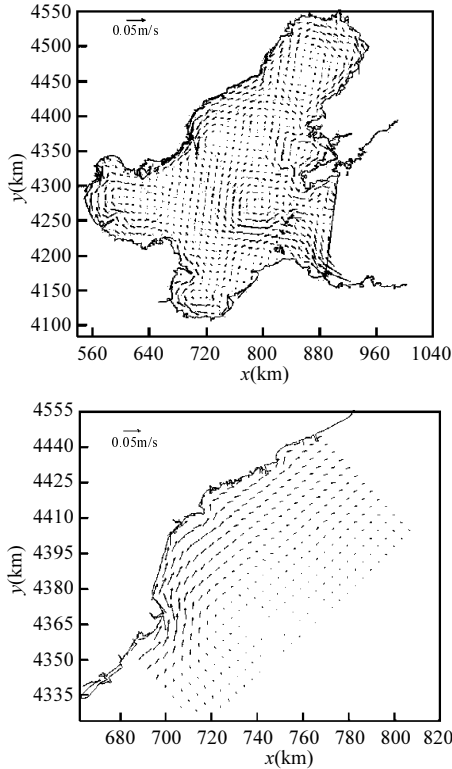


图 12 实时风况下 2012 年 5 月 16~21 日平均风生流流场
Fig.12 Time-averaged wind-driven current in real wind condition during 16~21 May 2012

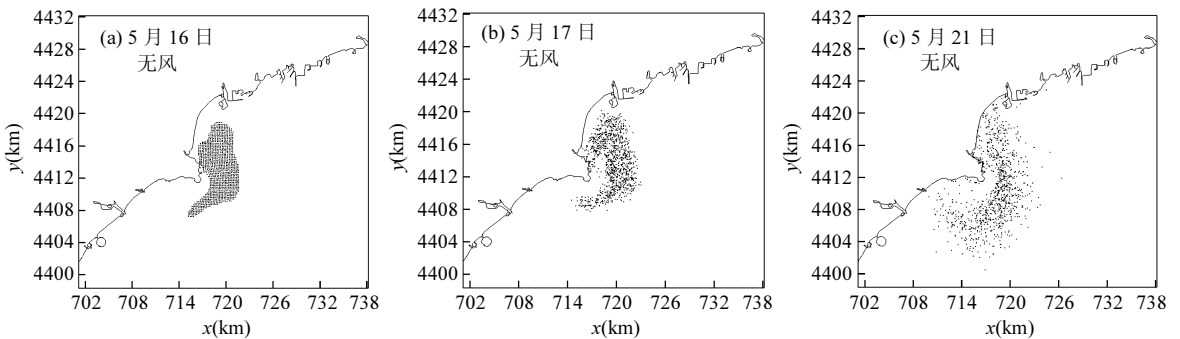
对比图 11 和图 12 的平均风生流流场可知,在 4m/s 恒定风况与实时风况下整个渤海区域风生流流场大体一致:风生流流速较大区域主要集中在秦皇岛沿岸、渤海海峡南部、辽东湾北部、渤海湾西部以及莱州湾南部;渤海区域内出现多个风生流环流,在渤海中部、渤海湾、莱州湾分别形成顺时针环流,辽东湾、金州湾分别形成逆时针环流.实时风况下的风生流的平均流速要比 4m/s 恒定风况下略大一些.在两种风况下,秦皇

岛近岸海域风生流最为明显,风生流流速小于 0.05m/s,越靠近岸区风生流流速越大,流向为沿岸往东北方向,与落潮流流向基本一致.

3.3 风对赤潮迁移扩散的影响分析

Hurst 指数 $H=0.8$,在无风、4m/s 恒定南风两种风况下进行赤潮粒子追踪模拟,图 13 为相应的模拟结果.与实时风况下的模拟结果(图 6)进行对比,在无风情况下,5 月 17 日赤潮从金山嘴附近海域往北移动并进入秦皇岛湾,但与实际情况相比移动距离偏小;至 5 月 21 日,除一部分粒子滞留于秦皇岛湾外,有较大一部分粒子随涨潮流往西南方向运移,与 5 月 16 日相比粒子云中心移动距离较小.在 4m/s 恒定南风的情况下,与实际情况大体相同(图 5)但略有偏差,5 月 17 日赤潮粒子往北运移进入秦皇岛湾,但粒子云分布较为扁平,汤河口与秦皇岛港前沿海域以及金山嘴前沿海域均有较多空白,至 5 月 21 日,赤潮粒子继续往北移动和扩散,分布范围与实际情况相比较为接近但越过金山嘴往南扩散的粒子较多.

根据水动力与赤潮模拟结果,秦皇岛近岸海域的赤潮主要随潮流的涨落而往复移动.涨潮时段,赤潮随涨潮流往西南方向沿岸移动;落潮时段,赤潮随落潮流往东北方向沿岸移动.由于秦皇岛海域位于无潮点附近,潮流较弱,且涨落潮流向相反,涨落潮时段赤潮的迁移距离相减使得在每个涨落潮周期内赤潮的净迁移距离较小.而风对赤潮的影响反映在风对流的影响上,风作用于海面而产生风生流来间接影响赤潮迁移.由于渤海夏季盛行偏南风,在风的作用下秦皇岛海域易产生风生流,风生流运动方向主要为东北方向,故秦皇岛海域夏季赤潮主要向东北方向运移.



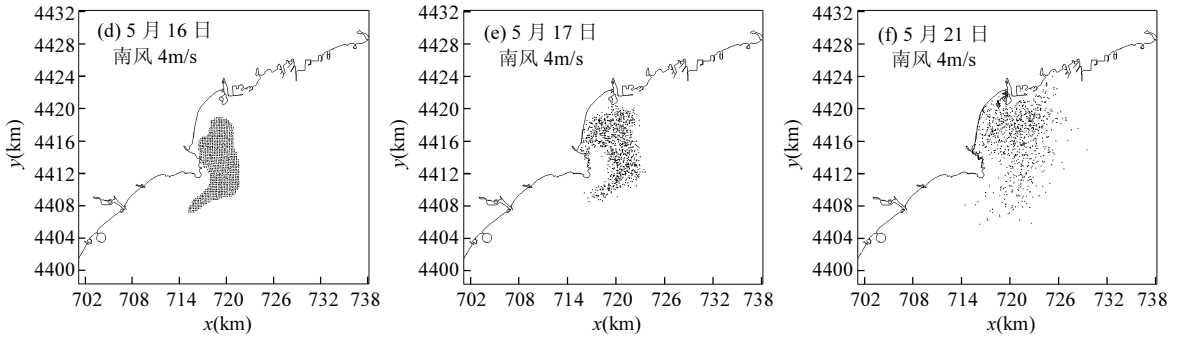


图 13 无风与 4m/s 恒定南风风况下的赤潮迁移扩散

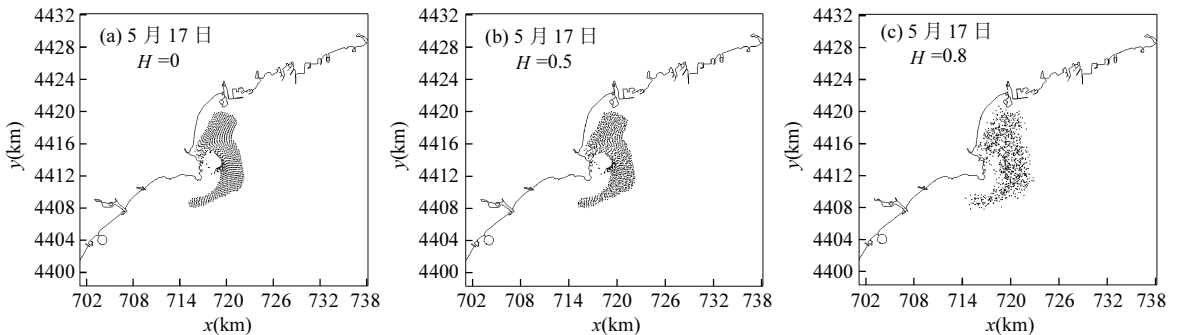
Fig.13 Migration and diffusion of red tide in no wind and 4m/s constant S wind conditions

3.4 Hurst 指数敏感性分析

为研究不同模拟方法对赤潮粒子云扩散范围的影响,以实时风况为例,分别计算拉格朗日法($H=0$)、常规布朗运动法($H=0.5$)与 FBM 粒子追踪法($H=0.8$)三种情况下粒子的迁移扩散过程,取同一时间步上的粒子云分布情况进行比较,如图 14 所示.三种方法中粒子云的运移轨迹大致相同,且均与实际情况相符,即不同的模拟方法对粒子云的迁移影响较小.但不同的模拟方法其扩散范围存在很大差别(表 1).拉格朗日法由于不存在随机项,在粒子云运动过程中赤潮粒子始终呈较为规则的排列状态.常规布朗运动法模拟的结果中粒子云呈随机排列状态,但粒子云的分布形态与拉格朗日法几乎相同,这是由于随机项很小而未能起到使粒子云充分扩散的作用,且常规布朗运动法下粒子运动轨迹是间断性连续的,只能产生 Fickian 扩散,这使粒子云团的方差随着时间线性增加.而在 FBM 粒子追踪法中,由于其随机项的计算具有连续性记忆,使粒子运动具有自相似性和非平稳性两个重要性质,因此在该方法下粒子

云得到充分扩散且粒子云分布范围与实际情况最为接近.

在实时风况下,研究不同 Hurst 指数对粒子云扩散范围的影响,分别计算 $H=0.75$ 、 0.77 、 0.83 、 0.85 四种情况下粒子的迁移扩散过程,取同一时间步上的粒子云分布情况进行比较,如图 15 所示.可以看出,Hurst 指数的大小直接控制着粒子云的扩散程度,Hurst 指数越大,扩散程度越大.不同 Hurst 指数下 5 月 17 日的模拟结果较为接近,这是因为距离初始释放时间较近,粒子云均未得到充分扩散的缘故.5 月 21 日的模拟结果则存在较明显的差异: $H=0.75$ 时粒子云较为扁平,金山嘴与新开河河口附近海域分布粒子较少,扩散范围与实际情况相比略微偏小; $H=0.85$ 时粒子云分布比较稀疏,往南和往东扩散的粒子较多,粒子云扩散范围与实际情况相比略微偏大; $H=0.77$ 、 0.83 时,粒子云扩散范围较为适中,与实际情况偏差较小且在可接受范围内.根据表 1,赤潮模拟面积随着 Hurst 指数的增大而增大,当 $H=0.8$ 时赤潮模拟面积与观测值较为接近,误差较小.



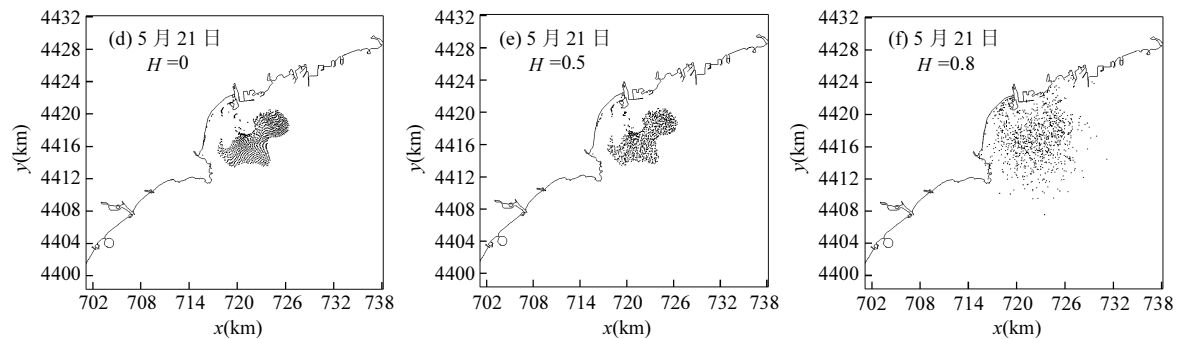


图 14 拉格朗日法($H=0$)、常规布朗运动法($H=0.5$)与 FBM 粒子追踪法($H=0.8$)的赤潮模拟对比

Fig.14 Comparison of lagrange method ($H=0$), conventional Brown method ($H=0.5$) and FBM particle tracking method ($H=0.8$) in the red tide simulation

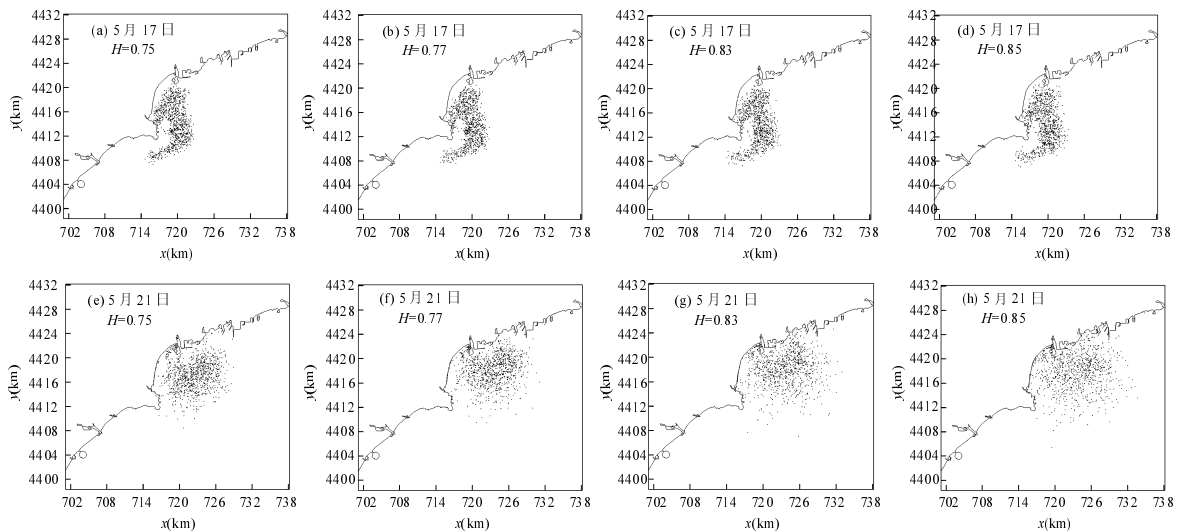


图 15 不同 Hurst 指数下的赤潮模拟对比

Fig.15 Comparison of the red tide simulations with different Hurst indexes

表 1 赤潮观测面积与不同 Hurst 指数下的赤潮计算面积

Table 1 The red tide area obtained from observations and numerical models in different Hurst

Hurst 指数	面积(km ²)		Hurst 指数	面积(km ²)	
	5 月 17 日	5 月 21 日		5 月 17 日	5 月 21 日
观测	60.93	83.50	0.77	58.01	76.55
0	40.91	34.56	0.8	58.04	89.30
0.5	41.92	45.79	0.83	59.18	105.17
0.75	57.33	63.53	0.85	59.27	119.38

根据以上研究,应用 FBM 粒子追踪法对赤潮进行模拟时,Hurst 指数应取在 0.80 ± 0.03 的范围内.因赤潮迁移扩散的影响因素较为复杂,其扩散速度与赤潮种类、赤潮浓度以及当地环境条件

等相关,不同条件下的赤潮其扩散特性并不完全相同.在实际应用中应当在适宜范围内控制 Hurst 指数的大小,以调整粒子云的扩散程度,拟合赤潮扩散范围,更好地表现不同赤潮种类在不同情况下的区域污染程度.

4 结论

4.1 秦皇岛近岸海域的赤潮主要随潮流的涨落而往复移动.涨潮期间,赤潮随涨潮流往西南方向沿岸移动;落潮期间,赤潮随落潮流往东北方向沿岸移动.由于涨、落潮流流向相反,一个涨落潮周期内赤潮的净迁移距离较小.

4.2 风对赤潮迁移具有一定的影响,风作用于

海面产生的风生流间接影响赤潮迁移。秦皇岛海域夏季风多为南风 and 偏南风,易产生流速较大的沿东北方向的风生流,受风生流的影响赤潮更易往东北方向迁移。

4.3 Hurst 指数能够较明显地影响粒子云的扩散范围,Hurst 指数取 0.80 ± 0.03 能比较真实地模拟秦皇岛海域赤潮的迁移扩散。

4.4 FBM 粒子追踪法可模拟赤潮的 non-Fickian 扩散现象,使其模拟的粒子云扩散范围和分布形状明显优于拉格朗日法和常规布朗运动法,更接近于实际情况。

参考文献:

- [1] 郭玉洁. 大连湾赤潮生物——赤潮异弯藻 [J]. 海洋与湖沼, 1994,(2):211-215.
- [2] 齐雨藻,洪英,吕颂辉,等. 南海大鵬湾海洋褐胞藻赤潮及其成因 [J]. 海洋与湖沼, 1994,(2):132-138.
- [3] 孙英杰,黄尧,赵由才. 海洋与环境 [M]. 北京:冶金工业出版社, 2011.
- [4] Okubo A. Oceanic diffusion diagrams [J]. Deep-Sea Research, 1971,18:789-802.
- [5] Osborne A R, Kirwan A D, Provenza A, et al. Fractal drifter trajectories in the kuroshio extension [J]. Tellus, 1989,41A:416-435.
- [6] Sanderson B G, Booth D A. The fractal dimension of drifter trajectories and estimates of horizontal eddy-diffusivity [J]. Tellus, 1991,43A:334-349.
- [7] List E J, Gartrell G, Winant C D. Diffusion and dispersion in coastal waters [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1990, 116(10):1158-1179.
- [8] Mandelbrot B B. The fractals: Form, chance and dimension [M]. San Francisco: Freeman, 1977.
- [9] Addison P S, Qu B, Nisbet A, et al. A non-fickian, particle-tracking diffusion model based on fractional Brownian motion [J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 1997,(25):1373-1384.
- [10] Qu B, Addison P S, Mead C T. Coastal dispersion modelling using an accelerated FBM particle tracking method [J]. Coastal Engineering Journal, 2003,45(1):139-158.
- [11] 顾恩慧,姚炎明. 乐清湾北港区溢油轨迹的分形模拟 [J]. 海洋通报, 2013,32(4):460-466.
- [12] 顾恩慧. 海上溢油行为与归宿的数值模拟 [D]. 浙江大学, 2013.
- [13] 瞿波, Addison P S, Mead C T. 加速分数型布朗运动粒子追踪模型在水面污染扩散中的应用 [J]. 水利学报, 2009(12):1517-1523.
- [14] 瞿波, 保尔·爱迪生, 孙兰红. 分数布朗运动的简化和应用 [J]. 上海师范大学学报(自然科学版), 2009(6):594-602.
- [15] Guo W J, Wang Y X, Me M X, et al. Modeling oil spill trajectory in coastal waters based on fractional Brownian motion [J]. Marine Pollution Bulletin, 2009,58(9):1339-1346.
- [16] WL|DelftHydraulics. User Manual Delft3D-FLOW [Z]. WL|Delft Hydraulics. 2013.
- [17] Addison P S, Ndumu A S, Qu B. A fast non-Fickian particle-tracking diffusion simulator and the effect of shear on the pollutant diffusion process [J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2000,34(2):145-166.
- [18] 瞿波, 保尔·爱迪生. 流体中污染物扩散的分形模拟 [J]. 水利水电科技进展, 2009(6):9-12.
- [19] Qu B, Addison P S. Development of FBMINC model for particle diffusion in fluids [J]. International Journal of Sediment Research, 2009,24(4):439-454.
- [20] Mandelbrot B B, van Ness J W. Fractional Brownian motions, fractal noises and applications [J]. SIAM Review, 1968,10(4): 422-437.
- [21] 秦耀辰, 刘凯. 分形理论在地理学中的应用研究进展 [J]. 地理科学进展, 2003(4):426-436.
- [22] 周火艳, 王崇云, 彭明春, 等. 滇池水华分形结构动态研究 [J]. 环境科学与技术, 2011,34(2):32-35,46.
- [23] Addison P S, Qu B. Development of FBMINC model for particle diffusion in fluids [J]. International Journal of Sediment Research, 2009,24(4):439-454.
- [24] Yamamoto T, Okai M. Effects of diffusion and upwelling on the formation of red tides [J]. Journal of Plankton Research, 2000, 22(2):363-380.
- [25] Chen X H, Zhu L S, Zhang H S. Numerical simulation of summer circulation in the East China Sea and its application in estimating the sources of red tides in the Yangtze River estuary and adjacent sea areas [J]. Journal of Hydrodynamics, 2007,19(3):272-281.
- [26] 郑向阳, 邢前国, 李丽, 等. 2008 年黄海绿潮路径的数值模拟 [J]. 海洋科学, 2011,(7):82-87.
- [27] 黄娟, 吴玲娟, 高松, 等. 黄海绿潮应急漂移数值模拟 [J]. 海洋预报, 2011,28(1):25-32.
- [28] 吴玲娟, 曹丛华, 黄娟, 等. 黄海绿潮应急溯源数值模拟初步研究 [J]. 海洋科学, 2011,(6):44-47.
- [29] 瞿波, 保尔·爱迪生. 用分数型布朗运动模拟海湾的剪切湍流分散 [J]. 水利水电科技进展, 2010,(3):12-16.
- [30] 瞿波. 分形几何与流体 [M]. 上海: 上海社会科学院出版社, 2013.
- [31] Allen J I, Somerfield P J, Gilbert F J. Quantifying uncertainty in high-resolution coupled hydrodynamic-ecosystem models [J]. Journal of Marine Systems, 2007,64(1-4):3-14.

致谢: 本研究相关监测资料由河北省环境监测中心提供, 赤潮范围根据国家海洋环境监测中心提供的卫星图片提取, 在此表示衷心感谢!

作者简介: 匡翠萍(1966-), 女, 江苏扬州人, 教授, 博士, 主要从事河口海岸工程和水环境研究, 发表论文 170 余篇。