

# 江苏重点海域绿潮漂移扩散数值模拟

吉会峰<sup>1,2</sup>, 刘吉堂<sup>1,2</sup>, 莫旭冬<sup>1,2</sup>, 高鑫鑫<sup>1,2</sup>, 杨波<sup>1,2</sup>

(1. 国家海洋局 南通海洋环境监测中心站, 江苏 南通 226002; 2. 海洋赤潮灾害立体监测技术与应用国家海洋局重点实验室, 上海 200137)

**摘要:** 江苏海域是绿潮灾害的多发海域, 本文利用 MIKE3 模型建立了江苏辐射沙洲重点海域三维水动力模型, 并采用实测资料对模型进行验证和率定; 在水动力模型的基础上建立绿潮漂移扩散模型, 对江苏海域绿潮漂移路径进行了模拟并与卫星遥感监测的结果进行对比。对比结果表明, 模型 24 h 和 48 h 模拟结果与卫星遥感图像分析结果较吻合, 模型能为江苏海域绿潮的预警预报提供一定参考。

**关键词:** 江苏; 绿潮; MIKE3; 漂移扩散  
**中图分类号:** P731.23      **文献标识码:** A  
**DOI:** 10.11759/hyxx20171118001

**文章编号:** 1000-3096(2018)05-0082-10

绿潮是海洋大型藻类爆发性生长聚集形成的藻华现象。近年来, 绿潮在全球沿岸海域爆发并造成严重危害的现象变得越来越频繁, 发生地理范围也日趋增大, 已经成为一种世界性的海洋灾害<sup>[1]</sup>, 其监测与防灾减灾一直是世界范围内的难题。从 2007 年黄海海域首次观测到漂浮浒苔开始, 浒苔绿潮每年都会周期性的在黄海海域出现, 影响着江苏、山东沿海地区。国家海洋局发布的《中国海洋灾害公报》显示, 2008 年 5—8 月, 黄海海域暴发的浒苔绿潮灾害造成直接经济损失达 13.22 亿元。

江苏海域是绿潮灾害的多发海域, 2007 年至今, 江苏近岸海域连续多年发生绿潮灾害, 并具有分布面积广、覆盖范围大、持续时间长的特点。绿潮发生对江苏近岸海域生态系统产生直接影响, 破坏海洋环境并间接对渔业生产造成影响<sup>[2]</sup>。有研究表明, 黄海绿潮爆发的源头就在江苏近岸海域, 紫菜养殖筏架是绿潮爆发的重要源头, 紫菜养殖筏架回收过程中, 数千吨绿潮藻被刮落入海是绿潮爆发的关键因素<sup>[3]</sup>。

如今, 在绿潮灾害成为一种周期性现象的同时, 更为重要的是: 如何预防这一灾害的发生, 在灾害发生后如何快速地作出反应。卫星遥感在监测绿潮方面具有重要的作用, 是获取绿潮信息的有效手段<sup>[4-9]</sup>, 但遥感观测也有局限性, 当被监测海面上空云量较多时, 可能会出现连续几天不能获得绿潮信息的问题, 而且遥感不能对绿潮的路径做出定量的预测。数值模拟可以对海洋现象进行连续模拟, 在有良好资料的基础上, 利用数值模拟来预测绿潮路径可以补充遥感手段的不足<sup>[10-11]</sup>。

本文通过收集江苏海域水深地形资料、潮汐潮流资料、风场资料及卫星遥感绿潮监测资料等, 建立了江苏重点海域绿潮漂移扩散模型, 可以为该海域绿潮灾害的预警预报提供有益参考。

## 1 模式简介

MIKE3<sup>[12]</sup>是丹麦水利研究所(Danish Hydraulic Institute, DHI)开发的专业三维自由水面流动模拟系统, 适用于湖泊、河口、海湾和海岸地区的水动力及其相关现象的三维仿真模拟, 可进行水利港口工程设计及规划、复杂条件下的水流计算、泥沙沉积与传输、水质模拟预报和环境治理规划等多方面研究应用<sup>[13-16]</sup>。

本文利用 MIKE3 FLOW MODEL FM 模型, 建立三维潮流数学模型, 主要对区域的流场进行模拟。模型基本方程如下:

(1) 连续方程:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = S \quad (1)$$

其中,  $u$ 、 $v$ 、 $w$ : 水流速度在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的分量;  $x$ 、

收稿日期: 2017-11-18; 修回日期: 2018-04-23

基金项目: 海洋赤潮灾害立体监测技术与应用国家海洋局重点实验室开放研究基金(MATHAB2014004); 国家海洋局东海分局青年科技基金(201624, 201622)

[Foundation: Open Research Foundation of Key Laboratory of Integrated Marine Monitoring and Applied Technologies for Harmful Algal Blooms, S.O.A, No.MATHAB2014004; The Youth Science and Technology Foundation of East China Sea Branch, S.O.A, No.201624, No.201622]

作者简介: 吉会峰(1987-), 男, 山东济南人, 工程师, 硕士, 主要从事物理海洋、水文动力研究, 电话: 0513-51009617, E-mail: jihf@eastsea.gov.cn

$y, z$ : 笛卡尔右手坐标系下的坐标;  $S$ : 源汇项。

(2) 动量方程:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial wu}{\partial z} = fv - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial x} dz - \frac{1}{\rho_0 h} \left( \frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial x_{xy}}{\partial y} \right) + F_u + \frac{\partial}{\partial z} \left( v_t \frac{\partial u}{\partial z} \right) + u_s S \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v^2}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial wv}{\partial z} = -fv - g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial y} dz - \frac{1}{\rho_0 h} \left( \frac{\partial s_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial x_{yy}}{\partial y} \right) + F_v + \frac{\partial}{\partial z} \left( v_t \frac{\partial v}{\partial z} \right) + v_s S \quad (3)$$

其中,  $t$ : 时间;  $\eta$ : 表面水位;  $d$ : 静水深;  $h$ : 总水深, 满足关系式  $h = \eta + d$ ;  $f$ : 科氏力参数, 满足关系式  $f = 2\Omega \sin\Phi$ ,  $\Omega$  为地球自转角速度,  $\Phi$  是纬度;  $g$ : 重力加速度;  $\rho, \rho_0$ : 水体密度和海水密度;  $S_{xx}, S_{xy}, S_{yx}, S_{yy}$ : 辐射应力分量;  $v_t$ : 垂向紊流涡粘系数;  $P_a$ : 大气压力;  $u_s, v_s$ : 源汇项水流速度;  $F_u, F_v$ : 斜压状态下的水平压力项。

## 2 水动力模型配置及验证

### 2.1 模型范围和网格

数值模型网格南起浙江象山, 北至山东威海, 基本覆盖了研究所关注的区域。模型水平方向采用

三角形网格, 并在苏北浅滩地形变化梯度比较大的区域适度加密网格(图 1)。整个计算区域共有 89 155 个三角形单元, 45 193 个节点, 网格最小空间步长约为 200 m。模型垂向采用  $\sigma$  坐标, 共均匀分为 6 个  $\sigma$  层。

计算域内地形方面, 苏北浅滩以及近海的水深采用中国人民解放军海军司令部航海保证部出版的 2013 年版海图上的水深数据, 外海的水深数据采用美国国家地球物理中心(National Geophysical Data Center, NGDC)提供的 ETOP01 全球地貌数据, 空间分辨率为  $1' \times 1'$ 。水深基准面统一为平均海平面, 计算区域水深如图 1 所示。

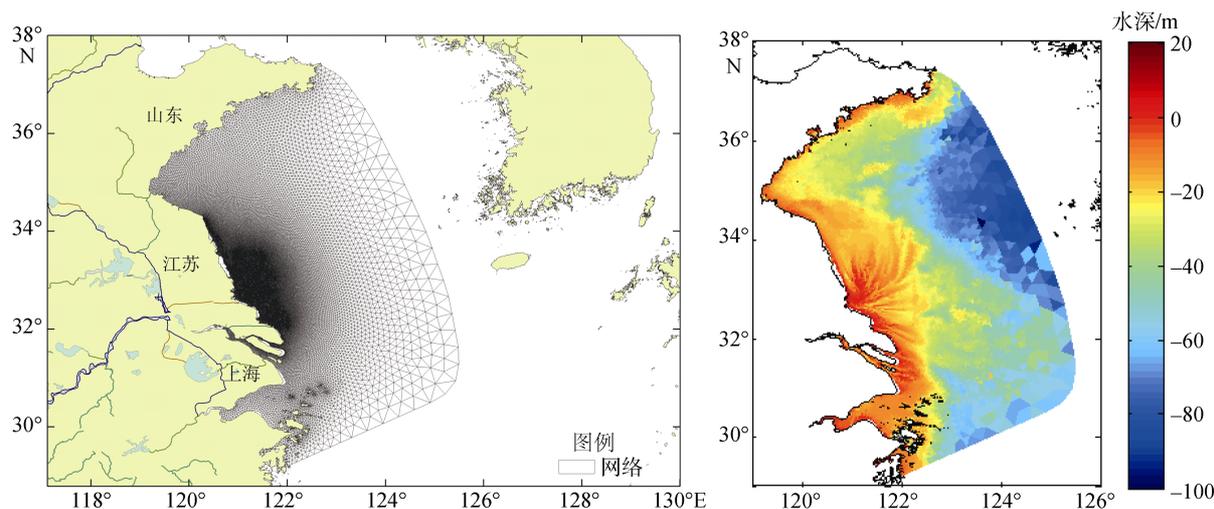


图 1 模型计算区域网格(左)和模型区域水深(右)  
Fig. 1 Model grid (left) and model area water depth (right)

### 2.2 定解条件

#### 2.2.1 初始条件

由于潮波运动是一种摩擦运动, 故采用冷启动, 即潮位为零, 流速为零, 由此产生的误差在计算过程中会自行消除, 在需要模拟的过程提前 5 d 开始计算, 以使模型稳定。模型为正压模型, 不考虑温度和盐度影响。

#### 2.2.2 边界条件

闭边界采用不可入条件, 法向流速为零, 即  $\vec{V} \cdot \vec{n} = 0$ 。

外海开边界共设置 40 个边界点, 给定潮位, 由

$M_2, S_2, N_2, K_2, K_1, O_1, P_1, Q_1$  八个主要分潮的调和常数通过计算合成。分潮调和常数采用日本国家天文台 NAO99b 潮波预报模型结果内插, 并经调整后用于本模型。

$$\xi = A_0 + \sum_{i=1}^8 H_i F_i \cos[\sigma_{it} - (v_0 + u)_i + g_i] \quad (4)$$

式中,  $A_0$  为平均海平面,  $F_i, (v_0 + u)_i$  为天文要素,  $H_i, g_i$  为某分潮的调和常数, 即振幅与迟角。

模型考虑了风场对海表流速的影响, 海表面风场采用美国环境预报中心和国家大气研究中心联合推出的 NCEP/NCAR Reanalysis 1 再分析数据。

## 2.3 模型参数

### 2.3.1 时间步长

模型主时间步长取 30 s, 根据 CFL 数来调整实际计算步长以保证模型稳定, 最小时间步长取 0.01 s, CFL 条件数取为 0.8。

### 2.3.2 干湿水深

模型采用干湿判别法处理动边界, 即当网格水深小于 0.1 m 时, 设动量为零, 只考虑物质通量; 当网格水深小于 0.005 m 时, 该网格不参与计算。

### 2.3.3 涡粘系数

水平涡粘系数采用 Smagorinsky 公式, Smagorinsky

系数  $C_s$  为 0.28; 垂向涡粘系数采用  $k-\varepsilon$  方程求解。

### 2.3.4 径流

模型考虑长江径流影响, 长江径流量取大通水文站流量数据。

## 2.4 模型验证

利用收集的近年来吕四、如东、大丰、滨海、连云港海域 10 个站位的实测海流资料以及吕四、洋口、连云港 3 个站点实测潮位资料对模型结果进行验证, 模型验证点位基本覆盖了所关心的区域, 验证资料站点分布见图 2。

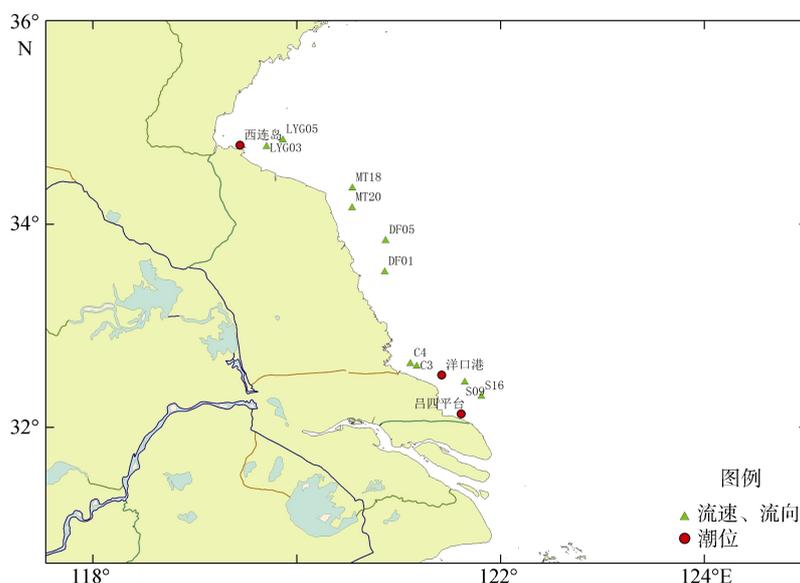


图 2 模型验证站点分布图

Fig. 2 The site location of model validation

### 2.4.1 潮位验证

潮位验证结果如图 3~图 5, 由图可见, 江苏沿海三个站点的潮位计算值与实测潮位较吻合, 其中计算值和实测值的误差小于 10%, 计算潮位与实测潮位

相位基本一致。

对模拟潮位进行调和分析, 得到  $M_2$ 、 $S_2$  两个主要分潮的同潮图(图 6), 其中虚线为等振幅线, 实线为等迟角线。与海洋图集上的分潮同潮图相比, 两个

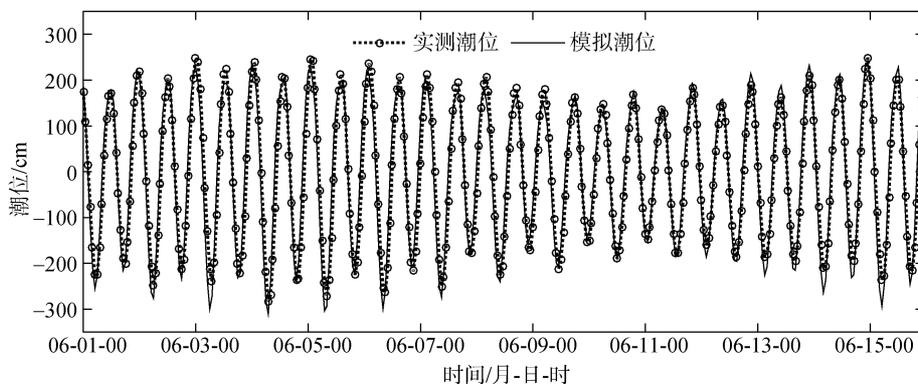


图 3 吕四潮位验证曲线

Fig. 3 The contrast curve of tide in Lvsi

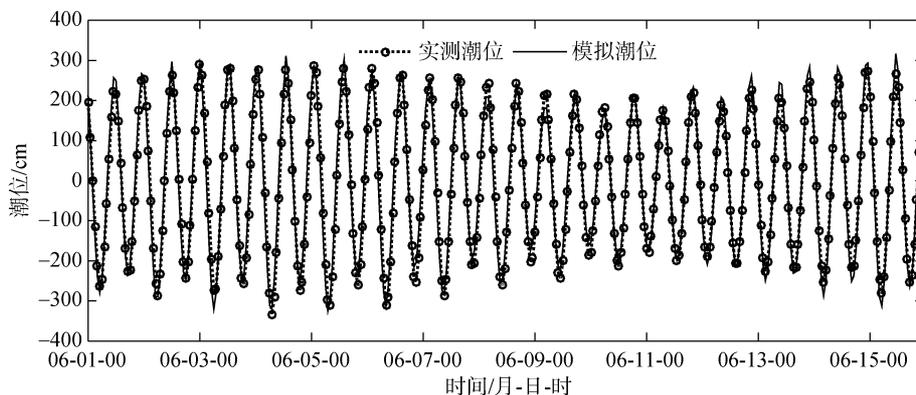


图 4 洋口潮位验证曲线  
Fig. 4 The contrast curve of tide in Yangkou

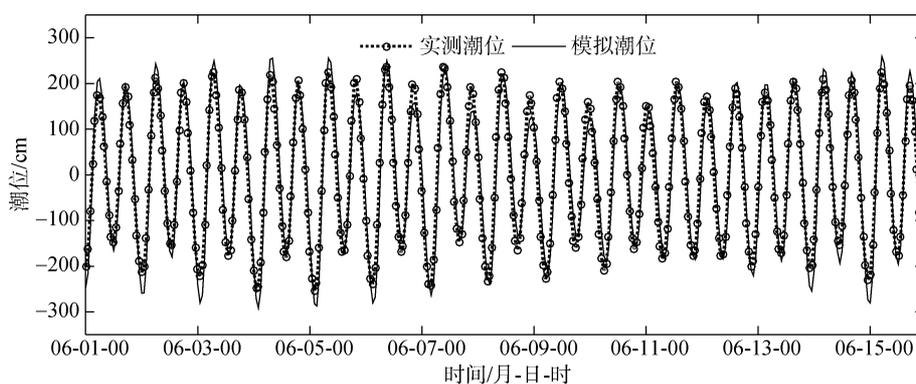


图 5 连云港潮位验证曲线  
Fig. 5 The contrast curve of tide in Lianyungang

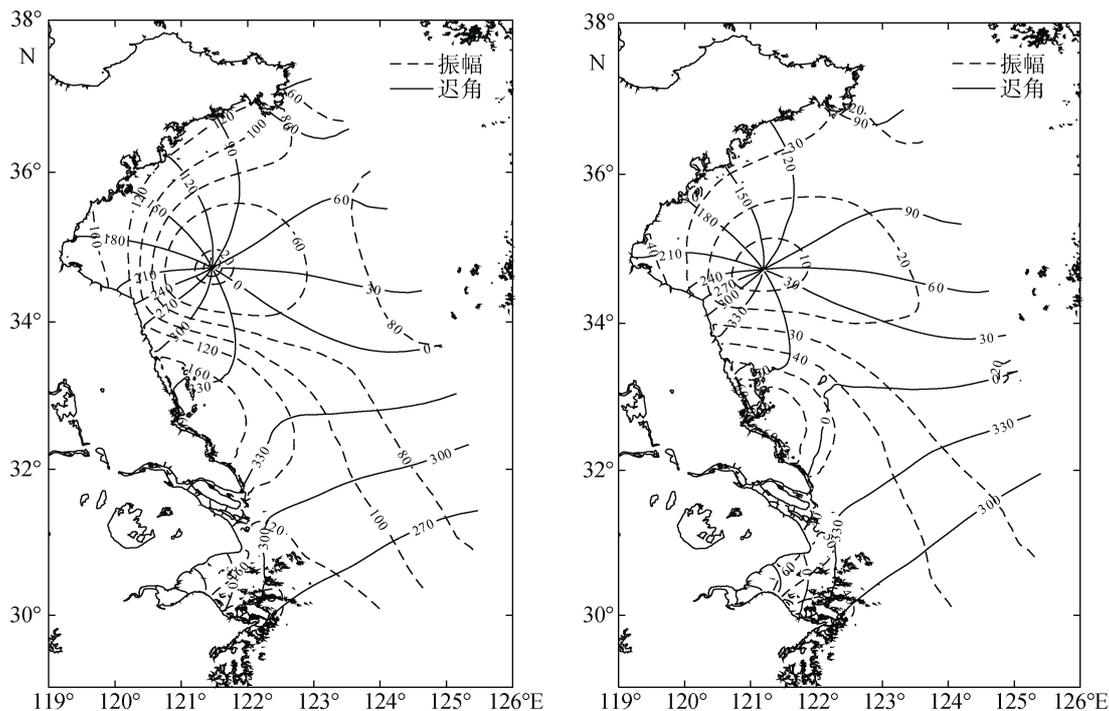


图 6 模拟  $M_2$ (左)和  $S_2$ (右)分潮同潮图  
Fig. 6 The cotidal charts for the  $M_2$  (left) and  $S_2$  (right) constituents

分潮的振幅和迟角拟合效果都较好,分潮无潮点位置基本一致。

### 2.4.2 海流验证

吕四、如东、大丰、滨海和连云港 10 个站位的

表层海流验证结果如图 7~图 11, 由图可见, 模型计算流速与实测流速值吻合较好, 涨落急流速和流速变化过程较为一致, 流向的模拟结果与实测值也具有良好的一致性。

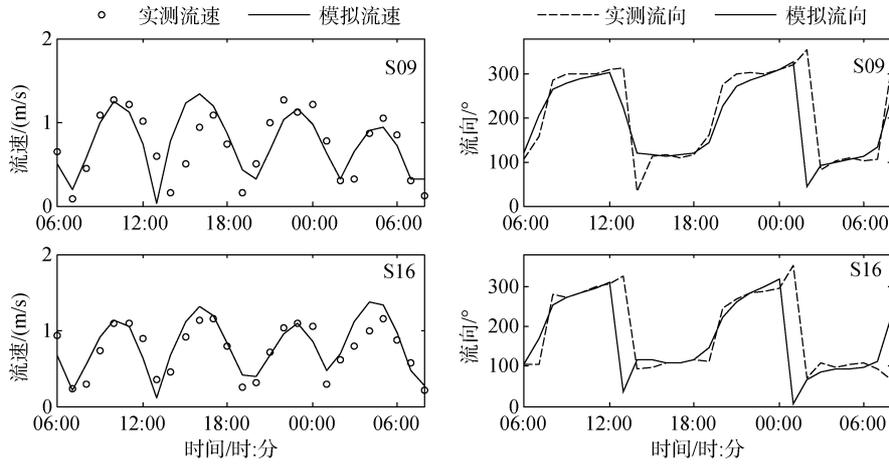


图 7 吕四 S09 和 S16 站表层流速流向验证结果

Fig. 7 The contrast curve of surface current speed and direction in S09 and S16

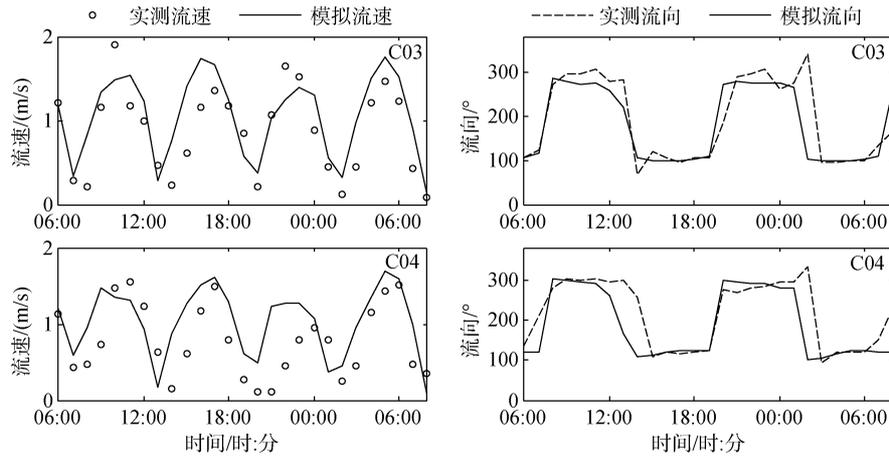


图 8 如东 C03 和 C04 站表层流速流向验证结果

Fig. 8 The contrast curve of surface current speed and direction in C03 and C04

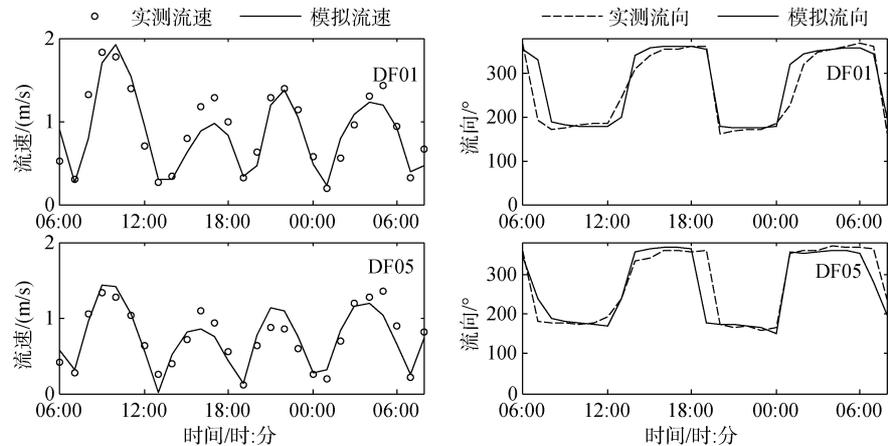


图 9 大丰 DF01 和 DF05 站表层流速流向验证结果

Fig. 9 The contrast curve of surface current speed and direction in DF01 and DF05

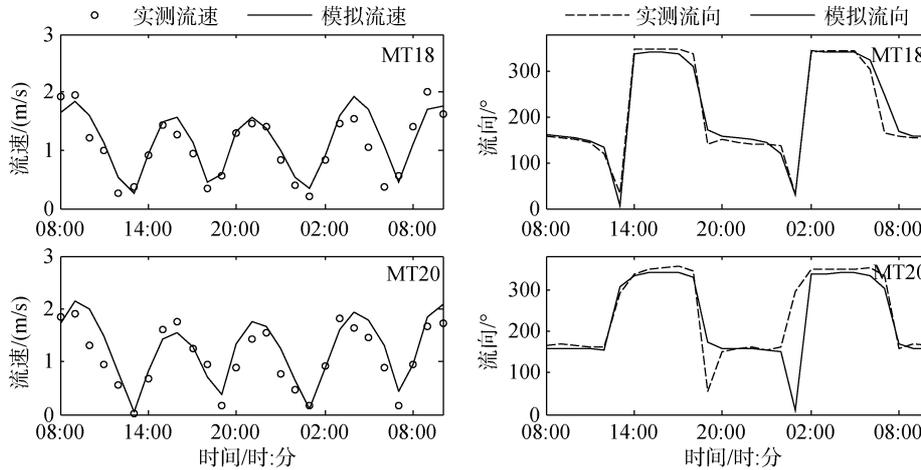


图 10 滨海 MT18 和 MT20 站表层流速流向验证结果

Fig. 10 The contrast curve of surface current speed and direction in MT18 and MT20

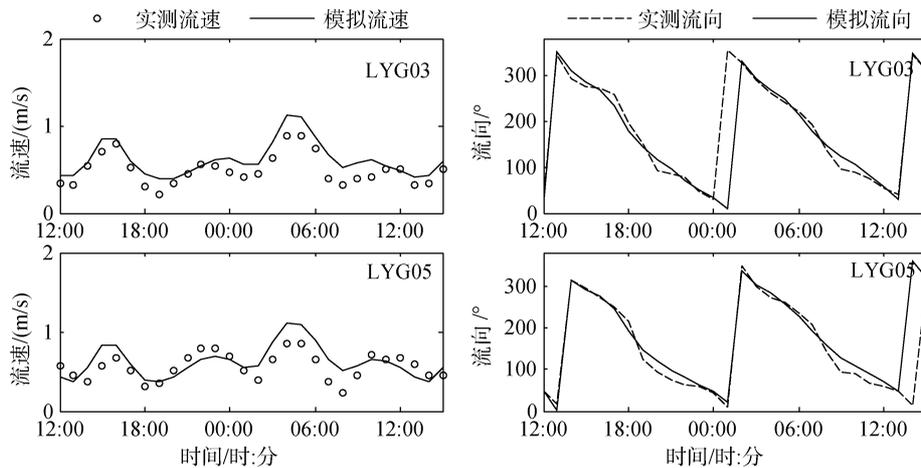


图 11 连云港 LYG03 和 LYG05 站表层流速流向验证结果

Fig. 11 The contrast curve of surface current speed and direction in LYG03 and LYG05

通过以上模型的率定与验证表明：水动力模型采用的物理参数和计算参数基本合理，计算方法可靠，能够较好地模拟研究潮波运动和水动力场特征。水动力模型可以为绿潮漂移扩散计算提供基本的水动力场输入条件。

### 3 绿潮漂移模型建立

在不考虑绿潮藻自身生态过程的情况下，绿潮藻在海水中的移动可以看作是质点在表层海流和海面风共同作用下的漂移、输运过程，可以采用拉格朗日粒子追踪方法对绿潮藻的漂移路径进行预测。

#### 3.1 计算方法

绿潮漂移计算采用欧拉-拉格朗日非耦合法，即利用水动力场的计算结果，结合公式(5)和公式(6)计

算绿藻质点漂移情况。

$$X=X_0+(U+\alpha W_{10}\cos A)\Delta t+R\cos B \quad (5)$$

$$Y=Y_0+(V+\alpha W_{10}\sin A)\Delta t+R\sin B \quad (6)$$

其中， $X_0$ 、 $Y_0$ 、 $X$ 、 $Y$  分别代表某绿潮质点的前后时刻的坐标； $U$ 、 $V$  分别为  $X$ 、 $Y$  方向的流速分量； $W_{10}$  为海面上的风速； $A$  为风向； $\alpha$  为风拖曳系数， $\alpha$  的取值范围一般在  $0.01\sim 0.05$ <sup>[17-18]</sup>，本文结合对海上漂流浮标漂移轨迹模拟的多次数值试验，确定  $\alpha$  取值为  $0.04$ ； $R$  为随机扩散项， $R=rE$ ， $r$  为  $0\sim 1$  之间的随机数， $E$  为扩散距离， $E=\sqrt{12D\Delta t}$ ， $D$  为水平方向扩散系数，其量值等于水平涡粘系数，由水动力模型计算获取； $B$  为随机扩散方向， $B=2\pi r$ ； $\Delta t$  为时间步长，与水动力模型同步计算。

其方法步骤：1、确定初始坐标位置；2、根据流场计算结果，用插值公式求该点的流速值，代入上

式求下一时刻的坐标位置。以此方式循环递推计算绿潮质点漂移轨迹。

### 3.2 绿潮漂移扩散模拟

根据国家海洋局东海监测中心发布的《东海监测中心卫星遥感监视监测简报》中绿潮遥感监测信息,对比验证漂移模型后报结果。由于绿潮(浒苔)的繁殖扩展速度非常之快,有时相差一天的卫星图片表现出来的绿潮分布形状大为不同,很难辨别出前一天的绿潮在今天的位置。本文经过认真筛选后,选取2014年5月21日—23日一次较为完整的绿潮过程,可以明显地辨别出同一片绿潮藻的漂移扩散状况,作为绿藻漂移实测位置,与模拟结果作对比检验。

根据卫星遥感监测结果,提取绿潮漂移信息,本次绿潮过程为:

(1) 5月21日13时MODIS影像发现,在盐城至连云港市海域分布有浒苔绿潮,分布范围:  $120^{\circ}32' \sim 121^{\circ}11'E$ 、 $34^{\circ}12' \sim 35^{\circ}09'N$ ,覆盖面积  $69.4 \text{ km}^2$ ,分布面积  $1\,547 \text{ km}^2$ 。

(2) 5月22日13时MODIS影像发现,在盐城至

日照市海域分布有浒苔绿潮,分布范围:  $120^{\circ}27' \sim 121^{\circ}27'E$ 、 $34^{\circ}12' \sim 35^{\circ}29'N$ ,覆盖面积  $137.4 \text{ km}^2$ ,分布面积  $3\,928 \text{ km}^2$ 。

(3) 5月23日12时45分MODIS影像发现,在盐城至日照市海域分布有浒苔绿潮,分布范围:  $120^{\circ}12' \sim 121^{\circ}35'E$ 、 $34^{\circ}16' \sim 35^{\circ}36'N$ ,覆盖面积  $181.6 \text{ km}^2$ ,分布面积  $5\,427 \text{ km}^2$ 。

通过遥感监测结果可以看出,本次过程,浒苔绿潮向东北方向漂移扩散,从盐城-连云港海域逐渐漂向日照海域;绿潮面积呈扩大趋势,5月21日分布面积为  $1\,547 \text{ km}^2$ ,5月22日分布面积为  $3\,928 \text{ km}^2$ ,5月23日分布面积为  $5\,427 \text{ km}^2$ 。

利用绿潮漂移扩散模型对绿潮漂移扩散情况进行模拟:绿潮藻的运移主要受表层海流和海表面风的共同影响,因此,设置绿潮质点于海表面。将绿潮质点释放的初始时刻设置为5月21日13时,初始位置设置为卫星遥感所监测到的绿潮分布位置(图12),在绿潮初始位置范围内一次性均匀释放1600个粒子。输入水动力模型模拟海流和风场条件,启动模型进行积分计算;预测24h和48h后绿潮的分布位置。

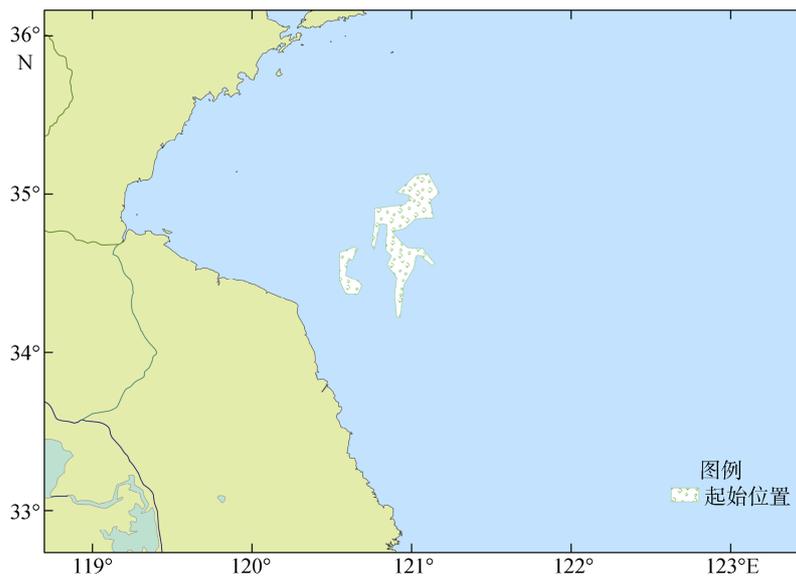


图12 绿潮模拟起始位置

Fig. 12 The starting position of green tide simulation

24h预测结果如图13所示,绿潮向东北方向漂移扩散,分布范围:  $120^{\circ}30' \sim 121^{\circ}19'E$ 、 $34^{\circ}21' \sim 35^{\circ}29'N$ ,分布面积约为  $3\,675 \text{ km}^2$ 。48h预测结果如图14所示,绿潮继续向东北方向漂移扩散,分布范围:  $120^{\circ}30' \sim 121^{\circ}30'E$ 、 $34^{\circ}24' \sim 35^{\circ}36'N$ ,分布面积  $4\,713 \text{ km}^2$ 。

将绿潮24h和48h后的模拟结果与卫星遥感结

果进行比较(表1),结果表明绿潮数值模拟结果与遥感监测结果较为一致:24h绿潮模拟分布面积为  $3\,675 \text{ km}^2$ ,模拟分布区域与遥感监测结果位置重合率为63%;48h绿潮模拟分布面积为  $4\,713 \text{ km}^2$ ,模拟分布区域与遥感结果位置重合率为61%。这表明模型能够较准确预测绿潮斑块的漂移轨迹。

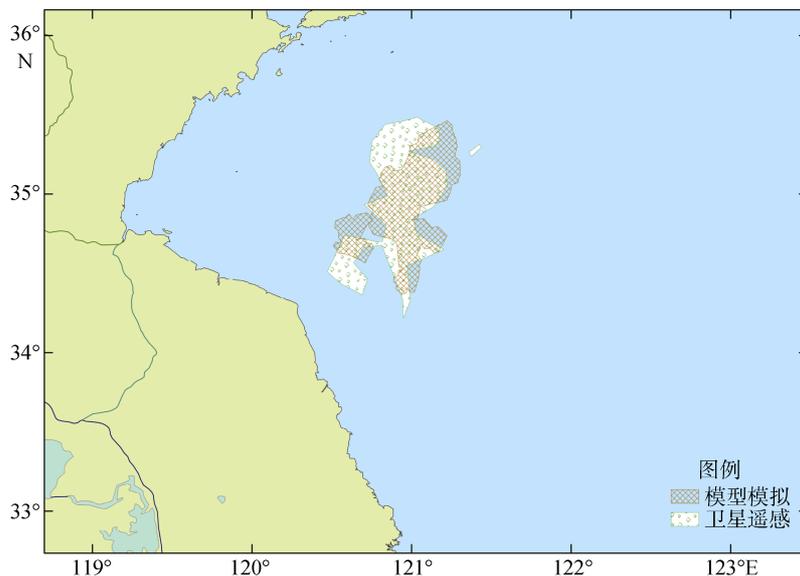


图 13 绿潮模拟 24 h 位置

Fig. 13 Simulation position of green tide for 24 h

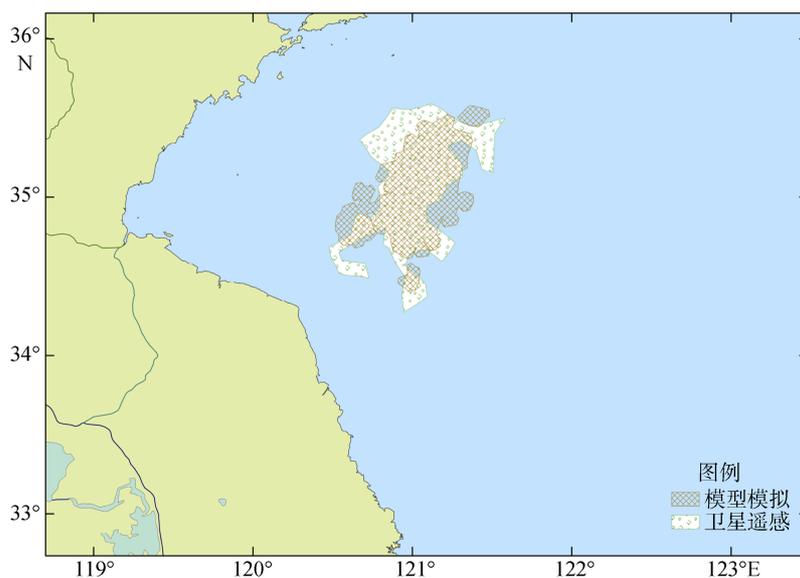


图 14 绿潮模拟 48 h 位置

Fig. 14 Simulation position of green tide for 48 h

表 1 数值模拟结果与卫星遥感监测结果对比

Tab. 1 Comparison between simulation results and satellite remote sensing monitoring results

日期/月.日	模拟时间/h	卫星遥感监测绿潮面积/km <sup>2</sup>	模型模拟绿潮面积/km <sup>2</sup>	位置重合部分面积/km <sup>2</sup>	重合率/%
5.21	0	1547	1547	1547	100
5.22	24	3928	3675	2473	63
5.23	48	5427	4713	3285	61

表 2 同时给出了风拖曳系数  $\alpha$  取不同值时的模拟结果, 可以看出,  $\alpha$  的取值对绿潮模拟分布面积和位置均有较大影响; 当  $\alpha$  取值过小时, 绿潮粒子扩散

不充分, 导致模拟绿潮分布面积偏小, 且分布范围也与卫星遥感结果存在较大偏差;  $\alpha$  取值过大, 会使模拟绿潮分布位置在风的作用下出现较大偏移, 降

低模拟的精度。

## 4 结论

本文通过收集江苏海域水深地形资料、潮汐潮流资料、风场资料及卫星遥感绿潮监视资料等，建立了江苏重点海域水动力数值模型并进行了模型验证。验证结果表明，水动力模型能够较好地模拟本海域

潮波运动和水动力场特征，可以为绿潮漂移扩散计算提供基本的水动力场输入条件。在水动力模型的基础上建立了绿潮漂移扩散模型，利用该模型对绿潮漂移扩散过程进行了模拟；通过与卫星遥感监测结果相对比，漂移扩散模型对绿潮 24 h 和 48 h 的漂移路径和扩散范围的模拟精度较高，能为江苏海域绿潮的预警预报提供一定参考。

表 2 不同  $\alpha$  值模型模拟结果对比

Tab. 2 Comparison of simulation results by different  $\alpha$  value

$\alpha$ 值	24 h 模拟结果			48 h 模拟结果		
	模拟绿潮面积/km <sup>2</sup>	与实测重合面积/km <sup>2</sup>	重合率/%	模拟绿潮面积/km <sup>2</sup>	与实测重合面积/km <sup>2</sup>	重合率/%
0.02	3248	2084	53	4176	2724	50
0.03	3412	2254	57	4427	2944	54
0.04	3675	2473	63	4713	3285	61
0.05	3713	2327	59	4775	2996	55

### 参考文献:

- [1] 黄娟, 吴玲娟, 高松, 等. 黄海绿潮分布年际变化分析[J]. 激光生物学报, 2014, 6: 572-578.  
Huang Juan, Wu Lingjuan, Gao Song, et al. Analysis on the interannual distribution variation of Green Tide in Yellow Sea[J]. Acta Laser Biology Sinica, 2014, 6: 572-578.
- [2] 吉启轩, 赵新伟, 章志. 江苏海域浒苔时空分布特征及对海洋环境的影响[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2015, 1: 61-64.  
Ji Qixuan, Zhao Xinwei, Zhang Zhi. Spatial and temporal distribution characteristic of the Enteromorpha prolifera in the Jiangsu coastal area and their influence on the ecological environment[J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2015, 1: 61-64.
- [3] 刘材材, 徐韧, 何培民, 等. 南黄海绿潮暴发与紫菜养殖的关系[J]. 海洋科学, 2017, 41(2): 35-43.  
Liu Caicai, Xu Ren, He Peimin, et al. Research on the relations between green tide and Porphyra cultivation in the south Yellow Sea[J]. Marine Sciences, 2017, 41(2): 35-43.
- [4] 蒋兴伟, 刘建强, 邹斌, 等. 浒苔灾害卫星遥感应急监视监测系统及其应用[J]. 海洋学报(中文版), 2009, 1: 52-64.  
Jiang Xingwei, Liu Jiangqiang, Zou Bin, et al. The satellite remote sensing system used in emergency response monitoring for enteromorpha prolifera disaster and its application[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2009, 1: 52-64.
- [5] 李三妹, 李亚君, 董海鹰, 等. 浅析卫星遥感在黄海浒苔监测中的应用[J]. 应用气象学报, 2010, 21(1): 76-82.  
Li Sanmei, Li Yajun, Dong Haiying, et al. Satellite remote sensing application to Enteromorpha prolifera monitoring in the Yellow Sea[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2010, 21(1): 76-82.
- [6] 王国伟, 李继龙, 杨文波, 等. 利用 MODIS 和 RADARSAT 数据对浒苔的监测研究[J]. 海洋湖沼通报, 2010, 4: 1-8.  
Wang Guowei, Li Jilong, Yang Wenbo, et al. A primary study of Enteromorpha prolifera using the modis and radarsat[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2010, 4: 1-8.
- [7] 叶娜, 贾建军, 田静, 等. 浒苔遥感监测方法的研究进展[J]. 国土资源遥感, 2013, 1: 7-12.  
Ye Na, Jia Jianjun, Tian Jing, et al. Advances in the study of Ulvapolifera monitoring with remote sensing[J]. Remote Sensing For Land & Resources, 2013, 1: 7-12.
- [8] 徐福祥, 高志强, 郑翔宇, 等. 基于 MODIS 数据的 2016 年黄海绿潮灾害动态监测研究[J]. 海洋科学, 2017, 41(5): 80-84.  
Xu Fuxiang, Gao Zhiqiang, Zheng Xiangyu, et al. Spatial and temporal distribution characteristic of green tides in the Yellow Sea in 2016 based on MODIS data[J]. Marine Sciences, 2017, 41(5): 80-84.
- [9] 丁一, 曹丛华, 黄娟, 等. 黄海绿潮多源卫星遥感业务化监测需求分析与系统设计[J]. 海洋科学, 2015, 39(2): 85-90.  
Ding Yi, Cao Conghua, Huang Juan, et al. The green tide multi-source satellite remote sensing operational monitoring requirement analysis and system design in

- the Yellow Sea[J]. Marine Sciences, 2015, 39(2): 85-90.
- [10] 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.  
Zheng Xiangyang, Xing Qianguo, Li Li, et al. Numerical simulation of the 2008 green tide in the Yellow Sea[J]. Marine Sciences, 2011, 7: 82-87.
- [11] 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, 35(6): 44-47.  
Wu Lingjuan, Cao Conghua, Huang Juan, et al. Numerical tracing simulation on Green Tides in the Yellow Sea for contingency forecast[J]. Marine Sciences, 2011, 35(6): 44-47.
- [12] DHI. MIKE21 & MIKE3 Flow model FM hydrodynamic and transport module scientific documentation[M]. Denmark: DHI Water & Environment, 2009.
- [13] 姜卫星. 黄浦江溢油事故的数值模拟研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.  
Jiang Weixing. Numerical simulation of oil spill accident in Huangpu River[D]. Shanghai: Tongji University, 2007.
- [14] 马腾, 刘文洪, 宋策, 等. 基于 MIKE3 的水库水温结构模拟研究[J]. 电网与清洁能源, 2009, 2: 68-71.  
Ma Teng, Liu Wenhong, Song Ce, et al. Application of MIKE3 in prediction analysis of the water temperature of reservoir[J]. Power System and Clean Energy, 2009, 2: 68-71.
- [15] 黄少彬, 李开明, 姜国强, 等. 基于 MIKE3 模型的珠江口水体交换研究[J]. 环境科学与管理, 2013, 8: 134-140.  
Huang Shaobin, Li Kaiming, Jiang Guoqiang, et al. Research on water exchange in pearl river estuary based on MIKE3 model[J]. Environmental Science and Management, 2013, 8: 134-140.
- [16] 王翠, 郭洲华, 李青生, 等. 基于 MIKE SA 模型的厦门西港海域溢油影响的数值模拟研究[J]. 应用海洋学学报, 2014, 2: 229-235.  
Wang Cui, Guo Zhouhua, Li Qingsheng, et al. Numerical simulation of oil spill in west Xiamen Harbor based on the MIKE spill analysis model[J]. Journal of Applied Oceanography, 2014, 2: 229-235.
- [17] 李曰嵩, 潘灵芝, 肖文军, 等. 风对黄海绿潮藻漂移的影响[J]. 海洋环境科学, 2014, 33(5): 772-776.  
Li Yuesong, Pan Lingzhi, Xiao Wenjun, et al. Effect of wind on the drifting of green macroalgae in the Yellow Sea[J]. Marine Environment Science, 2014, 33(5): 772-776.
- [18] 夏深圳. 基于遥感的黄海浒苔漂移速度与驱动机制研究[D]. 南京: 南京大学, 2016.  
Xia Shenzhen. Distribution and driving mechanism of the drift velocity of *Ulva prolifera* in the Yellow Sea based on remote sensing[D]. Nanjing: Nanjing University, 2016.

## Numerical simulation of the green tide drift and diffusion in the sea areas of Jiangsu Province

JI Hui-feng<sup>1, 2</sup>, LIU Ji-tang<sup>1, 2</sup>, MO Xu-dong<sup>1, 2</sup>, GAO Xin-xin<sup>1, 2</sup>, YANG Bo<sup>1, 2</sup>

(1. Nantong Marine Environmental Monitoring Center, SOA, Nantong 226002, China; 2. Key Laboratory of Integrated Monitoring and Applied Technology for Marine Harmful Algal Blooms, SOA, Shanghai 200137, China)

Received: Apr. 23, 2018

Key words: Jiangsu Province; green tide; MIKE3; drift and diffusion

**Abstract:** Green tide occurs frequently in the sea areas of Jiangsu Province. In this paper, a 3-D hydrodynamic model of the sea area around the radial sand ridge was established by the MIKE3 model, and used the observed data to carry on the model validation and parameter calibration. Based on the hydrodynamic model, the green tide drift and diffusion model is established. The green tide drift path is simulated by using the model. Compared with the satellite remote sensing monitoring, the simulation results of 24 hours and 48 hours are very consistent. The model can provide some reference for the early warning and forecasting of the green tide in Jiangsu sea area.

(本文编辑: 李晓燕)