黄海浒苔漂移输运和生长消亡过程的数值模拟与预测应用*

何恩业[1] 季轩梁[1] 高 姗[1①] 赵 亮[2] 王玉衡[2] 李 云[1] 杨 静[1]

(1. 国家海洋环境预报中心 自然资源部海洋灾害预报技术重点实验室 北京 100081; 2. 天津科技大学 海洋与环境学院 天津 300457)

摘要 本文在构建黄海浒苔漂移输运模型的基础上耦合了生长消亡过程的生态模块，利用 CFSR (Climate Forecast System Reanalysis)再分析数据、国家海洋环境预报中心全球业务化海洋学预报系统(Chinese Global operational Oceanography Forecasting System, CGOFS)黄东海再分析数据和 CFS (Climate Forecast System products)预报数据，结合国家卫星海洋应用中心黄海绿潮遥感资料，选取浒苔灾害在时空动态演变过程方面存在明显差异的 2016 年和 2019 年，开展了黄海浒苔漂移输运和生长消亡过程的数值模拟，进行敏感实验和年度预测检验。结果表明，该模型可以有效刻画 2016 年黄海浒苔发展趋势的显著特征，对浒苔的漂移路径、影响范围和相对生物量变化特征的数值模拟结果与监测实况较为吻合。在 2019 年的年度预测应用上，针对浒苔漂移输运路径的方向、影响海域的时间、生物量较往年的变化等方面，模拟效果也都比较理想，体现出该模型在实际业务化预报应用中的可靠性和有效性。

关键词 浒苔；生态动力学；浒苔预报；数值模拟；黄海

中图分类号 X55 doi: 10.11693/hyhz20200300090

自 2007 年起，每年 4—8 月，我国黄海中、南部海域都会暴发以浒苔为优势种的大规模绿潮灾害，因其灾害暴发周期长、影响区域广和致灾程度深受到广泛关注。2008 年大量浒苔聚集青岛海域，对奥帆赛造成严重威胁；2009 年山东因浒苔灾害导致直接经济损失 6.41 亿元；2015 年黄海浒苔最大覆盖面积达 594 km^2，单青岛市累计清理的浒苔就达 53.54×10^4 t；2018 年山东省、江苏省组织大量人力物力开展源头防控、海上拦截和打捞处置等工作，最终打捞浒苔共计 18.7 万余 t (中华人民共和国自然资源部, 2008—2019; 吉启轩等, 2015; 陈磊等, 2018)。浒苔灾害除造成巨大的经济损失外，对生态平衡的破坏以及导致的环境污染问题也是不能忽视的问题之一。浒苔发展盛期，在生态位的竞争中获得巨大优势，改变了浮游生物群落结构，削减了原始海域环境物种的多样性；消亡期的浒苔大量沉降、腐烂会消耗大量的溶解氧并产生毒素侵入底栖生态环境形成潜在的生态风险(吉启轩等, 2015; 颜天等, 2018)。

近年来，国内学者针对黄海浒苔开展了多方面的研究，如张浩(2013)论证了利用黄海南部 2—3 月水温变化来预测浒苔暴发规模的可行性；董明帆等(2018)分析了浒苔暴发初期苏北浅滩营养盐的变化规律和分布特征；吉会峰等(2018)基于 MIKE3 模型对江苏海域浒苔漂移扩散进行模拟；赵昌等(2018)基于中国近海高分辨率三维 MASNUM(marine science and numerical modeling)海浪-潮流-环流耦合海洋数值预报系统的预报数据和美国国家环境预报中心的 GFS(Global Forecast System)预报数据，建立浒苔漂

* 国家重点研发计划海洋环境安全保障专项，2016YFC1401605 号，2016YFC1401800 号。何恩业，助理研究员，E-mail: heenye@163.com

① 通信作者：高 姗，副研究员, E-mail: gaoshan_nmefc@126.com

收稿日期: 2020-03-24，收修改稿日期: 2020-07-08

移输运模式；白雨等(2019)基于卫星遥感影像数据研究了海表温度、光照和降水在黄海浒苔生消各阶段中的作用。这些研究方向主要集中在浒苔的生物学特性、浒苔暴发期间环境关键要素的变化规律及其响应机制、绿潮的监测和识别技术以及基于水动力条件下的物理漂移过程模拟等，而以水动力学和生物、化学过程联合作用下的生态动力学模型鲜有预报研究和应用。本研究是在考虑风、流驱动的漂移输运模型的基础上，增加了温度、光照环境限制因子对浒苔生长和消亡作用的生态模块，建立黄海浒苔绿潮生态动力学模型，利用 CFSR (Climate Forecast System Reanalysis)和 CGOFS (Chinese Global operational Oceanography Forecasting System)再分析数据(Kourafalou *et al*, 2015; 王辉等, 2016)以及 CFS (Climate Forecast System products)预报场数据，结合卫星遥感监测资料，开展黄海浒苔绿潮漂移输运和生长消亡过程 2016 年数值模拟的敏感性实验，以及 2019 年预测应用研究，为黄海浒苔绿潮灾害早期防控提供理论参考，服务于海洋防灾减灾。

1 数据资料来源和方法

1.1 数据资料来源

本文利用海面风场、光照强度、表层海流和海表温度再分析数据，对 2016 年黄海浒苔从暴发到消亡的全过程开展模拟，选用卫星遥感绿潮数据进行验证，率定模型参数。在此基础上，利用 2019 年 CFS 预报场数据，对黄海浒苔的年度发展趋势进行预测和分析。

黄海浒苔绿潮资料来源于 2011—2019 年《国家卫星海洋应用中心绿潮遥感监测通报》中发布的基于 HY-1B/1C、Radarsat1/2、Aqua/Terra 和 GF 系列等多源卫星数据对黄东海海域进行的业务化绿潮遥感影像反演结果，信息包含绿潮监测的时间、覆盖面积(km^2)、分布面积(km^2)和影响区域等，卫星遥感解译区域范围为 119°—125°E，32°—38°N，卫星遥感监测相关参数见表 1。该数据用于分析历年黄海浒苔灾害暴发的源地和时间，以此确定模型投放浒苔粒子的初始位置和起报时间，以及用于验证模式对浒苔粒子漂移输运的位置、时间、影响范围和相对生物量等的模拟效果。

表层海流和海表温度再分析数据来源于国家海洋环境预报中心 CGOFS 的黄东海再分析数据，该数据由 ROMS(Regional Ocean Modeling System)模拟计算，区域范围为 114°—143°E, 22.3°—53.1°N，水平分辨率为 1/30°，垂向 30 层，最小水深 5 m，时间分辨率 1 h，经过卫星高度计数据、海表温度遥感数据、浮标观测等数据同化融合形成再分析数据集。海面风场和光照强度再分析数据来源于美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)的 CFSR 海上 10 m 风场和太阳短波辐射全球数据(https://www.hycom.org/dataserver/ ncep-cfsr)，空间分辨率为 1/3°，时间分辨率 6 h，该数据是 NCEP 第三代大气-海洋-陆地-海冰耦合同化模拟系统的全球高分辨率再分析数据集。本文选取 2016 年 5—8 月 CFSR 海面风场、CGOFS 表层海流作为漂移输运模块的表层强迫场，CGOFS 海表温度、CFSR 光照强度数据作为生态模块中对浒苔生长的限制因子。

表 1 黄海浒苔卫星遥感监测相关参数

Tab.1 Information of the satellites used for monitoring *Enteromorpha* in the Yellow Sea

卫星	所属国家	主要传感器	分辨率(m)
HY-1B	中国	CZI	250
HY-1C	中国	CZI	50
TERRA/AQUA	美国	MODIS	250
GF-1	中国	多光谱相机	8 和 16
GF-3	中国	SAR	10—50
GF-4	中国	多光谱相机	50
Radarsat1/2	加拿大	C-SAR	30—100

海面风场、光照强度、表层海流和海表温度的年度预测数据均来源于 CFS，时间分辨率均为 6 h，预报时效为 9 个月 (https://nomads.ncdc.noaa.gov/modeldata/cfsv2_forecast_6-hourly_9mon_flxf/)，海面风场和光照强度预报场的水平分辨率为 190×384 全球格点数据，表层海流和海表温度的水平分辨率为 181×360 全球格点数据。本文选取 2019 年 5 月 15 日—8 月 31 日预报数据对 2019 年黄海浒苔发展趋势进行年度预测。

1.2 黄海浒苔漂移输运和生长消亡过程数值模式结构和设置

该模式的构建分为两个模块，漂移输运模块和生态模块(图 1)。漂移输运模块采用拉格朗日粒子追踪方法，在海面风场和表层海流的驱动下计算浒苔粒子的漂移方向、漂移距离、漂移速度和分布区域等。生态模块引入海表温度和光照强度等环境因子影响下的浒苔生长与死亡方程，计算浒苔粒子相对生物量的增加或减少。

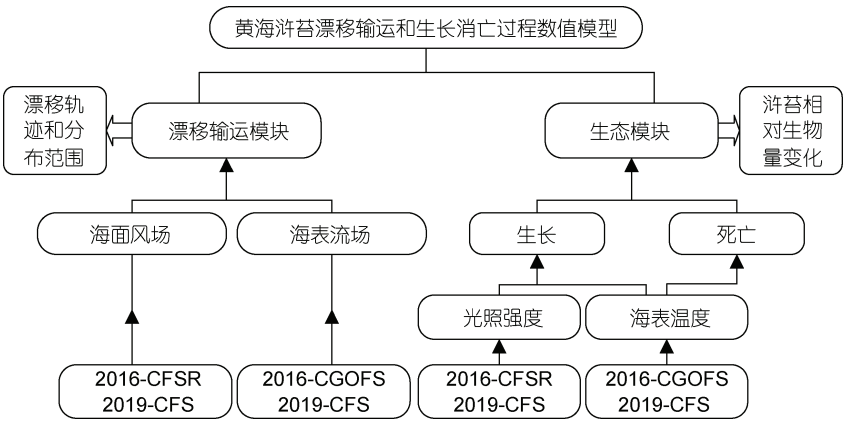

图 1　黄海浒苔漂移输运和生长消亡过程数值模式

Fig.1　The schematic of the *Enteromorpha* model (drift, life cycle) of the Yellow Sea

注: CFSR: Climate Forecast System Reanalysis; CFS: Climate Forecast System products; CGOFS: Chinese Global operational Oceanography Forecasting System

1.2.1　漂移输运模块　黄海浒苔作为漂浮态大型藻类自身没有运动能力(Zhao *et al*, 2015; 庞云龙等, 2017), 风场、表层流是影响黄海浒苔绿潮由南向北漂移的主要驱动力(Bao *et al*, 2015; 王宗灵等, 2018)。高松等(2014)研究发现海面风场与表层环流两者决定了浒苔漂移路径和影响区域; 张广宗等(2018)对2011—2017 年南黄海海域浒苔进行详细分析, 得出其漂移路径方向与海面风的风向高度一致。基于上述研究, 本文中的漂移输运模块参考李燕等(2010)、Lee 等(2011)计算方法, 只考虑风、流作用下浒苔粒子水平方向物理运动过程, 采用拉格朗日方法计算并分析浒苔漂移路径和时空分布特征, 浒苔粒子运动方程如下:

$$\frac{\mathrm{d}x_i}{\mathrm{d}t} = R_1 \cdot v_{\mathrm{a}}(x_i,t) + R_2 \cdot v_{\mathrm{d}}(x_i,t) \cdot \zeta(x_i,t), \qquad (1)$$

其中, x_i 分别为浒苔粒子 i 在 t 时刻的位置; v_{a}、v_{d} 分别表示流速和风速; R_1 为海流经验系数, 由敏感实验率定, 浒苔发展盛期会受到重力、浮力、波浪和湍流等作用, 这将导致海流赋予浒苔的速度会有所下降; R_2 为风经验系数, 由敏感实验率定, 表示风对浒苔的拖曳作用; $\zeta(x_i,t)$ 表示风对浒苔运动方向的改变作用, 衣立等(2010)研究发现浒苔移动偏向盛行风的右侧约 5°—40°, 设 α 为风与 x 轴方向的夹角, β 为风拖曳偏转角(浒苔移动偏向盛行风右侧的角度), 在 x 方向上则有 $\zeta_x = \cos(\alpha-\beta)$, 在 y 方向上则有 $\zeta_y = \sin(\alpha-\beta)$, 本研究设 β=20°。

浒苔粒子运动跨网格处理方法参考张海彦等(2012)对水母粒子跨网格运动所采用的追踪法, 设粒子初始位置为 (x_1, y_1), 则在一个时间步长 Δt 内粒子在纬向、径向上的位移分量为:

$$\Delta x = \left(\frac{u_w}{\partial u/\partial x} + x_1\right) \cdot \left(e^{\frac{\partial u}{\partial x}\Delta t} - 1\right);$$

$$\Delta y = \left(\frac{v_s}{\partial v/\partial y} + y_1\right) \cdot \left(e^{\frac{\partial v}{\partial y}\Delta t} - 1\right), \qquad (2)$$

式中, u_w、v_s 分别为网格西边界处的 x 向速度分量、南边界处的 y 向速度分量。若在 Δt 时间内粒子出现跨网格情况, 设粒子碰网格边界前所用时间为 Δt_1、所运动距离为 Δx_1, 跨网格边界后剩下的时间为 Δt_{rest}, 则有

$$\Delta t_{\mathrm{rest}} = \Delta t - \Delta t_1 = \Delta t - \frac{1}{\partial u/\partial x} \ln\left(\frac{\Delta x_1 \partial u/\partial x}{u_w + x_1 \partial u/\partial x} + 1\right), \qquad (3)$$

如果运动中浒苔粒子再次碰到网格边界, 则重复此步骤, 直至 $\Delta t_{\mathrm{rest}} = 0$ 为止, 对于 y 方向也同法处理。

浒苔粒子靠岸的判断方法参考李燕等(2010)处理方式, 若浒苔粒子当前时刻位置点和下一时刻位置点两点连成的直线和海岸线段相交, 则交点为粒子的登岸点, 浒苔到达陆地时就粘在陆地上, 不再参与计算。

1.2.2　生态模块　黄海浒苔灾害之所以暴发期长、影响范围广, 其重要原因之一是浒苔在适宜条件下繁殖能力较强。浒苔受风、流等外界强迫驱动下发生了漂移扩散, 移动到其他海域, 外部环境条件的改变会导致浒苔生长速率和死亡速率也随之变动。李瑞香等(2009)研究表明浒苔生长对温度的适应性较广, 5—30°C 均具有明显的种群增长率, 其最适宜生长的

温度范围为 14—26°C。范士亮等(2012)研究表明，浒苔最高生长速率出现在 15—20°C，2009 年和 2010 年的平均增长率分别高达 36%和 43%，大规模绿潮形成时的水温约为 17°C。吴晓文(2010)实验发现围隔外海区浒苔日均相对增长率为 4%。韩笑天等(2019)发现漂浮态浒苔在船基围隔中相对日生长率为 19.1%。高颖超等(2019)实验室培养浒苔发现 4500 lx 条件下最大相对日增长率为 11.9%。庞秋婷等(2013)现场船基围隔实验发现在营养盐适中时，浒苔相对生长率最高可达 82%，即使在低营养盐条件下也会保持 10%左右的生长速率。而近 30 年来南黄海无机氮年均浓度呈上升趋势，特别是 2008 年后出现急剧上升的趋势，与 1985 年相比，2008—2012 年黄海南部近岸海域无机氮浓度升高了 3 倍(Li *et al*, 2015)。大量的研究证明，温度、光照对黄海浒苔的发生发展起到关键性作用，因此黄海漂浮浒苔的生长率公式可表达为:

$$G = G_{\max} \cdot f(T) \cdot f(I) \cdot f(N、P) \quad , \tag{4}$$

式中，G 为浒苔生长率，$G_{\max}$ 为浒苔最大生长率，$f(T)$、$f(I)$ 和 $f(N、P)$ 分别为温度、光照强度和营养盐对浒苔生长速率的影响系数。本研究假设黄海浒苔暴发期间不受营养盐条件限制，浒苔生长和死亡只依赖于水温和光照，$f(N、P)$ 取值为 1。

按照 Shelforld 耐受性定律，浮游植物对温度的适应是存在上下限的(Shelford, 1913)，本研究根据 Eppley(1972)藻类生长率表达式 $G_T = G_{\max} \cdot \theta^{T-T_{\max}}$，其中，$G_T$ 为任意温度下的藻类生长率；$G_{\max}$ 为相同营养条件、光照条件以及最适宜温度下的生长率；θ 为水温影响调节常数；T 为水温(°C)；$T_{\max}$ 为最适宜温度(°C)。参考 Moisan 等(2002)浮游植物动态生长-温度模型，基于黄海漂浮浒苔生物学特点，改进了水温与浒苔生长率的映射关系(徐良等, 2013):

生长率函数为:

$$\begin{cases} G_T = G_{\max}\theta_1^{T-T_1}, \ T < T_1 \\ G_T = G_{\max}, \ T_1 \leqslant T \leqslant T_2 \\ G_T = G_{\max}\theta_2^{T_2-T}, T > T_2 \end{cases}, \tag{5}$$

死亡率函数为:

$$\begin{cases} D_T = D_{\max}\theta_3^{T-T_3}, \ T < T_3 \\ D_T = D_{\max}, \ T \geqslant T_3 \end{cases}, \tag{6}$$

式中，设 $G_{\max}$ 日最大生长率为 40%；$[T_1, T_2]$ 为最适宜温度区间，取值为 15—20°C；θ_1、θ_2 为生长率系数，分别取值为 1.15 和 1.80。D_T 为浒苔受温度影响的死亡率；设 $D_{\max}$ 日最大死亡率为 10%；θ_3 为死亡率系数，取值为 1.10；T_3 为最大死亡率临界温度，取值为 25°C。

浒苔是一种能适应高光强的海藻。黄海浒苔具有典型的潮间带海藻的光合特性，高的饱和光强[平均为 567 μE/(m²·s)]，较高的补偿光强[平均为 62 μE/(m²·s)]，从光补偿点到光饱和点有较大的距离，说明浒苔对光强有广泛的适应性(张晓红，2011)。实验结果显示，浒苔最适合光照 5000—6000 lx(吴洪喜等，2000)，饱和光照强度在 320—400 μE/(m²·s)(丛珊珊，2011)。一般情况下随着光强的增加，藻类光合作用会加强，但当光强超过一定界值时则会对藻类生长形成抑制，本文采用 Steele(1962)光抑制模型最优曲线公式来描述光强 I 对浒苔生长的影响:

$$f(I) = \frac{I}{I_{\text{opt}}} e^{\left(1-\frac{I}{I_{\text{opt}}}\right)}, \tag{7}$$

式中，I_{opt} 为最适合浒苔生长的光照强度，取值为 400 μE/(m²·s)。

综合生长率和死亡率方程，浒苔生物量净变动率 N_{growth} 可表述为:

$$N_{\text{growth}} = G_T \times f_{(I)} - D_T, \tag{8}$$

浒苔生长消亡模型的积分公式表达为:

$$\frac{\partial \text{Bio}}{\partial t} = N_{\text{growth}}\text{Bio} = G_T \times f_{(I)} \times \text{Bio} - D_T \times \text{Bio}, \tag{9}$$

其中，Bio 表示浒苔相对生物量，$G_T \times f_{(I)}$ 表示总生长率，D_T 表示总死亡率，本文假定浒苔粒子登陆后生物量不再发生变动。

1.2.3 模式设置 初始位置和起报时间的合理设定对提高模式的最终模拟和预报效果起到关键性的作用。近年来众多学者通过多角度对黄海浒苔溯源做了大量研究，如刘峰等(2012)在苏北浅滩沉积物中发现了大量浒苔微观繁殖体；刘材材等(2017)基于多源数据综合分析得出苏北浅滩紫菜养殖业是浒苔初始生物量的直接提供者；白雨等(2019)利用 2008—2017 年 MODIS 影像分析发现，历年黄海浒苔首次出现的位置主要集中在苏北浅滩离岸约 100—150 km 以内的海域，暴发的时间多在 5 月中旬至下旬；郑翔宇(2017)基于多源卫星数据对黄海浒苔进行溯源研究，最终断定 120.5°—121.5°E，33.0°—34.3°N 是浒苔暴发的源地。本文利用国家卫星海洋应用中心的绿潮遥感信息，对 2011—2019 年黄海浒苔暴发初期的位置和时间进行了相关统计分析(图 2a)，结果显示黄海浒苔灾害暴发的时间在 5 月中旬和下旬，暴发初期位置

集中在 119.8°—121.5°E, 33°—34.5°N 的苏北浅滩, 这与上述相关研究成果基本一致。因此, 将 5 月 15 日作为模式起报时间, 区域范围 119.8°—121.5°E, 33°—34.5°N 设置为浒苔初始位置(图 2b)。

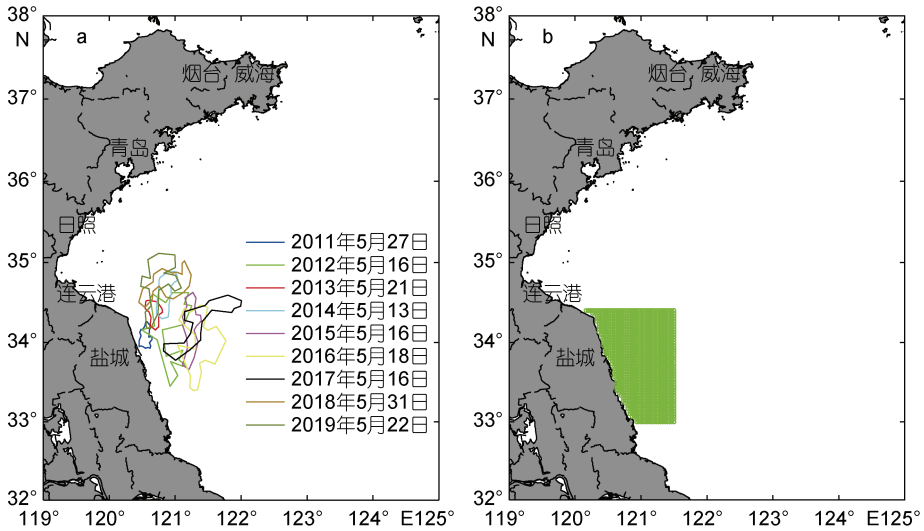

图 2　2011—2019 年卫星遥感黄海浒苔暴发初期位置(a)和模型设置的浒苔初始位置(b)

Fig.2　The location (a) of the earliest appearance of *Enteromorpha* in the Yellow Sea from 2011 to 2019, and the initial position (b) of *Enteromorpha* in model setting

本模型采用 C 网格, 模拟海域范围为 119°—125°E, 32°—38°N, 水平分辨率为 3 km, 时间步长为 720 s。浒苔的生成具有持续性, 从 5 月暴发至 6 月上旬, 浒苔在苏北浅滩会持续生成(王宗灵等, 2018; 颜天等, 2018)。因此, 在浒苔粒子释放实验中加入了持续释放过程, 5 月 15—30 日, 每隔 5 d 释放一次浒苔粒子, 每次释放粒子 1248 个, 每个粒子初始相对生物量设为 10 g。利用线性插值将风场、流场、温度场和太阳辐射场插值到浒苔漂移点上, 利用再分析表层海流、海表 10 m 风场、海表温度场和光照强度场以及卫星遥感绿潮资料对 2016 年黄海浒苔从暴发到消亡全过程进行模拟验证, 率定模型参数。在模型参数设定合理以及模拟效果稳定的基础上, 利用 CFS 预报场数据对 2019 年黄海浒苔发展趋势进行预测和分析。时效均为 5 月 15 日—8 月 31 日, 系统每天输出一次结果, 信息包含浒苔漂移路径、分布范围以及浒苔相对生物量等。

2　2016 年黄海浒苔漂移输运和生长消亡过程数值模拟

2016 年 5 月 16 日, 卫星遥感首次在盐城以东海域发现呈斑块状浒苔绿潮, 覆盖面积约二十余平方公里, 此后浒苔暴发规模逐渐增大(图 3)。模式设定的浒苔初始位置和起报时间均与前文一致, 为 119.8°—121.5°E, 33°—34.5°N 和 5 月 15 日。海面风场和光照强度为 CFSR 再分析数据, 表层海流和温度为 CGOFS 黄东海再分析数据。

2.1　参数率定

浒苔藻类的漂移主要受海面风场和表层海流的共同驱动, 相关研究一般将海流系数取值为 1.0, 风拖曳系数取值为 0.01—0.05(吉会峰等, 2018; 赵昌等, 2018)。本文利用 2016 年卫星遥感浒苔影像资料, 对黄海浒苔漂移输运过程中的海流影响系数 R_1 和风影响系数 R_2 设置了多组取值方案(表 2), 进行浒苔的漂移输运模拟结果对比测试, 以率定最佳参数。

敏感实验结果显示(图 4), 浒苔漂移路径和速度对海流系数 R_1 的取值敏感性较低, 当风系数值固定后, 海流系数取值 0.80—1.00 时对浒苔漂移路径影响甚微, 对漂移速度产生略微差异。整体而言, 模拟的浒苔主要形成两条路径, 均与风系数 R_2 的取值有关, 表明海面风场对绿潮分布和位置的变动有较大影响。当 R_2 取值过大时, 会使模拟浒苔迁移速度加快, 登陆时间过早, 模拟浒苔分布位置与实际偏差较大; 当 R_2 取值过小时, 会使模拟浒苔位移量偏小, 与监测实况匹配度不高, 且模拟的浒苔扩散范围略偏小(吉会峰等, 2018)。经过多次反复试验, 最终表层海流系数为 0.90, 海面风系数为 0.01 时模拟结果与卫星遥感监测结果吻合度相对最好, 在长达两个月的漂移输运

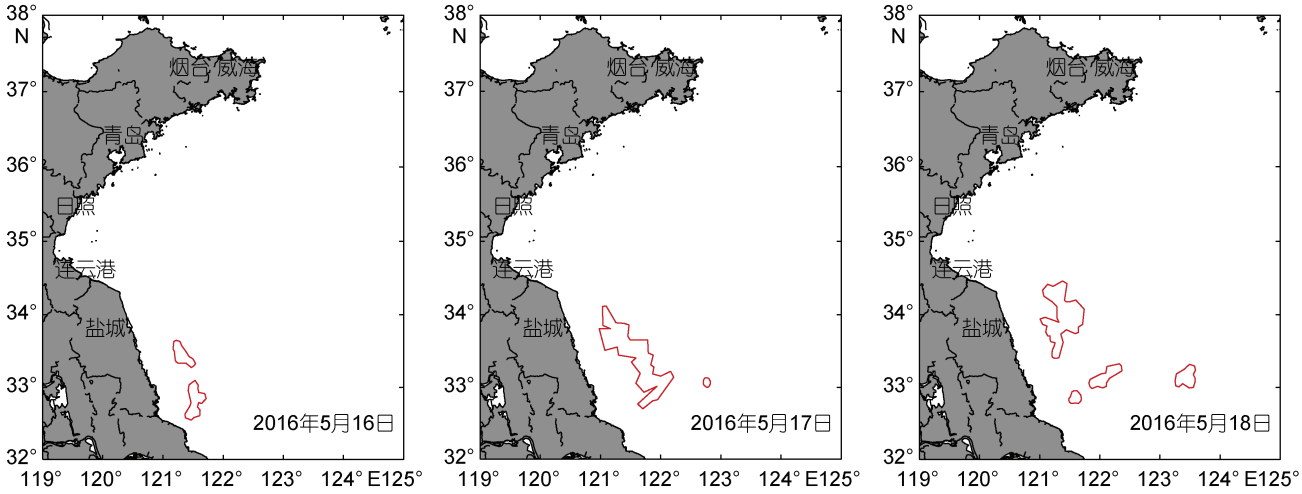

图 3 2016 年 5 月 16—18 日卫星遥感绿潮分布图

Fig.3 The satellite images in Yellow Sea from May 16 to 18, 2016

注: 红色包络线区域为浒苔分布区域

表 2 黄海浒苔漂移输运和生长消亡过程数值模拟的风、流参数率定实验方案

Tab.2 The experimental configuration of sensitivity variables for simulating the drift and life cycle of *Enteromorpha* in the Yellow Sea

实验方案	R_1 取值	R_2 取值
Exp1	1.00	0.02
Exp2	1.00	0.01
Exp3	0.90	0.02
Exp4	0.90	0.01
Exp5	0.80	0.02
Exp6	0.80	0.01

注: R_1: 海流影响系数; R_2: 风影响系数

数值模拟中, 模拟浒苔区域几何中心点位置和卫星遥感浒苔区域几何中心点的误差未超过 50 km(表 3), 其中 5 月中、下旬和 7 月中、上旬误差均在 30 km 以下, 6 月误差有所上升, 6 月 13 日最大误差为 47 km。推测可能为 5 月份浒苔在苏北浅滩开始集中暴发(刘材材等, 2017; 白雨等, 2019), 与模拟的初始位置较为一致有关, 而 7 月中上旬受黄海水温升高浒苔开始消亡(范士亮等, 2012)以及浒苔大量向山东沿岸堆积, 分布区域逐渐向近岸缩减(郑翔宇, 2017)有关。而在 6 月份, 浒苔藻体在营养生长的同时, 会不间断的释放生殖细胞, 并在风场和流场的作用下处于动态的分布变化中, 浒苔微观繁殖体不断的生长聚集从而形成不同规模的浒苔斑块, 使得浒苔分布区域不断扩大(刘峰等, 2012), 导致模拟区域与卫星遥感区域误差有所扩大。

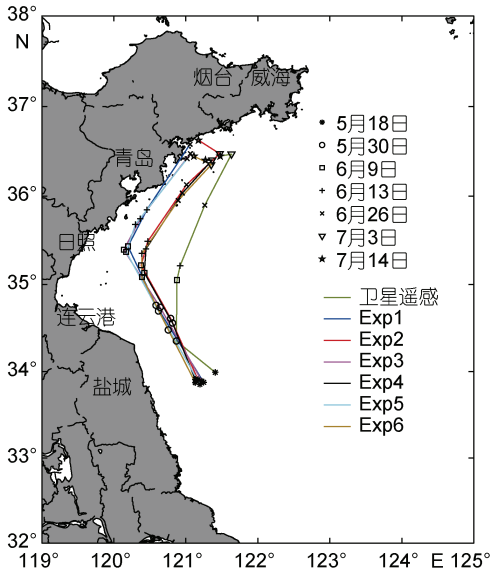

图 4 2016 年浒苔主体漂移路径(浒苔区域几何中心点)和速度的敏感试验(Exp1—Exp6 对应表 2)

Fig.4 The drift path and speed of *Enteromorpha* in 2016 in Exp1—Exp6

2.2 模型验证

2.2.1 漂移速度和影响海区 考虑到浒苔卫星遥感受天气影响较大, 本文在每旬中选取云量少、绿潮覆盖面积最大的卫星图片作为模拟结果的对比实况。图 5 为模拟的 2016 年浒苔漂移输运全过程与卫星遥感影像资料对比, 结果显示模拟与实况具有较好的吻合度。5 月下旬浒苔集中在江苏盐城东北部海域; 6 月上旬浒苔快速北漂越过 35°N 线, 且浒苔北缘区开始向东西两向扩展, 少量浒苔粒子奔袭至连云港沿

表 3　模型模拟浒苔区域几何中心点误差(2016 年)

Tab.3　Error of geometric center point of *Enteromorpha* area in model simulation (2016)

日期	模型模拟位置	卫星遥感位置	误差(km)
5 月 18 日	121.13°E, 33.91°N	121.41°E, 33.99°N	27
5 月 30 日	120.81°E, 34.56°N	120.87°E, 34.35°N	24
6 月 9 日	120.42°E, 35.13°N	120.88°E, 35.05°N	42
6 月 13 日	120.45°E, 35.40°N	120.92°E, 35.21°N	47
6 月 26 日	120.95°E, 36.03°N	121.26°E, 35.90°N	32
7 月 3 日	121.37°E, 36.40°N	121.63°E, 36.47°N	25
7 月 14 日	121.27°E, 36.40°N	121.48°E, 36.45°N	19

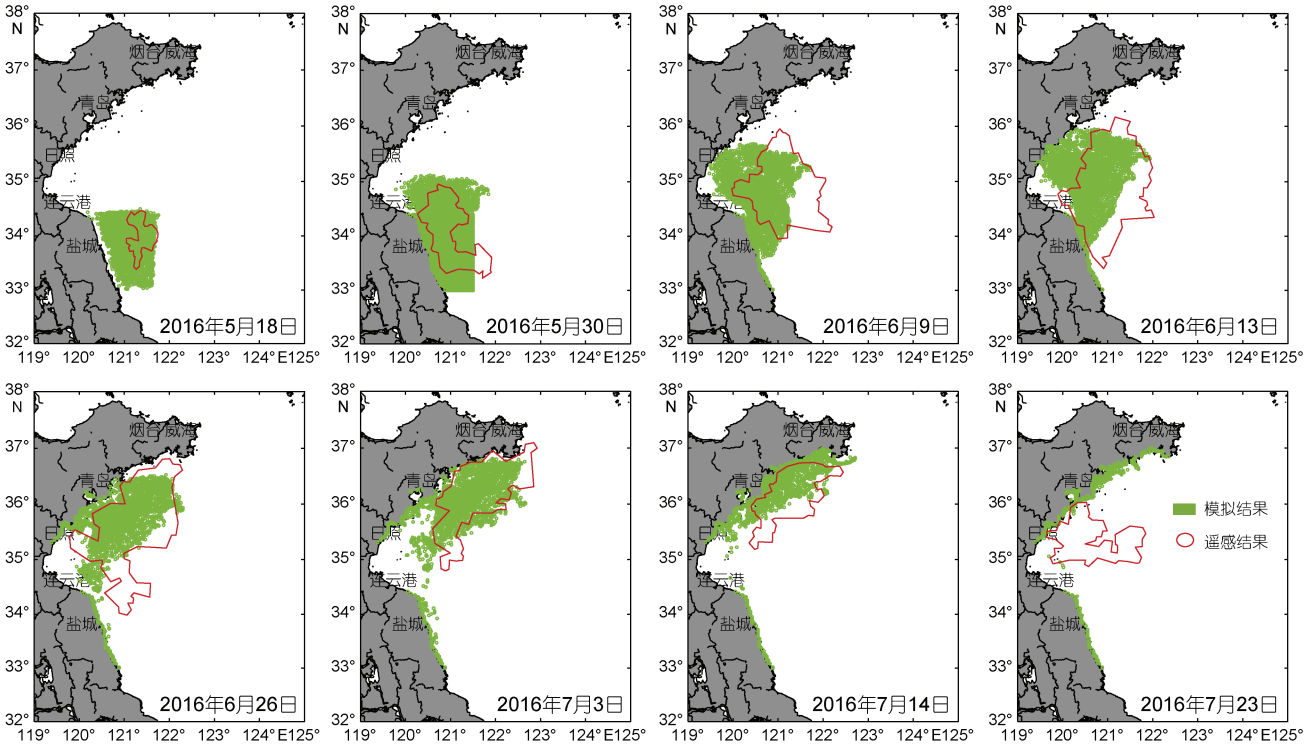

图 5　2016 年模拟结果(绿色区域)与卫星遥感结果(红线区域)对比

Fig.5　The comparison between the modeled results (the green part) and satellite images (the red part) in 2016

岸; 6 月中旬浒苔范围迅速扩大, 少量前沿浒苔抵达日照和青岛开发区沿岸海域, 并有极少量浒苔开始登滩; 6 月下旬浒苔主体压至日照、青岛近海, 大量浒苔开始登陆; 7 月上旬至中旬浒苔向东北方向漂移, 并在烟台海阳和威海乳山登陆; 7 月下旬大量浒苔在山东半岛中部南岸堆积, 外海已无大规模浒苔斑块聚集, 浒苔进入了消亡期。上述模拟结果与卫星遥感实况较为一致, 也与郑翔宇(2017)利用多源遥感数据绘制的 2016 年绿潮移动趋势图基本一致。

表 4 为数值模拟与卫星遥感浒苔分布面积时间序列对比, 5 月 18 日浒苔模拟分布面积为 15411 km^2, 基本包络了卫星遥感浒苔区域, 但重合率仅为 24%(重合率=重合部分面积/(模拟分布面积+卫星遥感面积-重合部分面积)), 推测为浒苔暴发初期处于微观繁殖体不断聚集萌发阶段, 形成的浒苔斑块分布范围较小(王宗灵等, 2018; 颜天等, 2018), 导致初期模拟面积远大于卫星遥感面积, 重合率较低; 之后浒苔分布区域快速扩增, 5 月 30 日模拟分布面积为 25911 km^2, 卫星遥感面积为 12465 km^2, 模拟分布区域与卫星遥感结果位置重合率增加到 39%; 至 6 月下旬浒苔达到最盛期时, 模拟浒苔分布面积超过了 30000 km^2, 模拟分布区域与遥感结果浒苔区域重合率超过了 50%; 7 月中旬以后, 模拟的浒苔已基本向近岸海域堆积, 卫星遥感浒苔分布区域范围也大幅减小(中华

表 4 数值模拟结果与卫星遥感监测结果对比

Tab.4 Comparison between simulation results and satellite remote sensing monitoring results

日期	卫星遥感面积 (km^2)	模型模拟面积 (km^2)	重合部分面积 (km^2)	重合部分 /卫星遥感	重合部分 /模型模拟	重合率
5 月 18 日	3678	15411	3632	99%	24%	24%
5 月 30 日	12465	25911	10639	85%	41%	39%
6 月 9 日	22617	26085	13794	61%	53%	40%
6 月 13 日	30387	28033	19057	63%	68%	49%
6 月 26 日	30260	26926	19712	65%	73%	53%
7 月 3 日	20554	27218	16719	81%	61%	54%
7 月 14 日	13609	15278	8962	66%	59%	45%

人民共和国自然资源部，2008—2019)。此外，自 6 月上旬至 7 月中旬的模拟过程中，重合部分面积占卫星遥感浒苔面积比例均保持在 60%以上，重合部分面积占数值模拟面积比例均保持在 50%以上。这表明模型能够较准确预测绿潮斑块的影响海域和漂移轨迹。

2.2.2 漂移轨迹变动特征 2016 年数值模拟和卫星遥感实况均显示，浒苔主体漂移路径以偏北向为主，最终登陆以青岛为中心的山东半岛沿岸城市，青岛受灾尤为严重(图 6a)。6 月中旬之前浒苔漂移方向以北偏西为主，6 月中旬转向北偏东方向，6 月下旬浒苔主体突然快速转向东北方向漂移，这可能与浒苔抵达山东沿海后受到东北向的沿岸流作用所致(图 4 中的 Exp4)。进入 7 月，浒苔主体开始在山东半岛沿岸海域做东西往复运动，期间大规模的浒苔持续侵袭沿岸滩地。由于模式设定的初始位置(分布区域几何中心点)比 2016 年卫星遥感的浒苔实际暴发位置偏西约 30 km，这对后续预报会产生一定的偏差，但是整体来看，该模式对 2016 年浒苔漂移方向、转向时间点、运动的规律和影响的岸段及程度等方面的模拟结果都与实况基本保持一致，基本抓住了 2016 年浒苔漂移输运过程的几个主要特征。

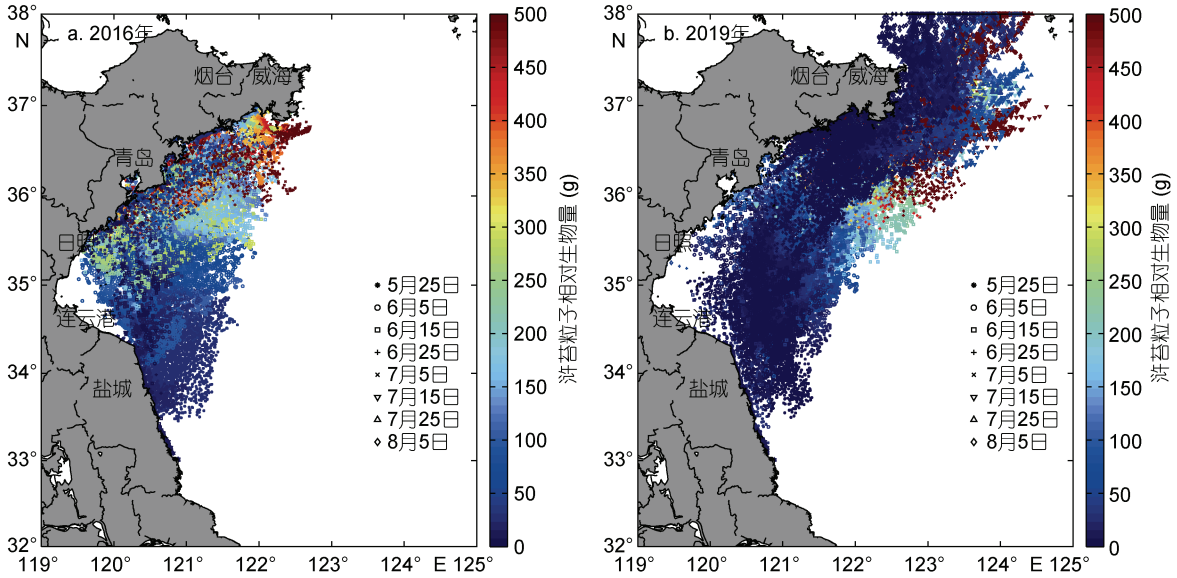

图 6 数值模拟的浒苔粒子在 2016 年与 2019 年漂移输运过程及对应时间

Fig.6 The drift process and biomass in different times in 2016 and 2019

2.2.3 浒苔生物量变动情况 模拟结果显示(图 7a)，5 月中旬浒苔开始持续增长，在 6 月中旬至下旬浒苔增殖能力迅速提升，开启了最大生长率时段，6 月末至 7 月初浒苔生物量达到峰值，7 月中旬之后浒苔死亡率超过了生长率，浒苔生物量迅速降低，至 8 月初模拟的浒苔相对生物量曲线进入平坦区，表明部分浒苔已经登陆，而剩余仍在海洋水体中的浒苔也已基本消亡，平坦区数值较高说明该年浒苔的登

陆量较大。目前实况绿潮生物量的估算主要是通过水平拖网方法获取的单位面积生物量乘以遥感图像中的绿潮覆盖面积得到(范士亮等，2012)，肖艳芳等(2017)基于实测数据，构建了卫星遥感的绿潮生物量估算模型，显示了浒苔生物量和覆盖面积变化呈现高度相关的一致性，研究表明绿潮覆盖面积的变化趋势可以反映浒苔生物量的变动情况，因此在检验浒苔生消模拟方面参考绿潮覆盖面积的变动情况是可行的。对比显示(图 7a)，模拟的浒苔相对生物量和卫星监测的浒苔覆盖面积的变动趋势及增量幅度较为一致，2016 年 5—6 月浒苔覆盖面积呈连续增加趋势，6 月底达到极大值，浒苔覆盖面积从开始的约 20 km^2 增长至约 1350 km^2，增长了约 60—70 倍，7 月开始走低，至 7 月底进入快速消衰期，卫星已经遥感不到成片浒苔分布。对比来看，该模式对黄海浒苔相对生物量变动趋势的模拟是基本可靠的。

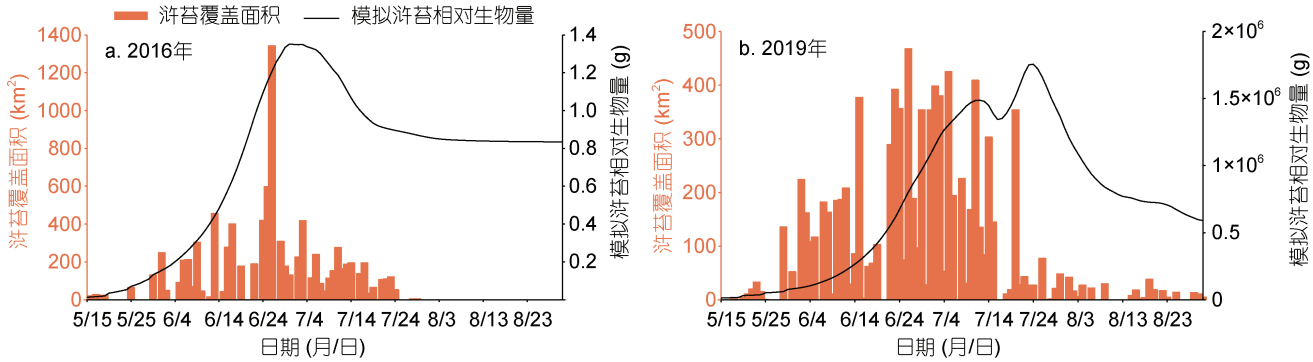

图 7　2016 年和 2019 年模型模拟浒苔粒子相对生物总量的变化和卫星遥感绿潮覆盖面积变化对比

Fig.7　The comparison between the simulated relative biomass of *Enteromorpha* and monitored coverage area of green tide from satellite in 2016 and 2019

3　2019 年黄海浒苔灾害发展趋势预测

基于该数值模型和 2016 年的初始位置、起报时间和模式参数，利用 CFS 的预报场数据，对 2019 年浒苔漂移输运和绿潮相对生物量动态变化全过程进行年度预测(2019 年 5 月 15 日—2019 年 8 月 31 日)，并利用卫星遥感数据进行了该模型在黄海浒苔年度预测应用上的可靠性检验。

预测结果显示(图 7b、图 8)，5 月中下旬浒苔集中在盐城以东海域；6 月上旬初期，浒苔主体快速向北漂移发展，并出现连续增长现象；6 月上旬末期，受风、流作用浒苔主体转向东北方向漂移发展，期间出现南北往复运动；6 月中旬后期部分浒苔登陆威海、烟台；6 月下旬少量浒苔登陆日照、青岛；7 月上旬至中旬，大量浒苔聚集登陆烟台、威海和青岛，生物量达到高峰维持阶段；7 月末，浒苔死亡率开始超过生长率，生物量开始减少；8 月浒苔进入缓慢的消亡期。由数值模型预测结果发现 2019 年黄海浒苔呈现几个典型特点(图 6b)，一是漂移路径前期偏北，中后期向东北方向迁移，相比往年漂移路径更偏东；二是影响岸段主要为山东半岛东北部南岸，青岛、日照受灾度相对较轻；三是登陆时间偏晚，首先侵袭的是烟台海阳和威海乳山，之后侵袭青岛，这与往年相比存在明显的差异；四是浒苔生物量呈现较多态势，且持续时间较长，至 8 月底还有部分浒苔未完全消亡。该特征与中国海洋灾害公报(中华人民共和国自然资源部，2008—2019)发布的 2019 年黄海浒苔特征一致。

模拟结果与 2019 年浒苔实况在漂移路径、影响区域和相对生物量的变动方面基本一致，但在浒苔后期分布区域的预测上有所差异。2019 年 7 月下旬，浒苔绿潮分布面积和覆盖面积不断减小，主要分布在山东半岛南部沿海一带，浒苔进入消亡期，国家卫星海洋应用中心于 9 月 9 日在 119.7°—121.8°E，34.2°—35.7°N 区域最后一次遥感探测到浒苔，覆盖面积为 0.5 km^2，分布面积为 1182 km^2，这是近 10a 黄海浒苔消亡最晚的一年。而数值模拟结果为 8 月份之后，山东近海只有极少数浒苔粒子分布，大部分浒苔粒子漂至威海东北部海域。这种差异的存在，推测与模式参数设置和数据场分辨率等有一定关系。模式设置 5 月中、下旬在浒苔源地多次释放浒苔粒子进行模拟和预测，而实际上在浒苔漂移发展进程中，海水中的浒苔微观繁殖体也会不断的生长聚集形成不同规模的浒苔斑块，使得浒苔分布区域更广(刘峰等，2012)。2019 年受海温等海洋环境要素的影响，浒苔

在苏北浅滩生成的时间超过 6 月上旬，从卫星实况图可见 6 月 24 日在江苏盐城东北部沿海仍然有新的浒苔生成，且分布范围较大，这种浒苔粒子释放时间设置的偏差造成了后期模拟与实况的差异。此外，本模型只考虑了浒苔粒子的平流运动，未考虑随机运动导致的扩散过程(如湍流或次网格效应导致的随机速度)，尤其是动力背景场水平分辨率不高的情况下，在小尺度的海洋物质输运模拟和预报中，浒苔粒子并不会完全按照由预报场得到的确定性速度(海流和风引起的速度)移动，这可能也是导致黄海浒苔后期模拟结果较实况偏东的原因之一。加之 2019 年浒苔相比往年漂移路径更为偏东、分布范围较广，大量浒苔未向岸边堆积聚集，近海较适宜的环境条件也增加了当年浒苔的灾害时长。与 2016 年相比，由于 2019 年浒苔暴发初期实际位置相比模型设定的初始位置偏向东南区域(图 8)，因此在 5 月下旬至 6 月初，数值模拟与卫星遥感结果偏差较大，但随着浒苔在黄海南部不断繁殖生长以及向西、向北方向扩展，从 6 月中旬开始数值模拟结果和卫星遥感结果便呈现出较高的吻合度，体现出该模型在实际业务化预报应用上的可靠性和有效性。

4 结论

本文基于 CFSR 再分析数据、CGOFS 黄东海再分析数据和 CFS 预报数据的海面风场、表层海流、海表温度和光照强度要素，开发了一套将生物学模型与海洋学模型相耦合的高分辨率黄海浒苔生态动力学模型。通过敏感实验和预报检验来看，该模式较好的模拟了浒苔的漂移路径、影响范围和增殖与消衰过程，模拟结果与卫星遥感监测实况较为一致。2016 年黄海浒苔漂移路径以偏北向为主，主要影响山东半岛中部南岸海域，青岛受灾尤为严重，浒苔先期登陆日照、青岛，其后登陆烟台和威海。2019 年浒苔漂移方向以东北向为主，主要影响山东半岛中、东部南岸，致使当地受灾较重，浒苔先期登陆烟台海阳和威海乳山，其后登陆青岛和日照，且浒苔绿潮灾害持续时间较长。

遥感分析和数值模拟均显示影响山东南岸的浒苔主要来自苏北浅滩，并于 5 月中旬暴发卫星遥感可见，这说明该模式预设的黄海浒苔源地和暴发日期是可行的。此外，模拟结果还显示表层海流、海面风场直接影响浒苔的迁移路径和分布范围，间接影响浒苔的生长和消亡；海温、光照等因子直接影响浒苔

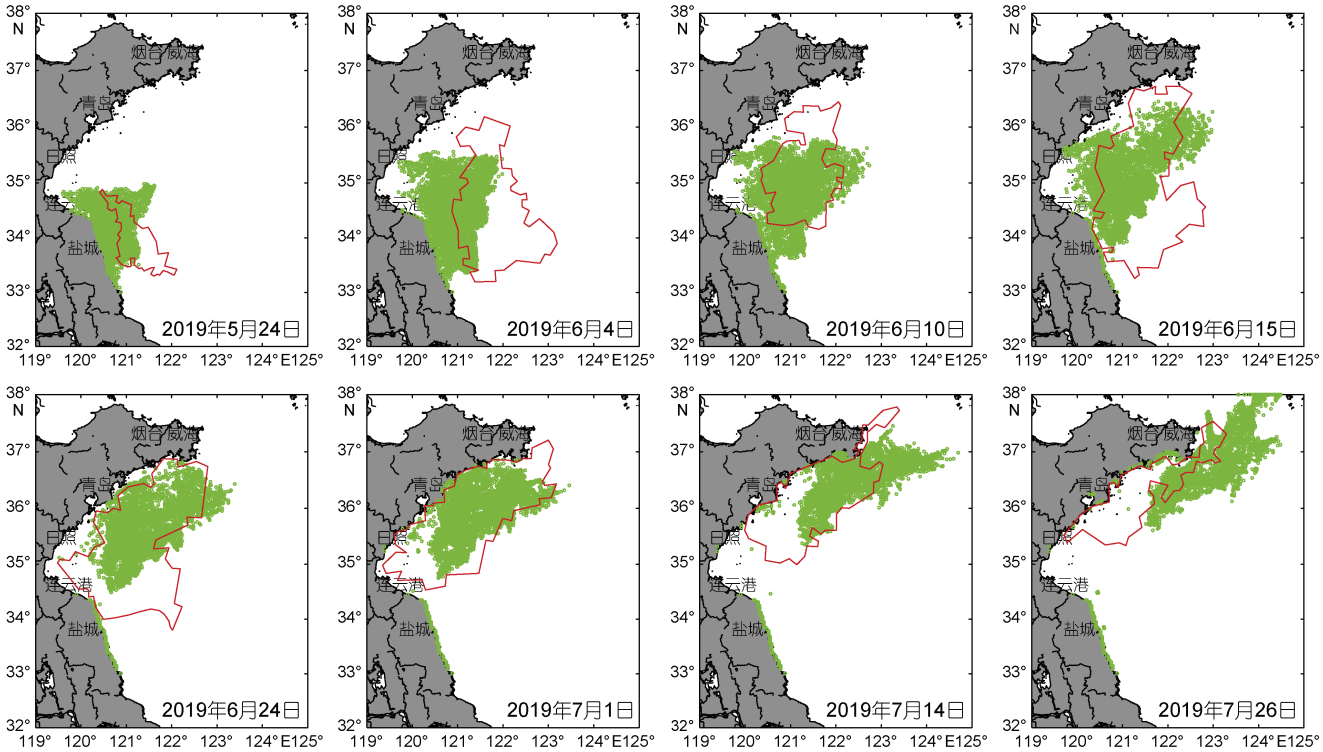

图 8 2019 年浒苔分布预测结果(绿色区域)与卫星遥感结果(红线区域)对比

Fig.8 The comparison between the modeled results (the green part) and satellite images (the red part) in 2019

的生、消, 间接影响浒苔的分布范围。作为国内首套业务化的黄海浒苔漂移输运和生长消亡过程数值模式, 仍存在许多不足之处, 如该模式未考虑营养盐过程、对环境驱动因子的描述还不够全面、初始条件的设置还需进一步探讨。此外, 在进行黄海浒苔长期预测时, 使用的 CFS 海流和海温数据分辨率较低, 同时浒苔在海水运动过程中还会受到湍流等其他作用的影响, 这些不足均可能导致浒苔的漂移过程存在一定偏差。因此, 如何提高海流和海温的分辨率、加入粒子随机运动过程以进一步完善浒苔漂移过程模拟也是下一步的重点工作。总之, 黄海浒苔的暴发是海洋物理、生物和化学过程综合作用的结果, 随着针对各环境因子与浒苔发生发展联动效应机制研究的深入, 海洋生态动力学模型在定量化描述和分析黄海浒苔时空演变特征方面将具有很强的优势。

参　考　文　献

中华人民共和国自然资源部, 2008—2019. 中国海洋灾害公报. 北京: 中华人民共和国自然资源部

王　辉, 万莉颖, 秦英豪等, 2016. 中国全球业务化海洋学预报系统的发展和应用. 地球科学进展, 31(10): 1090—1104

王宗灵, 傅明珠, 肖　洁等, 2018. 黄海浒苔绿潮研究进展. 海洋学报, 40(2): 1—13

丛珊珊, 2011. 环境因子对浒苔(*Enteromorpha prolifera*)生长、生存状态和营养吸收影响的实验研究. 青岛: 中国海洋大学硕士学位论文

白　雨, 赵　亮, 刘境舟, 2019. 生态因子在黄海绿潮生消过程中的作用. 海洋学报, 41(8): 97—105

刘　峰, 逄少军, 2012. 黄海浒苔绿潮及其溯源研究进展. 海洋科学进展, 30(3): 441—449

刘材材, 徐　韧, 何培民等, 2017. 南黄海绿潮暴发与紫菜养殖的关系. 海洋科学, 41(2): 35—43

吉会峰, 刘吉堂, 莫旭冬等, 2018. 江苏重点海域绿潮漂移扩散数值模拟. 海洋科学, 42(5): 82—91

吉启轩, 赵新伟, 章　志, 2015. 江苏海域浒苔时空分布特征及对海洋环境的影响. 山东农业大学学报(自然科学版), 46(1): 61—64

衣　立, 张苏平, 殷玉齐, 2010. 2009 年黄海绿潮浒苔爆发与漂移的水文气象环境. 中国海洋大学学报, 40(10): 15—23

吴洪喜, 徐爱光, 吴美宁, 2000. 浒苔实验生态的初步研究. 浙江海洋学院学报(自然科学版), 19(3): 230—234

吴晓文, 2010. 营养盐对浒苔生长的影响实验研究. 青岛: 国家海洋局第一海洋研究所硕士学位论文

张　浩, 2013. 黄海绿潮爆发机制分析及防治研究. 大连: 大连海事大学硕士学位论文

张广宗, 吴孟泉, 孙　晓等, 2018. 南黄海浒苔漂移轨迹年际变化规律及驱动因素. 海洋与湖沼, 49(5): 1084—1093

张晓红, 2011. 温度、盐度等环境因子对浒苔(*Enteromorpha prolifera*)及繁殖体生长的影响. 青岛: 国家海洋局第一海洋研究所硕士学位论文

张海彦, 赵　亮, 魏　皓, 2012. 青岛外海夏季水母路径溯源研究. 海洋与湖沼, 43(3): 662—668

李　燕, 李　云, 刘钦政, 2010. 浒苔漂移轨迹预报系统. 海洋预报, 27(4): 74—78

李瑞香, 吴晓文, 韦钦胜等, 2009. 不同营养盐条件下浒苔的生长. 海洋科学进展, 27(2): 211—216

肖艳芳, 张　杰, 崔廷伟等, 2017. 海面漂浮绿潮生物量光谱特征及估算模型. 光学学报, 37(4): 0430001

陈　磊, 王希明, 张绪良, 2018. 青岛近海浒苔暴发灾害成因探析. 高师理科学刊, 38(9): 37—42

庞云龙, 刘正一, 李佳霖等, 2017. 藻类生态型研究进展. 生态学杂志, 36(4): 1079—1086

庞秋婷, 李　凤, 刘湘庆等, 2013. 围隔实验中浒苔在不同营养盐条件下的生长比较. 环境科学, 34(9): 3398—3404

范士亮, 傅明珠, 李　艳等, 2012. 2009-2010 年黄海绿潮起源与发生过程调查研究. 海洋学报, 34(6): 187—194

郑翔宇, 2017. 基于多源数据的黄海绿潮遥感监测研究. 烟台: 中国科学院烟台海岸带研究所硕士学位论文

赵　昌, 尹丽萍, 王关锁等, 2018. 黄海浒苔漂移输运模式的建立与应用. 海洋与湖沼, 49(5): 1075—1083

徐　良, 冯　平, 孙冬梅等, 2013. 水温对藻类生长变化影响的数值模拟. 安全与环境学报, 13(5): 76—81

高　松, 黄　娟, 白　涛等, 2014. 2008 年与 2009 年黄海绿潮漂移路径分析. 海洋科学, 38(2): 86—90

高颖超, 杨　雪, 林　锟等, 2019. 不同光照条件下浒苔与三种赤潮微藻的竞争. 中国环境科学, 39(8): 3404—3411

董明帆, 杨福霞, 简慧敏等, 2018. 苏北浅滩绿潮爆发早期营养盐的水平分布. 中国海洋大学学报, 48(11): 93—99

韩笑天, 赵　婷, 苗　辉等, 2019. 苏北浅滩绿藻从定生到漂浮过程中的组成及其生长特性. 海洋与湖沼, 50(2): 308—315

颜　天, 于仁成, 周名江等, 2018. 黄海海域大规模绿潮成因与应对策略——“鳌山计划”研究进展. 海洋与湖沼, 49(5): 950—958

Bao M, Guan W B, Yang Y *et al*, 2015. Drifting trajectories of green algae in the western Yellow Sea during the spring and summer of 2012. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 163: 9—16

Eppley R W, 1972. Temperature and phytoplankton growth in the sea. Fish Bulletin, 70(4): 1063—1085

Kourafaloua V H, Mey P De, Hénaffa M L et al, 2015. Coastal Ocean Forecasting: system integration and evaluation. Journal of Operational Oceanography, 8(3): 127—146

Lee J H, Pang I C, Moon I J *et al*, 2011. On physical factors that controlled the massive green tide occurrence along the southern coast of the Shandong Peninsula in 2008: A numerical study using a particle-tracking experiment. Journal of Geophysical Research: Oceans, 116(12): C12036

Li H M, Zhang C S, Han X R *et al*, 2015. Changes in concentrations of oxygen, dissolved nitrogen, phosphate, and silicate in the southern Yellow Sea, 1980-2012: sources and seaward gradients. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 163: 44—55

Moisan J R, Moisan T A, Abbott M R, 2002. Modelling the effect of temperature on the maximum growth rates of

phytoplankton populations. Ecological Modelling, 153(3): 197—215

Shelford V E, 1913. Animal communities in Temperate America as Illustrated in the Chicago Region. Chicago: University of Chicago Press

Steele J H, 1962. Environmental control of photosynthesis in the sea. Limnology and Oceanography, 7(2): 137—150

Zhao J, Jiang P, Qin S *et al*, 2015. Genetic analyses of floating *Ulva prolifera* in the Yellow Sea suggest a unique ecotype. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 163: 96—102

NUMERICAL SIMULATION AND FORECASTING OF DRIFT, GROWTH, AND DEATH OF *ENTEROMORPHA* IN THE YELLOW SEA

HE En-Ye[1], JI Xuan-Liang[1], GAO Shan[1], ZHAO Liang[2], WANG Yu-Heng[2], LI Yun[1], YANG Jing[1]

(1. *National Marine Environmental Forecasting Center*, *Key Laboratory of Research on Marine Hazards Forecasting*, *Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China*, *Beijing* 100081, *China*; 2. *College of Marine and Environmental Sciences*, *Tianjin University of Science and Technology*, *Tianjin* 300457, *China*)

Abstract A model of *Enteromorpha* drifting in the Yellow Sea (YS) was proposed, which is coupled with the life cycle of *Enteromorpha*. Using the Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) reanalysis data, the Chinese Global operational Oceanography Forecasting System (CGOFS) reanalysis data, and the Climate Forecast System (CFS) data, combined with green tide remote sensing data of the National Satellite Ocean Application Service (NSOAS), the drifting path and relative biomass of *Enteromorpha* in the YS in 2016 and 2019 were simulated. The modeled drifting path, coverage area, and relative biomass of *Enteromorpha* in the YS were consistent with the monitoring results in 2016, indicating that the model was able to depict the significant features of the *Enteromorpha* development trend. The model was applied to predict the trend of *Enteromorpha* in 2019 using CFS forecast data. The forecast results indicate the *Enteromorpha* in 2019 would last longer with wider coverage, and drift more northerner by easterly than those of other years. The results in 2019 show a reasonable agreement with the satellite observed results, which means the model has good applicability for real case forecast *Enteromorpha* bloom in the YS.

Key words *Enteromorpha*; ecosystem dynamics; *Enteromorpha* forecast; numerical simulation; Yellow Sea