

2018 年黄海浒苔分布特征及动力机制分析

韩君君¹, 黄惠明¹, 张薇娜¹, 林伟波²

(1. 河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 江苏省海涂研究中心, 江苏 南京 210098)

摘要: 为揭示 2018 年黄海浒苔发生和聚集的动力学成因, 通过 MODIS L1B 影像数据和归一化植被指数法(NDVI)获取浒苔发生的初始时刻和位置。以三维水流动力模型为基础, 设立风海流、潮流以及二者共同作用的对照实验, 分析各要素对浒苔粒子输移的影响。结果表明, 在风海流单独作用下, 浒苔向北迁移但未登陆; 在潮流动力单独驱动下, 浒苔净漂移量小, 较难向北发生净输移; 二者共同作用下, 浒苔粒子向北输移登陆, 后报轨迹与遥感图像对比吻合良好, 进一步验证了风在浒苔迁移过程中占主导作用。

关键词: 浒苔; 遥感监测; NDVI; 动力模型; 漂移路径

中图分类号: P76 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2020)06-0037-08

DOI: 10.11759/hyxx20191016002

浒苔近些年夏季频发于黄海海域江苏、山东沿岸, 给当地经济社会造成巨大影响, 被认为是世界上规模最大的绿潮^[1-3]。在围绕其开展的一系列研究中, 起源与发生机制一直是焦点问题。

绿潮浒苔暴发强度大、覆盖范围广, 传统的观测手段难以同步监测, 遥感技术便逐渐应用于浒苔观测。中分辨率光谱成像仪(MODIS)是进行浒苔观测的主要传感器之一, 在历年浒苔研究中发挥重要作用^[4]。研究表明, MODIS 数据第 1 波段和第 2 波段对蓝绿藻浓度变化敏感, 在无云条件下可通过卫星影像真彩色合成对近岸水体及内河地区的水华现象进行探测研究^[5-7]。段洪涛等^[8]基于遥感数据提取不同时期的太湖蓝藻, 验证了 MODIS 数据监测藻类浮游植物的可行性。浒苔作为一种跨区域海洋生态灾害, 海洋动力场及气象条件是影响其迁移的主要因素, 利用数学模型模拟浒苔路径, 可弥补遥感监测在极端天气下的局限性^[9]。Lee 等^[10]基于 ROMS 环流模式, 利用拉格朗日法追踪模拟了浒苔漂移路径并分析其影响因子。Son 等^[11]根据 GOCI 卫星观测, 分析 2011 年浒苔漂移路径, 重点关注了台风过境期间浒苔分布变化情况。Bao 等^[12]基于 FVCOM 模拟了 2012 年浒苔的漂移路径。乔方利等^[13]利用三维海浪-潮流-环流耦合数值模式, 分析风场和海洋表层流场共同作用下的浒苔漂移路径, 赵昌等^[14]基于此研究建立高分辨率黄海浒苔漂移输运模式, 有效模拟出浒苔暴发区漂流浮标运动状况。李曰嵩

等^[15]利用三维海洋模型模拟了风和流作用下的浒苔漂移过程, 认为二者共同作用使浒苔聚集。陆荣洋等^[16]分析 2015 年黄海浒苔灾害的发展演变过程及时空分布特征, 并对比其与往年发展过程的差异。王萌等^[17]对 2016 年黄海浒苔信息进行监测, 认为浒苔大量生长后盛行风向是其漂移的主要驱动力。王宗灵等^[18]围绕近年来关于黄海浒苔的研究分析了影响其发生的生物学特征和环境驱动机制, 进一步说明浒苔受表层流和风的作用由南向北运移。上述研究均基于 2016 年之前某特定年份分析浒苔漂移路径以及影响因素。本文选取 2018 年相关资料, 使用 MODIS 遥感影像观测该年黄海海域浒苔的分布特征, 同时利用三维模型模拟了 2018 年夏季黄海浒苔绿潮的输移路径, 并分析影响其输移的动力因素, 以期数值模拟方法后报浒苔漂移路径及溯源提供研究基础。

1 研究方法

1.1 卫片反演

MODIS 是地球观测系统卫星(EOS)上搭载的光

收稿日期: 2019-10-16; 修回日期: 2019-11-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(51979096)

[Foundation: The National Natural Science Foundation of China, No. 51979096]

作者简介: 韩君君(1994-), 女, 海南海口人, 硕士研究生, 主要从事河口海岸及近海工程水动力环境等研究, E-mail: hanjun@hhu.edu.cn; 黄惠明, 通信作者, E-mail: hhm@hhu.edu.cn

学传感器, 有 250 m, 500 m 和 1 000 m 三种空间分辨率, 包含 36 个光谱通道, 波长范围 0.4~14.4 μm , 实现了从可见光到热红外波段的全光谱覆盖, 其中红外(0.620~0.679 μm)和近红外(0.84~0.876 μm)两个波段主要应用于植物叶绿素的吸收、云和植物以及土地覆盖等领域。文中所用 EOS 卫星遥感数据取自 <https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>, 选用分辨率为 500 m 的 MODIS L1B 数据。数据预处理主要包括几何校正、数据格式转换以及大气校正等。

在可见光、短波红外以及近红外波段合成的 RGB 彩色影像上, 海水呈黑色或深蓝色, 而浒苔水体常呈现为翠绿色, 利用这一光谱特征可以区分正常海水和浒苔水体。归一化植被指数法(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)能有效提取浒苔信息, 同时减少大气和云的影响^[19]。NDVI 值即近红外波段与可见光波段数值之差与数值之和的比值, 计算如式(1)所示:

$$I_{\text{NDVI}} = \frac{b_2 - b_1}{b_2 + b_1}, \quad (1)$$

式中, b_1 和 b_2 分别表示 MODIS 数据中近红外波段和红波段的遥感反射率, 为了避免计算时波段溢出, 采用浮点运算。

1.2 模型配置与验证

以江苏山东为中心建立大范围中国沿海三维水流数学模型, 南北范围 29.0°—41.0°N, 东西范围 117.0°—

141.0°E, 计算时间 2018 年 6 月 1 日至 2018 年 7 月 25 日。水平方向采用无结构化三角形网格(图 1), 涡黏系数使用 Smagorinsky 公式^[20]计算。垂向为 σ 坐标系, 涡黏系数采用 $\kappa - \varepsilon$ 紊流模型计算。模型采用冷启动模式驱动。边界条件设置陆地边界和水域开边界, 如图 1 所示, 边界 1 为陆地边界, 包括杭州湾以上的中国沿海以及朝鲜半岛西边界; 边界 2 和 3 分别为水域东边界和南边界, 其潮位由全球潮波模型预报而得。模型不考虑温度和盐度的影响, 气象资料源自 NCEP(<https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html>)。

浒苔漂移模型在三维水动力模块的基础上, 耦合基于拉格朗日法的粒子追踪模块。该模块可模拟粒子在对水体对流、扩散作用下随时间运动过程和模拟时段内的运动轨迹。浒苔粒子释放的初始位置如图 1 所示。风力和海流的共同作用下, 浒苔质点的初始位置(x_0, y_0)经过时间 Δt 后漂移到新的位置(x_i, y_i):

$$\begin{cases} x_i = x_0 + \sum_{i=1}^n (u_{ti} + u_{wi}) \Delta t \\ y_i = y_0 + \sum_{i=1}^n (v_{ti} + v_{wi}) \Delta t \end{cases}, \quad (2)$$

式(2)中, u_{ti}, v_{ti} 分别为 i 时刻仅在潮流作用下质点的流速; u_{wi}, v_{wi} 分别为 i 时刻仅在风海流作用下质点的流速^[21]。

从江苏近海海洋综合调查与评价专项资料中选取大丰港潮位过程及测站 Y1 和 Y5 的大小潮实测流速过程作为验证, 限于篇幅, 流速验证仅给出大潮

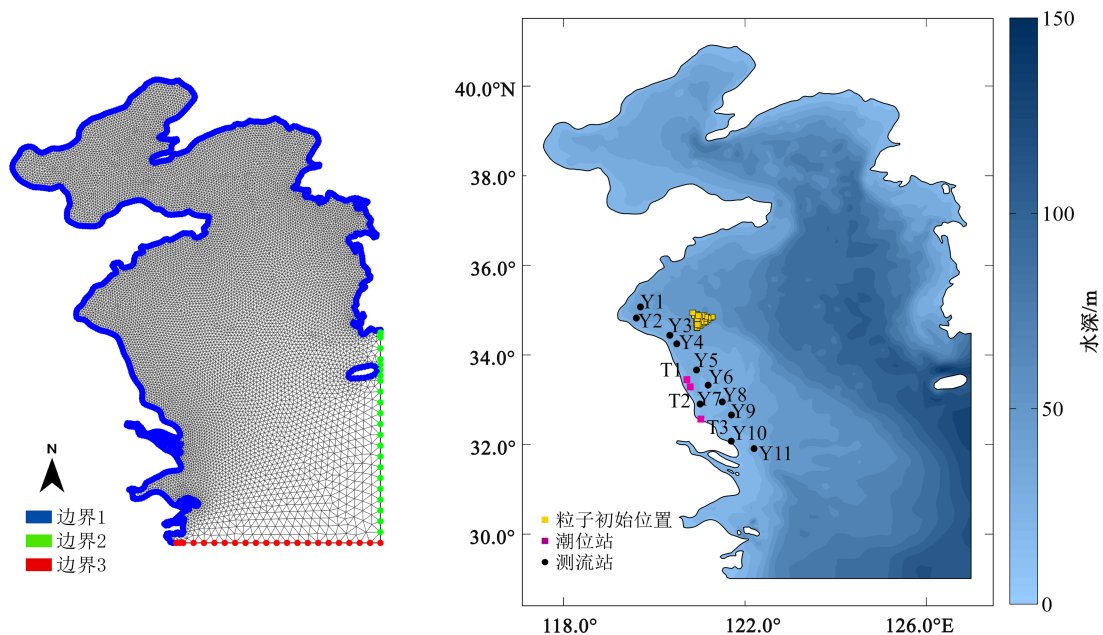


图 1 模型区域及点位

Fig. 1 Bathymetry of the simulation area and locations of hydrological gauging stations

流速验证过程,测站分布如图 1 所示。潮位及流速验证情况如图 2—图 4。

图 2—图 4 的验证结果表明,潮位站 T2 的潮位及测站 Y1、Y5 的流向验证都可达到较高精度,而分层流速验证情况存在略微误差,主要和江苏沿海复杂的地形有关,辐射沙脊群区域水道纵横且地形变化较大,受测量等各种原因限制,模型采用的地形数据不能完全还原辐射沙脊群区域水下地形。对于大范围的研究区域,以上模型的率定与验证表明:水动力模型选取的计算参数及物理参数基本合理,能够较好模拟水动力场特征,可以为粒子追踪模块绿潮漂移扩散计算提供基本的水动力场输入条件。

2 结果分析

2.1 卫片反演结果

实验表明浒苔覆盖区域在 NDVI 图上通常表现

为高亮水体,如图 5 所示。图 5 展示了 2018 黄海海域浒苔从起源、生长,再到大规模暴发,最终逐渐消亡的过程。遥感影像最早监测到的浒苔小面积聚集现象出现在 6 月初,2018 年 6 月 3 日的卫星图片可以看到苏北浅滩已有零星浒苔,无集中分布的区域,在连云港外海有明显小面积聚集现象。随着时间的推移逐渐发展生长,覆盖海域向北向东蔓延,开始形成分布离散的条状浒苔。到 6 月 24 日大规模暴发,聚集于黄海大部分海域,呈大量分布离散的条带状浒苔,横跨江苏连云港、山东日照、青岛、海阳等海域,距离海岸相对较近。由于打捞和自然死亡等原因,7 月中旬浒苔分布范围开始减小。至 7 月 25 日,只有在青岛附近外海海域监测到零星浒苔分布,随后逐步消亡直至全部消失。整体来看 2018 年夏季黄海浒苔的输移路径呈向北靠岸发展形势,历经起源、生长、暴发和消亡等阶段,整个持续过程历时 2 个月左右。

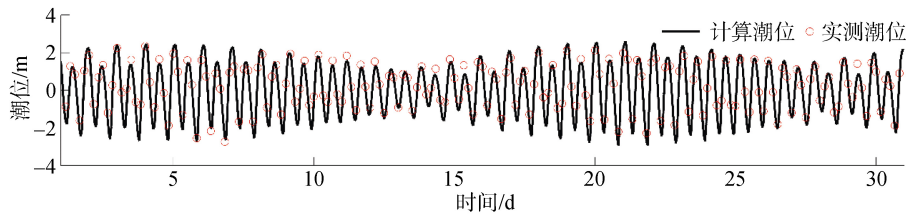


图 2 潮位站 T2(大丰港)潮位

Fig. 2 Comparison between simulated results and measured data for water level at T1 station

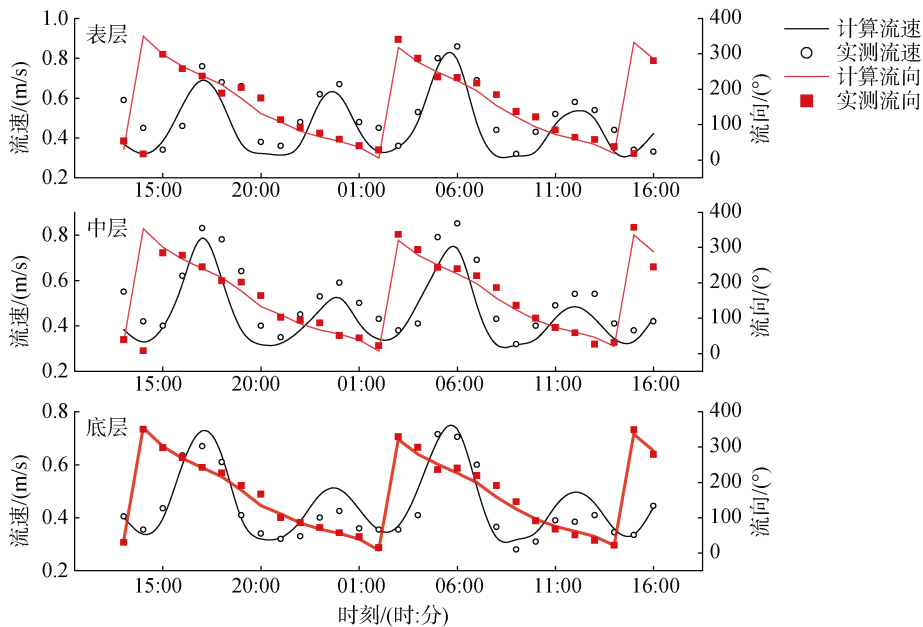


图 3 定点连续测站 Y1 分层流速流向对比图

Fig. 3 Horizontal flow velocity and direction at different depths for continuous fixed observation station Y1

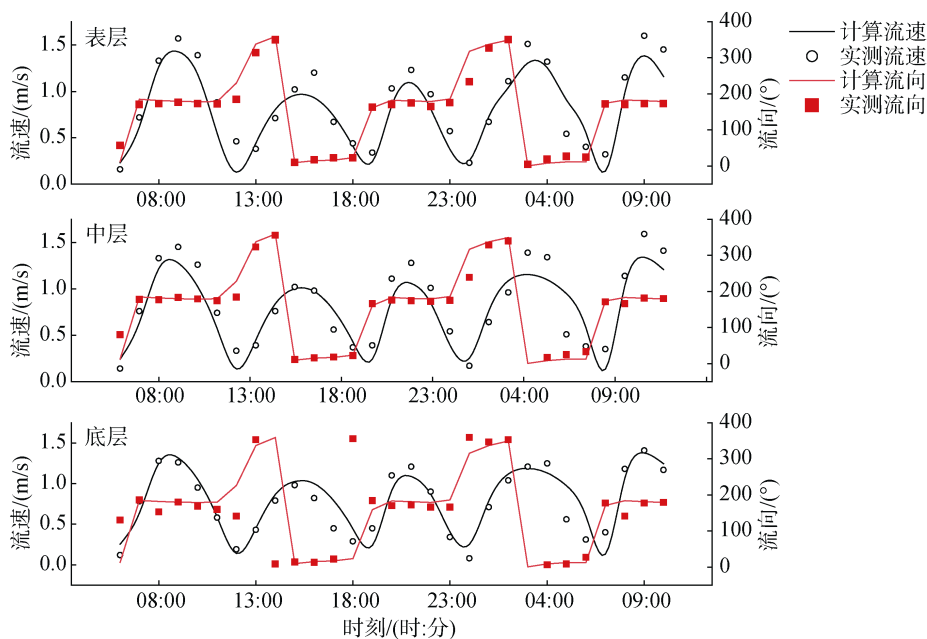


图 4 定点连续测站 Y5 分层流速流向对比图

Fig. 4 Horizontal flow velocity and direction in different depths of continuous fixed observation station Y5

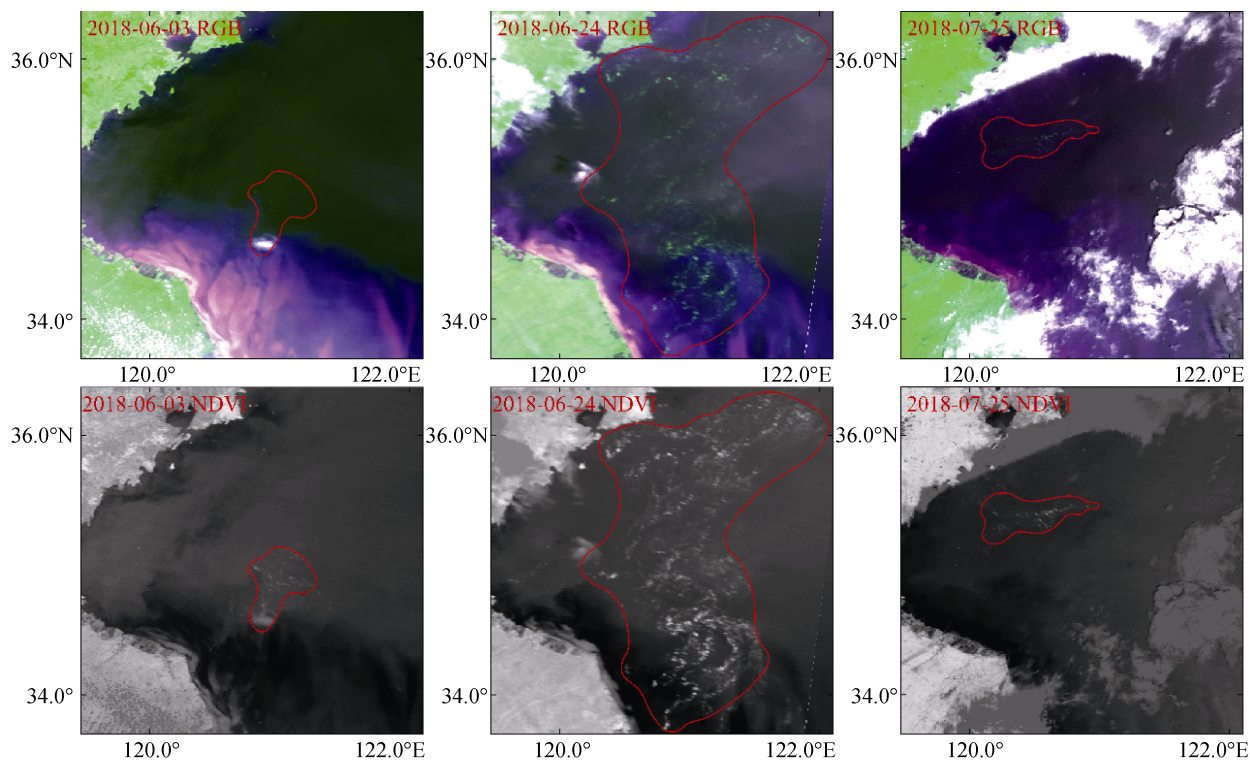


图 5 2018 年黄海浒苔分布 RGB 和 NDVI 比较

Fig. 5 RGB images derived from multi-spectral images and the NDVI distribution in the Yellow Sea in summer 2018

2.2 浒苔后报结果

本次模拟仅模拟浒苔粒子在海表面的迁移过程, 粒子大小和个数均不随着时间改变, 暂不考虑浒苔

在实际迁移过程中的生长和死亡, 以及因此产生的浒苔覆盖度的变化。粒子追踪模拟虽然不能完整的展现绿潮暴发过程, 但是从粒子的覆盖范围与运动趋势来看, 浒苔粒子运动轨迹和实际输移路径较为一

致。如图 6 所示, 分别选取模型中 2018 年 6 月 24 日 11: 00 和 2018 年 7 月 16 日 11: 00 两个时刻的模拟结果, 与过境时间较为接近的 EOS 卫星影像做浒苔迁移

情况对比, 结果表明模拟得到的浒苔粒子运动趋势与卫星遥感监测得到的浒苔运动结果基本一致, 即 6 月下旬大规模暴发, 7 月中旬向北逐渐靠岸进而登陆。

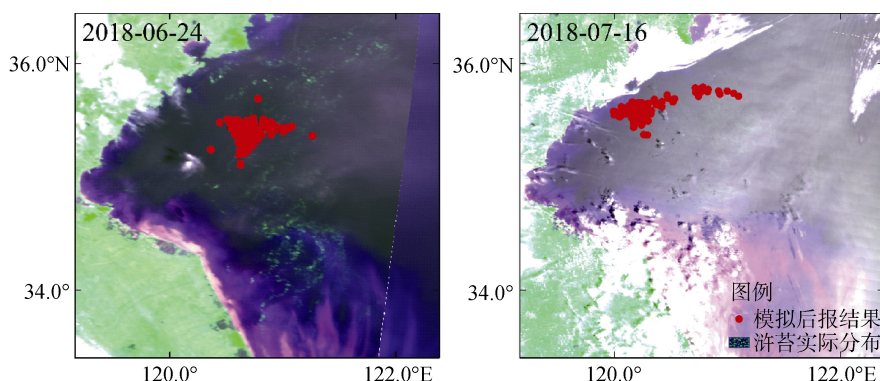


图 6 浒苔实际分布位置与模拟后报结果对比(其中浒苔实际分布情况详见图 5)

Fig. 6 Comparison of the monitoring locations of *Enteromorpha* and the simulated locations of water particles (the monitoring locations of *Enteromorpha* are shown in Fig. 5)

2.3 浒苔漂移成因分析

风场是海洋气象中常见的自然现象, 本文主要研究风海流及潮流对浒苔迁移路径的影响。图 7 选取模型中与卫星影像监测时间相对应的模拟结果, 分别展示了在风海流、潮流以及二者共同驱动下浒苔粒子的漂移路径。根据卫星影像(图 5)。显示情况, 选取浒苔漂移模型中粒子释放的初始时刻为 6 月 3 日, 初始位置为连云港外海, 一次性小面积释放粒子。结果表明: 在风海流及潮流动力强迫下, 粒子(图 7 中红色粒子)整体往西北方向靠岸运输, 直至山东沿岸附近登陆, 其运动趋势与卫星

图片监测到的实际浒苔漂移路径大致吻合; 关于模型中在风海流和潮流共同作用下粒子随时间变化的分布状况, 6 月 24 日粒子较初始位置处分布略为分散, 距离山东江苏海岸也更近, 到 7 月 25 日粒子已在山东沿海靠岸登陆, 分布范围扩大且逐渐成为条带状。仅在潮流动力强迫下的绿潮浒苔迁移模型中, 粒子(图 7 中紫色粒子)只随海流做往复运动, 不会出现明显分散输移现象, 也不会向北向东发生净输移。仅在风海流单独作用下, 粒子(图 7 中黄色粒子)运动呈现整体向北分散漂移趋势, 但与风海流及潮流共同强迫下的粒子相比较, 不会靠岸登陆。

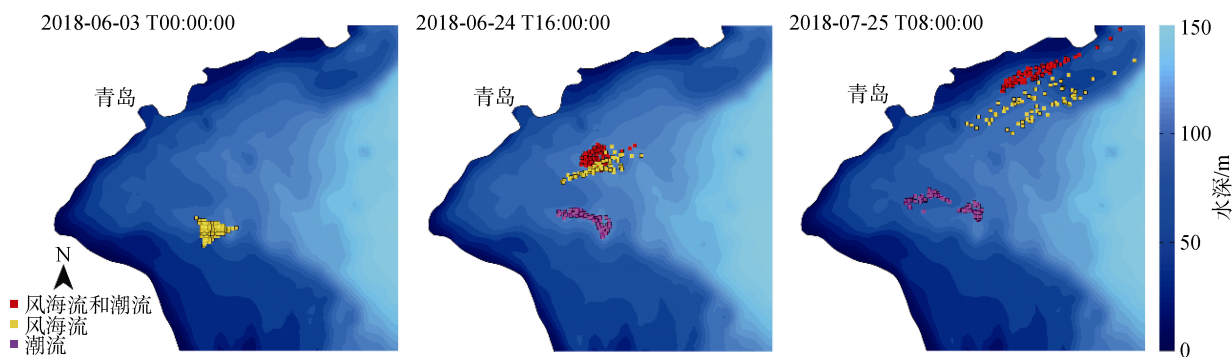


图 7 风海流、潮流及共同驱动下粒子的位置分布情况

Fig. 7 Distribution of water particles in the hindcast simulations with the external force of tides and winds

为更直观的监测浒苔粒子漂移情况, 选取连云港外海初始区域内单个粒子的轨迹(图 8)分析其运动。图中红色轨迹展示了风海流及潮流水动力共同强迫

下粒子的运动, 2018 年 6 月 3 日至 7 月 25 日, 粒子的平均迁移速度为 3.9 km/d, 运动轨迹先向北靠岸移动进而北上, 与遥感监测浒苔先向西北靠岸暴发

登陆进而北上消亡大致同步。其中, 橙色框内为 6 月 25 日至 7 月 12 日左右的粒子轨迹, 相较于该时段之前和之后的轨迹都更密集。由风场资料可知, 该段时间内的常风向为东南风, 风力 3—5 级, 次常风向为东风及南东南风, 风速的北向分量较小, 由此导致了浒苔粒子的运动轨迹较密集, 向北的净输移量较小。6 月 25 日前的常风向为东南风, 风力 4—5 级, 次常风向为南风, 风速的北向分量持续较大, 导致浒苔粒子向北的净输移量大。7 月 12 日之后常风向为南风, 风力 4—5 级, 次常风向为西南风, 此外, 受其他方向来风影响很小, 故粒子向北的净输移量相对较大。黑色轨迹展示了仅在潮流水动力强迫下粒子的运动, 在潮流动力为主的天气情况下, 粒子往西北方向有较小的输移, 浒苔日净漂移量小, 较难往北发生净输移。蓝色轨迹展示了仅在风海流强迫下粒子的运动, 粒子的平均迁移速度为 3.6 km/d, 向北输移幅度较大, 与风海流和潮流共同驱动下的粒子轨迹相比, 运动轨迹更偏东北方向。进一步表明风和流共同影响浒苔的迁移, 且风的影响在浒苔输运过程中占主导地位。

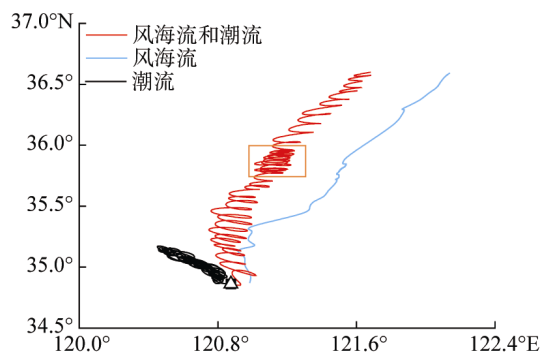


图 8 风海流、潮流及共同驱动下粒子运动轨迹

Fig. 8 Trajectory of the selected water particle in the hindcast simulation with the external force of tides and winds

3 结论

由于海上观测资料较少, 本文主要选取无云或者少云情况下的 MODIS L1B 影像数据分析了 2018 年黄海海域浒苔的分布特征以及风和流对其向北向东运移的影响, 结果表明浒苔密集区在六月初位于连云港外海, 先向北移动, 在青岛沿岸登陆后, 再沿山东半岛南部向东北移动, 其中风海流是影响浒苔输移的主要动力因素。本文的模拟是研究浒苔生态动力学的初步阶段, 仅考虑风海流及潮流作用对浒苔输

运的影响, 对于浒苔在漂移过程中的生长和消亡等生物过程还未涉及。同时, 浒苔初始位置的选取也会对浒苔路径的后报及预报产生影响, 因此精确选取浒苔的初始位置和初始时刻非常重要, 这就需要在以后的研究中提高遥感监测技术, 并加强与数值模拟之间的有机结合。

参考文献:

- [1] 张寒野, 吴望星, 宋丽珍, 等. 条浒苔海区试栽培及外界因子对藻体生长的影响[J]. 中国水产科学, 2006, 13(5): 781-786.
Zhang Hanye, Wu Wangxing, Song Lizhen, et al. Trial and field cultivation of *Enteromorpha clathrata* and effects of ecological factors on its growth[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2006, 13(5): 781-786.
- [2] Lotze H K, Schramm W. *Ecophysiological* traits explain species dominance patterns in macroalgal blooms[J]. Journal of Phycology, 2000, 36(2): 287-295.
- [3] Zhou Mingjiang, Liu Dongyan, Anderson D M, et al. Introduction to the special issue on green tides in the Yellow Sea[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2015, 163: 3-8.
- [4] 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.
- [5] Yang Dingtian, Pan Delu, Zhang Xiaoyu, et al. Detection of algal bloom within situ and MODIS in lake Taihu, China[C]//Charles R, Rosalia S. Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, and Large Water Regions 2005(5977). Bruges, Belgium: Proceedings of SPIE, 2005: 431-439.
- [6] Kutser T, Metsamaa L, Vahtmäe E, et al. Suitability of MODIS 250 m resolution band data for quantitative mapping of cyanobacterial blooms[J]. Proceedings of the Estonian Academy of Sciences Biology Ecology, 2006, 55(4): 318-328.
- [7] 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.
- [8] 段洪涛, 张寿选, 张渊智. 太湖蓝藻水华遥感监测方法[J]. 湖泊科学, 2008, 20(2): 145-152.
Duan Hongtao, Zhang Shouxuan, Zhang Yuanzhi.

- Cyanobacteria bloom monitoring with remote sensing in Lake Taihu[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2008, 20(2): 145-152.
- [9] 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.
- [10] Lee J H, Pang I C, Moon I J, et al. 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[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116(C12): C12036.
- [11] Son Y B, Min J E, Ryu J H. Detecting massive green algae (*Ulva prolifera*) blooms in the Yellow Sea and East China Sea using Geostationary Ocean Color Imager (GOCI) data[J]. *Ocean Science Journal*, 2012, 47(3): 359-375.
- [12] Bao Min, Guan Weibing, Yang Yang, et al. Drifting trajectories of green algae in the western Yellow Sea during the spring and summer of 2012[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2015, 163: 9-16.
- [13] 乔方利, 王关锁, 吕新刚, 等. 2008 与 2010 年黄海浒苔漂移输运特征对比[J]. *科学通报*, 2011, 56(18): 1470-1476.
Qiao Fangli, Wang Guansuo, Lü Xingang, et al. Drift characteristics of green macroalgae in the Yellow Sea in 2008 and 2010[J]. *Chinese Sci Bull*, 2011, 56(18): 1470-1476.
- [14] 赵昌, 尹丽萍, 王关锁, 等. 黄海浒苔漂移输运模式的建立与应用[J]. *海洋与湖沼*, 2018, 49(5): 1075-1083.
Zhao Chang, Yin Liping, Wang Guansuo, et al. The modelling of *Ulva prolifera* transport in the Yellow Sea and its application[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2018, 49(5): 1075-1083.
- [15] 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 Environmental Science*, 2014, 33(5): 772-776.
- [16] 陆荣洋, 申辉, 李大伟. 2015 年黄海浒苔演变特征的遥感分析[J]. *海洋科学*, 2016, 40(10): 134-142.
Lu Rongyang, Shen Hui, Li Dawei. Remote sensing of the Yellow Sea green tide evolution in 2015[J]. *Marine Sciences*, 2016, 40(10): 134-142.
- [17] 王萌, 郑伟, 李峰. Himawari-8 气象卫星黄海浒苔动态监测[J]. *应用气象学报*, 2017, 28(6): 716-723.
Wang Meng, Zheng Wei, Li Feng. Application of Himawari-8 data to *Enteromorpha prolifera* dynamically monitoring in the Yellow Sea[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2017, 28(6): 716-723.
- [18] 王宗灵, 傅明珠, 肖洁, 等. 黄海浒苔绿潮研究进展[J]. *海洋学报*, 2018, 40(2): 1-13.
Wang Zongling, Fu Mingzhu, Xiao Jie, et al. Progress on the study of the Yellow Sea green tides caused by *Ulva prolifera*[J]. *Haiyang Xuebao*, 2018, 40(2): 1-13.
- [19] 樊彦国, 白羽, 陈潘潘, 等. 青岛近海浒苔光谱特征研究[J]. *海洋科学*, 2015, 39(4): 87-91.
Fan Yanguo, Bai Yu, Chen Panpan, et al. Research of spectrum characteristics of *Enteromorpha* in Qingdao offshore[J]. *Marine Sciences*, 2015, 39(4): 87-91.
- [20] Smagorinsky J. General circulation experiments with the primitive equations[J]. *Monthly Weather Review*, 1963, 91(3): 99-164.
- [21] Zhang Weina, Huang Huiming, Wang Yigang, et al. Mechanistic Drifting forecast model for a small semi-submersible drifter under tide-wind-wave conditions[J]. *China Ocean Engineering*, 2018, 32(1): 99-109.

Distribution characteristics and dynamic mechanism of *Enteromorpha prolifera* in the Yellow Sea in 2018

HAN Jun-jun¹, HUANG Hui-ming¹, ZHANG Wei-na¹, LIN Wei-bo²

(1. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Tidal Flat Research Center of Jiangsu Province, Nanjing 210098, China)

Received: Oct. 16, 2019

Key words: *Enteromorpha prolifera*; remote sensing monitoring; Normalized Difference Vegetation Index(NDVI); dynamic model; drifting path

Abstract: In recent years, *Enteromorpha prolifera* outbreaks have become frequent in the Yellow Sea in summer. These outbreaks severely affect the coastal ecological environment and cause huge social and economic losses. In this study, MODIS L1B image data and Normalized Difference Vegetation Index method (NDVI) were used to obtain the initial time and position of *Enteromorpha prolifera*. Using a three-dimensional hydrodynamic model, a controlled experiment of wind current and tidal current and their combined effects was performed to analyze the influence of various factors on the transport of *Enteromorpha prolifera*. The results show that *Enteromorpha prolifera* particles drift ashore northward over a large distance and do not land only under the force of winds. When the weather condition is dominated by tidal current power, the net drift of *Enteromorpha prolifera* particles is small, and its northward movement is difficult. *Enteromorpha prolifera* particles drift ashore northward and land under the combined force of winds and tides. The drift trail in the hindcast is in good agreement with the remote-sensing images, and the wind played a dominant role in the migration process.

(本文编辑: 刘珊珊)