

黄海浒苔漂移运输模式的建立与应用*

赵 昌^{1, 2, 3} 尹丽萍^{1, 2, 3} 王关锁^{1, 2, 3} 乔方利^{1, 2, 3①}
王 刚^{1, 2, 3, 4} 夏长水^{1, 2, 3}

(1. 国家海洋局第一海洋研究所 青岛 266061; 2. 青岛海洋科学与技术国家实验室区域海洋动力学与数值模拟功能实验室 青岛 266237; 3. 国家海洋局海洋环境科学和数值模拟重点实验室 青岛 266061; 4. 国家海洋局数据分析与应用重点实验室 青岛 266061)

摘要 本文利用 NCEP GFS 预报风场和中国近海高分辨率三维 MASNUM 海浪-潮流-环流耦合海洋数值预报系统的预报数据, 建立黄海浒苔漂移运输模式, 用于黄海浒苔溯源和漂移运输数值模拟研究。使用 2009 年 5 月份黄海表层漂流浮标数据和 2012 年 MODIS 卫星遥感浒苔漂移分布资料对所建立的漂移运输模式进行验证, 结果表明所建立的模式能够有效的模拟出浒苔暴发区漂流浮标运动状况, 并能够有效地模拟出 2012 年浒苔漂移运输过程。最后运用所建立的模式开展 2008 年和 2010 年浒苔漂移运输过程, 模拟结果与文献报道的卫星观测结果一致。模拟结果表明, 受海洋表层流影响两年浒苔特征显著不同: 2010 年浒苔影响海域明显小于 2008 年, 且 2010 年浒苔主体没有大规模在青岛近岸堆积。

关键词 黄海; 浒苔; 漂移运输模式; 数值模拟

中图分类号 P731 **doi:** 10.11693/hyhz20180400089

我国黄海海域自 2008 年以来至今, 每年 4—8 月份有大规模的漂浮浒苔暴发。每年为了确定浒苔的影响范围和程度, 国家在浒苔暴发期投入大量人力物力开展监测, 主要手段有船只、飞机和卫星遥感(吴孟泉等, 2014; 王萌等, 2017)。浒苔无毒, 但漂浮状态的浒苔会在漂移过程中大量增殖, 每年在山东半岛沿岸堆积, 严重危害海滨城市的旅游业和养殖业(刘英霞等, 2009; 刘佳等, 2017)。在海中漂浮的浒苔会在海流的作用下沉降至海底, 给海洋造成更严重的污染, 其沉降分布与海流的辐聚辐散作用相关(Lü *et al.*, 2008; Qiao *et al.*, 2009)。

关于浒苔的来源的问题, 人们发现浒苔并不是山东半岛本地种, 而是来自苏北浅滩(乔方利等, 2008; 刘峰等, 2012)。有研究(Qiao 等, 2011; 乔方利等, 2011)通过数值模拟推测黄海浒苔起源地应该在苏北浅滩, 其结果也被后来的观测与研究证实(王宗灵等, 2018)。

关于浒苔暴发期间的移动路径和分布状况, 以往的研究表明浒苔从苏北浅滩随着海流向北移动(Qiao *et al.*, 2011; 吴孟泉等, 2014; 矫新明等, 2017), 在此过程中遇到苏北浅滩外侧的上升流系(Lü *et al.*, 2010), 从而获得足够的营养盐并快速增殖, 其移动路径和堆积位置与当年的风场状况有关。

自 2008 年以来, 人们针对黄海浒苔灾害开展了多学科的研究。研究热点集中在生物生态学特征、遥感与调查资料相结合分析浒苔的分布和输运状况, 以及评估浒苔对生态环境和地方经济带来的影响等。以往的研究表明, 浒苔的漂移运输和沉降主要受海洋动力学因素控制(李峤, 2010; Qiao *et al.*, 2011)。结合海洋环境数值模式所建立的浒苔漂移模式恰恰可以开展这方面的研究工作, Lee 等(2011)基于 ROMS 环流模式, 利用拉格朗日追踪方法模拟了浒苔漂移的路径并分析其影响因子。Son 等(2012)利用拉格朗

* 鳌山科技创新计划项目, 2016ASKJ02 号; 国家自然科学基金项目, 41506035 号。赵 昌, 助理研究员, E-mail: zhaoc@fio.org.cn

通讯作者: 乔方利, 博士生导师, 研究员, E-mail: qiaofl@fio.org.cn

收稿日期: 2018-04-11, 收修改稿日期: 2018-07-24

日追踪方法及 GOCI 卫星观测, 分析了 2011 年浒苔漂移路径, 特别是台风过境期间浒苔分布变化。Hu 等 (2010) 基于 FVCOM 模式, 分析了浒苔的发源地。Bao 等 (2015) 基于 FVCOM 模拟了 2012 年浒苔的漂移路径。然而, 上述研究只是针对特定的年份或者事件对浒苔的路径、分布进行分析研究, 或者模式模拟范围有限, 无法针对浒苔的暴发、漂移、分布进行大范围系统研究。本文建立了一个高分辨率大气-海洋环流-海浪驱动下的黄东海浒苔漂移模式, 并利用所建立的模型开展浒苔漂移数值研究, 以不断改进浒苔漂移预测的精度。

1 浒苔漂移模式的建立

1.1 海洋耦合模式与大气强迫

浒苔在海面上漂浮, 自身没有运动能力, 因而其漂移过程完全依赖于所处位置的大气与海洋动力环境。本文应用国家海洋局第一海洋研究所建立的 MASNUM 海浪-潮流-环流耦合海洋数值预报系统作为本文黄东海浒苔漂移运输模式的基础。预报系统所需的气象预报场来自 NCEP 的 GFS 预报 (<http://www.ncep.noaa.gov/pmb/products/gfs/>)。MASNUM 海浪-潮流-环流耦合预报系统的海浪模式采用 MASNUM 海浪数值模式 (Yuan *et al.*, 1991; 杨永增等, 2005); 海洋环流模式是采用 MPI 并行技术改造 (Wang *et al.*, 2010) 后的 POM 模式 (Blumberg *et al.*, 1987); 海浪-环流耦合采用 Qiao 等 (2004, 2010) 提出的非破碎波致混合的方案; 潮流-环流耦合采用在模式开边界上加入潮波输入的方式 (Lü *et al.*, 2010)。预报系统覆盖海区为 (15°—41°N, 105°—135°E), 空间分辨率为 (1/24)°×(1/24)°, 海洋环流模式垂向分为 30 层, 并对上层进行加密。海洋预报系统的开边界由相匹配的准全球和西北太平洋海区的海洋预报系统逐层嵌套获得 (Wang *et al.*, 2016)。潮汐边界条件由分辨率为 0.25°×0.25°的 TPXO.6 潮汐模式 (Egbert *et al.*, 1994) 结果插值得到。对系统预报结果进行了一系列对比检验, 结果表明预报系统对海温、海流的模拟能力令人满意 (Qiao *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2016)。同时也利用这一预报系统开展了一系列业务化应用 (Zhao *et al.*, 2015; Yin *et al.*, 2018)。

图 1 是耦合预报系统模拟的 2009—2017 年浒苔途径海区的表层多年月平均流场分布。从图中可以看出, 在浒苔暴发的月份, 海洋表层流场从苏北浅滩开始均为沿岸向北。35.0°—36.5°N 区域的沿岸表层流场多指向正北, 与东北-西南方向的海岸线相交, 这

是造成浒苔主要堆积在青岛及以南的山东半岛沿岸的主要原因。36°N 以北, 表层流逐渐转向东北, 与岸线平行, 因此青岛以北的山东半岛沿岸浒苔一般不会严重堆积。

1.2 黄海浒苔漂移运输模式

浒苔漂浮在海面, 受风、海浪和海流的共同作用, 故建立的浒苔漂移运输模式需同时包含以上各因素。目前为止人们仍然没有完全研究清楚浒苔的繁殖、生长和死亡的规律, 故本模式不考虑浒苔的生态繁殖与消亡过程, 而只将浒苔看作受风、海浪和海流共同作用下的被动漂移物体。考虑浒苔在水平方向上的物理运动过程, 其运动方程如下:

$$\frac{dx_i}{dt} = v_a(x_i, t) + Rv_d(x_i, t) + v_w(x_i, t), \quad (1)$$

式中, v_a 是海流赋予浒苔的速度; v_d 是风速, R 是风对浒苔的经验拖曳系数, $Rv_d(x_i, t)$ 就表达了风的拖曳给予浒苔的速度; v_w 是 Stokes 漂流, 它是由于海浪的非线性作用导致, 可直接由海浪模式预报的海浪参数计算得到。运动方程 (1) 采用如下的一阶公式求解:

$$x_i^{n+1} \cong x_i^n + \Delta t [v_a(x_i^n, t^n) + Rv_d(x_i^n, t^n) + v_w(x_i^n, t^n)], \quad (2)$$

通过漂移模式试验, x_i^n 为粒子 i 在第 n 个时刻所在位置, x_i^{n+1} 为粒子 i 在第 $n+1$ 个时刻所在位置, Δt 为两个时刻的时长, $v_a(x_i^n, t^n)$ 、 $v_d(x_i^n, t^n)$ 和 $v_w(x_i^n, t^n)$ 分别为第 n 个时刻粒子 i 所在位置海流速度、风速和 Stokes 漂流, 将 R 取为 0.02, 从而建立浒苔漂移模型。

本文采用的大气和海洋预报数据均为网格化数据, 与浒苔移动路径不一致。通过水平双线性插值的方法, 把预报的风场和流场数据插值到浒苔漂移点上, 然后进行模拟。本文所建立的浒苔模式为离线耦合模式; 使用的流场、风场和海浪 Stokes 漂流均来自预报系统, 该系统每 3 小时输出一次结果。所以模式计算时采用了时间插值的方式, 尽可能减小了时间分辨率不足的影响。

2 漂移预测数值模式应用

2.1 Argos 表面漂流浮标验证

Argos 表面漂流浮标是一种在海面漂移、利用 Argos 卫星系统定位、具有数据实时传输功能的海洋设备。Argos 浮标基于拉格朗日观点测量表层流速和

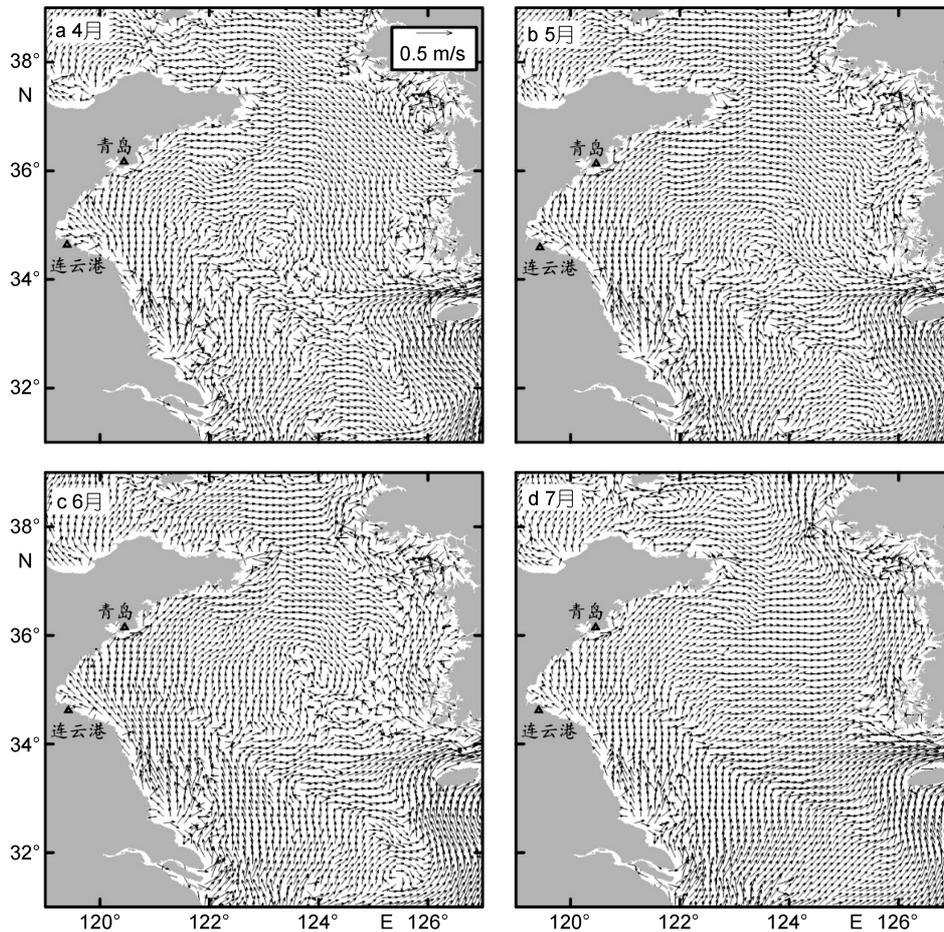


图 1 模拟南黄海月平均表层流场

Fig.1 Simulated monthly mean sea-surface current fields in the South Yellow Sea. a) April; b) May; c) June; d) July
注: a: 4月; b: 5月; c: 6月; d: 7月

海流方向, 基于这些实测资料, 可以进一步认识和了解观测海域的表层海流特征。Argos 表面漂流浮标在水面漂流时, 主要受到海流、波浪和风的作用, 与漂浮浒苔非常类似。

本文采用中国科学院海洋研究所 2009 年 5 月在西南黄海布放的 5 个 Argos 表面漂流浮标来验证浒苔运输模式。浮标设置的拖伞深度约为 10—15 米(李峤, 2010; Yuan *et al.*, 2017), 浮标详细信息见表 1。

表 1 Argos 漂流浮标主要参数
Tab.1 The main specifications of Argos floats in 2009

浮标编号	投放处水深(m)	拖伞深度(m)	投放日期	投放时间	投放坐标	
					经度(E)	纬度(N)
27076	35	15	20090518	18:40	122°58.7'	31°59.7'
27091	11	10	20090528	14:32	121°00.1'	33°59.9'
27078	11	11	20090528	14:32	121°00.1'	33°59.9'
27088	20	15	20090528	17:48	121°31.2'	34°00.1'
27077	20	15	20090528	19:44	122°01.1'	33°59.5'

漂流浮标和浒苔不完全相同, 受风和海浪 Stokes 漂流影响较小, 主要受拖伞所在整个深度流速控制。因而在开展模拟实验进行对比时, 公式(3)中海流选

取拖伞所在深度的海流, 风影响系数 R 降为 0.01。运用所建立的浒苔漂移预测数值模式对五个 Argos 表面漂流浮标进行预报, 分别在 24、48 和 72 小时后输出

漂移浮标的预报位置。浮标漂移路径中每天的最初时刻和位置作为下次预报的起始时刻和位置。对比预报的位置和浮标漂移的位置,模式在 24 小时、48 小时和 72 小时的平均模拟误差分别为 6.83 公里、12.37 公里和 23.08 公里,详情见表 2。这说明模式的 24 小时模拟能力较好。图 2 是 24 小时预报所得位置和

Argos 表面漂移浮标漂移位置误差分布图。从图中可以看出,24 小时预报误差大于 10 公里的概率很小。预报误差落在 3—7 公里这个区域的概率超过 50%,这与预报平均误差为 6.83 公里相符;误差在 0—10 公里的概率为 86.7%;误差在 0—17 公里的概率为 100%。

表 2 预报 Argos 位置平均误差
Tab.2 Average errors of the predicted location of the Argos

浮标编号	27076	27077	27078	27088	27091	平均误差
24 小时误差(公里)	8.20	5.11	6.00	7.13	7.69	6.83
48 小时误差(公里)	13.76	11.80	9.39	13.48	13.46	12.37
72 小时误差(公里)	25.54	22.82	20.74	23.00	23.17	23.08

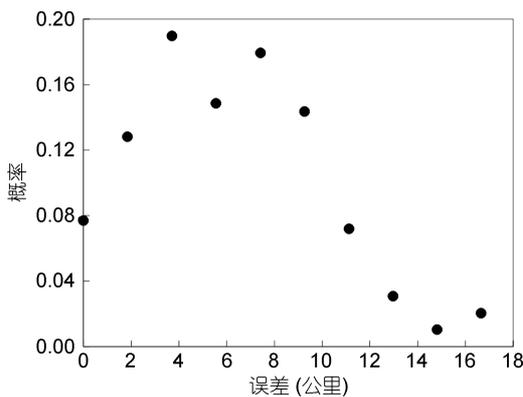


图 2 五个 Argos 漂流浮标 24 小时位置预报误差

Fig.2 Error distribution of the predicted locations of Argos floater drifted in 24h

为验证模式预报对长期运输的模拟能力,本文运用所建立的浒苔漂移预测数值模式对 5 个 Argos 漂移浮标进行长时间漂移路径预报。选取浮标漂移路径中一天的最初时刻和位置作为预报的起始时刻和位置。为分析方便,本文把漂移路径预报的结果分成两幅图显示:图 3a 为浮标 27076 和 27078 的预报路径,图 3b 为浮标 27077、27088 和 27091 的预报路径。

对 27076 浮标,本文从 2009 年 6 月 1 日 0 时开始作 41 天的浮标漂移路径预报。从图 3a 中可以看出,漂移模式对浮标漂移路径预报较好。在 6 月 10 日和 6 月 13 日,两个浮标漂移均发生了方向转换,模式对该过程的预报较好;在对 7 月初,浮标路径呈半圆形,模式对该现象也有一定的预报能力。对 27078 浮标,本文从 2009 年 6 月 15 日 0 时开始作 26 天的浮标漂移路径预报。从图 3a 中可以看出,漂移模式对浮标漂移路径预报较好,特别是 6 月 21 日至 6 月 30 日这十天时间里的预报路径几乎与实际路径重合。模式对

7 月初浮标漂移方向转换特征预报较精准,但在 6 月 16 日和 7 月 1 日模拟路径与实际路径有较大差异。对 27077 浮标,本文从 2009 年 6 月 10 日 0 时开始作 31 天的浮标漂移路径预报。从图 3b 中可以看出,漂移模式对浮标漂移路径预报较好,特别是在 6 月 25 日至 6 月 30 日的五天时间里预报路径几乎与实际路径重合。准确预测了 6 月 13 日和 7 月初浮标漂移方向的转换,但对于 7 月初浮标漂移方向转换时预报误差较大。对 27088 浮标,本文从 2009 年 6 月 10 日 0 时开始作 21 天的浮标漂移路径预报。从图 3b 中可以看出漂移模式对浮标漂移路径预报较好,特别是在 6 月 19 日至 6 月 28 日的十天时间里预报路径几乎与实际路径重合。对 6 月 13 日浮标漂移方向转换也能准确预报,但对于 6 月 13 日浮标漂移方向转换时预报误差较大。对 27091 浮标,本文从 2009 年 6 月 20 日 0 时开始作 21 天的浮标漂移路径预报。从图 3b 中可以看出漂移模式对浮标漂移路径预报较好,并对 7 月初浮标漂移方向转换特征有一定的预报能力,但对于 7 月初浮标漂移方向转换过程预报误差较大。

总体上看,本文所建立的浒苔漂移预测数值模式对 Argos 表面漂移浮标长时间漂移路径预报较为理想,特别是在漂移方向变化较小时,预报路径与实际路径几乎重合。但在漂移方向转换时,预报有一定的误差。主要原因是大气强迫场来自全球结果,对于局地风场突变过程尚难以精准预报;另外,与海洋环流数值模式所输出时间分辨率较粗也有一定关系。

2.2 浒苔溯源及其与 MODIS 结果对比

本文选取 MODIS 卫星数据来反演 2012 年浒苔的空间分布(Cui *et al.*, 2012),以确定浒苔起源地和时间。本文还将利用反演的浒苔分布来验证所建立的浒

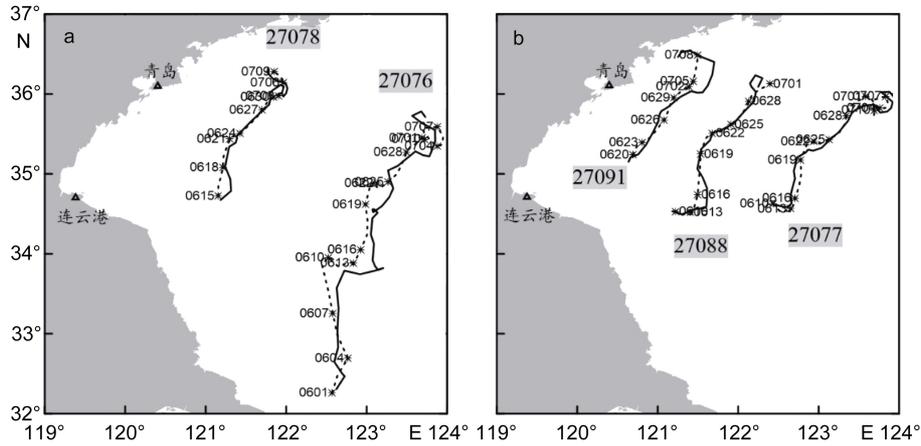


图 3 Argos 表面漂流浮标长时间位置预报
 Fig.3 The prediction of long-time location of the Argos floater
 注: 实线: 观测, 虚线: 预报(日平均)

苔漂移模式。

利用模式溯源可以推测浒苔起源地和时间, 文中认为模式回溯到发源地时间可作为浒苔的暴发时间。根据 2012 年 5 月 28 日 MODIS 卫星反演的浒

苔分布状况(图 4a), 利用模式追踪得到的 2012 年浒苔初始出现时间为 4 月 23 日, 地点为江苏浅滩。溯源所获取的浒苔初始暴发位置与观测结果较为一致(范士亮等, 2012; 王宗灵等, 2018)。

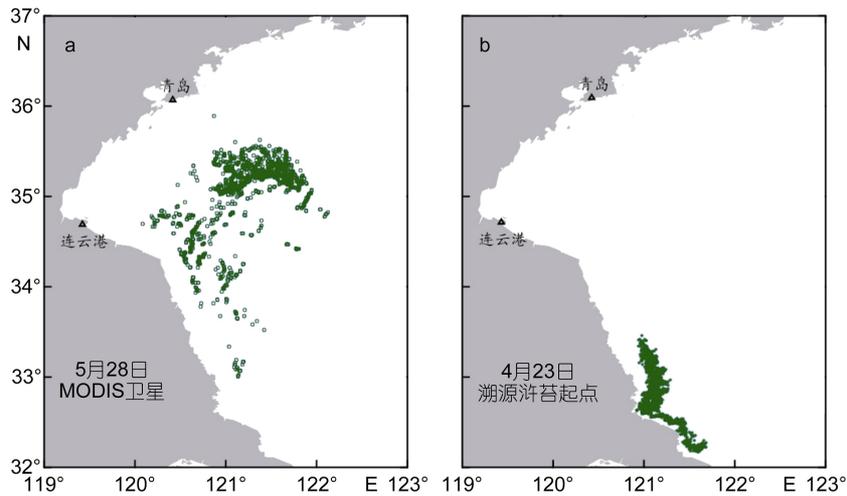


图 4 利用 2012 年 5 月 28 日卫星观测(a)溯源浒苔暴发的位置和时间(b)

Fig.4 The model predicted start time of *Ulva prolifera* retrieved from MODIS data on May 28, 2012 (a) and the initial position on April 28, 2012

基于由上面溯源数值实验获取的浒苔暴发位置和时间(图 4b), 利用所建立的浒苔漂移运输模式开展 2012 年浒苔漂移运输数值模拟, 并与 MODIS 反演的浒苔空间分布进行对比(图 5)。数值模拟实验中, 浒苔初始在 4 月 23 日溯源所获取的位置(图 4b)释放, 并利用模式预测其漂移的路径。图 5a、5b 和 5c 为使用当日 MODIS 卫星图像反演的浒苔空间分布。考虑到

卫星图像受天气影响, 并不能全部反演出所有的浒苔, 并且本文所建立的模式不包含浒苔的生长过程, 故所模拟出的浒苔空间分布(图 5d、5e 和 5f)与卫星图像有一定的差异。但是模拟所获取的浒苔最北的位置和 MODIS 卫星所反演的的位置一致并且范围相当, 且空间分布特征一致, 这表明本文所建立的模式能够较精准模拟预测浒苔在黄海的漂移运输过程。

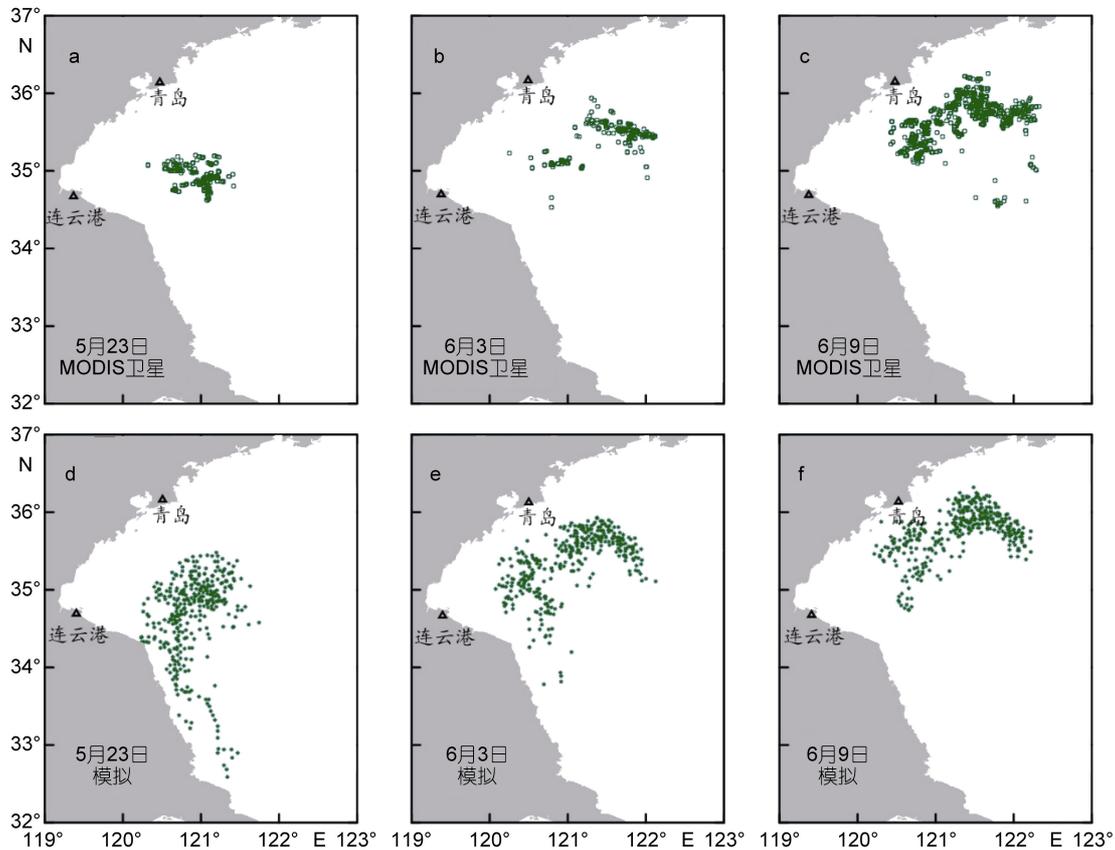


图5 MODIS 卫星观测(a、b 和 c)和模拟(d、e 和 f)2012 年 5—6 月浒苔分布

Fig. 5 MODIS (a, b, c) and simulated (d, e, f) distribution of *U. prolifera* in the Yellow Sea in 2012

2.3 2008 年和 2010 年浒苔漂移数值模拟

本文选取浒苔暴发对山东半岛影响较为严重的 2008 年和 2010 年开展模拟,进一步验证本文所建立模式的可靠性,并讨论这两年浒苔自源地开始漂移运输的全过程。模拟选取的浒苔源地和初始时间由上一节得到(图 4)。图 6 为模拟得到的 2008 年浒苔漂移运输过程。2008 年 5 月 20 日,浒苔主体在 34°—35°N、122°E 以西的位置,其前锋已超过 35°N;至 6 月 10 日,浒苔主体靠近山东半岛沿岸,影响范围扩大;6 月 20 日,已有很大一部分浒苔抵达山东半岛沿岸,向岸堆积态势显著;至 7 月 10 日,黄海漂浮浒苔主体在 36°N 以北,121°—123°E 的海区。至此浒苔对青岛的影响减弱,这与监测到浒苔在海洋中的分布和沿岸堆积时间一致(乔方利等, 2008; 吴孟泉等, 2014)。2010 年(图 7),浒苔整体漂移速度要慢于 2008 年,由于浒苔北移晚于 2008 和 2012 年,浒苔漂移至青岛外海的时间已进入 7 月,这一时间的海流主要指向东北(图 1),因此在 2010 年浒苔对青岛影响不大。至 5 月 20 日,浒苔主体在 33°—34°N、121°E 左右的海区;到

6 月 10 日,其主体漂移至 34°—35°N 的海区,大体与 2008 年 5 月 20 日影响范围一致,但范围要小于 2008 年;6 月 20 日,浒苔主体靠近山东半岛沿岸;至 7 月 10 日浒苔抵达山东半岛沿岸,并且其主体在 35°—36°N、121°E 左右的海区。其影响范围同样小于 2008 年,向岸堆积不显著,这与卫星监测情况一致(Qiao *et al*, 2011; 吴孟泉等, 2014)。

3 结论

本文基于 MASNUM 海浪-潮流-环流耦合预报系统和 GFS 预报风场数据,应用预报的风场、海流和海浪建立一个高分辨率黄海浒苔漂移运输模式。利用黄海 Argos 表层漂流浮标对数值模式进行了验证,结果表明模式能够较准确模拟浒苔暴发与漂移区域的漂流浮标运移特征。根据 2012 年 5 月 28 日 MODIS 卫星监测的浒苔空间分布,利用模式溯源得到 2012 年浒苔起源地和起源时间,结果与文献观测(现场和卫星)基本吻合。将溯源得到的浒苔暴发源地与时间作为该年度浒苔整体模拟的初始数据,模拟了 2012 年

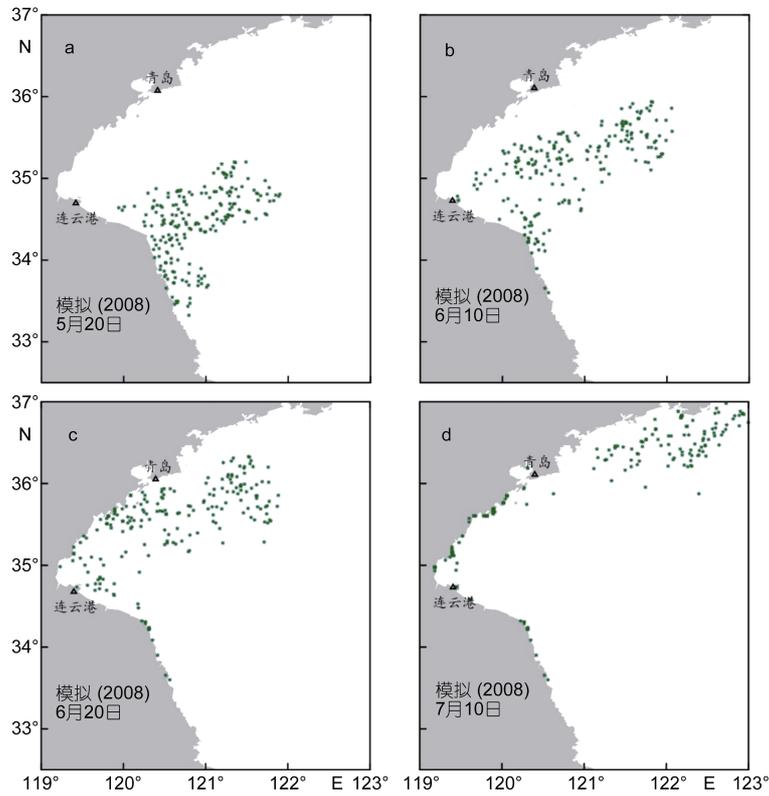


图 6 模拟 2008 年黄海浒苔运输分布状况

Fig.6 Distribution of simulated tracks of *U. prolifera* bloom in 2008

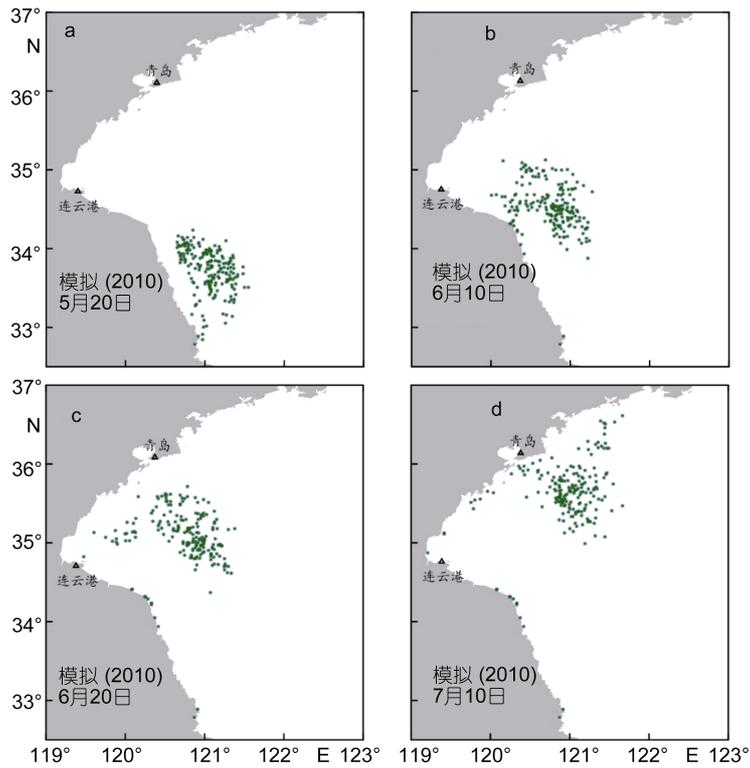


图 7 模拟 2010 年黄海浒苔运输分布状况

Fig.7 Distribution of simulated tracks of *U. prolifera* bloom in 2010

浒苔自源地开始在黄海漂移运输的整体过程,与 MODIS 卫星观测浒苔空间分布对比表明,本文所建立的模式能够较为精准地模拟黄海浒苔漂移运输过程。最后利用所建立的模式对比模拟了 2008 年和 2010 年黄海浒苔漂移运输过程,结果表明 2010 年浒苔整体影响海区要小于 2008 年,由于漂移速度慢于其它年份,致使浒苔抵达青岛外海时,海流已转向东北方向,浒苔主体未在青岛大规模登陆,这与实际观测结果相符。

致谢 感谢中国科学院海洋研究所袁东亮研究员团队提供的黄海 Argos 漂流浮标数据。

参 考 文 献

- 王 萌, 郑 伟, 李 峰, 2017. Himawari-8 气象卫星黄海浒苔动态监测. 应用气象学报, 28(6): 714—723
- 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
- 乔方利, 马德毅, 朱明远等, 2008. 2008 年黄海浒苔爆发的基本状况与科学应对措施. 海洋科学进展, 26(3): 409—410
- 乔方利, 王关锁, 吕新刚等, 2011. 2008 与 2010 年黄海浒苔漂移运输特征对比. 科学通报, 56(18): 1470—1476
- 刘 佳, 张洪香, 张俊飞等, 2017. 浒苔绿潮灾害对青岛滨海旅游业影响研究. 海洋湖沼通报, (3): 130—136
- 刘 峰, 逢少军, 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
- 刘英霞, 常显波, 王桂云等, 2009. 浒苔的危害及防治. 安徽农业科学, 37(20): 9566—9567
- 李 晓, 2010. 中国东部近海夏季环流特征及其动力机制. 北京: 中国科学院研究生院博士学位论文
- 杨永增, 乔方利, 赵 伟等, 2005. 球坐标系下 MASNUM 海浪数值模式的建立及其应用. 海洋学报, 27(2): 1—7
- 吴孟泉, 郭 浩, 张安定等, 2014. 2008 年-2012 年山东半岛海域浒苔时空分布特征研究. 光谱学与光谱分析, 34(5): 1312—1318
- 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
- 矫新明, 袁广旺, 毛成贵等, 2017. 2015 年南黄海海域浒苔时空分布特征. 杭州师范大学学报(自然科学版), 16(1): 51—56
- 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
- Blumberg A F, Mellor G L, 1987. A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model. In: Heaps N S ed. Three-Dimensional Coastal Ocean Models. Washington, D C: American Geophysical Union, 1—16
- Cui T W, Zhang J, Sun L E *et al*, 2012. Satellite monitoring of massive green macroalgae bloom (GMB): imaging ability comparison of multi-source data and drifting velocity estimation. International Journal of Remote Sensing, 33(17): 5513—5527
- Egbert G D, Bennett A F, Foreman M G G, 1994. TOPEX/POSEIDON tides estimated using a global inverse model. Journal of Geophysical Research: Oceans, 99(C12): 24821—24852
- Hu C M, Li D Q, Chen C S *et al*, 2010. On the recurrent *Ulva prolifera* blooms in the Yellow Sea and East China Sea. Journal of Geophysical Research: Oceans, 115(C5): C05017
- Lee H J, 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(C12): C12036
- Lü X G, Qiao F L, 2008. Distribution of sunken macroalgae against the background of tidal circulation in the coastal waters of Qingdao, China, in summer 2008. Geophysical Research Letters, 35(23): L23614
- Lü X G, Qiao F L, Xia C S *et al*, 2010. Upwelling and surface cold patches in the Yellow Sea in summer: Effects of tidal mixing on the vertical circulation. Continental Shelf Research, 30(6): 620—632
- Qiao F L, Dai D J, Simpson J *et al*, 2009. Banded structure of drifting macroalgae. Marine Pollution Bulletin, 58(12): 1792—1795
- Qiao F L, Wang G S, Lü X G *et al*, 2011. Drift characteristics of green macroalgae in the Yellow Sea in 2008 and 2010. Chinese Science Bulletin, 56(21): 2236—2242
- Qiao F L, Yuan Y L, Ezer T *et al*, 2010. A three-dimensional surface wave-ocean circulation coupled model and its initial testing. Ocean Dynamics, 60(5): 1339—1355
- Qiao F L, Yuan Y L, Yang Y Z *et al*, 2004. Wave-induced mixing in the upper ocean: Distribution and application to a global ocean circulation model. Geophysical Research Letters, 31(11): L11303
- Son Y B, Min J E, Ryu J H, 2012. Detecting massive green algae (*Ulva prolifera*) blooms in the Yellow Sea and East China Sea using Geostationary Ocean Color Imager (GOCI) data. Ocean Science Journal, 47(3): 359—375
- Wang G S, Qiao F L, Xia C S, 2010. Parallelization of a coupled wave-circulation model and its application. Ocean Dynamics, 60(2): 331—339
- Wang G S, Zhao C, Xu J L *et al*, 2016. Verification of an operational ocean circulation-surface wave coupled forecasting system for the China's seas. Acta Oceanologica Sinica, 35(2): 19—28
- Yin L P, Zhang M, Zhang Y L *et al*, 2018. The long-term prediction of the oil-contaminated water from the *Sanchi* collision in the East China Sea. Acta Oceanologica Sinica, 37(3): 69 - 72
- Yuan D L, Li Y, Wang B *et al*, 2017. Coastal circulation in the southwestern Yellow Sea in the summers of 2008 and 2009. Continental Shelf Research, 143: 101—117
- Yuan Y L, Hua F, Pan Z D *et al*, 1991. LAGFD-WAM numerical wave model-I. Basic physical model. Acta Oceanologica

Sinica, 10(4): 483—488
Zhao C, Wang G, Qiao F L *et al*, 2015. A numerical investigation

into the long-term behaviors of Fukushima-derived ^{137}Cs in the ocean. *Acta Oceanologica Sinica*, 34(12): 37—43

THE MODELLING OF *ULVA PROLIFERA* TRANSPORT IN THE YELLOW SEA AND ITS APPLICATION

ZHAO Chang^{1, 2, 3}, YIN Li-Ping^{1, 2, 3}, WANG Guan-Suo^{1, 2, 3}, QIAO Fang-Li^{1, 2, 3},
WANG Gang^{1, 2, 3, 4}, XIA Chang-Shui^{1, 2, 3}

(1. *The First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China*; 2. *Laboratory for Regional Oceanography and Numerical Modeling, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China*; 3. *Key Laboratory of Marine Science and Numerical Modelling, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China*; 4. *Key Laboratory of Data Analysis and Applications, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China*)

Abstract The NCEP GFS wind forecasted data and a high-resolution three-dimensional surface wave-tide-circulation coupled ocean forecast system for the China seas were used to establish a transport model for *Ulva prolifera* blooms in the Yellow Sea. To validate the model, drift paths of five Argos floats in 2009 and the MODIS data were compared with the model predictions. Comparison results show that the developed transport model can accurately reproduce the drift path of five Argos with a very small bias. The model was then used to study the transport and spatial distributions of *U. prolifera* bloom in 2012, and reproduced a good transport pattern. The simulated drift process and spatial distribution of *U. prolifera* blooms in 2008 and 2010 are consistent with the satellite observations: The spreading area of *U. prolifera* bloom in 2010 is smaller than that of 2008, and the bloom did not accumulate along the coast of Qingdao, which has been confirmed by the observations.

Key words the Yellow Sea; *Ulva prolifera* bloom; transport model; numerical simulation