

黄海绿潮应急漂移数值模拟

黄 娟, 吴玲娟, 高 松, 曹雅静, 白 涛

(国家海洋局北海预报中心, 山东 青岛 266033)

摘 要: 基于三维全动力 POM 海洋模式, 利用 2008~2009 年黄海绿潮多源实测和监测数据, 考虑奥帆赛场附近海域围油栏和流网等障碍物的阻拦作用, 利用拉格朗日粒子追踪方法对绿潮的漂移轨迹进行应急预测, 为政府相关部门了解绿潮的漂移轨迹, 并采取相应的措施提供有力可靠的依据。通过黄海绿潮漂移轨迹和海流数值模拟结果初步分析, 发现两者存在密切关系。

关键词: 绿潮; 漂移预测; 拉格朗日; 粒子追踪

中图分类号: P732 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2011)01-0025-08

1 引言

大型海洋绿藻大量增殖现象, 被称为“绿潮”(Green Tides)。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。从 1980 年美国、加拿大、荷兰、法国、意大利、日本和韩国等国家, 均爆发过绿潮灾害, 法国沿岸海域尤为严重。从 1997~2001 年, 受绿潮危害的滨海城市从 60 个增加到 103 个。2007 年, 中国黄海北部和中部局部海域首次发现由绿藻大量增殖发生的绿潮。2008 年 5 月以来, 在黄海北部特别是青岛沿岸海域, 绿潮大量增殖聚集。为了保证奥运会帆船/板赛的顺利举行, 为了沿海经济发展和保护生态环境, 国家海洋局举全国之力, 应对绿潮大面积爆发所带来的不利影响。2009 年和 2010 年, 黄海又出现大量绿潮繁殖漂移, 政府部门启动应急预案。绿潮作为我国一种新的自然灾害, 当其大面积爆发时, 对海洋环境、海洋渔业和海洋生态系统都会造成一定的影响。因此开展黄海绿潮应急漂移数值模拟研究, 可以进一步提高绿潮的应急预测水平, 为政府相关部门采取相应措

施提供有力可靠依据, 为保证海洋资源可持续利用, 保护海洋生态系统, 为防灾减灾做出贡献。

国外很多科学家对绿潮的生长机制、运动方向和速度等要素进行多方面研究, 并得到了初步的成果。Aurousseau 等^[1]在法国绿潮灾害比较严重的 Brest 湾, 建立三维生物地球化学模式, 对该海域的漂浮绿潮的生长和腐败-漂移-沉降进行模拟。Cugier 等^[2]建立的浮游植物三维生态学模型和三维水动力模型(Cugier 等^[3]), 建立适应于 Brest 湾的绿潮特征(Me'nesguen 等^[4]; M'enesguen^[5])的三维生物地球化学模型, 同时开展了潮间带绿潮的预报研究。Perrot 等^[6]发展了预报潮间带海藻的简单方法, 并于 2007 年 5 月建立了绿潮在潮间带生长和漂移的预报模式。2008 年 5 月 31 日黄海海域发现漂浮绿潮后, 国内研究人员对绿潮的漂移进行多方面研究, 并得到了初步的成果。北海预报中心立即启动高性能计算机, 利用卫星、船舶、飞机、海洋站等多源观测和监测数据, 采用 POM (Princeton Ocean Model) 三维全动力海流模式的拉格朗日粒子追踪方法, 快速准确预报绿潮的漂移方向和路径。乔方利等^[7]根据 7 月份绿潮的漂移路径, 提出“绿潮长程输运通道”观点, 认为绿潮的

收稿日期: 2010-01-08

基金项目: 国家海洋局青年科学基金(20100203)

作者简介: 黄娟 (1979-), 女, 本科, 主要从事海洋环境要素预报和研究, 防灾减灾工作。E-mail: huangjuan@nmfc.gov.cn.

长程输运通道会随着风场变化而略有不同,可将监测与打捞工作从整个面集中到狭窄通道内。

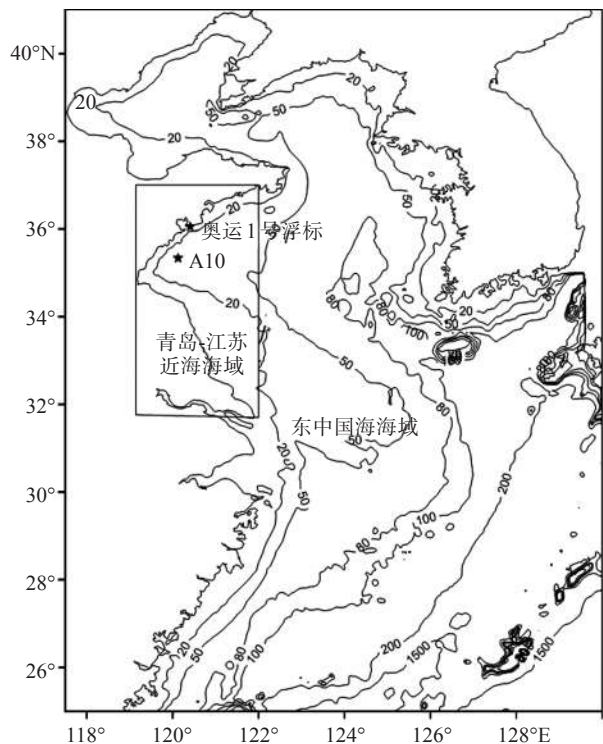
2 模式介绍和数据来源

绿潮漂移数值模式采用三维全动力POM海洋模式,根据绿潮所在位置、范围以及政府部门对应急预案的不同需求,建立两个区域模式:大区域是东中国海海域($117^{\circ}30'\sim 130^{\circ}E$, $25^{\circ}\sim 41^{\circ}10'N$),水平分辨率 $1/30^{\circ}$,垂向10层;小区域是青岛—江苏近海海域($119^{\circ}8.6'\sim 122^{\circ}E$, $31^{\circ}45.6'\sim 37^{\circ}N$),水平分辨率 $1/120^{\circ}$,垂向6层;模式地形来源于 GEBCO (General bathymetric Chart of Oceans)分辨率为 $1'\times 1'$ 的数据,并采用海图水深和

Google Earth 进行水深和岸线订正(见图1)。大区域模式采用全球海洋模式(HYCOM+ NCODA Global $1/12^{\circ}$ Analysis)模式的水位、流场、温盐场等输出结果作为大区域模式的初值和边值场,同时在边界上加上8个分潮(M_2 , S_2 , N_2 , K_2 , K_1 , O_1 , P_1 , Q_1)来驱动;采用北海预报中心业务化WRF (Weather Research and Forecasting)大气模式的风场和热通量场作为大气强迫场;考虑长江等主要河流径流的作用,长江的径流量采用大通站多年月平均径流量(见表1);奥帆赛场附近海域考虑围油栏和流网等障碍物的阻拦作用,绿潮大部分被阻挡在围油栏和流网外,而海水可以通过。小区域模式是采用两重嵌套技术,大区域计算结果为小区模式提供初值和边值条件;大气强迫场与大区域模式相同。海洋模式采用热启动,根据政府需求每天预报未来3~7天的绿潮漂移情况。

在不考虑绿潮自身生态特征的情况下,其在海水中的移动,可以看作是质点跟随海流的物理运动,所以绿潮应急漂移预测,采用拉格朗日粒子追踪方法。粒子追踪方法采用粒子随机走动模式来模拟粒子的运动。每个粒子的位移变量都可以由Lagrange方程来确定;粒子群的运动特性是一个随机过程,它的条件概率密度函数可以由相应的Fokker—Planck方程决定。将对流扩散方程转化为Fokker—Planck形式,通过数值求解粒子的Lagrange方程,确定每个粒子的位移,从而实现了粒子的动态追踪,达到了污染物运动过程数值模拟的目的^[8]。

三维全动力POM海洋模式中绿潮数据主要来源于2008~2009年TERRA/AQUA-MODIS、SAR COSMO-1/COSMO-2和HY-1B卫星、飞机、船舶和海洋站等多源观测和监测资料。利用多源资料反演和提取绿潮位置、范围和分布面积等信息,分析数据可信度,整合多源数据,为海洋数值模式提供绿潮初始场和比对场。



(方框代表小区域青岛—江苏近海,两个星号分别代表董家口倾倒区附近A10测流点和奥运1号浮标所在位置)

图1 绿潮漂移预测数值模拟区域水深和双重嵌套区域

表1 大通站多年月平均流量(cm^3/s)

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
月平均径流量	10200	11000	14800	23400	35000	40700	48200	43400	39700	34200	23800	14200

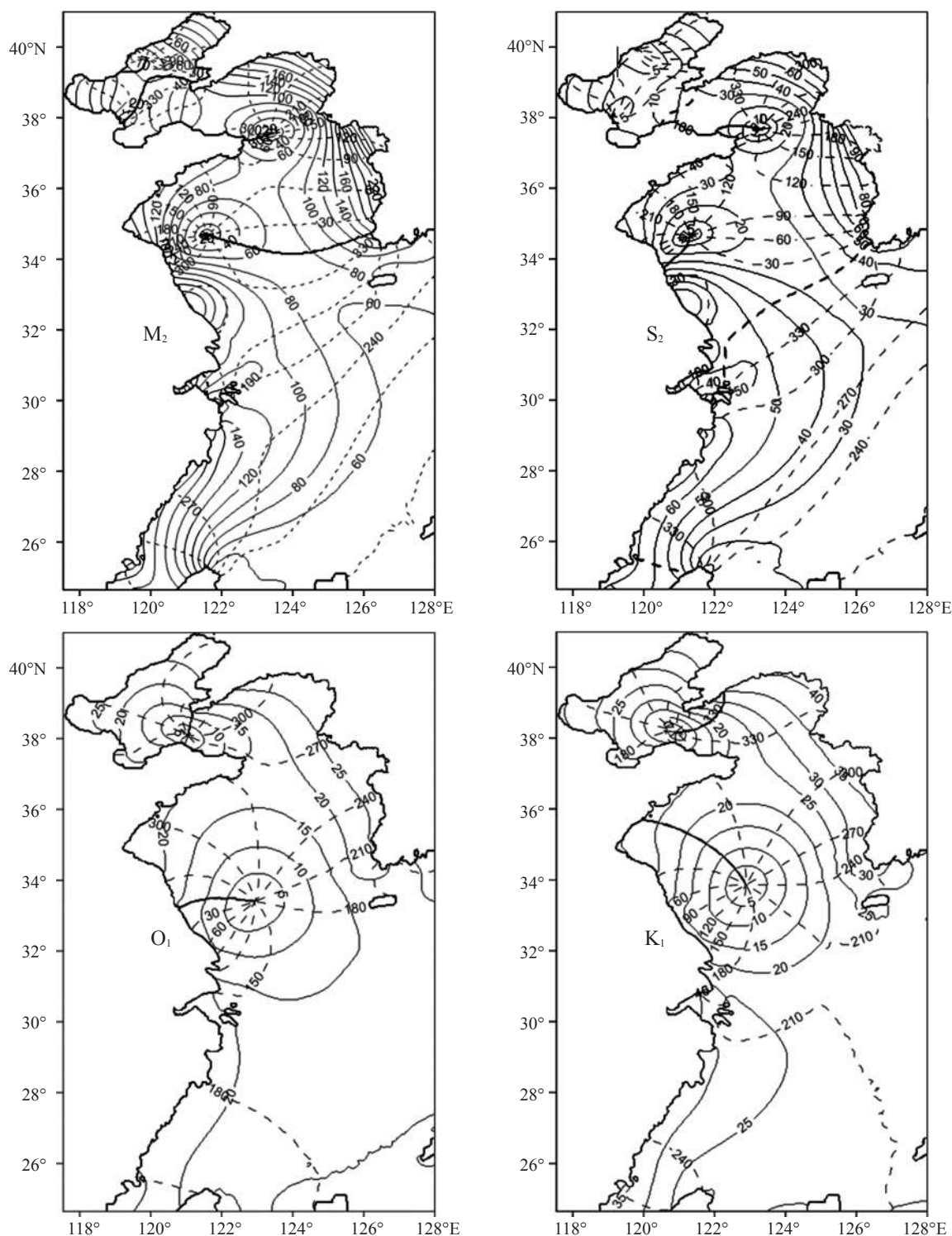


图2 模式模拟的东中国海 M_2 , S_2 , K_1 , O_1 的同潮位(实线)和同位相(虚线)

3 模式流场结果验证

图2是模式计算的东中国海四大分潮的同潮

图。从同潮图可以看出, 潮波从太平洋经日本九州至台湾之间的岛链地区传入东海。当潮波通过陆架波折时, 以前进波形式为主进入黄海, 振幅和流速陡增。受黄海岸界作用, 半日潮演变成以

表2 海洋站观测和模拟的四个主要分潮调和常数比较 (振幅单位m,位相单位:°)

	小麦岛			日照			鲅鱼圈			塘沽		
调和常数	模拟	实测	误差	模拟	实测	误差	模拟	实测	误差	模拟	实测	误差
K1 振幅	0.26	0.25	0.01	0.29	0.28	0.01	0.39	0.39	0.00	0.35	0.35	0
K1 位相	352	352	0	4	6	-2	97	93	4	153	151	2
M2 振幅	1.21	1.19	0.02	1.51	1.47	0.03	1.21	1.17	0.04	1.06	1.03	0.03
M2 位相	129	128	1	162	161	1	127	121	6	80	85	-5
O1 振幅	0.2	0.2	0	0.22	0.21	0.01	0.29	0.3	0.01	0.27	0.29	0.02
O1 位相	292	293	-1	302	305	-3	49	45	4	97	98	-1
S2 振幅	0.4	0.38	0.02	0.48	0.44	0.04	0.36	0.34	0.02	0.31	0.31	0
S2 位相	170	169	1	207	205	2	185	180	5	152	157	-5

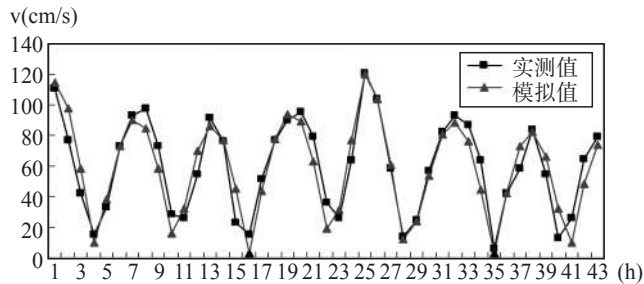
两个无潮点为重要标志、驻波为主要特征的潮波系统。日潮波演变为单一无潮点的、驻波为主要特征的潮波系统。潮波继续北上,经渤海海峡进入渤海,形成以黄河口和秦皇岛附近两个无潮点为特征的渤海半日潮系统以及渤海海峡附近出现无潮点的渤海全日潮波系统。从表2(主要海洋站观测和模拟的4个主要分潮调和常数比较)可以看出模拟的4个分潮与实测基本一致,误差较小。

图3~4是2008年8月19~20日奥运1号浮标120°24'E, 36°2.4'N和2009年3月26~27日董家口倾倒区附近A10测流点(120°1.967'E, 35°22.3'N)

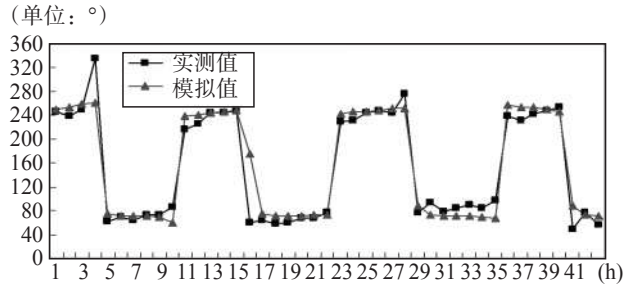
(位置见图1)表层流速、流向模拟计算值与实测值的比较。无论是流速还是流向,模拟值和实测值的变化基本一致,吻合较好。图5是2009年6月23日~7月11日黄海外海表层漂流浮标(FB96324)漂流轨迹与模拟漂流轨迹,从图中可以看出两者漂流方向和速度基本一致。总体来说,该数值模式能较好再现该海区的海流状况。

4 绿潮应急漂移数值模拟结果和验证

根据政府部门的不同需求,绿潮应急漂移数

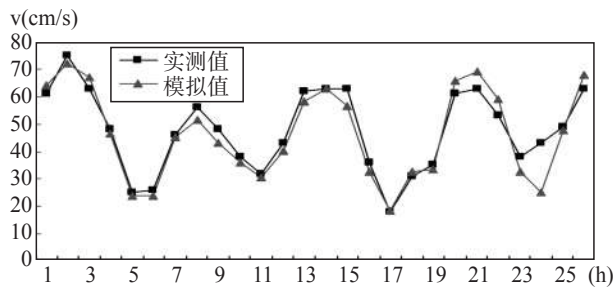


a 流速

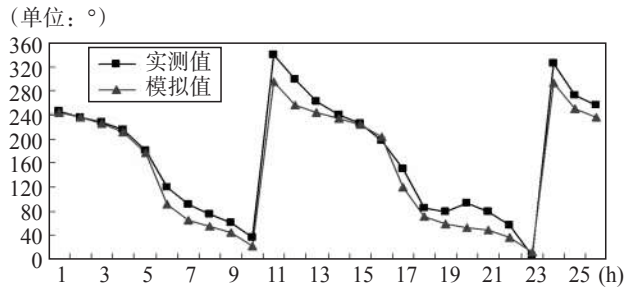


b 流向

图3 奥运1号浮标表层流速、流向计算值与实测值比较图



a 流速



b 流向

图4 董家口附近测流点A10表层流速、流向计算值与实测值比较图

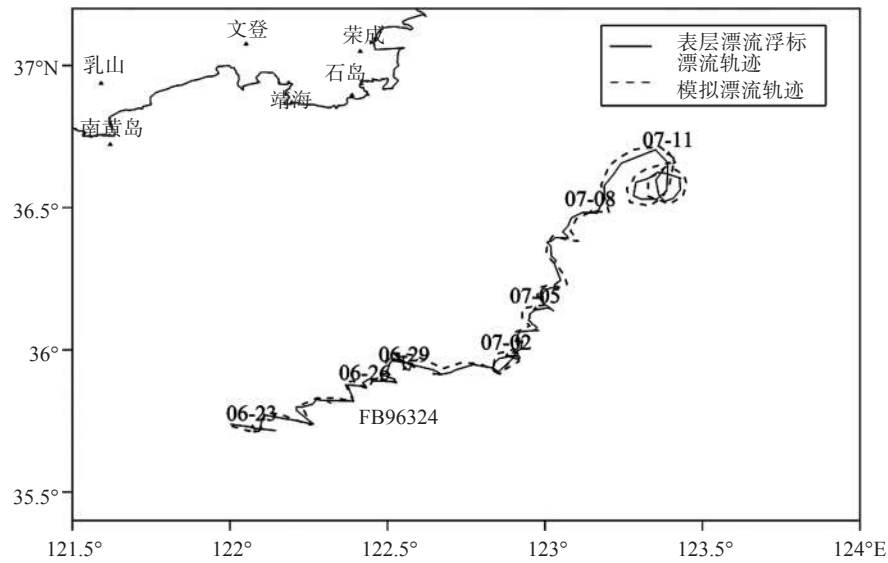


图5 2009年6月23日~7月11日表层漂流浮标轨迹和数值模拟结果比较

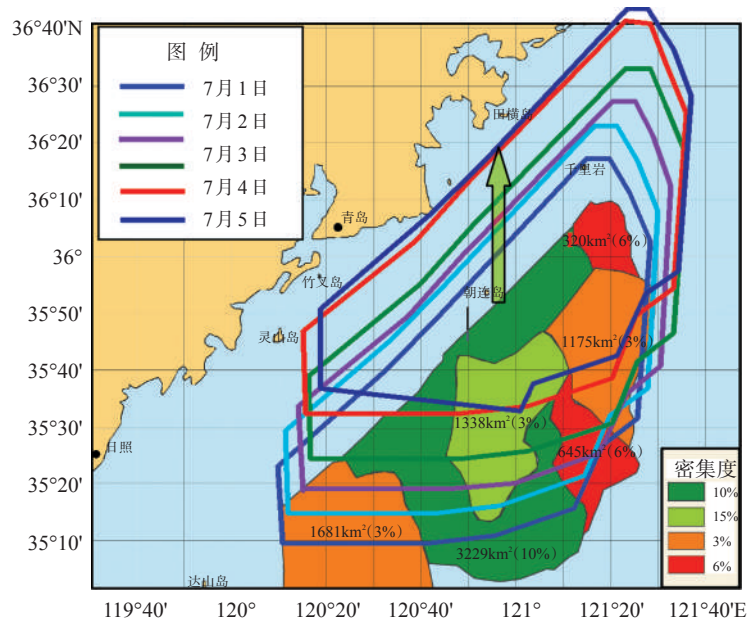


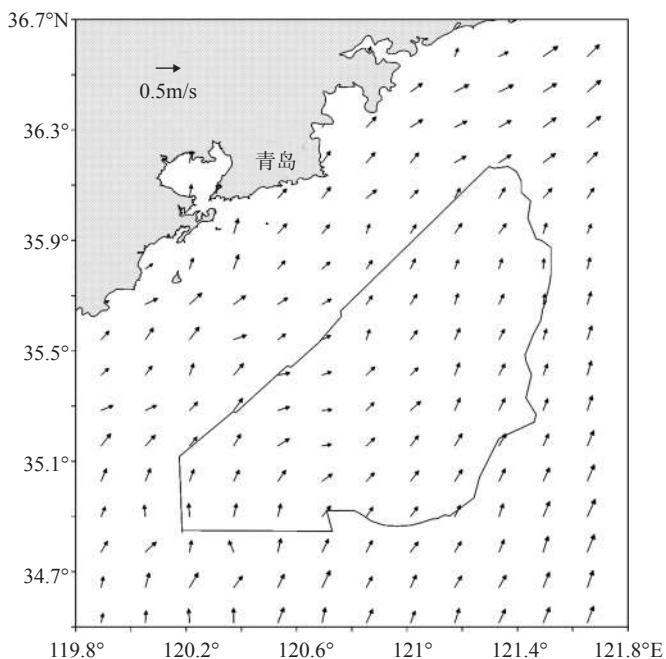
图6 绿潮2008年7月1~6日漂移趋势预测

值模拟结果以绿潮漂移趋势图、动态图和轨迹图等形式出现。

4.1 绿潮漂移趋势图和验证

根据2008年6月30日海监飞机监测结果,提取绿潮位置、分布范围等信息,基于三维全动力

POM模式,预测绿潮的漂移轨迹(见图6)。图7是青岛近海模拟流场未来6天(2008.7.1~2008.7.6)平均分布。数值模拟结果显示受偏北向海流的影响,绿潮未来6天向偏北方向漂移,漂移速度12.8km/d,与同时段卫星等多源监测的结果大体一致。

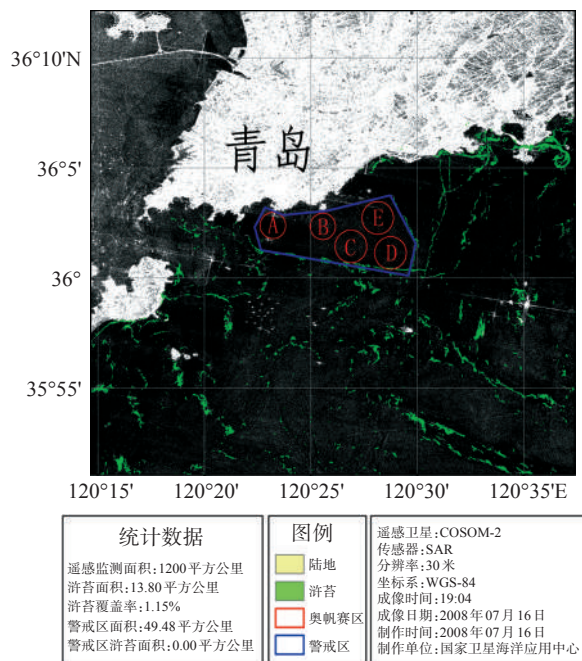


图中多边形代表2008年6月30日所监测绿潮的范围

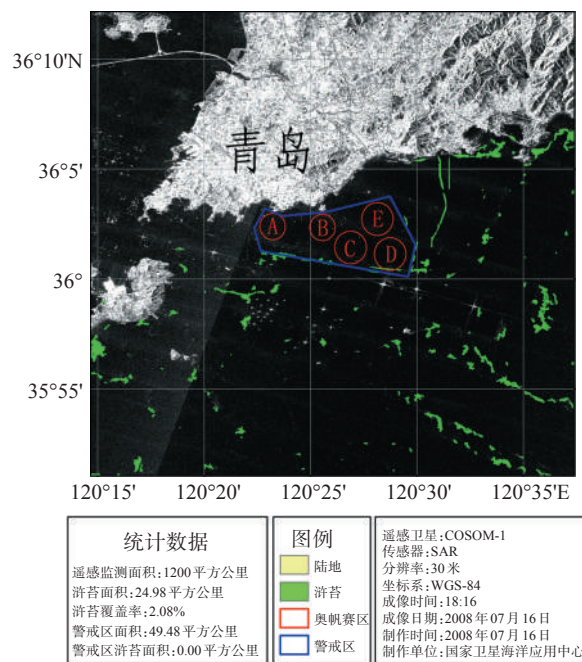
图7 青岛近海模拟表层流场6天(2008.7.1~2008.7.6)平均分布

4.2 绿潮漂移动态图和验证

SAR卫星成像分辨率为30 m, 与MODIS和HY-1B卫星比对, 能较好反映绿潮的信息。由于2008年青岛近海绿潮密集度比较高, 绿潮分布特征比较明显。恰好2008年7月16日SAR COSMO-1和COSMO-2分别于18:16和19:04经过青岛近海(图像来源于国家卫星海洋应用中心, 图8)。图8中A、B、C、D、E区域表示2008年奥运会帆船/板赛海域, 蓝色多边形代表奥帆赛场警戒区, 绿色代表绿潮(浒苔)。这个时间内绿潮打捞工作已经停止打捞, 而且SAR成像不受云覆盖的影响, 所以从SAR COSMO-1图像中提取有效信息作为绿潮漂移模式的初始场, 预报48分钟后绿潮的位置(见图9), 与SAR COSMO-2监测结果作比较(见图8右)。受青岛近海东北向流的影响(见图10), 绿潮向东北偏东向漂移。综合考虑绿潮有可能会沉降、SAR COSMO-1和COSMO-2成像也会出现一些差别等因素, 绿潮数值预报结果与SAR COSMO-2监测结果大体一致。另外从图9和10可



青岛近海浒苔遥感监测解译图 (SAR)



青岛近海浒苔遥感监测解译图 (SAR)

图8 2008年7月16日SAR COSMO-1和COSMO-2绿潮卫星监测解译图

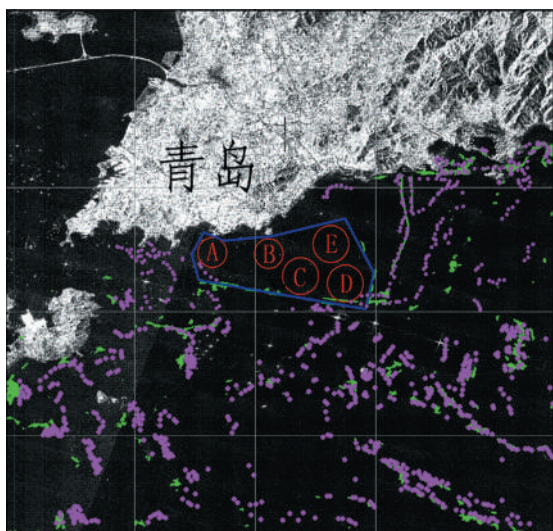


图9 2008年7月16日绿潮漂移模拟结果与SAR COSMO-2卫星监测结果比较

以看出, 由于考虑围油栏和流网等障碍物的阻拦作用, 绿潮大部分被阻挡在围油栏和流网外, 而海水可以通过围油栏和流网。

4.3 漂移轨迹图

利用2009年6月13日MODIS-TERRA卫星等综合解译信息资料, 进行绿潮应急漂移预测(见图11), 可以看到每个小时绿潮外边界点所在位置, 便于政府相关部门了解绿潮相关信息, 为启动应急预案提供依据。数值模拟结果(见图11~12)显

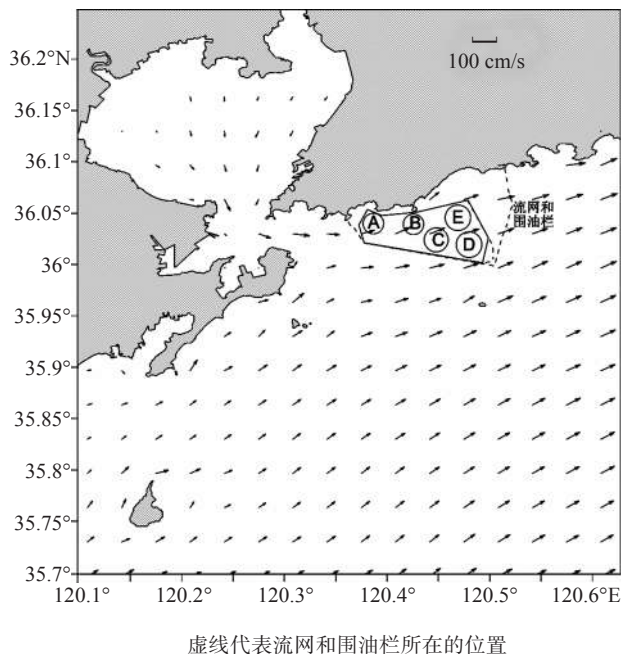


图10 2008年7月16日青岛近海18:16~19:04平均流场分布

示6月13~19日盐城外海的绿潮受西北偏北向流的影响, 基本向西北偏北方向漂移。

5 讨论

绿潮作为一种新的自然灾害, 当其大面积爆发时, 对海洋环境、海洋渔业和海洋生态系统都会造成一定的影响。开展黄海绿潮应急漂移数值

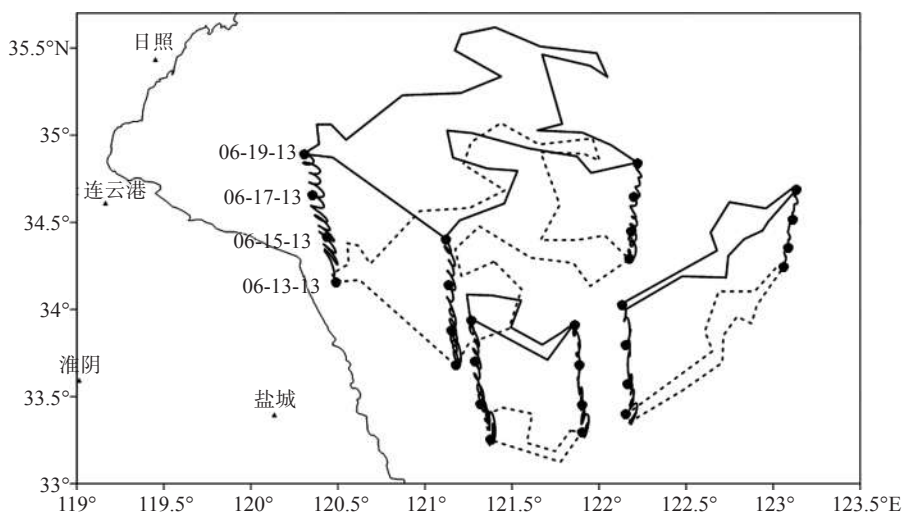


图11 2009年6月13~19日绿潮漂移轨迹(图中06-13-13代表2009年06月13日13:00)

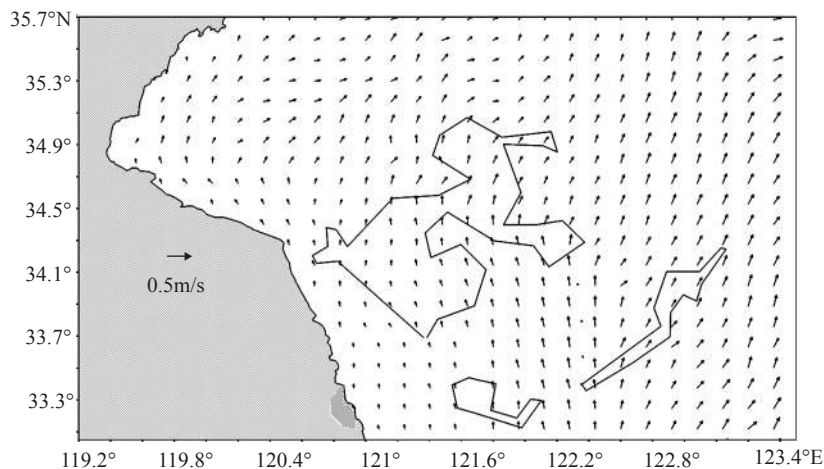


图12 青岛-江苏近海2009年6月13~19日6天平均流场分布

模拟工作, 已为政府相关部门了解绿潮的来源、漂移路径和方向等方面的信息, 并采取相应的措施提供有力可靠的依据, 为海洋资源可持续利用, 保护海洋生态系统, 为海洋防灾减灾做出贡献。通过黄海绿潮漂移数值模拟结果与卫星等多源监测数据的比较, 可以看出该模式能够较好模拟绿潮的漂移轨迹。通过黄海海流和绿潮漂移数值模拟结果分析, 绿潮的漂移轨迹与流场分布有密切的关系。在2008年和2009年的绿潮数值模拟过程中, 我们发现2008年和2009年绿潮在青岛近海漂移路径明显不同, 我们将进一步分析黄海绿潮漂移机制。

参考文献:

- [1] Aurousseau P. Les flux d'azote et de phosphore provenant des bassins versants de la rade de Brest[J]. Comparaison avec la Bretagne. *Océanis*, 2001, 27:137-161.
- [2] Cugier P, Hir Le P. Three dimensional (3D) ecological modelling of the Bay of Seine (English Channel, France) [J]. *J Sea Res*, 2005, 54:104-124.
- [3] Cugier P, Hir Le P. Development of a 3D hydrodynamical model for coastal ecosystem modeling, Application to the plume of the

Seine River (France) [J]. *Estuar Coast Shelf Sci*, 2000, 55:673-695.

- [4] Me' Nesguen, Salomon J C. Eutrophication modelling as a tool for fighting against *Ulva* coastal mass blooms, B. A. Schrefler and O. C. Zienkiewicz [eds.] [M]. *Computer modelling in ocean engineering*. Balkema, 1988:443-450.
- [5] Me' Nesguen, A. Modelling coastal eutrophication: the case of French mass blooms[C]. *Proceedings of the International Conference on Marine Coastal Eutrophication*, 1992, 979-992.
- [6] Perrot T, Dion P, Populus J. A predictive approach to the mapping of fucoid beds using Spot imagery and a digital elevation model [C]. *VIIIth International Seaweed Symposium*, June 20-25, 2004, Bergen, Norway.
- [7] 乔方利等. 2008年黄海绿潮爆发的基本状况与科学应对措施[J]. *海洋科学进展*, 2008, 26(3):409-410.
- [8] Zhang X Y. Ocean Outfall Modeling-Interfacing Near and Far Field Models with Particle Tracking Method[D]. Ph.D. thesis, Massachusetts Institute of Technology, 1995.