

2018年7月琼东上升流数值预报个例分析

张志远¹, 林士伟¹, 钟建¹, 王燕¹, 肖斌², 王关锁²

(1. 中国人民解放军91001部队, 北京 100161; 2. 自然资源部第一海洋研究所, 山东 青岛 266061)

摘 要: 利用浪潮流耦合模式FIKOM的2018年7月上半月琼东上升流预报产品,与全球混合坐标模式HYCOM数据,以及MW_IR和OSTIA两类卫星数据融合产品进行比较分析。研究结果表明:FIKOM模式较好地刻画了2018年7月上半月琼东上升流区域的位置以及该区域海洋表层及次表层冷水上翻和离岸流显著等陆架区上升流特征。4类产品温度场的比较分析表明:FIKOM模式对2018年7月上半月琼东上升流的预报准确性优于HYCOM预报结果。

关键词: 上升流; 琼东; 数值预报; 卫星遥感

中图分类号: P731.21

文献标识码: A

文章编号: 1003-0239(2021)05-0040-07

1 引言

随着军事活动和海洋深海作业的不断开展,水下海洋环境保障的需求越来越强烈,其中,水下温盐分布和温盐跃层是非常重要的保障要素,上升流和中尺度涡等海洋现象在温度和盐度分布中都有明显的表征,并对跃层分布产生显著的影响,进而形成复杂的跃层类型。研究海洋中的上升流现象,并及时给出准确的预报信息,是海洋环境预报中非常重要的环节之一。上升流会将海洋下层丰富的矿物质带到上层,引起鱼虾等动植物大量繁殖,极大地增强海洋有机物的初级生产力。从全球来看,比较大的上升流区都是重要的渔场。因此,针对上升流区域的水文特征和形成原因开展分析,后期利用数值预报和卫星遥感资料开展研究,将成为海洋研究工作的重点^[1-5]。

海洋中的上升流是由表层流场产生水平辐散造成的从底层沿直线上升的海流,是一种常见的海水运动。风吹走表层水,下面的水就会上升予以补充,表层以下的水,会由于表层流场的水平辐散而做上升流动;反之,表层流场的水平辐合会使海

水由海面做铅直下降的流动,这种海流被称为下降流。上升流和下降流统称为升降流,是组成海洋环流的重要部分,与海流水平运动共同构成总环流^[1-2]。尽管上升流流速比水平流流速小几个量级,但由于它会引起海洋上层(混合层)的搅拌,因此一直是大家研究的重点。

海南岛以东(琼东)沿岸海域位于南海北部陆架区,受季风和地形等多种因素影响,多在每年4—9月出现上升流现象。谢玲玲等^[6]和吴日升等^[7]分别从不同角度研究了琼东上升流的分布区域和形成机制,分析其基本水文特征、年际差异以及风场和地形等影响因素的作用,并对比了近年沿岸上升流的前沿进展。舒业强等^[8]总结了黑潮入侵南海、季风和地形等因素在南海北部陆架陆坡流系中的影响。

随着数值预报技术的发展,郭飞等^[9]和经志友等^[10]利用数值模式后报方法对琼东上升流进行了分析刻画,虽然分辨率较粗,但也印证了上升流的存在和分布特点。本文以业务化运行的高分辨率海浪-潮流-环流耦合数值预报系统(The First Institute of Oceanography Coordinate Ocean Model, FIKOM)^[11-12]产 品

收稿日期: 2020-08-05; 修回日期: 2020-10-12。

基金项目: 国家重点研发计划课题(2016YFB0201105、2017YFC1404005、2019YFC1408402)。

作者简介: 张志远(1978-),男,高级工程师,博士,主要从事海洋数值预报和信息化工作。E-mail: 13811119180@139.com

通讯作者: 林士伟(1991-),男,工程师,硕士,主要从事海洋数值预报和同化工作。E-mail: mylifeyear@163.com

为主体,提取琼东海温和海流预报数据,分析琼东上升流情况,并结合卫星遥感数据分析其分布规律,印证数值模式对琼东上升流的预报效果。

2 琼东区域地形特点

南海北部陆架区是我国华南大陆向南海自然延伸的部分,陆架区的海底地形线与东北-西南向的海岸线大致平行,并由岸边向海盆以0.03'左右的地形坡角缓倾。陆架海底的水深向外缘增大到230 m左右时,海底地形发生明显变化,其坡度陡增转为大陆坡。琼东海域200 m等深线与50 m等深线接近,最近距离只有60 km左右,陆架外深层低温水很容易接近岸边并上升。

南海属于典型的热带季风气候,风向明显随季节变化。冬季,寒冷的气流沿蒙古高压的东部边缘袭向海面,自北向南按顺时针方向偏转,盛行东北风。夏季,温暖的气流沿印度低压边缘自南向北按逆时针方向偏转,盛行西南风。2018年南海夏季风爆发时间异常偏晚,结束时间偏早,强度异常偏强。6月中上旬201804号台风“艾云尼”从南向北进入琼东上升流区域并反复徘徊,在广东徐闻、海南海口和广东阳江3次登陆,7月中下旬201809号台风“山神”从东向西横切琼东上升流区域,7月18日05时(北京时,下同)前后在海南万宁登陆。谢玲玲等^[13]对台风过境时海表温度响应的研究表明,台风速度、强度和进入上升流区域路径的角度等对海洋上层升温、降温 and 保持不变等各种情况有不同影响。因此,本文为了更好地分析数值预报模拟单纯上升流的效果,避开上述两个时段,选择7月上半月提取数值预报和卫星遥感数据,进行分析比较。

3 卫星遥感分析

目前,海洋资料的获取主要有现场观测和遥感

两种手段。现场观测数据主要是点、线观测,覆盖范围小,数量有限。随着海洋遥感卫星技术的充分发展,遥感手段因其覆盖范围广、时间连续和时效性强等优点,已经成为海洋资料获取的重要手段。针对海表温度的观测主要有微波和红外观测两种方式,因两种技术体制在观测方式、分辨率和受天气影响等方面互为补充,因此国内外组织或专家依托卫星资料开展了海表温度融合数据研究,其中全球海洋同化试验计划(Global Ocean Data Assimilation Experiment, GODAE)中的高分辨率海表温度试验计划(GODAE High-Resolution Sea Surface Temperature, GHRSSST)近10 a发布了大量产品^[14-15]。多源融合遥感观测海表温度数据,成为研究琼东上升流的重要衡量手段。

本文利用美国遥感系统研究公司的海表温度融合产品(Remote Sensing System_MicroWave-infrared optimally interpolated Surface Sea Temperature, RSS_MWSST)和英国气象局(Met Office)发布的海表温度融合产品(Operational SST and sea Ice Analysis, OSTIA)资料^[16]作为对比数据(见表1)。MW_IR产品是基于最优插值技术利用微波和红外遥感产品生产制作的,空间分辨率9 km,时间分辨率1 d(网址:ftp://ftp.remss.com/sst/daily/mw_ir/v05.0/)。OSTIA数据融合了卫星资料、浮标和船舶观测海温等资料,利用二维变分技术融合,空间分辨为6 km,时间分辨率1 d(网址:http://opendap.jpl.nasa.gov/opendap/OceanTemperature/ghrsst/data/L4/GLOB/UKMO/OSTIA/)。

本文选取2018年7月1日、5日、10日和14日4 d的两类卫星资料,该区域海表温度融合产品效果如图1所示。M180701、M180705、M180710和M180714分别是MW_IR数据4 d的海表温度效果,O180701、O180705、O180710和O180714分别是OSTIA数据4 d的海表温度效果。从两类卫星融合产品刻画的上流将冷水带到海表面冷水区分布的范围和温度差来看,2018年7月琼东上升流现象

表1 本文使用的GHRSSST发布的海表温度融合产品

产品名称	融合数据	空间分辨率	融合方法	发布单位
MW_IR	AMSR-E+TMI,MODIS+TMI+ AMSR-E	9 km	最优插值	RSS
OSTIA	现场观测+AATSR+AVHRR+AMSR-E+TMI+SEVIRI	6 km	二维变分	Met Office

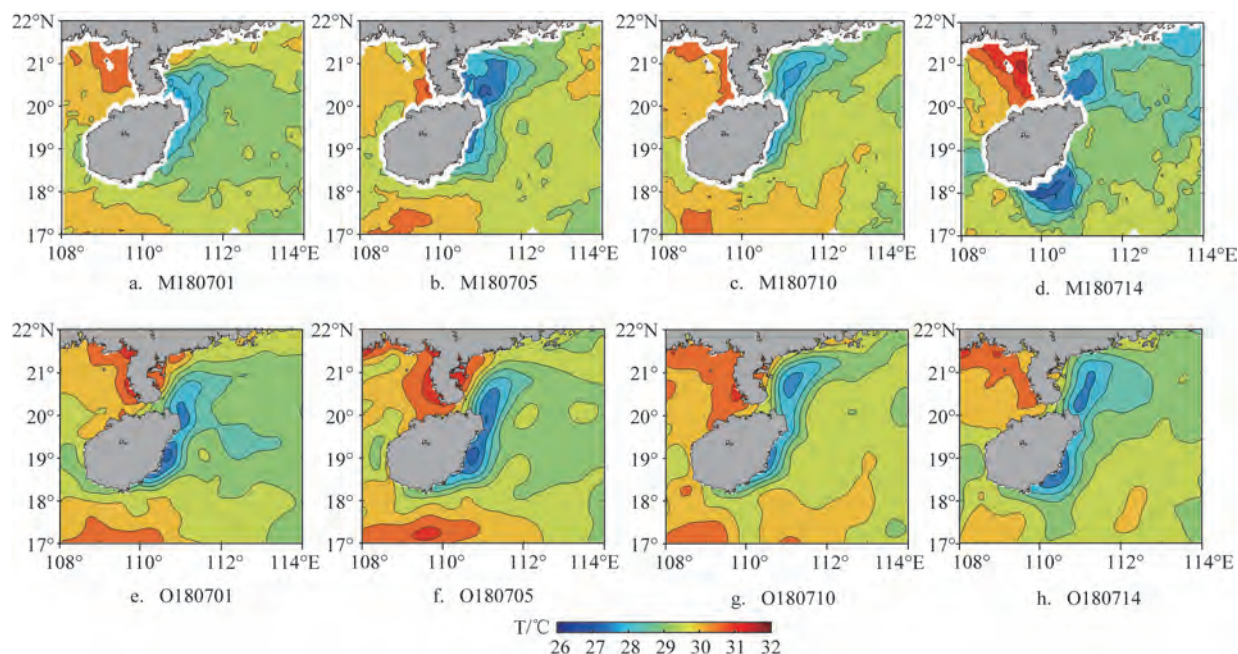


图1 琼东区域MW_IR和OSTIA海表海温卫星融合产品分布图

非常明显。

4 数值预报分析

本文采用业务化运行的FIOCOM基于浪致混合理论^[11],实现了海浪和环流耦合的海洋动力学框架,有效解决了上层海洋湍流混合严重不足这一长期困扰海洋模式发展的科学难题,突破了浪潮流耦合和自主资料同化系统构建等关键技术,有效提升了对上层海洋环境的预报能力。

4.1 预报模式

4.1.1 FIOCOM全球耦合海洋模式

该全球耦合海洋模式水平分辨率达到 0.1° ,水平方向采用三极网格实现完整全球模拟,垂向采用Z坐标,垂向对上层50 m进行了加密,平均分辨率5 m,表层垂向分辨率最高达到2 m。加密后模式垂向共分54层,最大水深5 500 m。环流模式初始场由WOA09(World Ocean Atlas 2009)气候态数据的温度和盐度插值得到,通过将浪致混合系数(B_v)叠加在KPP(K-Profile Parameterization)方案计算的混合系数中实现海浪-环流耦合^[17],采用正压潮流混合参数化方案^[18],水平摩擦采用Smagorinsky双调和

水平摩擦方案^[19]。

4.1.2 地形数据处理

上升流在很大程度上受地形影响,本系统所含的全球潮预报对地形也非常敏感,因此构建该业务化预报系统时,针对ETOPO1和GEBCO(General Bathymetric Chart of the Oceans)等多种水深数据进行整理和平滑,采用Blackman径向滤波器构造模式地形^[20]。

4.1.3 海洋耦合模式同化

稳定的海洋预报业务化系统需要以强大和完善的资料同化系统为前提,尹训强^[21]为FIOCOM耦合模式构建了高效并行的海洋观测数据集调整卡尔曼滤波(Ensemble Adjustment Kalman Filter, EAKF)同化系统。该同化系统将模式的集合运行和EAKF同化并行实现,解决了高分辨率高频次模式同化计算规模的瓶颈;另外,该系统还分别针对Argo等垂向剖面数据和海洋融合数据两类数据设计相应的同化处理过程,实现全要素的海洋观测数据同化。

4.2和4.3节将FIOCOM数值预报结果与卫星遥感融合产品和美国混合坐标模式HYCOM(HYbrid Coordinate Ocean Model)数值预报结果^[22]进行对比,分析FIOCOM数值预报产品对琼东上升

流的预报能力。

4.2 温度场预报分析

FIOCOM是业务化连续运行的,而本文主要对比的卫星遥感融合产品均为无云且覆盖全海域的逐日数据,为了时空尺度匹配基本一致,本文选取00时开始的0~24 h的海表温度日平均预报结果进行对比。参照胡晓悦等^[23]的分析结论,在南海及周边海域针对融合海表温度产品与现场海表温度验证的相关性、均方根误差和偏差分析中,OSTIA的准确性最高。本文以OSTIA融合产品作为基准,以图1黑色方框为界,选取该区域内3种产品的海温数据(剔除水深小于20 m的数据),分析FIOCOM预报、HYCOM预报、MW_IR融合产品与OSTIA融合产品的误差分布情况。

4.2.1 平面分布

本节针对第3部分卫星资料选取的时间段,选取2018年7月1日、5日、10日和14日4 d的海表温度日平均预报结果进行对比(见图2)。F180701、F180705、F180710、F180714分别是FIOCOM数据7月1日、5日、10日和14日4 d的海表温度效果,H180701、H180705、H180710、H180714分别是HYCOM数据7月1日、5日、10日和14日4 d的海表

温度效果。从图2中可以明显看出,在预报的时间段内FIOCOM和HYCOM的琼东上升流都非常明显。与图1的MW_IR和OSTIA卫星融合产品对比来看,FIOCOM预报的琼东上升流的范围和温度差与卫星遥感融合产品更接近,范围主要在 $18.5^{\circ}\sim 20.5^{\circ}\text{N}$, 112.5°E 以西海域,数值预报效果与柴扉等^[7]利用实测和物理海洋机理分析的结果非常一致。

从琼东海域20 m深海水温预报看(见图3),琼东和广东西部冷水区相连,这与许金电等^[24]指出的琼东和粤西沿岸上升流区域并非相互独立,20 m层已经连成一片,且琼东沿岸上升流的强度比粤西地区强等分析结果非常一致。

4.2.2 平面分布定量分析

选取2018年7月1—15日FIOCOM预报、HYCOM预报、MW_IR融合和OSTIA融合4类产品的数据进行定量比较。经统计,FIOCOM/OSTIA的均方根误差为0.63, HYCOM/OSTIA的均方根误差为0.68, FIOCOM的预报准确性稍好,并且15 d内相对比较稳定。MW_IR在该海域和OSTIA吻合较好,没有太大偏差(见图4)。

4.2.3 剖面垂向分布

本文选取2018年7月8日24~48 h的海温预报平均值作为比对基础,选取研究区域内如下4个剖

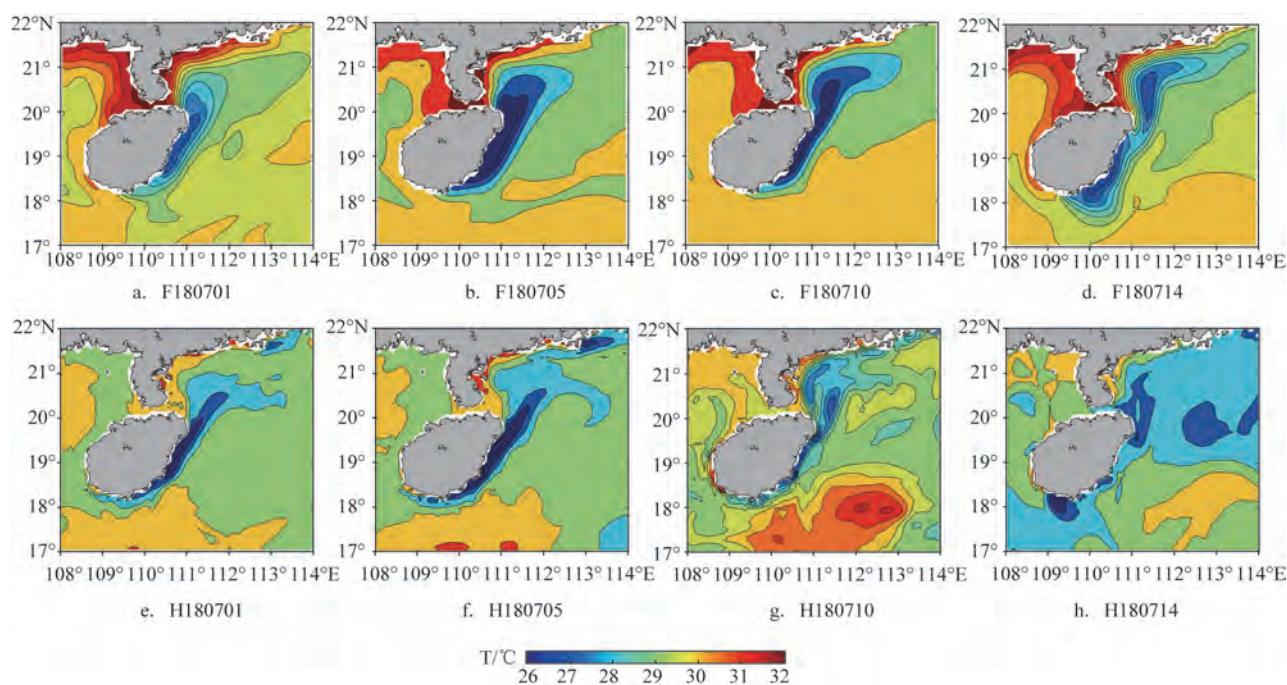


图2 琼东区域FIOCOM和HYCOM海表海温预报分布图

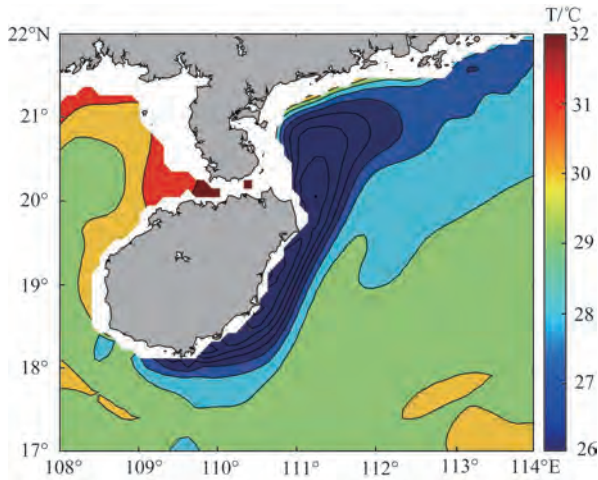


图3 琼东海域20 m深海水温预报

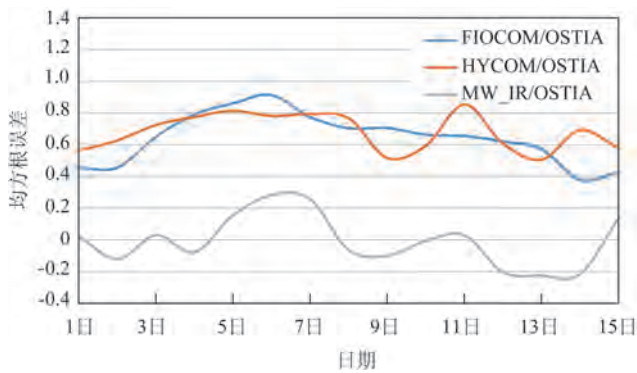


图4 7月1—15日FIOCOM、HYCOM、MW_IR与OSTIA均方根误差比分析图

面(经度取陆地到112°E):A(20°N断面)、B(19.5°N断面)、C(19°N断面)和D(18.5°N断面)。从图5可以看出,琼东上升流区域0~100 m海水的抬升趋势非常明显,海表冷水区和暖水区温度差比较剧烈,基本都在2~3℃,图6c显示最为强烈。在110.7°E,19°N区域,对比HYCOM在这4个断面的抬升情况(见图6),结果非常近似。

为定量比较上升流抬升强度,本文以图5中A、B、C和D 4条断面为基准,提取FIOCOM和HYCOM两个模式7月8日24~48 h预报和7月9日OSTIA融合产品作比较。从表2的比较结果可以看出,与OSTIA融合产品相比,两种模式产品预报的冷水区海面温度极差(即断面水温最大值减最小值)均较大,相比而言FIOCOM效果较好。

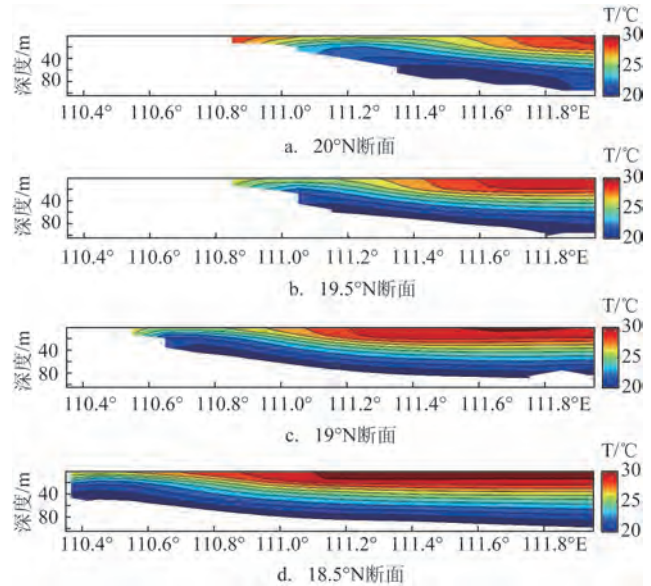


图5 FIOCOM 琼东上升流区预报断面图

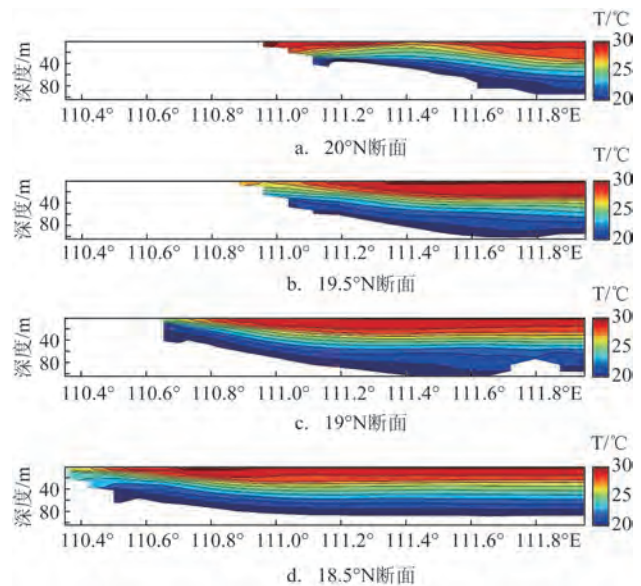


图6 HYCOM 琼东上升流区预报断面图

表2 FIOCOM和HYCOM两种模式产品与OSTIA融合产品断面海面温度极差比较(单位:℃)

剖面	FIOCOM	HYCOM	OSTIA
A	3.33	4.76	2.01
B	4.38	3.99	1.90
C	4.55	5.27	2.68
D	3.58	3.62	1.61
平均值	3.96	4.41	2.05

4.3 流场预报效果分析

琼东上升流会受季风和埃克曼力影响。本文选取上升流区域周边的清澜海洋站,统计得出2018年7月上半月在未受台风影响的情况下,平均的近海面风向均为南向或西南向,15 d内逐小时出现风速 $>2\text{ m/s}$ 的南风或西南风的概率为87%。可见风向与岸线大致平行,离岸的埃克曼输送会使上层海水离岸运动,同时为维持质量守恒,上层的海水辐散迫使底层海水向上涌升补偿,从而形成上升流。以7月4日 FIOCOM 海流预报数据为分析对象,提取 20.3°N 断面的流速分量 u 的分布,结果如图7所示。

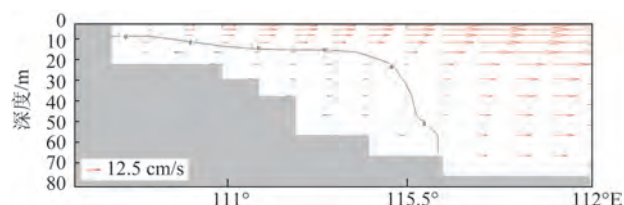


图7 20.3°N 断面的流速分量 u 的分布图

由图7可以看出, FIOCOM 数值预报产品清晰刻画了上升流的特征,沿东西方向的流速分量 u 在上升流域的浅表层构成了明显的离岸流,即埃克曼输送,与海洋下层形成的向岸流互为补充,形成一个循环。

4.4 模式误差分析及改进

尽管与 HYCOM 模式结果和卫星观测数据相比, FIOCOM 可以较好地刻画2018年7月上半月琼东上升流区域位置和水体特征等上升流特征,但依然存在上升流抬升强度偏大的问题。目前采用 Lee 等^[19]的潮混合方案,该方案对于近岸潮混合过程的刻画有待进一步改进。下一步将采用由引潮势驱动实现全球潮波直接模拟的方式引入潮致混合效应,预期将对潮混合过程有改进作用,进而改善上升流的模拟效果。

5 小结

本文采用业务化运行的浪潮流耦合模式

FIOCOM 对2018年7月上半月琼东上升流进行分析研究,并与美国全球混合坐标模式 HYCOM 数据以及 MW_IR 和 OSTIA 两类卫星遥感融合资料进行比较。分析结果表明:

(1) FIOCOM 模式较好地刻画了2018年7月上半月琼东上升流区域的位置以及海洋表层和次层海区低温分布,表层离岸流与下层向岸流形成循环等陆架区上升流特征。

(2) 两个模式数据与卫星遥感融合资料对比的海温预报均方根误差表明,业务化运行的 FIOCOM 模式对2018年7月上半月琼东上升流预报准确性优于 HYCOM 结果。

(3) FIOCOM 和 HYCOM 两个模式与同期 MW_IR、OSTIA 两类卫星遥感融合资料相比,冷水区分布预报效果较好。对应的4个断面对比看,海表温度梯度差基本在 $2\sim 3^{\circ}\text{C}$,甚至超过 4°C 。与遥感海表温度实测相比,不论是 FIOCOM 或 HYCOM,模式预报的上升流抬升强度皆偏大,造成冷水区温度偏低,这是后续海洋模式优化需要进一步解决的问题。

参考文献:

- [1] Zaytsev O, Cervantes-Duarte R, Montante O. Coastal Upwelling Activity on the Pacific Shelf of the Baja California Peninsula[J]. Journal of Oceanography, 2003, 59(4): 489-502.
- [2] Cui A Q, Street R L. Large-eddy simulation of coastal upwelling flow[J]. Environmental Fluid Mechanics, 2004, 4(2): 197-223.
- [3] 连展,魏泽勋,王永刚,等.中国近海环流数值模拟研究综述[J].海洋科学进展,2009,27(2):250-265.
- [4] 俞慕耕,刘金芳.南海海流系统与环流形势[J].海洋预报,1993,10(2):13-17.
- [5] 蒋国荣,郝少东,杜涛,等.南海北部温跃层逐月变化特征分析[J].海洋预报,2011,28(3):40-45.
- [6] 谢玲玲,张书文,赵辉.琼东上升流研究概述[J].热带海洋学报,2012,31(4):35-41.
- [7] 吴日升,李立.南海上升流研究概述[J].台湾海峡,2003,22(2):269-277.
- [8] 舒业强,王强,俎婷婷.南海北部陆架陆坡流系研究进展[J].中国科学:地球科学,48(3):20-31.
- [9] 郭飞,侍茂崇,夏综万.琼东沿岸上升流二维数值模型的诊断计算[J].海洋学报(中文版),1998(6):109-116.
- [10] 经志友,齐义泉,华祖林.南海北部陆架区夏季上升流数值研究[J].热带海洋学报,2008(3):1-8.
- [11] Qiao F, Yuan Y, Yang Y, et al. Wave-induced mixing in the upper ocean: Distribution and application to a global ocean circulation model[J]. Geophysical Research Letters, 2004, 31(11):293-317.
- [12] Shi Junqiang, Yin Xunqiang, Shu qi, et al. Evaluation on data assimilation of a global high resolution wave-tide-circulation

- coupled model using the tropical Pacific TAO buoy observations [J]. *Acta Oceanol. Sin.*, 2018, 37(3):8-20.
- [13] 谢玲玲,何超凤,李明明,等. 琼东上升流区海表温度对台风过境的响应[J]. *海洋科学进展*, 2017, 35(01):8-19.
- [14] Donlon C, Rayner N, Robinson I, et al. The global ocean data assimilation experiment high-resolution sea surface temperature pilot project[J]. *Bulletin of the American Meteorology Society*, 2007, 88(8):1197-1213.
- [15] Donlon C, Casey K S, Robinson I, et al. The GODAE high-resolution sea surface temperature pilot project[J]. *Oceanography*, 2009, 22(3):34-45.
- [16] Donlon C, Martin M, Stark J, et al. The Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis(OSTIA) system[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 116:140-158.
- [17] Large W G, McWilliams J C, Doney S C. Oceanic vertical mixing: A review and a model with a nonlocal boundary layer parameterization[J]. *Reviews of Geophysics*, 1994, 32: 363-403.
- [18] Lee H C, Rosati A, Spelman M J. Barotropic tidal mixing effects in a coupled climate model: Oceanic conditions in the Northern Atlantic[J]. *Ocean Modelling*, 2006, 11(3):464-477.
- [19] Griffies S M, Hallberg R W. 2000. Biharmonic friction with a Smagorinsky-like viscosity for use in large-scale eddy-permitting ocean models. *Monthly Weather Review* 128: 2935-2946
- [20] Shriver J, Arbic B K, Richman J, et al. An evaluation of the barotropic and internal tides in a high-resolution global ocean circulation model[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 117:C10024.
- [21] 尹训强. 集合调整 Kalman 滤波同化模块的建立及其在海洋和气候系统模式中的应用[D]. 中国海洋大学, 2015.
- [22] Rainer, Bleck. An oceanic general circulation model framed in hybrid isopycnic-Cartesian coordinates[J]. *Ocean Modelling*, 2002, 4(1):55-88.
- [23] 胡晓悦,张彩云,商少凌. 南海及周边海域融合海表温度产品的验证与互较[J]. *遥感学报*, 2015, 19(2):328-338.
- [24] 许金电,蔡尚湛,宣莉莉,等. 2006年夏季琼东、粤西沿岸上升流研究[J]. *海洋学报*, 2013, 35(4):11-18.

Numerical case study on the upwelling along the east coast of Hainan Island in July 2018

ZHANG Zhi-yuan¹, LIN Shi-wei¹, ZHONG Jian¹, WANG Yan¹, XIAO Bin², WANG Guan-suo²

(1. Unit No.91001 of PLA, Beijing 100161 China; 2. First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061 China)

Abstract: The upwelling forecast product along the east coast of Hainan Island in the first half of July 2018 simulated by the wave-tide-circulation coupled ocean model FIOCOM is compared with HYCOM and the fusion products of MW_IR and OSTIA. The results show that FIOCOM could capture the location of upwelling area east of Hainan Island in the first half of July 2018 as well as the features of the shelf upwelling such as the anomalous upwelling of cold water in the surface or subsurface sea and the significant offshore current in the area. The comparative analysis of temperature field of the four kinds of products reveals that FIOCOM is more accurate than HYCOM in forecasting the upwelling east of Hainan Island in the first half of July 2018.

Key words: upwelling; the east coast of Hainan Island; numerical forecast; satellite remote sensing