

基于区域海气浪耦合模式的海洋风场预报性能研究

詹思筠^{1,2}, 齐琳琳², 卢伟¹, 孟旭航³

(1. 解放军理工大学, 江苏 南京 211101; 2. 空军装备研究院航空气象防化研究所, 北京 100085;
3. 空军气象中心, 北京 100029)

摘要: 为评估面向海洋风场的耦合模式预报性能, 针对西北太平洋海域, 基于一次有无台风过程开展了区域海气浪耦合模式的72 h风场预报应用研究, 并重点对1 000 m以下低空风预报进行了GPS观测数据的比对检验评估。结果表明: 无论是海面10 m风还是1 000 m以下低空风, 耦合模式对无台风日的风场预报效果相对更好; 有无台风过程的检验评估均显示, 海面低空风预报随时间变化趋势与GPS观测的基本一致, 且各高度上均是 u 分量预报效果好于 v 分量的; 针对台风的耦合模式预报需从模式初始场和物理过程参数化等加以发展完善。

关键词: 西北太平洋; 区域海气浪耦合; 海洋风场

中图分类号: P732.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2017)06-0016-11

1 引言

海洋环境保障是海上军事活动、经济活动、能源开发、旅游以及海洋运输等诸多方面得以顺利进行的重要保证^[1]。作为海洋环境保障的重要组成部分, 准确的海洋风预报对于保障能源勘探开发、海上作业等经济活动, 以及海上飞机起降, 火箭、卫星等航天器飞行等的安全具有重要意义^[2-3]。西北太平洋是21世纪的全球地理-政治枢纽, 有着重要的政治、经济、军事地位^[4], 我国正位于西太边缘, 处于季风变换带, 气候差异显著, 且常常遭受台风的侵袭^[5]。因此, 准确而及时的西北太平洋风场预报对于保障舰船航行和飞机飞行安全等一系列经济、军事活动顺利遂行具有重要意义。

近年来, 数值模式预报已逐渐成为海洋风场预报的主要手段。谢强等^[6-7]根据有限海域特点建立了有限海域风场模式方程组, 并将该模式用于渤海海域进行预报实验, 得到的结果与观测资料一致。凌铁军等^[8]使用中尺度预报模式MM5(Fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model)在黄海和渤海

海域进行预报试验, 证实了MM5有较强的预报能力, 且稳定性强, 适合用于我国业务预报系统。陈德文^[9]建立了一个较适合于台湾岛周边海域的台风风场模型, 并成功应用于台湾周围海洋风预报模拟中。陈俊文等^[10]则利用WRF(Weather Research and Forecasting Model)模式成功模拟出一次南海冬季的大风过程。Accadia等^[11]利用QBOLAM(Quadrics Bologna Limited-Area Model)模式对地中海海域海洋风进行预报, 并用QuikSCAT卫星资料对其进行评估, 证实了其预报可信性。Vishnu等^[11]证明WRF模式在印度西海岸准确预测出前季风季的海洋风, 且海洋风昼夜变化特征与实际情况相符。已有研究表明: 尽管单一大气模式的海洋风场预报具有较好的业务应用能力, 但考虑到大气和海洋存在着相互作用, 单一模式在完整描述大气海洋彼此间相互作用过程存在不足^[12-13]。单一大气模式总是假定海表面温度(Sea Surface Temperature, SST)固定不变^[14], 然而实际上SST往往会随着大气湿度的变化而改变, 也受短波辐射和潜热通量等物理量的影响^[15], 同时, SST对大气存在一个负反馈机制, 变化的海温会

收稿日期: 2017-02-21; 修回日期: 2017-05-14。

基金项目: 国家“863”计划项目(2012AA091801); 中国科学院战略性先导科技专项(XDA10010405)。

作者简介: 詹思筠(1991-), 硕士在读, 从事海洋气象研究。E-mail: zsyzy0603@163.com

通信作者: 齐琳琳(1973-), 高级工程师, 博士, 从事海洋气象研究。E-mail: niceqll@mail.iap.ac.cn

对降水、大气层结稳定度^[16]、海洋风场甚至热带气旋^[14]产生不同影响。海浪场则能改变海表状态,直接影响海气界面上的动量、热量和物质交换过程^[17]。因此海洋风场预报,尤其是海面低空风的预报应以区域海气浪耦合模式的应用为发展方向。

目前针对区域海气浪耦合模式的应用研究国内外已取得一系列成果。姚素香等^[18]利用RegCM3 (ICTP Regional Climate Model version 3)和POM 2000 (Princeton Ocean Model)的耦合较好地模拟出我国夏季降水带,并给出了长江流域降水与孟加拉湾、南海等海域海温的关系。Huang等^[19]利用RegCM3和POM的耦合准确模拟出南海和西太平洋地区海表温度,很好地反映出相关海域的海气相互作用关系。Doscher等^[20]则利用海气冰耦合模式RCAO (Rossby Centre regional Atmosphere Ocean model)准确模拟出波罗的海的海温。Hsu等^[21]则将COAMPS (Coupled Ocean /Atmosphere Mesoscale Prediction System)模式应用于加利福尼亚的中部和南部海岸的海洋风预报,发现分辨率对模式准确率的重要性。孙建奇等^[22]等尝试用DEMETER (Development of a European Multimodel Ensemble System for Seasonal to Interannual Prediction)耦合模式对西北太平洋的台风活动进行预测,预测性能良好。刘娜等^[23]通过WRF、SWAN (Simulating Waves Nearshore)和ROMS (Regional Ocean Modeling System)耦合模式研究了2011年台风“梅花”的热通量交换和物理过程。Ren等^[24]利用该模式则研究了2011年台风“洛坦”期间的大气和海洋动力过程。关皓等^[17]基于中尺度大气模式(MM5)、区域海洋模式(POM)和第三代海浪模式(WAVEWATCH-III, WW3),建立了适用于我国南海海区的中尺度海气浪耦合模式,并较好模拟了两次台风过程。

上述研究表明:目前利用区域海气浪耦合模式进行的研究主要侧重于海温^[15,19-20]、降水^[16,18]和台风过程^[14,17,22-24],而对于海洋风场,尤其是海洋低空风的预报研究较为欠缺。因此,本文针对西北太平洋海域,分别基于一次有无台风过程开展了区域海气浪耦合模式的72 h风场预报性能研究,通过分析有无台风过程的耦合模式海面风场预报精度,找出可能影响原因,从而为进一步发展完善区域海气浪耦合模式的海洋风场业务预报提出一些可能改进方向。

2 区域海气浪耦合模式

本文的区域海气浪耦合模式以中尺度耦合器MCT (Model Coupling Toolkit)为主导,以区域气象模式WRF、海洋环流模式ROMS和海浪预报模式SWAN作为分量构成。其中,海洋模式ROMS是三维非线性、自由表面和基于地形跟随坐标的斜压原始模式,可以模拟不同尺度的运动,在国外已被广泛地应用于海洋研究诸多领域。大气模式WRF则是一个完全可压的非静力模式,是目前国际上应用最广泛、发展最成熟的中尺度大气模式,被世界上许多国家应用于气象研究和业务预报。而海浪模式SWAN是由荷兰Delft大学开发的第三代近岸海浪模式,能得出模拟海域内的各种波要素,具有稳定性好、计算精度较高等特点。耦合模式采用中尺度多模式耦合器MCT,通过“即插即拔”方式方便地连接各分量模式,耦合模式组成和变量传递如图1所示。

模式中的大气、海洋、海浪分量模式均采用可与彼此进行双向参数传递和数据交换的开放式计算框架,即在各自分量模式积分控制函数中加入耦合控制函数并予以调用使用。其中,大气分量模式在积分运算过程中不仅为海浪分量提供海面10 m风场,而且将计算得到的大气表层气压、2 m相对湿度、2 m温度、10 m风、总云量、蒸发、降水、长波和短波辐射、风应力、感热和潜热变量传递给它,同时还接收了海浪分量模式输出的浪高、周期和波和海洋分量模式输出的海表温度。同时,海洋分量模式在积分运算过程中不仅更新大气提供的下垫面温度,

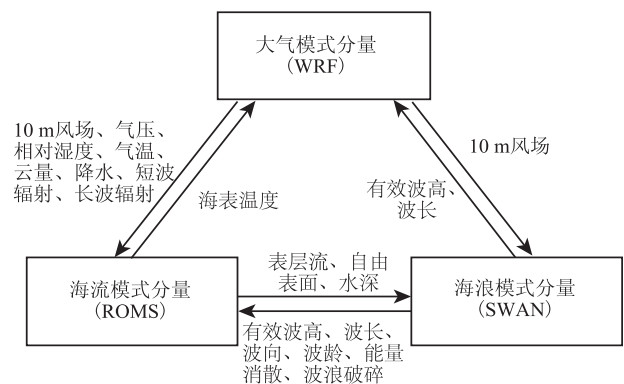


图1 耦合模式变量交换示意图

而且将计算得到的海平面高度、垂向平均流速和底面粗糙度传递到海浪分量模式,同时还接收大气作为其上边界强迫提供的大气表层气压、2 m相对湿度、2 m温度、10 m风、总云量、蒸发、降水、长波和短波辐射、风应力、感热和潜热通量,以及海浪输出的浪向、浪高、波长、周期、能量消散、波浪破碎。另外,海浪分量模式也是不仅输出浪高、周期和波长与大气进行耦合,而且将浪向、浪高、波长、周期、能量消散、波浪破碎的影响也传递至到海洋分量模式,同时接收大气提供的海面10 m风,以及海洋分量模式输出的海平面高度、垂向平均流速和底面粗糙度。相比而言,模式采用MPI分布式储存的MCT耦合器,将大气模式WRF、海洋模式ROMS和海浪模式SWAN作可扩展的耦合分量模式,将彼此间的交换变量以灵活的场变量存储格式,通过耦合消息传递和再分配方式,以及不同时空尺度数据网格插值,通过“插拔”方式的实现分量模式模块化的全局并行同步耦合具有较好的先进性。

以西北太平洋海域为研究对象,分别选取2014年9月8日和19日进行了耦合模式的72 h预报运行试验。其中,8日12时(世界时,下同)—11日12时定义为“无台风日”个例,而19日12时—22日12时定义为“台风日”个例(2014年16号台风“凤凰”)。耦合模式的WRF初、边值场采用 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 的T799(谱模式TL799L91)预报场,ROMS初、边值场采用 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 的北半球海洋预报场,而SWAN则采用提前24 h热启方式,所需风场资料同样来自 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 的T799预报场。模式水平分辨率为6 km,各分量模式逐1 h交换一次变量。模式计算区域如图2所示。需说明的是,图中红、蓝色标注点分别为无台风日和台风日用于评估模式性能的GPS(Global Position System)观测站点。而用于比对分析的客观分析场为逐6 h分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 的GFS(Global Forecast System)的初始分析场数据。

需说明的是,考虑到该耦合模式在试运行期间曾针对其与单一WRF模式开展过为期一年的比对分析试验。结果表明:耦合预报均方根误差年平均总体上具有一定优势,主要是风场和表层温度场上。因此,本文现给出2013年耦合模式与WRF模式的U风分量均方根误差月/年平均检验比对(见图3)来以做说明。

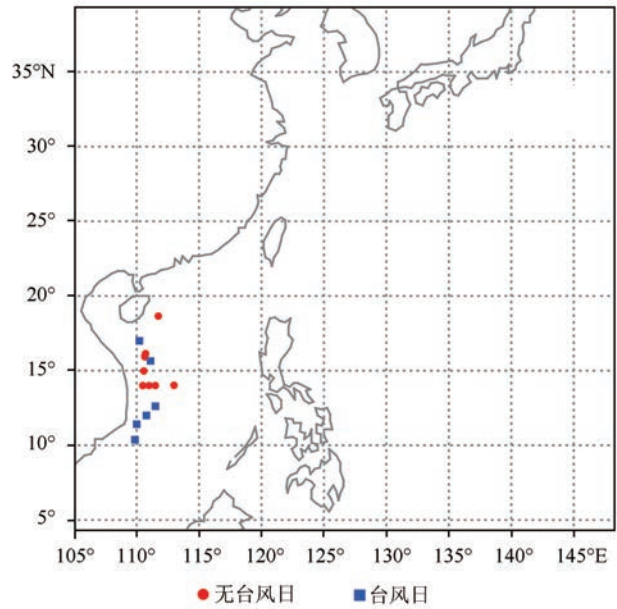


图2 模式计算区域及位于其内的GPS观测站点分布

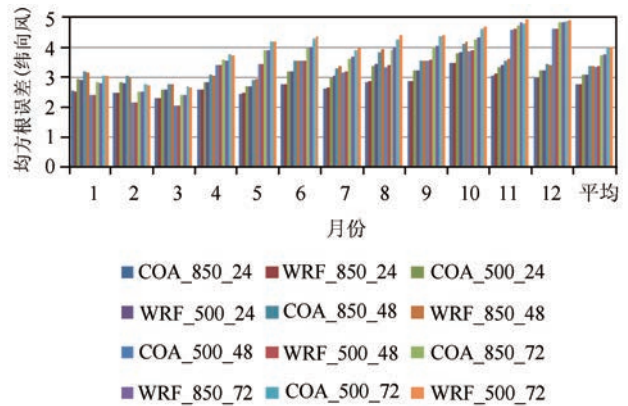


图3 2013年耦合模式与WRF模式24、48、72 h U风分量均方根误差月/年平均检验比对

3 海面10 m风的预报效果分析

以海面10 m风为例,分别针对2014年9月8日和19日的有无台风过程,不仅分析了72 h内逐24 h耦合模式的风场预报分布,而且还给出了预报场与相应时刻客观析场的风矢与风速差,以便更加直观地了解耦合模式预报效果。

3.1 无台风的风场效果分析

图4给出了8日12时—11日12时逐24 h模式

风场分布。可以看出,9日12时,南沙群岛-菲律宾群岛附近以西南风为主,在西沙群岛转为偏东风,东海-黄海-渤海一带则表现为偏北风;东部洋面自东向西呈东北风-偏南风的顺时针变化,并在四国海盆南部转为偏西风,向东汇入一个气旋中,模式风速基本维持在6 m/s以内。10日12时,南沙群岛的西南风、东海-黄海-渤海一带的偏北风和洋区东侧的东北风增强,风速可达10 m/s以上。洋区东侧的东北风一部分向南海输送,一部分在九州-帕劳海岭中部折为偏南风,向日本群岛附近运动。11日12时,南海南部的西南风与其北部的偏东风增强成为一个小型气旋,最大风速超过10 m/s;东海-黄海-渤海风速继续增强,且转变为东北风。菲律宾群岛附近的西南风增强,在预报区域东边界逆转为东南风,又在九州-帕劳海岭中部分别流向台湾海峡和日本群岛附近。

图5则是8日12时—11日12时逐24 h的预报风场减去相应时刻GFS风场而得到的风矢与风速差。可以看出:模式预报效果总体是好的。初始时刻,风速差主要集中在日本岛以南的气旋中心位置和棉兰老岛周围,且为负差值,风向差异则集中在加罗林群岛北部小部分地区和棉兰老岛周围洋区。随着预报时效的增加,风向差异区逐渐扩大至加罗林群岛北部的九州-帕劳海岭和马里亚纳海沟洋区;菲律宾群岛北部边界出现风速的正差值区,日本岛以南的负差值区则随气旋中心东移出试验区,加罗林群岛以北出现新的负差值区,预报场风

速低于客观场9 m/s以上,此处,风速差值区与风向差异区重叠。

由此可知,耦合模式对无台风情况下海面10 m风场具有良好的预报效果,除加罗林群岛附近外,预报的风场分布基本与客观场一致。

3.2 有台风的风场效果分析

图6给出了19日12时—22日12时逐24 h的模式预报风场分布。可以看出,20日12时,台风中心正位于台湾岛上,内部最大风速可达18 m/s以上。南海-菲律宾海沟一带位于台风南侧,自东向西盛行风由东南风转为西南风。黄海-日本海一带以偏东风为主,日本群岛附近则表现为西南风。21日12时,台风中心向东北方移至钓鱼岛附近,最大风速增强,达到20 m/s以上,日本群岛东部转变为东北风;东部洋面的偏东风在加罗林群岛附近逆转为西南风。22日12时,台风持续向东北方移动,台风中心位于东海,南海依旧盛行西南风,菲律宾海沟一带则转变为偏北风,并在加罗林群岛一带转变为偏西风-偏南风。日本群岛的偏北风和东北风加强,一部分在四国海盆一带转为偏东风,吹向台风位置,另一部分继续南下,在九州-帕劳海岭中部与南侧的偏东风汇合,吹向菲律宾群岛北部。

图7同样是19日12时—11日12时逐24 h的模式预报场与GFS风场的风矢与风速差。可以看出,台风日洋区风场差异较大,台风中心位置预报场与客观场差异更为显著。初始时刻,两类风场的台风

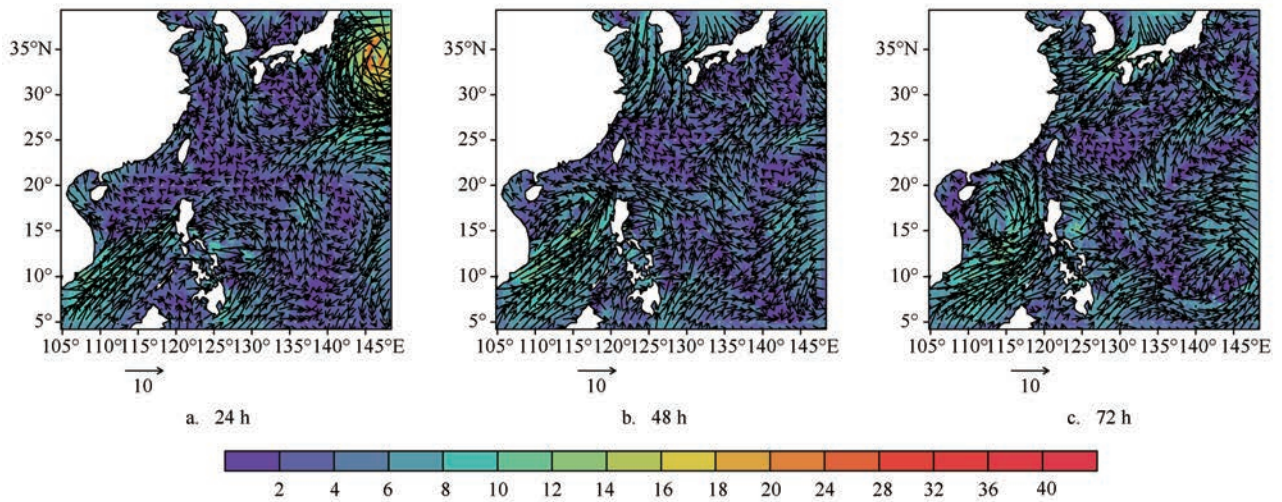


图4 2014年9月8日12时—11日12时逐24 h模式预报10 m风场分布

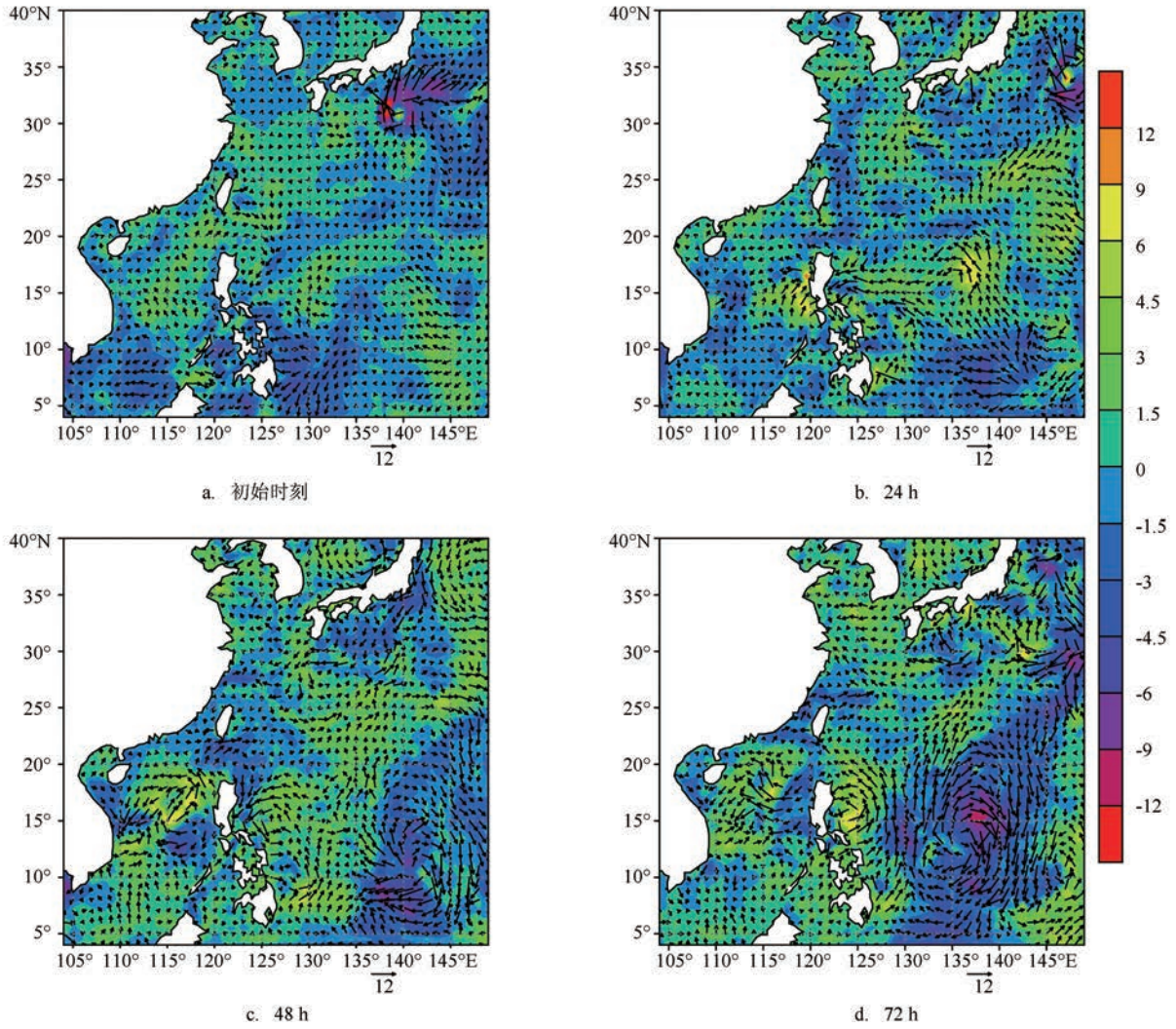


图5 2014年9月8日12时—11日12时逐24 h模式预报10 m风场与GFS风场差值图

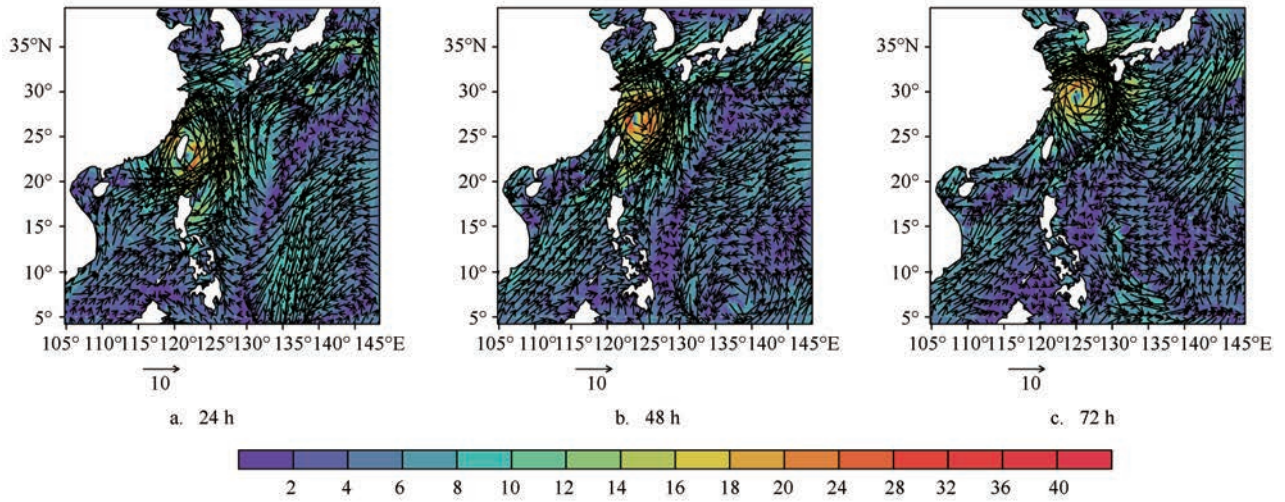


图6 19日12时—11日12时逐24 h模式预报10 m风场分布

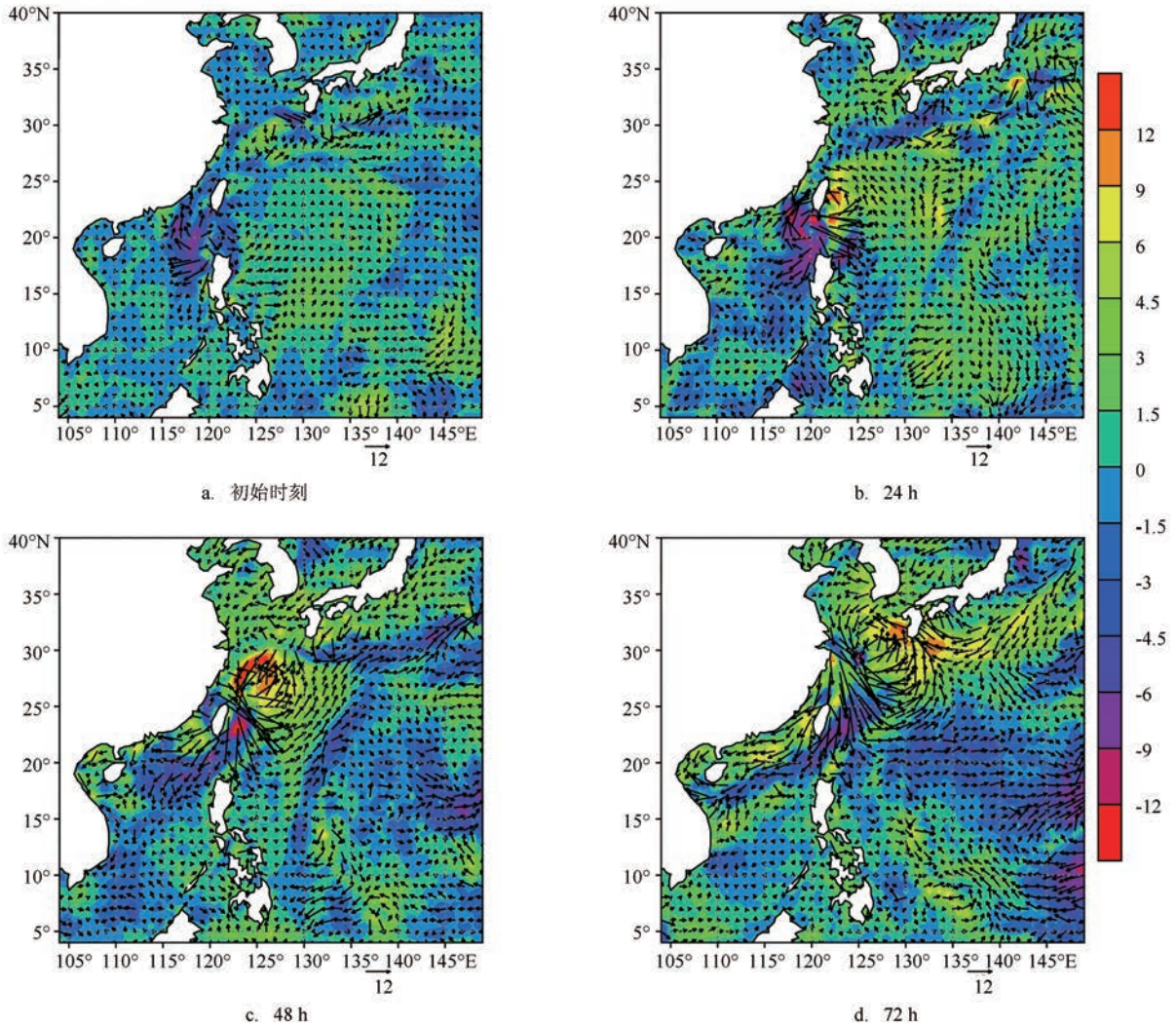


图7 2014年9月19日12时—22日12时逐24 h模式预报10 m风场与GFS风场差值图

中心均位于巴士海峡,预报场风速明显低于客观场;台风外部,风场差异不明显,在试验区东南边界有小的风速正差值区。随着预报时效的增加,台湾海峡-东海海域一带,由于预报场和客观场描述的台风路径/中心位置的偏差,分裂出明显的风速正/负差值区,其中正差值区表示预报场台风位置;台风外部,两类风场差异主要集中在试验区东侧边界,尤其在19日12时出现明显的风速负差值区,且与风向差异区重合。

由此可见,台风个例情况下,耦合模式预报的风场强度弱于客观分析场的,这与他人的耦合模式台风预报研究相一致。此外,对受台风影响弱的区域,模式风场预报效果相对好。

上述对有无台风的西北太平洋海面10 m风预报效果分析表明:区域海气浪耦合模式对无台风过程的海面10 m风预报效果较好,而对于台风过程的预报效果则偏弱。这一结果符合以往耦合模式对台风强度预报偏弱的结论^[25]。初始时刻,预报风场与客观场较一致,积分时间越长,初始场的偏差扩大,两类风场的差异也越大。无台风日,洋区风场差异主要集中在加罗林群岛以北洋面;台风日,除了台风中心所在位置,风场差异则集中在试验区东边界。

对于台风过程中海面10 m风,后续耦合模式将考虑从初始场和模式物理参数化过程予以加强。

4 海面低空风的预报效果评估

在耦合模式的海面10 m风预报效果分析基础上,本节利用获取到的海面空中风观测资料,通过对1 000 m以内模式预报风场 u 、 v 分量的误差统计分析,检验评估出区域海气浪耦合模式在有台风过程的低空风预报应用中的性能。

4.1 检验资料和评估方法

本文用以检验评估的观测资料为随船释放的GPS探空。资料时效为2014年8月29日00时—2014年9月21日00时,采用逐4 h,垂直向上每隔10 m记录一个数据。考虑到每个探空点只存有一个记录,故评估计算时采用整个预报时段内的平均数据。检验评估采用均方根误差(RMSE)和皮尔逊相关系数(R)进行。其中,均方根误差可以用来衡量观测值同真值之间的偏差,皮尔逊相关系数则能反映变量之间相关关系密切程度。均方根误差和皮尔逊相关系数计算公式如下所示:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (F_i - O_i)^2}{N}} \quad (1)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (F_i - \bar{F})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (F_i - \bar{F})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2}} \quad (2)$$

式中: F_i 代表模式预报场的 u 或 v 分量, O_i 代表GPS探空风场的 u 或 v 分量。

4.2 预报性能评估分析

表2为不同高度上,无台风日模式预报场与观测资料的比对分析结果。可以看出,10 m高度上, u 、 v 分量的均方根误差分别为0.78 m/s和1.66 m/s,相关系数则分别为0.91和0.85,模式预报效果很好,且模式预报 u 分量好于 v 分量的。500 m高度以内, u 分量的均方根误差随高度增加而增大,在500 m高度上达到最大2.09 m/s之后,均方根误差又随高度增加而减小;1 000 m高度以内, v 分量的均方根误差则随着高度增加而增加,并在1 000 m高度上达到最大3.62 m/s。其中, u 分量均方根误差维持在

表2 无台风日过程模式预报低空风场 u 、 v 分量比对分析

高度/m	u 分量		v 分量	
	RMSE/(m/s)	R	RMSE/(m/s)	R
10	0.78	0.91	1.66	0.85
50	1.57	0.87	1.78	0.87
100	1.97	0.89	2.45	0.87
200	1.83	0.84	2.53	0.86
300	1.99	0.84	2.73	0.85
400	2.07	0.87	2.83	0.85
500	2.09	0.90	3.04	0.80
600	2.06	0.88	3.10	0.78
700	1.84	0.82	3.34	0.75
800	1.75	0.79	3.55	0.72
900	1.64	0.77	3.58	0.69
1 000	1.88	0.71	3.62	0.68

1.5~2 m/s间, v 的则较 u 的略大,基本为在1.5~3.5 m/s间。同时, u 、 v 分量的相关系数随着高度上升而减小,50~700 m高度间, u 分量的相关系数保持在0.8以上, v 分量的保持在0.7以上,而700 m以上, u 、 v 分量的相关系数分别降至0.7和0.65以上。到了1 000 m高度上, u 、 v 的均方根误差增至1.88 m/s和3.62 m/s,相关系数则降至0.71和0.68。总体来看,无台风日个例中,耦合模式对海洋低空风的预报效果是不错的,且 u 分量的预报效果好于 v 分量的。

同样地,表3为不同高度上,台风日模式预报场与观测资料的误差分析结果。可以看出,200 m高度上, u 、 v 分量的均方根误差分别为4.86 m/s和7.56 m/s, u 的相关系数为0.60, v 分量的仅有0.34,显然,200 m高度上模式预报效果不佳,但模式对 u 分量的预报仍然好于 v 分量的。 u 分量的均方根误差在600 m高度以内随高度增加而减小,在600 m高度上达到最小值4.42 m/s之后,又随高度增加略有增大; v 分量的均方根误差则在700 m以内随着高度增加而减小,700 m高度上减至最小值6.26 m/s,之后高度上略有增加。其中, u 分量均方根误差维持在4.4~5 m/s间, v 的均方根误差较 u 的偏大,基本在6.2~7.8 m/s之间。与之相反, u 、 v 分量的相关系数随着高度上升增加,500 m及以下高度, u 分量的相关系数均不超过0.8,以上高度相关系数保持在0.8以上; v 分量的相关系数在700 m及以下高度偏低,不超过0.6,

表3 台风日过程模式预报低空风场 u 、 v 分量比对分析

高度/m	u 分量		v 分量	
	RMSE/(m/s)	R	RMSE/(m/s)	R
200	4.86	0.60	7.56	0.34
300	4.96	0.65	7.76	0.50
400	4.65	0.75	7.49	0.54
500	4.49	0.83	7.14	0.59
600	4.42	0.87	6.56	0.55
700	4.55	0.86	6.26	0.63
800	4.48	0.85	6.52	0.67
900	4.81	0.85	6.29	0.69
1 000	4.72	0.84	6.31	0.68

700 m 以上高度则保持在 0.63 以上, 但均不超过 0.7, 分析表明: 台风日时, 耦合模式的低空风预报效果相对略差, 但空中好于近海层。同时, 台风日情况下对 u 分量的预报效果仍然优于对 v 分量的预报效果。

为了进一步分析耦合模式海面低空风场的预报效果, 根据 GPS 观测位置, 以 10 m 和 1 000 m 高度为例, 给出了预报场与观测场散点对比分布, 其中红色代表无台风日预报场, 蓝色代表台风日预报场, 黑色代表 GPS 观测场。

图 8 为 10 m 高度上无台风日 (红色) 和台风日 (蓝色) 预报风场 u 、 v 分量与 GPS 实测风场 u 、 v 分量的随时间变化对比图。可以看出, 无台风日模式预报风场分布与观测的变化趋势基本一致。其中, 9

日 12 时之前, u 分量均为正, 表现为西风且风速递增。9 日 12 时骤变为东风。由于 u 、 v 分量中风速的符号不代表大小, 只表示分量方向, 因此风速大小表现为“减-增-减-增”的“W 型”变化。而 v 分量在 10 日之前均为正, 表现为南风且风速持续减小。到了 10 日后转为北风, 风速持续增大。台风日时模式预报风场的变化趋势与观测的也较为一致。其中, u 分量均为正, 持续表现为西风且风向没有变化, 风速大致表现为递增趋势。而 v 分量也为正, 持续南风且风速也表现为递增趋势。

同样, 1 000 m 高度上无台风日 (红色) 和台风日 (蓝色) 预报风场 u 、 v 分量与 GPS 实测风场 u 、 v 分量的随时间变化对比显示 (见图 9), 该高度上的预报风场与观测变化趋势也基本一致。无台风日模式预报的 u 分量最初表现为西风, 9 日 12 时后转变为东风。而 v 分量起初为南风, 风速达 6 m/s 左右。随后风速逐渐减小, 在 10 日 06 时后转变为北风。台风日模式预报的 u 分量持续为西风, 风速呈缓慢上升趋势, 相应的 v 分量持续表现为南风, 风速逐渐增加。但 1 000 m 高度上, 预报场风速明显较观测场偏低, 台风日的风速偏差尤其明显, 且 v 分量差值明显大于 u 分量。

图 10、11 分别为无台风和台风日时预报风场与 GPS 风场的垂直廓线图, 其中 a 图均为 u 分量的, b 图则为 v 分量的。同一颜色表示同一时刻的两种风场, 其中圆形表示预报风场, 三角形表示 GPS 数

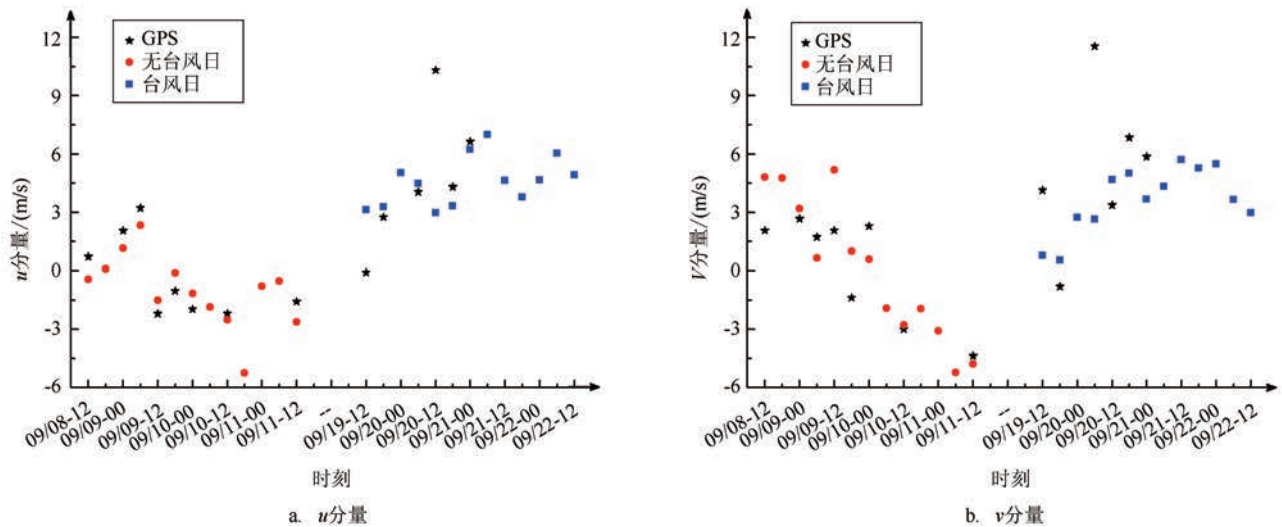


图8 10 m 高度模式预报风场和观测风场随时间变化

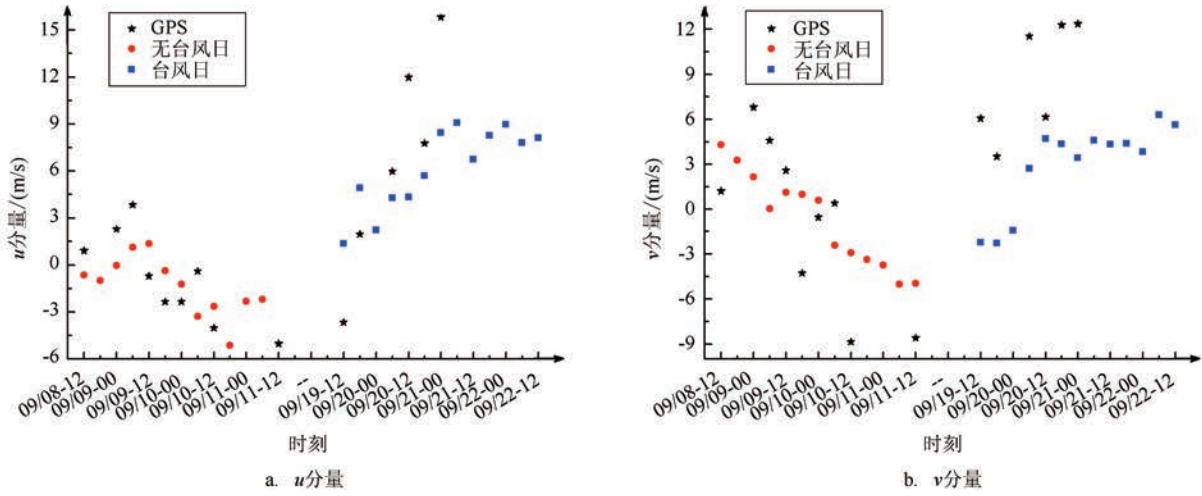


图9 1000 m高度模式预报风场和观测风场随时间变化

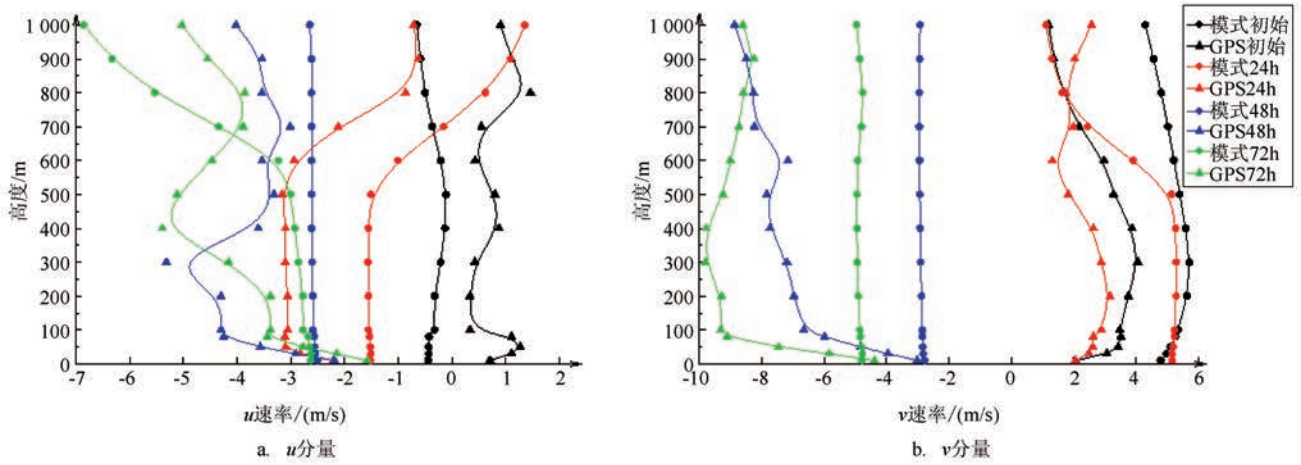


图10 无台风日预报风场和观测数据垂直廓线图

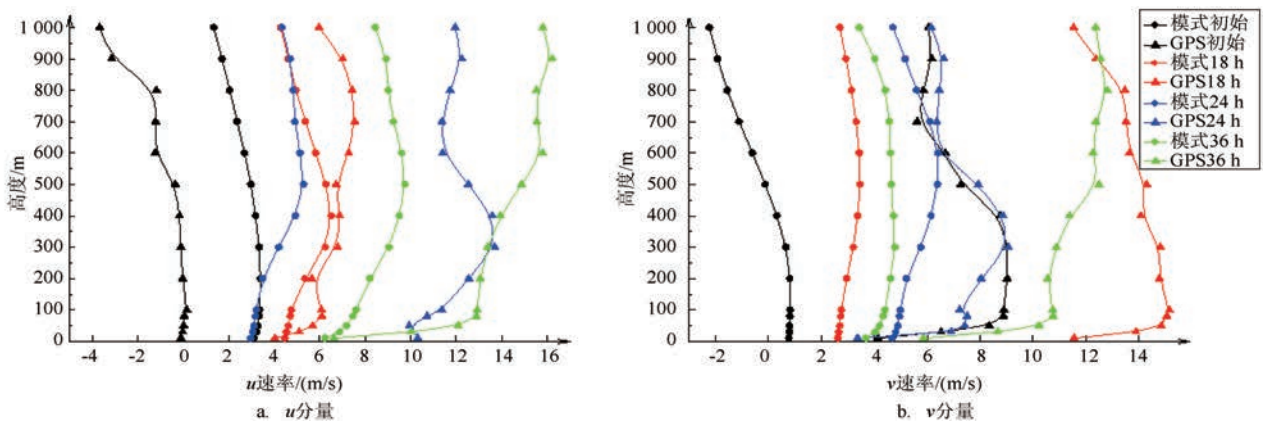


图11 台风日预报风场和观测数据垂直廓线图

据。显然,无论是否在台风日,预报风场与GPS数据的 u 、 v 分量大小上均存在偏差,但两种风场随高度的变化趋势较为接近。其中,台风日预报风场与GPS数据的偏差大小明显大于无台风日。无台风日时,两类风场的数值偏差随着高度的上升先增大后减小,在600~700 m高度左右偏差达到最小,在700 m以上高度继续扩大;台风日,两类风场随高度的变化趋势相当接近,但风速大小的差值非常明显。垂直廓线的分析结果与误差分析结果非常相近。

综上所述,无台风日,耦合模式的海面低空风预报与GPS观测更为接近,随时间变化趋势基本一致。尽管模式预报的风场性能随高度增加略有下降,且 v 分量的效果略差于 u 分量的,但总体性能是可接受的。相比而言,台风日,模式的低空风预报效果略有减弱,但风场变化趋势也是与观测时一致的。

5 结论与讨论

本文以西北太平洋为例,分别基于一次有无台风过程,利用区域海气浪耦合模式开展了72 h风场预报研究,并利用获取到的GPS风场观测资料着重对1 000 m以下海面低空风进行了预报性能评估,得出主要结论如下:

(1)在海气浪相互作用中,海洋主要通过大气输送热量,尤其是提供潜热来影响大气运动。大气则主要通过风应力向海洋提供动量改变海流,进而重新分配海洋的热含量。而海洋中海浪和海流是同时存在的,且海浪通过影响海面粗糙度来影响大气。通过耦合模式72 h海洋风场预报总体看来,耦合模式对无台风过程的海面10 m风预报效果较好,有台风过程影响时预报效果减弱,因此,针对台风的耦合模式预报需从模式初始场和物理过程参数化等加以发展完善;

(2)1 000 m以下海面低空风的预报效果评估显示,耦合模式对无台风情况的海面低空风预报结果与GPS观测更为接近,随时间变化趋势也相一致。预报效果随高度增加略有减弱。而有台风影响时,模式对海面低空风预报效果有所减弱,但变化趋势与观测也是基本一致。此外,无论有无台风过程,

耦合模式在各高度上均是 u 分量预报效果好于 v 分量的;

(3)受比对观测资料时效限制,本文耦合模式的海洋风场预报应用研究仅针对有无台风个例进行,后续还需开展系统性批量试验加以更充分的性能评估。

综上所述,区域海气浪耦合模式可以相对更为真实地反映海洋环境变化规律,可作为海洋气象业务预报重要工具加以持续发展。进一步研究大气和海洋中的中小尺度过程在海气耦合中的作用机制,持续改进海洋和大气界面通量交换及内部混合过程等参数化等是区域海气浪耦合模式发展的重点。同时,加强耦合模式海洋要素预报与海上观测的相互支撑、相互验证也是提升海上天气预报准确度的必然途径。

致谢:中国科学院南海所王东晓研究员和陈举研究员为本文的海上观测资料的应用分析给予了热情指导帮助,在此感谢。

参考文献:

- [1] 张学宏. 西北太平洋海浪数值预报业务化系统[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2005.
- [2] Accadia C, Zecchetto S, Lavagnini A, et al. Comparison of 10-m Wind Forecasts from A Regional Area Model and QuikSCAT Scatterometer Wind Observations over the Mediterranean Sea[J]. *Monthly Weather Review*, 2007, 135(5): 1945-1960.
- [3] 杨本湘. 西昌发射场区旱季高空最大风的分析预报[J]. *气象*, 2003, 29(6): 22-25.
- [4] 朱苗苗, 贾本凯, 郑崇伟, 等. 西北太平洋海表风速特征分析[J]. *气象水文海洋仪器*, 2013, 30(4): 125-128.
- [5] 刘志宏, 郑崇伟, 庄卉, 等. 近22年西北太平洋海表风速变化趋势及空间分布特征研究[J]. *海洋技术*, 2011, 30(2): 127-130.
- [6] 谢强. 有限区域海面风场数值模式及其在海洋动力要素预报中的应用[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 1999.
- [7] 谢强, 侯一筠, 尹宝树, 等. 有限区域海面风场数值模式的建立[J]. *海洋科学集刊*, 2000: 1-9.
- [8] 凌铁军, 张蕴斐, 杨学联, 等. 中尺度数值预报模式(MM5)在海面风场预报中的应用[J]. *海洋预报*, 2004, 21(4): 1-9. [9] 陈德文. 台湾岛周边海域台风海面风场及其模型化研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2006.
- [9] 陈德文. 台湾岛周边海域台风海面风场及其模型化研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2006.
- [10] 陈俊文, 蔡扬, 白毅平, 等. 南海冬季一次海面大风天气的WRF模式预报检验[J]. *海洋预报*, 2014, 31(4): 32-40.
- [11] Vishnu S, Francis P A. Evaluation of High-Resolution WRF Model Simulations of Surface Wind over the West Coast of India[J].

- Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2014, 7(5): 458-463.
- [12] 邹立维, 周天军. 区域海气耦合模式研究进展[J]. 地球科学进展, 2012, 27(8): 857-865.
- [13] 吕世华, 陈玉春, 朱伯承. 南海海域海-气耦合模式及其数值模拟试验[J]. 高原气象, 2000, 19(4): 415-426.
- [14] 孙明华. GRAPES-ECOM-si 区域海气耦合模式的发展及其对热带气旋强度预报的研究[D]. 南京: 中国气象科学研究院, 2013.
- [15] Li C H, Lin A L, Li T. Effects of Air-Sea Coupling on the Eastward Propagating Boreal Winter Intraseasonal Oscillation Over the Tropical Indian Ocean[J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2017, 10(1): 51-57.
- [16] 邹立维, 周天军. 一个区域海气耦合模式的发展及其在西北太平洋季风区的性能检验: 不同大气分量的影响[J]. 中国科学: 地球科学, 2012, 42(4): 614-628.
- [17] 关皓, 周林, 薛彦广, 等. 南海中尺度大气-海流-海浪耦合模式的建立及应用[J]. 热带气象学报, 2012, 28(2): 211-218.
- [18] 姚素香, 张耀存. 区域海气耦合模式对中国夏季降水的模拟[J]. 气象学报, 2008, 66(2): 131-142.
- [19] Huang Q, Yao S X, Zhang Y C. Analysis of Local Air-Sea Interaction in East Asia Using a Regional Air-Sea Coupled Model[J]. Journal of Climate, 2012, 25(2): 767-776.
- [20] Doscher R, Willen U, Jones C, et al. The Development of the Regional Coupled Ocean-Atmosphere Model RCOA[J]. Boreal Environment Research, 2015, 7(3): 183-192.
- [21] Hsu H M, Oey L Y, Johnson W, et al. Model Wind over the Central and Southern California Coastal Ocean[J]. Monthly Weather Review, 2007, 135(5): 1931-1944.
- [22] 孙建奇, 陈活泼. DEMETER 耦合气候模式对西北太平洋台风活动及其影响因子的预测效能[J]. 科学通报, 2011, 56(32): 2725-2731.
- [23] 刘娜, 凌铁军, 王辉, 等. 利用海洋-大气-海浪-沉积物运输耦合模式系统(COAWST)对西北太平洋台风的数值模拟[C]//第五届海峡论坛·2013海峡科技专家论坛、两岸海洋科技研讨会暨第五届海峡两岸海洋环境监测及预报技术研讨会. 青岛: 中国海洋学会, 2013.
- [24] Ren D Q, Du J T, Hua F, et al. Analysis of Different Atmospheric Physical Parameterizations in COAWST Modeling System for the Tropical Storm Nock-ten Application[J]. Natural Hazards, 2016, 82(2): 903-920.
- [25] Liu N, Ling T J, Wang H, et al. Numerical Simulation of Typhoon Muifa (2011) Using a Coupled Ocean-Atmosphere-Wave-Sediment Transport (COAWST) Modeling System[J]. Journal of Ocean University of China, 2015, 14(2): 199-209.

Application of a regional ocean-atmosphere-wave coupled model on predicted wind field cases in the Northwest Pacific Ocean

ZHAN Si-yu^{1,2}, QI Lin-lin², LU Wei¹, MENG Xu-hang³

(1. School of Meteorology of PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101 China; 2. Meteorological Institute of the Air Force Equipment Academy, Beijing 100085 China; 3. Meteorological Center of Air Force, Beijing 100029 China)

Abstract: In order to evaluate the performance of the coupling model faced to the ocean wind field, the application research of a regional ocean-atmosphere-wave coupled model is conducted based on a 72-hour wind field forecasting with a (non-) typhoon process over the northwest Pacific Ocean. The prediction results under 1000 meters are evaluated with the GPS observation data. The results show that, the coupled model can predict the ocean wind reasonably in a non-typhoon day whether at 10-meter height or under 1000 meters. The evaluation with/without typhoon process indicates that, the low-level wind forecast trends roughly identical to the GPS observations over time. The forecasting effect of u-components is better that of v-components at any level. Aiming at the coupled model forecasting for typhoon, the initial field and physical process parameters should be improved.

Key words: Northwest Pacific ocean; regional ocean-atmosphere-wave coupled model; marine wind field