

南海冬季一次海面大风天气的WRF模式预报检验

陈俊文¹, 蔡扬², 白毅平², 林文实¹

(1. 中山大学环境科学与工程学院, 广东 广州 510275; 2. 国家海洋局南海预报中心, 广东 广州 510310)

摘要: 为寻找出适合南海冬季海面大风天气预报的边界层参数化方案, 利用中尺度气象模式WRF中9种边界层方案(YSU、MYJ、QNSE-EDMF、MYNN2、MYNN3、ACM2、BouLac、UW、GBM)对2012年12月29-31日的大风过程进行预报, 并用最终分析资料(FNL)检验10 m风场预报。结果表明: 风速风向预报的整体平均偏差相当, 风向预报的均方根误差较风速大, 风速风向与实况的相关随着预报时间增加, 整体呈现下降趋势; 各方案对海陆交界风速预报普遍偏大2 m/s以上, 而在远离陆地的海域偏差较小; YSU方案对北部湾、东沙群岛、西沙群岛、南沙群岛4个海区风场的变化趋势均能较好预报, 整体而言, 南海大部分海域的预报偏差较小, YSU、MYNN2、MYNN3方案对风速预报较好, ACM2方案对风向预报较好。

关键词: 海面风场; WRF; 边界层参数化方案; 模式检验

中图分类号: P732 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2014)04-0032-09

1 引言

南海冬半年常受北方南下冷空气影响, 海面出现大风天气, 对航运、远洋捕捞、海水养殖、海岛旅游、石油开采等造成严重影响。因此对南海海面大风天气的预报需求日益增长, 准确预报海面大风的消长、位置、风力显得尤为重要。

气象台站通常采用经验预报、统计预报、数值模式预报、统计动力预报^[1]等方法预报海面风场, 其中数值模式预报已成为一种重要方式。但海上观测资料密度低, 对构造真实的初始场有很大困难。不少学者采用GRAPES三维变分同化模式^[2]、MM5中尺度模式^[3-5]、WRF中尺度模式^[6]对大陆近海、海峡或海面冷空气大风天气过程进行模拟预报, 均能较好模拟区域的风场演变、突变及分布特征, 但对单点的最大风速模拟偏小, WRF模式模拟结果优于MM5模式^[7-8]。Chen等^[9]利用MM5模式对缅甸湾海面气象场进行预报, 风速预报优于风向。盛春岩等^[10]对

比分析了MM5、WRF-RUC和T639模式对山东沿海最大风速预报的结果, 各模式对小风预报偏大, 大风预报偏小, 对6级以上大风WRF模式预报效果最好。崔琳琳等^[11]利用WRF模式模拟了2008年东海水面风场, 并与QuikSCAT卫星散射计资料进行比较分析, 台风月份两者偏差波动较大。但是利用数值模式对南海海面风场进行预报检验的工作较少。

数值模式对风场的准确模拟与模式的边界层参数化方案^[12]、陆面过程方案以及使用的地形、下垫面数据^[13]有很大关系。不少学者认为需因地制宜选用不同的边界层参数化方案, 以达到最好的预报效果。王颖等^[14]采用WRF模式的3种边界层参数化方案(YSU、MYJ和ACM2)对兰州地面风场进行模拟, 模拟风速均偏大, 认为ACM2方案效果最好; 张小培等^[15]则采用4种边界层参数化方案(YSU、ACM2、MYNN2和BouLac)对黄山周边风场进行模拟, 同样认为ACM2方案效果最好; 而Miglietta等^[16]用YSU和MYJ方案结合不同的扩散参数对地中海

收稿日期: 2013-08-02

基金项目: 973计划(2014CB953904); 高等学校博士学科点专项科研基金(20130171110027); 中央高校基本科研业务费专项(13LGC03)

作者简介: 陈俊文(1990-), 男, 硕士研究生, 主要从事大气数值模拟研究。E-mail: chjunw@mail2.sysu.edu.cn

克里特岛附近海域风场进行模拟,认为不采用扩散参数的YSU方案模拟效果最好。Han等^[17]利用MM5模式中5种边界层参数化方案(MRF、BLK、MYJ、GS和PC)结合3种陆面过程方案对东亚地区气象场进行模拟,风速模拟整体偏大,白天风速演变模拟优于夜间,风向模拟较差,并认为模拟误差主要来自次网格尺度受下垫面影响的湍流^[18]。Zhang等^[19]利用MM5模式中5种边界层参数化方案(BLK、GS、MRF、MYJ和BT)对美国中部地面风场进行模拟,认为地面风场对边界层参数化方案非常敏感,模拟与观测风速相位一致,而风向有5—6h相位差,白天风速模拟偏小,夜间风速模拟偏大^[20]。

本文主要分析不同边界层参数化方案对南海冬季海面大风天气的预报效果,选用WRF-ARW(Advanced Research WRF)模式对南海冬季海面大风天气进行48 h预报,对模式中9种边界层参数化方案的预报效果进行评估,从而寻找出适合南海冬季海面大风预报的方案。

2 资料和方法

2.1 风场实况资料

考虑到实况资料需要足够的分辨率及准确度与模式预报结果进行对比,本文选取NCEP(National Centers for Environmental Prediction)发布的6 h更新一次的FNL 1°×1°资料作为南海海面风场的实况资料。

2.2 WRF模式设计

2.2.1 WRF模式基本参数

WRF是新一代中尺度数值预报模式,是完全可

压的非静力模式。水平方向采用Arakawa C格点,垂直方向采用地形追随非静力气压垂直坐标。时间积分采用3阶Runge-Kutta显式差分方案,5阶或6阶平流差分,采用通量形式的预报方程。

本文选用3.5版本的WRF-ARW模式,预报区域采取两重嵌套(见图1),水平网格距分别为45 km、15 km,最外层积分步长为270 s。为加强边界层的模拟,1 km高度以下分12层,垂直共分42层。模式采用Lin云微物理方案,Kain-Fritsch积云参数化方案,RRTM(Rapid Radiative Transfer Model)长波辐射方案,Dudhia短波辐射方案,Noah陆面过程方案。初始场及边界场采用0.5°×0.5°的GFS(Global Forecast System)逐3 h预报资料,积分时长为48 h,每6 h输出一次结果。

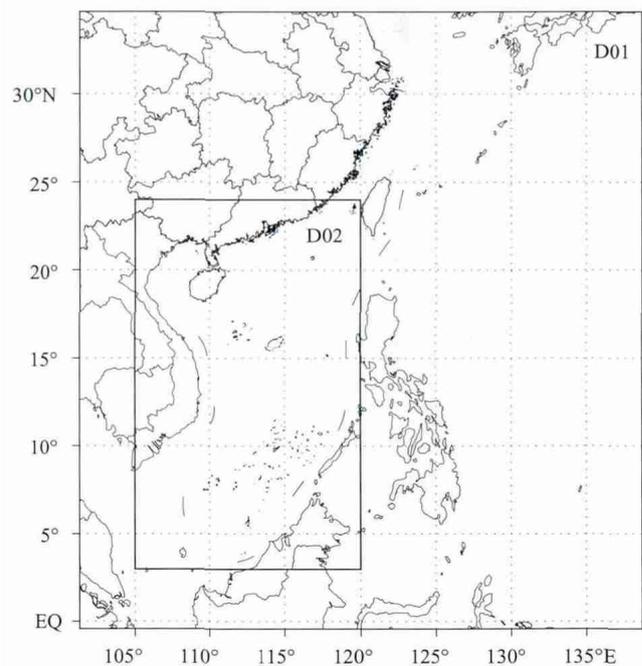


图1 预报区域

表1 模式试验方案设计

方案名称	边界层参数化方案	近地面层方案
YSU	Yonsei University scheme	MM5 Monin-Obukhov
MYJ	Mellor-Yamada-Janjic scheme	Eta Monin-Obukhov
QNSE	Quasi-Normal Scale Elimination PBL	QNSE
MYNN2	Mellor-Yamada Nakanishi and Niino Level 2.5 PBL	MM5 Monin-Obukhov
MYNN3	Mellor-Yamada Nakanishi and Niino Level 3 PBL	MM5 Monin-Obukhov
ACM2	Asymmetric Convective Model with non-local upward mixing and local downward mixing	MM5 Monin-Obukhov
BouLac	Bougeault-Lacarrère PBL	MM5 Monin-Obukhov
UW	UW scheme	MM5 Monin-Obukhov
GBM	Grenier-Bretherton-McCaa scheme	MM5 Monin-Obukhov

2.2.2 WRF模式试验设计

本文选用9种边界层参数化方案(见表1)对预报区域进行预报,由于部分方案只能选取相应的近地面层方案,所以无法统一近地面层方案,但大部分近地面层方案为MM5 Monin-Obukhov方案。

2.3 风场预报检验方法

2.3.1 指数检验

风场预报检验的范围是D02区域(见图1)中 3° — 24° N, 105° — 122° E的海域,陆地风场不算入检验范围,海陆边界判定采取多数原则($1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 范围),海域面积大于等于陆地面积记为海域,反之记为陆地。

由于实况资料的水平分辨率是 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$,而模式预报结果的水平分辨率是 $15\text{ km}\times 15\text{ km}$,两者无法直接进行点对点分析,故将预报结果进行区域平均,降低分辨率到 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$,与实况资料匹配。

为定量分析预报效果,分别计算10 m风速和风向的平均偏差(mean bias error, MBE)、均方根误差(root mean square error, RMSE)、相关系数(correlation coefficient, R)。计算公式如下:

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{wrfi} - x_{obsi}) \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{wrfi} - x_{obsi})^2} \quad (2)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_{wrfi} - \bar{x}_{wrf})(x_{obsi} - \bar{x}_{obs})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_{wrfi} - \bar{x}_{wrf})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_{obsi} - \bar{x}_{obs})^2}} \quad (3)$$

式中, x_{wrfi} 为每个时刻模式格点的气象要素值, x_{obsi} 为每个时刻实况资料格点的气象要素值, \bar{x}_{wrf} 为每个时刻模式格点的气象要素平均值, \bar{x}_{obs} 为每个时刻实况资料格点的气象要素平均值。

由于平均风向和风向差的计算存在过零问题。采用算术平均法计算平均风向会增加南风分量,为减小平均风向的计算误差,本文采用矢量法^[21]计算平均风向 A_{wd} ,定义如公式(4):

$$A_{wd} = \tan^{-1}(\bar{u}/\bar{v}) \quad (4)$$

式中, \bar{u} 为每个时刻风场u风的平均值, \bar{v} 为每个时刻风场v风的平均值。在计算风向差时同样采用矢量法,风向差D的计算如公式(5):

$$D = \cos^{-1} \left(\frac{|\bar{W}_1 \cdot \bar{W}_2|}{|\bar{W}_1| |\bar{W}_2|} \right) \quad (5)$$

式中, \bar{W}_1, \bar{W}_2 为全风速矢量。

2.3.2 海区预报检验

为检验海岛集中或航运繁忙海区的风场预报效果,选取北部湾(20° N, 108° E)、东沙群岛(21° N, 117° E)、西沙群岛(16° N, 112° E)、南沙群岛(9° N, 114° E)共4个海区的风速风向预报与实况进行比较分析。

3 预报个例分析检验

本文选取2012年冬季一次南海海面大风过程进行预报检验,WRF模式预报时间是12月29日08时至31日08时。

3.1 海面大风天气形势

如图2所示,2012年12月28日08时长江中下游的冷高压逐渐减弱东移入海,29日08时冷高压主体(1061 hPa)位于西藏以北。30日08时冷高压主体分裂出一个冷高压(1041 hPa)单体向东南方向移动进入华中地区,位于冷高压前沿的广东沿岸气压梯度加大,北部湾和南海东北部出现8—9级东北大风,中北部出现7级东北大风。31日08时冷高压减弱东移,南海的东北部至西南部维持6级以上东北大风。2013年1月1日08时南海大风天气基本结束。

3.2 预报效果检验

3.2.1 指数检验

分析9种试验方案风速及风向预报时段的平均MBE、RMSE、R(见表2),发现所有方案对风速的预报整体偏大1 m/s以内,BouLac方案风速的MBE最小。不同方案风速的RMSE相差较小,均为2.5 m/s左右,表明预报误差整体相当。从相关系数R上分析,风速相关较好,除了QNSE方案均能达到0.8以上,不同方案差异并不大,YSU、MYNN2及MYNN3方案最高。整体分析,MYNN2、MYNN3、YSU和BouLac方案的风速预报效果较好。

风向预报则明显差于风速,整体偏差基本比风速大,YSU方案的MBE最小。相关系数R则明显差

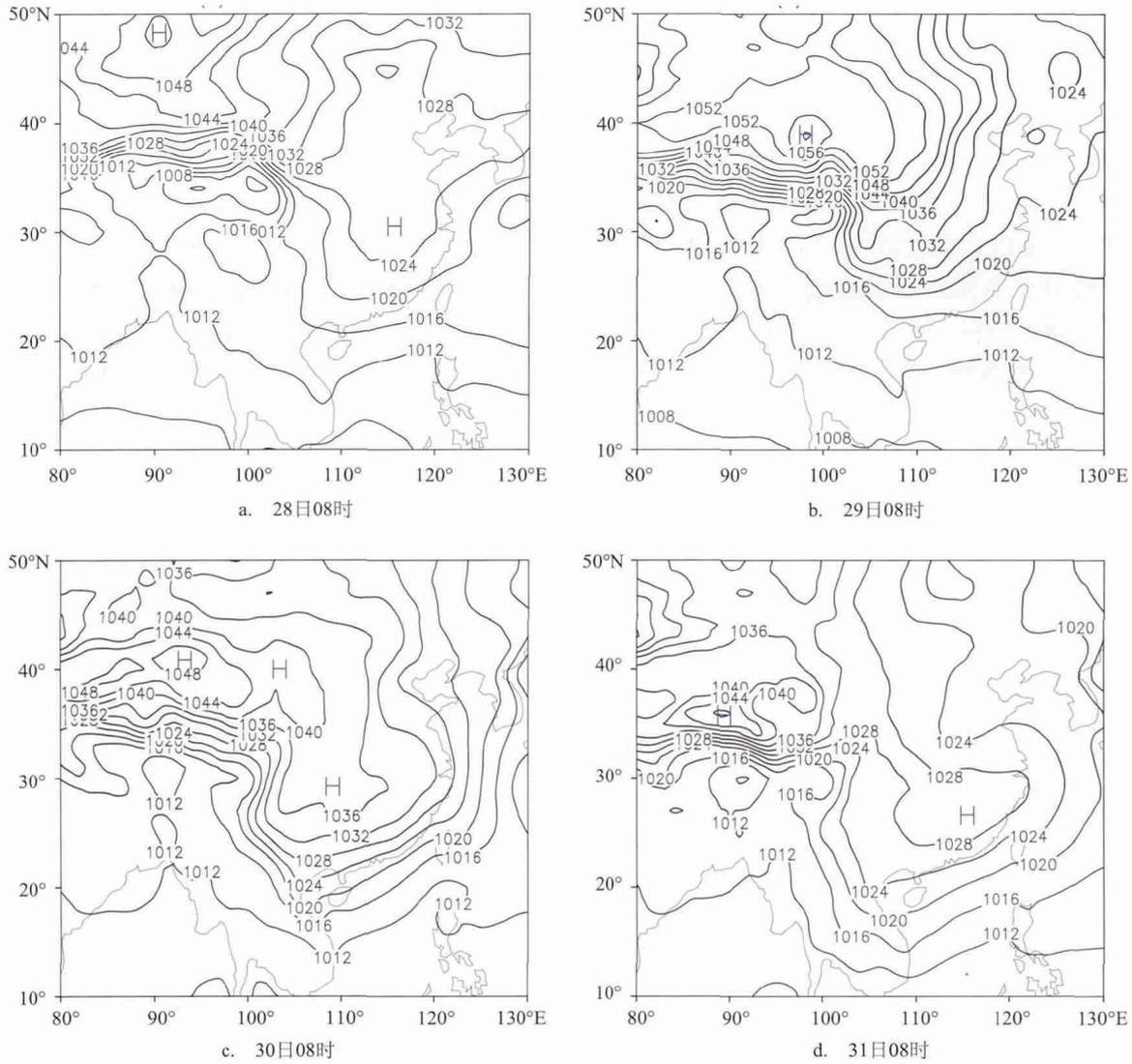


图2 28—31日海平面气压场 (来自FNL资料)

表2 9种试验方案预报的风速向平均MBE、RMSE、R

	YSU		MYJ		QNSE		MYNN2		MYNN3	
	WS	WD	WS	WD	WS	WD	WS	WD	WS	WD
MBE	0.71	-0.34	0.71	-1.42	0.53	-1.25	0.43	0.98	0.43	1.45
RMSE	2.34	23.73	2.48	23.96	2.71	24.81	2.23	24.31	2.21	24.16
R	0.83	0.57	0.80	0.60	0.76	0.55	0.83	0.57	0.83	0.57
	ACM2		BouLac		UW		GBM			
	WS	WD	WS	WD	WS	WD	WS	WD	WS	WD
MBE	0.64	1.26	0.17	-2.60	0.42	-1.35	0.66	-0.87		
RMSE	2.36	24.00	2.21	25.19	2.29	24.82	2.33	23.98		
R	0.82	0.59	0.83	0.55	0.82	0.55	0.82	0.57		

注:风速WS、风向WD单位分别为m/s、° R值均通过99%的信度检验。

于风速,均在0.6以下。 $RMSE$ 均偏大在 23° — 26° 左右,说明预报误差偏大,这是由于风向变化范围(0° — 360°)大,即使风向在1个方位(按16方位划分)内变化, $RMSE$ 也可达到这个程度。整体分析,ACM2和MYJ方案的风向预报效果较好。

通过分析9种试验方案不同预报时刻的风速及风向预报与实况相关系数 R (见图3),整体而言两者均随着预报时间增加呈现下降趋势。前12h预报风速的相关迅速下降,随后有所上升,这是由于前12h模式处于调整期,预报准确率较低。在预报30h后 R 值逐渐下降,其中QNSE和MYJ方案下降较快,可能与这两个方案采用相应的而非MM5 Monin-Obukhov近地面层方案有关。风向的相关显著差于风速且波动较剧烈,但未出现前12h预报相关迅速下降的情况,反而在30h预报出现急剧下降,48h预报出现异常高值。ACM2方案在30h预报风向均表现出比其余方案高许多的相关,这与其余方案的走势不一致。

初始场的风速和风向相关均分别是0.92和0.70,表明GFS的初始场存在一定偏差,在初始场并不准确的情况下,后续计算的误差在不断加大。

3.2.3 海区检验

综合以上分析,YSU、MYNN2、MYNN3、ACM2方案对风场的整体预报效果较好,下面选取YSU方案为例对各个预报时刻风场做检验分析。

从各个预报时刻的风场差值矢量图(见图4)可以看出,对于海陆交界地区的风场预报较差,东北风预报普遍偏大 2 m/s 以上,广东和越南沿岸偏差较大,局地偏大 8 m/s 以上(其余方案均有此问题,图略),说明模式低估了下垫面如地形、城市冠层对风速的拖曳作用,使得预报风速偏大不少。对于12h预报,广东沿岸大部的东北风偏大 6 — 8 m/s 。随后这种偏大趋势向南海中部推移并逐渐减弱,在30h预报偏差消失,说明模式对海陆交界的内边界层模拟较差,当气流从相对粗糙干冷的陆地移向平坦暖湿的海洋,在近海上空将形成一个内边界层,气流在经过相当一段距离后,风速廓线才达到平坦表面的平衡状态,这种预报偏差也就消失,而模式没有准确描述这种风廓线平衡适应的过程。除此之外,南海大部分海域预报偏差较小,南部海域少数预报时刻出现 2 — 4 m/s 偏差,说明模式对均一平坦下垫面的风场模拟较好。

对比选取4个海区的风速风向预报与实况(图5),YSU方案能较好预报各个海区风速及风向的变化趋势,风速风向的突变也能很好体现。北部湾的风速风向预报与实况基本一致,前12h风速风向预报有偏差,随后预报效果较好。东沙群岛风速预报普遍偏大 1 — 3 m/s ,风向的预报基本吻合。西沙群岛风速预报偏差在 2 m/s 以内,风向预报吻合。南沙群岛风速预报偏差最大,在 $\pm 3\text{ m/s}$ 之间,这与之前分

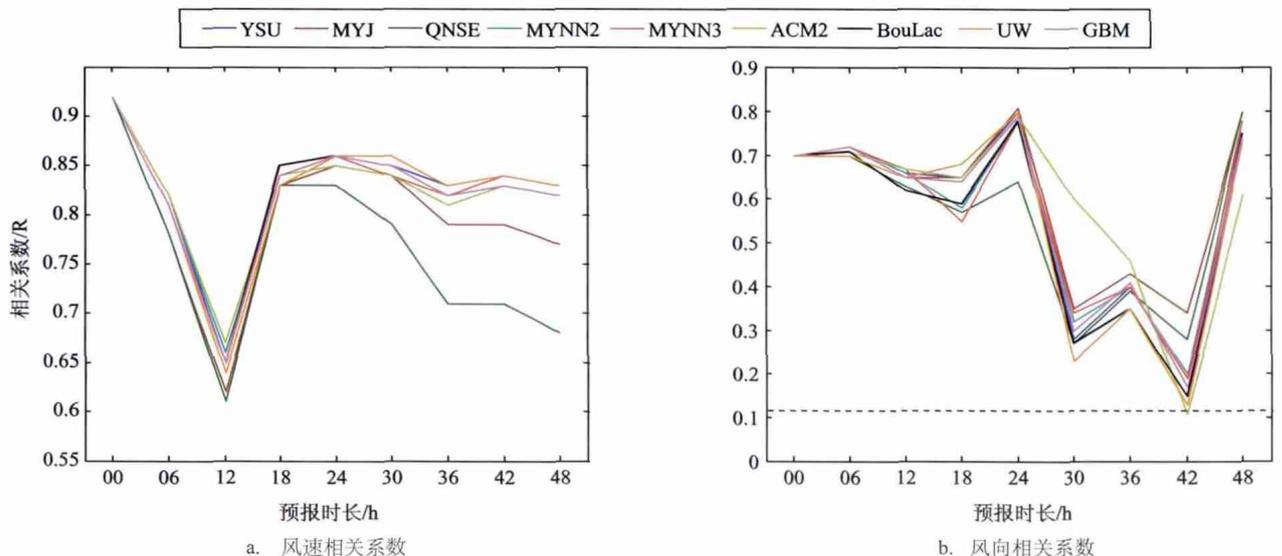


图3 9种试验方案各个预报时刻的风速风向相关系数 R (虚线为95%的信度检验)

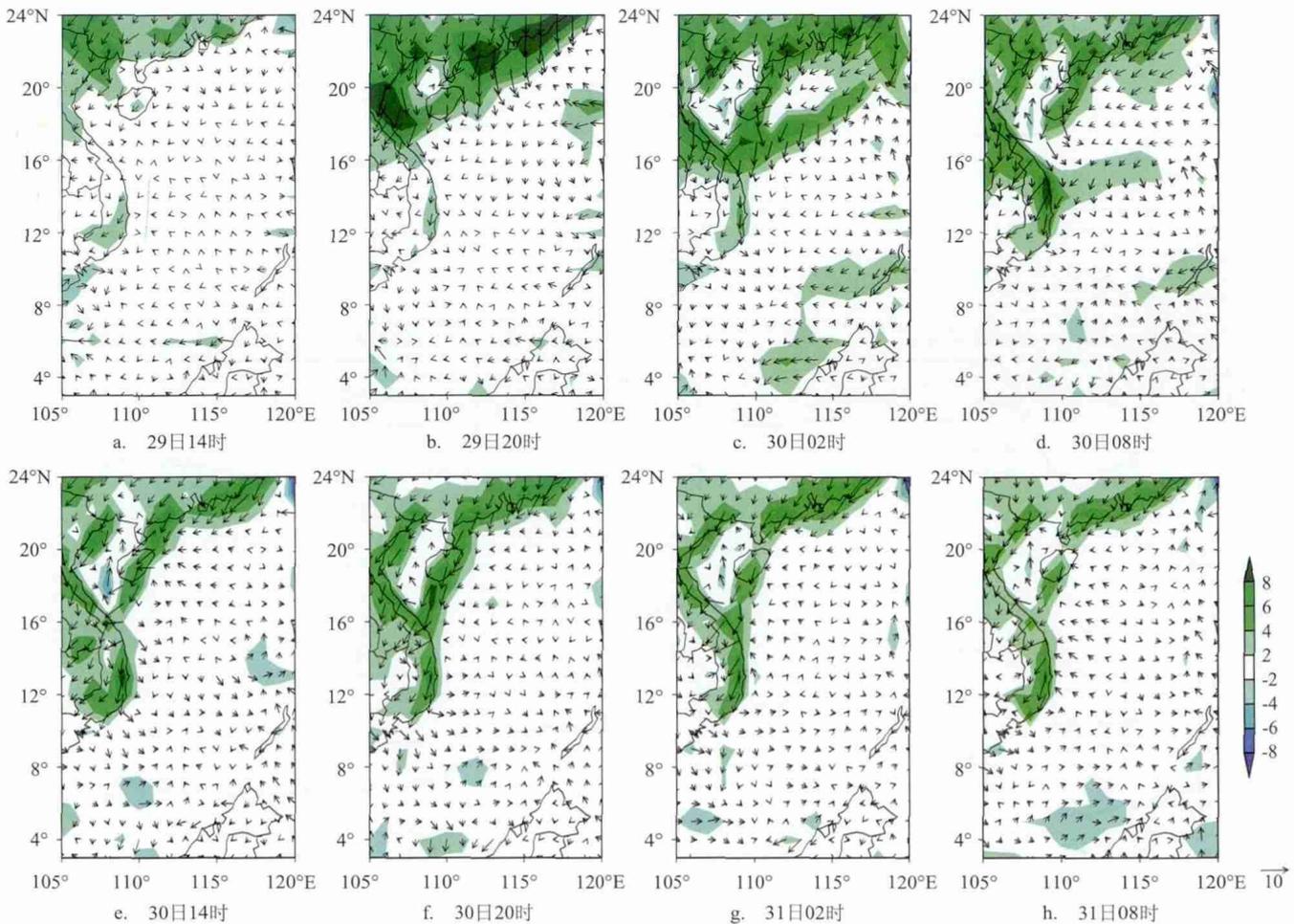


图4 YSU方案各个预报时刻风场差值矢量图(WRF-FNL),阴影部分为风速差

析的在南海南部预报偏差有时较大一致,风向在12 h 预报后偏差较大。整体而言,各海区风场的预报与实况较吻合,可以为海岛附近海域的预报提供一定的帮助,中北部海域预报效果较好,南部海域稍差一些。

4 结论

本文采用3.5版本WRF-ARW模式中9种边界层参数化方案,对2012年12月29—31日南海海面大风天气过程进行预报,并对海面10 m风场进行预报检验,结果表明:

(1) 风速风向预报的整体平均偏差相当,所有方案对风速的预报整体偏大1 m/s以内。风向的预报误差大于风速,风向平均均方根误差在23—26°之间,这与风向容易变化且变化范围大有关。风速

平均相关系数较高在0.76至0.83之间,风向则较低在0.55至0.60之间。从指数检验分析,MYNN2、MYNN3、YSU和BouLac方案对风速的预报效果较好,而ACM2和MYJ方案对风向的预报效果较好;

(2) 随着预报时间的增加,风速风向预报与实况的相关系数R整体呈现下降趋势。前12 h预报风速的R值迅速下降,随后有所上升,这是由于前12 h模式处于调整期,但风向预报没有此情况,风速预报后期QNSE和MYJ方案R值下降较快,可能与这两个方案采取的近地面层方案有关。风向的R值不稳定,波动剧烈,30 h预报出现急剧下降,而48 h预报出现异常高值,ACM2方案在30 h预报风向出现比其余方案均高的R值;

(3) 所有方案均对海陆交界的风场模拟较差,风速偏大2 m/s以上,广东和越南沿岸偏差较严重,

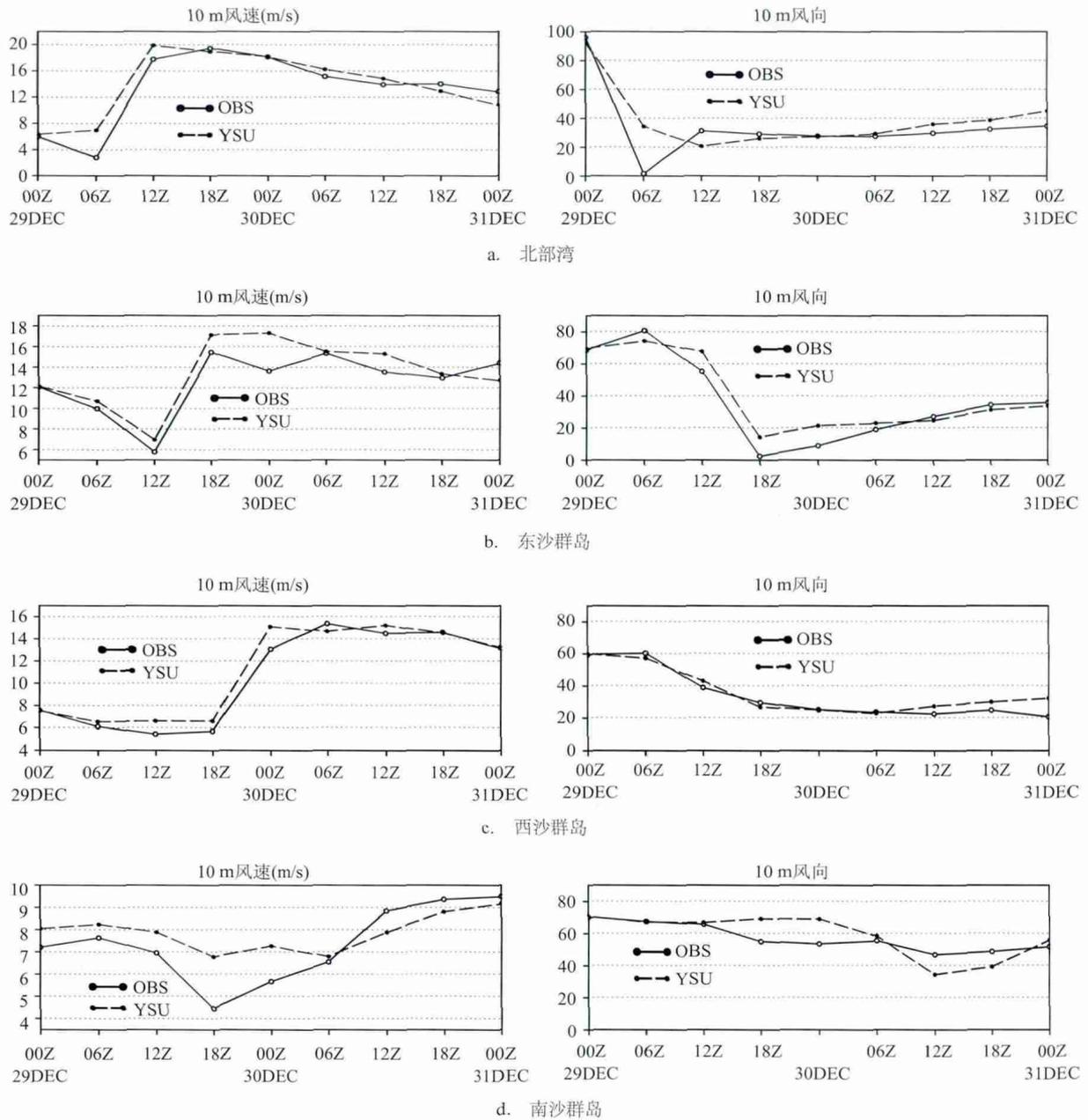


图5 YSU方案各海区风速及风向预报与实况对比(时间为UTC)

局部可达8 m/s以上。这与模式对下垫面的拖曳作用、海陆交界的内边界层模拟不准确有关,在远离陆地的海域偏差则较小。整体而言,南海大部分海域的预报偏差较小;

(4) YSU方案能较好预报北部湾、东沙群岛、西沙群岛、南沙群岛4个海区风场的变化趋势,能预报出风速及风向的突变,北部湾预报效果最好,东沙群岛和西沙群岛海域居中,南沙群岛海域预报效果相对较差。

5 存在的不足及展望

通常而言,预报员更关注的是南海海面大风的风力大小,因为风向可从大气环流中基本确定,冬季大风基本为东北或偏北风向,故风力的准确预报显得更为重要。从指数检验分析,对风速预报均较准确的是YSU、MYNN2、MYNN3方案,还需要从物理机制上进一步探讨预报较准确的原因,对方案

描述边界层的方程做进一步分析。同时本文仅分析了2012年12月一次大风过程,结论有一定的局限性,下一步应对数年的冬季海面大风天气做预报检验,增大样本容量分析YSU、MYNN2、MYNN3方案哪个最适合于南海冬季海面大风天气预报。并进一步探讨使用更精细准确的地形和下垫面资料对海陆交界风场的模拟是否有改善,尝试从物理机理上分析海陆交界风场预报差的问题。

参考文献:

- [1] 李敏,王辉,金啟华. 中国近海海面风预报方法综述[J]. 海洋预报, 2009, 26(3): 114-120.
- [2] 黄潮光,李晓欣,王伟,等. GRAPES模式在一次近海强风预报中的应用[J]. 海洋预报, 2012, 29(3): 15-19.
- [3] 季晓阳,吴辉斌,杨学联. 海面风场数值预报的历史和现状[J]. 海洋预报, 2005, 22(5): 167-171.
- [4] 陈德文,张世民,余金田. MM5模式风场检验及一次寒潮大风过程模拟[C]. 福建省海洋学会2008年学术年会暨海峡西岸经济区建设的海洋科技支撑与海洋资源开发学术研讨会论文集, 2010, 182-189.
- [5] 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.
- [6] 杨仁勇,冯文,许向春,等. 琼州海峡大风数值模拟及地形敏感性试验[J]. 热带气象学报, 2011, 27(1): 95-100.
- [7] 赵洪,杨学联,邢建勇,等. WRF与MM5对2007年3月初强冷空气数值预报结果的对比分析[J]. 海洋预报, 2007, 24(2): 1-8.
- [8] Gilliam R C, Pleim J E. Performance Assessment of New Land Surface and Planetary Boundary Layer Physics in the WRF-ARW[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2010, 49: 760-774.
- [9] Chen C S, Beardsley R C, Hu S, et al. Using MM5 to Hindcast the Ocean Surface Forcing Fields over the Gulf of Maine and Georges Bank Region[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2005, 22:131-145.
- [10] 盛春岩,阎丽凤,肖明静,等. MM5、WRF-RUC和T639模式对山东沿海风的预报分级检验[J]. 气象科学, 2013, 33(3): 340-346.
- [11] 崔琳琳,胡松. 2008年东海海面WRF风场和QuikSCAT风场差异分析[J]. 海洋预报, 2012, 29(5):39-47.
- [12] 王澄海,胡菊,靳双龙,等. 中尺度WRF模式在西北西部地区低层风场模拟中的应用和检验[J]. 干旱气象, 2011, 29(2): 161-167.
- [13] 苗世光,孙桂平,马艳,等. 青岛奥帆赛高分辨率数值模式系统研制与应用[J]. 应用气象学报, 2009, 20(3): 370-379.
- [14] 王颖,张镭,胡菊,等. WRF模式对山谷城市边界层模拟能力的检验及地面气象特征分析[J]. 高原气象, 2010, 29(6): 1397-1407.
- [15] 张小培,银燕. 复杂地形地区WRF模式四种边界层参数化方案的评估[J]. 大气科学学报, 2013, 36(1): 68-76.
- [16] Miglietta M M, Zecchetto S, De Biasio F. WRF model and ASAR-retrieved 10m wind field comparison in a case study over Eastern Mediterranean Sea[J]. Advances in Science and Research, 2010, 4: 83-88.
- [17] Han Z H, Ueda H, An J L. Evaluation and intercomparison of meteorological predictions by five MM5-PBL parameterizations in combination with three land-surface models[J]. Atmospheric Environment, 2008, 42: 233-249.
- [18] Hanna S R, Yang R X. Evaluations of Mesoscale Models Simulations of Near-Surface Winds, Temperature Gradients, and Mixing Depths[J]. Journal of Applied Meteorology, 2001, 40: 1095-1104.
- [19] Zhang D L, Zheng W Z. Diurnal Cycles of Surface Winds and Temperatures as Simulated by Five Boundary Layer Parameterizations[J]. Journal of Applied Meteorology, 2004, 43: 157-169.
- [20] Pleim J E. A Combined Local and Nonlocal Closure Model for the Atmospheric Boundary Layer. Part II: Application and Evaluation in a Mesoscale Meteorological Model[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2010, 49: 760-774.
- [21] 邱传涛,李丁华. 平均风向的计算方法及其比较[J]. 干旱气象, 1997, 16(1): 94-98.

Simulation of one gale case in winter in the South China Sea

CHEN Jun-wen¹, CAI Yang², BAI Yi-ping², LIN Wen-shi¹

(1. School of Environmental Science and Engineering, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China;

2. South China Sea forecasting Center, State Oceanic Administration, Guangzhou 510300, China)

Abstract :In order to find out the Planetary Boundary Layer (PBL) parameterization scheme which suits gale winds forecast in winter in the South China Sea (SCS), nine PBL parameterization schemes (YSU, MYJ, QNSE-EDMF, MYNN2, MYNN3, ACM2, BouLac, UW, GBM) were used in WRF model to simulate gale winds during 29th-31th December 2012. Wind speed and wind direction of 10 m from forecast were tested by comparing with the FNL data. Results indicate that the mean bias error of wind speed and wind direction was overall fairly, while the root mean square error of wind direction was larger than wind speed; the correlation between forecast and observation of wind speed/wind direction was going down as time passed by; predicted wind speed was 2 m/s or more higher than observed wind speed over coastal areas while smaller deviation over the sea far from mainland in all schemes; YSU scheme did well in forecast of wind field variability over the Gulf of Tonkin, Dongsha Islands, Xisha Islands and Nansha Islands; overall, the forecast error over the most parts of SCS was small, YSU, MYNN2 and MYNN3 were better schemes in wind speed forecast while ACM2 scheme was better in wind direction forecast than other scheme.

Key words sea surface wind field ;WRF ;planetary boundary layer parameterization scheme ;model verification