

张弛,王东海,巩远发. 2015. 基于 WRF/CALMET 的近地面精细化风场的动力模拟试验研究. 气象, 41(1):34-44.

基于 WRF/CALMET 的近地面精细化风场的动力模拟试验研究^{*1}

张 弛^{1,2} 王东海³ 巩远发¹

1 成都信息工程学院, 成都 610225

2 江西省气象台, 南昌 330046

3 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

提 要: 本文利用中尺度动力模式 WRF 和诊断模式 CALMET 对琼州海峡的两次冷空气过程的近地层风场进行模拟和诊断, 所用的资料是美国 NCEP 再分析 FNL 资料。WRF 模式第一至第四层网格的水平距离分别是 27、9、3 和 1 km, 并用 WRF-1 km 场以单向嵌套模拟方式降至 200 m, 同时以 WRF-1 km 预报场作为 CALMET 初猜场降尺度诊断至 200 m。分别用 CALMET-200 m 风场、WRF-1 km 风场和 WRF-200 m 风场, 3 个风场的风速、风向与沿琼海海峡分布的 21 个测站(其中 6 个测风塔)观测资料进行检验比较分析。主要结论是:(1) CALMET-200 m 的风速 RMSE 明显小于另外两组试验, 风向 RMSE 总体上差异不大; 在 60~80 m 高度上也没有明显差异。(2) 在 0~8 m·s⁻¹ 风速, 10 m 高度上 CALMET-200 m 风场诊断结果最好, 风速平均偏差值从 4~0 m·s⁻¹, WRF 的两组试验平均偏差值比 CALMET-200 m 结果大约 2 m·s⁻¹, 风向上表现为偏差的分布更加集中; 60~80 m 高度上, CALMET-200 m 诊断效果与 WRF-1 km 模拟效果相当, 但是冷空气时段内 WRF-200 m 的风速要远远差于另外两组试验; 而 3 组试验的风向并无大的差异。(3) WRF/CALMET 模式系统在非冷空气活动时段内的风速风向模拟诊断偏差更小, 说明其在层结相对较稳定时模拟诊断的准确度更高。

关键词: WRF/CALMET, 精细化, 近地层风, 冷空气过程

中图分类号: P456, P404

文献标志码: A

doi: 10. 7519/j. issn. 1000-0526. 2015. 01. 004

Dynamic Modeling Study of Highly Resolved Near-Surface Wind Based on WRF/CALMET

ZHANG Chi^{1,2} WANG Donghai³ GONG Yuanfa¹

1 Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225

2 Jiangxi Meteorological Observatory, Nanchang 330046

3 State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

Abstract: Two cold air events that happened in Qiongzhou Channel were modeled by mesoscale dynamic model WRF and diagnostic model CALMET, and the research focuses on the near-surface wind. Horizontal grid spaces of four nests in WRF model are 27 km, 9 km, 3 km and 1 km respectively. The fourth nest with 1 km grid space of CALMET and the fifth nest in WRF is set as model initial field for down grid space to 200 m, so as to get the final field which is able to fulfill the resolution required. Wind speed and direction of CALMET-200 m, WRF-1 km and WRF-200 m are contrasted with the observed winds at 21 observing stations (including 6 anemometer towers) distributed in the two sides of the Qiongzhou Channel. The main conclusions are as follows: (1) CALMET-200 m speed RMSE is much less than the two other experi-

* 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306005、GYHY201006014 和 GYHY201206039)、国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2012CB417204)和国家自然科学基金项目(41175064 和 U1233128)共同资助

2014 年 2 月 26 日收稿; 2014 年 6 月 20 日收修定稿

第一作者: 张弛, 主要从事近地面风精细化模拟诊断研究. Email: sunnyzhangchi@163.com

通信作者: 王东海, 主要从事中尺度动力学与数值天气预报和模拟等. Email: wangdh@cma. cma. gov. cn

ments with time going, but there is not any notable difference in wind direction *RMSE*. In the height of 60—80 m, *RMSE* can not show any difference in wind direction, either. (2) At 10 m height, CALMET-200 m wind is diagnosed to be the best with the average error varying from $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ to $0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. The average errors of the other two experiments are about $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ bigger than CALMET-200 m. The distribution of errors is more concentrated in direction. In 60—80 m height, the three experiments have almost the same results. But the result of WRF-200 m wind speed shows worse than the results of the other two experiments, while not differences in wind direction are found in the three experiments. (3) Smaller wind speed and direction average errors of WRF/CALMET system in non-cold air condition show that the system can perform better when the atmospheric stratification is relatively stable.

Key words: WRF/CALMET, highly resolved, near-surface wind, cold air

引言

琼州海峡属于我国内海,是我国三大海峡之一,连通北部湾和南海的重要通道,其海上交通比较繁忙,在有限的水域有众多往来的船只,因而海上安全事故时有发生,其中海面浓雾对海面交通往往存在很大的影响,容易发生碰撞事故(邓礼标,2005),加强近地层风的研究及其预报能使人们有效地预报雾并预防由它所带来的灾害。在航空业逐渐发展的今天,其安全性也越来越受到重视。据统计表明,民用飞机事故的主要发生在起飞、开始爬升和最终着陆阶段,一共占事故发生总数的67%。由此可见,飞机起降过程是安全飞行的重中之重,因而机场附近近地层风对飞行安全起着决定性的作用(曾天翔,1998;王海霞等,2013)。风能作为一种清洁能源,使用风能发电可以大大降低使用传统能源发电时产生的污染气体。由于气候变化和能源危机的影响,风能资源已得到世界各国的广泛关注,在风电领域的投入逐步增加,近地层风场的研究也越来越受到重视(许杨等,2013;常蕊等,2013; American Wind Energy Association,2003)。

大风天气的形成有多重诱因,而寒潮是其中比较突出的一种。寒潮是我国冬半年主要灾害性天气,它关系到季节推迟或提前,甚至是反常气候的重要标志。它通常带来剧烈降温和大风的天气,对国民经济以及人民的安全都造成巨大的威胁(邓先瑞,1977;刘传凤,1990)。大风天气也容易导致海难事件的频发,黄少军等(2006)根据统计渤海海域1999—2005年发生的6起事故与大风天气的关系,发现出现6级以上风力时,客滚船发生沉船事故可能性较大,而且难以救援。

早期风的空间分布气候学尝试用地形高度和地

表粗糙度这两个变量运用到统计中这一方法来进行研究,但是只能在平坦和同等质地的地形上的统计才能得到较好结果(Jackson et al, 1975; Troen et al, 1989; Dobesch et al, 1997)。即使如此,统计方法仍然过度地应用于实际研究中,某些研究里,尽管只有稀疏的站点观测资料可以用,但是仍然得到风向风速的频率分布及其拟合。在有大量的观测资料的前提下,其理论应用还是具有很大的局限性,统计结果难以达到人们对风场研究所需准确度和精度的要求(Bartholy et al, 2005; Mearn et al, 1999)。尤其是近地面层有着极为复杂的下垫面,受其影响往往更难得到准确的近地面风场信息。

实际情况下,近地面层的厚度变化很大,在地表粗糙度大的地方和层结不稳定时,近地层的厚度可以达到100~200 m,而在地表粗糙度小或者层结稳定的情况下,其厚度可能很浅薄。在这里我们把近地面层定义为黏性副层(1 cm)到100 m高度定义为近地面层。以观测方法来了解近地面层风场的区域分布,比如人为的在不同高度上大范围地观测风速,这需要大量的人力物力来设置观测点并且进行维护。对近地层风场进行精细化的诊断往往能填补有限的观测站所不能达到的目的,并且大量的降低成本。随着计算机的发展,对风场的研究也开始使用数值模拟来进行全方位的研究。尤其是在复杂下垫面的情况下,数值方法更加体现出了它的优势。王桂玲等(2006)利用质量守恒风场调整模式MCF对北京地区的低层大气进行了模拟诊断,得到了平均流场和局地扰动两个方面的结果,发现局地风场形势与当地地形有着十分密切的关系。李艳等(2009)揭示了区域模式的动力降尺度方式可以对近地层风场分布特征有很强的诊断能力。张云海(2004)利用修改过的Mass模式以及详细的地形资料诊断辽宁地区的近地层风场,发现山地的动力效应是影响近地层风场

的重要因素之一。路屹雄(2011)还有研究表明,城市地形会使局地地表能量发生较为明显的改变,会给地面风速带来很大的影响。

近些年,在近地层风的统计学方法的基础上(陈德桥等,2012),利用中尺度动力模式结合 CALMET(California Meteorological Model)诊断模式的方式来对区域风场进行研究的方法已经逐渐被人们接受并运用到研究中(王兴等,2012;李磊等,2013;杨薇等,2014;高留喜等,2014)。模式系统首先用中尺度模式对天气进行动力诊断,使这一区域风用网格距约为几千米的场风进行描述,然后再用诊断模式,在更细的地形以及使用土地利用数据对风场进行降尺度诊断研究,得到最终所需的风场。Yim 等(2007)利用 MM5/CALMET 模式结合观测资料对澳门复杂地形下的风能资源进行了时间长达一年的研究,证明模拟诊断试验能准确地诊断出澳门地区的局地风场的风速风向,其垂直风速也能很好地与垂直廓线观测资料相匹配。Wang 等(2008)研究发现,当读入一定量而且能表现当地环流特征的站点资料时,CALMET 模式具有很强的诊断能力。Lu 等(2012)利用 WRF/CALMET 动力诊断模式系统对海陵岛进行了为期一年的模拟诊断研究,发现其在层结稳定时期对风速诊断有较好表现。

此次试验的主要目的是对 WRF/CALMET 模式系统的模拟诊断能力进行详细分析,用观测风评估其准确性。评估在 WRF 所得的预报场的基础上对 CALMET 的诊断场进行分析,以试图得到 CALMET 在 WRF 模拟的预报场基础上有如何的改进。

1 试验设计

1.1 WRF 模式设计

此次研究中采用的 WRF 模式版本为 WRF 3.5.1。所用的数据是美国 NCEP 的 FNL 全球再分析资料,FNL 再分析数据每 6 h 采集一次,水平分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 。网格设置采用的是 5 重嵌套,垂直层数设置为 57 层,垂直层在 1 km 以下有 9 层,eta 坐标分别为 0.997、0.992、0.985、0.978、0.969、0.960、0.950、0.938 和 0.925。高度为 0.925 约为 930 hPa,离地高度约 1 km,可以较为详细模拟出边界层的特征。

第一至第四层网格采用双向嵌套,网格距依次为 27、9、3 和 1 km,积分步长为 40 s。第五重网格采用的嵌套方式是单向嵌套,网格距为 200 m,积分步长为 2 s。本次研究采用的微物理参数化方案为 Lin 方案,长波辐射参数化方案为 RRTM 方案,短波辐射参数化方案为 Dudhia 方案,边界层参数化方案为 MYJ 方案,近地层参数化方案为 eta 方案,陆面过程方案为 Noah-LSM 方案,积云对流方案为 BMJ 方案。

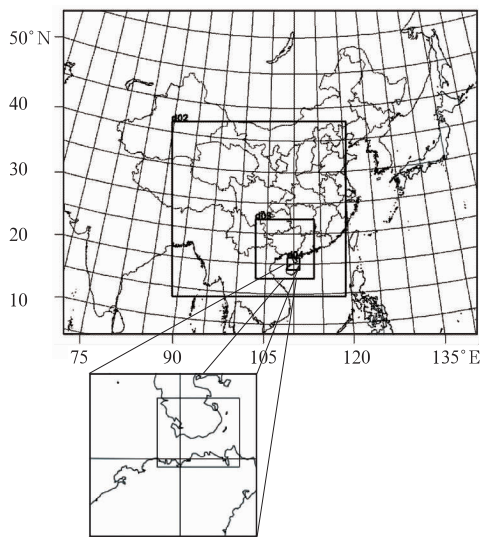


图 1 WRF 模式设置的五层模拟区域
(大图中为第一至第四层嵌套,小图中为第四、五层模拟区域)

Fig. 1 Five nest domains in WRF simulation
(Domains 1—4 are in the big figure, domains 4 and 5 are in small figure)

1.2 CALMET 模式

CALMET 通常以天气预报模式的预报场作为其初猜场,经过地形适应和客观分析两步得到最终的风场。地形适应过程通常有以下几步组成,地形动力效应与阻挡效应、坡面效应和散度最小化,在精确的地形资料和下垫面资料下来对近地面层风场进行调整,得到更适合局地地形的风场。客观分析主要是结合地面、高空观测资料对风场进行调整,最终得到局地风场。因此要准确地诊断出风场,时间和空间上高密度并且准确的观测资料至关重要。但是并不是任何区域都具备这些条件,研究有时需要在缺乏以上条件的情况下进行,本文的诊断研究就是在没有读入任何观测资料的前提下进行的,研究 CALMET 模式在没有进行客观分析只针对地形适

应过程的诊断效果。

这次试验,CALMET 模式把 WRF 分辨率为 1 km 的气象场作为 CALMET 的初始气象场,对琼州海峡区域的风场进行精细化诊断,水平网格为 600×500,网格距为 200 m,垂直分为 13 层,最低层为 10 m 离地高度(above ground level,AGL)。地形资料采用的是 NASA SRTM3(约为 90 m 分辨率,3 arc-sec)。

图 2 表示 CALMET 的模式区域。CALMET 采用的是横轴墨卡托投影(Universal Transverse Mercator Projection, UTM) 网格。UTM 坐标使用的分区方法是按经度分区,每一区域范围经度差

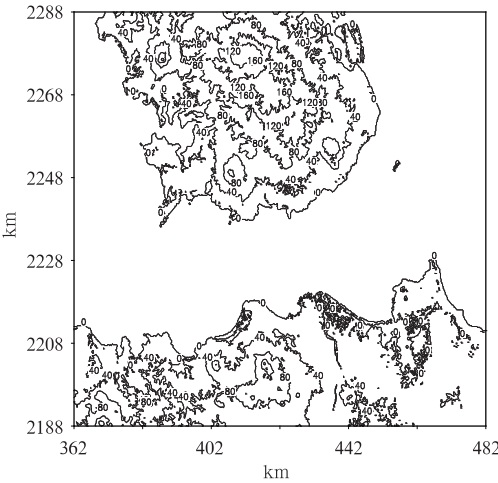
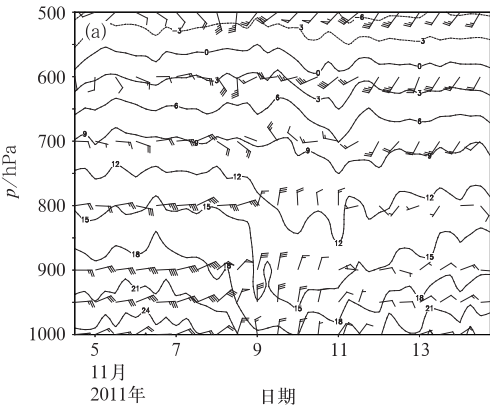


图 2 表示 CALMET-200 m 诊断区域的地形图
Fig. 2 Terrain of diagnostic domain
in CALMET-200 m



6°,从西向东顺序编号。全球共分 60 带,每带中央称为中央经线。每一区域的中央经线设定为 500 km,向西减小,向东增大。图中横坐标表示这一模式区域相对中央经线 111°E 的纬向距离,纵坐标表示这一区域距赤道的距离。

1.3 天气过程实况

冷空气天气过程是大范围的强冷空气在一定的环流形势下自北向南爆发的现象。因而最外层模拟区域整体向北,包括了北部贝加尔湖地区、雅库茨克、鄂霍次克海和乌拉尔山等地区。本次研究的两次冷空气过程分别在 2011 年 11 月 5—14 日和 2011 年 12 月 6—15 日。其中 11 月冷空气过程中影响琼州海峡的时间大致在 8 日 11 时至 10 日 11 时,12 月过程影响时间大致在 8 日 08 时至 12 日 08 时。

图 3 是 FNL 资料各层的温度和风向随时间的变化图,可以看出两次冷空气过程到达琼州海峡的时间、各层的风速和风向及过程降温的大小。11 月的冷空气过程大致于北京时 11 月 8 日 11 时到达琼州海峡。冷空气过程中,750 hPa 下都有明显的降温,近地层高度上最大降温约为 6℃,冷空气到达前低层有明显的东风存在,冷空气到达后风速增大,风向由偏东风转为北风。12 月的冷空气过程相比之下强度要大得多,650 hPa 下都有十分明显的降温,与 11 月的过程一样,冷空气到达前低空存在明显的偏东风,冷空气到达后有明显的偏东风转北风,近地层最大降温幅度达到 9℃。

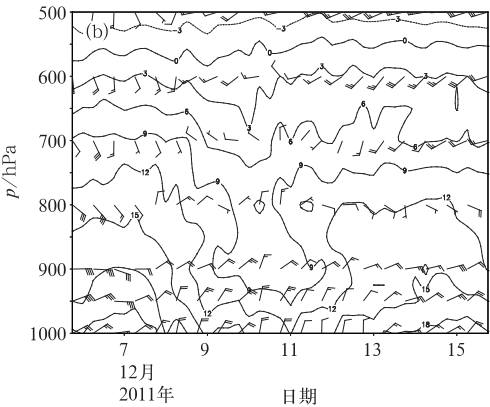


图 3 在 20°N、110°E 点上温度和风随时间和高度的变化
(a)11 月冷空气过程,(b)12 月冷空气过程
(等值线表示温度)

Fig. 3 Variation of temperature and wind along with time and height at 20°N, 110°E
(a) cold air in November, (b) cold air in December
(Contours represent temperature)

图 4 表示本文所使用的观测资料所在位置。观测资料采用的是区域气象站和测风塔两类观测资料。区域气象站的高度为 10 m,在图 4 中为空心圆

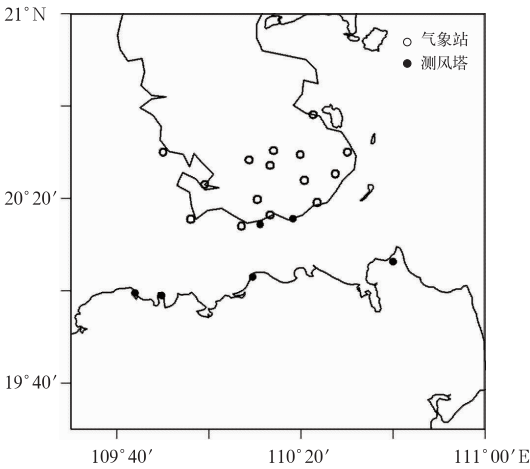


图 4 所有观测站在琼州海峡
的地理位置
Fig. 4 Geographical location of all
observatories at Qiongzhou Channel

点,实心圆点则为测风塔,分别为秀英塔、徐闻塔、19011、21002、21004 和 21005 测风塔,均包括 2 个测风高度,分别为 10 和 60/70/80 m 高度。总计 21 个观测点。

1.4 试验方案设计

利用 21 个观测点的风观测资料来对 WRF 和 CALMET 模拟结果进行评估,评估在冷空气到达琼州海峡前后,结果与真实风场的差异,从而对 WRF 和 CALMET 模式对近地面风场的精细化模拟诊断能力进行详细评估。一共设计了 3 组试验,分别是 CALMET-200 m、WRF-1 km 和 WRF-200 m(表 1)。

试验设计的思路是对比 WRF 在精细化到1 km 后,再采用两种方法精细化至 200 m,这两种方法分别采用诊断模式 CALMET 降尺度到 200 m 网格,以及在 WRF 中采用单层嵌套的方式模拟至200 m,并进行比较。与此同时对比 CALMET 降尺度之后比 WRF-1 km 的风场是否有改进。

表 1 设计的 3 组试验及其初始气象场

Table 1 Three designed experiments and their initial atmospheric fields

	风场数据		模式初始气象场	
	风场	分辨率/m	初始场	分辨率/km
CALMET-200 m	CALMET 诊断风场	200	WRF domain 4	1
WRF-1 km	WRF domain 4	1000	WRF domain 3	3
WRF-200 m	WRF domain 5	200	WRF domain 4	1

2 统计分析

2.1 RMSE 统计评分

从图 5 可以看出,无论是在 11 月还是 12 月的冷空气过程中,CALMET 诊断结果的均方根误差 (root-mean-square error, RMSE) 都明显地小于 WRF-1 km 和 WRF-200 m 的模拟结果。从 11 月冷空气过程可以看出, WRF-1 km 模拟结果的 RMSE 最大值大致为 $7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,而 CALMET-200 m 的诊断结果的 RMSE 最大值仅略大于 $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。但是从风向来看, CALMET-200 m、WRF-1 km 和 WRF-200 m 3 组试验结果都十分接近,几乎没有区别,12 月的风向结果也是如此。12 月冷空气过程风速的模拟诊断结果与 11 月冷空气十分相似。风速的 RMSE 曲线上显示 CALMET-200 m

的诊断结果明显好过 WRF-1 km 和 WRF-200 m 两组模拟,WRF-1 km 与 WRF-200 m 的最大 RMSE 值分别为 7 和 $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,而 CALMET-200 m 的最大 RMSE 值约为 $5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。对比 WRF-1 km 和 WRF-200 m 的两组模拟可以看出,WRF-200 m 在寒潮过程中风速模拟的 RMSE 要远远大于 WRF-1 km,出现这种问题可能的原因是 CALMET 模式在琼州海峡区域具有更细的地形信息,而且 CALMET 在描述局地环境下风时具有一定地优势。

在两次冷空气过程中,CALMET-200 m 的风速诊断结果 RMSE 12 月比 11 月大 $0.919\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,而 WRF-1 km 和 WRF-200 m 的风速模拟结果的平均 RMSE 12 月比 11 月分别大 1.276 和 $2.124\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。而从风向的模拟诊断结果的 RMSE 可以看出,12 月的风向 RMSE 整体要比 11 月更好,推测这一现象的出现可能是由于当冷空气过程更强时,

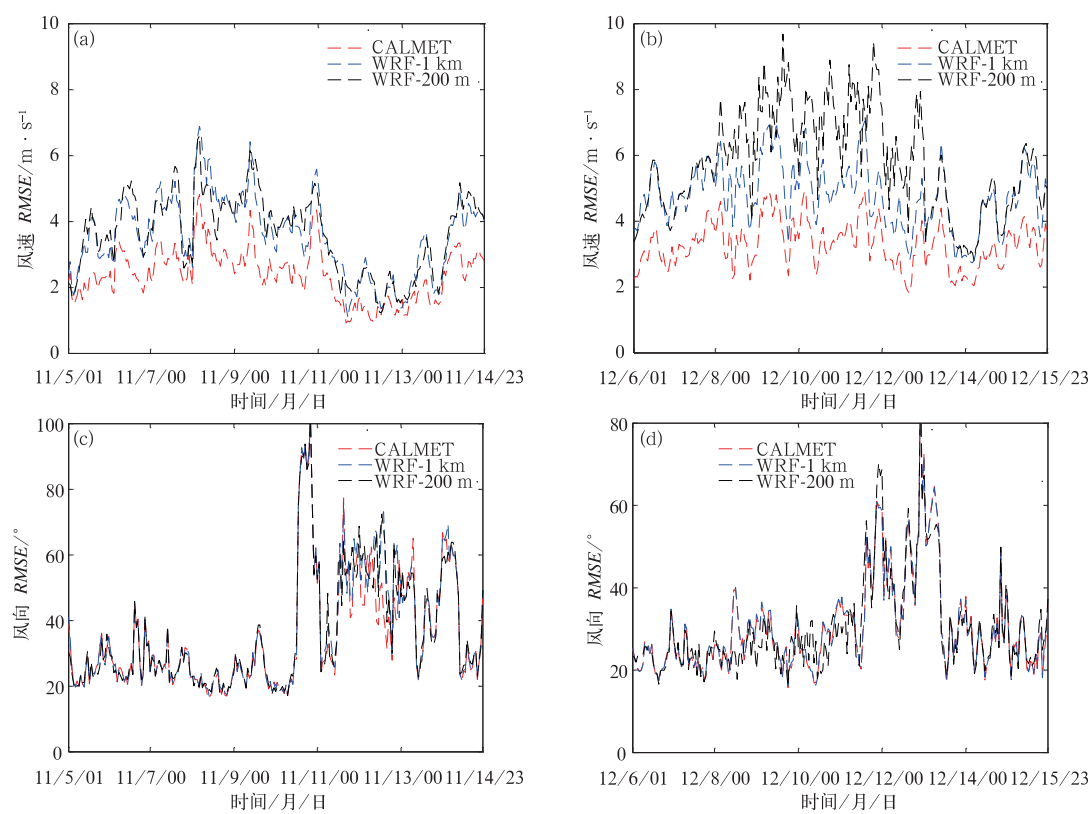


图 5 CALMET-200 m、WRF-1 km 和 WRF-200 m 3 组试验结果

在 21 个站点 10 m 高度上风的平均 RMSE

(a)11 月风速, (b)12 月风速, (c)11 月风向, (d)12 月风向

Fig. 5 10 m wind average RMSE of three experiments, CALMET-200 m, WRF-1 km and WRF-200 m at 21 observatories

(a) wind speed in November, (b) wind speed in December, (c) wind direction in November, (d) wind direction in December

WRF 更容易模拟出相对准确的风向。

与 10 m 风速相比,高空风的模拟诊断结果更为接近。从表 3 中可以看出,无论是风速还是风向, RMSE 值都十分接近。从 11 与 12 月的风速 RMSE 上可以看出, CALMET-200 m 的诊断风速要稍微比 WRF-1 km 和 WRF-200 m 好一些, WRF-1 km 和 WRF-200 m 平均 RMSE 值与 CALMET-200 m 的风速平均 RMSE 的差值在 11 和 12 月分别为 0.128、0.0882 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 0.064 和 0.9993 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,可见 CALMET 的诊断风场要比 WRF 的两次模拟过程都要表现更好。风向上来看,11 与 12 月 3 组模拟诊断的平均 RMSE 都十分接近。但在两个个例中,12 月的冷空气过程的风向误差要小于 11 月的误差,这一结论与 10 m 风的误差分析相似。从总体上来说, CALMET 诊断在风速上的表现较好,尤其是 10 m 高度的风速,在对

WRF-1 km 的改进较为明显,在与 WRF-200 m 的模拟结果比较时,发现 CALMET 在对风场的精细化诊断比 WRF 做得更好;而在风向的改进无论是从 10 m 高度到 60~80 m 高度上来说都没有十分明显的提高, WRF 模拟的结果从根本上决定了 CALMET 的诊断结果。

从 RMSE 的分析结果上,可以看出 CALMET-200 m 的 10 m 风速的诊断效果比另外两组模拟的效果要更好,而在近地面上层的风速模拟诊断效果的比较上, CALMET-200 m 也略好于另外两组模拟的效果,由此可见, CALMET 在诊断近地层的风速场具有比较出色的诊断效果。从风向上的模拟诊断来看,3 组试验的效果都十分接近,可见在风向的模拟诊断中,精细化模拟诊断的效果并不出众。

以上的评估只能简单的评定 3 组试验结果的好坏,而不能精确地指出哪组试验在哪些方面表现优

表 2 10 m 高度上,2011 年 11 和 12 月 21 个观测站上 3 组试验风的平均 RMSE

Table 2 10 m wind average RMSE at 21 observatories of three experiments in November and December 2011

月份	11 月						12 月					
类型	风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$			风向/ $^{\circ}$			风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$			风向/ $^{\circ}$		
模式	CALMET	WRF		CALMET	WRF		CALMET	WRF		CALMET	WRF	
网格距	200 m	1 km	200 m	200 m	1 km	200 m	200 m	1 km	200 m	200 m	1 km	200 m
平均 RMSE	2.047	3.210	3.269	26.150	27.084	27.056	2.966	4.486	5.393	23.996	23.962	23.835

表 3 2011 年 11 和 12 月测风塔 6 个观测站 3 组试验结果的 RMSE

Table 3 Wind average RMSE at 6 wind towers of three experiments in November and December 2011

月份	11 月							
类型	风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$				风向/ $^{\circ}$			
模式	CALMET		WRF		CALMET		WRF	
网格距	200 m	1 km	200 m	200 m	1 km	200 m	200 m	
RMSE	徐闻站	60 m	1.5537	1.5294	1.7347	19.6578	22.3445	22.9384
	19011 站	70 m	2.4256	2.9505	2.6020	20.1352	20.4422	21.6838
	21002 站		1.5078	1.5997	1.5240	13.3655	14.3293	15.1129
	21004 站		1.6209	1.6846	1.7190	21.0777	20.3330	28.5304
	21005 站		2.7436	2.7142	2.6464	37.1834	32.9705	31.4980
	秀英站	80 m	1.9207	2.0622	2.0759	18.8305	20.0459	20.1391
	平均值		1.9621	2.0901	2.0503	21.7083	21.7442	23.3171
月份	12 月							
类型	风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$				风向/ $^{\circ}$			
模式	CALMET		WRF		CALMET		WRF	
网格距	200 m	1 km	200 m	200 m	1 km	200 m	200 m	
RMSE	徐闻站	60 m	2.6738	2.4895	4.7910	14.7533	14.9652	16.2563
	19011 站	70 m	4.2239	4.8268	5.9617	23.5880	24.6985	24.4933
	21002 站		3.3881	3.2213	3.0057	10.2672	10.3226	10.1491
	21004 站		2.7954	2.8939	4.4169	18.8302	18.8377	17.7095
	21005 站		0.5439	0.5713	0.6701	/	/	/
	秀英站	80 m	3.1995	3.2061	3.9754	16.5590	16.8883	15.9591
	平均值		2.8041	2.8681	3.8034	16.9439	17.2753	17.0011

注：/ 表示观测数据缺失。

异,因此,需要采用更为详细的分析方法来进一步评估。

2.2 各风速段上的偏差分析

为了详细地看出在各个风速上风的区别,首先以实际观测的风速进行分级统计,用 x 轴表示;以 3 组试验的风速风向与真实观测差值的分布进行统计分析,用 y 轴表示。这样可以评估在不同风速段上对所有的模拟诊断偏差值进行统计,得到该风速段上的平均偏差值、四分位值、中位数和各个偏差段内的出现频率分布。同时再区分出冷空气活动期间与非冷空气活动期间的风速风向值进行统计,分析在两类天气现象下,风速风向的模拟诊断效果的差别。

2011 年琼州海峡区域 11 月冷空气活动时间段为当地时间 8 日 11 时至 10 日 11 时,12 月冷空气

活动时间段为 8 日 08 时至 12 日 20 时。其他时刻属于冷空气尚未到达琼州海峡区域或者冷空气已经变性,为非冷空气活动时刻。

(1) 10 m 高度风场

图 6 表示 10 m 高度风在冷空气活动期间 3 组模拟诊断风速和风向的偏差统计。对比图 6a 与 6c,可以发现低风速时,CALMET-200 m 的诊断风速要远远好于 WRF-1 km 和 WRF-200 m 的模拟结果,在 $0 \sim 4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的风速段,CALMET 的偏差平均值从 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 下降至约 $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,而 WRF-1 km 的这一段风速段内的模拟风速维持在 $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。从阴影的分布也可以看出,图 6a 的偏差分布比图 6c 的四分位距更小,表示 CALMET-200 m 的风速误差相对更加集中而且整体更小。图 6e 可见,WRF-200 m 的风速偏差非但没有比 CALMET 更

为准确,相比起图 6c 中 WRF-1 km 风场,无论是从平均偏差、四分数线和 50%线来看,WRF-200 m 的模拟风速都远小于 WRF-1 km。中风速段 4~7 m · s⁻¹,CALMET 的风速偏差都基本小于 2 m · s⁻¹,WRF-1 km 的风速偏差基本维持在 4 m · s⁻¹,WRF-200 m 的风速正偏差为 5~2 m · s⁻¹,随着风速的增大偏差值急剧减小。

图 7 表示 10 m 高度风在非冷空气活动期间 3 组试验风速和风向的偏差统计。图 7a 显示,CALMET-200 m 在低风速段诊断偏差大致在 2~4 m · s⁻¹,均值为 3 m · s⁻¹,且离散程度很低,偏差最大分布频率集中在 2~3 m · s⁻¹ 的风速段。大约在 8~9 m · s⁻¹ 风速段诊断的偏差值均值为 0 m · s⁻¹,在观测风速 > 10 m · s⁻¹ 时,CALMET-200 m 偏差急剧加大,13 m · s⁻¹ 时偏差的平均值达到 -4 m · s⁻¹。对比图 7c,发现 WRF-1 km 在 0 m · s⁻¹ 风速时,平均偏差值为 4 m · s⁻¹,比 CALMET-200 m 的偏差值大约 1 m · s⁻¹。而且在实际风速为 2~4 m · s⁻¹ 时偏差值较 0 m · s⁻¹ 时的偏差更大,这一风速段中,CALMET-200 m 的诊断风速比

WRF-1 km 的模拟风速小约 1 m · s⁻¹,而且 CALMET-200 m 的偏差离散程度要比 WRF-1 km 更小。而 WRF-200 m 的模拟结果比以上两组的试验具有更大的偏差,平均偏差的最大值达到了约 5 m · s⁻¹,离散程度也更大,可见 WRF 模式在对近地面风场精细化模拟时,会产生比相对较低分辨率风场更大的风速误差。3 组试验中,风向的模拟诊断结果相当相似,由此可见在没有冷空气的影响下,风向的模拟诊断更多地取决于 WRF-1 km 的模拟结果。

对比图 6 和图 7 的 10 m 风,冷空气控制时段和非冷空气控制时段在实际风速的分布上没有十分明显的区别。从 CALMET-200 m 的风速偏差图(图 6a 和图 7a)来看,冷空气控制时段内的平均偏差要相比非冷空气时段在 0~1 m · s⁻¹ 风速段内大 1 m · s⁻¹ 左右。在大风速段内,非冷空气时段内存在较大的负偏差,而冷空气时段内则相对要小约 1 m · s⁻¹。可见在两次过程中内,WRF/CALMET 模式系统在非冷空气时间段内能更准确地模拟诊断出低风速。风向上来看,冷空气活动期间内,CALMET-200 m 风向的四分位距范围在 0~1 m · s⁻¹ 上为

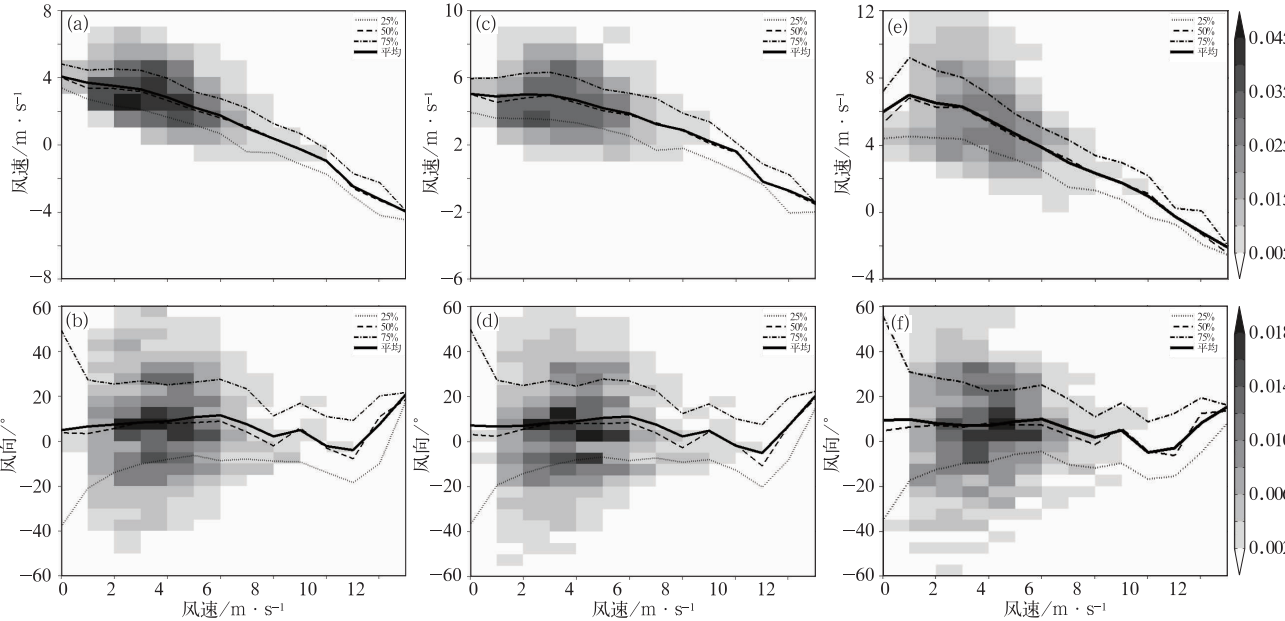


图 6 2011 年 11 和 12 月琼州海峡被冷空气控制时,3 组试验的 10 m 风与观测的偏差统计分布
CALMET-200 m 风速(a)和风向(b),WRF-1 km 的风速(c)和风向(d),WRF-200 m 的风速(e)和风向(f)
(阴影为出现频率)

Fig. 6 10 m wind error statistic distribution of three experiments with cold air in November and December 2011
CALMET-200m wind, (a) speed, (b) direction; WRF-1 km wind, (c) speed, (d) direction;
WRF-200 m wind, (e) speed, (f) direction
(Shading represents frequency)

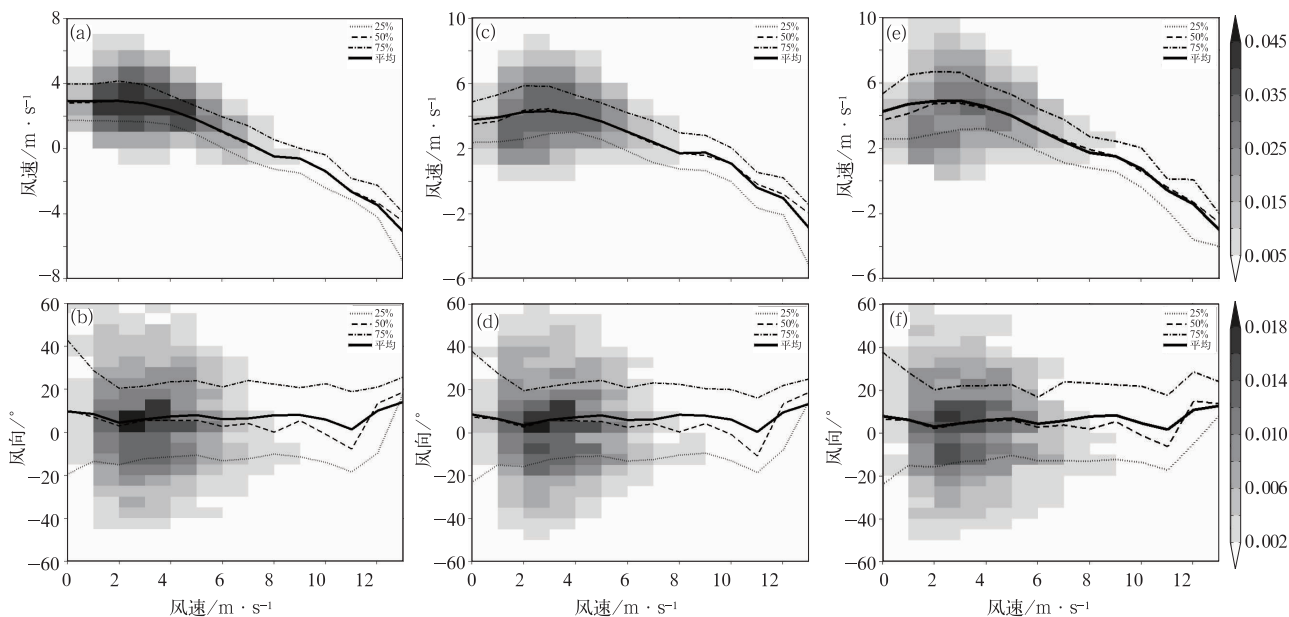


图 7 同图 6, 但为非冷空气控制下

Fig. 7 Same as Fig. 6, but for without cold air

$-40^{\circ} \sim 40^{\circ}$, 随着风速加大, 范围逐渐缩小为 $-10^{\circ} \sim 25^{\circ}$, 大风速段, 即 $> 8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 风速时, 风向的波动较大。对比 CALMET-200 m 在两个时间段内的区别, 发现风速在 $0 \sim 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 这一风速段时, 风向的偏差值都很大。随着风速增大, 四分位距都在一定程度上减小, 但是可以明显地看见在非冷空气活动时无论是四分位距、中位数和均值都保持在一个稳定的阈值范围内, 而冷空气活动时出现了较大的波动, 离散程度也更大。

(2) 60~80 m 高度风场

图 8 表示 CALMET-200 m 在测风塔上高度分别在 60/70/80 m 的一共 6 个测风塔上的风速风向偏差分布图。近地面层上层与 10 m 风速最大的不同是近地层上部风速要更大, 主要分布于 $4 \sim 8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

从图 8a 和 8b 上可以看出, 冷空气时段内 CALMET-200 m 在近地层上部的低风速模拟诊断偏差值都很大, 平均偏差值大约均为 $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上。从风速由低至高的整体变化看, 偏差值逐步缩小。近地层上部风向也出现与风速同样的现象, 在低风速段风向的模拟有很大的偏差, 随着风速的增大, 风向的模拟准确率都随之上升, 模拟的风速偏差基本都在 $-10^{\circ} \sim 20^{\circ}$ 。当风速在 $13 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 风向的偏差值接近于 0。相比 10 m 风在高速段的低样本量, 60~80 m 高度上同样在低风速段有很少

的样本, 其结论有待进一步证实。

图 8c 和 8d 为非冷空气时段内风速和风向偏差分布。与冷空气活动时类似, 都是在低风速段内偏差较大。风速偏差都是在实际风速为 $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 平均偏差和中位数线达到 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的偏差, 随着风速的增大偏差逐渐缩小, 实际风速为 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 偏差值逐渐为 $0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。在风向的模拟诊断上, 四分位线范围都在 $-40^{\circ} \sim 40^{\circ}$, 但是风向的偏差平均值已经十分接近于 0。相比 WRF-1 km、CALMET-200 m 在 $2 \sim 5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的风向诊断偏差上要更加稳定, 平均偏差值更小。

两个时段内对比, CALMET-200 m 在非冷空气活动时比冷空气活动时的风速误差要小很多, 尤其是在近地层上部的出现较多的 $4 \sim 8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 这一风速段, 冷空气活动时 CALMET 诊断风速偏差的平均值要更大, 约 $1 \sim 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 四分位距也更宽, 误差分布的离散程度更大, 误差较大。诊断风向时, 在冷空气活动时间段内, WRF/CALMET 模式系统对低风速段的风向模拟诊断偏差值较非冷空气活动时段内要大得多, 冷空气内实际风速值达到 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 风向误差趋近于真实风向, 在 $\pm 10^{\circ}$ 范围内波动。非冷空气活动时期, 风向偏差均值始终保持在 0° 附近, 四分位距比冷空气活动时段内小得多。

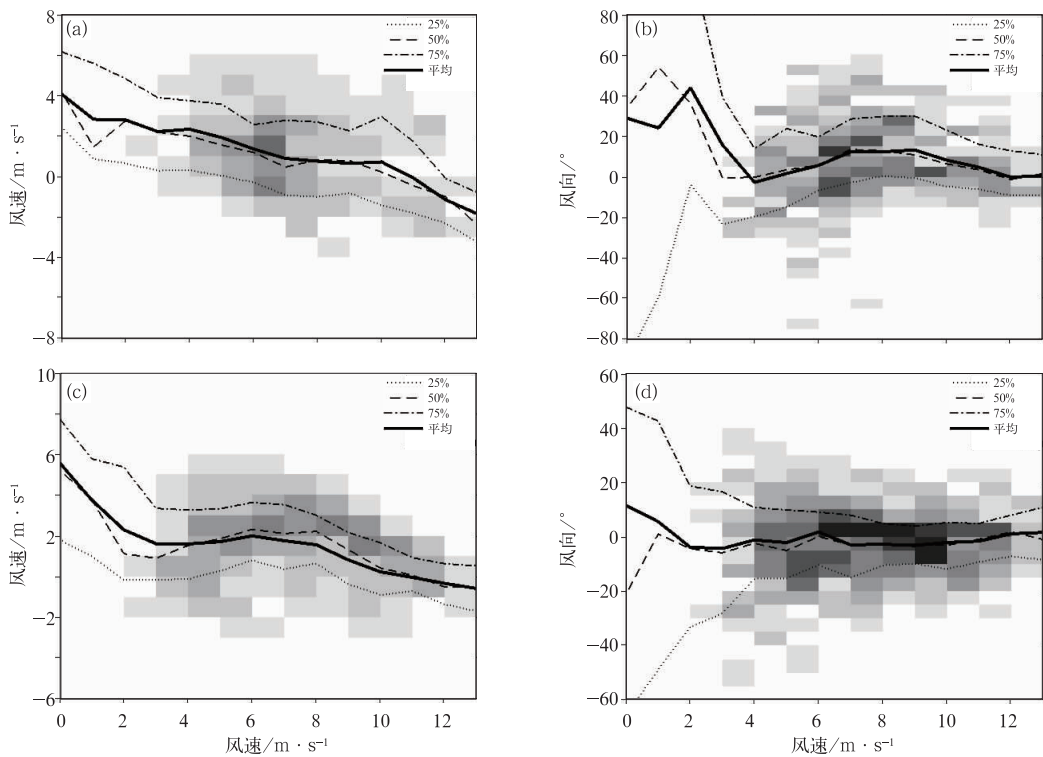


图 8 2011 年 11 和 12 月 60~80 m 高度上 CALMET-200 m 诊断风与观测的偏差值,冷空气控制时段的风速(a)、风向(b)和非冷空气控制时段的的风速(c)、风向(d)
(其他同图 6)

Fig. 8 60—80 m wind error statistic distribution of CALMET-200 m wind in November and December 2011, in cold air wind speed (a), wind direction (b) and in non-cold air wind speed (c), wind direction (d)
(Others are the same as Fig. 6)

3 结论和讨论

(1) 3 组试验中风速和风向的 *RMSE* 显示,在 10 m 高度上,CALMET-200 m 的诊断风速要比 WRF-1 km 和 WRF-200 m 的 *RMSE* 值小 1~2 m · s⁻¹,而 3 组试验的模拟诊断风向效果相当。60~80 m 高度上 CALMET-200 m 的诊断风速的 *RMSE* 比 WRF-1 km 试验略小,比 WRF-200 m 模拟风速平均小 1 m · s⁻¹,3 组试验的风向模拟诊断效果在 *RMSE* 上表现相当。

(2) 对 3 组试验不同高度上的风速风向与实际风的偏差进行分析。

10 m 高度上,WRF/CALMET 模式系统能比 WRF-200 m 和 WRF-1 km 更加准确地诊断出 0~4 m · s⁻¹ 的低风速段,平均偏差值要小 1~2 m · s⁻¹,约为 2~3 m · s⁻¹ 的正偏差。实际风速为 4~8 m · s⁻¹ 时,CALMET-200 m 诊断效果在所有风速段内

诊断效果最好,平均偏差和中位数线大致都在 0~2.5 m · s⁻¹,而这一风速段内 WRF-1 km 和 WRF-200 m 的平均偏差和中位数线大致都在 2~5 m · s⁻¹。CALMET 诊断模式在精细化的风场模拟中比 WRF-1 km 和 WRF-200 m 表现得更好,可见 CALMET 更多地考虑了地形的动力作用,而 WRF 全方位地考虑了各种要素却导致更大的偏差,可见在近地面风场的精细化模拟时,诊断模式存在一定的优势。风向上,CALMET-200 m 与 WRF-1 km 和 WRF-200 m 没有很大的区别,其原因在于近地面风向除了受局地风场的影响之外,还在很大程度上受到地形的影响。而两个模式之间地形并没有很大的差异,所以风向上 3 组试验没有大的区别。除了地形影响,CALMET 模式散度最小化过程中,由于散度是一个标量,并没有对风向这一矢量进行调整,因而对风向的诊断上,CALMET 并没有提高。

60~80 m 高度上,CALMET-200 m 对比 WRF-200 m 的模拟风场并没有太大的区别,仅仅比

WRF-1 km 略好,原因可能在于 CALMET 模式的两个风场诊断模块只使用了第一个地形适应模块,而地形对风的影响可能无法达到这一高度。近地面高层的风很大程度受到的是热力作用影响而非地形的动力作用,CALMET 在热力作用这一块还需要进一步的改进。

(3) 对比 WRF/CALMET 模式系统在冷空气活动期间与非冷空气活动期间的结果。10 m 高度上,CALMET-200 m 在非冷空气活动时段内比冷空气活动时段内在风速上表现出更小的偏差值和更小的四分位距,风向的诊断上也表现出同样的结果,可见 CALMET 在没有冷空气活动影响时能更加准确地诊断出 10 m 高度上的风速风向。在 60~80 m 高度上,冷空气过程中的风速偏差在 $4\sim 8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 这一风速段比非冷空气时期平均偏差值要大 $1\sim 2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,而且具有更大的四分位距。风向的表现上,冷空气活动时段段的低风速风向诊断误差要比非冷空气活动时期要大得多,冷空气活动时直至实际风速接近 $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,模拟诊断风向才趋近于真实风向,在 $\pm 10^\circ$ 波动,非冷空气时期内,风向偏差均值始终接近于 0° ,实际风速 $>4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,非冷空气活动时期风向偏差四分位距大致比冷空气活动时小 10° 。由此可见 WRF/CALMET 模式模拟诊断的风向在非冷空气时段内表现出更好的模拟诊断效果。

(4) 精确模拟诊断近地面风场,WRF/CALMET 模式具有比单纯 WRF 模式具有更准确的模拟诊断能力,而且能更少的消耗计算机资源,使得在近地面精细化风场的预报业务具有可行性。

参考文献

常蕊,朱蓉,柳艳香,等. 2013. 基于均生函数的风电场风速短临预报模型. 气象,39(2):226-233.

陈德桥,戴泽军,叶成志,等. 2012. 南岳高山站 1953—2010 年风的气候特征分析. 气象,38(8):977-984.

邓礼标. 2005. 琼州海峡海上交通事故的成因与对策. 航海技术,(6):19-20.

邓先瑞. 1977. 寒潮. 北京:商务印书馆,75.

高留喜,朱蓉,常蕊. 2014. QuikSCAT 和 ASCAT 卫星反演风场在中国南海北部的适用性研究. 气象,40(10):1240-1247.

黄少军,薛类波,石磊,等. 2006. 渤海海峡客滚船海难事故与大风事件关系分析. 气象与环境学报,22(3):30-32.

李磊,陈柏纬,杨琳,等. 2013. 复杂地形与建筑物共存情况下的风场模拟研究. 热带气象学报,29(2):315-320.

李艳,汤剑平,王元,等. 2009. 区域风能资源评价分析的动力降尺度研究. 气候与环境研究,14(2):192-200.

刘传凤. 1990. 我国寒潮气候评价. 气象,16(12):39-42.

路屹雄. 2011. 非均匀下垫面近地层风动力降尺度研究. 南京:南京大学.

王桂玲,蒋维楣. 2006. 复杂地形上的低层风场特征. 解放军理工大学学报(自然科学版),7(5):491-495.

王海霞,张宏升,李云峰,等. 2013. 上海浦东国际机场低层大气垂直风场特征研究. 气象,39(11):1500-1506.

王兴,马鹏里,张铁军,等. 2012. MM5 模式及 CALMET 模型对甘肃酒泉地区风能资源的数值模拟. 高原气象,31(2):428-435.

许杨,陈正洪,杨宏青,等. 2013. 风电场风电功率短期预报方法比较. 应用气象学报,24(5):625-630.

杨薇,苗峻峰,谈哲敏. 2014. 太湖地区湖陆风对雷暴过程影响的数值模拟. 应用气象学报,25(1):59-70.

曾天祥. 1998. 飞机事故及其原因统计分析. 航空标准化与质量,(6):37-43.

张云海. 2004. 地形对近地层风场日变化影响的数值模拟. 气象科技,32(1):25-28.

American Wind Energy Association. 2003. Global wind energy market report. <http://www.awea.org/pubs/documents/global-market2004.pdf>.

Bartholy J, Radics K. 2005. Wind profile and atmospheric stability over a complex terrain in southwestern part of Hungary. Phys Chem Earth,30(1-3):195-200.

Dobersch H, Kury G, Cermak J, et al. 1997. Wind Atlas for the Central European Countries-Austria, Croatia, Czech Republic, Hungary, Slovak Republic and Slovenia. Österreichische Beiträge zu Meteorolo,16:1-105.

Jackson P S, Hunt J C R. 1975. Turbulent flow over a low hill. Quart J Roy Meteor Soc,101(430):929-955.

Lu Yixiong, Tang Jianping, Wang Yuan, et al. 2012. Validation of near-surface winds obtained by a hybrid WRF/CALMET modeling system over a coastal island with complex terrain. J Trop Meteor,18(3):284-296.

Mearns L O, Bogardi I, Giorgi F, et al. 1999. Comparison of climate change scenarios generated from regional climate model experiments and statistical downscaling. J Geophys Res,104(D6):6603-6621.

Troen I, Petersen E L. 1989. European Wind Atlas. Commission of the European Community. Roskilde:Risoe Nat Lab.

Wang Weiguo, Shaw W J, Seiple T E, et al. 2008. An evaluation of a Diagnostic Wind Model (CALMET). J Appl Meteor Clim,47(6):1739-1755.

Yim S H L, Fung J C H, Lau A K H, et al. 2007. Developing a high-resolution wind map for a complex terrain with a coupled MM5/CALMET system. J Geophys Res,112(D5), doi:10.1029/2006JD007752.