

李俊徽,耿焕同,谢佩妍,等,2017. 基于 WRF-CALMET 的精细化方法在大风预报上的应用研究[J]. 气象,43(8):1005-1015.

基于 WRF-CALMET 的精细化方法在 大风预报上的应用研究*

李俊徽¹ 耿焕同² 谢佩妍¹ 张录军³

1 南京信息工程大学大气科学学院, 南京 210044

2 南京信息工程大学滨江学院, 南京 210044

3 南京大学大气科学学院, 南京 210093

提 要: 针对当前风场预报普遍精细程度偏低,动力降尺度改善风场预报应用偏少的问题,利用 CALMET 模式的动力诊断模块,结合高分辨率的地形资料对 WRF 模式输出的风场预报数据进行了动力降尺度处理,进而提高风场的精细化预报。其方法充分借助地形动力学效应,使大尺度的近地层风场经过坡度流与阻碍效应等修正后得到更精细的风场且体现出与局地地形相符的特征。试验部分以广东省为研究区域,并选取个例观测资料与陆地同化系统资料对模拟结果进行对比检验,结果表明动力降尺度之后的风场较之前更为精细且含有更多与地形相关的信息;与观测资料对比的总体相关性较好,误差也 smaller,与陆地同化系统资料对比变化趋势基本一致,且误差不大,这表明 WRF-CALMET 方法不仅能有效地提高风场预报数据的时空分辨率而且其结果更趋近于真实,对风场的精确预报具有重要的参考价值。

关键词: WRF, CALMET, 动力降尺度, 精细化

中图分类号: P457

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2017.08.011

Research on Application of Fineness Method Based on WRF-CALMET in Gale Forecasting

LI Junhui¹ GENG Huantong² XIE Peiyan¹ ZHANG Lujun³

1 School of Atmospheric Science, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2 Binjiang College, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

3 School of Atmospheric Science, Nanjing University, Nanjing 210093

Abstract: Aiming at the problem that the resolution of the current wind forecasts is not high and dynamic downscaling method is less applied to wind forecasting, this paper used the diagnostic wind field function of CALMET model and high spatial resolution terrain data to dynamically downscaling the wind forecast data outputted by WRF model. The main theory is kinematic effect of terrain. After the large-scale surface wind field was adjusted by slope flows and terrain blocking effects, the wind field became finer and showed the feature corresponding to terrain. In the experiment part, we took Guangdong Province as study region, using observation data and CLDAS (CMA land data assimilation system) data to examine the simulation result by a case. The result indicated that the resolution of wind field was more precise after downscaling and contained more sophisticated information related to terrain. Correlation coefficients between the simulation and observation results of wind speed were at a high level and the RMSE (root mean square error) was much smaller. The comparison between simulation and CLDAS showed the similar

* 国家自然科学基金项目(41201045)、江苏省自然科学基金(BK20151458)和江苏省青蓝工程(2016)共同资助

2016 年 7 月 29 日收稿; 2017 年 3 月 31 日收修定稿

第一作者:李俊徽,主要从事气象要素精细化及气象软件工程. Email:397266485@qq.com

通信作者:耿焕同,主要从事气象信息技术及多目标优化. Email:htgeng@nuist.edu.cn

result. To sum up, the combination of WRF-CALMET is an outstanding downscaling method which could effectively improve the temporal-spatial resolution of wind forecast data. Meanwhile it might be able to make the result closer to observation. Thus, this method could probably be a reference for wind forecasting in the future.

Key words: WRF, CALMET, dynamic downscale, refining

引言

随着科学发展与人民生活水平不断提高,对气象要素的精细化预报需求日益增强,尤其台风等一些极端天气事件发生时,更需要提高预报的精准性来更好地指导防灾减灾工作。目前虽然各地的气象台站为天气预报提供基础,但其空间分布稀疏且时间间隔较长,导致预报精细度不够高;特别对局部小范围区域的大风预报精确度还不够高,尤其是在地形复杂或难以部署观测的地区的预报往往偏差更大,因此研究大风预报的精细化对于提高局部区域的预报精度以及防灾减灾具有重要的现实意义。

风场的预报一般有统计预报和动力预报两种。统计预报是通过分析某地区风场的时空特征,根据统计分析结果运用逐步回归预报方法,建立预报方程来进行预报,国内外已有许多学者运用了此类方法对不同地区进行风场预报(董彦,2014;杨晓玲等,2012;Mauch et al,2013);同样也有一些运用主流的预报技术如小波包、卡尔曼滤波和人工神经网络等来实现预报(赵声蓉等,2012;Liu et al,2013),统计法通常过于依赖观测资料,预报时效短,从预报准确度上难以达到现代天气预报要求。风场动力预报国外开展较早,丹麦、德国、西班牙等国家的预报技术最为成熟,形成各自的模式如 Predicktor 和 Priviento 等(刘永前等,2007;Chandrasekar et al,2003);国内起步相对较晚,并还处在探究阶段,如孙川永等(2009)将美国的 RAMS 模式应用到某风场短期预报试验,证明此模式 6~72 h 短期风速预报较好,程兴宏等(2012)运用 WRF 模式对甘肃风电场区进行了预报结果模拟,评估了该模式预报风场的能力。虽然以上研究已表明了动力预报的可行性,但其关注点大多在预报的精准度上,而对空间分辨率涉及不多,因此亟需在精准度和精细度两方面进行综合探究。

动力降尺度方法是提高气象要素空间分辨率的有效手段之一,已有许多中小尺度结合的模式作为

降尺度的方法被应用于提高风场的空间分辨率之中,统称为动力降尺度。与统计降尺度相比其物理过程明确,受用于任何地方。李艳等(2009)利用 MM5 模式(水平分辨率为 5 km)评价了江苏省的风能资源,可精确地看出全省的风能空间分布情况。吴琼等(2012)用 MM5-CALMET 模式(水平分辨率为 1 km)对鄱阳湖地区进行风能资源评估,得出动力降尺度能够较好地模拟出鄱阳湖区域的风能资源分布。国外也有类似研究,Cerralbo et al(2015)利用 WRF-CALMET 模式研究了地中海地区 Alfac 海湾的风的变化不均一性(水平分辨率 1 km),表明降尺度之后能够体现出更多风的变化特征,Gioli et al(2014)利用 WRF-CALMET 模式(水平分辨率 2 km)模拟了意大利地区的风能,并用飞行测量器对结果进行评估,表明内陆的模拟效果好于沿海。以上研究虽表明降尺度在资源评估、气候模拟等领域已广泛应用且成效显著,但动力降尺度应用于风场预报还不多见(Jackson et al,2006;Wang et al,2008)。

为此,本文以 WRF 中尺度模式与 CALMET 诊断模式的组合为框架,利用高分辨率的地形高程与土地利用类型数据,借助动力降尺度方法对 WRF 风场预报产品进行精细化研究。在个例检验上,文中以广东省为研究区域,选取 1319 号台风天兔与 1208 号台风韦森特为研究个例,并利用站点资料与 CLDAS 陆面模式资料对动力降尺度后的效果进行对比分析。

1 研究区域与模式简介

1.1 研究区域

风速超过 $17.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 为大风级别,导致大风的原因有很多,但相比于锋、飑线和雷暴等天气系统,热带气旋占比最多。广东省地处我国东南沿海地区,经常受到热带气旋的影响,从而引发大风天气,而广东省又是我国经济大省且人口密集,对大风

预报水平提高的需求更为迫切,以便更大程度上避免灾害带来的经济损失与人员伤亡。因此,本文选取广东省作为研究区域。

1.2 WRF 模式

WRF (Weather Research and Forecasting) 模式是美国国家环境预报中心 (National Centers for Environmental Prediction, NCEP) 研发的继 MM5 之后的新一代中尺度同化预报系统,其分辨率高,可从数米到数千千米;水平方向采用荒川 (Arakawa) C 网格,垂直方向采用地形追随质量坐标系。WRF 模式拥有多种物理参数化方案,也可根据特殊模拟进行不同方案组合以得到更好的效果。本研究采用的是 WRF-ARW (3.6 版本),将 GFS 数据作为初始场提供给 WRF 模式,输出逐时的预报场。

1.3 CALMET 模式

CALMET 模式是非稳态拉格朗日烟团模型 CALPUFF 中的网格化风场模块,其核心为诊断风场模块与微气象模块,其生成的风场垂直方向最多可达 25 层,模式输入资料可以为地面、海上和探空资料,或 MM5、WRF 等模式输出资料,结合地形数据模拟输出逐时风场、三维温度场和混合层高度等气象要素 (董旭光等, 2011; 张弛等, 2015)。文中以 WRF 模式输出的逐时预报场为 CALMET 诊断风场的初猜场进行动力降尺度,进而得到精细化风场。

1.4 模拟方案

WRF 模式模拟区域中心点位于 (23. 15°N、113. 15°E),采用三层嵌套循环,最外层格点数为 100×90,水平格距为 27 km,次内层格点数为 214×172,水平格距为 9 km,最内层格点数为 427×361,水平格局为 3 km,垂直层分为 30 层,区域如图 1 所示。

微物理过程采用 WSM5 方案,长波辐射方案采用 RRTM 方案,短波辐射采用 Dudhia 方案,边界层方案为 YSU 方案,积云参数化方案为 Kain-Fritsch (new Eta) 方案 (李响, 2012)。

CALMET 模式将广东省分为 4 个区,格点数共为 603×785,垂直方向共有 10 层,以 WRF 最内层 (3 km) 的输出结果作为初始场,经诊断风场,微气象模块等处理后,最终输出 1 km 的精细化风场。其中 CALMET 模式的核心参数设置如表 1 所示。

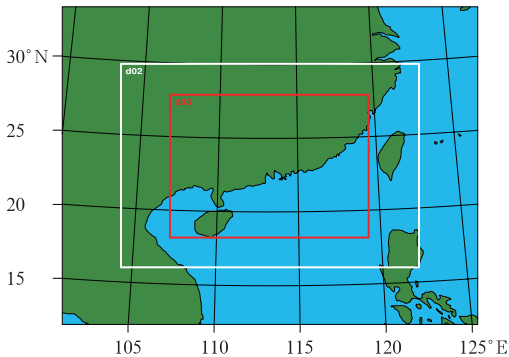


图 1 WRF 模式区域图

Fig. 1 Domain of WRF model

表 1 CALMET 模式核心参数设置表

Table 1 Critical parameters of CALMET model

参数	值	备注
NPSTA	-1	-1 代表无降水观测站,降水数据利用模式数据插值而成
IWFCOD	1	1 代表使用诊断风场模型
IFRADJ	1	1 代表使用 Froude 数调整效应
IKINE	1	1 代表计算动力学效应
IOBR	0	0 代表不使用 O'Brien 过程调整垂直风
ISLOPE	1	1 表示计算坡度流效应
RMIN	0.1 km	从范例中看出此参数约为分辨率的十分之一
TERRAD	10 km	此参数大约都在 10 左右
CRITFN	1	经验 Froude 数经调查一般都在 1 左右

2 数据与方法

2.1 数据来源

本文数据分为试验数据与校验数据。其中试验数据分为气象数据与地理数据,而校验数据分为站点数据与陆面同化系统数据。

气象数据来源于美国国家环境预报中心的全球预报系统 (GFS),根据 GFS 数据对过去十几年时间的评估,其预报水平已有大幅度提高,对热带气旋的路径与强度预报误差也在逐年递减 (Yang, 2013)。该数据时间分辨率为逐 6 h,空间分辨率为 0.5°×0.5° (约 50 km),将作为动力降尺度时的初始场。

由于文中影响动力降尺度效果的是地形对气象要素的调整,因此地理数据的选取至关重要 (Scire et al, 1998)。地理数据包括地形高程与土地利用类型两种主要数据。地形高程数据来自于美国国家航

空航天局(NASA)的 ASTER global digital elevation version2 数据,2010 年发布,分辨率为 $30\text{ m} \times 30\text{ m}$,其分辨率与资料的更新程度均位于全球前列(Tachikawa et al,2011);土地利用类型数据来自国家基础地理信息中心研制的全球地表覆盖数据,同样于 2010 年发布。其他常见的土地类型数据有 NOAA、MODIS 等,它们的分辨率都在 250 m 至 1 km ,而本文使用的土地类型数据的分辨率高达 $30\text{ m} \times 30\text{ m}$ (<http://glc30.tianditu.com/background.html>),在国际上处于领先。以上两类数据较好地满足了精细化对数据分辨率的要求。

文中使用两种校验数据,首先是站点观测数据,来自于中国气象数据网的中国地面气候资料日值数据集(V3.0),时间分辨率为逐日;广东省有 37 个站点,其分布如图 2。

另外一个校验数据是陆面同化系统(CLDAS)数据,是国家气象信息中心发布的亚洲区域逐时的大气驱动场产品,产品包含气温、气压、湿度、风速、降水和短波辐射六个要素。覆盖区域为亚洲区域($0^\circ \sim 65^\circ\text{N}$, $60^\circ \sim 160^\circ\text{E}$),时间分辨率为逐时,空间分辨率为 $0.0625^\circ \times 0.0625^\circ$ (约 6 km)。

此外热带气旋的数据来自中国气象局热带气旋资料中心的最佳路径数据集,包括自 1949 年以来西北太平洋(含南海,赤道以北,东经 180° 以西)海域热带气旋每 6 h 的位置和强度。

2.2 基于 WRF-CALMET 的精细化流程

精细化流程主要分为数据预处理、动力降尺度以及数据后处理三个步骤,流程如图 3 所示。预处理数据包括气象数据与地理数据。气象数据的预处

理先利用 WRF 模式生成逐时气象要素场,利用 CALWRF 数据接口程序将 wrfout 数据转换为 3D.DAT 即 CALMET 的气象要素初猜场格式数据;地理数据预处理相对复杂,根据降尺度分辨率使用 ArcGIS 软件对研究区域进行分区,之后依次进行掩膜提取、栅格转点操作和图像数据数字化,并将数据导出,利用 Matlab 对数据进行重新编排与布局,使其成为 CALMET 模式能够接收使用的地理数据 GEO.DAT,预处理完成的地理数据如图 4 所示。接下来,将预处理生成的气象数据和地理数据与表 1 所示参数一并输入 CALMET 模式,进行动力降尺度模拟得到精细化气象要素场,将生成的逐时的二进制结果文件进行读取与编排,最终将分区数据合并得到精细化结果。

2.3 基于 WRF-CALMET 的精细化方法理论依据

CALMET 诊断风场的形成机理复杂,其利用 Liu 和 Yocke(Scire et al,1998)提出的方法处理地形动力学效应,通过计算整个区域的风来获得受地形影响的垂直风速且满足大气稳定度递减指数函数,并对初始猜测风场重复执行辐散最小化方法,以获得水平方向风分量所受到的地形动力学影响。在 CALMET 模式中,坡面流算法根据 Mahrt 的射流(shooting flows)参数化为基础,利用地形坡度、坡高和时间等参数计算,其风分量接入风场调整空气动力学影响;地形对风场的热力学阻塞效应是通过局地弗劳德(Froude)数计算;最终风场的形成是通过插值、平滑处理、垂直速度的 O'Brien 调整、散度最小化 4 个子过程,并在平滑处理和 O'Brien 调整步骤之间调用海风程序,以模拟海岸线风场。

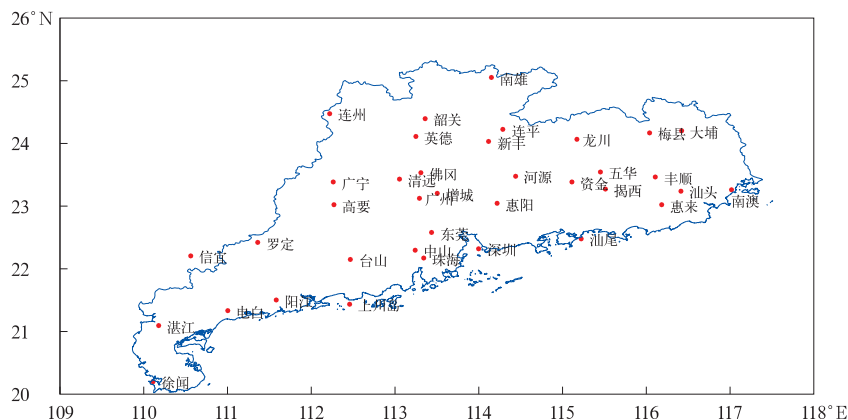


图 2 广东省 37 站点分布图

Fig. 2 The scatter of 37 observation stations in Guangdong

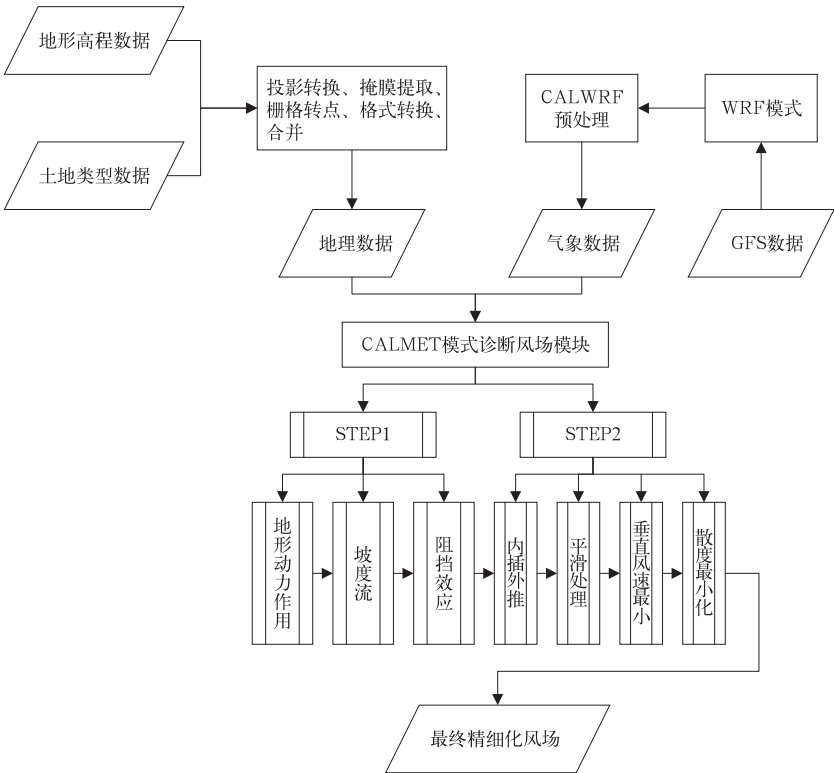


图 3 基于 WRF-CALMET 模式的精细化流程

Fig. 3 The flow chart of fineness method based on WRF-CALMET

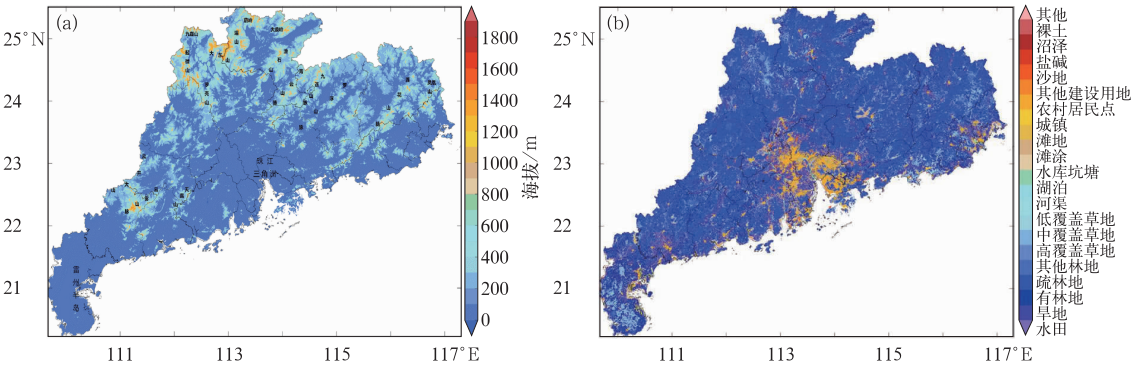


图 4 广东省地形图(a)和地形高程(b)土地利用类型

Fig. 4 The topographic pictures of Guangdong Province (a) and terrain height (b) land use category

3 个例检验

台风是一种灾害性天气,长时间以来已有大量学者投入到台风领域的研究中(何斌等,2016;黄颖等,2014;张守锋等,2015),提高风场预报的精细度可更有效地对台风防灾减灾工作进行指导。

3.1 个例介绍

本文选取了 1319 号台风天兔(Usagi)与 1208

号台风韦森特(Vicente)作为个例。2013 年 9 月 22 日 19:40(北京时,下同),“天兔”于汕尾沿海登陆广东省,登陆时中心附近最大风力达 14 级($45\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$),途经惠州市、东莞市,风力进一步减小至 13 级($38\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$),到达广州北部时削弱为强热带风暴,此后一路西北行途经清远市、广宁县后移出广东省边界;2012 年 7 月 24 日 04:15,“韦森特”于台山市赤溪镇沿海登陆广东省,登陆时中心附近最大风力达 13 级($40\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$),途经恩平市、阳春市,到达信宜市附近时削弱为热带风暴并移出广东省边

界。台风路径如图 5 所示。

据事后统计,受“天兔”影响,汕头、汕尾、揭阳等 11 市 65 县(区、市)979 万人受灾,30 人死亡,造成经济损失 208 亿元;受“韦森特”影响,广东河源、梅州、揭阳、汕尾、深圳等 13 市 70 个县(市、区)受灾,受灾 96.6 万人,11 人死亡,直接经济损失 18.7 亿元。

3.2 精细化效果

根据实况在 2013 年 9 月 23 日 06 时台风天兔中心正位于广东省中心(23.3°N 、 112.5°E),因此选择此时刻来对比精细化前后的效果。

图 6 是广东省全域近地层风场的对比图,可看出 CALMET 模拟的结果明显精细于 WRF 的模拟结果。虽然 WRF 模拟的结果中可看出气旋式的环流结构,但风向的细节变化体现不足,即使是在地形起伏剧烈的粤北山区也看不出风向的变化性。而从 CALMET 模拟结果中可以看出在地形起伏变化剧

烈的地方风向的跟随性改变。图 7 为同时刻粤北区域的风场分布情况放大示意图,从 CALMET 模拟的结果,不难看出在粤北山区起伏的地形下,结合海拔高度可以看出地形对风的阻碍作用,出现了风向的偏折,此类效果在粤东的莲花山脉与罗浮山脉也同样得以体现,而在相对平坦的地形如雷州半岛则未对风向造成更多影响。

图 8 是广东省全域近地层风速对比图,与风场类似可看出精细的效果。风在遇到地形阻碍时会形成爬升和偏折,其中偏折会使得该方向上的风速减小,而偏折气流会与附近的气流汇合从而增加风速。对比 WRF 的模拟结果,CALMET 的模拟结果在粤北山区以及粤东的山脉有明显的风速小值区域(图 8b 中的黑点),而在小值区的附近又有相对而言的大值区,这与风的偏折所带来的影响基本一致,而在 WRF 的模拟结果中并不能很好地反映出这些现象。

同样的精细化效果在“韦森特”个例中也得到验

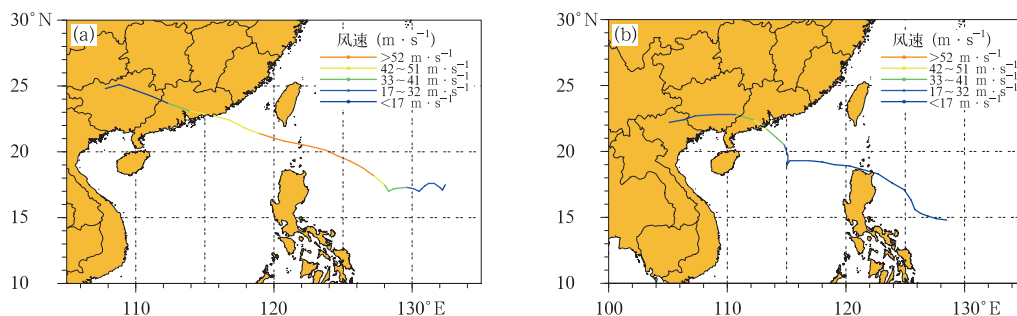


图 5 (a)天兔, (b)韦森特的台风路径图

Fig. 5 The track of Typhoons Usagi (a) and Vicente (b)

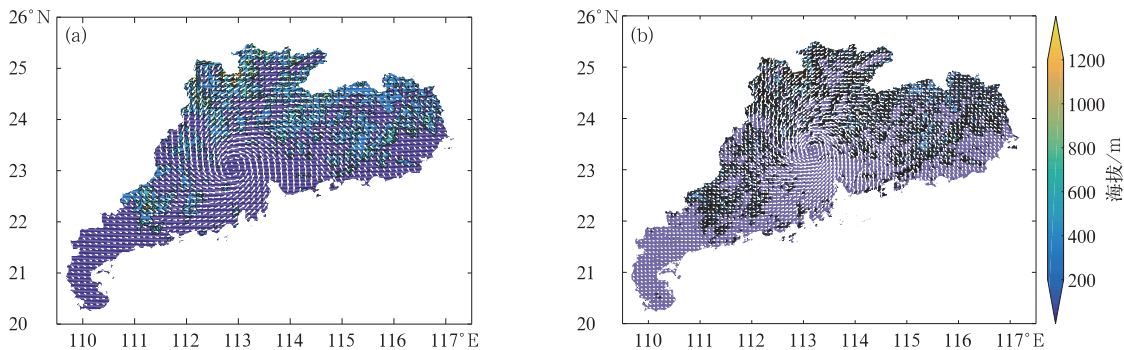


图 6 2013 年 9 月 23 日 06 时广东省近地层风场图

(a)WRF 模拟, (b)CALMET 模拟

Fig. 6 Surface wind field of Guangdong Province at 06:00 BT 23 September 2013

(a) simulated by WRF, (b) simulated by CALMET

(Vector is wind field, background is terrain height, unit: m)

证,图 9 为“韦森特”登陆广东省时的近地层风场对比图,图 10 为对应的风速对比图。

3.3 观测对比检验

为了定量比较模拟结果与观测结果的切合程

度,根据台风路径分别计算了“天兔”与“韦森特”的平均风速与最大风速模拟值的误差统计量,并以泰勒图的形式进行展示。“天兔”个例的泰勒图为 9 月 21—23 日的广东省 8 个台站的显示结果,台站依次为南雄、韶关、清远、广州、揭西、惠来、南澳、湛江(图11);

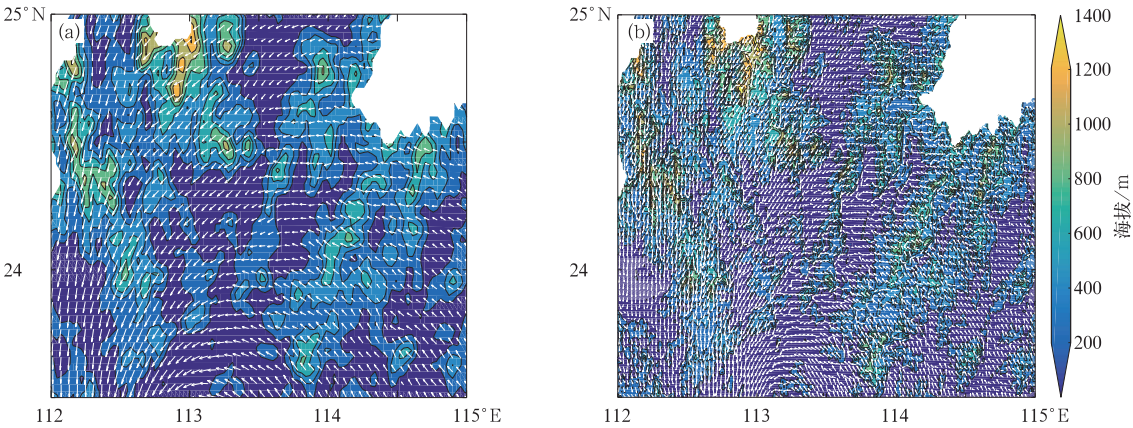


图 7 同图 6,但为粤北近地层风场图
Fig. 7 Same as Fig. 6, but for the north of Guangdong

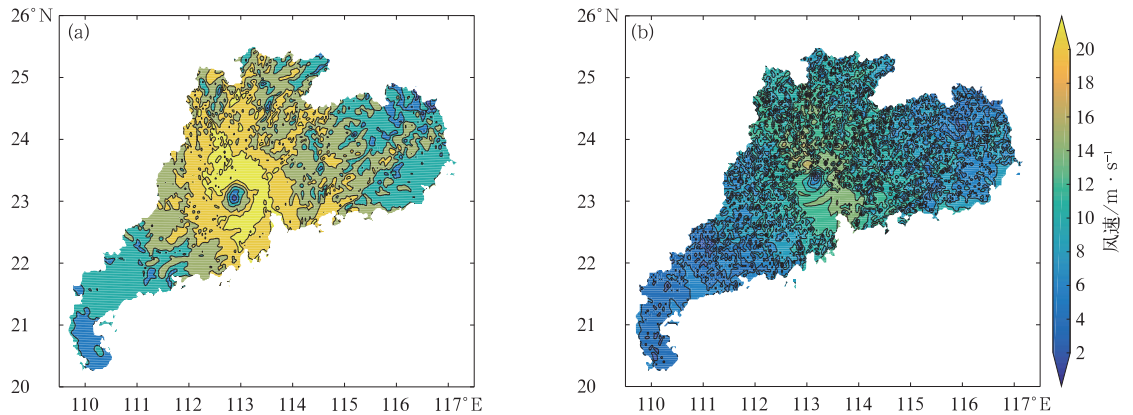


图 8 同图 6,但为近地层风速图
Fig. 8 Same as Fig. 6, but for surface wind speed

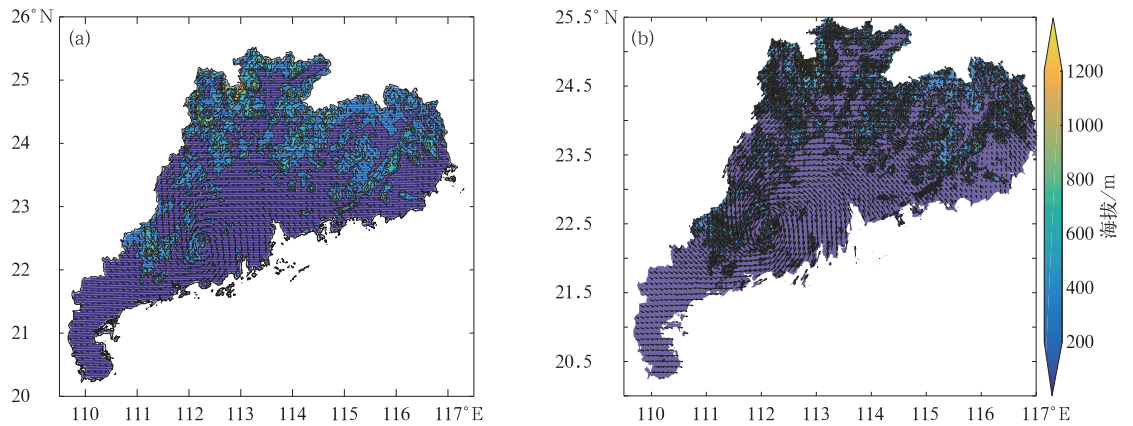


图 9 同图 6,但为 2012 年 7 月 24 日 12 时
Fig. 9 Same as Fig. 6, but for at 12:00 BT 24 July 2012

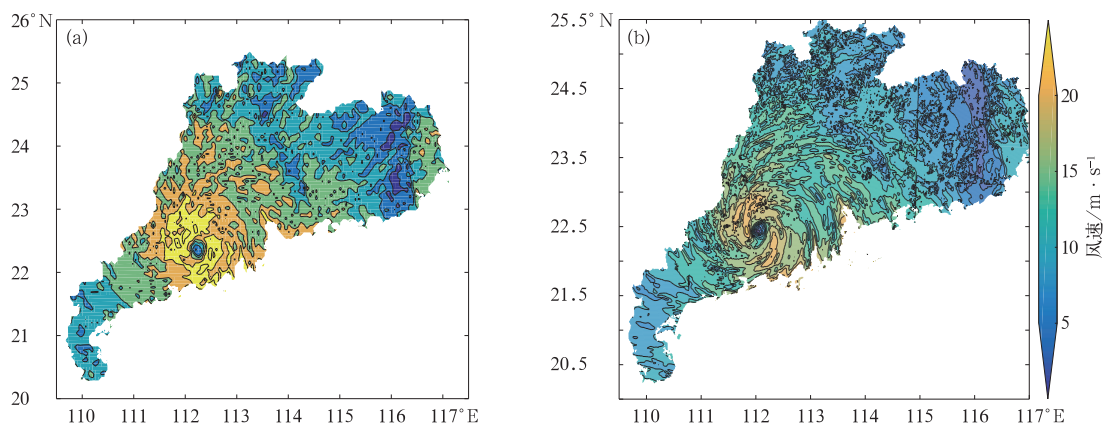


图 10 同图 6, 但为 2012 年 7 月 24 日 12 时近地层风速图

Fig. 10 Same as Fig. 6, but for surface wind speed at 12:00 BT 24 July 2012

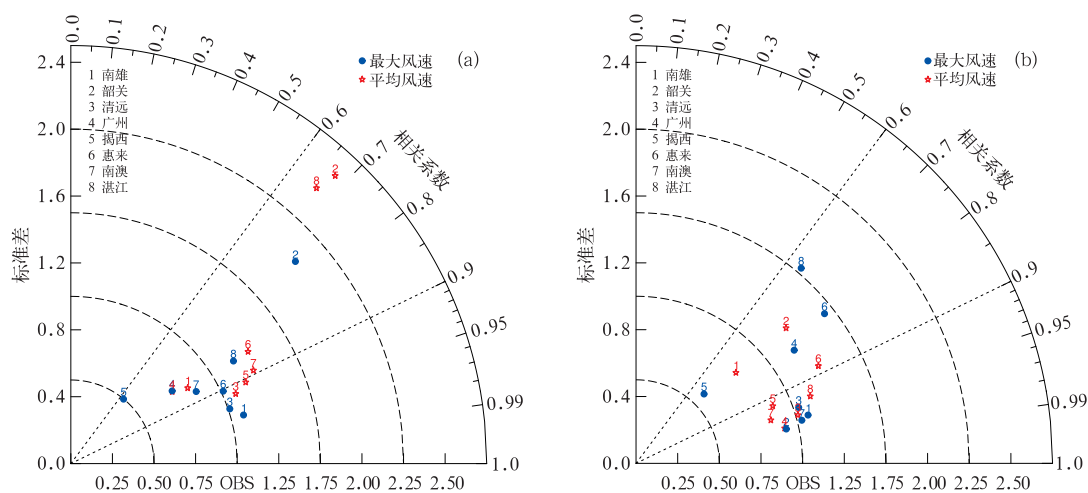


图 11 2013 年 9 月 21—23 日台风天兔 8 个站点的地面风模拟泰勒图

(a) WRF, (b) CALMET

Fig. 11 Taylor diagram of Typhoon Usagi for simulated surface wind of eight stations for 21–23 September 2013

(a) simulated by WRF, (b) simulated by CALMET

“韦森特”个例的泰勒图为 7 月 22—24 日的广东省 8 个台站的显示结果, 台站依次为珠海、深圳、南雄、连州、上川岛、电白、揭西、汕头(图 12)。泰勒图上点的序号 1~8 分别对应 8 个台站, 共有两组, 即风速平均值与最大值。点到原点的半径距离代表模拟值的归一化标准差, 原点与该点组成的直线与水平方向夹角的余弦值为模拟与观测的相关系数, 该点到 OBS(表示观测)虚线的距离代表模拟与观测的均方根误差。因此泰勒图中包含了大量的信息, 可以全方位综合地反映模拟结果的好坏。

图 11a 为 WRF 模拟结果的泰勒图, 可以看出所有点的相关系数都比较大, 最大风速的均值超过 0.8, 平均风速的均值也接近 0.8。误差方面平均风

速中韶关站点与湛江站点的平均风速误差较大, 前者主要受地形影响, 后者则可能是模拟效果的不足之处, 其他站点误差相对较小, 在清远、广州与南澳则最接近观测。

图 11b 为 CALMET 模拟结果的泰勒图, 与 WRF 的模拟结果分析比较后可看出 CALMET 的模拟显著效果, 如韶关与湛江的误差有明显的缩小, 韶关地处地形起伏明显的粤北山区, 误差的缩小也恰好说明 CALMET 模式考虑了地形对气象要素的影响; 图中也有个别点在精细化后均方根误差要大于之前, 如惠来站点的最大风速, 由于惠来地处汕尾东部, 北有莲花山脉, 而“天兔”于汕尾登陆, 东南风经过惠来后到达莲花山脉时存在爬升和阻碍, 而在

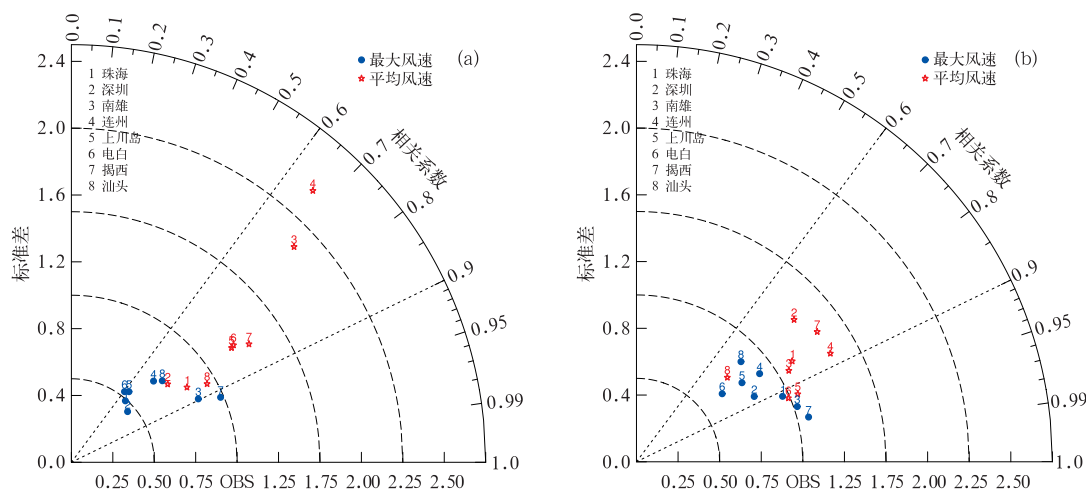


图 12 同图 11, 但为 2012 年 7 月 22—24 日台风韦森特

Fig. 12 Same as Fig. 11, but for Typhoon Vicente in 22—24 July 2012

CALMET 模式中因地形影响半径参数设置稍大会加大莲花山脉的阻碍作用,也加大了最大风速的修正,从而造成了惠来站最大风速的均方根误差反而增大;此外总体相关系数也有大约 0.05 的小幅提升。总之,综上所述经过精细化后的结果总体效果要优于精细化前。

同样在图 12a、12b 对比中可看出 WRF 模式对地形复杂地区的模拟结果稍差一些,而 CALMET 模式针对这一情况有大幅度的改善,其余站点也同样有小幅度的改善,因此总体上验证了 CALMET 模式的模拟结果会一定程度地改善精细化之前的模拟结果,并且改进后更接近真实观测值。

3.4 模式资料对比

CALMET 模式输出的要素场时间分辨率为逐时,为了更加精确地对模式降尺度结果进行对比评估,同时为了弥补观测数据在时间分辨率上的空缺,需要选取一个逐时的接近于观测的再分析数据来作为比较的标准。常规的再分析数据有 NCEP/NCAR Reanalysis, ERA-interim 和 JRA55 等,这些资料在空间分辨率上大多大于 0.1° (约 10 km),时间分辨率有逐小时、逐 3 h、逐 6 h 等,但满足不了时间和空间分辨率的要求。

中国气象局在“十二五”期间要研制一套高分辨率适用于我国的陆面同化系统资料(CLDAS),经验证该资料与观测资料吻合度较高;全国区域平均相关系数为 0.89,均方根误差为 0.02,偏差为 0.01。2013 年该资料的第一版投入业务使用,龚伟伟

(2014)对第一版数据进行评估,效果明显好于其他资料,由此说明该资料可用于对比检验。本文使用的 CLDAS 数据是第二版,效果要优于第一版。

对于台风天兔,挑选了广东省 4 个位置进行对比检验,分别是代表粤北的韶关(24.5°N 、 113.35°E),代表粤西的徐闻(20.2°N 、 110.10°E),代表粤东的汕尾(22.47°N 、 115.23°E)以及代表珠三角的广州(23.07°N 、 113.15°E),以 4 个方向的情况来代表广东省的整体情况;对于台风韦森特,同样挑选四个代表性位置,分别是代表粤北的南雄(25.05°N 、 114.15°E),代表粤西的阳江(21.5°N 、 111.58°E),代表粤东的汕头(23.24°N 、 116.41°E)以及代表珠三角的珠海(22.17°N 、 113.34°E)。

从图 13 中可以看出,对于台风天兔,WRF 模式输出、CALMET 模式的模拟结果与 CLDAS 三者的数据变化趋势基本一致,但 CALMET 的结果相对于 WRF 的结果更接近于 CLDAS 结果,使得精细化的结果更接近真实结果,验证了精细化之后的结果要优于精细化之前。具体来说,4 个地方的变化趋势均为白天上升,夜晚下降,并均能体现出由于台风登陆(22 日 20 时,即图 13a~13d 中 44 h)而带来的风速增加,其中在汕尾风速增幅最大,增加到了 $30\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上,风力达到了 12 级以上,反映出了台风的登陆地点;而广州与韶关风速上升的时间稍滞后于汕尾,徐闻则滞后的更多一些,并且风速的峰值也并未达到大风的等级,由此也可以反映出在省内台风影响粤东的程度高于其他地方。图 14 中,对于台风韦森特也可以看出变化趋势的一致性,风速在精

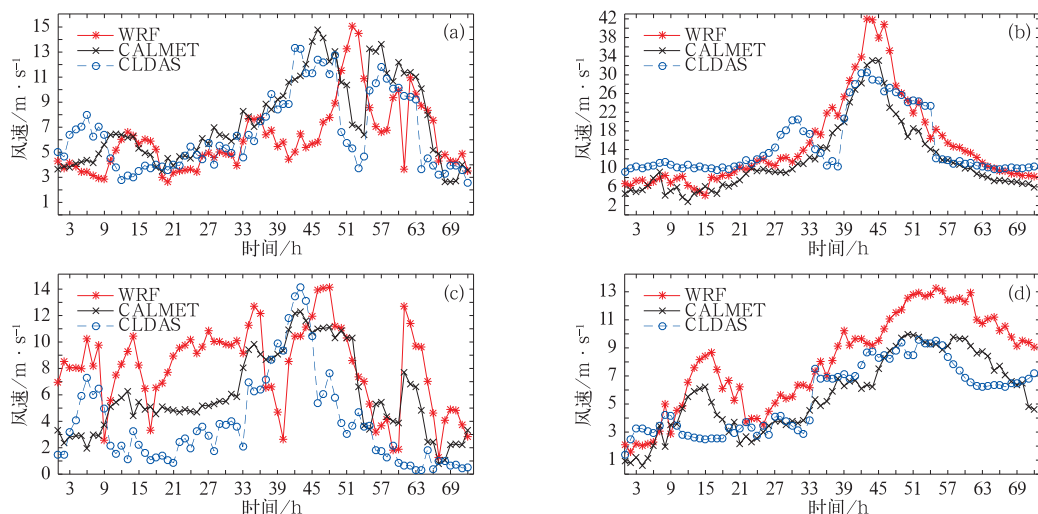


图 13 台风天兔局部站点 WRF/CALMET/CLDAS(2013 年 9 月 21 日 00 时至 23 日 23 时)72 h 风速折线对比图

(a) 广州站, (b) 汕尾站, (c) 韶关站, (d) 徐闻站

Fig. 13 The line chart of Typhoon Usagi 72 h wind speed comparison between WRF, CALMET and CLDAS from 00:00 BT 21 to 23:00 September 2013

(a) Guangzhou Station, (b) Shanwei Station, (c) Shaoguan Station, (d) Xuwen Station

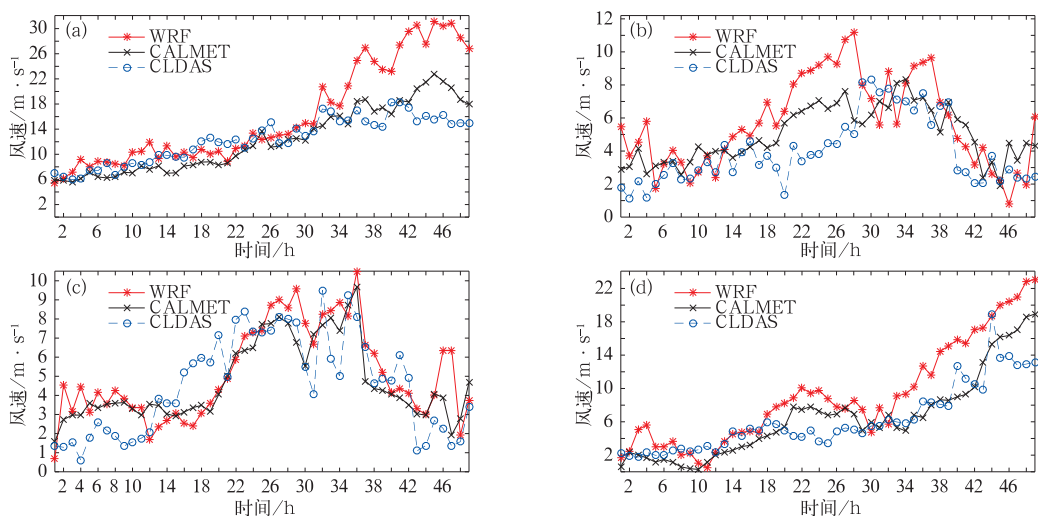


图 14 台风韦森特局部站点 WRF/CALMET/CLDAS(2012 年 7 月 22 日 00 时至 24 日 00 时)48 h 风速折线对比图

(a) 深圳站, (b) 龙川站, (c) 南雄站, (d) 阳江站

Fig. 14 The line chart of Typhoon Vicente 48 h wind speed comparison between WRF, CALMET and CLDAS from 00:00 BT 22 to 00:00 BT 24 July 2012

(a) Shenzhen Station, (b) Longchuan Station, (c) Nanxiong Station, (d) Yangjiang Station

细化的作用下向真实结果接近的趋势以及风速在 4 个方向的大小增减同样反映出各地受台风影响的程度。

4 结论与讨论

多年来,学者一直致力于不断地提高气象预报

水平,而高分辨率气象预报是其中一项重要研究内容。本文以 WRF 中尺度模式和 CALMET 诊断模式的组合为框架,采用动力降尺度方法,结合地形作用对 GFS 预报数据进行了精细化处理,得到了广东省 $1\text{ km}\times 1\text{ km}$ 的精细预报风场,并与观测资料和陆面同化系统资料(CLDAS)进行对比检验,得出如

下结论:

(1) 相比于精细化之前的结果,经过精细化的结果能够更好地反映出局地风场的变化趋势,从风速与风向上都体现出一些精细化之前看不出的微观特征如风向的偏转,风速遇阻挡时发生的骤减以及与其他方向气流汇合后的增加等。

(2) 通过与观测资料的整体对比结果来看,CALMET 诊断模式总体模拟效果较好,相关系数均值超过 0.8,均方根误差均值 15%,一些结果较好的站点误差则在 10%以内,并且精细化后的结果可有效地改善地势复杂的局部区域的预报结果;虽总体结果呈较好态势,但仍有极少数结果在精细化之后误差变大,原因在于参数设置方面未达到全局最优,在后续研究中将继续尝试参数的调整以弥补此不足之处。与陆面同化系统资料的对比结果来看,48 h 与 72 h 逐小时结果对比误差小且变化趋势基本一致。由此说明 WRF 中尺度模式结合 CALMET 动力降尺度模式能使预报数据结果更趋于真实观测结果。

(3) WRF-CALMET 相结合方法既可以有效地提高预报数据的分辨率,又能节省大量的计算资源,同时可避免在文字预报中会出现的“局部有大风”这一类的不确定说法,为提高精细化预报的准确度提供了可能,对今后风场预报有重要的参考价值。

参考文献

- 程兴宏,陶树旺,魏磊,等,2012. 基于 WRF 模式和自适应偏最小二乘回归法的风能预报试验研究[J]. 高原气象,31(5):1461-1469.
- 董旭光,刘焕彬,曹洁,等,2011. 山东省近海区域风能资源动力降尺度研究及储量估计[J]. 资源科学,33(1):178-183.
- 董彦,2014. 广西热带气旋大风的分布特征及预报研究[D]. 广西师范学院.
- 龚伟伟,2014. CMA 陆面数据同化系统(CLDAS)产品评估[D]. 南京信息工程大学.
- 何斌,潘士雄,李海军,等,2016. 浙江沿岸海域海面风场反演方法的研究[J]. 气象,42(7):875-884.
- 黄颖,金龙,黄小燕,等,2014. 基于局部线性嵌入的人工智能台风强度集合预报模型[J]. 气象,40(7):806-815.
- 李响,2012. WRF 模式中积云对流参数化方案对西北太平洋台风路径与强度模拟的影响[J]. 中国科学:地球科学,(42)12:1966-1978.
- 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[J]. 气候与环境研究,14(2):192-200.
- 刘永前,韩爽,胡永生,2007. 风电场出力短期预报研究综述[J]. 现代电力,24(5):6-11.
- 孙川永,陶树旺,罗勇,等,2009. 高分辨率中尺度数值模式在风电场风速预报中的应用[J]. 太阳能学报,30(8):1097-1099.
- 吴琼,贺志明,聂秋生,等,2012. 动力降尺度法对鄱阳湖区风能资源模拟效果分析[J]. 资源科学,34(12):2337-2346.
- 杨晓玲,丁文魁,袁金梅,等,2012. 河西走廊东部大风气候特征及预报[J]. 大气科学学报,35(1):121-127.
- 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[J]. 气象,41(1):34-44.
- 张守峰,余晖,向纯怡,2015. 中央气象台台风强度综合预报误差分析[J]. 气象,41(10):1278-1285.
- 赵声蓉,赵翠光,赵瑞霞,等,2012. 我国精细化客观气象要素预报进展[J]. 气象科技进展,2(5):12-21.
- Cerralbo P, Grifoll M, Moré J, et al, 2015. Wind variability in a coastal area (Alfacs Bay, Ebro River delta)[J]. Adv Sci Res,12(1):11-21.
- Chandrasekar A, Philbrick C R, Clark R, et al, 2003. Evaluating the performance of a computationally efficient MM5/CALMET system for developing wind field inputs to air quality models[J]. Atmos Environ,37(23):3267-3276.
- Gioli B, Gualtieri G, Busillo C, et al, 2014. Aircraft wind measurements to assess a coupled WRF-CALMET mesoscale system[J]. Meteor Appl,21(1):117-128.
- Jackson B, Chau D, Gurer K, et al, 2006. Comparison of ozone simulations using MM5 and CALMET/MM5 hybrid meteorological fields for the July/August 2000 CCOS episode[J]. Atmos Environ,40(16):2812-2822.
- Liu H, Tian H, Pan D, et al, 2013. Forecasting models for wind speed using wavelet, wavelet packet, time series and Artificial Neural Networks[J]. Appl Energy,107(1):191-208.
- Mauch B, Apt J, Carvalho P M, et al, 2013. An effective method for modeling wind power forecast uncertainty[J]. Energy Systems,4(4):393-417.
- Scire J S, Robe F R, Fernau M E, et al, 1998. A user's guide for the CALMET meteorological model (version 5) [M]. Earth Tech:12-15.
- Tachikawa T, Kaku M, Iwasaki A, et al, 2011. ASTER global digital elevation model version 2-summary of validation results [R]. NASA.
- Wang W, Shaw W J, Seiple T E, et al, 2008. An evaluation of a diagnostic wind model (CALMET)[J]. J Appl Meteor Climatol, 47(6):1739-1756.
- Yang F, 2013. Review of GFS forecast skills in 2013[R/OL]. <http://www.emc.ncep.noaa.gov/GFS/d-ocs/GFS>.