

基于中尺度和微尺度的复杂地形大风 预报方法研究

庄文兵¹ 章涵² 王建¹ 田浩² 赵建平¹ 何君² 金莹³

(1 国网新疆电力公司电力科学研究院, 乌鲁木齐 830011; 2 国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司, 武汉 430074;
3 象辑知源(武汉)科技有限公司, 北京 100084)

摘要: 复杂地形气象预报误差主要与模型对地形特征的准确描述、对物理动力过程的假设有关。采用融合中尺度数值天气预报系统(WRF)和微尺度风速模拟模型(CalMet)的方案,既能考虑大尺度、中尺度和微尺度上的动力学过程,又能最大程度上体现局部地形影响。融合预报结果与中尺度预报结果的对比分析表明,融合预报方法能更好地模拟复杂地形的大风过程,对于复杂地形地区大风风灾预测、预警和分析有重要的参考价值 and 指导意义。

关键词: 中尺度, 复杂地形, CalMet, 风速预报

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2017.02.002

Study of Wind Forecasts Based on Numerical Modeling and Downscale Diagnostics

Zhuang Wenbin¹, Zhang Han², Wang Jian¹, Tian Hao², Zhao Jianping¹, He Jun², Jin Ying³

(1 State Grid Xinjiang Electric Power Research Institute, Urumqi 830011 2 NaRi Group Corporation/State Grid China
Electric Power Research Institute, Wuhan 430074 3 Xiangjizhiyuan (Wuhan) Technology Co., Ltd, Beijing 100084)

Abstract: The error of meteorological forecast for complex terrain is mainly related to the model accurateness for describing terrain features and the physical dynamic processes. Integrating the mesoscale numerical weather forecasting system WRF and the CalMet model on micro-scale wind velocity simulation, it may account the dynamic processes on large scale, mesoscale and micro-scale, also may describe the local terrain effect upto the maximum extent. The results of the integrating model comparing to the mesoscale prediction show that the integrating forecasting method has a better capability of predicting the gale in complex terrain, and gives important reference and a significant guidance for forecasting, early warning and analyzing the windstorm in complex terrain.

Keywords: mesoscale, complex terrain, CalMet, wind forecast

0 引言

复杂地形地区风速预报准确率一直是难点和重点。目前预报研究主要集中在应用WRF(中尺度数值预报模式)对研究区域做不同边界层参数化方案模拟,发现参数化方案实用性因地而易,无明显统一变化规律。李艳等^[1]对中国沿海滩涂与内陆复杂高原山地进行两种不同边界层参数化方案(YSU/MRF)的对比检验,并选择WRF/Noah/YSU作为典型地形的风场预报系统,发现预报系统对春、秋季的预报效果优

于夏季,日变化的预报效果因地形而异,无统一变化规律。张华等^[2]应用WRF模型模拟分析风力发电场风速,并选用不同陆面过程方案,发现WRF模式能够较好地反映电场近地面风场情况,且模拟结果受到地形及地表粗糙度的影响较大。张德等^[3]还利用WEST(加拿大风资源数值模拟系统)进行中国地区风场模拟,发现WEST对低海拔地区模拟效果较好,而对中西部高海拔地区模拟效果欠佳。

随着计算机计算能力增强,计算成本不断降低,人们开始将中尺度模式和微尺度模式进行结合应用。程雪玲等^[4]就将WRF与CFD模式的Fluent软件耦合到一起做高分辨率风速分布资料,为风场的精细化模拟预报提供了一种耦合方法。其还利用地形高程数据建立地形计算网格模型,为复杂地形的风场研究做准

收稿日期: 2016年11月11日; 修回日期: 2016年12月27日

第一作者: 庄文兵(1984—), Email: dommo@126.com

资助信息: 国网新疆电力公司电力科学研究院科技项目
(5230DK15003s)

备^[5]。何晓峰等^[6]将耦合MM5中尺度模式和WindSim软件应用到鄱阳湖复杂地形风场研究中,发现对10 m高度的风速模拟有所改善。方艳莹等^[7]对WRF/WT和WRF/WAsP两个模型耦合风场预报方法做了对比分析,发现WRF/WT模式系统在风速频率分布不满足Weibull分布的情况和陡峭地形条件下有较好的模拟效果,相对WRF/WAsP有明显优势。

由于研究区域地貌复杂多样,地势高低起伏,山地盆地相互交错,数值模式虽然对中尺度的背景流场有较好的模拟能力,但不能准确模拟小尺度地形效应对流场产生的影响。因此采用中尺度模式预报,结合微尺度降尺度诊断的方法,既保留了中尺度模式对背景场的模拟,又利用了降尺度诊断模型中微气象学的相应理论,最终获得较合理和准确的小尺度要素场。CalMet降尺度模型经过了十多年的开发更新,已经非常成熟,其模型的核心部分是诊断风场和微气象模块,充分考虑地形因子和微气象原理,因此也被用来做复杂地形风场研究和多尺度耦合研究与应用。如周荣卫等^[8]建立了一个由MM5、CalMet以及风能资源参数计算模型组成的模式系统,并检验了该系统在我国不同地形下对风资源的评估能力。张弛等^[9]用WRF/CalMet做了近地面精细化风场的动力模拟试验,发现在层结相对稳定时模拟的准确度较高。王文勇等^[10]利用WRF/CalMet模式模拟山区风场,发现耦合模拟的结果与真实值更加接近,指出了WRF/CalMet对山区大气流场模拟的可行性。其他研究也表明^[11-12]CalMet使降尺度结果更加准确,但是,也有研究^[13]指出只靠提高中尺度模式的分辨率就能够模拟出较准确的风场。

本文选取新疆2014年4月大风灾害天气过程,分别利用数值模拟方法、WRF/CalMet降尺度融合方法来模拟此次大风过程。并且比较两种方法的准确性,找到更有效的大风模拟预报方法。

1 研究区概况与资料说明

1.1 资料说明

本文资料包括电网沿线微气象观测资料、国家基本站新疆地区资料、全球模式预报资料、土地利用数据、地形数据。

1.1.1 资料来源

微气象数据来自电网微气象监测的10个微气象站(表1)。气象站数据来源于中国气象局国家级气象资料存储检索系统资料,将其中离电网线路较近的哈密市十三间房站、哈密市鄯善站和巴里坤站3站地面气象观测数据用于CalMet降尺度中,站点信息见表2。全球背景场资料为NCEP/NCAR提供的全球再分析资料,

空间分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$,时间分辨率为6 h,该数据同化了全球卫星资料、降雨观测和其他加入国际数据交换的气象观测站的资料,是目前世界上使用较广泛,稳定性和准确性都较好的初始场资料。土地利用数据来自美国地质勘探局(USGS)的GLCC数据库中欧亚部分,精度1000 m,数据时间为2000年(<http://Ita.cr.usgs.gov/GLCC>)。地形数据来自srtm.csi.cgiar.org的SRTM数据,精度90 m,格式为GEOTIFF。

表1 微气象观测站基本信息
Table 1 Information of automatic weather station on towers along power lines

线路	编号	坐标	风速风向仪高度(m)	测风时间段
1	030	43.112°N, 89.458°E	48	2014年4月20—26日
	155	43.088°N, 90.175°E	66	
	296	43.173°N, 90.978°E	52	
	365	43.169°N, 91.381°E	51	
	385	43.169°N, 91.506°E	49	
399	43.178°N, 91.590°E	70		
2	472	43.143°N, 92.006°E	34	
	544	43.071°N, 92.427°E	36	
	620	43.124°N, 92.858°E	35	
	719	42.995°N, 93.338°E	42	

表2 国家气象站信息
Table 2 Information of national weather stations

站名	站号	坐标	测站高度(m)	测风时间段
十三间房	52495	43.217°N, 91.733°E	721.4	2014年4月20—26日
鄯善	51581	42.85°N, 90.233°E	398.6	
巴里坤	52101	43.6°N, 93.05°E	1679.4	

1.1.2 观测数据质量控制

由于原始观测数据有很多的误差来源,针对所有接入的气象观测资料除了进行格式检查外,还要对主要资料进行要素级的质量检查,本文依据《风电场风能资源评估方法》(GB/T 18710—2002)对数据进行检查,包括气候极值检查、台站极值检查、数据完整性检验、合理性检验、内部一致性检查和时间一致性检查,根据检查的综合结果对每一个被检查的要素给出质量标志,在数据被使用前提供参考。

数据完整性检验如表3所示,包括应测、缺测、完整率统计,结果表明数据的连续性较好,7个观测塔完整率达到80%以上,一个观测塔(620号)完整率过低,只有18%,因此不对620号观测塔进行对比分析。

合理性检验标准及结果如表4所示,包括范围检验和趋势检验。结果表明,观测数据均在合理范围之内。

1.2 研究区概况

研究区域位于新疆维吾尔自治区内,共有两段电网

表3 完整性检验
Table 3 Integrity check

编号	年月	风速			风向		
		应测数据	缺测数据	完整率 (%)	应测数据	缺测数据	完整率 (%)
030			140	86.11	140	86.11	
155			143	85.81	143	85.81	
296			530	47.42	530	47.42	
365			140	86.11	140	86.11	
385	2014年4月20—26日	1008	192	80.95	1008	192	80.95
399			140	86.11		140	86.11
472			188	81.35		188	81.35
544			270	73.21		270	73.21
620			821	18.55		821	18.55
719			141	86.01		141	86.01

线路,吐哈一线长369.6 km,吐哈二线长369.9 km,两段线路上微气象装置均在91°E, 43°N附近(表1),每个微气象站装置之间的经向方向距离约为9.3~79 km,纬向方向距离约为0.4~14.3 km。两段线路毗邻天山山脉东麓,北面有高山,南面有盆地,地形差异很大(图1)。



图1 研究区地形地貌示意图

Fig. 1 Topographic schematic of research domain

2 模型简介

本文采用的中尺度模式为NCEP、NCAR等科研机构为中心开发的一种中尺度数值天气预报模式WRF-ARW (Weather Research and Forecasting)。WRF模式为完全可压缩的非静力模式,水平网格采用Arakawa-C网格,垂直方向上采用地形追随坐标。WRF模式提供单向或双向网格嵌套,可选择多种物理过程及参数化方案,主要包括:微物理过程、长波辐射、短波辐射、积云参数化、边界层方案、表面层和陆面过程方案等。它是目前在气象领域应用最广泛的中尺度天气预报模式。

表4 合理性检验标准
Table 4 Data validation check

主要参数	高度 (m)	合理范围	超出范围组数
平均风速 (m/s)	80	$0 \leq \text{平均值} < 40 \text{ m/s}$	0
	70	$0 \leq \text{平均值} < 40 \text{ m/s}$	0
	50	$0 \leq \text{平均值} < 40 \text{ m/s}$	0
	30	$0 \leq \text{平均值} < 40 \text{ m/s}$	0
	10	$0 \leq \text{平均值} < 40 \text{ m/s}$	0
风向 (°)	80	$0 \leq \text{平均值} < 360^\circ$	0
	10	$0 \leq \text{平均值} < 360^\circ$	0
1 h 平均风速变化	—	$< 6.0 \text{ m/s}$	0
1 h 平均气温变化	—	$< 5^\circ\text{C}$	0
3 h 平均气压变化	—	$< 1 \text{ kPa}$	0

本文采用的降尺度模型为CalMet模型,是美国EPA推荐的环境空气质量模拟系统中用来模拟地形风场的边界层气象学模型。它基于质量守恒原理对风场进行诊断、对地形动力学、斜坡流、热力学阻塞等进行调整与诊断分析,考虑地形动力学和微气象大气边界层湍流相似性理论过程,输出混合层高度、稳定度等基于3D网格点的气象要素。在降尺度运算的过程中融合观测数据与模式预报数据,考虑高精度的地形和土地利用类型,在原理上非常适用于复杂地形气象要素诊断分析。

3 数值模式预报

3.1 数值预报区域

中尺度预报模式WRF-ARW的区域选择如图2所示。中心为电网线路中段位置,中心经纬度为43°N, 90°E。外层嵌套分辨率为27 km,中层嵌套分辨率为9km,内层嵌套为3 km。外层覆盖面积984.15万 km²,中层覆盖面积428.652万 km²,内层覆盖面积9.9099万 km²。

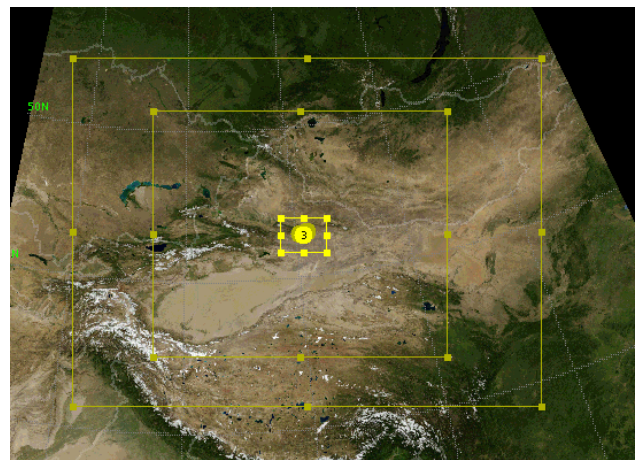


图2 中尺度WRF模式定义域设置示意图

Fig. 2 WRF domain

模式纳入了足够多的背景场信息。

3.2 数值预报时间

2014年4月21日00时—25日23时，研究区内发生了一次严重的寒潮大风天气过程，新疆电网吐哈一段和吐哈二段在4月23日均出现跳闸事故，造成了严重的经济损失。因此本文模拟预报时间为2014年4月的这次大风过程。数值模式的预报时间分辨率为逐10 min。

3.3 物理方案选择

由于WRF模式可选择多种物理过程及参数化方案，每种物理过程和参数化方案侧重点不同，即使对同一区域的同一气象要素进行模拟，不同方案得到的预报结果也大不相同，因此需要利用集合预报的方式选出最佳的预报结果。我们首先给出多种参数化方案组合，进行多任务集合预报，然后通过对比观测数据和预报数据的统计结果，包括相关系数、均方根误差等，选出模拟效果最好的参数化方案组合。

本研究针对每个微气象站进行多任务集合预报，一共10个微气象站14种参数化方案，即14个预报任务，140个站点时间序列提取任务。在14种方案中，考虑了大气边界层类型4种（PB1：YSU方案边界层，PB2：Mellor-Yamada-Janjic TKE方案，PB5：MYNN2.5层TKE方案，PB7：ACM2方案），城市下垫面类型3种（SU0：不考虑城市下垫面类型，SU1：考虑单层城市下垫面，SU2：多层城市下垫面），地表类型2种（SF2：unified Noah 路面模型，SF3：RUC路面模型），土壤类型4种（SC1：修正的MM5 Monin-Obukhov方案，SC2：Monin-Obukhov方案，SC5：MYNN方案，SC7：Pleim-Xiu方案）。还考虑了有无noah_mp陆面过程模块，该模块可选择多种陆气交换过程中的关键系数，本文考虑了与湍流扩散线相关的3种不同的拖拽系数（OP1：Monin-Obukhov常数，OP2：原始Noah常数，OP3：MYJ常数，OP4：YSU常数）。此外，方案名称中用no0和no1分别表示无noah_mp过程和有noah_mp过程。这些方案基本上涵盖了所有数值模式的可选参数化方案。其中边界层方案最为关键，它直接决定了边界层内大气运动遵从的物理规律，PB1方案有明确的卷夹层且在不稳定层中湍流动能扩散线呈抛物线状。PB2方案为ETA层参数化方案，特点是一维诊断湍流动能结合局地垂直混合过程，PB5方案的特点是可以预测次网格的湍流动能，PB7的特点是假设边界层大气的不对称对流运动，即局地向下混合结合非局地向混合过程。这些边界层方案都有自己侧重的优势，对于地形复杂地区各种湍流运动过程都可能出现的条件下这些方案都有

可行性。此外，在复杂地形下，不同的陆面过程、土壤类型对近地面天气过程有很大的影响。SF2假设土壤温湿通量层有4层，且考虑陆面雪的比例和冻土物理过程，对新疆一些山地和高寒地区的模拟会更加合理，SU3与SU2物理机制相似，但土壤温湿通量层增加到6层。因此两种方案对比可以反映出下垫面能量和水分传输过程的深度对近地面大气运动的影响。此外，虽然新疆地区城市下垫面复杂度较东部发达地区小，但仍需加以考虑，因此有无城市下垫面、单层还是多层城市下垫面都要模拟，从模拟结果中反推出最优方案。

3.4 站点提取与方案对比

先确定各微气象观测设备所在高度，将预报风速在该高度上做垂直差值，再用最邻近点法做水平差值，得到微气象观测设备所在位置对应的预报数据，然后对预报结果和观测值进行对比分析。

预报结果与观测数据的对比分析得到的绝对误差和相关系数如表5所示。结果表明，尽管10个站点相隔很近，但是最优参数化方案不是完全一致：030、544号站得到的最优方案为SU1PB7SC7SF7no0NU2，155号站的最优方案为SU1PB5SC5NU6SF3，296号站的最优方案为SU1PB7SC7NU4SF2，719号站的最优方案为SU1PB1SC1NU6SF3，365、385、399、472号站的最优方案为SU1PB5SC2NU6SF3，620号站的最优方案为SU1PB5SC1NU6SF3。这也说明了利用参数化集合预报的优势和必要。其中4个微气象站最优方案都为SU1PB5SC2NU6SF3，如果不用集合预报的方法，可以选用该方案进行统一预报以节省时间和计算资源。

表5 集合参数化方案预报结果
Table 5 Ensemble parameterization results

微气象站站号	最优方案名称	平均误差	相关系数
030	SU1PB7SC7SF7no0NU2	1.689004	0.489064
155	SU1PB5SC5NU6SF3	2.654931	0.543326
296	SU1PB7SC7NU4SF2	4.065386	0.676176
719	SU1PB1SC1NU6SF3	2.072327	0.462699
544	SU1PB7SC7SF7no0NU2	2.354298	0.308254
365	SU1PB5SC2NU6SF3	3.262691	0.639623
385	SU1PB5SC2NU6SF3	5.363964	0.286543
399	SU1PB5SC2NU6SF3	3.611419	0.727915
472	SU1PB5SC2NU6SF3	5.834655	0.414252
620	SU1PB5SC1NU6SF3	1.327692	0.910592

图3为各微气象观测站最优方案预报结果与观测数据的对比图。如图可见，数值模式预报可以捕捉风速随时间变化的总趋势。其中模式对030、155、296、365、719号观测站模拟效果较好，能较好地模

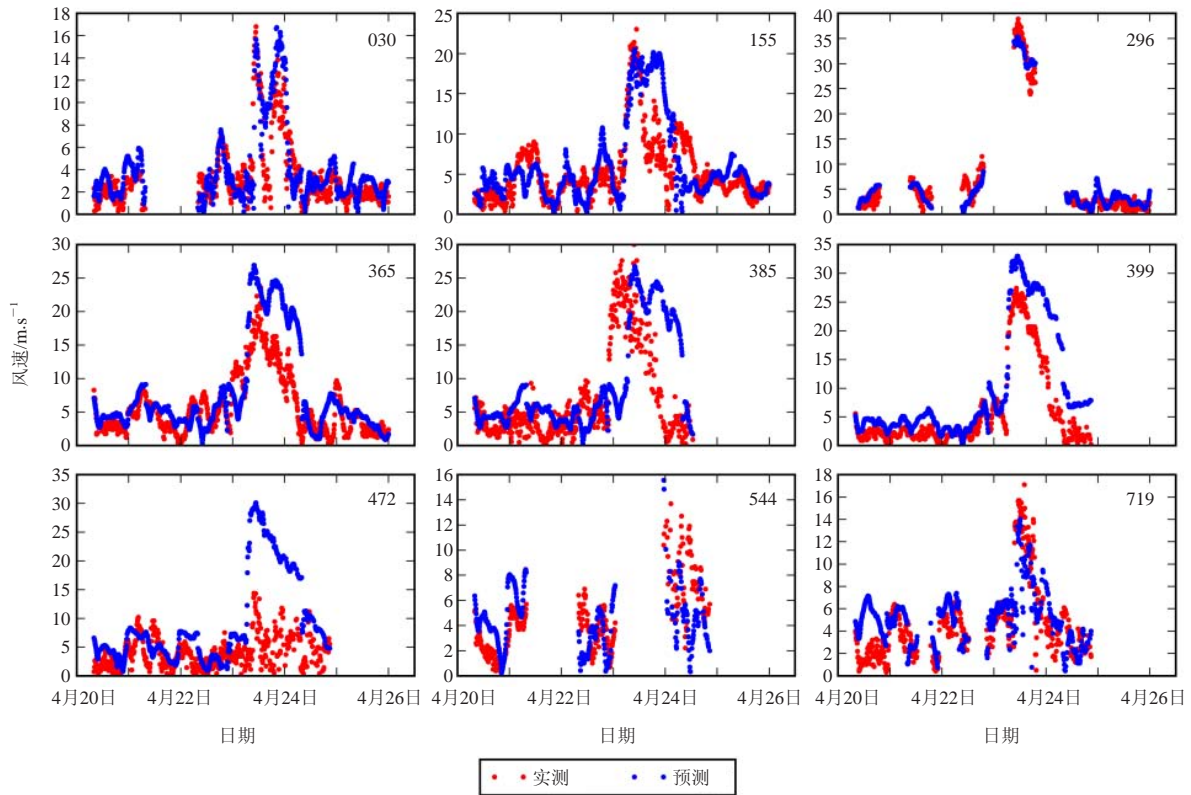


图4 CalMet降尺度得到的风速与观测风速对比图
(标题为微气象观测塔编号)

Fig. 4 Comparison between observations and CalMet downscaling diagnostics
(Titles are tower IDs)

拟到大风开始和结束的时间，大风最大值的模拟与观测也较接近。模式对385、399号观测站位置的大风起止时间模拟有一定的滞后，但大风最大值与观测也比较接近。对472号观测站模拟效果欠佳，明显高估了大风最大值。此外，由表5统计发现模式对620号观测站模拟的相关性最高误差最小，但是该观测站提供的观测数据量过少而未通过完整性检验（表3），无法给出客观评价，故在此不予讨论。

4 CalMet降尺度模拟

4.1 降尺度模拟区域

本文降尺度模拟旨在考察对比WRF/CalMet融合模拟与WRF单独模拟对风速预报的准确性。因此，降尺度区域选择中尺度模拟预报结果中绝对误差较大的385、395、472号3个观测站所在范围为中心，即以90.23°E，42.78°N为左下网格起始点，降尺度网格距离设置为1000 m，X方向网格数265，Y方向网格数80。垂直高度定义10层，分别为34、49、51、70、320、640、1200、2000、3000和4000 m，其中前3层分别对应3个观测站所在高度。选择大地基准面并将

经纬度坐标转换为通用横轴墨卡托坐标。

4.2 降尺度诊断时间

降尺度诊断时间与中尺度模拟时间相同，即为2014年4月21日00时—25日23时。时间分辨率为10 min。

4.3 站点提取与数据分析

在模拟区域设置里已将研究对象所在的高度层设置为垂直高度，因此在站点数据提取中，只需要用最邻近网格方式提取观测塔对应经纬度上的风速数据。并将降尺度结果和观测数据进行对比分析。

结果显示，296、365、385、399和472号观测站降尺度之后平均误差减小，其中，385号观测站的绝对误差为4.647267，相关系数为0.369514；399号观测站的绝对误差为2.191520，相关系数为0.697748；472号观测站的绝对误差为4.186236，相关系数为0.263354。如图4所示，385、399、472号3个站风速趋势预报准确，大风最大值偏差较小。其中，299号观测站的大风开始和结束的时间被很好地捕捉。296、365、719号3个站误差有所减小但是最大风速在降尺度过程中未能模拟出来。544号降尺度之后平均误差

表6 降尺度预报结果
Table 6 CalMet downscaling results

微气象站站号	平均误差	相关系数
030	4.763190	0.399784
155	3.719442	0.441573
296	3.635110	0.446160
719	2.235418	0.458132
544	2.585170	0.647313
365	2.567843	0.612213
385	4.647267	0.369514
399	2.191520	0.697748
472	4.186236	0.263354

增加,但相关系数提高到了0.647313,且高估了大风最大值。030号误差增加较大,主要原因是其所在的纬度位于降尺度模拟网格的边缘,模拟效果受到影响。

5 结果与讨论

由本文对大风过程的模拟可见,本次电网沿线大风过程开始于4月23日白天,结束于4月24日凌晨,大风最大值出现在23日上午到中午这段时间,其中365、385、399和472号站的10 min平均最大风速达到20 m/s以上,296号站甚至超过30 m/s达到狂风级别。

由图3和图4对比可见,WRF单独预报能较好地模拟最大风速小于20 m/s的各站,但是由于中尺度的精度限制,对局地低值区有过高估计,譬如472号观测站,该观测站的观测数据明显达不到大风级别,但是数值模拟依然给出过高预测,当融合CalMet降尺度过程后,模拟结果有非常明显的改善。此外,经过降尺度诊断的3个站预报绝对误差都有所减小,385号观测站减小了13%,399号观测站误差减小了39%,472号观测站误差减小了28%。385号观测站大风起止预报时间滞后的现象有所改善,399号观测站大风起止时间预报的滞后问题得到解决,472号观测站大风最大值预测过高的问题得到解决。无论是统计大风起止时间还是大风最大值上,利用WRF/CalMet融合方案都得到了很好的解决。可见CalMet降尺度在WRF的基础上大大地提高了预报准确性。WRF/CalMet融合方案能够更好捕捉局地效应,模拟复杂地形风速变化,预报更准确。另外,由图3和图4对比也发现030、155、719这几个站点,WRF/CalMet融合方案没有提高模拟效果,155站虽然相关系数增加,但是误差也增大。这主要由于模拟点在降尺度模拟网格的边缘,效果不

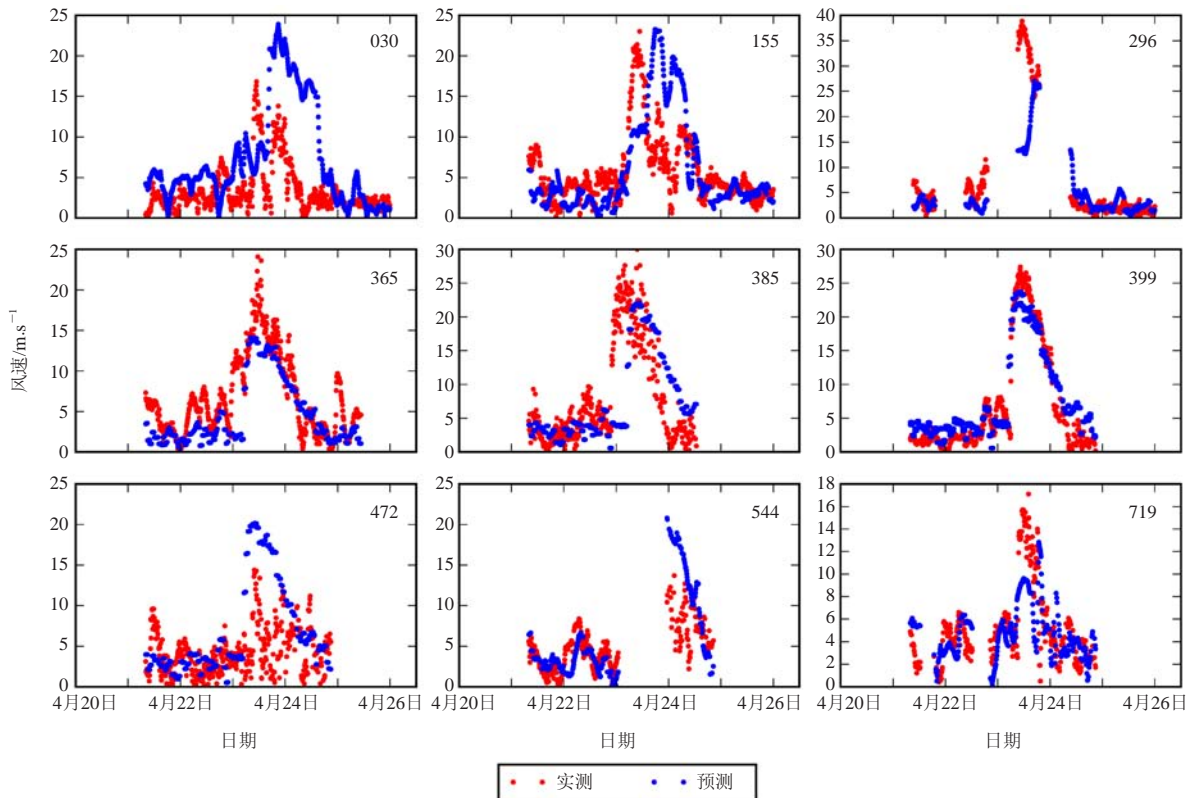


图4 CalMet降尺度得到的风速与观测风速对比图
(标题为微气象观测塔编号)

Fig. 4 Comparison between observations and CalMet downscaling diagnostics
(Titles are tower IDs)

理想,如果有更大范围的地形数据,能将这几个点置于网格中心位置,效果应该会有所提高。

本文通过研究数值模式和WRF/CalMet融合两种预报方法,对新疆地区大风灾害过程进行预报,并与实况进行对比分析。研究显示,当研究站点设置在降尺度模拟网格中心位置时,WRF/CalMet融合预报方案能够修正数值模式预报的误差,对大风出现和结束的时间预报更为准确,但当站点所在位置在降尺度网格边缘时,模拟效果较差。本文局限于地形数据的覆盖面积及土地利用数据的分辨率,在CalMet降尺度诊断中的空间分辨率最高只能为1 km,地形数据只能覆盖一部分电网微气象站点。如果能够获得更高分辨率的土地利用数据,进一步降低空间插值带来的误差,或者获得更大覆盖范围的地形数据,从理论上讲,风速诊断准确性会得到进一步提高。本研究表明,融合预报方法既能考虑大尺度、中尺度和微尺度上的动力学过程,又能体现局部地形影响,对于复杂地形地区大风风灾预测、预警、分析有一定的指导意义和实践价值。

参考文献:

- [1] 李艳,成培培,路屹雄,等.典型复杂地形风能预报的精细化研究.高原气象,2015(2):413-425.
 - [2] 张华,孙科,田玲,等.应用WRF模型模拟分析风力发电场风速.天津大学学报(自然科学版),2012(12):1116-1120.
 - [3] 张德,朱蓉,罗勇,等.风能模拟系统WEST在中国风能数值模拟中的应用.高原气象,2008,27(1):202-207.
 - [4] 程雪玲,胡非,曾庆存.复杂地形风场的精细数值模拟.气候与环境研究,2015,20(1):1-10.
 - [5] 程雪玲,胡非.复杂地形网格生成研究.计算力学学报,2006,23(3):313-316.
 - [6] 何晓凤,周荣卫,朱蓉.MM5与CFD软件相结合对复杂地形风能资源模拟初探——以鄱阳湖地区为例.资源科学,2010,32(4):650-655.
 - [7] 方艳莹,徐海明,朱蓉,等.基于WRF和CDF软件结合的风能资源数值模拟试验研究.气象,2012,38(11):1378-1389.
 - [8] 周荣卫,何晓凤,朱蓉.MM5/CALMET模式系统在风能资源评估中的应用.自然资源学报,2010,25(12):2101-2113.
 - [9] 张弛,王东海,巩远发.基于WRF/CALMET的近地面精细化风场的动力模拟试验研究.气象,2015,41(1):34-44.
 - [10] 王文勇,陈楠.山区风场的WRF/CALMET模式模拟.西南交通大学学报,2010,45(6):990-998.
 - [11] 马明亮,张加昆,魏鸿业,等.基于CALMET对复杂地形下风场的模拟研究.青海环境,2010,20(4):181-184.
 - [12] 成培培.复杂地形风能预报的精细化研究.南京:南京信息工程大学,2014.
 - [13] 佐河疆,孙银川,崔洋.WRF模式三种降尺度方案在风功率预报业务中的效果对比.电网与清洁能源,2013,29(10):105-108.
-
- (上接12页)
- [31] Makkonen L. Heat transfer and icing of a rough cylinder. Cold Regions Science and Technology, 1985, 10(2): 105-116.
 - [32] Makkonen L. Modeling power line icing in freezing precipitation. Atmos Res, 1998, 46(1): 131-142.
 - [33] Lebatto E, Farzaneh M, Lozowski E P. Three-dimensional morphogenetic model of ice accretion on a non-rotating cylinder. Proc 11th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, Montreal, Canada, 2005.
 - [34] 滕中林. 电线结冰厚度随高度的变化. 天气月刊, 1959.
 - [35] 谭冠日. 电线积冰若干小气候特征的探讨. 气象学报, 1982, 40(1): 13-23.
 - [36] 江祖凡. 电线积冰增长速度的研究. 科学通报, 1983, 15: 928-931.
 - [37] 蒋兴良, 孙才新. 三峡地区导线覆冰的特性及雾凇覆冰模型. 重庆大学学报, 1998, 21(2): 16-19.
 - [38] 孙才新, 蒋兴良, 熊启新, 等. 导线覆冰及其干湿增长临界条件分析. 中国电机工程学报, 2003, 23(3): 141-145.
 - [39] 刘春城, 刘佼. 输电线路导线覆冰机理及雨凇覆冰模型. 高电压技术, 2011, 37(1): 241-248.
 - [40] 梁曦东, 李雨佳, 张轶博, 等. 输电导线的覆冰时变仿真模型. 高电压技术, 2014, 40(2): 336-343.
 - [41] 朱永灿, 黄新波, 贾建援, 等. 输电导线覆冰生长及影响因素数值分析模型. 西安交通大学学报, 2015, 49(7): 120-125.
 - [42] 吴息, 孙朋杰, 熊海星, 等. 利用常规气象资料建立的导线覆冰模型. 大气科学学报, 2012, 35(3): 335-341.
 - [43] 吴息, 孙朋杰, 刘渝, 等. 基于雾条件下能见度估算的导线覆冰气象模型. 应用气象学报, 2012, 23(6): 755-762.
 - [44] 谢云云, 薛禹胜, 文福拴, 等. 冰灾对输电线故障率影响的时空评估. 电力系统自动化, 2013, 37(18): 32-41.
 - [45] 朱斌, 潘玲玲, 邹扬, 等. 考虑融冰因素的输电线路覆冰故障概率计算. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 79-84.
 - [46] 电力规划设计总院. 电力工程气象勘测技术规程: DL/T 5158—2012. 北京: 中国计划出版社, 2012.
 - [47] 谢运华. 三峡地区导线覆冰与气象要素的关系. 中国电力, 2005, 38(3): 35-39.
 - [48] 廖玉芳, 段丽洁. 湖南电线覆冰厚度估算模型研究. 大气科学学报, 2010, 33(4): 29-30.
 - [49] 温华洋, 田红, 唐为安, 等. 安徽省电线积冰标准冰厚的气象估算模型. 应用气象学报, 2011, 22(4): 747-752.
 - [50] 闻新, 周露, 李翔, 等. MATLAB神经网络仿真与应用. 北京: 科学出版社, 2003.
 - [51] 张学工. 关于统计学习理论与支持向量机. 自动化学报, 2000, 26(1): 32-42.
 - [52] 殷水清, 赵珊珊, 王遵娅, 等. 全国电线结冰厚度分布及等级预报模型. 应用气象学报, 2009, 20(6): 722-728.
 - [53] 郑振华, 刘建生. 遗传算法与BP神经网络相结合的输电线路覆冰厚度预测方法. 电网与清洁能源, 2014(4): 27-30.
 - [54] 戴栋, 黄筱婷, 代州, 等. 基于支持向量机的输电线路覆冰回归模型. 高压电技术, 2013, 39(11): 2822-2828.
 - [55] 侯雨仲, 王秀丽. 气象过程信息挖掘与输电线路覆冰预测. 西安交通大学学报, 2014, 48(6): 43-49.
 - [56] 尹子任, 苏小林. 基于粒子群算法优化支持向量机的输电线路覆冰预测. 电力学报, 2014, (1): 6-9.
 - [57] 黄宵宁, 许家浩, 杨成顺, 等. 基于数据驱动算法和LS-SVM的输电线路覆冰预测. 电力系统自动化, 2014, (15): 81-86.