

模式分辨率对东北地区近地层风场预报性能的影响

周荣卫^{1,2} 何晓凤^{1,2}

(1中国气象局公共气象服务中心, 北京 100081; 2北京华新天力能源气象科技中心, 北京 100081)

摘要: 应用WRF模式, 以ECMWF全球环流预报场为模式背景场, 对辽宁和吉林区域进行了4个典型月的10和3.33km分辨率的预报试验, 并基于两个省的47座测风塔同期观测资料, 对预报结果进行了常规统计检验、关键区间检验, 以及预报误差的分解, 探讨不同分辨率对东北地区近地层风场预报性能的影响。结果表明: 1) 模式水平分辨率对风速频率曲线的影响不大, 但在辽宁的预报效果优于吉林; 2) 全风速段检验结果表明70m高度预报性能优于10m高度; 3) 模式分辨率的变化对均方根误差分解后各项的贡献率影响不大, 但存在模式分辨率越高, 位相差略微增加, 系统差和幅度差的贡献略微降低的现象; 4) 分辨率的变化对不同风机工况的预测准确性有一定影响, 在冬、春季表现为分辨率越高, 无功工况下的预报准确性越高; 而在夏、秋季分辨率越高满发工况准确性越高; 5) 不论哪个季节, 分辨率的提高均导致发电工况下的TS评分降低, 均方根误差增大, 相对误差增大。可见在我国东北地区, 并非模式分辨率越高风速预报准确性越高。

关键词: ECMWF, 水平分辨率, 近地层, 风速, 预报

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2017.01.011

Effect of Model Horizontal Resolution on the Surface Wind Speed Forecast in the Northeast China

Zhou Rongwei^{1,2}, He Xiaofeng^{1,2}

(1 China Meteorological Administration Public Meteorological Service Centre, Beijing 100081

2 Huaxintianli Energy and Meteorological Technology Center, Beijing 100081)

Abstract: Experimental studies of surface wind forecasts were carried out by employing the WRF model at two different resolutions of 10 km and 3.33 km on the background field of global circulation forecasts from ECMWF for 4 typical months in Liaoning-Jilin provinces. The conventional statistical verification, key wind speed segment verification, and different decomposition of forecast error were analyzed based on observation data at 47 wind towers in the two provinces during the same period. The verification results of effects of different horizontal resolutions on the forecast performance of wind speed in boundary layer were discussed in Northeast China region. The main conclusions are gotten as followings: 1) the effect of model horizontal resolution was little on the wind speed frequency, but the forecast performance was better in Liaoning province than that in Jilin; 2) The verification results of full wind speed segment show that the prediction performance at 70m height was better than that at 10m height; 3) the effect of model resolution on the RMSE after decomposition was little; but that for the phase difference was increased slightly; the system difference and amplitude difference were decreased slightly with higher resolutions; 4) The effect of different model resolutions on the forecast performances of the wind speed were little under different conditions of wind turbine generator. The forecast performances of wind speed under reactive condition were higher with a higher model resolution in winter and spring, while the forecast performance of wind speed under full load condition were higher with higher resolution in summer and autumn; 5) When the model resolution is higher, TS score was lower in the wind speed forecasts under power generation condition, the RMSE was higher and the relative error was higher in all seasons. In Northeast China, the forecast performance of wind speed was not better with higher model resolution.

Keywords: ECMWF, WRF model, horizontal resolution, surface layer, wind speed

收稿日期: 2016年9月6日; 修回日期: 2016年11月29日
第一作者: 周荣卫(1979—), Email: zhourw@cma.gov.cn
资助信息: 气象关键技术集成与应用项目(CMAGJ2015M82);
国家自然科学基金项目(41305008); 国家电网公司科技项目“极端环境条件下强风区输电线路风荷载特性和铁塔结构研究”

0 引言

随着能源危机的到来和环境污染加剧, 清洁能源在能源消耗中的比例逐步增高, 风能作为清洁可再生能源, 在世界各国得到广泛应用。中国是风资源储量大国, 开发利用规模也逐年扩大, 到2015年底装机容量已为世界第一^[1]。然而随着发电量的增加, 风电的波动性

对电力系统的稳定运营造成的冲击也越来越明显，弃风限电现象趋于普遍化，2015年中国平均弃风比例已高达15%，限电量约339亿度^[2]。因此必须对风力发电量进行准确预测，为电网调配各种能源提供科学依据。

业内常见的风力发电量预测思路是“数值预报产品+功率预测模型^[3-4]”，数值预报是关键，近地层风速预报越准确，发电量的预报效果就越好，所以研究与风速预报效果关系密切的一些模式可调因子，对数值模式在风能等专业气象领域中的应用非常重要。近年来已有学者开展了这方面的研究：Draxl等^[5]评估了WRF模式4种边界层参数化方案对近地层风速和垂直风切变预报性能的影响；Santos-Alamillos等^[6]分析了物理过程参数化方案和地形特征对WRF模式模拟西班牙南部风场能力的影响；周荣卫等^[7]应用测风塔资料分析评估了3种全球模式对近地层风速突变现象的预报能力；何晓凤等^[8]应用3种全球模式预报场作为WRF的背景场，研究了不同背景场对风速预报效果的影响；李艳等^[9]研究了不同分辨率的地形数据对模式模拟近地层风场的影响；孙逸涵等^[10]通过敏感性试验研究WRF中不同参数化方案组合对风速预报效果的影响。这些成果表明：地形分辨率、模式背景场、模式物理过程参数化方案和边界层参数化方案等因素对模式预报风场的性能都有影响。然而除了上述因素，数值模式的水平分辨率对模式预报效果也有影响，高学杰等^[11]应用区域气候模式RegCM2研究了不同模式分辨率和地形对东亚降水预报效果的影响，发现在东亚地区降水模拟中分辨率与地形相比，起着至少同样重要的作用。模式分辨率是影响预报效果、计算效率和存储空间的关键因子，所以探讨模式分辨率与近地层风场预报性能的关系对数值模式在风电预报领域的实际应用非常重要。

本文应用欧洲中心中期天气预报产品ECMWF^[12]驱动区域数值模式WRF^[13]，对我国东北的辽宁和吉林两省进行不同分辨率的预报回算实验，因目前服务于风电行业的基础数值预报产品分辨率多为10km左右，所以本文将模式的水平分辨率设置为10和3.33km分辨率；且应用研究区域内的47座测风塔资料对不同分辨率风速预报结果进行评估，通过常规检验、分段检验和误差分解等统计手段，研究不同的模式分辨率对近地层风速预报效果的影响。

1 研究方法

1.1 预报方案设计

Weather Research and Forecasting (WRF) 模式系统是在美国国家自然科学基金和NOAA的共同支持

下，由美国多个研究部门和大学的科学家共同参与进行研究的新一代中尺度预报模式和同化系统。该模式系统的可移植性高，使用方便，开发团队和维护团队强大，在世界大多数国家的天气预报业务和相关业务部门及科研单位得到广泛应用，同时也是风电预报技术研究及业务应用中的最常用工具之一。本文以该模式为预报工具，具体预报方案设计见表1。

表1 预报方案及相关参数选项
Table 1 Model numerical settings

嵌套层数	双重嵌套
中心经纬度	36.3°N, 102°E
水平分辨率	domain1:10km, domain2:3.33km
垂直层数	45层
水平网格数	domain1:511×411, domain2:283×265
起报时间	12:00 UTC
预报时效	36h
产品间隔	逐小时
检验时段	12~36h
微物理过程	Lin
积云参数化	new Grell scheme(G3)
长波辐射	RRTM
短波辐射	Dudhia
边界层方案	YSU
近地层方案	MM5
陆面过程	Noah

本文选取2010年7和10月、2011年1和4月为研究时段，以12:00UTC起报的ECMWF产品为模式背景场，根据表1中的参数设置和方案组合，驱动WRF模式在辽宁和吉林开展4个典型月的逐日回报实验，预报区域范围如图1所示，每天为1个预报算例，预报时效为36h，检验次日00UTC之后的24h预报数据。检验前需将模式结果插值到拟检验测风塔处，由于模式在近地层内设置较多垂直层，70m高度的风速就由邻近70m高度的上、下模式层的风速预报数据线性插值而

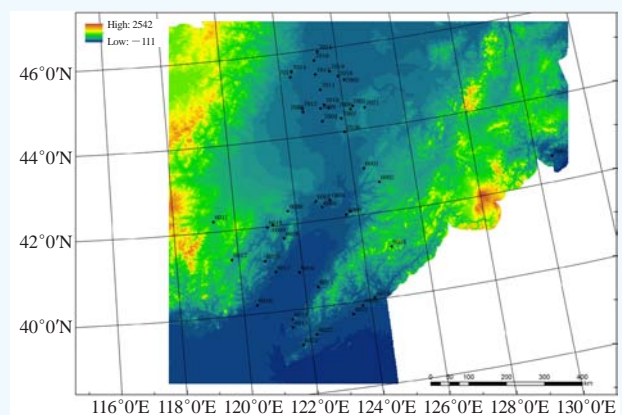


图1 Domain2试验区地形及测风塔位置示意图
Fig. 1 Terrain and mast locations in Domain2 experimental area

得, 水平方向则采用测风塔周边4个模式点数据进行双线性内插获得。

1.2 检验方法

本文首先通过计算观测序列 X_o 与预报序列 X_p 的均方根误差(RMSE)和相对误差(E_r)来定量评估风场的整体预报性能, 同时也用上述参数计算分析在风机运行区间($3\text{m/s} < \text{风速} \leq 15\text{m/s}$)不同分辨率的预报能力, 见式(1)~(3),

$$\epsilon = X_p - X_o, \quad (1)$$

$$E_r = \frac{|\epsilon|}{X_o}, \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\epsilon^2}, \quad (3)$$

式中, ϵ 为误差。

再通过Lange^[4]分解误差的方法, 将均方根误差分解成系统偏差(BIAS)、幅度偏差(SDBIAS)、位相偏差(DISP)3项, SDE为误差的标准偏差。其中, 幅度偏差是指能正确预测序列的时间变化, 但是量值会高估或者低估; 位相偏差是指预报的事件是对的, 但时间预测偏早或者偏晚。通过对上述三种偏差的分析, 探讨分辨率和各种偏差之间的关系, 具体计算方法见式(4)~(8)。

$$RMSE^2 = BIAS^2 + SDE^2 = BIAS^2 + SDBIAS^2 + DISP^2, \quad (4)$$

$$BIAS = \bar{\epsilon}, \quad (5)$$

$$SDE = \sigma(\epsilon), \quad (6)$$

$$DBIAS = \sigma(X_p) - \sigma(X_o), \quad (7)$$

$$DISP = \sqrt{2\sigma(X_p)\sigma(X_o)(1-r_{p,o})}, \quad (8)$$

式中, σ 为序列的标准偏差, $r_{p,o}$ 为两个序列的交叉相关系数。

最后通过TS评分法对无效风速区间($0\text{m/s} < \text{风速} \leq 3\text{m/s}$)、风机运行区间($3\text{m/s} < \text{风速} \leq 15\text{m/s}$)、满发风速区间($15\text{m/s} < \text{风速} \leq 25\text{m/s}$)和停机风速区间($>25\text{m/s}$)的预报能力进行定量评估, 见式(9)。

$$TS = \frac{NA}{NA + NB + NC}, \quad (9)$$

式中, TS为预报准确率; NA, NB和NC分别为报对、空报和漏报的次数。

2 数据

2.1 模式背景场数据

ECMWF资料是欧洲中期天气预报中心(European Center for Medium-Range Weather Forecasts)发布的全球数值预报产品, 该模式每天预报4次, 分别为00:00, 06:00, 12:00和18:00UTC起报, 预报时效为240h, 0~72h为逐3h输出, 78~240h为逐6h输出,

水平分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, 垂直方向在大气中有19层、土壤中有4层。

2.2 测风塔观测资料

本研究从全国风能资源专业观测网的400座测风塔中选出模拟范围内的47座测风塔, 其中辽宁26座、吉林21座, 分布于两省风能资源丰富区, 这些塔均经过严格的选址和外场考察, 区域代表性较佳、受人为活动影响小, 观测的风速数据可客观反映当地风况, 测风塔分布如图1所示。所有塔在10和70m高度均设有测风仪, 且70m高度与我国常见风机轮毂高度接近, 因而本文主要以10和70m高度的观测数据作为检验资料, 经统计发现, 研究时段内47座测风塔的资料完整率超过90%, 质量状况良好, 可用于模式性能评估。

为了便于检验分析, 本文探讨整体预报性能时, 分析所有塔的平均状况, 但分析风频特征时, 因不同地形下风速频率特征差异较大, 所以本文对测风塔做了分类挑选。基于SRTM3的90m分辨率高程数据, 以每座测风塔为中心, 计算了25km扫描半径内的最高、最低地形高差, 以此间接判断47座测风塔的地形复杂程度(表略)。计算结果显示, 吉林21座塔的高差范围大约在13~50m, 辽宁26座测风塔的高差范围在106~710m, 可见吉林风塔的地形复杂程度较低, 而辽宁塔的地形复杂程度较高。两省的风速频率特征可能不同, 所以下文对比风速频率特征的预报能力时, 将两省分开对比。

3 结果分析

从风速预报整体性能评估、误差来源分解分析、关键区间预报性能检验三方面探讨模式分辨率不同对预报性能的影响。

3.1 不同分辨率风场预报性能总体评价

首先基于所有测风塔各月70m高度的风速观测数据和不同分辨率的预报数据, 按每1m/s为一个区间, 统计其风速频率特征, 因辽宁和吉林风况特征不同, 所以对两省的风速频率曲线分别进行平均统计。图2为辽宁省4个典型月的平均风速频率曲线, 图3为吉林省的风速频率曲线。

由图2可知, 在辽宁区域, 各月预报的风速频率曲线与观测的风速频率曲线形态较相近, 但大多数时候, 如: 1、4和10月模式预报的最大频率比实际情况略高, 且最高频率对应的预报风速也比实际风速偏大一些, 但7月模式预报的最大频率比实际值偏小; 从不同分辨率的预报频率曲线对比来看, 整体而言10和3.33km的预报情况接近, 在最高频率处, 10km的预报频率比3.33km的略高, 相对而言和实际情况偏差更大

一些，其中1月的偏差最明显，其余几个月不同分辨率的频率曲线相差很小。

由图3可知，在吉林区域，1和4月的预报风速频率曲线与观测风速频率曲线形态偏差较明显，在 $4\text{m/s} \leq \text{风速} < 9\text{m/s}$ 的区间内预报频率过高，在 4m/s 之下和 9m/s 之上的预报频率偏低；10月在 $6\text{m/s} \leq \text{风速} < 9\text{m/s}$ 的区间内预报频率过高，在 6m/s 之下和 $9\text{m/s} \leq \text{风速} < 12\text{m/s}$ 区间频率略低；7月预报效果最好，预报的风速频率曲线与观测曲线较一致。从不同分辨率的曲

线对比来看，10和3.33km的预报风速频率曲线非常一致。对比图2和图3可知，辽宁整体预报效果优于吉林，但存在小风段预报频率偏大，大风段预报频率偏小的情况。此外，不论是哪个省，模式水平分辨率对风速频率曲线的影响都不大。

此外，用各塔10和70m观测资料和模式每个算例的24h风速预报序列，统计所有测风塔点每天的风速预报 E 和 $RMSE$ ，再计算各月所有塔统计参数的均值（表2）。从表2中数据可清楚地看出，不论是哪个

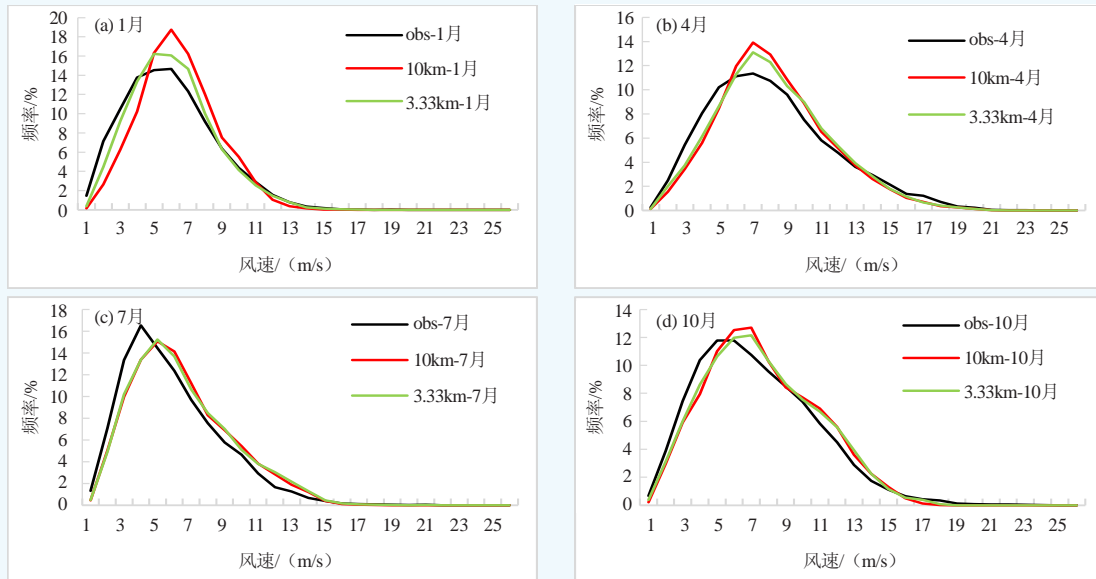


图2 辽宁26座测风塔平均风速频率分布曲线
(黑色：观测，红色：10km预报分辨率，绿色：3.33km预报分辨率)

Fig. 2 Wind speed frequency of observations and simulation results in Liaoning Province
(Black: observation, Red: simulation with 10km resolution, Green: simulation with 3.3km resolution)

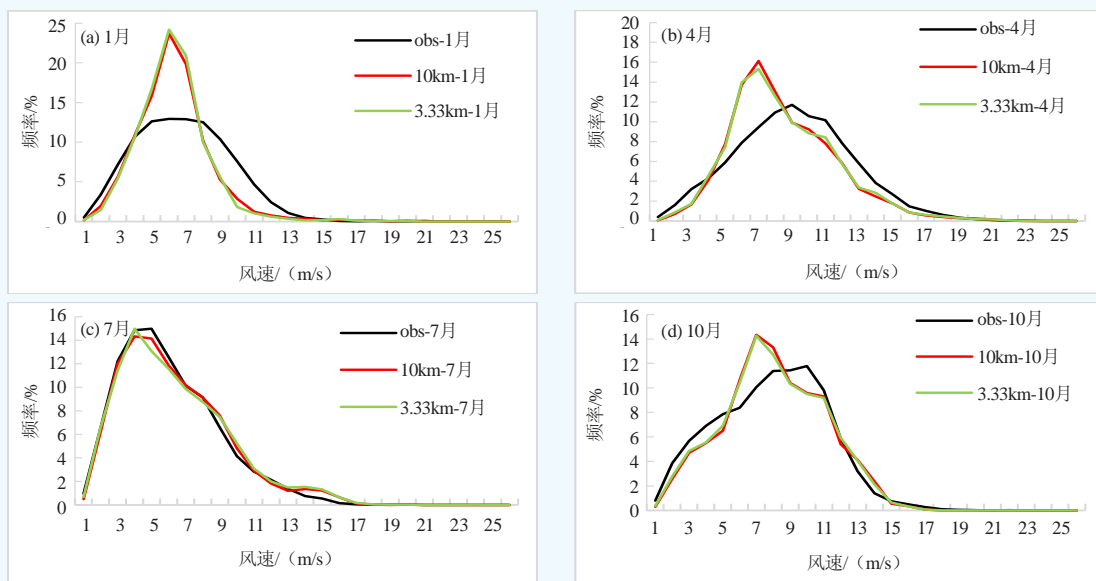


图3 同图2，但为吉林21座测风塔

Fig. 3 As same as in Fig.2, but for Jilin Province

典型月, 均为70m高度的 E_r 明显低于10m高度, 而10m高度的 $RMSE$ 略小于70m高度, 整体而言, 70m高度预报效果优于10m; 在夏、秋季节, 10km分辨率预报效果优于3.33km分辨率的预报效果, 在冬、春季节两者较接近, 3.33km分辨率的预报效果略优; 全年平均而言, 10km分辨率的效果优于3.33km分辨率的预报效果。

表2 不同分辨率预报结果在不同高度的风速预报效果检验
Table 2 Verification of forecasted wind speed at different heights and in different model resolutions

检验时段	水平分辨率/km	10m高度		70m高度	
		E_r	$RMSE$	E_r	$RMSE$
2010年7月	10.0	62.29	1.79	52.81	2.11
	3.33	64.91	1.86	54.79	2.20
2010年10月	10.0	55.73	1.94	38.69	2.08
	3.33	57.34	1.99	39.32	2.12
2011年1月	10.0	61.11	1.75	45.58	2.12
	3.33	59.93	1.75	45.45	2.13
2011年4月	10.0	45.91	2.19	37.92	2.49
	3.33	45.26	2.18	37.82	2.51
平均	10.0	56.26	1.92	43.75	2.20
	3.33	56.86	1.95	44.35	2.24

3.2 不同分辨率的预报误差来源分解

基于式(4)~(8)对所有测风塔处每日70m高度不同分辨率的风速预报均方根误差进行分解, 分解成系统差、振幅差和位相差, 分别计算这3个分项对均方根误差的贡献率, 最终统计各月所有塔的三类误差对均方根误差的平均贡献率, 如图4所示, 图中蓝色表示位相偏差贡献率(Disprate), 绿色表示幅度偏差贡献率(Sdbiasrate), 红色表示系统偏差贡献率(Biasrate)。由图4可知, 不论哪个月、何种分辨率的预报数据, 其 $RMSE$ 都是以位相偏差为主, 其次是系统偏差, 最小的是幅度偏差, 模式分辨率对各项的贡献率影响较小, 模式分辨率越高, 位相偏差略微增加系统差和幅度差的贡献略微降低。而位相偏差是几个分项中最难订正的, 可见模式分辨率的增高反而使

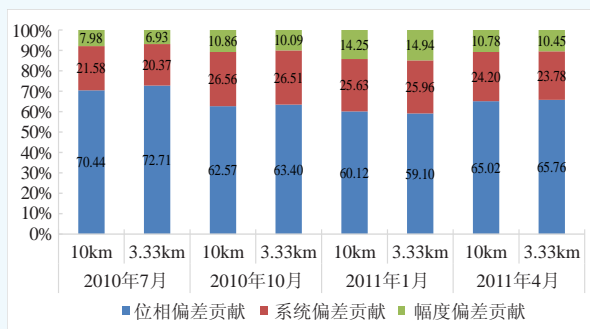


图4 不同分辨率70m高度风速预报误差贡献率

Fig. 4 Contribution rate of wind speed forecast error in different model resolutions at 70m height

得预报产品的可订正程度略微降低, 并非分辨率越高预报效果越好。

3.3 不同分辨率对不同分段区间预报能力差异

基于式(9), 本文计算了70m高度无功工况($0\text{m/s} < \text{风速} \leq 3\text{m/s}$)、发电工况($3\text{m/s} < \text{风速} \leq 15\text{m/s}$)、满发工况($15\text{m/s} < \text{风速} \leq 25\text{m/s}$)、停机工况($>25\text{m/s}$)4个区间下不同分辨率预报产品的TS评分(表3), 经过实测资料分析, 发现47个检验点的风速均 $<25\text{m/s}$, 评估预报产品在该区间的TS评分也是0, 所以对此种情况本文不做评估。由表3数据可知: 模式分辨率对不同发电工况下的TS评分有一定影响, 在1和4月, 分辨率的提高使得无功工况TS评分增高, 发电工况和满发工况TS评分降低; 而在7和10月, 分辨率越高, 满发工况的TS评分越高, 但无功工况和发电工况的TS评分降低。全年平均而言, 和春、冬季结论类似。

表3 70m高度不同风速区间的风速预报准确性TS评分
Table 3 TS scores of wind speed forecast performance in different wind speed segments at 70m height

检验年月	水平分辨率/km	无功工况	发电工况	满发工况
2010年7月	10.0	0.463	0.855	0.000
	3.33	0.456	0.847	0.161
2010年10月	10.0	0.453	0.940	0.028
	3.33	0.446	0.936	0.113
2011年1月	10.0	0.363	0.928	0.974
	3.33	0.396	0.906	0.737
2011年4月	10.0	0.281	0.948	0.342
	3.33	0.294	0.943	0.325
4个月平均	10.0	0.390	0.918	0.336
	3.33	0.398	0.908	0.334

因在无功工况下风机不发电, 在满发工况下, 风机按照额定功率值发电, 所以对于这两个区间而言, 只要模式预报的TS评分越高, 预报效果就越好; 而对于风机发电工况区间来说, 风速和功率之间遵循功率曲线关系, 风速报的量值越准确, 功率预报才能越好, 所以对于发电工况下, 我们进一步评估了70m高度 $3\text{m/s} < \text{风速} \leq 15\text{m/s}$ 不同分辨率的预报性能(图5)。图5a为 E_r , 图5b为 $RMSE$, 从两图中均可看出, 不论哪个月, 都是3.33km的预报误差高于10km的预报误差, E_r 是7月最大, 10月最小, $RMSE$ 是4月最大, 10月最小。

4 结论与讨论

本文基于WRF模式, 以ECMWF预报场为模式背景场对我国东北地区4个典型月进行不同分辨率的风速预报实验, 通过同期47座测风塔观测资料对预报效果进行全面评估得出以下结论。

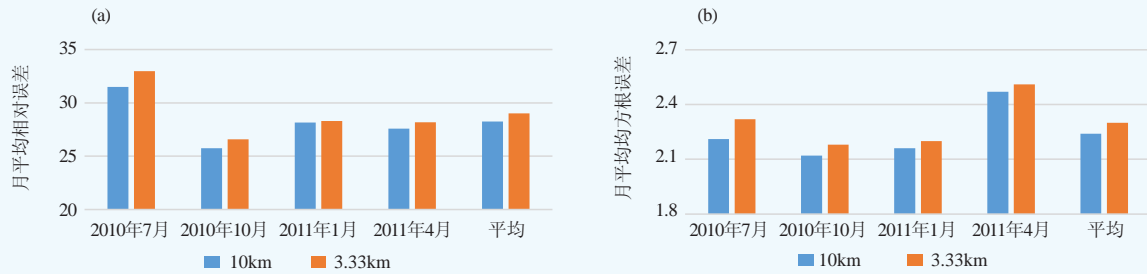


图5 70m高度发电工况下风速预报效果评估

(a) E_r ; (b) RMSE

Fig. 5 Forecast errors of wind speed under power generation condition at 70m height

(a) relative error; (b) root mean square error

1) 从风速频率曲线来看, 辽宁的预报性能整体较好, 吉林相对较差, 这可能与两省的地形特点有关, 由于吉林的测风塔多位于西部平原, 辽宁的地形地貌复杂一些, 测风塔多位于丘陵、平原和海上, 而模式动力降尺度时由于差分求解带入一定的计算误差, 对于平坦地区而言精细化地形引入导致的风速预报优化不足以弥补模式计算引入的误差, 所以吉林的预报效果相对略差, 辽宁较好。

2) 从全风速段检验来看, 70m高度的预报能力明显优于10m, 这与70m高度受地表特征的影响比10m高度更小有关。

3) 从70m高度均方根误差贡献率的对比来看, 模式分辨率的提升使得位相偏差增大, 系统差和振幅差降低, 这会使得预报产品的可订正性降低。

4) 从各种工况下风速预报效果来看, 分辨率的变化对各区间的TS评分带来一定影响: 分辨率提高对春、冬季无功区间的预报效果提升有利, 对夏、秋季满发区间的预报效果提升有帮助; 但不论哪种季节, 分辨率的提升, 均使得对风功率预测准确性有重要影响的发电工况的TS评分降低, E_r 和RMSE增大。

综上所述, 就本文工作可得出基本结论: 我国东北地区风速预报效果受模式分辨率的影响不大, 10和3.33km预报产品的准确率较接近, 但3.33km的预报准确率略低, 并非模式分辨率越高近地层风速预报效果越好。模式降尺度预报主要是通过引入更精细尺度的地形和地貌特征的影响, 从而提高预报效果, 但是每一次降尺度计算的基础是稍粗分辨率的预报结果, 通过模式的模拟计算获取更高分辨率预报结果, 如果降尺度部分带入的高分辨率地形地貌正效果不能抵消模拟降尺度运算的负效果, 就使得最终降尺度预报效果略低。因而, 在进行降尺度预报时要进一步调整模式的方案, 以提高预报效果。

由于上述评估结论是基于WRF模式和4个典型月

的120余天算例得出, 且只针对了10和3.33km两种模式分辨率, 只能据此初步给出东北地区风速预报水平对WRF模式水平分辨率的敏感性, 如果所用的模式不同、评估时段不同及分辨率不同, 可能结论会有所差异; 所以业务技术人员在做模式应用时, 需对不同预报区域、不同基础模式和不同的目标分辨率做好类似评估, 选择计算效率和预报准确率的平衡点, 有效节约成本。

参考文献

- [1] 中国可再生能源学会风能专业委员会. 2015年中国风电装机容量统计. 风能, 2016, (2): 48-63.
- [2] 路涛, 赵靛. 2015年中国风电开发主要数据汇总. 风能, 2016, (4): 30-32. doi: 10.3969/j.issn.1674-9219.2016.04.010.
- [3] 孙川永. 风电场风电功率短期预报技术研究. 兰州: 兰州大学, 2009.
- [4] 程兴宏, 陶树旺, 魏磊, 等. 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. 高原气象, 2012, 31(5): 1461-1469.
- [5] Draxl Caroline, Hahmann A N, Pena A, et. al. Evaluating winds and vertical wind shear from weather research and forecasting model forecasts using seven planetary boundary layer schemes. Wind Energy, 2012, 17(1):39-55. DOI: 10.1002/we.1555.
- [6] Santos-Alamillos F J, Pozo-Vazquez D, Ruiz-Arias J A, et. al. Analysis of WRF model wind estimate sensitivity to physics parameterization choice and terrain representation in Andalusia (Southern Spain). Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2013, 52(7):1592-1608.
- [7] 周荣卫, 何晓凤, 孙逸涵. 3种全球环流预报场近地层风速突变预报能力评估. 资源科学, 2013, 35(10): 2121-2129.
- [8] 何晓凤, 周荣卫, 孙逸涵. 3个全球模式对近地层风场预报能力的对比检验. 高原气象, 2014, 33(5): 1315-1322.
- [9] 李艳, 王元. 岛屿型复杂地形地貌条件下有效风能分布的甚高分辨率数值模拟. 太阳能学报, 2007, 28(6): 663-669.
- [10] 孙逸涵, 程兴宏, 柳艳香, 等. 不同参数化方案对风预报效果影响个案研究. 气象科技, 2013, 41(5): 870-877.
- [11] 高学杰, 徐影, 赵宗慈, 等. 数值模式不同分辨率和地形对东亚降水模拟影响的试验. 大气科学, 2006, 30(2): 185-192.
- [12] European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. Operational configurations of the ECMWF Integrated Forecasting System(IFS). <http://www.ecmwf.int/en/forecasts/documentation-and-support>.
- [13] National Center for Atmospheric Research Mesoscale & Microscale Meteorology Division. User's Guide for the Advanced Research WRF (ARW) Modeling System Version 3.7. http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_V3/contents.html.
- [14] Lange M. On the uncertainty of wind power predictions—analysis of the forecast accuracy and statistical distribution of errors. J Solar Ene Engi, 2005, 127(2): 177-184.