

张宇, 郭振海, 林一骅, 等. 2013. 中尺度模式风电场风速短期预报能力研究 [J]. 大气科学, 37 (4): 955–962, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12092.
Zhang Yu, Guo Zhenhai, Lin Yihua, et al. 2013. Predictive capacity of mesoscale model for short-range wind speed forecasting at wind power farm [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (4): 955–962.

中尺度模式风电场风速短期预报能力研究

张宇^{1,2} 郭振海¹ 林一骅¹ 迟德中³

¹ 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

² 中国科学院大学研究生院, 北京 100049

³ 兰州大学数理统计学院, 兰州 730000

摘 要 本文利用内蒙古乌兰察布风电场 2009 年观测记录和 WRF 数值模式预报, 研究了中尺度数值天气模式对风电场风速的短期预报能力。研究表明: 不同数值模式参数化方案的预报能力没有实质性的区别, 对于不同时效的风场预报各种方案的预报能力不尽相同。在天气演变较为剧烈时, 模式预报技巧相对较差。风电场周边主要天气系统对预报准确度有很大影响。就乌兰察布风电场而言, WRF 模式 2009 年日平均预报相对误差仅为 11.78%, 且误差大于 20% 的日数占研究总天数不超过 15%, 具有较高的预报技巧。当蒙古气旋、东北气旋剧烈发展或风速迅速减小时风速的预报误差较大。

关键词 风力发电 短期风速预报 中尺度模式 天气分析

文章编号 1006-9895(2013)04-0955-08

中图分类号 P456.7

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12092

Predictive Capacity of Mesoscale Model for Short-Range Wind Speed Forecasting at Wind Power Farm

ZHANG Yu^{1,2}, GUO Zhenhai¹, LIN Yihua¹, and CHI Dezhong³

¹ State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

³ School of Mathematics and Statistics, Lanzhou University, Lanzhou 730000

Abstract The predictive capacity of a mesoscale model for short-range wind speed forecasting at a wind power farm is investigated. The results of the Weather Research and Forecasting Model (WRF) are compared and analyzed in this paper and also compared with observation data at a wind power farm in Ulan Qab. The research shows that although the model parameterization schemes' forecasting ability varies with time, the schemes show no essential difference. The forecast level is relatively low when the weather is developing acutely. The synoptic background is the main contributor to the model's predictive capacity. At this wind farm, the daily mean forecast relative error of the WRF forecast with respect to the observation is only 11.78% in 2009, and the number of days for which the error is greater than 20% does not exceed 15%. The forecast error predominantly appears when the wind speed weakens rapidly or a Mongolian cyclone or Northeast cyclone undergoes dramatic evolution.

Keywords Wind power, Short-range wind speed forecast, Mesoscale model, Synoptic analysis

收稿日期 2012-06-13, 2012-11-22 收修定稿

资助项目 中国科学院战略性先导科技专项项目 XDA05110300

作者简介 张宇, 男, 1984 年出生, 博士研究生, 主要从事大气海洋边界层数值模拟和大洋环流数值模拟。E-mail: zhangyu7305@gmail.com

1 引言

风力发电是利用风吹动风力发电机发电来获取能源的方式。发电过程中没有其他能源消耗，是真正的“零排放”，因此风电是世界上最清洁的能源之一。在全球变暖背景下，风电成为了一种备受青睐的能源利用方式。目前，全世界风电装机容量每年以 30% 的速度递增 (IEA, 2009, 2010)。我国海上和陆地上的风能储量大约有 10 亿千瓦，风力发电资源十分丰富，有很高的开发利用价值，我国在十一五期间加快加大了在风能利用方面的投入 (Ma et al., 2010; IEA, 2006)。

由于近地层风速具有显著的湍流特征，风力发电很难像火力或水力等发电方式一样以恒定功率发电，这就给风电的调度作业以及并网利用带来极大的困难。而变化功率的发电方式，对风力发电电网安全和发电效率有着重要的影响。在一些极端的情况下，如果不能预知风力发电功率而盲目并网，很可能造成输电网络的崩溃，引起灾难性的后果。因此风力发电功率的预报等保障性措施，对风力发电的高效利用来说是非常关键的环节。按照风电调度以及风电厂并网的技术标准发展要求，最理想的情况是对每个风力发电机提供准确的 72 小时瞬时风速预报，这样可以从容调度。事实上，这一点在实际操作过程中很难实现。目前一些风电发展发达国家的业务应用 24 小时风速预报日平均相对误差在 20%~25% (Costa et al., 2008)，而从国内的相关研究文献上可以看到，我国 24 小时风速预报的日平均相对误差在 22%~30% 之间，略低于国际水平 (刘永前等，2007; 杨秀媛等，2005)。

在这一研究领域，神经网络等数理统计方法和 MM5 或 WRF 等中尺度气象数值模式数值预报，是目前国外较为流行的为风电厂提供风速预报的方法。统计方法是充分考虑风机历史风速观测的基本事实，利用相关的数学模型，进行未来几小时的“外推”，从而实现风速预报。由于这种方法缺少影响风速变化的动力学方面的信息，因此对 12~72 小时的风速预测，几乎没有很好的预报技巧。MM5、WRF 等业务用数值模式的预报能力毋庸置疑，已经被广泛应用于风能资源评估领域 (李艳等，2009)，但直接应用于风电场风速短期预报时仍存在某些时段预报不够准确的问题。为此，本文以内蒙古乌

兰察布风电场为例，选用 WRF 模式，采用三种边界层参数化方案进行一年的风速预报试验，并分析了三种方案预报误差的日变化和月变化。并从天气学角度初步探讨了影响预报准确度的一些天气背景因素。以期得出中尺度数值模式在风电场短时风速预报领域的应用能力和值得改进的方向。

2 数值方案和研究资料

本文用于对比研究的风电场位于内蒙古乌兰察布市境内 (41°07'N, 112°33'E)，海拔高度为 2040 m。研究表明 (张宇等，2010)，中尺度数值天气预报模式水平分辨率在 3 km 以下时，不同分辨率对单站边界层风速的预报能力差别不大，因此为达到预报时效性要求，缩短预报所需计算时间，乌兰察布风电场数值模式实时业务预报采用 27 km 水平分辨率。风电预报试验为保证和风电场实时预报一致，也采用和业务预报相同的水平分辨率 (27 km) 和预报范围 (15°~55°N, 80°~140°E，包含整个中国大陆地区)，并且同样采用 NCEP 的 GFS 全球预报资料作为初始场和边界场。试验预报时间也和实时预报相同，每日 08:00 (北京时间，下同) 开始预报，每次预报 72 小时。由于风力发电机主要位于大气边界层内，因此不同边界层参数化方案对预报能力的影响也是本文研究内容之一。数值预报试验的主要参数化方案见表 1。

表 1 WRF 预报试验各参数化方案

Table 1 Parameterization schemes of WRF forecast experiments

	方案 A	方案 B	方案 C
辐射过程参数化	RRTM/Dudhia ¹	RRTM/Dudhia	RRTM/Dudhia
微物理过程参数化	WSM6 ²	WSM6	WSM6
积云对流参数化	Kain-Fritsch ³	Kain-Fritsch	Kain-Fritsch
近地层参数化	MM5 相似理论	Eta 相似理论 ⁵	RUC LSM ⁶
边界层参数化	Yonsei University 方案 ⁷	Mellor-Yamada-Janjic 方案 ⁸	NCEP GFS 方案 ⁹

注：上标 1 (Dudhia, 1989; Mlawer et al., 1997); 2 (Dudhia et al., 2008); 3 (Kain, 2004); 4 (Beljaars, 1995; Dyer and Hicks, 1970; Paulson 1970; Webb 1970; Zhang and Anthes, 1982); 5 (Janjic, 1996); 6 (Smirnova et al., 1997); 7 (Hong et al., 2006); 8 (Mellor and Yamada, 1982); 9 (Hong and Pan, 1996)

对比观测资料来自风电场附近测风塔观测记录，观测高度为 70 m，记录为 10 分钟风向风速平均，记录长度为 2009 年 1 月 1 日至 2009 年 12 月 31 日。为和观测保持一致，本文从数值预报结果中

用插值法提取出和观测地理位置相同的风速记录。其中水平方向上采用反距离加权平均法插值 (Richard, 1982), 垂直方向上利用近地层风速分布的对数相似规律插值 (盛裴轩等, 2005)。

在 27 km 水平分辨率下, 中尺度数值气象模式的预报结果仍以大中尺度天气信号为主, 对天气背景形势预报的准确度在很大程度上决定了边界层风速预报的准确度。因此本文也研究了影响预报的天气因素。赵天保和符淙斌 (2006, 2009), 肖霞等 (2009) 的研究表明, ECMWF 的 ERA 再分析资料集相较其他再分析资料在中国区域的适用性更好, 因此, 我们选用该资料集作为天气实况同 WRF 预报的天气背景做对比分析。

3 预报结果对比分析

本文计算了三种参数化方案预报结果之间的日均误差和时均误差, 以及各方案预报结果同观测之间的日均误差和时均误差。本文定义绝对误差为

$|U_{sim}-U_{obs}|$, 相对误差为 $|U_{sim}-U_{obs}|/U_{obs}$, 其中计算日均误差时 U_{sim} 为数值预报的日平均风速, U_{obs} 为观测的日平均风速, 计算时均误差时则分别为相应的小时平均风速。计算结果见图 1 和 2。

表 2 三种参数化方案预报能力差异
Table 2 Prediction capacities of three parameterization schemes

参数化方案	平均相对误差	相对误差的均方差	相对误差大于 20% 天数 占总分析天数百分比
方案 A	11.78%	9.93%	14.04%
方案 B	14.66%	14.69%	25.73%
方案 C	13.45%	13.11%	21.93%

图 1 为三种参数化方案预报风速的差异。由图可知, 三种方案预报风速的日均相对误差不是很大, 基本都在 8% 以内, 说明它们的预报能力较为接近。表 2 列举了三种参数化方案具体预报差异。由表中数据可知, 总体上参数化方案 A 的预报能力最好, C、B 次之。但从图 2 可以发现, 并不

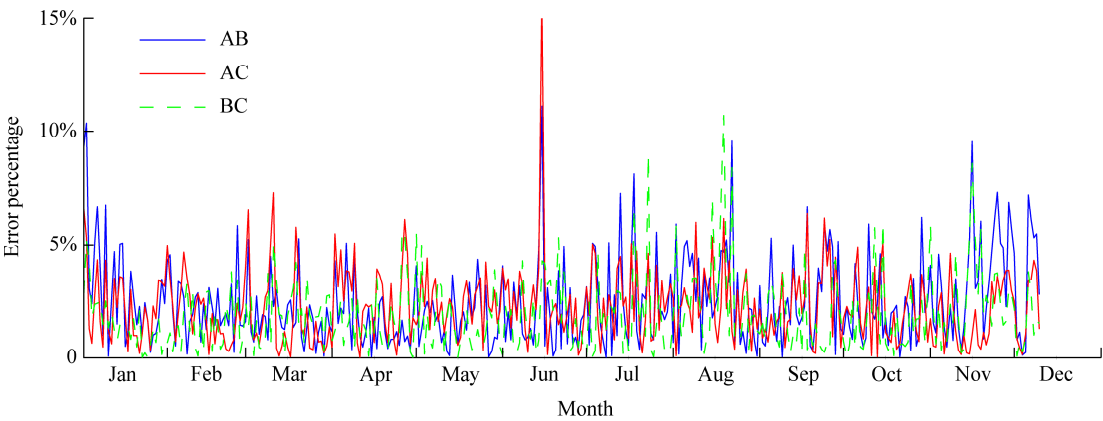


图 1 不同参数化方案预报风速间相对误差。AB 为方案 A 相对于方案 B 的误差; AC 为方案 A 相对于方案 C 的误差; BC 为方案 B 相对于方案 C 的误差
Fig. 1 Relative error between different parameterization schemes. AB is the relative error of scheme A with respect to B; AC is the relative error of scheme A with respect to C; BC is the relative error of scheme B with respect to C

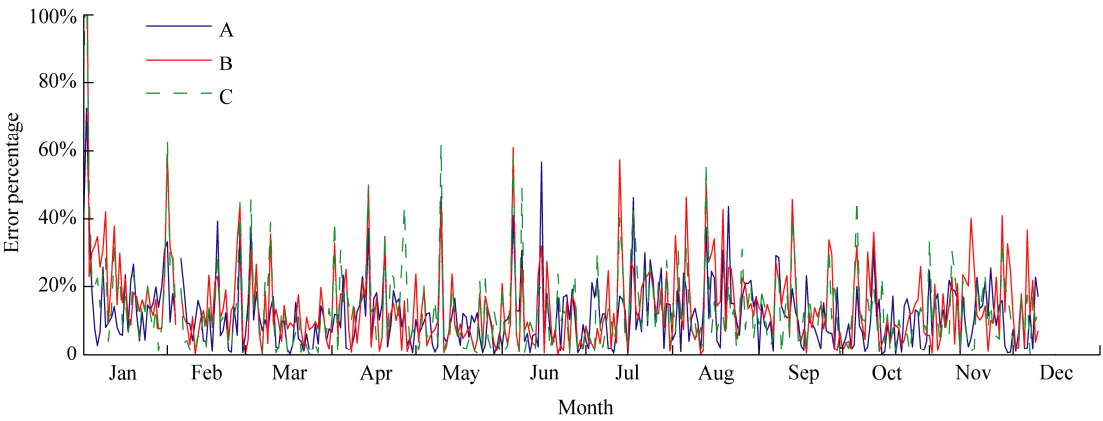


图 2 不同参数化方案预报风速同观测间相对误差
Fig. 2 Relative errors of parameterization schemes with respect to observations

是所有的参数化方案自始至终都能保持较好的预报能力,对于方案 A 预报差的日期,方案 B、C 可能预报得较好。出现这种情况的天数很多,限于篇幅,本文仅举出几个典型例子分析。例如,6 月 14 日的数值预报,方案 A 日均相对误差为 56.75%,方案 C 仅为 19.06%。由该日预报风速的趋势图也可看出,方案 A 预报风速同观测几乎呈反位相,而方案 C 仅在白天同观测位相相反(图 3)。

鉴于参数化方案 A 在整体上预报能力最好,本文着重分析了该方案的预报结果。由图 3、图 4 和图 8a、b 可以发现,数值模式预报结果较为平滑,不能够再现风速的瞬时变化,但对风速变化的大尺度特征预报得比较准确。从图 5 可看出,几乎总是在风速急速下降的时候,预报结果较差,说明了模式对中小尺度系统的预报能力不足,这和张宇(2010)等的研究结果也是一致的。此外,在弱风情况下,较小的绝对

误差可能因为基数过小而产生较大的相对误差,从而得出预报很差的结论(图 6)。如 2009 年 5 月 9 日和 6 月 4 日的预报结果,从总体趋势上看同观测较为接近,日均绝对误差也很小,但日均相对误差则都在 40% 以上。尽管风机一般的切入速度为 2.5 m/s,切出速度为 25 m/s,对于风能发电,研究弱风速基数下的误差意义不大,但就全面客观地评估一个模式的预报能力而言,仍具有一定的科学意义。

对不同季节天气的预报(图 7),参数化方案 A 对冬、春风速的预报能力较差,夏、秋相对较好。夏季 8 月份的预报相对误差虽然很高,但是该月绝对误差很低,因此并不能认为预报得不好。从均方差来看,1 月和 6 月的预报能力最不稳定。

4 天气背景分析

本文选取风速预报较差的几个个例,从天气背

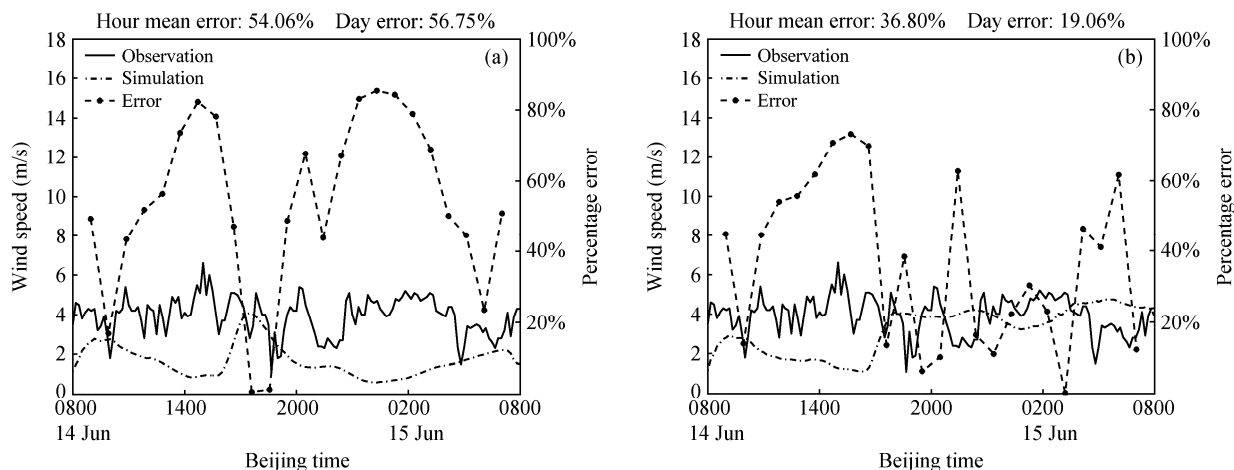


图 3 2009 年 6 月 14~15 日风速预报: (a) 方案 A; (b) 方案 C

Fig. 3 Wind speed forecast and prediction error during 14~15 Jun 2009: (a) Scheme A; (b) scheme C

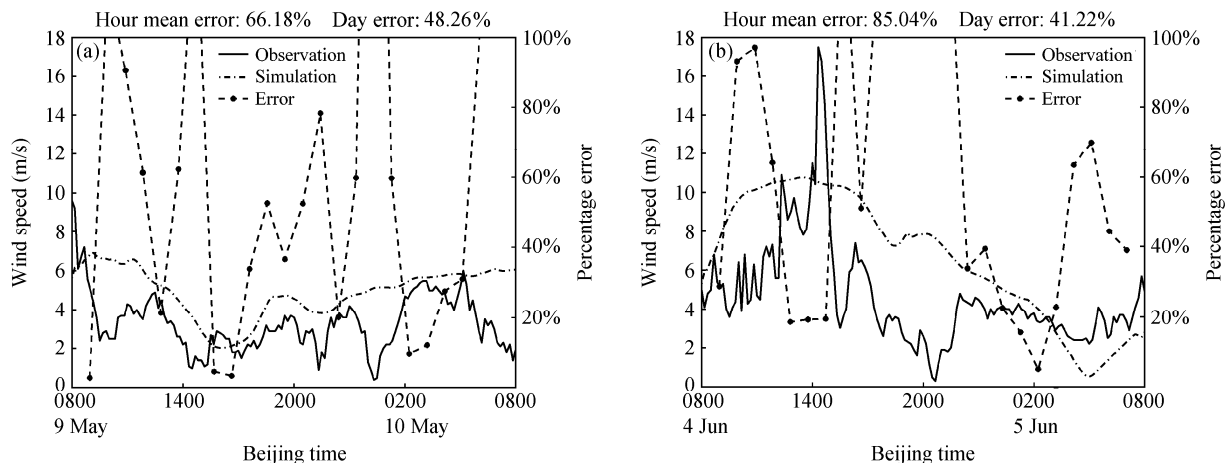


图 4 2009 年 5 月 9~10 日和 6 月 4~5 日预报结果

Fig. 4 Wind speed forecast and prediction error during May 9~10 and Jun 4~5, 2009

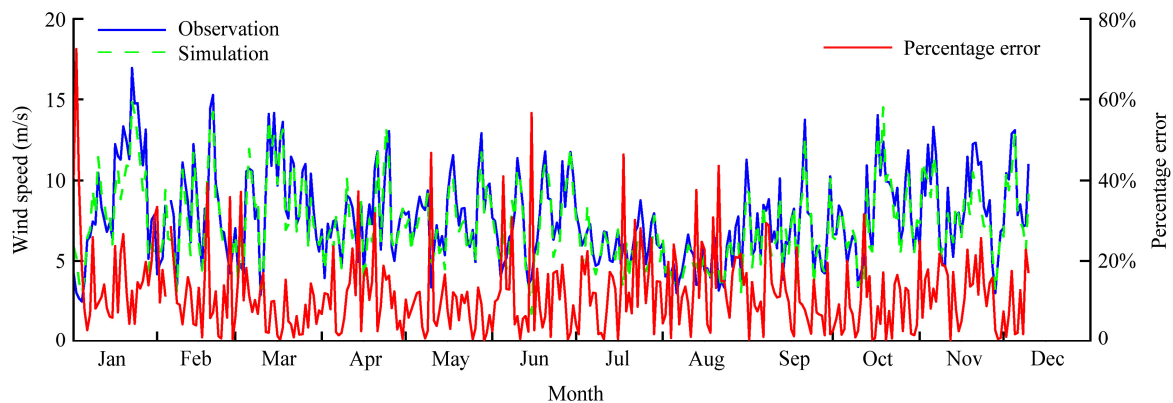


图 5 参数化方案 A 预报风速和观测风速及预报相对误差

Fig. 5 Wind speed forecasted with parameterization scheme A and observed wind speed, and relative error of forecast with respect to observations

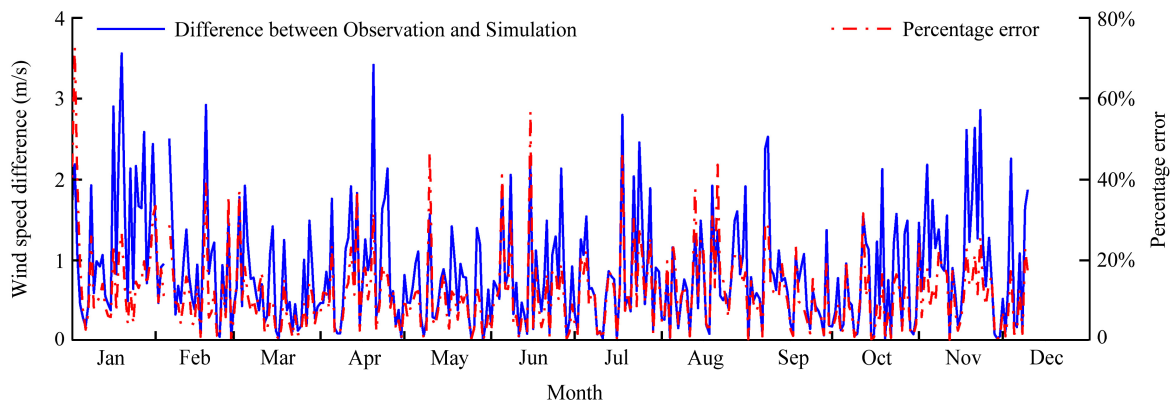


图 6 参数化方案 A 预报风速相对观测的日均相对误差和绝对误差

Fig. 6 Day mean absolute error and relative error of parameterization scheme A forecast with respect to observations

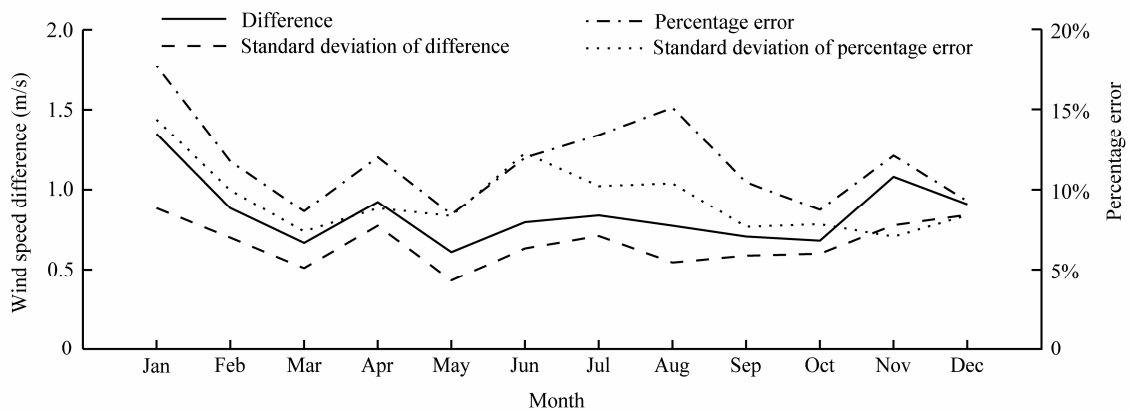


图 7 参数化方案 A 预报能力的月变化

Fig. 7 Monthly variation of prediction capacity of parameterization scheme A

景形势预报效果的角度来探讨影响风电场风速短期预报准确度的可能因子。

经过对比分析发现,总体上 WRF 预报的背景天气形势是准确的,但个别时间也会有较大的预报误差。冬春季的预报不准确主要与背景天气形势预报不准确相关,这种不准确往往造成预报的风速整体偏大或偏小;而夏秋季的预报不准确则与特

定的天气系统有关,这种系统出现时往往引起预报风速的演变趋势相对于观测位相偏移,从而造成很大的预报误差。通过对每日天气图的分析,发现符合这两种情况的天数为 27 天,占总预报较差天数的 58%。由于数量较多,限于文章篇幅,以下仅选取两个较为典型的个例分析。

以 2009 年 1 月 2 日为例,由该日风速趋势可

看出, WRF 预报风速整体比观测偏大。结合当天的天气形势可以看出, 蒙古气旋为当天影响风电场的主要天气系统。WRF 预报出的气旋强度要比实际更强, 位置也更靠近风电场, 导致预报风速偏大 (图 8a、a1、a2)。

以 2009 年 6 月 6 日为例, 该日 WRF 预报的风速基本同观测呈反位相。结合该天的天气形势可以

看出, 风电场主要受东北气旋和蒙古气旋的影响。WRF 预报的这两个天气系统比实况要提前发展了几个小时, ECMWF 再分析中的两大气旋均呈温度场落后高度场, 气旋发展阶段, 而 WRF 预报结果中温度场已完成和高度场同步, 气旋进入了锢囚消亡阶段。这导致预报前半段风速大于观测, 而后半段小于观测 (图 8b、b1、b2)。

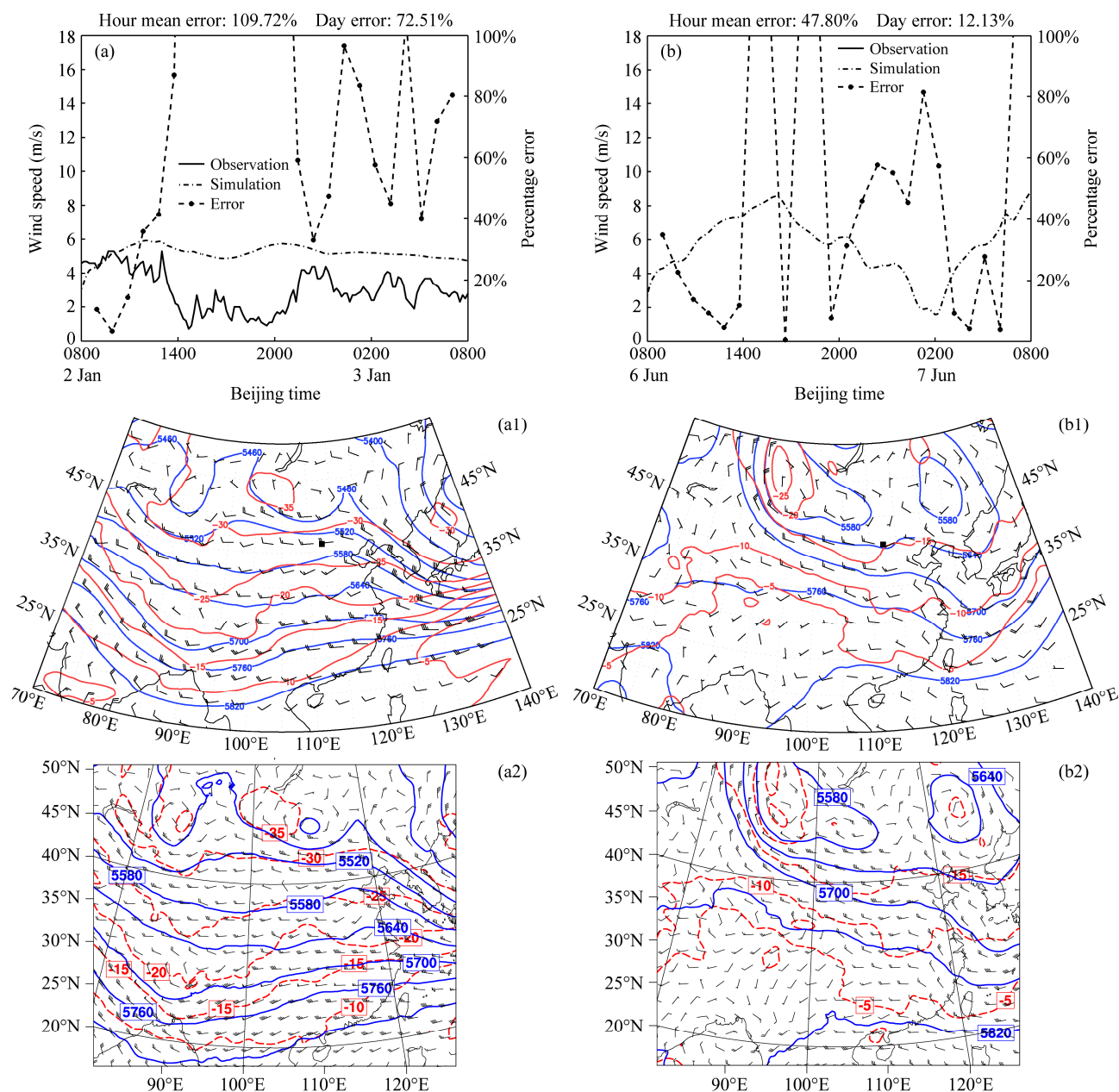


图 8 (a、b) 数值预报同观测风速对比及相对误差; 500 hPa 等压面天气分析: (a1、b1) ECMWF 再分析天气背景, (a2、b2) WRF 预报天气背景。 (a、a1、a2) 2009 年 1 月 2 日 08 时; (b、b1、b2) 2009 年 6 月 6 日 08 时。 (a1、b1、a2、b2) 实线为等势高度线; 虚线为等温线; 风矢标按 WMO 标准定义: 短划表示 2 m/s, 长划表示 4 m/s, 三角旗表示 20 m/s

Fig. 8 (a, b) Wind speed of numerical forecast and relative error with respect to observations; 500-hPa isobaric surface synoptic analysis: (a1, b1) ECMWF reanalysis weather situation, (a2, b2) WRF forecast weather situation. (a, a1, a2) 0800 BT (Beijing time) 2 Jan 2009; (b, b1, b2) 0800 BT 6 Jun 2009. (a1, b1, a2, b2) Solid line: geopotential height; dashed line: isotherm; wind bar is in WMO definition, half ticks represent 2 m/s, full ticks represent 4 m/s, pennants represent 20 m/s

对天气背景的分析可以得知,影响该风电场风速预报准确度的天气系统主要为北方温带气旋,这与风电场所处的地理位置是相符的。当气旋生成发展时大气运动会更加复杂多变,数值天气预报的技巧也相应下降,从而导致预报能力变差。

5 结论

通过上文的研究分析我们可以得出如下结论:

(1) 数值模式边界层参数化方案对边界层风速的预报有一定的影响,但是影响有限。没有一种最好的参数化方案,不同方案在不同时间区域预报能力各有优劣,就平均意义而言,MM5 近地层参数化方案和 YUS 边界层参数化方案组合优于其他。

(2) 数值模式在天气演变较为平缓的时段,预报技巧较高,在天气演变剧烈的时候,预报技巧较低,从天气背景分析可以找出一些影响预报准确度的主要因子。准确的预报大气中小尺度运动对提高预报能力非常重要。不同季节的整体预报能力也不相同。

(3) 对于本文风电场而言,蒙古气旋和东北气旋的发生发展对风速预报影响很大。在风速急速下降时预报误差往往较大,夏秋季预报能力要强于冬春。对于其他地区的风电场,相信可以通过类似方法找到主要影响的天气系统。

综上,WRF 数值天气模式直接用于风电场风速预报总体上效果较好,但也存在预报较差的时段。由于大幅提升数值模式预报能力涉及众多的研究领域,短期内难以实现。因此,用本文的方法细致研究风电场历史预报水平,分析主要影响因素,并针对这些因子对预报影响的特点,通过其他方法订正,不失为一种快速提高预报能力的经济可行方法。

参考文献 (References)

- Beljaars A C M. 1995. The parameterization of surface fluxes in large-scale models under free convection [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 121 (522): 255–270.
- Costa A, Crespo A, Navarro J, et al. 2008. A review on the young history of the wind power short-term prediction [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12 (6): 1725–1744.
- Dudhia J. 1989. Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model [J]. *J. Atmos. Sci.*, 46 (20): 3077–3107.
- Dudhia J, Hong S Y, Lim K S. 2008. A new method for representing mixed-phase particle fall speeds in bulk microphysics parameterizations [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 86: 33–44.
- Dyer A J, Hicks B B. 1970. Flux-gradient relationships in the constant flux layer [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 96 (410): 715–721.
- Hong S Y, Pan H L. 1996. Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium-range forecast model [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 124 (10): 2322–2339.
- Hong S Y, Noh Y, Dudhia J. 2006. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 134 (9): 2318–2341.
- International Energy Agency (IEA). 2006. China's power sector reforms: Where to next? [R]. OECD/IEA, Paris.
- International Energy Agency (IEA). 2009. World energy outlook 2009[R]. OECD/IEA, Paris.
- International Energy Agency (IEA). 2010. Energy technology perspective executive summary: Scenarios & strategies to 2050 [R]. OECD/IEA, Paris.
- Janjic Z I. 1996. The surface layer in the NCEP Eta Model [R]. Eleventh Conference on Numerical Weather Prediction, Norfolk, VA, 19–23 August, 354–355.
- Kain J S. 2004. The Kain-Fritsch convective parameterization: An update [J]. *J. Appl. Meteor.*, 43 (1): 170–181.
- 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. Li Yan, Tang Jianping, Wang Yuan, et al. 2009. Application of dynamical downscaling method for assessment of wind energy resources [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 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. Liu Yongqian, Han Shuang, Hu Yongsheng. 2007. Review on short-term wind power prediction [J]. *Modern Electric Power (in Chinese)*, 24 (5): 6–11.
- Ma H Y, Oxley L, Gibson J, et al. 2010. A survey of China's renewable energy economy [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14 (1): 438–445.
- Mellor G L, Yamada T. 1982. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems [J]. *Rev. Geophys.*, 20 (4): 851–875.
- Mlawer E J, Taubman S J, Brown P D, et al. 1997. Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave [J]. *J. Geophys. Res.*, 102 (D14): 16663–16682.
- Paulson C A. 1970. The mathematical representation of wind speed and temperature profiles in the unstable atmospheric surface layer [J]. *J. Appl. Meteor.*, 9 (6): 857–861.
- Richard F. 1982. Scattered data interpolation: Tests of some methods [J]. *Math. Comput.*, 38 (157): 181–200.
- 盛裴轩, 毛节泰, 李建国, 等. 2005. 大气物理学 [M]. 北京: 北京大学出版社, 243–244. Sheng Peixuan, Mao Jietai, Li Jianguo, et al. 2005. *Atmospheric Physics (in Chinese)* [M]. Beijing: Peking University Press, 243–244.
- Smirnova T G, Brown J M, Benjamin S G. 1997. Performance of different soil model configurations in simulating ground surface temperature and surface fluxes [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 125 (8): 1870–1884.
- Webb E K. 1970. Profile relationships: The log-linear range, and extension to strong stability [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 96 (407): 67–90.

- 肖霞, 郭振海, 张文煜, 等. 2009. NCAR 分析资料在大气边界层内误差的初步分析 [J]. 气候与环境研究, 14 (5): 475–483. Xiao Xia, Guo Zhenhai, Zhang Wenyu, et al. 2009. Preliminary error analysis of the NCAR analysis datasets in the atmospheric boundary layer [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 14(5): 475–483.
- 杨秀媛, 肖洋, 陈树勇. 2005. 风电场风速和发电功率预测研究 [J]. 中国电机工程学报, 25 (11): 1–5. Yang Xiuyuan, Xiao Yang, Chen Shuyong. 2005. Wind speed and generated power forecasting in wind farm [J]. Proceedings of the CSEE (in Chinese), 25 (11): 1–5.
- Zhang D L, Anthes R A. 1982. A high-resolution model of the planetary boundary layer-Sensitivity tests and comparisons with SESAME-79 data [J]. J. Appl. Meteor., 21 (11): 1594–1609.
- 张宇, 郭振海, 张文煜, 等. 2010. 中尺度模式不同分辨率下大气多尺度特征模拟能力分析 [J]. 大气科学, 34 (3): 653–660. Zhang Yu, Guo Zhenhai, Zhang Wenyu, et al. 2010. Analysis of mesoscale numerical model's ability of atmospheric multi-scale characteristics simulation in variety resolution [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (3): 653–660.
- 赵天保, 符淙斌. 2006. 中国区域 ERA-40、NCEP-2 再分析资料与观测资料的初步比较与分析 [J]. 气候与环境研究, 11 (1): 14–32. Zhao Tianbao, Fu Congbin. 2006. Preliminary comparison and analysis between ERA-40, NCEP-2 reanalysis and observations over China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 11 (1): 14–32.
- 赵天保, 符淙斌. 2009. 应用探空观测资料评估几类再分析资料在中国区域的适用性 [J]. 大气科学, 33 (3): 634–648. Zhao Tianbao, Fu Congbin. 2009. Applicability evaluation for several reanalysis datasets using the upper-air observations over China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (3): 634–648.

《气候与环境研究》“人工增雨研究专辑”专刊信息

我国既已有了在全世界最大范围的人工增雨作业, 今又酝酿了进一步使之科学化的规划, 为了提高我国人工影响天气工作的科学化, 我们作了有限的调查和约稿, 汇编成“人工增雨研究专辑”, 并在《气候与环境研究》2012 年第 17 卷第 6 期发表。本专辑选登其中一些具有普遍意义的成果和经验, 以及未来近期内可以再进一步提高的一些思考和建议。

本专辑适合云降水物理与人工影响天气的科研工作者和有关学科的科研人员及其相关领域的领导阅读。有需要者, 请按如下方式联系免费索取:

联系人: 赵秘书 (中国科学院大气物理研究所 LACS)

通信地址: 北京德胜门外祁家豁子华严里 40 号

邮编: 100029

电话: 010-82995309

E-mail: zhaoqin@mail.iap.ac.cn