

汪君, 王会军. 2013. WRF 模式对江苏如东地区风速预报的检验分析 [J]. 气候与环境研究, 18 (2): 145–155, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2013.11152.
Wang Jun, Wang Huijun. 2013. Forecasting of wind speed in Rudong, Jiangsu Province, by the WRF model [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 18 (2): 145–155.

WRF 模式对江苏如东地区风速预报的检验分析

汪君^{1,2} 王会军¹

¹ 中国科学院大气物理研究所竺可桢-南森国际研究中心, 北京 100029

² 中国科学院大学, 北京 100049

摘 要 探讨了 WRF 模式在风电场的风速或者功率预报中应用的可行性, 主要研究和评估了 WRF 模式对地处东亚季风区及海陆交界的江苏如东地区夏季和冬季风速的短期预报效能。研究发现 WRF 模式可以比较好地预报如东地区冬季的风速, 24 h 预报的风速时间序列和观测资料的相关系数可以达到 0.61, 通过置信度 99% 的检验, 48 h 和 72 h 的预报与观测风速相关系数分别为 0.54 和 0.47, 也能通过置信度 99% 的检验; 相对而言, 模式对夏季风速的预报则要差一些, 24 h 的相关系数有 0.59, 48 h 和 72 h 的相关系数只有 0.47 和 0.30, 但仍能通过置信度 99% 的检验。在量值上, 模式预报的风速比观测值都略偏大一些。而江苏南通市预报结果显示, 模式的预报效能要比如东稍高一些, 和如东类似, 模式对该地冬季的预报要好于对夏季风速的预报。从更大尺度范围的分析也表明, 模式对不同地区预报的准确度是不一样的, 对海面以及海陆交界的海岸预报精度要高一些, 在平坦的内陆地区预报也比较好, 但在山区预报效能则较差。总体说来, WRF 能胜任风速短期预报, 值得进一步研究和应用。

关键词 风电功率预报 风速预报 WRF 模式

文章编号 1006-9585 (2013) 02-0145-11

中图分类号 P456.7

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2013.11152

Forecasting of Wind Speed in Rudong, Jiangsu Province, by the WRF Model

WANG Jun^{1,2} and WANG Huijun¹

¹ Nansen-Zhu International Research Centre, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract To discuss the possibility of applying a numerical Weather Research and Forecasting (WRF) model to wind power forecasting, the summer and winter hourly wind speed forecasting performance of the WRF model used in Rudong, Jiangsu Province, is analyzed in this paper. It is determined that the WRF model can forecast winter wind speed in Rudong 24 h in advance very well with a correlation coefficient as high as 0.61 compared to observations and is statistically significant at the 0.01 level. Similarly, the forecasts with leading times of 48 h and 72 h are also sufficiently accurate, according to the correlation coefficients. In summer, however, forecasting is less accurate, although the correlation coefficient of the 24 h leading forecast is 0.59, which is still statistically significant at the 0.01 level. The forecasting of wind speed in Nantong was also examined with observed data and was determined to be more accurate than that in Rudong in both winter and in summer. For a larger domain, the performance of wind forecasting is also analyzed. Results show that the performance of the WRF model is better for ocean than for land and is better in winter than in summer. In general, the forecasted wind speed is greater than the actual wind speed and the performance of the WRF model forecasting differs significantly according to location and season. Essentially, short-term wind forecasting is valuable and is worthy of further investigation.

收稿日期 2011-09-22 收到, 2013-02-17 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金项目 41130103

作者简介 汪君, 男, 1984 年生, 博士研究生, 主要从事气象、水文和地质灾害等研究。E-mail: wangjun@mail.iap.ac.cn

Keywords Wind power forecasting, Wind speed forecasting, WRF model

1 前言

随着科技的日益发展,人们生活水平的提高,人类对能源的需求也越来越多,但是由于目前人类采用的能源主要来源于煤、石油和天然气等不可再生资源,在未来的发展中受限于这些资源的储量,并且对这些能源的使用可能导致环境的恶化,因此寻求清洁的可再生能源日益受到人们的重视。风电作为环保清洁的可再生资源,逐渐受到各个国家的重视,1990年以来,世界各国竞相发展使用风电技术,而我国近年来也开始大力推广风电技术。到2010年,我国风电总装机容量达到44781兆瓦,居世界首位。

虽然风电有清洁环保以及可再生等优势,但是由于风力的间歇性、波动性以及不可控性,使风电的介入对电网的安全稳定以及调度带来影响,这个影响是多层面以及多时间尺度的,尤其是十几分钟到几小时再到几天的超短期以及短期尺度。因此建立有效的风速波动与风电功率预报系统是十分必要的。

风电的功率预报,国外的研究与实用起步较早。例如1994年以来丹麦的WPPT(Wind Power Prediction Tool)(Nielsen and Madsen, 2000)已经在丹麦的一些电力系统中开始使用,其他类似的还有丹麦的Zephyr(Jursa and Rohrig, 2008)、德国的Previento(Lange et al., 2002)以及美国的eWind(Bailey and Brower, 1999)等,这些风电功率预报系统起步早、技术比较成熟,目前已经大量地使用在多个国家的电力系统中(Pinson et al., 2004; Costa et al., 2008; Lei et al., 2009; Giebel et al., 2011),并且他们还在不断地探索研制下一代的系统(Giebel et al., 2006; Kariniotakis et al., 2006; Marti et al., 2006; Bessa et al., 2011)。相比之下,我国的风电总装机量虽然比较大,但是功率预测系统的研究工作还处于起步探索阶段(谷兴凯等, 2007)。

目前成熟的功率预测系统,核心的部分就是对风速的预测,而采用的方法主要有数值天气预报模式(Ramirez-Rosado et al., 2009)的动力预测方法,还有利用人工神经网络(Pinson et al., 2003; Nielsen

et al., 2006; Jursa and Rohrig, 2008)、支持向量机(Sideratos and Hatzigargyriou, 2007; 戚双斌等, 2010)等的统计预测方法,但统计方法要进行较长时间尺度(如12 h以上)的预测,还是要基于动力方法预测的一些结果。因此,动力预测方法可以说是风电功率预测和风速预报最重要的基础。不仅如此,动力预测方法还可以进行温度、气压以及降水等的预报,可以为风电场的运行维护提供更多的参考信息。

关于风速预报,国内也做了一些探索工作,除了少量的统计方法外(潘长明和叶卓文, 1994; 涂小萍等, 2008; 戚双斌等, 2009),目前主要还是基于MM5等较早期开发的一些中尺度气象模式(凌铁军等, 2004; 高荣珍等, 2007; 孙川永等, 2009; 贺志明等, 2010)。WRF模式(Weather Research and Forecasting Model)是美国多个研究单位共同开发出的新一代中尺度气象模式,目前已经发展较为成熟,广泛使用在科研和实际预报工作中(Michalakes et al., 2005; Skamarock et al., 2008)。本文选取江苏如东作为验证分析WRF模式的风速预报能力的典型站点。如东位于我国东海海岸,是我国东部海岸风电建设典型的选址地,未来将被建设形成具有陆地、潮间带和近海三线风力发电并举格局的站点,将成为亚洲最大的海上风电场。

2 数据与方法

本文使用的数据资料主要有我国气象台站常规观测风速资料、美国国家环境预报中心和美国国家大气研究中心(NCEP-NCAR)的再分析资料(Kalnay et al., 1996)以及WRF模式的实时预报结果。

研究时间段是从2009年7月1日00:00(协调世界时,下同)到2009年7月31日23:00以及2010年1月1日00:00到2010年1月31日23:00,即夏季和冬季各选用了一个月。以下研究若无特别说明,时间均是指世界时。

本文采用了江苏如东气象站和南通市(以下简称南通)气象站的气象常规观测资料,由于如东气象站为县级气象站,风速观测为6 h一次,因此一天仅有4个时次的观测,加上缺测等因素,实际的

观测时次为一天 3 次左右。表 1 所示如东 2009 年 7 月逐小时的时间序列 744 个时次中，实际仅有 79 个有效观测，而 2010 年 1 月中实际也仅有 88 个有效观测。南通为市级观测站，因此观测间隔为 3 h 一次，表 2 所示，2009 年 7 月实际有效观测为 166 个，2010 年 1 月实际有效观测有 154 个。

表 1 如东站观测和预报风速基本情况统计表
Table 1 The basic statistic information for observed and forecasted wind speed at Rudong

		最小 值	一分 位数	中位 数	平均 值	三分 位数	最大 值	缺测 数
2009 年	观测	0	2	3	3	4	9	665
7 月	F01~24	0.21	3.26	4.79	5.03	6.57	15.24	74
	F25~48	0.23	3.54	5.01	5.24	6.65	15.15	122
	F49~72	0.07	3.26	4.89	4.99	6.79	11.68	169
2010 年	观测	0	2	3	3	4	6	656
1 月	F01~24	0.46	4.03	5.96	5.97	7.60	14.01	1
	F25~48	0.25	3.90	5.91	6.04	7.86	14.31	27
	F49~72	0.50	4.01	5.74	5.99	7.78	14.81	97

注：F01~24、F25~48、F49~72 分别表示模式 1~24 h 预报序列、25~48 h 预报序列和 49~72 h 预报序列。

NCEP-NCAR 再分析资料的水平空间分辨率是 2.5° (纬度) × 2.5° (经度)，每天 4 个时次即 00:00、06:00、12:00 和 18:00。

表 2 同表 1，但为南通站
Table 2 Same as Table 1, but at Nantong

		最小 值	一分 位数	中位 数	平均 值	三分 位数	最大 值	缺测 数
2009 年	观测	0	2	3	3.39	4.75	9	578
7 月	F01~24	0.13	2.43	3.66	3.77	5.09	9.28	74
	F25~48	0.12	2.78	3.96	4.15	5.46	10.6	122
	F49~72	0.17	2.59	3.97	4.07	5.45	10.57	169
2010 年	观测	0	2	3	2.89	4	8	590
1 月	F01~24	0.04	3.35	4.70	4.85	6.27	10.82	1
	F25~48	0.02	3.21	4.59	4.82	6.30	11.63	27
	F49~72	0.68	3.41	4.56	4.82	6.04	11.86	97

WRF 模式的区域设置如图 1 所示，整个模式为三重双向嵌套，即模式有 3 个区域，最外层的区域覆盖了中国东部的大部分地区以及东海、渤海、日本海以及西北太平洋部分地区等，此区域内模式的水平空间分辨率为 0.24° (纬度) × 0.24° (经度) (约 27 km)。模式初边值场来自 NOAA (美国国家大气海洋局) 和 NCEP 的 GFS 全球预报模式，数据步长为 3 h，水平空间分辨率为 0.5° (纬度) × 0.5° (经度)，海洋表面温度 (SST) 为 GFS 配套的海洋模式实时预报的 SST。区域 d02 是双向嵌套 3 层嵌套的第二层，大致范围是以如东为中心的周边 600 km

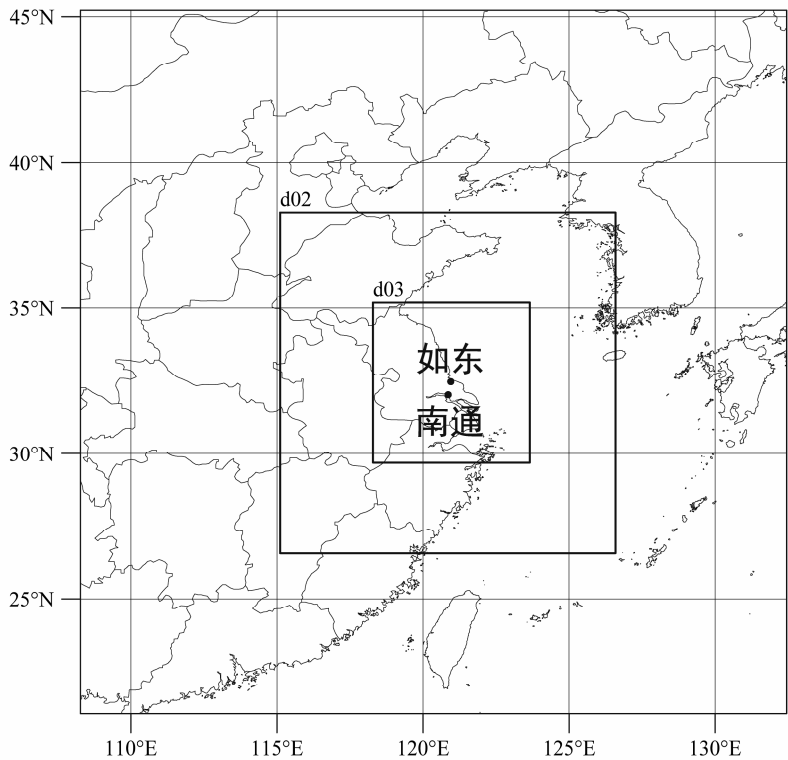


图 1 本研究的主要研究区域示意，最外层方框为 WRF 模式三层双向嵌套的最外层 (即 d01)。如东站和南通站位置如图所示
Fig. 1 The WRF model research domain. There are three domains, which are two-way nested. The locations of Rudong and Nantong routine stations are indicated as black dots

的范围, 包含了中国大陆东部大部分地区和周边沿海, 水平空间分辨率为 0.08° (纬度) $\times 0.08^{\circ}$ (经度) (约 9 km), 区域内地形比较复杂, 模式每 1 h 输出一次预报结果。三层嵌套的最里层, 即 d03, 水平空间分辨率为 0.03° (纬度) $\times 0.03^{\circ}$ (经度) (约为 3 km), 主要是如东站周边 200 km 范围内的区域, 包含江苏省的大部地区以及对应的东海沿海, 整个区域地形比较简单, 大部为平原, 有少量丘陵。

3 结果比较分析

3.1 站点资料比较分析

图 2 是如东站预报风速序列和观测值的对比, 其中 2009 年 7 月的台站观测值时间间隔是 6 h, 而预报的时间间隔是 1 h, 预报时效分别是 1~24 h、25~48 h、49~72 h。总体上, 各个预报序列都能

较好地预报风速的变化, 在量值上是比较相近的, 而且变化趋势也与观测基本吻合, 但是由于观测资料的时间分辨率不够高, 因此在预报结果中的很多峰值在观测资料中得不到验证; 不同预报时间的预报结果与观测值对比的统计数据见表 1。相对观测数据, 预报的结果总体偏大, 相对说来 1~24 h 的预报更接近观测值。为了定量比较预报结果与观测的关系及其差异, 我们采用观测与预报结果时间序列之间的相关系数和均方根误差等统计数据来定量衡量, 由于观测时次数远比预报时次少, 因此将预报的输出结果先求 6 h 平均以与观测对应, 再求相关系数、均方根误差等, 结果见表 3。2009 年 7 月预报结果与观测的 71 个有效数据数据 1~24 h 预报的相关系数达到 0.59, 通过了置信度 99.9% 的置信度检验, 均方根误差为 2.66 m/s; 相对说来, 25~48 h 的预报准确度就要差一些, 相关系数仅为 0.47,

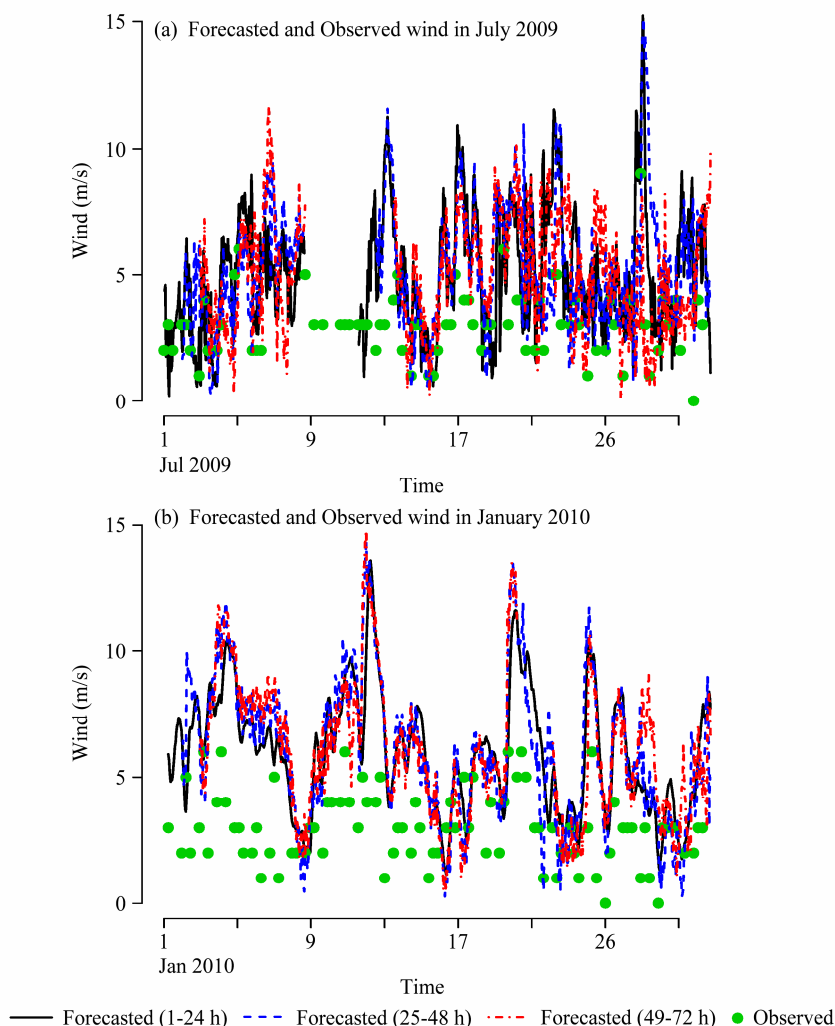


图 2 如东站 (a) 2009 年 7 月和 (b) 2010 年 1 月观测和 1~24 h、25~48 h、49~72 h 预报的逐小时时间序列

Fig. 2 The hourly time series of observations and forecasts with leading time 24, 48, and 72 h for (a) summer and (b) winter at Rudong

表 3 如东和南通两地观测和预报风速的对比
Table 3 The comparison between forecasted and observed data at Rudong and Nantong

		Nm1	Nm2	Nm3	Cr1	Cr2	Cr3	Rm1	Rm2	Rm3
2009 年	如东	71	65	59	0.59	0.47	0.30	2.66	2.88	2.48
7 月	南通	150	140	128	0.61	0.40	0.35	1.61	2.12	1.99
2010 年	如东	88	84	76	0.61	0.54	0.47	3.51	3.80	3.90
1 月	南通	153	147	133	0.72	0.64	0.58	2.39	2.59	2.73

注: Nm 表示观测和预报所一一对应的时间点数, Cr 表示观测和预报之间的相关系数, Rm 表示均方根误差 (单位: m/s)。它们后面的数字 1、2、3 分别表示提前 1、2、3 d 即 1~24 h、25~48 h、49~72 h 对应的预报值时间序列。如 Cr1 表示 1~24 h 预报风速与观测风速的时间序列相关系数。

但同样通过了置信度为 99.9% 的置信度检验, 而其均方根误差也要大一些, 为 2.88 m/s。

图 2b 是如东站 2010 年 1 月的时间序列。相对夏季的预报, 模式对于冬季的预报准确度要高一些, 1~24 h 的预报量值稍微有些偏大, 但是变化趋势与观测吻合地很好, 相关系数达到 0.61; 而 25~72 h 预报, 虽然预报风速仍然稍偏大, 但是预报风速的量值变化和实际风速的变化趋势也是非常一致的, 相关系数也比较高。从表 1 的统计数据来看, 预报结果相对实际观测值确实偏大, 无论是平均值还是最大值都偏大很多。同时, 表 3 的均方根误差也表明, 预报结果与观测结果的差值较大, 但是表 3 的相关系数表明, 模式 1~24 h 预报值与 2010 年 1 月的 88 个有效观测值之间的相关系数可以达到 0.61, 通过了 99.9% 的置信度检验, 均方根误差为 3.77 m/s; 25~48 h 的相关系数为 0.40, 虽然相比 1~24 h 的值要小, 但是也通过了信度为 99.9% 的置信度检验, 而且比 2009 年 7 月份的 25~48 h 预报结果要好一些。虽然 1 月的预报结果和实际观测值之间均方根误差都比较大, 比 7 月的均方根误差还要大, 但是相关系数相对 7 月较高, 因此可以做一个线性修正, 以 1~24 h 预报为例, 修正以后均方根误差可以缩小到 1.22 m/s (修正前为 3.51 m/s)。

为了进一步验证 WRF 模式对风速的预报效能, 我们分析了模式对距离如东气象站较近并有更多有效观测的南通气象站的预测结果。南通气象站为市级站, 观测的时间间隔为 3 h, 观测数据更为丰富一些。从图 3a 可以看出, WRF 模式对南通站 2009 年 7 月的风速也能较好地预报, 不管是提前 24 h、48 h 还是 72 h, 预报的风速值都比较接近实

际的风速值, 对风速的变化趋势也能较好地预报出来; 并且相比如东站的 7 月风速预报, 并没有出现明显的风速偏大的现象, 这点从表 2 的统计数据中也能看到。仔细观察也能发现, 在 7 月 1 日到 7 月 5 日之间以及 7 月 26 日到 7 月 30 日之间分别观测到有一次极大风速的过程, 但是预报的风速都略微偏小。相对而言 1~24 h 的预报结果更接近实际一些, 这一点在表 3 中有更明显的反映 (其中南通站预报结果为 3 h 平均以后再做相关和均方根误差分析)。1~24 h 预报的风速与实际观测的风速共有 150 个对应的时间点, 其相关系数为 0.61, 均方根误差为 1.61 m/s, 通过了置信度为 99.9% 的相关系数显著性检验; 而 25~48 h 和 49~72 h 预报风速和实际观测风速分别有 140 和 128 个对应的时间点, 相关系数分别为 0.40 和 0.35, 都通过了置信度为 99.9% 的置信度检验。均方根误差分别为 2.12 m/s 和 1.99 m/s, 可以看出, 相对于如东站, 模式预报结果和观测相比的相关系数更大, 而均方根误差更小。

图 3b 是 2010 年 1 月南通站观测风速的时间序列及其对应的模式预报时间序列。和 2009 年 7 月的情形类似, 模式都能较好地预报这个站点的风速值及其变化, 但与 7 月不同的是, 总体来说预报结果都有些偏大 (同见表 2)。根据表 3 可以知道, 3 个时段的预报结果与实际观测的风速之间的相关系数都较高, 因此如果做一个线性回归的修正, 那么预报结果与实际观测的风速将十分吻合。1 月和如东类似都比 2009 年 7 月的相关系数要大 (表 3), 说明模式对冬季风速的变化趋势预报准确度要比夏季高一些, 但是均方根误差比 7 月大一些, 说明对冬季风速变化幅度的预报要比夏季差一些。而和夏季类似, 南通 1 月预报和观测的相关系数都比如东站的对应时间段的相关系数要高, 同时均方根误差要小, 说明模式对这两个地方的预报能力是不一样的。

由于预报结果时间步长较短, 时间分辨率较高, 因此可以用来研究风速风向的日循环等特征。图 4 是模式预报 2009 年 7 月如东站风矢量的逐小时变化以及对应的月平均日变化图。由其中逐小时风矢量图可以看出, 如东站 7 月大部分时间为偏南风, 这是由于如东地处东亚季风区, 7 月基本受夏季风影响, 因此大部风时间为偏南风, 只是在少数时候受天气系统影响而吹偏北风。由于如东站同时

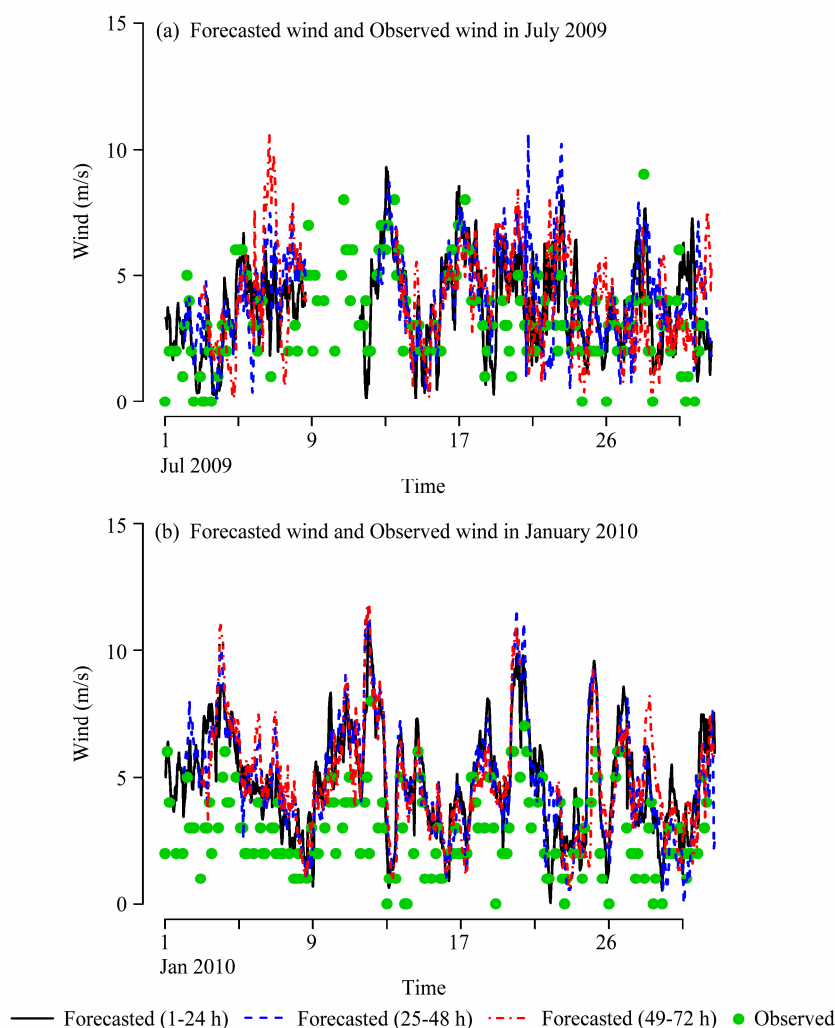


图3 同图2, 但为南通站

Fig. 3 Same as Fig. 2, but for Nantong

还位于海陆交界区, 因此海陆风的日夜交替也较为明显, 在月平均风矢量日变化中, 能够较为清楚地看到这种海陆风的变化。从协调世界时 06:00 也即是当地时间 14:00 开始, 随着陆地逐渐升温, 风由海洋吹向陆地, 海风逐渐占主导地位。而从协调世界时 18:00 即当地时间凌晨 02:00 开始, 随着陆地快速降温, 海洋表面温度高于陆地, 风由陆地吹向海洋, 陆风开始占主导地位。但这种海陆风的日变化在逐小时的图中并不明显, 这可能是由于局地天气系统的影响, 例如从 7 日到 11 日, 由于天气系统的影响, 风向基本保持为西南风, 并持续了 5 d 左右。总体来说, WRF 模式预报的风矢量日变化是比较合理的, 对风电场的实际应用来说是比较实用的。

3.2 区域资料比较分析

以上探讨了如东和南通两个测站风速的数值模式预报准确度, 总体看来在这两个气象站附近数

值模式可以很好地预报其风速, 那么它们周边的大范围内又是怎样的呢? 这里选取模式三层嵌套中的中间一层即 d02 作为研究区域。首先分析一下再分析资料中风速的平均分布。图 5a 是 2009 年 7 月 NCEP 再分析资料中风速的平均值, 而图 5b 是对应的 WRF 模式 1~24 h 预报值。由图 5a 可以看到, 整个地区风速基本上呈梯度分布, 东南方向海面风速较大, 而西北内陆风速则要小一些, 而且在海岸线附近可以清楚地看到一条风速大小的分界线。在浙江、福建和江西等省交界的地方也能清楚地看到一个风速相对较小的地方。通过对比再分析资料和模式预报资料可以发现, 模式预报的风速总体较实际风速偏大一些, 尤其是在海面和内陆, 而在海岸线附近的海面上, 预报结果与观测值则比较接近。预报风速在整个区域内总体偏大, 在福建东南的海面上偏大则特别明显, 而山东半岛以西的内陆地区

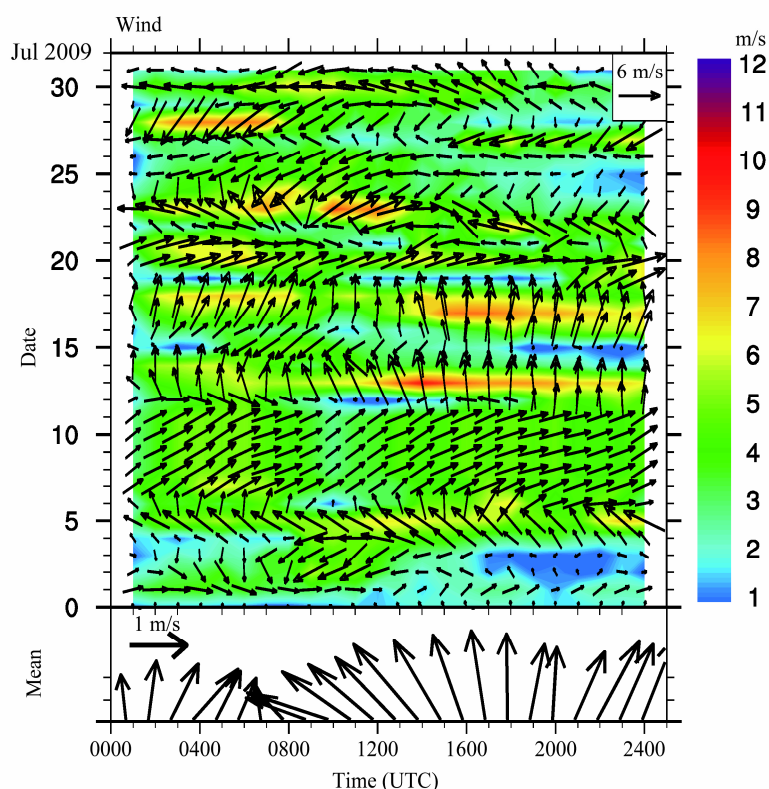


图4 模式1~24小时预报如东站2009年7月逐小时风矢量日变化及其月平均日变化

Fig. 4 Model forecasted hourly wind vectors at Rudong station in July 2009

误差则相对较小。从图 5c 预报风速与再分析资料之间的时间相关系数的空间分布图可以看到,在整个地区预报都较为准确,相关系数都比较大,特别是在海面上,相关系数达到了 0.70 以上,通过了置信度为 99% 的统计检验;而沿海地区以及较为内陆的地区(西北方向)相关系数也较大。相比较之下,内陆和沿海之间的区域相关系数比较低,尤其是江西、浙江和福建 3 省交界的地区,相关系数非常低,基本在 0.30 以下,甚至没有通过置信度 95% 的置信度检验。这个地区基本上是丘陵地带,山脉纵横、河网众多,地形特别复杂,下垫面情况复杂多变,因此在夏天,各种小尺度的天气系统变化特别频繁,模式不能较好地描述这些复杂下垫面下的小尺度系统,导致模式未能较好地预报这个地区的风速。从月平均风速的再分析和模式预报结果对比可以看到,模式基本上能较好地预报整个地区的风速,但是基本上预报风速仍然整体偏大。而从再分析资料和预报结果的时间序列相关系数的空间分布图也可以看出模式基本能较好地预报整个区域的风速;但是这种预报能力是有地区差异的,海上预报效果最好,沿海和内陆深处次之;这种情况的

原因和下垫面情况以及地理环境极为相关,当然也和夏季的天气活动情况相关极大。

图 6a 和 6b 分别是 2010 年 1 月的再分析月平均风速值和对应的模式 1~24 h 预报的月平均风速值。和夏季的情况类似,月平均风速的分布也是从海上到内陆依次递减,而且预报风速整体偏大,尤其是在东南海面上与山东、江苏两省沿海地区较为明显。从预报风速与再分析资料时间相关系数的空间分布来看(图 6c),整个海洋上与大部分陆地上的相关系数都相当之高,超过了 0.70,这是远远高于夏季的相关系数的;只有少部分地区的相关系数比较低,尤其是在浙闽丘陵和武夷山一带,相关系数甚至低于 0.3,虽然这个最低值和 2009 年 7 月的差不多,但是范围则要小得多。说明虽然冬季山区风速依然比较难于预报,但是相比夏季的小尺度对流活动,冬季的大尺度气团运动要更容易预报一些。

4 总结与讨论

通过以上的研究可以发现,简单配置的三重双

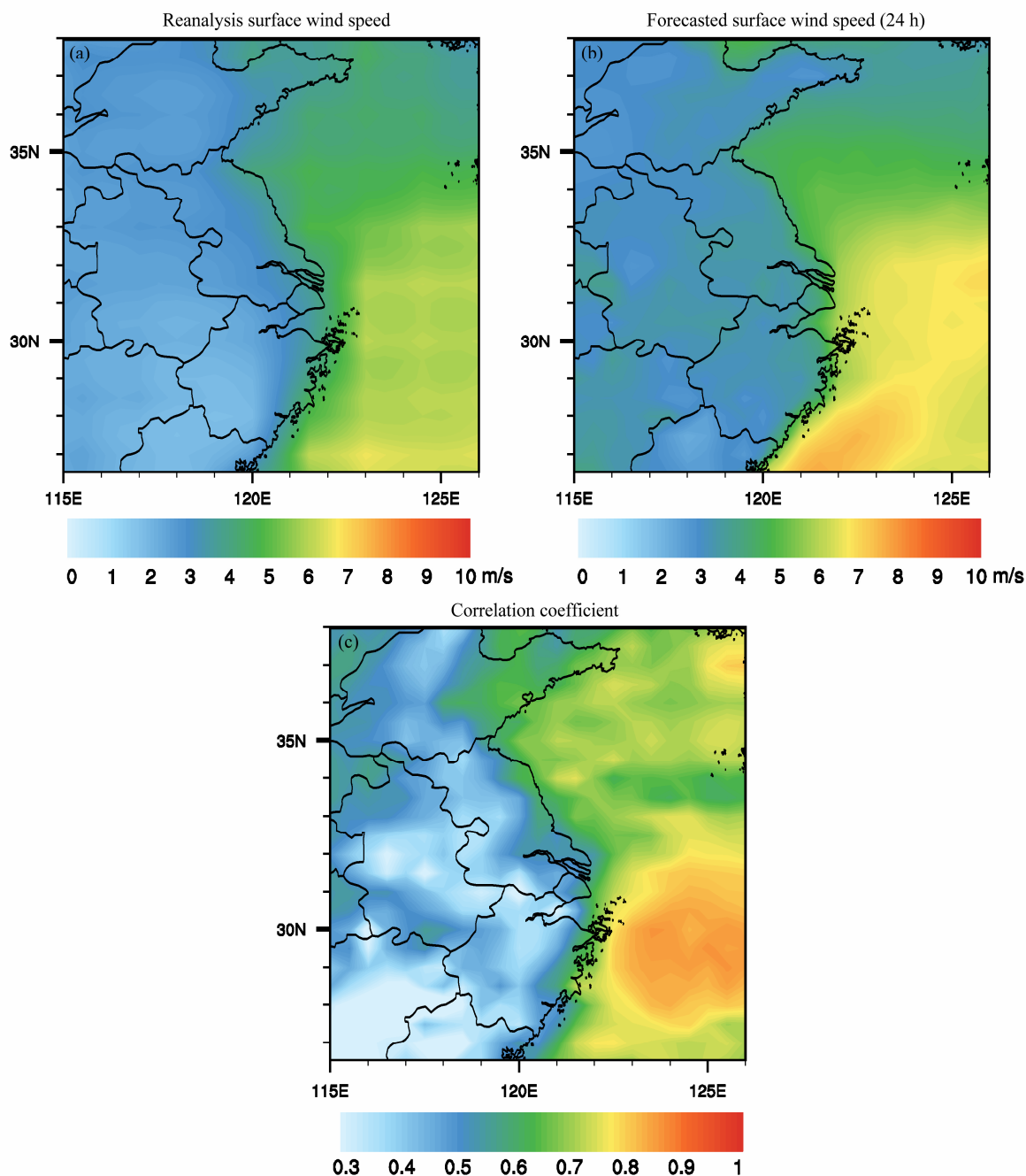


图5 2009年7月模式中间一层(d02)区域对应的(a)再分析资料和(b)1~24小时预报的风速月平均值,以及(c)风速预报资料与再分析资料之间6h序列时间相关系数的空间分布

Fig. 5 The monthly average wind speed in July 2009 from (a) reanalysis data and (b) WRF model forecasting, and (c) their correlation coefficient space distribution

向嵌套 WRF 模式能较好地预报如东和南通站甚至大部分沿海地区以及较为内陆地区的提前 1~72 h 的风速,也能较好地预报对应风速的变化趋势等。但是由于下垫面的复杂性以及小尺度天气系统的影响加上阵风、湍流等现象本身的复杂性,所以预报的精度也会受到一些影响,不同季节和不同地

方风速预报的准确度是不一样的。例如大部分地区的预报风速偏大,冬季预报风速相对夏季更为准确,沿海地区的风速基本上能较好地预报,山区的风速几乎不能很好地预报等等。总体来说,WRF 模式对沿海风电场的风速中短期预报是具有一定技巧的,值得进一步的细化研究。但是由于在实际

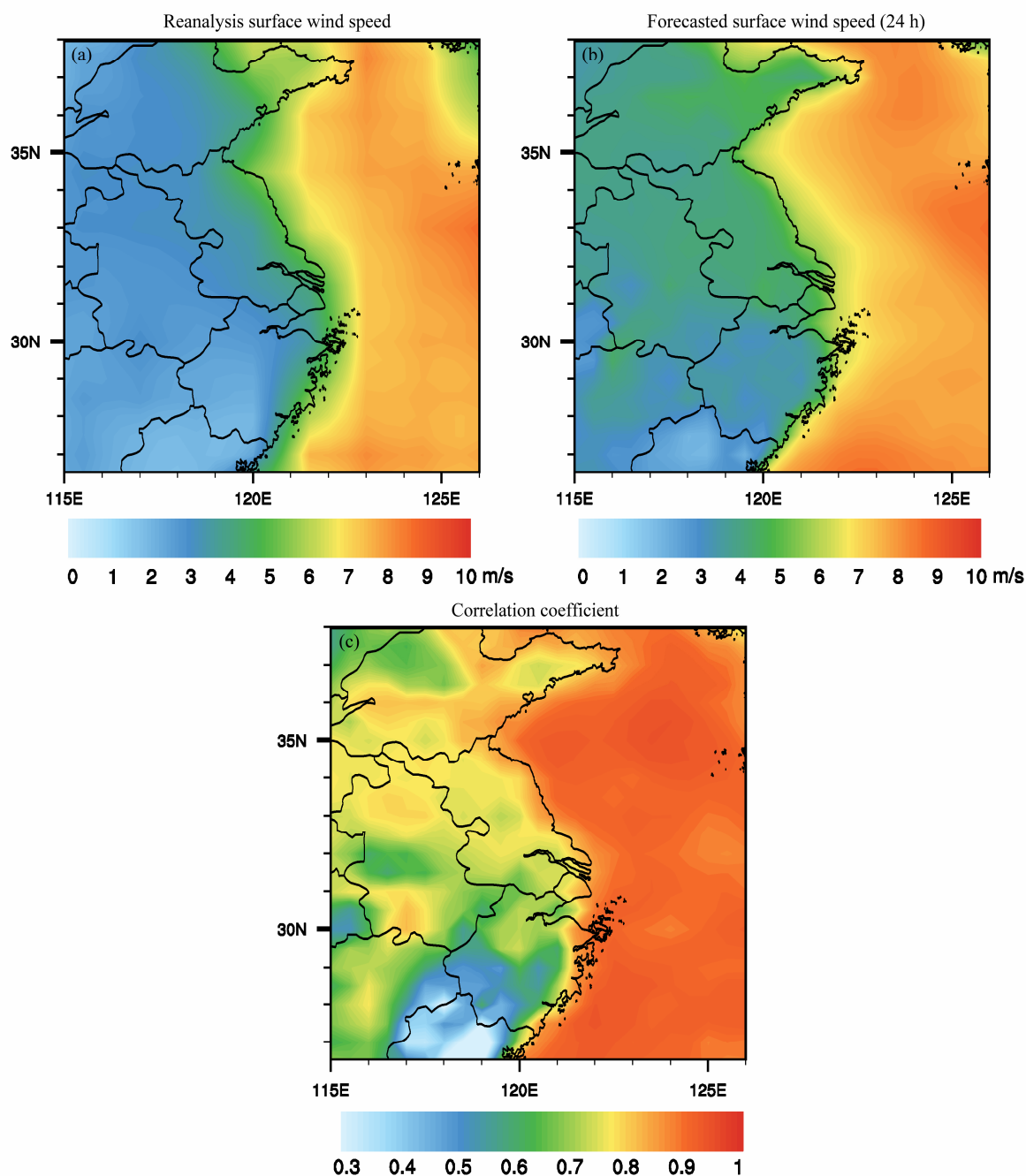


图6 同图5, 但为2010年1月

Fig. 6 Same as Fig. 5, but in January 2010

的应用中,所要求的预报风速高度应该是实际风电场所在的高度,而不是10 m表面风;实际风电场的尺度更小,对模式分辨率会要求更高;而且实际应用中要求的短期甚至临近预报只有中尺度气象模式也是不能胜任的。因此,在未来的研究与实际应用中,可以考虑:

(1) 采用更高的分辨率,更加细致地刻画地形以及下垫面的属性,详细描述风电场内及其周边的

环境因子,以更准确地预报风电场内不同位置的风速差异,并采用风电场的高时空分辨率资料进行更详细的验证分析。

(2) 选择适当的边界层参数化方案,并相应提高其垂直方向的分辨率,甚至采用多种边界层参数化方案集合的方式,以提供不同高度的风速预报。

(3) 采用数据同化的方法,整合多普勒雷达、风廓线雷达以及风电场本身的加密观测等资料,提高

模式的预报精度。

(4) 可以采用与统计方法如时间序列处理的相关方法、随机过程处理的相关方法等相结合, 提供更短时间尺度的预报。

(5) 采用风电场相关设备和过程参数化的方法, 直接输出功率预报, 为电力调度等系统提供更直观更详细的参考依据; 并考虑风电场本身布局等对风场环流场的影响等。

参考文献 (References)

- Bailey B M, Brower J Z. 1999. Short-term wind forecasting: development and application of a mesoscale model [C]. // European Wind Energy Conference. Nice. France. 1062–1065.
- Bessa R J, Miranda V, Botterud A, et al. 2011. 'Good' or 'Bad' wind power forecasts: A relative concept [J]. *Wind Energy*, 14 (5): 625–636.
- 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.
- 高荣珍, 杨育强, 孙桂平. 2007. 基于 MM5 的青岛近海风速精细化预报 [J]. *海洋湖沼通报*, 29 (4): 30–36. Gao Rongzhen, Yang Yuqiang, Sun Guiping. 2007. Study on refined wind speed forecast for Qingdao offshore zones [J]. *Transactions of Oceanology and Limnology (in Chinese)*, 29 (4): 30–36.
- Giebel G, Badger J, Perez I M, et al. 2006. Short-term forecasting using advanced physical modelling—the results of the ANEMOS project [C]. // European Wind Energy Conference (EWEC). Athens, Greece.
- Giebel G, Brownsword R, Kariniotakis G, et al. 2011. The State-of-the-art in short-term prediction of wind power: A literature overview [R]. ANEMOS. plus.
- 谷兴凯, 范高峰, 王晓蓉, 等. 2007. 风电功率预测技术综述 [J]. *电网技术*, 31 (增刊 2): 335–338. Gu Xingkai, Fan Gaofeng, Wang Xiaorong, et al. 2007. Summarization of wind power prediction technology [J]. *Power System Technology (in Chinese)*, 31 (Supplement 2): 335–338.
- 贺志明, 吴琼, 陈建萍. 2010. 沙岭风场风速预报试验分析 [J]. *资源科学*, 32 (4): 656–662. He Zhiming, Wu Qiong, Chen Jianping. 2010. An experimental analysis of wind speed prediction in Shaling wind field [J]. *Resources Science (in Chinese)*, 32 (4): 656–662.
- Jursa R, Rohrig K. 2008. Short-term wind power forecasting using evolutionary algorithms for the automated specification of artificial intelligence models [J]. *International Journal of Forecasting*, 24 (4): 694–709.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The Ncep/NCAR 40-year reanalysis project [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77 (3): 437–471.
- Kariniotakis G, Halliday J, Brownsword R, et al. 2006. Next generation short-term forecasting of wind power—overview of the ANEMOS project [C]. // European Wind Energy Conference, EWEC 2006. Athens, Greece.
- Lange M, Focken U, Heinemann D. 2002. Previento-regional wind power prediction with risk control [C]. // Proceedings of the World Wind Energy Conference. Berlin.
- Lei M, Luan S Y, Jiang C W, et al. 2009. A review on the forecasting of wind speed and generated power [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13 (4): 915–920.
- 凌铁军, 张蕴斐, 杨学联, 等. 2004. 中尺度数值模式 (MM5) 在海面风场预报中的应用 [J]. *海洋预报*, 21 (4): 1–9. Lin Tiejun, Zhang Yunfei, Yang Xuelian, et al. 2004. The application of MM5 model to predict sea surface wind field [J]. *Marine Forecasts (in Chinese)*, 21 (4): 1–9.
- Marti I, Kariniotakis G, Pinson P, et al. 2006. Evaluation of advanced wind power forecasting models—results of the ANEMOS project [C]. // European Wind Energy Conference, EWEC 2006. Athens, Greece.
- Michalakes J, Dudhia J, Gill D, et al. 2005. The Weather Research and Forecast (WRF) model: software architecture and performance [R]. Proceedings of the Eleventh ECMWF Workshop on the Use of High Performance Computing in Meteorology. W. Zwiefelhofer and G. Mozdzyński: 156–168.
- Nielsen T S, Madsen H. 2000. WPPT—a tool for wind power prediction [C]. // Proceedings of Wind Power for the 21st Century. Kassel, Germany.
- Nielsen T S, Madsen H, Nielsen H A, et al. 2006. Short-term wind power forecasting using advanced statistical methods [C]. // The European Wind Energy Conference, EWEC. Athens, Greece.
- 潘长明, 叶卓文. 1994. 利用 GMDH 方法作风速预报 [J]. *气象*, 20 (5): 33–35. Pan Changming, Ye Zhuowen. 1994. GMDH for forecasting wind-velocity [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 20 (5): 33–35.
- Pinson P, Chevallier C, Kariniotakis G. 2004. Optimizing benefits from wind power participation in electricity market using advanced tools for wind power forecasting and uncertainty Assessment [C]. // Proc. of the 2004 European Wind Energy Association Conference, EWEC'04. London, United Kingdom.
- Pinson P, Siebert N, Kariniotakis G. 2003. Forecasting of regional wind generation by a dynamic fuzzy-neural networks based upscaling approach [C]. // European Wind energy and Conference. Madrid: Spain.
- 戚双斌, 王维庆, 张新燕. 2009. 基于支持向量机的风速与风功率预测方法研究 [J]. *华东电力*, 37 (9): 1600–1603. Qi Shuangbin, Wang Weiqing, Zhang Xinyan. 2009. Wind speed and wind power prediction based on SVM [J]. *East China Electric Power (in Chinese)*, 37 (9): 1600–1603.
- 戚双斌, 王维庆, 张新燕, 等. 2010. 基于 SVM 的风速风功率预测模型 [J]. *可再生能源*, 28 (4): 25–32. Qi Shuangbin, Wang Weiqing, Zhang Xinyan, et al. 2010. Model building for wind speed and wind power prediction based on SVM [J]. *Renewable Energy (in Chinese)*, 28 (4): 25–32.
- Ramirez-Rosado I J, Fernandez-Jimenez L A, Monteiro C, et al. 2009. Comparison of two new short-term wind-power forecasting systems [J]. *Renewable Energy*, 34 (7): 1848–1854.
- Sideratos G, Hatzigiargyriou N D. 2007. An advanced statistical method for wind power forecasting [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 22 (1): 258–265.
- Skamarock W C, Klemp J B, Dudhia J, et al. 2008. A description of the advanced research WRF Version 3 [R]. NCAR Technical Note. Boulder, Colorado.
- 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. Sun Chuanyong, Tao Shuwang, Luo Yong, et al. 2009. The application of high resolution mesoscale model in wind speed forecasting in wind farm [J]. Acta Energiae Solaris Sinica (in Chinese), 30 (8): 1097–1099.

涂小萍, 赵声蓉, 曾晓青, 等. 2008. KNN 方法在 11~3 月中国近海测站

日最大风速预报中的应用 [J]. 气象, 34 (6): 67–73. Tu Xiaoping, Zhao Shengrong, Zeng Xiaoqing, et al. 2008. Application of an updated KNN method to daily maximum wind forecast for coastal weather station from November to March [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 34 (6): 67–73.