

中尺度 WRF 模式在西北西部地区 低层风场模拟中的应用和检验

王澄海¹, 胡菊¹, 靳双龙¹, 冯双磊², 刘纯²

(1. 兰州大学大气科学学院, 半干旱气候教育部重点实验室,
甘肃 兰州 730000; 2. 中国电力科学研究院, 北京 100192)

摘要:通过 WRF 模式对西北地区 1、4 月份风速的模拟, 检验了大气数值模式的模拟性能和误差大小。结果表明, WRF 模式在风场模拟上具有较好的性能, 在地面加热较强、增温较快、风速较大的 4 月份模拟效果要好于强风频发但风速较 4 月份小的 1 月份; 4 月份 10~70 m 各高度上 48 h 内的平均相对误差在 10% 以下, 相关系数 > 0.80, 通过 99% 的置信度; 1 月份各高度 48 h 的平均相对误差在 20% 以内, 但二者呈负相关, 相关系数绝对值 > 0.30, 通过 99% 的置信度; 在选取的 2 个模拟时段内, 在阵性大风出现的时段模拟值明显小于观测值。意味着风作为高层动量下传、低层地形和热力作用共同的产物, 在西北地区植被稀疏、地形复杂的环境下, 模式边界层的参数化是关键。

关键词: WRF 模式; 模拟误差; 中国西北; 风场预测; 风电功率

中图分类号: P435+.1

文献标识码: A

引言

在风能资源的应用中, 由于风能的间歇性和不连续性, 在以分为单位的时间尺度上, 很难准确预测风速和风向, 也就很难知道风电场在 1 min 后所发的电量; 从而使风能转换系统与电力网络的整合成为短期电力综合预测的一个关键而又重要的问题^[1]。目前, 我国风电装机比例较高的东北电网、内蒙古西部电网调峰问题已经成为制约风电发展的主要问题^[2-6]。

到目前为止, 对风的预测方法主要分为 2 类: 一类是寻求风和其他气象要素之间的线性和非线性关系, 另一类是分析风的时间序列, 或风的概率分布函数来建立模型预测。二者都是基于概率和数理统计的预测方法。现代的统计方法如卡尔曼滤波法 (Kalman - filters)^[7]、时间序列法 (ARMA)^[8]、人工神经网络法 (ANN)^[9-10]、模糊逻辑法 (Fuzzy Logic) 等^[11], 也是属于统计学的范畴。而统计学方法的内涵是对已有规律的外延, 回报准确率高, 预报准确率低。同时, 以统计为基础的预测模型的预报存在有

效预报时效较短的缺点, 而借助于数值气象预报则可有效延长预测时间, 目前的数值模式在 72 h 内的预测水平达到了 80% 以上^[12]。

风作为大气运动的产物, 必然是一个集地形、高低层天气系统相互作用、地面非绝热加热、海陆温差等物理过程的综合产物。其最终的预测途径必然是以求解大气运动的物理方程组为基础的数值天气预报; 风电预测系统准确率的提高, 最终也决定于数值预报的准确率的提高。因此, 未来风电预测系统准确率的提高依赖于数值天气预报系统的发展和完善。

目前, 世界各国的数值天气预报已成为日常天气预报的基本手段。数值天气预报的短期 (1~3 d) 预报水平得到了显著提高, 稳定性有了基本的保证。因此, 在风电发展较为成熟的国家, 如丹麦里索国家实验室的 Prediktor、德国的 SOWIE 系统和 Priviento、加拿大的中尺度气象模式和大尺度气候背景场分类方法的风能资源评估数值模式系统 WEST 模型、英国以及美国 Ewind 模型等^[13], 已经在数值天气预报的基础上研发出各自用于风电场功率短期预测的系

收稿日期: 2011-03-28; 改回日期: 2011-04-27

基金项目: 公益性行业 (气象) 科研专项 (GYHY201006035), 国家科技支撑计划“风光储输示范工程关键技术研究”共同资助

作者简介: 王澄海, 男, 博士, 教授, 主要从事数值模拟及气候变化研究. E-mail: wch@lzu.edu.cn

统并在业务中使用,产生了显著效益,也奠定了未来风电功率预测的基础和方向。

风电功率预测系统基本上都使用气象部门提供的数值气象预报结果作为预测系统的输入,尤其是欧盟资助 7 个国家 23 个机构参加的 ANEMOS 项目。ANEMOS 的前端是预报气象要素场的数值模式,模式的产品用现代统计方法释用,即选用非线性神经网络等方法进行训练迭代,将物理和统计 2 种模型结合到一起。该项目建成后将成为既可以适用于陆上,也可以适用于海上风电场短期功率预测的方法和工具,以优化风电场的储能系统和需要的备用容量。

在我国,开展的风能资源评估和风能资源详查工作中,使用了中尺度模式 MM5 和 MC2^[14]。均在 MM5 的基础上对区域的风能资源进行了评估,基于中尺度模式 MM5 对风能资源可以得到较为详细的分布。但是,仍然存在着 2 方面的工作需要进一步深入:一是中尺度模式的发展趋势,WRF 已替代了 MM5,而 WRF 模式对风的模拟能力如何需要大量的试验检验;其次风作为边界层内的物理过程,具有较高的瞬间性、阵发性和区地化等显著特点,通过风速模拟误差的分析,寻找并发展模式边界层参数化具有基础的理论意义。二是 WRF 模式作为发展比较成熟的中尺度天气预报模式,已成功地运用于短期天气预报业务并取得了显著成绩。但是,如何运用于风速(能)的预测并满足业务需求,需要对 WRF 在不同的下垫面和地形条件下试验检验,分析误差大小的规律和可能原因。

Storm Brandon 等比较了 WRF 的不同参数化方案对低空急流进行模拟,发现各种参数化方案都能模拟出低空急流的形式,却各有所长,可用于风电功率的预测^[15]。研究也表明,多层次嵌套和复杂地形下较细分辨率^[16-17]的设置对风速和风电功率有较好的预测效果。在我国,数值模式 WEST(Wind Energy Simulation Toolkit)^[13]、MM5^[16-17]、TAPM(The Air Pollution Model)^[18-19]、WRF(Weather research model)^[17,20]、RAMS(Regional Atmospheric Modeling System)^[21]等数值模式都用于风能资源评估与预测。位于我国西北地区的甘肃、新疆等地,气候干燥,植被稀少,风速大而且每年中大风日数较多,具有丰富的风能资源,是发展风力发电的重要地区,也是风电功率预测难度较大的地区。如已有的研究表明地面非绝热加热旺盛,是产生大风的重要条

件^[22-23]。

为了探索中尺度数值模式 WRF 在风电预测中的可行性,我们将 WRF 模式应用于我国西北地区,分析我国西北地区风的变化规律及特征,检验中尺度数值模式 WRF 在河西地区风速的模拟能力。

1 模式简介及资料

WRF(Weather Research Forecasting)是由美国多个研究部门及大学共同参与与开发研究的新一代中尺度预报模式。该模式中包括了如辐射过程、边界层参数化过程、对流参数化过程、次网格湍流扩散过程以及微物理过程等物理过程,是一个完全可压的非静力模式,控制方程组都写为通量形式。网格采用有利于在高分辨率模拟中提高准确性的 Arakawa C 格点。地形追随混合 6 垂直坐标,动能、熵、动量守恒,2 阶有限差分格式。质量坐标框架(ARW, EM)采用地形追随非静力气压垂直坐标,Arakawa C-grid,3 阶 Runge-Kutta 显式时间分离差分方案,5 阶或 6 阶平流差分方案,质量、动量、干熵及其标量守恒,应用通量形式的诊断方程。WRF 模式系统具有可移植、易维护、可扩充、高效率、方便等诸多特性,是目前最为先进的中尺度数值天气模式,目前已经在世界大多数国家的天气预报业务和相关的业务部门及科研单位广泛应用。

在本研究中,边界资料取自 NCEP 每 6 h 一次、分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 的再分析资料。模式进行 3 重嵌套,相应的水平网格距分别为 45 km、15 km、5 km,垂直方向从 1 000 hPa 到 100 hPa 分为 35 层,最外层积分步长为 120 s,每 15 min 输出一次模拟结果,积分时长为 96 h。

通过天气气候分析,在甘肃河西地区,由于降水量少、气候干燥,下垫面植被稀少,同时综合考虑气候背景和垫面的陆面特征,在反复试验和诊断的基础上,确定了模拟的区域(Domain)如图 1 所示。通过敏感性试验和模拟结果比较,采用以下的物理参数化方案:微物理过程方案为 WSM3 类简单冰方案,长波辐射为 RRMT 方案,短波辐射方案为 Dudhia 方案,边界层方案为 YSU 方案。

风速的观测资料来自于我国西北甘肃河西地区某风电场的风塔观测数据。该风塔垂直设置 4 层风速自动观测系统,分别为 10 m、30 m、50 m、70 m,每 10 min 平均取样。观测时间为 1 a,本文取其中 2 个月和模拟结果对比分析。风电场位于祁连山西

段,河西走廊平原及马鬃山附近,由于南北高中间低的地形特点,加之地形的狭管作用对风的加速作用,该地既是风电场的理想之地,但也增大了对该地区风速模拟的难度。

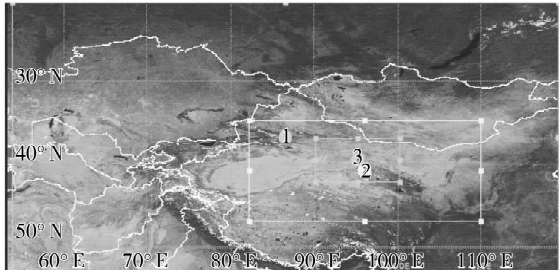


图1 模拟试验的范围(1,2,3
分别代表3重嵌套的网格范围)

Fig. 1 The domain of simulation experiment
(1,2,3 are nest number)

2 模拟结果的分析比较

对于一个固定地点,由于风速和风向具有季节性。受到环流背景和天气系统的影响也不一致。因此,为检验 WRF 模式在不同季节的模拟性能,我们对甘肃河西地区风速大、变化剧烈的4月份,相对4月份风速较小的1月份中随机选择4 d(96 h)进行风速模拟分析。从气候背景来看,1月份甘肃河西地区地面受冷高压控制,高空为新疆脊前的西北气流控制,由于主要受冷空气的东进南下的影响,河西地区的风速较大;而4月份,由于气温开始回升,高空环流处于经向环流向纬向环流调整阶段,且地面升温较快,因此,近地层风速往往较大,也是大风和沙尘暴灾害频发的时段,如2009年4月22~23日的沙尘暴等。

对于风电功率预测而言,低层风速,特别是风机轮毂高度(50~70 m)的风速尤为重要。低层风速模拟的准确程度直接影响风电功率预测的精度,这也是本文研究的重点。观测资料表明,1月份70 m的平均风速为6.1 m/s,4月份70 m的平均风速为10.1 m/s。

图2给出了2009年1月2~6日观测和模拟4个高度(10 m,30 m,50 m,70 m)的风速比较。从图中可以看出,在模式运行稳定后,风速的观测和模拟基本吻合。综合表1,平均而言,10~70 m各高度24 h、48 h的平均相对误差均在20%以下,并且在10 m和30 m处误差值为正,在50 m和70 m误差为负,相对误差值随高度减小,高层模拟值偏小;

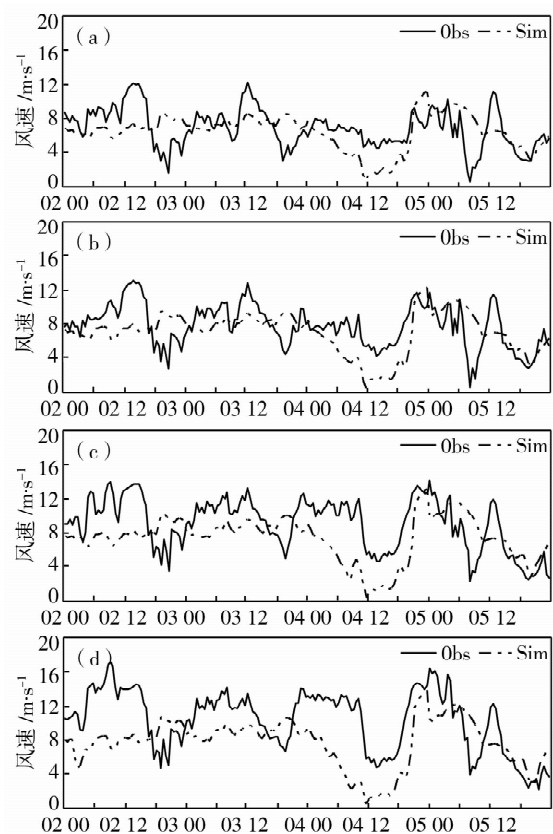


图2 观测和模拟的1月2~6日各高度上的风速
(a)10 m, (b)30 m, (c)50 m, (d)70 m

Fig. 2 The wind speed of observation and simulation
on Jan. 2-6 at different levels

(a)10 m, (b)30 m, (c)50 m, (d)70 m

72 h的模拟结果则表明,尽管用于平均的时间尺度较长,但除了10 m外其余各高度层的平均相对误差明显增大。从图2也可以看出,对72 h模拟效果较差,也说明48~72 h的模拟效果比前48 h差;而在96 h的平均相对误差虽然较小,但相对均方根误差却有所增大,模式模拟能力减弱。从表2可以看出,48 h的相关系数在-0.31~-0.44范围内变化,尽管通过了99%的置信度,但模拟值与实际值呈反相关,也即在风速较大时模拟值偏小,风速小模拟值偏大。除过模式的性能外,观测值是10 min的平均值,而模拟值是瞬时值。在模拟时段内,由于4个时段出现了阵性大风过程,例如1月3日02~12时,1月3日22时至4日10时,模拟结果都偏小,没能很好地再现出实际的风速变化。尤其在50 m,70 m高度上(图2c,d)可以明显地看出,时间尺度在1~3 h的阵风较多,而模式不能很好地再现出这种变化。表明在西北植被稀疏、降水偏少、空气干燥的干

旱区,模式采用目前的参数化方案的模拟结果在阵性大风时段出现偏小的系统误差,需要对边界层参

数化方案深入研究。综上所述也可以看出,该地的1月份风电功率预测的有效时段在48 h内。

表1 1月2~6日观测和模拟的风速相对误差

Tab. 1 The relative error of wind speed between observation and simulation on Jan. 2-6

| | | 24 h | | | 48 h | | | 72 h | | | 96 h | | |
|------|-----|-------|------|-------|-------|------|-------|-------|------|-------|-------|------|-------|
| | | 观测 | 模拟 | 相对误差% | 观测 | 模拟 | 相对误差% | 观测 | 模拟 | 相对误差% | 观测 | 模拟 | 相对误差% |
| 10 m | 平均值 | 7.70 | 6.85 | 11.61 | 7.52 | 7.13 | 11.31 | 7.14 | 6.29 | -2.92 | 6.83 | 6.41 | 13.92 |
| | 均方根 | 2.67 | 3.26 | 42.34 | 2.39 | 2.74 | 36.44 | 2.13 | 2.74 | 38.38 | 2.32 | 2.75 | 40.26 |
| 30 m | 平均值 | 8.53 | 7.56 | 2.35 | 8.66 | 7.87 | 0.45 | 8.27 | 6.91 | -12.4 | 7.85 | 7.04 | 3.63 |
| | 均方根 | 2.59 | 3.28 | 38.45 | 2.24 | 2.76 | 31.87 | 2.19 | 2.91 | 35.19 | 2.47 | 2.89 | 36.82 |
| 50 m | 平均值 | 9.94 | 8.05 | -7.55 | 10.08 | 8.37 | -9.01 | 9.89 | 7.32 | -22.6 | 9.17 | 7.47 | -9.16 |
| | 均方根 | 2.82 | 3.97 | 39.94 | 2.39 | 3.39 | 33.63 | 2.54 | 3.90 | 39.43 | 3.04 | 3.67 | 40.02 |
| 70 m | 平均值 | 11.42 | 8.17 | -17.9 | 11.26 | 8.60 | -16.4 | 11.04 | 7.48 | -29.3 | 10.31 | 7.64 | -17.7 |
| | 均方根 | 3.27 | 5.24 | 45.88 | 2.71 | 4.31 | 38.28 | 2.96 | 4.90 | 44.38 | 3.58 | 4.50 | 43.65 |

表2 1月2~6日观测和模拟值的相关系数

Tab. 2 The correlation coefficient between observed and simulated wind speed on Jan. 2-6

| 高度 | 24 h | 48 h | 72 h | 96 h |
|------|--------|--------|-------|-------|
| 10 m | -0.52* | -0.31* | 0.24* | 0.24* |
| 30 m | -0.49* | -0.33* | 0.38* | 0.35* |
| 50 m | -0.58* | -0.46* | 0.35* | 0.34* |
| 70 m | -0.48* | -0.44* | 0.33* | 0.38* |

注: *表示通过99%的信度检验

图3给出了2009年4月26~30日观测和模拟的4个高度(10 m, 30 m, 50 m, 70 m)的风速比较。图4给出了1月份和4月份观测的10 min平均风速 > 15 m/s 的频率分布,和1月份的情况比较而言,4月份的模拟结果明显要好一些(表3,表4)。在10~70 m高度范围,24 h模拟和观测的平均相对误差在-20%~-10%之间,48 h的平均相对误差在10%以内,72 h的误差范围在-10%~10%之间。72 h相对48 h各高度的误差均有加大。同样,96 h的相对误差的平均值由于平均的时间尺度较长,虽然和72 h的误差保持相当的水平,但是从表3可以看出,其对应的均方根误差及相对均方根误差都有较为明显的增大,表明在72~96 h时段预报效果变差。我们也注意到,模式开始的前24 h的预报效果比其后的24~48 h差,主要原因是在26日的12~15时连续出现风速 > 15 m/s 的大风而模拟结果并没能很好的再现,导致各高度处的误差较大。意味着如果出现瞬间风速较大的时段,其模拟误差

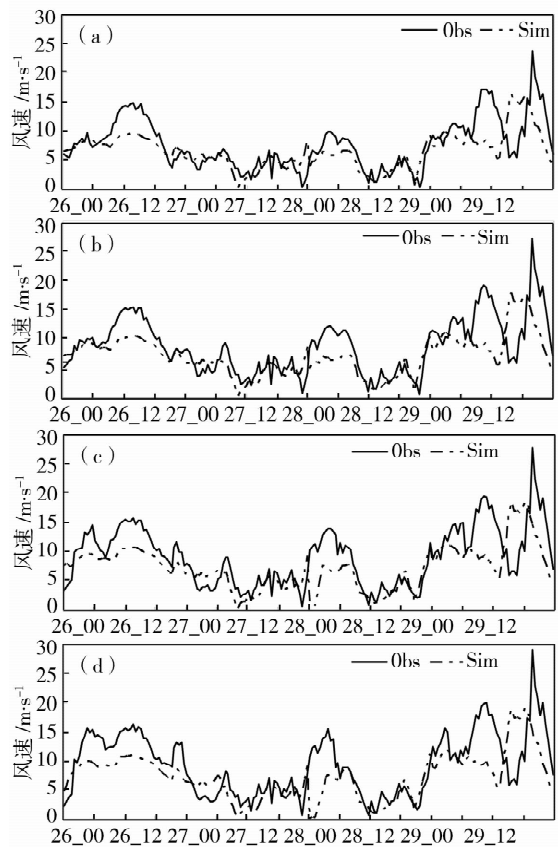


图3 观测和模拟的4月26~30日各高度上的风速 (a)10 m, (b)30 m, (c)50 m, (d)70 m

Fig. 3 The wind speed of observation and simulation on April 26-30 at different levels

(a)10 m, (b)30 m, (c)50 m, (d)70 m

也就较大。和图2的1月份相比,时间尺度在1~3 h的大风过程相对较少,风速的变化相对比较平稳。模拟和观测相关分析结果表明(表4),48 h的模拟

和观测值之间的相关系数 > 0.80,通过 99% 的置信度。由此也看出,4月份的有效模拟时段在 48 h 左右。

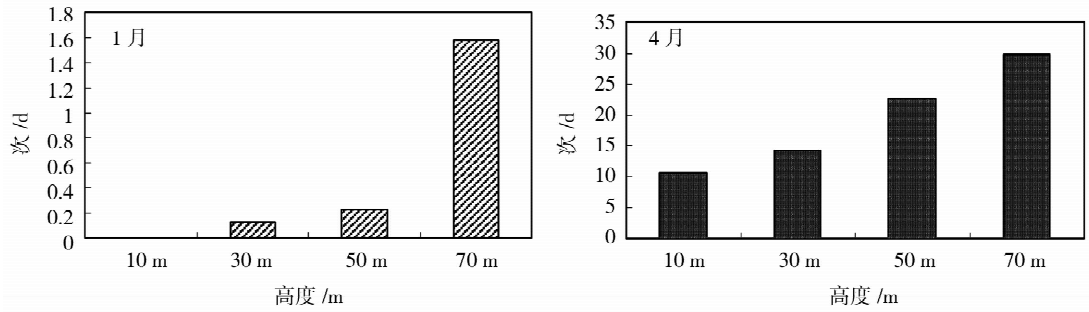


图4 1月、4月各高度风速 > 15 m · s⁻¹/d 的频率分布

Fig. 4 The frequency of wind speed more than 15 m · s⁻¹/ day in Jan. and April at different levels

表3 4月26~30日观测和模拟的风速相对误差

Tab. 3 The relative error about wind speed of observation and simulation on April 26 - 30

| | | 24 h | | | 48 h | | | 72 h | | | 96 h | | |
|------|-----|-------|------|-------|------|------|-------|------|------|-------|------|------|-------|
| | | 观测 | 模拟 | 相对误差% | 观测 | 模拟 | 相对误差% | 观测 | 模拟 | 相对误差% | 观测 | 模拟 | 相对误差% |
| 10 m | 平均值 | 9.34 | 7.73 | -10.6 | 6.84 | 6.06 | 9.55 | 6.30 | 5.53 | 11.11 | 7.65 | 6.53 | 7.00 |
| | 均方根 | 3.20 | 2.74 | 29.34 | 3.54 | 2.32 | 33.92 | 3.38 | 2.18 | 34.60 | 4.24 | 3.47 | 45.36 |
| 30 m | 平均值 | 10.32 | 8.48 | -14.0 | 7.61 | 6.55 | -1.82 | 7.23 | 5.97 | -2.34 | 8.71 | 7.10 | -3.47 |
| | 均方根 | 2.90 | 2.63 | 25.48 | 3.64 | 2.36 | 31.01 | 3.68 | 2.51 | 34.72 | 4.64 | 3.94 | 45.24 |
| 50 m | 平均值 | 11.36 | 8.96 | -14.8 | 8.15 | 6.86 | -1.58 | 7.76 | 6.14 | -7.74 | 9.24 | 7.37 | -7.13 |
| | 均方根 | 3.08 | 3.23 | 28.43 | 4.10 | 2.73 | 33.50 | 4.13 | 3.19 | 41.11 | 4.96 | 4.38 | 47.40 |
| 70 m | 平均值 | 12.23 | 9.12 | -17.9 | 8.53 | 6.94 | -3.11 | 7.92 | 6.18 | -7.11 | 9.45 | 7.48 | -6.56 |
| | 均方根 | 3.34 | 3.83 | 31.32 | 4.54 | 3.11 | 36.46 | 4.46 | 3.59 | 45.33 | 5.22 | 4.65 | 49.21 |

表4 4月26~30日观测和模拟值的相关系数

Tab. 4 The correlation coefficient between observation and simulation wind speed on April 26 - 30

| 高度 | 24 h | 48 h | 72 h | 96 h |
|------|-------|-------|-------|-------|
| 10 m | 0.90* | 0.81* | 0.81* | 0.64* |
| 30 m | 0.89* | 0.83* | 0.82* | 0.64* |
| 50 m | 0.83* | 0.83* | 0.75* | 0.62* |
| 70 m | 0.85* | 0.84* | 0.71* | 0.61* |

注: * 表示通过 99% 的信度检验

由图4可以看出,1月份,10 min 平均风速 > 15 m/s 的风出现的频率远远少于4月份,且 > 15 m/s 的风主要出现在 70 m 处,10 m 处没有出现 > 15 m/s 的强风,30 m 处 > 15 m/s 的大风发生的次数较 70 m 少近 10 倍,意味着冬季该地的大风过程主要受到高层的影响。4月份 > 15 m/s 的大风出现频率

约为1月份的几十倍。但是,我们也可以看到,高低层大风出现的频率相差不大,表明地面和高层对 10 ~ 70 m 高度的风速都产生影响。4月份风速的均方差也较1月份大(图5),风速、风速均方差随高度增大,模拟的均方差的随高度的变化规律基本和观测一致,但是,不管是1月还是4月,模拟的均方差都小于观测的均方差,也就是说模式对于极端值的模拟较小(大)。

4月份的模拟结果显著好于1月份。原因可能来自2个方面,一是春季4月份,地面加热强、温度上升快、同时出现 > 15 m/s 的频率高,平均风速较大。二是4月份陆气之间的能量、水分、热量交换相对要比1月份强,反映在低层出现 > 15 m/s 大风的频数也较多。综合图1、图4和已有的研究^[22],可以看出地表非绝热加热的变化在大风的形成过程中也是十分重要的因素。

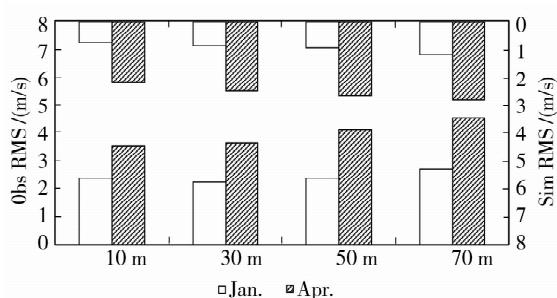


图5 1月、4月各高度观测及模拟的48 h 风速的均方根,上方及右边坐标为模拟均方差,下方及左边轴为观测的均方差

Fig. 5 The root mean square of wind speed of observed and simulated in first 48 h in Jan. and April at different levels (Top and right axis for simulated value, bottom and left axis for observed value)

3 讨论和小结

在风电功率预测中,风的预测是一个基本和决定性的前提。由于风既受高层大气运动的支配,也与地形地貌和下垫面的性质联系密切。这就给风能资源丰富的地区的风的预测带来了难度。在实际地形条件下,在下垫面性质特殊的西北地区,我们通过模拟试验就 WRF 模式对风场的模拟性能进行了检验和误差分析。得到以下初步结论:

(1) WRF 模式在西北河西地区风速的模拟结果表明, WRF 在风场的模拟上具有较好的性能。4 月份各高度 48 h 内的平均相对误差在 10% 以下,相关系数为 0.80,通过了 99% 的信度检验;1 月份各高度的 48 h 的平均相对误差在 20% 以内,满足目前风电功率预测的精度要求。

(2) 在春季的 4 月份, WRF 模式的模拟性能相对好于冬季的 1 月份。1 月份的平均风速相对要小于 4 月份,但由于西北地区的温度日较差较大,1~3 h 尺度的较大风速过程较多,即阵性大风多发,因而模拟的误差较大;而在春季,由于此时段正是地面加热快、风速较大的季节,但该季节该地区的短时间尺度(1~3 h)风速变化相对较小,模拟效果较为理想。

(3) 2 个时段的模拟结果表明,模拟结果在阵性大风时段则有偏小的系统误差,反映出风作为高层动量下传、低层地形和热力作用共同的产物,在西北地区的植被稀疏、地形复杂的环境下,模式中的边界层的参数化的处理需要仔细考虑。

目前的中尺度数值预报的结果,如 NCEP 的业

务模式在北美地区 500 hPa 的高度场在 72 h 内预测的技巧得分大约为 30%^[12],而边界层内的风速在目前的日常天气预报业务中对预报精度的要求低于降水等的要求。我们的分析结果表明,如果在 WRF 模式中选择合适的参数化方案,就风速的预测误差而言,可达到目前的风电功率预测的业务要求,和风电功率预测发达国家的水平相当。

参考文献:

- [1] 戴慧珠,王伟胜,迟永宁. 风电场接入电力系统研究的新进展[J]. 电网技术, 2007, 31(20): 16223.
- [2] 迟永宁,刘燕华,王伟胜,等. 风电接入对电力系统的影响[J]. 电网技术, 2007, 31(3): 77281.
- [3] 杨秀媛,肖洋,陈树勇. 风电场风速和发电功率预测研究[J]. 中国电机工程, 2005, 25(11): 1-5.
- [4] 刘永前,韩爽,胡永生. 风电场出力短期预报研究综述[J]. 现代电力, 2007, 24(90): 6-11.
- [5] 中国电力科学研究院,吉林省电力有限公司. 吉林省电网风力发电接入能力研究[R]. 2005.
- [6] 西北电网有限公司,中国电力科学研究院. 西北地区风电开发与利用研究[R]. 2007.
- [7] Bossanyi E A. Short-term wind prediction using Kalman filters[J]. Wind Engineering, 1985, 9(1): 1-8.
- [8] Torres J L, A Garcia, M. De Blas, et al. Forecast of Hourly Average Wind Speed with ARMA Models in Navarre (Spain)[J]. Solar Energy, 2005, 79: 65-77.
- [9] Mohamed A Mohandes, Shafiqur Rehman, Talal O Halawani. A neural networks approach for wind speed prediction[J]. Renewable Energy, 1998, 13(3): 345-354.
- [10] Thanasis G Barbounis, John B Theochairs, Minas C Alexiadis, et al. Long-term Wind Speed and Power Forecasting Using Local Recurrent Neural Network Models[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, 21(1): 273-284.
- [11] Pinson P, N Siebert, G Karimiotakis. Forecasting of Regional Wind Generation by a Dynamic Fuzzy-Neural Networks Based Upscaling Approach. In Proceedings CD-ROM [Z]. European Wind Energy Conference & Exhibition EWEC 2003, Madrid.
- [12] Kalnay, E. Atmospheric Modeling Data Assimilation and Prediction[M]. Cambridge, United Kingdom, 2003, 1-3.
- [13] 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[J]. 高原气象, 2008, 27(1): 202-207.
- [14] 中国气象局风能太阳能资源评估中心. 中国风能资源评估(2009)[M]. 北京:气象出版社, 2010. 1-37.
- [15] Storm Brandon, Dudhia Jimy, Basu, Sukanta, et al. Evaluation of the Weather Research and Forecasting Model on Forecasting Low-level jets: Implications for Wind Energy[J]. Wind Energy, 2009, 12(1): 81-90.
- [16] Ambarish Jash, Albin J, Gasiewski. Final Status Report on High Resolution Numerical Wind Forecasting[Z], 2009, Report.
- [17] 冯双磊,王伟胜,刘纯,等. 风电场功率预测物理方法研究[J].

- 中国电机工程学报, 2010, 30 (2): 1 - 6.
- [18] 马彦宏, 汪宁渤, 刘福潮, 等. 甘肃酒泉风电基地风电预报系统[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(16): 88 - 90.
- [19] 穆海振, 徐佳良, 杨永辉. 数值模拟在上海海上风能资源评估中的应用[J]. 高原气象, 2008, 27 (Suppl): 196 - 202.
- [20] 辛渝, 汤剑平, 赵逸舟, 等. 模式不同分辨率对新疆达坂城一小草湖风区地面风场模拟结果的分析[J]. 高原气象, 2010, 29 (4): 884 - 893.
- [21] 孙川永, 陶树旺, 罗勇, 等. 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, 2009, 30 (8): 1097 - 1099.
- [22] 朱飒, 李春华, 陆登荣. 甘肃酒泉区域风能资源评估[J]. 干旱气象, 2009, 27 (2): 152 - 156.
- [23] 王澄海, 靳双龙, 杨世莉. 新疆“2.28”大风过程中热、动力作用的模拟分析研究[J]. 中国沙漠, 接受, 待刊.

Application and Test of Lower Level Wind Field Simulation with Meso - scale Model WRF in Western Region of Northwest China

WANG Chenghai¹, HU Ju¹, JIN Shuanglong¹, FENG Shuanglei², LIU Chun²

(1. Key Laboratory for Semi - Arid Climate Change of the Ministry of Education, College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;
2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: In this paper, the performance of WRF model is validated by simulating wind velocity in January and April over northwestern China, and the errors between simulated and observed values were investigated. Results show that WRF performance was better in April, when wind speed was big and steady, surface heating strong and temperature increasing faster, but in January wind speed was lower but gust frequently occurred. The relative error in 48 hours at different levels was under 10%, the correlation coefficient (above 0.8) between observed and simulated values was significant at 90% in April. In January, the mean value of relative error in 48 hours at different levels was in the range of 20%, and the absolute value of the correlation coefficient was more than 0.30 and significant at the 99% confidence level. During the two simulation durations, the simulated value was obviously smaller than observed value when wind speed was high. Due to wind dominated by higher level momentum transfer downwards, terrain and thermodynamic function of land surface, the PBL parameters scheme in model is crucial in simulation of wind, especially in northwest China, where vegetable is sparse and terrain complex.

Key words: WRF model; simulation errors; northwestern China; wind simulation