

刘丽珺,梁友嘉. BJ-RUC模式的低层风场预报产品质量检验——以甘肃省当金山风电场为例[J]. 干旱气象, 2016, 34(4): 743-751, [LIU Lijun, LIANG Youjia. Quality Assessment of Low-level Wind Prediction Product by BJ-RUC Model: A Case Study of Akesai Wind Farm in Gansu Province[J]. Journal of Arid Meteorology, 2016, 34(4): 743-751], DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2016)-04-0743

# BJ-RUC模式的低层风场预报产品质量检验

——以甘肃省当金山风电场为例

刘丽珺<sup>1</sup>, 梁友嘉<sup>2</sup>

(1. 甘肃省气象服务中心, 甘肃 兰州 730020; 2. 武汉理工大学资源与环境工程学院, 湖北 武汉 430070)

**摘要:**利用2013年甘肃华电阿克塞当金山49.5 mW风电场风机监控数据采集系统的观测数据,对BJ-RUC模式的低层风场预报产品进行质量检验。结果表明:(1)总体上有效风速区在各季节预测效果较满发风速区好,且这2个风速区秋季预报效果最好,冬季预报效果最差;(2)年尺度上,观测值的Weibull分布众值偏右,形态相对接近正态分布,而预测值的Weibull分布众值偏左,形态相对偏离正态分布。月尺度上,除1月外,其余各月实况和预测的Weibull分布与全年的基本一致,且各月预测风速形状参数 $k$ 值接近2,为中性风,说明BJ-RUC模式模拟强阵性风速有局限性;(3)模拟的主导风向与实测的风向有较大偏差,仅对接近满发风速区的风向模拟得较准确,表明BJ-RUC模式对风向模拟有待提高。

**关键词:**风速;风向;BJ-RUC模式;误差分析

**文章编号:**1006-7639(2016)-04-0743-09 DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2016)-04-0743

**中图分类号:**P457.5

**文献标识码:**A

## 引言

随机变化的低层风场通常会导致电厂风电输出功率呈现出波动性和间歇性的特点<sup>[1]</sup>。风电场输出功率的预测研究已成为提高电网中风电并网能力的重要技术支撑和研究热点<sup>[2]</sup>。风电功率预测通常以数值天气预报(Numerical Weather Prediction, NWP)模式为基础,并与物理、统计和耦合预测算法集成,最终预测风电场输出功率。NWP模式的数据质量和不确定性显著影响并制约风电功率的预测精度,亟需对NWP模式数据进行科学评估和检验,这也是提高不同时间尺度风电功率预报精度的难点<sup>[3]</sup>。

目前,国际上可用于风电场功率预测的经典NWP模式主要有:MetUM(Met Office Unified Model)、GEM(Global Environmental Multiscale Model)、ECMWF(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)、WRF(Weather Research Forecasting)、

MM5(Fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model)、RUC(Rapid Update Cycle)和COSMO(Consortium for Small Scale Modeling)等<sup>[4]</sup>。近年来,国内相关研究也发展迅速,其中,北京市气象局在RUC模式基础上开发的北京快速循环更新同化系统(Beijing Rapid Update Cycle, BJ-RUC)已广泛应用于国内低层风场的风电功率预测<sup>[5-6]</sup>。相应地,针对多种低层风场数值模拟产品的检验方法也开始迅速发展,如:Powers<sup>[7]</sup>对6种主流中尺度模式的模拟值与观测值分别进行风速偏差(Mean Error, ME)、平均绝对误差(Mean Absolute Error, MAE)和均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)分析,系统评价了各模式数据预测质量;Jiménez等<sup>[8]</sup>对复杂地形下的低层风场进行2 km高分辨率的数值模拟,并使用标准化Taylor方法对各站点RMSE及相关系数进行检验;Storm等<sup>[9]</sup>通过拟合的威布尔(Weibull)风速概率密度函数对比分析了低空风切变条件下的风速模拟精度;李军等<sup>[10]</sup>利用双参数

收稿日期:2015-10-12;改回日期:2016-01-20

基金项目:国家自然科学基金(41601184)和中央高校基本科研业务费专项资金(2016IVA044)共同资助

作者简介:刘丽珺(1988-),女,甘肃定西人,工程师,主要从事CFD风场模拟研究。E-mail: chenshi2124@126.com

通讯作者:梁友嘉(1985-),男,甘肃庆阳人,讲师,主要从事生态系统评价和环境建模研究。Email: yjliang@whut.edu.cn

Weibull 分布模型分析内蒙古草原 6 层高度近 1 a 的风速序列资料,并利用最大似然法估计多时段、多高度 Weibull 分布尺度参数  $c$  和形状参数  $k$ ; Wang 等<sup>[11]</sup>基于 WRF 模式预报的甘肃酒泉电场区域风速和风向预报产品,分析了西北地区风场预报中的误差特征及其影响因素。本文利用 2013 年甘肃阿克塞当金山风电场风机实况数据,对 BJ-RUC 模式的低层风场数值预报产品进行评估检验,并探讨 BJ-RUC 模式在干旱区开展风预报应用的优势和局限性,可为电厂提高风电功率产出和掌握区域风速特征和风能资源状况提供科学参考,并为 BJ-RUC 模式区域性应用和改进提供案例参考。

## 1 数据与方法

### 1.1 数据

实况数据源于 2013 年甘肃华电阿克塞当金山 49.5 mW 风电场风机监控数据采集系统(Supervisory Control and Data Acquisition, SCADA),该系统由中国华电集团福新能源股份有限公司甘肃分公司提供。风电场位于甘肃省酒泉市阿克塞哈萨克族自治县(简称阿克塞县)南部约 70 km 处的高原戈壁,场址北侧为当金山,三面环山。场区海拔在 3 050 ~ 3 200 m 之间,地形平坦、地势开阔,附近有 215 国道,施工交通便利。风功率模拟数据由 BJ-RUC 模式获取, BJ-RUC 主模式为 WRF V2.2, 前处理模块为 WPS V2.2 和 WRF-VAR V2.1, 模拟时间为 2013 年全年。模式同化和预报区域设置为 27 km、9 km、3 km 三重嵌套,其中西北地区选用 9 km 分辨率数据,模式模拟范围为 96.45°E—127.53°E、37.20°N—54.48°N,垂直方向 38 层,模式层顶为 50 hPa。模式参数化方案为:WSM6 显式微物理方案、Kain-Fritsch (new Eta) 对流参数化方案、YSU 边界层方案、RRTM 长波辐射方案、Goddard 短波辐射方案、Noah 陆面模式<sup>[12]</sup>。模式采用全球环流模式背景场资料(T639 的 GFS 资料)进行再分析获得模式初值,并将常规及加密探空观测、常规及加密地面观测、船舶/浮标观测、飞机观测等全球观测资料作为业务运行同化资料<sup>[13]</sup>。

通过 BJ-RUC 将 WRF 数值预报模式产品 9 km 分辨率提高至 3 km,并进一步利用 CALMET (California Meteorological Model) 动力降尺度模式将分辨率再次提高到 1 km,然后插值到每个风机的轮毂高度(80 m),并输出未来 72 h 内每 15 min 格点的风速、风向、垂直风速、温度、相对湿度和压强等气象要素资料(图 1)。

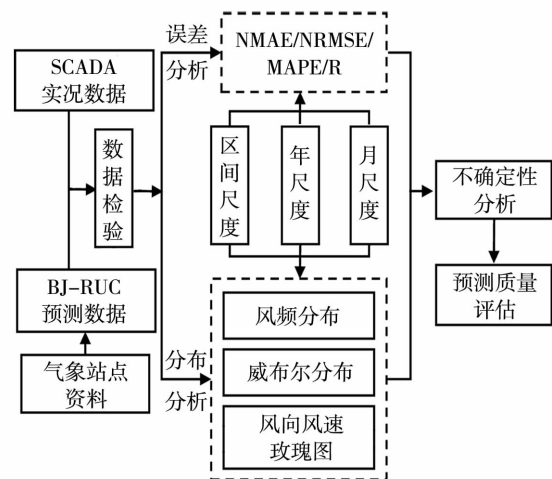


图 1 技术路线

Fig. 1 Flow chart of technology

### 1.2 基础数据检验

参考《风电场风能资源评估方法》(GB/T 18710-2002),数据检验主要关注数据的完整性和合理性。数据完整性是指其数量和时间顺序是否完整。其中,数据数量应等于预期记录的数量,而时间顺序应符合预期的开始和结束时间,且时间区间应连续。利用测风有效数据完整率指标检验,风电厂所需有效数据完整率一般需 >90%,具体公式如下:

$$R_{vi} = \frac{N_o - N_m - N_i}{N_o} \times 100\% \quad (1)$$

式(1)中,  $R_{vi}$  为有效数据完整率,  $N_o$  为应测数目(即 15 min 测量间隔数),  $N_m$  为缺测数目(即未记录的 15 min 间隔平均值数目),  $N_i$  为无效数据数目(即不合理的 15 min 间隔平均值数目)。合理性检验主要是根据数据的合理性范围来检验数据。通常,风速范围为 0 ~ 40 m · s<sup>-1</sup>, 风向范围为 0° ~ 360°。数据初始检验后,对缺测和不合理的数据进行二次判别,进一步甄别符合实际情况的有效数据,并将其加入原始数据组。并分析备用和参考传感器的同期记录数据,用于填补无效或缺测数据。

表 1 是当金山风电场 2013 年逐月测风有效数据的完整率,通过检验其各月的实况数据,剔除并替换无效数据,最终获取研究区实测的逐 15 min 风速风向数据。

### 1.3 误差分析

在数据检验基础上,进一步提高 BJ-RUC 模式模拟的 NWP 数据的准确性和可靠性,通过多尺度数据检验方法实现:(1)误差指数:包括标准化平均绝对误差(NMAE)、标准化均方根误差(NRMSE)、平均绝对百分比误差(MAPE)和相关系数(R)<sup>[14]</sup>,

表1 2013年各月当金山风电场测风有效数据的完整性

Tab.1 The integrity of valid wind data in Dangjinshan wind farm in Akesai county of Gansu Province in 2013

	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
完整率/%	100	100	96.94	100	96.51	100	99.73	98.99	98.63	99.49	100	97.21

其中  $NMAE$ 、 $NRMSE$  和  $MAPE$  越低则表明预报效果越好,  $R$  越高表明模拟值与实况值的相关性越好; (2) 误差分布: 包括风速频率威布尔分布和风向风速玫瑰图。根据上述指标分析风速区间和年、月尺度下模拟与实测数据的误差分布特征。

### 1.3.1 误差指数

风机运转对风速有严格要求。风速  $< 3.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时, 风机难以运转; 风速在  $3.0 \sim 11.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  区间内, 风机输出功率随风速增大而相应增大; 风速  $> 11.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  后, 风机处于满发状态, 其输出功率不再随风速增加而增大; 风速  $\geq 25.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时, 往往易造成风机结构损坏<sup>[15]</sup>。故参考上述标准, 将风速划分为4个等级区间: 低风速区 ( $0 \sim 3.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )、有效风速区 ( $3.5 \sim 11.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )、满发风速区 ( $11.5 \sim 25.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 和高风速区 ( $\geq 25.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )。分析不同风速区的预报特性及误差分布规律, 有针对性地提高风功率预测精度。

为更好地描述风速预报效果, 首先, 分别计算  $MAE$ 、 $RMSE$  和  $R$ 。其中, 对  $MAE$  和  $RMSE$  进行标准化处理以消除量纲影响, 从而得到  $NMAE$  和  $NRMSE$ 。其次, 按照《中华人民共和国能源行业标准(NB/T 31046-2013): 风电功率预测系统功能规范》要求: “单个风电场短期预测月均方根误差率应  $< 20\%$ , 超短期预测第4h预测值月均方根误差率应  $< 15\%$ ” 进行检验和分析。为准确评价预报在不同时段的效果, 还需计算平均绝对百分比误差 ( $MAPE$ )。

相关系数和误差指数的计算公式(2)中:  $n$  为计算时段内风速序列个数,  $S_i$  和  $O_i$  分别为风速预报和观测序列,  $\bar{S}$  和  $\bar{O}$  分别为预报和观测风速平均值。

### 1.3.2 误差分布

双参数威布尔(Weibull)分布函数  $f(v)$  是一单峰的正偏态分布函数, 更接近风速实际分布<sup>[16]</sup>, 其风速  $v$  的函数式(3)。式(3)中:  $f(v)$  为风速分布函数;  $k$  为无量纲形状参数, 反映风速分布情况。  $k$  值越大, 说明风速分布越集中, 表示风的变化越小, 阵性越弱;  $k$  值越小, 说明风速分布越分散, 表示风的变化越大, 阵性更强;  $c$  为尺度因子 ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ), 其与平均风速相关, 平均风速越大,  $c$  值越大;  $\mu$  为估算的风速平均值 ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ );  $\sigma$  为估算的风速标准差 ( $\text{m} \cdot$

$\text{s}^{-1}$ );  $\Gamma(1 + 1/k)$  为伽马函数。

$$\left\{ \begin{aligned} R &= \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}} \\ MAE &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |S_i - O_i| \\ RMSE &= \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2} \\ NMAE &= \frac{MAE}{\sqrt{\bar{O} \times \bar{S}}} \\ NRMSE &= \frac{RMSE}{\sqrt{\bar{O} \times \bar{S}}} \\ MAPE &= \frac{\sum_{i=1}^n \frac{O_i - S_i}{O_i} \times 100\%}{n} \end{aligned} \right. \quad (2)$$

$$\left\{ \begin{aligned} f(v) &= \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \\ k &= \left(\frac{\sigma}{\mu}\right)^{-1.086} \\ \mu &= \bar{v} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i \\ \sigma &= S_v = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (v_i - \mu)^2} \\ c &= \frac{\mu}{\Gamma(1 + 1/k)} \\ \Gamma(1 + 1/k) &= \left(0.568 + \frac{0.434}{k}\right)^{\frac{1}{k}} \end{aligned} \right. \quad (3)$$

此外, 风向风速玫瑰图是一种重要的图形分析工具, 可用于与风速因子密切相关的气象预报、城市规划、建筑规划和风资源评估等研究中<sup>[17]</sup>。风向风速玫瑰图基于网格化极坐标系统制图, 通过不同方位汇集风向及其频数, 频数最大方位表示该风向出现次数最多, 用不同颜色带区别风速大小。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同等级风速区的误差

由四季不同等级风速区间的频率分布(图2)发现: 四季中有效风速区间所占比例最大, 且夏、秋季

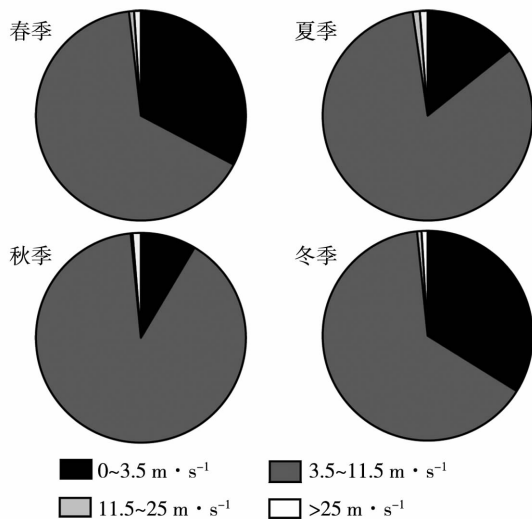


图2 2013年当金山风电场四季不同等级风速频率(单位:%)

Fig.2 The frequency of different levels wind speed in four seasons of Dangjinshan wind farm in Akesai county of Gansu Province in 2013 (Unit:%)

较高,分别占全季的83.43%和89.89%;低风速区间次之,春、冬季较高,分别占全季的32.74%和33.85%;满发和高速区间所占比例整体较小。其中,满发风速夏季占比最高为1.09%,秋季最低为0.28%;高速风速秋季占比最高为1.28%,冬季最低为0.94%。

由于高、低风速区不能发电,这里仅分析有效风速区和满发风速区各季节风预报效果(图3)。从季节来看,实况与预报值之间的相关系数 $R$ 在2个风速区都表现为秋季>冬季>春季>夏季。其中,在有效风速区实况与预报值四季均为正相关,而在满发风速区二者秋、冬季表现为正相关,春、夏季表现为负相关;除了冬季满发风速区误差较高外,其余季节2个风速区的 $NMAE$ 和 $NRMSE$ 都为 $0.5 \sim 1.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,且自秋、夏、春季依次降低;2个风速区的 $MAPE$ 季节分布略有不同。在有效风速区, $MAPE$ 表现为冬季>夏季>秋季>春季,而在满发风速区则表现为冬季>夏季>春季>秋季。对比2个风速区的误差和相关系数发现,平均 $R$ ,有效区>满发区; $MAPE$ ,除夏季外,有效区<满发区; $NMAE$ 和 $NRMSE$ ,有效区<满发区。综上分析可见,有效风速在各季节的预测效果较满发风速好,且秋季预报效果总体较好,冬季预报效果最差。

## 2.2 不同时间尺度误差

### 2.2.1 年尺度

年尺度误差分析能够体现BJ-RUC模式综合预报效果。由图4可知,当金山风电场2013年全风速区BJ-RUC模式预报值与实况的 $NMAE$ 为 $0.51 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , $NRMSE$ 为 $0.65 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , $R$ 为0.25, $MAPE$ 为39%,接近可发电风速区的误差结果,说明该模式产品总体质量较优。

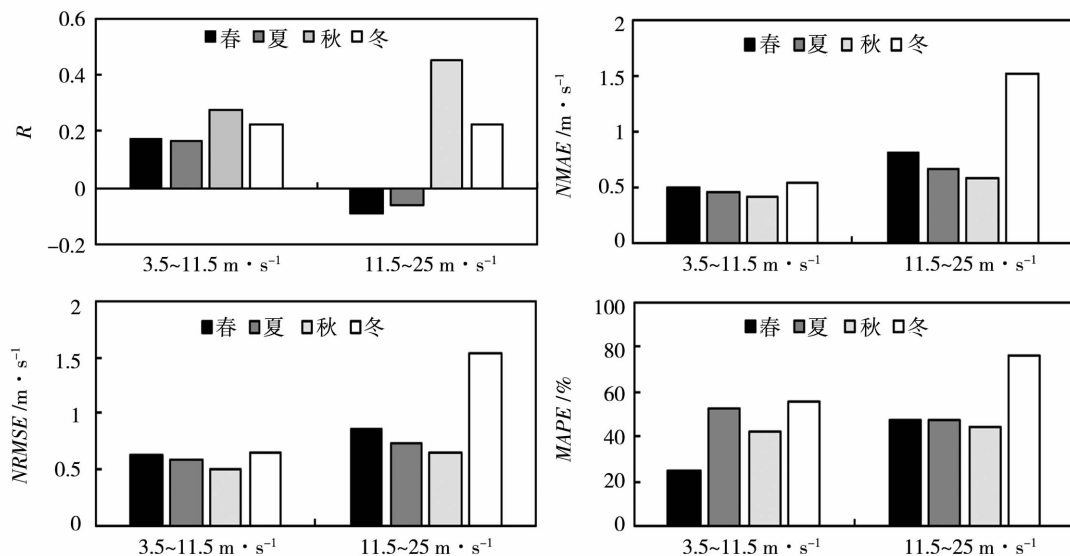


图3 BJ-RUC模式预报的当金山风电场2013年四季有效风速区和满发风速区与实况之间的 $R$ 、 $NMAE$ 、 $NRMSE$ 和 $MAPE$

Fig.3 The indicators of  $R$ ,  $NMAE$ ,  $NRMSE$  and  $MAPE$  for effective and full load wind speed between the forecasted by BJ-RUC and the observation of Dangjinshan wind farm in Akesai county of Gansu Province in four seasons in 2013

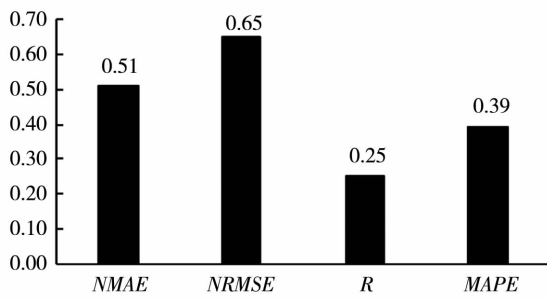


图4 2013年BJ-RUC模式预报的当金山风电场风速与实况的NMAE、NRMSE、R及MAPE  
 Fig. 4 The indicators of NMAE, NRMSE, R, and MAPE of wind speed between the forecasted by BJ-RUC and the observation of Dangjinshan wind farm in Akesai county of Gansu Province in 2013

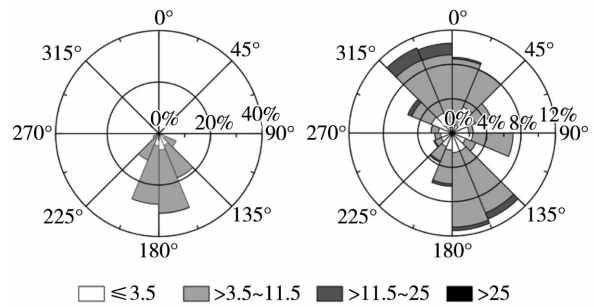


图6 2013年当金山风电场的实况与BJ-RUC模式模拟的风向风速(单位: $m \cdot s^{-1}$ )玫瑰图  
 Fig. 6 The wind direction and wind speed (Unit:  $m \cdot s^{-1}$ ) rose diagram of the observation and simulation by BJ-RUC of Dangjinshan wind farm in Akesai county of Gansu Province in 2013

根据全年实况(Obs)和预测(SL)轮毂高度风速估计的Weibull曲线(图5)得到:观测的全年轮毂高度 $c_{Obs}$ 为5.78, $k_{Obs}$ 为2.84;预测的全年轮毂高度 $c_{SL}$ 为6.33, $k_{SL}$ 为1.74。年实况Weibull分布众值偏右,形态相对接近正态分布;年预测Weibull分布众值偏左,形态相对偏离正态分布。

分析当金山风电场2013年风机轮毂高度处的风向玫瑰图(图6)发现:该电厂区观测的主导风向为南(S)和南南东(SSE),其频率分别达26.5%和22%;模拟的主导风向为南南东(SSE)和北北西(NNW),与实测有较大偏差,该模式对风向预报效果需提高。

2.2.2 月尺度

总体上,各月实况(Obs)与预测(SL)风速数据的Weibull曲线(图7)与全年大致相同。除1月外,

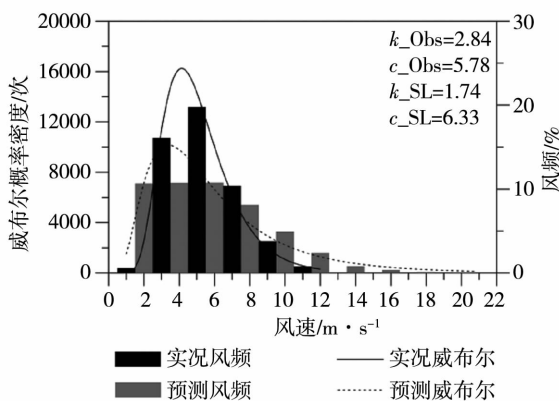


图5 2013年当金山风电场风速实况与BJ-RUC模式模拟的Weibull风频图  
 Fig. 5 The Weibull wind frequency diagram of the observation and simulated by BJ-RUC of Dangjinshan wind farm in Akesai county of Gansu Province in 2013

各月实况Weibull分布众值偏右,相对接近正态分布;预测值分布的众值偏左,相对偏离正态分布。各月 $k_{Obs}$ 在2.29~4.33之间,其中1—4月均 $<3$ ,4月最小,5—12月均 $>3$ ,9月最大; $c_{Obs}$ 在4.16~7.06之间,其中6月最大,12月最小。总体上,春、冬季 $c_{Obs}$ 和 $k_{Obs}$ 比夏、秋季小。各月 $c_{SL}$ 在4.17~8.09之间,3月最大,12月最小; $k_{SL}$ 在1.28~2.12之间,12月最小,8月最大,1—10月均接近2。根据《风电场风能资源评估方法》(GB/T 18710-2002):当 $k=2$ 时,Weibull分布变为Rayleigh分布。由于各月 $k_{SL}$ 在2.0左右,故风的变化一般,阵性强度中等,说明该模式未模拟出阵性较强的风速序列,预测较实况风速变化平缓。

图8是当金山风电场2013年各月风机轮毂高度处风向风速玫瑰图,发现该厂区观测的各月主导风向均为偏南风(S),而预测的主导风向除1月为东风(E)外,其余月份均为南东(SE)、南西(SW)、北东(NE)和北西(NW)方向,说明该模式对月尺度风向预报效果仍需提高。鉴于观测的全年主导风向均为偏南方向,应调整模式模拟风向。

2.2.3 日尺度

波动性和随机性导致风速很难准确预报,在大尺度环流背景相对稳定时,风的局地性使其日变化可能较大。因此,进一步计算日尺度模拟风速与实况的NRMSE、MAPE和R。通过对当金山风电场2013年8月1—31日风速模拟与实况间的误差和相关系数(表2)分析发现:1个月中2/3的天数的NRMSE $<20 m \cdot s^{-1}$ ,MAPE $<25\%$ ,基本满足规范中精度要求;相关系数R多为负值,表明BJ-RUC模式还需优化参数化方案,以提高相关性,同时也说明此方法对模拟结果有较好的检验效果。

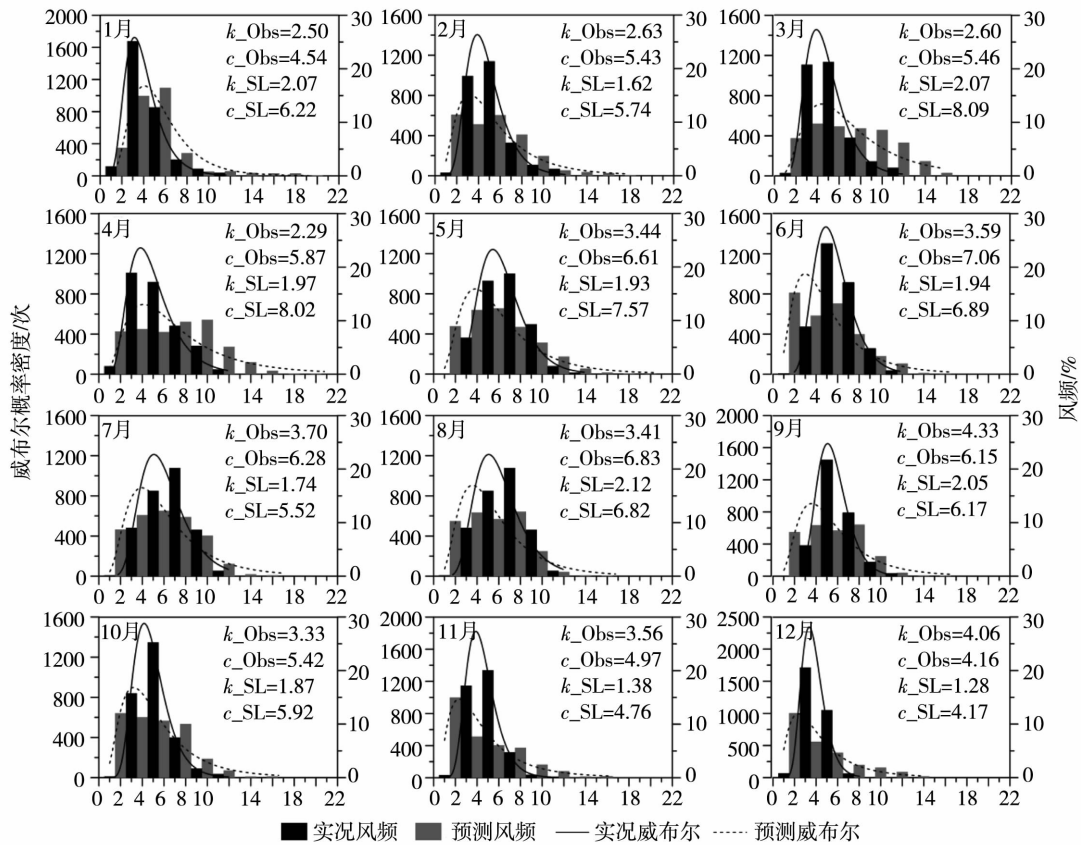


图7 2013年当金山风电场风速逐月实况与BJ-RUC模式模拟的威布尔风频图  
 Fig.7 The monthly Weibull wind frequency diagrams of the observation and simulation by BJ-RUC of Dangjinshan wind farm in Akesai county of Gansu Province in 2013

表2 2013年8月1—31日当金山风电场BJ-RUC模式预报和实况风速间的NRMSE、MAPE和R  
 Tab.2 The indicators of NRMSE, MAPE and R between the observed and simulated wind speed by BJ-RUC of Dangjinshan wind farm in Akesai county of Gansu Province from 1 to 31 August 2013

日期	NRMSE/m · s <sup>-1</sup>	MAPE/%	R	日期	NRMSE/m · s <sup>-1</sup>	MAPE/%	R
1	2.21	19.05	0.35	17	3.08	26.04	-0.68
2	1.65	21.16	0.07	18	2.41	23.35	0.33
3	1.93	23.42	0.77	19	2.73	26.28	-0.46
4	3.42	30.01	-0.21	20	2.86	33.41	-0.55
5	5.74	40.36	-0.65	21	3.10	29.76	0.27
6	3.12	30.51	0.34	22	2.53	22.40	-0.20
7	1.92	22.83	0.16	23	2.20	24.93	-0.51
8	3.55	50.56	0.73	24	3.49	40.94	-0.59
9	2.17	20.89	-0.11	25	3.05	28.82	0.70
10	2.94	26.70	0.19	26	2.87	21.73	0.04
11	1.23	20.25	0.28	27	4.59	43.86	-0.51
12	2.00	23.92	0.84	28	1.79	30.08	0.81
13	2.08	18.95	0.63	29	2.70	39.33	-0.80
14	3.70	20.54	-0.56	30	2.75	32.72	0.33
15	1.98	13.43	-0.15	31	1.74	15.95	-0.31
16	2.95	30.30	-0.44				

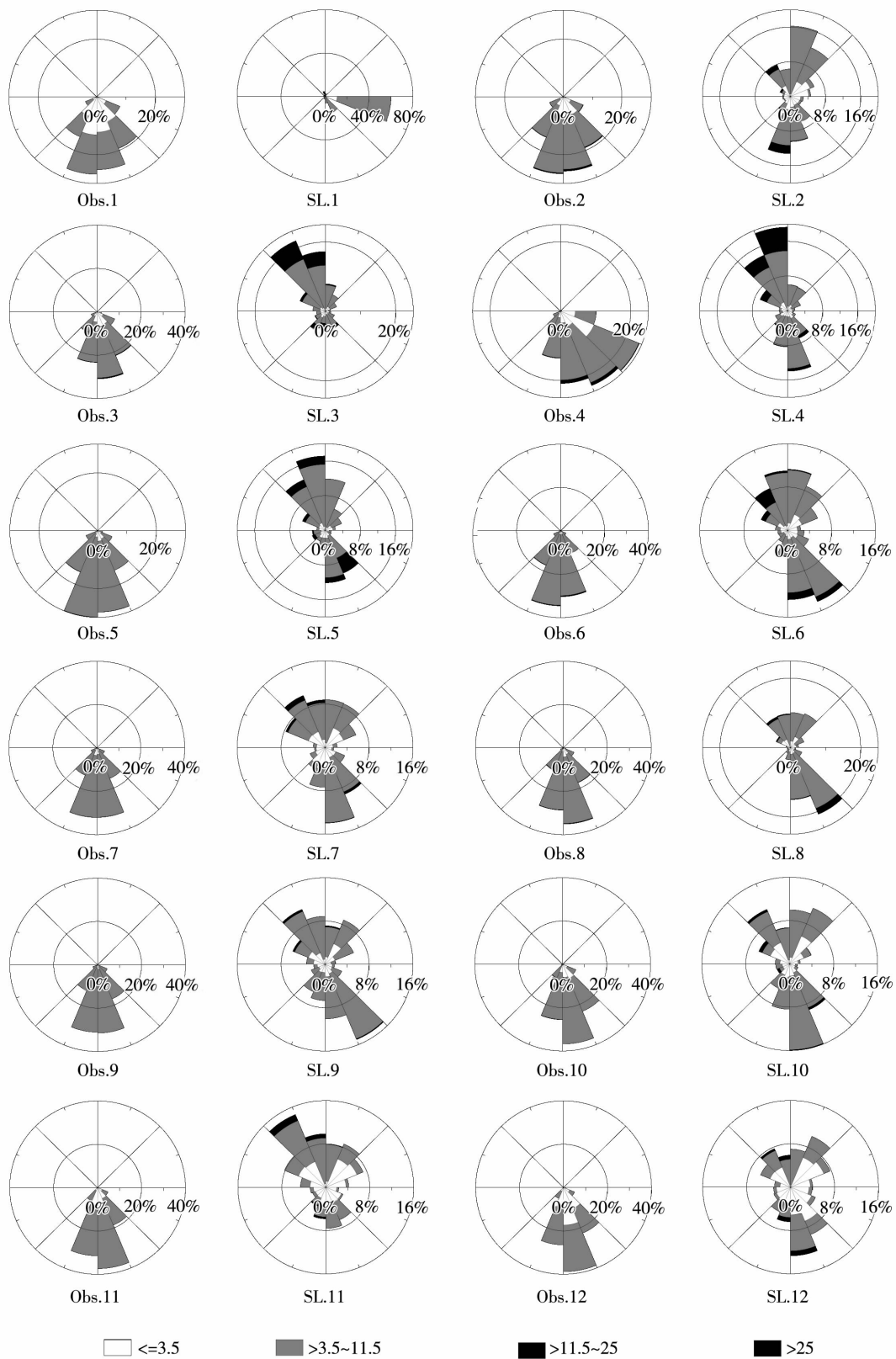


图8 2013年当金山风电场的逐月实况(Obs. 1-12)与BJ-RUC模式模拟(SL. 1-12)的风向风速(单位: $m \cdot s^{-1}$ )玫瑰图

Fig. 8 The monthly wind direction and wind speed (Unit: $m \cdot s^{-1}$ ) rose diagrams of the observation (Obs. 1-12) and simulation by BJ-RUC (SL. 1-12) of Dangjinshan wind farm in Akesai county of Gansu Province in 2013

### 3 结论与讨论

(1)当金山电场 2013 年各季中有效风速区所占比例最大,低风速区次之,满发和高风速区所占比例整体较小。

(2)BJ-RUC 模式模拟与观测的有效风速区和满发风速区的 NMAE、NRMSE 和 MAPE 值在秋季最小、冬季最大,且有效风速区的误差小于满发风速区,表明秋季 2 个风速区的预报效果优于其他季节,且各季节有效风速区的预测效果整体较好。

(3)年尺度上,实况的 Weibull 分布众值偏右,形态相对接近正态分布,而预测的 Weibull 分布众值偏左,形态相对偏离正态分布;月尺度上,除 1 月外,其余各月观测与模拟的 Weibull 分布与全年基本一致。风速的  $c$  和  $k$  都有明显的季节变化:总体上,春、冬季观测的  $c_{\text{Obs}}$  值比夏、秋季小,而  $k_{\text{Obs}}$  值秋季最大,春季最小;预测的各月风速估计  $k$  值接近 2,较观测值偏低,为中性风,说明 BJ-RUC 模式模拟的风速月变化较为平缓,观测值的曲线较观测更趋于对称,对强阵性风速预测有局限性。

(4)模式预测的风机主导风向与实测风向有较大偏差,但接近满发风速区的风向模拟较为准确。

低层风场既受天气形势变化影响,也受复杂下垫面影响,从而形成特殊的局地环流。BJ-RUC 数值模式的边界条件、物理参数化方案以及观测数据等方面都存在不确定性。首先,BJ-RUC 模式的预报中心定位为北京地区,西北干旱区与前者的地理位置、气候条件和下垫面条件均不一致,在模式的边界条件、物理参数化方案没有进一步本地化的情况下进行预报势必会影响预报精度;其次,当金山风电场无测风塔,观测数据来源于风机轮毂高度处 SCADA 系统采集的数据,风机数据受尾流影响较大,从而影响了模式的对比精度。BJ-RUC 能够快速更新循环同化最新的探测资料,其优势使其预报产品广泛应用于甘肃、陕西、内蒙古等新能源服务地区,已成为一种不可替代的数值预报产品,对 BJ-RUC 产品的质量评估与本地化应用是未来新能源领域开展数值预报服务的研究重点。

致谢:感谢中国华电集团福新能源股份有限公司甘肃分公司提供 SCADA 数据以及审稿专家和编辑的宝贵建议

### 参考文献

- [1] Alois Schaffarczyk. Understanding Wind Power Technology: Theory, Deployment and Optimisation[M]. John Wiley & Sons, Ltd., 2014,1-44.
- [2] Liu Z Y. Electric Power and Energy in China[M]. John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd., 2013,73-136.
- [3] 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.
- [4] Ishak A M, Srivastava P K, Gupta M, et al. The Development of Numerical Weather Models - A review[J]. Bulletin of Environmental and Scientific Research, 2014,3(1):15-20.
- [5] 江滢,宋丽莉,程兴宏. 风电场风速预报集合订正方法的尝试性研究[J]. 资源科学, 2013,35(3):673-680.
- [6] 盛春岩,刘诗军,肖明静. 十一运会 WRF-RUC 系统应用及典型个例评估[J]. 气象科技, 2010,38(增刊):6-12.
- [7] Powers J G. Numerical prediction of an Antarctic severe wind event with the Weather Research and Forecasting (WRF) model[J]. Monthly Weather Review, 2007,135(9):3134-3157.
- [8] Jiménez P A, González-Rouco J F, García-Bustamante E, et al. Surface wind regionalization over complex terrain: evaluation and analysis of a high-resolution WRF simulation[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2010,49(2):268-287.
- [9] Storm B, Basu S. The WRF model forecast-derived low-level wind shear climatology over the United States Great Plains[J]. Energies, 2010,3(2):258-276.
- [10] 李军,胡非,王丙兰,等. 风速的 Weibull 分布参数[J]. 太阳能学报, 2012,33(10):1667-1671.
- [11] Wang C H, Jin S L. The Features of the Errors and their Possible Causes from a Low-level Wind Field Simulated by WRF[J]. Wind Energy. 2013, DOI:10.1002/we.1635.
- [12] 魏东,尤凤春,范水勇,等. 北京快速更新循环预报系统(BJ-RUC)模式探空质量评估分析[J]. 气象, 2010,36(8):72-80.
- [13] Benjamin S G, Dévényi D, Weygandt S S, et al. An hourly assimilation-forecast cycle: The RUC[J]. Monthly Weather Review, 2004,132(2):495-518.
- [14] 刘永前,史洁,杨勇平,等. 基于预测误差分布特性的风电场短期功率预测不确定性研究[J]. 太阳能学报, 2012,33(12):2179-2184.
- [15] Thomas Ackermann. Wind power in power systems[M]. John Wiley & Sons, Ltd., 2005,25-51.
- [16] Bowden G, Barker P R, Shestopal V, et al. The Weibull distribution function and wind power statistics[J]. Wind Engineering, 1983,7(2):85-98.
- [17] Mertens S. The energy yield of roof mounted wind turbines[J]. Wind Engineering, 2003,27(6):507-518.



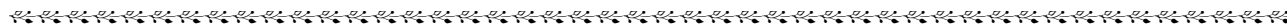
## Quality Assessment of Low-level Wind Prediction Product by BJ-RUC Model: A Case Study of Akesai Wind Farm in Gansu Province

LIU Lijun<sup>1</sup>, LIANG Youjia<sup>2</sup>

(1. *Gansu Meteorological Service Centre, Lanzhou 730020, China*; 2. *School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China*)

**Abstract:** Based on the observation data of Dangjinshan wind farm with 49.5 mW power in Akesai Kazak county of Gansu Province in 2013, the low-level wind prediction product of Beijing Rapid Update Cycle (BJ-RUC) with high-resolution system was assessed. The results are as follows: (1) The forecast effect for the effective wind speed ( $3.5 - 11.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) was better than the rated wind speed ( $11.5 - 25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) in four seasons as a whole, and that was the best in autumn and the worst in winter. (2) The Weibull distribution of wind speed frequency from the observation in a year was close to the normal distribution, while that from the simulation deviated from the normal distribution. The Weibull distribution of wind speed frequency in other months was similar to annual wind speed frequency except January. The  $k$  value from the simulated by BJ-RUC model in each month approximated 2.0, which indicated that the wind was neutral and simulated gustiness with strong wind speed by BJ-RUC model had limitations. (3) By comparison of the wind rose diagram, the simulations of dominant wind direction for four different levels wind in 2013 were greatly differ from the observation on the whole, but that for the approximative rated wind speed was accurate, which indicated the simulation of wind direction by BJ-RUC model need to be improved.

**Key words:** wind speed; wind direction; BJ-RUC model; error analysis



(上接第 742 页)

## Algorithm Improvement of Sea Fog Detection in the Daytime Based on FY-2E Data

TIAN Yongjie<sup>1</sup>, DENG Yujiao<sup>2</sup>, CHEN Wuhe<sup>1</sup>, WANG Jiechun<sup>2</sup>

(1. *School of Electronic and Information Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China*; 2. *Guangdong Ecological Meteorology Center, Guangzhou 510640, China*)

**Abstract:** According to the spectral radiation characteristics of clouds, fog and underlying surface and texture features of clouds and fog, combined with the previous studies, a series of discriminant indexes were established by using object-oriented method, firstly. Then, the algorithm was constructed to detect sea fog from FY-2E data in the daytime, which was applied to a dynamic process of the sea fog in the middle and northern Yellow Sea on 8 April 2014. The applying result showed that the proposed algorithm of sea fog detection in this paper could better monitor the dynamic change of the sea fog in the middle and northern Yellow Sea on 8 April 2014. In addition, the accuracy of the algorithm was tested based on eleven times fog product from FY-3B. The test results showed that the probability of detection (POD) was 90.9%, false alarm rate (FAR) was 33.2%, and critical success index (CSI) was 62.6%, which indicated that the proposed method in the paper was effective and feasible.

**Key words:** FY-2E; sea fog; dynamic threshold; cloud and fog separation