

蒙西地区不同边界层参数化方案的 近地层风场预报效果评估*

李玉鹏^{1,3}, 王东海^{1,2}, 尹金方¹

- (1. 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081;
2. 中山大学大气科学学院, 广东 广州 510275;
3. 吉林省气象科学研究所, 吉林 长春 130062)

摘要: 利用中尺度 WRF (Weather Research Forecast) 模式和 GSI (Gridpoint Statistical Interpolation) 同化系统, 通过改变边界层参数化方案对蒙西地区进行了 7 组回报试验, 并基于 70 个国家级地面站和 18 座风塔观测对试验结果进行多方面检验。结果表明: 模式的预报可以抓住实际风速风向的演变和位相变化。各边界层参数化方案的 10 m 和 70 m 风向较观测有轻微顺偏; 各方案对有效风速 (3 ~ 15 m/s) 的预报效果最好, 对满发风速 (15 ~ 25 m/s) 的效果次之, 对无效风速 (0 ~ 3 m/s) 的预报效果最差; 各方案都能模拟出风速风向的日变化特征, 表现为白天风速随时间增大和风向的顺转, 傍晚到夜间风速的减小和风向的逆转; 各方案对 10 m 风场的预报差异较 70 m 的更为明显, 且模拟的风速偏大, YSU 方案对 10 m 风速的预报效果最好, ACM2 对 70 m 风速预报效果最好; TEMF、YSU 以及 ACM2 方案对风切变指数的预报较好; 大气层结的稳定性对低层风场的模拟有比较重要的影响。

关键词: 蒙西; 风能发电; 风场预报; 边界层参数化方案; WRF

中图分类号: P45 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2018) 04-0016-14

Evaluations of different boundary layer schemes on low-level wind prediction in western Inner Mongolia

LI Yupeng^{1,3}, WANG Donghai^{1,2}, YIN Jinfang¹

- (1. State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China;
2. School of Atmospheric Sciences, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;
3. Jilin Meteorological Science Institute, Changchun 130062, China)

Abstract: In order to evaluate the performance of boundary layer (BL) schemes on wind prediction in western Inner Mongolia, seven hindcasting simulation experiments are conducted with different boundary layer parameterization configurations in Weather Research Forecast (WRF). Observations from 70 national stations and 18 wind towers are used as the reference of the evaluations. The results are shown as follows: The variability of wind field can be captured in the numerical simulations. There exists a slightly clockwise deviation in the directions of 10 m and 70 m wind fields in all simulation experiments. The performance of BL schemes on 3 ~ 15 m/s wind field is superior to those on 15 ~ 25 m/s, while poor simulation results are presented on 0 ~ 5 m/s wind field. The diurnal variation of wind speed and direction can

* 收稿日期: 2017-04-10

基金项目: 国家自然科学基金 (91437221); 公益性行业 (气象) 科研专项 (GYHY201306004 和 GYHY201506002)

作者简介: 李玉鹏 (1990 年生), 男; 研究方向: 中尺度数值模拟与同化; E-mail: yupenglee_cn@126.com

通信作者: 王东海 (1965 年生), 男; 研究方向: 数值预报与云微物理; E-mail: wangdh7@mail.sysu.edu.cn

be described in all BL schemes, as corroborated by an increasing wind speed and a clockwise rotating wind direction during the daytime and a decreasing wind speed and a counterclockwise rotating wind direction during the nocturnal time. The differences of BL scheme experiments on 10 m wind field are more obvious than those on 70 m wind field, with a larger overestimation in the amplitude of wind. The YSU works best at 10 m wind speed, and ACM2 performs better at 70 m wind speed. The TEMF, YSU and ACM2 are more effective for prediction of wind shear. The atmospheric stability is of vital importance for the simulation of low-level wind field.

Key words: Western Inner Mongolia; Wind power; Wind forecast; Boundary layer parameterization; WRF

可再生能源的使用为社会和经济的发展供应能源,并且减少化石燃料对环境和人类健康的负面影响^[1]。在众多可再生资源中,风能是一种清洁且储量丰富的可再生能源。据估计全球的风能约为 2.74×10^9 MW,其中可利用的风能为 2×10^7 MW,具有很高的开发利用价值^[2]。现阶段,全世界的风电装机容量以每年 30% 的速度增长^[3]。根据国家能源局发布的国家可再生能源发展目标,至 2050 年左右,风电在国家总体电源结构中所占的比例将达到 1/5 左右,成为我国电力供应中的主力电源之一^[4]。

风是大气中最基本的自然现象,可以表征大气的流动性和能量特征。风电产业不断发展,再加上极端天气事件频发,风场的模拟和预报变得越来越重要。早期针对风的预测方法很多是基于概率和数理统计的,包括时间序列法 (ARMA)、模糊逻辑法 (Fuzzy Logic)、人工神经网络法 (ANN)、卡尔曼滤波法 (Kalman Filters) 等^[5-8],但风受地形、天气系统演变、辐射、地面加热以及海陆热力差异等多种因素作用,而以统计为基础的预测模型缺少影响风速变化的动力学信息,因而预报时效较短,预报准确率低,只有通过求解大气运动物理方程组为基础的数值天气预报 (NWP) 才能较好地提高风电预测的准确率^[9]。近年来 WRF (Weather Research Forecast) 等中尺度天气数值预报模式趋于成熟,现已较为广泛地运用于风能资源评估领域^[10],中尺度数值模式在风电预报中的应用也得到国内众多学者的关注^[9, 11-15]。与此同时 WRF 等模式针对大气运动中的各种物理过程已经发展出一系列参数化方案,包括微物理参数化方案,辐射方案 (长波方案和短波方案),积云过程方案以及与边界层有关的方案: 表面层 (SL),行星边界层 (PBL) 和陆面过程模式 (LSM) 等等。各种物理过程参数化方案都是建立在一定的假设之上,不仅彼此之间是非线性的关系,而且与模式的动力核心

之间也是非线性的。这参数化方案的选择会给预报结果带来重要的影响^[16],特别是边界层参数化方案。

风机轮毂高度一般在 70 ~ 100 m,该高度范围内的近地层风场演变是边界层内的天气现象,近地层风场的预报效果很大程度上依赖于模式边界层参数方案的合理性^[9]。在植被稀疏、地形复杂的环境下,模式边界层的参数化是决定模式能否较好模拟出该地区近地层风场特征的关键^[17]。大气边界层物理过程与下垫面物理性质具有紧密关系,蒙西地区独特的地理位置和地形地貌会对该地区的边界层特性产生影响。

本文研究的蒙西地区处于 37 - 46°N, 97 - 120°E,以蒙古高原为主体,同时具有较为复杂多样的形态。平均海拔在 1 000 m 以上,北部地势较为平坦,中部自西向东分布着阴山山脉 (狼山、色尔腾山、大青山、灰腾梁),西南部还有贺兰山山脉,这些山脉共同构成内蒙古高原地貌的脊梁。该地区属典型的中温带季风气候,具有降水量少而不匀、寒暑变化剧烈的显著特点^[18-19]。除此之外,大气边界层物理过程也受到天气尺度背景场的制约与影响^[20],蒙西地区常年受到蒙古高压的作用,这也影响着该地区的边界层特性。下垫面和天气背景的共同作用使得该地区的边界层特性有独特的特点,边界层内的风速明显高于其他地区,其年平均风速在 3 m/s 以上,蕴藏丰富的风能资源^[21],合理地选择边界层参数化方案对于蒙西地区近地层风场的预报至关重要。

虽然国内外关于边界层参数化方案对近地形风场影响的研究并不少见^[22-27],但大多是基于 10 m 风场的天气学分析,与风电预报结合较少,而且这些研究很可能得不到“普适”的结论,因为在某一局地模式中与本站结合最好的参数化方案很可能在其他区域完全不适用^[28-29]。如果不对特定的地区进行边界层参数化方案的试验,只靠以往的研

究很难选出最优的方案,因此有必要对蒙西地区进行不同的边界层参数化方案数值试验,从而利用该地区丰富的风塔观测资料对结果进行评估检验,以便为该地区的风资源预报服务提供参考。

1 资料与研究方法

1.1 观测资料简介

本文用于检验模式预报效果的观测数据为蒙西地区 70 个国家级地面气象站的 10 m 风观测资料,和蒙西地区 18 座测风塔的 10 m 和 70 m 风向风速

资料。地面站和测风塔的分布如图 1 所示,可以看出,蒙西的中部站点分布较密,东部站点较稀疏。

1.2 边界层参数化方案简介及试验设置

现阶段 WRF 中的行星边界层参数化方案有 10 多种,主要有 MRF 方案^[30]、YSU 方案^[31]、ACM2 方案^[32]、TEMF 方案^[33]、MYJ 方案^[34]、QNSE 方案^[35]、BouLac 方案^[36]、MYNN2 方案^[37]、MYNN3 方案^[38]以及 UW 方案^[39],其中前 4 种边界层方案为非局地方案,其它为局地边界层方案,详见表 1。本研究将选取其中 7 种常用的方案进行试验。

表 1 WRF 模式中常用的边界层参数化方案

Table 1 The common boundary layer parameterization schemes used in WRF model

方案名称	湍流闭合阶数/阶	主要特点
MRF	1	反梯度非局地输送,使用 K 廓线的方法来确定扩散系数
YSU	1	基于 MRF 方案,显式地表示夹卷过程
ACM2	1	显式表示非局地输送,使用 K 廓线方法来确定扩散系数
TEMF	1.5	非局地边界层方案, M-Y 2.5 级, 预报 TE
MYJ	1.5	M-Y 2.5 级, 预报 TKE
QNSE	1.5	M-Y 2.5 级, 预报 TKE, 稳定层结使用光谱理论
BouLac	1.5	M-Y 2.5 级, 预报 TKE
MYNN2	1.5	M-Y 2.5 级, 预报 TKE
MYNN3	2	M-Y 3 级, 预报 TKE
UW	1.5	M-Y 2.5 级, 预报 TKE

本研究采用 WRF-ARW 3.7.1 模式对蒙西地区 2015 年 5 月的低层风场进行回报,预报每天世界时 12 时冷启,一次预报 36 h。试验中的初边条件来自于美国环境预报中心的全球预报系统提供的 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 的全球预报场,每 6 h 更新一次边界值。模式采用 12 km 和 4 km 的双层嵌套,两重模拟区域的水平网格数分别为 448×373 和 601×403 ,中心经纬度为 102.6°E 和 41°N ,模拟区域如图 1 所示。试验中还利用 GSI 系统同化地面观测、探空、飞机报等资料。模式的物理过程参数化方案

选择如下:短波辐射采用 Dudhia 方案^[40];长波辐射采用 RRTM 方案^[41];微物理过程采用 Lin 方案^[42];陆面过程采用 Noah 方案^[43];积云对流采用 KF 方案^[44],在此基础上采用 7 种不同的边界方案进行回报试验,7 种方案分别为 YSU、MYJ、MYNN2、QNSE、ACM2、UW 以及 TEMF,其中 YSU、ACM2 和 TEMF 为非局地闭合方案,其余为局地闭合方案。近地层方案与边界层相匹配的,所对应近地层过程参数化方案见表 2。

表 2 本文试验选取的 7 种边界层试验方案及其近地层方案

Table 2 Physical parameterization configuration of the simulation

模式参数	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5	方案 6	方案 7
边界层	YSU	MYJ	MYNN2	QNSE	ACM2	UW	TEMF
近地层	MM5	M-O	MYNN	QNSE	Pleim-xiu	MM5	TEMF

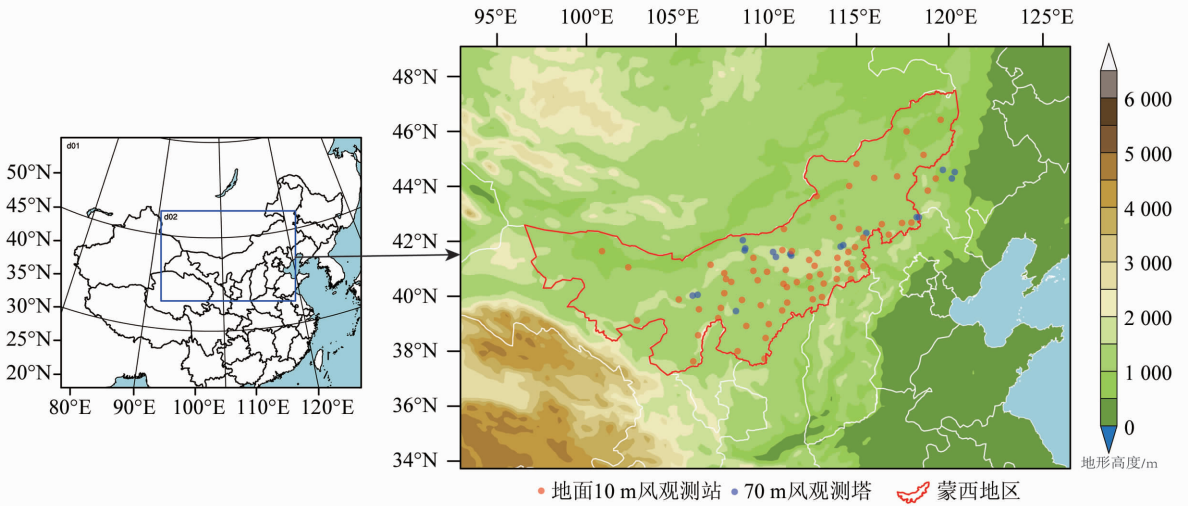


图 1 模式区域设置及测风站点分布

Fig. 1 Simulation domain and spatial distributions of wind observation stations in western Inner Mongolia

1.3 研究方法

本研究主要通过一些统计量来检验不同边界层对风场的预报情况，主要的统计量如下：

风速误差

$$ERR = x_f - x_0$$

风向误差为公式 (2)，因为风向是 $0^\circ \sim 360^\circ$ 的循环的标量，其误差的绝对值不会超过 180° ，所以与风速误差的公式有所区别。

$$ERR = \begin{cases} x_f - x_0, & |x_f - x_0| \leq 180; \\ (x_f - x_0) \left(1 - \frac{360}{|x_f - x_0|}\right), & |x_f - x_0| > 180 \end{cases}$$

绝对误差为，

$$AE = |ERR|$$

相对误差为，

$$RE = \frac{AE}{x_0} \times 100\%$$

有了上面的基础定义，可以得到平均误差 (ME)、平均绝对误差 (MAE)、平均相对误差 (MRE)、均方根误差 (RMSE) 和相关系数 (CORR) 等一系列统计量。

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N ERR$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N AE$$

$$MRE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N RE$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N ERR^2}$$

$$CORR = \frac{\sum_{i=1}^N (x_f - \bar{x}_f)(x_0 - \bar{x}_0)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_f - \bar{x}_f)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (x_0 - \bar{x}_0)^2}}$$

这些公式中， N 为观测数量， x_0 为观测值， x_f 为预报值。

Weibull 分布是用于描述风速分布的概率函数，风速 v 的 Weibull 分布概率密度函数表达式为，

$$f(v) = \frac{k}{\lambda} \left(\frac{v}{\lambda}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{\lambda}\right)^k\right]$$

其中 k 为形状参数，是一个无量纲量， λ 为尺度因子，单位为 m/s ，两个参数可用如下公式来计算

$$k = \frac{\sigma}{\mu}$$

$$\lambda = \frac{\mu}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} = \frac{\mu}{\left(0.568 + \frac{0.434}{k}\right)^{\frac{1}{k}}}$$

其中， σ 和 μ 分别表示风速的标准差和平均值。

为了研究风场预报效果与风切变之间的关系，定义风切变指数^[45]为

$$\alpha = \ln\left[\frac{v(z_2)}{v(z_1)}\right] / \ln\left(\frac{z_2}{z_1}\right)$$

其中， $v(z_1)$ 和 $v(z_2)$ 分别表示 z_1 和 z_2 高度处的风速，本文 z_1 和 z_2 分别取为 10 m 和 70 m。风切变指数 α 为无量纲数，一般分为 5 个等级，分别为强稳定、稳定、中性、对流及强对流，相应的 α 取值为分别为大于 0.3、0.2 ~ 0.3、0.1 ~ 0.2、0 ~ 0.1 及小于 0。

2 结果与分析

2.1 试验的整体效果分析

为研究不同边界层方案在蒙西风场预报中的表现,对 2015 年 5 月份蒙西地区风场进行回报试验,选取每次预报的第 12 ~ 35 h 共计 24 个时次的预报,然后采用反向距离方法将风场预报结果插值到观测站点以便与观测进行比较。首先分析近地层 10 m 高度 (图 2) 和 70 m 高度 (图 3) 的站点观测和模拟结果的平均风速和平均风向的逐小时变化曲线。10 m 站点观测的平均风速为 1 ~ 10 m/s, 70 m 的站点观测平均风速则在 2 ~ 14 m/s。对风向而言,10 m 跨度为 50° ~ 350°, 70 m 则为 100° ~

350°, 两者相差不大。就实况风速的变化而言,10 m 风速相对于 70 m 的风速脉动性更强,风速值的峰谷交替频率更高,且峰谷的起伏更为明显,这种情况在 1 ~ 20 日时段内尤为突出,20 ~ 30 日时段内波动强度变弱。各边界层方案对 10 m 风速都有一定的高估,且风速起伏越明显的地方,这种高估也就更为明显,这种系统性误差在前人的研究中也有所揭示^[46]。模式对风向的把握整体较好,10 m 和 70 m 都没有明显的偏差。总体而言虽然模式的预报结果抓住了实际风速风向的变化趋势和位相变化,但是不同的边界层方案之间存在明显差异,10 m 风速的差异尤为突出。

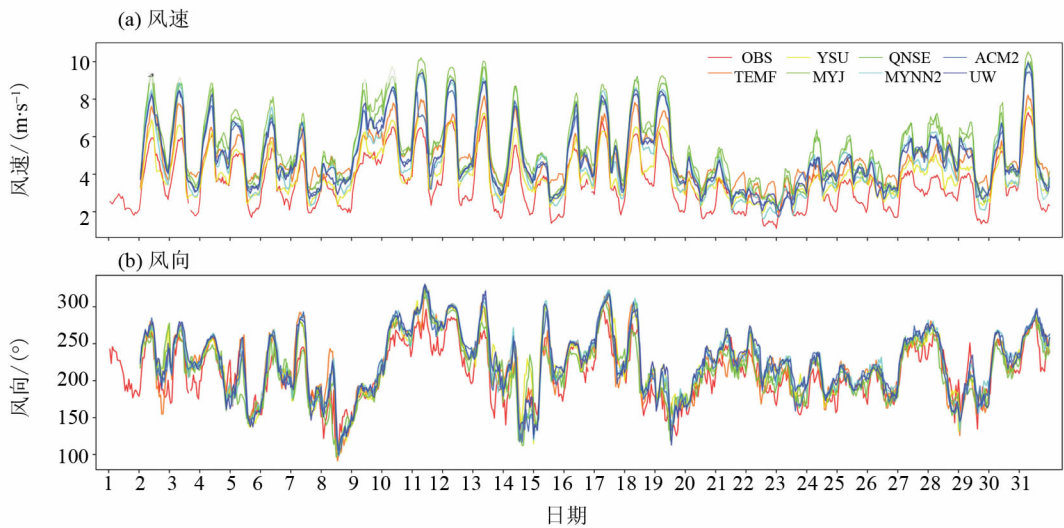


图 2 2015 年 5 月试验时段内观测与模拟的 10 m 风速和风向随时间的变化

Fig. 2 Time series of the observed and various BL scheme-simulated speed & direction for 10 m wind at in May 2015

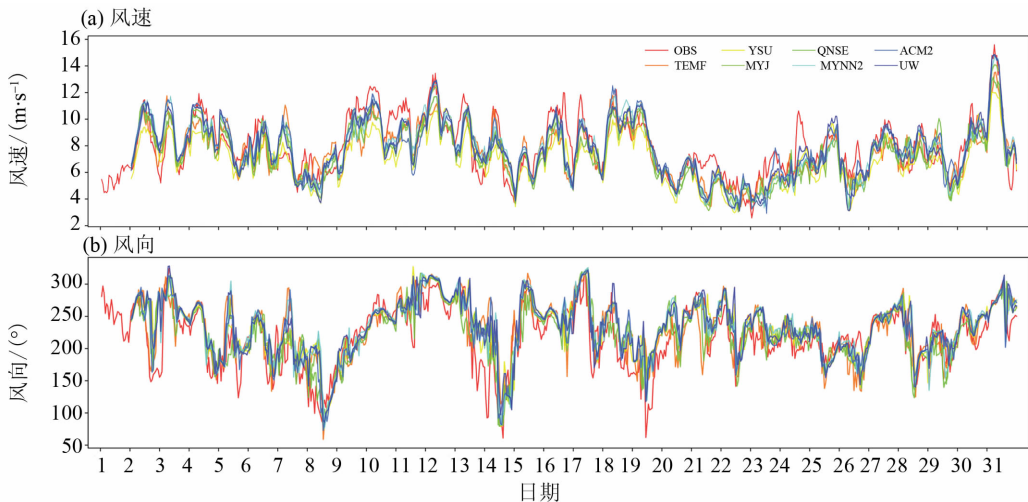


图 3 2015 年 5 月试验时段内观测与模拟的 70 m 风速和风向随时间的变化

Fig. 3 Time series of the observed and various BL scheme-simulated wind speed & direction at 70 m in May 2015

为了更直观地分析各方案对风向的模拟效果，分别对 10 m（图 4）和 70 m（图 5）的风场模拟结果绘制风玫瑰图与实况进行对比。由图 4 中可知，在试验期间 10 m 风场频率较高的风向在第 II 和第 III 象限，频率多在 7% 以上，而第 I 和第 IV 象限风向频率较低，都在 4% 左右。主导风向为 W、WNW 和 NW，这三者出现的频率都在 10% 左右，差距不大，其中 WNW 方向的频率是三者中稍高的。各方案都抓住了实际风向的整体分布特征，但一些细节方面跟实况仍有一些差异。各试验方案模拟的主导风向跟观测相比有顺时针偏差，其中 W 风较观测顺转了一个方位且频率偏大，同时与 WNW 风的频率差增大，其中 ACM2、MYJ、MY-

NN2 和 UW 等方案表现最为明显。而在第 I、IV 象限的非主导风向区内从 NE 沿顺时针到 SSE 这个区间内，各试验方案对其风向频率都有所低估。综合来看，YSU 和 TEMF 两种方案对 10 m 风向的把握要优于其余 5 种边界层方案。图 5 中 70 m 风场的主导风向和 10 m 的相似，也位于坐标系的第 II 和第 III 象限，非主导风向区为第 I 和第 IV 象限。W、WNW 和 NW 是出现频率最大的 3 个风向，频率都在 11% 左右，最主要的风向为 NW 风。各方案模拟的风向的总体分布形势与实况相符，但同样有使主导风向“加强”的趋势，即高估主导风向发生的频率，从而加大与非主导风向之间的频率差，使得模拟的风向更加趋于集中在某一风向范围内。

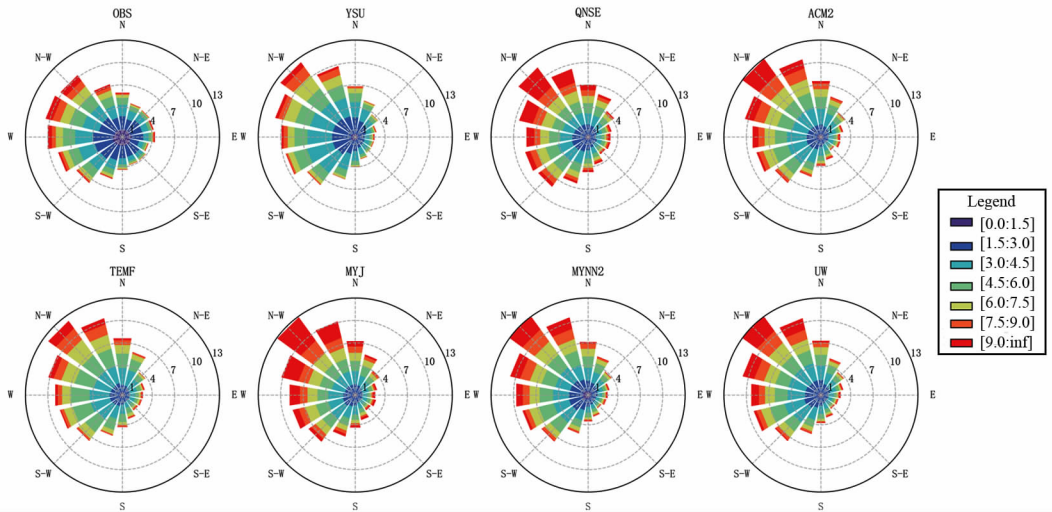


图 4 2015 年 5 月试验时段内 10 m 高度观测与各边界层方案的风玫瑰图

Fig. 4 Wind rose plots for the observed and various BL scheme-simulated results for 10 m wind in May 2015

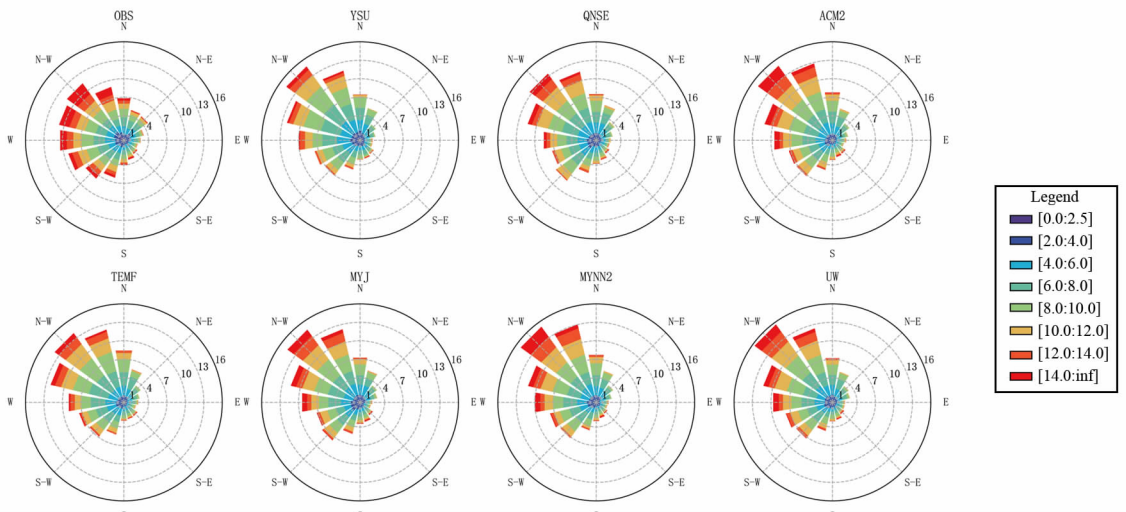


图 5 2015 年 5 月试验时段内 70 m 高度观测与各边界层方案的风玫瑰图

Fig. 5 Wind rose plots for the observed and various BL scheme-simulated results for 70 m wind in May 2015

表 3 和表 4 分别为不同高度风速风向预报结果的统计特征, 针对风速的统计量分别为相对误差 (RE)、误差根误差 (RMSE)、时序相关 (time CORR) 和站点相关 (station CORR), 因为风向是一个循环型的变量, 不存在“大小”的概念, 所以针对风向不讨论相对误差, 只计算其偏差 (ME), 其余 3 个统计量与风速相同。由表 3 不难看出, YSU 方案对 10 m 风场预报的平均相对误差 (19.34%) 和平均均方根误差 (1.95 m/s) 都很明显地低于其他方案。就各方案的平均站点相关系数而言, MYJ 的最高, 为 0.50, 最低的 TEMF 为 0.44, 各方案站点相关系数差异不大, 各方案对风速的空间分布形势的预报能力相近。MYNN2 的平均时序相关系数最大为 0.71, 最低的是 TEMF, 为 0.59, 比 MYNN2 低 0.12, 表明 TEMF 方案对风速的突变的预报能力较弱。而 70 m 风速预报结果的统计量与 10 m 风相反, YSU 的平均相对误差和平均均方根误差为各方案中最大的, 分别为 16.87% 和 3.19 m/s。70 m 风速的站点相关系数和时序相关系数都是 MYNN2 和 ACM2 的两种方案较高, 站点相关系数都为 0.56, 时序相关都为 0.69, 而 TEMF 方案两种相关系数最低, 分别为 0.50 和 0.62。如表 4 所示, 10 m 风向的统计结果表明, QNSE 方案预报的风向均方根误差最小, 为 4.66°, 误差最大的方案为 UW 方案, 为 15.20°, MYJ 的平均均方根误差最小, 为 53.71°, 平均均方根误差最大的为 TEMF 方案, 为 57.11°。站点相关系数和时序相关系数都是 MYNN2 方案最大, 分别为 0.40 和 0.48, 而 TEMF 方案两种相关系数各方案中都是最小, 分别为 0.37 和 0.44。QNSE 方案的

70 m 风向误差最小, 为 6.12°, 是, 而 UW 方案的误差最大, 为 15.37°。均方根误差则是 ACM2 最小, 为 39.34°, 最大的为 TEMF 方案, 为 43.68。站点相关系数最小的方案都是 TEMF, 两系数分别为 0.45 和 0.49, 而最大的方案分别为 UW 和 ACM2, 值分别为 0.50 和 0.55。综合来看, 各方案预报的 10 m 和 70 m 风向都有顺时针偏差, 但各方案的平均风向偏差都在 20° 以内。总体来讲 TEMF 方案在风向的预报上表现较差, MYNN2 表现较好。

图 6 是 10 m 和 70 m 观测及模拟的风速频率分布直方图及其对应的 Weibull 分布拟合曲线。图 6a 中实测的 10 m 风速众数偏左, 即低风速发生的频率较大, 高风速出现的频率较小, 其形状参数为 1.45, 尺度因子 λ 大小为 3.85 m/s。而各方案的模拟风速拟合的 k 值都要大于实际风速, 最小值为 1.88, 最大值为 2.09, λ 值也都大于实况, 从最小值 5.37 m/s 到最大值 6.22 m/s。各方案对小于 2.5 m/s 的低风速模拟的不是很好, 大于 2.5 m/s 的风速则都表现为一定的高估。YSU 方案的拟合曲线形状跟观测最为接近, 但是 λ 值较众值偏右。各试验方案的众值相对观测向右偏移, 趋向于正态分布。图 6b 的 70 m 实际风速分布情况跟 10 m 的有所不同, 其 k 值为 2.02, λ 为 8.95 m/s, 两个参数都比 10 m 的大, 所以相较 10 m 实测风速整体右移, 且形状更趋向于正态分布。各模拟方案的拟合参数相较 10 m 时与实况也更为接近。通过风速频率分布直方图和 Weibull 拟合曲线可以发现, 各方案在低风速和高风速时表现为对实际风速的低估, 在中等风速时则表现为一定程度的高估。

表 3 2015 年 5 月试验时段内 10 m 和 70 m 风速预报结果的统计特征

Table 3 Different metrics for comparing simulations of different BL schemes with observations at 10 m and 70 m for wind speed in May 2015

10 m 风速	TEMF	YSU	MYJ	QNSE	MYNN2	ACM2	UW
RE/%	42.96	19.34	57.76	49.36	34.72	41.97	41.58
RMSE/ (m · s ⁻¹)	2.41	1.95	2.90	2.74	2.32	2.40	2.41
Station CORR	0.44	0.46	0.50	0.47	0.49	0.49	0.49
Time CORR	0.59	0.67	0.70	0.67	0.71	0.68	0.70
70 m 风速	TEMF	YSU	MYJ	QNSE	MYNN2	ACM2	UW
RE/%	14.23	16.87	13.15	13.72	13.32	12.67	12.76
RMSE/ (m · s ⁻¹)	3.18	3.19	3.00	3.12	2.90	2.88	2.92
Station CORR	0.50	0.52	0.54	0.51	0.56	0.56	0.55
Time CORR	0.62	0.66	0.68	0.66	0.69	0.69	0.68

表 4 2015 年 5 月试验时段内 10 m 和 70 m 风向预报结果的统计特征

Table 4 Different metrics used for comparing simulations of different BL schemes with observations at 10 m and 70 m for wind direction in May 2015

10 m 风向	TEMF	YSU	MYJ	QNSE	MYNN2	ACM2	UW
ME/(°)	10.04	13.23	10.15	4.66	15.10	12.82	15.20
RMSE/(°)	57.11	55.18	53.71	54.97	54.22	53.94	54.20
Station CORR	0.37	0.39	0.39	0.38	0.40	0.39	0.39
Time CORR	0.44	0.47	0.47	0.46	0.48	0.47	0.46
70 m 风向	TEMF	YSU	MYJ	QNSE	MYNN2	ACM2	UW
ME/(°)	10.53	12.91	11.46	6.12	15.44	13.32	15.37
RMSE/(°)	43.68	39.73	40.39	41.30	39.35	39.34	39.50
Station CORR	0.45	0.50	0.49	0.48	0.48	0.49	0.50
Time CORR	0.49	0.54	0.54	0.53	0.54	0.55	0.54

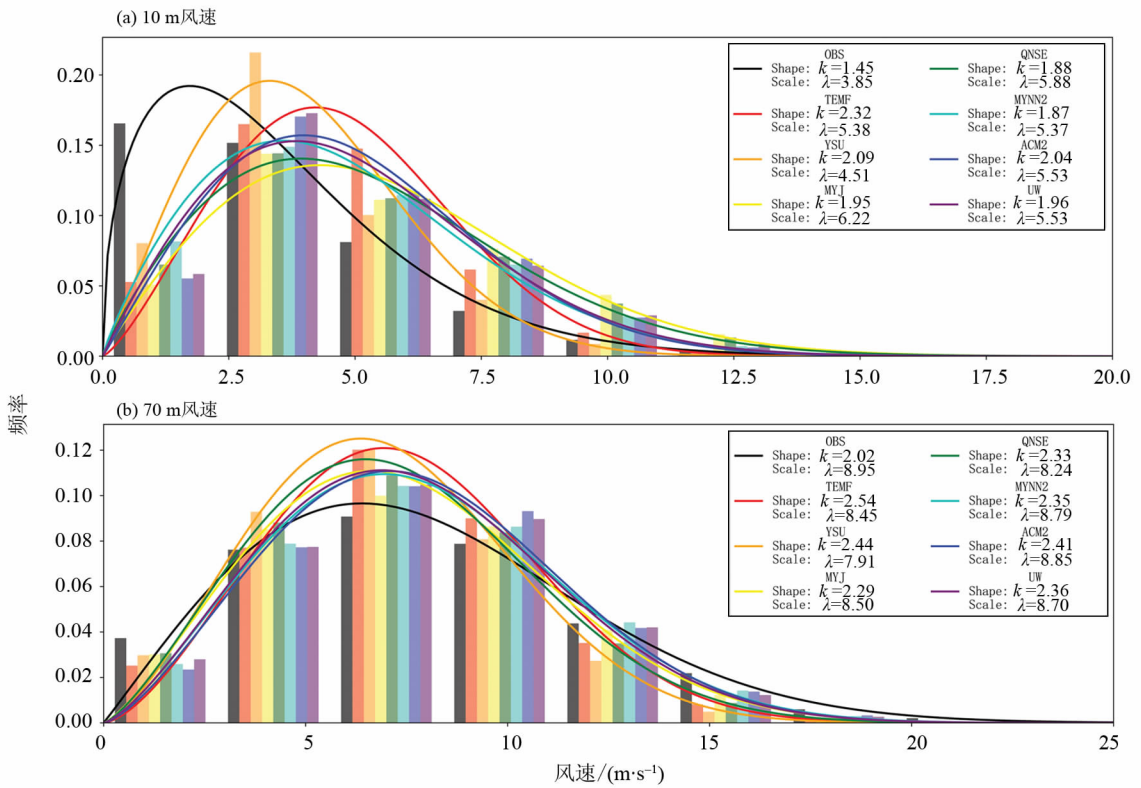


图 6 2015 年 5 月试验时段内 10 m 和 70 m 风速频率分布及 Weibull 拟合

Fig. 6 Wind speed distribution and Weibull fitting of simulations of different BL schemes and observations at 10 m and 70 m in May 2015

2.2 风速误差的分段分析

太小的风速不能使风机叶片转动，无法将动能转化为电能，风速太大则有损坏风机的危险，因此风电领域中一般将风速分为 4 个等级^[14]，分别为无效风速 (0 ~ 3 m/s)、有效风速 (3 ~ 15 m/s)、满发风速 (15 ~ 25 m/s) 和切出风速 (大于 25 m/s)，以此为基础分析不同风速区间的各边界层方案的预报效果，可以有针对性地选择边界层参数化方

案，并且优化模式的预报效果。这里取前 3 个风速等级来分析。

图 7 为 10 m 处风速的分段误差统计量结果，可以看到 3 个风速区间的平均相对误差和平均误差存在很大差异。各方案在无效风速 (0 ~ 3 m/s) 区间的平均相对误差最大，各方案对低风速的预报都有不同程度的高估，其中偏差最小为 YSU 方案，大小为 81.80%，最大为 MYJ，是 136.87%。在有

效风速 (3 ~ 15) m/s 区间内, 整体模拟结果的平均相对误差是 3 个风速区间内最小的, 7 种方案平均相对误差在 6.84% ~ 32.79%, 平均相对误差最小的仍然是 YSU 方案, 最大的仍是 MYJ 方案。而在 (15 ~ 25 m/s) 风速区间内, 各方案平均相对误差又有所增大, 范围为 33.10% ~ 46.72%, 这时 MYJ 表现最好, 而 YSU 表现最差。而 10 m 风速的平均绝对误差方面, 切入风速段和有效风速段 (0 ~ 15 m/s) 平均绝对误差小, 最大为 2.36 m/s, 满发风速段 (15 ~ 25 m/s) 平均误差大, 最大为

7.30 m/s。图 8 为 70 m 风速的分段检验的结果, 图 8b 显示切入风速区间各方案的平均相对误差最大, 满发风速段次之, 有效风速段最小。切入风速区间内各方案的误差在 130.79% ~ 156.43%, TEMF 最高, QNSE 最低。有效风速区间内各方案的平均相对误差在 5.36% ~ 14.29%, 最低和最高的方案分别为 ACM2 和 YSU。满发风速区间内平均相对误差仍然是 YSU 方案最高, 为 31.50, 最低的方案是 MYNN2, 大小为 22.44%。各风速段的平均绝对误差和 10 m 风速类似。

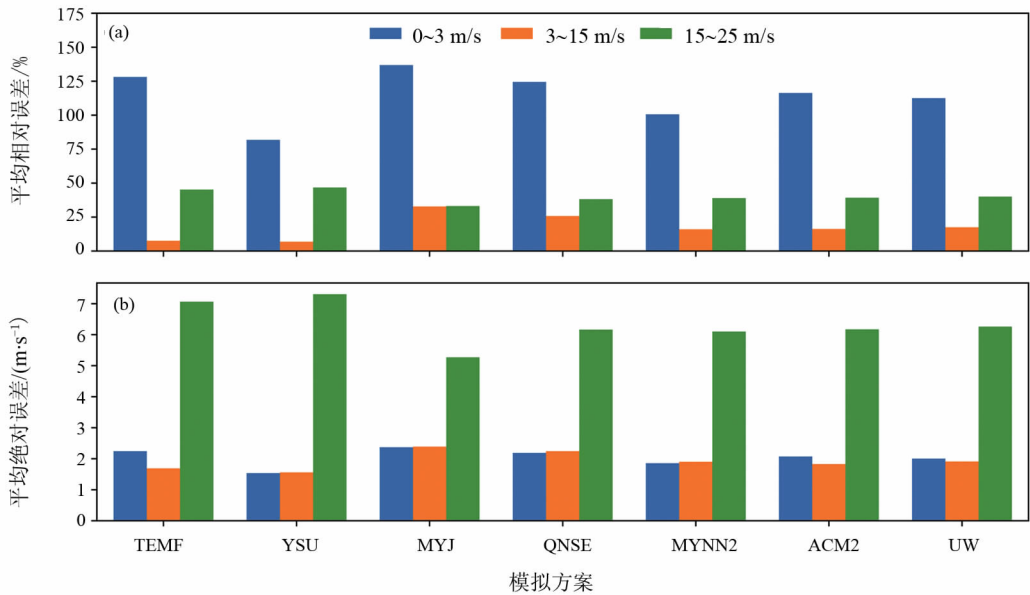


图 7 2015 年 5 月试验时段内 10 m 风速平均相对误差及平均绝对误差的分段统计结果

Fig. 7 Mean relative error and mean absolute error of wind speed for different wind categories at 10 m in May 2015

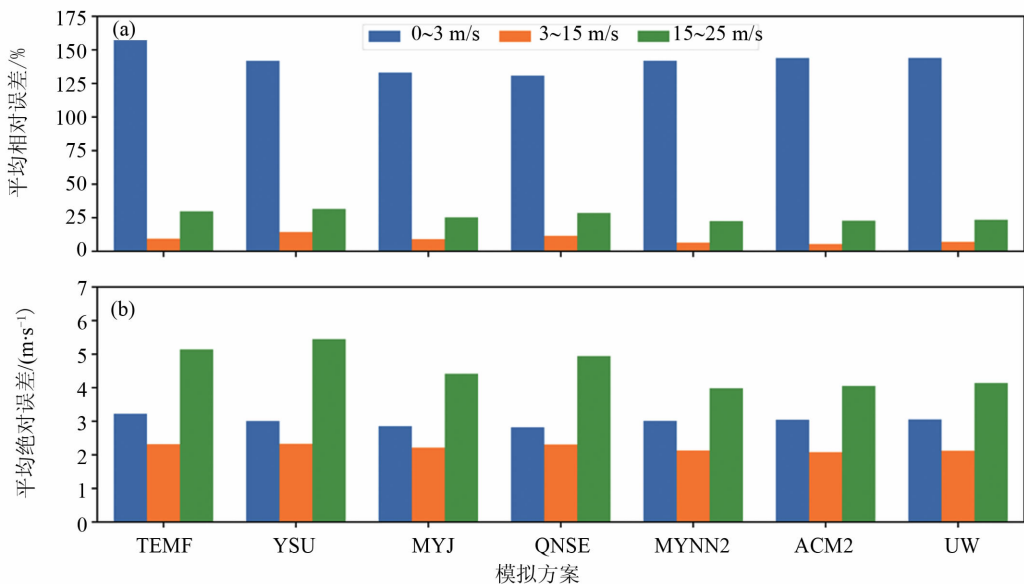


图 8 2015 年 5 月试验时段内 70 m 风速平均相对误差及平均绝对误差的分段统计结果

Fig. 8 Mean relative error and mean absolute error of wind speed for different wind categories at 70 m in May 2015

2.3 风场模拟误差的日变化特征分析

近地层风场变化很容易受到地表特性的影响，尤其是地表加热作用。在天气背景一定时，局地热力特性在一天中的改变必然会影响到近地层风场，因此分析各试验方案对风场日变化的预报效果是十分重要的。根据世界时和地方时的关系，文本白天对应的是世界时 00 - 10 时，夜间指世界时 11 - 23 时。图 9a 和 b 分别为风速和风向月平均得到日变化特征，可见实测的平均风速、平均风向存在很明显的日变化特点，当日 22 时 - 次日 08 时，风速逐渐增大，有大致 2 m/s 的增幅，08 - 21 时风速逐渐减小。风向也大致呈现出同样的日变化特征，00 - 08 时，平均风向不断顺转，这期间转动的幅度大约为 40°，08 - 14 时，风向又较快地逆转回到原本的方向，接着 14 - 23 时，风向较为稳定地维持在 190° ~ 200° 之间，期间有小幅波动。结合图 9 中的 c 和 d 发现，虽然各边界层方案都很好地抓住了这种风速风向的日变化特征，但各方案模拟得到的月平均风速要比观测偏高，其中最为明显的是 MYJ 方案，偏高最小的是 YSU 方案。大部分方案风速的平均相对误差在 11 时出现最低，且夜晚的误差大于白天的。对风向的模拟大部分方案都表现为正的偏差，即相对于观测顺偏，只有 QNSE 方案的平均风向偏差在 05 - 12 时出现了负的偏差。由图 10 可以看到 70 m 的实测风速风向也存明显的日变化特点，观测的平均风速在 00 - 07 时不断增大，07 - 23 时，风速不断减小。大部分的试验方案也都给出了类似的结果，只有 YSU 方案在 00 - 11 时

其模拟的风速结果比其它边界层方案偏低，跟观测比约偏低 1 ~ 1.5 m/s。70 m 风向白天与 10 m 的风向变化相似，但是夜间 14 - 23 时平均风向一直为顺转，与 10 m 时有所差异。另外，结合图 9 和图 10 综合来看可以发现，在 10 m 高度上实测平均风速小于各方案模拟的风速，而在 70 m 高度上的实测平均风速大部分时间都大于各方案模拟的平均风速，这说明 10 m 和 70 m 之间的实际风速切变要大于大部分模拟的风速切变，这种情况在白天更为突出。

2.4 稳定度指数分析

大气层结对近地层风场有很大影响，而风切变指数可以反映近地层的大气稳定度。上文风速日变化的分析也发现了实际风切变大于模拟风切变的现象。为了更为细致地分析各方案对风切变指数在试验时段内的模拟情况，图 11 给出了观测及各方案在一个月的试验段内逐小时的风切变指数变化特征。由图中可知风切变指数呈现出很明显的日变化特征，在每日白天大气以中性层结为主，有时会出现对流层结；而每日的夜间，稳定层结和强稳定层结占主导。7 种边界层方案的模拟结果也都呈现出明显的日变化特征，但是跟实况相比都存在一定误差。在白天，除了 TEMF 方案外，其余各方案的预报相较观测都趋向于更不稳定层结，MYJ 和 QNSE 表现最为明显，YSU 和 ACM2 最不明显；而夜间各方案模拟的风切变指数大部分方案小于观测，只有 MYNN2 和 YSU 的风切变指数稍高于观测。综合来看，TEMF、YSU 以及 ACM2 方案对风切变指数

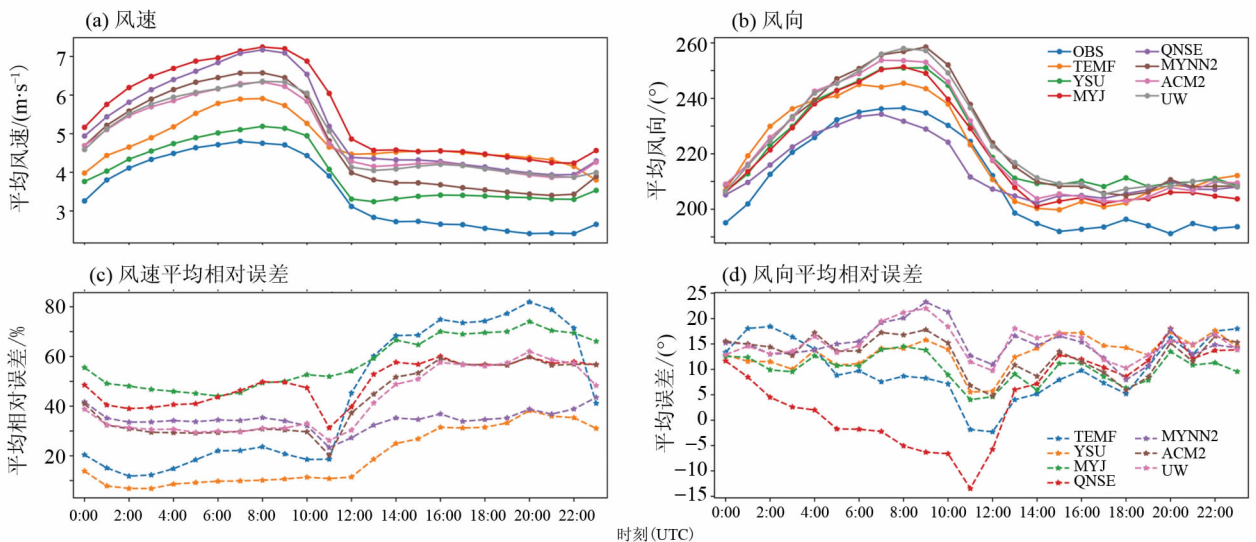


图9 2015年5月试验时段内10 m各方案模拟风速、风向及其误差的日变化

Fig. 9 The diurnal variation of wind speed, wind direction and their errors for 10 m wind in May 2015

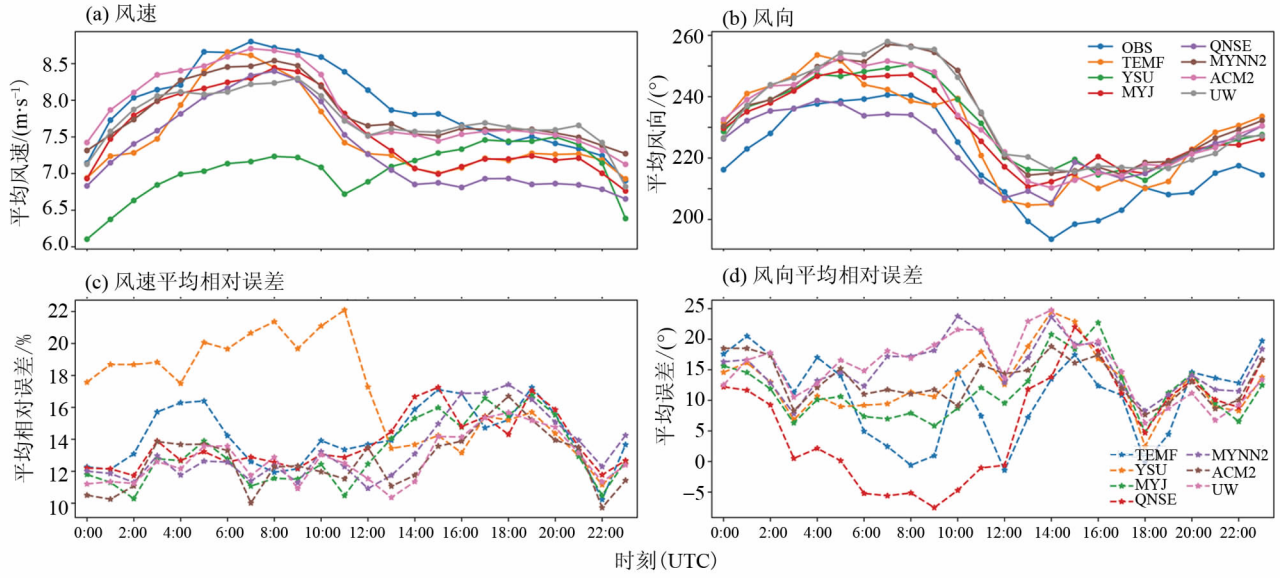


图 10 2015 年 5 月试验时段内 70 m 各方案模拟风速、风向及其误差的日变化

Fig. 10 The diurnal variation of wind speed, wind direction and their errors for 70 m wind in May 2015

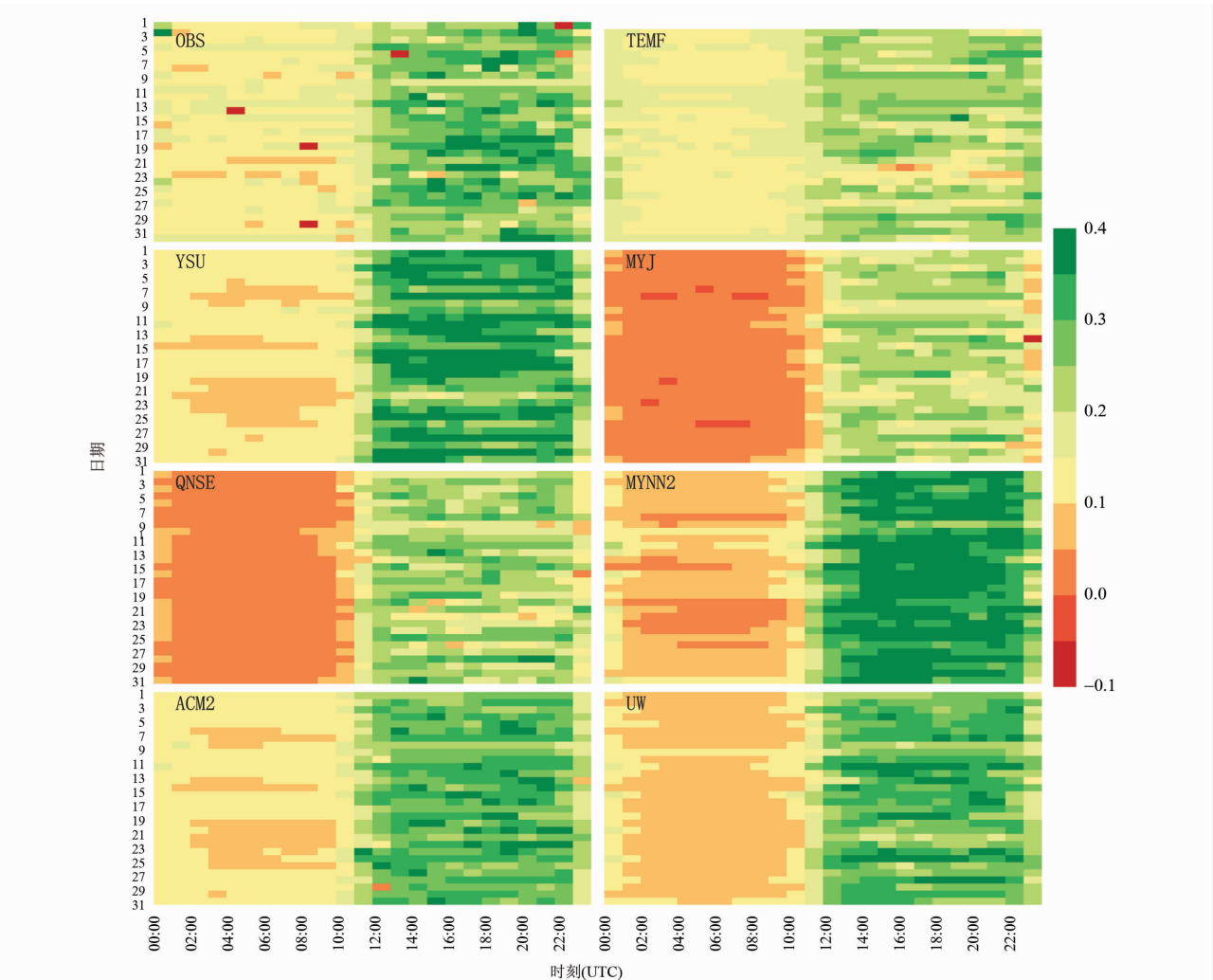


图 11 2015 年 5 月试验时段内模拟和观测的风切变指数

Fig. 11 The wind shear index of simulations of different BL schemes and observations during the hindcasting period in May 2015

的预报较其他方案稍好, 结合前面的分析可知, 在稳定度预报较为准确的时刻, 10 m 风速的预报也比较准确, 说明大气层结的稳定性对低层风场的影响更为突出。

4 结 论

利用 WRF 中尺度高分辨率数值模式和 GSI 同化系统, 采用 7 种不同的边界层方案对 2015 年 5 月份蒙西地区的近地面风场进行预报试验, 结果表明:

1) 总体而言各方案的预报都可以抓住实际风速风向的演变和位相变化; YSU 方案对 10 m 风速的预报效果最好, ACM2 对 70 m 风速预报效果最好; 各方案对 10 m 风场的预报差异较 70 m 的更为明显, 且模拟的风速偏大; 模式对低风速的预报能力较差。

2) 风速的分段检验表明, 各方案对有效风速

(3 ~ 15 m/s) 的预报效果最好, 对满发风速 (15 ~ 25 m/s) 的效果次之, 对无效风速 (0 ~ 3 m/s) 的预报效果最差。

3) 各方案都能模拟出风速风向的日变化特征, 表现为白天风速的不断增加和风向的顺转, 傍晚到夜间风速的减小和风向的逆转。

4) 不同的边界层方案对风切变指数的模拟存在差异, 大部分边界层方案在白天对风切变指数的模拟小于观测, 其中 TEMF、YSU 以及 ACM2 方案对风切变指数的预报较好。大气层结的稳定性对低层风场的模拟有比较重要的影响。

本研究受计算资源和资料的限制, 未能进行更长时间段的试验, 不同边界层方案的试验还可以进一步进行不同季节的敏感性试验。另外由于缺少站点上的通量观测数据, 未能对不同边界层方案的各种通量特征进行更为细致的检验和对比。这些问题需要在后续的研究中不断完善和深入。

参考文献:

- [1] EDENHOFER O, PICHS-MADRUGA R, SOKONA Y, et al. Renewable energy sources and climate change mitigation: Special report of the intergovernmental panel on climate change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2011.
- [2] 吴丰林, 方创琳. 中国风能资源价值评估与开发阶段划分研究 [J]. 自然资源学报, 2009(8): 1412 - 1421.
WU F L, FANG C L. Wind power resource appraisal and development stage regional division of China [J]. Journal of Natural Resources, 2009(8): 1412 - 1421.
- [3] 吴运东. 世界并网型风电技术发展趋势 [J]. 风力发电, 2001, 17(1): 1 - 4.
WU Y D. Development trend of world grid-connected wind turbine technology [J]. Wind Power, 2001, 17(1): 1 - 4.
- [4] 杜祥琬, 黄其励, 李俊峰, 等. 我国可再生能源战略地位和发展路线图研究 [J]. 中国工程科学, 2009, 11(8): 4 - 9.
DU X W, HUANG Q L, LI J F, et al. Research on the strategic status and development roadmap of renewable energy in China [J]. Engineering Sciences, 2009, 11(8): 4 - 9.
- [5] BOSSANYI E. Short-term wind prediction using kalman filters [J]. Wind Engineering, 1985, 9(1): 1 - 8.
- [6] TORRES J L, GARCIA A, DE BLAS M, et al. Forecast of hourly average wind speed with arma models in Navarre (Spain) [J]. Solar Energy, 2005, 79(1): 65 - 77.
- [7] MOHANDS M A, REHMAN S, HALAWANI T O. A neural networks approach for wind speed prediction [J]. Renewable Energy, 1998, 13(3): 345 - 354.
- [8] PINSON P, HAGEDORN R. Verification of the ecmwf ensemble forecasts of wind speed against analyses and observations [J]. Meteorological Applications, 2012, 19(4): 484 - 500.
- [9] 靳双龙. 中尺度 WRF 模式在风电功率预测中的应用研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 2013.
XIN S L. Application and researches of mesoscale model WRF in wind power prediction [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2013.
- [10] 李艳, 汤剑平, 王元, 等. 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, 2009(2): 192 - 200.
LI Y, TANG J P, WANG Y, et al. Application of dynamical downscaling method for assessment of wind energy resources [J]. Climatic and Environmental Research, 2009(2): 192 - 200.
- [11] 王勇. 基于 WRF 模式的酒泉风电基地近地层风场特征模拟研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 2012.
WANG Y. The simulation and analysis of wind characteristics near surface layer in Jiuquan with WRF [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2012.
- [12] 张飞民, 王澄海. 利用 WRF-3DVAR 同化常规观测资料对近地层风速预报的改进试验 [J]. 高原气象,

- 2014(3): 675–685.
- ZHANG F M, WANG C H. Experiment of surface-layer wind forecast improvement by assimilating conventional data with WRF-3DVAR [J]. *Plateau Meteorology*, 2014(3): 675–685.
- [13] 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 [J]. *高原气象*, 2014(5): 1315–1322.
- HE X F, ZHOU Y W, SUN Y H. Verification on surface wind speed of three global circulation models in China [J]. *Plateau Meteorology*, 2014(5): 1315–1322.
- [14] 孙逸涵, 何晓凤, 周荣卫. 不同背景场近地层风速的预报效果检验 [J]. *资源科学*, 2013(12): 2481–2490.
- SUN Y H, HE X F, ZHOU Y W. Evaluation of forecasting results of wind speed based on different background fields in the surface layer [J]. *Resources Science*, 2013(12): 2481–2490.
- [15] 徐丽娜, 石岚, 冯凯宁. BJ-RUC 预报系统在内蒙古 10m 风速预报中的效果检验 [J]. *干旱区资源与环境*, 2015(1): 149–153.
- XU L N, SHI L, FENG K N. Analysis of 10 m wind speed prediction using BJ-RUC forecast system in Inner Mongolia [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2015(1): 149–153.
- [16] AWAN N K, TRUHETZ H, GOBIET A. Parameterization-induced error characteristics of mm5 and WRF operated in climate mode over the alpine region: An ensemble-based analysis [J]. *Journal of Climate*, 2011, 24(12): 3107–3123.
- [17] 王澄海, 胡菊, 靳双龙, 等. 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 [J]. *干旱气象*, 2011, 29(2): 161–167.
- WANG C H, HU J, XIN S L, et al. Application and test of lower level wind field simulation with meso-scale model WRF in western region of northwest China [J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2011, 29(2): 161–167.
- [18] 张德. 风能资源数值模拟及其在中国风能资源评估中的应用研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 2009.
- ZHANG D. Study on wind energy numerical simulation and its application to wind energy resources assessment in China [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2009.
- [19] 孙璐. 蒙西风电场风资源的分析评估方法研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
- SUN L. Analysis assessment of wind resources in west Inner Mongolia wind farm [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.
- [20] 刘罡, 蒋维楣, 罗云峰. 非均匀下垫面边界层研究现状与展望 [J]. *地球科学进展*, 2005, 20(2): 223–230.
- LIU G, JIANG W M, LUO Y M. Status quo and prospects of researches on atmospheric boundary layer over inhomogeneous underlying surface [J]. *Advances in Earth Science*, 2005, 20(2): 223–230.
- [21] 兰忠成. 中国风能资源的地理分布及风电开发利用初步评价 [D]. 兰州: 兰州大学, 2015.
- LAN Z C. Preliminary evaluation on the geographic distribution of wind energy resources and its development and utilization in China [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2015.
- [22] DRAXL C, HAHMANN A N, PEÑA A, et al. . Evaluating winds and vertical wind shear from weather research and forecasting model forecasts using seven planetary boundary layer schemes [J]. *Wind Energy*, 2014, 17(1): 39–55.
- [23] GÓMEZ-NAVARRO J, RAIBLE C, DIERER S. Sensitivity of the WRF model to PBL parametrizations and nesting techniques: Evaluation of surface wind over complex terrain [J]. *Geosci Model Dev Discuss*, 2015, 8: 5437–5479.
- [24] HU X M, NIELSEN-GAMMON J W, ZHANG F. Evaluation of three planetary boundary layer schemes in the WRF model [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2010, 49(9): 1831–1844.
- [25] MIROCHA J D, SIMPSON M D, FAST J D, et al. Investigation of boundary-layer wind predictions during nocturnal low-level jet events using the weather research and forecasting model [J]. *Wind Energy*, 2016, 19(4): 739–762.
- [26] ZHANG D L, ZHENG W Z. Diurnal cycles of surface winds and temperatures as simulated by five boundary layer parameterizations [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2004, 43(1): 157–169.
- [27] WANG C, HU J, FENG S, et al. Comparing different boundary layer schemes of WRF by simulation the low-level wind over complex terrain [C] // *Proceedings of Artificial Intelligence, Management Science and Electronic Commerce (AIMSEC)*. Zhengzhou: The 2nd International Conference on IEEE, 2011: 6183–6188.
- [28] KRIEGER J R, ZHANG J, ATKINSON D E, et al. Sensitivity of WRF model forecasts to different physical parameterizations in the beaufort sea region [C]. Phoenix, USA: The Eighth Conference on Coastal Atmospheric and Oceanic Prediction and Processes, 2009.
- [29] GARCIA-DIEZ M, FERNANDEZ J, FITA L, et al. Seasonal dependence of WRF model biases and sensitivity to pbl schemes over Europe [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2013, 139(671): 501

- 514.
- [30] HONG S Y, PAN H L. Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium-range forecast model [J]. *Monthly Weather Review*, 1996, 124(10): 2322–2339.
- [31] HONG S Y, NOH Y, DUDHIA J. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes [J]. *Monthly Weather Review*, 2006, 134(9): 2318–2341.
- [32] PLEIM J E. A combined local and nonlocal closure model for the atmospheric boundary layer. Part i: Model description and testing [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2007, 46(9): 1383–1395.
- [33] ANGEVINE W M, JIANG H, MAURITSEN T. Performance of an eddy diffusivity-mass flux scheme for shallow cumulus boundary layers [J]. *Monthly Weather Review*, 2010, 138(7): 2895–2912.
- [34] JANJIC Z I. The step-mountain eta coordinate model: Further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes [J]. *Monthly Weather Review*, 1994, 122(5): 927–945.
- [35] SUKORIANSKY S, GALPERIN B, PEROV V. Application of a new spectral theory of stably stratified turbulence to the atmospheric boundary layer over sea ice [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2005, 117(2): 231–257.
- [36] BOUGEAULT P, LACARRERE P. Parameterization of orography-induced turbulence in a mesobeta-scale model [J]. *Monthly Weather Review*, 1989, 117(8): 1872–1890.
- [37] NAKANISHI M, NIINO H. An improved mellor-yamada level-3 model: Its numerical stability and application to a regional prediction of advection fog [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2006, 119(2): 397–407.
- [38] NAKANISHI M, NIINO H. Development of an improved turbulence closure model for the atmospheric boundary layer [J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan (Ser II)*, 2009, 87(5): 895–912.
- [39] BRETHERTON C S, PARK S. A new moist turbulence parameterization in the community atmosphere model [J]. *Journal of Climate*, 2009, 22(12): 3422–3448.
- [40] DUDHIA J. Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1989, 46(20): 3077–3107.
- [41] MLAWER E J, TAUBMAN S J, BROWN P D, et al. Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: Rrtm, a validated correlated- k model for the longwave [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1997, 102(D14): 16663–16682.
- [42] LIN Y L, FARLEY R D, ORVILLE H D. Bulk parameterization of the snow field in a cloud model [J]. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 1983, 22(6): 1065–1092.
- [43] TEWARI M, CHEN F, WANG W, et al. Implementation and verification of the Unified Noah land surface model in the WRF model [C] // *Proceedings of the 20th Conference on Weather Analysis and Forecasting/16th Conference on Numerical Weather Prediction*. Seattle, USA: 2004.
- [44] KAIN J S. The kain-fritsch convective parameterization: An update [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2004, 43(1): 170–181.
- [45] WHARTON S, LUNDQUIST J K. Assessing atmospheric stability and its impacts on rotor—disk wind characteristics at an onshore wind farm [J]. *Wind Energy*, 2012, 15(4): 525–546.
- [46] CHENG W Y, STEENBURGH W J. Evaluation of surface sensible weather forecasts by the WRF and the eta models over the western united states [J]. *Weather and Forecasting*, 2005, 20(5): 812–821.