

引用格式:穆清晨,王咏薇,邵凯,等.山地复杂条件下三种边界层参数化方案对近地层风模拟精度初步评估分析[J].资源科学,2017,39(7):1319-1360. [Mu Q C, Wang Y W, Shao K, et al. Three planetary boundary layer parameterization schemes for the preliminary evaluation of near surface wind simulation accuracy over complex terrain[J]. *Resources Science*, 2017, 39(7): 1349-1360.] DOI: 10.18402/resci.2017.07.12

山地复杂条件下三种边界层参数化方案对近地层风模拟精度初步评估分析

穆清晨^{1,2},王咏薇^{1,2},邵凯³,王恪非^{1,2},高雅琪^{1,2}

(1. 南京信息工程大学大气环境中心,南京 210044; 2. 南京信息工程大学大气物理学院,南京 210044;
3. 金风科技股份有限公司,北京 100176)

摘要:中国风能资源丰富,风能开发行业逐步发展,风速预报的准确性是关键问题。数值模式中,边界层参数化方案对地表热力及动力强迫引发的大气湍流特征的合理计算对于复杂地形条件下小尺度局地风速的预报十分重要。本文选取MYJ、YSU、ACM2三种边界层参数化方案模拟2010年贵州韭菜坪复杂地形条件下的近地层风以检验风速模拟性能。结果表明,在中国西南复杂山地地形条件下,由于计算机理包含非局地闭合的大尺度涡动对运动的影响,ACM2方案对近地层70m高度风速的模拟效果优于其余两种方案,2010年4月逐小时模拟结果与观测结果的均方根误差为3.56m/s,一致性指数为0.94。对风向的模拟三种方案结果相近,但与实测风向的误差随着高度不断减小,70m的模拟结果优于10m。采用威布尔概率密度函数估算平均风能密度,在不同高度上结果稍有差异,但在50m和70m(风机轮毂高度)高度上ACM2方案更优。

关键词:WRF模式;风速模拟;边界层参数化方案;山地地形

DOI: 10.18402/resci.2017.07.12

1 引言

风是一种无污染可再生能源,被广泛应用于风力发电^[1]。大气边界层内的风受到地形、高低层天气系统相互作用及地面非绝热加热、海陆温差等物理过程的影响,具有较强的瞬变性、波动性和间歇性,这给电力系统的安全稳定及供电能力带来了严峻的挑战^[2,3]。为了有效地利用风能资源,国家能源局在2011年颁布的《风电场功率预测预报管理暂行办法》中明确规定,所有并网运行或在建设中风电场均应具备风电功率预测预报能力,对预报准确度也有明确规定^[4]。数值模式预报是采用高性能计算机,以精确的描述天气演变过程的流体力学和热力学方程组为动力学基础,对大气运动的变化进行预报的方法^[5],能有效弥补统计预报方法对历史数据

要求高、预报时常受限等缺点^[6],尤其适用于复杂的地形和大气条件,在很大程度上减小了风场预报的不确定性,逐渐成为风速研究应用和业务发展的主流。

WRF (Weather Research Forecasting)^[7]是中国气象预报领域应用比较广泛的中尺度数值模式之一,其对风速模拟预报的效果受诸多因素影响^[8],不同参数化方案的设置会直接影响近地层风速模拟的准确性^[9]。合理地使用各物理参数化方案组合可以更好地预报风速与风向^[10],其中行星边界层参数化方案与辐射过程参数化方案设置对风速预报结果准确性影响较大,而微物理过程参数化方案与积云对流参数化方案设置对风速预报结果准确性影响较小^[11]。大气边界层是气候系统的重要环节,对

收稿日期:2016-12-10;修订日期:2017-05-05

基金项目:国家自然科学基金面上项目(41575009);江苏高校优势学科建设工程项目(PAPD);江苏省产学研前瞻性项目(BY2015070-15)。

作者简介:穆清晨,女,吉林白山人,硕士生,主要研究WRF参数化方案对风速预测影响。E-mail: muqc61@yahoo.com

通讯作者:王咏薇, E-mail: wyw@nuist.edu.cn

大气和气候有明显影响^[12],在对大气的数值模拟过程中,边界层的处理方法决定了模拟的大气边界层和混合层高度、湍流混合强度和时空演变以及风场的准确性^[13],尤其在复杂地形条件下,陆-气相互作用的独特动力和热力强迫效应不仅对天气形成和演化具有深刻影响,还对区域气候格局和大气环流具有重要作用^[14],王澄海等就曾对中国西北部近地层风进行模拟,结果指出在植被稀疏地形复杂的环境下,模式边界层的参数化方案选择是模拟风速的关键^[15]。祖繁等指出模式对山地及沿海风速的模拟误差各不相同^[16],近些年来对于不同的下垫面上边界层参数化方案的适应性研究如D. Carvalho等对伊比利亚半岛向岸风与离岸风能评估^[17]及葡萄牙高风模拟敏感性试验^[18]等多集中于沿海区域,对山地复杂地形条件下近地层风的研究如J. J. Gómez-Navarro等对瑞士风暴的模拟^[19]也不能完全适用于中国复杂地形。何晓凤等利用中国400座测风塔观测资料检验中国近地层风场预报能力时也指出内蒙古、东北和沿海部分区域误差较小,内陆地区误差较大,尤其在高原和内陆复杂地形下预报效果不佳^[20],因此在复杂地形条件下,讨论边界层参数化方案对风速预测的影响对于风能的预报及应用有一定意义。

本文选取WRF模式中MYJ(Mellor-Yamada-Janjic)^[21]、YSU(Yonsei University)^[22]、ACM2(Asymmetric Convective Model Version 2)^[23]三种边界层参数化方案对中国南部复杂山地地形条件下风电场2010年4月风速进行模拟。将各方案模拟结果与观测资料分别从风速、风向、风能等方面进行对比分析,评估三种边界层参数化方案在复杂下垫面条件下的风模拟效果,期望为中国南部复杂山地条件风模拟的参数化方案设置提供借鉴和参考。

2 模式、算例及观测数据简介

2.1 WRF模式及边界层参数化方案介绍

本文采用的WRF模式,是由美国多所研究机构和大学共同合作开发的一种统一的中尺度天气预报模式。中小尺度模式的水平格距一般为几十公里不等,比10~100m的边界层湍流输送的特征尺度量级要大得多,为了考虑这种次网格尺度的效应,需要采用参数化方法^[24]。

边界层参数化方案分为高阶局地闭合方案和非局地闭合方案两大类,局地闭合方案对闭合问题的解决方法是采用K闭合,即假设湍流动量交换和分子粘性引起的动量交换在形式上是相似的,可以用湍流粘性系数 K_m (或湍流扩散系数)及平均速度梯度来表示。MYJ方案的预报方程组中包含了湍流动能预报方程和二阶矩,属于1.5阶闭合方案,能预报湍流动能TKE并有局部的垂直混合,在对待局地湍流过程中相当精确^[25]。MYJ方案中 K_m 表达式为:

$$K_m = \frac{cE^2}{\epsilon} \quad (1)$$

式中 c 为经验系数; E 为动能; ϵ 为湍能耗散率。

由于K闭合方案借鉴分子扩散理论,假设湍流运动为小尺度湍涡,沿着平均量的梯度方向运动,物质和通量交换只发生在相邻的模式格点上,因此该种闭合方案较适用于考虑稳定边界层和中性大气的局地湍流影响^[26]。

不稳定边界层中,湍流发展异常活跃,其垂直尺度甚至能发展到边界层高度范围,此时的湍流通量交换主要由对流大涡完成。这种情况下,以湍流扩散理论即K理论为基础的局地闭合方案会低估由于大涡运动导致的边界层内的湍流活动,因此在局地闭合的基础上考虑非局地闭合的影响,在湍流扩散项中加入非局地项,表达式为:

$$-\frac{\partial}{\partial z}(\overline{C'w'}) = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_m \frac{\partial \overline{C}}{\partial z} + \Gamma \right) \quad (2)$$

式中 C 为风速(u)、水汽(q)、位温(θ)等; z 为高度; $\overline{C'w'}$ 为因脉动引起的垂直方向动量输送。加入的 Γ 项即非局地闭合的影响,从而使对流边界层的模拟更加准确^[25]。在非局地方案中,空间某一点的未知量不止与局地已知量的值和梯度有关,而是用空间许多点已知量的值进行参数化的。不同的非局地闭合方案在对 Γ 项的处理方式上不同。WRF中YSU和ACM2方案就是较为常用的两种非局地方案^[17-19],YSU方案详细考虑了夹卷层的作用,并且考虑了湍流扩散方程中的“反向梯度输送项”^[22],ACM2方案最初广泛应用于MM5(Mesoscale Model version 5)模式中并用来产生CMAQ(Model-3 Community Multiscale Air Quality)大气传输模式需要的气象驱动场,从WRF3.0启动ACM2方案开始移植到WRF模式中,在稳定或者中性大气层结

2017年7月

条件下,ACM2方案会关闭非局部闭合传输过程并使用局部闭合过程^[23]。

2.2 模拟设计及风电场测风资料

本文选取的模拟区域为中国南部贵州地区韭菜坪风电场,是中国典型山地地形。模拟区域的初始场和边界条件采用 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 分辨率的NCEP(National Centers for Environmental Prediction)全球预报场资料。如图1所示,算例设置为3重嵌套网格,d01到d03嵌套区域的水平分辨率分别为9km、3km及1km。第三层模拟区域范围为 26.63°N - 27.14°N , 103.99°E - 104.82°E 。3重网格区域地形数据分别采用Modis全球地形5min、2min、30s数据。垂直分层采用层顶气压100hPa的34层分层,近地层取密。积分时间步长设置为30s,模拟时间为2010/4/1 8:00~2010/5/1 1:00,时长为一个月。模拟共分三个算例,分别采用MYJ、YSU、ACM2三种边界层参数化方案对模拟区域进行模拟。其他物理参数化过程均设置相同,其中微物理过程方案选择WSM3(WRF Single-Moment 3-class Microphysics scheme)类简单冰相方案;长波辐射过程采用RRTM(Rapid and Accurate Radiative Transfer Model)方案;短波辐射过程采用Dudhia方案;陆面过程采用Noah陆面过程方案;第一层模拟区域采用浅对流Kain-Fritsch(new Eta)方案,第二、三层不采用积云对流参数化方案。

模拟结果评估所用的测风资料来源于贵州地区韭菜坪一期测风塔。图1可见实验风场具体位置坐标为 104.675°E , 26.876°N ,海拔2680m。该风电场场址地面基本为草地,有少量灌木林,海拔高程在2300~2900m之间。测风塔位于山脊上,海拔较高,其西南侧地形相对陡峭,西侧与东南侧有山峰,北侧与南侧地势较低。测风传感器高度分别为10m、30m、50m、70m,测风数据为10分钟风速风向,观测时间为2010年4月3日8:00-2010/5/1 1:00,选取的是典型的春季大风时段。

3 模拟结果与对比分析

3.1 不同边界层参数化方案对风速模拟的影响

将测风塔10m、30m、50m及70m高度实际测风数据分别与模拟结果进行对比,三种方案与实测风速逐小时对比如图2所示。山地条件下春季风速具

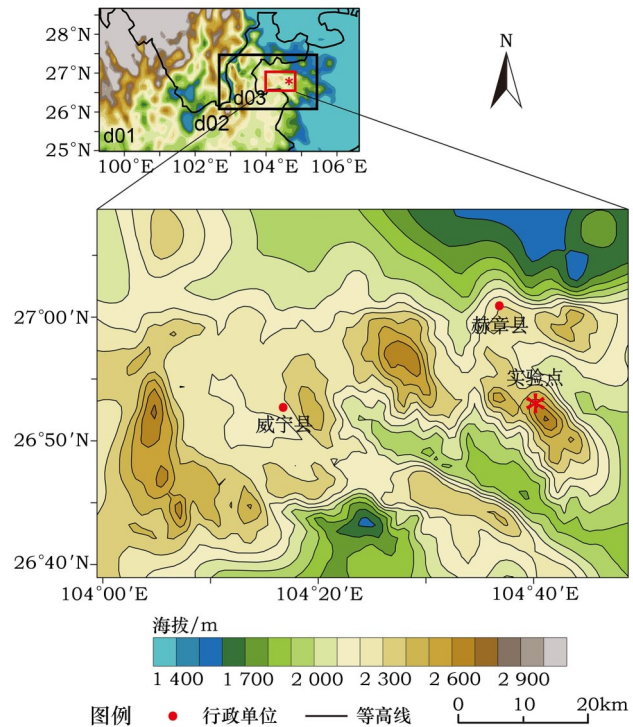


图1 模式模拟三重嵌套区域分布及地形

Figure1 Triple nested regional distribution of model and the terrain

有较大的波动性,约每3~5天出现一次极值。三种方案对风速的模拟结果与观测值均能大致吻合,在4个不同高度层中风速的变化不大,每种方案对各层的模拟结果也甚是相近,但不同的方案对风速波动的模拟却有区别。ACM2方案对风速峰值模拟最好,几处重要峰值如4月3日、5日及11日只有ACM2方案较好的模拟了出来,对谷值模拟也没有明显误差。MYJ方案对峰值模拟稍偏低一些,但个别模拟值如24日峰值明显偏高,但对谷值模拟较为准确。YSU方案除了几处峰值模拟稍不理想,其余与ACM2方案的模拟结果相近,但对谷值的模拟基本都偏低一些。

为量化评估模拟结果,选择相关系数 r 、百分比误差 E 、均方根误差 $RMSE$ 、一致性指数 I 四种统计参数,对比模拟结果与观测值的吻合程度,几种统计学参数公式如下:

相关系数:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (S_i - \bar{S})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (S_i - \bar{S})^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2}} \quad (3)$$

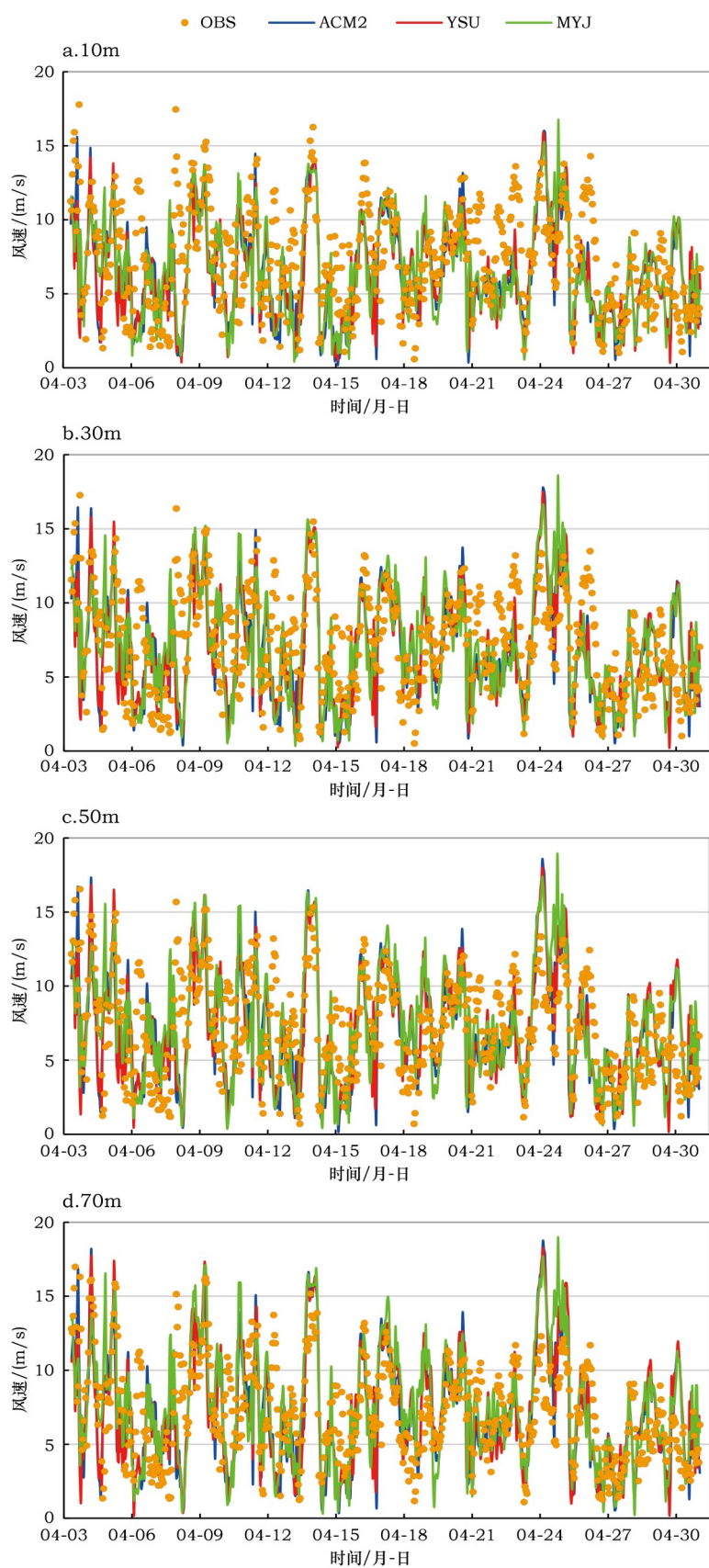


图2 10m、30m、50m、70m 实测风速与模拟结果对比

Figure 2 Comparison diagram of measured wind speed and simulation results at 10m, 30, 50, 70m

2017年7月

相对误差:

$$E = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|S_i - O_i|}{O_i} \quad (4)$$

均方根误差:

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i - O_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

一致性指数:

$$I = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (S_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^N (|S_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (6)$$

式中 S_i 与 O_i 分别为模拟与实测风速; \bar{S} 与 \bar{O} 分别为模拟与实测平均风速; N 为样本容量。相关系数 r 与一致性指数 I 的值均在 0~1 之间, 值越大代表两组数据的相关性越好, 一致性越高。而百分比误差 E 、均方根误差 $RMSE$ 越大则代表误差越高。将各层风速整月实测值与模拟值分别求平均, 计算出 4 个统计参量的值, 得到表 1。为了更清晰的看出各模式模拟风速的优劣, 将表 1 数据中吻合度最高的统计参数加粗标注。从表中明显看出在各个高度层吻合度最高的统计参数几乎都集中在 ACM2 方案, 10m、30m、50m、70 m 四个高度上相关系数 r 值最高, 10m、30m 高度在 0.43 左右, 70m 高度则达到 0.49, 相关性最好; 相对误差 E 在各个高度上均为最低, 控制在 0.48~0.54 之间, YSU 方案与 ACM2 结果相近, 只在 50m 高度上误差稍大。均方根误差

$RMSE$ 均在 3.7 以下, 对风速的波动有较好掌握; 一致性指数 I 在各高度层三种方案的结果都不错, 总体达到 0.94 以上。YSU 方案中有个别最优值但均与 ACM2 方案相同, 只有 50m 高度上达到 0.95 的一致性指数略高于 ACM2, 总体模拟情况较好, 仅次于 ACM2 方案。MYJ 方案的模拟结果则稍逊色, 相关系数、相对误差、均方根误差均稍逊于另两种方案, 只有一致性指数结果相当。综合比较 4 个高度层中 4 种统计参量的计算值, ACM2 方案对风速的模拟效果优于另外两种方案, 相关系数及一致性指数较高说明可以较好的模拟出瞬时风速, 相对误差和均方根误差较低则说明 ACM2 方案对风速变化率也有较好掌握。且随着高度的增加三种方案的模拟效果均有所提高, 高度越高各边界层方案之间的差异越小。

3.2 不同边界层参数化方案对于风向模拟的影响

将三种边界层参数化方案在 10m 和 70m 高度风向分布与实测值进行对比, 分别得到图 3 与图 4。图 3 为 10m 高度上实测和模拟风向的频率对比图, 结果显示 3 种方案对风向的模拟差距不大, 均模拟出了测风塔所处位置 4 月份的主导风向为偏西南风。但模拟结果相对于实测主导风向均有近 22.5° 的误差, 且主导风向频率的模拟结果比实测频率均低约 10%。三种方案对南风 and 偏东北风两个次主导风向的模拟结果则均不明显。

图 4 为 70m 高度的实测与模拟风向的频率对

表 1 不同边界层方案风速模拟统计参量对比

Table 1 Wind speed statistical parameter comparison of different boundary layer schemes

PBL Scheme	Height/m	sim_ave	obs_ave	r	E	$RMSE$	I
YSU	10	6.38	7.33	0.40	0.52	3.75	0.94
	30	6.83	7.30	0.42	0.54	3.71	0.94
	50	7.00	7.24	0.46	0.53	3.63	0.95
	70	7.12	7.12	0.49	0.48	3.58	0.95
MYJ	10	6.58	7.33	0.38	0.55	3.82	0.94
	30	7.10	7.30	0.40	0.58	3.83	0.94
	50	7.34	7.24	0.44	0.57	3.75	0.94
	70	7.54	7.12	0.47	0.52	3.72	0.95
ACM2	10	6.39	7.33	0.42	0.52	3.70	0.94
	30	6.79	7.30	0.43	0.54	3.70	0.94
	50	6.92	7.24	0.47	0.52	3.63	0.94
	70	7.01	7.12	0.49	0.48	3.56	0.95

注: 黑体数值表示最优值。

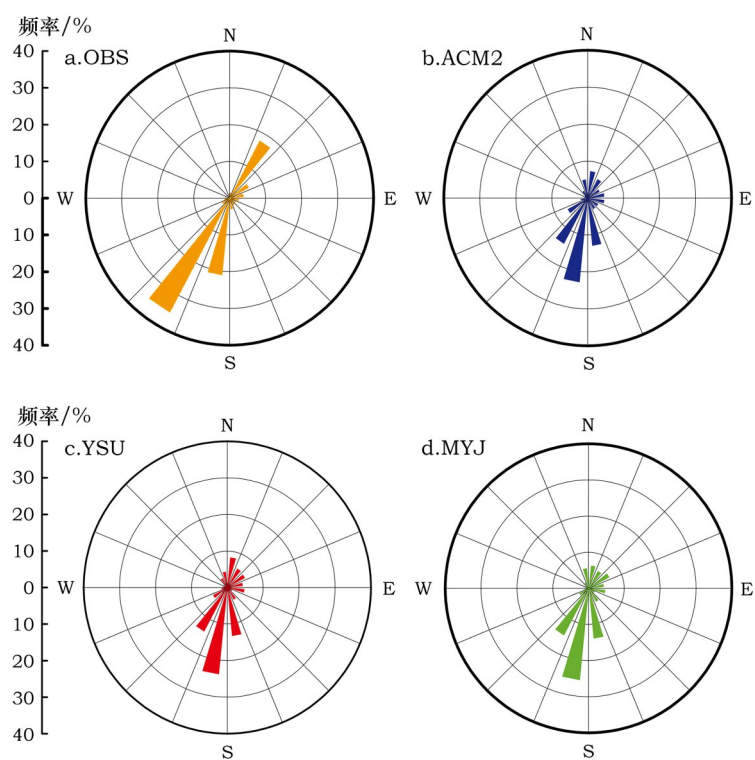


图3 10m 高度实测风向与模拟风向对比

Figure 3 Comparison diagram of measured wind direction and simulation results at 10m

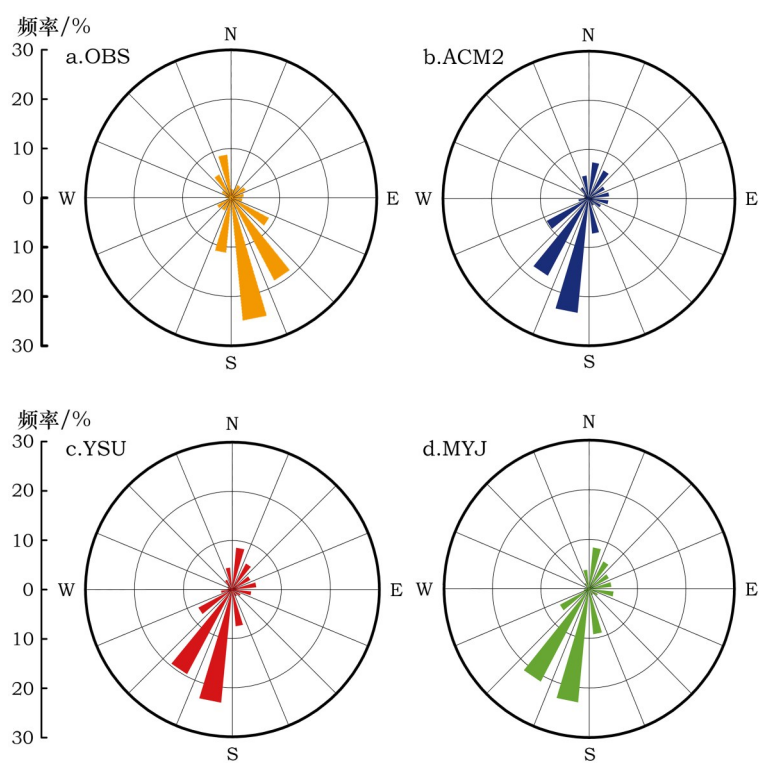


图4 70m 高度实测风向与模拟风向对比

Figure 4 Comparison diagram of measured wind direction and simulation results at 70m

2017年7月

比,三种参数化方案的模拟结果仍十分相近。70m高度的实测主导风向为东南偏南风,而三种方案的模拟结果中主导风向均为西南偏南风,主导风向仍均有22.5°左右的误差,但实测和模拟结果的主导风向频率基本一致。实测风的次主导风向为东南风,频率约20%,三种方案的模拟结果均为西南风,约有35°的误差,但频率仍较接近。对风向模拟产生偏差的主要原因与分辨率有关,实际地形上植被、水体及建筑等模式不能准确掌握,而这些对风向均有较大影响,分辨率的提升将会改善模拟结果。总的来说,三种边界层参数化方案受分辨率的限制在10m与70m高度上与实际主导风向均有约22.5°左右的偏差,对次风向的模拟误差较大。三种方案的模拟无明显差异,但对70m高度上风向频率的估计明显优于10m高度。可见风向对边界层参数化方案不敏感,但随着高度的增加模拟结果与实测值的误差也随之减小。

3.3 实测与模拟风的威布尔概率密度分布函数对比

准确的预测风能可以预估风场的发电效率,提高风能利用率且有效缓解发电机损伤,提高电机寿命^[27]。威布尔函数是常用的最接近实际风速情况的风速分布模型之一,它可以描述风速分布特征,利用参数预测各月的风能密度,也可以预测风力发电机全年运行时间及运行概率等^[28]。双参数威布尔分布是一种单峰的正偏态分布函数,其概率密度函数 $P(v)$ 表达式为:

$$P(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c} \right)^{k-1} \exp \left[- \left(\frac{v}{c} \right)^k \right] \quad (7)$$

式中 c 和 k 分别为威布尔分布的尺度参数和形状参数;尺度参数 c 反映风电场的平均风速; k 为无量纲量。特征参数可以根据某地在相当长的时间段内的风速实测数据回归拟合得到。经检验,各高度上测风塔实测风速与三种边界层参数化方案模拟的风速值均符合威布尔函数,计算确定得到威布尔分布参数见表2。表2所示 k 值几乎都介于2.0~2.4之间,这与吴伟等的研究结论认为中国威布尔分布的 k 值大部分集中在1.7~2.4之间的结论一致,且 k 在2.0~2.4时可减少风电机的损伤^[29]。尺度参数 c 大部分集中在(7~8)m/s之间,也符合选取模拟的春季风速较大月份的特点。通过计算得到的威布尔分布

表2 风速的威布尔分布参数值

高度	边界层方案	$c/(m/s)$	k
10m	OBS	8.28	2.28
	ACM2	7.21	2.08
	YSU	7.21	2.13
	MYJ	7.41	2.11
30m	OBS	8.23	2.34
	ACM2	7.67	2.02
	YSU	7.73	2.07
	MYJ	8.02	2.07
50m	OBS	8.17	2.32
	ACM2	7.82	1.98
	YSU	7.92	2.02
	MYJ	8.29	2.05
70m	OBS	8.17	2.32
	ACM2	7.82	1.98
	YSU	7.92	2.02
	MYJ	8.29	2.05

参数值,可以确定风速的分布形式,一般实测风速频率分布直方图较为杂乱,有多个峰值,经过威布尔拟合后原本杂乱无章的原始数据分布密度曲线变得比较光滑,能很好的将实测数据拟合为单峰概率密度函数,简化风能密度及有效风利用率等值的计算,因此给实际使用带来了许多方便,可以直接较为准确的计算出平均风功率密度、风能可利用小时数等等。

将各高度上实测风速与三种边界层参数化方案模拟的风速经过威布尔拟合后得到的风速分布函数进行比较,如图5所示。三种方案均能大致模拟出风速频率分布情况,10 m高度上以7m/s风速为分界线,模拟结果对7m/s以下小风频率有所高估,对7m/s以上中风则存在低估,对于13m/s以上大风模拟结果较准确,整体曲线向左偏移,这将导致模拟的平均风速偏低,三种边界层方案之间差距较小但与实测风速分布误差稍大。30m高度上模拟效果显著提升,较接近实测风速拟合曲线,对5m/s以下小风轻微高估,(5~13)m/s中风有略微低估,同样13m/s以上大风模拟结果很好。ACM2与YSU两种方案差距很小,而MYJ方案对小风模拟较优,但对大风存在轻微高估。50m和70m高度在中风速段低估较明显,10m/s以上大风模拟结果较优。总的

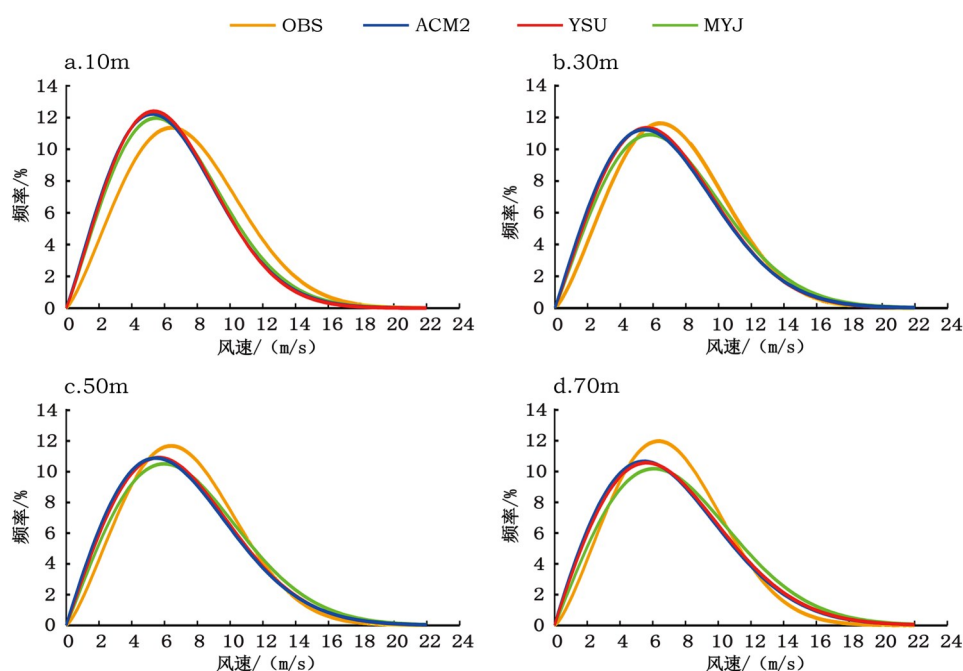


图5 各高度上实测与模拟风速威布尔概率密度分布

Figure 5 Weibull probability density distribution of the measured and simulated wind speed at different height

来说,对于较小风速段三种方案均存在一定程度的高估,而对较大风速则存在低估,这一方面是由于山地条件下复杂地形对风速有很大影响,测风塔位于山脊上,地势较高,且周围为平坦草地及少量灌木,没有高大树木的遮挡,有利于大风的形成,而模式不能完全还原测风塔地形特征,模拟总体风速较实际偏低则导致小风频率高估而较大风低估;另一方面在实际观测风速时,风杯风速计需要风速达到一定值时才能启动,响应偏慢则导致小风观测偏低,而旋转式风速计由于自身的非线性,在风速增大时比在风速减小时响应更快,造成对大风测量值偏大,这些系统偏差均有望通过对边界层参数化方案计算采用的动量方程修正或对观测数据进行校正而减小或消除,有待于日后进一步研究改善。相较而言在4m/s以下小风速段MYJ方案模拟结果较贴近实际情况,随着风速的增大模拟结果逐渐靠近观测结果,在中风速段存在低估,且随着高度的增加越来越明显,此时ACM2和YSU方案模拟结果较好,在50m和70m高度上这两种方案模拟结果更优,MYJ方案则对超过12m/s的大风存在高估。总体而言随着高度的增加,风速受复杂下垫面影响越来越小,模拟结果也越来越准确。

为了更直观的比较三种边界层参数化方案对风能的模拟效果,引入三个通过威布尔概率密度分布计算的物理量进行分析,分别是有效风利用率、平均风能密度与平均有效风能密度。风力发电机的有效利用风速一般为(3~25)m/s,利用表2中的威布尔参数 c 和 k ,可计算对应风速段占总风速的概率 F ,计算公式为:

$$F(v_1 \leq v \leq v_2) = \exp\left[-\left(\frac{v_2}{c}\right)^k\right] - \exp\left[-\left(\frac{v_1}{c}\right)^k\right] \quad (8)$$

式中 v_1 、 v_2 分别为最小与最大有效利用风速。平均风能密度 \bar{W} 是一定时间段内风能密度的平均值,单位为 W/m^2 ,计算公式为:

$$\bar{W} = \frac{1}{2} \rho c^3 \cdot \Gamma\left[1 + \frac{3}{k}\right] \quad (9)$$

式中 ρ 为空气密度; $\Gamma(x)$ 为伽马函数:

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} e^{-t} \cdot t^{x-1} dt \quad (10)$$

平均有效风能密度 \bar{W}_e 是在除去小于3m/s及大于25m/s这些不可利用的风速后,由平均风速所求出的风能密度,称为有效风能密度。它是描述一个地方风能潜力的最方便最有价值的量,计算式为:

$$\bar{W}_e = \frac{\bar{W}}{\exp\left[-\left(\frac{v_2}{c}\right)^k\right] - \exp\left[-\left(\frac{v_1}{c}\right)^k\right]} = \frac{\bar{W}}{F} \quad (11)$$

2017年7月

将不同高度上三种边界层参数化方案计算出的值与实测值对比,得到的各参量及有效风能密度百分比误差 δ (%),见表3,其中风能密度最优值加粗标识。在10m高度上受复杂下垫面影响,各参量误差都较大且存在较明显的低估,随着高度的增加有效风利用率不断贴近实际情况,至70m高度时仍存在轻微低估。三种方案对风利用率的模拟结果较为相近,MYJ方案略优于另两种方案,这是因为有效风利用率截断风速为(3~25)m/s,本次研究中几乎没有超过25m/s的风速,MYJ对小风频率模拟较准使得对有效风利用率模拟结果较好。有效风能密度的模拟结果在10m高度上误差较大,三种方案误差均在20%~30%之间,至30m高度结果明显优化,此时较贴近实际有效风能密度的为MYJ方案,但ACM2与YSU均与之相差不大。在50m和70m高度上有效风能密度模拟结果最优为ACM2方案,YSU方案次之,且明显优于MYJ方案。

总体而言随着高度的增加有效风利用率的模拟结果越来越优,三种方案之间差异不大,但平均有效风能密度误差随高度增加先减小后增大,且在10m和30m较低高度上为负值,MYJ方案模拟结果

较好但与另两种方案相差不大,而在50m和70m高度上为正值,ACM2方案模拟误差最小,YSU方案其次且明显优于MYJ方案。这可能是由于MYJ方案为局地方案,更适合稳定和中性大气,但对大尺度湍流的估计不足,故在近地面的10m及30m高度模拟较好,而YSU和ACM2方案较为适合垂直混合强烈的对流边界层,所以在较高高度上非局地闭合方案ACM2与YSU方案对风能的模拟优于MYJ方案。各参量计算结果显示ACM2与YSU模拟结果非常相似,ACM2结果较优可能是因为在山地下垫面条件下,边界层顶的逆温不明显,增加了夹卷过程显示求解的YSU方案相对于ACM2方案没有明显优势,ACM2方案对动力作用的准确模拟使其对阵风及瞬时风速模拟结果更优。鉴于大部分风机轮毂高度都大于50m,对50m及以上高度风能模拟最优为ACM2方案,且瞬时风速模拟的准确性对涡轮机的安全及电网平衡均有重要影响,ACM2方案在瞬时风速评估中各参量均为最优值,而MYJ方案则不能很好的模拟出瞬时风速及其变化率,故认为此次风模拟中ACM2方案更适用于此复杂地形条件下对近地层风性能模拟。

4 结论与讨论

本文使用WRF模式,选择中国西南部地区复杂山地为研究对象,评估了2010年4月3日至5月1日局地闭合边界层参数化方案MYJ、及非局地闭合参数化方案YSU、ACM2对于近地层风速的模拟性能,得出了一些初步结论。

三种方案均能大致上模拟出山地下垫面条件下近地面风场情况。在对近地层风速的模拟中ACM2方案对瞬时风速的模拟效果优于另外两种方案,均方根误差介于3.70到3.56之间,一致性指数在0.94以上,YSU方案次之。且随着高度的增加三种边界层方案中风速平均值与实测风速均值差值不断减小,相关系数和一致性指数均呈上升趋势,而相关误差与均方根误差均不断减小。这说明随着高度的增加三种方案的模拟效果均有所提高,且高度越高边界层方案之间的差异越小。

在对风向的模拟中三种边界层参数化方案受分辨率的限制在10m与70m高度上与实际主导风向均有约22.5°左右的偏差,对次风向的模拟误差较

表3 不同方案对各物理量模拟结果及百分比误差

Table 3 Different schemes to various physical quantities simulation results and the percentage error

高度	参数化方案	F	$\bar{W}/(W/m^2)$	$\bar{W}_e/(W/m^2)$	$\delta/\%$
10m	OBS	0.91	431.84	476.73	
	ACM2	0.85	309.11	363.07	-28.42
	YSU	0.86	303.50	354.21	-29.72
	MYJ	0.86	334.09	387.06	-22.64
30m	OBS	0.91	416.32	457.46	
	ACM2	0.86	384.64	447.05	-7.61
	YSU	0.87	383.20	441.40	-7.96
	MYJ	0.88	429.39	489.52	3.14
50m	OBS	0.91	408.97	450.87	
	ACM2	0.86	415.79	483.39	1.67
	YSU	0.87	421.11	484.50	2.97
	MYJ	0.88	477.67	541.14	16.8
70m	OBS	0.91	386.95	426.81	
	ACM2	0.86	437.68	509.06	13.11
	YSU	0.87	454.09	523.62	17.35
	MYJ	0.89	519.93	586.68	34.37

注:黑体数值表示最优值。

大。三种方案的模拟无明显差异,但对70m高度上风向频率的估计明显优于10m高度。可见风向对边界层参数化方案不敏感,但随着高度的增加模拟结果与实测值的误差也随之减小。

威布尔概率密度函数拟合三种边界层参数化方案与实测数据的风速分布曲线及各物理量对比分析结果显示,随着高度的增加有效风利用率的模拟结果越来越优,三种方案结果相近,但平均有效风能密度误差随高度增加先减小后增大,在大部分风机轮毂所在的50m及70m高度上,ACM2方案模拟误差最小,且ACM2方案很好的模拟了瞬时风速及其变化率,这对涡轮机的安全及电网平衡提供保障,更适用于此复杂地形条件下对近地层风性能模拟。

由于实测数据限制,本文只讨论了中国南部山地复杂地形下各高度上不同边界层参数化方案对风相关物理量的一个月模拟结果并分析了初步原因,得出适用于春季时节此地形条件下边界层方案,与其他参数化方案的组合及不同地形条件下的近地层风模拟性能仍需日后更深入的研究。

参考文献(References):

- [1] 施鹏飞. 我国风力发电前景[J]. 中国电力, 2003, 36(9): 54-62. [Shi P F. Looking forward to the prospect of wind power generation in China from the world's development trends[J]. *Electric Power*, 2003, 36(9): 54-62.]
- [2] 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(5): 6-11. [Liu Y Q, Han S, Hu Y S. Review on short-term wind power prediction[J]. *Modern Electric Power*, 2007, 24(5): 6-11.]
- [3] Rohrig K, Lange B. Improvement of the Power System Reliability by Prediction of Wind Power Generation[C]. Tampa: Power Engineering Society General Meeting, 2007.
- [4] 佚名. 风电场功率预测预报管理暂行办法[J]. 太阳能, 2011, (14): 6-7. [Anonymity. Wind power forecasting management interim measures[J]. *Solar Energy*, 2011, (14): 6-7.]
- [5] 郭婧芝, 许大伟. 论数值天气预报的应用问题及措施[J]. 中国科技博览, 2013, (30): 287-287. [Guo J Z, Xu D W. Concerning the application of numerical weather prediction problems and measures[J]. *China Science and Technology Review*, 2013, (30): 287-287.]
- [6] 成培培. 复杂地形风能预报的精细化研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2014. [Cheng P P. Meticulous Study on Wind Forecasting over the Complex Topography[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2014.]
- [7] 邓莲堂. 新一代中尺度天气预报模式-WRF模式简介[C]. 北京: 中国气象学会2003年年会“城市气象与科技奥运”分会, 2003. [Deng L T. A New Generation of Mesoscale Weather Forecast Model WRF Model Introduction[C]. Beijing: China Meteorological Society Annual Conference 2003 Urban Meteorological and branch of Science and Technology Olympics, 2003.]
- [8] 伍见军, 王咏薇, 丁源, 等. 风电场超短期风速预测方法对比[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(11): 2965-2969. [Wu J J, Wang Y W, Ding Y, et al. A comparison of very short term wind prediction by different methods[J]. *Science Technology and Engineering*, 2013, 13(11): 2965-2969.]
- [9] 孙逸涵, 程兴宏, 柳艳香, 等. 不同参数化方案对风预报效果影响个例研究[J]. 气象科技, 2013, 41(5): 870-877. [Sun Y H, Cheng H X, Liu Y X, et al. Impacts of different parameterization combination scheme on wind forecasts[J]. *Meteorological Science and Technology*, 2013, 41(5): 870-877.]
- [10] 丁慧. 基于WRF模式的洪泽湖风能资源数值模拟研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2011. [Ding H. Numerical Simulation of Wind Power Assessment in Hongze Lake Based on WRF [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2011.]
- [11] 刘霄, 赖旭, 陈玲. 大气模式物理过程参数化对风电场风速预报的影响[J]. 水电能源科学, 2012, 30(8): 208-210. [Liu X, Lai X, Chen L. Impacts of physical parameterization on simulation of wind speed forecasts[J]. *Water Resources and Power*, 2012, 30(8): 208-210.]
- [12] 张强, 黄荣辉, 王胜. 浅论西北干旱区陆面过程和大气边界层对区域天气气候的特殊作用[J]. 干旱气象, 2011, 29(2): 133-136. [Zhang Q, Huang R H, Wang S. Discussion about special function of land surface process and atmospheric boundary on regional climate in arid area of Northwest China[J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2011, 29(2): 133-136.]
- [13] 张小培, 银燕. 复杂地形地区WRF模式四种边界层参数化方案的评估[J]. 大气科学学报, 2013, 36(1): 68-76. [Zhang X P, Yin Y. Evaluation of the four PBL schemes in WRF model over complex terrain area[J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2013, 36(1): 68-76.]
- [14] 张强, 王蓉, 岳平, 等. 复杂条件陆-气相互作用研究领域有关科学问题探讨[J]. 气象学报, 2017, 75(1): 39-56. [Zhang Q, Wang R, Yue P, et al. Several scientific issues about the land-atmosphere interaction under complex conditions[J]. *Acta Meteorological Sinica*, 2017, 75(1): 39-56.]
- [15] 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):

2017年7月

- 161-167. [Wang C H, Hu J, Jin 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.]
- [16] 祖繁,樊曙先,王咏薇,等. 复杂下垫面风电场风速数值模拟及误差特征[J]. 大气科学学报, 2016, 39(5): 672-682. [Zu F, Fan S X, Wang Y W, *et al.* Numerical simulation and error characteristics for wind speed on a wind farm over a complex underlying surface[J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2016, 39(5): 672-682.]
- [17] Carvalho D, Rocha A, Gómez-Gesteira M, *et al.* Sensitivity of the WRF model wind simulation and wind energy production estimates to planetary boundary layer parameterizations for on-shore and offshore areas in the Iberian Peninsula[J]. *Applied Energy*, 2014, 135(2): 234-246.
- [18] Carvalho D, Rocha A, Gómez-Gesteira M, *et al.* A sensitivity study of the WRF model in wind simulation for an area of high wind energy[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2012, 33(7): 23-34.
- [19] Gómeznavarro J J, Raible C C, Dierer S. Sensitivity of the WRF model to PBL parameterization and nesting techniques: evaluation of wind storms over complex terrain[J]. *Geoscientific Model Development*, 2015, 8(7): 3349-3363.
- [20] 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, 33(5): 1315-1322. [He X F, Zhou R W, Sun Y H. Verification on surface wind speed of three global circulation models in China[J]. *Plateau Meteorology*, 2014, 33(5): 1315-1322.]
- [21] Janjic Z I. A stable centered difference scheme free of the two-grid-interval noise[J]. *Monthly Weather Review*, 1974, 102: 319-323.
- [22] 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.
- [23] Pleim J E. A combined local and nonlocal closure model for the atmospheric boundary layer. part II: application and evaluation in a mesoscale meteorological model[J]. *Journal of Applied Meteorology & Climatology*, 2007, 46(9): 1396-1409.
- [24] 陈德辉,薛纪善. 数值天气预报业务模式现状与展望[J]. 气象学报, 2004, 62(5): 623-633. [Chen D H, Xue J S. An overview on recent progresses of the operational numerical weather prediction models[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2004, 62(5): 623-633.]
- [25] 盛裴轩,毛节泰,李建国,等. 大气物理学[M]. 北京:北京大学出版社, 2003. [Sheng P X, Mao J T, Li J G, *et al.* *Atmospheric Physics*[M]. Beijing: Peking University Press, 2003.]
- [26] 张碧辉,刘树华,马雁军,等. MYJ和YSU方案对WRF边界层气象要素模拟的影响[J]. 地球物理学报, 2012, 55(7): 2239-2248. [Zhang B H, Liu S H, Ma Y J, *et al.* The effect of MYJ and YSU schemes on the simulation of boundary layer meteorological factors of WRF[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2012, 55(7): 2239-2248.]
- [27] 魏光辉. 基于威布尔分布函数的希尼尔水库风速模拟[J]. 水电与新能源, 2012, (3): 65-68. [Wei G H. Simulating on wind speed in Xini'er reservoir based on Weibull distribution function [J]. *Hydropower and New Energy*, 2012, (3): 65-68.]
- [28] Conradsen K, Nielsen L B, Prahm L P. Review of Weibull statistics for estimation of wind speed distributions[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1984, 23(8): 1173-1183.
- [29] 朱德臣,汪建文. 风工况双参数威布尔分布k值影响研究[J]. 太阳能, 2007, (6): 34-36. [Zhu D C, Wang J W. The wind condition of double parameters Weibull distribution k values impact study[J]. *Solar Energy*, 2007, (6): 34-36.]

Three planetary boundary layer parameterization schemes for the preliminary evaluation of near surface wind simulation accuracy over complex terrain

MU Qingchen^{1,2}, WANG Yongwei^{1,2}, SHAO Kai³, WANG Kefei^{1,2}, GAO Yaqi^{1,2}

(1. Yale-NUIST Center on Atmospheric Environment, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;

2. Nanjing University of Information Science and Technology, Atmospheric Physics Institute, Nanjing 210044, China;

3. Goldwind Science and Technology Co. Ltd., Beijing 100176, China)

Abstract: China is rich in wind energy resources and its wind power development industry has gradually matured. The accuracy of wind speed prediction remains a key problem for the sector. Planetary boundary layer parameterization schemes for numerical models are very important to small scale wind speed forecasting over complex terrain because of rational calculating the atmospheric turbulence characteristics caused by surface thermodynamics and dynamic forces. Here we selected three kinds of planetary boundary layer schemes (MYJ, YSU and ACM2) to simulate Guizhou Jiucaiping in April 2010 for near-ground wind velocity at mountain underlying conditions of complex topography to test simulation performance. We found that under complex mountainous terrain in southwest China the ACM2 scheme simulation of nearly instantaneous wind speed is better than the two other schemes at a height of 70m, due to the calculation mechanism contains the local closure of large scale vortex effect on movement. The simulation results of ACM2 and observations one by one hour root mean square error is $3.56 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ and the consistency index is 0.94 in April 2010. The wind direction simulation results of the three scheme were very similar, but as height increased the error between simulations and observations of wind direction decreased. The simulation results for wind direction at a height of 70m is better than the result at 10 m. In order to estimate average wind energy density we used the Weibull probability density function to calculate wind energy. Results show that average wind energy density varies at different heights, but at 50m and 70m (the general wind turbine height) the ACM2 scheme performs better.

Key words: WRF model; simulation of wind velocity; PBL schemes; mountain topography