

CALMET模式不同参数化方案对江西省山地风场模拟的对比分析

姚琳 徐卫民 彭王敏子 温新龙 沈竞
(江西省气象科学研究所, 南昌 330096)

摘要: 通过降尺度模式CALMET不同参数化方案对江西山地风场测风塔风速风向模拟结果的对比分析, 选取出适合山地风场模拟的最优参数化方案, 并进行连续一年的模拟效果检验。结果表明: CALMET模式以不采用地形动力效应参数调整和Froude数调整, 采用下坡气流效应调整和O'Brien垂直风速调整时, 对江西省境内山地风场50 m以上高度层风场模拟效果最佳。最优参数化方案不仅能较好地模拟出山地风场测风塔逐时风速, 并且对全年风速段分布模拟有较好的结果。CALMET模式能模拟出实际测风塔全年主导风向, 但模拟与实测结果主导风向分布约有一个方位的偏差, 主导风向频率有7%~8%的偏差。

关键词: CALMET模式, 风速, 风向, 参数化方案

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.01.010

Effects of Parameterization Schemes in the CALMET Model on Numerical Simulation of Wind Speed at the Mountain Wind Power Station of Jiangxi Province

Yao Lin, Xu Weiming, Peng Wangminzi, Wen Xinlong, Shen Jing
(Meteorological Sciences Institute of Jiangxi Province, Nanchang 330096)

Abstract: Through the different parameterization schemes of the CALMET model, results of simulated wind speed and wind direction of Jiangxi mountain wind field are compared. The results show that the optimal parameters of the fifth set of parameters, namely the CALMET model, are not suitable for detecting kinematic terrain effects. Adjustment of slope flows has smaller effect on wind field above 50 m level. The adjustment of mountain wind field without Froude number and adoption of the O'Brien method can improve the simulation of wind speed at the mountain wind power station. The optimal parameter scheme not only simulates well the trend of high mountain wind power station wind speed, but also produces good results for the simulated distribution of the wind speed segment throughout the year. The CALMET model can effectively simulate the actual wind direction of the actual wind tower, but there is about one azimuth and 7%-8% deviation between the simulated and measured wind direction distribution and dominant wind direction, respectively.

Key words: CALMET model, wind speed, wind direction, parameterization scheme

0 引言

风能作为一种可再生的清洁能源, 已成为许多国家推进能源转型的核心发展内容和应对气候变化的重要途径。江西省风能资源主要集中在环鄱阳湖地区与高海拔山地, 相对规模化集中开发大型风电场而言, 江西省更适合开发分散式风电, 因此江西省山地风场的精细化准确模拟对提高风电选址和风资源开发有着

重要意义。

目前对风能资源风速预测主要有统计法和数值模拟法, 统计法由于需要的数据量大等缺点没有得到广泛应用^[1-3], 计算机技术的发展使数值模拟法广泛应用于风能资源评估方面^[4-8], 随着数值模式水平的提高, 分辨率更高更为精细的小尺度模式在特定的区域风场模拟方面得到了很好的应用, 其中CALMET模式是美国EPA推荐的由美国地球技术公司(Earth Tech Inc)开发的可用于复杂地形的边界层微尺度气象诊断模式, 基于CALMET模式的动力降尺度方法是国内外风资源评估的手段之一^[9-13]。CALMET模式的风场选

投稿日期: 2018年11月26日; 修回日期: 2019年9月1日
第一作者: 姚琳(1986—), Email: vickyao129@126.com
通信作者: 徐卫民(1971—), Email: xwm405@163.com
资助信息: 中国气象局气候变化专项风险研究(CCSF201937)

项参数包含了地形动力学效应、下坡气流效应、地形阻塞效应和O'Brien垂直速度调整等, 由于数值模式在不同气候背景、地形地貌区域对风场模拟的效果与参数化方案的适应性紧密相关, 所以选取适合区域特点的参数化方案是数值模式模拟的关键^[14-17]。

本文利用CALMET模式对江西省境内高海拔山地风电场测风塔进行1月和7月的数值模拟, 对比分析不同参数化方案对山地风场逐时风速的模拟效果, 从而选出最优参数化方案, 并且对最优参数化方案进一步进行整1年的模拟效果研究。

1 模式及方案设计介绍

1.1 模式介绍及模拟方案设置

CALMET模式是中尺度与小尺度结合的模式系统, 利用中尺度数值模式WRF模式最内层格点输出结果(3 km×3 km)作为CALMET的背景驱动场(初始猜测场), 通过进一步的动力降尺度得到分辨率为0.5 km×0.5 km的诊断风场。

文中WRF模式是由美国NOAA、NCEP、Air Force等多个研究部门联合开发的中尺度数值预报模式, 是一个全可压非静力模式。本文选用WRF3.6版本, 模拟区域的中心点位于(25.6°N, 115.2°E), 27 km×9 km×3 km的3层嵌套网格, 网格数分别为: 52×55, 82×91, 91×121, 三重嵌套网格垂直方向均分为不等距30层, 模式顶约为19 km, 至少15层在1 km以下。地形数据分别为美国地质勘探局(USGS)的全球2'、1'和30"地形数据, 模式初始场为全球1°×1°、6 h一次的FNL/NCEP再分析数据。通过多种参数化方案模拟试验分析, 选取模拟结果与实测分析接近的方案, 最后确定为: WSM3微物理过程方案+MRF边界层方案+Noah陆面过程方案^[18]。WRF模式对研究区域进行为期1年的逐日模拟, 设置为每天运行36 h, 起止时间为每日12时(世界时)至第三日00时, 模拟结果取每天模拟的后24 h逐时输出结果。

CALMET模式是美国EPA推荐的由美国地球技术公司(Earth Tech Inc)开发的边界层微尺度气象诊断模式, CALMET模式包括诊断风场模块和微气象模块, 它通过质量守恒连续方程对风场进行诊断, 在输入模式所需的常规气象观测资料和中尺度气象模式输出场后, 进行地形动力学、下坡气流、地形阻塞效应调整, 并通过插值、平滑处理、垂直速度计算、辐散最小化等产生最终风场。本文计算采用的是CALMET v6.334的版本, CALMET模式水平网格数为200×200, 网格大小为0.5 km×0.5 km, 垂直分为11层, 地形资料采用水平分辨率3"的SRTM3资料, 下垫

面类型资料为30"水平分辨率的USGS资料。

为了研究适用于江西山地风电场的CALMET模式最优参数化方案, 选取了位于江西省境内高海拔山地风电场的2座测风塔资料对多种参数化方案的模拟结果进行效果评估。2座测风塔为NRG测风系统, 均位于兴国县北部丘陵山区大水山一带, 周围均无遮挡并暴露于强烈高空风中, 海拔高度分别为879 m和831 m, 均为5层测风塔, 每层各有一套风速仪, 在80 m、10 m高度层安装了风向仪; 塔层高度分别为10 m、30 m、50 m、70 m和80 m, 记录为10 min风速平均, 观测时间为2016年6月—2017年5月, 测风塔实测数据使用时进行了严格的质量控制, 按照国家标准《风电场风能资源评估方法》(GB/T 18710—2002)对测风塔原始数据进行完整性、合理性及有效性分析检验, 有效完整均达80%以上。模式区域及测风塔位置如图1。

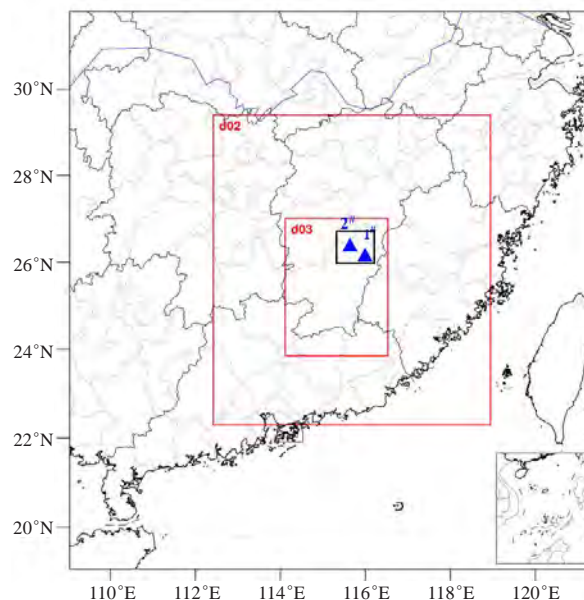


图1 模式区域(红色实线为WRF, 黑色实线为CALMET)及测风塔位置

Fig. 1 The simulation experiment domain and the location of the wind tower

1.2 参数化方案组设计

通过CALMET模式准确地诊断风场, 精细化的地形资料和下垫面类型、高质量和高密度的观测资料均至关重要, 但并不是任何区域能具备这样的条件, 特别是对于山地风场, 气象站分布往往距测风塔较远、稀疏且地形差距较大, 且测风高度也仅有10 m, 因此, 此次CALMET模式地面及高空气象输入资料均由中尺度气象模式WRF的模拟结果提供, 并且主要针对山地风场50~80 m高度层进行模拟研究。

CALMET模式的风场选项参数有地形动力学效应、下坡气流效应、地形阻塞效应和O'Brien垂直速度调整等。地形动力学效应是指地形对气团速度的强迫作用，主要通过计算整个区域的风来获得受地形影响的垂直风速，并满足大气稳定度递减指数函数，对初始猜测风场重复执行辐散最小化方法，直到三维辐散小于阈值，以获得水平方向风分量所受到的地形动力学影响。下坡气流效应是利用地形坡面、坡高、时间等参数计算，其风分量调入风场调整空气动力学影响。地形阻塞效应是指地形对风场的热力学阻塞效应通过局地弗劳德（Froude）数计算，如果网格点计算值小于临界Froude数，且风有上坡风量，则风向调整为与地形相切的方向，风速不变；如果超过临界Froude数，则不需要调整。O'Brien垂直速度调整是根据Godden和Lurmann的理论假定模拟区域的层顶垂直风速为 $0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ [19]。此次对CALMET模式的以上4个风场选项设计了5组参数化方案，模拟了2016年7月和2017年1月江西某山地风电场2座测风塔逐时风速风向，对50 m、70 m和80 m高度层模拟结果与测风塔数据进行比对分析，方案设计见表1。

表1 CALMET模式参数化方案

Table 1 Comparison of parameterization schemes in the CALMET model

编号	地形动力	O'Brien垂直速度	下坡气流效应	Froude数
1	关	关	关	开
2	关	关	开	开
3	开	关	开	开
4	关	开	开	开
5	关	开	开	关

2 CALMET模式参数化方案模拟效果对比

2.1 全风速模拟效果对比

平均绝对误差能反映出模拟值精度的实际情况，均方根误差反映了模拟结果与观测结果的离散程度，相关系数则可说明模拟值与观测值的变化趋势逼近情况。表2和表3分别给出了CALMET模式各组参数化方案对2座测风塔逐小时风速模拟结果与实测风速相关系数（R）、平均绝对误差（MAE）和均方根误差（RMSE） [20]。由表2结果可知，7月相关性比1月更好，数值上各组结果差距不大。图2为测风塔逐小时风速模拟检验结果，从图中可以看出，1月模拟效果优于天气过程较多的7月，特别是表现在2#塔模拟效果中，1月各高度层的均方根误差和平均绝对误差均小于7月。各组方案检验结果上看，第3组模拟效果最差，说明CALMET模式采用地形动力学时，地形强迫产生的垂直速度对水平风场调整不够充分，会导致模

拟结果误差较大，特别是天气过程较多的7月份。为了防止模式格点的高层产生异常的大垂直风速，通过采用O'Brien对垂直风速进行调整强迫模式模拟区域顶层的垂直风速为 $0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，进而让垂直风速更合理的对水平风速进行调整，通过比对方案检验结果第5组在均方根误差和平均绝对误差上均为最小，为最优方案，即动力降尺度CALMET模式对山地风场风速模拟时，不宜采用地形动力学效应参数，采用下坡气流效应调整对50 m以上高度层风场影响较小，关闭Froude数调整以及采用O'Brien垂直风速调整更利于提高对山地风场的模拟效果。

表2 测风塔逐小时风速模拟相关性结果

Table 2 Correlation coefficients of simulated hourly wind speed from the wind tower

塔号	组号	2017年1月			2016年7月		
		80 m	70 m	50 m	80 m	70 m	50 m
1#塔	1	0.64	0.66	0.67	0.79	0.81	0.80
	2	0.64	0.66	0.67	0.79	0.81	0.80
	3	0.68	0.66	0.63	0.77	0.79	0.75
	4	0.61	0.64	0.64	0.78	0.80	0.79
	5	0.62	0.65	0.65	0.78	0.80	0.79
2#塔	1	0.52	0.51	0.49	0.79	0.79	0.77
	2	0.52	0.51	0.49	0.79	0.79	0.77
	3	0.51	0.49	0.42	0.77	0.78	0.71
	4	0.52	0.51	0.49	0.79	0.79	0.76
	5	0.55	0.53	0.50	0.80	0.80	0.77

2.2 风向模拟效果对比

利用CALMET模式各组参数化方案模拟2017年1月和2016年7月山地风场1#测风塔逐时风向，通过风向统计结果得到各月风向玫瑰对比图（图3~图4），由图可知，1月各组模拟结果主导风向均与实测主导风向一致，第1、2、4和5组主导风向频率较实测值为3%~13%，第3组方案组主导风向频率较实测值偏小约5%，7月各组模拟结果主导风向均与实测主导风向有一个方位的偏差，主导风频偏大16%~24%，总体上各组方案均能较好地模拟出各测风塔的主导风向。

3 最优参数化方案效果检验

利用上述所选出的CALMET模式最优方案第5组对山地风场两座测风塔进行2016年6月至2017年5月整一年的逐小时风资源模拟，对模拟效果进行进一步分析。

3.1 指标检验

表3给出了CALMET模式最优方案对山地2座测风塔连续一年的逐小时风速模拟结果，1#、2#测风塔全年模拟结果相关系数分别介于0.62~0.79和0.53~0.81，均方根误差分别介于 $2.0\sim 2.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $2.1\sim 2.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，绝对平均偏差均介于 $1.6\sim 2.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

表3 山地风场测风塔逐小时风速模拟效果检验结果

Table 3 Simulated results of hourly wind speed of wind tower in the mountain wind field

塔号	高度层/m	春			夏			秋			冬			全年		
		R	RMSE/ (m·s ⁻¹)	MAE/ (m·s ⁻¹)	R	RMSE/ (m·s ⁻¹)	MAE/ (m·s ⁻¹)	R	RMSE/ (m·s ⁻¹)	MAE/ (m·s ⁻¹)	R	RMSE/ (m·s ⁻¹)	MAE/ (m·s ⁻¹)	R	RMSE/ (m·s ⁻¹)	MAE/ (m·s ⁻¹)
1 [#]	80	0.64	2.7	1.9	0.79	2.5	1.9	0.74	2.6	1.9	0.65	2.5	2.0	0.70	2.6	1.9
	70	0.72	2.3	1.7	0.79	2.3	1.8	0.71	2.5	1.8	0.62	2.5	1.9	0.71	2.4	1.8
	50	0.71	2.0	1.6	0.78	2.2	1.8	0.73	2.3	1.8	0.69	2.2	1.7	0.73	2.2	1.7
2 [#]	80	0.66	2.2	1.9	0.81	2.7	2.0	0.63	2.3	1.7	0.57	2.3	1.8	0.66	2.4	1.9
	70	0.65	2.4	1.8	0.79	2.4	1.8	0.63	2.2	1.6	0.55	2.2	1.8	0.66	2.3	1.7
	50	0.67	2.2	1.7	0.78	2.2	1.7	0.62	2.1	1.6	0.53	2.2	1.7	0.65	2.2	1.7
平均	0.67	2.3	1.8	0.79	2.4	1.8	0.68	2.3	1.7	0.60	2.3	1.8	0.69	2.3	1.8	

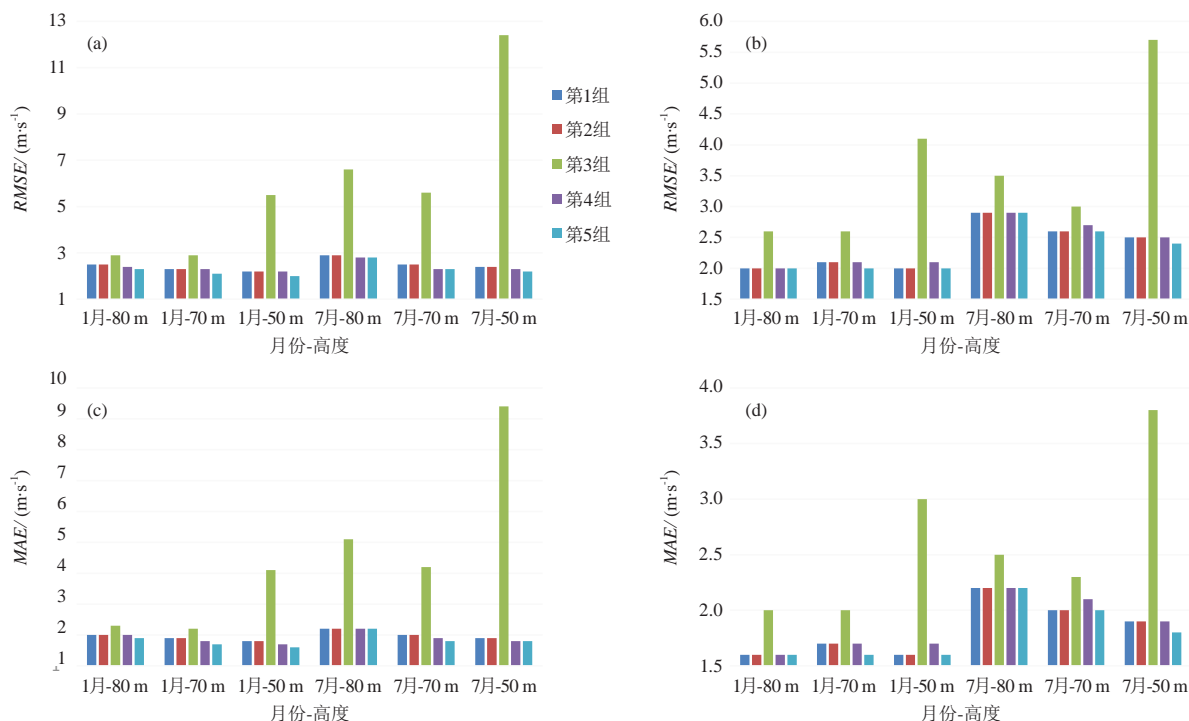


图2 测风塔逐小时风速模拟效果检验结果

(a) 1[#]塔均方根误差; (b) 2[#]塔均方根误差; (c) 1[#]塔平均绝对误差; (d) 2[#]塔平均绝对误差

Fig. 2 Test results of hourly wind speed simulation of wind tower

(a) Root mean square error of 1[#] wind tower; (b) Root mean square error of 2[#] wind tower; (c) Mean absolute error of 1[#] wind tower; (d) Mean absolute error of 2[#] wind tower

CALMET模式对山地风场整一年的各层风速模拟年均相关系数为0.69, 年均均方根误差和绝对平均偏差分别为2.3 m·s⁻¹和1.8 m·s⁻¹。

从总体平均结果来看, CALMET模式能较好的模拟出山地风场测风塔逐时风速, 四季模拟效果差别较小, 夏季相关系数优于其他季节, 秋季误差较其他季节最小。

3.2 风速模拟效果检验

1[#]塔实测80 m、70 m和50 m年均风速分别为6.4 m·s⁻¹、6.2 m·s⁻¹和6.0 m·s⁻¹, 模拟值年均风速分别为6.3 m·s⁻¹、6.2 m·s⁻¹和5.9 m·s⁻¹, 2[#]塔实测80 m、70 m和

50 m年均风速分别为5.6 m·s⁻¹、5.6 m·s⁻¹和5.5 m·s⁻¹, 模拟值年均风速分别为5.8 m·s⁻¹、5.9 m·s⁻¹和5.5 m·s⁻¹。

图5给出了2座测风塔80 m高度层实测与模拟风速月均变化, 由图可知, CALMET模式对测风塔的模拟结果与实测值风速月均变化趋势基本一致, 特别是1[#]测风塔风速较大月份4月、6月、7月和较小月份5月、8月, 以及2[#]测风塔风速较大月份6月、7月和较小月份5月、8月均有很好的模拟效果。

图6给出了2座测风塔80 m高度层实测值和模拟值风速段分布, 由图可知, CALMET模式对风速段分布的模拟效果与实测基本一致, 1[#]测风塔实测值和模拟

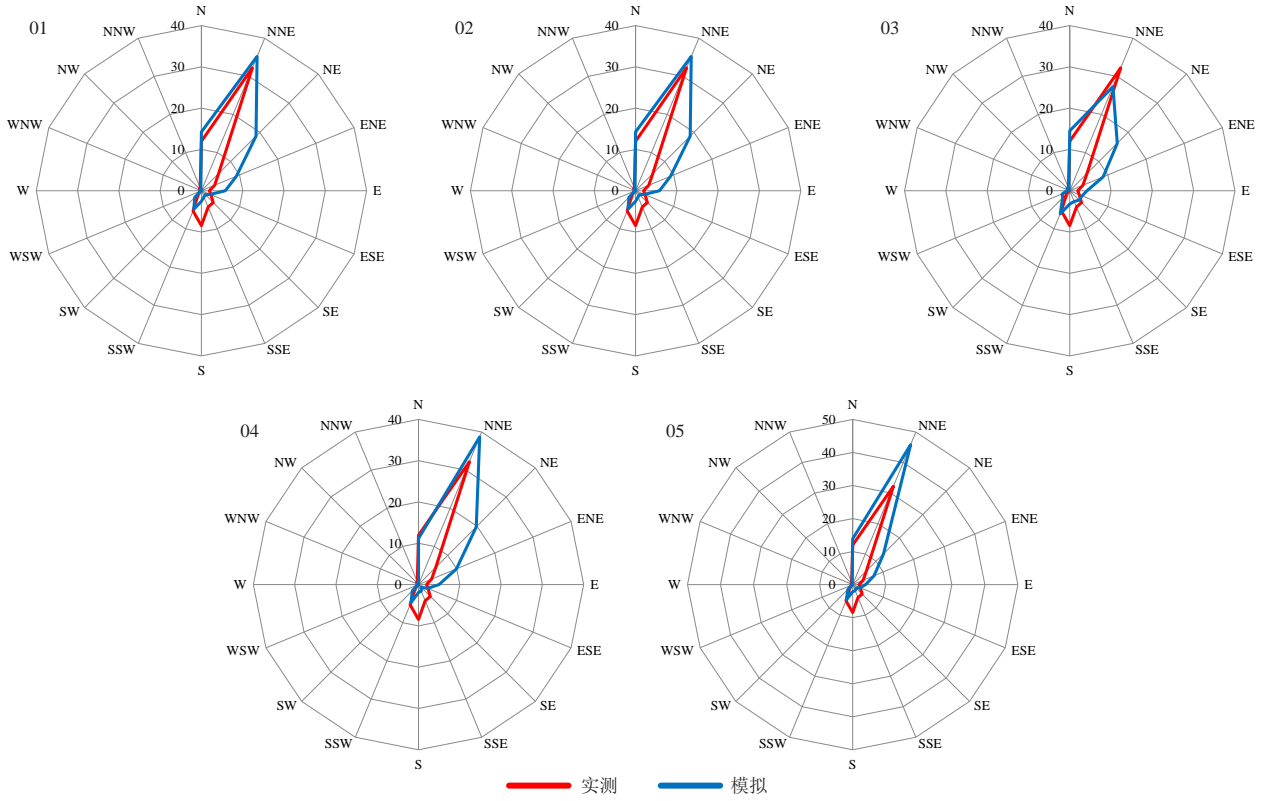


图3 1#测风塔80 m高度层2017年1月风向玫瑰图
Fig. 3 Wind rose diagram of 1# wind tower, 80 m high, January 2017

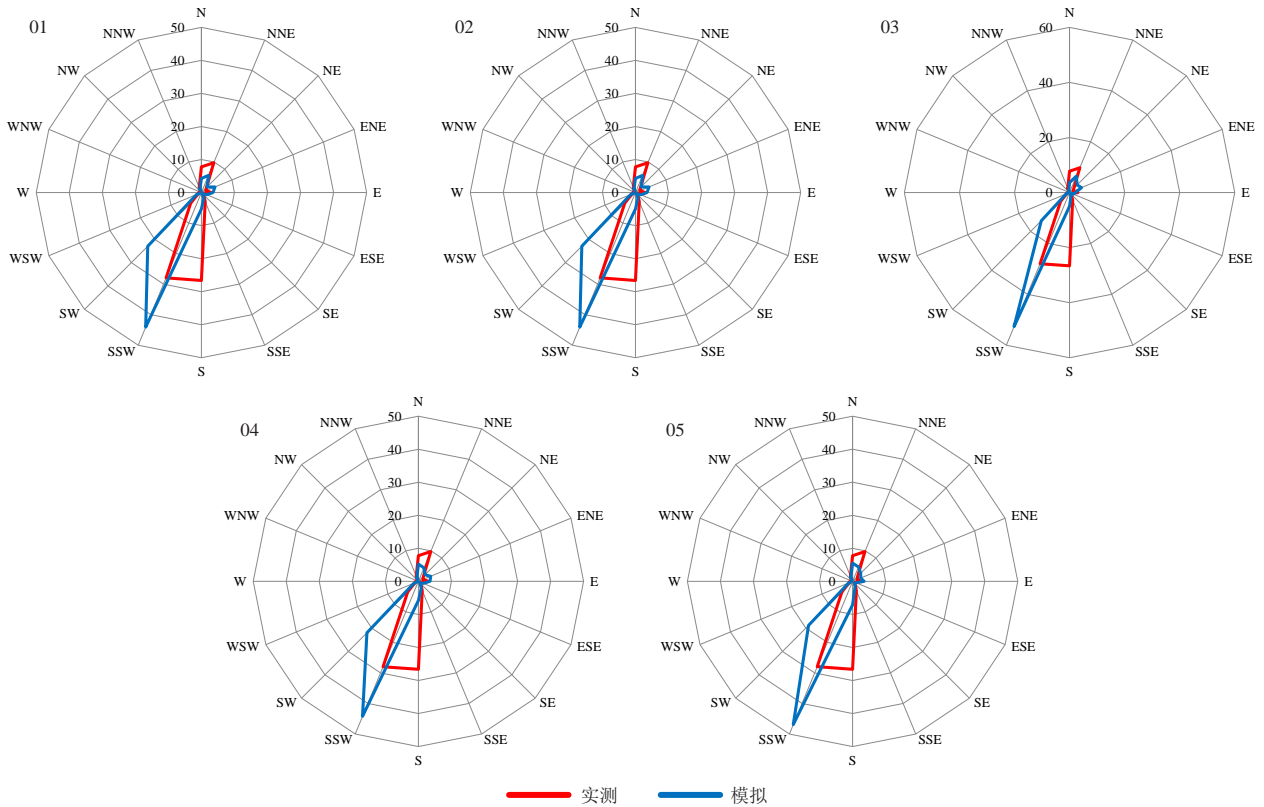


图4 1#测风塔80 m高度层2016年7月风向玫瑰图
Fig. 4 Wind rose diagram of 1# wind tower, 80 m high, July 2016

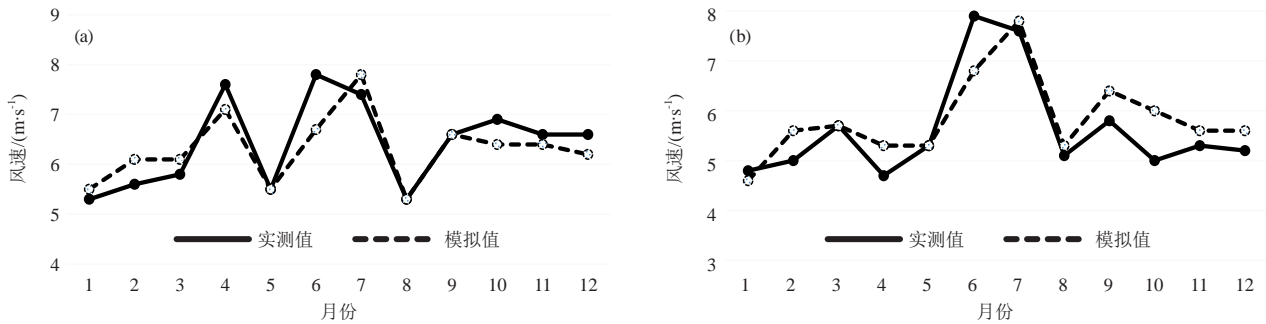


图5 1# (a)、2# (b) 测风塔80 m高度层风速月均变化

Fig. 5 Monthly variation of wind speed at 80 m height layer of 1#(a) and 2#(b) wind towers

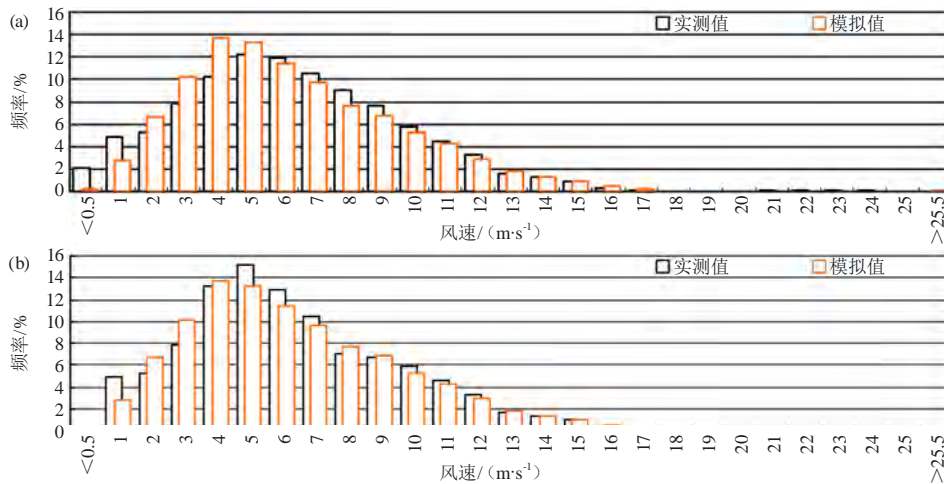


图6 1# (a)、2# (b) 测风塔全年80 m高度层风速分布

Fig. 6 Distribution of wind speed section of 80 m in the 1#(a) and 2#(b) wind towers

值风速分布均主要集中在 $3\sim 9\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，但在风速峰值区模拟值概率偏大且与实测值差别较大，有 $2\%\sim 4\%$ 的偏差。 $2^{\#}$ 测风塔实测值和模拟值风速分布均主要集中在 $2\sim 8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，在风速峰值区实测值偏大且与模拟值概率差别较大，有 $2\%\sim 5\%$ 的偏差。

3.3 风向检验

图7给出了各测风塔模式模拟及实测风向玫瑰图，由图可知，模拟与实测结果主导风向及风能分布有一定的差异，约有一个方位的偏差， $1^{\#}$ 塔实测值主导风向为N方向，模拟结果主导风向为NNE方向，

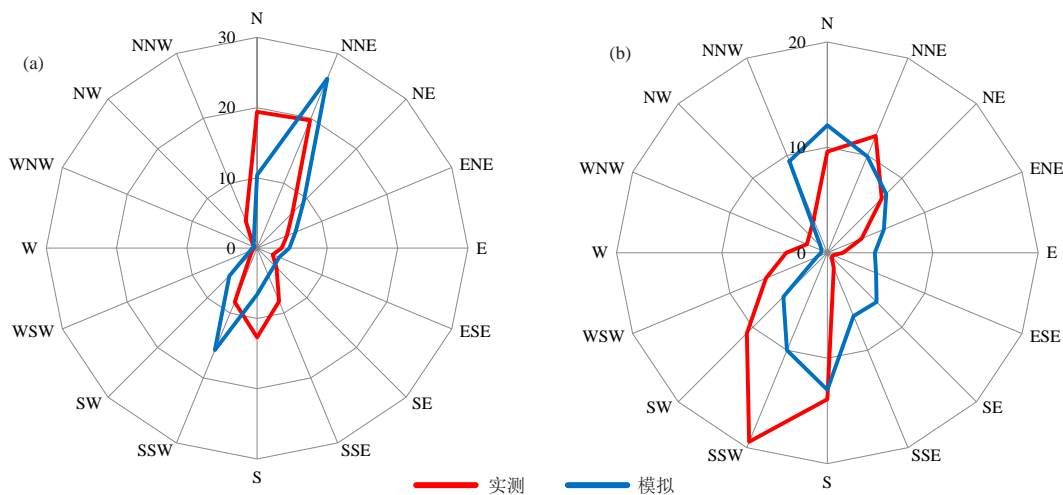


图7 1# (a)、2# (b) 测风塔80 m高度层全年风向玫瑰图

Fig.7 Annual wind rose of 1# (a) and 2# (b) wind towers at 80 m

频率上约有7%的偏差；2#塔实测值主导风向为SSW方向，模拟结果主导风向为S方向，频率上约有8%的偏差。

4 结论

基于不同参数化方案的CALMET模式对江西省境内山地风场的模拟，优选出最佳参数化方案并进一步进行全年山地风场模拟，得出以下结论。

1) 采用动力降尺度CALMET模式对江西省山地风场2016年7月和2017年1月风速进行模拟时，通过5组参数化方案模拟结果的比对分析得到：第5组参数化方案最优，即CALMET模式以不采用地形动力效应参数调整和Froude数调整，采用下坡气流效应调整和O'Brien垂直风速调整时，对江西省境内山地风场50 m以上高度层风场模拟效果最佳。

2) 采用CALMET模式最优参数化方案对江西省山地风场进行整1年的风速进行模拟，模拟结果表明：CALMET模式能较好的模拟出山地风场测风塔逐时风速，全年四个季节模拟指标效果差别较小，夏季相关系数优于其他季节，秋季误差较其他季节最小。其不仅能较好地模拟出风速及风能密度月均变化，对全年风速段分布模拟也与实测值较为一致，在峰值区分布概率有2%~5%的偏差。风向分布方面，CALMET模式能较好地模拟出实际测风塔全年主导风向，但模拟与实测结果主导风向分布约有一个方位的偏差，主导风向频率有7%~8%的偏差。

参考文献

[1] 刘郁珏, 李军, 胡非, 等. 一种考虑海拔高度的风速测量相关推测法. 应用气象学报, 2013, 24(1): 109-116.
[2] 王晶晶, 金健. 模块化模糊神经网络训练策略研究. 南京气象学院

学报, 2007, 30(2): 274-278.
[3] 陈靖, 解以扬, 李大鸣, 等. 天津市典型区域立体多重城市内涝模型研究. 气象与环境学报, 2017, 33(3): 36-44.
[4] 程兴宏, 陶树旺, 魏磊, 等. 基于WRF模式和自适应偏最小二乘回归发的风能预报试验研究. 高原气象, 2012, 31(51): 1461-1469.
[5] 李泽椿, 朱蓉, 何晓凤, 等. 风能资源评估技术方法研究. 气象学报, 2007, 65(5): 708-717.
[6] Kang S L, Lenschow D H. Temporal evolution of low-level winds induced by two-dimensional mesoscale surface heat-flux heterogeneity. Bound Layer Meteorol, 2014, 151(3): 501-529.
[7] Ramirez-Rosado I J, Fernandez-Jimenez L A, Monteiro C, et al. Comparison of two new short-term wind-power forecasting systems. Renewable Energy, 2009, 34(7): 1848-1854.
[8] 顾沈旦, 于丽娟, 尹承美, 等. WRF模式对济南地区夏季近地面气象场模拟效果评估. 气象与环境学报, 2016, 32(1): 1-8.
[9] 李得勤, 陈力强, 周晓珊, 等. 风电场风速降尺度预报方法对比分析. 气象与环境学报, 2012, 28(6): 25-31.
[10] 姜创业, 孙娴, 徐军昶. MMS/CALMET数值模拟在陕北风能资源评估中的应用. 中国沙漠, 2011, 31(6): 1606-1610.
[11] 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. 大气科学学报, 2016, 39(5): 672-682.
[12] Morales L, Lang F, Mattar C. Mesoscale wind speed simulation using CALMET model and reanalysis information: an application to wind potential. Renewable Energy, 2012, 48: 57-71.
[13] 周荣卫, 何晓凤, 朱蓉. MMS/CALMET模式系统在风能资源评估中的应用. 自然资源学报, 2010, 25(12): 2101-2113.
[14] Santos-Alamillos F J, Pozo-Vázquez D, Ruiz-Arias J A, Lara-Fanego V, et al. Analysis of WRF model wind estimate sensitivity to physics parameterization choice and terrain representation in Andalusia (Southern Spain). Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2013, 52(7): 1591-1609.
[15] 杨光焰, 吴息, 周海. WRF模式对福建沿海风电场风速预测的效果分析. 气象科学, 2014, 34(5): 530-535.
[16] 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. 大气科学学报, 2013, 36(1): 68-76.
[17] 孙学金, 李岩, 张燕鸿, 等. 基于WRF-LES的干旱湖区近地面风场模拟与敏感性研究. 高原气象, 2017, 36(3): 835-844.
[18] 姚琳, 沈竟, 温新龙, 等. WRF模式参数化方案对江西山地风电场的风模拟研究. 长江流域资源与环境, 2018, 27(7): 1509-1516.
[19] 辛渝, 陈洪武. XJRUC/CALMET及CALMET不同参数调整对达坂城一小草湖区风场预报影响. 高原气象, 2014, 33(6): 1674-1686.
[20] 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. 大气科学学报, 2016, 39(5): 672-682.

(上接46页)

[2] 蒋国碧, 龙良碧. 重庆市旅游气候研究. 西南师范大学学报(自然科学版), 1992, 17(4): 529-533.
[3] 罗晓玲, 兰晓波, 李岩瑛, 等. 人体舒适度指数预报体系研究. 干旱区资源与环境, 2004, (S2): 59-62.
[4] Houghton D M. Handbook of Applied Meteorology. New York: John Wiley and Sons, Inc, 1985: 778-811.
[5] Li P W, Chan S T. Application of a weather stress index for alerting the public to stressful weather in Hong Kong. Meteorological Applications, 2000, 7(4): 369-375.
[6] Smith K. The influence of weather and climate on recreation and tourism. Weather, 1993, 48(12): 398-404.
[7] 范业正, 郭来喜. 中国海滨旅游地气候适宜性评价. 自然资源学报, 1998, 13(4): 304-311.
[8] 余志豪, 孙根年, 罗正文, 等. 40° N以北城市夏季气候舒适度及消暑旅游潜力分析. 自然资源学报, 2015, 30(2): 327-339.
[9] 马丽君, 孙根年, 李馥丽, 等. 陕西省旅游气候舒适度评估. 资源科学, 2007, 29(6): 40-44.
[10] 马丽君, 孙根年, 马耀峰, 等. 极端天气气候事件对旅游业的影响——以2008年雪灾为例. 资源科学, 2010, 32(1): 107-112.
[11] 马丽君, 孙根年, 杨睿, 等. 城市气候舒适度与游客网络关注度时空相关分析. 地理科学进展, 2011, 30(6): 753-759.
[12] 冯粉粉, 温家洪, 王慧敏. 基于GIS的华东地区旅游气候舒适度分析. 上海师范大学学报(自然科学), 2012, (2): 196-202.
[13] 向红琼, 于飞. 贵州山地高分辨率旅游气象舒适度时空分布特征. 贵州气象, 2010, 34(3): 196-202.
[14] 于庚康, 徐敏, 于堃, 等. 近30年江苏人体舒适度指数变化特征分析. 气象, 2011, 37(9): 1145-1150.
[15] 李恺. 层次分析法在生态环境综合评估中的应用. 环境科学与技术, 2009, 32(2): 184-185.
[16] 马丽君, 孙根年. 中国东部沿海沿边城市旅游气候舒适度评估. 地理科学进展, 2009, 28(5): 713-722.
[17] 周文丽. 生态旅游资源综合评估指标体系及评估模型研究. 西北林学院学报, 2007, 22(3): 198-202.
[18] 任健美, 牛俊杰, 胡彩虹, 等. 五台山旅游气候及其舒适度评估. 地理研究, 2004, 23(6): 856-861.
[19] 田志会, 郑大玮, 郭文利, 等. 北京山区旅游气候舒适度的定量评估. 资源科学, 2008, 30(12): 1846-1851.
[20] 李东, 杨兆萍, 时卉, 等. 乌鲁木齐市旅游气候与旅游气候舒适度分析. 干旱区研究, 2014, 31(3): 404-409.
[21] 高峻. 滨海地区自然旅游资源开发潜力评估研究——以上海为例. 上海: 上海师范大学, 2008.