WRF_TopoWind 模式对中国低纬 高原高山风速模拟的适用性研究^{*}

杨鹏武1,王学锋1,王 麟2,朱 勇1

(1.云南省气候中心,云南 昆明 650034;

2.云南大学 资源环境与地球科学学院 大气科学系,云南 昆明 650091)

摘要:使用 WRF 3.6.1+最新的 TopoWind 方案(简称 WRF_TopoWind),对地处低纬高原的滇东、滇西高山 风速进行模拟,将模拟结果与所在区域的测风塔 70 m 高度风速进行对比,检验其对低纬高原高山风速模拟的 适应性.经分析发现,从全年模拟效果来看,滇东风速变化趋势模拟得较好,而滇西的风速值模拟精度较高;从 季节模拟效果来看,冬季最好,春、夏次之,秋季模拟效果比较差;有降水过程时,多数季节模拟效果比较差,无 降水过程时,多数季节模拟效果比较理想;WRF_TopoWind 基本适应于低纬高原的高山风电场选址、风能资源 评估等工作和研究.

关键词:WRF;TopoWind;模拟;低纬高原;高山风速 中图分类号:P 435.1;P 456.7 文献标志码:A

风能就是空气流动所产生的动能,人类可利用 的风能称为风能资源[1].数值模式可以不依赖于测 风设备,仅通过求解大气物理方程,便可以模拟任 意高度的风能资源分布及预测风速的变化,因此应 用数值模式进行风能资源评估及风功率预测成为 未来的发展趋势^[2-3].丹麦 Risoe 实验室^[4]将中尺 度数值模式 KAMM 与 WAsP 模式相结合,得到具 有较高分辨率的欧洲风资源分布图.张德等[5]利用 中尺度数值模拟系统 WEST 进行中国风能资源的 模拟,得到了全国离地80m高度的年平均风速(m ・s⁻¹)分布图.杨晓鹏等^[6]利用 MM5 和 Calmat 对 云南风能资源进行了模拟,模拟结果较好地反映云 南风能资源分布.白永祥等^[7]以 MM5 为基础,实现 了内蒙古电网区域风电功率预测系统,实现了风电 功率的短期和超短期预测.WRF 作为新一代中尺 度模式,采用地形跟随坐标,非静力方式,主要模拟 水平精度为1~10 km^[8],已经可以满足多数风能资

文章编号:0258-7971(2016)05-0766-07

源评估及风功率预测的需求.张华等^[9]应用 WRF 模式模拟分析风力发电场风速,结果表明 WRF 模 式可以较好地模拟出近地面风场的变化特征,但模 拟风速受到地形及地表粗糙度的影响较大.邢 婷^[10]研究了基于 WRF 模式和 SVM 方法的云南杨 梅山风电场风电功率预报技术,发现 WRF 模式对 风速变化趋势模拟较好,但模拟风速比实测风速振 幅大.综上所述,WRF 虽然对低层风场变化趋势有 较好的模拟,但是风速值偏差较大,主要是因为 WRF 没有对次网格地形阻力进行参数化,致使平 原和山谷风速偏大,高山和丘陵风速偏小^[11].为了 改善WRF 对低层风速的模拟能力,近年来有学 者^[12]已经在 YSU 边界层方案中加入了低层风速 矫正方案——TopoWind,目前国内对该方案的研 究和应用较少,本文将尝试使用 WRF 3.6.1+最新 的 TopoWind 方案^[13](以下简称 WRF_TopoWind), 对中国低纬高原的高山风速进行模拟,以检验其适

^{*} 收稿日期:2016-02-22

基金项目:中国气象局气候变化专项(CCSF201508);教育部博士点基金(20135301120010);低纬高原风能资源评估的数值模拟研究(ynuy201438);云南省气象局青年基金:乡镇自动气象站观测资料应用研究.

作者简介:杨鹏武(1976-),男,陕西人,高级工程师,主要从事气候资源开发及研究.E-mail:zkyy0111@163.com. 通信作者:王学锋(1962-),男,云南人,高级工程师,主要从事气候资源开发及研究.E-mail:wxf_yncc@126.com.

应性,为 WRF 模式在我国的低纬高原风能开发中 更好地应用提供依据.

1 模式方案及检验方法

低纬高原是指纬度低于 30°N,平均海拔高于 1 500 m 的高原地区,云南是中国低纬高原的主体^[14],为了客观检验 WRF_TopoWind 对低纬高原 高山风速的模拟效果,本文在云南滇东、滇西各选 1 个区域进行模拟,并将模拟结果与区域中气象局 所建的测风塔 70 m 高度(近似于当前主流风机的 轮毂高度)风速进行对比.其中滇东测风塔海拔高 度 2 380 m,滇西测风塔海拔高度 3 200 m.测风塔位 置如图 1 所示.



Fig.1 Distribution of wind tower

模拟方案中,WRF 版本为 3.6.1,初始场和边 界条件使用 6 h 一次的 NCEP 再分析资料 FNL,该 资料是在 GFS 的输出结果上同化了常规、卫星等 观测的 1°×1°格点资料.2 个模拟区域均以测风塔 所在位置为中心点(可直接选取 70 m 高度中央格 点的风速值与测风塔风速进行比较,无需插值), 采用 3 层嵌套,各层格点数分别为 82×82、70×70、 46×46,水平分辨率分别为9、3、1 km.垂直方向分为 35 层,考虑到风塔资料在近地层,故在模式近地层 200 m 以下分层较密,并设置 70 m 分层与测风塔 70 m 测风层对应.模拟时段为 2010 年 4 个典型月 1、4、7、10 月中各月的 11—15 日(分别代表冬、春、 夏、秋 4 季,选择模拟时段的原因是:2 个测风塔于 2009 年下半年建设完成,初期观测仪器不稳定, 2010年为观测数据主要收集时段.由于在野外观测,数据缺测比较多,为了避免与插补后的数据进行对比带来的不真实性,本文特别选择2个测风塔4个典型月中数据比较完整连续的时段进行模拟和对比).3层嵌套积分步长分别为54、18、6s,每次积分36h,每10min输出一个预报结果,取后面24h预报结果用于检验.由于TopoWind方案是嵌入在YSU行星边界层方案中,因此行星边界层选择YSU方案,模式的具体物理方案设置为如表1所示.

表1 模式物理方案

Tab.1 The setting of	f WRF_	_TopoWind	Physics
----------------------	--------	-----------	---------

设置名称	方案	备注
微物理方案	Single-moment 3- class	_
短波方案	Dudhia	—
长波方案	RRTM	—
边界层方案	YSU	最新 topo _ wind Scheme ^[13]
陆面过程	Unified Noah Model	—
表面层方案	MM5 Similarity Scheme	_
积云对流参 数化方案	Kain–Fritsch Scheme	第二、三层嵌套直 接使用显式物理 过程

本文使用相关系数和平均相对误差 2 个统计 量对模式的适应性进行检验,定义如下:

(1) 相关系数 相关关系是一种非确定性的 关系,是反映变量之间线性相关关系密切程度的统 计指标,即反映变量之间的一致性. *R* 值越大,说明 一致性越好.其计算公式为:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x}) (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^{n} (y_i - \bar{y})^2}},$$
 (1)

其中,x_i、y_i分别表示2个变量的第*i*个数值,x、y分 别为2个变量的算数平均,n为数据序列的总数.

(2)平均相对误差 相对误差指的是测量所 造成的绝对误差与被测量[约定]真值之比,平均 相对误差是指所有测量数据相对误差的平均值.一般来说,相比于绝对误差,相对误差更能反映测量的可信程度.RT值越小,说明实验数据具有更好的精确度.其计算公式为:

$$RT = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \frac{|P_i - O_i|}{O_i},$$
 (2)

其中,P_i为模拟值,O_i为实测值,n为数据序列的总数.

2 模拟结果分析

2.1 全年模拟结果分析 如图 2(a)、(b)所示,对 所有模拟数据进行分析发现,滇东模拟风速与实测 风速变化趋势(以下简称风速趋势)一致性非常 高,相关系数达到 0.80,而风速值的模拟精度(以 下简称风速精度)略差,平均相对误差为 0.36.滇西 风速趋势一致性比较好,相关系数为 0.74,而且风 速精度较高,平均相对误差为 0.32.总而言之,从全 年来看,滇东风速变化趋势模拟得较好,而滇西的 风速值模拟精度较高.

2.2 各季节模拟结果分析 冬季如图 3(a)、(e) 和图 4(a)、(b)所示,滇东区域在前 72 h 有昆明准静止锋过境,处于锋后的测风塔在低温、高湿、阴雨的条件下产生覆冰^[14],致使风速仪被冻结,所测风速明显偏小,无法做定量分析.除了覆冰时段以外, 滇东、滇西区域在整个冬季的风速趋势一致性都非常好,相关系数均超过了 0.80,风速精度也很高,平均相对误差均小于 0.25.

春季如图 3(b)、(f)和图 4(a)、(b)所示,风速 趋势方面,滇东区域的一致性非常好,相关系数超 过了 0.80,滇西区域也比较好,相关系数接近 0.60. 风速精度方面,滇东区域、滇西区域均略差,平均相 对误差均超过了 0.35,滇东甚至接近 0.40. 夏季如图 3(c)、(g)和图 4(a)、(b)所示,风 速趋势方面,滇东区域一致性一般,相关系数为 0.50,而滇西较好,相关系数超过了 0.60.风速精度 方面,滇东略差,平均相对误差超过了 0.35,滇西较 好,仅为 0.30.

秋季如图 3(d)、(h)和图 4(a)、(b)所示,风 速趋势方面,滇东区域一致性较好,相关系数接近 0.70,但是滇西区域比较差,仅为 0.21(通过了 0.01 的显著性检验).风速精度方面,滇东、滇西都比较 差,平均相对误差均为 0.40.

总而言之,模式对冬季低纬高原高山风速模拟 效果非常理想.对春季的风速趋势模拟较好,风速 精度略差,对夏季滇西效果较好,滇东模拟效果一 般,对秋季仅滇东风速趋势模拟较好,其它都较差. 2.3 有无降水过程模拟结果分析 经查询测风塔 周围气象站资料(下同)发现,滇东区域有降水的 模拟时段:春季为72~120 h,夏季为0~24 h、48~ 72 h,秋季为24~48 h、72~120 h,如图3(a)、(b)、 (c)、(d)和图5(a)、(b)所示,其中风速趋势最好 的是春季,相关系数超过了0.90.其次是秋季,相关 系数为0.57,最差的夏季仅为0.35(通过了0.01的 显著性检验).风速精度最高的同样是春季,平均相 对误差为0.30 左右,夏季和秋季均较差,平均相对 误差均大于0.45,夏季甚至达到了0.52.

滇西区域有降水的模拟时段:春季为72~120 h,夏季为72~120h,秋季的全部模拟时间,如图3 (e)、(f)、(g)、(h)和图5(a)、(b)所示,其中风速 趋势最好的是春季,相关系数超过0.70.其次是夏 季,相关系数不足0.50,秋季最差仅为0.21(通过 了0.01的显著性检验).风速精度最高同样是春 季,平均相对误差为0.36,秋季次之,平均相对误差 为0.40,夏季最差,平均相对误差为0.43.



Fig.2 The simulation results for a whole year







图 4 各季节模拟情况

Fig.4 The simulation results of each season







Fig.5 The simulation results under precipitation cases and non-precipitation cases

滇东区域无降水的模拟时段:冬季为72~120 h,春季为0~72h,夏季为24~48h、72~120h,秋季 为0~24h、48~72h,如图3(a)、(b)、(c)、(d)和 图5(a)、(b)所示,其中风速趋势各个季节都比较 好,相关系数均超过了0.60,最高的是冬季,为 0.83,最低的夏季也达到0.63.风速精度方面,冬季 及夏季都非常好,平均相对误差均小于或等于 0.25,秋季也比较好,为0.30左右,春季较差,达到 了0.43.

滇西区域无降水的模拟时段:整个冬季的模拟 时间,春季为0~72h,夏季为0~72h,如图3(e)、 (f)、(g)、(h)和图5(a)、(b)所示,其中风速趋势 方面,除了春季一般,为0.40外,冬季和夏季均超 过了0.60,冬季甚至接近0.90.风速精度冬季和夏 季都非常好,平均相对误差均小于0.25,而春季精 度略差,平均相对误差为0.36.

总而言之,对于有降水时段,除了春季模拟效 果比较好外,其它季节风速趋势和风速精度均不是 很理想,而无降水时段,除了滇东区域春季的风速 精度及滇西春季的总体模结果略差外,其它多数季 节模拟结果都比较理想.

3 结 论

通过对 WRF_TopoWind 模拟结果与地处低纬 高原的滇东、滇西测风塔 70 m 高度实测风速进行 对比分析,得到以下结论:

(1) 从全年模拟效果来看, 滇东风速趋势较 好, 而滇西的风速精度较高. 原因可能是该模式对 低纬高原不同地形的模拟效果不同,滇西多高大山脉,而滇东多矮小山体.

(2)从季节模拟效果来看,冬季最好,无论风速变化趋势,还是风速值精度都非常理想,春、夏次之,秋季较差.除了滇东风速趋势模拟效果较好外, 滇东风速精度、滇西风速变化趋势、滇西风速精度 均不是很理想.秋季模拟不理想的原因可能是,当前模式对低纬高原从夏季风向冬季风过渡时期的 天气形势描述还有一定的欠缺.

(3) 从有无降水过程的模拟效果来看,有降水 过程时,除了春季较好外,模式对多数季节的风速 模拟效果均不是很理想.原因可能是造成低纬高原 复杂地形下降雨的大气环流较为复杂,数值模式当 前还无法准确地描述相应的物理过程所致.无降水 过程时,除了春季略差外,模式对多数季节的风速 模拟效果都比较理想,说明模式对简单天气形势下 风场的描述比较准确.综上所述,WRF_TopoWind 基本适应于中国低纬高原的高山风电场选址、风能 资源评估,如果需要做精度要求更高的风电场风功 率预报,还需进一步研究并改善复杂地形下降水物 理过程、转换季节的天气形势描述,并尝试更换不 同的模式初始场、嵌套小尺度 CFD 模型等.

参考文献:

[1] 胡毅,张健.风资源评估中风速分布方法研究[J].内 蒙古科技与经济,2010,21:76-78.

HU Y, ZHANG J. Study of the wind speed distribution method in wind resources Assessment [J].Inner Mongolia Science Technology & Economy, 2010, 21:76-78.

- [2] 李泽椿,朱蓉,何晓凤,等.风能资源评估技术方法研究[J].气象学报,2007,65(5):708-717.
 LI Z C,ZHU R,HE X F,et al.Study on the assessment technology of wind energy resource[J].Acta Meteorolog-ica Sinica,2007,65(5):708-717.
- [3] 方艳莹,徐海明,朱蓉,等.基于 WRF 和 CFD 软件结合的风能资源数值模拟试验研究[J].气象,2012,38
 (11):1378-1389.

FANG Y Y, XU H M, ZHU R, et al. Study on numerial simulation wind energy resource base on WRF and CFD models [J]. Meteorological Monthly, 2012, 38 (11): 1378-1389.

[4] 韩春福,南明君.基于 WAsP 的风电场风能资源评估 的应用及分析[J].能源工程,2009,4:26-30.

HAN C F, NAN M J. Application and analysis of the wind resource assessment with WAsP software [J]. Energy Engineering, 2009, 4:26-30.

[5] 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.

> ZHANG D, ZHU R, LUO Y, et al. Application of Wind Energy Simulation Toolkit (WEST) to wind energy numerical simulation of China [J]. Plateau Meteorology, 2008,27(1):202-207.

[6] 杨晓鹏,杨鹏武.基于数值模拟的云南省风能资源分布研究[J].云南大学学报:自然科学版,2012,34
(6):684-688.

YANG X P, YANG P W.An research on the distribution of wind energy resources in Yunnan Province based on numerical simulation[J].Journal of Yunnan University: Natural Sciences Edition,2012,34(6):684-688.

- [7] 白永祥,房大中,侯佑华,等.内蒙古电网区域风电功 率预测系统[J].电网技术,2010,34(10):157-162.
 BAIYX,FANGDZ,HOUYH,et al.Regional wind power forecasting system for Inner Mongolia power grid
 [J].Power System Technology,2010,34(10):157-162.
- [8] 王晓君,马浩.新一代中尺度预报模式(WRF)国内应 用进展[J].地球科学进展,2011,26(11):1 191-1199.

WANG X J, MA H.Progress of application of the weather research and forecast (WRF) model in China[J].Advance in Earth Sciences, 2011, 26(11):1 191-1 199.

 [9] 张华,孙科,田玲,等.应用 WRF 模型模拟分析风力发 电场风速[J].天津大学学报,2012,45(12):1116-1120.
 ZHANG H,SUN K,TIAN L, et al. Wind speed simula-

tion of wind farm using WRF model[J].Journal of Tianjin University,2012,45(12):1116-1120.

- [10] 邢婷.基于 WRF 模式和 SVM 方法的杨梅山风电场 短期风电功率预报技术研究[D].南京:南京信息工 程大学,2014.
 XING T.The research on the wind power prediction on Yangmei Mountain wind farm based on the WRF weather forecast mode and SVM statistical regression approach[D].Nanjing: Nanjing University of Informa-
- [11] JIMÉNEZ P, DUDHIA J. Improving the Representation of Resolved and Unresolved Topographic Effects on Surface Wind in the WRF Model [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2012, 51(2): 300-316.

tion Science & Technology, 2014.

- [12] JIANG H, HARROLD M, WOLFF J K, et al. Investigating the impact of surface drag parameterization schemes on surface winds in WRF[C]//Atlanta:26th Conference on Weather Analysis and Forecasting,2014.
- [13] MASS C, OVENS D. Fixing WRF's high speed wind bias: A new subgrid scale drag parameterization and the role of detailed verification [C]//Seattle:24th conference on Weather Analysis and Forecasting,2011.
- [14] 王麟,刘毅鹏,汪健,等.5个 CMIP5 模式对低纬高原 气温的模拟和预估[J].云南大学学报:自然科学 版,2015,37(6):851-860.
 WANG L,LIU Y P,WANG J, et al.Simulations and estimates of low latitude highland temperature by 5 CMIP5 models[J].Journal of Yunnan University:Natural Sciences Edition,2015,37(6):851-860.
- [15] 陶云,吴星霖,段旭,等.2008 年云南滇东北电线覆 冰的气象条件[J].灾害学,2009,24(2):82-86.
 TAO Y,WU X L,DUAN X, et al.Meteorological conditions of wire ice coating in Northeastern Yunnan in 2008[J].Journal of Catastrophology,2009,24(2):82-86.

A study on the applicability of WRF_TopoWind model to simulate the mountain wind speed of the low latitude plateau in China

YANG Peng-wu¹, WANG Xue-feng¹, WANG Lin², ZHU Yong¹

(1.Climate Center of Yunnan Province, Kunming 650034, China; 2.Department of Atmosphere Science, School of Resource Environment and Earth Science, Yunnan University, Kunming 650091, China)

Abstract: The research has applied WRF 3.6.1 and the latest TopoWind scheme (hereinafter referred to as WRF_TopoWind) to simulate the mountain wind speed of Yunnan eastern and western parts in low latitude plateau of China. It has compared the 70 m high wind speed of wind tower in Yunnan eastern and western parts to test WRF_TopoWind adaptability to low latitude plateau mountain wind speed. The analysis has found that in terms of wind speed trend simulation the east part is better than the west for the whole year, and the west part is better than the east about wind speed value simulation precision for the whole year. The simulation result of winter is the best, and the simulation result of spring and summer takes second place, while autumn simulation effect is relatively poor. Most of simulation effect is poor in precipitation case, but most of simulation effect is good in non-precipitation case. WRF_TopoWind is basically applied in the work and research on wind farm site selection and wind energy resource assessment of low latitude plateau mountain areas.

Key words: WRF; TopoWind; simulates; low latitude plateau; mountain wind speed

772