

MM5 模式在新疆风能资源详查中的应用试验 ——以5月为例

辛 渝¹, 陈洪武¹, 赵逸舟¹, 李元鹏¹, 王 铁¹, 黄海云²

(1. 新疆气候中心, 新疆 乌鲁木齐 830002; 2. 新疆气象信息中心, 新疆 乌鲁木齐 830002)

摘 要:根据2006年5月份NCEP再分析资料,应用MM5对新疆进行的3 km分辨率地面风场的模拟试验表明:(1)模式基本能模拟出新疆风速偏大季节地面风场特征,对300 m、600 m高度处的模拟能力明显优于10 m高度,比10 m高度处的相对误差大多数小1个量级以上,可作为风电场风场预报的潜在工具之一。(2)虽然模式对新疆几大风区近地层10 m高度的模拟能力明显优于其它地区,模拟值与实测值间存在系统性误差,可通过统计订正的方法予以解决,但是仍需要通过某些途径提高模式对边界层的模拟能力,特别是对地形复杂区域、地势陡峭地带的模拟能力。

关键词:新疆; 风能资源详查; 数值模拟; 平均风速

中图分类号:P425

文献标识码:B

文章编号:1002-0799(2011)02-0012-07

A Case Study on Application Experiment of MM5 Model in Wind Energy Resources Detail Survey in Xinjiang

XIN Yu¹, CHENG Hong-wu¹, ZHAO Yi-zhou¹, LI Yuan-peng¹, WANG Tie¹, HUANG Hai-yun²

(1. Xinjiang Climate Center, Urumqi 830002, China;

2. Xinjiang Meteorological Information Center, Urumqi 830002, China)

Abstract: According to the NCEP reanalysis data in May, 2006, the surface wind field experiment with 3km resolution was carried by MM5 model in Xinjiang. The results are revealed as follow: (1) The model could simulate the spatial distribution characteristics of surface wind basically in windy season. Seen from the simulation capacity of the model, the relative error at the height of 300m or 600m was one order less than that of 10m, so that the model could be one of the potential tools in wind fields forecasting for wind farm. (2) Although the simulation capacity at 10m in gale area was better than that in other area, systematic errors existed between the simulated and observed value. Even though it could be settled by method of statistical modification, it was still necessary to improve the model simulating ability to boundary layer wind, especially in the complex terrain areas and the steep areas.

Key words: Xinjiang; detail survey on wind energy resources; numerical simulation; mean wind speed

收稿日期: 2010-09-06; 修回日期: 2010-11-15

基金项目: 新疆维吾尔自治区气象局气象科技研究课题(YX200805)资助。

作者简介: 辛渝(1969-), 女, 高级工程师, 从事气候资源开发与利用。E-mail: learnerxy@163.com

2008年7月26日,新疆发布自治区风电发展中长期规划,9月17日,又提出2010年实现新疆电网与西北电网联网的计划。然而当时,新疆气象局只完成了七大风区风能资源专业观测网中测风塔的勘探选址工作,同时风电企业测风塔资料也没有及时获得,风电建设前期的微观选址尚不清楚,无法为需求者提供有价值的参考信息。鉴于一些地区曾采用各种数值天气预报模式开展了相关研究,对此类问题的解决也有所帮助^[1-8],因此在新疆第三次风能资源普查以及张德等^[9]利用WEST对新疆进行5 km分辨率模拟的基础上,根据2006年的NCEP再分析资料,利用MM5V3.7.4对新疆大部分地区开展了3 km分辨率的模拟实验。同时考虑到新疆达坂城与小草湖风区中的风电机组最密集,又专门将该区域的分辨率提高到1 km,并重点分析了模式不同分辨率对该区域夏半年地面风场的模拟能力^[10]。本文则以新疆典型的多风季节——5月为例,检测它对其它地区地面风场3 km分辨率的模拟能力。希望为今后测风塔观测同期的风能资源数值模拟方案的优选、风能资源综合评估以及各风区的风场预报研究等提供参考。

1 资料与方法

模式方案设计、地形、陆面状态参数的选择、模拟能力评估统计参数、模式网格插值到站点的方法等同文献[10],此不赘述。以研究区内112个气象站(包括兵团所属气象站,表1)10 m高度逐小时的平均风速以及13个探空站(表2)距地300 m、600 m处的资料对模式的模拟能力进行评估,这些资料来源于新疆气象信息中心。

2 3 km 分辨率细网格月平均风速与流场的模拟

从图1可见,模拟的月平均风速分布极为复杂和不均匀,风速偏大区域呈孤岛分布。除海拔较高的山脊风速较大外,风口、河谷、山口等地区由于气流由开阔地区进入两侧高山或高山之间狭窄地区造成空气流线加密、流速加大,月平均风速也很大,而且这些区域的风速梯度变化非常明显,风速最大中心沿地形急剧减小,特别是小草湖与十三间房等强风区。对这些大风区盛行风向的模拟也与过去的认识相吻合。如,北疆东部的达坂城至小草湖(42.9°~43.8°N,87.4°~89°E)、北疆西北部的阿拉山口(44.67°~45.30°N,82.5°~83.25°E)、老风口(45.65°~46.50°N,84°~85.5°E)等以西北风为主,哈密地区的十三间房

表1 10 m 高度处 112 站日平均风速模拟值与实况值的均方根误差(RMSE)

站名	RMSE	站名	RMSE	站名	RMSE	站名	RMSE
百口泉	1.59	莫家湾	0.9	库米什	1.72	二师三十六团	1.44
石西	1.21	石河子	1.2	巴音布鲁克	1.3	四师六十三团	1.6
独山子	1.12	乌兰乌苏	1.23	和静	1.15	四师七十一团	0.91
白碱滩	1.59	玛纳斯	0.87	焉耆	0.8	五师八十三团	1.76
哈巴河	1.05	蔡家湖	0.52	和硕	0.78	五师八十九团	0.88
黑山头	1.29	呼图壁	1.12	托克逊	0.73	六师五家渠	0.51
吉木乃	1.3	米泉	1.46	东坎	1.51	六师新湖农场	0.79
布尔津	2.34	阜康	0.84	吐鲁番	1.34	六师芳草湖	0.73
福海	1.19	吉木萨尔	0.92	鄯善	1.42	七师一二三团	0.86
阿勒泰	0.75	奇台	0.56	阿克苏	1.42	七师一二四团	1.05
富蕴	1.1	察布查尔	2	温宿	1.07	七师一二五团	1.98
塔城	0.7	伊宁市	1.19	拜城	0.92	七师一二六团	1.82
裕民	1.33	尼勒克	0.73	新和	1.07	七师一二八团	2.34
额敏	1.04	伊宁县	1.15	沙雅	1.08	七师一三零团	0.82
和布克赛尔	2.07	巩留	1	轮台	1.2	七师奎屯	1.52
乌尔禾	1.2	新源	0.5	库丰	1.31	八师一三六团	2.71
青河	1.03	昭苏	1.09	尉犁	1.13	八师一四一团	0.8
阿拉山口	2.28	特克斯	0.99	库尔勒	2.83	八师一四二团	1.88
博乐	1.59	乌鲁木齐卫星站	0.96	博湖	1.58	八师一四四团	0.89
托里	1.07	乌鲁木齐	2.07	阿瓦提	1.4	八师一四七团	1.1
克拉玛依	1.61	小渠子	1.42	阿拉尔	1.03	八师一四八团	1.08
北塔山	0.76	柴窝堡	4.08	铁干里克	1.61	九师一六五团	1.31
霍尔果斯	1.49	巴仑台	2.06	淖毛湖	1.33	九师一六七团	0.88
霍城	1.66	牧试站	1.66	哈密	1.66	九师一七零团	3.48
温泉	1.22	天池	0.89	红柳河	1.17	十师北屯	0.97
精河	1.45	达坂城	1.21	二师二十二团	1.32	十师一八二团	1.32
乌苏	1.63	木垒	0.84	二师二十九团	1.49	十师一八四团	1.13
炮台	1.12	十三间房	3.15	二师三十三团	1.3	十三师红星二场	1.01

(42.67°~43.67°N,90°~92.5°E,即“百里风区”)以北风为主,三塘湖与淖毛湖(43.7°~45°N,91°~95.5°E)分别以西风、西北风为主,罗布泊(39°~41°N,87°~91.2°E)以东北风为主,北疆北部的额尔齐斯河谷(47°~48.05°N,85.55°~87.6°E)以西、西北风为主。

模式模拟的风速偏小区域分布在“两大盆地”(准噶尔盆地、塔里木盆地)、吐鲁番盆地、鄯善盆地、哈密盆地和巴里坤盆地,迎风坡河谷处的伊犁河谷、塔—额盆地,以及背风坡河谷(如博尔塔拉河谷)或背风坡处(如南疆北部沿山区一带),甚至还模拟出博尔塔拉河谷外侧风向多变、风速比其外侧更小等细微的空间特征^[11-12]。

上述表明模式模拟结果符合风速随地形变化的气候分布特征,也突出了地形对某地盛行风向的影

表2 新疆探空气象站距地 300 m 和 600 m 高度的月平均风速模拟值与观测值的相对误差百分率

测站	300 m			600 m		
	07 时	19 时	月平均	07 时	19 时	月平均
阿勒泰	-1.9	0.1	-0.9	5.9	1.0	3.5
塔城	-6.6	1.7	-2.5	3.1	1.1	2.1
和布克赛尔	7.5	0.5	4.0	3.0	0.9	2.0
阿拉山口	6.6	-0.8	2.9	-0.1	-0.5	-0.3
克拉玛依	9.8	-0.4	4.7	2.7	0.7	1.7
北塔山	-2.1	0.6	-0.8	4.1	1.4	2.8
伊宁	2.7	-1.5	0.6	6.4	0.1	3.2
乌鲁木齐	3.9	0.6	2.2	2.2	1.1	1.7
吐鲁番	-2.6		-2.6	-7.3		-7.3
阿克苏	4.1	2.7	3.4	-1.9	2.4	0.2
库车	5.4	1.2	3.3	10.7	0.7	5.7
库尔勒	9.7	0.5	5.1	1.5	0.1	0.8
哈密	6.3	0.5	3.4	-3.0	-0.1	-1.6

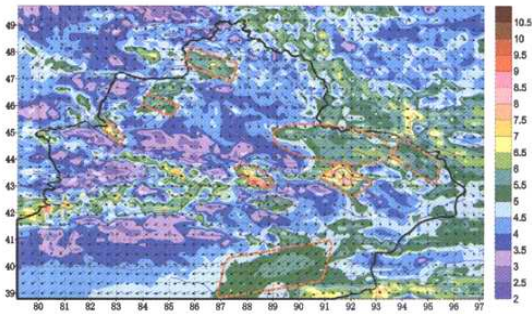


图1 2006年5月新疆主要风区10 m高度月平均风速(m/s)、平均流场(箭线)的模拟(细实线为地形等高线)

响以及气流在迎风坡阻塞减弱、山顶加速、背风减弱、狭管流线加密、风速加强等地形的机械摩擦与动力强迫作用。模拟出的风速相对大、小值区、平均流场特征等与通常对风能资源状况的了解十分吻合。

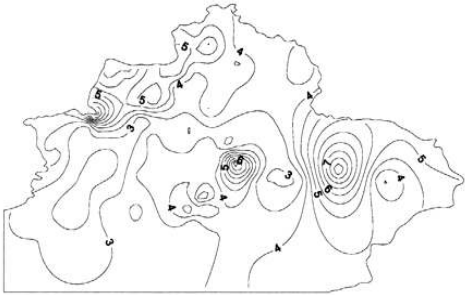
3 模拟风与实测风的对比分析

3.1 模拟场与实测场 10 m 高度大尺度对比分析

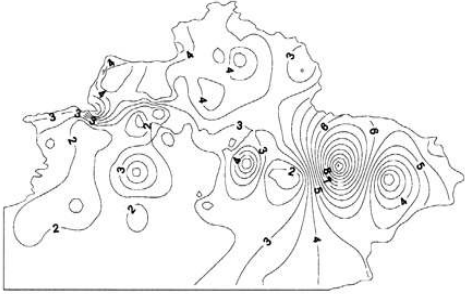
从图 2a、图 2b 可见,模拟的平均风速场的空间分布特征与实测一致,未出现大小值的空间“倒置”现象。两者的相似系数^[10]可达 0.92, 相关系数达 0.784, 显著性水平达 0.001 以上。说明基于站点的月平均风速的模拟场与实测场的空间分布很相近。

从图 2c 可见,绝大多数台站 10 m 高度上的月平均风速模拟偏差在 ± 1 m/s 以内,约占 63.4%,偏差

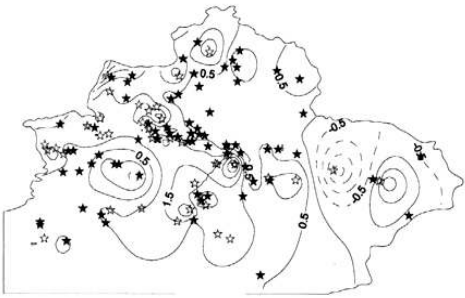
最大的是柴窝堡,模拟值比实况竟高达 3.63 m/s 左右。区域平均偏差为 0.782 m/s。同时还可见,大多数参考点的模拟值高于实况值,只有北疆的黑山头、奇台,天山山区中的巴音布鲁克,东疆的淖毛湖、红柳河、位于“百里风区”的十三间房及极少数兵团气象站的模拟值低于实况值。十三间房站的模拟值明显低于实况 2.25 m/s 左右。



(a)模拟场



(b)实测场



(c)模拟场与实测场的偏差

图2 新疆112站2006年5月份10 m高度平均风速(单位:m/s)的模拟值与实况值对比图
(注:C 图中“★”表示 $|MBE| \leq \pm 1.0$ m/s,“☆”表示 $|MBE| > \pm 1.0$ m/s,实线表示模拟值大于观测值,虚线反之。)

从图 3 可见,模拟值与实测值相对误差百分率 $\leq 10\%$ 的台站有 23 站,占全部台站数的 20.7%; $\leq 20\%$ 的台站 39 站,占 35.1%; $\geq 60\%$ 的台站 20 站,占 18.0%; $\geq 100\%$ 的台站有 4 个,占 3.6%。区域平

均相对误差百分率为 40%。其中,南疆站的相对误差百分率相对较大。

误差的大小与站点所在位置或与人类活动强弱区域密切相关。就新疆几大风区内或邻近风区的参考点而言,除布尔津、柴窝堡月平均风速的模拟值与实测值的相对误差百分率较大外,其余参考点(阿拉山口、达坂城、哈巴河、黑山头、福海、农九师一六五团、吉木乃、十三间房、淖毛湖、红柳河、托克逊、额敏、托里、白碱滩、克拉玛依、独山子等)的误差均介于 3~28% 间。这些区域受人类活动影响相对较小。模拟误差最大的主要分布在准噶尔盆地边缘的兵团气象站,如农八师一三六团(偏差 252%)、农八师一四二团(偏差 130%)、农七师一二五团(偏差 131%)、农七师一二六团(偏差 141%)等。其次是一些受城镇影响较大的参考站,如,库尔勒、乌鲁木齐、哈密、石河子、乌苏、精河等。在这些下垫面粗糙度过大的区域产生的如此偏差,很大程度上属于虚假误差。

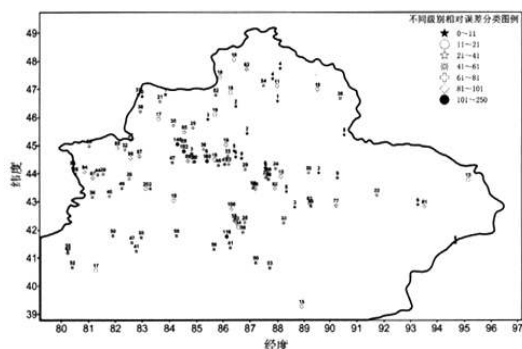


图3 2006年5月10 m高度月平均风速模拟值与实况值的相对误差百分率空间分布

3.2 研究区单站 10 m 高度日平均风速模拟值与实测值的相关性比较

从对单站 10 m 高度日平均风速的模拟与实测的相关性比较可见,大部分站点两者高度相关,显著性水平在 0.05,甚至 0.001 以上。特别是对北疆、东疆地区的模拟要好于南疆。日平均风速模拟值与观测值无关的只有表 3 中的 16 站(表 3 中坡度的计算参见文献 10)。这些站点多分布在地形复杂的山区(如乌鲁木齐牧试站)或地形陡峭地带(如柴窝堡坡度很大,达 4.2°)、背风坡河谷底部(如北疆的博乐、农五师 89 团气象站,两地相距约 10 km 左右)、城市(如阿克苏、库尔勒等)以及“人工绿洲区”(如兵团气象站中 45% 的站点实况值与模拟值无关,占了模

拟与实况无关总站数的 56% 左右)。

表3 单站日平均风速的模拟值与实测值

不相关的站点信息								
站 名	IA	坡度 (°)	城镇或 绿洲区	气流绕 流区	站 名	IA	坡度 (°)	城镇或 地形绕 流区
博乐	0.27	1.8	✓		农四师七十一团	0.43	1.3	✓ ✓
柴窝堡	0.39	4.2		✓	农五师八十九团	0.45	0.8	✓ ✓
牧气站	0.37	2.5		✓	农七师一二五团	0.31	0.0	✓
阿克苏	0.33	0.4	✓	✓	农七师一二六团	0.28	0.3	✓
温宿	0.37	0.8		✓	农八师一三六团	0.22	0.1	✓ ✓
库尔勒	0.35	1.3	✓	✓	农九师一六五团	0.49	1.6	✓
阿瓦提	0.46	0.0		✓	农九师一七零团	0.42	1.1	✓ ✓
农二师二十九团	0.40	0.0	✓		农十三师红星二场	0.48	0.8	✓

(注:“✓”表示“是”,空白表示“否”)

3.3 单站 10 m 高度日平均风速模拟值与观测值的平均绝对误差、均方根误差及一致性指数的分析

模式对大部分台站 10 m 高度上日平均风速模拟值的平均绝对偏差(MAE,表略)以及均方根误差(RMSE,表 1)均较大,大多在 1 以上。112 站的平均绝对偏差为 1.12 m/s;平均的均方根误差为 1.33。其中,布尔津、和布克赛尔、察布查尔、巴轮台、柴窝堡、阿拉山口、十三间房等达 2 以上。

从 112 站 10 m 高度上日平均风速模拟值与实测值的一致性指数^[3,10]的分布可见,一致性指数的大小仍与站点所处的地势、地貌有关。有 42 站的一致性指标在 0.71 或以上,约占 37.5%,多分布在北疆、东疆的风区或风区附近以及地势相对平坦、地貌相对单一的地带中。模式对日平均风速的模拟仍是北疆、东疆好于南疆,大风区的代表站好于非大风区的代表站。对位于山区背风坡山脚下的地带或背风坡气流下沉区、绕流区、地势陡峭以及距山脚较近地带等一致性指数最低。如博乐、柴窝堡、特克斯、吐鲁番牧试站、巴轮台、小渠子、布尔津等。其次是城镇区,如乌苏、哈密、米泉、阿克苏、库尔勒等。再次是“人工绿洲”区,见表 3。另外,值得一提的是,一致性指数低于 0.50 的台站也是日平均风速模拟值与实测值不存在显著相关的台站。

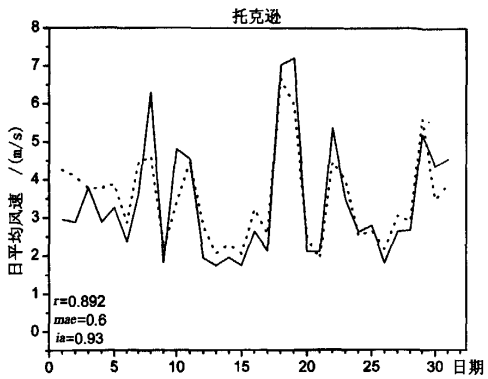
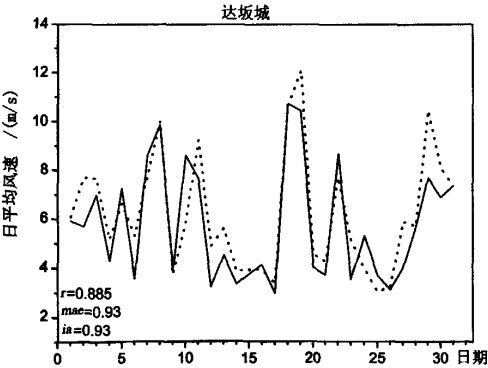
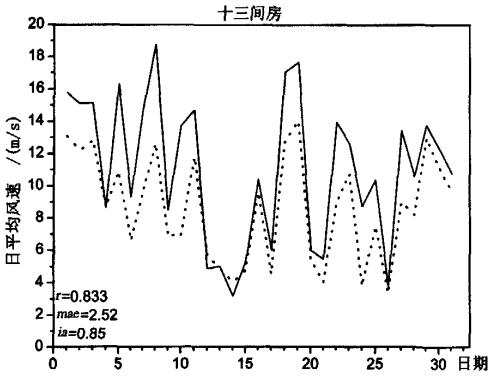
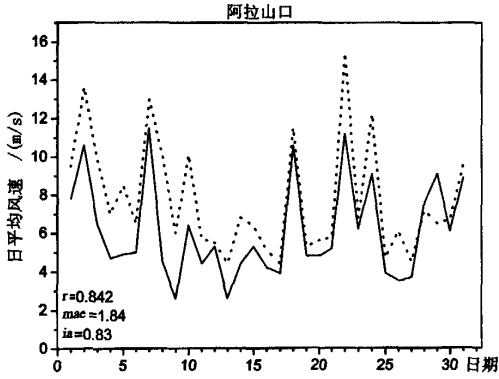
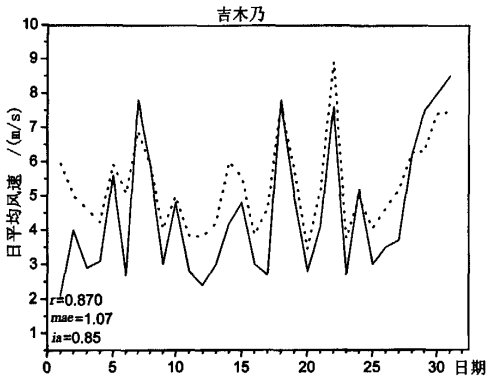
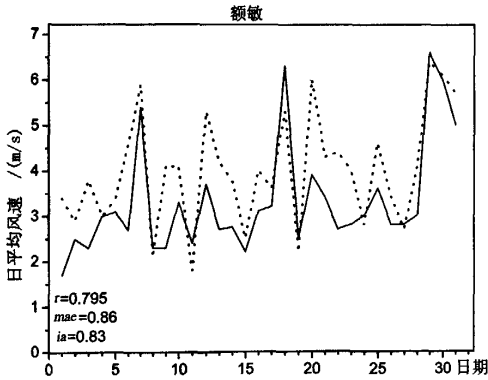
就新疆大风区内或邻近大风区的气象站 10 m 高度上日平均风速的模拟而言,阿拉山口、达坂城、托克逊、十三间房、淖毛湖、吉木乃、福海、黑山头、哈巴河、乌尔禾、克拉玛依、白碱滩、百口泉、额敏、托里等气象站虽然日平均风速的 RMSE(表 1)、MAE 较大,但模拟值与实测值间的一致性指标与相关系数均较高,显著性水平达 0.001 以上,故在很大程度上

可视为系统性误差,今后对这些区域的日平均风速进行预报时,可结合统计方法^[1]进行订正。风区中,模拟值与实测值一致性指标最低,相对误差百分率、绝对偏差、RMSE 最大的是柴窝堡,而且模拟值与实测值无关。

图4是从新疆几大风区或邻近风区中分别挑选1个参考气象站10 m高度的逐日平均风速实测与模拟值的变化图。可见尽管对有些站点的模拟偏差较大(如,布尔津站),但模式在一定程度上确实具有模拟不同环流形势与天气条件下风速变化的能力,基本能反映天气过程对风速变化的影响及风速的逐日走势和变化。从模拟的一致性指数看,模式对达坂城、托克逊日平均风速走势的变化模拟得最好,黑山头、白碱滩、哈巴河、十三间房、淖毛湖、克拉玛依等次之,但对十三间房模拟的日平均值明显偏低,这正如类似研究指出^[4]:中尺度MM5模式对模拟较大风速的区域确有欠缺。

3.4 模式对近地层 300 m、600 m 处风的模拟能力检验

为了更加客观评价模式的模拟能力,在此我们又特别引入了阿勒泰、塔城、克拉玛依、乌鲁木齐、北



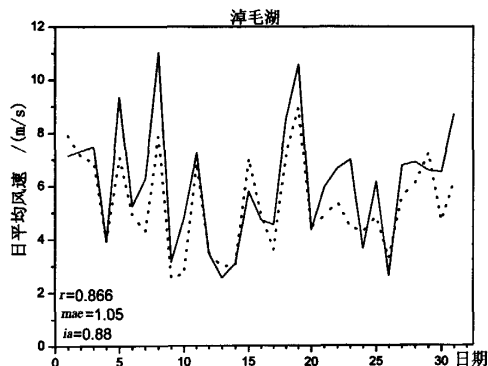


图4 新疆大风区中代表站 10 m 高度逐日

平均风速模拟值与实况值的对比

(实线:实况值;虚线:模拟值;“r”为模拟值与实况值的相关系数,“mae”为两者间的平均绝对偏差,“ia”为两者间的一致性指数)

塔山、哈密、伊犁、库车、库尔勒、阿克苏等 10 个数字式雷达测风探空气象站以及阿拉山口、和布克赛尔(和丰)、吐鲁番等 3 个小球测风站 300 m 和 600 m 高度处的月平均风速资料。由于探空观测为每日两次,释放探空球的时间分别为北京时 07 时 15 分、19 时 15 分(吐鲁番只有 07 时 15 分一个时次的高空探测),而探测到 300 m 和 600 m 处的风速时与正点 07 时、19 时接近,因此,在此分别将模拟时为 07 时、19 时 300 m、600 m 高度的月平均风速(上、下两 8 层平均风速的线性内插求得)与之进行了相应的对比(表 2)。可见:300 m 高度月均相对误差均在 5% 以内,大部分在 $\pm 3\%$ 以内,600 m 高度除吐鲁番、库车偏差略大外,其余大多也在 $\pm 3\%$ 以内。同时结合图 3 中 13 个探空站 10 m 高度处的模拟误差百分率可见,除塔城测站外,其余测站 300 m、600 m 高度处的月平均相对误差比 10 m 高度均减小了 1 个数量级以上。这表明,在排除地面粗糙度影响情况下,中尺度模式 MM5 的确能很好地模拟出近地层风场特征,能较好地给出天气背景场特征。

4 模拟与实况存在偏差的可能成因与解决的可能途径

从以上分析可见,模式对比较平坦区域以及受人类活动影响小或地表粗糙度小的区域的风场具有较好的模拟能力,可作为新疆风能资源评估或风场预报的潜在工具之一,但仍存在一定误差,其主要的可能原因有:一是中尺度模式本身的模拟能力有限,

特别是对极端强天气以及陡峭地带的模拟等,是否可通过与微尺度模式^[9]或流体力学模型^[10]的耦合得到有效解决还有待研究;二是模式的系统性误差,这种误差是由网格距和积分步长等产生的,模拟风速不可能与实况完全一致,只能在一定程度上代表实况风速,误差不可避免,对于一定范围内的平坦区域,可通过统计订正予以解决;三是模式地形^[11]、地表状态参数、空间分辨率等不能完全真实反映地形及周围环境条件对风速的影响也是重要原因。特别是地表状态参数,选用的是 1996 年的值。随着近年城镇化、“人工绿洲”的发展,模式中的地表状态参数必然与模拟时期存在一些差异,因此今后有必要根据近年测风塔资料、一些典型区域边界层观测资料以及最新的地表遥感数据^[12]等,改进边界层模式中的相关参数;四是来源于初始背景场-NCEP 再分析资料本身的误差^[14,15]。

5 结论与讨论

(1) 中尺度模式 MM5 能较好地模拟出新疆风速较大季节地面风场特征,对近地层 300 m 处的模拟能力明显优于 10 m 高度处,对新疆几大风区以及较平坦地带等具有较强的模拟能力,能较好地反映风速的逐日走势和变化,模拟与实测值间存在系统性误差,可作为今后风电场风场预报的潜在有力工具之一。但是对特大风区模拟明显偏低,对其它风区模拟得偏高。

(2) 在利用有限的几个探空站观测资料进行辅助对比分析中,虽然检测发现模拟的 300 m、600 m 处的风况与观测值十分吻合,且大多数测站比 10 m 高度处的误差小 1 个数量级以上,但由于高空观测资料本身垂直与水平分辨率均不高以及模拟时刻与观测时刻并非同步、观测时间不连续等,这种对比方式是否合理还有待斟酌。

(3) 本研究仅给出了模式对新疆大风时期 10 m 高度处风场的模拟能力,其它月份的模拟能力如何以及如何通过统计订正的方式进行新疆的风能资源评估、评估效果怎样等,将另文给出。

参考文献:

- [1] 赵彦厂,江志红,吴息,等.基于区域气候模式的江苏省风能评估试验[J].南京气象学院学报,2008,31(1):75-82.
- [2] 穆海振,徐家良,柯晓新,等.高分辨率数值模式在风能资源评估中的应用初探[J].应用气象学报,2006,17(2):152-159.
- [3] Steve H. L. Yim, Jimmy C. H. Fung, Alexis K. H. Lau, et

- al. Developing a high-resolution wind map for a complex terrain with a coupled MM5/CALMET system [J]. JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, 2007, VOL. 112, D05106, doi:10.1029/2006JD007752.
- [4] 龚强, 袁国恩, 张云秋, 等. MM5 模式在风能资源普查中的应用试验[J]. 资源科学, 2006, 28(1): 145-150.
- [5] 李晓燕, 余志. 基于 MM5 的沿海风能资源数值模拟方法研究[J]. 太阳能学报, 2005, 26(3): 400-408.
- [6] 袁春红, 薛衍, 杨振斌. 近海区域风速数值模拟试验分析[J]. 太阳能学报, 2004, 25(6): 740-743.
- [7] 李艳, 王元. 岛屿型复杂地形地貌条件下有效风能分布的甚高分辨率数值模拟[J]. 太阳能学报, 2007, 28(6): 663-669.
- [8] 曾雪兰, 余志, 邓院昌, 等. SRTM 数字高程模型在 MM5 风场模拟中的应用[J]. 资源科学, 2008, 30(5): 662-666.
- [9] 张德, 刘秋锋, 朱蓉等. 风能资源数值模拟系统 WEST 在新疆地区的应用[J]. 沙漠与绿洲气象, 2007, 1(1): 16-19.
- [10] 辛渝, 汤剑平, 赵逸舟, 等. 模式不同分辨率对新疆达坂城-小草湖风区地面风场模拟效果的分析[J]. 高原气象, 2010, 29(4): 884-893.
- [11] 辛渝, 陈洪武, 张广兴, 等. 博州气候暖湿化中若干其他气候特征的变化[J]. 中国沙漠, 2008, 28(3): 526-536.
- [12] 辛渝, 张广兴, 刘兴旺, 等. 1961—2005 年新疆博州地区农业热量因子的变化特征及成因分析 [J]. 冰川冻土, 2008, 30(3): 440-451.
- [13] 李磊, 张立杰, 张宁, 等. FLUENT 在复杂地形风场精细模拟中的应用研究[J]. 高原气象, 2010, 29(3): 621-628.
- [14] 赵天保, 艾丽坤, 冯锦明. NCEP 再分析资料和中国站点观测资料的分析与比较 [J]. 气候与环境研究, 2004, 9(2): 278-293.
- [15] SHI Xiaohui, XU Xiangde, XIE Lian. Reliability Analyses of Anomalies of NCEP/NCAR Reanalyzed Wind Speed and Surface Air Temperature in Climate Change Research in China [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2007, 21(3): 320-333.