

江苏东台地区风速风能特征分析及高精度模拟*

宗培书^{1,2}, 汤剑平^{2**}, 潘益农², 许春艳³

(1. 江苏省气象台, 南京, 210008; 2. 南京大学大气科学学院中尺度灾害性天气教育部重点实验室, 南京, 210093;
3. 江苏省海门市气象局, 海门, 226144)

摘要: 本文利用东台地区 3 个测风塔 1 年的测风数据分析了东台地区风速风能的特点, 并利用中尺度数值模式进行高精度风场预报, 评估了 MM5 模式对东台地区的适用性. 我们从东台沿海地区 2004 年 7 月 1 日至 2005 年 6 月 30 日 10 m、25 m 和 70 m 整一年的十分钟测风数据序列中计算出 Weibull-2 分布的形状参数、尺度因子两个参数, 然后利用这些参数, 通过风速的 Weibull 分布拟合东台地区的风速和风能分布, 对东台地区风能特点进行统计分析, 结果表明东台沿海地区风能资源丰富、风力稳定, 适合建立风电场进行大规模发电. 另外, MM5 模式模拟的东台地区水平分辨率为 1 km、为期一年小时风场与实测资料的对比显示, MM5 模式在高时空分辨率对东台地区风场有较好的模拟能力.

关键词: 风能, Weibull 模型, MM5 模式, 东台, 江苏

An analysis on the wind power potential and characteristics in the Dongtai area, Jiangsu, Eastern China

Zong Pei-Shu^{1,2}, Tang Jian-Ping², Pan Yi-Nong², Xu Chun-Yan³

(1. Jiangsu Provincial Observatory, Nanjing, 210008, China;
2. Key Laboratory of Mesoscale Severe Weather of Ministry of Education School of Atmospheric Science, Nanjing University, Nanjing, 210093, China;
3. Jiangsu Haimen Meteorological Administration, Haimen, 226144, China)

Abstract: In this paper, the wind power potential in the Dongtai area, Jiangsu province, eastern China, was investigated by both statistical method and atmospheric dynamical model. Based on the available ten-minute wind speed data, the Weibull-2 distribution function is firstly determined, in which the two parameters are identified. With the derived Weibull function, the wind speed and power distribution in Dongtai were studied. It is found that the wind energy is abundant and the atmospheric circulation is steady, which indicates that Dongtai is suitable to build the wind farm sites. In the dynamical model aspects, the MM5 model was used to generate the detailed temporal (hourly) as well as spatial (1 km) wind field in Dongtai for an entire year. The comparison of the wind speed and wind energy in different altitudes with that derived from the MM5 model shows that the MM5 model can generate high spatial and

* 基金项目: 中国气象局行业专项项目 (2008416048)

收稿日期: 2012-05-03

** 通讯联系人, E-mail: jptang@nju.edu.cn

temporal wind field correctly in Dongtai.

Key words: wind energy, Weibull distribution model, MM5 model, Dongtai, Jiangsu

随着石油、煤炭等化石燃料的日益枯竭以及人类对全球环境变化的日益关注,各国政府都致力于发展清洁的可再生能源,主要包括风能和太阳能。风能,也就是空气流动所产生的动能,是一种无污染和可再生的新能源。合理利用风能,既可减少环境污染,又可减轻能源短缺的压力,对于解决我国的能源问题有着重要的现实意义。我国是风能资源非常丰富的国家之一,最具丰富风能的地区主要分布于内蒙古、新疆、甘肃的河西走廊、东北、西北以及东南沿海地区^[1~3]。东台位于我国江苏沿海地区,有着明显的海陆风,是江苏省风能资源丰富区,也是我国典型的沿海风能资源区;同时,东台沿海有着大片平坦开阔的滩涂,地形条件非常适合建立风电场。

要利用风能资源,首先就要对该地区风速风能的分布特征进行分析。由于风的变化具有极大的随机性,对某地区的风能进行评估,最好的方法是在该地建立风塔实现长期观测。目前,对于平坦地形地区的风能资源评估,主要采用短期的1~2 a的塔层风连续观测资料的分析方法。我国风能资源评估行业标准规定,评估一个地区的风能资源,要求当地连续观测1 a以上的10 min平均风速。比如,为了给新疆达坂城地区风能开发利用提供参考,需要利用1993年1 a的10 min观测风速计算该地区各层高度上的平均风功率密度、有效风能密度等参数^[4]。在对观测资料进行统计分析过程中,我们还可以利用风速分布的统计模型对一个地区风速风能的特点作更为细致的研究。虽然风随时随地变化,而且风速与风能之间也不存在简单的线性关系,但是风的分布还是满足一定的统计关系的,Weibull分布模型就是目前最常用的一种风速分布模型。

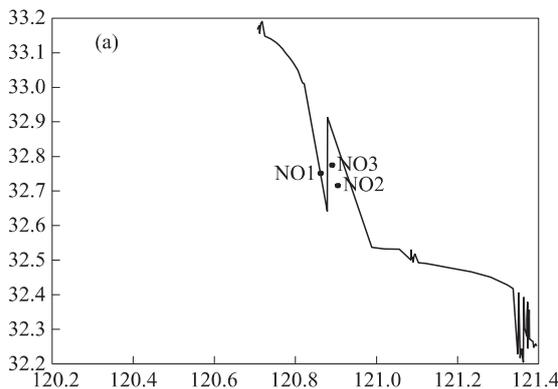
然而,就一般情况而言,风电场多建于旷

野、海岛、沿海滩涂等偏远且人烟稀少的地区,气象观测从未延伸到这些地区,因此,对于这些地区,长期观测资料往往是十分稀缺的,仅仅通过实测资料来评估该地风能潜力的方法也变得不可行^[5]。为了突破风能资源评估所需观测资料在空间分布密度和观测时间长度方面的限制,中、小尺度数值模式在风能资源评估中的应用技术得到快速发展。虽然数值模拟并不能代替现场观测,但利用数值模式能够较好地模拟低层大气风场分布,可以弥补近地面100 m高度缺少观测资料的不足,能将实际中点的观测结果扩张到面上,从而在一定程度上减少风能资源评估的不确定性。

在当前国内外用于模拟风场的天气学模式中,美国国家海洋大气中心(NCAR)开发的非静力平衡中尺度MM5(Fifth-Generation Mesoscale Model)模式是最成熟和完整的模式之一^[6~8]。Pérez S等^[7]利用了MM5进行了复杂地形下的动力降尺度和风场短期预报,并将生成的水平分辨率为3 km,每3 h输出一次的预报风场分别与实测和REMO模式模拟结果相比较,得出了MM5完全可以对复杂地形的地区进行高分辨率模拟和风能预报的结论。Yim等^[8]在研究香港地区的风能时,也证明了MM5模式适用于香港地区风能的精细化模拟和预报。然而,MM5模式并不适用于美国五大湖地区的风能模拟^[9]。因此,MM5对于东台地区是否适用,还需要作具体的考察。

在本文所作的研究中,我们使用了东台地区三个测风塔1年的10 min风速资料,利用Weibull-2分布模型,对东台地区1年的风能变化进行了统计分析。统计分析的结论有助于我们加深对东台沿海地区风速风能分布特征的了解,也为数值模拟结果的评估提供了实测基础。在数值模拟方面,我们选用MM5模式对东

台地区的风场作了水平分辨率为 1 km, 时间分辨率为 1 h 的高精度模拟, 在用实测资料验证 MM5 模式对东台地区风速风能模拟性能的同时, 也利用 MM5 模式给出了东台地区风场更为精细化的特征. 在风能资源的评价方面, 杨振斌等^[10]提出了两个新参数: 相当风速和有功风功率密度. 这两个参数可以显著地反映可能被风力机转换为电能的空气运动具有的动能, 从而更客观、准确地评价某一地点风能资源可利用程度, 是两个更具有指示意义的量值指标. 因此, 在我们的研究中, 也将计算这两个参数, 用以风电场的建设提供更具可行性的依据.



1 资料与方法

1.1 风能的统计分析 对东台地区风能的统计分析, 主要是利用风速的 Weibull 分布模型来拟合东台地区的风速和风能分布, 分析东台地区风能的时间、空间分布特点. 用以计算 Weibull 分布拟合过程中所需各参数的实测资料为东台沿海地区位于弥港镇东 (32°45'5"N, 120°51'44"E)、方唐河闸北 (32°42'56"N, 120°54'17"E) 和苍东垦区 (32°46'30"N, 120°53'26"E) 的三个测风塔 (图 1a) 提供的 2004 年 7 月 1 日至 2005 年 6 月 30 日的十分钟测风数据.

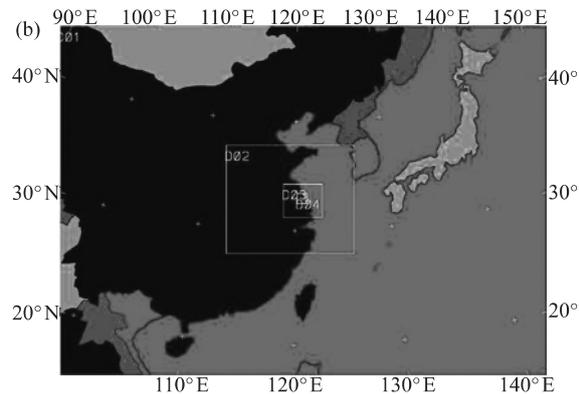


图 1 (a). 东台地区三个测风塔所在位置. (b). MM5 的 4 个嵌套网格, 水平分辨率分别为 27 km, 9 km, 3 km 和 1 km

Fig. 1 (a). Locations of the three wind towers in Dongtai. (b). Four nested domains in MM5 model (solid lines)

The resolutions from the outermost to the innermost domains are 27, 9, 3, and 1 km, respectively

1.1.1 风能的计算 风能就是气流具有的动能. 单位时间内气流通过与气流垂直的单位面积的风能, 称为风能密度. 假定气流的密度为 ρ (g/m^3), 瞬时气流速度为 v (m/s), 那么瞬时风能密度为

$$W = \frac{1}{2} \rho v^3$$

因为风速变化是随机的, 不可能确定风速随时间变化的函数形式, 所以只能用实测的离散值近似地估计 T 时段内的平均风能密度, 即

$$W_{av} = \frac{1}{2} \rho \sum_{i=1}^N v_i^3 / N$$

式中, N 表示 T 时段内风速观测次数. 但这样计算平均密度, 统计工作量较繁重, 且当 N 较小时, 还会给结果带来误差. 所以, 如果已知风

速的概率密度函数 $f(v)$, 计算量将减轻很多, 并且误差也较小. 描述风速概率分布有多种模型, 目前较常用的是 Weibull 分布模型.

1.1.2 风速的 Weibull 分布 据文^[11~14], 风速的 Weibull 分布是一种单峰、两参数的分布函数族, 它的风速概率密度函数和累积概率分布函数分别为:

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

$$(k > 0, c > 0, v > 0)$$

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

其中, v 为风速; k 为形状参数, 无量纲; c 为尺度因子, 量纲为 m/s . 这两个参数 k 和 c , 可以利用平均风速 \bar{v} 和标准差 σ 来估算.

1.2 风能的数值模拟 我们选用中尺度模式 MM5 来对东台地区的风能进行数值模拟. MM5 是由 PSU/NCAR (Pennsylvania State University/National Center for Atmosphere) 开发的非静力、采用地形 σ 坐标的局地模式, 多用来模拟和预测中尺度大气环流. 国内外多位学者的研究表明, MM5 非常适用于数值天气预报、空气质量等方面的研究^[7,8,15].

在本次 MM5 模拟过程中, 我们采用四层双向嵌套网格对东台地区的风场进行水平分辨率为 1 km 的高分辨率模拟(图 1b): 中心经纬度分别为 120.9°E 和 32.7°N; 最外层 D1 水平分辨率为 27 km, 格点数 180×130; 次外层 D2 水平分辨率为 9 km, 格点数 142×121; 第三层 D3 水平分辨率为 3 km, 格点数为 130×112; 最内层 D4 水平分辨率为 1 km, 格点数 100×100. 由于 MM5 采用的是地形 σ 坐标: $\sigma = (P - P_{top}) / (P_{sur} - P_{top})$, 故设定模式顶层气压 P_{top} 为 100 hPa. 在垂直方向上共分为 24 层, 其中 1 km 左右以下(行星边界层)分 10 层.

在参数化方案的选取方面, 采用 Grell 积云对流参数化方案、MRF 行星边界层方案、显示简单冰相水汽方案、云辐射方案, 以及松弛流入/流出边界条件.

在 MM5 所用资料方面, 地形资料为 U. S. Geological Survey (USGS) 30sec 资料, 模式的驱动资料则选用水平分辨率为 1.25°、时间间隔为 6 h 的 ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasting) 分析资料. 在具体的模拟过程中, 采用一次积分三天半, 即 84 h, 将前 12 h 作为 spin-up 时间而予以舍弃的时间积分方案, 每 1h 输出一次结果. 也就是说, 2004 年 7 月 1 日到 2005 年 6 月 30 日整一年的气象要素预报场, 是由 121 次 MM5 模拟结果组合而成的.

图 1a 给出了东台地区三个测风塔的位置, 由于它们距离十分相近, 在 1 km 的分辨率下基本处在同一个格点上, 所以先对三塔数据作算术平均, 再进行统计分析和与 MM5 模拟结果进行对比的工作. 对 MM5 模拟结果的合理

性检验方面, 我们主要是将 MM5 模式模拟结果与位于东台沿海地区实测的 10 m、25 m 和 70 m 风速、风能进行比较.

2 结果分析

2.1 东台沿海地区风的统计特征

2.1.1 风速的分布 风的随机性很大, 因此在判断一个地方的风况时, 必须依靠各地区风速的统计特性. 在风能利用当中, 反映风的统计特点的一个最重要的形式是风的分布曲线. 长期观测的结果表明, 年度地面风速分布曲线最有代表性. 图 2 给出了东台地区 10 m 高度上各月份风速的分布曲线, 即不同的风速所出现的频率. 由图 2 可见, 除 5 月份最常出现的风速集中在 8 m/s 至 10 m/s 外, 其余几个月的风速分布情况基本相似, 主要集中在 5 m/s 至 7 m/s 之间.

2.1.2 风能随时间、高度的变化 这里, 我们将利用 Weibull 分布模型对东台地区的风能进行计算、分析. 除了对传统的评价风能资源的各参量, 如形状参数、尺度因子、平均风能密度等的计算外, 我们还引入了两个新参数^[10]: 相当风速和有功风功率密度. 相当风速的定义为: 对于某一平均风速为 \bar{v}_e 的实测的风速序列, 假设存在一个标准大气(空气密度 $\bar{\rho}_0 = 1.225 \text{ kg/m}^3$) 下的平均风速为 \bar{v}_e 的风速序列 $v_i (i=1, 2, \dots, n)$, 该序列服从 Rayleigh 分布(风速分布的另一种统计模型), 并且具有与该实测序列相同的能量, 那么 \bar{v}_e 即为该实测风速序列的相当风速. 其计算公式如下:

$$\bar{v}_e = \left[\frac{\frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n v_{e,i}^3}{0.955 \times 1.225} \right]^{\frac{1}{3}}$$

相当风速的概念可为利用风速值的大小直接进行风电场(或潜在风电场)之间的风能资源丰欠比较提供一个具有可比较性的直观的评判指标. 该指标充分考虑了风速的概率分布、空气密度对风能大小的影响, 在某种意义上来说, 相当风速是一个具有能量概念, 但同时又具有风速量纲的参量.

有功风功率密度的定义是有效风力范围内

的风力在整个统计(观测)时段内所贡献的风功率密度,即:

$$\overline{P_e} = \int_{v_0}^{v_2} \frac{1}{2} \rho v^3 f(v) dv$$

其中, ρ 为空气密度, $f(v)$ 为二参数 Weibull 分布的概率密度函数, v_0 和 v_2 分别为启动风速和停机风速. 有功风功率密度值的大小直接反映了处于有效风力范围内的风速对平均风能密度的直接贡献,亦即可以被风力机直接利用的风能密度的大小. 所以可以说,有功风功率密度大的地区,风能资源一定丰富.

表 1 即为利用 Weibull 分布计算得出的各参量值,可见东台沿海地区的风能随高度明显增大,这是由于随着高度增加,空气流动受到的

摩擦力减小,因而风速、风能也随之增大的缘故;风能在夏半年,即春、夏季较大,而在冬半年,即秋、冬季较小,与我国风能分布普遍存在的“冬春大,夏秋小”的特点不一致. 这主要是因为东台位于亚热带季风气候区,夏季风明显较强的缘故.

图 3 是 2004 年 7 月 1 日至 2005 年 6 月 30 日一年时间内不同风速出现的频率及该风速对风能所作贡献的百分数,其中柱状图表示实测不同风速出现的频率,曲线则是 Weibull 模式根据实测风速拟合所得风速概率密度分布. 由图 3 可见,这一年里东台沿海地区 5.5~7.5 m/s 的风速最常出现,而对风能大小贡献最大的风速则集中于 7.5~10.5 m/s 之间.

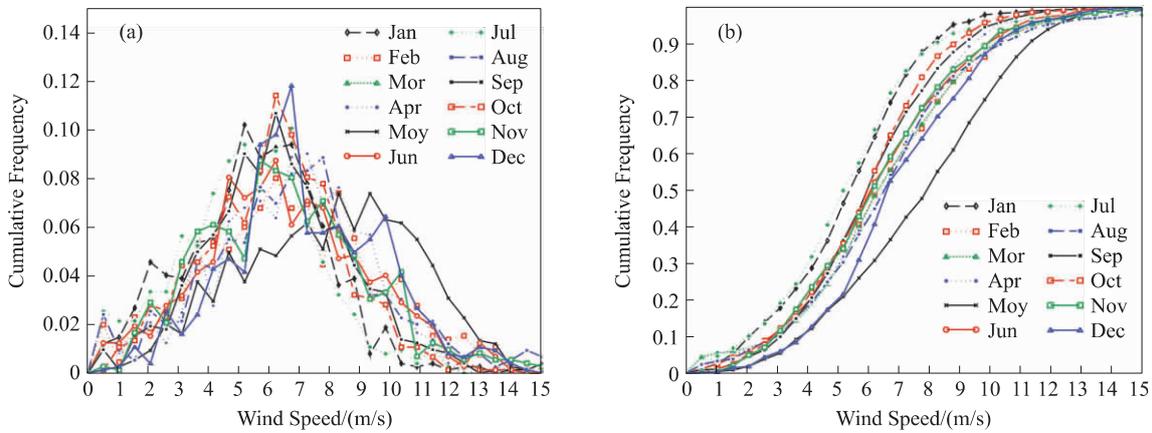


图 2 实测各月风速频率(图 a)及累积频率(图 b)分布曲线

Fig. 2 Distribution of the measured monthly wind speed probability(a)and cumulative probability(b)

表 1 由实测值计算所得东台沿海地区各季节及全年不同高度上 Weibull 参数、相当风速、有功风功率密度及平均风能密度

Table 1 Seasonal and annual Weibull parameters, equivalent wind speed, available wind power density, and average wind power density based on measured wind speed data at different heights in the Dongtai coastal region (a)10 m

季节	统计量				
	形状参数 k	尺度因子 c (m/s)	相当风速(m/s)	有功风功率密度(W/m^2)	平均风能密度(W/m^2)
春季	2.44	6.42	5.40	180.6	181.6
夏季	2.38	6.13	5.22	159.3	160.5
秋季	2.43	5.51	4.65	113.5	115.0
冬季	2.35	5.59	4.75	121.6	123.0
全年	2.37	5.92	5.03	143.7	145.0

(b)25 m

季节	统计量				
	形状参数 k	尺度因子 c (m/s)	相当风速(m/s)	有功风功率密度(W/m^2)	平均风能密度(W/m^2)
春季	2.42	7.14	6.00	250.8	251.6
夏季	2.24	6.68	5.76	217.4	218.4
秋季	2.45	6.23	5.22	164.2	165.3
冬季	2.35	6.39	5.40	182.9	184.0
全年	2.34	6.61	5.61	203.7	204.7

(c)70 m

季节	统计量				
	形状参数 k	尺度因子 c (m/s)	相当风速(m/s)	有功风功率密度(W/m^2)	平均风能密度(W/m^2)
春季	2.76	7.96	6.48	320.4	320.9
夏季	2.39	7.14	6.06	252.8	253.6
秋季	2.90	7.11	5.76	222.7	223.3
冬季	2.74	7.28	5.95	245.7	246.4
全年	2.66	7.38	6.07	260.2	260.9

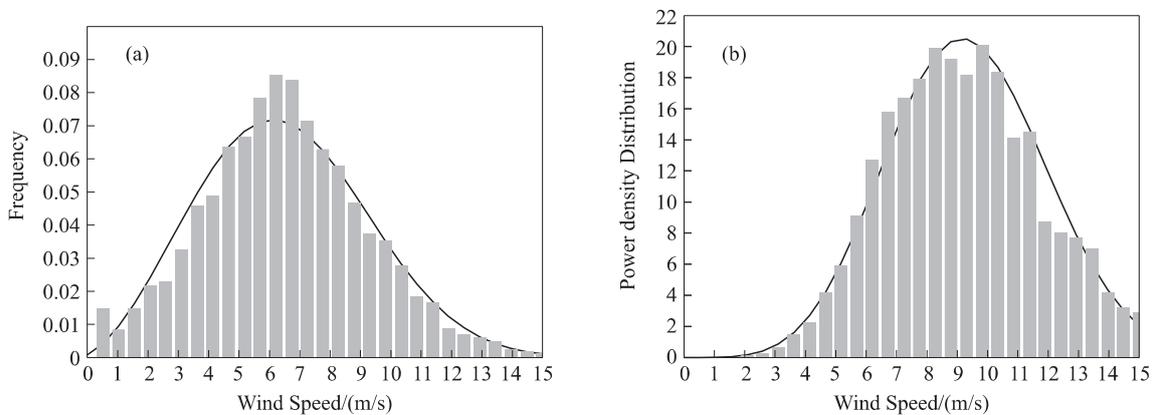


图 3 (a)实测 2004 年 7 月 1 日至 2005 年 6 月 30 日一年时间内不同风速出现的频率
(b)实测 2004 年 7 月 1 日至 2005 年 6 月 30 日一年时间内不同风速对风能所作贡献的百分数

Fig. 3 Distribution of the measured yearly wind probability(a)and power(b) density of different wind speeds

2.1.3 湍流强度 湍流强度表征了一个地区风速风向的稳定性,湍流强度越小,则环流越稳定,对风力机的磨损也越小.湍流强度可以根据以下公式计算:

$$I=S/V$$

其中, I 为湍流强度; S 为 10 min 风速标准偏差(m/s); V 为 10 min 平均风速(m/s).

根据实测资料,由上式算出东台沿海地区不同高度各月平均湍流强度曲线如图 4.可以看出,湍流强度基本上随高度的增高而减弱,而 70 m 高度上湍流强度变化幅度较大.也就是说,

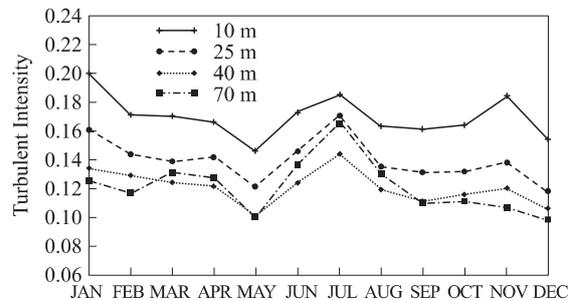


图 4 东台沿海地区不同高度上各月的湍流强度
Fig. 4 Monthly turbulence intensity at different heights in the Dongtai coastal region

东台沿海地区风速分布基本上较为稳定,可以提供稳定的电力,并且对风力机的损耗也较小.

2.2 MM5 模式模拟结果分析 对观测资料的分析已经表明,东台地区的风速稳定,风能资源丰富,适合建立风电场.下面,我们将通过 MM5 模式模拟的结果与实测资料的对比分析,检验 MM5 模式对东台地区的适用性,并探求更高时空分辨率上东台地区的风况特征.

2.2.1 MM5 输出结果的 Weibull 统计分析 风速的 Weibull 分布也可用于 MM5 模拟所得风场的统计分析,方法与利用 Weibull 分布对实测风速分析的相同,都是计算形状参数、尺度因子、相当风速、有功风功率密度及平均风能密

度.以上统计量的计算结果都列于表 2 中,可以看出,模拟所得风能随高度增加,且春季风能最为丰富而冬季风能最小,这与观测值分析结果相同.然而所有的统计量都比实测计算所得统计量的值要小,也就是说,MM5 模拟所得风速和风能都比实测情况偏小.

图 5 中,柱状图表示 MM5 模拟所得不同风速出现的频率,曲线则是 Weibull 模式根据模拟风速拟合所得风速概率密度分布.由图 5 可见 MM5 模拟出的最大风频风速集中在 4~6 m/s 之间,且 7~9.5 m/s 的风速对风能贡献最大.与图 3 的对比可见,无论是最大风频风速还是对风能贡献最大的风速,模拟的结果都比实测的偏小.

表 2 由 MM5 模式输出的小时风速计算所得东台沿海地区各季节及全年不同高度上 Weibull 参数、相当风速、有功风功率密度及平均风能密度

Table 2 Seasonal and annual Weibull parameters, equivalent wind speed, available wind power density, and average wind power density derived from MM5 output hourly wind speed data at different heights in the Dongtai coastal region

(a)10 m

季节	统计量				
	形状参数 k	尺度因子 c (m/s)	相当风速(m/s)	有功风功率密度(W/m^2)	平均风能密度(W/m^2)
春季	2.57	4.95	4.11	78.8	80.5
夏季	2.59	4.95	4.11	78.8	80.5
秋季	2.41	4.15	3.51	47.2	49.6
冬季	2.66	4.73	3.89	66.7	68.6
全年	2.51	4.53	3.79	60.6	62.7

(b)25 m

季节	统计量				
	形状参数 k	尺度因子 c (m/s)	相当风速(m/s)	有功风功率密度(W/m^2)	平均风能密度(W/m^2)
春季	2.73	7.28	5.96	246.6	247.2
夏季	2.64	5.77	4.77	124.0	125.2
秋季	2.66	6.21	5.13	154.6	155.6
冬季	2.87	6.89	5.60	204.0	204.7
全年	2.64	6.54	5.40	181.8	182.7

(c)70 m

季节	统计量				
	形状参数 k	尺度因子 c (m/s)	相当风速(m/s)	有功风功率密度(W/m^2)	平均风能密度(W/m^2)
春季	2.73	7.51	6.14	270.5	271.1
夏季	2.54	6.72	5.61	201.4	202.3
秋季	2.66	6.40	5.29	169.7	170.6
冬季	2.87	7.11	5.77	223.8	224.5
全年	2.66	6.94	5.72	216.2	217.0

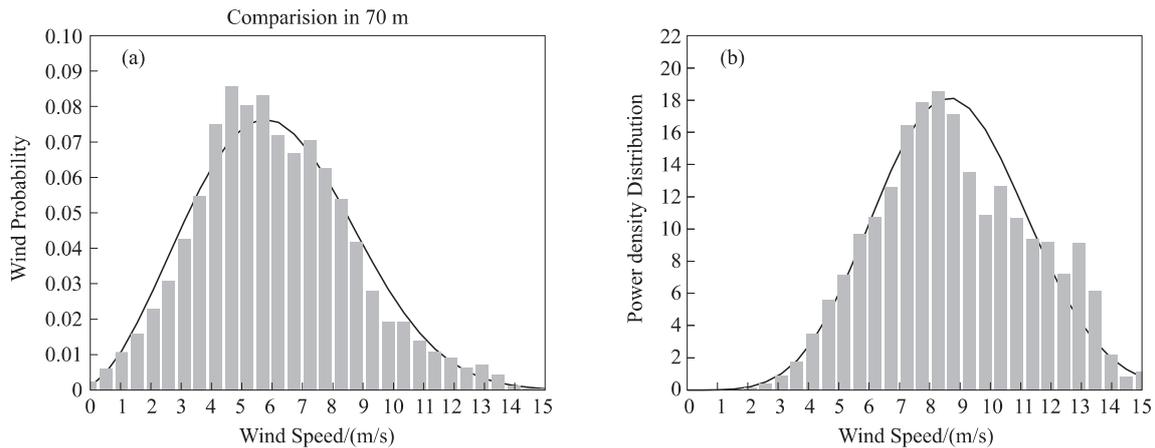


图 5 70 m 高度上(a). MM5 模拟所得 2004 年 7 月 1 日至 2005 年 6 月 30 日一年时间内不同风速出现的频率; (b). MM5 模拟所得 2004 年 7 月 1 日至 2005 年 6 月 30 日一年时间内不同风速对风能所作贡献的百分数

Fig. 5 Distributions of the MM5 output yearly wind probability(a)and power(b)density of different wind speeds at the height of 70 m

2.2.2 MM5 模拟风速与实测风速的对比

沿海地区有着较为独特的海陆风环流,给数值模式的模拟带来了一定的难度,所以 MM5 模式是否适用于东台沿海地区的风能模拟,还必须进一步严格论证.此外,一般情况下,沿海地区由于地理位置偏僻、地质条件受限、经济能力有限等原因,气象观测资料总是较为缺乏.所以寻求一个适合的数值模式及模拟方案,对于弥补沿海地区观测资料的不足,意义十分重大.

下面将利用统计学方法对 MM5 预报风场与实测风场进行定量地对比,我们选取了 4 个统计量对模式模拟的能力进行评估,它们分别是相关系数、均方根误差、偏差和 I 指数.

相关系数可以反映模拟风速和实测风速的相关程度,相关系数越大,则模拟结果越接近实测情况;均方根误差(RMSE)可以反映模拟风速与实测风速相偏离的程度, RMSE 越大,两者偏离的也越远;偏差(bias)是实测和模拟两组样本平均值之差,也可以表示模拟和实测风速的偏离程度.

为了更全面地评估 MM5 的模拟能力,本文还使用了文[8]所定义的 I 指数,它能够更加全面、合理地反映模拟和实测风速的偏差情况,因此我们将其做为评估 MM5 模拟结果最为重要的指标.它由下式定义:

$$I = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_{mi} - x_{oi})^2}{\sum_{i=1}^n (|x_{mi} - \bar{x}_o| + |x_{oi} - \bar{x}_o|)^2}$$

表 3 列出了 10 m、25 m 和 70 m 高度上各季节和全年的四个统计量之值.通过对相关系数和 I 指数的比较,从整年来看,MM5 对 25 m 高度上风场的模拟准确度最高,其次为 70 m,最后为 10 m;在 10 m 和 25 m 高度上,MM5 对冬半年的模拟能力强于夏半年,但在 70 m 高度上,却是夏半年稍强于冬半年.此外,从均值偏差也可以看出,MM5 的绝大多数模拟结果都比实测风速要小,而随着高度的增加,MM5 模拟风速的均值与实测风速的均值也越来越相近.

图 6 中各月模拟与实测风速序列的相关系数显示,从所有月份和高度的结果来看,MM5 与实测的相关系数最大为 0.7,最小为 0.25,整体在 0.45 左右.在 70 m 高度上,除了 6 月、7 月和 11 月的相关系数较低(接近 0.3)外,其他月份大多在 0.5 以上,整体的相关性较高.此外,MM5 的模拟能力并未出现随高度增加而增强的情况,相反,在 3、4、5 月都出现了相关系数随高度递减的现象,从总体来看,25 m 高度上的相关系数要高于 70 m 和 10 m,这可能与 MM5 模式的垂直插值方法有关.

表 3 不同高度上模拟和实测各季节和全年风速的统计量

Table 3 Seasonal and annual statistics between the MM5 output and the measured wind speed at different heights

(a) 10 m				
季节	统计量			
	相关系数 r	均方根误差 RMSE	偏差 bias	I 指数
春季	0.56	2.48	-1.29	0.63
夏季	0.42	2.80	-1.62	0.43
秋季	0.50	2.30	-1.20	0.58
冬季	0.56	2.05	-0.75	0.69
全年	0.47	2.51	-1.24	0.56

(b) 25m				
季节	统计量			
	相关系数 r	均方根误差 RMSE	偏差 bias	I 指数
春季	0.52	2.64	0.14	0.72
夏季	0.37	2.93	-0.79	0.57
秋季	0.51	2.31	-0.01	0.71
冬季	0.58	2.31	0.48	0.74
全年	0.44	2.69	-0.08	0.66

(c) 70m				
季节	统计量			
	相关系数 r	均方根误差 RMSE	偏差 bias	I 指数
春季	0.46	2.85	-0.39	0.68
夏季	0.39	2.98	-0.37	0.63
秋季	0.45	2.55	-0.65	0.65
冬季	0.25	3.10	0.06	0.56
全年	0.41	2.84	-0.41	0.64

2.2.3 MM5 模拟风能和实测风能的对比 风力机多建立在 70 m 高度上,因此该高度上的风能资源特点对于风能应用起着极为重要的作用.所以,在本次研究中,我们将主要关注 70 m 高度上的 MM5 模拟与实测风能比较的结果.

图 7 显示了 70 m 高度上由各月观测和 MM5 模拟风速序列计算所得的月平均风能,显而易见,除了 1 月和 4 月 MM5 模拟风能大于实测风能外,其余各月模拟风能均偏小.模拟所得风能最大值为 287 W/m²,出现在 5 月;最小值为

166 W/m²,出现在 11 月.而由实测资料分析所得风能最丰富的月份也为 5 月,417 W/m²;风能最小的月份为 1 月,仅 157 W/m².可见 MM5 模拟所得东台沿海地区各月风能的最大值明显偏小,而最小值又稍偏大.而且,MM5 能够模拟出风能最为丰富的月份,却在风能最小月份的模拟方面出现了两个月的偏差.

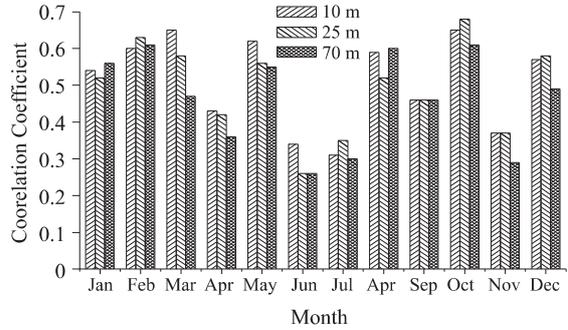


图 6 各月模拟风速序列与实测序列的相关系数
Fig. 6 Correlation coefficient values between the MM5 output and the measured wind speed data in each month

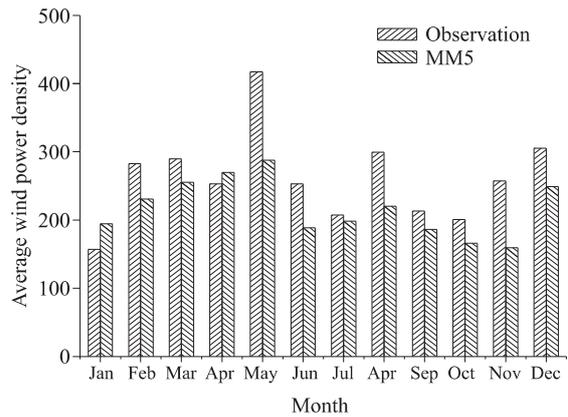


图 7 70m 高度上由各月观测和 MM5 模拟风速序列计算所得的月平均风能
Fig. 7 Monthly average wind power density derived from the measured and the MM5 output wind speed time-series at the 70 m height, respectively

为定量分析模拟结果和实测结果的偏离程度,我们计算了每月模拟风能对实测风能的相对误差,计算公式如下:

$$Error = \frac{P_m - P_o}{P_o}$$

其中, P_m 和 P_o 分别为模拟和实测月平均风能密度. 负的相对误差表明模拟风能比实测风能小, 正的相对误差表示模拟风能比实测风能大, 而相对误差的绝对值越大, 说明模拟风能与实测风能的偏差越大. 图 8 显示了相对误差随月份和高度的变化, 10 m 高度上的相对误差明显比 25 m 和 70 m 的大. 在 10 m 高度上, 大部分月份的相对误差均超过了 60%, 可以认为 MM5 对于 10 m 高度风能的模拟是失败的; 在 25 m 高度上, 相对误差的最大值出现在 1 月份, 为 60%, 而其余月份的相对误差都小于 10%; 在 70 m 高度上, 除 1 月和 4 月外, 模拟风能均比实测风能小, 模拟风能与实测风能偏差最大的月份为 11 月, 达到 -40%, 而其余月份基本上都在 -20% 左右. 在风力发电中, 主要利用的是 70 m 高度的风能, 而 70 m 高度上的相对误差是可以接受的, 因此我们认为利用 MM5 对东台沿海地区风能分布情况进行模拟是完全可行的风能评估方法.

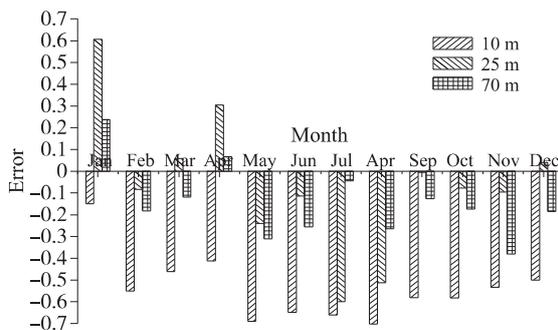


图 8 10 m、25 m 和 70 m 高度上由 MM5 模式输出结果计算所得各月平均风能密度与实测月平均风能密度的相对误差

Fig. 8 Error values in calculating the wind power density obtained from the MM5 output and the wind power density obtained from the measured data, on monthly basis, at 10 m, 25 m, 70 m height, respectively

3 结论与讨论

本文利用东台地区 3 个测风塔 1 年的测风数据, 分析了东台地区风速风能的特点, 并利用模式进行高精度风场预报, 评估了 MM5 模式对东台地区的适用性. 通过以上研究得出如下

主要结论:

(1) 东台沿海地区最常出现的风速集中在 5 m/s 至 7 m/s 之间, 风速随高度增加, 在 70 m 高度上平均风功率密度为 260.9 W/m^2 , 风能资源丰富, 极具开发利用的价值. 湍流强度的计算也指出东台沿海地区湍流强度较小, 环流稳定, 能产生稳定的电流, 对风力机的损耗也小, 适合建立大型风电场进行风力发电. 此外, 东台沿海地区风能分布的季节分布特点为夏半年大, 冬半年小, 这与我国风能分布的普遍特点“冬春大, 夏秋小”相矛盾.

(2) MM5 能够在高分辨率下较好地模拟出风速的变化, 但是模拟的变化趋势偏小, 且模拟值也比实测值偏小; 对夏半年风速变化幅度和大小的模拟都比对冬半年的模拟差. 夏季沿海地区频发的台风等强对流天气会造成小尺度湍流的增加, 可能是引起 MM5 模式对夏季风速模拟偏差大的原因. 在风机有效利用风能的 70 m 高度上, MM5 对风速和风能的模拟结果与实况相近. 这些结果表明, 利用 MM5 对东台沿海地区风能分布情况进行模拟是完全可行的.

References

- [1] Xue H, Zhu R Z. Evaluations on the potential of the utilization and distribution of wind energy resources in China. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 1990, 11(1): 1~11. (薛 桁, 朱瑞兆. 我国风能开发利用及布局潜力评估. *太阳能学报*, 1990, 11(1): 1~11).
- [2] Xue H, Zhu R Z, Yang Z B, *et al.* Assessment of wind energy reserves in China. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2001, 22(2): 167~170. (薛 桁, 朱瑞兆, 杨振斌等. 中国风能资源储量估算. *太阳能学报*, 2001, 22(2): 167~170).
- [3] Li Y, Wang Y, Tang J P. Temporal and spatial variety characteristics in near-surface wind energy in China. *Journal of Nanjing University(Natural Sciences)*, 2007, 43(3): 280~291. (李 艳, 王元, 汤剑平. 中国近地层风能资源的时空变化特征. *南京大学学报(自然科学)*, 2007, 43(3): 280~291).

- [4] Bao N S, Liu J F, Ni W D, *et al.* Wind energy resource analysis at Dabancheng wind farm in Xinjiang Region. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2006, 27(11): 1073~1077. (包能胜, 刘军峰, 倪维斗等. 新疆达坂城风电场风能资源特征分析. *太阳能学报*, 2006, 27(11): 1073~1077).
- [5] Zhang D, Liu Q F, Zhu R, *et al.* The application of Wind Energy Simulation Toolkit (WEST) in Xinjiang. *Desert and Oasis Meteorology*, 2007, 1(1): 16~19. (张德, 刘秋锋, 朱瑞等. 风能资源数值模拟系统 WEST 在新疆地区的应用. *沙漠与绿洲气象*, 2007, 1(1): 16~19).
- [6] Pashardes S, Christofides C. Statistical analysis of wind speed and direction in Cyprus. *Solar Energy*, 1995, 55(5): 14~405.
- [7] Pérez S, Jimenez P A, Navarrol J, *et al.* Using the MM5 model for wind prediction in a complex terrain site. *European Wind Energy Conference*, 2003, Madrid Spain.
- [8] Yim S H L, Fung J C H, Lau A K H, *et al.* Developing a high-resolution wind map for a complex terrain with a coupled MM5/CALMET system. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 112(D05106), 1~15.
- [9] Karsten A S. On the use of a regional-scale numerical climate model in wind energy applications. *Michigan State University Ph. D Dissertation*, 2005.
- [10] Yang Z B, Zhu R Z, Xue H. Two new concepts on wind energy assessment in wind farm—Equivalent wind speed, Available wind power density. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2007, 28(3): 248~251. (杨振斌, 朱瑞兆, 薛彬. 风电场风能资源评价两个新参数——相当风速, 有功风功率密度. *太阳能学报*, 2007, 28(3): 248~251).
- [11] Celik A N. A statistical analysis of wind power density based on the Weibull and Rayleigh models at the southern region of Turkey. *Renewable Energy*, 2003, 29: 593~204.
- [12] Dorvlo A S S. Estimating wind speed distribution. *Energy Conversion and Management*, 2002, 43: 8~23.
- [13] Hennessey J P. Some aspects of wind power statistics. *Journal of Applied Meteorology*, 1977, 16(2): 28~119.
- [14] Yang W J, Wang B. Fitting to wind velocity of surface layer using two-parameter Weibull distribution function and its application. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 1999, 10(1): 118~122. (杨维军, 王斌. 二参数 Weibull 分布函数对近地层风速的拟合及应用. *应用气象学报*, 1999, 10(1): 118~122).
- [15] Lu Y X, Wang Y, Li Y. A case study on selections of representative years of wind energy potential in Jiangsu. *Scientia Meteorologica Sinica*, 2009, 29(4): 524~526. (路屹雄, 王元, 李艳. 江苏风能资源代表年选择的方法比较. *气象科学*, 2009, 29(4): 524~526).