

王美琳, 罗勇, 周荣卫. WindSim 软件在复杂地形风电场风能资源评估中的应用[J]. 气象, 2010, 36(2): 113-119.

# WindSim 软件在复杂地形风电场 风能资源评估中的应用<sup>\*</sup>

王美琳<sup>1</sup> 罗 勇<sup>2</sup> 周荣卫<sup>2</sup>

1 中国气象科学研究院, 北京 100081

2 国家气候中心, 北京 100081

**提 要:** 复杂地形的风能资源评估研究对于风电事业的发展具有极为重要的意义。作者利用基于计算流体力学(CFD)方法的风能资源评估系统软件 WindSim 对我国复杂地形新疆托克逊县境内某风电场 2007 年的风资源情况进行了模拟, 并将模拟结果与测风塔观测结果进行对比分析。模拟结果表明, WindSim 软件对我国复杂地形地区平均风速的模拟能力比较好, 10 m、40 m、50 m、70 m 高度的月平均风速的平均相对误差分别是 12.91%、10.21%、9.68%、12.91%。同时, WindSim 软件不仅可以较为准确地模拟出该区域 2007 年的主导风向, 而且对该年的有效风速频率的模拟效果也很好。此风电场风能资源模拟试验说明, 该地区具有十分丰富的可供开发利用的风能资源, 进一步说明 WindSim 软件对我国复杂地形地区的风能资源评估工作具有很好的参考和应用价值。

**关键词:** WindSim, 风速风向模拟, 风能资源评估, 复杂地形

## Application of WindSim to Wind Energy Resource Assessment of Complex Terrain in China

WANG Meilin<sup>1</sup> LUO Yong<sup>2</sup> ZHOU Rongwei<sup>2</sup>

1 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

2 National Climate Center, Beijing 100081

**Abstract:** The wind energy resource assessment in a complex terrain is very important for the development of wind power generation field. Wind energy resource assessment software WindSim based on the Computational Fluid Dynamics (CFD) method is applied to simulate the wind energy resources of wind farm area in Toksun, Xinjiang in 2007. By comparing simulation results and observation data measured by anemometer towers, it is shown that the software WindSim provides good simulation results of mean wind speed in a complex terrain area, and the mean relative errors of monthly mean wind speed at 10 m, 40 m, 50 m and 70 m are 12.91%, 10.21%, 9.68% and 12.91% respectively. Moreover, the WindSim is able to accurately simulate the predominant wind direction at 40 m and 70 m height. At the same time, the WindSim can also obtain good results of effective wind speed frequency in a complex terrain area. The simulation results of wind energy resources in wind farm show that the area has rich wind energy resources which can be used by wind power generation. It is further indicated that WindSim software can be utilized in the assessment of wind energy resources of complex terrain and has further research value in the future.

**Key words:** WindSim, simulation of wind speed and wind direction, wind energy resource assessment, complex terrain

<sup>\*</sup> 国际合作项目“合作开发中国风电场风能短期预报模式系统”资助  
2009 年 1 月 20 日收稿; 2009 年 10 月 12 日收修定稿  
第一作者: 王美琳, 从事风能资源评估研究. Email: wangmeilin136@163.com

## 引言

受化石能源资源日趋枯竭、环境保护等的驱动,自 20 世纪 70 年代中期以来,世界主要发达国家和一些发展中国家都开始重视风能的开发利用。国际上风能开发利用的主要形式是风力发电。随着风力发电技术的成熟和向大规模、大型化、产业化方向的发展,风能已经成为目前世界上最引人注目的新型能源<sup>[1]</sup>。我国风能资源十分丰富,开发前景广阔,风力发电事业正在蓬勃发展。

在风能资源开发过程中,前期的风资源评估、风电场选址极为重要。场址选择的关键是真正了解风能资源的状况、分布和变化,分析与寻找合适的潜在风电场场址。因此,客观、准确的风能资源评估是促进风能规模化发展、大型风电场建设的重要前提和保障。

目前,风能资源评估工作主要是借助商业化的专业软件来完成,比如 WAsP, WindFarmer, WindPro 等。其中,风图谱分析及应用程序 WAsP (Wind Atlas Analysis and Application Programs) 是用于风电场微观选址的常用的资源分析工具软件。WAsP 是由丹麦 RISØ 国家实验室在 Jackson 和 Hunt 理论上开发出来的风资源分析处理软件,其主要功能是对某地的风能资源进行评估<sup>[2]</sup>。WAsP 是基于欧洲比较平坦的地形条件设计的,所以对于区域面积小、地形相对简单、地势较平坦的地区较为适用。

随着风能资源开发的不断深入,风电场规划选址开始从风能稳定、施工条件好的简单地形向高湍流、施工难度大的复杂地形发展。以 WAsP 为计算引擎的风能资源评估软件不适合处理复杂地形的风能资源情况<sup>[3-5]</sup>,目前我国已有学者针对复杂地形的风能资源进行了一些研究工作<sup>[6-7]</sup>。同时,挪威的 WindSim 软件是当前国际上应用比较广泛,但在我国尚未开展系统应用研究的适用于复杂地形风资源评估的小尺度非线性数值模式。

挪威 WindSim 公司开发的 WindSim 软件就是一个以计算流体力学(CFD)为核心的风资源评估系统软件。已有研究表明该软件对复杂地形条件下的风场具有一定的模拟能力<sup>[3-5,8-10]</sup>。Beat Schaffner 等<sup>[3]</sup>利用 WAsP、CFX-4 和 WindSim 对瑞士安德马特境内一个地形复杂,山脉众多的风电场的风能资源情况进行了模拟,并将模拟结果与 SODAR 观测资料进行对比。结果显示以 CFD 为核心的 WindSim

软件更适用于复杂多山地区的风资源评估。Pep Moreno 等<sup>[4]</sup>,利用 WAsP 和 WindSim 对几个地形比较复杂的地区的风资源情况进行了评估,结果表明,对于复杂地形来说, WindSim 可以作为线性模式的一个有效的补充。针对阿尔卑斯山地区, René Cattin 等<sup>[5]</sup>利用 WindSim 软件模拟了该地区的风资源情况,并利用常规气象站的观测资料以及 SODAR 观测资料对结果进行了验证,表明以 CFD 为核心的 WindSim 软件的模拟结果比 WAsP 软件的模拟结果更准确。Gravdahl 等<sup>[8]</sup>利用 WindSim 对丹麦的一个地形比较复杂的风电场进行了风资源评估、风机最佳选址以及风电量预报等工作,结果表明不同风电机之间的发电量差异可以达到 25%,而用 WindSim 软件重新设计该风电场风机位置后,此地区的发电量增加了 10%。

目前,我国学者主要还是在用 WAsP 进行风资源相关的研究工作<sup>[11-13]</sup>。但实际上,对于我国来说,除了部分沿海和内陆的平原地区外,大部分风场都处于复杂地形地貌的山区,而采用标准线性模型(如 WAsP 软件)模拟风场不能充分地再现复杂地形的风能资源情况。因此,本文尝试利用 WindSim 软件模拟我国复杂地形新疆托克逊县境内某风电场的风能资源分布情况,并与测风塔的观测数据进行对比分析,同时验证 WindSim 软件对我国复杂地形地貌和气候条件的适用能力。

## 1 WindSim 软件简介

WindSim 软件是挪威 WindSim 公司设计,基于计算流体力学方法进行风资源评估及风电场微观选址的软件。利用计算流体力学进行风资源评估和微观选址,实际上是求解风场边界条件下的流体力学微分方程,获得微观风场内的基本流动细节,根据空气流动的能量分布,安排风机处于高风能区的一门技术。它主要是通过有限体积方法数值求解 Navier-Stokes 方程,其湍流模型采用湍流动能耗散率闭合方案。

流体运动学的 Navier-Stokes 方程组(直角坐标系)为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} &= 0 \\ \rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} + \rho w \frac{\partial u}{\partial z} &= \\ - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) & \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} + \rho w \frac{\partial v}{\partial z} = \\ & -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \\ & \rho \frac{\partial w}{\partial t} + \rho u \frac{\partial w}{\partial x} + \rho v \frac{\partial w}{\partial y} + \rho w \frac{\partial w}{\partial z} = \\ & -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \end{aligned}$$

初始场采用边界层中性风廓线形式(对数率形式):

$$U(z) = \frac{U^*}{k} \ln \left( \frac{z+z_0}{z_0} \right)$$

其中  $\rho$  为空气密度,  $u$ ,  $v$  为水平风速,  $w$  为垂直风速,  $p$  为空气压强,  $\mu$  为动力学分子粘性系数,  $U^*$  为表面摩擦速度,  $k$  为 von Karman 常数(一般取 0.4),  $z_0$  为地表面粗糙度长度。

WindSim 软件需要输入一个地形文件和一个气象观测数据文件。其中,地形文件中包括了模拟区域内的海拔高度数据和地表粗糙度数据。气象观测数据文件是一个由风向风速观测数据计算得到的频率分布文件,其中风向分为 16 个方位,风速分为 50 个段位,计算 50 个风速区间所对应的 16 个风向的频率大小。

通过 WindSim 的风场计算部分可以迭代得出 16 个不同风向的稳定风场分布,再利用风场内测风塔的观测数据可以计算得到整个模拟区域内的不同高度的观测时段内风向风速频率、平均风速等。

## 2 模拟方案设计

为了检验 WindSim 软件对我国复杂地形地区的风电场风资源情况的模拟能力,本文对新疆托克逊县境内某风电场的风资源情况进行了一系列的模拟,并将模拟结果与观测资料进行对比分析。目前,我国评估一个拟建风电场的风能资源情况需要计算的参数主要包括不同时段的风速和功率密度、风速频率分布和功率频率分布、风向频率和功率密度方向分布、风切变指数和湍流强度等。本文主要是针对该风电场区域的平均风速、风速频率以及风向频率三个参数进行模拟研究的。

模拟风电场位于新疆托克逊县境内,地势高峻,多山谷隘口,三面环山,地形复杂,西部地势偏高,东部地势偏低(见图 1)。风电场内设有两座 70 m 高度测风塔,编号分别为 A 和 B,海拔高度分别为 287 m 和 409 m,两座测风塔相距约 9 km。每座塔分别在 10 m、40 m、50 m 和 70 m 高度安装测风仪,在 40

m 和 70 m 高度安装风向仪,测风塔观测时段均为 2007 年 1 月 1 日至 2007 年 12 月 31 日。

本文使用的地形资料是美国 SRTM(Shuttle Radar Topography Mission)数据的 SRTM3 这种精度(3 弧秒),分辨率为 90 m。通过美国陆地资源卫星(Landsat)得到该风电场区域存在 13 种下垫面植被类型,分别是水田、旱地、果园、草地、沙漠和戈壁、湖泊、沼泽地、居民地和城镇、雪地和冰川、裸露地、盐碱地、灌木、林地,然后参考中尺度气象模式 MM5 中的粗糙度值对每种植被类型给定粗糙度,从而得到整个模拟区域的地表粗糙度。

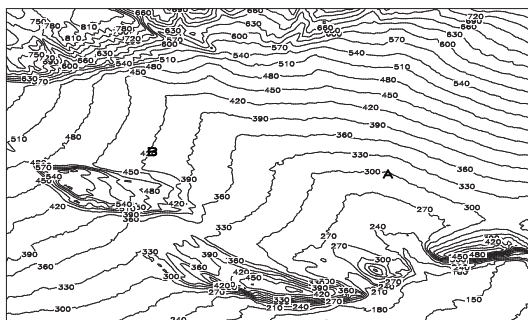


图 1 风电场地形高度及测风塔位置(A,B 为测风塔)

Fig.1 Terrain height of wind field and anemometer tower position (A,B indicate anemometer tower)

WindSim 软件首先根据地形资料和地表粗糙度资料的水平分辨率以及模拟的区域大小和设置的网格点数计算得到风电场地区计算区域的水平分辨率为  $204 \text{ m} \times 204 \text{ m}$ ,水平网格点数为  $97 \times 100$ ,面积约为  $19788 \text{ m} \times 20400 \text{ m}$ 。垂直方向的网格将地表到 10 km 高度分为 30 层,其中地表面以上 100 m 范围内共有 3 层,网格高度分别是 9 m、39 m、90 m。在计算过程中,WindSim 软件可以根据使用者的具体要求输出任意高度处的风资源情况。

本文利用 WindSim 软件模拟的主要物理量包括平均风速和风速风向频率分布情况。在模拟过程中,我们将 B 塔 2007 年的逐时风向风速资料做成风向风速频率分布数据文件输入到 WindSim 中,模拟得到了 A 塔 10 m、40 m、50 m、70 m 四个高度上 2007 年的月平均、年平均风速以及 A 塔 40 m、70 m 高度 2007 年的风速频率和风向频率分布情况,最后将模拟结果与 A 测风塔的观测数据进行对比分析。

## 3 模拟结果分析

### 3.1 风速频率分析

图 2 给出了 A 测风塔 40 m 以及 70 m 高度

2007 年的风速频率模拟结果与观测结果的对比。可以看出,A 塔两个高度上的小风速段在整个风速区间所占的比例都比较大,然而,两个高度上仍然都存在着相当大比例的可供风电机利用的有效风速( $3\sim25\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )。由图2还可以看出, WindSim 软件

对大部分风速区间都具有较好的模拟能力,但  $0\sim1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  风速段的模拟效果不好,软件模拟的风速频率明显低于实际观测到的风速频率,然而这并不影响风电的开发利用,因为对于风电开发商来说,更多关注的是大于风机启动风速( $3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )的风能资源情况。此外, WindSim 模拟的大部分额定风速段( $12\sim16\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )的风速频率都稍高于实际观测到的风速频率。

3.2 风向频率分析

拟建风电场的主导风向情况直接关系着风电机组的排列方向。因此,我们又对比了软件对此地区风向频率的模拟结果与测风塔观测结果的差异情况。

图 3 给出了 A 测风塔 2007 年 40 m 以及 70 m 高度的风向频率的模拟值与观测值的对比结果。由图可以看出,A 塔 40 m 高度的主导风向为 NW,70 m 高度的主导风向为 NNW。该软件可以准确地模拟出 70 m 高度处的主导风向情况,但对于其他风向的模拟结果不是很理想。40 m 高度处 A 测风塔

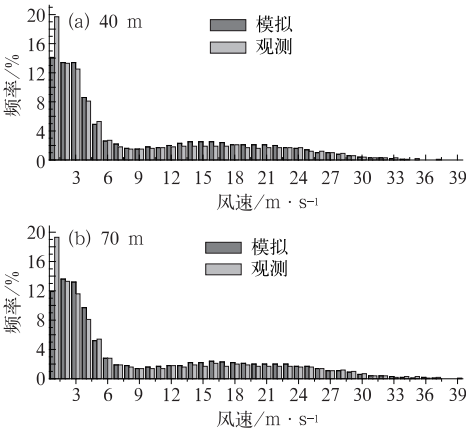


图 2 年平均风速频率模拟结果与观测数据的对比

Fig. 2 Comparison of annual average wind speed frequency between simulated and observed results at heights of 40 m(a) and 70 m(b)

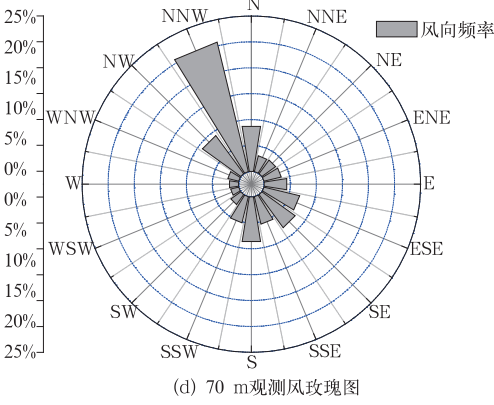
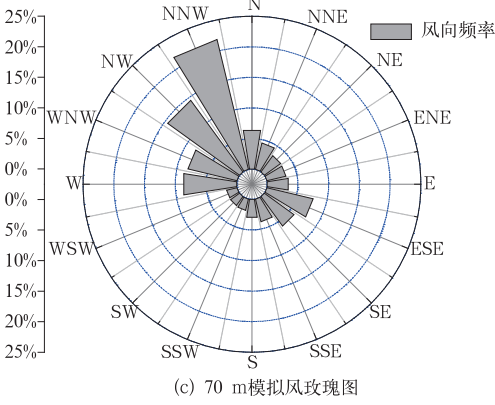
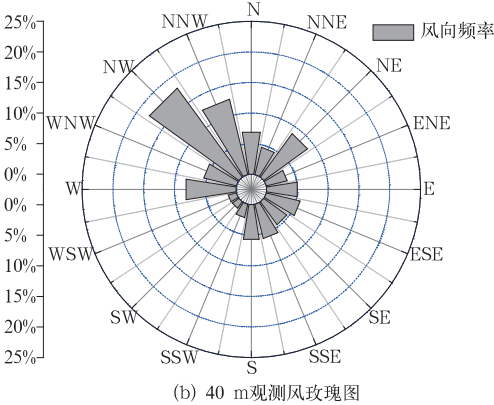
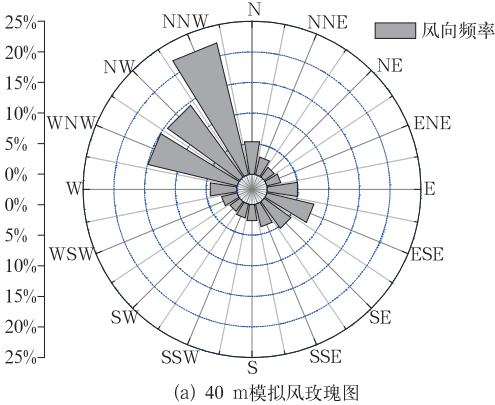


图 3 年风向频率模拟(a,c)与观测数据(b,d)的对比

Fig. 3 Comparison of annual wind direction frequency between simulated results (a,c) and observed data (b,d)

观测到的主导风向为 NW, 模拟结果却为 NNW, 这主要与 B 塔和 A 塔所处的地形有关系, 位于 A 塔西北面的 B 塔海拔高度比 A 塔高出 122 m, 因此, NW 风向受地形阻挡作用显著, 给模拟带来很大的难度。由于 NW 方向与 NNW 方向的偏差不是很大, 所以模拟结果对风机排布的影响不是很显著。由此可见, WindSim 软件对复杂地形地区主导风向频率的模拟结果较理想, 但其他风向模拟结果的偏差比较大, 而且较低高度处的模拟结果不及较高处的模拟结果, 也就是说, 此软件对受局地地形影响高度范围内的模拟效果较差。

3.3 平均风速分析

图 4 为 A 测风塔 10 m、40 m、50 m、70 m 四个高度的 2007 年各月平均风速模拟结果与测风塔观测结果的比较。此图表明, A 塔 40 m、50 m、70 m 高度的月平均风速变化趋势基本一致, WindSim 可以较好地模拟出该塔 2007 年大部分月份的 40 m、50 m 以及 70 m 高度的月平均风速大小, 只有 11 月和 12 月的风速偏差比较大, 这主要是由于这两个月

的风速比较小, 通过上面的风速频率对比分析了解到, WindSim 对 A 测风塔小风速段的模拟能力不是很理想。相比较这三个高度而言, 10 m 高度的模拟效果不是很理想, 大部分月份的模拟结果偏差比较大, 模拟值均低于观测值, 这主要是因为 10 m 高度风速受地形以及下垫面粗糙度的影响很大, 模拟如此贴近地面的风速具有一定的难度。通过对比发现, 70 m 高度上  $>5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  风速段的模拟结果不如对应的 50 m 高度的结果, 这可能是因为 WindSim 软件为了便于确定风廓线的形状, 假设大气边界层是中性稳定的, 而本文模拟区域地形复杂, 大气边界层有其自身的特点, 可能与软件假设的情况有所不同, 进而导致 70 m 的模拟结果不如 50 m, 但真正的原因有待进一步的分析研究。同时, 通过计算得到 10 m、40 m、50 m、70 m 高度模拟的月平均风速的平均相对误差分别是 12.91%、10.21%、9.68%、12.91%。70 m 高度的误差较大主要是因为相对 40 m 和 50 m 高度而言, 70 m 高度 11、12 月份的模拟效果很差, 进而导致了相当大的平均相对误差。

针对小风速的模拟结果, 相对于 11 月、12 月而

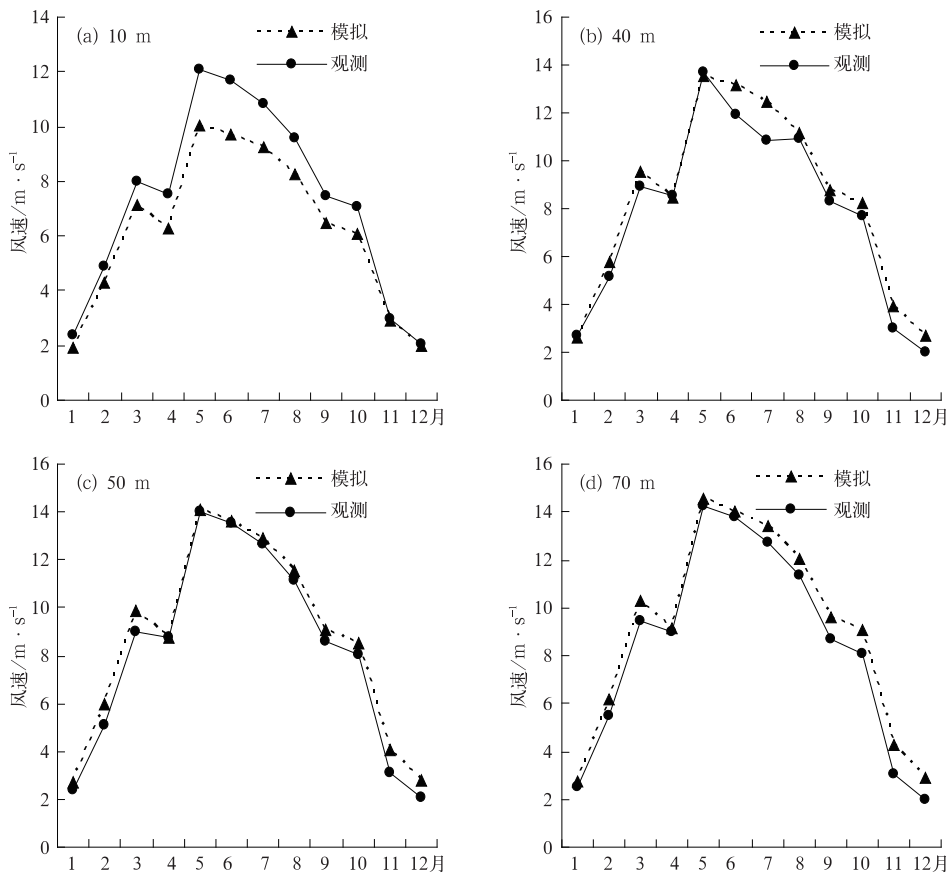


图 4 不同高度月平均风速模拟结果与观测数据的对比

Fig. 4 Comparison of monthly mean wind speed between simulated results and observed data at heights of 10 m (a), 40 m (b), 50 m (c), and 70 m (d)



言,三个高度上 1 月和 2 月的平均风速模拟结果都比较好。鉴于这三层的风速变化趋势比较一致,这里以 70 m 高度为例,分析 11、12 月的模拟结果与 1、2 月的模拟结果产生差异的原因。图 5 给出了 B 塔和 A 塔 70 m 高度 2007 年 1—2 月和 11—12 月的风向频率分布图。可以看出,A 塔 11、12 月的主

导风向为南风。由于模拟时采用的输入资料是 B 塔,B 塔位于 A 塔的西北边,所以当 A 塔为南风时,对其而言为上坡风,两个塔的相关性较小。这说明软件模拟结果的好坏不仅取决于风速的大小,也取决于风向的分布情况。

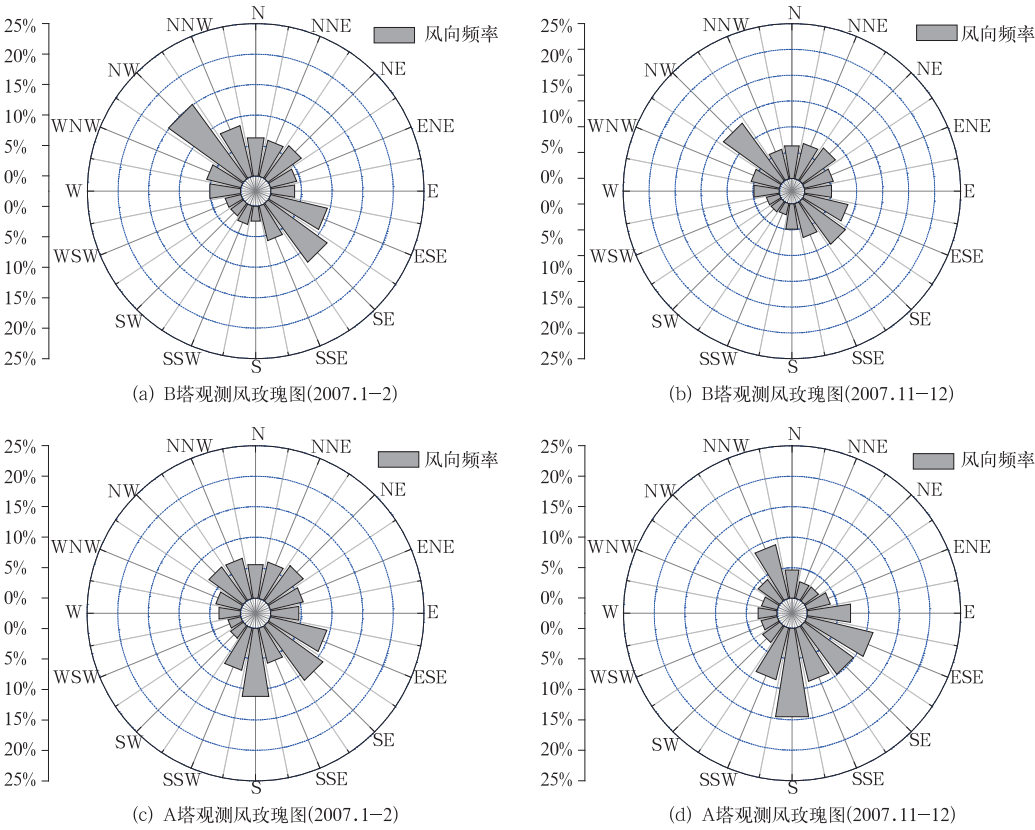


图 5 2007 年 1—2 月和 11—12 月 B、A 测风塔风向频率的对比  
Fig. 5 Comparison of wind direction frequency between towers B and A  
in January-February and November-December, 2007

针对模拟风电场复杂地形,我们又比较了 A 测风塔 10 m、40 m、50 m 以及 70 m 高度的全年平均风速的模拟结果与观测结果的差异(见表 1)。可以看出,A 塔处的风能资源十分丰富,四个高度的年平均风速均 $>7.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,而且随着高度的增加风速逐渐增大。各个高度的相对误差表明软件对模拟风

电场复杂地形地区风速的模拟能力比较好,40 m、50 m 以及 70 m 的相对误差均 $<8.0\%$ ,只有 10 m 高度,风速受地形和下垫面粗糙度的影响比较大,模拟结果不是很理想。

4 风资源分析

通过 WindSim 软件的模拟,我们得到了新疆托克逊县境内某风电场区域 2007 年的 70 m 高度上的年平均风速分布图(图 6)。

由图 6 可以看出,模拟风电场区域的风速分布相对来说比较均匀,大部分地区的年平均风速都达到  $9.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  以上。我们知道,风速随着海拔高度

表 1 不同高度年平均风速模拟结果和观测结果比较

Table 1 Comparison of annual mean wind speed between simulated results and observed data

	10 m	40 m	50 m	70 m
模拟值/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	6.21	8.38	8.68	9.04
观测值/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	7.21	7.82	8.20	8.38
相对误差/ $\%$	-13.9	7.2	5.9	7.9

的增加逐渐增大,结合该风电场区域的地形图(图 1)发现,模拟区域的平均风速分布基本上反映出该区域的地形特点,海拔高度变化平缓的区域风速梯度变化小,海拔高度差异大的区域风速梯度变化大(见图 6)。总的来说,该风电场区域具有十分丰富的可供开发利用的风能资源。该风电场区域 50 m 高度的年平均风速分布情况与 70 m 高度的情况相似,这里不再累赘。

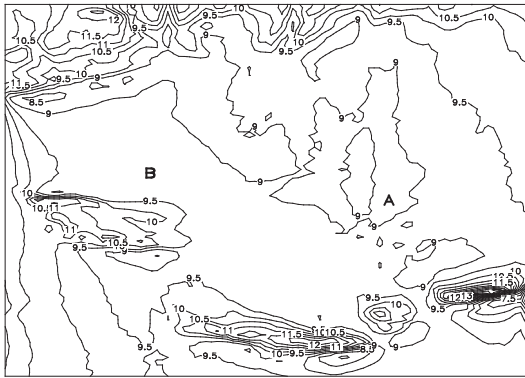


图 6 WindSim 模拟风电场区 70 m 高度处  
2007 年平均风速分布(单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

Fig. 6 Annual (2007) mean wind speed of wind farm  
70 m height simulated by WindSim (unit:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

## 5 结论

利用基于 CFD 的 WindSim 软件对我国复杂地形新疆托克逊县境内某风电场区域 2007 年的风能资源状况进行模拟研究,以验证此软件对我国复杂地形地貌和气候条件的适用能力。根据试验结果,得到以下结论:

(1) WindSim 软件对我国复杂地形此风电场地区的有效风速频率和主导风向的模拟效果都比较好,但对于小风和其他风向的模拟效果不是很理想。

(2) WindSim 软件可以较为准确地模拟出风电场区域 40 m、50 m、70 m 三个高度的 2007 年各月平均风速大小。模拟结果表明,一年中只有 11 月和 12 月的模拟风速偏差相对较大,这主要是因为 WindSim 对小风速的模拟能力不是很好,同时这两个月两座塔主导风向的相关性比较差。相比较而言,10 m 高度的模拟结果与观测数据差别比较大,这主要是由于地形以及下垫面粗糙度对 10 m 高度

风速的影响大于对其上部各层的影响。

(3) 利用 WindSim 模拟得到的该风电场区域 70 m 高度的年平均风速分布图表明,该风电场区域风能资源十分丰富,适合进行风力发电厂的建设。同时,模拟结果基本反映了风速随地形的变化。

总而言之,WindSim 软件对我国复杂地形地区的风能资源评估具有较好的指导和利用价值。尽管如此,我们仍需要做大量的个例分析来检验该软件的模拟能力。

## 参考文献

- [1] 刘全根. 国家能源结构调整的战略选择—加强可再生能源开发利用[J]. 地球科学进展, 2000, 15(2): 154-164.
- [2] 杨振斌, 薛桁, 袁春红, 等. 用于风电场选址的风能资源评估软件[J]. 气象科技, 2001, 29(3): 54-57.
- [3] Beat Schaffner, Arne Reidar Gravdahl. Wind Modeling in Mountains: Intercomparison and Validation of Models[R]. European Wind Energy Conference and Exhibition, Madrid, 2003.
- [4] Pep Moreno, Arne R Gravdahl, Manel Romero. Wind Flow over Complex Terrain: Application of Linear and CFD Models [R]. Wind Energy Conference and Exhibition, Madrid, 2003.
- [5] René Cattin, Beat Schaffner, Stefan Kunz. Validation of CFD Wind Resource Modeling in Highly Complex Terrain[R]. EU-Interreg III b Project, 2005.
- [6] 黄浩辉, 宋丽莉, 植石群, 等. 多元回归法在复杂地形风资源微尺度模拟中的应用[J]. 气象, 2007, 33(7): 98-104.
- [7] 宋丽莉, 黄浩辉, 植石群, 等. 风电场风资源测量与计算的精度控制[J]. 气象, 2009, 35(3): 73-80.
- [8] Gravdahl A R, Rorgemoen S, Morten Thogersen. Power Prediction and Siting-when the Terrain Gets Rough[R]. The World Wind Energy Conference and Exhibition, Berlin, 2002.
- [9] Maza J, Nicoletti G. CFD-RANS applications in complex terrain analysis. Numerical vs experimental results[R]. A case study: Cozzovallefondi wind farm in Sicily. EWEC, Athens, 2006.
- [10] Erik Berge, Arne R Gravdahl, Jan Schelling, et al. Wind in complex terrain: A comparison of WAsP and two CFD-models, EWEC, Athens, 2006.
- [11] 陕华平, 肖登明, 薛爱东. 大型风电场的风资源评估[J]. 华东电力, 2006, 34(2): 15-18.
- [12] 戎晓洪. 风速风向资料数据文件的建立[J]. 电力勘测, 2000, 2: 49-51.
- [13] 孙唯宓, 周力炜. 浅论 WAsP 软件在近海风力资源预测上的应用[J]. 能源与环境, 2008, (2): 27-29.