

引用格式:张双益,胡非. GlobeLand30 地表覆盖产品应用于精细化风能资源评估[J]. 资源科学, 2017, 39(1): 125-135. [Zhang S Y, Hu F. Application of GlobeLand30 land cover product in refined wind energy resource assessment[J]. *Resources Science*, 2017, 39(1): 125-135]. DOI: 10.18402/resci.2017.01.13

GlobeLand30 地表覆盖产品应用于 精细化风能资源评估

张双益^{1,2,3}, 胡 非¹

(1. 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理与大气化学国家重点实验室, 北京 100029;
2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国三峡新能源有限公司, 北京 100053)

摘 要:高山风电场具有多方面复杂特性,因此有必要开展精细化风能资源评估。本文创新性地引入了中国自主制作的全球首套 30m 分辨率地表覆盖产品 GlobeLand30,制作高精度地表粗糙度资料,并应用于精细化风能资源评估。该方法在云南大团山风电场案例进行了尝试实施,使用计算流体力学(CFD)模式 Meteodyn WT 获得了 30m 分辨率的平均风速和平均风功率密度图谱。采用风电场内测风塔的实测数据对模拟结果进行了检验,观测期 6 个月平均风速的模拟误差在 1% 以内,平均风功率密度的模拟误差在 4% 以内。模拟与实测的风速频率分布和风向玫瑰均保持了较好的一致性。采用模拟数据计算了两种典型风电机组的发电量,观测期的总发电量误差低于 1%。利用欧洲空间局地表覆盖产品开展了对照实验,其模拟结果的误差水平显著高于上述结果。本文研究成果基本满足风电场预测长期发电量水平的业务需求,具备应用与推广价值。

关键词:GlobeLand30 地表覆盖产品;地表粗糙度;精细化风能资源评估;Meteodyn WT 模式

DOI: 10.18402/resci.2017.01.13

1 引言

近年来全球风能行业进入到了蓬勃发展时期,从 2011 年开始,中国的风电装机容量已跃居世界第一^[1]。然而由于电网设施的投资和建设不足,导致中国部分地区的风电场出现了弃风限电现象,特别是“三北”地区部分省份的限电比例甚至超过了 40%^[2]。在此情况下,中国的中部和南方地区由于电网设施发达、用电负荷集中,易于风电场的并网和消纳,正逐步成为风电场开发的新兴热点^[3]。

中国中部和南方地区的风能资源禀赋总体较差,因此多将风电场选址在利于成风的高山地区。高山风电场由于受到复杂地形地貌、恶劣建设条件及有限风能资源等多条件的严格约束,因此需要进行精细化开发建设,严格控制风险、保障经济效

益。针对高山风电场特性,业界提出了“精细化风能资源评估”^[4,5]的概念,即利用先进技术手段,获取风电场内高分辨率、高准确度的精细化风能资源图谱,服务于风电场精细化开发建设。

精细化风能资源评估的主流方法包括数值模式、CFD 模式等,均需要利用高精度地表粗糙度^[6]资料建立边界条件并开展模拟计算。获取地表粗糙度资料的方法主要包括:梯度风速拟合法、质量守恒定律计算法^[7]、粗糙元的几何形状法^[8]、分布密度法^[9]等,风能资源评估常用地表覆盖类型划分法^[10]。如欧洲风能图谱^[11]在制作过程中将地表覆盖类型划分为水面、农田、森林、建筑物等 9 种,并一一映射赋值为不同粗糙度大小。该方法适合于平原或丘陵风电场,然而高山风电场的地形复杂、地貌多变,因

收稿日期:2016-08-15;修订日期:2016-10-24

基金项目:国家自然科学基金(11472272)。

作者简介:张双益,男,湖北老河口人,博士生,主要从事风能资源评价研究。E-mail:zhshy_002@163.com

通讯作者:胡非,E-mail:hufei@mail.iap.ac.cn

此难以全面、完整地收集场内的地表覆盖信息,对按地表覆盖类型划分法的应用造成了困难和障碍。

卫星遥感具有扫描范围大、数据覆盖广等优点,近年来开始被应用于制作地表粗糙度资料及风能资源评估工作。丹麦 Risoe 国家实验室采用 Landsat 卫星遥感图像、CORINE 及 AIS 地表覆盖数据等制成了欧洲地区 25m 分辨率的精细化地表粗糙度资料^[12],已被广泛应用于欧洲地区风电场的风能资源评估。国内机构也开始尝试利用美国地质调查局^[13]、欧洲空间局^[14]等卫星遥感产品估算中国地区的地表粗糙度分布^[15],取得了一定的成果。然而美国、欧洲等产品的分辨率多在 300~1000m,其空间细节不够、分类精度不高,制作出的地表粗糙度资料的分辨率较粗、准确度较差,也制约了精细化风能资源评估。

为提高风能资源评估的精细化和准确度,满足风电场预测长期发电量的业务需求,本文创新性地引入中国自主制作的全球首套 30m 高分辨率地表覆盖产品 GlobeLand30。该产品在分辨率和精度上均优于现有产品,可制作出高精度的地表粗糙度资料,应用于风电场的精细化风能资源评估。本文采用该方法在云南大团山风电场案例进行了尝试实施,使用计算流体力学(CFD)模式 Meteodyn WT 获得了 30m 分辨率的平均风速和平均风功率图谱,并对模拟结果进行了检验。期望本文研究成果为大气科学和风能行业提供参考,促进风能资源评估技术的发展和进步。

2 资料来源与研究方法

2.1 GlobeLand30 产品

国家基础地理信息中心于 2013 年 3 月发布了中国自主制作的全球首套 30m 分辨率地表覆盖产品 GlobeLand30^[16]。该产品为目前国际上分辨率最高的全球地表覆盖产品。制作过程使用的分类影像主要为 30m 多光谱影像,包括美国陆地资源卫星 Landsat、中国环境减灾卫星 HJ-1 等。

GlobeLand30 产品覆盖范围包括 80°S~80°N 的陆地区域。地表覆盖类型包括耕地、森林、水体、人造覆盖等 10 类。其中耕地、森林等 6 种类型的最低分类精度控制在 70% 以上,水体、人造覆盖等 4 种类型的最低分类精度控制在 80% 以上。根据同济大

学、农科院等单位的第三方评价,GlobeLand30 产品在全球范围 15 万个抽样点的分类精度达到了 83%^[17]。目前该产品已被应用于气候变化、土地利用和地表覆盖变化监测、生态环境、城镇化、农业等诸多领域^[18~20]。

2.2 与现有产品的优势对比

GlobeLand30 产品与文献[15]等采用的欧洲空间局地表覆盖产品 GlobCover 的对比见表 1。GlobeLand30 产品的优势在于:①产品年份 2010 年新于 GlobCover 基准年 2009 年;②分类影像采用多卫星数据对照,优于 GlobCover 采用中等分辨率成像光谱仪 MERIS 单一源;③产品制作使用了大量的辅助资料,包括中国 1:10 万土地利用数据^[21]等,有利于提高产品精度;④产品分辨率 30m 相对于 GlobCover 分辨率 300m 提高了 10 倍;⑤产品总体精度 83% 相对于 GlobCover 总体精度 73% 提升了 10%。经对比可见,GlobeLand30 产品在分辨率和精度上均优于现有产品。

表 1 GlobCover 与 GlobeLand30 主要参数对比

Table 1 Comparison of GlobCover and GlobeLand30 main parameters

项目	GlobCover	GlobeLand30
年份	2009 年	2010 年
分类影像	MERIS	Landsat、HJ-1 等
辅助资料	无	中国 1:10 万土地利用数据等
覆盖范围	65°S~90°N	80°S~80°N
地表种类	22 种	10 种
分辨率	300m	30m
总体精度	73%	83%

2.3 高精度地表粗糙度资料的制作

GlobeLand30 全球地表覆盖产品与地表粗糙度的映射关系尚未建立。参照文献[15]的方法:①建立 GlobeLand30 地表覆盖类型与欧洲风能图谱^[11]地表覆盖类型映射关系;②参考欧洲风能图谱^[11]对地表粗糙度的分配原则,即可建立 GlobeLand30 地表覆盖类型与粗糙度映射关系,如表 2 所示。

在获取目标风电场区域的 GlobeLand30 全球地表覆盖产品后,利用表 2 的映射关系,可快速制作出 30m 分辨率的高精度地表粗糙度资料。

2.4 精细化风能资源模拟

本文研究采用的模式是法国美迪公司开发的

2017年1月

表2 GlobeLand30 地表覆盖类型与粗糙度的映射关系

Table 2 The correlation table of GlobeLand30 land cover categories and land surface roughness

GlobeLand30 编号	GlobeLand30 地表覆盖类型	欧洲风能图谱 粗糙度等级	欧洲风能图谱 粗糙度/m
10	耕地	1.5	0.055 0
20	森林	3.0	0.400 0
30	草地	2.0	0.100 0
40	灌木地	1.0	0.030 0
50	湿地	0.5	0.002 4
60	水体	0	0.000 2
70	苔原	1.0	0.030 0
80	人造地表	3.5	0.800 0
90	裸地	0.5	0.002 4
100	冰川/永久冰雪	0	0.000 2
255	海域	0	0.000 2

计算流体力学(CFD)模式 Meteodyn WT^[22](简称“WT”)。它以大气湍流动量守恒方程和质量守恒方程(雷诺平均^[23]的 Navier-Stokes 方程)为动力框架,在定常不可压的情况下,公式如下:

$$\frac{\partial \rho \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$-\frac{\partial(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} [\mu (\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i}) - \rho \bar{u}'_i \bar{u}'_j] + F_i = 0 \quad (2)$$

式中 ρ 为空气密度; u_i 和 u_j 分别为风速在 x_i 和 x_j 方向的分量; i 和 j 为下标; \bar{u}_i 和 \bar{u}_j 分别为 u_i 和 u_j 的平均值; u'_i 和 u'_j 分别为 u_i 和 u_j 的脉动量; \bar{u}'_i 和 \bar{u}'_j 分别为 u_i 和 u_j 的脉动量的平均值; \bar{p} 为气压的平均值; μ 为分子动力黏性系数; F_i 为重力和科氏力项。

WT 模式采用了湍流混合长理论^[24], 雷诺应力项为:

$$-\rho \bar{u}'_i \bar{u}'_j = K_m (\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i}) \quad (3)$$

$$K_m = \sqrt{e} l_m \quad (4)$$

$$e = \frac{1}{2} \bar{u}'_i \bar{u}'_i \quad (5)$$

式中 K_m 为湍流动量交换系数; l_m 为湍流混合长, 利用 Yamada^[25]和 Arritt^[26]参数化方案可计算出; e 为湍流动能, 根据湍流动能传输方程计算。

WT 模式首先依据风电场地表粗糙度资料、地形海拔高度资料等, 建立风电场的边界条件; 然后

对三维空间进行网格化; 进一步开展 16 个等分风向的模拟计算, 得到不同位置计算结果之间的统计关系; 最后经由测风塔的观测资料, 外推得到风电场内高分辨率的精细化风能资源图谱。

3 研究案例

3.1 风电场基本情况

大团山风电场位于云南省临沧市云县涌宝镇附近的大团山上, 规划装机容量为 10 万 kW, 场址位于一条南北走向的山脊之上。图 1 为风电场的卫星地面照片和海拔高度分布, 可见场内的地形条件复杂, 植被覆盖茂密(图 1a), 该区域的海拔高度在 1700~2900m 区间(图 1b)。

现场设有两座 70m 高的测风塔: M0759(海拔 2704m)和 M1163(海拔 2583m)。两塔的直线距离约 4.3km, 均于 2012 年 5 月开始观测, 11 月结束观测, 观测期为 6 个月。M0759、M1163 两塔 70m 高度的平均风速分别为 6.87m/s、6.47m/s, 平均风功率密度分别为 226 W/m²、206W/m²。M0759 塔的主风向为 SW、WSW 和 W; M1163 塔的主风向为 WSW 和 W。

3.2 地表覆盖情况与地表粗糙度分布

根据现场踏勘资料, 风电场地表主要为山坡位置分布成片的耕种梯田, 山脊位置覆盖茂密的高山阔叶林, 以及潘家地、平河、箐门口三处水库。与 GlobeLand30 地表覆盖类型(图 2a)对比可见, 风电场主要地表覆盖类型为“耕地”(编号#10)、“森林”(编号#20)和“水体”(编号#60)。其中“耕地”主要分布在大团山东西两侧的山坡及山谷; “森林”主要分布在南北走向的山脊及附近; “水体”共有南、中、北三处。GlobeLand30 产品与风电场的实际地表覆盖情况保持了较好的一致性。

利用表 2 的映射关系, 制作出风电场的 30m 分辨率地表粗糙度分布图(图 2b)。同样分为 0.055m (“耕地”)、0.4m (“森林”)和 0.0002m (“水体”)3 种大小。

3.3 WT 模式计算

WT 模式采用的风电场 30m 分辨率地表粗糙度资料由上述方法制作, 采用的风电场地形海拔高度资料为美国航天局(NASA)与日本经济产业省(METI)共同推出的基于星载热发射仪和反射辐射仪(ASTER)的全球数字高程模型 GDEM2。其覆盖

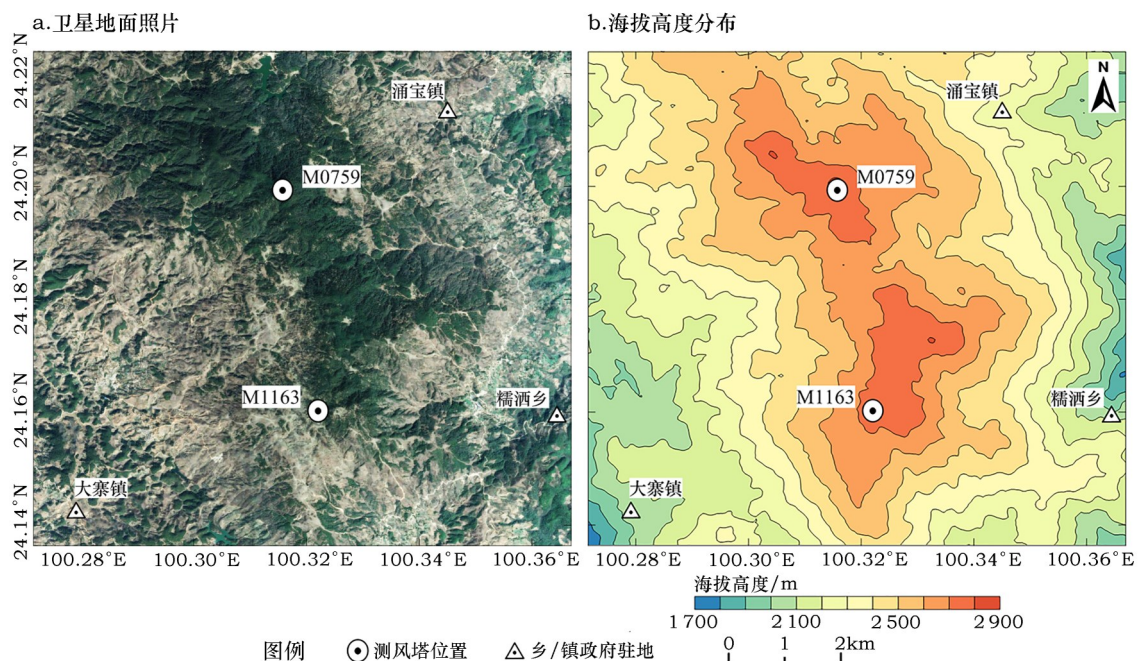


图1 风电场的卫星地面照片和海拔高度分布

Figure 1 The wind farm's satellite topography image and elevation distribution

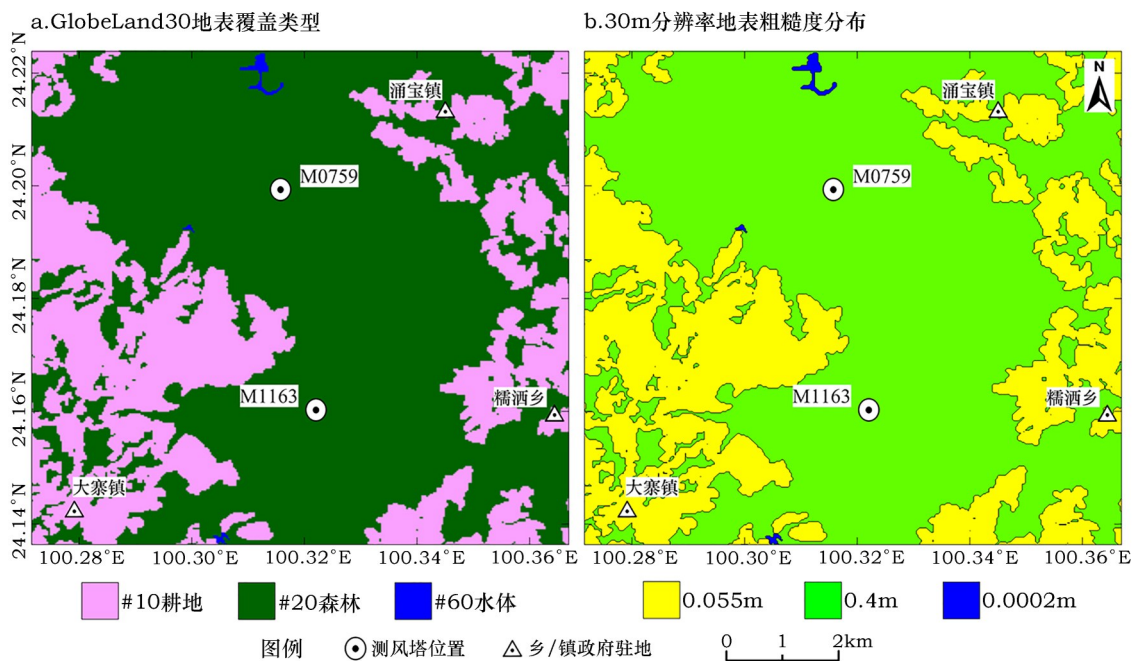


图2 风电场的GlobeLand30地表覆盖类型图和30m分辨率地表粗糙度分布

Figure 2 The wind farm's GlobeLand30 land cover categories and 30m resolution land surface roughness distribution

范围为 83°S – 83°N 的陆地区域,分辨率为30m,海拔高程误差约 $13\text{m}^{[27]}$ 。该模型已被广泛应用于风能资源数值模拟工作^[28]。

WT模式的计算区域大小为 $9.6\text{km}\times 9.6\text{km}$,划分为风电场内部区域和外围扩展区域。其中内部区

域网格的水平分辨率为30m,外围扩展区域网格的水平分辨率在30m的基础上进行增长式扩展;内部区域和外围扩展区域网格的最小垂直分辨率均为4m,同样向上进行增长扩展。本案例中水平分辨率的扩展系数为1.1,垂直分辨率的扩展系数为1.2。

2017年1月

建立计算网格后,按照16个等分风向分别假设入口风速为10m/s,根据中性风速廓线规律进行定向模拟计算,得到标准入口风速、不同风向条件下的风场分布。然后对M0759、M1163的70m高度实测风速风向序列进行外推,得到风电场内部区域的30m分辨率精细化风能资源分布图谱。

4 结果分析

4.1 精细化风能资源图谱

利用M0759、M1163两塔测风数据共同外推得到大团山风电场70m高度的精细化风能资源图谱见图3。显示:

(1)风能资源分布具有不均匀性。南北走向的山脊海拔在2500m以上区域资源条件较为丰富,平均风速可达6m/s以上、平均风功率密度在200W/m²以上;随着东西两侧山坡的海拔下降,资源条件变差,平均风速降低到(3~6)m/s,平均风功率密度为(100~200)W/m²;而山谷位置的资源条件最差,平均风速仅为(1~3)m/s,平均风功率密度在100W/m²以下。

(2)风能资源分布具有不连续性。图谱中地理位置的小幅改变可能导致风能资源大幅变化,如M0759塔向南侧位置的平均风速连续保持在6m/s以上、平均风功率密度在200W/m²以上;而向西侧位

置的平均风速缓慢下降为(5~6)m/s、平均风功率密度在(140~200)W/m²;向北侧和东侧位置的平均风速则快速跌落到4m/s以下,平均风功率密度在100W/m²以下。

以上分析可见,高山风电场的风能资源分布具有不均匀性和不连续性。开展风电场的设计工作时,应当以精细化风能资源图谱为核心,充分利用资源条件丰富的有限区域,科学开展风机布局,最大化挖掘发电潜力,提升风电项目的经济收益。

4.2 模拟风速、风功率密度的检验

本文采用交叉检验的方法,分别对M0759、M1163的70m高度实测风速风向序列进行外推,各自得到风电场70m高度的精细化风能资源分布图谱,然后分别采用M1163、M0759的70m高度实测数据对上述模拟结果进行检验。

图4给出了两座测风塔70m高度的实测与模拟月平均风速、风功率密度对比:

(1)从观测期6个月的平均值来看,M0759的实测与模拟平均风速分别为6.87m/s、6.89m/s;平均风功率密度分别为226W/m²、235W/m²。M1163的实测与模拟平均风速分别为6.47m/s、6.49m/s;平均风功率密度分别为206W/m²、203W/m²。模拟平均风速

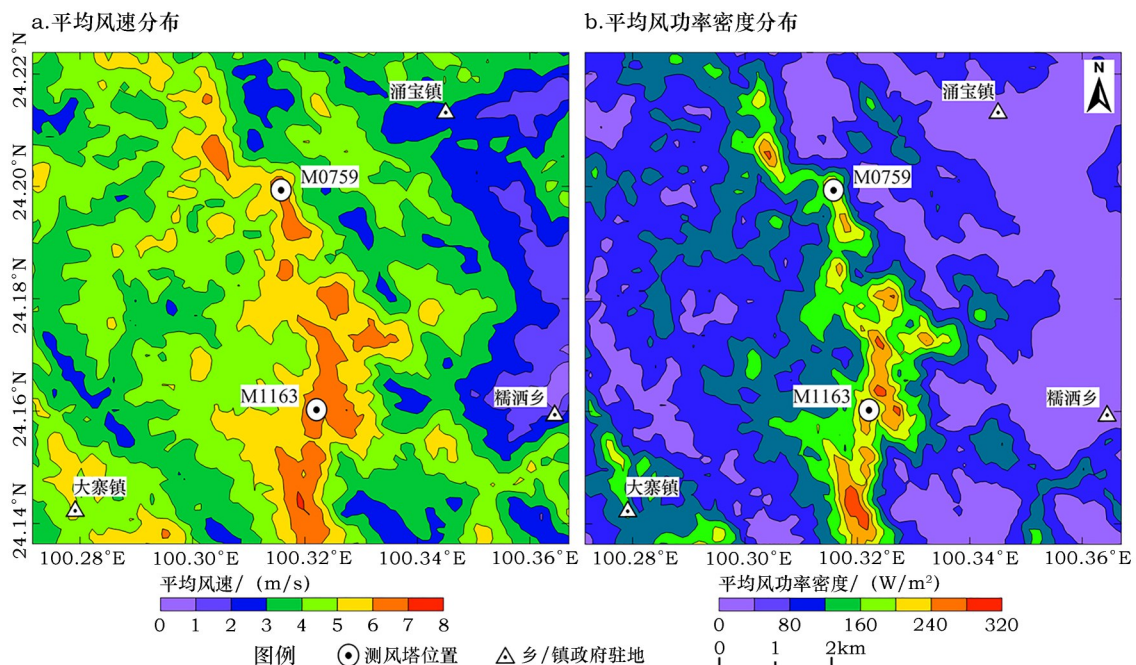


图3 风电场70m高度的精细化风能资源模拟结果

Figure 3 The wind farm's 70m height refined wind energy resource simulation results

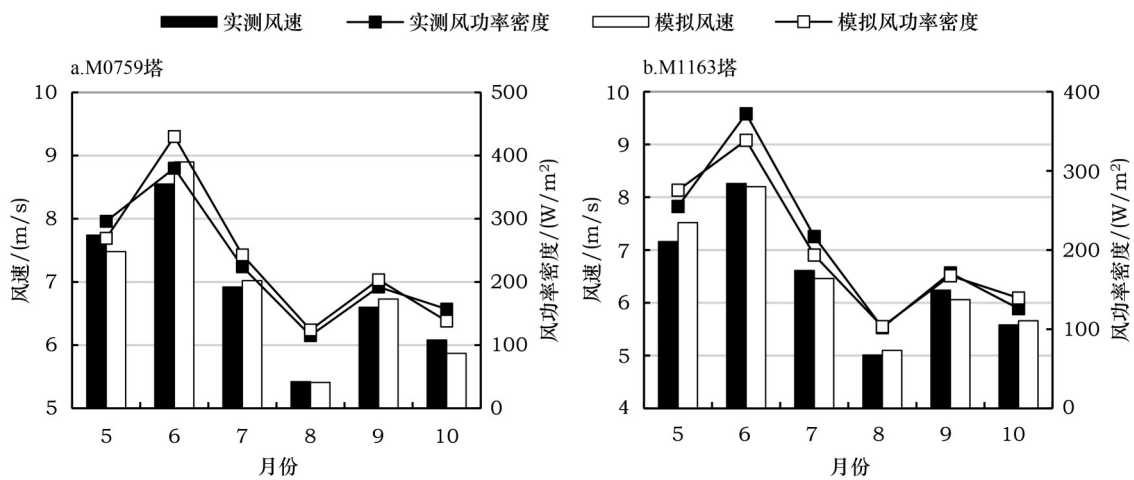


图4 测风塔70m高度实测与模拟月平均风速、风功率密度

Figure 5 Masts' 70m height observed and simulated monthly mean wind speed and wind power density

的误差在1%以内,而模拟平均风功率密度的误差在1%~4%。

(2)从各月份的平均值来看,M0759在6月份的模拟平均风速、平均风功率密度的误差均达到最大,分别偏高4%、13%。M1163在5月份的模拟平均风速误差为最大值,偏高5%;7月份的模拟平均风功率密度误差达到最大值,偏低11%。各月份的模拟平均风速误差在5%以内,模拟平均风功率密度误差在13%以内。

4.3 模拟风速频率分布、威布尔模型模拟拟合的检验

风速频率分布是表征风能资源统计特性的主要指标参数,常用威布尔模型描述^[29],公式如下:

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (6)$$

式中 $f(v)$ 为风速 v 出现的频率; k 为威布尔模型的形状参数; c 为尺度参数。

图5给出了两座测风塔70m高度的实测与模拟风速频率分布、威布尔模型拟合曲线对比,显示:

(1)实测与模拟风速频率分布总体上保持较好的一致性,但M0759在风速(6~11)m/s区间的模拟频率要低于实测频率,在其余区间的模拟频率要高于实测频率。而M1163表现相反,在风速(6~11)m/s区间的模拟频率要高于实测频率,而在其余区间的模拟频率要低于实测频率。

(2)威布尔模型拟合曲线也表现出相同状况。M0759的实测 $k=2.67$ 、 $c=7.91$ m/s,模拟 $k=2.30$ 、 $c=7.86$ m/s,由于模拟 k 值偏小,因此拟合曲线的峰值也

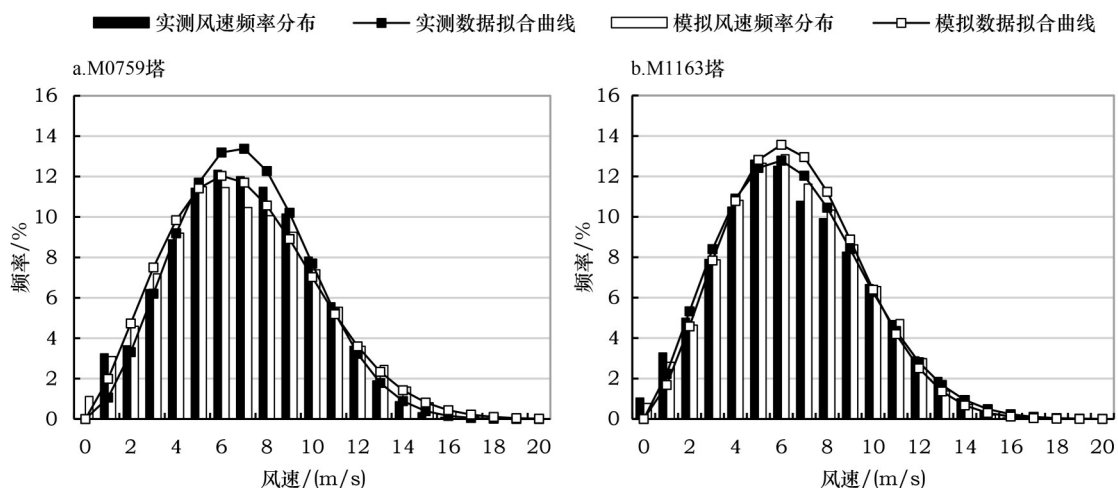


图5 测风塔70m高度实测与模拟风速频率分布及拟合曲线

Figure 5 Masts' 70m height observed and simulated wind speed frequency distribution and fitting curve

2017年1月

有所降低。M1163的实测 $k=2.31$ 、 $c=7.42\text{m/s}$,模拟 $k=2.49$ 、 $c=7.42\text{m/s}$,模拟 k 值偏高,拟合曲线的峰值也随之抬升。

4.4 模拟风向玫瑰的检验

图6给出了两座测风塔70m高度的实测与模拟风向玫瑰。M0759的主风向为SW、WSW和W,以上三个主风向的实测频率分别为12.89%、30.74%、19.10%,合计62.73%;模拟频率分别为9.11%、35.31%、16.68%,合计61.10%。M1163的主风向为WSW和W,以上两个主风向的实测频率分别为25.07%、27.57%,合计52.64%;模拟频率分别为23.84%、26.29%,合计50.13%。由此可见,实测与模拟风向玫瑰基本吻合。

4.5 模拟数据计算发电量的检验

在4.3章节获取风速频率分布拟合曲线 $f(v)$ 后,即可测算出风电机组的发电量,公式如下:

$$E = \int_{v=v_{in}}^{v_{out}} f(v) \times P(v) \times H \quad (7)$$

式中 E 为风电机组在时间段 H 内的总发电量; v_{in} 为机组开始发电的切入风速; v_{out} 为机组结束发电的切出风速; $P(v)$ 为机组的输出功率随风速的变化曲线(即功率曲线),由机组制造商提供。

选取国内市场上两种典型风电机组:WTG 93/1.5MW(机型A)和WTG 115/2.0MW(机型B),两种机型在现场空气密度下的功率曲线 $P(v)$ 如图7所示。

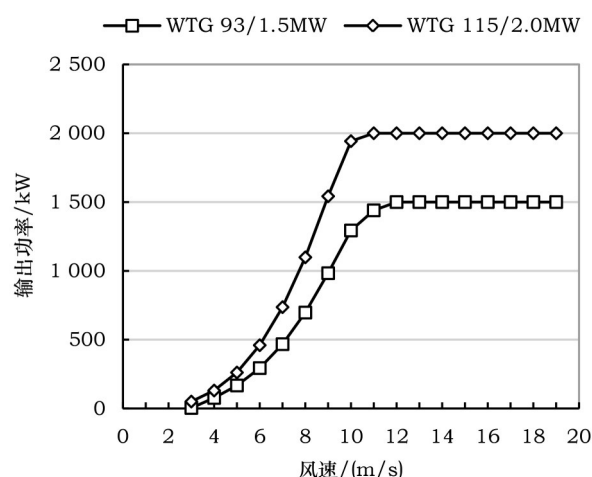


图7 风电机组的功率曲线

Figure 7 Power curves of the wind turbines

根据公式(7),分别采用两座测风塔的实测和模拟风速频率分布拟合曲线,结合两种典型风电机组的功率曲线,即可计算出观测期内各月份的发电量(图8):

(1)从观测期6个月的总发电量来看,M0759的实测、模拟数据分别计算出机型A的总发电量为2560MWh、2574MWh;分别计算出机型B的总发电量为3837MWh、3824MWh。M1163的实测、模拟数据分别计算出机型A的总发电量为2279MWh、2276MWh;分别计算出机型B的总发电量为3418MWh、3427MWh。模拟数据计算观测期总发电量的误差在1%以内;

(2)从各月份的发电量来看,M0759的模拟数

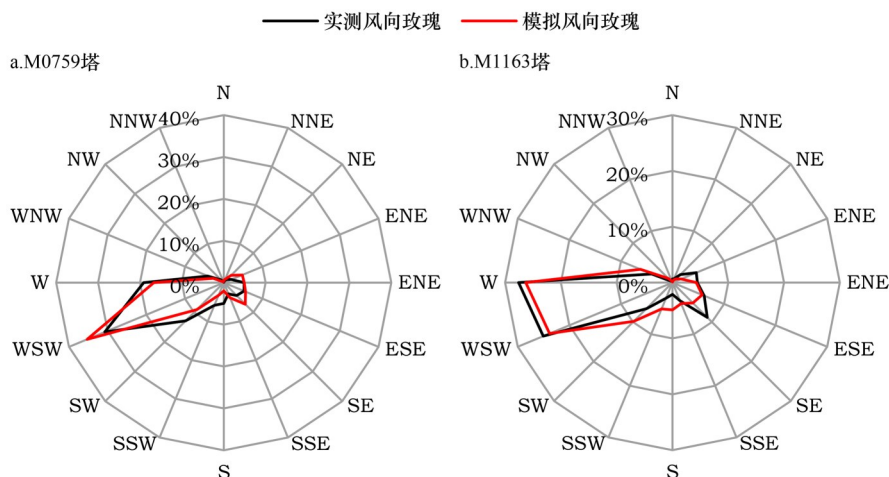


图6 测风塔70m高度实测与模拟风向玫瑰

Figure 6 Masts' 70m height observed and simulated wind rose

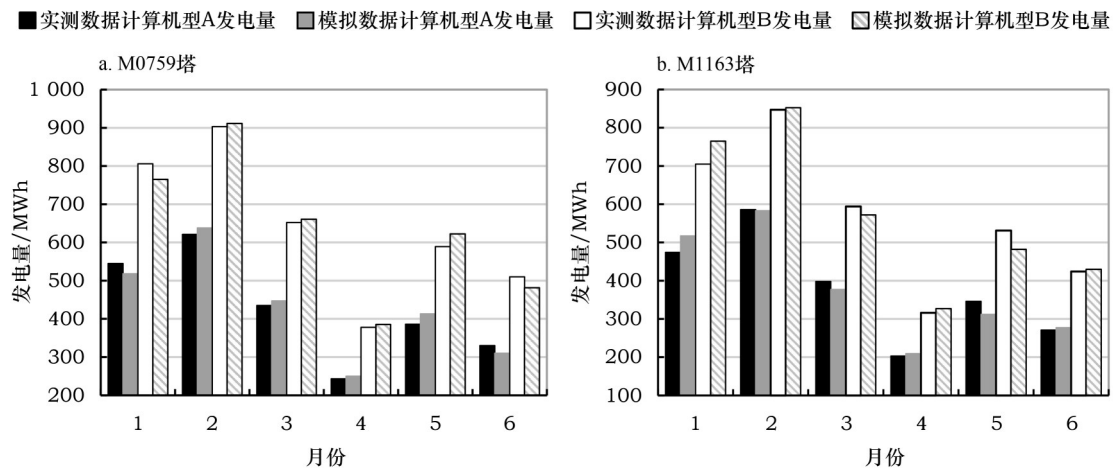


图8 测风塔实测与模拟数据分别计算的各月份发电量

Figure 8 Monthly energy production calculated by masts' observed data and simulated data

据计算出9月份的发电量具有最大误差,机型A偏高7%、机型B偏高5%。M1163的模拟数据同样计算出9月份的发电量具有最大误差,机型A偏低10%、机型B偏低9%。模拟数据计算各月份发电量误差在10%以内。

以上分析可见,虽然采用模拟数据计算各月份的发电量则存在一定的误差,但计算观测期的总发电量的效果较为理想,基本满足风电场预测长期发

电量水平的业务需求。

4.6 与现有产品的效果对比

本文补充开展了对照实验:采用欧洲空间局地表覆盖产品 GlobCover,根据文献[15]方法制作出风电场内 300m 分辨率地表粗糙度资料,同样使用 WT 模式开展风能资源模拟,其余条件保持不变。图9给出了风电场 GlobCover 地表覆盖类型及 70m 高度的精细化风能资源模拟结果。可见欧洲空间局产

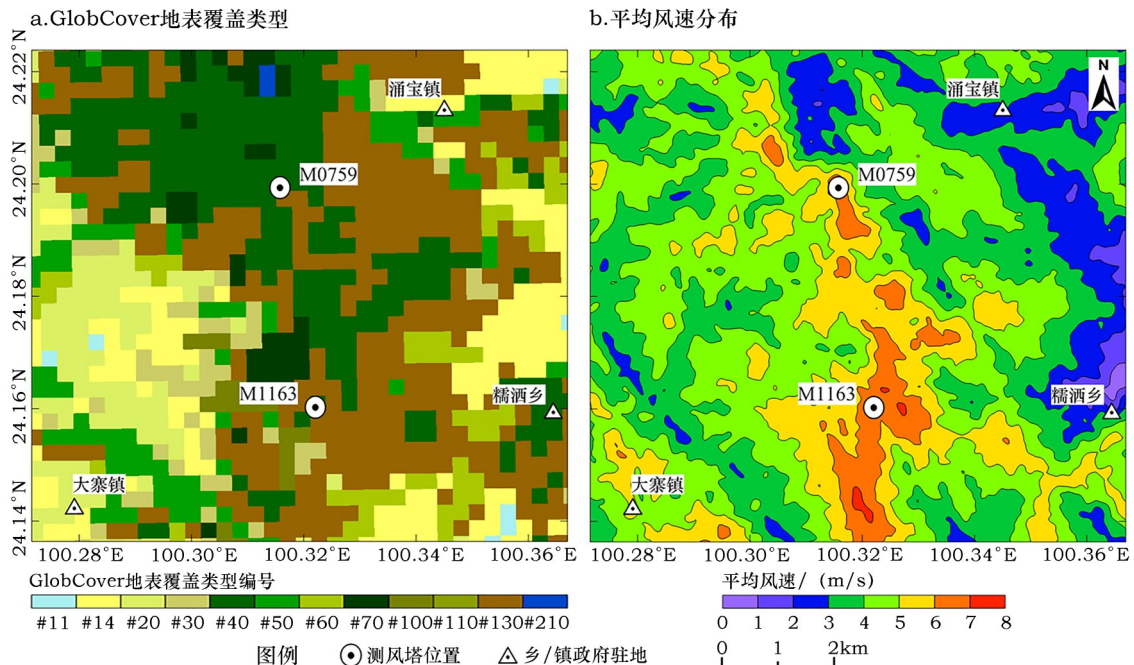


图9 风电场的GlobCover地表覆盖类型图及70m高度精细化风能资源模拟结果

(GlobCover地表覆盖类型编号对应的具体定义见文献[14])

Figure 9 The wind farm's GlobCover land cover categories distribution and simulation results of 70m height refined wind energy resource (GlobCover land cover categories and definition see reference [14])

2017年1月

品的空间分辨率明显粗于与 GlobeLand30 产品(对比图 9a 与图 2a),并且采用欧洲空间局产品的风能资源模拟结果与采用 GlobeLand30 产品的模拟结果具有细节上的差异(对比图 9b 与图 3a)。

同样采用 M0759、M1163 塔的实测数据对模拟结果进行检验,结果见表 3。观测期 6 个月的平均风速模拟误差在 3% 以内,平均风功率密度的模拟误差在 6% 以内;采用模拟数据计算观测期 6 个月的总发电量误差在 6% 以内。由此可见,采用欧洲空间局产品的模拟结果误差水平显著高于本文采用 GlobeLand30 产品的模拟结果(见 4.2 章节和 4.5 章节)。

表 3 GlobCover 的模拟结果检验

Table 3 Verification GlobCover's simulation results

塔号	项目	实测	模拟	误差/%
M0759	平均风速/(m/s)	6.87	6.74	-2
	平均风功率密/(W/m ²)	226	234	4
	机型 A 发电量/MWh	2 560	2 474	-3
	机型 B 发电量/MWh	3 837	3 676	-4
M1163	平均风速/(m/s)	6.47	6.65	3
	平均风功率密/(W/m ²)	206	218	6
	机型 A 发电量/MWh	2 279	2 417	6
	机型 B 发电量/MWh	3 418	3 618	6

5 结论与讨论

5.1 结论

本文采用 WT 模式,利用 GlobeLand30 地表覆盖产品制作出的高精度地表粗糙度资料,开展了云南大团山风电场案例的精细化风能资源评估。通过研究发现:

(1)高山风电场的风能资源分布具有不均匀性、不连续性。资源条件丰富的区域有限,且集中分布在南北走向的山脊上,不同位置的风能资源可能出现较大差别。应利用精细化风能资源图谱,科学开展风机布局,提升风电项目的经济收益。

(2)从观测期 6 个月的平均值来看,模拟效果较为理想。平均风速模拟误差在 1% 以内,平均风功率密度模拟误差在 4% 以内;模拟与实测的风速频率分布、风向玫瑰均保持了较好的一致性;模拟数据计算两种典型风电机组在观测期总发电量误差在 1% 以内。

(3)GlobeLand30 产品与现有产品对比优势明

显。采用欧洲空间产品开展对照实验,观测期平均风速模拟误差在 3% 以内,平均风功率密度的模拟误差在 6% 以内;模拟数据计算两种典型风电机组在观测期的总发电量误差在 6% 以内,误差水平显著高于上文采用 GlobeLand30 产品的模拟结果。

综上所述,GlobeLand30 地表覆盖产品应用于精细化风能资源评估是可行的,研究成果基本满足风电场预测长期发电量水平的业务需求,具备应用与推广价值。

5.2 讨论

对于大团山风电场的精细化风能资源评估结果,虽然从观测期 6 个月的平均值来看,模拟效果较为理想;但是从各月份的平均值来看,平均风速、平均风功率密度和发电量的模拟误差仍然显著。本文利用 CFD 工具开展了风能资源评估工作,通过评估发现,误差的主要来源包括:

(1)模式工具本身的局限性。WT 模式为降低计算量、适于工业化应用,放弃了模拟流体最准确的直接数值模拟(DNS)方法,而采用了雷诺平均(RANS)方法,并应用了一系列适合于大气边界层问题的湍流模型,这些因素会导致求解结果存在误差;此外,WT 模式作为 CFD 的一种,侧重于求解平均风和湍流运动,而忽视了气象要素的变化、天气现象的发生、及高山地区复杂多变的局地气候等方面带来直接和间接的影响。

(2)基础资料和处理方法的不完善性。GlobeLand30 虽然是目前国际上分辨率最高的全球地表覆盖产品,但其地表分类仅有 10 种,并不够丰富,难以全面反映不同的水土、植被、建筑物等地表的覆盖度和特征高度等细节信息;另外,草地、森林等地表覆盖会随着季节、年份不同呈现出落叶、枯荣、生长等变化,并影响地表空气动力学特征和地表粗糙度等,这些因素并没有在资料中得以反映。

(3)参数设置与具体使用的影响。本案例由于缺乏大气稳定度观测资料,因此 WT 模式在计算过程中假定为边界层为中性规律。而实际风场中的边界层热力结构和稳定度并非理想的中性假定,并可通过影响风切变、湍流、边界层高度等参数,从而改变地面的风场结构和风能资源特性;其次,WT 模式的计算网格对地形海拔、地表粗糙度资料采取的

插值和平滑措施,及流体力学方程组求解过程的迭代次数与收敛性,这些因素均会影响数值模拟结果。

总而言之,未来仍需要大量的研究和探索工作,以持续改进和提高风电场风能资源评估的精细化和准确度。

参考文献(References):

- [1] 罗承先. 世界风力发电现状与前景预测[J]. 中外能源, 2012, 17(3): 24–31. [Luo C X. Wind power generation today in the world and prospect forecast[J]. *Sino-global Energy*, 2012, 17(3): 24–31.]
- [2] 朱向东. 目前中国风电弃风现状及对策[J]. 能源与节能, 2012, (10): 30–30. [Zhu X D. Current situation and countermeasure of current China's wind power abandon[J]. *Energy and Energy Conservation*, 2012, (10): 30–30.]
- [3] 张双益, 王益群, 吕宙安, 等. 山地风电项目的装机容量优化方法研究[J]. 风能, 2015, (1): 58–62. [Zhang S Y, Wang Y Q, Lv Z A, et al. A study on mountain wind power project's installed capacity optimization method[J]. *Wind Energy*, 2015, (1): 58–62.]
- [4] 李军, 胡非, 程雪玲, 等. CFD在复杂地形风能开发中的应用研究[J]. 太阳能学报, 2013, 34(7): 1250–1256. [Li J, Hu F, Cheng X L, et al. Application of CFD on the simulation of the wind energy over complex terrain[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2013, 34(7): 1250–1256.]
- [5] 程雪玲, 胡非, 曾庆存. 复杂地形风场的精细数值模拟[J]. 气候与环境研究, 2015, 20(1): 1–10. [Cheng X L, Hu F, Zeng Q C, et al. Refined numerical simulation of complex terrain flow field[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2015, 20(1): 1–10.]
- [6] 李军, 胡非, 刘磊, 等. 风能资源评估中地表粗糙度的研究[J]. 资源科学, 2011, 33(12): 2341–2348. [Li J, Hu F, Liu L, et al. On estimation of surface roughness for wind energy resources assessment[J]. *Resources science*, 2011, 33(12): 2341–2348.]
- [7] Bruin H A R D, Moore C J. Zero-plane displacement and roughness length for tall vegetation derived from a simple mass conservation hypothesis[J]. *Boundary Layer Meteorology*, 1984, 31(1): 39–49.
- [8] Lu L, Liu S M, Xu Z W, et al. The characteristics and parameterization of aerodynamic roughness length over heterogeneous surfaces[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2009, 26(1): 180–190.
- [9] Garratt J R. The Atmospheric Boundary Layer[M]. New York: Cambridge University Press, 1992.
- [10] Davenport A G, Grimmond C S, Oke T R, et al. Estimating the Roughness of Cities and Sheltered Country[C]. Asheville: 12th AMS Conf. on Applied Climatology, 2000.
- [11] Troen I, Petersen E L. The European Wind Atlas[M]. Roskilde: Denmark Riso National Laboratory, 1989.
- [12] Nielsen M, Astrup P, Hasager C B, et al. Satellite Information for Wind Energy Applications[R]. Roskilde: Denmark Riso National Laboratory, 2004.
- [13] USGS. Land Use and Land Cover Data from 1: 250000– and 1: 100000– Scale Maps. U.S. Geological Survey Data Users Guide Number 4[R]. Reston: U. S. Geological Survey, 1986.
- [14] Bicheron P, Defourny P, Brockman C, et al. GLOBCOVER: Products Description and Validation Report[EB/OL]. (2009–02–28) [2015–07–05]. https://www.researchgate.net/publication/260137807_GLOBCOVER_products_description_and_validation_report?ev=auth_pub.
- [15] 李沁怡, 蔡旭晖, 宋宇. 中国高分辨率地表粗糙度分布研究[J]. 高原气象, 2014, 33(2): 474–482. [Li Q Y, Cai X H, Song Y. Research of the distribution of national scale surface roughness length with high resolution in China[J]. *Plateau Meteorology*, 2014, 33(2): 474–482.]
- [16] 陈军, 陈晋, 廖平安, 等. 全球30m地表覆盖遥感制图的总体技术[J]. 测绘学报, 2014, 43(6): 551–557. [Chen J, Chen J, Liao A P, et al. Concepts and key techniques for 30m Global land cover mapping[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2014, 43(6): 551–557.]
- [17] National Geomatics Center of China. 30-meter Global Land Cover Dataset (GlobeLand30) Product Description[R]. Beijing: National Geomatics Center of China, 2014.
- [18] 史学丽, 聂肃平, 居为民, 等. GlobeLand30地表数据对北京气候中心气候模式的影响[J]. 中国科学: 地球科学, 2016, 46(9): 1197–1208. [Shi X L, Nie S P, Ju W M, et al. Climate effects of the GlobeLand30 land cover dataset on the Beijing Climate Center climate model simulations[J]. *Science China Earth Sciences*, 2016, 46(9): 1197–1208.]
- [19] 陈军, 陈利军, 李然, 等. 基于GlobeLand30的全球城乡建设用地空间分布与变化统计分析[J]. 测绘学报, 2015, 44(11): 1181–1188. [Chen J, Chen L J, Li R, et al. Spatial distribution and ten years change of global built-up areas derived from GlobeLand30[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2015, 44(11): 1181–1188.]
- [20] Manakos I, Petrou Z I, Filchev L, et al. Globalland30 mapping capacity of land surface water in Thessaly, Greece[J]. *Land*, 2014, 4(1): 1–18.
- [21] Liu J, Liu M, Deng X, et al. The land use and land cover change database and its relative studies in China[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2002, 12(3): 275–282.
- [22] Delaunay D, Chantelot A, Guyader T, et al. Metedyn WT: A Software for Wind Resource Assessment in Complex Terrain[C]. London: EWEC, 2004.
- [23] 王福军. 计算流体动力学分析[M]. 北京: 清华大学出版社,

2017年1月

2004. [Wang F J. Computational Fluid Dynamics Analysis [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.]
- [24] 刘熙明, 胡非. 大气边界层的研究-从均匀到非均匀[J]. 气象与减灾研究, 2007, 30(2): 44-51. [Liu X M, Hu F. Atmospheric Boundary Layer (ABL) Research: From homogeneous to heterogeneous[J]. *Meteorology and Disaster Reduction Research*, 2007, 30(2): 44-51.]
- [25] Yamada T. Simulations of nocturnal drainage flows by a q2l turbulence closure model[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1983, 40(1): 91-106.
- [26] Arritt R W. The effect of water surface temperature on lake breezes and thermal internal boundary layers[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1987, 40(1-2): 101-125.
- [27] Tachikawa T, Hato M, Kaku M, *et al.* The Characteristics of ASTER GDEM Version 2[R]. Tokyo: IGARSS, 2011.
- [28] 朱凤霞, 林浩. 浅谈 ASTER GDEM 和 MERRA 数据在山地风电场选址中的应用[J]. 风能, 2015, (11): 66-69. [Zhu F X, Lin H. Discussion on the application of GDEM ASTER and MERRA data in the site selection of wind farm in mountainous area[J]. *Wind Energy*, 2015, (11): 66-69.]
- [29] 国家质量监督检验检疫总局. GB/T 18710-2002, 风电场风能资源评估方法[S]. 北京: 中国电力出版社, 2002. [General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China (AQSIQ). GB/T 18710-2002, Methodology of Wind Energy Resource Assessment for Wind Farm [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2002.]

Application of GlobeLand30 land cover product in refined wind energy resource assessment

ZHANG Shuangyi^{1,2,3}, HU Fei¹

(1. State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. China Three Gorges New Energy Company, Beijing 100053, China)

Abstract: Due to the complex characteristics of high mountain wind farms, it is necessary to carry out refined wind energy resource assessment. Here we innovatively introduce China's self-developed and world-first 30 m resolution land cover product: GlobeLand30. The product was used to produce high precision land surface roughness data applied to refined wind energy resource assessment. In a case study of the Datuanshan Mountain wind farm in Yunnan, China, 30 m resolution mean wind speed and wind power density distribution maps were obtained by Computational Fluid Dynamics (CFD) modeling Meteodyn WT. The simulation results were verified by observed data from meteorological masts inside the wind farm. For the entire six months' observation period, the average wind speed simulation error was less than 1%, and the average wind power density simulation error was less than 4%. The simulated and observed wind speed frequency distribution and wind direction were found to be consistent. Simulated data was used to calculate two typical wind turbines' energy production. Total energy production in the whole observation period had a simulation error within 1%. The European Space Agency land cover product was used in the control experiment, and its simulation error was generally greater than our model. These results basically meet the demand of predicting long-term power generation levels for wind farms and have the value of application and promotion.

Key words: GlobeLand30 land cover product; land surface roughness; refined wind energy resource assessment; Meteodyn WT model