

WRF 动力降尺度方法在广东近海风资源评估中的适用性分析

杜梦蛟^{1,2}, 王臻臻³, 张磊^{2*}, 文仁强¹, 李华^{4,5}, 夏静雯³, 辛欣³, 易侃¹, 贾天下¹

(1. 中国长江三峡集团有限公司科学技术研究院, 北京 100038; 2. 中国长江三峡集团有限公司广东分公司, 广东 广州 510030; 3. 宁波市鄞州区气象局, 浙江 宁波 315194; 4. 南京信息工程大学 水利部水文气象灾害机理与预警重点实验室/气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 江苏 南京 210044; 5. 南京信息工程大学 水文与水资源工程学院, 江苏 南京 210044)

摘 要: 利用 WRF 模式对 ERA5 再分析数据进行动力降尺度, 获得近海高分辨率的 WRF 数据, 并利用 3 座测风塔观测数据对 WRF 高分辨率数据和 ERA5 再分析数据进行适用性分析。结果表明: WRF 模式的风速与观测更为接近, ERA5 易低估各层风速; WRF 和 ERA5 对广东近海主导风向的再现能力基本一致, 且均能反映主导风向; WRF 和 ERA5 风速的时间序列与观测的相关性都很高, 均通过 99% 显著性检验; 相较于 ERA5, WRF 拟合得到的威布尔参数与观测更为接近。因此相较于 ERA5, WRF 模拟数据更适用于对广东风能资源的评估。利用 WRF 模拟得到的广东近海风资源空间分布结果表明, 广东近海风能密度大 ($>200 \text{ W/m}^2$), 有效风速的出现频率高 (>0.88), 且具有单一或两个主导风向, 以上特征有利于广东近海的风能资源开发。

关键词: 风能资源; 适用性评估; 海上风电; WRF 模式

中图分类号: P457.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2025)01-0089-09

0 引言

在能源日趋紧张的今天, 风能作为一种清洁的可再生能源, 受到了世界各国的高度重视。海上风能资源具有风速高、产能稳定、海表面粗糙度低、湍流强度低、发展空间不受限等优点^[1-2]。中国拥有丰富的海上风能资源, 为推动我国海上风能的发展提供了有利的先决条件^[1]。广东省由于用电需求巨大, 因此规划投产了一批风电建设项目, 充分开发利用风能资源有利于该地区产业转型和可持续发展^[3]。

在海上风能资源的开发过程中, 前期的风资源评估和风电场选址极为重要。鉴于海上气象观测资料匮乏, 加上地形、下垫面等众多因素的影响, 仅靠测风塔和现有观测资料无法满足对风能资源状况的评估^[4-5]。将高精度的再分析资料和数值模式结果作为风资源评估的辅助材料, 不仅可以填补无观测站点区域风资源数据的缺失, 还对风电场的选

址具有指导作用^[6-9]。

近年来, 再分析资料被广泛应用于风速研究^[10-15]。有研究对比分析了辽宁海岸带 20 个站点的观测资料与欧洲中期天气预报中心 (European Centre for Medium - Range Weather Forecasts, ECMWF) 的 ERA5 再分析资料, 发现 ERA5 能够很好地重现风速的变化^[16]; 已有研究也表明 ERA5 再分析数据易低估中国近海 10 m 高度处的风速^[9]。除再分析资料外, 中小尺度数值模式也是开展风资源研究的重要手段, 它们在区域尺度上能够模拟风向、风速等特征, 且具有成本低、时空分辨率高等优势^[17-18], 其中天气研究预报模式 (Weather Research and Forecasting Model, WRF) 就是典型代表。黄俊辉等^[19]基于 WRF 模式对江苏海上风电的选址进行了评估; 杜梦蛟等^[20]则使用不同物理参数化方案对 WRF 模式在中国近海风能资源评估的适用性进行了比较分析, 优选得到的物理参数化方案组合具有

收稿日期: 2023-12-01。

基金项目: 中国长江三峡集团有限公司科研项目 (WWKY-2020-0703、WWKY-2020-3025)。

作者简介: 杜梦蛟 (1990-), 男, 工程师, 博士, 主要从事海上风能资源模拟与评估研究。E-mail: du_mengjiao@ctg.com.cn

*通信作者: 张磊 (1977-), 男, 高级工程师, 学历, 主要从事海上风电项目建设、运行与技术创新工作。E-mail: zhang_lei@ctg.com.cn

较好的适用性,并具有实际业务应用价值。将WRF模式的模拟结果作为风数据的替代源是当前风资源评估的主要方式之一。

相较于ERA5再分析资料,WRF模式模拟的风场数据通常时空分辨率更高,但二者对近海风能的再现能力则需开展进一步研究。本文利用WRF模拟数据、ERA5再分析数据与广东近海3座海上测风塔的多层观测数据进行对比分析和检验评估,在此基础上利用WRF数据对广东近海的风能资源进行评估。

1 研究数据、模式及计算方法

1.1 数据介绍

本文主要使用了三峡集团海上测风塔的多层观测数据和ERA5再分析数据,其中,测风塔提供了10~100 m之间多层的风速、风向数据,输出逐小时的平均值,其中南澳洋东(NAY)、海陵岛(HLD)和沙扒(SP)站点测风塔数据的有效样本分别为96%、99%和99%。ERA5再分析资料是ECMWF在2017年发布的全球大气数值预报再分析资料的第5代产品^[21]。该数据集的水平分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$,时间分辨率为逐小时,资料时段为1940年至今,本文使用2018年10 m和100 m高度场的风场逐小时数据。同时,ERA5风场及其海温数据也用于本文WRF模拟的初始及边界条件的设置。

1.2 模式介绍

WRF模式是美国大气研究中心(National Center for Atmospheric Research, NCAR)、美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)联合一些大学和研究机构开发的中尺度动力模式。利用WRF模式在区域尺度上模拟得到风的气候学特征具有成本低、时空分辨率高等优势^[22-23]。本研究采用ECMWF提供的 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 的ERA5再分析数据驱动WRF模式,其中WRF模式采用3层嵌套方案,水平分辨率分别为27 km、9 km和3 km,对应的水平面格点数分别为 161×133 、 43×195 和 294×189 ,具体区域见图1。垂直分层共50层,能够较好地体现海上风资

源评估最关注的200 m以下风场的精细结构。微物理参数化方案采用NSSL 1-mom,大气边界层及近地层参数化方案为YSU-revised MM5 M-O,短波与长波辐射方案为RRTMG-RRTMG,模拟时间为2018年,每10 min输出一次数据。为了方便与ERA5的逐小时数据比较,本文将WRF的10 min输出数据进行算术平均得到相应的小时数据,用于后文分析。

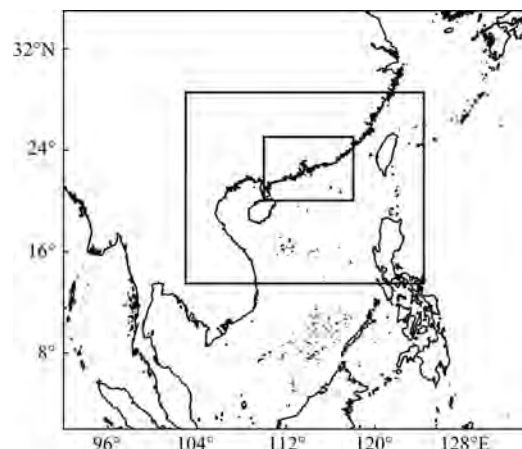


图1 WRF水平降尺度嵌套区域划分

Fig.1 Domains of WRF horizontal downscaling nested method

1.3 风能估算

1.3.1 风能密度

风能密度(Wind Power Density, WPD)是气流在单位时间内垂直通过单位面积的风能。计算公式为:

$$WPD = \frac{1}{2} \rho_{\text{air}} V^3 \quad (1)$$

式中: V 为风速(单位:m/s); ρ_{air} 为空气密度(单位:kg/m³),文中取标准大气海平面空气密度1.225 kg/m³。

1.3.2 有效风速出现频率

在实际的风能利用中,达到切入风速时风机才能发电,超过切出风速后风机会受到破坏,因此,介于切入风速与切出风速之间的风速(称有效风速)则是在风能发电过程中可以被利用的风速^[24]。本文使用有效风速出现频率(Effective Hour of Wind Speed, EW)表示这部分可被利用的风速。统计公式为:

$$EW = \frac{t}{T} \times 100\% \quad (2)$$

式中: t 为有效风速出现的时次; T 为总时次。文中将3~20 m/s区间内的风速定义为有效风速。

1.4 威布尔分布有关参数的估算

除了直接统计风速概率分布外,许多研究会利用概率分布函数(Probability Distribution Function, PDF)拟合得到具体参数后进行相关研究。威布尔(Weibull)双参数曲线族被认为是最适合用于风速统计描述的分布函数,利用其可以快速估计出一段时间内风机在有效风速范围内的运行时间,其概率密度函数可表示为:

$$PDF(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c} \right)^{k-1} \exp \left[- \left(\frac{v}{c} \right)^k \right] \quad (3)$$

式中: k 和 c 为威布尔分布的两个参数, k 称作形状参数, c 称作尺度参数; v 表示风速。威布尔参数的估算方法为^[25]:

$$k = \left(\frac{\sigma}{V_m} \right)^{-1.086} \quad (4)$$

$$c = \frac{V_m}{\Gamma(1 + (1/k))} \quad (5)$$

式中: V_m 表示平均风速; σ 表示风速的标准差; Γ (伽马函数)的表达式为:

$$\Gamma(y) = \int_0^{\infty} e^{-x} x^{y-1} dx \quad (6)$$

1.5 风切变指数的计算

风切变指数常用来表征风速随高度的变化程度,它直接影响垂直外推风速的准确性。我国在风能评估中常使用指数律公式来拟合风廓线,通常使用10 m和100 m高度处的风速计算风切变指数。计算公式如下:

$$\alpha = \ln \left(\frac{U_1}{U_2} \right) / \ln \left(\frac{z_1}{z_2} \right) \quad (7)$$

式中: α 表示风切变指数; U_1 是 z_1 高度处对应的风速; U_2 是 z_2 高度处对应的风速^[26]。通常 z_1 取100 m, z_2 取10 m。

2 WRF在广东沿海的适用性分析

本章利用WRF模式数据和ERA5再分析数据

与三峡集团在广东沿海南澳洋东(NAY)、海陵岛(HLD)和沙扒(SP)的3座海上测风塔的多层观测数据进行对比分析和检验评估。WRF和ERA5数据采用线性插值法获得3个测风塔站点处的风速值。

2.1 WRF、ERA5与观测风切变指数拟合的比较

通过统计观测数据可知,100 m高度上南澳洋东站点处的全年平均风速为8.01 m/s,海陵岛和沙扒站点分别为7.24 m/s和7.69 m/s。而从统计的WRF、ERA5数据与实际风速的绝对误差可以发现,3个站点处WRF数据与观测值的绝对误差均远小于ERA5数据与观测值的绝对误差(见表1),表明相较于ERA5,WRF对实际风速的再现能力更好。

表1 100 m高度全年平均风速观测值以及WRF和ERA5风速与观测值的绝对误差(单位:m/s)

地区	obs(观测值)	WRF - obs	ERA5 - obs
南澳洋东(NAY)	8.01	0.08	0.65
海陵岛(HLD)	7.24	0.06	0.68
沙扒(SP)	7.69	0.06	0.69

本节还利用WRF和ERA5数据10 m和100 m高度上的风速分别计算风切变指数来拟合风速垂直廓线,并和观测值进行比较。拟合结果显示,3个站点处由WRF数据拟合得到的风速垂直廓线与实测结果较为一致,而由ERA5风速拟合得到的廓线在各高度层均明显小于实测结果(见图2)。WRF和ERA5风速同观测的绝对误差也表明WRF对广东沿岸100 m高度上风速的再现能力更好(见表1)。之前的研究也显示,ERA5风速对广东近海的模拟结果与观测值差距较大^[9]。因此,利用10 m和100 m高度上的WRF模拟数据计算风切变指数来获得广东近海指定高度的风速,并用于评估难以建造测风塔处的风速,这个方法相对于使用ERA5数据更具可行性。

2.2 WRF、ERA5与观测风向分布情况比较

在风能开发过程中,风向频率是重要的考虑因

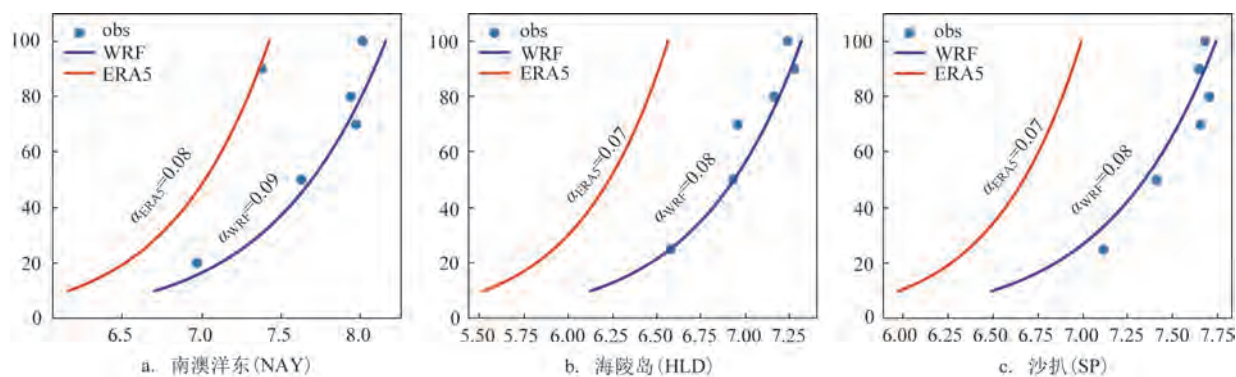


图2 3个测风塔站点处风切变指数的拟合

Fig.2 Fitted vertical wind profile at 3 wind tower stations

素之一,具有单一或两个主导风向对风机提高采集效率十分有利^[27]。因此,本文为了简明了解广东沿岸风向的典型分布,分别绘制了测风塔观测数据、WRF和ERA5数据在3个站点处的雷达图。从图3可见,在全年尺度上,3个站点均有1~2个主要风向。具体来看,北侧的南澳洋东(NAY)站点全年以东北风为主,其次是西南风(见图3a);南侧的海陵岛(HLD)和沙扒(SP)站点主要以偏东风为主(见图3b、3c),其次是偏南风。这种风向频率与广东近海冬夏季风的转换有关。海陵岛和沙扒站点处风向更偏东和偏南可能与该地区地形特点和更容易受到热带系统影响有关^[28]。较少的主导风向对风能资源的开发是有利的。在南澳洋东站点,WRF和ERA5数据得到的主导风向与观测基本一致,而另外两个站点得到的主导风向则与观测存在一定偏差,二者的偏北分量相较于观测更多。

本节统计了3个站点处风向的绝对误差,南澳洋东处WRF、ERA5数据与观测风向的绝对误差均最小,其次是沙扒站点,海陵岛站点处的误差相对较大。ERA5对广东近海风向的再现能力稍好于WRF(见表2),但总体差距不大,都能再现广东近海的主导风向。

表2 100 m高度全年平均风向观测值以及WRF风速和ERA5风速与观测值的绝对误差(单位:°)

Tab.2 The observation value and the absolute error of 100 m wind direction between WRF and ERA5 and the observations (unit:°)

地区	obs(观测值)	WRF-obs	ERA5-obs
南澳洋东(NAY)	106.8	2.0	0.3
海陵岛(HLD)	123.5	14.5	12.5
沙扒(SP)	121.8	7.6	8.0

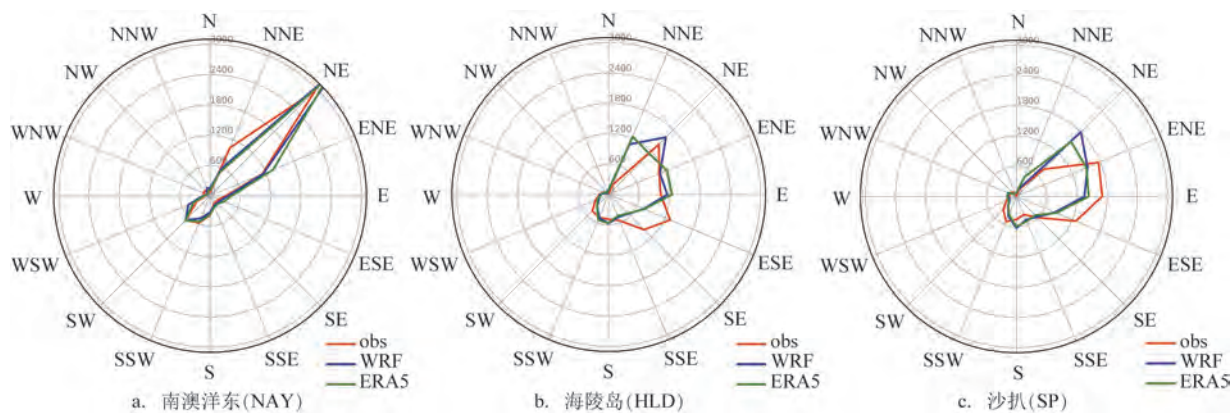


图3 3个测风塔站点处的风向雷达图

Fig.3 The radar graph of wind direction frequency at 3 wind tower stations

2.3 WRF、ERA5与观测相关性分析比较

根据测风塔得到的逐日风速时间序列可知,在一个完整年中,南澳洋东、海陵岛、沙扒3个站点的风速均存在夏季下降、冬季上升的趋势(图略),冬季的风能资源更为丰富。而根据对WRF、ERA5与观测的相关性分析可知,南澳洋东站点WRF(ERA5)和观测风速的相关系数为0.94(0.96),海陵岛站点的相关系数为0.89(0.93),沙扒站点的相关系数为0.84(0.92)。虽然WRF风速与观测的相关性不如ERA5,但两者都通过了99%的显著性检验,都能可靠地反映完整年内广东近海的风速演变。

图4为WRF、ERA5与观测的风速差的时间序列,反映出3个站点处WRF风速与观测的差值基本在0值上下波动(全年WRF与观测风速之差小于0

的占51.5%,大于0的占48.5%),误差基本在 ± 3 m/s范围内;而ERA5与观测的风速差值大都在0值以下(全年ERA5与观测风速之差小于0的占78.9%,大于0的占21.1%),这在11月一次年2月的冬季月份尤为明显(ERA5与观测风速之差小于0的占86.7%),表明ERA5易低估实际风速,这在2.1节中也有所反映。

除了风速演变外,我们仍需关注不同数据对风速分布情况的拟合能力。因此,接下来将对WRF和ERA5在这方面的能力进行比较分析。

2.4 WRF、ERA5与观测Weibull拟合的参数比较

威布尔(Weibull)双参数曲线族被认为是最适于对风速进行统计描述的分布函数,在风能开发中有广泛应用。基于双参数威布尔分布,本节计算了

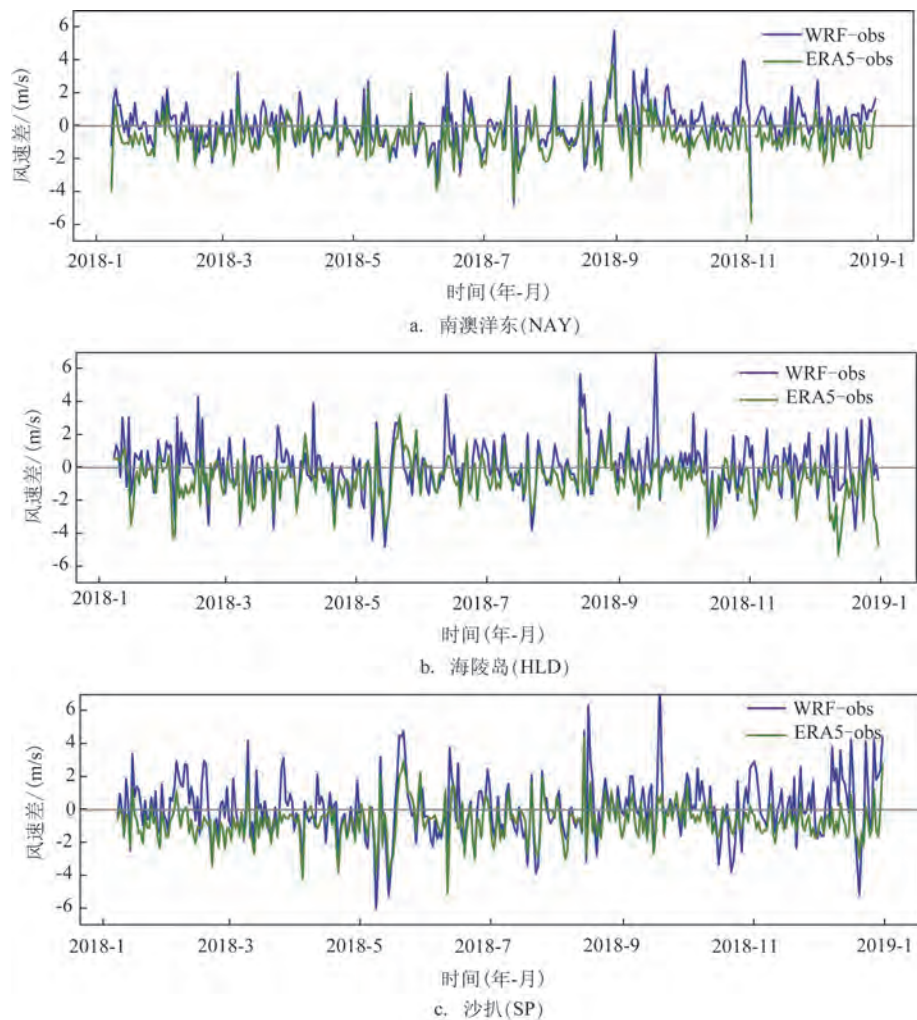


图4 3个测风塔站点处逐日风速差的时间序列

Fig.4 Time series of wind speed difference at 3 wind towers

WRF、ERA5 和观测数据在 3 个站点处风速概率分布的形状因子 k 和尺度因子 c , 以及相应的概率密度分布 (见图 5)。从形状参数 k 中可以判断风速是否均匀, k 值越大, 表示风速越均匀, 其概率分布范围越窄; 尺度参数 c 的分布一般与风速大小有关, c 值越大表示风速越大, c 在概率曲线上起放大或缩小作用。

与 ERA5 相比, WRF 数据在 3 个站点处拟合得到尺度参数 c 均与观测更接近; 南澳洋东和海陵岛站点处 WRF 数据拟合得到的形状参数 k 与观测更接近, 而沙扒站点处 ERA5 拟合得到形状参数 k 与观测更接近 (见图 5)。相对于观测, ERA5 偏大的 k 值说明再分析风速数据的分布更均匀, 而偏小的 c 值说明其通常集中在弱风速区, 体现在概率密度图上则是相对更窄和更左偏的分布曲线 (见图 5 绿线)。与 ERA5 相比, 3 个站点处 WRF 数据拟合得到的曲线与观测相对更接近 (见图 5)。因此, 在风速分布

的统计上 WRF 模拟数据更优, 可以直接使用其由威布尔拟合得到的参数估算广东近海的风功率密度和有效风时数等。

3 广东沿岸的风能资源概况

由前文可知, 在广东近海风速和风向的模拟上, WRF 模拟数据优于 ERA5 再分析数据, 前者能更好地再现 10 m 和 100 m 的风速, 以及 100 m 高度上风向的分布情况。威布尔曲线的拟合和风廓线的拟合表现也表明, WRF 模式数据更适合用于广东近海风速分布的统计和垂直方向上风速的外推, 从而有利于进一步研究广东近海的风资源特征。

利用 WRF 模拟数据得到的广东近海 100 m 高度上风能密度的空间分布, 其从远洋—近海、从东南—西北海域逐渐递减 (见图 6a), 但即使在近海,

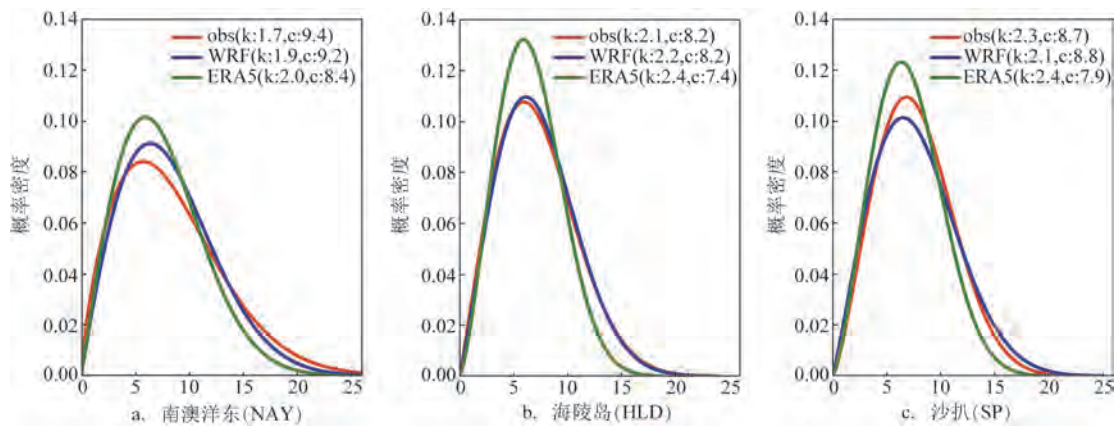
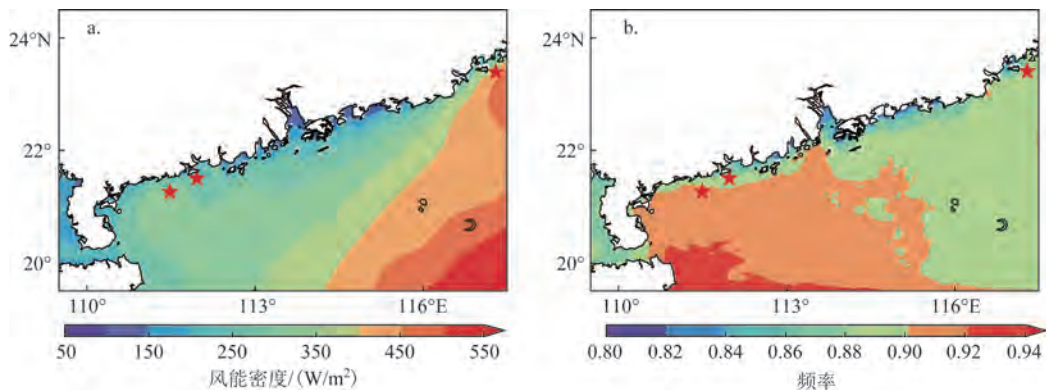


图 5 3 个测风塔站点处风速的威布尔拟合

Fig.5 The Weibull fitting of wind speed at 3 wind tower stations



注: ★表示 3 个测风塔所在位置

图 6 WRF 模拟数据得到的 2018 年广东近海 100 m 高度的年平均风能密度 (a) 和年平均有效风时数出现的频率 (b)

Fig.6 The spatial distribution of wind power density (a) and the frequency of the effective wind hour (b) at the height of 100 m based on WRF in offshore Guangdong

频率也普遍超过 200 W/m^2 , 表明广东沿岸的风能潜力巨大。

广东近海有效风速出现频率的空间分布(见图6b)则显示, 频率有从西南—东北海域逐渐递减的趋势, 但即使在东北方向, 有效风时数比率也普遍大于0.88, 表明广东沿海的风能转化率高, 有利于风能资源的采集与开发。

从2.2节中关于风向分布的统计也可知广东近海具有单一或两个主导风向, 有利于风机的采集效率。

4 总结与讨论

本文利用WRF模式对ERA5再分析数据进行动力降尺度, 获得近海高分辨率的WRF数据, 并利用3座测风塔观测数据对WRF高分辨率数据和ERA5再分析数据进行检验评估。整体而言, WRF在广东近海的适用性优于ERA5。本文利用WRF数据评估了广东近海的风资源特征。具体结论如下:

①适用性评估表明WRF风速与观测的绝对误差较ERA5更小, 风廓线的拟合也表明各高度层上WRF风速与观测更为接近, ERA5则易低估各高度层上的风速; WRF和ERA5对广东近海主导风向的再现能力基本一致, 其中对南澳洋东站点处风向的再现能力好于海陵岛和沙扒站点, 而WRF风向与观测的绝对误差较ERA5略大, 但二者基本能反映主导风向; 在与风速的相关性比较上, ERA5略好于WRF, 二者与观测数据的相关性均通过99%的显著性检验; 在风速的威布尔拟合上, 3个站点处WRF得到的风速概率密度曲线、形状参数和尺度参数与观测更接近, 而ERA5的尺度参数较观测均明显偏小而形状参数有所偏大。

②广东近海的风能密度普遍超过 200 W/m^2 , 有效风时数率大于0.88, 有利于风能资源的开发和利用。同时, 广东近海具有单一或两个主导风向, 其中北侧的南澳洋东站点处以东北风和西南风为主, 南侧海陵岛和沙扒站点以偏东风和偏南风为主, 较少的主导风向有利于风机的采集及转化效率的提高。

上述结论为广东近海的风能资源评估和开发

选址提供了一定的参考。例如在广东近海风电场的选址中, WRF模拟数据可以为地形相对复杂、难以建设测风塔的区域进行风能评估。但本文还存在不少可以改进的地方, 例如在计算风能密度时, 所用的是标准大气海平面空气密度而非100 m高度上的空气密度; 此外, 在适用性分析中, 观测样本偏少且测风塔位置分布不均, 这些可能会导致适用性分析的结论存在偏差。

参考文献:

- [1] 辛华龙. 中国海上风能开发研究展望[J]. 中国海洋大学学报, 2010, 40(6): 147-152.
XIN H L. Aspect on the development of offshore wind energy in China[J]. Periodical of Ocean University of China, 2010, 40(6): 147-152.
- [2] 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.
GONG Q, YUAN G E, ZHANG Y Q, et al. Application of MM5 model in wind energy resources survey[J]. Resources Science, 2006, 28(1): 145-150.
- [3] 广东印发《广东省碳达峰实施方案》[J]. 中国氯碱, 2023(2): 58.
Implementation plan for carbon peak in Guangdong Province[J]. China Chlor-Alkali, 2023(2): 58.
- [4] 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 Meteorologica Sinica, 2007, 65(5): 708-717.
- [5] 罗勇, 曹鹏, 杨凤志, 等. 中尺度数据在风电项目前期开发过程中的应用现状[J]. 船舶工程, 2020, 42(S2): 233-235.
LUO Y, CAO P, YANG F Z, et al. Application status of mesoscale data in early stage of development process of wind power projects [J]. Ship Engineering, 2020, 42(S2): 233-235.
- [6] 龚强, 袁国恩, 汪宏宇, 等. 应用MM5模式对地面大风过程的模拟试验[J]. 气象, 2005, 31(4): 53-57.
GONG Q, YUAN G E, WANG H Y, et al. Simulation experiments on surface gale process with MM5 model[J]. Meteorological Monthly, 2005, 31(4): 53-57.
- [7] 高山红, 谢红琴, 吴增茂, 等. 台风影响下渤海及邻域海面风场演变过程的MM5模拟分析[J]. 青岛海洋大学学报, 2001, 31(3): 325-331.
GAO S H, XIE H Q, WU Z M, et al. A simulation analysis of the evolution of the surface wind fields of Bohai Sea and the vicinity area under the influence of typhoon Tai-Tak with MM5[J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 2001, 31(3): 325-331.
- [8] 凌铁军, 张蕴斐, 杨学联, 等. 中尺度数值预报模式(MM5)在海面风场预报中的应用[J]. 海洋预报, 2004, 21(4): 1-9.

- LIN T J, ZHANG Y F, YANG X L, et al. The application of MM5 model to predict sea surface wind field[J]. *Marine Forecasts*, 2004, 21(4): 1-9.
- [9] 杜梦蛟, 邓浩, 文仁强, 等. 大气再分析资料在中国近海的风资源特征和适用性分析[J]. *气候与环境研究*, 2023, 28(5): 483-494.
- DU M J, DENG H, WEN R Q, et al. Wind resource characteristics and applicability of atmospheric reanalysis data in offshore China[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2023, 28(5): 483-494.
- [10] 朱景, 袁慧珍. ERA再分析陆面温度资料在浙江省的适用性[J]. *气象科技*, 2019, 47(2): 289-298.
- ZHU J, YUAN H Z. Applicability of ERA reanalysis data of land surface temperature in Zhejiang Province[J]. *Meteorological Science and Technology*, 2019, 47(2): 289-298.
- [11] 张凯峰, 项杰, 杨波, 等. 基于ERA-interim再分析资料的ASCAT风场产品在南海的精度评估及南海月平均风场特征分析[J]. *海洋预报*, 2017, 34(2): 27-36.
- ZHANG K F, XIANG J, YANG B, et al. Validation of ASCAT satellite scatterometer winds based on ERA-interim and monthly mean wind field over the South China Sea[J]. *Marine Forecasts*, 2017, 34(2): 27-36.
- [12] 孟宪贵, 郭俊建, 韩永清. ERA5再分析数据适用性初步评估[J]. *海洋气象学报*, 2018, 38(1): 91-99.
- MENG X G, GUO J J, HAN Y Q. Preliminary assessment of ERA5 reanalysis data[J]. *Journal of Marine Meteorology*, 2018, 38(1): 91-99.
- [13] 许昌, 吉晓红, 胡会永, 等. 利用再分析数据插补测风数据的准确性分析[J]. *风能*, 2017(5): 100-104.
- XU C, JI X H, HU H Y, et al. Accuracy analysis of the wind tower data with interpolation from reanalysis data[J]. *Wind Energy*, 2017(5): 100-104.
- [14] 刘霄, 赖旭, 郑付明. 基于再分析数据的测风数据插补方法[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2017, 45(7): 78-83.
- LIU X, LAI X, ZHENG F M. Analysis of the interpolation method for wind speed data based on reanalysis data[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2017, 45(7): 78-83.
- [15] 冯双磊, 王伟胜, 刘纯, 等. NCEP/NCAR再分析数据在风能资源评估中的应用研究[J]. *资源科学*, 2009, 31(7): 1233-1237.
- FENG S L, WANG W S, LIU C, et al. The application of NCEP/NCAR reanalysis data to the assessment of the wind resource[J]. *Resources Science*, 2009, 31(7): 1233-1237.
- [16] 敖雪, 翟晴飞, 崔妍, 等. 三种风场再分析资料在辽宁省海岸带的比较与评估[J]. *高原气象*, 2018, 37(1): 275-285.
- AO X, ZHAI Q F, CUI Y, et al. Comparison and evaluation of three types of wind field reanalysis data in coastal zone of Liaoning Province[J]. *Plateau Meteorology*, 2018, 37(1): 275-285.
- [17] 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.
- [18] 易侃, 张子良, 张皓, 等. 海上风能资源评估数值模拟技术现状及发展趋势[J]. *分布式能源*, 2021, 6(1): 1-6.
- YI K, ZHANG Z L, ZHANG H, et al. Technical status and development trends of numerical modeling for offshore wind resource assessment[J]. *Distributed Energy*, 2021, 6(1): 1-6.
- [19] 黄俊辉, 孙文涛, 李辰, 等. 基于WRF模式的海上风能资源特性分析及评价[J]. *太阳能学报*, 2021, 42(7): 278-283.
- HUANG J H, SUN W T, LI C, et al. Analysis and evaluation of offshore wind energy resources characteristics based on WRF model[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2021, 42(7): 278-283.
- [20] 杜梦蛟, 易侃, 文仁强, 等. WRF模式中不同物理参数化方案组合在中国近海风能资源评估中的适用性研究[J]. *海洋预报*, 2023, 40(1): 65-78.
- DU M J, YI K, WEN R Q, et al. Study on the applicability of different combination of physical parameterization schemes of WRF model in assessing offshore wind energy resources of China[J]. *Marine Forecasts*, 2023, 40(1): 65-78.
- [21] HERSBACH H, BELL B, BERRISFORD P, et al. ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present[Z]. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), 2023, DOI: 10.24381/cds.adbb2d47.
- [22] 彭雯, 高艳红. 青藏高原融冻过程中能量和水分循环的模拟研究[J]. *冰川冻土*, 2011, 33(2): 364-373.
- PENG W, GAO Y H. A simulation of the energy and water cycles in seasonal freezing-thawing process on the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, 33(2): 364-373.
- [23] 许建伟, 高艳红. WRF模式对夏季黑河流域气温和降水的模拟及检验[J]. *高原气象*, 2014, 33(4): 937-946.
- XU J W, GAO Y H. Validation of summer surface air temperature and precipitation simulation over Heihe River Basin[J]. *Plateau Meteorology*, 2014, 33(4): 937-946.
- [24] MA M, HE B, GUAN Y, et al. Assessment of global wind energy resource utilization potential[J]. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2017, XLII-2/W7: 1283-1289.
- [25] ARSLAN T, MURAT BULUT Y, YAVUZ A A. Comparative study of numerical methods for determining Weibull parameters for wind energy potential[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 40: 820-825.
- [26] 中华人民共和国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: 中国标准出版社, 2004: 1-19.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB/T 18710-2002 Methodology of wind energy resource assessment for wind farm [S]. Beijing: China Standard Press: 1-19.
- [27] 王哲, 张韧, 葛珊珊, 等. 俄罗斯北部海域风能资源的时空特征

- 分析[J]. 海洋科学进展, 2018, 36(3): 465-477.
- WANG Z, ZHANG R, GE S S, et al. Spatial and temporal characteristics of wind energy resources in northern sea of Russia [J]. *Advances in Marine Science*, 2018, 36(3): 465-477.
- [28] 周武, 黄小丹, 黄忠, 等. 阳江地区海陆风特征及其影响[J]. 气象, 2008, 34(12): 44-53.
- ZHOU W, HUANG X D, HUANG Z, et al. The characteristic of sea-land breeze in Yangjiang Area and its impact on precipitation and temperature[J]. *Meteorological Monthly*, 2008, 34(12): 44-53.

Applicability of WRF dynamic downscaling method in the assessment of wind resources in offshore Guangdong

DU Mengjiao^{1,2}, WANG Zhenzhen³, ZHANG Lei^{2*}, WEN Renqiang¹, LI Hua^{4,5}, XIA Jingwen³, XIN Xin³, YI Kan¹, JIA Tianxia¹

(1. Institute of Science and Technology, China Three Gorges Corporation, Beijing 100038, China; 2. China Three Gorges Corporation Guangdong Branch, Guangzhou 510030, China; 3. Ningbo Yinzhou Meteorological Bureau, Ningbo 315194, China; 4. Key Laboratory of Hydrometeorological Disaster Mechanism and Warning of Ministry of Water Resources/Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 5. School of Hydrology and Water Resources, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: This study employs the WRF model (Weather Research and Forecasting Model, WRF) to dynamically downscale ERA5 (ECMWF Reanalysis v5) reanalysis data, yielding high-resolution WRF data. The applicability of the WRF high-resolution data and ERA5 reanalysis data is assessed using observation data of 3 wind towers. Results show that wind speeds derived from the WRF exhibit closer agreement with observations, whereas ERA5 tends to underestimate wind speeds. Both WRF and ERA5 demonstrate comparable capabilities in reproducing the dominant wind directions in offshore Guangdong, reflecting these directions as well. The correlation coefficient between WRF (ERA5) and the observations exceeds the 99% confidence level. Compared with ERA5, the performance of Weibull fitting using WRF data is closer to the observations. Consequently, WRF data are more suitable than ERA5 for assessing wind energy resources in offshore Guangdong. The spatial distribution of wind resources, as derived from WRF data, reveals substantial wind power densities ($>200 \text{ W/m}^2$), a high frequency of effective wind speeds (>0.88). These factors, combined with the presence of one or two dominant wind directions, collectively indicate favorable conditions for wind energy development in offshore Guangdong.

Key words: wind energy resource; adaptability evaluation; offshore wind power; WRF model