

基于频谱补偿和数值模拟技术的江苏近海 大气边界层百米高度处极端风速研究^{*}

常蕊¹ 朱蓉¹ 尹宜舟¹ 马文通² 章大全¹

CHANG Rui¹ ZHU Rong¹ YIN Yizhou¹ MA Wentong² ZHANG Daquan¹

1. 国家气候中心,北京,100081

2. 中电投电力工程有限公司,上海,200233

1. *National Climate Center of China Meteorological Administration, Beijing 100081, China*

2. *China Power Investment Power Engineering Co., Ltd., Shanghai 200233, China*

2019-01-23 收稿,2019-05-17 改回.

常蕊,朱蓉,尹宜舟,马文通,章大全. 2019. 基于频谱补偿和数值模拟技术的江苏近海大气边界层百米高度处极端风速研究. 气象学报, 77(5):938-948

Chang Rui, Zhu Rong, Yin Yizhou, Ma Wentong, Zhang Daquan. 2019. Estimation of offshore extreme winds at 100 m over Jiangsu province based on spectral correction and numerical simulation. *Acta Meteorologica Sinica*, 77(5):938-948

Abstract Offshore wind energy development and utilization play an important role in haze governance and fulfilling the reduction commitments in advance. The reserve estimation of offshore wind resource in China is abundant enough to meet basic needs for the exploitation of wind power. Recently, more and more attention is paid on accurate estimation of offshore extreme winds, which impose important impacts on wind turbine design and operation. Different from numerous studies of typhoon extreme winds, the study of offshore extreme winds over the mid-high latitudes is significantly deficient due to the lack of effective methods, which is also a key area for the exploitation of wind power. Therefore, based on numerical modeling and spectrum analysis, the present study develops a practical, reliable and robust method for the estimation of 50 year extreme winds. This method can be applied to various mid-latitude offshore areas in China. Taking into account the complicated climatic characteristics of China's mid-latitude offshore areas affected by high-latitude cold winter winds and tropical cyclones, the 50 year return wind speeds at 100 m height over the offshore area of Jiangsu are estimated using this new method. It is shown that: (1) affected by strong cold winter winds, the 50 year return wind speed in the northern part of Jiangsu offshore area exceeds 40 m/s; (2) the 50 year return wind speed of 40 m/s (or even 44 m/s) near Xiangshui and Rudong is related to limited typhoon activities; and (3) the 50 year return wind speed over the central Jiangsu offshore area is generally lower than 35 m/s. This study not only provides a scientific basis for the design and operation of offshore engineering, such as offshore wind farms, but also contributes to further in-depth understanding of extreme climate events in China as well as the development of atmospheric boundary layer theory.

Key words Offshore wind energy assessment, Spectral correction, Numerical simulation, Extreme wind, Atmospheric boundary layer

摘 要 在平均风速基本满足近海风力发电需求的前提下,近海大气边界层百米高度处极端风速的合理估算成为中国海上风电开发领域的研究热点。与低纬度海域台风极端风速的广泛研究不同,由于缺乏有效的技术手段,对于台风影响相对较少的中纬度海域,极端风速的科学认识明显不足。研究以江苏近海为例,通过频谱分析技术,定量刻画了数值模拟风速能谱在

^{*} 资助课题:国家自然科学基金项目(41605086)、国家重点研发计划项目(2018YFB1501100)。

作者简介:常蕊,主要从事风能太阳能资源评估及气候变化研究。E-mail: changrui@cma.gov.cn

高频波段的能量衰减和截断特征;进而利用风速能谱曲线在频率域的积分及其在高频波段的补偿,实现无观测区域年最大风速的估算。与台风风场数值模拟技术相结合,综合考虑了中国中纬度海域受寒潮大风和热带气旋大风影响的复杂、特有气候特征,建立了一套可推广应用的近海大气边界层百米高度处极端风速估算的新方法。据此推算了江苏近海 100 m 高度处 50 年一遇的极端风速。结果表明:受寒潮大风影响,江苏北部海域的 50 年一遇风速超过 40 m/s;少量北上的热带气旋则造成响水和如东附近海域 40 m/s,甚至 44 m/s 以上的 50 年一遇风速;中部盐城附近海域的 50 年一遇风速则普遍低于 35 m/s。研究成果不仅为该海域近海海洋工程的开发设计及安全运行提供重要的科学支撑,同时也有助于加深对中国极端气候事件的科学认识和大气边界层科学理论的发展。

关键词 近海风能资源,频谱分析,数值模拟,极端风速,大气边界层

中图法分类号 P425.4

1 引言

当前,雾、霾的有效治理及减排承诺提前完成的现实需求促使能源革命加速推进,而陆地上可利用土地越来越少,建设海上风电场成为发展趋势。在此背景下,中国国家能源局于 2016 年印发《风电发展“十三五”规划》,进一步大力支持发展海上风电项目。海上风电的快速发展使得政府决策部门、风电运营企业及电网等对近海大气边界层百米高度处风能资源评估的需求越来越多。从储量上来看,中国近海风能资源完全能满足海上风电开发需求,在此前提下,考虑到中国海上风特性的复杂性,现有 IEC (International Electrotechnical Commission) 国际风机设计标准不宜直接用于中国近海海域,因此,开展以极端风速为指标的、适合中国近海气候特征的风特性研究成为关注热点。

与直接利用气象站历史观测资料 and 极值 I 型分布来研究陆地上 50 年一遇极端风速 (Gumbel, 1958) 的特征不同,受限于海上观测资料的不足,中国近海大气边界层百米高度处极端风速的研究主要集中在利用有限的台风观测资料和台风风场模拟技术来研究低纬度地区的台风极值风速特征。20 世纪 90 年代起,阎俊岳等 (1993, 1996) 利用台风观测和船舶气象观测初步建立起中国东海和南海的 1963—1987 年粗网格 (约 200 km × 200 km) 大风序列;宋丽莉等 (2011) 进一步探讨了工程抗台风研究中观测数据分析技术,为台风极值风速研究奠定了基础。随着数值模拟技术的不断发展,以流体力学为基础的台风数值模式在非对称台风风场模拟中发挥了重要作用 (胡邦辉等, 1999; 李强等, 2015; 段忠东等, 2012), 但应用于气象学中的台风数值模型主要是为台风数值预报做准备,这种模型用于工程区域风速的统计与预测太过复杂,且计算量大 (葛耀君

等, 2003), 直接快速用于工程区域的风特性研究具有一定难度。鉴于此, Schloemer (1954)、Shapiro (1983) 等先后建立了适合工程应用的台风分析模型; Batts 等 (1980) 也发展并完善了一种随机方法来模拟台风,该台风物理模型主要基于实测资料和经验关系拟合,包含了一个台风风场模型和台风登陆后的衰减模型,计算简便,适合工程应用,在台风极值风速分析中得到了广泛应用 (肖玉凤等, 2011; 陈朝晖等, 2008)。此外,蒙特卡罗数值模拟方法也是台风风场模拟及极值风速预测中常用的数值模型之一 (赵林等, 2007; 陈朝晖等, 2009)。

尽管台风极值风速研究取得了较大进展,但对于受台风影响较少的中纬度海域,冬季冷空气大风也是年最大风速的重要来源 (吴海英等, 2007; 温克刚等, 2008; 徐蜜蜜等, 2010), 但上述地区海上观测资料在时间上积累不足,在空间上局限于某些近海岸的孤立点,导致现阶段针对中国中纬度海域的风特性,尤其是极端风速的研究非常少,可借鉴的工作很有限。国际上,欧洲的近海风电起步较早,海上测风数据有一定积累,因此,基于海上实测数据开展的近海极端风速研究也取得了初步成果。德国阿尔法文图斯风场的测风平台 (平台名称为 FINO1) 自 2004 年开始持续测风,至今已累计近 15 年,该测风数据在欧洲近海极端风速估算 (Larsén, et al, 2012) 等领域得到广泛应用; 基于澳大利亚港口城市 Onslow 和 Brisbane 的历史观测数据,英国科学家分析了混合气候态下近海沿岸极端风速的特性 (Cook, et al, 2003)。尽管如此,在大部分海域,获取持续丰富的实测风资料仍具有一定的挑战性,因此,中尺度数值模式提供的风速信息不仅在近海风能资源储量评估中得到应用 (Brower, et al, 2001; Lange, et al, 2001; Yu, et al, 2006; 常蕊等, 2014; Chang, et al, 2014, 2015), 而且也被直接用于进行

极端风速分析(Hofherr, et al, 2010; Kunz, et al, 2010; Pryor, et al, 2012; Larsén, et al, 2009, 2011)。在缺乏长序列的中尺度数值模拟资料的情况下,近海极端风速分析中甚至直接使用了再分析资料(刘铁军等, 2013; Larsén, et al, 2014)。但由于上述中尺度风速数据一般代表了几小时甚至十几小时的平均状况,从波谱能量的角度来讲,高频波段的能量被很大程度地削弱了(Skamarock, 2004, 2011; Frehlich, et al, 2008),因此,直接基于中尺度风场资料估算的极端风速往往比实际小。

通过频谱分析的手段,相关研究也形象地刻画了数值模拟风场资料的高频能量耗散特征:与航空实测风速的能谱曲线相比, WRF (Weather Research and Forecasting) 模式模拟的风速能谱曲线在短波波段的能量迅速衰减(Skamarock, 2004),说明在数值模拟过程中平滑掉了高频尺度的变化;而湍流观测和理论研究指出,在波长几千米至几百千米范围内,能谱斜率基本符合柯尔莫诺夫(Kolmogorov)的“ $-5/3$ ”率,而当波长较长时,能谱斜率则接近“ -3 ”率(Brown, et al, 1979; Gage, et al, 1986; Lindborg, 1999; 徐敏, 2002; Tung, et al, 2003; Lindborg, et al, 2010; Larsén, et al, 2011),说明风速的能谱曲线是可以定量描述的,尤其是在中尺度风速资料能谱耗散较显著的高频波段。

综上所述,大气边界层湍流风速频谱分析技术为深入分析不同波段(或频率段)的能谱特征提供了有效手段,使得通过定量补偿数值模拟的高频能量耗散,有可能实现对中纬度大气边界层百米高度处极端风速特征的科学认识。国际上,这方面的技术研究刚刚起步,在假设风速样本的变化具有高斯分布特征的前提下, Larsén 等(2012, 2014)将中尺度风速资料在频率域上展开,将高频波段的能谱曲线直接订正至“ $-5/3$ ”率,从而实现了欧洲北海和南非地区极端风速的初步估算,证实了将中尺度风速资料和频谱分析技术应用于大气边界层百米高度处极端风速分析领域是可行的。但上述初步研究中使用的中尺度数据(常规再分析资料或以其为背景的数值模拟资料)在精细化描述近海大气边界层风场方面还有较大的改进空间;研究将中尺度资料高频波段的能谱直接订正至理论的“ $-5/3$ ”率,给最终的估算结果带来了一定的不确定性。目前,在中国充分利用海上测风塔高频测风资料的能谱曲线对中尺

度数值模拟风速能谱中的高频能量耗散进行等效补偿,从而构建良态风条件下的大风历史序列的工作还未开展。

因此,本研究选择中国中纬度海上风电场重点开发区域,同时也是研究所需各种基础资料最齐备的江苏近海海域,发展一套基于频谱补偿和数值模拟技术,并可推广应用于其他中、高纬度地区的近海大气边界层百米高度处极端风速分析方法。以期为该海域的近海风电工程、海上石油开发及近岸工程等海洋工程开发设计提供极端风速参数,减小海洋工程受大风影响时的风险系数,或根据极端风速的分布特点,找到受大风影响相对较小且风能资源丰富的开发区域。

2 资料和方法

2.1 资料

2.1.1 中尺度数值模拟风场资料

中尺度数值模拟风场资料来自中国国家气候中心的中国风能资源数据集,包含内外两重嵌套的风场模拟数据,水平分辨率分别为 $9\text{ km} \times 9\text{ km}$ 及 $3\text{ km} \times 3\text{ km}$ 。该数据集的研制过程中,(1)针对中国地形和气候条件下的近地层风特性,对 WRF 中尺度数值模式的垂直分层、物理参数化方案组合等进行了调整优化,重点加密了大气边界层的垂直分层;(2)为改善中国复杂地形条件下的近地层风场模拟效果,在模式背景数据源方面,有效融合同化了中国 2400 多个地面气象站和 169 个探空站等多源高质量观测资料;(3)为提升沿海陆地及近海区域的风场模拟效果,在中尺度数值模拟过程中,融入了高精度的海表温度资料,有效提升了中尺度大气环流模式在海洋区域的模拟性能。由于缺乏海上测风资料,这里利用第四次中国风能详查时期江苏省沿海附近的 14 座 70 m 高度测风塔观测资料对上述中尺度模拟风场资料做检验,结果表明近六成测风塔位置处的年平均模拟风速相对误差小于 5%;仅有 3 座测风塔位置处的相对误差超过 10%,且最大相对误差小于 15%(图 1);代表年逐时风速序列的相关系数均超过 0.53(样本量为 8760),通过 99.9% 统计信度的显著性 t 检验。说明即使在海陆交界的复杂地形区域,中尺度数值模拟的平均风场资料对江苏近海范围内的大气边界层百米高度处平均风特性具有较好的刻画能力。据此推论,本研究中使用的近

海域格点处的平均风场数值模拟结果也是基本可靠的。

选取该数据集中的 100 m 高度风场资料作为中尺度数值模拟资料。数据覆盖江苏近海海域(图 2),水平分辨率分别为 $9\text{ km} \times 9\text{ km}$ 及 $3\text{ km} \times 3\text{ km}$ 。时间范围 1995—2016 年,分辨率为逐时。

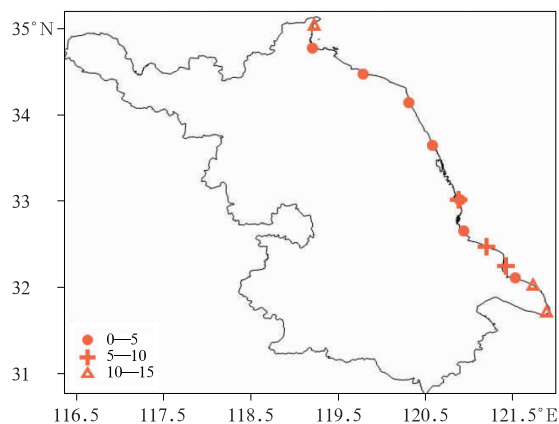


图 1 数值模拟的 70 m 高度风速与沿岸测风塔观测风速的相对误差(单位: %)

Fig. 1 Relative errors between WRF simulated winds and measurements from masts at 70 m hub-height (unit: %)

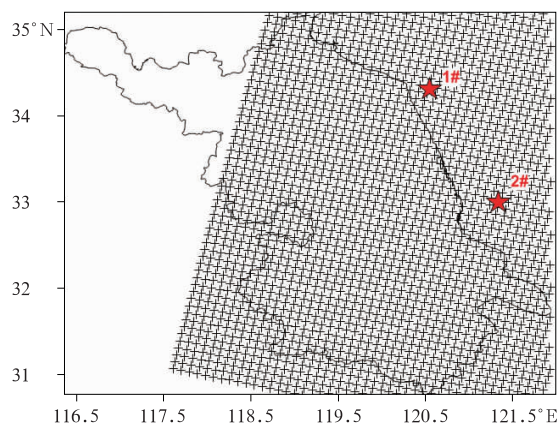


图 2 中尺度数值模拟风场资料覆盖范围示意(红星为两座海上测风塔)

Fig. 2 Coverage of the WRF simulated winds near Jiangsu offshore area (red stars denote the locations of the offshore masts used in the present study)

2.1.2 海上测风塔高频观测资料

在江苏近海范围内收集到了两座测风塔(图 2

红星位置)的代表年观测资料,其中 1# 海上测风塔离岸约 20 km,最高层风速、风向仪器安装高度为平潮面以上 90 m,采用美国 NRG 公司生产的测风仪器,记录的采样间隔是 10 min。收集到该测风塔一个完整观测年(2012 年)平均的梯度风速资料,90 m 高度平均风速为 7.27 m/s,80 m 高度平均风速为 7.19 m/s,50 m 高度平均风速为 6.78 m/s,30 m 高度平均风速为 6.49 m/s,20 m 高度平均风速为 6.22 m/s。根据上述梯度风速廓线,采用幂指数进行曲线拟合,得到该海上测风塔位置处的风速切变指数为 0.106,拟合相关系数为 0.997,超过 99.9% 的显著性水平 t 检验(图 3)。本研究的特征高度为平潮面以上 100 m,因此,后续计算中均利用这一切变指数将其他高度层的风速统一推算至 100 m 高度处。尽管使用该切变指数直接估算所有时次的垂直风速会存在一定的不确定性,但由于与复杂陆地地形相比,文中关注的开阔海洋上空的风切变指数相对较小,且百米高度处的风速变率仅为 1%(符平等,2014),因此,基于上述方法估算的风速是可接受的。

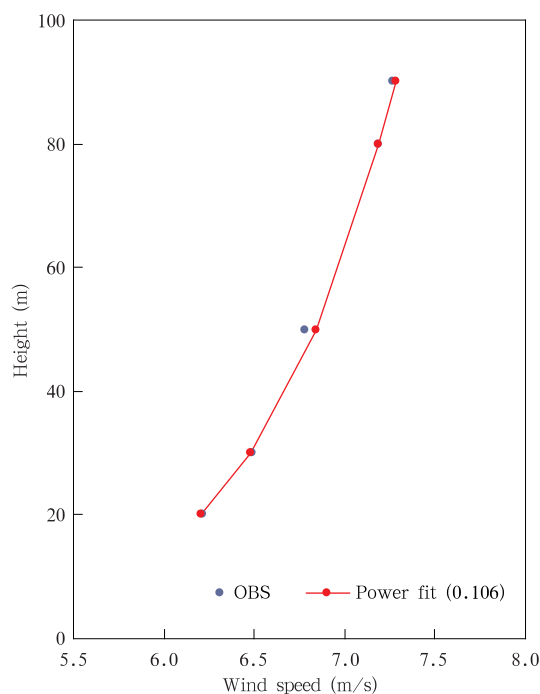


图 3 1# 海上测风塔各高度层观测风速及拟合曲线

Fig. 3 Observed wind speeds at different heights from #1 mast and the fitting curve using the power law function

2#海上测风塔离岸约40 km,最高层次风速、风向仪器安装高度为潮面以上87 m,同样采用美国NRG公司生产的测风仪器。研究收集到该测风塔87 m高度层一个完整观测年(2010年)逐10 min观测的风速序列,用于高频观测风速序列的频谱分析。

2.1.3 西北太平洋热带气旋最佳路径数据

研究中使用的“中国气象局上海台风研究所(CMA-STI)西北太平洋热带气旋最佳路径数据集”来自于中国台风网(www.typhoon.gov.cn),数据的时间分辨率为6 h,包括台风活动时间、台风中心位置、最低气压、2 min平均最大风速和2 min平均风速。

首先基于中国国家气候中心“气候应用平台—台风监测预报子系统”调查经过江苏近海100 km范围内的台风信息,并通过ArcGIS定位分析技术,提取出1995—2016年进入目标海域范围内的台风共计20个(图4)。

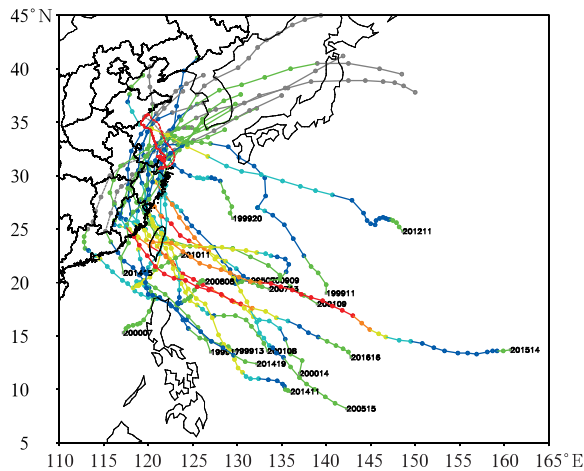


图4 江苏近海100 km范围内(红色虚线)的台风全路径活动信息

(实线是台风路径,其中红色代表超强台风,橘黄代表强台风,黄色代表台风,青色代表强热带风暴,蓝色代表热带风暴,绿色代表热带低压,灰色代表未达热带低压强度)

Fig. 4 Typhoon tracks within 100 km of Jiangsu offshore area (dashed red line)

(Solid lines indicate typhoon tracks, in which red parts represent super typhoons, orange parts represent strong typhoons, yellow parts represent typhoons, cyan parts represent strong tropical storms, blue parts represent tropical storms, green parts represent tropical low pressures, and gray parts represent systems weaker than tropical low)

2.2 方法

2.2.1 频谱补偿技术推算年最大风速

利用快速傅里叶变换(FFT)对2#海上测风塔位置一整年的10 min间隔风速序列和逐时的中尺度数值模拟序列进行频谱分析(图5)。可见观测风速序列的最高频率达到 72 d^{-1} (蓝色点线),也就是10 min间隔观测风速序列的奈奎斯特频率。由于中尺度数值模拟过程中对高频信号进行了平滑截断,因此,其高频区域的能谱曲线(图5实线)与实测高频风速序列的能谱分布特征(图5散点)存在较大差异。具体而言,与实测高频风速资料相比,中尺度数值模拟的风速序列能谱较低,在高频部分(超过 1 h^{-1} 的频率部分)能量截断,且数值模拟的空间分辨率越低,能谱损失越大。

假定风速序列满足高斯分布(良态风场)的前提下,Larsén等(2012)提出了年最大风速推算式

$$\frac{\overline{U_{\max}} - \bar{U}}{\sigma} = \sqrt{2 \times \ln\left(\frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{m_2}{m_0}} T_0\right)} \quad (1)$$

式中, $\bar{U}$ 为序列的平均值; T_0 为时间跨度,这里指1年; σ 为序列的标准差; m_0 和 m_2 分别为风速序列0阶和2阶谱

$$m_j = 2 \int_0^\infty \omega^j S(\omega) d\omega \quad \omega = 2\pi f \quad (2)$$

从式(2)及图5可见, m_0 和 m_2 分别对应图5b和5c中的曲线在整个频率域上的积分。

根据上述分析,首先对图5中的观测序列频谱进行推算验证,结果表明,图5b中观测序列的0阶谱 $m_0 = 6.59 \text{ m}^2/(\text{s}^2 \cdot \text{d})$,图5c中观测序列的2阶谱 $m_2 = 3716.63 \text{ m}^2/(\text{s}^2 \cdot \text{d}^3)$,据此推算的年最大风速为21.8 m/s,与测风塔观测到的年最大风速(21.2 m/s)非常接近。说明利用上述频谱分析方法推算年最大风速是可靠的。

由于中尺度数值模拟风速序列在高频部分存在能量损失,尤其对高于 1 h^{-1} 的能谱存在截断效应,因此,如果直接利用中尺度模拟风速的能谱进行积分,会损失高频部分(超过 1 h^{-1} 的频率)的能量,估算结果会存在较大误差。需要利用测风塔的高频观测风速能谱对数值模拟的高频能谱损失进行修正补偿,从而得到接近实测的推算结果。即文中频谱补偿是基于海上测风塔10 min平均的观测风速序列进行的。据此计算,图5中的WRF_3 km模拟风速序列进行频谱补偿前后推算的年最大风速分别为

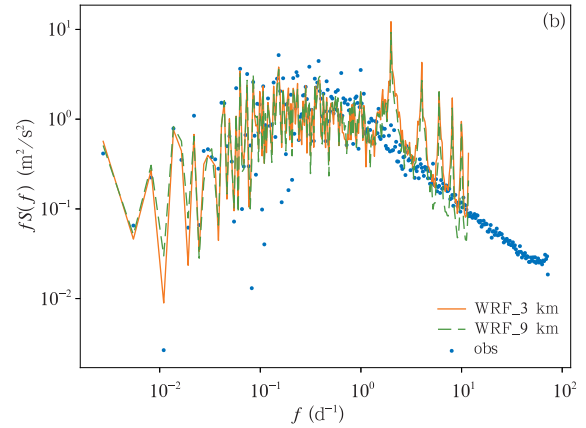
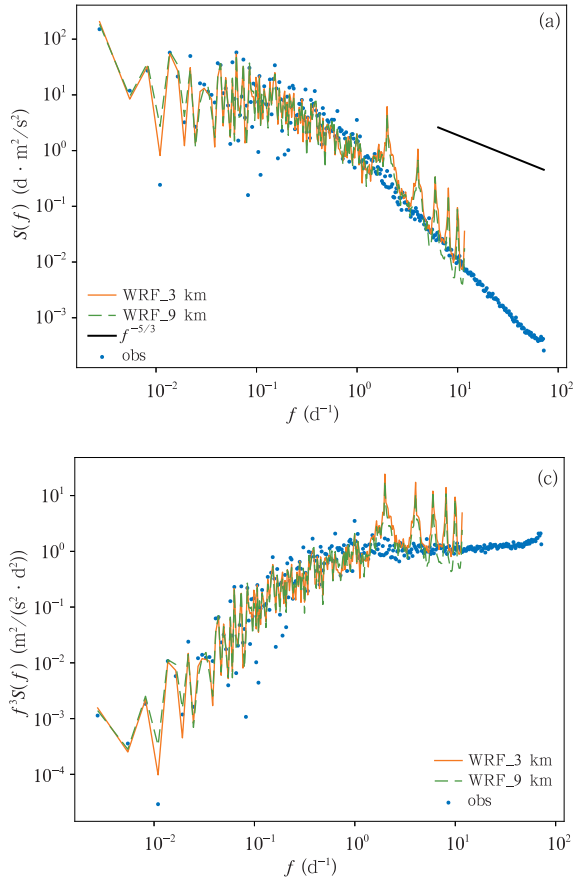


图5 2#海上测风塔位置2010年1—12月100 m高度风速观测序列、WRF_3 km和WRF_9 km数值模拟风速序列的频谱对比

(a. $S(f)$, b. $fS(f)$, c. $f^3S(f)$; 横坐标为频率 f)

Fig. 5 Spectra of wind speeds at 100 m from WRF-3 km simulation, WRF-9 km simulation and observation at #2 offshore mast during Jan - Dec 2010

(a. $S(f)$, b. $fS(f)$ and c. $f^3S(f)$ vs frequency f)

20.0 和 21.6 m/s; 而 WRF_9 km 模拟风速序列进行频谱补偿前后推算的年最大风速分别为 19.3 和 21.0 m/s。由于近海区域风速的空间变化较小, 因此, 上述频谱补偿推算结果对中尺度风速序列的空间分辨率不敏感, 利用 WRF_3 km 和 WRF_9 km 模拟风速序列推算的年最大风速与实测值(21.2 m/s)均较接近, 因此, 后续分析中将重点针对 WRF_9 km 模拟风速序列进行。

2.2.2 Batts 风场模型

上述频谱补偿技术适用于中尺度模拟的良态风场的年最大风速估算; 尽管江苏近海区域受台风影响相对较少, 但文中关注的 1995—2016 年仍有部分年份受少量热带气旋或其外围风场影响。因此, 在上述良态风场特征分析之外, 需要采用 Batts 台风风场模型对经过江苏近海 100 km 范围内的热带气旋风场进行模拟, 得到该海域热带气旋影响期间的最大风速。Batts 风场模型中, 最大梯度风速 V_{gx} 为

$$V_{gx} = K \sqrt{\Delta p} - \frac{R_{\max} f_0}{2} \quad (3)$$

式中, $R_{\max}$ 为最大风速半径, f_0 为科里奥利力参数, Δp 为中心压差, K 为经验常数, 文中取 6.72。

海面上 10 m 高度处 10 min 平均的最大风速 $V(z=10, R_{\max})$ 为

$$V(z=10, R_{\max}) = 0.865 V_{gx} + 0.5c \quad (4)$$

式中, c 为台风移动速度。

与台风中心距离为 r , 离海面 10 m 高度处 (10 min 平均) 风速为

$$V(z=10, r) =$$

$$\begin{cases} V(z=10, R_{\max}) \frac{r}{R_{\max}} & r < R_{\max} \\ V(z=10, R_{\max}) \left(\frac{R_{\max}}{r} \right)^x & r \geq R_{\max} \end{cases} \quad (5)$$

式中, $x \in [0.5, 0.7]$, 文中取 0.6。

$V(z=10, r)$ 得到的是距台风中心为 r 处的基本风速, 考虑不同的方位, 最终某空间点处的风速为 $V(z=10, r, \theta) = V(z=10, r) - 0.5c(1 - \cos\theta)$

$$(6)$$

式中, θ 为台风移动方向与模拟点和台风中心连线的夹角, 逆时针为正。

2.2.3 基于极值 I 型的 50 年一遇风速推算

从实际应用情况来看,抗风设计过程中,目前大多数国家均采用极值 I 型分布(耿贝尔分布)

$$F(x) = \exp(-\exp(-\alpha(x-\mu)))$$

$$(\alpha > 0, -\infty < \mu < \infty) \quad (7)$$

式中, α 为分布的尺度参数, μ 为分布的位置参数。利用已有的年最大风速序列 $x_1, x_2 \cdots x_n$ 合理估计出参数 α 和 μ ,则分布函数 $F(x)$ 被唯一确定。重现期为 R (概率为 $1/R$) 时最大风速为

$$R_x = \mu - \frac{1}{\alpha} \ln \left[\ln \left(\frac{R}{R-1} \right) \right] \quad (8)$$

对于极值 I 型分布,假定年最大风速序列为 $x_1 \leq x_2 \leq \cdots \leq x_n$,则参数估计一般采用经验分布函数

$$F^*(x_i) = \frac{i}{n+1} \quad i = 1, 2, \cdots, n \quad (9)$$

取序列

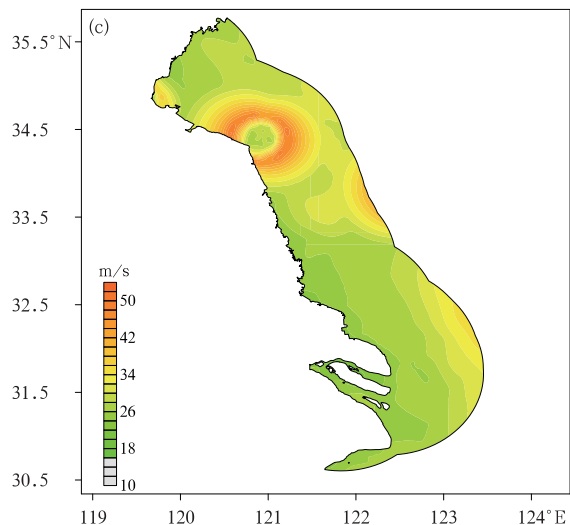
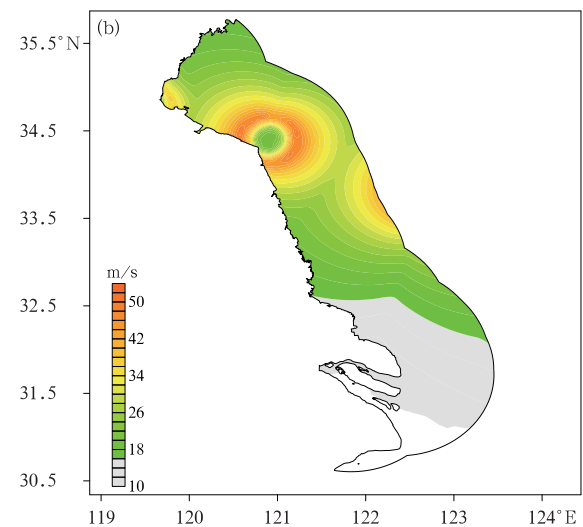
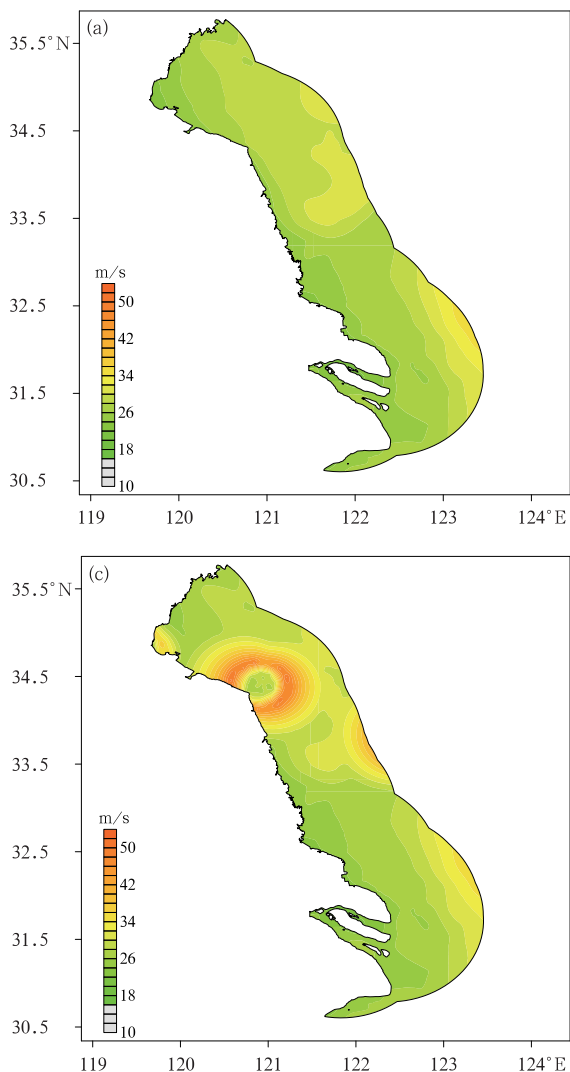


图 6 2012 年最大风速分布

(a. 频谱补偿, b. Batts 风场模型模拟,
c. 频谱补偿与 Batts 模拟综合推算)

Fig. 6 Maximum wind speed distribution in 2012 calculated by (a) spectral correction method, (b) Batts wind model and (c) spectral correction combined with Batts model

$$y_i = -\ln(-\ln(F^*(x_i))) \quad i = 1, 2, \cdots, n \quad (10)$$

可得

$$\begin{cases} \alpha = \frac{\sigma(y)}{\sigma(x)} \\ \mu = E(x) - \frac{E(y)}{\alpha} \end{cases} \quad (11)$$

3 模拟分析结果

3.1 年最大风速估算结果

从基于频谱补偿、Batts 风场模拟和两者综合推算的 2012 年最大风速分布(图 6)可以看出,基于频谱补偿技术推算的 2012 年最大风速代表了该区域良态风场(如冬季寒潮大风等)的特性,且在空间格点上实现全覆盖(图 6a);Batts 风场模型模拟的最大风速则代表了热带气旋影响下的风场特征,但受

气旋路径和天气系统空间范围的限制,其水平格点存在“空窗”区域(图 6b),2012 年仅有一个台风“达维”影响江苏中北部海域(图 4),江苏南部近海海域则无台风影响,因此,出现了图中无数据覆盖的“空窗”区域;同一年度,选取上述频谱补偿和 Batts 模拟的风速最大值,即可获取覆盖空间全网格点的年最大风速,且该风速综合反映了该区域受高纬度寒潮大风和热带气旋大风影响的结果(图 6c),对中纬度区域复杂的大风气候特征具有较高的代表性。

3.2 年最大风速序列及极值分布

从响水近海某格点处 1995—2016 年估算的年最大风速变化(图 7a)可见,该格点位置 2001、2005

和 2012 年的年最大风速受北上热带气旋及外围环流影响,尤其是 2012 年台风“达维”正面冲击影响下,年最大风速陡增,100 m 高度处的年最大风速达 42.6 m/s。图 7b 分别给出了频谱补偿年最大风速序列(图 7a 蓝色柱状)和频谱补偿+Batts 模型综合的年最大风速序列(图 7a 黑色曲线)的耿贝尔 I 型分布函数。据此推算,上述两个年最大风速序列对应的 50 年一遇极端风速分别为 42.5 和 50.0 m/s。可见尽管江苏近海区域受热带气旋影响较少,但少量北上热带气旋带来的大风天气对该区域 50 年一遇极端风速估算具有重要影响,实际应用中需综合考虑冷空气大风和热带气旋大风的影响。

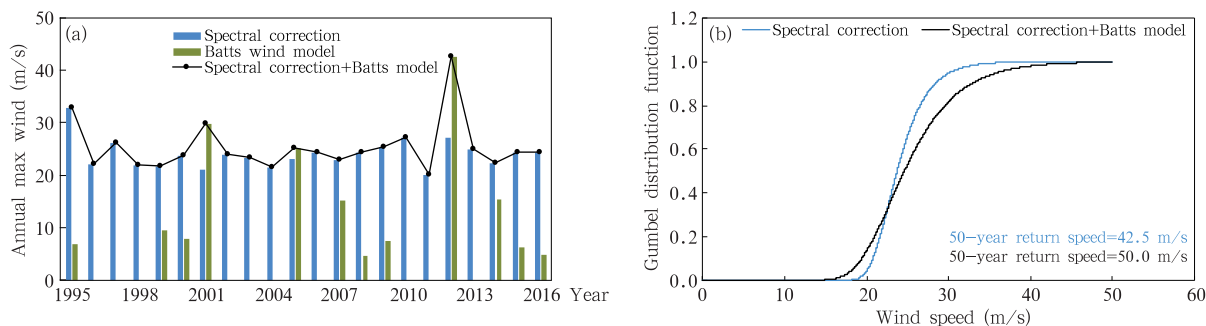


图 7 江苏响水近海附近某格点处(a)1995—2016 年估算的年最大风速变化及其(b)耿贝尔 I 型分布函数

Fig. 7 Variations of estimated annual maximum wind speed from 1995 to 2016 (a) and their Gumbel distribution curves (b)

3.3 50 年一遇极端风速分布

图 8 给出了江苏近海 100 km 范围内 100 m 高度处的 50 年一遇极端风速分布。可见基于频谱补偿技术推算(图 8a)的 50 年一遇极端风速,从江苏近海北部的 40 m/s 以上向南部的 35 m/s 逐渐减小,且离岸越远极端风速越大,尤其是江苏东北部近海海域的 50 年一遇极端风速甚至达 44 m/s,这可能与冬季的寒潮大风天气有关。除寒潮大风外,少量北上的热带气旋也可能造成该海域在个别年份出现较大风速。基于综合频谱补偿技术和 Batts 风场模拟技术的推算(图 8b),则进一步给出了综合考虑寒潮大风和北上热带气旋影响下,江苏近海 50 年一遇极端风速的分布特征。由图 8 可见,江苏响水滨海附近海域超过 44 m/s 和如东附近海域超过 40 m/s 的极端风速便与该海域热带气旋的活动密切相

关。中部盐城附近海域的 50 年一遇极端风速则普遍低于 35 m/s。

4 结论与讨论

本研究以江苏近海为例,综合考虑中国中纬度海域受高纬度寒潮大风和热带气旋大风影响的复杂气候特征,通过频谱补偿和数值模拟技术,建立了一套可推广应用的近海大气边界层百米高度处极端风速估算的新方法。据此推算了江苏近海 100 m 高度 50 年一遇极端风速的分布特征,表明:(1)受寒潮大风影响,江苏北部海域的 50 年一遇风速超过 40 m/s;(2)少量北上的热带气旋则造成响水和如东附近海域 40 m/s,甚至 44 m/s 以上的 50 年一遇风速;(3)中部盐城附近海域的 50 年一遇风速则普遍低于 35 m/s。这一工作对中国近海风电工程、海

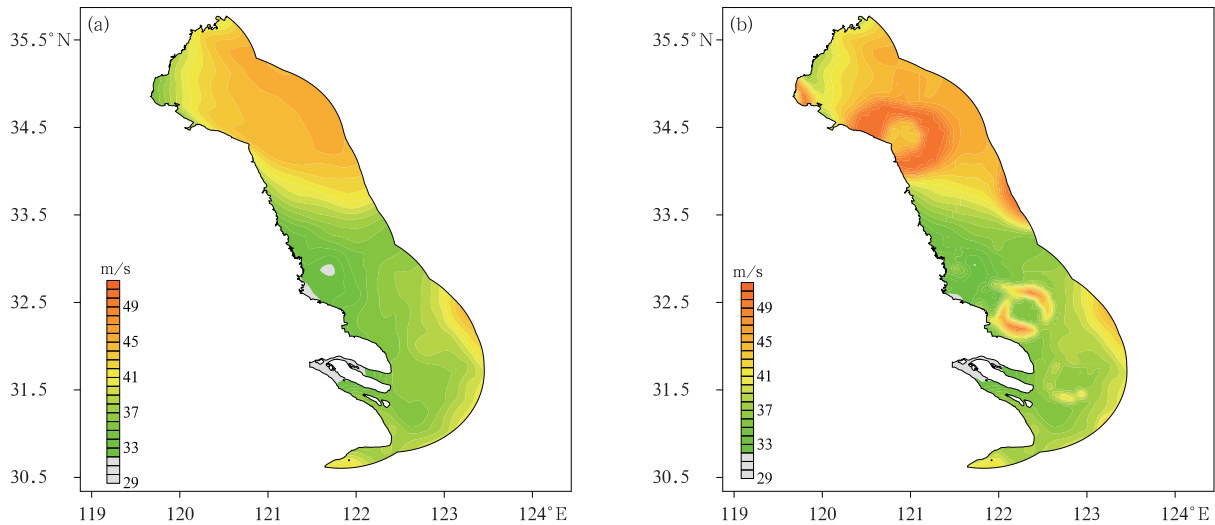


图8 江苏近海(离岸100 km)100 m高度处50年一遇风速分布

(a. 频谱补偿推算, b. 综合考虑频谱补偿和 Batts 台风模型推算)

Fig. 8 Estimation of 50 a return wind speed over the offshore area in Jiangsu province

(a. result of the spectral correction method, b. result of the spectral correction method combined with Batts wind filed model)

上石油开发及近岸工程等海洋工程的开发设计及安全运行有着重要的应用价值,不但可以为工程设计提供极值风速参数,减小海洋工程受大风影响时的风险系数,而且可以根据极端风速的分布特点,找到受大风影响相对较小且风能资源丰富的开发区域;同时,研究成果也有助于加深对对中国极端气候事件的科学认识和大气边界层科学理论的发展。

研究利用高频测风资料的频谱分析和大气流场数值模拟技术对缺乏观测支撑的中国近海海域大气边界层百米高度处极端风速估算进行尝试,建立了适用于缺乏观测区域的最大风速估算方法。使用该方法对数值模式的预估风速序列进行频谱分析补偿,也可用于极端风速的订正预估。但上述模型方法仅从大气环流的角度出发,未充分考虑海洋动力学过程及海气耦合过程的影响,未来的研究将通过中尺度大气模式 WRF 与近岸海浪数值模式 SWAN (Simulating Waves Nearshore) 进行耦合的方式来模拟台风风场,以期进一步改进近海海域极端风速的估算结果。

致谢:感谢 Larsén X G 和程雪玲博士在频谱分析计算方面给予的帮助。

参考文献

常蕊,朱蓉,周荣卫等. 2014. 高分辨率合成孔径雷达卫星反演风场资料在中国近海风能资源评估中的应用研究. 气象学报, 72

(3): 606-613. Chang R, Zhu R, Zhou R W, et al. 2014. An application of high resolution SAR wind retrievals to off-shore wind resources assessment in China. Acta Meteor Sinica, 72 (3): 606-613 (in Chinese)

陈朝晖,汤海涛. 2008. 台风极值风速的数值模拟及分布模型. 重庆大学学报, 31(11): 1285-1289. Chen Z H, Tang H T. 2008. Distribution models of extreme typhoon winds based on numerical simulation of wind data. J Chongqing Univ, 31(11): 1285-1289 (in Chinese)

陈朝晖,汤海涛. 2009. 基于 Monte-Carlo 法的极值风速模型研究. 工程力学, 26(S1): 193-197. Chen Z H, Tang H T. 2009. The extreme wind speed predicting model of typhoon by using Monte-Carlo method. Eng Mech, 26(S1): 193-197 (in Chinese)

段忠东,肖玉凤,肖仪清等. 2012. 基于数值模拟的台风危险性分析综述(II):随机抽样模拟与极值风速预测. 自然灾害学报, 21(2): 1-8. Duan Z D, Xiao Y F, Xiao Y Q, et al. 2012. Review of numerical simulation-based typhoon hazard analysis: Random sampling simulation and extreme wind speed prediction. J Nat Dis, 21(2): 1-8 (in Chinese)

符平,秦鹏飞,张金接. 2014. 海上风资源时空特性研究. 中国水利水电科学研究院学报, 12(2): 155-161. Fu P, Qin P F, Zhang J J. 2014. Research of spatio-temporal characteristics of off-shore wind resources. J China Inst Water Resour Hydropower Res, 12(2): 155-161 (in Chinese)

葛耀君,赵林,项海帆. 2003. 基于极值风速预测的台风数值模型评述. 自然灾害学报, 12(3): 31-40. Ge Y J, Zhao L, Xiang H F. 2003. Review for numerical typhoon models based on extreme wind velocity prediction. J Nat Dis, 12(3): 31-40 (in

- Chinese)
- 胡邦辉, 谭言科, 张学敏. 1999. 海面热带气旋域内风速分布. 大气科学, 23(3): 316-322. Hu B H, Tan Y K, Zhang X M. 1999. Distribution of wind speed of tropical cyclones over the sea. Chinese J Atmos Sci, 23(3): 316-322 (in Chinese)
- 李强, 张秀芝, 王乔乔等. 2015. 15°—35°N、105°—130°E 海域台风极值风速分析. 太阳能学报, 36(1): 85-89. Li Q, Zhang X Z, Wang Q Q, et al. 2015. The analysis of typhoon extreme wind in 15°—35°N, 105°—130°E waters. Acta Energ Sol Sinica, 36(1): 85-89 (in Chinese)
- 刘铁军, 郑崇伟, 潘静等. 2013. 中国周边海域海表风场的季节特征、大风频率和极值风速特征分析. 延边大学学报(自然科学版), 39(2): 148-152. Liu T J, Zheng C W, Pan J, et al. 2013. Analysis of seasonal characteristics, gale frequency and extreme wind speed around the China Sea. J Yanbian Univ (Nat Sci), 39(2): 148-152 (in Chinese)
- 宋丽莉, 陈雯超, 黄浩辉. 2011. 工程抗台风研究中风观测数据的可靠性和代表性判别. 气象科技进展, 1(1): 35-39, 43. Song L L, Chen W C, Huang H H. 2011. Reliability and representative assessments of wind observation data in the study of typhoon wind resistance engineering. Adv Meteor Sci Technol, 1(1): 35-39, 43 (in Chinese)
- 温克刚, 卞光辉. 2008. 中国气象灾害大典—江苏卷. 北京: 气象出版社. Wen K G, Bian G H. 2008. China Meteorological Disaster Ceremony—Jiangsu Volume. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese)
- 吴海英, 孙燕, 曾明剑等. 2007. 冷空气引发江苏近海强风形成和发展的物理过程探讨. 热带气象学报, 23(4): 388-394. Wu H Y, Sun Y, Zeng M J, et al. 2007. Discussion of physical mechanisms for a gale process caused by severe cold air offshore Jiangsu. J Trop Meteor, 23(4): 388-394 (in Chinese)
- 肖玉凤, 段忠东, 肖仪清等. 2011. 基于数值模拟的台风危险性分析综述(I): 台风风场模型. 自然灾害学报, 20(2): 82-89. Xiao Y F, Duan Z D, Xiao Y Q, et al. 2011. Review of numerical simulation-based typhoon hazard analysis: Typhoon wind-field model. J Nat Dis, 20(2): 82-89 (in Chinese)
- 徐蜜蜜, 徐海明. 2010. 我国近海大风分布特征及成因. 热带气象学报, 26(6): 716-723. Xu M M, Xu H M. 2010. The characteristic of strong wind distribution in the coastal area of China and its causes. J Trop Meteor, 26(6): 716-723 (in Chinese)
- 徐敏. 2002. 大气边界层湍流结构和气象环境的数值模拟: 从区域尺度到微尺度[D]. 南京: 南京大学, 108. Xu M. 2002. Numerical simulation of turbulence structure and meteorological environment in boundary layer: From regional scale to microscale[D]. Nanjing: Nanjing University, 108 (in Chinese)
- 阎俊岳, 陈乾金, 张秀芝等. 1993. 中国近海气候. 北京: 科学出版社, 2-20. Yan J Y, Chen Q J, Zhang X Z, et al. 1993. Chinese Offshore Climate. Beijing: Science Press, 2-20 (in Chinese)
- 阎俊岳, 黄爱芬. 1996. 中国近海大风极值计算方法研究. 气象学报, 54(2): 233-239. Yan J Y, Huang A F. 1996. A study of calculation methods for extreme wind speed over the China Sea. Acta Meteor Sinica, 54(2): 233-239 (in Chinese)
- 赵林, 葛耀君, 宋丽莉等. 2007. 广州地区台风极值风特性蒙特卡罗随机模拟. 同济大学学报(自然科学版), 35(8): 1034-1038, 1068. Zhao L, Ge Y J, Song L L, et al. 2007. Monte-Carlo simulation analysis of typhoon extreme value wind characteristics in Guangzhou. J Tongji Univ (Nat Sci), 35(8): 1034-1038, 1068 (in Chinese)
- Batts M E, Simiu E, Russell L R. 1980. Hurricane wind speeds in the United States. J Struct Div, 106(10): 2001-2016
- Brower M C, Bailey B, Zack J. 2001. Applications and validations of the MesoMap wind mapping system in different climatic regimes//Proceedings of WINDPOWER 2001. Washington, DC: American Wind Energy Association
- Brown P S Jr, Robinson G D. 1979. The variance spectrum of tropospheric winds over eastern. Eur J Atmos Sci, 36(2): 270-286
- Chang R, Zhu R, Badger M, et al. 2014. Applicability of synthetic aperture radar wind retrievals on offshore wind resources assessment in Hangzhou Bay, China. Energies, 7(5): 3339-3354
- Chang R, Zhu R, Badger M, et al. 2015. Offshore wind resources assessment from multiple satellite data and WRF modeling over South China Sea. Remote Sensing, 7(1): 467-487
- Cook N J, Harris R I, Whiting R. 2003. Extreme wind speeds in mixed climates revisited. J Wind Eng Ind Aerod, 91(3): 403-422
- Frehlich R, Sharman R. 2008. The use of structure functions and spectra from numerical model output to determine effective model resolution. Mon Wea Rev, 136(4): 1537-1553
- Gage K S, Nastrom G D. 1986. Theoretical interpretation of atmospheric wavenumber spectra of wind and temperature observed by commercial aircraft during GASP. J Atmos Sci, 43(7): 729-740
- Gumbel E J. 1958. Statistics of Extremes. New York: Columbia University Press, 51-52
- Hofherr T, Kunz M. 2010. Extreme wind climatology of winter storms in Germany. Climate Res, 41(2): 105-123
- Kunz M, Mohr S, Rauthe M, et al. 2010. Assessment of extreme wind speeds from regional climate models, Part I: Estimation of return values and their evaluation. Nat Hazards Earth Syst Sci, 10(4): 907-922
- Lange B, Højstrup J. 2001. Evaluation of the wind-resource estimation program WAsP for offshore applications. J Wind Eng Ind Aerod, 89(3-4): 271-291
- Larsén X G, Mann J. 2009. Extreme winds from the NCEP/NCAR reanalysis data. Wind Energy, 12(6): 556-573
- Larsén X G, Larsen S, Badger M. 2011. A case-study of mesoscale spectra of wind and temperature, observed and simulated. Quart J Roy Meteor Soc, 137(654): 264-274
- Larsén X G, Ott S, Badger J, et al. 2012. Recipes for correcting the impact of effective mesoscale resolution on the estimation of ex-

- treme winds. *J Appl Meteor Climatol*, 51(3): 521-533
- Larsén X G, Kruger A. 2014. Application of the spectral correction method to reanalysis data in South Africa. *J Wind Eng Ind Aerod*, 133: 110-122
- Lindborg E. 1999. Can the atmospheric kinetic energy spectrum be explained by two-dimensional turbulence? *J Fluid Mech*, 388: 259-288
- Lindborg E, Tung K, Nastrom G D, et al. 2010. Comment on 'Re-interpreting aircraft measurement in anisotropic scaling turbulence' by Lovejoy et al. (2009). *Atmos Chem Phys*, 10(3): 1401-1402
- Pryor S C, Barthelmie R J, Clausen N E, et al. 2012. Analyses of possible changes in intense and extreme wind speeds over northern Europe under climate change scenarios. *Climate Dyn*, 38(1-2): 189-208
- Schloemer R W. 1954. Analysis and synthesis of hurricane wind patterns over Lake Okeechobee, Florida. Washington: NOAA, 49
- Shapiro L J. 1983. The asymmetric boundary layer flow under a translating hurricane. *J Atmos Sci*, 40(8): 1984-1998
- Skamarock W C. 2011. Kinetic energy spectra and model filters // Lauritzen P, Jablonowski C, Taylor M, et al. *Numerical Techniques for Global Atmospheric Models*. Berlin, Heidelberg: Springer, 495-512
- Skamarock W C. 2004. Evaluating mesoscale NWP models using kinetic energy spectra. *Mon Wea Rev*, 132(12): 3019-3032
- Tung K K, Orlando W W. 2003. The k-3 and k-5/3 energy spectrum of atmospheric turbulence: Quasigeostrophic two-level model simulation. *J Atmos Sci*, 60(6): 824-835
- Yu W, Benoit R, Girard C, et al. 2006. Wind Energy Simulation Toolkit (WEST): A wind mapping system for use by the wind-energy industry. *Wind Eng*, 30(1): 15-33

欢迎订阅 2020 年度《气象学报》

《气象学报》中文版创刊于 1925 年,是由中国气象局主管,中国气象学会主办的全国性大气科学学术期刊,主要刊载有关大气科学及其交叉科学研究的具有创新性的论文;国内外大气科学发展动态的综合评述;新观点、新理论、新技术、新方法的介绍;研究工作简报及重要学术活动报道;优秀大气科学专著的评介以及有关本刊论文的学术讨论等。

《气象学报》中文版 2003 年和 2005 年连续两次荣获中华人民共和国新闻出版总署颁发的第二届、第三届“国家期刊奖百种重点学术期刊”奖;2013 年获“中国出版政府奖期刊奖提名奖”;2013、2015、2017 年入选国家新闻出版广电总局“百强报刊”;2007—2011 年和 2015—2017 年获得中国科学技术协会精品科技期刊工程项目的资助,2008、2011、2014、2017 年被评为“中国精品科技期刊”;2003—2007、2009、2016 年被中国科学技术信息研究所评为“百种中国杰出学术期刊”;2012、2013、2014、2015 年获评“中国最具国际影响力学术期刊”;2016、2017 年获评“中国国际影响力优秀学术期刊”。

《气象学报》为大气科学研究提供了学术交流平台,一直致力于推动中国大气科学基础研究和理论研究的发展,服务于中国气象现代化建设事业。作者和读者对象主要为从事气象、海洋、地理、环境、地球物理、天文、空间及生态等学科的科研人员、高校师生。

《气象学报》中文版为双月刊,国内外发行。

2020 年全年共 6 期,定价 240 元/年。

邮发代号: 2-368(国内) BM329(国际)

通讯地址: 北京市中关村南大街 46 号 中国气象学会《气象学报》编辑部

邮政编码: 100081

联系电话: 010-68406942, 68408571 (传真)

邮箱: cmsqxxb@263.net; qxxb@cms1924.org

期刊主页: http://www.cmsjournal.net/qxxb_cn

开户银行: 北京建行白石桥支行

户名: 中国气象学会

帐号: 11001028600059261046