

中国近海风能资源时空分布特征分析

王剑, 李响, 韩雪, 张蕴斐, 王晨琦

(国家海洋环境预报中心 自然资源部海洋灾害预报技术重点实验室, 北京 100081)

摘 要: 基于欧洲中期天气预报中心ERA5再分析资料的风场数据,对中国近海1979—2018年的风能分布开展多时空尺度分析。结果表明:中国近海风能丰富的区域分布在福建、浙江和广东的沿海海域;中国近海风能的年际震荡明显;秋冬两季风能优于春夏两季,12月达到最高值,5月达到最低值;中国近海大部分海域平均风功率密度的日变化呈现夜晚大于白天的特征,其中渤海北部和黄海北部海域在14时左右达到最小值,00时左右达到最大值。

关键词: 风能资源;风功率密度;日变化

中图分类号: P743 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2022)06-0055-07

1 引言

随着人类社会的不断发展,对能源的需求也日益增大。风能资源是一种清洁的可再生能源,对风能资源的有效开发和利用,可以改善对化石燃料的依赖,减少碳排放。我国海上风能资源非常丰富,据统计,我国海上风能储量可达600 GW左右^[1]。相较于陆上风能资源开发,海上风能具有不占用土地、噪音污染小、可缓解东部沿海地区电力短缺等优势,发展前景广阔。国家能源局数据显示,2021年我国海上风电累计装机26.39 GW,我国未来海上风电装机规模将处于世界领先地位。在我国碳达峰碳中和战略目标的指引下,海上风能资源的开发和利用将会进入新的蓬勃发展阶段。

精准的分析 and 预估对海上风能资源的开发和利用至关重要^[2-3]。海上风能资源的评估方法主要有数理统计^[4-6]和数值模式模拟^[7-8]两种。由于海上长时间连续观测数据的缺乏,通常使用卫星遥感资料 and 再分析资料进行分析。卫星遥感数据覆盖面广,但风速的反演数据存在部分缺失^[9-10]。再分析资料同化了常规观测、卫星和数值预报产品等多来源

资料,随着同化技术的发展,成熟的再分析资料可以提供可靠参考。许多学者使用再分析资料对特定区域的海上风能资源开展研究。ZHENG等^[11]使用欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-range Weather Forecasts, ECMWF)的第二代全球大气再分析资料ERA-40(40 years European Reanalysis)开展了10 m高度全球海表面风速变化研究;JIN等^[12]使用美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)研制的CFRS(Climate Forecast System Reanalysis)再分析资料分析了中国近海多个高度风能资源的年际变化;王国松等^[13]基于CFRS的风场再分析资料推算了70 m高度的风能分布。在实际的风力发电中,风电机组的轮毂高度通常在70~100 m^[14],而大部分观测和再分析资料只含有10 m高度的风场数据,因此以往研究主要基于此高度的风速来推算风机轮毂高度位置的风速。但是采用这种方法评估分析风能资源会产生一定的误差^[11, 15]。

为了减少风速推算产生的误差,更加准确地分析中国近海风能资源,本文使用ECMWF的ERA5(The fifth generation ECMWF Reanalysis)再分析资

收稿日期: 2022-03-25; 修回日期: 2022-04-11。

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFC1408004)。

作者简介: 王剑(1987-),女,工程师,硕士,主要从事海气相互作用方向研究。E-mail:wangjian@nmefc.cn

通信作者: 李响(1986-),男,副研究员,博士,主要从事海气相互作用方向研究。E-mail:lixang@nmefc.cn

料 100 m 高度的风场数据,从气候态、年际变化、季节变化和日变化多时空尺度全面分析了中国近海 40 a 的风能分布特征,以期风能资源的开发利用和电力系统的调峰优化提供参考。

2 数据与方法

2.1 再分析资料

ERA5 再分析资料是 ECMWF 新一代全球大气再分析资料。本研究采用 10 m 高度和 100 m 高度的风场、气压和气温数据,其中 10 m 高度风场数据用于与观测数据的比较分析,并验证 ERA5 再分析资料在中国近海的可靠性,100 m 高度的风场数据用于全面分析中国近海风能的时空变化特征。数据的时间跨度为 1979—2018 年,水平分辨率为 $0.281^\circ \times 0.281^\circ$,时间分辨率为 1 h。与以往的 ECMWF 再分析资料相比,ERA5 再分析资料采用集合四维变分同化技术,分辨率有所提高。

2.2 观测资料

全球通信系统 (Global Telecommunications System, GTS) 观测资料是由世界气象组织设立并发报的海洋大气观测资料。观测时次是每日的 00 时(世界时,下同)、06 时、12 时和 18 时,观测间隔为 6 h。本研究采用的是 10 m 高度风速数据,时间为 2017 年 1—12 月。

2.3 水深数据

GEBCO 是国际海道测量组织 (International Hydrographic Organization, IHO) 和政府间海洋学委员会 (Intergovernmental Oceanographic Commission, IOC) 联合发布的全球海陆地形数据集。数据精度为 1',是目前分辨率较高的全球水深数据。

2.4 方法

用于风能资源评估的常用指标包括平均风速和平均风功率密度。平均风功率密度指的是与风向垂直的单位面积中风所具有的功率,是评价一个地区风能潜力的重要参数^[16-17]。平均风功率密度计算通常包括统计方法^[16-18]和概率分布函数方法^[19-20]。以往的研究表明^[4-5,12-13],统计方法能够较好地开展

近海风能资源评估。本研究采用基于统计方法的平均风功率密度公式^[16]。公式如下:

$$Dwp = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n (\rho) (v_i^3) \quad (1)$$

$$\rho = \frac{P}{RT} \quad (2)$$

式中: Dwp 为平均风功率密度(单位: W/m^2); v_i 为 i 记录的风速(单位: m/s); n 为设定时段内的记录数; ρ 为空气密度(单位: kg/m^3); P 为年平均大气压力(单位: Pa); T 为年平均空气温度(单位: K); R 为理想气体常数,取 $287 J/(kg \cdot K)$ 。

3 ERA5 再分析数据可靠性分析

为了检验 ERA5 再分析资料在中国近海的可信度,本研究利用 GTS 观测资料的 10 m 高度风速与 ERA5 再分析资料进行比较,对比时间为 2017 年 1—12 月。选取中国近海及沿海岸从北向南数据完整性、连续性较好的 10 个 GTS 站点(见图 1)。将 ERA5 再分析数据插值到 GTS 观测数据所在位置,分别对比均方根误差、平均绝对偏差和平均偏差 3 个统计指标。结果表明,ERA5 数据的风速整体偏

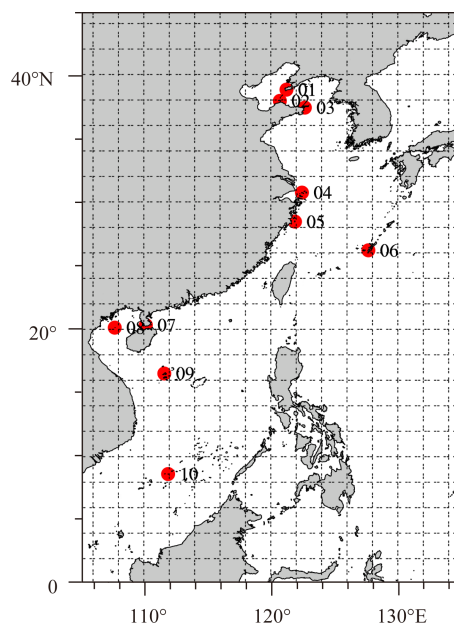


图 1 中国近海及沿海岸 GTS 站点位置示意图

Fig.1 Location of China's offshore and coastal GTS stations

大,平均均方根误差为 2.23 m/s,平均绝对偏差为 1.81 m/s,平均偏差为-1.29 m/s。从图 2 可以看出,ERA5 风速对 GTS 观测风速的反映能力较好,两者的相关系数可达 0.78。因此,ERA5 再分析资料对中国近海风速具有较好的重现能力,可以用于中国近海风能资源的评估研究。

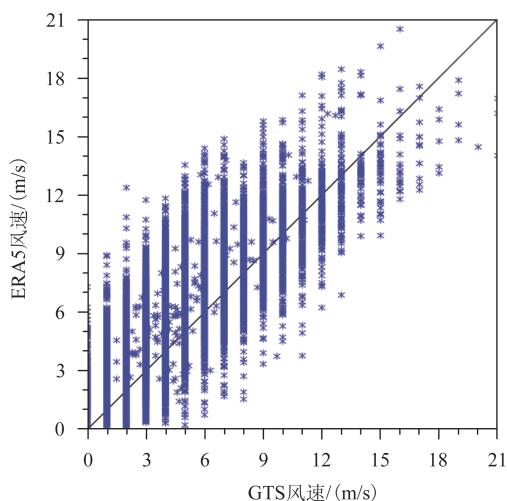


图2 ERA5 风速与 GTS 风速散点分布

Fig.2 Scatter distribution of ERA5 and GTS wind speed

4 中国近海风能时空分布特征分析

4.1 中国近海风能气候态分布特征

由于近地层风速垂直梯度变化较大,因此风速会随着高度的增加而增大。如图 3 所示,中国近海 10 m 高度和 100 m 高度的平均风速分别为 2~9 m/s 和 3~11 m/s,在“狭管效应”的作用下,台湾海峡大部分海域 100 m 高度的平均风速为 9~11 m/s。平均风功率密度与平均风速的空间分布一致(见图 4),中国近海 10 m 高度和 100 m 高度的平均风功率密度分别为 200~900 W/m² 和 300~1 600 W/m²,渤海和黄海平均风功率密度较低,大值区分布在福建、浙江和广东的沿海海域,台湾海峡 100 m 高度的平均风功率密度最大可达 1 600 W/m²。综合平均风速和平均风功率密度的分布可知,中国近海风能丰富的区域分布在福建、浙江和广东的沿海海域,从浙江沿海海域向北风能资源逐渐减小。本文得出的中国近海风速和风功率密度的气候态整体空间分布特征与之前学者的研究结果一致,而较

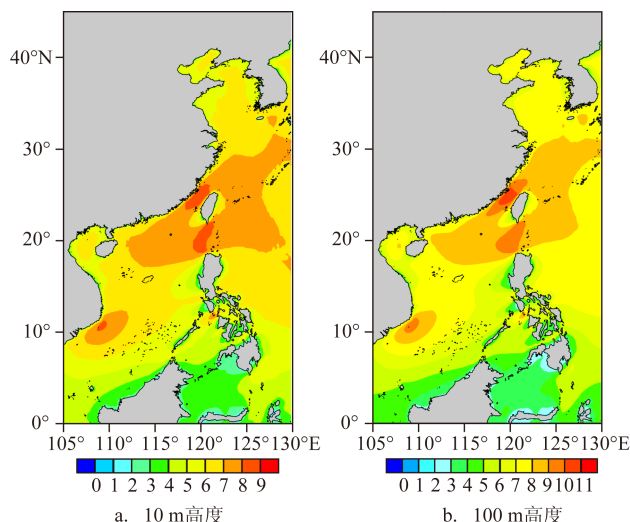


图3 中国近海 40 a 平均风速气候平均态(单位:m/s)

Fig.3 Climate state of 40-year average wind speed in offshore China(unit: m/s)

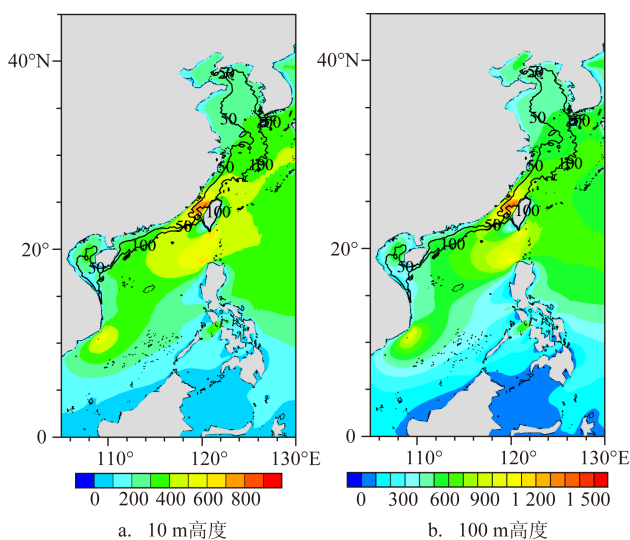


图4 中国近海 40 a 平均风功率密度气候平均态(单位: W/m²)与水深分布(等深线,单位:m)

Fig.4 Climate state of 40-year average wind power density in offshore China(unit: W/m²) and ocean water depth distribution(lisobath, unit: m)

JIN 等^[12]使用 CFSR 再分析资料和孙稚权等^[3]利用 ERA-interim 再分析资料计算得到的数值略高。

从中国近海的水深分布可知(见图 4),渤海和黄海海域水深较浅,杭州湾以南海域 50 m 等深线离岸距离更近。这之前学者的分析结果^[3, 13]一致。经计算,中国近海 50 m 和 50~100 m 等深线以内海

域的 100 m 高度平均风功率密度分别为 492 W/m^2 和 605 W/m^2 。随着海上浮式风电技术的发展,风电场的布局将逐步向深水区发展。

4.2 中国近海风能年际变化特征

为了研究中国近海风能的年际变化,我们将平均风速的季节变化从逐月数据中去除,得到中国近海 100 m 高度平均风速年际变化的异常趋势。从图 5 可以看出,平均风速的年际震荡明显,1979—1990 年和 1999—2004 年呈波动上升趋势,上升速率分别为 $0.023 \text{ m/(s} \cdot \text{a)}$ 和 $0.034 \text{ m/(s} \cdot \text{a)}$,均超过 95% 的置信度检验;1990—1998 年、2005—2010 年和 2011—

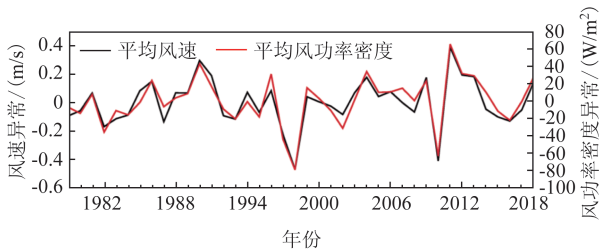


图5 中国近海 100 m 高度平均风速和平均风功率密度的年际变化

Fig.5 Interannual variation of mean wind speed and mean wind power density at 100-m height in offshore China

2018 年呈波动下降趋势,下降速率分别为 $-0.065 \text{ m/(s} \cdot \text{a)}$ 、 $-0.057 \text{ m/(s} \cdot \text{a)}$ 和 $-0.047 \text{ m/(s} \cdot \text{a)}$,均超过 95% 的置信度检验。此外,中国近海 100 m 高度的平均风功率密度的年际变化异常趋势和平均风速的变化趋势一致(见图 5)。中国近海风能的年际变化可能与厄尔尼诺和南方涛动(El Niño-Southern Oscillation, ENSO)事件对中国近海风场异常的影响^[21]以及海陆间温度差的变化有关^[22]。

4.3 中国近海风能季节变化特征

中国近海秋季(9—11月)和冬季(12月—次年2月)为北向风,夏季(6—8月)为南向风,春季(3—5月)是风向过渡季节。中国近海风能的季节变化明显,秋冬两季的风能优于春夏两季(见图 6)。

在春季,平均风功率密度大值区主要集中在渤海和黄海海域。夏秋两季,平均风功率密度的大值区逐步向南转移。冬季由于来自高纬度的冷空气影响较强,在海上产生了较大的气压梯度^[23],所以中国近海整体的平均风速和平均风功率密度较大,台湾海峡平均风功率密度可达 2000 W/m^2 。从图 7 可以看出,中国近海 100 m 高度平均风功率密度在 12 月达到最高值,在 5 月达到最低值。

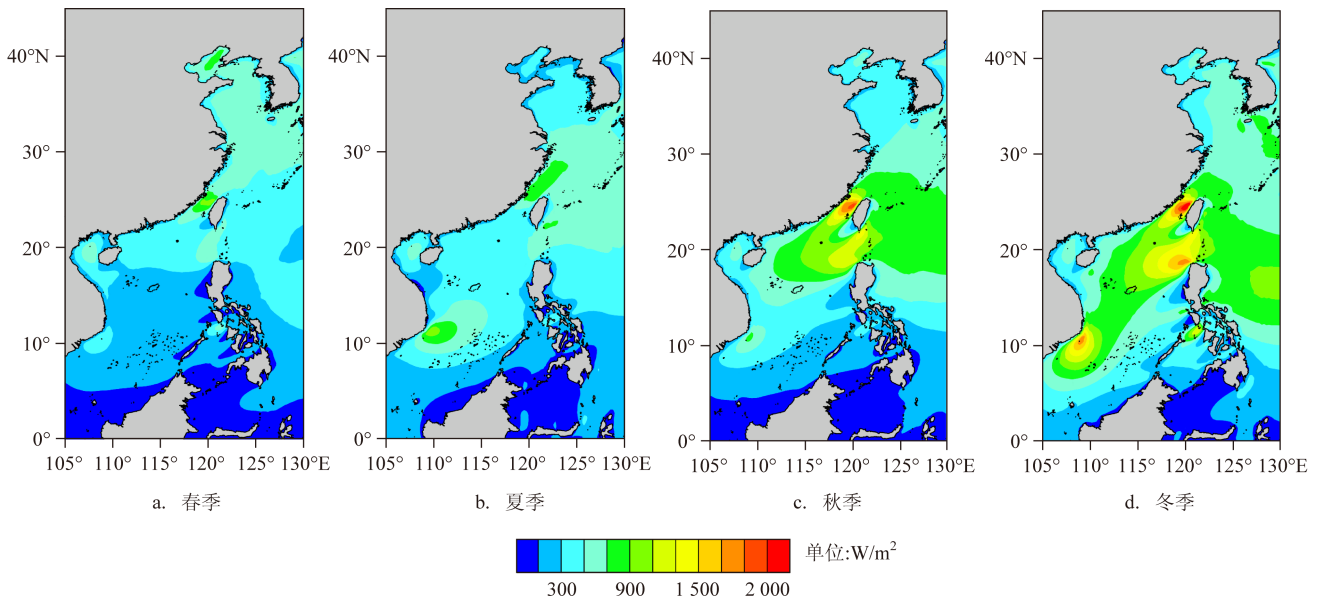


图6 中国近海 100 m 高度平均风功率密度的季节分布

Fig.6 Seasonal distribution of mean wind power density at 100-m height in offshore China

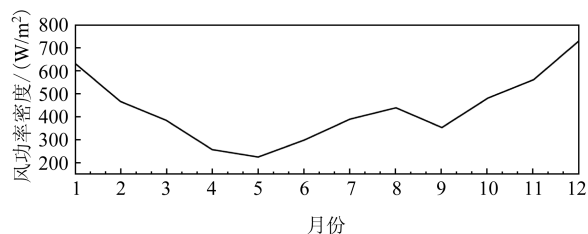


图7 中国近海 100 m 高度平均风功率密度的季节变化
Fig.7 Seasonal variation of mean wind power density at 100-m height in offshore China

4.3 中国近海风能日变化特征

海上风速受太阳辐射、地形和尾流等诸多因素影响,1 d内随时间的变化具有明显的波动。我们针对中国近海适宜建设海上风电场的代表区域^[24],如渤海北部海域、黄海北部海域、江苏沿海海域、杭州湾、福建沿海海域和广东沿海海域开展风能日变化

分析,以期电力系统调峰优化提供参考。在实际的风电应用中,风力发电机在风速过大时将停止运转,启动自我保护设置,风速过小则不能启动^[25],所以需要根据国际电工委员会(International Electrotechnical Commission, IEC)风力发电机发电标准的要求^[26],对风速数据进行处理,即去掉小于 4 m/s 和大于 16 m/s 的风速数据。

如图 8 所示,我国大部分海域(除广东沿海海域)的平均风功率密度均呈现夜晚大于白天的特征,其中渤海北部和黄海北部海域在 14 时左右达到最小,00 时左右达到最大,渤海北部海域日变化振幅最大。中国近海平均风功率密度的日变化特征与陆上不同,主要由于夜晚的海上水温易高于气温,海面大气呈现不稳定层结,有利于空气对流发展^[27],所以夜晚风速更大。广东沿海海域的平均风功率密度为白天略大于晚上,可能与该区域的狭长地形和受热带气旋的显著影响有关。

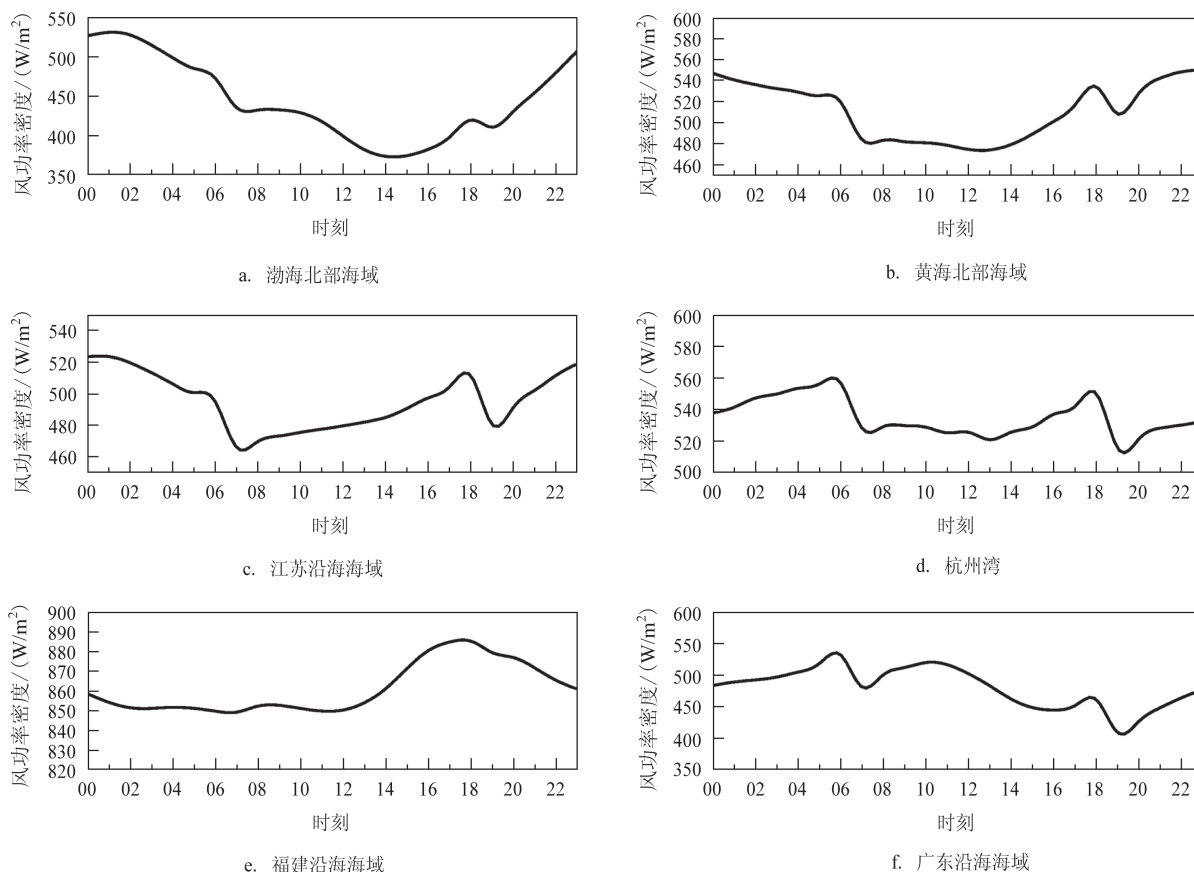


图8 中国近海 100 m 高度平均风功率密度日变化
Fig.8 Diurnal variation of mean wind power density at 100-m height in offshore China

5 总结与讨论

本文利用欧洲中期天气预报中心新一代ERA5再分析资料,对1979—2018年中国近海的风能时空分布开展研究,主要计算指标为100 m高度的平均风速和平均风功率密度。结论如下:

(1)中国近海风能丰富的区域分布在福建、浙江和广东的沿海海域;中国近海风能的年际震荡明显;秋冬两季的风能优于春夏两季,风能在12月达到最高值,5月达到最低值。

(2)中国近海大部分海域平均风功率密度的日变化呈现夜晚大于白天的特征,其中渤海北部和黄海北部海域在14时左右达到最小,00时左右达到最大。

本文采用再分析资料从长时间尺度宏观地分析了中国近海风能的时空分布。在今后的研究中,可以使用数值模拟或人工智能方法开展未来气候背景下的区域风能资源评估。在实际的风电开发中,海上比陆地的情况更为复杂,所以还要进一步分析热带气旋等气象灾害对风能开发的影响。

参考文献:

- [1] 陈卓,李霁恒,郭军红,等. 气候变化下的风能资源评估技术研究进展[J]. 中外能源, 2019, 24(7): 14-19.
CHEN Z, LI J H, GUO J H, et al. Research progress of wind energy resource assessment technology under climate change[J]. Sino-Global Energy, 2019, 24(7): 14-19.
- [2] 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.
- [3] 孙稚权,项杰,管玉平. 基于ERA-interim资料中国近海风能资源时空分布[J]. 海洋预报, 2016, 33(3): 50-56.
SUN Z Q, XIANG J, GUAN Y P. Wind energy in the offshore areas of China based on ERA-interim reanalysis data[J]. Marine Forecasts, 2016, 33(3): 50-56.
- [4] MIAO H Z Y, DONG D H, HUANG G, et al. Evaluation of Northern Hemisphere surface wind speed and wind power density in multiple reanalysis datasets[J]. Energy, 2020, 200: 117382.
- [5] ZHENG C W, XIAO Z N, PENG Y H, et al. Rezoning global offshore wind energy resources[J]. Renewable Energy, 2018, 129: 1-11.
- [6] 李正泉,宋丽莉,马浩,等. 海上风能资源观测与评估研究进展[J]. 地球科学进展, 2016, 31(8): 800-810.
LI Z Q, SONG L L, MA H, et al. Review of methodologies for offshore wind resource observation and assessment[J]. Advances in Earth Science, 2016, 31(8): 800-810.
- [7] ZHU R, ZHANG D, WANG Y D, et al. Assessment of wind energy potential in China[J]. Engineering Sciences, 2009, 7(2): 18-26, 31.
- [8] WANG Z F, DUAN C L, DONG S. Long-term wind and wave energy resource assessment in the South China sea based on 30-year hindcast data[J]. Ocean Engineering, 2018, 163: 58-75.
- [9] 郭乔影. 基于星地多源数据的海上风能资源评估方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020: 1-147.
GUO Q Y. Assessing ocean wind energy resources integrated multiple satellite and ground-based data[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020: 1-147.
- [10] CHANG R, ZHU R, BADGER M, et al. Offshore wind resources assessment from multiple satellite data and WRF modeling over South China Sea[J]. Remote Sensing, 2015, 7(1): 467-487.
- [11] ZHENG C W, ZHOU L, HUANG C F, et al. The long-term trend of the sea surface wind speed and the wave height (wind wave, swell, mixed wave) in global ocean during the last 44 a[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2013, 32(10): 1-4.
- [12] JIN S L, FENG S L, WANG B, et al. Assessment of offshore wind resource in China using CFSR data[J]. Advanced Materials Research, 2014, 1070-1072: 303-308.
- [13] 王国松,高山红,吴彬贵,等. 我国近海风能资源分布特征分析[J]. 海洋科学进展, 2014, 32(1): 21-29.
WANG G S, GAO S H, WU B G, et al. Distribution features of wind energy resources in the offshore areas of China[J]. Advances in Marine Science, 2014, 32(1): 21-29.
- [14] 夏登文,岳奇,徐伟. 海洋矿产与能源功能区研究[M]. 北京: 海洋出版社, 2013: 1-134.
XIA D W, YUE Q, XU W. Study on marine mineral and energy functional zones[M]. Beijing: China Ocean Press, 2013: 1-134.
- [15] 中国气象局风能太阳能资源评估中心. 中国风能资源评估报告(2009)[M]. 北京: 气象出版社, 2010: 1-142.
Wind and Solar Energy Resource Evaluation Center of China Meteorological Administration. China wind energy resource assessment report (2009) [M]. Beijing: Meteorological Press, 2010: 1-142.
- [16] 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.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB/T18710-2002 Methodology of wind energy resource assessment for wind farm [S]. Beijing: China Standard Press, 2004.
- [17] 姜波,刘富铄,徐辉奋,等. 浙江省沿海海洋风能资源评估[J]. 海洋技术, 2012, 31(4): 91-94.
JIANG B, LIU F Y, XU H F, et al. Evaluation of the wind energy resources in Zhejiang coastal area[J]. Ocean Technology, 2012, 31(4): 91-94.

- [18] JIANG D, ZHUANG D F, HUANG Y H, et al. Evaluating the spatio-temporal variation of China's offshore wind resources based on remotely sensed wind field data[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 24: 142-148.
- [19] 龚伟俊, 李为相, 张广明. 基于威布尔分布的风速概率分布参数估计方法[J]. *可再生能源*, 2011, 29(6): 20-23.
- GONG W J, LI W X, ZHANG G M. The estimation algorithm on the probabilistic distribution parameters of wind speed based on Weibull distribution[J]. *Renewable Energy Resources*, 2011, 29(6): 20-23.
- [20] LIU W T, TANG W Q, XIE X S. Wind power distribution over the ocean[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(13): L13808.
- [21] 邹玮, 徐峰, 涂石飞, 等. 南海近海面风场变化特征及其与 ENSO 的相关性研究[J]. *海洋气象学报*, 2018, 38(3): 83-91.
- ZOU W, XU F, TU S F, et al. Study on the variation characteristics of near-surface wind field over the South China Sea and its correlation with ENSO[J]. *Journal of Marine Meteorology*, 2018, 38(3): 83-91.
- [22] 宋超辉, 王楠, 王阔, 等. 基于 1988—2017 年 CCMP 数据的浙江沿海海表风速变化及成因[J]. *大气科学学报*, 2019, 42(4): 562-570.
- SONG C H, WANG N, WANG K, et al. Variation and cause of sea surface wind speed in Zhejiang coastal area based on CCMP data from 1988 to 2017[J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2019, 42(4): 562-570.
- [23] 王慧, 隋伟辉. 基于 CCMP 风场的中国近海 18 个海区海面大风季节变化特征分析[J]. *气象科技*, 2013, 41(4): 720-725.
- WANG H, SUI W H. Seasonal variation analysis of sea surface winds in China sea areas with CCMP wind field data[J]. *Meteorological Science and Technology*, 2013, 41(4): 720-725.
- [24] 韩家新. 中国近海海洋——海洋可再生能源[M]. 北京: 海洋出版社, 2015: 197-199.
- HAN J X. Offshore China: marine renewable energy[M]. Beijing: China Ocean Press, 2015: 197-199.
- [25] 段曰蔚. 多源数据融合下的江苏省风能资源评估[D]. 南京: 南京大学, 2016: 1-94.
- DUAN Y W. Combining meteorological stations and satellite data to evaluate the wind power resource of Jiangsu[D]. Nanjing: Nanjing University, 2016: 1-94.
- [26] IEC. IEC 61400-12-1 Wind energy generation systems-Part 12-1: power performance measurements of electricity producing wind turbines[S]. Geneva: IEC, 2017.
- [27] 陈鹤, 周顺武, 熊安元, 等. 河北省风能详查区风速日变化特征[J]. *干旱气象*, 2011, 29(3): 343-349.
- CHEN H, ZHOU S W, XIONG A Y, et al. Analysis on diurnal variation of wind velocity in Hebei province[J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2011, 29(3): 343-349.

Analysis of the spatial and temporal distribution characteristics of wind energy resources in offshore China

WANG Jian, LI Xiang, HAN Xue, ZHANG Yunfei, WANG Chenqi

(Key Laboratory of Marine Hazards Forecasting, National Marine Environmental Forecasting Center, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China)

Abstract: Based on the ERA5 reanalysis data of the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), the spatial and temporal variation characteristics of the wind energy resources in offshore China from 1979 to 2018 are analyzed. The results show that the areas rich in wind energy are located in the offshore regions along the Fujian Province, the Zhejiang Province and the Guangdong Province. The interannual oscillation of the wind energy in offshore China is significant. Wind energy is more abundant in autumn and winter than that in spring and summer with the highest value in December and the lowest value in May. The average wind power density reveals diurnal variation in most of China's offshore waters, which is larger at night than that during the day. It reaches the minimum and maximum value around 14:00 and 00:00, respectively, in the northern Bohai Sea and northern Yellow Sea.

Key words: wind energy resources; wind power density; diurnal variation