

Doi: 10.11840/j.issn.1001-6392.2022.03.009

基于 ERA5 再分析资料的中国近海浅水区域 风能潜力评估

郭鑫¹, 韩震^{1,2}, 廖廓³

(1. 上海海洋大学 海洋科学学院, 上海 201306; 2. 上海河口海洋测绘工程技术研究中心, 上海 201306;
3. 福建省气象科学研究所, 福建 福州 350001)

摘要: 风能潜力评估是风电场选址工作的基础。本文基于欧洲中期天气预报中心的 ERA5 再分析数据, 采用风功率密度 (Wind Power Density, WPD) 中值、容量系数 (Capacity Factor, CF) 以及鲁棒性变异系数 (Robust Coefficient of Variation, RCoV) 三种指标, 对中国近海浅水区域的风能潜力进行评估。研究结果表明: (1) 台湾海峡和东海南部风能资源最为丰富并且风能利用率最高, 风功率密度中值和容量系数分别为 400~900 W/m² 和 0.45~0.7。总体来看, 风功率密度中值从渤海到台湾海峡呈逐渐增加的趋势, 从台湾海峡到琼州湾呈逐渐减小的趋势, 容量系数大小分布情况相似。(2) 鲁棒性变异系数大小无明显分布规律, 广东湛江近岸海域鲁棒性变异系数在 0.70~0.75 之间, 风能发电量最为稳定, 但该地区的风能资源丰富程度较低。(3) 福州近岸海域不仅有丰富的风能资源和风能利用率, 且发电量较为稳定, 在不考虑其他因素的影响下, 是中国近海浅水区域建设海上风电场的最佳地点。

关键词: 海上风电场; 中国近海浅水区; ERA5 再分析资料; 风功率密度; 容量系数; 变异系数

中图分类号: P741; P425.6+3

文献标识码: A

文章编号: 1001-6932(2022)03-0325-11

Assessment of wind energy potential in shallow water offshore China based on ERA5 reanalysis data

GUO Xin¹, HAN Zhen^{1,2}, LIAO Kuo³

(1. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. Shanghai Engineering Research Center of Estuarine and Oceanographic Mapping, Shanghai 201306, China;

3. Fujian Institute of Meteorological Sciences, Fuzhou 350001, China)

Abstract: Wind energy potential assessment is the basis of wind farm site selection. Based on ERA5 reanalysis data from the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), the median wind power density (WPD), the capacity factor (CF) and robust coefficient of variation (RCOV) are used to evaluate the wind energy potential of China's offshore shallow water area. The results showed that: (1) The Taiwan Strait and the south of Donghai Sea have the most abundant wind energy resources and the highest wind energy utilization rate. The median wind power density and capacity coefficient are 400~900 W/m² and 0.45~0.7, respectively. In general, the median wind power density increases gradually from Bohai Sea to Taiwan Strait, and decreases gradually from Taiwan Strait to Qiongzhou Bay. The distribution of capacity coefficient is similar. (2) There is no obvious distribution rule of the robustness coefficient of variation. The robustness coefficient of variation in Zhanjiang coastal area of Guangdong Province is between 0.70 and 0.75, and the wind energy generation is the most stable, but the abundance of wind energy in this area is low. (3) The offshore area of Fuzhou not only have abundant wind energy resources and wind energy utilization rate, but also have stable power generation. Without considering the influence of other

收稿日期: 2021-07-21; 修订日期: 2021-10-22

资助项目: 上海市科委科研计划项目 (18DZ2253900)

作者简介: 郭鑫 (1995—), 硕士研究生, 主要从事海洋遥感方面研究。电子邮箱: gxocean2019@163.com

通讯作者: 韩震, 博士, 教授, 主要从事海洋信息探测方面研究。电子邮箱: zhhan@shou.edu.cn

<http://hytb.ijournals.cn>

factors, it is the best place for the construction of offshore wind farms in China's offshore shallow water area.

Keywords: offshore wind farms; China's offshore shallow water area; ERA5 reanalysis data; wind power density; capacity coefficient; coefficient of variation

随着化石燃料的不断消耗和环境问题的日益加剧,越来越多的国家认识到温室气体减排的重要性和紧迫性。中国力争 2030 年前二氧化碳排放达到峰值,2060 年前实现碳中和。实现单位国内生产总值二氧化碳排放下降有两种途径,一是减少二氧化碳的排放,即节能减排,二是提高二氧化碳的吸收容量,即增加碳汇^[1]。能源生产贡献了全球 1/2 以上的温室气体排放,对于节能减排,“去碳化”成为能源行业的主要发展方向,在“双碳”目标下,中国能源系统将继续加快向风能、太阳能和地热能等清洁能源的转型^[2]。

海上风能具有安全、无污染、储量大和分布广等优点,并且不占用土地资源,使其成为一种极具吸引力的潜在资源^[3]。欧洲是海上风能工业的诞生地,自 1991 年丹麦安装世界上第一台海上风力涡轮机以来,欧洲在海上风能发电的技术创新方面一直处于领先地位。中国海上风能发电起步较晚,但随着近 10 年的发展,已成为全球最大的海上风能市场之一。根据全球风能协会(Global Wind Energy Council, GWEC) 2020 年全球海上风能报告,中国海上风能装机容量位列全球第三(仅次于英国和德国),并在 2019 年创下一年内安装 2.4 GW 的海上风能纪录,位居全球第一。

风能资源的分布具有较强的区域和季节性差异。为了实现海上风能资源的有序、高效开发,需要事先对其进行明确的评估与规划。相比于陆上风能资源评估,海上风能资源评估受到海洋观测数据短缺的影响,早期只能利用气象站点、浮标和船舶等数据来进行小规模沿海海域的风能评估^[4-6]。随着海洋测量方法的进步,卫星数据已被广泛应用于海洋资源的评估中^[7-11]。与传统的地面观测相比,卫星数据可以覆盖更广泛的空间范围,从而降低了风能资源的评估成本,并提高了风能资源的评估效率。但由于卫星和轨道数量限制,也存在时间分辨率低、时序长短不一致等问题。此外,卫星只能观测到固定高度的海面风场信息。

大气再分析资料通过先进的全球资料同化系统对各种来源(地面、船舶、无线电探空、测风气

球、飞机、卫星等)的观测资料进行质量控制和同化处理得到,具有时间周期长(多在 40 a 以上)、连续性好、空间范围广和时空分辨率高等优点,适合对区域风能资源的长期变化进行研究。大气再分析资料已应用于不同国家的海上风能评估^[12-14]。Cheng 等使用 NCEP CFSR 再分析资料对中国近海风能资源进行评估^[15]。孙稚权等使用 ERA-interim 再分析资料对不同高度和水深条件下的中国近海风能资源的时空分布特征进行了分析研究^[16]。

欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium Range Weather Forecasts, ECMWF)于 2016 年发布了第五代大气再分析资料(ECMWF fifth-generation global atmospheric reanalysis, ERA5)。研究表明,与其他几种先进的再分析资料(ERA-Interim、JRA55、MERRA2、R1)相比,ERA5 的 100 m 高空风速数据集提供了在风力发电机涡轮轮毂高度上平均风速和变异性的最佳估计^[17]。Olason 也对 MERRA2 和 ERA5 再分析资料进行了对比,研究结果表明 ERA5 每小时数据的分布和变化与实测值更接近^[18]。Soares 等基于 ERA5 再分析资料 100 m 高空风速数据集,在年度和季节尺度上对专属经济区(exclusive economic zone, EEZ)内的全球海上风功率密度进行了定量描述^[19]。Soukissian 等基于 ERA5 再分析资料分析了地中海海上风能和太阳能资源分布及其变化^[20]。然而,目前使用 ERA5 再分析资料对中国近海风能资源评估的相关研究较少。鉴于 ERA5 再分析资料在风资源评估中的良好表现,本文利用 ERA5 再分析资料的 100 m 高空风速数据集,基于风功率密度中值、风机容量系数以及稳健变异系数对中国近海浅水区域的风能潜力进行综合评估。

1 研究区域与数据

1.1 ERA5 再分析数据

ERA5 是欧洲中期天气预报中心推出的第五代全球大气再分析资料,可以从哥白尼气候变化服务(C3S)气候数据中心下载(<https://cds.climate>。

copernicus.eu)。与上一代 ERA-Interim 产品相比, ERA5 采用最新版本的 ECMWF 综合预报系统模型 (IFS 41r2), 并对数据同化和模型参数化方案进行了改进, 时间输出提升至 1 h, 水平和垂直分辨率分别提升至 31 km 和 137 层^[21]。现代风力涡轮机的高度在 80~120 m 之间, 为应对风力发电行业的需求, ERA5 提供了离海平面 100 m 高空风速数据集。使用该数据集对中国近海浅水区域的风能潜力进行评估, 时间跨度为 2011 年 1 月至 2020 年 12

月, 经纬度范围为 3°N—42°N、105°E—132°E, 时间和空间分辨率分别为 1 h 和 0.25°。

1.2 浮标数据

为对 ERA5 风速数据进行质量检验, 使用了中国近海 3 个站点的浮标观测数据。站点所在经纬度、观测数据所在时间段、观测时间间隔以及观测高度见表 1。3 个浮标的观测高度为 3 m 或 10 m, 而本文所使用的 ERA5 风速在离海平面 100 m 高度处, 通过风速与高度的对数关系, 将浮标观测风速

表 1 中国近海浮标参数

浮标编号	站名	经纬度	测风高度/m	观测时间	观测间隔/h
0087	厦门气象	23.63°N, 118.20°E	10	2018-11—2018-12	1
0129	海峡 1 号	26.17°N, 122.50°E	10	2018-11—2018-12	1
8203	平潭	25.47°N, 119.86°E	3	2018-07—2018-12	1

订正到与 ERA5 风速同一高度, 其公式如下^[19]:

$$v = v_{\text{bouy}} \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_{\text{bouy}}}{z_0}\right)} \quad (1)$$

式中: z_0 为海表面粗糙度, 在大气条件为中性稳定时, z_0 为 0.0002 m; z 为所要转换到的高度; z_{bouy} 为浮标观测风速的高度; v_{bouy} 为浮标观测风速; v 为转换到目标高度时的风速。

1.3 水深数据

水深是影响风电场选址的重要因素, 目前大部分

海上风电场建设在浅水区域 (水深不超过 60 m), 考虑到成本和技术问题, 本文只针对中国近海浅水区域进行风能潜力评估。为确定中国近海水深大小的分布情况, 使用了 GEBCO (General Bathymetric Chart of the Oceans) 的网格化水深数据集 (<https://www.gebco.net/>), 其在 15 弧秒间隔的网格上提供了以米为单位的高程数据。结果显示, 中国海域的浅水区域主要集中在近岸海域 (图 1(a))。为方便对研究区域进行描述, 参照中央气象台对中国近海海区的划分^[22], 将研究区域划分为 18 个海区 (图 1(b))。

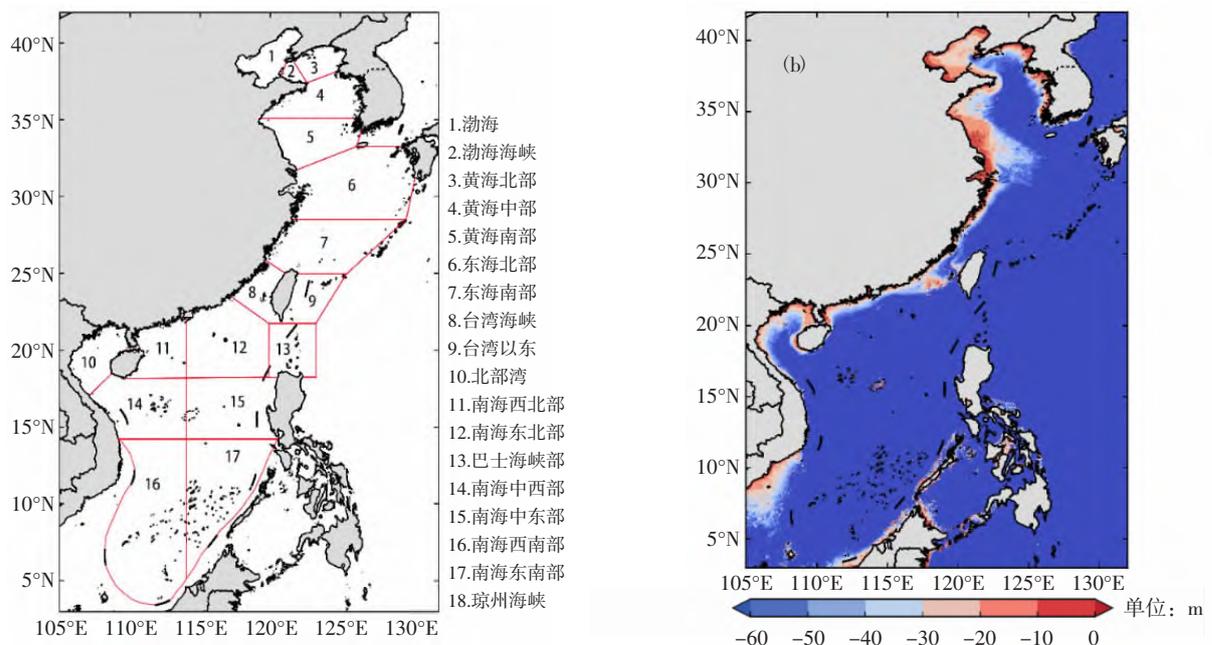


图 1 中国近海水深 (a) 与海区划分 (b) 示意图

2 ERA5 风速精度检验

在使用 ERA5 风速进行风能潜力评估前，需要对 ERA5 的风速精度进行检验。假设浮标风速为真实风速，为评估 ERA5 风速精度，首先对 ERA5 数据与浮标数据进行时空匹配。在空间上，利用离观测站点经纬度最近的 4 个网格点，使用反距离权重法对 ERA5 风速进行插值；在时间上，由于 ERA5 风速与浮标风速的分辨率相同，都为 1 h，因此不需要进行插值。完成 ERA5 风速与浮标风速在时间与空间上的匹配后，0087 号站点一共获得 1346 组数据，0129 号站点一共获得 1355 组数据，8203 号站点一共获得 972 组数据。本文采用平均绝对值误差 (MAE)、均方根误差 (RMSE) 和相关性系数 (R) 对 ERA5 风速与浮标风速之间的误差进行统计分析，其具体公式如下：

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_1^N (y_i' - y_i)^2} \quad (2)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_1^N |y_i' - y_i| \quad (3)$$

$$R = \frac{\sum_1^N (y_i' - \bar{y}_i') (y_i - \bar{y}_i)}{\sqrt{\sum_1^N (y_i' - \bar{y}_i')^2 \sum_1^N (y_i - \bar{y}_i)^2}} \quad (4)$$

式中： N 为样本量， y_i' 为第 i 时刻 ERA5 风速， y_i 为第 i 时刻浮标风速， \bar{y}_i' 为 ERA5 风速的平均值， \bar{y}_i 为浮标风速的平均值。

表 2 为 ERA5 风速与浮标风速误差的统计指标，图 2 为 ERA5 风速与不同站点浮标风速之间的回归线与散点图。

表 2 ERA5 风速与浮标风速数据误差统计特征值

浮标编号	MAE/(m·s ⁻¹)	RMSE/(m·s ⁻¹)	R	数据量
0087	1.066	1.350	0.966	1346
0129	1.019	1.334	0.929	1355
8203	1.164	1.492	0.926	972

3 评估指标

3.1 风功率密度中值

风功率密度是指与风向垂直的单位面积中风所具有的功率，由于风功率密度独立于风力涡轮机的

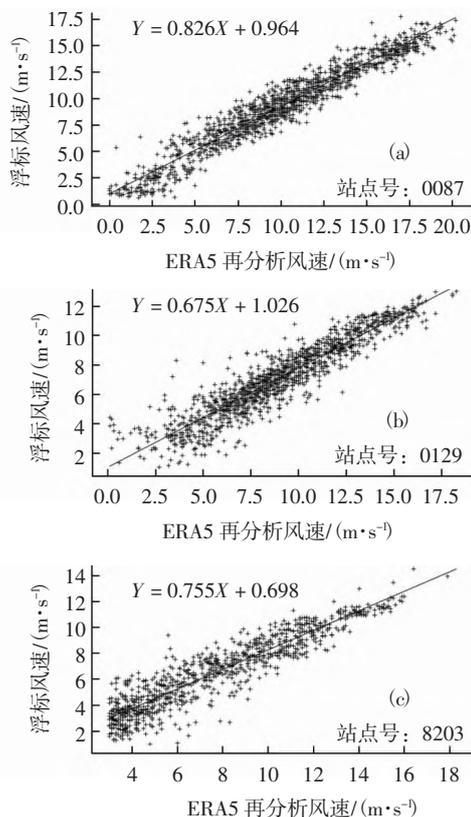


图 2 ERA5 风速与不同站点浮标风速之间的回归线与散点图

特性，其大小是风能资源丰富程度最直接的体现，可以通过计算给定时间范围内的风功率密度的集中趋势，来反映当地风能资源的丰富程度。在以往的研究中，平均风功率密度是风能资源评估中最常用的指标之一，其表达式为^[23]：

$$\bar{P} = \frac{1}{2n} \rho \sum_{i=1}^n v_i^3 \quad (5)$$

式中： \bar{P} 表示平均风功率密度 (W/m²)， v_i 表示第 i 小时风速 (m/s)， n 为给定时间范围内的小时数， ρ 为空气密度 (kg/m³)，根据国际大气标准，海平面 100 m 高空处 $\rho \approx 1.213 \text{ kg/m}^3$ 。

然而，使用均值去代表风功率密度的集中趋势可能存在一些问题。图 3 为中国近海浅水区域某一位置上的风功率密度直方图，横坐标代表风功率密度，纵坐标代表落入某一风功率密度区间的时刻数或数据量。从图中可以看出中国近海浅水区域的风功率密度随时间的分布状态非常倾斜，这种分布被称为长尾分布，在风功率密度中属于普遍现象，其极值会导致均值偏离实际分布中心。已有研究表明，风功率密度的中值几乎是均值的一半，意味着至少在 50% 的时间内，风功率密度小于平均风功

率密度的一半^[24]。图 4 为中国近海浅水区域风功率密度的中值与均值之比的核密度估计。核密度估计是非参数估计中的一种，相较于参数估计，它不加入任何先验知识，而是根据数据本身的特点、性质来拟合分布。可以看出，该分布近似于正态分布，大部分地区的风功率密度中值是均值的 20%~70%，换言之，中国近海浅水区域绝大部分的地区至少有 50% 的时间，风功率密度小于平均风功率密度的 30%~80%。使用平均风功率密度能够很好地代表某一地区风功率密度的平均状态，但对风功率密度的集中趋势的估计存在一定偏差。相比之下，中值可能是度量集中趋势更可靠的指标，对于任何分布，50% 的值高于中值，50% 的值低于中值，不易受到数据的极端数值影响，通过对不同时刻的风功率密度由小到大进行排序，得到风功率密度序列 P_1, P_2, \dots, P_n ($P_1 < P_2 < \dots < P_n$)，风功率密度中值为^[25]：

$$P_{0.5} = \begin{cases} P_{\frac{n}{2}+1} & n \text{ 为奇数} \\ \frac{P_{\frac{n}{2}} + P_{\frac{(n+1)}{2}}}{2} & n \text{ 为偶数} \end{cases} \quad (6)$$

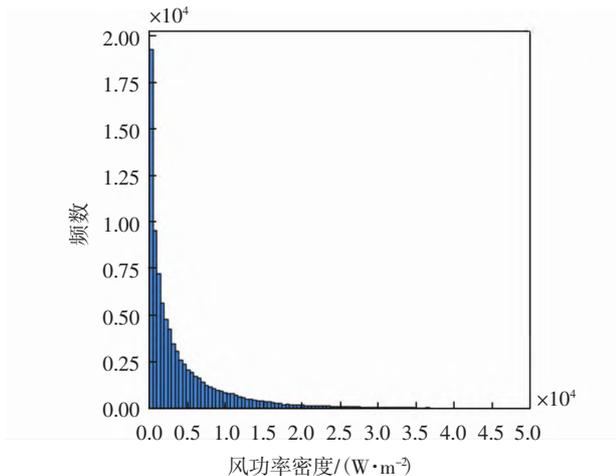


图 3 中国近海示例网格点上 (39°N, 120.75°E) 风功率密度直方图

3.2 容量系数

容量系数为给定时间范围内风力发电机实际输出能量与按额定功率运行时输出能量的比值，是反映风力发电能力的重要参数之一，在对风电场进行选址时，要求风机具有较高的容量系数，容量系数越高，其风能的利用率也越高。计算容量系数必须知道风力涡轮机对应的功率曲线，功率曲线描述了风速与涡轮机输出功率之间的关系，它与叶片的半

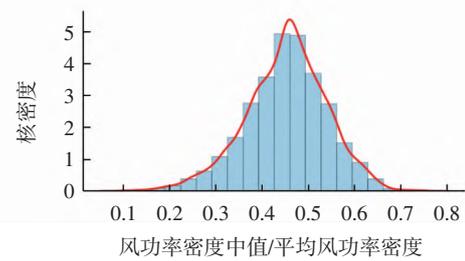


图 4 风功率密度中值与均值之比的核密度图

径（扫过的面积）、桨叶节距角和叶尖速比等因素有关^[26]，因此不同型号的风机可能存在不同的功率曲线。

为方便计算，本文使用典型风机功率曲线^[27-28]。风机以切入速度 v_c (3 m/s) 开始运行，输出功率随风速三次方增加，直到风速达到额定速度 v_r (11 m/s)，此时风机开始以额定功率运行，当风速超过切断速度 v_f (25 m/s) 时，停止转动以防止风机损坏（图 5）。典型风功率曲线表达式如下^[28]：

$$P(v) = P_r \begin{cases} 0 & v < v_c \\ \frac{v^3 - v_c^3}{v_r^3 - v_c^3} & v_c \leq v \leq v_r \\ 1 & v_r \leq v \leq v_f \\ 0 & v > v_f \end{cases} \quad (7)$$

式中： $P(v)$ 为给定风速下风力涡轮机的输出功率， P_r 为风力涡轮机的额定功率，将风速序列带入上式中，累加给定时间范围内的输出功率，得到风力涡轮机的实际输出功率：

$$E_c = \sum_{i=1}^N P(v_i) \Delta t_i \quad (8)$$

式中： E_c 为给定时间范围内风力涡轮机的实际输出功率， $P(v_i)$ 为风力涡轮机第 i 小时输出功率， $i=1, 2, 3, \dots, N$ ， N 为时间序列长度， Δt_i 为时间分辨率（1 h）， $N = \sum_{i=1}^N \Delta t_i$ 。风力发电机在给定时间范围内以额定功率 P_r 运行的能量 E_R 为 NP_r ，通过容量系数 C_f 的定义可得：

$$C_f = \frac{E_c}{E_R} = \frac{\sum_{i=1}^N P(v) \Delta t_i}{NP_r} \quad (9)$$

由公式(7)、(8)和(9)可以看出，容量系数不仅与风机自身的参数有关，还与风机所在位置的风速大小和随时间的分布状态有关，而风速大小和随时间的分布状态决定了该位置的风能大小和稳定性，因此容量系数除了对风能的利用率进行

评估外,还隐含了风能的丰富度和稳定性等信息,对评估某地区是否适合建设风电场具有很好的参考价值。

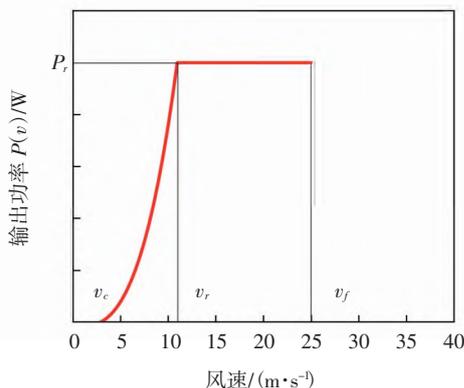


图5 典型风机功率曲线

3.3 鲁棒性变异系数

稳定的风能输入有利于风力涡轮机的有效运转,因此在评估风能潜力时需要了解给定时间范围内风功率密度大小在不同时刻的离散程度,通常采用变异系数(标准差与平均值之比)去度量。然而,由于标准差或平均值都不具有鲁棒性^[20],对异常值的存在或对长尾分布(如风功率密度)很敏感,存在变异系数被高估的问题。

本文使用一种基于中值绝对偏差(Median Absolute Deviation, MAD)的鲁棒性变异系数(Robustness Coefficient of Variation, RCoV)对风功率密度的变异性进行评估。中值绝对偏差给出了各数据偏离中值的距离中值,即在所研究的时间范围内,分别用第一个时刻的风功率密度、第二个时刻的风功率密度、……、最后一个时刻的风功率密度减去所有时刻风功率密度的中值,得到一个时间序列数据,然后对这个时间序列数据取绝对值,最后取这个时间序列数据的中值。

鲁棒性变异系数不同于普通变异系数(标准差与平均值之比),分子由中值绝对偏差代替了标准差,分母由中值代替了平均值,从而避免了上述所说的标准差或平均值受极端值和长尾分布的影响。鲁棒性变异系数的表达式为^[29]:

$$RCoV = \frac{MAD}{P_{0.5}} \quad (10)$$

$$MAD = med(|p_i - P_{0.5}|) \quad (11)$$

式中:RCoV为鲁棒性变异系数,MAD为中值绝对偏差, p_i 为第*i*时刻的风功率密度大小, $i=1, 2,$

$3, \dots, N$, N 为时间序列长度, $P_{0.5}$ 为风功率密度中值, $|\cdot|$ 为绝对值运算符, $med(\cdot)$ 表示中值运算符。Lee等^[30]使用27种不同方法对风速的变异性进行评估后,强烈建议在风能评估研究中使用RCoV,RCoV已用于美国风力发电密度的变化评估^[24]。

4 结果分析与讨论

4.1 不同指标的大小分布情况

使用三次样条插值将ERA5离海平面100 m高空风速数据和水深数据插值到 0.01° 的网格上进行空间匹配,然后对水深大于60 m的数据进行剔除,最后计算得到中国近海浅水区域2011—2020年海平面100 m高度处的风功率密度中值 $P_{0.5}$ 、容量系数 C_f 和鲁棒性变异系数RCoV。结果显示:

(1) 渤海、渤海海峡以及黄海北部, $P_{0.5}$ 多在100~300 W/m²之间,其中渤海北部存在高值中心,为250~300 W/m²。黄海中部至东海北部, $P_{0.5}$ 多在150~300 W/m²之间,由西北向东南呈梯度增加,青岛及其附近近岸海域 $P_{0.5}$ 较低,在100~150 W/m²之间。中国近海浅水区域 $P_{0.5}$ 最大的地区在东南南部和台湾海峡,为300~900 W/m²,且变化梯度较大,其中台湾海峡存在高值中心,在850~900 W/m²之间,这是由于台湾海峡的走向与季风一致,“狭管效应”会使得风速急剧增加,从而导致风功率密度较大^[31]。南海西北和东北部, $P_{0.5}$ 多在200~450 W/m²之间。北部湾 $P_{0.5}$ 多在100~350 W/m²之间,呈现出随着离岸距离增加而增加的趋势。总体来看,风功率密度中值从渤海到台湾海峡,呈逐渐增加的趋势,从台湾海峡到琼州湾,呈逐渐减小的趋势(图6(a))。

(2) 渤海、渤海海峡以及黄海北部, C_f 多在0.25~0.45之间,其中渤海北部存在高值中心,为0.4~0.45。黄海中部至东海北部, C_f 多在0.3~0.5之间,由西北向东南呈梯度增加。东海南部和台湾海峡, C_f 多在0.45~0.7之间,并在台湾海峡存在高值中心,为0.65~0.7,是中国近海浅水区域 C_f 最高的地区。南海东北和西北部, C_f 多在0.35~0.55之间,北部湾 C_f 多在0.25~0.5之间,前后两者都呈现出随着离岸距离增加而增加的趋势。总体来看,容量系数大小的分布情况与风功率密度中值基本一致(图6(b))。

(3) 渤海、渤海海峡以及黄海北部, $RCoV$ 在 0.80~0.95 之间, 其中渤海北部存在高值中心, 为 0.90~0.95, 渤海西部近岸海域较低, 为 0.80~0.85。黄海中部至东海北部, $RCoV$ 多在 0.80~0.90 之间, 而上海和杭州近岸海域较低, 为 0.75~0.80。东海南部和台湾海峡, $RCoV$ 在 0.75~1.00 之间, 存在 2 个高值中心和 1 个低值中心, 分别位于浙江温州近岸海域 (0.90~0.95)、台湾西部近岸海域 (0.95~1.00) 和福建福州近岸海域 (0.75~0.80)。南海东北和西

北部, $RCoV$ 在 0.70~0.90 之间, 由东北向西南呈逐渐减小的趋势, 在广东湛江近岸海域最低达到 0.70~0.75。北部湾的 $RCoV$ 在 0.80~1.00 之间, 由东向西呈现出逐渐增大的趋势, 且在海南西部近岸海域存在高值中心为 0.95~1.00。总体来看, 中国近海浅水区域的鲁棒性变异系数大小分布规律并不明显, 存在多个高值中心和低值中心, 其最小值区间位于广东湛江近岸海域, 最大值区间位于台湾海峡和海南西部沿岸海域 (图 6(c))。

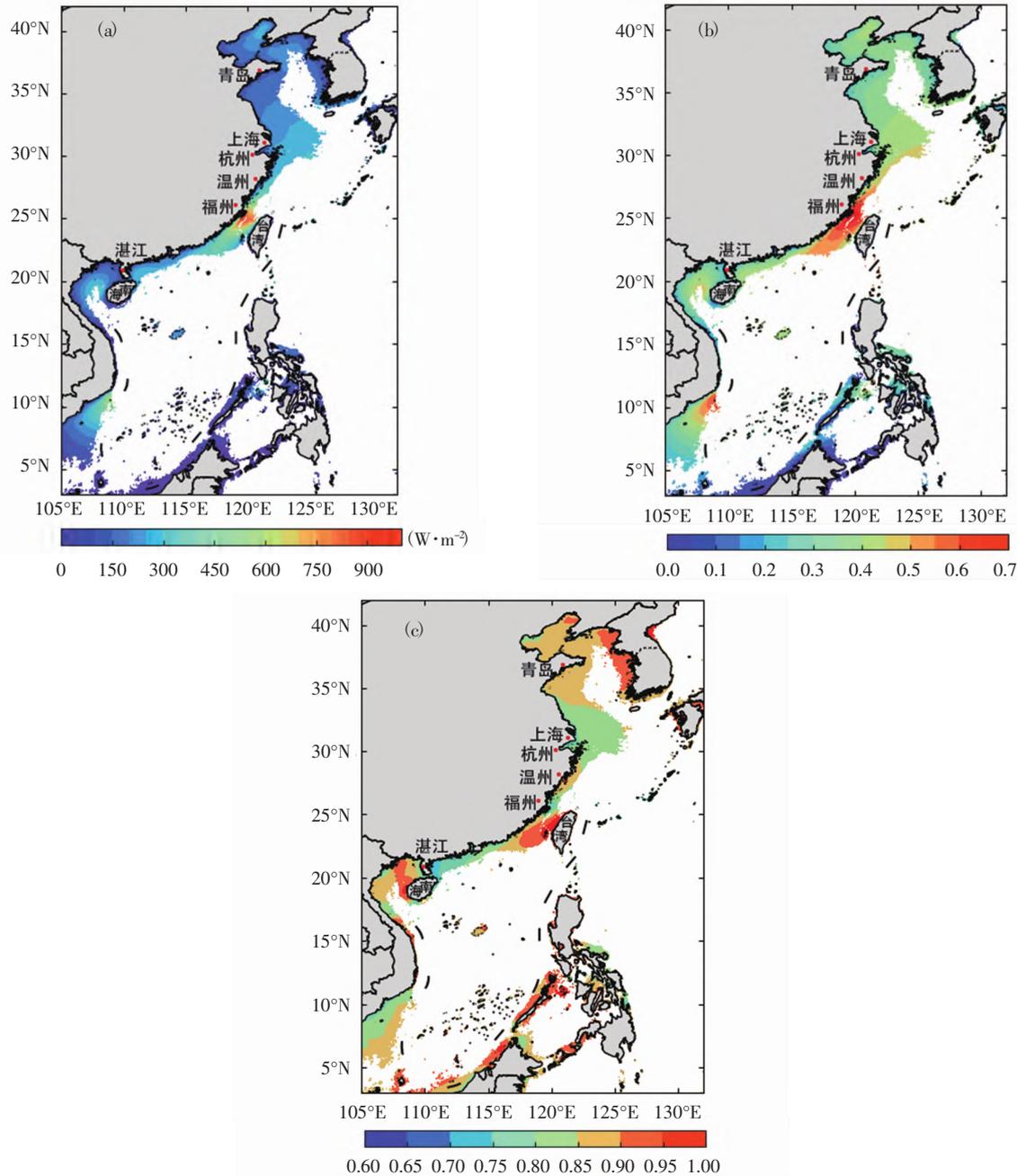


图 6 中国近海浅水区域 (a) 风功率密度中值、(b) 容量系数、(c) 鲁棒性变异系数大小分布情况

4.2 风能潜力分布情况

为寻找适合的海上风电场 (Offshore wind farm, OWF) 建设地点, 基于上述评估指标, 通过计算海上风能的期望值, 对中国近海浅水区域的风能潜力进行综合性评估。期望值由不同指标乘以对应的权重系数相加得到, 具体公式如下^[32]:

$$E = a_1 P_{0.5} + a_2 CF + a_3 (1 - RCoV) \quad (12)$$

式中: E 为风能期望值, a_1 、 a_2 、 a_3 分别为风功率密度中值、容量系数以及鲁棒性变异系数的权重系数, 根据 Zheng 等^[32] 提出的风能分类中重要因素的权重系数, $a_1 = 0.4$ 、 $a_2 = 0.4$ 、 $a_3 = 0.2$ 。与风功率密度中值和容量系数不同, 鲁棒性变异系数较低时其发电量更稳定, 可能更适合 OWF 的开发, 所以其值越小越好, 故将 $(1 - RCoV)$ 与其对应的权重系数相乘, 使期望值越大代表越适合海上 OWF 建设。

容量系数和鲁棒性变异系数的取值范围在 0~1 之间, 而风功率密度中值与容量系数和鲁棒性变异系的大小不在一个数量级, 在运用公式 (12) 之前, 需要对风功率密度中值进行归一化处理。归一化公式为:

$$p_{scale} = \frac{p_{0.5}^i - p_{0.5}^{\min}}{p_{0.5}^{\max} - p_{0.5}^{\min}} \quad (13)$$

式中: $p_{0.5}^i$ 为第 i 时刻的风功率密度中值; $p_{0.5}^{\min}$ 为研究时间范围内风功率密度中值最小值; $p_{0.5}^{\max}$ 为研究时间范围内风功率密度中值最大值, p_{scale} 为归一化后的风功率密度中值。

通过中国近海浅水区域风能期望值的分布情况 (图 7) 可以看出: 从渤海到东海北部, 期望值在 0.3~0.7 之间; 东海南部到南海西北部, 期望值在 0.4~1.00 之间; 北部湾期望值在 0.3~0.5 之间。期望值超过 0.5 的区域主要集中在浙江、福建以及部分广东近岸海域, 其高值中心位于福建福州近岸海域, 达到了 0.90 以上 (图 8(d))。

综合 3 种指标的表现来看, 福建福州近岸海域的风功率密度中值和容量系数较高, 同时鲁棒性变异系数较小 (图 8 (a)—(c)), 风能资源丰富程度较高的同时发电量具有较高的稳定性。广东湛江近岸海域的风能期望值也较高, 其发电量在中国近海浅水区域最为稳定, 即 $RCoV$ 最小, 但由于该地区的风能资源丰富程度较低, 导致风能期望值在 0.5~0.6 之间, 低于福建福州近岸海域。

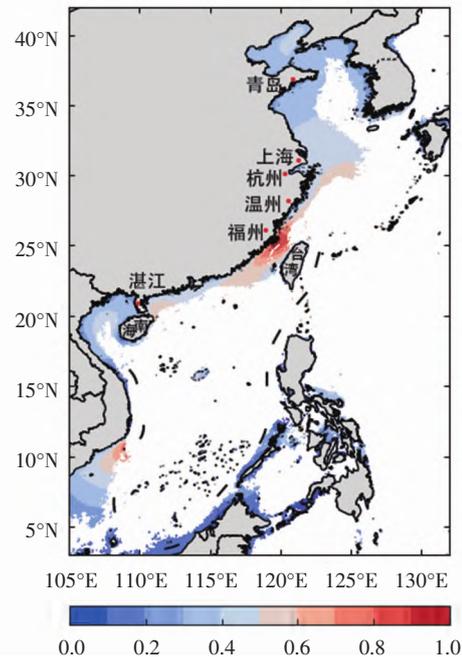


图 7 中国近海浅水区域风能潜力期望分布情况

4.3 讨论

目前人们对中国近海浅水区域风能资源评估已经做了大量的工作, 通常采用平均风功率密度来衡量当地风资源的丰富程度。以往研究表明, 福建、浙江以及广东近岸海域的风能较为丰富, 最为丰富的地区为台湾海峡, 渤海、黄海以及北部湾相对而言风能资源较小^[16,31]。本文使用了更能代表风功率密度集中趋势的风功率密度中值来分析风能资源大小的分布情况, 与之前研究相比, 得到的风能大小分布情况基本一致。但由风功率密度中值普遍低于均值可以看出, 平均风功率密度受极端值影响表现为对风功率密度大小集中趋势的高估。此外, 在前人对中国近海风资源的研究过程中, 往往仅对风资源的大小进行评估, 即统计风速或风功率密度大小的分布情况, 本文为了更加全面地评估中国近海浅水区域的风能开发潜力, 从风能的丰富程度、稳定性和利用率不同角度出发, 使用风能的期望值来判断一个地方的风能潜力大小。风能期望通过考虑不同要素和所占权重计算得到, 对于风能资源丰富程度较高的地方, 如果稳定性不好或利用率不高, 风能的期望值可能依旧不高。通过考虑更多的要素, 风能期望值可为风电场的选址工作提供更加合理的参考。

风资源潜力评估指标是通过大气环境中的风速计算得到的。一方面, 不同区域风速的时空分辨率

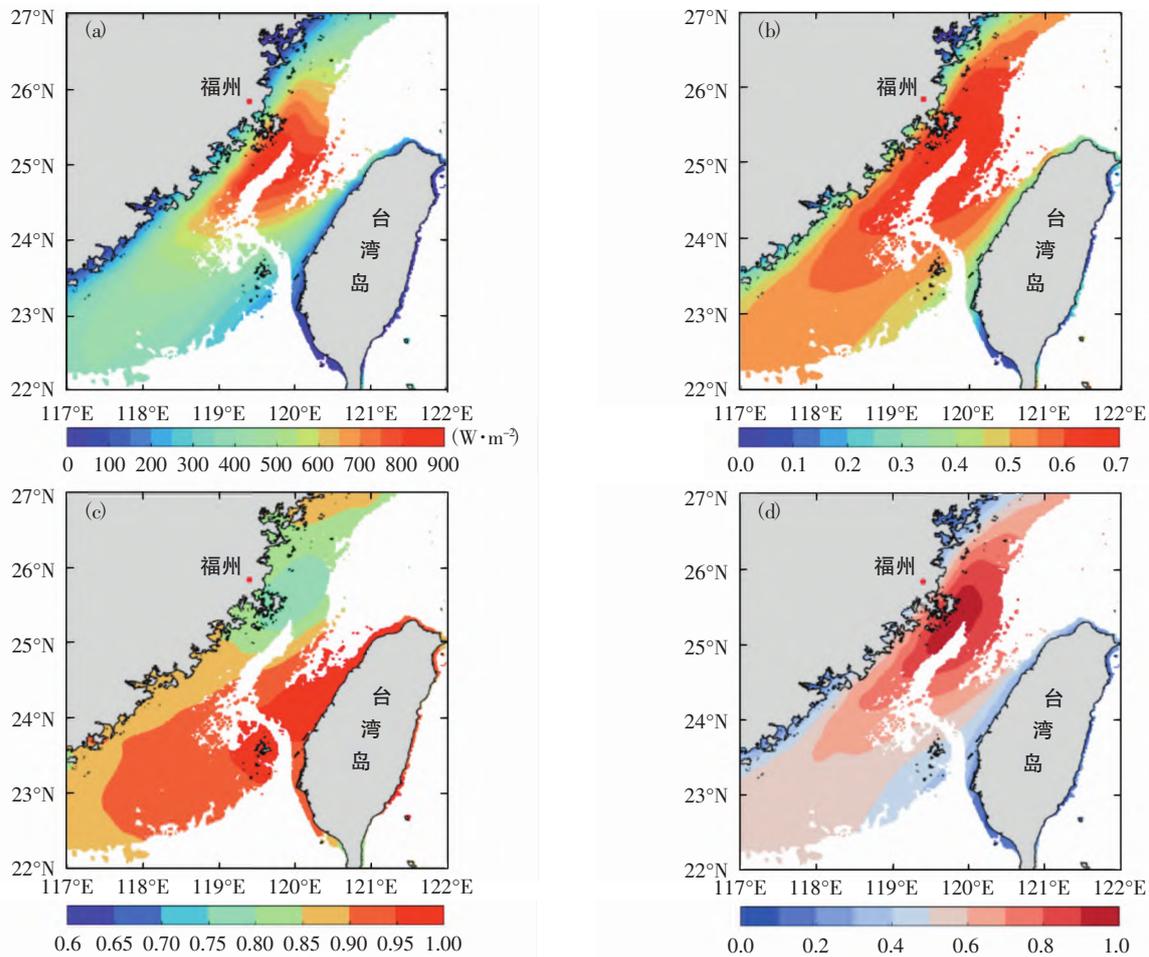


图 8 台湾海峡及其附近 (22°N—27°N, 117°E—122°E) (a) 风功率密度中值、(b) 容量系数、(c) 鲁棒性变异系数及 (d) 期望值大小分布情况

存在差异，但是其表达形式不受评估数据种类的影响，同一类型指标大小具有相同的数量级。例如：Gunturu 等^[24]通过 MERRA 大气再分析风速得到了美国近岸海域的风功率密度中值分布情况，为 100~500 W/m²，约为平均风功率密度的 1/2，鲁棒性变异系数为 0.74~0.86；Dupont 等^[28]使用 ERA-Interim 大气再分析风速对全球海平面 100 m 高空处的风能容量系数进行了统计，全球绝大部分地区在 0.15~0.70 之间，其中中国近岸海域在 0.30~0.50 之间，与本文结果相似。

另一方面，评估指标结果的准确性与风速精度密切相关。Ramon 等^[17]利用分布在全球各地的 77 座风速塔的现场观测数据与 ERA5 数据进行了对比，评估了 ERA5 再分析数据描述风速特性的不确定性。研究表明，在 100 m 高度处，ERA5 风速与实测风速的相关系数为 0.81，两者的季节气候学差异为 -2.5~2.75 m/s（冬季）和 -1.6~2.5 m/s

（夏季），年际变率差异约 -3.6%~5.7%（冬季）和 -3.8%~4.0%（夏季）。ASCAT 散射计与浮标的三重配置分析显示，散射计测量尺度上的全球随机 ASCAT 风分量误差约为 0.7 m/s^[33]。Rivas 等^[34]在全球尺度上对 ERA5 再分析资料的 10 m 应力等效风与 ASCAT 观测结果进行了对比，研究结果表明，前者在中纬度和赤道地区呈现过强的平均纬向风和过弱的平均经向风特征，平均纬向风和经向风的系统差异为 0.5 m/s，ERA5 的大规模平均风偏差与其缺乏高频瞬态风变化有关。本文利用中国近海浮标数据对 ERA5 风速进行了精度检验，该精度适用于中国近海区域。

5 结论

本文基于欧洲中期天气预报中心的 ERA5 再分析数据，分析了 2011—2020 年中国近海浅水区域

海平面 100 m 处的风功率密度中值、容量系数以及鲁棒性变异系数大小的分布情况,并基于上述指标计算风能期望值,来寻找适合的海上风电场建设地点。通过对结果的分析,得到了以下结论:

(1) 风能资源评估是海上风电场选址工作十分重要的环节,通常需要对当地风功率密度的集中趋势进行评估,以代表当地风能资源的大小。本文使用比平均风功率密度鲁棒性更好的风功率密度中值来代表风功率密度大小的集中趋势。虽然两者风能资源大小的分布情况大致相同,但使用平均风功率密度中值修正了平均风功率密度对风能大小集中趋势的过高估计。

(2) 除了对中国近海浅水区域的风资源丰富程度进行评估外,本文还使用了鲁棒性变异系数和容量系数对其风资源的稳定性和利用率进行了评估。相比于传统的变异系数,鲁棒性变异系数受极端值的影响更小;而容量系数除了评估当地风能的利用率大小外,也隐含了风能大小和稳定性等信息。

(3) 结合风功率密度中值、风机容量系数以及鲁棒性变异系数,得到了风能潜力的期望值大小分布情况,对中国近海海域浅水区域的风能潜力进行了更加精准和全面的评估。结果表明,福建福州近岸海域不仅有丰富的风能资源和较高的风能利用率,且发电量较为稳定。在不考虑其他因素的影响下是中国近海浅水区域最为合适的海上风电场建设地点。

中国海域辽阔,拥有巨大的海上风能开发潜力,在过去 10 年间,已有大量海上风电场投入建设。本文仅对中国近海浅水区域的风能潜力进行了评估,而随着技术的进步,特别是浮动式海上风电技术的成熟,海上风能发电将朝着更加深远的海域发展,在未来有必要对中国近海浅水区以外区域进行更加全面的风能潜力评估。

参 考 文 献

- [1] 刘芳明,刘大海,郭贞利. 海洋碳汇经济价值核算研究[J]. 海洋通报,2019,38(1):8-13.
- [2] 王海洋,荣健. 碳达峰、碳中和目标下中国核能发展路径分析[J]. 中国电力,2021,54(6):86-94.
- [3] SEMPREVIVA A M, BARTHELMIE R J, PRYOR S C. Review of methodologies for offshore wind resource assessment in European Seas[J]. *Surveys in Geophysics*, 2008, 29: 471-497.
- [4] YOUM I, SARR J, SALL M, et al. Analysis of wind data and wind energy potential along the northern coast of Senegal [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2005, 8: 95-108.
- [5] KUCUKALI S, DINÇKAL Ç. Wind energy resource assessment of Izmit in the West Black Sea coastal region of Turkey [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 30: 790-795.
- [6] GONZÁLEZ-LONGATT F, GONZÁLEZ J S, PAYÁN M B, et al. Wind-resource atlas of Venezuela based on on-site anemometry observation [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 39: 898-911.
- [7] HONG L X, MOELLER B. Offshore wind energy potential in China: Under technical, spatial and economic constraints[J]. *Energy*, 2011, 36: 4482-4491.
- [8] SOUKISSIAN T, KARATHANASI F, AXAOPOULOS P. Satellite-based offshore wind resource assessment in the Mediterranean Sea [J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2017, 42: 73-86.
- [9] KUMAR S V, NAGABABU G, SHARMA R, et al. Synergetic use of multiple scatterometers for offshore wind energy potential assessment[J]. *Ocean Engineering*, 2019, 196: 106745.
- [10] REMMERS T, CAWKWELL F, DESMOND C, et al. The potential of advanced scatterometer (ASCAT) 12.5 km coastal observations for offshore wind farm site selection in Irish Waters[J]. *Energies*, 2019, 12(2): 206.
- [11] YOUNG I R, KIREZCI E, RIBAL A. The global wind resource observed by scatterometer[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(18): 2920.
- [12] NAGABABU G, KACHHWAHA S S, NAIDU N K, et al. Application of reanalysis data to estimate offshore wind potential in EEZ of India based on marine ecosystem considerations [J]. *Energy*, 2017, 118: 622-631.
- [13] TAVARES L F A, SHADMAN M, ASSAD L P F, et al. Assessment of the offshore wind technical potential for the Brazilian Southeast and South regions[J]. *Energy*, 2020, 196: 360-371.
- [14] NEZHAD M M, NESHAT M, GROPPI D, et al. A primary offshore wind farm site assessment using reanalysis data: a case study for Samothraki Island[J]. *Renewable Energy*, 2021, 172: 667-679.
- [15] CHENG D H, XU Q J, YAO W F. Assessment of offshore wind resource in China using CFSR data[J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 1070: 303-308.
- [16] 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.
- [17] RAMON J, LLEDÓ L, TORRALBA V, et al. What global reanalysis best represents near-surface winds? [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2019, 145(724): 3236-3251.
- [18] OLAUSON J. ERA5: The new champion of wind power modelling? [J]. *Renewable Energy*, 2018, 126: 322-331.
- [19] SOARES P M M, LIMA D C A, NOGUEIRA M. Global offshore wind energy resources using the new ERA-5 reanalysis [J]. *Renewable Energy*, 2020, 15: 1040a2.
- [20] SOUKISSIAN T H, KARATHANASI F E, ZARAGKAS E K. Exploiting offshore wind and solar resources in the Mediterranean using ERA5 reanalysis data[J]. *Energy Conversion and Management*, 2021,

- 237:196–210.
- [21] HANS H, BILL B, PAUL B, et al. The ERA5 global reanalysis[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2008, 146(730):1999–2049.
- [22] 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.
- [23] 姜波, 赵世明, 徐辉奋, 等. 山东半岛沿海风能资源评估与分布研究[J]. 海洋技术, 2009, 28(4):101–103.
- [24] GUNTURU U B, SCHLOSSER C A. Characterization of wind power resource in the United States[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2012, 12:9687–9702.
- [25] HOZO S P, DJULBEGOVIC B, HOZO I. Estimating the mean and variance from the median, range, and the size of a sample[J]. BMC Medical Research Methodology, 2005, 5:13.
- [26] LYDIA M, SELVAKUMAR A I, KUMAR S S, et al. Advanced algorithms for wind turbine power curve modeling[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(3):827–835.
- [27] CHANG T P, LIU F J, KO H H, et al. Comparative analysis on power curve models of wind turbine generator in estimating capacity factor[J]. Energy, 2014, 73:88–95.
- [28] DUPONTA E, KOPPELAAR R, JEANMART H. Global available wind energy with physical and energy return on investment constraints[J]. Applied Energy, 2018, 209:322–338.
- [29] JURASZA J, CANALES F A, KIES A, et al. A review on the complementarity of renewable energy sources: Concept, metrics, application and future research directions[J]. Solar Energy, 2020, 195:703–724.
- [30] LEE J C Y, FIELDS M J, LUNDQUIST J K. Assessing variability of wind speed: comparison and validation of 27 methodologies[J]. Wind Energy Science, 2018, 3:845–868.
- [31] 许遐祯, 郭乔影, 李正泉, 等. 基于 ASCAT 风场数据的中国近海风能资源评估[J]. 气象科学, 2017, 37(6):816–824.
- [32] ZHENG C W, XIAO Z N, PENG Y H. Rezoning global offshore wind energy resources[J]. Renewable Energy, 2018, 129:1–11.
- [33] VOGELZANG J, STOFFELEN A, FIGA-SALDANA J. On the quality of high resolution scatterometer wind[J]. Journal of Geophysical Research, 2011, 116, C10033.
- [34] RIVAS M B, STOFFELEN A. Characterizing ERA-Interim and ERA5 surface wind biases using ASCAT[J]. Ocean Science, 2019, 15(3):831–852.

(本文编辑:王少朋)