



李昊星, 张双成, 刘梅姜, 等. 2026. 基于 CYGNSS 风速数据的海上风能资源评估. 地球物理学进展, 41 (1): 0083-0094, doi: 10. 6038/ pg2026JJ0028.

LI HaoXing, ZHANG ShuangCheng, LIU MeiJiang, et al. 2026. Offshore wind resource assessment based on CYGNSS wind speed data. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 41 (1): 0083-0094, doi: 10. 6038/ pg2026JJ0028.

基于 CYGNSS 风速数据的海上风能资源评估

Offshore wind resource assessment based on CYGNSS wind speed data

李昊星¹, 张双成^{1*}, 刘梅姜², 周昕¹, 刘宁¹, 陶铭硕¹, 洪卓众³

LI HaoXing¹, ZHANG ShuangCheng^{1*}, LIU MeiJiang², ZHOU Xin¹, LIU Ning¹, TAO MingShuo¹, HONG ZhuoZhong³

1. 长安大学地质工程与测绘学院, 西安 710054

2. 福建信息职业技术学院, 福州 350003

3. 厦门市海域使用动态监测中心, 厦门 361012

1. School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China

2. Fujian Polytechnic of Information Technology, Fuzhou 350003, China

3. Sea Area Use Dynamic Monitoring Center of Xiamen, Xiamen 361012, China

摘要 为拓展全球导航卫星系统反射测量技术 (Global Navigation Satellite System Reflectometry, GNSS-R) 在海洋监测领域的应用, 本文基于 2020 年至 2023 年的 CYGNSS 风速产品, 结合风速参考数据对 CYGNSS 风速产品的精度进行了系统评估, 并分析了中国热带及亚热带海域的风能资源分布特征。实验结果表明: CYGNSS 风速产品经海面粗糙度修正后, 外推风速精度提高约 47%, 与参考数据之间具有良好的匹配精度, 满足风能评估需求。在研究区域内, 东南海域风能资源较为丰富, 其中中国台湾海峡的年平均风功率密度最高, 达到 550 W/m^2 以上。南海南部风能资源较为匮乏, 年平均风功率密度低于 250 W/m^2 ; 各海区风功率密度具有显著的季节性差异, 东海海域在各个季节的风能资源分布较为稳定, 常年维持在 300 W/m^2 以上, 南海则存在较为剧烈的季相波动, 冬夏两季平均风功率密度差距较大; 就开发潜力而言, 黄海南部等海区在浅水海域风能蕴藏量及技术可开发量较高, 而南海东北部等海区在深水海域展现出巨大开发潜力。

关键词 全球导航卫星系统反射测量技术; 风速; 风功

Abstract To expand the application of Global Navigation Satellite System Reflectometry (GNSS-R) in the field of ocean monitoring, this paper, based on the CYGNSS wind speed products from 2020 to 2023, combined with the wind speed reference data, makes a systematic assessment of the accuracy of CYGNSS wind speed products and analyses the distribution characteristics of wind energy resources in the tropical and subtropical waters of China. Systematic assessment, and analyses of the distribution characteristics of wind energy resources in China's tropical and subtropical seas. The experimental results show that the extrapolated wind speed accuracy of the CYGNSS wind speed product is improved by about 47% after the correction of sea surface roughness, and it has a good matching accuracy with the reference data, which meets the needs of wind energy assessment. In the study area, wind energy resources are more abundant in the southeastern sea, among which the Taiwan Strait has the highest annual average wind power density, reaching more than 550 W/m^2 . In the southern part of the South China Sea, wind energy resources are relatively scarce, and the annual average wind power density is lower than 250 W/m^2 ; the wind power density of each sea area has significant seasonal differences, and the distribution of wind energy resources in the East China Sea is relatively stable in all seasons, with the distribution maintained at more than 300 W/m^2 all year round, while in the South China Sea there is a more violent seasonal fluctuation, and the difference between the average wind power density of the winter and summer seasons is significant; in terms of the

收稿日期 2025-04-27; 修回日期 2025-09-23.

投稿网址 <http://www.progeophys.cn>

基金项目 国家自然科学基金 (42474028)、国家重点研发计划项目 (2020YFC1512000)、陕西省自然科学基金基础研究计划项目 (2022JM-164)、陕西省地学大数据与地质灾害防治创新团队项目 (2022) 和陕西省科技创新团队项目 (2021TD-51) 联合资助。

第一作者简介 李昊星, 男, 2001 年生, 硕士研究生, 从事 GNSS 反射测量原理及应用研究. E-mail: haoxing. li@ chd. edu. cn

*** 通讯作者** 张双成, 男, 1979 年生, 教授, 博士生导师, 主要从事对地观测与防灾减灾研究及应用. E-mail: shuangcheng369@ chd. edu. cn

率密度;风能蕴藏量;技术可开发量;水深

中图分类号 P237

文献标识码 A

doi:10.6038/pg2026JJ0028

CSTR:32085.14.pg2026JJ0028

potential for development, the wind power density in shallow waters in the southern part of the Yellow Sea is relatively high. In terms of developing potential, the southern Yellow Sea and other sea areas have high wind energy reserves and technological development capacity in shallow waters, while the northeastern part of the South China Sea and other sea areas show great development potential in deep waters.

Keywords GNSS-R; Wind speed; Wind power density; Wind energy reserves; Technology development capacity; water depth

0 引言

二氧化碳的过度排放与能源危机对全球环境和世界发展造成了巨大威胁(Koivisto *et al.*, 2020). 为应对全球气候变化,我国计划在 2030 年前实现碳排放达峰,并在 2060 年前实现碳中和,以减少化石燃料的使用. 海上风电作为一种成熟的新能源形式,具有风能储量大、不占用陆地资源等优势,随着远洋漂浮式风电场等新技术的发展,其开发潜力和商业化前景广阔(de Assis Tavares *et al.*, 2022).

海面风速是评估海上风能资源的核心指标,广泛且长期的风速监测对于海域风能资源的评估具有重要意义(Cowin *et al.*, 2023). 当前,海上风能资源的评估主要依赖于传统的单点测风数据和卫星遥感风场数据. 对于局部或近海海域的风能评估,通常采用沿海气象站部署的测风仪收集风速数据,并结合数值模拟进行分析(王静等, 2014; 金永德和卢智林, 2018). 这些方法能够提供局部海域的风能评估,但由于其覆盖范围有限,难以满足大范围海上风能评估的需求. 因此,ERA5 (ECMWF Reanalysis v5)、CCMP (Cross Calibrated Multi-Platform Ocean Surface Wind Velocity)等综合多种风场数据的时空再分析数据集成为大范围、长期风能评估的主要数据来源,尤其对近海和中远海风能资源的评估具有重要意义.

近年来,卫星遥感技术在海上风能资源评估中的应用逐渐得到广泛关注,主要分为主动遥感和被动遥感两类. 主动遥感技术,例如合成孔径雷达 (synthetic aperture radar, SAR)等在风能评估领域具有较高的时间分辨率和精度优势,但其探测范围较为有限,且数据处理过程复杂. 星载 GNSS-R 作为一种新兴的被动遥感技术,近年来在土壤湿度、内陆水体以及海面风场等对地观测领域展现出了巨大的应用潜力(Zhou *et al.*, 2022; Zhang *et al.*, 2021; Nan *et al.*, 2022). GNSS-R 技术通过接收全球导航卫星系

统的直射信号与反射信号,以提取镜面点信息,从而实现高时空分辨率的探测. 与主动遥感技术相比,GNSS-R 具有较强的信号穿透性、较广的覆盖范围和较低的使用成本等优势(张双成等, 2024). 在海面风场反演方面,GNSS-R 技术已经得到广泛应用,当前的主流反演方法包括基于 Zavorotny-Voronovich 模型的经验函数法以及基于深度学习的机器学习模型(Ruf *et al.*, 2019a, b). 随着算法模型及众多 GNSS-R 卫星平台的发展,其为风能评估、气象预报及海洋观测提供了新的技术支撑(Bu *et al.*, 2023).

本研究以 2020—2023 年 CYGNSS L2 级风场产品作为 GNSS-R 数据源,通过将其与参考数据进行时空匹配与精度验证,系统评估了 CYGNSS 风速产品的可靠性. 基于匹配分析结果,进一步探讨了研究区域风能资源的空间分布及变化特征,为区域风能资源评估提供了可靠的科学依据. 图 1 展示了本研究的整体技术路线.

1 资料与方法

1.1 研究区域概况

根据《近海预报海区划分》将中国海域划分为 18 个海区,图 2 展示了各海区的基本位置及水深分布(中华人民共和国自然资源部, 2020). 本次研究区域覆盖中国南海、东海及黄海部分海域,包括 4 至 18 海区.

1.2 数据资料

1.2.1 GNSS-R 数据

CYGNSS (CycloneGlobal Navigation Satellite System) 是于 2016 年发射的 GNSS-R 星座系统,包含 8 颗小型卫星. 每颗卫星搭载 GNSS-R 有效载荷,且每个延迟-多普勒测量仪 (DDMI) 具备四个 GPS L1 频段信号传输通道,能够同时接收四个由地球表面反射的 GPS 信号(刘奇等, 2021),平均重访周期为 7.2 h. CYGNSS 的主要任务是监测热带气旋的动态,8 颗卫星以 35°的轨道倾角在距地 580 km 的泛

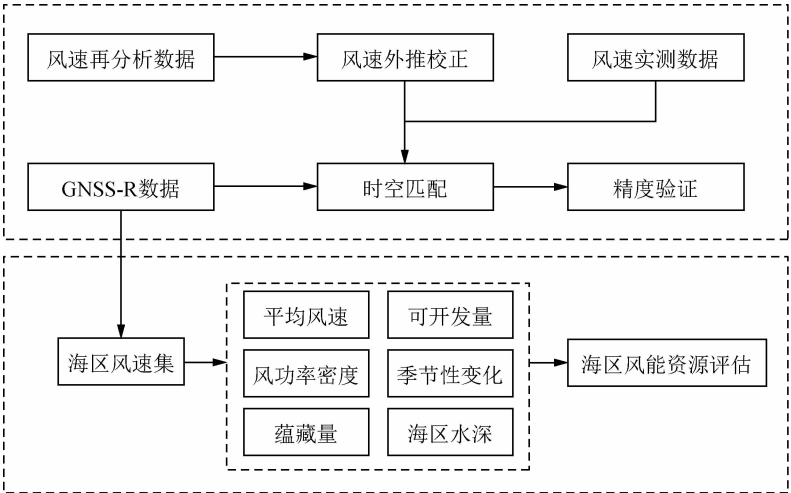


图 1 研究框架图

Fig. 1 Research process diagram

热带地区运行,覆盖南北纬 38°之间,为该区域提供高频次的地表观测数据。

本文使用的数据为美国国家海洋和大气管理局 National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)发布的 CYGNSS L2 级风速产品 (Saïd *et al.*, 2022). 此数据产品针对官方风速产品中存在的星间偏差问题,采用三维查找表方法估算每颗卫星轨迹上观测值与反演值的系统偏差,并通过严格的质量控制程序进行修正,最终提高了数据的精度和一致性 (Du *et al.*, 2024)。

1.2.2 风速实测数据

本研究选用了两类数据集作为 CYGNSS 风速产品精度验证的实测数据,包括美国国家浮标数据中心 (National Data Buoy Center, NDBC) 提供的浮标数据以及中国东海海域的船测风速数据,表 1 展示了这些风速实测数据的基本参数. NDBC 浮标数据选自位于东太平洋和大西洋的五个站点,观测范围为 2020 年 1 月 1 日至 2023 年 12 月 31 日,观测间隔为 1 h;而中国东海船测数据涵盖 2020 年第二季度、2021 年第二以及第三季度的数据,空间范围位于北纬 26°至 31°、东经 120°至 116°区域,观测间隔为 3 s,主要用于验证 CYGNSS 风速产品在中国海域的精度. 图 3 展示了船测风速点的空间分布情况。

上述风速实测数据均为单点测量结果,其中 NDBC 浮标的空间位置固定,而船测数据则因测量船的移动而导致每个风速点具有不同的经纬度坐标. 为确保数据间的有效关联性,本研究采用时间间隔不超过 10 min、空间距离不大于 25 km 的匹配标

准 (Han *et al.*, 2025). CYGNSS 风速点与实测风速点之间的空间距离采用 Haversine 公式计算,其是一种基于球面几何学原理的距离计算方法,广泛应用于地理空间分析,利用经纬度计算球面两点之间的最短路径,公式如下:

$$a = \sin^2\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) + \cos(\varphi_1) \cdot \cos(\varphi_2) \cdot \sin^2\left(\frac{\Delta\lambda}{2}\right),$$

(1)

$$c = 2 \cdot \text{atan2}(\sqrt{a}, \sqrt{1-a}),$$

(2)

$$d = R \cdot c,$$

(3)

式中, φ_1 和 φ_2 为两个数据点的纬度; $\Delta\varphi$ 和 $\Delta\lambda$ 分别为纬度差和精度差; R 为地球半径,一般取 6371 km; a 和 c 为中间变量。

表 1 风速实测数据基本参数

Table 1 Basic parameters of wind speed measurement data

数据来源	站号 / 时期	纬度/(°)	经度/(°)	观测时段	测风间隔
NDBC 浮标数据	51000	14.536	306.864	2020.01—2023.12	1 h
	51004	16.973	278.425	2020.01—2023.12	1 h
	51002	23.528	206.208	2020.01—2023.12	1 h
	41040	17.042	202.254	2020.01—2023.12	1 h
	42057	17.538	207.770	2020.01—2023.12	1 h
船测数据	2020.2	—	—	2020.04—2020.06	3 s
	2021.2	—	—	2021.04—2021.06	3 s
	2021.3	—	—	2021.07—2021.09	3 s

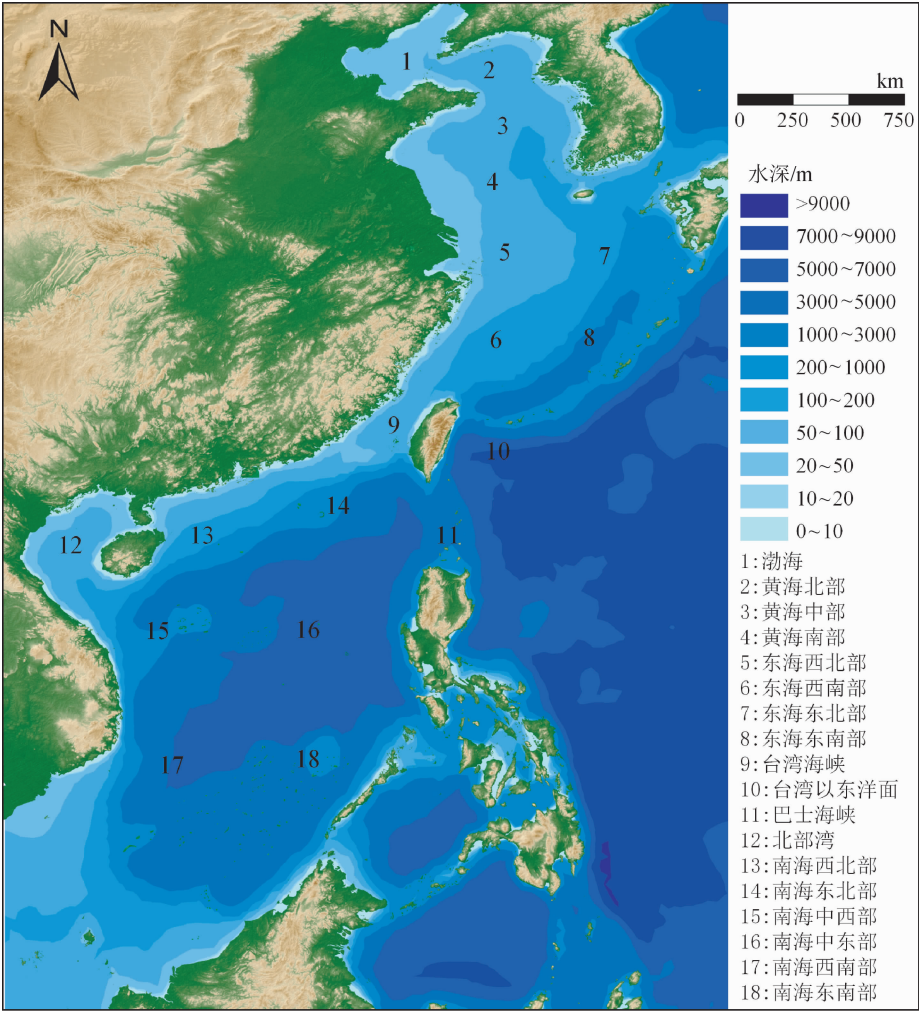


图 2 研究区水深及海区划分

Fig.2 Water depth and division of sea area in study area

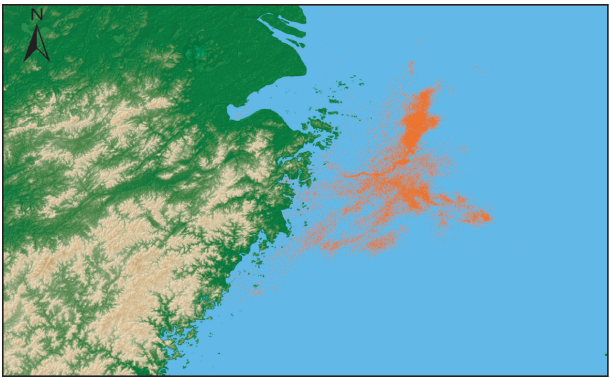


图 3 船测风速点空间位置分布

Fig.3 Spatial distribution of wind speed measurement points on the ship

1. 2. 3 风速再分析数据

本研究采用欧洲中期天气预报中心 (European

Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) 发布的 ERA5 再分析风速数据集作为参考数据之一,主要用于与 CYGNSS 数据的精度评定及海面粗糙度的计算. 该数据集覆盖范围为全球,包含 10 m 及 100 m 风速集,时间分辨率为 1 h,空间分辨率为 0. 25°,时间跨度为 2020 年 1 月 1 日至 2023 年 12 月 31 日. ERA5 再分析数据作为参考值被大量应用于卫星遥感海面风速反演的研究中,本研究使用空间双线性插值及时间线性插值方法进行数据匹配,此方法被广泛应用于 GNSS-R 风速数据与再分析格网数据的匹配中,具有较好的时空精度 (Clarizia and Ruf,2020;Ruf *et al.*,2019a,b).

1. 2. 4 水深数据

水深数据是表征海底地形形态的关键参数,在海洋科学研究、资源勘探和海洋工程等领域具有重

要应用。目前主要的水深数据获取手段包括船载声学测深、卫星测高反演和多源数据融合技术(欧阳明达,2022),其中多源融合产品因其覆盖范围广、精度适中的特点,适用于大范围近海水深测绘需求。本文使用的海洋水深数据为 GEBCO (General Bathymetric Chart of the Oceans) 全球水深数据集,这是一项集成全球海洋深度信息的高分辨率地形数据产品(Kapoor,1981)。其基于多种数据采集手段,包括船载测深、卫星遥感与水下声纳技术,通过全球范围内的测量成果,构建了一个精确描述全球海洋地形的模型。该数据集覆盖全球范围,空间分辨率为 1",能够精确呈现从浅海到深海的详细地形特征。

1.3 风能资源评估方法

1.3.1 风速外推方法

同一海洋位置在不同海面高度的风速差异较大,星载 GNSS-R 海面风速反演一般考虑距离海面 10 m 高度的风速大小,而风能资源评估中考虑到海上风电机组的建设尺寸,需要讨论距离海面高度 100 m 高度的风速特征。为了在同一海拔高度比较浮标和 CYGNSS 风速产品的数据及风能资源评估结果,需要利用海面风速与高度的对数关系将卫星风速转换为距海面 100 m 高度处的风速,具体公式如下(Badger *et al.*,2016):

$$V(z) = \frac{u_*}{\kappa} \left[\ln\left(\frac{z}{z_0}\right) - \psi_m \right], \quad (4)$$

式中, $V(z)$ 是高度 z 处的风速(m/s); κ 是卡尔曼常数; ψ_m 是受大气稳定性修正的参数,在稳定的大气条件下, ψ_m 通常为正数,反之则为负数。获取 ψ_m 的空间分布信息有助于提高风速外推的精度,Badger 等基于 WRF 模型及 SAR 风速数据得到波罗的海海域 100 m 高度处 ψ_m 的范围在 -2.5 到 0 之间,在大气稳定性修正前后,风速差异约为 0.5 m/s。

由于缺少相应的长期海洋大气观测数据,一般假定海洋环境长期处于中性稳定的情况下, $\psi_m = 0$ 。这种情况下,可从如下公式计算高度外推后的风速(许遐祯等,2017):

$$v = v_{\text{ref}} \frac{\ln(z/z_0)}{\ln(z_{\text{ref}}/z_0)}, \quad (5)$$

式中, v_{ref} 为当前风速; z_{ref} 为当前风速对应高度; v 为目标风速; z 为目标高度。 z_0 为海表面粗糙度,可从如下公式计算:

$$z_0 = \alpha_c \frac{u_*^2}{g}, \quad (6)$$

式中, α_c 为 Charnock 系数; g 为地球重力加速度; u_* 为海面摩擦速度。当参考风速已知时,海表面粗糙度可通过公式(4)和(6)迭代得到。

1.3.2 风能参数计算方法

在风能资源评估中需要综合考量多项关键指标,以全面揭示区域内风能开发的潜力和效益。本研究围绕风功率密度、风能蕴藏总量以及技术可开发量三个核心指标,系统地分析了目标区域的风能输出强度、储量规模及技术经济可行性,以此来综合评估研究区域的风能资源分布及发展前景。

风功率密度是指单位面积上可利用的风能功率(Kozai *et al.*,2012),是评估风能资源的重要指标,能够直接影响风力发电机组的布局 and 性能优化。平均风功率密度是指单位时间内通过垂直于气流单位面积上的风能。平均风功率密度可以利用统计方法得到,公式如下(Hasager *et al.*,2015):

$$E = \frac{1}{2} \rho \bar{V}_i^3, \quad (7)$$

式中, E 为平均风功率密度,单位为 W/m^2 ; ρ 为空气密度,标准海平面下, $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$; V_i 为第 i 次计算的平均风速,平均风速计算公式如下(Doubrawa *et al.*,2015):

$$\bar{V} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_i, \quad (8)$$

式中, $\bar{V}$ 为平均风速; V_i 为第 i 次计算的风速; n 为样本总数。

风能蕴藏总量是评估区域风能资源开发潜力的核心指标,其计算需要通过划分风功率密度等级并统计对应区域面积,实现资源潜力的量化分析,具体公式如下(蔡继峰等,2021):

$$E = \frac{1}{100} \sum_{i=1}^N S_i P_i, \quad (9)$$

式中, E 为区域风能蕴藏总量, N 为风功率密度等级数, S_i 表示年平均风功率密度等值线间的区域面积, P_i 为对应等级的风功率密度代表值。计算过程中,风功率密度按 50 W/m^2 间隔递增分级,各等级代表值取区间中值。

技术可开发量指在工程可行性与能量转换效率约束下,区域内风力发电机组可实际利用的风能资源潜力。其计算需筛选年平均风功率密度 $\geq 150 \text{ W/m}^2$ 的高效区域,并通过叶轮扫掠面积修正系数 0.785 ($\pi/4$)剔除叶片间隙及非连续扫掠导致的无效区域。该方法既避免理论值高估,又精准量化实际能量

捕获效率,可为风电场规划与机组优化提供科学依据(丁杰等,2022).

1.3.3 精度验证指标

为了全面评估本研究中风速反演方法的精度与可靠性,本研究选取均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)、平均绝对误差(Mean Absolute Error, MAE)、偏差(Bias)以及相关系数(Correlation Coefficient, R)作为误差评估指标.具体计算公式如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (A_i - B_i)^2}{n}}, \tag{10}$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |A_i - B_i|}{n}, \tag{11}$$

$$BIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (A_i - B_i)}{n}, \tag{12}$$

$$R = \frac{\sum (A_i - \bar{A})(B_i - \bar{B})}{\sqrt{\sum (A_i - \bar{A})^2 \sum (B_i - \bar{B})^2}}, \tag{13}$$

式中, A_i 为参考风速; B_i 为 CYGNSS 风速; $\bar{A}$ 为参考风速平均值; $\bar{B}$ 为 CYGNSS 风速平均值; n 为样本总数.

2 结果与分析

2.1 风速外推方法精度分析

长时间、大范围的海面风场反演中,局部特殊海域条件对整体结果的影响较小,假设在中性稳定的大气条件下,海面粗糙度通常可定为 0.0002 m (Badger *et al.*,2019).但在风速外推过程中,随着外

推高度的增加,累积误差亦会逐渐增大.为此,选取 2023 年 1 月 1 日至 12 月 31 日的 ERA5 10 m 和 100 m 参考风速数据,与 CYGNSS 风速数据时空匹配后,利用迭代算法对风速点处海面粗糙度进行修正计算.随后,通过比较 CYGNSS 风速外推至 100 m 高度与 ERA5 数据之间的精度差异,评估了海面粗糙度修正前后的效果.

结果显示,当海面粗糙度固定时,CYGNSS 风速外推至 100 m 与 ERA5 数据的相关系数为 0.81,RMSE 为 2.69 m/s,BIAS 为 1.47 m/s,MAE 为 1.81 m/s;而经过修正后,相关系数提高至 0.91,RMSE 降低至 1.41 m/s,BIAS 降至 0.06 m/s,MAE 降至 0.99 m/s.如图 4 所示,海面粗糙度修正在很大程度上提升了 CYGNSS 风速外推与 ERA5 数据的匹配度.

2.2 CYGNSS 数据精度分析

在对 CYGNSS 风速产品与风速实测数据进行匹配并计算误差指标的过程中,深入分析了风速产品的精度特征,如表 2 及图 5 所示.在与浮标数据的对比分析中,RMSE 在 1.25 m/s 至 1.47 m/s 之间波动,MAE 介于 0.85 m/s 与 1.00 m/s 之间,相关系数及 BIAS 则较为稳定.这些结果表明,CYGNSS 风速产品在大部分浮标站点的匹配中均展现出较高的精度,能够较好地反映海面风速的变化趋势.在与船测数据的对比分析中,整体结果显示出较高的精度水平,RMSE 最低为 1.16 m/s,MAE 为 0.88 m/s,BIAS 为 -0.17 m/s,且相关系数达到了 0.94.这些数值表明,CYGNSS 风速产品在东海地区船测数据的匹配中具有较高的准确性和一致性,能够较为可靠地反映实际风速状况.

表 2 CYGNSS 与风速实测数据误差特征分析
Table 2 Characterisation of errors in CYGNSS and measured wind speed data

数据来源	站号/时期	RMSE/(m/s)	MAE/(m/s)	BIAS	R	匹配数量
NDBC 数据	41040	1.25	0.90	-0.14	0.83	3636
	42057	1.25	0.85	-0.03	0.87	1954
	51000	1.47	1.00	0.11	0.80	4086
	51002	1.36	0.99	-0.12	0.82	3803
	51004	1.38	0.96	0.17	0.77	3930
船测数据	2020.2	1.30	0.88	-0.26	0.83	2338
	2021.2	1.43	1.05	0.39	0.73	4339
	2021.3	1.16	0.94	-0.17	0.94	1456

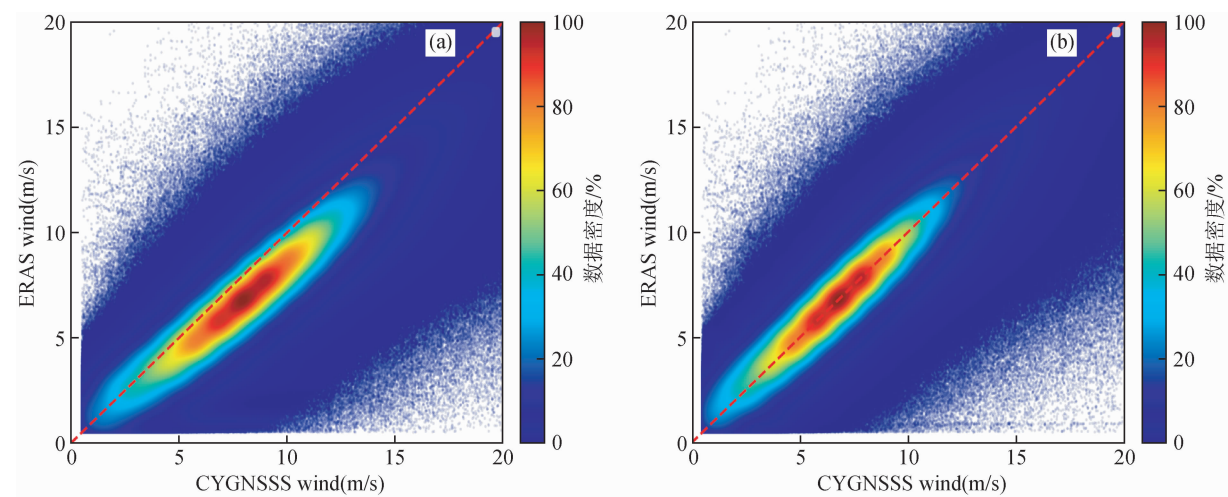


图 4 粗糙度修正前后 CYGNSS 外推风速与 ERA5 对比
(a)粗糙度固定;(b)粗糙度修正.
Fig.4 CYGNSS vs. ERA5 wind speed: impact of roughness correction
(a) Fixed roughness;(b) Roughness correction.

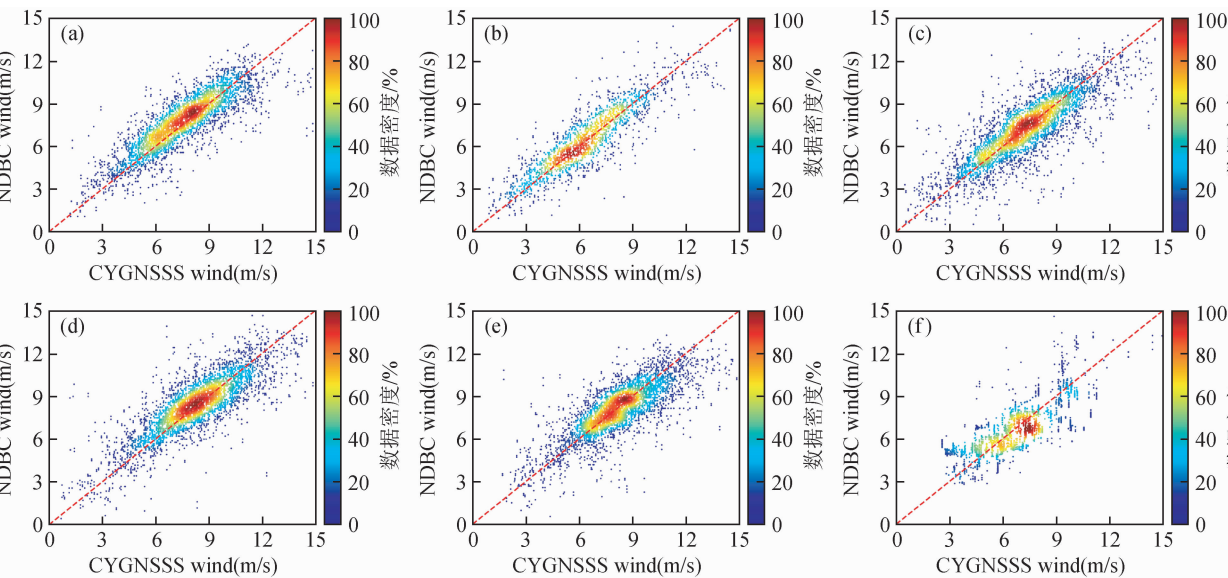


图 5 CYGNSS 风速与实测数据精度对比
(a)41040 站;(b)42057 站;(c)51000 站;(d)51002 站;(e)51004 站;(f)船测风速.
Fig.5 Comparison of accuracy between CYGNSS wind speed and measured data
(a)Station 41040; (b)Station 42057; (c) Station 51000; (d)Station 51002; (e)Station 51004; (f) Wind speed measured by the ship.

为表征 ERA5 再分析数据与 CYGNSS 风速产品之间的匹配精度,分别选取 2023 年 1 月、4 月、7 月和 10 月的 ERA5 风速数据作为四个季节的代表样本,构成完整的年度样本集. 通过对 CYGNSS 风速数据与 ERA5 数据进行时空匹配,并结合样本数据分布情况展开精度评估. 实验结果如图 6 所示,不同月份之间的样本匹配数量及

精度指标差异较小,其中 RMSE 平均为 1.96 m/s, MAE 为 1.14 m/s, BIAS 为 0.48, 相关系数达到 0.80. 尽管相较于浮标和船测数据的匹配结果, CYGNSS 与 ERA5 的匹配误差略大,但其依然展现出较高的相关性和一致性,进一步验证了 CYGNSS 风速产品在再分析数据对比研究中的可靠性与适用性.

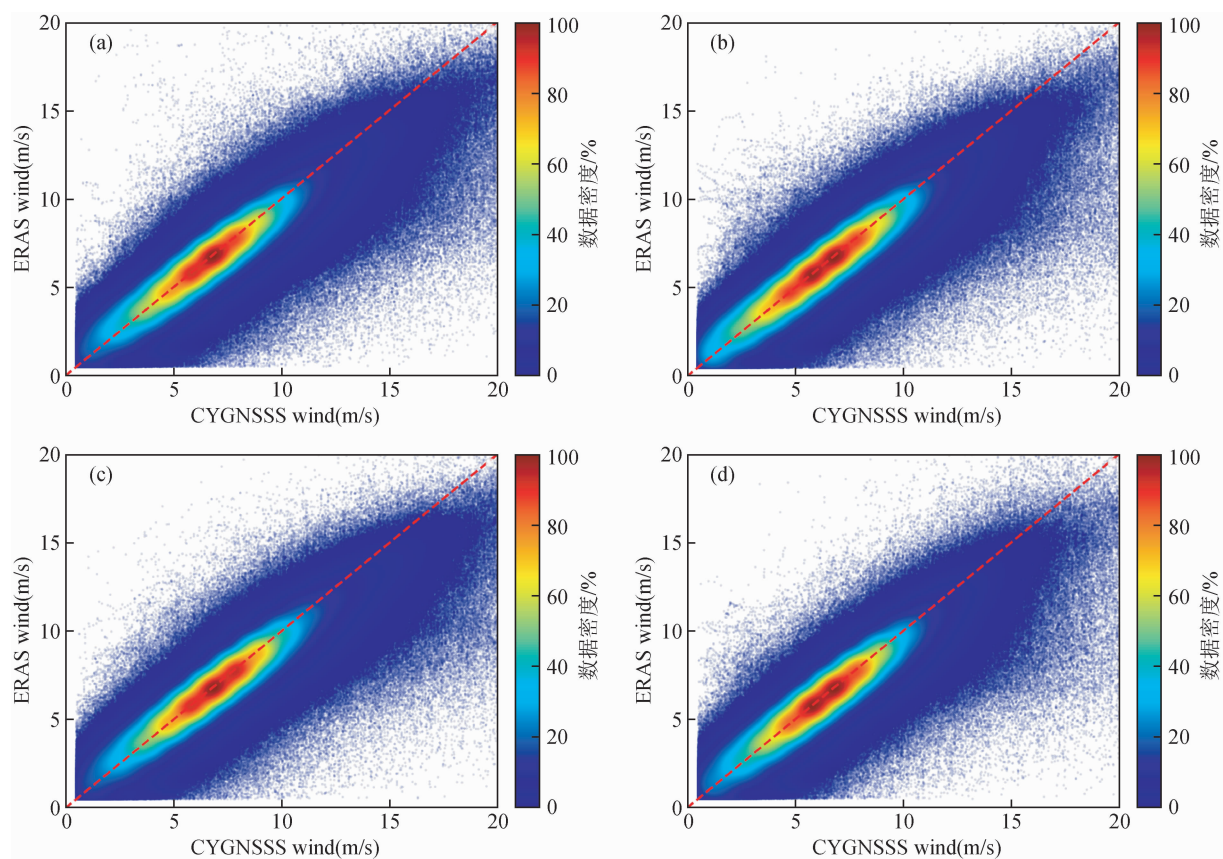


图6 CYGNSS 风速与 ERA5 精度对比

(a)4月;(b)7月;(c)10月;(d)1月.

Fig.6 Accuracy comparison between CYGNSS wind speed and ERA5

(a) April; (b) July; (c) October; (d) January.

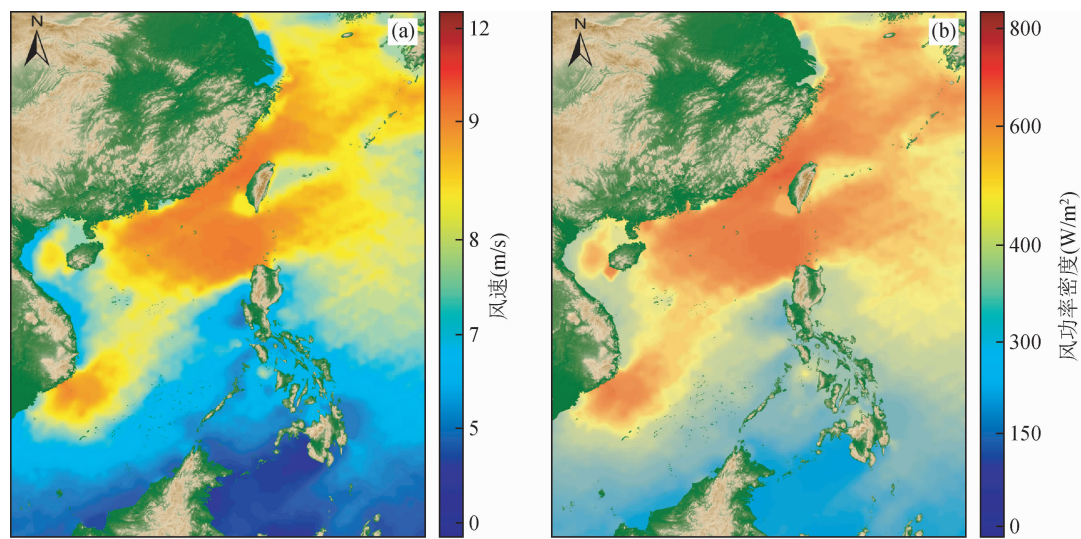


图7 2020—2023 年平均风能资源分布

(a) 风速;(b) 风功率密度.

Fig.7 Average distribution of wind energy resources in 2020—2023

(a) Wind speed; (b) Wind power density.

2.3 风能资源空间分布特征

2.2 节结果表明,CYGNSS 风场数据与参考数据具有较高的相关性,在验证了时空匹配方法行之有效的的基础上,也证明可用于风能资源评估.依据上文提出的风速外推及风功率密度计算方法,基于 2020 年 1 月 1 日至 2023 年 12 月 31 日的 CYGNSS 风场数据,统计得出研究区域的年均风能资源分布特征(见表 3).

图 7 直观展示了风速及风功率密度的空间分布特征.风能资源丰富地区主要分布在广东、福建和浙江沿海海域,整体呈东北-西南走向,其中中国台湾海

峡区风能资源最为丰富,年平均风速超过 9.5 m/s,风功率密度超过 550 W/m².这主要归因于其特殊地理位置与我国近海盛行风向一致,季风通过海峡引发狭管效应,导致风能丰富且集中,而由其延伸至的南海东北部海区同样具有较高的平均风速.东海海域风能资源分布呈现出“南高北低”的特征,其中东海西南部平均风功率密度均超过 400 W/m²,显示出较高的风能开发潜力.南海中部及西部海域风能资源相较匮乏,年平均风速均为超过 9.5 m/s,加之其远离陆地,风能利用难度较大,该区域目前风能开发潜力有限.

表 3 2020—2023 年 100 m 高度风能资源特征分布
Table 3 Distribution of wind energy resource characteristics at 100 m height in 2020—2023

海区	100 m 风速/(m/s)			100 m 风功率密度/(W/m ²)		
	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值
黄海南部	4.01	11.77	7.89	39.69	998.63	304.89
东海西北部	4.77	11.47	8.26	66.50	924.38	348.52
东海西南部	5.04	10.95	8.65	78.82	805.15	400.14
东海东北部	4.50	10.85	8.18	55.65	782.22	337.11
东海东南部	7.06	10.97	8.31	215.50	809.62	352.39
中国台湾海峡	6.27	12.77	9.61	151.14	1276.66	557.95
中国台湾以东洋面	6.67	9.75	8.30	181.37	567.07	353.48
巴士海峡	4.92	12.05	8.87	73.04	1072.74	436.40
北部湾	3.94	9.55	7.80	37.33	534.10	295.87
南海西北部	4.89	12.07	8.53	71.46	1078.23	383.79
南海东北部	6.04	11.58	9.15	135.01	951.04	473.86
南海中西部	3.39	17.14	7.73	23.77	3084.12	286.97
南海中东部	4.36	9.95	7.70	50.76	604.05	287.76
南海西南部	4.31	11.76	7.22	49.01	995.22	243.90
南海东南部	3.14	8.75	6.86	18.96	411.47	201.77

将 3 至 5 月定义为春季,6 至 8 月定义为夏季,9 至 11 月定义为秋季,12 月至翌年 2 月定义为冬季.图 8 展示了 2020 年至 2023 年研究区域 100 m 高度处风功率密度的四季分布特征.整体来看,风能资源呈现显著的“春秋弱、冬夏强”季节性特征:冬季风能最为充沛,中国台湾海峡平均风速达 12.74 m/s,对应风功率密度高达 1174.31 W/m²,展现出卓越的开发价值;而夏季各海域指标显著衰减,南海东南部与西南部风功率密度仅相当于冬季基准值的 16%~

17%,暗示该时段风电产能可能受限.区域对比显示,东海海域表现突出,其春夏两季风功率密度仍稳定维持在 300 W/m² 以上,具备持续开发潜力;南海则存在较为剧烈的季相波动,冬夏风功率密度差异可达 800 W/m².值得注意的是,中国台湾海峡冬季风功率密度冠绝研究区,结合其平缓海床地形,可成为海上风电布局的战略节点;南海东北部的强化现象则可能与冬季季风与地形辐合效应的协同作用密切相关.

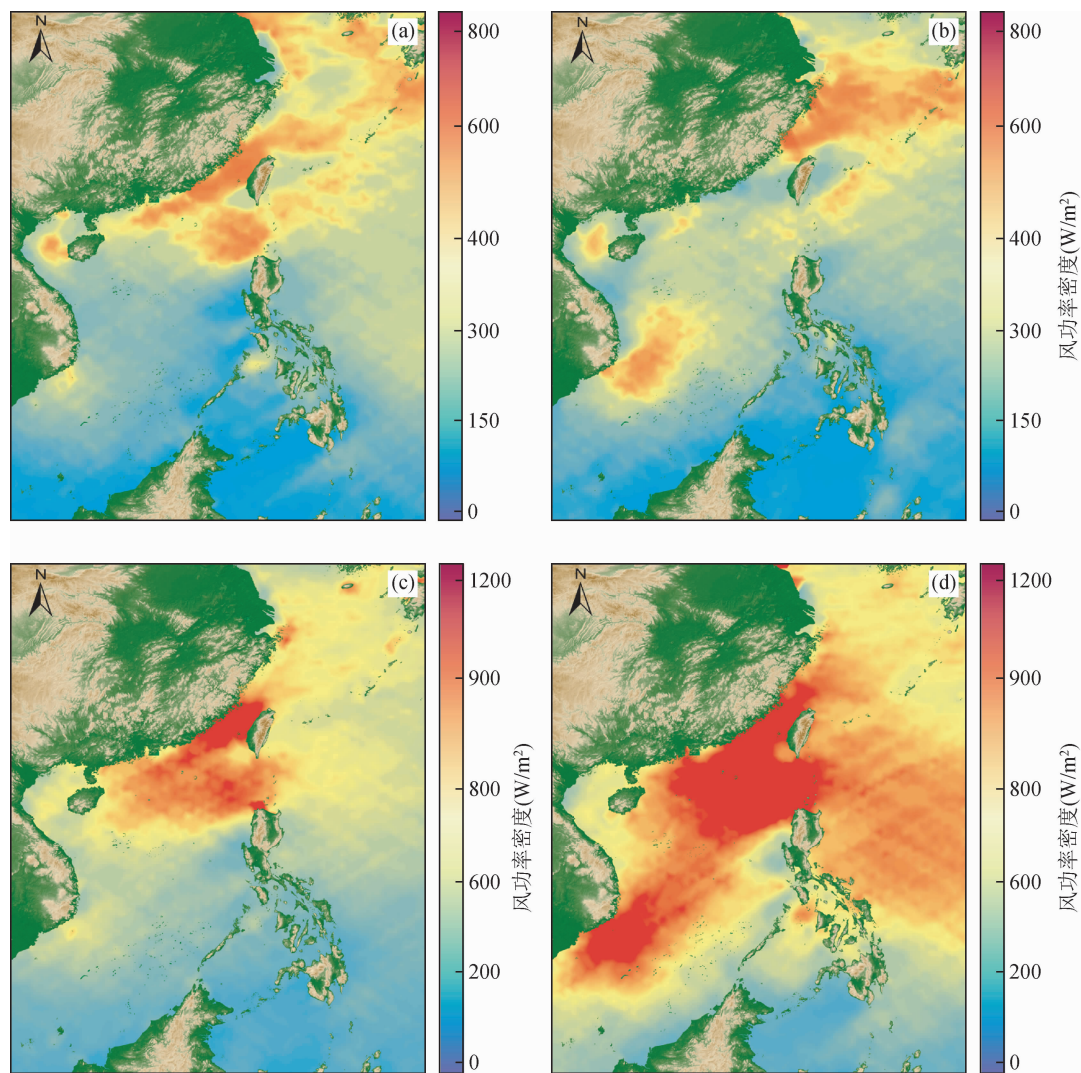


图8 2020—2023 年平均风能资源分布

(a) 春季;(b)夏季;(c)秋季;(d)冬季.

Fig. 8 Average distribution of wind energy resources in 2020—2023

(a) Spring; (b) Summer; (c) Autumn; (d) Winter.

2.4 沿岸海区风能资源开发潜力

当前,海上风能资源的开发主要依赖于风电场的建设,将风能转化为电能.海上风电场的建设及运作需要顾及风能资源丰富程度、风能稳定性、海洋水深等多种因素.水深是影响海上风能资源开发难度和效率的关键因素之一.通常情况下,深水区的风速较高,风能资源相对丰富,但风电机组的建设和维护难度都会更大.而远离海岸的区域,风能资源的稳定性较差,同样会影响风电机组的运行效率.因此目前大部分海上风电场仍集中在沿岸海域开展建设.

表4详细展示了研究区域内七个沿岸海区在不同水深区间的风能资源开发潜力分布,涵盖风能蕴藏总量及技术可开发量两项核心指标.数据显示,各

海区风能资源分布呈现显著空间分异特征:随着水深增加,各海区风能蕴藏总量和技术可开发量大多呈阶梯式增长,尤其在50 m以上深水区表现突出.从技术开发效率来看,各海区技术可开发量占蕴藏总量的比例稳定在76%~79%区间,开发潜力均衡性较强.具体而言,黄海南部在浅水区(0~50 m)具有显著优势,其风能蕴藏总量达 $21.14 \times 10^7 \text{ kW/m}^2$,技术可开发量 $16.35 \times 10^7 \text{ kW/m}^2$,综合开发效率达77.4%,凸显其作为近海风电优质开发区的战略地位.而南海东北部在深水区(50 m以上)展现出巨大开发潜力,风能蕴藏总量高达 $136.17 \times 10^7 \text{ kW/m}^2$,技术可开发量达 $106.89 \times 10^7 \text{ kW/m}^2$,占比78.5%,表明该区域是未来深海风电规模化开发的重点靶区.

表 4 沿岸海区风能资源开发潜力分布

Table 4 Distribution of wind energy resource development potential in coastal marine areas

海区	风能蕴藏总量/(kW/m ²)			技术可开发量/(kW/m ²)		
	0 ~ 30 m	30 ~ 50 m	50 m 以上	0 ~ 30 m	30 ~ 50 m	50 m 以上
黄海南部	13.39	7.75	17.98	10.27	6.08	14.1
东海西北部	1.78	10.87	10.0	1.36	8.53	7.88
东海西南部	0.62	4.23	70.7	0.49	3.32	55.5
中国台湾海峡	2.78	4.76	15.49	2.18	3.74	12.16
北部湾	2.84	8.08	10.11	2.16	6.31	7.93
南海西北部	0.98	4.40	39.02	0.77	3.45	30.62
南海东北部	2.69	7.92	136.17	2.11	6.21	106.89

3 结 论

为了拓展星载 GNSS-R 在海洋监测领域的应用,本文基于 CYGNSS 风场数据,对比了与风速参考数据的精度指标,随后利用 CYGNSS 风速数据对中国热带及亚热带海域进行了风能评估,并结合季节性差异与水深因素,分析了研究区域内不同海区风能资源的空间分布特征.实验结果表明:

(1)CYGNSS 风速数据经过海面粗糙度修正后风速外推精度显著提高,与参考数据经时空匹配后,精度评定结果较高,验证了 CYGNSS 风速数据在海面风速反演中的可靠性与适用性,表明其在风速监测中的高精度与可行性.

(2)风能资源的空间分布具有明显区域及时间差异.在研究区域内,中国台湾海峡的风能资源表现最为突出.季节性差异对风能资源的分布具有重要影响.大多数海区的风能资源呈现出显著的季节性波动,这对不同季节风能资源的评估与利用提出了更高要求,并为区域风能开发提供了重要的季节性参考.

(3)沿岸海区在风能资源开发中的潜力各不相同,黄海南部等海区在浅水海域风能蕴藏量较大,而南海东北部等海区在深水海域展现出巨大开发潜力,适合于未来远洋海上风电的利用.

致 谢 感谢审稿专家提出的修改意见和编辑部的大力支持!

References

Badger M, Peña A, Hahmann A N, *et al.* 2016. Extrapolating satellite winds to turbine operating heights. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 55 (4): 975-991, doi: 10.1175/JAMC-D-15-

0197.1.
Badger M, Ahsbahs T, Maule P, *et al.* 2019. Inter-calibration of SAR data series for offshore wind resource assessment. *Remote Sensing of Environment*, 232: 111316, doi: 10.1016/j.rse.2019.111316.
Bu J W, Yu K G, Zuo X Q, *et al.* 2023. GloWS-Net: A deep learning framework for retrieving global sea surface wind speed using spaceborne GNSS-R data. *Remote Sensing*, 15(3): 590, doi: 10.3390/rs15030590.
Cai J F, Hu G S, Shi H. 2021. A review of domestic and international research on wind energy resource assessment standards. *Wind Energy (in Chinese)*, (12): 56-63, doi: 10.3969/j.issn.1674-9219.2021.12.022.
Clarizia M P, Ruf C S. 2020. Statistical derivation of wind speeds from CYGNSS Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 58 (6): 3955-3964, doi: 10.1109/TGRS.2019.2959715.
Cowin E, Wang C L, Walsh S D C. 2023. Assessing predictions of Australian offshore wind energy resources from reanalysis datasets. *Energies*, 16(8): 3404, doi: 10.3390/en16083404.
de Assis Tavares L F, Shadman M, de Freitas Assad L P, *et al.* 2022. Influence of the WRF model and atmospheric reanalysis on the offshore wind resource potential and cost estimation: A case study for Rio de Janeiro State. *Energy*, 240: 122767, doi: 10.1016/j.energy.2021.122767.
Ding J, Wu G W, Chen J Q, *et al.* 2022. Research on evaluation of ocean wind energy resources in the south China sea based on CCMP reanalysis of wind field data. *Journal of Ocean Technology (in Chinese)*, 41(5): 83-90, doi: 10.3969/j.issn.1003-2029.2022.05.009.
Doubrawa P, Barthelmie R J, Pryor S C, *et al.* 2015. Satellite winds as a tool for offshore wind resource assessment: The Great Lakes Wind Atlas. *Remote Sensing of Environment*, 168: 349-359, doi: 10.1016/j.rse.2015.07.008.
Du H, Li W Q, Cardellach E, *et al.* 2024. Deep residual fully connected network for GNSS-R wind speed retrieval and its interpretation. *Remote Sensing of Environment*, 313: 114375, doi: 10.1016/j.rse.2024.114375.
Han X H, Li X H, Yang J S, *et al.* 2025. Evaluation and deep learning-based calibration of Nearshore sea surface wind speeds from FY-3E GNOS-II and TIANMU-1 missions. *Geo-spatial Information Science*, 1-12, doi: 10.1080/10095020.2024.2441473.
Hasager C B, Mouche A, Badger M, *et al.* 2015. Offshore wind climatology based on synergetic use of Envisat ASAR, ASCAT and QuikSCAT. *Remote Sensing of Environment*, 156: 247-263, doi: 10.1016/j.rse.2014.09.030.
Jin Y D, Lu Z L. 2018. Assessment of wind and wave energy resoures in Ningde coastal area. *Transactions of Oceanology and Limnology (in Chinese)*, (1): 52-59.
Kapoor D C. 1981. General bathymetric chart of the oceans (GEBCO). *Marine Geodesy*, 5(1): 73-80.

Koivisto M, Gea-Bermúdez J, Sørensen P. 2020. North Sea offshore grid development: combined optimisation of grid and generation investments towards 2050. *IET Renewable Power Generation*, 14 (8): 1259-1267, doi: 10. 1049/iet-rpg. 2019. 0693.

Kozai K, Ohsawa T, Takahashi R, *et al.* 2012. Evaluation method for offshore wind energy resources using scatterometer and Weibull parameters. *Journal of Energy and Power Engineering*, 6: 1772-1778.

Liu Q, Zhang S C, Nan Y, *et al.* 2021. Flood detection of South Asia using spaceborne GNSS-R coherent signals. *Geomatics and Information Science of Wuhan University (in Chinese)*, 46 (11): 1641-1648, doi: 10. 13203/j. whugis20210056.

Ministry of Natural Resources, People's Republic of China. 2020. HY/T 0292-2020 Offshore forecast areas zoning (in Chinese). Beijing: Standards Press of China.

Nan Y, Li W Q, Ye S R, *et al.* 2022. Standard deviation of spaceborne GNSS-R ocean scatterometry measurements. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60: 5109916, doi: 10. 1109/TGRS. 2022. 3146980.

Ouyang M D. 2022. Research progress and prospects of seabed topography inversion from altimetry data. *Progress in Geophysics (in Chinese)*, 37 (6): 2291-2300, doi: 10. 6038/pg2022GG0003.

Ruf C S, Balasubramaniam R. 2019a. Development of the CYGNSS geophysical model function for wind speed. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 12 (1): 66-77, doi: 10. 1109/JSTARS. 2018. 2833075.

Ruf C S, Gleason S, McKague D S. 2019b. Assessment of CYGNSS wind speed retrieval uncertainty. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 12 (1): 87-97, doi: 10. 1109/JSTARS. 2018. 2825948.

Saïd F, Jelenak Z, Park J, *et al.* 2022. The NOAA track-wise wind retrieval algorithm and product assessment for CyGNSS. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60: 4202524, doi: 10. 1109/TGRS. 2021. 3087426.

Wang J, Cao J, Qiu C, *et al.* 2014. Distribution characteristics and assessment of wind energy resources over Shandong coastal areas. *Journal of Nanjing University of Information Science & Technology (Natural Science Edition) (in Chinese)*, 6 (4): 342-348, doi: 10. 3969/j. issn. 1674-7070. 2014. 04. 008.

Xu X Z, Guo Q Y, Li Z Q, *et al.* 2017. Wind resource assessment in the offshore of China based on ASCAT wind data. *Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese)*, 37 (6): 816-824, doi: 10. 3969/2016jms. 0069.

Zhang S C, Ma Z M, Li Z H, *et al.* 2021. Using CYGNSS data to map flood inundation during the 2021 extreme precipitation in Henan Province, China. *Remote Sensing*, 13 (24): 5181, doi: 10. 3390/

rs13245181.

Zhang S C, Guo Q Y, Ma Z M, *et al.* 2024. Research advances and some thoughts on soil moisture retrieval by space-borne GNSS-R. *Geomatics and Information Science of Wuhan University (in Chinese)*, 49 (1): 15-26, doi: 10. 13203/j. whugis20230100.

Zhou X, Zhang S C, Zhang Q, *et al.* 2022. Research of deformation and soil moisture in loess landslide simultaneous retrieved with ground-based GNSS. *Remote Sensing*, 14 (22): 5687, doi: 10. 3390/rs14225687.

附中文参考文献

蔡继峰, 胡高硕, 石浩. 2021. 国内外风能资源评估标准研究综述. 风能, (12): 56-63, doi: 10. 3969/j. issn. 1674-9219. 2021. 12. 022.

丁杰, 吴国伟, 陈家庆, 等. 2022. 基于 CCMP 再分析风场资料的南海海洋风能资源评估研究. 海洋技术学报, 41 (5): 83-90, doi: 10. 3969/j. issn. 1003-2029. 2022. 05. 009.

金永德, 卢智林. 2018. 宁德沿海风能和波浪能资源评估. 海洋湖沼通报, (1): 52-59.

刘奇, 张双成, 南阳, 等. 2021. 利用星载 GNSS-R 相干信号探测南亚洪水. 武汉大学学报 (信息科学版), 46 (11): 1641-1648, doi: 10. 13203/j. whugis20210056.

欧阳明达. 2022. 测高数据反演海底地形研究进展与展望. 地球物理学进展, 37 (6): 2291-2300, doi: 10. 6038/pg2022GG0003.

王静, 曹洁, 邱黎, 等. 2014. 山东沿海风能资源分布特征及评估. 南京信息工程大学学报 (自然科学版), 6 (4): 342-348, doi: 10. 3969/j. issn. 1674-7070. 2014. 04. 008.

许遐祯, 郭乔影, 李正泉, 等. 2017. 基于 ASCAT 风场数据的中国近海风能资源评估. 气象科学, 37 (6): 816-824, doi: 10. 3969/2016jms. 0069.

张双成, 郭沁雨, 马中民, 等. 2024. 星载 GNSS-R 反演土壤湿度研究进展与思考. 武汉大学学报 (信息科学版), 49 (1): 15-26, doi: 10. 13203/j. whugis20230100.

中华人民共和国自然资源部. 2020. HY/T 0292-2020 近海预报海区划分. 北京: 中国标准出版社.