

多普勒激光雷达监测的夏秋福建沿海风机典型高度上的风能变化特征

陈 泉^{1,2*}, 史文浩¹, 汤 杰^{2,3#}, 陈勇航¹, 赵兵科², 刘 琼¹, 王宇鹏¹, 李瑞雪¹, 张 琪¹

¹东华大学环境科学与工程学院, 上海

²中国气象局上海台风研究所, 上海

³亚太台风研究中心, 上海

收稿日期: 2022年9月18日; 录用日期: 2022年10月20日; 发布日期: 2023年8月29日

摘 要

风电可以弥补我国东南沿海经济重心能源供应不足, 但随着风机高度不断突破, 传统的测风手段已无法满足监测需求。为此, 采用布设在福建三沙沿海和内陆两个观测点的多普勒测风激光雷达, 针对2020年8~11月100~200米典型风机高度上湍流强度、风功率密度分布情况进行精细化对比分析。结果表明: 无论是沿海还是内陆监测点, 随着垂直高度的上升, 湍流强度逐渐减小而风功率密度逐步增大; 从日变化来看, 在103.9 m、155.9 m、207.8 m垂直高度上, 日出前湍流强度最大, 风功率密度最小。在这三个高度上, 沿海区域的湍流强度最大值分别为0.178、0.154、0.133, 风功率密度最小值分别为138.463 W/m²、175.860 W/m²、186.455 W/m², 而内陆区域的湍流强度最大值分别为0.180、0.144、0.121, 风功率密度最小值分别为145.835 W/m²、184.868 W/m²、196.712 W/m²。日落后的湍流强度最弱, 风功率密度达到最大, 沿海区域的湍流强度的最小值分别为0.106、0.088、0.075, 风功率密度最大值分别为259.219 W/m²、299.590 W/m²、322.200 W/m²。内陆区域的湍流强度最小值分别为0.116、0.086、0.074, 风功率密度最大值分别为254.318 W/m²、303.084 W/m²、328.150 W/m²。从风资源的月际变化看, 8、9月份风功率密度为100 W/m²左右; 10、11月份风能资源丰富, 11月份的平均风功率密度可达到800 W/m²左右。

关键词

多普勒测风激光雷达, 超声风温仪, 湍流强度, 风功率密度

Doppler Lidar-Monitored Wind Energy Variation Characteristics in Summer and Autumn along the Fujian Coast at Typical Height of Wind Turbines

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 陈泉, 史文浩, 汤杰, 陈勇航, 赵兵科, 刘琼, 王宇鹏, 李瑞雪, 张琪. 多普勒激光雷达监测的夏秋福建沿海风机典型高度上的风能变化特征[J]. 环境保护前沿, 2023, 13(4): 1053-1065. DOI: 10.12677/aep.2023.134127

Quan Chen^{1,2*}, Wenhao Shi¹, Jie Tang^{2,3#}, Yonghang Chen¹, Bingke Zhao², Qiong Liu¹
Yupeng Wang¹, Ruixue Li¹, Qi Zhang¹

¹College of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai

²Shanghai Typhoon Institute, China Meteorological Administration, Shanghai

³Asia Pacific Typhoon Research Center, Shanghai

Received: Sep. 18th, 2022; accepted: Oct. 20th, 2022; published: Aug. 29th, 2023

Abstract

Wind power can make up for the lack of energy supply in the economic center of gravity along the southeast coast of China, but with the continuous breakthrough of wind turbine heights, the traditional means for wind cannot meet the monitoring needs. To this end, we quantitatively analyzed the distribution of turbulence intensity and wind power density at the height of 100-200 m from August to November 2020 using the data from Doppler wind measurement lidars at two observatories in the Sansha area, Fujian Province. The results showed that the turbulence intensity gradually decreased and wind power density gradually increased with the increase of height at both the coastal and inland monitoring points. In terms of daily variation, the values of turbulence intensity at the vertical heights of 103.9 m, 155.9 m and 207.8 m were the largest and the wind power densities were the smallest before sunrise. At these three heights, in the coastal regions, the maximum values of turbulence intensity were 0.178, 0.154 and 0.133, and the minimum values of wind power densities were 138.463 W/m², 175.860 W/m² and 186.455 W/m², respectively. While in the inland regions, the maximum values of turbulence intensity were 0.180, 0.144 and 0.121, and the minimum values of wind power densities were 145.835 W/m², 184.868 W/m² and 196.712 W/m², respectively. The turbulence intensity was the weakest and the wind power density reached the maximum after sunset. Also at those three heights, in coastal areas, the minimum values of turbulence intensity were 0.106, 0.088 and 0.075, and the maximum values of wind power densities were 259.219 W/m², 299.590 W/m² and 322.200 W/m², respectively. In inland regions, the minimum values of turbulence intensity were 0.116, 0.086 and 0.074, and the maximum values of wind power densities were 254.318 W/m², 303.084 W/m² and 328.150 W/m², respectively. From the inter-monthly variation of wind resources, the monthly average values of wind power density in August and September were about 100 W/m²; the wind energy resources were abundant in October and November, and the monthly average value of wind power density in November reached about 800 W/m².

Keywords

Doppler Wind Lidar, Ultrasonic Anemometer, Turbulence Intensity, Wind Power Density

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在当前保护环境、应对气候变暖的迫切需求下, 清洁、可再生的风能对环境友好, 亟待进一步开发利用[1]。我国拥有超过 1.8 万公里的海岸线, 海上风电潜力巨大, 可开发容量达到 30 亿千瓦。与陆地风电不同, 海上风电更少受土地占用、噪声污染等因素制约[1] [2] [3] [4]。我国传统能源主要分布在西北内陆, 而经济重心在东南沿海, 海上风电不仅可以弥补能源供应的不足, 而且能够有效降低火力发电导致

的环境污染，“向海争风”正成为东部沿海地区绿色低碳发展的“蓝色动力”[5]。根据《2021年中国海洋经济统计公报》[4]，我国海上风电新增容量连续多年领跑全球。据国际能源署预测，2040年我国海上风电装机容量将与整个欧盟相当，减排能力将进一步提升。

近年来，随着国家和沿海省份高度重视开发潜在的海上风能，风电设备大型化，风电生产基地正在向沿海转移。然而，随着风机高度不断突破，传统的气象站点测风手段已无法满足监测需求。为了在风电场设计和运行过程中避免资金、人力、物力投入的浪费，亟待深入研究和揭示沿海地区风的时空变化规律[6]。国内外学者在这方面已开展了一些研究。如钱莉等[7]利用河西走廊东部设置的气象自动观测站收集的1971~2004年期间逐小时观测数据，发现相较于年平均风速仅2.7 m/s的北部地区，南部地区大于等于3.5 m/s，年平均有效风能时数大于5000 h，风能资源丰富。基于测风塔观测，Serhat Kucukali等[8]分析了2008年6月至2009年6月伊兹米特地区50米高度处收集的风数据，发现当地盛行东北偏东风向，湍流强度与高度呈现负相关。王丽娜等[9]通过气象站常规观测数据对大连地区风能资源进行评估时发现，大连多年平均风速为3.8 m/s，沿海的风速风能最为丰富，尤其是旅顺地区，30年平均风功率密度高达191.7 W/m²，是大连内陆地区的3~4倍。龙强等[10]针对放置在渤海湾北岸地区的两座测风塔的观测数据进行比对，发现海上的测风塔相对于沿岸的测风塔探测得到的平均风速更大，在110 m高度能达到7 m/s的风速；而湍流强度刚好相反，海上的湍流强度普遍小于沿岸的湍流强度，且随着高度的上升湍流强度的变化愈发平缓，70 m至110 m之间湍流强度基本稳定在0.08左右。

综上所述，以往研究人员在进行风能研究时多基于测风塔或气象站等传统观测手段，垂直高度信息有限、时间和空间分辨率低、设备维护成本昂贵、后期人员维修困难等不足，使得这方面的研究很缺乏，特别是针对电机垂直高度上的风能变化规律的研究尚罕见。而多普勒测风激光雷达可以提供秒级时间分辨率、米级空间分辨率的监测数据，能够弥补传统手段的不足。因此，本研究利用基于福建三沙和沿海两部多普勒测风激光雷达探测到的数据，对在风机典型高度100~200米的湍流强度、风功率密度等风能特性日变化和月际变化规律进行研究，以此来更具体地了解电机垂直高度上的风能变化规律，以期为沿海风能的监测与开发利用提供新的参考依据。

2. 研究方法

本研究在福建省宁德市三沙镇(经度119.9205，纬度26.8636)展开。福建省宁德市，地处我国东南沿海地区，海洋资源得天独厚，海域面积4.45万平方公里，大陆海岸线1046公里，占全省三分之一左右。海洋渔业资源丰富，是福建省乃至中国重要的海水养殖区域，约60万人从事海上养殖、捕捞和加工销售，渔业已成为当地沿海乡村振兴的重要支柱产业。由于常年受海洋季风气候影响，该地区拥有储能丰富的风资源，年平均风速可达到6 m/s [11]。

整个观测过程共配备三台仪器，分别是两台不同型号的多普勒测风激光雷达(以下简称激光雷达)和一部安装在测风塔上的超声风温仪。Wind PrintV2000型号激光雷达放置在三沙气象站，代表内陆区域。Wind PrintS4000激光雷达安装在台风观测基地，代表沿海区域。测风塔相距三沙气象站300米左右的距离，距离观测基地几百米。

研究首先验证了激光雷达在边界层风场的探测精度，将安装在测风塔最高70米处的超声风温仪的观测数据作为真值，与激光雷达77.9米的风场数据进行比对，因高度非常接近故视为在同一高度观测。在此基础上，本研究针对湍流强度、风功率密度等风能特性日变化和月际变化规律进行分析，重点探究100米至200米风机典型高度上的风能变化特征。

从以往对福建沿海地区的研究来看，秋季风能资源丰富，其有效风能占比高，且秋季风能变异系数低，稳定性好，同时夏季是风能最丰富的时段[12]。据文明章等人研究[13]，福建沿海地区8~11月份的

平均风速以及平均有效风功率密度在年变化中处于中高值阶段,其中 10 月份风能资源最丰富,平均风速和平均有效风功率密度分别为 9.1 m/s 和 742.0 W/m²;朱琳等人的研究表明[14],福建沿海地区 8~11 月份的风速和风能密度变化趋势相同,在年变化中处于中高值阶段,8 月最低,11 月最高。因此,本研究针对 2020 年 8 月至 11 月进行研究。

2.1. 多普勒测风激光雷达

多普勒测风激光雷达的原理是向大气中发射激光信号,与大气中的组分发生作用,利用多普勒频移与风速之间的关系,测量多普勒频移,进而反演计算出风场[15],而反演技术是通过多普勒光束定向摆动(Doppler-Beam-Display, DBS)和速度方位显示(Velocity-Azimuth-Display, VAD)这两种扫描方式进行。多普勒测风激光雷达跟传统观测风装置相比,克服了传统装置使用寿命短、使用环境要求高、高度受限、分辨率低等缺点,因此大大提高了监测数据的测量精度和测风准确性[16]。

本研究采用的多普勒测风激光雷达是青岛华航环境科技有限责任公司生产的 WindPrint S4000 型号和 WindPrint V2000 型号的激光雷达(图 1)。这两种型号的激光雷达都采用 DBS 扫描方法,即在固定角度的情况下,通过不同角度方位组合的探测来实现测量的一种技术方法。WindPrint S4000 激光雷达能探测 4000 m 以下的径向风速、风廓线和垂直风速。时间分辨率 5 s,空间分辨率 15m,测风精度在 0.100 m/s 以内,工作温度范围为-30℃~+50℃,有着体积小、功耗低,安装方便、启动快捷的优点;WindPrint V2000 激光雷达同样能探测垂直高度 3000 m 以下的风速与风向数据。时间分辨率 3~4 s,风速测量范围 0~75 m/s,工作温度范围为-40℃~60℃,具有重量轻、方便携带测量和利用率高等特点。

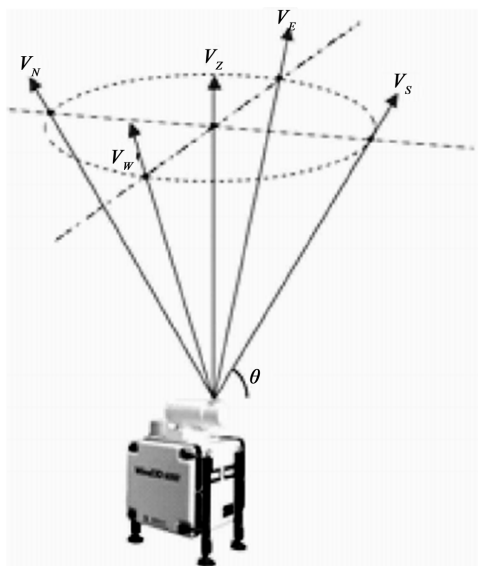


Figure 1. WindPrintS4000 lidar and WindPrintV2000 lidar

图 1. WindPrintS4000 (左)、WindPrintV2000 (右)型号多普勒测风激光雷达

2.2. 超声风温仪

本研究中配备的超声风温仪是由 Gill 公司提供的 WindMaster Pro 型三维超声波风速风向计(图 2),分别在测风塔 10 m、30 m、50 m 和 70 m 高度处各分布一台,以此探测各高度处的风场情况。超声风温仪能提供声温、声速和 UVW 风矢量输出,可在 0~65 m/s 风速下正常工作,风速分辨率达到 0.010 m/s,风向的探测范围为 0°~359°。此外,从数据采集频率来看,该仪器可达到 20 Hz 的观测频率。

2.3. 监测过程与数据处理

为了解观测期间福建三沙地区的气候状况,采用当地气象自动站逐小时的探测数据进行分析(图 3),发现观测期间自动站收集到的最高气温是在 9 月 14 日的 11:00,气温为 32.4℃,最低气温则是在 10 月 22 日凌晨 1:00,为 13.1℃。8、9 月份平均气温为 27℃,气温总体上保持在 23℃~30℃范围,较为稳定;10 月份平均气温为 22℃,气温上下波动幅度较大。8、9 月份平均相对湿度 82.4%,相对湿度总体维持在 70%~90%之间,10 月份平均相对湿度 76.1%,整体波动较大,相对湿度总体处于 50%~80%区间。



Figure 2. Ultrasonic wind thermometer
图 2. 超声风温仪

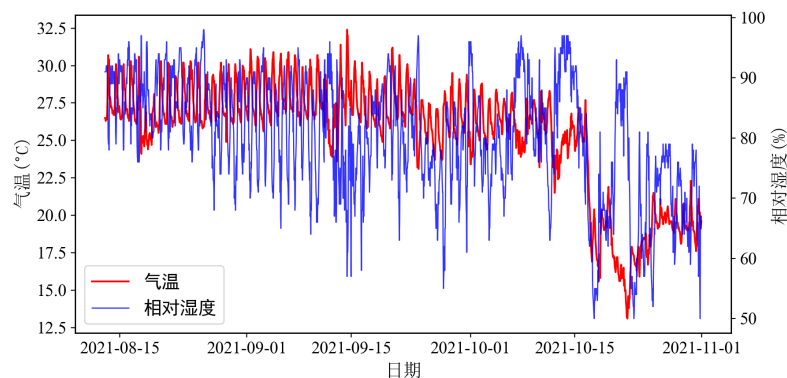


Figure 3. Temperature and humidity change with time
图 3. 温度湿度随时间变化图

为确保数据处理过程可靠,需要针对个别变量进行质量控制,例如水平风速大于 50 m/s;垂直风速大于 20 m/s 或小于 -20 m/s;风向小于 0°或大于 360°;信噪比小于 7 的数据都要筛选出来剔除[17]。为评估三沙地区的风能资源情况,本研究决定从湍流强度、风功率密度等风能特性展开分析,具体的计算公式如下:

$$TI = \frac{\sigma_{\mu}}{\bar{\mu}} \quad (1)$$

$$k = \left(\frac{\sigma_{\mu}}{\bar{\mu}} \right)^{-1.086} \quad (2)$$

$$c = \frac{\bar{\mu}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (3)$$

$$p = \frac{1}{2} \rho c^3 \Gamma \left(1 + \frac{3}{k} \right) \quad (4)$$

注： TI 为湍流强度， σ_μ 为 10 分钟风速标准偏差， $\bar{\mu}$ 为 10 分钟平均风速， k 为威布尔分布的形状参数， c 为威布尔分布的尺度参数， p 为风功率密度， ρ 为空气密度， Γ 为 gamma 函数。

3. 结果与讨论

3.1. 数据情况概述

福建省宁德市三沙镇地处我国东南沿海地区，常年受海洋季风气候影响，拥有储能丰富的风资源，年平均风速可达到 6 m/s，因此监测该地区的风能具有代表性[18]。如图 4，实测数据结果显示 S4000 型和 V2000 型两部激光雷达在 77.9 m 高度探测到的三沙地区的风速与放置在测风塔 70 m 上的超声风温仪观测的风速相关性均达到 0.9 以上，整体的变化趋势较为一致。其中，8、9 月份的风速总体处于 0~8 m/s 范围，偏小，且上下波动剧烈；10、11 月份的平均风速集中在 6~12 m/s 区间且无明显波动，说明 10、11 月份的风速相对稳定的。S4000 激光雷达于 9 月 17 日 22:30 探测到最小风速 0.149 m/s，在 8 月 26 日 18:30 探测到最大风速 18.048 m/s。同一高度，V2000 激光雷达在 9 月 17 日的 23:10 观测到最小风速 0.247 m/s，在 11 月 6 日观测到风速峰值 17.835 m/s。

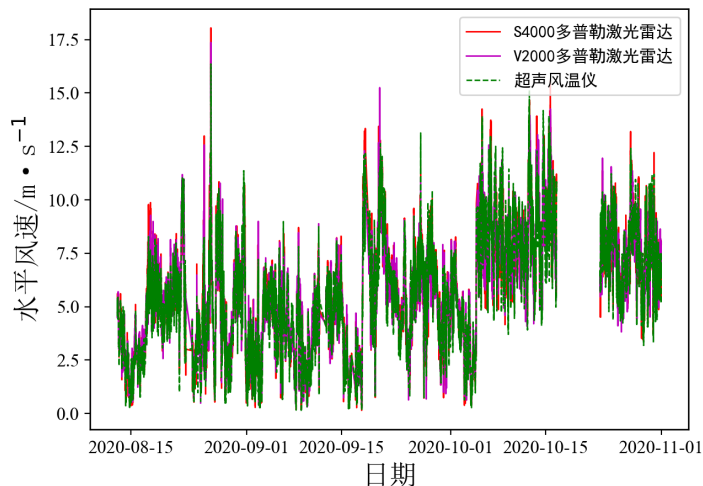


Figure 4. The horizontal wind speed changes with time

图 4. 水平风速随时间变化图

进一步对计算得到的湍流强度、风功率密度作日变化平均处理时发现(图 5)，三部仪器在 77.9 m 高度探测的湍流强度从总体上而言均是经历了 0 时至 9 时增大、9 时至 24 时减小的日变化过程，S4000 激光雷达、V2000 激光雷达和超声风温仪探测到的湍流强度各自在 9:10、8:10、9:00 时刻是最大的，分别为 0.190、0.202、0.258，在 19:30、20:40、21:40 三个时刻湍流强度都是最小的，仅为 0.120、0.135、0.135。风功率密度的日变化也有着相似的变化趋势，7 时至 9 时是风功率密度最小的时段，下午 15:30~19:00 是风功率密度最大的时段。湍流强度在 9 时达到极值的可能原因为，随着时间的推移地面温度不断升高大气温度也不断升高，地面与海平面上空的大气温度差异逐渐缩小，并且空气密度差异也不断缩小。不论是湍流强度，还是风功率密度，两部激光雷达和超声风温仪的计算结果都具有很强的相关性，湍流强度方面超声风温仪与两部激光雷达之间的相关性均达到了 0.65 以上，风功率密度方面相关性也是都超过了 0.8，由此也验证了两部激光雷达对湍流强度、风功率密度的测算是真实可靠的。

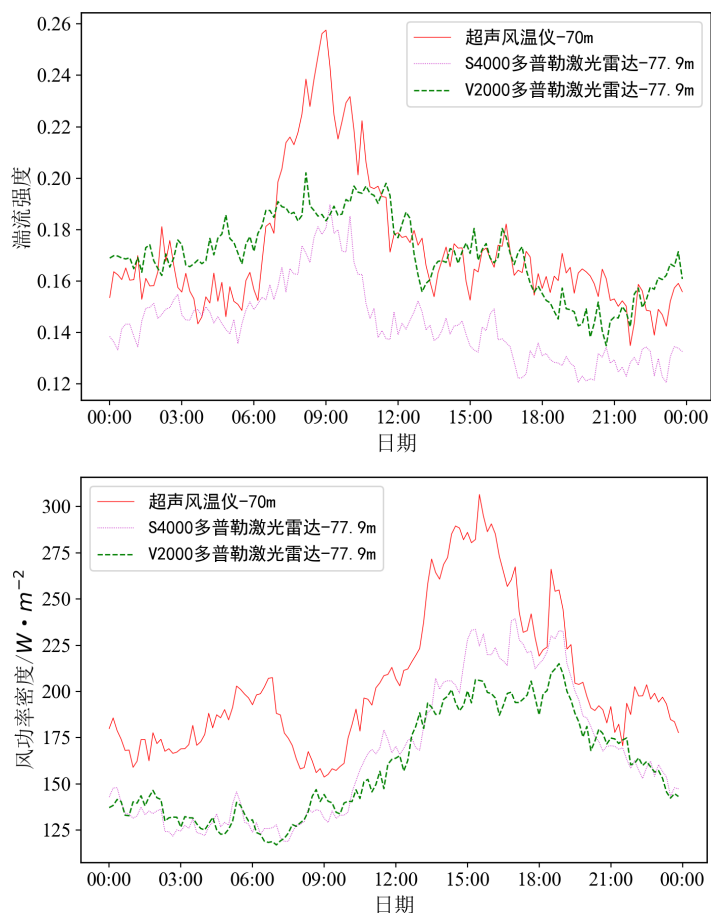


Figure 5. Daily variation of turbulence intensity and wind power density at a height of 77.9 m
图 5. 77.9 m 高度湍流强度和风功率密度日变化图

3.2. 日变化

为继续探究三沙地区风能的日变化垂直分布特征,本研究选取了 103.9 m、155.9 m、207.8 m 三个典型高度分析整个试验期间 8 月至 11 月的湍流强度、风功率密度的日变化平均情况。

湍流强度通常随地形、天气、季节变化等因素发生改变,能有效地反映风的脉动变化特征[19]。湍流强度作为风资源前期评估工作中的重点评估对象,其结果对风电场选址、风机设置起着重要参考价值[20]。如图 6,两部激光雷达在三个高度估算的湍流强度其日变化平均情况的走势较为一致。S4000 激光雷达计算得到的湍流强度有明显的日变化,0 时至 9 时湍流强度上升,9 时至 24 时湍流强度下降,V2000 激光雷达的湍流强度的日变化时间相比 S4000 激光雷达出现滞后,可能与两部雷达放置位置不同有关,0 时至 11 时湍流强度呈上升趋势,11 时至 24 时湍流强度呈下降趋势。

由表 1 的统计结果发现,整体的湍流强度是随着探测高度的增大而减小的,且随着高度的升高湍流强度减小的趋势也在趋于平缓,S4000 激光雷达从 103.9 m 到 155.9 m 湍流强度降低 13.534%,从 155.9 m 上升到 207.8 m 湍流强度降幅 12.174%,同样的,V2000 激光雷达计算的湍流强度从 103.9 m 到 155.9 m 减小 22.819%,从 155.9 m 到 207.8 m 降幅的趋势进一步减缓,只有 15.652%,这与龙强的研究结论是一致的。从探测位置来看,沿海放置的 S4000 激光雷达 103.9 m 探测高度处的湍流强度相比内陆监测点的 V2000 激光雷达同一高度处的湍流强度要小,可能是因为陆地地形更为复杂,下垫面更为粗糙,使得风速减小所导致的。155.9 m 和 207.8 m 两个高度沿海和内陆监测点的湍流强度大小基本相同。从日变化平

均情况来看,上午时段的湍流强度总体大于下午时段的湍流强度,S4000 激光雷达在三个高度上探测到的湍流强度日变化的最小值的时刻均是 19:50,V2000 激光雷达探测到最小湍流强度也是稳定在 19:30 或 19:40 时刻。由此看出在 100~200 m 高度区间内的风资源较传统测风设备所测风资源更为丰富。

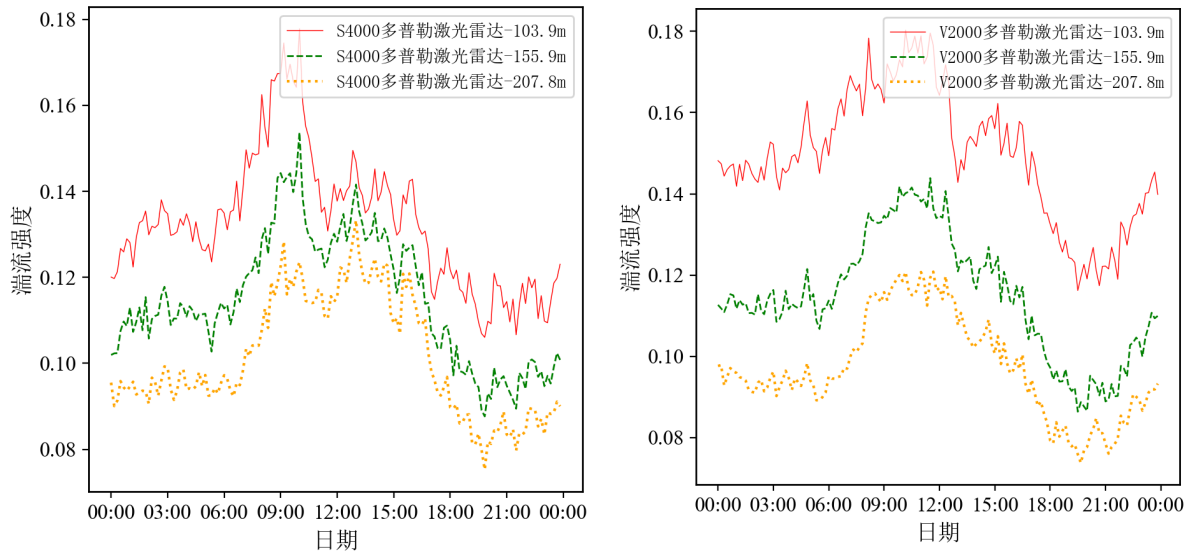


Figure 6. Diurnal variation of turbulence intensity at three detection altitudes

图 6. 三个探测高度上的湍流强度日变化图

Table 1. The turbulence intensity of lidar at different heights

表 1. 多普勒测风激光雷达不同高度的湍流强度

多普勒测风激光雷达探测高度	平均值	最小值	最大值
S4000 激光雷达 103.9 m	0.133	0.106	0.178
V2000 激光雷达 103.9 m	0.149	0.116	0.180
S4000 激光雷达 155.9 m	0.115	0.088	0.154
V2000 激光雷达 155.9 m	0.115	0.086	0.144
S4000 激光雷达 207.8 m	0.101	0.075	0.133
V2000 激光雷达 207.8 m	0.097	0.074	0.121

图 7 表现了 S4000 型、V2000 型激光雷达湍流强度在三个垂直高度上每个月的日变化,结果表明两部激光雷达的测算结果具有较高的相关性。无论是 S4000 激光雷达,还是 V2000 激光雷达,在三个不同高度上四个月的湍流强度日变化都存在类似的走势分布,日出时段的湍流强度达到最大,日落时分的湍流强度则最小。

风场的可靠预测是风电场优化设计和运行的重要基础,而风功率密度是预测风场功率输出的关键因素[21]。相比湍流强度,两部激光雷达在三个高度上估算到的风功率密度的日变化平均情况整体吻合程度更高(图 8)。S4000 激光雷达计算到在 0 时至 9 时、19 时至 24 时两个时间段内风功率密度随着时间的变化而减小,9 时至 19 时随时间的增大而增大,V2000 激光雷达的探测结果显示在 0 时到 10 时和 19 时到 24 小时两时段内风功率密度呈减小趋势,10 时至 19 时内呈上升趋势。

结合表 2 可以发现,从探测高度来看,高度越高风功率密度也更大,但随着高度的提高风功率密度

增大的趋势也在减缓, S4000 激光雷达在 103.9 m 到 155.9 m 探测高度内风功率密度上涨幅度达 20.46%, 而从 155.9 m 到 207.8 m 之间风功率密度涨幅仅为 10.814%。V2000 激光雷达测算的风功率密度从 103.9 m 高度到 155.9 m 高度, 中间涨幅有 19.207%, 而从 155.9 m 到 207.8 m 高度只上涨了 6.407%。可以看出风功率密度在 100~200 m 高度区间内是逐渐增大的, 涨幅速度却趋于平缓。从探测位置来看, 沿海的风功率密度整体上均低于内陆监测点的风功率密度, 与王丽娜等人关于沿海与内陆监测点之间风功率密度的结论相矛盾, 这可能是由于地形因素造成激光雷达受遮挡所造成的。从日变化平均情况来看, 上午时段的风功率密度明显小于下午的风功率密度。两部激光雷达计算得到的最大风功率密度的时间稳定在 18:50 左右, 风功率密度最小的时段集中在 9:00~11:00 之间, 都与湍流强度的分布特征呈现相反的趋势。

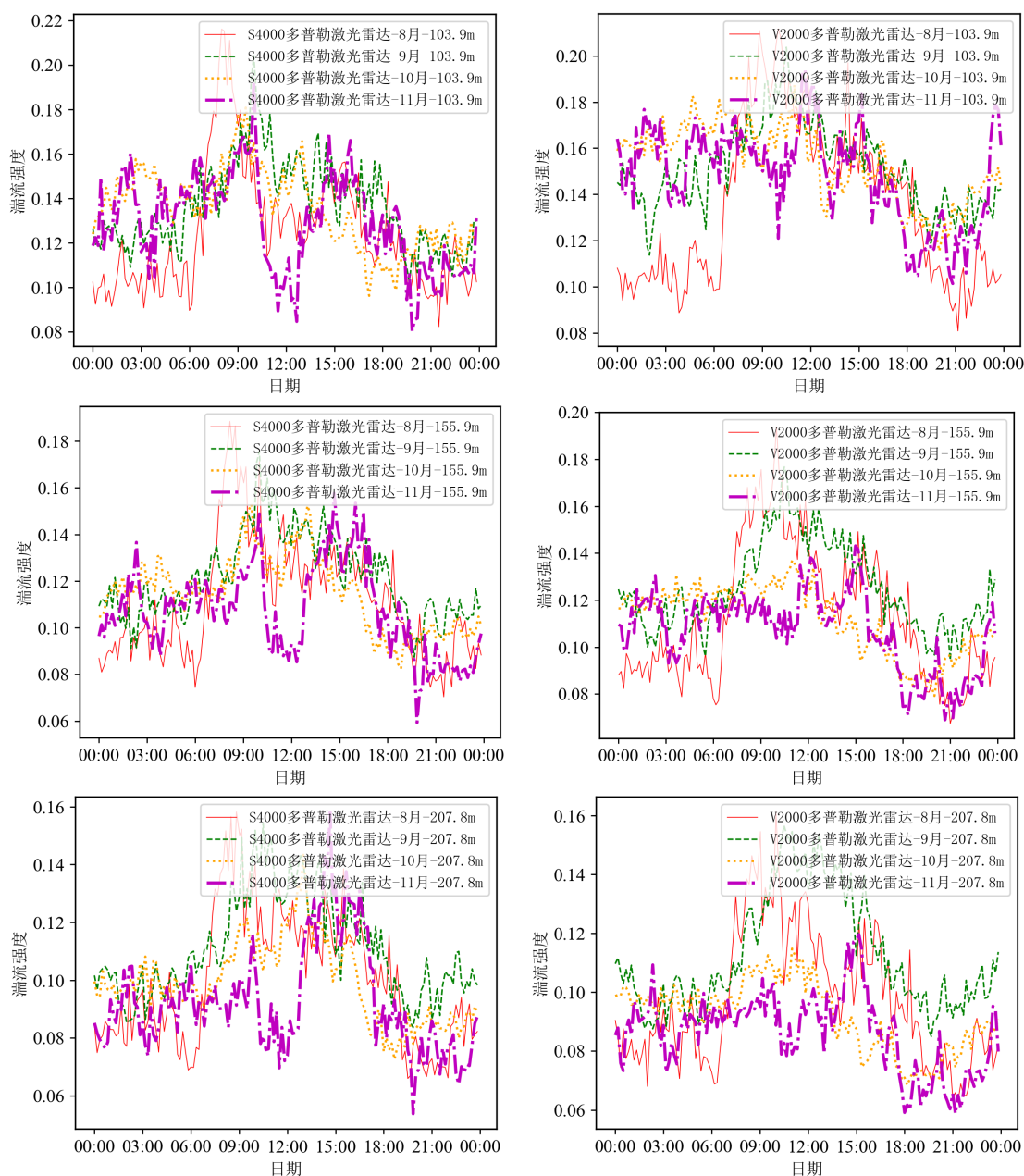


Figure 7. Monthly daily variation of turbulence intensity at the three detection heights

图 7. 三个探测高度上湍流强度每个月的日变化图

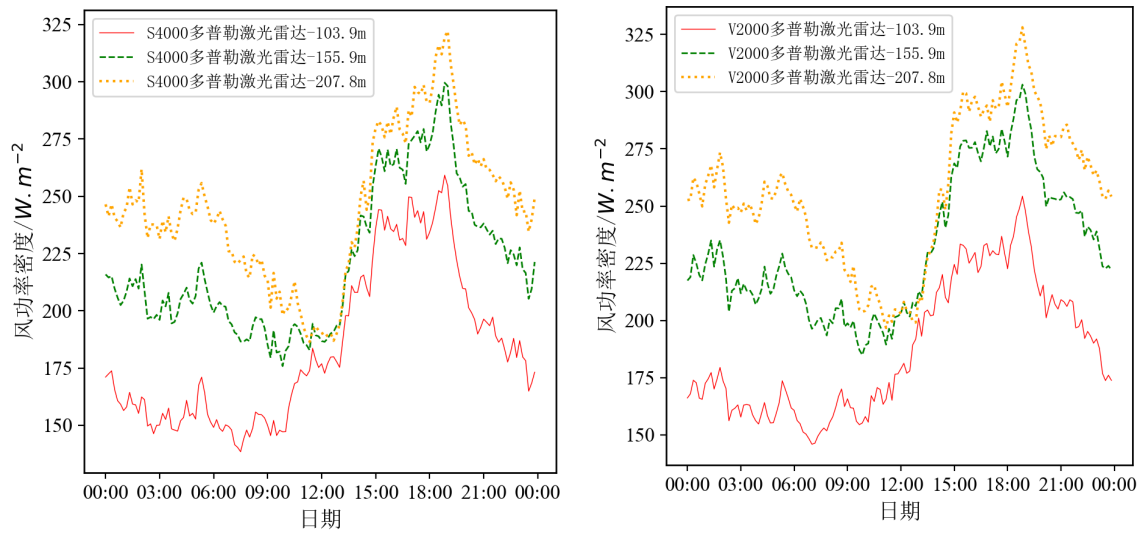
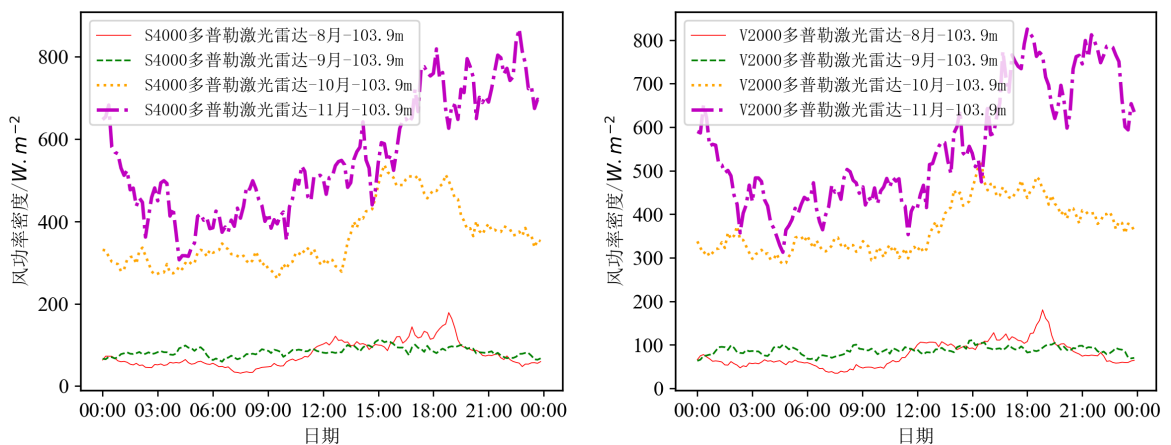


Figure 8. Daily variation of wind power density at three detection altitudes
图 8. 三个探测高度上的风功率密度日变化图

Table 2. Wind power density at different heights of lidar
表 2. 多普勒测风激光雷达不同高度的风功率密度

多普勒测风激光雷达探测高度	平均值	最小值	最大值
S4000 激光雷达 103.9 m	183.552	138.463	259.219
V2000 激光雷达 103.9 m	187.104	145.835	254.318
S4000 激光雷达 155.9 m	221.105	175.860	299.590
V2000 激光雷达 155.9 m	231.583	184.868	303.084
S4000 激光雷达 207.8 m	245.016	186.455	322.200
V2000 激光雷达 207.8 m	255.604	196.712	328.150

图 9 展现了 S4000 型、V2000 型激光雷达风功率密度每个月的日变化在垂直高度上的分布，计算结果显示两部激光雷达对风功率密度的测算一致性是比较好的。8、9 月份的风功率密度日变化总体上没有过大的波动，基本是稳定在 100 W/m^2 左右，10、11 月份风功率密度日变化上下产生较大波动，下午时段的风功率密度相较于上午时段的风功率密度整体有 50% 的上涨。



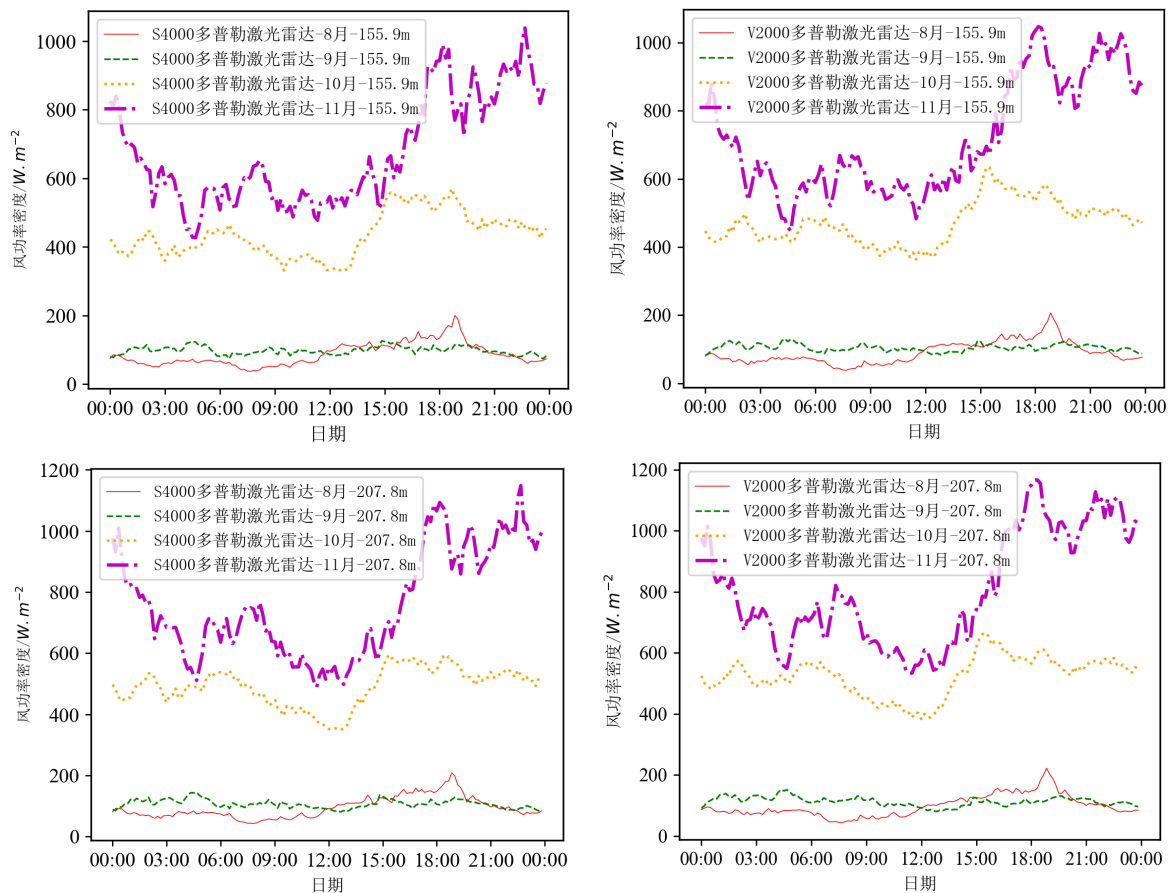


Figure 9. Monthly daily variation of upwind power density at three detection altitudes

图 9. 三个探测高度上风功率密度每个月的日变化图

3.3. 月际变化

结合月平均湍流强度图 10 发现, 155.9 米和 207.8 米高度上湍流强度最大值出现在 9 月, 湍流强度

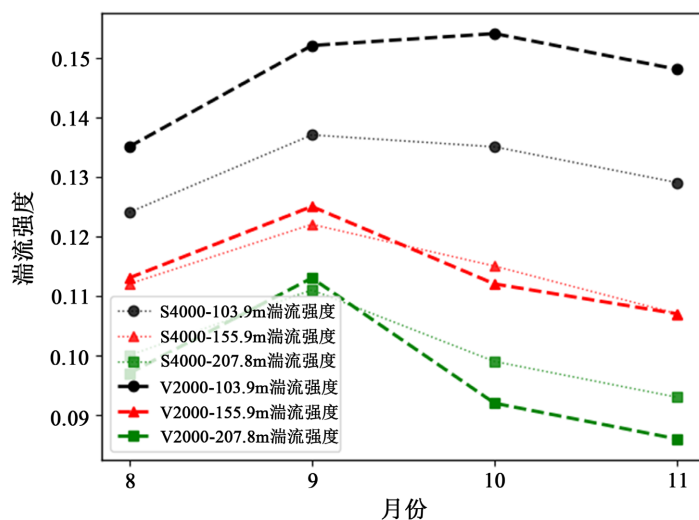


Figure 10. Monthly average turbulence intensity at three detection altitudes

图 10. 三个探测高度上的月平均湍流强度

最小值出现在 11 月, 推断可能与 9 月份的风速都小于 11 月份的水平风速有关。从探测高度看, 随着高度的上升该地区的湍流强度也在不断的减小, 且减小的趋势也是趋于缓和, 103.9 m 处每个月平均湍流强度范围在 0.12~0.15 之间, 155.9 m 和 207.8 m 的平均湍流强度范围则稳定在 0.09~0.12。从探测位置来看, 8、9 月份内陆监测点的湍流强度整体要高于沿海边的湍流强度。

结合月平均风功率密度图 11 看, 随着高度的上升该地区的风功率密度也在不断的增大, 而增大的趋势也是在减缓, 在 103.9 m 到 155.9 m 之间风功率密度上涨了超过 20%, 而从 155.9 m 到 207.8 m 上涨幅度仅有 12% 左右。从探测位置来看, 内陆监测点每个月平均风功率密度都是大于沿海的这个可能是因为受地形干扰或者是受风向影响。相比 8、9 月份, 10、11 月份的风能资源更加丰富, 结合季节来看, 8 月份属于夏季, 9、10、11 月份属于秋季, 整体风能资源情况夏季少, 秋季多, 尤其是秋末时段风功率密度最盛。

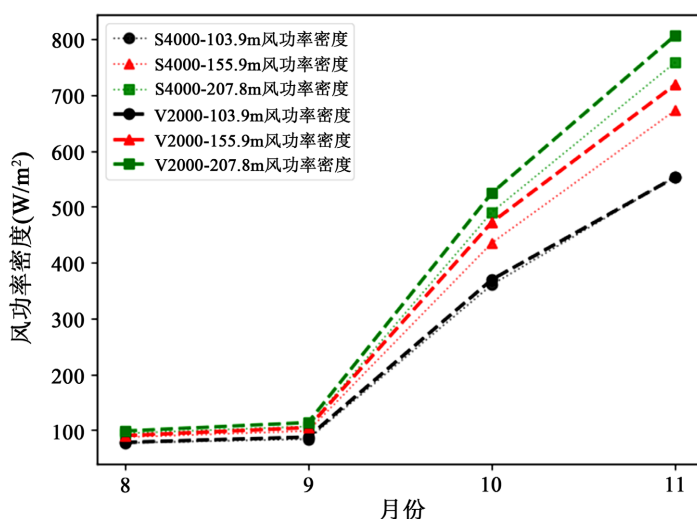


Figure 11. Monthly average wind power density at three detection altitudes
图 11. 三个探测高度上的月平均风功率密度

4. 结论

本研究利用位于福建三沙的 S4000 型和 V2000 型多普勒测风激光雷达, 分析了我国典型的东南沿海地区——福建三沙内陆和沿海两个监测点在风机典型高度 100-200 米的湍流强度、风功率密度的分布特征, 为后续高效开发利用沿海风能提供科学参考依据。主要研究结论如下。

1) 观测期 S4000 多普勒测风激光雷达探测到的 77.9 米高度的最大风速是 18.048 m/s, V2000 多普勒测风激光雷达探测到的 77.9 米高度的最大风速是 17.835 m/s。

2) 随着探测高度的上升, 两部多普勒测风激光雷达测算的湍流强度逐渐减小、风功率密度逐步增大, 且减小或增大的趋势趋于平缓。一般来说, 为了产生更高的电能, 风力涡轮机都会建在风功率密度更高的地方, 考虑到成本问题, 建议将风机安装高度设置在 150 米左右。

3) 风功率密度和湍流强度的日变化基本呈现相反分布, 日出前湍流强度最大, 风功率密度最小; 日落后湍流强度最小, 风功率密度达到最大。8、9 月份三个高度上的风功率密度基本稳定在 100 W/m² 左右, 风能资源相对较少; 10、11 月份风功率密度随着高度上升而增大, 具有丰富的风能储能资源。考虑到 8、9 月份属于夏末秋初时节, 太阳能资源较多, 因此建议将风能和太阳能进行结合来提供发电, 而 10、11 月份则充分利用风能资源进行发电。

基金项目

科技部重点研发计划(2018YFC1506303, 2018YFC1506305); 科技部重点研发计划国际合作专项(2017YFE0107700); 国家自然科学基金(41775065, 41475060, 41805088); 本研究同时受上海气象局台风科技创新团队支持。

参考文献

- [1] 孙萍玲, 李学平, 赵海燕, 孙祺, 刘伟江. 风电机组噪声特性研究[J]. 中国环境监测, 2022, 38(2): 129-135.
- [2] 施建荣, 姚德飞, 任剑盛, 等. 风电场风机噪声监测方法初探[J]. 中国环境监测, 2012, 28(6): 117-120.
- [3] 牟永铭, 严中平. 风电场噪声影响模拟方法研究[J]. 中国环境监测, 2012, 28(6): 45-48.
- [4] 自然资源部网站. 2021 年中国海洋经济统计公报[EB/OL]. http://www.gov.cn/xinwen/2022-06/07/content_5694511.htm, 2022-06-07.
- [5] 新华网. 我国“向海争风”领跑全球[EB/OL]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1734984116150525359&wfr=spider&for=pc>, 2022-06-07.
- [6] 杨振斌, 薛桁, 袁春红, 等. 用于风电场选址的风能资源评估软件[J]. 气象科技, 2001, 29(3): 54-57.
- [7] 钱莉, 杨永龙, 杨晓玲, 等. 河西走廊东部风能资源分布特征及开发利用[J]. 气象科技, 2009, 37(2): 198-204.
- [8] Kucukali, S. and Dinkal, I. (2014) Wind Energy Resource Assessment of Izmit in the West Black Sea Coastal Region of Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **30**, 790-795. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.11.018>
- [9] 王丽娜, 祝青林, 徐梅. 大连地区风能资源评估及分布[J]. 气象科技, 2010, 38(4): 521-525.
- [10] 龙强, 王锋, 王畅, 等. 渤海湾北岸海陆风及湍流强度特征分析[J]. 应用海洋学学报, 2020, 39(3): 303-311.
- [11] 张天明. 福建风能资源开发利用探讨[J]. 中国农村水利水电, 1996(9): 29-31.
- [12] 文明章, 吴滨, 林秀芳, 等. 福建沿海 70 米高度风能资源分布特点及评估[J]. 资源科学, 2011, 33(7): 1346-1352.
- [13] 朱琳, 谢婷, 王怡人, 等. 基于 Sentinel-1 合成孔径雷达卫星影像的福建沿海区域风能资源分析[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2022, 61(1): 140-148.
- [14] 李军, 胡非. 复杂地形下激光雷达测风误差的修正[J]. 可再生能源, 2017, 35(5): 727-733.
- [15] 戴慧珠, 陈默子, 王伟胜, 等. 中国风电发展现状及有关技术服务[J]. 中国电力, 2005, 38(1): 80-84.
- [16] 刘航. 风电场激光雷达测风应用技术研究[C]//中国农机工业协会风能设备分会《风能产业》编辑部. 风能产业. 北京: 《风能产业》编辑部, 2017: 98-100.
- [17] 史文浩, 汤杰, 陈勇航, 等. 多普勒激光雷达探测台风“利奇马”边界层风场精度分析[J]. 热带气象学报, 2020, 36(5): 577-589.
- [18] 宋丽莉, 毛慧琴, 钱光明, 等. 热带气旋对风力发电的影响分析[J]. 太阳能学报, 2006, 27(9): 961-965.
- [19] 班欣, 冯还岭, 祁欣, 等. 连云港沿海近地层湍流强度特征[J]. 气象科技, 2012, 40(2): 285-292.
- [20] Al-Hinai, A., Charabi, Y. and Aghay Kaboli, S.H. (2021) Offshore Wind Energy Resource Assessment across the Territory of Oman: A Spatial-Temporal Data Analysis. *Sustainability*, **13**, Article 2862. <https://doi.org/10.3390/su13052862>
- [21] 赵燕华, 蒋翠花, 吴杰. 宿迁 70 米高度测风塔风速和风能的变化特征分析[C]//中国气象学会. S8 大气探测与仪器新技术、新方法. 青岛: 中国气象学会, 2012: 353-358.