

# 基于 Sentinel-1 合成孔径雷达卫星影像的 福建近海风能资源分析

朱琳<sup>1</sup>, 谢婷<sup>1</sup>, 王怡人<sup>1</sup>, 胡利平<sup>2</sup>, 耿旭朴<sup>1\*</sup>

(1. 厦门大学海洋与地球学院, 近海海洋环境科学国家重点实验室, 海洋遥感大数据福建省高校工程研究中心, 福建 厦门 361005; 2. 电磁散射重点实验室, 北京 100854)

**摘要:**海面风场风能资源分析对海上风电场的建设开发具有重要意义。近年来随着遥感技术的发展, 星载合成孔径雷达(SAR)为海面风能的分析与评估提供了新的手段。基于2015—2019年福建沿海区域的122景Sentinel-1 SAR影像, 采用快速傅里叶变换(FFT)风向反演方法及地球物理模式函数CMOD5.N风速反演方法对福建沿海进行SAR风场反演, 并从风能有效性、风能稳定性及风能时空分布特征等方面分析了福建近海风能资源。得到的主要结论为: 风速数值范围较大的秋、冬季有效风能占比较高, 可达到70%以上; 福建沿海地区多年平均风能稳定性较好, 春、秋、冬季风能稳定性较好, 夏季风能稳定性较差; 福建沿海风能的分布主要为东北-西南走向逐渐递减类型, 在台湾海峡中部区域出现风能最大值。

**关键词:** 合成孔径雷达; Sentinel-1; 风场反演; 风能资源分析

**中图分类号:** P 743      **文献标志码:** A

风能属于可再生能源, 具有无污染、可持续等优势, 且随着风能发电技术的不断改进与完善, 其发电生产成本大幅降低, 已逐步接近传统能源, 是最具开发前景的新能源发电方式之一。目前, 近海风能资源分析研究经常利用实地监测结果、卫星反演结果以及数值模拟结果等。使用卫星反演数据进行风能资源分析可以克服实测数据测量成本高、序列数据少等缺点。其中星载合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)是一种具有高成像分辨率的主动成像式微波雷达, 可以在全天候条件下工作, 其探测不受云层影响, 空间分辨率最高可达米级, 能够获取到台风的很多细节信息, 因此SAR在观测台风时有着很大的优势<sup>[1-3]</sup>。

提取SAR图像风向信息主要有快速傅里叶变换法(fast Fourier transform, FFT)和局部梯度法(local gradient, LG)等方法, 基于这些方法可以从单极化(VV或HH)SAR图像自带风条纹中提

取出风向信息，去除 180° 模糊后可以得到唯一确定的风向。反演 SAR 数据同极化 VV 模式风速利用的是地球物理模式函数 (Geophysical Model Function, GMF) CMOD 系列反演模型，由欧洲中期预报中心 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) 设计，目前有 CMOD4、CMOD5、CMOD5.N、CMOD7 等模型产品。如 Mouche 等<sup>[4]</sup>结合 CMOD 系列模型与多普勒频移效果进行 SAR 风场反演，该方法在 Sentinel-1 卫星 SAR 数据风场反演中取得了较好结果。Yang 等<sup>[5]</sup>将美国西部海岸三年 QuickSACT 散射计风场数据与 Radarsat-1 SAR 卫星遥感反演风场数据进行了相应时空匹配工作，证明了 SAR 数据更适用于近海风场反演。福建省海岸线总长六千多 km，海域面积 13.6 万 km<sup>2</sup>，沿海大于 500 m<sup>2</sup> 的岛屿有 1321 个，风能资源开发潜力巨大<sup>[6]</sup>，其中台湾海峡区域更因其独特“狭管效应”优势而形成天然海上风库，是我国海上风电开发的重点关注省份，国内学者对此进行风能资源的研究甚多<sup>[7-8]</sup>。Hasager 等<sup>[9]</sup>使用 SAR 影像及散射计数据反演了丹麦近岸海域风场，证明了 SAR 技术在近岸海域风能资源分析方面的适用性。文明章等<sup>[10]</sup>基于风塔 70 m 高度的观测资料分析福建沿海的风能资源分布特点，但以往学者的研究风能分布大多数是基于测风塔或模式再分析等资料，其数据量过少且分辨率不够高，且涉及中国近海区域的 SAR 影像风场反演工作及风能资源评估分析中对于海面不同高度处的风资源状况时空分析较少，缺乏结合实际风电场选址的风能参数分析工作，不能对风能资源分布进行准确评估。

针对以上问题，本文基于哨兵一号 Sentinel-1 卫星福建近海区域 SAR 影像数据，使用快速傅里叶 FFT 方法计算得到区域海面风向，并与 ERA-interim 外部风向数据相结合输入地球物理模型 CMOD5.N 中，计算得到对应区域海面风速数据，并使用有效风速、有效风能密度、风能变异系数、风向频率等指标对福建沿海区域风能资源时空分布特征进行了分析讨论。

## 1 数据与方法

### 1.1 数据来源

#### 1.1.1 Sentinel-1 数据

哨兵一号卫星 (Sentinel-1 A/B) 是欧空局 (European Space Agency, ESA) 哥白尼计划 (the Copernicus Program) 专门设计和开发的新卫星星座。数据来源于：<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>。

本文使用了 Sentinel-1 卫星 IW 模式的 L1 级高分辨率 GRD (ground range detected) 地距影像产

品数据共 122 景，其分布范围为 22° ~26° N，117° ~121° E，图像覆盖区域如图 1 所示。时间跨度为 2015—2019 年，每年各月份影像数量总体分布均匀，具有较好的统计意义<sup>[11]</sup>。不同年份影像数量分布如表 1 所示。

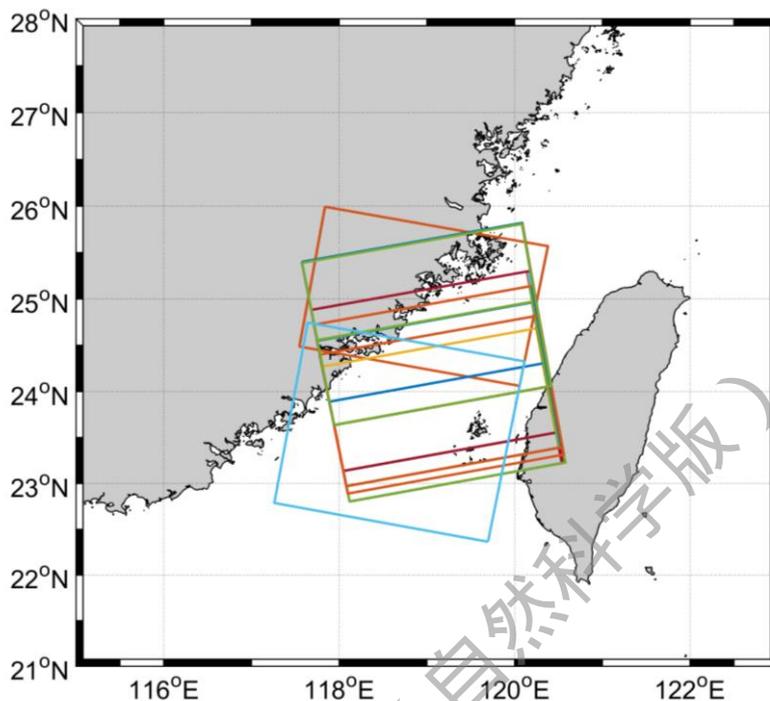


图 1 Sentinel-1 SAR 数据覆盖图

Fig.1 Sentinel-1 SAR data coverage map

表 1 Sentinel-1 SAR 数据年份分布表

Tab.1 Sentinel-1 SAR data year distribution table

年份	2015	2016	2017	2018	2019	总计
影像数量	18	29	26	29	20	122

### 1.1.2 ERA-interim 数据

ERA-interim 是一套数据量大、时空分辨率高、广泛使用的全球大气模式再分析规划化网格数据，是 ERA 整套数据中最新数据产品，由欧洲中尺度天气预报中心（European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF）提供（<https://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily/levtype=sfc/>），在观测资料的应用及同化方法方面也有很大改进<sup>[12]</sup>。

ERA-interim 再分析数据时空范围分布广阔，时间范围覆盖 1979 年 1 月 1 日至今不断更新中，时间间隔为 6 h，空间范围覆盖全球，其产品包括气压、海表温度、海表风场等大气海洋参数<sup>[12-13]</sup>，

其风场数据与卫星观测资料有着很好的匹配性<sup>[14]</sup>，满足中国近海风场研究精度要求。故本文使用 ERA-interim 产品中的  $0.125^{\circ} \times 0.125^{\circ}$  分辨率数值模拟风场数据为 SAR 数据风向反演提供辅助风向数据。

## 1.2 方法

本文收集 Sentinel-1 卫星福建近海区域 SAR 影像数据，基于 SAR 影像自带风条纹，使用快速傅里叶 FFT 方法计算得到 SAR 影像区域海面风向，与 ERA-interim 外部风向数据相结合，将得到的对应风向数据代入地球物理模型 CMOD5.N 中，计算得到对应区域海面风速数据，结合海面风向及风速数据得到福建近海区域高空间分辨率风场数据。使用反演得到的风场数据对福建近海区域海上进行了风能有效性和稳定性的分析，其中风能有效性的评估指标为有效风速和有效风能密度，风能稳定性的评估指标为风能变异系数和风向频率。并于最后使用 SAR 反演风场结果结合再分析数据，对福建近海区海上风能进行了时空变化特征。

### 1.2.1 风向反演

在进行海表风场反演前分别进行了辐射定标、陆地掩膜、噪声处理等数据预处理工作。GMFs 模式函数求解海面风速时需要风向信息作为初始信息输入。风向信息的来源主要有 SAR 自带风条纹提取风向及外部风向输入两种类型。为保证风向数据的时空匹配性及分辨率统一性，以直接提取 SAR 影像自带风条纹方法获取风向数据为主，ERA-interim 风场数据为辅来获取风向信息。

为了去除诸如海冰、溢油等海表特征因素对 SAR 图像风场反演的影响，将对 SAR 影像进行一次初始筛选，得到可用于提取风向的 SAR 影像。筛选过程中，利用非均匀性参数 CVAR 作为影像筛选判断条件，计算公式如下<sup>[15]</sup>：

$$CVAR = \text{var}(I) / (I)^2 \quad (1)$$

其中  $I$  为子图块后向散射系数，使用该公式可检验 SAR 影像  $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$  分解图块的同质性。当 CVAR 大于 1 时，图像影响因素不均匀，存在中尺度海洋或大气影响因素，此类影像图块区域将被舍弃。后续将使用 ERA-interim 海面风向数据作为这些图块区域的风向输入，由此可以排除 SAR 影像中的中尺度海洋或大气因素对风向提取的影响。

风向提取的方法主要有基于频率域及基于空间域。基于频率域的常见风向提取方法有快速傅里叶变换法 (FFT) 等，基于空间域有局部梯度法 (LG)，二维连续小波变换 (two-dimensional continuous wavelet transform, 2D-CWT) 方法等<sup>[16-17]</sup>。研究表明，FFT 方法较适合小风速范围风向反演，具体步

骤如下：

- 1) 选取合适的 SAR 子图像，进行滤波去噪处理；
- 2) 对子图像进行快速傅里叶变换得到其频谱图；
- 3) 对频谱图进行尺度分离，得到两个谱能量峰；
- 4) 对两个谱能量峰连线，风向与该连线垂直，但具有 180° 模糊；
- 5) 将 ERA-interim 风场数据作为风向辅助数据，利用北半球海区的热带气旋(TC)呈现出逆时针方向旋转的风场特征，对计算得到的风向进行校正，消除风向 180° 模糊的问题。

## 1.2.2 风速反演

SAR 反演海面风场的基本原理为 Bragg 共振机制，在 20° ~60° 的入射角范围内，海面粗糙度与雷达波束遵循 Bragg 谐振机制，海面风场对海表面粗糙度数值产生影响，可使后向散射系数 NRCS 发生变化<sup>[18]</sup>，关系表达式为：

$$k_r = 2k_{em} \sin \theta \quad (2)$$

其中， $k_r$  为 Bragg 共振波数， $k_{em}$  为电磁波波数， $\theta$  为 SAR 雷达波束入射角。因此，基于 SAR 影像后向散射系数可进行海洋表面风场反演。

地球物理函数模型建立了 VV 极化模式与卫星方位角、入射角以及海面风场的函数关系。SAR 影像同极化 VV 模式反演风场常用方法有 CMOD4、CMODIFR2、CMOD5、CMOD5.N、CMOD7 等模型。文中选用 CMOD5.N 模式进行风速反演，该模式由 Hersbach<sup>[19]</sup>于 2010 年对 CMOD5 模式函数的参数进行了相应校正后开发得到，具体计算公式如下：

$$\sigma^\circ = b_0(1 + b_1 \cos \varphi + b_2 \cos 2\varphi)^{1.6} \quad (3)$$

其中， $\sigma^\circ$  是后向散射系数 NRCS， $\varphi$  是相对风向，单位为， $b_0$ 、 $b_1$ 、 $b_2$  是关于风速的经验函数。

由上述方法反演得到的是海面 10 m 高度处的风场数据，而风能随海面高度的变化而变化，通常风能随海面高度的增高而呈上升趋势。因此，本文使用指数规律风廓线进行了海面不同高度风场数据的求取工作，以 SAR 影像 VV 极化反演得到的海面 10 m 高度风场数据为基础，利用指数规律风廓线工具，计算得到了不同高度的风场数据，指数规律风廓线具体计算公式<sup>[20]</sup>如下：

$$V_n = V_{10} \left( \frac{Z_n}{Z_{10}} \right)^\alpha \quad (4)$$

式中， $V_n$  和  $V_{10}$  分别为海表  $n$  m 和 10 m 高度处风速，单位是 m/s； $Z_n$  和  $Z_{10}$  为高度数值，单位是 m； $\alpha$  为风廓线切变指数，该指数主要与区域大气稳定度及下垫面海面粗糙度有关。式（4）是风能评估中最常用的公式<sup>[21-27]</sup>，丁国安<sup>[22]</sup>研究表明采用指数公式计算不同高度的风速十分接近实测值。

### 1.2.3 有效风速

在实际区域海上风能发电生产过程当中, 介于 3~25 m/s 范围之间的风速数值通常被称为有效风速范围, 所有有效风速可以有效产生风能<sup>[28]</sup>。一般情况下, 风速低于 3 m/s 则风机设备无法正常启动, 因此 3 m/s 通常被称为切入风速, 当风速高于 25 m/s 时, 风机将会判断风速过大, 为避免设备产生损坏而切断发电进程, 因此 25 m/s 风速也被称为切出风速。有效风速这一概念在风能发电领域应用十分广泛。

### 1.2.4 有效风能密度

海面风能数值的大小与风速密切相关, 风能密度参数用来表示在一定时间范围内垂直通过某单位面积的风所带来的所有能量数值, 该参数是风能资源评估分析工作中极为重要的综合指标之一, 应用十分广泛, 风能密度参数<sup>[29]</sup>的具体计算公式为:

$$W = \frac{1}{2} \rho V^3 \quad (5)$$

式中,  $W$  为风能密度, 单位是  $W/m^2$ ;  $\rho$  为空气密度, 单位是  $kg/m^3$ ,  $V$  为风速, 单位是  $m/s$ 。从风能密度参数计算公式可以看出, 对应海域空气密度的大小是风能密度参数计算中的影响因素之一, 因此, 在风能密度参数计算前, 需要结合海面高度、大气压、海面温度等海面特征进行对应海域空气密度的计算<sup>[30]</sup>, 计算后  $\rho$  数值大小为  $1.34 kg/m^3$ 。

有效风能指风电机组在能够正常运行储存转化风能的风速范围内计算得到的风能资源, 其风速取值范围为 3~25 m/s, 处于有效风能范围内的所有风能密度值称为有效风能密度, 即在一定时间段内通过规定单位面积的有效风能为有效风能密度。有效风能密度指标可用于对某特定区域的海上风能资源进行分析与评估。

### 1.2.5 风能变异系数

风能变异系数参数是作为风能稳定性分析的一个重要评估指标<sup>[31]</sup>, 风能变异系数计算公式为:

$$C_v = \frac{s}{\bar{x}} \quad (6)$$

式中,  $C_v$  为变异系数值,  $s$  为风速序列的标准差数值,  $\bar{x}$  为风速序列的均值。

### 1.2.6 风向频率

风向频率参数表示一定规定时间段范围内, 各方位的风向次数统计数占总数的百分比数值, 通常可用风向玫瑰图来进行直观化表示。通过风向频率图可以得到目标地区主导风向及风向变化稳定性, 从而辅助该地区风能资源分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 风能有效性

本文使用有效风能密度作为风能有效性的评估指标，由国家标准风电场风能资源评估方法<sup>[32]</sup>可知，其中风速主要测量 10, 30, 50 m 高度数据，故本文对福建沿海区域海面各高度测量多年平均有效风能，其结果如图 1、2 所示（反演分辨率为 5 km×5 km）：

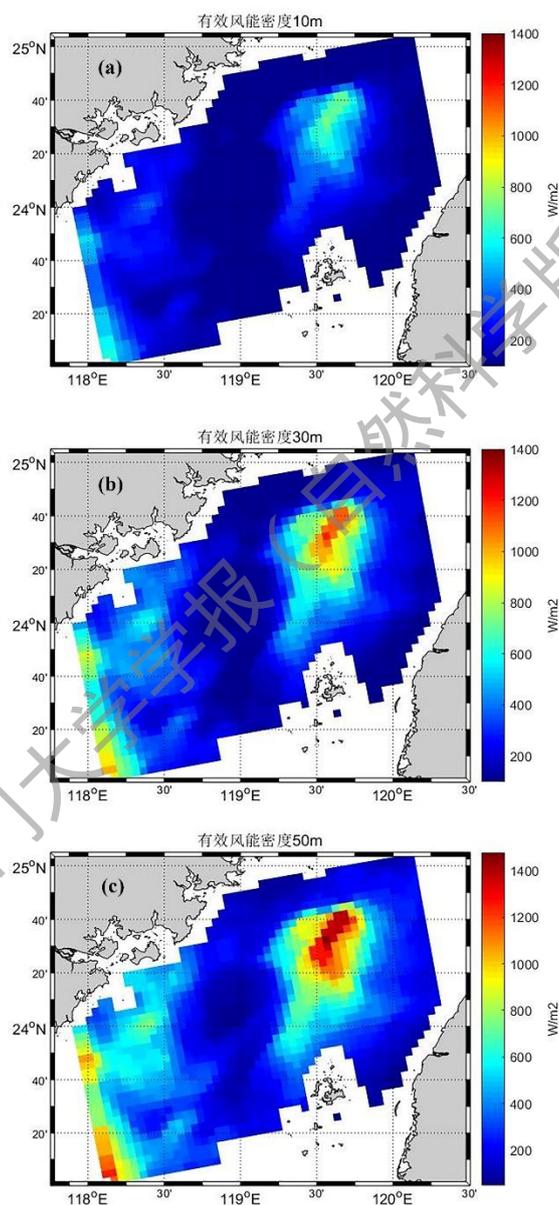


图 2 福建沿海各高度多年平均有效风能密度

Fig. 2 Multi-year average effective wind energy density at various altitudes along the coast of Fujian

由以上结果可以看出：1) 福建沿海区域不同高度的风能资源空间分布较为一致，风速及风能密度大小随高度增加而增大；2) 福建沿海区域的风能密度空间分布情况及规律与风速的空间分布情况

较为一致，但风能密度细节分布更为突出，可以对此进行细节风能资源评估与分析。

对所有风能计算格点数进行统计，分别求出福建沿海各月、季有效风能总数及风能总量，得到有效风能占比，福建沿海各月、季有效风能概率结果如图 3 所示。

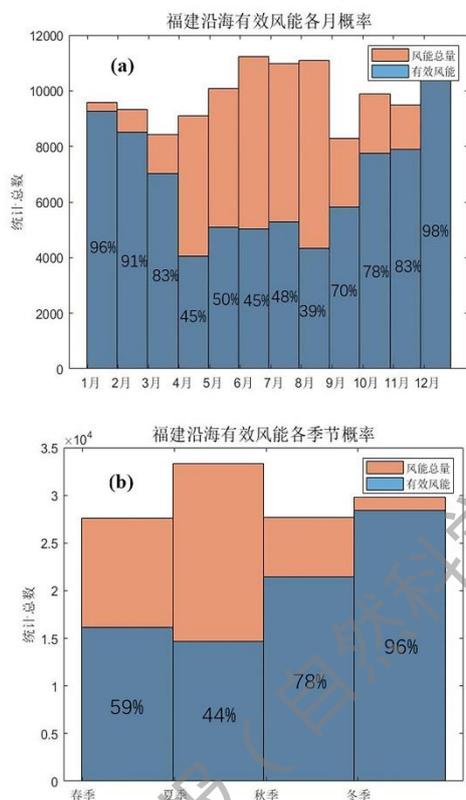


图 3 福建沿海各月、季有效风能概率

Fig. 3 Probability of effective wind energy in each month and season along Fujian coast

由图 3 可以看出，福建沿海区域有效风能概率较高，总计有效风能占比 68.21%，其中分月特征变化趋势为：4 月—10 月出现最低值，最低为 40% 左右，11 月—次年 3 月有效风能所占百分比比较高，最高为 11—12 月，占比达到 97% 左右。分季特征变化趋势为：春、夏季较低，为 50% 左右，秋、冬季较高，在 70% 以上。从分月、分季特征趋势可以看出，风速范围大的秋、冬季有效风能占比比较高，符合海上风电资源开发条件。

## 2.2 风能稳定性

除了风能有效性外，风能的稳定性也是风能资源分析的重要组成部分，一定程度上决定了风电机组建设的安全性及生产效率大小。文中将从风能变异系数和风向频率分布方面进行风能稳定性时空特征分析。

福建沿海多年平均风能变异系数结果如 4 图所示。在图 4 中，从台湾海峡至厦门区域风能变异

系数逐渐降低，符合客观规律，即台湾海峡附近由于地形及狭管效应影响，风能较不稳定，靠近大陆地区风能较为稳定。但上述多年平均结果可能将平均季节性信号丢失，因此，将风能密度结果按春（3、4及5月），夏（6、7及8月），秋（9、10及11月），冬（12、1及2月）四季分别进行平均，得到各季节平均风能密度并计算季节平均风能变异系数，季节平均风能变异系数结果如图5。

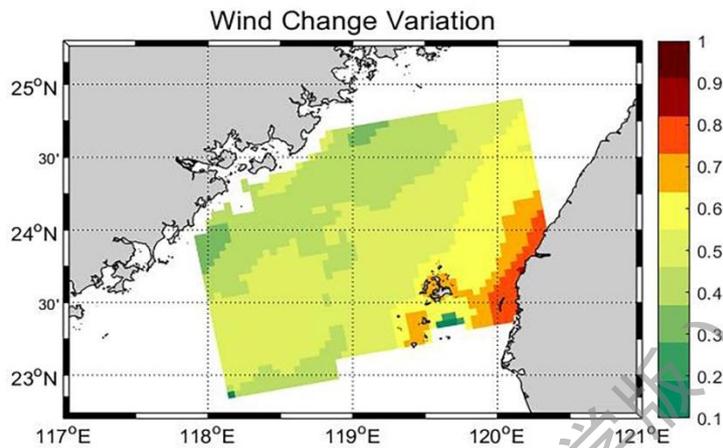


图4 多年平均风能变异系数

Fig. 4 Multi-year average wind energy variation coefficient

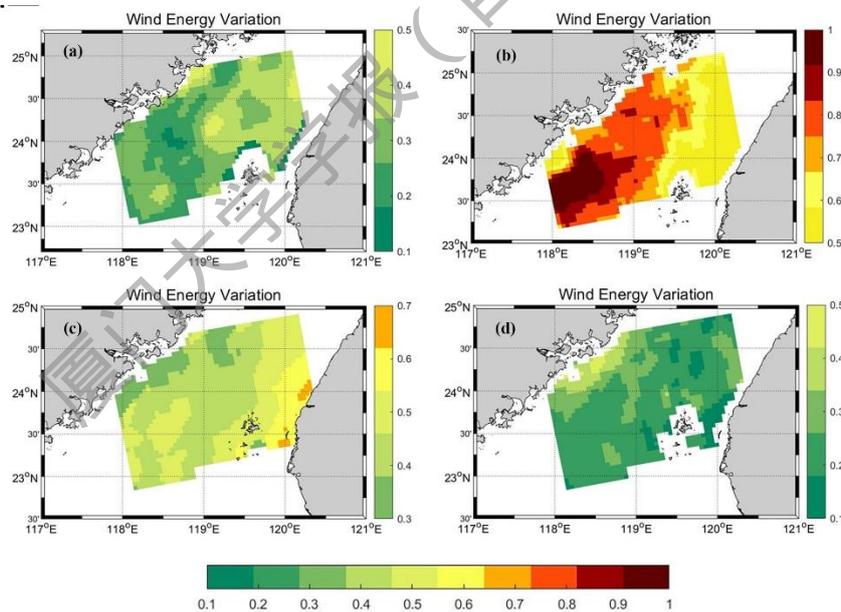


图5 各季节风能变异系数

Fig. 5 Coefficient of variation of wind energy in each season

由以上结果可以看出：1) 福建沿海年平均风能稳定性较好，大部分区域风能变异系数均在 0.5 以下；2) 各季节风能变异系数分布特征存在一定差异，春、秋、冬三季数值较低，大部分在 0.5 以下，夏季风能变异系数数较大，风能稳定性较差。

对福建沿海区域的各季节有效风向进行统计并绘制风向玫瑰图（包括风向  $180^\circ$  模糊），结果如图 6 所示。由风向玫瑰图可以看出，福建沿海常年风向以东北-西南风为主，夏季偏北，秋季偏东，春冬季东北-西南风占大部分，由此可见，福建沿海地区风向较为稳定，风向变化较小。

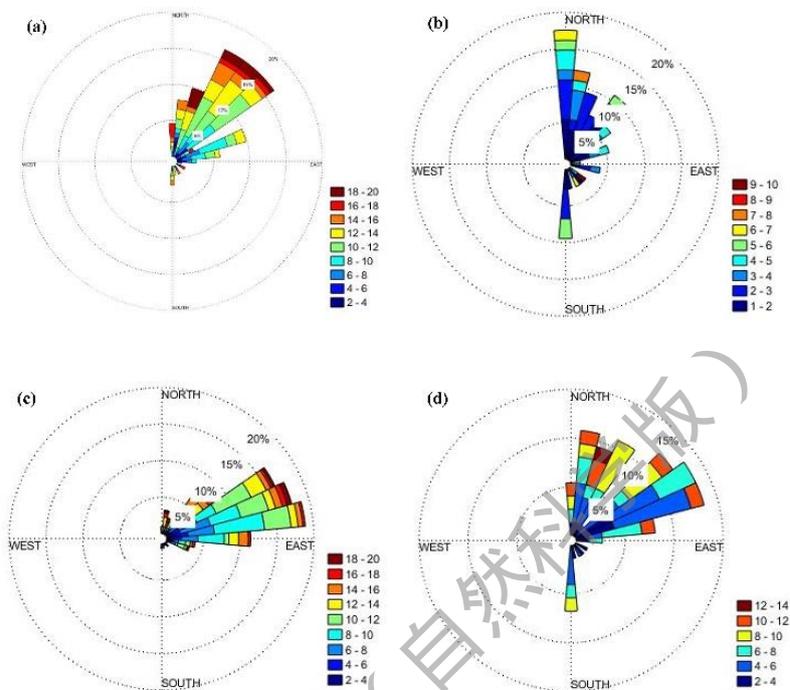


图 6 各季节风向玫瑰图

Fig. 6 Wind direction rose diagram in each season

### 2.3 风能时空变化特征

福建沿海各月风速、风能密度变化趋势图如图 7 所示。

由以上结果可以看出，福建沿海风能时空特征各月间各有差异。主要变化趋势为：9、10 月风速数值呈上升趋势，12、1 月到达顶峰，3、4 月呈下降趋势，在 5、6、7、8 月间达到海面风速最低值，福建沿海区域的风能密度变化趋势与风速变化趋势相似。

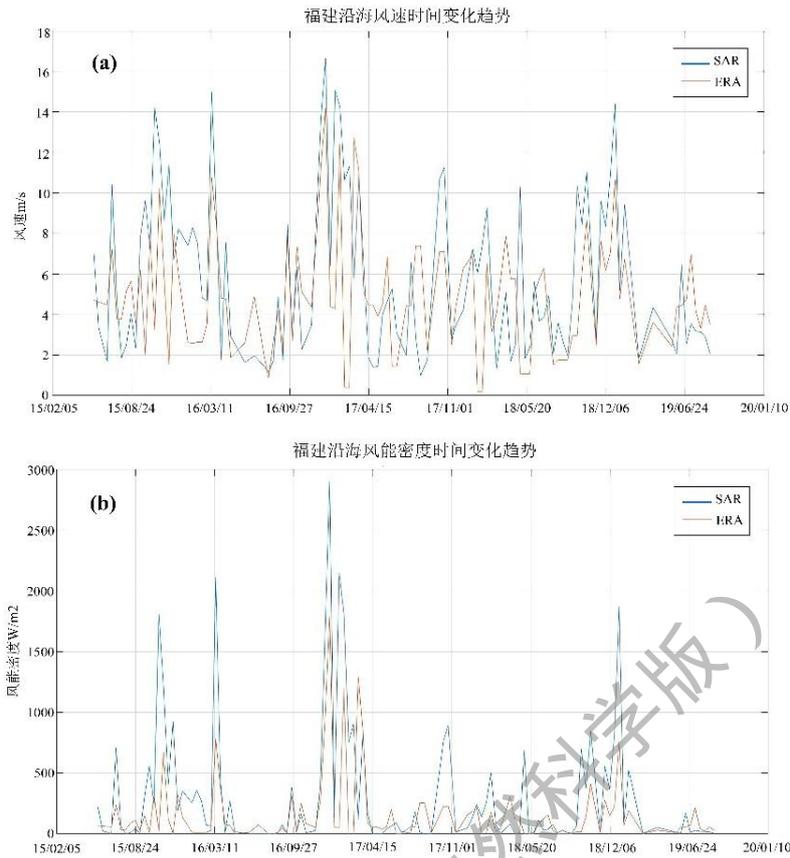


图 7 各月风速、风能密度变化趋势

Fig. 7 Monthly wind speed and wind energy density change trend chart

经验正交函数 EOF 分析方法 (Empirical Orthogonal Function, EOF) 可以实现对海表风速矩阵数据的结构特征分析, 并提取其主成分特征向量, 用尽可能少的模态表达出主要的时间和空间变化。Lorenz 在 20 世纪 50 年代首次将其引入气象和气候研究, 该方法现已被广泛应用于海洋和其他学科中<sup>[33]</sup>。

经验正交函数 EOF 分析主要原理如下<sup>[34]</sup>, 首先将观测风速资料用矩阵表示, 记为矩阵  $X$ , 矩阵  $X$  可以分解为空间函数和时间函数两部分的乘积, 通过求  $XX^T$  的非零特征值, 可以得出空间函数矩阵以及时间系数。特征向量对应的是空间样本, 在一定程度上反映要素场的空间分布特点; 主成分对应的是时间变化, 反映相应空间模态随时间的权重变化。

根据上文所述方法, 对福建沿海风场数据进行分析, 得到海面风速时间序列的主成分特征向量, 其中第一、二模态的分析结果如图 8 和 9 所示。图 8 (a) 和图 9 (a) 中纵坐标 INDEX 表示时间系数, 图 8 (b) 和图 9 (b) 中色标表示特征向量值。

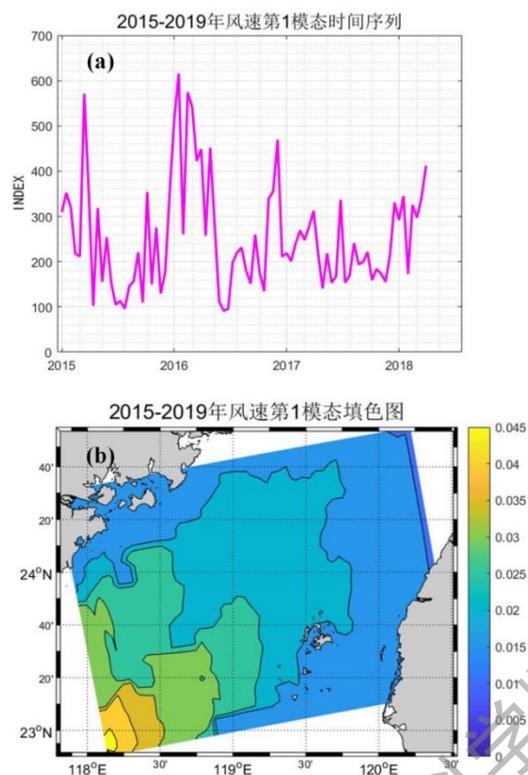


图 8 福建沿海风场 EOF 分析第一模态

Fig. 8 The first mode of EOF analysis of Fujian coastal wind field

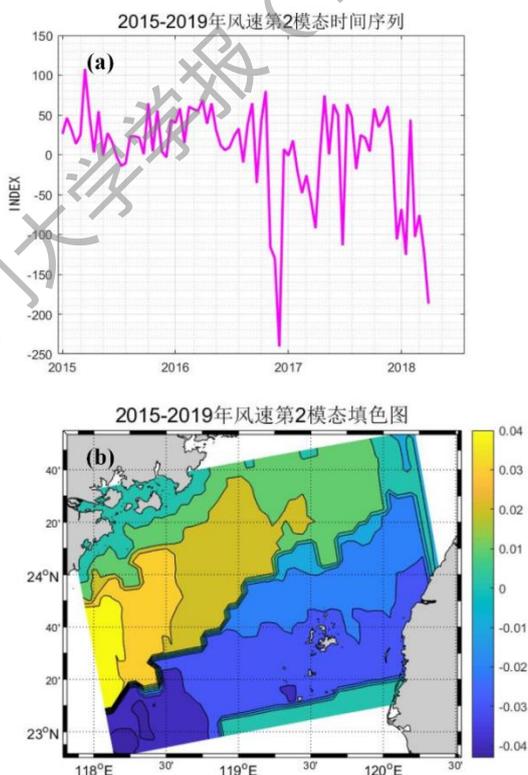


图 9 福建沿海风场 EOF 分析第二模态

Fig. 9 The second mode of EOF analysis of Fujian coastal wind field

图 8 为福建沿海海面风速 EOF 分析第一模态结果，第一模态的方差贡献率为 89.56%，远高于其他模态的方差贡献率，从图像中观察可知，这一模态可能是影响福建沿海区域季风强盛时期的状况，福建沿海风能资源空间分布主要为西南—东北类型，即西南区域年平均风速较高，而东北区域年平均风速较小。EOF 分析的第二模态方差贡献率为 4.47%，如图 9 所示，风场 EOF 分析第二模态的特征向量在空间上也体现了福建沿海风能资源空间分布主要为西南—东北类型，但与第一模态不同的是在台湾海峡中部出现了风速较大值区域，该分布现象的出现是因为台湾海峡“狭管效应”的空间分布。“狭管效应”是指当气流由开阔地带流入地形构成的峡谷时，由于空气质量不能大量堆积，于是加速流过峡谷，风速增大。当流出峡谷时，空气流速又会减缓，台湾海峡与常年盛行的东北风形成的狭管效应，使得福建沿海及岛屿的风速加大，可利用风速持续时间加长。第一模态与第二模态的累计方差贡献率为 94.02%，因此，EOF 分析的前两个模态能够较好地解释说明福建沿海风能资源时空分布特征。

### 3 结论

本文使用 Sentinel-1 卫星 SAR 影像 VV 极化数据进行海表风场反演，得到了高空间分辨率的 2015~2019 年福建沿海风场数据，将 SAR 海面风场反演结果与 ERA-interim 再分析风场数据进行 1km×1km 的网格化处理，从风能有效性、风能稳定性及风能时空分布三个方面进行了福建沿海风能资源时空特征分析。研究表明：

1) 福建沿海区域不同高度的风能资源空间分布较为一致，风速及风能密度均随高度增加而增大；风能密度空间分布与风速的空间分布情况较为一致，但具有更多细节，据此得到的月、季有效风能结果表明风速数值范围较大的秋、冬季有效风能所占百分比较高；

2) 福建沿海多年平均风能稳定性较好，各季节风能变异系数分布存在一定差异，春、秋、冬三季较低，大部分在 0.5 以下，夏季风能变异系数较大，风能稳定性较差，风向玫瑰图表明福建沿海地区风向变化较小，风向较为稳定；

3) 福建沿海各月风速、风能密度变化趋势图说明风能密度变化趋势与风速变化趋势相似，因此，福建沿海风速的 EOF 分析结果表明，福建沿海风能的空间分布主要为东南-西北走向逐渐递减类型，在台湾海峡中部区域出现风能最大值。

研究结果表明 Sentinel-1 卫星 SAR 影像 VV 极化数据反演海面风场方法具有可行性且能用于福建沿海区域风能资源评估。但研究中未考虑除 VV 极化外其他极化模式的风场反演方法，因此，在之后的研究中可以采用多种类型 SAR 卫星数据，并采用多源再分析数据进行辅助分析，提高分析准

确度与说服力。

## 参考文献:

- [1] HORSTMANN J, FALCHETTI S, WACKERMAN C, et al. Tropical cyclone winds retrieved from C-band cross-polarized synthetic aperture radar[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2015, 53(5): 2887-2898.
- [2] LI X, ZHANG J A, YANG X, et al. Ocean surface response to hurricanes observed by SAR[C]//IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. [S.l.]: IEEE, 2012: 5180-5183.
- [3] 张彪, 何宜军. 高海况海洋遥感信息提取技术研究进展[J]. 海洋技术学报, 2015, 34(3):16-20.
- [4] ALEXIS A, MOUCHE A, FABRICE C, et al. On the Use of Doppler Shift for Sea Surface Wind Retrieval From SAR[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012, 50(7): 2901-2909.
- [5] YANG X, LI X, ZHENG Q, et al. Comparison of Ocean-Surface Winds Retrieved From QuikSCAT Scatterometer and Radarsat-1 SAR in Offshore Waters of the U.S. West Coast[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2011, 8(1):163-167.
- [6] 姜晓艳, 明详, 张菁, 等. 沈阳市风能资源分布特点及其开发利用研究[J]. 资源科学, 2009, 31(10): 1764-1771.
- [7] 刘静, 俞炳丰, 姜盈霓. 对福建省陆地风能资源的评估[J]. 可再生能源, 2002, 25(1): 59-61.
- [8] 朱伟强. 福建省沿海风力资源特性分析[J]. 电力勘测设计, 2006(1): 33-36.
- [9] HASAGER C B , PENA A , CHRISTIANSEN M B , et al. Remote sensing observation used in offshore wind energy[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2008, 1(1):67-79.
- [10] 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.
- [11] BARTHELMIE R J, PRYOR S C. Can satellite sampling of offshore wind speeds realistically represent wind speed distributions?[J] Journal of Applied Meteorology, 2003, 42(1): 83-94.
- [12] DEE D P, UPPALA S M, SIMMONS A J, et al. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2011, 137(656): 553-597.
- [13] 郑崇伟, 李崇银, 杨艳, 陈雄. 巴基斯坦瓜达尔港的风能资源评估[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2016, 55(2): 210-215.
- [14] 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.
- [15] ZHANG B , PERRIE W , VACHON P W , et al. Ocean Vector Winds Retrieval From C-Band Fully Polarimetric SAR Measurements[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012, 50(11): 4252-4261.
- [16] JUNG Y, PARK S E. Comparative analysis of polarimetric SAR calibration methods[J]. Remote Sensing, 2018, 10(12):2060.

- [17] STROMBERGSSON D, MARKLUND P, BERGLUND K, et al. Bearing monitoring in the wind turbine drivetrain: a comparative study of the FFT and wavelet transforms[J]. *Wind Energy*, 2020, 23(6):2491.
- [18] MOUCHE A A, CHAPRON B, ZHANG B, et al. Combined co- and cross-polarized SAR measurements under extreme wind conditions[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2017, 99: 1-10.
- [19] HERSBACH H. Comparison of C-band scatterometer CMOD5.N equivalent neutral winds with ECMWF[J]. *Atmos Ocean Technol*, 2010, 27: 721-736.
- [20] YE X, LIN M, SONG Q, et al. The optimized small incidence angle setting of a composite Bragg scattering model and its application to sea surface wind speed retrieval[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2020, 99:1.
- [21] 丁国安, 朱瑞兆. 关于低层大气风速廓线的讨论[J]. *气象*, 1982(8): 18-20.
- [22] 丁国安, 薛桁, 朱瑞兆. 武汉地区低空风的特性[C]//大气湍流扩散及污染论文集. 北京: 气象出版社, 1982.
- [23] 薛桁, 朱瑞兆, 冯守忠, 等. 我国北部草原地区近地层平均风特征分析[J]. *太阳能学报*, 1992, 13(3): 230-238.
- [24] 朱瑞兆. 我国太阳能风能资源评价[J]. *气象*, 1984(10): 19-23.
- [25] 植石群, 钱光明, 罗金铃. 广东省沿海风随高度变化研究[J]. *热带地理*, 2001, 21(2): 131-134.
- [26] 朱瑞兆. 近地层风特性与风能利用[C]//风能、太阳能资源研究论文集. 北京: 气象出版社, 2008.
- [27] 李鸿秀, 朱瑞兆. 关于风切变指数对轮毂高度影响的探讨[C]//第五届亚洲风能大会论文集. 北京: 第五届亚洲风能大会, 2008.
- [28] 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.
- [29] 朱晓辉, 杨晓峰, 杜延磊, 等. 风能方向性参量遥感反演[J]. *遥感学报*, 2018, 22(2): 253-264.
- [30] 王桐, 唐荣林, 李召良, 等. 遥感反演蒸散发的日尺度扩展方法研究进展[J]. *遥感学报*, 2017, 23(5): 813-830.
- [31] ZHOU Y, ZHAO L, MATSUO I B M, et al. A dynamic weighted aggregation equivalent modeling approach for the DFIG wind farm considering the weibull distribution for fault analysis[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2019, 99: 1.
- [32] 中国水利水电建设工程咨询公司. GB/T 18710-2002 风电场风能资源评估方法[S]. 中国标准出版社, 2002.
- [33] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京:气象出版社, 1999: 120.
- [34] 杨亮. 基于遥感数据的西北太平洋海面风场时空特征分析[D]. 山东青岛:国家海洋局第一海洋研究所, 2007: 1-76.

# Wind energy assessment analysis of Fujian coastal area based on Sentinel-1 synthetic aperture radar images

ZHU Lin<sup>1</sup>, XIE Ting<sup>1</sup>, WANG Yiren<sup>1</sup>, HU Lingping<sup>2</sup>, GENG Xupu<sup>1\*</sup>

(1.State Key Laboratory of Marine Environmental Science, Engineering Research Center of Ocean Remote Sensing Big Data, Fujian Province Higher Education Institutes, College of Ocean and Earth Sciences, Xiamen University, Xiamen 361102, China; 2.Science and Technology on Electromagnetic Scattering Laboratory, Beijing 100854, China)

**Abstract:** The analysis of wind energy resources in sea-surface wind farms is of great significance to the construction and development of offshore wind farms. In recent years, with the development of remote sensing technology, synthetic aperture radar (SAR) has provided a new method for the analysis and evaluation of sea-surface wind energy. Based on the 122 Sentinel-1 SAR images of Fujian coastal area from 2015 to 2019, this paper uses the Fast Fourier Transform (FFT) wind direction inversion method and the geophysical model function CMOD5.N wind speed inversion method to carry out SAR wind in the coastal area of Fujian, and makes an analysis of the offshore wind energy resources in Fujian from the aspects of wind energy efficiency, wind energy stability and wind energy temporal and spatial distribution characteristics. The main conclusions obtained are: the effective wind energy in autumn and winter accounts for a relatively high proportion, reaching more than 70%; the average wind energy stability in the coastal areas of Fujian is good for many years, the wind energy stability in spring, summer and winter is good, and the wind energy stability in autumn is poor; The spatial distribution of wind energy along the coast of Fujian is mainly a declining northeast-southwest trend, and the maximum wind energy appears in the middle of the Taiwan Strait.

**Keywords:** synthetic aperture radar; Sentinel-1; wind field retrieval; wind energy