

吴萍昊, 钟凯文, 胡泓达, 赵怡, 许剑辉, 王云鹏. 2019. 基于 Sentinel-1A 数据在广东省近海海面风场反演应用. 热带地理, 39 (3): 357-364.

Wu Pinghao, Zhong Kaiwen, Hu Hongda, Zhao Yi, Xu Jianhui and Wang Yunpeng. 2019. Application of Sentinel-1A Data in Offshore Wind Field Retrieval within Guangdong Province. Tropical Geography, 39 (3): 357-364.

## 基于 Sentinel-1A 数据在广东省 近海海面风场反演应用

吴萍昊<sup>1,2,3</sup>, 钟凯文<sup>2</sup>, 胡泓达<sup>2</sup>, 赵怡<sup>1,2,3</sup>, 许剑辉<sup>2</sup>, 王云鹏<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 广州地球化学研究所, 广州 510640; 2. 广州地理研究所, 广州 510070; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:**采用基于风条纹提取风向的方式, 利用地球物理模式函数, 基于 Sentinel-1A 数据, 通过 CMOD5 模型反演 2017 年 3、5、7、12 月份广东省近海海域风场。将反演结果与实测数据对比, 风速普遍比实测风速大, 风速反演的平均绝对误差为 1.98 m/s, 均方根误差为 2.74 m/s, 相关系数为 0.8。其中 3、5、7 月的风速较为接近, 且平均绝对误差和均方根误差都 < 2 m/s, 而 12 月份平均风速 > 8 m/s, 实测数据与卫星过境时间不完全匹配, 导致平均绝对误差和均方根误差都偏大。哨兵一 (Sentinel-1A) 影像反演结果整体上与实测数据相一致, 验证了 COMD5 反演模型适用于广东省近海高分辨率海洋风场反演, 可为下一步估算广东省风能资源储量提供可能。

**关键词:**海面风场; 哨兵一; 风条纹; 合成孔径雷达; 遥感反演; 广东省近海

中图分类号: P74; P715.7

文献标志码: A

文章编号: 1001-5221 (2019) 03-0357-08

DOI: 10.13284/j.cnki.rddl.003137

海面风场是影响洋流、大气的重要因素, 是监测渔业、海洋水汽环境交互重要的信息来源, 更是一种必要的清洁能源, 其储量丰富、分布广泛、成本低廉和安全系数高, 具有非常可观的发展前景。合理开发和使用风能资源, 首先必须通过科学的手段合理地评估海洋风能资源。传统的测风是通过海上浮标、观测站等方式观测, 但受限于成本, 难以实现大范围的连续监测。近年来, 迅猛发展的微波遥感技术手段为高效评估风场提供了可能。微波散射计通过不同角度多次测量海面, 可以同步反演出海面风向、风速, 但其空间分辨率较低, 约在 25~50 km 范围内。另外, 散射计在近海岸地区容易被陆地回波影响, 无法测量近海岸几十公里内的区域 (Monaldo et al., 2002; 张雷等, 2012)。相比之下, 微波合成孔径雷达具有高空间分辨率、高精度和成本低廉等优势, 成为反演风场的重要技术手段。

地球物理模式函数 (GMF) 是描述雷达后向散

射截面和风速、风向相关关系的函数, 基于该函数的 CMOD5 模型是由 Hersbach 等 (2007) 在 CMOD4 (Stoffelen et al., 1997) 基础上改进, 基于 C 波段 VV 极化方式的一种风速反演模型。在应用该模型反演海洋风场方面, 国内外学者进行了一系列的研究。如隶属于丹麦技术大学风能气象部门、丹麦国家实验室 RISO 的高级科学家 Charlotte Bay Hasager (2011) 利用 900 景 SAR 影像, 基于 CMOD5 模式反演风速, 评估波罗的海的海面风能资源; Jagdish 等 (2018) 基于 RISAT-1 卫星影像, 利用 CMOD5.N、CMOD5 和 CMOD\_IFR2 模型反演北印度洋海域风场; 蒋洁等 (2014) 以香港东南海域为试验区, 将 ENVISAT ASAR 影像和 QuickSCAT 风场数据相结合, 评估近海风能资源, 实现了高空间分辨率和高时间分辨率的结合, 且得出采用 CMOD5 模式反演结果精度较高的结论; 戚纤云等 (2017) 将长江口岸作为研究区, 对比 CMOD4、CMOD-IFR2 和

收稿日期: 2018-11-19; 修回日期: 2019-05-01

基金项目: 广东省科学院院属骨干科研机构创新能力建设专项项目 (2017GDASCX-0101); 广东省科技计划项目 (2019B020208013); 广东省科学院 2018 年实施创新驱动发展能力专项资金项目-引进全职博士学位人才资助专项 (2018GDASCX-0902)

作者简介: 吴萍昊 (1995—), 女, 江西省抚州市人, 硕士研究生, 主要从事遥感信息分析与应用研究, (E-mail) wupinghao@gdas.ac.cn;

通信作者: 钟凯文 (1972—), 男, 研究员, 主要从事数字城市及其应用研究、水色遥感、遥感与地理信息系统集成等研究, (E-mail) zkw@gdas.ac.cn.

CMOD5三种模型反演风场的适宜性,得出前两者模型比较适合长江口外近海海域的结论;Zhang(2017)基于美国西海岸离岸的Sentinel-1影像,对比CMOD4、CMOD-IFR2、CMOD5和CMOD5.N模型,得出CMOD5模型在高精度风场反演过程中具有较高的精度的结论。以上研究都使用了CMOD5模型反演海面风场,大部分都得到了较好的结果,但由于地域的特殊性,也有学者得出该模型不适合某地区海面风场反演的结论,故CMOD5模型是否适用于广东省近海海域合成孔径雷达影像高精度风场反演,还有待考证。

近年来也有许多学者将SAR影像、散射计数据和风场预报数据等应用于近海海域风能资源评估。如Nie(2018)基于散射计数据、辐射计数据和CCMP风场等资料评估了中国近海海域风能资源的开发潜力,却未涉及SAR影像反演风场的方法;常蕊等(2014)以杭州湾海域为例,基于ASAR影像经过资料同化证明了SAR影像在海洋风能评估中的作用,但未讨论将基于Sentinel-1A影像反演的风场作为近海风能资源评估的数据依据。

因此,本文选定海洋风能储量丰富的广东省近海作为研究区,结合2014年发射的Sentinel-1A卫星影像,基于CMOD5模型和风条纹反演海面风场,探究Sentinel-1A卫星应用于广东省沿海高分辨率风场反演的可能性,最后将结果与数值预报模式CCMP数据、实测浮标数据对比,验证风场反演精度,以期为进一步准确估算广东省风能资源提供可能。

## 1 研究区概况和数据

### 1.1 研究区概况

广东省拥有超过全国1/5的海岸线,全长约4 114 km,海域十分辽阔,港湾、码头众多,处于亚热带和南亚热带海洋性季风气候区,冬季和夏季季风特征十分明显,冬季风出现在11月到次年3月,气流干冷,盛行偏北风;而夏季风则出现在4月至10月,气流温暖,盛行偏南风。近海海域独特的自然条件形成了特殊的风能资源分布特点,为风电建设奠定了自然基础。同时,广东省政府的大力支持也为广东省风电建设提供了技术后盾。近几年,海上风电项目已在珠海、阳江等地先后启动,以期打造广东风电产业基地。本文选定的研究区为广东省近海100 km范围,位于南海北部,是中国沿海大风风速集聚的地区之一,也是大风日数最多的沿海海域之一(王慧等,2013)。

### 1.2 数据

**1.2.1 SAR影像** 获取广东省近海海域星载合成孔径雷达Sentinel-1A影像,作为本文的研究数据。哨兵一一是由欧洲航天局哥白尼计划(GMES)2014年发射,是迄今为止第一种由2颗卫星组成的双星系统,载有C波段合成孔径雷达。Sentinel-1A数据产品分为0、1和2级,本文采用的是1级数据产品中的地距影像(GRD),已经过多视处理,具有强度信息,并依照地球椭圆模型投影到地球表面的遥感影像。广东省近海的GRD影像,干涉宽幅模式为宽幅模式(IW),该工作模式下的SAR数据幅宽250 km,距离和方位分辨率分别为20、22 m,极化方式为VV+VH。分别选定广东省近海海域2017年3、5、7和12月份,共44景VV极化Sentinel-1A SAR影像,基于CMOD5模型进行广东省近海海面风场反演。

**1.2.2 实测数据** 本文选取的广东省近海海域测风站点,均为海上的石油平台、海岛站点,选取的实测风速为距离海平面10 m处的风速。考虑到粤港澳大湾区特殊的地势条件,在珠三角地区集中选取2个站点作为风场反演验证点,而选取其他站点时,则尽可能地使其均匀分布在研究区内。Sentinel-1A卫星过境时间大部分位于T 10:00—11:00,因此,为保证实测数据的一致性,选取实测站点T 10:30海面10 m高度的风场作为验证数据。8个站点包括4个石油平台和4个海岛站点(表1、图1)。

**1.2.3 CCMP风场数据** CCMP风场数据是由ESE提供,以欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的再分析资料为背景场,采用增强的变分同化分析法融合了多种卫星探测海面风资料和船舶、浮标观测资料的距海面10 m高的风场数据(旷芳芳等,2015)。该风场资料为ASCII码格式文件,其风速风向由U水平(纬度方向)和V垂直(经度方向)分量风速来表示,水平分辨率为0.25°,时间间隔为6 h,为尽量接近实测数据和卫星过境时间,本文采用的CCMP风

表1 测风站点基本信息

Tab.1 Basic information of the stations

站点编号	站点类型	所属地区	时间	经度	纬度
G3597	陆丰石油平台	深圳	T 10:30	116°09'25"E	21°35'16"N
G3358	惠州32-1平台	广州	T 10:30	115°16'12"E	21°09'39"N
G7427	湛江12-1A石油平台	湛江	T 10:30	108°40'55"E	20°40'51"N
G7526	湛江13-6石油平台	湛江	T 10:30	112°06'36"E	19°39'00"N
G1368	南澳县云澳镇赤屿海岛站	汕头	T 10:30	117°07'08"E	23°19'08"N
G1398	南澎岛海岛站	汕头	T 10:30	117°16'58"E	23°15'36"N
G3704	深圳宝安区西乡街道细丫岛站	深圳	T 10:30	113°49'08"E	22°32'49"N
59490	珠海内伶仃岛	粤港澳	T 10:30	113°46'58"E	22°25'58"N

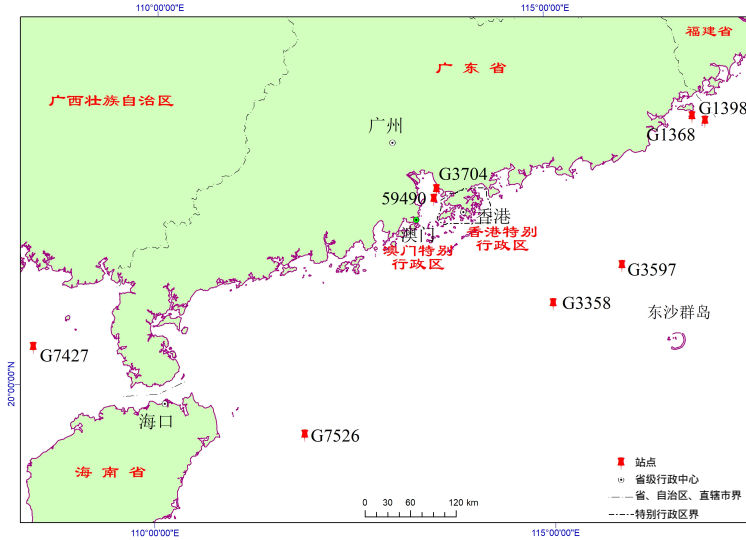


图1 研究区及测风站点分布

Fig.1 Distribution of the research area and stations

场数据为T 12:00。

## 2 SAR反演风场

### 2.1 风场反演原理

2.1.1 基于风条纹提取海面风向 海面风场作用于海洋表面时,会使得大气海面交界处于不稳定的状态,而当风场到达一定的强度后,会在海面上形成螺旋状的大气边界层涡旋,该涡旋会使得海面出现辐聚或辐散现象,改变了海面粗糙度,反映在合成孔径雷达影像上,即形成后向散射强度改变后周期性条纹,由于该种条纹总是与海面风向平行,故而称之为风条纹(常俊芳, 2012)。通过基于频率域的傅里叶变换法(Gerling et al., 1986; Lehner et al., 1998; Vachon et al., 2000)提取合成孔径雷达影像的海面风向。

利用基于频率域的傅里叶变换计算SAR图谱的公式为:

$$Y_{l,m} = \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N X_{j,k} e^{\frac{2\pi i(jl+km)}{N}} \quad (1)$$

式中:  $Y$ 为图像低波谱数;  $X$ 为定标后图像灰度值;  $l, m = 1, 2, \dots, N$ 。傅里叶变换将SAR图像以频谱域的方式表现出线性条纹特征,同时利用阈值去除噪音,由于风条纹的尺度远小于百米级的海浪尺度,故选取低波数部分就可以得到风条纹波数谱。

2.1.2 CMOD5模型海面风速反演 基于地球物理模式函数的CMOD系列: CMOD4、CMOD5和CMOD-IFR2(Quilfen et al., 1998)等,是适用于C波段VV极化方式的风速反演模型,本文采用VV极化方式的合成孔径雷达数据,故无需极化转换,

风速反演模式采用CMOD5模型。该模型利用半经验模式,通过统计雷达后向散射截面(NRCS)与相应位置的浮标或数值预报等数据,构建归一化的雷达后向散射截面 $\sigma^0$ 与风速 $V$ 、相对风向 $\phi$ (即风向与雷达视向之间的夹角)以及雷达入射角 $\theta$ 的函数关系式。而通过输入NRCS、相对风向以及雷达入射角,就可以得到相应的风速。该模型在CMOD4基础上一定程度地改善了风速饱和的问题(张璇等, 2018)。

CMOD5的基本形式为(韩延磊, 2010):

$$\sigma^0 = B_0(1 + B_1 \cos \phi + B_2 \cos 2\phi)^{1.6} \quad (2)$$

式中:  $B_0$ 、 $B_1$ 和 $B_2$ 均为风速 $v$ 和入射角 $\theta$ 两个变量的函数。

引入  $x = (\theta - 40) / 25$ ,  $B_0$ 的定义为:

$$B_0 = 10^{a_0 + a_1 v} (a_2 v, s_0)^\gamma \quad (3)$$

式中:  $a_0$ 、 $a_1$ 、 $a_2$ 、 $\gamma$ 和 $s_0$ 均取决于入射角 $\theta$ ,

即都为只与 $x$ 相关函数,相关系数用 $c_1, c_2, \dots, c_{13}$ 表示。

$B_1$ 表示为:

$$B_1 = \frac{c_{14}(1+x) - c_{15}(0.5+x - \tanh[4(x+c_{16}+c_{17}v)])}{1 + e^{0.34(v-c_{18})}} \quad (4)$$

$B_2$ 的表达式为:

$$B_2 = (-d_1 + d_2 v_2) e^{-v_2} \quad (5)$$

当  $v > (c_{19} - 1)$  时:

$$v_2 = (v + v_0) v_0 \quad (6)$$

当  $v < (c_{19} - 1)$  时:

$$v_2 = c_{19} - \frac{(c_{19} - 1)}{c_{20}} + \frac{v^n}{n(c_{19} - 1)^{n-1} v_0^n} \quad (7)$$

式中:  $v_0$ 、 $d_1$ 、 $d_2$ 只与入射角 $\theta$ 有关,均可以用 $x$ 的相关函数表达,相关系数用 $c_{21}, c_{22}, \dots, c_{28}$ 表示。

### 2.2 数据预处理

Sentinel-1A影像预处理包括应用轨道文件、影像镶嵌、辐射定标、斑点滤波、地形校正以及研究区海面提取(图2)。辐射定标是为了将Sentinel-1A影像的灰度值转化为归一化后向散射截面(NRCS),建立雷达图像与目标截面后散射系数之间的定量关系,使得每个像素点所代表的是与雷达信号强度无关的目标物本身的散射特性(毕上上, 2016)。辐射定标的公式为:

$$\sigma^0 = \frac{(DN^2 - \eta)}{A^2} \quad (8)$$

式中:  $\sigma^0$ 代表归一化后向散射截面;  $DN$ 表示影像灰度值;  $\eta$ 表示噪声参数;  $A$ 表示后向散射校正参数。

在SAR影像成像过程中,在分辨单元内的地物

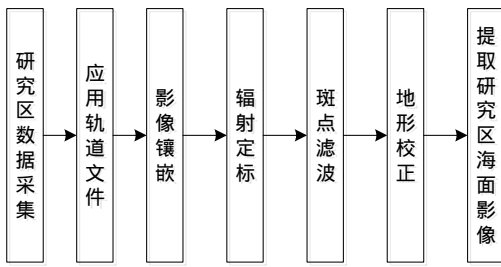


图2 影像预处理流程

Fig.2 The flow chart of image data preprocessing procedure

随机散射微波,在影像上表现为信号相关的小斑点,它既降低了影像的画面质量,又严重影响图像分类、目标检测和专题信息提取等操作。而斑点滤波是对遥感影像进行斑点噪声抑制,去除影像本身的斑点噪声,本文采用的是Gamma滤波。该滤波假定影像的灰度值服从Gamma分布,斑点噪声是非线性乘性噪声,利用最大后验概率来滤除该噪声,能够较好

地保持SAR影像原有的辐射特性。

地形校正为消除由于地形起伏引起的影像畸变,本文采用的Sentinel-1A影像数据包括陆地和海面的影像,所以需要整幅影像进行地形校正的预处理,通过陆地掩膜方式对SAR影像进行海陆分离提取研究区海面影像,仅针对覆盖研究区海面的影像部分进行风场反演。

### 2.3 风场反演

将预处理Sentinel-1A数据,通过傅里叶变换提取影像风条纹信息,对比CCMP预报风场分析风向数据,去除风向180°模糊度,然后基于CMOD5模式反演风速。最后将反演结果分别与CCMP预报风场、实测数据对比,计算平均绝对误差值和均方根误差,分析反演结果,同时再将CCMP预报风场数据作为辅助验证数据,比较验证反演风场在不同空间位置站点风速精度(图3)。

为展示珠三角地区海面风场分布状况,以2017-

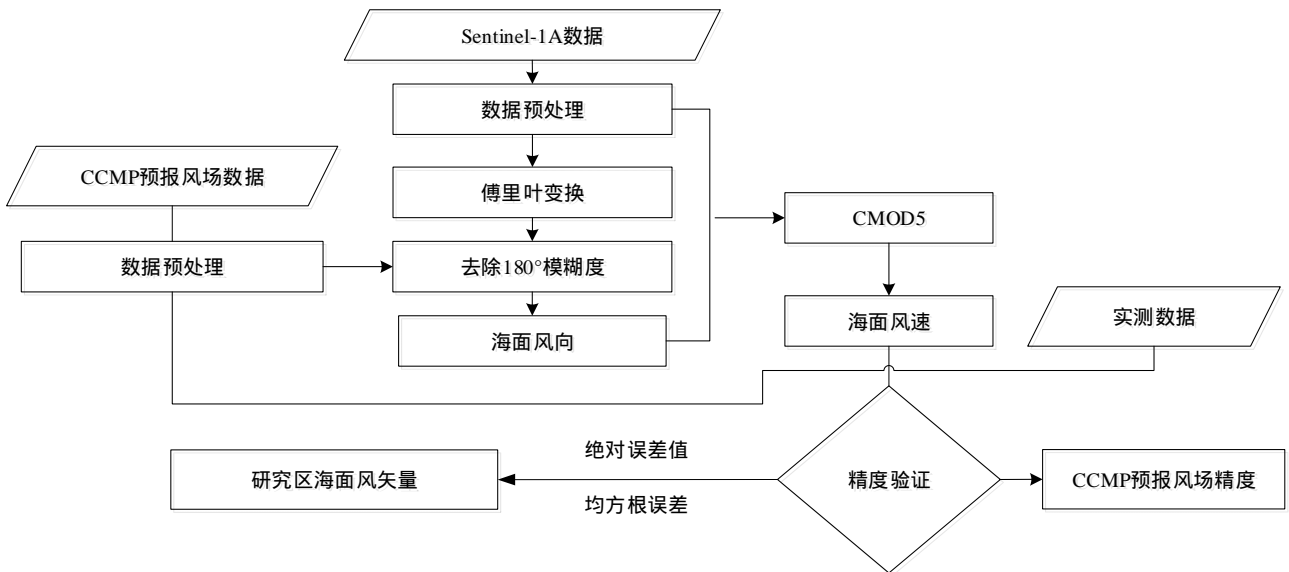


图3 风场反演流程

Fig.3 The flow chart of wind field retrieval

03-12的一景Sentinel-1A影像为例,通过CMOD5模型反演出3 km × 3 km海面风场,然后利用CCMP预报风场去除风向180°模糊度,得到海面风场分布(图4)。

### 2.4 结果分析

2.4.1 与实测数据对比 将Sentinel-1A影像风速反演结果分别插值到各个站点,然后与实测数据对比,共计56个样本,反演结果平均绝对误差值约为1.98 m/s,均方根误差约为2.70 m/s,相关系数约为0.8。从整体来看,两组数据误差较小、相关性高,说明这些样本整体上反演风速与实际风速具有较好的一

致性。

从不同月份的角度对比分析反演结果(表2),可以看出CMOD5模型反演的风速比实测风速大,12月份风速明显比3、5、7月大,这是由于冬季广东省近海在冷空气影响下,海面风速较其他季节显著增大。3、5和7月的反演结果与实测数据之间的平均绝对误差和均方根误差都 < 2 m/s,相关系数也在0.7~0.9之间,说明在这3个月份,反演的海面风速与实测数据之间有良好的相关性和一致性,反演结果精度较高。12月份,平均绝对误差为3.43 m/s,均方

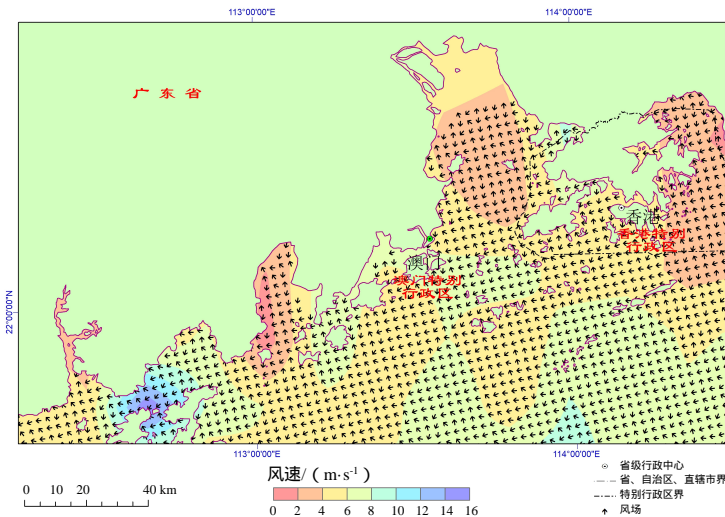


图 4 广东省沿海 2017 年 3 月 12 日 10 m 高度处经过风向模糊度去除的反演风场

Fig.4 An retrieval wind field at 10 m height off the coast of Guangdong Province on Mar. 12<sup>th</sup>, 2017

表 2 按月份风场反演结果对比

Tab.2 Comparison of wind field retrieval results by month

月份	站点	样本数/个	风速/ ( m·s <sup>-1</sup> )			
			实测数据平均	反演风速平均	平均绝对误差	均方根误差
3 月	G1368	3	11.27	10.89	1.86	1.89
	G7526	1	3.20	4.85	1.65	1.65
	G3597	2	6.60	7.91	1.31	1.33
	G7427	1	5.20	2.44	2.76	2.76
	G3704	2	3.75	5.12	1.37	1.68
	合计	9	6.99	7.33	1.71	1.83
5 月	G1368	3	4.00	4.36	0.60	0.74
	G7526	2	6.75	8.17	1.42	1.64
	G3597	3	4.13	6.66	2.53	3.08
	G7427	2	3.10	3.23	0.97	3.07
	G3704	1	4.80	6.93	2.13	2.13
	59490	2	1.65	3.84	2.19	2.19
	G1398	2	4.05	3.38	0.67	0.76
	合计	15	4.02	5.15	1.47	1.87
7 月	G1368	2	1.15	1.85	0.98	1.20
	G7526	3	8.93	8.95	0.70	0.76
	G3597	3	6.20	8.79	2.69	3.51
	G7427	2	6.80	4.60	2.20	2.20
	G3704	2	4.50	6.62	2.12	2.20
	59490	1	4.40	3.81	0.59	0.59
	G1398	2	1.80	2.06	1.00	1.03
	G3358	3	9.73	8.99	0.74	0.98
合计	18	5.97	6.35	1.42	1.92	
12 月	G1368	2	13.05	13.166	0.58	0.59
	G7526	2	11.40	9.74	1.66	1.79
	G3597	2	14.35	13.61	0.85	1.13
	G7427	2	9.40	5.36	4.04	4.78
	G3704	3	2.87	7.21	4.34	4.47
	59490	1	1.70	7.53	5.83	5.83
	G3358	2	7.65	15.11	7.46	7.84
	合计	14	8.71	10.22	3.43	4.41
总计	所有站点	56	6.30	7.15	1.98	2.74

根误差为 4.41 m/s，可以看出该月份反演的风速与实测数据之间误差较大。从表 2 中可以看出 12 月份 7 个站点中，有 4 个站点 G3358、G7427、G3704、59490 的误差 > 4 m/s。为探究 12 月份误差偏大的原因，将这 4 个站点的所有样本分别计算误差，得出 G3358 站点的误差最大，平均绝对误差值约为 3.43 m/s，均方根误差约为 5.01 m/s，可能该站点反演的风场存在准确性问题。其次是站点 G7427、G3704 和 59490，平均绝对误差值 > 2 m/s，均方根误差 > 3 m/s，说明这 3 个站点的反演结果与实测数据具有一致性。综上所述，12 月份反演风场与实测数据偏差较大，大部分是由于影像获取时刻和实测数据之间存在时间差异，在冬季海面风场变化较大的情况下，风速之间的差异也很大，其次也存在个别站点风场反演结果不准确的问题。

2.4.2 与 CCMP 风场数据对比 将 Sentinel-1A 影像风速反演结果与 CCMP 风场预报数据对比，2017-07-03 两景影像平均绝对误差值为 2.14 m/s，均方根误差为 2.40 m/s；2017-07-05 两景影像平均绝对误差值为 1.15 m/s，均方根误差为 1.67 m/s；2017-07-12 两景影像平均绝对误差值为 1.07 m/s，均方根误差为 1.47 m/s。这六景影像反演结果与 CCMP 风场预报结果较为一致，验证了 7 月份 CMOD5 模式反演广东省近海海域 Sentinel-1A 影像的准确性，用其反演海面高精度风场具有可行性。

为进一步验证 12 月份风速反演误差较大的原因，将 12 月份 CCMP 数据与实测站点数据对比，得到的平均绝对误差值约为 2.96 m/s，均方根误差约为 4.02 m/s，相关系数为 0.59 (表 3)。可以看出，12 月份的 CCMP 数据和实测数据也有一定差异。G3358、G7427 和 59490 这三个站点的 CCMP 风场与实测数据之间的平均绝对误差值都 > 3 m/s，均方根误差都 > 4 m/s，G1368 站点的误差也都 > 4 m/s。这一结果与风速反演结果的比对情况相似。比对 12 月份风速反演结果和 CCMP 风场数据，绝对误差值约为 3.64 m/s，均方根误差约为 4.49 m/s，相关系数为 0.57，偏差较大。处于冬季时段

表3 12月份 CCMP 风场对比

Tab.3 Comparison of CCMP wind fields in December

站点	样本数/个	风速/(m·s <sup>-1</sup> )			
		实测数据平均	CCMP 风速平均	平均绝对误差	均方根误差
G3358	2	7.65	13.08	5.43	6.85
G7427	2	9.40	7.00	3.54	4.28
59490	1	1.7	7.61	5.80	5.80
G3704	3	2.87	4.66	1.85	2.24
G3597	2	14.35	13.31	1.30	1.66
G1368	2	13.05	8.60	4.45	4.48
G7526	2	11.40	11.46	0.27	0.28
所有站点	14	8.71	9.18	2.96	4.02

的12月份,大风日数最多、大风风速最强,南海东北部大风日数最多可达20多天(王慧等,2013),而Sentinel-1A卫星过境时间、CCMP风场时刻与实测数据时间点之间并不完全匹配,导致在风速较大的天气,影像反演风场结果、数值预报风场和实测数据之间都可能出现较大偏差。

在CCMP风场数据对比实测数据过程中,整体误差最大的站点也为G3358,将其误差较大的样本点所在时间:2017-12-08的CCMP风场数据插值到研究区域,得到站点与风速区间的空间位置关系(图5)。可见,G3358站点位于12~15 m/s的风速阶段,是风速值最大的区域,这证明该站点当天实测数据与反演风场、CCMP风场之间偏差较大的原因与风速较高有关。

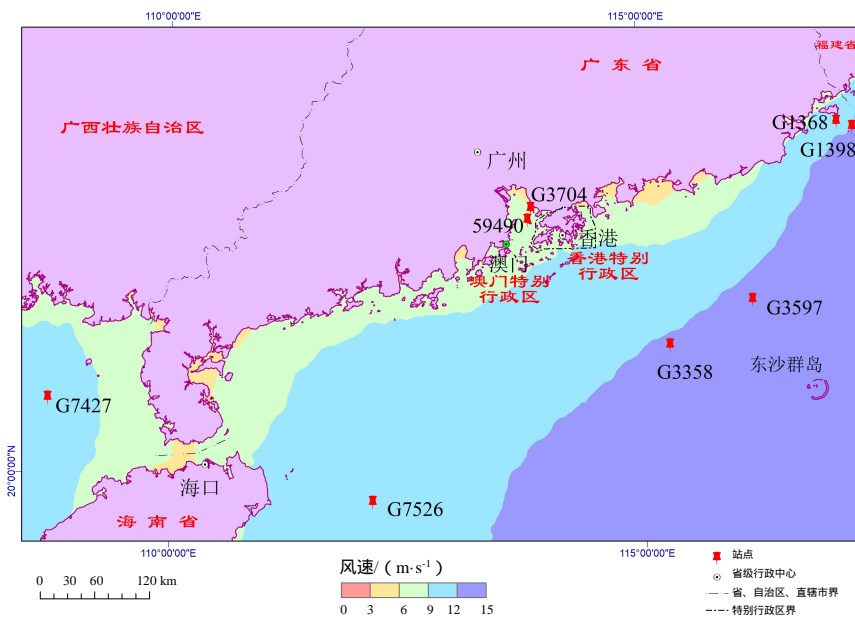


图5 2017-12-08 研究区 CCMP 风场分布

Fig.5 Distribution of CCMP wind field in the research area on Dec. 8<sup>th</sup>, 2017

### 3 讨论

Sentinel-1A是欧洲太空局于2014年发射的对地观测卫星,对比其他微波遥感卫星,具有高分辨率、宽幅模式、重访周期短等优势,但由于发射时间距今较近,目前国内基于Sentinel-1A SAR影像进行近海海面风场反演的研究仍然欠缺。本文基于Sentinel-1A影像和CMOD5模型反演得到2017年3、5、7、12月份广东省近海海面风场,并与站点实测海面风速进行对比验证,反演结果精度较好:海面风速反演的平均绝对误差为1.98 m/s,均方根误差为2.74 m/s,相关系数为0.8,虽然存在一定的高估情况,但整体上来看,反演风速与实测风速基本保持一致且相关性较高。3、5、7月的反演风场对比实测数据,误差均 < 2 m/s,7月份的Sentinel-1A影像与CCMP风场资料也有良好的一致性。对比Shao(2017)反演高分三号卫星影像,VV极化的均方根误差为2 m/s,看出3、5、7月的均方根误差都是小于该值,但由于12月误差过大,导致整体均方根误差 > 2 m/s。

2017年不同月份的海面风场反演结果反映了广东省近海海面风场的季节性变化状况:3、12月处于冬季风时段,5、7月处于夏季风时段,3、12月的平均风速均大于5、7月的平均风速,印证了广东省近海冬季风风速普遍大于夏季风风速的特征。特别是12月份风速明显比其他3个月大很多,最高风速约至13 m/s左右,与刘春霞(2003)利用QuikSCAT散射计分析南海大风特征时,提出南海东北部大风区风速在12月份达到峰值的结论相一致。另外,在实际风速显著增大的12月份,反演风速与实测风速之间的误差也较其他月份偏大,这一点与张婷等(2013)将卫星散射计与海面平台所测的风场数据比较时得出的结果类似。在12月份,由于风速的增大以及COMD模型在高风速情况下反演精度难以保证,导致反演风速与实测数据之间的误差也偏大,其中误差最大的站点G3358位于距离大风中心较近的区域,导致该站点无论在模型反演风场,还是

CCMP预报风场中,与实际测量数据的误差都最大。

本文在实验中只采用CMOD5模型和数量有限的Sentinel-1A SAR影像进行海面风场反演实验,结果不免有些单薄,下一步的研究计划基于不同的地球物理模式函数,利用数量更为充足的SAR影像数据,更加全面地探究Sentinel-1A SAR影像在反演高分辨率、高精度近海海面风场的适用性。另外,同时随着微波遥感技术的进步,越来越多的海面风场资料不断涌现,能为近海海洋风能资源评估提供更多的科学依据。

## 4 结论

基于Sentinel-1ASAR影像数据,利用CMOD5模型反演高分辨率广东省近海海面风场,取得良好的精度,并揭示了广东省近海海面风场季节性差异和变化特征,验证了COMD5反演模型和Sentinel-1A影像适用于高分辨率、大范围、长时间序列的广东省近海海面风场反演和监测。为进一步基于Sentinel-1A影像反演结果估算广东省近海海洋风能资源储量提供了可能性。

致谢:本研究使用的Sentinel-1A影像数据、CCMP风场数据、气象站点数据分别由欧洲太空局(ESA)、美国国家航空航天局(NASA)和广东省气象探测数据中心提供。同时,感谢国家科技基础条件平台——国家地球系统科学数据共享平台(<http://www.geodata.cn>)提供数据支撑。

## 参考文献 (References):

- 毕上上. 2016. 基于Sentinel-1A卫星SAR图像的海面风矢量反演研究. 厦门: 厦门大学. [Bi Shangshang. 2016. Research on Sea Surface Wind Vector Retrieval Based on the SAR Image of Sentinel-1A Satellite. Xiamen: Xiamen University. ]
- 常俊芳. 2012. 近岸海洋风能的星载SAR遥感技术及应用研究. 青岛: 中国海洋大学. [Chang Junfang. 2012. Research on Spaceborne SAR Remote Sensing Technology and Application of Offshore Wind Energy. Qingdao: Ocean University of China. ]
- 常蕊, 朱蓉, 周荣卫, 叶东, 张晓伟, Badger M, Hasager C B. 2014. 高分辨率合成孔径雷达卫星反演风场资料在中国近海风能资源评估中的应用研究. 气象学报 (3): 606-613. [Chang Rui, Zhu Rong, Zhou Rongwei, Ye Dong, Zhang Xiaowei, Badger M and Hasager C B. 2014. Application of High-Resolution SAR Satellite Retrieval Wind Field Data in China's Offshore Wind Energy Resource Assessment. *Acta Meteorologica Sinica*, (3): 606-613. ]
- Gerling T W. 1986. Structure of the Surface Wind Field from the Seasat SAR. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 91(C2): 2308-2320.
- Hasager C B, Badger M, Peña A, Larsén X G and Bingöl F. 2011. SAR-Based Wind Resource Statistics in the Baltic Sea. *Remote Sensing*, 3(1): 117-

144.

- Hersbach H, Stoffelen A and Haan S D. 2007. An Improved C-Band Scatterometer Ocean Geophysical Model Function: CMOD5. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 112(C3): 6-24.
- 韩延磊. 2010. SAR和CALIPSO数据反演海面风速. 青岛: 中国海洋大学. [Han Yanlei. 2010. SAR and CALIPSO Data Retrieval of Sea Surface Wind Speed. Qingdao: Ocean University of China. ]
- Jagdish Bipasha, Paul Shukla, Abhisek Chakraborty and Raj Kumar. 2018. Validation of Wind Speed Retrieval from RISAT-1 SAR Images of the North Indian Ocean. *Remote Sensing Letters*, 9(5): 421-428.
- 蒋洁, 刘永学, 李满春, 钟礼山, 陈振杰, 张荷霞. 2014. 基于ENVISAT ASAR影像与QuickSCAT风场数据风能资源评价——以香港东南海域为例. 地理与地理信息科学, 30(2): 40-43. [Jiang Jie, Liu Yongxue, Li Chunman, Zhong Lishan, Chen Zhenjie and Zhang Hexia. 2014. Wind Energy Resource Evaluation Based on ENVISAT ASAR Image and QuickSCAT Wind Field Data. *Geography and Geo-information Science*, 30(2): 40-43. ]
- 旷芳芳, 张友权, 张俊鹏, 贾村. 2015. 三种海面风场资料在台湾海峡的比较和评估. 海洋学报, 37(5): 44-53. [Kuang Fangfang, Zhang Youquan, Zhang Junpeng and Jia Cun. 2015. Comparison and Evaluation of Three Kinds of Sea Surface Wind Field Data in Taiwan Strait. *Acta Oceanologica Sinica*, 37(5): 44-53. ]
- Lehner S, Horstmann J, Koch W and Rosenthal W. 1998. Mesoscale Wind Measurements Using Recalibrated ERS SAR Images. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 103(C4): 7847-7856.
- 刘春霞, 何溪澄. 2003. QuikSCAT散射计矢量风统计特征及南海大风遥感分析. 热带气象学报, 19(S1): 107-117. [Liu Chunxia and He Xicheng. 2003. Statistical Characteristics of QuikSCAT Scatterometer Vector Wind and Remote Sensing Analysis of South China Sea Gales. *Journal of Tropical Meteorology*, 19(S1): 107-117. ]
- Monaldo F M, Thompson D R, Beal R C, Pichel W G and Pablo Clemente-Colón. 2002. Comparison of SAR-Derived Wind Speed with Model Predictions and Ocean Buoy Measurements. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(12): 2587-2600.
- Nie B and Li J. 2018. Technical Potential Assessment of Offshore Wind Energy over Shallow Continent Shelf along China Coast. *Renewable Energy*, 128: 391-399.
- Quilfen Y, Chapron B, Elfouhaily T, Katsaros K B and Tournadre J. 1998. Observation of Tropical Cyclones by High-Resolution Scatterometry. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 103(C4): 7767-7786.
- 戚纤云, 周云轩, 田波, 于鹏. 2017. 基于Sentinel-1A的长江口近岸风矢量场反演研究. 华东师范大学学报(自然科学版), (6): 126-135. [Qi Xianyun, Zhou Yunxuan, Tian Bo and Yu Peng. 2017. Retrieval of the Wind Field Near the Yangtze River Estuary Based on Sentinel-1A. *Journal of East China Normal University (Natural Science)*, (6): 126-135. ]
- Shao W, Sheng Y and Sun J. 2017. Preliminary Assessment of Wind and Wave Retrieval from Chinese Gaofen-3 SAR Imagery. *Sensors*, 17(8): 1705-1708.
- Stoffelen A and Anderson D. 1997. Scatterometer Data Interpretation: Estimation and Validation of the Transfer Function CMOD4. *Journal of*

- Geophysical Research Oceans*, 102(C3): 5767-5780.
- Vachon P W and Dobson F W. 2000. Wind Retrieval from RADARSAT SAR Images: Selection of a Suitable C-Band HH Polarization Wind Retrieval Model. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 26(4): 306-313.
- 王慧, 隋伟辉. 2013. 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. *气象科技*, 41(4): 720-725. [Wang Hui and Sui Weihui. 2013. Analysis of Seasonal Variation of Offshore Wind in 18 Coastal Regions of China Based on CCMP Wind Field. *Meteorological Science and Technology*, 41(4): 720-725. ]
- Zhang K, Xu X, Han B, Lamin R, Mansaray, Guo Q and Huang J. 2017. The Influence of Different Spatial Resolutions on the Retrieval Accuracy of Sea Surface Wind Speed With C-2PO Models Using Full Polarization C-Band SAR. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 99: 1-11.
- 张雷, 石汉青, 龙智勇, 杜华栋, 张子杨. 2012. 星载合成孔径雷达图像反演海面风场方法综述. *海洋通报*, 31(6): 713-720. [Zhang Lei, Shi Hanqing, Long Zhiyong, Du Huadong and Zhang Ziyang. 2012. Overview of Methods for Satellite Borne SAR Image Retrieval of Sea Surface Wind Field. *Marine Science Bulletin*, 31(6): 713-720. ]
- 张婷, 张杰, 杨俊钢, 孟俊敏. 2013. 卫星散射计与海面平台所测的风场数据比较. *海洋学研究*, 31(2): 45-51. [Zhang Ting, Zhang Jie, Yang Jungang and Meng Junmin. 2013. Comparison of Satellite Scatterometer and Wind Field Data Measured by Sea Surface Platform. *Journal of Marine Sciences*, 31(2): 45-51. ]
- 张璇, 郝明磊, 曾祥能. 2018. C波段SAR图像海面风场反演研究进展. *气象水文海洋仪器*, (1): 1-7. [Zhang Xuan, Hao Minglei and Zeng Xiangneng. 2018. Research Progress of C-Band SAR Image Retrieval of Sea Surface Wind Field. *Meteorological Hydro-Oceanographic Instruments*, (1): 1-7. ]
- 张雷, 石汉青, 龙智勇, 杜华栋, 张子杨. 2012. 星载合成孔径雷达图

## Application of Sentinel-1A Data in Offshore Wind Field Retrieval within Guangdong Province

Wu Pinghao<sup>1,2,3</sup>, Zhong Kaiwen<sup>2</sup>, Hu Hongda<sup>2</sup>, Zhao Yi<sup>1,2,3</sup>, Xu Jianhui<sup>2</sup> and Wang Yunpeng<sup>1</sup>

(1. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China; 2. Guangzhou Institute of Geography, Guangzhou 510070, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Offshore wind energy resources are a common clean energy source. They have rich reserves and are widely distributed, inexpensive, and safe with few environmental constraints and large selection space. They exhibit considerable development and utilization prospects. In this paper, wind direction data were extracted based on wind stripes from Sentinel-1A data, and the CMOD5 retrieval model was used to invert the wind field in the offshore waters of Guangdong Province in March, May, July, and December 2017. Eight sites were selected, and 56 samples were compared with measured data; the sample wind speed was generally higher than measured wind speed. The mean absolute deviation (MAE) of wind speed retrieval was approximately 1.98 m/s, the root mean square error (RMAE) was approximately 2.74 m/s, and the correlation coefficient was 0.8. The wind speeds in March, May, and July were relatively close, and the MAE and RMSE were all under 2 m/s, while the average wind speed in December was above 8 m/s with a higher deviation in MAE and RMSE as the measured data did not exactly reflect satellite transit times. A comparison of the December CCMP data with the measured site data revealed a mean absolute deviation of approximately 2.96 m/s, root mean square error of approximately 4.02 m/s, and correlation coefficient of approximately 0.59. Differences were observed between the CCMP data and the measured data in December, which was similar to the retrieved wind speed data. G3358, G7427, G3704, and 59490 station errors were calculated by the four stations with the largest errors in December. The G3358 station exhibited the most significant errors: the mean absolute deviation was approximately 3.43 m/s and the root mean square error was approximately 5.01 m/s. The data period in which the G3358 station data exhibited the highest error was December 2017, and CCMP wind field data was interpolated to the study area at this period. It was found that the G3358 station is located at the wind speed stage of 12-15 m/s, which is nearest to the large wind speed area in all stations. The reason for the large deviation between the measured site data and the retrieval wind field and CCMP wind field may be related to the higher wind speed. The results of Sentinel-1A image retrieval were consistent with the measured data overall, which verifies that the COMD5 model is applicable to offshore high-resolution marine wind field data retrieval in Guangdong Province, and it provides a possibility for future research on wind energy resource and reserves estimation in Guangdong Province.

**Key words:** ocean wind field; Sentinel-1A; wind stripe; synthetic aperture radar; remote sensing retrieval; offshore Guangdong Province