

# 基于卫星微波散射计风场的台风中心定位方法比较研究

王晓霞<sup>1</sup>, 刘建强<sup>1</sup>, 张毅<sup>1,2</sup>, 徐雅梦<sup>3</sup>

(1. 国家卫星海洋应用中心, 北京 100081; 2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广东广州 511458; 3. 中国矿业大学地球科学与测绘工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 基于HY-2A/B、Metop-A卫星微波散射计风场产品,开展了两种定位台风中心方法的比较研究。以2019年台风“娜基莉”为例,分析了在台风形成期与成熟期不同发展阶段的定位结果。结合台风风场涡旋特性与风速特征,考虑相对垂直涡度和水平散度两个影响因子,探究了高风速阈值涡度场定位法和高风速阈值复合场定位法的定位效果,并与中国气象局热带气旋资料中心的最佳路径数据集比较。结果表明:台风成熟期定位精度较形成期更优,高风速阈值复合场定位法精度更佳,平均偏差为 $0.1^{\circ}\sim 0.2^{\circ}$ ,均方根误差小于 $0.25^{\circ}$ 。

**关键词:** 台风中心定位;高风速阈值;涡度场;复合场

**中图分类号:** P714.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2020)05-0024-10

## 1 引言

台风是一种极具破坏力的灾害性天气系统,常伴有狂风暴雨等天气现象。台风会严重威胁人类的生命安全,并给人类的生产生活造成重大破坏。准确定位台风中心位置和监测台风移动路径对于台风预报与监测研究具有重要意义。

南海是台风活动最频繁的海域之一,因此本研究将南海海域作为研究区。南海台风生成与大气海洋季节尺度变化有密切关系。夏季高温使得海水易蒸发,大气层结不稳定,同时受上空活跃的西南季风影响,与西太副热带高压辐合带偏东风相遇汇成季风辐合带,形成季风槽,这有利于对流层低层正涡旋辐合和高层负涡旋辐散的增强。垂直上空暖湿气流的辐聚给台风的产生提供了充足的水汽条件;弱的垂直风切变为台风形成提供了初始扰动和动力条件<sup>[1-2]</sup>。准确获得台风中心位置,有利于开展台风所在背景场和环流场等动力分析。

卫星遥感具有时空分辨率高、覆盖范围广等优势,是台风预报与监测的重要手段。微波散射计是

获取海面风场数据的主要载荷,可同时获得全球海面风向和风速。其他手段均有一定的局限性,如:由卫星云图上的云移动推导出的风是云顶风,不是海面风;微波辐射计和雷达高度计仅能获取风速资料,得不到风向资料<sup>[3]</sup>。较早的微波散射计包括1978年美国Seasat卫星搭载的SASS、1991年欧洲ERS系列卫星搭载的AMI、1999年美国QuikSCAT卫星搭载的SeaWinds微波散射计。目前在轨的微波散射计有欧洲Metop系列卫星搭载的ASCAT(Advanced SCATterometer),工作频率在C波段;2011年和2018年我国海洋动力卫星系列中HY-2A与HY-2B搭载的HSCAT、2016年印度发射的Scatsat-1卫星上搭载的OSCAT-2微波散射计、2018年中法海洋卫星CFOSAT搭载的RFSCAT,工作频率在Ku波段。多颗在轨运行的微波散射计为台风监测提供了大量观测数据。在利用这些数据进行台风识别与定位研究方面可以做更深入的探索。Lecomte等<sup>[4]</sup>和Gierach等<sup>[5]</sup>发展了基于风速阈值以及涡度分布的识别算法,但是由于微波散射计分辨率较低、人工参与识别较多,因此最终识别率并不高。Ho

收稿日期: 2019-11-11; 修回日期: 2020-03-08。

基金项目: “全球变化与海气相互作用”专项(GASI-02-PAC-YGST2-02); 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州)人才团队引进重大专项(GML2019ZD0302)。

作者简介: 王晓霞(1995-),女,硕士,主要从事散射计风场应用研究。E-mail: 1457549281@qq.com

通讯作者: 张毅(1983-),男,副研究员,博士,主要从事海洋遥感微波-极化研究。E-mail: zhangyi@mail.nsoas.org.cn

等<sup>[6]</sup>和 Talukder 等<sup>[7]</sup>利用从 QuikSCAT 微波散射计提取的热带气旋特征,采用支持向量机方法实现了热带气旋自动识别与跟踪,但是由于算法是基于统计主风向相对强度判别方法来表征风场涡旋特征,因此在降雨等恶劣条件下风向误差大、算法准确率较低。Zhang 等<sup>[8]</sup>比较了 HY-2A 微波散射计与 QuikSCAT 微波散射计的海面风场数据在 3 个台风的路径和强度研究中的差异,结果表明,利用微波散射计海面风场数据可以进行强度较弱的热带气旋的相关研究。2015 年,邹巨洪等<sup>[9]</sup>发展了基于 HY-2 卫星微波散射计风矢量产品的热带气旋自动识别算法,即先利用热带气旋风场的风速与风向分布直方图特征进行粗搜索,再利用种子生长法精确搜索目标区域内螺旋状流线。这个方法可以在降雨造成风矢量反演精度降低的条件下,实现对热带气旋的准确自动识别。2017 年,赵勇等<sup>[10]</sup>基于台风风场分解原理<sup>[11]</sup>和改进的 Tikhonov 正则化原理,结合台风涡度场和散度场分布规律实现台风中心定位。Hu 等<sup>[12]</sup>结合 FY-2 卫星云图和 HY-2 微波散射计风场数据展开台风监测研究,结合二者的优势所获得的结果具有较高的定位精度。

本研究基于 HY-2A/HY-2B/Metop-A 微波散射计风场数据,依据台风经过时海面风场风速较高和风向涡旋性高的特性,并考虑台风发生时低层绝对涡度和高层辐散场等形成因子,结合海面涡度场和散度场的分布规律,针对台风不同发展阶段,应用两种台风中心定位方法,即高风速阈值与涡度场定位法和高风速阈值与复合场定位法进行比较研究。最后,将两种方法的定位结果与中国气象局(China Meteorological Administration, CMA)热带气旋资料中心最佳路径资料<sup>[13]</sup>进行准确度对比。

## 2 数据与方法

### 2.1 数据选择与处理

#### 2.1.1 HY-2A/2B 风场数据

HY-2A 卫星是我国第一颗海洋动力环境卫星,于 2011 年 8 月 16 日成功发射。HY-2B 卫星是我国第二颗海洋动力环境卫星,于 2018 年 10 月 25 日成功发射。卫星微波散射计工作频率在 Ku 波段,极

化方式有 HH 极化和 VV 极化两种,风速测量精度为 2 m/s,风向测量精度为 20°,有效测量范围在 2~24 m/s。卫星微波散射计采用笔形圆锥扫描方式,能够实现对全球海面风场的宽刈幅观测(1 800 km)<sup>[14]</sup>。卫星微波散射计具有全球连续观测能力,在 1~2 d 时间内的全球覆盖率大于 90%;同时在南海区域范围(5°~20°N, 105°~120°E)内具有实时观测能力,南海过境时间大约在 10 时(北京时,下同)和 22 时。

研究数据采用国家卫星海洋应用中心业务化发布的 2016—2018 年 6 月的 HY-2A/SCAT L2B 数据和 2019 年 1—12 月的 HY-2B/SCAT L2B 数据,地面分辨率为 25 km。

#### 2.1.2 Metop-A 风场数据

Metop-A 是欧洲第一颗极地轨道卫星。ASCAT 为其搭载的卫星散射计具有 3 个垂直极化天线,发射 5.225 GHz(C 波段)脉冲。天线在仪器两侧延伸,因而产生两个 500 km 宽的观测刈幅,之间相隔大约 360 km,在 24 h 内能覆盖全球 76% 的区域<sup>[15]</sup>。卫星散射计的风速测量精度、风向测量精度和测量范围分别为 2 m/s、20°、4~24 m/s,经过南海时间大约在 13 时和 01 时。

研究数据采用 2016—2018 年 6 月空间分辨率为 25 km 的 ASCAT L2B 数据。

#### 2.1.3 双星联合观测

1 d 内单颗卫星观测可以覆盖全球大部分区域,如 ASCAT 1 d 的全球覆盖率可达 70% 以上, HY-2 卫星散射计在 24 h 内的全球覆盖率可达 90% 以上。但是仍然有刈幅空白区域,难以满足业务应用需求。双星联合观测既可以将 1 d 内的全球覆盖率提高到 97%<sup>[15]</sup>,还可以提高时间观测效率。

时间观测统计应考虑固定轨道周期内对同一观测区域的观测次数,而不同轨道观测周期容易混淆重复观测,因而设定观测周期为 180°W~180°E 的观测时间。在一个观测周期内卫星观测到南海海域,观测次数加 1,并记录观测时间。从图 1 可以发现, HY-2/SCAT 和 ASCAT 在 24 h 内观测到南海海域为两次,两次观测时间间隔在 12 h 左右;而双星联合观测时间间隔平均缩短至 6 h,因此可以有效提高观测采样效率。因而,本研究联合 HY-2A/SCAT 和 ASCAT 共同监测南海区域范围的台风,尽可能避免刈幅空白观测区域。

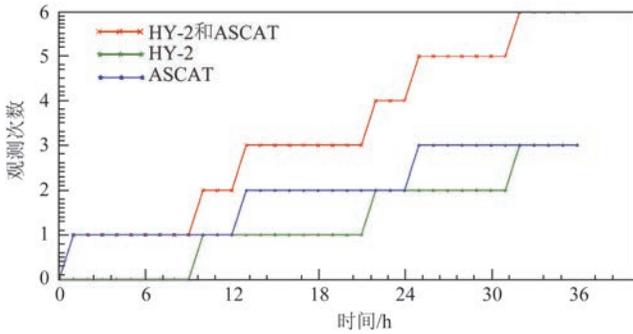


图1 ASCAT/HY-2以及双星联合观测在南海区域(5°~20°N、105°~120°E)的次数统计

采用反距离加权插值(Inverse Distance Weight, IDW)方法将两颗卫星的散射计数据进行融合来观测南海区域上的台风。该插值方法主要用于标量插值,因此将海面风场矢量数据分解为水平  $u$  和垂直  $v$  风场并作插值,最后合并为矢量风场。

反距离加权插值方法如下:

$$W_i = \frac{W_i h_i^{-p}}{\sum_{j=1}^n h_j^{-p}}$$

$$h_i = \sqrt{(x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2} \quad (1)$$

$W_0$ 是待插值点的估计值; $W_i$ 是第  $i$  点的风速值; $h_i$ 是距离; $p$ 是距离的幂,一般选取  $p=2$ 。

#### 2.1.4 风场资料检验

在检验台风定位结果之前,首先需要检验散射计测风精度。考虑到台风多发生在夏秋季节,因而选择这个时间范围的风场资料进行验证。采用2017年6月—2017年10月美国国家浮标资料中心(National Data Buoy Center, NDBC)的浮标风测数据,对HY-2A/SCAT和Metop-A/ASCAT散射计风场数据作测风真实性检验(图2、3)。选择2019年6月—2019年10月期间浮标风测资料,检验HY-2B/SCAT散射计测风能力。选择时间窗口60 min、空间窗口25 km范围的散射计风场数据,与NDBC浮标站点测风匹配比较。站点信息见表1,包括站点序号、经纬度信息和站点风速计高度。由于卫星散射计获得海面风为10 m高度中性稳定风,而所选观测站点测量高度为4.1 m高度和4.9 m高度海面风,因此根据海上不同高度风速换算关系公式<sup>[16]</sup>,将浮标实测风转换成10 m高度海面风。

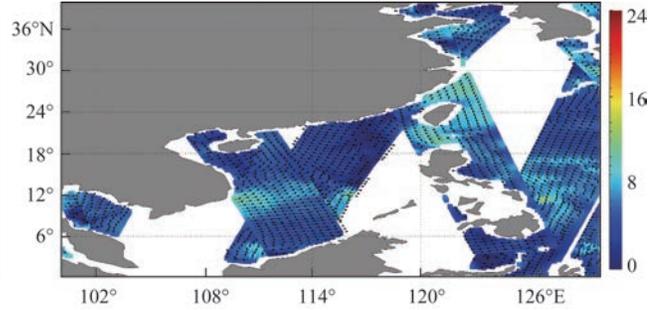


图2 2017年6月10日南海区域范围ASCAT观测风场

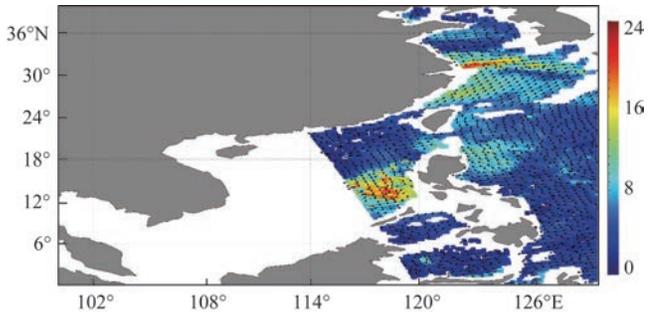


图3 2017年6月10日南海区域范围HY-2A/SCAT观测风场

表1 NDBC观测站点信息表

| 序号    | 经度/°    | 纬度/°   | 风速计高度/m |
|-------|---------|--------|---------|
| 41010 | 78.485  | 28.878 | 4.1     |
| 41048 | 69.573  | 31.831 | 4.1     |
| 42056 | 84.945  | 19.820 | 4.1     |
| 46035 | 177.703 | 57.016 | 4.9     |
| 51101 | 162.075 | 24.361 | 4.1     |

$$U_{10} = K_z U_z,$$

$$K_z = \frac{\ln(10/z_0)}{\ln(z/z_0)} \quad (2)$$

式中: $U_z$ 为浮标风速, $z$ 为浮标风速计高度, $K_z$ 为不同高度风速转换系数。由于海面粗糙度随风场变化,以7 m/s为界限,当风速>7 m/s时, $z_0$ 为0.022,当风速<7 m/s时, $z_0$ 为0.002 3。

本研究误差检验统计量包括风速、风向平均偏差和均方根误差。选择卫星经过站点时间前后1 h范围、空间窗口0.25°内的点数据做误差统计。表2显示HY-2A风速整体平均偏差为-0.3 m/s,均方根误差为2.07 m/s;风向平均偏差为11.28°~18.31°,均方根误差较大,为23.73°~35.90°。Metop-A风速

表2 HY-2A/2B和Metop-A/ASCAT与NDBC实测风速(单位:m/s)/风向(单位:°)误差统计

| 站点编号  | 散射计         |            |             |            |               |            |             |            |
|-------|-------------|------------|-------------|------------|---------------|------------|-------------|------------|
|       | HY-2A       |            | Metop-A     |            | HY-2A和Metop-A |            | HY-2B       |            |
|       | 平均偏差        | 均方根误差      | 平均偏差        | 均方根误差      | 平均偏差          | 均方根误差      | 平均偏差        | 均方根误差      |
| 41010 | 1.09/18.31  | 2.18/32.10 | 0.97/15.30  | 2.07/29.82 | 1.07/19.71    | 2.09/41.25 | 0.87/20.36  | 1.96/30.23 |
| 41048 | 0.86/12.57  | 1.14/30.68 | -0.78/19.43 | 1.65/35.46 | 0.76/15.8     | 1.26/22.36 | -0.82/11.67 | 2.04/25.21 |
| 42056 | -1.23/11.28 | 2.21/23.73 | 0.64/18.9   | 1.02/36.74 | 0.55/14.76    | 0.90/27.53 | 1.07/10.97  | 2.17/20.10 |
| 46035 | -1.57/21.36 | 2.98/33.27 | 1.28/23.62  | 2.36/40.05 | 0.89/19.85    | 1.67/36.85 | -0.91/14.57 | 1.93/28.20 |
| 51101 | -0.65/15.96 | 1.85/35.90 | -0.31/20.37 | 1.12/39.62 | 0.37/19.43    | 0.92/29.71 | -0.86/13.51 | 1.87/27.19 |

整体平均偏差为0.36 m/s,均方根误差为1.64 m/s;风向平均偏差为15.30°~23.62°,风向均方根误差比HY-2A/SCAT大,在29.82°~40.05°之间。联合观测风场的风速、风向平均偏差比单星观测风场小,整体风速平均偏差为0.72 m/s,均方根误差为1.36 m/s。HY-2B整体平均偏差为-0.15 m/s,均方根误差为1.99 m/s;风向平均偏差为10.97°~20.36°,风向均方根误差较大,在20.10°~30.23°之间。

总的来看, HY-2A/2B卫星测风风速比NDBC的浮标风偏小,而Metop-A卫星测风风速比NDBC浮标风偏高,联合观测风场比单星观测风场风速平均误差偏小。HY-2B卫星观测风场优于HY-2A, Metop-A观测风场优于HY-2A观测风场。分析表明,误差一部分来源于浮标与选定空间窗口范围下卫星测风数据的空间不一致,以及HY-2卫星与Metop-A卫星的观测时间不一致,时间窗口范围较大,导致数据比较存在偏差。卫星风产品可以用于业务化应用研究,本文以HY-2A和Metop-A联合风场以及HY-2B观测风场进行台风中心定位。

### 2.1.5 定位验证资料

验证数据为CMA最佳路径资料。资料包括:时间、中心位置、中心最低气压、风力强度、风力等级和热带气旋发展状态等。资料每行路径的间隔小时数为6 h,发布时刻分别为00时、06时、12时和18时。其中2017年部分台风发展期的间隔小时数为3 h。由于卫星散射计观测资料所得风场数据与最佳路径数据集资料在时间上存在差异,因此,在研究中忽略了台风移速的快慢,将散射计风场数据观测时间点反距离加权插值到CMA最佳路径数据集上,从而在同一时间尺度上进行台风定位结果对比。

## 2.2 原理与方法

### 2.2.1 高风速阈值定义

一般地,台风结构在水平方向上分为台风眼区、云墙和螺旋云带区。台风中心位于台风眼区,由于空气下沉运动导致眼区绝热增温,台风中心温度最高、气压最低、风速最小。台风云墙区空气有强烈的上升对流运动,此区域天气恶劣,常发生狂风暴雨。在充分发育的强热带气旋内,中心附近大气压力最低,紧贴着热带气旋“风眼”周围的风力最强<sup>[12]</sup>。根据台风水平结构的组成原理和大风区风速特征,首先定位出台风大风区的位置边界,即遍历研究区风场数据,搜索出高风速海域的边界范围。气象学中,一般用17 m/s、26 m/s和34 m/s来衡量台风内外核与螺旋云带尺度大小,因而将17 m/s设置为高风速搜索阈值边界值,在风场研究数据中搜索风速>17 m/s并且风矢量单元格个数>4×4(即100 km×100 km)的区域。

### 2.2.2 高风速阈值与涡度场定位法

一般地,台风具有明显的气旋性涡旋结构。在大气动力学与天气诊断分析研究中,涡度是一个重要的物理量。涡度表征的是大气运动的旋转特征,用来衡量空气质块旋转运动强度。通过观察涡度的分布特性与发展变化规律,可以分析出天气系统的发展变化特点。涡度是一个矢量,但由于大气的近水平运动,一般只考虑涡度的垂直分量,即垂直涡度分量或相对涡度垂直分量<sup>[17]</sup>。在北半球,风场沿逆时针方向向台风中心辐聚,因此定义逆时针旋转为正方向。理论上讲,台风结构范围内的涡度场值大于零并且台风中心处有局部最大值点。

有研究表明,利用吉洪诺夫正则化方法结合数

值微分计算有限区域内涡度方法的精度比中央差分算法高,尤其是在对较小尺度天气系统的识别能力上。涡度的计算公式是利用观测风场对空间坐标进行微分运算获得<sup>[18]</sup>。本研究借鉴数值微分计算涡度的思路,将其应用到南海海域风场,建立涡度场并定位台风中心。

HY-2B 卫星散射计 L2B 产品风矢量单元大小为 25 km × 25 km,风矢量单元的行列数分别为 1 624 和 76。球面上利用观测风场计算涡度时,经圈与纬圈都具有 2π 的周期,因此可以在经纬圈上逐行逐列地利用一维一阶导数来计算<sup>[19]</sup>。

按照风速与风向的关系,首先计算出风速的  $u$ 、 $v$  分量:

$$\begin{aligned} u &= (\text{wind\_speed}) * \sin(\text{wind\_dir}) \\ v &= (\text{wind\_speed}) * \cos(\text{wind\_dir}) \end{aligned} \quad (3)$$

式中:  $u$  为水平分量,  $v$  为垂直分量, wind\_speed 为风速值, wind\_dir 为风向值,用弧度表示。

相对涡度垂直分量  $\zeta$  的表达式为:

$$\zeta = \frac{\partial v}{\partial \lambda} - \frac{\partial u}{\partial \varphi} \quad (4)$$

式中:  $\lambda$  为经度,  $\varphi$  为纬度,  $\lambda$ 、 $\varphi$  取决于台风风场范围,南海海域取 100°~125°E, 0°~25°N。首先,将球面风场插值到规则网格点上生成观测风场;然后逐行逐列计算出  $\frac{\partial u}{\partial \lambda}$ 、 $\frac{\partial v}{\partial \lambda}$ 、 $\frac{\partial u}{\partial \varphi}$  和  $\frac{\partial v}{\partial \varphi}$ , 计算并建立涡度场  $\zeta$ ;最后,结合台风大风带的结构特性,定义在高风速海域范围内涡度场的最大值点为台风中心。

### 2.2.3 高风速阈值与复合场定位法

在大气运动演变过程中,散度也是一个重要的物理量。散度表征大气质子运动辐合、辐散强度特征,辐合为负、辐散为正。由于大气近水平运动特性,这里只考虑大气运动的水平散度。根据台风高空辐散场与低层辐聚的特性,台风结构所在散度场理论上为负值并且台风中心处存在局部最小值点。

复合场不仅考虑了台风的涡度场特性,还考虑了散度场特性。将散度场与涡度场做乘法,复合场理论上为负值并且在台风中心处存在最小值点。因此,首先构建出散度场,并结合涡度场的构建方法生成观测风场。水平散度  $D$  的表达式是:

$$D = \frac{\partial u}{\partial \lambda} + \frac{\partial v}{\partial \varphi} \quad (5)$$

复合场 = 涡度场 × 散度场,即  $C = \zeta \times D$ 。考虑台风结构的高风速特征,高风速海域范围内的复合场  $C$  最小值点即为台风中心。

## 3 案例应用与评价

一般地,台风生成发展阶段包括形成期、发展期、成熟期和衰退期。洋面上初始低压气旋扰动,对流层风切变小,吸收海洋提供的热量和水汽后风力迅速增强。随着台风向陆地接近,受陆地地形阻挡作用,同时维持气旋发展的能量减小,风力减弱。本文以 2019 年台风“娜基莉”为例,对台风形成发展时期和成熟期进行定位,并对不同方法作出比较。

### 3.1 台风“娜基莉”概况

2019 年 11 月 5 日 20 时,南海洋面上生成 8 级热带风暴,并向东偏南移动(见图 4);7 日 08 时发展为强热带风暴,23 时方向转折向西偏南移动,风力继续增强;8 日 14 时发展成为台风并水平向西移,持续 2 d 直至 10 日早晨风力减弱;11 日凌晨登陆,风力减弱至热带风暴。

### 3.2 不同方法定位结果分析

#### 3.2.1 高风速阈值与涡度场定位法应用结果分析

HY-2B 卫星微波散射计垂直极化刈辐宽度可达 1 700 km,观测风场可以覆盖近乎完整的台风结构(见图 5),矢量风场中也可以提取风向涡旋信息,在判断台风位置时更加清晰。成熟期的台风结构特征比形成期更加明显(见图 6)。小而近圆的风眼区风速最低,风力强劲的大风区和外围螺旋带区的风场、风向涡旋度较高。形成期风眼大而散,风力较弱。

从“娜基莉”涡度场分布中可以明显看出(见图 6a),台风结构区域风场涡度值较高,台风结构以外的风场区域涡度普遍相对偏低,在台风成熟期这种特征更为明显(见图 6b)。在形成期涡度场中存在涡度值较高的非台风区域(见图 6c),观察其矢量观测风场,风向涡旋度并不高,因此考虑高风速阈值来限定台风结构大体范围是非常必要的,可以据此筛选出台风区域。如果高风速区域搜索中仍存在非台风区域,考虑观测风场、风向涡旋信息来判断与筛选。

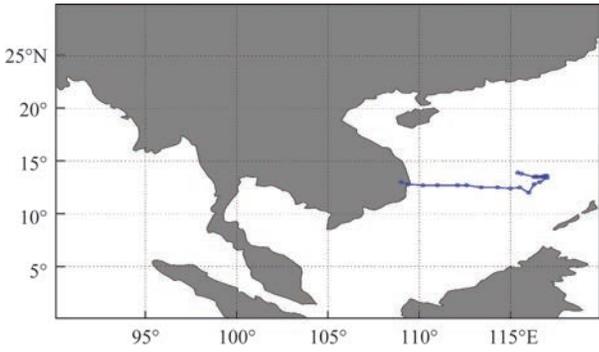


图4 台风“娜基莉”移动路径

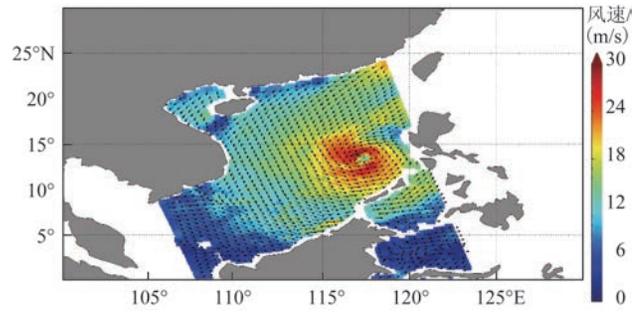
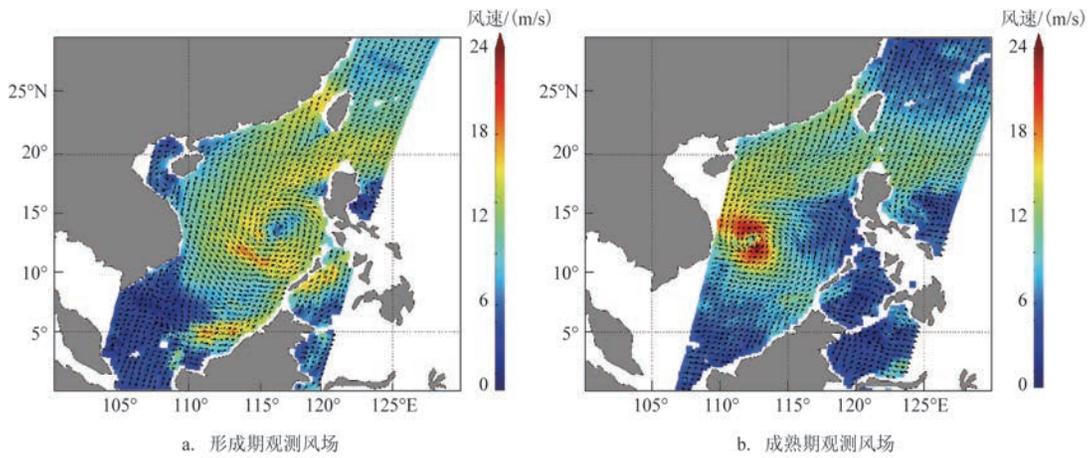
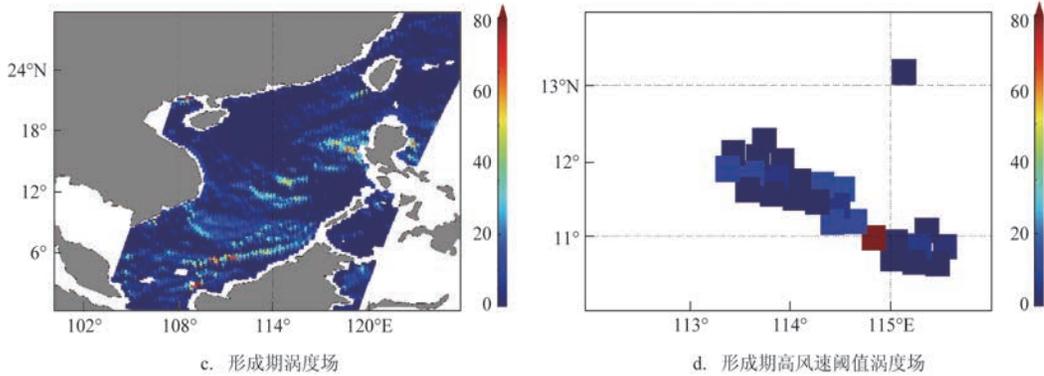


图5 2019年11月7日台风“娜基莉”  
HY-2B/SCAT 观测风场



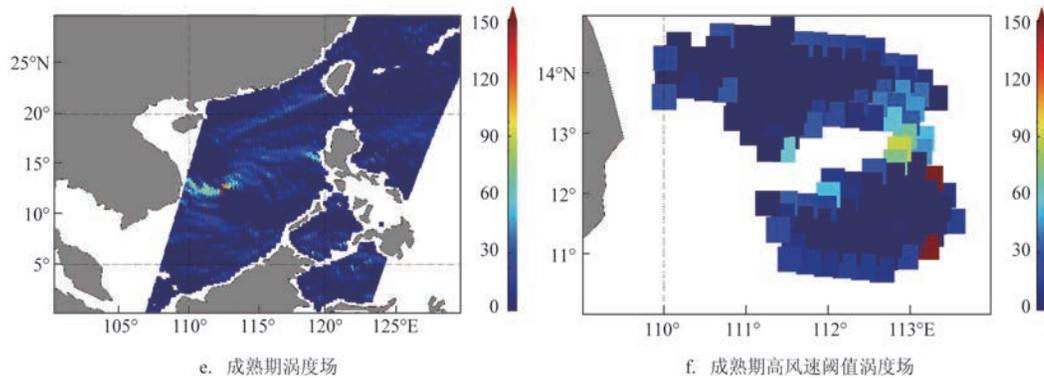
a. 形成期观测风场

b. 成熟期观测风场



c. 形成期涡度场

d. 形成期高风速阈值涡度场



e. 成熟期涡度场

f. 成熟期高风速阈值涡度场

图6 台风“娜基莉”观测风场、涡度场和高风速阈值涡度场分布

无论是形成期还是成熟期阶段的台风,高风速阈值涡度场分布中存在涡度最大值点,即为台风中心。

### 3.2.2 高风速阈值与复合场定位法应用结果分析

复合场结合了涡度场和散度场二者的特性。散度场反映了风场的水平散度信息,台风中心处散度最弱,理论上台风结构区域散度值为负。将涡度场与散度场复合相乘,复合场值会发生数量级的翻倍,理论上在台风结构区域甚至整个风场区域内会出现最小值点(数值上为最大值,因为散度为负值),即为台风中心。很明显,成熟期台风结构区域与周围海域的复合值差异明显(见图7),大风区复合值为负,台风中心处复合值最低。形成期复合场分布较涡度场分布的台风结构区域特征明显,考虑是风场复合了散度因子的关系。不过仍然存在台风结构区域之外的一些极小值点,因而在高风速阈值限定之后,最低复合值点即台风中心点清晰可定位。

## 3.3 台风中心定位方法评价

### 3.3.1 定位结果误差统计

为了验证台风中心定位结果的准确度,将两种方法获得的结果与CMA最佳路径数据集对比并作出误差统计。本文基于HY-2A/SCAT与Metop-A/ASCAT联合观测和HY-2B/SCAT两种观测手段,统计了2016、2017、2019全年以及2018年1—6月南海区域24例台风,及其在形成期与成熟期不同强度下两种方法的定位误差,包括:经向、纬向和总距(各方法定位点与CMA数据集位置点之间的距离)3种位置的平均偏差和均方根误差。结果见表3和表4。

在台风形成期阶段(见表3),利用高风速阈值与涡度场定位法得到的经纬向平均偏差 $<0.20^\circ$ ,均方根误差 $<0.30^\circ$ ;总距平均偏差 $<0.25^\circ$ ,均方根误差 $<0.30^\circ$ 。利用高风速阈值与复合场定位法得到的经纬向平均偏差 $<0.18^\circ$ ,均方根误差 $<0.28^\circ$ ;总

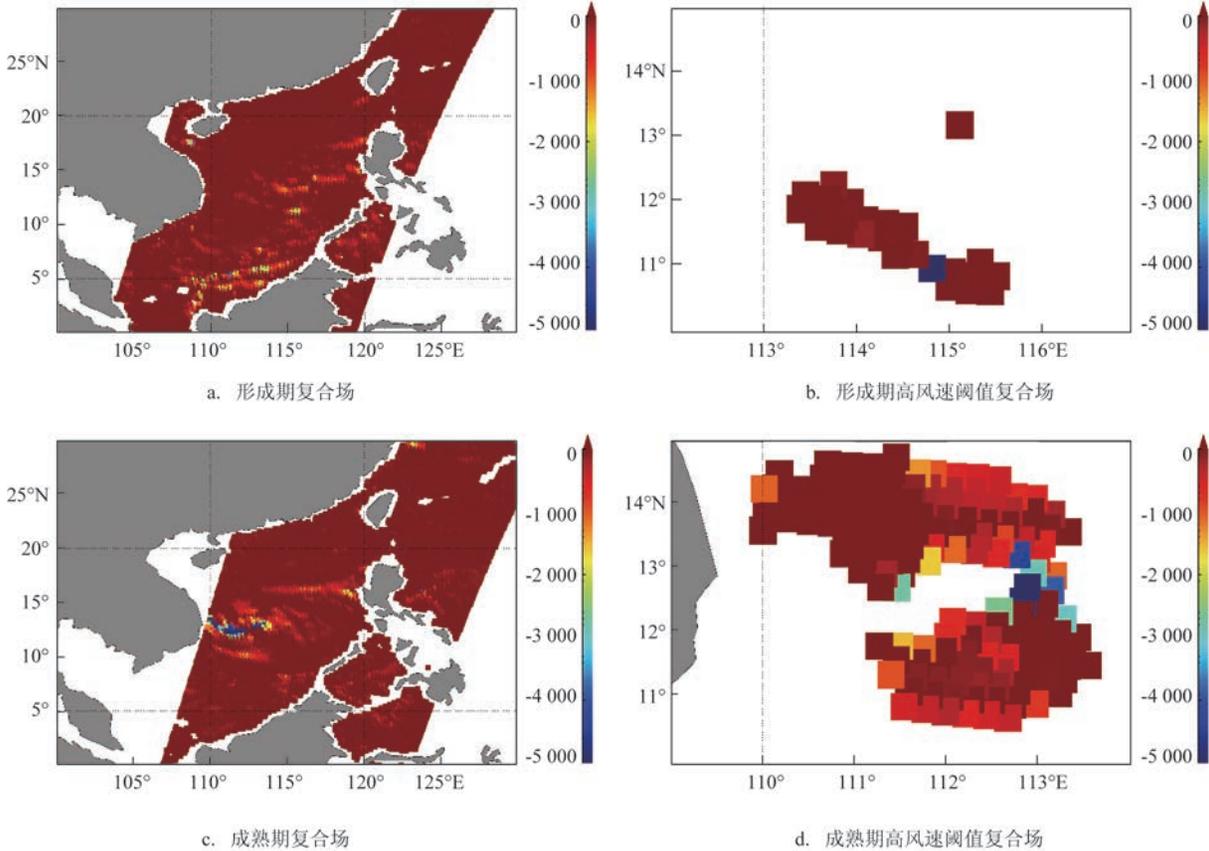


图7 台风“娜基莉”复合场和高风速阈值复合场分布

表3 台风形成期定位结果与CMA最佳路径误差统计

| 观测手段               | 定位方法         | 偏差    | 经向/°  | 纬向/°  | 总距/°  |
|--------------------|--------------|-------|-------|-------|-------|
| HY-2A/Metop-A 联合观测 | 高风速阈值与涡度场定位法 | 平均偏差  | 0.146 | 0.182 | 0.230 |
|                    |              | 均方根偏差 | 0.297 | 0.276 | 0.286 |
|                    | 高风速阈值与复合场定位法 | 平均偏差  | 0.138 | 0.167 | 0.184 |
|                    |              | 均方根偏差 | 0.264 | 0.276 | 0.271 |
| HY-2B/SCAT         | 高风速阈值与涡度场定位法 | 平均偏差  | 0.159 | 0.166 | 0.198 |
|                    |              | 均方根偏差 | 0.260 | 0.275 | 0.269 |
|                    | 高风速阈值与复合场定位法 | 平均偏差  | 0.153 | 0.172 | 0.187 |
|                    |              | 均方根偏差 | 0.251 | 0.262 | 0.273 |

表4 台风成熟期定位结果与CMA最佳路径误差统计

| 观测手段               | 定位方法         | 偏差    | 经向/°  | 纬向/°  | 总距/°  |
|--------------------|--------------|-------|-------|-------|-------|
| HY-2A/Metop-A 联合观测 | 高风速阈值与涡度场定位法 | 平均偏差  | 0.132 | 0.116 | 0.143 |
|                    |              | 均方根偏差 | 0.214 | 0.226 | 0.250 |
|                    | 高风速阈值与复合场定位法 | 平均偏差  | 0.128 | 0.117 | 0.129 |
|                    |              | 均方根偏差 | 0.229 | 0.206 | 0.218 |
| HY-2B/SCAT         | 高风速阈值与涡度场定位法 | 平均偏差  | 0.139 | 0.123 | 0.148 |
|                    |              | 均方根偏差 | 0.260 | 0.249 | 0.255 |
|                    | 高风速阈值与复合场定位法 | 平均偏差  | 0.124 | 0.119 | 0.130 |
|                    |              | 均方根偏差 | 0.233 | 0.212 | 0.224 |

距平均偏差 $<0.20^\circ$ ,总距均方根误差 $<0.28^\circ$ 。在台风成熟期阶段(见表4),利用高风速阈值与涡度场定位法得到的经纬向平均偏差 $<0.14^\circ$ ,均方根误差 $<0.27^\circ$ ;总距平均偏差 $<0.15^\circ$ ,均方根误差 $<0.26^\circ$ 。利用高风速阈值与复合场定位法得到的经纬向平均偏差 $<0.13^\circ$ ,均方根误差 $<0.24^\circ$ ;总距平均偏差 $<0.13^\circ$ ,均方根误差 $<0.23^\circ$ 。根据地球赤道周长与绕赤道一周的弧度为 $360^\circ$ ,可以计算出 $1^\circ$ 对应地面大约为111 km。因此,成熟期阶段高风速阈值与复合场定位法经纬向平均偏差大约为14.43 km,均方根误差为26.64 km。

### 3.3.2 不同定位方法评价

根据误差统计表(见表3和表4),可以发现以下规律:

(1)比较不同的台风定位方法,发现高风速阈值与复合场定位法比涡度场定位法精度高。因为复合场中复合了垂直涡度和水平散度两种因素,考虑了大气旋转和辐合辐散特性,而涡度场定位只考虑了一种因素。

(2)比较不同阶段台风定位效果,成熟期定位精度高于形成期。台风形成期风力较弱,风场涡旋

性较差,大气运动质子辐合辐散较弱,特征不明显而导致定位偏差较大。台风成熟期风力较强,风场涡旋性明显,台风结构完整,大气质子旋转运动较强,定位效果优于形成期。

(3)比较两种观测手段,发现HY-2B观测风场定位误差与联合观测风场定位误差相近。从时效性上看,联合观测风场远优于单星观测;从卫星反演风场质量上看,HY-2B观测风场要优于HY-2A/SCAT、ASCAT风场,因此HY-2B单星观测风场可用于台风中心定位。

总的来看,两种方法定位平均偏差在 $0.1^\circ\sim 0.25^\circ$ 之间,均方根偏差在 $0.1^\circ\sim 0.3^\circ$ 之间,定位精度有待进一步提高。分析误差来源,从环境场因素考虑,台风发生时常伴随强降雨、大风恶劣天气,观测风场精度严重受损,严重影响涡度、散度场的精度,导致定位偏差较大。从传感器方面考虑,散射计的空间分辨率为 $0.25^\circ$ ,HY-2A/2B散射计测风范围为 $2\sim 24$  m/s,ASCAT测风范围为 $4\sim 24$  m/s;在高风速台风环境场下散射计测风灵敏度较差,获取信号能力易饱和,因而造成定位偏差较大。不同发展阶段、不同强度的台风,各方法的定位效果也不尽相

同。成熟期台风结构更加完整,风场涡旋特性更加明显,采用高风速阈值与复合场定位法的偏差比涡度场定位法小,定位效果更佳。在与台风CMA最佳路径数据集比较时,由于时间不一致且把台风当作匀速移动来看,因而插值过程中可能导致产生定位偏差。

## 4 结论与讨论

本文基于HY-2A/SCAT与ASCAT联合观测风场以及HY-2B/SCAT观测风场,统计了2016—2018年6月以及2019年1—12月发生在南海区域的24例台风,及其在形成期与成熟期阶段的不同定位方法的定位偏差。比较分析后得出以下结论:

(1)整体来看,本文应用的高风速阈值与涡度场定位法和高风速阈值与复合场定位法两种方法的定位平均偏差 $<0.25^\circ$ ,均方根误差 $<0.3^\circ$ 。台风发生在高风速环境场条件下,散射计测风灵敏度较差,在后续台风定位研究中应考虑这一点,进一步提升定位精度。

(2)由于台风形成期大气运动辐合辐散较弱,风场涡旋特征不明显,因此,定位效果较成熟期差。从方法上讲,根据大气垂直涡度和水平散度影响因子来定位台风中心,定位效果较涡度场定位法更好。因为复合场考虑了两种影响因子,其台风结构所在风场与周围风场相比,在数量级上表现出明显差异性,能够较容易获得台风中心。成熟期时,采用高风速阈值与复合场定位法平均偏差在 $0.1^\circ\sim 0.2^\circ$ ,均方根误差 $<0.25^\circ$ 。

### 参考文献:

- [1] 王慧, 丁一汇, 何金海. 西北太平洋夏季风的变化对台风生成的影响[J]. 气象学报, 2006, 64(3): 345-356.
- [2] 黄荣辉, 皇甫静亮, 武亮, 等. 关于西北太平洋季风槽年际和年代际变异及其对热带气旋生成影响和机理的研究[J]. 热带气象学报, 2016, 32(6): 767-785.
- [3] 王毅, 黄润恒, 刘建强. 卫星散射计台风风场资料的个案研究[C]//第十一届全国遥感技术学术交流会论文集. 海口: 中国空间科学学会, 中国宇航学会, 中国航空学会, 中国自动化学会, 中国电子学会, 中国海洋学会, 中国测绘学会, 中国地质学会, 1999: 489-491.
- [4] Lecomte P, Crapolicchio R, Saavedra de Miguel L. Cyclone tracking with ERS-2 scatterometer: algorithm performances and post-processed data examples[C]//Proceeding of the Envisat & ERS Symposium. Gothenburg, 2000.
- [5] Gierach M M, Bourassa M A, Cunningham P, et al. Vorticity-based detection of tropical cyclogenesis[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2007, 46(8): 1214-1229.
- [6] Ho S S, Talukder A. Automated cyclone identification from remote QuikSCAT satellite data[C]//Proceedings of 2008 IEEE Aerospace Conference. Big Sky, MT: IEEE, 2008: 1-9.
- [7] Talukder A, Ho S S, Liu T, et al. Global cyclone detection and tracking using multiple remote satellite data[EB / OL]. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download;jsessionid=A42AB558C79E0BE29CA18D39CA1940BF?doi=10.1.1.549.8690&rep=rep1&type=pdf>.
- [8] Zhang D R, Zhang Y Z, Hu T G, et al. A comparison of HY-2 and QuikSCAT vector wind products for tropical cyclone track and intensity development monitoring[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2014, 11(8): 1365-1369.
- [9] 邹巨洪, 林明森, 邹斌, 等. HY-2卫星散射计热带气旋自动识别算法[J]. 海洋学报, 2015, 37(1): 73-79.
- [10] 赵勇, 赵朝方, 孙如瑶. HY-2A散射计数据在台风“苏力”海表面风场结构研究中的应用[J]. 海洋湖沼通报, 2017(2): 39-47.
- [11] Chorin A J, Marsden J E. A mathematical introduction to fluid mechanics[M]. 2nd ed. New York: Springer, 1990.
- [12] Hu T G, Wang X, Zhang D R, et al. Study on typhoon center monitoring based on HY-2 and FY-2 data[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2017, 14(12): 2350-2354.
- [13] Ying M, Zhang W, Yu H, et al. An overview of the China meteorological administration tropical cyclone database[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2014, 31(2): 287-301.
- [14] 蒋兴伟, 林明森, 宋清涛. 海洋二号卫星主被动微波遥感探测技术研究[J]. 中国工程科学, 2013, 15(7): 4-11.
- [15] 刘宇昕, 张毅, 王兆徽, 等. 基于ASCAT微波散射计风场与NCEP再分析风场的全球海洋表面混合风场[J]. 海洋预报, 2014, 31(3): 10-18.
- [16] 陈永利, 赵永平, 张必成, 等. 海上不同高度风速换算关系的研究[J]. 海洋科学, 1989(3): 27-31.
- [17] 赵勇, 赵朝方, 王志雄. 基于卫星散射计海面风场数据的台风中心定位研究[C]//第19届中国遥感大会论文集. 2014: 1854-1865.
- [18] 关吉平, 黄思训, 张立凤. 全球风场构建涡度、散度的新方法[J]. 物理学报, 2014, 63(17): 179201.
- [19] 蔡其发, 黄思训, 高守亭, 等. 计算涡度的新方法[J]. 物理学报, 2008, 57(6): 3912-3919.

## Comparative study on typhoon center locating based on satellite microwave scatterometer wind field

WANG Xiao-xia<sup>1</sup>, LIU Jian-qiang<sup>1</sup>, ZHANG Yi<sup>1,2</sup>, XU Ya-meng<sup>3</sup>

(1. National Satellite Ocean Application Service, Beijing 100081 China; 2. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory, Guangzhou 511458 China; 3. China University of Mining and Technology, College of Geoscience and Surveying Engineering, Beijing 100083 China)

**Abstract:** This paper conducts a comparative study of two methods of typhoon center locating based on HY-2A/2B and Metop-A satellite microwave scatterometer wind field products. Taking the typhoon “Nakri” in 2019 as an example, we analyze the locating results of typhoon center in the typhoon formation and mature stage. By considering the characteristics of wind field vortex and the wind speed and two influence factors of vertical vortex and horizontal divergence, we discuss the performance of two locating methods based on the vorticity field and composite field of the high wind speed threshold. The performance is compared with the best track dataset of the China Meteorological Administration Tropical Cyclone Database. The results show that the locating accuracy of the typhoon center is higher in the development stage compared to the mature stage, and locating method based on the composite field of the high wind speed threshold reveals higher accuracy with the average deviation of  $0.1^{\circ}\sim 0.2^{\circ}$  and root mean square error of less than  $0.25^{\circ}$ .

**Key words:** typhoon center positioning; high wind speed threshold; vorticity field; composite field