

此版本修订日期：2025-01-22 T13:100

微波遥感资料在台风丰满度提取中的应用研究

张国胜^{1,2,3}, 方贺^{2,4}, 孙轶⁵

1 海南热带海洋学院 海洋科学技术学院, 海南三亚 572022

2 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京, 100081

3 气象灾害教育部重点实验室、气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京信息工程大学, 南京 210007

4 浙江省气候中心, 杭州 310051

5 舟山市气象局, 舟山 316021

摘要: 台风丰满度 (TCF) 以无量纲形式联合台风内外核尺度来表征风暴结构, 对台风业务预报具有一定的指示意义。星载微波传感器可以不受天气条件限制直接探测台风海面风, 为 TCF 的准确提取提供了新的技术手段。本文以 2023 年超强台风“玛娃”为例, 通过采集的星载合成孔径雷达 (SAR)、散射计和辐射计等微波遥感资料建立 TCF 独立提取模型, 并利用最佳台风路径数据集资料对提取结果进行验证。结果显示, 多源星载微波传感器探测资料在 TCF 估算方面具有良好的适用性, 与最佳台风路径数据的均方根误差 (RMSE) 为 0.08, 相关系数为 0.78。虽然 ASCAT-B 和 ASCAT-C 星载散射计海面风场产品会对台风强度造成低估, 但它对台风最大风速半径 (RMW) 和 17m/s 风圈半径 (R17) 的估算是准确的。ASCAT-B 估算 RMW 和 R17 的 RMSE 分别为 21.9 km 和 39.2 km, ASCAT-C 则分别为 16.7 km 和 48.8 km。本文证明了虽然微波传感器工作在不同波段以及拥有不同的空间分辨率, 但是它们在 TCF 独立提取方面都具有较好适用性。

关键词 台风 合成孔径雷达 丰满度 最大风速半径 台风结构

文章编号 10.3878/j.issn.1006-9895.2412.24056 中图分类号 P447 文献标志码 A

Application of Microwave Remote Sensing Data in Typhoon Fullness Extraction

ZHANG Guosheng^{1,2,3}, Fang He^{2,4} Sun Yi⁵

1 College of Marine Science and Technology, Hainan Tropical Ocean University, Sanya 572022, China

2 State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China

3 Key Laboratory of Meteorological Disaster (KLME), Ministry of Education & Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters(CIC-FEMD), Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210007

4 Zhejiang Climate Center, Hangzhou 310051

5 Zhoushan Meteorological Bureau, Zhoushan 316021

Abstract: Tropical cyclone fullness (TCF) is a dimensionless metric that integrates both the inner- and outer- core scales of a typhoon to characterize the storm wind structures, which shows particular direction significance for operational typhoon forecasting. Spaceborne microwave sensors, which are capable of directly observing typhoon ocean surface winds regardless of weather conditions, offer a new technical approach for the accurate extraction of TCF. Taking super typhoon Mawar (2023) as an example, this study proposed a TCF retrieve method by collecting spaceborne Synthetic Aperture Radar (SAR), scatterometers, and radiometers data. Subsequently, we make a comparison between model results and typhoon best-track data. Results show that multi-source spaceborne microwave sensor data has good applicability in TCF estimation. The root mean square error (RMSE) and correlation coefficient between satellite-retrieved and best-track data are 0.08 and correlation coefficient 0.78, respectively. Although the typhoon intensity is underestimated by ASCAT-B and ASCAT-2 spaceborne scatterometers ocean wind products, the estimates for the radius of maximum wind (RMW) and the radius of 17 m/s winds (R17) are accurate. Specifically, ASCAT-B measured storm RMW and R17 are 21.9 km and 39.2 km, and ASCAT-C are 16.7 km and 48.8 km for ASCAT-C, respectively. Despite working different frequency bands and having varying spatial resolutions, this study demonstrates that multisource microwave sensors are suitable for TCF extraction independently.

Keywords Typhoon, Synthetic aperture radar (SAR), Fullness, Radius of maximum

59 wind, Typhoon structure

60 1 引言

61 我国是受台风影响最严重的国家之一，平均每年 7~8 个登陆台风，它产生
62 的大风、暴雨和风暴潮等气象灾害严重威胁沿海地区居民的生命和财产安全。
63 台风移动路径、强度和尺度的预报一直是国内外台风业务预报领域的重点和难
64 点。近几十年来，得益于计算机技术的发展、预报技巧的提高和数值天气预报
65 模式理论方法的进步，国内外对台风路径的预报已有很大的提升 (Leroux et al.,
66 2018; 麻素红等, 2021; 岳健等, 2023)，强度预报也取得了一定的进展
67 (Emanuel and Zhang, 2016; 端义宏等, 2020)。相比之下，台风尺度预报能力滞
68 后于路径和强度的预报 (Cangialosi et al., 2016; Schenkel et al., 2023)。究其原因，
69 一方面是数值天气预报对台风结构的描述能力有限，尤其是在开阔洋面上观测
70 资料的稀缺很难给出准确的台风尺度信息 (孔莉莎和张秀芝, 2022)；另一方面
71 台风强度和路径的预报偏差会增加尺度预报的误差 (周明珠和徐晶, 2023)。

72 台风尺度是衡量强风影响范围的关键指标，被认为是决定台风破坏性的重
73 要因素，对台风防灾减灾工作具有重要作用。国内外学者提出了许多关于台风
74 尺度的定义方式，但是对其并无统一定义。目前广泛使用最大风速半径 (RMW)
75 和七级风圈半径 (17 m s^{-1} 风速半径，简称 R17) 衡量台风尺度。前者描述了台
76 风中心与最大风速之间的距离，即台风内核尺度 (Li et al., 2019; Combot et al.,
77 2020; 黄雨婧和谈哲敏, 2024; 李好雨和储可宽, 2024)；后者可以看作风暴外部
78 环流范围，即风暴外围尺寸 (Chan and Chan, et al., 2012; 林岩銓和王丹阳, 2022;
79 饶晨泓等, 2023)。大量研究表明，台风的强度与单一尺度 (RMW 或 R17) 之

作者简介 张国胜, 1986 年出生, 主要从事海洋微波遥感研究。E-mail: zhanggs@nuist.edu.cn

通讯作者 方贺, E-mail: fanghe_doc@163.com

资助项目 浙江省自然科学基金 LZJM25D050008, LQ21D060001, 国家自然科学基金 42305153, 华东区域气象科技协同创新基金 QYHZ202307, 灾害天气国家重点实验室开放课题 2024LASW-B22, 气象灾害教育部重点实验室&气象灾害预报预警与评估协同创新中心联合开放课题 KLME202408, 浙江省气象局科技项目 2021YB07、2022ZD06、2024YB06, 中国气象局创新发展专项 CXFZ2022J040, 中国气象局重点创新团队编号: CMA2023QN12.

Funded by the Zhejiang Provincial Natural Science Foundation of China (Grant LZJM25D050008, LQ21D060001), National Natural Science Foundation of China (Grant 42305153), East China Regional Meteorological Science and Technology Collaborative Innovation (Grant QYHZ202307), the Open Grants of the State Key Laboratory of Severe Weather (Grant 2024LASW-B22), the Joint Open Project of KLME & CIC-FEMD, NUIST (Grant KLME202408), Science and technology project of Zhejiang Meteorological Bureau (Grant 2021YB07, 2022ZD06, 2024YB06), Innovation and Development Project of China Meteorological Administration (Grant CXFZ2022J040), the Youth Innovation Team Fund of China Meteorological Administration (Grant CMA2023QN12).

间没有显著的关系 (Merrill, 1984; Weatherford and Gray 1988; Chavas and Emanuel, 2010; Chan and Chan, 2012; Guo and Tan, 2017; Chen et al., 2021), 并且两者之间还存在着非线性关系 (Wu et al., 2015; Song et al., 2016; Song et al., 2020)。最近, Ruan and Wu (2022) 利用 2000 年至 2018 年的红外亮温和台风最佳路径数据资料研究了北大西洋台风加强和扩展过程, 发现当 RMW 稳定时, 台风强度与 R34 (34 knot 风速半径, $1 \text{ knot} \approx 0.514 \text{ m s}^{-1}$) 之间呈线性关系, 且台风增强的越快, R34 扩展的越快。为了更加深入理解台风强度和尺度相互作用机理, Guo and Tan (2017) 基于发现台风内核尺度或外围尺度与强度不存在显著的关联, 并进一步提出了台风丰满度 (TC Fullness, 简称 TCF) 这一新物理量。TCF 是以无量纲形式联合台风内外核尺度来表征风暴结构, 即 R17 与 RMW 的距离和 R17 的比值, 其值在 0 ~ 1.0 之间。TCF 是强台风出现的必要条件, TCF 大的台风更可能实现快速增强 (Guo and Tan, 2022)。

由于台风的生命周期主要位于开阔的洋面上, 而海上观测资料稀缺, 因此目前对台风尺度的估计主要依赖于卫星遥感观测。相比可见光和红外卫星遥感探测, 星载微波传感器可以不受日照、云以及太阳光线的影响, 实现全天时、全天候、大范围的对海成像, 已逐渐成为全球海表面风场和台风遥感监测的重要技术手段 (Mouche et al., 2017; 张路等, 2020; Ribal et al., 2021; Knaff et al., 2021; 方贺等, 2022; 董海啸等, 2023)。星载合成孔径雷达 (SAR)、散射计和辐射计是最为常用的星载微波传感器, 它们各具特色, 优势突出, 在台风遥感监测领域发挥着重要优势。星载 SAR 是主动式微波传感器的杰出代表, 高分辨率是它与生俱来的优势, 商用星载 SAR 分辨率最高可达 1m, 十分适合台风结构的精细化遥感监测 (Zhang et al., 2020; Combot et al., 2020; Fang et al., 2022)。相比于 SAR 卫星, 星载散射计和辐射计空间分辨率较粗 (约 25 km), 但其优势在于扫描幅宽, 探测范围基本覆盖整个台风海面风场, 较高的重访周期可以在台风活动期间进行重复观测 (Manaster et al., 2021; Qian et al., 2023)。此外, L 波段辐射计风致亮温与台风风速之间存在良好的正相关, 即使在降雨等在极端天气条件下也不会出现风速“饱和”现象, 以 SMAP 为代表的辐射计风场产品已广泛应用于台风强度和结构的监测当中 (Li et al., 2022; Zhang et al., 2022)。相较于传统的遥感手段, 无线电掩星技术凭借其高时空分辨率、低成本、可连续运行等优势得到了快速发展, 可为研究台风期间大气参数的时空分布特征提供宝贵

的资料，在台风强度和尺度监测方面拥有巨大的应用潜力（He et al., 2009; Zhang et al., 2022）。

台风 TCF 联合台风内外核尺度来表征风暴结构，而无论是 R17 还是 RMW 都和海表面风有着直接的联系。星载微波传感器通过获取的海表面雷达后向散射强度信号，可以直接测量海表面风场信息，这为提取 TCF 提供了新的技术手段。在前人利用卫星资料提取 RMW 和 R17 的研究当中（张路，2020; Zhang et al., 2021; Sun et al., 2023），一般利用时间插值方法从台风最佳路径数据集（best-track）提取中心经纬度信息，这会在一定程度上增加计算 RMW 和 R17 的误差。此外，best-track 数据集的都是在台风过后才进行分析整合，这会严重制约星载微波传感器资料在台风业务化监测中的应用。

台风“玛娃”是 2023 年太平洋台风季首个超强台风，具有远海生成、强度猛烈、持续时间久和移速缓慢等特征。得益于其较长的生命周期，利用多源星载微波传感器在风暴海上活动期间开展协同观测可以获得丰富的研究资料。基于此，本文以超强台风“玛娃”为例，通过采集风暴活动期间多源星载 SAR、辐射计和散射计观测资料，发展不依赖于外部资料的星载微波传感器台风丰满度提取技术，并利用最佳台风路径数据集进行验证。本文研究成果可为我国台风预报和观测业务提供数据基础和技术支撑，进而提升星载微波传感器资料在气象部门的应用水平。

2 台风“玛娃”概况

图 1 所示为台风“玛娃”移动路径及其多源星载 SAR 卫星探测的台风归一化雷达后向散射系数（NRCS）。台风“玛娃”于 5 月 20 日下午 06 时（世界协调时 UTC，下同）在美国关岛南偏东方向约 970 km 的洋面上生成，中心最大风速 18 m s^{-1} ，随后以每小时 5 ~ 10 km 的速度向北偏西方向缓慢移动，强度逐渐增强。5 月 26 日 09 时，“玛娃”位于菲律宾马尼拉偏东方大约 1750 km 的西北太平洋洋面上，此时风暴已达到超强台风级别，中心最大风速为 68 m s^{-1} 。随后，“玛娃”以强热带风暴级别横穿冲绳群岛，然后在向东北移动到海上时转变为热带风暴，并于 6 月 2 日 17 时被中央气象台停止编号。台风“玛娃”是 5 月份有记录以来最强的北半球热带气旋之一，也是 2023 年全球最强的热带气旋。

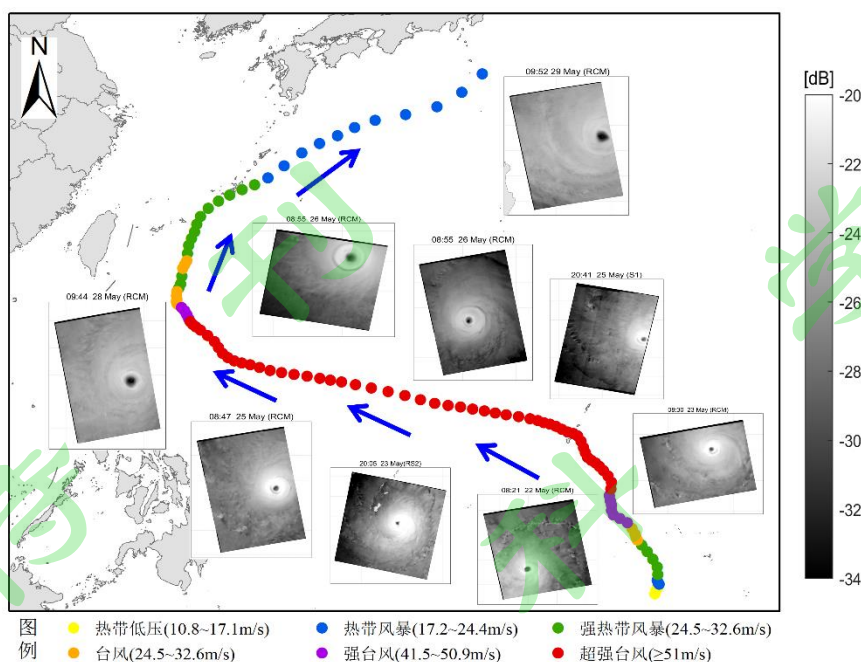


图 1 2023 年超强台风“玛娃”移动路径及星载 SAR 影像空间分布

Fig.1 Super Typhoon Mawar track and SAR images distribution

3 资料与方法

3.1 资料来源

2023 年台风“玛娃”活动期间，本研究使用三种 C 波段交叉极化星载 SAR 卫星影像用于台风“玛娃”观测，分别为 RADARSAT-2 (RS-2)、RADARSAT Constellation Mission (RCM) 和 Sentinel-1 (S1)。5 月 21 至 6 月 1 日期间，RS-2、RCM 和 S1 卫星共计观测台风“玛娃”15 次，其中 9 次完整或部分捕获台风眼区域（图 1）。星载 SAR 卫星影像由国家海洋和大气管理局（NOAA）下属的卫星应用与研究中心（STAR）提供，在对原始 SAR 影像几何校正、辐射定标等预处理基础上，利用 MSA1 (Mouche 2017; 2019) 地球物理模式函数进行风速反演。由于星载 SAR 载荷提供的是局部海面的雷达后向散射强度信号的瞬时测量值，因此对高分辨率 SAR 影像进行 3km 空间分辨率重采样可以获取 1 分钟持续风速 (Combot et al., 2020; Knaffet et al., 2021)。此外，空间分辨率重采样还可以有效降低系统噪声对 SAR 影像的影响，从而有效提高 SAR 海面风反演精度 (Zhang et al., 2017; Fang et al., 2021)。

星载微波辐射计风场产品来自美国土壤湿度主动/被动 (SMAP) 和日本先

进微波扫描辐射计（AMSR2）。Remote Sensing System（RSS）整合了 SMAP 和 AMSR2 逐日风场资料，并重新处理为 0.25° 空间分辨率的标准网格数据供用户下载使用（Manaster et al., 2021; Li et al., 2022）。本文通过 RSS 系统下载 60 余景 SMAP 和 AMSR2 台风海面风影像，其中 17 景完整或部分捕获台风眼区域。

星载散射计资料来自 RSS 提供的 ASCAT-B/C L2 级海面风场产品，空间分辨率为 0.25° 。在台风“玛娃”海上活动期间，共获取 ASCAT-B 和 ASCAT-C 台风海面风影像 60 余景，其中 18 景完整或部分捕获台风眼区域。相较于其他工作在 Ku 波段的散射计，ASCAT 探测的 C 波段海面雷达后向散射信号受降雨影响较小（Lindsley et al., 2016; 王晓霞等, 2020; 冷洪泽等, 2024）。

台风最佳路径数据来自国际气候管理最佳轨迹档案数据集（IBTrACS）。IBTrACS 可以提供时间分辨率为 3h 的台风强度、中心经纬度、RMW 以及风圈半径信息。本文采用 IBTrACS 4.0 版本中的 USA 子集台风“玛娃”的记录信息，时间范围是 5 月 20 日至 6 月 3 日。IBTrACS 数据集在本文的用途主要是用于检验卫星提取 RMW、R17 和 TCF。

3.2 台风丰满度提取算法

理想状态下的台风结构是一个圆环状，中心有眼（图 2）。它的尺度主要由两个因素决定，一是 RMW，即内核尺度；二是强风半径，即外围风圈大小，通常取 R17。RMW 和 R17 之间的环状区域对台风结构和强度的演变至关重要，因为雨带、强对流以及强风等台风天气现象大多出现在该区域。Guo and Tan（2017）将 R17 和 RMW 的差值定义为台风外核风裙范围，并在此基础上提出了一种新的描述台风强度的结构参数，即台风丰满度。TCF 的具体表达式如下：

$$TCF = 1 - \frac{RMW}{R17} \quad (1)$$

式中，TCF 为台风丰满度，RMW 为台风最大风速半径，R17 为风速达 17m/s 的风圈半径。

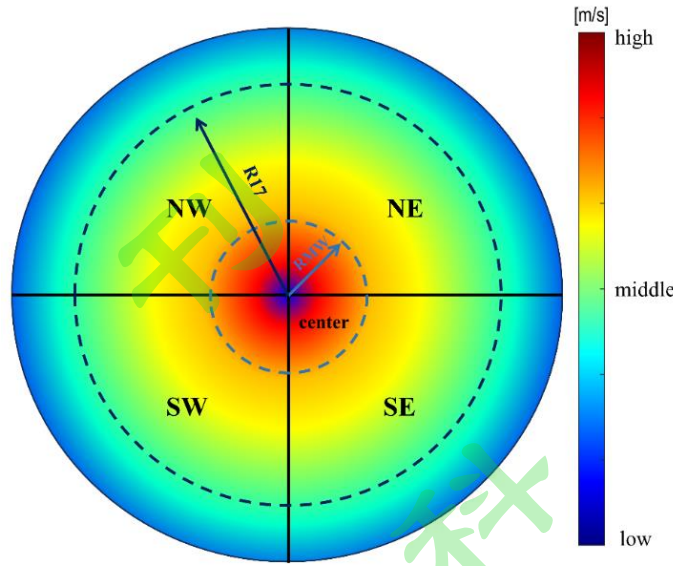


图 2 台风海面二维风速及其结构配置

Fig.2 Two-dimensional wind speed of Typhoon and its structural configuration

3.2 台风中心提取算法

台风中心信息是提取 TCF 的关键，因为 RMW 和 R17 的定义与台风中心直接相关。星载 SAR 卫星探测资料具有高空间分辨率的优势，在台风中心独立定位、结构分析中发挥了重要作用。在前期研究中，我们基于交叉计划的 RS-2 台风，提出了一个半修正的朗肯涡旋模型来描述台风的水平风廓线特征（Zhang et al., 2014），其表达式如下：

$$V_r = \begin{cases} v_1 \left(\frac{r}{r_1} \right) & (r \leq r_1) \\ (v_2 - v_1) \left(\frac{r - r_1}{r_2 - r_1} \right) + v_1 & (r_1 \leq r \leq r_2) \\ v_2 \left(\frac{r_2}{r} \right)^\alpha & (r_2 \leq r \leq 150 \text{ km}) \end{cases} \quad (2)$$

式中， r_1 为风暴眼壁内部的一个风速极大值位置（拐点）； r_2 是最大风速的位置，即 RMW； v_1 和 v_2 分别为对应的内部风速极值和台风强度； α 为衰减系数。

考虑到台风眼大多呈椭圆形，因此我们对公式（2）中的 RMW 进行了修正，则无拐点的风廓线模型如下式所示（Zhang et al., 2017b）：

$$V_r = \begin{cases} v_1 \left(\frac{r}{r_1} \right) & (r \leq r_1) \\ v_2 \left(\frac{r_1}{r} \right)^\alpha & (r_2 \leq r \leq 150 \text{ km}) \end{cases} \quad (3)$$

$$r_1(\theta) = ab / \sqrt{(a \sin \theta)^2 + (b \cos \theta)^2} \quad (4)$$

式中， a 和 b 分别表示台风眼椭圆的短轴和长轴， θ 是台风中心与眼壁连线和长

轴的夹角。因此，利用公式（3）和（4），可以不借助外部数据直接从 SAR 影像中提取台风中心经纬度信息，具体步骤见 Zhang et al（2014; 2017b）。

对于星载散射计和辐射计海面风产品，其空间分辨率较粗，一般为 0.25° ，因此无法精细的刻画台风眼墙的结构。因此，我们在半修正的朗肯涡旋模型基础上剔除了眼墙内的“拐点”，且将台风眼简化为圆形结构，采用单体的朗肯涡旋模型来表示散射计和辐射计观测台风的径向风速变化，其表达式如下：

$$U = \begin{cases} u_{max} \times \left(\frac{r}{r_{max}}\right) & (r \leq r_{max}) \\ u_{max} \times \left(\frac{r_{max}}{r}\right)^\alpha & (r_2 \leq r \leq 150km) \end{cases} \quad (5)$$

式中， u_{max} 为台风强度， r_{max} 表示 RMW， r 是到台风中心的距离， α 为衰减系数。因此，可以不借助外部数据直接从散射计和辐射计遥感风场中提取台风中心经纬度信息，具体步骤见 Zhang et al（2022）。

3.3 台风 R17 提取算法

利用星载微波传感器资料提取台风 R17 主要分为三个步骤：（1）利用上面的方法独立获取台风中心信息；（2）将卫星观测台风二维海面风在平面上划分为 4 个地理象限，分别为东南（第一象限）、东北（第二象限）、西南（第三象限）和西北（第四象限）4 个地理象限。以台风中心为原点，绘制 R17 风速阈值（ 17 m s^{-1} ）等值线，等值线由若干等值点连成的线段组成；（3）计算台风中心与每个象限中最长连接线段上每个像素之间的距离，取每个象限这些距离的累积分布函数(CDF)的 90%位置所在的半径值作为该象限的 R17；（4）实际情况中，台风水平结构往往是不对称的，因此取 4 个地理象限下半径均值作为该卫星影像的 R17。利用卫星观测海面风提取 RMW 的方法相对简单。在卫星探测幅宽内，以台风中心为圆点查找海面风速最大值并记录经纬度信息，台风原点与该经纬度点之间的距离即为 RMW。

4 结果与分析

4.1 台风中心

利用台风中心估算模型，本节对 40 景星载 SAR、辐射计和散射计台风观测进行中心经纬提取，并利用 best-track 记录的信息进行验证。结果显示（图 3），模型估算中心经度与 best-track 的 RMSE 为 0.21° ，偏差为 0.02° ，相关系数 0.99；

纬度与 best-track 的 RMSE 为 0.23° ，偏差为 -0.03° ，相关系数 0.99。由此可见，利用台风中心提取算法从星载微波传感器台风海面风观测资料中提取的中心信息，与 best-track 具有较好的一致性。

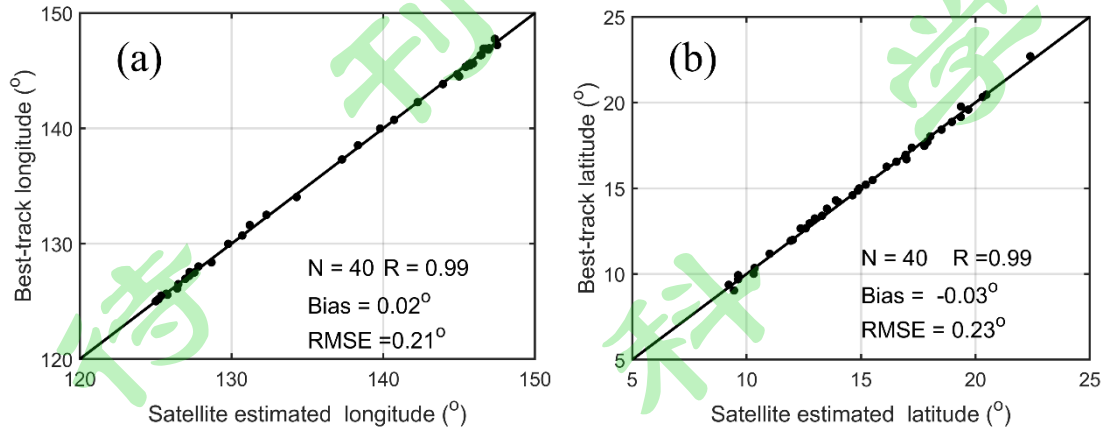


图 3 模型估算台风中心与 best-track 对比

Fig.3 Comparison between model-estimated and best-track reported TC center

4.2 内核尺度

台风 RMW 是反映台风最大风速分布特征的参数，常用于表示风暴的内核尺度。基于提取的台风中心信息，表 1 展示卫星观测估算台风“玛娃”RMW 与 IBTrACS 的比较结果。结果显示，星载 SAR 卫星估算的 RMW 具有较高精度，与 IBTrACS 记录的相关系数 0.71，RMSE 为 9.53 km 。星载散射计和辐射计估算台风 RMW 与 IBTrACS 数据的 RMSE 在 $11.9\sim 21.9\text{ km}$ ，偏差在 $5.73\sim 16.42\text{ km}$ 。这对于空间分辨率 25 km 的星载辐射计和散射计风场产品而言，RMW 的估算精度可以接受的。事实上，从卫星资料上估算台风 RMW 一直是一个难点 (Kossin et al., 2007; Lajoie and Walsh, 2008; Combet et al., 2020)。本文使用的星载微波辐射计和散射计空间分辨率约为 40 km ，RSS 对原始数据进行空间分辨率重采样，生成了分辨率为 25 km 的 10 分钟持续风速产品。当台风眼区比较小时，眼墙附近的强风区域会被覆盖导致不能有效识别，从而造成 RMW 提取的误差 (Knaff et al., 2021)。值得指出的是，ASCAT-B 和 ASCAT-C 风场产品对台风强度的估算普遍偏低，因此散射计风场产品不宜直接用于台风的最大持续风速估计 (Ribal et al., 2021; Liu et al., 2022; 王岩峰等, 2023)。但本研究发现 ASCAT 散射计对于 RMW 提取结果较好。星载散射计通过发射电磁波测量海洋表面 NRCS，NRCS 与海面风速呈明显正相关性，可以根据这一关系建立经验的 GMF 反演海

面风速，这也是星载微波传感器风场反演的基本原理（Lindslyey et al., 2016; 方贺等，2018; 王冰花等，2021）。因此，反演风速的“饱和”不会影响散射计探测海面 NRCS 的二维空间分布。在台风天气条件下，即使利用 GMF 反演的最大风速会出现“低估”现象，但是最大风速对应 NRCS 的经纬度位置不会改变，这也是散射计可以较好的探测 RMW 的重要原因。

表 1 卫星观测超强台风“玛娃”强度和 RMW 与 IBTrACS 的比较

Table 1 Comparisons between satellite measured storm intensity and RMW and IBTrACS data for Super Typhoon Mawar

卫星	RMSE (km)	Bias (km)	Cc
SAR	9.53	-2.32	0.71
SMAP	11.93	5.73	0.57
AMSR2	18.6	11.17	0.66
ASCAT-B	21.9	16.42	0.90
ASCAT-C	16.74	10.41	0.60

4.3 外围尺寸

台风 R17 描述了风暴外围风速 17 m s^{-1} 的风圈半径，它是决定台风破坏力的重要因子，常用于表征台风灾害影响半径（张路等，2020; Sun et al., 2023）。利用台风 R17 提取算法，我们从多源星载微波传感器海面风资料中提取 R17 并与 IBTrACS 资料进行比较（表 2）。图 4 所示为基于多源星载 SAR 卫星提取的台风“玛娃”4 个地理象限上的 R17 空间分布。结合表 2 可以看出，本文选取的 3 颗星载 SAR 卫星对台风“玛娃”台风 R17 提取效果较好，与 IBTrACS 资料的 RMSE 为 51.4 km，相关系数为 0.89。图 5 所示为基于 SMAP 和 AMSR2 两颗星载辐射计提取的 4 个地理象限上的 R17 空间分布。可以看出，SMAP 和 AMSR2 均可以有效提取台风“玛娃”的 R17，与 IBTrACS 资料相比两者 RMSE 分别为 62.4 km（SMAP）和 53.1 km（AMSR2），相关系数分别为 0.85（SMAP）和 0.91（AMSR2）。Zhang 等（2021）利用 SMAP 资料对台风 R17 进行了估算，与 IBTrACS 资料相比两者 RMSE 为 57.8 km，这与本文利用 SMAP 和 AMSR2 估算的 R17 精度具有较好的一致性。

前文指出，星载散射计海面风产品在台风天气条件下探测风速严重低于实际风速，但是其对风暴 R17 的监测较为准确。从图 6 可以看出，ASCAT-B 和 ASCAT-C 均可以较好的提取 4 个地理象限的风暴 R17。与 IBTrACS 资料对比，

ASCAT-B 和 ASCAT-C 的 RMSE 分别为 39.2 km 和 48.8 km，相关系数分别为 0.91 和 0.85。张路等（2020）利用台风风剖面提取方法，研究了 HY-2A 散射计风场资料在风暴 R17 提取中的适用性，结果显示 HY-2A 提取的 R17 与参考资料的 RMSE 为 37.6 km。董海啸等（2023）基于方位角平均估算方法，探究了 ASCAT 风场资料在台风 R17 提取效果，结果表明 ASCAT 估算风暴 R17 与最佳台风路径数据的 RMSE 为 52.4km。通过对比前人研究发现，利用 ASCAT-B 和 ASCAT-C 散射计风场资料提取的台风“玛娃” R17 具有较高的精度。

表 2 卫星观测超强台风“玛娃” R17 与 IBTrACS 的比较
Table 2 Comparisons between satellite measured storm R17 and IBTrACS data for Super Typhoon Mawar

卫星	RMSE (km)	Bias (km)	Cc
SAR	51.4	-32.6	0.89
SMAP	62.4	43.2	0.85
AMSR2	53.1	44.6	0.91
ASCAT-B	39.2	26.37	0.91
ASCAT-C	48.8	14.57	0.85

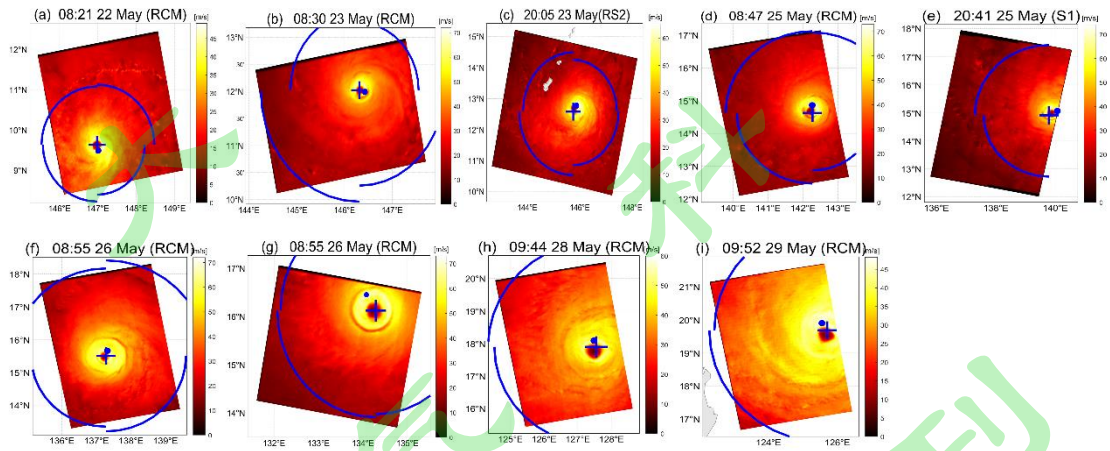


图 4 基于多源 SAR 卫星影像提取的超强台风“玛娃”的 RMW 和 R17。蓝色实心圆表示 RMW 所在位置，黑色“+”表示 IBTrACS 记录的台风中心，蓝色弧线表示四个地理象限上的 R17。
Fig.4 RMW and R17 retrieved from multisource SAR images of Super Typhoon Mawar. The black solid circle mark the locations of RMW. The black cross symbol represents the locations of storm center. The black arcs represent R17 at the four geographical quadrants.

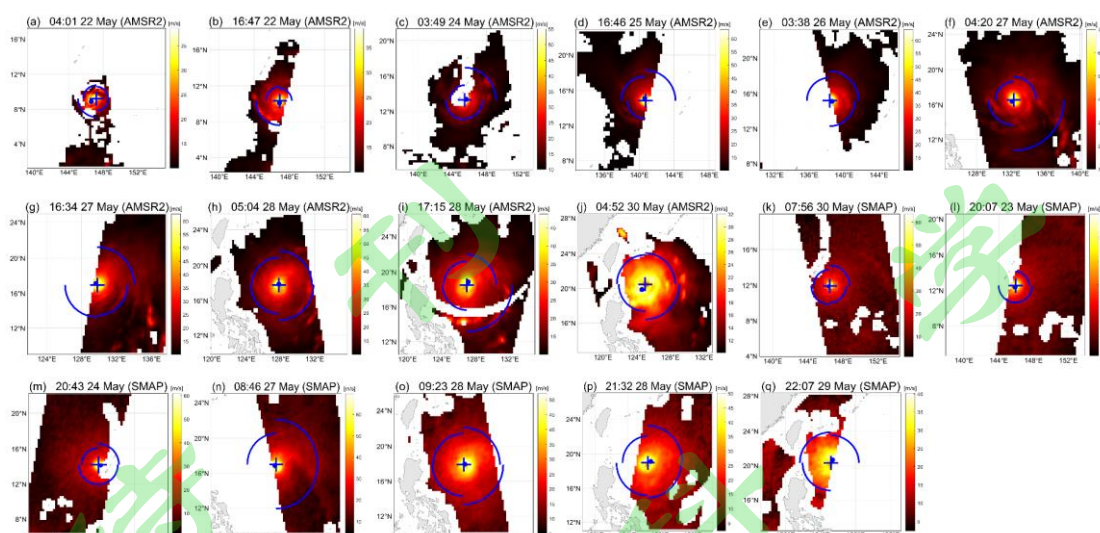


图5 基于 SMAP 和 AMSR2 辐射计海面风提取的超强台风“玛娃”的 RMW 和 R17。黑色实心圆表示 RMW 所在位置，黑色“+”表示 IBTrACS 记录的台风中心，黑色弧线表示四个地理象限上的 R17。

Fig.5 RMW and R17 retrieved from SMAP and AMSR2 radiometer of Super Typhoon Mawar. The black solid circle mark the locations of RMW. The black cross symbol represents the locations of storm center. The black arcs represent R17 at the four geographical quadrants.

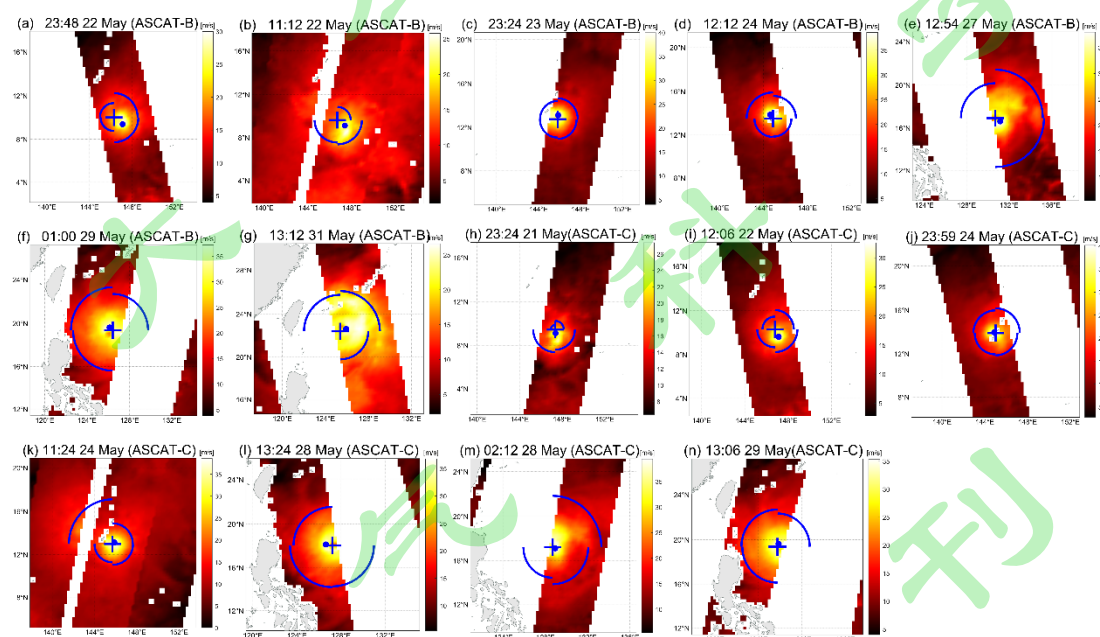


图6 基于 ASCAT-B 和 ASCAT-C 辐射计海面风提取的超强台风“玛娃”的 RMW 和 R17。黑色实心圆表示 RMW 所在位置，蓝色“+”表示 IBTrACS 记录的台风中心，蓝色弧线表示四个地理象限上的 R17。

Fig.6 RMW and R17 retrieved from ASCAT-B and ASCAT-C scatterometer of Super Typhoon Mawar. The black solid circle mark the locations of RMW. The black cross symbol represent the locations of storm center. The black arcs represent R17 at the four geographical quadrants.

4.4 TCF 独立估算和验证

台风“玛娃”是一个持续时间较长的风暴，于5月20日下午06时西北太平

洋洋面生成，6月2日17时变性为温带气旋，大约持续13天（图1）。在此期间，星载SAR、辐射计和散射计等微波传感器对其联合观测100余次，其中40次完整或部分捕获台风眼区域。基于星载微波传感器和IBTrACS提取“玛娃”RMW和R17参数信息，本节利用公式（1）对台风TCF进行了估算和分析。结果显示（图7），星载微波传感器和IBTrACS估算的台风“玛娃”TCF具有良好的一致性，两者相关系数为0.78，RMSE为0.08。值得注意的是，ASCAT-B/C散射计会对台风强度造成低估，但它对RMW和R17的估算是准确的，因此散射计提取的TCF也具有较好的准确性。Gao等（2021）和Fang等（2024）利用星载SAR台风观测资料建立了TCF和台风强度的非线性关系，因此未来可以利用星载散射计提取的TCF来估算台风强度，进而对最大风速低估现象进行一定的校正。

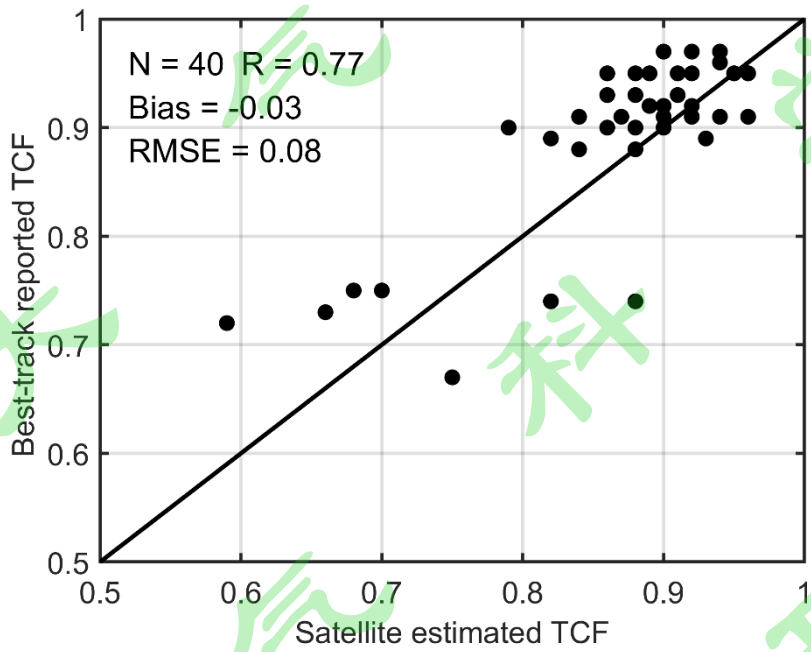


图7 星载微波传感器提取台风“玛娃”TCF和IBTrACS资料对比

Fig.7 Comparison of satellite estimate TCF and IBTrACS reports for Super Typhoon Mawar

图8所示为2023年5月20日0时至6月3日06时IBTrACS资料记录的台风“玛娃”TCF和强度的时序分布，以及星载微波传感器在不同时刻提取的TCF。图中可以看出，在台风“玛娃”活动期间，基于多源星载微波传感器资料提取的台风TCF与IBTrACS资料在时序分布上有着良好的一致性。5月21日23时ASCAT-C散射计对台风“玛娃”进行了首次观测，此时风暴为强台风级

别，卫星提取的 TCF 为 0.73，IBTrACS 记录的 TCF 为 0.67，两者误差为 0.06。自此以后，台风“玛娃”的 TCF 整体趋势快速上升，并一直维持着较高的丰满度，最终于 5 月 22 日 21 时发展成超强台风，并一直持续至 5 月 29 日 09 时。迅速增长的 TCF 表明，伴随强度的快速增长，“玛娃”的内核环流迅速加强内缩、外围环流迅速加强扩张。从图 7 还可以看出，自 5 月 26 日凌晨起“玛娃”的强度开始迅速减弱并一直持续到 6 月 3 日风暴变性为温带气旋，但是台风 TCF 在此期间并没有迅速减弱，体现了一定的“滞后性”，这与郭晞等（2020）利用热带气旋指示计划（TCGP）资料分析的超强台风“利奇马”TCF 和强度的变化非常相似。

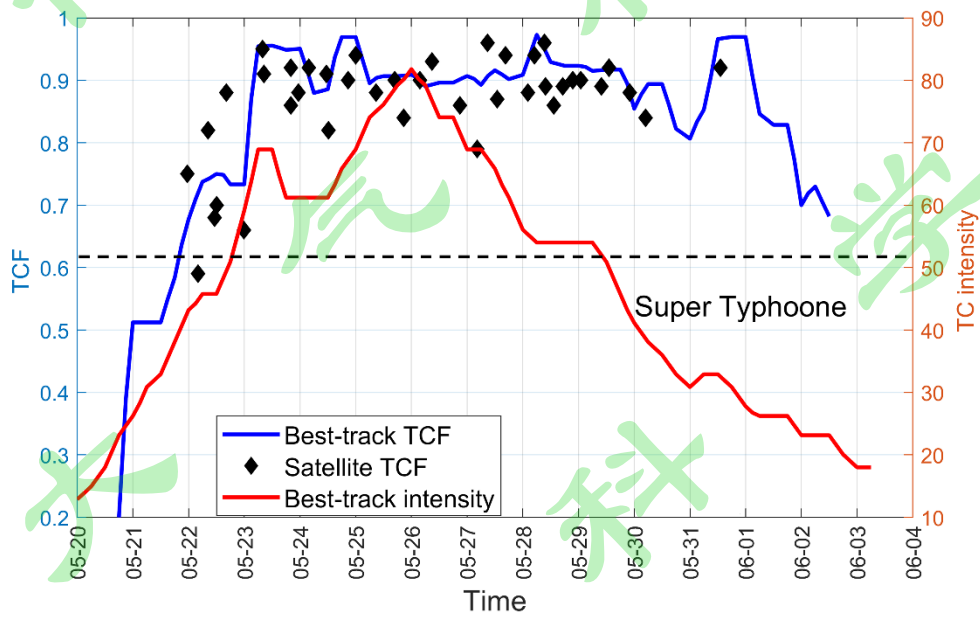


图 8 台风“玛娃”活动期间 IBTrACS 记录 TCF、强度和卫星提取 TCF 对比。蓝色和红色折线分别为 IBTrACS 记录的台风 TCF 和强度，黑色菱形为卫星提取 TCF，黑色虚线为超强台风风速阈值。

Fig.8 Comparison between best-track reports TCF and intensity, and satellite estimate TCF during Super Typhoon Mawar lifecycle. The blue and red lines are the typhoon TCF and intensity from IBTrACS data, respectively. The black diamond is the TCF extracted by the satellite, and the black dashed line is the super typhoon wind speed threshold.

值得说明的是，相较于星载辐射计和散射计，SAR 具有高空间分辨率高空空间分辨率优势，在台风精细化结构探测方面具有先天的优势。图 9（a）展示了向日葵 8 号（H8）静止卫星 5 月 26 日 07 时 20 分拍摄的“玛娃”真彩色合成卫星云图。图 9（b）所示为同日 S1 SAR 卫星于 08 时 55 分观测的风暴影像，此时“玛娃”为超强台风级别，海面最大风速为 72.9 m s^{-1} 。得益于 SAR 卫星高分辨率成像机制，可以看出“玛娃”具有非常完整的圆形的眼区，台风眼壁和螺旋

雨带等区域清晰可见。SAR 估算的 TCF 为 0.91，IBTrACS 资料记录 TCF 为 0.9，两者误差为 0.01。卫星云图通过可见光探测的风暴上层云系结构，而 SAR 卫星则是利用微波观测台风底层（海面 10m 高度）的风场分布，结合可见光和微波资料同时开展台风精细化结构研究将为台风预报和观测业务提供新的技术手段。

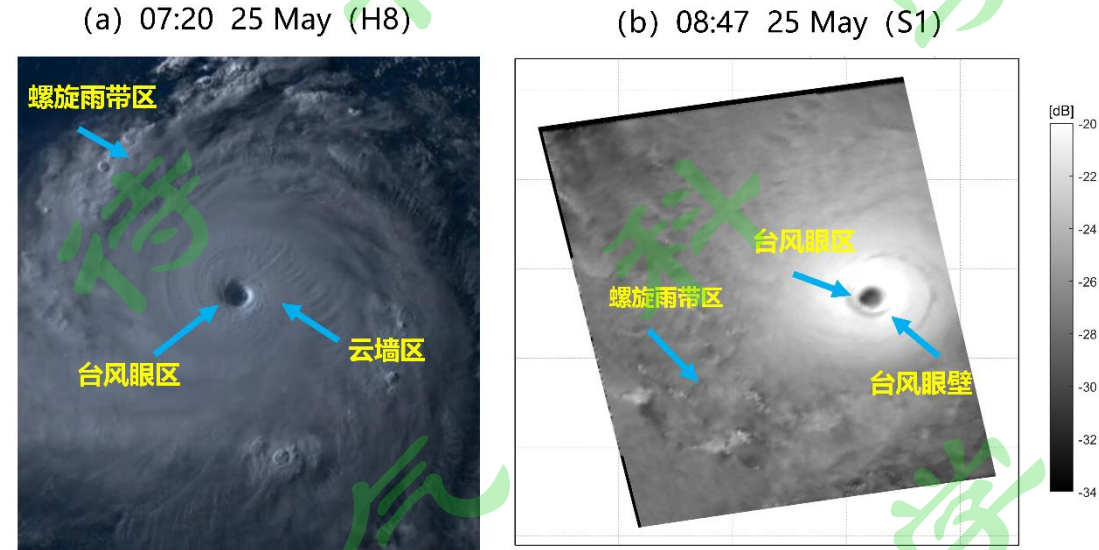


图9 向日葵8号（H8）静止卫星和S1 SAR卫星对台风“玛娃”的联合观测
Fig.9 Joint observation by the Himawari-8 (H8) geostationary satellite and S1 SAR for typhoon Mawa

4.5 TCF 误差来源

本文利用 IBTrACS 资料作为参考，对多源星载微波传感器估算的台风“玛娃”TCF 进行检验，误差来源主要有两个方面。首先根据 TCF 定义可知，RMW 和 R17 的准确性直接决定了 TCF 的精度。目前星载微波传感器都是搭载于极轨卫星且有着固定的扫描幅宽，而台风是不断移动的，因此并非每次探测都可以完整捕获台风中心区域（图4、5和6），因此台风最大风速出现的位置有可能出现在卫星影像外部，从而增加了 RMW 的误差（Sun et al., 2023）。此外，对于外围尺寸非常大的风暴，有限的扫描幅宽无法同时探测到 4 个地理象限的风圈半径，这会导致卫星估算的 R17 误差增大（Zhang et al., 2021）。第二个误差则来自最佳台风路径数据本身。在缺乏海洋浮标和飞机观测等开阔海面，最佳台风路径数据中的风圈半径估算严重依赖于卫星资料，尤其是星载散射计海面风场数据（Barcikowska et al., 2012; Courtney et al., 2020; Knaff et al., 2021）。然而，Ku 波段散射计（QuikSCAT 等）在台风天气条件下受降雨衰减和仪器信号饱和影响严重，这会导致风圈半径具有很大的不确定性（Brennan et al., 2009; 姜祝辉等，

364 2021; Zhao et al., 2023)。

365 5 结论

366 TCF 以无量纲形式联合台风内外核尺度来表征风暴结构，对业务化台风预
367 报和观测具有一定的指示意义。星载微波传感器可以不受天气条件限制直接探
368 测台风条件下的海表面 10m 风场，从而有效探测台风内核 (RMW) 和外核
369 (R17) 尺度及中心位置，这为 TCF 的独立提取提供了契机。本文以 2023 年超
370 强台风“玛娃”为例，利用台风中心提取模型从星载 SAR、散射计和辐射计观
371 测资料估算了台风中心经纬度，进而发展了基于多源星载微波传感器的 TCF 独
372 立提取模型，并利用最佳台风路径数据集进行验证。主要结论如下：

373 (1) 微波传感器资料估算的台风中心经纬度与 best-track 资料具有较好的
374 一致性，经度与 best-track 的 RMSE 为 0.21° ，纬度 RMSE 为 0.23° 。

375 (2) 星载 SAR 具有高空间分辨率优势，对台风内外核尺度提取精度明显
376 高于空间分辨率较低的散射计和辐射计，RMW 和 R17 的 RMSE 分别为 9.53 km
377 和 51.4km。

378 (3) 散射计和辐射计探测资料虽然空间分辨率较粗，但在台风内外核尺度
379 提取方面均具有良好的适用性，模型估算 RMW 与 best-track 的 RMSE 在
380 11.93~21.9km 之间，R17 与 best-track 的 RMSE 在 39.2~51.4 km 之间。

381 (4) 台风“玛娃”活动期间，多源星载微波传感器对其联合观测 100 余次，
382 其中 40 次完整或部分捕获台风眼区。卫星提取的 TCF 与 IBTrACS 资料的 RMSE
383 为 0.08，相关系数为 0.78，表明微波遥感探测资料在 TCF 提取中具有良好的适
384 用性。

385 参考文献 (References)

386 周明珠, 徐晶. 2023. 西北太平洋热带气旋强度和尺度协同变化特征 [J]. 应用气象
387 学报, 34(04): 463-474. Zhou Mingzhu, Xu Jing. 2023. Synergistic variation of
388 tropical cyclone intensity and scale in the Northwest Pacific Ocean [J]. Journal of
389 Applied Meteorological Science (in Chinese), 34(04): 463-474.
390 doi:10.11898/1001-7313.1012040708WAF2222188.1

391 岳健, 董林, 陈静, 等. 2023. 基于再分析尺度化因子的集合预报初值扰动对台风烟

392 花(2106)预报的影响 [J]. 气象, 49(07): 773-789. Yue Jian, Dong Lin, Chen Jing,
 393 et al. 2023. Effect of ensemble initial perturbations with rescaling on the forecast
 394 of Typhoon In-Fa (2016) [J]. Meteri Mon, 49(7): 773-789(in Chinese).
 395 doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2023.032901.
 396 王岩峰, 王冠琳, 林劲松, 等. 2023. 热带气旋海上观测进展 [J]. 海洋科学进展, 41(1):
 397 1-23. Wang Yanfeng, Wang Guilin, Lin Jingsong, et al. 2023. Progress in ocean
 398 observation of tropical cyclones [J]. Advances in Marine Science (in Chinese),
 399 41(1): 1-23. doi:10.12362/j.issn.1671-6647.20220614001
 400 饶晨泓, 陈光华, 陈可鑫, 等. 2023. 西北太平洋热带气旋尺度变化过程中降水云系
 401 的演变特征及其作用 [J]. 大气科学, 47(6): 1796-1806. Rao Chenhong Chen
 402 Guanghua, Chen Kexin, et al. 2023. Evolution Characteristics and Role of
 403 Precipitation Cloud Systems in the Size Change Process of Tropical Cyclones over
 404 the Western North Pacific [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in
 405 Chinese), 47(6): 1796-1806. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2204.21256
 406 麻素红, 张进, 瞿安祥, 等. 2021. 垂直分层加密和预报区域扩大对 GRAPES_TYM
 407 台风预报的影响 [J]. 气象学报, 79(1): 94-103. Ma Suhong, Zhang Jin, Qu
 408 Anxiang, et al. 2021. Impacts to tropical cyclone prediction of GRAPES_TYM
 409 from increasing of model vertical levels and enlargement of model forecast
 410 domain [J]. Acta Meteor Sin (in Chinese), 79(1): 94-103.
 411 doi:10.11676/qxxb2020.067
 412 冷洪泽, 曹航, 胡瑞生, 等. 2023. 中法海洋卫星散射计风场资料融合与检验 [J]. 大
 413 气科学, 48: 1-14. Leng Hongze, Cao Hang, Hu Ruisheng, et al. 2023. Fusion
 414 and Test of Wind Data from a China-France Oceanography Satellite Scatterometer
 415 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 48: 1-14.
 416 doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2302.22204
 417 姜祝辉, 张伟. 2021. 降雨情况下散射计洋面风速的误差分析与改进 [J]. 清华大学
 418 学报(自然科学版), 61(11): 1334-1340. Jiang Zhuhui, Zhang Wei. 2021.
 419 Improved scatterometer sea surface wind speed prediction during rain [J]. J
 420 Tsinghua Univ (Sci& Technol) (in Chinese), 61(11):1334-1340.
 421 doi:10.16511/j.cnki.qhdxxb.2020.26.033
 422 郭晞, 仇欣, 李超, 等. 2020. 超强台风“利奇马”(1909) 双眼墙形成及发展过程
 423 分析 [J]. 气象科学, 40(3): 315-324. Guo Xi, Qiu Xin, Li Chao, et al. 2020.

424 Analysis on the formation and evolution of the concentric eyewall of Typhoon
 425 “Lekima” [J]. Journal of the Meteorological Sciences(in Chinese), 40(3): 315-
 426 324. doi:10.3969/2019jms.0076
 427 方贺, 杨劲松, 樊高峰, 等. 2022. 组合表面 Bragg 散射模型共极化 SAR 海表面风速
 428 反演 [J]. 遥感学报, 26(06): 1274-1287. Fang He, Yang Jingsong, Fan Gaofeng,
 429 et al. 2022. Ocean surface wind speed retrieve from copolarized SAR using
 430 composite surface bragg scattering model [J]. National Remote Sensing Bulletin
 431 (in Chinese), 26(06): 1274-1287. doi:10.11834/jrs.20210143
 432 方贺, 谢涛, 周育锋, 等. 2018. 基于 C-2PO 模型和 CMOD5.N 地球物理模式函数的
 433 的 SAR 风速反演性能评估 [J]. 海洋学报, 2018, 40(9): 103-112. Fang He,
 434 Xie Tao, Zhou Yufeng, et al. 2018. Evaluation of SA R wind speed retrieved based
 435 on C-2PO model and CMOD5.N geophysical model functions [J]. Haiyang
 436 Xuebao (in Chinese), 40(9): 103-112. doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2018.09.009
 437 端义宏, 方娟, 程正泉, 等. 2020. 热带气旋研究和业务预报进展—第九届世界气象
 438 组织热带气旋国际研讨会 (IWTC-9) 综述 [J]. 气象学报, 78(3): 537-550.
 439 Duan Yihong, Fang Juan, Cheng Zhengquan, et al. 2020. Advances and trends in
 440 tropical cyclone research and forecasting: An overview of the ninth World
 441 Meteorological Organization International Workshop on Tropical Cyclones
 442 (IWTC-9) [J]. Acta Meteor Sinica (in Chinese), 78(3): 537-550.
 443 doi:10.11676/qxxb2020.050
 444 董海啸, 冯佳俊, 张渊智. 2023. 基于 ASCAT 风场数据的热带气旋风圈半径的研究
 445 [J]. 海洋预报, 40(06): 67-77. Dong Haixiao, Feng Jiajun, Zhang Yuanzhi. 2023.
 446 Study of tropical cyclone radius based on ASCAT wind field data [J]. Marine
 447 Forecasts (in Chinese), 40(06): 67-77. doi:10.11737/j.issn.1003-0239.2023.06.007
 448 Zhao K, Stoffelen A, Verspeek J, et al. 2023. A Conceptual Rain Effect Model for Ku-
 449 Band Scatterometers [J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens, 61: 1-9.
 450 doi:10.1109/TGRS.2023.3264246
 451 Zhang H, Huangfu J, Wang X, et al. 2022. Comparative analysis of Binhu and cosmic-
 452 2 radio occultation data[J]. Remote Sensing, 2022, 14(19): 4958. doi:
 453 10.3390/rs14194958
 454 Zhang G, Zhang B, Perrie W, et al. 2014. A Hurricane Tangential Wind Profile
 455 Estimation Method for C-Band Cross-Polarization SAR[J]. IEEE Transactions on

456 Geoscience and Remote Sensing, 52(11): 7186-7194.
 457 Zhang G, Perrie W, Li X, et al. 2017. A Hurricane Morphology and Sea Surface Wind
 458 Vector Estimation Model Based on C-Band Cross-Polarization SAR Imagery[J].
 459 IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 55, (3): 1743-1751.
 460 Zhang G S, Xu C, Li X F. 2022. Tropical Cyclone Center and Symmetric Structure
 461 Estimating from SMAP Data [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 60: 1-11.
 462 doi:10.1109/TGRS.2021.3131004
 463 Zhang G S, William P, Zhang B. 2020. Monitoring of tropical cyclone structures in ten
 464 years of RADARSAT-2 SAR images [J]. Remote Sens Environ, 236: 111449.
 465 doi:10.1016/j.rse.2019.111449
 466 Zhang B, Zhu Z, Perrie W, et al. 2021. Estimating tropical cyclone wind structure and
 467 intensity from spaceborne radiometer and synthetic aperture radar [J]. IEEE J-
 468 STARS, 14: 4043-4050. doi:10.1109/JSTARS.2021.3065866
 469 Song J, Klotzbach P. 2016. Wind Structure Discrepancies between Two Best Track
 470 Datasets for Western North Pacific Tropical Cyclones [J]. Mon. Wea. Rev.,
 471 144(12): 4533-4551. doi:10.1175/MWR-D-16-0163.1
 472 Song J, Duan Y, Klotzbach P J. 2020. Revisiting the relationship between tropical
 473 cyclone size and intensity over the western North Pacific [J]. Geophys. Res. Lett,
 474 47(13). doi:10.1029/2020GL088217
 475 Schenkel B A, Noble C, Chavas D, et al. 2023. Recent progress in research and
 476 forecasting of tropical cyclone outer size [J]. Trop. Cyclone Res. Rev.
 477 doi:10.1016/j.tcr.2023.09.002
 478 Ruan Z, Wu Q. 2022. Relationship between size and intensity in North Atlantic tropical
 479 cyclones with steady radii of maximum wind [J]. Geophys. Res. Lett, 49(3).
 480 doi:10.1029/2021GL095632
 481 Ribal, A., A. Tamizi, I. R. Young. 2021. Calibration of Scatterometer Wind Speed under
 482 Hurricane Conditions [J]. Atmos. Ocean. Technol., 38: 1859–1870.
 483 doi:10.1175/JTECH-D-21-0055.1
 484 Mouche A, Chapron B, Zhang B, et al. 2017. Combined Co- and Cross-Polarized SAR
 485 Measurements Under Extreme Wind Conditions [J]. IEEE Trans. Geosci. Remote
 486 Sens., 55: 6746-6755. doi:10.1109/TGRS.2017.2732508
 487 Manaster A, Ricciardulli L, Meissner T. 2021. Tropical Cyclone Winds from WindSat,
 488 AMSR2, and SMAP: Comparison with the HWRF Model [J]. Remote Sens, 13:
 489 2347-2366. doi:10.3390/rs13122347

490 Liu S, Lin W, Portabella M, et al. 2022. Characterization of tropical cyclone intensity
 491 using the HY-2B scatterometer wind data [J]. Remote. Sens, 14(4): 1035.
 492 doi:10.3390/rs14041035
 493 Lindslyey R D, Blodgett J R, Long D G. 2016. Analysis and validation of high-
 494 resolution wind from ASCAT [J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens, 54(10): 5699-
 495 5711. doi:10.1109/TGRS.2016.2570245
 496 Li X, Yang J, Han G, et al. 2022. Tropical cyclone wind field reconstruction and
 497 validation using measurements from SFMR and SMAP radiometer [J]. Remote
 498 Sensing, 14(16): 3929. doi:10.3390/rs14163929
 499 Leroux M D, Wood K, Elsberry R L, et al. 2018. Recent advances in research and
 500 forecasting of tropical cyclone track, intensity, and structure at landfall [J].
 501 Tropical Cyclone Research and Review, 7(2): 85-105.
 502 doi:10.6057/2018TCRR02.02
 503 Lajoie, F. and Walsh K., 2008: A Technique to Determine the Radius of Maximum Wind
 504 of a Tropical Cyclone. Wea. Forecasting. 23, 1007-1015.
 505 <https://doi.org/10.1175/2008WAF2007077.1>.
 506 Kossin, J. P., Knaff J. A., Berger H. I., Herndon D. C., Cram T. A., Velden C. S.,
 507 Murnane R. J. and Hawkins J. D., 2007: Estimating Hurricane Wind Structure in
 508 the Absence of Aircraft Reconnaissance. Wea. Forecasting. 22, 89-101.
 509 <https://doi.org/10.1175/WAF985.1>.
 510 Knaff J A, Sampson C R, Kucas M, et al. 2021. Estimating tropical cyclone surface
 511 winds: current status, emerging technologies, historical evolution, and a look to
 512 the future [J]. Trop. Cyclone Res. Rev. 10(3): 125-150.
 513 doi:10.1016/j.tcrr.2021.09.002
 514 He W, Ho S, Chen H, et al. 2009. Assessment of radiosonde temperature measurements
 515 in the upper troposphere and lower stratosphere using COSMIC radio occultation
 516 data[J]. Geophysical Research Letters, 6(17). doi:
 517 doi.org/10.1029/2009GL038712
 518 Guo X, Tan Z M. 2022. Tropical cyclone intensification and fullness: The role of storm
 519 size configuration [J]. Geophys. Res. Lett s, 49(16). doi:10.1029/2022GL098449
 520 Guo X, Tan Z M. 2017. Tropical cyclone fullness: A new concept for interpreting storm
 521 intensity [J]. Geophys. Res. Lett, 44(9): 4324-4331. doi:10.1002/2017GL073680
 522 Gao Y, Zhang J, Sun J, et al. 2021. Application of SAR data for tropical cyclone

523 intensity parameters retrieval and symmetric wind field model development[J].
524 Remote Sensing, 13(15): 2902. doi: 10.3390/rs13152902
525 Fang H, Perrie W, Fan G, et al. 2022. High-resolution sea surface wind speeds of Super
526 Typhoon Lekima (2019) retrieved by Gaofen-3 SAR [J]. Frontiers of Earth Science,
527 16(1): 90-98. doi:10.1007/s11707-021-0887-8
528 Fang H, Perrie W, Fan G, et al. 2021. Ocean surface wind speed retrieval from C-band
529 quad-polarized SAR measurements at optimal spatial resolution [J]. Remote
530 Sensing Letters, 12(2): 103-112. doi:10.1080/2150704X.2020.1846220
531 Fang H, Fan G, Perrie W, et al. 2024. Tropical Cyclone Ocean Winds and Structure
532 Parameters Retrieved from Cross-Polarized SAR Measurements[J]. Journal of
533 Meteorological Research, 38(5): 937-953. doi:10.1007/s13351-024-3223-x.
534 Emanuel K, Zhang F Q. 2016. On the predictability and error sources of tropical
535 cyclone intensity forecasts [J]. Atmos Sci, 73(9): 3739-3747. doi:10.1175/JAS-D-
536 16-0100.1
537 Combot C, Mouche A, Knaff J. 2020. Extensive high-resolution synthetic aperture radar
538 (SAR) data analysis of tropical cyclones: Comparisons with SFMR flights and best
539 track [J]. Mon Wea Rev, 148(11): 4545-4563. doi:10.1175/MWR-D-20-0005.1
540 Chan K T F, Chan J C L. 2012. Size and strength of tropical cyclones as inferred from
541 QuikSCAT data [J]. Mon. Wea. Rev., 140(3): 811-824. doi:10.1175/MWR-D-10-
542 05062.1
543 Brennan M J, Hennon C C, Knabb R D. 2009. The operational use of QuikSCAT ocean
544 surface vector winds at the National Hurricane Center [J]. Weather and Forecasting,
545 24(3): 621-645. doi:10.1175/20