

台风“摩羯”演变过程中的多时相SAR海面风场精细特征分析

胡清清¹, 王臣^{2,3,4}, 李慧敏³, 李晓明^{2,3}

1. 南京信息工程大学 气候系统预测与变化应对全国重点实验室, 南京 210044;

2. 海南省航天技术创新中心, 文昌 571333;

3. 空天信息大学, 济南 250299;

4. 中国气象局 上海台风研究所, 上海 100081

摘要: 2024年第11号台风“摩羯”在菲律宾以东海域生成后向西北方向移动, 在南海海域迅速增强为超强台风等级, 给珠江三角洲地区带来严重风雨与洪涝灾害。本文基于多源合成孔径雷达SAR (Synthetic Aperture Radar) 星载卫星多时相观测数据, 利用500 m分辨率海面风场反演产品, 经过陆地掩膜、噪声滤除、扇贝效应去除及台风中心定位等处理, 提取分析台风“摩羯”演变过程中的风场精细结构参数。结果表明, “摩羯”在快速增强阶段最大风速和风圈半径均显著增大, 风场结构不对称性增强, 在达到超强台风后保持稳定。基于二维傅里叶变换的谱分析发现, SAR海面风场能够清晰呈现台风边界层千米尺度滚涡结构, 其方向与台风外围切变场基本一致, 波长集中在2—3 km, 且其分布不随台风强度变化而显著改变, 与当前滚涡形成及维持主要受局地风切变不稳定动力影响的认识一致。虽然本文研究数据样本有限, 但初步证实了SAR在揭示台风海面风场精细结构及边界层千米尺度过程方面的巨大潜力, 为后续开展多台风案例大数据统计, 深入理解台风不同强度阶段的海气相互作用动力机制提供重要参考。

关键词: 合成孔径雷达, 台风“摩羯”, 风场结构, 风圈半径, 不对称性, 边界层滚涡

中图分类号: P47/P2

引用格式: 胡清清, 王臣, 李慧敏, 李晓明. 2026. 台风“摩羯”演变过程中的多时相SAR海面风场精细特征分析. 遥感学报, 30(6): 1727–1742

Hu Q Q, Wang C, Li H M and Li X M. 2026. Fine-scale analysis of multitemporal SAR-Derived sea surface winds for Typhoon Yagi (2024). National Remote Sensing Bulletin, 30(6): 1727–1742 [DOI:10.11834/jrs.20265470]

1 引言

台风是一种能量巨大、破坏力极强的热带气旋, 其所携带的强风、暴雨及次生灾害对沿海地区的生命财产安全和基础设施构成严重威胁。台风来临时, 局地复杂极端天气事件会直接或者间接破坏农业、渔业、交通和能源系统, 严重时威胁人员生命安全。因此, 实时准确地预测台风路径与强度, 对于减轻灾害损失和提升防灾减灾能力具有重大意义。实现这一目标的关键在于深入理解台风动力学演变机理和海气界面耦合过程 (Emanuel, 2018)。其中, 台风海面风场的精细结

构是揭示台风强度变化与对流动力过程的重要观测依据, 常通过风圈半径、风场不对称性等结构性参数加以量化。然而, 随着观测技术与研究方法的持续进步, 大气边界层千米尺度过程对台风海面风场扰动的影响逐渐受到关注 (Li等, 2013; Tang等, 2021), 这使得台风演变过程中的海面风场精细结构成为当下观测和研究焦点。

现有的星载散射计与微波辐射计能够提供台风风场广域观测, 一定程度上保证了风场整体结构连续性和时效性。散射计数据被广泛用于台风边界层结构反演 (张路等, 2020) 和资料同化研究 (孙佳琪等, 2021), 辐射计的长时序观测也为

收稿日期: 2025-11-10; 预印本: 2026-03-02

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 42576190, 42350003, 42476182); 上海台风研究基金(编号: TFJJ202110)

第一作者简介: 胡清清, 研究方向为微波海洋遥感。E-mail: 202312370009@nuist.edu.cn

通信作者简介: 王臣, 研究方向为微波海洋遥感。E-mail: cwang@aitech.edu.cn

风圈半径及强度变化提供了有力支撑(方贺等, 2024)。然而, 散射计在高风速区(>20 m/s)的反演能力受限, 风向解模糊也依赖外部参考风场, 当前产品最高分辨率仅能达到6.5 km。而辐射计虽然可提供全域风速, 但像元分辨率仅约为40—60 km(Fu等, 2019)。尽管通过数据处理算法优化、多频通道组合、以及新型载荷研制等手段可以提升散射计与辐射计的风场空间分辨率, 但目前数据能支持诊断的空间尺度仍大于台风边界层中常见的千米滚涡结构, 导致其对台风海面风场的全面解析存在限制。尤其是在深入理解海面风场对台风边界层千米尺度过程的响应和反馈方面, 亟需引入与该过程尺度相当或者更优分辨率的观测数据。

合成孔径雷达SAR(Synthetic Aperture Radar)凭借其米级空间分辨率、全天候观测与宽刈幅成像能力, 在台风海面风速场反演中展现出独特优势。SAR垂直极化(VV)通道在中低风速段反演精度较高(Christiansen等, 2006), 而其交叉极化(VH/HV)通道在高风速段受到的反射信号饱和影响也较小, 因而可以有效实现台风下全域风速的快速反演(Wang等, 2022; Mouche等, 2017, 2019), 是当前台风卫星遥感观测不可或缺的传感器之一。同时, Li等(2013)通过分析161景Radarsat-1 SAR图像, 系统阐述了热带气旋不同尺度的形态特征, 并指出SAR在解析大气边界层千米尺度滚涡过程应用中的巨大潜力。后续Zhang等(2021a)的研究进一步表明, SAR与微波辐射计联合反演可改进台风风场结构诊断, 并揭示了不同强度台风的海面风场不对称性规律(Zhang等, 2020), 为SAR观测数据广泛应用于台风数值模式提供了重要参考。然而, 单星SAR的重访周期较长, 难以对同一台风事件进行连续动态监测, 限制了其对台风演变过程的动态捕捉, 因而多源SAR数据的联合分析将成为突破该限制的重要途径。

2024年第11号台风“摩羯”(Yagi)于9月1日在菲律宾以东海域生成, 进入南海后获得充足的海表热能补给, 并受到垂直风切变环境的影响, 在之后48小时内由热带风暴迅速增强为超强台风(Zhan和Feng, 2025; 陈瑾, 2024; 严谨和李贺, 2024)。该台风案例具有典型的快速增强过程, 是研究台风海面风场精细结构及其与边界层动力过程相互作用的理想案例。鉴于此, 本研究利用

Sentinel-1、Radarsat-2和Radar Constellation Mission(RCM)3颗SAR卫星对台风“摩羯”的多时相联合观测资料, 基于美国国家海洋和大气管理局NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)卫星应用与研究中心STAR(Center for Satellite Applications and Research)提供的500 m分辨率海面风场产品, 先后进行噪声滤除、扇贝效应和拼接痕迹去除、台风中心定位、与风圈半径提取等处理, 系统分析了台风“摩羯”演变过程中的风场结构、不对称性、以及千米尺度边界层滚涡特征, 为理解台风快速增强的海气相互作用机制提供了观测证据与方法支撑, 也为后续开展台风SAR海面风场大数据统计研究提供技术参考。

2 台风路径与SAR观测数据

2.1 台风“摩羯”移动路径

本文采用国际热带气旋最佳路径IBTrACS(International Best Track Archive for Climate Stewardship)数据集(Gahtan等, 2024)。该数据集由NOAA主导建立, 汇集了全球主要区域气象业务机构的观测记录, 是目前覆盖时间最长、覆盖范围最全面的全球热带气旋最佳路径数据集。提供自1842年以来逐6小时时间分辨率的热带气旋中心位置、最大风速、最低气压等基础要素参数。该数据集凭借其多源融合和长期一致性, 成为研究热带气旋气候学统计特征和动力过程演变的重要资料。

如图1所示, 不同颜色圆点代表台风强度, 表明台风“摩羯”在进入南海之前最大风速在20 m/s左右, 维持在热带风暴级别, 然而当其穿越菲律宾北部进入南海后, 出现典型的快速增强过程, 在24小时内连升三级, 由强热带风暴迅速增强至超强台风, 最大风速达到60 m/s, 并在此后保持该强度直至登陆广东西南沿海。该台风不仅对广东、海南等沿海地区造成严重灾害影响, 也为研究台风快速增强动力机制提供了代表性案例。本文以SAR观测数据获取时间为基准, 将台风“摩羯”IBTrACS最佳路径和相关参数进行时空双线性插值, 计算得到与SAR时间对应的IBTrACS台风中心位置、移动方向与结构性参数。

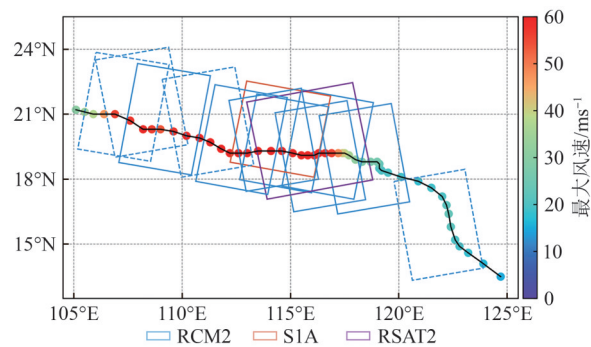


图1 2024年11号台风“摩羯”最佳路径及多源星载SAR观测数据(黑线为台风路径,彩色点代表台风强度,彩色矩形框为获取的13景台风SAR图像位置,其中实线框为陆地占比少的9景SAR图像)

Fig. 1 Best track of Typhoon Yagi (No. 202411) and spatial coverage of spaceborne SAR observations (The solid black line denotes the typhoon’s trajectory, with colored dots indicating intensity levels along the track. Colored rectangles mark the footprints of 13 SAR scenes acquired from multiple satellite missions, while solid boxes highlight the 9 scenes with minimal land contamination that are analyzed in this study)

2.2 多时相SAR观测数据

针对2024年西北太平洋台风“摩羯”, Sentinel-1、Radarsat-2以及RCM共收集到如图1所示的13景SAR影像数据,构成了一组台风演变过程中的多时相观测序列。该序列中的9景SAR影

像覆盖了台风“摩羯”中心关键区域,能够清晰观测到台风眼区、眼墙及螺旋雨带等典型结构特征,而其余4景图像因陆地占比较高,未能完整捕捉到台风眼和眼墙环形结构。因此,本文只聚焦分析9景对台风眼区结构观测完整的SAR影像数据,相关参数如表1所示。

其中, Sentinel-1卫星作为欧洲航天局“哥白尼计划”的核心对地观测模块(Torres等, 2012), 包含了都搭载C波段SAR传感器的S1-A、S1-B与S1-C等3颗卫星, 其干涉宽刈幅模式能够提供大多数热带气旋的双极化观测影像, 空间分辨率优于50 m。Radarsat-2卫星由加拿大航天局与商业公司联合研制, 是一颗具备全极化成像能力的高性能雷达卫星, 可获取空间分辨率最高达3 m的数据, 为刻画台风精细内部结构提供了可能。RCM是加拿大新一代三星式SAR雷达星座, 作为Radarsat-2的后继系统, RCM的核心优势在于其高时间分辨率的观测能力。得益于C波段对云、雨的穿透能力, 3颗SAR卫星在台风极端天气条件下都能保持数据成像的稳定性, 是当下有效获取海面风场信息的主要数据来源。同时通过多星协同工作, 大幅缩短了观测周期, 对台风“摩羯”的快速发展过程实现了高效和连续的动态监测。

表1 针对台风“摩羯”的9景SAR影像观测数据基本信息

Table 1 Basic information of the 9 SAR scenes acquired for Typhoon Yagi

编号	卫星	获取时间	极化方式	入射角/(°)	分辨率/m	台风等级	IBTrACS台风中心
A	RCM2	2024-09-03 10:17:03	HH/HV	35.0—55.8	50	热带风暴	(119.06°E, 18.74°N)
B	RCM2	2024-09-03 22:11:03	HH/HV	18.2—47.4	50	强热带风暴	(117.88°E, 18.98°N)
C	RCM2	2024-09-04 10:25:08	HH/HV	35.0—55.7	50	台风	(117.06°E, 19.20°N)
D	Sentinel-1	2024-09-04 22:18:41	VV/VH	21.1—46.5	40	强台风	(115.97°E, 19.10°N)
E	RCM2	2024-09-04 22:19:05	HH/HV	18.3—47.3	50	强台风	(115.97°E, 19.10°N)
F	Radarsat-2	2024-09-05 10:22:08	VV/VH	20.9—48.2	50	超强台风	(114.37°E, 19.30°N)
G	RCM2	2024-09-05 10:33:22	HH/HV	35.0—55.8	50	超强台风	(114.34°E, 19.30°N)
H	RCM2	2024-09-05 22:27:05	HH/HV	18.2—47.4	50	超强台风	(112.41°E, 19.20°N)
I	RCM2	2024-09-06 22:34:57	HH/HV	33.7—56.6	50	超强台风	(108.39°E, 20.30°N)

鉴于星载SAR台风海面风场反演理论与技术的成熟性,同时为确保与后续研究所用风场数据的一致性,本文采用由NOAA STAR公开发布的准实时SAR热带气旋海面风场反演数据产品(<https://www.star.nesdis.noaa.gov/socd/mecb/sar/index.php>[2025-11-10])。该产品针对全球范围内Sentinel-1、Radarsat-2和RCM卫星对热带气旋的观测影像,提供500 m与3 km空间分辨率的雷达后向散射系数、经纬度、雷达入射角等雷达参数、及反演得到的海面风场。该产品风场反演核心算法是表征SAR后向散射系数与海面风速、风向及观测几何之间定量关系的地球物理模式函数。在台风强风条件,SAR交叉极化信号因对风速变化响应更为敏感,且受信号饱和影响较小,成为反演台风高风速的主流选择(Mouche等,2017)。其中,Sentinel-1和Radarsat-2的地球物理模式函数沿用了Mouche等(2017)开发的C波段交叉极化模型。而为适配RCM独特的雷达系统参数,STAR于2023年专门开发了对应的新型交叉极化地球物理模式函数,成功应用于RCM热带气旋风场产品的业务化制作。该台风SAR海面风场产品与浮标、下投式探空仪、机载辐射计以及其他遥感数据进行了大量交叉对比验证,分析表明其核心评价指标都达到了业务化应用与科学研究的预期标准(He等,2024; Bayler等,2024)。

3 台风SAR海面风场处理

由于NOAA STAR并未完全对原始SAR数据做必要的预处理,导致其提供的风场产品存在较为严重的相干斑噪声、扇贝效应和条带拼接痕迹,给台风风场结构性参数提取和精细结构分析带来困难,因此需要首先对500 m分辨率的SAR海面风场产品进行陆地掩膜、噪声抑制、扇贝效应与条带拼接痕迹去除。

3.1 陆地掩膜

我们基于Python编程环境下的Basemap地理制图工具包,生成陆地和非陆地二值掩膜。该工具包内置的高分辨率海岸线数据源自GSHHS数据库,其海岸线在中低纬度地区的空间精度通常优于2 km。通过迭代算法,我们依次判断SAR海面风场数据中的每一个经纬度坐标点是否位于陆地区域内,从而生成与原始风场维度一致的二值化陆

地掩膜矩阵。基于该矩阵,我们计算了每景SAR海面风场数据中的陆地像元占比,排除占比超过50%的4景影像。同时在对剩余9景SAR风场数据进行分析时,利用该掩膜去除陆地和岛屿像元,以最大程度确保统计计算与特征提取均来自有效的海面风场数据。

3.2 噪声滤除

SAR作为一种相干成像雷达系统,提供的图像会受到斑点噪声的影响(Lee等,1994)。这种噪声源于雷达回波信号在亚分辨率单元内散射体间的相干叠加,在图像上表现为颗粒状亮度起伏。尽管SAR成像算法及风场反演过程中的空间采样能在一定程度上抑制斑点噪声,但在采用的500 m分辨率风场产品中,仍可观测到由噪声导致的局部风速异常值。这些异常值会在风场统计分析及结构参数提取中引入偏差。为抑制风速异常值并增强风场结构的空间连续性,我们对SAR海面风速场数据进行局地高斯平滑滤波。如图2所示,经高斯滤波后,该区域风速场的均方根误差由5.12 m/s降至4.97 m/s,降幅约为2.93%,同时从选取的风速剖面可见,局地极大值与极小值得到了有效平滑。

3.3 扇贝效应和条带拼接现象去除

在星载SAR宽刈幅扫描成像模式中,平台速度微小漂移、天线增益不稳定、非均匀脉冲采样、以及卫星姿态扰动等因素,会导致方位向信号的周期性调制误差,在重建图像中表现为沿方位向分布的交替明暗条纹,即扇贝效应(孙增国等,2023)。如不进行校正或去除,该系统误差会传递至反演的海面风速场中,形成如图2(a)所示的周期性纹理。此外,由于不同子带获取时间存在微秒级差异,SAR信号的辐射响应有所不同,导致宽幅图像在子带拼接处产生如图2(a)中所示的沿雷达视向边界线,即条带拼接现象(明峰等,2006)。这两类周期性条纹影响SAR海面风场的空间物理一致性,对定量分析造成严峻挑战,特别是在使用快速傅里叶变换、小波分析等方法时,这些周期性条纹会引入强烈的谱峰信号,掩盖或混淆真实的大气边界层特征信号(Huang等,2018)。因此,有效识别并去除SAR影像及其风场产品中的扇贝效应和条带拼接现象,对基于SAR观测的相关研究分析至关重要。

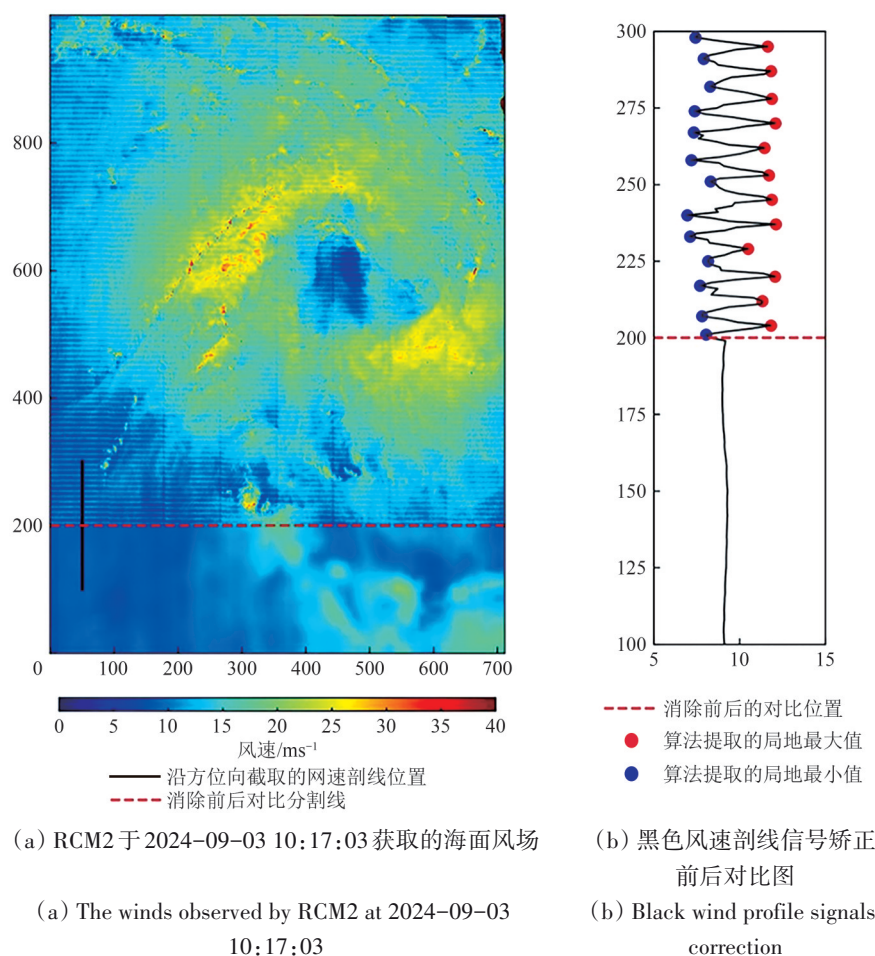


图2 SAR海面风场扇贝效应和条带拼接现象快速消除方法示例

Fig. 2 Example of rapid removal of scalloping and inter-swath artifacts in SAR-derived sea surface winds

相比复杂的二维热噪声重建方法 (Zhang 等, 2023), 本研究采用针对周期性信号的特征检测均匀滤波, 构建SAR海面风场中扇贝效应与条带拼接现象快速消除算法, 步骤如下:

(1) 如图2中(a)黑线所示, 沿方位向截取一定范围的风速剖面, 提取局地极大和极小值, 计算相邻极值点间的像素距离, 通过距离均值确定扇贝效应周期波长 λ (像素单位);

(2) 构建长度 $L = 3\lambda$ 的滑动均值滤波器, 对SAR风速场每一列(方位向)做卷积, 消除扇贝效应。选取 3λ 是一种在频谱上对主频实现强衰减同时保持较好原始空间结构的折衷;

(3) 基于相同原理, 针对条带拼接产生的周期性线性信号, 计算周期波长并构建滑动均值滤波器, 消除由条带拼接引入的边界线现象。

图2(a)以红色虚线为界, 对比了扇贝效应与条带拼接现象去除前后的风速场, 可以看到处理后的扇贝纹理和条带拼接痕迹得到显著抑制, 滤波后风速场的整体标准差由4.99 m/s降至4.13 m/s,

降低了17.4%, 表明大尺度风速起伏仍占主导。相比之下, 梯度强度均方根误差由 3.74×10^{-3} 降至 2.96×10^{-4} , 降低了92.1%, 说明细尺度空间纹理被有效平滑。频谱分析进一步表明, 高频能量在空间尺度阈值小于20 km、30 km和40 km时的损失分别为98.3%、91.3%和85.1%。从图2(b)中所示的风速剖面也可以清晰看出, 处理前风速存在明显的高频周期性波动, 而处理后的风速一致性更高。尽管该快速均值滤波方法不可避免地会平滑海面风场中的千米尺度精细特征, 降低SAR海面风速场有效分辨率, 但相较于由扇贝和条带拼接引入的伪影信号, 这种处理将有利于台风结构性参数的提取。值得注意的是, 扇贝效应和条带拼接痕迹在Sentinel-1和Radarsat-2卫星数据地面系统中进行了热噪声重建处理, 对SAR海面风速场反演的影响远小于RCM卫星产品数据。随着星载SAR技术的不断进步, 尤其是天线方向图和热噪声定标精度的提升, 这些系统性误差将在SAR后向散射信息数据层面得到有效解决, 届时

将不再需要影响海面风速场精细特征信息的快速滤波处理。

4 台风中心提取与对比

4.1 SAR风场台风中心定位

相比于传统原位观测与数值模拟,星载SAR凭借其高空间分辨率瞬时观测能力,能够在单影像中捕捉台风在特定时刻的不同尺度风场结构。这一特性使得SAR海面风场不仅能揭示台风眼及其周边强风带的空间分布(Li等, 2013),还能清晰刻画风速径向梯度和环流对称性等关键特征,为台风中心识别与精确定位提供了依据。本研究提出并实现了一种面向500 m分辨率SAR海面风场的多级判据自动定位算法,用于客观准确地识别台风中心位置,具体步骤如下:

(1) 计算每景SAR海面风场最大风速值 $U_{\max}$,以 $\tau = 0.8 U_{\max}$ 为阈值提取如图3(a)黑色曲线所示的风速等值线,将该等值线所包络区域作为后

续台风中心候选点搜索范围。如果等值线无法闭合(如图4(b)–(f))或者不包含台风中心(图4(a)),则提取等值线在SAR图像坐标系下的4个方向极值,构建台风中心候选点矩形搜索框;

(2) 在上述确定的搜索区域内,识别提取所有局地风速最小值点位置,并去除区域边缘(即等值线上)的提取点,将剩余最小值点标记为台风中心待判断点,如图3(a)中的黑色点所示;

(3) 以每个候选点为原点,沿方位向和距离向分别提取长度不大于100 km的风速剖面,如图3(a)中黑色直线所示,检测每条剖线上台风中心待判定点两侧是否存在局地最大值,当两个最大值的风速都至少是待判定点风速的两倍时,判定为台风中心候选点。

(4) 通过上述检验后得到的台风中心候选点集合,若仅有单点满足全部条件,则被输出为最终台风中心,若存在多个满足条件的候选点,则选择其中风速值最低的点作为最终台风中心。

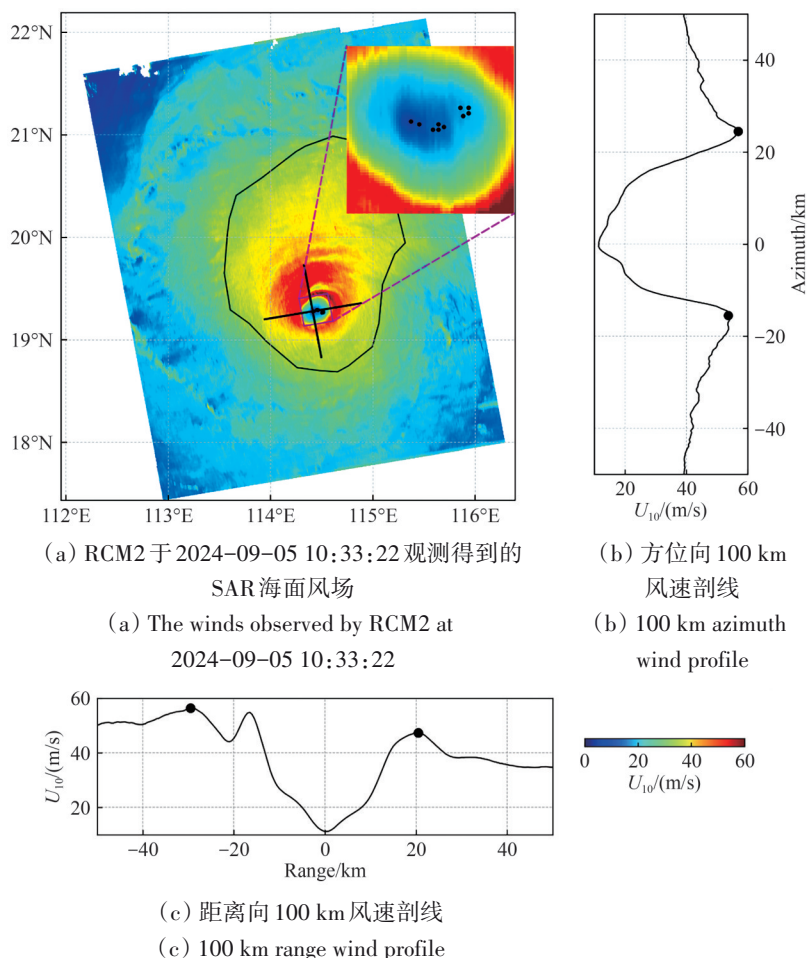


图3 基于SAR海面风场的台风中心定位示例

Fig. 3 Typhoon center localization based on SAR-derived sea surface winds

该算法综合考虑了噪点抑制和台风中心周围存在环状眼壁结构的特点, 实施运算简单快捷, 能够满足本文9景SAR海面风场数据的台风中心快速提取需求(图4)。但算法涉及80%风速等值线、

100 km 风速剖面、2倍风速差等多个阈值选择, 在其他台风SAR海面风场数据案例中的普适性需要进一步检验确定。

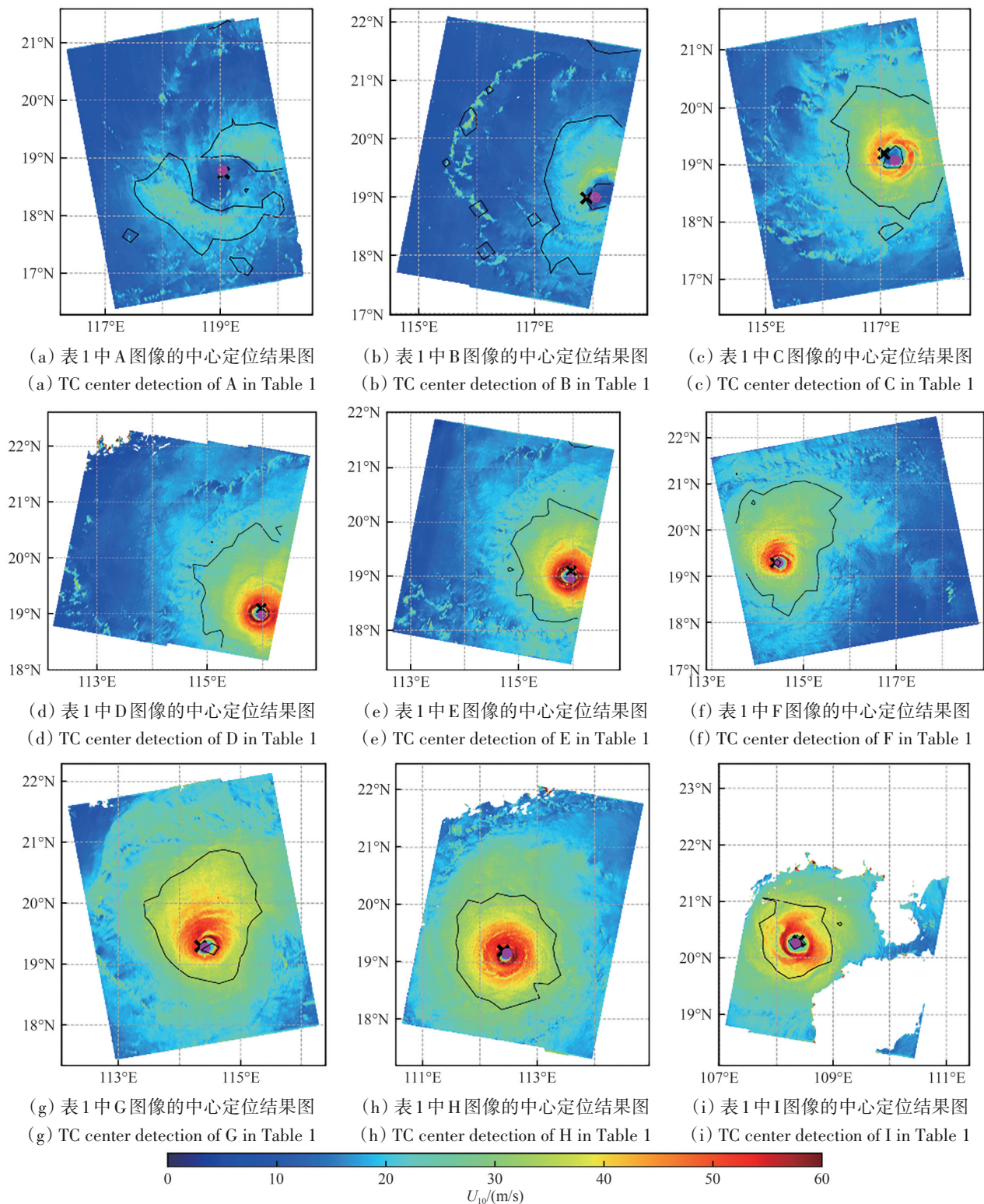


图4 针对台风“摩羯”的9景SAR海面风场台风中心定位结果(紫色圆点), 黑色叉号为基于台风最佳路径插值得到的台风中心位置, 图中编号(a)——(i)与表1中A—I相对应

Fig. 4 Typhoon center locations derived from 9 SAR sea surface winds for Typhoon Yagi. Purple dots denote the SAR-derived typhoon centers, and black crosses represent the centers interpolated from the best track data. Labels (a)——(i) correspond to cases A—I in Table 1

4.2 台风路径中心偏差分析

为进一步分析9景SAR图像观测时刻的海面风场台风中心提取结果（紫色点）与台风最佳路径中心（黑色叉号）差异，图5右上角柱状图给出了两者的距离差。结果表明，SAR提取的台风中心相较于台风最佳路径存在轻微滞后性，即前者普遍位于后者的东侧（台风“摩羯”自东偏南向西偏北方向移动）。两者的空间距离差介于6—24 km之间，在台风由热带风暴增至强台风阶段波动较大，而当“摩羯”发展为超强台风后，两者的偏差稳定在8 km左右。这表明SAR瞬时观测能够较为精确地提供台风中心位置和风场结构信息，为

台风中心的准实时、精确定位提供高质量观测依据。然而，当前台风最佳路径是预报员结合多种观测资料人工标注的结果，这一过程更多依赖静止气象卫星的光学和红外图像以及极轨气象卫星的被动微波亮温图像，几乎没有用到SAR卫星数据。光学和被动微波图像都是云顶高度的图像，而SAR观测的是海面粗糙度和风速场变化，这导致SAR图像的台风中心通常与云顶高度的台风中心有20 km左右的偏差，很好的解释了图5中台风中心6—24 km的差异，间接证明了上述提取方法的可靠性。

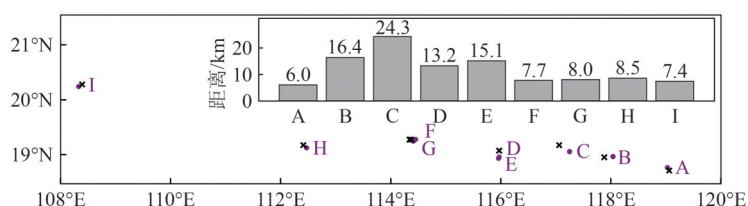


图5 紫色圆点为针对台风“摩羯”的9景SAR海面风场台风中心提取位置,黑色叉号为台风最佳路径插值得到的台风中心位置,柱状图为两者距离差分布

Fig. 5 Purple dots indicate the typhoon centers extracted from 9 SAR-derived sea surface winds, and black crosses show the interpolated best-track centers. The histogram in the upper right corner illustrates the spatial distance differences between the two sets of positions

从台风“摩羯”的演变过程来看，台风最佳路径插值得到的中心位置在增强阶段表现更不稳定。这一现象可能与当前数值模式对台风强度与路径的模拟精度有限有关，尤其在台风快速发展阶段，核心区强烈的对流爆发、内核眼壁置换及非对称环流结构等复杂动力过程，会导致模式模拟与实际观测存在偏差。此外，台风最佳路径的时间分辨率通常为3—6 h，插值方法基于匀速线性假设，无法准确捕捉台风中心在短时间内的摆动、回旋及非线性移动特征，从而在插值结果中引入不确定性。这种时间平滑效应使得传统路径产品难以满足当前对台风精细结构和快速演变过程的研究需要，也为其与原位观测及卫星数据的联合分析带来挑战。鉴于台风中心位置对其动力学结构分析、强度估计及数值模式初始化的重要作用，随着星载SAR观测数据的持续积累与覆盖提升，基于高分辨率SAR风场的台风中心自动定位方法，将为路径产品的动态校正和模式同化提供新的数据支撑。未来通过融合多源SAR观测与高时间分辨率被动微波或散射计数据，有望构建更

具时空连续性的台风中心轨迹产品，从而显著提升台风路径重建、强度演变分析及模式初始化的精度与可靠性。本研究后续所有与台风结构相关的定量计算均以SAR提取的台风中心位置为准，而台风移动方向仍采用台风最佳路径的插值结果。

5 海面风场精细结构特征

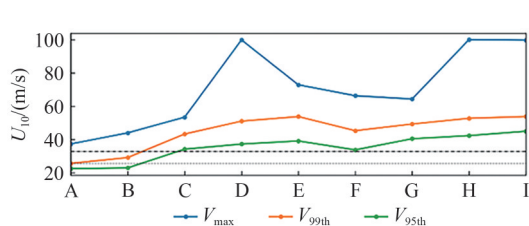
5.1 风圈半径

基于9景台风“摩羯”SAR海面风速场数据，分别提取最大风速、99%分位风速和95%分位风速，量化台风在不同演化阶段的最高风速强度。如图6(a)所示，在台风由热带风暴向超强台风演变过程中，风速场整体呈显著增强趋势。其中，最大风速在空间上表现出较大波动，尤其在SAR数据编号为D、H和I对应的观测时刻（表1），风速明显高于相邻观测值。这一现象与SAR图像覆盖部分陆地有关（图4），而在本研究中，我们未对陆海边缘进行图形学膨胀处理，导致部分陆地像元仍然存在，过高的后向散射强度造成风速异

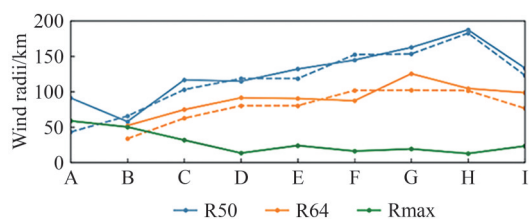
常值。尽管改进陆地掩膜能够有效避免陆地像元带来的风速异常,但仍不能解决SAR图像固有的相干斑噪声。相比之下,99%分位风速和95%分位风速表现出一致的趋势,都是先快速上升,然后缓慢增大,分别对应台风“摩羯”快速增强阶段及后续强台风和超强台风稳定阶段。因此,在利用SAR海面风场数据提取台风最大风速时,应对受陆地、岛屿或船只平台影响而产生的异常数值进行滤除,或直接采用99%分位风速以降低统计误差。但值得注意的是,最大风速与99%分位风速之间存在一定差异,可能对基于SAR观测序列进行的台风强度及其演变研究引入系统性偏差。

参照 Zhang 等 (2021a) 的研究方法,本研究进一步从SAR海面风场数据中提取了最大风圈半径 ($R_{\max}$)、64 节风速风圈半径 (R_{64}) 和 50 节风速风圈半径 (R_{50}),以表征台风眼及周边高风速区的空间结构特征。以图 6 (b) 所示的 2024-09-05 T 22:27:05 RCM2 观测的海面风场为例,最大风圈半径基本位于台风眼墙位置,而 R_{64} 风圈主

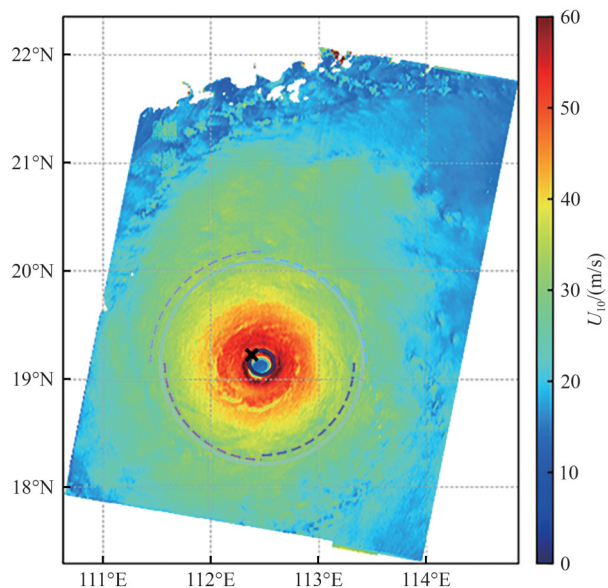
要分布于台风高风速区域的雨带附近。进一步分析台风移动坐标系下的 4 个象限风圈分布,可以清晰看到台风海面风场存在明显的不对称性,这与已有研究结果一致 (Zhang 等, 2021a, 2021b; Horinouchi 等, 2023)。图 6 (c) 展示了台风“摩羯”演变过程中三类风圈半径的时间变化特征。在快速增强阶段,最大风圈半径呈现下降趋势,而 R_{64} 与 R_{50} 风圈半径均随之增大,反映了台风强度增强导致眼墙结构收缩、周边高风速区整体扩展的物理过程。在强台风稳定阶段,三类风圈半径分别稳定在约 20 km ($R_{\max}$)、90 km (R_{64}) 和 125 km (R_{50})。进入超强台风阶段后, R_{64} 与 R_{50} 风圈半径进一步增大,表明台风能量在高风速区进一步集中,而最大风圈半径变化甚微,说明台风眼结构在强台风强度条件下趋于稳定,符合快速旋转气流下的物理特征。同时,与台风最佳路径资料中提供的 R_{64} 和 R_{50} 数值相比, SAR 海面风场数据提取结果存在微小差距,两者总体趋势一致。



(a) 9景图像最大风速、99%分位和95%分位风速图
(a) Maximum, 99th and 95th percentile wind speed of the nine images



(c) 9景图像 $R_{\max}$ 、 R_{50} 和 R_{64} 结果图
(c) $R_{\max}$, R_{50} and R_{64} result maps of the nine images



(b) RCM2 于 2024-09-05 T 22:27:05(H) 获取风场风圈半径提取示例
(b) Example of wind radii extraction by RCM2 at 2024-09-05 T 22:27:05

图 6 台风“摩羯”风场特征随强度变化分析图

Fig. 6 Analysis of Typhoon Yagi Wind Field Characteristics with intensity changes

5.2 台风风场不对称性

为量化台风“摩羯”在演化过程中风场结构的不对称性,本研究采用了非对称扰动分析方法,

具体为对 9 景 SAR 海面风场数据进行方位角傅里叶分析 (Nolan 和 Montgomery, 2000; 陶建军 等, 2012)。该方法是研究热带气旋结构不对称性的标

准工具, 通过将风场分解为对称的平均分量和一系列不同波数 (wavenumber) 的扰动分量, 从而有效分离并量化不对称特征。分析的第一步是将位于地理坐标系下的二维风速场, 转换为以 SAR 提取的台风中心为原点的极坐标系 (r, θ) , 其中 r 为径向距离, θ 为方位角。在此坐标系下, 任意给定径向距离 r 上的风速场 $U(r, \theta)$ 可被分解为一系列傅里叶谐波分量。其傅里叶系数 $A_n(r)$ 和 $B_n(r)$ 的计算公式如下:

$$A_n(r) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N U(r, \theta_j) \cos(n\theta_j) \quad (1)$$

$$B_n(r) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N U(r, \theta_j) \sin(n\theta_j) \quad (2)$$

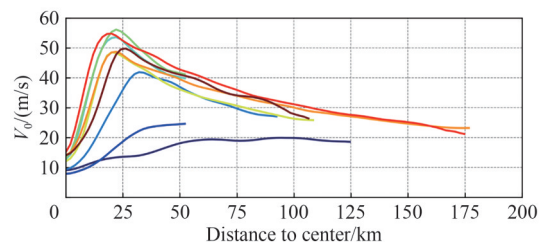
式中, N 是极坐标下方向均匀划分的个数, θ_j 是每个风速的方向数值, $U(r, \theta_j)$ 是沿方向 θ_j 每个径向距离下风速。扰动波数 V_n 的振幅为

$$V_n(r) = \sqrt{A_n^2 + B_n^2} \quad (3)$$

当 $n = 0$ 时, $V_0(r) = A_0(r)$ 代表风场的方位角平均值, 即风场的轴对称分量, 描述了平均风速随径向距离变化的廓线。当 $n = 1$ 时, $V_1(r)$ 代表风场中尺度最大、最主要的非对称分量, 通常与环境垂直风切变、台风移动以及效应等外部强迫因子密切相关。

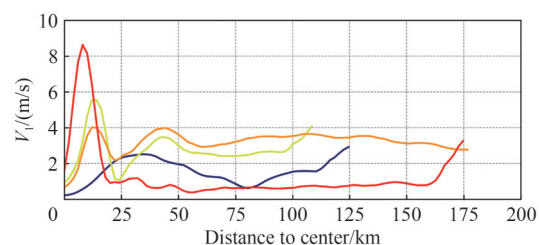
图 7 展示了基于 9 景 SAR 风场数据进行波数分解的结果, 分别揭示了台风“摩羯”的对称与非对称结构特征。图 7 (a) 给出了波数 0 分量 $V_0(r)$ 的径向分布曲线。这些曲线共同描绘了典型的热带气旋径向风速廓线特征, 在台风中心附近风速较低, 随后向外急剧增加, 在某一径向距离上达到峰值 (即最大风速半径), 之后随距离增加而逐渐减弱。观测结果显示, 大部分样本的最大风速半径位于距风眼约 20—40 km 的范围内, 这与成熟台风的眼壁及其外围螺旋雨带的物理结构相吻合。图 7 (b) 展示了波数 1 分量 $V_1(r)$ 的径向变化, 该分量直观地量化了风场非对称性的强度。结果清晰地表明, 台风“摩羯”在靠近核心的区域存在显著的非对称性, 部分观测样本的非对称振幅高达 6—8 m/s, 说明在特定方位上的风速远高于其他方位。随着径向距离的增加, 非对称性强度总体呈减弱趋势, 表明台风外围环流的风场分布相对更为均匀。尤为值得关注的是, 通过对比不同发展阶段的样本, 可以发现风场非对称性与台风强

度演变之间存在潜在关联。对比台风快速增强前与快速增强阶段的多个样本可以发现, 台风在进入快速增强阶段前, 其波数 1 非对称性相对较弱, 而在快速增强过程中, 非对称性振幅明显增强。这一现象揭示了台风强度变化与其内部风场结构调整的紧密耦合关系, 表明台风增强过程可能伴随着非对称结构的显著发展。



(a) 9 景图像波数 0 分量图

(a) Wavenumber-0 component maps for the nine images



(b) 9 景图像波数 1 分量图

(b) Wavenumber-1 component maps for the nine images



图 7 台风“摩羯”9 景 SAR 图像的波数 0 平均风速变化和波数 1 分量变化趋势

Fig. 7 Variation of the wavenumber-0 mean wind speed component and Trend of the wavenumber-1 asymmetry amplitude component derived from the nine SAR scenes of Typhoon Yagi

5.3 边界层千米尺度特征

SAR 海面风场的另一显著优势在于其超高的空间分辨率, 这使其能够有效诊断大气边界层中千米尺度动力过程对海气界面的扰动 (Wang 等, 2020; Tang 等, 2021)。以 Radarsat-2 2024-09-05 T 10:22:08 对台风“摩羯”的观测为例, 高分辨率 500 m 风场 (图 8 (a)) 相比 3 km 分辨率风场 (图 8 (b)), 清晰呈现了千米尺度的边界层滚涡结构 (也被称为风条纹)。这些滚涡表现为图 8 (d) 中局地准线性交替正负的风速异常 (矩形窗口内风速减去其均值), 空间尺度在千米量级, 是近年来大量研究报道的台风边界层滚涡动力过程对近海

面风场的直接影响 (Li 等, 2013; Tang 等, 2021), 对海气能量交换以及台风快速增强具有不可忽视的作用 (Zhang 等, 2008; Sukhanovskii 和 Popova, 2020)。值得注意的是, 在如图 8 (e) 所示的 3 km 分辨率 SAR 风场, 以及图 8 (c)、图 8 (f) 所

示的更粗分辨率数值模式风场中, 边界层滚涡几乎不可见。这表明, 现有粗分辨率风场数据难以捕捉台风边界层的细微结构, 因此如何在数值模式中考虑边界层滚涡效应, 并改进相关参数化方案, 是当前基础观测与动力探索面临的重大挑战。

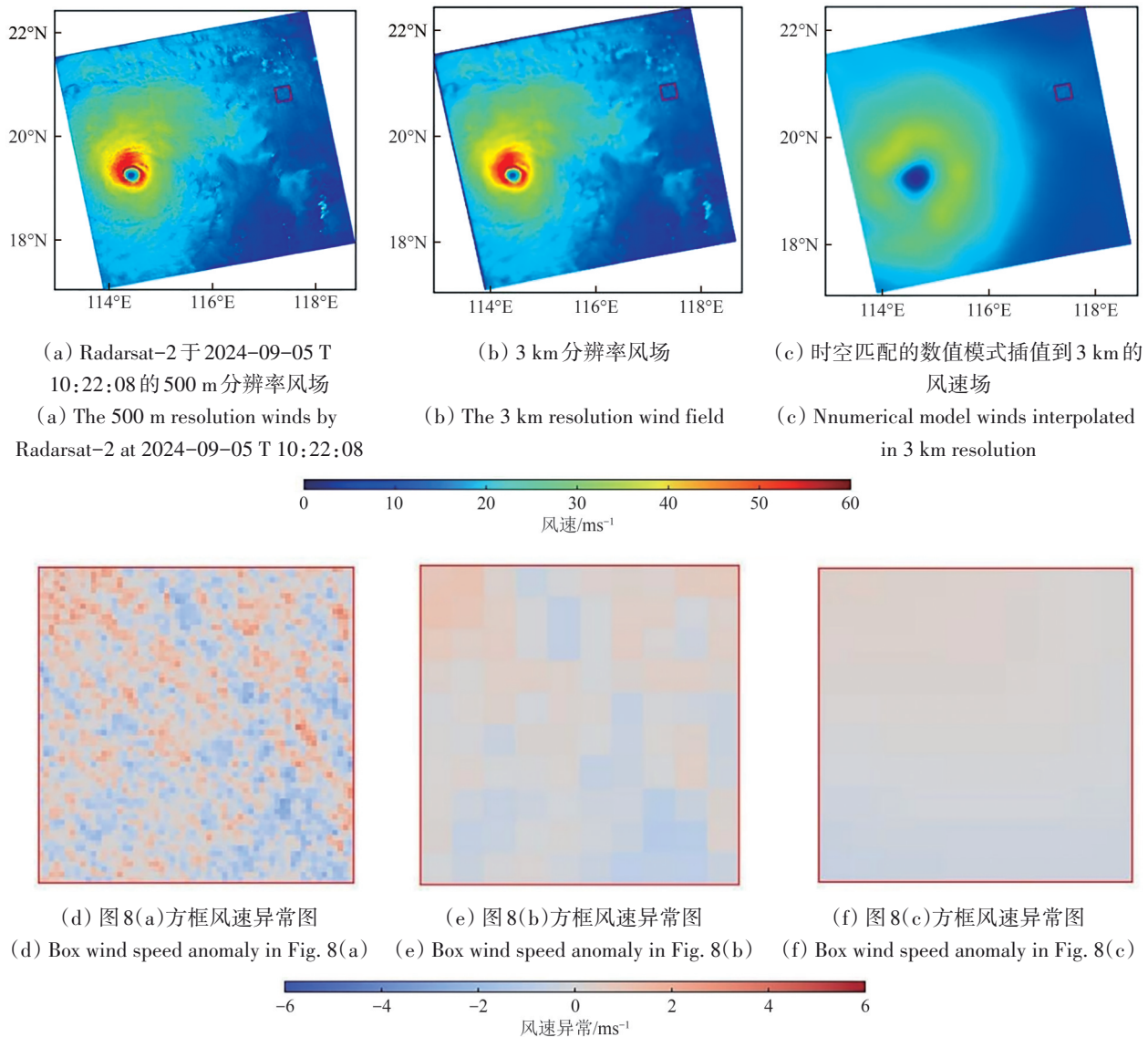


图 8 不同分辨率海面风场中的台风边界层千米尺度精细特征

Fig. 8 Kilometer-scale fine structures of the typhoon boundary layer in sea surface winds at different spatial resolutions

图 9 展示了基于二维傅里叶变换提取台风边界层千米尺度滚涡方向和波长特征的示意图。图 9 (a) 为选取自台风外围的局地海面风速场窗口, 与图 8 (d) 对应, 该风速场包含明显的中小尺度扰动结构, 这些扰动通常反映了台风边界层内辐合与切变作用下形成的卷状或条带状湍流特征。为了定量分析其主导尺度和方向分布, 将该风速场进行二维快速傅里叶变换, 得到其在波数空间中

的频谱能量分布。傅里叶变换通过将空间域信号分解为一系列具有不同波数和方向的正弦分量, 使得流场中占主导地位的周期性信号能够在频谱空间中以能量峰值的形式显现。经傅里叶变换和平移处理后的功率谱如图 9 (b) 所示, 该频谱能量图是由笛卡尔坐标系至极坐标系转换得来, 以便于特征提取, 其中 ϕ 表示如图 (a) 中左下角所示的 SAR 图像坐标系方向角度, 而 L 对应空间波

长。因傅里叶变换频谱图像具有 180° 对称性，且滚涡方向也只需判断是否与风向基本一致，因此只需选择 ϕ 角度的 180° 图谱段进行分析即可。在图9中可以清晰地看到能量汇集于 $\phi = 302^\circ$ 和 $\phi = 122^\circ$ 方向处的显著谱峰，对应的主导波长约为2.6 km。这说明该区域风场中存在沿西北至东南方向排列

的准周期性滚涡条带状结构。该分析方法能够有效揭示台风边界层风场中千米尺度湍流的主导方向与特征尺度，能够较好量化台风边界层的滚涡能量分布、方向性和尺度大小，被大气边界层滚涡识别和统计相关研究广泛采用（Morrison等，2005；Huang等，2018）。

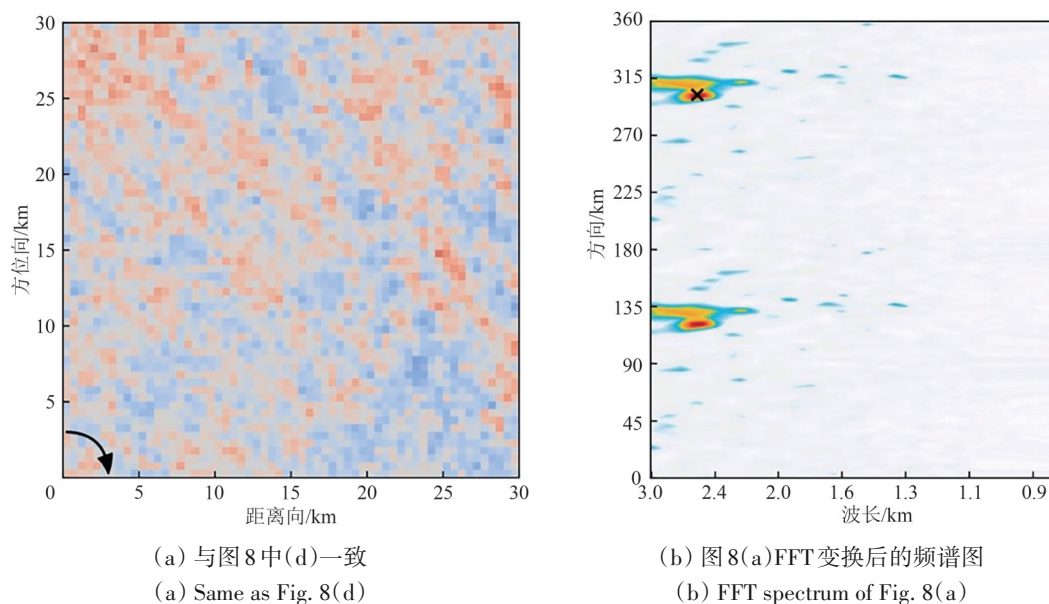


图9 基于傅里叶变换的台风边界层千米尺度滚涡方向和波长特征提取

Fig. 9 Extraction of kilometer-scale roll orientation and wavelength in the typhoon boundary layer using the Fourier transform

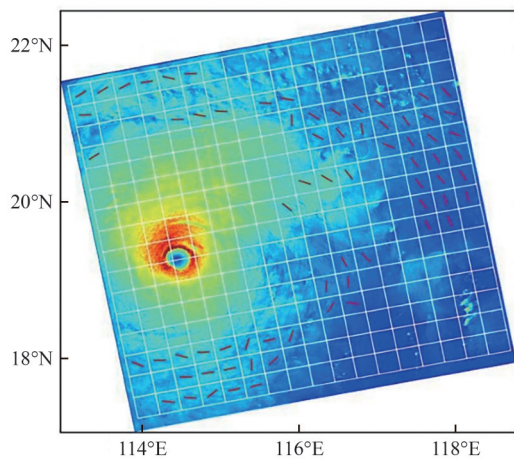
应用上述基于二维傅里叶变换的滚涡方向和尺度提取算法，对编号为D和F的两景SAR海面风场进行了系统分析。首先将风速场划分为30 km大小的网格窗口，对每个窗口进行目视解译识别以确定滚涡是否存在，进而计算二维傅里叶变换能量谱，提取滚涡主导方向和波长。本文选用30 km窗口的原因在于能够包含更多的像元值，以提高傅里叶变换的频谱图像质量，基于高分辨率SAR后向散射图像的分析中，一般采用20 km的窗口大小，能够兼顾窗口内像元数量和图像裁剪的窗口数量。图10(a)和(c)展示了两景SAR风速场与滚涡方向的空间分布情况，白色网格为分析窗口，红色短线代表滚涡的主导方向。图10(b)和(d)则给出了对应的波长分布图。可以看出，两景数据中滚涡特征均清晰可辨，其方向与台风环流切变方向基本一致，表明所采用方法能够稳定地量化台风边界层内千米尺度滚涡结构。虽然滚涡方向局部区域出现轻微偏转，可能与地形、对流单体或风向转折带有关，我们的结果总体说明滚涡

的能量主要来源于台风主环流的动力输入，边界层内的切变输运在湍流结构形成中起核心作用。

从空间分布上看，滚涡主要出现在台风外围低于20 m/s的风速区，这些区域海气温度梯度较弱，边界层处于近中性或略稳定状态，有利于滚涡的形成与维持。这一现象与以往观测和数值结果一致，进一步说明滚涡的形成并非由对流不稳定主导，而是受台风环流诱导的切变流和惯性不稳定驱动（Foster，2005；Gao和Ginis，2016）。两景SAR风场中滚涡波长分布主要集中在2—3 km之间，波长分布呈单峰特征且离散度较低。本研究结果相比Huang等（2018）与Morrison等（2005）观测的1.5—2.2 km略偏大，可能与台风个例的强度、纬度位置及SAR成像参数（入射角、极化方式）等因素有关。此外，这两景SAR所对应的时间均处于台风“摩羯”成熟期的两个阶段，中心风速都超过40 m/s，表明滚涡尺度在强台风和超强台风条件下差异并不显著，基本维持在一定范围内。从本文使用的SAR海面风速场数据来看，滚涡在高

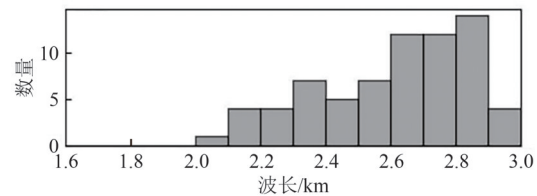
风速 (>20 m/s) 区域几乎不可见, 可能与海面波浪破碎增强导致滚涡引起的海面粗糙度变化信息淹没有关, 边界层滚涡在台风高风速区的发生与否, 一方面需要更多的 SAR 观测数据或相应的

SAR 成像模拟进行统计分析研究 (Huang 等, 2018), 另一方面也需要机载和现场协同观测数据进一步确定 (Tang 等, 2021)。



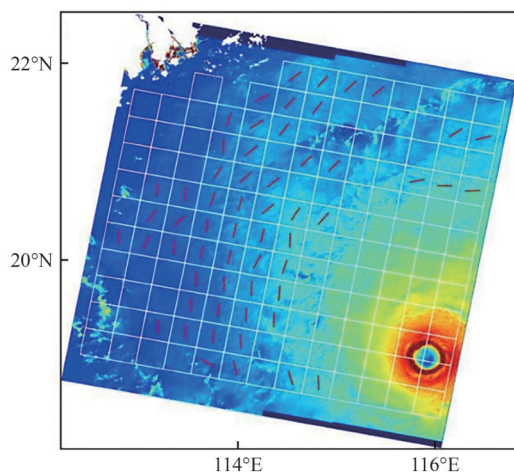
(a) 表 1 D 风场滚涡区域图

(a) Roll vortex region D of the wind field in Table 1



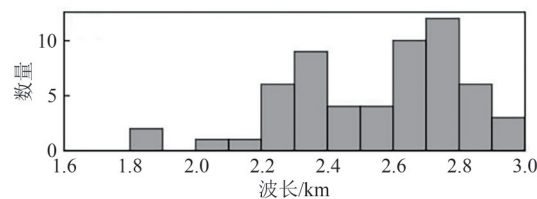
(b) 图 10(a) 滚涡波长统计图

(b) Statistical plot of roll vortex wavelength in Fig. 10(a)



(c) 表 1 F 风场滚涡区域图

(c) Roll vortex region F of the wind field in Table 1



(d) 图 10(b) 滚涡波长统计图

(d) Statistical plot of roll vortex wavelength in Fig. 10(b)

图 10 基于傅里叶变换提取的 SAR 海面风场千米尺度滚涡特征

Fig. 10 Kilometer-scale roll features extracted from SAR-derived sea surface winds using the Fourier transform

本研究仅对台风“摩羯”期间两个代表性时刻的观测进行了初步分析, 发现边界层滚涡的尺度在台风快速增强过程中并未显著增大, 表明台风边界层滚涡特征可能在某一常数尺度附近波动。该现象表明滚涡的动力机制具有一定稳定性, 其能量来源主要受台风主环流的切变与惯性作用控制, 未来研究将通过更大样本量的统计分析来验证这一推测。尽管高分辨率 SAR 数据已被证明是研究台风边界层千米尺度滚涡的重要手段, 但受限于观测样本数量、不同卫星与成像模式的空间

分辨率差异, 目前基于 SAR 海面风场的滚涡研究仍相对有限。亟需解决的关键科学问题包括: 滚涡信号可识别的空间分辨率阈值尚不明确; 滚涡过程是否普遍存在于台风边界层; 其特征参数是否随台风强度呈系统变化; 以及滚涡存在对海气界面动能与热量交换的贡献程度。上述问题的深入探讨依赖于大量多源 SAR 观测数据与时空匹配的现场测量支撑。本文针对台风“摩羯”的初步结果验证了所提方法的可行性, 为后续系统性研究提供了方法基础与实施参考。

6 结 论

本文基于 Sentinel-1、Radarsat-2 与 RCM 多源 SAR 卫星对 2024 年第 11 号台风“摩羯”的联合观测,系统地研究了其从热带风暴发展至超强台风生命周期内的海面风场精细结构与演变特征。针对星载 SAR 宽幅成像模式中普遍存在的扇贝效应与条带拼接痕迹等系统性伪影,本文提出并验证了一种基于信号周期特征检测的各向异性均匀滤波方法。同时,为确保分析的准确性,发展了一种基于多级物理判据的高分辨率风场台风中心自动定位算法。方法上的改进有效提升了 SAR 海面风场数据的质量与可靠性,为后续精细化结构分析奠定了基础。研究结果表明,台风“摩羯”的结构性参数,如最大风速($V_{\max}$)和特定风速阈值(如 34 节、50 节)的风圈半径,与台风强度的演变表现出高度一致性。在台风的快速增强阶段,最大风速与风圈半径均呈现迅速增大趋势,而当台风进入成熟的强台风与超强台风后,这些参数趋于稳定,反映了成熟气旋内部动力与热力结构的准平衡状态。得益于 500 m 的高空间分辨率,本研究在 SAR 海面风场中清晰地观测到了大气边界层内的公里级滚涡相干结构。分析发现,这些滚涡的特征参数并未随台风强度的变化而表现出显著差异。这一发现表明,大气边界层内的中小尺度动力过程可能具有相对稳定的演变规律,为后续基于大数据样本的统计分析和机理探讨指明了重要的研究方向。

本研究展示了高分辨率 SAR 数据在揭示台风内部精细结构及其动力过程方面的巨大潜力。更多高分辨率、高重访频率的 SAR 卫星观测将有助于深入揭示海面风场结构及边界层精细特征的时空演变,为理解台风快速增强等关键物理过程提供前所未有的观测依据。得益于本文研究成果,我们未来工作将一方面利用日益丰富的 SAR 数据资料,构建更大规模的台风案例数据库,通过系统性的统计分析,量化研究边界层滚涡精细结构对海气通量、动量输运以及台风强度和结构变化的影响机制,探寻其作为强度预报指示性因子的可能性。另一方面,将致力于推动 SAR 观测与高分辨率台风数值模式的深度结合。利用 SAR 揭示的精细风场特征,对不同行星边界层参数化方案的模拟能力进行系统性评估与检验,旨在发现当

前模式的不足并指导其物理过程的改进,最终为提升高精度台风预报的业务能力提供更为可靠的科学依据。

参考文献(References)

- Bayler E, Chang P S, De La Cour J L, Helfrich S R, Ignatov A, Key J, Lance V, Leuliette E W, Byrne D A, Liu Y H, Liu X M, Wang M H, Wei J W and DiGiacomo P M. 2024. Satellite oceanography in NOAA: research, development, applications, and services enabling societal benefits from operational and experimental missions. *Remote Sensing*, 16(14): 2656 [DOI: 10.3390/rs16142656]
- Chen J. 2024. Rain and wind impacts of Typhoon Yagi (No. 11) on China and defense strategies. *Disaster Reduction in China*, (19): 12-13 (陈瑾. 2024. 今年第 11 号台风“摩羯”对我国的风雨影响及防御. *中国减灾*, (19): 12-13) [DOI: 10.3969/j.issn.1002-4549.2024.19.005]
- Christiansen M B, Koch W, Horstmann J, Bayhasager C and Nielsen M. 2006. Wind resource assessment from C-band SAR. *Remote Sensing of Environment*, 105(1): 68-81 [DOI: 10.1016/j.rse.2006.06.005]
- Emanuel K. 2018. 100 years of progress in tropical cyclone research. *Meteorological Monographs*, 59: 15.1-15.68 [DOI: 10.1175/AMSMONOGRAPHS-D-18-0016.1]
- Fang H, Zhang C, Yan R K, Dong L, Yang J S and Zhang G S. 2024. Application of multi-source spaceborne microwave sensors observations in the analysis of intensity and wind structure of typhoon Koinu. *Acta Meteorologica Sinica*, 82(6): 816-826 (方贺, 张驰, 严睿恺, 董林, 杨劲松, 张国胜. 2024. 多源星载微波传感器在台风“小犬”强度和风场结构分析中的应用研究. *气象学报*, 82(6): 816-826) [DOI: 10.11676/qxxb2024.20240008]
- Foster R C. 2005. Why rolls are prevalent in the hurricane boundary layer. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 62(8): 2647-2661 [DOI: 10.1175/JAS3475.1]
- Fu L L, Lee T, Liu W T and Kwok R. 2019. 50 years of satellite remote sensing of the ocean. *Meteorological Monographs*, 59: 5.1-5.46 [DOI: 10.1175/AMSMONOGRAPHS-D-18-0010.1]
- Gahtan J., K. R. Knapp, C. J. Schreck, H. J. Diamond, J. P. Kossin, M. C. Kruk, 2024: International Best Track Archive for Climate Stewardship (IBTrACS) Project, Version 4r01. NOAA National Centers for Environmental Information. doi:10.25921/82ty-9e16
- Gao K and Ginis I. 2016. On the equilibrium-state roll vortices and their effects in the hurricane boundary layer. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 73(3): 1205-1222 [DOI: 10.1175/JAS-D-15-0089.1]
- He J Y, Chan P W, Choy C W, Cheung P, Chan Y W, Lam C C, He Y H, Rong P, Su H and Li Z M. 2024. Multi-platform observations of severe typhoon Koinu. *Earth and Space Science*, 11(3): e2023EA003366 [DOI: 10.1029/2023EA003366]
- Horinouchi T, Tsujino S, Hayashi M, Shimada U, Yanase W, Wada A and Yamada H. 2023. Stationary and transient asymmetric fea-

- tures in tropical cyclone eye with wavenumber-1 instability: case study for Typhoon Haishen (2020) with atmospheric motion vectors from 30-second imaging. *Monthly Weather Review*, 151(1): 253-273 [DOI: 10.1175/MWR-D-22-0179.1]
- Huang L Q, Li X F, Liu B, Zhang J A, Shen D L, Zhang Z H and Yu W X. 2018. Tropical cyclone boundary layer rolls in synthetic aperture radar imagery. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 123(4): 2981-2996 [DOI: 10.1029/2018JC013755]
- Lee J S, Jurkevich L, Dewaele P, Wambacq P and Oosterlinck A. 1994. Speckle filtering of synthetic aperture radar images: a review. *Remote Sensing Reviews*, 8(4): 313-340 [DOI: 10.1080/02757259409532206]
- Li X F, Zhang J A, Yang X F, Pichel W G, Demaria M, Long D and Li Z W. 2013. Tropical cyclone morphology from spaceborne synthetic aperture radar. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94(2): 215-230 [DOI: 10.1175/BAMS-D-11-00211.1]
- Ming F, Hong J and Wu Y R. 2006. Study on scalloping radiometric error in ScanSAR. *Journal of Electronics and Information Technology*, 28(10): 1806-1808 (明峰, 洪峻, 吴一戎. 2006. ScanSAR的Scalloping辐射误差研究. *电子与信息学报*, 28(10): 1806-1808)
- Morrison I, Businger S, Marks F, Dodge P and Businger J A. 2005. An observational case for the prevalence of roll vortices in the hurricane boundary layer. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 62(8): 2662-2673 [DOI: 10.1175/JAS3508.1]
- Mouche A, Chapron B, Knaff J, Zhao Y L, Zhang B and Combet C. 2019. Copolarized and cross-polarized SAR measurements for high-resolution description of major hurricane wind structures: application to Irma category 5 hurricane. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 124(6): 3905-3922 [DOI: 10.1029/2019JC015056]
- Mouche A A, Chapron B, Zhang B and Husson R. 2017. Combined co- and cross-polarized SAR measurements under extreme wind conditions. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 55(12): 6746-6755 [DOI: 10.1109/TGRS.2017.2732508]
- Nolan D S and Montgomery M T. 2000. The algebraic growth of wavenumber one disturbances in hurricane-like vortices. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 57(21): 3514-3538 [DOI: 10.1175/1520-0469(2000)057<3514:TAGOWO>2.0.CO;2]
- Sukhanovskii A and Popova E. 2020. The importance of horizontal rolls in the rapid intensification of tropical cyclones. *Boundary-Layer Meteorology*, 175(2): 259-276 [DOI: 10.1007/s10546-020-00503-2]
- Sun J Q, Du J Y, Hua F and Chen Y D. 2021. Data assimilation of CFOSAT scatterometer wind field and its application in typhoon forecast. *Advances in Marine Science*, 39(4): 492-507 (孙佳琪, 杜建廷, 华锋, 陈耀登. 2021. CFOSAT散射计风场资料同化在台风预报中的应用. *海洋科学进展*, 39(4): 492-507) [DOI: 10.3969/j.issn.1671-6647.2021.04.002]
- Sun Z G, Peng X J, Liu H X, Chen W R and Wang X P. 2023. Descalloping of GF-3 ScanSAR image based on self-attention mechanism and CycleGAN. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 34(12): 1279-1287 (孙增国, 彭学俊, 刘慧霞, 陈卫荣, 王鑫鹏. 2023. 基于自注意力机制和CycleGAN的高分三号ScanSAR图像的扇贝效应抑制. *光电子·激光*, 34(12): 1279-1287) [DOI: 10.16136/j.joel.2023.12.0076]
- Tang J, Zhang J A, Chan P, Hon K, Lei X T and Wang Y. 2021. A direct aircraft observation of helical rolls in the tropical cyclone boundary layer. *Scientific Reports*, 11(1): 18771 [DOI: 10.1038/s41598-021-97766-7]
- Tao J J, Hu X H and Li C K. 2012. The formation mechanism and change characteristics of the wavenumber-1 vortex Rossby wave in the typhoon. *Acta Meteorologica Sinica*, 70(6): 1200-1206 (陶建军, 胡向辉, 李朝奎. 2012. 台风中涡旋波1波扰动的形成机制及其变化特征. *气象学报*, 70(6): 1200-1206) [DOI: 10.11676/qxxb2012.101]
- Torres R, Snoeijs P, Geudtner D, Bibby D, Davidson M, Attema E, Potin P, Rommen B, Floury N, Brown M, Traver I N, Deghaye P, Duesmann B, Rosich B, Miranda N, Bruno C, L'Abbate M, Croci R, Pietropaolo A, Huchler M and Rostan F. 2012. GMES sentinel-1 mission. *Remote Sensing of Environment*, 120: 9-24 [DOI: 10.1016/j.rse.2011.05.028]
- Wang C, Vandemark D, Mouche A, Chapron B, Li H M and Foster R C. 2020. An assessment of marine atmospheric boundary layer roll detection using Sentinel-1 SAR data. *Remote Sensing of Environment*, 250: 112031 [DOI: 10.1016/j.rse.2020.112031]
- Wang S, Yuen K V, Yang X F and Zhang B. 2022. A nonparametric tropical cyclone wind speed estimation model based on dual-polarization SAR observations. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60: 4208213 [DOI: 10.1109/TGRS.2022.3188328]
- Yan J and Li H. 2024. Process analysis of rain and wind impacts of Typhoon Yagi on Hainan Island. *Journal of Agricultural Catastrophology*, 14(12): 103-105 (严谨, 李贺. 2024. 台风“摩羯”对海南岛风雨影响过程分析. *农业灾害研究*, 14(12): 103-105) [DOI: 10.3969/j.issn.2095-3305.2024.12.035]
- Zhan R F and Feng J. 2025. Causes and predictability of the “explosive” intensification of Super Typhoon Yagi after entering the South China Sea in 2024. *Science China Earth Sciences*, 68(4): 1298-1302 [DOI: 10.1007/s11430-024-1533-7]
- Zhang B, Zhu Z Q, Perrie W, Tang J and Zhang J A. 2021a. Estimating tropical cyclone wind structure and intensity from spaceborne radiometer and synthetic aperture radar. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 14: 4043-4050 [DOI: 10.1109/JSTARS.2021.3065866]
- Zhang G S, Li X F, Perrie W and Zhang J A. 2021b. Tropical cyclone winds and inflow angle asymmetry from SAR imagery. *Geophysical Research Letters*, 48(20): e2021GL095699 [DOI: 10.1029/2021GL095699]
- Zhang G S, Perrie W, Zhang B, Yang J S and He Y J. 2020. Monitoring of tropical cyclone structures in ten years of RADARSAT-2 SAR images. *Remote Sensing of Environment*, 236: 111449 [DOI: 10.1016/j.rse.2019.111449]
- Zhang J A, Katsaros K B, Black P G, Lehner S, French J R and Drennan W M. 2008. Effects of roll vortices on turbulent fluxes in the hurricane boundary layer. *Boundary-Layer Meteorology*, 128(2): 173-189 [DOI: 10.1007/s10546-008-9281-2]

Zhang K Y, Zhang B, Perrie W, Zheng G, Yang J S and Fang H. 2023. Assessment of thermal noise effect on wind speed retrieval accuracy using Sentinel-1 cross-polarized TOPSAR images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 61: 4208011 [DOI: 10.1109/TGRS.2023.3323260]

Zhang L, Hu T G, Zhang Y, Zhang D R, Li Y and Shen L D. 2020. Re-

search on typhoon wind profile information extraction based on sea surface wind field data of HY-2A microwave scatterometer. *Haiyang Xuebao*, 42(1): 102-112 (张路, 胡潭高, 张毅, 张登荣, 李瑶, 沈黎达. 2020. 基于 HY-2A 微波散射计海面风场资料的台风风剖面信息提取研究. *海洋学报*, 42(1): 102-112) [DOI: 10.3969/j.issn.0253-4193.2020.01.011]

Fine-scale analysis of multitemporal SAR-Derived sea surface winds for Typhoon Yagi (2024)

HU Qingqing¹, WANG Chen^{2,3,4}, LI Huimin³, LI Xiaoming^{2,3}

1. State Key Laboratory of Climate System Prediction and Risk Management, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;

2. Hainan Aerospace Technology Innovation Center, Wenchang 571333, China;

3. Aerospace Information Technology University, Ji'nan 250299, China;

4. Shanghai Typhoon Institute, China Meteorological Administration, Shanghai 100081, China

Abstract: Typhoon Yagi (No. 202411) formed east of the Philippines and moved northwestward. After entering the South China Sea, it rapidly intensified and reached super typhoon status. The storm subsequently unleashed severe winds, torrential rain, and catastrophic flooding across the Pearl River Delta. A thorough characterization of the fine-scale surface wind structure and its temporal evolution is fundamental to unraveling the physical mechanisms governing typhoon intensity variations and to enhancing the skill of operational forecasts. Conventional observing systems are generally insufficient for resolving fine-scale surface winds, while synthetic aperture radar (SAR) provides a unique capability for all-weather, high-resolution wind retrieval. The growing constellation of SAR satellites now enables multi-source collaborative observations that are critical for resolving the fine-scale wind-field evolution and boundary-layer structure of rapidly intensifying tropical cyclones.

The present study exploits a multi-temporal SAR dataset consisting of 13 images acquired by Sentinel-1, Radarsat-2, and RCM (all C-band) throughout the lifecycle of Typhoon Yagi, of which 9 scenes covering the inner core were retained for analysis spanning from tropical storm to super typhoon stages. Using the 500-m-resolution sea surface wind retrieval products, we performed land masking and applied Gaussian smoothing to suppress speckle noise, along with a uniform filter to effectively remove scalloping and inter-swath stitching artifacts inherent in wide-swath SAR imagery. In addition, we developed a multi-criterion automatic localization algorithm that identifies the typhoon center by detecting wind speed minima within the eyewall and accounting for the radial wind structure. Based on these processed wind fields, we extracted and analyzed the structural parameters during the evolution of Typhoon Yagi, including maximum wind speed, 95th and 99th percentile wind speeds, 50-kt and 64-kt wind radii, and the radius of maximum wind, and further applied azimuthal Fourier decomposition to quantify the wind field asymmetry.

The results reveal that during rapid intensification, the radius of maximum wind contracted markedly while maximum wind speed, 50 kt and 64 kt wind radii expanded considerably, and the winds became more asymmetric than before, all of which stabilized upon the storm's attainment of super typhoon intensity. Owing to its 500-m spatial resolution, the SAR-derived wind field allowed for the unambiguous identification of kilometer-scale roll vortices in the atmospheric boundary layer. Two-dimensional Fourier transform spectral analysis was employed to extract the dominant orientations and wavelengths of the roll vortices, revealing that these wavelengths are predominantly concentrated between 2 and 3 km, and that the roll orientations are broadly aligned with the ambient shear field of the typhoon. Furthermore, the spatial distribution of the rolls shows no significant variation between the severe typhoon and super typhoon stages, which is consistent with the prevailing understanding that the formation and maintenance of roll vortices are primarily governed by local wind-shear instability dynamics.

Despite limited sample size, this study demonstrates the unique potential of high-resolution SAR in capturing both axisymmetric structural evolution and kilometer-scale boundary-layer processes of typhoons. The established preprocessing and center-localization methodologies provide a robust framework for future large-sample multi-typhoon analyses, while underscoring the urgent need to incorporate boundary-layer roll effects into numerical parameterization schemes, given that current coarse-resolution models fail to resolve these fine-scale dynamical features essential to air-sea interaction.

Key words: Synthetic Aperture Radar (SAR), typhoon yagi, wind structure, wind radius, asymmetry, boundary-layer rolls

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 42576190, 42350003, 42476182); Shanghai Typhoon Research Foundation (No.TFJJ202110)