

基于 ASCAT 风场数据的热带气旋风圈半径的研究

董海啸, 冯佳俊, 张渊智*

(南京信息工程大学海洋科学学院, 江苏 南京 210044)

摘 要: 研究介绍了一种基于 ASCAT 散射计风场数据计算热带气旋风速达到 34 节和 50 节时风圈半径(R_{34} 和 R_{50})大小的方法,根据美国国家海洋和大气管理局提供的最佳路径数据,分析了 2013—2022 年发生在西北太平洋和北大西洋的热带气旋(TC)。结果表明:ASCAT 估算的 R_{34} 比最佳路径记录大 4.5% 左右,标准误差、均方根误差和相关系数分别为 8.6 km、52.4 km 和 0.88; R_{50} 比最佳路径记录小约 4.0%,标准误差、均方根误差和相关系数分别为 -15.4 km、39.6 km 和 0.74,说明本方法能够较好地估计 TC 风圈半径。两个海盆中 TC 强度(最大持续风速)与 R_{34} 的相关性较强(相关系数为 0.62~0.66),比 R_{50} (与 TC 强度的相关系数为 0.36~0.48)能够更好地表征 TC 的影响强度和尺度大小,也说明了从 ASCAT 风场得到的风半径信息对于监测和预报 TC 强度是有参考价值的。用 R_{34} 定义 TC 大小和分类统计,发现两个海盆上平均尺度的峰值出现在 9 月和 10 月,中型 TC 的总数量最多,3 种类型 TC 的变化趋势总体均呈现单峰分布,小型和中型 TC 的峰值出现在 9 月,大型 TC 的峰值滞后 1 个月。

关键词: ASCAT 散射计;热带气旋;最佳路径数据;34 节风圈半径

中图分类号: P732.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2023)06-0067-11

0 引言

环太平洋、大西洋大陆国家由于其独特和复杂的地理环境,自然灾害频发,其中热带气旋(Tropical Cyclone, TC)灾害^[1]以其发生频次高、危害程度重、影响范围广和灾害链长而备受关注。TC 是一种天气气候系统,体现了大气、海洋、陆地之间的相互作用,对 TC 特征结构(强度和尺度)的研究对于 TC 的监测和预报都有重要的指导意义。

随着卫星遥感技术的发展,其具备的高时空分辨率和大面积同步观测的优越性极大地降低人力、物力观测成本,在过去的几十年已被广泛应用于无法获得现场数据的极端条件下 TC 海表风场的研究。欧洲 Metop 气象业务极轨卫星携带的先进散射计 ASCAT(Advanced Scatterometer)能够提供覆盖

95% 以上热带海洋的每日风场资料,尤其是在 2009 年 11 月快速散射计 QuikSCAT(Quick Scatterometer)失效以后,ASCAT 成为 TC 预报和快速风矢量搜索算法^[2]的重要数据来源,并已广泛应用于气象服务^[3]。

ASCAT 风场数据已被广泛应用于海洋等领域研究。高留喜等^[4]利用 QuikSCAT 和 ASCAT 反演风场与浮标资料在中国南海北部进行统计检验分析,发现两套卫星资料在该区域有较好的适用性。RICCIARDULLI 等^[5]对来自气象卫星 Metop-A、Metop-B 和 Metop-C 的 ASCAT 风数据进行相互校准以获得稳定的气候数据记录。POLVERARI 等^[6]使用了 2009—2017 年经过再处理的 12.5 km 分辨率的 ASCAT-A 风数据进行分析,发现 ASCAT 对 15 m/s 以上风速存在低估情况,因此提出了一种基于 12 m/s 以上风速的校准方法。

收稿日期: 2022-09-22。

基金项目: 国家自然科学基金-广东联合基金重点项目(U1901215)。

作者简介: 董海啸(1999-),男,硕士在读,主要从事台风和海岸带相关研究。E-mail: 20211209002@nuist.edu.cn

*通信作者: 张渊智(1964-),男,教授,博士,主要从事海岸带环境与灾害遥感研究。E-mail: yzhang209@nuist.edu.cn

与此同时,基于 ASCAT 风场数据的 TC 研究也有一定的进展。WIMMERS 等^[7]基于 ASCAT 散射计在内的多源卫星遥感数据改进了 TC 中心定位算法 (ARCHER-2),对比美国国家飓风中心最佳轨迹结果,中心修正误差的中值范围为 24~49 km。LIU 等^[8]使用海洋二星 B 卫星 (HY-2B) 散射计数据 HSCAT 和 ASCAT 提出了一种直接采用最大散射计风速来评估 TC 强度的替代方法,评估了风半径 r_{17} (风速达到 17 m/s) 在确定 TC 强度上的可行性。NI 等^[9]针对合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar, SAR) 和 ASCAT CMOD7 数据在 TC 条件下进行风速优化,通过调整 ASCAT 风速来匹配 SAR 风速,可以使 ASCAT 风速的误差减小约 16.0 %。张圣雪等^[10]结合风云二号 F 星 (FY-2F)、风云二号 G 星 (FY-2G) 和 ASCAT 数据基于偏角方差 (Deviation Angle Variance, DAV) 技术建立了 TC 强度回归模型,对于验证集数据模型的均方误差为 4.66 m/s,平均绝对误差为 3.99 m/s,证实了该模型可以较好地估计 TC 强度。NI 等^[11]提出了一种将计算最大 1 min 持续风速作为 Rankine 涡旋模型衰减参数函数的方法,以获得更准确的 TC 强度估计,将此方法应用于 2016—2017 年的 ASCAT 风场数据后,结果优于 MAYERS-RUF 方法^[12]。

上述研究大多以 ASCAT 风场作为数据源,围绕 TC 中心位置、强度、TC 情况下风速产品优化校准等方面开展。不同强度的风圈具有不同的预报指示意义,34 节 (风速达到 17.5 m/s) 风圈半径 (R_{34}) 可以表示 TC 主体环流所带来的大风影响范围,一般以其大小来衡量 TC 尺度。SOISUVARN 等^[13]基于 ASCAT 风场气候数据研究了 2007—2012 年西北太平洋 (Northwest Pacific, NWP) TC 的 R_{34} 和 R_{50} (50 节的风圈半径),并提出了一种新的风圈半径表征技术,本文将在此基础上对 ASCAT 数据在计算 TC 风圈半径方面进行进一步评估,尝试基于 ASCAT 风场数据计算 2013—2022 年 5—11 月发生在西北太平洋和北大西洋 (North Atlantic, NA) TC 的 R_{34} 和 R_{50} 以扩充研究时间序列,采用 Pearson 相关分析法确定 R_{34} 定义 TC 大小的可行性并对所有 TC 大小进行分类,对 10 年间 TC 风圈半径的变化进行统计分析。

本文将在第 1 节中对所使用的数据进行介绍;

在第 2 节中对最佳路径数据和 ASCAT 数据进行时空窗匹配提取 TC 风场信息,通过 TC 案例来展示本文所采用的基于 ASCAT 风场数据 R_{34} 和 R_{50} 的计算方法;在第 3 节中利用最佳路径数据对结果进行比较,用 ASCAT 数据对 TC 大小进行定义,并对 10 年间北大西洋和西北太平洋所有 TC 样本的 R_{34} 和 R_{50} 进行统计分析;最后在第 4 节中进行总结。

1 数据

1.1 ASCAT 风场数据

ASCAT 是欧洲空间局 (European Space Agency, ESA) 发射的 Metop 气象业务极轨卫星上携带的仪器之一,由欧洲气象卫星应用组织 (EUMETSAT) 使用。Metop-A 是 Metop 系列 3 颗卫星中的第一颗,于 2006 年 10 月 19 日发射, Metop-B 于 2012 年 9 月 17 日发射, Metop-C 于 2018 年 11 月 7 日发射。ASCAT 向海面发射特性良好的微波能量脉冲,并接收和记录产生的回波以传输到地面站,然后导出有关风速和风向的数据,其具备更好的分辨率和超过其前身 (ERA 地球资源卫星 ERS-1 和 ERS-2 上的有源微波仪器) 两倍的覆盖范围,可以在短短 5 d 内实现近乎全球的覆盖范围。

ASCAT L2B 海岸风场产品是由荷兰皇家气象研究协会 (Royal Netherlands Meteorological Institute, KNMI) 在 L1B 级产品的基础上再加工而成,空间分辨率为 12.5 km,采用改进的地球物理模型函数 CMOD7 GMFs 将风矢量映射到后向散射信号值中,本文下载的数据分别来自 Metop-A、Metop-C 卫星,时间范围为 2013—2022 年的 5—11 月,空间范围为西北太平洋和北大西洋。

1.2 最佳路径数据

美国国家海洋和大气管理局 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) 提供了最佳路径的 TC 数据集,最佳路径数据来源于许多机构和数据集。在 TC 形成期间,气象预报员对 TC 的历史位置和强度进行观测,同时预测其未来的位置和强度。在风暴结束后 (通常在当年台风/飓风季结束后),预报员收集所有可用的信息 (来自陆地、浮标、船只等的相关报告、雷达数据、飞机数据和卫星数

据等),利用这些信息对 TC 的路径和强度做出最佳估计,因此形成“最佳路径”。随着时间的推移和技术的发展,相关机构对所有留存的数据进行再分析并更新较旧的最佳路径数据集。本论文选取美国源机构观测的时间范围为 2013—2022 年的 5—11 月发生在 NWP 和 NA 编号入档的 TC 最佳路径数据,包括每个观测时刻(世界时,下同)的风眼位置、中心最大风速、4 个象限的 R_{34} 、 R_{50} 和 TC 名称。计算数据集中的 R_{34} 和 R_{50} 时,对所有地理象限(NW、NE、SW、SE 方向)的风圈半径进行方位平均。

2 研究方法

2.1 风速优化

ASCAT CMOD7 模型数据在 TC 发生时低估风速,CMOD7D^[6]模型是 CMOD7 模型的多项式变换。CMOD7D 公式为:

$$V_{7D} = 0.0095 * V_7^2 + 1.52 * V_7 - 7.6 \quad (1)$$

式中:下标 7D 和 7 分别代指 CMOD7D 和 CMOD7 模型。使用该模型可对原始风场 ≥ 12 m/s 的风速进行优化, V_{7D} 和 V_7 分别表示优化后和原始风场的风速。在相对平静的海域,即 $V_7 < 12$ m/s 时可忽略 V_{7D} 的值,即 V_{7D} 值被 V_7 取代。数据处理时需要将风矢量分解成水平分量(U)和垂直分量(V),计算公式为:

$$U = \sin(\text{direction}) \cdot \text{speed} \quad (2)$$

$$V = \cos(\text{direction}) \cdot \text{speed} \quad (3)$$

式中:风向变量 direction 的单位是($^{\circ}$),风速 speed 的单位是 m/s。

2.2 时空窗匹配

由于最佳路径数据的时间间隔为 3 h,通过时空

窗匹配可过滤出 ASCAT L2B 数据中的 TC 风场。首先对最佳路径数据进行区域筛选,保留路径在 NWP 和 NA 海盆上的 TC;然后进行时间窗匹配,利用最佳路径数据中每个 TC 的时间与 ASCAT 每日风场时间匹配(设置 1.5 h 阈值),同时以最佳路径数据中每个 TC 路径中心位置为圆心,500 km 为搜索半径筛选出卫星数据中的 TC 风场。

在进行时空窗匹配时,为了提高 R_{34} 和 R_{50} 计算的准确性,对 ASCAT 风场数据按以下标准进行二次筛选:① TC 中心必须被刈幅覆盖,中间和边缘的距离必须大于 1° ;② TC 涡流结构必须有超过 60% 被刈幅覆盖;③ 目标区域内相邻网格点没有明显的风向冲突问题(风向模糊),存在明显 TC 涡流的逆时针结构。

最终获得 2013—2022 年的 5—11 月 NWP 和 NA 海盆的 ASCAT 风场共 1 212 幅,对应形成于 NA 的 TC 79 个和 NWP 的 TC 132 个,共 211 个 TC 事件。匹配得到的 TC 在其整个生命周期每个观测时刻的最大风速按照 Saffir-Simpson 等级(即热带低压(Tropical Depression, TD)、热带风暴(Tropical Storm, TS)、飓风等级 1—5(Hurricane 1—5, H1—5))进行分类,结果见图 1。

为了方便对每个 TC 进行分类编号归档,我们按照在同一个 TC 的生命周期内,ASCAT 散射计对其重复观测的次数进行进一步细化分类,结果见图 2。经过时空窗匹配再筛选之后的 TC 数据集中,ASCAT 散射计对单个 TC 的重复观测次数大部分集中在 1~6 次,共形成 142 个 TC,占总数的 67.3%,每个重复观测次数与其对应的 TC 个数相乘再累加后对应的数值 1 212 则是进行时空窗匹配和二次筛选的 ASCAT 风场的幅数。

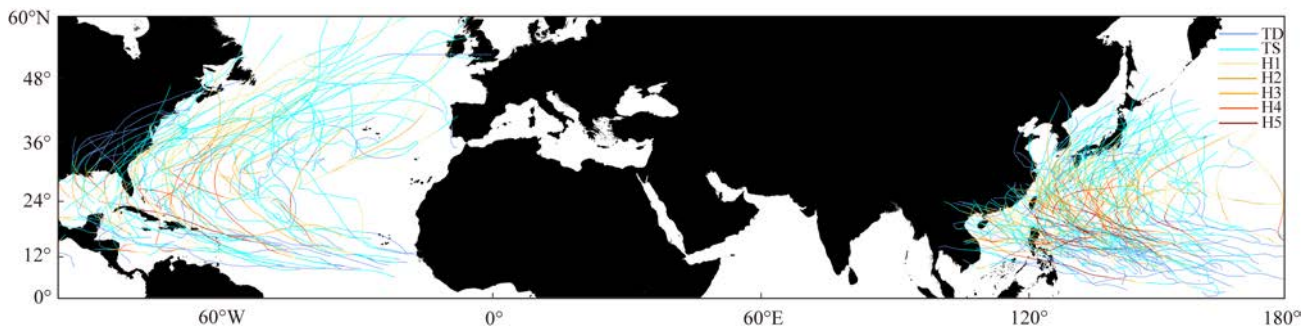


图1 2013—2022年5—11月NWP和NA的TC最佳路径

Fig.1 Best Track of TC during May and November in NWP and NA in 2013—2022

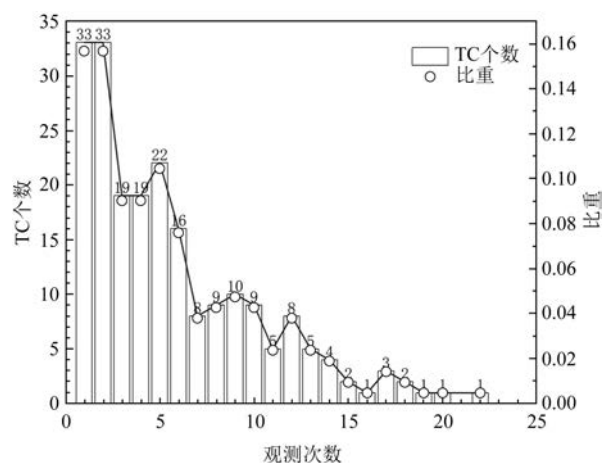


图2 TC-ASCAT观测次数分布

Fig.2 Distribution of TC-ASCAT observations

进行案例研究的主要目的是验证 R_{34} 和 R_{50} 计算方法在卫星散射计观测资料中应用的适用性,因

此案例选取遵循在同一个TC的生命周期内散射计尽可能多地对其进行重复观测的原则,最终选取观测次数较多的1705号台风“奥鹿”(18幅)作为TC案例以便更好地进行本文风圈半径计算方法的结果展示。

ASCAT分别于2017年7月25日22时12分、28日11时、31日23时30分以及8月3日00时27分观测到了较为完整的台风“奥鹿”的海面风场,结果见图3。

2.3 风圈半径

TC大小是研究其结构的一个重要参数,通常被定义为最外层闭合等压线的平均半径(Radius of the Outermost Closed Isobar, ROCI)和海面风场风速为15 m/s或17 m/s时的平均半径^[14]。但MERRILL^[15]发现,ROCI会随季节和地区发生变化

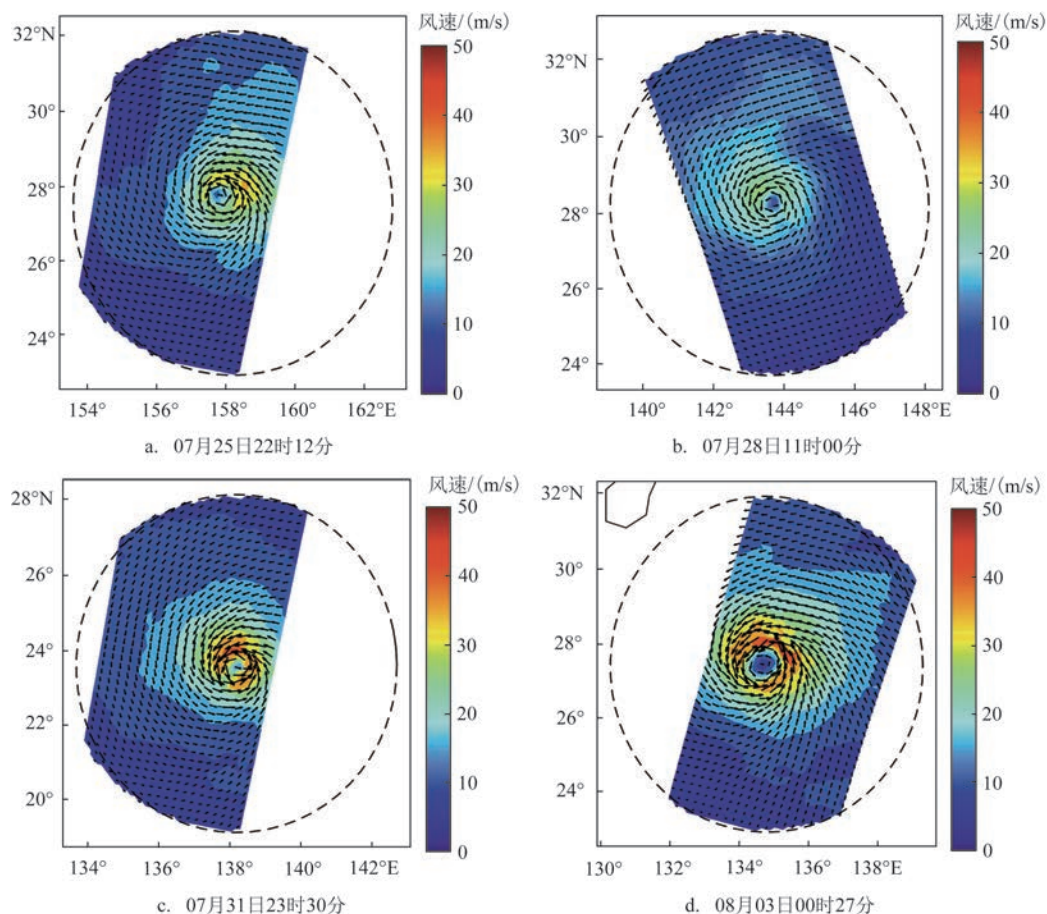


图3 ASCAT观测的台风“奥鹿”风场

Fig.3 Wind field of Typhoon "Noru" observed by ASCAT

且与 TC 强度的相关性较弱。一般情况下,TC 的风圈半径通常在海面风场风速达到 34 节、50 节和 64 节时被观测记录到^[13],3 种半径分别对应于大风级、风暴级和台风/飓风级的 TC 强度。经过时空窗匹配之后,我们发现上述研究中 34 节和 50 节风圈半径的样本量分别为 1 212 和 439,而 64 节风圈半径的样本量较少,这可能是由于 ASCAT 相邻观测刈幅之间相距较远减少了匹配的机会以及风场数据对实际风速的低估导致的。

考虑上述因素,本文选用 R_{34} 来反映 TC 的结构特征和强度大小,并采用等方位角平均的方法基于 ASCAT 海面风场计算 TC 的 34 节和 50 节的风圈半径。具体来说,首先对最佳路径数据的风眼位置进行时间插值以确定 ASCAT 风场对应时刻的 TC 中心;其次,设定正负 1 节的风速阈值来绘制匹配风场的 34 节和 50 节风速等值廓线,结果见图 4;然后,以

时间插值确定的 TC 中心为准,将空间分为 8 个方位角(见图 5a),通过空间双线性插值获取风速等值廓线上距离每个方位角最近两个点的连线与方位角的交点,并绘制风速-半径剖面(见图 5b);最后,计算各个交点与风眼的距离获得各方位角上的 34 节和 50 节风圈半径 D_i 和 S_i ($i=1, 2, \dots, 8$),计算公式为:

$$R_{34} = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 D_i \quad (4)$$

$$R_{50} = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 S_i \quad (5)$$

式中:下标代表每个方位,将方位角进行平均后可得出半径计算公式,并用 R_{34} 和 R_{50} 表征该时刻 TC 尺度大小。

从图 4 可以看出,TC 风场在实际情况下往往具有非对称特征,高风速区呈现不均匀分布,集中在

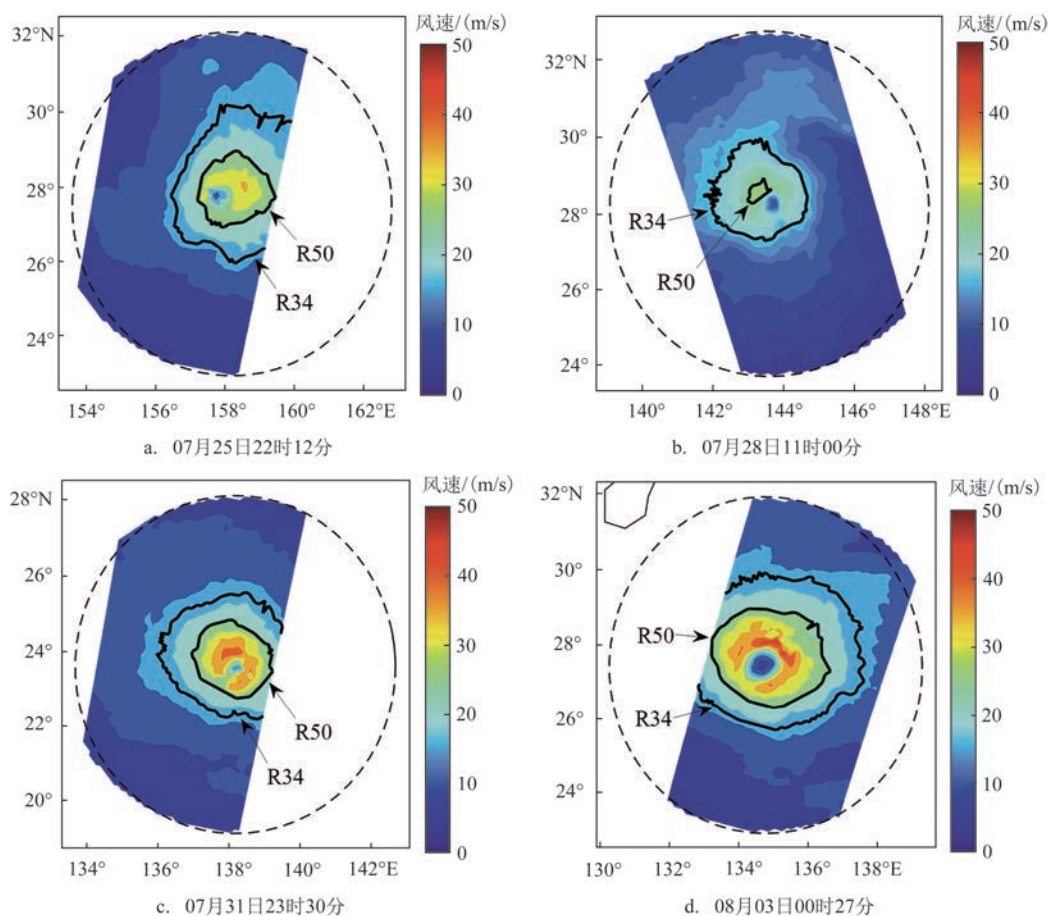


图4 台风“奥鹿”34节和50节风速等值廓线

Fig.4 34-knot and 50-knot wind speed contour of Typhoon "Noru"

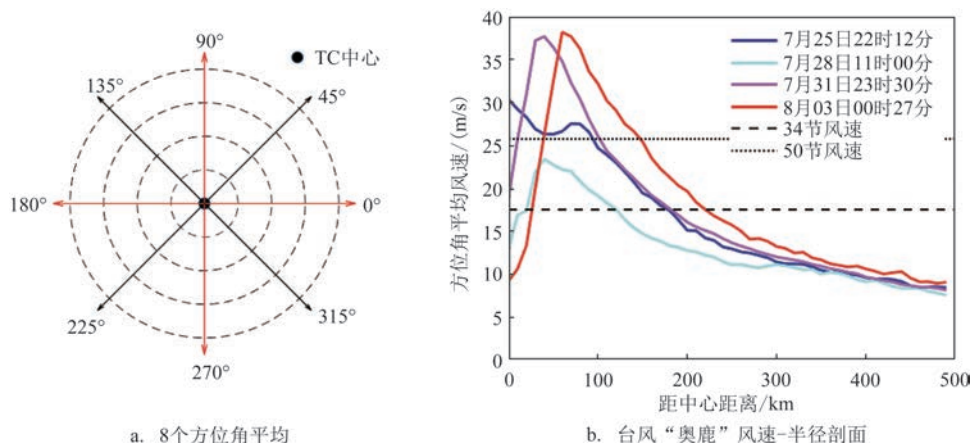


图5 R34和R50计算方法

Fig.5 The method of calculating R34 and R50

环流某一侧,圆对称性结构较差,每个方位角的风圈半径是不相等的;当34节风圈较大时,由于刈幅限制,等值廓线不闭合,部分方位角上的风圈半径无法计算;由于TC风眼附近存在低风速区,一个方位角上存在多个符合风速阈值内的风速。

针对以上情况,我们优化了计算程序,将缺失的方位角半径设为缺测值,不计入方位角平均计算之中。真实环境下能够较完整呈现台风“奥鹿”结构的ASCAT风场数据中的风速矢量往往是以离散格点形式分布的,这可能是由于雷达测量噪声引起风速廓线伪振荡导致的,所以通过设定阈值定义风速区间来绘制风场风速等值线的方法得到的廓线边缘是粗糙的,使用方位角平均将风速等值廓线圆对称化,可以消除大部分与TC运动相关的不对称^[16],同时也便于后续的研究。

图5b是台风“奥鹿”在4个时刻各方位角风速随距离变化的风剖面曲线,在其生成和发展阶段,风速-半径剖面较为平坦;随着台风进入成熟阶段,其逐渐发展出风眼结构且逐渐增大,风速-半径剖面越来越陡峭,呈单“峰”分布且风速“峰”越来越突出。此时,34节和50节风速等值线出现多个交点,在计算各方位角上的风圈半径值时,需要排除风眼内的较小值,保留风眼外的较大值作为该方位角上的有效值。

2.4 比较方法

计算时空窗匹配所得TC的R34和R50与对应

最佳路径数据的观测值对比,采用偏差法、均方根误差法和相关系数分析法作为衡量比较结果的标准。计算公式为:

$$\text{偏差 Bias} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - X_i) \quad (6)$$

$$\text{均方根误差 RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - X_i)^2} \quad (7)$$

$$\text{相关系数 CC} = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})(X_i - \bar{X})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}} \quad (8)$$

式中: X_i 、 Y_i 分别表示最佳路径数据中风圈半径的观测值和基于ASCAT风场的计算值, i 代表每个数据的编号, \bar{X} 、 \bar{Y} 分别对应于 X_i 、 Y_i 数据集的均值; n 为样本数。Bias表示两个数据序列的偏离程度,正偏差表明计算值高于观测值,即高估,反之为负偏差,低估。RMSE值始终为正且对异常值反映敏感,越接近0表明计算方法越适用。CC值表示两个序列的相关程度,CC=1表示两变量完全线性相关,CC=0则表示两变量完全不相关,一般情况下,CC>0.8表示两变量相关度较好。

3 结果与讨论

3.1 结果比较

基于第2节的方法将NWP和NA海盆2013—2022年的5—11月的所有TC(见图1)结合在一起构

建 ASCAT 风场 $R34$ 和 $R50$ 数据集,并与最佳路径数据进行对比,结果见图 6a 和 6b。 $R34$ 和 $R50$ 的样本总数分别为 1 212 和 439, $R34$ 和 $R50$ 的 Bias 分别为 8.6 km 和 -15.4 km, RMSE 分别为 52.4 km 和 39.6 km。ASCAT 观测的 $R34$ 比最佳路径大 4.5% 左右,差异误差约为 12.3%;而 ASCAT 观测的 $R50$ 比最佳路径小约 4.0%,差异误差约为 25.4%,这个结果优于 SOISUVARN 等^[13]计算的 $R34$ 和 $R50$ 与最佳路径的比较结果,其对应的差异值和误差分别为 3%、36%、28% 和 39%。

ASCAT 估算的 $R34$ 和 $R50$ 与最佳路径数据的 CC 值分别为 0.88 和 0.74 ($p < 0.01$),相关性较高。图 6c 和 6d 展示了 ASCAT 风半径和最佳路径数据的线性回归结果, $R34$ 和 $R50$ 的拟合关系分别为 $y = 1.03x$ 和 $y = 0.87x$,拟合模型的判定系数 (R^2) 分别为 0.77 和

0.54,表明回归直线对最佳路径数据的拟合程度较好,且 $R34$ 比 $R50$ 的拟合结果更接近观测值,相关性更加显著。

由于 Metop-A、Metop-B、Metop-C 是极轨卫星,在 2.2 节时空窗匹配时也发现其中低纬度的经过频率很低,ASCAT 对所有 TC 样本的单日观测次数最多为 1~2 次,且当 TC 较大时,由于刈幅限制,ASCAT 通常只能观测到部分环流结构(在图 4 中体现为 34 节风速等值风圈不闭合),因此,对 TC 结构不完整的风场进行方位角平均可能会引起 $R34$ 偏大;另一方面,由于 ASCAT 对高风速存在低估^[6],这会引起强度达到风暴及以上的 TC 的 50 节风圈比真实情况小,因此 $R50$ 呈现负偏差,以上可能是导致基于 ASCAT 风场的计算结果与最佳路径存在差异的原因。

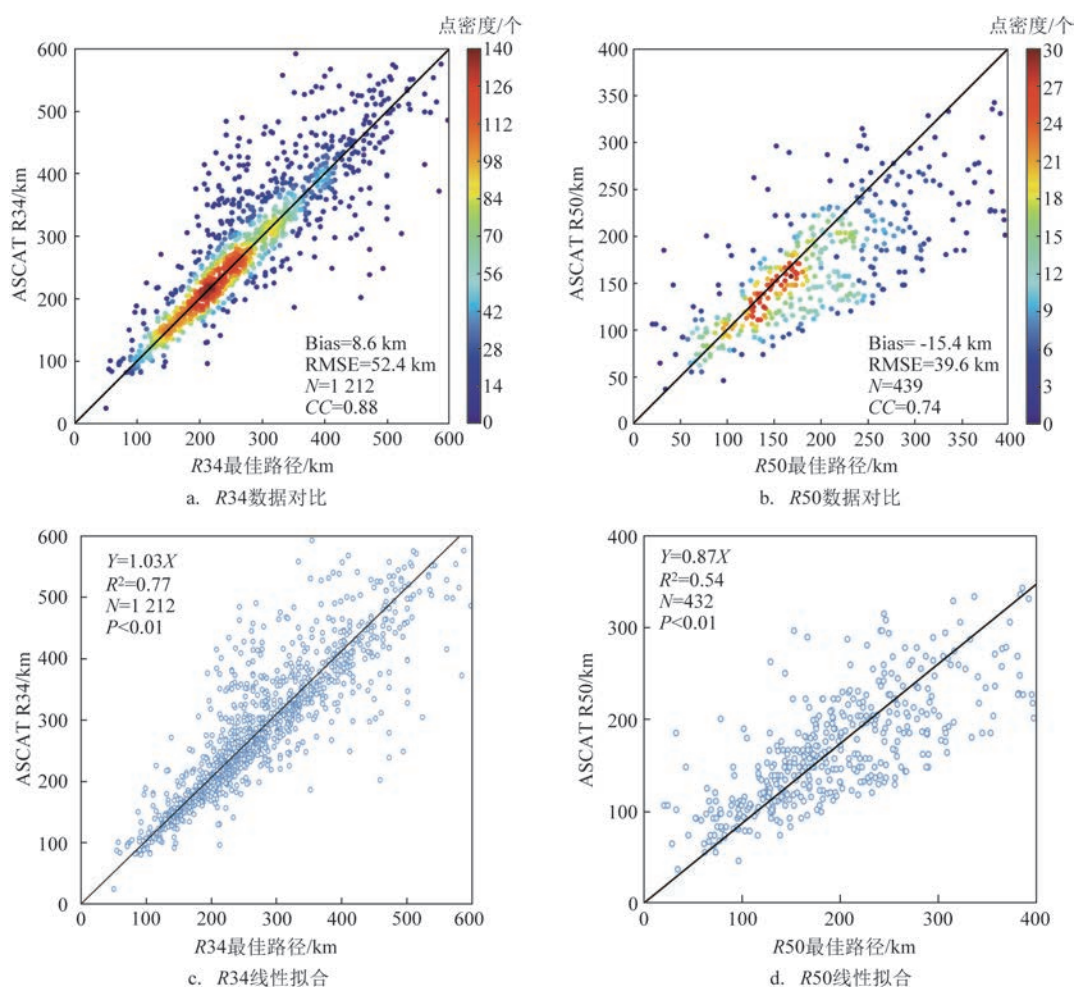


图6 最佳路径和ASCAT风圈半径统计比较

Fig.6 Statistical comparison of $R34$ and $R50$ between Best Track and ASCAT data

3.2 R34表征TC尺度

在2.3节中已提出用 $R34$ 来反映TC的结构特征和强度大小,虽然C波段ASCAT对降雨相当不敏感,但是由于在高风速情况下风速数据存在不确定性,而且散射计测量的风速和最佳路径数据的时间尺度不一样,本节采用最佳路径的1 min持续最大风速 V_{\max} 来表征TC强度,检验与TC大小相关的4个潜在相关环境变量(V_{\max} 、纬度、TC移动速度和风暴年龄)对ASCAT估算的TC风圈半径的影响程度,对这4个参数和TC风圈半径($R34$ 和 $R50$)进行Pearson相关分析,结果见表1。

结果表明,在这4个参数中,最大风速与 $R34$ 和 $R50$ 的总体相关性最强($CC=0.36\sim 0.66$),与 $R50$ 在NWP和NA海盆中的估计($CC=0.36\sim 0.48$)相比, $R34$ 与最大风速具有更强的相关性($CC=0.62\sim 0.66$)。在NWP海盆中,纬度与风圈半径的相关性较小($CC=0.13\sim 0.18$),在NA海盆中具有弱相关性($CC=0.25\sim 0.26$),同样在NWP中TC移动速度与风圈半径的相关性很小($CC=0.07\sim 0.10$),在NA中相关性也较弱($CC=0.16\sim 0.28$)。值得注意的是,不同于纬度和TC的移动速度,TC风暴年龄与各海盆的风圈半径相关性增强(在NWP的 $CC=0.28\sim 0.33$;在NA的 $CC=0.35\sim 0.37$),KIM等^[17]认为这是由于TC风暴年龄与最大风速和纬度之间的相关性较强导致的。

以上结果表明,基于ASCAT风场计算的 $R34$ 变化趋势与最佳路径最大风速的变化趋势基本一致,这也说明了散射计的 $R34$ 值比 $R50$ 能够更好地表征TC的影响强度和范围,因此,本文选用 $R34$ 值来反映TC的结构特征和定义其强度大小(尺度)的方法是具有可行性的。此外,本文发现TC的大小($R34$)和其对应的强度之间存在明显正相关($CC=0.62\sim 0.66$),这与胡邦辉等^[18]的结论相似,以上结果也体现了从ASCAT风场得到的风半径信息,在临近预报或短期预报方面对于分析TC强度是有参考价值的。

3.3 TC大小分类和分布

2.3节中已经介绍过,计算 $R34$ 和 $R50$ 时将研究的TC都看作具有对称性,使用方位角平均将风速等值廓线圆对称化可以消除大部分与TC运动相关的不对称。本节对2013—2022年的5—11月ASCAT探测到的NWP和NA海盆上的有效TC数据进行分类,小型和大型TC的分类节点采用 $R34$ 的均值(R)加减标准差(s)来定义,得到的值分别为 1.54° 纬度和 3.51° 纬度,因此将小于 1.5° 纬度的TC归为小型,大于 3.5° 纬度的TC归为大型,中间为中型。

表2总结了MERRILL^[15],日本气象厅(Japan Meteorological Agency, JMA)和联合台风预报中心(Joint Typhoon Warning Center, JTWC)以及梁梅等^[19]对TC进行分类的结果,采用ROCI分类和基于

表1 NWP、NA和整个研究区TC风半径($R34$ 、 $R50$)与TC尺度相关环境变量之间的Pearson相关系数

Tab.1 Pearson's correlation coefficients between TC wind radii ($R34$, $R50$) and TC size-related environmental variables in NWP, NA and the entire study area

TC风圈半径	环境变量	CC		
		NWP	NA	整个研究区
$R34$	最大风速/(m/s)	0.66	0.62	0.64
	中心纬度/ $^\circ$ N	0.18	0.25	0.19
	TC移动速度/(m/s)	0.07	0.28	0.20
	TC风暴年龄/d	0.28	0.35	0.30
$R50$	最大风速/(m/s)	0.48	0.36	0.44
	中心纬度/ $^\circ$ N	0.13	0.26	0.23
	TC移动速度/(m/s)	0.10	0.16	0.15
	TC风暴年龄/d	0.33	0.37	0.37

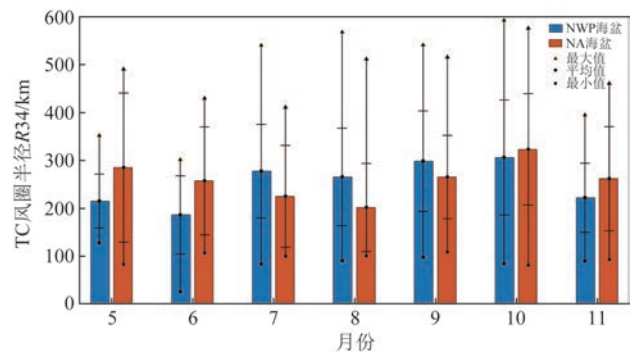
表2 不同研究人员和气象中心对TC大小的分类

Tab.2 TC size categories used by different researchers and meteorological centers

分类依据	来源	时间	地区	类型/°纬度		
				小型	中型	大型
根据最外侧闭合等压线 ROCI	MERRILL ^[15]	1961—1969	NWP、AO	<3	3~5	>5
	JMA 和 JTWC	—	NWP、SP、IO	<3	3~6	>6
根据 17 m/s 风圈半径 SiR34	梁梅等 ^[19]	1980—2016	NWP	<1.2	1.2~2.1	>2.1
根据 34 节风圈半径 R34	本研究	2013—2022	NWP、NA	<1.5	1.5~3.5	>3.5

等值风速的平均半径进行定义的结果存在差异。本文对小型 TC 的分类节点(1.5°纬度)与梁梅等(1.2°纬度)相近,由于 ROCI 会随季节和地区变化且与 TC 强度的相关性较弱,因此 MERRILL、JMA 和 JTWC 对小型和大型 TC 的分类结果偏大(分类节点约为 3°纬度和 5°~6°纬度)。

图 7 为 2013—2022 年的 5—11 月 NWP 和 NA 海盆上 ASCAT 估算的 R34 月平均变化及标准差区间。标准差与月均值分布基本一致,两个海盆上平均尺度的峰值出现在 9 月(NWP 的 R34 为 297.8 km)和 10 月(NWP 的 R34 为 305.6 km; NA 的 R34 为 322.5 km),同时 R34 最大值均在 10 月(NWP 的 R34 为 591.9 km; NA 的 R34 为 575.4 km),之后 11 月、5 月、6 月呈下降趋势且 NWP 的降幅更大,随着夏季临近(7 月、8 月),NWP 的增长趋势平稳,而 NA 的平均尺度低值出现在 8 月(R34 为 201 km),NWP 上月均值的最大值出现在 10 月,与梁梅等^[19]根据 37 a (1980—2016 年)数据集分析得到的 TC 尺度季节变



注:误差条表示平均值的标准差区间

图7 2013—2022 年 ASCAT R34 月平均变化趋势

Fig.7 Monthly average variation trend of ASCAT R34 during 2013—2022

化的结果一致。

对 ASCAT 的 TC 数据进行大小分类的月分布结果见图 8,其中中型 TC 总数量最多,在 NWP 和 NA 所占比重分别为 68% 和 66.7%,NWP 的中型 TC 主要分布在 8—10 月,而 NA 则集中分布在 9—10 月。

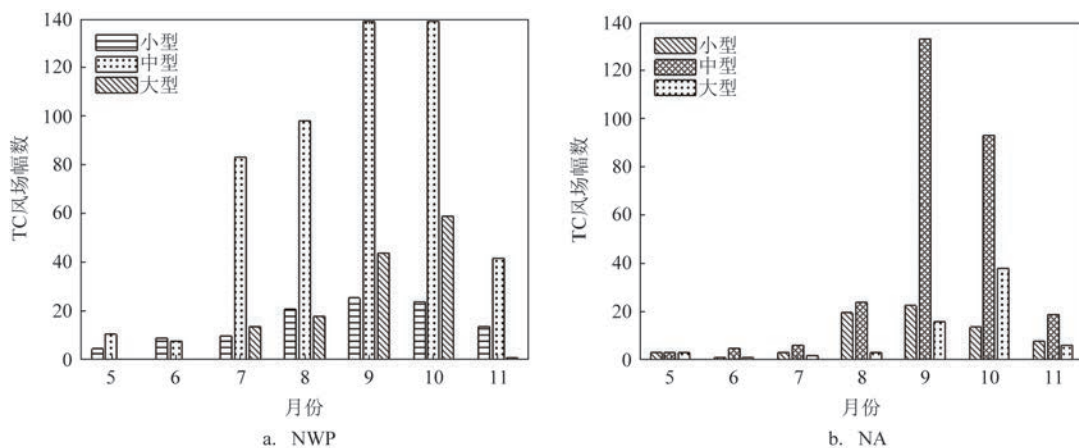


图8 2013—2022 年两个海盆上 ASCAT TC 的 3 种类别的时间分布

Fig.8 Time distribution of the ASCAT TC in three categories during 2013—2022 over the two basins

NWP的大型TC数量在7—10月呈显著增势且在10月达到峰值,其中9月和10月的数量超过小型TC,而NA的大型TC在9月和10月明显增长,10月出现峰值且数量超过小型TC。两个海盆上3种类型TC的变化趋势总体均呈现单峰分布,小型和中型TC的峰值出现在9月,大型TC峰值滞后1个月,但小型和大型TC的总数相差不大,其在NWP上分别为14.3%和17.7%,NA上分别为17%和16.3%,这与LIU等^[20]的研究结果一致。

4 结论

本文基于ASCAT风场数据,采用了方位角平均估计TC风场R34和R50的计算方法,探索了ASCAT在研究TC风圈半径的应用,并与最佳路径数据进行比较,同时对结果的误差做了分析,最后对西北太平洋和北大西洋上2013—2022年的5—11月的TC大小进行分类和统计分析。主要结论如下:

①对于匹配的所有TC样本,R34比最佳路径大4.5%左右,差异误差约为12.3%,R50比最佳路径小约4.0%,差异误差约为25.4%;R34和R50的Bias分别为8.6 km和-15.4 km, RMSE分别为52.4 km和39.6 km,与最佳路径数据的CC值分别为0.88和0.74($p < 0.01$),相关性较高。与其他已有方法比较,结果表明本方法能够较好地估计TC风圈半径。

②在风圈半径与TC大小潜在相关环境变量的相关性分析中,最大风速与R34和R50的总体相关性最强($CC=0.36 \sim 0.66$),R34与最大风速在NWP和NA海盆中具有较强的相关性($CC=0.62 \sim 0.66$)。ASCAT散射计的R34值比R50能够更好地表征TC的结构特征和尺度大小,在临近预报或短期预报方面对于分析TC强度是有参考价值的。

③从2013—2022年NWP和NA海盆上R34的月平均变化趋势来看,TC平均尺度的峰值出现在9月(NWP的R34为297.8 km)和10月(NWP的R34为305.6 km;NA的R34为322.5 km);两个海盆TC分类的月分布结果表明,中型TC的总数量最多,在NWP和NA所占比重分别为68%和66.7%,3种类型TC的变化趋势总体均呈现单峰分布,小型和中型TC的峰值出现在9月,大型TC峰值滞后1个月,

但小型和大型TC的总数量相差不大。

由于需要将最佳路径记录和ASCAT风场相匹配,受数据时空范围的限制,匹配案例数目较少。下一步的工作将使用更多源的数据集获取更多的匹配案例来验证和优化本文方法,同时拓展研究时间序列,建立TC尺度大小的气候学统计分析。

致谢:本文使用的ASCAT近海岸风场数据由欧洲气象卫星组织(EUMETSAT)海洋与海冰卫星应用设施(OSI SAF)提供,本论文是第一作者本科毕业设计的部分内容,在完成本科毕业设计期间还得到张彪教授的建议和指导。本文是在原毕业设计的基础上经过进一步修改、补充、计算和扩充后完成,在此一并致谢。

参考文献:

- [1] POWELL M D, REINHOLD T A. Tropical cyclone destructive potential by integrated kinetic energy[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2007, 88(4): 513-526.
- [2] VOGELZANG J, STOFFELEN A, VERHOEF A, et al. On the quality of high-resolution scatterometer winds[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2011, 116(C10): C10033.
- [3] STOFFELEN A, KUMAR R, ZOU J H, et al. Ocean surface vector wind observations[M]//BARALE V, GADE M. *Remote Sensing of the Asian Seas*. Cham: Springer, 2019.
- [4] 高留喜, 朱蓉, 常蕊. QuikSCAT和ASCAT卫星反演风场在中国南海北部的适用性研究[J]. *气象*, 2014, 40(10): 1240-1247.
GAO L X, ZHU R, CHANG R. Applicability research using QuikSCAT and ASCAT satellite inversion wind data in the northern part of South China Sea[J]. *Meteorological Monthly*, 2014, 40(10): 1240-1247.
- [5] RICCIARDULLI L, MANASTER A. Intercalibration of ASCAT scatterometer winds from MetOp-A, -B, and -C, for a stable climate data record[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(18): 3678.
- [6] POLVERARI F, PORTABELLA M, LIN W M, et al. On high and extreme wind calibration using ASCAT[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, 60: 4202210.
- [7] WIMMERS A J, VELDEN C S. Advancements in objective multisatellite tropical cyclone center fixing[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2016, 55(1): 197-212.
- [8] LIU S Q, LIN W M, PORTABELLA M, et al. Characterization of tropical cyclone intensity using the HY-2B scatterometer wind data[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(4): 1035.
- [9] NI W C, STOFFELEN A, REN K J, et al. SAR and ASCAT tropical cyclone wind speed reconciliation[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(21): 5535.

- [10] 张圣雪, 赵朝方. 西北太平洋热带气旋强度的多源卫星遥感研究[J]. 海洋湖沼通报, 2020(1): 169-182.
ZHANG S X, ZHAO C F. Study of tropical cyclone intensity over the Northwest Pacific Ocean based on multi-satellite remote sensing data[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2020 (1): 169-182.
- [11] NI W C, STOFFELEN A, REN K J, et al. Tropical cyclone intensity estimation from spaceborne microwave scatterometry and parametric wind models[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2022, 15: 4719-4729.
- [12] MAYERS D, RUF C. Estimating the true maximum sustained wind speed of a tropical cyclone from spatially averaged observations[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2020, 59(2): 251-262.
- [13] SOISUVARN S, OUDOMYING S. Characterization of the tropical cyclones wind radii in the North Western Pacific Basin using the ASCAT winds data products[C]//Proceedings of 2018 Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS-Toyama). Toyama: IEEE, 2018: 1428-1433.
- [14] CHAN K T F, CHAN J C L. Size and strength of tropical cyclones as inferred from QuikSCAT data[J]. Monthly Weather Review, 2012, 140(3): 811-824.
- [15] MERRILL R T. A comparison of large and small tropical cyclones [J]. Monthly Weather Review, 1984, 112(7): 1408-1418.
- [16] SHEA D J, GRAY W M. The Hurricane's Inner Core Region. I. Symmetric and asymmetric structure[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1973, 30(8): 1544-1564.
- [17] KIM H J, MOON I J, OH I. Comparison of tropical cyclone wind radius estimates between the KMA, RSMC Tokyo, and JTWC[J]. Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences, 2022, 58(4): 563-576.
- [18] 胡邦辉, 谭言科, 王举. 热带气旋海面最大风速半径的计算[J]. 应用气象学报, 2004, 15(4): 427-435.
HU B H, TAN Y K, WANG J. Calculation of maximum wind velocity radius of tropical cyclone on sea surface[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2004, 15(4): 427-435.
- [19] 梁梅, 梁沛乐, 范伶俐, 等. 1980—2016年西北太平洋热带气旋尺度与强度关系[J]. 广东海洋大学学报, 2022, 42(3): 45-52.
LIANG M, LIANG P L, FAN L L, et al. Relationship between tropical cyclone scale and intensity over the Northwest Pacific from 1980 to 2016[J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2022, 42(3): 45-52.
- [20] LIU K S, CHAN J C L. Synoptic flow patterns associated with small and large tropical cyclones over the western North Pacific [J]. Monthly Weather Review, 2002, 130(8): 2134-2142.

Study on wind radius of tropical cyclone based on ASCAT wind field data

DONG Haixiao, FENG Jiajun, ZHANG Yuanzhi*

(School of Marine Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: This paper introduces a method for calculating the wind radius (34-knot and 50-knot wind radii, R_{34} and R_{50}) when the wind speed of a tropical cyclone reaches 34 knots and 50 knots based on the ASCAT scatterometer wind field data. Tropical cyclones (TC) occurred in the Northwest Pacific and North Atlantic from 2013 to 2022 are analyzed using Best Track dataset provided by NOAA, the results show that: The R_{34} estimated by ASCAT is about 4.5% larger than the Best Track record, and the standard error, root mean square error and correlation coefficient are 8.6 km, 52.4 km and 0.88, respectively; The R_{50} is about 4.0% smaller than the Best Track record, and the corresponding values are -15.4 km, 39.6 km and 0.74, respectively; The correlation coefficient between TC intensity (maximum sustained wind speed) and R_{34} in two basins is 0.62~0.66, while that of R_{50} is 0.36~0.48, suggesting that R_{34} has a better performance in characterizing TC's influence intensity and scale. It also indicates that the wind radius obtained from ASCAT wind field is valuable in monitoring and predicting TC's intensity. Using R_{34} to define the size of TC and categorical statistics, we find that the peak value of mean TC size occurs in September and October in both basins, and the total number of medium TC is the largest. The trend of the three types (small, medium, large) of TC shows unimodal distribution, the peak values of small and medium TC occur in September, and that of large TC lag by one month.

Key words: ASCAT scatterometer; tropical cyclone; best track dataset; 34-knot wind radii