

DOI:10.11737/j.issn.1003-0239.2025.05.006

## 双多普勒雷达风场反演技术在两次上海登陆台风中的应用分析

金妍<sup>1</sup>, 管理<sup>1\*</sup>, 管靛<sup>2</sup>, 喻佳丽<sup>1</sup>, 陈赛华<sup>1</sup>

(1. 上海中心气象台, 上海 200030; 2. 上海海洋中心气象台, 上海 200030)

**摘要:** 探讨了利用三维变分方法进行双多普勒雷达风场反演, 并将相关结果应用于上海近海登陆台风中心定位的方法。首先利用区域递归多普勒退速度模糊算法, 对单雷达进行径向风场退速度模糊处理, 而后选取最邻近台风中心的两部多普勒天气雷达, 基于三维变分方法进行双雷达联合反演格点风场, 据此进行高时间频次的台风中心定位。研究表明: 三维变分双雷达风场反演方法能够有效刻画台风的环流结构, 同时具备时空分辨率高、定位精准等特点。基于该方法的台风定位结果与中央气象台定位结果偏差较小。

**关键词:** 台风中心定位; 多普勒雷达; 风场反演; 三维变分

**中图分类号:** P732 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2025)05-0052-11

### 0 引言

台风是气象灾害中破坏力极强的天气系统, 也是影响我国东南沿海地区的主要灾害性天气之一。上海地处长三角平原最东端, 每年夏秋两季频繁受到台风的侵袭。台风常常会带来狂风、暴雨和风暴潮, 并引发城市内涝等一系列次生灾害, 对人民生命财产安全等构成严重威胁<sup>[1-3]</sup>。台风本体的直接风雨影响与台风移动路径密切相关, 而台风路径预报则与台风中心的精确定位密不可分。

台风定位作为国内外各主要业务中心主观预报和各类客观预报方法的初始依据, 对灾害性天气的影响时段、影响地区的预报预警服务工作具有重要作用, 其可能存在的定位误差会给后续预报结论的确定带来重大影响<sup>[4]</sup>。预报质量依赖于热带气旋初始定位的精度, 精度越高的定位对短期预报越重要<sup>[5]</sup>。世界气象组织(World Meteorological Organization, WMO)的技术文件中提出, 初始定位的偏差可影响至少48 h内的预报<sup>[6]</sup>。从初始和预报位置上

减去定位误差后的结果表明: 不同时段内预报误差均有所减少, 且越临近预报, 误差减少越多<sup>[7]</sup>。而当热带气旋逐渐靠近海岸线时, 实时定位还会影响预警区域的确定, 以1508号台风“鲸鱼”为例, 实时定位的较大偏差导致台风登陆前的预警中, 预计登陆地点与实际情况出现了较大分歧<sup>[8]</sup>。

早期台风定位的主要技术手段多依赖于卫星云图<sup>[9]</sup>, 但当台风接近陆地时, 由于受下垫面地形差异的影响, 台风结构更加复杂, 此时由于云形不易确定台风的中心位置, 定位工作面临较大困难<sup>[10]</sup>。此外, Dvorak<sup>[11]</sup>基于卫星云图还建立了一套详实的台风定强方法, 并应用于台风定强业务中。然而, 早期卫星资料的时空分辨率较低, 难以实时、精确地掌握台风动向, 进而在一定程度上限制了台风定位和定强的精度。

相较于卫星而言, 多普勒天气雷达时空分辨率更高, 能够在业务中获得更准确和及时的台风定位结果。Senn等<sup>[12]</sup>基于雷达观测探讨了台风螺旋雨带的形成机制, 并提出了利用雷达观测的台风螺旋

收稿日期: 2024-10-30。

基金项目: 中国气象局创新发展专项(CXFZ2024J001); 中国气象局气象能力提升联合研究专项(23NLTSZ002); 中国气象局青年创新团队(CMA2023QN06); 上海市自然科学基金(23ZR1456900、23ZR1456900); 上海市气象局科技人才类项目(KJRC202403、KJRC202411)。

作者简介: 金妍(1997-), 女, 工程师, 硕士, 主要从事短临监测预报技术研究。E-mail: jinyan\_cuit@163.com

\*通信作者: 管理(1989-), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事短临监测预报技术研究。E-mail: glion2005@163.com

雨带进行定位的方法。Griffin等<sup>[13]</sup>提出了眼墙集合中心定位法等,对于雷达回波组织结构良好且存在明显的螺旋雨带或眼墙的台风,可以做出较精确的定位。此外,多普勒雷达径向速度信息也被用于台风定位业务中,Wood<sup>[14]</sup>首先提出利用多普勒雷达径向速度场确定涡旋风场中心的几何轴对称中心定位法,该方法通过分别计算正、负最大径向速度值的坐标位置,进而推算台风中心位置。Tanamachi等<sup>[15]</sup>首先提出一种用于从单多普勒雷达数据中估计台风环流结构的速度轨迹显示技术(Ground-Based Velocity Track Display, GBVTD),并将其进一步应用于台风定位和定强业务中。在此基础上,Liou等<sup>[16]</sup>提出了扩展速度轨迹显示(Extended Ground-based Velocity Track Display, EGBVTD)方法,通过使用两部或多部多普勒天气雷达,提升对非对称结构台风的定位和定强精度。苏源等<sup>[17]</sup>提出将多部多普勒雷达零速度线的重合点认定为台风中心,并利用空间密度聚类法和线性回归分析,对台风零速度线弯曲、不连续以及重合点不唯一等情况做进一步中心定位判定的台风定位方法。

但天气雷达直接探测得到的是径向速度,在其开展应用分析时存在局限性,进而导致台风中心定位偏差,因此需要开展径向风场反演实际三维格点风场的研究。为此,研究者们发展了多种单多普勒雷达风场反演方法,如速度方位角显示法(Velocity Azimuth Display, VAD)<sup>[18]</sup>、速度体积处理法(Volume Velocity Processing, VVP)<sup>[19]</sup>、速度方位角处理法(Velocity Azimuth Processing, VAP)<sup>[20]</sup>、涡度-散度方法<sup>[21]</sup>、三维变分方法<sup>[22]</sup>,并进行了大量试验,且在个例研究方面取得了一定的成功。方奎明等<sup>[23]</sup>利用单多普勒雷达径向速度反演风场、再分析资料风场和气象自动站风场进行台风风场数据融合,融合后的风场对台风大风临近预报和降水落区预报具有一定指导意义。但单雷达反演风场的方式,主要基于风场分布均匀或呈线性、风场分布不随时间变化等假设条件,然而实际大气流场具有复杂性,限制了其准确性的提升。为解决上述问题,随着雷达布网密度的提升,国内外学者提出了利用两部或多部多普勒天气雷达联合反演获取更高精度风场结构的解决方案,主要包括双多普勒雷达风场反演<sup>[24-25]</sup>、3部或以上多普勒雷达风场反演<sup>[26-27]</sup>等。段

云霞等<sup>[28]</sup>利用两部雷达观测资料反演台风登陆前的风场,并利用常用的台风涡旋模型验证了反演风场的合理性,加深了雷达资料在台风过程分析中的应用。Cha等<sup>[29]</sup>对比了单雷达和双雷达在台风定位中的结果,发现双雷达反演技术通过相互约束,减小了风场反演的偏差,有助于提升台风定位和定强的精度和可靠性。

本文针对上海两次登陆台风个例,基于东部沿海地区高时空分辨率的S波段天气雷达网,利用最邻近台风的两部多普勒天气雷达资料,开展基于三维变分数据同化(Three Dimensional Variational Data Assimilation, 3DVAR)方法的双多普勒雷达联合反演风场,据此进行台风中心定位,并将结果与中央气象台定位结果进行对比,以期对台风实时定位和精准预报提供更好的参考。

## 1 资料来源

本文选取近年来登陆上海(含二次登陆)的两个台风中心进行定位,分别为2022年第12号台风“梅花”和2024年第13号台风“贝碧嘉”。上述两个台风为1950年以来登陆上海的最强(台风“贝碧嘉”)及次强(台风“梅花”)台风,且两个台风登陆后均沿着近海北上。一般而言,当台风靠近近海时,主要参考近海自动气象站开展更为精准的台风中心定位,上述两个台风登陆点附近具备较高密度的近海自动站探测站点。因此,可依靠高密度观测资料获得更加准确、可靠的台风中心定位结果。

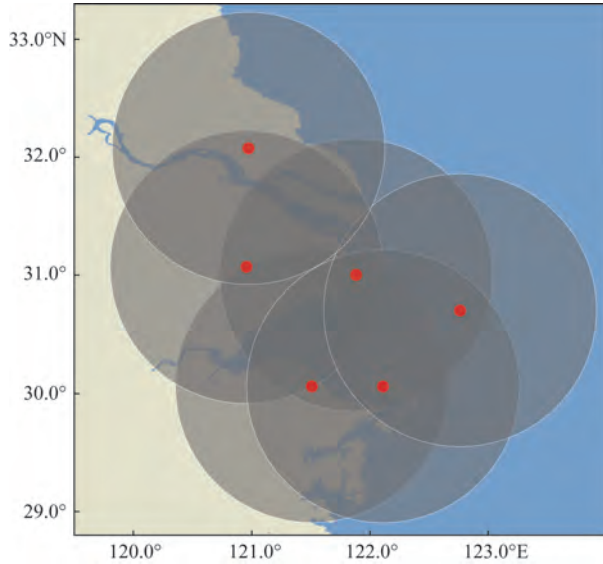
### 1.1 台风资料

台风资料为中央气象台发布的台风路径预报资料(网址:<http://typhoon.nmc.cn/web.html>)。该路径中的台风定位,是通过卫星云图遥感、近海雷达探测、飞机报、地面天气图分析等多源资料的综合定位分析法获得。

### 1.2 雷达资料

参与多雷达风场反演的资料包括江浙沪沿海地区的6部S波段双偏振多普勒天气雷达,分别为青浦和南汇雷达(上海)、南通雷达(江苏)、嵊泗雷达、舟山雷达以及宁波雷达(浙江)。体扫时间分辨

率为5~6 min,最大探测距离为230 km,径向分辨率为62.5~250 m,雷达站点分布见图1。



注:灰色圆表示6部雷达最大230 km的扫描区域,红点表示雷达站点位置

图1 雷达扫描位置分布图

Fig.1 Radar position distribution

由图1可知,东部沿海地区具备高覆盖率的双偏振多普勒雷达布网,本文选取与对应台风位置最接近的两部雷达进行联合风场反演。2023年以来,

江浙沪气象部门相继开展了天气雷达多模式观测试点工作,其中对流模式(VCP11和VCP216)可获取更高分辨率的垂直仰角扫描平面,有助于提升台风定位定强的准确率。针对两次登陆台风过程的雷达选择以及对应雷达的体扫模式见表1,图中时刻均为北京时(下同)。

## 2 方法介绍

### 2.1 区域递归多普勒退模糊算法

多普勒天气雷达资料具有较高的时空分辨率,为台风定位定强业务提供重要依据。但在探测强台风及以上级别台风时,雷达径向风场难免出现速度模糊情况,因此需首先对单雷达径向风场进行退速度模糊处理。

本文所采用的雷达退模糊算法为区域递归多普勒退模糊算法(Region-based Recursive Doppler Dealiasing, R2D2),该算法主要基于径向速度在时间和空间上的连续性原则,进行雷达径向速度资料退模糊操作。首先进行雷达数据质量控制,利用反射率因子、径向速度、谱宽等普通变量,以及差分反射率因子、差分相位、相关系数等偏振量,计算相应变量的纹理值,再通过多参量纹理阈值筛选,识别并剔除非气象回波;其次,识别速度差异较大的区

表1 多普勒天气雷达参数

Tab.1 Doppler weather radar parameters

台风“梅花”			台风“贝碧嘉”		
时间(北京时)	参与雷达/体扫模式		时间	参与雷达/体扫模式	
2022/9/14 17:00	舟山/VCP21	宁波/VCP21	2024/9/16 02:00	嵊泗/VCP216	舟山/VCP216
2022/9/14 18:00	舟山/VCP21	宁波/VCP21	2024/9/16 03:00	嵊泗/VCP216	舟山/VCP216
2022/9/14 19:00	舟山/VCP21	嵊泗/VCP21	2024/9/16 04:00	嵊泗/VCP216	舟山/VCP216
2022/9/14 20:00	舟山/VCP21	嵊泗/VCP21	2024/9/16 05:00	嵊泗/VCP216	舟山/VCP216
2022/9/14 21:00	舟山/VCP21	嵊泗/VCP21	2024/9/16 06:00	嵊泗/VCP216	舟山/VCP216
2022/9/14 22:00	舟山/VCP21	嵊泗/VCP21	2024/9/16 07:00	嵊泗/VCP216	舟山/VCP216
2022/9/14 23:00	舟山/VCP21	嵊泗/VCP21	2024/9/16 08:00	嵊泗/VCP216	舟山/VCP216
2022/9/15 00:00	嵊泗/VCP21	南汇/VCP21	2024/9/16 09:00	嵊泗/VCP216	舟山/VCP216
2022/9/15 01:00	青浦/VCP21	南汇/VCP21	2024/9/16 10:00	青浦/VCP11	南通/VCP11
2022/9/15 02:00	青浦/VCP21	南汇/VCP21	2024/9/16 11:00	青浦/VCP11	南通/VCP11
2022/9/15 03:00	青浦/VCP21	南通/VCP21	2024/9/16 12:00	青浦/VCP11	南通/VCP11
2022/9/15 04:00	青浦/VCP21	南通/VCP21	2024/9/16 13:00	青浦/VCP11	南通/VCP11

注:VCP21体扫模式共有9层仰角,分别对应0.5°、1.5°、2.4°、3.4°、4.3°、6.0°、9.9°、14.6°和19.5°,径向分辨率为250 m;VCP11体扫模式共有13层仰角,分别对应0.5°、1.5°、2.4°、3.4°、4.3°、5.2°、6.2°、8.7°、10.0°、12.0°、14.0°、16.7°和19.5°,径向分辨率为250 m;VCP216体扫模式共有15层仰角,分别对应0.5°、1.0°、1.5°、2.4°、3.4°、4.3°、5.3°、6.2°、7.5°、8.7°、10.0°、12.0°、14.0°、16.7°和19.5°,径向分辨率为62.5 m。

域并标记为可能出现速度模糊的区域,设立缓冲区并计算一次退模糊后的径向风场,之后再进行检查。在此基础上,依次进行区域退模糊、空间退模糊和窗口退模糊,进一步校正速度场;最后,通过递归迭代重复去噪过程,逐步减小缓冲区大小,直到迭代改进最小化,最终得到退模糊后的速度场,其算法流程图见图2<sup>[30]</sup>。

以2024年第12号台风“贝碧嘉”为例,选取台风登陆前一刻(即9月16日06时54分)进行研究。由于台风“眼墙”区域风力较大,舟山雷达0.5°仰角出现径向速度模糊(见图3a白色虚线圈),对应区域内速度均出现从极大(极小)到极小(极大)的突变,表明该区域存在速度模糊。经过R2D2退模糊处理后(见图3b),白色圆圈内的径向模糊区得到有效订正,退速度模糊后的径向极大风速超过40 m/s。

### 2.2 三维变分风场反演算法

选取最邻近台风的两部多普勒天气雷达,两两联立,利用三维变分方法进行双多普勒雷达联合反演,得到格点实况风场。三维变分方法综合考虑了雷达观测、物理定律(如质量连续性方程)、高分辨率数值预报模式场约束等因素,具体包括雷达观测、质量连续性方程、垂直涡度方程、模型场约束、背景约束(如探空数据)和平滑约束。这些约束条件有助于提升反演结果的物理一致性和观测符合

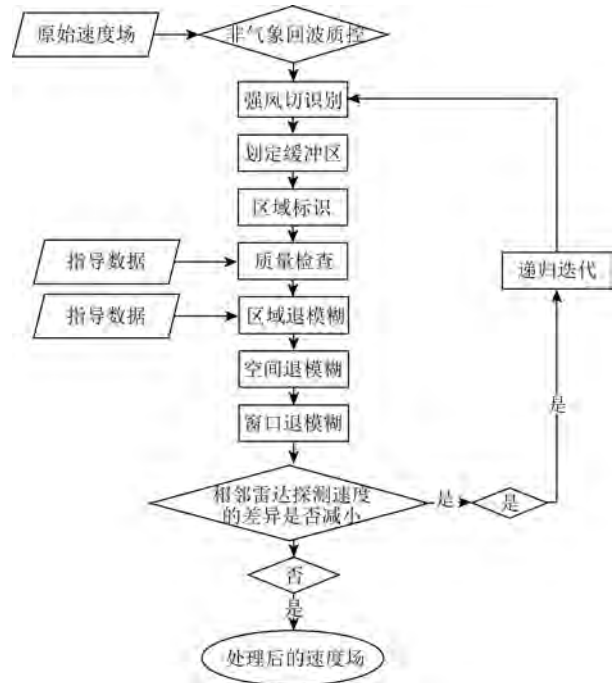


图2 R2D2算法流程图

Fig.2 Flowchart of algorithm steps within R2D2

性,进而利用最小代价函数来检索风场。在变分双多普勒风场反演分析中,代价函数 $J$ 是重要组成部分,它衡量了分析风场与观测数据的差异,并确保分析结果满足各项物理约束<sup>[31-32]</sup>。代价函数是各项约束条件的加权和,每项都对应不同的误差或约束

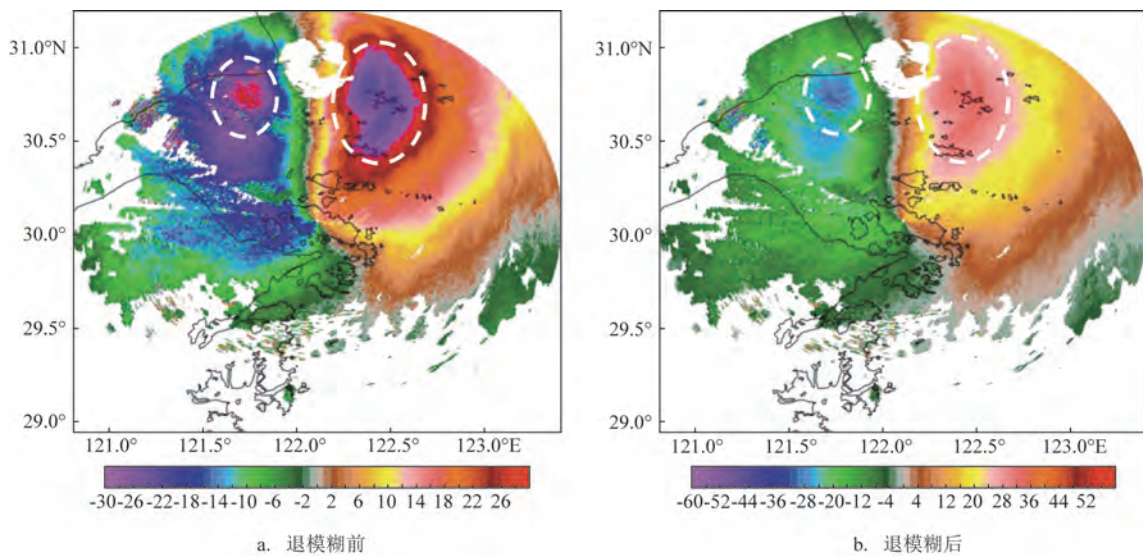


图3 2024年9月16日06时54分舟山雷达观测的0.5°仰角的径向速度场(单位:m/s)

Fig.3 Radial velocity field at 0.5° elevation observed by Zhoushan radar at 06:54 on September 16, 2024 (unit: m/s)

要求,其一般组成包括:

$$J = J_0 + J_M + J_V + J_S \quad (1)$$

式中: $J_0$ 、 $J_M$ 、 $J_V$ 、 $J_S$ 分别是与观测约束、质量守恒约束、涡度约束和平滑性约束相关的函数,每项函数具体表达式为:

观测误差项 $J_0$ 表示分析径向速度与观测径向速度的差异:

$$J_0 = \sum_{\text{Rad1}} \lambda_{01} r_1^2 (v_{r1}^{\text{obs}} - v_{r1}^a)^2 + \sum_{\text{Rad2}} \lambda_{02} r_2^2 (v_{r2}^{\text{obs}} - v_{r2}^a)^2 \quad (2)$$

质量守恒项 $J_M$ 能确保分析风场满足质量守恒定律:

$$J_M = \sum_{\text{Cart}} \lambda_M \left[ \frac{\partial(\rho_s u^a)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_s v^a)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho_s w^a)}{\partial z} \right]^2 \quad (3)$$

涡度垂直方程项 $J_V$ 能保证风场的旋转运动符合物理规律:

$$J_V = \sum_{\text{Cart}} \lambda_V \left[ (u^a - U) \frac{\partial \zeta^a}{\partial x} + (v^a - V) \frac{\partial \zeta^a}{\partial y} + w^a \frac{\partial \zeta^a}{\partial z} + \left( \frac{\partial v^a}{\partial z} \frac{\partial w^a}{\partial x} - \frac{\partial u^a}{\partial z} \frac{\partial w^a}{\partial y} \right) + \zeta^a \left( \frac{\partial u^a}{\partial x} + \frac{\partial v^a}{\partial y} \right) \right]^2 \quad (4)$$

平滑约束项 $J_S$ 能避免分析结果出现不符合实际的剧烈变化:

$$J_S = \sum_{\text{Cart}} \lambda_{S1} \left[ \left( \frac{\partial u^a}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial u^a}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial v^a}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v^a}{\partial y} \right)^2 \right] + \sum_{\text{Cart}} \lambda_{S2} \left[ \left( \frac{\partial u^a}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial v^a}{\partial z} \right)^2 \right] + \sum_{\text{Cart}} \lambda_{S3} \left[ \left( \frac{\partial w^a}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial w^a}{\partial y} \right)^2 \right] + \sum_{\text{Cart}} \lambda_{S4} \left( \frac{\partial w^a}{\partial z} \right)^2 \quad (5)$$

式中:加权系数 $\lambda_{01}$ 、 $\lambda_{02}$ 、 $\lambda_M$ 、 $\lambda_V$ 、 $\lambda_{S1}$ 、 $\lambda_{S2}$ 、 $\lambda_{S3}$ 和 $\lambda_{S4}$ 的相对大小决定了式(1)中各个约束的相对重要性<sup>[31]</sup>。

利用R2D2算法对单雷达径向风场进行退速度模糊处理后,先对单雷达数据从径向向三维网格进行插值处理,再结合网格数据结果开展3DVAR三维风场反演。需要指出的是,本文的三维变分方法主要通过观测数据和质量守恒进行加权约束,且在双雷达3DVAR风场反演算法中,当两部雷达对应波束的夹角 $\theta < 30^\circ$ 时,算法认为雷达波束间的夹角过小,无法反演得到真实的格点风场信息。图4为双雷达联合反演区域示意图,其中蓝色区域对应有效反演区域,橙色部分为无法反演的区域。

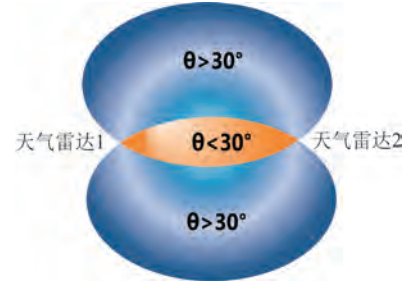


图4 双雷达联合反演区域示意图

Fig.4 Dual-radar joint inversion regional schematic diagram

本文中三维变分方法反演风场的水平覆盖范围选定为雷达周边(对应表1中雷达1)150 km × 150 km范围,水平分辨率为1 km,对应301 × 301个网格;垂直范围为0~2 km,分辨率为200 m,对应11层高度层。在台风持续向西移动过程中,选择与台风位置最接近的两部雷达进行联合风场反演。此外,在利用风场反演结果进行台风定位时,将最低层(200 m)的气旋式环流中心确定为台风中心位置。

### 3 效果应用分析

#### 3.1 台风“梅花”反演试验

##### 3.1.1 过程回顾

2022年第12号台风“梅花”于9月8日08时在西北太平洋洋面上生成,11日02时加强为强台风,12日半夜进入东海,之后长时间维持强台风强度,14日20时30分以强台风级在我国浙江舟山普陀区沈家门登陆(风速42 m/s),然后穿过舟山本岛进入杭州湾,15日00时30分在上海奉贤沿海再次登陆,登陆时为台风级,中心附近最大风力有12级(风速35 m/s)。在台风主要影响期间,上海市区极大风速为25.8 m/s,沿江沿海地区极大风速为42.8 m/s,洋山港区和上海市沿海海面极大风速达49.3 m/s。

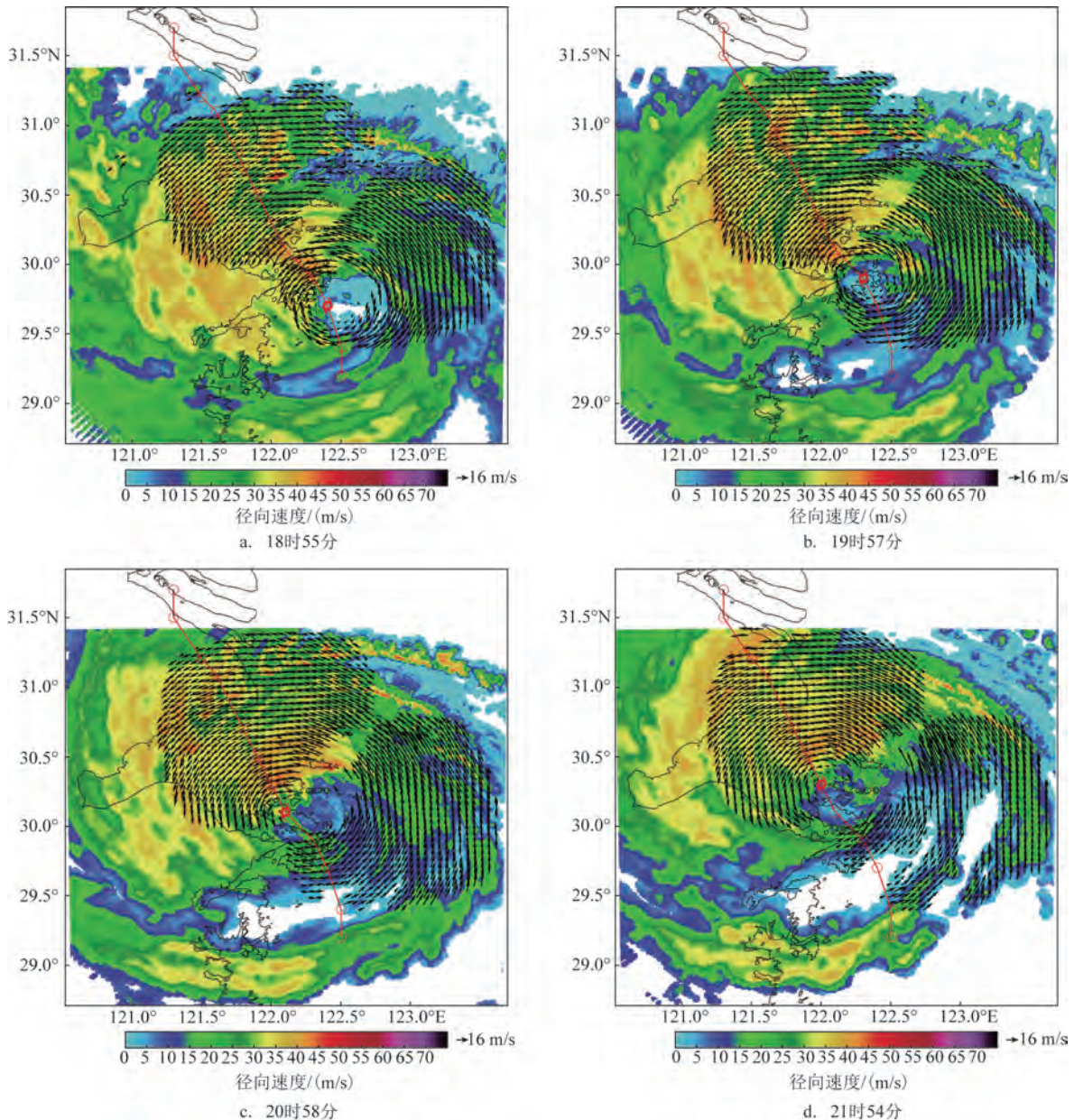
##### 3.1.2 反演风场结构概述

由于台风在不同时刻的结构较为相似,因此,选择台风登陆前后的4个时次反演结果进行具体分析。从9月14日19时57分(即台风登陆前时次)反演的200 m高度水平风场分布图可见,较强的雷达回波主要位于台风中心的西侧和北侧;通过两部雷

达开展风场反演的结果可以看出,雷达对台风涡旋结构的反演效果较好,风场的气旋式分布结构显著,且风场反演的涡旋中心与中央气象台台风中心(见图5红色台风符号)位置基本完全吻合,中心风速较小,向外围扩展时风速快速增强,呈明显气旋式环流。

另外,在台风中心西北侧和东南侧的风场分布呈明显的对称性结构,两侧均出现超40 m/s风速,最

大风速出现在台风移动方向的右侧;而台风中心西南侧和东北侧的风场分布较为不对称,西南侧风场较弱,东北侧风场较强。台风登陆后,从20时58分的雷达风场反演图上看到,其特征与登陆前相似,两部雷达很好地反演出了台风的涡旋结构特征,风场呈现明显的气旋式分布,风场反演的涡旋中心与实况定位的台风中心相比,位置略微偏西,整体风场反演结果良好。



注:填色为反射率因子,红色台风符号为当前时刻台风中心定位

图5 2022年9月14日双雷达反演的200 m高度的水平风场(矢量)分布

Fig.5 Horizontal wind field (vector) distribution at a height of 200 m inverted by dual radars on September 14, 2022

## 3.2 台风“贝碧嘉”反演试验

### 3.2.1 过程回顾

2024年第13号台风“贝碧嘉”于9月10日夜间在西北太平洋洋面上生成,9月16日07时30分在上海浦东临港新城沿海登陆,登陆时中心附近最大风力达14级(风速42 m/s),为1949年以来登陆上海的最强台风,其中崇明的极大风速最大,达41.2 m/s。

### 3.2.2 反演风场结构概述

台风“贝碧嘉”于2024年9月16日07时30分登陆,因此选择05时59分、06时55分、07时57分和08时54分4个时次开展基于双雷达风场反演技术的台风定位工作,结果见图6。

从雷达回波和200 m高度反演风场可知,台风登陆前强回波主要出现在台风中心的东侧,台风前进方向上的回波较弱。从风场结构来看,基于3DVAR的双雷达风场反演技术能较好地反演出此次台风的涡旋结构,风场呈现明显气旋式环流分布特征,且反演的风场涡旋中心与中央气象台公布的台风中心位置(见图6红色台风符号)吻合较好。从中心向外扩展时风速显著增强,且风场呈不对称结构分布,台风中心东侧环流强、西侧环流弱,即最大风速出现在台风移动方向的右侧,最大风速超过40 m/s。台风登陆后的雷达回波和风场结构特征与登陆前基本一致,风场反演结果与实况较为接近,涡旋中心与台风定位中心基本吻合,但风速较登陆

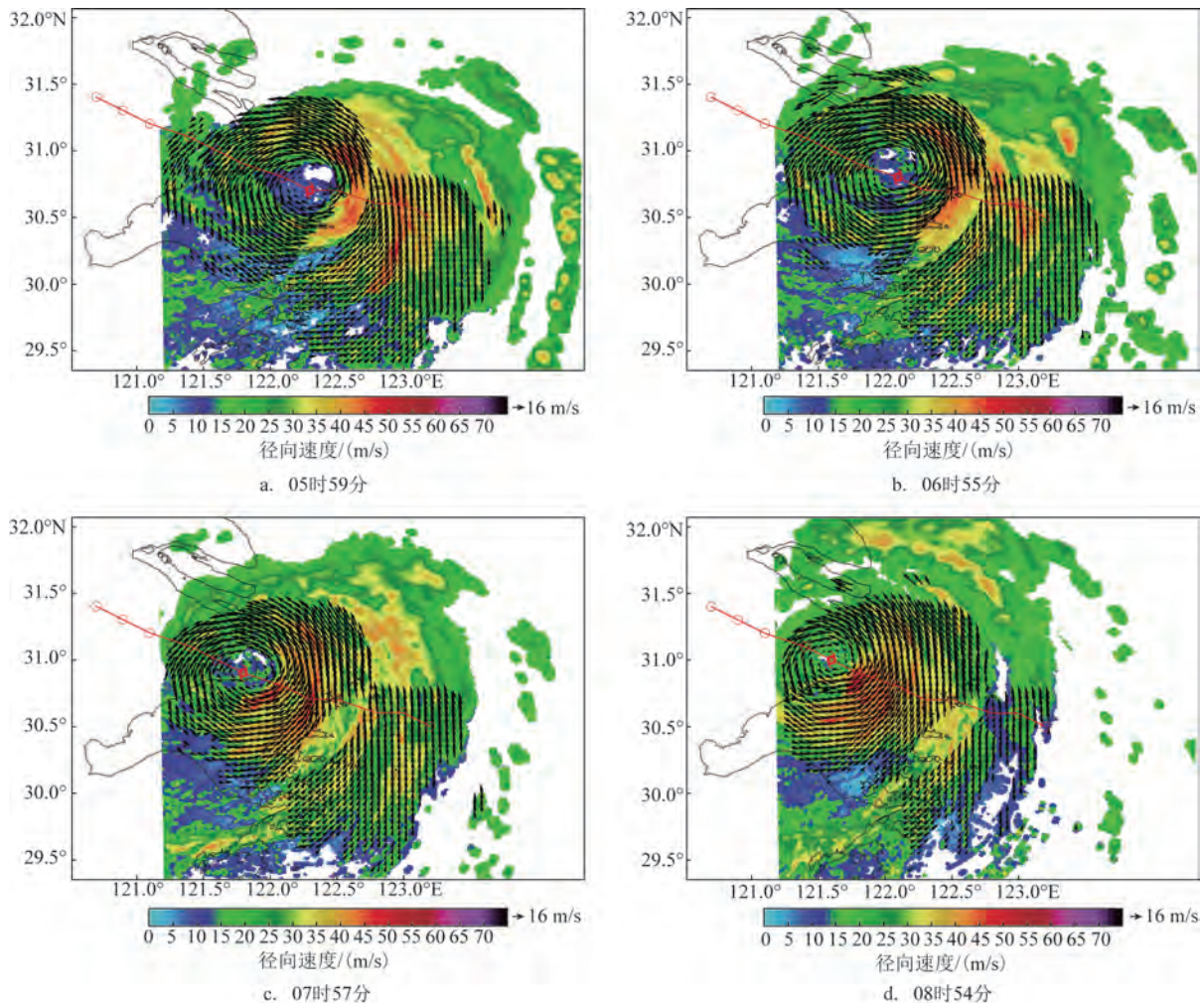


图6 2024年9月16日双雷达反演的200 m高度的水平风场(矢量)分布

Fig.6 Horizontal wind field (vector) distribution at a height of 200 m inverted by dual radars on September 16, 2024

前有所减弱。

### 3.3 台风定位对比

表2为双雷达风场反演定位法逐时定位结果与中央气象台定位结果的对比,相较于中央气象台定位结果,运用该方法对台风“梅花”和“贝碧嘉”定位的平均绝对偏差分别为 $(0.05^\circ, 0.05^\circ)$ 、 $(0.05^\circ, 0.03^\circ)$ ,大部分时次的台风中心与中央气象台定位结果在经向、纬向上的偏差都在 $0.1^\circ$ 以内,即10 km以内。这其中,台风“梅花”反演结果的标准差为

$(0.01^\circ, 0.03^\circ)$ 、台风“贝碧嘉”反演结果的标准差为 $(0.04^\circ, 0.02^\circ)$ ,且这两个台风的双雷达风场反演定位结果与中央气象台定位结果的相关系数均超过0.99,反演路径与中央气象台定位路径基本一致,说明该风场反演方法在不同时次的反演中性能较为稳定。

但具体分析每个台风不同时次的定位情况发现,不同时刻定位结果的绝对误差存在一定的不连续性,这可能是受到台风和探测雷达间的距离影响,不同的探测距离导致雷达探测高度不同。与此

表2 台风“梅花”和“贝碧嘉”定位情况

Tab.2 Positioning of Typhoon "Muifa" and "Bebinca"

台风	时次	中央气象台定位	双雷达风场反演定位	绝对偏差	
2212号台风“梅花”	9月14日 17时	122.5°E、29.2°N	122.48°E、29.38°N	0.02°E、0.18°N(20 km)	
	9月14日 18时	122.5°E、29.4°N	122.44°E、29.48°N	0.06°E、0.08°N(10 km)	
	9月14日 19时	122.4°E、29.7°N	122.44°E、29.72°N	0.04°E、0.02°N(4 km)	
	9月14日 20时	122.3°E、29.9°N	122.38°E、29.91°N	0.08°E、0.01°N(8 km)	
	9月14日 21时	122.1°E、30.1°N	122.19°E、30.05°N	0.09°E、0.05°N(10 km)	
	9月14日 22时	122.0°E、30.3°N	122.01°E、30.29°N	0.01°E、0.01°N(1 km)	
	9月14日 23时	121.9°E、30.5°N	121.92°E、30.54°N	0.02°E、0.04°N(5 km)	
	9月15日 00时	121.8°E、30.7°N	121.81°E、30.68°N	0.01°E、0.02°N(2 km)	
	9月15日 01时	121.6°E、31.1°N	121.64°E、31.05°N	0.04°E、0.05°N(7 km)	
	9月15日 02时	121.5°E、31.2°N	121.42°E、31.28°N	0.08°E、0.08°N(12 km)	
	9月15日 03时	121.3°E、31.5°N	121.36°E、31.47°N	0.06°E、0.03°N(7 km)	
	9月15日 04时	121.3°E、31.7°N	121.25°E、31.69°N	0.05°E、0.01°N(5 km)	
	2413号台风“贝碧嘉”	9月16日 02时	123.2°E、30.5°N	123.08°E、30.56°N	0.12°E、0.06°N(13 km)
		9月16日 03时	123.0°E、30.6°N	122.90°E、30.59°N	0.10°E、0.01°N(10 km)
9月16日 04时		122.8°E、30.6°N	122.71°E、30.62°N	0.09°E、0.02°N(9 km)	
9月16日 05时		122.5°E、30.7°N	122.48°E、30.71°N	0.02°E、0.01°N(2 km)	
9月16日 06时		122.3°E、30.7°N	122.28°E、30.75°N	0.02°E、0.05°N(6 km)	
9月16日 07时		122.1°E、30.8°N	122.07°E、30.86°N	0.03°E、0.06°N(7 km)	
9月16日 08时		121.8°E、30.9°N	121.83°E、30.89°N	0.03°E、0.01°N(3 km)	
9月16日 09时		121.6°E、31.0°N	121.57°E、31.04°N	0.03°E、0.04°N(5 km)	
9月16日 10时		121.4°E、31.1°N	121.39°E、31.09°N	0.01°E、0.01°N(1 km)	
9月16日 11时		121.1°E、31.2°N	121.15°E、31.19°N	0.05°E、0.01°N(5 km)	
9月16日 12时		120.9°E、31.3°N	120.96°E、31.27°N	0.06°E、0.03°N(7 km)	
9月16日 13时		120.7°E、31.4°N	120.67°E、31.38°N	0.03°E、0.02°N(4 km)	

同时,台风中心在不同高度可能出现倾斜,尤其当台风登陆后,受地面摩擦等因素影响,其结构遭到破坏,进而影响雷达探测结果。因此,双雷达风场反演定位法相对中央气象台定位的绝对误差会出现不连续性,误差大小随着台风中心与雷达距离等因素的变化而变化。综上所述,使用双部雷达资料进行风场反演,能较准确地反映出台风的整体涡旋特征,并且该方法对台风实时定位具有较好的参考意义,在实际业务中具备较强的推广价值。

## 4 结论和讨论

为研究双多普勒雷达风场反演技术在实际台风定位业务工作中的应用性,本文利用青浦、南汇、南通、嵊泗、舟山和宁波地区的6部多普勒天气雷达进行两两组合,构建双雷达探测系统,并选取两次登陆上海的台风个例,探讨基于三维变分方法的双雷达风场反演在近海台风定位中的作用。结论如下:

①针对探测台风时雷达径向风场出现速度模糊的问题,本文利用区域递归多普勒退模糊算法,对单雷达径向风场进行退速度模糊处理,处理后的径向雷达速度场与实况相符,确保了雷达初始速度场数据的准确性和可靠性。

②基于最邻近台风的两部多普勒天气雷达,利用三维变分方法进行双多普勒雷达联合风场反演以实现台风中心定位,该方法具有时空分辨率高、定位精准等特点,能较准确地反映台风的整体涡旋特征。此外,从选取的两个个例可以看出,该方法定位的台风中心与中央气象台定位结果偏差较小,在实际业务工作中具有较高的参考价值。

③双雷达风场反演定位法基于组网雷达开展,由于雷达径向风场资料易出现“距离折叠”和“多普勒两难”现象,影响探测数据可用性,因此该方法的较优适用范围为台风登陆前后及台风在沿海移动时。

本文选取的个例台风的气旋式风场环流特征较为显著,尚未对风场对称性结构不明显的台风展开研究。未来需分别讨论不同结构和强度台风的风场反演结果,进一步验证该算法的适用性和准确性。此外,双雷达风场反演中存在部分反演盲区,

会导致区域风场信息缺失,考虑在算力允许(尤其是GPU算力)的情况下,利用3部及以上的雷达开展联合风场反演,并寻求反演精度和运算时效的最优配置,这对未来的业务预报具有重要应用价值。

### 参考文献:

- [1] 徐逸雯,王倩,卢琪,等.台风“灿都”强度路径及影响舟山降水成因分析[J].海洋预报,2023,40(1):91-100.  
XU Y W, WANG Q, LU Q, et al. Analysis of the intensity and path of typhoon "Chanthu" and its impact on the precipitation in Zhoushan[J]. Marine Forecasts, 2023, 40(1): 91-100.
- [2] 项素清,韩兴,方鹤鸣,等.2106号台风“烟花”的路径及降水特点分析[J].海洋预报,2023,40(3):75-84.  
XIANG S Q, HAN X, FANG H M, et al. The path and precipitation characteristics of "In-Fa" in typhoon 2106[J]. Marine Forecasts, 2023, 40(3): 75-84.
- [3] 曾瑾瑜,林金滢,余洋,等.2109号台风“卢碧”路径和强度特征及预报偏差分析[J].海洋预报,2022,39(3):10-24.  
ZENG J Y, LIN J G, YU Y, et al. An analysis on the track and intensity characteristics and forecast deviation of typhoon 2109 "Lupit"[J]. Marine Forecasts, 2022, 39(3): 10-24.
- [4] 褚萌,雷小途,陈国民.热带气旋路径预报“真实”误差分析[J].大气科学学报,2022,45(1):22-29.  
CHU M, LEI X T, CHEN G M. Analysis of "real" errors of tropical cyclone track forecasts[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2022, 45(1): 22-29.
- [5] 杨彩福,谭杰,徐海坡.南海热带气旋路径预报[J].海洋预报,2001,18(2):30-38.  
YANG C F, TAN J, XU H P. Tropical cyclone track forecast over South China Sea[J]. Marine Forecasts, 2001, 18(2): 30-38.
- [6] WMO.全球热带气旋预报指南(世界气象组织技术文件,WMO/TD-NO.560)[M].裴国庆,译.北京:气象出版社,1995:71-72.  
WMO. Global guide to tropical cyclone forecasting (World Meteorological Organization, WMO/TD-NO.560) [M]. QIU G Q, trans. Beijing: China Meteorological Press, 1995: 71-72. (in Chinese).
- [7] NEUMANN C J, PELISSIER J M. Models for the prediction of tropical cyclone motion over the north Atlantic: an operational evaluation[J]. Monthly Weather Review, 1981, 109(3): 522-538.
- [8] 许映龙,黄奕武.2015年西北太平洋和南海台风活动特征及主要预报技术难点[J].海洋气象学报,2017,37(1):31-41.  
XU Y L, HUANG Y W. The activity characteristics and forecasting difficulties of tropical cyclones over western North Pacific and South China Sea in 2015[J]. Journal of Marine Meteorology, 2017, 37(1): 31-41.
- [9] 许映龙,娇梅燕,毕宝贵,等.近海台风雷达定位方法应用研究[J].大气科学,2006,30(6):1119-1128.

- XU Y L, JIAO M Y, BI B G, et al. The applied study of the positioning method of a tropical cyclone over offshore using a Doppler radar[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2006, 30(6): 1119-1128.
- [10] 许映龙, 张玲, 高拴柱. 我国台风预报业务的现状及思考[J]. *气象*, 2010, 36(7): 43-49.
- XU Y L, ZHANG L, GAO S Z. The advances and discussions on China operational typhoon forecasting[J]. *Meteorological Monthly*, 2010, 36(7): 43-49.
- [11] DVORAK V F. Tropical cyclone intensity analysis and forecasting from satellite imagery[J]. *Monthly Weather Review*, 1975, 103(5): 420-430.
- [12] SENN H V, HISER H W. On the origin of hurricane spiral rain bands[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1959, 16(4): 419-426.
- [13] GRIFFIN J S, BURPEE R W, MARKS F D JR, et al. Real-time airborne analysis of aircraft data supporting operational hurricane forecasting[J]. *Weather and Forecasting*, 1992, 7(3): 480-490.
- [14] WOOD V T. A technique for detecting a tropical cyclone center using a Doppler radar[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1994, 11(5): 1207-1216.
- [15] TANAMACHI R L, BLUESTEIN H B, LEE W C, et al. Ground-based velocity track display (GBVTD) analysis of W-band Doppler radar data in a tornado near Stockton, Kansas, on 15 May 1999[J]. *Monthly Weather Review*, 2007, 135(3): 783-800.
- [16] LIOU Y C, WANG T C C, LEE W C, et al. The retrieval of asymmetric tropical cyclone structures using Doppler radar simulations and observations with the extended GBVTD technique[J]. *Monthly Weather Review*, 2006, 134(4): 1140-1160.
- [17] 苏源, 倪悦, 曾凡辉, 等. 基于组网多普勒雷达径向速度场的福建近海台风中心定位研究[J]. *热带气象学报*, 2024, 40(2): 189-197.
- SU Y, NI Y, ZENG F H, et al. Offshore tropical cyclone locating method for Fujian based on network Doppler radial velocity field[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2024, 40(2): 189-197.
- [18] 朱立娟, 龚建东, 李泽椿. 资料同化中雷达 VAD 风质量控制研究[J]. *高原气象*, 2012, 31(6): 1731-1738.
- ZHU L J, GONG J D, LI Z C. Study on quality control of radar VAD wind in data assimilation[J]. *Plateau Meteorology*, 2012, 31(6): 1731-1738.
- [19] WALDTEUFEL P, CORBIN H. On the analysis of single-Doppler radar data[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 1979, 18(4): 532-542.
- [20] 陶祖钰. 从单 Doppler 速度场反演风矢量场的 VAP 方法[J]. *气象学报*, 1992, 50(1): 81-90.
- TAO Z Y. The VAP method to retrieve the wind vector field based on single-Doppler velocity field[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1992, 50(1): 81-90.
- [21] 姜海燕, 葛润生. 一种新的单部多普勒雷达反演技术[J]. *应用气象学报*, 1997, 8(2): 219-223.
- JIANG H Y, GE R S. A new retrieval technique for single-Doppler radar[J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 1997, 8(2): 219-223.
- [22] 王艳春, 王红艳, 刘黎平. 三维变分方法反演风场的效果检验[J]. *高原气象*, 2016, 35(4): 1087-1101.
- WANG Y C, WANG H Y, LIU L P. Performance evaluation of three-dimensional variation assimilation retrieval of wind field[J]. *Plateau Meteorology*, 2016, 35(4): 1087-1101.
- [23] 方奎明, 谈志安, 陈莲, 等. 多源数据融合在台风登陆前后风速的识别应用[J]. *海洋预报*, 2024, 41(5): 99-106.
- FANG K M, TAN Z A, CHEN L, et al. Application of multi-source data fusion in identification of wind speed before and after typhoon landfall[J]. *Marine Forecasts*, 2024, 41(5): 99-106.
- [24] SMULL B F, HOUZE R A. Dual-Doppler radar analysis of a midlatitude squall line with a trailing region of stratiform rain[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1987, 44(15): 2128-2149.
- [25] 王俊, 盛日锋, 陈西利. 一次弓状回波、强对流风暴及合并过程研究 II: 双多普勒雷达反演三维风场分析[J]. *高原气象*, 2011, 30(4): 1078-1086.
- WANG J, SHENG R F, CHEN X L. Case study of bow echo, severe convective storm and merger process II: analysis on three-dimensional wind field retrieved by dual Doppler radar[J]. *Plateau Meteorology*, 2011, 30(4): 1078-1086.
- [26] 周海光, 王玉彬. 多部多普勒雷达同步探测三维风场反演系统[J]. *气象*, 2002, 28(9): 7-11.
- ZHOU H G, WANG Y B. A retrieving system of three-dimensional wind fields by multiple-Doppler radar[J]. *Meteorological Monthly*, 2002, 28(9): 7-11.
- [27] 刘黎平, 莫月琴, 沙雪松, 等. C 波段双多基地多普勒雷达资料处理和三维变分风场反演方法研究[J]. *大气科学*, 2005, 29(6): 986-996.
- LIU L P, MO Y Q, SHA X S, et al. Radar data processing and a variational algorithm for 3-dimensional wind field retrieval by C band bistatic radar network[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2005, 29(6): 986-996.
- [28] 段云霞, 邵爱梅, 杨毅. 利用双多普勒雷达资料对一次台风流场结构的分析[J]. *高原气象*, 2010, 29(1): 187-196.
- DUAN Y X, SHAO A M, YANG Y. Analysis on three-dimension wind fields for a typhoon process using dual-Doppler radar[J]. *Plateau Meteorology*, 2010, 29(1): 187-196.
- [29] CHA T Y, BELL M M. Comparison of single-Doppler and multiple-Doppler wind retrievals in Hurricane Matthew (2016)[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2021, 14(5): 3523-3539.
- [30] FELDMANN M, JAMES C N, BOSCACCI M, et al. R2D2: a Region-based Recursive Doppler Dealiasing algorithm for operational weather radar[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2020, 37(12): 2341-2356.
- [31] SHAPIRO A, POTVIN C K, GAO J D. Use of a vertical vorticity equation in variational dual-Doppler wind analysis[J].

Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2009, 26(10):  
2089-2106.  
[32] POTVIN C K, SHAPIRO A, XUE M. Impact of a vertical

vorticity constraint in variational dual-Doppler wind analysis:  
tests with real and simulated supercell data[J]. Journal of  
Atmospheric and Oceanic Technology, 2012, 29(1): 32-49.

## Application analysis of dual Doppler radar wind field inversion technology in two typhoons landing in Shanghai

JIN Yan<sup>1</sup>, GUAN Li<sup>1\*</sup>, GUAN Liang<sup>2</sup>, YU Jiali<sup>1</sup>, CHEN Saihua<sup>1</sup>

(1. Shanghai Meteorological Centre, Shanghai 200030, China; 2. Shanghai Marine Meteorological Center, Shanghai 200030, China)

**Abstract:** This article explores a method for locating typhoon centers near Shanghai using a dual Doppler radar wind field inversion technique based on three-dimensional variational data assimilation (3DVAR). Initially, the Region-based Recursive Doppler Dealiasing (R2D2) algorithm is employed to correct radial wind field deblurring for single radar. Subsequently, the two nearest Doppler weather radars are selected to collaboratively invert the gridded wind field using 3DVAR, and thus carry out high-frequency positioning of the typhoon center. The research results demonstrate that the 3DVAR dual radar wind field inversion method effectively captures the circulation structure of typhoons, while also featured by high spatiotemporal resolution and precise positioning. The typhoon positioning results derived from 3DVAR method have a small deviation from those provided by the Central Meteorological Observatory.

**Key words:** typhoon positioning; Doppler radar; wind field retrieval; 3DVAR