暴雨灾害
Torrential Rain and Disasters
中国科技核心期刊
中国科技论文统计源期刊

基于多部S波段雷达组网融合数据的γ中尺度涡旋识别方法及其应用

毛焱敏 王超 刘黎平 苏德斌

A multi-S-band radar network algorithm for γ-mesoscale vortex detection and its operational applications

MAO Yanmin，WANG Chao，LIU Liping，SU Debin

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2024-036

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

江西一次冰雹过程的S波段双偏振雷达回波特征分析
Analysis on characteristics of S-band dual-polarization radar echo of a hail event in Jiangxi Province
暴雨灾害. 2022, 41(6): 621-630 https://doi.org/10.12406/byzh.2020-242

一种X波段相控阵天气雷达反射率因子订正算法
A reflectivity factor correction algorithm for X-band phased array radars
暴雨灾害. 2023, 42(4): 446-454 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-025

X波段双偏振相控阵雷达定量降水估测研究
Analysis of radar quantitative precipitation estimation using X-band polarimetric radar
暴雨灾害. 2023, 42(4): 437-445 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-043

双偏振天气雷达精细化探测技术对2021年两个龙卷风暴识别能力的影响分析
Analysis on the influence of fine detection technology of dual polarization weather radar on recognition ability of two tornado storms in 2021
暴雨灾害. 2022, 41(2): 130-141 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2022.02.003

高密度雷达网风场反演的优化方法及其应用效果检验
The optimization method for wind field retrieval using high-density radar networks and its application effect verification
暴雨灾害. 2024, 43(6): 713-722 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-209

FY-4A卫星夜间大雾识别及其在高速公路服务应用中的潜力分析
Night heavy fog identification based on FY-4A satellite and its potential analysis in the service of expressway
暴雨灾害. 2021, 40(2): 190-200 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.02.011

关注微信公众号，获得更多资讯信息

毛焱敏,王超,刘黎平,等.2025.基于多部 S 波段雷达组网融合数据的 γ 中尺度涡旋识别方法及其应用[J].暴雨灾害,44(3):277−288.
MAO Yanmin, WANG Chao, LIU Liping, et al. 2025. A multi-S-band radar network algorithm for γ-mesoscale vortex detection and its operational applications [J]. Torrential Rain and Disasters,44(3):277−288 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024−036

基于多部 S 波段雷达组网融合数据的 γ 中尺度涡旋识别方法及其应用

毛焱敏[1, 2], 王超[2], 刘黎平[2], 苏德斌[1]

(1. 成都信息工程大学电子工程学院, 成都 610225; 2. 灾害天气科学与技术全国重点实验室, 北京 100081)

摘　要: 基于 2019 年 4 月 26—27 日广东省多部 S 波段新一代天气雷达数据, 采用中气旋探测算法, 对多雷达相交区域内的同一个 γ 中尺度涡旋识别结果进行对比分析, 提出适用于我国新一代天气雷达网的 γ 中尺度涡旋组网融合方法。结果表明: (1) 受雷达垂直分辨率限制、地形遮挡和径向速度距离模糊效应影响, 不同雷达在共同探测区内涡旋识别数目和同个涡旋特征参数存在显著差异。(2) 当两部雷达与涡旋距离相当时, 特征参数一致性较高, 而距离差大时, 较远雷达由于分辨率下降识别的旋转速度、切变和直径变弱, 底高升高, 深度下降。(3) 基于距离权重和高度校正的组网融合方法可有效整合多雷达优势, 克服距离差异和地形遮挡等对 γ 中尺度涡旋探测的影响, 获得更精确的垂直厚度, 更大的旋转速度、切变和直径值, 以及更大的识别范围。

关键词: 中气旋; S 波段雷达; 识别; 数据融合

中图法分类号: P412.25　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2024−036

A multi-S-band radar network algorithm for γ-mesoscale vortex detection and its operational applications

MAO Yanmin[1, 2], WANG Chao[2], LIU Liping[2], SU Debin[1]

(1. *College of Electronic Engineering*, *Chengdu University of Information Technology*, *Chengdu* 610225; 2. *State Key Laboratory of Severe Weather Meteorological Science and Technology* (*LASW*), *Beijing* 100081)

Abstract: Using observation data from multiple S-band CINRAD radars in Guangdong Province from April 26-27, 2019, this study implemented a mesocyclone detection algorithm to compare and analyze identification results of the same γ-mesoscale vortices within the overlapping areas of multiple radars and proposed a fusion method for γ-mesoscale vortex detection by China's new-generation weather radar network. The results are as follows. (1) Vortex identification results are significantly affected by limited radar vertical resolution, terrain blockage, and radial velocity distance ambiguity, leading to variations in vortex counts and vortex characteristic parameters among different radars. (2) When two radars have similar distances to a vortex, their identified parameters show good consistency. However, when the distance difference increases, the radar farther away tends to detect weaker rotational velocities, reduced shear, smaller diameters, higher base heights, and shallower depths due to radar resolution degradation. (3) By incorporating distance weighting and height correction, the proposed fusion method effectively combines the advantages of multiple radars, overcoming limitations from distance differences and terrain blockage. This approach yields more accurate depth measurements, larger rotational velocities, shear and diameter, and an extended range for γ-mesoscale vortices.

Key words: mesocyclone; S-band radar; identification; data fusion

引　言

对流风暴内形成的直径在 10 km 内气旋性旋转的涡旋是造成龙卷、冰雹、雷暴大风等强对流天气的重要动力来源 (王红燕等, 2013; Wapler et al., 2016; 于怀征等, 2020), 其中, 与超级单体上升气流相关、尺度在 2~10 km、垂直涡度不低于 0.01 s^{-1} 的被称为中气旋 (Markowski, 2011); 而另一类通常出现在弓形

收稿日期: 2022−01−25; **定稿日期**: 2024−11−04

资助项目: 国家自然科学基金项目 (U2142210); 中国气象科学研究院科技发展基金项目 (2023KJ037)

第一作者: 毛焱敏, 主要从事中尺度天气学研究。E-mail: 1018977621@qq.com

通信作者: 王超, 主要从事雷达气象学研究。E-mail: chaowang716@163.com

© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY−NC−ND 4.0

回波或飑线前沿、结构和动力特征与中气旋显著不同、主要分布于低层且垂直涡度偶尔达到中气旋量级的涡旋则被称为 γ 尺度中涡旋 (Weisman and Trapp, 2003), 本文将这两类涡旋统称为 γ 中尺度涡旋。这些涡旋在多普勒雷达中表现出沿径向对称的正负速度极大值区, 是监测和预警强对流天气的重要依据。

传统业务算法主要针对中气旋进行识别 (Lee and White, 1998; Elizaga et al., 2007; 侯谨毅和王萍, 2017), 例如美国早期的中气旋算法 (WSR-88D Build 9.0 Mesocyclone Algorithm, 88D B9MA) 及其衍生的我国业务化中气旋算法。然而, 这些算法要求切变段速度必须从负速度极大值到正速度极大值严格单调递增, 与实际观测情况不符 (Burgess et al., 1993); 同时, 较高的阈值导致部分引发龙卷等强天气但未达到“中气旋标准”的弱 γ 中尺度涡旋被漏识别 (Stumpf et al., 1998)。为此, 美国强风暴实验室发展了第三代业务化中气旋算法 (National Severe Storm Laboratory Mesocyclone Detection Algorithm, NSSL-MDA), 旨在识别所有风暴尺度 (1~10 km) 的 γ 中尺度涡旋 (Stumpf et al., 1998)。王超 (2023) 基于上述 NSSL-MDA 算法发展了适用于我国业务雷达的 γ 中尺度涡旋识别追踪算法, 并与我国业务化中气旋算法进行了对比, 结果表明其对弱 γ 中尺度涡旋的识别能力显著提升。

尽管 NSSL-MDA 算法的本地化有效提高了对我国强对流的预警能力, 但单部 S 波段新一代天气雷达 (CINRAD/SA) 在远距离(如最低仰角以下盲区和相邻仰角波束间未覆盖空白区)或近处(即静锥区内)对 γ 中尺度涡旋的探测仍存在漏测问题 (冯晋勤等, 2010; 王易等, 2018; 柳云雷等, 2020)。此外, 远距离处波束展宽导致采样体积增大, 速度平滑效应显著, 使得探测到的涡旋强度低于实际值 (Wood and Brown, 1997; 吴芳芳等, 2012)。因此, 为增强远距离 γ 中尺度涡旋的连续探测能力, 同时提供更准确的 γ 中尺度涡旋特征参数, 实现多部雷达组网是必要的。然而, 不同雷达共同覆盖区内对同一涡旋的观测距离和地物遮挡等因素存在差异, 导致这些雷达观测的涡旋数目和特征参数不一致 (Hengstebeck et al., 2018; Brown et al., 2000), 影响预报员判断。

目前, 学者针对雷达数据已发展了多种原始观测量的拼图算法, 包括反射率因子 (肖艳姣和刘黎平, 2006)、径向速度三维风场反演 (刘黎平等, 2003) 和双偏振参量拼图 (吴翀, 2018), 以及基于上述观测量拼图结果的相态识别 (吴翀等, 2021) 和定量降水估测 (勾亚彬等, 2014) 等算法。然而, γ 中尺度涡旋获取自极坐标系下基数据, 若对其进行水平和垂直平面上的插值可能会影响涡旋特征中最大速度等关键信息。因此, 必须在极坐标系下进行多雷达拼图。目前国外在中气旋的多雷达组网融合方面已有一定研究, 如 Hengstebeck 等 (2018) 利用本地化中气旋算法对德国 17 部 C 波段业务雷达组网观测的中气旋数据进行处理, 经过对涡旋的匹配及匹配后的特征参数高度加权发展了涡旋组网融合算法, 结果表明该方法有效减少涡旋识别中地物和距离等因素的影响, 增强了强对流的预警能力。

我国 CINRAD/SA 雷达在东南沿海和中部等人口稠密区布网密集, 站点平均间距仅 70~120 km, 这使得业务雷达共同观测区域内 γ 中尺度涡旋的出现频率较高, 为多雷达组网提供了基础条件。本文基于广东省广州、韶关、清远 3 部 CINRAD/SA 雷达的共同观测数据, 利用本地化的 NSSL-MDA 算法对比不同雷达对 γ 中尺度涡旋的识别数目和特征参数差异, 发展涡旋匹配与组网融合方法, 并检验融合产品的效果。

1 数据与方法介绍

1.1 雷达数据和两次强对流过程概况

本文使用的观测数据来自广东省广州市、韶关市以及清远市 CINRAD/SA 雷达, 探测时段 2019 年 4 月 26 日 09 时 12 分 (北京时, 下同)—27 日 04 时 54 分, 期间发生 2 次伴有中气旋的强对流过程。第一次对流过程出现在 26 日 09 时 06 分, 风暴初生于梧州市东北部, 成熟于 13 时 00 分, 随后逐渐衰弱, 在 15 时 42 分移出雷达观测范围。第二次对流过程风暴出现在 26 日 17 时 12 分, 形成于贺州市东部山区, 在往西南方向移动的过程中于 22 时 06 分增强至超级单体风暴, 随后逐渐衰弱, 27 日 04 时 54 分在南海区域消散。两次对流过程都属于 α 尺度范围 (300 km 左右) 的中尺度对流系统, 且均伴随着多轮 γ 中尺度涡旋的初生和消散。

三部雷达执行的均是 VCP21 (volume coverage pattern 21) 降水体扫模式 (9 层仰角为 0.5°~19.5°), 体扫时间为 6 min。考虑到地形遮挡导致不同雷达对同一 γ 中尺度涡旋识别结果存在偏差, 本文选择地形影响较大的广州和韶关雷达 (两者直线距离 200 km) 以及地形影响小的广州和清远雷达 (两者直线距离 215 km) 两两匹配对比分析。

1.2 γ 中尺度涡旋探测算法

1.2.1 算法概述

本文使用的是本地化的 NSSL-MDA 算法 (王超, 2023), 算法处理流程如图 1 所示。在运行该算法前, 还需进行速度退模糊处理来订正速度模糊提高 γ 中尺度涡旋特征参数可用性并减少算法空报, 在此使用已公开获取且已经过本地化检测的退模糊工具 Py-ART (Helmus and Collis, 2016)。此外, 选取合适的切变段反射率阈值以减少噪声数据 (本文将 30 dBz 的雷暴云形成临界阈值设置为切变段起始识别阈值) 并同时获取更大的弱回波区内速度极大值 (本文将 10 dBz 设为切变段终止识别阈值)。

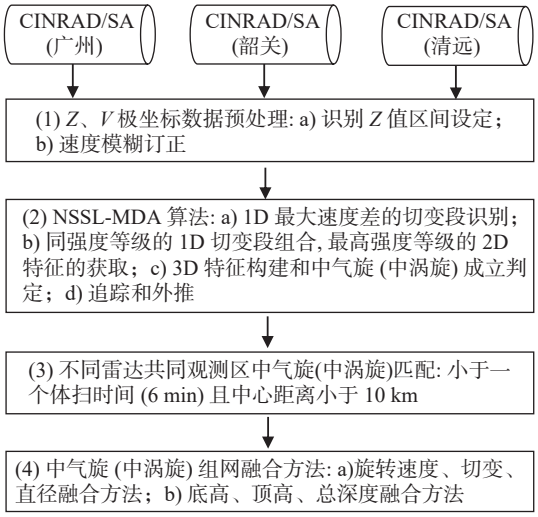


图 1 基于多部 S 波段新一代天气雷达 (CINRAD/SA) 的 γ 中尺度涡旋识别、匹配及组网融合流程图 (Z 和 V 分别表示反射率因子和径向速度, 1D、2D、3D 分别表示一维、二维、三维)

Fig. 1 Flowchart for the identification, matching, and network fusion of γ-mesoscale vortices based on multiple S-band CINRAD radars (Z and V represent factor and radial velocity, 1D, 2D, and 3D represent one-dimensional, two-dimensional, and three-dimensional, respectively)

经上述预处理的数据输入至本地化 NSSL-MDA 中进行识别, 包含以下四个步骤: 1) 在同一斜距上随方位增大, 识别由负到正的两个库间满足最大速度差并符合算法阈值标准的一维涡旋切变段矢量, 并由不同切变强度等级阈值 (表 1) 对每个一维切变段进行判断, 存储为不同等级的一维切变段矢量组; 2) 将临近斜距上的一维矢量从最小等级开始依次组合, 获得由弱到强的切变段拼接形成的存在交叉或嵌套区域的不同二维特征, 并根据位置关系从中保留最外围弱的二维特征以及最强核心的二维特征中心位置及高度特征参数组合为唯一的二维特征; 3) 将不同仰角层上存在空间关联的唯一二维特征间构建为三维特征, 并判断是否满足 γ 中尺度涡旋最低标准。其中, 本文将三维特征底高 5 km 以下, 顶高 12 km 以下, 且具有连续 2 层及以上仰角 (该三维特征距雷达 175 km 内, 175 km 外仅需满足 1 层仰角) 的涡旋定义为 γ 中尺度涡旋; 4) 利用相邻时次上三维特征的位置进行追踪和线性外推。上述算法的具体细节详见王超 (2023)。

表 1 NSSL-MDA 算法强度等级阈值

Table 1 Strength rank thresholds for the NSSL-MDA algorithm

强度等级	最大正负速度差或最大相邻库间速度差/($m \cdot s^{-1}$)	方位切变量/($m \cdot s^{-1} \cdot km^{-1}$)
1	10.0	2.00
2	10.0	3.00
3	15.0	3.75
4	20.0	4.50
5	25.0	5.25

注: 表中阈值仅适用于0~100 km范围内; 在100~200 km范围内, 表中速度差阈值(第二 列)线性降低至75%, 切变阈值(第三列)线性降低至50%; 超过200 km, 阈值与200 km处相同; 等级2以后阈值通过线性插值计算, 最高为26级。

对上面 NSSL-MDA 输出的识别结果, 进行人工检验得到准确的 γ 中尺度涡旋结果, 再经过对不同雷达的交叉观测区域内相同时间的同一个 γ 中尺度涡旋间匹配, 得到共同探测到的涡旋以及部分雷达漏测的涡旋。最后完成对 γ 中尺度涡旋的组网融合。

1.2.2 γ 中尺度涡旋特征参数定义

算法输出 γ 中尺度涡旋的 7 个主要的特征参数如下: (1) 质心位置。6 km 以下所有仰角层上识别的二维切变特征质心的平均位置, 以该坐标距雷达的方位及水平距离表示。(2) 最大直径。12 km 以下所有仰角层上识别的二维特征中最大的一个最大正速度与最大负速度间距离。(3) 最大旋转速度。12 km 以下所有仰角层上识别的二维特征内最大正速度与最大负速度间差值一半的最大值。(4) 最大切变量。12 km 以下所有仰角层上识别的二维特征中最大正速度与最大负速度差值除以两库间距离的最大值。(5) 底高。识别的最低层仰角上二维特征中心位置处的海拔高度。(6) 顶高。识别的最高层仰角上二维特征中心位置处的海拔高度。(7) 总深度。12 km 以下所有二维特征中最高和最低的两个二维特征中心位置所在的半波束高度之差。

1.3 不同雷达间的 γ 中尺度涡旋配对及比较方法

对广州和韶关雷达、广州和清远雷达识别到的 γ 中尺度涡旋进行匹配。若两部雷达的 γ 中尺度涡旋质心经过地理换算后平面投影距离相差小于 10 km, 且时间差不超过一个体扫 (6 min), 则视为匹

配成功。本文对匹配成功的涡旋，选取 5 个主要特征参数进行分析：最大旋转速度、最大切变量、底高、总深度和最大直径。通过计算各特征参数的平均偏差 (MD，记为 M_D)，标准差 (SD，记为 S_D) 和相关系数 (CC，记为 C_C)，比较两部雷达探测结果的差异。计算公式如下

$$M_D = \frac{\sum_{i=1}^{n}(X_{A(i)} - X_{B(i)})}{n} \tag{1}$$

$$S_D = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left((X_{A(i)} - X_{B(i)}) - \left(\sum_{i=1}^{n} X_{B(i)} \cdot n^{-1} - \sum_{i=1}^{n} X_{A(i)} \cdot n^{-1}\right)\right)^2}{n}} \tag{2}$$

$$C_C = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(X_{A(i)} - \overline{X}_A\right)\left(X_{B(i)} - \overline{X}_B\right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(X_{A(i)} - \overline{X}_A\right)^2 \sum_{i=1}^{n}\left(X_{B(i)} - \overline{X}_B\right)^2}} \tag{3}$$

式中，n 指的是两部雷达共同匹配的涡旋数目，下标 i 表示第 i 个匹配涡旋，X_A 和 X_B 分别代表 A 雷达和 B 雷达识别的相同特征参数，$\overline{X}_A$和$\overline{X}_B$分别代表 A 雷达和 B 雷达识别的相同特征参数的平均值。

1.4 γ 中尺度涡旋组网融合方法

(1) 旋转速度、切变和直径的融合方法。采用距离指数权重法 (肖艳姣等, 2006) 对 CINRAD/SA 雷达网覆盖区域内 γ 中尺度涡旋特征参量进行组网融合。对于两部雷达的资料重叠区的涡旋，第 i 个涡旋的特征参量可以通过下面的公式得到

$$f^m(i) = \frac{f_A(i)w_A + f_B(i)w_B}{w_A + w_B} \tag{4}$$

其中，$f^m(i)$是第 i 个涡旋两部雷达的特征参量融合值，$f_A(i)$(或$f_B(i)$) 是来自 A(或 B) 雷达的第 i 个涡旋的三维特征参量值，w_A(或w_B) 是给$f_A(i)$(或$f_B(i)$) 的权重因子，如果$f_A(i)$(或$f_B(i)$) 为 0，则涡旋 i 的值就等于$f_A(i)$(或$f_B(i)$) 的特征参量值；若两者均不为 0，则采用 A、B 雷达参量值的权重平均。指数权重因子 w 的计算公式为

$$w = \exp\left(-\frac{r^2}{R^2}\right) \tag{5}$$

其中，r 为涡旋到雷达的距离，R 为距离门限 (此处 R=100 km，王红艳, 2016)。

(2) 底高、顶高和总深度的融合方法。在同一时刻，若仅一部探测到 γ 中尺度涡旋，则将此涡旋的底高、顶高和总深度直接作为融合后的值；若两部雷达同时观测到同一涡旋，上述距离指数加权无法反映其实际的高度信息。因此，将不同雷达探测到底高和顶高结合，形成垂直更密集的 γ 中尺度涡旋信息。具体方式为：分别选取底高更低、顶高更高的值作为融合后的底高和顶高，融合后的总深度由融合后的底高和顶高的半波束高度相减而来。

2 S 波段雷达组网融合前识别 γ 中尺度涡旋分析

2.1 两部雷达识别 γ 中尺度涡旋匹配分析

本节首先对广州和韶关雷达共同观测区域内的 γ 中尺度涡旋进行匹配，并对匹配失败的涡旋分类分析原因。由于广州和清远雷达共同观测区域内的涡旋匹配失败原因与前者类似，故不再重复分析。最后，结合广州和清远雷达匹配成功的涡旋，分析地形遮挡对 γ 中尺度涡旋识别的影响。

在两次强对流过程中，广州和韶关雷达分别探测到 272 个和 222 个 γ 中尺度涡旋。其中，在共同观测区域内，广州和韶关雷达分别探测到到 250 个和 172 个涡旋。图 2a 展示了广州和韶关雷达共同覆盖区域内 111 个匹配成功和 139 个匹配失败(广州雷达有识别而韶关未能识别)的涡旋位置分布。图 2b 则对这 139 个匹配失败的涡旋进行了原因分类及位置分布展示，主要原因包括以下 4 种：

第一种原因是 γ 中尺度涡旋较弱且距离较远 (共 62 个，图 2b)。这些涡旋切变强度较弱 (低于算法标准)，垂直伸展较浅 (通常仅 1 层仰角)，且距离韶关雷达较远 (190 km 外)，由于远距离垂直空间间隙变大及波束展宽分辨率降低引起了 γ 中尺度涡旋弱于真实切变强度，导致这些弱涡旋在韶关雷达中未能达到识别标准而被遗漏。例如，图 3a 为广州雷达识别的 2.4°仰角层径向速度图中的 γ 中尺度涡旋 (黑框内)，该涡旋距雷达约 33 km，该层最大的相邻方位库最大速度差是 12 m·s^{-1}、旋转速度为 11.5 m·s^{-1}，切变值 1.4 m·s^{-1} km^{-1}，对应表 1 强度等级为 2，表明此 γ 中尺度涡旋内切变还不够强。经换算，距离韶关雷达为 203 km，对应到广州雷达同一高度的仰角为 0.5° (图 3b)，此位置仅出现了很弱的达不到算法识别标准的涡旋，且其他仰角层已无涡旋特征。

第二种原因是距离模糊的影响 (共 13 个，图 2b)。距离模糊导致径向速度缺测且无法恢复涡旋特征，当 γ 中尺度涡旋正好处于此距离模糊区内则识别不出。在图 2a 中，这些受距离模糊而未识别出 γ 中尺度涡旋均分布在韶关雷达西南方向 150 km 附近。图 3d 展示了韶关雷达红色轮廓线内因距离模糊而无明显 γ 中尺度涡旋特征的例子，在同一位置和高度

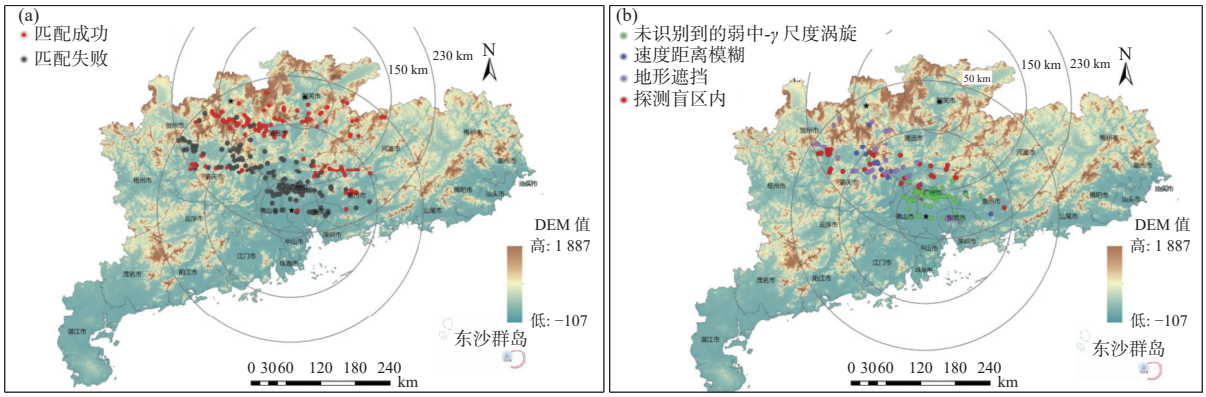


图 2 2019 年 4 月 26 日广州与韶关雷达 (★表示雷达站位置) 间匹配与未匹配的 γ 中尺度涡旋的位置分布 (a) 以及匹配失败的原因分类及其位置分布 (b) (圆圈表示雷达探测范围, DEM 为海拔高度, 单位: m)

Fig. 2 The (a) spatial distribution of matched vs. unmatched γ-mesoscale vortices and (b) causes of unmatched vortices with their spatial distribution between Guangzhou and Shaoguan radars on April 26, 2019 (the symbol '★' denotes radar site locations, the circle represents the radar detection range, and DEM is the altitude, unit: m)

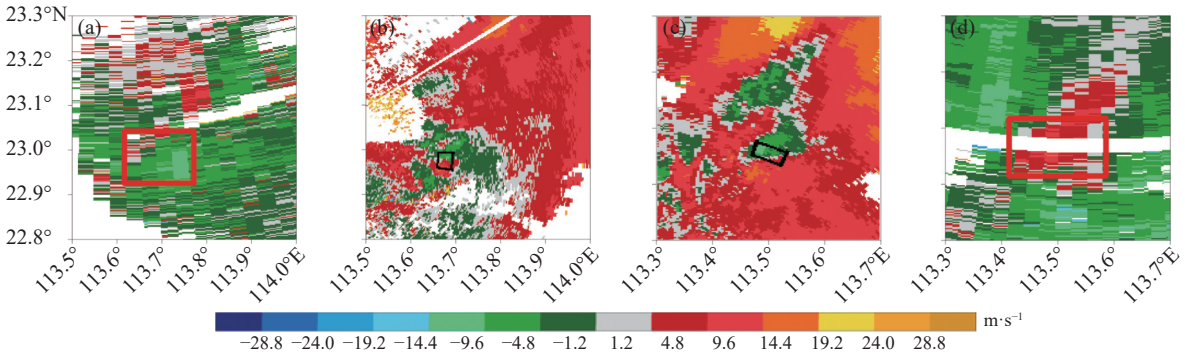


图 3 广州雷达 2019 年 4 月 26 日 12 时 54 分 2.4° (a) 和 13 时 12 分 1.5° (c) 仰角层径向速度图中正确识别的 γ 中尺度涡旋 (黑框), 以及韶关雷达对应时次 0.5° (b) 和 1.5° (d) 仰角层径向速度图中未能识别的 γ 中尺度涡旋 (红框)

Fig. 3 Correctly identified γ-mesoscale vortices (black boxes) in the radial velocity at the (a) 2.4° elevation layer at 12:54 BT and (c) 1.5° elevation layer at 13:12 BT on April 26, 2019 from the Guangzhou radar, and unidentified meso-γ-scale vortices (red boxes) in the simultaneous radial velocity at the (b) 0.5° and (d) 1.5° elevation layers from the Shaoguan radar

处, 广州雷达则在此位置探测到该涡旋 (图 3c)。

第三种原因是地物完全或部分遮挡了低层 γ 中尺度涡旋而无识别 (共 32 个, 图 2b)。从图 2b 可看出韶关雷达四周分布山脉地形, 尤其是此雷达站西南方向存在 2 km 高度以上的南岭山脉, 韶关雷达未识别出的 γ 中尺度涡旋分布在此山脉后方。相反, 在此区域内的 γ 中尺度涡旋在广州雷达方向基本不受地物遮挡影响而得到保留。例如, 图 4a 展示了韶关雷达西南方位上约 135 km 处一个 γ 中尺度涡旋 (涡旋 A) 受山脉遮挡影响的个例, 涡旋 A 被韶关雷达漏测而在不受地物影响的广州雷达中被识别。涡旋 A 在广州雷达 116 km 处被识别 (对应于韶关雷达的 135 km), 分布在广州雷达 0.5° ~ 1.5°仰角层上 (对应海拔 1.9 ~ 4.1 km)。韶关与涡旋 A 沿线的地形高度剖面图 (图 4b) 显示, 距离韶关 47 km 处的山脉高度接近 1.2 km, 已经超过韶关雷达最低仰角 (0.5°) 的主波束高度, 并且韶关 1.5°仰角的波束中心为 4.8 km, 又高于涡旋 A 的顶高, 因此涡旋 A 在韶关雷达上无回波特征。

第四种原因是部分浅层 γ 中尺度涡旋顶部位于雷达观测盲区 (共 32 个, 图 2b)。由于韶关雷达海拔较高, 雷达最低扫描高度有限, 难以探测到远处的这些低顶高涡旋。

综上所述, 除 γ 中尺度涡旋本身较弱、垂直伸展浅及雷达观测模式限制外, 地物遮挡是影响 γ 中尺度涡旋识别的主要因素。为此, 本节进一步分析了广州和清远雷达的匹配结果。从雷达位置分布 (图 5) 可见, 韶关站地势中间低、周围高, 易受山脉遮挡; 而清远站海拔更高, 受到地物遮挡的影响较小, 能够探测到更多广州雷达范围内的 γ 中尺度涡旋, 在广州和清远雷达间共匹配到 181 个 γ 中尺度涡旋。图 5 展示了三个雷达站点共同观测区域地形分布, 其中蓝色散点是广州和韶关站共同识别到而清远站未识别的 γ 中尺度涡旋, 其数目较少且部分在清远雷达观

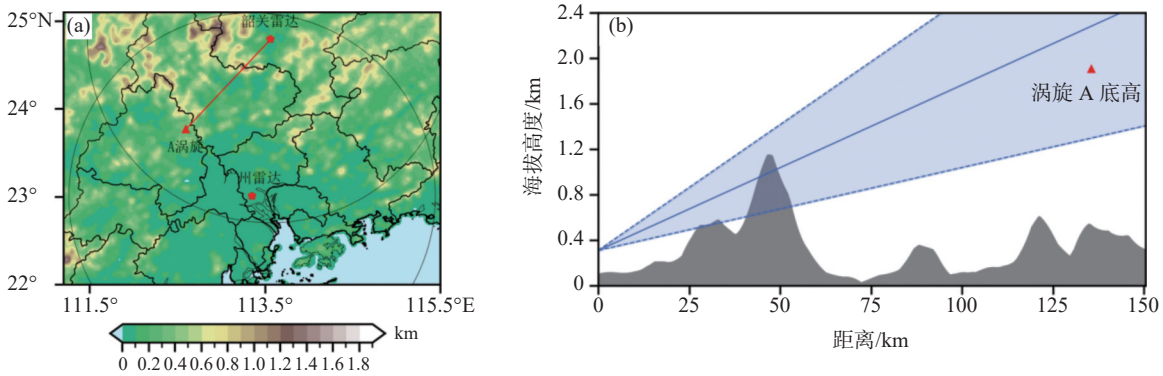


图 4 γ 中尺度涡旋 (涡旋 A)、韶关雷达站和广州雷达站周围的数字高程图 (a) 以及韶关雷达站与涡旋 A 连线方向上的地形高度分布 (b) (图 a 中黑色空心圆代表以雷达站为中心, 半径 230 km 的范围; 图 b 中蓝色阴影区表示 0.5°仰角层波束照射高度范围)

Fig. 4 (a) Digital elevation map showing the γ-mesoscale vortex (Vortex A), the Shaoguan radar station, and the Guangzhou radar station. (b) Terrain height distribution along the red line between the Shaoguan radar station and Vortex A (The black hollow circle represents a 230 km radius centered on the radar station in Fig. 4a, the blue shaded area indicates the beam irradiation height interval for the 0.5° elevation layer in Fig. 4b)

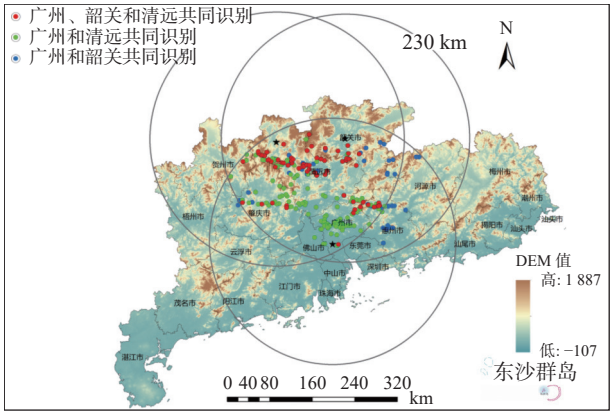


图 5 2019 年 4 月 26 日广州、韶关以及清远雷达识别 γ 中尺度涡旋匹配结果的位置分布图

Fig. 5 Spatial distribution of the matching results of γ-mesoscale vortices identified by the Guangzhou, Shaoguan, and Qingyuan radars during the severe weather event on April 26, 2019

测范围外; 绿色散点为广州和清远站共同识别而韶关站未能识别的 γ 中尺度涡旋, 其多分布于韶关站西南方向山脉后方及接近广州站点的位置。这表明清远雷达凭借地形优势, 能够探测到韶关雷达受遮挡的区域, 进一步证明了受地物遮挡影响的雷达其识别的涡旋数目和涡旋特征参数质量均不高。

2.2 雷达距离差异对 γ 中尺度涡旋识别的影响

本文针对 2019 年 4 月 26 日过程, 选取广州与韶关雷达以及广州与清远雷达共同区域内匹配的 γ 中尺度涡旋识别结果, 分析了雷达与 γ 中尺度涡旋的距离区别对识别结果的影响。具体分析方法如下: 定义 γ 中尺度涡旋质心位置与雷达站之间的水平地面投影距离为中心距离 (单位 km), 通过计算广州与配对雷达 (韶关/清远) 识别结果的中心距离差绝对值, 将配对结果划分为 5 个等级: 等级 1 (<30 km)、等级 2 (30 ~ 50 km)、等级 3 (50 ~ 100 km)、等级 4 (100 ~ 150 km) 和等级 5 (>150 km)。基于公式 (1—3) 计算了 M_D、S_D 和 C_C 指标。

图 6a、c 和 e 展示了广州与韶关雷达的对比结果。值得注意的是, 由于匹配样本的中心距离差均小于 150 km, 故不计算等级 5 的值。分析表明, 在最大旋转速度、最大切变和最大直径参数上, 距离差较小时 (0 ~ 50 km) 的 M_D 和 S_D 值显著低于距离差较大时 (>100 km), 表明参数离散度随距离差增大而增加。而底高、总深度参数与距离差无明显相关性, 考虑到匹配涡旋数目也较少, 这可能与韶关雷达受到地形遮挡导致的探测性能下降有关。为了验证地形因素的影响, 进一步分析了清远与广州雷达 181 个所匹配样本 (图 6b、d 和 f)。结果显示, 与广州和韶关匹配涡旋特征参量相比, 整体上清远和广州匹配涡旋特征参量更为一致。除了底高和总深度外, 最大旋转速度、最大切变和直径的演变趋势更为一致, 表现为 M_D 和 S_D 随着距离的增加而增大, C_C 则相应减小。在共同探测区域内涡旋的底高的 M_D 都为负, 表示整体上广州雷达探测到的涡旋底高更低、深度更大。这归因于多数涡旋更靠近广州雷达, 以及广州雷达海拔较低、更多的扫描层数有利于获取更完整的垂直结构。这一发现与刘应军等 (2006) 关于近距离探测可获得更多垂直采样数据的结论相符。

综合分析表明, γ 中尺度涡旋特征参量的识别差异主要受以下因素影响: 其一是距离效应。当涡旋与两部雷达距离相当时, 参量一致性较高; 距离差异增大时, 更远雷达因波束宽度导致空间分辨率下降, 通过速度平滑效应减弱了旋转速度、切变、直径的识别数值, 同时波束中心高度增加造成涡旋底部探测不完整, 导致底高虚高、深度低估。其二是地形影响。韶关雷达因地形遮挡导致匹配参数差异显著,

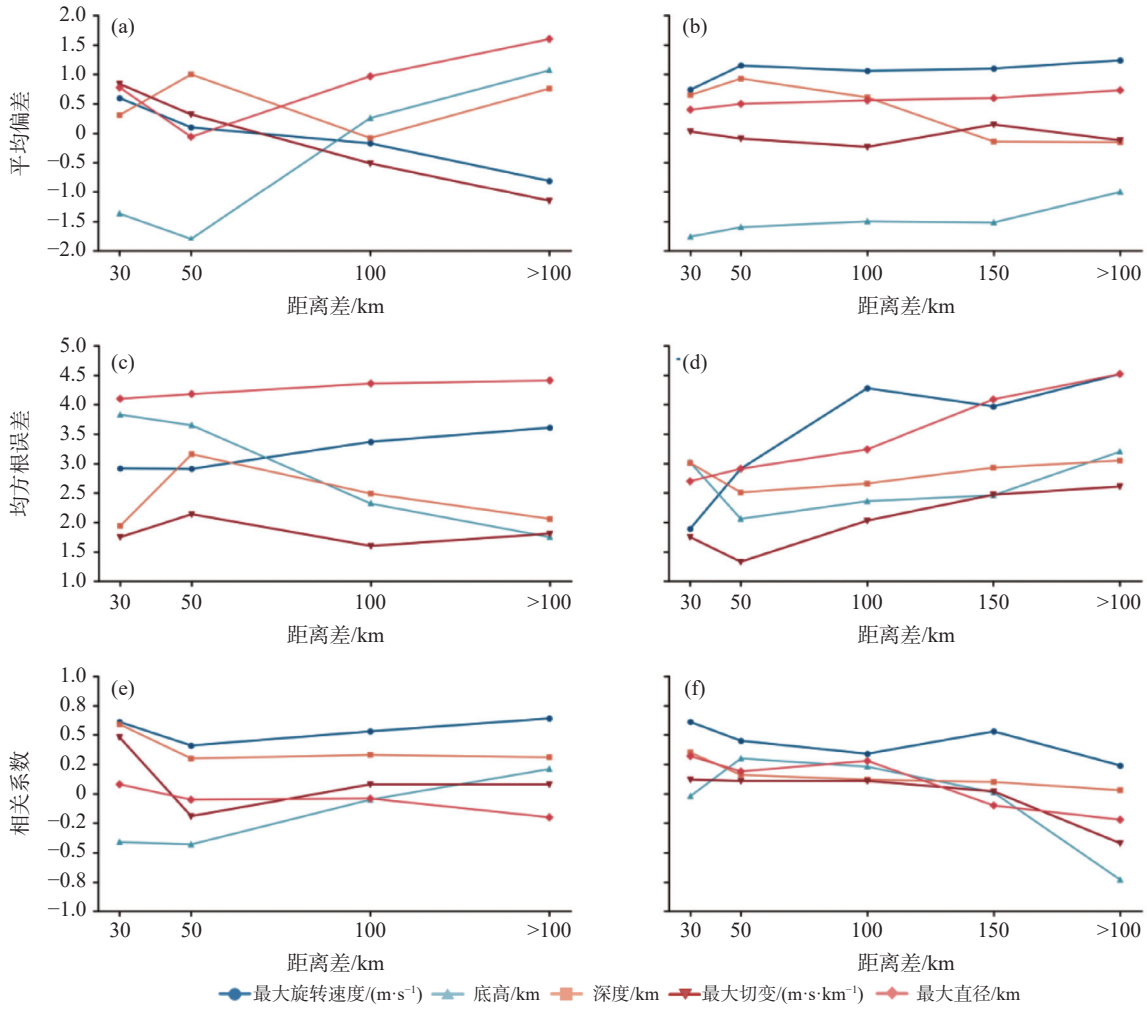


图 6 2022 年 4 月 26 日过程中广州与韶关 (a、c、e)、广州与清远 (b、d、f) 雷达匹配的 γ 中尺度涡旋的平均偏差 M_D (a, b)、标准差 S_D (c, d) 和相关系数 C_C (e, f) 对比 (横轴为 γ 中尺度涡旋与两部雷达的距离差)

Fig. 6 Comparison of characteristic parameters (a, b) M_D, (c, d) S_D and (e, f) C_C of matched γ-mesoscale vortices between (a, c, e) Guangzhou radar and Shaoguan radars and (b, d, f) between Guangzhou radar and Qingyuan radars during the event on April 26, 2022 (The horizontal axis shows distance-difference)

而地形影响较小的清远雷达与广州雷达的识别结果具有更好的一致性。

2.3 同一 γ 中尺度涡旋的多雷达识别结果对比

本节选取 2019 年 4 月 26 日广州和清远雷达共同探测到的一次长生命史的中气旋过程进行对比分析, 重点探讨雷达观测距离差异对中气旋回波特征和识别结果的影响。观测时段分析显示, 广州雷达 (20 时 30 分—22 时 06 分, 17 个体扫) 较清远雷达 (20 时 48 分—22 时 06 分, 14 个体扫) 提前 18 min 识别到该中气旋, 这与 2.1 节所述地形遮挡效应一致: 初期中气旋顶部较低, 处于海拔较高的清远雷达观测盲区内, 随着中气旋发展顶部抬升后才被清远雷达探测到。

图 7 直观展示了本次中气旋过程 (20 时 30 分—22 时 06 分) 期间广州雷达 0.5°仰角层上反射率回波 (图 7a—i) 以及同时刻清远雷达相应海拔的 (1.5°仰角层) 反射率回波 (图 7f—r) 演变过程图, 相对应时次的速度回波演变如图 8 所示。以不受低层盲区影响的广州站为例, 此中气旋形成于超级单体内, 图 8a 中此中气旋在 20 时 30 分首次被识别时超级单体已达到成熟期 (图 7a 最大 Z 值已达到 60 dBz 以上), 而在识别到中气旋之后的时次内, 超级单体进一步增强, 表现在图 7b—e 广州站超级单体的最强 (>60 dBz) 回波面积逐渐增长, 这得益于中气旋进一步的维持和变强 (图 8b—e)。而在 21 时 30 分 (图 8f—i) 之后中气旋的开始缓慢减弱, 相应所在超级单体也开始减弱, 表现为强回波区域面积减小, 最大回波强度降低 (图 7f—i)。

为了更清晰地量化比较两个雷达识别的中气旋强弱演变趋势差异, 图 9 展示了广州和清远单部雷达探测该中气旋特征参数的时间演变曲线, 包括最大旋转速度、最大切变量、底高和顶高、总深度以及

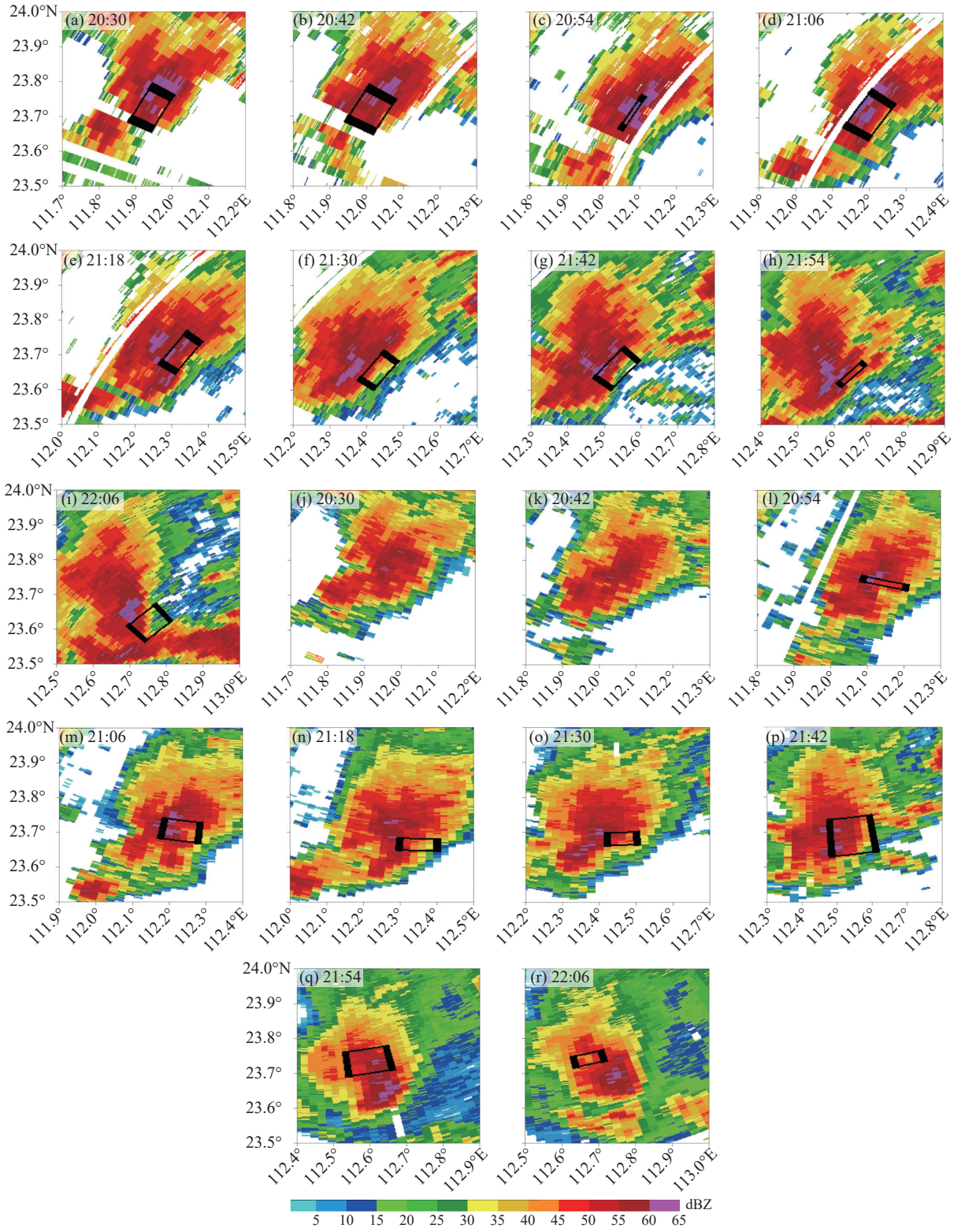


图 7 2019 年 4 月 26 日 20 时 30 分—22 时 06 分中气旋过程广州雷达 0.5°仰角 (a—i) 和清远雷达 1.5°仰角 (j—r) 不同时次反射率回波特征观测结果 (黑色矩形框表示 γ 中尺度涡旋识别区域)

Fig. 7 Reflectivity characteristics of the mesocyclone event during 20:30-22:06 BT on April 26, 2019 from (a-i) Guangzhou radar at 0.5° elevation, (j-r) Qingyuan radar at 0.5° elevation (Black rectangles represent the identified areas of the γ-mesoscale vortices)

最大直径。分析结果显示，两部雷达识别的中气旋特征参数数值虽存在一定差异，但整体变化趋势较为一致。具体来看，两部雷达在最大旋转速度 (图 9a)、最大切变 (图 9b) 和最大直径 (图 9e) 参数上的差异，主要在于它们与中气旋的距离不同 (均在 100 km 外，且两者相差约 40 km)。不过从整个过程来看，这些参数的平均偏差相对较小。最大的差异体现在顶高 (图 9c) 和总深度 (图 9d) 上。在 21 时 00

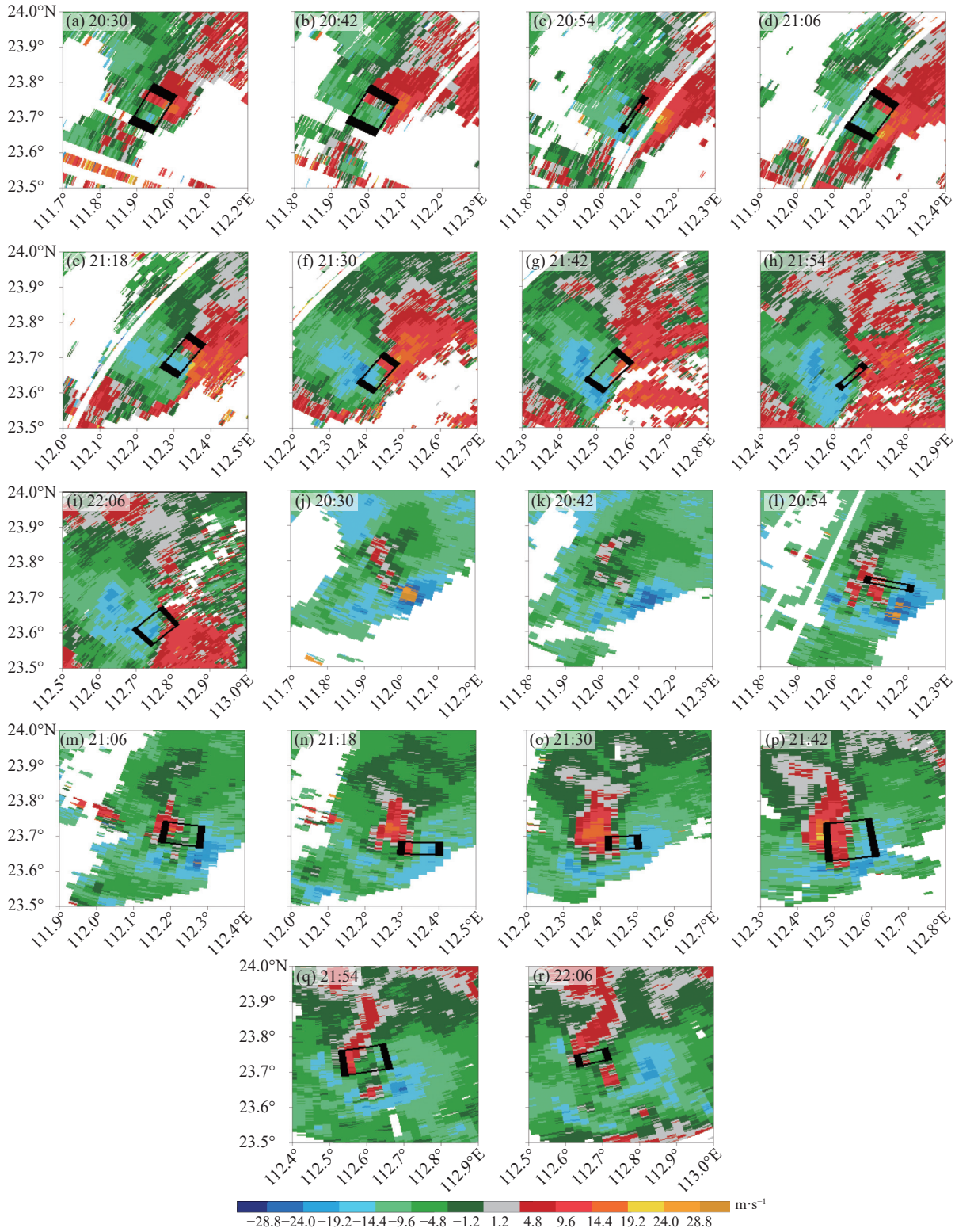


图 8 同图 7, 但为径向速度特征

Fig. 8 Same as Fig.7, but for radial velocity fields

分—21 时 18 分期间, 广州雷达识别的特征参数更大, 而此时清远雷达的高层仰角未能探测到中气旋回波 (未展示)。这一现象可能与中气旋距离清远雷达较近 (大约 110 km), 而距离广州雷达较远 (大约 150 km) 有关。由于 S 波段雷达的 VCP21 扫描模式垂直采样不足, 广州雷达探测到的中气旋的高度恰好处于清远雷达最高仰角层和次高仰角层之间的探测盲区内。

从演变过程来看, 该中气旋在 20 时 30 分—21 时 18 分期间持续增强, 之后开始减弱。以广州站为例, 从 20 时 30 分首次检测到该中气旋开始, 到

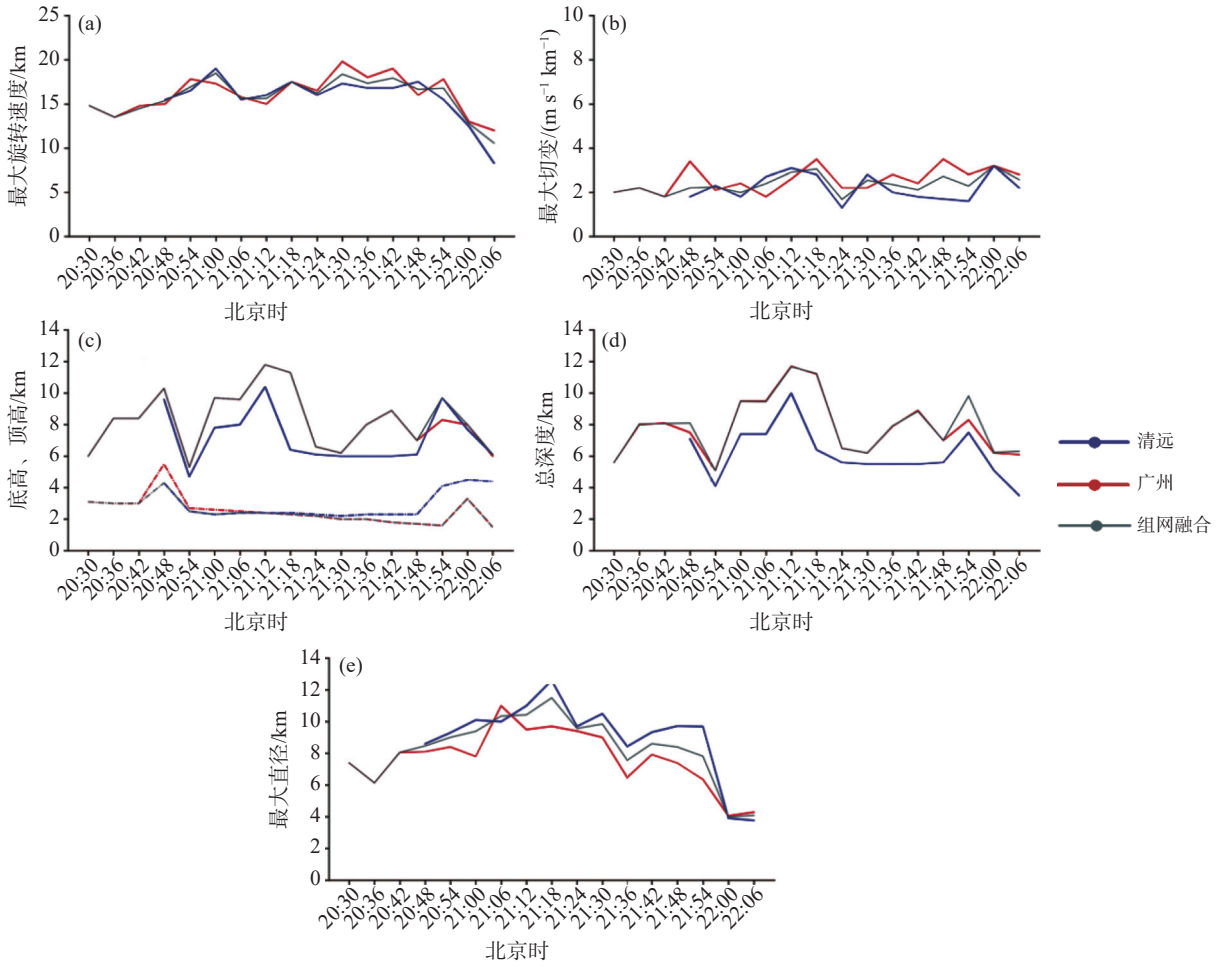


图 9 2019 年 4 月 26 日 20 时 30 分—22 时 06 分广州与清远雷达组网融合前后的 γ 中尺度涡旋最大旋转速度 (a)、最大切变 (b)、底高 (虚线) 和顶高 (实线) (c)、总深度 (d)、最大直径 (e) 时序变化

Fig. 9 Temporal variation of (a) maximum rotation velocity, (b) maximum shear, (c) base/top height, (d) total depth, (e) maximum diamete of γ-mesoscale vortex before and after matched Guangzhou-Qingyuan radar observations during 20:30-22:06 BT on April 26, 2019

21 时 18 分, 最大旋转速度从 14 m·s^{-1} 增至 20 m·s^{-1}、顶高从 6 km 升至 12 km、总深度从 6 km 增至 12 km, 最大直径从 6 km 增至 11 km (图 9a、c、d、e), 表明中气旋在增强的同时, 其水平范围和垂直伸展程度都在增大。这一变化与图 7b—e 显示的超级单体强回波区 (>60 dBz) 面积增长相对应。随着中气旋总深度的减小也滞后地反映于超级单体减弱上, 21 时 30 分后 (图 7f), 超级单体强回波面积也逐渐减小。值得注意的是, 虽然从清远雷达的反射率图 (图 7j—n) 中并不能直观看出风暴增强过程, 但通过特征参数 (图 9a、c、d、e) 的定量分析, 仍能准确反映超级单体的发展状态。

3 多部 S 波段雷达的 γ 中尺度涡旋组网融合分析

基于前文研究, 除地形遮挡因素外, γ 中尺度涡旋的识别结果主要受雷达距离影响。据此, 本文提出了一种综合考虑距离权重和高度因子的多雷达 γ 中尺度涡旋融合组网方法 (详见 1.3 节), 该方法能有效减少涡旋识别中地物和距离等因素的影响。

3.1 组网融合效果个例验证

选取 2.3 节所述的 γ 中尺度涡旋全过程进行组网融合实验, 结果如图 9 中灰线所示。从图 9a 可以看出, 由于单部雷达识别的最大旋转速度本身差异较小, 融合结果与两部雷达识别值保持了良好一致性, 同时完整保留了其随时间变化的趋势特征。对于最大切变值 (图 9b), 由于该参数取决于识别中气旋所有仰角层中的最大正负速度差及其间距离, 原始识别结果容易出现突变情况, 而融合处理使得最大切变值随时间的变化更加符合中气旋实际的发展趋势。从图 9c、d 可知, 经组网融合后, γ 中尺度涡旋底高、顶高、深度均有所增加。图 9e 显示, 直径参数在保持连续性的同时, 有效减小了两部雷达识别结果的差异。综合分析表明, 组网融合不仅弥补了清远雷达扫描局限性造成的探测缺失, 更重要的是提供了更加完整和准确的 γ 中尺度涡旋发展过程观测结果。

3.2 组网融合效果统计分析

本节选取 2019 年 4 月 26 日过程广州与清远雷达共同匹配的 181 个 γ 中尺度涡旋进行组网融合实验, 通过计算 M_D、S_D 和 C_C, 系统比较了融合结果与单站雷达识别结果 (广州、清远) 间的差异。需说明的是, 本文分析仅针对匹配成功的涡旋样本。

表 2 展示了组网融合结果与单站雷达识别参数的对比情况, 包括 γ 中尺度涡旋的底高、顶高、总深度、最大旋转速度、最大切变量、最大直径这 6 个特征参数的对比。分析表明, 融合后的底高较广州和清远雷达分别降低 0.39 km 和 1.87 km, 且其 S_D 和 C_C 更小, 说明底高的取值更多地来自广州雷达识别结果。这一结果印证了前文结论, 即广州雷达凭借其低层探测优势, 对底高参数的确定起主导作用。同理, 顶高则更多体现清远雷达的高空探测能力。这种优势的互补的融合方式, 有效解决了广州雷达对顶高的低估和清远雷达对底高的高估问题。值得注意的是, 融合后的总深度较单站识别结果平均增加 2 km 以上, 表明基于高度相加的组网融合方法能更准确反映涡旋实际垂直伸展, 这对龙卷的预报非常重要。

在动力参数方面, 融合结果展现出显著优势: 最大旋转速度、最大切变和最大直径均优于单站识别结果, 同时保持较高的相关性。具体而言, 最大旋转速度比广州雷达平均增加了 0.1 $m\cdot s^{-1}$, 这归因于距离加权的设计, 即赋予近距离的雷达 (广州) 更大权重, 既保留了涡旋的精细结构特征, 又有效补偿了远距离的雷达 (清远) 因波束展宽导致的分辨率损失。综合来看, 本文提出的组网融合方法通过整合双雷达的互补优势, 不仅提高了涡旋参数的探测能力 (更大的旋转速度、切变以及直径), 还扩展了有效识别范围 (增加的涡旋厚度), 为多雷达组网观测提供了方法。

表 2 2019 年 4 月 26 日广州与清远雷达组网融合结果与单站识别 γ 中尺度涡旋特征参数差异对比

Table 2 Comparison of γ-mesoscale vortex characteristic parameters between network fusion (Guangzhou- Qingyuan radars) and individual radar detections during the event on April 26, 2019

参数	组网融合后与广州单站对比			组网融合后与清远单站对比		
	M_D	S_D	C_C	M_D	S_D	C_C
底高/km	−0.39	0.86	0.84	−1.87	1.71	0.14
顶高/km	1.90	2.29	0.59	0.88	1.46	0.76
总深度/km	2.21	2.35	0.48	2.45	1.67	0.64
最大旋转速度/($m\cdot s^{-1}$)	0.10	2.36	0.76	1.09	2.98	0.67
最大切变量/($m\cdot s^{-1}\cdot km^{-1}$)	0.46	1.35	0.48	0.13	1.55	0.58
最大直径/km	0.49	2.45	0.57	0.28	2.86	0.52

4 结　论

本文使用中气旋探测算法对广州、韶关及清远三部 CINRAD/SA 雷达在 2019 年 4 月 26 日 08 时—27 日 08 时获取到的 γ 中尺度涡旋识别结果进行两两配对分析, 基于分析结果提出了 γ 中尺度涡旋组网融合方法, 并将组网融合效果进行检验, 得出主要结论如下:

(1) 多雷达协同观测时, γ 中尺度涡旋的匹配效果主要受四个因素影响: 首先, 弱涡旋因远距离探测时分辨率降低而易被漏检; 然后, 距离模糊导致的径向速度缺失会直接影响涡旋识别; 其次, 地形遮挡造成速度场中涡旋特征消失; 最后, 低顶高涡旋受雷达扫描仰角限制难以被远端雷达捕捉。这些因素共同导致不同雷达的涡旋识别数量和特征参数存在显著差异。

(2) 特征参数对比表明, 韶关雷达因受地形遮挡严重, 其与广州雷达匹配的涡旋参数分布离散度高。而地物遮挡较少的清远雷达与广州雷达识别结果匹配显示, 当涡旋与两部雷达距离相当时, 获取的涡旋特征参数一致性较好; 当距离差异较大时, 远端雷达探测的涡旋的旋转速度、切变和直径更小, 底高更高和深度也更小。涡旋演变过程时序分析发现, 随着涡旋移近, 参数一致性提升, 但受垂直采样限制, 广州雷达的顶高和深度始终高于清远雷达。

(3) 组网融合验证显示, 基于距离权重和高度校正的组网融合方法能有效解决两部雷达识别结果偏差大的问题, 而且弥补了单雷达由于地物遮挡等识别缺失的问题。统计检验表明: 组网融合结果在平均偏差 (M_D)、标准差 (S_D) 和相关系数 (C_C) 三个指标均优于单雷达识别结果。组网融合后的 γ 中尺度涡旋有着更大的旋转速度、切变和直径, 同时能够获取到更大的垂直伸展高度, 尤其是总深度平均增加了 2 km 以上。证明该方法能有效整合多雷达观测优势, 显著提升 γ 中尺度涡旋的监测能力。

参考文献 (References):

冯晋勤,汤达章,俞小鼎,等.2010.新一代天气雷达中气旋识别产品的统计分析[J].气象,36(8):47−52. Feng J Q, Tang D Z, Yu X D, et al. 2010. The accuracy statistics of mesocyclone identification products from CINRAD/SA [J]. Meteorological Monthly,36(8):47−52 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2010.8.007

勾亚彬,刘黎平,杨杰,等.2014.基于雷达组网拼图的定量降水估测算法业务应用及效果评估[J].气象学报,72(4):731−748. Gou Y B, Liu L P, Yang J, et al. 2014. Operational application and evaluation of the quantitative precipitation estimates algorithm based on the multi-radar mosaic [J]. Acta Meteorologica Sinica,72(4):731−748 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2014.050

侯谨毅,王萍.2017.基于速度对结构检测的中气旋自动识别方法[J].天津大学学报,50(11):1176−1184. Hou J Y, Wang P. 2017. Mesocyclone automatic recognition method based on detection of velocity couplets [J]. Transactions of Tianjin University,50(11):1176−1184 (in Chinese). doi:10.11784/tdxbz201703012

刘应军,顾松山,周雨华,等.2006.新一代天气雷达体扫模式的比较分析[J].气 象,32(1):44−50. Liu Y J, Gu S S, Zhou Y H, et al. 2006. Comparison of CINRAD/SA volume coverage patterns on algorithms output [J]. Meteorological Monthly,32(1):44−50 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1000−0526.2006.01.007

柳云雷,李昌兴,张乐坚,等.2020.基于高分辨率高程数据统计分析新一代天气雷达组网的地形遮挡影响[J].气象学报,78(4):705−720. Liu Y L, Li C X, Zhang L J, et al. 2020. Statistical analysis of terrain blockage impacts on the CINRAD network based on DEM data [J]. Acta Meteorologica Sinica,78(4):705−720 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2020.037

刘黎平,张沛源,梁海河,等.2003.双多普勒雷达风场反演误差和资料的质量控制[J].应用气象学报,14(1):17−29. Liu L P, Zhang P Y, Liang H H, et al. 2003. Error estimation in wind fields derived from Dual-Doppler radar and data quality control [J]. Journal of Applied Meteorological Science,14(1):17−29 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1001−7313.2003.01.003

王红燕,王东平,牛淑贞,等.2013.河南长葛南席一次龙卷成因分析及雷达预警初探[J].暴雨灾害,32(3):256−262. Wang H Y, Wang D P, Niu S Z, et al. 2013. Analysis on the causes of a tornado in Nanxi, Changge of Henan province and the preliminary study on radar warning [J]. Torrential Rain and Disasters,32(3):256−262 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2013.03.009

王红艳.2016.新一代天气雷达组网估算降水的覆盖能力分析及方法研究[D]. 南京:南京信息工程大学. Wang H Y. 2016. Accessment of coverage ability and research of methods for regional mosaic QPE of CINRAD [D]. Nanjing University of Information Science & Technology (in Chinese)

王超.2023.基于双线偏振雷达的冰雹云演变的微物理和动力特征的提取方法及应用研究[D]. 南京:南京信息工程大学. Wang C. 2023. Study on the microphysical and dynamic characteristics extraction algorithm of hailstorm evolution utilized with dual-polarization radar and its application [D]. Nanjing University of Information Science & Technology (in Chinese)

王易,郑媛媛,孙康远,等.2018.南京雷达中气旋产品特征值统计分析[J].气象学报,76(2):266−278. Wang Y, Zheng Y Y, Sun K Y, et al. 2018. A statistical analysis of characteristics of mesocyclone products from Nanjing radar [J]. Acta Meteorologica Sinica,76(2):266−278 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2017.087

吴芳芳,俞小鼎,张志刚,等.2012.对流风暴内中气旋特征与强烈天气[J].气象,38(11):1330−1338. Wu F F, Yu X D, Zhang Z G, et al. 2012. The characteristics of the mesocyclone and severe weather associated with convective storms [J]. Meteorological Monthly,38(11):1330−1338 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2012.11.002

吴翀.2018.双偏振雷达的资料质量分析,相态识别及组网应用[D]. 南京:南京信息工程大学. Wu C. 2018. Data quality analysis, hydrometeor classification and mosaic application of polarimetric radars in China [D]. Nanjing, Nanjing University of Information Science & Technology (in Chinese)

吴翀,刘黎平,仰美霖,等.2021.X 波段双偏振雷达相态识别与拼图的关键技术[J].应用气象学报,32(2):200−216. Wu C, Liu L P, Yang M L, et al. 2021. Key technologies of hydrometeor classification and mosaic algorithm for X-band polarimetric radar [J]. Journal of Applied Meteorological Science,32(2):200−216. doi:10.11898/1001−7313.20210206

肖艳姣,刘黎平.2006.新一代天气雷达网资料的三维格点化及拼图方法研究[J].气象学报,64(5):647−657. Xiao Y J, Liu L P. 2006. Study of methods for interpolating data from weather radar network to 3-D grid and mosaics [J]. Acta Meteorologica Sinica,64(5):647−657 (in Chinese). doi:10.3321/j.issn:0577−6619.2006.05.011

于怀征,刁秀广,孟宪贵,等.2020.山东省一次罕见强对流天气的环境场及雷达特征分析[J]. 暴雨灾害,39(5):477-486. Yu H Z, Diao X G, Meng X G, et al. 2020. Analysis of radar echo features and environmental backgrounds of a rare severe convective weather in Shandong province [J]. Torrential Rain and Disasters,39(5):477-486 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2020.05.006

Brown R A, Janish J M, Wood V T. 2000. Impact of WSR-88D scanning strategies on severe storm algorithms [J]. Weather and Forecasting,15:90−102.doi:10.1175/1520−0434(2000)015<0090:IOWSSO>2.0.CO;2

Burgess D W, Donaldson R J, Desrochers P R. 1993. Tornado detection and warning by radar [J]. Geophysical Monograph,79:203−221. doi:10.1029/GM079p0203

Elizaga F, Conejo S, Martin F. 2007. Automatic identification of mesocyclones and significant wind structures in Doppler radar images [J]. Atmospheric Research,83(2/4):405−414. doi:10.1016/j.atmosres.2005.10.023

Hengstebeck T, Wapler K, Heizenreder D, et al. 2018. Radar Network–Based Detection of mesocyclones at the german weather service [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology,35(2):299−321. doi:10.1175/JTECH−D−16−0230.1

Helmus J J, Collis S M. 2016. The Python ARM Radar Toolkit (Py-ART), a library for working with weather radar data in the Python programming language [J]. Journal of Open Research Software,4:e25. doi:10.5334/jors.119

Lee R R, White A. 1998. Improvement of the WSR-88D Mesocyclone algorithm [J]. Weather and Forecasting,13:341−351. doi:10.1175/1520−0434(1998)013<0341:IOTWMA>2.0.CO;2

Stumpf G J, Witt A, Mitchell E D W, et al. 1998. The National Severe Storms Laboratory Mesocyclone Detection Algorithm for the WSR-88D [J]. Weather and Forecasting,13:304−326. doi:10.1175/1520−0434(1998)013<0304:TNSSLM>2.0.CO;2

Wapler K, Hengstebeck T, Groenemeijer P. 2016. Mesocyclones in Central Europe as seen by radar [J]. Atmospheric Research,168:112-120. doi:10.1016/j.atmosres.2015.08.023

Weisman M L, Trapp R J. 2003. Low-level mesovortices within squall lines and bow echoes. Part I: Overview and dependence on environmental shear [J]. Monthly Weather Review,131(11):2779−2803. doi:10.1175/MWR3215.1

Wood V T, Brown R A. 1997. Effects of radar sampling on single-doppler velocity signatures of mesocyclones and tornadoes [J]. Weather and Forecasting,12(4):928−938. doi:10.1175/1520−0434(1997)012<0928:eorsos>2.0.co;2

Markowski P, Richardson Y. 2011. Mesoscale meteorology in mid-latitudes [M]. John Wiley and Sons,430pp. doi:10.1002/9780470682104.ch2

(责任编辑 杨 浩)