

肖靖宇,杨玲,俞小鼎,等,2022.佛山相控阵阵列雷达探测 2020 年 9 月 4 日短时强降水天气过程的分析[J].气象,48(7):826-839. Xiao J Y, Yang L, Yu X D, et al, 2022. Analysis of short-time severe rainfall on 4 September 2020 detected by phased array radar in Foshan[J]. Meteor Mon, 48(7):826-839(in Chinese).

佛山相控阵阵列雷达探测 2020 年 9 月 4 日 短时强降水天气过程的分析*

肖靖宇^{1,2} 杨玲^{1,2} 俞小鼎³ 马舒庆⁴ 李彩玲⁵ 乔丹⁶

1 成都信息工程大学电子工程学院, 成都 610225

2 中国气象局大气探测重点开放实验室, 成都 610225

3 中国气象局培训中心, 北京 100081

4 中国气象局气象探测中心, 北京 100081

5 广东省佛山市气象局/佛山市龙卷风研究中心, 佛山 528315

6 雷象科技(北京)有限公司, 北京 100089

提 要: 为了研究高时空分辨率的相控阵阵列雷达可否精细探测强降水的演变, 利用质量控制后的佛山 X 波段相控阵阵列天气雷达资料, 分析了 2020 年 9 月 4 日广东省佛山市南海区发生的一次局地短时强降水天气过程。分析了 16:00—17:30 南海区出现的多单体风暴的强度场和三维风场结构, 并探究强度场、三维风场与降水量之间的关系。结果表明: 阵列天气雷达能够对强对流天气过程进行更精细的探测。合并阶段, 观测到小尺度、短时间内多个对流单体的初生、分裂和合并过程。成熟阶段, 分析 γ 中尺度气旋的形成过程以及气旋式辐合维持时强度场、三维风场、散度场和涡度场的结构。消亡阶段, 分析 γ 中尺度反气旋的形成与增强过程。气旋与反气旋消失后, 单体迅速消亡。基于高时空分辨率的强度场和三维风场获得的各统计量, 发现在自动气象站降水出现前 10~15 min 以及最大 5 分钟降水出现前 5~10 min, 反射率因子与水平风速有明显变化。本研究结果对监测预警短时强降水有预示作用, 为高时空分辨率的相控阵阵列雷达精细探测强降水的演变提供了参考依据。

关键词: 短时强降水, X 波段相控阵阵列天气雷达, 强度场, 三维风场, 统计量

中图分类号: P458, P412

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2022.032801

Analysis of Short-Time Severe Rainfall on 4 September 2020 Detected by Phased Array Radar in Foshan

XIAO Jingyu^{1,2} YANG Ling^{1,2} YU Xiaoding³ MA Shuqing⁴ LI Cailing⁵ QIAO Dan⁶

1 College of Electronic Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225

2 CMA Key Laboratory of Atmospheric Sounding, Chengdu 610225

3 China Meteorological Administration Training Centre, Beijing 100081

4 CMA Meteorological Observation Centre, Beijing 100081

5 Foshan Tornado Research Center/Foshan Meteorological Office of Guangdong Province, Foshan 528315

6 Rayshon Technology Co. Ltd., Beijing 100089

Abstract: To study whether the phased array radar with high temporal and spatial resolution can accurately detect the evolution of heavy precipitation, the quality control of Foshan X-band phased array weather

* 湖湘高层次人才聚集工程-创新人才项目(2019RS1073)资助

2021 年 6 月 21 日收稿; 2022 年 3 月 31 日收修定稿

第一作者: 肖靖宇, 主要从事阵列天气雷达和强对流天气分析研究. E-mail: 1183302601@qq.com

通讯作者: 杨玲, 主要从事大气探测技术、信息获取与处理研究. E-mail: cimyang@cuit.edu.cn

radar (PAWR) data is used to analyze a local short-time severe rainfall that occurred in Nanhai District of Foshan City, Guangdong Province on 4 September 2020. The intensity field and three-dimensional wind field structure of multi-cell storms in Nanhai District from 16:00 BT to 17:30 BT are analyzed, and the relationship between the intensity field, three-dimensional wind field and the precipitation is explored. The results show that PAWR can provide more precise observations of severe convective weather. In the merging stage, the initiation, splitting and merging processes of multiple convective cells on small scale and within short period of time are observed. In terms of the mature stage, the formation process of meso- γ scale cyclone, the structural characteristics of the intensity field, three-dimensional wind field, divergence field and vorticity field during the cyclone convergence period are discussed. In the extinction stage, the structural characteristics of the formation and enhancement process of meso- γ scale anticyclones are analyzed. After the disappearance of cyclone and anticyclone, the convective cells rapidly die out. In addition, based on the statistics obtained from the intensity field and three-dimensional wind field with high spatial and temporal resolution, it is found that the reflectivity factor and horizontal wind speed change significantly in 10–15 min before precipitation and in 5–10 min before the 5 min heaviest precipitation observed by automatic weather stations. The results of this study would have a predictive effect on the monitoring and early warning of short-time severe precipitation, and provide some references for the phased array radar with high temporal and spatial resolution to finely detect the evolution of severe precipitation.

Key words: short-time severe rainfall, X-band phased array weather radar, intensity field, three-dimensional wind field, statistic

引言

短时强降水,主要是指发生时间短、空间尺度小、降水效率高的对流性降水。1 h雨量 ≥ 20 mm或3 h雨量 ≥ 50 mm,为典型的中小尺度系统驱动(俞小鼎,2013;孙继松,2017)。由于降水强度大,在短时间内易形成局地洪水,甚至引发山体崩塌、滑坡等次生地质灾害,造成的人员伤亡和财产损失在所有气象灾害中是最大的(樊李苗和俞小鼎,2013)。因此研究短时强降水天气的形成机制及提前发布短时临近预警,对防灾减灾具有非常重要的意义(徐娟等,2014)。

国内外许多学者对短时强降水进行了深入的分析。Marks(1985)和Klaassen(1989)对雨强的探测进行了深入的研究。张涛等(2012)、陈炯等(2013)、王国荣和王令(2013)、伍红雨等(2020)研究表明不同区域受气候背景、地形和城市下垫面等因素影响,短时强降水表现出一定的时空分布规律。樊李苗和俞小鼎(2013)、田付友等(2017)、王迪等(2020)研究给出短时强降水天气的环境参数特征。

国内众多学者利用单部或多部多普勒天气雷达进行风场反演,张勇等(2011)利用组网天气雷达产

品三维格点反射率因子资料与两步变分法反演三维风场,对2009年第7号台风天鹅的风场结构做了分析,结果表明:两步变分法较好地反演出“天鹅”台风的水平环流结构。刘婷婷等(2014)利用单部多普勒雷达四维变分同化方法反演重庆市两次局地强降水不同高度水平风场,分析了易发生局地强降水区域的局地环流特征,结果表明:风场反演能较准确地给出低空急流、低层辐合和局地气旋式涡旋的位置及演变情况。韩颂雨等(2017)研究表明双雷达和三雷达资料能较好地反演降雹超级单体的三维风场精细结构,有助于加深对冰雹云结构的认识,进而提高冰雹预报能力。目前,对于中小尺度天气系统引起的短时强降水天气过程的强度场与三维风场相互关系的研究仍有限。

尽管进行了大量研究,但是气象学界对强对流天气过程中不同天气现象的酝酿、发生、发展、传播和消亡等物理过程的认识程度远不如其他灾害性天气过程(如区域性暴雨、台风等)那样清晰,这是造成有效预警能力不足的根本原因(孙继松等,2014)。目前,相控阵技术已逐渐应用于天气雷达领域(吴翀等,2014;刘黎平等,2015),相控阵雷达能够获取高时空分辨率探测数据,对认识对流单体中小尺度系统的发展演变有较大帮助(于明慧等,2019;程元慧

等,2020)。利用三个及以上相控阵接收发射子阵(简称子阵)组成的阵列天气雷达能够得到高时空分辨率的强度场和三维反演风场,有潜力为强对流天气过程分析提供技术支持(马舒庆等,2019;叶开等,2020)。

本文利用 3DVAR (three-dimensional variational data assimilation) 风场反演算法获得风场(Shapiro et al,2009;Potvin et al,2012;North et al,2017),该算法已在长沙机场阵列天气雷达进行风场验证(李渝等,2020)。本文对 2020 年 9 月 4 日佛山市南海区的一次局地短时强降水天气过程进行分析,展示此次短时强降水的小尺度强度场与三维风场等结构特征。选取逐 30 s 的强度场与三维风场反演资料,以及自动气象站逐 5 min 降水量资料,研究强度场、三维风场与自动站降水量三者之间的联系,以期对短时强降水天气的预报预警提供依据。

1 资料和天气过程

1.1 资料

架设于佛山市的相控阵阵列天气雷达(图 1a)由七个子阵组成,每三个相邻的子阵为一组进行协同扫描。每个子阵的最大探测距离均为 36.48 km,径向分辨率为 30 m。水平方向上每个子阵均采用机械扫描方式,覆盖 $0^{\circ}\sim 360^{\circ}$ 方位,垂直方向上采用相控阵多波束扫描技术,采用 4 个发射波束和 64 个接收波束覆盖仰角,其中单偏振子阵覆盖 $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 仰

角,双偏振子阵覆盖 $0^{\circ}\sim 72^{\circ}$ 仰角。每三个相邻的子阵采用近似等边三角形方式布局,单个子阵体扫时间为 30 s,对应 60° 范围的扫描时间为 5 s。理论上,三个子阵的共同覆盖区域(简称三维精细探测区)的探测资料时差在 5 s 以内,两个子阵共同覆盖区域的探测资料时差在 10 s 以内,Li et al(2020)研究表明探测资料数据时差越小,获得的风场越准确。三维探测区外的圆形区域内也有探测资料,这些区域称为普通探测区(图 1b)。

本文所用资料包括 2020 年 9 月 4 日佛山市南海区($22.90^{\circ}\sim 23.30^{\circ}\text{N}$ 、 $112.90^{\circ}\sim 113.20^{\circ}\text{E}$)16—18 时(北京时,下同)自动气象站逐 5 min 降水资料,9 月 4 日 16:00—17:30 广州 CINRAD/SA 雷达(简称广州雷达)基数据,佛山市阵列天气雷达三水潮湾站子阵 3(简称子阵 3)、禅城梧村站子阵 6(简称子阵 6)、南海尖峰岭子阵 7(简称子阵 7)雷达基数据,以及三部子阵融合强度场与三维风场反演资料。广州雷达基数据仅用于雷达资料对比验证,本文天气过程分析均使用阵列天气雷达资料,三维风场反演资料为单体内部风场。强度场与三维反演风场资料:水平格点间隔为 100 m,反演层数为 75 层,垂直格点间隔为 200 m。

1.2 天气过程和雷达回波分析

2020 年 9 月 4 日东亚大槽加深东移,槽后西北气流带动冷空气南下,佛山处于槽前偏西南气流中,588 hPa 等压线控制广东。925 hPa 上切变线位于粤北地区,有一支西南气流从海南东侧海面向北延

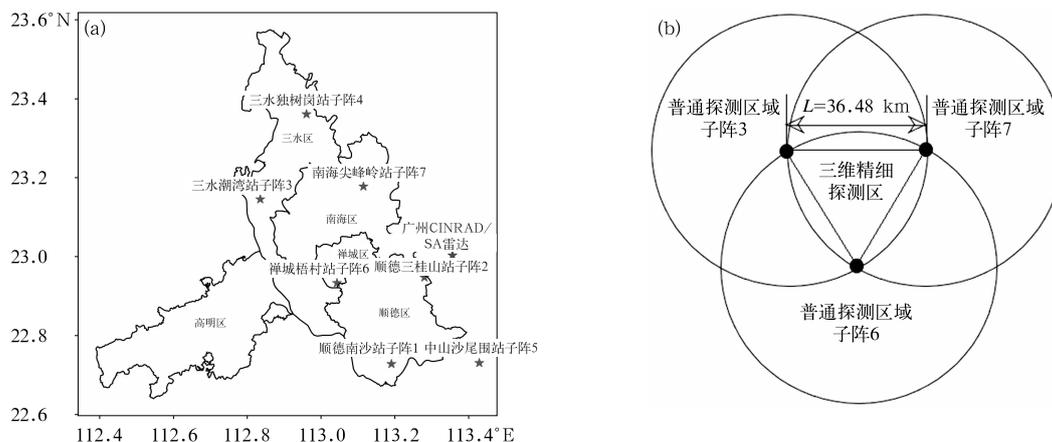


图 1 (a)广州 CINRAD/SA 雷达与佛山阵列天气雷达布局,(b)三个收发子阵探测区

Fig. 1 (a) CINRAD/SA radar layout in Guangzhou and array weather radar layout in Foshan, (b) deployment of three transmit-receive subarrays detection areas

伸到珠江三角洲西部,另外有一支东北气流从台湾海峡南下影响到珠江三角洲东部地区,二者在珠三角附近形成辐合,700 hPa 和 850 hPa 上切变线位于长江流域南侧一带,切变线南侧有偏西风急流在湖南和江西北部发展,200 hPa 上珠三角地区恰好处于偏北显著气流和西北显著气流两支气流直接的分流区。地面上弱低压在北部湾维持,本地受类均压场控制。距离佛山南海区最近的清远探空站 2020 年 9 月 4 日 08 时探空站资料表明:各层大气相对湿度较大,对流有效位能(CAPE)值为 $2100 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,对流抑制能量(CIN)值为 $0 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,不稳定能量充足(图 2)。综上所述,佛山 2020 年 9 月 4 日有充沛的水汽和水汽辐合,地面与 700 hPa 之间的条件不稳定结合低层水汽条件形成 CAPE 大值,具有显著的深厚湿对流潜势。此外,更大尺度范围内低层辐合,高层辐散,周边环境为上升气流,有利于 CAPE 增大,CIN 减小,深厚湿对流形成的可能性将更大。

2020 年 9 月 4 日 16:00—17:00,佛山市南海区有多个单个单体或多单体结构的对流风暴生成,形成多单体风暴群,回波演变过程见图 3。合并阶段,16:00 多单体 1、多单体 2 均在内部合并(简称第一次合并)(图 3a₁),16:05 多单体 1 上方出现新的对流单体(简称单体 1)(图 3a₂),16:11 单体 1 迅速发展,其右侧出现新的对流单体(简称单体 2),此时多单体 1、多单体 2 内部合并结束并分别发展成为新的对流单体(简称单体 3、单体 4)(图 3a₃),16:11—16:28 单体 3 及单体 4 开始分裂,单体 1、单

体 2、单体 3、单体 4 逐渐合并(简称第二次合并),并向东北方向移动(图 3a₄~3a₇)。16:30 合并阶段结束,第二次合并后形成的对流单体分裂为两个新的对流单体(简称单体 5、单体 6)(图 3a₈),单体 5 进入成熟阶段。成熟阶段,16:30—16:50 单体 5 发展旺盛并向东北方向缓慢移动,单体 6 移动更快(图 3b₁~3b₂)。消亡阶段,16:50 单体 5 转为消亡阶段,17:15 单体 5 与右侧新生对流单体(简称单体 7)合并(简称第三次合并)(图 3c₁~3c₄),之后回波整体向东移动,迅速消亡。回波分析显示,相控阵雷达可以精细地探测对流单体合并、成熟及消亡的演变过程。

2 数据质量控制

风场反演前,对雷达基数据进行地物杂波滤除、径向速度退模糊和衰减订正等质量控制(Holleman and Beekhuis, 2003; 魏万益等, 2020; 肖柳斯等, 2021),之后进行如下数据检验流程:金属球定标、子阵间径向速度对比、反演风场正确性和合理性检验。

当各收发子阵架设后,要检查径向速度的正确性。检查方法如下:

(1) 金属球定标。采用金属球定标法对各子阵的径向速度进行机外标定。以子阵 3 为例进行说明,采用快速扫描模式,体扫时间调整为 15 s。在 2019 年 11 月 24 日,获取连续 10 个体扫样本,利用金属球相对于子阵 3 的实际径向速度与子阵 3 所测径向速度进行对比,子阵 3 的最大径向速度探测误差为 $0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,满足径向速度探测精度为 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的设计要求。子阵 3 探测的方位角、俯仰角、距离与金属球实际的方位角、俯仰角、距离存在一个固定偏差,方位角偏差量平均为 2.16° ,俯仰角偏差量平均为 0.28° ,距离偏差量平均为 189 m。不符合精度要求,因此后续对子阵 3 指北和天线俯仰角及距离库探测进行了相应角度的修正。对子阵 6、子阵 7 也采用该方法进行正确性检验,并进行相应修正。

(2) 子阵间径向速度对比验证。以子阵 3 与子阵 6 对比为例,选取 2020 年 9 月 4 日 16:01—16:17 间隔 30 s 连续 33 个时刻数据, 0° 仰角连线中点处径向速度进行对比(子阵 3 径向速度大小取反以便于对比分析)。子阵 3 与子阵 6 的各时刻径向速度均

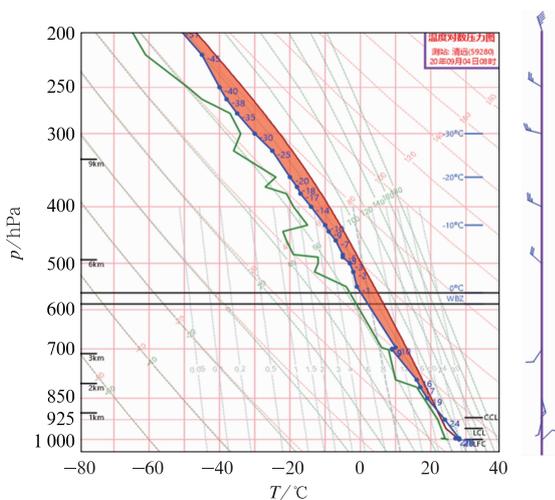


图 2 2020 年 9 月 4 日 08 时清远站 $T\text{-ln}p$ 图

Fig. 2 Qingyuan sounding at 08:00 BT 4 September 2020

满足方向相反(即数值取反)的设计要求,径向速度值之差最大为 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 4a)。子阵 6 与子阵 7 也采用该方法选取 2020 年 9 月 4 日 16:27—16:40 间隔 30 s 连续 27 个时刻数据进行径向速度对比验证(图 4b)。结果表明,满足两部子阵连线中点处径向速度大小基本相同,方向相反,符合设计要求。

(3) 反演风场正确性和合理性检验。李渝等

(2020)利用部署在湖南省长沙黄花机场的阵列天气雷达 2019 年雷达资料进行外场试验,研究结果表明:1)在稳定性降水过程中,反演与风廓线雷达产品较为一致,比较合理;2)阵列天气雷达反演风场在不同的降水类型下得到的风场结构符合各类天气系统的基本特征,较为合理。

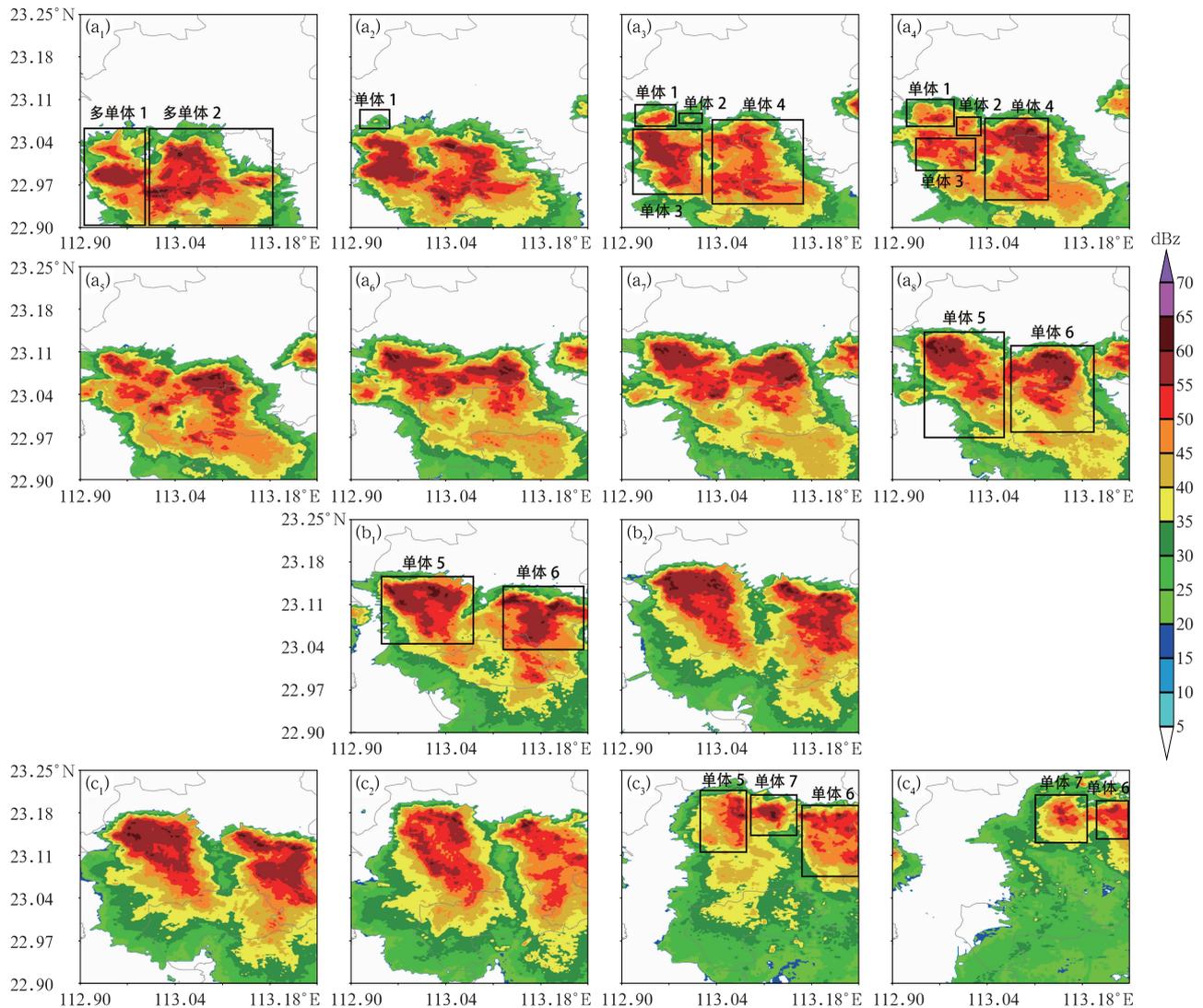


图 3 2020 年 9 月 4 日 16:00—17:30 在 0.1~14.9 km 高度上的组合反射率回波演变

(a) 合并阶段:(a₁)16:00,(a₂)16:05,(a₃)16:11,(a₄)16:15,(a₅)16:18,(a₆)16:25,(a₇)16:28,(a₈)16:30;

(b) 单体 5 成熟阶段:(b₁)16:40,(b₂)16:48;

(c) 单体 5 消亡阶段:(c₁)16:50,(c₂)17:00,(c₃)17:15,(c₄)17:30

Fig. 3 Composite reflectivity echo at 0.1–14.9 km height from 16:00 BT to 17:30 BT 4 September 2020

(a) merging stage: (a₁) 16:00 BT, (a₂) 16:05 BT, (a₃) 16:11 BT, (a₄) 16:15 BT, (a₅) 16:18 BT, (a₆) 16:25 BT,

(a₇) 16:28 BT, (a₈) 16:30 BT; (b) convection cell 5 mature stage: (b₁) 16:40 BT, (b₂) 16:48 BT;

(c) convection cell 5 extinction stage: (c₁) 16:50 BT, (c₂) 17:00 BT, (c₃) 17:15 BT, (c₄) 17:30 BT

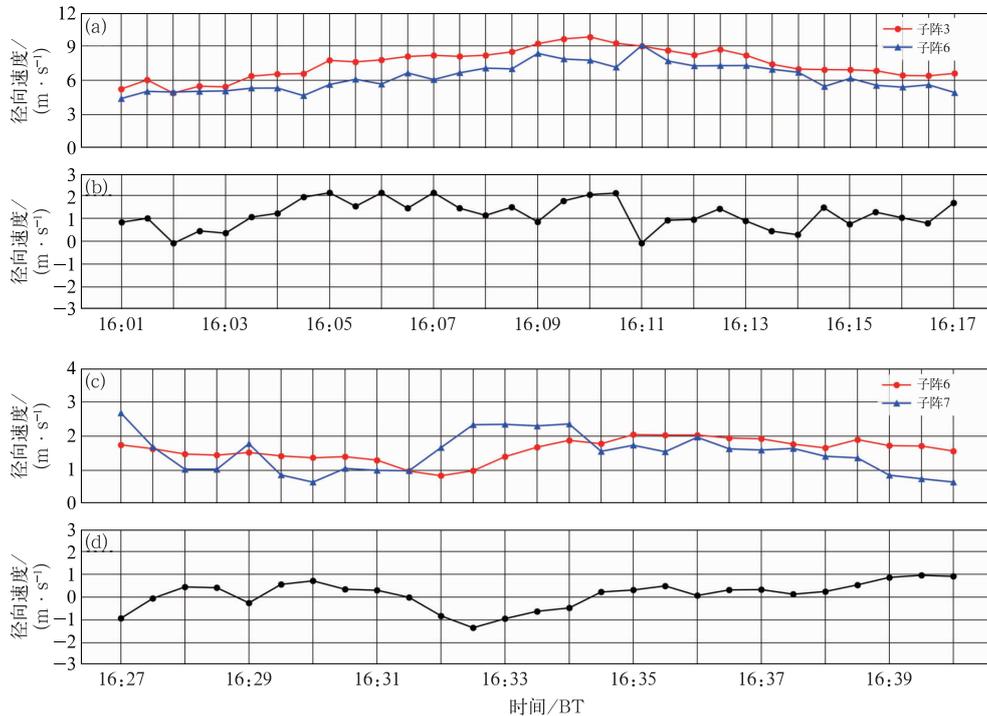


图 4 2020 年 9 月 4 日 (a,b)16:01—16:17 和 (c,d)16:27—16:40 子阵连线中点径向速度对比
(a)子阵 3 与子阵 6 径向速度(子阵 3 数值取反),(b)子阵 3 与子阵 6 径向速度绝对值差,
(c)子阵 6 与子阵 7 径向速度(子阵 7 数值取反),(d)子阵 6 与子阵 7 径向速度绝对值差

Fig. 4 Comparison of radial velocity at the midpoint of the subarray connection

(a, b) from 16:01 BT to 16:17 BT and (c, d) from 16:27 BT to 16:40 BT 4 September 2020

(a) radial velocity of subarray 3 and subarray 6 (the value of subarray 3 reversed),

(b) the absolute value difference of radial velocity of subarray 3 and subarray 6,

(c) radial velocity of subarray 6 and subarray 7 (the value of subarray 7 reversed),

(d) the absolute value difference of radial velocity of subarray 6 and subarray 7

3 强度场与三维风场分析

本次强对流天气过程发展迅速,涉及多个单体。下文将该次过程分为合并阶段、成熟阶段和消亡阶段进行详细分析,各阶段观测的对流单体均处于三部及以上子阵所构成的三维精细探测区内。

3.1 雷达资料对比验证

为进一步检查该个例使用的强度场与三维风场反演资料的正确性,利用广州雷达和子阵 3、子阵 6、子阵 7 基数据以及三部子阵融合强度场与三维风场反演资料进行相互对比验证,由于广州雷达与相控阵阵列天气雷达子阵波段不同,各项硬件参数不同,故在大雨滴和冰雹等情况下探测到的回波强度存在固有的不一致,并且两者空间分辨率也有很大差异,

故下文仅从定性的角度进行一致性分析。以 2020 年 9 月 4 日 16:58 广州雷达 9.78° 仰角 PPI 资料(对应高度约为 6.3 km),子阵 3 在 6.3 km 高度的 CAPPI 资料以及 6.3 km 高度处强度场与反演风场资料为例,进行对比说明。

强回波指 ≥ 45 dBZ 的回波区域(韩光,2008)。广州雷达、子阵 3 以及融合强度场(图 5a₁~5a₃)的回波形状以及强回波区域均较为一致。子阵 3 与广州雷达虽然架设于不同的位置(图 1a),但径向速度图中(图 5b₁,5b₂)均存在两处明显的正负径向速度交界线。6.3 km 高度上,反演风场显示单体 5 左侧与右侧分别出现清晰可见的气旋与反气旋,且风速大值区与子阵 3 的径向速度大值区一致(图 5a₃)。两部及以上子阵覆盖区域与回波区域大小几乎相同(图 5b₃)。故本次强对流天气过程资料完整且较为准确能够用于分析。

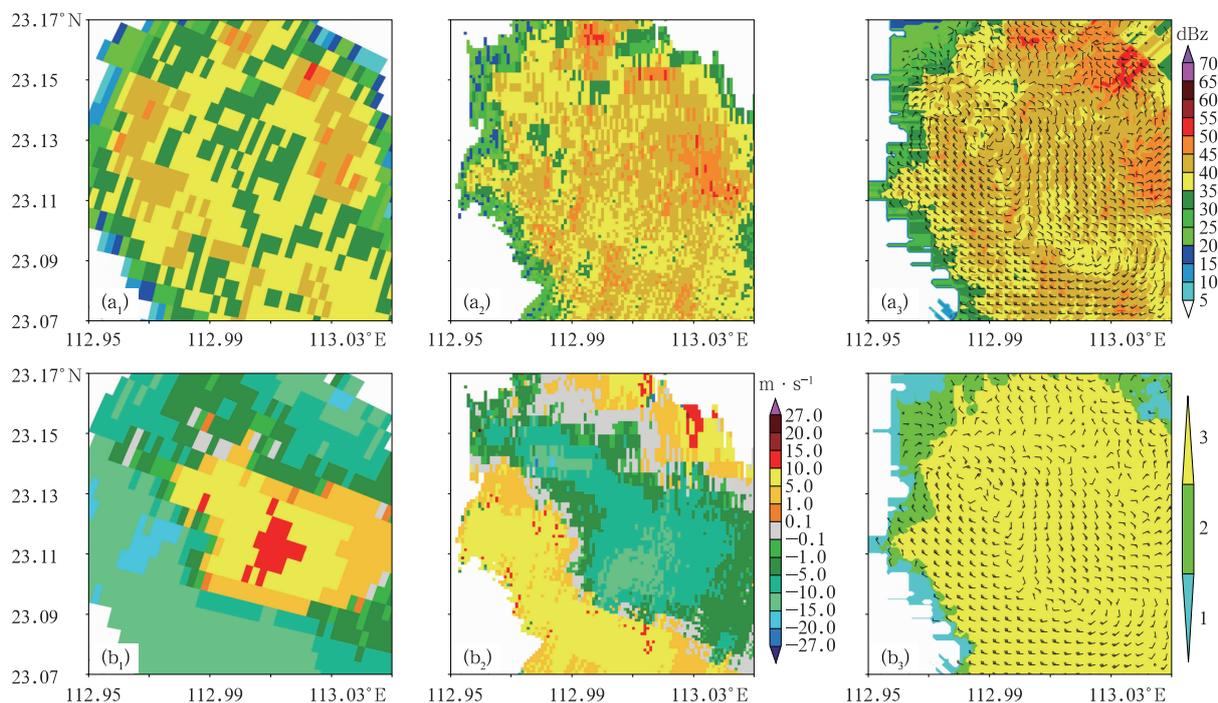


图 5 2020 年 9 月 4 日 16:58 雷达对比

(a_1, b_1) 广州雷达 9.78° 仰角(雷达架设于图 1a 东南方位): (a_1) 基本反射率因子, (b_1) 径向速度;
 (a_2, b_2) 子阵 3 在 6.3 km 高度(子阵架设于图 1a 西北方位): (a_2) 基本反射率因子, (b_2) 径向速度;
 (a_3, b_3) 6.3 km 高度: (a_3) 强度场(填色)与风场(风羽), (b_3) 子阵覆盖数量(填色)与风场(风羽)

Fig. 5 Comparison of radar data at 16:58 BT 4 September 2020

(a_1, b_1) elevation 9.78° in Guangzhou Radar (The radar is set up in the southeast of Fig. 1a):

(a_1) base reflectivity, (b_1) radial velocity;

(a_2, b_2) 6.3 km height from subarray 3 (The subarray is set up in the northwest of of Fig. 1a):

(a_2) base reflectivity, (b_2) radial velocity;

(a_3, b_3) 6.3 km height: (a_3) intensity field (colored) and wind field (barb),

(b_3) coverage number of subarrays (colored) and wind field (barb)

3.2 合并阶段

16:01—16:10 第一次合并, 多单体 1、多单体 2 内部各对流单体都处于相近的发展增强阶段, 合并后发展增强。16:11—16:30 第二次合并(图 3a₃ ~ 3a₈), 单体 1、单体 2 发展增强, 单体 3、单体 4 开始分裂并迅速减弱, 之后单体 1、单体 2 与单体 3、单体 4 分裂出的上侧回波合并, 回波迅速增强, 回波顶迅速升高, 之后逐渐合并为一个对流单体, 向东北方向缓慢移动, 而单体 3、单体 4 分裂出的下侧回波却减弱。

翟菁等(2012)在数值模拟中把两个对流单体云团之间的合并分为两类: 第一类合并为发展强度接近的单体之间的合并, 两个单体都处于相近的发展增强阶段, 则合并后单体发展增强, 上文第一次合并

与之相同。第二类合并为发展不同的单体之间的合并, 一个单体处于发展期, 而另一个单体处于成熟至成熟后的衰减期, 合并过程中一个单体得到增强, 而另一个单体却减弱。上文第二次合并中单体 3、单体 4 分裂时回波迅速减弱, 之后分裂出的上侧回波与单体 1、单体 2 合并得到增强, 而分裂出的下侧回波逐渐减弱, 这与单纯的一个单体增强, 另一个单体减弱的结果略有不同。

3.3 成熟阶段

16:30 第二次合并后形成的对流单体逐渐分裂为单体 5 和单体 6, 由于单体 5 出现深厚持久的气旋与反气旋, 且始终位于三维精细探测区域, 故本节仅分析单体 5 出现气旋与反气旋部分的发展情况。此时, 单体 5 回波触地, 回波顶高为 12.1 km, 最大

反射率因子约为 65 dBz,中低层(2.1~5.1 km)存在较强辐合,其中心位于强回波中心(图 6a₁,6a₂)。

16:35 强回波中心面积增大,回波顶略微升高至 13.1 km,中低层(2.1~5.1 km)在强回波区域出现气旋(图 6b₁,6b₂),强回波区域面积增大,气旋周围风速略微增大。之后回波顶迅速升高至 14.9 km,气旋向上、向下增长,水平范围扩大并逐渐形成闭环。

16:48 单体 5 回波触地,回波顶高 14.9 km,最大反射率因子约为 65 dBz,形成 γ 中尺度气旋,直径最大约为 6 km,厚度约为 7 km,自 1.1 km 高度处延伸至 8.1 km。2.1 km(图 6c₁)高度上,气旋位于单体 5 左上侧强回波中心处,直径约为 3 km。气旋左上侧风速较小,右下侧风速较大,最大约为 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。在 4.1 km(图 6c₂)高度上,气旋位置相对 2.1 km(图 6c₁)高度略向右下侧分布,气旋直径显著增大至 6 km 左右。6.1 km(图 6c₃)高度上,气旋位置相对 4.1 km(图 6c₂)高度略向右下侧分布,气旋中心

反射率因子减小,直径几乎不变。该高度上气旋左下侧风速较大,右上侧风速较小,最大约为 $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。散度场、涡度场与风场对应情况较好,风场中气旋式辐合处以负散度正涡度为主,最小散度值约为 $-3.8 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$,最大涡度值约为 $7.1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。气旋外围表现为较强辐散,气旋右侧既存在辐合中心又存在辐散中心,但整体表现为负涡度,形成反气旋趋势(图 6d₁,6d₂)。7.1 km(图 6c₄)高度上,气旋位置相对 6.1 km(图 6c₃)高度几乎不变,强回波区域面积显著减小,气旋右侧风向出现明显切变,由 6.1 km 高度东南风转为西北风,反气旋趋势更为明显。

该阶段单体 5 发展旺盛,途径的各自动站站点逐 5 min 降水量较多,最大值约为 7 mm(图 8a),单体 5 从对流层低层直到中高层一直存在气旋式辐合,且气旋位置及强回波中心随高度的增加逐渐向东南方向倾斜,在强降水回波发展旺盛时辐合区上

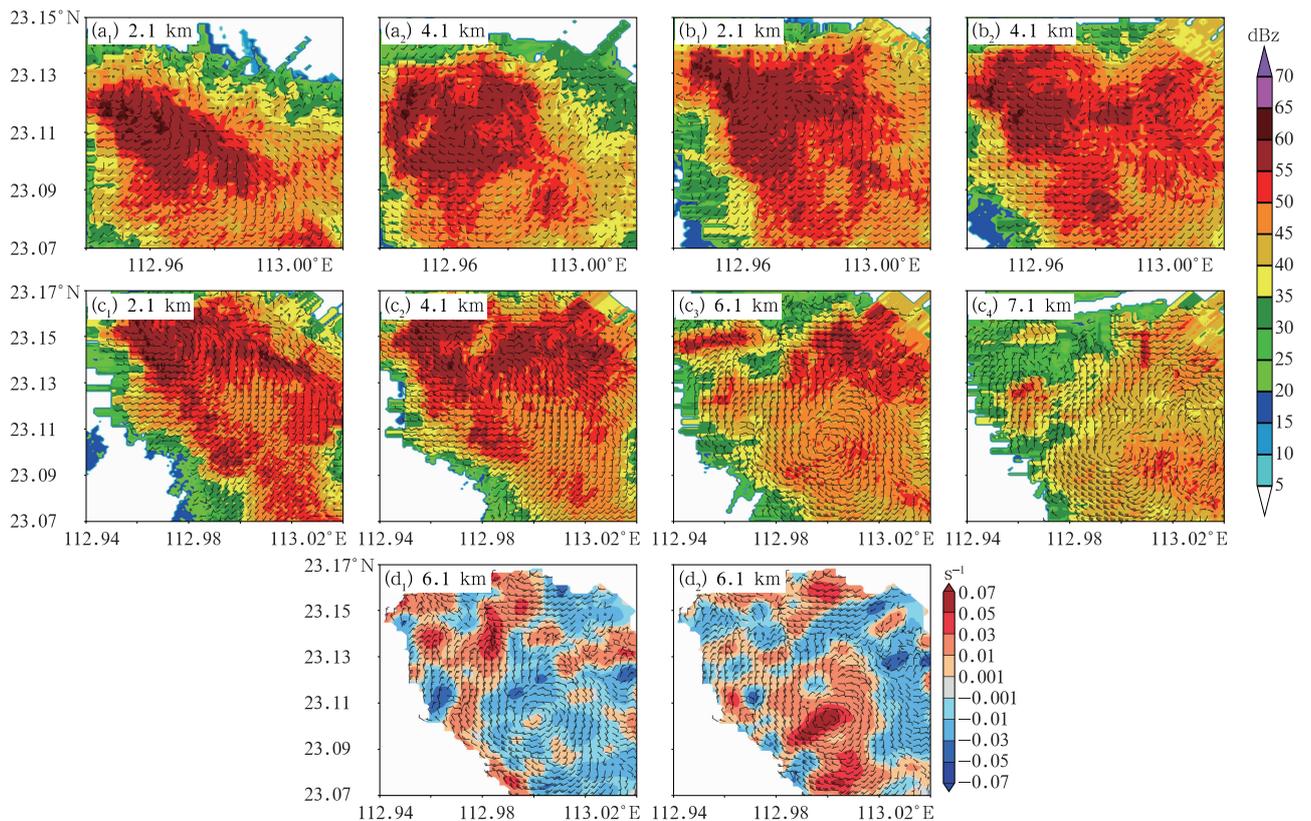


图 6 2020 年 9 月 4 日成熟阶段(a)16:30,(b)16:35,(c)16:48 不同高度的强度场(填色)与三维风场(风羽),(d)16:48 的(d₁)散度场(填色)和(d₂)涡度场(填色)与三维风场(风羽)

Fig. 6 Intensity field (colored) and three-dimensional wind field (barb) in mature stage at various heights at (a) 16:30 BT, (b) 16:35 BT, (c) 16:48 BT; (d₁) divergence field (colored), (d₂) vorticity field (colored) and three-dimensional wind field (barb) at 16:48 BT 4 September 2020

空叠加有辐散区。郝莹等(2012)分析多次短时强降水的径向速度场,发现中小尺度辐合的稳定维持是强降水持续的主要原因,本文成熟阶段的强度场与三维风场反演资料进一步清晰地展示了形成中小尺度气旋式辐合的过程,气旋式辐合维持时各高度上强度场与三维风场、气旋最强处散度场与涡度场的结构特点。

3.4 消亡阶段

16:50 中高层(6.1~7.1 km)在强回波区出现反气旋(图 7a₁,7a₂),之后反气旋向上略微增长,水平

范围扩大并逐渐形成闭环,气旋水平范围逐渐缩小。回波顶高逐渐降低,强回波面积逐渐减小,单体 5 移动速度变快。

17:00 单体 5 回波触地,回波顶高下降至 14.1 km,最大反射率因子约为 65 dBz,形成 γ 中尺度反气旋,直径最大约为 6 km,厚度约为 3 km,自 6.1 km 高度处延伸至 9.1 km。2.1 km(图 7b₁)高度上气旋消失,表现为很强的水平风切变。4.1 km(图 7b₂)高度上,气旋位于单体 5 左上侧,与 16:48 相同高度上(图 6c₂)比较,气旋向左上移动,辐合减弱。最大风速由 $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 减小至 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,整体

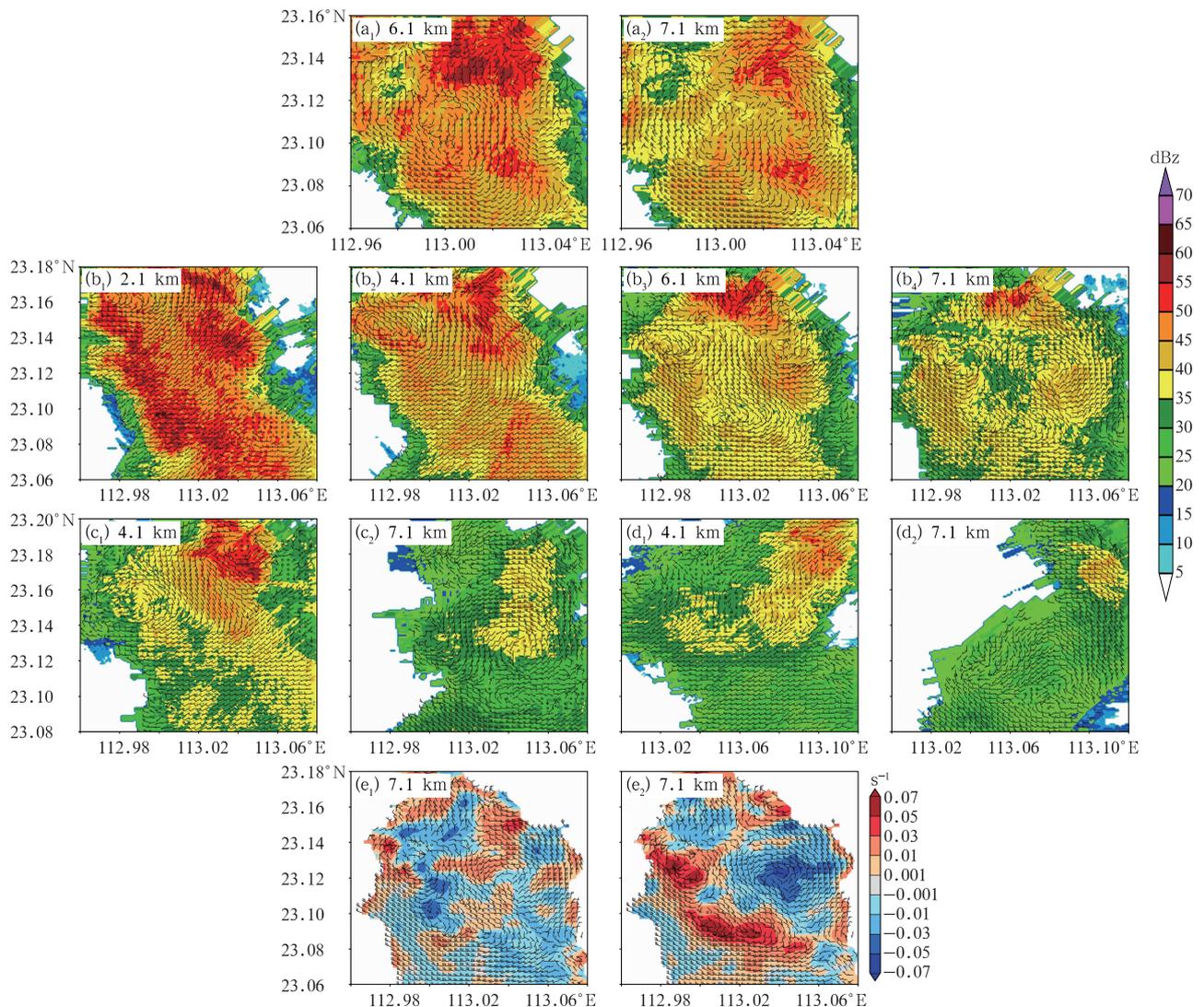


图 7 2020 年 9 月 4 日消亡阶段(a)16:50,(b)17:00,(c)17:10,(d)17:22 不同高度的强度场(填色)与三维风场(风羽),(e)17:00 的(e₁)散度场(填色)和(e₂)涡度场(填色)与三维风场(风羽)

Fig. 7 Intensity field (colored) and three-dimensional wind field (barb) in the extinction stage at various heights at (a) 16:50 BT, (b) 17:00 BT, (c) 17:10 BT, (d) 17:22 BT; (e₁) divergence field (colored), (e₂) vorticity field (colored) and three-dimensional wind field (barb) at 17:00 BT 4 September 2020

风速减小,气旋中心反射率因子显著降低,强回波面积显著减小,整个回波面积显著增大,单体 5 右侧风场出现明显风切变。6.1 km 高度(图 7b₃)与 16:48 相同高度上(图 6c₃)比较,气旋受到右侧反气旋影响,分为左上侧、左下侧两个气旋。7.1 km(图 7b₄)高度上,气旋左下侧与反气旋右上侧风速较大,最大约为 $18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,回波强度较强,最大反射率因子约为 60 dBz。两者交界处风速较小,最大约为 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,回波强度较弱,最大反射率因子约为 40 dBz。该层强度场与三维风场为外围强度大,风速大,中心强度小,风速小的结构。散度场、涡度场与风场对应情况较好,风场中反气旋式辐散处以正散度负涡度为主,其中最大散度值约为 $4.5 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$,最小涡度值约为 $-5.7 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ (图 7e₁,7e₂)。反气旋左侧的两个气旋中风切变较强,以辐合为主,但局部已经开始形成辐散,整体表现为正涡度。

17:10 强回波面积进一步减小,反气旋向下延伸至 4.1 km,该高度(图 7c₁)与 17:00 相同高度上(图 7b₂)比较,回波面积增大,但强回波面积减小,气旋处风速显著减小,对应位置最大反射率因子由

60 dBz 显著减小至 45 dBz,气旋右侧回波强度变化较小,单体 5 右侧有单体 7 正在发展。7.1 km 高度(图 7c₂)与 17:00 相同高度上(图 7b₄)比较,反气旋范围显著扩大,回波强度减弱,面积缩小。

17:22 单体 5 回波顶高降至 10.1 km,与右侧单体 7 合并,消亡速度放缓。4.1 km 高度(图 7d₁)与 17:10 相同高度(图 7c₁)比较,最显著的变化是气旋消失,回波强度减弱。7.1 km(图 7d₂)与 17:10 相同高度上(图 7c₂)比较,最显著的变化是反气旋消失,回波强度减弱。之后对流单体迅速消亡,所经过自动站站点逐 5 min 累计降水量显著减少。

4 反射率因子、三维风场与自动站降水量的关系初探

基于阵列天气雷达高时空分辨率的特点,选取逐 30 s 的反射率因子场与三维风场反演资料,以及回波移动路径上的自动气象站逐 5 min 累计降水量资料(图 8a),探究反射率因子(即强度)场、三维风场与自动站降水量三者之间的联系。

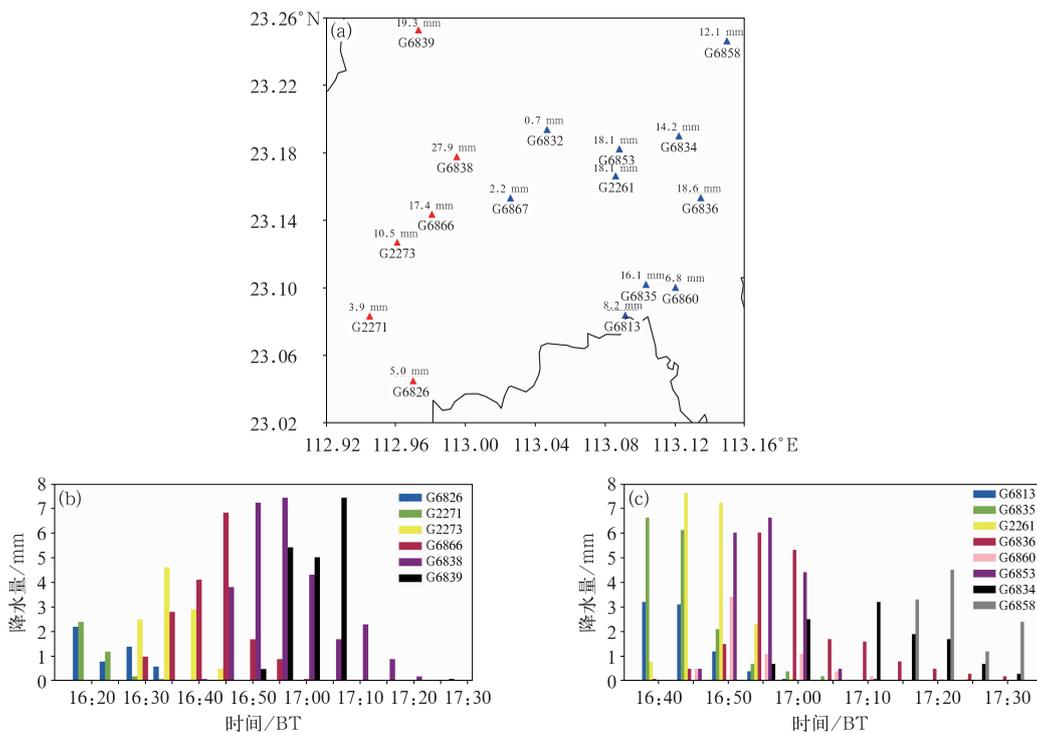


图 8 2020 年 9 月 4 日(a)单体 5(红色三角)与单体 6(蓝色三角)经过的部分自动气象站 16—18 时累计降水量;(b)单体 5,(c)单体 6 经过的自动气象站降水量统计

Fig. 8 (a) The accumulated precipitation of some automatic weather stations with convective cell 5 (red triangle) and convective cell 6 (blue triangle) passing by from 16:00 BT to 18:00 BT; (b, c) precipitation statistics of automatic weather stations with (b) convective cell 5 and (c) convective cell 6 passing by on 4 September 2020

选取单体 5 经过的 6 个自动气象站站点进行统计(图 8b),同时为探究三维风场的影响,将各阶段发展情况类似,但没有形成深厚持久气旋与反气旋的单体 6 经过的 8 个有降水的和 3 个无降水或降水很少的自动气象站站点也进行统计(图 8c)。单体 5 经过的自动气象站,最大累计降水量为 27.9 mm。单体 6 经过的自动气象站,最大累计降水量为 18.6 mm。以各自动气象站站点为中心,水平范围 1 km×1 km,统计自动站出现降水的前后 20 min 之间逐 30 s 的下列均值:1)垂直范围 0~6 km 的反射率因子均值(简称反射率因子);2)垂直范围 0~3 km 的水平风速均值(简称 0~3 km 风速);3)垂直范围 3~6 km 的水平风速均值(简称 3~6 km 风速);4)垂直范围 0~6 km 的涡度、散度均值(简称涡度、散度);5)垂直范围 0~6 km 的正涡度、负散度均值(简称正涡度、负散度)。

选取以自动站为中心水平范围 1 km×1 km,可以更好地观测各统计量,得到相对平稳的变化趋势,利于找出各统计量之间的关系。对垂直范围 0.1 km,0~1 km,0~3 km,0~6 km 反射率因子统计,发现四者所绘制的曲线变化趋势基本一致,但前三者存在较大抖动,故选择更为平稳的 0~6 km 反射率因子作为统计量,以更好地观察与自动气象站 5 min 降水量之间的关系。Wu et al(2020)通过数值模拟表明风场变化对风暴的结构和组织有重要影响,对流层中层或低层风场的增强有利于对流的发展。且据统计 0~6 km 风速均值与 0~6 km 正涡度变化趋势较为一致,故低层风场选择 0~3 km,中层风场选择 3~6 km,以 0~3 km 与 3~6 km 的风速均值作为统计量。

单体 5 和单体 6 经过的各自动站站点的统计量结果表明(表 1):单体 5 与单体 6 的反射率因子最大值均为 55 dBz,单体 5 存在深厚持久的气旋、反气旋,0~3 km 与 3~6 km 风速统计量最大值均大于单体 6,且单体 5 经过的自动站中的最大累计降水

量远大于单体 6。

观察各站点中各统计量之间的关系,得到以下特点(图 9,其余站点略):

1)最大反射率因子一般出现在最大 5 分钟降水前的 5~10 min,降水发生时,反射率因子会有略微减小,在最大 5 分钟降水发生前略微增大,之后迅速减小。通常出现强降水的站点最大反射率因子远大于无降水或降水很少的站点。

2)0~3 km 风速与反射率因子变化趋势较为一致,在最大 5 分钟降水发生前 5~10 min 迅速减小。通常出现强降水的站点 0~3 km 风速最大值均大于 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,最大为 $7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,无降水或降水很少的站点 0~3 km 风速最大值均小于 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

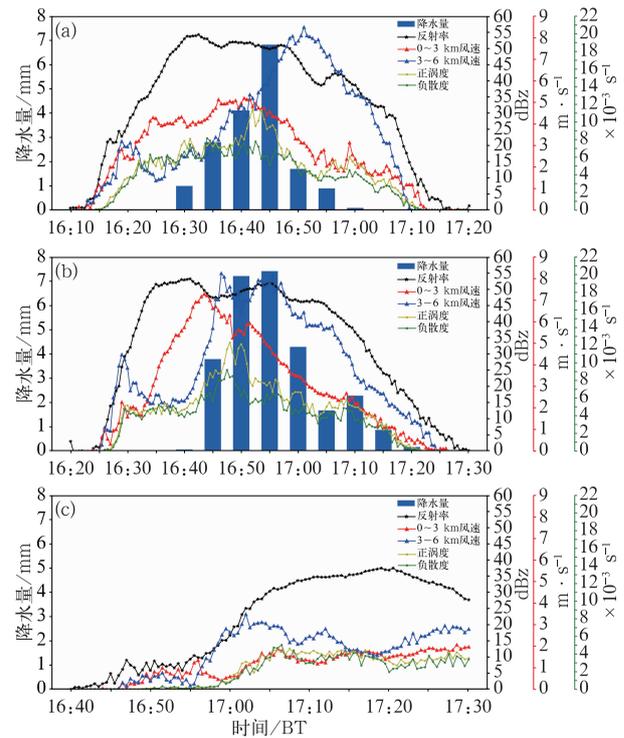


图 9 2020 年 9 月 4 日(a)G6866,(b)G6838,(c)G2280 站点统计量

Fig. 9 Statistics of (a) G6866 Site, (b) G6838 Site, (c) G2280 Site on 4 September 2020

表 1 单体 5 与单体 6 的各项统计量对比

Table 1 Comparison of various statistics of convective cell 5 and convective cell 6

统计参数	反射率因子 最大值/dBz	是否存在深厚持久 的气旋、反气旋	0~3 km 风速 最大值/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	3~6 km 风速 最大值/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	自动站累计降水量 最大值/mm
单体 5	55	存在	7	8.5	27.9
单体 6	55	不存在	5	7	18.6

3) 3~6 km 风速在降水发生前 10~15 min 会达到第一个极值,在最大 5 分钟降水发生前后 5 min 达到最大值,通常 3~6 km 风速最大值更大,且后于 0~3 km 风速达到最大值。

4) 正涡度与负散度变化趋势基本一致,在最大 5 分钟降水发生前 5~10 min 迅速减小,与 0~3 km 风速变化趋势较为一致。

5 结论与讨论

对 2020 年 9 月 4 日佛山市局地短时强降水天气过程分析,得到以下几点结论:

(1) 2020 年 9 月 4 日佛山市满足强对流天气发生所需要的水汽条件,不稳定层结条件和抬升条件,CAPE 值充分大,CIN 值较小,自动站数据表明 4 日下午佛山市南海区出现了局地短时强降水天气过程。

(2) 通过数据质量控制和雷达资料对比等方法验证,证明阵列天气雷达径向速度资料完整,较为准确,反演风场较为合理,能够用于对此次短时强降水过程的分析。

(3) 强度场与三维风场分析发现:合并阶段,各单体发生多次分裂、合并,观测到两类不同发展阶段的对流单体之间的合并过程,一类是发展强度接近的单体之间的合并,合并后单体发展增强,一类是发展强度不同的单体之间的合并,处于成熟期的单体分裂成两个单体,一个单体与发展期单体合并得到增强,一个单体逐渐减弱。成熟阶段,回波中低层风场出现较强切变,之后强回波中心迅速形成 γ 中尺度气旋,气旋形成后自动气象站测得的降水量明显增加,表明气旋式辐合的稳定维持是强降水持续的主要原因。消亡阶段,强回波区形成 γ 中尺度反气旋,反气旋逐渐增强,气旋逐渐减弱,降水量明显减少,回波移动速度加快。最终,气旋与反气旋均消失,对流单体迅速消亡。该次短时强降水天气过程分析表明,阵列天气雷达能够对强对流天气过程进行更为精细的探测。

(4) 强度场、三维风场与自动站降水量的关系初探:从高时空分辨率的强度场、三维风场中获得的各统计量对短时强降水有一定预示作用。最显著的关系特点为:水平范围均为 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$,垂直范围

0~6 km 反射率因子均值、垂直范围 0~3 km 风速均值、垂直范围 0~6 km 正涡度与负散度均值的最大值通常出现在最大 5 分钟降水前 5~10 min,垂直范围 3~6 km 风速均值的第一个极值通常出现在降水前 10~15 min,最大值通常出现在最大 5 分钟降水前后 5 min。

尽管本文对该次局地短时强降水天气过程进行了详细的强度场与三维风场分析,但并未对垂直速度进行分析,因为降水粒子下落末速度计算如果存在较大误差会使垂直速度的结果不准确。未来将开展对降水粒子下落末速度的估算,探索垂直气流的计算方法,同时对强度场、三维风场与自动站降水量之间的关系进行深入研究,将统计分析更多个例,进一步探究这些特征的形成机理。

参考文献

- 陈炯,郑永光,张小玲,等,2013. 中国暖季短时强降水分布和日变化特征及其与中尺度对流系统日变化关系分析[J]. 气象学报,71(3):367-382. Chen J, Zheng Y G, Zhang X L, et al, 2013. Analysis of the climatological distribution and diurnal variations of the short-duration heavy rain and its relation with diurnal variations of the MCSs over China during the warm season[J]. Acta Meteor Sin, 71(3):367-382(in Chinese).
- 程元慧,傅佩玲,胡东明,等,2020. 广州相控阵天气雷达组网方案设计及其观测试验[J]. 气象,46(6):823-836. Cheng Y H, Fu P L, Hu D M, et al, 2020. The Guangzhou phased-array radar networking scheme set-up and observation test[J]. Meteor Mon, 46(6):823-836(in Chinese).
- 樊李苗,俞小鼎,2013. 中国短时强对流天气的若干环境参数特征分析[J]. 高原气象,32(1):156-165. Fan L M, Yu X D, 2013. Characteristic analyses on environmental parameters in short-term severe convective weather in China[J]. Plateau Meteor, 32(1):156-165(in Chinese).
- 韩光,2008. 强回波演变统计分析[J]. 气象,34(S1):115-117. Han G, 2008. Statistical analysis of strong echo evolution[J]. Meteor Mon, 34(S1):115-117(in Chinese).
- 韩颂雨,罗昌荣,魏鸣,等,2017. 三雷达、双雷达反演降雹超级单体风暴三维风场结构特征研究[J]. 气象学报,75(5):757-770. Han S Y, Luo C R, Wei M, et al, 2017. Research on three-dimensional wind field structure characteristic of hail supercell storm by dual- and triple-Doppler radar retrieval[J]. Acta Meteor Sin, 75(5):757-770(in Chinese).
- 郝莹,姚叶青,郑媛媛,等,2012. 短时强降水的多尺度分析及临近预警[J]. 气象,38(8):903-912. Hao Y, Yao Y Q, Zheng Y Y, et al, 2012. Multi-scale analysis and nowcasting of short-time heavy rainfall[J]. Meteor Mon, 38(8):903-912(in Chinese).

- 李渝,马舒庆,杨玲,等,2020.长沙机场阵列天气雷达风场验证[J].应用气象学报,31(6):681-693. Li Y, Ma S Q, Yang L, et al, 2020. Wind field verification for array weather radar at Changsha Airport[J]. J Appl Meteor Sci, 31(6):681-693(in Chinese).
- 刘黎平,吴翀,汪旭东,等,2015. X波段一维扫描有源相控阵天气雷达测试定标方法[J].应用气象学报,26(2):129-140. Liu L P, Wu C, Wang X D, et al, 2015. Test and calibration methods for X-band active phased-array weather radar[J]. J Appl Meteor Sci, 26(2):129-140(in Chinese).
- 刘婷婷,苗春生,张亚萍,等,2014.多普勒雷达风场反演技术在西南涡暴雨过程中的应用[J].气象,40(12):1530-1538. Liu T T, Miao C S, Zhang Y P, et al, 2014. Application of Doppler radar wind field retrieval technique to southwest vortex rainstorm process[J]. Meteor Mon, 40(12):1530-1538(in Chinese).
- 马舒庆,陈洪滨,王国荣,等,2019.阵列天气雷达设计与初步实现[J].应用气象学报,30(1):1-12. Ma S Q, Chen H B, Wang G R, et al, 2019. Design and initial implementation of array weather radar[J]. J Appl Meteor Sci, 30(1):1-12(in Chinese).
- 孙继松,2017.短时强降水和暴雨的区别与联系[J].暴雨灾害,36(6):498-506. Sun J S, 2017. Differences and relationship between flash heavy rain and heavy rainfall[J]. Torr Rain Dis, 36(6):498-506(in Chinese).
- 孙继松,戴建华,何立富,等,2014.强对流天气预报的基本原理与技术方法[M].北京:气象出版社. Sun J S, Dai J H, He L F, et al, 2014. Basic Principles and Technical Methods of Severe Convective Weather Forecast[M]. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese).
- 田付友,郑永光,张涛,等,2017.我国中东部不同级别短时强降水天气的环境物理量分布特征[J].暴雨灾害,36(6):518-526. Tian F Y, Zheng Y G, Zhang T, et al, 2017. Characteristics of environmental parameters for multi-intensity short-duration heavy rainfalls over East China[J]. Torr Rain Dis, 36(6):518-526(in Chinese).
- 王迪,牛淑贞,曾明剑,等,2020.河南省分类强对流环境物理条件特征分析[J].气象,46(5):618-628. Wang D, Niu S Z, Zeng M J, et al, 2020. Analysis on the characteristics of environmental and physical conditions for the classified severe convections in Henan Province[J]. Meteor Mon, 46(5):618-628(in Chinese).
- 王国荣,王令,2013.北京地区夏季短时强降水时空分布特征[J].暴雨灾害,32(3):276-279. Wang G R, Wang L, 2013. Temporal and spatial distribution of short-time heavy rain of Beijing in summer[J]. Torr Rain Dis, 32(3):276-279(in Chinese).
- 魏万益,马舒庆,杨玲,等,2020.长沙机场阵列天气雷达地物识别算法[J].应用气象学报,31(3):339-349. Wei W Y, Ma S Q, Yang L, et al, 2020. Ground clutter detection algorithm for array weather radar at Changsha Airport[J]. J Appl Meteor Sci, 31(3):339-349(in Chinese).
- 吴翀,刘黎平,汪旭东,等,2014.相控阵雷达扫描方式对回波强度测量的影响[J].应用气象学报,25(4):406-414. Wu C, Liu L P, Wang X D, et al, 2014. The measurement influence of reflectivity factor caused by scanning mode from phased array radar[J]. J Appl Meteor Sci, 25(4):406-414(in Chinese).
- 伍红雨,李芷卉,李文媛,等,2020.基于区域自动气象站的广东极端强降水特征分析[J].气象,46(6):801-812. Wu H Y, Li Z H, Li W Y, et al, 2020. Characteristics analysis of extremely severe precipitation based on regional automatic weather stations in Guangdong[J]. Meteor Mon, 46(6):801-812(in Chinese).
- 肖柳斯,胡东明,陈生,等,2021. X波段双偏振相控阵雷达的衰减订正算法研究[J].气象,47(6):703-716. Xiao L S, Hu D M, Chen S, et al, 2021. Study on attenuation correction algorithm of X-band dual-polarization phased array radar[J]. Meteor Mon, 47(6):703-716(in Chinese).
- 徐娟,纪凡华,韩风军,等,2014.2012年盛夏山东西部一次短时强降水天气的形成机制[J].干旱气象,32(3):439-445, 459. Xu J, Ji F H, Han F J, et al, 2014. Mechanism analysis of a short-term strong precipitation in midsummer of 2012 in western Shandong Province[J]. J Arid Meteor, 32(3):439-445, 459(in Chinese).
- 叶开,杨玲,马舒庆,等,2020.阵列天气雷达高分辨率强度场融合方法研究[J].气象,46(8):1065-1073. Ye K, Yang L, Ma S Q, et al, 2020. Research on high-resolution intensity field fusion method of array weather radar[J]. Meteor Mon, 46(8):1065-1073(in Chinese).
- 于明慧,刘黎平,吴翀,等,2019.利用相控阵及双偏振雷达对2016年6月3日华南一次强对流过程的分析[J].气象,45(3):330-344. Yu M H, Liu L P, Wu C, et al, 2019. Analysis of severe convective process in South China on 3 June 2016 using phased-array and dual-polarization radar[J]. Meteor Mon, 45(3):330-344(in Chinese).
- 俞小鼎,2013.短时强降水临近预报的思路与方法[J].暴雨灾害,32(3):202-209. Yu X D, 2013. Nowcasting thinking and method of flash heavy rain[J]. Torr Rain Dis, 32(3):202-209(in Chinese).
- 翟菁,胡雯,冯妍,等,2012.不同发展阶段对流云合并过程的数值模拟[J].大气科学,36(4):697-712. Zhai J, Hu W, Feng Y, et al, 2012. Numerical simulations of convective cloud merging processes at different development stages[J]. Chin J Atmos Sci, 36(4):697-712(in Chinese).
- 张涛,方翀,朱文剑,等,2012.2011年4月17日广东强对流天气过程分析[J].气象,38(7):814-818. Zhang T, Fang C, Zhu W J, et al, 2012. Analysis of the 17 April 2011 severe convective weather in Guangdong[J]. Meteor Mon, 38(7):814-818(in Chinese).
- 张勇,刘黎平,仰美霖,等,2011.“天鹅”台风风场结构特征[J].气象,37(6):659-668. Zhang Y, Liu L P, Yang M L, et al, 2011. Analysis on the structure characteristics of Typhoon Goni[J]. Meteor Mon, 37(6):659-668(in Chinese).
- Holleman I, Beekhuis H, 2003. Analysis and correction of dual PRF velocity data[J]. J Atmos Ocean Technol, 20(4):443-453.
- Klaassen W, 1989. Determination of rain intensity from Doppler

- spectra of vertically scanning radar[J]. *J Atmos Ocean Technol*, 6(4):552-562.
- Li Y, Ma S Q, Yang L, et al, 2020. Sensitivity analysis on data time difference for wind fields synthesis of array weather radar[J]. *SOLA*, 16:252-258.
- Marks F D Jr, 1985. Evolution of the structure of precipitation in Hurricane Allen (1980)[J]. *Mon Wea Rev*, 113(6):909-930.
- North K W, Oue M, Kollias P, et al, 2017. Vertical air motion retrievals in deep convective clouds using the ARM scanning radar network in Oklahoma during MC3E[J]. *Atmos Meas Tech*, 10(8):2785-2806.
- Potvin C K, Shapiro A, Xue M, 2012. Impact of a vertical vorticity constraint in variational dual-Doppler wind analysis: tests with real and simulated supercell data[J]. *J Atmos Ocean Technol*, 29(1):32-49.
- Shapiro A, Potvin C K, Gao J D, 2009. Use of a vertical vorticity equation in variational dual-Doppler wind analysis[J]. *J Atmos Ocean Technol*, 26(10):2089-2106.
- Wu H Y, Zeng M J, Mei H X, et al, 2020. Study on sensitivity of wind field variation to structure and development of convective storms[J]. *J Trop Meteor*, 26(1):57-70.

(本文责编:俞卫平)