

珠江三角洲地区一次局地极端强降雨的大气环流条件及其可预警性分析

庞绮汶¹ 余晓健¹ 郭瑞玲¹ 巢婧华¹ 钟立华¹ 蔡贤达² 招伟文³

(1 广东省佛山市南海区气象局, 佛山 528200; 2 广东省佛山市高明区气象局, 佛山 528500;

3 广东省佛山市顺德区气象局, 佛山 528300)

摘要: 应用常规气象观测资料、多普勒天气雷达产品, 结合ERA5 (0.25°×0.25°) 再分析资料, 对2021年8月1日17:00—19:00发生在广东省佛山市南海区的局地短时暴雨进行分析, 结果表明: 短时暴雨发生的环流背景是前倾槽配合850 hPa的切变线; 中层强的上升运动和低层源源不断的水汽输送为本次过程提供了有利的动力条件和水汽条件; 地面长时间存在的气旋性涡旋和辐合区可能是造成此次强降雨的重要原因之一。本文还对此次极端强降雨的气象服务工作进行分析, 总结了工作经验, 为今后重大气象服务提供参考。

关键词: 极端强降雨, 垂直累积液态含水量 (VIL), 暴雨预警信号, 多普勒雷达特征

中图分类号: P4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2024.03.008

Atmospheric Circulation Conditions and Early Warning Capability of a Local Extremely Heavy Rainfall in Pearl River Delta

Pang Qiwen¹, Yu Xiaojian¹, Guo Ruiling¹, Chao Jinghua¹, Zhong Lihua¹, Cai Xianda², Zhao Weiwen³

(1 Nanhai Meteorological Service, Foshan 528200; 2 Gaoming Meteorological Service, Foshan 528500;

3 Shunde Meteorological Service, Foshan 528300)

Abstract: Using conventional meteorological observation data, the products of Doppler weather radar and the 0.25°×0.25° ERA5 reanalysis data, this study analyzes a local short-time heavy rainfall in Nanhai District, Foshan City, Guangdong Province from 17:00 BT to 19:00 BT on 1 August 2021. The results show that the circulation background of the short-time rainstorm is a forward trough with an 850 hPa shear line. The strong mid-level upward motions and the persistent low-level water vapor transport provide favorable dynamic and water vapor conditions for this extremely heavy rainfall. The long-duration existence of the cyclonic vortexes and convergence on the ground may be one of the important reasons leading to the occurrence of this extremely heavy rainfall. This paper also analyzes the meteorological service for the extremely heavy rainfall and summarizes the work experiences, which can provide reference for meteorological services in the future.

Keywords: extremely heavy rainfall, VIL, warning signals for heavy rainfall, Doppler radar echo

0 引言

近些年, 我国各地极端天气气候事件频发, 如2012年7月21日和2016年7月20日北京的极端特大暴雨过程^[1], 2017年5月7日广州极端强降雨^[2], 2021年7月20日河南罕见的极端强降雨等。极端强降雨事件已受到广泛关注, 各地对极端强降雨做了较多的分析^[3-7]。谢维等^[3]对2020年6月8日新余局地暴雨天气过程进行分析, 得出地面辐合线是形成局地短时强降雨的触发机制, 降雨系统随着地面辐合线移动; 辐合线移动过程中存在气旋性环流, 导致系统移速缓慢, 形成局

地暴雨; 新生云系如果出现合并现象, 往往会快速发展加强形成强降雨天气。汪海恒等^[4]对2019年韶关“5·18”局地特大暴雨的成因进行分析, 研究表明多个单体持续发展与合并, 出现“列车效应”, 近地面冷池维持向南楔入, 低层西南风加强叠加于冷池上导致强风速辐合辐散区和中气旋的出现, 是维持强回波持续发展的重要原因。短时暴雨可导致城市道路、立交桥下积水, 对城市交通产生影响, 严重时可能造成交通瘫痪, 威胁人民生命财产安全等极端后果。

短时强降雨是气象工作关注重点, 也是预报难点。数值预报捕捉中小尺度天气系统难度大, 以至于短时强降雨等高影响天气的短期预报时有空报、漏报等现象。做好短时临近预报预警业务, 及时发布气

收稿日期: 2022年11月25日; 修回日期: 2023年8月1日

第一作者: 庞绮汶(1990—), Email: 382790640@qq.com

象预警信号,是弥补短期预报空报和漏报的最佳手段。不少学者也通过研究对暴雨预报预警技术提出了一定的指标。杨芳园等^[8]的研究表明,地面中尺度辐合线对强降雨的发生有1~2 h的提前预报实效。王丽荣等^[9]依据回波顶高和垂直累积液态含水量(VIL)产品能够提前18 min预报短时暴雨的发生。孔启亮等^[10]认为实际业务工作中可以通过判断回波的质心高度和边界层风速有无跃增来估计降雨效率潜势,当推断较高的降雨效率潜势将持续较长时间时,应及时发布暴雨警报。李桂英等^[11]也提出了延安短时强降雨天气雷达临近预警指标:当满足天气尺度辐合特征,同时满足组合反射率、40 dBZ强回波伸展高度平均值分别达48.8 dBZ、4 km,则可以考虑该站点及附近地区进入短时强降雨临近预警状态。

佛山市地处珠江三角洲腹地,气候温和,雨量充足,而暴雨是佛山市主要灾害性天气之一,历来是预报的重点和难点。以往对佛山市暴雨的研究多止步于诊断分析^[12-14],而结合预警信号发布情况进行讨论的相对较少,特别是针对佛山市南海区的短时暴雨过程成因分析及临近预警更少。为了切实践行“人民至上生命至上”理念,筑牢防灾减灾第一道防线,研究掌握南海区短时强降雨的特征及建立强对流天气监测预警指标尤为重要。

本研究应用常规观测资料、多普勒天气雷达产品,结合ERA5(0.25°×0.25°)再分析资料,采用天气分析和统计相结合的方法,对2021年8月1日南海区出现的局地短时强降雨过程作详细分析,以期进一步认识类似极端强降雨天气过程,为提高该类天气的预报水平提供参考,为防范化解恶劣天气交通安全风险和更精准及时地做好短时临近预报服务提供支撑。

1 天气实况

2021年8月1日17:00—19:00(北京时,下同)佛山市南海区普降暴雨,局部大暴雨,并伴有短时强降雨和8~9级阵风,风力最大点九江镇沙头成人文化技术学校达22.1 m/s(9级);全区共有6个自动站录得100 mm以上降雨,22个自动站录得50~99.9 mm降雨,11个自动站录得25~49.9 mm降雨(图1)。较强降雨中心集中于狮山镇和大沥镇,其中狮山镇龙头村委自动站录得全区最大累计雨量为134.4 mm和滑动1 h最大雨量为124.3 mm(17:25—18:20),刷新南海区小时雨量极值(106.1 mm)。南海国家气象观测站也录得117.5 mm的累计雨量。从本次过程累计降雨量前三的自动站(狮山镇龙头村委自动站、狮山镇政府自动站和大沥镇联安村委自动站)逐5 min降雨量可知,龙头村委和狮山镇政府的极端强降雨集中

在17:00—18:10,而联安村委极端强降雨则集中在17:40—18:05。极端强降雨期间,每个站点每5 min降雨量几乎都超过10 mm,可见雨强之大。除此以外,此次降雨过程还具有局地性强、历时短的特点,造成南海区多处地方出现水浸、车辆受损、广告牌倒伏等灾情。

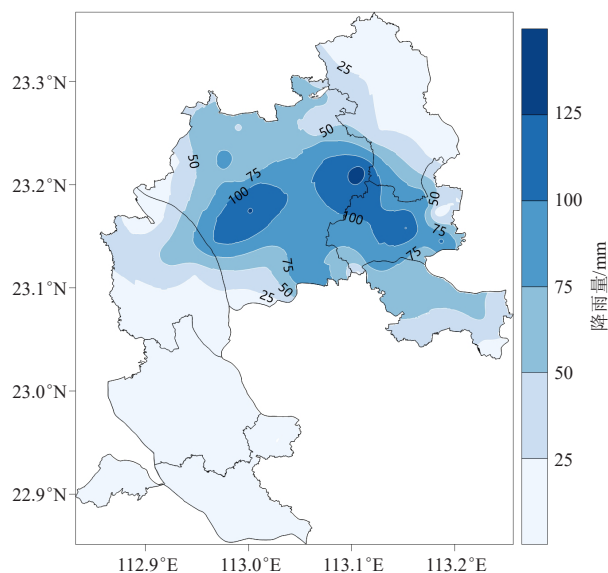


图1 2021年8月1日17:00—19:00南海区累计降雨量分布
Fig. 1 The distribution of accumulated precipitation in Nanhai during 17:00—19:00 BT on 1 August 2021

2 环流形势和环境条件

2.1 环流形势分析

图2a为2021年8月1日08:00的天气形势综合分析图。可以看出500 hPa环流场上,高空槽压至广东省北部,而冷中心位于广西省东南部,暖中心位于广东省中部偏西地区,南海区正好受槽前反气旋环流的暖中心控制;850 hPa和925 hPa上广西省东南部和广东省一直存在显著流线,有利于将北部湾的暖湿气流向广东上空输送。850 hPa上广东省北部存在东西向切变线,南海区刚好位于切变线南侧和西南大风轴气旋性弯曲的一侧,利于暖湿气流在该区域汇聚。850 hPa的湿区覆盖广西大部到广东西部和广东东部到福建、江西一带,而925 hPa上整个华南地区温度露点差小于4℃,湿度大,南海区上空存在较好的水汽条件。从加密地面自动气象观测站风场(图2b)可知,8月1日14:00南海区狮山镇受气旋性弯曲的弱切变影响。弱切变在此地稳定少动,一直维持至20:00才缓慢消失,这可能是本次降雨系统移动缓慢,甚至停滞、维持在狮山镇和大沥镇的重要原因。从14:00的500 hPa到地面各层风场来看(图略),当地受低压中心尾槽影响,且槽线随高度向前进方向倾斜,属于前倾槽,为强对流酝

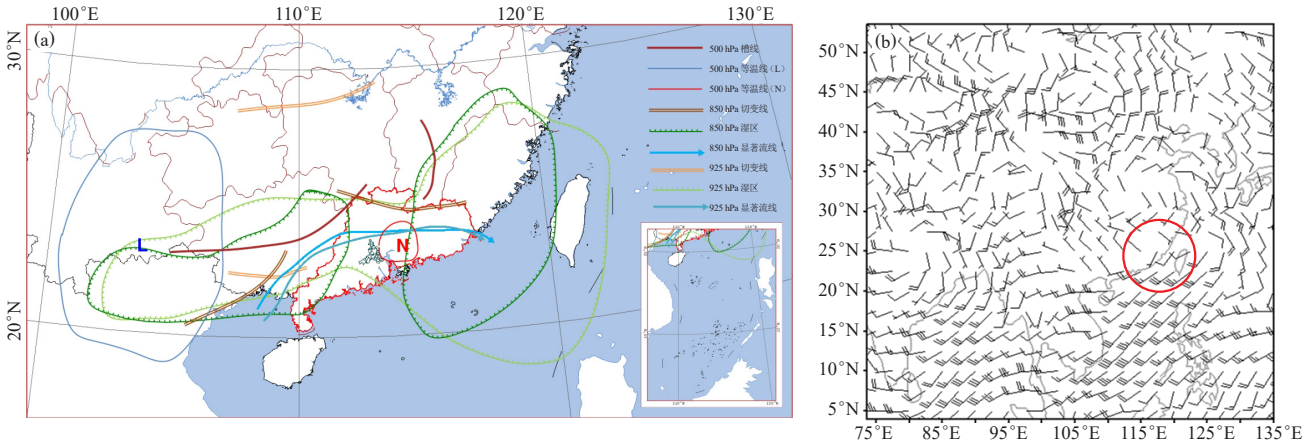


图2 2021年8月1日08:00的天气形势综合分析图(a)和14:00地面风场(b, 红色圈: 气旋性弯曲)

Fig. 2 The synoptic map at 08:00 BT (a) and surface wind field at 14:00 BT (b, the red circle: cyclonic circulation) on 1 August 2021

酿、发生、发展提供了很好的环境条件。

2.2 探空资料分析

从8月1日08:00时清远探空 T - $\ln p$ 图(图3)可以看出,暴雨发生前,湿层比较深厚,在500 hPa附近有干层,有利于短时强降雨和局地雷暴大风等强对流天气出现;对流有效位能(CAPE)面积呈狭窄型,处于弱不稳定;800 hPa以上均为不稳定层,且500 hPa以下风场随高度顺时针旋转,表明存在暖平流,500 hPa以

上风场随高度逆时针旋转,表明存在冷平流,这种高层冷平流和低层暖平流叠加增大了层结的不稳定度;0~6 km垂直风切变较弱。根据层结资料分析可知,8月1日08:00的 K 指数为35.9 °C,抬升指数为-3.54,最大抬升指数为-3.2,CAPE达到1508.7 J/kg,这种中等强度的CAPE(比如1500~2000 J/kg)可能比极端的CAPE更有利于高降雨效率的形成。综合来看,热力、动力、水汽条件等均有利于出现短时暴雨。

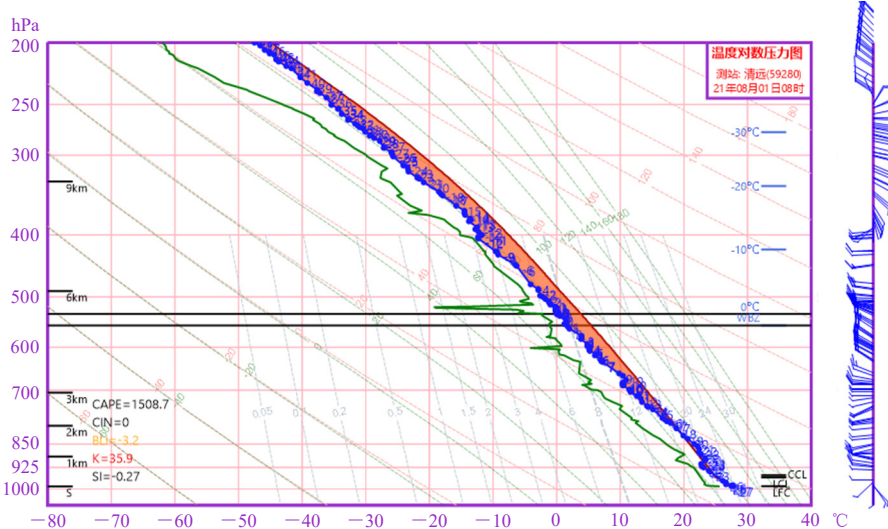


图3 2021年8月1日08:00清远探空 T - $\ln p$ 图

Fig. 3 T - $\ln p$ at Qingyuan Station at 08:00 BT on 1 August 2021

3 物理量分析

3.1 动力条件分析

产生暴雨的条件除了需要大气层结的不稳定以外,还需要强盛而持久的上升运动。由涡度剖面图(图4a)可以看出,17:00近地面出现正涡度,且900~600 hPa存在强的正涡度中心,涡度最大值为 $6 \times 10^{-5}/s$,中低空正涡度有利于该地区上空形成强的上升运动,为暴雨的产生提供动力条件^[15];而

在500 hPa以上存在明显的负涡度中心,中心最大值为 $-5 \times 10^{-5}/s$,有利于高空辐散抽吸作用。沿113.01°E, 23.14°N作垂直速度的时间-气压分布图(图4b)可见,在暴雨发生前,上升运动向上伸展到对流层顶,且在400 hPa高度达到极值(上升速度达-1.1 Pa/s),强的垂直上升速度是触发本次强降雨的重要动力条件。在暴雨发生期间(17:00—19:00),整层大气除了高层上升运动以外,中低层开始出现下

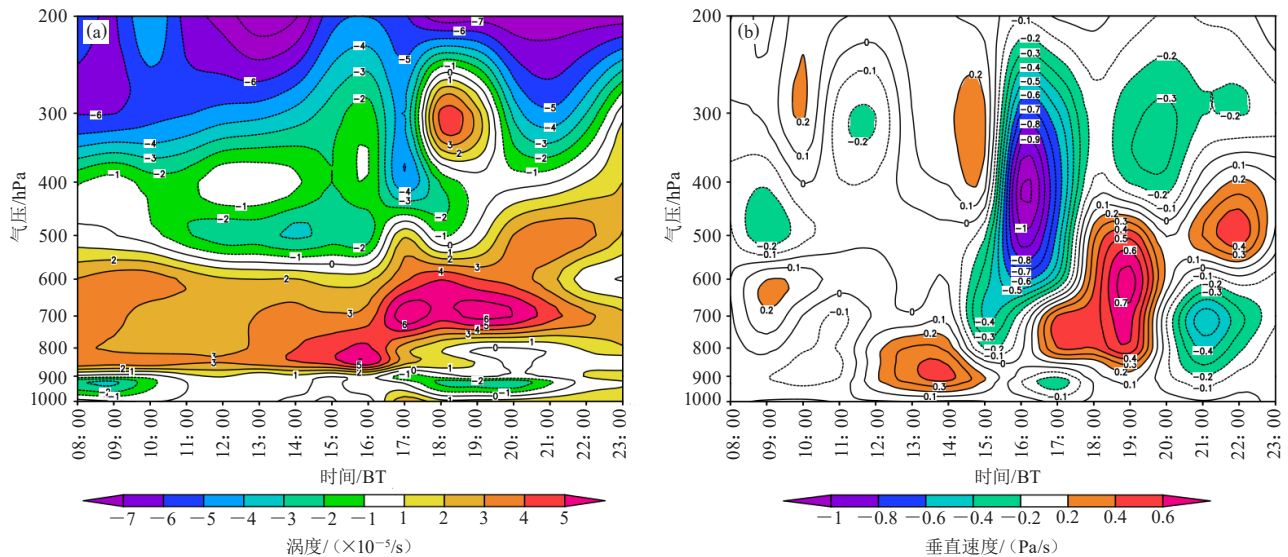


图4 2021年8月1日08:00—23:00涡度(a)和垂直速度(b)的时间-气压分布

Fig. 4 Time-pressure distribution of vorticity (a) and vertical velocity (b) during 08:00–23:00 BT on 1 August 2021

沉运动,这可能由于大量雨滴坠落产生拖曳作用和雨滴蒸发冷却导致负浮力;在19:00前后,400 hPa到近地层存在明显的下沉运动中心,下沉速度达0.7 Pa/s,预示着本次暴雨过程趋于结束。

3.2 水汽条件分析

大量的水汽输送是形成暴雨的必要条件之一。从8月1日14:00整层水汽含量图(图略)可知,水汽中心主要集中在广东省中南部地区,南海区的大气柱水总量为 60 kg/m^2 ,水汽条件较为充足。降雨量与水汽通量散度关系密切,从图5可知,8月1日16:00—17:00近地面和700~600 hPa均有明显的水汽通量散度负值

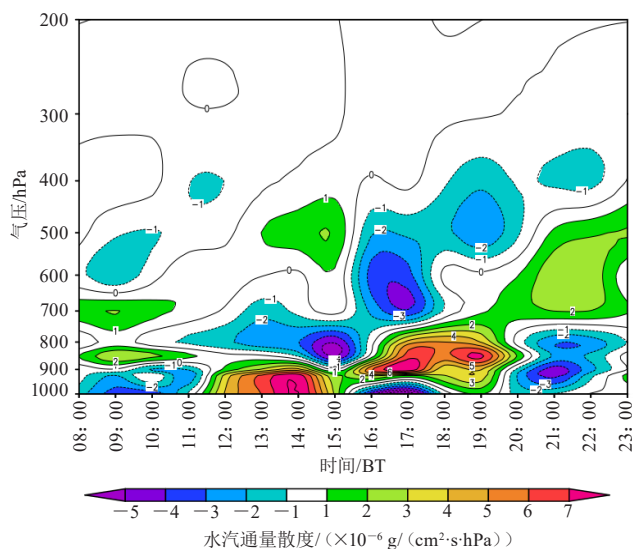


图5 2021年8月1日08:00—23:00水汽通量散度的时间-气压分布图

Fig. 5 Time-pressure distribution of water vapor flux divergence during 08:00–23:00 BT on 1 August 2021

中心,最大值均为 $-4 \times 10^{-6} \text{ g/(cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{hPa)}$,表明有大量的水汽积聚,即有源源不断的水汽汇聚,为本次暴雨提供必要的水汽补充。

4 暴雨的多普勒雷达特征及可预警性分析

4.1 基本反射率的特征分析及可预警性

从雷达产品综合分析时序演变图(图6)来看,此次短时暴雨是由4个对流单体两两合并造成的,回波呈带状,两个强回波中心与暴雨中心重叠,一个位于狮山镇中部,一个位于大沥镇中部。16:36狮山镇开始有对流泡生成,强度为35 dBZ,回波顶高6 km, VIL为 1 kg/m^2 ;而大沥镇17:00开始有对流泡形成,强度为40 dBZ,回波顶高9 km, VIL为 45 kg/m^2 。17:30狮山镇和大沥镇的回波合并(图6a),回波强度不断增强,范围扩大,18:00回波强度(最大65 dBZ)和面积达到最大,回波顶高18 km,最强VIL中心为 65 kg/m^2 以上,此时3个自动站的小时雨量均接近或超过80 mm。直到18:30左右回波强度、回波顶高、VIL才有明显的减弱降低趋势,19:00南海区基本为大面积的层状云降雨。

从图6a白线处作剖面得出雷达剖面图(图6b),可以看到降雨中心对流成熟阶段的垂直结构特征,不难发现雷达回波底部几乎与地面相接,系统成熟阶段垂直伸展高度很高,50 dBZ以上强度的回波向上扩展到10~12 km,远远超过 $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ 等温线高度(8.9 km),60 dBZ以上强回波也向上扩展到9~10 km,表明对流云团垂直发展剧烈,呈现出高质心对流结构特征,且17:30—17:48可以看出对流风暴垂直结构上存在较明显的悬垂结构特征,表明云团中除液态水以外,还可

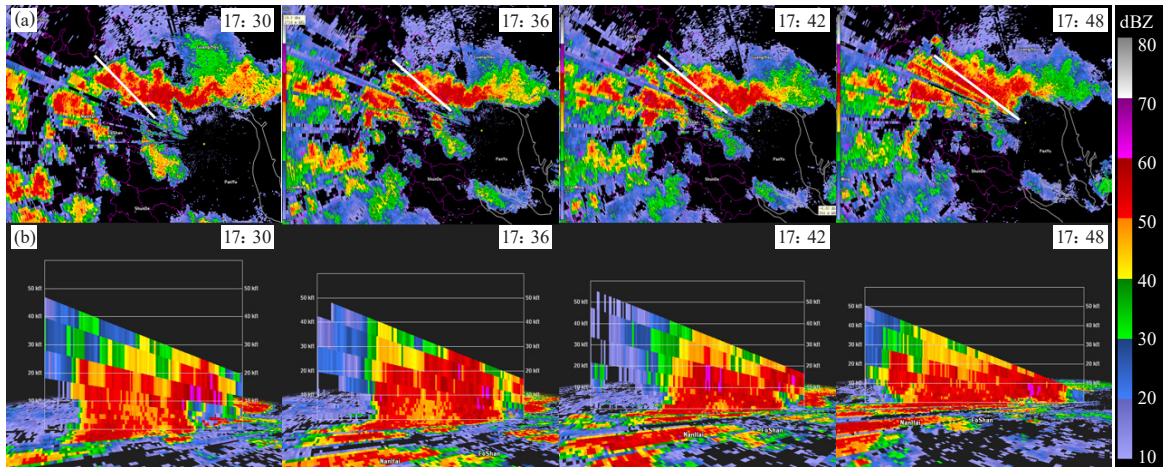


图6 2021年8月1日17:30—17:48广州雷达1.5°仰角反射率因子(a)及其白线处垂直剖面(b)
Fig. 6 The reflectivity (a) and vertical profile at white line of fig. a (b) of 1.5° elevation angle from Guangzhou Radar during 17:30—17:48 BT on 1 August 2021

能含有过冷水或冰晶粒子等混合相态水物质^[16]，只是由于0℃层高度较高(5.3 km)且地面气温较高，冰晶粒子等在下降过程中融化成水滴，所以地面没有观测到明显的冰雹。本次过程的对流风暴与一般的高质心型对流风暴移动速度较快的特征相反，对流云团移动速度较慢，与前文提及地面弱切变稳定维持在南海区有关。

4.2 径向速度场特征分析及可预警性

17:18—17:42大沥镇附近有辐合区；17:30起狮山镇附近存在气旋性辐合区，风速辐合和涡旋特征到18:06才消失，18:12狮山镇南部开始出现低层辐

散区，回波强度于18:24逐渐减弱到30 dBZ以下，雨强同样有减弱趋势，逐5 min降雨量相继减弱到5 mm以下。由于多普勒雷达基本速度图上有气旋性辐合出现预示中小尺度强对流云团的发展，当气旋性辐合维持时间较长且回波强度在45 dBZ以上时往往有短时暴雨的产生^[17]，因此17:45南海区气象台发布了狮山镇、大沥镇、里水镇、丹灶镇暴雨橙色预警信号，其中狮山镇、大沥镇、丹灶镇暴雨橙色预警信号均达到40 min以上的提前量，但由于里水镇没有出现3 h超过50 mm的累计雨量，出现空报，拉低了此次分镇预警信号的平均提前量。图7为17:42—18:00广州雷达0.5°仰角径向速度演变图。

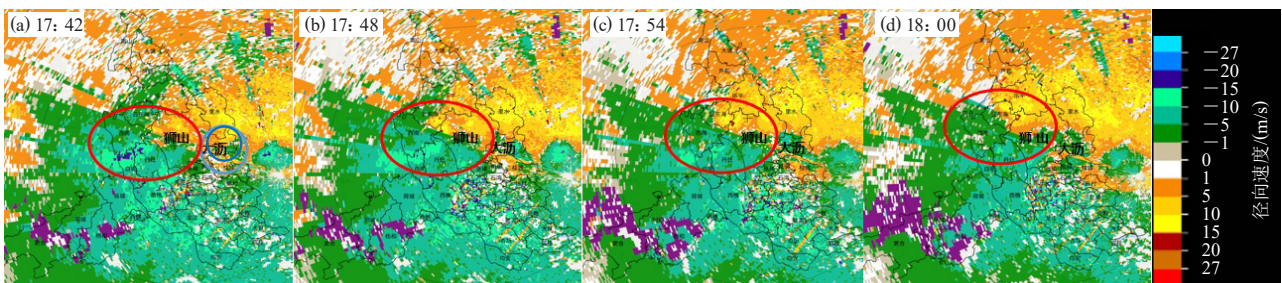


图7 2018年8月1日17:42—18:00广州雷达0.5°仰角径向速度演变(红圈:狮山镇的辐合区;蓝圈:大沥镇的辐合区)
Fig. 7 The radial velocity of 0.5° elevation angle from Guangzhou Radar during 17:42—18:00 BT on 1 August 2021 (the red circle: convergence in Shishan Town; the blue circle: convergence in Dali Town)

4.3 垂直累积液态含水量(VIL)分析及可预警性

对本次过程累计降雨量前三的自动站(狮山镇龙头村委自动站、狮山镇政府自动站和大沥镇联安村委自动站)逐5 min降雨量与自动站所在位置的广州雷达VIL变化做了对比分析(图8)，可以看出，降雨初期，VIL的峰值均提前于逐5 min降雨量峰值，出现VIL大值区到自动站录得短时降雨之间有10~20 min，也就是提前量有10 min以上。这说明VIL大值区在降雨开

始前有很好的指示意义，这与杨立洪等^[18]得出的结论相一致。同时也能看出，如果同一地点VIL≥25 kg/m²出现连续两个时次(12 min)或以上，未来几个时次的5 min降雨量会维持在10 mm左右，直到VIL减弱到20 kg/m²以下。

5 成功经验与讨论

及时、准确的气象预警预报信息是做好应急气象服务的前提，对此次珠三角地区局地极端降雨过

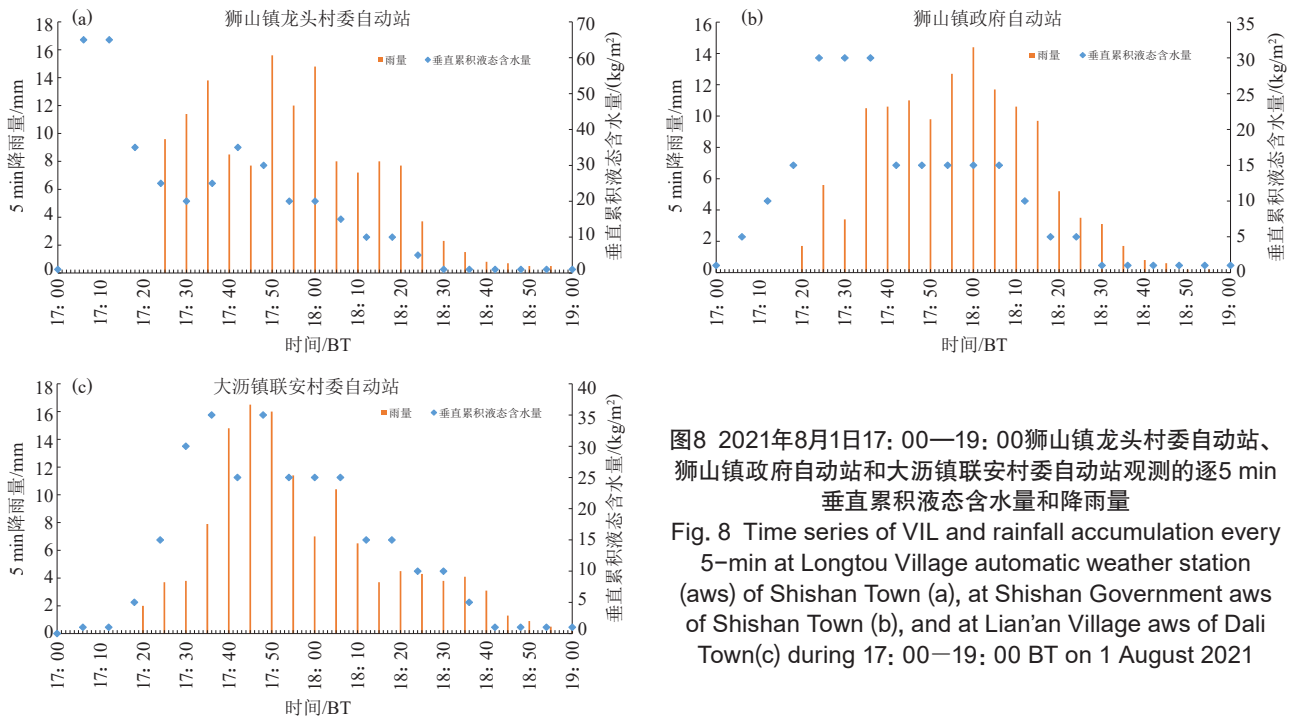


图8 2021年8月1日17:00—19:00狮山镇龙头村委自动站、狮山镇政府自动站和大沥镇联安村委自动站观测的逐5 min垂直累积液态含水量和降雨量
Fig. 8 Time series of VIL and rainfall accumulation every 5-min at Longtou Village automatic weather station (aws) of Shishan Town (a), at Shishan Government aws of Shishan Town (b), and at Lian'an Village aws of Dali Town(c) during 17:00—19:00 BT on 1 August 2021

程,气象部门做到了及时、准确发布和升级暴雨预警信号。雷雨大风预警信号提前量为39 min,暴雨黄色预警提前量为41 min,暴雨橙色以上预警提前量为26 min以上,基本达到现代化目标要求,特别是南海区狮山镇和大沥镇暴雨红色预警信号提前量为55 min,成功为本次暴雨过程防灾减灾工作争取宝贵时间。

在极端天气服务中利用多普勒雷达不同产品及综合指标分析对发布暴雨预警信号有一定的指示意义。当VIL $\geq 25 \text{ kg/m}^2$ 在同一地区维持2~3个体扫(12~18 min)以上,可以作为预测短时强降雨的指标,可以考虑升级暴雨橙色预警信号,或直接跳级发布暴雨橙色预警信号,会有较大的提前量。若速度图上有气旋性涡旋或辐合维持3个体扫(18 min)或以上,则可以果断发布暴雨预警信号,若气旋性涡旋或辐合消失后,且没有其他明显的系统影响,则可考虑不发布或不升级预警信号。

本研究通过对2021年8月1日17:00—19:00降雨过程进行分析,初步探讨了多普勒雷达不同产品及综合指标对佛山市南海区当地发布暴雨预警信号的指示作用。但文中仅针对一次个例进行分析,未来还需要利用更多典型个例对南海区短时暴雨触发机制、维持发展条件以及一些强对流天气监测预警指标进行更深入的探索。

参考文献

[1] 田付友,杨舒楠,郑永光,等.北京地区两次极端特大暴雨过程中短时强降雨环境条件对比分析[J].暴雨灾害,2021,40(1):27-36.

- [2] 田付友,郑永光,张小玲,等.2017年5月7日广州极端强降水对流系统结构、触发和维持机制[J].气象,2018,44(4):469-484.
- [3] 谢维,马中元,袁春,等.一次地面辐合线突发局地短时强降雨特征分析[J].江西科学,2021,39(3):452-456.
- [4] 汪海恒,张曙,伍志方,等.2019年韶关“5·18”局地特大暴雨极端性成因分析[J].热带气象学报,2021,37(1):49-60.
- [5] 郝莹,姚叶青,郑媛媛,等.短时强降雨的多尺度分析及临近预警[J].气象,2012,38(8):903-912.
- [6] 杨伟,曹向林,袁泉,等.2014年7月4日洞庭湖大暴雨过程分析[J].安徽农业科学,2015,43(3):244-246,250.
- [7] 叶朗明,徐碧裕,刘显通,等.2017年广东西部一次暖区极端降水过程的维持机制及微物理特征[J].气候与环境研究,2021,26(3):263-274.
- [8] 杨芳园,潘娅婷,邹灵宇,等.昆明市两次局地短时暴雨过程对比分析[J].云南大学学报(自然科学版),2021,43(5):953-963.
- [9] 王丽荣,刘黎平,王立荣,等.一次局地短时大暴雨中 γ 尺度分析[J].高原气象,2011,30(1):217-225.
- [10] 孔启亮,孙翠梅,李建国,等.梅汛期区域性暴雨的多尺度分析及临近预警[J].气象科学,2014,34(5):564-572.
- [11] 李桂英,王文波,同明伟,等.延安市短时强降雨天气多普勒雷达特征及临近预警指标[J].现代农业科技,2021(14):201-203.
- [12] 伍淑瑜,张伟强,招伟文.2016年1月佛山一次冬季暴雨诊断分析[J].贵州气象,2017,41(4):30-34.
- [13] 麦雪湖,何秋蕊,梁华玲.2018年1月佛山一次冬季暴雨的成因分析[J].广东气象,2018,40(5):6-9.
- [14] 黄先香,炎利军,余乐福,等.秋季台风“彩虹”引发佛山特大暴雨过程分析[C]//第33届中国气象学会年会S1灾害天气监测、分析与预报.西安:中国气象学会,2016:579-584.
- [15] 李景祥,王知航,黄少芬.超强台风凡亚比造成漳州市大暴雨的诊断分析[J].农业与技术,2015,35(3):200-202.
- [16] Williams E R. The electrification of severe storms[M]//Doswell C A. Severe Convective Storms. Boston: American Meteorological Society, 2001: 527-561.
- [17] 陈瑞敏,康文英,张国萍.副高外围局地暴雨过程中尺度分析[C]//中国气象学会2006年年会“中尺度天气动力学、数值模拟和预测”分会论文集.成都:中国气象学会,2006:496-499.
- [18] 杨立洪,黄茂栋,黄彬.多普勒雷达垂直累积液态含水量产品分析[J].广东水利水电,2008(4):28-30.

(编辑:郑秋红)