

# 佛山初春冰雹天气层结结构及雷达特征初探

郭瑞玲<sup>1</sup> 钟立华<sup>1</sup> 麦玲玲<sup>2</sup> 余晓健<sup>1</sup> 王硕甫<sup>2</sup> 梁华玲<sup>1, 2</sup> 蔡康龙<sup>3</sup> 黄先香<sup>3</sup>

(1 广东省佛山市南海区气象局, 佛山 528200; 2 广东省佛山市气象局, 佛山 528200;

3 广东省佛山市龙卷风研究中心, 佛山 528200)

**摘要:** 采用MICAPS资料、探空资料、雷达资料以及NCEP 2.5°×2.5°再分析资料对近2年佛山地区的3次初春(2—3月)冰雹事件进行分析,发现:1)2019年2月21日和2020年3月27日的冰雹过程属于锋面低槽型,2020年3月18日冰雹过程属于高架雷暴型。2)3次过程“上冷下暖”层结结构不明显,不满足 $\Delta T_{85}$ 越大、冰雹直径越大的规律,但“上干下湿”层结结构明显;2019年2月21日和2020年3月27日的冰雹过程最大热浮力强度大于6℃,具备出现大冰雹潜势;满足 $H-/H+$ (冷云和暖云厚度比值)值越大,冰雹直径越大规律。3)雷达图上悬垂回波明显,2019年2月21日和2020年3月27日的冰雹过程还探测到前侧暖湿气流流入缺口和明显中气旋,3月27日冰雹过程高仰角处还探测到明显三体散射长钉;3次过程的VIL值不大,这可能是初春冰雹与夏季冰雹区别之一。

**关键词:** 冰雹, 大气层结, 雷达回波, 初春, 佛山

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.06.011

## Preliminary Study on Atmospheric Stratification Structure and Radar Characteristics of Hail Weather in Early Spring in Foshan

Guo Ruiling<sup>1</sup>, Zhong Lihua<sup>1</sup>, Mai Lingling<sup>2</sup>, Yu Xiaojiang<sup>1</sup>, Wang Shuofu<sup>2</sup>,  
Liang Hualing<sup>1</sup>, Cai Kanglong<sup>3</sup>, Huang Xianxiang<sup>3</sup>

(1 Nanhai Meteorological Service, Foshan 528200 2 Foshan Meteorological Service, Foshan 528200

3 Foshan Tornadoes Research Center, Foshan 528200)

**Abstract:** This study used MICAPS data, sounding data, radar data and NCEP2.5×2.5 reanalysis data to analyze the three hail events in Foshan in early spring (February to March) in the past two years. The results suggest: (1) The weather situation of the hails on 21 February 2019 and on 27 March 2020 were both the frontal low trough type, and the weather situation of the hail on 18 March 2020 was the elevated thunderstorm type. (2) The “cold upper and warm lower” stratification structures in the processes of the three hails were not obvious, which does not satisfy the rule that the larger the  $\Delta T_{85}$ , the larger the hail diameter, but the “dry upper and wet lower” stratification structure were obvious; the maximum thermal buoyancy intensity in the processes of the hails on 21 February 2019 and 27 March 2020 were over 6℃, which had the potential for large hail and satisfy the rule that the larger the  $H-/H+$  (the ratio of the thickness of cold cloud to warm cloud), the larger the hail diameter. (3) The overhang echoes on the radar chart were obvious. V-shaped gaps and obvious medium cyclones were also detected in the processes of the hails on 21 February 2019 and 27 March 2020, and three-body scattering spikes were obviously detected at high elevation angles in the process of the hail on 27 March; the VIL value of the three processes of the hails were not big, which may be one of the differences between hail in early spring and hail in summer.

**Keywords:** hail, atmospheric stratification, radar echo, early spring, Foshan

### 0 引言

冰雹与雷雨大风、短时强降水等同属广东常见的强对流天气,冰雹具有突发性强、生命史短、局地性强、破坏力大等特点,一旦发生对农作物、基础设施及厂棚房屋造成较为严重的破坏,并对户外人员的生

命安全构成威胁,尤其是大冰雹。虽然广东省并不属我国冰雹的多发区,但冰雹具有较强致灾性,一直以来被广东气象工作者重视并深入开展研究。有从统计角度分析冰雹特征,如陈立祥等<sup>[1]</sup>统计分析了1984—1986年广州地区冰雹等强对流天气特征,并根据对流层中水平风的垂直切变将广州地区强对流天气分为2类4型;林仲青<sup>[2]</sup>利用1990—1997年的资料,分析了广东省2—5月冰雹的分布特征;伍志方等<sup>[3]</sup>对产生冰雹的中小尺度天气系统的多普勒雷达回波特征进行了

收稿日期:2020年9月9日;修回日期:2020年11月10日

第一作者:郭瑞玲(1982—),Email:18691718@qq.com

资助信息:广东省科技厅社会发展科技协同创新体系建设专项(2019B020208015)

分析;李怀宇等<sup>[4]</sup>对2004—2013年广东冰雹天气的时空分布、天气形势、物理量等进行了统计分析;曾智琳等<sup>[5]</sup>统计分析了2004—2017年发生在广东的23个大冰雹事件的大气层结状态与结构特征,定量诊断了大冰雹的融化效应,并建立了判别大冰雹的物理参数模型。有着重历史个例分析,如林志强等<sup>[6]</sup>对1996年4月19日的一次冰雹过程进行了综合分析;叶爱芬等<sup>[7]</sup>分析了2003年广东省一次冰雹强对流天气的成因;谢健标等<sup>[8]</sup>分析了伴有强冰雹的广东2005年3·22强飚线天气过程。

总的来看,以往研究主要侧重于全年冰雹特征统计及历史个例,对于季节性冰雹研究得较少。由于近年来强对流天气呈现早发趋势,因此分析春季冰雹天气形势、层结结构及雷达回波有助于早春强对流天气预报预警提供有价值参考。

## 1 资料与方法

本文收集了近2年佛山地区初春(2—3月)的冰雹事件,冰雹的确认主要通过三防办工作人员、村居信息员报告的时间和地点以及冰雹尺寸,并结合多普勒天气雷达观测到的风暴单体资料,进一步验证冰雹出现的时间和地点,由于冰雹从相应的雹暴系统中产生到降落到地面,再被目击者见到并报告,存在时间差,因此允许雷达回波的雹暴单体与冰雹报告存在一定的时间差和空间距离,一般在冰雹观测记录点附近10 km内必须存在相对应的强风暴单体,时间差为1 h内。以日为单元,对于同一天在多个时段或多个地区观测冰雹,或同一个风暴形成的多个冰雹观测记录均记为同一个冰雹过程。经过上述处理,近2年共收集到3个佛山初春冰雹过程,分别出现在2019年2月21日、2020年3月18日和3月27日。

对挑选出来的冰雹个例采用MICAPS资料、探空资料等进行天气形势和大气层结对比分析,再利用NCEP 2.5°×2.5°再分析资料计算垂直上升速度和温度平流并进行对比分析,另外结合广州雷达资料对冰雹过程进行雷达回波特征分析。统计发现这3次冰雹事件发生的时间在早晨、下午至傍晚,由于高空观测资料仅有08时、20时(北京时,下同),利用探空资料时采取未受对流系统影响、距离最近的08时(20时)探空资料。

## 2 环流形势特征

### 2.1 天气实况

2019年2月21日15—20时佛山市出现大雨到暴雨,伴有强雷电、7~8级阵风和局地冰雹,南海大沥北村水闸录得最大阵风19.8 m/s(8级),16:00—16:15,南海里水宏岗村、白岗村、文教社区、贤僚村先后遭受冰

雹袭击,持续时间约5 min,冰雹最大直径2~3 cm,将该次过程简称2·21过程。2020年3月18日08—10时佛山市出现短时强降水、雷电、7~8级阵风和局地冰雹,高明荷城高富石油录得阵风17.2 m/s(8级)、南海九江水务所录得全市最大阵风18.9 m/s(8级),08:48,南海九江下西社区出现小冰雹,持续时间1~2 min,简称3·18过程。

2020年3月27日16—23时佛山市普降暴雨,伴有强雷电、短时强降水、7~8级阵风和局地冰雹,高明荷城高富石油录得全市最大阵风18.3 m/s(8级),18时左右南海黄岐、沙溪、横杠一带出现冰雹,持续时间约10 min,冰雹最大直径1~2 cm,20时左右高明更合出现直径约2 cm冰雹,持续时间约5 min,简称3·27过程。上述3次过程伴随冰雹出现的最大阵风约8级,较夏季冰雹出现时伴随阵风9~11级要小,这可能的原因是春季零度层高度低,地面气温较夏季低,冰雹挣脱上升气流下降所需的动力较夏季小。

### 2.2 形势分析

如图1所示,2·21过程前期地面受变性冷高压控制,气温回升,随后地面冷高压推动冷锋南压进入广东省,21日08时地面冷锋到达粤北;低层(925 hPa、850 hPa)切变线跟随地面冷锋南压,切变线南侧为西南急流,偏南暖湿气流为对流提供充足水汽和不稳定能量;500 hPa槽线位于108°E附近,槽后强盛西北气流推动高空槽东移,有相应温度冷槽配合。20时地面冷锋南压至我省中南部,已移过佛山,850 hPa温度脊区位于地面冷锋上空,中低层切变线、槽线伴随地面冷锋东传南压,大风急流轴随之东传,对流过程结束。

3·27过程前期有低槽发展,气温回升,随后地面冷高压推动冷锋南压,27日08时地面冷锋到达华南北部;同时低层(925 hPa、850 hPa)切变线也位于华南北部,切变线南侧有西南急流;700 hPa、500 hPa槽线位于108°E附近,槽前有强盛偏西到西南气流。20时地面冷锋南压进入广东省,伴随925 hPa切变线南压进入广东省;850 hPa切变线略有南压,其南侧仍维持强盛西南气流;500 hPa槽线已移入粤西,槽后强盛西北气流推动高空槽东传,有温度冷槽配合,此时强对流天气仍没结束。

3·17过程地面受冷高压后部均压场,925 hPa切变线位于广西东部—湖南南部—江西北部一带,切变线南侧为东南气流;850 hPa切变线位于广西中部—湖南南部—江西中部—安徽南部,其南侧西南急流为对流提供了充足水汽;500 hPa槽线南段位于西南—江淮一带,−12℃冷中心位于粤北,叠加在850 hPa暖脊上,使大气层结变得不稳定。之后随着低层切变线南压进入广东省,影响佛山市对流活动开始。

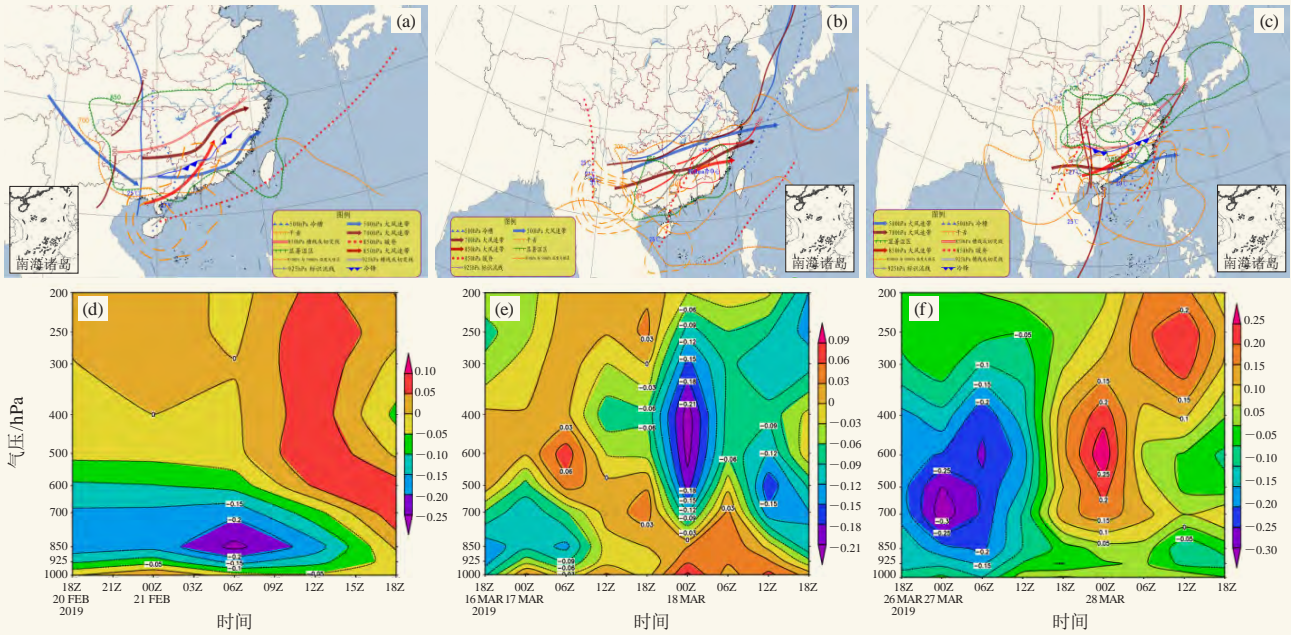


图1 中尺度分析图 (a, b, c) 及垂直上升速度 (单位: m/s) 图 (d, e, f)  
 (a) 2019年2月21日08时; (b) 2020年3月17日20时; (c) 2020年3月27日08时;  
 (d) 2019年2月21日; (e) 2020年3月17日; (f) 2020年3月28日

Fig. 1 Mesoscale analysis diagram at 08:00 BT 21 February 2019 (a), 20:00 BT 17 March 2020 (b), 08:00 BT 27 March 2020 (c), and vertical velocity (unit: m/s) on 21 February 2019 (d), 17 March 2020 (e), and 28 March 2020 (f)

从上述形势分析可知, 2·21和3·27过程前期地面有低槽发展或变性冷高压控制, 气温回升, 随后地面冷高压推动地面冷锋南压进入广东省; 低层切变线跟随地面冷锋往南移动, 切变线南侧强盛偏南暖湿气流为对流提供水汽和不稳定能量; 500 hPa槽线位于108°E附近, 槽后强盛西北气流推动高空槽东移, 并有相应的温度槽相随; 垂直上升速度图可看出这2次过程对流抬升是从地面开始, 属锋面低槽型, 冰雹出现在高空槽前, 地面冷锋、低层切变线附近。而3·17过程地面是冷高压后部均压场, 近地层大气层结稳定, 500 hPa冷中心叠加在850 hPa暖脊上, 使大气层结变得不稳定; 垂直上升速度图可明显看出此次过程对流抬升不是从地面开始, 而是从800 hPa开始, 符合高架雷暴特征, 冰雹出现在低层切变线附近, 属高架雷暴型。

### 3 大气层结

#### 3.1 物理量分析

在有利的环流形势背景下, 冰雹需要在适宜的环

境特征下生长, 为此对这3次冰雹过程开始前6~12 h一些物理量进行分析 (表1)。温度露点差越大表示空气越干燥, 此3次过程 $T-T_d$ 最大值均超过20 °C, 2·21过程 $T-T_d$ 最大值达到31 °C, 而3·18过程 $T-T_d$ 最大值是这3次过程里最小, 但 $T-T_d$ 最大值所在高度最高达到466 hPa, 整层比湿积分3·18过程是3次强对流过程里最大的, 为4382, 也就是说3·18过程干层高度高, 水汽含量大。3次过程总指数都接近或超过50 °C; K指数超过35 °C, 3·18过程更是达到46.7 °C; 沙氏指数SI均小于-1 °C, 3·27过程达到-5.16 °C; 雷暴瑞士指数小于5.3 °C说明有出现雷暴天气的可能, 3次过程雷暴瑞士指数远小于5.3 °C, 其中3·18和3·27分别达到-0.2和-4.7 °C; CAPE值只有2·21超过1000 J/kg, 其余2次过程都少于100 J/kg, 3·18过程CAPE=0 J/kg, 把对流抬升高度提高到800 hPa, 同样得到CAPE=0 J/kg, 当天广东省其余探空站点CAPE值都很小, 最大也就只有30多, 但下沉对流有效能挺大, 达到200多, 这可能与高架雷暴近地层是冷性稳

表1 冰雹天气物理量参数  
 Table 1 Physical parameters of hail weather

| 时间             | ( $T-T_d$ )<br>最大值/°C | ( $T-T_d$ )<br>最大值所在高度/hPa | IQ/°C  | TT/°C | K/°C | SI/°C | SWISS00/°C | CAPE/(J/kg) | 0°C层/m | -20°C层/m |
|----------------|-----------------------|----------------------------|--------|-------|------|-------|------------|-------------|--------|----------|
| 2019年2月21日 08时 | 31                    | 591                        | 3838.3 | 49    | 35   | -1.16 | 2.3        | 1230.4      | 3935.3 | 7313.3   |
| 2020年3月17日20时  | 23.6                  | 466                        | 4382   | 48.2  | 46.7 | -1.01 | -0.2       | 0           | 4126   | 7539.4   |
| 2020年3月27日08时  | 23.9                  | 558                        | 3841.5 | 54.2  | 40.2 | -5.16 | -4.7       | 99.2        | 3793   | 7233.8   |

定层结有关; 0 °C层和-20 °C层高度均低于广东春季平均0 °C层(4291 m)和-20 °C层(7619 m)高度,说明冰雹雷暴云中的冰雹能下降到地面的可能性很大。

### 3.2 垂直温湿层结特征

环境大气的垂直热力分布直接影响降水粒子的相态转化,从对流系统内产生的雹胚、到雹胚长大,大气的层结状态在其中发挥着重要作用,为此选取强对流开始前的6~12 h温湿层结状态作分析,为以后预报冰雹提供帮助。

通常认为大气呈“上冷下暖”结构分布代表着层结不稳定,一般用850 hPa与500 hPa的温度差( $\Delta T_{85}$ )作为考量大气层结“上冷下暖”的特征值,是判断是否有强雷暴等天气的重要依据,有研究<sup>[4-5]</sup>表明广东冰雹过程 $\Delta T_{85}$ 一般为19~30 °C、平均值为24~25 °C,显然本文所选取的3次过程的 $\Delta T_{85}$ 都超过24 °C,3·27过程甚至达到27.1 °C,具备出现冰雹的潜势。从实况数据得到2·21过程冰雹直径比3·27过程冰雹直径大,而2·21过程 $\Delta T_{85}$ 小于3·27,因而不满足 $\Delta T_{85}$ 越大、冰雹直径越大的规律,这与高晓梅等<sup>[9]</sup>的结果不一致,但与曾智琳等<sup>[5]</sup>研究结果相吻合,这可能与所处纬度高低有关。

造成风雹等强对流天气的深厚湿对流绝大部分具有斜压性特征,这种斜压不稳定相当程度是高低空温度平流差异的结果。选取这3次强对流天气过程冰雹发生前8~12 h内的温度平流分析(图2),发现2·21和3·27过程属于低空暖平流型,冰雹发生前700 hPa以下有明显暖平流活动,暖平流强度介于 $5 \times 10^{-5} \sim 12 \times 10^{-5} \text{ K s}^{-1}$ ,并且暖平流最强位置出现在850 hPa附近,这表明低空暖性强迫可能对冰雹产生

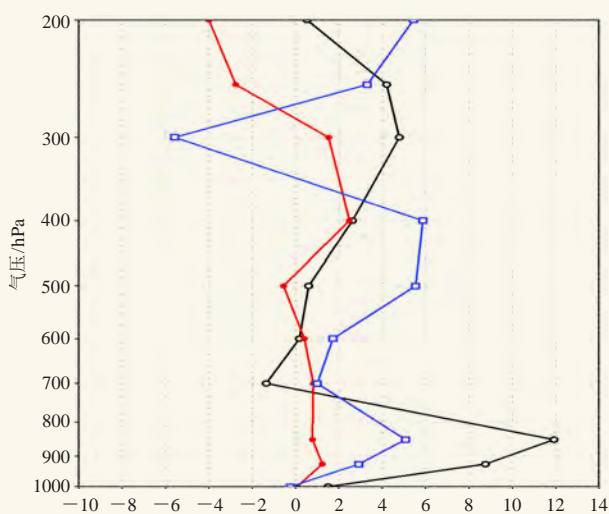


图2 垂直方向温度平流(黑色:2019年2月21日08时,红色:2020年3月17日20时,蓝色:2020年3月27日08时)  
Fig. 2 Vertical temperature advection at 08:00 BT 21 February 2019 (black), 20:00 BT 17 March 2020 (red), 08:00 BT 27 March 2020 (blue)

有一定作用。3·18过程属于弱温度平流类,中低层温度平流在 $\pm 2 \times 10^{-5} \text{ K s}^{-1}$ ,这与高架雷暴对流开始前大气层结是稳定层结相关,冰雹事件发生后12 h内边界层可发现冷平流活动,这说明冰雹产生与对流触发有关。但这3次过程对流层中层(400~700 hPa)的冷平流强度非常弱,还不到 $-2 \times 10^{-5} \text{ K s}^{-1}$ ,说明“上冷下暖”的层结结构不明显。那么这3次过程的对流层势不稳定很可能不是由“上冷下暖”层结形成的,因而有必要分析这3次过程的垂直湿度层结。

当低层有湿空气或湿平流、中高层有干空气或干平流就可能造成对流不稳定层结。为了从探空角度揭示这种特征,有研究<sup>[5]</sup>把探空温湿曲线满足500 hPa温度露点差大于等于15 °C定义为对流层中层存在干层,当700~1000 hPa有最小温度露点差小于2 °C定义为对流层低层存在湿层,满足这两个条件即为“上干下湿”不稳定结构,但这3次过程有2次是不满足的,实际的温湿廓线可以看出明显的“喇叭口”上干下湿的层结,所以用500 hPa温度露点差大于等于15 °C作为中层干层不适合2·21和3·27过程。由于露点温度在等压过程中是保守量,露点温度的高低反映出该层的干湿程度,选取850 hPa与500 hPa的露点温度差( $\Delta T_{d85}$ )表征大气“上干下湿”,广东冰雹过程的 $\Delta T_{d85}$ 为20~67 °C、平均值为31.7~46.3 °C,此3次过程 $\Delta T_{d85}$ 都超过30 °C,3·18和3·27过程 $\Delta T_{d85}$ 达到40 °C,说明3·18和3·27过程“上干下湿”层结特征比2·21过程更加突出(表2)。

表2 温湿特征层参数

Table 2 Temperature and humidity characteristic layer parameters

| 时间             | $T_{850-500}/^{\circ}\text{C}$ | $T_{d850-500}/^{\circ}\text{C}$ | $(T-T_d)/500/^{\circ}\text{C}$ | 700~1000 hPa是否存在最小温度露点差 $\leq 2^{\circ}\text{C}$ |
|----------------|--------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|--|
| 2019年2月21日 08时 | 25.0                           | 31.0                            | 7.0                            | 是  |
| 2020年3月17日 20时 | 24.1                           | 40.1                            | 16                             | 是  |
| 2020年3月27日 08时 | 27.1                           | 40.0                            | 12.9                           | 是  |

由此可见,除了环境温度“上冷下暖”的特征,环境湿度“上干下湿”的特征更能促进热力不稳定增长,因而在做冰雹潜势预报时需多加关注垂直湿度层结结构。

### 3.3 冰雹特殊层结特征

冻结层高度(DBZ)是考虑是否有冰雹产生的一个重要特殊高度,影响着降水粒子在空中的相态变化和冰雹下降融化的空间距离。研究<sup>[5]</sup>表明,冰质粒子融化层高度更接近于湿球温度零度层(WBZ)高度,对比这3次过程的DBZ和WBZ高度比较接近,相差最大的3·18过程也仅为236 m,相差最小的3·27过程只有70 m,说明这3次冰雹过程低层大气比较湿。

垂直方向的冷云层和暖云层的分布特征是影响冰雹循环增长的重要因素，决定着对流风暴内雹胚能否增长得更大。将平衡高度（ $EL$ ）与干球零度层高度（ $DBZ$ ）之间的高度差定义为冷云厚度， $DBZ$ 与抬升凝结高度（ $LCL$ ）之间高度差定义为暖云厚度。对比这3次冰雹过程，3·27过程冷云厚度最薄，仅为

2757 m，而2·21过程比3·27过程厚得多，达到5577 m，冷云厚度大，有利于雹胚在过冷水层增长。进一步分析冷暖云厚度比值 $H-/H+$ ，2·21过程冷暖云厚度比值比3·27过程大1倍左右，根据冰雹实况资料满足冷暖云厚度比值越大，冰雹直径越大（表3）。

从探空反映的CAPE在不同高度的分布代表着不

表3 环境参数及特殊高度层  
Table 3 Environmental parameters and special heights

| 时间             | LCL/m | WBZ/m | EL/m | $H_{-10}/m$ | $H_{-30}/m$ | $H-/m$ | $H+/m$ | $H-/H+$ | 最大热浮力高度/m | 最大热浮力强度/ $^{\circ}C$ |
|----------------|-------|-------|------|-------------|-------------|--------|--------|---------|-----------|----------------------|
| 2019年2月21日 08时 | 136   | 3865  | 9512 | 5505        | 9185        | 5577   | 3799   | 1.5     | 5820      | 6                    |
| 2020年3月17日20时  | 80    | 3890  | —    | 5603        | 8883        | —      | 4046   | —       | —         | —                    |
| 2020年3月27日08时  | 80    | 3642  | 6550 | 5482        | 9974        | 2757   | 3713   | 0.7     | 4800      | 6                    |

同高度的热浮力大小，因而把CAPE内气块绝热上升形成的状态曲线与环境温度（层结曲线）最大温差定义为最大热浮力强度，而状态曲线与层结曲线差值最大位置即为最大热浮力高度，在此高度上气块具有最大垂直加速度。3·18过程因CAPE=0，故无法确定最大热浮力强度。2·21和3·27这两次冰雹过程最大热浮力强度均为 $6^{\circ}C$ ，但它们的最大热浮力高度不一样，3·27最大热浮力高度比2·21低约1000 m，位于冰雹有效增长层（ $-30\sim-10^{\circ}C$ 高度）之下，那么上升气流很难把雹胚顶托进有效增长层，雹胚不能发展为更大的冰雹，这可能也就是3·27实况冰雹没2·21过程来得大的原因之一。

#### 4 雷达回波特征

2019年2月21日中午开始肇庆地区不断有回波生成，多个雷暴单体独立发展。14: 54，回波开始有组织地合并；15: 12，回波开始影响佛山市北部；15: 54，回波单体移入佛山后快速发展，回波强度增大至55dBZ，强回波单体出现前侧暖湿气流流入流缺口（图3）；16: 00强回波中心开始移入南海区里水镇，回波强度增大至65 dBZ，回波悬垂结构明显，60 dBZ强回波中心高度位于5 km以上，大约 $-10^{\circ}C$ 层高度，位于冰雹有效增长层内，有利于雹胚增长，径向速度图上 $3.4\sim 6.0^{\circ}$ 仰角出现明显中气旋，此时南海区里水镇VIL=33 kg/m<sup>3</sup>；16: 06仍可见前侧暖湿气流流入流缺口，60 dBZ强回波中心高度维持在5 km以上，径向速度图 $3.4^{\circ}$ 仰角中气旋依然存在，南海区里水镇VIL=35.5 kg/m<sup>3</sup>；16: 12，前侧暖湿气流流入流缺口仍可见，60 dBZ强回波中心高度仍位于5 km以上，65 dBZ强回波中心抬升到7 km左右，可见明显悬垂结构，说明上升气流非常旺盛，径向速度图上 $3.4^{\circ}$ 仰角仍探测到中气旋，但南海里水VIL下降至29.5 kg/m<sup>3</sup>；16: 24，强回波单体已移出南海区里水镇。

2020年3月18日7: 40—9: 30，飚线系统自北向南影响佛山市。8: 20，飚线南段强回波主体经肇庆市高要进入佛山市高明区，回波强度增大至67 dBZ，在引导气流作用下强回波主体继续向东南方向移动；08: 36强回波主体进入南海区九江镇，此时飚线北段回波结构松散，强度也有所减弱；08: 42，南段回波进一步加强至69 dBZ，结构密实，呈明显“指状”回波特征，55 dBZ强回波中心高度达到6 km，大约 $-10^{\circ}C$ 层高度，位于冰雹有效增长层内，有利于雹胚长大，65 dBZ强回波中心高度5 km左右，回波悬垂结构明显，径向速度图上可以看到高明区荷城镇附近出现大风区以及南海九江镇和西樵镇交界处存在切变，液态水含量VIL值大约30 kg/m<sup>3</sup>；08: 48，指状回波强度维持69 dBZ，55 dBZ强回波中心高度开始下降至5 km附近，65 dBZ强回波中心高度下降至3 km，此时南海区九江镇出现小冰雹，也就是说强回波中心下降时伴随着冰雹下降，径向速度图上大风区东移至南海九江镇和西樵镇交界附近，此时VIL值大约30 kg/m<sup>3</sup>；08: 54回波强度减弱至65 dBZ，55 dBZ强回波中心高度进一步下降至5 km以下，径向速度图上大风区减弱消失，南海九江镇VIL值下降至20 kg/m<sup>3</sup>以下（图4）。

2020年3月27日14—23时，佛山不断受东移南压强回波云团影响。17: 48，影响南海区狮山镇的回波突然加强，回波强度达到65 dBZ；18时（图5），强回波横穿狮山镇，开始影响大沥镇，此时回波强度增大至71 dBZ，65 dBZ强回波中心高度位于6~7 km，位于 $-10^{\circ}C$ 层之上，55 dBZ强回波中心高度达到7~8 km，位于 $-20^{\circ}C$ 层之上，回波悬垂结构明显，表明对流很旺盛，并且在 $14.6^{\circ}$ 仰角上探测到明显三体散射长钉，径向速度图上 $3.4\sim 6.0^{\circ}$ 出现中气旋特征，VIL值不大，仅为30.5 kg/m<sup>3</sup>；18: 06，强回波主体影

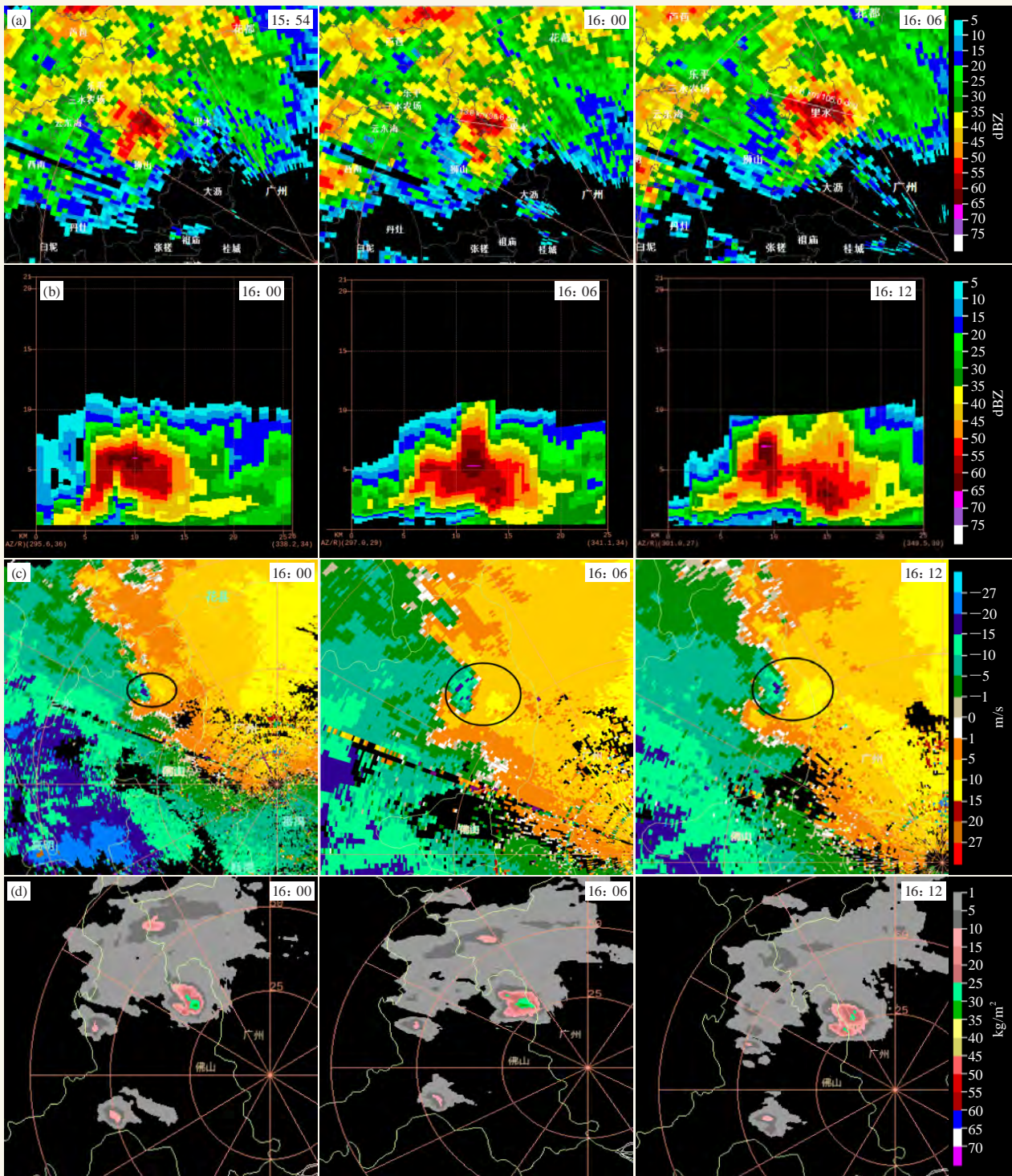


图3 2019年2月21日15:54—16:12广州雷达1.5°仰角

(a) 反射率因子; (b) 径向速度图; (c) 反射率因子垂直剖面; (d) 液态水含量

Fig. 3 The reflectivity (a), radial velocity (b), reflectivity vertical profile (c) of 0.5° elevation and liquid water content (d) by Guangzhou radar during 15:54—16:12 BT 21 February 2019

响大沥镇, 反射率因子图上可看到前侧暖湿气流流入流缺口, 19.5°仰角出现明显三体散射长钉, 65 dBZ强回波中心高度下降至5 km左右, 大概在-10 °C层, 仍在冰雹有效增长层内,  $VIL=34.5 \text{ kg/m}^3$ ; 18: 12,

强回波仍位于大沥镇, 回波强度有所下降, 但最大回波强度仍有68 dBZ, 强回波中心高度明显下降, 65 dBZ强回波中心高度下降至5 km以下, 同时65 dBZ强回波中心面积明显减小, 仍可见明显悬垂回波,

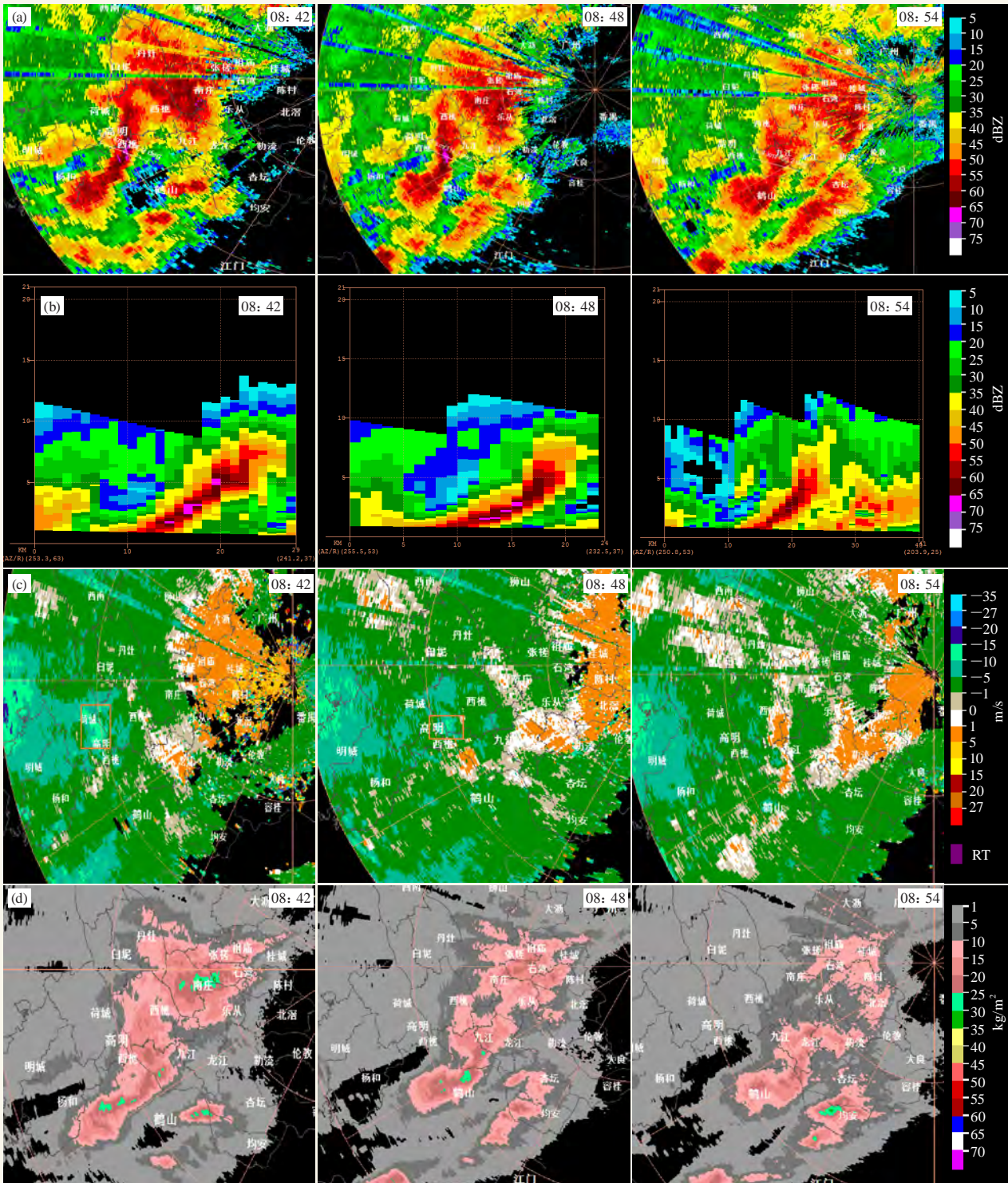


图4 2020年3月18日08:42—08:54广州雷达1.5°仰角

(a) 反射率因子; (b) 径向速度图; (c) 反射率因子垂直剖面; (d) 液态水含量

Fig. 4 The reflectivity (a), radial velocity (b), reflectivity vertical profile (c) of 0.5° elevation and liquid water content (d) by Guangzhou radar during 08:42 BT—08:54 BT 18 March 2020

$VIL=31 \text{ kg/m}^3$ ; 18: 18, 强回主体移出大沥进入广州市境内。20时前后, 影响高明的强回波强度最强时达到75 dBZ, 6.0°仰角20: 12—20: 24连续3个体扫出现明显三体散射长钉, 径向速度图上0.5°仰角20:

12—20: 18连续2个体扫出现中气旋(图略), 其余特征值不详细叙述。

总的来说, 此3次冰雹过程雷达图上出现明显悬垂回波, 只是悬垂高度和强回波中心到达的高度不

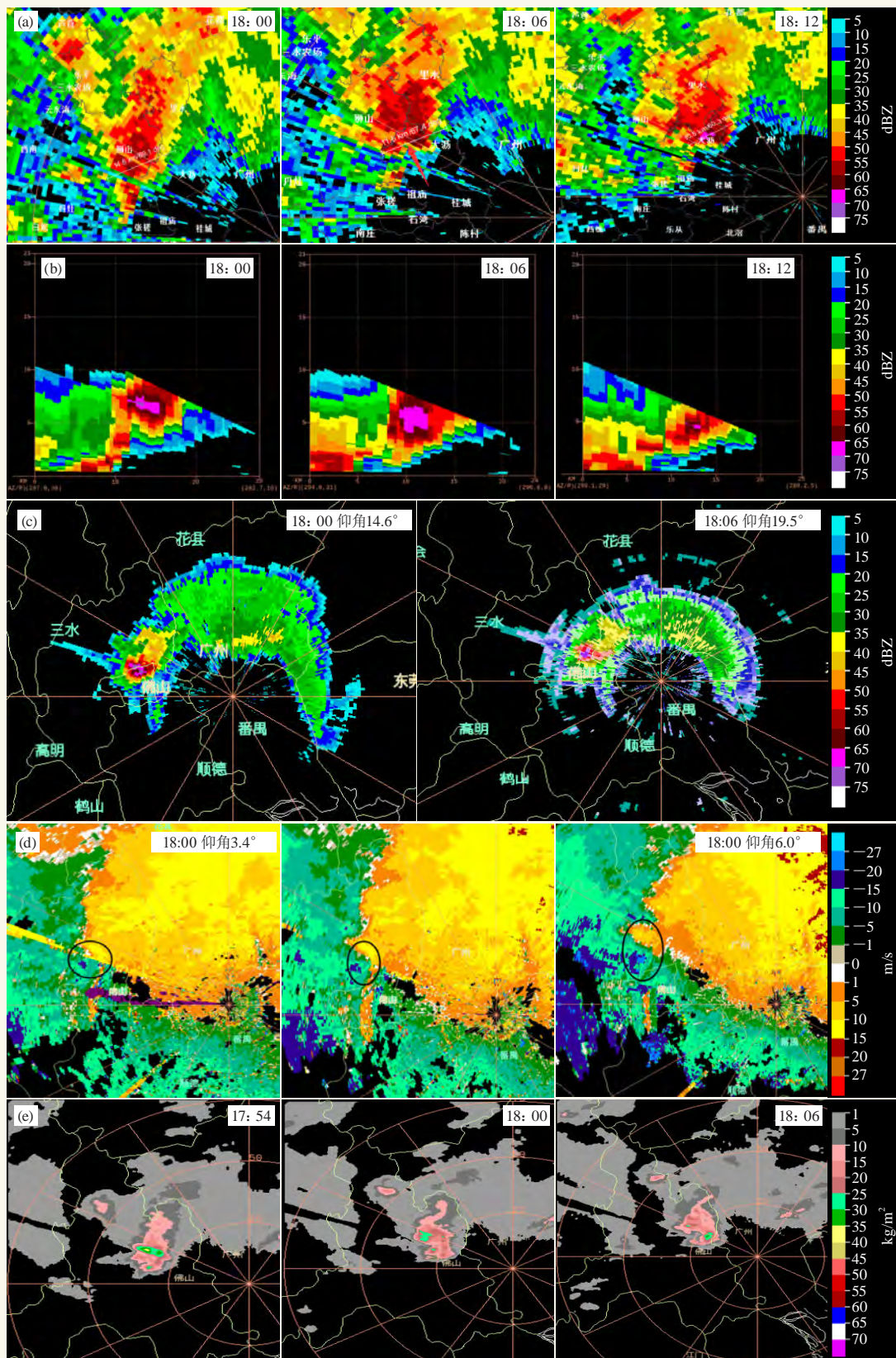


图5 2020年3月27日18: 00—18: 12广州雷达1.5°仰角  
 (a) 反射率因子; (b) 反射率因子垂直剖面; (c) 径向速度; (d) 液态水含量; (e) 三体散射  
 Fig. 5 The reflectivity (a), reflectivity vertical profile (b), radial velocity (c) of 1.5° elevation, liquid water content (d) and three-body scattering(e) by Guangzhou radar during 18:00–18:12 BT 27 March 2020

同, 3·27过程回波强度最强, 强回波中心范围最大。2·21和3·27过程出现前侧暖湿气流流入流缺口、明显中气旋, 3·27过程在高仰角还探测到明显三体散射长钉。值得注意的是, 这3次冰雹过程VIL值不大, 可能的原因是春季地面气温较低, 垂直上升气流较夏季弱, 冰雹不需要长得很大就能下降到地面, 这可能是春季冰雹与夏季冰雹区别之一, 但春季冰雹是否具有低VIL还需要更多事件验证。

## 5 小结

本文对近2年影响佛山地区的3次春季冰雹天气过程进行天气形势、层结结构及雷达回波特征进行分析, 得出如下结论:

1) 2·21和3·27冰雹过程是地面冷高压推动冷锋南压进入广东省, 低层切变线跟随地面冷锋向南移动, 冰雹出现在锋面、切变线附近, 高空槽前, 属锋面低槽型, 强对流启动时间在午后至傍晚。3·18冰雹过程对流抬升从800 hPa开始, 中高层有切变线、高空槽配合, 地面是冷脊后部均压场, 属高架雷暴型, 强对流启动时间在早晨。

2) 表征不稳定的物理量总指数、K指数、沙氏指数表现很好, 达到广东强对流发生的高阈值, 但CAPE表现不太理想, 只有2·21过程超过1000 J/kg, 其余2次过程均低于100 J/kg, 3·18过程低CAPE值可能是高架雷暴的一个特性, 另一个低CAPE值过程有待更深入研究。3次过程“上冷下暖”层结结构不明显, 不满足 $\Delta T_{85}$ 越大, 冰雹直径越大的规律; “上干

下湿”层结结构明显, 3·18和3·27过程“上干下湿”层结特征比2·21过程更加突出, “上干下湿”的特征更能促进热力不稳定增长, 因而在做冰雹潜势预报时需多加关注垂直湿度层结结构。2·21和3·27冰雹过程最大热浮力强度大于6 °C, 具备出现大冰雹潜势, 但3·27过程最大热浮力高度都位于冰雹有效增长层之下, 使得雹胚不能生长成更大的冰雹, 这可能是实况出现小冰雹原因之一。2·21和3·27冰雹过程满足 $H-H+$ 值越大, 冰雹直径越大的规律。

3) 3次冰雹过程出现明显悬垂回波, 2·21和3·27冰雹过程还出现前侧暖湿气流流入流缺口、明显中气旋, 3·27冰雹在高仰角还探测到明显三体散射长钉, 但3次冰雹过程的VIL值都不大, 可能是初春冰雹与夏季冰雹区别之一。

## 参考文献

- [1] 陈立祥, 刘运策. 广州地区强对流天气的统计特征和分类特征. 热带气象学报, 1989, 5(2): 170-178.
- [2] 林仲青. 广东省2—5月各类强对流天气的时空分布. 广东气象, 1999(1): 21-22.
- [3] 伍志方, 叶爱芬, 胡胜, 等. 中小尺度天气系统的多普勒统计特征. 热带气象学报, 2004, 20(4): 391-399
- [4] 李怀宇, 何如意, 胡胜, 等. 近10年广东冰雹的统计特征及天气形势. 气象科技, 2015, 43(2): 261-268.
- [5] 曾智琳, 湛芸, 朱克云, 等. 广东省大冰雹事件的层结特征与融化效应. 大气科学, 2019, 43(3): 598-615.
- [6] 林志强, 李献洲, 庄旭东. 一次强风暴天气过程分析. 气象, 1998, 24(12): 22-26.
- [7] 叶爱芬, 伍志方, 程元慧. 一次春季强冰雹天气过程分析. 气象科技, 2006, 34(5): 583-586.
- [8] 谢健标, 林良勋, 颜文胜. 广东2005年“3·22”强飚线天气过程分析. 应用气象学报, 2007, 18(3): 321-329.
- [9] 高晓梅, 俞小鼎, 王令军, 等. 鲁中地区分类强对流天气环境参量特征分析. 气象学报, 2018, 76(2): 196-212.
- [10] 黄先香, 炎利军, 蔡康龙, 等. 2018年中国龙卷活动特征. 气象科技进展, 2019, 9(1): 49-55.
- [11] 郑媛媛, 张备, 王啸华, 等. 台风龙卷的环境背景和雷达回波结构分析. 气象, 2015, 41(8): 942-925.
- [12] 曾明剑, 吴海英, 王晓峰, 等. 梅雨期龙卷环境条件与典型龙卷对流风暴结构特征分析. 气象, 2016, 42(3): 280-293.
- [13] 俞小鼎, 姚秀萍, 熊延南, 等. 多普勒天气雷达原理与业务应用. 北京: 气象出版社, 2017.
- [14] 俞小鼎, 郑媛媛, 张爱民, 等. 安徽一次强烈龙卷的多普勒天气雷达分析. 高原气象, 2006, 25(5): 914-924.
- [15] 张小玲, 杨波, 朱文剑, 等. 2016年6月23日江苏阜宁EF4级龙卷天气分析. 气象, 2016, 42(11): 1304-1314.
- [16] 郑永光, 蓝渝, 曹艳察, 等. 2019年7月3日辽宁开原EF4级强龙卷形成条件、演变特征和机理. 气象, 2020, 46(5): 589-602.
- [17] 李兆慧, 王东海, 麦雪湖, 等. 2015年10月4日佛山龙卷过程的观测分析. 气象学报, 2017, 75(2): 288-313.
- [18] 朱君莹, 蔡康龙, 龚佃利, 等. 登陆台风“摩羯”(1814)在山东引发龙卷的灾情调查与天气雷达识别. 海洋气象学报, 2019, 39(4): 21-34.
- [19] 黄先香, 炎利军, 植江玲, 等. 2014年6月3日佛山龙卷风过程分析. 广东气象, 2016, 38(4): 1-6.
- [20] 郑媛媛, 朱红芳, 方翔, 等. 强龙卷超级单体风暴特征分析与预警研究. 高原气象, 2009, 28(3): 617-625.
- [21] 刁秀广, 孟宪贵, 张立, 等. 台风“摩羯”与“温比亚”环流中龙卷小尺度涡旋特征及可预警性分析. 海洋气象学报, 2019, 39(3): 19-28.
- [22] 郑永光, 朱文剑, 田付友. 2015年“东方之星”翻沉事件和2016年阜宁EF4级龙卷对流风暴环境条件、结构特征和机理. 气象科技进展, 2018, 8(2): 44-54.
- [23] 黄先香, 炎利军, 王硕甫, 等. 1822号“山竹”台风龙卷过程观测与预警分析. 热带气象学报, 2019, 35(4): 458-469.
- [24] 刁秀广, 万明波, 高留喜, 等. 非超级单体龙卷风暴多普勒天气雷达产品特征及预警. 气象, 2014, 40(6): 668-677.
- [25] 黄先香, 炎利军, 王硕甫, 等. 佛山市龙卷风活动的特征及环流背景分析. 广东气象, 2014, 36(3): 20-24.
- [26] 黄先香, 俞小鼎, 炎利军, 等. 1804号台风“艾云尼”龙卷分析. 气象学报, 2019, 77(4): 645-661.
- [27] 朱文剑, 盛杰, 郑永光, 等. 1522号“彩虹”台风龙卷现场调查与中尺度特征分析. 暴雨灾害, 2016, 35(05): 403-414.
- [28] 黄先香, 俞小鼎, 炎利军, 等. 广东两次台风龙卷的环境背景和雷达回波对比. 应用气象学报, 2018, 29(1): 70-83.
- [29] 黄先香, 炎利军, 蔡康龙, 等. 1415号“海鸥”台风龙卷天气过程分析. 灾害学, 2018, 33(4): 114-121.
- [30] 李彩玲, 炎利军, 李兆慧, 等. 1522号台风“彩虹”外围佛山强龙卷特征分析. 热带气象学报, 2016, 32(3): 416-424.
- [31] Davies J R. Streamwise vorticity: The origin of updraft rotation in supercell storms. J Atmos Sci. 1984, 41: 2991-3006.
- [32] 黄先香, 俞小鼎, 炎利军, 等. 珠江三角洲台风龙卷的活动特征及环境条件分析. 气象, 2019, 45(6): 777-790.

(上接27页)