

一次春季强冰雹天气过程分析

叶爱芬¹ 伍志方¹ 程元慧² 肖伟军¹ 温晶¹

(1 广州中心气象台, 2 广东省气象局, 广州 510080)

摘要 利用常规观测资料及新一代多普勒雷达资料对 2004 年 3 月 30 日发生在广东的强冰雹过程进行了详细分析。结果表明:中高层强冷空气入侵配合地面中尺度低压的发展,导致不稳定能量突增;下湿上干的不稳定层结、合适的 0℃层与 -20℃层高度利于大冰雹的形成;强有力的中尺度抬升系统和强垂直风切变直接导致强对流的发生,并使强对流长时间维持。在强风暴的发展过程中,广州新一代多普勒雷达(CINRAD-SA)观测到高悬的强回波、风暴中低层强入流、风暴顶强辐散及冰雹云三体散射所产生的钉状回波(TBSS)等特征。雷达资料分析表明:TBSS 的强度随着上升气流的强弱及冰雹的降落发生变化;即使无中气旋,持久稳定的风暴相对入流和风暴顶强辐散也能使强风暴长时间维持;风暴顶辐散减弱,标志着入流减弱,伴随着强回波核下降,风暴进入消亡阶段。

关键词 强冰雹 针状回波 入流 高层强辐散

引言

为提高冰雹预报能力,一方面利用常规观测资料从生成冰雹的宏观条件进行研究^[1,2];另一方面利用先进的探测手段,如利用新一代多普勒雷达,了解冰雹云发生发展过程及其结构特征,通过监测强回波进行冰雹云的识别^[3],使冰雹的预警成为可能。2004 年 3 月 30 日下午广东省出现强冰雹天气过程,强度及影响范围为近年罕见。30 日 15:10~17:00 两个雹暴先后影响广东省中部三水、清远、花都及从化一带,雹击带长达 110 km,大冰雹有鸡蛋大小,农作物严重受损。另一东南移雹暴先后在南海、顺德及深圳出现小冰雹,持续时间较短。在该冰雹天气过程中,广州 CINRAD-SA 多普勒雷达长时间从多个层次上观测到三体散射现象,这是广州多普勒雷达投入使用以来首次观测到明显的钉状回波。本文就此次强冰雹天气过程的发生背景及多普勒雷达资料进行分析。

1 天气形势及大气稳定度分析

1.1 天气形势

3 月下旬后期 850 hPa 切变线一直在南岭附近

摆动;地面为弱高压脊;500 hPa 中低纬环流平直,不断有小槽东移。28 日 500 hPa 中纬又一小槽东移并引导弱冷空气东移南下。29 日夜间接变线及地面弱锋面进入广东省。30 日 08:00 地面广东大范围升压,转弱北风,地面锋面位于南部沿海,上空 300 hPa 附近有 4~7℃的强降温,其中中部、西北部(清远、连平)降温 7℃。30 日白天偶见阳光,升温不均匀,中部地区(清远南部、广州及肇庆)地面气温上升最明显,14:00 中部地区形成闭合低压环流。地面中尺度辐合上升运动及切变线的共同作用,形成了强有力的抬升机制。

1.2 大气稳定度

冰雹主要出现在清远及其附近地区,特对清远探空资料进行分析。

30 日 08:00 部分物理量前 24 h 变化如下: $\Delta\theta_{se(500-850)}$ 从 -17.4℃升至 -4.76℃;沙氏指数从 -3℃升至 1℃;对流有效位能降低。上述物理量的变化及 08:00 地面升压使预报员很易忽视当天的强对流过程。

30 日 08:00,从 θ_{se} 的垂直分布来看,850 hPa 以下各层的 θ_{se} 明显减小,同时 500 hPa 至 300 hPa 的 θ_{se} 也减小,300 hPa 的 θ_{se} 24 h 下降了 10℃,使得

广州中心气象台科研基金资助

作者简介:叶爱芬,女,1973 年生,学士,工程师,从事短时预报工作,Email:yeaifen@tqyb.com.cn

收稿日期:2005 年 5 月 30 日;定稿日期:2005 年 7 月 26 日

$\Delta \theta_{se(300-700)}$ 从 $+4.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下降至 $-0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 因此中高层由稳定变得不稳定。

图1为清远探空站24h变温的时间-高度剖面图,如图所示30日08:00高层强冷空气入侵。高层强降温配合白天地面升温中心,导致不稳定度剧增,最佳对流有效位能^[4]增至 2500 J/kg 。

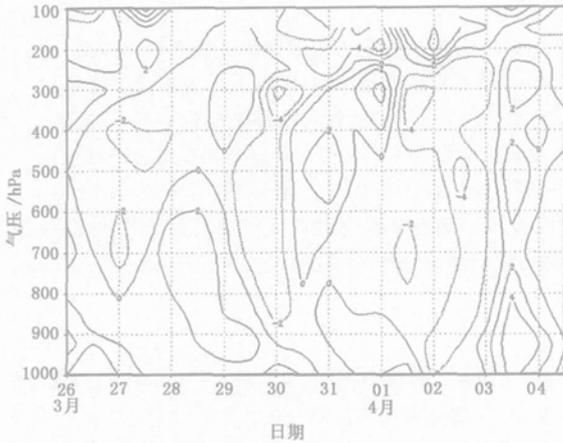


图1 2004年3月26日至4月4日清远探空站24h变温(单位: $^{\circ}\text{C}$)时间-高度剖面图

1.3 适合冰雹生长的环境

30日08:00,清远站 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 高度比 400 hPa 低 190 m 左右,约 7330 m ; $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 层高度在 4000 m 左右。 700 hPa 以下湿度较大, $T - T_d < 3\text{ }^{\circ}\text{C}$; 700 hPa 以上湿度减小, 640 hPa $T - T_d$ 增大至 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 500 hPa 的 $T - T_d$ 为 $11\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。合适的 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 与 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 层高度和上下干湿的层结有利于产生冰雹^[5]。

离深圳较近的香港 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 层高度比清远高出 450 m 左右,冰雹下落时暖层相对较厚,且高层降温幅度较小,这是东南移雹暴产生冰雹尺寸小的两个主要原因。

1.4 较强的垂直风切变和单一方向的速度矢量

30日08:00计算清远站的垂直风切变, 850 hPa 至 500 hPa 的垂直风切变为 $3.8 \times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$; 850 hPa 至 400 hPa 的垂直风切变为 $4.2 \times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$ 。 300 hPa 以下速度矢量基本上呈单一方向(连接切变风矢组成速度矢图,切变风矢指的是高层和底层风矢量之差,图略),这种风切变分布促使新生单体在现存单体的有利一侧周期性地产生和发展,并组织成完善的强风暴^[6]。

2 多普勒雷达资料分析

2.1 反射率因子及其垂直剖面

30日14:00,粤西肇庆境内出现弱对流云团, 15 min 以后两个对流云团得到了明显发展,云团A位于德庆,云团B略偏东位于四会, A、B 的强度达到 40 dBz 以上。14:30,云团A东移并加强,范围扩大,约 $20\text{ km} \times 25\text{ km}$,云团中有多个 55 dBz 以上的回波核,为多单体风暴,上下结构仍较对称,在其南侧有若干个更小尺度的对流云团发展。15:01,云团A已与其南侧的云团合并呈长条状,有南北两个强回波核(60 dBz 以上),上下结构明显不对称,发展为强风暴;云团B进入花都,强度为 55 dBz 。15:12,云团B在花都境内发展增强至 60 dBz 以上,不久地面出现小冰雹,雷达图上没有出现三体散射现象。 15 min 以后B强度减弱并东移以降水为主。15:25,长条状回波A分裂成单体C和单体D(图2,见图版3)。单体D向东南移,地面出现小冰雹、强降水和雷雨大风。单体C约以 70 km/h 的速度向东略偏北方向移动,产生了一条 110 km 长的雹击带,单体C为重点分析对象。

15:25,继续向东偏北方向移动的单体C在仰角 3.4° 的反射率因子(R)图上强度达 68 dBz ,并出现钉状回波(TBSS)。TBSS是由于冰雹云的三体散射造成沿雷达径向在强回波远离雷达一侧出现异常回波,异常回波强度通常小于等于 20 dBz ,呈类似细长的钉子状。出现TBSS一般地面对应有直径大于等于 2 cm 的冰雹^[6]。此时 0.5° 的 R 图上强度为 58 dBz 。15:37,单体C进入三水(72 km , 318°),中高层强回波完全位于低层强回波左前方的弱回波区之上;钉状回波从 6 km 高处向下延伸接近地面; 64 dBz 的强回波在 0.5° 仰角出现,地面出现直径 3 cm 的大冰雹。15:43,单体C进入清远,在 3.4° 和 1.5° R 图上沿径向的TBSS长达 20 km ,由低仰角到高仰角强回波中心向东北方向严重倾斜(图3,见图版3)。15:49, 3.4° 的 R 图上强度达 70 dBz ,TBSS更宽广。15:55,在 0.5° R 图上出现了 15 km 长的TBSS,地面出现直径达 4 cm 的冰雹。16:01,在相对于单体C运动方向的左前侧(入流方向)出现V型槽口。16:07,单体C逐渐进入从化, 3.4° R 图上TBSS达到一个峰值,径向长度达 40 km , 0.5° R 图上TBSS长度为 30 km ,TBSS一直到 7.5 km 高度

仍可看到,50 dBz 的强回波一直到 10 km 高度,70 dBz 的强回波在 7.5 km 高处探测到,高悬的强反射率因子核是冰雹云的特征之一。16:13,由于冰雹下落,中层 TBSS 略减弱,而 0.5° R 图 TBSS 反而加强,回波倾斜结构和弱回波区(WER)很明显,上升气流仍强盛。16:19,0.5° TBSS 减弱,中层 TBSS 加强,70 dBz 的强回波到达 8 km 高度处。16:25,进入了冰雹云整个发展过程的顶盛时期,3.4° R 图 TBSS 长度达 50 km(图 4,见图版 3),65 dBz 的强回波从地面一直伸到 7.5 km 以上,75 dBz 强回波核位于 4.5 km 高处,回波上下保持倾斜结构(图 5,见图版 4),地面出现密集的大冰雹,最大冰雹达鸡蛋大小。16:31,3.4° R 图上 TBSS 减弱,强回波的倾斜度减小,回波核迅速下降,标志着上升气流减弱,单体 C 开始减弱,但地面大冰雹天气继续。16:49,只有 0.5° R 图仍有 TBSS。16:55,0.5° TBSS 也消失,冰雹过程趋于结束。此后单体 C 继续减弱。

2.2 速度图

当回波在雷达站西方有规律地向偏东移动时,在其前方一直有辐合区,但其左前侧的入流由于与雷达径向相切,在速度图及风暴相对平均径向速度(SRM)图上没有明显表现。15:37 单体 C 进入三水(72 km,318°)开始可以见到入流。16:01,在 1.5°、3.4° 速度图上入流的径向速度达 -19 m/s,在 8 km 高处仍可看到入流,无旋转现象,12 km 高处有 +13 m/s、-13 m/s 的强辐散(图 6,见图版 4)。风暴顶辐散是与风暴中强上升气流密切相关的小尺度特征,它提供了上升气流的一个度量,可以与大冰雹尺寸相关联,并且是风暴强度变化的一个指标。16:25,12 km 高度处的强辐散减弱,8 km 处的入流也减弱,3.4°、1.5°、0.5° 对应的入流仍很强盛(图 7,见图版 4),1.5°、3.4° 速度图上有 -19 m/s、10 m/s 的径向风速辐合,0.5° SRM 图上有 -21 m/s、11 m/s 的辐合。16:31,1.5°、3.4° 速度图入流同时降低到 -13 m/s,0.5° 降低到 -10 m/s。16:43,入流基本消失,下沉气流占主导地位。

2.3 垂直风廓线(VWP)

15:55,广州多普勒雷达反演的 VWP 图从低层到高层得到较连续的风场资料,垂直方向从 2.1 km 到 6.1 km 的风向顺转,风切变达 $4.5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。18:07,2.1 km 到 6.1 km 的风向顺转达 60°,风切变达 $5.0 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$;垂直方向从 0.9 km 到 2.1 km 由

东南风转西南风,有强垂直风切变。强的垂直风切变有利于风暴相对气流的发展,导致有组织风暴的发生和发展。

2.4 垂直液态含水量(VIL)

根据米散射公式,当 $\alpha = \pi D / \lambda$ (D 为粒子直径, λ 为雷达波长)很小时粒子的后向散射截面 σ 比几何截面小很多,随着 α 的增大,后向散射截面可以超过几何截面。大冰球的 σ 比同样体积水球的 σ 大,甚至可以大一个量级。雷达探测到大冰雹时接收到的回波功率往往较大,对应较高的反射率因子 Z 值。计算 VIL 公式为 $\sum 3.44 \times 10^{-6} [(Z_i + Z_{i+1})/2]^{4/7} \cdot \Delta h$ (Z_i 和 Z_{i+1} 为雷达下、上采集层的反射率因子, Δh 为两采集层间的厚度),因此大冰雹往往对应高 VIL 值。

15:00~16:43 单体 C 对应的 VIL 一直保持在 50 kg/m² 以上的高值。15:00~16:31 大部分时间保持在 55 kg/m² 以上。16:25 及 16:31 达到 61 kg/m²。随着上升气流减弱及冰雹降落,16:43 VIL 降至 50 kg/m²,此后 VIL 快速降低。

2.5 回波顶高

冰雹云中的上升气流强,其回波顶高度比普通雷暴的回波顶高度高。

15:00~16:25,单体 C 的回波顶高维持在 12 km 以上,其中 15:25、15:31 及 16:19、16:25 顶高达到 14 km。由于上升气流减弱,16:31 顶高由 14 km 降至 11 km,但此时仍有密集的大冰雹降落到地面。16:49 回波顶降到 10 km 以下,同时 R 图上回波强度速度降低,TBSS 在各个层次消失,冰雹天气接近尾声。

3 结论

(1) 高层强降温区与地面升温中心重合,不稳定能量突增。午后形成的闭合低压与切变线组成了强有力的抬升系统,直接导致对流的发生。强垂直风切变使得对流组织成完善的强风暴。

(2) 合适的 0℃层和 -20℃层高度及下湿上干的层结有利于冰雹的生长,本次强冰雹过程再次验证了这点。

(3) 强雹暴有相对较高的回波顶,高悬的强回波,回波结构明显不对称,由低仰角到高仰角回波中心向左前方倾斜,并在入流一侧出现“V”型槽口。

(4) 广州多普勒雷达从 15:25 至 16:43 探测到

强雹暴的 TBSS, TBSS 的强度随着上升气流的强弱及冰雹的降落发生波动。TBSS 首先在较高仰角被探测到,稍后在低仰角探测到,低仰角出现 TBSS 标志着地面有大冰雹出现。雹暴减弱消亡时 TBSS 首先在高仰角消失,说明上升气流减弱;低仰角 TBSS 后消失,此时标志着大冰雹过程结束。

(5) 即使无中气旋,持久稳定的风暴相对入流和风暴顶强辐散也能使冰雹云长时间维持;风暴顶辐散减弱,标志着上升气流减弱,入流减弱,伴随着强回波核下降,雹暴即刻进入消亡阶段,VIL 及回波顶高随之降低。

(6) 强雹暴发展阶段由于相对入流与雷达径向相切,在速度图及 SRM 图上没有明显特征;在强雹暴维持和减弱阶段速度图有指示意义,速度图的变

化略提前于强度的变化。

参考文献

- [1] 赵淑艳,朱文志.北京地区冰雹云生成的宏观条件分析[J].气象科技,2004,32(5):348-351.
- [2] 许晨海,朱福康,杨连英.美国强天气过程预报进展[J].气象科技,2003,31(5):308-313.
- [3] 朱小燕,朱君鉴.我国新一代天气雷达网监测系统[J].气象科技,2004,32(4):255-257.
- [4] 彭治班,刘健文,郭虎,等.国外强对流天气的应用研究[M].北京:气象出版社,2001:89-95.
- [5] 朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等.天气学原理和方法[M].北京:气象出版社,1981:281-327.
- [6] 中国气象局培训中心.新一代天气雷达原理与应用讲义[G].北京:中国气象局培训中心,2000:158-235.

Analysis of a Severe Hail Event Occurred in Guangdong in Spring

Ye Aifen¹ Wu Zhifang¹ Cheng Yuanhui² Xiao Weijun¹ Wen Jing¹

(1 Guangzhou Central Meteorological Office, 2 Guangdong Meteorological Bureau, Guangzhou 510080)

Abstract: Based on conventional meteorological observations and Doppler radar data, the environmental conditions and the evolution and features of a severe hailstorm event occurred on 30 March 2004 in Guangdong Province are analyzed. It is pointed out that strong upper cold air associated with a mesoscale low on the surface stimulated abrupt increasing instability; the large hailstones were generated in a very unstable environment at appropriate altitudes of 0 °C and - 20 °C layers; strong vertical wind shear and mesoscale lifting systems initiated the hailstorm and maintained it for a long life time. The CINRAD-SA Doppler radar data show the signatures of high reflectivity aloft, strong storm-top divergence, WER (Weak Echo Region) and TBSS (Three Body Scatter Spike) in the hailstorm. The radar data also indicated that TBSS was detected before large hailstones fell to the ground, the hailstorm could be maintained for a long life cycle by the strong storm-top divergence and sufficient low level inflows.

Key words: hailstorm event, TBSS, inflow, storm-top divergence



图2 2004年3月30日15:25广州多普勒雷达反射率因子图

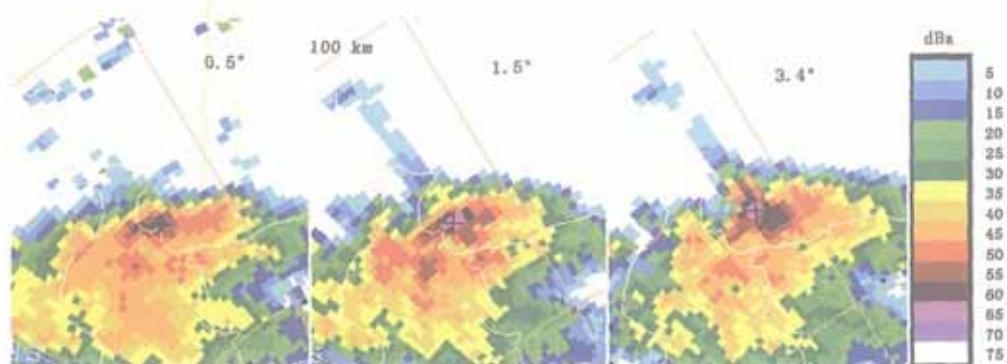


图3 15:43广州多普勒雷达局部反射率因子图(标在“+”的地区为强回波中心)

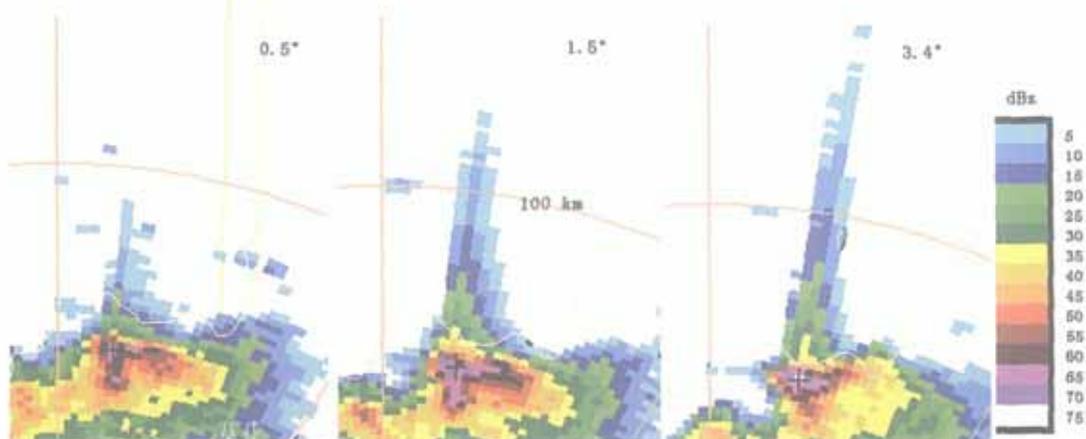


图4 16:25广州多普勒雷达局部反射率因子图(说明同图3)

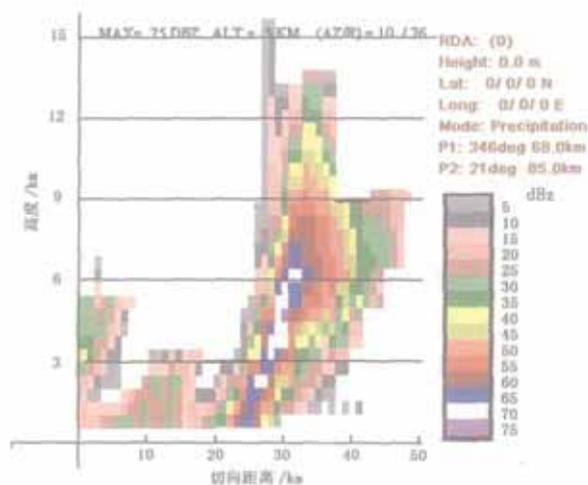


图5 16:25 广州多普勒雷达反射率因子垂直剖面图(左起 P1 点)

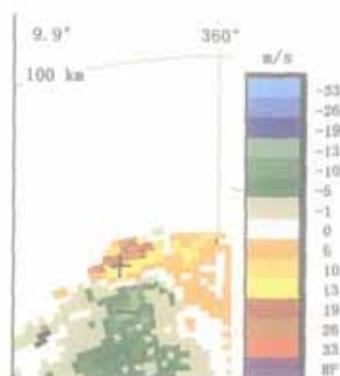


图6 16:01 广州多普勒雷达局部径向速度图(“+”为正速度中心,“-”为负速度中心)

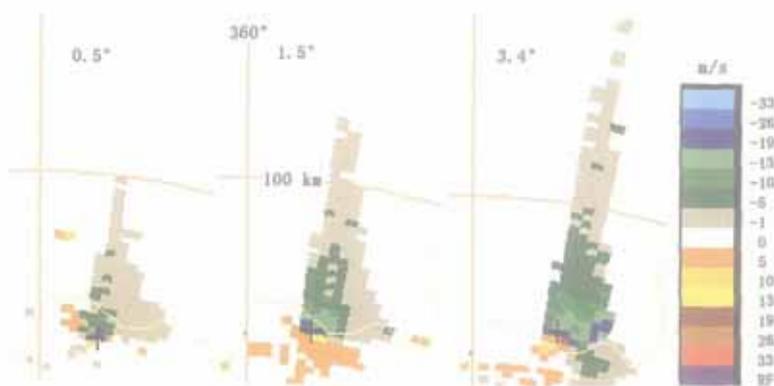


图7 16:25 广州多普勒雷达局部径向速度图(标注“+”的地区为入流中心)