

文章编号: 2096-1618(2017)02-0220-06

# “4.17”广东雷雨大风冰雹天气成因分析

罗瑞婷<sup>1,2</sup>, 王硕甫<sup>2</sup>, 殷美祥<sup>3</sup>

(1. 广东省清远市气象局, 广东 清远 511510; 2. 成都信息工程大学, 四川 成都 610103; 3. 广东省气象公共服务中心, 广东 广州 510640)

**摘要:**为进一步提高强对流天气的预报水平, 利用 NCEP 的  $1^\circ \times 1^\circ$  再分析资料及气象常规资料, 对广东 2011 年 4 月 17 日雷雨大风冰雹过程的天气形势、物理因子及中尺度系统进行综合分析, 试图从多角度研究此次强对流天气成因。研究表明: 高空槽、中低层切变线及地面冷锋是此次强对流天气的主要影响系统, 急流作为暖湿气流的载体, 为强对流的产生提供充足的水汽与能量条件, 冷空气与高能不稳定的暖空气交汇, 是触发不稳定能量释放的机制; 大喇叭形的珠江口及地形摩擦作用使大量来自海洋的水汽在珠江口辐合上升, 使强对流得以维持; 高空辐散与低空的辐合的配置及较强的环境风垂直切变, 为雷暴的形成和维持提供非常有利的动力条件, 对雷暴单体的形成具有重要作用; 同时, 雷达图的弓状回波, 后侧入流缺口等特征对冰雹落区和降雹时间的预报有很好的指示意义。

**关键词:** 天气学; 强对流; 雷暴; 冰雹; 环流特征; 物理量分析

**中图分类号:** P446

**文献标志码:** A

**doi:** 10.16836/j.cnki.jcui.2017.02.017

## 0 引言

强对流天气是指时空尺度小, 天气变化剧烈, 常伴有短时强降水、大风、冰雹甚至龙卷等具有破坏力极强的天气, 具有突发性强, 发展快, 持续时间短等特点<sup>[1]</sup>。强对流天气破坏力强, 不仅造成经济损失, 而且威胁生命, 为此中国开展了国家级专业化强对流天气预报业务。也有许多学者对强对流的气候特征进行研究和分析<sup>[2-5]</sup>。同时, 许多研究表明, 大气层结的强不稳定、一定的抬升作用、天气尺度系统配合是产生强对流天气的有利条件<sup>[6-9]</sup>。丁一汇等<sup>[10]</sup>对强对流天气与暴雨天气的环境条件进行对比, 结果表明温度平流对强对流天气的贡献最大, 中高层冷平流起非常重要作用。

但强对流天气时间和空间尺度小, 对其做出精准的预报仍具有一定的难度。随着近年来新一代多普勒天气雷达的建设, 强对流天气的监测与预报技术不断发展<sup>[11-14]</sup>。夏丽花<sup>[15]</sup>对福建飚线过程雷达回波特征的分析结果表明, 强对流天气常常出现在弓状回波突出部位后凹侧。张腾飞<sup>[16]</sup>利用雷达径向速度资料, 提出低层强的入流上升气流、高层较强的辐散外流, 为强对流单体的发展提供稳定的垂直环流, 使雹块得以形成和增长。吴芳芳<sup>[17]</sup>统计苏北地区超级单体的回波特征, 并且根据不同形态特征分经典超级单体、强降水超级单体及强降水超级单体组成的复合风暴 3 种类型。马禹<sup>[18]</sup>则对新疆雹云的卫星云图特征进行分析, 结果表明新疆降雹云团多是冷云核和雷暴云。另外, 高分辨率模式预报产品也开始应用于强对流天气预报<sup>[19-21]</sup>。

利用 NCEP 的  $1^\circ \times 1^\circ$  再分析资料及气象常规资料, 对广东 2011 年 4 月 17 日雷雨大风冰雹过程的天气形势、物理因子及中尺度系统进行综合分析, 从多角度研究此次强对流天气成因。这对于认识强对流天气的成因和改进预报方法, 进一步提高强对流天气的预报水平, 减少雷暴灾害的损失具有重要意义。

## 1 天气过程总体特点

风速极大, 受灾面积广。根据广东省气象站网监测, 2011 年 4 月 17 日广东共 104 个测站出现大于  $17.2 \text{ m/s}$  (8 级) 的大风, 其中顺德录得省最大阵风  $45.5 \text{ m/s}$  (14 级), 高要回龙自动站录得  $39.3 \text{ m/s}$  的最大风速。

局地性强。17 日 08 时至 18 日 08 时, 广东省共 86 个测站录得大于  $50 \text{ mm}$  的雨量, 共 334 个测站录得  $25 \sim 50 \text{ mm}$  的雨量, 其中深圳罗湖党校录得广东省最大累积雨量  $154.8 \text{ mm}$ 。16 日 20 时至 17 日 20 时, 高要莲都录得  $62.5 \text{ mm}$  的雨量。雷雨大风中挟裹着冰雹, 在广州南沙、佛山顺德、南海九江、佛山高明、肇庆德庆地区, 东西向的狭长区域出现冰雹, 基本出现在强雷暴呈东西向的路径范围, 具备局地性强的特点。

灾害严重。19 人遇难, 受伤人数达 155 人, 受灾人数高达 3239 人,  $1086.7$  公顷的农作物受灾, 房屋倒塌 45 间, 多地的经济损失及人员伤亡严重, 导致的灾害历史罕见。

## 2 强对流风暴系统的演变

从图 1 可以清晰地看出, 17 日 05 时在广西的东北部有一块强回波, 回波强度达到  $50 \text{ dBZ}$ , 回波体向东

偏南方向移动,并逐渐增强。于 17 日 09 时从广西境内移入广东,强度最大为 60 dB。11 时呈现明显的弓状回波,后侧入流缺口,回波强度增强至 65 dBZ。11 时经过广东的肇庆,雷暴单体继续沿东南方向传播,13 时已经过了广东的中部(顺德、高明、南海、广州等地),雷暴的下击暴流很可能导致这些地区出现不同程度的大风,另外这些地区还出现暴雨甚至冰雹。14 时珠三角地区已经受雷暴的影响,并在 14 时后进入减弱阶段,随后系统东移入海,风暴系统逐渐失去能量,

最后逐渐减弱消失。

密实的强对流雷暴云团在卫星云图上显示非常的明显,并且与雷达图基本吻合。17 日 04 时,在广西的东北部有一带状云体,10 时云团已经到了广东中西部及北部,并且云体在广东境内获得水汽,有所增强。12 时至 14 时,雷暴云在珠三角持续较长时间,导致珠三角地区出现暴雨、大暴雨、大风、甚至冰雹。到了 17 日 20 时,云团东移入海,有所减弱,广东的此次强对流天气过程基本结束。

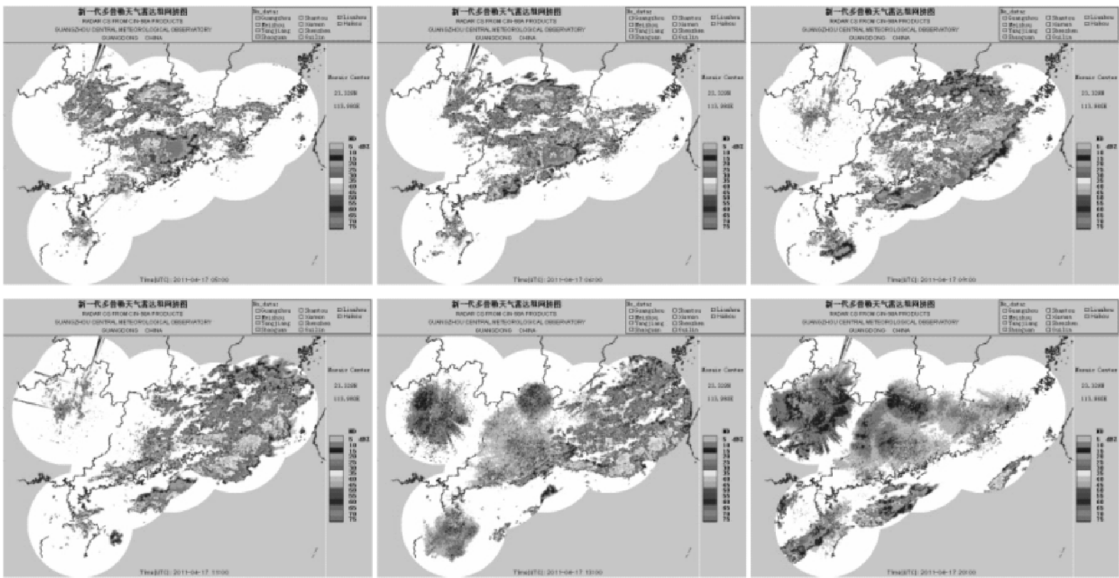


图1 2011年4月17日强对流风暴的演变情况

### 3 环流形势分析

16 日 20 时在贵州西部、重庆、陕西一带有一条东北-西南走向的槽,槽的移动速度较慢,槽的强度较强,并且槽线上有负变高,槽将增强,槽前有负变高,槽会继续向东移动。西太平洋副高西侧的西南气流和槽前的西南气流汇合,在高空形成强风带,急流轴位于云南东部、广西北部 and 湖南南部,风速有明显的辐合。17 日 08 时槽东移到广西中部、贵州西部一带,槽后的偏北气流增强,风速在 20 m/s 以上,槽前的偏南气流范围也增大,且风速也在 16 m/s 以上。槽前有大片的负变高,槽将向东移动,17 日影响广东中北部。

从 850 hPa 上看切变线动态变化可知,4 月 15 日切变线位于湖南北部,经江西北部,到浙江南部,15 日至 16 日,切变线快速往南压,16 日 08 时切变线两侧的气流明显增大,在切变线的西侧有一个涡旋环流,这便有利广东北部和中部的的水汽汇合。16 日 20 时位于广东的北部和中部,17 日切变线在广东徘徊,18 日东移入海,切变线消失。从 14 日至 17 日风场分析,广东由西南气流控制,西南风带来充足的水汽为强对流的发展准备条件,17 日 20 时后广东基本受偏北气流控制,强对流天气结束。

通过分析地面锋线位置变化可知,4 月 15 日 11 时弱冷空气影响广东西北部,15 日降温 1℃~4℃,广东大部分地区受低槽控制。16 日 20 时,冷高压的前缘有一锋线,位于广西的东北部和广东的西北部,冷锋后由微弱的偏北气流控制,有大片的负变温,锋前有偏南气流,呈现小幅度的气温上升。17 日 08 时锋线南压到广东省的西北部和广西梧州附近,到 17 日 14 时已南压到广东省的中部和西南部,并且存在一个明显的气旋性小涡旋占据广东省的大部分地区,这个气流辐合的位置就是发生雷雨大风冰雹的区域。综上所述,17 日广东省大部分地区地面受锋面及气流辐合的影响,暖空气被抬升。低空受切变线影响,气流也辐合上升。天气系统造成的系统性上升作为此次对流天气的触发机制之一。高层还受高空槽的影响,西南气流大风区自北向南移入广东北部和中部,增加高层的不稳定层结,为对流性天气的发生形成条件。这样高低层互相对应,说明这是个深厚的对流系统,再加上高空急流的加强作用,为强雷暴的发展准备更有利的条件。

### 4 物理量分析



4.1 水汽条件

从 2011 年 04 月 17 日 08 时 995 hPa 的相对湿度图看,广东的相对湿度在 85 % ~ 95 %,湿度较大。从该时次 500 hPa 的散度场分析,在广东的西北部有明显的辐散。地面存在一个明显的气旋性小涡旋占据广东省的大部分地区,说明低层存在气流的辐合,且相对湿度较大,暖湿气流低层的辐合和高空的辐散相互配置,高空的抽吸作用,更有利于低层水汽的上升运动,更有利于强雷暴的发展。

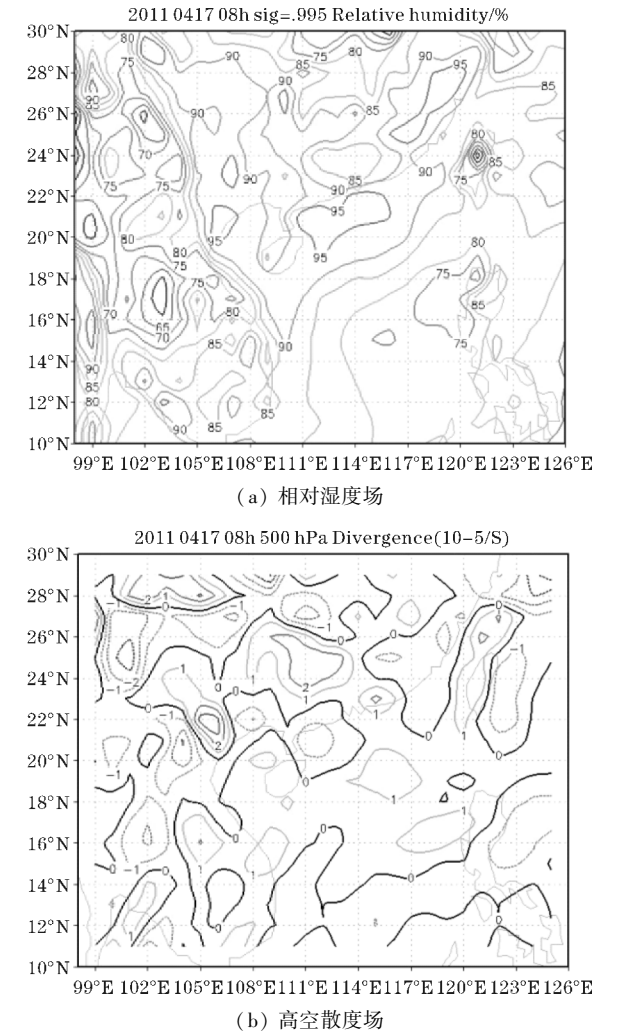


图2 4月17日08时相对湿度场和高空散度场

4.2 稳定度分析

由于具有探空资料的站点不多,选取发生雷雨大风冰雹天气区域附近的广西梧州和广东清远站点的探空图(图 3),由 4 月 17 日 08 时广西梧州站及清远站的探空资料显示,正的不稳定能量面积大于负的不稳定能量面积,属于真的潜在不稳定型。有充分的不稳定能量释放使对流的发展。 $K$  指数既反映温度递减率,又能体现大气中低层的湿度条件和饱和程度, $K$  指数越大,表示大气层结越不稳定,越潮湿。此时梧州  $K$

指数达到 36℃,一般暴雨前  $K$  指数都会达到 35℃ 以上。并且梧州站点的沙氏指数小于 0℃,SI 呈现负值表示大气层结是不稳定的,一般 SI 与对流性天气有一定的对应关系,−3℃ < SI < 0℃ 有发生雷暴的可能性。清远的  $K$  指数接近 35℃,沙氏指数也处于临界值,随着对流的继续发展,大气层结愈不稳定。另外,两地的  $\theta_{se850} \sim \theta_{se500}$  均大于 0,也反映两地的对流不稳定。

露点曲线体现了测站上空的水汽垂直分布状况,从两张 T-LnP 图上看,露点曲线和层级曲线呈现“喇叭形”,下部紧靠,上部分离,下部表示温度不用降得太多就能达到露点,表示低层空气很湿,低层吹的是西南风,西南气流暖而湿也能反映这一点。相反,高层受偏北气流影响,冷而干。露点曲线和层结曲线有小幅度向右倾斜,并从地面形势分析 17 日 08 时广东中部和西北部有锋面存在,锋面的作用将暖空气抬升,形成浅层的逆温层。逆温层阻碍了低层和高层的热量和水汽交换,使上层更干,低层更湿,形成“上干下湿”的不稳定层结。并且逆温层的阻挡,有利于贮藏不稳定能量,只要一定的触发机制,破坏逆温层,不稳定能量就会爆发。

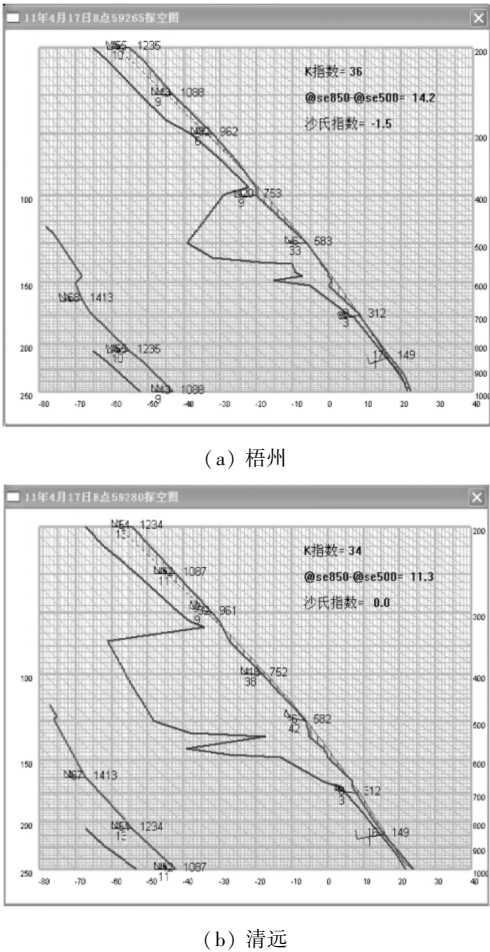
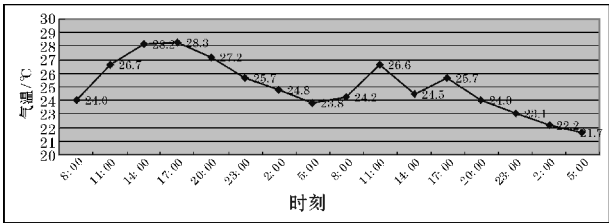


图3 4月17日08时梧州

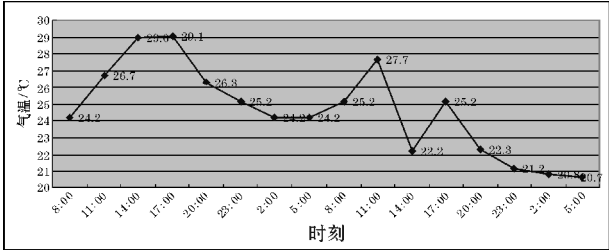
4.3 对流触发机制

4.3.1 热力条件

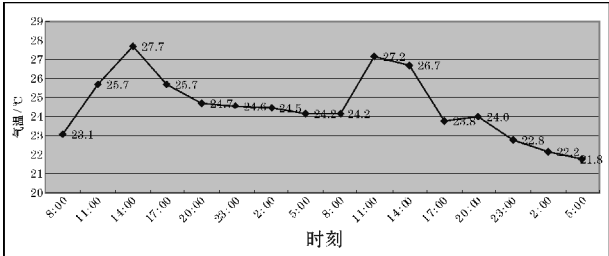
选取发生冰雹区域附近的几个站点作温度随时间的变化分析(图4),16日粤中的温度较高,最高有28℃以上,粤东南的深圳有27.7℃,粤西南的中山有29.2℃,温度普遍较高,甚至连雷暴过后气温仍然较高,在22℃以上,说明热力条件比较充足,局地热力抬升的作用促使强对流的发展。17日08时起,温度一直上升,在11时达到最高值在26℃~28℃,11时呈现下降的趋势。粤中的下降速度较快,14时到达最低值,说明雷雨已经到达粤中。随着天气系统的移动,雷雨天气接着影响粤东南和粤西南,气温在17时达到最低。



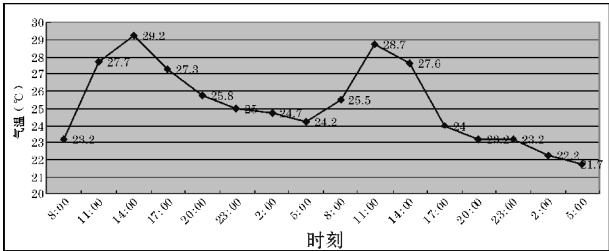
(a) 广州



(b) 高要



(c) 深圳



(d) 中山

图4 广州、高要、深圳、中山4月16~18日地面气温时间曲线图

4.3.2 动力条件

(1) 环境风垂直切变

从清远高空风时间剖面图(图5)看,15日08时和20时,1500 m(850 hPa)以下均受西南气流控制。16日08时850 hPa上风向转为西风,并且5500 m(500 hPa)以上的风速开始明显增大。16日20时850 hPa上风向转为偏北风,说明冷空气已经影响该地区。17日08时低层受西南气流影响,风速在2~4 m/s,但3000 m(700 hPa)上风向转为西北风,风速急剧增加,已达18 m/s,垂直方向上有明显的风向和风速垂直切变。风速高度逆转,雷暴云一般向其前进方向传播。17日20时,已经受冷气团控制,吹东北风,700 hPa上吹西北风,存在风速垂直切变和东西向的风向垂直切变。垂直切变的环境风可以为对流提供能量,促使强对流风暴发展并维持,较强的垂直切变风对超级单体的形成具有重要作用。

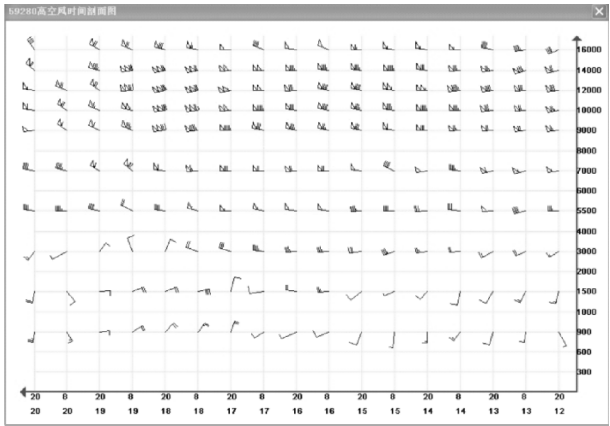


图5 清远探空风的垂直剖面图

(2) 涡度场分析

图6是冰雹代表地区(顺德)和暴雨代表地区(深圳)的涡度垂直剖面图。4条实线分别代表顺德深圳17日08时和14时涡度随时间和高度的分布。4条实线比较吻合,说明资料具有一定的代表性和准确性。由图显示,17日08时,顺德和深圳地区在700 hPa以下为正涡度,在900~800 hPa间达到最大正涡度值,顺德涡度值稍大于深圳地区,因此顺德发生的强对流天气更猛烈。700 hPa以上为负涡度,最大涡度中心位于高空200 hPa上。17日14时,2个地区低层的正涡度增大,并且依旧是顺德的涡度大于深圳。高层的负涡度减小,说明08时到14时间对流有所发展。总体上,低层有正涡度,高层有负涡度,具有上升运动,并且涡度随时间在加强,说明垂直运动逐步加强。

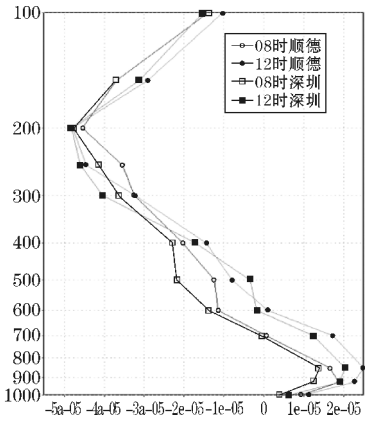
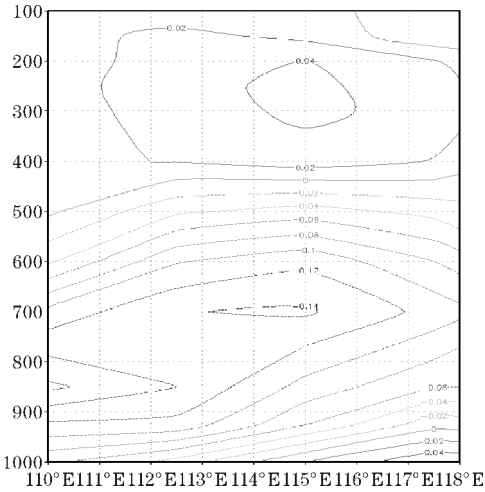


图6 顺德及深圳地区涡度垂直剖面

(3) 垂直速度特征分析

利用2011年ncep资料中的omega数据,用grads软件做出 $110^{\circ}\sim 118^{\circ}$ 、经度为 $22.5^{\circ}$ 区域(广东珠江三角洲一带)的垂直速度剖面图(图7)。由图7可知,低层 $\omega < 0$ ,具有上升运动,最大上升中心位于700 hPa高度上。高层 $\omega > 0$ ,具有下沉运动。这与涡度场和散度场基本吻合。高层具有负涡度,气流成顺时针旋转,产生辐散。为保持质量的连续,低层必须有补偿的上升运动,让上升运动维持,把低层的水汽向高层输送,为强对流提供充足的水汽。综上所述,此次雷雨大风冰雹的垂直特征显著,动力因子发挥强大的力量,强的上升运动作为对流天气的触发机制,然而低层的辐合,高层的辐散则将雷暴发展成强雷暴。





- [6] 郑媛媛,姚晨,郝莹,等. 不同类型大尺度环流背景下强对流天气的短时临近预报预警研究[J]. 气象,2011,37(7):795-801.
- [7] 许新田,王楠,刘瑞芳,等. 2006年陕西两次强对流冰雹天气过程的对比分析[J]. 高原气象,2010,29(2):447-460.
- [8] 许爱华,张琰,刘献耀. 江西“暖区”强对流天气的热力和动力条件诊断分析[J]. 气象,2001,27(5):30-34.
- [9] 苏永玲,何立富,巩远发,等. 京津冀地区强对流时空分布与天气学特征分析[J]. 气象,2011,37(2):177-184.
- [10] 丁一汇,章名立,李鸿洲,等. 暴雨和强对流天气发生条件的比较分析[J]. 大气科学,1981,5(4):388-397.
- [11] 俞小鼎,郑媛媛,廖玉芳,等. 一次伴随强烈龙卷的强降水超级单体风暴研究[J]. 大气科学,2008,32(3):508-522.
- [12] 俞小鼎,周小刚,王秀明. 雷暴与强对流临近天气预报技术进展[J]. 气象学报,2012,70(3):311-337.
- [13] 郑永光,张小玲,周庆亮,等. 强对流天气短时临近预报业务技术进展与挑战[J]. 气象,2010,36(7):33-42.
- [14] 陈晓燕,付琼,岑启林,等. 黔西南州一次分裂型超级单体风暴环境条件和回波结构分析[J]. 气象,2011,37(4):423-431.
- [15] 夏丽花,冯晋勤,黄美金,等. 一次强对流天气过程的成因分析[J]. 气象,2006,32(7):110-114.
- [16] 张腾飞,段旭,鲁亚斌,等. 云南一次强对流冰雹过程的环流及雷达回波特征分析[J]. 高原气象,2006,25(3):531-538.
- [17] 吴芳芳,俞小鼎,张志刚,等. 苏北地区超级单体风暴环境条件与雷达回波特征[J]. 气象学报,2013,71(2):209-227.
- [18] 马禹,王旭,郭江勇. 新疆系统性冰雹天气过程的环流形势及卫星云图特征分析[J]. 高原气象,2004,23(6):787-794.
- [19] 漆梁波. 高分辨率数值模式在强对流天气预警中的业务运用进展[J]. 气象. 2015,41(6):661-673.
- [20] 王秀明,钟青,韩慎友. 一次冰雹天气强对流(雹)云演变及超级单体结构的个例模拟研究[J]. 高原气象,2009,28(2):352-365.
- [21] 张玲,张艳玲,陆汉城,等. 不稳定能量参数在一次强对流天气数值模拟中的应用[J]. 南京气象学院学报,2008,31(2):192-199.

## Analysis of Causes of Guangdong's Thunderstorm and Hail Happened on April 17, 2011

LUO Rui-ting<sup>1,2</sup>, WANG Shuo-fu<sup>2</sup>, YIN Mei-xiang<sup>3</sup>

(1. Meteorological Bureau of Qingyuan City, Qingyuan, 511500, China; 2. Chengdu University of Information Technology, Chengdu, 610225, China; 3. Meteorological public service Center of Guangdong, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** Using NCEP  $1^\circ \times 1^\circ$  reanalysis data and conventional meteorological data, the circulation, physical factors and mesoscale system of thunderstorm in Guangdong province on April 17, 2011 are analyzed. By the analysis we try to reveal the causes of thunderstorm from the multiple perspectives. The research showed that the main influencing system of thunderstorm is upper trough, the low level shear line and the cold front. The warm vapor with high moisture carried by the jet provides sufficient water vapor and energy. The cold mass entered the unstable warm mass with high moisture is the mechanism to release the unstable energy. The large trumpet-shaped Pearl River estuary and the topography friction caused a large amount of water vapor from the ocean to converge at the estuary of the Pearl River to maintain strong convection.

The structure of the upper divergence, the lower level convergence and forceful vertical shear of environment wind, these conditions provided the favorable dynamic condition to the formation and maintaining of the thunderstorm, which plays an important role in the formation of cell thunderstorms. At the same time, Doppler weather radar offers a good reference to estimate, the characteristic of Bow Echo and rear inflow notch are good meaning for forecasting falling area and time of hail from radar.

**Keywords:** synoptics; severe convection; thunderstorm; hail; circulation characteristic; physical diagnosis