

吴乃庚,林良勋,冯业荣,等. 2013. 2012 年初春华南“高架雷暴”天气过程成因分析. 气象, 39(4):410-417.

# 2012 年初春华南“高架雷暴”天气过程成因分析<sup>\*</sup>

吴乃庚 林良勋 冯业荣 刘运策 邓文剑

广州中心气象台, 广州 510080

**提 要:** 利用华南地区多普勒天气雷达资料、气象站监测资料以及 NCEP 客观分析资料, 分析了 2012 年 2 月 27 日华南地区发生的一次罕见高架对流天气过程特点。结果表明, 在低层强大冷气团控制下, 地面冷锋后华南地区出现的伴有短时强降雨、雷电和冰雹的强对流天气过程是一次较典型的冷区“高架雷暴”, 近地面大气层结较稳定, 低空存在逆温, 强对流天气落区与 850 hPa 切变线位置有较好对应。中高层的西风槽东南移和高空急流南压, 配合低层 850 hPa 南岭山脉南侧偏南急流显著加强, 为高架对流发生发展提供了有利的大气环流背景。边界层冷空气补充南下迫使低层暖湿空气抬升, 中高层槽前辐散气流产生高空“抽吸”作用, 配合华南上空有利的大气动力和热力不稳定条件, 形成了此次罕见的高架强对流。与一般地面发展雷暴不同, 此次“高架雷暴”暖湿空气是从逆温以上的 850 hPa 附近开始对流抬升, 而不是从边界层开始。

**关键词:** 高架雷暴, 冷锋, 逆温, 切变线, 条件对称不稳定

**中图分类号:** P458

**文献标识码:** A

**doi:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2013.04.002

## Analysis on the Causes of an Elevated Thunderstorm in Early-Spring of South China

WU Naigeng LIN Liangxun FENG Yerong LIU Yunce DENG Wenjian

Guangzhou Central Meteorological Observatory, Guangzhou 510080

**Abstract:** South China (SC) suffered a rarely seen elevated thunderstorm on 27 February 2012. Based on meteorological observation data, Doppler weather radar data and NCEP/NCAR analysis data, the characteristics and causes of the elevated thunderstorm are analyzed. The results show that this convective weather with short-time heavy rain, hail and thunderstorm which occurred behind a cold front was a typical elevated thunderstorm. There was a low-level temperature inversion over SC, the atmospheric layer near surface was stable and the location of the convective weather was correlated well with the 850 hPa shear line. The east-southward propagation of westerly trough and the southward movement of westerly jet in the mid-high level together with reinforce of the 850 hPa low-level moist southerly on the southern side of the Nanling Mountains created favorable atmospheric circulation conditions for development of the elevated convection. The conditional symmetric instability of the air over SC and the convective uplift mechanism of warm air including southward movement of cold air in boundary layer and upper-level divergence contributed to the “elevated convection” weather. Different from the general thunderstorm that develops from the surface, the warm and moist air for this elevated thunderstorm began to lift convectively from the layer near 850 hPa which was above the temperature inversion, not beginning from the boundary layer.

**Key words:** elevated thunderstorm, cold front, temperature inversion, shear line, conditional symmetric instability

<sup>\*</sup> 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201006001)和中国气象局气象关键技术集成与应用项目(CMATG2010Z02)共同资助

2012 年 4 月 28 日收稿; 2012 年 11 月 12 日收修定稿

第一作者: 吴乃庚, 主要从事华南天气气候诊断与预报预测研究. Email: 28273013@qq.com

## 引言

雷暴是伴有雷击和闪电的强对流天气,并常伴有强降水、大风和冰雹等。我国是雷暴多发区,每年雷暴天气致灾严重,因此雷暴的分析和预测研究工作一直以来备受研究和业务人员的关注。张家诚(1991)及张敏锋等(1998)等利用过去几十年的观测资料和 EOF、小波分析等统计方法对我国雷暴天气的时空分布、年际变化和季节变化等进行了分析。陈思蓉等(2009)分析了雷暴日变化气候特点并归纳了雷暴异常年的大气环流特征。鲍旭炜等(2010)利用中尺度数值模式研究了环境风场存在低层反向切变情况下处于“亚最优切变态”的多单体雷暴系统维持和发展机制。陈双等(2011)基于多普勒雷达变分同化系统反演资料对复杂地形下雷暴增强个例进行了研究,揭示了地形对雷暴增强的抬升辐合作用。蒙伟光等(2007)利用耦合陆面模式和中尺度气象模式模拟了珠江三角洲城市化对雷暴的影响,表明城市化发展有利新对流启动和发展,促使雷暴强度增强。此外,不少学者基于新一代多普勒天气雷达资料,对不同雷暴天气过程发展、演变特征进行了研究(俞小鼎等,2008;郑媛媛等,2004)。这些研究成果为气象业务人员进行雷暴分析和预警预报提供了重要的参考。

从抬升发展高度看,雷暴可分为地面发展雷暴(surface based thunderstorms)和高架雷暴(elevated thunderstorms)两种,前者更为常见,研究分析也相对较多,而高架雷暴目前仍是强对流预报方面难题之一(彭治班等,2001)。20世纪90年代,Colman(1990a;1990b)最早从美国的一些观测和个例统计中提出了低层冷空气上面的暖湿空气对流的高架雷暴概念,并分析了美国高架雷暴的时空特征和基本形成机制。所谓高架雷暴是指雷暴云云底在边界层以上的雷暴,自从 Colman 引入高架雷暴概念后,引起了气象学家的高度关注。Ostby(1999)指出,与传统理解的边界层内不稳定空气被强迫抬升产生对流不同,某些湿对流是在边界层上方发生,由于边界层上方观测资料时空分辨率低,这种雷暴的预报是气象学者面临的重要难题。Grant(1995)通过对美国发生的11个冷区高架雷暴过程分析表明,这些雷暴的云底并不在边界层内,而是在明显的锋面逆温层以上,最不稳定气块常位于850 hPa附近或以上,

同时这些个例伴随的强天气记录中90%以上是冰雹,大风及龙卷出现概率很少。Moore(2003)则统计分析了美国暖季(4—9月)伴有强降水出现的高架雷暴天气过程的环境场特征,并初步归纳了相应的概念模型。Jankov等(2002)发现这些锋区北侧的高架雷暴个例数值预报模式很难模拟预报。Anderson等(2002)研究进一步指出,数值预报模式对“高架雷暴”预报不足,是因为模式的对流参数化方案主要集中考虑在近地面对流初始发展,而不能反映对边界层上的对流发展。

国内方面,近年也有一些学者对我国的北方几个罕见的冬季“雷打雪”冷季雷暴个例进行了诊断分析(刘鹏等,1998;李新芳等,1999;李青春等,2011;苏德斌等,2012;吴伟等,2011;周昆等,2010),得到了一些有一定参考意义的成果,但总体来说对高架雷暴的分析并不多,且主要集中在对我国中高纬地区个例的分析,对低纬度地区高架雷暴的分析并不多见。

2012年2月27日,华南地区出现了一次罕见的冷锋后高架雷暴天气,各地先后出现初雷,华南中北部地区更是在3~6℃的低气温状态下出现强降水和雷电,局部伴有冰雹等强对流天气,数值模式和业务预报对此次过程均未能提前准确预测,虽然总体致灾不算太严重,但首场异常的“强天气”造成的社会反响,给气象部门的预报服务工作带来了不小的压力。本文基于华南地区多普勒天气雷达拼图资料、地面观测和区域自动站资料、每日2次的探空站监测资料以及NCEP/NCAR的每日4次客观分析资料(Final Operational Global Analysis, FNL, 分辨率 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ ,垂直方向为26层)等,利用天气学分析及物理量诊断方法,从雷暴过程的时空分布、各层大气环流形势特征以及高架雷暴的垂直结构等方面,初步探讨此罕见的“高架雷暴”天气过程的特点和成因,以期为今后同类灾害性天气事件的分析、监测和预报提供有益线索和思路。

## 1 “高架雷暴”过程的天气特点

2012年2月25日起,受强冷空气及其补充影响,华南地区气温持续下降,日平均气温低,各地出现阴雨寒冷天气,2月27日随着地面冷锋南压到华南沿海,华南大部分市县日平均气温降至8℃以下,华南北部最低气温仅0~3℃,部分站点气温甚至在

0℃以下,且日温差仅有 1~3℃,寒冷程度甚至接近广东省寒潮发布标准。然而,在寒冷天气下,27 日下午起华南上空开始出现明显的降水云团,并逐渐东移加强发展,27 日傍晚后华南大部上空已被大范围降水云团覆盖(图 1a)。27 日下午到 28 日早晨,华南大部分市县出现了中到大雨,北部出现暴雨(图略),多个市县先后出现 2012 年的初雷,部分市县更在寒冷天气下出现了冰雹(直径 5~8 mm),其中包括广西南部的南宁地区也罕见地出现了冰雹,广西多个市县发布了冰雹橙色预警信号。此次过程以 27 日夜間雨势和雷电最为猛烈,雷电、强降水和冰雹主要出现在桂东北、粤北、以及湘、赣、闽三省的南部(图 1b)。28 日上午起,各地强对流天气逐渐减弱结束。

## 2 “高架雷暴”过程的天气形势配置

### 2.1 地面和低层天气形势特征

利用 NCEP 客观分析资料,图 2 给出了 2012 年 2 月 25—29 日沿着 112°E 的 975 和 850 hPa 的风场和温度场时间演变。由图 2a 可见,25 日起受强冷空气及其补充影响,华南地区气温持续下降,温度锋区(等温线密集区)在华南中南部,华南地区受偏北风场控制,27 日温度锋区进一步南压到 20°N 附近的华南南部沿海,华南中北部大部分地区最低气温降至 6℃以下,28 日随着冷空气东移减弱,华南地区主要受偏东气流影响,气温明显回升到 10℃以上。由对应的 850 hPa 演变图(图 2b)可见,25 日开始 850 hPa 强温度锋区(强度达 12℃/3 个纬度)和切变线在 25°N 附近的华南北部维持,华南上空温度在 6~12℃之间与近地面存在明显的逆温,27 日早晨开始华南上空偏南气流明显加强,27 日夜間风力甚至超过  $14\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,28 日起随着切变北侧北风渐弱,偏南暖湿气流使得华南地区气温回升到 10℃以上,强对流天气过程结束。

为了更清晰了解对流期间形势特征,图 3 给出了 27 日 20 时(对流旺盛期)的地面观测和 850 hPa 探空图。Colman(1990)对美国的高架雷暴个例的分析指出,高架对流与典型地面抬升的对流区别的一个显著特征是高架对流主要发生在锋面以北冷区

而不是在锋区附近或南侧暖区,且地面和近地层稳定度大。从 27 日 20 时地面温度与海平面气压场(图 3a)可见,受冷空气补充影响,锋面已位于华南沿海海面,华南受锋后北风控制,大部分地区气温在 10℃以下,特别是发生雷电、冰雹等强对流的华南中北部地区日平均气温仅有 3~7℃。从探空资料计算也可知,若一般地以地面层抬升开始计算,华南大部均未有正的地面湿对流有效位能(CAPE),假相当位温也在 300 K 以下(图略),表明地面层结较为稳定。另一方面,从 850 hPa 天气图可知(图 3b),南侧的偏南风较前期显著加强(达到急流强度,最大风速  $19\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ),强盛的偏南暖湿气流使得华南上空温度达到 10~15℃(与地面存在明显的逆温),锋区明显。同时,偏南气流明显加强使得华南处于低层水汽辐合区,东北—西南向的切变线位于华南北部,与此次强对流天气落区有较好对应(短时强降水、雷电和冰雹等强对流天气主要发生在切变附近及其南侧不稳定暖区)。因此,此次雷暴过程很可能是从 850 hPa 开始发展抬升而不是地面,对此第 3 节将进一步分析。

### 2.2 中高层天气形势特征

对应中低层天气系统特征,中高层主要反映的是西风波动的东移影响华南。从逐日形势变化可知(图略),25 日起 500 hPa 高空不断有西风小槽东移影响华南,因此低层切变一直在华南北部维持,地面冷空气不断补充南下;27 日起环流经向度加大,受较深厚的高空槽东移影响(从 500~200 hPa 高空槽均十分明显),华南出现了强雷暴天气;28 日,随着高空槽的东移过境,华南地区雷暴过程结束。图 4a 给出了 27 日 20 时的 500 hPa 位势高度场和风场的分布,图中可见,西太平洋副热带高压相对较弱,华南地区主要受高空槽前西南气流影响,且西南风速较大,中心超过  $35\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。而 200 hPa 上(图 4b),南亚高压仍位于南海,华南地区同样受深槽前西—西南气流影响,副热带高空急流轴已从前期的 30°N 南压到 25°N 以南的华南地区,中心风速超过  $60\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,高空急流的加强和南移增加了华南地区的垂直风切变,对雷暴发展提供了有利的动力条件(朱乾根等,2007)。同时,从散度分布可知,受高空槽的东移影响,500 和 200 hPa 槽前均存在西南—

东北向的正散度中心,对华南地区低层暖湿气流辐合上升十分有利。

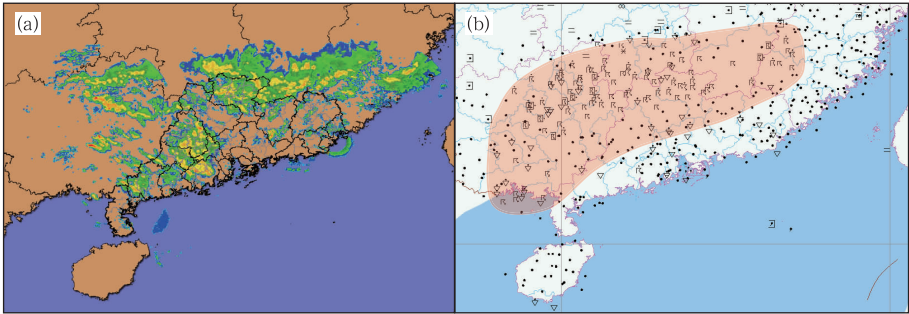


图 1 2012 年 2 月 27 日 20 时华南区域雷达拼图(a)和天气现象观测分布图(b)  
(阴影区为主要雷雨区)

Fig.1 Reflectivity mosaics (a) and weather observation (b) of South China at 20:00 BT 27 February 2012  
(Thunderstorm areas are shaded)

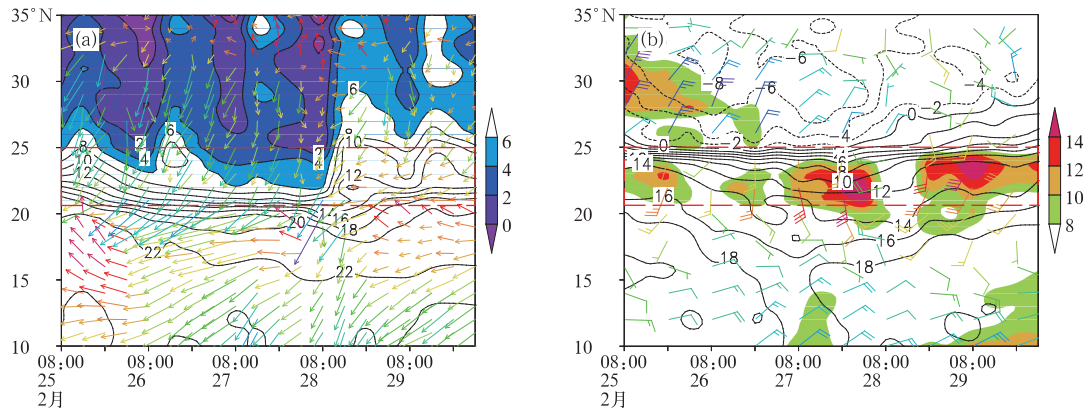


图 2 2012 年 2 月 25—29 日沿着 112°E 的 975 hPa(a)、850 hPa(b)温度(等值线)和风场的时间演变图  
(a 图阴影代表小于 6℃的冷区,单位:℃;b 图阴影代表风速中心,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;图中时间为世界时)

Fig. 2 Latitude-time cross-section of 975 hPa (a) and 850 hPa (b) wind (unit:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) and temperature (unit:  $^{\circ}\text{C}$ ) along 112°E from 25 to 29 February 2012  
[Shaded areas in (a) represent temperature  $< 6^{\circ}\text{C}$ , shaded areas in (b) represent wind speed  $> 8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]

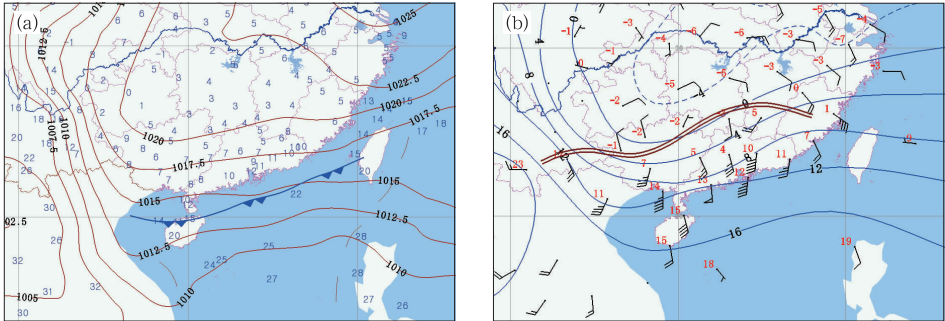


图 3 2012 年 2 月 27 日 20 时地面温度与海平面气压场(a)和 850 hPa 风场和温度场(b)  
(温度单位:℃,气压单位:hPa)

Fig. 3 Surface temperature and sea level pressure (a) and 850 hPa wind and temperature (b) at 20:00 BT 27 February 2012  
(temperature unit:  $^{\circ}\text{C}$ , pressure unit: hPa)

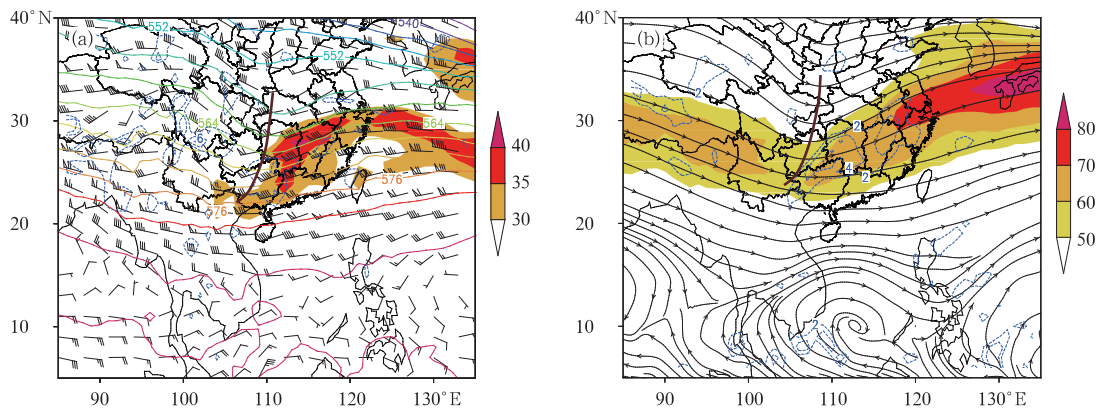


图 4 2012 年 2 月 27 日 20 时 500 hPa 位势高度场、风场和正散度中心(a)和 200 hPa 流场及正散度中心(b)

(阴影区为风速中心,风速单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,高度单位:dagpm,散度单位: $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ )

Fig. 4 500 hPa geopotential height (contour, unit: dagpm), wind field (wind barb, unit:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) and positive divergence (dotted line, unit:  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) (a) and 200 hPa mean streamline and positive divergence (b) at 20:00 BT 27 February 2012  
(Values of wind speed greater than  $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  are shaded)

3 “高架雷暴”发生的大气垂直结构特征

前面对各层天气环流形势分析可知,虽然地面为冷气团控制层结较稳定,但边界层以上切变线、强偏南气流、高空槽等环流系统对此次雷暴对流发展十分有利。具体大气条件方面,低层水汽辐合和强烈的垂直风切变是强雷暴发展的重要条件,图 5 给出的是 27 日 20 时 850 hPa 水平风场、水汽通量负

散度中心和低层垂直风切变分布,从图中可见,强盛的偏南暖湿气流使得华南上空水汽输送十分明显,华南北部的西南—东北向切变线十分有利于水汽辐合和维持,水汽通量辐合中心位于两广地区;同时,华南中北部低层(700~975 hPa)有显著的垂直风切变,风向由西南风转为近地面的东北风,风速切变中心超过  $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。低层明显的水汽辐合和强烈的垂直风切变有利于雷暴强对流发展,这也是强雷暴中心主要发生在华南中北部的一个重要原因。

为了分析大气环流的空间结构特征,更清楚地了解“高架雷暴”的可能成因,图 6 给出了广东河源和广西梧州两探空站的温度对数压力( $T-\ln p$ )图,从图中可见,与汛期暴雨时整层高湿不同,此过程高湿区主要集中在 600 hPa 以下的中低层;同时,华南地区上空存在明显的逆温(近地面层  $0 \sim 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , 850 hPa 附近超过  $10^{\circ}\text{C}$ ),这也是为何从地面开始计算的对流有效位能(CAPE)、抬升指数(LI)和假相当位温( $\theta_{se}$ )等物理量均显示强对流发展条件不足的原因,而若从逆温层顶开始计算则可以看到 CAPE 和 LI 均显示出有利对流发展条件(表 1)。而从垂直风廓线可知,华南低层为冷气团控制的北到东北风,850 hPa 偏南风明显加大(超过  $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ),700 hPa 以上为强盛的西到西南风,无论风速和风向都存在强烈的垂直切变。强烈的低空垂直切变与前面分析的 850 hPa 的水平风切变造成的条件对称不稳定(CSI),为强对流的发生发展和维持提供了十分有

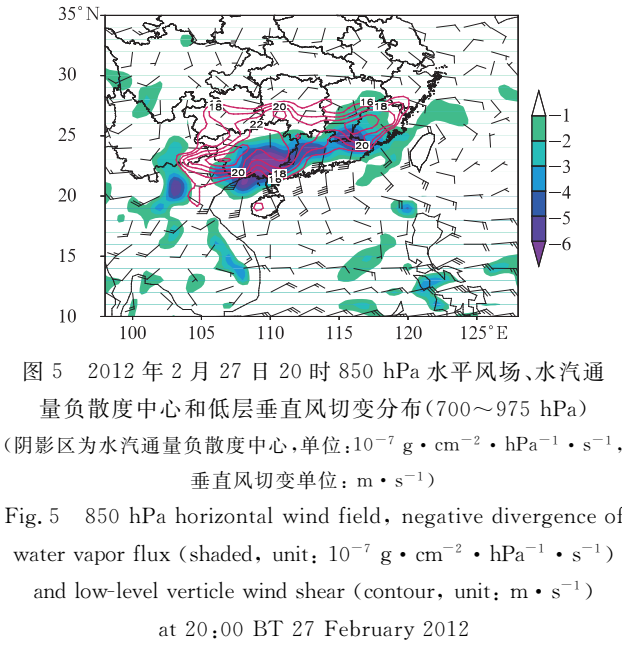


图 5 2012 年 2 月 27 日 20 时 850 hPa 水平风场、水汽通量负散度中心和低层垂直风切变分布(700~975 hPa)

(阴影区为水汽通量负散度中心,单位: $10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ,垂直风切变单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

Fig. 5 850 hPa horizontal wind field, negative divergence of water vapor flux (shaded, unit:  $10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ) and low-level verticle wind shear (contour, unit:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) at 20:00 BT 27 February 2012



利的动力不稳定条件。另外,由于地面冷气团控制,低层存在逆温层,对流不稳定层主要在 700~500 hPa 之间(厚度相对较薄),且 700~850 hPa 之间存在 0℃ 以上融化层(冰雹落到此层可能会被溶化),

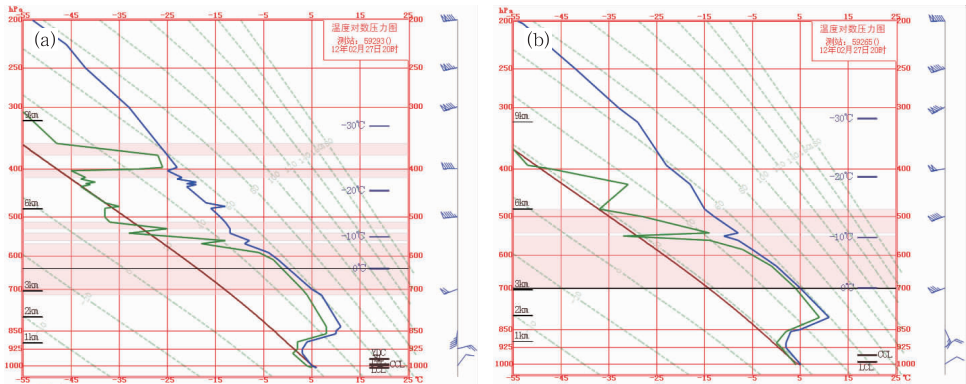


图 6 2012 年 2 月 27 日 20 时广东河源站(a)和广西梧州站(b)探空图  
(阴影区为热力不稳定层)

Fig. 6 The  $T$ -log $p$  diagram over Heyuan (a) and Wuzhou (b) sounding stations at 20:00 BT 27 February 2012  
(Shaded areas represent the unstable layers)

表 1 2012 年 2 月 27 日 20 时广东河源、清远站和广西梧州、桂林站的强对流物理量指数  
Table 1 The severe convective parameters of Heyuan, Qingyuan, Wuzhou and Guilin sounding stations at 20:00 BT 27 February 2012

	对流有效位能/ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$		抬升指数/ $^{\circ}\text{C}$		假相当位温/ $\text{K}$
	地面抬升	逆温层顶抬升	地面抬升	逆温层顶抬升	
河源(59293)	0.8	124.4	19.76	-5.0	293
清远(59280)	0.0	142.5	22.17	-5.5	291
梧州(59265)	0.0	229.5	21.95	-8.4	291
南宁(59431)	0.0	645.1	19.83	-14.4	292

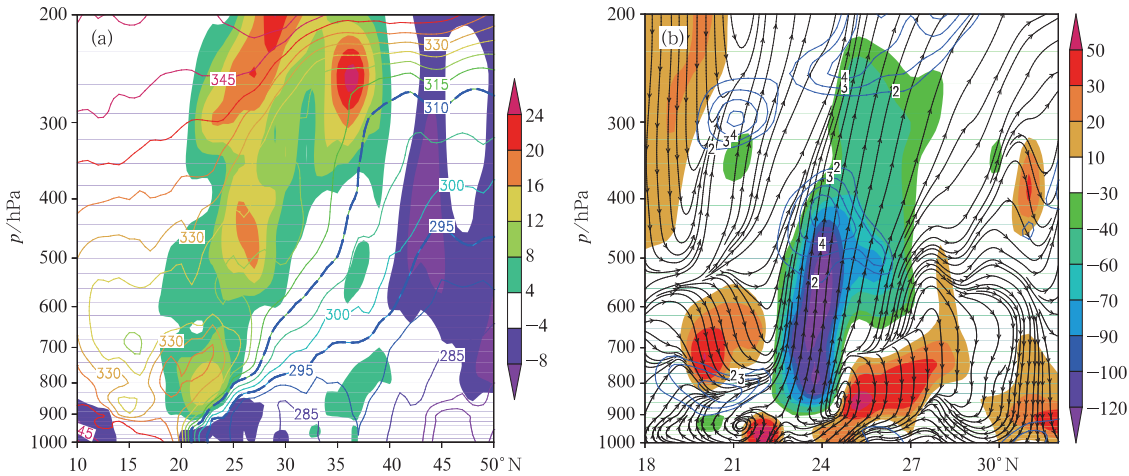


图 7 2012 年 2 月 27 日 20 时沿 112°E 的假相当位温和经向风剖面图(a)以及经向环流和散度剖面图(b)  
(a 图阴影区为经向风中心,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,位温单位: $\text{K}$ ; b 图阴影区为垂直运动中心,  
单位: $10^{-2} \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ ,等值线为正散度中心,单位: $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ )

Fig. 7 Height-latitude cross-section of pseudo-equivalent potential temperature (contour, unit:  $\text{K}$ ) and meridional wind (shaded, unit:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) (a) and meridional circulation (stream line, shaded areas represent the significant vertical motion, unit:  $10^{-2} \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ ) and positive divergence (contour, unit:  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) (b) along  $112^{\circ}\text{E}$  at 20:00 BT 27 February 2012

同时冷区高架雷暴从 850 hPa 抬升(对流运动强度不如暖区地面抬升类冰雹强)雹块增长总路径不长,因此强对流过程以 5~8 mm 的小冰雹为主,未出现大冰雹。而从冰雹落区看,这次过程冰雹主要出现在高空槽前辐散中心、低层 850 hPa 切变线附近、0℃层相对较低、低层垂直切变和水汽辐合显著几个条件均配合较好的广西的北部和东部地区。

为了进一步说明“高架雷暴”天气的大气垂直结构和动热力特征,图 7a 给出了 2 月 27 日 20 时沿着 112°E 的假相当位温和经向风垂直分布图。考虑到实际大气位温并不保守,锋面也非由固定气块组成的物质面,将锋区下界约定为 295 K,上界定为 310 K(杨贵名等,2009)。从图中可见, $\theta_{sc}$ 的锋区特征线下界下方为来自中高纬度的冷气团,锋区特征线上界上方为来自热带洋面的暖气团,两特征线上下界间为锋区,锋区自 500 hPa 逐渐向南降低倾斜,地面冷气团向南推进到 22°N 以南的华南沿海海面。整个华南地区 900 hPa 以下近地层受冷空气偏北气流控制, $\theta_{sc}$ 小于 300 K,而 800~700 hPa 假相当位温则超过 335 K,表明近地层大气层结相对稳定,而 700~500 hPa 之间与图 6 探空观测计算结果一致为热力不稳定层( $\frac{\partial \theta_{sc}}{\partial p} > 0$ ),适当的抬升机制将使这种不稳定能量释放出来。

抬升方面,除了近地层冷气团的不断补充南下对华南上空 850 hPa 附近暖湿气流抬升提供了一定的动力抬升条件外,中高层高空槽前的辐散气流也十分有利于华南上空暖湿空气上升发展。因此,图 7b 较清楚地显示了此次“高架对流”的垂直特征,近地面冷空气补充南下促使低层暖湿空气抬升,中高层辐散气流产生高层“抽吸”作用,配合华南上空有利的大气动力和热力不稳定条件,对强对流的发生发展和维持十分有利,强上升运动中心高度接近 400 hPa,与一般夏季雷暴不同的是,此次“高架”对流过程暖湿空气是从 850 hPa 附近才开始抬升对流,而不是从地面层开始。同时,值得注意的是,锋区北侧经向环流呈现两圈环流特征,其中大环流与高层急流激发的非地转环流相关,而低层的小环流与中低层锋面激发的热力环流有关,这些环流特征配置与 Moore(2003)归纳的美国暖季(4—9 月)伴有强降水的高架雷暴过程概念模型较为相似。

## 4 小结和讨论

利用天气学分析及物理量诊断方法,从雷暴过程的时空分布、各层大气环流形势、物理量特征以及垂直结构等方面,对 2012 年初春华南地区一次冷区雷暴过程的特点和成因进行了探讨,得到了以下初步认识:

(1)强大冷气团控制下,此次地面冷锋后的华南地区出现的伴有短时强降水、雷电和冰雹的强对流天气过程是一次“高架雷暴”天气,近地面大气层结较稳定,低空存在逆温层,强对流天气落区与 850 hPa 的切变线位置有较好的对应。

(2)中高层的西风槽东南移和高空急流南压,配合低层 850 hPa 华南南侧偏南急流显著加强,为高架雷暴发生提供了低层水汽辐合和高层辐散抽吸的有利大气环流背景。

(3)近地面冷空气补充南下促使低层暖湿空气抬升,中高层槽前辐散气流产生高空抽吸作用,配合华南上空有利的大气动热力不稳定条件(850 hPa 水平风切变、低空强烈垂直风切变、中层静力不稳定),形成了此次罕见的高架强对流。与一般夏季雷暴不同的是,此次“高架雷暴”过程暖湿空气是从逆温以上的 850 hPa 附近开始对流抬升,而不是从边界层开始。

需要指出的是,本文的分析还比较初步,此次“高架雷暴”过程冰雹、雷电出现的区域以及多普勒雷达探测特征、南岭山脉的地形作用等还未有深入分析,有关“高架雷暴”的预报预警技术的分析有待更多个例进行总结。

## 参考文献

- 鲍旭炜,谈哲敏. 2010. 二维多单体雷暴系统中对单体生成和发展的新机制. 气象学报, 68(3): 296-308.
- 陈双,王迎春,张文龙,等. 2011. 复杂地形下雷暴增强过程的个例研究. 气象, 37(7): 802-813.
- 陈思蓉,朱伟军,周兵. 2009. 中国雷暴气候分布特征及变化趋势. 大气科学学报, 32(5): 703-710.
- 李青春,程丛兰,高华,等. 2011. 北京一次冬季回流暴雪天气过程的数值分析. 气象, 37(11): 1380-1388.
- 李新芳,李锡怀. 1999. 洛阳“雷打雪”现象发生机制分析. 四川气象, 25(1): 41-42.
- 刘鹏,李书文. 1998. 气旋爆发性发展产生的北方冬季雷暴天气分析. 气象, 24(5): 47-51.
- 蒙伟光,闫敬华,扈海波. 2007. 城市化对珠江三角洲强雷暴天气的可

- 能影响. 大气科学, 31(2):364-376.
- 彭治班, 刘健文, 郭虎, 等. 2001. 国外强对流天气的应用研究. 北京: 气象出版社, 241-245.
- 苏德斌, 焦热光, 吕达仁. 2012. 一次带有雷电现象的冬季雪暴中尺度探测分析. 气象, 38(2):204-209.
- 吴伟, 邓莲堂, 王式功. 2011. “0911”华北暴雪的数值模拟及云微物理特征分析. 气象, 37(8):991-998.
- 杨贵名, 毛冬艳, 孔期, 等. 2009. “低温雨雪冰冻”天气过程锋区特征分析. 气象学报, 67(4):652-665.
- 俞小鼎, 郑媛媛, 廖玉芳, 等. 2008. 一次伴随强烈龙卷的强降水超级单体风暴研究. 大气科学, 32(3):508-522.
- 张锋敏, 冯霞. 1998. 我国雷暴天气的气候特征. 热带气象学报, 14(2):156-182.
- 张家诚. 1991. 中国气候总论. 北京: 气象出版社, 190-198.
- 郑媛媛, 俞小鼎, 方翀, 等. 2004. 一次典型超级单体风暴的多普勒天气雷达观测资料分析. 气象学报, 62(3):317-328.
- 周昆, 余金, 王东勇, 等. 2010. 2010 年初安徽两次暴雪过程对比分析. 第 27 届中国气象学会年会灾害天气研究与预报论文集.
- 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等. 2007. 天气学原理和方法. 北京: 气象出版社, 432-434.
- Anderson C J, Gallus Jr W A, Arritt R W, et al. 2002. Impact of adjustments in the Kain-Fristch convective scheme on QPF of elevated convection. Preprints, 19th Conf on Weather Analysis and Forecasting, San Antonio, TX, Amer Meteor Soc, 23-24.
- Colman B R. 1990a. Thunderstorms above frontal surfaces in environments without positive CAPE. Part I: A climatology. Mon Wea Rev, 118:1103-1122.
- Colman B R. 1990b. Thunderstorms above frontal surfaces in environments without positive CAPE. Part II: Organization and instability mechanisms. Mon Wea Rev, 118:1123-1144.
- Grant B N. 1995. Elevated cold-sector severe thunderstorms. Natl Wea Dig, 19:25-31.
- Jankov I, Gallus Jr W A. 2002. Contrast between good and bad forecasts of warm season MCSs in 10 km Eta simulations using two convective schemes. Preprints, 19th conf. on Weather Analysis and Forecasting, San Antonio, TX, Amer Meteor Soc, 242-243.
- Moore J T. 2003. The environment of warm-season elevated thunderstorms associated with heavy rainfall over the central United States. Wea and Forecasting, 18:861-878.
- Ostby F P. 1999. Improved accuracy in severe storm forecasting by the severe local storms unit during the last 25 years: Then versus now. Weather and Forecasting, 14:526-543.