

陈军,李小兰,喻义军,等. 贵州铜仁一次大范围高架雷暴降雹天气过程分析[J]. 干旱气象, 2017, 35(4): 649-656. [CHEN Jun, LI Xiaolan, YU Yijun, et al. Analysis on a Large-range Elevated Thunderstorm Hail Weather Process in Tongren of Guizhou[J]. Journal of Arid Meteorology, 2017, 35(4): 649-656], DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2017)-04-0649

## 贵州铜仁一次大范围高架雷暴降雹天气过程分析

陈军<sup>1</sup>, 李小兰<sup>2</sup>, 喻义军<sup>3</sup>, 方标<sup>1</sup>, 滕林<sup>4</sup>, 胡萍<sup>1</sup>

(1. 贵州省铜仁市气象局, 贵州 铜仁 554300; 2. 贵州省玉屏县气象局, 贵州 玉屏 554000;  
3. 贵州省印江县气象局, 贵州 印江 555200; 4. 贵州省剑河县气象局, 贵州 剑河 556400)

**摘要:**利用常规观测、地面加密自动站降水观测、多普勒天气雷达和探空观测资料以及 NCEP/NCAR 再分析资料,对 2016 年 4 月 15 日夜间发生在贵州省铜仁市多个县的一次大范围冰雹天气过程进行诊断分析,并与当地通常的地面发展雷暴降雹过程进行对比,探寻铜仁市冰雹强对流天气的预报指标。结果表明:(1)“上干下湿”的不稳定层结和较强的垂直风切变是冰雹产生的有利环境条件;(2)地面冷空气侵入,迫使暖湿气流沿“冷垫”爬升,且与 850 hPa 切变线共同作用在边界层顶触发了强对流天气,冰雹产生在冷垫北侧、850 hPa 切变线附近,具有明显的高架雷暴特征;(3)多个对流单体发展成多单体风暴,维持时间较长,强回波柱密实而深厚,回波悬于空中,质心在 6 km 左右;(4)降雹区 VIL 集中在 30~45 kg·m<sup>-2</sup>之间,50 dBZ 以上的强回波顶高在 8 km 以上,强回波底高小于 3.5 km, VIL 和强回波顶高整体小于当地的由地面发展雷暴产生的雹暴。

**关键词:**高架雷暴;冰雹;干侵入;冷垫;垂直风切变;VIL

**文章编号:**1006-7639(2017)-04-0649-08 DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2017)-04-0649

**中图分类号:**P458.1<sup>+</sup>21

**文献标识码:**A

### 引言

冰雹可由地面发展雷暴(surface based thunderstorms)产生,也可以由高架雷暴(elevated thunderstorms)产生,前者较为常见,且研究分析也相对较多,而后者目前仍是强对流预报的难点之一<sup>[1]</sup>。高架雷暴概念最早由 COLMAN<sup>[2-3]</sup>在 20 世纪 90 年代提出,是指雷暴云云底在边界层以上的雷暴,与由近地面发展的雷暴不同。GRANT<sup>[4]</sup>、俞小鼎<sup>[5]</sup>等也对高架雷暴作了定义,其特征为:近地层为稳定的冷空气(冷垫),有明显的逆温层,西南暖湿气流沿冷垫之上爬升,雷暴是在大气边界层以上被触发。近年来,针对由地面发展雷暴产生的冰雹天气,从气象要素特征、垂直风切变、层结稳定度以及数值模拟等方面<sup>[6-10]</sup>做了很多研究,取得了一定的成果。研究表明<sup>[11-15]</sup>,强的垂直风切变有利于强对流有组织的发展和维持,对冰雹的产生起到至关重要作用;冰雹融化层高度的高低是决定冰雹大小甚至降雹与否的主

要因子之一。对于高架雷暴产生的冰雹天气,许爱华等<sup>[16]</sup>指出,中层强西南暖湿气流在强锋区冷垫上抬升,形成我国南方典型的高架雷暴。我国春季冷锋后高架雷暴主要发生在南方地区,且有一定的日变化特征,常伴有冰雹和短时强降水天气<sup>[17]</sup>,而低空急流形成的暖湿气流输送和高空急流引起的冷平流侵入是激发高架雷暴对流的重要触发机制<sup>[18]</sup>,当高架雷暴发展时边界层为冷高压控制<sup>[19]</sup>,与一般地面发展雷暴不同,高架雷暴暖湿空气是从逆温层以上附近开始对流抬升<sup>[20]</sup>。

西南山区地形复杂,每年春季冰雹等灾害性天气频发,在地形的抬升作用下冰雹形成的 0℃层及 -20℃层高度、抬升凝结高度等特征与南方降雹有一定的差异。因此,对西南山区的冰雹,特别是高架雷暴降雹过程的研究非常必要。另外,无论是地面发展雷暴降雹还是高架雷暴降雹,都会对农业生产、交通运输等造成极大的经济损失,而对冰雹强对流

收稿日期:2017-01-05;改回日期:2017-04-25

基金项目:“对流温度  $T_c$  在铜仁夏季局地热对流降水预报中的应用”(铜气科合 QN[2016]07)、“基于多普勒雷达速度产品的梵净山区域短时强降水预报预警技术研究”(黔科合[2016]支撑 2813)、“铜仁冷式和暖式切变型暴雨环流特征及落区分析”(黔气科合 QN[2016]09)及“玉屏县农业气候资源时空变化特征分析”(铜气科合[2016]08)共同资助

作者简介:陈军(1990—)男,助理工程师,主要从事短期天气预报及雷达短临监测工作。E-mail:djcyj23@163.com

天气的决策服务指导仍不能满足地方服务需求。因此,本文利用常规观测资料、地面加密自动站降水资料和 NCEP/NCAR 再分析资料(分辨率  $1^\circ \times 1^\circ$ )以及探空、多普勒天气雷达资料,对 2016 年 4 月 15 日贵州铜仁地区大范围冰雹天气的环流背景、触发机制、物理量特征等进行分析,并与华南的高架雷暴降雹、贵州山区通常的地面发展雷暴降雹过程进行对比,探寻铜仁市冰雹强对流天气与各物理参数的关系,为今后相关工作开展提供一定的科学依据。

## 1 冰雹分布及环流形势

### 1.1 降雹降雨实况

2016 年 4 月 15 日 21:00—23:00(北京时,下同),贵州省铜仁市思南县、德江县、印江县(城区)及松桃县十几个乡(镇)不同程度地出现雷电、冰雹、雷暴大风和短时强降水等强对流天气(图 1)。冰雹基本呈带状分布,其直径普遍为 5~10 mm,印江县个别冰雹直径达 40 mm,持续时间 3~8 min。4 县先后短短十几分钟内普降中到大雨,最大小时雨量达 36.8 mm。据民政局统计,受灾最严重的印江县有 12 380 人受灾,1 户房屋倒塌,222 间房屋损坏,162  $\text{hm}^2$  农作物受灾,450 多辆车受损,直接经济损失 2 788 万元。

### 1.2 环流形势及天气系统配置

2016 年 4 月 15 日 20:00(图 2a),500 hPa 中高纬地区为“2 槽 1 脊”型,贝加尔湖南侧为一大槽,槽线向南延伸至青藏高原东侧川南地区,与高原短波槽合并,贵州省位于槽前西南气流中,低纬南支槽位

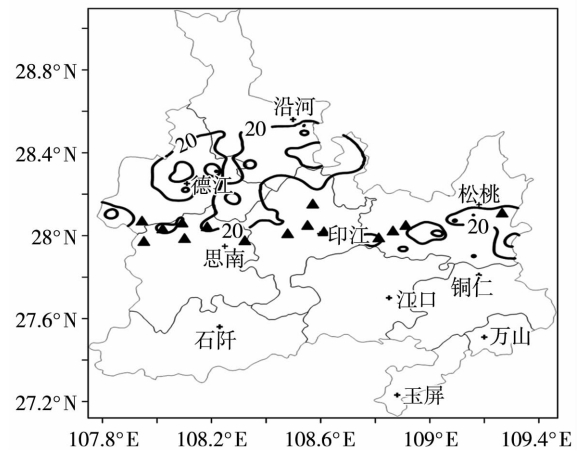


图 1 2016 年 4 月 15 日 21:00—23:00 贵州省铜仁市降水(粗实线,单位:mm)与冰雹(三角形)分布

Fig. 1 Spatial distribution of precipitation (thick solid lines, Unit:mm) and hail (triangles) from 21:00 BST to 23:00 BST on 15 April 2016 in Tongren of Guizhou Province

于  $100^\circ\text{E}$  附近;700 hPa 上,急流位于广西至湖南南部一带,铜仁市处于西南急流左侧,西南风风速达  $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,切变线位于川中—渝北一带;850 hPa 上,急流位于广西至湖南中部一带,铜仁市处于西南急流左前侧辐合区内,风速  $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,切变线位于贵阳—铜仁中部一带;地面冷锋位于铜仁南部,但冷空气未到达贵阳。20:00 过后,地面冷锋南压至贵州中部以南区域。此次过程铜仁地区冰雹发生在锋后的冷气团里,西南急流左侧,850 hPa 切变线附近,距离地面中尺度辐合线 300 km 以上,具有“高架雷暴”的特征。这与贵州山区通常的锋前降雹有明显

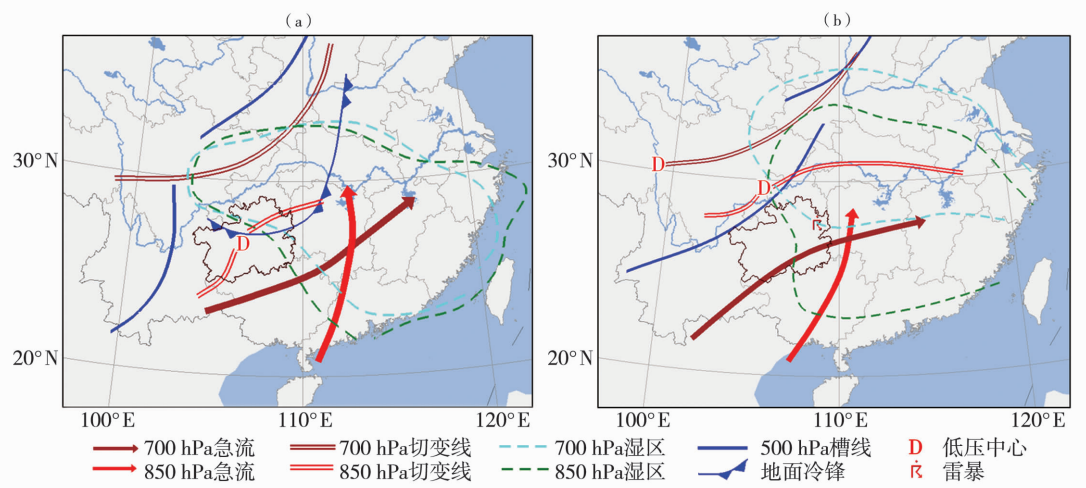


图 2 2016 年 4 月 15 日 20:00(a)和 4 月 2 日 20:00(b)贵州铜仁市降雹过程的天气系统配置

Fig. 2 The weather system configurations during the hail processes at 20:00 BST on 15 April (a) and 2 April (b) 2016 in Tongren of Guizhou

不同,即贵州山区降雹多发生在地面中尺度辐合线附近,850 hPa 切变线南侧,且距离 850 hPa 切变线较远。图 2b 为 2016 年 4 月 2 日 20:00 铜仁大范围地面发展雷暴降雹过程的天气系统配置<sup>[8]</sup>,可看出,地面无冷空气参与,降雹区距离 700 hPa 和 850 hPa 切变线较远。

## 2 冰雹发生的环境场

### 2.1 “上干下湿”的湿度层结

“上干下湿”的湿度层结能够增强大气的不稳定性,许多学者从大气中高层干侵入入手开展研究<sup>[21-24]</sup>。刘会荣等<sup>[25]</sup>定义干侵入为来源于对流层附近的气流入侵到低层的现象。在强对流发生前 14:00,沿冰雹发生区域 108°E 做假相当位温  $\theta_{se}$  垂直剖面(图 3),其中  $\theta_{se}$  低值区为干空气主体,且有 2 个低值中心,分别位于 28.5°N 的边界层和 700~400 hPa 附近,前者意味着“冷垫”已形成,后者表明中高层有干冷空气侵入。边界层干空气的前沿即是  $\theta_{se}$  暖脊,二者间的锋区为梯度最大湿斜压锋区,且  $\theta_{se}$  随高度升高而减小,气层表现为对流性不稳定层结。20:00(图略),冷锋继续南压,锋前地面冷空气加强,促使暖湿气流抬升,激发强对流产生;同时锋前暖湿气流沿着锋面抬升过程中,在对流层中层与干冷空气叠加,激发了强烈的对流运动。综上可知,强对流发生前,中高层干冷空气侵入明显,并与低层

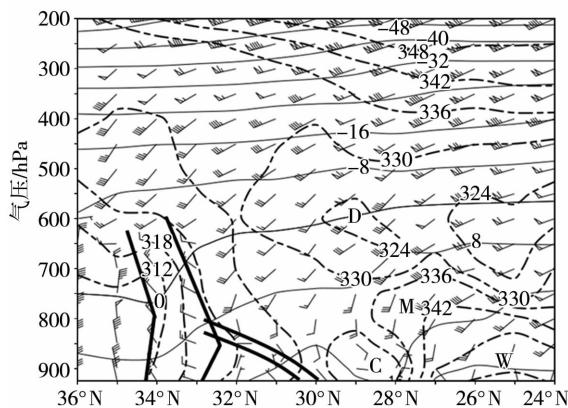


图3 2016年4月15日14:00沿108°E的假相当位温(实线,单位:K)和温度(虚线,单位:°C)垂直剖面(单粗线为 $\theta_{se}$ 锋区,双粗线为冷锋,C为冷中心,W为暖中心,D为干中心,M为湿中心)  
Fig. 3 The vertical sections of pseudo-equivalent potential temperature (solid lines, Unit:K) and temperature (dotted lines, Unit:°C) along 108°E at 14:00 BST on 15 April 2016  
(The single thick lines for  $\theta_{se}$  frontal zone, double thick line for cold front, C for cold center, W for warm center, D for dry center, M for moist center)

西南暖湿气流叠加,形成“上干下湿”的不稳定层结,有利于激发强烈的对流运动。

### 2.2 逆温层与中层强温度直减率

铜仁临近的湖南怀化站 2016 年 4 月 15 日 20:00 探空图(图 4)显示,强对流发生前,925~850 hPa 有较薄的逆温层存在,两层温差仅 3~4 °C,而 850 hPa 与 500 hPa 的温差达 26 °C 以上,700 hPa 与 500 hPa 的温差达 18 °C 以上,说明铜仁地区对流层中层环境温度直减率很大,大气层结很不稳定。据贵州山区预报员统计,当  $T_{850} - T_{500} \geq 25$  °C、 $T_{700} - T_{500} \geq 16$  °C 时,大气很不稳定,有利于强对流天气的产生。经计算,对流有效位能(CAPE)值仅有 22.6 J·kg<sup>-1</sup>,潜在能量非常小。由于雷暴是在边界层顶触发,假设抬升点从 850 hPa 开始,则订正后的 CAPE 值明显较大,为 932.1 J·kg<sup>-1</sup>(图 4 中网格状面积),说明强对流发生前具有较大的对流有效位能。农孟松等<sup>[19]</sup>对广西的高架雷暴降雹过程分析指出,降雹前逆温层明显,逆温可达 9 °C;700~500 hPa 垂直温度差在 17~19 °C 之间,850~500 hPa 垂直温度差在 33~42 °C 之间;CAPE 值非常小,订正后也很小。可见,华南的高架雷暴天气过程与贵州山区的高架雷暴天气过程在逆温层强度、中层垂直温度直减率等方面有一定的差异。

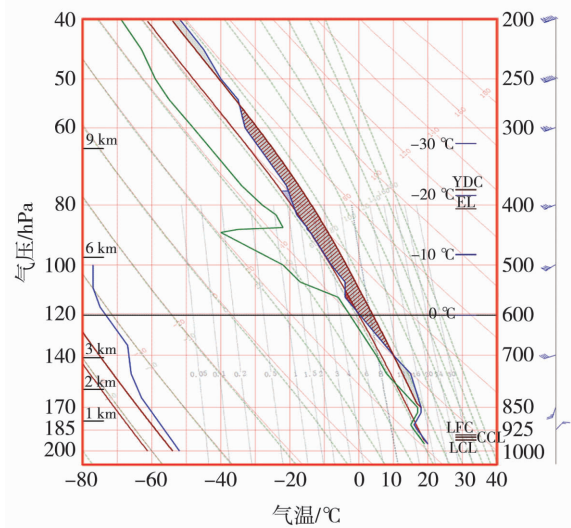


图4 2016年4月15日20:00湖南怀化站探空图

Fig. 4 T - lnP diagram at Huaihua radiosonde station of Hu'nan Province at 20:00 BST on 15 April 2016

### 2.3 强垂直风切变

垂直风切变是冰雹形成和维持的一个重要条件。从图 4 可知,冰雹发生前,925 hPa 为 6 m·s<sup>-1</sup> 的弱东北风,850 hPa 转为 10 m·s<sup>-1</sup> 的偏南风,到

700 hPa 则转为  $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的西南风,400 hPa 风速达  $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。可见,地面至 6 km 高度范围的垂直风切变非常大。从图 5 垂直风切变分布看出,冰雹发生前地面至 400 hPa 的垂直风切变较强,铜仁地区的垂直风切变大于  $9 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ,其南部最大达  $11 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ,远大于陈关清等<sup>[26]</sup>得出的“铜仁区域冰雹发生前垂直风切变在  $4 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  以上”结论,而与农孟松等<sup>[19]</sup>的“华南高架雷暴降雹时垂直风切变较强”结论一致。由此可见,强垂直风切变是本次铜仁地区大范围降雹的重要因素,利于雹暴系统发展加强,且高架雷暴降雹过程的垂直风切变比贵州山区一般地面发展雷暴降雹过程大得多。

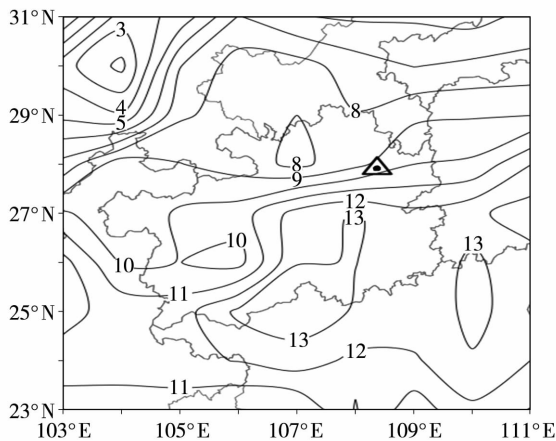


图 5 2016 年 4 月 15 日 20:00 铜仁地区垂直风切变分布(单位:  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ )

Fig. 5 The distribution of vertical wind shear in Tongren of Guizhou Province at 20:00 BST on 15 April 2016 (Unit:  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ )

### 3 降雹物理条件分析

#### 3.1 抬升触发条件

4 月 15 日 20:39,强对流在铜仁市西部开始发展。强对流发生时(图 6),降雹区域( $27^\circ\text{N}$  附近)上空垂直速度很大,有 2 个大值中心(图 6 中矩形框内),分别位于 800 hPa 和 450 hPa 附近,对应的中心值均达到  $-20 \times 10^{-1} \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ 。前者产生的原因是低空 850 hPa 切变线的辐合和边界层冷垫抬升,二者共同作用在边界层顶触发了强对流天气产生;后者产生的原因是“上干下湿”的不稳定层结激发了对流运动和中层槽前引起的系统性上升运动,二者共同作用导致中层产生较强的上升运动。另外,  $28^\circ\text{N}$  附近低层 900 hPa 左右为  $-20 \times 10^{-1} \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$  的冷空气下沉运动中心,该中心与  $27^\circ\text{N}$  附近上空 800 hPa 附近的上升运动中心构成正环流圈。 $26^\circ\text{N}$

附近上空为副热带高压(以下简称副高)边缘大范围的下沉运动区,该下沉气流与  $27^\circ\text{N}$  附近的上升运动区构成反环流圈。综上所述,低空 850 hPa 切变线的辐合作用和边界层冷空气抬升作用共同触发了此次强对流天气,上升运动在边界层与冷空气下沉运动构成了正环流圈、与副高边缘下沉气流构成了反环流圈,正、反环流圈加强了上升运动,使得对流风暴维持较长时间,有利于大范围降雹。

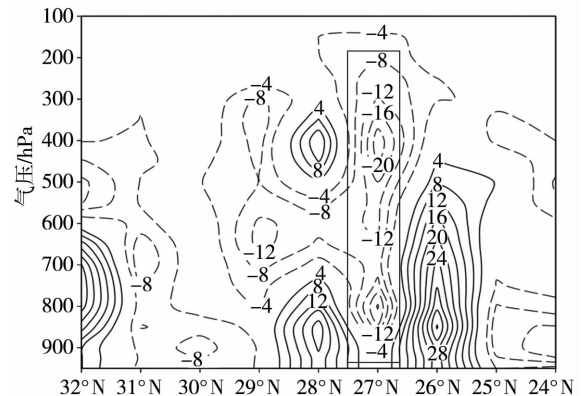


图 6 2016 年 4 月 15 日 20:00 沿  $108^\circ\text{E}$  做垂直速度的经度—高度剖面(单位:  $10^{-1} \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ )

Fig. 6 Vertical section of vertical velocity along  $108^\circ\text{E}$  at 20:00 BST on 15 April 2016 (Unit:  $10^{-1} \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ )

#### 3.2 热力不稳定条件

不稳定层结是强对流天气发生的必要条件之一。朱乾根等<sup>[27]</sup>指出对流有效位能(CAPE)、SI 指数及 K 指数等能够反映测站上空的不稳定层结状况,这些指数常被应用于实际业务中。从表 1 湖南省怀化探空站热力不稳定指数可知,强对流发生前, K 指数持续增加,20:00 达  $38^\circ\text{C}$ ,有利于成片雷暴的产生<sup>[28]</sup>;SI 指数较小且逐渐减小,20:00 降为  $-4.31^\circ\text{C}$ ,有发生强雷暴的可能;08:00,怀化对流气温  $T_c$  为  $18.0^\circ\text{C}$ ,较白天铜仁降雹区域的最高气温  $24^\circ\text{C}$  偏低  $6^\circ\text{C}$ ,有利于午后局地对流云的发展<sup>[29-30]</sup>。 $0^\circ\text{C}$  层和  $-20^\circ\text{C}$  层高度是业务工作中识别冰雹云特征的重要参数<sup>[31]</sup>,一般  $0^\circ\text{C}$  层高度在 600 hPa 上下,  $-20^\circ\text{C}$  层高度在 400 hPa 左右时,利于冰雹生成。廖晓农等<sup>[32]</sup>指出,当  $0^\circ\text{C}$  层与  $-20^\circ\text{C}$  层之间的厚度较小时,说明对流层中层不稳定,更利于冰雹形成。从表 1 可知,强对流发生前,  $0^\circ\text{C}$  层高度由 08:00 的 4 262.5 m 升至 20:00 的 4 580.0 m,说明低层暖层变厚,大气稳定度降低;而  $-20^\circ\text{C}$  层高度由 08:00 的 7 791.5 m 降至 20:00 的 7 628.6 m,说明高层冷层加深。可见,  $0^\circ\text{C}$  层与  $-20^\circ\text{C}$  层间的厚度变小,中层不稳定增强,有利于冰雹形成。

表1 2016年4月15日08:00和20:00湖南怀化探空站的各项热力不稳定指数值

Tab.1 The values of thermal instability indexes at Huaihua radiosonde station of Hu'nan Province at 08:00 BST and 20:00 BST on 15 April 2016

时间	K/°C	SI/°C	T <sub>c</sub> /°C	0 °C层高度/m	-20 °C层高度/m
08:00	35	-1.09	18.0	4 262.5	7 791.5
20:00	38	-4.31	20.6	4 580.0	7 628.6

## 4 雷达回波分析

### 4.1 高架对流回波特征

4月15日20:24,贵州遵义市凤冈县境内有回波发展加强且东移进入铜仁市西部思南县境内,回波呈团状,中心值50 dBZ以上(图略);团状回波继续东移发展加强,且有新的对流单体在其西北侧生成,至20:39,发展为3个侧向排列的强回波(图7a),中心值达55 dBZ以上。对应的强回波中心剖面(图7b)显示,3块强回波依次排列,悬浮在4 km高度之上,后侧的强回波质心较高且发展最强,有界弱回波区特征明显,前侧的回波质心逐渐降

低,且不断有新单体生成,形成有组织的多单体风暴。20:55(图7c),强回波经过印江县,50 dBZ以上的强回波顶高度延伸至8 km以上,超过了-20 °C层,而强回波底高度在2 km左右;55 dBZ以上的强回波质心在6 km左右,对流回波柱密实深厚,具有高架对流的特征。

为了与一般地面发展雷暴降雹过程对比,选取了2016年4月2日贵州铜仁地区一次锋前大范围降雹天气过程的雷达回波(图7d),发现触发于近地面的雷暴质心在4 km左右,且50 dBZ以上的强回波从地面一直延伸至高空,而此次高架雷暴50 dBZ以上的强回波悬于空中,且质心明显偏高。

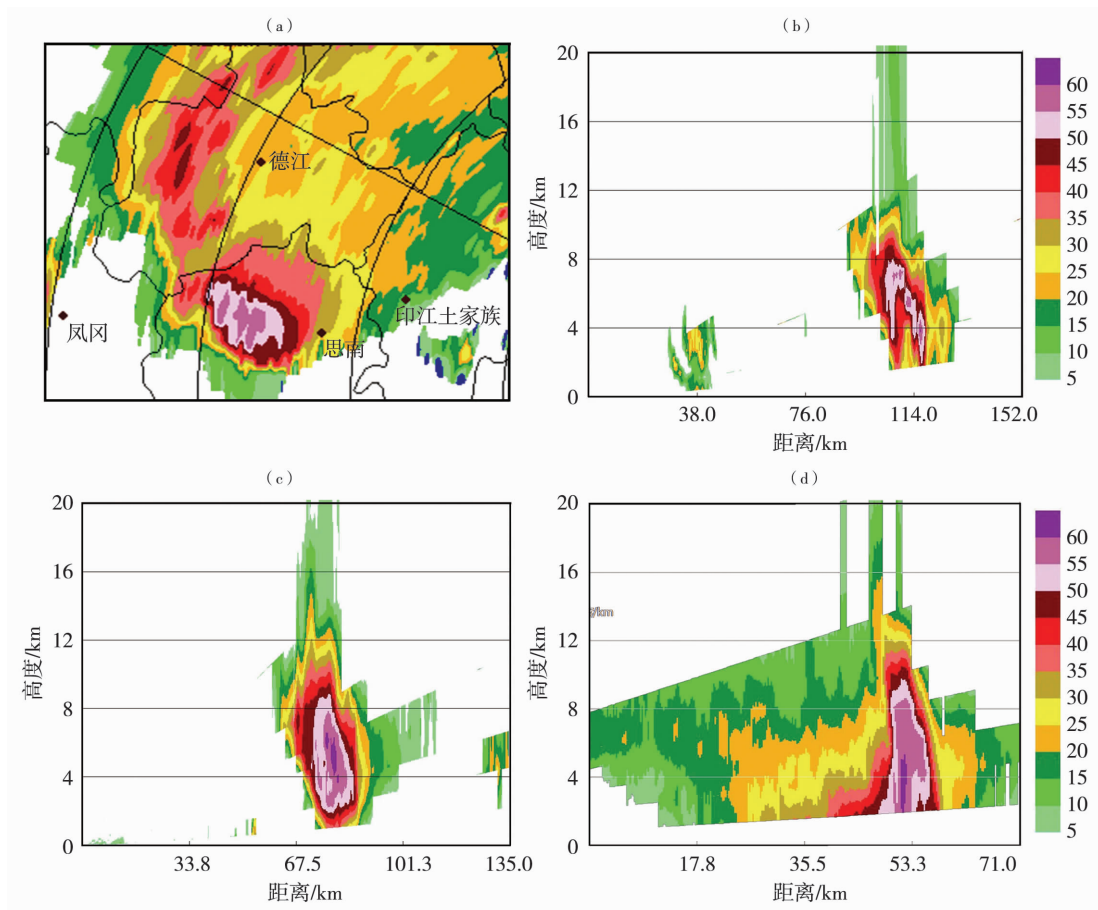


图7 2016年4月15日20:39(a,b)和20:55(c)和4月2日20:55(d)铜仁站雷达组合反射率因子(a)及强回波中心剖面(b,c,d)(单位:dBZ)

Fig.7 The composite reflectivity factor at 20:39 BST on 15 April (a) and the section of strong echo center at 20:39 BST (b), 20:55 BST (c) on 15 April and 20:55 BST on 2 April (d), 2016 in Tongren station of Guizhou Province (Unit: dBZ)

#### 4.2 降雹区 VIL 及强回波高度特征

表 2 为各乡镇(从西向东按冰雹先后影响时间排列)降雹区域的垂直累积液态水含量(VIL)及对应的 50 dBZ 以上强回波顶高及底高。由表 2 可知,4 月 15 日铜仁地区高架雷暴降雹过程中,降雹区的 VIL 普遍在  $30 \sim 45 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  之间,最大郎溪镇降雹区可达  $56.8 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ;各乡镇降雹区 50 dBZ 以上强回波顶高普遍在 8 km 以上,张家界乡镇降雹区最大为 9.1 km,而强回波底高普遍在 3.5 km 以下。4 月 2 日铜仁一般地面发展雷暴降雹区的 VIL 普遍大于  $38 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ,聚凤乡降雹区最大,达  $66.8 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ;各乡镇降雹区 50 dBZ 以上强回波顶高普遍大于 8 km,

表 2 2016 年 4 月 2 日、15 日铜仁区域降雹点的 VIL 及 50 dBZ 以上强回波顶高和底高  
Tab. 2 VIL and top height, bottom height of strong echo with more than 50 dBZ in hailfall points of Tongren on 2 and 15 April 2016

时间	降雹点	VIL/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$	50 dBZ 以上回波 顶高/km	50 dBZ 以上回波 底高/km
15 日	复兴	30.3	8.1	3.8
	亭子坝	28.2	8.2	3.4
	宽坪	33.8	8.5	3.5
	东华	34.2	8.4	3.4
	张家寨	31.2	9.1	3.0
	鹦鹉溪	46.5	8.7	2.8
	凉水井	40.1	8.5	2.4
	朗溪	56.8	9.2	2.5
	合水	30.5	8.0	2.3
	印江	44.8	9.0	1.8
	天堂	29.5	8.1	3.2
	桃花源	51.7	8.9	1.4
	河坝场	64.7	8.2	
	聚凤	66.8	9.1	
	白沙	49.1	9.8	
2 日	国荣	44.1	9.7	
	石固	44.1	8.5	
	大坝场	38.4	8.1	
	官和	44.1	8.7	
	铜仁城区	42.5	9.1	
	铜仁机场	45.2	8.7	

白沙乡镇降雹区最大为 9.8 km。这些指标对短临预报预警及人影防雹作业具有一定指导意义。对比发现,一般雷暴降雹天气强回波发展的高度值和 VIL 值整体比高架雷暴降雹天气大。可能原因是一般雷暴降雹 CAPE 值较大,如 4 月 2 日大范围冰雹过程的 CAPE 值达  $1382 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,而本次高架雷暴降雹过程订正后的 CAPE 值仅为  $932 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,因而对流云顶高度差异较大;VIL 是假定垂直气柱中所有反射率因子由液态水形成,对气柱内含水量求积分而得,由于高架对流回波悬于空中,VIL 值相对较小。另外,这种差异与贵州山区复杂地形也有很大关系,这是今后值得探讨的问题。

## 5 结 论

(1) 此次大范围冰雹过程是发生在高空槽、低层切变线和低空急流共同作用背景下,地面冷空气迫使暖空气沿“冷垫”爬升,与低空 850 hPa 切变线共同作用在边界层顶(逆温层顶)触发了强对流,冰雹产生在地面冷垫北侧、850 hPa 切变线附近。

(2) 中高层干冷空气侵入与低层西南暖湿气流交汇导致层结不稳定,“上干下湿”的层结是冰雹产生的有利环境。

(3) 此次过程降雹前, $K$  指数达  $38 \text{ }^\circ\text{C}$ 、SI 指数为  $-4.31 \text{ }^\circ\text{C}$ ,大气层结很不稳定; $0 \text{ }^\circ\text{C}$  层高度由 4 262.5 m(08:00)升至 4 580 m(20:00),而  $-20 \text{ }^\circ\text{C}$  层高度由 7 791.5 m(08:00)降至 7 628.6 m(20:00),两层间的厚度变小,中层不稳定增强;垂直风切变较大,达  $9 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  以上,这些均有利于强对流的发展加强。

(4) 多单体风暴使得强对流维持时间较长,强回波质心较高且密实而深厚,有利于冰雹的形成和发展,具有高架雷暴的特征;有界弱回波区及回波悬垂现象一定程度上表征了冰雹的发生;降雹区的 VIL 在  $30 \sim 45 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  之间,且 50 dBZ 以上的强回波顶高达 8 km 以上,强回波底高在 3.5 km 以下。对于贵州山区,在相似的环流背景下,春季当有东北方向冷空气回流时,预报场上若出现“上干下湿”的湿度层结,且 08:00 垂直风切变较大,尽管 CAPE 值较小,仍需关注有出现高架雷暴降雹天气的可能。

### 参考文献

- [1] 彭治班,刘健文,郭虎. 国外强对流天气的应用研究[M]. 北京:气象出版社,2001.
- [2] COLMAN B R. Thunderstorms above frontal surfaces in environments without positive CAPE. Part I: A climatology[J]. Monthly Weather Review, 1990,118(5):1103-1122.

- [3] COLMAN B R. Thunderstorms above frontal surfaces in environments without positive CAPE. Part II: Organization and instability mechanisms[J]. Monthly Weather Review, 1990, 118(5): 1123 - 1144.
- [4] GRANT B N, PRENTICE R. Elevated cold - sector severe thunderstorms: A preliminary study[J]. Natl Wea Dig, 1995, 19(4): 25 - 31.
- [5] 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.
- [6] 姚日升, 涂小萍, 杜坤. 两次冰雹过程边界层气象要素变化特征[J]. 高原气象, 2015, 34(6): 1677 - 1689.
- [7] 刘一玮, 寿绍文, 解以扬, 等. 热力不均匀场对一次冰雹天气影响的诊断分析[J]. 高原气象, 2011, 30(1): 226 - 234.
- [8] 陈军, 李小兰, 喻义军, 等. 贵州铜仁地区一次罕见大范围冰雹过程分析[J]. 干旱气象, 2016, 34(6): 1047 - 1053.
- [9] 郑艳, 李云艳, 蔡亲波, 等. 海南一次罕见强冰雹过程环境条件与超级单体演变特征分析[J]. 暴雨灾害, 2014, 33(2): 163 - 170.
- [10] 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.
- [11] 黄治勇, 周志敏, 徐桂荣, 等. 风廓线雷达和地基微波辐射计在冰雹天气监测中的应用[J]. 高原气象, 2015, 34(1): 269 - 278.
- [12] 黄艳, 裴江文. 2012年新疆喀什一次罕见冰雹天气的中尺度特征[J]. 干旱气象, 2014, 32(6): 989 - 995.
- [13] 陈关清, 方标. 贵州铜仁暴雨和冰雹雷达回波特征对比分析[J]. 气象研究与应用, 2015, 36(1): 72 - 75.
- [14] 俞小鼎. 关于冰雹的融化层高度[J]. 气象, 2014, 40(6): 649 - 654.
- [15] 濮文耀, 李红斌, 宋煜, 等. 0℃层高度的变化对冰雹融化影响的分析和应用[J]. 气象, 2015, 41(8): 980 - 985.
- [16] 许爱华, 陈云辉, 陈涛, 等. 锋面北侧冷气团中连续降雹环境场特征及成因[J]. 应用气象学报, 2013, 24(2): 197 - 206.
- [17] 盛杰, 毛冬艳, 沈新勇, 等. 我国春季冷锋后的高架雷暴特征分析[J]. 气象, 2014, 40(9): 1058 - 1065.
- [18] 鲍媛媛, 康志明, 李伦. 2009年早春南方地区一次高架雷暴天气过程的机理分析[J]. 高原气象, 2015, 34(2): 515 - 525.
- [19] 农孟松, 赖珍权, 梁俊聪, 等. 2012年早春广西高架雷暴冰雹天气过程分析[J]. 气象, 2013, 39(7): 874 - 882.
- [20] 吴乃庚, 林良勋, 冯业荣, 等. 2012年初春华南“高架雷暴”天气过程成因分析[J]. 气象, 2013, 39(4): 410 - 417.
- [21] 于玉斌, 姚秀萍. 干侵入的研究及其应用进展[J]. 气象学报, 2003, 61(6): 769 - 778.
- [22] 陶祖钰, 周小刚, 郑永光. 从涡度、位涡、到平流层干侵入——位涡问题的缘起、应用及其歧途[J]. 气象, 2012, 38(1): 28 - 40.
- [23] 汤鹏宇, 何宏让, 阳向荣, 等. 北京“7.21”特大暴雨中的干侵入分析研究[J]. 高原气象, 2015, 34(1): 210 - 219.
- [24] 姚秀萍, 吴国雄, 赵兵科, 等. 与梅雨锋上低涡降水相伴的干侵入研究[J]. 中国科学(D辑), 2007, 37(3): 417 - 427.
- [25] 刘会荣, 李崇银. 干侵入对济南“7.18”暴雨的作用[J]. 大气科学, 2010, 34(2): 374 - 386.
- [26] 陈关清, 杨群, 李伟栋, 等. 贵州铜仁连续两次冰雹天气过程的对比分析[J]. 干旱气象, 2016, 34(1): 163 - 172.
- [27] 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, 2000: 436 - 460.
- [28] 刘健文, 郭虎, 李耀东, 等. 天气分析预报物理量计算基础[M]. 北京: 气象出版社, 2005: 216 - 217.
- [29] 李耀东, 刘健文, 吴洪星, 等. 对流温度含义阐释及部分示意图隐含悖论成因分析与预报应用[J]. 气象学报, 2014, 72(3): 628 - 637.
- [30] 束宇, 姜有山, 张志刚. 对流温度在局地热对流降水预报中的应用[J]. 气象, 2015, 41(1): 52 - 58.
- [31] 雷雨训, 吴宝俊, 吴正华. 冰雹概论[M]. 北京: 科学出版社, 1978.
- [32] 廖晓农, 俞小鼎, 于波. 北京盛夏一次罕见的大雹事件分析[J]. 气象, 2008, 34(2): 10 - 17.

## Analysis on a Large – range Elevated Thunderstorm Hail Weather Process in Tongren of Guizhou

CHEN Jun<sup>1</sup>, LI Xiaolan<sup>2</sup>, YU Yijun<sup>3</sup>, FANG Biao<sup>1</sup>, TENG Lin<sup>4</sup>, HU Ping<sup>1</sup>

- (1. *Tongren Meteorological Bureau of Guizhou Province, Tongren 554300, China;*
2. *Yuping Meteorological Station of Guizhou Province, Yuping 554000, China;*
3. *Yinjiang Meteorological Station of Guizhou Province, Yinjiang 555200, China;*
4. *Jianhe Meteorological Station of Guizhou Province, Jianhe 556400, China)*

**Abstract:** Based on the conventional observation data, precipitation at automatic weather stations, composite reflectivity factor of Doppler radar in Tongren of Guizhou, sounding data in Huaihua radiosonde station of Hu'nan and NCEP reanalysis data with  $1^\circ \times 1^\circ$  spatial resolution, a large – range elevated thunderstorm hail weather process at night on 15 April 2016 occurring in Tongren of Guizhou Province was diagnosed and analyzed. Compared with a surface based thunderstorm hail process occurring in Tongren on 2 April 2016, the forecast indexes of hail were explored in Tongren of Guizhou. Results are as follows: (1) The instable stratification with dry air in upper layer and warm air in lower layer and stronger vertical wind shear were beneficial to occurrence of the hail weather process. (2) The intrusion of continuous surface cold and dry air compelled the climbing of warm and humid air along cold pad, and the convergence of shear line on 850 hPa generated the ascending motion at the boundary layer top, which jointly acted on the boundary layer to trigger strong convection. The characteristics of elevated thunderstorm were obvious. The hail occurred in the north of cold pad and near shear line on 850 hPa. (3) Multi – cell storms maintained for a long time in Tongren of Guizhou, the strong echo column was dense and deep, and it hanged in sky with high centroid at 6 km height, which was conducive to the formation and development of hail. (4) During the hailfall of the elevated thunderstorm, VIL in hail area mainly ranged from 30 to 45  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ , the top and bottom heights of strong echo with more than 50 dBZ were 8 km above and 3.5 km below, respectively. The values of the first two quantities were smaller than those of the surface based thunderstorm hail process on the whole.

**Key words:** elevated thunderstorm; hail; dry intrusion; cold pad; vertical wind shear; VIL

=====

(上接第 633 页)

## Spatial – temporal Characteristics and Influence Factors of Total Cloud Cover in Qinghai Province During 1961 – 2015

ZHANG Xiaojun, MA Xueqian, TIAN Jianbing

(*Weather Modification Office, Qinghai Meteorological Bureau, Xi'ning 810001, China*)

**Abstract:** Based on the observation data of 46 meteorological stations in Qinghai during 1961 – 2015, the spatial – temporal characteristics and influence factors of total cloud cover were analyzed by using the empirical orthogonal function (EOF) and Mann – Kendall test. The results show that the maximum total cloud cover was 64%, the minimum was 48%, and the average was 57% in Qinghai. The total cloud cover showed a decreasing trend with the average rate of  $-0.006\% \text{ a}^{-1}$ , and the maximum was  $-0.187\% \text{ a}^{-1}$ , which passed the significant level of 0.05. The abrupt change of the total cloud cover occurred in 1979. From EOF analysis of total cloud cover anomaly, the variance contribution rate of the first pattern reached 49.97%, which presented the consistency change feature of total cloud cover in Qinghai, while the second pattern showed an opposite change of total cloud cover for the northern and southern parts of Qinghai, and the third pattern corresponded well with the complex landforms of Qinghai Province, which was influenced by the large mountains. The correlation coefficients were calculated between time coefficients of the first three patterns from EOF of total cloud cover anomaly and meteorological factors. The time coefficient of the first pattern was negatively correlated with temperature and sunshine hours, but positively correlated with relative humidity, precipitation and evaporation. The time coefficient of the second pattern was closely and negatively related to temperature, and positively related to humidity, sunshine hours and evaporation.

**Key words:** total cloud cover; distribution characteristics; climate indices; meteorological factors