

周泓,段玮,赵爽,等. 2014. 滇中地区冰雹的多普勒天气雷达及闪电活动特征分析. 气象, 40(9):1132-1144.

滇中地区冰雹的多普勒天气雷达 及闪电活动特征分析^{*}

周 泓¹ 段 玮² 赵 爽³ 王 宝¹

1 云南省玉溪市气象局, 玉溪 653100
2 云南省气象科学研究所, 昆明 650034
3 云南省大理州气象局, 大理 617200

提 要: 利用雷达数据和云南省闪电定位系统数据,对滇中地区 2006—2011 年 6 次典型降雹过程中的雷达回波和闪电特征进行综合分析,结果表明:滇中冰雹回波的基本反射率因子具有典型的冰雹回波特征,如弓形回波、三体散射、旁瓣回波、有界(无界)弱回波区、“V”型槽口以及钩状回波等。地面降雹区基本出现在雹暴反射率因子强度梯度较大的区域,也就是负地闪密集活跃区或者临近区域。闪电密集区的移动可作为预测冰雹回波移动路径的一个指标。降雹时段是负地闪的活跃期,正地闪出现频率极少,这与我国北方地区冰雹出现时高正地闪频数特征存在明显不同。负地闪每 5 min 频数峰值的出现时间略超前地面降雹时间 5~12 min,可作为滇中出现冰雹的一个参考指标。闪电频数的时空分布和变化特征,对于滇中地区冰雹天气的监测、临近预警以及防雹作业指挥有一定的参考作用。

关键词: 滇中地区, 冰雹, 多普勒雷达, 回波特征, 闪电活动特征

中图分类号: P412 **文献标志码:** A **doi:** 10. 7519/j. issn. 1000-0526. 2014. 09. 011

Characteristics Analysis of Doppler Radar Echoes and Lightning of Hailstorms in Central Yunnan Province

ZHOU Hong¹ DUAN Wei² ZHAO Shuang³ WANG Bao¹

1 Yuxi Meteorological Office of Yunnan Province, Yuxi 653100
2 Yunnan Meteorological Institute, Kunming 650034
3 Dali Meteorological Office of Yunnan Province, Dali 617200

Abstract: Using the data collected from Doppler radar and lightning detection network in Yunnan Province, the characteristics of radar echo and cloud-to-ground (CG) lightning in six typical hail processes are analyzed comprehensively in Central Yunnan Province from 2006 to 2011. The results show that there are typical characteristics of hailstone echoes in basic reflectivity radar images, such as bow echo, TBSS, side lobe echo, WBER (BER), V-shaped notch, hook echo, etc. Hail area always appears in the places where basic reflectivity gradients are high, and the negative CG lightnings are dense and active as well. The movement of the concentrated CG lightning area can be the index indicating the moving of hailstone echoes. The hailing periods are the active phase of negative CG lightning, during which the appearance of positive CG lightning is seldom seen. This is significantly different from the hailing with the high positive CG lightning frequency feature in northern area of China. The peaks of 5 min negative CG lightning occur 5—12 min earlier than hailstone falling, which can be regarded as a reference index of predicting hailing in cen-

^{*} 国家自然科学基金项目(41205067)、云南省应用基础研究专项(2010CD138)和云南省气象局预报员专项项目(YB201207)和云南省科技惠民计划(2014RA002)共同资助
2013 年 8 月 6 日收稿; 2014 年 6 月 6 日收修定稿
第一作者:周泓,主要从事中短期天气预报及其研究. Email:zhoudog513@163.com

tral Yunnan Province. The spatio-temporal distribution and changing of negative CG lightning frequency could play some reference roles in monitoring and warning hails and commanding hail operations in Central Yunnan Province.

Key words: Central Yunnan Province, hail, Doppler radar, echo characteristics, lightning characteristics

引言

冰雹云既存在强盛的上升气流,又有冰相粒子参与的复杂的微物理过程,因此冰雹云中的起电过程非常剧烈,放电现象也非常活跃。近年来,闪电作为强对流过程的“指示器”已被用于识别发展中的对流云。Reap等(1989)发现出现大冰雹的可能性随着正地闪次数的增加而加大,随后的研究(MacGorman et al, 1994; Stolzenburg, 1994; 陈哲彰, 1995; 李永果等, 2008)也发现以正地闪为主的雷暴常常在正地闪发生阶段出现大冰雹。Williams等(1999)发现最高闪电频数出现在灾害性天气到达地面之间的0~20 min。Wiens等(2005)对2000年发生在堪萨斯州西部的一次龙卷风暴的研究也表明大量正地闪的出现预示着风暴中剧烈上升运动,更能促进大冰雹的生成。国内气象工作者近年来也对我国冰雹天气做了大量的研究。例如段鹤等(2011)、李德俊等(2011)、王秀玲等(2012)总结和归纳了各地降雹过程中的雷达特征。周筠君等(1999)、支树林等(2009)、蒋大凯等(2010)、冯桂力等(2001; 2010)、张一平等(2010)、Yao等(2013)、张信华等(2011)、慕建利等(2012)、尹丽云等(2010)分析了我国各地多个冰雹个例中的闪电活动特征,这些研究都帮助我们加深了对强对流天气发生时闪电活动特征的认识,但正如Williams(2001)所指出的个例分析表明该关系具有一定的可变性,因为不同的地理位置、气象条件、海拔高度等都可能引起雷暴放电特征的差异。云南省地处低纬高原中部,具有特殊的地形地貌和地理位置,是我国强对流天气频发区域,其中冰雹就是最常见的强对流天气灾害之一(秦剑等, 2000)。云南中部包括昆明市、玉溪市、楚雄市,属于云南经济文化中心,具有重要的经济战略意义。近年来经济和城市的日益发展,突发性强对流灾害天气所造成的损失也与日俱增,因此,加深冰雹灾害发生规律的认识,做好对流性天气的预报预警对于防灾减灾、保障国民经济建设是一件十分重要而紧迫的任务。以往针对云南省的冰雹与闪电的研究多集中在冰雹个例的分析,系统而定量的研

究并不多见,本文通过对滇中地区几个典型降雹过程的雷达回波演变和闪电活动特征进行统计分析,试图找出滇中地区冰雹云闪电活动特点,为今后利用闪电资料作出滇中冰雹的短临预报和人工防雹作业指挥打下基础。

1 资料

由于冰雹天气的局地性、突发性和短时性,很难由气象站观测到完备的冰雹资料,因此根据气象、民政等部门调查的冰雹灾情资料收集而来的数据,较之气象站地面观测资料更为完整。本文选取发生在滇中地区2006—2011年的6次典型降雹过程,运用多普勒天气雷达数据和闪电定位仪数据分析滇中地区冰雹天气的雷达回波演变和闪电特征。

昆明棋盘山多普勒天气雷达站,海拔2515 m,为CINRAD/CC多普勒天气雷达,最大可测速度为 $24.86 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,最大可测距离为150 km,其所探测范围基本覆盖滇中地区。云南省闪电定位系统是由分布在云南全省的22个ADTD闪电定位仪及闪电定位中心站组成,通过多个探测子站采用双曲时差技术为主、辅以磁方向定位算法、定向时差的混合交汇算法对每次回击过程的时间、强度、位置、极性、陡度进行监测和定位。每个单站的探测半径为150 km,闪电定位网能实现滇中地区探测精度400 m,探测效率90%~95%的理论值分布。

2 冰雹天气过程综述

2.1 冰雹灾害情况

表1列出了2006—2011年发生在滇中地区6次典型降雹过程的概况,发生时间均在午后至晚上,降雹时间最短10 min,最长70 min,冰雹直径最小5 mm左右,最大达到35 mm,给人民生命财产造成了严重损害。

2.2 冰雹天气的天气形势特征

据《云南省天气预报员手册》统计,云南省冰雹

表 1 滇中地区 2006—2011 年 6 次典型降雹过程概况

Table1 Survey of six typical hail processes in the Central Yunnan during 2006—2011

个例	日期	降雹时间	降雹地点	冰雹直径	受灾情况
1	2006 年 7 月 16 日	17:08—17:30	昆明安宁市	最大直径为 15 mm	房屋倒塌 2 间,农作物受灾 838.8 hm ² ,绝收 18.7 hm ²
2	2007 年 6 月 4 日	15:37—15:58	楚雄元谋县	最大直径为 20 mm	农作物受灾 195.8 hm ²
3	2008 年 7 月 23 日	14:15—14:25	玉溪红塔区	最大直径约为 15 mm	农作物受灾 103.33 hm ² ,绝收 53.33 hm ²
4	2009 年 4 月 7 日	21:20—21:40	玉溪澄江县	直径在 10~35 mm 不等	157 间居民住房和 210 间烤烟苗棚被损坏,农作物受灾 746.2 hm ²
5	2010 年 7 月 31 日	20:30—21:40	楚雄禄丰县	最大直径约为 20 mm	农作物受灾 1689.19 hm ² ,绝收 90.7 hm ²
6	2011 年 8 月 31 日	16:56—17:10	昆明晋宁县	直径大约 5 mm 左右	农作物受灾 384.13 hm ² ,绝收 130.4 hm ² ,365 间民房被损,1 人受伤

天气主要影响系统有:南支槽型、西北气流型、低压槽型和热带低压型(许美玲等,2011)。翻查该 6 次过程的历史天气图,确定 6 次天气过程分别为:2006 年 7 月 16 日为台风碧利斯外围偏东气流影响;2007 年 6 月 4 日为南支槽影响;2008 年 7 月 23 日和 2009 年 4 月 7 日为西北气流影响;2010 年 7 月 31 日为辐合区及切变线共同影响;2011 年 8 月 31 日为热带低压外围气流和赤道辐合带共同影响。这 6 次过程为云南省典型的降雹天气过程。

3 冰雹个例雷达回波及地闪特征

3.1 个例 1

2006 年 7 月 16 日冰雹天气过程的环流背景为台风外围气流影响,根据雷达基本反射率图追溯影响安宁的雹暴,其发源于昆明晋宁县西南部,生成时间大约为 7 月 16 日 16:01,单体初生强度并不强,最高基本反射率因子强度为 38 dBz,此时并无地闪活动出现,单体顺偏东气流缓慢向西移动,16:07 出现第一个负地闪,随后负地闪缓慢增加,至 16:34 对流回波向西移动了 7 km,接近安宁县边界,基本反射率因子强中心接近 50 dBz,同时回波形状出现前侧“V”型槽口以及 WBER,冰雹回波特征已经出现,从地闪分布来看,负地闪密集出现于回波西侧,回波有随负地闪密集区移动的趋势,16:30 出现第一个正地闪,正地闪位于强回波下风方向的弱回波区。回波在移动过程中呈继续加强趋势,17:02 进入安宁县(图 1a),出现了明显地钩状、旁瓣回波以及 WBER 特征(图 1b和 1c),最强基本反射率因子达

到 57.9 dBz,从17:00—17:10 的 10 min 地闪分布叠加图(图 1a)上可以看出负地闪出现爆发式增加,密集区位于强反射率因子区域,成块状分布,但强基本反射率因子中心与负地闪密集区并未安全重合。17:08 强反射率因子梯度较大处开始地面降雹,17:35 回波仍具有明显冰雹回波特征(图 2b 和 2c),负地闪密集区西移至安宁县和易门县交界处,由 10 min 地闪频数分布可以看出,负地闪频数略有减少,并出现分散趋势(图 2a)。17:57 雹暴已经移出安宁地区,进入玉溪易门县,但是负地闪的密集区仍位于安宁县和易门县的交界处,仍为基本反射率因子梯度较大的地方。

虽然闪电密集区位于雷达反射率因子强度较大的区域附近,但是闪电密集区并未与强回波中心重叠,反射率因子强度梯度较大的区域是固态粒子(冰晶、雹粒)和过冷水滴大量集聚的区域,固态粒子之间的碰撞感应起电、冰晶与雹碰撞摩擦的温差起电、较大过冷水滴与雹粒碰冻释放潜热产生冰屑温差起电都使得该区域形成明显闪电源区;雹暴随闪电密集区移动的原因主要是雹暴前侧为反射率因子强度梯度大的区域,风暴移动方向通常受低层环境风场影响较大,在低层环境风较强的情况下,雹暴将会顺着环境风方向移动,因此将出现负地闪密集区位于风暴移动路径前侧的现象。

以往的分析往往是统计强对流天气发生区域内很大范围内的闪电数据,而实际情况是降雹只发生在某个小区域,因此分析结果往往与实际情况存在一定程度的误差。为避免这种不足,以降雹中心为参考点,统计其周围半径 50 km 区域内的闪电数据,另外考虑降雹时间通常很短,多发生在 20 min

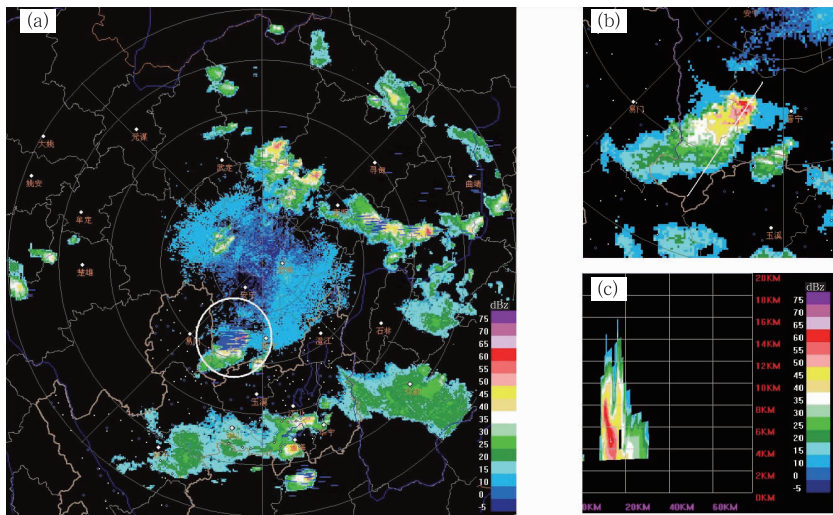


图 1 2006 年 7 月 16 日 17:02 昆明雷达反射率(1.5°仰角)与 2006 年 7 月 16 日 17:00—17:10 地闪分布 (正闪为红色“+”,负闪为蓝色“-”)叠加图(a),雹暴放大图(b,3.4°仰角)以及沿白线的剖面图(c)

Fig. 1 Composition graph of reflectivity at Kunming Radar Station at 17:02 BT on 16 July 2006 (at 1.5° elevation) and spatial distribution of total CG lightning (positive CG lightning is red “+”, negative CG lightning is blue “-”) between 17:00—17:10 BT 16 July 2006 (a), image of hailstorm amplified (b, at 3.4° elevation) and profile image along white line (c)

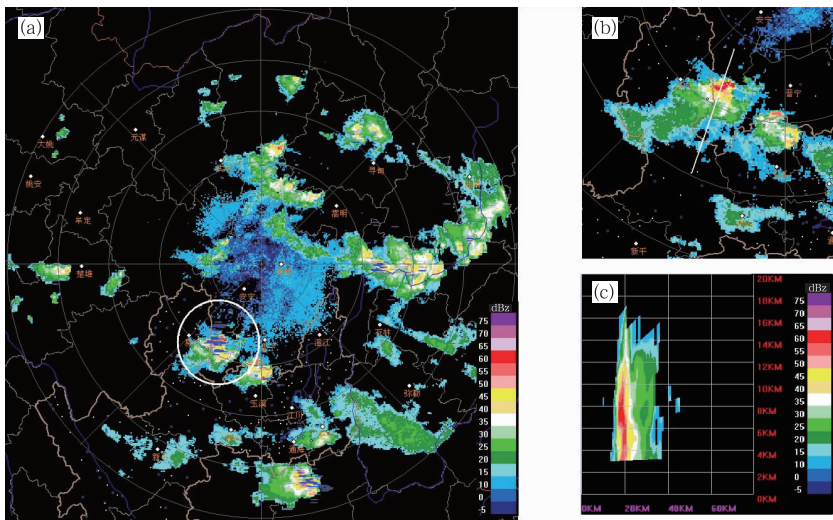


图 2 2006 年 7 月 16 日 17:35 昆明雷达基本反射率(1.5°仰角)与 2006 年 7 月 16 日 17:30—17:40 闪电分布 (正闪为红色“+”,负闪为蓝色“-”)叠加图(a),雹暴放大图(b,3.4°仰角)以及沿白线的剖面图(c)

Fig. 2 Composition graph of reflectivity at Kunming Radar Station at 17:35 BT on 16 July 2006 (at 1.5° elevation) and spatial distribution of total CG lightning (positive CG lightning is red “+”, negative CG lightning is blue “-”) between 17:30—17:40 BT 16 July 2006 (a), image of hailstorm amplified (b, at 3.4° elevation) and profile image along white line (c)

甚至10 min以内,因此选取5 min间隔的闪电频数来探讨地面降雹前后的闪电变化特征。从安宁降雹点周围 50 km 的 5 min 闪电频数时间分布图(图 3)上可以看到在 16:25—16:30 负地闪出现了一个小峰

值,16:35 后负地闪开始明显“跃增”,16:50—16:55 达到峰值 132 次·(5 min)⁻¹,在小幅下降之后再次增加,峰值较地面降雹时间提前了约12 min,地面降雹开始以后(17:08),负地闪频数急剧减少,由前一时

段的 125 次 · (5 min)⁻¹,减为 49 次 · (5 min)⁻¹,下一时段闪电活动又快速增强到 78 次 · (5 min)⁻¹,其后闪电活动虽有波动,但整体表现较为活跃,直至 19:00 以后负地闪才逐渐减弱。从正地闪出现时间来看,雹暴共产生了 9 次正地闪,均处于雹暴的成熟阶段,首次正地闪出现时间为 16:30,提前于地面降

雹时间,结合雷达基本反射率因子演变和地闪分布图来看,正地闪出现的位置有时出现在雹暴下风方的弱回波区中,有时出现在雹暴强反射率因子中心附近,与降雹地点并无明显对应关系,且与北方地区雹暴过程中正地闪比例平均为 57.39%存在明显不同(冯桂力等,2010)。

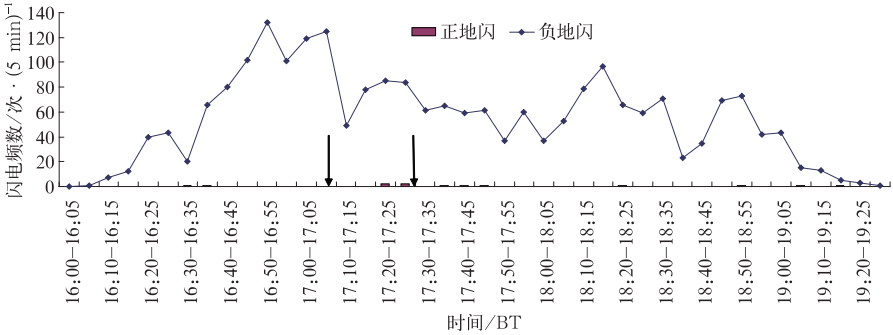


图 3 2006 年 7 月 16 日 16:00—19:25 安宁县降雹中心(24.664°N,102.373°E)周围 50 km 地闪频数变化(箭头区间为降雹时段)
Fig. 3 Changing of CG lightning frequency around hail shooting center (24.664°N,102.373°E) 50 km at Anning County Station from 16:00 to 19:25 BT 16 July 2006 (Arrow interval is hailing period)

3.2 个例 2

2007 年 6 月 4 日冰雹天气过程的环流背景为南支槽影响,雷达回波演变图显示对流回波自西南向东

北方移动过程中不断生消。6 月 4 日 15:14 元谋南部有对流单体初生(图略),单体初生强度最高基本反射率因子强度低于 30 dBz,此时元谋境内无地闪活动,15:25 对流单体基本反射率因子强度突增(图 4a和

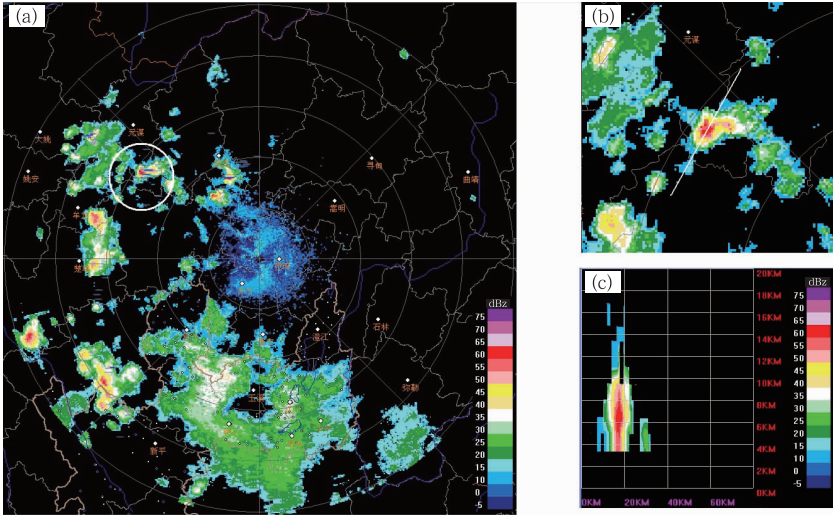


图 4 2007 年 6 月 4 日 15:25 昆明雷达基本反射率(1.5°仰角)与 2007 年 6 月 4 日 15:20—15:30 闪电分布(正闪为红色“+”,负闪为蓝色“-”)叠加图(a),雹暴放大图(b,2.4°仰角)以及沿白线的剖面图(c)
Fig. 4 Composition graph of reflectivity at Kunming Radar Station at 15:25 BT 4 June 2007 (at 1.5° elevation) and spatial distribution of total CG lightning (positive CG lightning is red “+”, negative CG lightning is blue “-”) between 15:20—15:30 BT 4 June 2007 (a), image of hailstorm amplified (b, at 2.4° elevation) and profile image along white line (c)

4b),最强基本反射率因子强度跃增达 48.7 dBz,出现高悬的强回波中心与三体散射特征(图 4b 和 4c),10 min(15:20—15:30)地闪频数分布叠加图显示(图 4a),元谋县南部开始出现负地闪;随后有多单体回波逐渐由西南方移入元谋县南部和西部,元谋县南部回波基本反射率因子强度加强,15:41 多单体回波最强反射率达到 57.9 dBz,具有明显 BER,此时元谋南部地闪逐渐活跃,但负地闪活动范围不太集中(图 5),从对流回波演变来看,15:41 后对流回波强度略有减弱,到 15:52 该回波与西南方移来的回波出现合并趋势,15:57 合并后回波强度增强(图 6),呈现弓形回波形状,负地闪不仅出现增加趋势,且密集程度较之前时刻明显增加,在负地闪密集区的下风方向还出现一次正地闪;之后回波在东移过程中强度逐渐减弱,弓形结构消失,地闪活动也趋于分散和减弱。

从元谋县降雹点周围 50 km 的 5 min 闪电频数时间分布图上(图 7)可以发现在 14:20—15:25 负地闪出现了一个小峰值,峰值过后 14:42 和 14:48 分别出现一次正地闪,对应雷达基本反射率图此时元谋县境内并无对流回波,14:50 之后负地闪频数维持 5~11 次·(5 min)⁻¹,负地闪活动并不活跃,15:00 元谋县有回波自西南方移入,回波强度均在 35 dBz 以下,15:14 在元谋境内生成的回波强度也

不强,负地闪维持不活跃状态,15:25—15:30 负地闪出现明显“跃增”,达到峰值 36 次·(5 min)⁻¹,峰值较地面降雹时间提前了约 7 min,地面降雹开始以后(15:37),闪电频数迅速减少为 8 次·(5 min)⁻¹,下一时刻闪电活动又开始活跃,呈现持续增强趋势,15:50—16:10 负地闪频数达到 57~62 次·(5 min)⁻¹,并在 15:50 出现 2 次正地闪,对照雷达基本反射率图发现其中一次正地闪出现在牟定县内的对流强回波体下风方的弱回波区中,而另一次正地闪出现在降雹回波北方的对流回波体强中心附近。在地面降雹结束之后(15:58),负地闪活跃期继续维持了约 10 min 后出现大幅下降,之后负地闪振荡减弱直至消失。为何负地闪频数峰值会出现超前地面降雹时间呢?大多数冰雹增长发生在一20~ -10℃,根据 Takahashi(1978)的试验结果,当云内过冷水含量较大时,该温度范围内雹和冰晶的碰撞通常使冰雹获得负电荷,由于雹暴内存在大量的雹粒子,因此十分有利于主要负电荷区的形成,为负地闪的产生提供了电荷源。当受到强上升气流的影响,降水粒子在落地之前将在高层停留一段时间,从而导致了地面降雹通常落后于负地闪频数峰值的发生。降雹后由于云内雹粒和冰相粒子出现突然减少或减少速度加剧,从而造成地闪频数出现突降。

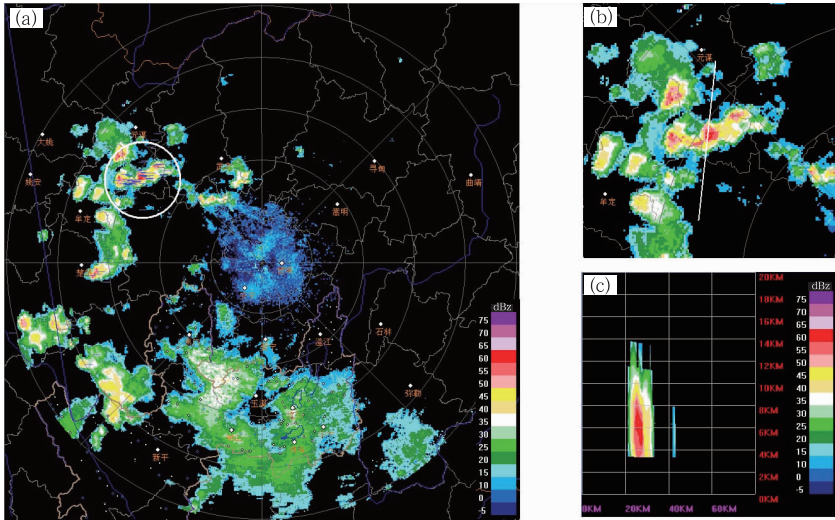


图 5 2007 年 6 月 4 日 15:41 昆明雷达基本反射率(1.5°仰角)与 2007 年 6 月 4 日 15:40—15:50 闪电分布(正闪为红色“+”,负闪为蓝色“-”)叠加图(a),雹暴放大图(b,2.4°仰角)以及沿白线的剖面图(c)

Fig. 5 Composition graph of reflectivity at Kunming Radar Station at 15:41 BT 4 June 2007 (at 1.5° elevation) and spatial distribution of total CG lightning (positive CG lightning is red “+”, negative CG lightning is blue “-”) between 15:40—15:50 BT 4 July 2007 (a), image of hailstorm amplified (b, at 2.4° elevation) and profile image along white line (c)

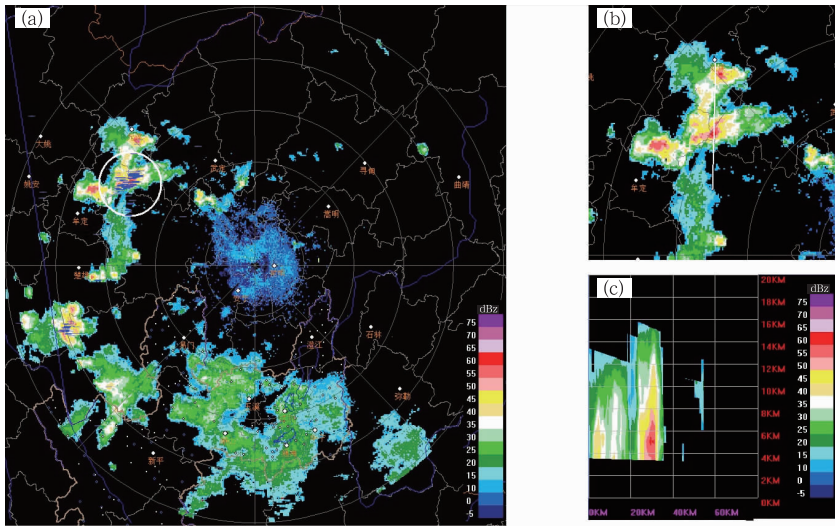


图 6 2007 年 6 月 4 日 15:57 昆明雷达基本反射率(1.5°仰角)与 2007 年 6 月 4 日 15:50—16:00 闪电分布(正负闪为红色“+”,负闪为蓝色“-”)叠加图(a),雹暴放大图(b,1.5°仰角)以及沿白线的剖面图(c)

Fig. 6 Composition graph of reflectivity at Kunming Radar Station at 15:57 BT 4 June 2007 (at 1.5° elevation) and spatial distribution of total CG lightning (positive CG lightning is red “+”, negative CG lightning is blue “-”) between 15:50—16:00 BT 4 June 2007 (a), image of hailstorm amplified (b, at 1.5° elevation) and profile image along white line (c)

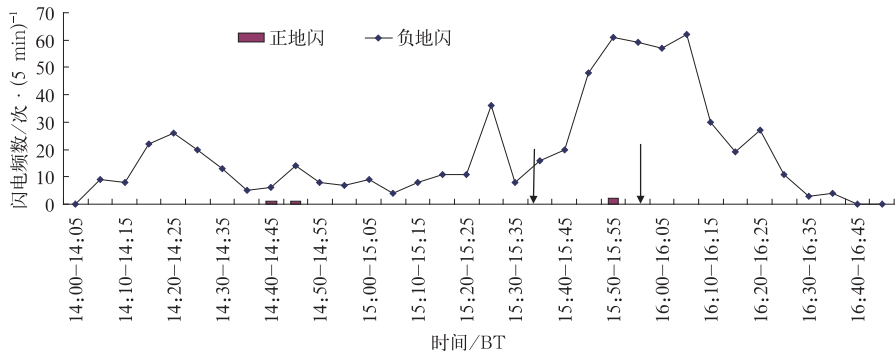


图 7 2007 年 6 月 4 日 14:00—16:50 元谋县降雹中心(25.546°N、101.875°E)周围 50 km 地闪频数变化(箭头区间为降雹时段)

Fig. 7 Changing of CG lightning frequency around hail shooting center (25.546°N,101.875°E) 50 km at Yuanmou County Station from 14:00 to 16:50 BT 4 June 2007 (Arrow interval is hailing period)

3.3 个例 3

2008 年 7 月 23 日冰雹天气过程的环流背景为西北气流,根据雷达反射率图演变追溯影响玉溪红塔区的雹暴,其大约 13:43 生成于红塔区西北部,单体初生基本反射率因子强度不到 30 dBz,单体沿西北气流缓慢向南移动,至 14:05 单体强度发生突增,最强基本反射率因子强度达到 57.1 dBz,并开始出现旁瓣回波特征(图略),14:10 单体最强反射率强

度达到 60.5 dBz(图 8),具有明显旁瓣回波、三体散射以及 WBER 特征,具有典型的冰雹回波特征。14:21 雹暴的强度开始减弱,冰雹回波特征逐渐不明显,14:27 单体最强反射率强度已降至 50 dBz 以下,冰雹回波特征已消失。从地闪分布来看,雹暴强度突增后,14:09 出现了 2 次负地闪,位于雹暴的北侧上风方向,雹暴强度继续增长,14:11 在雹暴的北侧上风方又出现 1 次负地闪,14:14 又分别在雹暴北侧上风方和雹暴强回波处各出现 1 次负地闪,

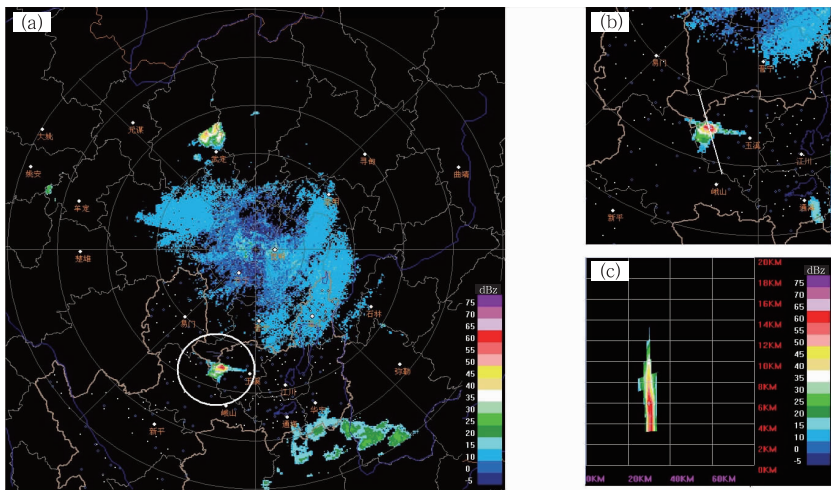


图 8 2008 年 7 月 23 日 14:10 昆明雷达基本反射率(1.5°仰角)与 2008 年 7 月 23 日 14:05—14:15 闪电分布(负闪为蓝色“—”)叠加图(a),雹暴放大图(b,2.4°仰角)以及沿白线的剖面图(c)

Fig. 8 Composition graph of reflectivity at Kunming Radar Station at 14:10 BT 23 July 2008 (at 1.5° elevation) and spatial distribution of total CG lightning (negative CG lightning is blue “—”) between 14:05—14:15 BT 23 July 2008 (a), image of hailstorm amplified (b, at 2.4° elevation) and profile image along white line (c)

14:15 地面降雹开始后,负地闪也减弱消失。此次降雹由对流单体造成,生消时间较短,地闪活动并不活跃,但首次负地闪出现时间提前地面降雹时间约 6 min。

3.4 个例 4

2009 年 4 月 7 日冰雹天气过程的环流背景为西北气流,根据雷达反射率图追溯影响澄江的雹暴,其发源于楚雄牟定,生成时间大约为 17:23,单体初生强度并不强,最高反射率不到 30 dBZ,单体沿西北气流逐渐向东南方向移动,至 18:13 与其东北方的几个单体回波逐渐形成结构松散的带状回波,基本反射率因子强度有所增强,平均强度达到 40 dBZ,对流回波移速较快,每小时达到 42 km,并在东南移动过程中继续加强,19:52 移至昆明安宁市北部,结构具有明显弓形回波特征,基本反射率因子强中心超过 50 dBZ,20:08 接近昆明市,强度略有减弱,但形状仍保持弓形,20:30 后回波强度重新加强,移速略有加快,21:03 位于澄江县西北方,基本反射率因子强度最高达到 57.2 dBZ,具有明显钩状回波、后侧“V”型槽口以及 WBER,是典型的冰雹回波(图略)。从闪电分布来看,地闪密集区一直出现在回波移动前方,基本反射率因子强度梯度较大的地方,21:00 后负地闪频数出现“跃增”,而在回波后

部出现一个正地闪。21:14 强回波体移入澄江县(图 9),其继续维持明显的冰雹回波特征,负地闪呈现继续增加趋势,并集中在回波前部基本反射率梯度较大的区域,6 min 之后地面开始降雹,随着地面降雹开始,强回波区域的负地闪数出现回落,到 21:36 回波形状形成明显的蛇线状(图 10),最强回波反射率因子强度达 56.8 dBZ,雹暴回波特征维持,雹暴移动过程中所到之处均出现了降雹。21:58 回波体仍具有强冰雹回波特征:旁瓣回波、三体散射、钩状、“V”型缺口以及 WBER,但整体已经移出澄江县。

统计澄江县降雹中心(24.675°N、102.972°E)周围半径 50 km 以内区域的 5 min 闪电频数(图 11),可以看出在 20:05—20:10 就开始出现闪电活动,闪电以负地闪占绝大多数,初期负地闪为缓慢增加,明显“跃增”开始于 21:05,峰值时间为 21:10—21:15,达到 27 次·(5 min)⁻¹,比地面降雹开始时间提前了大约 5 min,降雹开始后地闪活动进入迅速减弱阶段,负地闪频数降至 9 次·(5 min)⁻¹,21:30—21:35 负地闪再次出现大幅增加,负地闪频数在一定程度上反映了云中上升气流的强度,说明这段时间对流活动表现活跃,仍有降雹的可能,负地闪频数起伏波动变化显著,21:50—21:55 又达到一次峰值,但此时雹暴已经处于澄江县边缘,

21:58 后强回波体东南移出澄江县,因此雹暴引起的地面降雹对澄江县已无影响。之后负地闪振荡减弱。正地闪分别在 20:53、20:59、21:02 和 21:47 各观测到 1 次,结合雷达回波演变图发现 20:53、

21:02 和 21:47 出现的正地闪位置位于强回波西北侧的弱回波区,但 20:59 的正地闪却出现在远离强回波近 45 km 的弥勒县,其位置位于强回波体的东南方。

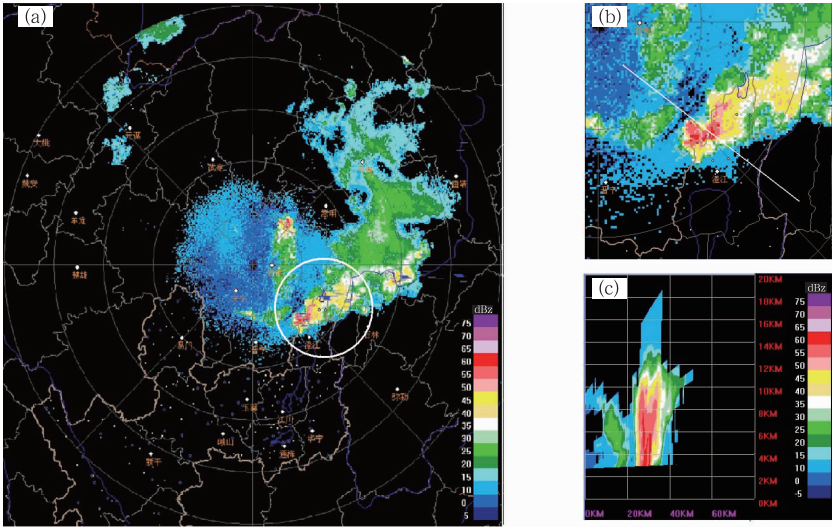


图 9 2009 年 4 月 7 日 21:14 昆明雷达基本反射率(1.5°仰角)与 2009 年 4 月 7 日 21:10—21:20 闪电分布(负闪为蓝色“—”)叠加图(a),雹暴放大图(b,1.5°仰角)以及沿白线的剖面图(c)

Fig. 9 Composition graph of reflectivity at Kunming Radar Station at 21:14 BT 7 April 2009 (at 1.5° elevation) and spatial distribution of total CG lightning (negative CG lightning is blue “—”) between 21:10—21:20 BT 7 April 2009 (a), image of hailstorm amplified (b, at 1.5° elevation) and profile image along white line (c)

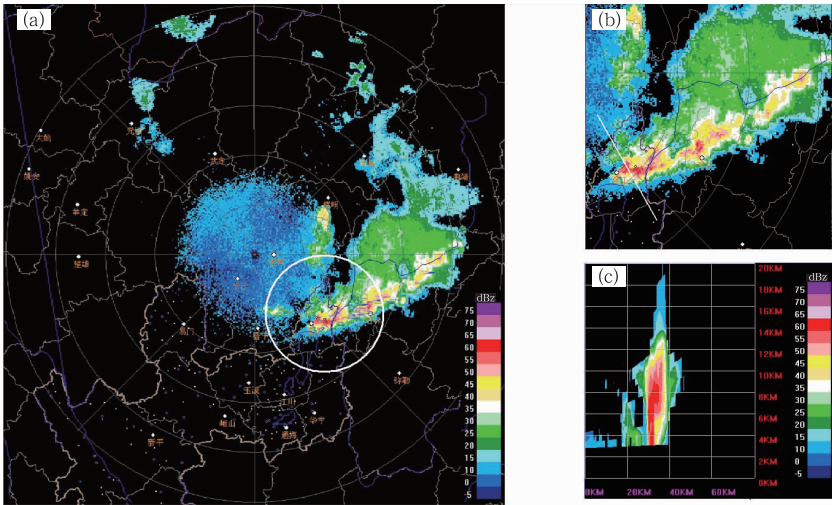


图 10 2009 年 4 月 7 日 21:36 昆明雷达基本反射率(1.5°仰角)与 2009 年 4 月 7 日 21:30—21:40 闪电分布(负闪为蓝色“—”)叠加图(a),雹暴放大图(b,1.5°仰角)以及沿白线的剖面图(c)

Fig. 10 Composition graph of reflectivity at Kunming Radar Station at 21:36 BT 7 April 2009 (at 1.5° elevation) and spatial distribution of total CG lightning (negative CG lightning is blue “—”) between 21:30—21:40 BT 7 April 2009 (a), image of hailstorm amplified (b, at 1.5° elevation) and profile image along white line (c)

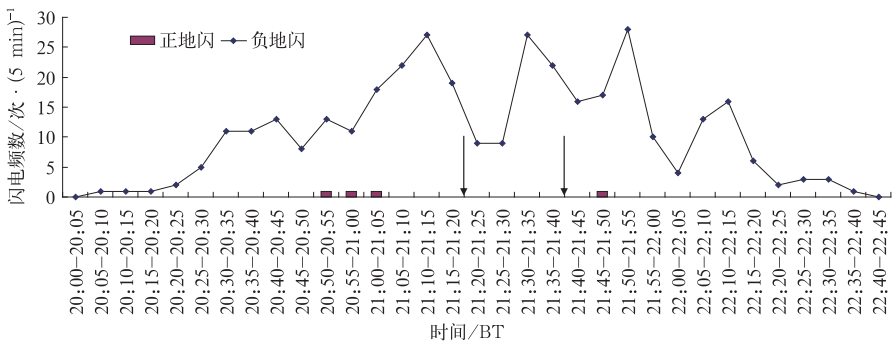


图 11 2009 年 4 月 7 日 20:00—22:45 澄江县降雹中心(24.675°N、102.972°E) 周围 50 km 地闪频数变化(箭头区间为降雹时段)

Fig. 11 Changing of CG lightning frequency around hail shooting center (24.675°N,102.972°E) 50 km at Chengjiang County Station from 20:00 to 22:45 BT 7 April 2009 (Arrow interval is hailing period)

3.5 个例 5

2010 年 7 月 31 日冰雹天气过程是受辐合区和切变线共同影响造成的,根据雷达基本反射率图追溯影响禄丰的雹暴,其发源于禄丰东部,生成时间大约为 18:53,单体初生时最高反射率不到 30 dBz,其东部和南部另有多个单体回波,对流单体为块状,回波原地少动,至 19:04 其最高反射率因子强度已接近 50 dBz,并出现旁瓣回波特征,19:37 基本反射率因子强中心突然跃增至 58.5 dBz,并出现后侧“V”

型槽口、WBER 以及三体散射和旁瓣回波特征,雹暴体具有明显弓形回波复合体结构。从闪电分布来看,负地闪在 19:30 之前分布都较为分散,19:30—19:40 闪电频数分布出现集中趋势,其密集区位置位于强基本反射率因子回波的西北方,回波缓慢向西北方移动;闪电频数到 20:20—20:30 出现明显增加,负地闪集中分布于强回波体的西北方,也就是回波移动的方向,而其西南方出现一次正地闪,武定县境内的地闪频数也出现“跃增”,对照雷达基本反射率图(图 12),武定出现两个对流单体,禄丰县地面

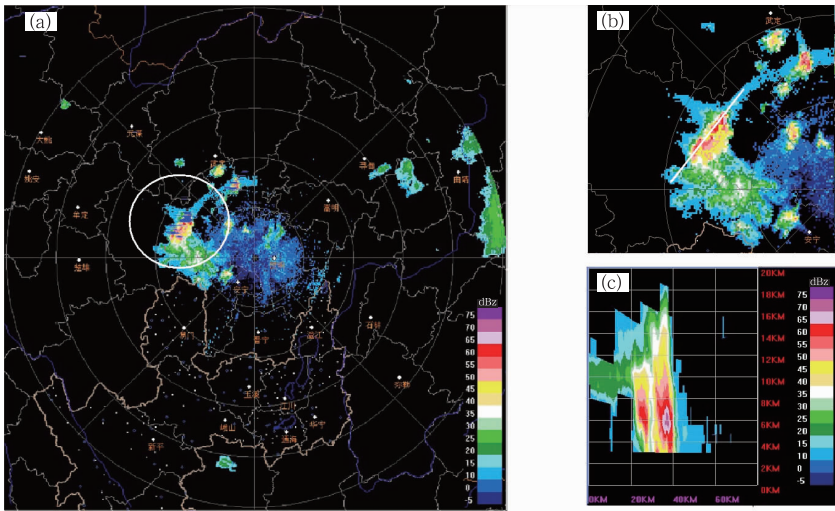


图 12 2010 年 7 月 31 日 20:27 昆明雷达基本反射率(1.5°仰角)与 2010 年 7 月 31 日 20:20—20:30 闪电分布(正闪为红色“+”,负闪为蓝色“-”)叠加图(a),雹暴放大图(b,2.4°仰角)以及沿白线的剖面图(c)

Fig. 12 Composition graph of reflectivity at Kunming Radar Station at 20:27 BT 31 July 2010 (at 1.5° elevation) and spatial distribution of total CG lightning (positive CG lightning is red “+”, negative CG lightning is blue “-”) between 20:20—20:30 BT 31 July 2010 (a), image of hailstorm amplified (b, at 2.4° elevation) and profile image along white line (c)

降雹(20:30)开始后,负地闪明显减少,20:32—20:38 之间,基本反射率图上反映出雹暴体的三体散射特征不明显,10 min(20:30—20:40)地闪频数分布也显示负地闪为减少趋势,有 2 次正地闪出现在雹暴的西南方;20:49 三体散射特征再次出现(图略),10 min(20:40—20:50)地闪频数分布又出现爆发式增加,并在强回波尾部出现 2 次正地闪,21:05 雹暴主体已经移至禄丰县北部,雹暴所到之处均出现地面降雹,1 次正地闪出现在武定县强回波中,雹暴体一路向西北方移动过程中,范围逐渐减小,21:33 已至禄丰县和元谋县边界,地闪频数明显减少,对禄丰县的影响基本结束。

从禄丰县降雹中心点(25.252°N、102.16°E)周围 50 km 的闪电频数时间分布图(图 13)上可以看出:17:59 出现第一个负地闪,之后负地闪频数缓慢波动增加,20:20—20:25 达到峰值 61 次·(5 min)⁻¹,这个时间比地面降雹时间(20:30)大约提前了 5 min,在经历小幅下降后呈现爆发式增加,至 20:55—21:00 达到最强 162 次·(5 min)⁻¹,持续增加的负地闪频数表明雹暴中强烈的上升气流,21:00 后负地闪频数振荡减少,影响禄丰的雹暴至 21:30 移出禄丰县,负地闪频数在维持了一段时间后逐渐减少消失。值得注意的是:在禄丰县降雹前和降雹阶段,负闪频数每一次小波谷出现的时候或

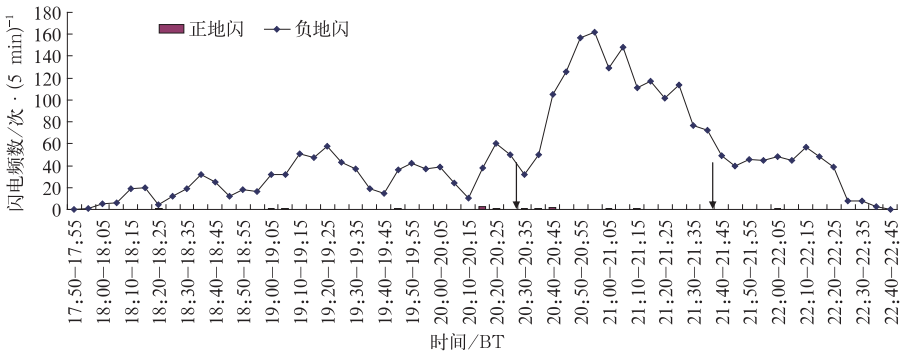


图 13 2010 年 7 月 31 日 17:50—22:45 禄丰县降雹中心(25.252°N、102.16°E)周围 50 km 地闪频数变化(箭头区间为降雹时段)
Fig. 13 Changing of CG lightning frequency around hail shooting center (25.252°N,102.16°E) 50 km at Lufeng County Station from 17:50—22:45 BT 31 July 2010 (Arrow interval is hailing period)

者之后都会有正地闪活动。

3.6 个例 6

2011 年 8 月 31 日冰雹天气过程的环流背景为热带低压外围气流和赤道辐合带共同影响。根据雷达反射率演变图发现回波是自东北向西南方移动的,移动过程中不断生消。影响昆明晋宁县的雹暴于 16:40 生成于晋宁县西南部与安宁县的交界处,单体初生强度最高基本反射率因子强度为 30.2 dBz,单体生成后缓慢向南移动,强度逐渐加强,强回波中心向上发展,16:44 回波北侧出现第一次负地闪,10 min(16:40—16:50)的地闪频数分布显示地闪逐渐活跃,负地闪集中出现在强回波体附近,在强回波北侧的弱回波区出现一次正地闪,16:51 雷达显示回波强度突增,已经出现钩状回波、旁瓣回波和三体散射特征,最高反射率因子强度达到 56 dBz(图 14),17:02 最高反射率因子强度接近 58 dBz,但

从 10 min(16:50—17:00)地闪频数分布来看,强回波附近的地闪活动却呈现减弱现象,在强回波北侧的弱回波区继续有正地闪出现,强回波维持至 17:13 有所减弱,冰雹回波特征减弱消失,从 10 min(17:10—17:20)地闪频数分布发现,负地闪密集区仍位于强回波移动方向前沿,而回波在西南移动过程中继续减弱,17:35 强回波基本已经移出晋宁县,雹暴对晋宁县的影响趋于结束。

从晋宁县降雹点中心(24.955°N、102.4°E)周围 50 km 的闪电频数时间分布图(图 15)上可以看出 15:44 出现第 1 个负地闪之后 5 min 负地闪频数呈现跳跃式波动增加趋势,16:35 开始出现持续性增加趋势,16:45—16:50 达到峰值 31 次·(5 min)⁻¹,这个时间比地面降雹时间(16:56)大约提前了 6 min,地面降雹开始后,负地闪频数出现剧烈下降现象,16:55—17:00 负地闪频数减少至 13 次·(5 min)⁻¹,之后负地闪频数又恢复活跃,活跃的

负地闪频数表明雹暴中仍具有明显的上升气流;但从雷达回波演变来看,17:13 雹暴回波已不具备冰雹回波的特征,强回波中心已下降,地面降雹已结束。随着对流回波向西南方向移动,17:35 强回波基本已经移出晋宁,雹暴对晋宁的影响趋于结束。

对照雷达回波演变发现 15:54 所出现的正地闪是由玉溪江川县的雹暴所产生的,16:44、16:59 和 17:07 出现的正地闪正是晋宁县发生冰雹的雹暴所产生的,该雹暴的首次正地闪出现时间略提前地面降雹时间。

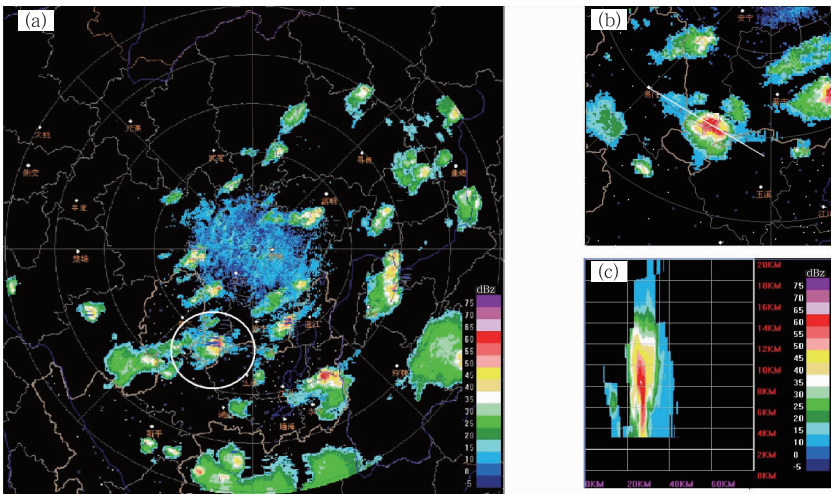


图 14 2011 年 8 月 31 日 16:51 昆明雷达基本反射率(1.5°仰角)与 2011 年 8 月 31 日 16:40—16:50 闪电分布(正闪为红色“+”,负闪为蓝色“-”)叠加图(a),雹暴放大图(b,5.3°仰角)以及沿白线的剖面图(c)
Fig. 14 Composition graph of reflectivity at Kunming Radar Station at 16:51 BT 31 August 2011 (at 1.5° elevation) and spatial distribution of total CG lightning (positive CG lightning is red “+”, negative CG lightning is blue “-”) between 16:40—16:50 BT 31 August 2011 (a), image of hailstorm amplified (b, at 5.3° elevation) and profile image along white line (c)

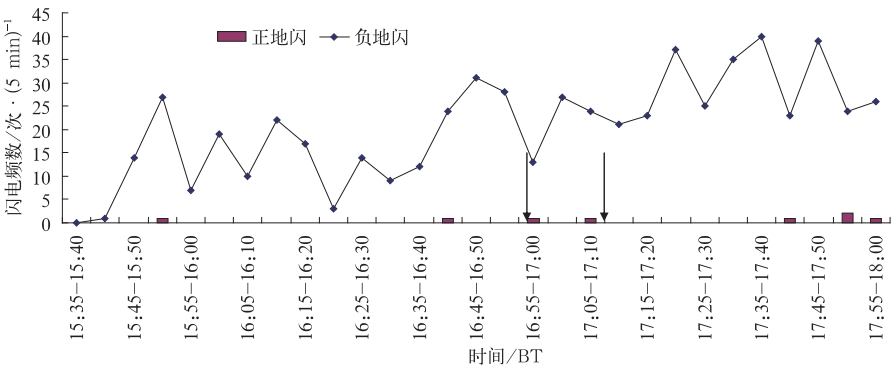


图 15 2011 年 8 月 31 日 15:35—18:00 晋宁县降雹中心(24.53°N,102.366°E)周围 50 km 地闪频数变化(箭头区间为降雹时段)

Fig. 15 Changing of CG lightning frequency around hail shooting center (24.53°N,102.366°E) 50 km at Jinning County Station from 15:35 to 18:00 BT 31 August 2011 (Arrow interval is hailing period)

4 结 论

本文通过对滇中地区近几年的 6 次典型降雹过

程中的雷达回波和闪电特征进行分析,得出以下几点结论:

(1) 滇中冰雹回波的基本反射率因子具有典型的冰雹回波特征,包括弓形回波、三体散射、旁瓣回

波、有界(无界)弱回波区、“V”型槽口以及钩状回波。

(2) 雹暴中负地闪占绝对优势,正地闪出现频率很少,且分布不集中,这与北方地区冰雹出现时高正地闪频数特征存在明显不同。正地闪出现的位置和时间与降雹位置和时间没有明显对应关系。

(3) 闪电密集区集中在雹暴的反射率因子强度梯度较大的区域,回波区有随闪电密集区移动的趋势,可作为预测冰雹路径的一个指标。多单体风暴中的地闪频数及聚集区域主要取决于雹暴单体的数目、强度和相互接近的程度。多单体风暴造成的降雹主要发生在负地闪的活跃期。单体风暴有时并未出现明显的地闪,但依然可以产生冰雹。

5 讨 论

从时间和位置上分析,对流发展初期,地闪在空间上稀疏出现,随着对流的发展,地闪分布趋向集中,且频数存在明显“跃增”;总体来看地面降雹发生在雹暴成熟阶段以及负地闪的活跃期,地面降雹开始之前5~12 min,负地闪每5 min频数会出现一次峰值,地面降雹开始后,负地闪每5 min频数会出现小幅下降,之后迅速恢复活跃。负地闪每5 min频数峰值的出现时间略超前地面降雹时间5~12 min,可作为滇中出现冰雹的一个参考指标。在雹暴减弱消散阶段,地闪频数显著减少。

闪电频数的变化和空间分布特征,在强对流天气监视和临近预警中有一定的参考作用,在实际分析应用时,应结合雷达、卫星云图、加密自动站等高空时密度的监测资料,进行综合分析,才能得出对实际强对流监测和预报有指示意义的综合指标,本文仅对近年来滇中地区几个典型降雹个例的雷达回波和闪电频数的演变特征做了初步研究,要进一步全面认识云南雹暴中的闪电发生规律,还需要依赖于对雹暴内动力、微物理过程以及他们之间的相关性的充分认识。

参考文献

陈哲彰. 1995. 冰雹与雷暴大风的云对地闪电特征. 气象学报, 53(3): 367-374.

段鹤, 严华生, 王晓君, 等. 2011. 滇南中小尺度灾害天气的多普勒统计特征及识别研究. 气象, 37(10): 1216-1227.

冯桂力, 边道相, 刘洪鹏, 等. 2001. 冰雹云形成发展与闪电演变特征分析. 气象, 27(3): 33-38.

冯桂力, 王俊, 牟容, 等. 2010. 一次中尺度雷暴大风过程的闪电特征分析. 气象, 36(4): 68-74.

蒋大凯, 才奎志, 曲荣强. 2010. 辽宁省一次强对流天气的地闪特征. 气象, 36(6): 73-78.

李德俊, 唐人毛, 熊守权, 等. 2011. 强冰雹和短时强降水天气雷达特征及临近预警. 气象, 37(4): 474-480.

李永果, 马丽, 刘强, 等. 2008. 冰雹云系发展演变与其地闪的相关性分析. 气象科技, 36(3): 331-334.

慕建利, 李泽椿, 湛芸. 2012. 一次强暴雨过程地闪活动特征与中尺度对流系统和强降水的关系. 气象, 38(1): 56-65.

秦剑, 解明恩, 刘瑜, 等. 2000. 云南气象灾害总论. 北京: 气象出版社, 111-129.

王秀玲, 郭丽霞, 高桂芹, 等. 2012. 唐山地区冰雹气候特征与雷达回波分析. 气象, 38(3): 344-248.

许美玲, 段旭, 杞明辉, 等. 2011. 云南省天气预报员手册. 北京: 气象出版社, 155-157.

尹丽云, 张腾飞, 许迎杰, 等. 2010. 低纬高原中部一次强对流天气过程的多普勒雷达和闪电特征分析. 高原气象, 29(4): 1026-1035.

张信华, 黄元森, 江彩英, 等. 2011. 闽北强对流天气的短时监测及判别方法研究. 气象, 37(6): 687-692.

张一平, 王新敏, 牛淑贞, 等. 2010. 河南省强雷暴地闪活动于雷达回波的关系探析. 气象, 36(2): 54-61.

支树林, 姜桂杰. 2009. 江西冰雹天气期间的闪电活动特征. 气象与减灾研究, 32(3): 36-41.

周筠珏, 张义军, 郗秀书, 等. 1999. 陇东地区冰雹云系发展演变与其地闪的关系. 高原气象, 18(2): 237-244.

MacGorman D R, Burgess D W. 1994. Positive Cloud-to-ground lightning in tornadic storms and hailstorms. Mon Wea Rev, 122: 1671-1697.

Reap R M, MacGorman D R. 1989. Cloud-to-ground lightning: Climatological characteristics and relationships to model fields, radar observations, and severe local storms. Mon Wea Rev, 117: 518-535.

Stolzenburg M. 1994. Observations of high ground flash densities of positive lightning in summertime thunderstorms. Mon Wea Rev, 122: 1740-1750.

Takahashi T. 1978. Riming electrification as a charge generation mechanism in thunderstorms. Atmos Sci, 35: 1536-1548.

Wiens K C, Rutledge S A, Tessendorf S A. 2005. The 29 June 2000 Supercell Observed during STEPS. Part2: Lightning and Charge Structure. Amer Meteor Soc, 62: 4151-4177.

Williams E R. 2001. The electrification of severe storms. Meteorol Monogr, 28: 527-561.

Williams E, Boldi B, Matlin A, et al. 1999. The behavior of total lightning activity in severe Florida thunderstorms. Atmos Res, 51: 245-265.

Yao Wen, Zhang Yijun, Meng Qing, et al. 2013. A comparison of the characteristics of total and cloud-to-ground lightning activities in hailstorms. Acta Meteor Sinica, 27(2): 282-293, doi: 10.1007/s13351-013-0212-x.