

张腾飞,尹丽云,张杰,等. 云南两次中尺度对流雷暴系统演变和地闪特征. 应用气象学报,2013,24(2):207-218.

## 云南两次中尺度对流雷暴系统演变和地闪特征

张腾飞<sup>1)\*</sup> 尹丽云<sup>1)</sup> 张杰<sup>2)</sup> 谢屹然<sup>1)</sup> 朱莉<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>(云南省气象台,昆明 650034) <sup>2)</sup>(云南省气象信息中心,昆明 650034)

### 摘 要

在利用 NCEP/NCAR 再分析资料诊断分析 2010 年 9 月 21—23 日中尺度对流雷暴系统形成的环流背景基础上,通过云南省闪电定位系统地闪监测资料和 FY-2E 卫星云图资料的同步叠加,分析两个中尺度雷暴系统的演变和地闪特征。结果表明:台风凡亚比(1011)西行减弱的热带低压为中尺度对流雷暴系统提供有利的暖湿和抬升动力环流背景,促使中尺度弧状对流云带、中尺度雷暴云团和中尺度对流复合体生成和发展。雷暴云团结构和地闪活动空间分布不均匀并随时间变化,且正、负地闪频数与云顶亮温(TBB)相关,当 TBB 降低和等值线密度变大,雷暴云团发展,低 TBB 中心偏于云团的前部云区,负地闪频数剧增;当 TBB 达最低值时,雷暴云团成熟,负地闪频数达峰值,正地闪出现;当 TBB 升高且等值线密度变小时,雷暴云团减弱,低 TBB 中心靠近云团中心,负地闪频数迅速减小,正地闪频数达到峰值;密集的负地闪出现在雷暴云团前部大的 TBB 梯度区和 TBB 不大于 $-56^{\circ}\text{C}$ 的低值中心附近,正地闪分散在 TBB 不大于 $-56^{\circ}\text{C}$ 的低值中心附近,偏于负地闪区域后部发生。

**关键词:** 云南; 中尺度对流雷暴系统; 地闪特征

### 引 言

中尺度雷暴对流系统往往伴随短时强降水、冰雹、大风、雷电等强烈灾害性天气,给工农业生产和人民生活带来严重影响。随着闪电定位系统的建立和探测资料的日趋完善,近年来利用闪电探测系统结合雷达、卫星、地面气象观测系统等开展了大量中尺度雷暴对流系统的研究工作,可以揭示强风暴系统与雷电活动的发展演变规律以及研究强对流风暴的冰雹、突发性暴雨等局地气象灾害临近预报方法和技术,为灾害性天气过程的监测和预测提供新的手段<sup>[1-3]</sup>。Rutledge 等<sup>[4]</sup>分析认为,中尺度对流系统闪电频数和地闪位置分布与观测的风暴降水结构相关,大部分正地闪是由风暴对流区上部正电荷的平流所引起,正地闪与层状云区的起电机有关。Holle 等<sup>[5]</sup>通过分析 4 个 MCS 的地闪分布后发现,地闪频数峰值出现在风暴生成后几小时,在成熟阶段正地闪比例增加,在消散阶段负地闪频数急剧下

降。Qie 等<sup>[6]</sup>观测研究表明,闪电资料可以用来确定对流过程及其发展趋势和强度,且闪电资料有可能用来预报对流活动的发生和发展。蒙伟光等<sup>[7]</sup>研究认为,地闪发生频率与雷暴系统强度演变有直接联系,随着系统回波强度的增强,地闪发生的频率也增高,且地闪易于出现在有组织更强的对流系统中。袁铁等<sup>[8]</sup>研究表明,飑线等强对流云系的不同部位闪电活动情况不同,闪电主要发生在飑线前部的对流区。冯桂力等<sup>[9]</sup>、刘冬霞等<sup>[10]</sup>研究表明:地闪极性分布和雷暴的强度之间存在一定关系,正地闪活跃的雷暴通常伴有冰雹和龙卷、灾害性大风等强天气;且进一步研究<sup>[11]</sup>表明:负地闪在典型中尺度对流系统中占绝对优势,主要出现在云顶亮温低于 $-50^{\circ}\text{C}$ 云区、回波强度超过 40 dBZ 强对流区,且密集的正地闪也与强回波区相对应,而稀疏的正地闪则多发生在系统后部的稳定性降水或云砧部位。

同时研究<sup>[12-15]</sup>表明:地闪活动具有明显的地域特征,与各地温湿条件密切相关<sup>[16]</sup>。云南地处低纬度高原地区,同时受到印度、东亚两支季风的共

2012-05-12 收到,2012-12-27 收到再改稿。

资助项目:国家自然科学基金项目(41265001),云南省科技计划项目(2009CA014)

\* email: tfzhang@21cn.com

同作用,是全国雷暴高发区,伴随的强对流灾害性天气具有多发性、突发性和局地性特点。本文利用闪电定位系统、气象卫星等观测资料及 NCEP/NCAR 再分析资料,分析在一次连续雷暴天气过程中的两个中尺度雷暴云团演变的地闪特征以及地闪与云顶亮温之间的关系,加强对低纬度高原地区中尺度对流雷暴系统的地闪演变特征和结构的认识,以期为强对流天气分析预报提供依据。

## 1 资料

本文所用资料包括:

①2010年9月21日和22日 NCEP/NCAR 02:00, 08:00, 14:00, 20:00(北京时,下同)再分析资料,格距为  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ ,垂直方向共有26层。

②中国气象局 DVBS 广播下发的2010年9月21—23日 FY-2E 卫星云图资料(GPF格式),分辨率为  $0.045^{\circ} \times 0.045^{\circ}$ ,观测间隔为30 min。

③云南省23个闪电定位仪组成、覆盖全省的 ADTD 闪电定位系统监测的2010年9月21日08:00—23日08:00地闪资料,即云地之间发生的闪电。

## 2 天气概况及环流形势

2010年9月21—23日云南省发生了一次较强雷暴天气过程。根据云南省闪电定位系统监测资料统计,9月21日08:00—23日08:00全省发生地闪共42243次,其中负地闪41179次,正地闪1064次,整个雷暴过程负地闪占97%。由21日08:00—22日08:00地闪频数分布(图1a)可以看出,地闪主要发生在滇中及以南地区,共发生地闪33087次,地闪区域宽且频数高,局部地闪密度大,其中文山地区的马关县南部  $22.75^{\circ}\text{N}, 104.35^{\circ}\text{E}$  附近地闪密度高达  $2.47\text{次}/\text{km}^2$ ; 22日08:00—23日08:00(图1b)地闪集中发生在滇中到滇西南,共9156次,其中玉溪地区  $24.45^{\circ}\text{N}, 101.85^{\circ}\text{E}$  附近最大地闪密度达  $1.45\text{次}/\text{km}^2$ 。据不完全统计,这次雷暴天气过程伴随频繁的地闪,在曲靖、玉溪、红河、楚雄、大理、临沧6个地区的13个县(市)部分乡镇产生了冰雹、大风、暴雨洪涝、雷击等灾害,最大冰雹直径达10 mm 以上,造成民房受损和人员伤亡以及农作物、电力设施等受灾。

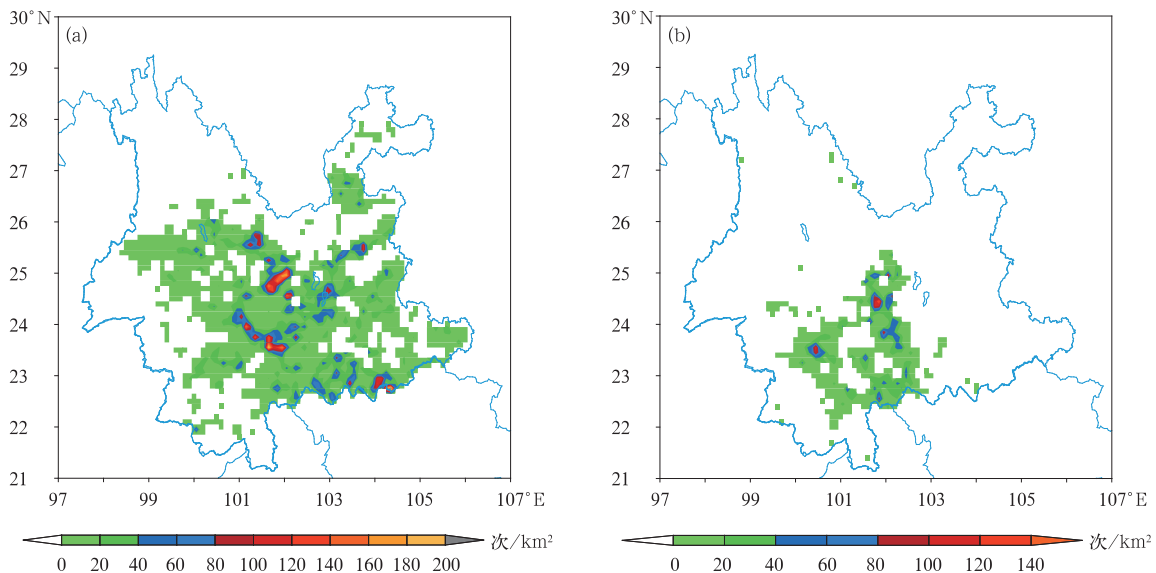


图1 2010年9月21日08:00—22日08:00(a)和22日08:00—23日08:00(b)地闪空间分布  
Fig. 1 Cloud-to-ground lightning spatial distribution from 0800 BT 21 Sep to 0800 BT 22 Sep(a) and from 0800 BT 22 Sep to 0800 BT 23 Sep(b) in 2010

从700 hPa环流形势可以看出,21日14:00(图2a)台风凡亚比(1011)在福建省漳浦县沿海登陆后

减弱为热带低压,主体到达广东、广西和湖南,中心在  $25^{\circ}\text{N}, 112^{\circ}\text{E}$  附近,其外围热带偏东气流控制到

云南省东部边缘,并且风速自东向西减小,在滇东地区存在风的辐合,地闪首先在滇东开始;22日 14:00(图 2b)热带低压明显西移,中心西移到 25°N,108°E 附近,外围热带偏东气流控制到云南省大部地区,且滇东热带偏东风加大,云南省风速自东向西减小,在

滇中附近存在明显的风速辐合,云南省的地闪影响区域西扩,可见该区域与热带偏东气流风辐合区有较好的对应关系,热带低压外围偏东气流不仅为雷暴天气发生发展带来较好的暖湿条件,而且形成的偏东风辐合提供较好的抬升动力条件。

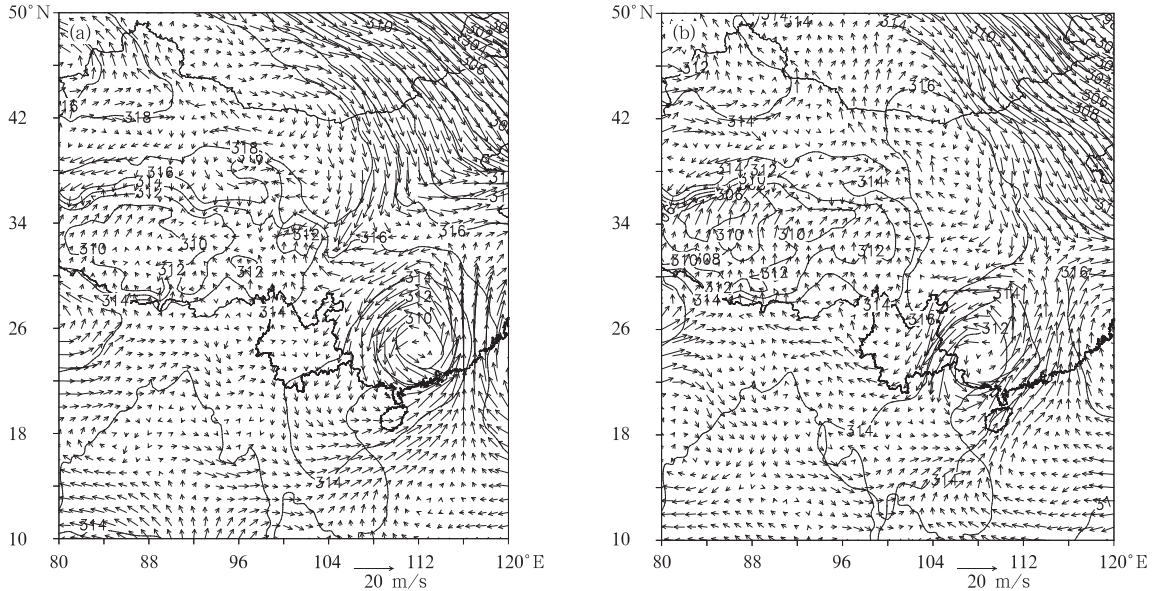


图 2 2010 年 9 月 21 日 14:00(a)和 22 日 14:00(b) 700 hPa 环流形势(等值线,单位:gpm)及风场(矢量)

Fig. 2 700 hPa circulation pattern(isoline,unit:gpm) and wind field(vector) at 1400 BT 21 Sep(a) and 1400 BT 22 Sep(b) in 2010

### 3 红外云图演变与地闪活动关系

云顶亮温(TBB)指地球表面一个区域被云覆盖时,水平空间区域平均的云顶有效辐射温度,代表云最高处的温度。下面对造成 2010 年 9 月 21—23 日雷暴天气过程的两个中尺度雷暴云团演变及与闪电活动对应关系进行详细分析。

#### 3.1 雷暴云团 A 的演变与闪电活动

在云南省东部热带低压外围的偏东气流辐合区附近 9 月 21 日午后开始点状对流单体生成,TBB 不大于 $-32^{\circ}\text{C}$ 的对流单体有负地闪发生,对流单体发展且逐渐呈弧状排列,16:30(图略)在曲靖南部、红河北部、文山形成弧状对流云带 E-F,对流单体 TBB 达 $-58\sim-42^{\circ}\text{C}$ ,负地闪增加,17:00(图 3a)E-F 偏西移,南端文山境内的对流单体生成和发展迅速,相互合并为 3 个对流云团,发展更加迅速,面积扩大,17:30(图略)进一步合并发展为两个较大的对流云团(雷暴云团),TBB 下降到 $-62^{\circ}\text{C}$ ,且两个云

团相互靠拢和相互连接,在每个对流云团的西南部(移动方向的前侧)负地闪频繁。

18:00(图 3b)完全合并形成长约 1.5 个经距、宽约 1 个纬距呈椭圆形的  $\beta$  中尺度的雷暴云团 A,随高空偏东引导气流偏西移,进入红河境内,整个云团上 TBB 具有西部低、东部高的特征,西部云体 TBB 达 $-66^{\circ}\text{C}$ ,而东部云体 TBB 为 $-58^{\circ}\text{C}$ ,地闪在雷暴云团上的分布也不均匀,频繁的负地闪主要发生在雷暴云团 A 的西部(前部),说明西部云体对流发展更加旺盛,19:00(图 3c)雷暴云团 A 主体在文山和红河境内,TBB 继续下降、面积继续扩大,西部 TBB 达 $-68^{\circ}\text{C}$ ,东部 TBB 达 $-62^{\circ}\text{C}$ ,负地闪始终发生在云团的西部,在云团中部开始有正地闪发生,20:00(图 3d)云团 A 扩大到长约 2.2 个经距、宽约 1.8 个纬距的  $\alpha$  中尺度对流云团,在云团上的西南部局部 TBB 达 $-72^{\circ}\text{C}$ ,其附近及前侧闪电异常活跃,东部 TBB 保持在 $-62^{\circ}\text{C}$ 左右,始终没有闪电发生,21:30(图 3e)云团 A 发展为 TBB 不大于 $-52^{\circ}\text{C}$ 的云区长约 2.7 个经距、宽约 2.2 个纬距的中尺度

对流复合体 (MCC), 达到成熟阶段, TBB 低于  $-72^{\circ}\text{C}$  的云区仍然偏于整个 MCC 的西部, 越往东 TBB 越高, 密集负地闪依然发生在 MCC TBB 不大于  $-60^{\circ}\text{C}$  的云区及其前部, 而分散的正地闪出现在

云团中部和负地闪发生区域的后侧, 22:30 (图 3f) 云团 A 具有典型的 MCC 椭圆形结构特征, 但 TBB 低于  $-72^{\circ}\text{C}$  的云区逐渐缩小, 地闪活动平缓, 但依然发生在整个 MCC 的前部, 正地闪偏于 MCC 的中部

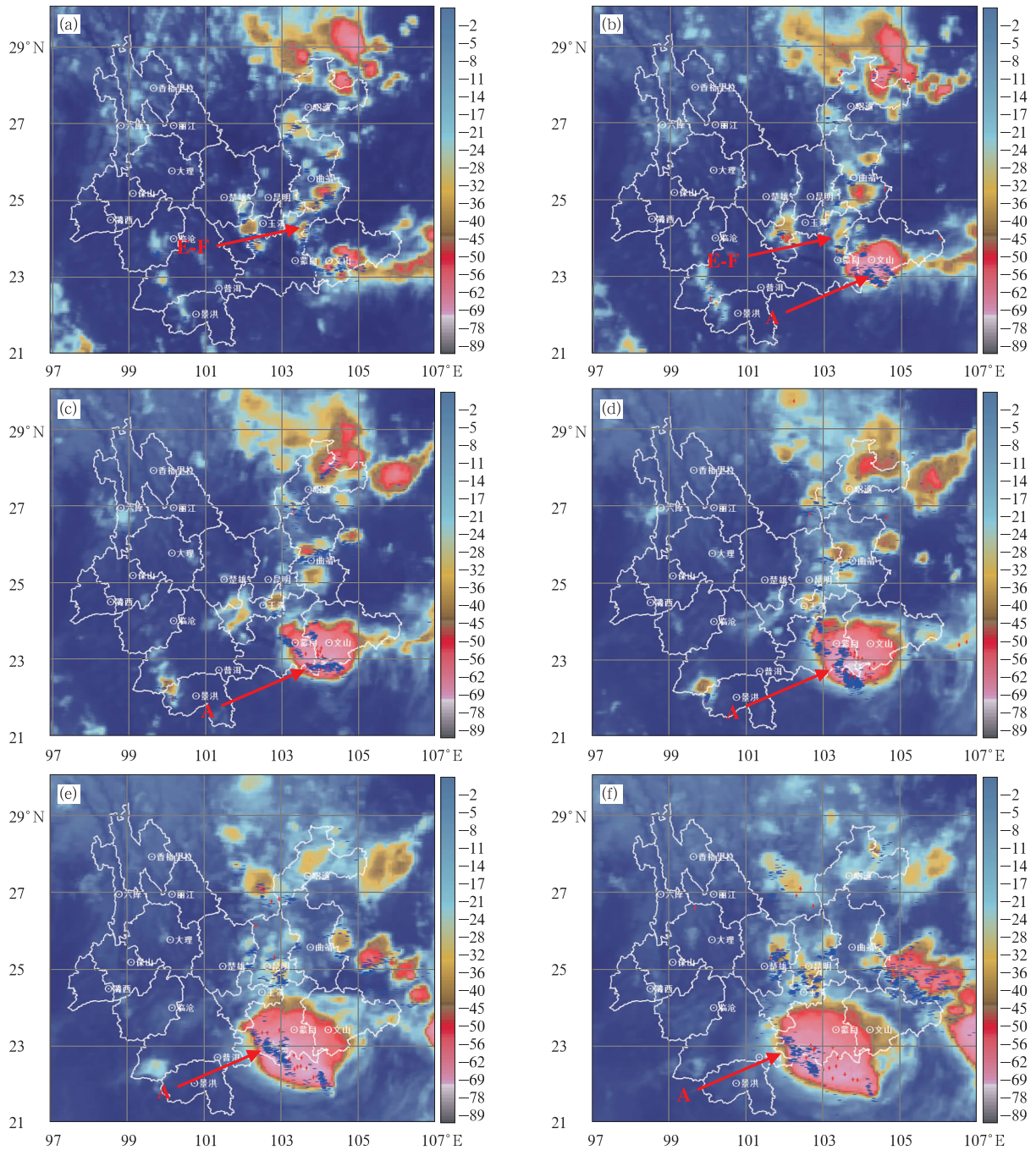


图 3 2010 年 9 月 21 日雷暴云团 A 卫星红外云图(TBB, 单位:  $^{\circ}\text{C}$ )和前 30 min 闪电叠加 (红色“+”和蓝色“-”分别表示正、负地闪)

(a)17:00, (b)18:00, (c)19:00, (d)20:00, (e)21:30, (f)22:30

Fig. 3 Satellite infrared cloud image(unit of TBB:  $^{\circ}\text{C}$ ) stacked with lightning before 30 min for thunderstorm cloud cluster A on 21 Sep 2010 (blue “+” and red “-” represent positive and negative cloud-to-ground lightning, respectively)

(a)1700 BT, (b)1800 BT, (c)1900 BT, (d)2000 BT, (e)2130 BT, (f)2230 BT

发生,且正地闪比例增加,23:30(图略)MCC 冷云区开始出现分裂、变形和缩小,东部云区 TBB 不小于  $-48\text{ }^{\circ}\text{C}$  的云区增加,MCC 逐渐减弱,地闪活动减弱。

### 3.2 雷暴云团 B 的演变与闪电活动

2010 年 9 月 22 日 15:00 前云南东部为逐渐西

移的层状云覆盖,云层分布均匀和稳定,TBB 较高,一般在  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  以上,没有闪电发生。16:00(图 4a)层状云区的前侧(西部)楚雄、玉溪到红河等地区对流单体生成和发展,这主要由于在有云区和无云区的交界,即干湿空气的交界午后受热不均易形成对

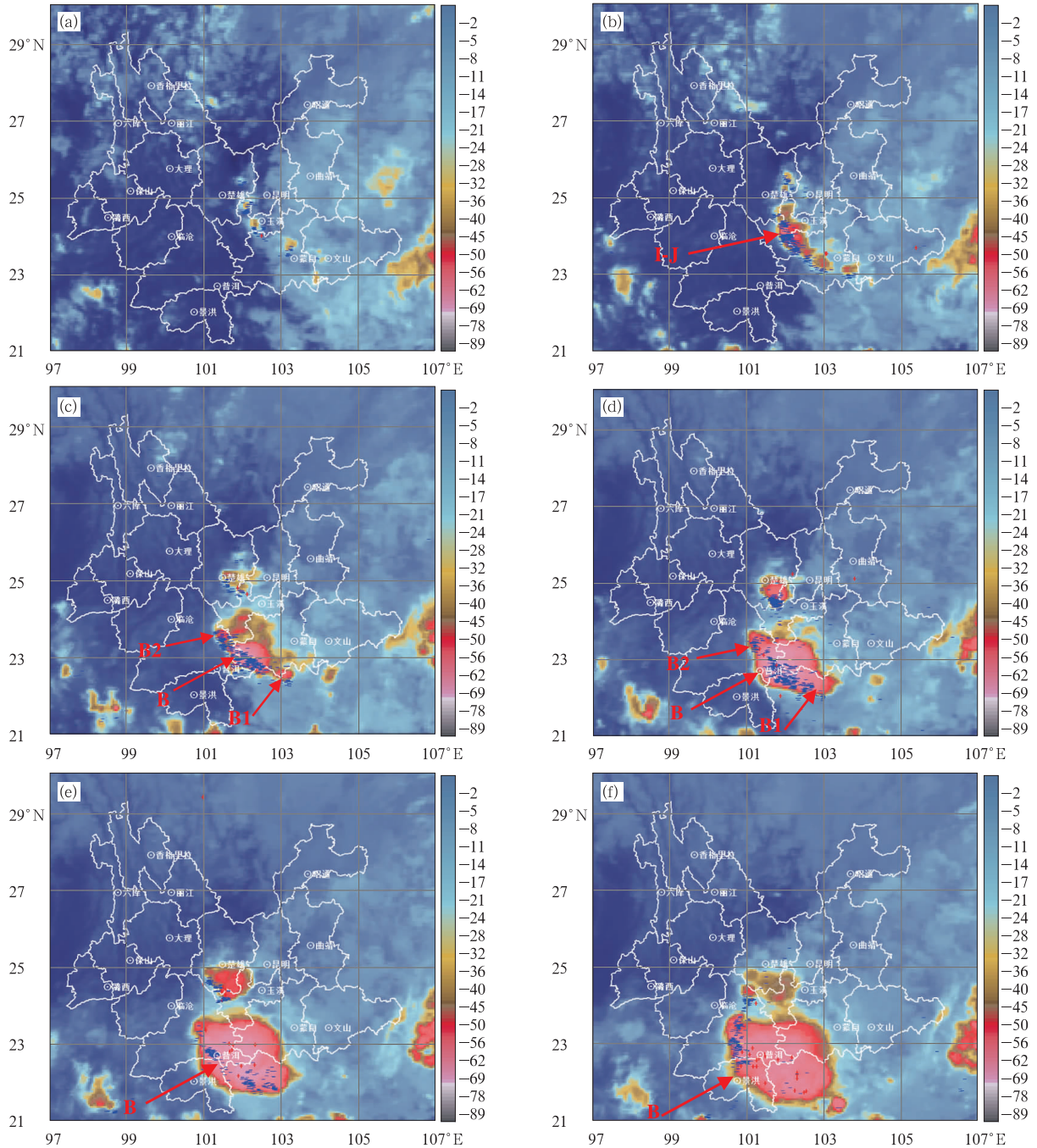


图 4 2010 年 9 月 22 日雷暴云团 B 卫星红外云图(TBB,单位:  $^{\circ}\text{C}$ )和前 30 min 闪电叠加(红色“+”和蓝色“-”分别表示正、负地闪)  
(a)16:00,(b)17:30,(c)19:30,(d)20:30,(e)21:30,(f)22:30

Fig. 4 Satellite infrared cloud image(unit of TBB:  $^{\circ}\text{C}$ ) stacked with lightning before 30 min for thunderstorm cloud cluster B on 22 Sep 2010(blue “+” and red “-” represent positive and negative cloud-to-ground lightning, respectively)  
(a)1600 BT,(b)1730 BT,(c)1930 BT,(d)2030 BT,(e)2130 BT,(f)2230 BT

流不稳定而触发对流发展,对流单体 TBB 为  $-40 \sim -32^{\circ}\text{C}$ ,负地闪开始发生,17:00(图略)对流单体逐渐发展和彼此连接,在玉溪境内的两个对流云团发展迅速,面积扩大数倍,TBB 分别下降至  $-49^{\circ}\text{C}$  和  $-51^{\circ}\text{C}$ ,其南侧和北侧还不断有新的对流单体生成,形成弧状雷暴云带 I-J,负地闪频繁,17:30(图 4b)弧状雷暴云带 I-J 西南移,最南端可能暖湿条件好,对流单体发展迅速且不断生成补充,使弧状雷暴云带 I-J 变得越来越紧密,其长度和宽度进一步增加,其中玉溪境内的两个对流云团合并加强,TBB 下降到  $-56^{\circ}\text{C}$ ,整个雷暴云带负地闪始终占绝对优势,且密集闪电主要发生在雷暴云带前缘。

19:00(图略)在弧状雷暴云带继续西南移过程中,结构逐渐变得松散且强度减弱,失去弧状雷暴云带的特征,而处于南侧的对流云团 B 向西南方向(向前)扩展到红河州西部,TBB 下降至  $-59^{\circ}\text{C}$ ,地闪发生密集,其他对流云团分裂减弱、TBB 上升、云系分散(散乱),地闪减弱,19:30(图 4c)云团 B 迅速发展为低于  $-52^{\circ}\text{C}$  冷云区近似呈圆形结构的  $\beta$  中尺度对流云团(雷暴云团),TBB 下降至  $-65^{\circ}\text{C}$ ,云体结构密实,云团前部 TBB 低于其后部,频繁的负地闪同样发生在云团的前部,同时在减弱弧状雷暴云带的前侧触发了 B1, B2 对流单体补充到 B 的南北两侧,20:30(图 4d) B1 和 B2 两个对流单体并入到雷暴云团 B 中,发展为长约 2.6 个经距、宽约 1.5 个纬距的  $\alpha$  中尺度对流云团,TBB 为  $-70 \sim -68^{\circ}\text{C}$ ,开始有少量正地闪伴随频繁的负地闪发生,21:30(图 4e)云团 B 达到成熟阶段,TBB 不大于  $-52^{\circ}\text{C}$  的冷云区长约 2.6 个经距、宽约 2.0 个纬距,演变为近似圆形结构的 MCC, TBB 维持,地闪活动平缓,负地闪始终发生在云团前侧,正地闪分布在中心区域,22:30(图 4f)云团 B 处于减弱阶段,云区松散和均匀,整个云团前后部位 TBB 均匀,约为  $-62^{\circ}\text{C}$ ,地闪活动减少,中心区正地闪增加,23:30(图略)雷暴云团 B 分裂减弱,直至 23 日 02:00 减弱消失。

综上所述,台风凡亚比(1011)西行减弱的热带低压的外围偏东气流一方面携带充沛水汽,另一方面由于热带偏东气流的辐合作用和午后地面加热不均,有利于对流雷暴云团的形成和发展。首先,在热带偏东气流辐合区附近生成中尺度弧状对流云带;其次,由于局部对流云团合并或者向周围暖湿条件好的区域扩展后导致水汽和能量的进一步集中,迅速发展成为中尺度雷暴云团,进而发展为中尺度对

流复合体,先后两次中尺度雷暴系统的演变和沿相同路径偏西移造成云南省连续 2 d 的雷暴天气过程,雷暴云团生命史达 7~8 h。在雷暴云团发展演变过程中,热带低压前侧(西侧)热带东风急流的辐合抬升作用触发雷暴云团前部暖湿空气对流发展,产生强的上升运动,上升气流又会给云的中上部提供丰富过冷却云水,使雷暴云得到进一步发展,TBB 下降,云体厚度增加,云内大小不一的不同相态粒子共存和碰并几率较大,为云内电荷提供条件<sup>[17]</sup>,且这些区域的温度和粒子相态有利于负电荷区的形成<sup>[18]</sup>,因此,前侧就成为对流发展和能量来源的主要区域和闪电密集区,频繁地闪(负地闪为主)主要出现在 TBB 不大于  $-56^{\circ}\text{C}$  的中部云区及其前部,密集的负地闪对应着云中的上升气流区<sup>[11]</sup>,且负地闪分布越密集,频数越高,中尺度雷暴系统发展越剧烈,后部主要是云砧和高云区,一般存在降水和下沉气流,抑制对流发展和闪电发生。

#### 4 TBB 结构特征及与地闪分布关系

为了进一步了解雷暴云团的结构和闪电特征,图 5 和图 6 分别给出雷暴云团 A 和 B 生成发展初期、发展鼎盛阶段、成熟阶段和减弱阶段卫星云图 TBB 与前 30 min 发生闪电的叠加分布,为图形清晰并便于分析,图 5 和图 6 仅给出了 TBB 不大于  $-20^{\circ}\text{C}$  的等值线分布情况,间隔为  $4^{\circ}\text{C}$ ,并且由外向内加粗实线表示 TBB 为  $-32^{\circ}\text{C}$ ,  $-52^{\circ}\text{C}$  等值线。

##### 4.1 雷暴云团 A 的结构和地闪分布

从图 5 可以看出,2010 年 9 月 21 日 18:00(图 5a)不连续弧状云带 E-F 南段(文山境内)的 3 个对流云团合并,形成了发展初期的雷暴云团 A, TBB 等值线密集,最低达  $-69^{\circ}\text{C}$ ,且整个云体 TBB 呈不对称分布,低 TBB 中心偏向于云体前部(西南部)以及 TBB 等值线前部比后部更为密集,即前部 TBB 梯度大于后部,密集的负地闪主要出现在前部 TBB 不大于  $-60^{\circ}\text{C}$  的低中心和大的 TBB 梯度云区内,30 min 内云团上发生了 733 次负地闪;20:00(图 5b)雷暴云团 A 发展到鼎盛阶段,TBB 最低中心达  $-74^{\circ}\text{C}$ ,始终偏向于云体的前部,闪电最活跃,30 min 内云团上共发生负地闪 1245 次、正地闪 18 次,正地闪比例占 1%,分散在云体中部,但基本在负地闪的后部;21:00(图 5c)雷暴云团 A 发展到成熟阶段,达到 MCC 标准,TBB 最低中心有所上升至

-73℃,地闪活动开始逐渐减弱,30 min 内云团上发生负地闪 812 次、正地闪 12 次;23:00(图 6d)雷暴云团 A 开始减弱,TBB 最低中心上升至-70℃,30 min 内云团上发生负地闪 524 次、正地闪 33 次,地闪频数减少,但正地闪比例明显增加,占总地闪的

6%,且密集的负地闪始终出现在云团 TBB 不大于-60℃低值中心和前部大的 TBB 梯度云区内,大多数正地闪分散在 TBB 不大于-60℃的中心云区附近。

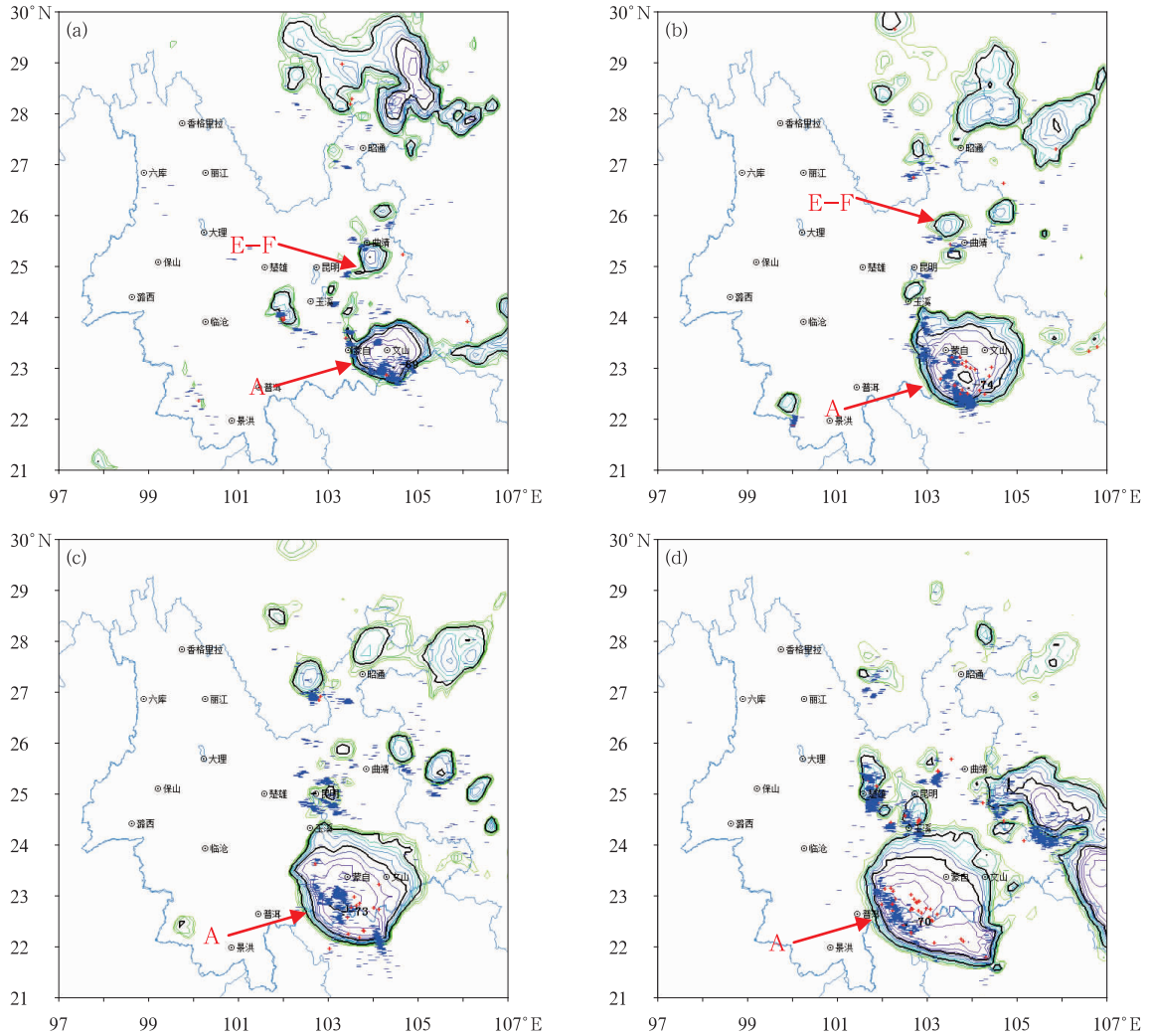


图 5 2010 年 9 月 21 日雷暴云团 A 的 TBB 不大于-20℃等值线分布  
(单位:℃;等值线间隔为 4℃;-32℃,-52℃为粗实线)和前 30 min 闪电叠加  
(红色“+”和蓝色“-”分别表示正、负地闪)  
(a)18:00,(b)20:00,(c)21:00,(d)23:00

Fig. 5 Distribution of TBB no higher than -20℃(unit:℃; the interval is 4℃;-32℃,-52℃ are thick lines)  
of thunderstorm cloud cluster A stacked with lightning before 30 min on 21 Sep 2010  
(blue “+” and red “-” represent positive and negative cloud-to-ground lightning, respectively)  
(a)1800 BT,(b)2000 BT,(c)2100 BT,(d)2300 BT

#### 4.2 雷暴云团 B 的结构和地闪分布

从图 6 可以看出,22 日 20:00(图 6a)减弱的弧状雷暴云带 I-J 上的对流单体 B 重新迅速发展,并且南北两侧触发新生的对流单体并入,形成发展初

期的雷暴云团 B,TBB 低值中心下降至-69℃,同样偏向于云团的前部云区,等值线密度大和梯度大,且雷暴云团具有前部云区 TBB 梯度大于后部云区的结构特征,30 min 内发生负地闪 455 次,均发生

在云团 TBB 不大于  $-56^{\circ}\text{C}$  低值中心和前部等值线密集区内,没有正地闪出现;21:00(图 6b)云团 B 发展到呈椭圆形结构的鼎盛阶段, TBB 维持在  $-69^{\circ}\text{C}$ , 偶有正地闪在 TBB 低值中心和云区中心附近发生, 30 min 内发生负地闪 270 次、正地闪 5 次; 22:00(图 6c)云团达到 MCC 标准, 发展到成熟阶段, TBB 低值中心上升至  $-67^{\circ}\text{C}$ , 并且逐渐接近云

区中心, 云团前部云区和后部云区的梯度差异减小, 云团的前后云区逐渐变得均匀, 负地闪减弱, 但正地闪增加, 30 min 内发生负地闪 212 次、正地闪 14 次; 23:00(图 6d)雷暴云团 B 处于减弱阶段, 结构变形, 主体云区 TBB 上升至  $-64^{\circ}\text{C}$ , 30 min 内发生负地闪 128 次、正地闪 17 次。

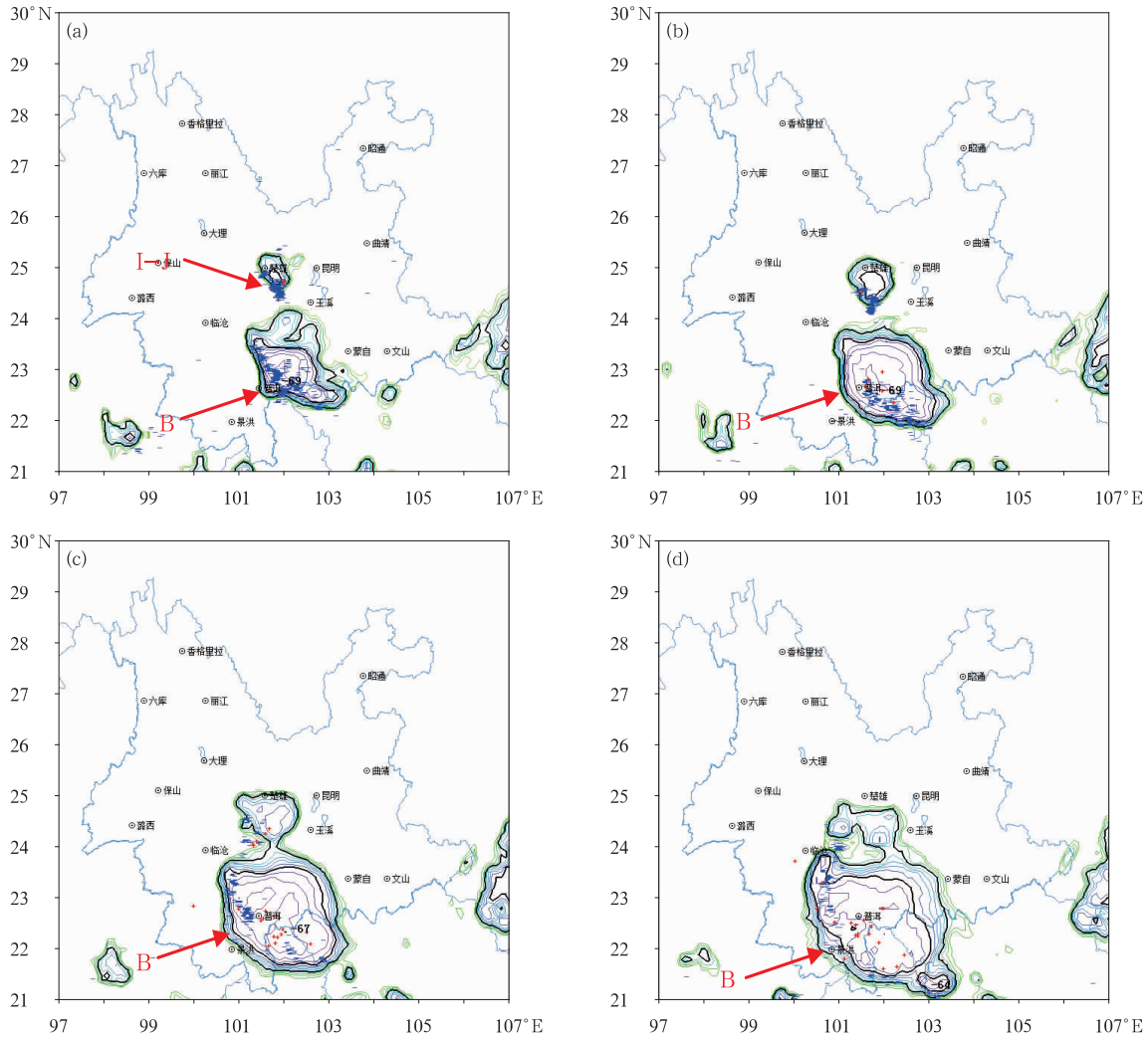


图 6 2010 年 9 月 22 日雷暴云团 B 的 TBB 不大于  $-20^{\circ}\text{C}$  等值线分布(单位:  $^{\circ}\text{C}$ ; 等值线间隔为  $4^{\circ}\text{C}$ ;  $-32^{\circ}\text{C}$ ,  $-52^{\circ}\text{C}$  为粗实线)和前 30 min 闪电叠加(红色“+”和蓝色“-”分别表示正、负地闪) (a)20:00, (b)21:00, (c)22:00, (d)23:00

Fig. 6 TBB no higher than  $-20^{\circ}\text{C}$  isoline distribution(unit:  $^{\circ}\text{C}$ ; the interval is  $4^{\circ}\text{C}$ ;  $-32^{\circ}\text{C}$ ,  $-52^{\circ}\text{C}$  are thick lines) of thunderstorm cloud cluster B stacked with lightning before 30 min on 22 Sep 2010 (blue “+” and red “-” represent positive and negative cloud-to-ground lightning, respectively) (a)2000 BT, (b)2100 BT, (c)2200 BT, (d)2300 BT

由上面分析可知, 雷暴云团的结构和正、负地闪的时空分布存在很大差异, 一方面雷暴云团前侧对流区负地闪密集, 而正地闪分散在后部云砧和层状云区域, 另一方面雷暴云团发展前期主要为负地闪,

后期开始出现正地闪, 消散阶段正地闪逐渐增加, 这与 Fuquay<sup>[19]</sup> 和 Rutledge 等<sup>[4]</sup> 得出的结论一致, 符合 Carey 等认为的雷暴为三极性电荷结构(正电荷中心集中在 4.5 km 和 9.5 km 处, 而负电荷中心集



中在 6 km 处)的研究结果<sup>[20]</sup>,中层为持续稳定深厚的霰和雹负电荷区,高层为携带正电荷的冰晶,降水粒子下落形成的低层次正电荷能够增加局地电场,有利于负地闪的发生<sup>[21]</sup>。在雷暴云团西移过程中,后侧下沉气流触发抬升前侧暖湿空气,形成入流上升气流,而上升气流核心内是霰和雹携带负电荷区域,从而形成中层持续稳定深厚的负电荷区,导致雷暴云团前侧对流发展旺盛、TBB 低且梯度大和负地闪密集;另外雷暴云团发展初期,前侧主要对流区域形成深厚的垂直上升气流,高层正电荷层被中层负电荷层遮挡而不能暴露于地面,以中层负电荷层产生负地闪为主,雷暴单体发展到成熟之后,在高空偏东风切变的作用下形成向前的倾斜上升气流,高层的云冰正电荷区域与中层的负电荷区倾斜,形成突出于云体的云砧,减少了负电荷对正电荷的屏蔽作

用,由于其下方不存在异性电荷区域,云体上部电荷区形成的正地闪增加,这可能也是雷暴云团 TBB 低值中心逐渐靠近云团中心和正地闪偏于中心发生的原因,需对多个雷暴个例并结合雷达回波进行探讨。

### 5 地闪特征与 TBB 的演变关系

下面对中尺度雷暴云团从生成、发展、成熟到减弱过程中的闪电极性、闪电频数与云团 TBB 随时间演变进行分析,进一步研究雷暴云的闪电活动规律与强度的关系。

图 7 给出雷暴云团每 30 min 卫星云图最低 TBB 和对应前每 30 min 总地闪、负地闪、正地闪频数随时间演变。

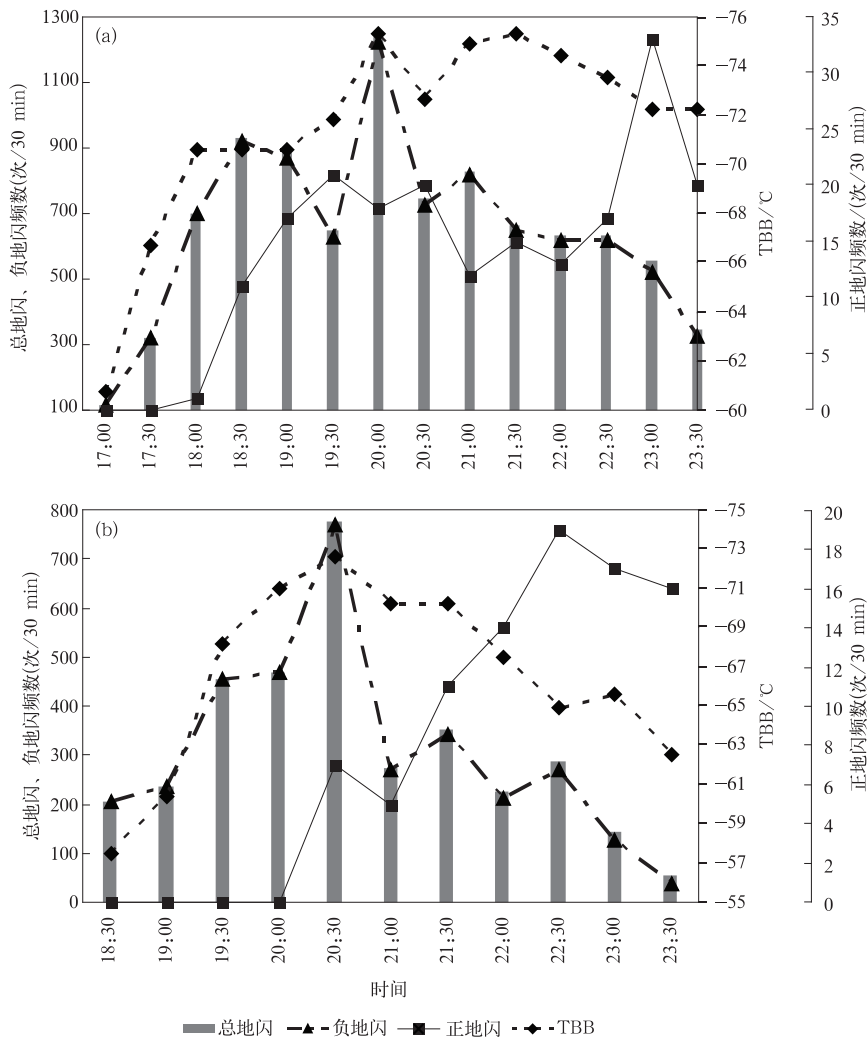


图 7 雷暴云团 A(a)和 B(b)总地闪、负地闪、正地闪频数和 TBB 随时间演变

Fig. 7 Time evolution of total, negative and positive cloud-to-ground lightning frequency, and TBB for thunderstorm cloud cluster A(a) and cluster B(b)

从图7可以看出,负地闪频数比正地闪频数大1~2个量级,总地闪频数和负地闪频数随时间的演变趋势一致、曲线几乎重合,说明雷暴云团以负地闪为主,负地闪在整个雷暴云团生成、发展、成熟到减弱的整个演变过程中处于绝对优势,雷暴云团负地闪频数的演变也能表征总地闪频数的演变;另外总地闪、负地闪、正地闪频数随时间发生着有规律的变化,地闪频数是一个先增加达到峰值后再减小的过程,首先在雷暴云团发展初期负地闪频数迅速增大而无正地闪发生,随着雷暴云团的逐渐发展到鼎盛和成熟阶段,负地闪频数接近峰值时,正地闪开始出现,之后随着雷暴云团的减弱,负地闪频数减小而正地闪频数增加,雷暴云团的正地闪、负地闪活跃程度呈反相关关系。除具有以上共性外,两个雷暴云团闪电演变规律还存在不同点,雷暴云团A(图7a)比雷暴云团B(图7b)生命史长约2h,且地闪更加活跃,其中雷暴云团A地闪高峰长达3h,18:30—21:30出现了3个闪电频数峰值,最大地闪频数峰值达1200次/30min以上,并且其间出现的两个负地闪频数谷值对应着两个正地闪频数峰值,而随后出现的两个负地闪频数峰值对应着两个正地闪频数谷值,这可能与雷暴云团内部对流活动存在起伏变化有一定关系;雷暴云团B出现了1个闪电高峰后,闪电频数急剧下降,此时正地闪频数却在迅速增加,这也是雷暴云团持续时间稍短的原因。

从雷暴云团负地闪频数与TBB随时间演变总体可以看出,它们也具有相似的演变趋势。雷暴云团发展到TBB不大于 $-56^{\circ}\text{C}$ 时,负地闪活动开始,且随着TBB降低,负地闪异常活跃且频数剧增,TBB下降到最低值时,负地闪频数达到最大峰值,之后随着TBB逐渐升高,负地闪频数迅速减小,但由于减弱雷暴云团形成的云砧导致TBB保持较低且升高缓慢,这样的典型特征雷暴云团B表现得更加突出;雷暴云团TBB越低,说明对流发展越强,负地闪频数越大,即地闪越活跃,如2010年9月21日20:00雷暴云团A TBB达最低 $-75^{\circ}\text{C}$ ,地闪频数达到峰值,30min发生负地闪1222次、总地闪1240次,22日20:30雷暴云团B TBB最低达 $-73^{\circ}\text{C}$ ,地闪也最活跃,30min发生负地闪768次、总地闪775次。而从正地闪频数与TBB随时间演变可以看出,雷暴云团A和B TBB下降到一定程度才开始有正地闪发生,分别下降到 $-70^{\circ}\text{C}$ 和 $-72^{\circ}\text{C}$ ,说明正地闪是雷暴云团发展到强盛阶段的产物,之后虽然雷暴

云团A的正地闪频数有起伏,但总体上从TBB继续下降到最低值后逐渐上升,正地闪频数呈逐渐增加趋势,同样这一特征在雷暴云团B上表现更加突出,说明正地闪频数增加是雷暴云团逐渐发展成熟的标志,这也是正地闪的出现和频增易于诱发强天气原因,随着TBB逐渐上升,正地闪频数达到峰值,雷暴云团处于减弱阶段。

负地闪在整个中尺度雷暴云团演变过程中占主导地位,这与许多观测事实和研究结果一致,也与我国雷暴主要具有三极性结构有关,雷暴中负电荷区的电荷浓度比正电荷区大1个量级,负地闪的回击数较正地闪偏多<sup>[18]</sup>,其演变趋势能表征雷暴云团地闪活动演变特征,且正地闪、负地闪活跃程度呈反相关,并与TBB之间存在一定的相关关系,负地闪是雷暴云团发展的产物,而正地闪是雷暴云团发展到强盛阶段的标志。

## 6 小 结

1) 西行减弱的热带低压是中尺度雷暴对流系统的有利环流背景,外围偏东气流提供较好的暖湿条件,而偏东气流辐合提供有利的抬升动力条件。午后由于热力条件进一步改善,在热带偏东气流辐合区附近先后生成两条中尺度弧状对流云带,弧状对流云带上局部对流云团合并发展或扩展为两个中尺度雷暴云团,最后发展为两个中尺度对流复合体,沿相同路径偏西移产生强烈雷暴天气和频繁闪电活动。

2) 从发展到成熟阶段雷暴云团具有结构和闪电空间分布不均匀的特征,前部为主要对流区,TBB等值线密度和梯度大,后部为由于降水和下沉气流形成的云砧和高云区,TBB等值线密度和梯度小且均匀,低TBB中心偏于云团的前部云区;密集的负地闪出现在雷暴云团前部大的TBB梯度区和TBB不大于 $-56^{\circ}\text{C}$ 的低值中心附近,正地闪分散出现在TBB不大于 $-56^{\circ}\text{C}$ 的低值中心附近,偏于负地闪区域后部发生,这与雷暴具有三极性电荷结构特征有关,前侧云中的入流上升气流导致在中层形成持续稳定深厚的霰和雹负电荷区而产生负闪电,其后部的降水和下沉气流形成高层云砧正电荷区和低层降水粒子次正电荷区而产生正闪电。

3) 雷暴云团的结构和闪电活动随时间演变,随着雷暴云团逐渐发展到成熟阶段,在高空偏东风切

变的作用下形成向前的倾斜上升气流,造成云区向前倾斜和高层的云冰正电荷区域与中层的负电荷区倾斜,导致 TBB 上升、等值线密度变小、TBB 低值中心靠近云团中心和云体上部云冰正电荷形成的正闪电增加。

4) 雷暴云团正、负地闪活跃程度呈反相关,并与 TBB 存在相关关系。TBB 降低,负地闪频数剧增,说明上升气流强和雷暴云团发展;当 TBB 达最低值时,负地闪频数达峰值且正地闪出现,说明倾斜上升气流开始形成和雷暴云团成熟;TBB 升高,负地闪频数迅速减小,正地闪频数继续增加到峰值,说明倾斜上升气流和雷暴云团减弱。

### 参考文献

- [1] 张义军,孟青,马明,等. 闪电探测技术发展和资料应用. 应用气象学报,2006,17(5):611-620.
- [2] 张腾飞,段旭,张杰,等. 云南强对流暴雨的闪电和雷达回波特征及相关性. 热带气象学报,2010,27(3):379-386.
- [3] 张腾飞,张杰,郭荣芬. 一条中尺度雨带的多普勒雷达回波特征及环境条件分析. 应用气象学报,2005,16(1):70-77.
- [4] Rutledge S A, Lu C, MacGorman D R. Positive cloud-to-ground lightning in mesoscale convective system. *J Atmos Sci*, 1990, 47: 1085-2100.
- [5] Holle R L, Watson A L, Lopez R E, et al. The life cycle of lightning and severe weather in a 3—4 June 1985 PRE-STORM mesoscale convective system. *Mon Wea Rev*, 1994, 122:1798-1808.
- [6] Qie Xiushu, Yan Muhong, Guo Changming, et al. Lightning data and study of thunderstorm nowcasting. *Acta Meteor Sinica*, 1993, 7:244-256.
- [7] 蒙伟光,易燕明,杨兆礼,等. 广州地区雷暴过程云-地闪特征及其环境条件. 应用气象学报,2008,19(5):611-619.
- [8] 袁铁,鄯秀书. 基于 TRMM 卫星对一次华南飑线的闪电活动及其与降水结构的关系研究. 大气科学,2010,34(1):58-70.
- [9] 冯桂力,鄯秀书,袁铁,等. 一次冷涡天气系统中雹暴过程的地闪特征分析. 气象学报,2006,64(2):211-220.
- [10] 刘冬霞,鄯秀书,冯桂力. 华北一次中尺度对流系统中的闪电活动特征及其与雷暴动力过程的关系研究. 大气科学,2010,34(1):95-104.
- [11] 冯桂力,鄯秀书,周筠珺. 一次中尺度对流系统的闪电演变特征. 高原气象,2006,25(2):220-228.
- [12] 郑栋,孟青,吕伟涛,等. 北京及其周边地区夏季地闪活动时空特征分析. 应用气象学报,2005,16(5):638-644.
- [13] 鄯秀书, Ralf Toumi. 卫星观测到的青藏高原雷电活动特征. 高原气象,2003,22(3):288-294.
- [14] 戴建华,秦虹,郑杰. 用 TRMM/LIS 资料分析长江三角洲地区的闪电活动. 应用气象学报,2005,16(6):728-736.
- [15] 王艳,张义军,马明. 卫星观测的我国近海海域闪电分布特征. 应用气象学报,2010,21(2):157-163.
- [16] 张腾飞,许迎杰,张杰,等. 云南雷电活动的大气相对湿度诊断特征及响应关系分析. 应用气象学报,2010,21(2):180-188.
- [17] 陈渭明. 雷电学原理. 北京:气象出版社,2006:79-144.
- [18] 张义军,葛正谟,陈成品,等. 青藏高原东部地区的大气电特征. 高原气象,1998,17(2):135-141.
- [19] Fuquay D M. Positive cloud-to-ground lightning in summer thunderstorm. *J Geophys Res*, 1982, 87:7131-7140.
- [20] Carey L D, Murphy M J, McCormick T L, et al. Lightning location relative to storm structure in a leading-line, trailing-stratiform mesoscale convective system EJ3. *J Geophys Res*, 2005, 110: D03105, doi:10.1029/2003JD004371.
- [21] Jacobson E A, Krider E P. Electrostatic field changes produced by Florida lightning. *J Atmos Sci*, 1976, 33:103-117.

## Evolutions and Cloud-to-ground Lightning Features of Two Mesoscale Convective Thunder Storm Systems in Yunnan

Zhang Tengfei<sup>1)</sup> Yin Liyun<sup>1)</sup> Zhang Jie<sup>2)</sup> Xie Yiran<sup>1)</sup> Zhu Li<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> (Yunnan Provincial Meteorological Observatory, Kunming 650034)

<sup>2)</sup> (Yunnan Provincial Meteorological Information Center, Kunming 650034)

### Abstract

The circulation background of mesoscale convective thunderstorm system is diagnostically analyzed from 21 September to 23 September in 2010 by NCEP/NCAR data, and the evolutions and cloud-to-ground lightning activity features of two mesoscale convective thunderstorm systems are analyzed by synchronous stack of lightning detection system observations and FY-2E satellite images. Results show that the advan-

tageous circulation background conditions of high energy, high humidity, and lifting dynamism are also supplied for the mesoscale convective thunderstorm systems by the weakened thermal depression. Mesoscale arc convective cloud belts appears first, on which partial convective cloud clusters gradually develop to mesoscale storm cloud clusters and then run into mesoscale convective storm complexes moving to the west along the same route, leading to strong thunderstorm weather and frequent CG lightning activities on the way.

The negative cloud-to-ground (negative CG) lightning is predominant compared to the positive cloud-to-ground (positive CG) lightning during the whole lifetime of a thunder cloud cluster. But not only the storm cloud cluster contracture and the CG lightning activity feature change with time, but also positive CG and negative CG lightning frequency is well related to the cloud top temperature, which is related to the three-negative-polar structure of thunder cloud over the lower latitude plateau of China. When the cloud top temperature TBB descends and TBB isoline density increases, the thunder cloud cluster develops gradually, the low TBB center locates to its foreside, and the negative CG lightning frequency leaps. When the TBB descends to the minimum, the thunder cloud cluster develops to the maturation, negative CG lightning frequency gets to an apex, and positive CG lightning begin to take place. When the TBB ascends and TBB isoline density decreases, the thunder cloud cluster weakens gradually, the low TBB center closes up its center, the negative CG lightning frequency decreases rapidly, and positive CG lightning frequency increases to the apex gradually. In the meantime when TBB of a thunder cloud cluster is lower, convective development is stronger and CG lightning activity is more furious.

The storm cloud cluster contracture and the CG lightning spatial distribution are asymmetric. In its foreside TBB is lower and the TBB isoline density and grads are bigger than those in its rearward. Negative CG lightning mainly cluster in its foreside with big TBB grads and within the low center where TBB is no higher than  $-56^{\circ}\text{C}$ , while sparse positive CG lightning usually disperse within the low center when TBB is no higher than  $-56^{\circ}\text{C}$ , namely taking place in the rearward of dense negative CG lightning.

The activity of positive CG and negative CG lightning are negatively correlated. Positive CG lightning hardly takes place during the negative CG rapid incremental phase, it usually begins during the negative CG lightning mild phase, and it increases when negative CG lightning weaken. So negative CG lightning is the result of storm cloud cluster development and positive CG lightning is the result of storm cloud cluster developing to mature.

**Key words:** Yunnan; meso-scale convective storm system; cloud-to-ground lightning feature