

慕建利,李泽椿,谌芸. 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[J]. 气象,2012,38(1):56-65.

# 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<sup>\*1</sup>

慕建利<sup>1</sup> 李泽椿<sup>2</sup> 谌芸<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 中国气象局公共气象服务中心,北京 100081

<sup>2</sup> 国家气象中心,北京 100081

**提 要:** 利用 2007 年 8 月 8 日 18 时至 9 日 02 时发生在陕西关中强暴雨期间的地闪、卫星 TBB、雷达回波和地面加密降水资料,通过统计和对比分析的方法,分析了地闪活动特征及其与中尺度对流系统(MCS)和强降水的关系。地闪活动特征分析显示,暴雨过程中负地闪占绝对优势,为总地闪的 97.7%。负闪频数和总闪频数的逐时演变趋势完全一致且呈现两峰一谷的趋势,正闪频数的变化呈现三峰两谷的趋势,但是正闪频数最大值与总闪、负闪频数峰值时间一致。负闪活跃期正负闪 6 min 演变均表现为多峰结构,正闪的波峰提前于负闪的波峰 12 min。负闪频数变化和 MCS、雷达反射率因子演变对比分析表明,负闪发生区是未来对流云团和对流发展加强区,负闪频数密集区位于对流云团前部 TBB 等值线密集区,负闪频数的急剧增加意味着未来对流系统的猛烈发展;负闪主要出现在回波强度大于 40 dBz 的区域,正闪则落到强回波中心两侧 30~40 dBz 的回波区,中尺度对流系统快速发展加强期,负闪密集区位于回波单体的前沿,中尺度系统发展稳定少动期,负闪大部分集中在各对流单体的强回波中心附近。对比分析地闪与暴雨发生发展的关系可见,地闪的发生和急剧增加对暴雨发生和发展加强有很好的指示意义,初闪的发生提前于强降水发生,地闪急剧增加与降水强度猛增密切相关,负地闪发生密集区是未来强降水发生区。

**关键词:** 地闪特征, 中尺度对流系统, 强暴雨

## Characteristics of Ground Lightning and Relationships of Mesoscale Convective Systems and Heavy Rainfall in a Strong Rainstorm

MU Jianli<sup>1</sup> LI Zechun<sup>2</sup> CHEN Yun<sup>2</sup>

<sup>1</sup> CMA Public Meteorological Service Centre, Beijing 100081

<sup>2</sup> National Meteorological Centre, Beijing 100081

**Abstract:** Based on the observation data of the lightning location system, temperature of blackbody brightness, Doppler radar echo and denser surface precipitation measurements from the process of a heavy rainstorm during 8–9 August 2007 in the Central Shaanxi Plain, the characteristics of ground lightning, and relationships of ground lightning, MCS, and rainstorm intensity are analyzed separately. The results indicate that the negative ground lightning accounts for the 97.7 percent of the total ground lightning. Hourly evolution tendency of negative ground lightning frequency and total ground lightning frequency presents a two-peak one-valley structure. Positive flash frequency changes have a tri-peak two-valley trend. The ground lightning frequency of 6 min positive and negative flashes in the active negative lightning period displays a trend of multi-peak value. The peaks of positive ground lightning frequency is 12 min prior to negative ground lightning frequency peaks. The relationship of ground lightning and MCS shows that the

\* 北京局地暴雨中尺度对流系统研究(2010LASW-A05)、GRAPES中尺度模式的预报和改进(GYHY201006016)和中尺度灾害天气短时(2–12小时)预报技术研究(GYHY201006003)共同资助

2011年2月12日收稿; 2011年9月22日收修定稿

第一作者:慕建利,主要从事中尺度气象学和数值模拟研究. Email: mujl668@sina.com

negative ground lightning happening area is the convective cloud cluster development and strengthening area in the future. The densified locality of negative ground lightning frequency is situated in the concentrated TBB isoline area in front of the convective cloud cluster. The sharp increase of negative ground lightning frequency means MCS development by-and-by. Negative flash occurred mainly in the echo area whose strength is greater than 40 dBz, and positive lightning falls into both sides of strong echo center. During the rapid development of MCS, negative flash dense area is located in the forefront of single echo. In MCS stabilization period, negative flashes are concentrated near the center of the strong echo. The evolution relationship between the ground lightning and the heavy precipitation reveals that the occurrence and sharp growth of the ground lightning have very good indicative significance to the development and strengthening of the rainstorm. The occurrence of the first flash occurs ahead of the strong precipitation happening. The sharp increase of ground lightning has a close connection with the sudden increase of precipitation intensity. And the concentrated regions of the negative ground lightning may indicate the area where strong precipitation happens.

**Key words:** characteristics of ground lightning, mesoscale convective system (MCS), heavy rainstorm

## 引 言

地闪是云与大地之间的一种放电过程。闪电定位系统可以连续记录闪电发生的时间和位置,通过分析闪电频数的演变,揭示生命史只有几十分钟到几小时的中小尺度对流天气系统活动。大量研究表明,中尺度对流系统(MCS)的发生发展与地闪活动特征(闪电频数,强度和极性、时空演变等)有很好的对应关系,而且中尺度对流系统的不同发展阶段对应的闪电活动特征也不相同。云对地闪电的击电位置和 TBB 等先后研究发现地闪发生在 TBB 等值线密集区<sup>[1-7]</sup>。地闪和雷达回波研究说明负地闪主要发生在 40 dBz 以上的强回波区且能够很好地预示强回波未来移动方向<sup>[8-10]</sup>。地闪活动与降水对比分析表明地闪活动与强降水有很好的对应关系,与弱的降水对应较差,地闪频数峰值提前于降水峰值,这些研究说明地闪信息的使用有助于降水预报和降水准确率的提高<sup>[4,11-14]</sup>。

2007 年 8 月 8 日夜,陕西关中中西部发生了一场 50 年一遇的特大暴雨过程,致使农田损毁,交通、通讯、电力中断、城镇内涝、洪水暴涨、山体滑坡塌方和泥石流等灾害,造成直接经济损失 5 亿多元,导致 9 人死亡。事实上,这次暴雨过程历时短、强度大、突发性强为历史罕见,暴雨发生前影响系统不明显,陕西关中处于中纬度高压坝控制之中,南部没有急流存在,没有明显的水汽和能量输送,在准确预报暴雨的落区、起止时间、雨量和分布等方面相当困

难。因此,充分利用中尺度观测资料,分析它们与强降水的关系,揭示它们在暴雨预报中的指示意义十分必要。

近年来,卫星、雷达和地面加密观测资料在陕西暴雨预报和研究中已经得到了广泛的应用,但是地闪资料的应用和研究较少,尤其是地闪资料在暴雨中尺度系统的预报和研究中更少。尽管国内外在这方面的研究已经有了大量的成果,可是闪电特征及其与强对流的关系随不同的地理位置、气象条件、海拔高度都可能有很大的差异<sup>[15]</sup>,并在一定程度上依赖于局地的对流状况<sup>[16]</sup>。因此有必要通过不同的暴雨个例总结分析陕西地闪特征及其与中尺度系统和强降水的关系,为地闪资料在陕西强暴雨中尺度系统的监测和预警的应用积累基础资料 and 提供科学依据。本文以上述强暴雨过程为例,利用地闪、卫星 TBB、雷达回波、加密降水资料和 T213 资料,分析揭示陕西关中平原强暴雨过程中的地闪活动特征、对流云降水与雷电活动的关系和地闪演变对强降水预报的指示意义,有助于提高 MCS 的综合分析能力,达到提高防灾减灾等预警服务水平和质量的目的。

## 1 强暴雨过程与资料概况

### 1.1 资料概况

本文地闪资料来自陕西省雷电监测定位系统的观测资料,该系统在全省布设 9 个定位点(图 1),系统提供的每个闪电信息包括闪电发生的时间、位置、

强度、陡度、电荷、闪电能量、误差和定位方式等雷电特征。降水资料是全国地面自动加密观测站、陕西地面自动观测站、区域加密自动观测站包括宝鸡、咸阳、西安、汉中、安康、商州区域加密观测站逐时降水量共 2036 站(陕西有 240 个站点)以及陕西 98 个地面自动观测站分钟降水量资料;天气形势场分析资料使用国家气象中心同化了卫星资料的 T213( $0.5625^{\circ} \times 0.5625^{\circ}$ )6 h 一次的再分析高空资料和常规地面观测资料;卫星资料应用 FY-2C  $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$  的 1 h 一次的云顶亮温(TBB)资料;雷达资料为西安 CB 多普勒雷达气象观测资料。

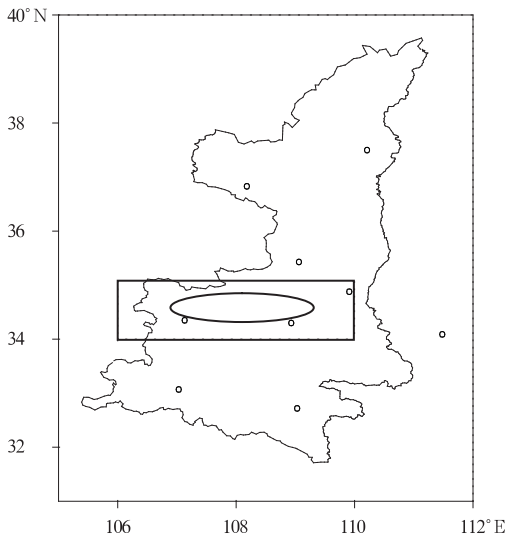


图 1 陕西省雷电监测定位系统站点分布(圆圈), 图 2 和图 5 中地闪统计范围(长方形)和暴雨区(椭圆)

Fig. 1 Distribution of lightning detection locations in Shaanxi Province (circle), statistical area (rectangle) of ground lightning described in Fig. 2 and Fig. 5 and heavy rainfall area (ellipse)

## 1.2 强暴雨过程简介

2007 年 8 月 8 日 18 时至 9 日 02 时(北京时,下同),陕西中部关中地区出现了一次暴雨到大暴雨过程。暴雨过程有 47 站降水达 50 mm 以上,其中,12 站达 100 mm 以上,2 站在 150 mm 以上。强降水主要集中在 8 日 20 时至 9 日 01 时的 6 h 内,并在关中地区从西到东形成 3 个大暴雨中心,中心最大降水量分别为 187、151 和 118 mm,最大降水强度 79、95 和  $92 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ,为典型的中尺度强对流降水过程。

此次强暴雨是在高、中、低空有利的环流配置下,不同纬度天气系统共同作用的结果。对流层高

层强大的南亚高压东北侧西北风与西风急流入口区西风(或西南风)共同作用,在西风急流入口区右侧形成的明显辐散有利于低空辐合加强和垂直上升运动的发展。对流层中层高纬度地区  $50^{\circ} \sim 120^{\circ} \text{E}$  为稳定而宽广的低压环流,低压底部不断分裂冷空气随短波槽向东南扩散;中纬度地区青藏高原高压和西太平洋副热带高压打通后形成的高压坝在陕西中部断裂后形成切变线,使西太平洋副热带高压底部和热带辐合带北部的偏东暖湿气流在四川折向北与南下冷空气在暴雨区交汇。对流层低层河套小高压底部的东风气流与副热带高压西侧的偏东南风在关中中西部相遇形成东西向切变线;在地面图上,临近暴雨时在甘肃陇东形成冷高压,高压底部为东北—西南向冷锋,它们共同作用导致了强对流降水。

## 2 强暴雨的地闪活动特征

8 日 15 时至 9 日 01 时,关中暴雨区附近( $34^{\circ} \sim 35^{\circ} \text{N}$ 、 $106^{\circ} \sim 110^{\circ} \text{E}$ )共发生了 6459 次地闪,其中,负闪为 6310 次,正闪只有 149 次,说明暴雨期间,地闪中负闪占绝对优势,占总地闪的 97.7%,正闪只占总地闪的 2.3%。从地闪的逐时演变来看(图 2a),负闪频数和总闪频数的演变趋势完全一致,从非常少到突然增大,8 日 20 时达到最大(3711 次)后又突然减小,到 22 时达最少,23 时又略增多,随后开始减少至消失,从而在整个暴雨过程中形成了两峰(一强一弱)一谷的趋势。正闪频数的变化不同于总闪和负闪的变化,呈现三峰两谷的趋势。从地闪的 6 分钟演变来看(图 2b),负闪多发期主要集中在 8 日 19 时 22 分至 21 时 28 分时段内,除 21 时 22 分少于  $100 \text{ 次} \cdot 6 \text{ min}^{-1}$  外,其余时间均在  $100 \text{ 次} \cdot 6 \text{ min}^{-1}$  以上,最大出现在 20 时 40 分,为  $532 \text{ 次} \cdot 6 \text{ min}^{-1}$ ,并且在这段时间内有多个波动;与负闪活跃期相对应,正闪也是明显的活跃期,同时也出现多个波动,而且与负闪的波数相等,但是正闪的波峰提前于负闪的波峰,如负闪的最大峰值出现在 8 日 20 时 40 分,而正闪的最大峰值( $13 \text{ 次} \cdot 6 \text{ min}^{-1}$ )出现在 20 时 28 分,比负闪的峰值提前 12 min。负闪在 21 时 58 分至 23 时基本上没有发生,23 时后至 9 日 01 时 30 分为弱活动期,负闪在弱活动期也存在多峰结构。21 时 30 分至 24 时 30 分没有正闪出现,正闪在暴雨发生前期和消亡期也比较活跃,呈现多峰结构。可见,暴雨期间,正、负闪不论在高频发

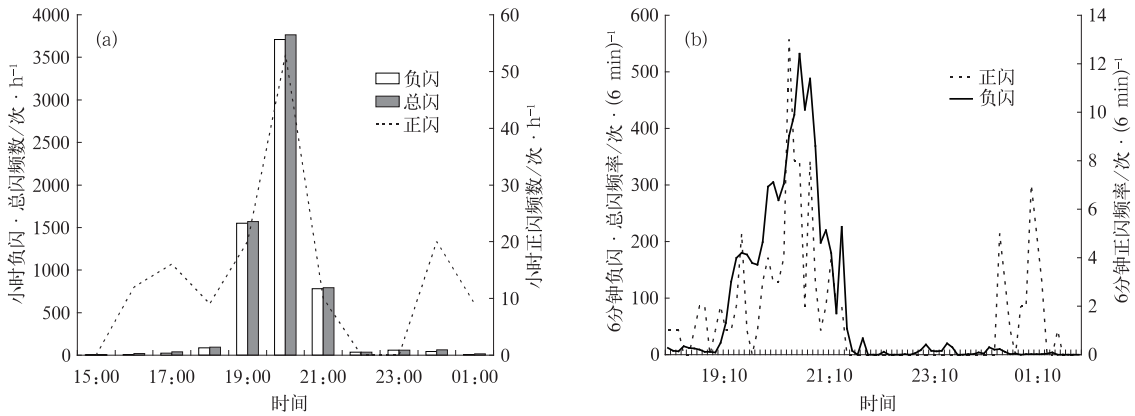


图 2 关中暴雨区附近 ( $34^{\circ}\sim 35^{\circ}\text{N}, 106^{\circ}\sim 110^{\circ}\text{E}$ ) 地闪频数(次)演变图

(a) 逐时, (b) 每 6 min

Fig. 2 The hourly (a) and six-min (b) evolutions of ground lightning rate in heavy rainfall region ( $34^{\circ}\sim 35^{\circ}\text{N}, 106^{\circ}\sim 110^{\circ}\text{E}$ )

时段,还是在低发时段,并非一成不变,而是高低交替的演变过程,说明造成暴雨的对流系统相对来说时强时弱。

### 3 地闪活动与中尺度系统的关系

#### 3.1 地闪活动与云顶亮温的关系

分析逐时卫星云图 TBB 与地闪频数的变化发现, MCS 在发生发展阶段、成熟阶段和消亡阶段的地闪频数分布是完全不一致的。从图 3 清楚可见, MCS 在发生发展期地闪发生先于对流云团的发展,地闪频数的快速增加早于对流系统的快速发展,即地闪密集区(发生区)与对流系统中心没有重合,而是位于对流系统的东侧或北侧的 TBB 等值线密集区;地闪发生区域,未来 1 h 雨团向该区域发展,地闪频数突然快速增加后 1 h 对流系统快速加强,例如 8 日 17 时,秦岭山区和宝鸡西北部首先出现了地闪,8 日 18 时,甘肃东部的对流云团向东南移至关中西部的陇县附近,秦岭山区对流云团强度增加, TBB 值降低到  $-52^{\circ}\text{C}$ , 此时,秦岭山区对流云团北侧出现地闪,陇县东南部也有地闪发生,8 日 19 时,南北两对流云向 18 时地闪发生区发展,形成西北—东南向的带状对流系统,西北侧低于  $-52^{\circ}\text{C}$  的 2 个中心之间及其东部地闪频数快速增长,8 日 20 时,两个中心合并并且向东发展加强,形成中心强度为  $-62^{\circ}\text{C}$  以下的  $\beta$  中尺度对流系统,地闪增加更加猛烈,位于  $\beta$  中尺度对流系统中心偏东的 TBB 等值线密集处。8 日 21 时,  $\beta$  中尺度对流系统向东扩展,范

围明显增大,强度进一步增强,中心 TBB 低于  $-72^{\circ}\text{C}$ , MCS 发展为成熟阶段,但此时地闪频数急剧下降,并且分布在 MCS 强中心附近,即地闪均出现在中尺度对流系统中,8 日 22—24 时, MCS 范围在缓慢增大,但地闪频数降至很低,均分布在对流系统中心附近。MCS 消亡期(9 日 01—02 时,图略),地闪频数进一步降低直至消失。

由此可见,地闪频数的发展增加,可作为 MCS 发生发展的判据之一;地闪的运动方向和地闪频数密集区与 MCS 的移动方向和未来发生区对应。说明负地闪可以很好地指示或有助于识别未来强对流区。

#### 3.2 地闪活动与雷达回波的关系

第 2 节 6 min 地闪活动演变分析可见,地闪多发期主要集中在 8 日 19 时 22 分至 21 时 28 分且存在多峰结构,21 时 58 分至 23 时基本上没有地闪发生。下面分析地闪多发期地闪活动与雷达回波的关系。

图 4 是地闪多发期也是中尺度系统快速发展期和发展稳定期的 3 个地闪峰值(对应图 2b)时雷达组合反射率因子与其前 6 min 累积地闪叠加图。图中可见,负闪主要出现在回波强度  $>40$  dBz 的区域,正闪则落到强回波中心两侧  $30\sim 40$  dBz 的回波区(属于云砧和层状云区域)。MCS 快速发展加强期,负闪密集区位于回波单体的前沿或前部,亦即对流单体向负闪密集区发展,例如 8 日 19 时 20 分有 3 个对流单体快速发展,其中西侧对流单体的东北部、南侧和后侧均有密集负闪出现,未来该对流单体向东北移动,而且该对流单体的南侧和西侧未来

又有对流单体发展,中部的对流单体前沿为密集负闪区,对应未来该对流体向东发展,东南部的小对流单体则向东北负闪区发展。MCS 发展稳定少动期,负闪大部分集中在各对流单体的强回波中心附近,也有少数负闪与正闪分散在回波体的后部,如图 4b

所示。当 MCS 发展成熟后向东移动时,负闪出现在对流单体的不同位置,正闪则位于对流体的前后部(图 4c),未来对流系统向对流体前部密集负闪区发展。这些分析说明发展中的对流单体将向其前部负闪密集区移动。

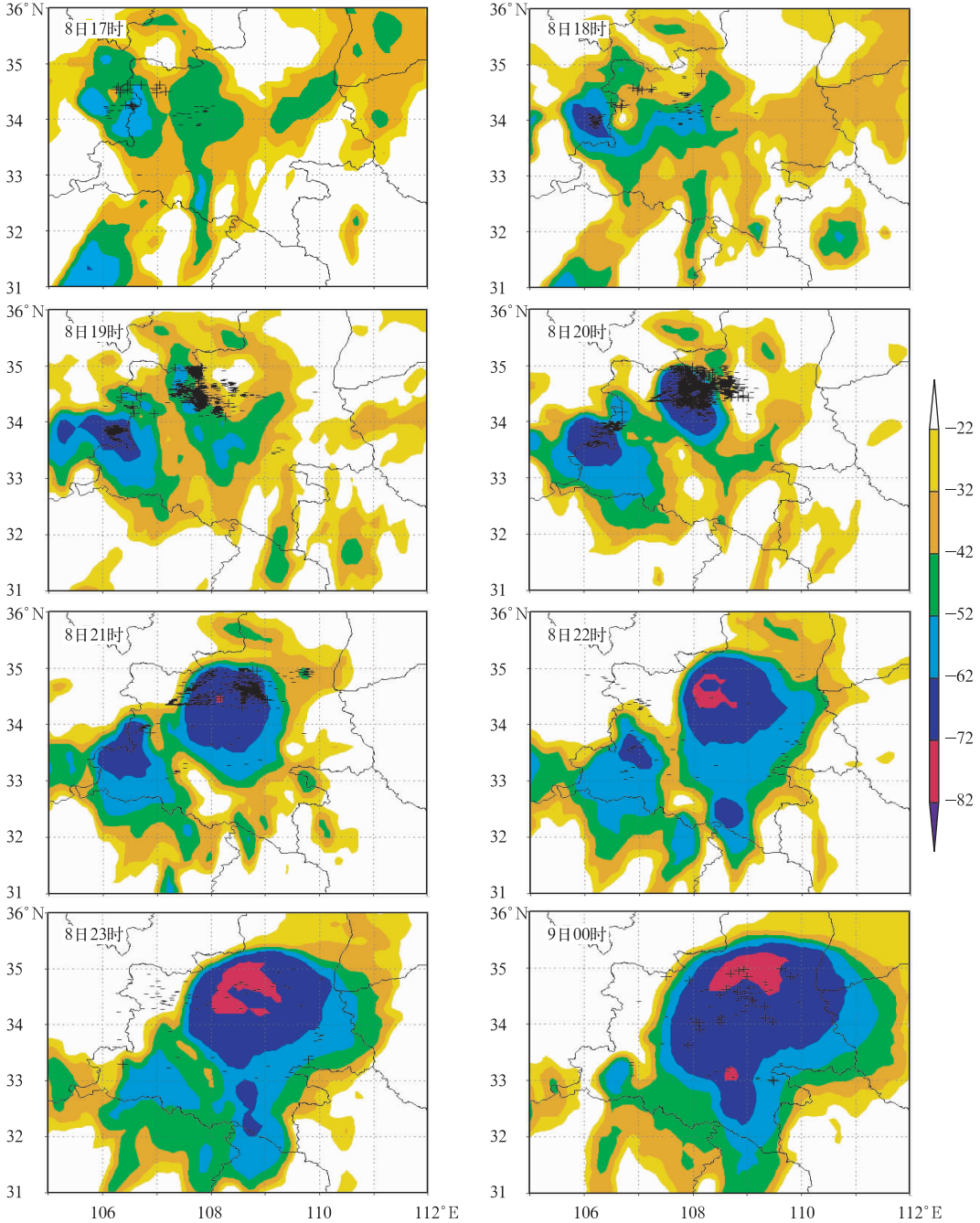


图 3 2007 年 8 月 8 日 17 时至 9 日 00 时逐时 TBB(阴影, °C) 及其前 1 h 累积正(+)和负(-)地闪分布图

Fig. 3 Hourly distributions of TBB (shadings, unit: °C) and the prior-1 h accumulated ground lightning from 17:00 BT 8 to 00:00 BT 9 August 2007 (“+” and “-” mark positive and negative lightnings, respectively)



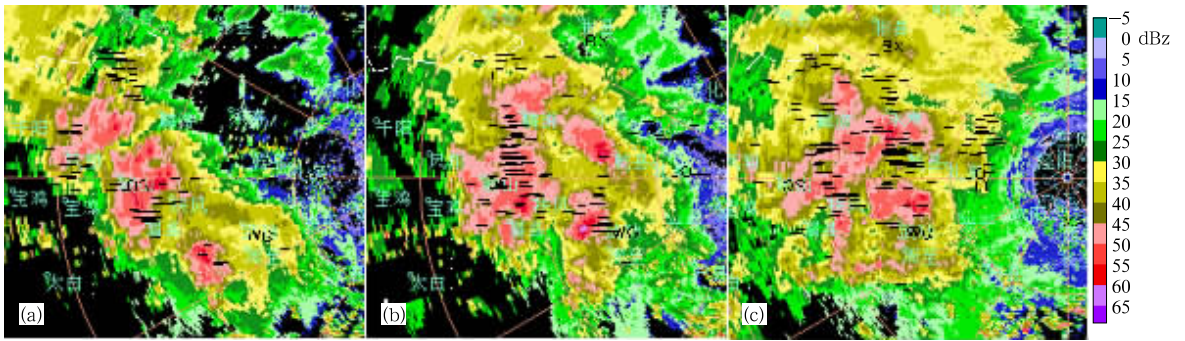


图 4 2007 年 8 月 8 日雷达组合反射率因子(单位:dBz)及其前 6 min 累积正(+)和负(-)地闪分布  
(a) 19:20, (b) 20:09, (c) 20:40

Fig. 4 The composite reflectivity (unit: dBz) and the prior-6 min accumulated ground lightning at 19:20 BT (a), 20:09 BT (b), and 20:40 BT (c) 8 August 2007, respectively (“+” and “-” mark positive and negative lightnings, respectively)

## 4 地闪活动与强降水的关系

### 4.1 强暴雨中尺度雨团活动特征

将在  $30 \text{ km}^2$  的范围内,连续 2 h 有 2 站或 2 站以上降水量  $\geq 10 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  的降水定义为中尺度雨团,其中,  $25 \text{ mm} \leq 1 \text{ h}$  降水量  $< 50 \text{ mm}$  的降水称为强降雨团,  $1 \text{ h}$  降水量  $\geq 50 \text{ mm}$  的降水称为特强降雨团。分析陕西地面观测站、自动加密站和区域加密自动站 1 h 降水资料发现,关中强暴雨过程是 2 个尺度较小雨团形成并快速东移合并成特强中尺度雨团,其生命史为 9 h,水平尺度最大  $100 \text{ km} \times 40 \text{ km}$ 。

8 日 18 时在关中西北部陇县和秦岭山区太白生成后(图 6 中的雨团 1 和 2),分别向东南和东北方向缓慢移动,1 h 后发展为强降雨团,强度分别为  $30$  和  $29 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ,20 时两雨团合并加强,形成一个有 7 站 1 h 降水量超过  $40 \text{ mm}$ 、中心降水强度达  $77 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 、水平尺度约为  $100 \text{ km} \times 40 \text{ km}$  的  $\beta$  中尺度特强大雨团,维持 2 h;8 日 22 时强降水略有减弱并向东偏北移动,降水强度为  $58 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ,8 日 23 时再次加强东移,中心降水强度高达  $95 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ,此时,中尺度特强大雨团达到最强,有 7 站 1 h 降水量  $> 50 \text{ mm}$ ;8 日 24 时有 5 站 1 h 降水量  $> 50 \text{ mm}$ ,中心降水强度  $92 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ,形成直径为  $80 \text{ km}$  的特强降雨团,9 日 01 时移至秦岭东坡,降水开始减弱,02 时后减弱消失,强降水结束。

### 4.2 地闪活动与强降水结构的关系

图 5 是暴雨期间逐时降水量和负地闪时间演变图,由于 8 日 22 时至 9 日 02 时负地闪频数很小,为了更好地显示其变化趋势,图中长虚线是扩大 10 倍后的负地闪频数,实线是逐时最大降水量,短虚线是

8 日 17—21 时逐时负地闪频数。图中可见,暴雨过程中,雨强与负地闪频数的变化趋势有很好的对应关系,它们均有 2 个峰值,分别出现在 8 日 20 时和 8 日 23 时;但是,雨强的大小与负地闪的频数并非呈现正的相关性,即最大雨强对应的不是最高负地闪频数,而是雨强突然增大时,相应负地闪突然达到最高频数,然后负地闪频数快速减小到很低,雨强再次增加时,负地闪频数也再次增大,但仍然很小。负地闪频数与雨强的变化关系可以说明,对流性强降水系统快速发展期间,相应负地闪频数最大,如对流系统快速发展期,雨强从 8 日 19 时的  $29 \text{ mm}$  增加到 20 时的  $77 \text{ mm}$ ,1 h 增加了  $48 \text{ mm}$ ,负地闪频数增加了 2160 次;当对流降水系统成熟期后,对应负地闪频数快速减少,但对流降水系统成熟期出现波动时,负地闪频数也相应出现波动,如对流系统成熟

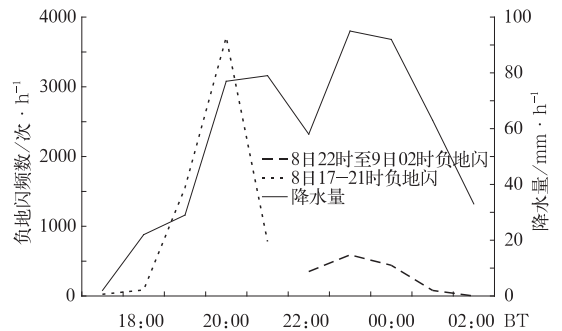


图 5 2007 年 8 月 8 日 17 时至 9 日 02 时关中暴雨区附近 ( $34^{\circ} \sim 35^{\circ} \text{N}$ ,  $106^{\circ} \sim 110^{\circ} \text{E}$ ) 负闪

(单位:次  $\cdot \text{h}^{-1}$ )与雨强(单位: $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ )演变图

Fig. 5 The evolution of negative lightning (unit: times  $\cdot \text{h}^{-1}$ ) and precipitation intensity (unit:  $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ) in heavy rainfall region ( $34^{\circ} \sim 35^{\circ} \text{N}$ ,  $106^{\circ} \sim 110^{\circ} \text{E}$ ) over the period 17:00 BT 8 to 02:00 BT 9 August 2007

期,雨强从8日22时的58 mm增加到23时的95 mm,1 h增加了37 mm,负地闪频数增加了24次。

图6是关中暴雨区附近( $34^{\circ}\sim 35^{\circ}\text{N}$ 、 $106^{\circ}\sim 110^{\circ}\text{E}$ )逐时地闪频数及其降水量,图7同图6,只是降水量为其后2 h总累积降水量。对比分析可见,暴雨过程中,地闪和强降水的关系随暴雨的发生发展的不同阶段而不同。暴雨发生发展期,地闪提前于强降水2 h发生,如暴雨发生发展期(8日17—21

时),地闪密集区同期没有降水对应(图6),但地闪密集区与其后2 h强降水区相对应(图7);暴雨系统成熟期(8日22—24时),地闪频数明显减少,但相对而言,地闪与强降水同时发生,其密集区与强降水区基本重合(图6);暴雨系统衰亡期(9日01—02时),几乎没有地闪出现(图略)。可见,利用地闪资料可以提前1~2 h预报出强对流性降水,为短时强对流降水的预报提供一种参考工具。

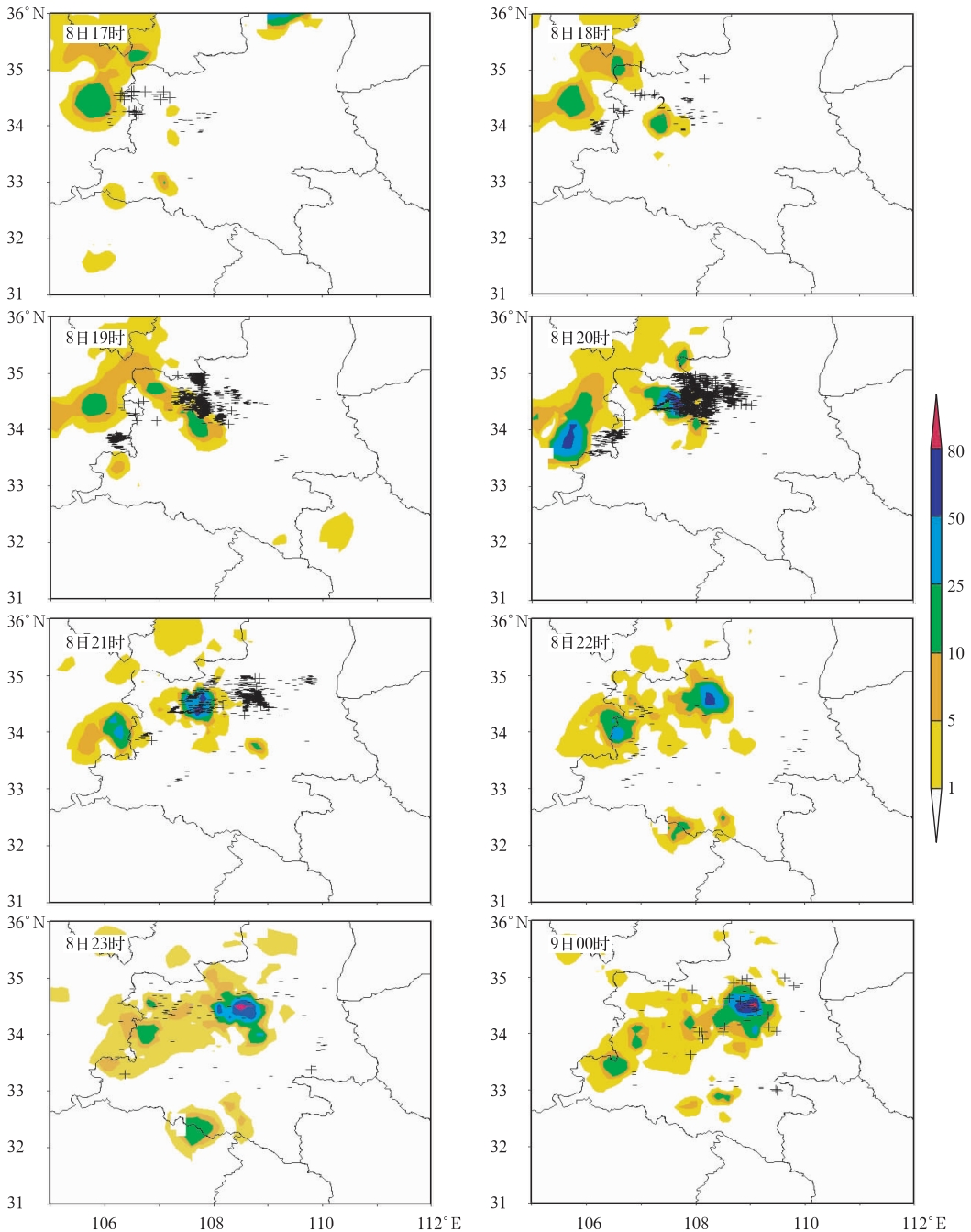


图6 2007年8月8日17时至9日00时逐时正(+),负(-)地闪及降水量(阴影,单位:mm)

Fig. 6 Distributions of hourly precipitation (shadings, unit: mm) and ground lightning from 17:00 BT 8 to 00:00 BT 9 August 2007

(“+” and “-” mark positive and negative lightnings, respectively)

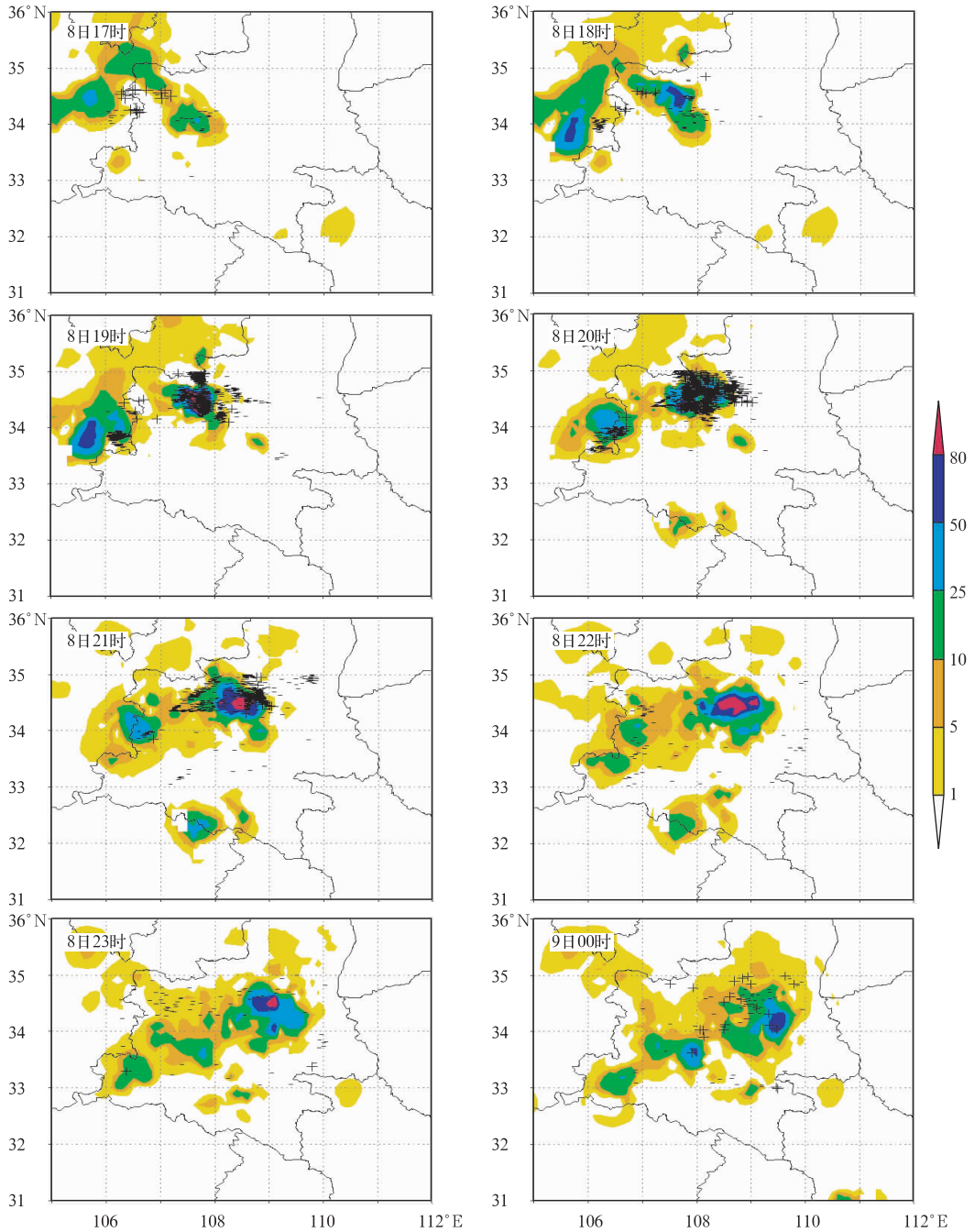


图 7 2007 年 8 月 8 日 17 时至 9 日 00 时逐时正(+),负(-)地闪及其  
后 2 h 累积降水量(阴影,单位:mm)

Fig.7 Distributions of hourly ground lightning and post-2 h accumulated  
precipitation (unit: mm) from 17:00 to 00:00 BT 8 August 2007  
("+" and "-" mark positive and negative lightning, respectively)

### 5 暴雨 MCS 不同发展阶段地闪活动差异的可能成因分析

前 2 节分析地闪活动与中尺度系统和强降水的

关系中发现,在暴雨中尺度系统不同发展时期,地闪活动特征具有明显的差异。以下结合天气学分析出现这些差异的可能原因。

闪电发生的初始触发机制主要为云中正负极性电荷的碰撞放电。目前,虽然对雷暴云内的起电机



制还没有清楚的结论<sup>[17-18]</sup>,但普遍认为强上升气流和冰相粒子的碰撞是起电的基本条件。在强上升气流和对起电贡献较大的霰粒、冰晶等的共同作用下,使雷暴云中电荷分布形成<sup>[19-20]</sup>,负地闪主要出现在对流云区,由于在对流云区的边界向层状云区传输过程中不同相态粒子碰撞几率增大,而该区域内的温度、粒子形态等有利于负电荷区的形成<sup>[1]</sup>。

这次关中强暴雨发生在陕西关中中西部地区,该地区三面环山,其南侧秦岭山脉走向在关中中西部呈东西向到西安蓝田后向东北呈东北—西南走向,与关中北侧的黄土高原和西侧的六盘山一起使关中平原处于自西向东略偏北开口的喇叭口地形中;强暴雨过程分为发生发展加强期(8日18—21时),成熟期(8日22时至9日00时)和消亡期(9日01—02时)3个阶段。关中西部喇叭口的收口处岐山附近强降水发生在强暴雨发展加强期,受这种喇叭口地形的辐合作用,不仅地形抬升明显,而且易于形成偏东风辐合区和偏东风、偏北风的中尺度辐合线,使垂直上升运动突然猛烈加强,造成垂直方向气流强烈的扰动,在这种强烈气流扰动作用下带电粒子碰撞几率增大,从而发生较多的地闪<sup>[21]</sup>。强降水的发展加强是由2个小尺度的对流单体合并发展所致,2个对流单体在岐山西部合并碰撞也会导致垂直上升运动加强,从而进一步增大了带电粒子碰撞几率。另外,强降水发生发展在午后18—20时,此时地面温度明显升高,地面不稳定能量猛增,位温升高,而闪电活动很大程度上依赖于空气的热动力特性,进入云内能量越大,其电活动也越强,绝大多数地闪分布于地面相对位温较高的区域<sup>[21-25]</sup>。暴雨成熟阶段,中尺度系统向东移动,喇叭口地形造成的辐合作用逐渐减小,在垂直方向上的气流扰动减小,粒子碰撞几率减小;温度很快降低以及不稳定能量的大量释放,进入云内能量减少,位温降低,地闪发生的几率大减;此外,暴雨成熟阶段,虽然垂直方向上的气流扰动减小,但是垂直上升运动达最强时刻,从发展加强期 $6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 上升速度核(位于550~400 hPa)发展为 $14\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 特强速度核(位于200 hPa),这种强上升气流抬高了雷暴中主负电荷区的高度,相当于拉大了负电荷区离地面的距离,而减少与其上部的主正电荷区的距离<sup>[26]</sup>,正是这种“电荷抬升机制”<sup>[27]</sup>使地闪频数(尤其是负地闪频数)减小。暴雨消亡期,因降水物下沉拖曳作用,垂直上升运动减弱,上升速度核减小为 $6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,位置也下降至550

hPa,主负电荷区的高度也随之降低,增加了对地放电的几率。

## 6 小 结

本文分析了2007年8月8日18时至9日02时强暴雨的地闪分布和演变特征,并结合TBB、雷达回波和地面加密降水资料,揭示了地闪活动与MCS和强降水结构的关系,研究结果如下。

(1)暴雨期共发生地闪6459次,地闪中负闪(6310次)占绝对优势,占总地闪的97.7%,正闪(149次)只占总地闪的2.3%。负闪频数和总闪频数的逐时演变趋势完全一致,呈现两峰一谷的趋势,但正闪频数变化呈现三峰两谷的趋势,正闪频数最大值(最大峰值)与总闪、负闪频数峰值时间一致。负闪活跃期正负闪6 min演变均表现为多峰结构,正闪的波峰提前于负闪的波峰12 min。

(2)MCS发生发展期,地闪位于对流云团前部TBB等值线密集区及其东侧,未来对流云团向地闪发生区发展,地闪频数的急剧增加意味着未来对流系统的猛烈发展,地闪频数极大值发生在MCS强烈发展期。MCS成熟阶段,地闪猛烈下降,地闪出现在对流云团强中心附近。MCS消亡期,地闪位于对流云团中心附近,但很快消失。

(3)负闪主要出现在回波强度 $>40\text{ dBz}$ 的区域,正闪则落到强回波中心两侧 $30\sim40\text{ dBz}$ 的回波区。MCS快速发展加强期,负闪密集区位于回波单体的前沿或前部,亦即对流单体向负闪密集区发展。MCS发展稳定少动期,负闪大部分集中在各对流单体的强回波中心附近。当MCS发展成熟后向东移动时,负闪出现在对流单体的不同位置。

(4)暴雨发生初期和发展加强期,地闪的发生提前于强降水约2 h,地闪急剧增加与降水强度猛增密切相关,即地闪频数极大值出现在强降水快速增长期。暴雨强盛期,负闪与强降水同时发生,而且负闪与降水中心基本重合,负闪频数快速降低。这些特征与Lang等<sup>[28]</sup>的研究一致,一些强风暴产生非常低的地闪频数,并非通常认为的对流越强,雷暴云中的地闪活动也越强。

(5)地闪资料的应用可以为短时强对流降水的预报提供一种参考工具,根据初闪发生的时间、负地闪发生密集区和地闪的急剧增加可估计未来强降水可能发生的时间、地点和强度。

本文通过对陕西关中一次大暴雨过程中地闪特征及其与中尺度系统、降水的关系研究得出了一些结果,为短时强对流降水的预报增加了一种参考工具,但这些结果仅仅是通过一个个例分析得出的,其代表性如何还需要今后多选择一些个例做进一步的分析研究和验证,此外,文中虽然对所得结论的可能原因进行了天气学分析,但这些分析相当有限,其机理有待进一步深入分析研究。

## 参考文献

- [1] Rutledge S A, MacGorman D R. Cloud-to-ground lightning activity in the 10–11 June 1985 mesoscale convective system observed during the Oklahoma-Kansas PRE-STORM project [J]. *Mon Wea Rev*, 1988, 116(7): 1393-1408.
- [2] Rutledge S A, Lu C, MacGorman D R. Positive cloud-to-ground lightning in mesoscale convective systems [J]. *Atmos Sci*, 1990, 47(17): 2085-2100.
- [3] 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 [J]. *Mon Wea Rev*, 1994, 122(8): 1798-1808.
- [4] 张义军, 华贵义, 言穆弘. 对流和层状云系电活动、对流及降水特性的相关分析 [J]. *高原气象*, 1995, 14(4): 396-405.
- [5] 葛正漠, 郭昌明, 言穆弘. 灾害性天气中的地闪特征 [J]. *高原气象*, 1995, 14(1): 39-45.
- [6] 魏锦成, 陈泽面. 闪电定位资料应用于雷暴天气监测与诊断的个例分析 [J]. *气象*, 1997, 23(12): 39-42.
- [7] 冯桂力, 郗秀书, 周筠君. 一次中尺度对流系统的闪电演变特征 [J]. *高原气象*, 2006, 25(2): 220-228.
- [8] 易笑园, 宫全胜, 李培彦, 等. 华北飊线系统中地闪活动与雷达回波顶高的关系及预警指标 [J]. *气象*, 2009, 35(2): 34-40.
- [9] 张一平, 王新敏, 牛淑贞, 等. 河南省强雷暴地闪活动与雷达回波的关系探析 [J]. *气象*, 2010, 36(2): 54-61.
- [10] 蒋大凯, 才奎志, 曲荣强. 辽宁省一次强对流天气的地闪特征 [J]. *气象*, 2010, 36(6): 73-78.
- [11] 周筠君, 郗秀书, 张义军, 等. 地闪与对流性天气系统中降水关系的分析 [J]. *气象学报*, 1999, 57(1): 103-111.
- [12] Carey L D, Rutledge S A. The relationship between precipitation and lightning in tropical island convection: AC-band polarimetric radar study [J]. *Mon Wea Rev*, 2000, 128(8): 2687-2710.
- [13] 曹治强, 李万彪. 两个中尺度对流系统的降水结构和闪电特征 [J]. *气象学报*, 2005, 63(2): 243-249.
- [14] 苗爱梅, 贾利冬, 吴蓁, 等. 070729 特大暴雨的地闪特征与降水相关分析 [J]. *气象*, 2008, 34(6): 74-80.
- [15] Williams E R. The electrification of severe storms [J]. *Meteorol Monogr*, 2001, 28: 527-561.
- [16] 郗秀书, 周筠君, 袁铁. 卫星观测到的全球闪电活动及其地域差异 [J]. *地球物理学报*, 2003, 46(6): 743-750.
- [17] 郭凤霞, 张义军, 言穆弘. 青藏高原那曲地区雷暴云电荷结构特征数值模拟研究 [J]. *大气科学*, 2007, 31(1): 28-36.
- [18] 黄丽萍, 管兆勇, 陈德辉, 等. 基于高分辨率中尺度气象模式的实际雷暴过程的数值模拟试验 [J]. *大气科学*, 2008, 32(6): 1341-1351.
- [19] Carey L D, Rutledge S A. A multiparameter radar case study of the microphysical and kinematic evolution of a lightning producing storm [J]. *Meteor Atmos Phys*, 1996, 59: 33-64.
- [20] Lopez R E, Aubagnac J P. The lightning activity of a hailstorm as a function of changes in its microphysical characteristics inferred from polarimetric radar observations [J]. *Geophys Res*, 1997, 102(14): 16799-16813.
- [21] 刘冬霞, 郗秀书, 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 [J]. *大气科学*, 2010, 34(1): 95-104.
- [22] Smith S B, LaDue J G, MacGorman D R. The relationship between cloud-to-ground lightning polarity and surface equivalent potential temperature during three tornadic outbreaks [J]. *Mon Wea Rev*, 2000, 128: 3320-3328.
- [23] 言穆弘, 刘欣生, 安学敏, 等. 雷暴非感应起电机制的模拟研究 II 环境因子影响 [J]. *高原气象*, 1996, 15(4): 438-447.
- [24] 冯桂力, 王俊, 牟容, 等. 一次中尺度雷暴大风过程的闪电特征分析 [J]. *气象*, 2010, 36(4): 68-74.
- [25] 王新敏, 张霞, 徐文明, 等. T213/T639 数值产品在河南省雷电潜势预报中的释用 [J]. *气象*, 2011, 37(5): 576-582.
- [26] 冯桂力, 郗秀书, 袁铁. 一次冷涡天气系统中雹暴过程的地闪特征分析 [J]. *气象学报*, 2006, 64(2): 212-220.
- [27] MacGorman D R, Burgess D W, Mazur V, et al. Lightning rates relative to tornadic storm evolution on 22 May 1981 [J]. *Atmos Sci*, 1989, 46: 221-250.
- [28] Lang T J, Rutledge S A, Dye J E, et al. Anomalously low negative cloud-to-ground lightning flash rates in intense convective storms observed during STERAO-A [J]. *Mon Wea Rev*, 2000, 128: 160-173.