

# 山东地区冰雹云的闪电活动特征

冯桂力<sup>1, 2</sup> 郟秀书<sup>3</sup> 吴书君<sup>4</sup>

1 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000

2 山东省气象科学研究所, 济南 250031

3 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

4 山东省滨州市气象局, 滨州 256612

**摘 要** 利用山东电力部门提供的雷电定位资料, 对 10 次冰雹过程的地闪活动特征进行了分析。通过分析发现, 雹暴中正地闪占总地闪的比例平均为 57.39%, 远高于当地正地闪比例的气候特征值 13.48%。地面降雹区基本出现在正地闪密集(活跃)区或邻近区域。在雹云快速发展阶段, 地闪频数存在明显的“跃增”; 在减弱消散阶段, 地闪频数显著减少, 但正地闪比例有所提高。负地闪频数峰值的出现通常提前于降雹 0~20 min, 正地闪频数峰值的出现一般滞后于降雹发生时间。整个降雹阶段对应于正地闪的活跃阶段。另外, 结合对卫星观测的总闪电资料分析, 发现冰雹云的云闪与地闪的比值远高于一般的雷雨过程, 其云闪密度也远高于雷雨过程。以上这些特征对于冰雹的识别和对冰雹的超短时预报具有指示意义。

**关键词** 雹暴 地闪 云闪 特征分析

**文章编号** 1006-9895(2008)02-0289-11

**中图分类号** P426.5

**文献标识码** A

## Cloud-to-Ground Lightning Characteristics of Hail Clouds in Shandong Province

FENG Gui-Li<sup>1, 2</sup>, QIE Xiu-Shu<sup>3</sup>, and WU Shu-Jun<sup>4</sup>

1 Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000

2 Shandong Institute of Meteorological Sciences, Jinan 250031

3 Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

4 Binzhou Meteorological Bureau, Binzhou 256612

**Abstract** There are usually intensive electrification and active discharges in severe hailstorms because of strong up-draft and abundant ice particles and supercooled water content. Although a lot of researchers have analyzed the lightning activities in hailstorms and many useful results have been achieved, the evolution of lightning activities and its relations with hail-falling in hailstorms are not quite clear up to now. In order to help to understand the lightning characteristics in hailstorms and the application of lightning information to the warning of severe convective weather, the cloud-to-ground (CG) lightning activities of hailstorms occurring in Shandong Province are studied in this paper. The CG flashes were observed by Shandong Lightning Detection Network (SLDN), which consists of 10 sensors covering all over the Shandong Province. Firstly, the characteristics of CG lightning polarity, spatial and temporal distribution of ten hailstorms are analyzed statistically. The results show that the mean proportion of positive CG lightning accounting for total CG lightning is 57.39%, which is much higher than the local climatic normal rate by 13.48%. The hail-falling is often reported in the region of dense positive CG lightning. Sometimes hailstone appears

**收稿日期** 2006-06-27, 2007-01-22 收修定稿

**资助项目** 中国科学院知识创新工程重要方向项目 KZCX2-YW-206, 国家自然科学基金资助项目 40505001、40325013, 山东省气象局基金 2005sdqxj01

**作者简介** 冯桂力, 男, 1971 年出生, 在读博士, 高级工程师, 主要从事大气电学和人工影响天气方面的研究。E-mail: fenggl@lzb.ac.cn

slightly at right flank of the dense CG lightning region. There is a distinct intensive increase in CG flash rate in the quickly developing period of hail cloud, while the rapid reduction in CG flash rate occurs at the dissipating stage. The hailstone falling corresponds to an active positive flash period, and the increase of positive CG flash rate is generally accompanied with a decrease of negative CG flash rate. The peak negative CG flash rate usually occurs 0 to 20 minutes earlier than hailstone falling, but the peak positive CG flash rate usually is late or simultaneous for the occurrence of hailstones. When the polarity of CG lightning changes, it often indicates the advent of severe weather such as hail, strong wind and heavy precipitation. Secondly, using the advantage of TRMM LIS being able to detect total lightning, i. e. intracloud (IC) and CG lightning, the ratios of IC lightning to CG lightning in hailstorms are compared with those in common thunderstorms. The analysis discloses that both the ratio of IC to CG lightning and IC flash density in hailstorms are far bigger than those in the thunderstorms. This is mainly caused by elevated charge structures associated with strong updrafts. These features are likely useful for hailstorms forecasting. At last, the reasons of high percentage of positive CG lightning in hailstorms are discussed, and it is speculated that inverted tripole charge structure is likely leading to high ratio of positive CG lightning in hailstorms.

**Key words** hailstorm, cloud-to-ground lightning, intracloud lightning, characteristics analysis

## 1 引言

冰雹天气系统除产生降雹外,通常还伴有强降水、破坏性大风和闪电等灾害性天气,对农业生产和人们的生命财产造成严重危害。雷电作为强对流天气过程的“指示器”,已被用于识别发展中的对流云。对冰雹闪电活动的研究已受到越来越多的关注,尤其是近些年来,随着闪电探测技术的飞速发展,国内外利用闪电定位系统和多参数雷达获取的资料对冰雹天气过程进行了大量分析,并得出了许多有意义的结论。Reap 和 MacGorman<sup>[1]</sup>发现,大冰雹出现的可能性随着正地闪频数的增加而增大。随后的研究也发现,以正地闪为主的雷暴常常在正地闪发生阶段产生大冰雹<sup>[2]</sup>。MacGorman 等<sup>[3]</sup>通过对 15 次大冰雹和龙卷过程的地闪分析发现,其中 4 个风暴整个生命史中正地闪占多数,另外 11 个风暴在成熟阶段正地闪占多数。同时,他们配合雷达观测还发现,正地闪居多的风暴多数属于弱降水的经典超级单体,而负地闪居多的风暴则多数为强降水的超级单体;大冰雹出现在正地闪频繁的时候,一旦转为负地闪,降雹的大小和频率都将减小。陈哲彰<sup>[4]</sup>利用京津冀中尺度试验基地三站闪电定位资料对冰雹与雷暴大风的地闪分析得出,暴雨时地闪活动比冰雹大风时频数多且集中;暴雨时以负闪占绝对优势,而冰雹大风时正闪占绝对优势。周筠珺等<sup>[5]</sup>观测发现地闪频数在降雹前 30 min 陡然上升。张义军等<sup>[6]</sup>对甘肃平凉地区正地闪特性的分析也表明,降雹的峰值时间与正地闪峰值时间有

比较好的一致性。以上研究表明,降雹的发生与正地闪具有密切的关系,在一些孤立的风暴中有时也会产生高的正地闪比例<sup>[7, 8]</sup>。郟秀书等<sup>[9, 10]</sup>和赵阳等<sup>[11]</sup>对中国内陆高原地区雷暴的地闪特征进行研究发现,与中低纬度地区相比,高原的正地闪比例明显要高,反映出高原雷暴的特殊性。

纵观国内外对雷暴天气闪电活动特征的大量研究发现,尽管对冰雹云闪电活动做了很多研究,但对冰雹云闪电活动时空分布特征的研究较少,对闪电与降雹的关系也了解不深,正如 Williams<sup>[12]</sup>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。本文应用山东电力雷电探测网的地闪资料,并结合热带测雨卫星(Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM))提供的总闪电资料,对冰雹过程的闪电活动特征进行统计分析,并对冰雹云闪电活动时空分布特征以及闪电与降雹的关系进行了研究,以期促进闪电资料在强对流灾害性天气的监测预警和人工防雷作业指挥中的应用。

## 2 资料来源简介

本文所用的地闪资料由山东电网雷电监测定位系统(Shandong Lightning Detection Network,简称 SLDN)提供。该系统由 10 个探测仪(分别在聊城、济宁、莱芜、临沂、潍坊、青岛、威海、龙口、滨州、德州)和一个中心数据处理总站(设在山东省电力调度中心)组成,覆盖山东全省(见图 1)。

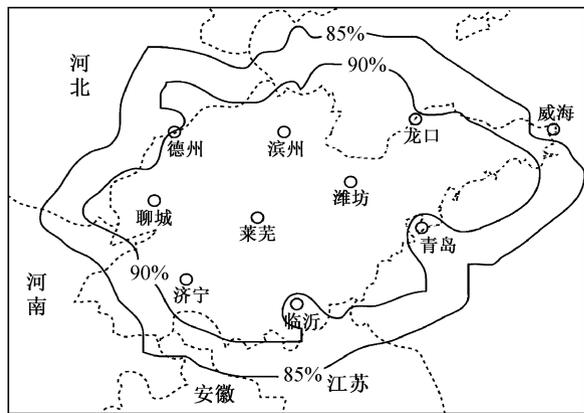


图1 山东省雷电监测定位网和探测效率分布图(圆圈表示雷电探头位置)

Fig.1 The distribution of 10 lightning detection stations (marked with circle) and detection efficiency (isolines) of the Shandong lightning detection network

整个雷电探测设备由中国科学院空间中心研制和布设,系统定位采用多站时差综合定位方法。每个单站都将测到的闪电发生时间、方位、电场和磁场信号实时传输给中心站,进行实时定位处理。定位系统经过优化处理后提供每个闪电发生的时间、位置、强度、极性等。

SLDN 系统的理论探测效率见图 1,除了胶东半岛东部和鲁西南地区外,全省绝大部分探测效率为 90%。发生在山东省境内(除半岛最东部和鲁西南地区)的地闪,其电磁信号均可以同时被 4 个站接收到,4 站闪电定位理论计算误差值小于 500 m。尽管由于自然闪电难于进行人工观测,系统探测结果无法与实际资料进行对比分析,但是通过对山东境内高压输电线路雷击故障点分析<sup>[13]</sup>,发现该系统给出的地闪位置与雷击故障点的距离都在 2000 m 之内,说明该资料相对气象应用来说还是可靠的。另外,通过对多次雷暴过程的闪电和多普勒雷达回波以及卫星云图的叠加分析,发现该系统给出的地闪资料也是令人满意的。

除了地闪资料以外,本文还用到了 TRMM 卫星<sup>[14]</sup>上携带的闪电成像仪(Lightning Imaging Sensor,简称 LIS)提供的总闪电资料。LIS 包含一个光学凝视成像仪,闪电放电时产生的亮度瞬间变化是它识别闪电活动的依据,因此它能同时观测雷暴发生的云闪和地闪。凝视成像仪的主要组成是一个 128×128 传感器矩阵,分辨率为 3~6 km(星下点

3 km),对每个点的观测时间接近 90 s。闪电数据包括四类:事件(Event)、组(Group)、闪电(Flash)和区域(Area)。事件是 LIS 的基本数据单位,是指在 2 ms 的时间内辐射超过背景阈值的像素点。由于在 2 ms 积分时间内一次放电通常会照亮不止一个像素点,于是把相连的像素点划在一起叫做组。在时间间隔不超过 330 ms、空间间隔不超过 5.5 km 的所有组被定义为一次闪电。把空间上不超过 16.5 km、约 3 像素的所有闪电定义为区域。由以上的定义可以看出,这里对闪电的定义接近我们习惯上接受的闪电概念,而区域则与习惯上的雷暴单体(或对流泡)相对应。本文采用的是 LIS 提供的闪电(Flash)轨道资料。

为便于分析表述,我们用 POP 表示正地闪占总地闪的百分比: $POP = +CG/CG \times 100\%$ ,式中 CG 表示总地闪,+CG 表示正地闪。云闪与地闪的比例用 Z 表示: $Z = IC/CG$ ,式中 IC 表示云闪。

### 3 冰雹云的地闪活动特征分析

#### 3.1 冰雹云的地闪极性特征

考虑到地闪、雷达、卫星资料、地面观测等资料的完整性,我们对收集到的 2000~2002 年发生在山东的 10 次降雹实例的地闪进行了统计分析,结果列于表 1。从表 1 中可以发现:

(1) 雹云中 POP 值较高。在 10 次降雹过程中有 8 次的 POP 超过 30%,POP 的平均比例为 57.39%,该值略低于陈哲彰<sup>[4]</sup>给出的京津冀冰雹过程中的 POP 值(65.8%),却远高于山东地区正地闪比例的气候特征值 13.48%<sup>[15]</sup>。其中两次冰雹云的地闪全是正极性,POP 高达 100%;POP 最小值为 3.9%,即发生在 2002 年 7 月 29 日临沂市沂南、蒙阴两县的降雹过程,这是一次多单体雷暴过程,在两个云团合并的过程中造成了鲁中大范围的强降水。

(2) 结合过程降水量可发现,较高正地闪比例的雹云过程的降水量并不高,相反,正地闪比例较低的雹云过程的降水量却较高。陈哲彰<sup>[4]</sup>给出的个例分析也发现类似现象。由此可以推测,在强降水伴冰雹的天气过程中正地闪比例通常不高。国外也已发现在弱降水超级风暴中通常易发生较大的正地闪频数<sup>[16]</sup>,但具体原因尚有待于继续探讨。

(3) 冰雹云生命史中的地闪总数分布范围较大,

表 1 2000~2002 年山东 10 次冰雹天气过程的地闪活动特征

Table 1 Statistical characteristics of the cloud-to-ground (CG) lightning activity of 10 hail events in Shandong Province during 2000 - 2002

降雹过程	降雹地点	最大雹径/cm	总地闪数/次	POP	降水量*/mm	雷暴持续时间/h	降雹持续时间**/min
2000-06-30	济南	2	184	73.4%	38.7	6.5	15
2000-08-20	潍坊	4	46	100%	13.8	2.5	15
2000-10-04	烟台	4	359	70.5%	11.1	4	5
2001-06-15	济南	4	1524	82.7%	36.8	7	20
2001-06-19	潍坊	2.5	298	18.1%	65.9	5.5	10
2001-08-23	淄博	4	686	37.0%	35.9	10	15
2002-05-29	德州	4.5	241	56.0%	14.2	4	20
2002-06-01	东营	2	1713	36.4%	6.3	5.5	5
2002-07-17	德州	5	34	100%	8.0	3	10
2002-07-29	临沂	2	3146	3.9%	45.3	6	5
平均			823	57.8%	57.3	5.4	12

注：\* 表示雷暴中心附近的过程降水量，\*\* 表示降雹持续时间为点观测最大值。

从 34 次到 3146 次，个体雹暴发生的地闪总数相差  $10^1 \sim 10^2$  量级。由此可见，单纯地用地闪次数或频数的大小来识别冰雹云是不可靠的。

### 3.2 雹暴过程地闪的空间分布特征

我们将地闪位置和降雹区域叠加在一起，来探讨冰雹落区和地闪的空间分布之间的关系，以期利用地闪的时空分布来识别降雹的发生及雹击的位置。

图 2a (见文后彩图) 是 2000 年 6 月 30 日凌晨济南北部发生的一次雹暴天气过程的地闪和冰雹落区分布图。这次过程由西北向东南方向移动，地闪分布与系统移动完全一致。地面观测表明在商河县怀仁、张坊、玉皇庙乡和济阳县唐庙乡出现降雹，雹粒直径 1~2 cm，各地降雹持续时间约 15 分钟，阵风 8 级。降雹发生的位置正好位于负地闪转为正地闪的过渡区，并偏向正地闪区域。

图 2b (见文后彩图) 给出了 2000 年 8 月 20 日发生在潍坊市的一次单体雹暴的地闪和冰雹落区分布图。该雹暴单体由海风锋触发，并快速扫过潍坊境内向鲁中移动，其生命史为 2.5 小时。降雹区域在坊子的清池、车留庄、沟西、荆山洼 4 个乡镇和安丘的黄旗堡、王家庄子、宋官疃 3 个乡镇，基本为地闪所覆盖，降雹区域略偏向地闪的右侧 (从系统移动方向来看)。Changnon<sup>[17]</sup> 对冷锋雹暴的地闪和雹击带的空间分布也观测到类似结论。其原因可能与强雷暴动力和微物理结构有关，因为雷暴的右前侧通常为强入流上升区，强降雹发生在紧邻上

升气流区的下沉气流区内，而地闪则通常对应于冰相降水粒子区和高垂直积分含水量区<sup>[18]</sup>，这样有可能导致地闪和冰雹落区在空间上的些许差异。张义军等<sup>[19]</sup> 已发现某些雷暴云中或雷暴云发展的某些阶段可以呈现出与正常极性相反的电荷结构，即在雷暴云中上部是主正电荷区，而上部为负电荷区。从本次雷暴整个生命史内发生的地闪全为正极性来看，似乎符合反极性的电荷结构。

另外，通过对其余个例的地闪活动和地面降雹的空间分布进行统计分析发现，大多数雹云移动较快，移速在 30~50 km/h 之间，在地面上留下一条闪击带，偶尔有跳跃现象，地面降雹区基本出现在正地闪密集 (活跃) 区或邻近区域，与正地闪的空间分布对应较好。

### 3.3 雹暴过程地闪的时间分布特征

雷达观测表明，降雹前雹暴通常会出现爆发性增长，那么相应的闪电频数是否也存在跃增现象，即在雷暴最大闪电频数出现之前，闪电频数是否也会急剧增大？降雹前后正负地闪频数的变化又是如何？下面结合 3 个降雹实例来分析地闪频数随雹暴演变的时间分布特征。

个例 1: 2000 年 6 月 30 日降雹过程的地闪频数演变图见图 3 所示。在系统的开始阶段，地闪以正极性为主。此时配合云图发现，位于冷锋前的两个弱单体在 01:00 (北京时，下同) 合并，使云团发展加强，对应时段地闪频数出现一个小的跃增，由 2 次/10 min 跃增为 9 次/10 min，随后地闪频数略

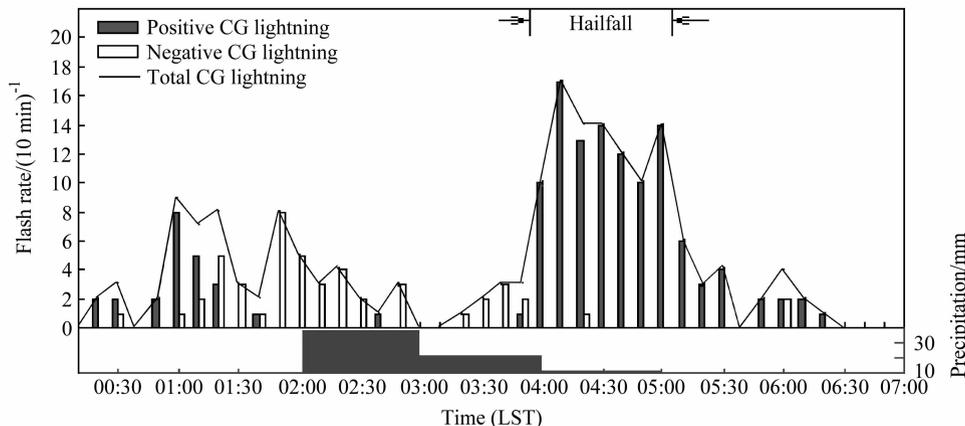


图3 2000年6月30日每10分钟地闪频数演变图和商河站逐小时的降水分布图(图的下部)

Fig. 3 The evolution of CG flash rate per 10 min for the hailstorm occurring on 30 Jun 2000, corresponding rain rate at Shanghe station (bottom)

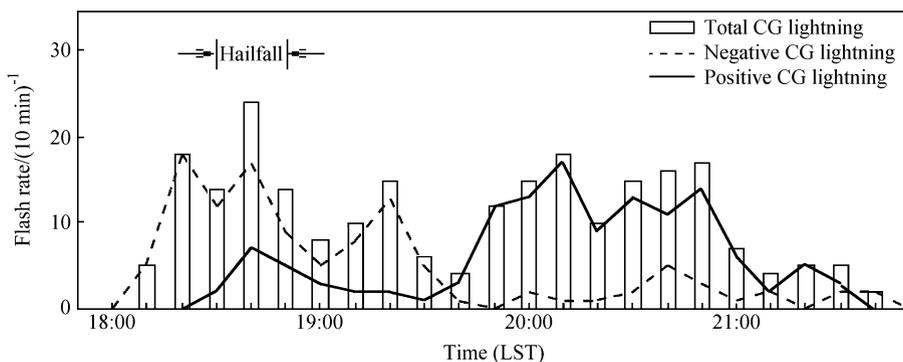


图4 2002年5月29日平原县雹暴每10分钟的地闪频数演变图

Fig. 4 The evolution of CG flash rate per 10 min for the hailstorm on 29 May 2002

有下降。01:30后地闪极性由正转为负，一直到03:50负地闪都占绝大多数，对应商河县气象站观测的降水也主要发生在这个时段(见图3)。03:50以后地闪频数急剧增加，到04:10出现17次/10min的最大值。结合地面观测发现，降雹开始于负地闪频数峰值之后10分钟，处于正地闪频数增加阶段。很明显降雹发生在降水之后，且处于弱降水阶段。在降雹持续期间，正地闪非常活跃，基本都在10次/10min以上。降雹结束后，地闪活动迅速减弱。这次雹暴的地闪活动和降水分布情况表明，地闪由正转为负极性对应于地面强降水的发生，而地闪由负转为正极性则对应冰雹大风等强天气的发生。这一事实与MacGorman等<sup>[3]</sup>发现的地闪主要极性的变化通常对应着风暴降水性质的变化这一结论极为一致。

个例2: 2002年5月29日18:00~19:00, 平

原县遭受暴风雨及冰雹袭击。累计降雹时间长达20min, 伴随7~8级大风, 冰雹大如鸡蛋, 小如玉米粒。从图4可以看出, 18:00~18:40地闪次数迅速增加, 18:30~18:40出现了24次地闪的峰值, 随后开始减少, 到19:00又开始增加; 19:30~19:40地闪频数最小, 仅为4次, 随后又开始增加, 并维持在10~18次/10min之间, 21:00后开始减少, 系统为消散减弱阶段。

从图4每10分钟正、负地闪频数的变化可清楚发现, 在18:00~19:30之间以负地闪为主, 而在19:50~21:00之间正地闪占绝对优势。负地闪频数在18:10~18:20出现跃增, 10分钟内出现了18次负地闪, 为第一峰值, 随后开始减少, 在减少的过程中又出现了两个峰值, 分别出现在18:30~18:40(为17次/10min)和19:10~19:20(13次/10min)。对照多普勒雷达回波发现, 负地闪频数

的波动与该风暴是由多单体组成有关。从 18:30 起地面开始观测到降雹, 这一时刻正好是负地闪频数开始减少, 正地闪频数开始增加的时间。18:30~18:40 正地闪出现一个峰值 (7 次/10 min), 随后开始减少。

个例 3: 2002 年 7 月 29 日下午鲁中山区出现了大范围的雷雨过程, 其中 18:25 至 18:50, 临沂市沂南、蒙阴两县交界处的 4 个乡镇遭受暴风冰雹袭击, 最大风力 8 级, 冰雹直径约 0.5~2 cm, 持续时间达半小时, 最大厚度约 5~10 cm, 这是一次伴有强降雨的冰雹过程。

从图 5 每 10 分钟地闪频数演变可以看出, 在 17:00 左右地闪频数出现跃增, 从 16:50 的 52 次/10 min 猛增到 17:20 的 226 次/10 min, 随后地面开始出现正地闪, 但频数很低 (为 2 次/10 min)。沂南西北部的岸堤乡于 18:25 观测到降雹, 该时刻正好为地闪频数开始快速下降阶段。在 18:20 到 18:50 降雹时段内, 负地闪频数一直是减少的, 而同时正地闪开始变得活跃, 到 18:40 正地闪频数达 15 次/10 min, 随后正地闪活动减弱。20:00 后雹云开始减弱消散, 负地闪消失, 出现的地闪全部为正地闪。

对其它降雹个例的地闪活动随系统演变的情况也进行了同样的分析, 结果基本类似, 现总结如下: (1) 在雹云快速发展阶段, 地闪频数存在明显的“跃增”, 多数情况下负地闪占绝对优势。(2) 在风暴的成熟阶段, 即降雹发生时段, 通常地闪频数演变有如下特征: 负地闪频数快速下降, 而正地闪频数开始增加, 即负地闪频数峰值的出现略超前地面降雹时间 0~20 min, 而正地闪频数峰值的出现一般滞后于降雹发生时间。(3) 在减弱消散阶段,

地闪频数显著减少, 但 POP 有所增加, 甚至正地闪占绝对优势。(4) 少数强雷暴过程自始至终出现的几乎全是正地闪, 在这种情况下降雹发生在正地闪频数快速增加阶段。(5) 地闪活动在正负极性突变 (转折) 之后将有灾害性天气发生, 一般由负转为正多为冰雹大风, 而由正转为负常伴有强降雨。

从 10 次冰雹过程的统计来看, 负地闪频数峰值的出现通常略超前地面降雹时间 0~20 min, 下面对其原因进行简单讨论。大多数冰雹增长发生在  $-10 \sim -25^{\circ}\text{C}$  之间。根据 Takahashi<sup>[20]</sup> 的实验结果, 当云内过冷水含量较大时 ( $0.5 \sim 4 \text{ g/m}^3$ ), 该温度范围内霰 (雹) 和冰晶的碰撞通常使霰 (雹) 获得负电荷。由于雹云内存在大量的霰雹粒子<sup>[21, 22]</sup>, 因而雹云中霰冰碰撞的非感应起电机制非常活跃, 十分有利于主负电荷区的形成, 为负地闪的产生提供了电荷源。受强上升气流的影响, 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滞后负地闪频数峰值的发生。Williams 等<sup>[23]</sup> 发现最高闪电频数出现在灾害性天气到达地面之前的 5~20 min。

### 3.4 冰雹云中地闪和云闪的比例

由于 SLDN 不能提供云闪信息, 因此无法了解云闪和地闪的分布特征。而 TRMM 卫星上所携带的 LIS 则可以探测发生于其视野内雷暴的总闪电活动。尽管 LIS 注视雷暴的时间很短 (LIS 以  $> 7 \text{ km/s}$  的速度围绕地球运转, 可以监视一个孤立雷暴或雷暴系统所发生的闪电约 90 s), 但 LIS 能够获取总闪电信息, 再配合地闪资料依然可以了解雷暴中云闪和地闪的活动特征。对照 10 次冰雹天气过程和 TRMM 卫星运行轨道, 发现仅有 2 条轨道扫过正在降雹的云系, 分别是 2002 年 5 月 29 日的

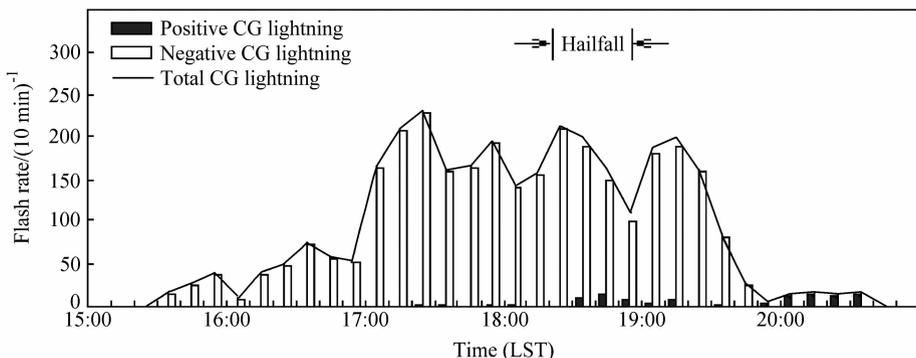


图 5 2002 年 7 月 29 日每 10 分钟地闪频数演变图

Fig. 5 The evolution of CG flash rate per 10 min on 29 Jul 2002

表 2 LIS 和 SLDN 同步观测一览表

Table 2 Comparison of simultaneous observations from Lightning Imaging Sensor (LIS) and Shandong Lightning Detection Network (SLDN)

日期	雹暴	TRMM 扫描时间	轨道号	总闪电 (IC+CG)	总地闪	Z
2002-05-29	是	20:34:35~20:35:39	25866	127	4	30.8
2002-07-17	是	19:25:26~19:26:55	26629	68	1	67.0
2002-07-19	否	17:33:54~17:35:04	26659	13	2	5.5
2002-07-20	否	16:39:09~16:40:45	26674	113	10	10.3
2002-07-20	否	18:16:43~18:18:27	26675	72	12	5.0
2002-08-03	否	10:12:21~10:13:45	26888	15	5	2.0
2002-08-05	否	09:57:55~09:59:50	26919	117	35	2.3
2002-08-23	否	01:26:52~01:28:26	27194	81	10	7.1
2002-08-25	否	22:39:52~22:41:27	27239	12	3	3.0
2002-08-26	否	00:17:12~00:18:43	27240	17	4	3.3

25866 号轨道和 2002 年 7 月 17 日的 26629 号轨道 (见表 2)。在 2002 年 5 月 29 日 20:34:35~20:35:39 时间内卫星观测到位于滨州西南的雷暴云团共发生总闪电 127 次,而在相同时间段内地面观测系统共观测到地闪 4 次,其中正地闪为 1 次、负地闪为 3 次, Z 值约为 30.8。另外,2002 年 7 月 17 日德州冰雹过程中,在 19:25:26~19:26:55 时间内出现总闪电 68 次,而在相同的时间段内仅观测到 1 次正地闪, Z 值为 67。Carey 和 Rutledge<sup>[8]</sup> 观测到一次强降雹过程中 Z 值高达 70。两个雹云的云闪不仅频数很高,密度也很大。由于云闪频数、上升气流和雹/霰回波体积之间存有很好相关性<sup>[24, 25]</sup>,因此高云闪频数可指示云内的雹/霰含量丰富,有利于冰雹的发生。张义军等<sup>[26]</sup>通过三维强风暴动力-电耦合模式研究发现,雹云内电场强度增强也有利于地面降雹量的增加。为了跟一般雷雨过程比较,表 2 同时给出了 6 次(共 8 条轨道)一般雷雨过程的云闪和地闪分布,可以看出雷雨过程中 Z 值一般在 2.0~10.3 之间,平均为 4.4,明显小于冰雹云的 Z 值。冰雹和雷雨的 Z 值都远高于马明<sup>[27]</sup>所给出的相应值(分别为 6.6 和 0.65),造成这么大差别的原因可能是,一方面安徽省地基定位仪对云闪的探测效率要小于对地闪的探测效率,造成较多的云闪漏测;另一方面,本文所用资料只是卫星扫过雷暴云很短时间内的云、地闪比例,与雷暴整个生命史的比例可能有一定的差异。由此可见,尽管强雷暴放电非常活跃,但是其地闪活动有可能不活跃。Williams 等<sup>[23]</sup>也注意到,在云内闪电活动

增加时,有地闪活动受到抑制的趋势,说明不同闪电类型之间对同一电荷源存在着竞争。图 6 (见文后彩图)给出了冰雹云和雷雨云 LIS 和 SLDN 同步观测的闪电空间分布,可以看出两者空间分布的对应关系较好。另外,也可以发现冰雹云的云闪分布比雷雨云更加密集。

通过上面比较可以发现,冰雹云的 Z 值显著比雷雨云大。其原因主要是因为冰雹云垂直气流速度远大于一般雷雨云,强上升气流必然导致云中强的起电过程,同时上升气流也将云体抬得更高,相应的电荷区也被抬高,即所谓的“电荷抬升机制”,这已得到观测证实<sup>[28, 29]</sup>,一方面加大了一 10~-20°C 区间主电荷区与地面的距离,导致地闪频数有所减小;另一方面减小了主电荷区与其上下异性电荷区之间的距离,导致云闪频数大大增加。这两者的作用都使得冰雹云的 Z 值显著大于雷雨云。

## 4 结论和讨论

本文通过对 10 次冰雹过程的闪电统计特征分析,得到如下主要结论:

(1) 通过对 10 次降雹过程的地闪资料分析表明,雹暴中正地闪占总地闪的平均比例为 57.39%,远高于当地正地闪比例的气候特征值,但少数伴有强降水的雹暴中正地闪比例也很低。

(2) 地面降雹区基本出现在正地闪密集(活跃)区或邻近区域,与正地闪的空间分布对应较好。

(3) 在雹云快速发展阶段,地闪频数存在明显

的“跃增”；降雹发生时段，通常地闪频数演变有如下特征：负地闪频数快速下降，而正地闪频数开始增加，整个降雹阶段对应于正地闪的活跃阶段；在减弱消散阶段，地闪频数显著减少，但正地闪所占比例有所增加；负地闪频数峰值提前于降雹 0~20 min，正地闪频数峰值一般滞后降雹发生时间。

(4) 冰雹云的 Z 值远高于一般的雷雨过程，且冰雹云云闪的密度也高于雷雨过程。

(5) 当地闪活动的正负极性发生突变（转折），即由正极性为主转为负极性为主或由负极性为主转为正极性为主时，通常预示着强天气的产生，在强对流灾害性天气监测预警及人工影响天气作业中应该格外关注。

通过上面的统计分析发现冰雹云的正地闪比例非常高，甚至多数雹云在降雹阶段都表现为以正地闪为主，造成这种现象的原因是什么呢？Williams<sup>[12]</sup>曾就正地闪为主的风暴的产生原因归纳如下：一是倾斜电荷结构，即中高层水平风的强垂直切变使经典的偶极性或三极性电荷结构的高层电荷发生偏移，这将减小中层主负电荷的屏蔽作用，使得高层的正电荷直接暴露于地面，导致正地闪的增加。二是低层正电荷区的增强，即经典的三极性电荷结构的低层正电荷增强并占主导地位，导致地闪以正极性为主。另外，由于增强的低层正电荷的屏蔽作用和大范围强上升气流抬升主负电荷区的作用，导致负地闪频数将下降。三是降水退屏作用，即瞬间强降水使带负电荷的降水粒子快速下落到地面，会导致经典的三极性电荷结构的上部主正电荷不被屏蔽而更容易产生正地闪。四是反极性电荷结构，即经典的电荷结构完全颠倒，常规的主负电荷区被正电荷所替代，高层为负电荷区。Williams 仅是从正地闪的电荷源来分析和假定的，而忽视了产生正地闪所需要的另外一个条件，即低层负电荷区。在正常的三极性电荷结构的配置下，低层弱正电荷的存在能够增加局地电场，从而有利于负地闪的发生<sup>[30]</sup>，这已经被越来越多的专家认可。同样对于正地闪而言，低层弱负电荷的存在也能够促进正地闪的发生。一维、二维起电模式证实，如果低层正（负）电荷参与放电的话，负（正）地闪更容易发生<sup>[31, 32]</sup>。Mansell 等<sup>[33]</sup>通过更加详细的三维模拟研究也同样发现，没有低层电荷区的存在正负极性地闪都不会发生。最近，Wiens 等<sup>[34]</sup>对 STEPS

期间的一次超级单体的研究发现，这个风暴电荷结构为反三极性电荷结构，所有的正地闪都来自 5~9 km，通常聚集在降水（雹）中心的下风方一侧，并且还发现若没有低层电荷的参与，正、负极性的地闪都难以产生。Williams 归纳的前三种情况下过分强调正电荷的存在，几乎没有考虑低层负电荷区的存在和作用。通过以上模式研究和观测表明，多数强雷暴在降雹阶段表现为以正地闪为主的原因很可能是由反极性电荷结构造成的。而强雷暴的中高层持续稳定深厚的正电荷区是如何形成的？该过程可能与冰雹云混合层内的强上升气流和丰富的过冷却云水有关<sup>[34]</sup>。对雷暴起电机和云内的动力和微物理过程的复杂关系的认识还有待于借助大量的云微物理和电场的同步观测以及数值模拟试验作进一步的探讨。

总之，尽管本文对 10 次冰雹天气过程的闪电特征进行了详细分析，初步得到了冰雹云的一些闪电活动特征，但是还应该继续加强对冰雹云闪电活动（云闪和地闪）的监测和分析，尤其是加强对冰雹云的微物理结构和电场探空观测，并结合数值模式来研究强对流天气过程电荷结构和闪电活动的关系，加深对强对流天气的闪电活动与云物理过程和动力结构的关系的认识。

## 参考文献 (References)

- [1] Reap R M, MacGorman D R. Cloud-to-ground lightning: Climatological characteristics and relationships to model fields, radar observations, and severe local storms. *Mon. Wea. Rev.*, 1989, **117**: 518~535
- [2] Stolzenburg M. Observations of high ground flash densities of positive lightning in summertime thunderstorms. *Mon. Wea. Rev.*, 1994, **122**: 1740~1750
- [3] MacGorman D R, Burgess D W. Positive cloud-to-ground lightning in tornadic storms and hailstorms. *Mon. Wea. Rev.*, 1994, **122**: 1671~1697
- [4] 陈哲彰. 冰雹与雷暴大风的云对地闪电特征. *气象学报*, 1995, **53** (3): 367~374  
Chen Zhezhang. The characteristics of lightning from clouds to ground accompanying with hailstones, thunderstorms and gusts. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 1995, **53** (3): 367~374
- [5] 周筠璐, 张义军, 郟秀书, 等. 陇东地区冰雹云系发展演变与其地闪的关系. *高原气象*, 1999, **18** (2): 236~244  
Zhou Yunjun, Zhang Yijun, Qie Xiushu, et al. The relationship between the variation of hail cloud system and its cloud

- to ground lightning in the east part of Gansu Province. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 1999, **18** (2): 236~244
- [6] 张义军, 言穆弘, 张翠华, 等. 甘肃平凉地区正地闪特征分析. *高原气象*, 2003, **22** (3): 295~300  
Zhang Yijun, Yan Muhong, Zhang Cuihua, et al. Analysis on characteristics of positive cloud-to-ground in Pingliang area of Gansu. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2003, **22** (3): 295~300
- [7] Engholm C D, Williams E R, Dole R M. Meteorological and electrical conditions associated with positive cloud-to-ground lightning. *Mon. Wea. Rev.*, 1990, **118**: 470~487
- [8] Carey L D, Rutledge S A. Electrical and multiparameter radar observations of a severe hailstorm. *J. Geophys. Res.*, 1998, **103**: 13979~14000
- [9] 邴秀书, 刘欣生, 张广庶, 等. 甘肃中川地区雷暴的地闪特征. *气象学报*, 1998, **56** (3): 312~322  
Qie Xiushu, Liu Xinsheng, Zhang Guangshu, et al. Characteristics of lightning discharge to ground in Zhongchuan area. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 1998, **56** (3): 312~322
- [10] 邴秀书, 余晔, 王怀斌, 等. 中国内陆高原闪电特征的统计分析. *高原气象*, 2001, **20** (4): 395~401  
Qie Xiushu, Yu Ye, Wang Huaibin, et al. Analyse on some features of ground flashes in Chinese inland plateau. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2001, **20** (4): 395~401
- [11] 赵阳, 张义军, 董万胜, 等. 青藏高原那曲地区雷电特征初步分析. *地球物理学报*, 2004, **47** (3): 405~410  
Zhao Yang, Zhang Yijun, Dong Wansheng, et al. Preliminary analysis of characteristics of lightning in the Nagqu area of the Qinghai-Xizang Plateau. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 2004, **47** (3): 405~410
- [12] Williams E R. The electrification of severe storms. *Meteorol. Monogr.*, 2001, **28**: 527~561
- [13] 刘方兴, 李学勇, 曹志东, 等. 山东雷电监测定位系统数据分析与应用. *山东电力技术*, 1997, **96** (4): 1~8  
Liu Fangxing, Li Xueyong, Cao Zhidong, et al. The application and analysis of data of lightning location system in Shandong Province. *Shandong Electric Technology* (in Chinese), 1997, **96** (4): 1~8
- [14] 李锐, 傅云飞, 赵萍. 利用热带测雨卫星的测雨雷达资料对 1997/1998 年 El Niño 后期热带太平洋降水结构的研究. *大气科学*, 2005, **29** (2): 225~235  
Li Rui, Fu Yunfei, Zhao Ping. Characteristics of rainfall structure over the tropical Pacific during the later period of 1997/1998 El Niño derived from TRMM PR observations. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2005, **29** (2): 225~235
- [15] 冯桂力, 陈文选, 刘诗军, 等. 山东地区闪电的特征分析. *应用气象学报*, 2002, **13** (3): 347~355  
Feng Guili, Chen Wenxuan, Liu Shijun, et al. Preliminary analysis of lightning characteristics in Shandong. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 2002, **13** (3): 347~355
- [16] Branick M L, Doswell C A III. An observation of the relationship between supercell structure and lightning ground-strike polarity. *Wea. Forecasting*, 1992, **7**: 143~149
- [17] Changnon S A. Temporal and spatial relations between hail and lightning. *J. Appl. Meteor.*, 1992, **31**: 587~604
- [18] Shafer M A, Carr F H. Cloud-to-ground lightning in relation to digitized radar data in severe storms. Preprints, Conference on Atmospheric Electricity, American Meteorological Society, Boston, 1990. 732~737
- [19] Zhang Yijun, Krehbiel P R, Liu Xinsheng. Polarity inverted intracloud discharges and electric charge structure of thunderstorm. *Chinese Sci. Bull.*, 2002, **47**: 1725~1728
- [20] Takahashi T. Riming electrification as a charge generation mechanism in thunderstorms. *J. Atmos. Sci.*, 1978, **35**: 1536~1548
- [21] 刘术艳, 肖辉, 杜秉玉, 等. 北京一次强单体雹暴的三维数值模拟. *大气科学*, 2004, **28** (3): 457~470  
Liu Shuyan, Xiao Hui, Du Bingyu, et al. Three-dimensional numerical simulation of a strong convective storm in Beijing. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2004, **28** (3): 457~470
- [22] 洪廷超, 肖辉, 李宏宇, 等. 冰雹云中微物理过程研究. *大气科学*, 2002, **26** (3): 421~432  
Hong Yanchao, Xiao Hui, Li Hongyu, et al. Studies on microphysical processes in hail cloud. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2002, **26** (3): 421~432
- [23] Williams E, Boldi B, Matlin A, et al. The behavior of total lightning activity in severe Florida thunderstorms. *Atmos. Res.*, 1999, **51**: 245~265
- [24] Wiens K C, Tessendorf S A, Rutledge S A. June 29, 2000 STEPS supercell storm: Relationships between kinematics, microphysics, and lightning. Preprints, 21st Conference on Severe Local Storms, San Antonio, *Amer. Meteor. Soc.*, 2002. 315~318
- [25] Fu Danhong, Guo Xueliang. A cloud-resolving study on the role of cumulus merger in MCS with heavy precipitation. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2006, **23** (6): 857~868
- [26] 张义军, 孙安平, 言穆弘, 等. 雷暴电活动对冰雹增长影响的数值模拟研究. *地球物理学报*, 2004, **47** (1): 25~32  
Zhang Yijun, Sun Anping, Yan Muhong, et al. Numerical modeling for effects of electric activity during thunderstorms upon the growth of hail particles. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 2004, **47** (1): 25~32
- [27] 马明. 雷电与气候变化相互关系的一些研究. 中国科学技术大学地球和空间科学学院博士学位论文, 2004. 89~94  
Ma Ming. Some studies on the relationship between lightning and climatic changes. Ph. D. dissertation (in Chinese), School of Earth and Space Sciences, University of Science and

- Technology of China. 2004. 89~94
- [28] Stolzenburg M, Rust W D, Smull B F, et al. Electrical structure in thunderstorm convective regions. I: Mesoscale convective systems. *J. Geophys. Res.*, 1998, **103**: 14059~14076
- [29] Lang T J, Rutledge S A, Wiens K C. Origins of positive cloud-to-ground lightning flashes in the stratiform region of a mesoscale convective system. *Geophys. Res. Lett.*, 2004, **31**, L10105, doi: 10.1029/2004GL019823
- [30] Jacobson E A, Krider E P. Electrostatic field changes produced by Florida lightning. *J. Atmos. Sci.*, 1976, **33**: 103~117
- [31] 孙安平, 言穆弘, 张义军, 等. 雷暴云下空间电荷层形成的数值研究. *大气科学*, 2001, **25** (1): 16~24
- Sun Anping, Yan Muhong, Zhang Yijun, et al. A numerical study of space charge formation beneath thunderstorm. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2001, **25** (1): 16~24
- [32] Marshall T C, Stolzenburg M. Electrical energy constraints on lightning. *J. Geophys. Res.*, 2002, **107**, 4052, doi: 10.1029/2000JD000024
- [33] Mansell E R, MacGorman D R, Ziegler C L, et al. Simulated three-dimensional branched lightning in a numerical thunderstorm model. *J. Geophys. Res.*, 2002, **107**, 4075, doi: 10.1029/2000JD000244
- [34] Wiens K C, Rutledge S A, Tessendorf S A. The 29 June 2000 supercell observed during STEPS. Part II: Lightning and charge structure. *J. Atmos. Sci.*, 2005, **62**: 4151~4177

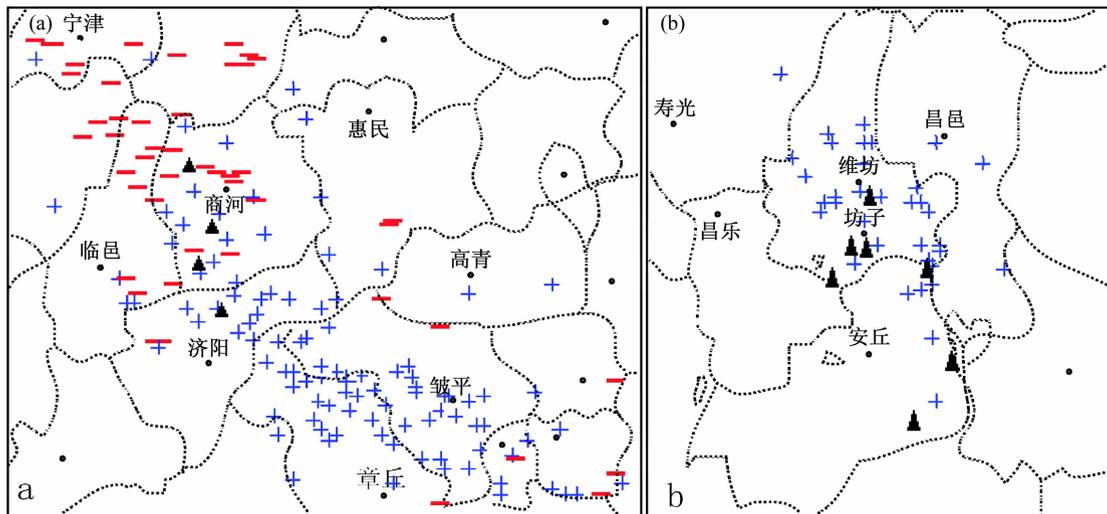


图 2 地闪和冰雹落区的空间分布：(a) 2000 年 6 月 30 日凌晨；(b) 2000 年 8 月 20 日上午。“+”、“-”表示正、负地闪，黑三角表示降雹  
 Fig. 2 Spatial distribution of CG lightning and hailfall on 30 Jun 2000 (a) and 20 Aug 2000 (b). “+” and “-” stand for positive and negative CG lightning respectively, black triangle for hailfall location

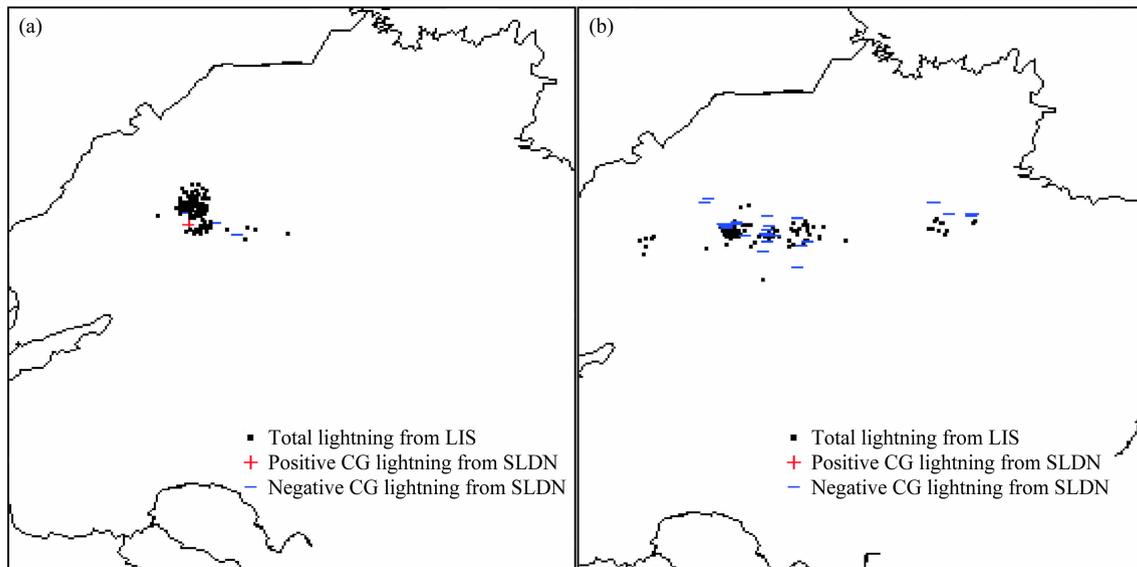


图 6 TRMM 和 SLDN 同步观测的闪电分布图：(a) 2002 年 5 月 29 日 20:34:35~20:35:39 冰雹过程；(b) 2002 年 8 月 5 日 09:57:55~09:59:50 雷雨过程  
 Fig. 6 Spatial distribution of lightning observed synchronously by TRMM and SLDN for (a) hailstorm during 2034:35 – 2035:39 LST 29 May 2002, (b) thunderstorm during 0957:55 – 0959:50 LST 5 Aug 2002