

# 冰雹云形成发展与闪电演变特征分析<sup>①</sup>

冯桂力 边道相 刘洪鹏 山义昌

(山东省气象科学研究所, 济南 250031) (山东省潍坊市气象局)

## 提 要

1998年4月23日下午在中尺度对流系统(MCS)的影响下,山东潍坊地区出现了一次大范围的冰雹强对流天气。应用闪电定位系统、卫星和雷达观测资料,研究了这次降雹过程形成和发展不同阶段闪电的变化特征。分析发现:雹云在形成发展和减弱消亡阶段,每5分钟闪电频数低于20次,且正闪电频数明显低于负闪电;雹云在成熟阶段,闪电频数每5分钟平均值大于20次,且正、负闪电频数相当,而在强降雹前短时会出现正闪电频数超过负闪电现象。此外还发现,在降雹前20~30分钟闪电频数有跃增现象,其增加速率和降雹强度呈正相关关系,降雹的起始时刻与总闪电和负闪电每5分钟频数出现极大值的时刻有明显的一致性。

**关键词:** 冰雹 回波 闪电频数

## 前 言

冰雹是山东省主要自然灾害之一。在冰雹云发展演变的过程中,常伴随有大量地闪的发生。70年代我国在防雷作业中曾广泛利用闪电计数器作为监测冰雹发生与否的工具,并总结出每5分钟多于100次即有80%的降雹概率<sup>[1]</sup>。近年来,随着雷电探测技术的发展,闪电定位系统在对流风暴观测中越来越得到重视。为了了解冰雹云在发展演变过程中与地闪的活动规律,国内外气象工作者曾作过不少的研究工作。Goodman和MacGorman<sup>[2]</sup>1986年发现,闪电往往在最强的雷暴单体中心产生,其峰值闪电频数发生的时间恰好是风暴云顶温度最冷的时间。周筠君等<sup>[3]</sup>发现陇东地区每5分钟地闪频数的最大值一般是出现在开始降雹前6~16分钟之间。虽然国内外气象工作者就雹云中的闪电作了很多工作,但冰雹云发展演变与地闪的变化仍须作较深入的研究,且冰雹云及其

地闪特征具有明显的地域性。本文利用闪电定位资料和雷达、卫星资料对1998年4月23日潍坊地区一次强对流降雹天气过程作了分析,以期利用闪电资料来研究冰雹云的形成和演变过程,增强对冰雹云的识别能力。

## 1 主要试验仪器和资料

闪电观测仪器采用电子工业部第22所研制的XDD03型雷电探测系统。该系统通过环形天线接收东西与南北向的两路磁场信号来测定闪电的方向,其距离定位采用所接收的闪电信号本身所携带的信息进行测定。这种测距方法是在信号接收机中设计了1.1、1.9、3.0、4.1kHz 4个窄带选频放大器,从接收的E分量电磁脉冲中提出4个频率的分量,对其峰值采样,输入计算机求出各分量的幅度比,再利用极低频电波的传播色散特性,估计其距离。该系统可以全天候监测500km范围内的地闪,给出地闪出现的时间、位置、强度和极性。

① 本文受山东省气象局“九五”重点攻关项目“雷电探测系统在人工防雷中的应用”资助。

雷达资料采用潍坊 711 雷达数字化资料, 卫星云图资料为 GMS 云图资料。

## 2 天气背景

1998 年 4 月 23 日 08 时山东处于 850hPa 上较深的低槽前部; 700hPa 槽线在太原—西安—重庆, 槽后有较强的冷平流; 500hPa 有一大连—青岛—汉口前倾槽, 冷中心位于贝加尔湖以北; 地面冷锋位于沈阳—天津—西安一线, 锋后变压较大, 在银川有一个 +6.1hPa 的变压中心。在此天气形势下, 有利于贝加尔湖和蒙古附近冷空气向华北南部输送, 导致高空温度下降, 大气低层在槽前暖平流的作用下增温, 高空降温和低层增温的共同作用使大气层结出现极度不稳定。14 时地面图上, 锋线位于丹东—济南东—郑州一线, 从地面风场来看, 潍坊地区处在风场辐合区, 有利于低层暖湿空气的抬升和强对流天气的发生发展。4 月 23 日下午, 受高空槽和地面冷锋共同影响, 潍坊市自西向东出现了强雷雨、大风天气, 并伴有降雹。至 20 时, 锋面移到平壤—青岛—汉口一线,

山东大部吹东北风, 此次过程基本结束。

从卫星云图看, 12:25 在山东中部有一小块云团, 云顶辐射亮温最低值为  $-40^{\circ}\text{C}$ 。13:32 (图 1) 该云团发展成为南北有 1 个纬距、东西跨 2 个经距的块状云团 (图 1a), 且边界清晰, 呈东北—西南走向, 云顶亮温达  $-50^{\circ}\text{C}$ 。14:32 云区面积进一步增大, 南北达 1.5 纬距, 东西距 3 个经距 (图 1b)。对流云团边界温度梯度较大, 云顶亮温低于  $-60^{\circ}\text{C}$ ; 亮温低于  $-50^{\circ}\text{C}$  的云区明显增大, 强中心位于潍坊市境内。15:32 该云团在东移过程中, 强度维持少变 (图 1c), 但云团分裂成两个强中心, 东部强中心基本位于潍坊地区, 且强度大于西部位于鲁中山区的强中心。16:32 (图 1d) 东部强中心移出潍坊, 其强度减弱, 而西部强中心进一步增强, 云顶亮温低于  $-60^{\circ}\text{C}$ , 强度超过前者。17:32 该云团强度减弱 (图 1e), 低于  $-50^{\circ}\text{C}$  的云区范围减少, 两个强中心也消失了。19:32 该云团基本消散 (图 1f)。

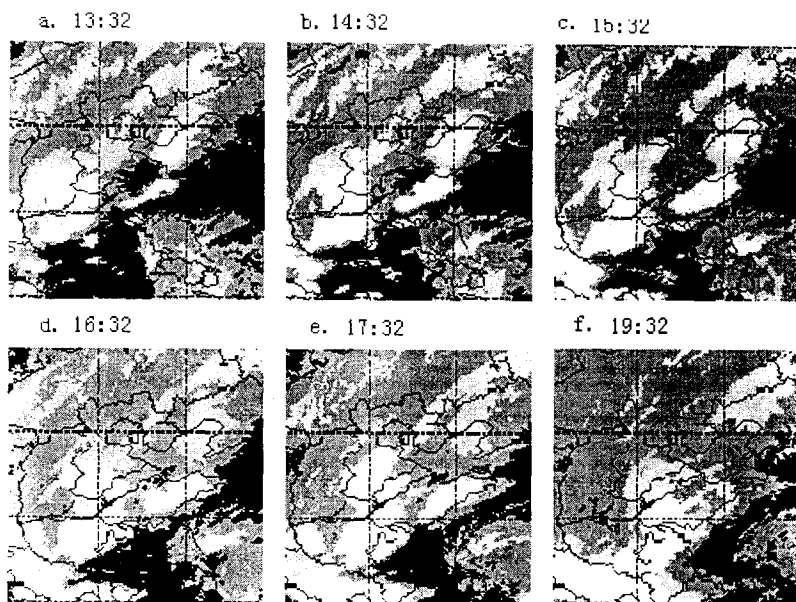


图 1 1998 年 4 月 23 日卫星云图演变情况

## 3 闪电的统计分析及其地闪特征

### 3.1 闪电的统计分析

对 1998 年 4 月 23 日全天的闪电资料进

行统计分析, 全天接收的闪电总数为 5983 个, 观测的最大电流强度为 32760.0A, 最小值为 21.0A, 平均强度为 11190.1A, 大于

8495.3A 的闪电占总数的 50%。统计表明负闪电（电流方向向下的闪电为正闪电，反之为负闪电）占多数，正闪电占的百分比为 25.2%。我们曾对三次的雷雨过程进行统计分析，发现正闪电所占百分比基本为 5%~15%。根据国内外大量观测的闪电资料也表明，负闪电最为常见<sup>[4]</sup>。MacGoramn 等人也发现，第一次地闪出现在发展了 9 分钟的雷暴云冰水混合相中，生成大雹的冰雹云在成熟阶段总是产生异常多的正地闪。4 月 23 日降雹过程出现的正闪电比例明显高于非降雹过程，完全和 MacGorman 等人观测结果相一致。其物理原因主要是冰雹融化起电效应造成的。冰雹的融化起电过程使降水粒子带正电，冰粒子融化时出现气泡破裂所形成的大量云滴带负电。在云中正、负电荷重力分离过程中，带负电的云滴将随上升气流达到云体中上部，使该区域形成负电荷区，而带

正电的降水粒子则因重力沉降聚集在 0℃ 以下的云底附近。使云底附近形成正电荷区，从而为正地闪的发生创造了良好条件。

### 3.2 雹云演变过程的地闪特征

因造成潍坊强降雹的对流云团主要在山东半岛中部地区，我们仅对 35.5~37.5°N、118~120°E 范围内闪电资料进行分析，发现在冰雹云发展的不同阶段闪电频数也随之出现了较有规律的变化。

#### 3.2.1 发生发展阶段

从实况资料来看，13:38 潍坊雷达观测到在测站西部和西北方向（即在东营、滨州、寿光及青州附近）有许多零散、发展迅猛的对流回波（图 2a）。在本站西部 60km 处有一块状回波，东西宽 225km，南北跨度为 50km，中心强度为 30dBz；该雷暴云回波顶高为 13km（图 3a），大于 30dBz 的回波中心高度为 8km。

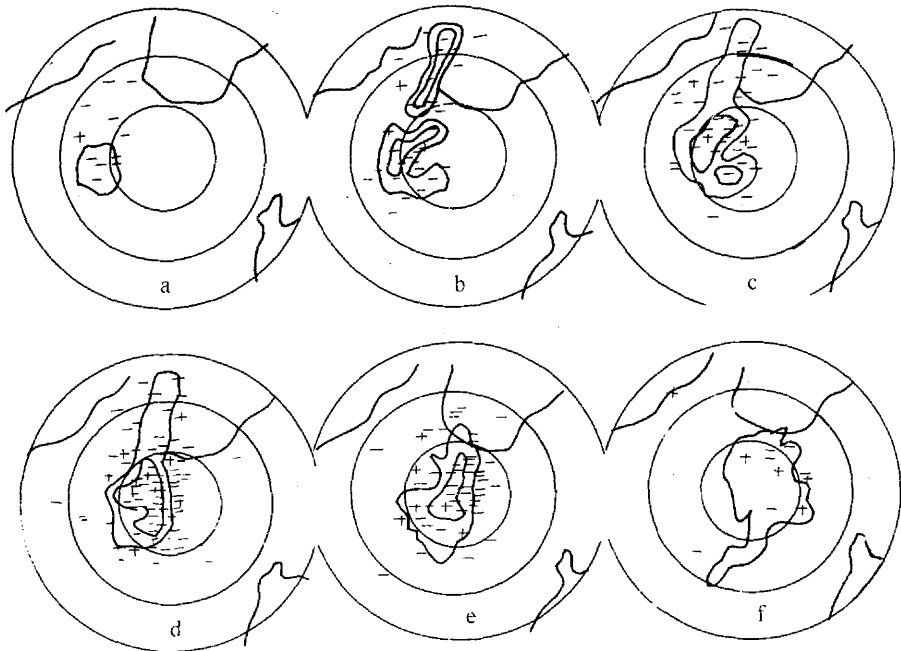


图 2 PPI 回波演变图（回波曲线从外向内分别为 0dBz, 30dBz；+、- 表示正、负闪电；每圈距离 50km）  
 a: 时间为 13:38, 仰角 1.0°; b: 13:59, 1.9°; c: 14:17, 2.1°;  
 d: 14:31, 2.0°; e: 15:04, 3.8°; f: 16:22, 1.9°

经过连续观测发现，回波以  $30\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$  的速度向东偏南方向移动。这些零散的雷暴

云团在移动过程中开始合并，并迅速发展，大于 30dBz 的回波范围明显增大。到 13:59

(图 2b) 已发展成为许多单体雷暴云排列而成的带状回波, 回波的东西宽 30km, 南部跨距 160km。中心强度 30dBz 距本站 40km (寿光市境内), 在 RHI 图回波顶高为 14km, 30dBz 顶高达 12km (图 3b)。对闪电资料进行统计分析表明 (见图 4), 在发展阶段 (13~14 时) 每 5 分钟的总闪电频数均小于 20

次, 最大值为 19 次, 平均值为 10.7 次; 每 5 分钟负闪电频数最大值为 15 次, 平均值为 8.9 次; 每 5 分钟正闪电频数最大值 6 次, 平均 1.8 次。在发展阶段负闪电出现频数占总闪电的 84%, 远大于正闪电。闪电强度的平均值为 3470A。

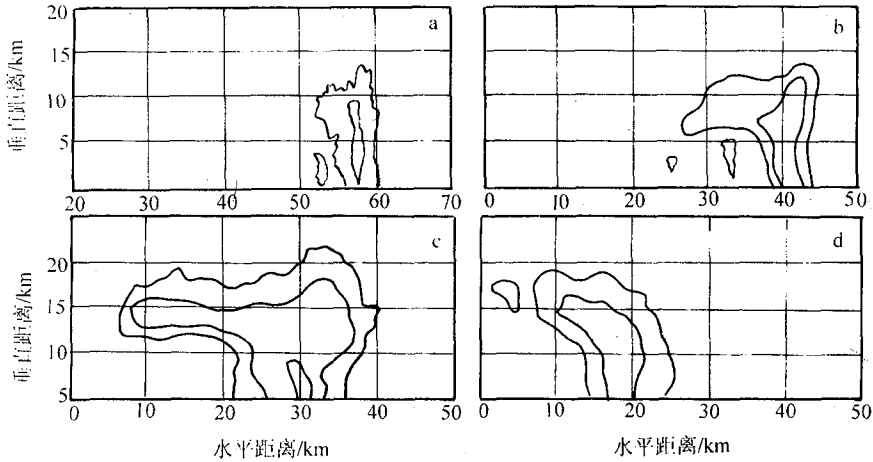


图 3 不同时刻 (a 为 13: 48、b 为 14: 05、c 为 14: 30、d 为 15: 02) RHI 回波演变图 (从外向内分别表示 0、30、50dBz)

### 3.2.2 成熟阶段

雹云在快速东移过程中继续发展加强, 其回波范围增大, 东西宽 40km, 南北跨距 165km, 形成多个 30dBz 以上的强回波中心 (图 2c, d)。从 RHI 回波来看 (图 3c), 回波顶高达 15.6km, 30dBz 回波高度跃增到 14km, 最大回波 >50dBz。由于雹云前部强持续的上升暖湿气流而雹云后部有干冷空气的侵入, 使雹云前方云砧进一步发展, 在 10km 处云砧最远达 30km。从实况资料看, 从 14: 30 开始, 寿光、昌乐的部分乡镇先后出现降雪, 单站降雪持续时间约 10 分钟, 雹块最大直径 1.0cm。随后雹云移到潍坊上空 (图 2e), 在 14: 55~15: 00 时潍坊本站出现降雪, 冰雹最大直径 1.0cm。此时雹云回波顶高 14km, 30dBz 回波高 12km (见图 3d)。雹云移入本站后移速加快, 近  $40\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ , 并且不断有新的单体生成和发展加强。位于本站西南  $195^\circ$ 、60km 处新生的雷暴云很快发展成冰雹云, 强度达 42dBz (由于本站降水, 回波衰减比较大)。15: 20~15: 30 在安丘南部

的石埠子和庵上、诸城西北的马庄一带出现降雪, 降雪持续时间 10 分钟, 冰雹最大直径 5cm, 并伴有 7~8 级大风。

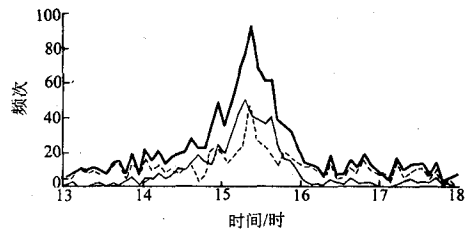


图 4 1998 年 4 月 23 日每 5 分钟闪电频次的演变图 (范围为  $35.5 \sim 37.5^\circ\text{N}$ 、 $118 \sim 120^\circ\text{E}$ )

粗实线为总闪电, 细实线为正闪电, 虚线为负闪电

14: 00~15: 00 总闪电频数为 289 次, 每 5 分钟的闪电频数最大值为 50、最小值为 14 次, 平均 24.1 次。正闪电所占比例明显加大, 占总数的 47.7%。14: 00~15: 00 闪电呈现逐渐增加的趋势, 增加速率为 1.7 次/5 分钟, 其中 14: 15~14: 45 有一个持续增加的

过程,其增加速率为2.8次/5分钟。15:00以后,闪电频次出现爆发性增长(见图4),至15:20闪每5分钟闪电频数达92次,其增加速率为14次/5分钟,其中正、负闪电也均表现为爆发性增长。特别值得注意的是,正闪电数已超过负闪电数,且正闪电频数较总闪电和负闪电提前5分钟出现极值(51次/5分钟)。从上述的观测结果可以看出,每5分钟总闪电和负闪电出现极值时间基本和强降雹的起始时刻相一致。在强降雹阶段闪电频次迅速下降,频次减少速率为9.7次/5分钟。对15:00~16:00的闪电进行分析表明,正闪电出现频数明显高于负闪电,占总闪电的57.6%。

### 3.2.3 衰减消亡阶段

16:00时以后整个云团在东移过程中,范围虽有所扩大,但是强度已逐渐减弱,大于30dBz的区域大大减小(见图2f)。闪电特征表现为:闪电频次明显减少,总闪电数平均值为12.8次/5分钟,正闪电为1.7次/5分钟,正闪电所占的百分比下降为20.8%。

## 4 云地闪与PPI的对应关系

为了进一步研究在雹云演变过程中,云地闪与雷达回波PPI的对应关系,我们以雷达观测时间为中心前后各取2.5分钟,将该5分钟时间段内的闪电叠加在相应时刻的雷达回波图上,结果见图2。从图2可以看出,在对流云发展阶段,仅有少量地闪发生,负闪明显高于正闪。在13:38共出现闪电13次,正闪仅1次;13:59闪电出现30次,正闪为4次。在雹云成熟阶段(图2d、e),闪电次数明显增加,正闪的比例显著增加,在14:31总闪电次数为70,正闪高达37次,闪电的分布比较集中,大部分闪电没有出现在>30dBz的范围内,而是位于0~30dBz之间或0dBz附近,且大部分闪电位于回波移动的前方。在雹云消散减弱阶段,闪电次数明显下降。

## 5 结 语

(1) 该次强对流天气过程在云图上表现为中尺度对流系统(MCS),其生命周期超过

5小时,系统演变经历3个阶段:发生发展阶段,冷云顶膨胀,云顶温度迅速降低,从-40℃降低到-60℃;成熟阶段,云顶辐射亮温最低值达-69℃,其中-50℃的面积进一步扩大,整个云团不断有新单体出现;减弱阶段,最冷的云顶变暖,云砧与母体分离并开始消散。

(2) 在雹云的发展和减弱阶段,闪电频数低,每5分钟总闪电频数低于20次,负闪电占总闪电的80%以上,明显多于正闪电。而在成熟阶段闪电频数明显增大,每5分钟总闪电频数平均值大于20次,最大值为92次。正闪电所占比例基本和负闪电相当,在强降雹前的短时间内可超过负闪电所占比例。

(3) 在降雹开始前的20~30分钟内,闪电频次出现跃增,其增加速率为每5分钟几次至十几次,增加速率和降雹的强度存在较好的正相关。降雹起始时刻基本和总闪电、负闪电频数出现极值时刻相一致,而正闪电则提前5分钟出现极值。

(4) 闪电的形成与冰相粒子有一定的正相关关系。在冰雹云发展、成熟、减弱三个阶段中,冰雹云中心的冰相粒子由少变多,再由多变少,与之相应的闪电也同样有由少变多,再由多变少的过程,从而间接表明冰雹云起电机理是以非感应起电机理为主。

(5) 在雹云的演变过程中,大多数闪电出现在强回波移动的前方,且正闪和负闪都集中在0~30dBz之间。降雹发生时,存在明显的闪电集中区。

## 参考文献

- 1 叶宗秀等. 冰雹云闪电频数特征及其在防雷中的应用. 高原气象, 1982, 1: 53~59.
- 2 Donald R. MacGorman, Ronald L. Hondl, and Thomas Filiaggi. Cloud to ground flash rates relative to radar-inferred storm properties. 10th international conference on atmospheric electricity. 1996, 361~363.
- 3 周筠君等. 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).
- 4 孙景群. 大气电学基础. 北京: 气象出版社, 1987.

# The Evolution of Hail Cloud System and Character of Its Cloud to Ground Lightning

Feng Guili<sup>1)</sup> Bian Daoxiang<sup>1)</sup> Liu Hongpeng<sup>1)</sup> Shan Yichang<sup>2)</sup>

1 (Shandong Research Institute of Meteorological Science, Jinan 250031)

2 (Weifang Meteorological Office)

## Abstract

There was a severe hail storm under the influence of mesoscale convective system in Weifang district, Shandong Province on April 23, 1998. Based on the data obtained by the lightning location system, radar and satellite, the variation character of lightning in various periods of hail cloud forming and developing was studied. The results show that the number of lightning per five minutes is less than 20, and the positive lightning frequency is obviously smaller than the negative one in the periods of hail cloud forming and weakening. The lightning average value per five minutes is bigger than 20, and the positive lightning frequency is equivalent to the negative one in the mature stage. The positive one is temporarily bigger than the negative one just before the severe hail beginning. It is also found that the sudden increase of lightning frequency emerged in the 20—30 minutes before the hail fall beginning, while increasing rate is directly related to the intensity of hail storm. The moment of hail beginning is consistent to that of the maximum value of lightning emerging.

**Key Words:** hail cloud system radar echo lightning frequency