福建冰雹云三维闪电及双偏振雷达回波特征分析

阮悦[1,2]　黄慧琳[3]　魏鸣[4]　潘佳文[5]　陈秋萍[2]

1.福建省灾害性天气重点实验室　福州 350001

2.福建省气象台　福州 350001

3.福建省气象服务中心　福州 350001

4. 气象灾害预报预警与评估协同创新中心，南京信息工程大学,南京 210044

5. 厦门市气象局　厦门 361012

提　要：为了深入认识冰雹云中闪电的演变特征及云物理机制，利用 VLF/LF 三维闪电监测资料，结合 S 波段双偏振雷达、地面观测等资料，采用统计、对比方法，对福建 2017－2020 年 31 个冰雹单体闪电特征进行了分析。结果表明：降雹前闪电频数峰值约有三分之二在 50 次/6 min 以上，80%冰雹云地面降雹出现在闪电峰值后的 3～25 min；降雹前总闪电频数出现跃增，70%雹暴单体频数平均递增率达 4 次/min 以上，闪电快速跃增提前于降雹的时间大多在 6～40 min；云闪频数在成熟阶段最多，发展阶段最少；冰雹单体三个阶段云闪集中分布在 2～6 km 高度层；差分反射率因子（ZDR）、相关系数（CC）等参数及粒子相态识别分析表明雹云降雹前融化层以上由冰雹和霰组成，融化层下由干、湿冰雹和雨粒子组成，低层则主要由湿冰雹和中大雨粒子组成；闪电频数、正地闪或正云闪占比率与回波强度、最强回波高度、强回波伸展高度呈正相关。本研究结合了闪电资料与双偏振雷达参量，为识别冰雹云体演变及雷电预警提供参考。

关键词：冰雹，三维闪电，双偏振雷达，识别预警

DOI：10.7519/j.issn.1000-0526.2022.011501

Analysis of three dimensional lightning and dual-polarization radar echo characteristics of Hail Cloud

RUAN Yue[1,2], HUANG Lingguang[2], WEI Ming[3] ,PAN Jiawen[4],CHEN Qiuping[2]

1.Fujian Key Laboratory of Severe Weather, Fuzhou 350001

2.Fujian Meteorological Observatory, Fuzhou 350001

3. Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, NUIST, Nanjing 210044

4. Xiamen Meteorological Bureau, Xiamen 361012

Abstract: Based on VLF / LF three-dimensional lightning monitoring data, combined with S-band dual- polarization radar and ground observation data, the lightning characteristics of 31 hail cells

*国家自然科学基金 (41675029)、福建省自然科学基金 (2018J01060)、福建省自然科学基金 (2019J01099) 共同资助

第一作者：阮悦，主要从事雷达资料应用和天气预报工作.E-mail：ryry1991@163.com

通讯作者：陈秋萍，主要从事短时临近天气预报工作.E-mail：chenqiuping1962@163.com

in Fujian from 2017 to 2020 were analyzed by using statistical analysis and comparative analysis methods. The results show that: before hailing, about two-thirds of the lightning frequency peaks are more than 50 times / 6 min, and 80% hail cloud surface hail falls behind 3-25 minutes after the occurrence of the lightning peak; the total lightning frequency increases sharply before hail, and 70% of the hail storm cell average increase rate is more than 4 times / min, and the time of lightning rapid jump ahead of hail is mostly 6-40 minutes; cloud flash is the most in the three stages in mature stage The results show that, before hail falling, the above melting layer of hail cloud is composed of hail and graupel, and under the melting layer is composed of dry hail, wet hail and rain particles, while the lower layer is mainly composed of wet hail The lightning intensity is closely related to the echo intensity, the strongest echo height and the strong echo spreading height. These results can provide reference for hail recognition and lightning warning.
Key words: hail, 3D lightning, dual-polarization radar, recognition and warning

引言

冰雹等灾害性天气常常伴有强闪电发生，放电过程中形成的强大电流及其辐射的电磁场，对大量使用微电子器件的现代社会造成巨大影响。近年来，国内外利用闪电定位系统和多种雷达对中尺度对流天气过程进行了大量的观测，取得了很多有意义的研究成果。美国国家强风暴预报中心（NSS－FC）在 1988－1990 年间，组织了相应的“闪电资料应用于强对流天气预报业务”评估研究，并肯定了闪电资料可以有效地改进强对流的诊断和预报（张义军等，2006）。冯桂力等（2008）、陈哲彰（1995）对不同地区冰雹过程闪电特征进行了研究，发现雹暴发展演变过程中具有较高的正地闪比例。周筠君等（1999）、李国昌等（2005）对不同地区冰雹云发展演变过程中闪电特征开展研究，发现在降雹前闪电频次出现“跃增”现象并伴随一定的闪电频次峰值出现。

在地闪活动规律与雷达回波的关系方面，国内外有诸多研究成果，尹丽云等（2012）发现在飑线整个发展阶段，-10℃和-20℃层高度上雷达回波强度的每一次跳跃变化都对应着地闪频次的跃增，且其回波强度跃变总在地闪频次变化之前 6～30 min 发生。支树林等（2012）统计计算了 2003－2010 年江西境内的地闪与回波强度的相关性，发现 0 ℃层以上最大回波强度介于 45～55 dBz 时，对应地闪活动最强。李南等（2006）对安徽省 3 次天气过程的闪电与雷达资料的相关性进行了分析，发现闪电发生的数目和变化与回波顶高（ET）有较好的对应关系。国外一些研究者（Ge et al，1992；Yan et al，1992；Qie et al，1993）发现雷达回波强度和地闪频数有很好的对应关系，随着风暴的生消演变，正、负闪电频数呈现不同的变化特征。

新一代天气雷达在监测预警冰雹等强对流方面已经取得很多研究成果（冯晋勤等，2010；郑媛媛等，2004；陈秋萍等，2015），近年双偏振雷达由于其识别降水粒子相态方面的能力，在冰雹识别预警及人工防雹指挥等方面得到了很好的应用（曹俊武和刘黎平；2006；刘黎平等，1996；刘黎平，2002；潘佳文等，2020 a，b；冯晋勤等，2018；高丽等，2021）。

上述研究大多数都是探讨地闪分布特征及针对个例的三维闪电特征分析，少见结合双偏振雷达资料的分析。本研究利用 VLF/LF 闪电定位系统及 S 波段双偏振雷达资料，基于雷达观测到的雹暴单体，动态追踪整个雹暴生命史中闪电频数的演变，分析地闪、云闪随高度分布及闪电与回波伸展高度的相关性，归纳对冰雹云识别预警有重要指示意义的参数指标，以期为冰雹云的识别预警及雷电预警提供参考。

1　资料与说明

1.1　冰雹样本资料

普查 2017－2020 年福建省内的降雹事件。冰雹事件的来源主要包括：(1)由县市(区)级气象部门核实并通过中国气象局气象灾害管理系统上报的冰雹灾情直报信息。(2)根据官方媒体的灾情报道新闻以及微博等新媒体手段发布的目击报告，从中筛选出具有确切照片记录和实时定位信息的冰雹发生记录，剔除冰雹尺寸模糊，时间、地点信息不明确的报告，同时具有完整闪电资料。（3）为了闪电数据不受其它雷暴系统干扰，冰雹样本挑选雷达回波中雹暴周围 15 km 范围无其它风暴存在的个例。据此选取冰雹个例 31 个。

1.2　闪电定位资料

本项目采用中国科学院电工研究所研制的 VLF/LF（ADTD_2C）闪电监测定位系统数据，该探测仪采用数字波形鉴别技术，鉴别速度快，可提供闪电发生时间、云闪、地闪、经度、纬度、强度、极性等参数的实时自动连续监测信息。闪电定位系统由福州、平潭、厦门、福鼎、德化、崇武、东山、平和、武平、龙岩、泰宁、宁化、永安、政和、南平、武夷山 16 个探测站组成，站距 150 km 左右，探测范围覆盖福建全省及与福建相邻的广东、江西、浙江省部分地区和台湾海峡，探测效率高于 85% ，站网内定位精度平面小于 300 m、高度小于 500 m。探测站的具体分布情况如图 1 所示。

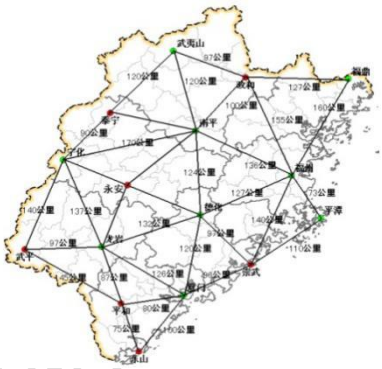


图 1　福建省三维闪电监测网站址分布图

Fig. 1　Distribution of 3D lightning monitoring websites in Fujian

本文根据福建全省雷达系统中提供的风暴高度、强度等信息将雹暴分为 3 个阶段：发展、成熟、消亡阶段。规定雷达回波处于强度增强、40 dBz 以上强回波面积增大、风暴顶高处于增加中为发展阶段；强度、50 dBz 以上强回波面积及风暴顶高处于维持（或变化不大）为成熟阶段；处于强度减弱、50 dBz 以上强回波面积减小、风暴顶高降低中为减弱消散阶段。文中所用闪电资料是以产生降雹的风暴为中心，组合反射率因子 20 dBz 以上区域范围内探测到的所有闪电数据，主要分析云闪和地闪频数、云闪比率、正负闪比率、云闪高度等参量及其演变特征。同时详细分析了 2 个雹云单体闪电与 S 波段双偏振雷达回波特征。

2　冰雹闪电频数及其演变

2.1　闪电频数分布及其演变

文中对闪电频数的计算是指闪电发生时刻 6 min 闪电频数的累加值。统计发现闪电频数越大，可能产生的冰雹直径越大。从收集到的样本记录看，降雹前闪电频数约有三分之二在 50 次以上，其中三分之一达 200～500 次（图 2），最高达 416 次 / 6 min。本研究 31 个样本中较大冰雹（≥1 cm）共 20 个，其中 16 个总闪电频数达 50 次/6 min 以上，占 80%，较小冰雹（＜1 cm）共 11 个，其中只有 3 个总闪电频数达 50 次/6 min 以上，仅占 27.2%。

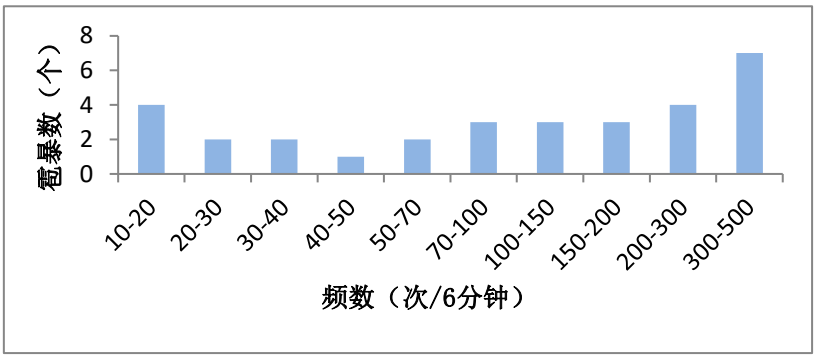


图 2　　总闪电频数分布

Fig. 2　Distribution of total lightning frequency

统计有闪电发生的 31 个冰雹云闪电演变情况，发现降雹前总闪电频数出现跃增，70%以上雹暴总闪电频数递增率达 4 次/min 以上。

冰雹云中云闪活动强烈，云闪与总闪比值≤25%的有 9 个，占 29.0%，＞30%以上共 20 个，占 64.5%。闪电监测数据表明 3 个阶段中成熟阶段云闪最多、云闪与总闪的比值最大，最大达 61.0%，平均为 30.4%；消亡阶段比值次之，发展阶段云闪最少、比值也最小。

2.2　闪电频数峰值和快速跃增超前于地面降雹时间

通过对冰雹云闪电变化特征和降雹时间分析，85%降雹出现在闪电频数的峰值（简称闪电峰值）后，其中 3 次闪电峰值出现在地面降雹前，80%降雹出现在闪电峰值后的 3～25 min 内（图 3），滞后于峰值时间最长超过 30 min。统计闪电跃增开始时间，发现绝大多数雹云降雹前闪电快速跃增，跃增提前于降雹的时间大多在 6～40 min，占总数 74.2%（图 3），峰后降雹 28 个个例中均在此范围内，其中降雹发生在闪电峰值出现前的 3 个雹暴，其快速跃增提前于降雹时间均不多，提前时间仅 3～5 min 左右。闪电峰值和快速跃增可以作为冰雹云的识别预警指标。

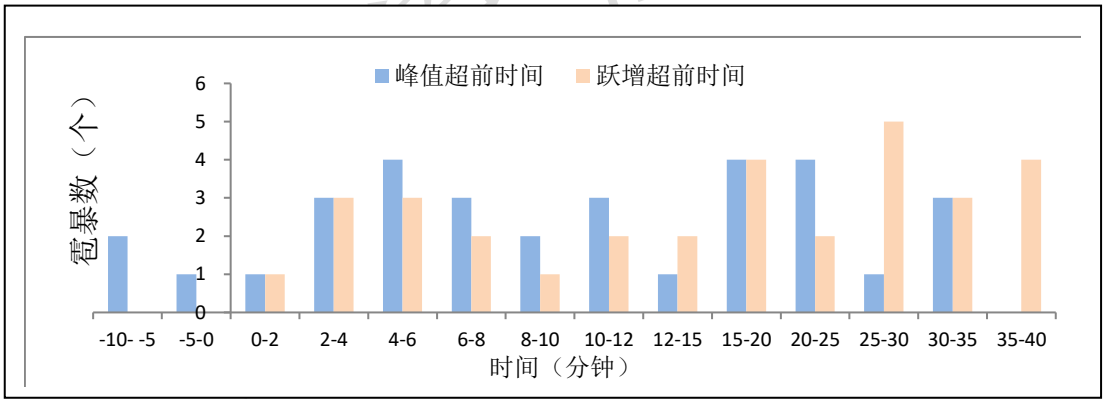


图 3　闪电频数的峰值和快速跃增超前于地面降雹时间

Fig. 3　The time ahead of the ground hail of peak value and rapid jump of lightning frequency

2.3　冰雹云正闪比率分布特征

积雨云中正负电荷的分布非常复杂，但总体而言，云体的上部以正电荷为主，下部以负电荷为主，而雹胚常存在于积雨云的上部，也即与正电荷密切相关。依据冰雹的成长理论，积雨云发展得越高，云上部形成冰雹的可能性及其直径就越大，生成的正电荷就越多。

为了减小少量闪电对正负闪比率统计结果的影响，对于地闪数≤4 次/6 min 不进行统计，正地闪与地闪比率分布结果见图 4，31 个冰雹云中，成熟阶段正地闪与地闪比率＞0.15 以上的达 74.0%，其中 0.15～0.3 之间次数较多，达 48.1%；消亡阶段则是比率＞0.15 以上的为 59.0%，其中 0.3～0.4 次数最多，达 36.4%；发展阶段低值最多，比率＞0.15 以上的为

50.0%，且近三分之一比率为0。

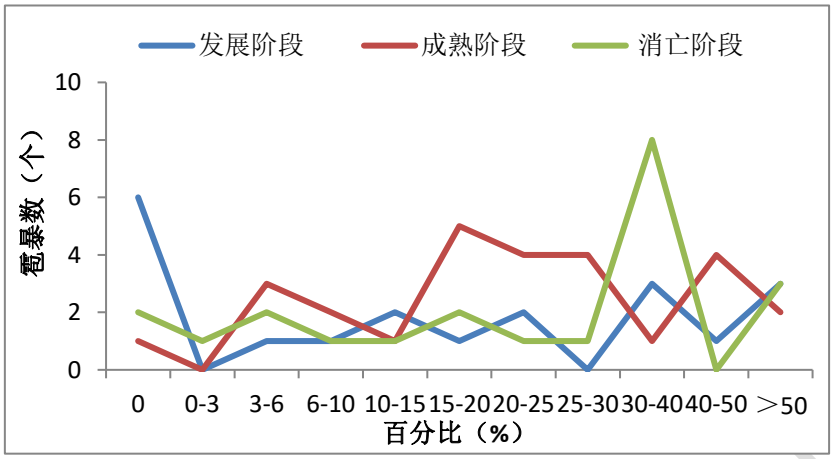


图4　正地闪与地闪比率分布

Fig. 4　Distribution of positive ground lightning and ground lightning ratio

同上原因对于云闪数≤2次/6 min不进行统计，正云闪与云闪比率分布结果见图5，冰雹云成熟及消亡阶段正云闪与云闪比率＞0.15以上的达60.0%；发展阶段低值最多，比率＞0.15以上的为40.0%，且近三分之一比率为0附近。

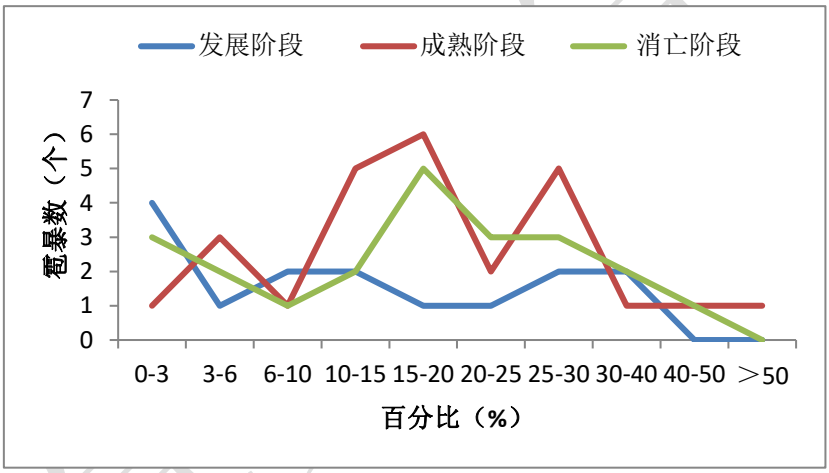


图5　正云闪与云闪比率分布

Fig. 5　Distribution of positive cloud flash and cloud flash ratio

2.4　冰雹云闪电高度分布特征

冰雹云是强烈的对流系统，发展高度高，除了地闪外，还会发生强烈的云闪。图6是31个雹暴单体三个阶段云闪在各个高度层上频次分布，图上可见在三个阶段总云闪集中分布在2～6 km高度层。成熟阶段云闪是三阶段中最多的，主要分布在2～6 km高度层上，中位数在25次/6 min左右，3～4 km高度层上75%分位数达100～200次/6 min；减弱阶段主要分布在2～4 km高度层，中位数为10次/6 min左右；发展阶段云闪最少，中位数仅1次/6 min，即约50%样本发展阶段云闪为0，且6 km以上高度层基本无云闪。

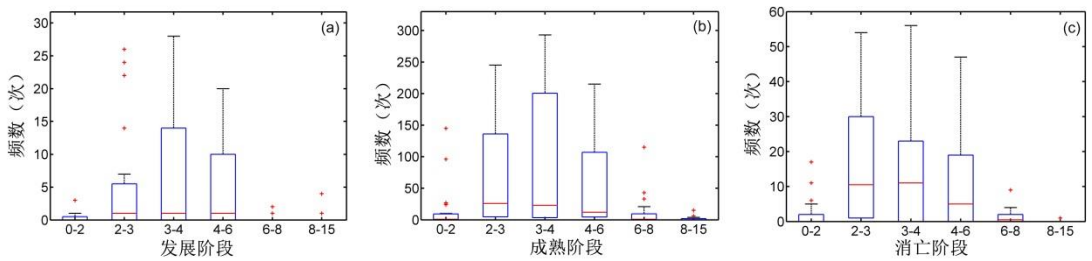


图 6　三个阶段各高度层云闪频数分布（a. 发展阶段、b. 成熟阶段、c. 消亡阶段，图中箱体上限为 75%分位数，下限为 25%分位数，红线为中位数，+代表异常值）

Fig. 6　Distribution of cloud flash frequency at different altitudes in three stages (a. development stage, b. mature stage, c. extinction stage, the upper limit of the box is 75% quantile, the lower limit is 25% quantile, the red line is median, + represents abnormal value)

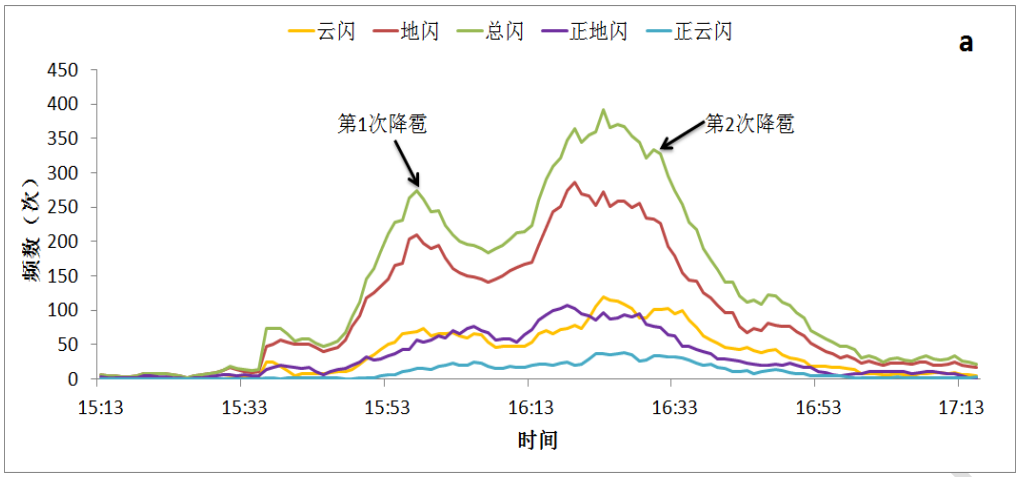
3　个例分析

为了更详细地了解冰雹云体演变过程的闪电特征，下面结合厦门双偏振雷达资料分析两个冰雹云个例。为了保证文中分析个例雷达偏振参量的可靠性，本文利用低反射率因子区域订正差分反射率因子 Z_{dr} 的方法对文中 2 次降雹过程（2018 年 5 月 23 日、2020 年 5 月 6 日）的系统偏差进行了分析、订正。分析思路是基于：均匀的弱降水粒子（微雨滴）的形状接近球形，Z_{dr} 趋近于 0、且相关系数大，因此偏振量的平均值可以作为偏振量的系统偏差。选取分析资料规则如下：

选取冰雹过程减弱消亡阶段的 10 个体扫的 0.5 °仰角，沿径向选取水平反射率因子 Z_h 为 15～20 dBz、且相关系数 CC＞0.98 对应距离库的 Z_{dr} 数据，当 Z_h≥20 dBz，舍弃该距离库及后面的 Z_{dr} 数据，重新开始另一个径向 Z_{dr} 数据的读取，据此 2 个过程分别选取了 32 791 个、80 869 个 Z_{dr} 样本。统计结果表明 2 个过程 Z_{dr} 均呈正态分布（图略），2018 年 5 月 23 日过程 Z_{dr} 平均数为 0.52dB，存在系统性偏差，需往小订正 0.52 dB，2020 年 5 月 6 日 Z_{dr} 平均数为 0.11 dB，在 Z_{dr} 偏差允许范围，无需订正。下文 2018 年 5 月 23 日个例分析采用经过了偏差订正后 Z_{dr} 的数据。

3.1 2020 年 5 月 6 日冰雹过程

厦门 S 波段双偏振雷达资料显示，5 月 6 日雹云是超级单体风暴，强度强、高度高，在成熟阶段中除了 1 个体扫外，最强强度均在 69～76 dBz，55 dBz、60 dBz 强回波区最高伸展高度分别达 11.0 km、10.0 km。雹云 15 时左右初生发展至 15:41 进入成熟阶段，此时强度为 71 dBz，出现了三体散射（TBSS）特征，TBSS 长度较短仅为 8 km 左右，此后在移动中快速加强，15:58 TBSS 长度达到生命史中最大约为 40 km，并出现钩状、中气旋、回波悬垂等超级单体特征（图 8a、b），此时地面已经降雹。图 7a 是该雹云单体生命史期间 6 min 累加闪电频数演变图，双峰结构对应了 2 次降雹过程，15:35 时闪电频数第一次跃升达 75 次/6 min 左右，此时地面仅在雹云后部有弱降水，至 15:47 闪电骤增，11 min 中由 50 次/6 min 跃增到 275 次/6 min，递增率约 20 次/ min，云闪频数较大，占总闪比率约 0.3。对应的强回波高度上升为 7.2 km，15:58 闪电频数达到峰值时地面降雹，没有收集到冰雹直径数据，伴有 13.5 mm/10 min 的短时强降水，此次降雹与闪电频数峰值时间同步，滞后于闪电频数跃增约为 11 min。之后随着强回波高度由 16:09 的 5.2 km 上升至 16:15 的 7.2 km，闪电再次加强，至 16:21 前后达峰顶 360 次/6 min 左右，之后频数维持了约 5 min 才开始减小。16:32 强回波高度陡降为 2.1 km，地面在 16:30－16:35 降下 1～2 cm 直径的冰雹，同时伴有 13.1 mm/10 min 的短时强降水。该超级单体第二次降雹滞后于闪电峰值约 9 min，滞后于闪电频数跃增约 20 min，频数递增率为 9 次/ min，云闪频数较大，占总闪比率约 0.29。



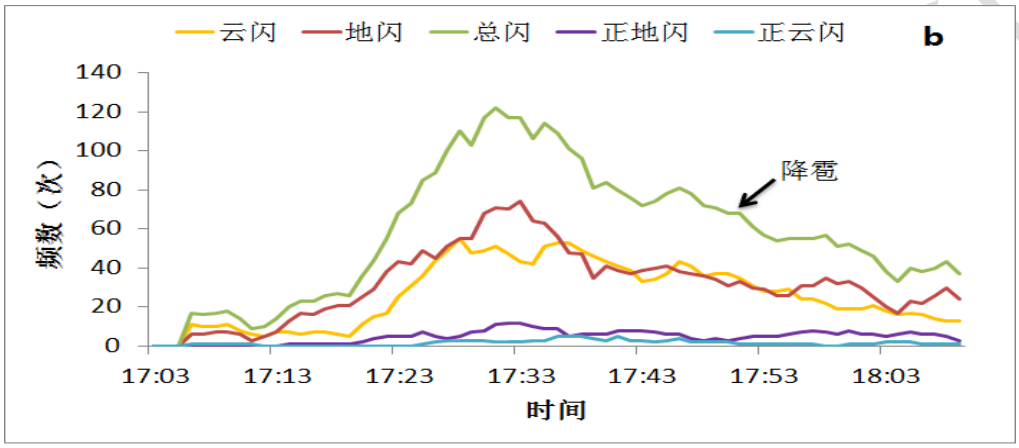


图 7 冰雹云闪电频数时序图（a.5 月 6 日，b.5 月 23 日）

Fig. 7 Time series of hail cloud lightning frequency (a.May 6,b.May 23)

差分反射率因子表示水平极化和垂直极化回波的反射率因子之比的对数，与粒子总数在不同尺寸上的分布有关，一般来说，冰雹由于在下落过程中不断翻转、摆动，其 Z_{dr} 值趋于 0，尺寸较大的冰雹其下落过程中保持自由降落状态，$Z_{dr}<0$（曹俊武和刘黎平，2006）。厦门双偏振雷达观测到第一次降雹前 6 min 左右在 0.5 °仰角（高度约为 1.7 km）强度为 62 dBz 的强回波区（图 8 中实线椭圆圈内）外围差分反射率因子（Z_{dr}）为 3.0～4.0 dB，强中心区包裹着 0.6 dB 的区域，另外在强中心西北侧的钩状回波中段处（次强中心）Z_{dr} 也为 0.6 dB，该区域差分传播相移率 K_{dp} 达 3.7° ． k m^{-1}，2 个强回波中心区域相关系数（*CC*）存在明显的低值中心，为 0.85（图 8c、8e），外围增大为 0.90～0.96，可以判断为融化层以下采样体积里混有大中雨滴以及外包水膜的雹粒，此时地面已开始出现强降水，10 min 最强降水量达 13.5 mm；2.4 °仰角（高度约为 4.8 km），强度达 69 dBz 的强中心区外围 Z_{dr} 为 0.5～1.5 dB，中心区包裹着−1～−2 dB 的低值区（图 8d），强回波中心区相关系数低为 0.8（图 8f），判断为冰雹和霰组成，当天湿球温度 0℃层高度（WBZ）（俞小鼎，2014）、−20℃层高度分别为 4.6 km、7.9 km（图 9a）。该雹云单体强度强，TBSS 长度长，这是大冰雹发生三体散射时由地面反射水平偏振波与垂直偏振波的差异造成的（Picca and Pyzhkov，2012）。图 8 可见三体散射回波强度 15～25 dBz，对应区域 Z_{dr} 出现由负极值到正极值的突变，其根部 Z_{dr} 达 7.7 dB（图 8d 中蓝色虚线椭圆内），CC 低至 0 .3～0.7，且数值分布无规律，呈现明显的非气象回波特征。通过粒子相态识别（HCL）对上述分析结果给出结论：在 0.5 °仰角对应

高度主要为大中降水粒子和冰雹粒子相伴；2.4 °仰角对应高度由冰雹和霰组成（图 8g、8h）。

16:21 该雹云第二次降雹前 TBSS 长度仍有 20 km，0.5 °仰角（高度约为 2.3 km）68 dBz 强回波中心处 Z_{dr} 为−1.0 dB，外围为 3.0～4.0 dB，该区域差分传播相移率 K_{dp} 达 3° · km^{-1}，*CC* 为 0.85～0.96，判断为大中雨滴和下降到融化层下的外包水膜冰雹的混合水凝物，2.4 °仰角（高度约为 6.2 km）强度达 73dBz 的强中心区 Z_{dr} 为−1.5～0.5 dB，CC 为 0.8 左右，判断以冰雹为主（图略）。

图 9a 是本次降雹过程 3 个阶段云闪频数、雷达回波强度和强回波高度时序图，从图上可见，三个阶段云闪主要分布在 2～6 km 高度层，成熟阶段频数是三个阶段中最高的，达 715 次，该阶段 3～4 km 高度层频数为最高的，达 346 次，6～8 km 高度层频数低至 25 次；消亡阶段频数次之，发展阶段频数最低。三个阶段地闪频数分别为 102、2 037、396 次，成熟阶段地闪频数也是三个阶段中最高的（图略）。距离雹暴约 100 km 的厦门雷达探测到的强回波高度时序图上，发展、消亡阶段强回波高度均较低，成熟阶段除了 2 次降雹前高度分别由前一个体扫陡降为 4.4 km、2.1 km 外，大部分高度维持在 5.2～7.2 km，居于 WBZ 与−20℃层高度之间，60 dBz 强回波区伸展到−20℃～−30℃高度层之间，可见在有利冰雹增长的高度（−10℃～−30℃）是冰相粒子尺度最大或密度最大的区域，而其余 2 个阶段强回波中心高度更低，对比各时段闪电频数与高度对应关系，发现相关性大。

《气象》待刊

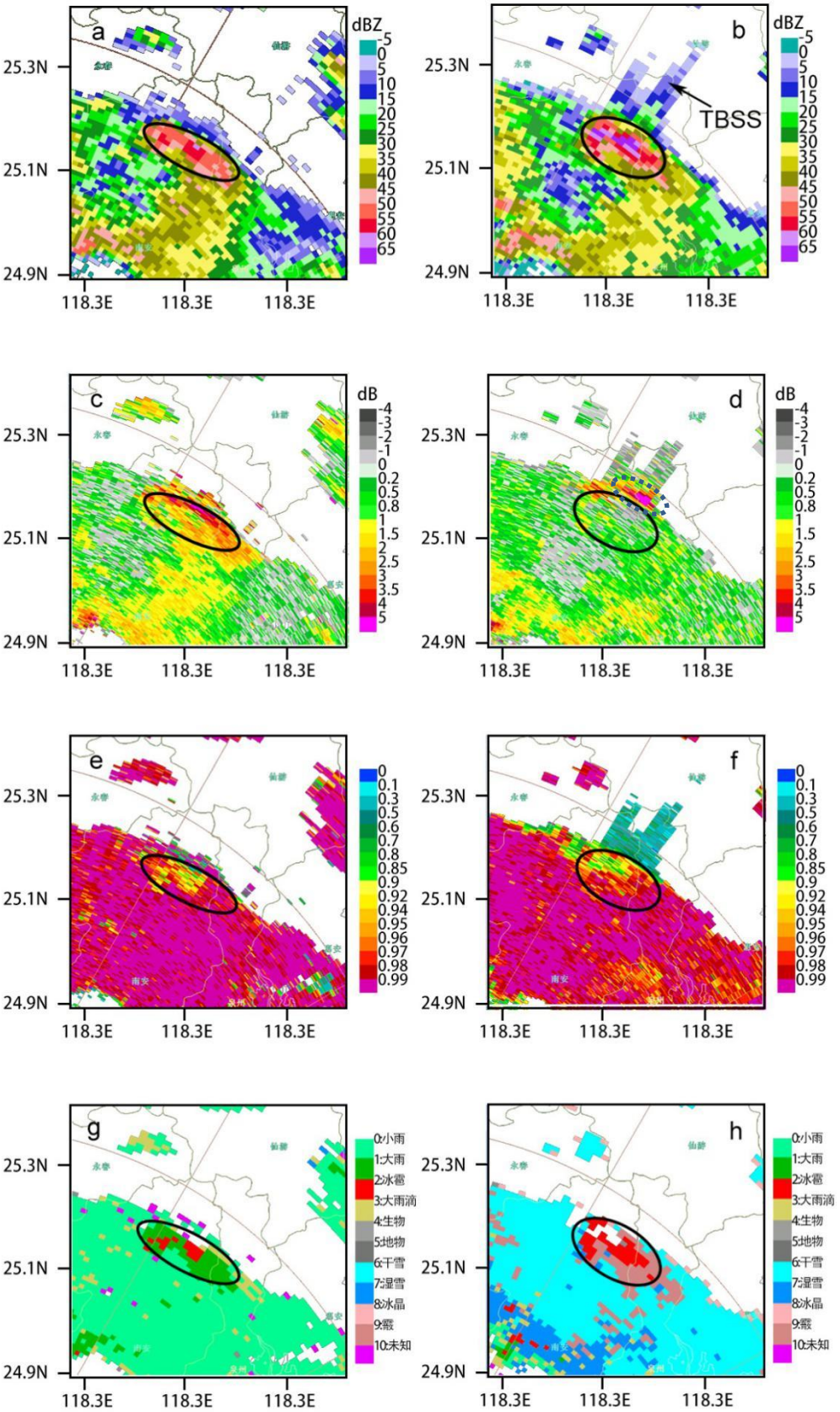


图 8　5 月 6 日 15 时 52 分 0.5 °仰角（a、c、e、g）和 2.4 °仰角(b、d、f、h)水平反射率因子（a、b）、差分反射率因子(c、d)、相关系数（e、f）、粒子相态识别（g、h）

Fig. 8　Z_h (a, b), Zdr(c, d), CC (e, f), HCL (g, h) taken at 0.5 °(a, c, e, g) and 2.4 °(b, d, f, h) elevation at 15:52 BT 6 May

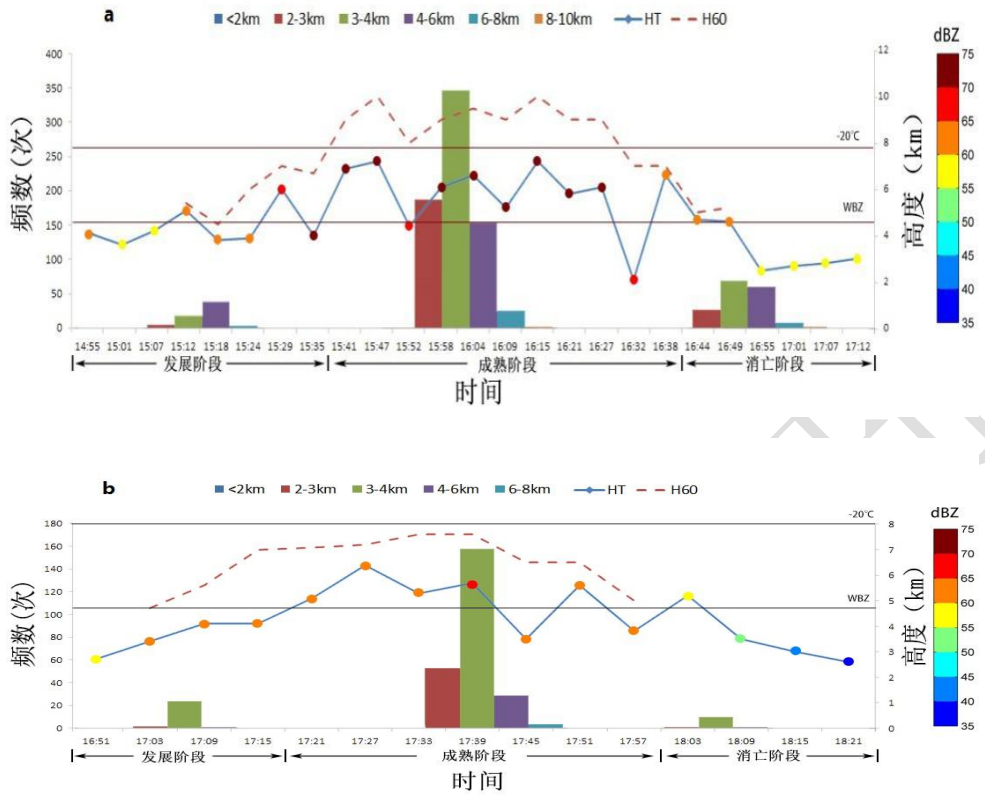


图 9　云闪各高度层频数分布和回波强度及强回波伸展高度时序图

（a. 5 月 6 日，b. 5 月 23 日，柱状为各高度层云闪频数，实线为最强回波高度，实线上圆点为对应体扫最强回波强度，虚线为 60 dBz 强回波伸展高度，横线分别是湿球温度 0℃层高度和−20℃层高度）

Fig. 9　Frequency distribution of cloud flashes at different altitudes and time sequence diagram of echo intensity and strong echo extension height (a. May 6 .b. May 23, the column is the number of cloud flashes at each height layer, the solid line is the strongest echo height, the dot on the solid line is the strongest echo intensity of the corresponding volume scan, the dotted line is the extension height of 60 dBz, and the horizontal line is the height of wet bulb temperature 0 ℃ layer and − 20 ℃ layer respectively)

3. 2 2018 年 5 月 23 日冰雹过程

厦门 S 波段双偏振雷达资料显示，5 月 23 日雹云从 16:51 初生发展至 18:21 消亡，生命史约为 90 min，该雹云强度相对弱，在 1 个多小时的成熟阶段中除了 1 个体扫最大回波强度达到 66 dBz 外，其余均在 65 dBz 以下，55 dBz、60 dBz 强回波区最高伸展高度分别 9.1 km、7.6 km，生命史中未出现中气旋、钩状、回波悬垂等超级单体特征，仅有较弱的、短暂的强回波倾斜结构及旁瓣、约十几分钟的 TBSS 特征，在 2.4 °仰角（高度约为 7.5 km）TBSS 长度最长，也仅 8 km 左右（图 10b）。图 7b 是该雹云单体生命史期间 6 min 累加闪电频数演变图，在 17:20 闪电频数开始跃升，至 17:31 由 26 次/6 min 跃增到峰顶 122 次/6 min，递增率为 8.7 次/ min，之后开始减小。17:45 强回波高度降为 3.5 km，地面在 17:50－17:55 降下直径为 8 mm 的冰雹，并伴有短时强降水。该单体降雹滞后于闪电峰值约为 19 min，滞后于闪电频数跃增约为 30 min，云闪频数较大，云闪与总闪比率约 0.4。

雷达观测到降雹前 9 min 在 0.5 °仰角（高度约为 2.8 km），51 dBz 强回波中心区（图

10 中实线椭圆圈内）Z_{dr} 为−0.3 dB，周围为 0～1.5 dB 区域，夹杂着小块 2.8 dB 的大值区（图 10c），该区域差分传播相移率 K_{dp} 达 4°．km^{-1}，相关系数 CC 为 0.85～0.97（图 10e），可以判断为冰雹粒子下降到融化层下形成外包水膜的小冰雹和大雨滴相伴，并且以大雨滴为主，此时地面已出现强降水，5 min 降水量为 6 mm，此后 10 min 大田本站降水量达 17.8 mm；1.5 °仰角（高度约为 5.2 km），64 dBz 强回波中心区 Z_{dr} 为−0.5 dB，周围夹杂着 0～1.5 dB 的区域，CC 为 0.85～0.97（图 10f），判断为固态中小冰雹及雨滴组成，当天湿球温度 0℃层高度（WBZ）为 4.7 km，−20℃层高度 8.1 km（图 9b）。与 5 月 6 日雹云单体相比，该单体强度更弱，TBSS 长度仅为 8 km 左右，对应的 Z_{dr} 由负极值到正极值的突变也没有前例明显，CC 值也更大，其根部 Z_{dr} 仅为 2.8 dB（图 8d 中蓝色虚线椭圆内）。上述分析结果由粒子相态识别（HCL）给出结论：在低层 0.5 °仰角主要为大雨滴和干、湿冰雹粒子相伴；1.5 °仰角（高度约为 5.2 km）以冰雹为主。

图 9b 是本次降雹过程 3 个阶段云闪频数、雷达强回波高度时序图，从图上可见，三个阶段云闪主要分布在 2～6 km 高度层，成熟阶段云闪频数是三个阶段中最高的为 244 次，该阶段 3～4 km 高度层云闪频数为最高的，达 158 次，6～8 km 高度层频数仅 4 次；消亡阶段云闪最少为 12 次。三个阶段地闪频数分别为 45、293、27 次，成熟阶段地闪频数也是三个阶段中最高的（图略）。雷达强回波高度时序图上，成熟阶段除了降雹前高度由前一个体扫陡降为 3.5 km 外，高度维持在 3.8～6.4 km，居于 WBZ 上下与−20℃层高度之间，60 dBz 强回波区伸展高度在−20℃层以下。

《气象》待刊

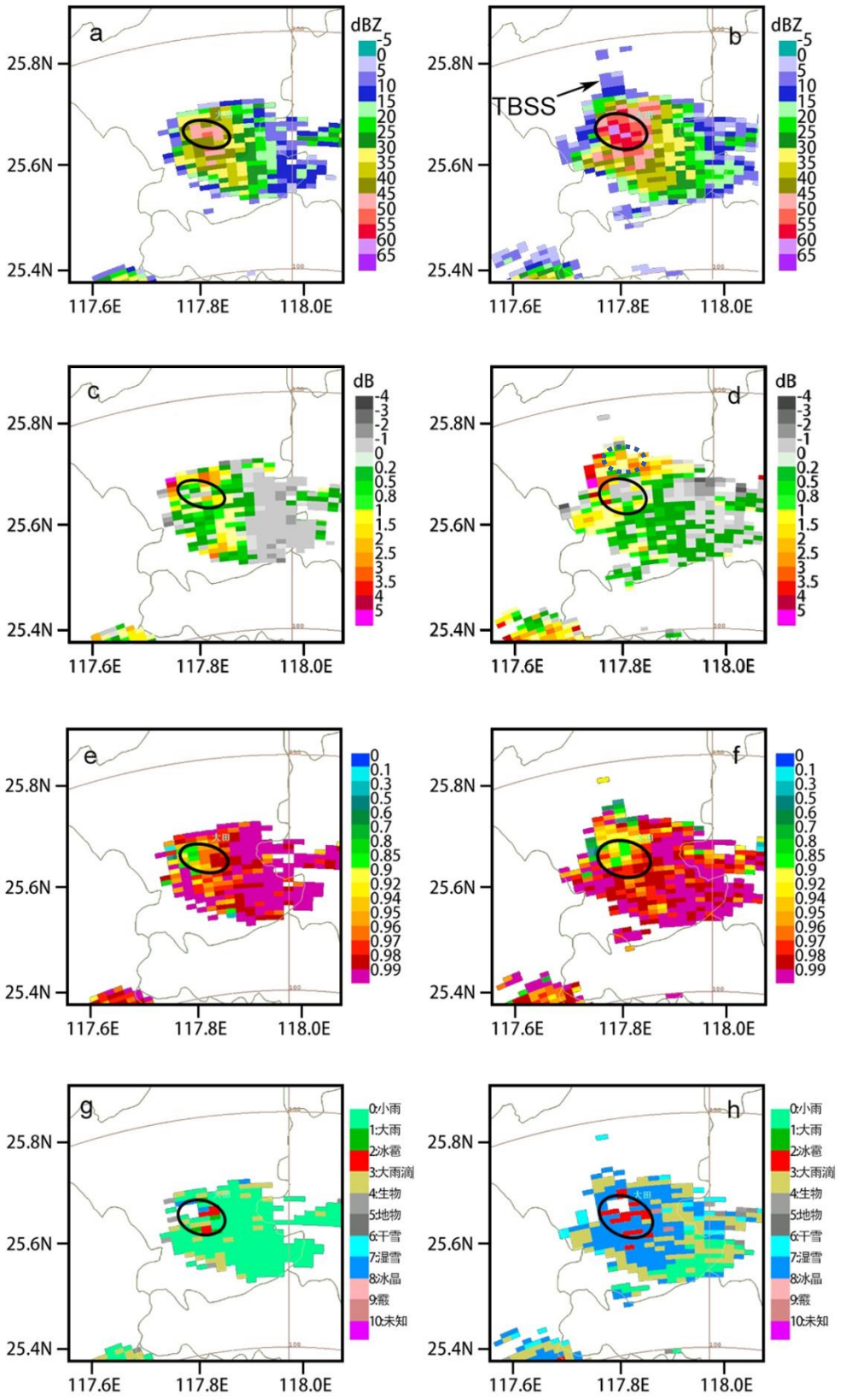


图 10　　5 月 23 日 17 时 41 分 0.5 °仰角（a、c、e、g）和 1.5 °仰角(b、d、f、h)水平反射率因子（a、b）、差分反射率因子(c、d)、相关系数（e、f）、粒子相态识别（g、h）

Fig. 10 Z_h (a, b), Zdr(c, d), CC (e, f), HCL (g, h) taken at 0.5 °(a, c, e, g) and 1.5 °(b, d, f, h) elevation at 17:41 BT 23 May

3.3 2 个雹云对比

上述 2 个个例中：第一个雹暴闪电频数次峰为 275 次/6 min、主峰为 395 次/6 min，次峰对应的降雹直径不详，主峰对应的冰雹直径为 1～2 cm；第二个雹暴闪电峰值为 123 次/6 min，对应的冰雹直径为 8 mm；降雹前闪电频数普遍有跃增现象，第一个雹云在峰值降雹后出现开始第二轮降雹前，仍有闪电跃增达到峰值现象；2 个雹云降雹期间总闪电、地闪、云闪的变化趋势一致，第一个雹云正地闪、正云闪与总闪电、地闪、云闪的变化趋势一致，第二个雹云正地闪、正云闪整个过程均处于低值区，即第二个雹云正闪无明显增大。通常而言，闪电频数与云顶伸展高度有较好的正相关性，闪电活动多依赖于对流的发展（张义军等，2009）。为了了解冰雹云闪电与雷达回波强度、对流发展高度之间关系，计算了 2 个冰雹云各阶段闪电频数和雷达回波平均最强强度及强回波高度（表 1）。

表 1 2 个雹云各阶段闪电频数和雷达回波强度及强回波高度（2020.5.6/2018.5.23）

Table 1 Lightning frequency and radar echo intensity and strong echo height of two hails at different stages (2020.5.6 / 2018.5.23)

	地闪（次）	云闪（次）	总闪（次）	正地闪占地闪比	正云闪占云闪比	H_T（km）	H_{60}（km）	强度（dBz）
发展阶段	102/45	65/27	167/72	0.35/0.07	0.06/0.04	4.3/3.3		62.8/59.5
成熟阶段	2037/293	715/244	2752/537	0.35/0.17	0.29/0.05	6.0/4.5	9.1/6.8	71.8/63.0
消亡阶段	396/27	163/12	559/39	0.30/0.15	0.31/0.08	3.4/3.6		58.0/48.7

比较图9和表1可见，2020年5月6日雹云个例平均强度各阶段均大于2018年5月23日个例，前者成熟阶段最强回波强度基本上均在70～75 dBz之间，60 dBz 的强回波垂直扩展超过−20℃等温线高度，有几个体扫已超过−30℃层高度（当天H_{-30}为9.3 km），后者强度维持在60～65 dBz之间，60 dBz的强回波垂直扩展在−20℃等温线以下。这些特征与俞小鼎等（2020）总结得出的强冰雹的多普勒天气雷达回波特征包括高悬的强回波（55 dBz的强回波垂直扩展超过−20℃等温线对应的高度以上）及出现65 dBz以上的强回波的结论相符合。前者H_{60}比后者高2.3 km，H_T也高1.5 km，表明2个雹云对流发展高度存在明显的差异，与之对应的前者闪电频数是后者5倍多，正地闪比率前者是后者2倍，正云闪比率则是近6倍，前者冰雹直径为1～2 cm，后者直径为8 mm。统计前述31个雹暴单体，发现25个（占总数80.6%）雹云单体有此相似特征，即H_{60}越高，闪电频数、正地闪或正云闪比值越大，H_{60}越低，闪电频数、正地闪或正云闪比率越小。

4 结论与讨论

（1）降雹前总闪电频数峰值约有三分之二在 50 次/6 min 以上，闪电峰值越大，可能产生的冰雹直径越大；大多数冰雹单体地面降雹时间落后于闪电峰值出现后 3～25 min 内；

（2）降雹前闪电频数跃增，闪电跃增提前于降雹的时间大多在 6～40 min；

（3）成熟阶段云闪是三阶段中最多的，发展阶段最小，云闪与总闪比值也相同；

（4）冰雹单体三个阶段云闪集中分布在 2～6 km 高度层，前 2 个阶段 3～4 km 高度层的云闪频数最高；

（5）差分反射率因子（Z_{dr}）、相关系数（*CC*）等参数及粒子相态识别分析表明雹云降雹前融化层以上由冰雹和霰组成，融化层下由干、湿冰雹和雨滴组成，低层则主要由湿冰雹和中

大雨滴组成；

（6）闪电频数、正地闪或正云闪占比率与回波强度、最强回波高度、强回波伸展高度呈正相关。

（7）本文闪电频数的计算是基于雷达观测到的单体，且动态追踪整个生命史，剔除了其它风暴单体的数据干扰，相较于对固定区域进行闪电频数统计，能较好地追踪并反映雹暴整个生命史中闪电频数的演变。由于 VLF/LF 三维闪电监测仪器是采用数字波形鉴别技术识别闪电，识别效率还可以进一步提高，配合双偏振雷达各参量，上述预警指标可以有效地识别预警冰雹。

参考文献

曹俊武, 刘黎平, 2006. 双线偏振多普勒天气雷达识别冰雹区方法研究[J]. 气象, 32(6): 13-19. Cao J W, Liu L P, 2006. Hail identification with dual-linear polarimetric radar observations[J]. Meteor Mon, 32(6): 13-19(in Chinese).

陈秋萍, 陈齐川, 冯晋勤, 等, 2015. “2012.4.11”两个强降雹超级单体特征分析[J]. 气象, 41(1): 25-33. Chen Q P, Chen Q C, Feng J Q, et al, 2015. Analysis of two severe hail supercell storms on 11 April 2012[J]. Meteor Mon, 41(1): 25-33 (in Chinese).

陈哲彰, 1995. 冰雹与雷暴大风的云对地闪电特征[J]. 气象学报, 53(3): 367-374. Chen Z Z, 1995. The characteristics of lightning from clouds to ground accompanying with hailstones, thunderstorms and gusts[J]. Acta Meteor Sin, 53(3): 367-374 (in Chinese).

冯桂力, 郄秀书, 吴书君, 2008. 山东地区冰雹云的闪电活动特征[J]. 大气科学, 32(2): 289-299. Feng G L, Qie X S, Wu S J, 2008. Cloud-to-ground lightning characteristics of hail clouds in Shandong province[J]. Chin J Atmos Sci, 32(2): 289-299 (in Chinese).

冯晋勤, 汤达章, 俞小鼎, 等, 2010. 新一代天气雷达中气旋识别产品的统计分析[J]. 气象, 36(8): 47-52. Feng J Q, Tang D Z, Yu X D, et al, 2010. The accuracy statistics of mesocyclone identification products from CINRAD/SA[J]. Meteor Mon, 36(8): 47-52 (in Chinese).

冯晋勤, 张深寿, 吴陈锋, 等, 2018. 双偏振雷达产品在福建强对流天气过程中的应用分析[J]. 气象, 44(12): 1565-1574. Feng J Q, Zhang S S, Wu C F, et al, 2018. Application of dual polarization weather radar products to severe convective weather in Fujian[J]. Meteor Mon, 44(12): 1565-1574 (in Chinese).

高丽, 潘佳文, 蒋璐璐, 等, 2021. 一次长生命史超级单体降雹演化机制及双偏振雷达回波分析[J]. 气象, 47(2): 170-182. Gao L, Pan J W, Jiang L L, et al, 2021. Analysis of evolution mechanism and characteristics of dual polarization radar echo of a hail caused by long-life supercell[J]. Meteor Mon, 47(2): 170-182 (in Chinese).

李国昌, 李照荣, 李宝梓, 2005. 冰雹过程中闪电演变和雷达回波特征的综合分析[J]. 干旱气象, 23(3): 26-33. Li G C, Li Z R, Li B Z, 2005. Analysis between lightning evolution and radar echo feature in hailstorm process[J]. Arid Meteor, 23(3): 26-33 (in Chinese).

李南, 魏鸣, 姚叶青, 2006. 安徽闪电与雷达资料的相关分析以及机理初探[J]. 热带气象学报, 22(3): 265-272. Li N, Wei M, Yao Y Q, 2006. Analysis and mechanism study on the correlation between lightning and radar data in severe weather[J]. J Trop Meteor, 22(3): 265-272 (in Chinese).

刘黎平, 钱永甫, 王致君, 1996. 用双线偏振雷达研究云内粒子相态及尺度的空间分布[J]. 气象学报, 54(5): 590-599. Liu L P, Qian Y F, Wang Z J, 1996. The study of spacial distribution of phase and size of hydrometeorsin cloud by dual linear polarization radar[J]. Acta Meteor Sin, 54(5): 590-599 (in Chinese).

刘黎平, 2002. 双线偏振多普勒天气雷达估测混合区降雨和降雹方法的理论研究[J]. 大气科学, 26(6): 761-772. Liu L P, 2002. A theoretical study of estimations of rain and hail rates in mixed-phase areas with dual linear polarization radar[J]. Chin J Atmos Sci, 26(6): 761-772 (in Chinese).

潘佳文, 蒋璐璐, 魏鸣, 等, 2020a. 一次强降水超级单体的双偏振雷达观测分析[J]. 气象学报, 78(1): 86-100. Pan J W, Jiang L L, Wei M, et al, 2020a. Analysis of a high precipitation supercell based on dual polarization radar observations[J]. Acta Meteor Sin, 78(1): 86-100 (in Chinese).

潘佳文, 魏鸣, 郭丽君, 等, 2020b. 闽南地区大冰雹超级单体演变的双偏振特征分析[J]. 气象, 46(12): 1608-1620. Pan J W, Wei M,

Guo L J, et al, 2020b. Dual-polarization radar characteristic analysis of the evolution of heavy hail supercell in southern Fujian[J]. Meteor Mon, 46(12): 1608-1620 (in Chinese).

尹丽云, 张杰, 张腾飞, 等, 2012. 低纬高原一次飑线过程的地闪演变特征分析[J]. 高原气象, 31(4): 1100-1109. Yin L Y, Zhang J, Zhang T F, et al, 2012. Analysis on lightning activity characteristic of a squall line system in low-latitude plateau[J]. Plateau Meteor, 31(4): 1100-1109 (in Chinese).

俞小鼎, 2014. 关于冰雹的融化层高度[J]. 气象, 40(6): 649-654. Yu X D, 2014. A note on the melting level of hail[J]. Meteor Mon, 40(6): 649-654 (in Chinese).

俞小鼎, 王秀明, 李万莉, 等, 2020. 雷暴与强对流临近预报[M]. 北京: 气象出版社: 416. Yu X D, Wang X M, Li W L, et al, 2020. Thunderstorm and Severe Convection approach Forecast[M]. Beijing: Meteorological Press: 416 (in Chinese).

张义军, 孟青, 马明, 等, 2006. 闪电探测技术发展和资料应用[J]. 应用气象学报, 17(5): 611-620. Zhang Y J, Meng Q, Ma M, et al, 2006. Development of lightning detection technique with application of lightning data[J]. J Appl Meteor Sci, 17(5): 611-620 (in Chinese).

张义军, 言穆弘, 孙安平, 等, 2009. 雷暴电学[M]. 北京: 气象出版社: 246. Zhang Y J, Yan M H, Sun A P, et al, 2009. Thunderstorm Electricity[M]. Beijing: Meteorological Press: 246 (in Chinese).

郑媛媛, 俞小鼎, 方翀, 等, 2004. 一次典型超级单体风暴的多普勒天气雷达观测分析[J]. 气象学报, 62(3): 317-328. Zheng Y Y, Yu X D, Fang C, et al, 2004. Analysis of a strong classic supercell storm with Doppler weather radar data[J]. Acta Meteor Sin, 62(3): 317-328 (in Chinese).

支树林, 许爱华, 李俊, 等, 2012. 江西省地闪气候特征及其活动强弱评价方法探讨[J]. 气象与减灾研究, 35(2): 37-44. Zhi S L, Xu A H, Li J, et al, 2012. Climatic feature of cloud-to-ground lightning in Jiangxi and the preliminary study of evaluation methods of its activity[J]. Meteor Disaster Reduct Res, 35(2): 37-44 (in Chinese).

周筠君, 张义军, 郄秀书, 等, 1999. 陇东地区冰雹云系发展演变与其地闪的关系[J]. 高原气象, 18(2): 236-244. Zhou Y J, Zhang Y J, Qie X S, et al, 1999. The relationship between the variation of hail cloud system and its cloud to ground lightning in the east part of Gansu province[J]. Plateau Meteor, 18(2): 236-244 (in Chinese).

Ge Z M, Yan M H, Guo C M, et al, 1992. Analysis of cloud-to-ground lightning characteristics in mesoscale storm in Beijing area[J]. Acta Meteor Sin, 6(4): 491-500.

Picca J, Ryzhkov A, 2012. A dual-wavelength polarimetric analysis of the 16 May 2010 Oklahoma city extreme hailstorm[J]. Mon Wea Rev, 140(4): 1385-1403.

Qie X S, Yan M H, Guo C M, et al, 1993. Lightning data and study of thunderstorm nowcasting[J]. Acta Meteor Sin, 7(2): 244-256.

Yan M H, Guo C M, Qie X S, et al, 1992. Observation and model analyses of positive cloud-to-ground lightning in mesoscale convective System[J]. Acta Meteor Sin, 6(4): 501-510.

《气象》待刊