doi:10.11676/qxxb2020.012 气象学报

包含三次降雹的雹暴过程地闪活动特征分析*

韩颂雨[1] 郑 栋[2] 张义军[3] 罗昌荣[4]
HAN Songyu[1] ZHENG Dong[2] ZHANG Yijun[3] LUO Changrong[4]

1. 浙江省气象信息网络中心, 杭州, 310001
2. 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京, 100081
3. 复旦大学大气与海洋科学系/大气科学研究院, 上海, 200433
4. 海峡气象开放实验室, 厦门, 361012

1. *Zhejiang Meteorological Information Network Center*, *Hangzhou* 310001, *China*
2. *State Key Laboratory of Severe Weather*, *Chinese Academy of Meteorological Sciences*, *Beijing* 100081, *China*
3. *Institute of Atmospheric Sciences/Department of Atmospheric and Oceanic Sciences*, *Fudan University*, *Shanghai* 200433, *China*
4. *Laboratory of Straits Meteorology*, *Xiamen* 361012, *China*

2019-06-12 收稿, 2019-08-01 改回.

韩颂雨, 郑栋, 张义军, 罗昌荣. 2020. 包含三次降雹的雹暴过程地闪活动特征分析. 气象学报, 78(1): 101-116

Han Songyu, Zheng Dong, Zhang Yijun, Luo Changrong. 2020. Characteristic analysis of cloud-to-ground lightning activity during hailstorm process with three hail falling events. ***Acta Meteorologica Sinica*****, 78(1):101-116**

Abstract The characteristics of cloud-to-ground (CG) lightning activity of hailstorms are an important issue. Based on the CG lightning data and wind fields retrieved by three groups of dual-Doppler radar, the characteristics of CG lightning activity in a hailstorm process that included three hail events and their relationship with hailstorm dynamics and microphysical conditions are analyzed and discussed. The results reveal that: (1) Three consecutive hail events occurred during the whole hailstorm process, accompanied with three peaks of CG lightning activity, and the CG lightning flash rate increased rapidly prior to hail falling. After the hail began, the CG lightning flash rate decreased rapidly; (2) During the whole hailstorm process, the vertical velocity at 0℃ and −20℃ levels corresponding to CG lightning position were concentrated within the ranges −2—2 m/s and −10—10 m/s, respectively. However, the CG lightning positions during the three hail periods respectively corresponded to the strong subsidence airflow zone nearby, the boundary area between strong rising and sinking airflow zone and weak subsidence airflow zone at −20℃ level; (3) The three radar echo parameters, i.e., the maximum reflectivity of the hailstorm Z_{max}, the maximum reflectivity at −20℃ level $Z_{max_-20℃}$, the grid numbers of greater than 40 dBz at −20℃ level $Sum_{(Z_{-20℃}>40\,dBz)}$, had the same trend as the CG lightning flash rate, and their correlation coefficients are 0.64, 0.64 and 0.76, respectively. The two vertical velocity parameters, i.e., the absolute value of maximum vertical velocity at −20℃ level corresponding to CG lightning position $|W|_{max\ -20℃}$ and the volume number of the vertical velocity absolute value greater than 5m/s above −20℃ level $|V|_{5\ m/s\ \uparrow -20℃}$, are proportional to the CG lightning flash rate and their correlation coefficients are 0.72 and 0.65 respectively. The maximum values of parameters of the stage corresponded to the CG lightning flash rate maximum value of the stage. Considering the dynamic and microphysical effects, the precipitation ice mass flux F has the most significant correlation with the CG lightning flash rate, and their correlation coefficient is 0.85. The CG lightning flash rate was low in the second hail stage, when the hailstorm developed most rigorously. It is inferred that the characteristics of charge structure under strong dynamic process is not conducive to the occurrence of the CG lightning. However, the dynamic process played a positive dominant role during the whole hailstorm process. The updraft changed ahead of the ice crystal mass and lightning rate changes, and affected the radar echo changes.

* 资助课题: 国家自然科学基金(41875001、41675005)、浙江省科技厅重大项目(2017C03035)。
作者简介: 韩颂雨, 主要从事雷达气象应用研究。E-mail: 514884835@qq.com
通信作者: 张义军, 主要从事大气电学研究。E-mail: zhangyijun@fudan.edu.cn

Key words Hail, CG lightning of hailstorm, CG lightning flash rate, Dual-Doppler radar retrieval, Vertical velocity

摘 要 为研究雹暴的地闪活动特征,利用地闪资料与3组双雷达探测资料反演的风场,对包含3次降雹的一次雹暴过程的地闪活动特征及其与雹暴动力、微物理条件的关系进行了分析与讨论。主要结果为:(1)整个雹暴过程中发生了3次持续降雹事件,并伴随着3次地闪活动出现峰值,在降雹前地闪频次均有跃增现象。降雹开始后,地闪频次均迅速减少。(2)整个雹暴过程中对应地闪接地位置的0℃层、−20℃层高度的垂直速度范围分别集中在−2—2 m/s和−10—10 m/s。但3次降雹时段的地闪接地位置分别对应−20℃层高度的强下沉气流区附近、强上升与下沉气流区的交界区和弱的下沉气流区。(3)选取的雹暴内最大反射率(Z_{max})、−20℃层高度最大反射率($Z_{max_-20℃}$)、−20℃层高度大于40 dBz格点数($Sum_{(Z_{-20℃}>40\,dBz)}$)3个雷达回波参量与地闪频次变化趋势一致,其相关系数分别为0.64、0.64、0.76。选取的对应地闪接地位置−20℃层高度的最大垂直速度绝对值($|W|_{max\,-20℃}$)和−20℃层高度以上垂直速度绝对值大于5 m/s的体积($|V|_{5\,m/s\uparrow-20℃}$)两个垂直速度参量与地闪频次成正比,且阶段最大值与地闪频次阶段最大值对应,相关系数分别为0.72、0.65。综合考虑动力和微物理影响的可降冰质量通量(F)与地闪频次的相关最显著,相关系数达0.85。整个雹暴过程发展最旺盛的第2次降雹阶段的地闪频次较低,推测强动力过程作用下的电荷结构特征不利于地闪发生。但动力过程在整个雹暴过程中具有正向支配作用,上升气流变化超前于冰晶质量和闪电频次变化,影响着雷达回波变化。

关键词 冰雹,雹暴地闪,地闪频次,双雷达风场反演,垂直速度

中图法分类号 P427.32

1 引 言

冰雹是一种常见的灾害性天气,对农业危害很大,至今仍是灾害性天气研究的重点和难点。雹暴中既存在强上升气流,又有冰相粒子参与的微物理过程,其地闪活动与动力、云微物理及降水等过程关系复杂,其地闪活动特征较为独特。

大量研究发现,降雹前雹暴中地闪频次存在明显的“跃增”,且频次峰值超前于降雹出现时刻;降雹后地闪频次显著减少(冯桂力等,2008;郑栋等,2010;Yao, et al, 2013)。地闪极性有的雹暴个例以正地闪为主导(Montanyà, et al, 2009; Pineda, et al, 2016),而有的雹暴个例以负地闪为主导(Carey, et al, 2003b; Montanyà, et al, 2007),这主要是受不同动力和微物理特性的影响(Carey, et al, 2003a; 2007)。

雹暴个例中的闪电频次与雷达回波参量有一定相关。易笑园等(2012)用多种雷达参量描述了一次多单体雹暴结构的演变与闪电活动,指出回波顶高与闪电频数变化有很好的对应,且回波顶高变化趋势超前于闪电,具有预警意义。王晨曦等(2014)对一次雹暴过程分析发现,地闪活动的强、弱与60 dBz强反射率的高度变化、70 dBz回波的出现和消失有较好的相位对应关系。Xu等(2016)在两次雹暴个例中发现,闪电活动的变化与−15℃层高度以上大于40 dBz回波的体积有很强的联系。

Changnon(1992)研究了48个美国夏季雹暴发现,闪电落区倾向于分布在对应冰雹落区的强反射率核心之外。且有25个个例降雹区没有地闪发生,其他个例在降雹区地闪个数也非常少。冯桂力等(2007)分析了10次雹暴过程的闪电分布和演变特征发现,总闪电主要出现在6 km高度处强回波区(>30 dBz)及其周围。Liu等(2009)分析雹暴个例发现地闪倾向于发生在反射率为25—35 dBz的区域。Carey等(1998)研究指出,地闪的发生与霰混合物的存在有非常密切的关系,地闪出现在强回波区,但并不完全与强上升气流一致。王晨曦等(2014)利用闪电定位和双多普勒雷达资料对一次雹暴过程的地闪活动进行分析发现,降雹阶段,强上升气流区以及降雹区内地闪活动较少,地闪更多地出现在弱上升、弱下沉气流以及二者交界区附近。

然而雹暴的地闪活动与垂直速度关系的研究较少。Wang等(2017)研究了22例雷暴垂直速度与地闪的关系,特意去除了包含降雹的雷暴,因为强上升气流控制下地闪频次较低,会导致与普通雷暴不同的结果。其研究结果表明雷暴中地闪频次与上升气流体积相关,7—11 km高度的可降冰质量通量总和与地闪频次的相关更强。Deierling等(2008)分析也发现−5℃层高度以上大于5或10 m/s的上升气流体积与闪电频次达到了高相关(相关系数0.93)。

以上研究较为全面地揭示了雹暴中闪电活动的各方面特征,但关于雹暴垂直速度与地闪活动的关系探究较少,尤其是雹暴垂直速度与地闪频次的定量关系研究更少。文中利用地闪定位资料与3组双

雷达反演的风场，对包含 3 次降雹的一次雹暴过程的地闪活动特征及其与雹暴动力、微物理条件的关系进行了分析。主要从地闪频次与雷达回波参量的定量关系、地闪活动与降水结构和垂直速度的空间配置关系、地闪频次与垂直速度、可降冰质量通量的定量关系这几方面来展开，并依此讨论 3 次降雹过程地闪频次的差异原因，以期为揭示雹暴中的地闪活动特征及其与动力、微物理的复杂关系提供参考。

2 天气过程、资料与方法

2016 年 4 月 8 日一次强雷暴过程从赣、粤交界的江西省定南县区域开始发展，自西向东移动，先后出现 3 次降雹事件，雹暴移动轨迹如图 1 所示。17 时 10 分(北京时，下同)在广东梅州平远县洋背村观测到冰雹；19 时 05 分在福建省永定大溪、湖坑、南靖田螺坑地区先后观测到持续近 30 min 的较强冰雹天气过程，伴随雷电和大风，冰雹最大直径超过 4 cm，农作物大面积受灾；而随后在 20 时 35 分，龙海榜山镇、石码镇等地也下起了冰雹，持续 10 多分钟。3 次降雹过程中第 2 次冰雹最大，且是雹暴过程发展最为强盛的时期。

文中使用的地闪资料由 ADTD 地闪定位系统监测，其探测效率可达 90%，探测精度为 500 m(刘岩等，2009；王娟等，2015)。数据从中国气象局大气探测中心“国家雷电监测预警网”中获取，这些数据包括地闪的回击时间、经度、纬度以及雷电流峰值、陡度和极性等。文中将相邻回击时间间隔在 500 ms 和距离在 10 km 以内的回击归为一次地闪(田芳等，2008)，并把电流峰值最大的回击记录作为代表该次地闪的电流信息。

使用梅州、龙岩、厦门、泉州 4 部 S 波段多普勒雷达基数据(雷达分布位置如图 1)，雷达的体扫周期约 6 min。将 4 部雷达体扫数据插值到等经纬度等高度网格(0.01°×0.01°×211 m)上，为获取 0℃ 层高度(4292 m)、−20℃ 层高度(7668 m)确切风场信息，将高度格距选为 211 m。水平方向采用克罗斯曼距离权重插值法，垂直方向采用线性插值，利用罗昌荣等(2012)提出的地球坐标系双雷达风场反演方法进行风场反演，反演的该个例风场与观测到的飞机报资料对比，平均风向绝对误差为 7.6°，平均风速绝对误差为 1.77 m/s。另外，该双雷达风场反演方法反演的“莫兰蒂”台风风场与厦门探空站观测风场进行对比，风向平均绝对误差为 8.8°，风速平均绝对误差为 2.9 m/s；与厦门风廓线雷达观测风场对比，风向平均绝对误差为 7.8°，风速平均绝对误差为 2.7 m/s(韩颂雨，2017)；与厦门秒探空数据观测风场对比，风向平均误差 2.8°，风速平均误差 1.37 m/s(王叶红等，2019)。总体来说对比结果误差较小，利用该双雷达反演方法反演的风场较为可靠。该雹暴整个过程使用 3 组双雷达进行风场反演，15 时 22 分—17 时 46 分使用“龙岩-梅州”雷达反演，17 时 52 分—20 时 11 分使用“龙岩-厦门”雷达反演，20 时 17 分—22 时 23 分使用“龙岩-泉州”雷达反演，这样使得单体回波始终落在双雷达反演最佳区域进而减小反演误差。最后得到间隔约 3 min 的风场反演结果。

图 1 2016 年 4 月 8 日 15 时 22 分至 22 时 23 分雹暴过程轨迹(以每个时次雹暴单体内最大反射率所在位置来定位，冰雹符号位置代表地面观测到降雹，红色三角形为 4 部观测雷达的位置)

Fig. 1 Hailstorm process trajectory route on 15:22−22:23 BT 8 April 2016

(The trajectory is determined by the locations of the maximum reflectivity in hailstorm at each time, the hail symbols represent hail observations on the ground, the red triangles represent positions of the four observation radars)

这次雹暴出现在一次飑线南侧的“弓尾部”，较为孤立。通过定位整个雹暴单体过程的移动，提取围绕雹暴单体长方形框范围内的地闪数据与雷达数据，以确保分析中所用数据属于此雹暴单体。

3 雹暴发展过程及地闪活动与雷达回波参量的关系

Wang 等(2017)以−10℃高度层以上大于45 dBz的格点数($V_{45\ dBz\uparrow-10℃}$)是否大于0来划分判断雷暴单体的初生、成熟、消散3个阶段。初生阶段定义从雷达第一次探测风暴时(T_1)开始，到$V_{45\ dBz\uparrow-10℃}$第一次大于0的T_2时刻(并保持连续两个时刻(T_3、T_4)$V_{45\ dBz\uparrow-10℃}>0$)；成熟阶段定义从$T_3$时刻开始，到$V_{45\ dBz\uparrow-10℃}$等于0的$T_5$时刻(并保持连续两个时刻($T_6$、$T_7$)，$V_{45\ dBz\uparrow-10℃}=0$)；消散阶段定义从$T_6$时刻开始，到$T_8$时刻(雷达回波消失)。

文中个例中T_1(15时22分)时刻初次监测到雷达回波，T_2(16时22分)时刻该参数($V_{45\ dBz\uparrow-10℃}$)值大于0，T_3(16时28分)、T_4(16时34分)时刻$V_{45\ dBz\uparrow-10℃}$也大于0，直到17时52分、17时58分$V_{45\ dBz\uparrow-10℃}=0$，但18时04分$V_{45\ dBz\uparrow-10℃}$大于0以后一直延续，不能算消散，直到$T_5$(21时11分)、$T_6$(21时17分)、$T_7$(21时25分)时刻$V_{45\ dBz\uparrow-10℃}$都等于0。据此定义该个例的初生阶段为15时22分—16时22分；成熟阶段为16时28分—21时11分；消散阶段为21时17分—22时23分。从地闪频次时间序列(图2)可以看到，初生阶段与消散阶段均未探测到地闪。而这次雹暴过程持续时间长、移动路径长，在移动过程中受下垫面和局地水汽的影响，并不能这样简单地划分为初生、成熟和消散3个阶段。

从最大反射率值与地闪频次时间序列(图2)可以看到，该雹暴过程地闪频次相应于最大反射率值变化出现3次峰值，过程存在3次反复发展。依据地面观测，在地闪频次第1次出现峰值的17时10分出现冰雹；第2次峰值的19时05分观测到持续近30 min的较强降雹；而随后第3次峰值在20时35分出现持续10多分钟的降雹。因此，文中将地闪发生的3个集中区域分为第1峰值阶段(15时22分—18时)，第2峰值阶段(18时—19时48分)，第3峰值阶段(19时48分—22时23分)，对应3次降雹过程(如图2中蓝色虚线划分所示)。

图3是雹暴过程中3次降雹时刻的雷达回波及

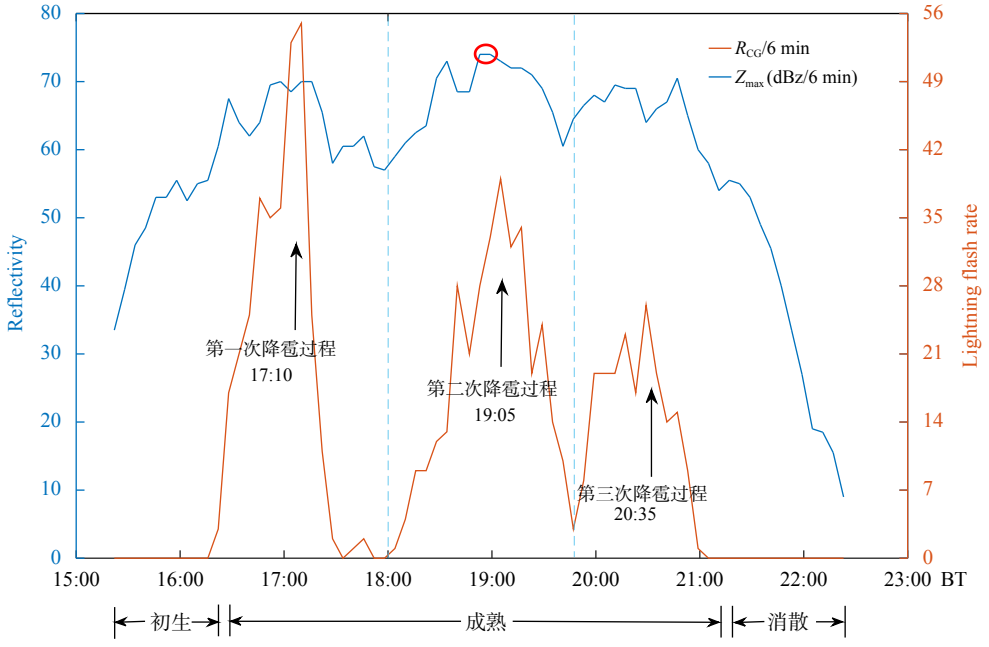


图2 雹暴内最大反射率值与地闪频次(次/(6 min))的时间变化序列

(箭头表示降雹起始时间，蓝色虚线表示三次地闪峰值阶段的划分)

Fig. 2 Temporal change sequences of the maximum reflectivity during hailstorm and the CG lightning flash rate per 6 min

(Arrows indicate the starting time of the three hail events, blue dotted lines represent the division of the three peak phases of CG lightning)

剖面，雹暴在东移弓状飑线南侧的“弓尾部”发展（图 3a），出现了 3 次明显的减弱、增强交替反复过程。这可能与地形因素有关，从图 1 雹暴过程轨迹（图 1）可以看到，3 次降雹之前，路径均经过高山，因地形的抬升辐合作用使得回波增强，而在 3 次降雹之后，路径均是过山因地势平缓使得回波减弱。但地形等作用复杂，且过程受下垫面和局地水汽等其他多因素影响，这次过程出现 3 次反复发展的具体原因还需开展更细致的研究与分析。

整个雹暴过程在 18 时 53 和 59 分，最大反射率因子达到整个过程最强（74 dBz，图 2 红圈标注），是冰雹云最为强盛的时刻。

从雷达观测中也发现多次旁瓣回波与三体散射长钉回波（图 3b_1、b_2、c_1、c_2），过程中三体散射长钉最长达 25 km（19 时 05 分 4.3°仰角回波，图略），旁瓣回波最长达 32.7 km（19 时 11 分 0.5°仰角的回波，图略），垂直累积液态含水量（VIL）最大值达到 51 kg/m^2（18 时 47 分）。

整个过程中，从 18 时 34 分开始 0.5°仰角回波（图略）低层出现明显入流缺口和钩状回波，并持续至 19 时 11 分，19 时 11 分整个雹暴结构形态呈现由悬垂、弱回波区、强回波柱构成的完整典型超级单

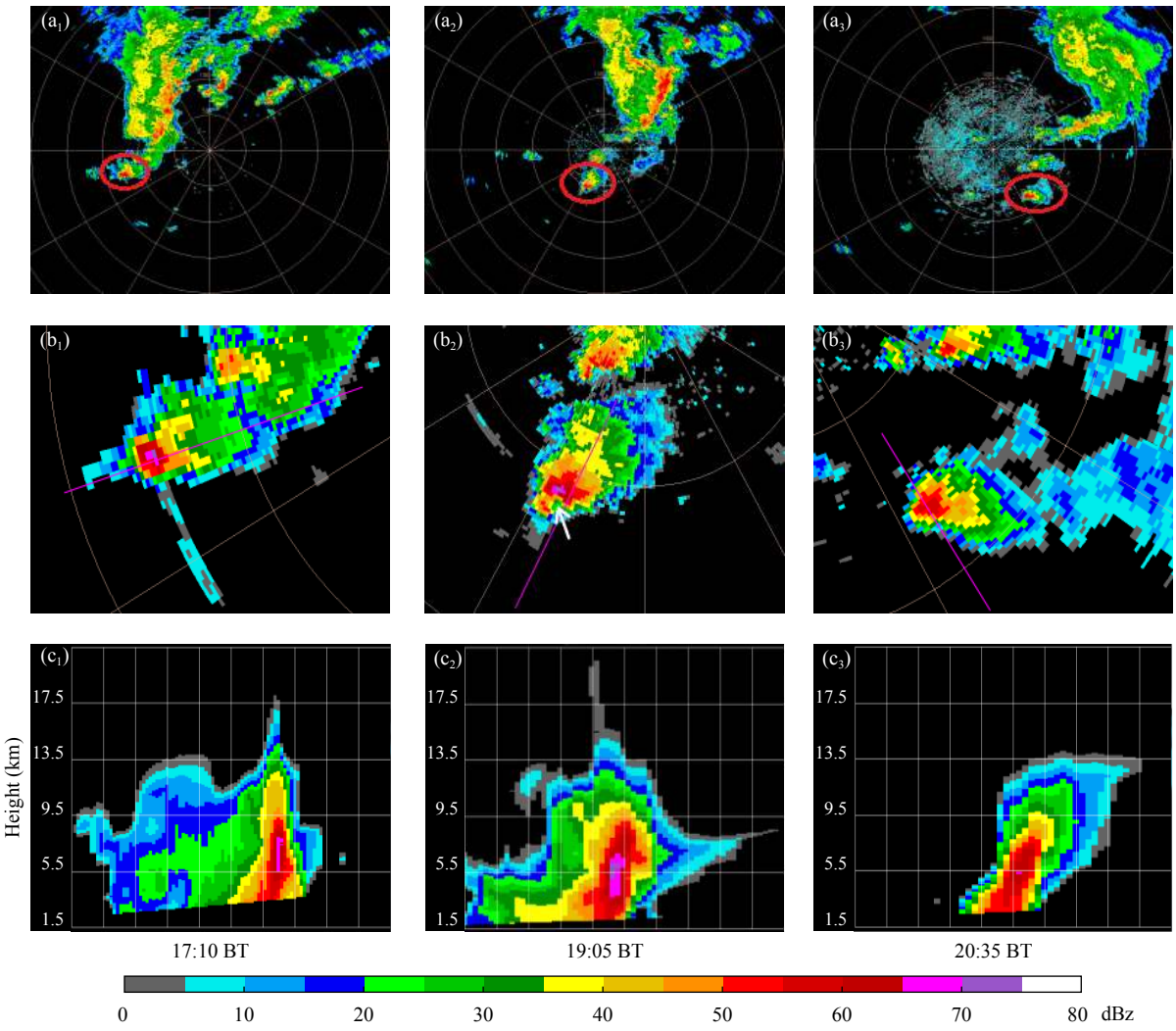


图 3　雹暴过程中 3 次降雹时刻（a_1—c_1. 17:10 BT，a_2—c_2. 19:05 BT，a_3—c_3. 20:35 BT）龙岩雷达回波及剖面

（a. 0.5°仰角回波，b. 1.5°仰角回波，c. 沿着图 b 中紫线的剖面）

Fig. 3　Longyan radar reflectivity and profiles at three times（a_1–c_1. 17:10 BT, a_2–c_2. 19:05 BT, a_3–c_3. 20:35 BT）during the hailstorm process

（a. reflectivity at 0.5°elevation, b. reflectivity at 1.5°elevation, c. cross section along the purple line shown in b）

体结构特征(韩颂雨等, 2017)。从降雹时刻 19 时 05 分的剖面(图 3c_2)也可见由悬垂、弱回波区、强回波柱构成的超级单体特征,图 3b_2 有明显的钩状回波特征(白色箭头指示)。而在 17 时 10 分和 20 时 35 分这两个降雹时刻,均未见钩状回波、悬垂和穹隆等特征,仅出现强回波柱结构,但 17 时 10 分比 20 时 35 分更明显一些。

由图 2 看到,整个雹暴过程的 3 次反复发展不仅与 3 次地闪峰值阶段相对应,地面观测的降雹起始时刻与地闪频次(次/(6 min))出现阶段最大值时刻也有明显的一致性。并且在 3 次降雹前地闪频次均有跃增现象,图 2 中第 1 次降雹时刻前 48 分钟地闪频次开始增加;第 2 次降雹时刻前 61 分钟地闪频次开始增加;第 3 次降雹时刻前 48 分钟地闪频次开始增加。而在 3 次降雹开始后,地闪频次均迅速减少,主要原因可能是随着冰雹的长大和降落导致云内冰相粒子含量突降,同时降雹的拖曳作用减弱了上升气流,造成降雹发生后地闪频次突降(郑栋等, 2010; Xu, et al, 2016)。而每次降雹后地闪频次突降,但随后地闪频次又快速发展起来,是因为雷暴又发展增强起来,酝酿起新的降雹过程,雹暴的 3 次反复发展影响着地闪频次的变化。从雹暴过程整体来看,或从地闪频次变化来看,动力过程的增强和减弱与地闪频次的增强和减弱是彼此关联的,动力过程具有正向支配作用。

虽然图 2 中雹暴内最大反射率与地闪频次的增减变化趋势一致,但最大反射率达到过程最大的第 2 次降雹过程,却没有对应最大的地闪频次(出现在第 1 次降雹过程中)。地闪频次的增加速率、阶段最大值与最大反射率值并非正相关。

同样−20℃ 层高度最大反射率($Z_{max_-20℃}$)与地闪频次增减趋势对应,也存在一定的相关(图 4),但该参量最大的第 2 次降雹过程也没对应最大的地闪频次。图 4b 中地闪频次大于 0 的值与 $Z_{max_-20℃}$ 的拟合关系式为(R_{CG_3}=0.59×$Z_{max_-20℃}$−21.98),相关系数为0.64。上述最大反射率值与地闪频次大于 0 的值拟合相关系数也达 0.64(拟合图略)。

图 5 中−20℃ 层高度反射率大于 40 dBz 格点数 $Sum_{(Z_{-20℃}>40\ dBz)}$ 与地闪频次的拟合关系式为(R_{CG_3}=0.14×$Sum_{(Z_{-20℃}>40\ dBz)}$+1.02),相关系数达 0.76,但地闪频次较大的第 1 次降雹过程却对应较小的 $Sum_{(Z_{-20℃}>40\ dBz)}$。

虽然 3 个雷达回波参量与地闪频次的增减变化趋势一致,但地闪频次过程最大的第 1 次降雹过程,却对应着峰值最小的雷达回波参量,雷达回波参量过程最大的第 2 次降雹过程却没对应最大的地闪频次。

4 地闪活动与降水结构和垂直速度的空间配置关系

图 6 是 3 次降雹时刻的地闪活动与回波、垂直速度的空间配置。第 1 次降雹时刻(17 时 10 分,图 6a_1、a_2),0℃ 层高度有较弱的气旋式辐合,地闪活动较多,且接地位置多对应在−20℃ 层高度强下沉气流区附近。第 2 次降雹时刻(19 时 05 分,图 6b_1、b_2),雹暴发展达到鼎盛时期,0℃ 层高度气旋式辐合

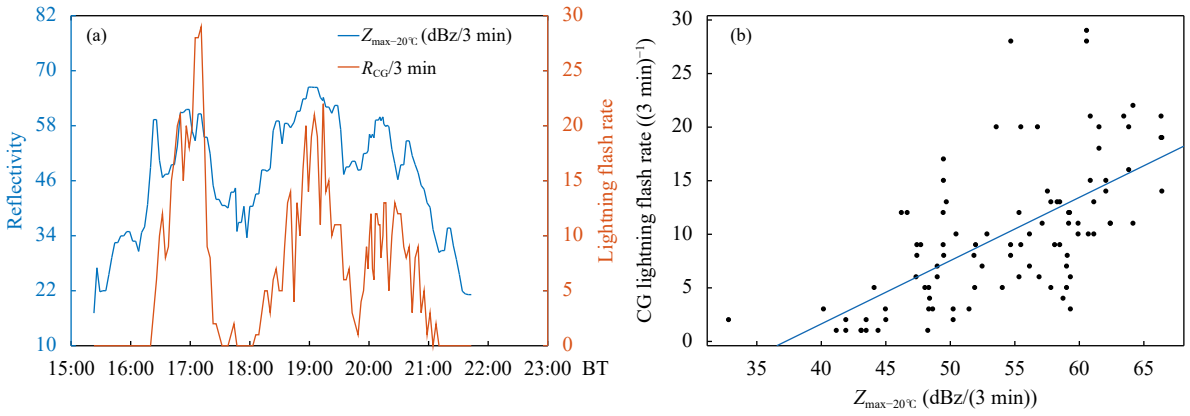


图 4 −20℃ 层高度最大反射率与地闪频次(次/(3 min))的时间变化(a)及关系拟合(b)

Fig. 4 (a) Temporal variation of the maximum reflectivity at −20℃ level and the CG lightning flash rate per 3 min and (b) their relationship fitting

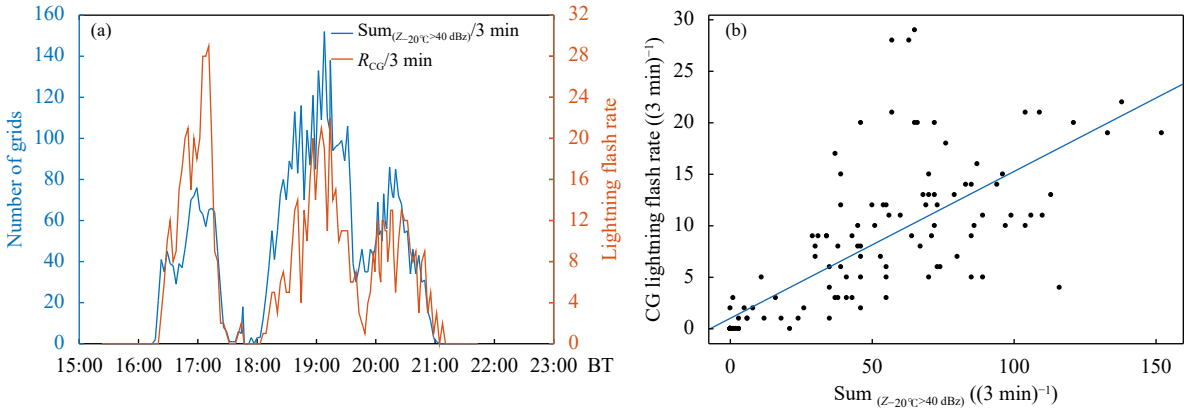


图 5 −20℃ 层高度反射率大于 40 dBz 格点数与地闪频次（次/(3 min)）的时间变化（a）及关系拟合（b）

Fig. 5 （a）Temporal variation of the number of grids with reflectivity greater than 40 dBz at −20℃ level and the CG lightning flash rate per 3 min and（b）their relationship fitting

结构完整，地闪接地位置主要对应在−20℃ 层高度强上升与下沉气流区（达±30 m/s）的交界处。图 6b$_3$、b$_4$ 分别是 19 时 05 分沿图 6b$_1$ 白线的南北、东西剖面回波与风场（该白线位置基本靠近地闪接地位置），图 6b$_3$ 的南北剖面中回波形态向南边略弯且略微显现悬垂结构，该地闪分布区域垂直方向上雹暴基本被上升气流所控制。图 6b$_4$ 的东西剖面中强回波核整体为下沉气流，对应着降雹区域，地闪接地位置在降雹区域附近。第 3 次降雹时刻（20 时 35 分，图 6c$_1$、c$_2$），气旋式结构不完整，地闪活动较少，接地位置对应在−20℃ 层高度弱的下沉气流区域。

第 1 次降雹时刻的地闪接地位置对应在−20℃ 层高度强下沉气流区附近，第 3 次降雹时刻对应在弱的下沉气流处。第 2 次降雹时刻是雹暴发展最为全盛时期，地闪接地位置对应在−20℃ 层高度强上升与下沉气流区的交界处，在降雹区域附近。

Wang 等（2015）模拟研究中发现在雷暴生命史中垂直速度 1—5 m/s 范围内的冰相粒子易获得最大的电荷，他们认为准稳定区域（垂直速度−1—1 m/s），最有利于分离由霰和冰晶粒子携带的不同极性电荷从而形成明显的分层电荷结构，而电荷的产生主要是因为相对较强的上升气流（粒子间频繁碰撞、充足的冰相粒子），因此降雹时刻地闪接地位置多对应在−20℃ 层高度强垂直气流处附近和弱的垂直气流处。

5 地闪活动与垂直速度的关系

本次雹暴（强单体）过程一共出现 851 次地闪，其中 20 次正地闪，占比较小，但文中的地闪数据处理都把正地闪包含在内了。图 7、8 是对应地闪接地位置且双雷达能反演得到的 0℃、−20℃ 高度层的垂直速度分布。

由图 7 可见，对应地闪接地位置 0℃ 层高度的垂直速度大多集中在−2—2 m/s。速度值在 0—2 m/s 出现地闪数比−2—0 m/s 稍多一些，弱的上升气流占比高。最大上升速度为 5.66 m/s，最大下沉速度为 6.14 m/s。

由图 8 可见，对应地闪接地位置−20℃ 层高度的垂直速度大多集中在−10—10 m/s。速度值在−10—0 m/s 出现地闪数比 0—10 m/s 稍多一些，弱的下沉气流占比高。上升速度最大为 27.85 m/s，下沉速度最大为 44.44 m/s。

从图 7、8 来看，地闪接地位置多对应在 0℃、−20℃ 层高度弱的垂直速度区域。

图 9 是地闪频次与对应地闪接地位置−20℃ 层高度双雷达反演的最大垂直速度绝对值的时间变化及拟合关系。3 次降雹过程中地闪频次的 3 次跃增与垂直速度值变化一致（图 9a、b），且变化幅度大小也很吻合。

图 9a、c 是 6 min 内地闪频次与最大垂直速度绝对值的时间变化及拟合关系，图 9c 显示的拟合关系式为（$R_{CG_6}=0.94\times|W|_{max-20℃}+9.08$），相关系数为 0.72。

图 9b、d 是 3 min 内地闪频次与最大垂直速度绝对值的时间变化及拟合关系，图 9d 显示的拟合关系式为（$R_{CG_3}=0.50\times|W|_{max-20℃}+5.58$），相关系数为 0.70。

上述结果显示,对应地闪接地位置的−20℃层高度上升或下沉气流,风速值越大,发生地闪的次数就越多,两者成正比关系。可能是由于上升、下沉气流越大,粒子间的碰撞也越频繁,形成了强充电过程,输送的冰相粒子越多,因此引起的地闪频次越多。王飞等(2016)也提到上升运动一方面影响到云内水成物,尤其是冰相物的形成,以及随后在这些水成物之间发生的起电过程;另外,上升运动还影响着带电水成物的分离过程,进而影响到电荷分层结构的形成。

文中也做了对应地闪接地位置0℃层高度的最大垂直速度绝对值与地闪频次(6 min /3 min)的拟合关系,相关系数分别为0.49和0.44,相关关系明显低于−20℃层高度的结果。图7、8显示0℃层高度上升气流占比多一些,−20℃层高度下沉气流占比多一些,说明有些区域在0℃层高度是上升气流,到−20℃层高度就是下沉气流了。上升气流若达到比较高的高度,会把更多的水成物粒子带到更冷的

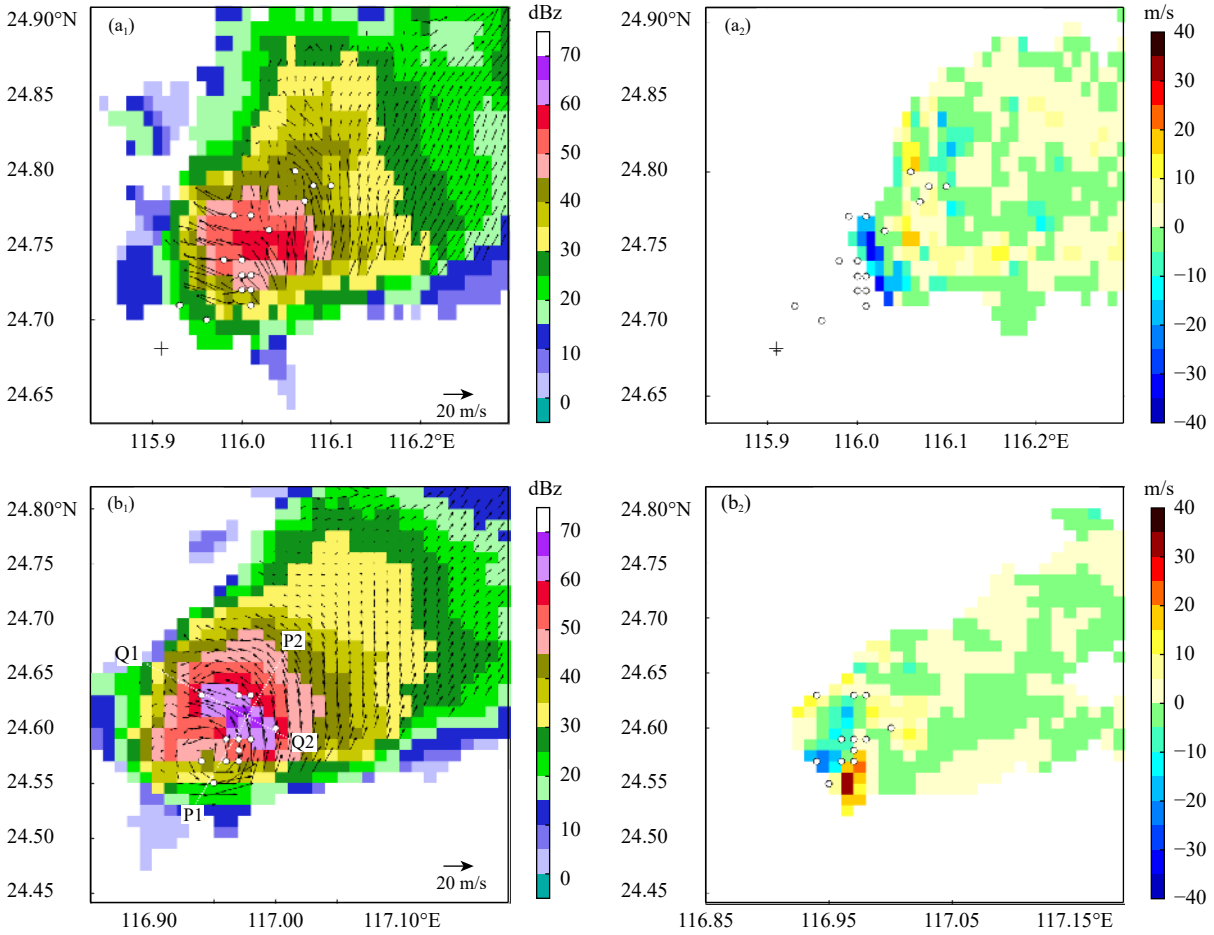
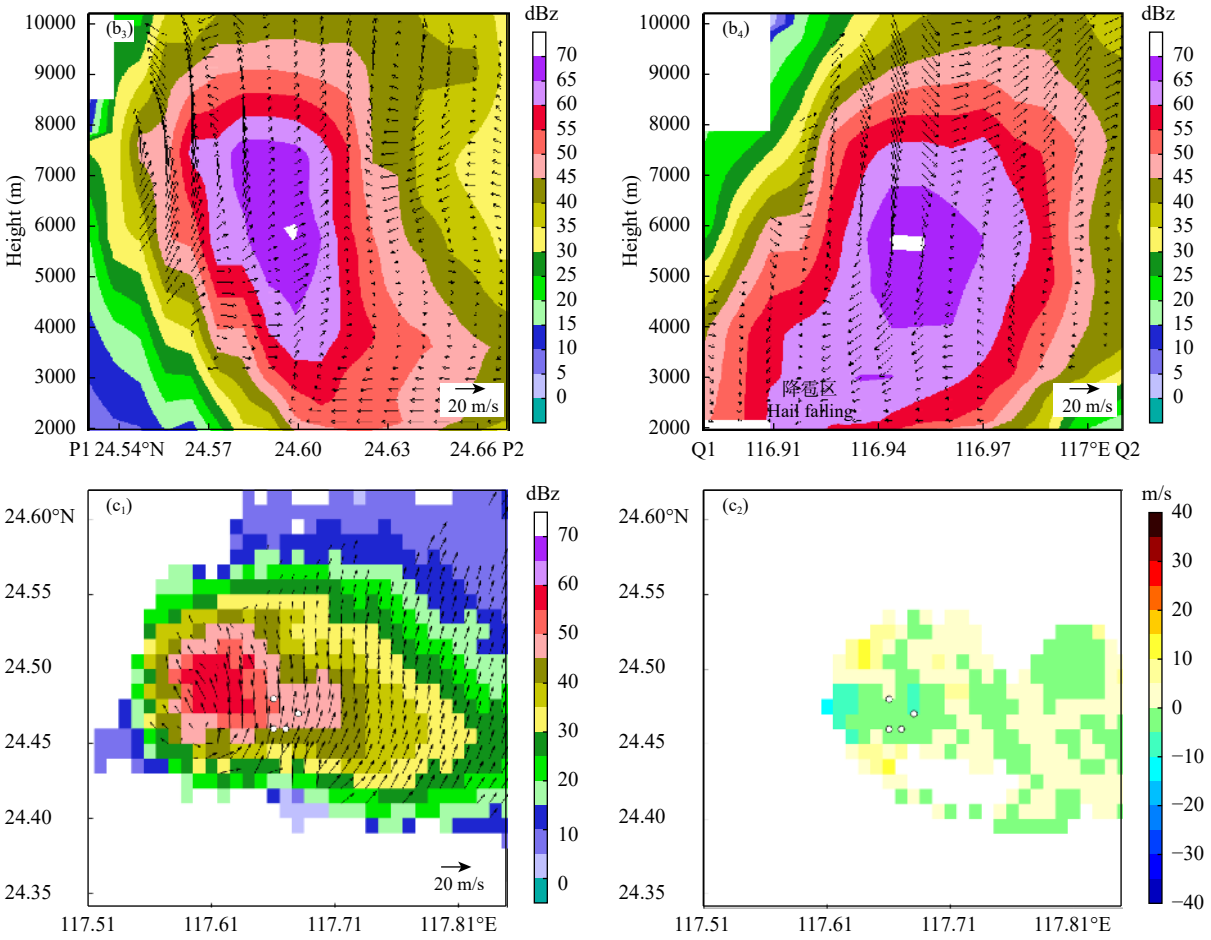


图6 3次降雹时刻(a. 17时10分, b. 19时05分, c. 20时35分)的地闪活动与回波、垂直速度的空间配置

("o"表示负地闪发生的位置,"+"表示正地闪;叠加的是每个时次前后1分钟之内发生的地闪。
譬如17时10分叠加的是17时09分—17时11分发生的地闪;a_1、b_1、c_1是0℃层(4229 m)高度反演的水平风场(箭头)及回波(阴影),a_2、b_2、c_2是−20℃层(7668 m)高度反演的垂直速度分布。其中图b_3、b_4分别为沿着图b_1中两条白线P1—P2(24.53°—24.67°N)、Q1—Q2(116.89°—117.01°E)所在位置的南北、东西剖面的垂直速度与回波)

Fig. 6 Spatial configuration of CG lightning activity and echo and vertical velocity at three hail events

("o" represents negative CG lightning position, "+" represents positive CG lightning; a, b and c correspond to time 17:10, 19:05 and 20:35 BT, respectively. CG lightnings that occurred within 1 minute of each time are marked. For example, the ground flashes occurred between 17:09 BT and 17:11 BT are showed in Fig. a for the time of 17:10 BT. a_1, b_1 and c_1 show retrieved horizontal wind fields (arrows) at 0℃ level (4229 m) and radar echoes (shaded). a_2, b_2 and c_2 show vertical wind fields at −20℃ level (7668 m) retrieved by radar. b_3, b_4 are vertical velocities and echoes of the north-south and east-west cross sections along the two white lines P1−P2 (24.53°−24.67°N) and Q1−Q2 (116.89°−117.01°E) shown in b_1, respectively)



续图 6

Fig. 6 Continued

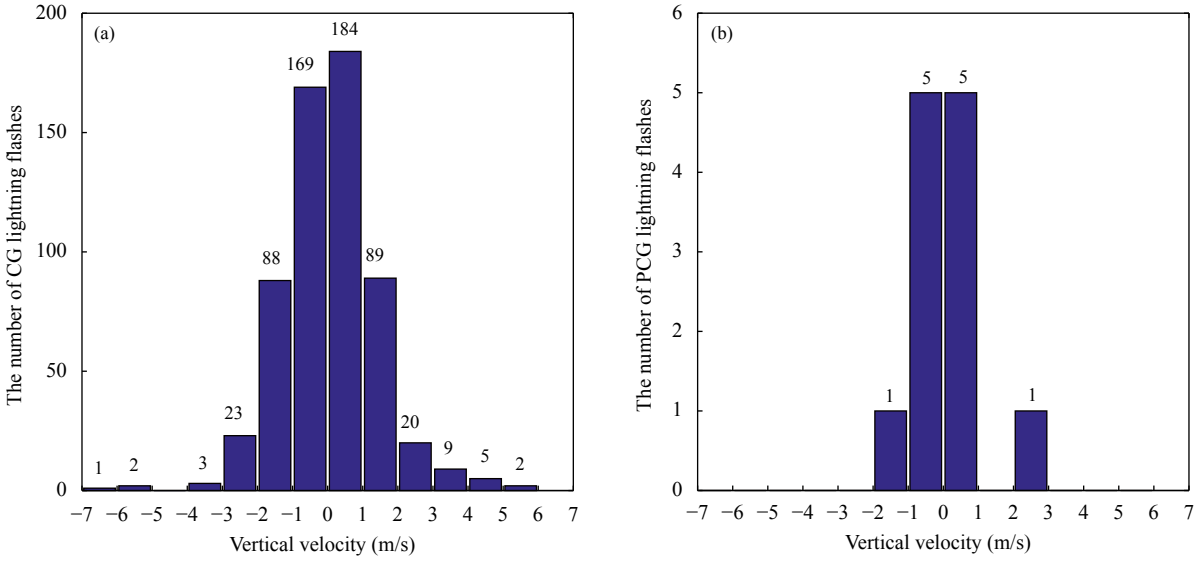


图 7 对应地闪接地位置 0℃ 层高度双雷达反演的垂直速度分布（a. 地闪, b. 正地闪）

Fig. 7 Vertical wind field at 0℃ level retrieved by dual-Doppler radar corresponding to CG lightning positions (a. CG lightning, b. positive CG lightning)

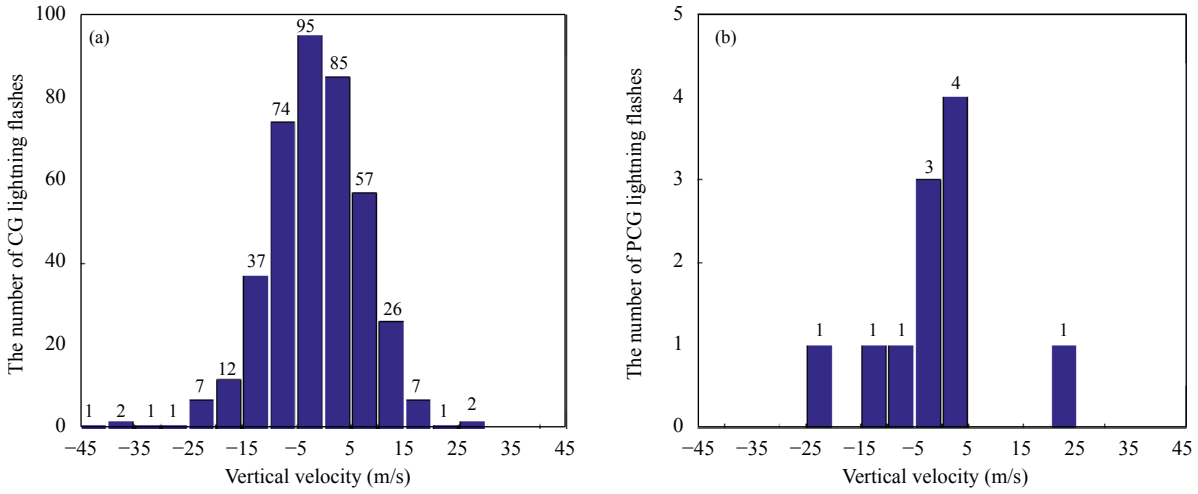


图 8 对应地闪接地位置−20℃ 层高度双雷达反演的垂直速度分布（a. 地闪, b. 正地闪）

Fig. 8 Vertical wind field at −20℃ level retrieved by dual-Doppler radar corresponding to CG lightning positions (a. CG lightning, b. positive CG lightning)

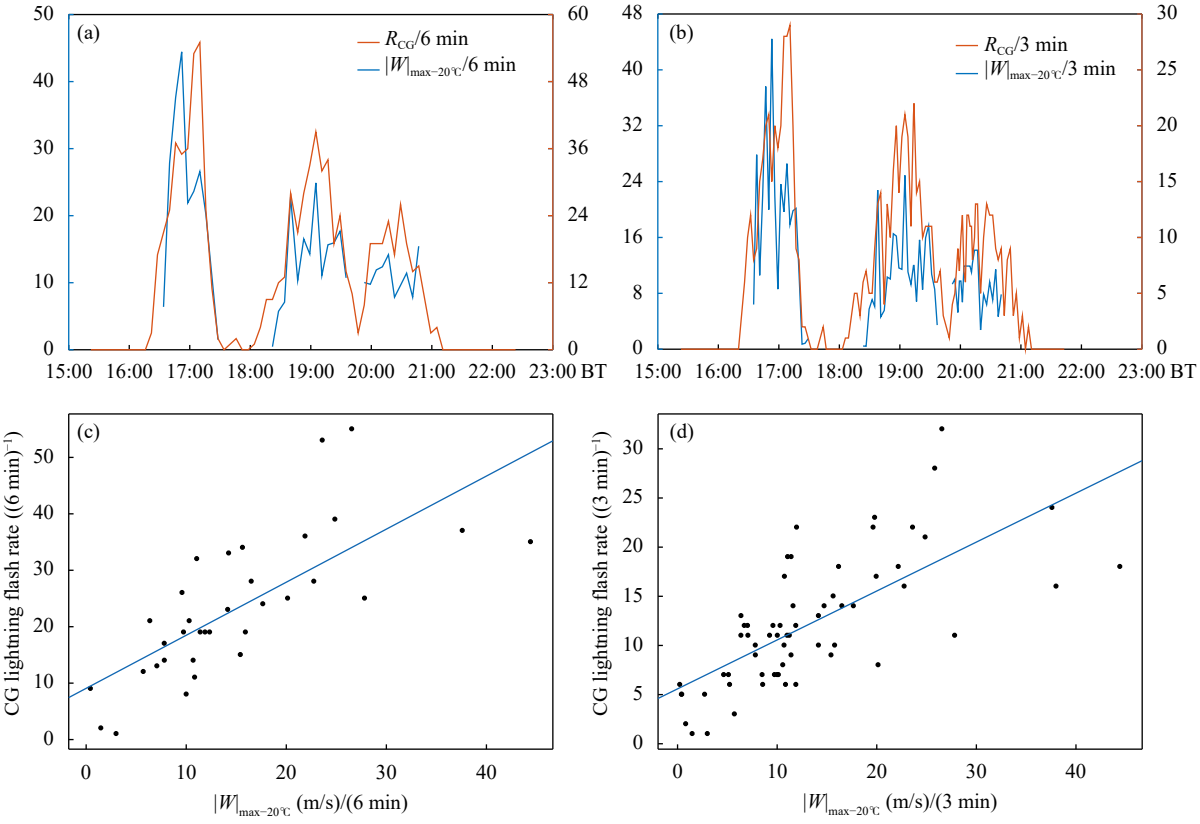


图 9 地闪频次与对应地闪接地位置−20℃ 层高度双雷达反演的最大垂直速度绝对值的时间变化（a、b）及关系拟合（c、d）

（a、c. 次/(6 min), b、d. 次/(3 min)）

Fig. 9 Temporal changes of CG lightning flash rate and the maximum vertical velocity absolute value at −20℃ level retrieved by dual-Doppler radar corresponding to CG lightning positions (a, b) and their relationship fittings (c, d)

(a, c. (6 min)$^{-1}$, b, d. (3 min)$^{-1}$)

混合相区（冰水混合区），这里是起电比较强的区域。言穆弘等（1996）利用模式研究也发现，只有在上升气流中心穿过−20℃温度层才会产生强起电。因此，解释了地闪频次与−20℃层高度垂直速度参量的相关比0℃层更好的这一结果。

图10是地闪频次与−20℃层高度以上垂直速度绝对值大于5 m/s体积数的时间变化及关系拟合，图10b显示的拟合关系式为（R_{CG_3}=0.007×$|V|_{5\ m/s\uparrow-20℃}$+1.97），相关系数为0.65。两者大致成正相关，$|V|_{5\ m/s\uparrow-20℃}$越大，地闪频次越高。

−20℃层高度以上垂直速度绝对值大于5 m/s的体积数（$|V|_{5m/s\uparrow-20℃}$）与地闪频次的相关性不如对应地闪接地位置−20℃层高度的最大垂直速度绝对值（$|W|_{max-20℃}$）。但从两者的时间变化上均可看到：这两个变量的阶段最大值在第1次降雹阶段最大，第2次降雹阶段次之，第3次降雹阶段最小，与3次降雹阶段地闪活动的强弱差异相对应。

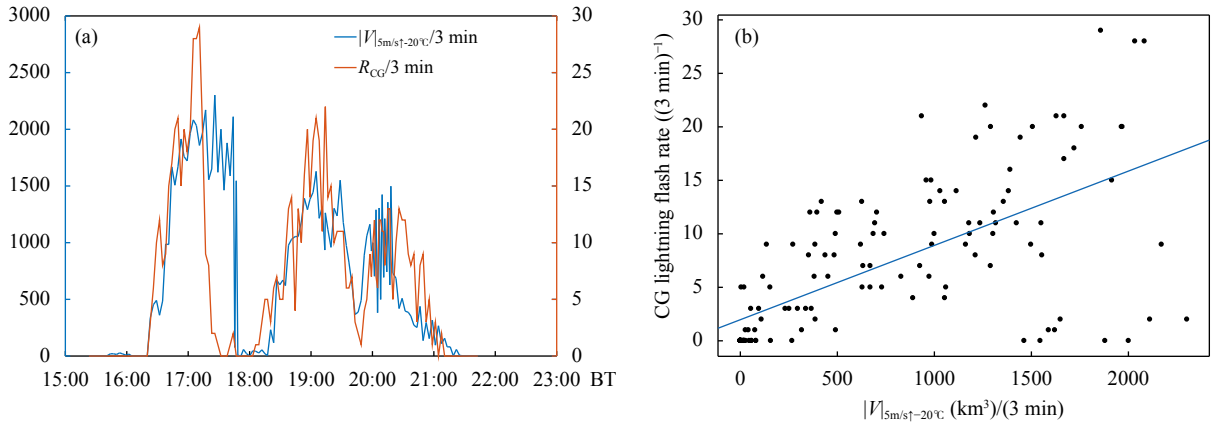


图10　地闪频次与雹暴内−20℃层高度以上垂直速度绝对值大于5 m/s体积数的时间变化（a）及关系拟合（b）

Fig. 10　(a) Temporal changes of CG lightning flash rate and the volume number of the vertical velocity absolute value greater than 5 m/s above −20℃ level during the hailstorm, and (b) their relationship fitting

6　地闪活动与可降冰质量通量的关系

为考虑动力和微物理过程对地闪活动的综合影响，先根据Carey等（2000）提出的方程（式（1））计算降水冰晶质量M（单位：g/m^3）。

$$M = 1000\pi\rho_i N_0^{\frac{3}{7}}\left(\frac{5.28\times10^{-18}}{720}Z\right)^{\frac{4}{7}} \quad (1)$$

式中，Z是反射率因子（单位：mm^6/m^3），$N_0 = 4\times10^6$ m^{-4}，$\rho_i = 917$ kg/m^3，式（1）被应用于计算7—11 km高度范围内的冰晶质量。一般用于估计热带地区的冰晶质量，也已应用到其他区域和全球的闪电研究中（Petersen, et al, 2001；Gauthier, et al, 2006）。

$$F = M\times W \quad (2)$$

再将冰晶质量乘以垂直速度即为冰晶质量通量F（式（2））（单位：g/(m^2·s)），它能衡量降水冰晶粒子在垂直方向的运动，上升气流通量为$+F$，下沉气流通量为$-F$，他们的绝对值相加，$F = |+F|+|-F|$代表了降水冰晶质量的运动程度。

文中选取7—11 km高度大于25 dBz的雷达反射率数据及对应反演的垂直速度，计算了该高度范围内可降冰质量通量的总和（(kg·m)/s）（图11）。图11a中两者的时间变化曲线非常吻合，图11b显示的拟合关系式为（$R_{CG_3} = 0.02\times F + 0.55$），相关系数为0.85。可降冰质量通量与地闪频次相关性非常显著，可降冰质量通量越大，地闪频次越高。

7　选取的参量与地闪频次的定量关系小结

文中所选取的参量与地闪频次的相关均显著，相关系数在0.64以上（表1）。

选取的Z_{max}、$Z_{max_-20℃}$、$Sum_{(Z_{-20℃}>40\ dBz)}$3个雷达回波参量与地闪频次的增减变化趋势一致，其相关系数分别为0.64、0.64、0.76。但地闪频次过程最大的第1次降雹过程却对应峰值最小的雷达回波参量，雷达回波参量过程最大的第2次降雹过程却没对应

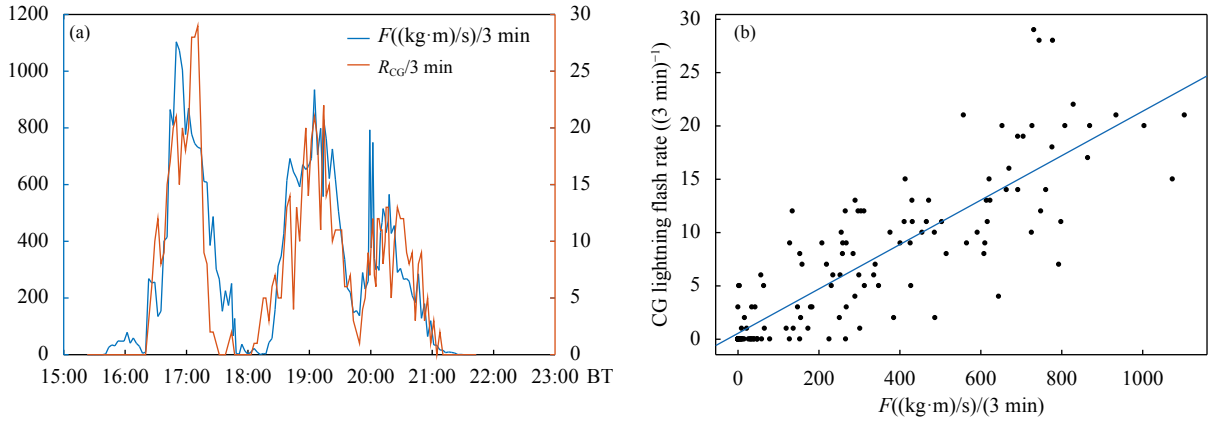


图 11 地闪频次与雹暴内可降冰质量通量的时间变化（a）及关系拟合（b）

Fig. 11 （a）Temporal changes of CG lightning flash rate and the precipitation ice mass flux in hailstorm and（b）their relationship fitting

表 1 雹暴内不同参量与地闪频次的相关系数小结

Table 1 Summary of correlation coefficients（R）of different parameters with CG lightning flash rate during the hailstorm

参量		参量说明	R
雷达回波参量	Z_{max}(dBz)	雹暴内的最大反射率值	0.64
	$Z_{max_-20℃}$(dBz)	−20℃层高度的最大反射率值	0.64
	$Sum_{(Z_{-20℃}>40\ dBz)}$	−20℃层高度大于40 dBz 格点数	0.76
垂直速度	$\|W\|_{max\ -20℃}$/6 min	对应地闪接地位置−20℃层高度的最大垂直速度绝对值（m/s）	0.72
	$\|W\|_{max\ -20℃}$/3 min		0.70
	$\|V\|_{5\ m/s↑-20℃}$	−20℃层高度以上垂直速度绝对值大于5 m/s 的体积数	0.65
可降冰质量通量	F((kg·m)/s)	7—11 km高度范围内冰晶质量乘以对应的垂直速度为可降冰质量通量	0.85

最大地闪频次。

选取的$|W|_{max\ -20℃}$、$|V|_{5m/s↑-20℃}$两个垂直速度参量与地闪频次成正比关系，相关系数分别为 0.72（0.70）、0.65。且 3 次降雹过程中这两个垂直速度参量阶段最大值在第 1 次降雹阶段最大，第 2 次降雹阶段次之，第 3 次降雹阶段最小，与地闪频次阶段最大值相对应。另外，表 2 中也显示，0、−10、−20℃层高度最大上升气流及 0、−20 至 0℃层高度的上升气流平均值这些动力参数均为在第 1 次强地闪活动期最高，中间 1 次强地闪活动期次之，最后 1 次强地闪活动期最小。

选取的可降冰质量通量（F）考虑了动力和微物理过程对地闪活动的综合影响，它与地闪频次的相关最为显著，相关系数达 0.85。可见 3 次降雹阶段

表 2 第 1 次、中间 1 次和最后 1 次发生地闪时雷暴动力参数的对比

Table 2 Comparison of thunderstorm dynamic parameters at the first, middle and last CG lightnings

动力参数	第1次强地闪活动期（16:22 BT）	中间1次强地闪活动期（19:11 BT）	最后1次强地闪活动期（21:06 BT）
0℃层高度最大上升气流(m/s)	**3.74**	3.45	2.85
−10℃层高度最大上升气流(m/s)	**27.02**	14.88	10.28
−20℃层高度最大上升气流(m/s)	**38.22**	14.42	12.36
0℃层高度上升气流的平均值(m/s)	**0.62**	0.37	0.27
−20℃至0℃层高度上升气流的平均值(m/s)	**3.28**	1.35	1.18
≈10 m/s上升气流(8—12 m/s)出现的最大高度(m)	8512	**12099**	11044
≈20 m/s上升气流(18—22 m/s)出现的最大高度(m)	8512	**11888**	无(W_{max}=12.48 m/s)
风暴内上升气流所占的百分比(%)	0.31	**0.43**	0.34

的地闪活动特征差异是由不同的动力条件、微物理条件共同决定的。

8 结 论

利用地闪资料与3组双雷达反演的风场，探究了包含3次降雹的雹暴过程的地闪活动特征及其与动力、微物理条件的关系。得到以下主要结论：

（1）该雹暴演变过程中出现3次反复发展，并发生了3次降雹过程，且对应着3次地闪活动峰值阶段。在降雹前地闪频次均有跃增现象。在降雹开始后，地闪频次均迅速减少。

（2）雹暴过程中3次降雹时刻的地闪活动与回波、垂直速度的空间配置发现，第1次降雹时刻的地闪接地位置对应在−20℃层高度强下沉气流区附近，第3次降雹时刻对应在弱下沉气流处。第2次降雹时刻是雹暴发展最为全盛时期，地闪接地位置对应在−20℃层高度强上升与下沉气流区的交界处，在降雹区域附近。

（3）整个雹暴过程中的地闪接地位置对应0、−20℃层高度的垂直速度范围分别集中在−2—2和−10—10 m/s区域，多对应在弱的垂直速度区域。

（4）选取的雹暴内最大反射率（Z_{max}）、−20℃层高度最大反射率（$Z_{max_-20℃}$）、−20℃层高度大于40 dBz格点数（$Sum_{(Z_{-20℃}>40\,dBz)}$）3个雷达回波参量与地闪频次变化趋势一致，其相关系数分别为0.64、0.64、0.76。

选取的对应地闪接地位置−20℃层高度的最大垂直速度绝对值（$|W|_{max-20℃}$）、−20℃层高度以上垂直速度绝对值大于5 m/s的体积数（$|V|_{5m/s\uparrow-20℃}$）两个垂直速度参量与地闪频次成正比关系，且阶段最大值与地闪频次阶段最大值相对应，相关系数分别为0.72、0.65。

综合考虑动力和微物理影响的可降冰质量通量与地闪频次的相关最为显著，相关系数达0.85。

9 讨 论

从分析结果看，第2次降雹阶段是整个雹暴过程发展最为强盛时期，降雹也最强，表2中最后3个参数10、20 m/s上升气流出现的最大高度、风暴内上升气流所占比也是在中间1次强地闪活动期最高，显然第2次降雹阶段的动力条件更强，但地闪频次峰值却没有第1次降雹阶段高。这是因为更强的动力过程和冰雹（微物理）过程可能对地闪有一定的抑制作用（Wang, et al, 2017）。虽然强上升气流提供了强的起电过程（粒子间频繁碰撞、充足的冰相粒子），但同时强上升气流和风切变也会引起不同极性电荷区的混乱分布，且高度分层状态不明显。因此，电荷分布的区域电势较小，而地闪需要大的电势（大范围分布的分层电荷结构）（Bruning, et al, 2013; Calhoun et al, 2013; Zheng, et al, 2016）。另外，由于强上升气流的作用可能导致雹暴电荷区整体抬升，正、负电荷区之间的距离缩小，云闪更容易发生，而地闪发生频次减少。因此，强动力过程作用下的电荷结构特征可能不利于地闪发生，整个雹暴过程最为强盛的第2次降雹阶段的地闪频次较低。

从雹暴过程整体或从地闪频次变化来看，动力过程的增强和减弱与地闪频次的增强和减弱是彼此关联的，动力过程具有正向支配作用（雹暴的3次反复发展影响着地闪频次的变化）。Schultz等（2015）使用偏振雷达和多雷达分析雷暴发现−10℃层至−40℃层高度的冰晶质量和上升气流体积的增加导致了闪电的突增，而上升气流体积的增加超前于冰晶质量和闪电频次的增加。Dotzek等（2005）和DiGangi等（2016）认为脉动的闪电活动可能由于雷暴的上升气流引起，上升气流的发展支撑着风暴的发展（Houston, et al, 2011）。上升速度影响着雷达回波的变化（强回波达到的高度、雷达回波参量变化等），文中初步做了−20℃层高度以上最大上升速度与最大反射率的关系研究（文中未给出），大致成正相关，其相关系数达0.66，说明上升速度与回波参量存在一些联系。而更多的业务与研究情况下是没有反演的流场，但雷达回波的资料会实时有，如果能探究得到上升速度与回波参量的关系，这样就可根据回波特征大致判断上升气流速度的情况，进而研究闪电活动及雹暴的预报等问题，这也许在未来可进行更进一步的思考与探究。

参考文献

冯桂力，郄秀书，袁铁等. 2007. 雹暴的闪电活动特征与降水结构研究. 中国科学 D 辑：地球科学，37(1)：123-132. Feng G L, Qie X S, Yuan T, et al. 2007. Lightning activity and precipitation structure of hailstorms. Sci in China Ser D: Earth Sci, 50(4): 629-639

冯桂力，郄秀书，吴书君. 2008. 山东地区冰雹云的闪电活动特征. 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. Chinese J Atmos Sci, 32(2): 289-299 (in Chinese)

韩颂雨. 2017. 华东沿海地区强对流及台风天气系统的三维流场结构分析: 以浙江、福建地区的个例为例 [D]. 南京: 南京信息工程大学. Han S Y. 2017. Three-dimensional flow field analysis of severe convective and typhoon weather systems in coastal areas of East China[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology (in Chinese)

韩颂雨, 罗昌荣, 魏鸣等. 2017. 三雷达、双雷达反演降雹超级单体风暴三维风场结构特征研究. 气象学报, 75(5): 757-770. Han S Y, Luo C R, Wei M, et al. 2017. Research on three-dimensional wind field structure characteristic of hail supercell storm by dual-and triple-Doppler radar retrieval. Acta Meteor Sinica, 75(5): 757-770 (in Chinese)

刘岩, 王振会, 康凤琴等. 2009. 浙江和甘肃两地区地闪特征的初步对比分析. 高原气象, 28(3): 669-674. Liu Y, Wang Z H, Kang F Q, et al. 2009. Characteristics of cloud-to-ground Flashes in Zhejiang and Gansu areas. Plateau Meteor, 28(3): 669-674 (in Chinese)

罗昌荣, 池艳珍, 周海光. 2012. 双雷达反演台风外围强带状回波风场结构特征研究. 大气科学, 36(2): 247-258. Luo C R, Chi Y Z, Zhou H G. 2012. Characteristics of 3-D wind structure of typhoon outer intensive banded echo using dual-Doppler weather radar data. Chinese J Atmos Sci, 36(2): 247-258 (in Chinese)

田芳, 肖稳安, 冯民学等. 2008. 闪电定位仪观测结果的修订分析. 华东电力, 36(6): 38-42. Tian F, Xiao W A, Feng M X, et al. 2008. Amendment and analysis of observation data for lightning positioning devices. East China Electric Power, 36(6): 38-42 (in Chinese)

王晨曦, 郑栋, 张义军等. 2014. 一次雹暴过程的闪电活动特征及其与雹暴结构的关系. 热带气象学报, 30(6): 1127-1136. Wang C X, Zheng D, Zhang Y J, et al. 2014. Lightning activity and its relationship with the storm structure in a hailstorm. J Trop Meteor, 30(6): 1127-1136 (in Chinese)

王飞, 张义军, 郑栋. 2016. 上升运动核心区与霰粒子非感应起电区关系的模拟研究. 高原气象, 35(3): 834-843. Wang F, Zhang Y J, Zheng D. 2016. Model study of relationship between updraft core and graupel non-inductive charging region. Plateau Meteor, 35(3): 834-843 (in Chinese)

王娟, 谌芸. 2015. 2009-2012 年中国闪电分布特征分析. 气象, 41(2): 160-170. Wang J, Chen Y. 2015. Analysis of the 2009-2012 lightning distribution characteristics in China. Meteor Mon, 41(2): 160-170 (in Chinese)

王叶红, 赵玉春, 罗昌荣等. 2019. 双雷达风场反演拼图在登陆台风“莫兰蒂”(1614)强降水精细预报中的同化应用试验. 气象学报, 77(4): 617-644. Wang Y H, Zhao Y C, Luo C R, et al. 2019. Assimilation experiments for the application of dual-radar retrieval wind mosaics in detailed heavy precipitation forecast produced by landfall typhoon "Meranti" (1614). Acta Meteor Sinica, 77(4): 617-644 (in Chinese)

言穆弘, 刘欣生, 安学敏等. 1996. 雷暴非感应起电机制的模拟研究Ⅱ: 环境因子影响. 高原气象, 15(4): 438-447. Yan M H, Liu X S, An X M, et al. 1996. A simulation study of non-inductive charging mechanism in thunderstorm Ⅱ: Affect of environmental factor. Plateau Meteor, 15(4): 438-447 (in Chinese)

易笑园, 张义军, 沈永海等. 2012. 一次海风锋触发的多单体雹暴及合并过程的观测分析. 气象学报, 70(5): 974-985. Yi X Y, Zhang Y J, Shen Y H, et al. 2012. Observational analysis of a multicell hailstorm triggered by a sea-breeze front and its merging process. Acta Meteor Sinica, 70(5): 974-985 (in Chinese)

郑栋, 张义军, 孟青等. 2010. 一次雹暴的闪电特征和电荷结构演变研究. 气象学报, 68(2): 248-263. Zheng D, Zhang Y J, Meng Q, et al. 2010. Total lightning characteristics and the electric structures evolution in a hailstorm. Acta Meteor Sinica, 68(2): 248-263 (in Chinese)

Bruning E C, MacGorman D R. 2013. Theory and observations of controls on lightning flash size spectra. J Atmos Sci, 70(12): 4012-4029

Calhoun K M, MacGorman D R, Ziegler C L, et al. 2013. Evolution of lightning activity and storm charge relative to dual-doppler analysis of a high-precipitation supercell storm. Mon Wea Rev, 141(7): 2199-2223

Carey L D, Rutledge S A. 1998. Electrical and multiparameter radar observations of a severe hailstorm. J Geophys Res Atmos, 103(D12): 13979-14000

Carey L D, Rutledge S A. 2000. The Relationship between Precipitation and lightning in tropical island convection: A C-band Polarimetric radar study. Mon Wea Rev, 128(8): 2687-2710

Carey L D, Rutledge S A, Petersen W A. 2003a. The relationship between severe storm reports and cloud-to-ground lightning polarity in the contiguous United States from 1989 to 1998. Mon Wea Rev, 131(7): 1211-1228

Carey L D, Rutledge S A. 2003b. Characteristics of cloud-to-ground lightning in severe and nonsevere storms over the central United States from 1989-1998. J Geophys Res Atmos, 108(D15): 4483

Carey L D, Buffalo K M. 2007. Environmental control of cloud-to-ground lightning polarity in severe storms. Mon Wea Rev, 135(4): 1327-1353

Changnon S A. 1992. Temporal and spatial relations between hail and lightning. J Appl Meteor, 31(6): 587-604

Deierling W, Petersen W A. 2008. Total lightning activity as an indicator of updraft characteristics. J Geophys Res Atmos, 113(D16): D16210

DiGangi E A, MacGorman D R, Ziegler C L, et al. 2016. An overview of the 29 May 2012 Kingfisher supercell during DC3. J Geophys Res Atmos, 121(24): 14316-14343

Dotzek N, Rabin R M, Carey L D, et al. 2005. Lightning activity related to satellite and radar observations of a mesoscale convective system over Texas on 7-8 April 2002. Atmos Res, 76(1-4): 127-166

Gauthier M L, Petersen W A, Carey L D, et al. 2006. Relationship between cloud-to-ground lightning and precipitation ice mass: A radar study over Houston. Geophys Res Lett, 33(20): L20803

Houston A L, Wilhelmson R B. 2011. The dependence of storm longevity on the pattern of deep convection initiation in a low-shear environment. Mon

Wea Rev, 139(10): 3125-3138

Liu D X, Feng G L, Wu S J. 2009. The characteristics of cloud-to-ground lightning activity in hailstorms over northern China. Atmos Res, 91(2-4): 459-465

Montanyà J, Soula S, Pineda N. 2007. A study of the total lightning activity in two hailstorms. J Geophys Res Atmos, 112(D13): D13118

Montanyà J, Soula S, Pineda N, et al. 2009. Study of the total lightning activity in a hailstorm. Atmos Res, 91(2-4): 430-437

Petersen W A, Rutledge S A. 2001. Regional variability in tropical convection: Observations from TRMM. J Climate, 14(17): 3566-3586

Pineda N, Rigo T, Montanyà J, et al. 2016. Charge structure analysis of a severe hailstorm with predominantly positive cloud-to-ground lightning. Atmos Res, 178-179: 31-44

Schultz C J, Carey L D, Schultz E V, et al. 2015. Insight into the kinematic and microphysical processes that control lightning jumps. Wea Forecasting, 30(6): 1591-1621

Wang C X, Zheng D, Zhang Y J, et al. 2017. Relationship between lightning activity and vertical airflow characteristics in thunderstorms. Atmos Res, 191: 12-19

Wang F, Zhang Y J, Zheng D, et al. 2015. Impact of the vertical velocity field on charging processes and charge separation in a simulated thunderstorm. J Meteor Res, 29(2): 328-343

Xu S, Zheng D, Wang Y Q, et al. 2016. Characteristics of the two active stages of lightning activity in two hailstorms. J Meteor Res, 30(2): 265-281

Yao W, Zhang Y J, Meng Q, et al. 2013. A comparison of the characteristics of total and cloud-to-ground lightning activities in hailstorms. Acta Meteor Sinica, 27(2): 282-293

Zheng D, MacGorman D R. 2016. Characteristics of flash initiations in a supercell cluster with tornadoes. Atmos Res, 167: 249-264

欢迎订阅 2020 年度《气象学报》

《气象学报》中文版创刊于 1925 年，是由中国气象局主管，中国气象学会主办的全国性大气科学学术期刊，主要刊载有关大气科学及其交叉科学研究的具有创新性的论文；国内外大气科学发展动态的综合评述；新观点、新理论、新技术、新方法的介绍；研究工作简报及重要学术活动报道；优秀大气科学专著的评介以及有关本刊论文的学术讨论等。

《气象学报》中文版 2003 年和 2005 年连续两次荣获中华人民共和国新闻出版总署颁发的第二届、第三届“国家期刊奖百种重点学术期刊”奖；2013 年获“中国出版政府奖期刊奖提名奖”；2013、2015、2017 年入选国家新闻出版广电总局“百强报刊”；2007—2011 年和 2015—2017 年获得中国科学技术协会精品科技期刊工程项目的资助，2008、2011、2014、2017 年被评为“中国精品科技期刊”；2003—2007、2009、2016 年被中国科学技术信息研究所评为“百种中国杰出学术期刊”；2012、2013、2014、2015 年获评“中国最具国际影响力学术期刊”；2016、2017、2018、2019 年获评“中国国际影响力优秀学术期刊”。

《气象学报》为大气科学研究提供了学术交流平台，一直致力于推动中国大气科学基础研究和理论研究的发展，服务于中国气象现代化建设事业。作者和读者对象主要为从事气象、海洋、地理、环境、地球物理、天文、空间及生态等学科的科研人员、高校师生。

《气象学报》中文版为双月刊， 国内外发行。

2020 年全年共 6 期，定价 240 元/年。

邮发代号：2-368（国内） BM329（国际）

通讯地址：北京市中关村南大街 46 号 中国气象学会《气象学报》编辑部

邮政编码：100081

联系电话：010-68406942，68408571（传真）

邮 箱：cmsqxxb@263.net，qxxb@cms1924.org

期刊主页：http://www.cmsjournal.net/qxxb_cn

开户银行：北京建行白石桥支行

户 名：中国气象学会

帐 号：11001028600059261046