

广东一次强飑线过程的地闪变化特征分析

郭青¹ 李源锋¹ 高国靖¹ 郭春辉² 郭志萍³ 曾惠娟¹

(1 梅州市气象局, 梅州 514021; 2 肇庆市气象局, 肇庆 526000; 3 河源市气象局, 河源 517000)

摘要: 利用广东的地闪定位资料、天气雷达资料、卫星资料以及探空资料, 对2014年3月31日广东的一次飑线过程的地闪活动进行分析。重点分析飑线过程地闪活动变化特征以及地闪活动与同期气象观测资料的关系。分析表明: 飑线发展初期, 地闪活动快速增加; 在旺盛阶段, 地闪频数维持较高水平; 减弱阶段, 地闪活动明显减少, 在整个飑线发展过程中, 负地闪活动占主导地位, 正地闪比峰值落后于地闪频数峰值约在1 h出现; 飑线过程单位面积内92.8%的地闪活动发生在组合反射率 > 40 dBz的回波区, 其中组合反射率 > 60 dBz的回波区地闪活动最为活跃; 飑线旺盛阶段, 在雷达图上表现出明显“弓形回波”、速度模糊以及明显的速度辐合等强对流天气特征; TBB亮温 ≤ 220 K区域与闪电活动的密集区域有很好的对应关系; 地闪活动活跃期: 温度露点差垂直分布呈现明显的不稳定层结特性, 在湿度垂直分布主要表现为“上干下湿”型和“湿层深厚”型两个阶段, 飑线的旺盛发展阶段中低空有强的垂直风切变。

关键词: 飑线, 地闪频数, 雷达回波, 正负地闪

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2021.06.007

Analysis on Lightning Activity Characteristic of a Strong Squall Line System in Guangdong

Guo Qing¹, Li Yuanfeng¹, Gao Guojing¹, Guo Chunhui², Guo Zhiping³, Zeng Huijuan¹

(1 Meizhou Municipal Bureau of Meteorology, Meizhou 514021 2 Zhaoqing Municipal Bureau of Meteorology, Zhaoqing 526000 3 Heyuan Municipal Bureau of Meteorology, Heyuan 517000)

Abstract: Based on the cloud-to-ground (CG) lightning location data, weather radar data, satellite data and radiosonde data of Guangdong Province, this paper analyzes the lightning activity of a squall line process in Guangdong Province on 31 March 2014. This paper focuses on the analysis of the variation characteristics of the CG activity in the squall line process and the relationship between the CG activity and the meteorological observation data in the same period. The results show that: in the early stage of squall line development, the CG activity increases rapidly; in the vigorous stage, the CG frequency maintains a high level; in the weakened stage, the CG activity decreases obviously. In the whole squall line development process, the negative CG activity takes the dominant position, and the peak value of positive lightning ratio is about 1h behind the peak value of CG frequency; 92.8% of the CG activity per unit area of squall line process occurred in the echo area with combined reflectivity greater than 40 dBz, and the echo area with combined reflectivity greater than 60 dBz was the most active; In the strong stage of squall line, there are obvious “bow echo”, fuzzy velocity and obvious velocity convergence on radar image; TBB bright temperature lower than 220 K area has a good corresponding relationship with the dense area of lightning activity; the active period of ground lightning activity is usually accompanied by obvious unstable stratification characteristics, mainly including the “upper dry and lower wet” type and the “wet layer deep” type, and there is strong vertical wind shear in the middle and low altitude during the vigorous development stage of squall line.

Keywords: squall line, frequency of CG, radar echo, positive and negative lightning

0 引言

飑线通常有若干排列成行的雷暴单体或雷暴群组成, 是风向、风速发生突变的、狭窄的强对流天气带。飑线上的雷暴通常由若干个雷暴单体组成, 少则四五个, 多则十几二十个, 由于发展有先后, 所以飑

线比个别雷暴单体带来的天气变化更为剧烈, 常伴随着强风、雷暴甚至冰雹等灾害性天气^[1-2]。

近年来, 国内外学者对飑线的产生机理开展大量研究工作, 取得了丰富的成果。赖悦等^[3]、尹丽云等^[4]分析了飑线过程的闪电特性; 一些学者^[5-11]研究分析了飑线过程的雷达回波特性; 刘娟等^[12]、李哲等^[13]、李娜等^[14]分析了不同地区飑线天气诊断分析以及数值模拟。Cetrone等^[15]通过分析西非地区的几次飑线过程, 分析表明闪电活动和雷达回波强度有明显的相关

收稿日期: 2020年6月11日; 修回日期: 2020年7月5日
第一作者: 郭青(1985—), Email: guoq85mz@aliyun.com
资助信息: 广东省气象局科学技术研究项目(GRMC2017M36)

性; Newton^[16]发现飚线出现环境条件通常表征为: 强的垂直风切变, 并且对流层中下层水汽旺盛。本文运用相关气象资料对广东一次飚线过程的地闪活动进行分析, 通过分析地闪频数和相关气象资料的关系, 以期探寻地闪活动对强对流天气的指示作用, 旨在为本地区强对流天气的雷电预警预报工作提供技术参考。

1 资料来源及分析方法

本文采用2014年3月30—31日的地闪定位数据来源于广东电力系统闪电定位系统; 天气雷达资料来源于肇庆市天气雷达站, 观测时间间隔为6 min; 探空资料来源于河源市气象局东源探空站(站号: 59293); 气象卫星资料中FY-2E卫星的云顶亮温资料(TBB)来源于国家卫星气象中心的风云卫星遥感数据服务网; 其他气象观测资料来源于广东省气象局业务网。

本文主要采用数理统计的分析方法, 对2014年3月31日03—11时广东的一次飚线过程地闪数据与同期的气象观测数据进行统计分析, 得到了飚线过程的地闪变化特征并分析。本文统计雷达、卫星观测时刻同时发生的闪电频数时, 将雷达观测时间后6 min、卫星观测后1 h发生的闪电定义为该定位时间飚线过程同时发生的闪电。

2 飚线过程的地闪特征

受高空槽东移和低涡切变线南压影响, 广东地区受西南暖湿气流控制, 加之高空急流一直在本地区维持。良好的热力和动力条件, 不断诱发小尺度扰动的产生, 进而促使飚线系统的产生以及发展。2014年3月31日03—11时广东地区出现了飚线天气过程, 期间出现气压涌升、气温骤降、湿度增大以及风速急增等天气现象, 发生了大范围的强对流天气过程。此次过程对流活动持续时间长, 将近8 h; 影响范围广, 几乎横扫整个广东。飚线过程共监测到地闪频数为209575 fl (fl为flashes的简写, 表示闪电频数), 其中负地闪为161170 fl, 正地闪为48405 fl, 正地闪比为23.1%, 远高于赖悦等^[3]研究得到的正地闪仅占总地闪频数6.8%, 远低于Feng等^[17]研究得到正地闪频数占总地闪频数一半以上的结论。由此可见, 不同地区不同系统的地闪活动差异很大。

图1为飚线过程地闪频数随时间的变化, 可以看出: 在飚线初始发展阶段(03—04时): 总的地闪频数快速增长, 平均地闪频数为1954 fl·6 min⁻¹, 其中负地闪频数的增长速率远大于正地闪频数, 正地闪比变化相对平缓, 整个阶段负地闪占比超过90%。04: 00—07: 30为飚线的旺盛发展阶段, 地闪频数

一直维持较高水平, 呈“窄幅震荡增长”趋势, 平均地闪频数达到3147 fl·6 min⁻¹, 期间总的地闪频数以及负地闪频数均于07: 12达到最大值, 依次为4178 fl·6 min⁻¹、2969 fl·6 min⁻¹, 平均正地闪占比为22.95%。07: 30以后为飚线的减弱消亡阶段, 地闪频数虽偶尔有震荡增加现象, 但总体趋势呈明显减少, 平均地闪频数为2219 fl·6 min⁻¹, 负地闪频数减少速率远快于正地闪频数; 平均正地闪比达到24.14%, 正地闪比峰值于08: 18达到最大值36.68%, 落后地闪频数峰值约1 h。

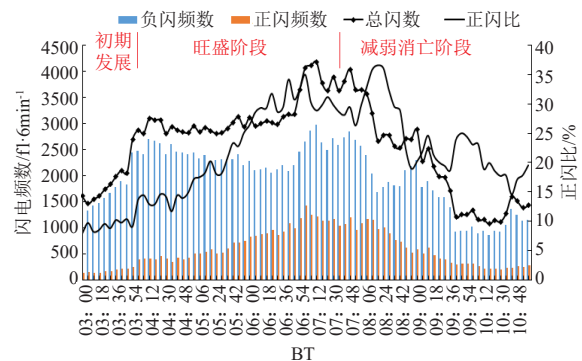


图1 2014年3月31日飚线过程地闪频数随时间的变化
Fig. 1 Variation of ground flash frequency with time in squall line process on 31 March 2014

3 地闪特征与相关气象资料关系

3.1 地闪特征与天气雷达资料关系

雷达组合反射率通常用来表征云内大粒子(如冰晶、大的过冷水滴等)分布特性, 通常组合反射率越大, 说明云内大粒子的密度越大, 进而越容易发生碰并产生闪电活动。

本文将飚线过程雷达观测范围300 km内, 每6 min地闪与雷达组合反射率格点对应叠加, 统计出单位面积在不同组合反射率区间对应的地闪频数百分比(图2)。从图2可以看出: 92.8%的地闪活动发生在组合反射率大于40 dBz的回波区(即组合反射率大于40 dBz范围内对应的地闪频数占92.8%), 其中组合反射率大于60 dBz的回波区地闪活动最为活跃, 出现了58.8%的地闪活动。组合反射率小于40 dBz的弱回波区地闪活动较少。结合图3a可知, 组合反射率小于40 dBz的弱回波区面积最大, 但由于其对流不够旺盛、回波顶高度不高, 因而地闪活动相对较少; 而大于40 dBz区间回波顶高度较高, 闪电活跃, 因此闪电活动百分比高; 特别是60 dBz以上的回波区面积很小, 加之对流极为旺盛, 因此其单位面积的闪电频数百分比最高。地闪活动分布特征与雷达强回波区域有较好的对应关系, 且地闪活动密集区域与回波顶的最

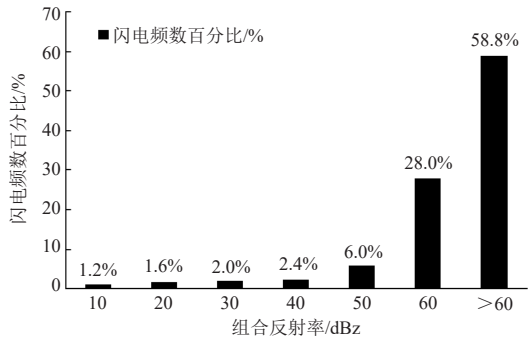


图2 地闪频数与组合反射率统计

Fig. 2 Statistics of ground flash frequency and combined reflectivity

大高度相对应。

在飑线旺盛阶段，在雷达组合反射率图上有明显的“弓形”回波（图3a），水平尺度达到300 km以上，强回波中心强度大于60 dBz；沿几个强回波中心得到垂直剖面图（图3b）可知，对流发展高度较高，最大回波顶高度大于15 km，强回波中心在7~8 km位置，有悬垂结构；由图3c可知，在强回波顶点位置的偏北风与偏南风形成明显的强辐合，速度达到43 m/s，在速度图上有速度模糊现象；由图3d可知，飑线系统的垂直液态含水量为45~50 kg/m²。由此可见，飑线旺盛阶段，雷达图上表现出明显“弓形回

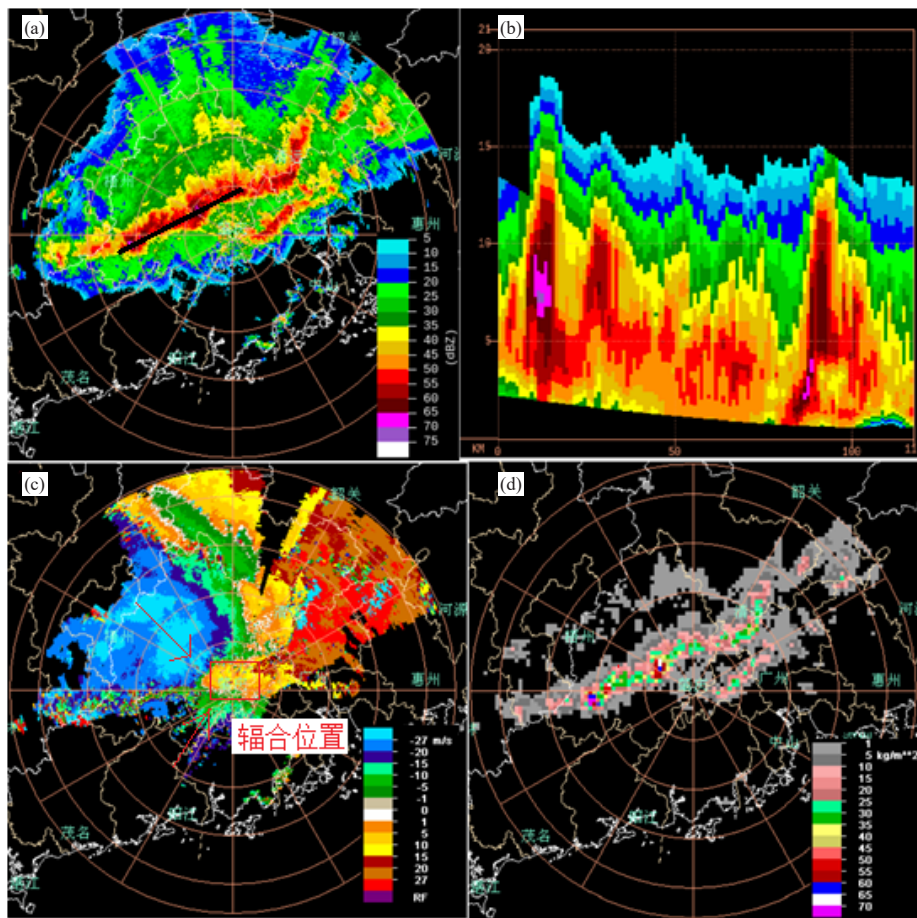


图3 2014年3月31日06:24飑线旺盛阶段雷达图(北京时,下同)

(a) 组合反射率; (b) 沿图3a黑色线垂直剖面; (c) 1.5°仰角速度; (d) 垂直液态含水量

Fig. 3 Radar chart of squall line in vigorous stage at 06:24 BT 31 March 2014

(a) combined reflectivity, (b) vertical section along black line in Fig. 3a, (c) 1.5° elevation velocity, (d) vertical liquid water content

波”、速度模糊以及明显的速度辐合等强对流天气特征，这一阶段刚好与着密集的闪电活动相对应。

3.2 地闪特征与卫星资料的关系

许多学者研究表明微波亮温的高低与云内粒子散射能力强弱密切相关^[18]，云内粒子的散射能力强

弱与地闪活动活跃程度相对应。一般而言，云内粒子散射能力越强，微波亮温就越低。本文FY-2E卫星微波亮温以及同期广东地区地闪活动空间分布对比分析发现，31日03:00 TBB亮温≤220 K区域主要出现在广西境内，在广东境内则出现在韶关与河源

交界区域(图4a),而同期这两个区域出现了密集的地闪活动(图5a),特别是在广西境内地闪活动异常活跃;31日05:00 TBB亮温 ≤ 220 K区域向东移动到了广西与广东的交界区域(图4b);07:00 TBB亮温 ≤ 220 K区域整体移入广东境内,几乎覆盖了整个广东中部以及北部(图4c);由图4d可知,11:00 TBB亮温 ≤ 220 K区域随着飊线减弱向东移动到了珠江口区域。结合同期广东地区地闪活动空间分布特性不难发现,TBB亮温 ≤ 220 K区域与闪电活动的密集区域有很好的对应关系。

3.3 地闪特征与探空资料的关系

图6为东源站30日19时—31日19时($T-T_d$)垂直分布曲线以及湿度垂直廓线,由图6a可知,30日19时、31日07时的东源站温度廓线($T-T_d < 5^\circ\text{C}$)贯穿整个对流层,呈明显的不稳定层结特征;由图6b可知,30日19时初步呈现“上干下湿”特征,中低层湿度趋于饱和,平均相对湿度大于90%,高层比较干冷,平均相对湿度70%左右,有利于对流活动的发展;31日07时整个对流层“湿层深厚”特征特别明显,整个对流层湿度近于饱和,平均相对湿度均大于90%,对流活动异常旺盛,极易造成闪电活动活跃;同日19时对流层中上层湿度趋于干燥,对流层不稳定层结特征不明显,对流活动减弱,闪电活动随着减少。

环境风的垂直风切变是指水平风(含风速大小以及风的方向)随高度变化。公式为 $S = \sqrt{(u_1 - u_0)^2 + (v_1 - v_0)^2}$,式中: S 表示垂直风切变,

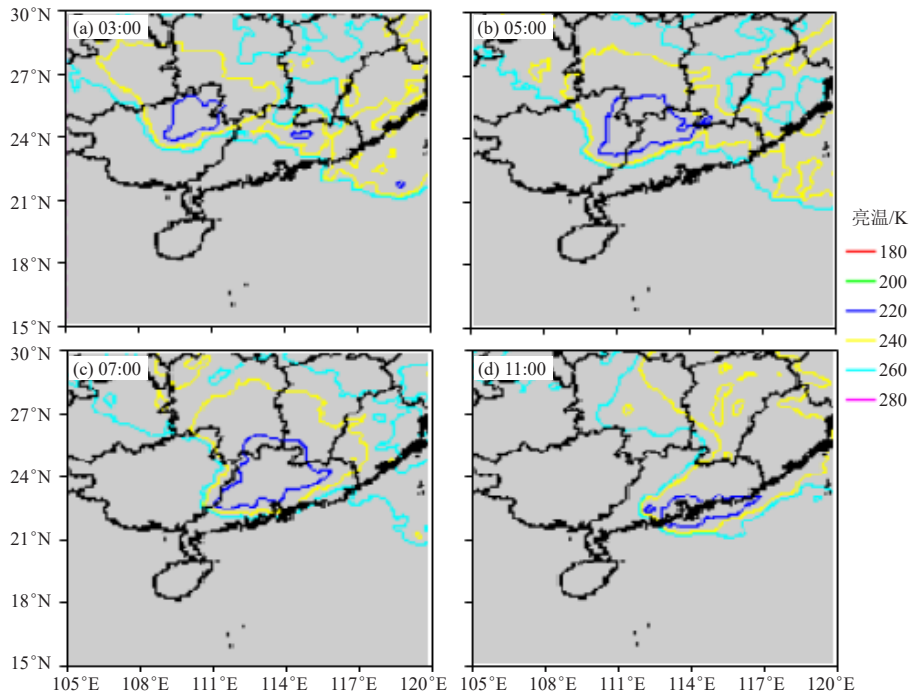


图4 2014年3月31日FY-2E卫星微波亮温度

Fig. 4 Cloud top brightness temperature of FY-2E satellite on 31 March 2014

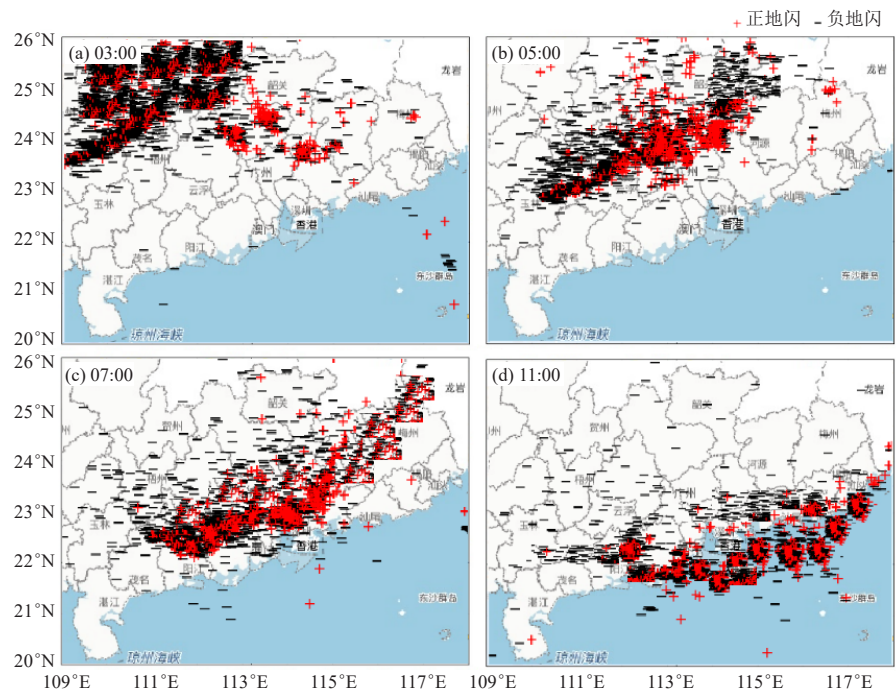


图5 2014年3月31日广东地区地闪活动空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of lightning activity in Guangdong on 31 March 2014

($u_1 - u_0$)、($v_1 - v_0$)分别表征某一高度风的分量以及近地面风的分量,本文近地面风取1000 hPa处风的分量。

由此得到30日19时、31日07时及19时环境风的垂直风切变曲线(图6c),由图可知,在700 hPa以下:飊线初期发展阶段,中低空垂直风切变不

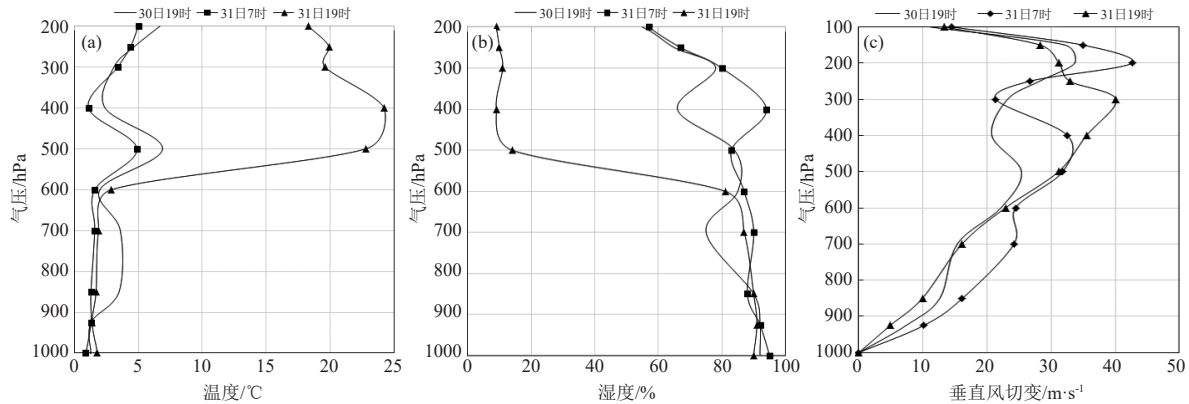


图6 2014年3月30—31日东源站探空站温度露点差(a)、湿度(b)、垂直风切变(c)垂直分布

Fig. 6 Vertical distribution of temperature and dew point difference (a), humidity (b), vertical wind shear (c) of Dongyuan station from 30 to 31 March 2014

断加强, 30日19时850 hPa相对地面垂直风切变为12.6 m/s; 飑线的旺盛发展阶段(31日07时)垂直风切变最强, 850 hPa相对地面垂直风切变为16.1 m/s; 飑线减弱消亡阶段, 垂直风切变明显减弱, 31日19时850 hPa垂直风切变仅为9.9 m/s。

综上所述, 飑线过程对流层层结不稳定加之中低层强的垂直风切变, 有利于水汽上升, 形成旺盛的对流活动, 进而发生剧烈的闪电活动。

4 结论

本文利用广东的地闪定位资料、天气雷达资料、卫星资料以及探空资料, 对2014年3月31日广东的一次飑线过程的地闪活动进行了分析, 结果表明:

1) 飑线发展初期, 地闪活动快速增加; 在旺盛阶段, 地闪频数维持较高水平; 减弱阶段, 地闪活动明显减少, 在整个飑线发展过程中, 负地闪活动占主导地位, 正地闪比峰值落后于地闪频数峰值约1 h出现;

2) 飑线过程单位面积内92.8%的地闪活动发生在组合反射率大于40 dBz的回波区, 其中组合反射率大于60 dBz的回波区地闪活动最为活跃; 飑线旺盛阶段, 在雷达图上表现出明显“弓形回波”、速度模糊以及明显的速度辐合等强对流天气特征。

3) TBB亮温 ≤ 220 K区域与闪电活动的密集区域有很好的对应关系; 地闪活动活跃期通常伴有明显的不稳定层结特性, 湿度垂直分布呈现出“上干下湿”型和“湿层深厚”型两个阶段; 飑线的旺盛发展阶段中低空有强的垂直风切变。

本文对飑线过程地闪活动与不同尺度气象资料的相关分析, 基于有限的资料分析得出, 具有一定的

局限性, 有待于今后采集更多的个例做深入的分析研究。

参考文献

- [1] 郗秀书, 张其林, 袁铁, 等. 雷电物理学. 北京: 科学出版社, 2013: 192-196.
- [2] 张培昌, 杜秉玉, 戴铁丕, 等. 雷达气象学. 北京: 气象出版社, 2011: 411-416.
- [3] 赖悦, 张其林, 陈洪滨, 等. 深圳一次强飑线过程的闪电频数与天气雷达回波关系分析. 热带气象学报, 2015, 31(4): 549-558.
- [4] 尹丽云, 张杰, 张腾飞, 等. 低纬高原一次飑线过程的地闪演变特征分析. 高原气象, 2012, 31(4): 1100-1109.
- [5] 缪子青, 何宏让, 张云, 等. 一次飑线过程雷达回波特征及环境条件分析. 气象科学, 2016, 36(1): 71-79.
- [6] 潘玉洁, 赵坤, 潘益农. 一次强飑线内强降水超级单体风暴的多普勒雷达分析. 气象学报, 2008, 66(4): 621-636.
- [7] 牟容, 余君, 张亚萍, 等. 一次飑线过程的雷达回波分析及其反演风场研究. 气象科学, 2012, 32(2): 153-159.
- [8] 丁治英, 夏良, 高松, 等. 一次飑线过程中雷达回波的组织结构变化及成因分析. 热带气象学报, 2017, 33(5): 323-333.
- [9] 曹倩, 张述文, 曹帮军, 等. 超强不稳定和弱切变环境下一次飑线过程的雷达资料同化与分析. 热带气象学报, 2016, 32(5): 645-655.
- [10] 刁秀广, 孟宪贵, 万明波, 等. 源于飑线前期和强降雨带后期的弓形回波雷达产品特征及预警. 高原气象, 2015, 34(5): 1486-1494.
- [11] 段鹤, 严华生, 王晓君, 等. 滇南飑线的发生环境及其多普勒雷达回波特征. 热带气象学报, 2012, 28(1): 68-76.
- [12] 刘娟, 周昌云, 曹乃和, 等. 如皋一次罕见的飑线天气过程. 气象科学, 2010, 30(4): 564-568.
- [13] 李哲, 李国翠, 刘黎平, 等. 飑线优化识别及雷暴大风分析. 高原气象, 2017, 36(3): 801-810.
- [14] 李娜, 冉令坤, 高守亭. 华东地区一次飑线过程的数值模拟与诊断分析. 大气科学, 2013, 37(3): 595-608.
- [15] Cetrone J, Houze Jr R A. Leading and trailing anvil clouds of west African squall lines. Journal of the Atmospheric Sciences, 2011, 68(5): 1114-1123.
- [16] Newton C W. Severe convective storms. Advances in Geophysics, 1967, 12: 257-308.
- [17] Feng G, Qie X, Wang J, et al. Lightning and Doppler radar observations of a squall line system. Atmospheric Research, 2009, 91(2-4): 466-478.
- [18] 张文娟. 热带气旋闪电活动特征及其与气旋特性演变的关系研究. 北京: 中国科学院大学, 2013.