

孙凌, 陈志雄, 徐燕, 等. 2019. 北京一次强飚线过程的闪电辐射源演变特征及其与对流区域和地面热力条件的关系 [J]. 大气科学, 43(4): 759–772. Sun Ling, Chen Zhixiong, Xu Yan, et al. 2019. Evolution of lightning radiation sources of a strong squall line over Beijing metropolitan region and its relation to convection region and surface thermodynamic condition [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 43(4): 759–772. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1805.18128

# 北京一次强飚线过程的闪电辐射源演变特征及其与对流区域和地面热力条件的关系

孙凌<sup>1,2,5</sup> 陈志雄<sup>1,2</sup> 徐燕<sup>1</sup> 孙竹玲<sup>1</sup> 袁善锋<sup>1,2</sup> 王东方<sup>1,2</sup>  
田野<sup>1,4</sup> 徐文静<sup>1,2,3</sup> 郟秀书<sup>1,2</sup>

1 中国科学院大气物理研究所中层大气与全球环境探测重点实验室, 北京 100029

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 中国气象局北京城市气象研究所, 北京 100089

4 北京市气象探测中心, 北京 100176

5 成都信息工程大学, 成都 610225

**摘要** 利用2015年夏季北京闪电综合探测(BLNET)总闪辐射源定位、多普勒天气雷达、地面自动气象站和探空资料等多种协同观测资料,详细分析了2015年8月7日北京一次强飚线过程不同阶段的闪电特征,并探讨了闪电与对流区域和地面热力条件之间的关系。飚线过程整体上以云闪为主,根据雷达回波和闪电频数可以将飚线过程分为发展、增强及减弱三个阶段。发展阶段表现为多个孤立的 $\gamma$ 中尺度对流降水单体,随着北京城区降水单体的迅速发展,强回波顶高延伸到 $-20^{\circ}\text{C}$ 温度层高度,闪电辐射源高度也逐步增加,闪电明显增多,但总闪电频数整体低于80次/min。增强阶段单体合并,闪电频数快速增长, $0^{\circ}\text{C}$ 层以上及以下的强回波( $>40\text{ dBZ}$ )体积明显增大,飚线形成后,总闪和地闪均达到峰值,分别约248次/min和18次/min,负地闪占总地闪比例为90%,辐射源主要分布在线状对流降水区内,辐射源数量峰值出现在5~9 km高度层。减弱阶段飚线主体下降到 $0^{\circ}\text{C}$ 以下并迅速衰减,辐射源分布明显向后部层云降水区倾斜。95%的闪电发生在对流线附近10 km范围内,即对流云区和过渡区。在系统发展和增强阶段,对流云区与层云区辐射源的活跃时段基本一致;系统减弱阶段,对流降水云区辐射源数量迅速减少。在系统的不同发展阶段,闪电活跃区域对应于冷池流出同平原暖湿气流在近地面形成的相当位温强梯度带内。

**关键词** 飚线 闪电辐射源 雷达回波 相当位温 对流云区

文章编号 1006-9895(2019)04-0759-14

中图分类号 P446

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1805.18128

## Evolution of Lightning Radiation Sources of a Strong Squall Line over Beijing Metropolitan Region and Its Relation to Convection Region and Surface Thermodynamic Condition

SUN Ling<sup>1,2,5</sup>, CHEN Zhixiong<sup>1,2</sup>, XU Yan<sup>1</sup>, SUN Zhuling<sup>1</sup>, YUAN Shanfeng<sup>1,2</sup>,  
WANG Dongfang<sup>1,2</sup>, TIAN Ye<sup>1,4</sup>, XU Wenjing<sup>1,2,3</sup>, and QIE Xiushu<sup>1,2</sup>

1 Key Laboratory of Middle Atmosphere and Global Environment Observation, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of

收稿日期 2018-02-10; 网络预出版日期 2018-07-25

作者简介 孙凌,女,1983年出生,博士研究生,主要从事中尺度数值模拟和闪电资料分析。E-mail: sunling@mail.iap.ac.cn

通讯作者 孙竹玲, E-mail: sunzhuling@mail.iap.ac.cn

资助项目 国家自然科学基金项目41475002、41630425,国家重点基础研究发展计划(973计划)项目2014CB441401

Found by National Natural Science Foundation of China (Grants 41475002, 41630425), National Basic Research Program of China (973 Program, Grant 2014CB441401)

Sciences, Beijing 100029

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

3 Institute of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100089

4 Beijing Municipal Meteorological Observation Center, Beijing 100176

5 Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225

**Abstract** Based on the data obtained from the 2015 summer campaign in Beijing area, including the total lightning location data from Beijing Lightning Network (BLNET), S-band Doppler radar data, ground-based automatic weather stations observations and radiosonde data, the evolution of lightning activities during a severe squall line process that occurred over Beijing metropolitan region on 7 August 2015 was analyzed. Its relation to convection region and surface thermodynamic condition was also discussed. According to radar echoes and lightning occurrence frequency, the whole squall line process can be divided into three stages (developing, intensifying and weakening), and the intra-cloud (IC) lightning flashes predominated during all the three stages in general. In the developing stage, several isolated  $\gamma$  mesoscale convective cells rapidly developed. With the echo top of the storm cell over Beijing metropolitan region extending to  $-20^{\circ}\text{C}$  level, lightning activities significantly increased, and the lightning radiation sources gradually spread to upper altitudes, but lightning rate was still less than 80 flashes/min for the whole system. In the intensifying stage, the flash rate increased rapidly, which was associated with the merging process of the cells. When the squall line formed, the volume of strong radar echoes ( $>40$  dBZ) increased significantly for both above and below  $0^{\circ}\text{C}$  levels, and the total flash and cloud-to-ground (CG) flash peaked with rates of 248 flashes/min and 18 flashes/min, respectively. Negative CG flashes accounted for 90% of the total CG flashes. The lightning radiation sources were mainly detected in the linear convection area, and the number of radiation sources peaked within the layer of 5–9 km. In the weakening stage, the core of the squall line dropped below  $0^{\circ}\text{C}$  level and quickly decayed, with the radiation sources obviously sloping backward to the area of stratiform clouds. About 95% of total flashes occurred within 10 km of the convective line, namely the convection and transition region. During intensifying and weakening stages, radiation sources reached active period simultaneously in the convection and stratiform region, while during the weakening stage, radiation sources in the convection region declined abruptly in the number. Lightning flashes mainly occurred over regions with strong surface equivalent potential temperature gradient induced by the outflow of convective cold pool and the relatively warm moist airmass from the plain.

**Keywords** Squall line, Lightning radiation source, Radar reflectivity, Equivalent potential temperature, Convection region

## 1 引言

飊线过程是一种典型的强对流灾害性天气,由几个到十几个强对流单体集合排列成带状结构,宽度长达上百公里,持续时间可达几小时到十几小时。伴随飊线产生的短时强降水、冰雹、大风、闪电等灾害性天气严重影响城市正常运行秩序。在特大城市区域,飊线系统产生的大风、暴雨和雷击事件所带来的危害可被成倍放大。

飊线系统内的闪电活动与对流发展有密切关系 (MacGorman et al., 1989; Carey and Rutledge, 1996; 刘冬霞等, 2008; Schultz et al., 2017)。Carey et al. (2005) 对一次飊线系统的闪电活动分析发现了前部对流线内的云闪延伸结构,同时还指出闪电辐射源在对流线内呈现出双层的结构分布且

从对流云区向层状云区倾斜。Dotzek et al. (2005) 发现飊线发展阶段正地闪多发生于 V-型云顶的周围以及龙卷风的北侧一带,而成熟阶段则在对流前缘线的后部存在两层主要的放电区域和一个向层状云区倾斜的上部放电区。Feng et al. (2009) 对山东一次飊线过程的闪电活动进行分析发现,飊线过程的正地闪超过了负地闪,正地闪发生在线状对流区,负地闪发生在层状云区,正地闪并不对应于主上升气流区,而是紧邻上升气流区的后部。袁铁和郗秀书 (2010) 利用 TRMM/LIS 闪电资料对华南一次飊线的闪电活动及其与降水结构的关系进行研究,发现在 6 km 高度上闪电发生附近的最大雷达反射率因子主要集中在 35~50 dBZ,绝大多数闪电发生在低于 200 K 的亮温区。刘冬霞等 (2010) 分析华北一次飊线过程发现在低于  $-40^{\circ}\text{C}$  的温度区

域内地闪分布较多，负地闪密集地分布在大于 40 dBZ 的回波范围内，而正地闪则稀疏地分布在 30~40 dBZ 的回波范围内。刘冬霞等（2013）对北京地区一次飏线过程的分析发现，闪电与对流降水整体存在较好的相关，在飏线成熟阶段，闪电辐射源密度的分布呈现出双层结构特征。易笑园等（2013）发现在飏线对流单体合并后，闪电频数陡增并对应降水强度增大，对灾害天气的预警具有积极意义。徐燕等（2018）根据 VDRAS (Variational Doppler Radar Analysis System) 反演的动力场分析发现，飏线对流云单体合并后闪电活动的陡增与上升气流的强度和范围的增加有关，频繁的闪电活动主要发生在具有较强垂直风切变的区域。目前针对我国飏线内闪电活动特征的研究有一定的进展，对飏线的形成机理和动力特征也开展了大量研究（刘黎平等，2007；张进和谈哲敏，2008；孙虎林等，2011；Meng et al., 2012；李娜等，2013；刘佳等，2013；孙建华等，2014；张建军等，2016；张哲等，2016；周围等，2018），但是针对飏线系统内总闪电活动以及闪电同动力、热力结构的相关分析研究还较少，特别是针对飏线系统不同发展阶段的全闪辐射源三维发展特征的研究更少。

受东北冷涡和台风带来的低层暖湿气流影响，2015 年 8 月 7 日北京地区午后爆发了一次强烈的飏线过程，在北京城区持续约 6 小时。飏线系统自西北向东南移动，在北京中部发展成熟，降水主要集中在北京中部，最大降水量 81.7 mm，造成城区多处积水。飏线系统还产生了剧烈的闪电活动以及大风、冰雹等灾害性天气，总闪电频数最大值达到 248 次/min，首都机场延误或取消航班上千架次，多条公交线路受到影响，严重影响了城市秩序，是近年来京津冀地区最强、影响最大的飏线过程之一。北京闪电综合探测网 (Beijing Lightning Network, 简称 BLNET) 完整探测到了此次飏线过程的闪电活动，并可给出闪电辐射源发生发展的三维空间位置。本文基于 BLNET、多普勒雷达以及北京自动气象站等观测资料，详细分析了这次飏线过程中的闪电活动和雷达回波特征，并对闪电活动与地面热动力特征的关系进行综合研究，由此了解飏线系统内不同发展阶段、不同区域内闪电活动的差异，以及闪电发生的环境条件，为高影响天气的预警预报、防灾减灾提供科学依据。

## 2 资料介绍

本文所用资料来自国家“973”项目“雷电重大灾害天气系统的动力—微物理—电过程和成灾机理 2015 年夏季北京协同观测资料（简称“雷暴 973”）”，主要包括：BLNET 的全闪二维与三维定位资料，北京 SA 型多普勒雷达反射率资料和自动气象观测站资料。

BLNET 是一个区域性的、多频段的闪电综合探测和定位网，能同时对地闪和云闪辐射脉冲进行探测和三维定位（王宇等，2015；Wang et al., 2016）。2015 年以来，BLNET 共建有 16 个观测子站，整个探测网南北跨度约为 120 km，东西跨度约 110 km，基本覆盖了整个北京区域和河北、天津部分地区。每个子站均布设有快电场变化测量仪（也称快天线），部分测站还架设了低频磁天线探测仪和闪电甚高频（VHF）辐射探测仪。定位系统将探测到的各个闪电辐射脉冲自动识别为地闪回击脉冲和云闪脉冲，通过提取并分析脉冲的电磁波到达各测站的时间信息，利用时间差法计算得到脉冲的发生时刻和空间位置。BLNET 对云闪、地闪及总闪的探测效率分别达到了 97.4%、73.9% 以及 93.2%（Srivastava et al., 2017）。通过对 2014 年、2016 年击中大气物理研究所 325 m 气象铁塔的两次闪电分析，发现 BLNET 对这两次闪电的水平定位误差为 250 m 和 52.9 m（Srivastava et al., 2017）。BLNET 的闪电二维定位资料包括辐射脉冲发生的时间、经度、纬度及脉冲类型等，三维定位资料除了这些信息外，还包括脉冲发生的高度。通常一个闪电包含多个辐射源定位结果，本文参考 Srivastava et al. (2017) 的方法，将发生时间小于 400 ms 且水平距离小于 15 km 内的辐射源认为是同一个闪电，并以第一个辐射源定位结果作为该次闪电的定位结果，且如果一个闪电的辐射源既包括地闪脉冲，又包括云闪脉冲，则以第一次地闪脉冲定位结果作为本次闪电的定位结果。

雷达资料来自北京南苑 (39.81°N, 116.47°E) S 波段多普勒天气雷达，扫描半径为 230 km，体扫周期为 6 min。自动气象观测站测量的大气基本要素包括地面气压、温度、风速、风向和降水，截止到 2012 年底，北京市气象局布设 295 套自动气象站，在城区达到了约 3 km 分辨率，具有高精度、高时空分辨率等优点，这些为精细化研究雷暴过程

的热动力条件提供了重要的观测数据。

### 3 结果分析

#### 3.1 天气背景

图1为2015年8月7日飊线过程当天08:00(北京时间,下同)的天气形势图,可以看出,受500 hPa东北冷涡影响,高空槽从低涡中心延伸到河套平原一带,而低涡西南侧有一个冷中心位于蒙古国境内,槽后的西北气流经过该冷中心,带来强烈的冷平流侵袭内蒙古中部,而北京处在槽前较低位置,西风气流较为平直,冷平流较弱;850 hPa台风苏罗迪带来的暖湿气流沿着太行山流动,形成一条明显的湿舌,覆盖山西省并延伸到北京西部,北京地区比湿大于 $11 \text{ g kg}^{-1}$ ,这股西南气流和东北低涡后部干冷的西北气流在北京北部汇合。

图2给出了北京南苑气象观测站08:00和14:00的探空廓线。08:00探空图上低层1000~850 hPa维持西南气流,850 hPa附近存在明显的逆温稳定层结,西南气流带来的水汽不断积聚导致850 hPa以下露点温度差很小,相对湿度很大,地面比湿在 $18 \text{ g kg}^{-1}$ 左右,水汽充沛,抬升凝结高度为988 hPa,高度较低,对流有效位能CAPE(Convective Available Potential Energy)值达到 $2232 \text{ J kg}^{-1}$ ,属于中等强度。而此时,从图2a上可以看出对流抑制能量CIN(Convective Inhibition)很小

( $-6 \text{ J kg}^{-1}$ ),700 hPa附近风速不变,风向随高度逆转,表明有弱的冷平流活动,干冷空气侵入使得600~400 hPa之间露点温度差明显增大,中高层大气偏干,平衡高度位于250 hPa(约11 km),容易产生深对流。14:00,低层水汽条件依然十分充足,而300 hPa附近明显变干,中高层大气偏干的趋势更为显著;低层大气受太阳短波辐射加热明显升温,相对湿度有所降低,但是比湿保持不变,逆温层结依然存在,但高度有所降低,逆温层自下向上,风向呈现先顺转再逆转的变化,表明这一高度附近风切变较大,逆温层结以下依然为湿层,抬升凝结高度接近900 hPa,平衡高度接近200 hPa(12 km左右),CAPE值达到 $3317 \text{ J kg}^{-1}$ ,CIN依然很小。综合来看,低层台风水汽的输入和高层低涡后部弱的冷平流入侵造成了北京上空存在上干下湿的结构,逆温层结维持时间较长,不稳定能量在逆温层结的作用下不断积聚,大气的的不稳定性逐步增强,触发了此次飊线过程。

#### 3.2 飊线系统的闪电活动演变概况

图3给出了此次飊线系统整个生命史期间不同类型闪电频数随时间的演变,16:00开始探测到闪电,但频数较小,这些闪电主要由位于北京西北边界上的雷暴云产生,北京区域内还未探测到明显的对流活动。随着西北侧山区的雷暴云向东南方向移动进入平原,受其底部冷池出流影响,多个孤立的

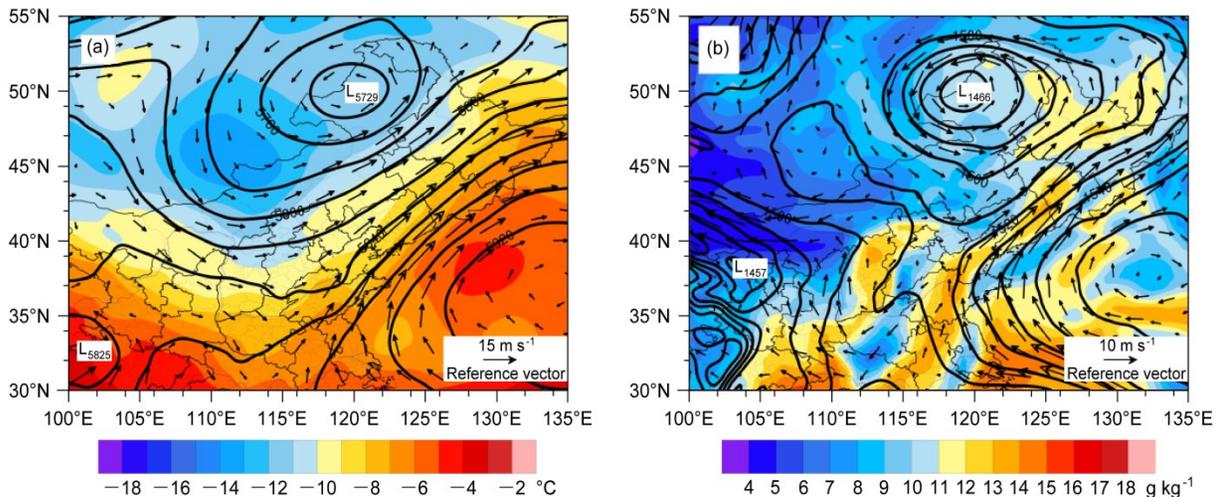


图1 2015年8月7日08:00 (a) 500 hPa位势高度(黑色实线,单位:gpm)、温度(填色,单位:°C)、风矢量(箭头,单位: $\text{m s}^{-1}$ ), (b) 850 hPa位势高度(黑色实线,单位:gpm)、比湿(填色,单位: $\text{g kg}^{-1}$ )、风矢量(箭头,单位: $\text{m s}^{-1}$ )

Fig. 1 (a) 500-hPa geopotential height (black contours, units: gpm), temperature (shadings, units: °C), and wind vectors (arrows, units:  $\text{m s}^{-1}$ ), (b) 850-hPa geopotential height (black contours, units: gpm), specific humidity (shadings, units:  $\text{g kg}^{-1}$ ), and wind vectors (arrows, units:  $\text{m s}^{-1}$ ) at 0800 BJT (Beijing time) 7 August 2015

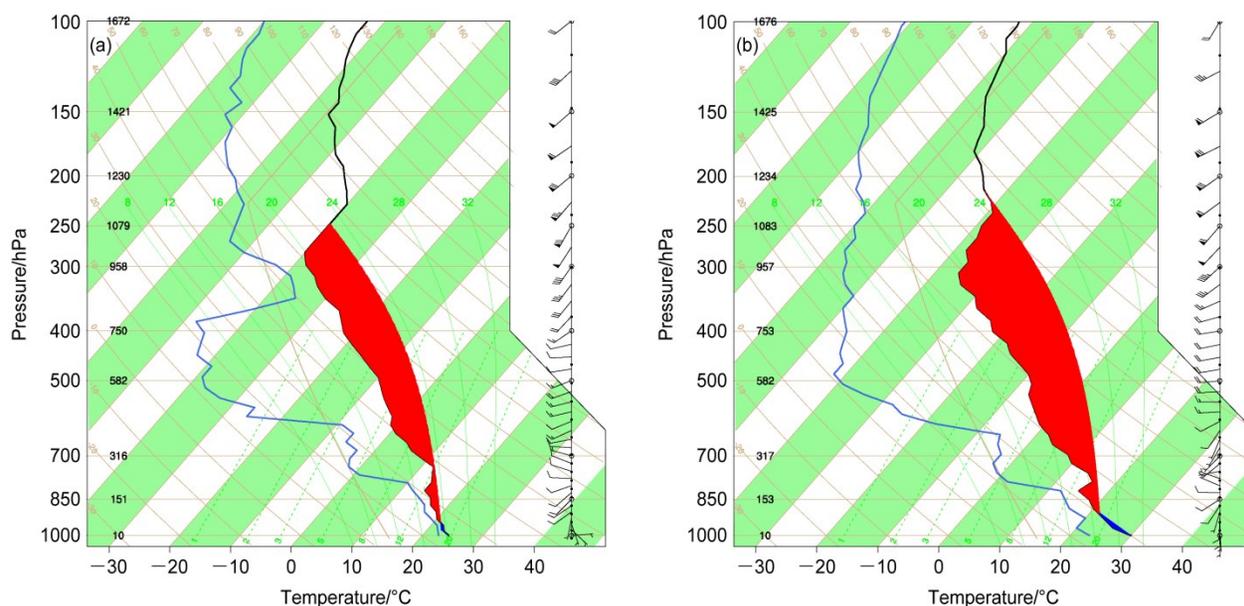


图2 2015年8月7日北京南苑气象观测站探空廓线：(a) 08:00；(b) 14:00。红（蓝）色阴影为CAPE（CIN）的值，单位： $J kg^{-1}$ ；黑（蓝）线为温度（露点温度）廓线，单位： $^{\circ}C$

Fig. 2 Sounding profiles at Nanyuan observatory at (a) 0800 BJT and (b) 1400 BJT on 7 August 2015. Red and blue shadings represent values of CAPE (Convective Available Potential Energy) and CIN (Convective Inhibition), respectively, units:  $J kg^{-1}$ ; black (blue) lines indicate temperature (dew point temperature) profile, units:  $^{\circ}C$

$\gamma$ 中尺度对流降水单体开始在北京西北部和城区不断触发并且迅速发展，单体间发生合并，对流系统的组织性不断增强，与此相对应，17:00~19:30这个时段内闪电频数增加，并且在19:06达到峰值，总闪电频数最大达到了248次/min。19:30飚线在北京东南边境上形成后，系统内的闪电活动开始逐渐减弱，闪电频数持续下降，20:00总闪电频数为38次/min左右。从整个系统的闪电频数和雷达回波来看，可以将其大致分为三个阶段：(1)发展阶段(16:00~17:36)，闪电频数整体低于80次/min，地闪数量缓慢上升，探测到的地闪以负地闪为主。(2)增强阶段(17:36~19:48)，闪电频数快速增长阶段，尤其在19:00开始，闪电频数30分钟内增长了将近一倍，地闪数量继续增加并随后稳定在15次/min左右，地闪中负地闪的比例持续上升达到90%，19:30飚线发展旺盛阶段，正地闪最大比例为30%左右。(3)减弱阶段(19:48~22:00)，闪电频数不断降低，20:00以后随着对流系统整体逐渐消亡，地闪数量也持续下降，直到22:00左右系统结束。总体上看，此次飚线过程在成熟阶段内闪电活跃，闪电活动整体上以云闪为主，地闪活动则以负地闪为主，正地闪比例在发展阶段及减弱阶

段后期高于增强阶段。

### 3.3 不同发展阶段的闪电活动、雷达回波特征以及地表温湿特征

从上文的分析可以看出，此次飚线过程中对流系统在发展、成熟以及衰减不同生命阶段闪电频数呈现出明显的阶段性变化。通常云闪可以很好地指示强对流系统内上升气流的强度，而地闪则与对流核以及下沉气流的产生相关性较好，综合分析对流系统内的云闪和地闪可以较全面揭示不同阶段内系统的对流发展特征。下面利用BLNET二维及三维定位资料、多普勒天气雷达以及地面自动站资料，分析飚线发展、成熟以及衰减三个不同阶段的闪电活动和雷达回波特征的关系，以及闪电和地表温湿状况的联系。

16:00北京的北部和西部边界已经有对流活动生成，闪电主要由这些分布较为零散的对流单体产生。16:12北京中部对流触发并快速发展（图略），16:30北京中部开始有 $\gamma$ 中尺度对流降水单体加强，并开始产生闪电，闪电主要发生在风场呈现气旋性切变的地方，在图4a的地面风场上可以明显看到，北京北部的雷暴云产生的东北风带来的低相当位温 $\theta_e$ 空气侵袭北京中部。北部雷暴云的出流边界不断

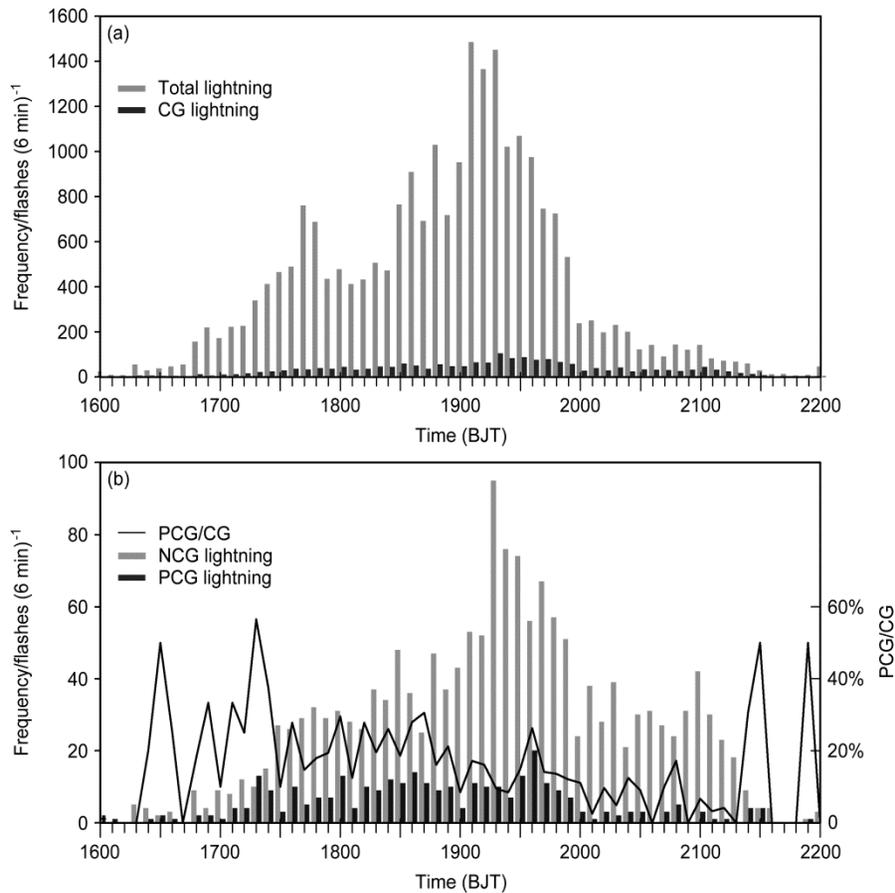


图3 2015年8月7日 (a) 总闪和地闪频数的时间演变, (b) 正、负地闪频数的时间演变及正地闪与总地闪的比例

Fig. 3 Temporal changes in (a) total flash rate and cloud-to-ground (CG) flash rate, (b) positive cloud-to-ground (PCG) flash rate, negative cloud-to-ground (NCG) flash rate, and the ratio of PCG flash rate to CG flash rate on 7 August 2015

移近, 北京中部出现一个 $\theta_e$ 低值区, 云闪集中在这个低温区内 (由于闪电密度大, 图中以闪电频数等值线形式呈现)。17:18对流单体在北京中部不断发展, 从图4b上可以看到北京中部的强回波向东北、向南以及向西延伸, 回波强度增大, 地面 $\theta_e$ 不断降低, 低温区面积不断扩大。17:36强回波范围达到极值, 北京中部的低相当位温区域也逐渐和北部大范围冷池相接。在此期间闪电活动随着系统发展不断增多, 闪电主要发生在强回波中心, 覆盖低相当位温区域, 负地闪主要集中在低温区外围。

闪电频数与混合相态层内强回波发展高度具有很好的相关性 (Xu et al., 2010), 因此, 进一步利用BLNET三维定位资料分析北京中部单体强度演变以及闪电辐射源垂直分布的关系。图5给出了剖面 (图4b、c中黑色线段) 前后10 km范围内6 min探测到的辐射源。由于此时单体移至南苑雷达站点附近, 高层回波信息因雷达探测仰角的设置问题存

在缺失, 但是依然可以看出单体强度随时间增强, 强回波向高层扩展。根据20:00北京站探空资料显示 (图略),  $0^{\circ}\text{C}$ 、 $-10^{\circ}\text{C}$ 以及 $-20^{\circ}\text{C}$ 高度分别为4.5 km、6 km以及7.5 km。17:18单体处于发展阶段, 55 dBZ回波发展到6 km, 突破 $-10^{\circ}\text{C}$ 高度, 辐射源集中在对流核附近; 17:36单体明显成熟, 对流核强度大于60 dBZ, 其中55 dBZ回波顶高延伸至8 km, 到达 $-20^{\circ}\text{C}$ 高度。系统内强回波顶高不断增加, 对流核强度逐渐增强, 这是由于低层的水汽不断往高层输送, 一方面通过潜热释放不断增强上升气流强度, 一方面为过冷水和冰相粒子的形成提供源项, 混合相态层内大量的冰相粒子, 有利于云体通过非感应起电机机制积聚大量电荷, 因此探测到的辐射源数量明显增多, 辐射源分布也往高层延伸。

17:42北京中部的强回波开始断裂, 断裂首先从南段开始, 随后东段回波也开始断裂成东西两段, 断裂开的西段回波逐渐和原北京西侧边境上的

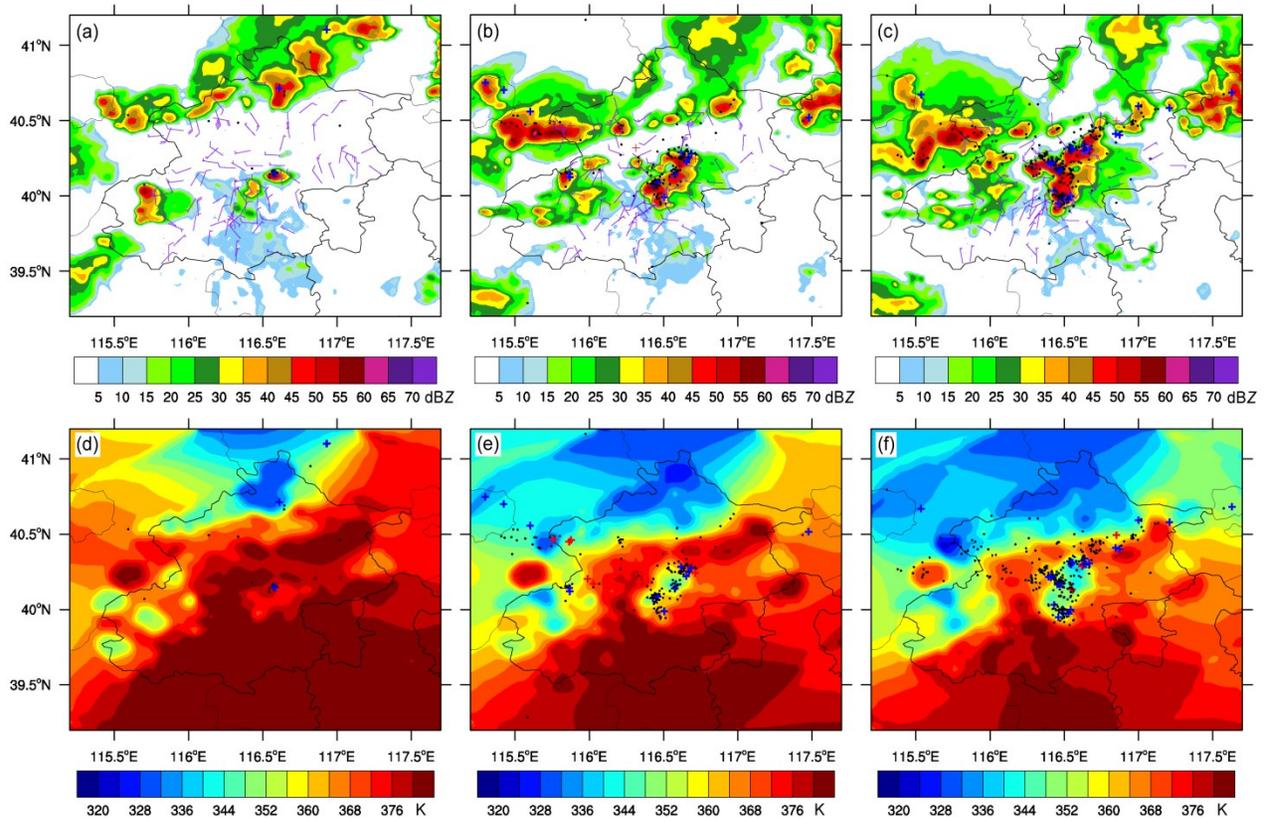


图4 2015年8月7日 (a) 16:30、(b) 17:18、(c) 17:36 飑线系统的雷达组合反射率 (填色, 单位: dBZ)、地面风场 (风向杆, 单位:  $m s^{-1}$ )、6 min 内闪电; (d-f) 为 (a-c) 相应时间的 6 min 内闪电和地面相当位温 (填色, 单位: K)。黑色圆点代表云闪, 红 (蓝) 色 “+” 代表正 (负) 地闪, 图 b、c 中的黑色线段为图 5a、b 的剖面位置

Fig. 4 Reflectivity (shadings, units: dBZ) and wind (bars, units:  $m s^{-1}$ ) in the squall line and the lightning in 6 minutes at (a) 1630 BJT, (b) 1718 BJT, (c) 1736 BJT on 7 August 2015; lightning within 6 minutes and ground potential equivalent temperature (shadings, units: K) at (d) 1630 BJT, (e) 1718 BJT, (f) 1736 BJT on 7 August 2015. Black dots: IC (intra-cloud lightning); red “+”: PCG flash rate; blue “+”: NCG flash rate. The black lines in Figs. b and c represent the section lines in Fig. 5a and Fig. 5b, respectively

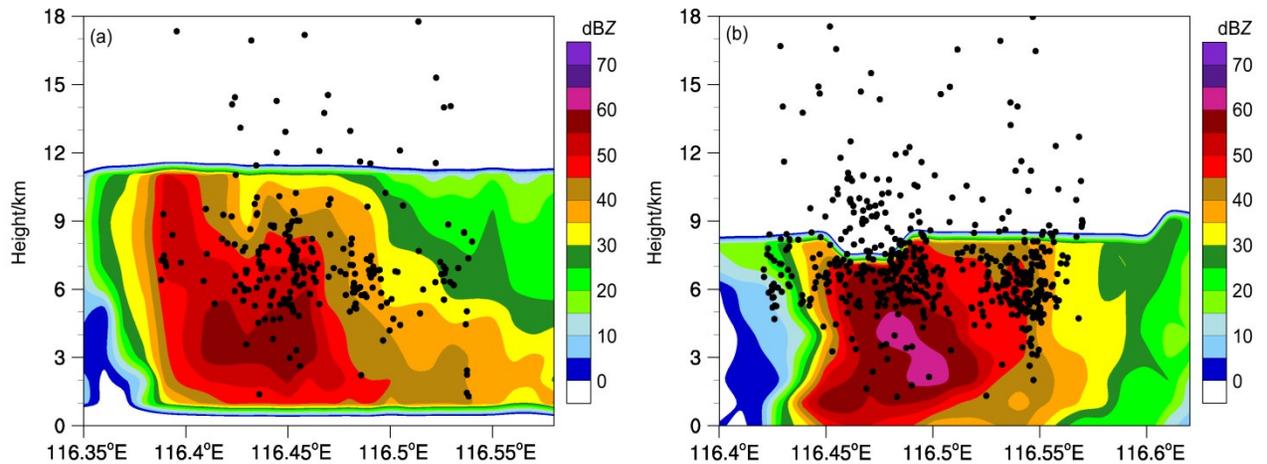


图5 2015年8月7日 (a) 17:18 的雷达反射率 (填色, 单位: dBZ) 沿图 4b 中黑色线段和 (b) 17:36 的雷达反射率 (填色, 单位: dBZ) 沿图 4c 中黑色线段的垂直剖面及剖面前后 10 km 范围内 6 min 内的辐射源 (黑色点)。高层回波信息因雷达探测仰角的设置问题存在缺失  
Fig. 5 Height-longitude cross sections of radar reflectivity (shadings, units: dBZ) and distributions of lightning radiation sources (black pots) within 10 km of the convective cell in 6 minutes at (a) 1718 BJT and (b) 1736 BJT on 7 August 2015. The black lines in Figs. 4b and 4c represent section lines in Figs. 5a and 5b, respectively. Echo information at upper levels are missing due to the elevation angle setting of the radar

单体合并。此阶段内闪电集中在断裂开的单体内。回波断裂处回波较高（大于 35 dBZ），但  $\theta_e$  梯度较弱，几乎没有闪电产生，形成闪电空白区域。17:54 北京中部由于冷池发展，地表出现气流辐散，中部低温区和北部大范围冷区（小于 350 K）相连，闪电集中在中部冷区外围  $\theta_e$  强梯度带内。18:24 可以观察到北京西南角上有一股暖湿的南风吹来，使得北京西部的单体合并后增强，在其南端不断有新单体生成并且并入母体，这使得西侧单体不断向南延伸，形成一条带状回波。18:42 原先断裂开的东部单体和南部单体逐渐合并，形成另一条回波带（图 6b）。这两条回波带之间有单体不断产生并发展，但新生的单体处在较高  $\theta_e$  区域内，没有明显的闪电活动。这一阶段内闪电主要集中在两条

回波带内。

由图 7a 可见，19:00 北京南部地面西南风增强，回波带之间的单体发展构成桥梁使得两条回波带合并成线状强对流，原先在连接处没有明显闪电活动，此时出现了闪电爆发现象。闪电集中在飚线前部线状强回波带和地面  $\theta_e$  强梯度带内，线状强回波后部的层云区域内闪电较少。飚线系统整体向东南方向移动，在其西南端地面  $\theta_e$  梯度很大，不断有单体新生，线状强回波逐渐延伸，闪电活动也不断向西南方向扩展，而北京中部的单体逐渐衰减成层状云，闪电较少。随着飚线系统的发展和移动，闪电活动沿着  $\theta_e$  强梯度带呈现带状分布，负地闪集中在强回波和  $\theta_e$  强梯度带，正地闪倾向发生在  $\theta_e$  梯度较弱的过渡区域内。对比 19:00 和 19:30 两个时刻

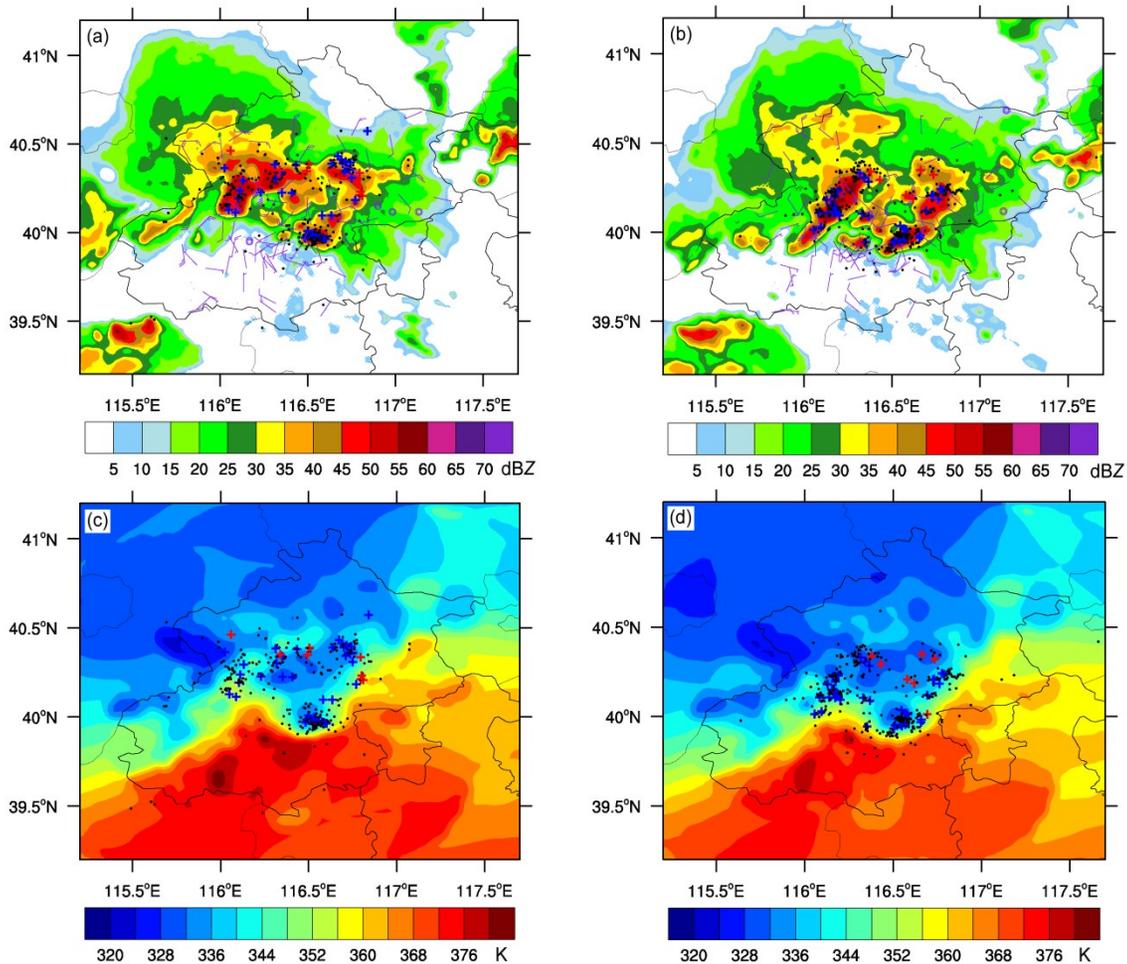


图6 2015年8月7日 (a) 18:24、(b) 18:42 飚线系统的雷达组合反射率 (填色, 单位: dBZ)、地面风场 (风向杆, 单位:  $\text{m s}^{-1}$ )、6 min 内闪电; (c、d) 为 (a、b) 相应时间的 6 min 内闪电和地面相当位温 (填色, 单位: K)。黑色圆点代表云闪, 红 (蓝) 色代表正 (负) 地闪  
Fig. 6 Reflectivity (shadings, units: dBZ) and wind (bars, units:  $\text{m s}^{-1}$ ) in the squall line and the lightning within 6 minutes at (a) 1824 BJT, (b) 1842 BJT on 7 August 2015; lightning within 6 minutes and ground potential equivalent temperature (shadings, units: K) at (c) 1824 BJT, (d) 1842 BJT on 7 August 2015. Black dots: IC; red "+": PCG flash rate; blue "+": NCG flash rate

的雷达回波剖面及辐射源分布（图8a、b）可以看出：19:00随着对流合并，对流结构密实，前部由于持续的入流形成明显的悬垂回波结构，宽广的上升气流区支撑系统内软雹和冰晶的生成和维持，大于45 dBZ回波强度发展至11 km，系统闪电频数逐渐达到峰值。探测到的辐射源主要分布在系统前部线状对流区内，而系统后部层云区辐射源数量相对较少；19:30系统主体逐渐下降到0°C以下，飑线后部迅速衰减成层状云。剖面图上能明显看出层云区亮带，辐射源数量明显减少，辐射源分布明显向后部层云降水区倾斜。

19:48飑线断裂（图9c），此时低 $\theta_e$ 几乎取代了原高 $\theta_e$ 区域，地表冷池范围覆盖北京，地表 $\theta_e$ 梯度减小，闪电活动也逐渐减少，主要发生在对应的地面冷池出流边界上具有较大 $\theta_e$ 梯度的区域。断裂开的西段回波由于南风持续带来的高 $\theta_e$ 空气入流而继

续维持，对应较多的负地闪。在回波断裂处地面 $\theta_e$ 梯度很小，对应闪电空白区。到20:30之后（图9d），北京处在飑线后部层云区内，地表 $\theta_e$ 在330 K左右，已没有明显的 $\theta_e$ 梯度存在，在东南边界上还有残余的散乱雷暴云，探测到的闪电主要为北京东南部的强回波产生的负地闪。

### 3.4 飑线不同区域的闪电活动特征

飑线系统内不同区域内流场和降水特征不同，对应的闪电活动也有很大差异，因此参考Lang and Rutledge（2008）提出的不同区域识别方法，基于雷达基本反射率，将-10°C温度层上大于30 dBZ的区域划分为对流降水云区，将对流云区外10 km内划为过渡区，其余部分则为层状降水云区，根据此分区结果分析不同区域的闪电活动特征，如图10所示。无论云闪还是地闪，均主要分布在对流云区，过渡区次之，层云区最少。对流云

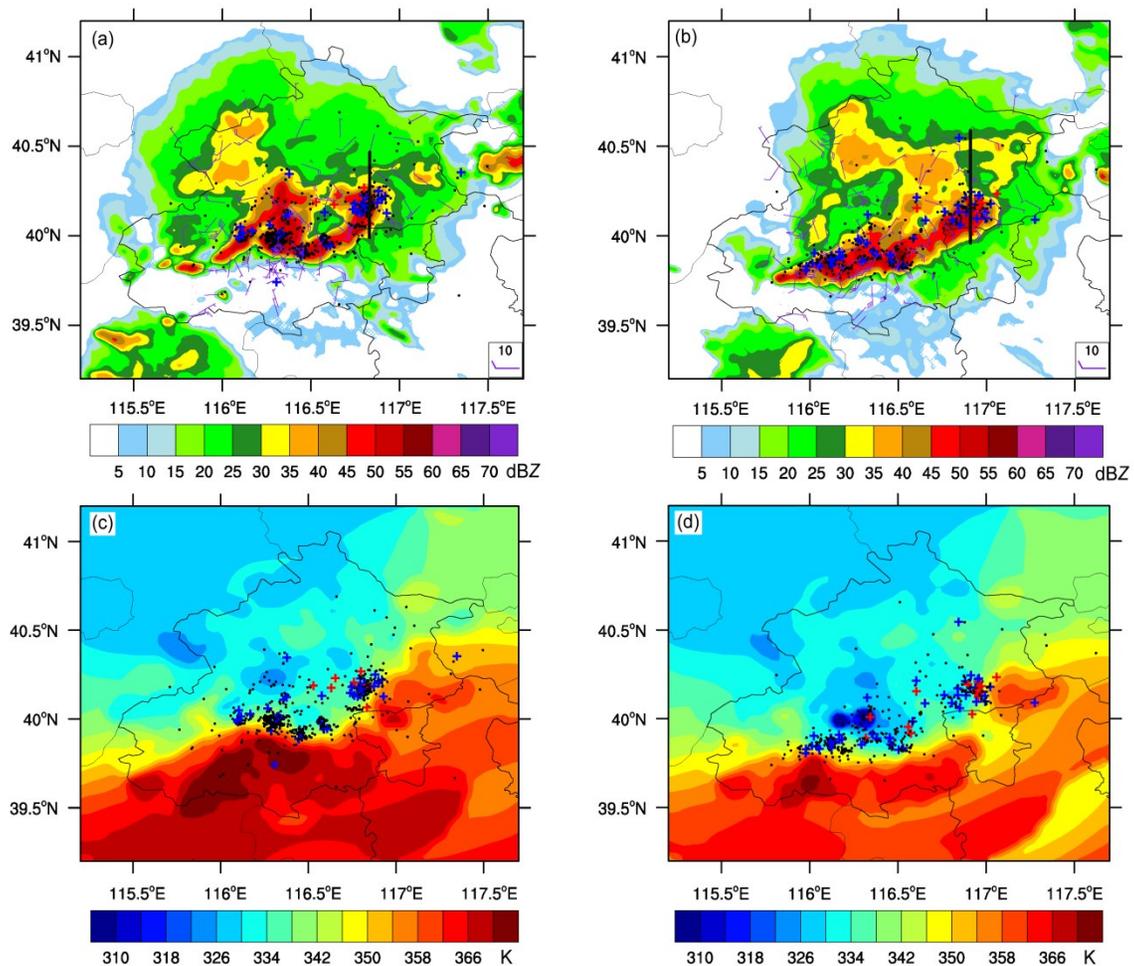


图7 同图6，但时间为2015年8月7日（a、c）19:00、（b、d）19:30

Fig. 7 As in Fig. 6, but for (a, c) 1900 BJT and (b, d) 1930 BJT on 7 August 2015

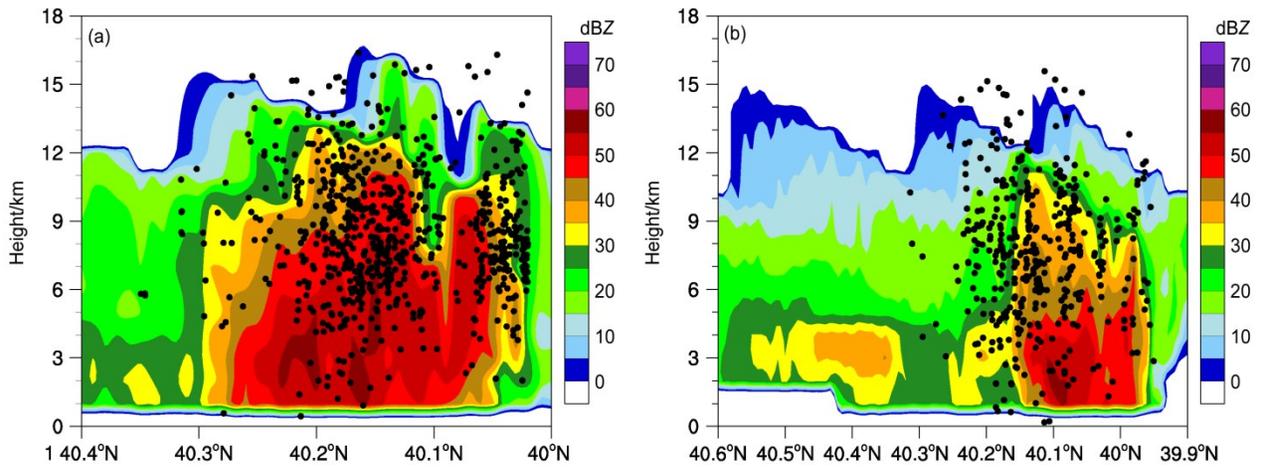


图8 2015年8月7日 (a) 19:00的雷达反射率(填色, 单位: dBZ)沿图7a中黑色线段和 (b) 19:30的雷达反射率(填色, 单位: dBZ)沿图7b中黑色线段的垂直剖面及剖面前后 10 km 范围内 6 min 内的辐射源(黑色点)

Fig. 8 Height-latitude sections of radar reflectivity (shadings, units: dBZ) and distributions of lightning radiation sources (black pots) within 10 km of the convective cell in 6 minutes at (a) 1900 BJT and (b) 1930 BJT on 7 August 2015. The black lines in Figs. 7a and 7b represent section lines in Fig. 8a and Fig. 8b, respectively

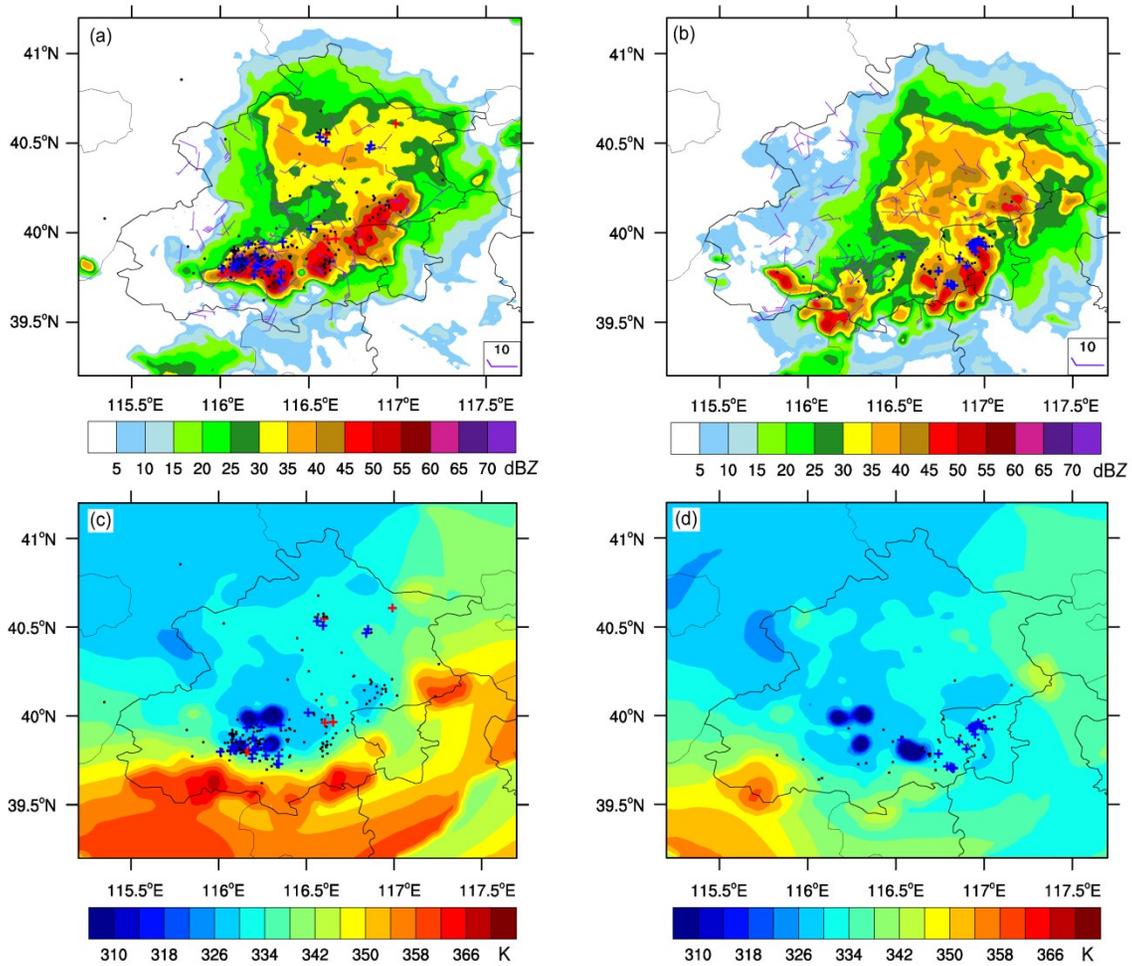


图9 同图6, 但时间为2015年8月7日 (a、c) 19:48、(b、d) 20:30

Fig. 9 As in Fig. 6, but for (a, c) 1948 BJT and (b, d) 2030 BJT on 7 August 2015

区的闪电频数随对流发展的变化最剧烈，受系统发展的影响最大，这也说明了对流云区是云内的主要起电区域。过渡区是降水粒子从对流云区到层状云区的传送区域，受对流云区动力与微物理活动的影响较大，过渡区云闪频数随对流发展也呈现出一定的变化，但变化程度远不如对流云区明显。层云区的闪电活动较弱，随对流发展未呈现出明显的变化。图 10c 为单位对流区域面积的闪电数量，即飑线不同区域内的闪电数量除以对应的区域面积而得，以此来衡量该区域产生闪电的能力。可以看出对流云区的放电能力远远强于层云区和过渡区，与徐燕等（2018）得到的结果一致。图 10d 是整个飑线过程中不同区域不同类型闪电的分布比例，95% 以上的闪电分布在对流降水云区与过渡区，层云区最少。

为进一步说明飑线不同区域内放电过程在垂直

方向上的差异，本节进一步分析了辐射源在不同区域内的演变，图 11 是此次飑线过程对流云区、过渡区和层云区的辐射源高度分布以及 0°C 层以上及以下强回波体积的变化。由于 BLNET 是一个区域性闪电探测网，为降低探测效率对分析结果的影响，我们将统计范围定在探测效率较高的网内区域 (39.5°~40.5°N, 115.8°~116.8°E)，统计时间间隔为 6 min，垂直方向上间距为 0.5 km。可以看出辐射源集中分布在对流云区，辐射源活跃期持续了 4 h 左右，持续时间较长。辐射源主要集中在 5~9 km 的高度上，对应于 0°C~-30°C 混合相态层内，整体高度变化比较明显：在发展阶段，辐射源中心高度缓慢升高；减弱阶段，辐射源中心高度明显下降。17:42 辐射源开始出现第一个活跃期，0°C 层以上及以下的强回波 (>40 dBZ) 的体积均在增长，对应北京中部的单体发展成熟；18:00 左右辐射源

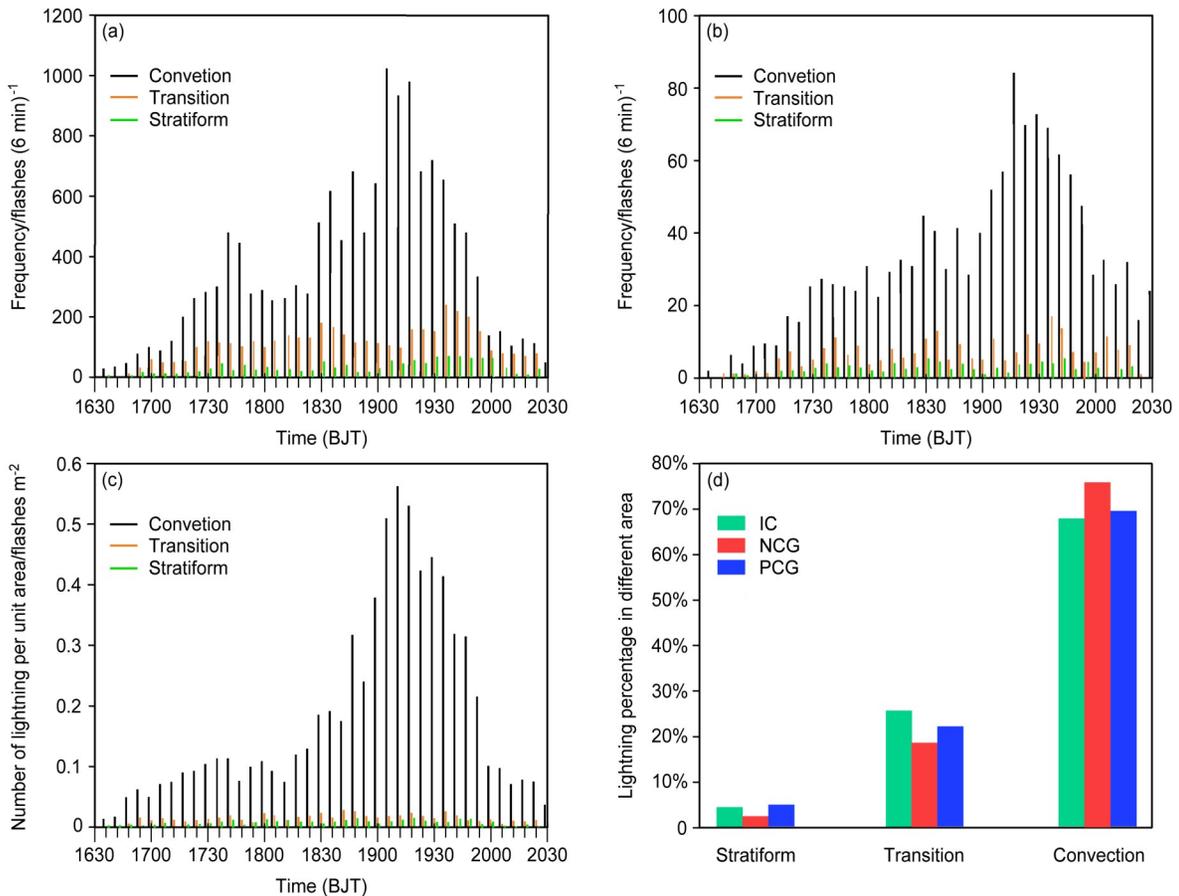


图 10 (a) 云闪、(b) 地闪在对流云区、过渡区、层云区随时间的变化；(c) 不同区域内单位面积的闪电数量随时间的变化；(d) 整个过程中不同类型闪电在不同区域的分布比例

Fig. 10 Evolution of lightning flash rate in convection cloud region, transition region, stratiform cloud region: (a) IC flash rate; (b) CG flash rate. (c) Evolution of lightning flash rate per unit area. (d) Percentages of different lightning types in different regions during the whole process

出现一个寂静期, 此时 40 dBZ 回波体积有所下降。18:24 辐射源开始出现第二次活跃期, 0°C 层以上强回波体积开始增加, 并在 18:36 及 18:48 达到峰值, 对应着对流单体逐渐合并, 辐射源数目持续增长。19:06 辐射源再次活跃, 此时经过对流合并后已形成有组织的爬线系统, 对应 0°C 层以下强回波体积出现短时间的稳定。19:18 开始, 随着合并后的爬线系统发展旺盛, 7 km 高度上出现辐射源强中心, 中心值超过 220 个/6 min。19:30 开始, 辐射源集中区逐渐下降, 对流云逐渐转为层状云, 随着爬线系统的快速移出并消散, 辐射源数量快速减少, 其集中高度也快速下降。

过渡区和层云区的辐射源相对较少, 说明此区域的内部对流和起电活动较弱。在 17:42、18:36 以及 19:36 出现三个辐射源活跃期, 和对流云区辐射

源活跃时期基本一致, 说明过渡区和层云区的辐射源的来源与对流云区密切相关。特别是在 19:30 开始, 此时对流云区辐射源活动已经开始减弱, 而过渡区和层云区内有较多的辐射源, 这也说明辐射源向后部层云区倾斜, 闪电电荷源由对流云区经过渡区传送到层云区域。

## 4 结论与讨论

受东北冷涡和低层暖湿气流影响, 2015 年 8 月 7 日午后北京城区爆发了一次强烈爬线天气过程。本文综合利用“雷暴 973”2015 年夏季北京协同观测获得的 BLNET 总闪定位、多普勒雷达资料、地面自动观测站以及探空等资料, 对此次强爬线过程的天气背景、不同生命史阶段以及不同区域的辐射

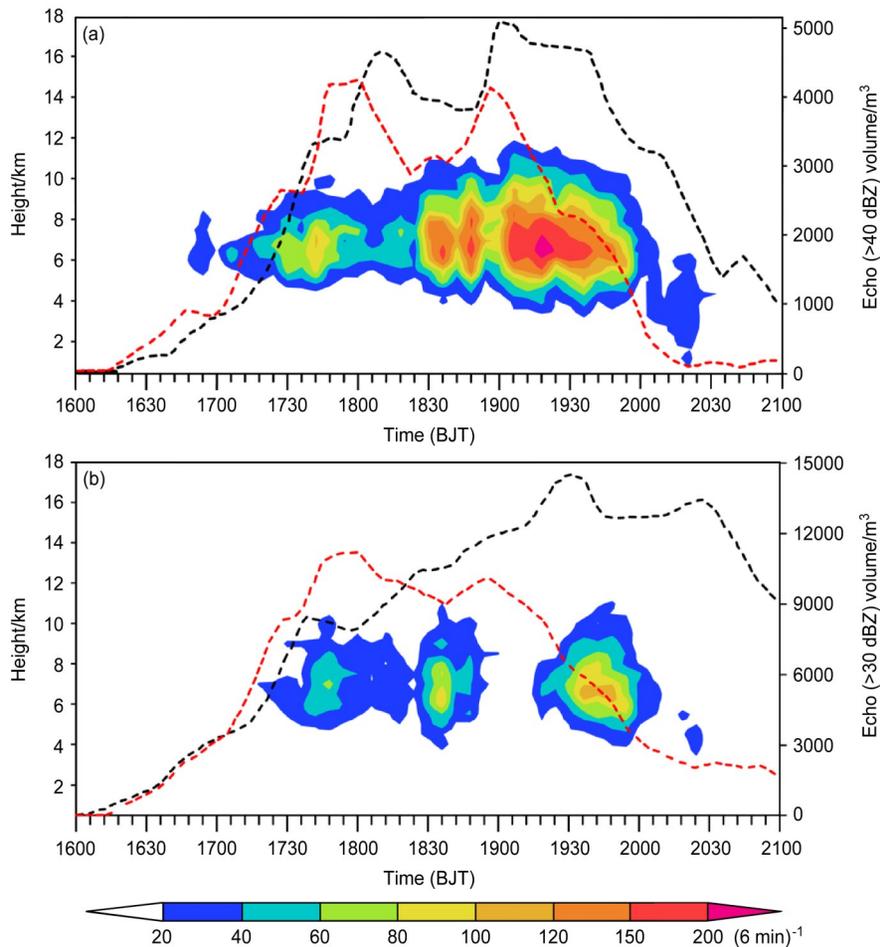


图 11 (a) 对流云区、(b) 过渡区和层状云区的闪电辐射源数量随高度和时间的变化[阴影, 单位:  $(6 \text{ min})^{-1}$ ]。图 a 中红(黑)色虚线为 0°C 层以上(下) >40 dBZ 回波体积(单位:  $\text{m}^3$ )；图 b 中红(黑)色虚线为 0°C 层以上(下) >30 dBZ 回波体积(单位:  $\text{m}^3$ )

Fig. 11 Time-height plots of lightning radiation sources [shadings, units:  $(6 \text{ min})^{-1}$ ] in (a) convection cloud region and (b) transition and stratiform cloud regions. Red (black) dashed line in Fig. a indicates the evolution of echo ( $>40 \text{ dBZ}$ ) volume (units:  $\text{m}^3$ ) above (below)  $0^\circ\text{C}$  level; red (black) dashed line in Fig. b is the evolution of echo ( $>30 \text{ dBZ}$ ) volume (units:  $\text{m}^3$ ) above (below)  $0^\circ\text{C}$  level

源演变特征进行了详细分析,并探讨了闪电和地面热力特征的关系,主要结论如下:

(1) 低层台风带来的暖湿气流和高层低涡后部弱冷平流的共同入侵造成了北京上空上干下湿的结构,逆温层结维持时间较长,不稳定能量在逆温层结的作用下不断积聚,大气不稳定性逐步增强,触发了此次飚线过程。14:00 探空表明北京的对流不稳定能量 CAPE 值达到  $3317 \text{ J kg}^{-1}$ 。

(2) 整个飚线过程的闪电活动整体上以云闪为主,地闪活动以负地闪为主。根据雷达回波和闪电频数将其分为三个阶段:发展阶段、增强阶段和减弱阶段。发展阶段:闪电频数低于 80 次/min,且以负地闪为主。增强阶段,单体合并,飚线形成,闪电频数快速增长,总闪和地闪峰值分别为 248 次/min 和 18 次/min,负地闪占总地闪的比例持续上升达到 90%,此时负地闪集中发生在相当位温的强梯度带上方,正地闪对应于相当位温梯度较弱的过渡区域内。减弱阶段,总闪和地闪频数降低。正地闪比例在发展阶段及减弱阶段后期高于增强阶段。

(3) 闪电辐射源主要分布在对流区内,过渡区次之,层云区最少,在对流区内和过渡区域发生的闪电占 95% 以上。对流线形成后,对流核增强,对流云区内强回波 ( $>40 \text{ dBZ}$ ) 体积增大,闪电辐射源数量增多,其峰值出现在 5~9 km 高度。在飚线的发展和增强阶段,层云区的辐射源活跃期与对流云区辐射源活跃期的时间基本一致;在飚线系统衰减阶段,强回波主体逐渐下降到  $0^\circ\text{C}$  以下,辐射源分布向后部层云区倾斜,闪电电荷源由对流云区经过渡区传送到层云区域。

已有研究 (Smith et al., 2000) 表明,当雷暴云移过高(低)相当位温区域,上升气流强度将增强(减弱),雷暴云的闪电活动也将受到影响。文中分析了闪电活动同近地面温湿状况和雷达反射率因子的关系,当对流在北京城区触发后不断发展,由于系统的降水冷却作用,在近地面出现冷池和低相当位温区,闪电集中在该低相当位温区的外围,即相当位温梯度较大的区域。当系统混合相态层内强回波体积不断增大,闪电活动不断增强,可以看到对应地面相当位温梯度也不断增强。当系统进入消散阶段,地面的相当位温梯度减弱,缺少前部暖湿空气的补充,系统上升气流强度减弱,系统强回波主体逐渐下移到  $0^\circ\text{C}$  层以下。近地面的空气温湿状况将影响雷暴云内的垂直速度大小,进而影响云

内降水粒子的生成和分布,这也很大程度上决定了闪电数量和极性。未来将进一步深入研究近地面温湿状况如何改变雷暴云动力特征、水成物源项,并利用加入起电、放电过程的数值模式来研究此次飚线的电荷结构及其发生发展过程与地面温湿条件的相互作用,进一步明确近地面温湿场对雷暴云起电和闪电活动的影响。

### 参考文献 (References)

- Carey L D, Rutledge S A. 1996. A multiparameter radar case study of the microphysical and kinematic evolution of a lightning producing storm [J]. *Meteor. Atmos. Phys.*, 59(1-2): 33-64. doi: 10.1007/BF01032000
- Carey L D, Murphy M J, McCormick T L, et al. 2005. Lightning location relative to storm structure in a leading-line, trailing-stratiform mesoscale convective system [J]. *J. Geophys. Res.*, 110 (D3): D03105. doi:10.1029/2003JD004371
- 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 [J]. *Atmos. Res.*, 76(1-4): 127-166. doi:10.1016/j.atmosres.2004.11.020
- Feng G L, Qie X S, Wang J, et al. 2009. Lightning and Doppler radar observations of a squall line system [J]. *Atmos. Res.*, 91(2-4): 466-478. doi:10.1016/j.atmosres.2008.05.015
- Lang T J, Rutledge S A. 2008. Kinematic, microphysical, and electrical aspects of an asymmetric bow-echo mesoscale convective system observed during STEPS 2000 [J]. *J. Geophys. Res.*, 113(D8): D08213. doi:10.1029/2006JD007709
- 李娜, 冉令坤, 高守亭. 2013. 华东地区一次飚线过程的数值模拟与诊断分析 [J]. *大气科学*, 37(3): 595-608. Li Na, Ran Lingkun, Gao Shouting. 2013. Numerical simulation and diagnosis study of a squall line in eastern China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 37(3): 595-608. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12007
- 刘冬霞, 鄒秀书, 冯桂力, 等. 2008. 华北一次强对流天气系统的地时空演变特征分析 [J]. *高原气象*, 27(2): 358-364. Liu Dongxia, Qie Xiushu, Feng Guili, et al. 2008. Analyses on lightning temporal and spatial characteristics in the severe convective weather in North China [J]. *Plateau Meteor. (in Chinese)*, 27(2): 358-364.
- 刘冬霞, 鄒秀书, 冯桂力. 2010. 华北一次中尺度对流系统中的闪电活动特征及其与雷暴动力过程的关系研究 [J]. *大气科学*, 34(1): 95-104. Liu Dongxia, Qie Xiushu, Feng Guili. 2010. Evolution characteristics of the lightning and the relation with dynamical structure in a mesoscale convective system over North China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 34(1): 95-104. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2010.01.09
- 刘冬霞, 鄒秀书, 王志超, 等. 2013. 飚线系统中的闪电辐射源分布特征及云内电荷结构讨论 [J]. *物理学报*, 62(21): 219201. Liu Dongxia, Qie Xiushu, Wang Zhichao, et al. 2013. Characteristics of lightning radiation source distribution and charge structure of squall line [J]. *Acta Phys. Sinica (in Chinese)*, 62(21): 219201. doi:10.7498/aps.62.219201

- 刘佳, 沈新勇, 张大林, 等. 2013. 台风“麦莎”的强度对台风前部飑线发展过程影响的研究 [J]. 大气科学, 37(5): 1025-1037. Liu Jia, Shen Xinyong, Zhang Dalin, et al. 2013. Impact of typhoon intensity on the development of a pre-tropical cyclone squall line [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37(5): 1025-1037. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.12134
- 刘黎平, 牟容, 许小永, 等. 2007. 一次飑线过程的动力和微物理结构及滴谱变化对降水估测的影响研究 [J]. 气象学报, 65(4): 601-611. Liu Liping, Mu Rong, Xu Xiaoyong, et al. 2007. Dynamic and microphysical structures of a squall line system and effects of rain drop size distribution on precipitation [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 65(4): 601-611. doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2007.04.012
- MacGorman D R, Burgess D W, Mazur V, et al. 1989. Lightning rates relative to tornadic storm evolution on 22 May 1981 [J]. J. Atmos. Sci., 46(2): 221-250. doi: 10.1175/1520-0469(1989)046<0221:LRRTTS>2.0.CO;2
- Meng Z Y, Zhang F Q, Markowski P, et al. 2012. Modeling study on the development of a bowing structure and associated rear inflow within a squall line over South China [J]. J. Atmos. Sci., 69(4): 1182-1207. doi:10.1175/JAS-D-11-0121.1
- Schultz C J, Carey L D, Schultz E V, et al. 2017. Kinematic and microphysical significance of lightning jumps versus non-jump increases in total flash rate [J]. Wea. Forecasting, 32(1): 275-288. doi:10.1175/WAF-D-15-0175.1
- Smith S B, LaDue J G, Macgorman D R. 2000. The relationship between cloud-to-ground lightning polarity and surface equivalent potential temperature during three tornadic outbreaks [J]. Mon. Wea. Rev., 128(9): 3320-3328. doi:10.1175/1520-0493(2000)128<3320:TRBCTG>2.0.CO;2
- Srivastava A, Tian Y, Qie X S, et al. 2017. Performance assessment of Beijing Lightning Network (BLNET) and comparison with other lightning location networks across Beijing [J]. Atmos. Res., 197: 76-83. doi:10.1016/j.atmosres.2017.06.026
- 孙虎林, 罗亚丽, 张人禾, 等. 2011. 2009年6月3~4日黄淮地区强飑线成熟阶段特征分析 [J]. 大气科学, 35(1): 105-120. Sun Hulin, Luo Yali, Zhang Renhe, et al. 2011. Analysis on the mature-stage features of the severe squall line occurring over the Yellow River and Huaihe River basins during 3-4 June 2009 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35(1): 105-120. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.01.09
- 孙建华, 郑淋淋, 赵思雄. 2014. 水汽含量对飑线组织结构和强度影响的数值试验 [J]. 大气科学, 38(4): 742-755. Sun Jianhua, Zheng Linlin, Zhao Sixiong. 2014. Impact of moisture on the organizational mode and intensity of squall lines determined through numerical experiments [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38(4): 742-755. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.13187
- 王宇, 郗秀书, 王东方, 等. 2015. 北京闪电综合探测网(BLNET): 网络构成与初步定位结果 [J]. 大气科学, 39(3): 571-582. Wang Yu, Qie Xiushu, Wang Dongfang, et al. 2015. Beijing Lightning Network (BLNET): Configuration and preliminary results of lightning location [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 39(3): 571-582. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1407.14138
- Wang Y, Qie X S, Wang D F, et al. 2016. Beijing Lightning Network (BLNET) and the observation on preliminary breakdown processes [J]. Atmos. Res., 171: 121-132. doi:10.1016/j.atmosres.2015.12.012
- Xu W X, Zipser E J, Liu C T, et al. 2010. On the relationships between lightning frequency and thundercloud parameters of regional precipitation systems [J]. J. Geophys. Res., 115(D12): D12203. doi:10.1029/2009JD013385
- 徐燕, 孙竹玲, 周筠珺, 等. 2018. 一次具有对流合并现象的强飑线系统的闪电活动特征及其与动力场的关系 [J]. 大气科学, 42(6): 1393-1406. Xu Yan, Sun Zhuling, Zhou Yunjun, et al. 2018. Lightning activity of a severe squall line with cell merging process and its relationships with dynamic fields [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42(6): 1393-1406. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1801.17220
- 易笑园, 张义军, 王红艳, 等. 2013. 线状中尺度对流系统内多个强降雨单体的结构演变及闪电活动特征 [J]. 气象学报, 71(6): 1035-1046. Yi Xiaoyuan, Zhang Yijun, Wang Hongyan, et al. 2013. Characteristics of the evolution of the severe rainfall cells structure in the leading line mesoscale convective system and the lightning activity [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 71(6): 1035-1046. doi:10.11676/qxxb2013.094
- 袁铁, 郗秀书. 2010. 基于 TRMM 卫星对一次华南飑线的闪电活动及其与降水结构的关系研究 [J]. 大气科学, 34(1): 58-70. Yuan Tie, Qie Xiushu. 2010. TRMM-based study of lightning activity and its relationship with precipitation structure of a squall line in South China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34(1): 58-70. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2010.01.06
- 张进, 谈哲敏. 2008. 启动对流的初始扰动对热带飑线模拟的影响 [J]. 大气科学, 32(2): 309-322. Zhang Jin, Tan Zheming. 2008. Impacts of initial convection-triggering perturbations on numerical simulation of a tropical squall line [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32(2): 309-322. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.02.10
- 张建军, 王咏青, 钟玮. 2016. 飑线组织化过程对环境垂直风切变和水汽的响应 [J]. 大气科学, 40(4): 689-702. Zhang Jianjun, Wang Yongqing, Zhong Wei. 2016. Impact of vertical wind shear and moisture on the organization of squall lines [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40(4): 689-702. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1505.14337
- 张哲, 周玉淑, 邓国. 2016. 2013年7月31日京津冀飑线过程的数值模拟与结构分析 [J]. 大气科学, 40(3): 528-540. Zhang Zhe, Zhou Yushu, Deng Guo. 2016. Numerical simulation and structural analysis of a squall line that occurred over the Beijing-Tianjin-Hebei region of China on 31 July 2013 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40(3): 528-540. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1507.15127
- 周围, 包云轩, 冉令坤, 等. 2018. 一次飑线过程对流稳定度演变的诊断分析 [J]. 大气科学, 42(2): 339-356. Zhou Wei, Bao Yunxuan, Ran Lingkun, et al. 2018. Diagnostic analysis of convective stability evolution during a squall line process [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42(2): 339-356. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1712.17126