

袁铁, 郅秀书. 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.

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

袁铁^{1, 3} 郅秀书²

1 兰州大学大气科学学院, 甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室, 兰州 730000

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

3 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000

摘 要 利用热带测雨计划任务卫星 (TRMM) 的测雨雷达 (PR)、闪电成像仪 (LIS) 和微波辐射计 (TMI) 资料, 研究了 2005 年 5 月 6 日发生在我国华南的一次强飑线过程的闪电活动及其与降水结构之间的关系。结果表明, 该飑线系统中对流降水面积仅为层云的一半, 但是总降水率却远大于层云的总降水率。绝大多数闪电发生在对流区, 有少数闪电出现在层云区域。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 区间, 峰值频数在 40~45 dBZ, 35 dBZ 以下较少。研究还表明, 对流单体的最大雷达反射率垂直廓线可以很好地指示单体的闪电频数和对流发展强度。对闪电与微波亮温的研究表明, 大多数闪电发生在低亮温区域, 特别是低于 200 K 亮温区, 而在 240~260 K 的区域也可观测到少量闪电, 这一般对应于飑线的层云区域。结合 2003 年 4 月 17 日黄淮地区的另一次强飑线系统的进一步研究发现, 在单体尺度上, 总闪电频数和冰相降水含量之间表现出非常密切而稳定的关系, 相关系数达 0.92。总闪电频数和冰相降水含量之间的稳定关系在中尺度数值模式中闪电资料的同化和飑线系统的闪电参数化研究中均有较大的应用潜力。

关键词 飑线 闪电 降水结构 冰相降水含量 TRMM 卫星

文章编号 1006-9895 (2010) 01-0058-13

中图分类号 P427

文献标识码 A

TRMM-Based Study of Lightning Activity and Its Relationship with Precipitation Structure of a Squall Line in South China

YUAN Tie^{1, 3} and QIE Xiushu²

1 Gansu Key Laboratory of Arid Climatic Change and Hazard Defences, College of Atmospheric Science, Lanzhou University, Lanzhou 730000

2 Laboratory for Middle Atmosphere and Global Environment Observation (LAGEO), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

3 Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000

Abstract The data from precipitation radar (PR), lightning imaging sensor (LIS), and passive microwave imaging (TMI) onboard the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) satellite have been used to investigate lightning activity and its relationship with precipitation structure of a strong squall line over south China on May 6, 2005. The

收稿日期 2008-10-09, 2009-06-18 收修定稿

资助项目 中国科学院知识创新工程重要方向项目 KZCX2-YW-206, 国家自然科学基金资助项目 40325013, 中国科学院知识创新工程领域前沿项目 IAP07310

作者简介 袁铁, 男, 1975 年出生, 讲师, 主要研究领域为大气电学与卫星遥感。E-mail: tyuan@lzu.edu.cn

results show that convective rains only occupied half of the area of stratiform rains, but the former contributed much more rainfall to the total than the latter. Most lightning flashes occur near the strong convective region, and a few flashes occur in the stratiform region of the squall line. At 6-km altitude, most of lightning flashes occur in the echo region between 35 and 50 dBZ, which peak during 40–45 dBZ, and fewer flashes can be seen in the echo region with reflectivity smaller than 30 dBZ. The results also indicate that the vertical profile of the maximum radar reflectivity has capability to reveal flash rate and vertical development of convective cells. Furthermore, it is found that most of lightning flashes occur in the region of low brightness temperature, especially the region lower than 200 K, and a few flash can also be seen in the region of 240–260 K, which usually corresponds to the stratiform region of squall lines. A combined study with another squall line over the Huanghe River-Huaihe River area on April 17, 2003 shows that there is a close relationship between flash rate and ice precipitation content between 7–11 km altitude at a convective cell scale, and the correlation coefficient is 0.92, which suggest that the stable relationship between flash rate and ice precipitation content can be valuable in the study of both the assimilation of lightning data into mesoscale models and lightning flash parameterizations of squall lines.

Key words squall line, lightning flash, precipitation structure, ice precipitation content, TRMM satellite

1 引言

飑线是一种由多个雷暴单体或雷暴群组成的狭窄强对流天气带,属中尺度深厚对流系统,经常伴随出现大风、闪电、冰雹和龙卷等灾害性天气,给人民的生命和财产带来巨大的损失。但由于飑线尺度小,发生、发展迅速,常规气象手段探测能力有限,相应的业务数值预报系统预报水平还有待进一步提高。因此,增强对飑线的形成机制、内部结构以及伴随天气现象的认识,对其预报水平的改进有着重要的意义。基于天气图、雷达和卫星等资料,并结合数值模拟方法,国内学者在飑线的结构特征、发生发展的过程及机理等方面开展了大量的工作,得到了许多有意义的结果(刘勇等,1998;李鸿洲等,1999;Sun and Tan, 2001;刘淑媛等,2007;谢健标等,2007),但对飑线系统中闪电活动的研究还少见报道。

飑线系统不但存在强烈的对流和降水,也常发生频繁的闪电活动。Orville et al. (1988) 研究发现,飑线中的地闪通常呈偶极子型的空间分布特征,即负地闪主要发生在前部对流区,而正地闪大多出现在飑线后部的层云区。最近,Carey et al. (2005) 和 Ely et al. (2008) 利用闪电探测和定位系统(LDAR)的三维定位资料发现,闪电的甚高频辐射源主要位于飑线前部的对流区,并且闪电的路径从对流区向后、向下倾斜进入后部的层云区域,雷达观测表明,层云区的正地闪可能是对流区的电荷平流和层云内部的局地起电机机制等所致。雷暴云

内部的动力和微物理过程在一定程度上决定了闪电的发生和发展,因此,揭示雷暴起电、放电与雷暴动力、微物理过程之间的关系是大气电学的重要研究内容(Lang et al., 2004)。Carey and Rutledge (1996) 利用多参数雷达研究了产生闪电的雷暴云动力和微物理过程,发现当云中霰粒子的体积增大时,云闪率呈现指数增长,地闪率的快速减小与雷暴中霰和雹的下降时间一致。Seity et al. (2003) 发现雷电发生在含有冰相粒子的区域,地闪的发生与霰雹混合物的存在有非常密切的关系。Dotzek et al. (2005) 曾利用美国国家闪电定位网(NLDN)和LDAR系统探测的闪电信息、雷达反演的微物理特征及卫星云图对带有拖尾层云的中尺度系统研究发现,绝大多数正地闪的起始位置与冰雹粒子和高密度的霰粒子区域相一致。而Fehr et al. (2005) 利用欧洲雷电NO_x计划(EULINOX)中的偏振雷达和闪电资料(地闪和总闪)发现,超单体和多单体中闪电活动与雷达反演的云体上部的水成物总质量和各类水成物的质量之间存在密切相关,但飑线中并没有发现相关性,并指出对流的组织结构在闪电发展过程中占有重要的地位。最近,Gauthier et al. (2006) 利用美国休斯顿地区7年的NLDN和雷达资料发现,雷暴的地闪活动与雷达反演的冰相降水含量之间有很好的线性关系。

在国内,基于地面地闪定位网络和天气雷达的同步观测,并结合热带降水测量计划任务卫星(TRMM)资料,冯桂力等(2007)曾经对冰雹云的闪电活动特征与降水结构进行了详细研究。张义军

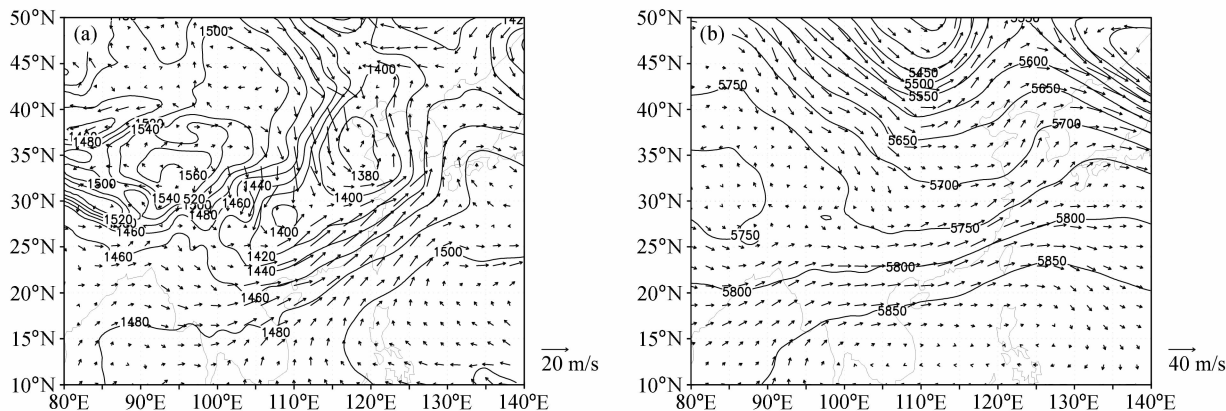


图1 2005年5月5日20时(a) 850 hPa和(b) 500 hPa的环流形势

Fig. 1 Circulation patterns at (a) 850 hPa and (b) 500 hPa at 2000 LST 5 May 2005

等(2004)利用美国强雷暴起电和降水研究(STEPS)实验期间的闪电成像阵列(LMA)的三维定位资料对两次超级单体的电荷结构及其地闪特征进行了研究,发现雷暴云的流场结构对闪电位置和闪电通道的结构有重要影响。受资料限制,目前我国对飊线过程闪电活动的研究还较少。TRMM卫星能够对热带和副热带地区的降水特征进行多种探测器的联合观测,其资料已被许多国内学者广泛用于降水结构和闪电活动的研究(傅云飞等,2003;郅秀书等,2003;Qie et al., 2003;马明等,2004;郑媛媛等,2004;曹治强和李万彪,2005),也为飊线系统的闪电和降水结构的关系研究提供了良好的条件。本文将利用TRMM卫星的雷达、闪电和微波同步观测资料,详细分析2005年5月6日发生在我国华南地区的一次强飊线的闪电活动和降水结构特征,并进一步阐述闪电活动与雷达反射率、微波亮温以及冰相降水含量之间的关系,希望能够为闪电资料在飊线预警预报业务中的应用提供相关理论基础。

2 天气背景介绍

2005年5月5~6日广东省曾发生了当年影响范围最大的一次强对流天气过程(简称“05.5.6”)。从5日白天到6日凌晨,广东全省从北向南、自西向东先后有76个市县(区)出现了八级或八级以上雷雨大风,广宁、从化、广州、白云区、花都、连州等地还出现了降雹,其中花都的冰雹最大有鸡蛋般大小,此次强对流事件给广东人民群众带来了巨大的财产损失和人员伤亡。

根据我国风云二号卫星云图可知,此次天气过程是由西北移来的冷锋所致,加上高空槽和低空急流的共同作用(见图1),使得这次系统发展非常强烈,大约在5月5日23时(北京时,下同)达到最强。TRMM卫星在5月6日凌晨1时正好过境(轨道号为42578),此时该系统正处在由成熟期向消散期过渡期间,但从后面的降水结构与闪电活动的分析可以看到,此时的对流活动仍然非常旺盛。

3 资料来源和数据处理方法

TRMM卫星于1997年12月升空,载有降水雷达(Precipitation Radar,简称PR)、微波成像仪(TRMM Microwave Imager,简称TMI)、闪电成像仪(Lightning Imaging Sensor,简称LIS)、可见光与红外扫描仪(Visible Infrared Scanner,简称VIRS)和云和地球辐射平衡系统(Clouds and the Earth's Radiant Energy System,简称CERES)五个探测器,主要任务是探测热带、亚热带地区的降水结构、降水率及降水分布情况,为理解全球气候变化机制和监测环境变化提供数据积累。TRMM卫星是一颗非太阳同步极轨卫星,轨道倾角为 35° ,绕地球一周约需90分钟。卫星设计寿命为3年,2001年8月为延长工作寿命其轨道高度从350 km升高到403 km,预计可延长工作寿命至2012年。本文使用的TRMM卫星资料包括:LIS原始轨道资料,PR的2A23和2A25标准产品,TMI的1B11标准产品。目前,TRMM卫星资料在国内外已经得到了非常广泛的应用,关于PR和TMI的详细信息请参考相关文献(傅云飞等,2003),在此不

再赘述, 这里仅对 LIS 的闪电产品进行简单介绍。

LIS 闪电资料由 4 个参量组成, 即“事件”、“组”、“闪电”和“区域”。事件是 LIS 闪电资料当中最基本的参量, 当 LIS 成像阵列的某个像素光辐射值超过背景阈值时就产生了一个“事件”; 在 2 ms 积分时间内一个或多个相邻的“事件”构成一个“组”, 近似对应于地闪的回击或云闪的反冲流光; 闪电是最重要的产品, 由时间间隔不超过 330 ms 和空间间隔不超过 5.5 km 的一个或多个“组”组成, 总持续时间没有限制, 对应于传统的闪电定义; 最后, 空间间隔不超过 16.5 km 的一簇闪电组成一个“区域”, 没有闪电之间间隔限制, 这一定义近似于雷暴单体的定义。

在 TMI 所在的频率段, 通常海洋表面的反射率较陆地表面小得多, 导致卫星探测到的微波亮温在海岸附近会存在很大的梯度。另外, 即使在陆地地区由于水体的存在或土壤湿度、植被等的不均匀也可能导致卫星探测到的微波亮温出现不连续的情况。为了消除海陆边界和陆地表面不均一带来的微波亮温不连续现象, Spencer et al. (1989) 提出了极化修正亮温 (PCT) 的概念。在 85 GHz 频率, 他们定义的极化修正亮温为:

$$T_{\text{PCT}85} = 1.818T_{85v} - 0.818T_{85h},$$

其中, $T_{\text{PCT}85}$ 代表 85 GHz 频率的极化修正亮温, T_{85v} 和 T_{85h} 分别代表 85 GHz 的垂直和水平亮温。

为了研究飊线中雷暴单体的闪电活动与降水结构的关系, 需要进行单体识别。利用雷达反射率因子对单体进行识别的方法一般是选择某一参考高度, 然后将反射率因子和尺寸超过指定阈值的连续区域定义为一个单体。不同的作者对参考高度、反射率因子的选择稍有不同 (Zipser and Lutz, 1994; Toracinta et al., 1996)。风暴识别、追踪、分析和预报系统 (Thunderstorm Identification, Tracking, Analysis and Nowcasting, 简称 TITAN) (<http://www.ral.ucar.edu/projects/titan/home>) 使用了双阈值 (30 dBZ 和 45 dBZ) 进行风暴的识别, 选用第二个阈值是为了区分相互重叠但实际上并不是一个单体而是两个单体的情况。本文借鉴了 TITAN 的双阈值方法, 选择 4.25 km 高度的雷达反射率因子进行单体的识别。

Carey and Rutledge (2000) 提出了一个由雷达反射率因子计算冰相降水粒子的含量的方法, 即:

$$M = 1000\pi\rho_i N_0^{3/7} \left(\frac{5.28 \times 10^{-18}}{720} Z \right)^{4/7},$$

其中, Z 为雷达反射率因子 (单位: mm^6/m^3), $N_0 = 4 \times 10^6/\text{m}^4$, $\rho_i = 917 \text{ g/m}^3$, M 是冰相降水含量 (单位: g/m^3)。该方法最初是针对热带地区对流云提出来的, 但后来陆续被许多作者引用, 如用于分析全球、区域和单体闪电与冰相降水含量之间的关系等 (Petersen and Rutledge, 2001; Petersen et al., 2005; Gauthier et al., 2006)。虽然 TMI 的 2A12 产品也给出了冰相粒子含量 (包括云冰和降水性冰) 的反演值, 但考虑到 TMI 资料的分辨率较低, 并且轨道之间存在间隙的情况, 所以, 我们这里选择 Carey and Rutledge (2000) 的方法进行冰相降水含量的计算。

4 分析结果

4.1 “05.5.6” 的降水结构特征

图 2 给出了 TRMM 卫星过境期间 PR 雷达对该飊线的观测结果。从图 2a、b 可以看到, 在系统前部有大量的对流单体呈线状排列, 伴随着强降水的发生, 紧随对流线区的回波强度明显减小, 但接下来回波又有所增强, 为大片的层云区。图 2c、d 进一步给出了对流线区和垂直于对流线区反射率因子的垂直剖面结构, 可以看出这是一个非常典型的成熟飊线系统, 飊线的三个组成部分 (Houze et al., 1989) ——前部对流区、中部对流向层云的转换区和后部的层云区都清晰可见。其中对流区的回波顶高达到了近 17 km, 最大回波出现在中下部, 达 55 dBZ; 转换区的回波强度非常弱, 仅 20 dBZ 左右; 层云区的亮带结构非常明显, 高度约在 4 km 左右, 中部的反射率因子达到了 40 dBZ 以上。

表 1 给出了 PR 对 “05.5.6” 系统探测到的降水廓线的统计结果。可以看到, 虽然对流降水像素数量少于层云降水 (二者之比是 0.55), 但是近地面处的对流降水平均降水率却是层云平均降水率的

表 1 “05.5.6” 华南飊线的降水廓线样本数量

Table 1 The sample number of precipitation profile of the squall line for “05.5.6”

类型	像素数量	总降水率/	平均降水率/	最大降水率/
		$\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$	$\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$	$\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$
对流降水	1993	32177	16.14	133.87
层云降水	3601	19207	5.33	110.37

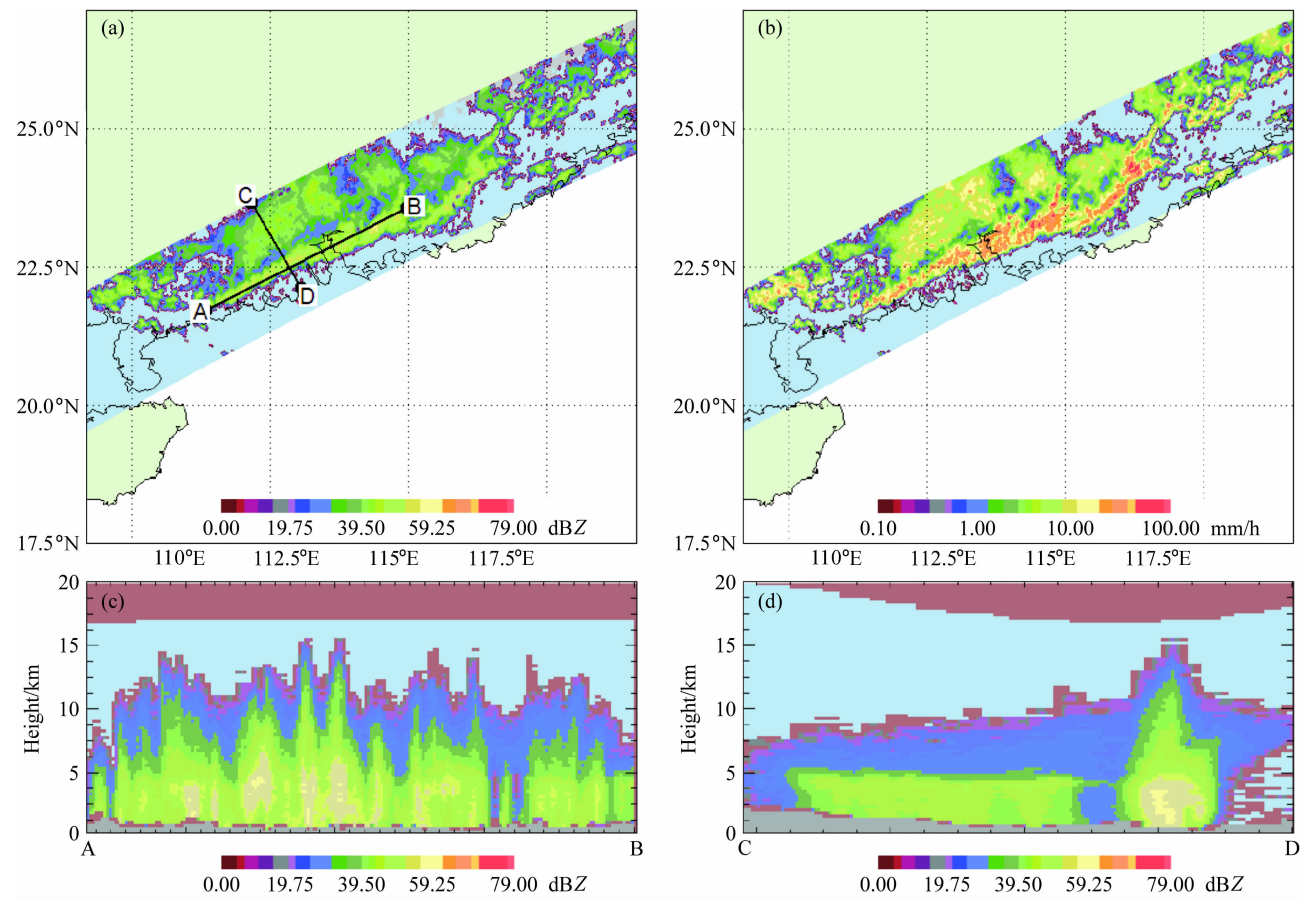


图 2 基于 PR 雷达的“05. 5. 6”水平和垂直剖面图：(a) 2 km 高度处雷达反射率因子的水平剖面；(b) 近地面降水率；沿 a 图 AB (c) 和 CD (d) 雷达反射率的垂直剖面

Fig. 2 Horizontal and vertical cross sections of reflectivity of the squall line on May 6, 2005 (hereinafter called “05. 5. 6”) based on Precipitation Radar (PR): (a) Horizontal cross section of radar reflectivity at 2 km; (b) precipitation rate at the near surface; vertical cross sections along (c) AB and (d) CD in (a)

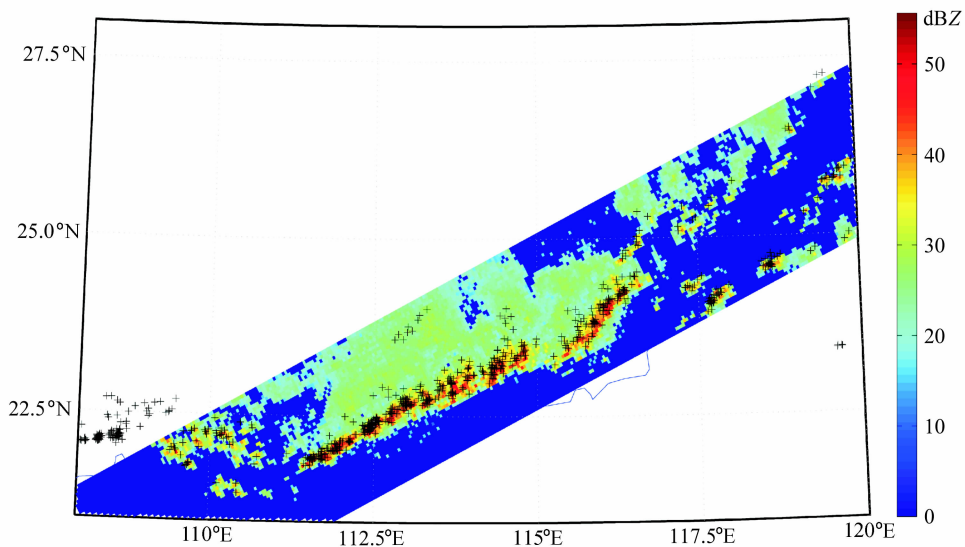


图 3 闪电和 6 km 高度雷达反射率因子 (dBZ) 叠加图。+ 表示闪电的位置

Fig. 3 Horizontal distribution of radar reflectivity at 6-km altitude with flash locations. Plus signs indicate flashes

3 倍, 导致对流降水的总降水率远大于层云的总降水率(二者之比为 1.68), 这种情况与 1998 年 7 月 20 日发生在武汉地区的中尺度特大暴雨(以下简称“98.7.20”, 傅云飞等, 2003)的情形相类似。不同的是, 这里的近地面层云平均降水率(5.11 mm/h)要高于“98.7.20”的 3.4 mm/h 和“99.6.9”的 2.9 mm/h, 原因可能与降水系统所处的阶段及层云区域的发展强度不同等有关。

4.2 “05.5.6”的闪电活动特征

LIS 在 TRMM 卫星过境期间对“05.5.6”系统一共观测到 785 个闪电(考虑到 LIS 的注视时间约 83 s, 相应的瞬时闪电频数约 567 flashes/min), 其中有 568 个闪电位于 PR 雷达视场之内, 给我们研究闪电与降水结构之间的关系提供了一个非常好的机会。另外, LIS 的算法表明, 当时在这一地区一共观测到了 90 个“区域”(一个“区域”近似于实际降水系统中的一个雷暴单体), 从“区域”的数量也可推断该系统由众多的对流单体组成, 是一个发展非常旺盛的强烈飊线系统。

图 3 是“05.5.6”系统的闪电与 6 km 高度上雷达反射率因子叠加图, 从中可见, 强对流区域呈带状分布, 基本都集中在系统的前部, 最大反射率因子达到 55 dBZ 以上, 在系统的层云区域, 也能看到其中存在较强的回波, 反射率因子可达 40 dBZ。绝大多数的闪电都发生在系统前部的强对流区, 闪电位置也呈现带状分布, 与强对流区相对应。另外, 有少数的闪电发生在层云区域, 闪电发生处的雷达反射率因子值相对周围区域要大。目前, 关于层云闪电的起源仍然不是很清楚, 但通常

认为强对流区的电荷平流和层云区内部的起电是两种比较重要的来源(Carey et al., 2005)。从降水率来看, “05.5.6”系统的层云区发展比较旺盛, 有可能为层云区内部起电提供了条件。

4.3 闪电活动与雷达反射率因子之间的关系

在闪电和雷达资料的对比研究中, 当不知道闪电的发生高度时, 通常采用 6 km 处的雷达反射率因子作为代表, 和闪电发生的位置与极性进行比较。之所以选择 6 km 高度, 一方面是因为对大多数的降水系统, 与其它高度相比, 6 km 高度的雷达回波面积通常最大, 另一方面, 6 km 高度一般也处在降水云的混合相区域(即温度在 $-20^{\circ}\text{C} < T < 0^{\circ}\text{C}$) 内部, 是雷暴云非感应起电机机制所涉及的主要起电区。图 4 给出了闪电数目随 6 km 高度雷达反射率因子的分布情况, 其中图 4a 中的反射率因子取与闪电位置最接近处的数值, 而图 4b 则是取闪电发生处临近区域(相邻像素)的最大值。可以看到, 闪电发生区域雷达反射率因子的分布范围相当广泛, 但图 4a 与图 4b 的结果有较大的差异。图 4a 中的雷达反射率因子主要集中在 20~45 dBZ 区间, 峰值频数发生在 30~35 dBZ, 有少数低于 25 dBZ, 这一情况与冯桂力等(2007)、曹治强和李万彪(2005)的结果类似。而图 4b 中的雷达反射率因子则明显移向高值区, 主要集中在 35~50 dBZ 区间, 峰值频数在 40~45 dBZ, 35 dBZ 以下明显减少, 25 dBZ 以下尤其明显。考虑到 LIS 闪电定位本身存在 3~6 km 的定位误差, 以及 LIS 闪电的位置是对“组”的位置进行权重得到, 所以 LIS 给出的闪电发生位置可能与实际的云中起电区之间存

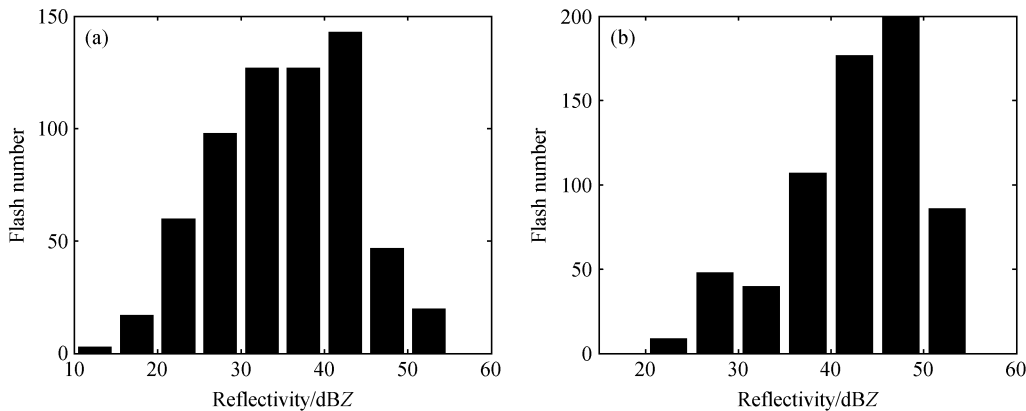


图 4 6 km 高度不同雷达反射率因子的闪电频数分布直方图: (a) 反射率因子为闪电发生处值; (b) 反射率因子为闪电发生临近最大值
Fig. 4 The histogram of variance of flash number with reflectivity at 6-km altitude: (a) The nearest reflectivity around flashes; (b) the highest reflectivity around flashes

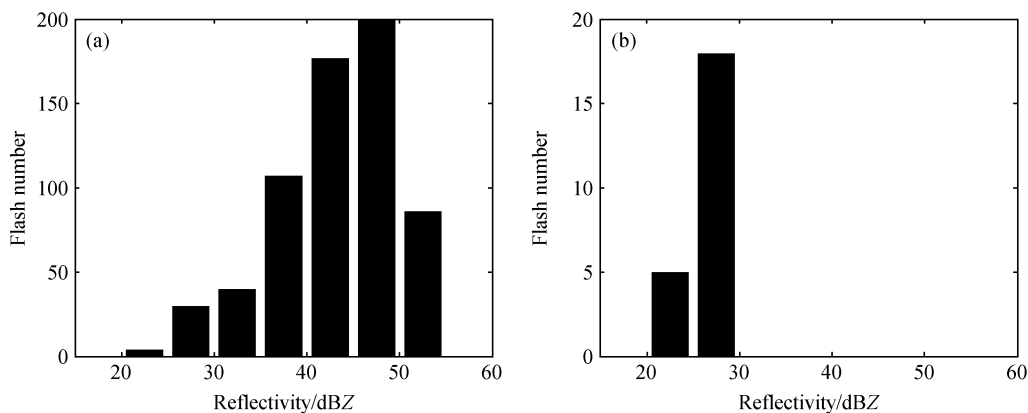


图5 6 km 高度 (a) 对流云区和 (b) 层云区不同雷达反射率因子的闪电频数分布直方图

Fig. 5 The histogram of variance of flash number with reflectivity at 6-km altitude for (a) convective region and (b) stratiform region

在一定的偏差,从而会导致结果直接取闪电发生处的反射率因子值偏低,而取闪电发生附近的最大反射率因子值方法能有效克服这一问题 (Toracinta et al., 1996),并可以使闪电的发生与雷暴云中起电区域有较好的对应。图5与图4b类似,不同的是图5对降水类型(即将降水分为对流降水和层云降水)进行了分类。从图5可以看到,图4b中低反射率因子区(30 dBZ 以下)的闪电主要是层云区的闪电,而高反射率区(30 dBZ 以上)的闪电主要由对流降水区所贡献。

一些研究通常把6 km 高度处的雷达反射率因子达到某一阈值(如40 dBZ)作为降水系统发生闪电的指标,但当6 km 的反射率因子达到阈值时,并不意味着就一定会发生闪电。图6给出了6 km 处的反射率因子达到35 dBZ 以上时,有闪电和无闪电发生处的平均反射率因子廓线。从图中可以看到,虽然6 km 上有闪电发生处的平均反射率因子要比没有闪电发生处要大,但差值并不是很大,而在6 km 以上高度(如7 km、8 km 等)二者之间的差距要明显大一些,即闪电发生处的反射率因子垂直递减率要小于没有闪电发生的地方,这通常意味着闪电发生区域的高处可能有较大或较多的冰相粒子存在。因此,除了雷达反射率因子本身的大小之外,其垂直递减率也可以看作是对流发展强度的一个指标。在下部大小相同的情况下,雷达反射率因子的垂直递减率越小,说明高处的雷达回波越大,预示着对流的垂直发展越旺盛,越有利于非感应起电机制的发生,越容易发生闪电。反之,即使6 km 的雷达反射率因子很大,但如果垂直递减率也较

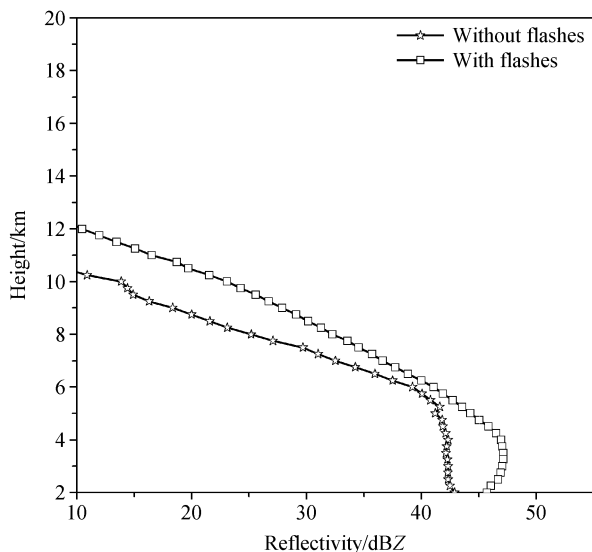


图6 6 km 处反射率因子大于35 dBZ 时有闪电与无闪电的平均雷达反射率廓线

Fig. 6 Mean vertical profile of radar reflectivity with and without flashes for Z (at 6 km) > 35 dBZ

大,则表明混合相区域的发展并不是很充分,也就不利于闪电的发生。

对降水系统的垂直结构而言,通常的雷达 RHI 图像并不能给出不同高度上的雷达反射率因子最大值,而最大反射率因子的垂直廓线 [Vertical Profile of Radar Reflectivity (简称 VPRR),定义为系统在各个高度上的最大反射率因子的垂直分布] 则可以提供这方面的信息。Szoke et al. (1986) 研究发现,热带海洋单体和中纬度大陆单体的 VPRR 有很大差异,并认为在混合相区的高反射率因子值是大粒子很好的指示,也是上升气流速度的一个很

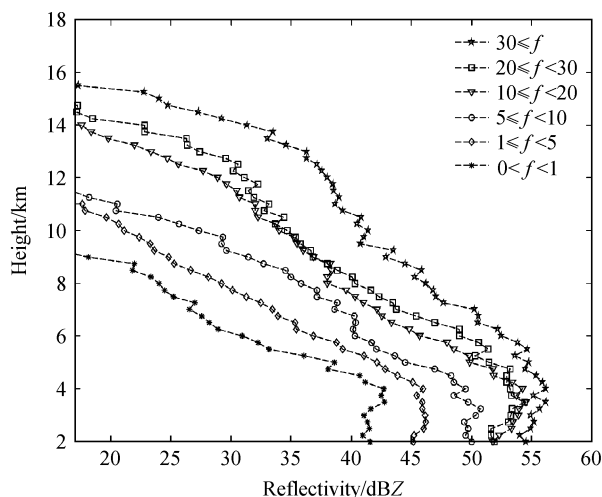


图7 不同闪电频数的“区域”最大反射率因子中值的垂直廓线。 f 表示闪电频数(单位: min^{-1})

Fig. 7 Vertical profile of the median of maximum radar reflectivity in the “areas” with different flash frequency. f is flash frequency (min^{-1})

好指示。Zipser and Lutz (1994) 在研究了大陆和海洋的 VPRR 特征后指出, 对流单体的 VPRR 可以作为雷暴强度和闪电发生概率的指示器。图7给出了“05.5.6”系统中不同闪电频数的雷暴单体(这里选用 LIS 中“区域”所在的事件所包含的像素作为单体定义)的最大反射率垂直廓线分布。可以看到, 具有最高闪电频数的单体, 其各高度上的反射率因子通常都是最高的, 并且冻结层以上反射率因子的递减率也最小; 而闪电频数最低的单体其各高度上的反射率因子通常最小, 同时冻结层以上反射率因子的递减率也最大; 中间闪电频数的单体其廓线居中。结果表明, 对流单体的最大反射率垂直廓线的确可以很好地指示单体的闪电频数和对流发展强度。

4.4 闪电活动与 85 GHz 微波亮温之间的关系

研究表明, 85 GHz 通道的亮温主要由雨层上的冰相粒子所决定, 非常适合探测降水系统中冰层的微物理结构。关于微波亮温与闪电活动的定性分析已经有一些, 但是很多是基于 SSM/I 的资料 (Mohr et al., 1996; Toracinta and Zipser, 2001)。TRMM 卫星的 TMI 与 SSM/I 类似, 但空间分辨率更高, 能够更精确地识别降水云的特征。图8(见文后彩图)给出了“05.5.6”系统叠加了闪电位置的 85 GHz 极化修正亮温分布图, 从图中可以看到, 与雷达所反映的飊线结构(对流区、转换区和

层云区)有所不同, 亮温图像中最低的亮温区域与对流区的高反射率相对应, 均指示着强对流的发生, 然而雷达图像中的转换区在亮温图像中并没有表现出来, 从强对流区的低亮温区向层云区亮温是逐步增加的。原因可能是转换区存在着大量的小冰晶, 对雷达而言因粒子尺度太小, 导致出现一个反射率低值区, 而冰晶对微波信号的强散射作用, 却造成了亮温的低值区。最后层云区的亮温最高, 一般在 240~260 K 左右。从图中还可见到, 绝大多数闪电发生在低亮温区域, 特别是低于 200 K 亮温区, 而在 240~260 K 的区域也可有闪电出现, 这一般对应着层云区的闪电, 有些可能是正地闪 (Carrey et al., 2005), 但遗憾的是, 仅由 LIS 的观测还无法做出闪电类型(云闪、负地闪、正地闪)的识别。

为进一步分析闪电发生与微波亮温的关系, 图9给出了不同 85 GHz 极化修正亮温间隔的闪电频数分布直方图, 与前面反射率分析类似, 这里也分两种情况进行分析, 即闪电发生处的值和闪电发生附近(相邻像素)的最小值。从图9a可以看到, 仅从闪电发生处的统计结果来看, 亮温值的分布范围很宽, 从低于 100 K 到 280 K 都可能发生闪电, 而且各个温度间隔的发生闪电的概率相差并不是很大。然而当取闪电发生附近亮温的最小值统计后(见图9b), 绝大多数的亮温集中在 200 K 以下(占 74%), 200 K 以上的较少(仅占 26%), 而 240 K 以上的亮温仅占总数的 6%。这一结果与 Mohr et al. (1996) 一致。Mohr et al. (1996) 发现, 中尺度对流系统中负地闪高密度区通常对应于 200 K 以下的 85 GHz 亮温区, 正地闪则大多分布在 210~250 K 的亮温区。

4.5 闪电活动与冰相降水含量之间的关系

实验室研究、模式计算和现场试验均表明闪电的产生与雷暴中冰相粒子的发展和数量有着非常密切的联系 (Takahashi, 1978; Saunders et al., 1991; MacGorman and Rust, 1998)。最近的星载(如 LIS 和 PR)和地基(如 NLDN、LMA 和地基雷达)观测结果均表明, 从全球尺度到区域尺度以及单体尺度, 降水尺度冰相粒子含量和闪电活动都存在非常密切的关系 (Petersen et al., 2005; Deierling et al., 2005; Gauthier et al., 2006), 这些结果的建立都与雷暴的非感应起电机机制紧密相联。但是实际上雷暴云类型很多(如单体、多单体、超单体、

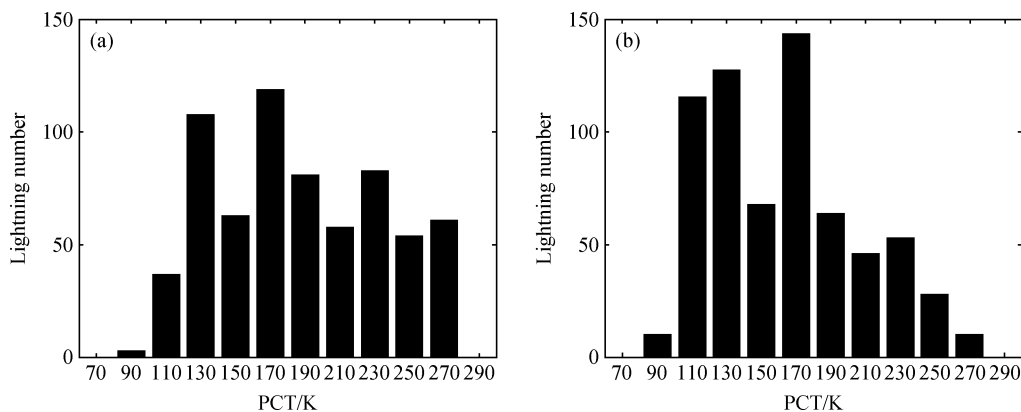


图9 不同 85GHz 极化修正亮温间隔的闪电频数分布直方图: (a) 闪电发生处; (b) 闪电发生临近最小值

Fig. 9 The histogram of variance of lightning number with PCT at 85 GHz: (a) The nearest value around flashes; (b) the lowest value around flashes

胞线等),而起电又是一个非常复杂的过程,对于不同类型的雷暴,冰相粒子含量和闪电活动之间是否也存在基本不变的相互关系?最近,Fehr et al. (2005)发现,多单体、超级单体中闪电与雷暴上部的水成物粒子含量表现为线性相关,而在胞线过程中没有发现二者之间有相关性。那么,是否所有的胞线中水成物粒子含量与闪电活动的关系都不好,还是 Fehr et al. (2005) 的发现仅仅是个别情况,下面,我们将针对发生在我国华南地区的这次胞线过程中的闪电活动与冰相粒子含量之间的关系进行检验。

利用 Carey and Rutledge (2000) 的参数化方案,我们首先计算了每个像素在 7~11 km 路径上的冰相降水含量,将结果与闪电分布情况进行比较[图 10 (见文后彩图)]。从图 10 中可以发现,在空间上闪电与高冰相降水含量的区域对应得非常好,冰相降水含量越高,该区域的闪电数量也越多。对比前面的图 3 还可以发现,闪电与冰相降水含量的对应关系要好于闪电与某一高度的雷达反射率的对应关系。为确定二者之间的相关程度,接下来利用双阈值单体识别算法对“05. 5. 6”系统进行了单体识别,并分别统计单体的闪电和 7~11 km 冰相降水含量,二者的相关统计结果见图 11。这里选用雷达反射率识别的单体而不是“区域”作为雷暴单体进行相关分析,是考虑到二者之间关系的进一步应用。例如,如果用雷达产品进行闪电活动参数化时我们事先并不能知道“区域”,但是用反射率却可以来确定雷暴单体。从图 11 中可以看到,“05. 5. 6”系

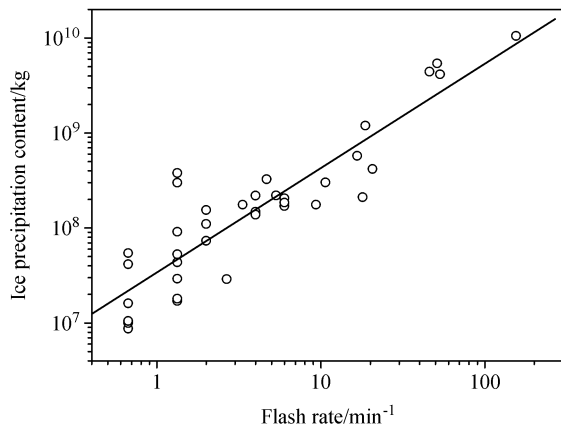


图 11 “05. 5. 6” 单体闪电频数与冰相降水含量的关系。直线为拟合线

Fig. 11 Flash rate versus ice precipitation content between 7-11 km altitude at cell scales for “05. 5. 6”. Solid line is a fitting line

统的单体闪电频数分布在很宽的范围,从最小 0.7 flashes/min 一直到最大 155 flashes/min;但在单体尺度上闪电和冰相降水含量之间表现出非常密切的关系,相关系数达 0.9 (通过了信度水平为 0.001 的显著性检验),其拟合公式为

$$\lg(M_{\text{ice}}) = 7.53 + 1.10 \lg(f); \rho = 0.90$$

其中, M_{ice} 为单体冰相粒子含量 (单位: kg), f 为闪电频数 (单位: min^{-1})。Gauthier et al. (2006) 研究了休斯敦地区大量的雷暴单体云地闪电和冰相降水含量之间的关系,也发现二者相关性非常高。虽然这里仅分析了一个系统,但其中包含大量的雷暴单体 (算法识别到 37 个)。另外,这里使用的不是云地闪电而是总闪电资料 (云闪和地闪之和)。

平均而言, 云闪与云地闪电数量之比大约是 3, 但会随着雷暴类型、海拔高度等因素而存在较大变化 (Boccippio et al., 2001; Soriano and de Pablo, 2007; 冯桂力等, 2008)。因此, 使用总闪电资料能够更准确地反映雷暴云的闪电活动特征。

为了检验“05.5.6”系统中总闪电频数和冰相降水含量之间的关系是否具有一定的普遍性, 我们又进一步分析了 2003 年 4 月 17 日发生在黄淮地区的另一个飊线系统 (以下简称“03.4.17”)。TRMM 卫星的三条轨道 (轨道号分别为 30902、30903 和 30904) 扫描到了“03.4.17”系统, 分析方法与前面相同, 结果见图 12。从图中可以看到, 两次飊线过程均表现出了非常频繁的闪电活动, 而且单体数量也非常多。在“03.4.17”系统的三条轨道中一共有 63 个单体被识别到, 单体的闪电频数分布范围也很宽, 最高闪电频数也达到了 53 min^{-1} 。“03.4.17”系统与两次飊线的综合拟合公式分别为

“03.4.17”: $\lg(M_{\text{ice}}) = 7.59 + 1.12 \lg(f)$, $\rho = 0.90$,
两次过程: $\lg(M_{\text{ice}}) = 7.56 + 1.115 \lg(f)$, $\rho = 0.92$,
均通过了信度水平为 0.001 的显著性检验。从上面可以看到, 虽然两个飊线系统发生的地理区域不同 (一个华南地区, 一个黄淮地区), 但是总闪电频数和冰相降水含量之间都表现出了明显的相关关系, 预示着飊线系统中的总闪电和冰相降水含量的关系是比较稳定的。

Petersen et al. (2005) 曾将全球划分为 $0.5^\circ \times$

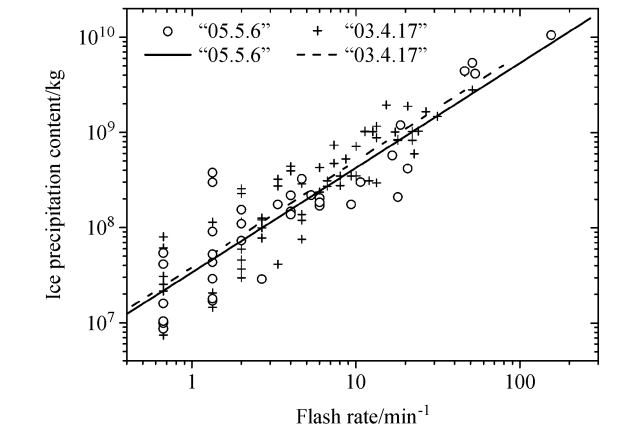


图 12 同图 11, 但为“05.5.6”与“03.4.17”单体闪电频数与冰相降水含量的关系
Fig. 12 Same as Fig. 11, but for “05.5.6” and the squall line on Apr 17, 2003

0.5° 的网格 (近似 $50 \text{ km} \times 50 \text{ km}$ 大小), 在全球尺度上研究了闪电活动 (总闪电) 和冰相降水含量关系, 而 Gauthier et al. (2006) 则利用美国的地面雷达和 NLDN 资料研究了休斯顿地区 (采用雷达体扫和 $2 \text{ km} \times 2 \text{ km}$ 网格两种方法) 和单体尺度上的地闪和冰相降水含量之间的关系, 这些研究都发现了雷暴的闪电活动与冰相降水含量之间存在的线性关系。我们这里的单体闪电频数所对应的 $7 \sim 11 \text{ km}$ 冰相降水含量与 Gauthier et al. (2006) 的单体研究结果在数量级上一致, 但数值要小一些。Gauthier et al. (2006) 仅使用了地闪资料, 我们这里使用的是总闪电资料, 而地闪一般仅占总闪电的一部分。因此, 与地闪相比, 单体总闪电频数所对应的 $7 \sim 11 \text{ km}$ 冰相降水含量要低一些。我们的研究进一步肯定了雷暴的闪电活动与冰相降水含量之间的密切关系, 同时由于针对飊线这种特定的中尺度对流系统, 所得到的结果在收敛性方面更好一些, 相关性也更好一些。

5 结论

利用 TRMM 卫星的雷达、闪电和微波资料, 对发生在我国华南前汛期的一次强烈飊线过程的闪电活动及其与降水结构的关系进行了详细研究, 并结合黄淮地区的另一次强飊线系统, 给出了基于冰相降水含量对闪电进行参数化的定量关系。主要结果如下:

- (1) 虽然对流降水的面积仅为层云降水的一半, 但对流降水的近地面平均降水率是层云降水的 3 倍, 总降水率方面却是对流降水远大于层云降水。“05.5.6”系统的闪电绝大多数发生在前部的对流区, 也有小部分发生在层云区域。
- (2) 在 6 km 高度上, 闪电发生处临近区域的最大雷达反射率因子主要集中在 $35 \sim 50 \text{ dBZ}$ 区间, 峰值频数为 $40 \sim 45 \text{ dBZ}$, 35 dBZ 以下较少。研究表明, 对流单体的最大反射率垂直廓线可以很好地指示单体的闪电频数和对流发展强度。
- (3) 绝大多数闪电发生在低亮温区域, 特别是亮温低于 200 K 的区域 (占总闪电数的 74%), 在亮温高于 200 K 的区域闪电活动较少 (占总闪电数的 26%)。另外, 亮温高于 240 K 的区域也可看到闪电的出现 (仅占总闪电数的 6%), 这一般对应于飊线系统的层云区。

(4) 在单体尺度上,“05.5.6”飑线中的总闪电频数和冰相降水含量之间表现出了密切的关系,相关系数为 0.9。通过与黄淮地区的“03.4.17”飑线结果的对比发现,两个飑线系统的单体尺度上的总闪电频数和冰相降水含量之间的关系非常稳定,并进一步给出了二者的拟合公式,相关系数达到了 0.92。

本文的研究表明,飑线中的闪电活动与雷达反射率、微波亮温 and 冰相降水含量之间都存在着密切的关系,结果不但为利用雷达反射率和微波亮温信息预警预报闪电活动提供了一定的理论基础,同时也表明了闪电资料能够用于飑线系统中强对流区(或单体)的识别。随着我国闪电探测技术的进步和全国范围的探测网络的建立,可以预计闪电资料将会成为一种新型的气象资料,并将在强对流天气的预警预报业务中发挥重要的作用。由于 TRMM 卫星属极轨观测方式,还存在探测时间比较有限的不足,下一步的工作应该利用我国的闪电定位资料对闪电和雷达、微波信号之间的关系进行更细致的分析,并进一步考虑将闪电定位资料同化进数值模式,从而改进中小尺度强对流天气的预警预报水平。

致谢 感谢审稿人所提的修改意见。感谢全球水文资源中心为本文提供了 LIS 资料,TRMM 科学数据和信息系统为本文提供了 PR 和 TMI 资料。

参考文献 (References)

- Boccippio D J, Cummins K L, Christian H J, et al. 2001. Combined satellite- and surface-based estimation of the intracloud-cloud-to-ground lightning ratio over the continental United States [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 129: 108–122.
- 曹治强, 李万彪. 2005. 两个中尺度对流系统的降水结构和闪电特征 [J]. *气象学报*, 63 (2): 243–249. Cao Zhiqiang, Li Wanbiao. 2005. Analysis of the structures of rainfall and the characters of lightning of two meso-scale systems [J]. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 63 (2): 243–249.
- 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: 33–64.
- Carey L D, Rutledge S A. 2000. The relationship between precipitation and lightning in tropical island convection: A C-band polarimetric radar study [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 128: 2687–2710.
- 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: D03105, doi: 10.1029/2003JD004371.
- Deierling W, Latham J, Petersen W A, et al. 2005. On the relationship of thunderstorm ice hydrometeor characteristics and total lightning measurements [J]. *Atmos. Res.*, 76: 114–126.
- 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: 127–166.
- Ely B L, Orville R E, Carey L D, et al. 2008. Evolution of the total lightning structure in a leading-line, trailing-stratiform mesoscale convective system over Houston, Texas. [J] *J. Geophys. Res.*, 113, D08114, doi:10.1029/2007JD008445.
- Fehr T, Dotzek N, Höller H. 2005. Comparison of lightning activity and radar-retrieved microphysical properties in EULINOX storms [J]. *Atmos. Res.*, 76: 167–189.
- 冯桂力, 郗秀书, 袁铁, 等. 2007. 雹暴的闪电活动特征与降水结构研究 [J]. *中国科学 (D辑)*, 37 (1): 123–132. Feng Guili, Qie Xiushu, Yuan Tie, et al. 2007. Lightning activity and precipitation structure of hailstorms [J]. *Science in China (Series D)* (in Chinese), 37 (1): 123–132.
- 冯桂力, 郗秀书, 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 Guili, Qie Xiushu, Wu Shujun. 2008. Cloud-to-ground lightning characteristics of hail clouds in Shandong Province [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 32 (2): 289–299.
- 傅云飞, 宇如聪, 徐幼平, 等. 2003. TRMM 测雨雷达和微波成像仪对两个中尺度特大暴雨降水结构的观测分析研究 [J]. *气象学报*, 61 (4): 421–431. Fu Yunfei, Yu Rucong, Xu Youping, et al. 2003. Analysis on precipitation structures of two heavy rain cases by using TRMM PR and TMI [J]. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 61 (4): 421–435.
- 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 [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 33, L20803, doi: 10.1029/2006GL027244.
- Houze R A Jr, Biggerstaff M I, Rutledge S A, et al. 1989. Interpretation of Doppler weather-radar displays of midlatitude mesoscale convective systems [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 70: 608–619.
- Lang T J, Miller L J, Weisman M, et al. 2004. The severe thunderstorm electrification and precipitation study [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 85: 1107–1125.
- 李鸿洲, 蔡则怡, 徐元泰. 1999. 华北强飑线生成环境与地形作用的数值试验研究 [J]. *大气科学*, 23 (6): 713–721. Li Hongzhou, Cai Zeyi, Xu Yuntai. 1999. A numerical experiment of topographic effect on genesis of the squall line in North China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 23 (6): 713–721.
- 刘淑媛, 孙健, 杨引明. 2007. 上海 2004 年 7 月 12 日飑线系统中尺度分析研究 [J]. *气象学报*, 65 (1): 84–93. Liu Shuyuan, Sun Jian, Yang Yinming. 2007. Structural analysis of meso-scale con-

- vective systems in the squall line process on 12 July 2004 in Shanghai [J]. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 65 (1): 84–93.
- 刘勇, 马廷标, 等. 1998. 一次飢线过程中龙卷及飢锋生成的中尺度分析 [J]. *大气科学*, 22 (3): 326–335. Liu Yong, Ma Tingbiao, et al. 1998. A meso-scale analysis of tornado and squall front forming in a squall line process [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (*Scientia Atmospherica Sinica*) (in Chinese), 22 (3): 326–335.
- 马明, 陶善昌, 祝宝友, 等. 2004. 1997/1998 El Niño 期间中国南部闪电活动的异常特征 [J]. *中国科学 (D 辑)*, 34 (9): 873–881. Ma Ming, Tao Shanchang, Zhu Baoyou, et al. 2004. The anomalous variation of the lightning activity in southern China during the 1997/98 El Niño event [J]. *Science in China (Series D)* (in Chinese), 34 (9): 873–881.
- MacGorman D R, Rust W D. 1998. *The Electrical Nature of Storms* [M]. New York: Oxford Univ. Press, 422 pp.
- Mohr K I, Toracinta R, Zipser E J, et al. 1996. A comparison of WSR-88D reflectivities, SSM/I brightness temperatures, and lightning for mesoscale convective systems in Texas. Part II. SSM/I brightness temperatures and lightning [J]. *J. Appl. Meteor.*, 35: 919–931.
- Orville R E, Henderson R W, Bosart L F. 1988. Bipole patterns revealed by lightning locations in mesoscale storm systems [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 15: 129–132.
- Petersen W A, Rutledge S A. 2001. Regional variability in tropical convection: Observations from TRMM [J]. *J. Climate*, 14: 3566–3586.
- Petersen W A, Christian H J, Rutledge S A. 2005. TRMM observations of the global relationship between ice water content and lightning [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 32: L14819, doi: 10.1029/2005GL023236.
- 鄒秀书, 袁铁, 周筠珺. 2003. 卫星观测到的全球闪电活动及其地域差异 [J]. *地球物理学报*, 46 (6): 743–750. Qie Xiushu, Yuan Tie, Zhou Yunjun. 2003. Global lightning activities and their regional differences observed from the satellite [J]. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 46 (6): 743–750.
- Qie X, Toumi R, Yuan T. 2003. Lightning activities on the Tibetan Plateau as observed by the lightning imaging sensor [J]. *J. Geophys. Res.*, 108 (D17), 4551, doi: 10.1029/2002JD003304.
- Saunders C P R, Keith W D, Mitzeva R P. 1991. The effect of liquid water on thunderstorm charging [J]. *J. Geophys. Res.*, 96 (D6): 11007–11017.
- Seity Y, Soula S, Tabary P, et al. 2003. The convective storm system during IOP 2a of MAP: Cloud-to-ground lightning flash production in relation to dynamics and microphysics [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 129: 523–542.
- Soriano L R, de Pablo F. 2007. Total flash density and the intra-cloud/cloud-to-ground lightning ratio over the Iberian Peninsula [J]. *J. Geophys. Res.*, 112, doi: 10.1029/2006JD007624.
- Spencer R W, Goodman H M, Hood R E. 1989. Precipitation retrieval over land and ocean with the SSM/I: Identification and characteristics of the scattering signal [J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 6: 254–273.
- Sun Tingkai, Tan Zheming. 2001. Numerical simulation study for the structure and evolution of tropical squall line [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 18 (1): 117–138.
- Szoke E J, Zipser E J, Jorgensen D P. 1986. A radar study of convective cells in mesoscale systems in GATE. Part I: Vertical profile statistics and comparison with hurricanes [J]. *J. Atmos. Sci.*, 43: 182–198.
- Takahashi T. 1978. Riming electrification as a charge generation mechanism in thunderstorms [J]. *J. Atmos. Sci.*, 35: 1536–1548.
- Toracinta E R, Mohr K I, Zipser E J, et al. 1996. A comparison of WSR-88D reflectivities, SSM/I brightness temperatures, and lightning for MCSs in Texas. Part I: Radar reflectivity and lightning [J]. *J. Appl. Meteor.*, 35: 902–918.
- Toracinta E R, Zipser E J. 2001. Lightning and SSM/I-ice-scattering mesoscale convective systems in the global tropics [J]. *J. Appl. Meteor.*, 40: 983–1002.
- 谢健标, 林良勋, 颜文胜, 等. 2007. 广东 2005 年“3·22”强飢线天气过程分析 [J]. *应用气象学报*, 18 (3): 321–329. Xie Jianbiao, Lin Liangxun, Yan Wensheng, et al. 2007. Dynamic diagnosis of an infrequent squall line in Guangdong on March 22, 2005 [J]. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 18 (3): 321–329.
- 张义军, 孟青, Krehbiel P R, 等. 2004. 超级单体雷暴中闪电 VHF 辐射源的时空分布特征 [J]. *科学通报*, 49 (5): 499–505. Zhang Yijun, Meng Qing, Krehbiel P R, et al. 2004. Spatial and temporal characteristics of VHF radiation source produced by lightning in supercell thunderstorms [J]. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 49 (5): 499–505.
- 郑媛媛, 傅云飞, 刘勇, 等. 2004. 热带测雨卫星对淮河一次暴雨降水结构与闪电活动的研究 [J]. *气象学报*, 62 (6): 790–802. Zheng Yuanyuan, Fu Yunfei, Liu Yong, et al. 2004. Heavy rainfall structures and lightning activities in a cold-front cyclone happened in Huai River derived from TRMM PR and LIS observations [J]. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 62 (6): 790–802.
- Zipser E J, Lutz K R. 1994. The vertical profile of radar reflectivity of convective cells: A strong indicator of storm intensity and lightning probability? [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 122: 1751–1759.

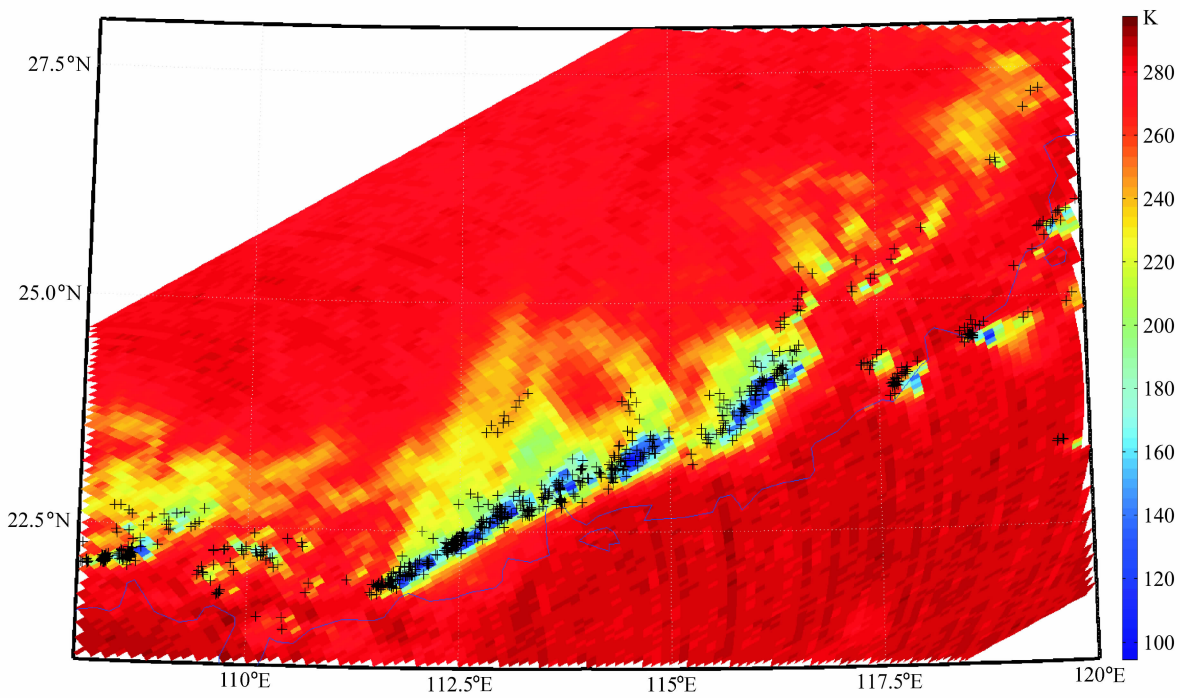


图 8 闪电与 85GHz 极化修正亮温 (单位: K) 叠加图。+ 为闪电位置
Fig. 8 Polarization-corrected temperature (PCT) at 85 GHz with flash locations. Plus signs indicate flashes

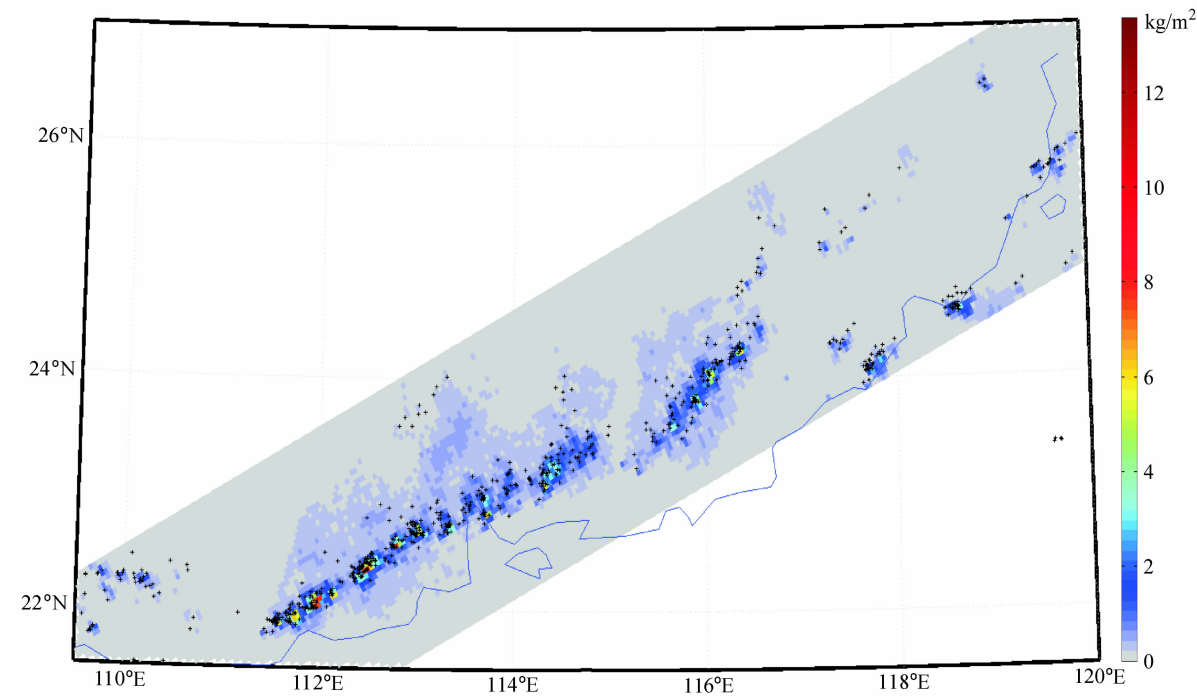


图 10 闪电与 7~11 km 冰相降水含量 (单位: kg/m^2) 叠加图。+ 表示闪电
Fig. 10 Horizontal distribution of ice precipitation content between 7-11 km altitude with flash locations. Plus signs indicate flashes