

# 闪电气象学研究进展<sup>\* 1</sup>

郟秀书 刘冬霞 孙竹玲

QIE Xiushu LIU Dongxia SUN Zhuling

中国科学院大气物理研究所中层大气与全球环境重点实验室,北京,100029

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

2013-12-26 收稿,2014-03-26 改回.

郟秀书, 刘冬霞, 孙竹玲. 2014. 闪电气象学研究进展. 气象学报, 72(5): 1054-1068

Qie Xiushu, Liu Dongxia, Sun Zhuling. 2014. Recent advances in research of lightning meteorology. *Acta Meteorologica Sinica*, 72(5): 1054-1068

**Abstract** Lightning meteorology focuses on investigating the lightning activities in different types of convective weather systems and the relationship of lightning to the dynamic and microphysical processes in thunderstorms. With the development and application of advanced lightning detection and location technologies, lightning meteorology has been developed into an important interdisciplinary between atmospheric electricity and meteorology. This paper mainly reviews the advances of lightning meteorology research in recent years in China from the following five aspects: (1) development of advanced lightning location technology, (2) characteristics of lightning activity in different convective systems, (3) relationship of lightning to the dynamic and microphysical processes in thunderstorms, (4) charge structure of thunderstorms, and (5) lightning data assimilation techniques and application to severe weather forecasting. In addition, some important aspects on future research of the lightning meteorology are proposed.

**Key words** Lightning activity, Lightning detection, Charge structure, Lightning assimilation, Convective weather system

**摘要** 闪电气象学是随着现代闪电探测和定位技术的发展与应用而不断发展起来的一个学科,也是大气电学和气象学的重要交叉学科分支。综述了近年来中国在闪电气象学方面的发展和研究进展,主要从 5 个方面进行阐述和回顾:在闪电气象学研究中发挥了重要作用的现代闪电探测和定位技术,不同类型强对流天气系统的闪电活动特征,闪电活动与雷暴的动力、微物理结构的关系,雷暴电荷结构探测和数值模拟,以及闪电资料同化方法及其在强对流天气中的预警预报作用和闪电的预报等,并指出了中国闪电气象学今后的努力方向。

**关键词** 闪电活动, 闪电定位, 电荷结构, 闪电资料同化, 对流天气系统

**中图法分类号** P401 P4446 P427.3

## 1 引言

闪电是对流性天气系统发展到一定程度的产物,不仅与动力过程和微物理过程的发展密切相关,而且可在很大程度上指示强对流的发生和发展。在热力、动力或者地形条件的作用下,对流不稳定环境中被抬升的气团形成积雨云(雷暴云),并伴随着强

烈的上升气流和下沉气流。雷暴云中不同相态的水成物粒子由于运动速度的不同,不断发生碰并、分离并伴随着电荷的转移,从而使雷暴云内不同的水成物粒子携带不同极性的电荷,形成不同电荷区并最终导致闪电的发生。闪电气象学主要研究不同强对流天气条件下的闪电活动规律、闪电与云的动力过程和微物理过程的关系、闪电资料在强对流天气监

\* 资助课题:国家重点基础研究发展计划项目(2014CB441401)、国家自然科学基金项目(40930949、41105002)。

作者简介:郟秀书,主要从事大气电学和雷电气象学研究。E-mail: qjex@mail.iap.ac.cn

測預警、預報中的應用以及閃電的預報問題等。

基於現代閃電探測技術的觀測實驗和資料的獲取是詳細了解強對流系統中閃電活動規律的基礎,也是閃電資料在強對流災害性天氣預警預報中應用的基礎。因此,本文首先對在閃電氣象學研究中發揮了重要作用的現代閃電定位技術的發展和現狀進行簡單回顧,然後介紹不同強對流天氣中的閃電特徵以及與雲的動力、微物理過程的關係、雷暴的電荷結構、閃電資料的同化方法以及在強對流監測預警、預報中的應用和閃電的預報等。由於篇幅所限,不涉及閃電物理學及效應方面的研究進展。

## 2 現代閃電定位技術的發展

隨著電子技術和信息技術的發展,20世紀70年代開始,美國、法國、中國等先後開始研發先進的閃電定位系統,從20世紀80年代研發成熟的地閃定位網,至90年代已研發出可以對閃電放電過程進行精確圖示的甚高頻(VHF)輻射源定位系統、全球閃電定位網絡,以及基於衛星的空間閃電探測等。這些探測技術不斷發展完善,並應用於一些有重要影響的國際研究計劃,例如:2000年美國在中部大平原地區開展的“強雷暴起電和降水研究計劃(STEPS)”,2004年開展的“雷暴起電和閃電實驗(TELEX)”計劃。2007年由法國倡議發起的歐洲為期10年(2010—2020年)的天氣觀測計劃“地中海水循環實驗(HyMex)”等,都採用了高時空分辨率的閃電甚高頻輻射源三維定位技術。基於先進閃電探測手段開展觀測實驗,獲得高時空分辨率的綜合觀測資料,研究不同強對流天氣系統中的閃電活動特徵及其與動力和微物理過程的關係是目前國際大氣電學研究的一個活躍領域,並促進了閃電探測資料在災害性天氣監測預報中的應用。

### 2.1 地基閃電探測和定位技術

閃電放電過程產生頻譜範圍很寬的輻射電磁波,不僅在無線電頻段有很強的輻射,甚至在X射線和 $\gamma$ 射線高能輻射頻段也有可探測到的輻射,從而為閃電遙感探測和定位提供了重要途徑。應用最廣泛的閃電定位系統是最早由美國亞利桑那大學發展起來的基於交叉環磁天線定向法的地閃定位系統(DF),工作在甚低頻和低頻(VLF/LF)頻段,可以根據地閃回擊產生的電磁輻射特徵波形對地閃進行識別,從而實現對地閃的定位。隨著全球定位技術

(GPS)的發展,這種定位系統已經發展成為基於地閃定位系統和時間差(TOA)技術的聯合地閃定位技術(IMPACT),並首先在美國進行業務運行(Cummins, et al, 1998),稱為美國國家閃電定位網絡(NLDN),隨後在整個北美、南美、歐洲和中國等許多國家都建設了類似的閃電定位網絡。地閃定位網絡探測效率約95%,定位精度優於500 m,時間精度約1 ms (Biagi, et al, 2007)。中國氣象部門和電力部門都建立了類似的地閃定位網絡,地閃定位除了給出回擊發生的時間、地點等信息外,還利用所探測的磁場峰值給出回擊電流峰值的估算。在20世紀80—90年代,地閃定位系統在對強對流天氣系統閃電特徵的認識方面發揮了重要作用(Reap, et al, 1989; Qie, et al, 1993)。

美國新墨西哥礦業技術學院開發的閃電圖示系統(LMA)是一種基於長基線時間差的閃電甚高頻輻射源定位技術,也是當前國際上最精確的一種三維閃電定位技術(Rison, et al, 1999)。最初的中心頻率為63 MHz,帶寬為6 MHz,根據所處區域的電磁輻射背景干擾情況,可以在甚高頻頻段選擇不同的中心頻率。該系統不僅能夠探測占全部閃電不到1/3的地閃,而且也能够對占全部閃電2/3以上的雲閃進行三維定位。閃電圖示系統採用非线性最小二乘法反演計算輻射源的三維空間位置,能夠對閃電的發生、發展過程進行詳細描述。對一個孤立的閃電放電過程,閃電圖示系統一般可以探測到幾百至上萬個輻射事件,可以精確地描繪閃電的三維發展結構。閃電圖示系統已經在美國和歐洲多個與強對流有關的科學觀測計劃,如強雷暴起電和降水研究計劃、雷電起電和閃電實驗、深對流雲和化學以及地中海循環實驗等觀測實驗中作為主要的探測手段被應用。美國閃電探測與測距系統(LDAR II)採用與閃電圖示系統類似的定位原理,可選擇兩個工作頻段(60—66和222—228 MHz),也是目前探測效率和定位精度均較高的甚高頻閃電輻射源三維定位系統。

中國也研製了與閃電圖示系統類似的長基線時間差法閃電甚高頻輻射源三維定位系統(LMS),其中心頻率為270 MHz,在網內及網絡附近10 km左右的範圍內,當輻射源發生高度為4—15 km時,水平誤差不超過11 m,高度誤差一般是水平誤差的2—3倍,隨著輻射源高度的降低,高度誤差會增大

(张广庶等,2010)。图 1 给出的是由 LMS 观测得到的一次云闪辐射源的三维定位结果,可以清楚地看出闪电辐射源的传输路径,闪电首先在下部负电荷区始发,然后向上传输至正电荷区,并随后在上、

下两个电荷区内发展。目前 LMS 还仅限于科学研究,未能实现对一次雷暴过程闪电过程的实时、连续定位,因此尚不能用于对强对流天气系统中闪电活动的业务化监测。

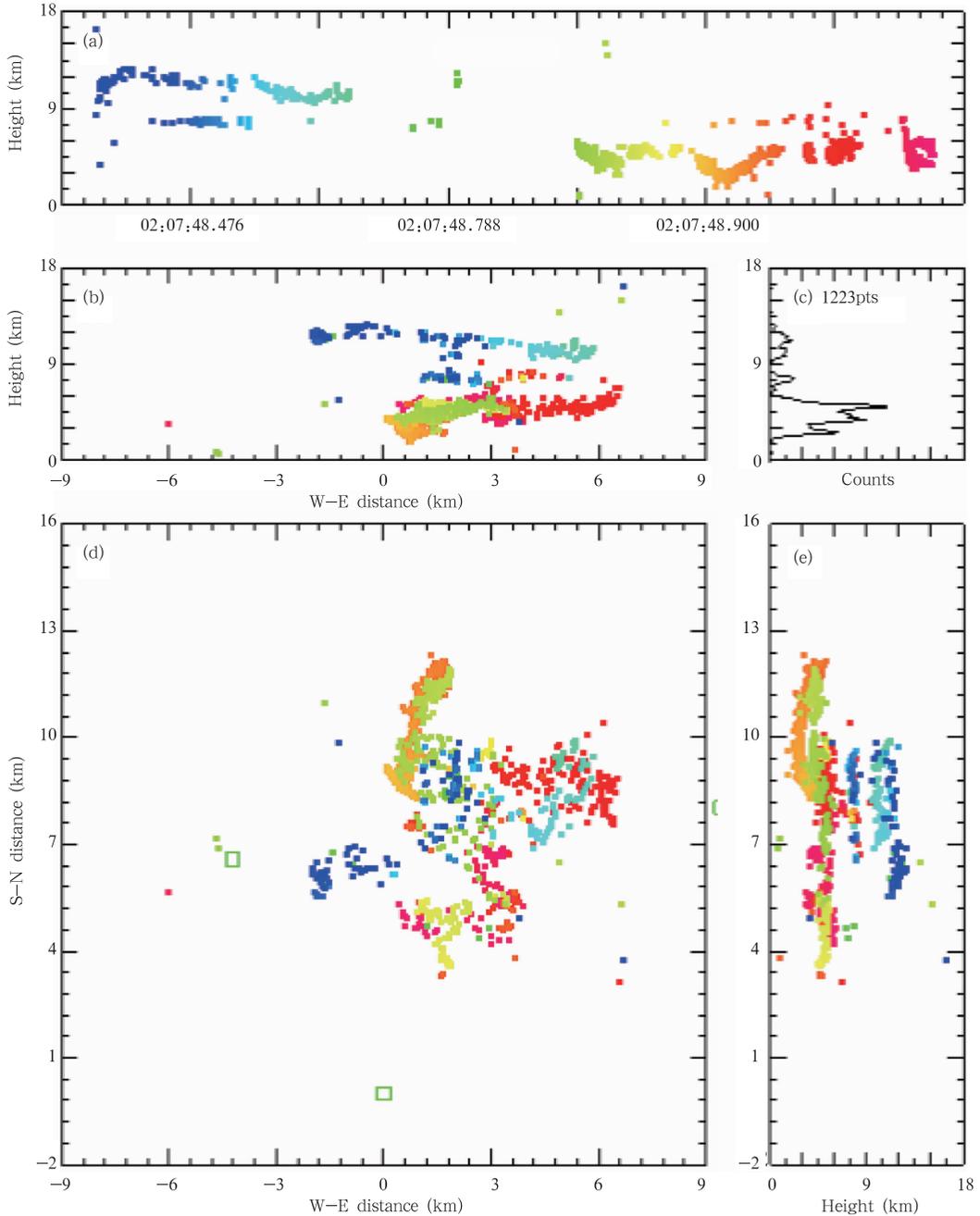


图 1 LMS 对一次云闪发展过程的三维定位(张广庶等,2010)

(a. 闪电辐射源高度随时间的变化, b. 南北方向上的立面投影, c. 辐射源发生数目随高度的分布, d. 平面投影, e. 东西方向上的立面投影)

Fig. 1 The 3D location of an IC lightning detected by LMS

(a. The height of lightning radiation versus time, b. location projection in North-South, c. the number of lightning radiation sources versus height, d. location projection in East-West, e. east-westward vertical projection of lightning radiation sources; Different colors stand for time evolution, and the discharge started in blue; Zhang, et al. 2010)

法国 SAFIR (System d'Alerte Fondre par Interferometrie Radio electrique) 是一种以干涉法为基础的甚高频闪电探测和定位系统。SAFIR 接收信号的中心频率可在 110—118 MHz 范围内进行选择,带宽为 1 MHz。SAFIR 也具有三维定位的能力,可以给出闪电通道结构的发展情况,同时,SAFIR 系统还集成有低频电场天线,利用 300 Hz 到 3 MHz 的电场信号来分辨云闪和地闪 (Richard, et al, 1986)。Liu 等 (2011) 利用北京 SAFIR3000 闪电定位网以及多普勒天气雷达,分析了一次线状中尺度对流系统的闪电辐射源演变特征,发现探测网的中心辐射源与雷达回波有较好的一致性,但是也有较多辐射点的高度误差相对较大。

此外,中国还有基于干涉法的窄带干涉仪 (张广庶等, 2008)、宽带干涉仪 (董万胜等, 2002) 和时间差法 (曹冬杰等, 2012; Sun, et al, 2013) 的短基线闪电甚高频辐射源定位系统,但是大多仅限于二维定位和有限的三维定位 (吴亭等, 2012),且由于覆盖范围较小,尚仅限于闪电物理研究中。

全球闪电定位网 (WWLLN) 中心站位于美国华盛顿大学,工作于甚低频段 (3—30 kHz),可以探测到几千千米外闪电发生的电磁辐射信号,通过全球约 60 个地面测站对闪电进行连续监测,并利用全球定位系统获得闪电电磁辐射信号到达各测站的精确时间,进而利用时间差对闪电进行定位 (Dowden, et al, 2008)。由于工作频段较低而且目前测站较少,全球闪电定位网的探测精度和效率都较低,探测精度约为 10 km。随着测站数目的增多,其探测效率已由 2006—2007 年的 3.88% 提高至 2008—2009 年的 10.30%。此外,工作在甚低频/低频频段的闪电定位系统还有美国的洛斯阿拉莫斯天线阵列 (LASA, Smith, et al, 2002)、欧洲闪电探测网 (LINET, Betz, et al, 2009) 和北京闪电定位网络 (BL-Net, Wang, et al, 2009) 等。

## 2.2 空基闪电光学探测技术

热带测雨卫星 (TRMM) 闪电成像传感器 (LIS) 可以提供星下强对流天气系统中的总闪电活动特征。闪电成像传感器能对 35°S—35°N 的地球闪电活动进行观测,在地球上的视野为 600 km × 600 km,空间分辨率为 3—6 km,可监测一个孤立雷暴或雷暴系统中大约 90 s 的闪电活动。闪电成像传感器之前的类似探测器为 OTD (Optical Transient Detector),搭载于微实验室卫星 (Mictolab-1) 上,可以探测地球上 75°S—75°N 范围内 1300 km ×

1300 km 区域内的闪电活动,空间分辨率为 10 km,时间分辨率为 2 ms,探测效率为 50%—66%。闪电成像传感器不区分云闪和地闪,且能够昼夜连续观测, Boccippio 等 (2002) 对比闪电成像传感器和闪电图示系统探测资料,发现两种资料在空间和时间上具有很好的一致性,云闪发生在雷暴云中上部,相对地闪更容易被闪电成像传感器探测到,闪电成像传感器倾向于探测到地闪放电的后期,其探测效率在中午和晚上分别为 (73 ± 11)% 和 (93 ± 4)%,对云闪的定位误差约为 4 km,对地闪定位误差约为 12 km。

尽管 OTD 与闪电成像传感器两种探测资料的空间分辨率、观测范围等方面存在差异,美国国家航天航空局 (NASA) LIS/OTD 团队对这两个产品进行了相互校验和融合,目前已经形成了长时段 (1995 年 5 月至今) 的全球闪电活动数据库,不仅考虑了仪器探测效率的时空变化,而且还对传感器的注视时间进行了订正,是全球第一个长时段、且有较高精度的闪电资料库。图 2 给出了基于 1995 年 5 月—2012 年 2 月共计 18 年的 LIS/OTD 资料得到的全球闪电活动分布,可以明显地看出陆地闪电活动远多于海洋,二者闪电密度之比约为 10:1 (朱润鹏等, 2013)。闪电成像传感器探测资料与热带测雨卫星上的降水雷达 (PR)、微波探测器 (TMI) 等传感器探测资料相结合,可以提供不同强对流天气系统的闪电活动、降水和微物理特征等资料。

## 3 不同强对流天气系统中的闪电活动特征

不同类型强对流天气系统中的闪电特征常常会有很大差异,随着闪电探测技术的发展,利用闪电定位网、多普勒天气雷达以及卫星等探测技术对雷暴中闪电活动特征和规律的认识已有很大提高。20 世纪 80—90 年代随着地闪定位网在美国布网并投入业务化观测,基于地闪定位资料对一些强对流天气系统的闪电活动特征的认识取得了重要进展。之后,随着可以同时的云闪和地闪进行定位的 SAFIR、LDAR 和 LMA,以及卫星闪电探测系统 (LIS/OTD)、WWLLN 等对闪电资料的获取,对具有不同降水特征的强对流天气 (如飑线、超级单体、冰雹云、台风) 的闪电活动规律和成因也已有大量研究成果 (郟秀书等, 2005; 张义军等, 2006; Qie, 2012),虽然尚未获得完全清晰的认识,但是以闪电定位和多参数雷达等为主要探测手段开展的大规模综合实验已经或正在为揭示不同天气系统的闪电活动规律提供重要的观测资料。

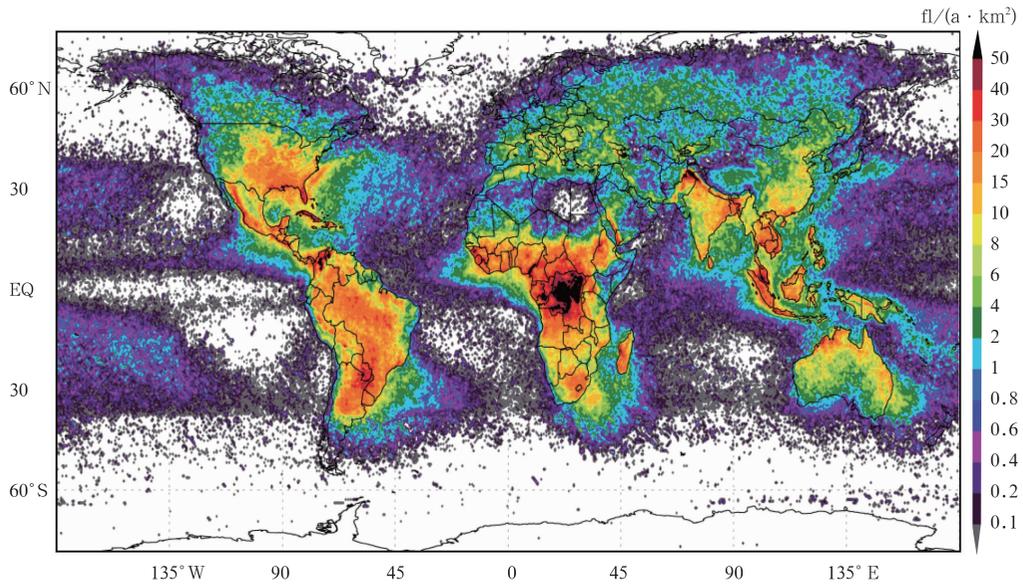


图2 基于18年(1995年5月—2012年2月)LIS/OTD资料的全球闪电活动分布(郟秀书等,2013)

Fig. 2 Lightning distribution across the globe in 18 years (May 1995 – February 2012) by LIS/OTD (Qie, et al, 2013)

### 3.1 冰雹云中的闪电活动特征

一般而言,雷暴生命史中负地闪大于正地闪的发生频率,但从对冰雹云的个例统计来看,冰雹云中正地闪发生的比例较高(Carey, et al, 1998;冯桂力等,2006,2007;Liu, et al, 2009)。冯桂力等(2007)基于地闪定位、雷达、TRMM/LIS探测资料研究发现,整个冰雹云过程中正地闪比例较高,降雹阶段恰好对应着正地闪快速增加的阶段,Zheng等(2010)利用SAFIR3000总闪电和雷达探测资料,对冰雹云个例的研究也发现降雹与正地闪存在很好的对应关系,因此,基于正地闪频数可以在一定程度上指示冰雹的发生。但是,Soula等(2004)对法国南部的冰雹云研究表明,该地区冰雹云的地闪频数远低于那些仅产生降水的风暴,其中冰雹云的地闪频数一般不超过2 fl/min,而暴雨却可以达到12 fl/min。因此,单纯用正地闪频数的大小来识别冰雹云可能是不可靠的。

实际上,包括冰雹云在内的强天气事件中常常存在频繁的云闪活动,总闪电(包括云闪和地闪)频数的跃增对强天气事件发生的指示作用更为有效。Schultz等(2011)选择了发生于美国4个不同区域的711个雷暴,保证了对强雷暴(即产生龙卷、冰雹直径 $\geq 1.9$  cm,或者风速 $\geq 26$  m/s)和非强雷暴都有很好的代表性,利用 $2\sigma$ 闪电跃增法(DFRDT),分别检验了总闪电和地闪跃增对强天气事件的检测能

力,发现虽然总闪电和地闪在强天气事件发生之前都有增加,但是利用总闪电较地闪对强天气事件的检测更有效,而且总闪电的超前时间为20.65 min,利用地闪的超前时间仅为13.54 min。Yao等(2013)对北京地区的冰雹云进行了研究,发现 $2\sigma$ 闪电(包括正闪和总闪)跃增法也可以应用于北京的冰雹预警。

### 3.2 线状中尺度对流系统中的闪电活动特征

线状中尺度对流系统(MCS)是夏季频繁发生的一类强对流天气系统,也称飏线。Parker等(2001)根据雷暴的形态将线状中尺度对流系统分为3类:前部层状降水中尺度对流系统(LS-MCS)、后部层状降水中尺度对流系统(TS-MCS)、平行层状降水中尺度对流系统(PS-MCS),利用地闪定位资料发现前部层状降水中尺度对流系统比其他两种类型产生更多的正地闪。大量的观测研究发现,在线状中尺度对流系统成熟阶段负地闪占主导地位,消散阶段层状云区的正地闪相对频繁(Parker, et al, 2001; Feng, et al, 2009)。最近基于闪电甚高频辐射源定位的一些个例研究发现,线状中尺度对流系统的闪电(地闪+云闪)频数可以从130至600  $\text{min}^{-1}$ 不等(Lang, et al, 2008; 刘冬霞等, 2013)。袁铁等(2010a)利用TRMM/LIS资料对一次发生于中国华南的强飏线研究发现,在卫星过境时刻其瞬时闪电频数高达567 fl/min,这说明飏线系统由于存在大范围

的强烈对流,闪电活动较一般雷暴要活跃得多。基于 SAFIR3000 闪电定位系统探测资料,Liu 等(2013)分析了发生于北京的一次线状中尺度对流系统过程,结果显示闪电活动与雷达回波、地面降水有很强的对应关系,闪电密度最大值发生在强对流区域(图 3),而层状云区产生的闪电较少,但大多为正地闪。

Carey 等(2005)利用 LDAR II 探测网络对一次线状中尺度对流系统的闪电活动进行分析,得出了线状中尺度对流系统内精细的云闪延伸结构,同时还发现雷暴内的闪电辐射源成双层结构分布,且从对流云区向层状云区倾斜(图 4),在一定程度上反映了线状中尺度对流系统中参与闪电放电的电荷源分布。

关于线状中尺度对流系统层状云区正电荷的形成可能来自于两种机制:(1)电荷平流机制,即层状云区的正电荷是由对流区携带正电荷的冰晶在高层气流作用下平流至层状云区而形成的,图 4 给出的电荷源分布与中尺度对流系统中冰相粒子的下沉轨迹有较好的一致性(图 5),由于冰相粒子是雷暴云中最重要电荷携带者,说明层状云区的电荷源与来自于对流云区荷电粒子平流有关。(2)局地起电机机制,认为层状云区的电荷是由层状云内部冰相粒子的弹性碰撞引起的电荷分离,即非感应起电机机制而形成。层状云区放电源的大范围水平传播和 0°C 层亮带上部混合相区域内雷达反射率因子的增大也证实了层状云内部存在着局地起电机机制(Dotzek, et al, 2005)。

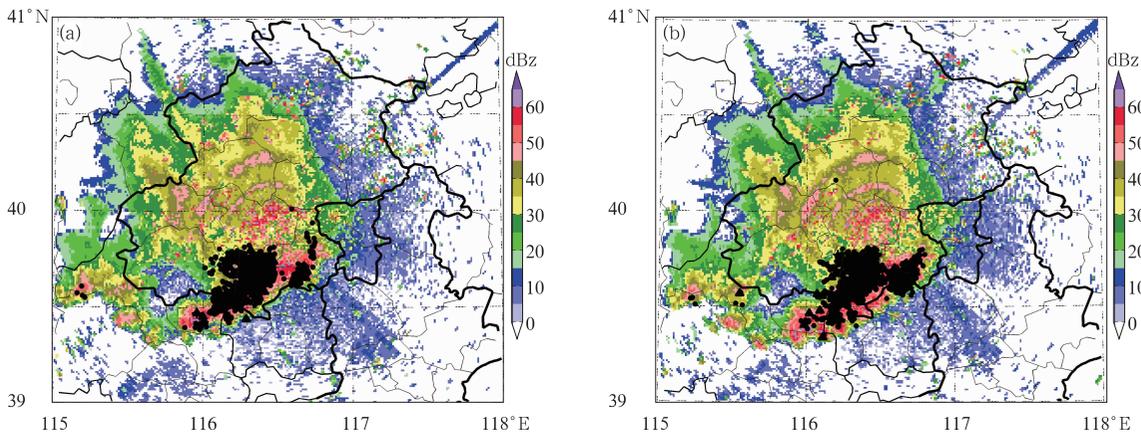


图 3 一次线状中尺度对流系统演化过程中闪电分布与雷达回波反射率的分布  
(闪电为雷达探测时刻前后 3 min 的闪电叠加,黑色点代表闪电位置;Liu, et al, 2013)

Fig. 3 Composite radar reflectivity and lightning location within six minutes at two times during the evolution of a leading line MCS (Black dots represent lightning flashes; Liu, et al, 2013)

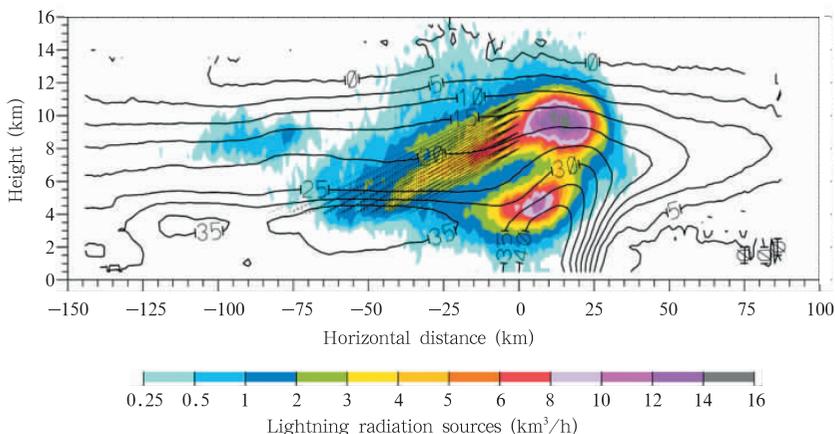


图 4 典型中尺度对流系统的 30 min 平均雷达反射率因子(等值线)与闪电甚高频辐射源(阴影)合成(Carey, et al, 2005)

Fig. 4 Lightning radiation sources detected by VHF (shading) and radar reflectivity (contours) of a typical linear MCS (Carey, et al, 2005)

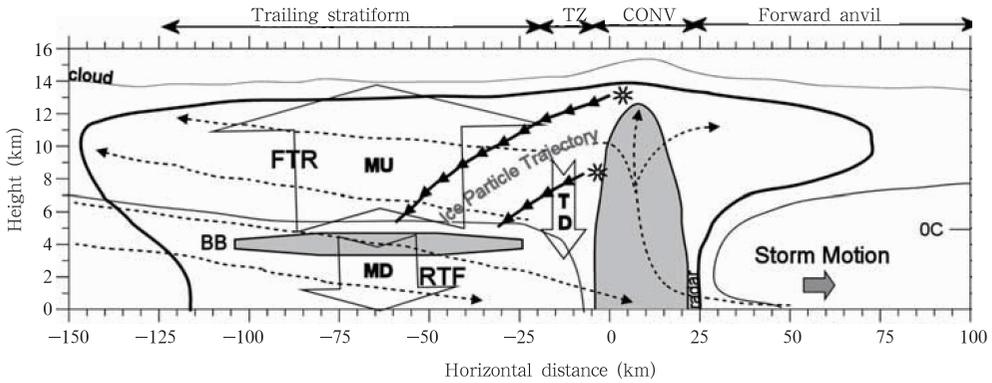


图5 中尺度对流系统概念模型 (Carey, et al, 2005)

Fig. 5 An MCS conceptual model (Carey, et al, 2005)

在中尺度对流系统发生期间,常会引发一类中高层大气发光事件(Pasko, et al, 2002; 杨静等, 2008; Yang, et al, 2013a, 2013b),其中,“红色精灵”一般认为是由发生于中尺度对流系统层状云区域的正地闪诱发的, Lu 等(2009)认为这种正地闪回击中和的电荷矩较一般地闪要大得多,可达 1500—3200 C·km。Yang 等(2013a, 2013b)曾对产生和不产生中高层大气放电事件——红色精灵的雷暴过程进行了研究,发现产生红色精灵的对流要比未产生红色精灵的对流发展旺盛,但是对应的微物理特

征没有明显区别。

### 3.3 台风中的闪电活动

不同热带气旋之间闪电活动差异较大,但大部分台风阶段的平均闪电密度呈现出明显的三圈分布结构(Molinari, et al, 1994; 潘伦湘等, 2010; Zhang, et al, 2012)。闪电密度峰值出现在外雨带,平均闪电密度远高于内雨带和眼壁区域,眼壁区域存在一个较小的闪电密集区,内雨带区域闪电密度接近于 0,外雨带中的闪电具有不对称分布,主要发生在深厚对流区域(图 6)。

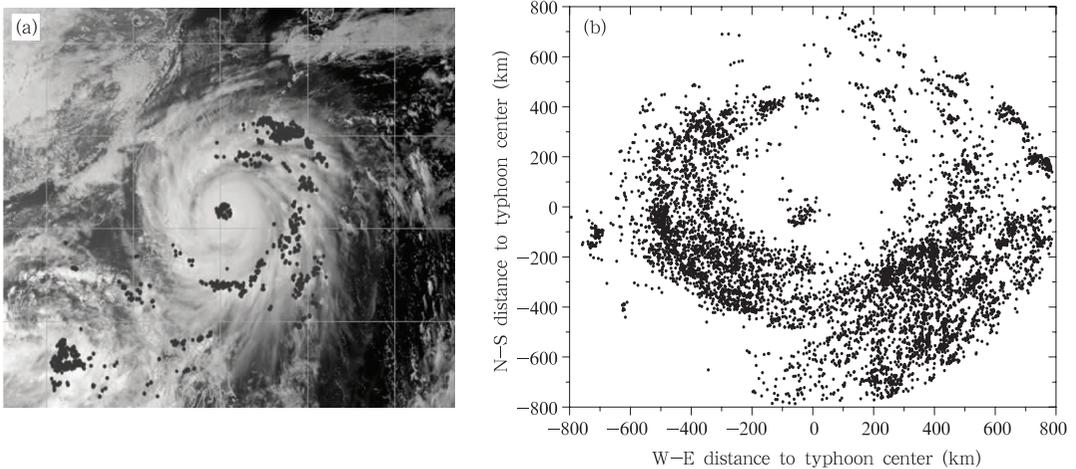


图6 2008年9月27日00时02—06分(世界时)“蔷薇”台风的闪电(黑点)与06时GMS-6可见光云图的叠加(a)及成熟阶段的闪电空间分布合成图(b)

Fig. 6 (a) Lightning (dark dots) during 00:02—00:06 UTC 27 September 2008, superimposed over visible cloud imagery from GMS-6 data at 06:00 UTC, and (b) composite lightning distribution at the mature stage of Typhoon Qiangwei

台风中心闪电密度在气旋增强阶段要高于减弱阶段(Abarca, et al, 2011)。通常,在台风中心最大风速急剧增大的阶段,眼壁上的闪电爆发,而在眼壁闪电爆发的几小时后中心风速达到最大值,这意味着眼壁闪电有可能对强度变化有指示作用(潘伦湘等, 2010)。Price 等(2009)利用全球闪电定位网探测资料分析了全球 2005—2007 年发生的 58 个飓风,认为闪电频数与飓风强度(最大持续风速)存在正相关,平均相关系数高达 0.86。Pan 等(2014)对西北太平洋上 69 次热带气旋的闪电活动研究发现,无论是弱台风(1—3 级)还是强台风(4—5 级),闪电最大峰值与台风最大风速峰值存在超前、同步和滞后的关系,但一半以上的台风其 12 h 累积最大闪电峰值都超前风速最大峰值。杨美荣等(2011)分析了 46 个热带气旋不同强度阶段的闪电活动、雷达反射率和冰散射信号的分布特征、以及闪电的发生与雷达反射率和冰散射信号的相互关系,发现热带气旋强度不同,闪电的空间分布亦有差别。海洋上的闪电日变化具有两个峰值,分别发生在下午和早晨(Pan, et al, 2013)。

### 3.4 “袖珍云闪”事件对强对流的指示作用

最近 20 多年来,雷暴放电过程中产生的一类特殊放电事件,被称为“袖珍云闪”或者双极性大脉冲事件受到广泛关注,该类放电事件相比于一般的云内放电其空间尺度小、持续时间短(10—20  $\mu\text{s}$ ),但能够同时产生极强的高频和低频辐射信号,其强度比一般的云闪大一个数量级(Smith, et al, 1999; 祝宝友等, 2007; Zhu, et al, 2010; Wang, et al, 2012)。Wu 等(2011)通过对袖珍云闪的三维定位,发现负极性袖珍云闪的放电高度总体上与对流层顶高度相当,其数量相比于正极性袖珍云闪明显偏少,很可能产生于较为罕见的极旺盛的雷暴过程中,因此在揭示强对流活动方面可能有其独特的优势。袖珍云闪倾向于出现在雷暴云顶部和中部,不但出现于强雷达回波区域,在低于 30 dBz 的雷暴云后期也可以发生。其出现的高度随着雷暴云顶高度的增高或降低而变化,而袖珍云闪发生的高度没有特别的规律。Wang 等(2012)利用 LMS 探测资料对 2007—2008 年夏季在山东滨州观测到的 236 例袖珍云闪的三维定位分析发现,袖珍云闪发生于 7—

16 km 的高度,在 267—273 MHz 频段内的峰值辐射功率为 12—781 kW。吕凡超等(2013)对大兴安岭地区的双极性大脉冲事件研究表明,双极性大脉冲事件倾向于出现在雷暴中闪电活动较为活跃的时段,双极性大脉冲事件较多发生在特定对流核中高雷达回波区的外围区域,并且多数集中在对流核移动方向的前部,双极性大脉冲事件的空间位置随时间的变化与特定对流核心随雷暴的移动具有较强的一致性。

## 4 雷暴云中闪电活动与动力、微物理参量和降水之间的关系

在强对流天气系统中存在以强烈上升气流、下击暴流和水平风切变等为特征的动力过程,以各类粒子增长、相变为特征的微物理过程,以起电、电荷分布和放电为特征的电过程,三者相互影响。通常认为,闪电发生在当上升气流强到足以产生冰相的霰粒和液态水的混合相区域。Carey 等(1998)研究发现,地闪的发生与霰混合物的存在有着非常密切的关系,地闪出现在强回波区,但并不完全与强上升气流一致。Bruning 等(2007)基于雷达、闪电定位和电场探空仪,对一次多单体雷暴观测结果表明,在首次闪电发生时存在大量软雹粒子,并得出引发闪电的强电场是由上升气流作用下冰相粒子碰撞起电所致。闪电频数和冰相粒子含水量成正相关,冰相粒子含量越高,相应的闪电活动也越频繁。

Zhou 等(2002)研究发现,地闪与对流性天气中的降水有较强的相关,这种相关用来对一般性对流天气中降水进行估测是可行的,同时地闪频数与层结最大不稳定能量一样能够指示对流性天气的发生和发展(周筠珺等, 1999)。冯桂力等(2007)利用地面雷达和地闪定位资料,并结合 TRMM 卫星上的 LIS、测雨雷达(PR)和微波成像仪(TMI)等探测资料研究发现,雹暴的对流降水贡献占绝对优势(超过 85%),可以用闪电和对流降水的相关来有效地识别对流降水区。基于 TRMM 卫星的多种探测资料,袁铁等(2010a)研究了中国华南一次强飚线过程的闪电活动及其与降水结构的关系,发现绝大多数闪电发生在对流区,有少数闪电发生在层状云区域,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。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。郑媛媛等(2004)对淮河一次锋面气旋系统的分析表明,闪电活动均发生在冷锋的强对流降水云团中,暖锋中虽有强对流降水,但无闪电活动;闪电活动频数高值区所对应的降水廓线中、上部存在大量的冰相粒子。不同闪电频数的雷暴单体相应的降水廓线差别明显,雷暴中闪电频数越大,5 km以上高度廓线给出的雨强越大,说明雷暴单体中闪电越多时,降水云冻结层以上存在的冰相粒子越多(马明等, 2012)。

为了全球模式或中尺度模式中的闪电参数化,获得闪电活动与雷暴云中动力和微物理特征参量的定量关系是必要的。目前这方面的大部分工作也是基于 TRMM 卫星的多传感器探测资料开展的。Ushio 等(2001)研究指出,闪电频数随雷暴的高度呈指数变化,并且与强回波和上升气流关系密切。Yuan 等(2008)发现,在雷暴尺度上,闪电频数与雷暴参量(如雷暴顶高、冻结层厚度和最小极化修正温度等)存在指数关系,但是无论是降水系统尺度还是对流单体尺度,闪电频数与 7—11 km 冰相降水含量的关系都表现得相对稳定,而且相关系数也较大(最高可超过 0.7),从而提供了一个有可能在区域或全球尺度上普遍使用的雷电参数化方案(袁铁等, 2010b)。

## 5 雷暴云电荷结构——探测和数值模拟

电场探空技术作为雷暴与闪电研究一种不可缺少的手段,最大优势是能直接探测雷暴云内的电场,直观地反映探空路径上的电荷垂直分布。大量的雷暴云穿云电场探空实验,对认识不同雷暴云内的电荷分布起到了很大的推动作用,促进了对雷暴起电机、电荷结构及其与动力结构的关系、以及闪电始发机制等的认识。

### 5.1 雷暴云内电荷分布的探测

早在 20 世纪初, Simpson 等(1937)就通过云内电场探空提供了雷暴云三极性电荷结构的直接科学

证据,这一简化的三极性电荷结构模型被广泛接受了约半个世纪。之后,越来越多的电场探空资料表明,在大部分的雷暴云中实际电荷结构要比三极性复杂。Marshall 等(1995)对美国南部大平原多单体与超级单体雷暴进行了观测,取得了 11 次电场和热动力参量的探空数据,发现弱上升气流区电荷结构复杂,10 km 以下有 7—9 个电荷区;而强上升气流区电荷结构较为简单,10 km 以下有 3—5 个电荷区。Stolzenburg 等(1998)利用 49 次电场探空资料,对美国 3 类雷暴系统(中尺度对流系统、南部大平原超级单体雷暴和新墨西哥山地小型雷暴)研究表明,3 类雷暴对流区具有共同的基本电荷结构:上升气流内的基本电荷结构包括 4 个垂直排列、极性交错的电荷区,最低电荷区带正电;上升气流外(仍在对流区内)的基本电荷结构包括 6 个垂直排列、极性交错的电荷区,最低电荷区也带正电(图 7)。这 3 类雷暴的基本电荷区所处的高度随上升气流的增强而抬升。

美国的 STEPS 实验揭示了具有反极性电荷结构特征雷暴的存在。Tessendorf 等(2007)利用闪电辐射源三维定位系统对两次雷暴过程中的闪电辐射源进行定位分析,发现一例雷暴符合正常三极性电荷结构模型,即下部为正电荷区,中部为主负电荷区,上部为主正电荷区,虽然没有反映出上部负的屏蔽电荷区,但从参与放电的电荷区来说,与电场探空结果是一致的。而另外一例雷暴云闪电辐射源定位结果则显示,雷暴云中上部区域为范围很大的正电荷区,而上部为负电荷区,这与常规电荷结构完全相反,称为反极性电荷结构,反极性电荷结构常存在于超级单体风暴中,并伴随龙卷等灾害性天气的发生(MacGorman, et al, 2005)。张义军等(2005)利用美国闪电图示系统的观测资料分析超级单体雷暴的闪电特征发现,雷暴中闪电洞或闪电环在时空分布上与上升气流和下沉气流区相对应,闪电洞出现在龙卷风发生之前,在龙卷风发生期间,闪电洞最为明显。大量正地闪产生期间,雷暴的主体部分(对流区)电荷结构呈反三极性,正地闪由中部的正电荷区产生;在大量负地闪发生期间,负地闪主要发生在雷暴的砧体部分,由于雷暴主体部分的电荷分布向砧体区倾斜,云中砧体部分电荷结构为反偶极性,上部负电荷区产生了大量负地闪(张义军等, 2004)。

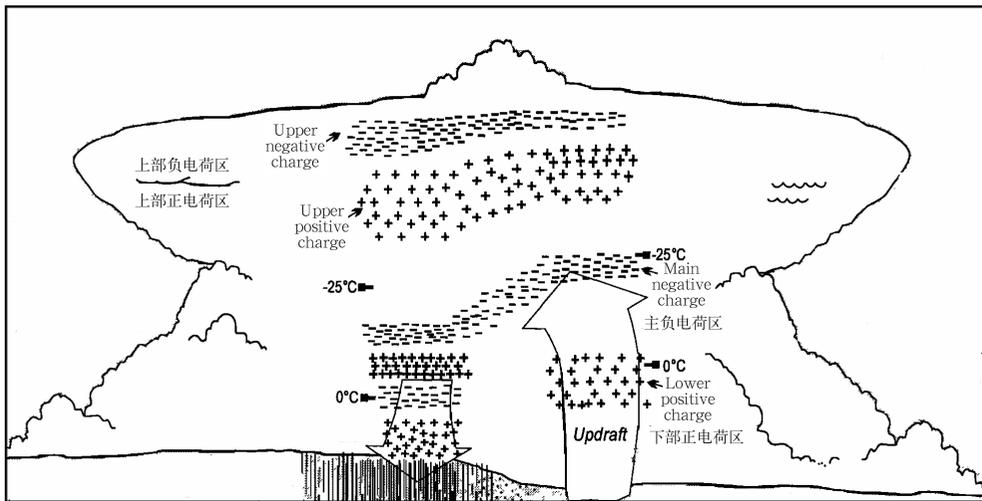


图7 雷暴对流降水区内电荷结构模型(Stolzenburg, et al, 1998)  
 Fig.7 Conceptual model of the charge structure in the convective region of a thunderstorm (Stolzenburg, et al, 1998)

在中国内陆高原地区的雷暴也常呈现出特殊的电荷结构。Qie 等(2005,2009)综合分析大量雷暴云下的地面电场记录和闪电电荷源定位结果,认为中国内陆高原雷暴的基本电荷结构为三极性,但有些雷暴具有异常大的下部正电荷区,且这种类型的雷暴所占比例具有随局地平均海拔高度升高而增大的趋势,完善了已有的下部正电荷区较大的推论(Liu, et al,1987)。赵中阔等(2009)基于电晕探针探空技术,对发生于甘肃平凉地区的雷暴进行穿云观测,发现雷暴呈现中间为负电荷区,上部、下部为正电荷区的三极性电荷结构,且下部的正电荷区较常规三极性要大,进一步证实了这一结论。最近,Li 等(2013)基于宽带电场变化脉冲的三维定位发现,在青海一次雷暴过程的发展和成熟阶段,电荷结构为上负下正的反偶极性,而消散阶段则演化为正-负-正-负的四极性电荷结构,对应的离地高度分别为5、4、3和1.8 km。

### 5.2 雷暴云电荷结构的数值模拟研究

随着计算机性能的提高,利用数值模拟方法来研究雷暴云起电、放电过程成为可能,强风暴的动力-电耦合模拟逐渐成为雷暴电学的重要研究手段之一,其优势在于:(1)能将云内微物理过程和起电、放电过程与制约云发展过程的宏观动力过程有机结合起来,探讨其相互作用的复杂关系;(2)实际观测中无法全面测量整个雷暴云的物理过程和动力特征,而模拟则可提供高时空分辨率的各种物理过程

及其演化;(3)可以检验各种起电、放电机制及理论假说的有效性。

一般认为,强对流天气系统中的主要起电机制是非感应起电机制(Takahashi, 1978; Saunders, et al, 1991),即在混合相区域大、小冰相粒子的弹性碰撞导致的电荷分离,它不需要外界电场的作用。非感应起电机制不仅引起的电荷变化率较大,而且该机制中决定电荷转移极性的反转温度是决定云内电荷结构的关键因子,与观测结果有很强的一致性。依赖于环境电场的水成物粒子感应起电机制在雷暴云起电之初也有重要作用。

随着模式的不断改进和观测结果的不补充,基于数值模式模拟雷暴的电荷结构越来越接近实际雷暴。Mansell 等(2005)在三维雷暴云模式中,加入感应和非感应起电机制,同时对5种不同的非感应起电机制参数化方案进行模拟对比,其中3种能够产生正常的三极性电荷结构(中间为负电荷区,上部、下部为正电荷区),另外2种则主要依赖于霰粒子的淞附增长率。雷暴云中闪电的传输和击穿过程较复杂,在起电模式的基础上,建立闪电放电过程的参数化方案,可以对闪电的发展和传输进行高时空分辨率的模拟。中国在基于冰雹云模式发展的雷暴云模式的电荷结构和放电过程模拟方面开展了大量研究工作(言穆弘等,1996;张义军等,2000;孙安平等,2002;谭涌波等,2007),并逐渐注重对真实雷暴云的模拟(郭凤霞等,2007;周志敏等,2009)。Tan

等(2006)曾在二维高分辨率雷暴云模式基础上发展了 Mansell 等(2002)的闪电参数化方案,模拟了雷暴云闪电放电通道结构和传播特征,闪电通道和先导过程的模拟分辨率精确到了 12.5 m,很好地再现了放电通道的分叉特征和双向先导的发展。

为了更真实地模拟较大尺度的雷暴云过程,近年来雷暴云电荷结构的数值模拟更多地基于中尺度模式开展。黄丽萍等(2008)利用中尺度 GRAPES 模式为云模式提供背景场和在中尺度模式嵌套条件下耦合起电放电过程的方式,分别实现了在中尺度模式中对闪电活动的模拟。李万莉等(2012)和 Liu 等(2014)把 Takahashi78 和 Saunders98(Saunders, et al, 1998)两种非感应起电机引入 RAMSV6.0 模式,并加入闪电放电整体参数化方案,对北京夏季雷暴过程的模拟发现, Takahashi78 方案的电荷结构从起电到放电开始一直都是三极性特征, Saunders98 方案的电荷结构则从反偶极性变为三极性,模拟得到的闪电频数与实测结果一致。徐良韬等(2012)在 WRF 模式中加入了起电、放电物理过程参数化方案,对一次超级单体的电荷结构进行模拟,得到了与强对流天气系统中正、负、正的三极性结构,主正电荷区在  $-40\text{--}-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,主负电荷区在  $-10\text{--}-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,下部正电荷区在  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 层附近,总电荷浓度最大值接近  $2\text{ nC/m}^3$ 。对飏线过程的模拟结果表明,部分单体电荷结构呈现出反偶极性,飏线中最大电荷浓度小于超级单体。在飏线成熟阶段模拟得到的闪电分布与观测的地闪活动分布相似。

## 6 闪电资料的同化及强对流天气的预警预报

由于闪电探测资料具有探测范围广、地形影响小、可实现连续监测等优点,在强对流天气系统的监测、预警、预报中具有非常大的应用潜力。随着高质量闪电定位资料的获得,闪电资料同化已经成为一个重要的国际前沿科学问题。

目前,对闪电探测资料同化方法的探索已经取得了实质性进展。Alexander 等(1999)较早开展了闪电资料同化方法的尝试,曾将微波探测数据和地闪资料等通过一种经典的图像处理方法,建立了闪电与降水率的关系,同化进入预报模式后提高了 12—24 小时的降水预报。Mansell 等(2007)将美国国家闪电定位网络地闪资料和闪电图示系统总闪资料加入耦合的大气-海洋中尺度预测模式(CO-

AMPS)中,利用闪电资料来控制模式中的对流参数,结果显示加入了闪电资料模拟的降水与实际更加接近。李万彪等(2008)利用 TRMM 卫星得到的闪电和对流降水资料,建立了二者的关系,并将 LIS 闪电数据反演的对流降水等资料,连续同化到 ARPS(Advanced Regional Prediction System)模式的初始场中,对江淮流域暴雨模拟结果显示暴雨的中心位置和强度预报都得到了一定程度的改善。Pessi 等(2009)基于 MM5 模式,利用 TRMM 卫星得到的闪电和降水资料,建立了闪电和降水率的关系式,并使用该关系式将地基闪电探测网得到的闪电资料转化为降水率加入到模式,对北太平洋一个低压系统的数值模拟得到了很好的结果。冉令坤等(2011)综合使用 Papadopoulos 等(2009)和 Mansell 等(2007)的方法,利用 TRMM 卫星得到的闪电资料,对水汽与云凝结物进行了张弛逼近同化,并调整 KF 积云对流参数化方案,从而改善了模式初始水物质场的质量,在一定程度上提高了短时降水的预报水平。雷暴云中水成物粒子分布对闪电的发生起着举足轻重的作用, Fierro 等(2012)从微物理过程入手,利用云尺度的总闪资料,通过建立水汽混合比与闪电频数、霰混合比的经验关系式,将闪电资料同化进入 WRF 模式,对一次龙卷过程进行了模拟试验,显著提高了对流预报效果。

除了闪电资料在强对流预报中的应用外,闪电自身的预报也是当前探讨的重要问题。郑栋等(2005)利用北京地区闪电定位资料并结合探空资料研究发现,闪电活动与潜在对流性稳定度指数、抬升指数、对流有效位能和 700 hPa 相当位温具有较强的相关,在此基础上分析了多参数综合预报闪电活动的概率,提出了闪电活动预报的诊断指标。较强的上升速度和充足的水汽可以产生更多的对闪电起电、放电有直接影响的冰相物,并能使其持续生成,从而形成较大的电荷浓度(郑栋等, 2007)。在此研究基础上,中国气象科学研究院开发了闪电监测和预警系统(张义军等, 2006),该系统采用多参数、多算法集成技术,结合天气预报产品,采用综合预报方法给出 0—2 小时可能发生闪电的区域以及闪电发生的概率。Wang 等(2010)根据闪电密度和雷达回波的相关,在中尺度 GRAPES 中建立了一个地闪预报方案,对中国南部两次雷暴过程的模拟发现,该方案可大致预报出 6 h 内的闪电活动中心,地闪密度

的量級與觀測結果也基本一致。McCaul(2009)通過統計所得的冰相粒子與閃電密度的相關關係,建立了預測閃電密度的回歸方程,對一次造成龍卷風的超級单体雷暴和一次雹暴6 h內閃電的落區和移動趨勢進行了預測,得到了較好的預報效果。Barthe等(2010)則利用WRF模式對發生於高原地區的強雷暴以及一次氣團雷暴進行了模擬,並根據模擬結果對利用不同物理量(可降冰質量、冰水路徑、冰量通量產物、上升氣流、最大上升速度、雲頂高度)預測閃電落區的能力進行了檢驗,得出了較好的結果。Yair等(2010)在WRF中引入了一個全新的閃電潛勢指數,利用觀測到的閃電資料預報下一時刻閃電的發生,對發生於地中海的3次雷暴過程的閃電落區和降水量進行了預報,提高了強對流天氣的預報能力。

## 7 結 語

本文綜述了近年閃電氣象學研究的發展,並着重對中國的研究進展進行了詳細的回顧,總結了在閃電氣象學研究中發揮了重要作用的現代閃電探測和定位技術,對冰雹雲、飢線、台風等不同強對流天氣系統的閃電活動特征進行了系統總結,回顧了閃電與雷暴雲動力、微物理過程和降水關係方面的研究進展,對基於探測和數值模擬的雷暴電荷結構研究進行了總結,並闡述了閃電資料同化方法的發展及其在強對流天氣系統預警、預報中的應用等。

由於強對流天氣系統發生的複雜性和個體差異,以及對閃電進行準確全面探測的困難,增加了对閃電活動規律認識的難度,許多科學問題仍有待進一步研究,特別是對中國不同天氣系統閃電活動規律的認識仍然是十分有限的。高精度、高時空分辨率閃電定位技術是雷電氣象學發展的重要基礎,也是閃電資料在強對流災害性天氣預警、預報應用的關鍵技術。甚高频辐射源三维定位技術能以較高的時間和空間精度描繪雷電的發生、發展,雷暴雲內的電場和氣象綜合探空是了解雲內起電的直接手段,美國已經基本發展完善。相比於美國的甚高频辐射源定位系統LMA的業務化運行和雷暴雲內的電場探空技術,中國還有很大的差距。雖然中國科學院寒區旱區環境與工程研究所已經發展了與LMA類似的LMS(張廣庶等,2010),但是未能實現閃電的實時定位和監測,距離業務化運行還有很大

的距離。雷暴雲內的電場探空雖然也取得了一定的進展(趙中闊等,2009),但僅能對強電場進行探測,而且資料有限,因此中國的閃電三维探測技術和探空技術應得到充分重視和加強。

雷暴內動力過程、微物理過程和起電、放電過程以及其間的相互關係和耦合機制是雷電氣象學的重要科學問題。基於閃電探測和定位網絡、多普勒雙偏振雷達觀測、雷暴雲內的原位探空和地面觀測資料,研究強對流天氣系統中閃電活動特征以及與動力、微物理結構的關係,探討閃電與降水、雷暴動力和微物理因子的關係是今後雷電氣象學發展的核心研究內容,將為雷電資料在強對流天氣過程監測預警中的應用提供理論基礎。

在高時空分辨率閃電定位資料獲取的基础上,探討閃電資料的同化方法,並在數值預報模式中進行應用,將為提高災害性強對流天氣過程的短時預報水平補充新方法。利用雷達、雷電兩種資料各自的優勢和互補性,可以進一步提高模式初始場中對流活動信息的準確性,為進一步提高強對流天氣的短時臨近預報能力奠定基礎,這也是目前國際上正在開展的重要研究方向。此外,建立雷電數值預報模式,開展雷電的數值預報,提高對雷電災害的預警、預報能力和水平,也將是今後雷電氣象學研究的一個重要研究方向和應用目標。

## 參考文獻

- 曹冬杰, 鄒秀書, 段樹等. 2012. 基於VHF辐射源短基線定位系統對閃電放電過程的研究. 物理學報, 61(6): 510-522
- 董萬勝, 劉欣生, 張義軍等. 2002. 利用閃電寬帶干涉儀系統對地閃先導-回擊過程的觀測研究. 中國科學(D輯), 32(1): 81-88
- 馮桂力, 鄒秀書, 袁鐵等. 2006. 一次冷渦天氣系統中雹暴過程的地閃特征分析. 氣象學報, 64(2): 211-220
- 馮桂力, 鄒秀書, 袁鐵等. 2007. 雹暴的閃電活動特征與降水結構研究. 中國科學(D輯), 37(1): 123-132
- 郭風霞, 張義軍, 言穆弘. 2007. 青藏高原那曲地區雷暴雲電荷結構特征數值模擬研究. 大氣科學, 31(1): 28-36
- 黃麗萍, 管兆勇, 陳德輝等. 2008. 基於高分辨率中尺度氣象模式的實際雷暴過程的數值模擬試驗. 大氣科學, 32: 1341-1351
- 李萬彪, 宋國京, 童科. 2008. TRMM衛星LIS閃電資料在數值模式中的應用. 北京大學北京大學學報(自然科學版), 44(3): 399-406
- 李萬莉, 劉冬霞, 鄒秀書等. 2012. 基於RAMS V6.0的非感應起電機制評估和雷暴初期電荷結構模擬. 物理學報, 61(5): 535-545
- 劉冬霞, 鄒秀書, 王志超等. 2013. 飢線系統中的閃電辐射源分布

- 特征及云内电荷结构讨论. 物理学报, 62(21): 219201, doi: 10.7498/aps.62.219201
- 吕凡超, 祝宝友, 马明等. 2013. 东北地区两次雷暴中 NBE 的活动特征观测. 中国科学(D辑), 43(5): 848-861
- 马明, 林锦冰, 傅云飞. 2012. 一次强对流活动中雷电与降水廓线特征研究. 气象学报, 70(4): 797-805
- 潘伦湘, 郗秀书, 刘冬霞等. 2010. 西北太平洋地区强台风的闪电活动特征初步分析. 中国科学(D辑), 40(2): 252-260
- 冉令坤, 周玉淑. 2011. TRMM 卫星的闪电观测资料在中尺度数值模式中的 Nudging 同化应用研究. 大气科学, 35(6): 1145-1158
- 孙安平, 言穆弘, 张义军等. 2002. 三维强风暴动力电耦合数值模拟研究 I: 模式及其电过程参数化方案. 气象学报, 60(6): 722-731
- 谭涌波, 陶善昌, 祝宝友等. 2007. 云闪放电对云内电荷和电位分布影响的数值模拟. 地球物理学报, 50(4): 1053-1065
- 吴享, 董万胜, 李良福等. 2012. 基于电离层反射的袖珍云闪(CID)三维定位研究. 地球物理学报, 55(4): 1095-1103
- 徐良韬, 张义军, 王飞等. 2012. 雷暴起电和放电物理过程在 WRF 模式中的耦合及初步检验. 大气科学, 36(5): 1041-1052
- 言穆弘, 郭昌明, 葛正谟. 1996. 积云动力和电过程二维模式研究 I: 理论和模式. 地球物理学报, 39(1): 52-64
- 杨静, 郗秀书, 张广庶等. 2008. 发生于山东沿海雷暴云上方的红色精灵. 科学通报, 53(4): 482-488
- 杨美荣, 袁铁, 郗秀书等. 2011. 西北太平洋热带气旋的闪电活动、雷达反射率和冰散射信号特征分析. 气象学报, 69(2): 370-380
- 袁铁, 郗秀书. 2010a. 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. 大气科学, 34(1): 58-70
- 袁铁, 郗秀书. 2010b. 中国东部及邻近海域暖季降水系统的闪电、雷达反射率和微波特征. 气象学报, 68(5): 652-665
- 张广庶, 赵玉祥, 郗秀书等. 2008. 利用无线电窄带干涉仪定位系统对地闪全过程的观测与研究. 中国科学(D辑), 38(9): 1167-1180
- 张广庶, 王彦辉, 郗秀书等. 2010. 基于时差法三维定位系统对闪电放电过程的观测研究. 中国科学(D辑), 40(4): 523-534
- 张义军, 言穆弘, 张翠华等. 2000. 不同地区雷暴电荷结构的模式计算. 气象学报, 58(5): 617-627
- 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. 科学通报, 49(5): 499-505
- 张义军, 孟青, 吕伟涛等. 2005. 两次超级单体雷暴的电荷结构及其地闪特征. 科学通报, 50(23): 2663-2675
- 张义军, 孟青, 马明等. 2006. 闪电探测技术发展和资料应用. 应用气象学报, 17(5): 611-620
- 赵中阔, 郗秀书, 张廷龙等. 2009. 一次单体雷暴云的穿云电场探测及云内电荷结构. 科学通报, 54(22): 3532-3536
- 郑栋, 张义军, 吕伟涛等. 2005. 大气不稳定性参数与闪电活动的预报. 高原气象, 24(2): 196-203
- 郑栋, 张义军, 马明等. 2007. 大气环境层结对闪电活动影响的模拟研究. 气象学报, 65(4): 622-632
- 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. 气象学报, 62(6): 790-802
- 周筠珺, 郗秀书, 张义军等. 1999. 地闪与对流性天气系统中降水关系的分析. 气象学报, 57(1): 103-111
- 周志敏, 郭学良. 2009. 强雷暴云中电荷多层分布与形成过程的三维数值模拟研究. 大气科学, 33(3): 600-620
- 祝宝友, 陶善昌, 谭涌波. 2007. 伴随超强 VHF 辐射的闪电双极性窄脉冲初步观测. 气象学报, 65(1): 124-130
- 朱润鹏, 袁铁, 李万莉等. 2013. 基于卫星观测资料的全球闪电活动特征研究. 气候与环境研究, 18(5): 639-650
- 郗秀书, 张义军, 张其林. 2005. 闪电放电特征和雷暴电荷结构研究. 气象学报, 63(5): 646-658
- 郗秀书, 张其林, 袁铁等. 2013. 雷电物理学. 北京: 科学出版社, 297pp
- Abarca S F, Corbosiero K L, Vollaro D. 2011. The world wide lightning location network and convective activity in tropical cyclones. Mon Wea Rev, 139(1): 175-191
- Alexander G D, Weinman J A, Karyampudi V, et al. 1999. The effect of assimilating rain rates derived from satellites and lightning on forecasts of the 1993 superstorm. Mon Wea Rev, 127(7): 1433-1457
- Barthe C, Deierling W, Barth M C. 2010. Estimation of total lightning from various storm parameters: A cloud-resolving model study. J Geophys Res, 115: D24202, doi: 10.1029/2010JD014405
- Betz H D, Schmidt K, Laroche P, et al. 2009. LINET: An international lightning detection network in Europe. Atmos Res, 91(2-4): 564-573
- Biagi C J, Cummins K L, Kehoe K E, et al. 2007. National lightning detection network (NLDN) performance in southern Arizona, Texas, and Oklahoma in 2003-2004. J Geophys Res, 112: D05208, doi: 10.1029/2006JD007341
- Boccippio D J, Koshak W J, Blakeslee R J. 2002. Performance assessment of the optical transient detector and lightning imaging sensor. Part I: Predicted diurnal variability. J Atmos Oceanic Tech, 19(9): 1318-1332
- Bruning E C, Rust W D, Schuur T J, et al. 2007. Electrical and polarimetric radar observations of a multicell storm in TELEX. Mon Wea Rev, 135(7): 2525-2544
- Carey L D, Rutledge S A. 1998. Electrical and multiparameter radar observations of a severe hailstorm. J Geophys Res, 103(D12): 13979-14000
- 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 Geophys Res, 110: D03105, doi:10.1029/2003JD004371
- Cummins K L, Murphy M J, Bardo EA, et al. 1998. A combined TOA/MDF technology upgrade of the U. S. national lightning detection network. J Geophys Res, 103(D8): 9035-9044
- 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): 127-176
- Dowden R L, Holzworth R H, Rodger C J, et al. 2008. World-wide lightning location using VLF propagation in the Earth-ionosphere waveguide. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 50(5): 40-60
- Feng G L, Qie X S, Wang J, et al. 2009. Lightning and Doppler radar observations of a squall line system. *Atmos Res*, 91(2-4): 466-478
- Fierro A O, Mansell E R, Ziegler C L, et al. 2012. Application of a lightning data assimilation technique in the WRF-ARW model at cloud-resolving scales for the tornado outbreak of 24 May 2011. *Mon Wea Rev*, 140(8): 2609-2627
- 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 Geophys Res*, 113: D08213, doi: 10.1029/2006JD007709
- Li Y J, Zhang G S, Wen J, et al. 2013. Electrical structure of a Qinghai-Tibet Plateau thunderstorm based on three-dimensional lightning mapping. *Atmos Res*, 134: 137-149
- Liu D X, Feng G L, Wu S J. 2009. Temporal and spatial characteristics of cloud-to-ground lightning of hailstorms over north China. *Atmos Res*, 91(2-4): 459-465
- Liu D X, Qie X S, Xiong Y J, et al. 2011. Evolution of the total lightning activity in a leading-line and trailing stratiform mesoscale convective system over Beijing. *Adv Atmos Sci*, 28(4): 866-878
- Liu D X, Qie X S, Pan L X, et al. 2013. Some characteristics of lightning activity and radiation source distribution in a squall line over north China. *Atmos Res*, 132-133: 423-433
- Liu D X, Qie X S, Li W L. 2014. Charge structure of a summer thunderstorm in North China: A simulation using the RAMS-electrical model. *Adv Atmos Sci*, 31: 1022-1034, doi:10.1007/s00376-014-3078-7
- Liu X S, Ye Z M, Shao X M, et al. 1989. Intracloud lightning discharge in the lower part of thundercloud. *Acta Meteor Sinica*, 3: 212-219
- Lu G, Cummer S A, Li J, et al. 2009. Charge transfer and in-cloud structure of large-charge-moment positive lightning strokes in a mesoscale convective system. *Geophys Res Lett*, 36: L15805, doi: 10.1029/2009GL038880
- MacGorman D R, Rust W D, Krehbiel P, et al. 2005. The electrical structure of two supercell storms during STEPS. *Mon Wea Rev*, 133(9): 2583-2607
- Mansell E R, MacGorman D R, Ziegler C L, et al. 2002. Simulated three-dimensional branched lightning in a numerical thunderstorm model. *J Geophys Res*, 107: 4075, doi: 10.1029/2000JD000244
- Mansell E R, MacGorman D R, Ziegler C L, et al. 2005. Charge structure and lighting sensitivity in a simulated multicell thunderstorm. *J Geophys Res*, 110: D12101, doi: 10.1029/2004JD005287
- Mansell E R, Ziegler C L, MacGorman D R. 2007. A lightning data assimilation technique for mesoscale forecast models. *Mon Wea Rev*, 135(5): 1732-1748
- Marshall T, Rust W, Stolzenburg M. 1995. Electrical structure and updraft speeds in thunderstorms over the southern great plains. *J Geophys Res*, 100(D1): 1001-1015
- McCaul E W, Goodman S J, LaCasse K M, et al. 2009. Forecasting lightning threat using cloud-resolving model simulations. *Wea Forecasting*, 24(3): 709-729
- Molinari J, Moore P K, Idone V P, et al. 1994. Cloud-to-ground lightning in Hurricane Andrew. *J Geophys Res*, 99 (D8): 16665-16676
- Pan L X, Qie X S, Zhu R P, et al. 2013. Land-sea contrast in the lightning diurnal variation as observed by the WWLLN and LIS/OTD data. *Acta Meteor Sinica*, 27(4): 591-600
- Pan L X, Qie X S, Wang D F. 2014. Lightning activity and its relation to the intensity of typhoons over the Northwest Pacific Ocean. *Adv Atmos Sci*, doi: 10.1007/s00376-013-3115-y (in press)
- Papadopoulos A, Serpetzoglou E, Anagnostou E N. 2009. Evaluating the impact of lightning data assimilation on mesoscale model simulations of a flash flood inducing storm. *Atmos Res*, 94(4): 715-725
- Parker M D, Rutledge S A, Jonson R H. 2001. Cloud-to-ground lightning in linear mesoscale convective systems. *Mon Wea Rev*, 129: 1232-1241
- Pasko V P, Stanley M A, Mathews J D. 2002. Electrical discharge from a thundercloud top to the lower ionosphere. *Nature*, 416(6877): 152-154
- Pessi A T, Businger S. 2009. The impact of lightning data assimilation on a winter storm simulation over the North Pacific Ocean. *Mon Wea Rev*, 137(10): 3177-3195
- Price C, Asfur M, Yair Y. 2009. Maximum hurricane intensity preceded by increase in lightning frequency. *Nature Geoscience*, 2(5): 329-332
- Qie X S, Guo C M, Yan M H, et al. 1993. Lightning data and study of thunderstorm nowcasting. *Acta Meteor Sinica*, 7(2): 244-256
- Qie X S, Zhang T L, Chen C P, et al. 2005. The lower positive charge center and its effect on lightning discharges on the Tibetan Plateau. *Geophys Res Lett*, 32(5), doi: 10.1029/2004GL022162
- Qie X S, Zhang T, Zhang G, et al. 2009. Electrical characteristics of thunderstorms in different plateau regions of China. *Atmos Res*, 91(2-4): 244-249
- Reap R M, MacGorman D R. 1989. Cloud-to-ground lightning: Climatological characteristics and relationships to model fields, ra-

- dar observations, and severe local 796 storms. *Mon Wea Rev*, 117(3): 518-535
- Richard P, Delannoy A, Labaune G. 1986. Results of spatial and temporal characterization of VHF-UHF radiation of lightning. *J Geophys Res*, 91(D1): 1248-1260
- Rison W R, Thomas R J, Krehbiel P R, et al. 1999. A GPS-based three-dimensional lightning mapping system: Initial observations in central New Mexico. *Geophys Res Lett*, 26(23): 3573-3576
- Saunders C P, Keith W D, Mitzeva R P. 1991. The effect of liquid water on thunderstorm charging. *J Geophys Res*, 96(D6): 11007-11017
- Saunders C P, Peck S L. 1998. Laboratory studies of the influence of the rime accretion rate on charge transfer during crystal/graupel collisions. *J Geophys Res*, 103(D12): 13949-13956
- Schultz C J, Peterson W A, Carey L D. 2011. Lightning and severe weather: a comparison between total and cloud-to-ground lightning trends. *Wea Forecasting*, 26(5): 744-755
- Simpson G and Scrase F J. 1937. The distribution of electricity in thunderclouds. *Proc Roy Soc London, Ser A*, 161: 309-352
- Smith D A, Shao X M, Holden D N, et al. 1999. A distinct class of isolated intracloud lightning discharges and their associated radio emissions. *J Geophys Res*, 104(D4): 4189-4212
- Smith D A, Eack K B, Harlin J, et al. 2002. The Los Alamos Sferic Array: A research tool for lightning investigations. *J Geophys Res*, 107(D13): 4183, doi:10.1029/2001JD000502
- Soula S, Seity Y, Feral L, et al. 2004. Cloud-to-ground lightning activity in hail-bearing storms. *J Geophys Res*, 109: 2101-2113
- Stolzenburg M, Rust W D, Marshall T C. 1998. Electrical structure in thunderstorm convective regions; 3. Synthesis. *J Geophys Res*, 103(D12): 14097-14108
- Sun Z L, Qie X S, Liu M Y, et al. 2013. Lightning VHF radiation location system based on short-baseline TDOA technique: Validation in rocket-triggered lightning. *Atmos Res*, 129-130: 58-66
- Takahashi T. 1978. Riming electrification as a charge generation mechanism in thunderstorms. *J Atmos Sci*, 35(8): 1536-1548
- Tan Y B, Tao S C, Zhu B Y. 2006. Fine-resolution simulation of the channel structures and propagation features of intracloud lightning. *Geophys Res Lett*, 33(9): L09809, doi:10.1029/2005GL025523
- Tessendorf S A, Rutledge S A, Wiens K C. 2007. Radar and lightning observations of normal and inverted polarity multicellular storms from STEPS. *Mon Wea Rev*, 135(11): 3682-3706
- Ushio T, Heckman S J, Boccippio D J, et al. 2001. A survey of thunderstorm flash rates compared to cloud top height using TRMM satellite data. *J Geophys Res*, 106(D20): 24089-24095
- Wang D F, Qie X S, Yuan T, et al. 2009. An analysis of the initial stage of intracloud lightning using the pulse location technique based on the fast electric field change. *Acta Meteor Sinica*, 23(6): 772-781
- Wang F, Zhang Y J, Dong W S. 2010. A lightning activity forecast scheme developed for summer thunderstorms in South China. *J Meteor Res*, 24(5): 631-640
- Wang Y H, Zhang G S, Qie X S, et al. 2012. Characteristics of compact intracloud discharges observed in a severe thunderstorm in northern part of China. *J Atmos Sol-Terr Phys*, 84-85: 7-14
- Wu T, Dong W S, Zhang Y J, et al. 2011. Comparison of positive and negative compact intracloud discharges. *J Geophys Res*, 116: D03111, doi:10.1029/2010JD015233
- Yair Y, Lynn B, Price C, et al. 2010. Predicting the potential for lightning activity in Mediterranean storms based on the Weather Research and Forecasting (WRF) model dynamic and microphysical fields. *J Geophys Res*, 115: D04205, doi:10.1029/2008JD010868
- Yang J, Yang M R, Liu C, et al. 2013a. Case studies of sprite-producing and non-sprite-producing summer thunderstorms. *Adv Atmos Sci*, 30(6): 1786-1808
- Yang J, Qie X S, Feng G L. 2013b. Characteristics of one sprite-producing summer thunderstorm. *Atmos Res*, 127: 90-115
- 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
- Yuan T, Qie X. 2008. Study on lightning activity and precipitation characteristics before and after the onset of the South China Sea summer monsoon. *J Geophys Res*, 113: D14101, doi:10.1029/2007JD009382
- Zhang W J, Zhang Y J, Zheng D, et al. 2012. Lightning distribution and eyewall outbreaks in tropical cyclones during landfall. *Mon Wea Rev*, 140(11): 3573-3586
- Zheng D, Zhang Y J, Meng Q, et al. 2010. Lightning activity and electrical structure in a thunderstorm that continued for more than 24 h. *Atmos Res*, 97(1-2): 241-256
- Zhou Y, Qie X, Soula S. 2002. A study of the relationship between cloud-to-ground lightning and precipitation in the convective weather system in China. *Ann Geophys*, 20(1): 107-113
- Zhu B, Zhou H, Ma M, et al. 2010. Observations of narrow bipolar events in East China. *J Atmos Sol-Terr Phys*, 72(2-3): 271-278