

潘伦湘, 郟秀书. 2010. 0709 号超强台风圣帕 (Sepat) 的闪电活动特征 [J]. 大气科学, 34 (6): 1088 - 1098. Pan Lunxiang, Qie Xiushu. 2010. Lightning activity in super typhoon Sepat (0709) [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (6): 1088 - 1098.

# 0709 号超强台风圣帕 (Sepat) 的闪电活动特征

潘伦湘<sup>1,2</sup> 郟秀书<sup>1</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 中国科学院研究生院, 北京 100049

**摘要** 利用全球闪电定位网 (WWLLN) 获取的闪电定位资料和中国气象局 (CMA) 提供的台风定位资料, 分析了 2007 年第 9 号超强台风圣帕的闪电时空演变特征。分析结果表明: 在热带低压至强热带风暴时期, 台风中心闪电活动频繁, 外围闪电少; 台风成熟时期, 呈现明显的三圈结构; 减弱消散时期, 中心闪电骤减, 几乎为零, 外围闪电密度远远超过中心闪电密度。眼壁闪电和台风总闪电存在阶段性变化。在台风中心最大风速急剧增大的阶段, 眼壁上的闪电两次爆发, 而在第二次眼壁闪电爆发后的两个小时, 中心风速达到最大值, 表明闪电活动有可能对台风增强有指示意义。台风眼壁置换是台风强度发生变化的一个转折点, 也是台风闪电活动发生变化的一个转折点, 从台风眼壁置换开始, 眼壁上闪电数接近于零。闪电次数跟云顶亮温存在显著性相关。结合热带测雨计划任务卫星 (TRMM) 上装载的闪电成像仪 (LIS) 和微波辐射计 (TMI) 资料, 进一步对比分析了台风闪电与强对流区域的关系, 发现闪电易发生在修正极化亮温低于 225 K 的深对流系统中, 但并不是所有的深对流中都能探测到闪电的发生。WWLLN 和 LIS 探测到闪电发生区域基本一致。

**关键词** 台风圣帕 (Sepat) 闪电 眼壁 台风强度

**文章编号** 1006 - 9895 (2010) 06 - 1088 - 11

**中图分类号** P427

**文献标识码** A

## Lightning Activity in Super Typhoon Sepat (0709)

PAN Lunxiang<sup>1,2</sup> and QIE Xiushu<sup>1</sup>

1 Key Laboratory of Middle Atmosphere and Global Environment Observation, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

**Abstract** The spatial and temporal distribution of lightning activity was examined in super typhoon Sepat in 2007, by using the data from the World Wide Lightning Location Network (WWLLN) and China Meteorological Administration (CMA). The results indicated that during the initial stage of typhoon, lightning near the centre was more active than that in outer rainbands. There were three lightning flash regions in the mature stage. During the dissipate stage, the lightning at the centre sharply decreased, and the lightning density in the outer rainband was much more than that at the centre. The evolution of eyewall lightning and total lightning tended to be episodic. Two eyewall lightning outbreaks occurred during the intensification of typhoon Sepat, and the second outbreak happened two hours prior to its maximum intensity, indicating that lightning activity might be used as a proxy of intensification of super typhoon. Eyewall replacement is indicative of typhoon intensity change and eyewall lightning change. Since the eyewall replacement, the flashes happening in the eyewall region was nearly zero. The flashes number was significantly correlated with the cloud top bright temperature. By combining the data of lightning imaging sensor (LIS)

**收稿日期** 2009 - 11 - 13, 2010 - 05 - 21 收修定稿

**资助项目** 中国科学院“百人计划”专项经费, 国家自然科学基金资助项目 40930949

**作者简介** 潘伦湘, 女, 1984 年出生, 博士研究生, 主要从事雷电与强对流天气研究。E-mail: panlx@mail.iap.ac.cn

and TRMM Microwave Imager (TMI) aboard the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) satellite, it is found that lightning was most likely to occur in the deep convective systems with the polarized brightness temperature lower than 225 K. Lightning areas indicated by the WWLLN were similar to that by the TRMM-LIS.

**Key words** typhoon Sepat, lightning, eyewall, typhoon intensity

## 1 引言

伴随台风登陆发生的大风、暴雨以及风暴潮给人民生命财产造成很大的威胁。已有的台风研究更多侧重于台风结构及路径预报等(陈联寿和孟智勇, 2001), 而对台风闪电的研究则由于受到观测手段的限制, 在一定程度上受到制约, 但是随着地基全球闪电探测网的建设和卫星闪电探测技术的发展, 台风闪电的研究正在成为学术界关注的一个前沿课题。

最早, Black and Hallett (1986) 通过机载仪器, 观测到飓风中存在过冷水滴、软雹、冰晶及雪花等, 并发现只有在上升速度大于 5 m/s 的对流区域中存在过冷水滴, 弱垂直上升速度不足以把较大的冰粒子和过冷水滴携带到零度层之上。Black and Hallett (1999) 总结了从 1980 年起约 20 年的穿越飓风的飞行记录, 发现距中心 100 km 范围内或眼壁上闪电很少。他们利用固定在 WP-3D 飞机上的电场仪测量了飓风 Claudette 和 Tina 中的电场, 发现当眼壁上的电场较弱时, 对应成熟飓风眼壁上的闪电密度也比较低。在几次的穿眼壁飞行中, 测量到的最强垂直方向上的电场约为 17~24 kV/m, 比陆地上的雷暴中的电场要低 3~5 倍 (Marshall et al., 1995)。Samsury and Orville (1994) 利用美国国家闪电探测网 (NLDN) 地闪资料和飞机穿云资料分析了飓风 Hugo (1989) 和飓风 Jerry (1989), 18 个小时内 (包括登陆前和登陆后) 飓风 Hugo 内只探测到 33 次地闪, 而飓风 Jerry 内则探测到 691 次地闪。飓风 Hugo 负极性首次回击脉冲峰值电流为 49 kA, 飓风 Jerry 的首次回击脉冲峰值电流为 40 kA。Molinari et al. (1994) 对飓风 Andrew (1992) 登陆前后的闪电时空分布特征进行研究, 根据闪电特征把飓风分为三个区域: 眼壁区域、内雨带和外雨带, 闪电主要集中在飓风眼壁区域和距飓风中心大于 190 km 外围雨带中, 而 40~100 km 范围内地闪密度几乎接近于零。Corbosiero and Molinari (2002)、Corbosiero and

Molinari (2003) 分析了大西洋 1985~1999 年 35 个热带气旋, 发现当 850hPa 和 200hPa 之间的风速垂直切变超过 5 m/s 时, NLDN 探测到的闪电超过 90% 发生在气旋中心 (距离中心 100 km) 和外雨带 (距中心 100~300 km)。同时, 发现闪电发生在气旋移动方向的右前方。Molinari et al. (1999) 利用 NLDN 资料对 1985~1991 年间大西洋上 9 个飓风的地闪特征进行了分析, 发现飓风眼壁附近有一个弱的闪电密集带, 眼壁外 80~100 km 范围内存在一明显的小值区, 而外雨带 (距飓风中心 210~290 km) 则是闪电高发带, 眼壁闪电在飓风增强阶段或者在最强阶段爆发。Cecil et al. (2002)、Cecil and Zipser (2002) 利用热带测雨计划任务卫星 (TRMM) 上装载的闪电成像仪 (LIS) 的闪电资料对 261 条轨道扫过的 45 个热带气旋进行分析, 认为反射率、冰粒子散射和闪电可以反应对流的强度, 眼壁和外雨带闪电密度是内雨带和热带海洋地区闪电密度的 4 倍, 外雨带地区发生的闪电要比飓风的其他区域及海洋上的对流系统要多。Squires and Businger (2008) 综合远距离闪电探测网 (LLDN)、TRMM 卫星以及飞机探测 (WP-3D) 资料分析了大西洋两个影响极大的 5 级飓风 Rita 和 Katrina, 发现在飓风剧烈增强的阶段, 眼壁上的闪电爆发。飓风 Rita 眼壁闪电密度和外雨带闪电密度之比为 6:1, 而 Katrina 的眼壁闪电密度与外雨带闪电密度之比为 1:1。Price et al. (2009) 利用全球闪电定位网 (WWLLN) 资料分析了 2005~2007 年全球 58 个飓风, 认为闪电频数跟飓风强度 (最大持续风速) 存在正相关, 相关系数高达 0.86。在飓风达到最强大约前一天闪电频数增加。潘伦湘等 (2010) 最近分析了 2005~2008 年西北太平洋地区登陆我国的 7 个强台风, 发现在台风剧烈增强的阶段, 眼壁闪电爆发, 在眼壁闪电爆发后的几个小时, 台风强度达到最强。雷小途等 (2009) 利用 TRMM 卫星资料对西北太平洋热带气旋的闪电特征及其与强度进行了分析, 利用发生在不同区域闪电信息对热带气旋的强度进行了估算。

以上对飓风闪电的宏观分布和闪电频数特征的研究,使我们对飓风中的闪电有了一定的了解。这些研究中,闪电资料的来源主要有四个,NLDN 探测网只能探测到近海 400 km 范围内飓风中的地闪,TRMM 卫星扫过台风的时间和空间有限,飞机穿飓风代价昂贵且资料也不连续,而地基全球闪电探测网 WWLLN 则可提供准实时的连续闪电观测资料。

圣帕 (Sepat) 是 2007 年在西北太平洋和南海上生成的唯一的超强台风,海平面最大风速超过 65 m/s。2007 年 8 月 13 日,圣帕在菲律宾以东的洋面上生成,强度迅速加强,于 15 日下午加强为超强台风。18 日凌晨圣帕减弱为强台风,05:40 (除特别说明外,均指北京时间) 登陆台湾,18 日下午减弱为台风,19 日凌晨 02 时在福建省惠安县沿海登陆,登陆时中心附近最大风力有 12 级 (33 m/s)。登陆后圣帕先向西北方向移动,19 日 20 时在江西境内减弱为热带低压,之后低压环流一直存在并缓慢向西挺进,相继进入湖南、广西、贵州,并一直影响到云南境内,持续的时间长达 7 天左右。潘伦湘等 (2010) 在对登陆我国的 7 个强台风的研究中,包含了台风圣帕,它是其中闪电活动最活跃的台风,特别是眼壁闪电十分频繁。而且,TRMM 卫星几次扫过台风圣帕,本文将在此基础上,对圣帕台风的闪电时空演变特征进行详细研究,并结合日本多用途输送卫星-1R (MTSAT-1R) 卫星云图,TRMM-LIS 卫星闪电资料和微波辐射计 (TMI) 资料,进一步对比分析闪电与强对流区域的关系。

## 2 资料和方法

所用的闪电定位资料由全球闪电定位网 WWLLN (World Wide Lightning Location Network) 提供,该网由美国华盛顿大学地球与空间科学中心负责建设,可对全球闪电活动进行实时监测,其探测精度约为 10 km,时间精度为 30 ms,详细介绍参看潘伦湘等 (2010)。本文所用资料为 WWLLN 算法改进后的结果,Rodger et al. (2009) 比较 2007 年 WWLLN 探测到的全球闪电,发现新算法改进后对全球闪电的探测效率由 2% 增加到 3%。

同时,本文还利用了 TRMM-LIS 闪电和 TMI

亮温资料 (1B11),其详细介绍可参阅袁铁和邵秀书 (2010)。利用了 MTSAT-1R 的云图资料。另外,还利用了 中国台风网“CMA-STI 热带气旋最佳路径数据集”提供的台风定位以及台风中心最低气压和海平面最大风速等资料。本文取样时用台风定位时刻前后半小时的闪电代表该时刻的闪电。在台风初始时期,每隔 6 小时给出一次定位,为了得到每个小时台风中心位置,利用三次样条插值法计算出逐时台风中心位置。根据日本高知大学提供的 MTSAT-1R 提供的卫星云图判断,台风半径取 800 km,可认为基本上包含了台风绝大部分的雨带,则发生在 800 km 范围内闪电定义为台风总闪电。

## 3 台风闪电的时空分布特征

热带气旋在径向方向上可以分为三个部分,外区、眼壁区和眼区。眼壁区对应围绕台风眼的云墙。外区分为内雨带和外雨带,内雨带一般距台风眼壁 50~100 km,内雨带都是在卷云覆盖区内部。下面详细分析台风内的闪电分布以及与台风雨带的联系。

### 3.1 闪电空间分布特征

当台风中心附近最大风速大于 32.7 m/s 时,则定义为台风成熟阶段。选取台风初始、成熟和消散三个阶段,分别计算台风闪电密度随径向距离的变化。以台风中心为原点,每向外 20 km 为一环计算闪电的密度 (图 1)。图 1a 对应于台风处于热带低压到热带风暴阶段 (12~13 日),台风中心闪电活动频繁,中心区域闪电密度大于外围闪电密度。距离台风中心 100~200 km 闪电密度为零,200 km 以外闪电密度增加。而到了台风增强成熟阶段 (15~16 日) (图 1b),中心闪电密度骤然增大,在 40~60 km 处达到最大值。100 km 以外的闪电密度减小,300 km 以外闪电密度又稍微增大。当台风处于减弱阶段 (18~19 日) (图 1c),中心闪电极少,100~200 km 这个区间的闪电依然很少,而 200 km 以外闪电密度增加,减弱阶段 200 km 以外的闪电密度远远超过了增强阶段的闪电密度。

### 3.2 闪电与 MTSAT-1R 卫星云图云顶亮温的关系

为了分析云顶亮温与闪电分布之间的关系,我们将卫星云图观测时刻  $\pm 30$  min 内发生的闪电叠加在云图上 (图 2)。文中所用的卫星资料是由日本高知大学提供的 MTSAT-1R 的 IR1 云图资料,每幅云

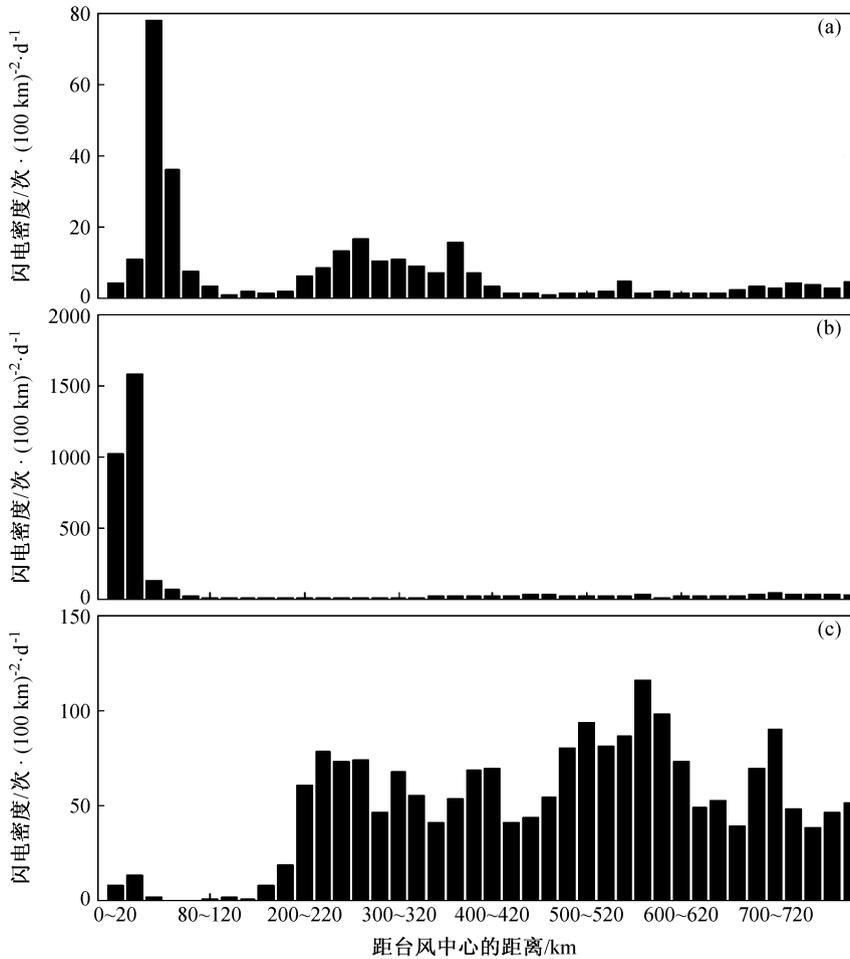


图 1 圣帕台风日总闪电密度随径向距离的变化: (a) 热带风暴阶段; (b) 台风成熟增强阶段; (c) 台风消散阶段  
Fig. 1 Radial distribution of flash density of typhoon Sepat: (a) Tropical storm stage; (b) mature enhancing stage; (c) dissipating stage

图的覆盖范围为 (70°N~20°S, 70 E°~160°E), 资料分辨率为 0.05 经纬度。分别选取 8 月 13 日 10 时、8 月 16 日 10 时和 8 月 19 日 04 时分别代表台风热带风暴阶段、超强台风阶段和台风消散阶段这三个阶段的闪电分布。

8 月 13 日 10 时台风处于热带风暴阶段, 可以发现台风半径比较小, 且该阶段还没有出现台风眼, 闪电主要发生在台风中心和螺旋雨带云顶亮温低于 220 K 的云中, 中心闪电频数高于外雨带闪电频数。而 8 月 16 日 10 时, 台风已经成熟, 三圈结构非常明显, 台风眼清晰可见, 台风眼半径约为 20 km。环绕台风眼有约 200 km 云顶亮温低于 200 K 的云区。但是中闪电主要发生在环绕台风眼 40 km 的范围内。相比于热带风暴阶段, 从眼壁外的 200 km 范围内基本探测不到闪电, 尽管其云顶亮温比较低。消散阶段, 台风眼完全消失, 这个时

期闪电主要发生在外螺旋雨带中, 但是闪电并不是跟低中心重合。闪电的分布基本上跟台风对流的三圈分布一致, 中心或眼壁及外雨带闪电多, 而内雨带闪电发生得很少。

从以上的分析, 我们可以知道, 眼壁和外螺旋雨带是闪电多发区, 而在内雨带闪电发生得很少。虽然, 内雨带对应的云顶亮温比较低 (<200 K), 但是在 8 月 16 日 10 时这一个小时内没有探测到闪电。内雨带的云主要是从眼壁向外流出的冰晶粒子, 其中缺乏过冷水, 不存在混相区, 因此闪电在此区域内很少发生。雨带具有非对称性, 导致台风闪电的发生也具有非对称性。

为了更细致地说明云图资料和闪电发生的关系, 图 3 给出不同云顶亮温出现的闪电次数分布图, 闪电资料取卫星观测时刻 ± 30 min 内的资料。纵观图 2a - c, 几乎所有的闪电都发生在 <240 K

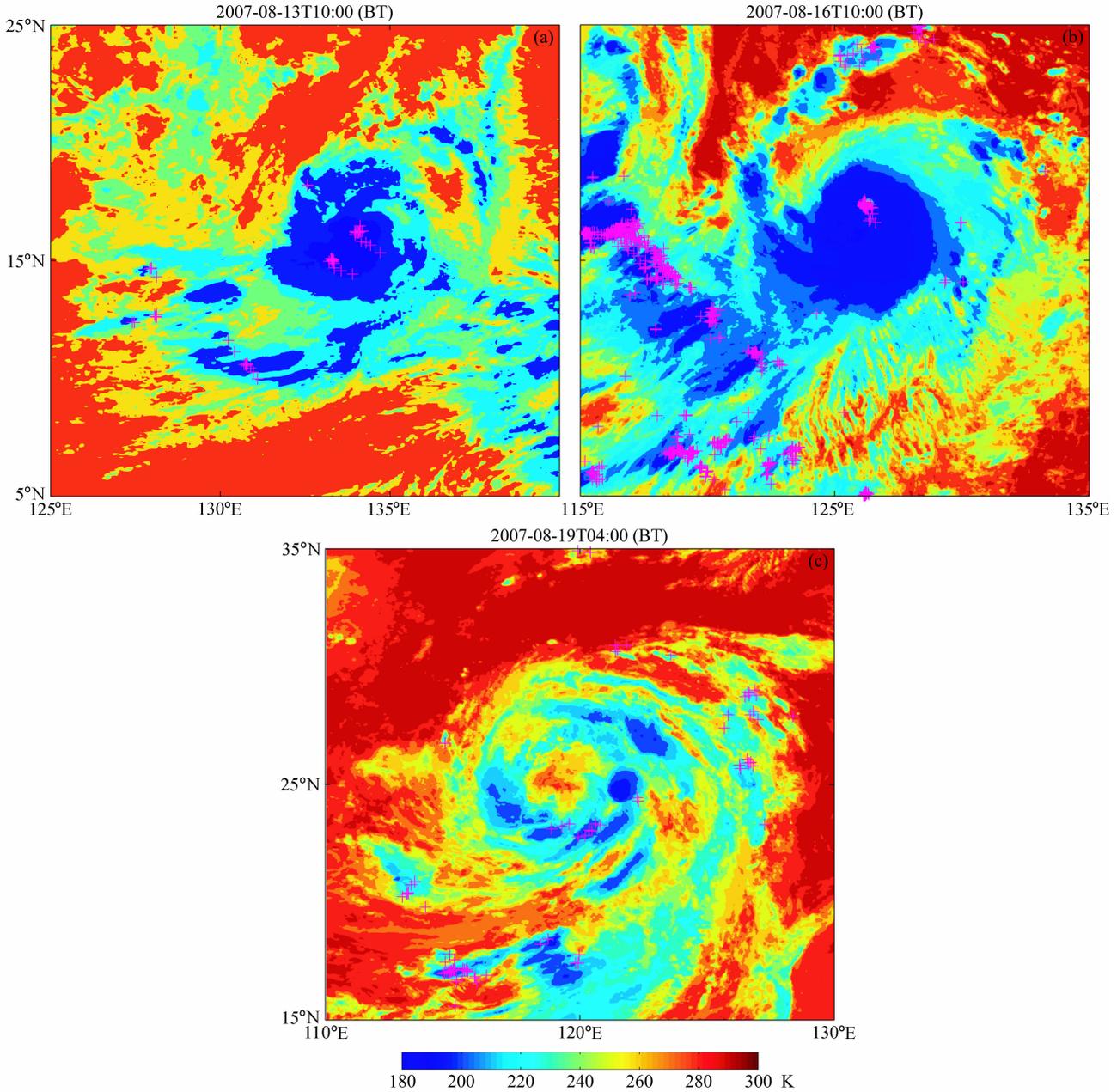


图2 圣帕台风 MTSAT-1R 红外云图和云图时间前后半个小时闪电的分布: (a) 热带风暴阶段; (b) 超强台风阶段; (c) 消散阶段。+ 为闪电

Fig. 2 Cloud top brightness temperature distribution from MTSAT-1R satellite for typhoon Sepat and the distribution of flashes within one hour around the cloud image time (BT; Beijing Time); (a) Tropical storm stage; (b) mature stage; (c) dissipating stage. Plus signs indicate flashes

的范围内。1310、1610 和 1904 在其对应图上所给的区域内分别探测到 57 次、759 次和 89 次闪电。有 93% 闪电发生在亮温低于 240 K 的范围内。另外对闪电发生次数与云顶亮温的关系进行多项式拟合, 得到关系式如下:

$$f = -4.5x^2 + 754.7x - 46022.9, r = 0.98,$$

其中,  $x$  为云顶亮温,  $f$  为闪电次数。两者拟合的相关系数  $r$  为 0.98, 说明可以根据云顶亮温和闪电次数之间的相关性利用云顶亮温来估计闪电发生的情况。

### 3.3 台风总闪电及眼壁闪电逐时变化

以往由于受到探测手段的限制, 很难得知台风

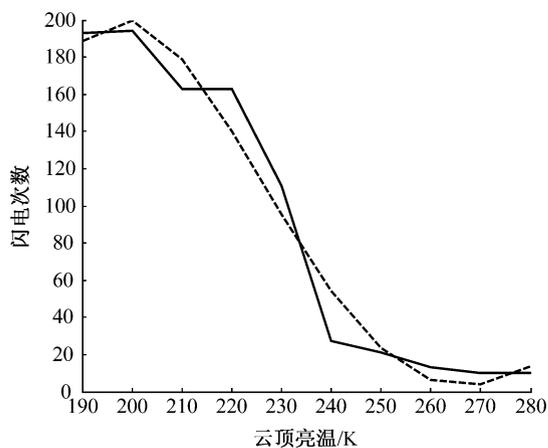


图3 不同云顶亮温出现的闪电次数分布。虚线为多项式拟合曲线

Fig. 3 The distribution of flashes number vs. cloud top brightness temperature, the dashed curve stands for fitting curve

从生成、发展直至消亡各阶段的闪电情况，而 WWLLN 的实时定位为我们研究台风整个生命史中的闪电活动提供了很好的手段。从以上闪电随径向距离的变化可知，距中心 40~80 km 内存在一个闪电密集带，并考虑到定位的误差等因素，台风眼出现后把距离台风中心 100 km 范围内的闪电定义为眼壁的闪电，其余的距离中心 100 km 的闪电称为台风中心闪电。

图 4a 是圣帕台风中心或眼壁闪电随时间的演变图，并相应给出了台风眼出现，眼壁置换及台风登录台湾省和福建省的时间。眼壁上的闪电具有阶段性变化。在台风增强阶段，眼壁上闪电发生比较频繁，而在台风减弱阶段，眼壁闪电发生很少，某些时段甚至没有闪电发生。在台风急剧增强阶段以及达到最强期间，眼壁闪电两次爆发。24 小时降压达到 30 hPa，眼壁闪电第一次爆发出现在 8 月 15 日中午，在 14 时达到其最大值；眼壁闪电的第二次爆发出现在 16 日上午，09 时达到其最大值。在第二次闪电爆发后两个小时，台风强度达到最强 910 hPa。17 日 01 时，眼壁开始发生置换，从卫星云图上可以分辨 (MTSAT-1R 图略)。眼壁置换是台风强度变化的一个转折点 (Houze et al., 2007)，可以看到，这也是眼壁闪电的一个转折点，从眼壁置换开始，眼壁上基本没有闪电发生，而台风 05:40 在台湾花莲登陆。台风在台湾停留几个小时，返回海洋。在登陆及返回海洋这段时间内，台

风中心零星出现一些闪电。

台风总闪电跟眼壁闪电变化存在一些差别，台风总闪电也具有阶段性变化，台风总闪电对应眼壁闪电爆发也存在极大值。而在台风减弱阶段，虽然眼壁或者中心闪电活动很少甚至没有闪电发生，但是台风总闪电活动依然活跃，并出现 3 次峰值。特别是 18 日中午这段时间，台风总闪电活动最为频繁。这是否跟台风登陆台湾地形抬升有关？虽然登陆后所受地面摩擦作用增加，但是水汽的供应并没有减少，这就使得闪电频数增加。值得注意的是，在 17 日 01:00~06:00 这段时间，不管是眼壁闪电还是台风总闪电都发生极少，这段时间刚好对应台风眼壁的置换时期。

### 3.4 台风眼壁闪电

眼壁指环绕台风眼的一个环形云墙，是整个台风对流活动比较活跃的区域。8 月 15 圣帕台风的眼壁闪电第一次爆发，提取 09 时~14 时眼壁的闪电演变情况 (图 5a)。从静止卫星云图 (MTSAT-1R) 上可以看到比较清晰的台风眼。在 6 个小时的演变过程中，闪电数一直比较少，闪电出现在台风眼的南部。而到了第二次闪电爆发时期，台风眼依然清晰可辨。第二次闪电爆发时眼壁闪电较第一次闪电爆发要多 (见图 5b)，眼壁对流较第一次爆发时的眼壁对流要强。16 日 06 时，闪电基本围绕台风眼呈圆形分布，且闪电数逐渐增加，台风眼也清晰可辨。16 日 09 时眼壁闪电达到其高峰，眼壁闪电分布相对均匀。在眼壁闪电达到其最大值后的两个小时台风达到最强。两次眼壁闪电爆发 6 小时降压均达到 10 hPa。眼壁闪电变化在一定程度上反映了台风的强度变化，但是闪电强度变化超前于台风强度的变化。

## 4 WWLLN 闪电活动与 TRMM 卫星资料的对比

在圣帕整个生命史中，TRMM 卫星扫过其台风中心的轨道为数不多，故只选取圣帕台风登陆前两个时次进行对比分析。2007 年 8 月 15 日 TRMM 卫星扫过圣帕台风中心的时间为 18:49，轨道号为 55541；2007 年 8 月 17 日 TRMM 卫星扫过圣帕台风中心的时间为 10:23，轨道号为 55567。选取卫星注视台风前后 10 分钟内的 WWLLN 闪电和 LIS 探测到的闪电 (探测时间约为 90 秒钟) 与

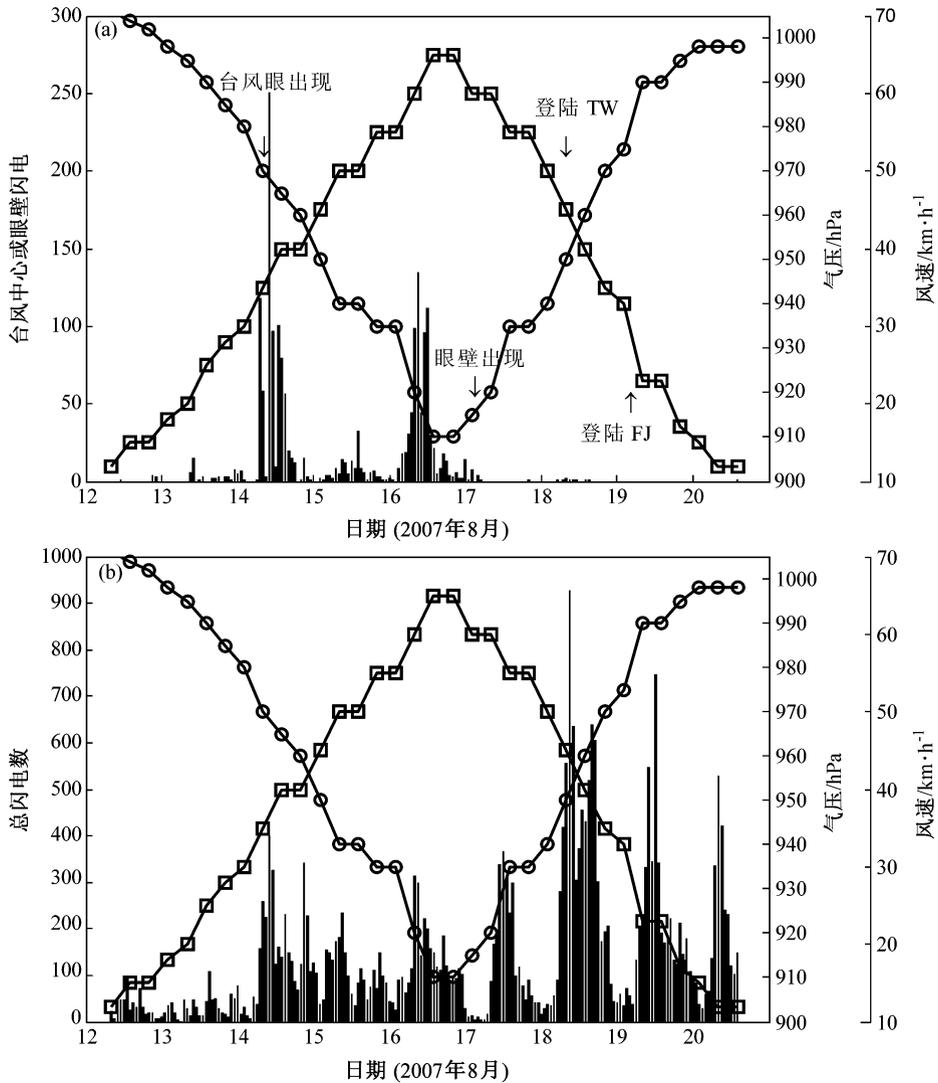


图4 台风闪电(柱)随时间的演变以及6小时风速(方框)和气压(圆圈)随时间的演变:(a)中心闪电逐时变化;(b)台风总闪电逐时变化。图中TW、FJ分别代表台湾省和福建省

Fig. 4 Histogram of typhoon lightning, along with 6-h maximum sustained wind (square) and the minimum pressure (circle): (a) Eyewall lightning activity evolution; (b) total lightning activity evolution. TW and FJ stand for Taiwan Province and Fujian Province separately

TRMM 卫星 85GHz TMI 的亮温进行叠加 (图 6)。

Mohr et al. (1999) 把修正极化亮温值 (PCT) 250 K 定义为降水系统的一个阈值, 低于 250 K 降水系统归为对流系统, 低于 225 K 的降水系统划分为深对流系统。图 6a 为 8 月 15 日圣帕台风处于急剧增强的阶段, 眼区清晰可见, PCT 超过了 280 K, 是个无云区。周围的眼壁与之组成紧凑的漩涡螺旋, 但是眼壁对流分布并不均匀, 眼壁没有闭合。眼壁东侧的 PCT 低于 200 K, 其中有闪电发生。在眼壁外的 200 km 范围基本没有探测到闪电

发生, 这个区域的量温值较高, 对应的是台风内雨带的层状云区域。在台风前进方向的右前方的螺旋台中, 闪电比较集中, 闪电也发生在亮温比较低的对流区。在 TRMM 卫星注视台风的时间内, 共探测到 11 次闪电。叠加在 85 GHz TMI 上的 LIS 闪电虽然较少, 但是在东侧眼壁上有闪电发生, 在台风中心正北面的一小块对流云中也有闪电发生。而 WWLLN 在卫星注视时间前后 10 分钟共探测到 67 次闪电, 对 LIS 探测时段和轨道区域内 WWLLN 探测到 2 次闪电。WWLLN 和 LIS 探测闪电发生区域基本一致。图 6b 为台风减弱阶段,

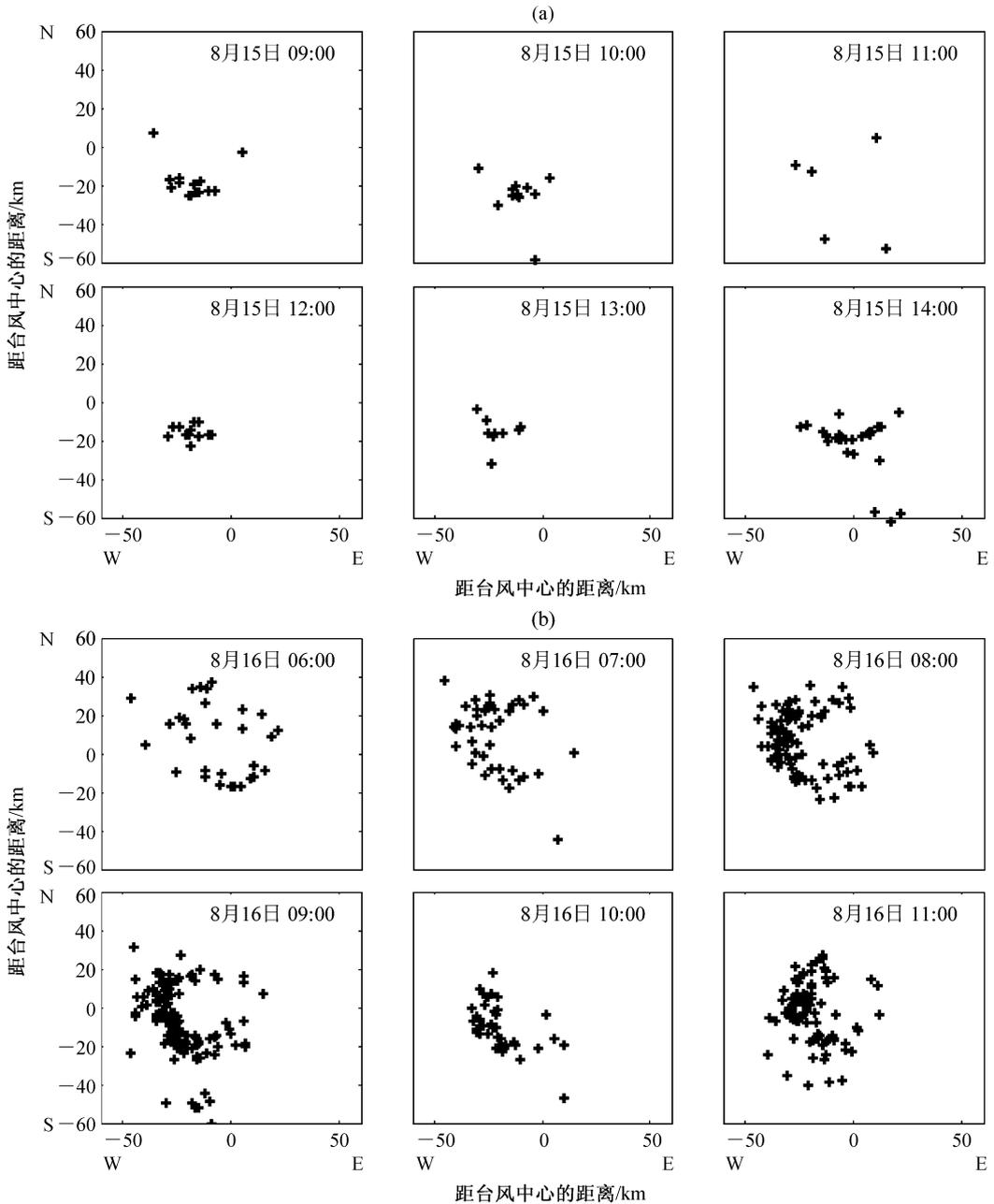


图 5 (a) 第一次和 (b) 第二次眼壁闪电爆发时的闪电时空分布

Fig. 5 The time evolution and spatial distribution of lightning during the (a) first and (b) second eyewall lightning outbreak

跟图 5a 相比, 台风眼变大, 并出现了双台风眼结构。台风外眼壁的亮温在 220 K 左右, 而台风次眼壁的亮温在 260 K 左右。处于减弱的眼壁上没有探测到闪电。正北边的外螺旋雨带, PCT 低至 220 K, 其上有成簇闪电发生。同时, LIS 也没有探测到台风眼壁上有闪电发生, 而在台风眼正北边的螺旋雨带中闪电发生。深对流系统中易发生闪电, 但是并

不是所有的深对流系统都有闪电发生, 这也可能是由于台风中的闪电频数较低, 在所研究的时段内没有探测到闪电所致。在卫星注视的时间前后 10 分钟内 WWLLN 探测到 31 次闪电, LIS 90 秒内探测到 18 次闪电, 对应时段和轨道区域内 WWLLN 探测到 1 次闪电。由此估计 WWLLN 对总闪 (包括云闪和地闪) 的探测效率约为 11%, 与国外研究者

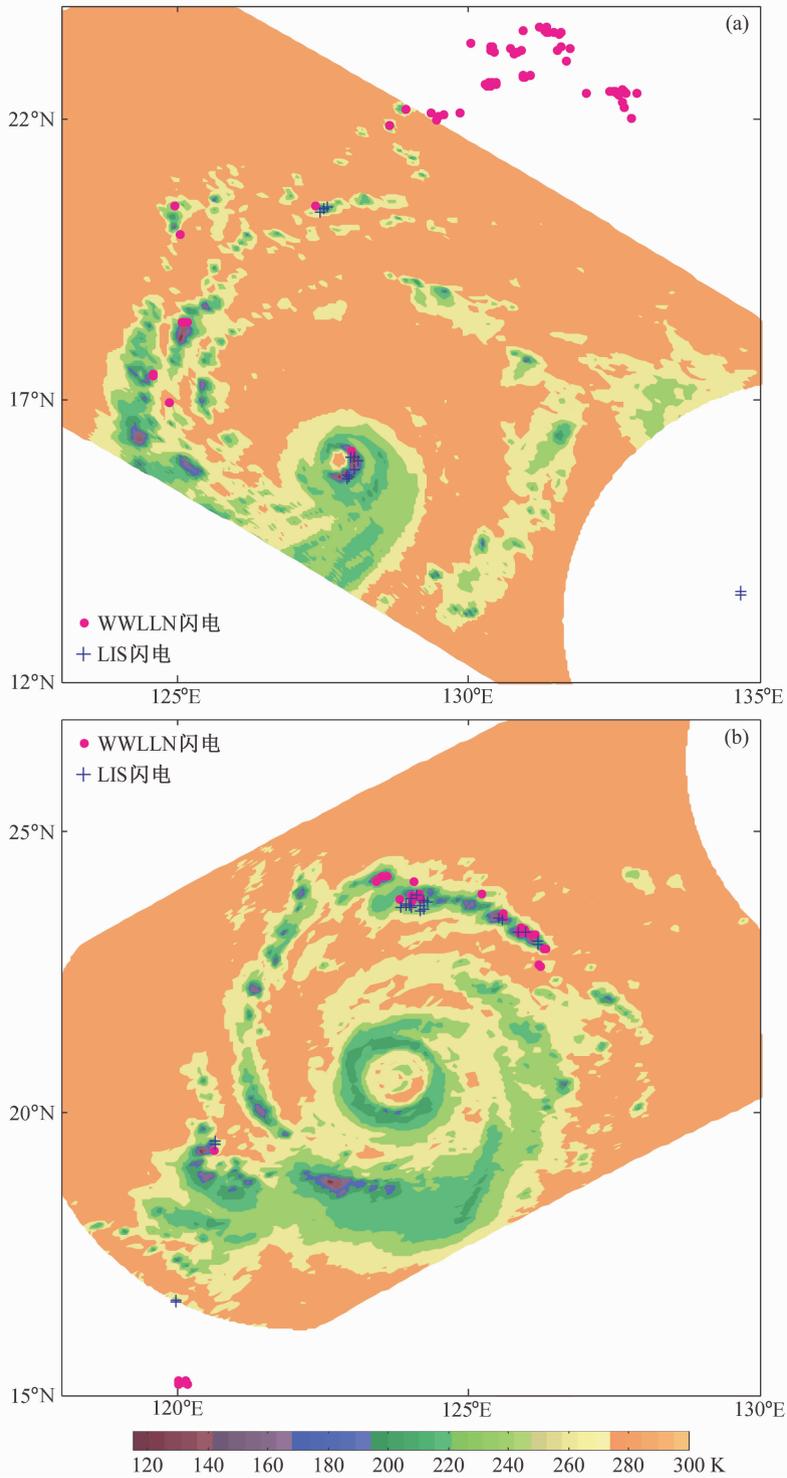


图 6 2007 年 8 月闪电与 TRMM 卫星 85GHz TMI 亮温 (彩色) 的叠加图: (a) 15 日 18:49; (b) 17 日 10:23

Fig. 6 Lightning detected by WWLLN (World Wide Lightning Location Network) and LIS (lightning imaging sensor) overlaid on brightness temperature images from 85 GHz TMI (TRMM Microwave Imager): (a) 1849 BT 15 Aug 2007; (b) 1023 BT 17 Aug 2007

(Rodger, et al., 2005, 2006) 利用局域雷电探测网的对比结果基本一致。

## 5 结论及讨论

利用 WWLLN 获取的闪电实时定位资料和中

央气象台提供的台风定位资料, 详细分析了 2007 年第 9 号超强台风“圣帕”的闪电空间分布和时间演变特征以及闪电和 85GHz 微波亮温的关系。研究结果表明:

(1) 台风成熟时呈现明显的三圈结构, 台风眼壁上存在一个环形闪电密集带 (距台风中心约 20~80 km), 而距离台风中心约 100~300 km 范围闪电很少, 距离中心 300 km 以外的外围雨带中闪电逐渐增加。这跟台风三圈降水结构基本一致, 眼壁和外围雨带降水强, 而内雨带降水弱。

(2) 闪电易发生在云顶亮温低于 240 K 的云区。闪电次数和云顶亮温的关系可以 2 次多项式进行拟合, 它们之间存在显著性正相关, 说明在一定程度上可以用云顶亮温来估计闪电的发生。

(3) 眼壁闪电和台风总闪电都存在阶段性变化。在台风中心最大风速急剧增大阶段, 眼壁上的闪电两次爆发, 而在第二次眼壁闪电爆发后的两个小时中心风速达到最大值。闪电强度变化超前于台风强度的变化。眼壁闪电变化在一定程度上反映了眼壁对流强度的变化。眼壁置换是台风强度变化的一个转折点, 同时也是眼壁闪电变化的一个转折点, 从台风眼壁置换开始, 眼壁闪电减少, 基本上没有闪电发生。这意味着有可能利用眼壁闪电变化转折点来表示台风强度变化的转折。

(4) 闪电易发生在修正极化亮温低于 225 K 的深对流系统中, 但并不是所有的深对流中都能探测到闪电的发生。对比 WWLLN 探测的闪电资料与 LIS 所探测的资料, 尽管 WWLLN 的探测效率相对于 LIS 要低, 但是就所观测到的这两个轨道中的闪电而言, WWLLN 探测到了的闪电区域基本跟 LIS 探测到闪电的区域一致。尽管 WWLLN 的探测效率较低, 但是基本上能反映出台风闪电的变化特征。

通过上面的分析可以看出, 在外雨带和台风中心或眼壁闪电频数较高, 而在内雨带闪电频数接近于零, 闪电基本呈现三圈分布。首先, 云内的起电过程和放电与垂直上升气流密切相关, 垂直上升气流调节过冷水的供给, 而过冷水又是各种冰相粒子增长的基础, 冰粒子又被认为是电荷转移所必须的载体。其次, 强的上升气流有利于电荷的分离形成云层上下不同极性的电荷区。眼壁内有很强的上升气流能把过冷水迅速输送到零度层以上。内雨带介

于眼壁和外雨带之间, 其云层被认为主要是由眼壁向外流的冰相粒子, 不存在过冷却水, 那么就抑制了闪电的发生。外雨带结构相对复杂, 目前对其内部了解还比较少。但是螺旋雨带有显著的上升运动, 对流活动旺盛, 是台风内部热量垂直输送和位能转换的主要区域。在整个圣帕台风中, 外雨带的闪电是最多的。

以上只是一个台风个例的结果, 具有一定的局限性, 但是通过地面全球闪电定位网探测到的台风闪电和 TRMM 卫星资料的综合分析, 发现了超强台风的闪电时空演变特征与其强度变化有一定的联系。在今后的工作中, 我们还将通过较多的个例分析, 来揭示从热带低压到超强台风不同阶段的闪电特征, 并结合数值模拟探讨台风闪电与台风动力和微物理过程的联系。

**致谢** 感谢华盛顿大学地球与空间科学中心提供的 WWLLN 闪电资料和上海台风研究所提供的热带气旋最佳路径资料, 日本高知大学提供的 MTSAT-1R 云图资料, 以及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 TMI 资料。

### 参考文献 (References)

- Black R A, Hallett J. 1986. Observations of the distribution of ice in hurricanes [J]. *J. Atmos. Sci.*, 43 (8): 802-822.
- Black R A, Hallett J. 1999. Electrification of the hurricane [J]. *J. Atmos. Sci.*, 56 (12): 2004-2028.
- Cecil D J, Zipser E J, Nesbitt S W. 2002. Reflectivity, ice scattering, and lightning characteristics of hurricane eyewalls and rainbands. Part I: Quantitative description [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 130 (4): 769-784.
- Cecil D J, Zipser E J. 2002. Reflectivity, ice scattering, and lightning characteristics of hurricane eyewalls and rainbands. Part II: Intercomparison of observations [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 130 (4): 785-801.
- 陈联寿, 孟智勇. 2001. 我国热带气旋研究十年进展 [J]. *大气科学*, 25 (3): 420-432. Chen Lianshou, Meng Zhiyong. 2001. An overview on tropical cyclone research progress in China during the past ten years [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 25 (3): 420-432.
- Corbosiero K L, Molinari J. 2002. The effect of vertical wind shear on the distribution of convection in tropical cyclones [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 130 (8): 2110-2132.
- Corbosiero K L, Molinari J. 2003. The relationship between storm motion, vertical wind shear, and convective asymmetries in tropical cyclones [J]. *J. Atmos. Sci.*, 60 (2): 366-376.
- Houze R A, Chen S S, Smull B F, et al. 2007. Hurricane intensity and eyewall replacement [J]. *Science*, 315 (5816): 1235-1239.

- 雷小途, 张义军, 马明. 2009. 西北太平洋热带气旋的闪电特征及其与强度关系的初步分析 [J]. 海洋学报, 31 (4): 29-38. Lei Xiaotu, Zhang Yijun, Ma Ming. 2009. The preliminary analysis of the lightning characteristics and the relationship between lightning and intensity of tropical cyclone in northwest Pacific [J]. Acta Oceanologica Sinica (in Chinese), 31 (4): 29-38.
- Marshall T C, Rust W D, Stolzenburg M. 1995. Electrical structure and updraft speeds in thunderstorms over the southern Great Plains [J]. J. Geophys. Res., 100 (D1): 1001-1016.
- Mohr K I, Famiglietti J S, Zipser E J. 1999. The contribution to tropical rainfall with respect to convective system type, size, and intensity estimated from the 85-GHz ice-scattering signature [J]. J. Appl. Meteor., 38 (5): 596-606.
- Molinari J, Moore P K, Idone V P, et al. 1994. Cloud-to-ground lightning in Hurricane Andrew [J]. J. Geophys. Res., 99 (D8): 16665-16676.
- Molinari J, Moore P, Idone V. 1999. Convective structure of hurricanes as revealed by lightning locations [J]. Mon. Wea. Rev., 127 (4): 520-534.
- 潘伦湘, 鄒秀书, 刘冬霞, 等. 2010. 西北太平洋地区强台风的闪电活动特征 [J]. 中国科学 (D 辑), 40 (2): 252-260. Pan L X, Qie X S, Liu D X, et al. 2010. The lightning activities in super typhoons over the Northwest Pacific [J]. Science China Earth Sciences, 53 (1): 1-8.
- Price C, Asfur M, Yair Y. 2009. Maximum hurricane intensity preceded by increase in lightning frequency [J]. Nature Geoscience, 2: 329-332.
- Rodger C J, Brundell J B, Dowden R L. 2005. Location accuracy of VLF World Wide Lightning Location (WWLL) network: Post-algorithm upgrade [J]. Ann. Geophys., 23: 277-290.
- Rodger C J, Werner S, Brundell J B, et al. 2006. Detection efficiency of the VLF World-Wide Lightning Location Network (WWLLN): Initial case study [J]. Ann. Geophys., 24: 3197-3214.
- Rodger C J, Brundell J B, Holzworth R H, et al. 2009. Growing Detection Efficiency of the World Wide Lightning Location Network [C]. Workshop on Coupling of Thunderstorms and Lightning Discharges to Near-Earth Space, 1118: 15-20.
- Samsury C E, Orville R E. 1994. Cloud-to-ground lightning in tropical cyclones: A study of Hurricanes Hugo (1989) and Jerry (1989) [J]. Mon. Wea. Rev., 122 (8): 1887-1896.
- Squires K, Businger S. 2008. The morphology of eyewall lightning outbreaks in two category 5 hurricanes [J]. Mon. Wea. Rev., 136 (5): 1706-1726.
- 袁铁, 鄒秀书. 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.