

王芳, 郄秀书, 崔雪东. 2017. 西北太平洋地区热带气旋闪电活动的气候学特征及其与气旋强度变化的关系 [J]. 大气科学, 41 (6): 1167–1176. Wang Fang, Qie Xiushu, Cui Xuedong. 2017. Climatological characteristics of lightning activity within tropical cyclones and its relationship to cyclone intensity change over the Northwest Pacific [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 41 (6): 1167–1176, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1704.17102.

西北太平洋地区热带气旋闪电活动的气候学特征 及其与气旋强度变化的关系

王芳^{1,2,3} 郄秀书^{1,2} 崔雪东³

¹ 中国科学院大气物理研究所中层大气和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 浙江省气象安全技术中心, 杭州 310008

摘 要 利用 2005~2014 年全球闪电定位网(WWLLN)资料和中国气象局提供的热带气旋(Tropical Cyclone, TC)位置和强度资料, 分析了近 10 年西北太平洋地区 228 个 TC 中的闪电时空分布特征及其与气旋强度变化的关系。结果表明: TC 闪电活动年际变化呈震荡分布, 夏半年闪电活动比冬半年强, 闪电频数日变化呈单峰分布, 峰值出现在 12:00 (地方时, 下同), 谷值出现在 06:00。闪电密度呈三圈分布结构, 内核区和外雨带区闪电密度较高, 内雨带区最低; 闪电密度空间不对称分布, 最高值出现在 TC 南侧。TC 强度改变时, 内核区闪电密度随 TC 不同强度等级的分布与外雨带区不同。TC 内核区闪电活动较外雨带区强, 内核区和外雨带区的闪电密度最大值分别出现在 TC 快速增强和强度一般变化时; 快速增强过程一般发生在中等强度的 TC 中, 而快速减弱过程一般发生在强度较强的 TC 中。TC 快速增强前后, 内核区闪电活动变化比全部 TC 闪电和外雨带区明显, 表明内核闪电活动较全部 TC 闪电和外雨带区闪电能更好的指示 TC 的快速增强。

关键词 热带气旋 时空分布 热带气旋强度 强度变化

文章编号 1006-9895(2017)06-1167-10

中图分类号 P444

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1704.17102

Climatological Characteristics of Lightning Activity within Tropical Cyclones and Its Relationship to Cyclone Intensity Change over the Northwest Pacific

WANG Fang^{1,2,3}, QIE Xiushu^{1,2}, and CUI Xuedong³

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

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

³ Zhejiang Meteorological Safety Technology Center, Hangzhou 310008

Abstract The spatial and temporal distribution of lightning activity and its relationship with tropical cyclone (TC) intensity change for 228 TCs over the Northwest Pacific are studied using 10 years (2005–2014) of time series data

收稿日期 2017-01-04; 网络预出版日期 2017-05-04

作者简介 王芳, 女, 1983 年出生, 博士研究生, 主要从事雷电与强对流天气研究。E-mail: wangfang8336@163.com

通讯作者 郄秀书, E-mail: qiex@mail.iap.ac.cn

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

Funded by National Key Basic Research Program of China (Grant No. 2014CB441401), National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41475002)

provided by the WWLLN (World-Wide Lightning Location Network) along with TC position and intensity data from China Meteorological Administration. The average flash rate shows an oscillatory variation from 2005 to 2014, and TC flash rate in the summer half year is higher than that in the winter half year. The average flash rate increases in the morning and decreases obviously in the night with the maximum at 1200 LT (local time) and the minimum at 0600 LT. TCs exhibit three distinct regions of electrical activity, with higher flash density in both the inner core and outer rainband and the minimum in the inner rainband. The azimuthal distribution of flash density is asymmetric, and the highest flash density appears to the south of the TC center. Lightning activity at six TC intensity levels in the inner core is different from that in the outer rainband when the TC intensity changes. Lightning activity in the inner core is more active than in the outer rainband, and the highest flash density appears in rapid intensification (RI) cases and average intensity change (AIC) cases for the inner core and outer rainband, respectively. Lightning for RI cases often occurs in medium intensity TCs, while rapid weakening (RW) cases are at strong TCs. For RI cases, flash density changes with time are more evident in the inner core than in the outer rainband and the whole TC region, which indicates that lightning activity in the inner core could be a better indicator for short-term RI forecast.

Keywords Tropical cyclones, Spatial and temporal distribution, Tropical cyclone intensity, Intensity change

1 引言

自 Black et al. (1986) 观测到飓风 Diana 中有闪电发生以来, 学者们开始关注热带气旋 (tropical cyclone, 以下简称 TC) 中的闪电活动, 以研究 TC 内部对流结构演变和强度变化 (Black et al., 1994; Heymsfield et al., 2001)。TC 闪电密度沿径向方向呈“高一低一高”的三圈空间分布, 分别对应 TC 内核区、内雨带区和外雨带区 (Cecil et al., 2002; Cecil and Zipser, 2002; 潘伦湘等, 2010; Zhang et al., 2012)。外雨带区闪电较活跃, 但某些时期, 眼壁附近闪电也会突然增加 (Lyons and Keen, 1994), 眼壁闪电的爆发不仅与 TC 强度变化和眼壁置换有关 (Molinari et al., 1999; Squires and Businger, 2008; 潘伦湘等, 2010; Fierro et al., 2011), 还与 TC 路径转向有关 (Zhang et al., 2012)。

不少专家就 TC 闪电活动与 TC 强度的关系展开研究, 指出 TC 闪电活动与 TC 强度具有较高的正相关 (Price et al., 2009; Pan et al., 2014), 并且闪电密度峰值超前于 TC 强度峰值出现 (Price et al., 2009)。强度较弱的 TC 的闪电密度较高 (Cecil and Zipser, 1999; Abarca et al., 2011; Zhang et al., 2015), 而强 TC 中的过冷水被冰晶核化, 不利于起电过程的发生 (Rakov and Uman, 2003)。此外, 闪电活动还与 TC 强度变化有关, TC 增强和减弱的速度不同时, 内核区对流强度参数分布特征不同 (Jiang, 2012), 大西洋飓风增强时内核区的闪电密度大于减弱时, 而外雨带区闪电密度无明显变化 (Abarca et al., 2011), TC 快速增强和快速减弱前后, 内核区闪电密度分布差异较大, 相对于外雨带区而言, 内

核区闪电活动能更好的预报 TC 快速增强过程 (Zhang et al., 2015)。也有学者得出外雨带区闪电活动与 TC 强度变化的关系比内核区明显, 认为外雨带区闪电活动比内核区更能较好的预报 TC 的强度变化 (DeMaria et al., 2012)。已有研究表明, 闪电密度、TC 强度以及 TC 强度变化之间具有一定的相关, 但是不同学者得出的研究结论有差异 (Thomas et al., 2010; Fierro et al., 2011; Pan et al., 2014; Zhang et al., 2015)。一个可能原因是大西洋和太平洋 TC 中的对流活动的物理过程有所不同, 另外, 因为学者从不同的角度来探讨闪电活动和 TC 强度的关系。

近年来, 西北太平洋地区强台风频发, 其猛烈风力及引起的大规模风暴潮给沿海国家和地区造成严重破坏。2013 年, 超强台风 “Soulík” (1307)、“Utor” (1311)、“Usagi” (1319)、“Haiyan” (1330) 登陆, 其中 “Haiyan” 登陆菲律宾, 造成数千人死亡, 直接经济损失数千亿美元, 是有气象记录以来登陆时强度最强的台风。2014 年, 南海北部出现了 3 个强台风等级以上的 TC, “Rammasun” (1409) 以绝对优势成为 1973 年以来登陆中国华南最强的台风。因此, 研究该地区 TC 中的闪电活动特征, 具有重要的科学意义, 同时有助于提高 TC 路径和强度预报水平, 增强防台减灾能力。本文利用 2005~2014 年 10 年时间序列的全球闪电定位网 (WWLLN) 资料、中国气象局上海台风研究所 (CMA-STI) 整编的 “CMA-STI 热带气旋最佳路径数据集” 资料, 分析西北太平洋地区 TC 闪电活动的时空分布特征, 探讨 TC 闪电活动与气旋强度变化的关系。

2 资料和方法

2.1 闪电资料

本文所用的闪电定位资料来源于 WWLLN, 该网由美国华盛顿大学地球与空间科学中心负责建设。目前, 已在全球建立 68 个探测站 (Virts et al., 2013), 通过探测闪电发生时甚低频 (3~30 kHz) 波段的脉冲信号, 利用时间到达法对闪电进行定位。该网可对全球闪电进行实时监测, 其空间探测精度为 10 km, 时间精度为 30 ms。

随着探测站点的增加和定位算法的升级, WWLLN 的探测效率逐年增加。利用 2005~2014 年 LIS/OTD 闪电资料, 评估 WWLLN 对西北太平洋区域闪电活动的探测效率, 发现 WWLLN 探测效率由 2005 年的 4.3% 提高至 2014 年的 18.9%。本文在统计 TC 闪电时, 利用 LIS/OTD 闪电资料对 WWLLN 资料进行逐年修正, 修正因子为探测效率的倒数。

2.2 热带气旋资料

热带气旋资料来自中国气象局“CMA-STI 热带气旋最佳路径数据集”, 该数据集提供了 TC 每 6 h 中心位置、强度、中心最低气压和中心最大风速等信息。Corbosiero and Molinari (2002, 2003) 将该 6 h 称为单独时间段 (individual time period, 以下简称 ITP)。利用三次样条插值法将 TC 中心位置和强度信息插值为逐小时数据, 并用 TC 定位时刻前后 30 min 内的 WWLLN 数据代表该小时内的闪电。TC 半径取 600 km, 并沿径向分为三个区域: 内核区 0~100 km、内雨带区 100~200 km 和外雨带区 200~600 km (Pan et al., 2014)。由于 TC 中心在洋面上和登陆后的对流活动的物理机制有所不同, 本文只讨论 TC 在洋面上的闪电活动。

TC 强度根据国家标准《热带气旋等级》(GB/T19201-2006) 分为热带低压 (TD)、热带风暴 (TS)、强热带风暴 (STS)、台风 (TY)、强台风 (STY) 及超强台风 (SuperTY) 六个等级。

3 闪电活动时空分布特征

2005~2014 年, 西北太平洋地区共生成 228 个强度热带低压以上的 TC (包括 54 个 TS、50 个 STS、34 个 TY、40 个 STY 和 50 个 SuperTY), 所统计的 TD、TS、STS、TY、STY 和 SuperTY 强度等级的 ITP 样本数分别为 1262、1190、765、775、525 和

291。在这 228 个 TC 中, WWLLN 共监测到闪电 3958732 次, 其中内核区、内雨带区及外雨带区发生的闪电数分别占 11.2%、9.8% 和 79.0%。

图 1 给出了 2005~2014 年 TC 闪电活动的年际变化。由图 1a 可见, 平均单位 TC 的闪电频数按年际震荡分布, 2005 年、2008 年、2010 年和 2012 年平均单位 TC 的闪电频数较高, 2007 年、2009 年、2011 年和 2013 年较低。从各年平均单位 ITP 的闪电频数分布来看, 整体分布趋势与单位 TC 闪电频数的分布一致, 其中 2005 年出现的最大值为 2011 年最低值的 2.7 倍。从 TC 各强度等级平均闪电频数年际变化来看 (图 1b), TD 和 STY 时的闪电活动年际分布较为一致, 平均闪电频数峰值出现在 2008 年、2010 年及 2013 年, 谷值出现在 2007 年、2009 年及 2011 年。除 2005 年外, TS 时的闪电活动年际变化较平缓, 谷值出现在 2006 年和 2011 年, 最低为 $3782 \text{ fl (6 h)}^{-1}$ (fl 为 flashes 的简写, 这里表示闪电次数)。STS 和 TY 等级, 闪电活动年际分布较为一致, 2005 年、2008 年、2012 年闪电频数较高, 而 2007 年、2009 年及 2013 年较低, 不同的是, STS 等级在 2010 年出现一个较高的闪电频数峰值。SuperTY 等级, 2005~2007 年平均闪电频数相对较低, 随后, 闪电活动震荡分布, 2008 年、2011 年及 2014 年较高, 2009 年及 2013 年较低。总体而言, 各强度等级的 TC 均呈震荡分布, 除 TS 外, 2005~2009 年各强度 TC 的闪电活动年际变化较为一致, 2010~2014 年各强度 TC 闪电分布差异明显。

从各月平均闪电频数分布来看 (图 2), 呈先增加后减少的变化趋势, 1~4 月, 闪电频数缓慢增加, 5~8 月闪电活动快速增强, 8 月闪电频数最高, 单月 TC 闪电频数为 863906 fl m^{-1} 。9~12 月闪电活动逐渐减弱。从各月平均单位 ITP 的闪电频数变化来看, 整体变化不如单位 TC 的闪电频数逐月变化明显。夏半年 (4~9 月) 中除 5 月外, 单位 ITP 的平均闪电频数相对接近, 最高为 $11821 \text{ fl (6 h)}^{-1}$, 是最低时 (5 月) 的 1.8 倍。冬半年 (10 月至次年 3 月), 除 11 月单位 ITP 的平均闪电频数较高外, 其余均低于夏半年。总体而言, 夏半年 TC 闪电活动较冬半年剧烈。

图 3 为 TC 平均闪电频数日变化。从图中可以看出, 闪电活动呈单峰分布, 平均闪电频数峰值出现在 12:00 (地方时, 下同), 谷值出现在 06:00。06:00~12:00 闪电频数逐渐增加, 达到峰值后, 闪

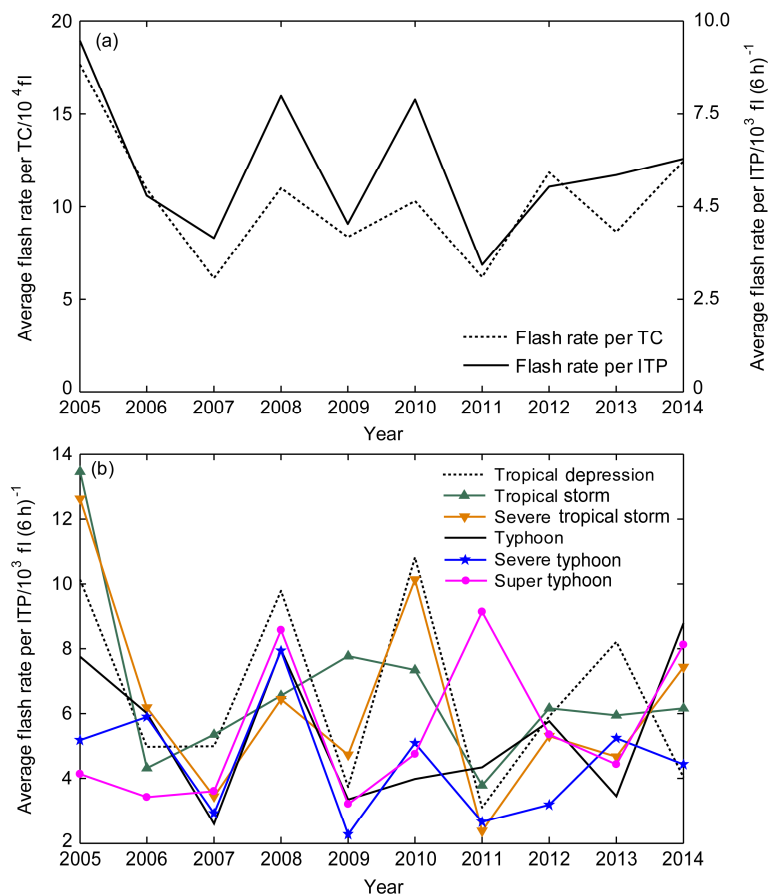


图1 2005~2014年距TC中心600 km区域内闪电活动的年际变化: (a) TC平均闪电频数年际变化; (b) TC不同强度等级平均闪电频数年际变化。图a中左侧纵坐标表示平均单位TC的闪电频数, 右侧纵坐标表示平均单位ITP的闪电频数

Fig. 1 Annual variation of average flash rate within 600 km from the TC (tropical cyclone) center during 2005–2014: (a) Flash rate of all TCs; (b) flash rates for TCs at different intensity levels. In Fig. a, the left Y-axis represents the average flash rate per TC, the right Y-axis represents the average flash rate per ITP (individual time period)

电活动略有减弱, 14:00~18:00 闪电活动强度保持稳定。夜间, 闪电活动减弱, 凌晨出现短暂的维持后继续减弱, 至凌晨 06:00 平均闪电频数降至最低。总之, 09:00~18:00 闪电频数相对较高, 00:00~07:00 闪电频数相对较低。闪电频数峰值和谷值出现的时间与 Pan et al. (2013) 所统计的西北太平洋地区闪电活动日变化极值出现的时间基本一致, 但是其得出的 00:00 有一闪电密度次峰值, 在 TC 闪电活动中没有体现。

图4为距TC中心600 km内平均闪电密度空间分布。由图4a可见, 闪电密度随径向距离的增加而单调下降(虚线), 内核区闪电密度最高, 峰值超过 $80 \text{ fl km}^2 \text{ a}^{-1}$, 距TC中心100 km外的闪电密度降至 $20 \text{ fl km}^2 \text{ a}^{-1}$ 以下, 此后, 随着半径增加, 闪电密度变化平缓。这种分布形式, 与 Molinari et al.

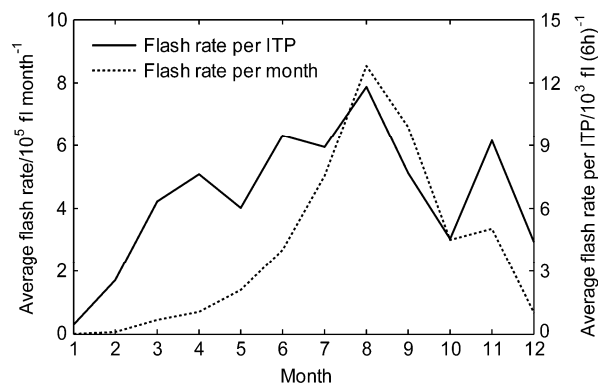


图2 2005~2014年距TC中心600 km区域内闪电活动月变化。虚线为单位TC平均闪电频数, 实线为单位ITP的平均闪电频数

Fig. 2 Monthly variations of flash rate within 600 km from the TC center during 2005–2014. The dashed line represents the average flash rate, and the solid line represents the average flash rate per ITP

(1999)得出的三圈分布结构不同,在所统计的 228 个 TC 中,单位 TC 的闪电总数最高为 105694 fl,最低为 64 fl。在 20 km 环形区内,单位 ITP 的闪电频数最高为 7371 fl (6 h)⁻¹,最低为 0 fl (6 h)⁻¹。为避免少数样本中的闪电密度极值影响总体的统计特征,使每个样本具有相同的统计权重,对闪电密度进行归一化处理。归一化方法参照 Stevenson et al. (2016),具体步骤如下:

(1) 将距 TC 中心 600 km 区域沿径向方向分为 30 等份,每份为半径 20 km 的环形区域,分别统计每个 TC 中各环形区的闪电密度 M_{ij} ,其中, $i=1\sim 228$ 为 TC 样本, $j=1\sim 30$ 为沿 TC 径向方向的环形区域;

(2) 将每个样本下的 30 个环形区域内的闪电密度 0~1 归一化, $N_{ij} = (M_{ij} - M_{i\min}) / (M_{i\max} - M_{i\min})$;

(3) 分别求 30 个环形区内归一化后的闪电密度的和: $N_j = \sum_{i=1}^{228} N_{ij}$;

(4) 将 N_j 再一次 0~1 归一化。

从统计结果可以看出(图 4a, 实线), TC 闪电活动呈双峰分布,内核区闪电活动相对较强,峰值出现在距气旋中心 20~40 km 内;内雨带区闪电活动较弱,最低值出现在 100~120 km 内;外雨带区闪电活动也较强,且随径向距离的增加,闪电活动增强。

在 228 个 TC 样本中,177 个(78%) TC 的闪电密度呈三圈分布结构,而剩余的 51 个 TC 中, TC 闪电密度无规则分布或内核区无闪电发生,其中最

大强度在 TY 以下的有 39 个,最大强度为 SuperTY 的仅 1 个,说明 TC 闪电密度径向分布与其所能发展到的最大强度有关,强度较强的 TC 闪电密度更易出现三圈分布特征。

TC 径向三圈分布结构在闪电活动的空间合成分布中也较明显(图 4b),在 TC 中心附近,存在一个弱的高值区;距中心 200 km 附近,闪电密度值最低;外雨带区,闪电密度极值高于 TC 内核区和内雨带区。此外,从图 4b 中还可以看出, TC 闪电密度呈不对称分布,南侧的闪电密度远高于北侧。外雨带区,径向距离增加, TC 南侧的闪电密度值也增加,最大值出现在 TC 南侧 500~600 km 之间; TC 北侧,闪电密度值较低,且随径向距离的变化不明显,整个外雨带的闪电密度低值区也出现在此处。

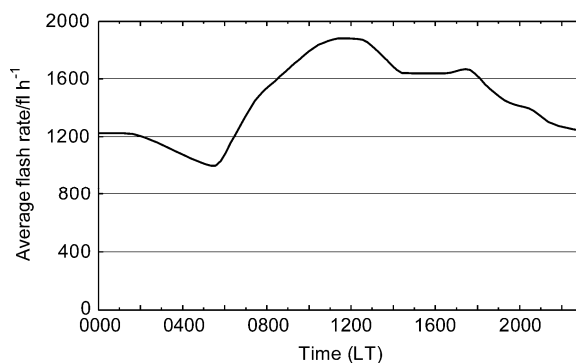


图 3 2005~2014 年距 TC 中心 600 km 区域内平均闪电频数日变化, LT 表示地方时

Fig. 3 Diurnal evolution of average flash rate within 600 km from the TC center during 2005–2014, LT is the local time

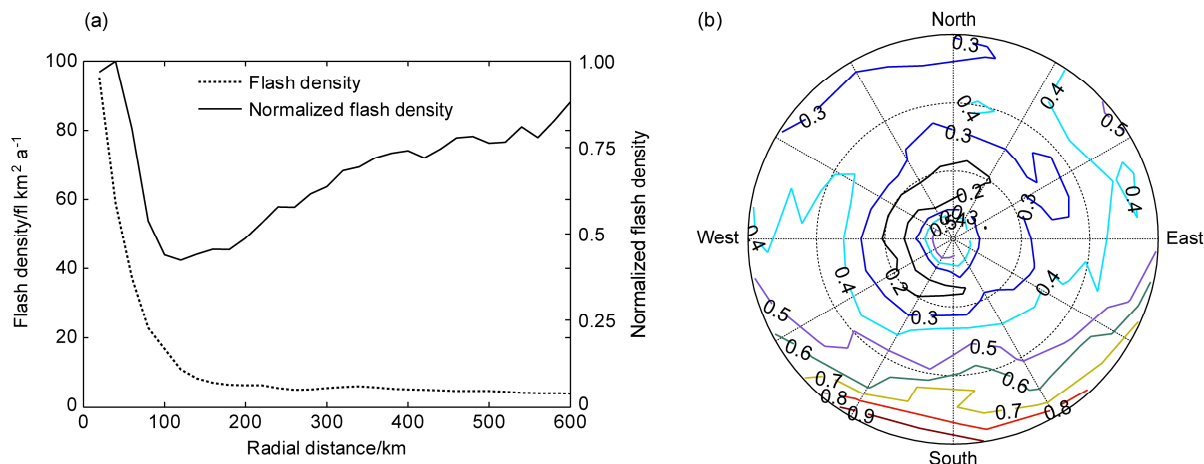


图 4 2005~2014 年距 TC 中心 600 km 内的平均闪电密度分布: (a) 平均径向分布(虚线)、归一化的径向分布(实线); (b) 归一化的水平合成分布
Fig. 4 Distribution of average flash density within 600 km from the TC center during 2005–2014: (a) Radial distribution of flash density (dashed line) and normalized flash density (solid line); (b) horizontal distribution of normalized flash density

4 闪电活动与 TC 强度变化

图 5 为 TC 增强($\Delta V_{\max 6} > 0 \text{ m s}^{-1}$, 1565 个 ITP)、减弱($\Delta V_{\max 6} < 0 \text{ m s}^{-1}$, 595 个 ITP) 以及强度稳定($\Delta V_{\max 6} = 0 \text{ m s}^{-1}$, 2648 个 ITP) 时闪电密度分布, $\Delta V_{\max 6}$ 表示 6 h 内 TC 中心最大风速变化。闪电密度的计算如下, 逐个统计 228 个 TC 样本强度变化

时, 不同强度等级的闪电密度, 分别将各样本的结果进行 0~1 归一化, 再分别求 TC 各强度时的平均闪电密度, 最后再将统计结果 0~1 归一化。由图可见, 强度稳定阶段的 ITP 数最多, 占 55%, 强度减弱阶段的 ITP 数最少, 仅占 12%, 可能原因是 TC 在洋面上时大部分处于较为稳定的发展阶段 (Zhang et al., 2015), 而 TC 减弱可能在近海及 TC

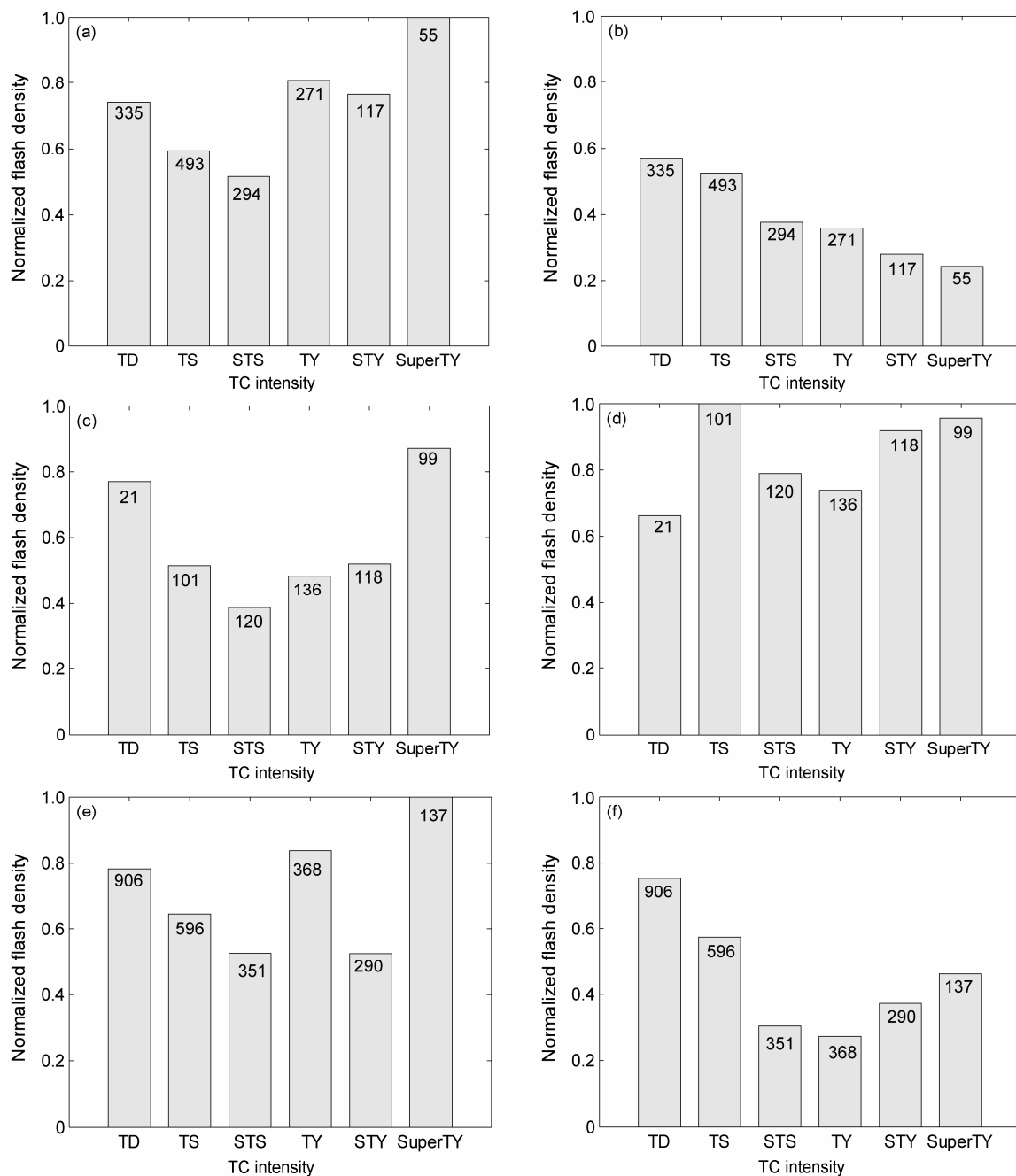


图 5 2005~2014 年 (a、b) TC 增强阶段、(c、d) TC 减弱阶段、(e、f) TC 稳定阶段的闪电密度与不同 TC 强度等级的关系。左列: TC 内核区, 右列: TC 外雨带区, 柱状顶端的数字为 ITP 样本数

Fig. 5 The relationship between flash density and TC intensity levels during (a, b) TC intensifying period, (c, d) TC weakening period, and (e, f) TC stable period. The left (right) column indicates the inner core (outer rainband) region, the number at the top of each bar is the number of ITPs

登陆期间发生。TC 增强时 (图 5a、5b), 内核区和外雨带区闪电密度随气旋强度的发展呈不同的变化趋势。内核区, 闪电密度首先随 TC 的增强而降低, 在 STS 等级, 内核区闪电密度最低。随后, 闪电密度快速增加, TY 至 STY 强度时, 内核区闪电活动强度总体变化并不明显, 均强于 TD 等级。SuperTY 等级, 闪电密度进一步增加至最大。外雨带区, TC 增强时的闪电密度整体弱于内核区, 且随着 TC 强度的增强而逐渐降低, SuperTY 时的闪电密度值最低。

TC 减弱时 (图 5c、5d), 内核区的闪电活动较外雨带区弱。内核区, 闪电活动随 TC 强度变化的分布与 TC 增强时一致, 呈先减小后增加的变化趋势, 且 STS 时, 内核区闪电密度最低, 而 SuperTY 时, 闪电密度值最高。外雨带区, TC 不同强度等级的闪电密度分布无规则, TD 等级, 闪电密度值最小, 而 TS 等级则骤增至最大, STS 至 TY 时, 闪电密度又降低, 随后闪电密度逐渐增强, STY 至 SuperTY 时的闪电密度值仅低于 TS 等级。

TC 强度稳定时 (图 5e、5f), 内核区闪电密度变化无规则, TD 至 STS 等级, 闪电密度逐渐减小, 但是 TY 时闪电密度突然升高, 超过了 TD 时的值, STY 等级时的闪电密度陡降, 其值与 STS 接近, 而 SuperTY 时又骤增至最大。外雨带区, 闪电密度变化呈先减小后增加的趋势, TD 时的闪电密度相对最高, 随后逐渐减小, 至 TY 时降至最低, STY 至 SuperTY 时, 外雨带区闪电密度略有增大, 但仍低于 TD 和 TS 强度等级。

参考 Kaplan and DeMaria (2003) 和 Shu et al.

(2012) 对 TC 的分类标准, 根据 24 h 内 TC 中心最大风速的变化, 将 TC 强度变化分为三类: 快速增强 RI (Rapid Intensification, $\Delta V_{\max 24} \geq 15 \text{ m s}^{-1}$)、一般变化 AIC (Average Intensity Change, $-20 \text{ m s}^{-1} < \Delta V_{\max 24} < 15 \text{ m s}^{-1}$) 和快速减弱 RW (Rapid Weakening, $\Delta V_{\max 24} \leq -20 \text{ m s}^{-1}$)。分别讨论三类不同强度变化时 TC 内核区和外雨带区的闪电密度变化。闪电密度归一化方法与图 5 类似, 使得所统计样本的权重相同。由图 6 可见, 不论 TC 处于何种强度变化阶段, 内核区闪电密度高于外雨带区。在内核区, TC 快速增强时的平均闪电密度最高; 强度快速减弱时, 内核区的闪电活动较弱, 闪电密度远低于快速增强时; 强度一般变化时,

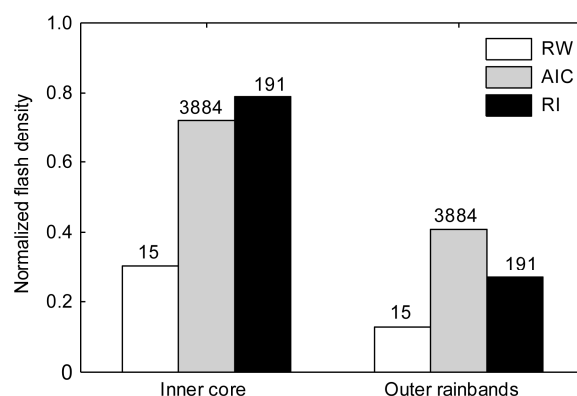


图 6 2005~2014 年 TC 强度变化时内核区和外雨带区的平均闪电密度。RI 表示快速增强阶段, AIC 表示一般变化阶段, RW 为快速减弱阶段

Fig. 6 Average flash density in the inner core and outer rainband for RI, AIC, and RW during 2005–2014. RI, AIC, and RW indicate rapid intensification, average intensity change, and rapid weakening periods, respectively

内核区闪电密度略低于快速增强时。与内核区不同, TC 强度一般变化时外雨带区的闪电密度最大, TC 快速增强时的闪电密度反而减小, 强度快速减弱时的闪电密度远低于强度一般变化时。Zhang et al. (2015) 指出 $\Delta V_{\max 24}$ 介于 $15 \sim 25 \text{ m s}^{-1}$ 之间时, 闪电密度最高, 而 $\Delta V_{\max 24} \geq 25 \text{ m s}^{-1}$ 时, 内核区和外雨带区的闪电密度均降低。对 TC 强度变化进一步细分发现, $\Delta V_{\max 24} \geq 25 \text{ m s}^{-1}$ 时, 内核区的闪电密度最高, 而外雨带区闪电密度则快速减至最低 (图略), 这与 Zhang et al. (2015) 统计结果略有不同, 主要是因为 $\Delta V_{\max 24} \geq 25 \text{ m s}^{-1}$ 样本数相对较少, 而 2013 和 2014 年在 4 次 SuperTY 中 $\Delta V_{\max 24} \geq 25 \text{ m s}^{-1}$ 时的内核区闪电活动非常剧烈, 该阶段的闪电密度值远高于其他阶段, 使得整个统计值升高。

从气旋强度变化时有闪电出现的 ITP 数统计来看 (表 1), 发生快速减弱的 ITP 数最低, 均出现在 TC 较强时, TD 至 STS 等级无快速减弱过程发生。TC 强度一般变化的 ITP 样本数最多, 占总样本的 95%, 主要发生在 TD 和 TS 等级, 且随 TC 的增强, 强度发生一般变化的 ITP 样本数下降, SuperTY 时仅为 TD 时的 21%。TC 快速增强过程主要出现在 TS 至 TY 等级, SuperTY 时发生快速增强过程的样本数最少, 仅占快速增强样本数的 1%。该统计结果与 Jiang (2012) 和 Zhang et al. (2015) 所得结论一致。

表 1 2005~2014 年 TC 强度变化时有闪电发生的 ITP 数统计
Table 1 Number of ITPs in six TC intensity levels for RW, AIC, and RI during 2005–2014

	ITP 数					
	TD	TS	STS	TY	STY	SuperTY
RW	0	0	0	5	7	3
AIC	1126	946	560	579	433	240
RI	17	46	58	51	17	2

图 7 给出了 TC 快速增强、快速减弱及一般变化前后, 内核区、外雨带区和 TC 600 km 影响区域内闪电密度分布。闪电密度也进行了相似方法的归一化。从图中可以看出, 内核区闪电活动较外雨带和整个 TC 影响区域剧烈, 且无论在哪个区域, TC 快速减弱前后的闪电活动远弱于相应的快速增强和一般变化过程。在 TC 内核区 (图 7a), 气旋快速增强前 24 h, 闪电活动减弱, 随着气旋快速增强过程的到来, 闪电活动开始加剧, 并在快速增强过程结束 12 h 后, 闪电密度达到最大。TC 强度发生 AIC 前, 内核区闪电活动也随着 AIC 的临近而减弱, 当 AIC 发生时, 内核区闪电活动增强, 随后保持稳定, 直至 AIC 结束 24 h 后, 内核区闪电密度基本无变化。TC 强度快速减弱前 24 h, 内核区闪电活动开始减弱, 至 TC 快速减弱 24 h 后, 内核区基本无闪电发生。

从外雨带闪电密度变化来看 (图 7b), TC 快速增强前, 外雨带区闪电密度变化很小, 闪电活动强度稳定; TC 快速增强过程中, 外雨带区闪电密度略有增加; 至快速增强结束后 12 h, 闪电密度最大。从强度发生 AIC 前 24 h 内至 AIC 发生时, 外雨带区的闪电活动逐渐减弱; 随后 24 h 内, 闪电密度无明显变化。快速减弱过程发生前 24 h 内, 外雨带区闪电密度很小, 闪电活动持续减弱; 随着快速减弱过程的到来, 外雨带区基本无闪电发生, 直至快速减弱过程结束 24 h 后。距气旋中心 600 km 区域内 (图 7c), TC 快速减弱、快速增强及一般变化前后的闪电密度随时间的变化关系与外雨带区基本一致。

以上分析可见, TC 快速增强及 AIC 前后, 内核区闪电活动随时间的演变差异较明显, 表明内核区闪电活动对 TC 强度变化具有一定的指示作用。内核区, TC 快速增强过程结束后 12 h, 闪电密度最大, 再一次表明 TC 强度增强过程中内核闪电密度的增加, 可能预示着增强过程即将结束 (DeMaria et al., 2012; Zhang et al., 2015)。

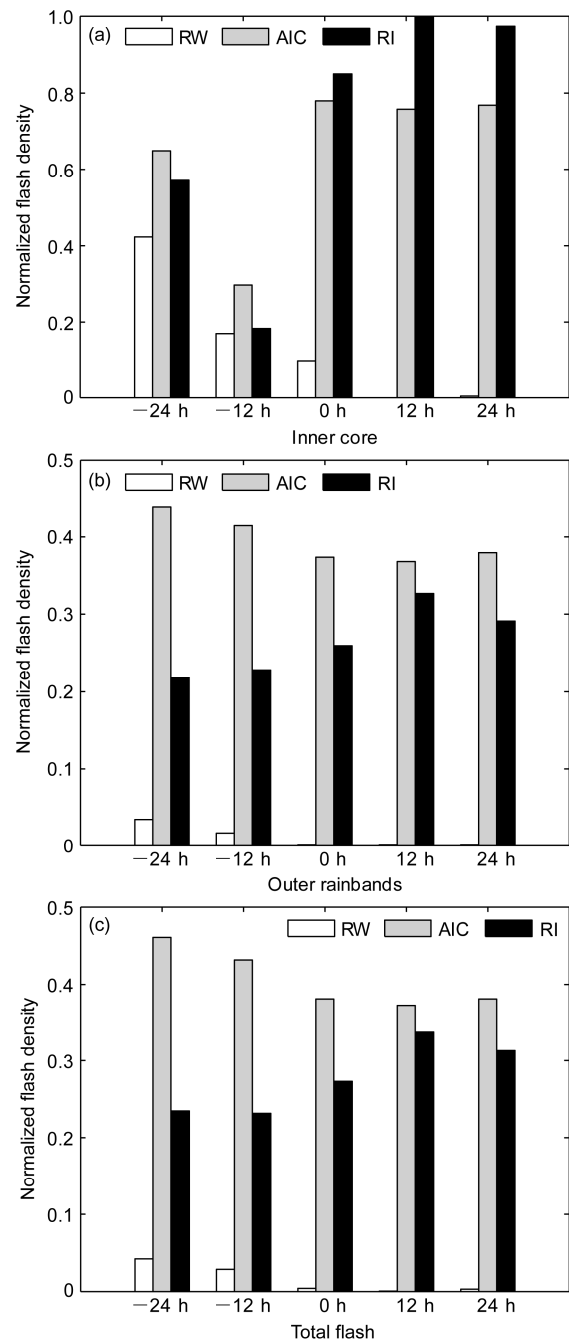


图 7 2005~2014 年 TC 快速增强、快速减弱及一般变化前后 24 h 内平均闪电密度分布: (a) 内核区; (b) 外雨带区; (c) 距 TC 中心 600 km 区域
Fig. 7 Average flash density for the (a) inner core, (b) outer rainband, and (c) within 600 km from the TC center in the 24 h before RI, RW, and AIC and the 24 h after RI, RW, and AIC

5 结论和讨论

利用 2005~2014 年的 WLLN 闪电实时定位资料、中国气象局提供的 TC 资料, 分析了西北太平洋地区近 10 年内 228 个 TC 的闪电活动时空分布

特征及其与气旋强度变化的关系。研究结果表明:

(1) TC 闪电活动按年际震荡变化, 除 TS 外, 2005~2009 年不同强度等级 TC 的闪电活动年际变化较一致, 而 2010~2014 年的差异较明显。夏半年闪电活动较冬半年强, 闪电活动日变化呈单峰分布, 上午 06:00~12:00 闪电频数逐渐增加, 峰值出现在 12:00。午后至夜间, TC 中的闪电频数逐渐降低, 并在早晨 06:00 降至最低。

(2) 闪电密度呈明显的三圈分布结构, 距 TC 中心 0~100 km 的内核区和距中心 200~600 km 的外雨带区闪电密度较高, 距中心 100~200 km 内雨带区的闪电密度最低。TC 闪电密度呈不对称分布, 南侧闪电密度高于北侧, 且径向距离越大, 闪电密度越高, 最大值出现在 TC 南侧 500~600 km 区域内。

(3) TC 强度增强时, 内核区闪电密度随气旋强度的增强逐渐降低, 并在 STS 等级闪电密度最低, 随后逐渐增加, SuperTY 时闪电密度最高。外雨带区闪电密度随气旋强度的增强而单调减小。TC 强度减弱时, 内核区闪电密度随气旋强度的演变与增强时一致。外雨带区闪电密度变化无规则, TD 强度等级时最低, 而 TS 时最高。TC 强度稳定时, 内核区闪电密度变化无规则, TY 和 SuperTY 时闪电密度较高, 而 STS 和 STY 时较低。外雨带区闪电密度随气旋强度的增强逐渐减小, 在 TY 等级降至最低, STY 至 SuperTY 时闪电密度略增加。

(4) TC 内核区闪电密度高于外雨带区。内核区, TC 快速增强时的闪电密度最高, 而快速减弱时最低; 外雨带区, TC 强度一般变化时的闪电密度最高, 快速减弱时最低。快速减弱过程一般发生在强 TC (TY、STY 和 SuperTY) 中; 强度发生一般变化的样本数随 TC 的增强而减小; 快速增强过程主要出现在中等强度的 TC 中 (TS、STS 和 TY)。

(5) TC 强度变化前后, 内核区闪电密度随时间的变化比外雨带区和 TC 整个影响区域明显。无论 TC 的哪个区域, 强度快速减弱前后 24 h 内的闪电密度均低于快速增强和 AIC 过程。在外雨带区和 TC 整个影响区域, TC 快速增强过程发生前 24 h 内和 AIC 开始发生至结束 24 h 后, 闪电密度随时间的演变无明显变化。总体而言, 内核区闪电活动与 TC 强度变化的关系最显著, 尤其是快速增强过程, 说明 TC 内核区闪电活动对 TC 强度的快速增强具有较好的指示意义。

TC 闪电密度沿径向表现为典型的三圈分布结

构, 内核区和外雨带区闪电密度较高, 而内雨带区闪电密度较低, 再次验证了 Molinari et al. (1999) 的结论。DeMaria et al. (2012) 得出大西洋和东太平洋飓风中的闪电活动沿径向距离的增加而单调降低, 他认为这是因为不同飓风的水平尺度差异较大, 在统计闪电密度时, 尺度大的强飓风的内核区和尺度小的弱飓风的内雨带区重叠, 使得所统计的内雨带闪电密度增加。另一个原因可能是不同 TC 个体中对流活动强度差异较大, 这种差异不仅体现在 TC 闪电总数上, 也体现在内核区和外雨带区的闪电分布上。如, “Katrina” (2005)、“Rita” (2005) 和 “Haiyan” (2013) 等内核区闪电活动非常强, 而外雨带区的闪电活动则较弱 (Squires and Businger, 2008; Wang et al., 2016)。某些 TC 的外雨带区闪电活动强而内核区闪电活动弱, 如, “Chanchu” (2006)、“Sinlaku” (2008) 等 (潘伦湘等, 2010)。还有一些 TC 中的闪电分布是紊乱的。以上原因造成统计时高值区和低值区被平均了。此外, 强 TC 闪电活动的三圈结构比弱 TC 明显, 其内核区对流活动更强, 内雨带区更弱, 而一些闪电紊乱分布的 TC, 其能发展到的最大强度均较低 (Abarca et al., 2011)。TC 闪电密度在方位上的不对称分布, 主要受 850 hPa 至 200 hPa 之间环境风垂直切变的影响 (Wang et al., 2016)。Stevenson et al. (2016) 指出, 环境风垂直切变使得外雨带区闪电向顺切变的右侧集中。西北太平洋地区, 平均环境风垂直切变方向指向偏东方向 (Chen et al., 2006), 使得外雨带区闪电在 TC 南侧高于北侧。此外, 西北太平洋地区 TC 移动方向主要分布在正西至正北之间, TC 移动前方的闪电密度反而较低, 这与 Corbosiero and Molinari (2003) 得出的结论不同。

TC 内核闪电活动与气旋强度变化的关系比外雨带区显著, 这与 Zhang et al. (2015) 所得的结论一致。不同的是 Zhang et al. (2015) 指出, TC 强度快速增强前, 内核区闪电活动开始减弱, 并且, 这个减弱过程一直持续至 TC 快速增强结束。本文通过对 10 年的 TC 闪电活动的分析发现, TC 快速增强前, 内核区闪电活动确实有所减弱, 但一旦快速增强发生, 内核区的闪电活动则开始加剧, 并一直持续至快速增强过程结束 12 h 后。可能与 TC 快速增强时眼壁闪电爆发有关。同时, TC 快速增强过程发生前, 外雨带区闪电活动保持稳定, 说明 TC 闪电活动虽然对强度快速增强具有一定的响应, 但

不能为预报快速增强过程提供可靠的参考信息。

致谢 感谢华盛顿大学地球与空间科学中心提供的 WWLLN 闪电资料以及中国气象局提供的热带气旋强度和位置资料。

参考文献 (References)

- Abarca S F, Corbosiero K L, Vollaro D. 2011. The world wide lightning location network and convective activity in tropical cyclones [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 139 (1): 175–191, doi:10.1175/2010MWR3383.1.
- Black P G, Black R A, Hallett J, et al. 1986. Electrical activity of the hurricane [C]// 23rd Conference on Radar Meteorology and Conference on Cloud Physics. Boston: American Meteorological Society, 277–280.
- Black R A, Bluestein H B, Black M L. 1994. Unusually strong vertical motions in a Caribbean hurricane [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 122 (12): 2722–2739, doi:10.1175/1520-0493(1994)122<2722:USVMIA>2.0.CO;2.
- Cecil D J, Zipser E J. 1999. Relationships between tropical cyclone intensity and satellite-based indicators of inner core convection: 85-GHz ice-scattering signature and lightning [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 127 (1): 103–123, doi:10.1175/1520-0493(1999)127<103:RBTCIA>2.0.CO;2.
- 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, doi:10.1175/1520-0493(2002)130<0769:RISALC>2.0.CO;2.
- 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, doi:10.1175/1520-0493(2002)130<0785:RISALC>2.0.CO;2.
- Chen S S, Knaff J A, Marks F D Jr. 2006. Effects of vertical wind shear and storm motion on tropical cyclone rainfall asymmetries deduced from TRMM [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 134 (11): 3190–3208, doi:10.1175/MWR3245.1.
- Corbosiero K L, Molinari J. 2002. The effects of vertical wind shear on the distribution of convection in tropical cyclones [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 130 (8): 2110–2123, doi:10.1175/1520-0493(2002)130<2110:TEOVWS>2.0.CO;2.
- 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, doi:10.1175/1520-0469(2003)060<0366:TRBSMV>2.0.CO;2.
- DeMaria M, DeMaria R T, Knaff J A, et al. 2012. Tropical cyclone lightning and rapid intensity change [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 140 (6): 1828–1842, doi:10.1175/MWR-D-11-00236.1.
- Fierro A O, Shao X M, Hamlin T, et al. 2011. Evolution of eyewall convective events as indicated by intracloud and cloud-to-ground lightning activity during the rapid intensification of hurricanes Rita and Katrina [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 139 (5): 1492–1504, doi:10.1175/2010MWR3532.1.
- Heymsfield G M, Halverson J B, Simpson J, et al. 2001. ER-2 Doppler radar investigations of the eyewall of hurricane Bonnie during the convection and moisture experiment-3 [J]. *J. Appl. Meteor.*, 40 (8): 1310–1330, doi:10.1175/1520-0450(2001)040<1310:EDRIOT>2.0.CO;2.
- Jiang H Y. 2012. The relationship between tropical cyclone intensity change and the strength of inner-core convection [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 140: 1164–1176, doi:10.1175/MWR-D-11-00134.1.
- Kaplan J, DeMaria M. 2003. Large-scale characteristics of rapidly intensifying tropical cyclones in the North Atlantic basin [J]. *Wea. Forecasting*, 18 (6): 1093–1108, doi:10.1175/1520-0434(2003)018<1093:LCORIT>2.0.CO;2.
- Lyons W A, Keen C S. 1994. Observations of lightning in convective supercells within tropical storms and hurricanes [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 122 (8): 1897–1916, doi:10.1175/1520-0493(1994)122<1897:OOLICS>2.0.CO;2.
- Molinari J, Moore P, Idone V. 1999. Convective structure of hurricanes as revealed by lightning locations [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 127 (4): 520–534, doi:10.1175/1520-0493(1999)127<0520:CSOHAR>2.0.CO;2.
- 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 [J]. *中国科学: 地球科学*, 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 (8): 1241–1248, doi:10.1007/s11430-010-3034-z.
- Pan Lunxiang, Liu Dongxia, Qie Xiushu, et al. 2013. Land-sea contrast in the lightning diurnal variation as observed by the WWLLN and LIS/OTD data [J]. *Acta Meteor. Sinica*, 27 (4): 591–600, doi:10.1007/s13351-013-0408-0.
- 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 [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 31 (3): 581–592, doi:10.1007/s00376-013-3115-y.
- Price C, Asfur M, Yair Y. 2009. Maximum hurricane intensity preceded by increase in lightning frequency [J]. *Nature Geoscience*, 2 (5): 329–332, doi:10.1038/ngeo477.
- Rakov V A, Uman M A. 2003. *Lightning: Physics and Effects* [M]. Cambridge, USA: Cambridge University Press, 687pp.
- Shu S J, Ming J, Chi P. 2012. Large-scale characteristics and probability of rapidly intensifying tropical cyclones in the western North Pacific basin [J]. *Wea. Forecasting*, 27 (2): 411–423, doi:10.1175/WAF-D-11-00042.1.
- Squires K, Businger S. 2008. The morphology of eyewall lightning outbreaks in two category 5 hurricanes [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 136 (5): 1706–1726, doi:10.1175/2007MWR2150.1.
- Stevenson S N, Corbosiero K L, Abarca S F. 2016. Lightning in eastern North Pacific tropical cyclones: A comparison to the North Atlantic [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 144 (1): 225–239, doi:10.1175/MWR-D-15-0276.1.
- Thomas J N, Solorzano N N, Cummer S A, et al. 2010. Polarity and energetics of inner core lightning in three intense North Atlantic hurricanes [J]. *J. Geophys. Res.*, 115 (A3): A00E15, doi:10.1029/2009JA014777.
- Virts K S, Wallace J M, Hutchins M L, et al. 2013. Highlights of a new ground-based, hourly global lightning climatology [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 94 (9): 1381–1391, doi:10.1175/BAMS-D-12-00082.1.
- Wang F, Qie X S, Liu D X, et al. 2016. Lightning activity and its relationship with typhoon intensity and vertical wind shear for super typhoon Haiyan (1330) [J]. *J. Meteor. Res.*, 30 (1): 117–127, doi:10.1007/s13351-016-4228-x.
- Zhang W J, Zhang Y J, Zheng D, et al. 2012. Lightning distribution and eyewall outbreaks in tropical cyclones during landfall [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 140 (11): 3573–3586, doi:10.1175/MWR-D-11-00347.1.
- Zhang W J, Zhang Y J, Zheng D, et al. 2015. Relationship between lightning activity and tropical cyclone intensity over the Northwest Pacific [J]. *J. Geophys. Res.*, 120 (9): 4072–4089, doi:10.1002/2014JD022334.