

登陆广东地区强台风及超强台风闪电活动特征研究

李敏勋¹ 曾莉茗¹ 陈金星² 黄彬² 贺汉清² 余益君¹

(1 梅州市突发事件预警信息发布中心, 梅州 514021; 2 梅州市气象局, 梅州 514021)

摘要: 利用广东闪电定位监测资料、广东台风路径实时发布系统的热带气旋(TC)强度和路径资料, 分析了2008—2018年登陆广东地区的7个强台风和1个超强台风的闪电活动时空分布特征及其与TC强度变化的关系。结果表明: TC闪电活动的增减与TC登陆与否没有直接关系, TC闪电活动日变化呈“单峰”分布, 峰值出现在17:00(北京时, 下同), 谷值出现在07:00; TC径向闪电密度呈“三圈”结构分布, 内核区和外雨带闪电活动活跃, 内雨带闪电活动不活跃, TC不同区域微物理特征和上升气流的差异是导致TC闪电活动呈现“三圈”结构的原因; 无论在TC登陆前或是登陆后, 外雨带闪电活动均占绝对优势, TC在登陆后闪电活动有向TC中心内收的趋势; TC闪电活动在空间分布上呈现非对称结构; TC闪电活动强弱与发生闪电时的TC强度等级不存在明显关系, 并不是TC强度越强, 闪电越活跃; 闪电活动易发生在台风(TY)阶段, 随着TC强度的增强, 闪电活动逐渐减弱; 内核区随着TC强度的增强, 闪电活动存在爆发, TC减弱时闪电活动出现递减, 表明内核区闪电活动对TC强度变化具有较好的指示意义; TC减弱期内核区和内雨带闪电活动最强, TC增强阶段外雨带闪电活动最活跃。

关键词: 台风, 闪电, 强度变化, 闪电密度

中图分类号: P4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2025.01.002

Lightning Activity Characteristics of Severe Typhoon and Super Typhoon Landing in Guangdong Province

Li Minxun¹, Zeng Liming¹, Chen Jinxing², Huang Bin², He Hanqing², Yu Yijun¹

(1 Meizhou Emergency Early Warning Release Center, Meizhou 514021; 2 Meizhou Meteorological Bureau, Meizhou 514021)

Abstract: Based on the cloud-to-ground (CG) lighting location data as well as tropical cyclone (TC) intensity and path data from Guangdong typhoon real-time release system, we analyzed the spatiotemporal distribution characteristics of lightning activity and its relationship with TC intensity changes in seven severe typhoons and one super typhoon that landed in Guangdong from 2008 to 2018. The results show that the increase or decrease of TC lightning activity is not directly related to whether the TC makes landfall or not. The daily variation of TC lightning activity presents a single peak distribution, with a peak at 17:00 BT and a valley at 07:00 BT. TC exhibits three distinct circles of radial lightning density, with active lightning in the inner core and outer rainband, but inactive lightning in the inner rainband. The differences in microphysical characteristics and updrafts within different regions of TC are responsible for the “three-circle” structure of TC lightning activity. Whether before or after TC landing, the outer rainband has an overwhelming majority of lightning, and there is a trend for lightning activity to converge towards the center of the TC after landing. TC lightning activity displays a spatially asymmetric distribution. There is no significant correlation between the intensity of TC lightning activity and the intensity level of the TC at the time of lightning occurrence. It is not the case that the stronger the TC intensity, the more active the lightning. Lightning activity is most likely to occur during the typhoon stage, and as the intensity of the TC increases, the lightning activity gradually weakens. In the inner core, lightning activity surges with the intensification of the TC, and the weakening of the TC is accompanied with the decrease of lightning activity, indicating that lightning activity in the inner core has good indicative significance for changes in TC intensity. During the weakening period of the TC, the inner core and inner rainband experience the strongest lightning activity, while during the intensification period of the TC, lightning activity is most active in the outer rainband.

Keywords: typhoon, lightning, intensity variation, lightning density

0 引言

热带气旋(TC)是对中国影响最为严重的自然灾害之一,

平均每年登陆中国的TC有7~8个, TC登陆前后所引发的暴雨、大风、雷电、风暴潮等给人们生命、财产安全造成巨大威胁^[1-5]。TC发展演变不仅与大尺度的环流背景有关, 还受其内部中小尺度强对流系统的影响。随着闪电监测技术的不断发展, 学者们注意到TC系统中对流活动与闪电有很好的对应关系^[6],

收稿日期: 2023年12月21日; 修回日期: 2024年6月12日

第一作者: 李敏勋(1991—), Email: 1113220844@qq.com

资助信息: 广东省气象局科学技术研究项目(GRMC2023Q32)

通过对TC闪电活动的研究能够深化我们对TC内部结构和微物理特征的认识,甚至还有可能发现闪电活动在预测TC强度变化中的潜在作用。

近年来,中外不少学者对TC整个生命周期的闪电活动特征进行了研究,认为TC闪电活动和TC强度存在一定的相关性^[7-10]。杨美荣等^[11]发现强度较弱的TC闪电活跃程度较高,当强度超过强热带风暴级后,TC强度越强,闪电活动反而越少。不少研究还发现TC内核闪电爆发与TC演变之间存在联系,Zhang等^[10]发现TC在快速增强和减弱阶段内核区闪电活动变化明显,对TC强度变化具有较好的指示意义;DeMaria等^[12]对北大西洋和北太平洋的TC内核闪电活动分析发现,TC处于快速减弱阶段内核闪电密度最高,内核闪电密度峰值的出现可能预示着TC强度达到最强并将开始减弱。相反,Squires等^[13]和Solorzano等^[14]研究发现TC强度迅速增强时眼壁区闪电活动存在爆发现象,他们认为这对TC强度预报具有参考价值。随着对TC结构研究的不断深入,潘伦湘等^[15]对西北太平洋地区生成的7个台风闪电数据统计发现,台风外雨带发生的闪电要远高于台风中心,台风中心闪电数占比不足1%,TC闪电活动在径向分布上存在“三圈”结构;杨宁等^[16]对西北太平洋洋面上生成的55次台风过程进行研究也发现了相似特征。王芳等^[8]通过将样本数扩大为228个TC发现,内核区和外雨带闪电密度随TC强度变化呈不同的变化趋势,TC内核区闪电密度要高于外雨带。雷小途等^[7]对1998—2005年西北太平洋生成的219个TC研究发现,TC外雨带闪电存在西南多、东北少的特征,而内核区和内雨带存在东北和西南多、东南和西北少的非对称分布。Abarca等^[17]研究同样发现TC闪电的空间分布结构呈非对称性。韦昌雄等^[18]对“贝碧嘉”(1305)和“威马逊”(1409)两个TC在4个象限的闪电空间分布进行统计发现,闪电活动主要发生在TC西半部分。

上述研究对了解TC过程闪电活动具有重要参考意义,但广东作为中国受TC影响最大的省份之一^[1],针对登陆广东地区TC的闪电活动特征分析还比较少。登陆广东地区TC的闪电具有怎样的时间和空间分布特征?TC闪电活动特征与TC强度变化是否存在相关?TC内核闪电活动爆发对TC强度预报有无指示意义?本文对2008—2018年登陆广东地区的7个强台风及1个超强台风的闪电活动特征进行分析,旨在为TC的预报、预警工作提供参考。

1 数据与方法

本研究使用的闪电定位资料来源于广东电力闪电

监测网(GDLLS),台风强度及其路径资料来源于广东台风路径实时发布系统,气象卫星资料中风云2E卫星(FY-2E)红外云图数据来源于风云卫星遥感数据服务网,其他气象观测资料来源于广东省气象局业务网。

广东电力闪电监测网于1997年开始建设,由广东省电力试验研究所和武汉高压研究所共同组建,主要用于地闪监测,该系统由16个探测子站组网而成。地闪定位系统采用方向-时差综合定位方法,能有效监测地闪发生的时间、经纬度、强度、极性等信息,电流强度由电磁场的测量和反演得到,是目前中国监测时间最长、运行最稳定且数据质量较高的闪电定位系统之一,迄今为止已经累积20多年的历史观测资料^[6, 19]。Chen等^[20]利用雷击故障点分析试验表明系统回击平均定位误差为633 m,其后通过人工触发闪电资料对探测站性能做了评估,发现闪电探测效率约为94%。郭青^[19]通过2017年两次人工触发闪电对电力监测网数据进行了评估,得出定位误差为670 m。

FY-2E是中国风云系列气象卫星中的地球静止轨道气象卫星之一,搭载了多种观测仪器,包括可见光和红外扫描辐射计、高分辨率红外相机、干涉式红外光谱仪等。本研究使用的数据为该卫星9210格式1 h平均相当黑体亮温产品,空间分辨率为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$,时间分辨率为1 h。

本研究主要采用数据统计分析方法,对2008—2018年登陆广东的7个强台风及1个超强台风的闪电数据进行统计分析,研究TC在登陆前、后的闪电变化特征。某一时次的闪电频数为该时次后1 h观测记录的闪电数。参考Corbosiero等^[21]的研究,将台风6 h内的发展变化情况定义为单独时间段(Individual Time Period, ITP)。由于广东台风路径实时发布系统提供的TC路径和位置为每6 h一次,即02:00、08:00、14:00和20:00(北京时,下同),因此将TC定位时刻 ± 3 h内的闪电频数作为该时刻总的闪电频数,作为一个单独ITP。利用FY-2E的红外云图结合闪电活动分布叠加,对8个TC逐时刻进行对比分析,发现以TC为中心500 km为半径基本涵盖了所有闪电活动,因此定义TC各区域划定方法为:内核区(0~100 km)、内雨带(100~200 km)、外雨带(200~500 km)。

2 台风概况

2008—2018年登陆广东的台风共计35个,年平均3.2个,其中登陆的强台风有7个,分别为“黑格比”(0814)、“尤特”(1311)、“天兔”(1319)、“彩虹”(1522)、“海马”(1622)、“天鸽”(1713)和“山竹”(1822),超强台风1个,为“威马逊”(1409)。8个TC

均生成于西北太平洋，无中国南海（简称南海）生成台风，其原因可能是TC的发展增强需要广阔的热带洋面，以及海水表面温度要高于 $26.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，从而为TC的增强提供巨大的能量，南海狭窄的海面虽然也能为TC的发生、发展提供能量，但是要发展为强台风乃至超强台风依然条件有限，所以登陆广东地区的强台风及超强台风多在西北太平洋生成。8个TC在登陆后均给广东地区造成了巨大的经济损失，有些甚至直接或间接影响了广西、云南、江西等地。鉴于其造成的巨大损失和人员伤亡，有6个台风名在当次使用后遭到除名。

3 TC闪电活动特征分析

3.1 时间分布

图1为TC登陆前、后闪电频数的变化，部分TC登陆前、后闪电频数变化明显，其中一半的TC在登陆后闪电频数有所增多，另一半则有所减少，说明闪电活动的增减变化与TC登陆与否没有直接关系。闪电活动最活跃的TC为“天鸽”，监测到闪电161501次，闪电活动最不活跃的TC为“海马”，闪电数为143次。“海马”闪电不活跃的主要原因可能是登陆时间偏晚。根据历史个例统计，广东“终台”（当年最后一个登陆广东的TC）的平均出现日期为9月30日，而“海马”的登陆时间为10月21日，此时南海洋面温度较低，不利于TC能量的积累，加之登陆前后对流发展不旺盛，导致其闪电活动弱。

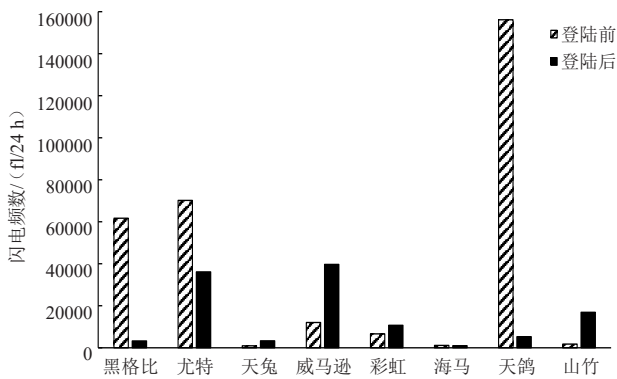


图1 距TC中心500 km区域内不同TC登陆前、后各24 h闪电频数对比

Fig. 1 Comparison of lightning frequency occurring 24 h before TC landing and 24 h after TC landing within 500 km from the TC center

图2为TC登陆前、后各24 h内逐时平均闪电分布。可以看出TC平均闪电频数呈明显的“单峰”分布，峰值出现在17:00，谷值出现在07:00。闪电活动在00:00—15:00呈振荡变化，16:00闪电频数出现明显跃增，随后在达到峰值后缓慢下降，闪电高发期主要集中于16:00—21:00。为减少部分样本极值对整体

统计结果的影响，赋予每个TC样本相同的统计权重，逐个统计8个TC各时次闪电频数，并进行归一化处理，再分别求各时次的平均闪电频数，分析结果也得到类似的日变化分布特征（图略）。

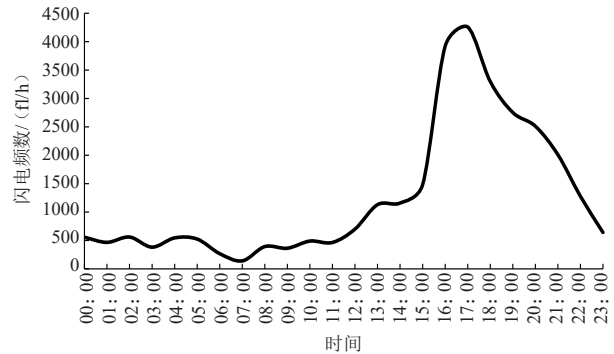


图2 距TC中心500 km区域内平均闪电频数日变化
Fig. 2 The diurnal variation of average lightning frequency within 500 km from the TC center

3.2 径向分布

图3为距TC中心500 km内平均闪电密度径向分布。从图3a中可以发现，TC在登陆前、后各24 h内的闪电密度在距TC中心20~60 km存在一个闪电密集区，在40 km处达到最大值 $770.4\text{ f}/(10^4\text{ km}^2 \cdot 24\text{ h})$ 。在80~180 km内雨带附近闪电密度较小。一些研究认为内雨带附近一般为层状云，是由TC中心向外排出的冰粒子沉降作用形成，这种沉降作用减少了过冷液态水，使其内部过冷液态水缺乏，同时蒸发和融化作用抑制了上升气流，不易形成混合相态区，因此难以为闪电的发生提供条件^[6, 16, 22]。从200 km向外闪电活动呈现“多峰型”，主峰出现在距TC中心260 km处，次峰出现在460 km处，闪电密度分别为956和698.7 $\text{f}/(10^4\text{ km}^2 \cdot 24\text{ h})$ 。TC平均闪电密度径向分布呈明显“三圈”（内核区较强—内雨带弱—外雨带强）结构特征，Molinari等^[23]、Cecil等^[24]和潘伦湘等^[15]的研究也同样发现相似的特征。本研究的TC样本平均闪电密度极值出现在外雨带，这与潘伦湘等^[15]研究的西北太平洋7个强台风和超强台风结果相似，与王芳等^[8]统计的228个TC平均闪电密度极值出现在内核区有所不同，可能原因是其统计的TC样本包含热带风暴、强热带风暴等低强度TC。Molinari等^[23]发现TC强度较弱时闪电径向分布多呈单峰型，TC发展越成熟，外雨带闪电活动越活跃，“三圈”结构特征越明显。8个TC内核区、内雨带和外雨带闪电频数占比分别为2.7%、8.2%和89.1%，无论TC登陆前或是登陆后，外雨带闪电均占据绝对优势，这与温颖等^[25]、魏凌翔等^[26]研究发现的TC闪电活动多发生于外雨带一致。登陆后闪

电频数在内核区和外雨带分别较登陆前减少49.7%和66.1%，而在内雨带增长137.8%，内雨带闪电活动在登陆后有较明显增长，这可能与TC登陆后下垫面改变有关。TC外围云系与陆地的摩擦作用增加了该区域的摩擦辐合，强烈的辐合作用催生了更强的上升气流^[27-28]，为闪电的发生创造了条件。

由于所统计的20 km环形区内，TC样本之间闪电密度差别较大，闪电密度最高达到3955 fl/(10⁴ km²·24 h)，最低却只有0 fl/(10⁴ km²·24 h)，对各TC样本闪电密度进行归一化处理。归一化方法参照王芳等^[8]，具体步骤如下：

1) 将距TC中心500 km区域沿径向分为25份，每份步长20 km，统计每个TC样本各自环形区域闪电密度(M_{ij} ，其中， $i=1\sim 8$ ，为TC序号， $j=1\sim 25$ ，为TC样本每20 km步长的环形区域序号)。

2) 将各个TC的25个环形区域内的闪电密度进行归一化：

$$N = (M_{ij} - M_{i\min}) / (M_{i\max} - M_{i\min}), \quad (1)$$

式中， $M_{i\min}$ 表示该TC环形区域内闪电密度的最小值； $M_{i\max}$ 表示该TC环形区域内闪电密度的最大值。

3) 对8个TC样本同一步长的环形区域内归一化后的闪电密度进行求和：

$$N_j = \sum_{i=1}^8 N_{ij}, \quad (2)$$

4) 将 N_j 再一次进行0~1归一化。

统计结果如图3a中虚线，可以看出经过归一化处理后，内核区闪电密度有所下降，内雨带与外雨带闪电密度上升，但总体趋势与归一化前一致，TC径向分布依然具有明显的“三圈”结构，个别TC样本的闪电密度极值并未对整体结果产生太大影响，说明统计的8个TC样本在径向分布上具有一定相似性。

为进一步探究各TC样本登陆前和登陆后闪电径向变化情况，对各TC样本登陆前、后的闪电密度进行与上述相同的归一化(图3b)，可以看出，TC在登陆前、后“三圈”结构特征依然存在。登陆前平均闪电密度极值出现在460 km附近，登陆后该区域闪电密度有所下降，闪电密度极值出现在260 km附近，160~300 km处闪电密度增长明显，登陆后闪电活动有向TC中心内收的趋势。利用闪电定位资料能够较好地识别TC中心与对流结构的位置变化，特别是对于内雨带中对流系统的拖曳层云以及外雨带深对流位置的判断，丰富了对TC结构和雨带变化研判的观测资料。

3.3 空间分布

大量研究表明，在非感应起电机制下^[29-30]，闪

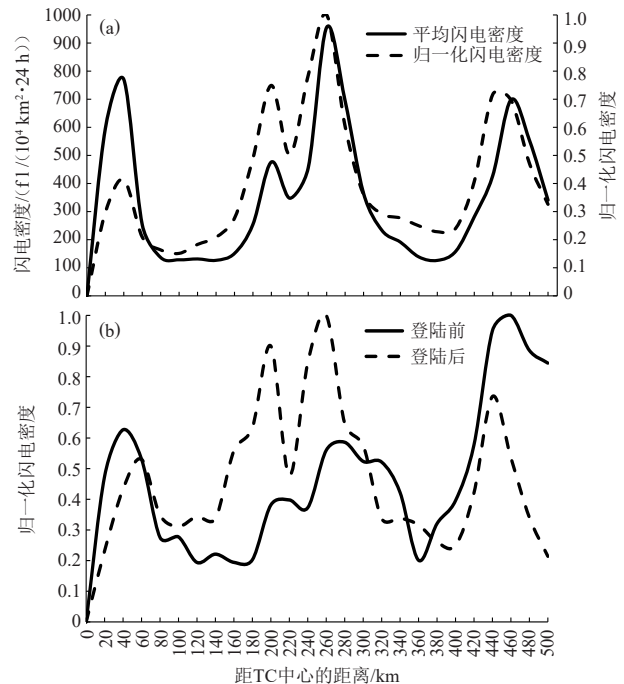


图3 距TC中心500 km内闪电密度随TC径向距离的变化 (a) TC登陆前、后24 h (共48 h) 闪电密度变化; (b) TC登陆前、后24 h (各24 h) 归一化闪电密度对比

Fig. 3 Variation of lightning density with TC radial distance within 500 km from the TC center

(a) Changes in lightning density within 24 h before TC landing and 24 h after TC landing (48 h totally); (b) Comparison of normalized lightning density within 24 h before and 24 h after TC landing (24 h respectively)

电活动和云系内部上升气流以及冰相发展过程密切相关，强烈的上升气流能够将更多的液态水带往高空^[31]，凝结或冻结成更多冰相粒子^[32]，粒子在过冷水环境下的相互碰撞导致电荷转移，从而为闪电发生创造了条件。通过前述分析，8个TC在径向分布上具有一定的相似性，以强台风“彩虹”和超强台风“威马逊”为例，分别代表强台风和超强台风的登陆过程进行研究。选取2015年10月14日11:00—14:00共4个时次，用于研究“彩虹”在登陆过程中闪电活动的分布情况，将闪电活动空间分布与对应时次的TC云系进行叠加得出图4。可以发现，11:00—13:00，TC内核结构完整，闪电活动频繁，尤其是正闪电，正闪电高发表明此时TC中心上升气流强^[33-34]。一些研究指出，TC中心内部由于缺乏过冷水，在一定程度上抑制了冰晶和霰粒子等在液态水环境下的起电过程，只有上升气流较强时，内核附近才会产生闪电^[35]。14:00，TC登陆后受下垫面改变的影响，中心结构遭到破坏，内核区上升气流减弱，闪电活动开始减弱。从TC中心向外的内雨带云层深厚，该区域主要为拖曳层云，不具

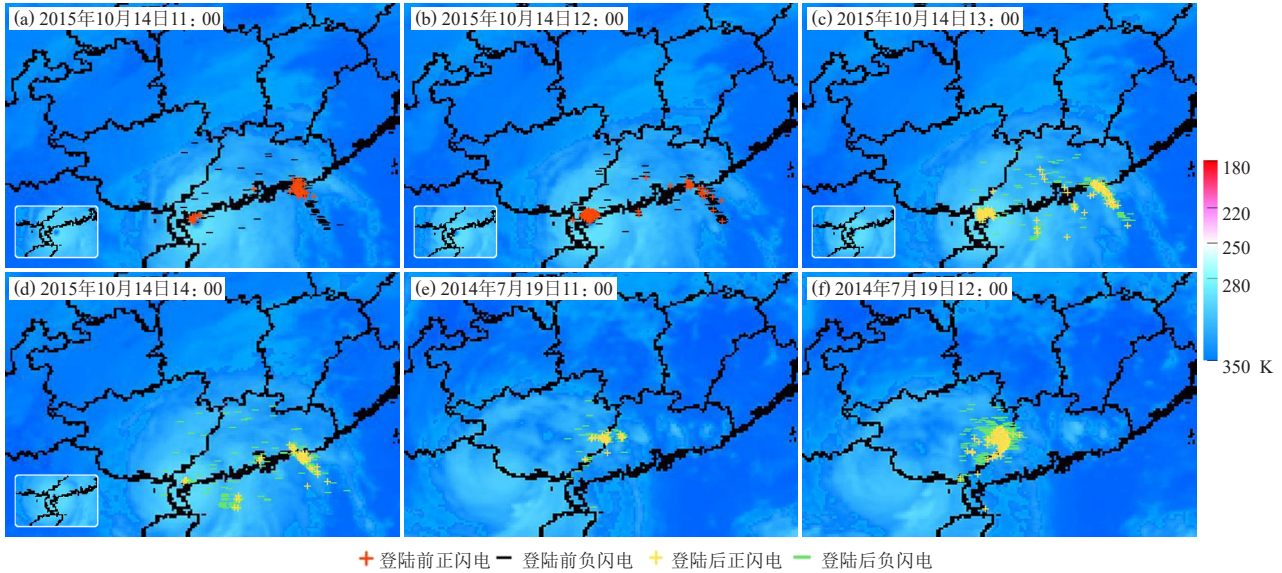


图4 强台风“彩虹”(a—d, 方框部分为TC登陆时TC中心云图)和超强台风“威马逊”(e—f)闪电和TC云系叠加图
Fig. 4 Overlay map of the lightning and TC cloud system from severe typhoon “Mujigae” (a—d, the box: the cloud map of the TC center during TC landing) and super typhoon “Rammasun” (e—f)

备强烈的上升气流，因而闪电活动不明显；再往外的螺旋雨带则与闪电密集区有较好的对应关系，结构类似于亚热带季风间歇期的大陆深对流^[6]，相较内雨带具有更强的对流特性，存在较强的上升气流，冰相粒子也更丰富。对比超强台风“威马逊”与强台风“彩虹”登陆前、后的外围云系发现，“威马逊”登陆过程中，内核区与内雨带闪电活动不明显；但随着TC登陆后向西北移动，2014年7月19日11:00在两广交界处(图4e)，TC外雨带对流云系开始发展，闪电活动渐趋活跃，并于12:00闪电频数增长为1628 fl/h(图4f)，增幅达1202.4%，随后几小时外雨带闪电活动保持活跃，TC外围螺旋雨带与闪电密集区依然有很好的对应关系。由于外雨带闪电活动主要与深对流的位置有关，因此闪电分布相较TC中心具有明显的结构非对称性。从以上分析可知，TC不同区域不同的微物理特征(冰晶、霰、过冷水)和上升气流导致了闪电活动的差异，因此将TC进行分区域研究是合理的。

为进一步研究TC样本的闪电空间分布，以TC中心为圆心，上方为正北方位，将TC闪电活动分成4个象限，分别为东北象限、西北象限、西南象限和东南象限，制作TC闪电空间分布图。其中7个TC样本具有较明显的“三圈”结构，只有“海马”由于闪电活动较少，结构特征不明显。图5为“彩虹”过程闪电活动空间分布，从图中可以看出，TC闪电活动呈不对称分布，正闪相较于负闪更加集中，正闪附近伴随有负闪的发生。其余7个TC也具有相似的特征(图略)。TC中心闪电密集爆发，TC登陆前闪电活动主要集中于距

离TC中心400 km附近，登陆后则内收至距离TC中心200 km附近，这与3.2节闪电的径向分布一致。

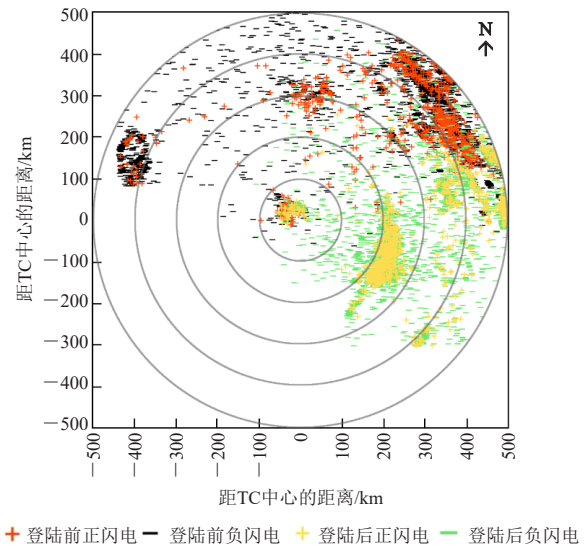


图5 强台风“彩虹”过程闪电活动空间分布
Fig. 5 Spatial distribution of lightning activity during severe typhoon “Mujigae”

表1为TC登陆前、后闪电活动各象限占比统计，登陆前西北方向是闪电活动最频繁的方位，登陆后西北方向闪电活动急剧减少；东南方向在TC登陆前闪电占比不超过2%，登陆后(除“威马逊”外)闪电有明显上升。TC登陆前闪电活动主要集中在TC中心北部，登陆后闪电活动主要集中在TC中心南部。

表1 TC登陆前、后闪电活动各象限占比统计

Table 1 Statistics on the proportion of lightning activity in each quadrant before and after TC landing

TC	登陆状态	东北象限/%	西北象限/%	西南象限/%	东南象限/%
	登陆前	2.11	52.35	44.89	0.64
黑格比	登陆后	42.80	0.16	0.64	56.40
	总计	5.90	47.50	40.78	5.83
	登陆前	23.74	76.07	0.10	0.09
尤特	登陆后	8.45	0.16	78.82	12.58
	总计	18.36	49.37	27.79	4.48
	登陆前	4.65	76.74	17.57	1.03
天兔	登陆后	31.90	3.55	6.06	58.49
	总计	29.04	11.23	7.27	52.46
	登陆前	32.72	67.28	0.00	0.00
威马逊	登陆后	99.14	0.03	0.07	0.76
	总计	80.66	18.74	0.05	0.55
	登陆前	82.87	16.84	0.04	0.24
彩虹	登陆后	51.09	0.18	0.08	48.65
	总计	63.73	6.81	0.07	29.39
	登陆前	5.63	88.73	4.23	1.41
海马	登陆后	26.39	1.39	43.06	29.17
	总计	16.08	44.76	23.78	15.38
	登陆前	0.90	92.31	6.07	0.71
天鸽	登陆后	29.27	25.31	10.33	35.09
	总计	1.84	90.09	6.22	1.86
	登陆前	15.27	82.21	1.66	0.86
山竹	登陆后	22.21	0.11	0.31	77.37
	总计	21.56	7.80	0.44	70.21

4 闪电活动与TC强度变化

4.1 闪电活动与TC强度的关系

TC是发生在中、低纬度地区的大尺度大气环流，随着TC的缓慢移动，其强度也在不断变化。按世界气象组织(WMO)对热带气旋的划分标准，可分为6个等级：热带低压(TD)、热带风暴(TS)、强热带风暴(STS)、台风(TY)、强台风(STY)和超强台风(SUPERTY)^[1]。

图6为不同强度等级TC单位ITP的平均闪电密度变化，由于不同样本之间单位ITP内闪电密度差异较大，如“黑格比”处于STY阶段最大闪电密度极值为 $397.08 \text{ fl}/(10^4 \text{ km}^2 \cdot 6 \text{ h})$ ，而“天鸽”只有 $2.36 \text{ fl}/(10^4 \text{ km}^2 \cdot 6 \text{ h})$ ，为避免单位ITP内极值对总体统计数据的影响，对各TC样本闪电密度进行归一化。闪电密度计算方法如下：逐个统计8个TC样本不同强度等级的闪电密度，分别将样本结果进行0~1归一化，再分别求TC各强度时的平均闪电密度。从图6可知，TC处于STY和TY等级的时间最长，分别有34个和22个ITP；TC闪电活动强弱与发生闪电时TC的强度等级不存在明显关系，并不是TC强度越强，闪电越活

跃；TC平均闪电密度随TC不同强度振荡变化，处于TD和STS阶段平均闪电密度相当，TY等级时闪电最活跃，当达到TY阶段后，TC强度越强，闪电活动反而越不活跃。

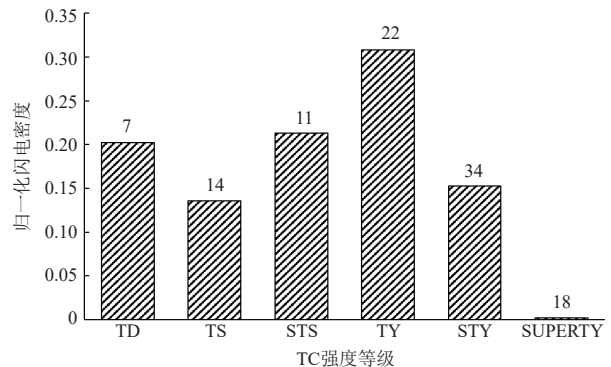


图6 单位ITP(每6 h)内平均归一化闪电密度与不同TC强度等级的关系(柱图所标数字为TC在该等级的ITP个数)

Fig. 6 Relationship between the average normalized lightning density and TC intensity within a ITP (per 6 h, the number in the figure: the number of ITP for TC at this level)

4.2 闪电活动与TC强度变化的关系

通过对TC内核区、内雨带和外雨带的闪电活动与TC强度变化进行对比分析，进一步研究和预判TC的增强和减弱。文中定义TC增强为 $\Delta V_6 > 0$ (其中 ΔV_6 表示在1个ITP内TC中心最大风速的变化)，强度稳定为 $\Delta V_6 = 0$ ，强度减弱为 $\Delta V_6 < 0$ 。通过统计，TC强度增强有26个ITP，强度稳定有32个ITP，强度减弱有48个ITP，TC处于强度减弱时刻最长。闪电密度的归一化方法与4.1节类似。

图7为TC内核区、内雨带和外雨带在TC强度变化时临近24 h闪电密度变化情况。可以看出，内核区在TC强度增强前闪电活动并不明显，随着TC强度增强，闪电活动存在爆发，随后继续增强；相反，在TC减弱期来临前闪电活动较为活跃，随着TC减弱期的开始闪电活动出现递减；TC强度在稳定期前后各6 h内核区闪电活动变化不明显，表明内核区闪电活动对TC强度变化具有较好的指示意义。从图7b可以看出，内雨带在TC增强期同样具有闪电活动爆发的特征；稳定期前后各6 h内核区闪电活动变化不明显；内雨带闪电随着减弱期的临近，闪电活动有小幅增长，随后出现下降。从图7c可以看出，相较内核区和内雨带，外雨带在TC增强期闪电活动更剧烈，且外雨带在TC增强前闪电活动基本保持稳定，闪电密度变化很小，随着TC增强，闪电活动才开始爆发，但随即下降，维持时间不长；外雨带在TC稳定期闪电活动存在缓慢递减；在TC减弱期来临前闪电活动缓慢增长，至减弱6 h后达到峰值，随后开始下降。

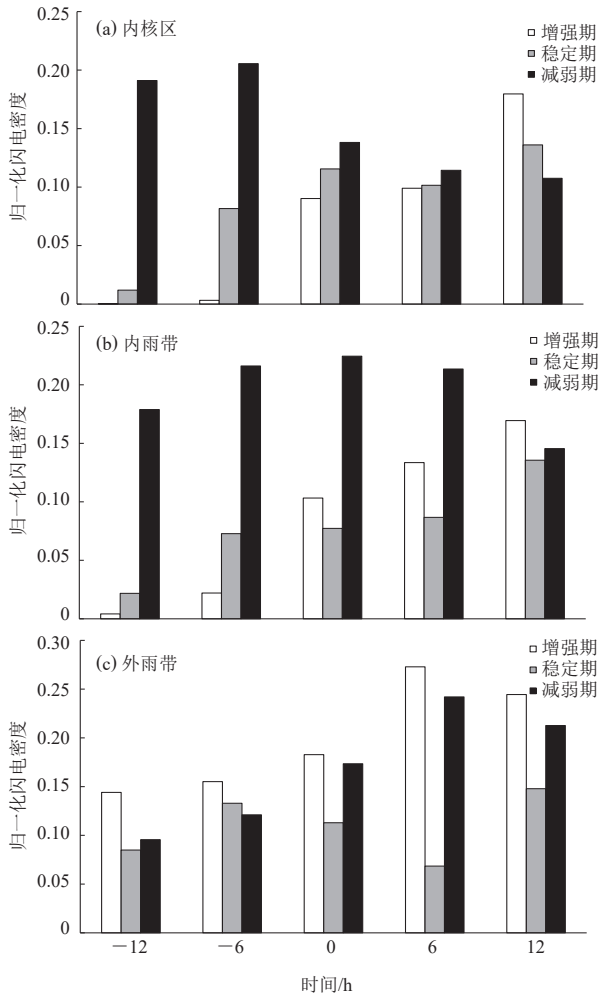


图7 单位ITP (每6 h) 内平均归一化闪电密度在TC强度变化前、后12 h内各分区的变化

Fig. 7 Changes in average normalized lightning density in different areas within 12 h before and after TC intensity changes with a ITP (6 h)

4.3 特征及分析

通过4.1和4.2节分析可知, TC的闪电活动在不同强度等级时活跃程度不同, 但并不是TC强度等级越

强, 闪电越活跃, 其活跃程度为TY>STS>TD>STY>TS>SUPERTY。内核区和内雨带在TC减弱期闪电活动最强, 外雨带在TC增强期闪电活动最活跃。TC增强时, 各区闪电活动开始活跃, 内核区和内雨带闪电活动增长明显。其原因可能与TC内起电机理变得活跃有关, Black等^[36]和杨美荣等^[11]分别对大西洋台风和西北太平洋台风的观测数据进行了研究, 发现TC内部存在过冷水、软雹和冰晶粒子是TC闪电活动发生的必要条件, 且闪电活动与TC上升气流密切相关。TC内部过冷水滴附着在软雹上与冰晶粒子碰撞产生电荷转移, 使得霰、软雹等大粒子与冰晶等小粒子带上不同的电荷, 两者在重力和上升气流的共同作用下, 较重的雹粒子沉降至下部, 较轻的冰粒子被抬升至上部, 从而在系统中出现正、负电荷区^[16]。TC在增强过程中, 中心附近气压不断降低, 促使周边气流不断向中心辐合, 上升气流发展越来越旺盛, 进一步促进了系统内正、负电荷区的形成, 所以在TC增强前闪电趋向活跃。TC不同区域在强度变化时呈现的特征也不尽相同, 相关特征详见图8的概念示意图。

5 结论

利用2008—2018年广东电力监测网的闪电监测资料、广东台风路径实时发布系统的TC强度和路径资料, 分析了登陆广东地区的7个强台风和1个超强台风的闪电活动时、空分布特征及其与TC强度变化的关系, 主要结论如下。

1) TC闪电活动的强弱变化与TC登陆与否没有直接关系, TC闪电活动日变化呈“单峰”分布, 峰值出现在17:00, 谷值出现在07:00。

2) 闪电密度呈“三圈”结构分布, 内核区和外雨带分别存在闪电密集带, 内雨带区闪电密度较低。无论在TC登陆前或是登陆后, 外雨带闪电均占据绝对优势, TC在登陆后闪电活动有向TC中心收缩的趋势。

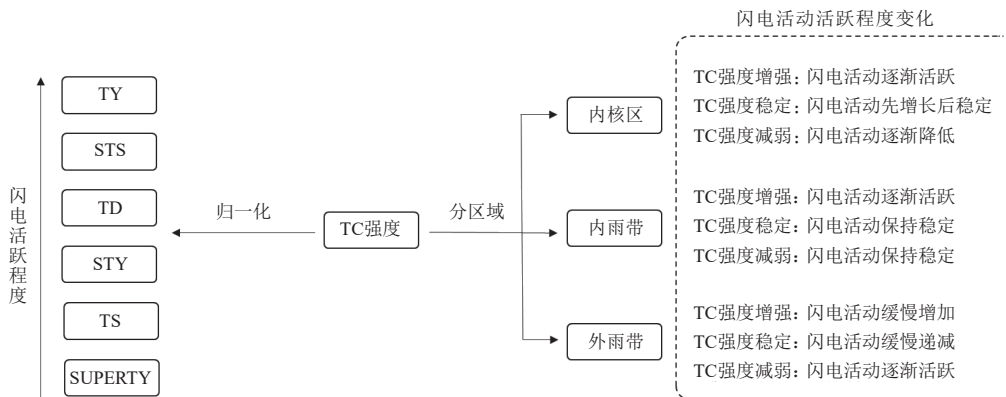


图8 闪电活动与TC强度关系的概念示意图

Fig. 8 The concept diagram of the relationship between lightning activity and TC intensity

TC不同区域内部微物理和上升气流的差异,是TC闪电活动呈现“三圈”结构特征的原因,闪电活动与TC内部深对流活动位置密切相关,使TC闪电活动在空间分布上呈现非对称性。

3) TC闪电活动强弱与发生闪电时TC的强度不存在明显关系,并不是TC强度越强,闪电越活跃。闪电活动易发生在台风阶段,随着TC强度的继续增强,闪电活动逐渐减弱。

4) 内核区闪电活动对TC强度变化具有较好的指示意义,随着TC强度的增强,内核区闪电活动存在爆发现象,TC减弱时闪电活动出现递减。TC减弱期内核区和内雨带闪电活动较强,TC增强期外雨带闪电活动活跃。

本文针对TC过程的闪电活动特征研究仅基于8个TC样本和有限的气象资料分析得出,具有一定的片面性,其他强度的TC是否具有相似的特征,还有待今后采集更多的个例开展研究。此外,由于目前探测手段的限制,TC内部微物理特征研究还不够深入,其与TC闪电活动存在怎样的关系,还有待进一步探讨。

参考文献

- [1] 广东省气象局《广东省天气预报技术手册》编写组. 广东省天气预报技术手册[M]. 北京: 气象出版社, 2006.
- [2] 陈联寿, 孟智勇. 我国热带气旋研究十年进展[J]. 大气科学, 2001, 25(3): 420-431.
- [3] 汪路, 卢莹, 赵海坤. 台风灾害时空特征分析与评估模型构建[J]. 灾害学, 2023, 38(4): 187-194.
- [4] 张娇艳. 中国台风降水和灾害气候分析[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2011.
- [5] 杨慧. 1960—2017年中国热带气旋降水气候特征研究[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2019.
- [6] 张文娟. 热带气旋闪电活动特征及其与气旋特性演变的关系研究[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2013.
- [7] 雷小途, 张义军, 马明. 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, 2009, 31(4): 29-38.
- [8] 王芳, 鄒秀书, 崔雪东. 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, 2017, 41(6): 1167-1176.
- [9] Price C, Asfur M, Yair Y. Maximum hurricane intensity preceded by increase in lightning frequency[J]. Nature Geoscience, 2009, 2(5): 329-332.
- [10] Zhang W J, Zhang Y J, Zheng D, et al. Relationship between lightning activity and tropical cyclone intensity over the Northwest Pacific[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2015, 120(9): 4072-4089.
- [11] 杨美荣, 袁铁, 鄒秀书, 等. 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[J]. 气象学报, 2011, 69(2): 370-380.
- [12] DeMaria M, DeMaria R T, Knaff J A, et al. Tropical cyclone lightning and rapid intensity change[J]. Monthly Weather Review, 2012, 140(6): 1828-1842.
- [13] Squires K, Businger S. The morphology of eyewall lightning outbreaks in two category 5 hurricanes[J]. Monthly Weather Review, 2008, 136(5): 1706-1726.
- [14] Solorzano N N, Thomas J N, Holzworth R H. Global studies of tropical cyclones using the world wide lightning location network[C]//Proceedings of AMS 2008 Meeting. New Orleans: American Meteorological Society, 2008.
- [15] 潘伦湘, 鄒秀书, 刘冬霞, 等. 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, 2010, 40(2): 252-260.
- [16] 杨宁, 张其林. 西太平洋台风最大风速与闪电活动特征[J]. 大气科学学报, 2012, 35(4): 415-422.
- [17] Abarca S F, Corbosiero K L, Vollaro D. The World Wide Lightning Location Network and convective activity in tropical cyclones[J]. Monthly Weather Review, 2011, 139(1): 175-191.
- [18] 韦昌雄, 张廷龙, 周方聪. 两次登陆海南岛的热带气旋闪电活动特征对比分析[J]. 气象研究与应用, 2016, 37(4): 1-4.
- [19] 郭青. 广东地区台风登陆前后雷电活动变化特征及成因研究[D]. 成都: 成都信息工程大学, 2020.
- [20] Chen L W, Zhang Y J, Lu W T, et al. Performance evaluation for a lightning location system based on observations of artificially triggered lightning and natural lightning flashes[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2012, 29(12): 1835-1844.
- [21] Corbosiero K L, Molinari J. The relationship between storm motion, vertical wind shear, and convective asymmetries in tropical cyclones[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2003, 60(2): 366-376.
- [22] 潘伦湘, 鄒秀书. 0709号超强台风圣帕(Sepat)的闪电活动特征[J]. 大气科学, 2010, 34(6): 1088-1098.
- [23] Molinari J, Moore P, Idone V. Convective structure of hurricanes as revealed by lightning locations[J]. Monthly Weather Review, 1999, 127(4): 520-534.
- [24] Cecil D J, Zipser E J, Nesbitt S W. Reflectivity, ice scattering, and lightning characteristics of hurricane eyewalls and rainbands. Part I: Quantitative description[J]. Monthly Weather Review, 2002, 130(4): 769-784.
- [25] 温颖, 赵阳, 赵果, 等. 台风“莫拉克”登陆过程的闪电活动与雷达回波特征[J]. 高原气象, 2015, 34(3): 832-841.
- [26] 魏凌霄, 邱学兴, 董金, 等. 超强台风“利奇马”(1909)的闪电活动特征[J]. 气象科学, 2020, 40(1): 123-129.
- [27] Zhang W J, Zhang Y J, Zhou X J. Lightning activity and precipitation characteristics of typhoon Molave (2009) around its landfall[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2013, 27(5): 742-757.
- [28] 邱振峰. 西北太平洋台风演变过程中的闪电活动特征研究[J]. 南京: 南京信息工程大学, 2020.
- [29] Takahashi T. Riming electrification as a charge generation mechanism in thunderstorms[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1978, 35(8): 1536-1548.
- [30] Jayaratne E R, Saunders C P R, Hallett J. Laboratory studies of the charging of soft-hail during ice crystal interactions[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1983, 109(461): 609-630.
- [31] 郑栋, 张义军, 马明, 等. 大气环境层结对闪电活动影响的模拟研究[J]. 气象学报, 2007, 65(4): 622-632.
- [32] Qie X S, Liu D X, Sun Z L. Recent advances in research of lightning meteorology[J]. Journal of Meteorological Research, 2014, 28(5): 983-1002.
- [33] Lang T J, Rutledge S A. Relationships between convective storm kinematics, precipitation, and lightning[J]. Monthly Weather Review, 2002, 130(10): 2492-2506.
- [34] Smith S B, LaDue J G, MacGorman D R. The relationship between cloud-to-ground lightning polarity and surface equivalent potential temperature during three tornadic outbreaks[J]. Monthly Weather Review, 2000, 128(9): 3320-3328.
- [35] Molinari J, Moore P K, Idone V P, et al. Cloud-to-ground lightning in Hurricane Andrew[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1994, 99(D8): 16665-16676.
- [36] Black R A, Hallett J. Observations of the distribution of ice in hurricanes[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1986, 43(8): 802-822.

(编辑: 郑秋红)