

张文娟,张义军,郑栋,等.热带气旋闪电活动特征研究综述[J].海洋气象学报,2021,41(3):1-10.
ZHANG Wenjuan, ZHANG Yijun, ZHENG Dong, et al. An overview on the research of lightning activity in tropical cyclones[J].
Journal of Marine Meteorology, 2021, 41(3): 1-10. DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2021.03.001. (in Chinese)

热带气旋闪电活动特征研究综述

张文娟¹, 张义军^{2,3}, 郑栋¹, 吕伟涛¹, 徐良韬¹

(1. 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081; 2. 复旦大学大气与海洋科学系/大气科学研究院, 上海 200438; 3. 复旦大学海洋气象灾害联合实验室, 上海 200438)

摘要: 针对热带气旋(tropical cyclone, TC)闪电已有研究,首先从闪电活动分布特征、眼壁闪电爆发对TC强度和路径的指示、外雨带闪电活动与雨带对流结构的关系三个方面进行了总结;其次从动力-微物理方面对TC闪电的形成原因和特征机理进行了梳理;最后提出当前研究中存在的两个关键问题,并对后续研究内容进行了展望。基于地基和空基相结合的综合闪电探测得到的闪电属性特征参量,有望建立一个明确的、具有代表性的闪电活动-TC强度变化关系。利用沿海地区架设的三维闪电定位系统结合地基双偏振雷达,针对登陆台风强对流过程开展的综合观测研究,将有助于推进闪电观测资料在台风中小尺度强对流监测、预警和资料同化中的应用。

关键词: 闪电; 热带气旋; 台风; 眼壁; 闪电爆发

中图分类号: P427.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2021)03-0001-10

DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2021.03.001

An overview on the research of lightning activity in tropical cyclones

ZHANG Wenjuan¹, ZHANG Yijun^{2,3}, ZHENG Dong¹, LÜ Weitao¹, XU Liangtao¹

(1. State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China;
2. Department of Atmospheric and Oceanic Sciences/Institute of Atmospheric Sciences, Fudan University, Shanghai 200438, China; 3. Union Laboratory of Marine Meteorological Disasters, Fudan University, Shanghai 200438, China)

Abstract Based on previous studies on lightning activity in tropical cyclones (TC), this paper firstly summarizes the characteristics of TC lightning distribution, the indications of eyewall lightning outbreak on TC intensity and path, and the relationship between lightning activity and convective structure in the outer rainbands. Secondly, the formation and mechanism of TC lightning are summarized from the perspective of dynamics and microphysics. Finally, two key factors that affect the application of lightning data in TC monitoring and forecasting are discussed, and the future research contents are prospected. Using parameters of lightning characteristics (e.g. flash type, flash area, flash duration, flash radiation) obtained by both ground-based and space-based lightning detection systems, a more clear and representative relationship between lightning activity and TC intensity change will be established. The comprehensive observation study on the strong convection process of typhoon landing by using the three-dimensional lightning location system in coastal areas and the ground-based dual-polarization radar will be helpful to promote the application of lightning observation data in the monitoring, warning and data assimilation of meso-scale strong convective activity in typhoons.

Key words lightning; tropical cyclone; typhoon; eyewall; lightning outbreak

收稿日期: 2021-07-05; 修订日期: 2021-08-05

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFC1510103); 中国气象科学研究院基本科研业务费重点项目(2020Z009)

通信作者: 张文娟, 女, 博士, 研究员, 主要从事雷暴电学研究, zwj@cma.gov.cn。

引言

登陆热带气旋(tropical cyclone, TC)及其伴随的强风暴雨是影响我国的主要灾害性天气之一^[1]。随着探测技术的进步和对物理机制的理解,TC路径预报已取得一定进展,但强度预报仍有待于进一步提高,特别是影响TC精细结构变化的机理仍认识不足。TC特征演变不仅与大尺度的环流背景和动力过程有关,还受到其内部中小尺度过程的影响。目前大多数观测平台(特别是海上)并不能对这些中小尺度过程进行持续、有效的观测^[2],因此限制了对TC精细结构的深入研究和准确预报。TC观测急需突破传统需求,转为更加注重云微物理过程的结构观测^[3]。因此,综合利用各种有效手段开展精细化观测研究对于提高TC预报准确性具有重要意义。

闪电探测具有距离远、实时性强、连续性高的优势,目前已在陆地雷暴和灾害性天气的监测和预警中得到广泛应用。闪电资料能够较好地指示强对流发生的时间、位置和强度^[4];闪电频次跃变能够对冰雹和超级单体的发生进行预警^[5-6];闪电资料在数值模式中的同化能显著提高强对流天气过程的模拟和预报效果^[7]。闪电探测技术自20世纪70年代以来得到快速发展,目前已实现对放电过程进行描绘的甚高频辐射源定位系统、覆盖全球范围的地基闪电定位网,以及基于卫星的空间全闪探测^[8]。TC闪电活动的地基探测系统主要包括:1)低频-甚低频区域闪电定位网,如美国国家闪电探测网(NLDN)^[9]、美国长距离闪电探测网(LLDN)^[10]、Los Alamos闪电定位阵列(LASA)^[11],我国气象部门(ADTD)^[12]和电力部门(LLS)^[13]闪电定位网。区域闪电定位网的探测效率和定位精度较高,但由于受到观测范围的限制,因此主要用于近海和登陆TC的闪电活动监测。2)全球闪电定位网,如WWLLN^[14]、GLD360^[15]、ENTLN^[16]。全球闪电定位网利用较少子站建成覆盖全球的定位网络,能够用于监测TC整个生命史(特别是海上)过程的闪电活动^[17],在TC闪电时空分布及其与气旋强度变化关系的认识方面发挥了重要作用。尽管如此,全球闪电定位网工作在甚低频段,以地闪探测为主且探测效率较低,因此限制了对TC闪电活动的全面深入理解。3)甚高频闪电定位系统,如美国闪电图示系统LMA。该系统采用辐射源定位技术实现总闪探测并给出精确的三维闪电定位信息。

由于系统150 km以外探测效率显著下降,因此在TC闪电探测的使用中受到限制。目前,GRIFIN et al.^[18]和LOGAN^[19]已使用甚高频地基闪电定位系统开展了TC闪电研究。利用LMA结合双偏振雷达观测,对登陆后再次增强的热带风暴闪电三维发展结构进行了独特分析。

卫星是全球(陆地和海洋)TC闪电和对流活动的有效观测平台。利用热带测雨卫星(TRMM)搭载的低轨闪电成像仪(LIS),一些学者研究了全球TC闪电活动的总体分布,揭示了不同海域闪电活动的特征差异,并得到了与以往地基闪电观测系统不同的TC闪电-强度关系结果^[20],这可能与极轨卫星的不连续采样方式有关。新一代地球静止卫星闪电成像仪开启了全球闪电监测的新时代。2016年发射升空的美国GOES-R GLM^[21]和我国首颗卫星闪电成像仪FY-4A LMI^[22],分别为大西洋和西北太平洋提供了前所未有的闪电探测能力。新一代静止卫星闪电成像仪可以对观测区域内包括云闪、云间闪、云地闪在内的全闪电活动进行探测,能够实现TC发生、发展和消亡过程中闪电活动的连续、长时间和大范围实时监测,将为TC强对流和闪电活动的监测和预警提供重要信息。

1 TC闪电活动分布特征

由于对流活动较弱、过冷水较为缺乏,早期人们普遍认为TC只能引起大风和强降雨,而不产生闪电活动。BLACK and HALLETT^[23]最早在飓风“Diana”(1984)中观测到频繁的闪电活动。VENNE et al.^[24]、LYONS et al.^[25]也注意到飓风中存在一定闪电活动,并指出闪电集中发生在眼壁和外雨带。我国有关TC闪电的研究先于国外学者。早在1960—1975年,中央气象局曾组织远程测站网开展天电探测业务,利用天电资料研究台风的移动^[26]。此后随着闪电探测技术的发展,越来越多的观测证实TC中存在闪电活动,并指出闪电活动与TC对流有关。

TC闪电活动存在明显的三圈分布特性(图1)^[13,27]。眼壁(或内核)存在一定的闪电活动,但闪电频次低于外雨带;内雨带闪电活动很少;外雨带具有最高的闪电频次,且大部分闪电发生在外雨带^[28-32]。我国登陆台风的闪电活动同样呈现出“眼壁较强-内雨带弱-外雨带最强”的三圈分布特性^[13]。研究发现,不同TC之间闪电活动差异较大,闪电易发生在热带低压和热带风暴中^[27,33-35],易发

生在海面温度超过 27 °C 的海域^[20,36],易发生在修正极化亮温低于 225 K 的 TC 深对流区^[37]。尽管眼壁闪电活动弱于外雨带,但其能够为 TC 发展演变提供重要信息。近期研究^[15,38]表明,成熟台风眼壁闪电存在一种独特的环状分布形态,称为 EEL (enveloped eyewall lightning)。利用 EEL 可以实时

估算台风的中心位置、移动速度、最大风圈半径、眼墙厚度等参量,其位置估算结果与联合台风警报中心(Joint Typhoon Warning Center, JTWC)的平均误差仅为 17 km,从而为传统台风监测提供了一种新工具^[38]。

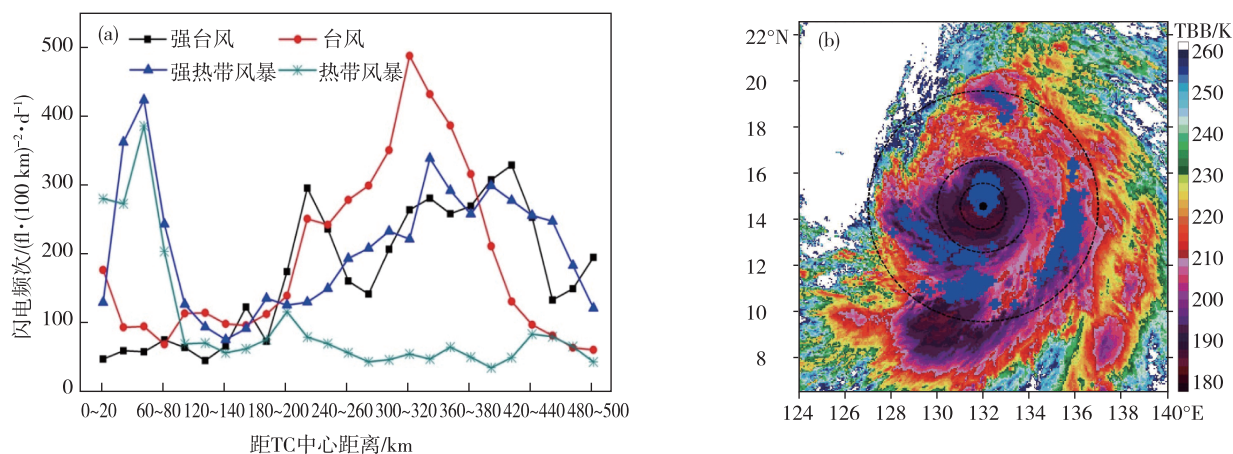


图1 热带气旋闪电活动的三圈分布特性(a.不同强度等级(热带风暴、强热带风暴、台风和强台风)热带气旋中闪电密度随径向距离的变化,样本为1999—2010年33个登陆广东的热带气旋,闪电资料来自广东电力闪电定位系统;b.超强台风“威马逊”(2008)快速增强过程中闪电活动和MTSAT卫星观测云顶亮温(TBB)的叠加,蓝色区域表示WWLLN探测的闪电,三个虚线圆圈分别表示内核(0~100 km)、内雨带(100~200 km)和外雨带(200~500 km))。图片摘自文献[13,27]

Fig.1 The characteristics of lightning distribution in tropical cyclones (Fig.1a is for radial distribution of lightning density in different TC intensity levels (tropical storm, severe tropical storm, typhoon, and severe typhoon), the samples are 33 tropical cyclones that made landfall in Guangdong during 1999–2010, and lightning data are from the Lightning Location System of Guangdong Electric Power Company. Fig.1b is for lightning activity overlaid with minimum TBB from MTSAT satellite during the rapid intensification of super typhoon Rammasun (2008), the blue areas indicate lightning detected by WWLLN, and the three dotted circles represent the areas of inner core (0–100 km), inner rainbands (100–200 km) and outer rainbands (200–500 km).) Adapted from references [13,27]

闪电频次和TC中心最大维持风速之间具有较强的相关性。TC生命史中闪电活动的时序演变一般分为三个阶段:①TC增强阶段,闪电活动开始增多。特别是快速增强的初期,眼壁闪电频次急剧增加,随后有所减弱,在快速增强的后期眼壁闪电活动可能再次增多。②TC达到最大强度阶段,一般出现TC闪电频次的峰值或次峰值。③TC减弱阶段,眼壁和外雨带闪电频次均逐渐减小。登陆TC由于与陆地的相互作用,外雨带闪电活动会再次增强,对应着眼壁闪电频次的低值时段。此后随着气旋的减弱,TC闪电活动逐渐停止。利用WWLLN对全球飓风的统计^[14,39]发现,闪电频次的增加提前飓风最大强度约24 h。在西北太平洋区域,同样发现闪电活动和台风强度变化存在一定关系,最大闪电频次超前台风最大风速25~49 h^[40-44]。基于闪电活动对气旋的指示作用,一些研究^[45-46]已尝试将闪电

数据同化到数值模式中进行TC强度预报。

2 眼壁闪电爆发

2.1 眼壁闪电爆发对TC强度变化的指示

眼壁(或内核)闪电存在某些特定阶段频次突然增多、活动异常活跃的现象,即眼壁闪电爆发^[10,47-49]。图2给出了台风“百合”(2001)登陆过程中,闪电定位网探测到的眼壁闪电活动,发现在路径转向、快速增强和登陆三个过程中,存在眼壁闪电爆发^[13]。闪电爆发现象一定程度上揭示了眼壁的循环机制,可能预示TC的快速增强。大西洋观测^[50]表明,飓风增强阶段眼壁闪电密度是未增强阶段的1.5~2倍。眼壁闪电爆发出现在飓风“Rita”(2005)快速增强、最大强度和眼壁置换三个阶段^[10],爆发提前飓风“Andrew”(1992)最大强度约6 h^[28]。LASA闪电定位阵列对飓风中双极性窄

脉冲(narrow bipolar event, NBE;一种特殊的云内放电事件)的三维观测同样发现,眼壁 NBE 爆发提前飓风增强约 3 h,增强过程中 NBE 放电高度增加,呈逆时针方向旋转,揭示了眼壁强对流单体的时空演变^[2]。对 2005—2017 年西北太平洋 230 个台风的

统计^[35]发现,台风快速增强时闪电集中分布在眼壁和内核区域,且具有轴对称分布特性。对于我国登陆台风,ZHANG et al.^[13]通过定义眼壁闪电爆发判别指标,发现 30%爆发发生在 TC 增强和最大强度阶段,爆发平均 7.1 h 后 TC 达到最大强度。

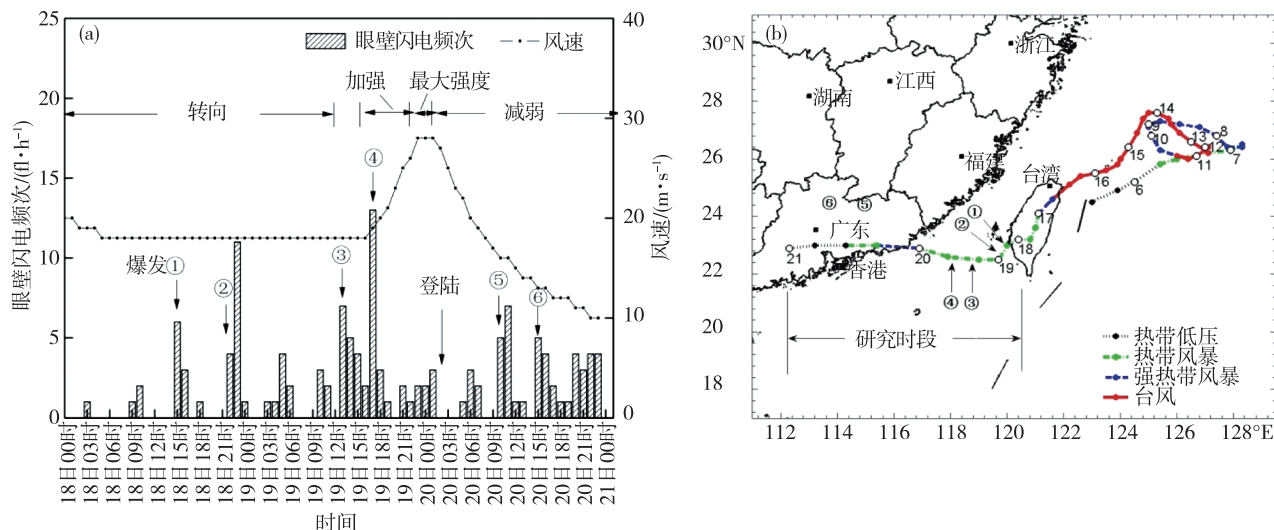


图2 台风“百合”(2001)登陆期间的眼壁闪电爆发(a.眼壁闪电频次和中心最大风速时序变化图,b.台风最佳路径图;①—⑥为判别方法识别的眼壁闪电爆发,①②③发生在TC转向阶段,④发生在登陆前的快速增强阶段,⑤⑥发生在登陆后)。图片摘自文献[13]

Fig.2 Eyewall lightning outbreaks of Typhoon Nari (2001) during the landfall period (a. time series of eyewall lightning frequency and hourly maximum sustained wind speed, b. the best-track positions for the typhoon life cycle. Arrows with serial numbers ①–⑥ indicate the six outbreaks of eyewall lightning, occurring during the periods of recurvature (①②③), rapid intensification (④), and post-landfall (⑤⑥).) Adapted from reference [13]

除闪电频次外,眼壁闪电爆发的空间方位、径向距离、相对于垂直风切变的分布及其配置关系,能够为TC演变提供更加全面的指示信息。许多研究将闪电空间分布与表征环境结构的850~200 hPa垂直风切变联系起来,以探讨眼壁闪电活动与TC强度变化的关系。对大西洋飓风的统计^[50-52]发现,当垂直风切变处于中等强度($5 \sim 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)时,眼壁中90%以上闪电发生在风切变的下风向(特别是下风向左侧),并且切变越强,眼壁对流和闪电分布越集中。在飓风增强之前,眼壁闪电呈散落分布;当增强时闪电集中爆发在某一特定象限,且强度越强,闪电径向分布峰值越靠近TC中心^[35,53]。对超强台风“海燕”(2013)的观测^[49,54]发现,台风快速增强时,眼壁闪电密度的高值区位于垂直风切变的下风向,位于最大风圈半径(RMW)之内,并逐渐向台风中心靠近;而登陆后减弱阶段的闪电爆发则主要发生在风切变的上风向左侧,位于RMW之外,且远离台风中心。基于前人研究结果总结的眼壁闪电爆发特征与气旋强度演变关系概念图见图3。图

3a给出了气旋增强阶段的眼壁闪电爆发特征:①中等强度的垂直风切变量;②相对较高的闪电频次;③闪电大值区位于垂直风切变的下风向,位于RMW之内,并逐渐向TC中心靠近。图3b给出了气旋减弱阶段的眼壁闪电爆发特征:①中等偏弱的垂直风切变量;②逐渐降低的闪电频次;③闪电大值区位于垂直风切变的下风向,位于RMW之外,并逐渐远离TC中心。基于对大西洋和东太平洋的10 a统计结果,STEVENSON et al.^[55]提出眼壁闪电爆发能够为预报员判断未来24 h气旋是否增强提供重要信息。

2.2 眼壁闪电活动对TC移动路径的指示

眼壁闪电活动对TC路径变化同样具有指示作用。我国早期研究^[26]发现,台风有向其外围强闪电区移动的趋势,闪电位置及其发展趋势对台风移向具有诊断作用,一定的特征闪电可以帮助确定台风的登陆地段。MOLINARI et al.^[28]发现眼壁闪电突增后4 h,台风“Bob”(1991)出现路径转折,因此指出处于稳定状态下的眼壁闪电爆发,很可能预示着

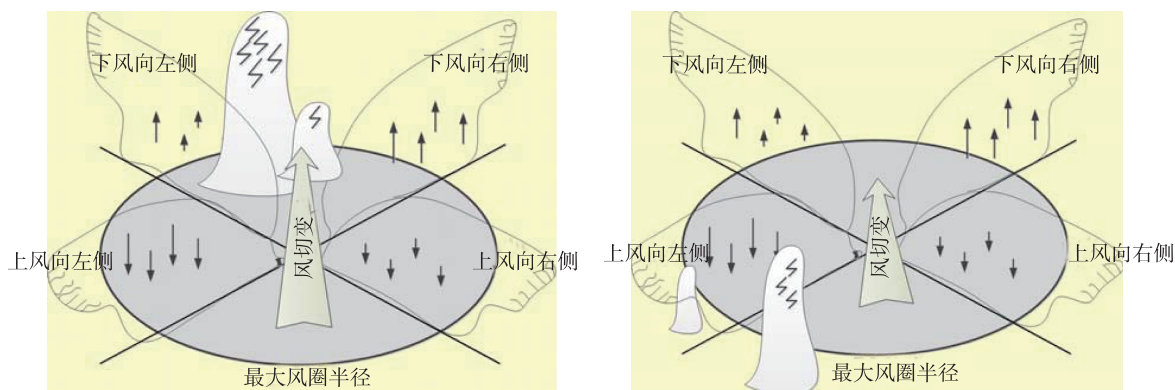


图3 眼壁闪电爆发特征与气旋强度演变关系示意图(a.气旋增强阶段, b.气旋减弱阶段)

Fig.3 A schematic diagram of the relationship between eyewall lightning outbreak and TC intensity (a. the stage of TC intensifying, b. the stage of TC weakening)

TC 路径的改变。对我国登陆台风的统计^[13]发现, 大约 10% 的眼壁闪电爆发与台风转向有关。在超强台风“海燕”(2013) 登陆后的减弱阶段, 眼壁闪电爆发后出现路径转向, 这可能与风切变和路径夹角的突然变化所导致的眼区对流不对称有关^[49]。在方位分布方面, 对大西洋飓风的观测^[52,56]发现, 大部分闪电发生在飓风前进方向的前侧, 当飓风靠近海岸时, 右前象限闪电活动明显增多。而西北太平洋台风与之不同, 移速较慢 ($v < 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 的台风其闪电主要发生在移动方向的后侧。对于移速较快 ($v > 6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 的台风, 内核闪电主要发生在移动方向的前侧, 而外雨带闪电发生在移动方向的右后象限^[36]。

尽管如此, 一些研究^[20,32,57]指出外雨带闪电同样能够为气旋演变提供较好的指示作用。最近研究^[58-59]表明, TC 内核和外雨带存在不同的闪电类型, 外雨带以地闪活动为主^[18], 内核可能具有更大的云闪比例。GLM 对飓风闪电属性特征的研究^[16,60]显示, 闪电类型与飓风增强具有较强的相关性, 飓风增强时眼壁的云闪比例显著增大。飓风增强期间的闪电比减弱期间的闪电具有更大的面积、更强的辐射能以及更长的持续时间。

3 外雨带闪电活动与雨带对流结构

TC 闪电活动主要发生在外雨带, TRMM 卫星观测到外雨带的闪电频次是内核和内雨带的 4 倍^[61]。成熟飓风外雨带闪电活动与对流和降水的径向分布一致^[28]。飓风登陆期间闪电主要发生在外雨带对流区的右侧, 对应最强的雷达反射率和降雨区^[56], 有时与外雨带中超级单体的产生有关^[47]。

结合星载雷达的研究^[20]发现, 外雨带闪电的变化趋势与混合相态区 30 dBZ 回波体积的变化相一致, 由此推测外雨带具有充足的过冷水^[62]。我国台风登陆过程中, 闪电多发生在外雨带面积较大的回波后侧或外侧(图 4)^[59]。西北太平洋台风闪电的气候学统计^[34]也表明, 外雨带闪电密度最大值出现在台风南侧 500~600 km 径向范围处。闪电活动成簇地发生在外雨带低亮温和高反射率的深对流区域^[59], 发生在 6 km 高度具有较高雷达反射率的区域^[30], 垂直上升区的中心位置和强度对外雨带闪电分布具有明显影响^[63]。利用引入起电放电过程的 WRF 中尺度数值模式对台风“莫拉菲”(2009) 的模拟发现, 外雨带主要表现为正的三极性或偶极性电荷结构, 即在霰粒子与冰晶组成的正偶极性电荷结构下存在一个由霰粒子组成的正电荷区。台风登陆后衰亡阶段的对流表现为负的偶极性电荷结构, 类似于陆地雷暴消散阶段的特性^[64]。

外雨带闪电活动与雨带对流结构密切相关。由于同时受到涡旋动力和外部环境的约束, 外雨带显示出独特的对流结构特征: 一般具有宽广的层状降水区, 不同组织结构的对流单体活跃其中; 单体具有向外倾斜的结构和显著的上升、下沉运动; 对流单体趋于在雨带的上风向形成和发展, 往下风向移动并逐渐消散^[65-66]。闪电活动的演变和雨带的发展具有一致性。外雨带混合相态区反射率增强时, 意味着上升气流的增强, 有利于闪电的发生^[67]。闪电信息能够清晰地描绘雨带的对流特征并提供动力和微物理过程相关信息^[33,56]。闪电频次的增加能够预示霰或冰雹粒子体积的增加以及上升气流的加强, 进而表征雨带对流的发展^[48]。尽管如

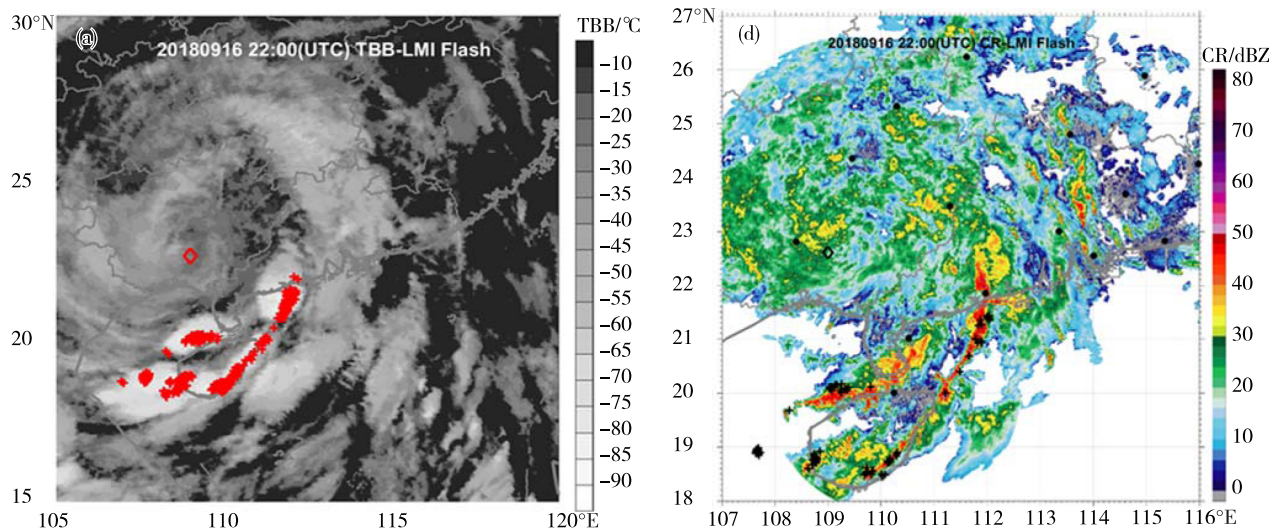


图4 超强台风“山竹”(2018)登陆期间, FY-4A LMI 观测的外雨带闪电活动(a. 闪电和 Himawari-8 TBB 的叠加图, b. 闪电和华南区域组网雷达组合反射率的叠加图; 卫星和雷达观测时刻为 2018 年 9 月 16 日 22 时(世界时), 闪电叠加时段为卫星时刻 ± 30 min、雷达时刻 ± 5 min, \diamond 表示台风中心位置, 红色和黑色“+”表示 FY-4A LMI 闪电)。图片摘自文献 [59]

Fig.4 Lightning activity in the outer rainbands of Super Typhoon Mangkhut (2018) during the landfall period observed by FY-4A LMI (a. LMI flashes overlaid with Himawari-8 TBB imagery, b. LMI flashes overlaid with composite reflectivity from South China regional radar system. The observation time is 22:00 UTC on 16 September 2018. The Flashes period is ± 30 min (± 5 min) of the observation time for satellite (radar) imagery. \diamond indicates the typhoon center. The red and black crosses represent FY-4A LMI flashes.) Adapted from reference [59]

此, 由于受到地形、环境等多种因素的影响, 外雨带对流尺度的云微物理结构非常复杂。目前有关外雨带闪电开展的研究仍然较少, 对其电过程的认识还非常有限。

4 动力-微物理机理探讨

4.1 闪电三圈分布成因

哪些因素造成了 TC 中闪电分布的三圈特性? 眼壁、内雨带和外雨带闪电活动差异的原因是什么? 一些学者从对流结构方面进行了解释。飞机观测发现, TC 大部分区域被层云和弱对流降水控制, 冰粒子含量普遍较少, 0°C 层以上雷达反射率迅速减小。只有出现强上升气流($v > 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)时, 混合相态区才能同时产生霰粒子和过冷液态水, 从而产生闪电活动^[23, 68]。除上升气流影响外, FIERRO et al.^[48] 进一步指出 TC 闪电频次与霰粒子体积和质量、液态水含量、水平风等因素有关。由此可见, 混合相态区的上升气流通量、强上升气流体积、霰粒子体积和质量、液态水含量、水平风等是 TC 闪电形成的主要影响因素。

眼壁的对流结构类似于弱电化的海洋季风深对流, 最大反射率位于 0°C 层以下, 0°C 层以上反射率值迅速减小^[28]。眼壁的倾斜上升气流将负电荷

区上层的正电荷向外推移, 形成闪电和最大云顶亮温区的位置差异。过冷水和强上升气流的缺乏, 一定程度上限制了液态水条件下冰晶和霰粒子的碰撞起电, 所以通常情况下眼壁闪电活动相对螺旋雨带较弱。只有在对流发展较强时, 眼壁才会产生较强的闪电活动^[28]。内雨带具有中尺度对流系统拖曳层云的结构, 由于雷达图中常观测到亮带, 特性类似具有弱上升气流的层云降雨区^[28]。内雨带是眼壁向外排出的冰粒子沉降作用而形成, 这种沉降过程减少了过冷水含量, 融化和蒸发造成的冷却作用抑制了上升气流, 因此很少产生闪电^[9]。外雨带结构类似于亚热带季风间歇期的大陆深对流, 由于具有较强的上升和下沉气流, 闪电频次相对较高^[28]。外雨带受到环境气流的影响, 具有强烈的对流不稳定, 造成 0°C 层以上液态水、霰和冰粒子同时出现, 因此容易产生电荷分离和闪电活动。我国登陆台风的研究^[69]表明, 外雨带较强的上升气流、较大的降水粒子浓度、混合相态区较高的冰相粒子浓度以及对流云体较高的垂直和较广的水平分布, 是外雨带产生较强闪电活动的主要原因。

4.2 眼壁闪电爆发成因

闪电的发生与云中软雹、霰、冰晶等冰相物粒子紧密相关, TC 中云微物理过程(特别是混合相态

区冰相物粒子)对起电过程和电荷结构的形成具有重要影响^[70]。卫星观测表明,眼壁区域云顶相对光滑,表明眼壁对流较弱;而外雨带云顶则显示出高度活跃的对流性。眼壁与外雨带的云微物理特征差异可能由垂直风切变的强度差异所引起。眼壁中的上升气流被剪切并呈现倾斜,因此眼壁云很少能发展较高。而外雨带云系在较弱的垂直风切变组织下,强上升气流能够使云层发展成为较高的对流云^[71]。

一些学者从动力和微物理角度解释了眼壁闪电爆发的成因。当上升气流较弱时,眼壁的混合相态区相对浅薄,暖区中雨滴通过碰并增长,小雨滴在达到混合相态区之前从上升气流中移出;混合相态区中冰粒子淞附增长过程不强,因此起电较弱^[68]。当上升气流增强时,混合相态区高度和过冷水含量增大,从而产生有效的起电和更高的闪电密度,导致眼壁闪电爆发。LIN and CHOU^[35]指出眼壁闪电集中分布的有利环境条件包括:较强的高空辐散、较高的海表温度、较大的最大潜在强度(MPI)以及较弱的垂直风切变。REINHART et al.^[67]指出眼壁产生活跃闪电的三个动力-微物理条件,即内核强上升气流达到 $10\sim 20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,大于30 dBZ的混合相态区强回波发展到 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 层以上,冰晶、霰和过冷水的同时出现。SQUIRES and BUSINGER^[10]同样指出眼壁闪电爆发时,上升气流迅速增强,眼壁迅速收缩并呈现出最强的对流垂直结构。这种垂直结构减小了带电粒子的水平向外扩散,使眼壁能够长时间地维持一个强电场,从而产生较大的闪电密度。此后随着时间的增长,过冷水含量逐渐减弱,导致电荷分离速度迅速下降,从而限制了起电过程,导致爆发后眼壁闪电活动的减弱^[50]。数值模式结果显示,TC增强过程与眼壁对流爆发有关^[72],当眼壁中有“热塔”存在时,TC增强的机会大大增加^[73]。因此可以通过眼壁闪电爆发的时空特征变化,反映眼区中小尺度强对流以及“热塔”的发展演变,从而探讨TC特征的改变。

5 总结和展望

闪电探测与雷达、卫星等多种探测手段相结合的综合观测,已为揭示陆地天气系统的对流活动规律提供了重要观测资料。尽管如此,目前闪电资料在TC监测和预警中尚未完全发挥其独特优势,究其原因主要存在以下两个制约因素。第一,闪电活动与TC对流结构的相关关系和演变规律尚不清

楚。由于TC(特别是雨带)对流结构的独特性和复杂性,以往基于陆地雷暴系统建立的闪电-对流关系不能直接应用于TC中。因此需要重新认识TC环流背景下,闪电活动与对流特征在分布、强度和结构之间的对应关系,以及闪电活动与TC对流生消、发展之间的演变规律,进而研究如何利用闪电资料指示TC的变化。第二,TC云微物理过程对电过程的作用机制是否与陆地雷暴存在差异尚不明确。TC闪电活动具有较大的差异性,尽管已有研究证实了闪电活动与TC中小尺度对流的发展密切相关,但闪电活动差异性的根本原因尚不清楚,其中的云微物理作用机制也不明确。需要通过研究云微物理过程如何作用于电过程并影响其分布特征,进而研究如何利用闪电活动来指示TC云微物理过程及其对流活动的变化。

近些年,随着我国闪电探测技术的发展,先进的地基三维全闪探测网正在持续建设。新的闪电探测系统已实现放电过程的三维定位,提供了比以往地闪数据更丰富、与云微物理结构关系更加直接的全闪活动信息。我国首颗卫星闪电成像仪FY-4A LMI也已发射升空并为西北太平洋区域TC闪电观测提供了重要技术手段。三维闪电探测数据的涌现以及FY-4A卫星闪电成像仪的发展,使得闪电观测参量从以往的频次、密度扩展到闪电类型、面积尺度、持续时间、辐射能等更多属性特征。未来地基和空基相结合的综合闪电探测,有望建立一个更加明确、具有代表性的闪电活动-TC强度变化的关系模型。

我国大力发展的地基双偏振雷达探测技术为登陆台风精细结构提供了良好的观测手段。闪电探测与雷达探测手段的结合,为台风观测提供了一种新资料和新方法。利用沿海地区架设的三维闪电定位系统结合双偏振雷达可以开展综合观测研究,针对登陆台风的强对流过程,尝试从以下两个科学问题出发进行探索:1)台风环流背景下,闪电和对流活动的对应关系和演变规律是什么?如何利用闪电活动特征指示台风独特的对流结构及其演变过程?2)台风闪电活动的云微物理作用机制与陆地雷暴是否存在差异,云微物理过程如何作用于电过程并影响台风结构和特征的改变?针对以上问题开展的系统性研究,不仅能够加深台风对流结构和闪电活动的规律性认识,同时有助于推进闪电观测资料在台风中小尺度强对流监测、预警和资料同化中的应用。

参考文献:

- [1] 陈联寿,孟智勇,丛春华.台风暴雨落区研究综述[J]. 海洋气象学报,2017,37(4):1-7.
- [2] FIERRO A O, SHAO X, HAMILIN T, et al. Evolution of eyewall convective events as indicated by intra-cloud and cloud-to-ground lightning activity during the rapid intensification of hurricanes Rita and Katrina[J]. *Mon Wea Rev*,2010,139(5):1492-1504.
- [3] 端义宏.登陆台风精细结构的观测、预报与影响评估[J]. 地球科学进展,2015,30(8):847-854.
- [4] 郑栋,张义军,孟青,等.北京地区雷暴过程闪电与地面降水的相关关系[J]. 应用气象学报,2010,21(3):287-297.
- [5] YAO W, ZHANG Y, MENG Q, et al. A comparison of the characteristics of total and cloud-to-ground lightning activities in hailstorms[J]. *J Meteor Res*,2013,27(2):282-293.
- [6] LIU D, QIE X, CHEN Y, et al. Investigating lightning characteristics through a supercell storm by comprehensive coordinated observations over north China[J]. *Adv Atmos Sci*,2020,37(8):861-872.
- [7] 郗秀书,袁善锋,陈志雄,等.北京地区雷电灾害天气系统的动力-微物理-电过程观测研究[J]. 中国科学:地球科学,2021,51(1):46-62.
- [8] 郗秀书,刘冬霞,孙竹玲.闪电气象学研究进展[J]. 气象学报,2014,72(5):1054-1068.
- [9] MOLINARI J, MOORE P K, IDONE V P, et al. Cloud-to-ground lightning in Hurricane Andrew[J]. *J Geophys Res Atmos*,1994,99(D8):16665-16676.
- [10] SQUIRES K, BUSINGER S. The morphology of eyewall lightning outbreaks in two category 5 hurricanes[J]. *Mon Wea Rev*,2008,136(5):1706-1726.
- [11] SHAO X, HARLIN J, STOCK M, et al. Katrina and Rita were lit up with lightning[J]. *Eos Trans Amer Geophys Union*,2005,86(42):398-399.
- [12] LI P, ZHAI G, PANG W, et al. Preliminary research on a comparison and evaluation of FY-4A LMI and ADTD data through a moving amplification matching algorithm[J]. *Remote Sens*,2021,13(1):11.
- [13] ZHANG W, ZHANG Y, ZHENG D, et al. Lightning distribution and eyewall outbreaks in tropical cyclones during landfall[J]. *Mon Wea Rev*,2012,140(11):3573-3586.
- [14] PRICE C, ASFUR M, YAIR Y. Maximum hurricane intensity preceded by increase in lightning frequency[J]. *Nature Geoscience*,2009,2(5):329-332.
- [15] VAGASKY C. Enveloped eyewall lightning: The EEL signature in tropical cyclones[J]. *J Oper Meteor*,2017,5(14):171-179.
- [16] RINGHAUSEN J S, BITZER P M. An in-depth analysis of lightning trends in hurricane Harvey using satellite and ground-based measurements[J]. *J Geophys Res Atmos*,2021,126(7):e2020JD032859.
- [17] SOLORZANO N N, THOMAS J N, BRACY C. Monitoring tropical cyclones with lightning and satellite data[J]. *Eos Trans Amer Geophys Union*,2018,99,DOI:10.1029/2018EO092439.
- [18] GRIFFIN E M, SCHUUR T J, MACGORMAN D R, et al. An electrical and polarimetric analysis of the overland reintensification of Tropical Storm Erin (2007)[J]. *Mon Wea Rev*,2014,142(6):2321-2344.
- [19] LOGAN T. An analysis of the performance of the Houston Lightning Mapping Array during an intense period of convection during Tropical Storm Harvey[J]. *J Geophys Res Atmos*,2021,126:e2020JD033270.
- [20] XU W, RUTLEDGE S, ZHANG W. Relationships between total lightning, deep convection, and tropical cyclone intensity change[J]. *J Geophys Res Atmos*,2017,122(13):7047-7063.
- [21] GOODMAN S J, BLAKESLEE R J, KOSHAK W J, et al. The GOES-R Geostationary Lightning Mapper (GLM)[J]. *Atmos Res*,2013,125-126:34-49.
- [22] HUI W, ZHANG W, LYU W, et al. Preliminary observations from the China Fengyun-4A Lightning Mapping Imager and its optical radiation characteristics[J]. *Remote Sens*,2020,12(16):2622.
- [23] BLACK R A, HALLETT J. Observation of the distribution of ice in hurricanes[J]. *J Atmos Sci*,1986,43(8):802-822.
- [24] VENNE M G, LYONS W A, KEEN C S, et al. Explosive supercell growth: A possible indicator for tropical storm intensification? [C]//Proceedings of the 24th conference on radar meteorology. Tallahassee: Amer Meteor Soc,1989:545-548.
- [25] LYONS W A, VENNE M G, BLACK P G, et al. Hurricane lightning: A new diagnostic tool for tropical storm forecasting? [C]//Proceedings of the 18th conference on hurricanes and tropical meteorology. San Diego: Amer Meteor Soc,1989:113-114.
- [26] 陈联寿,丁一汇.西北太平洋台风概论[M].北京:科学出版社,1979:366-369.
- [27] ZHANG W, ZHANG Y, ZHENG D, et al. Relationship between lightning activity and tropical cyclone intensity over the northwest Pacific[J]. *J Geophys Res Atmos*,2015,120(9):4072-4089.

- [28] MOLINARI J, MOORE P K, IDONE V P. Convective structure of hurricanes as revealed by lightning locations [J]. *Mon Wea Rev*, 1999, 127(4): 520-534.
- [29] 潘伦湘, 郟秀书, 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.
- [30] 王艳, 郑栋, 张义军. 2000—2007年登陆台风中闪电活动与降水特征[J]. *应用气象学报*, 2011, 22(3): 321-328.
- [31] BOVALO C, BARTHE C, YU N, et al. Lightning activity within tropical cyclones in the South West Indian Ocean [J]. *J Geophys Res Atmos*, 2014, 119(13): 8231-8244.
- [32] STEVENSON S N, CORBOSIERO K L, ABARCA S F. Lightning in eastern North Pacific tropical cyclones: A comparison to the North Atlantic [J]. *Mon Wea Rev*, 2016, 144(1): 225-239.
- [33] 杨美荣, 袁铁, 郟秀书, 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.
- [34] 王芳, 郟秀书, 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.
- [35] LIN S J, CHOU K H. The lightning distribution of tropical cyclones over the Western North Pacific [J]. *Mon Wea Rev*, 2020, 148(11): 4415-4434.
- [36] WANG F, QIE X, WANG D, et al. Lightning activity in tropical cyclones and its relationship to dynamic and thermodynamic parameters over the northwest Pacific [J]. *Atmos Res*, 2018, 213: 86-96.
- [37] 潘伦湘, 郟秀书. 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.
- [38] PERMYAKOV M, KLESHCHEVA T, POTALOVA E, et al. Characteristics of typhoon eyewalls according to World Wide Lightning Location Network data [J]. *Mon Wea Rev*, 2019, 147(11): 4027-4043.
- [39] WHITTAKER I C, DOUMA E, RODGER C J, et al. A quantitative examination of lightning as a predictor of peak winds in tropical cyclones [J]. *J Geophys Res Atmos*, 2015, 120(9): 3789-3801.
- [40] 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.
- [41] PAN L, QIE X, LIU D, et al. The lightning activities in super typhoons over the Northwest Pacific [J]. *Sci China Ser D Earth Sci*, 2010, 53(8): 1241-1248.
- [42] 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.
- [43] PAN L, QIE X, WANG D. Lightning activity and its relation to the intensity of typhoons over the Northwest Pacific Ocean [J]. *Adv Atmos Sci*, 2014, 31(3): 581-592.
- [44] KONG X, ZHAO Y, QIU Z, et al. A simple method for predicting intensity change using the peak time lag between lightning and wind in tropical cyclones [J]. *Geophys Res Lett*, 2020, 48(2): e2020GL088872.
- [45] MARKS F D, SHAY L K, BARNES G, et al. Landfalling tropical cyclones: Forecast problems and associated research opportunities [J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 1998, 79(2): 305-323.
- [46] ZHANG R, ZHANG W, ZHANG Y, et al. Application of lightning data assimilation in a numerical forecast of Super Typhoon Haiyan (2013) [J]. *J Meteor Res*, 2020, 34(5): 1052-1067.
- [47] LYONS W A, KEEN C S. Observations of lightning in convective supercells within tropical storms and hurricanes [J]. *Mon Wea Rev*, 1994, 122(8): 1897-1916.
- [48] FIERRO A O, LESLIE L, MANSELL E, et al. A high resolution simulation of the microphysics and electrification in an idealized hurricane-like vortex [J]. *Meteorol Atmos Phys*, 2007, 98(1): 13-33.
- [49] ZHANG W, RUTLEDGE S A, XU W, et al. Inner-core lightning outbreaks and convective evolution in Super Typhoon Haiyan (2013) [J]. *Atmos Res*, 2019, 219: 123-139.
- [50] ABARCA S F, CORBOSIERO K L, VOLLARO D. The World Wide Lightning Location Network and convective activity in tropical cyclones [J]. *Mon Wea Rev*, 2011, 139(1): 175-191.
- [51] CORBOSIERO K L, MOLINARI J. The effects of vertical wind shear on the distribution of convection in tropical cyclones [J]. *Mon Wea Rev*, 2002, 130(8): 2110-2123.
- [52] CORBOSIERO K L, MOLINARI J. The relationship between storm motion, vertical wind shear, and convective asymmetries in tropical cyclones [J]. *J Atmos Sci*, 2003, 60(2): 366-376.
- [53] MOLINARI J, DODGE P, VOLLARO D, et al. Mesoscale aspects of the downshear reformation of a tropical cyclone [J]. *J Atmos Sci*, 2006, 63(1): 341-354.
- [54] WANG F, QIE X, LIU D, et al. Lightning activity and its relationship with typhoon intensity and vertical wind shear for Super Typhoon Haiyan (1330) [J]. *J Meteor Res*, 2016, 30(1): 117-127.
- [55] STEVENSON N S, CORBOSIERO K L, DEMARIA M, et al. A 10-year survey of tropical cyclone inner-core lightning bursts and their relationship to intensity change

- [J]. *Wea Forecast*, 2018, 33(1):23-36.
- [56] SAMSURY E, ORVILLE R E. Cloud-to-ground lightning in tropical cyclones: A study of Hurricanes Hugo (1989) and Jerry (1989) [J]. *Mon Wea Rev*, 1994, 122(8): 1887-1896.
- [57] DEMARIA M, DEMARIA R T, KNAFF J A, et al. Tropical cyclone lightning and rapid intensity change [J]. *Mon Wea Rev*, 2012, 140(6): 1828-1842.
- [58] FIERRO A O, STEVENSON S N, RABIN R M. Evolution of GLM-observed total lightning in Hurricane Maria (2017) during the period of maximum intensity [J]. *Mon Wea Rev*, 2018, 146(6): 1641-1666.
- [59] ZHANG W, HUI W, LYU W, et al. FY-4A LMI observed lightning activity in Super Typhoon Mangkhut (2018) in comparison with WLLN data [J]. *J Meteor Res*, 2020, 34(2): 336-352.
- [60] DURAN P, SCHULTZ C J, BRUNING E C, et al. The evolution of lightning flash density, flash size, and flash energy during Hurricane Dorian's (2019) intensification and weakening [J]. *Geophys Res Lett*, 2021, 48(8): e2020GL092067.
- [61] CECIL D J, ZIPSER E J, NESBITT S W. Reflectivity, ice scattering, and lightning characteristics of hurricane eye-walls and rainbands. Part I: Quantitative description [J]. *Mon Wea Rev*, 2002, 130(4): 769-784.
- [62] CECIL D J, ZIPSER E J. Reflectivity, ice scattering, and lightning characteristics of hurricane eye-walls and rainbands. Part II: Intercomparison of observations [J]. *Mon Wea Rev*, 2002, 130(4): 785-801.
- [63] 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.
- [64] 徐良韬, 张义军, 张文娟, 等. 台风莫拉菲 (2009) 登陆前后电荷结构演变的模拟研究 [J]. *气象学报*, 2016, 74(6): 1002-1016.
- [65] HOUZE R A. Clouds in tropical cyclones [J]. *Mon Wea Rev*, 2010, 138(2): 293-344.
- [66] FRANKLIN C N, HOLLAND G J, MAY P T. Mechanisms for the generation of mesoscale vorticity features in tropical cyclone rainbands [J]. *Mon Wea Rev*, 2006, 134(10): 2649-2669.
- [67] REINHART B, FUELBERG H, BLAKESLEE R, et al. Understanding the relationships between lightning, cloud microphysics, and airborne radar-derived storm structure during hurricane Karl (2010) [J]. *Mon Wea Rev*, 2014, 142(2): 590-605.
- [68] BLACK R A, HALLETT J. Electrification of the hurricane [J]. *J Atmos Sci*, 1999, 56(12): 2004-2028.
- [69] ZHANG W, ZHANG Y, ZHOU X. Lightning activity and precipitation characteristics of Typhoon Molave (2009) around its landfall [J]. *Acta Meteor Sinica*, 2013, 27(5): 742-757.
- [70] WILLIAMS E R. The electrification of thunderstorms [J]. *Sci Amer*, 1988, 259(5): 88-99.
- [71] HU J, ROSENFELD D, RYZHKOV A, et al. Synergetic use of the WSR-88D radars, GOES-R satellites, and lightning networks to study microphysical characteristics of hurricanes [J]. *J Appl Meteor Climatol*, 2020, 59(6): 1051-1068.
- [72] 李青青, 周立, 范轶. 台风云娜 (2004) 的高分辨率数值模拟研究: 眼壁小尺度对流运动 [J]. *气象学报*, 2009, 76(5): 787-798.
- [73] KELLEY O A, STOUT J, HALVERSON J B. Tall precipitation cells in tropical cyclone eyewalls are associated with tropical cyclone intensification [J]. *Geophys Res Lett*, 2004, 31(24): L24112.