

杨玉婷,余乐福,刘超,等. 基于多资料的超强台风“彩虹”(2015)闪电活动与雷达回波特征分析[J]. 热带气象学报,2025,41(2):245-259.

文章编号: 1004-4965(2025)02-0245-15

基于多资料的超强台风“彩虹”(2015)闪电活动 与雷达回波特征分析

杨玉婷^{1,2},余乐福^{1,2},刘超^{1,2},陈逸伦³,刘天澳³

(1. 佛山市气象局, 广东 佛山 528000; 2. 佛山市龙卷风研究中心/中国气象局龙卷风重点开放实验室, 广东 佛山 528000;

3. 中山大学大气科学学院, 广东 珠海 519082)

摘要: 利用地球网络全闪系统(ENTLS)资料、CMA-STI热带气旋最佳路径集的台风数据和GPM(Global Precipitation Measurement)/DPR(Dual-frequency Precipitation Radar)卫星资料,分析超强台风“彩虹”全生命期的闪电活动和雷达回波特征。(1) 增强阶段TC呈现出明显的三圈结构特征,内核区(0~80 km)存在一个闪电密集区,内雨带(80~160 km)内少有闪电活动,大于160 km的外围雨带的闪电活动又显著增加。(2) 径向分布随时间的变化指出,内核闪电与外雨带闪电的活跃期不一致;在台风最大风速达到峰值的前1 h,内核闪电活动爆发;闪电密度于生成阶段10月2日15时在320 km附近达到峰值。(3) 径向分布随强度的变化表明,内核区闪电主要出现在超强台风等级,内雨带的闪电活动仅在热带风暴和强热带风暴级别有体现。外雨带的闪电活动,不同等级TC展现的活跃区域不同,且随着TC强度的增强,活跃区沿径向方向向外移动;强度减弱,闪电活动区域沿径向向里缩小至160~400 km。(4) 闪电活动和雷达回波参数关系表明,零度层高度超过5 km为彩虹台风闪电发生的前提条件,且回波顶高至少要发展到10 km以上,混相层中有过冷水或大冰晶粒子,才有利于闪电的发生。

关键词: 超强台风;彩虹;闪电活动;ENTLS;GPM/DPR

中图分类号: P444 文献标志码: A Doi: 10.16032/j.issn.1004-4965.2025.023

1 引言

西北太平洋是全球热带气旋(简称TC)发生最多的区域,而广东作为西北太平洋TC登陆我国最频繁的省份,登陆时所带来的暴雨、大风、风暴潮以及闪电等灾害天气极大威胁着沿岸地区的生命和财产安全。由于TC生成于远离陆地闪电定位系统的热带洋面,观测螺旋雨带中闪电的手段相对有限。因此相比于陆地上的雷暴系统,当前对TC闪电活动及其形成机制的认识还比较薄弱。卫星遥感探测技术的发展使TC闪电的研究正成

为学术界的一个热门课题,通过关注TC中的闪电活动,来探讨TC的对流结构和强度变化。

针对TC闪电活动的空间特征,早前研究发现TC闪电沿径向方向呈“高-低-高”的三圈空间分布特征^[1-2],眼壁和外雨带为闪电密集区,内雨带为闪电不活跃区,与成熟的台风对流结构是一致的。雷小途等^[3]在研究西北太平洋TC闪电频数相对于TC中心的合成分布指出,西北太平洋TC闪电随方位角的分布呈现出非均匀性,外雨带闪电呈现西南向多、东北向少的非对称分布特征,而内核和内雨带呈现东北和西南多、东南和西北少的不对称性分布。张志伟等^[4]研究得出TC闪电活动的方

收稿日期:2023-12-13;修订日期:2024-12-28

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFF0802000);国家自然科学基金项目(42105068,42075004);广东省基础与应用基础研究基金项目(2024A1515011006);广东省气象局科学技术研究项目(GRMC2020Q12)共同资助

通讯作者:陈逸伦,男,陕西省人,副教授,博士,主要从事云和降水物理学研究。E-mail: chenylun3@mail.sysu.edu.cn

位分布与TC强度、所处地理位置及环境密切相关。Zhang等^[5]指出TC闪电的活动存在明显的地域差异,西北太平洋TC闪电密度峰值区位于中国东南沿海和南海北部,其次在南海中部和菲律宾以东海域也观测到较多的闪电活动,而其余深海水域的TC闪电密度远低于南海海域。

就TC闪电活动和强度变化的关系来说,强度较弱的热带低压(TD)更容易发生闪电,TC强度越强,发生闪电的时次以及单位时次的平均闪电频数均越少^[3]。内核区闪电活动变化对TC增强具有很好的指示意义^[2,6]。多个研究表明眼壁闪电爆发稍提前于或在TC加强阶段^[7-10],但DeMaria等^[11]和Stevenson等^[12]认为外雨带区域闪电密度的增强更有可能超前于TC强度的加强。且进一步发现成熟台风整个区域的闪电频次与最大维持风速有显著的正相关关系(相关系数 $r=0.7\sim 0.8$)^[13-15]。然而在北大西洋和东北太平洋区域,TC内核闪电活动和TC强度变化却存在负相关关系,即TC内核区域闪电的爆发预示着TC强度开始减弱^[11-12]。

台风闪电活动的形成机制受观测手段的限制,认识还比较有限。目前雷暴起电过程主要为感应起电和非感应起电机理,非感应起电机理比感应起电机理对雷暴云起电的影响更大^[16],且受诸多因素影响,如动力因素、云内微物理过程、外界环境因素等^[17-18]。一些学者研究发现在具有较强上升运动的系统中,存在可以延伸至 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的较大的过冷水区域,是软雹、冰晶和云滴的共存区,他们之间的相互作用是台风起电的微物理原因^[19-21]。王芳等^[22]研究闪电频数与云发展的高度及回波强度有关,回波强度 $>45\text{ dBZ}$ 时,云发展越高,闪电频数越大;云顶高度 $<6\text{ km}$ 时,闪电发生较少。地面温度较高的雷暴云内正、负电荷最大密度较大^[23]。随着卫星遥感探测技术的发展,全球降水测量计划GPM(Global Precipitation Measurement)中的双频星载降水雷达DPR(Dual-frequency Precipitation Radar)能提供详尽的降水信息,包括三维的降水强度、降水反射率因子、雨滴谱以及二维的零度层高度、亮带高度和厚度、回波顶高等。因此通过卫星观测手段,能获取台风在洋面的雷达回波信息,从而探讨不同阶段台风闪电活动和雷达回波特征的关系。

西北太平洋2015年22号超强台风“彩虹”是

有气象记录以来10月登陆广东的最强台风。特点是强度异常强、近海发展快、风雨影响大,还导致广州、佛山、汕尾等地遭遇龙卷侵袭,造成极其严重的经济损失和人员伤亡。本文使用广东省地球网络全闪系统(ENTLS, Earth Networks Total Lightning System)观测数据和GPM的2级双频联合反演产品,重点尝试解决以下问题:闪电活动的三圈结构特征是否在台风“彩虹”的生成阶段、增强阶段和减弱阶段都有展现?不同区域的闪电活动随时间的演变特征又是怎样的?不同TC强度等级的闪电活动径向分布特征?以闪电的形成机制为出发点,是否能得到雷达回波参数与台风闪电活动的关系?为解决这些问题,本文首先讨论ENTLS资料在研究台风“彩虹”过程中的可信度,对台风的闪电活动特征进行分析,并探讨闪电活动和雷达回波参数的关系。结果有助于我们加深对闪电活动特征的了解,强化对台风闪电形成机制的认识,同时可对星载雷达数据应用在闪电的监测和预警起到一定的参考作用。

2 资料与方法

2.1 闪电定位资料

本文所用到的闪电定位资料是ENTLS观测数据。ENTLS采用时间到达差探测方法连同GPS技术和复杂的算法对每个回击的整个波形准确定位和对闪电类型分类(IC(云闪)/CG(云-地闪)),全球范围内ENTLS的探测效率约为56.8%^[24],区域内探测效率可达到95%以上^[25]。该系统可探测到远距离上、连续的、大量的IC和CG活动,弥补了陆面探测和卫星探测的不足。

广东省气象部门于2014年建立的广东省ENTLS在省内共设有17个站点,分别为梅州蕉岭、湛江徐闻、茂名电白、茂名信宜、揭阳、清远连州、云浮、湛江廉江、上川岛、广州白云、广州南沙、汕头南澳、肇庆怀集、江门新会、河源东源、惠州、韶关曲江,站点布放示意图如图1所示(三角形标注)。广东省布设的ENTLS探测范围主要集中在广东省及周边地区,此外还能探测到海上的强闪电。

为了评估ENTLS在台风“彩虹”全生命期的性能表现,本文还引入了华南区域闪电定位系统

观测数据。广东省气象部门建立的华南区域闪电定位网,采用了中国科学院空间科学与应用研究所研制的ADTD(Advanced Direction and Time of arrival Detecting system)闪电系统。单站探测距离约为150 km,ADTD闪电定位系统采用时差方向联合定位法,定位方式有四种,“二站振幅”、“二站混合”、“三站混合”和“四站算法”。用来探测云地闪,目前在广东省内共设有九个站点,站点布放

示意图如图1所示(圆点标注)。

闪电“flash”通常由回击“stroke”组成,Zhang等^[26]研究中指出是否聚类到闪电对研究TC闪电活动几乎没有影响,所以文中ENTLS和ADTD未根据时空阈值进行闪电聚类,以回击来表示闪电活动。台风定位时刻 t 后1 h内的闪电表示该时刻的闪电。

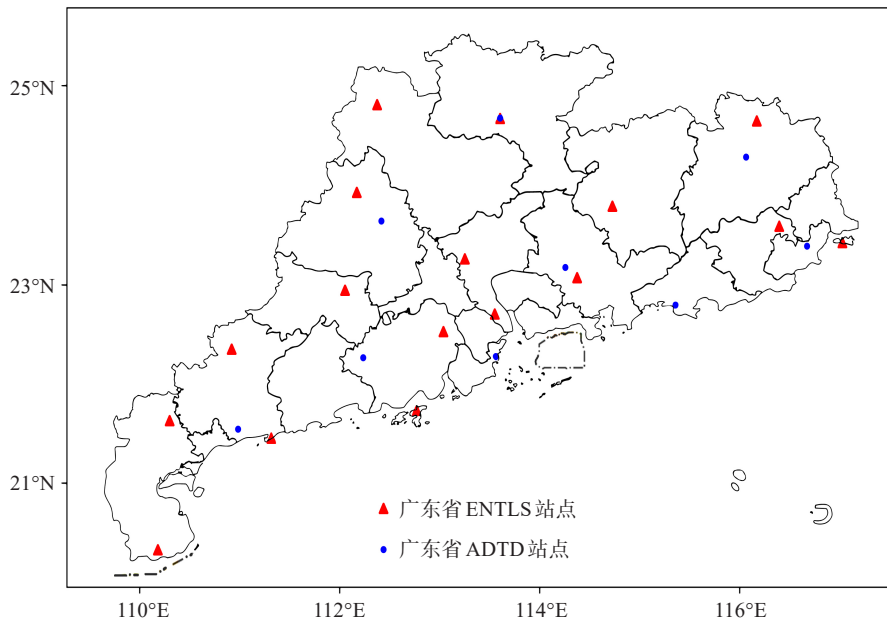


图1 广东省闪电定位网站点位置分布图

ENTLS:红色三角;ADTD:蓝色圆点。

2.2 TC资料

TC资料来源于自CMA-STI热带气旋最佳路径集,包括时间间隔为6 h中心定位(经纬度)、最低气压和最大风速。为方便下文的数据统计和分析,本文采用双线性插值法将台风中心位置插值为1 min一次的数据,用三次样条插值法得到1 h的中心最低气压、最大风速。本文对TC强度的划分,是参照国家标准《热带气旋等级》(GB/T19201-2006),使用差值后的每小时中心最大风速数据来划分,和原始数据的定级会略有出入。

2015年10月1日09时(世界时,下同),原位于菲律宾东部的西太平洋海域的热带云团加强为热带低压并快速向西北方向移动,1日18时加强为1522号热带风暴“彩虹”,2日02时穿过菲律宾群岛进入南海中部海面,12时加强为强热带风暴,3日06时加强为台风,15时加强为强台风,4日加强为超强台风,并于4日06时10分在广东省湛江市

坡头区沿海地区登陆,登陆时其中心附近最大风力 $52 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (16级),中心最低气压935 hPa。登陆后,“彩虹”继续向西北方向移动,于4日10时从湛江廉江市移入广西博白县境内,并减弱为台风,14时减弱为强热带风暴,4日19时减弱为热带风暴,5日01时减弱为热带低压,06时减弱为低压区。图2为台风“彩虹”(2015年10月1日17时—4日23时)期间的路径图和登陆前10月4日06时云顶温度图。

本文分析的时段是台风“彩虹”从生成到消亡整个生命期(10月1日17时—4日23时),共79 h。生成阶段(TS-STs),10月1日17时—3日05时,共37 h;增强阶段(TY-SuperTY),10月3日06时—4日06时,共25 h;减弱阶段(STY-TS),10月4日07时—4日23时,共17 h。台风的直径一般为600~1 000 km,最大可达2 000 km,最小只有100 km^[27]。根据卫星云图,计算最强时刻TC从眼区至

外围云带的距离,判断台风“彩虹”的最大直径约为800 km,包含绝大部分的雨带。陈联寿等^[28]定义距TC中心100 km内为内核,100~200 km为内雨带,200~1 000 km为外雨带;但由于台风个体

差异,TC结构和雨带范围会略有不同。从台风“彩虹”的空间分布特征来看,本文取距离中心80 km为内核,80~160 km为内雨带,160~800 km为外雨带。

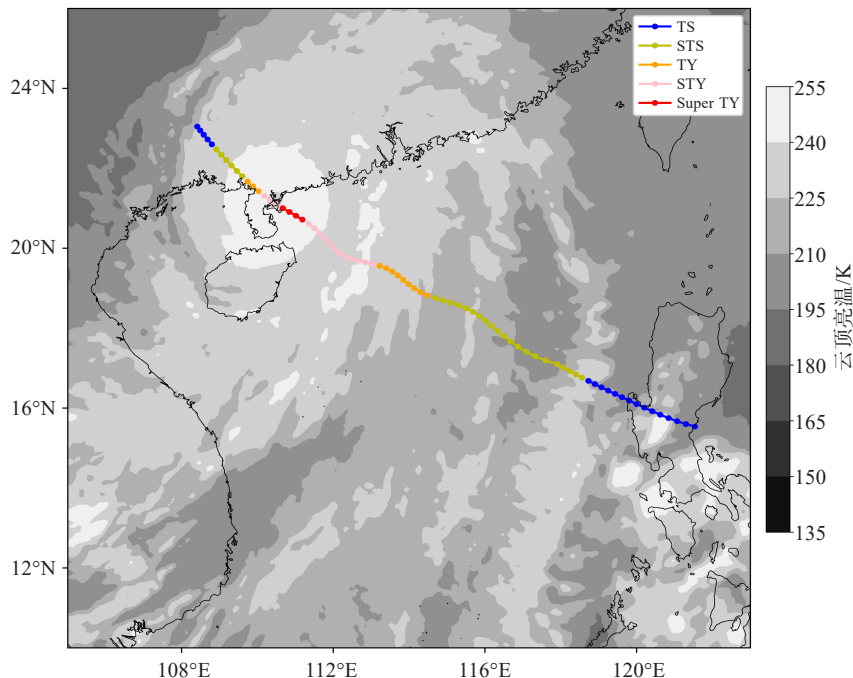


图2 台风“彩虹”路径和强度图(2015年10月1日17时—10月4日23时)叠加10月4日06时云顶温度图(单位:K)

2.3 GPM/DPR 卫星资料

全球降水观测计划(GPM)是美国国家航天航空局和日本宇宙航空研究开发机构主导的新一代卫星观测项目,为热带降雨观测任务(TRMM)的升级版本,其目标是实现对全球范围的降水观测。GPM核心观测平台搭载了全球首个星载双频卫星雷达DPR,工作频段分别为Ku和Ka段(13 GHz和35 GHz),同时搭载了一个多波段(10~183 GHz)的锥扫微波成像仪GMI。主要参数^[29]:KuPR的扫描宽度为245 km,天线扫描角 $\pm 17^\circ$,垂直分辨率250 m;KaPR的扫描宽度为120 km,天线扫描角 $\pm 8.5^\circ$,垂直分辨率为250 m或500 m。水平分辨率均为5.2 km,探测高度约为19 km。卢美圻等^[30]得出星载双频卫星雷达DPR和地面S波段雷达探测台风“彩虹”的结果十分相似,说明GPM/DPR数据在研究“彩虹”可靠性高。文中所用数据主要为2A-DPR产品,包括三维的衰减订正后反演的降水反射率因子、降水强度、雨滴谱以及二维的回波顶高、零度层高度。

3 ENTLS系统探测性能分析

在闪电数据探测效率评估方法方面的研究中^[31],是通过建立特定的时间和空间窗口来判定对比系统数据中的同一次闪电。时间和空间窗口主要是根据各系统数据的特性来选取,时间窗口的选取范围介于 ± 1 s^[32]至 ± 0.5 ms^[31],而对空间窗口设置的典型值范围一般为50~100 km。基于前人研究经验和两套数据的特性,文中将时间窗口选取为1 s,将空间窗口半径取为50 km。如果存在ENTLS系统与ADTD系统中探测的闪电发生时间差少于等于1 s,且两者的空间距离小于等于50 km的单次闪电,则将两套系统中对于这次闪电的数据进行匹配,并视其为同一次闪电。

本文参照不同闪电系统间的相互对比^[33](ENTLS系统与ADTD系统),来对ENTLS系统的性能进行评估。将台风“彩虹”10月1日17时—4日23日期间发生在广东省及周边地区的两套系统

探测的闪电进行统计,得到的结果列在表1中,台风“彩虹”全生命期,ENTLS探测到的地闪回击数是37 501,ADTD探测到的地闪回击数是3 468,ENTLS的探测总数是ADTD的10.8倍。同时根据上文提到的评估方法,两套系统匹配回击数是

2 568,回击匹配数占ENTLS总回击数的百分比(ADTD相对ENTLS系统的探测效率)为7%,回击匹配数占ADTD总回击数的百分比(ENTLS相对ADTD系统的探测效率)为74%。相比而言ENTLS探测到的信息更多,探测性能更高。

表1 2015年10月1日17时—4日23时广东及周边地区ENTLS与ADTD探测的地闪回击数和匹配的回击数

| ENTLS地闪回击数(ADTD相对探测效率) | ADTD地闪回击数(ENTLS相对探测效率) | 匹配回击数 |
|------------------------|------------------------|-------|
| 37 501(7%) | 3 468(74%) | 2 568 |

综上所述,ENTLS数据不仅能检测到洋面上、连续的、大量的IC和CG活动,能精准地捕捉到更多闪电的信息,且在台风“彩虹”全生命期的相对探测效率为74%,说明ENTLS闪电数据在台风“彩虹”闪电的研究中可信度是较高的。相比CG而言,全闪更能反映与风暴结构和微物理相关的信息^[34],且能预测TC强度的变化^[35],因此本文没有将地闪和云闪分类进行探讨。

4 闪电活动的径向分布特征

4.1 闪电活动的概况

台风“彩虹”全生命期共发生闪电122 095次,闪电频次 $1\ 545.5\ \text{h}^{-1}$ 。其中生成阶段闪电频次 $1\ 818.8\ \text{h}^{-1}$,增强阶段闪电频次 $1\ 094.2\ \text{h}^{-1}$,减弱阶段闪电频次 $1\ 614.4\ \text{h}^{-1}$,闪电频次最多的发生在TC生成阶段。全生命期发生的闪电次数,有600次发生在内核,累计闪电密度 $0.029\ 9\ \text{fl}\cdot\text{km}^{-2}$,

1 112次在内雨带,累计闪电密度 $0.018\ 4\ \text{fl}\cdot\text{km}^{-2}$,120 383次发生在外雨带,累计闪电密度 $0.062\ 4\ \text{fl}\cdot\text{km}^{-2}$,外雨带覆盖的空间面积大,是闪电密度的重要贡献原因。

图3为闪电活动的地理空间分布,闪电密度为单位格点内的闪电次数。生成初期(图3a),闪电活动并不明显,强度增强到强热带风暴级别,闪电活动激增,路径南北两侧呈不同的分布形态,南侧密集区呈散点状分布,近海南岛海域为最大密度中心,北侧密集区呈片状分布在 $115\sim 120^\circ\text{E}$, $18.5\sim 22.5^\circ\text{N}$ 区域;增强阶段(图3b),南侧闪电分布较分散,北侧呈螺旋带状分布,闪电高密度区集中在东北侧,为珠江口东部到惠州沿海一带及惠州近海海域、汕尾内陆及近海地区、台湾海峡南部海域;减弱阶段(图3c),闪电集中在TC路径东侧的近陆地的近海区域,当台风趋近海岸时,可能受到地形影响辐合增强,从而使得近海岸区域的对流活动明显增强。

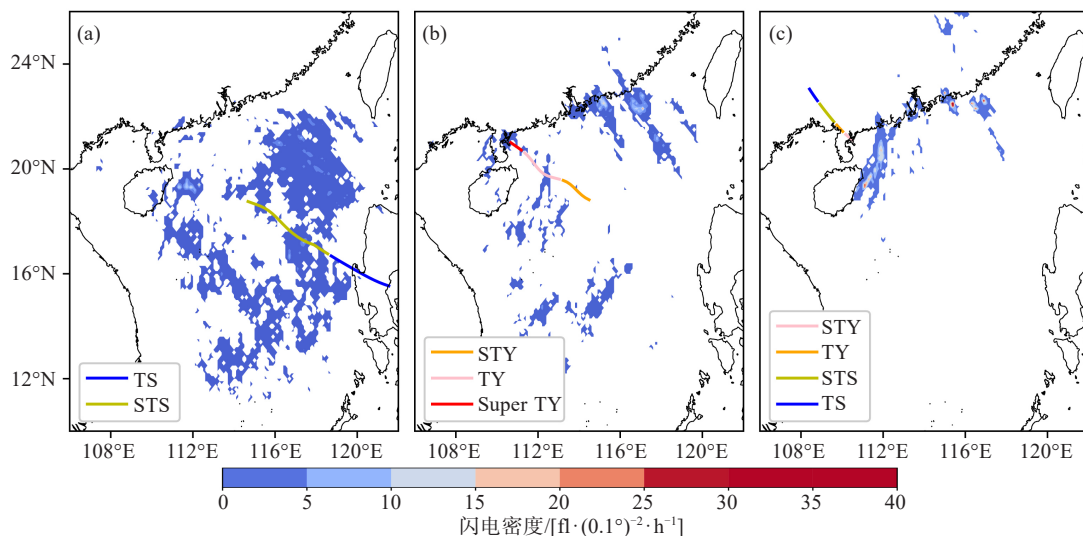


图3 不同时期距台风“彩虹”中心800 km内的闪电密度的地理空间分布
路径每点代表每小时位置。a.生成阶段;b.增强阶段;c.减弱阶段。

4.2 闪电活动径向分布特征

以台风中心为原点,每10 km取一个环,计算该环内的闪电密度,得到不同时期距台风“彩虹”中心800 km内的累计闪电密度的径向空间分布(图4)。从图4c可见,增强阶段呈现出明显的三圈结构特征,在台风中心区域(0~80 km)存在一个闪电密集区,同潘伦湘等^[6]结果吻合,密度中心偏北。而距中心80~160 km范围内少有闪电活动,在东南和东北部有零星分布的闪电发生。大于160 km的外围雨带的闪电活动又显著增加,东南和东北部外雨带的闪电活动尤为突出,呈现一个不连续的螺旋状分布。外围雨带中闪电的这种非对称性,除了受环境因子的影响^[5],作为云起电的核心因子,云内凝结核的分布情况有较大的关系^[36]。

全生命期(图4a),总体上也有较好的三圈结

构。台风内核区和外雨带为闪电密集区,内雨带除了西南方向,有一小片闪电密集区,其余方向几乎没有闪电活动。内雨带西南方向的闪电活动在TC生成阶段有明显体现,可能与该时期的台风结构分布有一定关系。同时生成阶段(图4b)的TC闪电活动有明显的不对称性,TC的西部闪电活动明显多于东部,且西边闪电活动在内核、内雨带和外雨带均有体现,而东边的闪电主要集中在外雨带区域,东北部在距TC中心200~400 km有一片密集带,东南部在距TC中心400~700 km范围内有分散状的密集区。相比其他时期的闪电活动,减弱阶段(图4d)的闪电活动分布虽少,但是闪电密度最大。主要集中在距TC中心东部,东南方向距TC中心200~300 km范围内有片状密集区,其余云带的闪电活动呈螺旋式的零星分布。

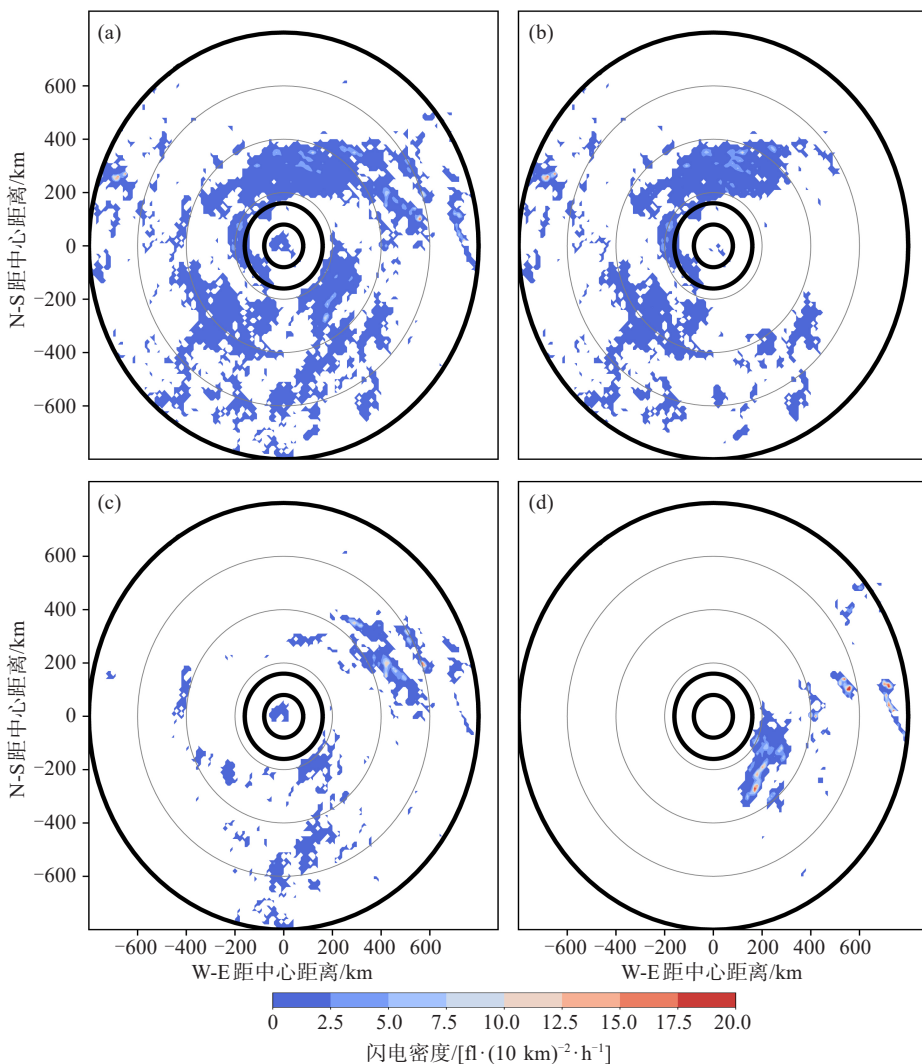


图4 不同时期距台风“彩虹”中心800 km内的闪电密度的径向空间分布 a. 全生命期;b. 生成阶段; c. 增强阶段;d. 减弱阶段。黑圆线半径分别为80 km、160 km、800 km,灰圆线半径为每200 km往外递增。

4.3 不同区域闪电活动随时间的变化特征

为了进一步深入研究闪电活动的三圈结构,本文径向上分内核、雨带和外雨带分别研究,由图5可见,在台风“彩虹”生成阶段,最大风速(中心气压)呈现阶梯式上升(下降)的趋势。10月2日19时开始,最大风速就开始快速上升,持续至10月3日19时。之后强台风TC的最大风速缓慢上升,由于强台风的MPI(最大潜在强度)小,使得增长速度减慢。10月3日23时再次加快增长速度,登陆广东前1小时,最大风速和中心气压同时达到了峰值(谷值),10月4日06时登陆广东,最大风速(中心气压)开始快

速下降(上升),直到16时开始放缓减弱速度。

图5为内核、内雨带和外雨带的闪电活动随时间变化分布,同图4类似,台风“彩虹”在增强阶段有很好的三圈结构,内核为闪电密集区,内雨带几乎没有闪电,外雨带的闪电数量和闪电密度最多。内核区(图5a)的闪电主要集中发生在TC登陆广东前6 h内,也是TC强度发展到最强时期(10月4日01—06时)。在台风最大风速达到峰值的前1 h,内核闪电活动爆发(10月4日04时)。其中在TC快速增长时期(10月2日19时—3日19时)和TC登陆1 h后,内核几乎没有闪电活动。

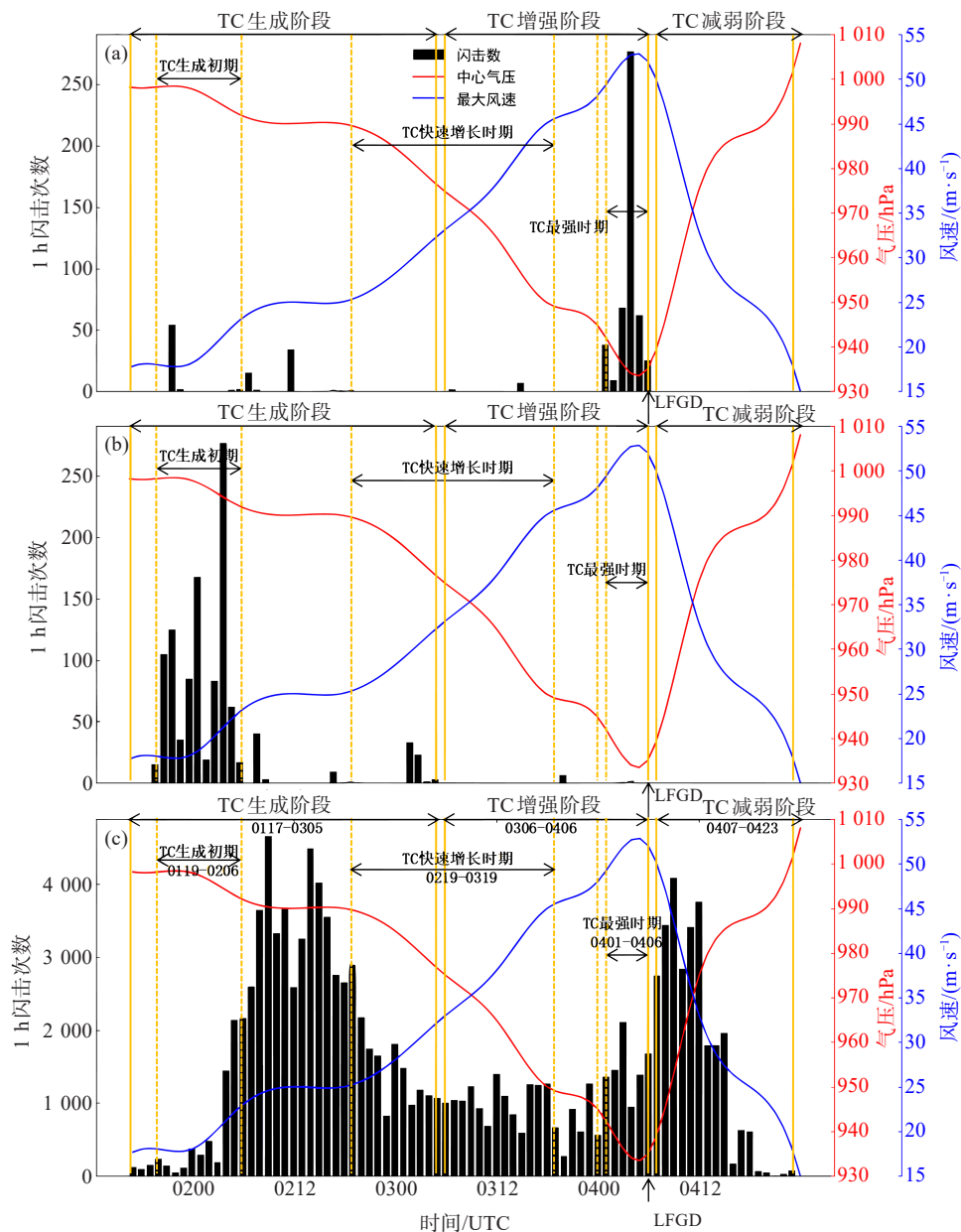


图5 闪电频次、最大风速和中心气压随时间的逐小时变化 a. 内核; b. 内雨带; c. 外雨带。 LFGD代表登陆广东的时间。

内雨带(图 5b)在 TC 生成初期(10月 1 日 19 时—2 日 06 时)有一个闪电活动集中期,可能是由于初期 TC 云系小,距 TC 中心 80~160 km 属于理解意义上的外雨带。随 TC 云系的发展,后期内雨带几乎没有闪电活动。

外雨带(图 5c)是 TC 产生闪电最多的区域,闪电密度也最大。前期外雨带闪电相对稀少,之后波动上升,在初始阶段中期达到一个峰值。从图 6 更直观看出外雨带闪电密度峰值出现在 10 月 2 日 15 时,随后再波动下降,闪电活动减弱阶段与 TC 快速增长时期接近,然后 TC 中心靠近陆地后,大部分的外雨带处于陆地上,闪电活动再次增加,直到 TC 登陆后闪电活动激增达到次峰值。

图 6 中,TC 生成初期(10 月 1 日 19 时—2 日 06 时),TC 闪电密度小,主要集中在距中心 80~200

km 的区域。闪电密度中心随时间逐渐远离 TC 中心,从距中心距离 200 km 向 400 km 范围内传播,10 月 2 日 15 时在 320 km 附近达到峰值。TC 于 10 月 2 日 09 时升级为强热带风暴,闪电密度有两个峰值区,高值区位于距中心 700 km 附近(西北向),次高值区在距中心 200 km 附近。在 TC 快速增长时期,闪电密度也明显减弱,中心位置随时间向外扩展的速度减慢。当 TC 强度发展到最强时期(10 月 4 日 01—06 时),可看到闪电密度有明显的螺旋状结构,第一段集中在 200~400 km,第二段为 400~600 km,第三段为 600~800 km,且这种结构登陆前后 1 h 最明显。登陆减弱为台风后闪电密度主要集中在 200~400 km 和 600~800 km,近中心区域的外雨带闪电密度重新加大。

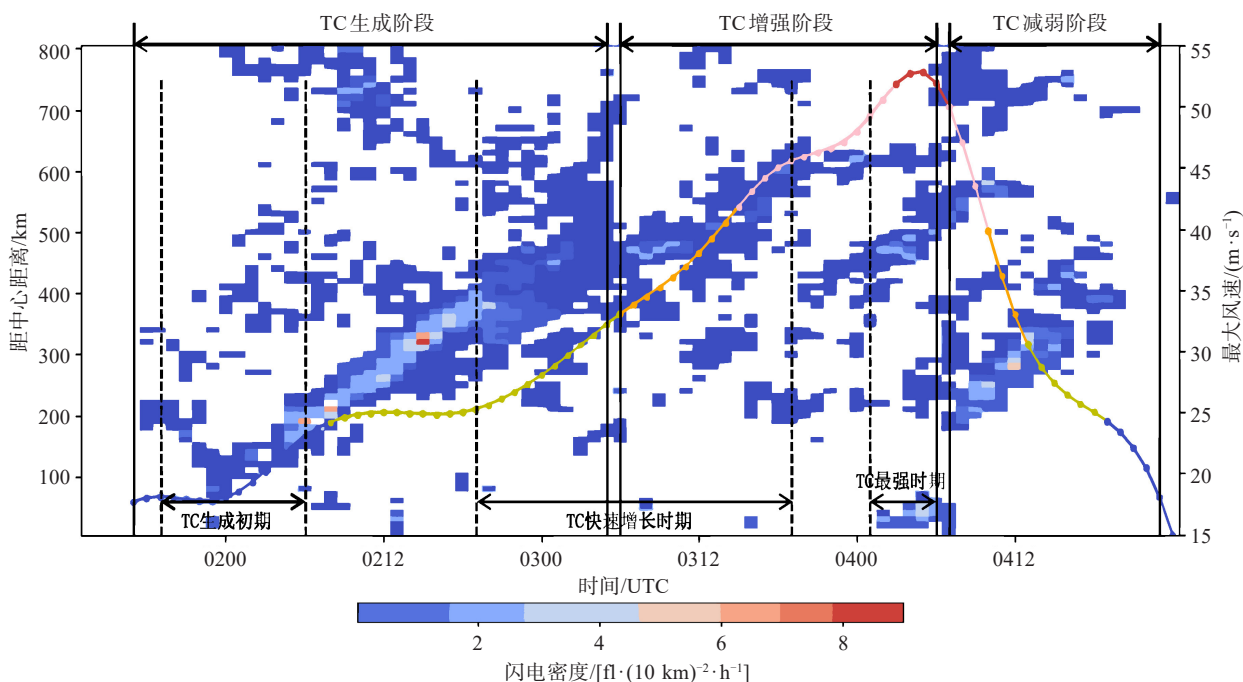


图 6 距 TC 中心不同距离上闪电密度随时间的变化 闪电密度数值低于 0.02 的区域设为白色;彩色折线为 TC 最大风速,不同颜色代表 TC 的不同强度等级。蓝色:热带风暴;黄色:强热带风暴;橙色:台风;粉色:强台风;红色:超强台风。

4.4 径向分布随强度的变化特征

图 7 为不同强度等级时闪电活动的径向分布变化, a 为闪电密度, b 为闪电频次, c 为对应等级时不同距离上的闪电次数占比。黄色表示强度升级为 TS-STY 级别, 绿色表示强度升级为 TY-STY 级别, 蓝色表示强度为 SuperTY 级别, 红色表示强度降级为 TY-STY 级别(用 STY-TY 表示), 黑色表示强度降级为 TS-STY 级别(用 STS-TS 表示)。

可见 TC 强度较弱时, 内核基本没有闪电活动, 内核闪电主要出现在 SuperTY 等级, 该等级的 TC 约 93% 的闪电是发生在外雨带, 与张志伟等^[4]分析台风“山竹”闪电略有不同。

内雨带的闪电密度、闪电频数和闪电占比非常小, 只有在 TC 强度为 TS-STY 级别才会出现, 且相比其他径向距离的闪电占比是最少的。

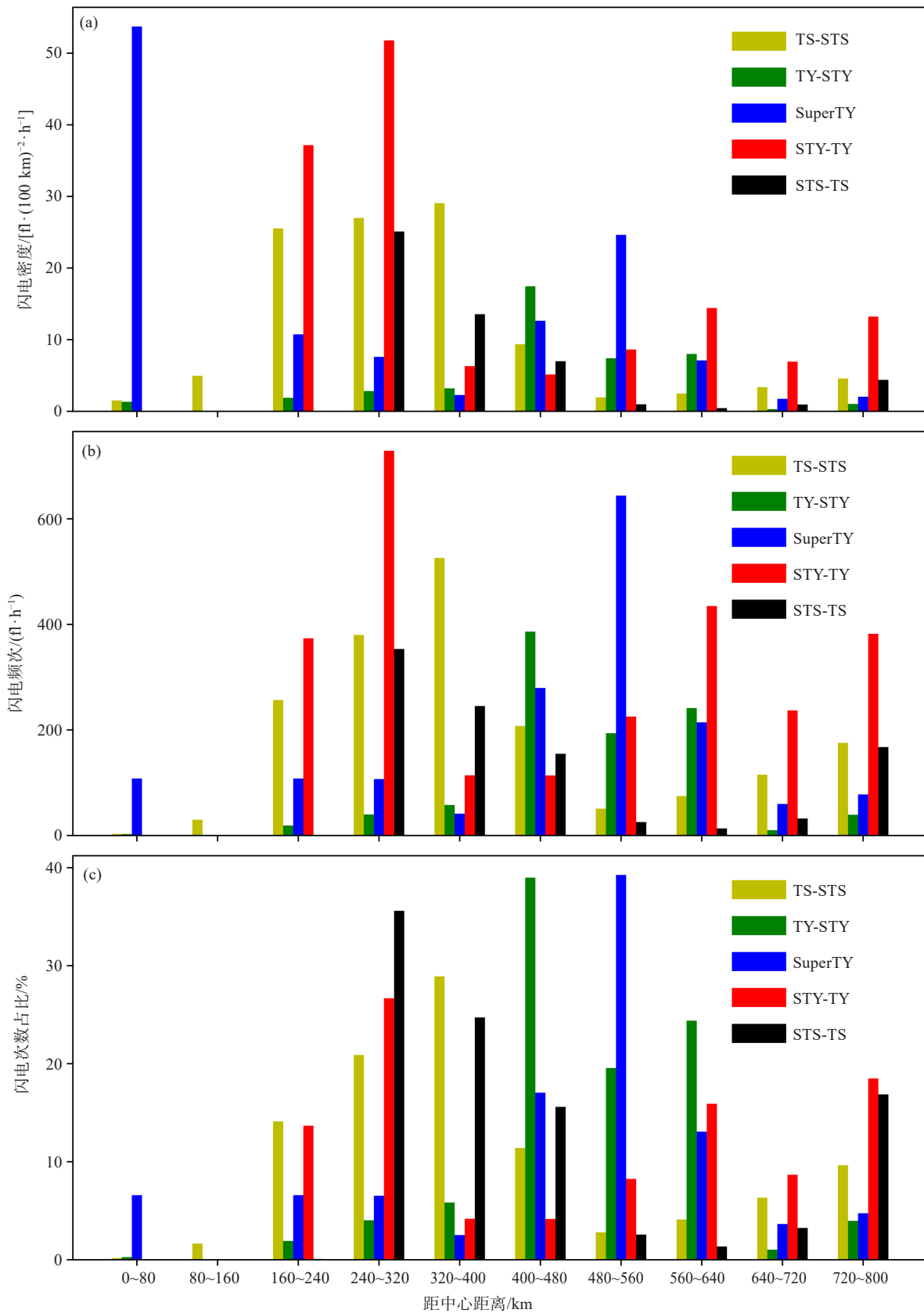


图7 不同强度台风“彩虹”闪电活动的径向分布特征 a. 闪电密度;b. 闪电频次;c. 径向距离的闪电次数占比。
 黄色表示强度第一次为TS-STS级别,绿色表示强度第一次为TY-STY级别,蓝色表示强度为SuperTY级别,红色表示强度第二次为TY-STY级别(用STY-TY表示),黑色表示强度第二次为TS-STS级别(用STS-TS表示)。

外雨带各时期的闪电数量、闪电密度和闪电占比变化基本一致。从内雨带向外雨带过渡,TC强度为TS-STs、STs-TS和STY-TY级别的闪电活动开始激增。不同等级闪电活跃区域不同,TS-STs等级时在160~400 km, TY-STY等级时在400~480 km, SuperTY等级时在480~560 km, STY-TY等级时在160~320 km, STs-TS等级时在240~400 km。

总体而言,内核区闪电主要出现在SuperTY等级,内雨带的闪电活动在TS-STs级别才有体现,外雨带的闪电活动不同等级的活跃区域不同,且随着强度的增强,活跃区沿径向方向向外移动,强度减弱,闪电活动区域缩小至160~400 km。

5 闪电活动和雷达回波特征分析

台风起电的原因又是什么呢?研究表明雷暴云中的微物理结构对云内起电过程和电荷结构的形成有重要影响^[23]。Black等^[20]的研究发现软雹、冰晶和云滴之间的相互作用可导致电荷的转移,是台风起电的微物理原因。杨美荣等^[37]研究西北太平洋热带气旋的闪电活动发现雷达反射率高值区对应闪电活动峰值区,但闪电频数和回波强度并非线性关系。基于前人的观测和研究结论,本节使用GPM/DPR卫星资料,从动力和微物理环境的影响因子出发,选取了3个相关的雷达回波参

数:雨强、回波顶高度和零度层高度。分析闪电活动和3个参数在三个阶段特殊时次,10月1日17:54(生成阶段)、10月3日17:43(成熟阶段、登陆前)、10月4日07:36(减弱阶段、登陆后)的结构特征和关系。基于考虑雷暴云的平均生命时长约半小时,本文定义某时刻后半小时的闪电表示该时次的闪电活动。

5.1 闪电活动和雨强

5.1.1 闪电活动和雨强水平结构

GPM核心观测平台在生成阶段,10月1日17:54捕捉到TC在菲律宾吕宋岛上完整的结构(图8a),此刻还没有台风眼形成,吕宋岛东南部为雨强超 $20\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的降水,被扫描到的区域并没有观测到闪电活动,而是菲律宾近海海域发现了零星的闪电活动;在成熟阶段(图8b)台风“彩虹”登陆广东前,10月3日17:43扫描到较完整的结构,台风眼清晰可见。大范围的降水主要集中在内核、内雨带,但没有探测到闪电的活动。在外雨带线段NB区域附近有密集的闪电活动,对应的雨强中心较分散,距中心400~600 km区域有分散的闪电活动;在台风减弱阶段(图8c)登陆后,10月4日07:36扫描到的台风眼已经不清晰了。降水分布在内核、内雨带及外雨带区域,雨强超过 $20\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的大值区集中在距台风中心100~300 km区域。海南岛到珠江口以西的海域有条状密集的闪电活动,与雨强大值区能较好对应。

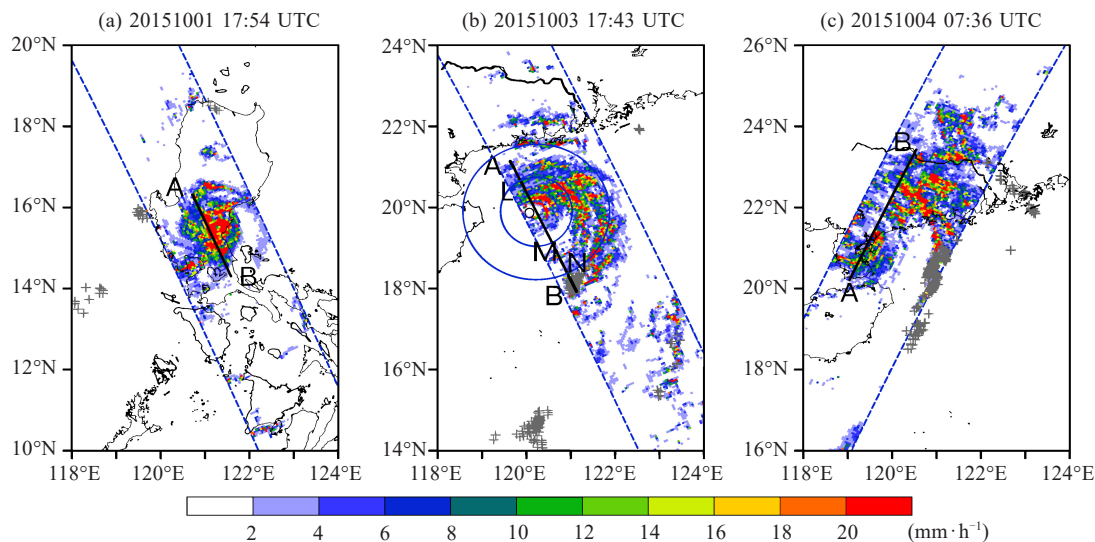


图8 GPM/DPR观测到的台风降水率水平分布 a. 10月1日17:54; b. 10月3日17:43; c. 10月4日07:36。AB为做剖面的线段,蓝色实线为内核区和内雨带,b中O为台风中心, L、M为AB与内圈的交点、N为AB与外圈的交点,加号代表闪电。

5.1.2 降水反射率因子、粒子浓度与大小的垂直结构

由于10月3日17:43扫描结构较完整,可对比有闪电和没闪电的降水结构特征。沿图8b中AB线段剖面得到反射率-粒子浓度-粒子大小的径向垂直结构图(图9),图中粒子浓度做了标准化处理,粒子浓度数值介于25~47,粒子直径范围在0.5~2.2 mm之间。由于闪电是雷暴云中的微物理过程发展起来的,本文仅对TC对流性降水做分析。眼区(图9a)没有降水,内核区、近N点内雨带

和近B点外雨带的降水反射率因子随高度降低增大,为对流性降水;内核区的回波高度近10 km,内雨带的回波仅发展到8 km,外雨带的回波顶高近13 km。内核区和外雨带反射率因子超过39 dBZ的高度均可达5.5 km,研究表明,对流降水5~7 km为冰水混合层^[38-39]。对比混相层的粒子浓度和粒子大小(图9b、9c)发现,内核区的粒子大小和浓度均小于外雨带,其中外雨带有密集的闪电活动,内核区没有闪电活动。因此在强上升气流下,混相层大粒子的输送有利于闪电的发生。

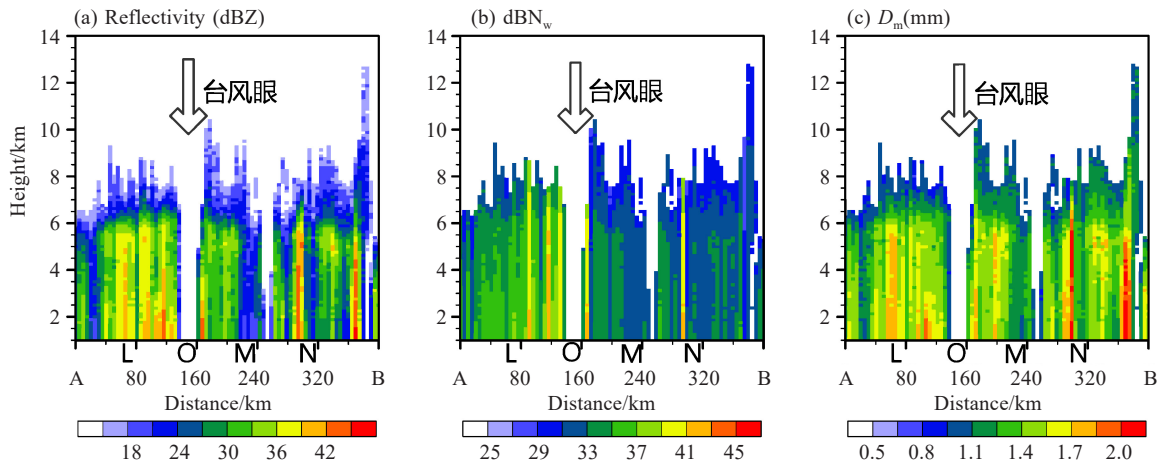


图9 沿图8b中的AB线段剖面得到反射率-粒子浓度-粒子大小的径向垂直结构

a. 反射率因子;b. 粒子浓度;c. 粒子直径。

5.2 闪电活动与回波顶高

回波顶高度是降水云中上升气流强弱的反映,对流云发展越旺盛,云顶高度越高,越有利于闪电产生,即必须通过强的上升气流把过冷水或大冰晶粒子向上输送^[21]。从上节分析可见,回波顶高为8~10 km的区域没有闪电活动。进一步分析发现,生成阶段(图10a)台风主体位于陆地上,内核区回波顶高可达10 km以上,但没有闪电活动;增强阶段(图10b)台风主体处于洋面,内核区、部分内雨带和外雨带回波顶高度大于10 km,仅外雨带有闪电活动;减弱阶段(图10c)台风主体一半在洋面,一半在陆地,部分内核区和外雨带回波顶高度超10 km的区域,但闪电活动只出现在外雨带,外雨带的回波顶高与闪电活动的分布范围有较好的匹配度。即回波至少要发展到10 km以上,才有闪电发生的机率。当回波顶高均超10 km时,闪电发生在外雨带的概率明显大于内核区。台风发展成熟时,靠近陆地闪电的活动明显增强。

5.3 闪电活动与零度层高度

零度层亮带反映了层状云降水中存在明显的冰水转换过程,亮带以上的降水以冰晶、雪花(固态粒子)为主,亮带以下以雨滴(液态粒子)为主。零度层高度也可反映大气热力情况,高度越低,低层气温较低,不利于雷暴云的对流发展。地面温度较高时,雷暴云内负电荷分布的垂直厚度较小,电荷最大密度高于地面温度低的区域^[23]。

图11中三个时次的零度层高度值介于4.7~5.8 km之间,10月1日17:54处于TC生成阶段(图11a),雨强和回波顶条件有利,零度层高度的值介于4.8~5.0 km之间,扫描到的区域没有闪电活动;零度层高度分布沿径向递减(图11b),眼区气温高,零度层高度也最高,出现闪电活动的高度介于5.1~5.3 km;在减弱阶段登陆后,对流发展高度降低,零度层高度整体随之降低,闪电活动区域的零度层高度为5.1~5.2 km。零度层高度超过5.0 km为闪电发生的前提条件。

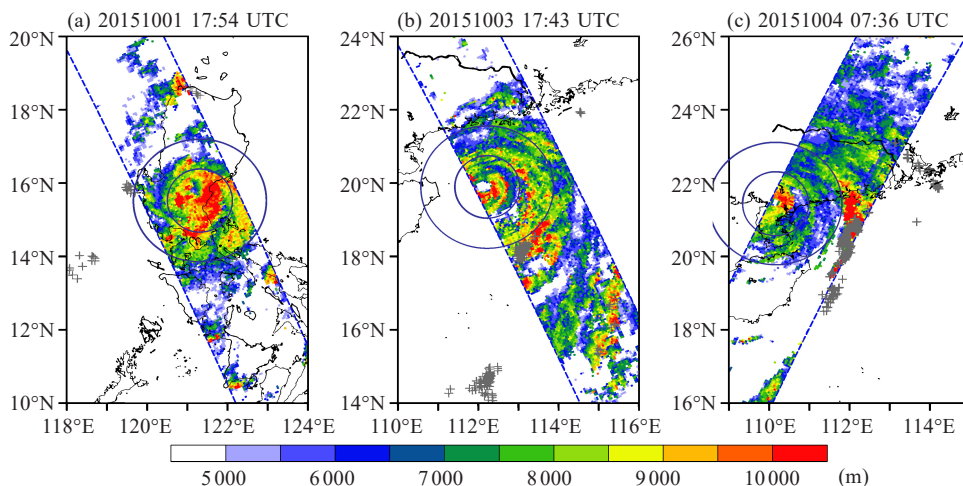


图10 GPM/DPR观测到的台风回波顶高度的水平分布 a. 10月1日 17:54; b. 10月3日 17:43; c. 10月4日 07:36。蓝色实线为内核区和内雨带,加号代表闪电。

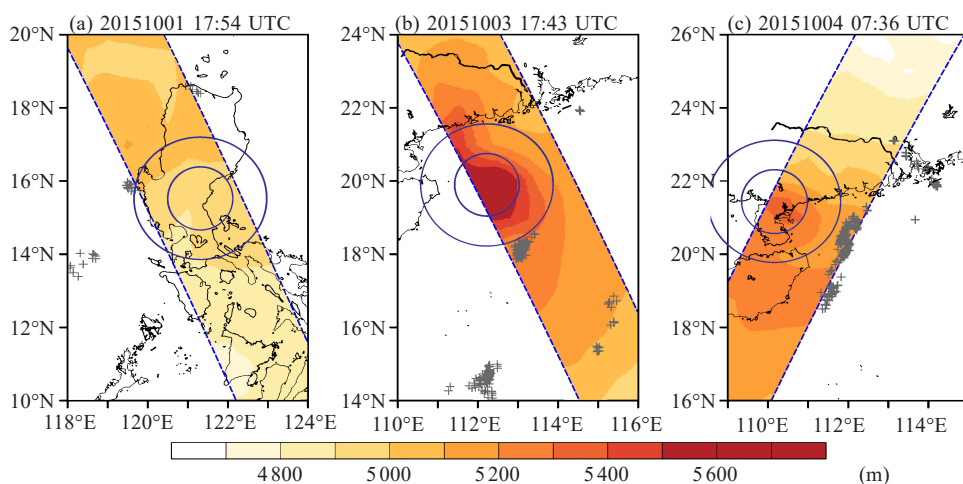


图11 GPM/DPR观测到的台风零度层高度的水平分布 a. 10月1日 17:54; b. 10月3日 17:43; c. 10月4日 07:36。蓝色实线为内核区和内雨带,加号代表闪电。

综合以上分析,零度层高度超过5 km为闪电发生的前提条件,且回波顶高至少要发展到10 km以上,混相层中有过冷水或大冰晶粒子,才有利于冰水混合物的向上输送。图9外雨带闪电的降水垂直结构发现,在云中起电层5~9 km(0~-20℃)内,5~7 km高度层内雷达反射率剧烈减弱,由于液态粒子间的碰并增大过程随着高度的逐渐消失,大的液态水粒子的减少^[40],雷达反射率随高度减弱明显;大约7 km以上反射率减小速度变慢,由于7 km以上粒子数量和大小随高度减少速度变慢。由此猜想起电层内,主要表现为过冷水和软雹间碰撞冻、冰晶和软雹间的碰撞过程。

6 结论和讨论

本文利用ENTLS资料、TC路径数据、GPM/DPR卫星资料。对2015年台风“彩虹”从生成到消亡全生命期中的闪电活动和雷达回波特征进行了分析,得到如下结论。

(1) TC闪电在增强阶段(TY-SuperTY)的TC呈现出明显的三圈结构特征,内核区(0~80 km)存在一个闪电密集区,密度中心偏北;内雨带(80~160 km)内少有闪电活动;大于160 km的外围雨带的闪电活动又显著增加,呈现一个不连续的

螺旋状分布;生成阶段TC闪电三圈结构特征不明显,在内核、内雨带和外雨带均有体现;减弱阶段的闪电活动则集中在外雨带。

(2) 径向分布随时间的变化特征表明,内核闪电与外雨带闪电的活跃期不一致,在台风最大风速达到峰值的前1 h,内核闪电活动爆发。10月2日15时闪电密度在320 km附近达到峰值;在TC快速增长阶段(10月2日19时—3日19时),中心位置随时间向外扩展的速度减慢;TC强度发展到最强时期(10月4日01—06时),闪电密度有明显的螺旋状结构。

(3) 径向分布随强度的变化特征得出,内核区闪电主要出现在SuperTY等级,内雨带的闪电活动在TS-STC级别才有体现,外雨带的闪电活动不同等级的活跃区域不同,且随着强度的增强,活跃区沿径向方向向外移动,强度减弱,闪电活动区域

缩小至160~400 km。

(4) 分析闪电活动和雷达回波参数关系表明,当零度层高度超过5 km,且回波顶高发展到10 km以上,混相层中有过冷水或大冰晶粒子,才有利于闪电的发生。

上述结论使我们加深对闪电活动特征的了解,同时通过分析台风内部降水结构和影响闪电形成的雷达回波参数,加强对闪电形成机制的认识,对雷达数据应用在闪电的监测和预警起参考作用。但本文只针对一个台风个例进行了研究,其中结论有待于通过更多个例研究进行论证。

致谢:佛山市龙卷风研究中心白兰强博士对本文提出修改意见,广东省气象探测数据中心吴兆雄高级工程师提供广东省ENTLS和华南ADTD闪电定位网的相关资料,特此感谢。

参 考 文 献:

- [1] 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): 16 665-16 676.
- [2] MOLINARI J, MOORE P, IDONE V. Convective structure of hurricanes as revealed by lightning locations[J]. *Mon Wea Rev*, 1999, 127(4): 520-534.
- [3] 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.
- [4] 张志伟, 郭凤霞, 初雨, 等. 超强台风“山竹”(1822)的闪电活动特征[J]. *大气科学*, 2023, 47(2): 399-416.
- [5] ZHANG W, ZHANG Y, ZHENG D, et al. Quantifying the contribution of tropical cyclones to lightning activity over the Northwest Pacific [J]. *Atmos Res*, 2020, 239: 104906.
- [6] 潘伦湘, 鄧秀书, 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.
- [7] LYONS W A, KEEN C S. Observations of lightning in convective supercells within tropical storms and hurricanes[J]. *Mon Wea Rev*, 1994, 122(8): 1 897-1 916.
- [8] SQUIRES K, BUSINGER S. The morphology of eyewall lightning outbreaks in two category 5 hurricanes[J]. *Mon Wea Rev*, 2008, 136(5): 1 706-1 726.
- [9] STEVENSON S N, CORBOSIERO K L, MOLINARI J. The convective evolution and rapid intensification of Hurricane Earl (2010)[J]. *Mon Wea Rev*, 2014, 142(11): 4 364-4 380.
- [10] 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): 4 072-4 089.
- [11] DEMARIA M, DEMARIA R T, KNAFF J A, et al. Tropical cyclone lightning and rapid intensity change[J]. *Mon Wea Rev*, 2012, 140(6): 1 828-1 842.
- [12] 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.
- [13] PRICE C, ASFUR M, YAIR Y. Maximum hurricane intensity preceded by increase in lightning frequency[J]. *Nature Geosci*, 2009, 2(5): 329-332.
- [14] 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.
- [15] 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): 3 789-3 801.
- [16] 言穆弘, 刘欣生, 安学敏, 等. 雷暴非感应起电机制的模拟研究I. 云内因子影响[J]. *高原气象*, 1996, 15(4): 425-437.
- [17] 张义军, 言穆弘. 对流风暴中大气电涡度模式计算[J]. *高原气象*, 1991, 10(3): 293-304.
- [18] 孙安平, 张义军, 言穆弘. 雷暴电过程对动力发展的影响研究[J]. *高原气象*, 2004, 23(1): 26-32.
- [19] BLACK R A, HALLETT J. Observations of the distribution of ice in hurricanes[J]. *J Atmos Sci*, 1986, 43(8): 802-822.
- [20] BLACK R A, HALLETT J. Electrification of the Hurricane[J]. *J Atmos Sci*, 1999, 56(12): 2 004-2 028.
- [21] REINHART B, FUELBERG H E, BLAKESLEE R J, 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.
- [22] 王芳, 肖稳安, 雷恒池, 等. 吉林地区一次雷暴云个例电和云微物理特征的模拟分析[J]. *高原气象*, 2009, 28(2): 385-394.
- [23] 赵鹏国, 周筠珺, 邓德文, 等. 雷暴微物理过程对电活动影响的数值模拟研究[J]. *高原气象*, 2013, 32(3): 884-893.
- [24] BITZER P M, BURCHFIELD J C. Bayesian techniques to analyze and merge lightning locating system data[J]. *Geophys Res Lett*, 2016, 43(24): 12 605-12 613.
- [25] ZHU Y, RAKOV V A, TRAN M D, et al. Evaluation of ENTLN performance characteristics based on the ground truth natural and rocket-triggered lightning data acquired in Florida[J]. *J Geophys Res Atmos*, 2017, 122(18): 9 858-9 866.
- [26] ZHANG W, HUI W, LYU W, et al. FY-4A LMI observed lightning activity in Super Typhoon Mangkhut (2018) in comparison with WWLLN data[J]. *J Meteor Res*, 2020, 34(2): 336-352.
- [27] 朱乾根, 林景瑞, 寿绍文, 等. *天气学原理和方法*(第3版)[M]. 北京: 气象出版社, 2000: 509-516.
- [28] 陈联寿, 丁一汇. *西太平洋台风概论*[M]. 北京: 科学出版社, 1979.
- [29] IGUCHI T, SETO S, MENEGHINI R, et al. GPM/DPR level-2 algorithm theoretical basis document[R]. NASA. <https://pmm.nasa.gov/resources/documents/gpmdpr-level-2-algorithm-theoretical-basis-document-atbd>, 2010, [2017-02-24].
- [30] 卢美圻, 魏鸣. GPM资料在分析“彩虹”台风降水垂直结构中的应用[J]. *遥感技术与应用*, 2017, 32(5): 904-912.
- [31] RODGER C J, WERNER S, BRUNDELL J B, et al. Detection efficiency of the VLF worldwide lightning location network (WWLLN): Initial case study[J]. *Ann Geophys*, 2006, 24(12): 3 197-3 214.
- [32] SERGIO F A, KRISTEN L C, THOMAS J G J. An evaluation of the Worldwide Lightning Location Network(WWLLN) using the National Lightning Detection Network(NLDN) as ground truth[J]. *J Geophys Res*, 2010, 115(D18): 206.
- [33] 郑嘉怡, 陆高鹏, 刘非凡, 等. 基于全球闪电定位网的江淮闪电定位网探测效率分析: 以台风“利奇马”为例[J]. *热带气象学报*, 2023, 39(1): 129-138.
- [34] BOCCIPPIO D J, CUMMINS K L, CHRISTIAN H J, et al. Combined satellite-and surface-based estimation of the intracloud-cloud-to-ground lightning ratio over the continental United States[J]. *Mon Wea Rev*, 2001, 129(1): 108-122.
- [35] FIERRO A O, MANSELL E R, ZIEGLER C L, et al. Explicitly simulated electrification and lightning within a tropical cyclone based on the environment of Hurricane Isaac (2012)[J]. *J Atmos Sci*, 2015, 72(11): 4 167-4 193.
- [36] 孙萌宇, 郗秀书, 刘冬霞, 等. 北京地区闪电活动与气溶胶浓度的关系研究[J]. *地球物理学报*, 2020, 63(5): 1 766-1 774.
- [37] 杨美荣, 袁铁, 郗秀书, 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.
- [38] 杜爽, 王东海, 李国平, 等. 基于双频星载降水雷达 GPM 数据的华南地区降水垂直结构特征分析[J]. *热带气象学报*, 2020, 36(1): 115-130.
- [39] 张廷龙, 郗秀书, 言穆弘. 青藏高原雷暴的闪电特征及其成因探讨[J]. *高原气象*, 2007, 26(4): 774-782.
- [40] 何会中, 程明虎, 周凤仙. 0302号鲸鱼台风降水和水粒子的三维结构特征[C]//中国气象学会2005年年会论文集. 北京: 中国气象学会, 2005: 15.

Analysis of Lightning Activity and Radar Echo Characteristics of Super Typhoon Mujigae (2015) Based on Multi-Source Data

YANG Yuting^{1,2}, YU Lefu^{1,2}, LIU Chao^{1,2}, CHEN Yilun³, LIU Tianao³

(1. Foshan Meteorological Service, Foshan, Guangdong 528000, China;

2. Foshan Tornado Research Center, and China Meteorological Administration Tornado Key Laboratory, Foshan, Guangdong 528000, China;

3. School of Atmospheric Sciences, Sun Yat-sen University, Zhuhai, Guangdong 519082, China)

Abstract: Utilizing data from the Earth Networks Total Lightning System (ENTLS), typhoon data from the CMA Tropical Cyclone Best Track Dataset, and GPM/DPR satellite data, this study analyzed lightning activity and radar echo characteristics throughout the lifecycle of Super Typhoon Mujigae. The findings indicate that: (1) During its intensification, the typhoon exhibited a distinct triple-ring structure, with a dense lightning zone in the inner core (0–80 km), sparse lightning activity in the inner rainband (80–160 km), and significantly increased lightning activity in the outer rainband extending beyond 160 km. (2) Temporal changes in the radial distribution reveal asynchronous inner core and outer rainband lightning activity. A surge in inner core lightning activity occurred one hour before the typhoon reached its peak wind speed. This surge peaked in terms of lightning density within a 320 km radius at 15:00 on October 2, 2015, during the genesis process. (3) Changes in intensity-related radial distribution show that inner core lightning primarily occurred in super typhoons, inner rainband lightning was evident only in tropical storms and strong tropical storms. Outer rainband lightning activity was showed different active regions of varying intensities. Moreover, as TC intensity increased, the outer rainband lightning activity expanded radially outward, and the area of lightning activity shrinks radial inward to 160–400 km range when the TC intensity decreases. (4) The relationship between lightning activity and radar echo parameters reveals that a zero-degree layer height exceeding 5 km was a prerequisite for the lightning of Typhoon Mujigae, and a cloud top height of at least 10 km was necessary for the upward transport of ice-water mixtures. The presence of supercooled water or large ice crystals in the mixed-phase layer was found to be conducive to lightning occurrence.

Key words: super typhoon; Mujigae; lightning; ENTLS; GPM/DPR