

超强台风“山竹”(1822)的闪电活动特征

张志伟, 郭凤霞*, 初雨, 邹迪可, 鲁鲜, 吴泽怡, 刘舟

中国气象局气溶胶-云-降水重点开放实验室/南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室/气候与环境变化国际合作联合实验室/气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 江苏南京 210044

摘要 为了进一步认识热带气旋(TC)全生命期中闪电的活动特征, 本文利用全球闪电定位网(WWLLN)资料、中央气象台的TC路径数据、风云四号A星(FY-4A)的相当黑体温度(TBB)数据和ERA5再分析资料, 研究了2018年登陆中国的最强台风“山竹”从生成到消亡全生命期中闪电活动的时空分布和随强度的变化特征, 探讨了闪电活动与风圈半径及下垫面的关系。结果表明: (1)“山竹”中的闪电活动有明显的三圈结构, 内核闪电密度最大, 内雨带几乎没有闪电, 外雨带闪电数量最多。内核闪电与外雨带闪电的主要发生时间不同, 外雨带在远海也能产生大量闪电。(2)闪电活动的方位分布与TC强度、所处地理位置及环境密切相关, 不同时期闪电方位分布不同。(3)闪电活动与风圈半径没有明确的关系, 闪电活动多发于风圈半径较小的东南和西南方位。(4)TC快速增强期间及前后, 内核闪电活动对TC强度增强具有一定的指示作用。此外, 内核闪电活动与对流强度呈现较好的相关性。(5)岛屿和陆地的存在对于强对流的发展有着极重要的作用。气流遇到较高地形被迫抬升, 形成闪电。TC西南方位距岛屿东南侧约300km的海面, 水汽、热量充足且人为气溶胶较多, 有利于上升气流的发展, 进而产生闪电。这些认识有助于闪电资料在TC中小尺度强对流监测和预警中的应用。

关键词 超强台风 山竹 闪电 WWLLN

文章编号

中图分类号

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2203.21229

Characteristics of Lightning Activity in Super Typhoon Mangkhut (1822)

ZHANG Zhiwei, GUO Fengxia*, CHU Yu, ZOU Dike, LU Xian, WU Zeyi, LIU Zhou

Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration/ Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education (KLME)/ Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change (ILCEC)/Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters (CIC-FEMD), Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China

收稿日期 2021-12-06; **网络预出版日期** 2022

作者简介 张志伟, 男, 1996年出生, 硕士研究生, 主要从事大气电学研究。E-mail: zhiweizhangvv@163.com

通讯作者 郭凤霞, E-mail: guofx@nuist.edu.cn

资助项目 国家重点研发计划项目 2017YFC1501503; 国家自然科学基金项目 41875002 和 41975003

Funded by National Key Research and Development Program of China (Grant 2017YFC1501503); National Natural Science Foundation of China (Grant 41875002 and 41975003)

Abstract In order to further understand the characteristics of lightning activity during the whole life of Tropical Cyclone (TC), this paper uses World Wide Lightning Location Network (WWLLN) data, TC best-track data from National Meteorological Center of China Meteorological Administration, Black Body Temperature (TBB) data from Fengyun-4A satellite and ERA5 reanalysis data for studying the strongest typhoon "Mangkhut" that landed in China in 2018. The temporal and spatial distribution of lightning activity and its variation with intensity during the whole process from generation to extinction are studied, and the relationship between lightning activity and wind circle radius and underlying surface is discussed. The results show that: (1) The lightning activity in "Mangkhut" has obvious three-circle structure, with the highest density of lightning in the inner core, almost no lightning in the inner rainbands, and the largest amount of lightning in the outer rainbands. The main occurrence time of inner core lightning is different from that of outer rainbands lightning, which can also produce a large amount of lightning in the open sea. (2) The azimuthal distribution of lightning activity is closely related to TC intensity, geographical location and environment, and it is different in different periods. (3) There is no clear relationship between lightning activity and wind circle radius. Lightning activity mostly occurs in the southeast and southwest, where the wind circle has a smaller radius. (4) During and around TC rapid intensification, the inner core lightning activity has a certain indicator effect on TC intensity intensification. In addition, there is a good correlation between lightning activity and convective intensity in the inner core. (5) The existence of islands and land plays an important role in the development of severe convection. When the stream hits higher terrain, it is forced to lifting, forming lightning. The southwest direction of TC is about 300km away from the southeast side of the island, and there are sufficient water vapor, heat and more anthropogenic aerosols, which are conducive to the development of updraft, thus generating lightning. These understandings contribute to the application of lightning data in monitoring and early warning of mesoscale and small-scale severe convection in TCs.

Keywords Super Typhoon, Mangkhut, Lightning, WWLLN

1 引言

我国每年都要遭受严重的台风灾害，加强台风强度和路径预报具有重要意义（陈联寿和孟智勇, 2001）。近年来，随着对热带气旋（TC）发生机制更深入的认识和探测技术的进一步发展，TC 路径预报的准确性大大提高。然而，对 TC 强度的预报仍需进一步提高（Marks et al., 1998; DeMaria et al., 2014）。TC 强度变化不仅与大尺度环境和动力过程有关，还与内部中小尺度对流有关（Guimond et al., 2010; Wadler et al., 2018）。潘伦湘等（2010）研究发现内核闪电爆发在一定程度上可以预示 TC 强度变化。

闪电活动与雷暴中的动力和微物理过程以及降水结构密切相关（Petersen et al., 1999）。混合相态区中霰和冰晶碰撞分离的非感应起电机是雷暴中的主要起电过程（Takahashi, 1978），导致了雷暴中闪电的发生（Williams, 1988）。因此，闪电可以用来指示 TC 中强上升气流的位置（Molinari et al., 1994），闪电活动的增强表明 TC 中深对流进一步发展，使得霰和冰雹粒子的区域

增大 (Wiens et al., 2005; Fierro et al., 2007)。闪电探测网与雷达、卫星和其他观测平台的结合将有助于进一步了解对流结构和热带气旋的强度变化。

TC 闪电的径向分布有明显的三圈结构特征, 内核和外雨带闪电活动多, 内雨带几乎没有闪电活动 (Molinari et al., 1994)。TC 不同区域的动力和微物理过程不同, 内核和外雨带有不同的闪电类型, 外雨带以地闪 (CG) 为主 (Griffin et al., 2014), 内核以云闪 (IC) 为主 (Fierro et al., 2018)。内核强烈的垂直上升气流能使过冷水和冰晶向上延伸至高层低温区 (Reinhart et al., 2014), 起电增强 (Black et al., 1999), 有利于闪电放电。内雨带为层状云区, 主要是由从眼壁向外流出的冰晶粒子和雪晶组成, 缺少过冷水, 不利于起电过程, 因而闪电较少发生 (潘伦湘和郟秀书, 2010; 潘伦湘, 2012)。外雨带闪电活动活跃的原因可能是环境大气不稳定, 有利于对流发生, 进而产生起电和放电现象 (Molinari et al., 1999)。

受到 TC 自身发展和移动路径的影响, 闪电随方位角的分布也呈现出非均匀性 (Abarca et al., 2011)。西北太平洋 TC, 外雨带呈现出西南多、东北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 (雷小途等, 2009)。

根据 TC 强度与闪电数量相关性的统计表明, 闪电的发生能够提供 TC 强度变化的信息。眼壁闪电的爆发往往对 TC 强度的增强有预示作用 (Molinari et al., 1994, 1999), 且内核闪电活动较全部 TC 闪电和外雨带闪电能更好的指示 TC 的快速增强 (王芳等, 2017)。TC 中心闪电活动变化峰值提前一天于 TC 强度变化的峰值, 且二者变化趋势基本相同 (Price et al., 2009)。眼壁区闪电爆发可能会预示路径转向, 有 10% 的内核闪电爆发发生在台风路径的转向之前 (Zhang et al., 2012)。

超强台风“山竹”是 2018 年登陆中国的最强台风, 于 9 月 7 日 12 时 (世界时, 下同) 在西北太平洋生成, 9 月 11 日 0 时发展为超强台风, 9 月 14 日 17 时 40 分登陆菲律宾北部, 9 月 15 日凌晨 2 时左右离开菲律宾进入南海, 向西北方向移动。9 月 16 日 9 时在广东省江门市登陆, 最小中心气压为 960hPa, 最大风速 42m/s, 登陆后逐渐减弱, 并于 9 月 17 日 9 时在广西地区消亡。山竹给我国南方多省 (区) 带来大风和暴雨天气, 造成大量人员伤亡和财产损失。国内外诸多学者对其沿海洪水 (Yang Jie et al., 2019)、海滩沉积物 (Hoi-Shing Lo et al., 2020)、风力 (Y.C. He et al., 2020)、降水 (王晓雅等, 2019; 陈淑琴等, 2021) 和降水氧同位素 (杨云月等, 2020) 等方面进行了研究, Zhang et al. (2020a) 研究了其登陆过程中闪电活动和对流演化的时空分布特征, 发现风云 4 号 A 星 (FY-4A) 闪电成像仪 (LMI) 观测到的闪电位置与低相当黑体温度 (TBB) 和高组合反射率 (CR) 区域具有良好的空间对应关系。现有的 TC 中闪电活动特征的研究少有针对 TC 全生命期闪电活动特征的研究。台风山竹生命期长达 10 天, 经度范围跨度近 60 度, 云系庞大, 是很好的研究对象。本文对台风山竹全生命期内的闪电活动进行了时间、空间 (径向、方位) 和强度的分析, 并对闪电活动与风圈半径、对流强度和下垫面的关系进行了分析, 以期进一步了解 TC 的闪电活动特征。有关 TC 闪电的统计研究为大量 TC 个例闪电数据的处理整合, 可能会丢失某些 TC 个例闪电特征的一些细节, 开展 TC 个例的详细分析有助于我们获得 TC 闪电特征更为清楚的细

节认知。本文 TC 强度大、路径长并且所处环境多变，得出的某些 TC 闪电特征可作为 TC 强对流发生发展的重要参考。

2 资料和方法

2.1 闪电定位资料

TCs 通常产生于大洋深处，大部分发展时间都在远离陆地的宽广洋面上，而目前大多数地基闪电定位网探测距离近，仅能探测其临岸期间的闪电，无法用于 TC 全程闪电的探测。全球闪电定位网（WWLLN）探测范围远超一般地基闪电探测网，能够很好地探测远离陆地 TC 中的闪电（Abarca et al., 2011）。不受时空限制观测闪电是 WWLLN 相比其他地基闪电监测平台所拥有的优势，因此 WWLLN 是观测 TC 全程闪电的优良平台。

目前，全世界有 70 多个传感器用于探测全球闪电活动（Hutchins et al., 2013）。WWLLN 可以探测到 CG 和 IC 闪击产生的峰值电流，记录下闪击的时间和经纬度信息（Jacobson et al., 2006）。由于 CG 的峰值电流通常大于 IC 的峰值电流所以 WWLLN 对 CG 的探测效率高于 IC 的，前者大约是后者的两倍（Abarca et al., 2010）。近年来，随着传感器数量的增加和定位算法的升级，无线链路网络的探测性能不断提高，平均定位精度约为 5km，探测效率约为 11%（Hutchins et al., 2013; Virts et al., 2013）。本文若无特殊说明用 TC 定位时刻前后半小时的闪击代表该时刻的闪击，未经过探测效率订正。一次闪电过程有一至多次闪击，Zhang et al.（2020a）的文章表明闪击是否聚类到闪电对研究 TC 闪电活动几乎没有影响，所以本文未聚类成闪电，以闪击来表征闪电活动。

2.2 TC 路径资料

TC 路径、强度和风圈半径数据来自中央气象台台风网。该网站提供了前期 6 小时（有时 3 小时）一次和后期 1 小时一次的 TC 中心位置、最小中心气压、最大风速和风圈半径。对前期数据利用三次样条插值得到 1 小时一次的中心位置、最小中心气压和最大风速，以便下文进行数据处理。本研究中分析的时间段共 238 小时是山竹从 9 月 7 日 12 时生成到 9 月 17 日 9 时消亡全生命期。TC 强度根据国家标准《热带气旋等级》（GB/T19201-2006）划分，经过插值后计算得到各阶段各强度等级存在时间。生成阶段，热带风暴（TS）27 小时和强热带风暴（STS）9 小时；发展阶段，台风（TY）34 小时和强台风（STY）14 小时；成熟阶段，超强台风（SuperTY）97 小时；消亡阶段，STY 35 小时、TY 8 小时、STS 3 小时、TS 7 小时和热带低压（TD）4 小时。根据卫星云图判断，由于此次 TC 过程云系庞大，所以 TC 半径取 1000km，该范围基本上包含了绝大部分的雨带，发生在此范围内的闪电定义为 TC 总闪电。根据 TC 结构及雨带性质（陈联寿和丁一汇，1979）定义距 TC 中心 100km 内为内核，100-200km 为内雨带，200km-1000km 为外雨带。由于 TC 生成发展过程中其范围和各部分是不断变化的，所以这只是一个笼统的划分。

2.3 卫星 TBB 资料

TBB 数据从 FY-4A 获得。卫星的多通道扫描成像辐射计 (AGRI) 成像通道为 14 个, 覆盖了可见光与近红外、短波红外、中波红外、水汽和长波红外等波段。该卫星覆盖东亚、东南亚和太平洋等地区。本研究使用 $10.8\ \mu\text{m}$ 通道, 空间分辨率 4km, 时间分辨率 15min。

2.4 再分析资料

风场和涡度数据来自欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 第五代再分析资料 ERA5, 采用更为先进的 4Dvar 同化方案, 将大量历史观测数据整合到全球估计中, 比 ERA-Interim 更精确。本文使用数据的时间分辨率为 1 小时, 空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 。

2.5 TC 快速增强阶段的定义方法

本文采用 Wang and Zhou (2008) 提出的方法定义 TC 快速增强 (RI) 事件, 即将同时满足 24 小时风速变化 $\geq 15.4\ \text{m/s}$, 第一个 6 小时风速变化 $> 2.6\ \text{m/s}$, 第一个 12 小时风速变化 $> 5.1\ \text{m/s}$ 这三个条件的时刻定义为 RI 开始时刻, 将这三个条件不能再同时满足的时刻定义为 RI 终止时刻。根据此方法, 计算得到此次 TC 过程共有两次 RI, 将第一次 RI 称为 “F-RI”, 时间为 11 日 4 时至 11 日 11 时, 持续 8 小时, 第二次 RI 称为 “Re-RI”, 时间为 11 日 18 时到 11 日 21 时, 持续 4 小时, 以 “C-RI” 指代两次 RI, 共计 12 小时。

3 闪电活动的径向分布特征

3.1 径向分布的总体特征

从图 1 可以看出, 山竹闪电特征总体上有较好的三圈结构, 闪电主要集中在内核和外雨带。内核闪电密度大, 密度中心偏南; 内雨带闪电很少, 但在 TC 南部有一小块闪电区; 外雨带高闪电密度区呈现较大范围的螺带状分布, 其中西南方位闪电高值区多, 可能是因为 TC 西南方位的海温较高、西南季风经过赤道会携带大量水汽抵达东南亚一带 (张文娟, 2013), 有利于上升气流发展, 产生更多的闪电 (Stevenson et al., 2016)。整个过程, 共计发生闪击 148695 次, 其中内核 5466 次, 内雨带 437 次, 外雨带 142792 次, 可见外雨带闪电活动是 TC 闪电活动的主要来源。

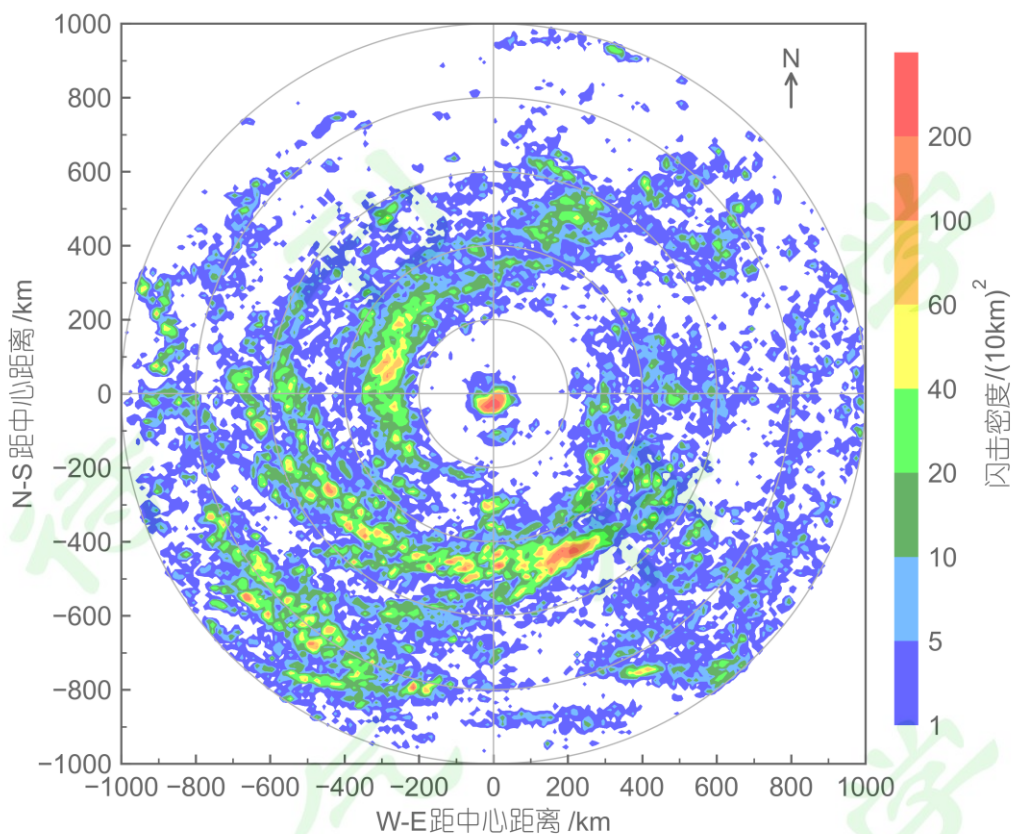


图 1 全生命期距 TC 中心 1000km 内累计闪击密度的径向空间分布

Fig. 1 Radial spatial distribution of cumulative stroke density within 1000km from TC center during the whole life

3.2 径向分布随 TC 强度的变化特征

全生命期内（图 2），TC 移动路径南侧闪电活动强于北侧，南侧海温高、水汽足，从而闪电多（张文娟，2013；Stevenson et al., 2016），此特征也可见图 1。前期，闪电稀少，呈散点状分布；中期，闪电活动增多，呈螺带状分布，闪电高密度区有菲律宾中部东侧地区和棉兰老岛以东海面；后期，闪电活动剧烈，呈团状分布，闪电高密度区有越南中部、海南岛东南方向海面、海南岛西北部海域、海南岛西南部和广东江门南部近海地区，这与 Zhang et al.（2020a）得到的“山竹”登陆前的闪电密度分布一致。其中棉兰老岛以东海面、越南中部、海南岛东南方向海面、海南岛西北部海域和广东江门南部近海地区最大闪击密度可达每 100 平方公里 200 次闪击以上。

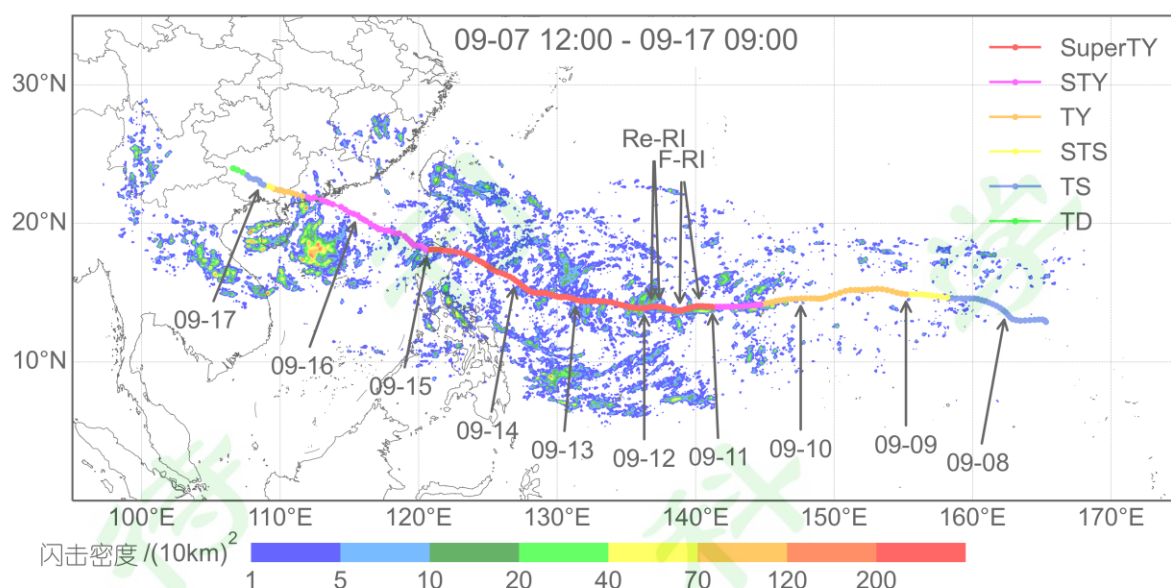


图 2 全生命期距中心 1000km 内累计闪击密度的地理空间分布（路径每点代表每小时位置，上方箭头指向 F-RI 和 Re-RI，下方箭头指向日期 MM-DD）

Fig. 2 Geospatial distribution of cumulative stroke density within 1000km from TC center during the whole life (each point of the track represents the hourly position, the arrows upper points to F-RI and Re-RI, the arrows below points to the date MM-DD)

图 3 中，a 为对应等级时的平均闪击密度；b 为对应等级时的平均小时闪击数；c 为对应等级时不同距离上的闪击数占比。可见，TC 强度较弱时，内核基本无闪电，内核闪电仅出现在 TY-1、STY-1 和 SpuerTY-1 等级，其中，STY-1 等级闪击密度和闪击数最大，此等级时，整个 TC 总闪击的 40%以上发生在内核区。

内雨带全程闪电活动极少，在 TS-1 和 STS-1 等级占比相对较高，其中 TS-1 等级接近 5%；内雨带闪击密度在 STY-2 等级时最大。

外雨带各等级闪电数量变化与密度变化基本一致，与潘伦湘等（2010）的结论吻合。从 TY-2 等级开始闪电活动激增，不同等级时闪电活跃所处的距离范围不同，TY-2 等级时在 400-500 和 700-900km，STS-2 等级时在 300-500km，TS-2 等级时在 400-500km。不同距离范围闪击占比较高的时期不同，200-400km 在前期占比较高，500-700km 在中期占比较高，400-500 和 700-1000 km 在后期占比较高。

总体上，山竹内核闪电密度在 TY-1、STY-1 和 SpuerTY 时最大，外雨带闪电密度在 TY-2、STS-2、TS-2 和 TD 时最大。Abarca et al.（2011）和杨美荣等（2011）统计发现内核闪电密度在 TS、STY 和 SpuerTY 等级时最大，外雨带闪电密度在其他等级时最大，本文结论与其大部分符合，某些强度分布不符合可能是因为不同 TC 之间有差别。

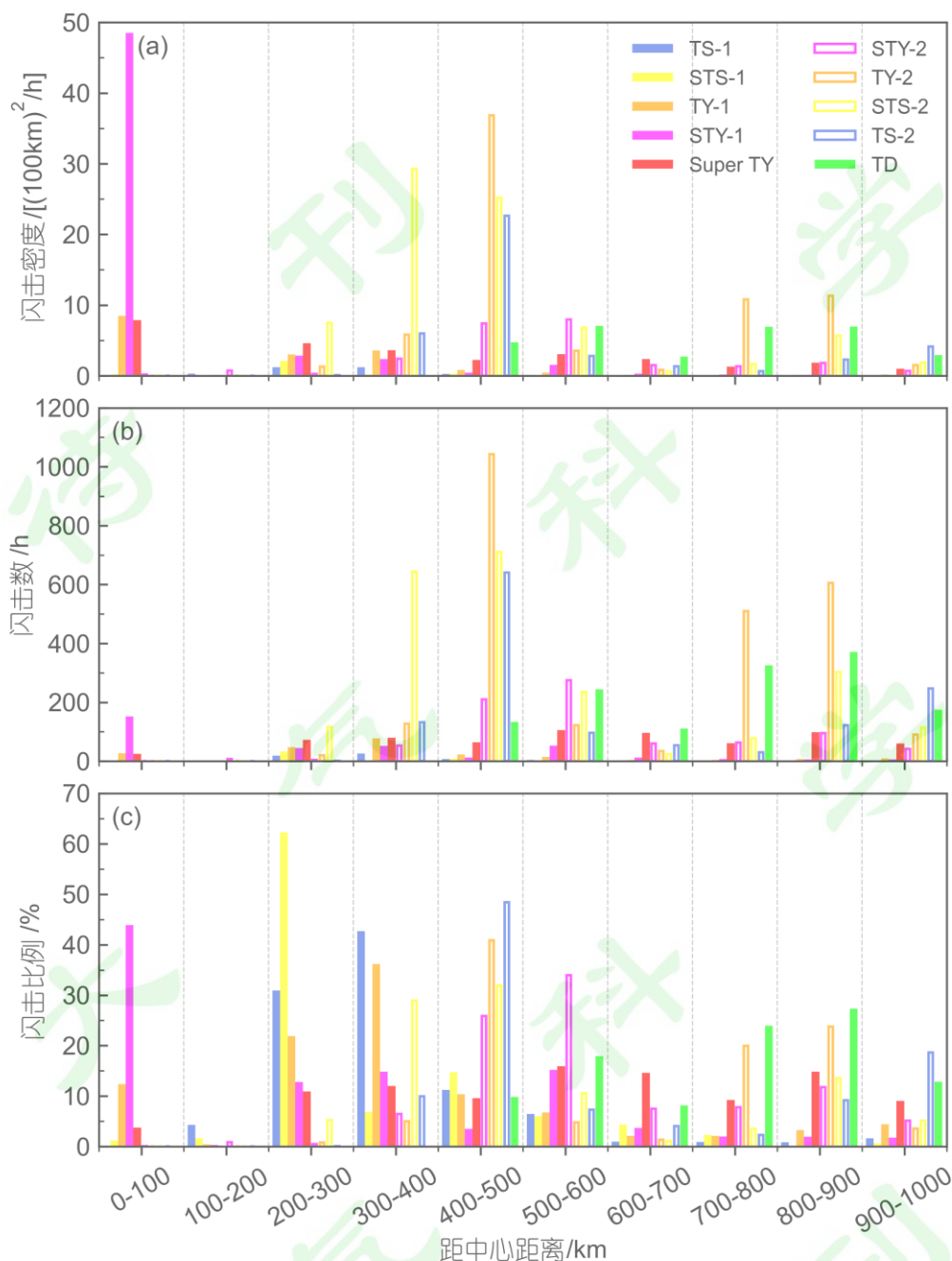


图 3 不同强度等级时闪击活动的径向分布特征（以 1、2 区分同一强度等级先后顺序，a.小时平均闪击密度；b.小时平均闪击数；c.同一强度等级时不同径向距离的闪击数占比）

Fig. 3 Radial distribution characteristics of stroke activity at different intensity levels (distinguish the order of the same intensity grade by 1 and 2, a. hourly average stroke density; b. hourly average stroke count; c. proportion of stroke count in different radial distances at the same intensity level)

3.3 径向分布随时间的变化特征

由图 4 可见，F-RI 之前和期间，中心气压持续下降，最大风速持续加大。中心气压和最大风速从 F-RI 结束时的 11 日 12 时到 14 日 18 时稳定不变。中心气压在登陆菲律宾时快速上升，而在登陆广东前 8 小时就开始阶梯上升，最大风速在登陆菲律宾时快速减弱，而在登陆广东前 8 小时就

195 开始阶梯减弱。这可能是因为登陆菲律宾前，TC 处在宽广洋面上，TC 前进方向上菲律宾吕宋岛对
196 雨带的影响有限，不会对内核的中心气压和最大风速造成影响。而在登陆广东前，TC 处于狭窄的
197 南海区域，TC 前进方向上的华南沿海广大区域对雨带造成一定影响进而影响到了内核中心气压和
198 最大风速。在 TC 离开菲律宾进入南海，得到水汽补充后，中心气压略有降低，最大风速略有上
199 升。

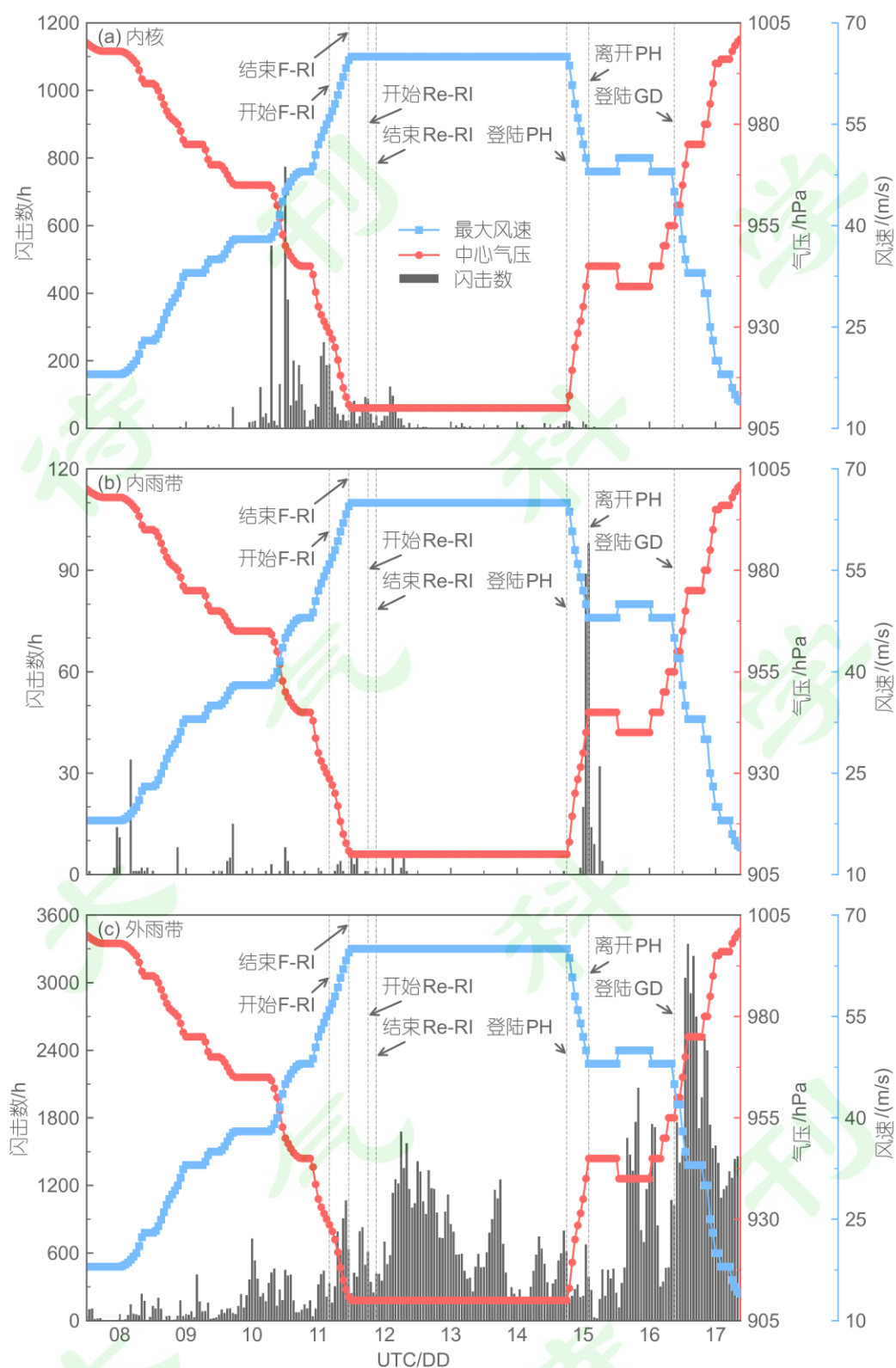


图 4 闪击数、最大风速和中心气压随时间的逐小时变化 (a.内核; b.内雨带; c.外雨带。PH, GD 分别代表菲律宾和广东省, 箭头指向不同特殊时刻, 下同)

Fig. 4 Hourly variation of stroke count, maximum wind speed and central pressure with time (a. inner core; b. inner rainbands; c. outer rainbands. PH and GD stand for Philippines and Guangdong Province separately, arrows point to different special moments , the same below)

结合图 3 和 5 可见, SpuerTY 中期之前(13 日 0 时之前)闪电密度高值区在 300km 附近。SpuerTY 时云系不断扩大, 闪电分布广, 密度较低。SpuerTY 之后(15 日 0 时之后)闪电密度呈现双峰值分布, 高值区在 500km 附近, 800km 附近是次高区, 这是由于处于螺旋雨带强对流区易产生闪电, 潘伦湘等(2010)发现 TC “森拉克”和“珍珠”外雨带中的闪电密度呈现双峰值, 山竹与之类似。

由图 4 和 5 同样可见, 山竹有较好的三圈结构, 内核闪电密度最大, 内雨带几乎没有闪电, 外雨带闪电数量最多, 这与通常对 TC 闪电分布的认识是一致的。内核闪电活动主要集中在 C-RI 前后(10 日 9 时至 12 日 6 时), 即气压迅速下降的阶段, 其余时间内核闪电活动很少, 内核闪电活动在 F-RI 之前 16 小时最为剧烈。由于内核主要是 IC (Fierro et al., 2018), 外雨带主要是 CG (Griffin et al., 2014), WWLLN 对 CG 的探测效率高于 IC (Abarca et al., 2010), 所以实际内核闪电数量与外雨带闪电数量的比值可能更高。内雨带闪电整体上比较少, 在 TC 达到最低气压之前及初始阶段(7 日 12 时至 12 日 12 时), 有零星闪电发生, 这可能是因为 TC 初期云系小, 距 TC 中心 100-200km 可能属于外雨带, 但是根据图 5 可以看出, 初期 TC 云系小时 600-1000km 的区域几乎没有闪电发生, 引入的无关 TC 系统的闪电数据对本文研究的影响很小。最低气压持续的中后期没有闪电, 在离开菲律宾进入南海时有一个内雨带闪电活动的短时活跃期, 此后, 再没有闪电发生。外雨带是 TC 产生闪电活动最多的区域, 前期外雨带闪电稀少, 波动上升, 在最大强度中前期(12 日 6 时)达到一个峰值, 这说明 TC 在海洋上也可产生大量闪电 (Zhang et al., 2020b), 随后波动下降, 在进入南海得到水热补充后, 闪电活动再次增加, 出现第二个峰值, 这与邱振峰(2020)的研究结果相同。登陆广东后闪电活动激增达到最大峰值, 约是洋面上闪电活动峰值的两倍, 远低于 9.6: 1 的陆地海洋闪电密度比 (朱润鹏等, 2013), 由于 WWLLN 在海洋上站点少, 探测效率低于陆地, 实际比例可能更低。

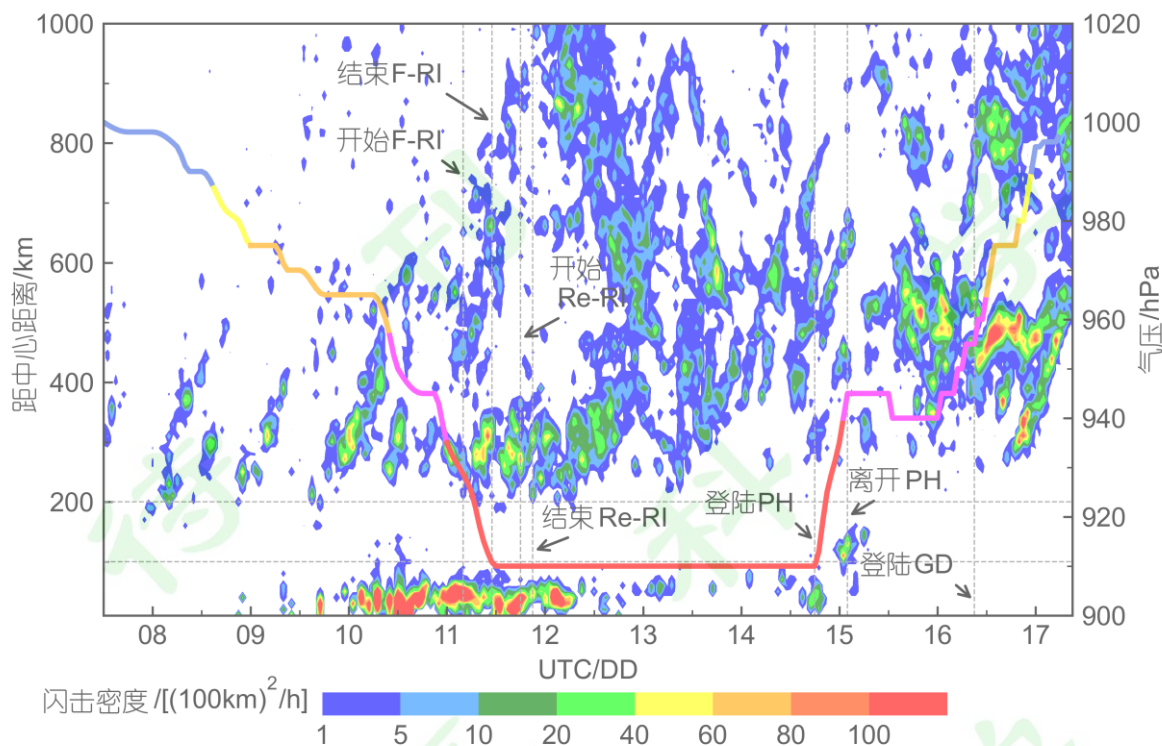


图 5 距 TC 中心不同距离上平均闪电密度随时间的变化（彩色折线为 TC 的中心气压，不同颜色代表 TC 的不同强度等级，参见图 2 图例，下同）

Fig. 5 Variation of average stroke density with time at different distances from TC center (the color broken line is the central pressure of TC, and different colors represent different intensity levels of TC, see the legend in Figure 2, the same below)

4 闪电活动的方位分布特征

4.1 方位分布随时间的变化特征

图 6 为平均闪电密度的方位分布。可见，内核闪电主要发生在 C-RI 期间及前后（10 日 9 时至 12 日 6 时）的东南和西南方位，其余时刻闪电稀少且分散。内雨带除了在离开菲律宾时在南部有较为集中的闪电，其余时刻闪电很少且分散。内核和内雨带闪电活动呈现出西北东北少，西南东南多的非对称分布特征，与雷小途等（2009）得到的 TC 内核和内雨带闪电活动方位分布不太相同，这可能是因为 TC 与 TC 之间具有差异，作为 TC 个例的“山竹”与 TC 统计结果不能完全一致。

外雨带刚开始的两天闪电很少且较为分散，零星分布在东北和西北方位，F-RI 之前到 SuperTY 中期，闪电主要分布东南、西南和西北方位，SuperTY 后期，闪电主要分布在西南和西北方位。登陆菲律宾时闪电主要分布在东北方位海面，进入南海后，得到来自西南方位的水汽补充，闪电主要分布在西南方位，登陆广东后，闪电主要分布在东南和西南方位。总体上，外雨带闪电活动呈现出西北东北少，西南东南多的非对称分布特征，与雷小途等（2009）得到的 TC 外雨带闪电活动方位分布较一致。闪电活动西南东南多可能是因为 TC 西南东南方位的海温较高，能给上升气流提供更多的热源，进而使螺旋雨带粗壮、云顶温度低值区面积大，产生更多的闪电。

247 结果显示内核、内雨带和外雨带的闪电分布特征相似，均为东北西北少、东南西南多的非对
248 称分布，与雷小途等（2009）TC 内核和内雨带闪电分布特征与外雨带闪电分布特征不同的研究不
249 一致，这可能是由于某些 TC 有其特殊性，会呈现出内核、内雨带和外雨带闪电分布特征一致。

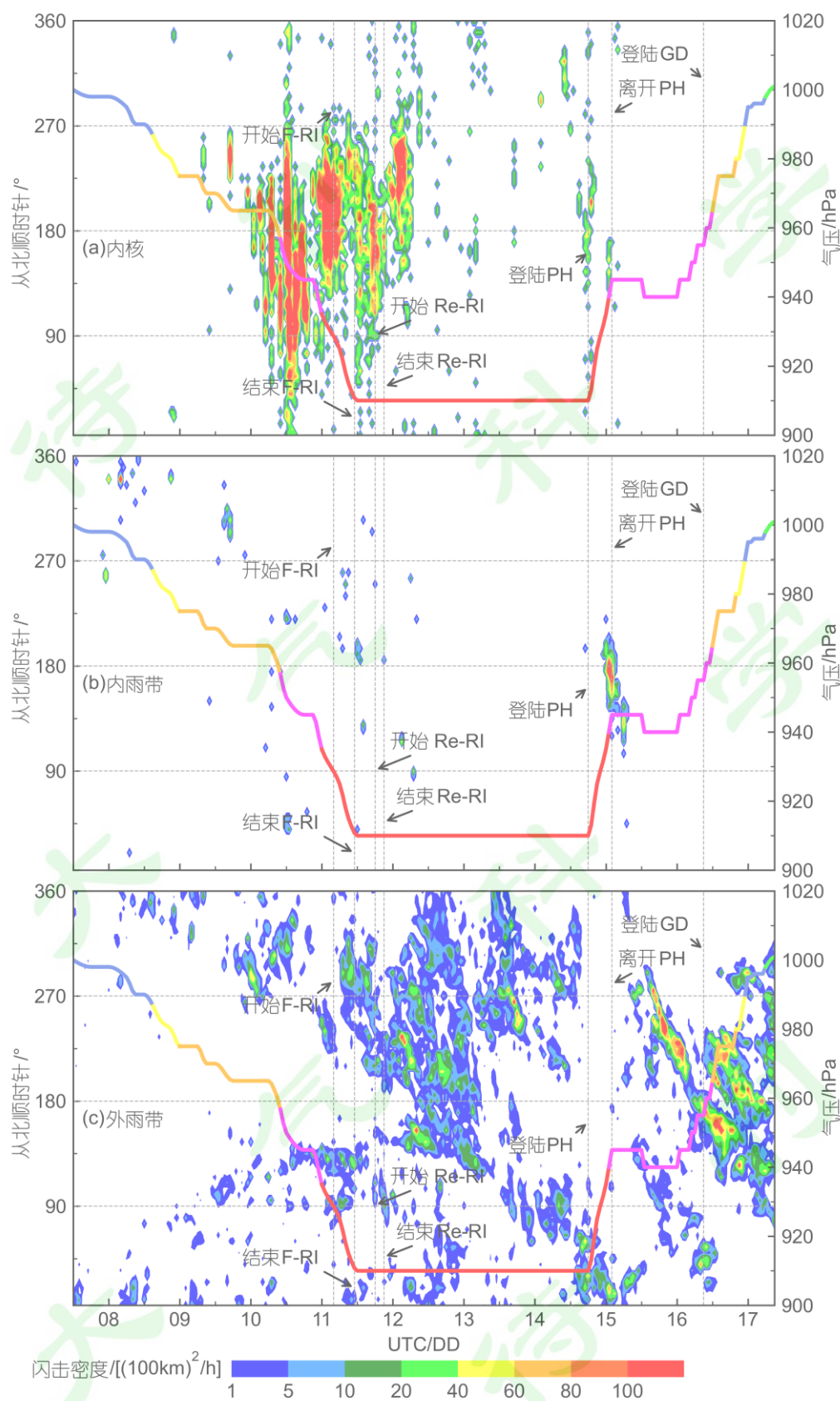


图 6 TC 不同方位上平均闪击密度随时间的变化 (a.内核; b.内雨带; c.外雨带)

Fig. 6 Variation of average stroke density with time in different azimuth of TC (a. inner core; b. inner rainbands; c. outer rainbands)

4.2 方位分布随 TC 强度的变化特征

由图 7 也可见,整体上,TC 的东南、西南方位闪电多,密度大,东北、西北方位闪电少,密度小。强度减弱到 TY 等级,东南、西南方位闪电开始激增。结合图 6 和 7 可见,TS-1、STS-1 和 TY-1 等级,东北、西北方位的闪电占比较高,其中 STS-1 等级西北方位闪电占比甚至超过 80%,TY-2、STS-2、TS-2 和 TD 等级,东南、西南方位闪电占比高。TC 前期闪电主要分布在东北和西北方位,TC 后期闪电主要分布在东南和西南方位,可能是因为 TC 初期云系小,受东北信风的影响强于海温,东北、西北方位受到来自东北信风的风力加强,更易形成深对流而产生闪电;TC 后期云系大,受东北信风的影响弱于海温,东南、西南方位热量高水汽足,还有西南季风带来的暖湿气流,利于上升气流发展,从而产生闪电。

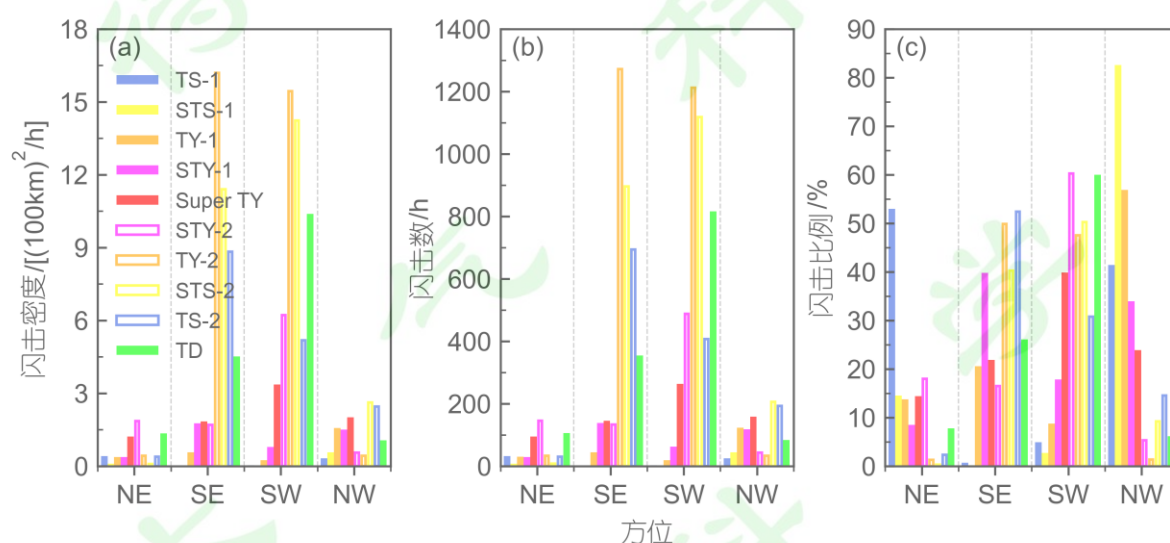


图 7 不同强度等级闪击活动方位分布特征 (以 1、2 区分同一强度等级先后顺序, a.小时平均闪击密度; b.小时平均闪击数; c.同一强度等级时不同径向距离的闪击数占比)

Fig. 7 Azimuth distribution characteristics of stroke activity at different intensity levels (distinguish the order of the same intensity grade by 1 and 2, a. hourly average stroke density; b. hourly average stroke count; c. proportion of stroke count in different radial distances at the same intensity level)

4.3 闪电活动与不同方位风圈半径的关系

由图 6 和 8 可见,在 10 日 6 时之前,四个方位的风圈半径基本呈现出在浮动中不断缓慢增大的趋势,整体上,东北和西北风圈半径相当,东南和西南风圈半径相当,东北和西北的风圈半径明显大于东南和西南的。在此期间,闪电稀少,主要发生在东北和西北。可见,随着风圈半径的增大,闪电数会增多。

10 日 6 时至 11 日 6 时,四个方位的 7、10 和 12 级风圈半径均明显增大,整体上,仍然是东北和西北风圈半径相当,东南和西南风圈半径相当,东北和西北的风圈半径明显大于东南和西南的。在此期间,风圈半径最大的东北方位的闪电仍然很少,但东南、西南和西北的闪电均较之前多。可见,除了东北方位外,随着风圈半径的增大,闪电数会增多。

11 日 6 时（即 F-RI 开始之后）至 13 日 14 时，四个方位的 7、10 和 12 级风圈半径均保持不变。在此期间，东北的闪电仍然很少，但东南、西南和西北的闪电活动明显多于前一阶段，尤其是西南。所以可知，除了东北方位外，风圈半径保持不变的情况下，闪电数也会增加。

13 日 14 时之后至登陆菲律宾前，东北、西北和东南风圈半径明显增大，西南风圈半径变化较小。与之前相比较，在此期间，东南和西南的闪电活动明显减少，西北和东北变化不明显。可见，风圈半径基本不变时，闪电数也会减少，但风圈半径变大的情况下，闪电数也会不变或减少。

登陆菲律宾期间，风圈半径变化比较复杂，东北和东南三个级别的风圈半径均减小，7 级和 10 级的西南风圈略有增加，12 级的西南风圈不变，7 级和 12 级的西北风圈略有减小，10 级的西北风圈略有增加。可见，登陆整体上使风圈半径减小，闪电活动也明显变少，只在东北有零星闪电，其他方位基本没有闪电。

离开菲律宾至登陆广东之间，整体上，各方位的 7 级和 10 级风圈半径是先增大后减小的趋势。在 10 级风圈半径中，总体上，东北最大，东南次之，西南再次，西北最小。此阶段的闪电活动较前一阶段有增加，主要分布在西南，其次是东南和东北，西北方位很少。可见，风圈半径最小的方位，闪电数最少，但风圈半径最大的方位闪电并不是最多的。

登陆广东后，风圈半径在陆地上无意义且无数据。

岛屿对风圈和闪电活动的影响，较大的岛屿会使该处的风圈半径减少、闪电增多。岛屿比海面的摩擦力大，对风的阻碍作用更强，使得该处风圈比别处要小。同时，岛屿对气流有抬升作用，加强对流发展，促进闪电产生。

从以上的分析可见，总体上东北的风圈半径最大，但东北方位的闪电活动很少，西北方位的风圈半径略小于东北方位，但闪电活动明显多于东北方位。闪电活动多发于风圈半径较小的东南和西南方位。除了东北方位外，随着风圈半径的增大，闪电数会增多，也会不变或减少。风圈半径保持不变的情况下，闪电数也会增加。登陆菲律宾期间，整体上风圈半径减小，闪电活动也明显变少。这说明闪电活动与风圈半径没有明显的直接联系，可能需要结合其他多种因素综合分析。

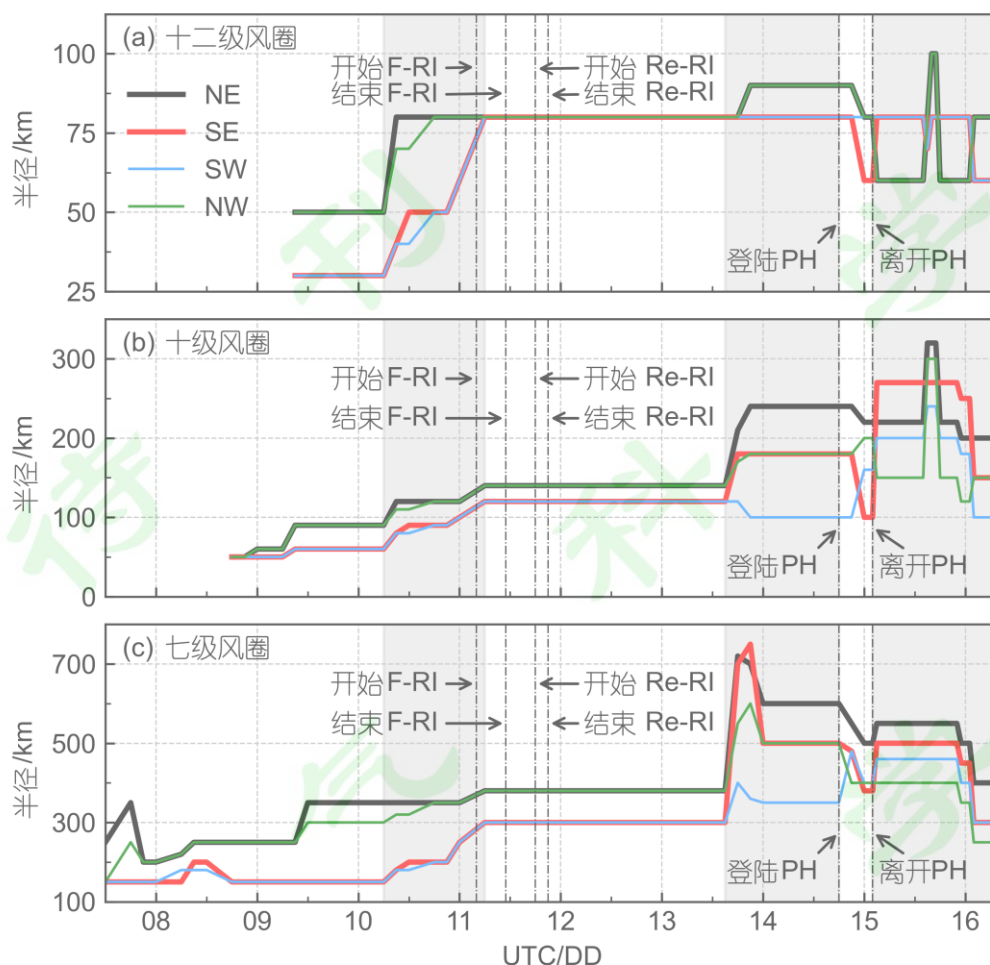


图 8 TC 不同方位风圈半径随时间的变化（生成至登陆广东省前）（a.十二级风圈，b.十级风圈，c.七级风圈，灰色背景区分六个阶段）

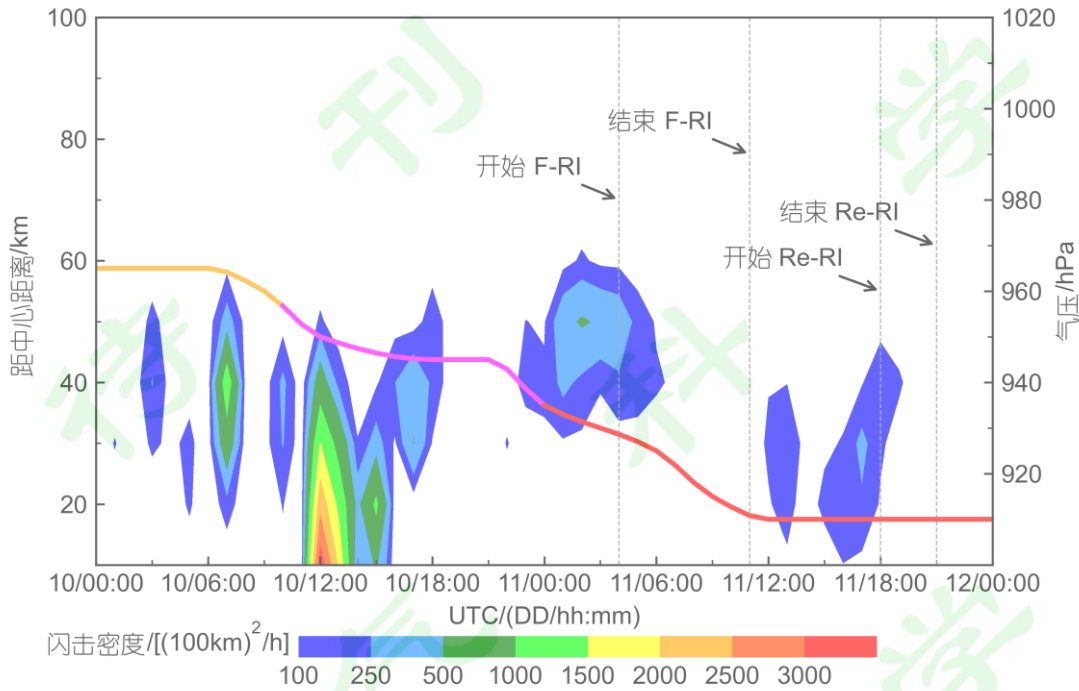
Fig. 8 Variation of wind circle radius in different azimuth with time (from generation to landing in Guangdong Province) (a. wind circle rank 12, b. wind circle rank 10, c. wind circle rank 7, six stages distinguished by gray background)

5 内核闪电活动与 RI 和对流强度之间的关系

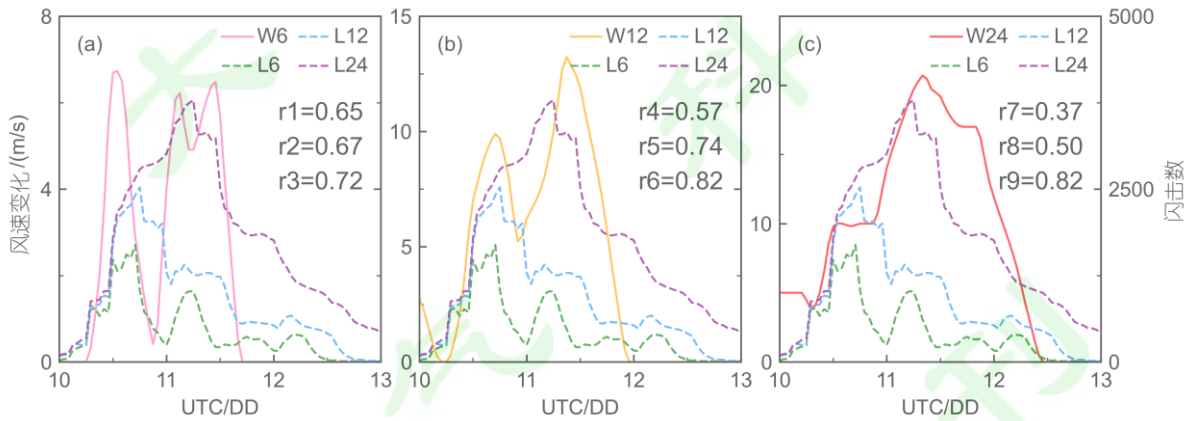
5.1 内核闪电爆发与 RI 的关系

Price et al. (2009) 发现 TC 中心闪电变化峰值比强度变化峰值提前一天，潘伦湘等 (2010) 研究了 7 个强台风发现 TC 强度在眼壁区闪电爆发后的几个小时达到最强。由 3.3 的分析可知，山竹内核闪电活动主要集中在 C-RI 之前，在 F-RI 之前 16 小时内核闪电爆发（图 9），所以，内核闪电可能与 RI 之间有密切的关系。本文将 C-RI 前后期间（10 日 0 时至 13 日 0 时）的 6、12 和 24 小时最大风速变化（W6、W12 和 W24）分别与 6、12 和 24 小时内核累计闪击次数（L6、L12 和 L24）进行 Pearson 相关性分析（图 10），均通过 99.9% 信度检验。其中 W12-L24、W24-L24 相关系数超过 0.8，是极强相关，W6-L6、W6-L12、W12-L12 和 W6-L24 相关系数超过 0.6 是强相关，这说明 TC 最大风速变化与内核累计闪击次数有较好的相关性。结合图 4 可知，F-RI 在内核闪电爆发后的 16 小时出现，TC 强度在内核闪电爆发后的 24 小时达到最强，与 Price et al. (2009) 和潘伦

319 湘等（2010）的结论相似，因此内核闪电爆发可以作为 TC 强度增强的指示器（Molinari et al., 1994,
320 1999）。



321
322 图 9 C-RI 期间及前后内核平均闪击密度随时间的变化
323 Fig. 9 Variation of inner core average stroke density with time during and around C-RI



324
325 图 10 C-RI 期间及前后最大风速变化 (W) 与内核累计闪击次数 (L) 的相关性 (W 和 L 后面数字代表小时数。
326 (a) 6 小时最大风速变化与 6、12 和 24 小时内核累计闪击次数的相关性; (b) 12 小时最大风速变化与 6、12 和
327 24 小时内核累计闪击次数的相关性; (c) 24 小时最大风速变化与 6、12 和 24 小时内核累计闪击次数的相关性。
328 $r1-9$ 代表 W6、W12 和 W24 分别与 L6、L12 和 L24 的相关系数)
329 Fig. 10 Correlation between the change of maximum wind speed (W) and the cumulative number of inner core stroke (L)
330 during and around C-RI. The numbers after W and L represent hours. (a) Correlation between the 6-hour change of
331 maximum wind speed and the 6, 12 and 24-hour cumulative number of inner core stroke; (b) Correlation between the 12-
332 hour change of maximum wind speed and the 6, 12 and 24-hour cumulative number of inner core stroke; (c) Correlation
333 between the 24-hour change of maximum wind speed and the 6, 12 and 24-hour cumulative number of inner core stroke. $r1-9$
334 represent the correlation coefficients of W6, W12 and W24 with L6, L12 and L24 respectively.

5.2 内核闪电与对流强度的关系

利用 TBB 数据和 ERA5 涡度数据分析了内核闪电活动与对流演变的关系，共分为五个时间段（图 11）。第一阶段（8 日 10 时之前），云顶温度较高，低温区面积小且上升气流弱，没有闪电发生。第二阶段（8 日 10 时到 9 日 7 时），云顶温度较低，低温区面积较大，但是上升气流不是很强，没有闪电发生。第三阶段（9 日 8 时到 12 日 6 时），云顶温度较低、低温区面积较大，上升气流强，且在持续增大，闪电频发。第四阶段（12 日 7 时到 14 日 18 时），上升气流较前一阶段开始回落，但仍然较强，但是云顶温度较前一阶段略有升高，低温区面积较前一阶段明显减小，仅有少量闪电发生。第五阶段（14 日 18 时之后），登陆菲律宾和广东后，云顶温度迅速上升，低温区面积迅速减小，上升气流也迅速减弱，虽然经过南海时有水汽和热量的补充，但是云顶温度下降和低温区面积增加有限，基本没有闪电发生。由此可见，TC 内核区的闪电和对流关系密切。

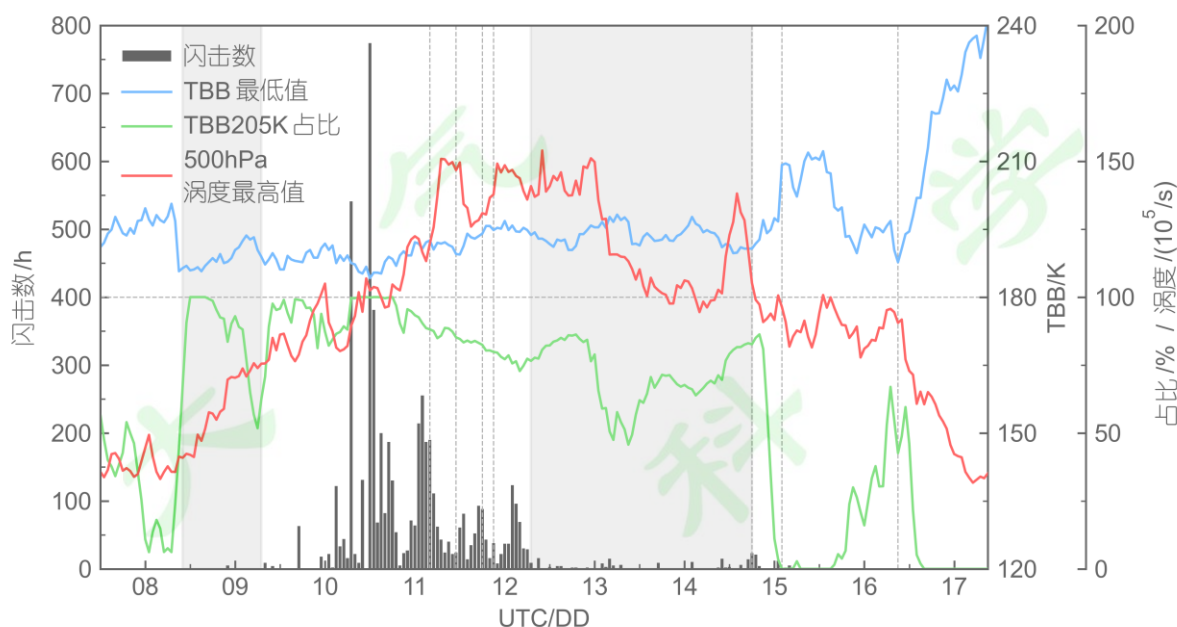


图 11 内核的闪击数、TBB 最低值、TBB 低于 205K 的面积占比和 500hPa 涡度（相对）最高值随时间的变化（灰色背景区分五个阶段）

Fig. 11 Variation of stroke number, minimum value of TBB, proportion of the area where TBB is lower than 205k and maximum value of 500hPa vorticity (relative) with time in inner core (five stages distinguished by gray background)

6 闪电活动与下垫面特征的关系

从图 1、5 和 6 可以看到 TC 内核在 C-RI 之前闪电活动剧烈，从图 5 和 6 可以发现内雨带在离开菲律宾时闪电活动较多，从图 2 可以看出在 TC 全生命期形成了一些外雨带高密度闪电区，这些区域的形成是否与下垫面特征有关？由于上一章节已经对内核闪电活动的发生做了探讨，所以本章节不选取特定时刻对其进行分析，选取了 TC 的三个特殊时刻对内雨带和外雨带的闪电活动、地形、流场和云顶亮温进行分析。

6.1 内核闪电活动与下垫面特征的关系

由图 2 和 5 可见，内核闪电活动主要集中在位于宽广洋面上的风速加强期间，特别是快速增强之前。内核闪电主要受内核区域强的垂直上升气流影响产生，而上升气流受到下垫面的水汽和热量的影响，在宽广洋面上水汽和热量充足支持上升气流的发展，海面比陆地摩擦力小不会破坏内核结构。一般来说，风速减弱或位于陆地时内核无闪电发生。

6.2 内雨带闪电活动与下垫面特征的关系

一般情况下，内雨带闪电稀少，但在离开菲律宾时内雨带出现较多闪电（图 4、5 和 6），此内雨带较多闪电出现在 TC 南部约 120km 处，选取闪击数最多的时刻 15 日 1 时（STY 等级）进行研究。由图 12a 和 b 可见，TC 离开菲律宾，在距 TC 中心西南 120km 附近产生大量闪电，此处闪电增多的原因可能是受吕宋岛山区地形影响，水平风场风力减弱，气流抬升形成深对流，有利于发生闪电。此外，内雨带通常是层状云，下垫面对其影响较小，推测 120km 附近产生的闪电可能是属于内核闪电而非内雨带闪电，原因是登陆菲律宾时台风眼遭到破坏，内核外扩。

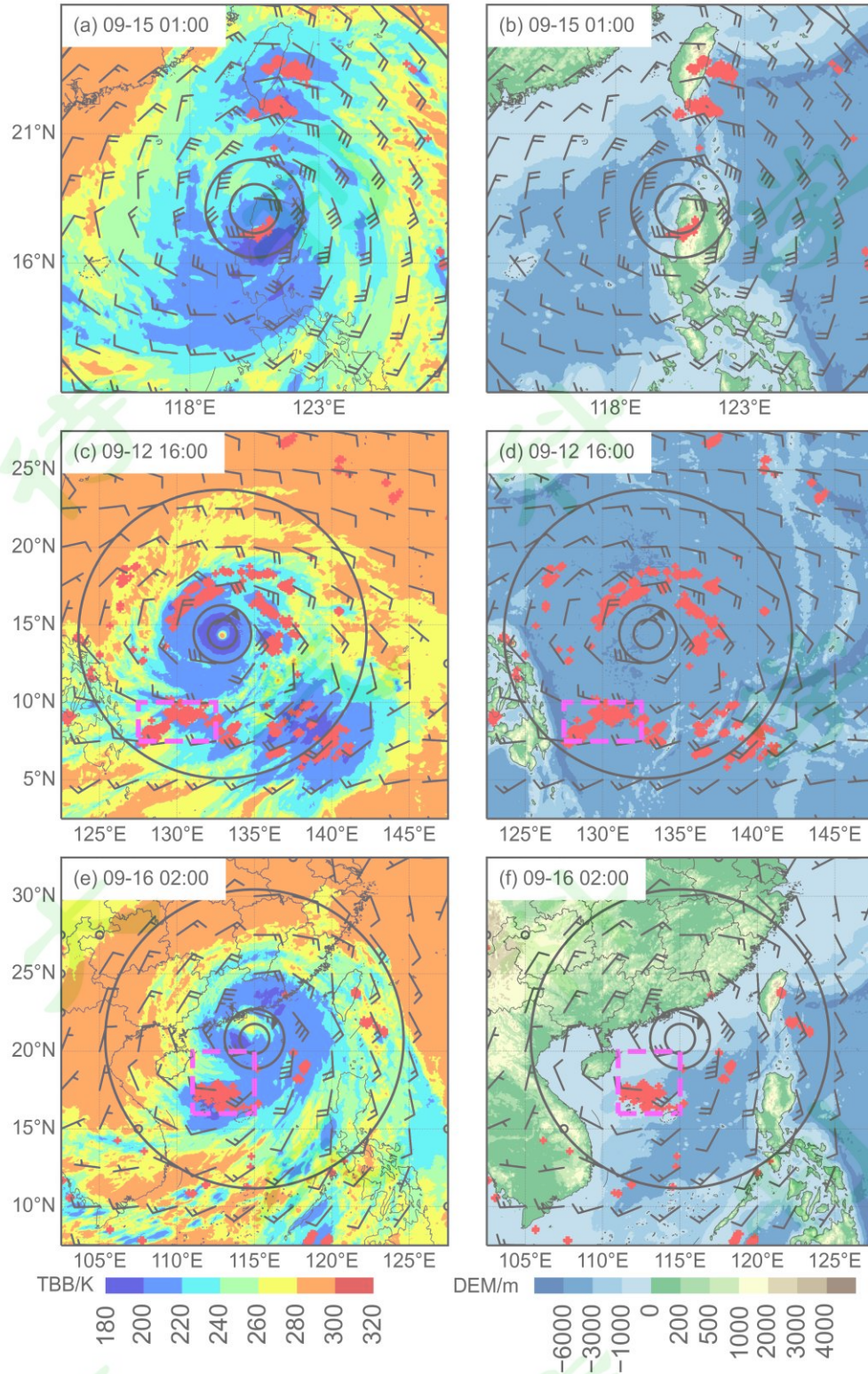


图 12 三个特殊时刻的闪电活动情况（(a, c, e) TBB（填色）；(b, d, f) 海拔（填色）；(c, d, e, f) 粉色矩形框指示研究区域。850hPa 风场，红色“+”代表闪击，黑圈（圆弧）由内到外分别代表距中心半径 100km、200km 和 1000km）

Fig. 12 Lightning activity at three special moments. ((a, c, e) TBB (shading); (b, d, f) altitude (shading); (c, d, e, f) pink rectangular boxes indicate the study area. 850hPa wind field, red "+" represents stroke, and black circle (arc) represents 100km, 200km and 1000km from the center radius from inside to outside respectively)

6.3 外雨带闪电活动与下垫面特征的关系

图 12a 和 b 可见, TC 北部受台湾山脉影响, 在台湾东部和东南部海面的水平风场风力减弱, 气流上升增强形成两个强对流区, 产生大量闪电活动, 该时刻也是该区域产生闪击数最多的时刻。可见, 在 TC 移动过程中, 水平风场易受地形影响减弱, 气流被迫抬升形成强对流区, 进而有利于闪电的发生。

此外, 从图 2 中可见, 有几个闪电高密度区, 其中闪击密度较大、范围较广的区域有棉兰老岛以东海面和海南岛东南方向海面。棉兰老岛以东海面, 超过 96% 的闪击发生在 11 日 22 时至 13 日 4 时之间, 其中小时闪击数量占该区域总闪击数量大于 7% 的时刻有 12 日 3、4、16、17 和 18 时, 均不超过 11%, 选取时间较居中且小时闪击数量较多的 12 日 16 时进行研究。海南岛东南方向海面, 超过 96% 的闪击发生在 15 日 16 时至 16 日 20 时之间, 其中小时闪击数量占该区域总闪击数量大于 5% 的时刻有 15 日 20 时和 16 日 1、2、13、14、15 时, 均不超过 7%, 选取时间较居中且小时闪击数量较多的 16 日 2 时进行研究。

由图 12c-f 可见, 棉兰老岛以东海面 (9 月 12 日 16 时, SuperTY 等级, 图中矩形区域) 和海南岛东南方向海面 (9 月 16 日 2 时, STY 等级, 图中矩形区域) 两个闪电高密度区都处于距岛屿约 300km 的东侧海面, 此区域闪电较多的原因可能是位于 TC 西南方位, 风场经过陆地后携带大量人为气溶胶吹向东南侧海面, 在 TC 临近大陆的污染环境时, 人为气溶胶会引起外雨带对流增强 (Wang et al., 2014; 梁志超等, 2022)。此外, 中底层水平风速过大不利于闪电发生 (郭凤霞等, 2014), 此处的水平风速较弱有利于气溶胶作为云凝结核 (CNN) 参与对流, 在一定浓度下气溶胶的增多使对流强度增加, 产生更多的冰晶和霰粒子, 它们之间发生的碰撞是云内的主要起电过程, 更多的冰晶和霰粒子使得起电过程增强 (Mansell and Ziegler, 2013; 师正等, 2015; 刘俊等, 2018; 孙萌宇等, 2020)。海面可以提供比陆地多的热源和水汽促进 TC 对流发展 (Emanuel et al., 1988; 李瑞等, 2020), 充足的水汽有利于各种水成物粒子的生成, 进而促进云内起电、放电过程 (Williams and S áori, 2004; Shi et al., 2018)。可见, 距岛屿约 300km 的东南侧海面在位于 TC 西南方位时可能是个热源、水汽源与气溶胶的平衡点, 对对流发展的促进作用最强, 与陆地距离过近不能提供足够的热源和水汽源, 与陆地过远人为气溶胶浓度会降低。

由以上的分析可见, 在 TC 发展过程中, 岛屿和陆地的存在对于强对流的发展有着极重要的作用。

7 结论和讨论

本文利用 WLLN 资料、TC 路径数据、TBB 数据和 ERA5 资料。对 2018 年登陆中国的最强台风“山竹”从生成到消亡整个生命周期中的闪电活动特征进行了分析, 得到结论如下:

(1) TC 闪电有较好的三圈结构, 内核闪电密度最大, 内雨带几乎没有闪电, 外雨带闪电数量最多。内核闪电与外雨带闪电的主要发生时间不一致, 内核闪电主要发生在 TC 最大强度之前和最大强度前期, 外雨带闪电主要发生在最大强度中前期和登陆广东前后。TC 外雨带在远海也能产生大量闪电, 闪电峰值约为登陆后峰值的一半。

(2) 闪电活动的方位分布与 TC 强度、所处地理位置及环境密切相关。前期 (SuperTY 等级之前) 闪电分布以东北、西北方位为主, 后期 (SuperTY 等级之后) 以东南、西南方位为主。这可能是前期云系小, 受东北信风影响大, 后期云系大, 受水汽热量和地形影响大所致。

(3) 闪电活动与风圈半径无明显的直接关系。闪电活动多发于风圈半径较小的东南和西南方位。随着风圈半径的增大, 闪电数会增多, 也会不变或减少。在风圈半径不变的情况下, 闪电数也会增加。登陆菲律宾期间, 整体上风圈半径减小, 闪电活动也明显变少。

(4) 内核闪电爆发提前于 TC 最大强度, 且内核累计闪击次数与最大风速变化有较好的相关性, 表明内核闪电爆发可以作为 TC 强度增强的指示器。此外, 内核的闪电活动与对流强度呈现较好的相关性, 对流强度大时闪电活动多。

(5) 闪电活动受下垫面因素影响, 岛屿和陆地的存在对于强对流的发展有着极重要的作用。在地形较高的地区, 气流被迫抬升, 容易形成闪电。TC 西南方位距岛屿约 300km 的东南侧海面, 水汽、热量充足且有较多人为气溶胶输送到外雨带, 有利于上升气流的发展, 进而产生闪电。

致谢 南京信息工程大学魏鸣教授和张其林教授以及中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室郑栋研究员对本文数据收集方面提供帮助, 特此感谢。感谢华盛顿大学地球与空间科学中心提供的 WWLLN 闪电资料。

参考文献 (References)

- Abarca S F, Corbosiero K L, Galarneau Jr T J. 2010. An evaluation of the worldwide lightning location network (WWLLN) using the national lightning detection network (NLDN) as ground truth [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115(D18). doi: 10.1029/2009jd013411.
- Abarca S F, Corbosiero K L, Vollaro D. 2011. The World Wide Lightning Location Network and Convective Activity in Tropical Cyclones [J]. *Monthly Weather Review*, 139(1):175-191. doi: 10.1175/2010MWR3383.1.
- Black R A, Hallett J. 1999. Electrification of the Hurricane [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 56(12):2004-2028. doi: 10.1175/1520-0469(1999)056<2004:EOTH>2.0.CO;2.
- 陈联寿, 丁一汇. 1979. 西太平洋台风概论 [M]. 北京: 科学出版社. Chen Lianshou, Ding Yihui. 1979. Introduction to Typhoon in the Western Pacific (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press.
- 陈联寿, 孟智勇. 2001. 我国热带气旋研究十年进展 [J]. *大气科学*, 03:420-432. Chen Lianshou, Meng Zhiyong. 2001. An Overview on Tropical Cyclone Research Progress in China during the Past Ten Years [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 03:420-432. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2001.03.11.
- 陈淑琴, 李英, 范悦敏, 等. 2021. 台风“山竹”(2018)远距离暴雨的成因分析[J]. *大气科学*, 45(3): 573-587. Chen Shuqin, Li Ying, Fan Yuemin, et al. 2021. Analysis of Long-Distance Heavy Rainfall Caused by Typhoon Mangosteen (2018) [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 45(3): 573-587. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2009.20126.
- DeMaria M, Sampson C R, Knaff J A, et al. 2014. Is tropical cyclone intensity guidance improving? [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 95(3): 387-398. doi: 10.1175/BAMS-D-12-00240.1.
- Emanuel K A. 1988. The maximum intensity of hurricanes[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 45(7): 1143-1155. doi: 10.1175/1520-0469(1988)045<1143:tmioh>2.0.co;2.
- Fierro A O, Leslie L, Mansell E, et al. 2007. A high-resolution simulation of microphysics and electrification in an idealized hurricane-like vortex [J]. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 98(1): 13-33. doi: 10.1007/s00703-006-0237-0.
- Fierro A O, Stevenson S N, Rabin R M. 2018. Evolution of GLM-observed total lightning in Hurricane Maria (2017) during the period of maximum intensity [J]. *Monthly Weather Review*, 146(6): 1641-1666. doi: 10.1175/MWR-D-18-0066.1.

449 Griffin E M, Schuur T J, MacGorman D R, et al. 2014. An electrical and polarimetric analysis of the overland
450 reintensification of Tropical Storm Erin (2007) [J]. *Monthly Weather Review*, 142(6): 2321-2344. doi: 10.1175/MWR-
451 D-13-00360.1.

452 Guimond S R, Heymsfield G M, Turk F J. 2010. Multiscale observations of Hurricane Dennis (2005): The effects of hot
453 towers on rapid intensification [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 67(3): 633-654. doi: 10.1175/2009JAS3119.1.

454 郭凤霞, 刘冰, 白翎, 等. 2014. 中低层水平风速对闪电和降水影响的数值模拟[J]. *高原气象*, 33(04):1135-1145. Guo
455 Fengxia, Liu Bing, Bai Ling, et al. 2014. Numerical Simulation Study on the Effect of Middle and Low-Level
456 Horizontal Wind Speed on Lightning and Precipitation [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 33(04):1135-1145. doi:
457 10.7522/j.issn.1000-0534.2013.00004.

458 He Y C, He J Y, Chen W C, et al. 2020. Insights from Super Typhoon Mangkhut (1822) for wind engineering practices
459 [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 203:104238. doi: 10.1016/j.jweia.2020.104238.

460 Hutchins M L, Holzworth R H, Virts K S, et al. 2013. Radiated VLF energy differences of land and oceanic lightning [J].
461 *Geophysical Research Letters*, 40(10): 2390-2394. doi:10.1002/grl.50406.

462 Jacobson A R, Holzworth R, Harlin J, et al. 2006. Performance assessment of the world wide lightning location network
463 (WWLLN), using the Los Alamos sferic array (LASA) as ground truth [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic*
464 *Technology*, 23(8): 1082-1092. doi: 10.1175/JTECH1902.1.

465 雷小途, 张义军, 马明. 2009. 西北太平洋热带气旋的闪电特征及其与强度关系的初步分析[J]. *海洋学报(中文*
466 *版)*, 31(04):29-38. Lei Xiaotu, Zhang Yijun, Ma Ming. 2009. The preliminary analysis of the lightning characteristics
467 and the relationship between lightning and intensity of tropical cyclone in northwest Pacific [J]. *ACTA*
468 *OCEANOLOGICA SINICA (in Chinese)*, 31(04):29-38. doi:10.3321/j.issn:0253-4193.2009.04.004.

469 李瑞, 尹承美, 胡鹏, 等. 2020. 海气热通量和垂直风切变对强热带风暴“温比亚”(2018)影响研究[J]. *海洋湖沼通报*,
470 (03):7-15. Li Rui, Yin Chengmei, Hu Peng, et al. Effects of Air-sea Heat Flux and Environmental Vertical Wind Shear
471 on Severe Tropical Storm Rumbia (2018) [J]. *Transactions of Oceanology and Limnology (in Chinese)*, (03):7-15.
472 doi:10.13984/j.cnki.cn37-1141.2020.03.002.

473 梁志超, 丁菊丽, 费建芳, 等. 2022. 气溶胶直接和间接效应对台风眼墙和外雨带的影响及其分离贡献 [J]. *中国科学: 地*
474 *球科学*, 52(1):154-170, doi: 10.1360/SSTe-2020-0362. Liang Zhichao, Ding Juli, Fei Jianfang, et al. 2021.
475 Direct/indirect effects of aerosols and their separate contributions to Typhoon Lupit (2009): Eyewall versus peripheral
476 rainbands. *Science China Earth Sciences*, 64(12): 2113-2128, doi:10.1007/s11430-020-9816-7.

477 刘俊, 谭涌波, 师正, 等. 2018. 气溶胶对雷暴云微物理过程和起电影响的数值模拟[J]. *气候与环境研究*, 23 (6): 758-768.
478 Liu Jun, Tan Yongbo, Shi Zheng, et al. 2018. A numerical study of aerosol effects on microphysical process and
479 electrification in thunderstorms [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 23 (6): 758-768,
480 doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2018.18047.

481 Lo H S, Lee Y K, Po H K, et al. 2020. Impacts of Typhoon Mangkhut in 2018 on the deposition of marine debris and
482 microplastics on beaches in Hong Kong [J]. *The Science of the Total Environment*, 716(May10):137172.1-137172.9.
483 doi:10.1016/j.scitotenv.2020.137172.

484 Mansell E R, Ziegler C L. 2013. Aerosol effects on simulated storm electrification and precipitation in a two-moment bulk
485 microphysics model[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 70(7): 2032-2050. doi: 10.1175/JAS-D-12-0264.1.

486 Marks F D, Shay L K, PDT-5. 1998. Landfalling tropical cyclones: Forecast problems and associated research opportunities
487 [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79(2): 305-323. doi: 10.1175/1520-
488 0477(1998)079<0305:lrcfpa>2.0.co;2.

489 Molinari J, Moore P K, Idone V P, et al. 1994. Cloud - to - ground lightning in Hurricane Andrew [J]. *Journal of*
490 *Geophysical Research: Atmospheres*, 99(D8): 16665-16676. doi:10.1029/94jd00722.

491 Molinari J, Moore P, Idone V. 1999. Convective Structure of Hurricanes as Revealed by Lightning Locations [J]. *Monthly*
492 *Weather Review*, 127(4):520-534. doi: 10.1175/1520-0493(1999)127<0520:CSOHR>2.0.CO;2.

潘伦湘, 郗秀书. 2010. 0709 号超强台风圣帕(Sepat)的闪电活动特征 [J]. 大气科学, 34(06):1088-1098. Pan Lunxiang, Qie
 Xiushu. 2010. Lightning Activity in Super Typhoon Sepat (0709) [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in
 Chinese), 34(06):1088-1098. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2010.06.05.
 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(02):252-260.
 Pan Lunxiang, Qie Xiushu, Liu Dongxia, et al. 2010. Lightning Activity Characteristics of Strong Typhoon in
 Northwest Pacific [J]. Science China Earth Sciences, 40(02):252-260. doi : 10.1360/zd2010-40-2-252.
 潘伦湘. 2012. 西北太平洋地区台风闪电活动特征及成因研究 [D]. 中国科学院研究生院博士学位论文. Pan Lunxiang.
 2012. Characteristics and causes of typhoon lightning activity in the Northwest Pacific Ocean [D]. Ph. D. dissertation
 (in Chinese), Graduate University of Chinese Academy of Science.
 Petersen W A, Cifelli R C, Rutledge S A, et al. 1999. Shipborne dual-Doppler operations during TOGA COARE: Integrated
 observations of storm kinematics and electrification [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 80(1): 81-98.
 doi: 10.1175/1520-0477(1999)080<0081:SDDODT>2.0.CO;2.
 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.
 邱振峰. 2020. 西北太平洋台风演变过程中电学活动特征研究 [D]. 南京信息工程大学硕士学位论文. Qiu Zhenfeng.
 2020. Characteristics of electrical activities in the evolution of typhoons in the northwest Pacific Ocean [D]. M. S.
 thesis (in Chinese), Nanjing University of Information Science & Technology. doi:
 10.27248/d.cnki.gnjqc.2020.000201.
 Reinhart B , Fuelberg H , Blakeslee R , et al. 2014. Understanding the relationships between lightning, cloud microphysics,
 and airborne radar-derived storm structure during Hurricane Karl (2010) [J]. Monthly Weather Review, 142(2):590-605.
 doi: 10.1175/MWR-D-13-00008.1.
 师正, 谭涌波, 唐慧强, 等. 2015. 气溶胶对雷暴云起电以及闪电发生率影响的数值模拟 [J]. 大气科学, 39 (5): 941-952.
 Shi Zheng, Tan Yongbo, Tang Huiqiang, et al. 2015. A Numerical Study of Aerosol Effects on the Electrification and
 Flash Rate of Thunderstorms [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 39 (5): 941-952,
 doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1412.14230.
 Shi Z, Tan Y, Liu Y, et al. 2018. Effects of relative humidity on electrification and lightning discharges in thunderstorms[J].
 Terrestrial, Atmospheric & Oceanic Sciences, 29(6). doi: 10.3319/TAO.2018.09.06.01.
 Stevenson S N, Corbosiero K L, Abarca S F. 2016. Lightning in eastern North Pacific tropical cyclones: A comparison to the
 North Atlantic[J]. Monthly Weather Review, 144(1): 225-239. doi:10.1175/MWR-D-15-0276.1.
 孙萌宇, 郗秀书, 刘冬霞, 等. 2020. 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, 63(05): 1766-1774.
 Sun Mengyu, Qie Xiushu, Liu Dongxia, et al. 2020. Analysis of potential effects of aerosol on lighting activity in
 Beijing metropolitan region. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 63(05): 1766-1774. doi:
 10.6038/cjg2020N0095.
 Takahashi T. 1978. Riming electrification as a charge generation mechanism in thunderstorms [J]. Journal of Atmospheric
 Sciences, 35(8): 1536-1548. doi: 10.1175/1520-0469(1978)035<1536:reaacg>2.0.co;2.
 Virts K S, Wallace J M, Hutchins M L, et al. 2013. Highlights of a new ground-based, hourly global lightning climatology
 [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 94(9): 1381-1391. doi: 10.1175/BAMS-D-12-00082.1.
 王芳, 郗秀书, 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.
 王晓雅, 蒋卫国, 邓越, 等. 2019. “山竹”台风影响地区的小时降雨动态变化及危险性动态评估 [J]. 灾害学,
 34(03):202-208. Wang Xiaoya, Jiang Weiguo, Deng Yue, et al. 2019. Hourly Rainfall Dynamics and Hazard Dynamic

536 Assessment of Mangkhut Typhoon-affected Areas [J]. Journal of Catastrophology (in Chinese), 34(03):202-208.
 537 doi:10.3969/j.issn.1000-811X.2019.03.037.
 538 Wadler J B, Rogers R F, Reasor P D. 2018. The relationship between spatial variations in the structure of convective bursts
 539 and tropical cyclone intensification as determined by airborne Doppler radar [J]. Monthly Weather Review, 146(3):
 540 761-780. doi: 10.1175/MWR-D-17-0213.1.
 541 Wang B, Zhou X. 2008. Climate variation and prediction of rapid intensification in tropical cyclones in the western North
 542 Pacific [J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 99(1): 1-16. doi: 10.1007/s00703-006-0238-z.
 543 Wang Y, Lee K H, Lin Y, et al. 2014. Distinct effects of anthropogenic aerosols on tropical cyclones [J]. Nature Climate
 544 Change, 4:368–373. doi: 10.1038/nclimate2144.
 545 Wiens K C, Rutledge S A, Tessendorf S A. 2005. The 29 June 2000 supercell observed during STEPS. Part II: Lightning and
 546 charge structure [J]. Journal of the atmospheric sciences, 62(12): 4151-4177. doi: 10.1175/JAS3615.1.
 547 Williams E R. 1988. The electrification of thunderstorms [J]. Scientific American, 259(5): 88-99. doi:
 548 10.1038/scientificamerican1188-88.
 549 Williams E R, Sári G. 2004. Lightning, thermodynamic and hydrological comparison of the two tropical continental
 550 chimneys[J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 66(13-14): 1213-1231. doi:
 551 10.1016/j.jastp.2004.05.015.
 552 杨美荣, 袁铁, 鄧秀书, 等. 2011. 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,
 553 69(02):370-380. Yang Meirong, Yuan Tie, Qie Xiushu, et al. 2011. An analysis of the characteristics of lightning
 554 activities, radar reflectivity and ice scattering for tropical cyclones over the western North Pacific [J]. Acta Meteor.
 555 Sinica (in Chinese), 69(02):370-380. doi:10.11676/qxxb2011.032.
 556 杨云月, 许涛, 罗翠榆, 等. 2020. 典型厄尔尼诺期间台风降水 $\delta \sim (18)^\circ\text{O}$ 变化分析:以 2018 年 22 号台风“山竹”为例 [J].
 557 热带海洋学报, 39(04):34-41. Yang Yunyue, Xu Tao, Luo Cuiyu. 2020. Analysis on the variation of typhoon
 558 precipitation $\delta \text{ }^{18}\text{O}$ during typical El Niño event: A case study of Typhoon Mangkhut (2018) [J]. Journal of Tropical
 559 Oceanography (in Chinese), 39(04):34-41. doi: 10.11978/2019081.
 560 Yang J, Li L, Zhao K, et al. 2019. A comparative study of Typhoon Hato (2017) and Typhoon Mangkhut (2018)—Their
 561 impacts on coastal inundation in Macau[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 124(12): 9590-9619.
 562 doi:10.1029/2019jc015249.
 563 张文娟. 2013. 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].中国气象科学研究院. Zhang Wenjuan. 2013.
 564 Characteristics of lightning activity in tropical cyclones and their relationship with the evolution of cyclone
 565 characteristics [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Chinese Academy of Meteorological Sciences.
 566 Zhang W, Zhang Y, Zheng D, et al. 2012. Lightning distribution and eyewall outbreaks in tropical cyclones during landfall
 567 [J]. Monthly weather review, 140(11): 3573-3586. doi:10.1175/MWR-D-11-00347.1.
 568 Zhang W, Hui W, Lyu W, et al. 2020a. FY-4A LMI Observed Lightning Activity in Super Typhoon Mangkhut (2018) in
 569 Comparison with WWLLN Data[J]. Journal of Meteorological Research, 34(2). doi: 0.1007/s13351-020-9500-4.
 570 Zhang W, Zhang Y, Zheng D, et al. 2020b. Quantifying the contribution of tropical cyclones to lightning activity over the
 571 Northwest Pacific[J]. Atmospheric Research, 239: 104906. doi:10.1016/j.atmosres.2020.104906.
 572 朱润鹏,袁铁,李万莉,等. 2013. 基于卫星观测资料的全球闪电活动特征研究 [J]. 气候与环境研究, 18(05):639-650. Zhu
 573 Runpeng, Yuan Tie, Li Wanli, et al. 2013. Characteristics of Global Lightning Activities Based on Satellite
 574 Observations [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 18(05):639-650. doi:10.3878/j.issn.1006-
 575 9585.2012.12017.