

周鑫, 张文娟, 张义军, 等. 西北太平洋热带气旋闪电时空尺度和光辐射能. 应用气象学报, 2022, 33(1): 69-79.
DOI: 10.11898/1001-7313.20220106

西北太平洋热带气旋闪电时空尺度和光辐射能

周鑫¹⁾²⁾ 张文娟^{1)*} 张义军³⁾⁴⁾ 郑栋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⁾(成都信息工程大学电子工程学院, 成都 610225)

³⁾(复旦大学大气与海洋科学系/大气科学研究院, 上海 200438)

⁴⁾(复旦大学海洋气象灾害联合实验室, 上海 200438)

摘 要

利用 1998—2014 年热带测雨(Tropical Rainfall Measuring Mission, TRMM)卫星上携带的闪电成像仪(lightning imaging sensor, LIS)数据, 建立西北太平洋热带气旋闪电数据集, 并研究该区域热带气旋闪电属性特征。结果表明: 热带气旋闪电各属性值均呈对数正态分布特征, 热带气旋极大值闪电更倾向于发生在海洋和热带低压强度等级。不同强度等级(热带低压、热带风暴、台风)的热带气旋闪电持续时间无明显差异, 但热带风暴强度等级的闪电空间尺度和光辐射能平均值均低于热带低压和台风。对于热带气旋的不同区域(内核、内雨带、外雨带), 内核闪电的持续时间最大、光辐射能最强, 且持续时间和光辐射能随着闪电与热带气旋中心距离的增加而逐渐减小, 外雨带达到最小值。在海陆差异方面, 热带气旋闪电在海洋上的空间尺度和光辐射能比陆地大, 而闪电持续时间无明显差异。与非热带气旋闪电相比, 热带气旋闪电的延展距离、通道面积和光辐射能均更小, 但闪电平均持续时间更长。

关键词: 闪电成像仪; 西北太平洋; 热带气旋; 闪电属性

引 言

热带气旋是影响沿海地区的主要灾害性天气系统之一, 它产生的狂风、暴雨、巨浪和风暴潮, 给沿岸地区人民生命和国家财产安全带来严重威胁^[1]。西北太平洋地区热带气旋生成较多, 其中约 80% 发展成台风。台风造成途经沿海地区严重大风、暴雨、风暴潮等灾害^[2], 因此加强西北太平洋区域热带气旋的研究和预报具有重要意义。很多观测和研究表明: 热带气旋不仅存在独特的对流结构特征^[3-5], 还常伴随闪电活动, 且闪电活动与热带气旋的对流演变和强度变化密切相关^[6-11]。

随着闪电探测技术的发展, 针对西北太平洋热带气旋闪电活动特征已开展一系列研究。雷小途等^[12]利用热带测雨(Tropical Rainfall Measuring

Mission, TRMM)卫星上携带的闪电成像仪(lightning imaging sensor, LIS)探测数据, 分析西北太平洋热带气旋闪电特征, 发现眼壁、内雨带和外雨带普遍存在闪电现象, 且闪电频数与热带气旋强度及其变化存在一定关系。热带气旋闪电密度具有三圈分布的特性, 即内核和外雨带闪电密度较高, 内雨带闪电密度最低^[7, 10], 强度较弱的热带低压和热带风暴中平均闪电频次相对较高^[9-10]。杨美荣等^[13]研究登陆我国的 46 个热带气旋发现, 当强度达到强热带风暴等级后, 气旋强度越强, 平均闪电数量反而越少。Zhang 等^[14]分析登陆我国的 33 个热带气旋发现, 随着强度等级的增加, 闪电密度大值区从眼壁区域(0~60 km)转移到外雨带区域(180~500 km)。杨宁等^[15]发现台风中心最大风速的发生时间多滞后于闪电频数的峰值时刻。Pan 等^[16]发现热带气旋登陆后对流活动增强, 导致闪电活动增强。Kong

2021-10-12 收到, 2021-12-03 收到再改稿。

资助项目: 国家重点研发计划(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, 邮箱: zwj@cma.gov.cn

等^[17]利用全球闪电定位网数据研究发现,西北太平洋地区热带气旋闪电活动的频数和峰值分布与最大风速及其变化存在一定相关性。尽管有关西北太平洋热带气旋闪电的研究已开展多年,但大多集中在闪电频次或闪电密度的时空分布特征、闪电活动与热带气旋强度变化的关系方面,有关热带气旋闪电属性的研究鲜见报道。

闪电活动的表征参量除了闪电频次和闪电密度外,还包括闪电属性特征,即时间尺度、空间尺度和辐射强度等。闪电时间尺度指闪电的持续时间,空间尺度指闪电的延展距离和通道面积,辐射强度指闪电的电流和光辐射能等。研究发现,全球闪电属性最高值位于美国东部,最低值位于印度^[18-20]。超级单体中闪电面积与闪电频次在空间上呈反相关关系,当对流活动相对较弱时,闪电倾向于具有更大的尺度或光辐射能^[21-23]。利用 TRMM 卫星 LIS 闪电数据,一些学者对全球热带和亚热带中低纬度区域的闪电时空尺度和辐射能进行研究,指出二者均具有明显的海陆特征差异,并且与陆地闪电相比,海洋闪电具有更大属性值^[18-20]。郟秀书等^[24]通过分析全球 13 个地区的闪电光辐射能和持续时间之间的关系,发现二者平均值呈显著线性相关,说明放电强度大的闪电,持续时间也长,且光辐射能及持续时间表现出随闪电数量增多而减少的趋势。闪电频次、尺度和强度等闪电属性特征主要受雷暴动力过程影响。Bruning 等^[21]提出在雷暴弱对流或非对流区域,云中电荷结构更倾向于形成大电荷区,有利于大尺度闪电放电,但闪电频次较低;在雷暴强对流区,湍流混合极有可能将大电荷区分为相对较小的电荷区,电荷结构以正电荷区与负电荷区相互交错分布形态为主,有利于产生频次高但空间尺度小的闪电活动。

为了认识热带气旋闪电属性特征,揭示其与陆地雷暴闪电属性的差异,本研究利用 TRMM 卫星

LIS 闪电数据,以西北太平洋热带气旋闪电属性特征为主要对象开展研究,包括以下内容:①西北太平洋热带气旋闪电的时空尺度和辐射能参量的分布范围,其与陆地雷暴闪电属性参量的差异;②不同区域(内核、内雨带、外雨带)、不同强度等级(热带低压、热带风暴、台风)热带气旋闪电属性的差异;③登陆前、后(即发生在海洋和陆地)热带气旋闪电属性的差异。研究以上问题有助于进一步认识热带气旋闪电活动特征及其所指示的强对流活动发生发展规律。

1 数据和方法

1.1 闪电数据

研究使用的闪电数据来源于美国国家航空航天局提供的 TRMM 卫星 LIS 闪电数据(<https://ghrc.nsstc.nasa.gov/hydro/details/lislip>)。TRMM 卫星 1997 年 11 月发射,2015 年停止观测。TRMM 卫星轨道倾角为 35° ,2001 年 8 月轨道高度由 350 km 抬升至 402.5 km。LIS 通过 128×128 像素的电荷耦合元件阵列探测闪电光信号,在地表的视野为 500~550 km,空间分辨率为 3~6 km,用于观测 $38^\circ\text{S} \sim 38^\circ\text{N}$ 范围内的闪电活动。戴建华等^[25]研究表明:LIS 全天的探测效率为 $(88 \pm 9)\%$,白天和夜间的探测效率分别为 $(73 \pm 11)\%$ 和 $(93 \pm 4)\%$ 。LIS 闪电数据主要包括:事件,成像仪单个感应点探测到超过特定阈值的光脉冲;组,在相邻像素点上探测到的 2 ms 内 1 个或多个闪电事件的集合;闪电,由时间间隔不超过 330 ms 和空间间隔不超过 5.5 km 的 1 个或多个组组成,一般视为 1 次物理意义上的闪电;区域,空间间隔不超过 16.5 km 分离的闪电构成,近似认为是 1 个雷暴单体。本文使用 LIS 闪电数据中事件和闪电参量,时间为 1998—2014 年,闪电属性参量见表 1。

表 1 闪电属性参量

Table 1 Lightning attribute parameters

参量	物理含义
发生时间	单次 LIS 闪电第 1 个事件发生时间
发生位置	单次 LIS 闪电经过光辐射能加权平均后的中心点经纬度
光辐射能	单次 LIS 闪电包含的所有事件光辐射能之和(单位: $\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$)
持续时间	单次 LIS 闪电的第 1 组与最后 1 组间的时间差(单位: s)
通道面积	单次 LIS 探测到的亮度超过背景光辐射能阈值的非重叠事件像素面积之和(单位: km^2)
延展距离	单次 LIS 闪电包含的所有事件中相距最远两个事件的距离(单位: km)

1.2 热带气旋最佳路径数据

热带气旋强度和路径数据来源于中国气象局上海台风研究所整编的西北太平洋热带气旋最佳路径数据集。该数据集提供热带气旋每 6 h(或 3 h)的中心位置、中心气压、风速等信息^[26]。利用线性插值法将最佳路径数据插值成逐小时数据,得到热带气旋逐小时的位置、强度等信息。根据中心最大平均风速,本文将热带气旋划分为 3 个强度等级:①热带低压等级(风速为 $10.8 \sim 17.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),②热带风暴等级(风速为 $17.2 \sim 32.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,包括传统分类中的热带风暴和强热带风暴),③台风等级(风速不小于 $32.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,包括传统分类中的台风、强台风和超强台风)。

本文研究对象为 1998 年 1 月—2014 年 12 月每日 18:00—次日 06:00(北京时,下同)内 TRMM 卫星 LIS 在西北太平洋地区($0^\circ \sim 55^\circ \text{N}$, $100^\circ \sim 180^\circ \text{E}$)探测的热带气旋(共 362 个样本)。由于极轨卫星的扫描特点,LIS 无法持续探测热带气旋整个生命史的闪电活动,每个轨道监测大约 90 s 的独立热带气旋样本,1998 年 1 月—2014 年 12 月 LIS 共获得 362 个热带气旋的 1305 个独立样本,包括 381 个热带低压独立样本,555 个热带风暴独立样本和 369 个台风独立样本。图 1 给出研究时间内 LIS 获得的西北太平洋所有热带气旋独立样本中心位置。

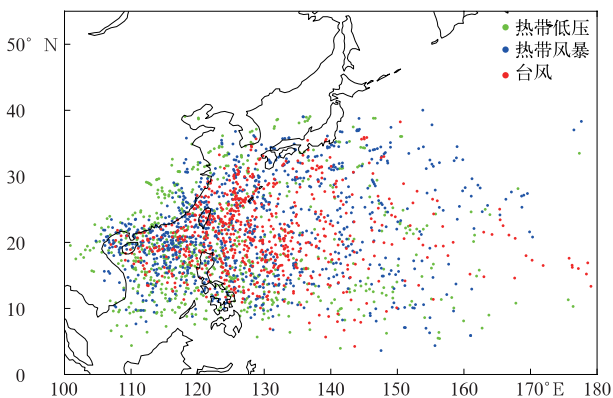


图 1 1998—2014 年 LIS 获得的西北太平洋热带气旋独立样本中心位置

Fig. 1 The center position of individual tropical cyclone overpass observed by LIS during 1998—2014

1.3 研究方法

以往研究表明:西北太平洋热带气旋闪电主要发生在距离中心 500 km 范围内^[8,14,27],因此本文将发生在距离热带气旋中心 500 km 范围内的闪电定

义为热带气旋闪电,范围之外的闪电定义为非热带气旋闪电。将热带气旋在径向方向划分为内核、内雨带和外雨带 3 个区域,范围分别定义为 $0 \sim 100 \text{ km}$, $100 \sim 200 \text{ km}$ 和 $200 \sim 500 \text{ km}$ 。

由于光学闪电信号的探测受到背景光辐射的影响,LIS 在白天和夜间对闪电的探测性能存在差异。尤金等^[28]发现 LIS 探测的闪电事件最小光辐射能在 09:00—14:00(白天)和 18:00—次日 06:00(夜间)两个时段相对稳定。尽管如此,LIS 白天时段的探测效率低于夜间,探测的闪电样本量较少,且白天受到光照影响,LIS 探测的闪电属性值与真实值存在一定偏差^[24]。为了尽可能避免这种影响,本文选择 LIS 探测性能相对稳定且样本量相对较大的夜间时段进行研究。此外,为保证 LIS 闪电数据的可靠性,将持续时间等于 0 s 或大于 3 s,或延展距离小于 4 km 或大于 1000 km 的闪电剔除,该数据筛选方法与尤金等^[28]一致。经过质量控制后,闪电数据样本共 21363 个。

根据研究目的本文将热带气旋闪电分为以下 3 类:①按照闪电发生的区域,分为海洋热带气旋闪电(海洋上热带气旋范围内的闪电)和陆地热带气旋闪电(亚洲大陆上热带气旋范围内的闪电,陆地区域不包括菲律宾、日本、台湾岛和海南岛等岛屿),占比分别为 74% 和 26%;②按照闪电发生时热带气旋所处的强度等级,分为热带低压闪电、热带风暴闪电和台风闪电,占比分别为 27%,51% 和 22%;③按照闪电发生在热带气旋的区域,分为内核闪电、内雨带闪电和外雨带闪电,占比分别为 7%,9% 和 84%。

2 热带气旋闪电属性参量及其分布特征

2.1 概率及累积分布特征

图 2 给出不同强度等级(热带低压、热带风暴和台风)热带气旋闪电属性(持续时间、延展距离、通道面积和光辐射能)的概率及累积概率分布。不同强度等级热带气旋闪电各属性均符合对数正态分布的特点,即大部分样本分布在闪电属性数值较小的区域,而小概率值覆盖较宽的闪电属性大值区,且概率随着属性值的增加而缓慢减小。热带气旋闪电的持续时间峰值位于 $0 \sim 0.1 \text{ s}$,延展距离峰值位于 $12 \sim 16 \text{ km}$,通道面积峰值位于 $100 \sim 200 \text{ km}^2$,光辐射能峰值位于 $0 \sim 0.2 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ 。可以看到,热带气旋闪电属性峰值的分布与尤金等^[28]揭示的西北

太平洋海洋雷暴系统的闪电属性峰值分布一致,但与陆地雷暴系统存在差异。东亚陆地雷暴系统的闪电延展距离峰值区间位于 $8\sim 12\text{ km}$ ^[28],热带气旋闪电延展距离峰值落区大于陆地雷暴系统。由累积概率曲线可知,热带气旋强度越强,持续时间短的闪电样本概率越大。如在持续时间小于 0.3 s 的闪电

中,台风所占比例大于热带风暴和热带低压;而当闪电持续时间大于 0.7 s 后,热带低压和热带风暴的比例超过台风。在延展距离和光辐射能方面,热带风暴累积概率曲线一直大于热带低压和台风,表明在热带风暴强度阶段,延展距离较小和光辐射能较弱的闪电样本概率相对热带低压和台风更大。

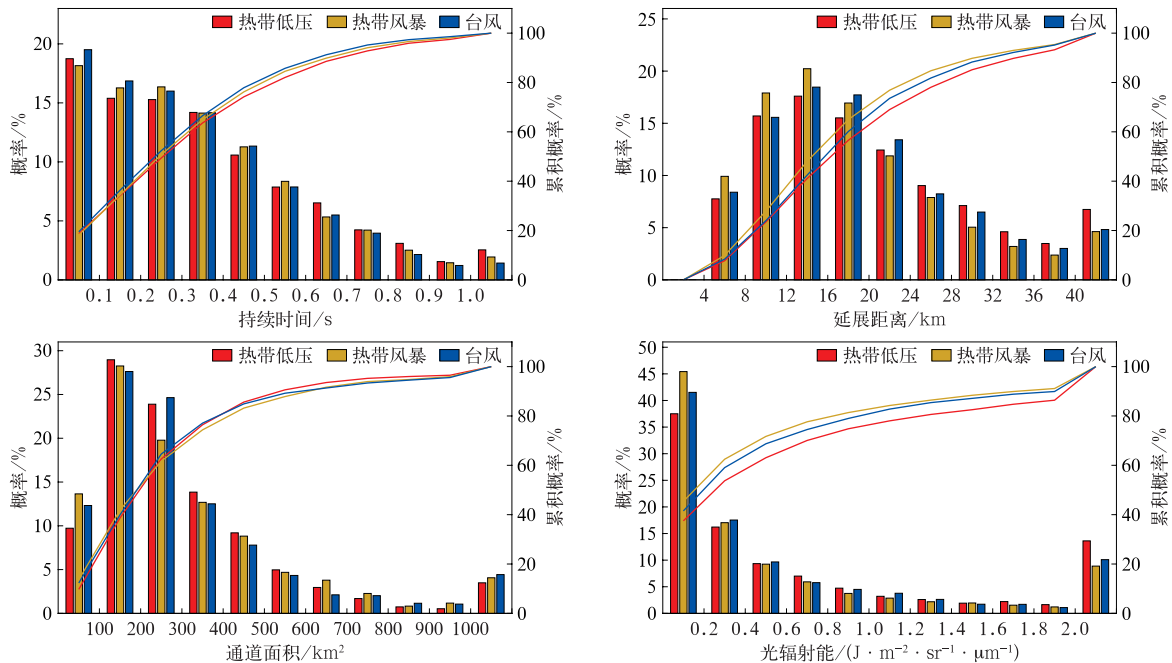


图2 不同强度等级热带气旋闪电参量的概率(柱状)及累积概率(曲线)分布

Fig. 2 Probability(the column) and cumulative probability(the curve) distributions of tropical cyclone lightning parameters at different intensity levels

图3是热带气旋不同区域(内核、内雨带、外雨带)闪电属性的概率及累积概率分布特征。内核、内雨带和外雨带各区域闪电的属性概率分布均呈对数正态分布的特点。热带气旋不同区域闪电的持续时间、延展距离、通道面积和光辐射能,其峰值分布区间与图2相同。由持续时间的累积概率分布曲线看到,内核位于内雨带与外雨带下方,表明内核中持续时间短的闪电样本概率小于内雨带和外雨带区域。在空间尺度(包括延展距离和通道面积)和光辐射能方面,累积概率分布曲线中外雨带位于最上方,中间是内雨带,下面是内核,表明离热带气旋中心越远的区域(如外雨带),空间尺度较小和光辐射能较弱的闪电样本发生概率更大。

热带气旋闪电属性各参量间均呈显著相关(均达到 0.05 显著性水平):热带气旋闪电的延展距离和通道面积关系非常紧密(相关系数 $r=0.99$),闪

电空间尺度和光辐射能关系也非常紧密($r=0.81$)。闪电持续时间与闪电延展距离($r=0.58$)、通道面积($r=0.33$)以及光辐射能($r=0.36$)之间相关较显著。Peterson等^[18]和尤金等^[28]也发现闪电持续时间与闪电空间扩展尺度以及光辐射能之间的对应关系较差。Peterson等^[18]甚至指出,具有更长持续时间的LIS地闪,对应的回击电流强度偏弱。Zheng等^[29]还发现随着闪电密度的增大,闪电持续时间和空间尺度最初均快速减小,但当达到某一闪电密度临界值时,闪电通道的空间尺度变化不大,闪电持续时间反而呈整体增长趋势。不同闪电放电物理过程的差异决定闪电通道时空形态特征之间关系的复杂性。闪电通道时空形态随季节、下垫面、母体雷暴类型、闪电类型等呈现出不同的变化特征,需要更加深入的研究。

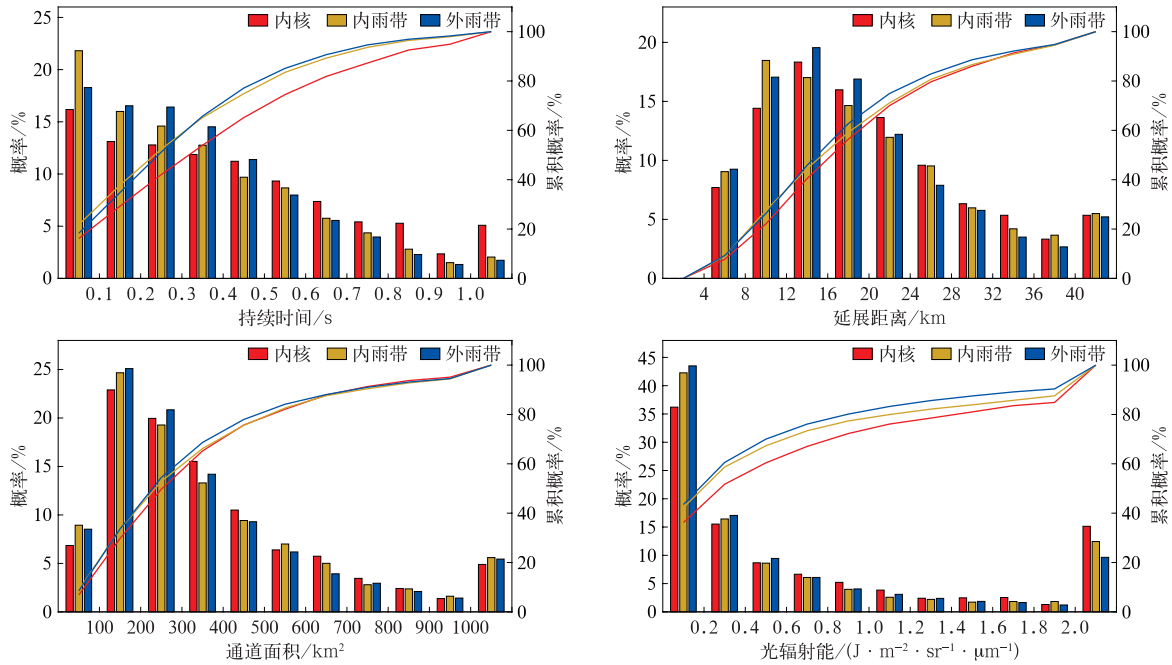


图 3 热带气旋不同区域闪电参量概率(柱状)及累积概率(曲线)分布

Fig. 3 Probability(the column) and cumulative probability(the curve) distributions of lightning parameters in different areas of tropical cyclone

2.2 热带气旋极大值闪电分布

将热带气旋闪电属性值前 10% 的闪电定义为热带气旋极大值闪电,统计不同分类条件下,热带气旋极大值闪电数量占该类闪电总数的比例(表 2)。如计算热带气旋持续时间前 10% 的极大值闪电中发生在热带低压下的比例,需选择热带气旋闪电持续时间前 10% 的闪电,统计其中发生在热带低压强度等级的闪电数量,计算其占有所有热带低压强度等级闪电的比例(11.32%)。由表 2 可以看到,在不同强度阶段中,热带气旋极大值闪电更易发生在弱强度等级的气旋中,即持续时间长、空间尺度大和光辐射能强的闪电在热带低压等级中占有最大比例(11.32%~13.31%)。台风等级中空间尺度和光辐射能大的极值闪电比例高于热带风暴等级,但持续时间长的极值闪电比例低于热带风暴。统计陆地与海洋极大值闪电的比例,按照闪电属性参量持续时

间、延展距离、通道面积和光辐射能顺序,依次是 9.46%,7.31%,7.25%,7.47%和 10.08%,10.76%,10.81%,10.66%,表明海洋热带气旋极大值闪电发生在海洋的平均比例高于陆地,即持续时间长、空间尺度大和光辐射能强的闪电更倾向于发生在海洋(平均比例为 10.08%~10.81%)。

在热带气旋不同区域,持续时间长和光辐射能强的极大值闪电易发生在内核(比例分别为 18.13%和 14.87%),而通道面积大的极大值闪电易发生在内雨带区域(比例为 10.55%),外雨带极大值闪电所占比例最低。尤金等^[28]发现西北太平洋地区持续时间长、延展距离大和光辐射能强的闪电倾向于发生在高度较高和面积较大的雷暴中。内核极大值闪电较高的比例可能表明热带气旋在海洋上某些特定发展过程中,内核的云顶高度更高、对流强度更强。

表 2 不同分类中热带气旋极大值闪电数量占该类闪电总数的比例(单位:%)

Table 2 Proportion of the number of extreme lightning to the total number of lightning within tropical cyclones in different categories(unit:%)

闪电属性	热带气旋强度等级			热带气旋区域		
	热带低压	热带风暴	台风	内核	内雨带	外雨带
持续时间	11.32	10.08	8.69	18.13	10.72	9.24
延展距离	12.70	8.72	9.73	11.35	11.42	9.74
通道面积	12.03	8.88	10.36	9.92	10.55	9.95
光辐射能	13.31	8.69	9.66	14.87	12.22	9.36

3 热带气旋闪电属性特征差异

3.1 热带气旋不同强度和区域闪电属性差异

为了分析闪电属性与热带气旋强度之间的关系,计算不同强度等级热带气旋4种闪电属性特征的平均值、中值和分布范围(图4)。由图4可见,闪电持续时间在热带气旋3个强度等级间无明显差异,在闪电空间尺度和光辐射能方面,热带风暴强度等级的闪电属性中值和平均值均低于热带低压和台

风强度等级,为3个强度等级最小,表明:当热带气旋由热带低压逐渐发展成较为稳定的热带风暴和强热带风暴时,闪电属性特征值下降;当热带气旋进一步增强,达到台风强度等级时,闪电的空间尺度和辐射能量再次增强。西北太平洋热带气旋闪电活动和气旋强度的关系研究表明:处于热带风暴强度等级的热带气旋,其闪电频次最大,均大于热带低压和台风的闪电频次^[9-10]。本研究显示热带风暴阶段闪电的空间尺度与光辐射能最小,这种光辐射能与闪电频次呈反相关的结果与以往研究一致^[23-24]。

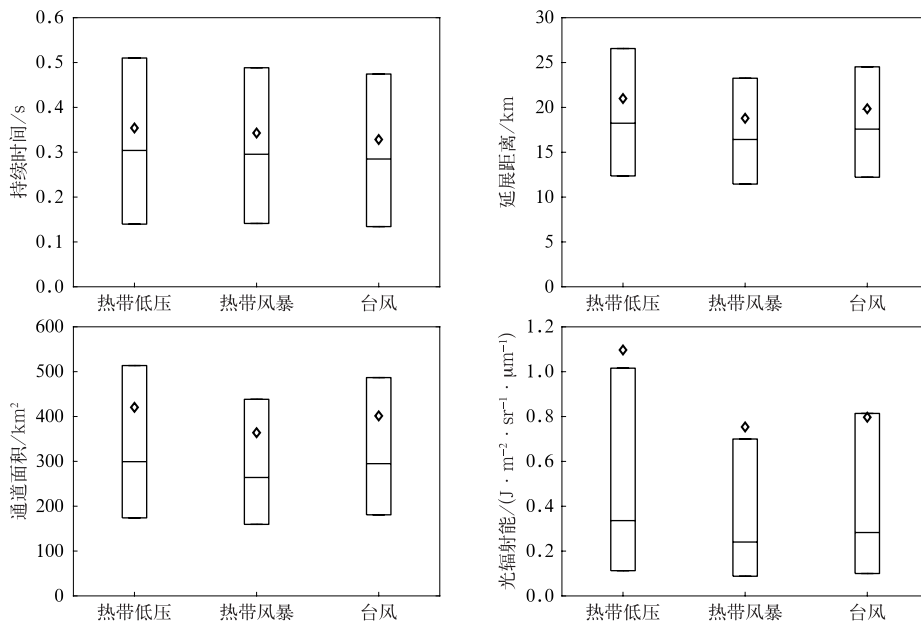


图4 不同强度等级热带气旋闪电属性参量

(方框底部和顶部边缘分别表示第25和第75分位数;方框内水平线代表中值,菱形代表平均值)

Fig. 4 Lightning attributes at different tropical cyclone intensity levels

(the bottom and top edges of the box denote the 25th and 75th percentiles, respectively;

the horizontal line in the box denotes the median value, and the diamond denotes the average value)

热带气旋不同区域发生的闪电属性参数分布如图5所示。由图5可以看到,闪电的延展距离和通道面积在热带气旋的不同区域内无明显差异。但值得注意的是,与内雨带和外雨带相比,内核的闪电持续时间和光辐射能(包括中值和平均值)最高,说明内核闪电的平均持续时间最长,平均光辐射能最强。光辐射能中值在内核、内雨带和外雨带依次递减,表明随着闪电与热带气旋中心距离增加,闪电光辐射能逐渐减小。Zheng等^[22]对一次陆地超级单体的观测研究发现,强雷暴倾向于产生持续时间短、光辐射能小的闪电。本研究发现,与内核相比,外雨带闪电的持续时间更短和光辐射能更小,一定程度上说明外雨带比内核和内雨带的对流活动更强。内核在特定阶段倾向于产生较强的对流活动,特别是在热

带气旋快速增强和眼壁置换阶段^[13],会出现内核闪电爆发现象^[14]。但从闪电属性总体分布推测,热带气旋内核的整体对流活跃程度较外雨带弱。闪电参量特征由雷暴中的电荷结构决定,电荷结构受云面积和对流强度共同影响。通常面积较大的云产生较大有效电荷区的可能性较大,但外雨带强对流引起的强烈湍流混合可能将大电荷区分成相对较小的电荷区^[21],从而使闪电特征参量值减小。

热带气旋的闪电属性与气旋强度变化有关。已有研究表明:热带气旋强度变化的不同阶段,闪电属性呈现出不同特征^[30-31]。Duran等^[30]对飓风Dorian(2019)研究发现,在增强和减弱过程中,内核均发生闪电爆发,且增强过程的闪电面积更大、能量更强。Ringhausen等^[31]对飓风Harvey(2017)研究指

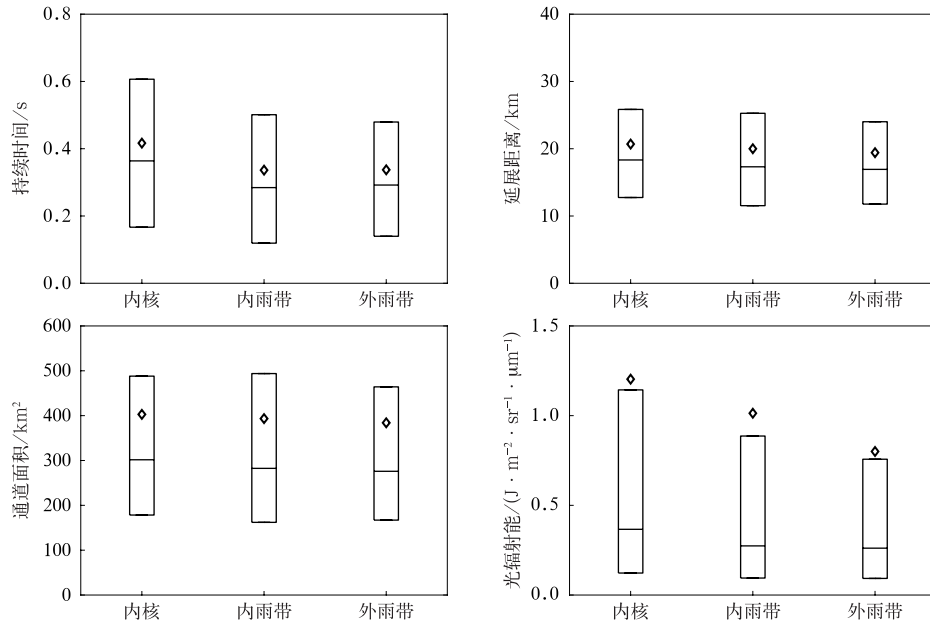


图 5 热带气旋不同区域闪电属性参量

(方框底部和顶部边缘分别表示第 25 和第 75 分位数;方框内水平线代表中值,菱形代表平均值)

Fig. 5 Lightning attributes in different tropical cyclone regions

(the bottom and top edges of the box denote the 25th and 75th percentiles, respectively;

the horizontal line in the box denotes the median value, and the diamond denotes the average value)

出,外雨带闪电面积和持续时间的减小及眼壁闪电能量和闪电中包含事件数量减少,是热带气旋增强的前兆。

外雨带和眼壁区的闪电属性与热带气旋强度均呈负相关关系。随着热带气旋强度的增加,外雨带闪电数量增加,但闪电尺度减小。这是由于热带气旋增强时外雨带对流增强,强上升气流将电荷抬升到更高的高度。由于闪电击穿阈值随高度呈指数下降,因此相同电场下外雨带闪电更易发生。此外,强上升气流导致强湍流,湍流增加产生更小的电荷口袋区,从而在外雨带产生面积更小、但更频繁的闪电活动^[31]。眼壁区闪电属性与热带气旋强度的负相关并不显著。当眼壁区闪电包含的闪电事件数量减少、闪电能量降低时,热带气旋将增强。模式研究发现当飓风增强时,眼壁内电荷区高度随时间下降,下层正电荷区与中间负电荷区大小相当,阻碍通道向地面传播,从而抑制地闪、有利于云闪的产生^[32]。飓风增强时眼壁区云闪比例增加,闪电能量也降低,这是因为云闪比地闪尺度更小、平均能量更低,即云闪越多,眼壁区整体的闪电属性越小;从云中较低位置开始的闪电必须穿过更多的云层,散射增加导致到达云顶的光减少,因此卫星探测到的眼壁区闪电能量降低^[31]。

上述研究表明:闪电能量和闪电尺度用于区分

增强和减弱过程的闪电爆发,闪电属性可为热带气旋强度变化提供信息。静止卫星闪电成像仪能够对陆地和海洋闪电活动进行连续探测,因此可提供更多热带气旋闪电的有益信息。热带气旋闪电位置、闪电频次、闪电属性的变化有助于识别热带气旋强度和结构的变化,可辅助预报员对热带气旋增强进行有效判断。

3.2 海洋和陆地热带气旋闪电属性差异

图 6 为海陆热带气旋的闪电属性参量对比。由图 6 可以看到,陆地热带气旋和海洋热带气旋的闪电持续时间无明显差异,但在空间尺度和光辐射能上,海洋热带气旋的闪电属性均大于陆地热带气旋(包括中值和平均值),即海洋热带气旋闪电通常比陆地热带气旋闪电的平均空间尺度更大、平均能量更强。热带气旋在海洋上整体对流活动较弱,导致其闪电的频次低、空间尺度大、光辐射能强。热带气旋登陆后对流活动加强^[33],闪电频次升高、闪电空间尺度减小、光辐射能减弱。该特征与其他非热带气旋雷暴系统闪电空间尺度和光辐射能属性的海陆差异一致^[20,28]。

研究表明,闪电活动和形态属性存在明显海陆差异。陆地闪电频次和闪电密度高于海洋(平均闪电密度比约为 10:1)^[34],但海洋闪电的平均时空尺度和能量大于陆地^[18,35]。闪电的光辐射能在海洋

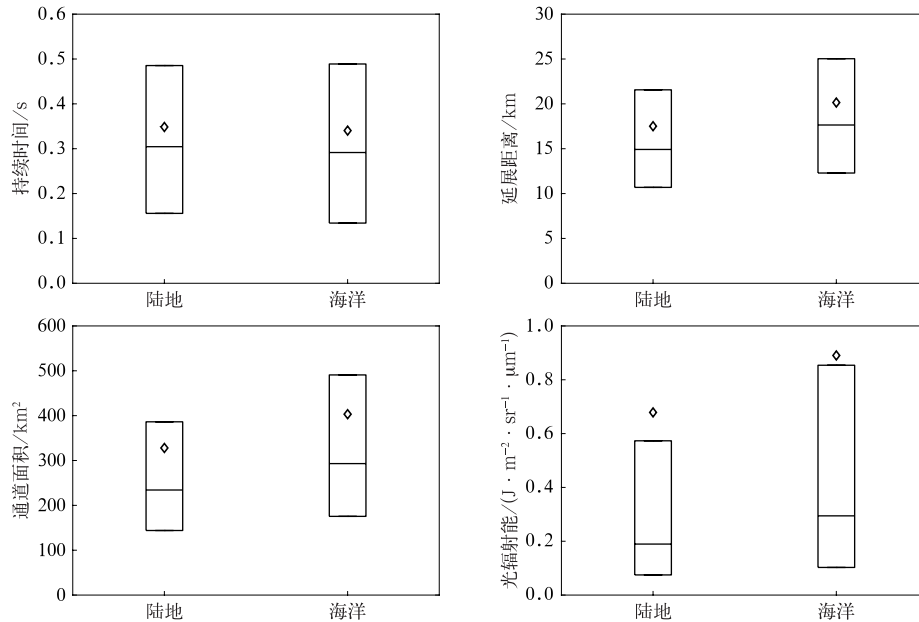


图 6 海陆热带气旋闪电属性参量

(方框底部和顶部边缘分别表示第 25 和第 75 分位数;方框内水平线代表中值,菱形代表平均值)

Fig. 6 Lightning attributes for tropical cyclones on land and ocean

(the bottom and top edges of the box denote the 25th and 75th percentiles, respectively;
the horizontal line in the box denotes the median value, and the diamond denotes the average value)

和陆地也存在较大差别。海洋闪电的放电强度高于陆地,海洋每次闪击的平均光辐射能为陆地的两倍左右^[19,24]。此外,闪电面积在陆地和海洋的可视性也存在差异。Peterson 等^[18]指出海洋闪电的平均照亮面积大于陆地闪电约 30%。

闪电尺度与雷暴强度变化趋势相反,海陆闪电属性的差异与其母体雷暴的对流强弱有关。海洋雷暴对流强度弱于陆地雷暴。海洋雷暴水平尺度更大、发展更成熟,陆地雷暴具有结束更早、水平扩展更小的特点^[20]。具有强对流特征的陆地雷暴倾向于产生频次高但时空尺度、能量较小的闪电,而具有弱对流特征的海洋雷暴虽然闪电频次相对较低,但倾向于产生时空尺度更大、能量更强的闪电^[35]。

3.3 热带气旋与非热带气旋闪电属性差异

为了进一步分析热带气旋系统与非热带气旋系

统的闪电属性差异,统计西北太平洋热带气旋闪电主要发生区域(20°~30°N,100°~123°E 亚洲大陆地区和 10°~35°N,106°~140°E 海洋地区,不包括陆地和岛屿)内热带气旋与非热带气旋闪电属性。热带气旋闪电样本量为 18111,非热带气旋闪电样本量为 539037。表 3 是热带气旋闪电和非热带气旋闪电属性参量的平均值对比。由表 3 可见,非热带气旋系统的 4 个闪电属性特征参量与尤金等^[28]统计的我国内陆和东部沿海区域的闪电属性值范围一致。可见,无论陆地或海洋区域,在闪电延展距离、通道面积和光辐射能方面,热带气旋闪电较非热带气旋闪电统计特征值更小。在持续时间方面,热带气旋闪电比非热带气旋闪电更长。由于非热带气旋系统的雷暴强度变化范围较大,因此本结果仅为统计意义上的平均结果。

表 3 热带气旋闪电与非热带气旋闪电属性参量对比
Table 3 Comparisons of attribute parameter for lightning in tropical cyclone and non-tropical cyclone

闪电属性	热带气旋		非热带气旋	
	陆地	海洋	陆地	海洋
持续时间/s	0.35	0.35	0.30	0.34
延展距离/km	17.48	19.63	18.55	20.86
通道面积/km ²	326.54	388.42	354.58	416.63
光辐射能/(J·m ⁻² ·sr ⁻¹ ·μm ⁻¹)	0.66	0.84	0.78	1.23

4 结论与讨论

本研究利用 1998—2014 年 TRMM 卫星 LIS 闪电数据,分析西北太平洋热带气旋的闪电属性(包括持续时间、延展距离、通道面积和光辐射能)特征,并从不同强度等级的热带气旋、热带气旋不同区域、海洋热带气旋和陆地热带气旋、热带气旋和非热带气旋 4 个方面对比闪电属性特征,得到以下主要结论:

1) 热带气旋闪电属性峰值分布与西北太平洋海洋雷暴系统分布一致,均符合对数正态分布,但与东亚陆地雷暴系统存在差异。热带气旋极值闪电更倾向于发生在海洋和热带低压强度等级。外雨带极大值闪电所占比例最小,内核闪电在持续时间和光辐射能的极大值比例最大,表明热带气旋在海洋上的某些特定发展过程中,内核的云顶高度更高、对流强度更强。

2) 不同强度等级(热带低压、热带风暴、台风)热带气旋的闪电持续时间无明显差异,热带风暴闪电的空间尺度和光辐射能均低于热带低压和台风,表明:当热带气旋由热带低压发展成稳定的热带风暴和强热带风暴时,闪电属性特征值下降;当热带气旋增强达到台风强度等级时,闪电的空间尺度和辐射能量再次增强。

3) 热带气旋内核的闪电持续时间最长、光辐射能最强,且持续时间和光辐射能随闪电与热带气旋中心距离的增加而逐渐减小,外雨带达到最小。在海陆差异方面,热带气旋闪电在海洋上具有比陆地上更大的空间尺度和更强的光辐射能。热带气旋登陆后闪电的空间尺度减小、光辐射能减弱。与非热带气旋闪电相比,热带气旋闪电延展距离、通道面积和光辐射能更小,但闪电平均持续时间更长。

TRMM 卫星的极轨运行方式导致 LIS 探测的热带气旋闪电数据样本有限,且更大概率观测到外雨带闪电。由于 LIS 白天探测能力受限,本文仅使用夜间探测数据,因此需要积累更多数据以进一步完善热带气旋闪电属性特征的研究。同时,卫星闪电成像仪的聚类算法对闪电事件的判别设置固定的时间和空间阈值,阈值设置是否对部分闪电事件及其属性判定造成影响,也需要深入探讨。热带气旋与外部环境的相互作用,一定程度上具有陆地雷暴特点,但同时又受到涡旋动力约束,因此显示出独特的对流结构和闪电活动特征^[8,14,36]。有关热带气旋

闪电属性特征和影响因素、与其他海洋和陆地雷暴系统闪电属性的差异,需利用卫星、雷达等多种观测数据开展综合分析。

参 考 文 献

- [1] 曹祥村,袁群哲,杨继钊,等. 2005 年登陆我国热带气旋特征分析. 应用气象学报, 2007, 18(3): 412-416.
Cao X C, Yuan Q Z, Yang J L, et al. Features of the tropical cyclones landing on China in 2005. *J Appl Meteor Sci*, 2007, 18(3): 412-416.
- [2] 张永恒,范广洲,马清云,等. 浙江省台风灾害影响评估模型. 应用气象学报, 2009, 20(6): 772-776.
Zhang Y H, Fan G Z, Ma Q Y, et al. The evaluation model of typhoon disaster influence on Zhejiang Province. *J Appl Meteor Sci*, 2009, 20(6): 772-776.
- [3] May P T. The organization of convection in the rainbands of tropical cyclone Laurence. *Mon Wea Rev*, 1996, 124(5): 807-815.
- [4] 徐文慧,倪允琪. 登陆台风环流内的一次中尺度强对流过程. 应用气象学报, 2009, 20(3): 267-275.
Xu W H, Ni Y Q. A strong mesoscale convective process in landfalling typhoon. *J Appl Meteor Sci*, 2009, 20(3): 267-275.
- [5] 傅佩玲,胡东明,黄浩,等. 台风山竹(1822)龙卷的双极化相控阵雷达特征. 应用气象学报, 2020, 31(6): 706-718.
Fu P L, Hu D M, Huang H, et al. Observation of a tornado event in outside-region of Typhoon Mangkhut by X-band polarimetric phased array radar in 2018. *J Appl Meteor Sci*, 2020, 31(6): 706-718.
- [6] Molinari J, Moore P, Idone V. Convective structure of hurricanes as revealed by lightning locations. *Mon Wea Rev*, 1999, 127(4): 520-534.
- [7] 王艳,郑栋,张义军. 2000—2007 年登陆台风中闪电活动与降水特征. 应用气象学报, 2011, 22(3): 321-328.
Wang Y, Zheng D, Zhang Y J. Typhoon processes making landfall in China from 2000 to 2007. *J Appl Meteor Sci*, 2011, 22(3): 321-328.
- [8] DeMaria M, DeMaria R T, Knaff J A, et al. Tropical cyclone lightning and rapid intensity change. *Mon Wea Rev*, 2012, 140(6): 1828-1842.
- [9] Zhang W J, Zhang Y J, Zheng D, et al. Relationship between lightning activity and tropical cyclone intensity over the Northwest Pacific. *J Geophys Res Atmos*, 2015, 120(9): 4072-4089.
- [10] 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. 大气科学, 2017, 41(6): 1167-1176.
Wang F, Qie X S, Cui X D. Climatological characteristics of tropical cyclone lightning activity in the Northwest Pacific and its relationship with cyclone intensity changes. *Chinese J Atmos Sci*, 2017, 41(6): 1167-1176.
- [11] 张文娟,张义军,郑栋,等. 热带气旋闪电活动特征研究综述.

- 海洋气象学报, 2021, 41(3): 1-10.
- Zhang W J, Zhang Y J, Zheng D, et al. An overview on the research of lightning activity in tropical cyclones. *J Marine Meteor*, 2021, 41(3): 1-10.
- [12] 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. 海洋学报, 2009, 31(4): 29-38.
- Lei X T, Zhang Y J, Ma M. Preliminary analysis of lightning characteristics of thermoelectric cyclones in the Northwest Pacific and their relationship with intensity. *Acta Oceanol Sinica*, 2009, 31(4): 29-38.
- [13] 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. 气象学报, 2011, 69(2): 370-380.
- Yang M R, Yuan T, Qie X S, et al. Analysis of lightning activity, radar reflectance and ice scattering signal characteristics of tropical cyclone in the Northwest Pacific. *Acta Meteor Sinica*, 2011, 69(2): 370-380.
- [14] Zhang W J, Zhang Y J, Zheng D, et al. Lightning distribution and eyewall outbreaks in tropical cyclones during landfall. *Mon Wea Rev*, 2012, 140(11): 3573-3586.
- [15] 杨宁, 张其林. 西太平洋台风最大风速与闪电活动特征. 大气科学学报, 2012, 35(4): 415-422.
- Yang N, Zhang Q L. Relationship between the maximum winds and lightning activity of 55 typhoons over the Western Pacific during 2005 and 2010. *Trans Atmos Sci*, 2012, 35(4): 415-422.
- [16] Pan L, Qie X, Wang D. Lightning activity and its relation to the intensity of typhoons over the Northwest Pacific Ocean. *Adv Atmos Sci*, 2014, 31(3): 581-592.
- [17] 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. *Geophys Res Lett*, 2021, 48. DOI: 10. 1029/2020GL088872.
- [18] Peterson M, Liu C. Characteristics of lightning flashes with exceptional illuminated areas, durations, and optical powers and surrounding storm properties in the tropics and inner subtropics. *J Geophys Res Atmos*, 2013, 118(20): 11727-11740.
- [19] Beirle S, Koshak W, Blakeslee R, et al. Global patterns of lightning properties derived by OTD and LIS. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, 2014, 14(10): 2715-2726.
- [20] Peterson M, Deierling W, Liu C, et al. The properties of optical lightning flashes and the clouds they illuminate. *J Geophys Res Atmos*, 2017, 122(1): 423-442.
- [21] Bruning E C, MacGorman D R. Theory and observations of controls on lightning flash size spectra. *J Atmos Sci*, 2013, 70(12): 4012-4029.
- [22] Zheng D, MacGorman D R. Characteristics of flash initiations in a supercell cluster with tornadoes. *Atmos Res*, 2016, 167: 249-264.
- [23] Zhang Z, Zheng D, Zhang Y, et al. Spatial-temporal characteristics of lightning flash size in a supercell storm. *Atmos Res*, 2017, 197(11): 201-210.
- [24] 鄒秀书, 周筠珺, 袁铁. 卫星观测到的全球闪电活动及其地域差异. 地球物理学报, 2003, 46(6): 743-750.
- Qie X S, Zhou Y J, Yuan T. Global lightning activities and their regional differences observed from the satellite. *Chinese J Geophys*, 2003, 46(6): 743-750.
- [25] 戴建华, 秦虹, 郑杰. 用 TRMM/LIS 资料分析长江三角洲地区的闪电活动. 应用气象学报, 2005, 16(6): 728-736.
- Dai J H, Qin H, Zheng J. Analysis of lightning activity over the Yangtze River Delta using TRMM/LIS observations. *J Appl Meteor Sci*, 2005, 16(6): 728-736.
- [26] 赵珊珊, 高歌, 孙旭光, 等. 西北太平洋热带气旋频数和强度变化趋势初探. 应用气象学报, 2009, 20(5): 555-563.
- Zhao S S, Gao G, Sun X G, et al. Climatological characteristics of tropical cyclones in the Northwestern Pacific. *J Appl Meteor Sci*, 2009, 20(5): 555-563.
- [27] Xu W, Rutledge S A, Zhang W. Relationships between total lightning, deep convection, and tropical cyclone intensity change. *Geophys Res Atmos*, 2017, 122(13): 7047-7063.
- [28] 尤金, 郑栋, 姚雯, 等. 东亚和西太平洋闪电时空尺度及光辐射能. 应用气象学报, 2019, 30(2): 191-202.
- You J, Zheng D, Yao W, et al. Spatio-temporal scale and optical radiance of flashes over East Asia and Western Pacific areas. *J Appl Meteor Sci*, 2019, 30(2): 191-202.
- [29] Zheng D, Zhang Y, Meng Q. Properties of negative initial leaders and lightning flash size in a cluster of supercells. *J Geophys Res Atmos*, 2018, 123(22): 12857-12876.
- [30] 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. *Geophys Res Lett*, 2021, 48, e2020GL092067. DOI: 10. 1029/2020GL092067.
- [31] Ringhausen J S, Bitzer P M. An in-depth analysis of lightning trends in Hurricane Harvey using satellite and ground-based measurements. *J Geophys Res Atmos*, 2021, 126, e2020JD032859. DOI: 10. 1029/2020JD032859.
- [32] Fierro A O, Mansell E R. Relationships between electrification and storm-scale properties based on idealized simulations of an intensifying hurricane-like vortex. *J Atmos Sci*, 2018, 75(2): 657-674.
- [33] 阎俊岳. 近海热带气旋迅速加强的气候特征. 应用气象学报, 1996, 7(1): 28-35.
- Yan J Y. Climatological characteristics of rapidly intensifying tropical cyclones over the offshore of China. *J Appl Meteor Sci*, 1996, 7(1): 28-35.
- [34] Christian H J, Blakeslee R J, Boccippio D J, et al. Global frequency and distribution of lightning as observed from space by the Optical Transient Detector. *J Geophys Res Atmos*, 2003, 108(D1). DOI: 10. 1029/2002JD002347.
- [35] You J, Zheng D, Zhang Y J, et al. Duration, spatial size and radiance of lightning flashes over the Asia-Pacific region based on TRMM/LIS observations. *Atmos Res*, 2019, 223: 98-113.
- [36] Black R A, Hallett J. Electrification of the hurricane. *J Atmos Sci*, 2010, 56(12): 2004-2028.

Characteristics of Lightning Scales and Optical Property in Tropical Cyclones over the Northwest Pacific

Zhou Xin¹⁾²⁾ Zhang Wenjuan¹⁾ Zhang Yijun³⁾⁴⁾ Zheng Dong¹⁾

¹⁾ (State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

²⁾ (College of Electronic Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225)

³⁾ (Department of Atmospheric and Oceanic Sciences/Institute of Atmospheric Sciences, Fudan University, Shanghai 200438)

⁴⁾ (Joint Laboratory of Marine Meteorological Disasters, Fudan University, Shanghai 200438)

Abstract

Tropical cyclone is one of the major weather disasters affecting coastal areas, which can produce high winds and heavy rains, posing serious threats to the safety of people's lives and property in coastal areas. China is in the Northwest Pacific, which is affected more frequently by tropical cyclones than any other area in the world. Therefore, it is of great significance to strengthen the research on tropical cyclone in the Northwest Pacific. In recent years, observations and studies have proved that lightning activity often occurs in tropical cyclone, which is closely related to the convective evolution and intensity variation of tropical cyclone. Based on data of lightning imaging sensor (LIS) carried on the TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) satellite during 1998–2014, the characteristics of lightning properties (including duration, extended distance, channel area and optical radiant energy) of tropical cyclone in the Northwest Pacific are studied by establishing the lightning dataset of tropical cyclone in the region. The results show that all attributes of tropical cyclone lightning present lognormal distribution characteristics, and the distribution of peak values of these attributes is consistent with that of the Northwest Pacific thunderstorm system, but different from that of East Asia land thunderstorm system. The maximum of tropical cyclone lightning tends to occur over the ocean at tropical depression intensity levels. The maximum proportion of lightning in the outer rain belt is the lowest, while the maximum proportion of the duration and optical radiant energy of lightning in the inner core is the highest. The tropical cyclone lightning duration of different intensity levels has no significant difference, but the mean value of lightning spatial scale and optical radiation energy of tropical storm are lower than those of tropical depression and typhoon. For different areas of tropical cyclone, the maximum value of duration and optical radiant energy of core lightning decrease with the increase of distance between lightning and tropical cyclone center. In terms of maritime-continental contrasts, tropical cyclone lightning occurs over the ocean with larger spatial scale and stronger optical radiant energy than that over the land, while lightning duration is roughly the same. After tropical cyclone landing, the spatial scale of lightning decreases and the optical radiant energy of lightning weakens. Compared with non-tropical cyclone lightning, tropical cyclone lightning has shorter extension distance, narrower channel area and weaker optical radiant energy, but the average duration of lightning is longer.

Key words: lightning imaging sensor; the Northwest Pacific; tropical cyclone; lightning attributes