

杨宁,张其林. 2012. 西太平洋台风最大风速与闪电活动特征[J]. 大气科学学报, 35(4): 415-422.

Yang Ning, Zhang Qi-lin. 2012. Relationship between the maximum winds and lightning activity of 55 typhoons over the western Pacific during 2005 and 2010[J]. Trans Atmos Sci, 35(4): 415-422. (in Chinese)

西太平洋台风最大风速与闪电活动特征

杨宁^{1,2}, 张其林^{1,2}

(南京信息工程大学 1. 气象灾害省部共建教育部重点实验室; 2. 大气物理学院, 江苏 南京 210044)

摘要: 利用全球闪电定位网(World Wide Lightning Location Network, WWLLN)获取的闪电定位资料和中国气象局上海台风所提供的台风路径数据, 统计分析了 2005—2010 年在西太平洋洋面上发生的 55 次台风过程中闪电活动特征及闪电频数与最大风速的相关性。结果表明, 在西太平洋地区台风系统中发生的闪电大致有 3 个高发区, 分别位于距台风中心 20~40 km 的云墙区、280~340 km 与 440~580 km 的外云带中。台风中心出现最大风速的时刻往往滞后于闪电频数峰值出现时刻, 滞后时间一般在 0~24 h 内, 平均滞后时间为 26.6 h。因此, 台风中闪电活动的频繁程度对 24 h 内的台风强度发展具有一定的指示意义。

关键词: WWLLN; 台风; 闪电频数; 滞后时间

中图分类号: P427 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-7097(2012)04-0415-08

Relationship between the maximum winds and lightning activity of 55 typhoons over the western Pacific during 2005 and 2010

YANG Ning^{1,2}, ZHANG Qi-lin^{1,2}

(1. Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education;

2. School of Atmospheric Physics, NUIST, Nanjing 210044, China)

Abstract: Based on the lightning data by the World Wide Lightning Location Network(WWLLN) and the typhoon data from Typhoon Institute of Shanghai Meteorological Bureau, the paper presents the lightning activity characteristics and the relationship between the lightning frequency and the maximum winds of 55 typhoons occurring over the western Pacific during 2005 and 2010. The results show that over the west Pacific, there are three distinct lightning flash regions in mature typhoons. One significant maximum in the eyewall regions about 20—40 km away from the center; the other two are located in outer rainbands (280—340 km and 440—580 km from the center). Most typhoons have lightning activity peaks before the maximum winds. The lag times ranges from 0 to 24 hours and the average lag times is 26.6 h. Therefore, the frequency of lightning activity is, to some degree, an indicator for the typhoon intensity development within 24 h.

Key words: WWLLN; typhoons; lightning frequency; lag time

0 引言

台风是地球上最强烈的风暴, 在北太平洋西部(国际日期线以西, 100°E 以东)称为台风, 在北太西

洋及东太平洋称之为飓风。一般始发于洋面温度超过 26℃ 的热带或副热带海洋上, 从热带低压发展成为热带风暴, 进一步加强成为强热带风暴后最终形成台风。整个台风的生命周期可维持几天到几周不

收稿日期: 2011-06-27; 改回日期: 2011-09-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40975002); 公益性行业科研专项(GYHY200806014; GYHY2007622)

作者简介: 杨宁(1986—), 男, 江苏南通人, 硕士, 研究方向为雷电科学, cnntyn@qq.com.

等,其大部分时间都位于洋面上,登陆后由于下垫面的变化,台风系统中的水汽供应量减少,能量无法得到补充,难以维持整个台风系统,致使其逐步削弱直至消亡。最近的统计表明最近的几十年中台风的总体强度呈现上升趋势(Emanuel, 2005; Webster et al., 2005)。

多年来,闪电活动一致被认为与对流活动的微物理和动力学过程有着密切的联系。当上升气流速度大于 10 m/s 时,就能促使电荷分离从而建立起足够强大的电场。有研究表明,当台风中上升气流速度突破 20 m/s 时,台风强度将快速增强,同时台风中闪电活动也会出现明显的增长(Black et al., 1994)。这表明台风强度与闪电频数之间存在着一定的联系。国外的一些学者使用 LLDN(long range lightning detection network)资料分析了 2005 年发生在大西洋上的 Rita 与 Katrina 台风,结果表明,在台风强度迅速增强期间眼壁上有闪电爆发(Squires and Businger, 2008)。随后 Shao et al. (2005) 利用 LASA(Los Alamos Sferic Array)资料同样分析了 Rita 与 Katrina 台风,发现在台风增强期间闪电爆发,数量达到 600 次/h 。在这之后 Thomas et al. (2010) 研究了 Rita、Katrina、Emily 台风,发现在台风进入减弱阶段之前,系统内部正地闪数量会增加。国内曾利用 LIS(Lightning Imaging Sensor)资料分析了 1998—2005 年太平洋区域热带气旋中的闪电特征,结果表明在西北太平洋热带气旋的眼壁附近、内雨带和外雨带内普遍存在闪电活动(雷小途等, 2009)。随后潘伦湘等(2010)研究了西北太平洋地区 2005—2008 年的 7 个台风的闪电空间分布及时间演变特征,发现西北太平洋地区强台风成熟时平均闪电密度呈现出三圈结构。

为了进一步了解台风过程中闪电活动特征,本文选取了 2005—2010 年西太平洋洋面共计 55 次台风过程,并对台风系统内的闪电活动及其与最大风速之间的关系进行了统计和分析。

1 资料及方法介绍

本文闪电定位数据由美国华盛顿大学地球与空间科学中心建设的 WWLLN(World Wide Lightning Location Network)网络提供。该网络采用闪电发生时产生的 $3\sim 30\text{ kHz}$ 甚低频电磁辐射信号对闪电进行定位。由于甚低频信号频率比较低,波长较长,并可以通过电离层反射。这些特性使其可以传输至几千千米之外并被接收到,使得该网络可以远距离对

闪电进行探测。WWLLN 的优势在于可以实时不间断地进行探测,提供一个完整台风过程的闪电定位资料(Lay et al., 2007)。该探测网利用分布于全球范围内的各子站点,采用改进的时间到达法对闪电进行定位。每个站点将实时接收到的信号传输至网络中央数据处理中心进行处理、计算,最终得到闪电发生位置。WWLLN 网络分布在全球的站点从 2003 年的 11 个,已经扩展到 2010 年的 50 个。

对 2004 年澳大利亚国家闪电定位网与 WWLLN 系统的对比后发现,在这期间 WWLLN 系统的总体探测效率达到了 13% ,平均探测精度为 3.4 km (Rodger et al., 2005)。近期有学者使用 WWLLN 资料与美国国家闪电探测网资料作比较,发现 WWLLN 的总体探测效率达到 10.30% ,探测精度达到 $4.03\sim 4.98\text{ km}$ 。对于电流强度大于 35 kA 的闪电,WWLLN 探测效率开始持续增长,对于电流强度大于 55 kA 的闪电,探测效率达到了 20% ,这说明 WWLLN 对强闪电有着良好的探测效率(Sergio et al., 2010)。虽然 WWLLN 系统的总体探测效率约为 10% 左右,但这并不影响其捕捉台风中各时刻闪电发生的总体趋势,其在大尺度范围内实时提供闪电数据的能力是其他系统无法比拟的。

本文台风资料来源于中国气象局上海台风所。台风强度的定义取自《热带气旋等级》国家标准(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局和中国国家标准化管理委员会, 2006)。定义台风的最大风速大于 32.7 m/s ,强台风的最大风速大于 41.5 m/s ,超强台风的最大风速大于 51 m/s 。因西太平洋地区属于台风高发区域,所以从该区域中得出的结论可具有一定代表性。图 1 是本文选用的 2005—2010 年 55 次台风的移动路径及发生区域。该 55 次台风分别为:2005 年的 Damrey、Talim、Sonca、Nesat、Haitang、Matsa、Mawar、Nabi、Khanun、Saola、Longwang、Kirogi;2006 年的 Chanchu、Ewinar、Sao-mai、Shanshan、Yagi、Xangsane、Cimaron、Utor;2007 年的 Kong-rey、Yutu、Usagi、Man-yi、Sepat、Nari、wipha、Krosa、Kajiki;2008 年的 Rammasun、Nakri、Fengshen、Fung-wong、Hagupit、Jangmi、Dolphin;2009 年的 Kugira、Chan-hom、Molave、Morakot、Vamco、Choi-wan、Parma、Melor、Lupit、Nida;2010 年的 Conson、Chanthu、Dianmu、Kompasu、Malou、Fana-pi、Malakas、Megi、Chaba。

台风在其生命期间不断地移动,考虑到台风移动时速比较缓慢,最高时速约在 25 km/h 。故本文

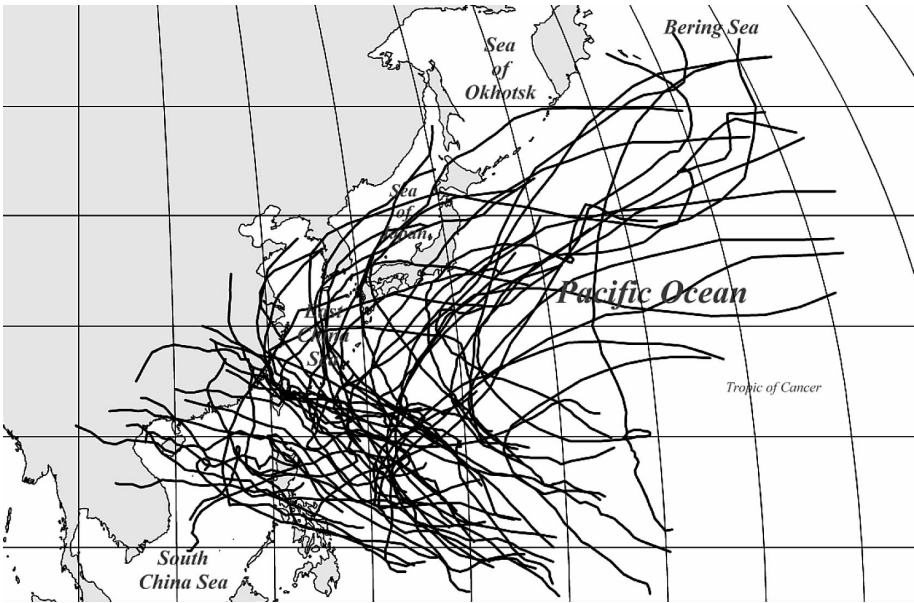


图 1 2005—2010 西北太平洋地区 55 次台风过程分布及路径汇总

Fig. 1 The 55 typhoons' distribution and paths over northwest Pacific during 2005—2010

利用每个整点时刻至下一整点时刻,以台风中心点为原点的 780 km 半径范围内发生的闪电来代表该时刻的闪电数,并视台风在这一时段内做匀速运动。由于台风的水平尺度一般为 1 000 km 左右,因此将半径 r 选为 780 km 是比较合理的,基本可以将整个台风系统包含在内。台风路径数据中每隔 6 h 给定一次台风中心经纬度,考虑到 6 h 的时间步长会对精度产生影响,故采用线性插值方法,对原始台风定位数据进行插值处理,得出逐时台风中心位置。

2 台风过程中闪电时空分布特征

为了详细分析台风系统内闪电的普遍规律,本

文对 55 次台风过程中的闪电活动进行了统计分析,发现台风过程中的闪电活动具有一定的相似性。因此,下面选取 5 次台风过程进行介绍,如表 1 所示。从表中可见,台风过程中伴随着明显的闪电活动,但由于个例之间的差异,各台风系统内的总闪电数变化幅度较大,最高日平均闪电数达到 1 842 次/d,最低仅为 342 次/d。考虑 WWLLN 系统对地闪与云闪的探测效率分别为 10.3% 和 4.82% (Sergio et al., 2010),修正后与表 2 陆地各地区不同对流系统比较后发现,台风系统中闪电频数低于陆地对流系统,但系统内的闪电活动总体来说仍然比较频繁。

表 1 2005—2010 年间 5 次台风过程闪电活动特征

Table 1 The characteristics of five typhoons' lightning activity during 2005—2010

年份	台风名称	起止时间(世界时)		最大风速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	中心气压/ hPa	闪电数/次	
		起始	结束			$r < 100 \text{ km}$	$r < 780 \text{ km}$
2007	韦帕 Wipha	9 月 15 日 00:00	9 月 20 日 12:00	55	935	800	1 710
2008	海豚 Dolphin	12 月 11 日 00:00	12 月 18 日 18:00	35	971	1 919	12 896
2009	环高 Vamco	8 月 16 日 12:00	8 月 25 日 18:00	53	940	1 456	4 404
2009	彩云 Choi-wan	9 月 12 日 00:00	9 月 20 日 18:00	65	915	600	5 354
2009	妮姐 Nida	11 月 12 日 00:00	12 月 03 日 00:00	70	903	6 117	22 829

表 2 陆地各地区对流系统闪电频数

Table 2 The lightning frequency of convection system on land

类型	地区	闪电频数/(次·min ⁻¹)	参考资料
超级单体	美国,科罗拉多州	30	Lang et al. ,2002
超级单体	美国,俄克拉荷马	78	Buechler et al. ,2000
多单体	美国,格里利市	55	Carey and Rutledge,1998
中尺度对流系统	中国,山东	20 ~ 30	郗秀书等,2007

台风系统一般可根据径向距离划分为 3 个区域,分别为眼区、云墙区以及外层区(包括外云带和内云带)。图 2 给出了这 5 次台风过程中的闪电空间分布特征。可以看出,台风过程中闪电活动具有 3 个高密度区。首先,在位于台风中心 20 ~ 40 km 处的云墙区处存在着一个显著的闪电高发带,闪电频数随径向距离的增加迅速增大。其次,在距离中心 280 ~ 340 km 范围内出现第二个密集区,闪电频

数较内雨带中有明显增加。随后,闪电数随径向距离振荡波动并在距中心 440 ~ 580 km 附近区域激增,出现第三个密集区。

图 3 进一步给出了 5 次台风过程中闪电活动的时变特征。可以看出,各台风系统中闪电数量随时间的变化并不连续,短时间内闪电的活动变得异常活跃,且在闪电频数到达峰值后闪电活动迅速减弱,呈现振荡变化的状态。由图 3 还可以发现,在台风

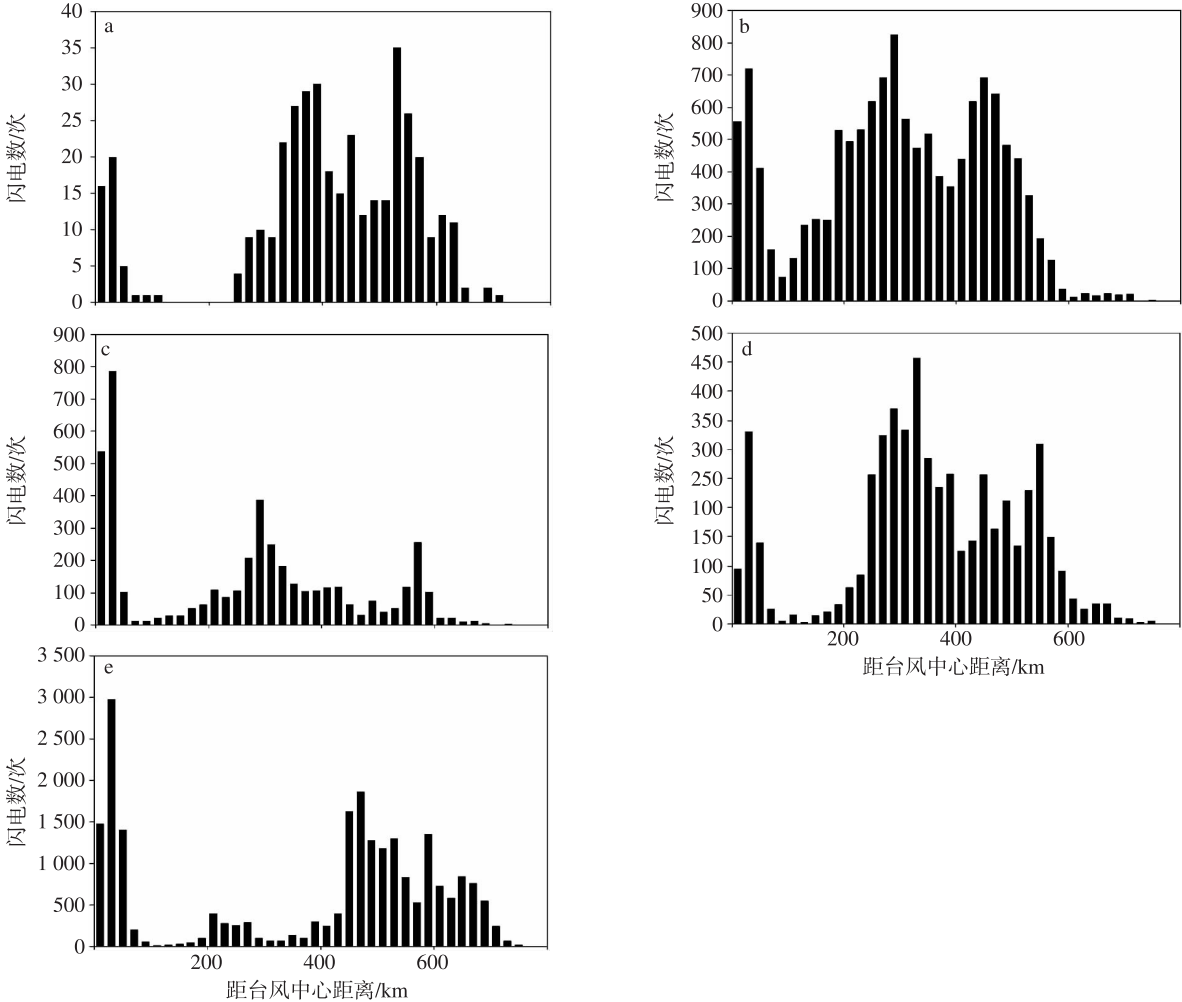


图 2 各台风系统中闪电随径向距离分布特征 a. 韦帕;b. 海豚;c. 环高;d. 彩云;e. 妮姐
Fig. 2 The lightning characteristics of typhoon systems with the radial distance distribution a. Wipha;b. Dolphin;
c. Vamco;d. Choi-wan;e. Nida

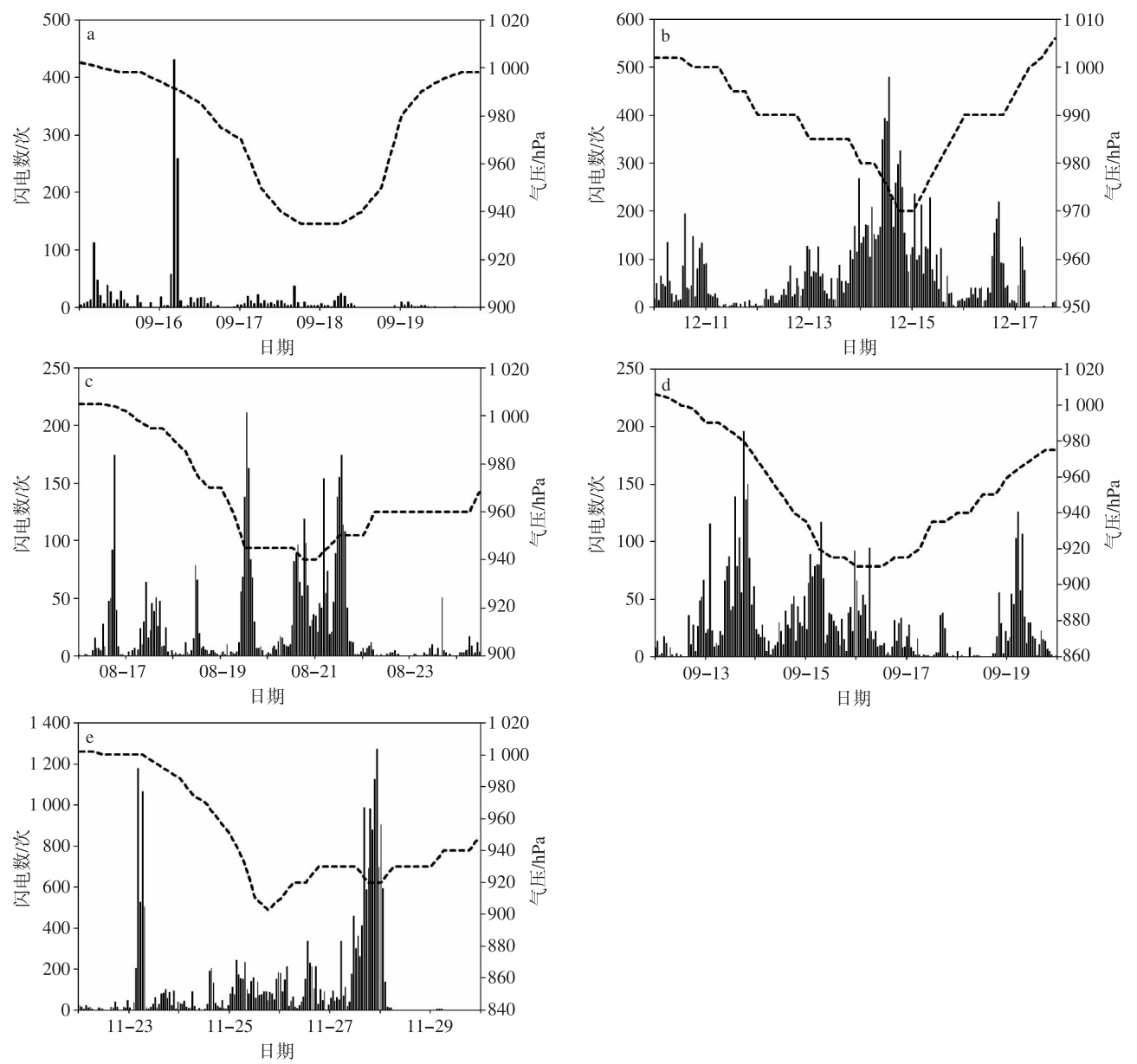


图 3 台风系统内闪电随时间变化特征 (柱状图代表台风系统内每小时闪电数;虚线代表台风中心最低气压) a. 韦帕;
b. 海豚;c. 环高;d. 彩云;e. 妮姐

Fig. 3 The lightning characteristics of typhoon system with time variation (The bar chart denotes the number of lightning per hour in typhoon system;the dotted line denotes the minimum pressure in typhoon center) a. Wipha;b. Dolphin;c. Vamco;d. Choi-wan;e. Nida

强度增强(中心气压降低)阶段,系统内闪电数激增,闪电活动在这一阶段相当活跃呈现爆发状态。而在台风强度减弱阶段,系统内闪电活动较少,变化较为平稳。

台风强度增加时系统内的闪电数发生增长,可能是由于此时系统内变得更有效的起电机机制导致的。通过飞机穿越大西洋台风所得到的观测资料发现,在台风中存在着过冷水滴、软雹和冰晶粒子(Black and Hallett,1986)。当过冷水滴凝结在软雹

粒子上时,粒子质量增加并下坠,并与质量较轻的冰晶粒子碰撞,两者之间的碰撞摩擦使电荷发生转移。由于冰的热电效应,温度较高的雹粒子带负电荷,而温度较低的冰粒子带正电荷。再经过重力分离作用,带正电荷的冰粒子随上升气流升至上部,带负电荷的雹粒子因重力作用沉降至下部,在系统中形成正负电荷区。对于冰晶与雹粒子单离散性谱分布,荷电的速率 $\frac{dQ}{dt}$ 为

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{\pi}{4} E_{gi} (D_g + D_i)^2 |\Delta V| N_g N_i dq。$$

其中： N_g 、 N_i 分别为雹粒与冰晶的浓度； D_g 、 D_i 分别为这两类粒子的直径； E_{gi} 是碰撞反弹系数； $\Delta V = V_g - V_i$ 是碰撞雹粒子和冰晶粒子的速度差。

当台风强度开始增强时，中心气压开始降低，促使气流不断向系统中心辐合并作上升运动。上升过程中水汽凝结释放出潜热补给台风能量，使得系统内气流的上升运动越来越强。当上升气流增强时，根据上述起电机制可知此时电荷分离过程将更加迅速。通过 Black and Hallett (1999) 对约 20 a 穿越台风的飞行观测资料总结后发现，闪电活动与速度大于 10 m/s 的上升气流存在着密切的联系。荷电速率的增加导致系统中电荷总量增加，这需要更多次数的放电使系统内的电荷被中和，在系统内就表现为闪电活动的增强。每次闪电发生后，系统中的电荷量便会相应减少，而此时系统内的起电机制会不断作用补充消耗的电荷，继续维持闪电的发生。

3 台风过程中闪电频数与最大风速的特征

为了研究台风中闪电频数与台风最大风速之间的相关性，本文选取了 2005—2010 年间发生在西太平洋地区的 55 次台风过程并进行了统计。下面以 200906 号台风莫拉菲 Molave 为例。由 2009 年 7 月 15—19 日间莫拉菲的移动路径 (图 4) 可见，它始发于一个位于菲律宾以东海域的热带低气压，7 月 16 日 20 时 (北京时)，升级为热带风暴。得益于西太

平洋高海温、强劲的辐散辐合及风切变的环境，其强度快速增强，于 17 日下午增强成强热带风暴。因减速及洋面温度较高的原因，台风强度进一步增强，在 18 日清晨升级成台风。在进入南海北部后，因得到西南季风带来的水汽支援，莫拉菲的强度继续缓慢增强，直至登陆前中心风力仍保持增长。19 日凌晨，台风莫拉菲在深圳附近一带登陆，于 05 时 (北京时) 减弱为强热带风暴，随后急剧减弱，逐渐消散。

图 5 为整个莫拉菲台风过程中逐时闪电频数变化与最大风速的时变特征。从图中可以看出，闪电频数随着台风风速的增强而增加，闪电活动于 18 日 07 时 (北京时) 开始呈现活跃状态，随后系统内闪电爆发并于 10 时到达峰值，达到峰值后系统内闪电数目迅速减少。而在闪电数达到了峰值后系统内风速极值于 12 时左右出现。两者变化的趋势存在一致性。值得注意的是，闪电频数最大值出现时刻先于最大风速出现的时刻。取 18 日 00—18 时闪电数和风速两者的数据做相关性分析，得出两者的相关系数为 0.89。

图 6 给出了 55 次台风过程中最大风速滞后于闪电峰值的时间分布曲线，横坐标表示时滞时间，纵坐标为出现该时滞时间的概率。由图 6 可见，最大风速滞后于闪电峰值的概率明显大于超前的概率，经过统计，83.6% 的台风过程存在风速峰值滞后于闪电峰值这一现象，41.8% 的滞后时间为 0 ~ 24 h，滞后时间峰值约为 6 h，平均滞后时间为 26.6 h。

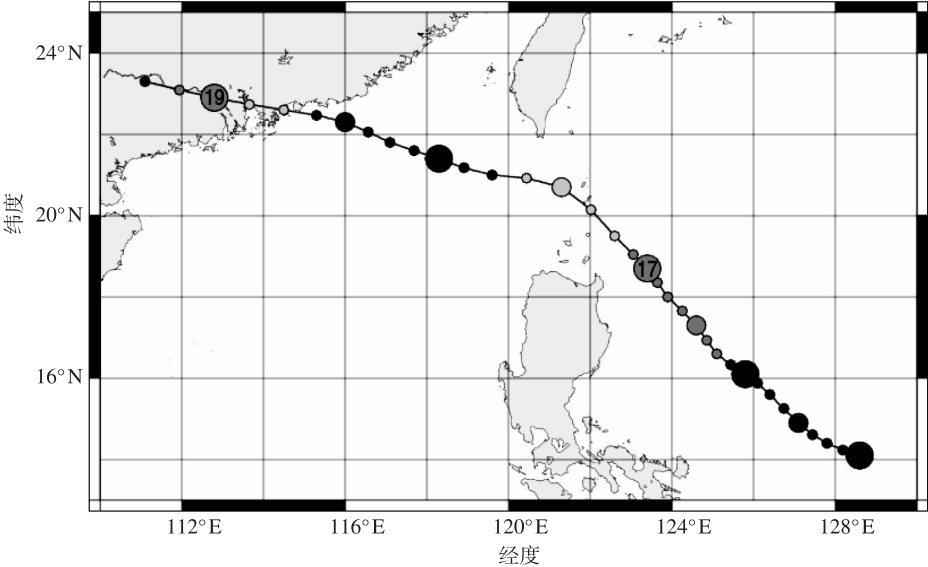


图 4 2009 年 7 月 15—19 日莫拉菲台风移动路径示意

Fig. 4 Typhoon Molave path during July 15 and 19 in 2009

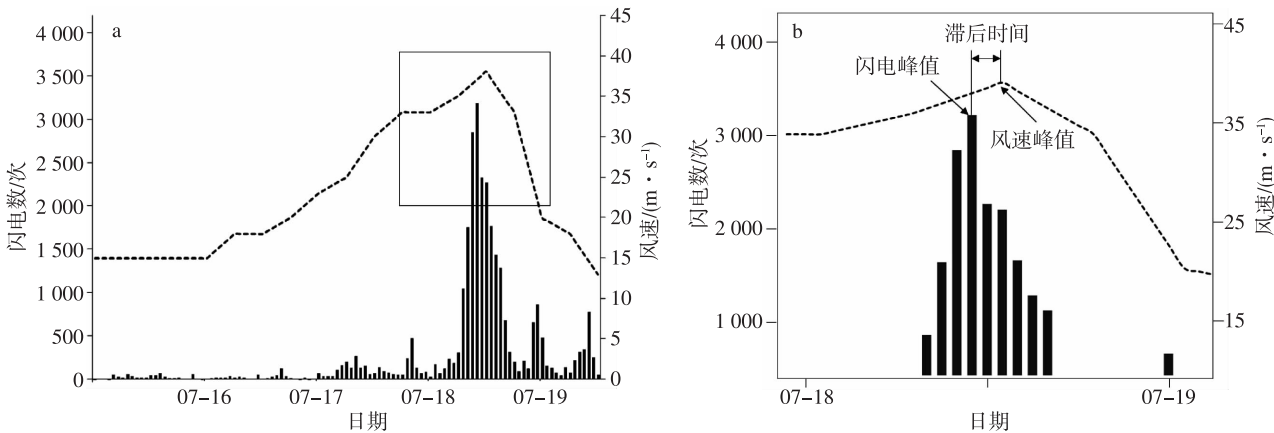


图 5 莫拉非台风过程中逐时闪电数与近中心风速特征(柱状图表示台风系统内逐时的闪电数;虚线表示台风近中心风速) a. 完整过程;b. 局部放大

Fig. 5 The number of lightning and characteristics of wind speed in the center of Molave typhoon (The bar chart denotes the number of lightning in typhoon system per hour;the dotted line denotes the wind speed in typhoon center) a. the whole process;b. the detailed view

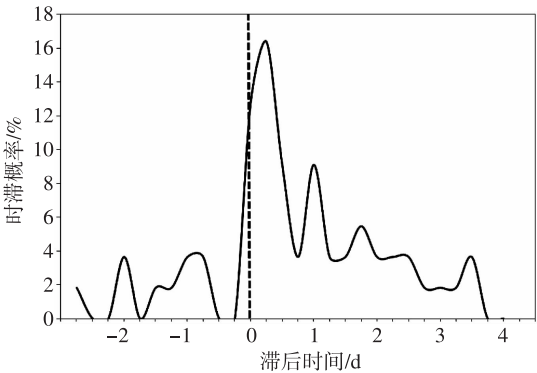


图 6 2005—2010 年台风最大风速与闪电峰值时滞分布(横坐标中正值表示闪电峰值提前于风速极值出现的天数,负值表示风速极值先于闪电峰值出现的天数;纵坐标为出现这一时滞的概率)

Fig. 6 Lag time between the maximum lightning activity and the maximum winds of typhoons during 2005—2010 (Positive values imply that the lightning activity peaked before the maximum winds, and negative values imply the opposite; the vertical ordinate indicates the occurrence probability of lag time)

4 结论与讨论

本文利用全球闪电定位网(WWLLN)的闪电定位数据与中国气象局上海台风所提供的台风定位资料,对 2005—2010 年发生在西太平洋地区的 55 次台风过程中闪电活动与最大风速两者间的关系进行了研究。得到以下结论

1)西太平洋台风系统中发生的闪电大致有 3 个高发区,分别位于距离中心 20 ~ 40 km 的云墙区,

280 ~ 340 km 及 440 ~ 580 km 的外云带中。台风系统内云带中的闪电活动发生较少。

2)在台风过程中,闪电往往在台风强度增强阶段呈现爆发状态。在此期间系统内闪电活动频繁,闪电数目在短时间内剧增,在达到峰值后急剧减少并回落至较少发生的状态。在台风强度减弱阶段,系统内闪电活动较少,变化较为平稳。登陆后,台风强度迅速减弱。系统内的闪电也随之相应减少。

3)大约 83.6% 的台风存在风速峰值滞后于闪电峰值这一现象。最大风速的出现相对于闪电数的爆发存在一定的滞后性,滞后时间峰值约为 6 h,一般滞后时间在 0 ~ 24 h 内。

本文仅利用了 WWLLN 闪电定位资料和上海台风研究所提供的台风路径数据,对西太平洋上空台风过程中的闪电特征进行了初步分析和统计。由于 WWLLN 探测效率的局限,下一步工作的重点是将雷达、卫星等资料融合至台风闪电时空分布特征分析中,可能会得到更好的结果。随着对台风中闪电活动与系统内微物理过程两者间关系的进一步研究,还可将闪电活动作为参考因子加入到台风模型中,更好地对台风过程进行预测。

参考文献:

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,31(4):29-38.
潘伦湘,邱秀书,刘东霞,等. 2010. 西北太平洋地区强台风的闪电活动特征[J]. 中国科学 D 辑,40(2):252-260.
郗秀书,张其林,冯桂力,等. 2007. 中尺度对流系统中雷电的人工引发及特征放电参数的测量和估算[J]. 中国科学 D 辑,37(6):

564-572.

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 2006. GB/T 19201-2006 热带气旋等级[S]. 北京:中国标准出版社.

Black R A, Hallett J. 1986. Observations of the distribution of ice in hurricanes[J]. *J Atmos Sci*, 43:802-822.

Black R A, Hallett J. 1999. Electrification of the hurricane[J]. *J Atmos Sci*, 56:2004-2028.

Black R A, Bluestein H B, Black M L. 1994. Unusually strong vertical motions in a Caribbean hurricane [J]. *Mon Wea Rev*, 122:2722-2739.

Buechler D E, Driscoll K T, Goodman S J, et al. 2000. Lightning activity within a Tornadoic thunderstorm observed by the optical transient detector (OTD) [J]. *Geophys Res Lett*, 27(D15):2253-2256.

Carey L D, Rutledge S A. 1998. Electrical and multi parameter radar observations of a severe hailstorm[J]. *J Geophys Res*, 103(D12):13979-14000.

Emanuel K. 2005. Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years[J]. *Nature*, 436:686-688.

Lang R, Maurelli A N, Van der Zande W J, et al. 2002. Forward modeling and retrieval of water vapor from the Global Ozone Monitoring Experiment; Treatment of narrow band absorption spectra [J]. *J Geophys Res*, 107, 4300. doi:10.1029/2001JD001453.

Lay E H, Jacobson A R, Holzworth R H, et al. 2007. Local time variation in land/ocean lightning flash density as measured by the World Wide Lightning Location Network [J]. *J Geophys Res*, 112, D13111. doi:10.1029/2006JD007944.

Rodger C J, Brundell J B, Dowden R L. 2005. Location accuracy of VLF Worldwide Lightning Location (WWLL) network; Post-algorithm upgrade[J]. *Ann Geophys*, 23:277-290.

Sergio F A, Kristen L C, Thomas J G Jr. 2010. An evaluation of the Worldwide Lightning Location Network (WWLLN) using the National Lightning Detection Network (NLDN) as ground truth[J]. *J Geophys Res*, 115, D18206. doi:10.1029/2009JD013411.

Shao X M, Harlin J, Stock M, et al. 2005. Katrina and Rita were lit up with lightning[J]. *EOS, Trans Amer Geophys Union*, 86:398-399.

Squires K, Businger S. 2008. The morphology of eyewall lightning outbreaks in two category 5 hurricanes[J]. *Mon Wea Rev*, 136:1706-1726.

Thomas J N, Solorzano N, Cummer S A, et al. 2010. Polarity and energetics of inner core lightning in three intense North Atlantic hurricanes [J]. *J Geophys Res*, 115, A00E15. doi:10.1029/2009JA014777.

Webster P J, Holland G J, Curry J A, et al. 2005. Changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment [J]. *Science*, 309:1844-1846.

(责任编辑:刘菲)