



论文

西北太平洋地区强台风的闪电活动特征

潘伦湘^{①②}, 郅秀书^{①*}, 刘冬霞^{①②}, 王东方^①, 杨静^①

① 中国科学院大气物理研究所中层大气与全球环境探测重点实验室, 北京 100029;

② 中国科学院研究生院, 北京 100049

* 联系人, qiex@mail.iap.ac.cn

收稿日期: 2009-01-18; 接受日期: 2009-08-31

中国科学院知识创新工程重要方向项目(编号: KZCX2-YW-206)和国家杰出青年科学基金获得者“百人计划”专项经费资助

摘要 利用全球闪电定位网(WWLLN)获取的闪电定位资料和中央气象台提供的台风定位资料, 分析了西北太平洋地区 2005~2008 年登陆我国的 1 个强台风和 6 个超强台风的闪电空间分布及其随时间的演变特征. 分析结果表明: 西北太平洋地区强台风成熟时平均闪电密度呈现出明显的三圈结构: 眼壁上存在一个明显的闪电弱密集带(20~80 km), 而距离台风中心 80~200 km 范围内闪电密度接近于零, >200 km 的外雨带中闪电又逐渐增加. 外雨带中的闪电远远多于台风中心或者眼壁上发生的闪电, 台风中心发生的闪电所占比例小于总数的 1%. 若把距台风中心 100 km 范围内的闪电定义为台风眼壁闪电, 则在台风中心最大风速急剧增大的阶段, 眼壁上的闪电爆发, 而在眼壁闪电爆发的几个小时后中心风速达到最大值, 有个别台风在台风最强期间的前半段眼壁闪电爆发, 这对台风强度的预报有一定的指示意义. 在台风减弱阶段, 中心闪电发生很少.

关键词

强台风

闪电

WWLLN

西北太平洋地区

西北太平洋是全球热带风暴发生最多的区域, 而我国是世界上遭受台风灾害最为严重的国家之一, 平均每年有 7~8 个台风登陆我国^[1]. 台风带来的充沛水汽虽然可以缓解一些地区的旱情, 但是伴随台风登陆所带来的暴雨、大风及风暴潮给人民的生命和财产造成重大的损失. 因此, 加强对台风的研究和预报, 以及保护人民的生命财产有重要意义. 台风生成于热带洋面, 远离陆地闪电定位网, 目前对台风中的闪电观测还非常有限. 因此, 相比于陆地上的雷暴系统, 我们对台风这种极端天气中的闪电活动特征了解甚少. Jorgensen 等^[2]研究发现海洋上的对流运动要比陆地上的对流运动弱很多. 由于上升速度的差异, 陆地上对流系统发生的闪电远远多于台风中的闪电.

Christian 等^[3]利用 OTD 资料分析全球闪电发生的频率及空间分布特征, 发现陆地和海洋的平均闪电密度近似为 10:1. Molinari 等^[4]利用美国国家闪电探测网(NLDN)获取的地闪资料对飓风 Andrew(1992)登陆前后的闪电时空分布特征进行研究, 根据闪电特征把飓风分为 3 个区域: 眼壁区域、内雨带和外雨带. 主要集中在飓风眼壁区域和距飓风中心>190 km 外围雨带中, 而 40~100 km 范围内地闪密度几乎接近于零. 发现距飓风中心 300 km 以内的区域, 平均发生地闪 4400 fl·d⁻¹. Samsury 和 Orville^[5]也利用 NLDN 资料分析了 1989 年的两个飓风 Hugo 和 Jerry 的地闪特征, 发现其特征与飓风 Andrew 差别很大. 强飓风 Hugo 在 18 h 内仅发生了 33 次地闪、中等强度飓风

Jerry 在 18 h 内也只有 691 次地闪, 均远远少于飓风 Andrew. 两个飓风中的正闪比例远远高于探测网探测到的平均值. Lyons 和 Keen^[6]利用 LPATS 资料分析了 1987 年一个靠近陆地但未命名的热带风暴、飓风 Diane(1984)、Florence(1988)和飓风 Elena(1985)等的闪电分布特征. 结果表明: Diane 和 Florence 两个飓风中心的闪电在飓风剧增阶段闪电爆发. Diane 的闪电主要集中在距飓风中心 200 km 以外的外雨带, 而 Florence 在眼壁附近闪电频率较高, 特别是在其增强阶段就更明显. Molinari 等^[7]利用 NLDN 资料对 1985~1991 年间大西洋上 9 个飓风的地闪特征进行了综合分析, 结果表明: 飓风的地闪频数最大可达 $5700 \text{ fl} \cdot \text{d}^{-1}$, 最小接近零. 但平均而言, 飓风眼壁附近有一个弱的闪电密集带, 眼壁外 80~100 km 范围内存在一明显的小值区, 而外雨带(距飓风中心 210~290 km)则是闪电高发带, 眼壁闪电在飓风增强阶段或者在最强阶段爆发. Cecil 等^[8]利用 OTD 卫星闪电资料分析了十几个热带气旋(TC), Cecil 等^[9,10]利用 TRMM 卫星 LIS 闪电资料对 261 条轨道扫过的 45 个 TC 进行分析, 也得到了类似于 Molinari 等^[7]的结果. 同时也发现大部分的眼壁闪电出现在强 TC 中(最大风速 $>49 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$). 另外发现, 眼壁上的闪电密度也比陆地上的雷暴闪电密度要小. Squires 等^[11]综合 LLDN, TRMM 卫星以及飞机探测(WP-3D)资料分析了大西洋两个影响极大的 5 级飓风 Rita 和 Katrina, 发现在飓风剧烈增强的阶段, 眼壁上的闪电爆发. Shao 等^[12]利用 LASA 分析了 Rita 和 Katrina 飓风里的闪电活动. Solorzano 等¹⁾利用 WWLLN 研究了 2 个大西洋飓风和 3 个西太平洋台风, 也都证实了 Molinari 等^[7]的结果.

前人的研究得出一些富有指示性的结果, 使我们对台风中的闪电有了初步的了解. 但是 NLDN 探测网只能探测靠近海岸的飓风, 卫星携带的探测器(例如 OTD, LIS 等)虽可弥补地面闪电探测网的不足, 但由于卫星轨道扫过的区域和时间有限, 也只能了解台风某一阶段、某一区域的闪电情况. 本文所利用的全球闪电定位网(WWLLN)覆盖全球, 可以对闪电进行实时观测, 弥补了常规定位网和卫星探测的不足. 前人的大量工作主要针对于大西洋地区的飓风, 对于西北太平洋地区的台风闪电活动分析还比较少.

西北太平洋台风闪电具有怎样分布特征? 西北太平洋台风闪电活动与台风强度之间存在什么样的关系? 闪电活动对台风预报有无指示作用等? 本文将对登陆我国的 7 个西北太平洋地区的强台风和超强台风进行分析.

1 资料及方法介绍

本文所用的闪电定位资料由全球闪电定位网(world wide lightning location network, WWLLN)提供, 该网由美国华盛顿大学地球与空间科学中心负责建设, 目的是对全球闪电活动进行实时探测. 该探测网通过全球 40 个地面测站探测闪电产生的甚低频(VLF)电磁辐射信号, 并用 GPS 获得 VLF 信号到达各测站的精确时间, 每个测站将所测波形进行分析, 并将到达时间实时发送到中心站, 利用时间到达法(TOGA)确定闪电的发生位置. 每一个接收站包括一个 VLF 天线、前置放大器、一个 GPS 和用于记录数据以及传输数据的电脑. WWLLN 工作在甚低频段, 因此可以探测到几千公里外闪电发生的电磁辐射信号^[13], 实现了对远距离闪电的探测. 为避免干扰, 全球 40 个测站中至少有 5 个测站探测到同一 VLF 信号时, 才被视为一个闪电.

Lay 等^[14]用 WWLLN 资料与巴西闪电探测网(BIN)资料作比较, 发现 WWLLN 对地闪的探测效率只达到 0.3%. Rodger 等^[15,16]用 WWLLN 探测网与澳大利亚闪电定位网(Kattron)做比较, 发现 WWLLN 对总闪(地闪+云闪)的探测效率约为 13%, 对地闪的探测效率约为 26%, 对云闪的探测效率约为 10%. Jacobson 等^[17]用其与 NLDN 及 LASA 作比较发现, 对 $I_p > 40 \text{ kA}$ 的闪电, WWLLN 探测效率达到 4%. Rodger 等^[16]最近把 WWLLN 与新西兰闪电探测网(NZLDN)进行对比, 发现对 $I_p > 50 \text{ kA}$ 云闪的探测效率约为 10%, 这说明 WWLLN 对强闪电有很好的探测效率. WWLLN 的探测精度约为 10 km, 时间精度为 30 ms.

另外, 本文还利用了中央气象台提供的台风定位资料, 包括台风编号、时间(年、月、日、时)、位置(中心经纬度), 台风中心最低气压, 中心附近最大

1) Solorzano N N, Thomas J N, Holzworth R H, et al. Global studies of tropical cyclones using the World Wide Lightning Location Network. Paper presented at the AMS Annual Meeting 2008 in New Orleans, 2008

平均风速, 台风移动方向, 台风移动速度等. 2005~2008 年西北太平洋共生成 94 个热带气旋, 其中有 56 个发展成为台风. 所选的 7 个台风个例包括 0505 号海棠(Haitang)、0513 号泰利(Talim)、0601 号珍珠(Chanchu)、0608 号桑美(Saomai)、0709 号圣帕(Sepat)、0813 号蔷薇(Jangmi)、0815 号森拉克(Sinlaku), 除了 0601 号台风珍珠是强台风(最大平均风速 $>41.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)外, 其余 6 个均为超强台风(最大平均风速 $>51 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), 路径见图 1, 这 7 个台风在我国大陆及台湾登陆, 台风登陆均造成重大的经济损失和人员伤亡, 例如桑美台风登陆时曾造成 483 人死亡, 138 人失踪, 直接经济损失为 196.6 亿元(<http://www.typhoon.gov.cn>).

台风虽不断移动, 但由于台风移速比较小, 时速最高只达到 25 km(约 0.25 个纬距), 而闪电的发生又具有瞬时性且发生频数相对较低, 因此, 取样时利用从台风定位时刻至未来一小时发生的距中心 800 km 范围内的闪电来代表该定位时刻台风内的闪电. 在台风初始时期, 由于每隔 6 h 才给出一次定位, 为了得到每个小时台风的位置, 利用三次样条插值法计算出逐时的台风位置. 台风的直径一般为 600~1000 km, 最大可达 2000 km, 最小只有 100 km^[18]. 本文所选取的台风为强、超强台风, 根据数字台风网(<http://agora.ex.nii.ac.jp/digital-typhoon>)提供的 MTSAT-1R 静止卫星云图查看了 7 个台风云图, 台风直径平

均取为 1600 km.

2 台风闪电的整体分布特征

对 2005~2008 年登陆我国的 1 个强台风和 6 个超强台风进行统计分析, 结果列于表 1. 分析发现, 尽管由于台风个例之间的差异造成闪电总数具有较大的变化范围, 对于 800 km 范围内日平均闪电频数来说, 最高可达 $7496 \text{ fl}\cdot\text{d}^{-1}$, 最低的只有 $613 \text{ fl}\cdot\text{d}^{-1}$, 日平均闪电一般在 $2000\sim3000 \text{ fl}\cdot\text{d}^{-1}$, 考虑到 WWLLN 对地闪 26%和总闪 13%的探测效率^[15,16], 可以发现台风中的闪电虽然低于中尺度对流系统(MCS)中的地闪频数 260 次/5 min^[19]和雹暴系统中的总闪频数 55 次/min^[20], 但闪电活动仍然较多.

从台风的整个生命史来看, 台风外雨带中发生的闪电远远多于台风中心发生的闪电, 7 个台风 100 km 内发生的闪电不到总数的 1%, 这跟 Molinari 等^[7]得到的结果 40 km 范围内闪电数占总闪电数低于 1%, 80 km 闪电数占总闪电的 4.3%有所差别. 造成差别的原因一方面与所取台风的尺度有关, Molinari 等^[7]所取飓风半径为 300 km, 而本文所取的台风半径为 800 km, 另一方面也可能跟太平洋和大西洋台风之间的特性差异有关. 台风登陆后, 台风眼基本消失, 台风中心闪电很少, 这可能与台风登陆后受到陆面摩擦

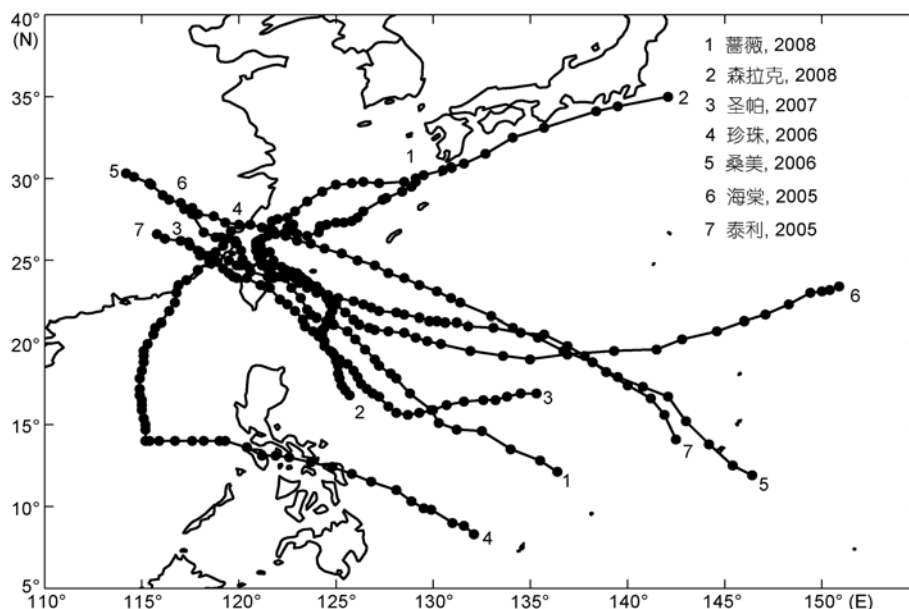


图 1 西北太平洋地区 2005~2008 年 1 个强台风和 6 个超强台风路径

表 1 2005~2008 年西北太平洋登陆我国的 1 个强台风和 6 个超强台风闪电活动特征

台风名称 (中央台 编号)	强度 (hPa)	最大 风速 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	起始和结束 时间		持续 时间 (h)	800 km 日 平均闪电数 ($\text{fl}\cdot\text{d}^{-1}$)	闪电数(包括云闪和地闪)					
							TD~STY ^{a)}		整个生命史		登陆后	
							<100 km	<800 km	<100 km	<800 km	<100 km	<800 km
蔷薇(0815)	910	65	09-24 10-01	20:00 02:00	151	2100	33	1687	180	13210	4	2165
森拉克(0813)	935	52	09-09 09-20	05:00 08:00	268	3467	1	1772	271	38837	1	595
圣帕(0709)	910	65	08-13 08-20	02:00 02:00	169	7496	637	2437	3912	52776	25	12432
珍珠(0601)	945	45	05-09 05-18	08:00 08:00	226	3370	112	12864	215	31683	0	676
桑美(0608)	915	60	08-05 08-12	20:00 05:00	154	613	113	1159	433	3934	71	1220
海棠(0505)	910	65	07-12 07-20	08:00 17:00	202	2048	141	1078	289	17227	1	6068
泰利(0513)	910	65	08-27 09-02	08:00 07:00	144	2287	1167	9494	1921	13724	0	511

a) TD, 热带低气压阶段; STY, 强雷暴生成阶段

作用以及失去海洋所提供的充沛水汽等影响有关。但是桑美台风登陆后中心闪电发生频率依然很高。桑美台风是 50 年来登陆中国大陆最强的台风, 登陆时仍维持着比较完好的台风眼, 且其中心附近最大风速高达 $60\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

2.1 闪电在台风径向距离上的变化特征

台风在径向方向上包括 3 个区域, 即眼区、眼壁区和外区。外区分为内雨带和外雨带, 内雨带一般指位于距台风眼壁 50~100 km 范围内的雨带, 内雨带一般为层状云, 对流较弱, 是眼壁区到外雨带的过渡带^[21]。

本文成熟台风是指处于增强阶段的台风海平面最大风速超过 $32.7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。以台风中心为原点, 每 20 km 取一个环, 计算该环内的闪电频数($\text{fl}\cdot\text{d}^{-1}$)和密度($\text{fl}\cdot(100\text{ km})^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)。Molinari 等^[7]取大西洋飓风平均半径为 300 km, 本文所选取的台风均为强、超强台风, 台风的半径较大, 所以取台风半径为 800 km, 应该包含大部分或所有台风发生的闪电。考虑到坐标的问题, 对于最大闪电密度大于 $200\text{ fl}\cdot(100\text{ km})^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 的台风分为一类, 最大闪电密度小于 $120\text{ fl}\cdot(100\text{ km})^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 的台风归为一类。图 2 给出了 7 个成熟台风日平均闪电密度和闪电数随台风径向距离的变化。

由图 2 可以看出, 尽管每个台风之间其闪电活动随径向距离的变化存在很大的差别, 但是这 7 个台风中的闪电都呈现出明显的三圈结构。首先, 在距中心

20~80 km 处的眼壁区域存在一个闪电密集区。圣帕、桑美和海棠这 3 个台风在 20 km 处达到最大值, 而蔷薇、森拉克、珍珠、泰利分别在 40, 80, 60 和 80 km 处达到最大值。其中圣帕台风在眼壁上的闪电密度高达 $1346\text{ fl}\cdot(100\text{ km})^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, 而桑美台风眼壁上的闪电也超过 $300\text{ fl}\cdot(100\text{ km})^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 。其他 5 个台风眼壁上的最大闪电密度在 $13\sim50\text{ fl}\cdot(100\text{ km})^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 之间变化。其次, 在距离中心 100~200 km 的内雨带闪电密度很小, 基本上接近于 0。最后, 从 200 km 以外的外雨带中闪电又逐渐增加。圣帕和桑美台风外雨带中的闪电密度远远低于眼壁区域的闪电密度。森拉克和珍珠台风外雨带中的闪电密度呈双峰型变化, 一个峰值出现在距中心约 300 km, 另外一个在距中心约 600 km 处。蔷薇和海棠外雨带中的闪电密度基本成单峰型, 在 350~520 km 处闪电频数较高。圣帕台风眼壁上不管是闪电密度还是闪电总数都是最大的。其他 6 个台风眼壁上的闪电数远远低于圣帕台风。外围雨带中闪电数随径向距离的变化跟闪电密度随径向距离的变化基本一致。

2.2 闪电的空间分布特征

图 3(a)给出了 7 个台风成熟阶段归一化到台风中心的闪电合成后的空间分布图。从图 3 可更直观地看到, 在台风中心区域(0~80 km)存在一个闪电密集区, 而距离中心 80~200 km 范围内闪电相对较少, 而 >200 km 的外围雨带中闪电又逐渐增加。这跟闪电的

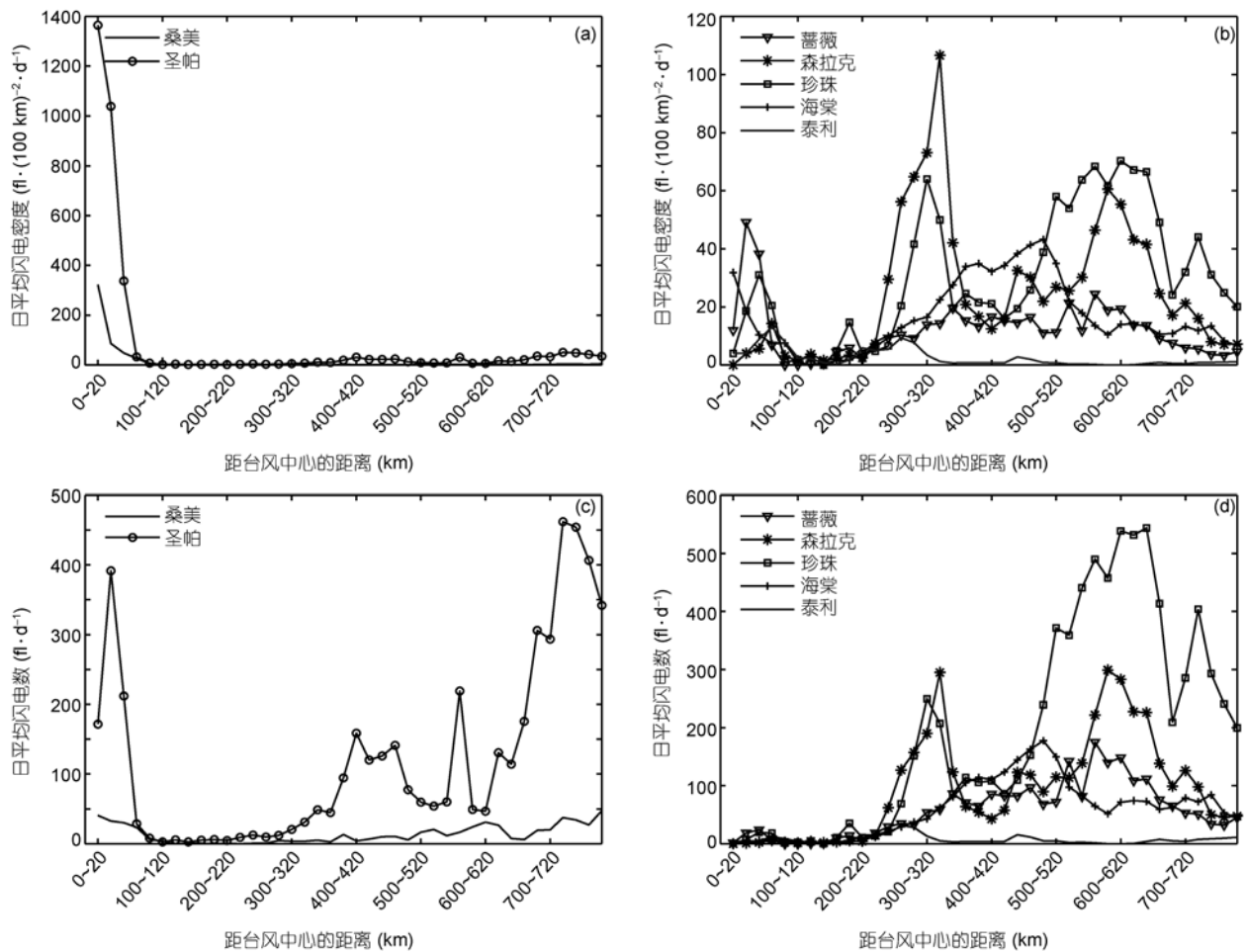


图 2 成熟台风日平均闪电密度及日平均闪电数随台风径向距离的变化

(a) 最大闪电密度大于 $200 \text{ fl} \cdot (100 \text{ km})^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 的 2 个台风; (b) 最大闪电密度小于 $120 \text{ fl} \cdot (100 \text{ km})^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 的 5 个台风; (c), (d) 成熟台风日平均闪电总数随台风径向距离的变化

径向分布基本一致. 台风中的闪电并不是均匀分布, 在外围螺旋雨带中闪电成簇出现, 这可能与深对流系统有关. 外围雨带中的闪电具有非对称分布, 在西北方向上闪电较少, 而在东南方向闪电则相对较多. 图 3(b)是海棠台风成熟阶段 7 月 16 日的闪电分布特征, 中心有一些闪电, 但分辨不出台风眼, 距中心 60~300 km 范围内没有闪电发生, 海棠的外雨带中有一个宽约 200 km 的闪电密集带, 在台风的西北方向闪电较少, 而东南方向上闪电较多.

图 3(c), (d)是蔷薇和珍珠台风成熟时 02~06 时的闪电分布, 考虑到 02~06 时台风移速较小, 云图没有很大变化, 把 02~06 时闪电相对 06 时台风中心进行坐标平移, 然后叠加在 06 时可见光云图上. 可以清

晰地看到蔷薇的台风眼, 台风眼比较小, 环绕台风眼有一环形闪电密集带, 大约宽 30 km, 对应台风眼壁. 眼壁以外的 300 km 没有闪电发生, 外雨带中闪电又逐渐增加. 外雨带中的闪电并不是均匀分布, 只出现在较深厚的云中. 台风珍珠外雨带中的闪电频数远远高于蔷薇台风, 台风眼同样清晰可见, 台风眼半径约为 50 km, 比蔷薇台风略大. 环绕台风眼有一环形的闪电密集带, 眼壁外围 200 km 范围零星有闪电分布, 而外围螺旋雨带闪电增加, 成簇出现, 外雨带中发生的闪电多于眼壁上发生的闪电. 闪电呈现出的三圈分布跟台风眼壁对流强、内雨带弱、外雨带强基本一致. 基于以上分析, 把距台风中心 100 km 范围内的闪电定义为中心闪电或眼壁闪电, 而把 800 km

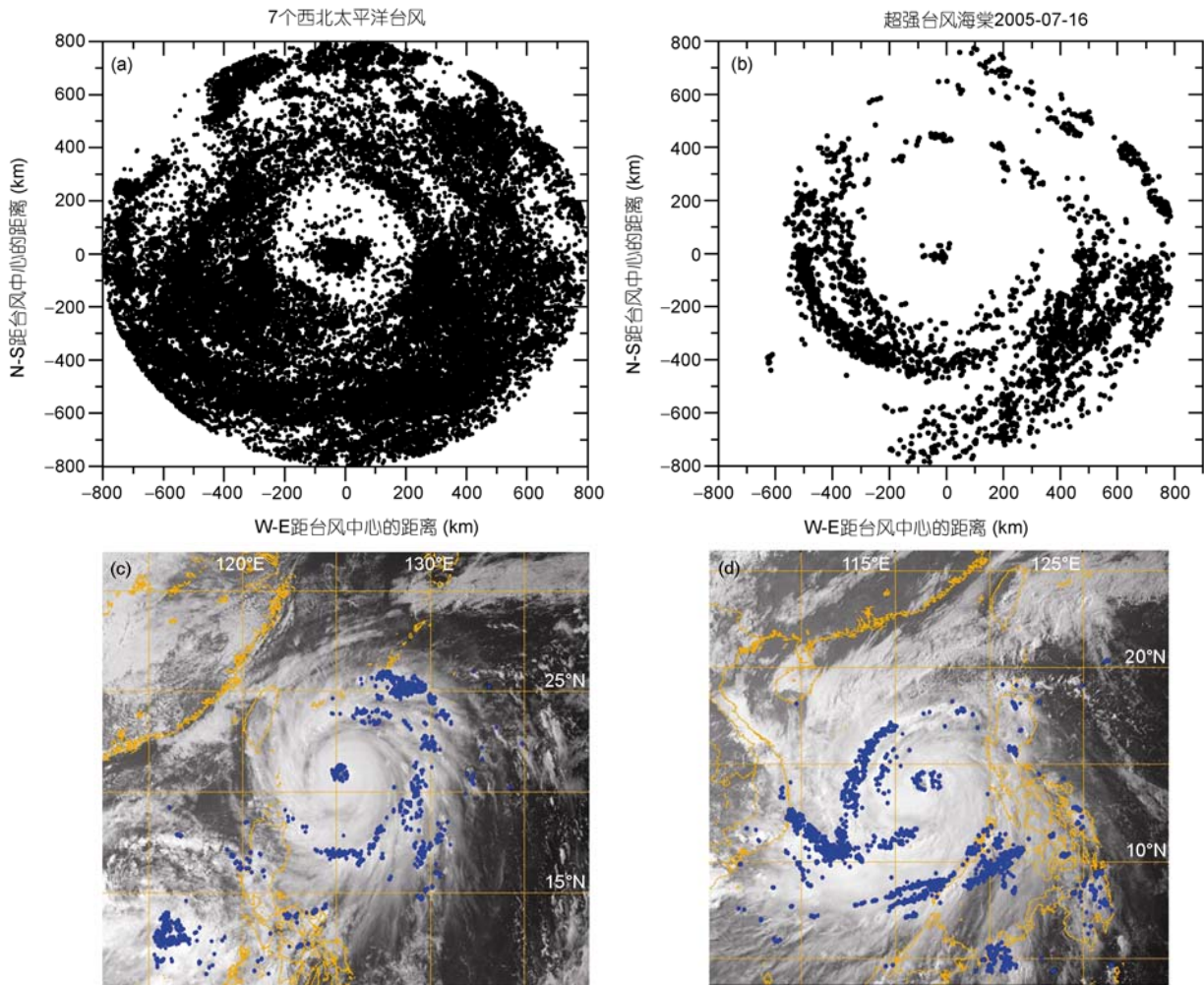


图 3 闪电空间分布特征

(a) 7 个台风成熟阶段的闪电空间分布合成图; (b) 海棠台风成熟时的闪电空间分布; (c) 蔷薇台风 9 月 27 日 02~06 时(UTC)闪电与 06 时 GMS-6 可见光云图的叠加; (d) 珍珠台风 5 月 14 日 02~06 时(UTC)闪电与 06 时 GMS-6 可见光云图上的叠加, 蓝色圆点为闪电

范围内的闪电定义为平均闪电。

2.3 台风闪电随时间演化特征

以往的研究由于受到观测手段的限制, 对台风整个生命过程的闪电演变情况了解甚少. 图 4(a)是台风蔷薇 800 km 逐时闪电变化以及 3~6 h 最大平均风速随时间的变化(其他台风类似, 图略), 在台风达到最强前几个小时, 平均闪电很活跃. 其余 6 个台风也在各自达到最强强度前的一天或者两天, 闪电活动频繁. 这说明, 平均闪电在一定程度上跟台风强度有联系. 而在台风最强期间, 平均闪电发生很少.

根据美国海军实验中心(NRL)提供的综合卫星

云图和日本数字台风网提供的 MTSAT-1R 卫星云图判断台风眼出现的时间. 图 4(b)~(h)给出了 7 个台风 100 km 范围内逐时闪电数随时间的变化情况, 同时标出台风眼出现的时间, 眼壁替换的时间以及台风登陆的时间地点.

图 4(b)是海棠台风闪电逐时变化以及最大风速和最低气压随时间的变化. 7 月 15 日 05 时台风眼出现. 可以观测到在台风强度剧增的阶段(7 月 13 日~16 日 12 时), 并且在台风达到其最强强度(7 月 16 日 12 时)之前, 台风眼壁闪电爆发. 在台风最强的阶段台风眼壁上没有任何闪电发生. 台风眼壁发生置换, 外眼壁逐渐替换掉内眼壁. 从 7 月 17 日 06 时的 TRMM

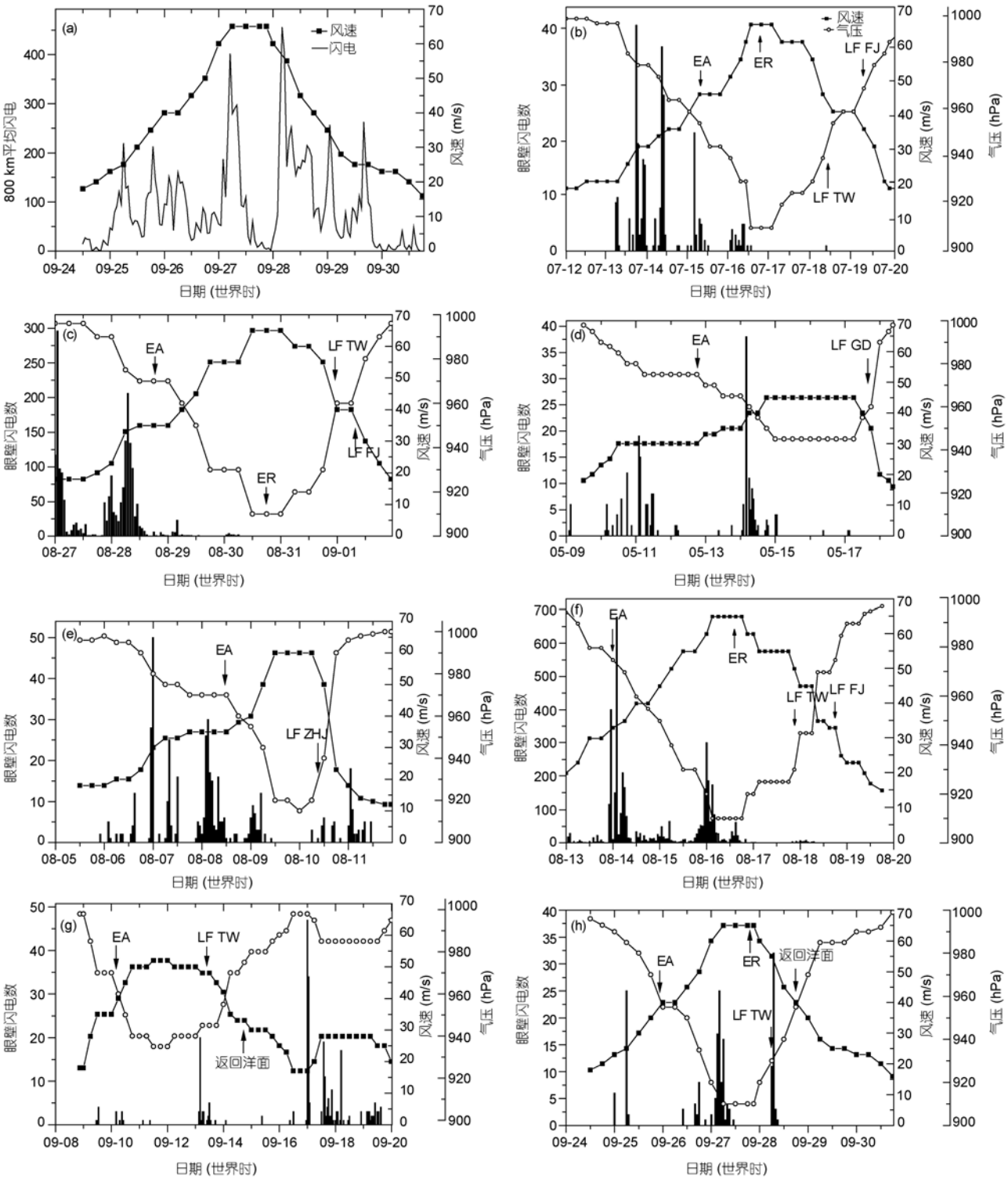


图 4 闪电随时间演化特征

(a) 蔷薇台风 800 km 范围内闪电逐时变化; 海棠(b)、泰利(c)、珍珠(d)、桑美(e)、圣帕(f)、森拉克(g)和蔷薇(h)在 100 km 范围内逐时闪电数随时间的变化, 6 或 3 h 最低气压、最大风速随时间的变化, 台风眼出现和眼壁替换的时间以及台风登陆的时间地点。图中柱状代表台风中心每小时闪电数; 圆圈代表台风中心最低气压; 方框代表中心附近最大平均风速; TW, 台湾; ZHJ, 浙江; FJ, 福建; GD, 广东; EA, 台风眼出现; ER, 眼壁置换; LF, 登陆

卫星 85 GHz 红外云图(图略)上可以清楚的分辨出双眼结构. 在海棠台风减弱期间, 100 km 内基本上没有闪电发生.

图 4(c)是泰利台风逐时闪电变化特征, 泰利台风在其强度达到最强前的 6 h 眼壁闪电爆发, 眼壁上发生的闪电较海棠台风少. 在台风初期, 泰利台风中心活动较其他任何一个台风都频繁. 而从其眼壁置换开始, 中心没有任何闪电发生. 图 4(d)则是台风珍珠逐时闪电演变情况, 台风珍珠曾在 12~13 日期间两次登陆菲律宾, 而后进入南海登陆我国广东, 在其达到最强的前 1 天, 眼壁闪电爆发. 台风圣帕和蔷薇在达到其强度最强前几个小时, 闪电爆发. 泰利、珍珠、圣帕台风减弱期间, 台风中心没有闪电发生. 森拉克台风不管在台风增强还是减弱阶段中心闪电很少. 平均而言, 在台风中心最大风速急剧增大(中心气压急剧降低)的阶段, 眼壁上的闪电爆发, 而在眼壁闪电爆发几个小时后, 中心风速达到最大值. 也有个别台风在最强期间有台风眼壁闪电的爆发. 当风速达到最大值(气压降至最低)阶段, 台风眼壁发生置换^[22]. 当台风处于最强的阶段, 平均闪电较少, 眼壁发生置换后, 中心闪电很少, 有的台风中心基本上没有闪电.

3 结论与讨论

利用全球闪电定位网(WWLLN)获取的闪电实时定位资料和中央气象台提供的台风定位资料对西北太平洋地区 1 个强台风和 6 个超强台风的闪电特征进行分析. 尽管该网探测效率较美国的地闪定位网 NLDN 低, 但是基本上能反映台风中的闪电情况, 为台风闪电研究提供了很好的基础资料. 主要研究结果如下:

(1) 虽然每个台风闪电分布情况都不完全相同, 但是平均而言, 西北太平洋台风成熟时平均闪电密度呈现出明显的三圈结构: 眼壁和 >200 km 的外雨带是闪电的高发区, 距台风中心 80~200 km 闪电频数接近于零. 台风眼壁的云墙是整个台风云高最高的地方, 通常可以高达十几公里. 尽管台风眼壁的云墙能达到很高的高度, 云墙内一般情况下只有上升气流而无下沉气流, 和积雨云内常有剧烈的上升和下沉气流相互冲击的情况不同, 因此, 云墙内很少出现强烈的乱流扰动和雷暴现象^[18]. Jorgensen 等^[2], Marks^[23], Black 等^[24]发现台风眼壁中的最大上升速度 <8

$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 有时也会出现较大的上升气流, 但一般说来, 飓风中的上升速度较陆地上的雷暴系统上升气流的速度要小得多. 但是飓风雨带中的上升速度又比眼区的上升速度稍弱. 眼壁区平均上升速度大约为 $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 最大上升速度约为 $7\sim 8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. 值得注意的是, 在台风最强期间的后半段, 台风眼壁云墙依然很高, 但是其中却很少有闪电发生.

(2) 台风中外雨带中的闪电具有不对称分布, 闪电成簇出现, 主要发生在深厚对流区域. 外围雨带中的闪电远远多于台风中心发生的闪电. 台风中心发生的闪电所占比例不到总数的 1%.

(3) 台风登陆后, 台风中心区域闪电明显地减少, 有的台风中心闪电频数几乎为零. 台风登陆后, 由于水汽供应量减少, 能量来源枯竭, 同时陆地摩擦又比海洋大, 低层空气大量涌入中心, 导致台风迅速减弱, 台风中心闪电自然相应减少.

(4) 在台风中心最大风速急剧增大的阶段, 眼壁上的闪电爆发, 而在眼壁闪电爆发之后的几个小时后中心风速达到最大值, 有个别台风在台风最强期间的前半段眼壁闪电爆发. 这对台风强度的预报有一定的指示意义. 在台风减弱阶段, 大部分台风中心基本上没有闪电发生.

为什么台风中会发生闪电呢? Black 和 Hallett^[25]利用飞机穿越 3 个大西洋飓风所得观测资料发现飓风中存在过冷水滴、软雹和冰晶, 但同时发现, 仅仅在上升气流速度 $>5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的对流区才可以观测到过冷水滴. 之后, 他们对约 20 年的飞行记录进行了总结^[26], 发现对许多雷暴而言, 闪电与 $>10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的强上升气流速度相联系, 而且过冷水滴可以延伸至低于 -20°C 的区域. 在具有较强垂直速度的系统中, 存在可以延伸至较低温度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可以导致电荷的转移, 这是台风起电的微物理原因.

当然, 是否所有的台风在增强阶段都有眼壁闪电的爆发, 眼壁闪电爆发后几个小时台风是否达到其最大值? 由于只分析了西北太平洋地区登陆我国的 1 个强台风和 6 个超强台风, 从 7 个台风结果的一致性来看, 本文结果至少对于强台风和超强台风而言, 具有一定的普遍意义. 但对于其他强度的热带气旋, 是否也具有这样的特征还需要进一步的研究. 今后的工作将继续针对一般台风和热带气旋中的闪电时空分布特征进行分析. 由于目前探测手段的限制,

对台风中云微物理过程了解很少, 台风中的闪电与云微物理过程存在怎样的关系, 也值得深入研究, 进一步的工作还将结合数值模拟研究台风中闪电的形成机制, 这对台风模式参数化也将有一定的帮助.

致谢 华盛顿大学地球与空间科学中心提供 WWLLN 资料; 中央气象台提供台风定位资料; 美国海军中心 (http://www.nrlmry.navy.mil/tc_pages) 和数字台风网 (<http://agora.ex.nii.ac.jp/digital-typhoon>) 提供卫星云图资料; 审稿专家提出建设性修改意见; 在此一并致谢.

参考文献

- 1 陈联寿, 孟智勇. 我国热带气旋研究十年进展. 大气科学, 2001, 25: 420—432
- 2 Jorgensen D P, Zipser E J, LeMone M A. Vertical motions in intense hurricanes. J Atmos Sci, 1985, 42: 839—856
- 3 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, 2003, 108: 4005
- 4 Molinari J, Moore P K, Idone V P, et al. Cloud-to-ground lightning in Hurricane Andrew. J Geophys Res, 1994, 99: 16665—16676
- 5 Samsury C E, Orville R E. Cloud-to-ground lightning in tropical cyclones: A study of Hurricanes Hugo (1989) and Jerry (1989). Mon Weather Rev, 1994, 122: 1887—1896
- 6 Lyons W A, Keen C S. Observations of lightning in convective supercells within tropical storms and hurricanes. Mon Weather Rev, 1994, 122: 1897—1916
- 7 Molinari J, Moore P, Idone V. Convective structure of hurricanes as revealed by lightning locations. Mon Weather Rev, 1999, 127: 520—534
- 8 Cecil D J, Zipser E J. Relationships between tropical cyclone intensity and satellite-based indicators of inner core convection: 85-GHz ice-scattering signature and lightning. Mon Weather Rev, 1999, 127: 103—123
- 9 Cecil D J, Zipser E J, Nesbitt S W. Reflectivity, ice scattering, and lightning characteristics of hurricane eyewalls and rainbands. Part I: Quantitative description. Mon Weather Rev, 2002, 130: 769—784
- 10 Cecil D J, Zipser E J. Reflectivity, ice scattering, and lightning characteristics of hurricane eyewalls and rainbands. Part II: Intercomparison of observations. Mon Weather Rev, 2002, 130: 785—801
- 11 Squires K, Businger S. The morphology of eyewall lightning outbreaks in two category 5 hurricanes. Mon Weather Rev, 2008, 136: 1706—1726
- 12 Shao X M, Harlin J, Stock M, et al. Katrina and Rita were lit up with lightning. EOS, 2005, 86: 398—399
- 13 Crombie D D. Periodic fading of VLF signals received over long paths during sunrise and sunset. J Res Nat Bureau Standards Radio Sci, 1964, 68D: 27—34
- 14 Lay E H, Holzworth R H, Rodger C J, et al. WWLL global lightning detection system: Regional validation study in Brazil. Geophys Res Lett, 2004, 31: L03102, doi: 10.1029/2003GL018882
- 15 Rodger C J, Brundell J B, Dowden R L. Location accuracy of VLF World Wide Lightning Location (WWLL) network: Post-algorithm upgrade. Ann Geophys, 2005, 23: 277—290
- 16 Rodger C J, Werner S, Brundell J B, et al. Detection efficiency of the VLF World-Wide Lightning Location Network (WWLLN): Initial case study. Ann Geophys, 2006, 24: 3197—3214
- 17 Jacobson A R, Holzworth R H, Harlin J, et al. Performance assessment of the World Wide Lightning Location Network (WWLLN), using the Los Alamos Sferic Array (LASA) array as ground-truth. J Atmos Ocean Tech, 2006, 23: 1082—1092
- 18 朱乾根, 林景瑞, 寿绍文, 等. 天气学原理和方法. 第3版. 北京: 气象出版社, 2000. 509—516
- 19 刘冬霞, 鄢秀书, 冯桂力, 等. 华北一次强对流天气系统的地闪时空演变特征分析. 高原气象, 2008, 27: 358—364
- 20 冯桂力, 鄢秀书, 袁铁, 等. 雹暴的闪电活动特征与降水结构研究. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2007, 37: 123—132
- 21 陈联寿, 丁一汇. 西太平洋台风概论. 科学出版社, 1979. 59—60
- 22 Houze R A, Chen S S, Smull B F, et al. Hurricane intensity and eyewall replacement. Science, 2007, 315: 1235—1239
- 23 Marks F D Jr. Evolution of the structure of precipitation in Hurricane Allen (1980). Mon Weather Rev, 1985, 113: 909—930
- 24 Black M L, Burpee R W, Marks F D Jr. Vertical motion characteristics of tropical cyclones determined with airborne Doppler radial velocities. J Atmos Sci, 1996, 53: 1887—1909
- 25 Black R A, Hallett J. Observations of the distribution of ice in hurricanes. J Atmos Sci, 1986, 43: 802—822
- 26 Black R A, Hallett J. Electrification of the hurricane. J Atmos Sci, 1999, 56: 2004—2028