

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^{* 1}

杨美荣¹ 袁 铁¹ 郅秀书² 潘伦湘^{2,3}

YANG Meirong¹ YUAN Tie¹ QIE Xiushu² PAN Lunxiang^{2,3}

1. 兰州大学大气科学学院, 半干旱气候变化教育部重点实验室, 兰州, 730000

2. 中国科学院大气物理研究所, 中层大气和全球环境探测重点实验室, 北京, 100029

3. 中国科学院研究生院, 北京, 100049

1. *Key Laboratory for Semi-Arid Climate Change of the Ministry of Education, College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China*

2. *LAGEO, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*

3. *Graduate university of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

2009-09-02 收稿, 2009-10-27 改回.

Yang Meirong, Yuan Tie, Qie Xiushu, Pan Lunxiang. 2011. An analysis of the characteristics of lightning activities, radar reflectivity and ice scattering for tropical cyclones over the western North Pacific. *Acta Meteorologica Sinica*, 69(2), 370-380

Abstract Using the data from the precipitation radar (PR), lightning imaging sensor (LIS), and passive microwave imaging (TMI) onboard on the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) satellite, the characteristics of lightning activities, radar reflectivity and ice scattering of the 46 China-landfalling tropical cyclones from 1998 to 2008 are analyzed, and the relationships among lightning occurrence and radar reflectivity and ice scattering are investigated. The tropical cyclones are divided into the six intensity periods according to the maximum sustained wind near the eyewall. The results indicate that lightnings are more likely to happen in the weaker intensity period of tropical cyclones compared with the stronger ones. After a tropical cyclone reaches the tropical storm's intensity, the stronger it is, the fewer flashes are. There are different spatial distributions of lightning activities in the different intensity periods of tropical cyclones. The largest flash rate occurs in eyewall regions during tropical storm, severe typhoon and super severe typhoon periods, while it occurs in outer rainband regions during the other periods. As a whole, the precipitation in tropical cyclones is dominated by stratiform rains. The radar reflectivity is sharply decreased and the ice scattering signature is weaker as well above the freezing level. Though the strongest convective signatures appear in eyewall regions, there are fewer lightning flashes in eyewall regions than in outer rainband regions. Given the same radar reflectivity, lightning flashes are more likely to occur in typhoon and severe tropical storm periods with a maximum threshold of radar reflectivity found in super typhoon periods. The electrical activities are closely related to ice crystal, graupel, supercooled water and convective updraft, so to some extent, lightning data can give us some information about the microphysical and dynamic processes in tropical cyclones.

Key words Tropical cyclone, Lightning, Radar reflectivity, Ice scattering, TRMM

摘 要 利用热带测雨卫星(TRMM)携带的测雨雷达(PR)、闪电成像仪(LIS)和微波辐射计(TMI)的同步探测资料,选取1998—2008年登陆中国的46个热带气旋,分析了其不同强度阶段的闪电活动、雷达反射率和冰散射信号的分布特征,以及闪

* 资助课题:国家杰出青年科学基金获得者“百人计划”专项经费和国家自然科学基金项目(40930949,40774083,40905008)。
作者简介:杨美荣,主要从事雷电与强对流灾害性天气研究。E-mail: yangmr07@lzu.cn
通讯作者:袁铁,主要从事大气电学与卫星遥感研究。E-mail: tieyuan@lzb.ac.cn

电的发生与雷达反射率和冰散射信号之间的关系。结果发现:强度较弱的热带气旋平均闪电次数相对较高;当强度达到强热带风暴阶段后,强度越强,闪电数量反而越少。热带气旋强度不同,闪电的空间分布也有差别,热带风暴、强台风和超强台风阶段眼壁区闪电密度最大,而其他阶段则在外雨带区密度最大。热带气旋大部分区域被层云和弱对流降水控制,0℃层以上雷达反射率迅速减小,冰散射信号也普遍较弱。虽然热带气旋的眼壁区对流活动最强,但相比于外雨带却较不易发生闪电。在同等大小的雷达反射率下,闪电更易发生在台风和强热带风暴阶段,超强台风阶段发生闪电阈值最高。由于闪电的发生与软雹、冰晶和过冷水等微物理参量以及上升气流速度紧密相关,因此闪电资料可以提供关于热带气旋不同区域的微物理过程和动力过程信息。

关键词 热带气旋, 闪电, 雷达反射率, 冰散射, TRMM 卫星

中图法分类号 P427.3 P447

1 引言

热带气旋(Tropical Cyclone,以下简称 TC)是生成于热带洋面上的一种有组织的天气尺度涡旋系统,在靠近陆地时具有非常强的破坏力。西北太平洋是全球 TC 生成最多的海域,平均每年登陆中国的 TC 约 7—8 个(陈联寿等,2001),通常会带来人员伤亡和巨大的财产损失。多年来,中国学者对西北太平洋 TC 的活动规律、以及 TC 造成的暴雨、环流特征等开展了大量的研究工作(林毅等,2002;雷小途等,2001;任福民等,2008;袁金南等,2008),取得了众多有意义的研究成果,但强度和路径仍然是 TC 预报的两大难题。

近些年来,随着闪电探测技术的发展,人们对 TC 中的闪电活动特征越来越关注。20 世纪 90 年代,研究发现 TC 闪电活动在空间上呈现明显的 3 个区域分布特征,分别对应眼壁区、内雨带、外雨带,其中外雨带闪电最多(Lascody, et al, 1992; Molinari, et al, 1994; Samsury, et al, 1994)。Molinari 等(1999)使用美国国家闪电定位网(NLDN)提供的闪电资料分析 9 个大西洋飓风发现,在距飓风中心 40—60 km 有一个低闪电密度带,80—100 km 闪电密度最小,在 210—290 km 为一个高闪电密度带。Black 等(1999)利用飞机探测资料分析飓风内电场发现,闪电发生在上升气流大于 10 m/s 并且过冷水存在高度延伸至 -20℃ 的区域中。Natalia 等(2008)利用全球闪电定位网(WWLLN)提供的 TC 实时闪电数据分析发现,在强 TC 强度增强前或者增强过程中眼壁区闪电活动爆发,并且在 TC 登陆前眼壁区闪电活动也会突然加强。Price(2009)利用 WWLLN 资料发现,闪电次数与 6 小时后 TC 强

度存在较好的相关性。潘伦湘等(2010)利用 WWLLN 闪电资料分析 7 个登陆中国的强台风发现,西北太平洋台风成熟时平均闪电密度呈现出明显的 3 圈结构,并利用闪电资料直观地反映了台风的动力结构特征。已有的研究表明,TC 中的闪电活动与 TC 的结构和强度演变存在着比较密切的联系。

由于 TC 大部分时间都位于洋面上,陆地上的探测系统很难对其探测,因此,TC 的观测资料相对还很缺乏。初期人们仅能使用地闪定位网观测到的靠近陆地时段内 TC 的闪电资料或者飞机穿云观测得到的资料。2003 年开始发展起来的 WWLLN 可以对 TC 闪电进行实时观测,但其探测效率较低(Rodger, et al, 2006),且对与闪电发生密切相关的降水结构缺乏观测。TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission)卫星载有多个探测器,可以同时的云和降水进行多传感器同步观测,获得三维雷达反射率、降水率、闪电活动以及冰散射信号(微波亮温)等多种信息。TRMM 卫星目前已经运行了 10 余年,积累了大量全球 TC 的观测数据,不但可以用于研究 TC 的闪电活动特征,还能够进一步分析 TC 中的闪电与降水结构参量之间的关系。Cecil 等(2002)利用 1997—1998 年的 TRMM 资料分析了 45 个 TC 不同区域(眼壁区、内雨带、外雨带)内的雷达反射率、冰散射以及闪电活动的特征,发现眼壁区发生闪电的阈值较高,外雨带较易发生闪电。最近,何会中等(2006)利用 TRMM 资料详细分析了 0302 号台风鲸鱼内不同高度、不同径向距离内各种水成物粒子的分布情况,为了解台风云结构及相关理论模型的建立提供了有价值的参考。

中国已有不少利用 TRMM 资料针对陆地雷暴

闪电活动的研究(Qie, et al, 2003; 袁铁等, 2005), 考虑到当前对西北太平洋地区, 尤其是不同强度 TC 内的闪电活动了解还很少, 所以本文借助 TRMM 的多传感器观测资料详细分析登陆中国的 46 个 TC 的不同强度阶段闪电分布特征, 并进一步研究闪电活动与 TC 强度、雷达反射率以及冰散射的关系, 其结果不但有助于对西北太平洋地区 TC 内闪电活动特征的认识, 同时也可以为未来利用闪电资料描述 TC 的结构和强度变化提供参考。

2 资料说明和方法简介

2.1 TRMM 资料说明

TRMM 卫星于 1997 年 12 月升空, 载有测雨雷达(PR)、微波辐射计(TMI)、闪电成像仪(LIS)、可见光与红外扫描仪(VIRS)和地球辐射平衡系统(CERES)共 5 个探测器。TRMM 卫星轨道倾角为 35° , 可以探测到地球 35°S — 35°N 的区域, 绕地球一周约需 90 min, 一天约 16 圈。为延长工作寿命, 该卫星于 2001 年 8 月轨道运行高度从 350 km 升到 403 km, 目前仍在正常工作。本文使用的 TRMM 资料包括 PR 的 2A25、TMI 的 1B11 以及 LIS 的原始轨道资料。

测雨雷达(PR)是 TRMM 最具创新的仪器, 轨道宽度为 215 km(升轨后为 243 km), 工作频率为 13.8 GHz, 星下点水平分辨率为 4.3 km(升轨后为 5 km), 垂直分辨率 0.25 km, 共 80 层, 从地球率率表面至 20 km, 观测内容有三维雷达反射率、三维降水率、雷暴顶高、降水类型(即将降水分为对流降水、层云降水和其他类型降水, 具体定义见文献(傅云飞等, 2003))。

LIS 探测器可同时探测云闪和地闪, 星下点分辨率可达 5 km, 覆盖区域为 $600\text{ km} \times 600\text{ km}$, 对该范围内的观测点可以监视约 80 s, LIS 探测效率可达 88%(Boocippio, et al, 2002)。研究表明 LIS 对云闪的定位误差为 4 km, 对地闪的定位误差为 12 km, 较易探测到云闪(Ushio, et al, 2002)。由于探测时间较短, TC 中大部分的降水区域没有探测到闪电, 并且会出现最小闪电频数为 0.67 fls/min(即一个闪电)的情况, 不过, 这与海洋上常年平均的闪电频数相比还是相当大的。

无源微波成像仪(TMI)扫描宽度为 758 km(升轨后为 878 km), 包含的通道有: 10.65、19.35、21.3、37.0 和 85.5 GHz, 除 21.3 GHz 是垂直极化外, 其他 4 个通道均为双极化通道, 共 9 个通道。各频率通道的水平分辨率不等, 本文用到的 85.5 GHz 分辨率为 $7\text{ km} \times 4.4\text{ km}$ (升轨后 $7\text{ km} \times 5\text{ km}$), 由于 TMI 每完成一个扫描, 其星下点会步进 14 km 的距离, 因此, 85 GHz 通道存在欠采样的问题。在 TMI 所在的频段, 不同的下垫面反射率差别较大(例如海洋反射率比地面小得多, 在陆地上由于土壤湿度、植被等的不均匀也可能造成微波亮温不连续的情况)。为了消除海陆边界以及陆地表面不均一造成的微波亮温的不连续, 本文使用了 Spencer 等(1989)修正的 85 GHz 极化温度, 其定义为

$$T_{\text{PCT85}} = 1.82T_{85v} - 0.28T_{85h}$$

其中, T_{85v} 与 T_{85h} 分别代表 85 GHz 的垂直和水平亮温。

2.2 TC 资料选取及匹配

本文研究的 TC 选择标准为在其生命期间达到台风强度、登陆中国、并且 TRMM 卫星有比较好的观测资料, 这样 1998—2008 年有 46 个 TC 符合条件, 一共有 255 条 TRMM 轨道数据。对于每一次 TRMM 过境, 根据 TMI 显示的 TC 图像, 以外围螺旋雨带的边界定为 TC 的边界, 并将属于该范围的闪电视为该 TC 的闪电。

TC 强度资料来自美国联合台风警报中心(JTWC), 为 6 h 一次的 TC 中心最低气压、TC 中心附近 1 min 平均最大风速、TC 位置等信息, 本文仅使用最大风速资料。研究发现, 相比于中国气象局(CMA)和日本东京台风中心(RSMC Tokyo)的 TC 强度资料, JTWC 强度资料最大风速在 50 m/s 以上风速区间内出现的频率最大(余晖等, 2006)。由于 TC 强度为每 6 h 一次, 因此本文采用线性插值法来确定 TRMM 过境时的 TC 强度。

2006 年之前的 TC 中心位置数据是根据地球观测研究中心(JAXA-EORC)的热带气旋数据库中提供的每条 TRMM 过境时的中心位置, 2006 年之后是根据 TC 的 TMI 图像并结合 JTWC 资料确定的。根据 Molinari 等(1999)和 Cecil 等(2002)中热带气旋的区域划分范围, 本文大致将 TC 中心 100

km 范围定为眼壁区,100—200 km 为内雨带,外雨带区一般从 200 km 处开始直到外围螺旋雨带边界处。

采用中国中央气象台/国家气象中心的 TC 强度分类标准对 46 个 TC 的 255 条 TRMM 轨道按照 TC 中心附近最大风速分为 6 个阶段:热带低压阶段(Tropical Depression,简称 TD),中心附近最大风速(下同)10.8—17.1 m/s;热带风暴阶段(Tropical Storm,简称 TS),17.2—24.4 m/s;强热带风暴阶段(Severe Tropical Storm,简称 STS),24.5—32.6 m/s;台风阶段(Typhoon,简称 TY),32.7—41.4 m/s;强台风阶段(Severe Typhoon,简称 STY),41.5—50.9 m/s;超强台风阶段(Super Typhoon,简称 SuperTY),大于 50.9 m/s。由于 TD 闪电数量较少(表 1),文中不对其作分析。

2.3 降水系统识别

本文利用 PR 雷达近地表反射率,采用 Cecil 等(2002)的算法对 TC 中的降水系统进行识别:任意相连、至少 4 个近地表反射率因子不小于 20 dBz 的像素区域为一个降水系统。因此一个最小的降水系统至少包含 4 个符合上述条件的 PR 像素点,即最小面积为 75 km²。降水系统的闪电活动和微波亮温是采用最邻近法(即像素点之间的距离最近)确定的。由于 TMI(758 km)、LIS(600 km)扫描宽度均大于 PR(215 km),因此在对 TC 的降水系统特征进行分析的时候,实际上使用的是 PR 的 215 km 扫描范围内的资料。

3 分析结果

3.1 TC 闪电分布特征

表 1 中列出了 1998—2008 年登陆中国的 46 个 TC 闪电统计结果。可以看到,在 255 条轨道中,LIS 观测到了 TC 中的闪电 2375 次,其中处于强热带风暴(STS)阶段的闪电数量最多,并且包含闪电轨道的比例也最高,达到 74%,而处于其他阶段的有闪电轨道均在 50%左右。热带低压(TD)阶段的闪电总数与含闪电轨道的比值最小,其次为超强台风阶段(SuperTY)。TC 处于热带风暴(TS)、强热带风暴(STS)和台风(TY)阶段时较易发生闪电。

当达到强热带风暴阶段后,TC 强度越强,闪电数量反而越少。总体而言,TC 闪电活动弱于陆地雷暴(Feng, et al, 2007; Yuan, et al, 2008)。

表 1 1998—2008 年登陆中国的 46 个 TC 闪电统计

Table 1 The flash statistics of the 46 TCs landing in China from 1998 to 2008

类别	含闪电轨道数/ 轨道总数	闪电总数	闪电总数/ 含闪电轨道数
TD	8/17	28	3.4
TS	18/32	365	20.3
STS	29/39	928	32.0
TY	31/68	607	19.6
STY	21/54	227	10.8
SuperTY	24/44	220	9.2

为了揭示 TC 闪电活动的空间分布特征,我们分析了 TC 处于不同强度阶段时闪电密度随径向距离的变化情况(图 1)。闪电密度的计算方法是在 TC 径向距离上每隔 5 km 取一个圆环,计算圆环内每平方千米每分钟的闪电次数(n)。可以看到,除了台风和强台风阶段,闪电密度分别在眼壁区和外雨带出现两个峰值。当 TC 处于热带风暴、强台风、超强台风阶段时,闪电较易发生在眼壁区;而当 TC 处于强热带风暴、台风阶段时,闪电更易发生在外雨带区域。超强台风阶段眼壁区闪电密度最高,但其外雨带闪电密度最低。从闪电的范围可以大致判断 TC 强对流云区的范围,热带风暴和超强台风云区范围较小,热带风暴阶段范围较小可能是因为 TC 刚开始发展,螺旋雨带不够完整,甚至还只是一个雷暴单体。超强台风阶段则可能是因为 TC 强度达到最大,结构成熟,螺旋雨带紧凑所致。

3.2 TC 雷达反射率与闪电

雷达反射率的大小主要取决于云和降水粒子的相态和粒径大小,水粒子的电解质常量比冰粒子大,在粒子大小相同的情况下,水粒子的反射率比冰粒子大 7 dBz 左右(Zipsper, et al, 1994)。为了解 TC 中雷达反射率分布,我们选取处于台风阶段的 TC 取其降水系统雷达反射率累计概率达到 75%的廓线,代表性的给出雷达反射率的垂直分布(图 2)。可以看出,在 5 km 左右存在 0℃层亮带,亮带层以上雷达反射率迅速减少,这表明台风区域被层云和弱对流降水控制。图中 5—7 km 反射率减少

最剧烈,此层为冰水混合层;大约 7 km 以上为冰晶层,反射率递减率变小。在冰水混合层,虽然可降水粒子含量迅速增多(何会中等,2006),但水滴的碰并增大过程随着高度的增加逐渐消失,由于大的液态

水粒子的减少,雷达反射率剧烈减弱。而冰晶层内雷达反射率的减少主要与冰粒子的数量、大小有关,因此,雷达反射率因子减小速度变慢。其他 TC 阶段与台风阶段的雷达反射率总体分布类似(图略)。

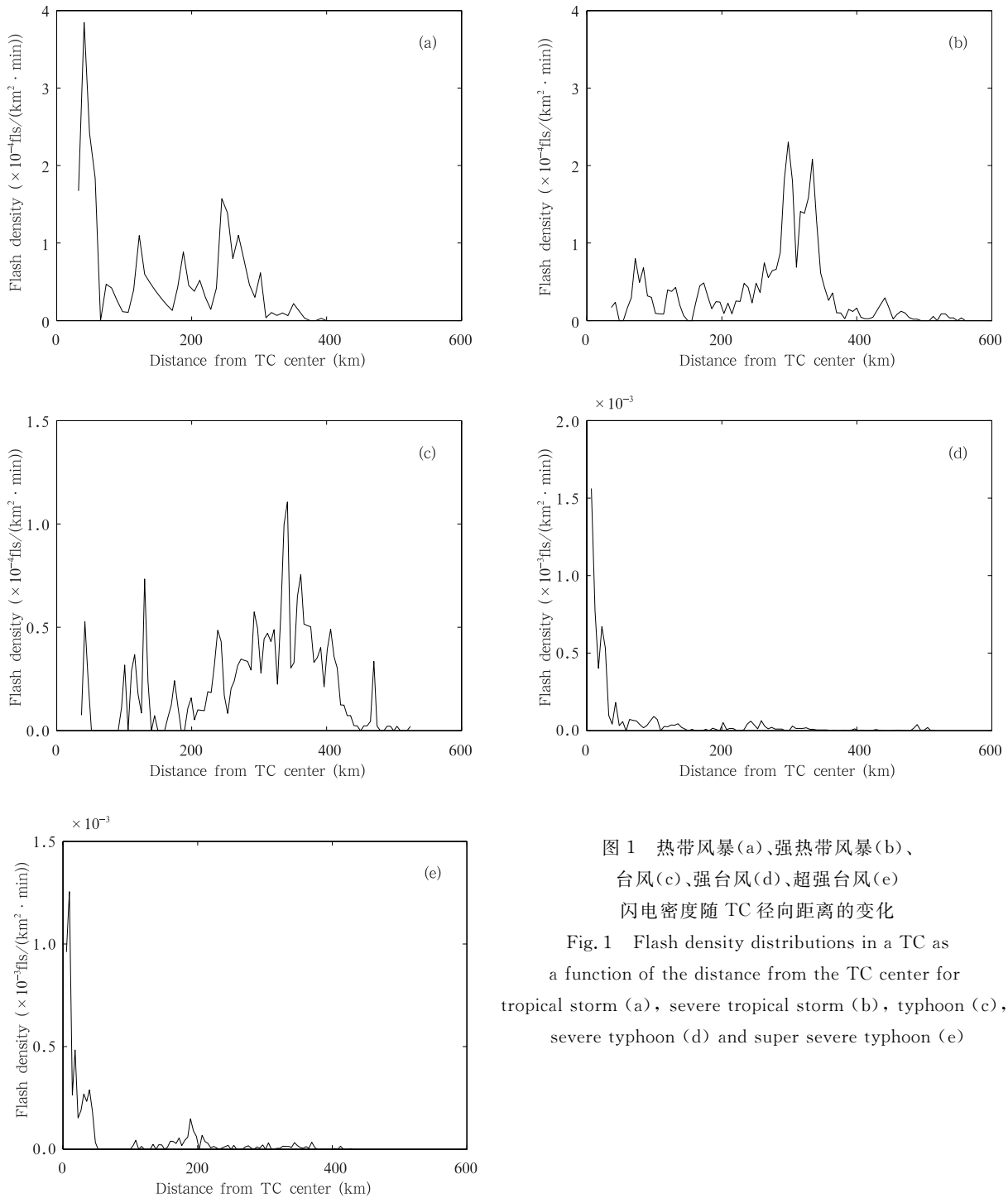


图1 热带风暴(a)、强热带风暴(b)、台风(c)、强台风(d)、超强台风(e) 闪电密度随 TC 径向距离的变化

Fig. 1 Flash density distributions in a TC as a function of the distance from the TC center for tropical storm (a), severe tropical storm (b), typhoon (c), severe typhoon (d) and super severe typhoon (e)

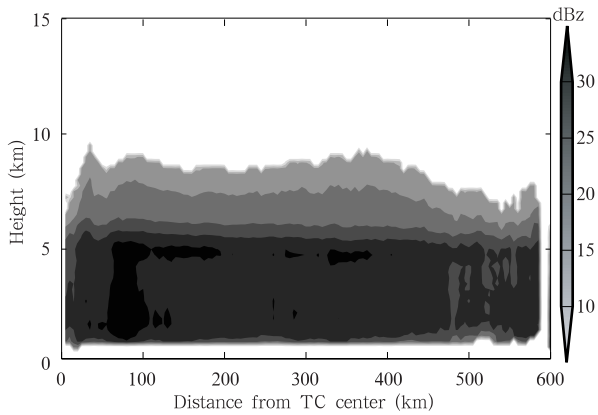


图2 台风中降水系统雷达反射率累计概率为75%的廓线随台风径向距离分布
Fig.2 The 75%-cumulative probability of radar reflectivity from the precipitation systems in typhoons as a function of the radial distance

为了分析对流活动强度,本文统计了各 TC 阶段对流云像素的雷达反射率累计概率达到 75% 的廓线(图 3)。对流性降水的识别采用的是第 6 版 TRMM 手册中规定的算法,识别的结果分为“可能是对流性降水”和“确定为对流性降水”,本文仅选取“确定为对流性降水”的像素进行分析。从图 3 可以看出,各 TC 阶段对流降水高反射率值主要集中在眼壁区,热带风暴眼壁区云顶高度最高,其次为强台风。对照图 1 可以发现,图 3 中的反射率高值区一般对应图 1 中的闪电峰值区,个别没有对应上的(图 1a),可能主要是因为 PR 较窄的轨道没有观测到。闪电发生的区域一般云顶高度超过 10 km,且雷达反射率等值线较稀疏(即反射率递减率较小)。

以上的分析发现,眼壁区内的对流活动最强,但各类别 TC 眼壁区的闪电密度却相差很大。为了进一步分析眼壁区对流降水像素的雷达反射率和闪电

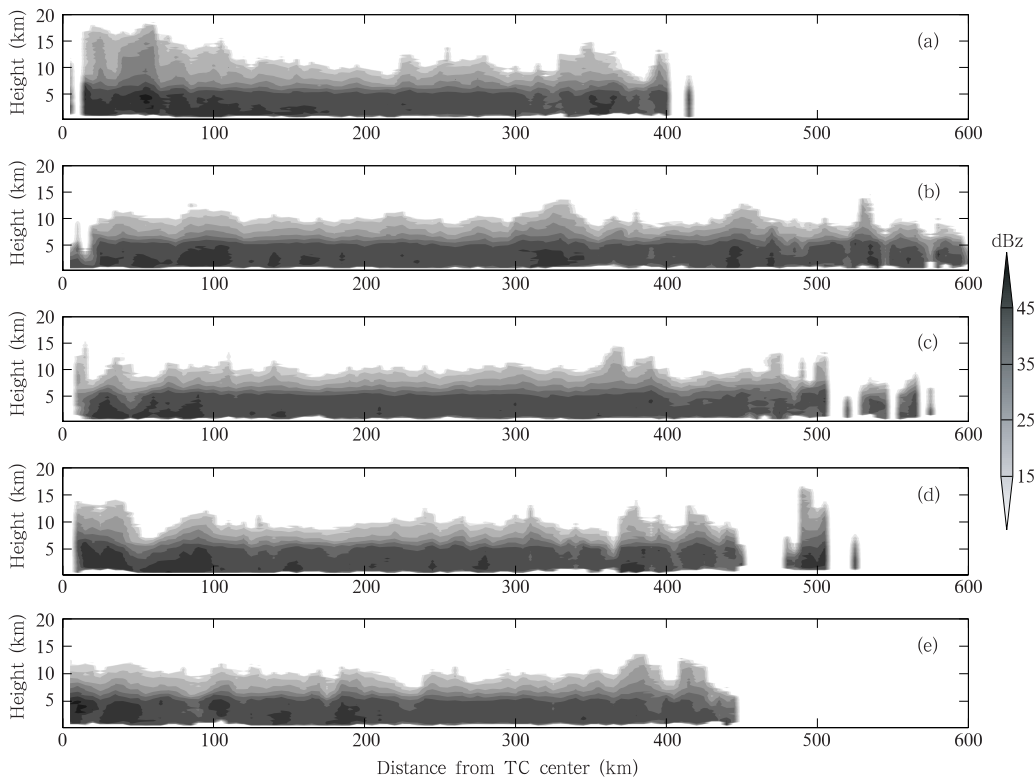


图3 热带风暴(a)、强热带风暴(b)、台风(c)、强台风(d)、超强台风(e)阶段对流降水区雷达反射率累计概率达到75%的廓线
Fig.3 The 75%-cumulative probability of convective precipitation system radar reflectivity in tropical storm (a), severe tropical storm (b), typhoon (c), severe typhoon (d) and super severe typhoon(e)

的关系,我们给出了 TC 各阶段的眼壁区对流降水像素的雷达反射率廓线(图 4)。从图中可以看出,热带风暴阶段眼壁区反射率最大,但其眼壁区内的闪电密度却低于强台风和超强台风阶段,这说明闪电与反射率并不是简单的线性关系。除热带风暴阶段外,其他 TC 阶段的眼壁区 5—7 km 高度雷达反射率越大,其眼壁区闪电密度也越大,但雷达反射率的差别非常小。

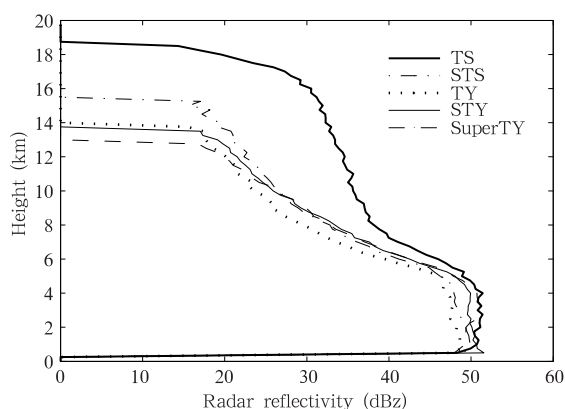


图 4 各 TC 阶段眼壁区对流降水区雷达反射率累计概率达到 95% 的廓线

Fig. 4 Vertical profiles for the convection rain radar reflectivity of 95%-cumulative probability in eyewalls of a TC

从 TC 中的闪电活动与降水系统 7 km 高度最大雷达反射率及 6 与 9 km 最大反射率之差的关系(图 5)可以看出,在 7 km 降水系统最大雷达反射率大于 40 dBz、6 到 9 km 的最大反射率之差在 15 dBz 以下的区域闪电发生概率最大。图中出现两个明显区域,上部属于降水系统反射率小且反射率递减率大的区域。这个区域的降水系统一般在 9 km 高度没有被探测到雷达反射率,属于层云或弱对流降水区;位于下部的区域,随着 7 km 高度最大雷达反射率的增大和 6 到 9 km 反射率递减率的减少,闪电频数呈增加状态,最多可达 151 fls/min。分析表明,7 km 高度最大反射率在 40—55 dBz 的降水系统共有 40 个发生闪电,占有发生闪电降水系统的 32%,但其闪电数量占到闪电总数的 77.2%。需要说明的是,图中出现的空白带,是由 PR 探测器的探

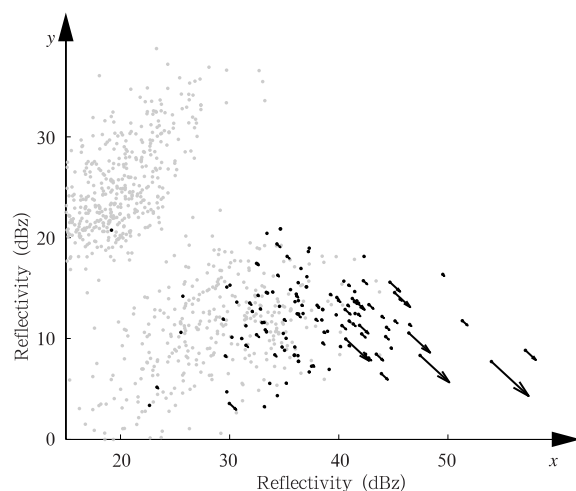


图 5 所有 TC 降水系统的闪电频数随 7 km 高度最大雷达反射率(x)及 6 与 9 km 最大反射率之差(y)分布
(灰色为无闪电降水系统,黑色为有闪电降水系统,箭头越长表示闪电频数越大)

Fig. 5 Flash count as a function of the maximum 7 km reflectivity and the difference of maximum reflectivity between the 6 and 9 km altitude in all the TC precipitation systems (Precipitation systems without lightning are plotted with gray dots, precipitation systems with lightning are plotted with black arrows and the longer arrows representing more flashes)

测阈值和反射率随高度的递减率造成的。

图 6 给出了各 TC 阶段闪电发生概率随降水系统的最大雷达反射率廓线的分布情况。7 km 高度雷达反射率达到 40 dBz 的降水系统中,在热带风暴阶段中有 71% 的概率会发生闪电,强热带风暴、台风、强台风和超强台风阶段分别为 91%、92%、77% 和 64%。可见,对于给定某高度的雷达反射率值,超强台风阶段闪电发生概率较小,台风阶段较易发生闪电,其次为强热带风暴阶段。Cecil 等(2002)比较 TC 眼壁区、内雨带、外雨带发现眼壁区发生闪电阈值较高,外雨带较易发生闪电。这里统计的是整个 TC 范围内的闪电发生概率情况,结合图 1 可以发现,强台风和超强台风内眼壁区闪电较多,因此有可能是这个原因造成他们整体发生闪电阈值偏高。

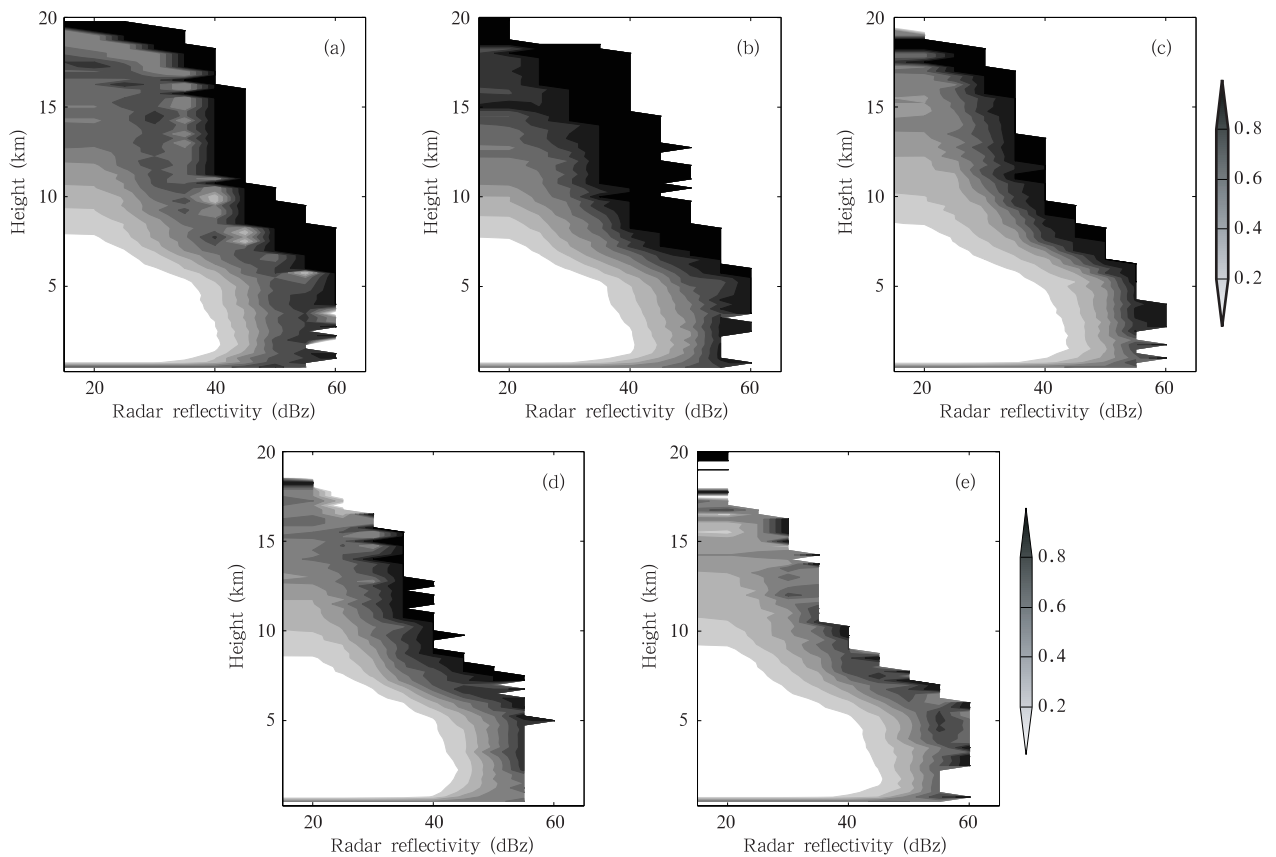


图6 热带风暴(a)、强热带风暴(b)、台风(c)、强台风(d)、超强台风(e)阶段闪电发生概率随降水系统最大雷达反射率廓线分布

Fig. 6 Vertical profile of the fraction of the precipitation systems with lightning as a function of the (maximum) radar reflectivity at each height for tropical storm (a), severe tropical storm (b), typhoon (c), severe typhoon (d) and super severe typhoon (e)

3.3 TC 微波亮温与闪电

微波亮温的高低取决于粒子冰散射的强弱(冰散射越强,亮温越低),冰散射的强弱决定于探测波长和水成物粒子的垂直分布、相态、密度、粒径等参量。TMI 的 85 GHz 通道波长较短(3.5 mm),因此对小冰粒子的响应比较敏感。图 7 给出了各 TC 阶段降水系统的最小 85 GHz 极化修正温度累计概率分布情况。与雷达反射率情况相似,各 TC 阶段均被弱的冰散射信号控制,各类 TC 大约有 70%—85%降水系统最小 85 GHz 极化修正温度大于 255 K,而 255 K 通常表示降水系统有明显冰散射(Mour, et al, 2009),这说明大部分降水系统为层云降水或者弱对流降水。

计算发现,各 TC 阶段有约 70%—80%的闪电发生在 85 GHz 极化修正温度小于 200 K 的像素附

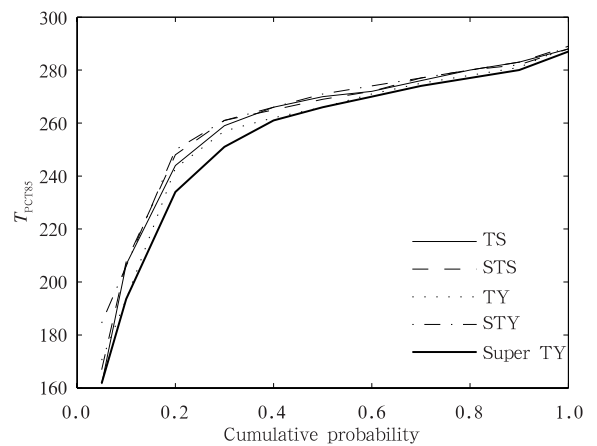


图7 各 TC 阶段降水系统最小 85 GHz 极化修正温度的累计概率分布

Fig. 7 Cumulative probability of the minimum T_{PCR85} of the TC precipitation systems

近(10 km内)。眼壁区闪电附近 85 GHz 极化修正温度更低。因此,我们又选取了各 TC 阶段中 85 GHz 极化修正温度不大于 200 K 的像素,进一步分析其与闪电的关系(图 8)。可以看到,闪电的峰值区一般对应 85 GHz 极化修正温度的低值区。眼壁区的冰散射信号最强,各类 TC 眼壁区均有 85 GHz 极化修正温度低于 100 K 的像素,尤其是 TS 眼壁区冰散射最强。比较眼壁区与外雨带可以发现,即使外雨带的冰散射弱于眼壁区,但闪电数量仍然较多。将闪电数量按照 TC 径向距离上 85 GHz 极化修正温度不大于 200 K

的像素数标准化后,发现眼壁区比值小于外雨带,这说明眼壁区发生闪电阈值较大,外雨带更易发生闪电。有学者认为这是因为外雨带较易含有过冷液态水(Samsury, et al, 1994; Black, et al, 1999),而在眼壁区过冷水会被源源不断输送过来的冰粒子消耗掉,根据非感应起电机,冰晶、软雹和过冷液态水是产生闪电的 3 个基本条件,因此,过冷液态水较少可能是眼壁区闪电活动少的原因。另外,过冷水的存在会使 TMI 探测到的微波亮温值升高,这也是有些区域 85 GHz 极化修正温度较高,闪电数量却较多的原因。

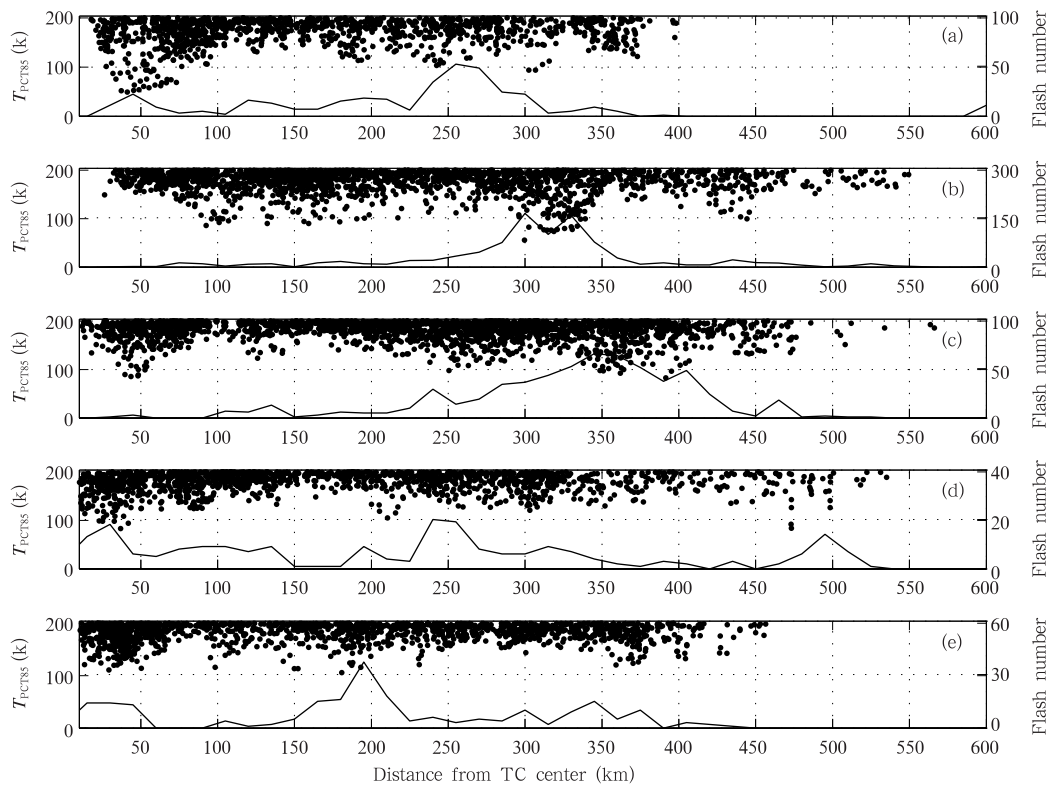


图 8 热带风暴(a)、强热带风暴(b)、台风(c)、强台风(d)、超强台风(e)阶段闪电数量与不大于 200 K 的 85 GHz 极化修正温度值随 TC 径向距离的分布。
(图中黑色曲线表示闪电数量,黑色圆点表示 85 GHz 极化修正温度值)

Fig. 8 Flash number and $T_{PCT85} (\leq 200 \text{ K})$ distributions as a function of the distance from the TC center for tropical storm (a), severe tropical storm(b), typhoon (c), severe typhoon (d), super severe typhoon (e)

(The black line represents the flash number and the black dot represents T_{PCT85})

4 结论与讨论

本文选取 1998—2008 年登陆中国的 46 个 TC 共计 255 条 TRMM 同步轨道数据,分析了 TC 不同强度阶段中闪电、雷达反射率以及微波亮温的分布

特征,以及闪电与雷达反射率和微波亮温的关系,主要结论如下:

(1) 闪电较易发生在强度较弱的 TC 阶段中, TC 强度达到强热带风暴阶段后,强度越强,闪电数量反而越少。强度不同,闪电在 TC 中的空间分布

有差别。各 TC 闪电密度一般在眼壁区和外雨带出现两个峰值。热带风暴、强台风和超强台风阶段,闪电较易发生在眼壁区,在眼壁区密度最大;而当 TC 强度阶段为强热带风暴、台风时,闪电在外雨带区域密度最大。强台风阶段眼壁区闪电密度最高,但其外雨带闪电密度最低。Molinari 等(1999)使用 NLDN 的地闪资料分析 9 个大西洋飓风,其中有 7 个强度属于强热带风暴和台风,其闪电密度分布结果与本文的强热带风暴和台风阶段的结论一致。另外两个中 Elena 为强台风,其闪电密度分布与本文的不符;Hugo 为超强台风,其闪电分布与本文相符。潘伦湘等(2009)选取 7 个西北太平洋强台风分析了台风成熟时期(TC 中心附近最大风速大于 32.7 m/s)闪电分布特征,与本文比较发现超强台风桑美和圣帕与本文的强台风、超强台风阶段闪电空间分布相似,其他台风与本文达到台风级别(TC 中心附近最大风速大于 32.7 m/s)的闪电分布特征一致。

(2) TC 内层云降水和弱对流性降水占主导地位,在 5 km 左右高度存在 0°C 层亮带,亮带层以上雷达反射率迅速减少,TC 区域被层云和弱对流降水控制。冰散射总体分布也较弱,TC 各强度阶段大约有 70%—85%的降水系统最小 85 GHz 极化修正温度大于 255 K,也就是没有显著冰粒子存在。

(3)含闪电降水系统 7 km 高度处最大雷达反射率大部分大于 30 dBz,且 6、9 km 的反射率之差在 15 dBz 以下;雷达反射率越大,闪电频数越高。同闪电与雷达反射率关系类似,各 TC 有约 70%—80%的闪电发生在 85 GHz 极化修正温度小于 200 K 的像素附近,眼壁区闪电附近 85 GHz 极化修正温度更低。冰散射越强,降水系统闪电频数越大。对于给定某高度的雷达反射率值,超强台风阶段闪电发生概率较小,台风阶段较易发生闪电,其次为强热带风暴。其中一个原因是超强台风眼壁区闪电所占比例较大,一般而言眼壁区发生闪电的阈值较大。

(4)各类 TC 阶段中眼壁区对流活动最强,热带风暴眼壁区对流显著强于其他强度阶段,这主要是因为热带风暴中有些处于 TC 的初始阶段,甚至还是单个的雷暴,其对流非常旺盛。外雨带较易发生闪电,眼壁区发生闪电阈值较大。这主要是因为眼壁区过冷水较少(Samsury, et al, 1994; Black, et al, 1999),影响了起电作用。眼壁区闪电在不同 TC 强

度阶段中的密度差别较大,分析发现这与 TC 的 5—7 km 高度雷达反射率高值区关系密切,除了热带风暴以外,眼壁区 5—7 km 雷达反射率越大,其眼壁区闪电密度也越大,但反射率差别均较小,可见闪电活动对这些要素的差异非常敏感,这种敏感性有利于我们研究不同雷暴的微物理特征。另外,热带风暴阶段虽然眼壁区反射率较强,其眼壁区闪电密度却低于强台风和超强台风阶段,原因可能是由于其上升运动太强,冰粒子消耗掉过冷水,使其闪电相对较少。

由于 TC 中闪电较陆地雷暴要少得多,而 LIS 一次探测时间只有 80 s,在有限的卫星扫描时间内 TC 内可能正好没有闪电发生,这更减小了 LIS 探测到闪电的可能性,从而导致观测到闪电的数量有限,因此无法进行定量的统计分析。虽然所用样本数有限,但本文所得结果与 Molinari 等(1999)、Cecil 等(2002)以及潘伦湘等(2010)的分析结果基本一致,在一定程度上说明了本文结果的可靠性,不过未来仍需要更多资料的积累来进一步加以检验。

致谢:感谢审稿专家提出的宝贵意见,感谢美国宇航局 Goddard 空间飞行中心数据分发中心(DAAC)提供了 TC 的闪电、雷达和微波资料,感谢美国联合台风警报中心(JTWC)提供 TC 中心附近最大风速资料。

参考文献

- 陈联寿,孟智勇. 2001. 我国热带气旋研究十年进展. 大气科学, 25(3): 420-432
- 陈联寿,罗哲贤,李英. 2004. 登陆热带气旋研究的进展. 气象学报, 62(5): 541-549
- 傅云飞,宇如聪,徐幼平等. 2003. TRMM 测雨雷达和微波成像仪对两个中尺度特大暴雨降水结构的观测分析研究. 气象学报, 61(4): 421-435
- 何会中,程明虎,周凤仙. 2006. 0302 号(鲸鱼)台风降水和水粒子分布的三维结构特征. 大气科学, 30(3): 491-503
- 雷小途,陈联寿. 2001. 热带气旋的登陆及其与中纬度环流系统相互作用的研究. 气象学报, 59(5): 602-615
- 林毅,刘爱鸣,林新彬. 2002. 台风中尺度对流云团与中尺度暴雨相互关系的综合分析. 热带气象学报, 18(4): 393-398
- 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研究. 中国科学:地球科学, 40(2): 252-260
- 余晖,胡春梅,蒋乐贻. 2006. 热带气旋强度资料的差异性分析. 气象学报, 64(3): 357-363
- 任福民,王小玲,陈联寿等. 2008. 登陆中国大陆、海南和台湾的热带气旋及其相互关系. 气象学报, 66(2): 224-235
- 袁金南,林爱兰,刘春霞. 2008. 60 年来西北太平洋上不同强度热

- 带气旋的变化特征. 气象学报, 66(2): 213-223
- 袁铁, 鄒秀书. 2005. 青藏高原中部闪电活动与相关气象要素季节变化的相关分析. 气象学报, 63(1): 123-127
- Black M L, Burpee R W, Marks F D. 1996. Vertical motion characteristics of tropical cyclones determined with airborne doppler radial velocities. *J Atmos Sci*, 53: 1887-1909
- Black R A, Hallett J. 1999. Electrification of the hurricane. *J Atmos Sci*, 56: 2004-2028
- Boocippio D J, Koshak W J, Blakeslee R J. 2002. Performance assessment of the Optical Teansient Detector and Lightning Imager Sensor, Part 1: Predicted diurnal variability. *J Atmos Oceanic Tech*, 19(9): 1318-1332
- Cecil D J, Zipser E J. 1999. Relationships between tropical cyclone intensity and satellite-based indicators of inner core convection: 85-GHz ice-scattering signature and lightning. *Mon Wea Rev*, 127: 103-123
- Cecil D J, Zipser E J, Nesbitt S W. 2002. Reflectivity, ice scattering, and lightning characteristics of hurricane eyewalls and rainbands. Part I: Quantitative description. *Mon Wea Rev*, 130: 769-784
- Price C, Asfur M, Yair Y. 2009. Maximum hurricane intensity preceded by increase in lightning frequency. *Nature Geoscience*, Doi:10.1038/NGEO477
- Feng Guili, Qie Xiushu, Yuan Tie, et al. 2007. Lightning activity and precipitation structure of hailstorms. *Sci China Series D-Earth Sci*, 50(4): 629-639
- Karen I. Molinari M J, Thorncroft C D. 2009. The interannual stability of cumulative frequency distributions for convective system size and intensity. *J Climate*, 22: 5218-5231
- Lascody R A. 1992. A different look at Hurricane Andrew-Lightning around the eyewall. *Natl Wea Dig*, 17: 39-40
- MacGorman D R, Burgess D W, Mazur V, et al. 1989. Lightning rates relative to tornadic storm evolution on 22 May 1981. *J Atmos Sci*, 46: 221-250
- Marks D A, Willis P T. 1993. Probability-matched reflectivity-rain-fall relations for a hurricane from aircraft observations. *J Appl Meteor*, 32: 1134-1141
- Molinari J, Moore P K, Idone V P, et al. 1994. Cloud-to-ground lightning in Hurricane Andrew. *J Geophys Res*, 99: 16665-16676
- Molinari J, Moore P, Idone V. 1999. Convective structure of hurricanes as revealed by lightning locations. *Mon Wea Rev*, 127: 520-534
- Natalia N S, Jeremy N T, Robert H H. 2008. Global studies of tropical cyclones using The World Wide Lightning Location Network. Paper presented at the AMS Annual Meeting 2008 in New Orleans
- Rodger C J, Werner S, Brundell J B, et al. 2006. Detection efficiency of the VLF World-Wide Lightning Location Network (WWLLN): Initial case study. *Ann Geophys*, 24: 3197-3214
- Samsury C E, Orville R E. 1994. Cloud-to-ground lightning in tropical cyclones: A study of Hurricanes Hugo (1989) and Jerry (1989). *Mon Wea Rev*, 122: 1887-1896
- Spencer R W, Goodman H M, Hood R E. 1989. Precipitation retrieval over land and ocean with the SSM/I: Identification and characteristics of the scattering signal. *J Atmos Oceanic Tech*, 6: 254-273
- Ushio Tomoo, Stan Heckman, Kevin Driscoll, et al. 2002. Cross-sensor comparison of the Lightning Imaging Sensor(LIS). *Int J Remote Sensing*, 23(13): 2703-2712
- Yuan T, Qie X. 2007. Study on lightning activity and precipitation characteristics before and after the onset of the South China Sea summer monsoon. *J Geophys Res*, 113: D14101, Doi: 10.1029/2007JD009382
- Zipser E J, Lutzk R. 1994. The vertical profile of radar reflectivity of convective cells: A strong indicator of storm intensity and lightning probability? *Mon Wea Rev*, 122: 1751-1759