

西北太平洋热带气旋尺度变化过程中 降水云系的演变特征及其作用

饶晨泓^{1, 3} 陈光华^{1, 2} 陈可鑫^{1, 3} 鲁小琴²

1 中国科学院大气物理研究所云降水物理与强风暴重点实验室, 北京 100029

2 中国气象局上海台风研究所, 上海 200032

3 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 基于 2007-2016 年热带降水观测计划 (TRMM) 和全球降水观测计划 (GPM) 的卫星降水资料、最佳路径 (IBTrACS) 数据集和多平台 TC 风场资料 (MTCSWA), 根据西北太平洋 (WNP) 热带气旋 (TC) 的七级风圈半径 (R17) 变化速率将其分为尺度快速扩张 (RE) 和尺度快速收缩 (RC) 事件, 主要研究 RE 和 RC 事件不同时期中 TC 外核区的降水云系演变特征及其影响 R17 变化的物理机制。研究表明: (1) RE 事件中 TC 外核区的降水强度明显高于 RC 事件, 说明 TC 外核区的降水强度对 R17 扩张具有重要作用; 且 RE 事件前期强降水分布较 RC 事件更松散, 这是区分 RE 和 RC 事件的一个前期信号; (2) TC 外核区在 RE 和 RC 事件中降水的共同特征表现为: 层云 (对流) 降水的强度小 (大), 面积大 (小), 主要加热中高层 (中低层) 大气, 层云降水和对流降水的标准化降雨率数值相当; 差异为: RE 事件中 TC 外核区前、中、后期的降水面积、降水强度和标准化降雨率都高于 RC 事件; (3) RE 事件中 TC 外核区不仅惯性稳定度大, 且非绝热加热大, 因而风场动能大, 有利于尺度扩张; 动能的增强还有利于低层入流的发展, 促进 R17 的扩张和对流单体的发展。

关键词 TRMM 和 GPM 卫星 热带气旋 快速扩张 快速收缩

文章编号 中图分类号 P458.1+24 **文献标识码** A

doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2204.21256

Evolution characteristics and roles of precipitation cloud systems in the process of size change of tropical cyclones over the Western North Pacific

RAO Chenhong^{1,3}, CHEN Guanghua^{1,2}, CHEN Kexin^{1,3}, LU Xiaoqin²

1 Key Laboratory of Cloud-Precipitation Physics and Severe Storms, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 Shanghai Typhoon Institute, China Meteorological Administration, Shanghai 200032

3 University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049

收稿日期 2021-12-27; **网络预出版日期**

作者简介 饶晨泓, 女, 1998 年出生, 博士研究生, 主要从事热带气旋研究。E-mail:

raochenhong@mail.iap.ac.cn

通讯作者 陈光华, E-mail: cgh@mail.iap.ac.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 42175073、41975071; 上海台风研究基金项目 TFJJ202003

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 42175073, 41975071); Shanghai Typhoon Research Foundation (TFJJ202003)

Abstract: According to the change rate of the gale-force wind radius (R17) of tropical cyclones (TC) in the Western North Pacific (WNP), they were divided into size rapid expansion (RE) events and size rapid contraction (RC) events. This work studied the evolution characteristics of precipitation cloud systems in the outer core regions of TC in RE events and RC events as well as the physical mechanism responsible for the R17 change. The satellite data of Tropical Rainfall Measurement Missions (TRMM) and Global Precipitation Measurement (GPM), the International Best Track Archive for Climate Stewardship dataset (IBTrACS) and Multiplatform Tropical Cyclone Surface Winds Analysis (MTCSWA) from 2007 to 2016 were used. The results show that: (1) the precipitation intensity in the TC outer core region of RE events is significantly higher than that in the RC events, indicating that the precipitation intensity in the outer core region of TC plays an important role in the expansion of R17. The distribution of heavy precipitation in RE events is looser than that in RC events during before period, which can act as a precursory signal to distinguish two kinds of the events. (2) The common characteristics of precipitation in the outer core region of TC in the RE and RC events include the stratiform (convective) precipitation with low (high) precipitation intensity and large (small) precipitation area, and dominant diabatic heating in the middle and upper (middle and lower) atmosphere. The standardized rainfall rates of stratiform precipitation and convective precipitation are similar. However, the precipitation area, precipitation intensity and standardized precipitation rate in the outer core region of RE events are higher than those in RC events. (3) The outer core region of TC in RE events features high inertial stability and high diabatic heating, so that the wind field has high kinetic energy, which is favorable for size expansion of TC. In addition, the enhancement of kinetic energy is also conducive to develop low-level inflow, promoting the expansion of R17 and the development of convective cells.

Keywords TRMM and GPM satellite, Tropical cyclones, Rapid expansion, Rapid contraction

1 引言

热带气旋 (Tropical Cyclone, 简称 TC, 又称台风) 是对人类威胁最大的灾害性天气系统之一。我国沿海地区常遭到台风的肆虐, Wang et al. (2019) 指出, 2005-2016 年, 每年由 TC 带来的灾害平均会导致 254 人死亡, 3670 万人的生活受影响, 直接经济损失达 696 亿元。相较于 TC 的其它特征参数, 目前关于 TC 尺度的研究相对较少。TC 尺度除了可以衡量 TC 灾害的面积外 (吴磊, 2013), 还会影响 TC 的运动 (Fiorino and Elsberry, 1989; Fovell et al., 2009), 甚至通过热量、水汽和动量的经向输送影响热带和副热带的相互作用, 从而影响大气环流 (Emanuel, 2008)。此外, TC 尺度还是风暴潮模型的重要参数以及影响 TC 下垫面海水上翻的重要因子, 对 TC 近海或登陆前后的防灾减灾工作具有重要作用 (Price, 1981; Chan et al., 2018)。因此, 对 TC 尺度进行研究具有十分重要的意义。

尽管 TC 尺度是重要的 TC 特征参数之一，但是目前对其并无统一的定义。在业务预报和统计分析中，常用到以下 6 个定义：眼半径（REYE）、最大风速半径（RMW）、最外围闭合等压线半径（ROCI）、七级风圈半径（ 17 m s^{-1} 风速半径；R17）、十级风圈半径（ 25.7 m s^{-1} 风速半径；R26）、飓风风速半径（ 32.9 m s^{-1} 风速半径；R33；Merrill, 1984；Weatherford and Gray, 1988a, b；Kimball and Mulekar, 2004；Moyer et al, 2007；Knaff et al., 2007；Maclay et al., 2008；Xu and Wang, 2010a, b）。R17 是目前研究中使用较广泛的 TC 尺度指标，因此本文使用 R17 表征 TC 尺度。

影响 TC 尺度变化的因素有很多，其中凝结潜热对 TC 尺度的发展具有重要作用（Riehl and Malkus, 1961；Yanai, 1961；Shapiro and Willoughby, 1982；Möller and Shapiro, 2002；Bui et al., 2009；Wang, 2009；Fudeyasu and Wang, 2011；Li et al., 2014）。Nolan et al.（2007）的研究指出，TC 的主要能量来源是水汽凝结释放的潜热，其中一部分潜热转化为势能，维持静力平衡和热成风平衡；另一部分潜热转化为动能，有利于主环流加速、扩张。Hill and Lackmann（2009）发现在水汽充沛的环境中，外围螺旋雨带潜热释放可导致位涡及其平衡风场的扩张，从而增大 TC 外围尺度。除了潜热外，惯性稳定度也是 TC 尺度发展过程中一个重要的动力参数。Schubert and Hack（1982）和 Hack and Schubert（1986）的研究表明在飓风的发展过程中，惯性稳定度与风暴内核尺度的发展一致，高惯性稳定度区主要出现在主眼墙附近及其内部区域，体现出对径向入流的阻力，它的建立致使 Rossby 变形半径减小，非绝热加热产生的能量集中在一个较小的范围内，从而有利于飓风的加强和内核尺度的扩张。之后，众多研究者利用模式输出资料也得出了相似的结论（李杭玥等, 2015；刘珍圆等, 2019）。陈联寿和刘式适（1997）指出，惯性稳定度对热带气旋的尺度有指示意义：当惯性稳定度参数和层结稳定度参数随着离中心的距离增加而增加时，热带气旋的尺度增加；反之，则减小。

大量的观测研究已经表明热带云团中主要存在两种降水：对流降水和层云降水（Houze, 1997）。由于对流降水和层云降水有着不同的动力和热力特征，因此在研究 TC 尺度演变的过程中有必要将它们分开，区分它们在 TC 尺度变化过程中的演变特征和作用。随着卫星、雷达等探测技术的发展，高时空分辨率的数据产品为描绘降雨云系精细的三维结构和演变特征，有效识别不同降雨类型提供了

可能。利用卫星资料对不同类型降水在 TC 生成和发展过程中的作用已有一定的研究，何会中等（2006）研究了台风“鲸鱼”（0302）登陆后的降水云系，发现层云降水所占面积比例较大，对流降水所占面积比例较小但总贡献很大；Fritz et al.（2016）将降水云系划分为层云、浅积云、浓积云和深对流，通过分析 TC 生成前 3 天不同云系的覆盖面积和降雨强度，揭示不同云系的演变过程在 TC 生成过程中的相对贡献；Wang et al.（2020）的研究中指出，在 TC 生成阶段，对于对流降水而言，整个对流层基本都为非绝热加热和垂直上升运动，其最大值位于对流层中低层，所对应的散度廓线表现为低层辐合，高层辐散；而在层云降水中，低层由于层云降水的蒸发冷却表现为非绝热冷却，对流层中高层为非绝热加热，对应的散度廓线在对流层中层表现为辐合，在高低层表现为辐散。由此可见，卫星所具备的降雨云系三维结构的探测能力，可以为研究层云降水和对流降水在 TC 尺度变化过程中的作用提供支持。

以往的研究多侧重考察大尺度环境场对 TC 尺度的影响及对单个 TC 进行数值模拟研究，本文将使用高分辨率卫星资料研究不同降水云系在 TC 尺度变化过程中的演变特征及作用，重点关注尺度快速扩张（Rapid Expansion，简称 RE）和尺度快速收缩（Rapid Contraction，简称 RC）的 TC 在前期、中期、后期外核区的降水差异，以及对流降水和层云降水的特征和作用；进一步通过分析潜热垂直廓线和近地表惯性稳定度的分布来探究 TC 尺度变化的原因。

2 数据与方法

2.1 最佳路径数据集和风场资料

本文使用的 TC 数据来自第四代最佳路径（International Best Track Archive for Climate Stewardship，简称 IBTrACS）数据集（Knapp et al., 2010；[https://www.ncdc.noaa.gov/ibtracs/\[2020-03-10\]](https://www.ncdc.noaa.gov/ibtracs/[2020-03-10])）。风场资料来自美国国家海洋和大气管理局/国家环境卫星数据和信息署（NOAA/NESDIS）提供的多平台 TC 风场资料（Multiplatform Tropical Cyclone Surface Wind Analysis，简称 MTCSWA）（Knaff et al., 2000；[http://www.ssd.noaa.gov/PS/TROP/mtcswa.html\[2020-03-10\]](http://www.ssd.noaa.gov/PS/TROP/mtcswa.html[2020-03-10])）。MTCSWA 风场资料是多个基于卫星的近地表风速估计的融合产品，能够较准确地反映 TC 环流的风场信息，因此本文使用 MTCSWA 10 m 高度上的风场资料计算得到 R17（陈可鑫等, 2020）。本文的研究时段为 2007-2016 年的 6-11 月，空间

范围为 0° - 40° N, 140° - 180° E 的西北太平洋海域。IBTrACS 数据集与 MTCSWA 数据的时间分辨率都为 6 h, 即在 00:00 (协调世界时, 下同)、06:00、12:00、18:00 各有一次观测记录。MTCSWA 数据的覆盖范围为以 TC 为中心半径 7.5° 的区域, 水平分辨率为 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ 。

2.2 卫星介绍

本文使用的卫星降水和潜热数据来自热带降水观测计划 (Tropical Rainfall Measurement Missions, 简称 TRMM) 数据和全球降水观测计划 (Global Precipitation Measurement, 简称 GPM) 数据。TRMM 卫星由美国国家航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, 简称 NASA) 和日本宇宙航空研究开发机构 (Japan Aerospace Exploration Agency, 简称 JAXA) 合作开发设计, 搭载了主动与被动微波探测器, 主要用于监测和研究热带、亚热带地区降水。TRMM 卫星于 1997 年 11 月发射并于 2015 年 4 月失效, 作为 TRMM 卫星的后续产品, GPM 卫星于 2014 年 2 月发射, 搭载了比 TRMM 卫星更加敏感的双频降水雷达 (DPR) 和 13 个频段的微波成像仪 (GMI)。

本文选用 2007-2013 年 6-11 月的 TRMM 卫星数据和 2014-2016 年 6-11 月的 GPM 卫星数据。其中, 降水数据为 TRMM V07 版本的 2A25 数据 (Caylor et al., 1997; [https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/TRMM_2A25_7/summary?keywords=TRMM%20A25\[2021-04-01\]](https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/TRMM_2A25_7/summary?keywords=TRMM%20A25[2021-04-01])), 与旧版本相比, V07 版本优化了 $k-Z_e$ 关系中的调整参数, 使其对降水的估计更加合理; 以及 GPM V06A 版本的 2ADPR 数据 (Arulraj et al., 2017; [https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/GPM_2ADPR_06/summary?keywords=GPM%20DPR%20ADPR\[2021-04-01\]](https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/GPM_2ADPR_06/summary?keywords=GPM%20DPR%20ADPR[2021-04-01])), 与旧版本相比, V06 版本能够更合理的识别层云降水。TRMM V07 2A25 数据和 GPM V06A 2ADPR 数据都能够提供每个像素的经纬度、扫描时间、降水类型和降水率等信息, 且数据格式一致, 水平分辨率为 5 km。除了降水数据, 本文还利用 TRMM 和 GPM V06A 版本的 3GSLH 数据获得不同类型降水的潜热廓线来研究不同降水的热力性质。SLH 算法综合考虑了降水类型、降水强度和降水深度的信息, 与 CSH 算法相比, 该算法能更真实地反映对流情况。3GSLH 数据的水平分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$, 垂直

分辨率为 0.25 km，时间分辨率为 1.5 h (Takayabu et al., 2010; [https://gportal.jaxa.jp/gpr/search?tab=1\[2021-08-01\]](https://gportal.jaxa.jp/gpr/search?tab=1[2021-08-01]))。由于 TRMM 和 GPM 扫描地球表面一圈的时间约为 90 分钟，为了使更多的卫星数据能够被利用，将 IBTrACS 数据集与 M TCSWA 数据的 TC 中心和 R17 线性插值至 1 小时间隔。

2.3 RE (RC) 事件的定义

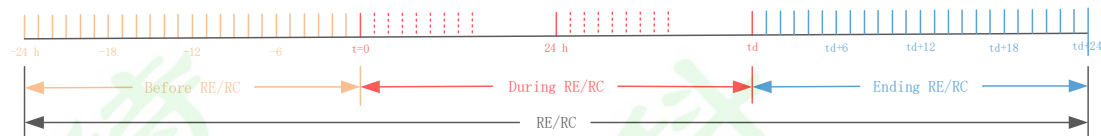


图 1 RE (RC) 事件前期、中期和后期示意图

Fig.1 Schematic of Before RE (RC) events, During RE (RC) events and Ending RE (RC) events

Kieper and Jiang (2012) 的研究指出，TC 是不断演变的，其强度快速增强 (RI) 的过程应看作一个事件，持续时间可达 48-60 h。参考 Tao et al. (2017) 对 RI 事件的定义，本文将 TC 尺度快速扩张 (收缩) 的演变过程看作一个事件，定义方法如下：首先，定义 R17 的 24 h 相对变化率为 $(R17_{t+24}-R17_{t+0})/R17_{t+0}$ ，其中 $R17_{t+0}$ 为当前时刻的 R17， $R17_{t+24}$ 为当前时刻之后 24 h 的 R17，按其升序排列，大于 (小于) 其第 66 (33) 个百分位点的样本构成的集合称为 TC 尺度快速扩张 (收缩) 样本集；其次，TC 尺度快速扩张 (收缩) 的样本集中，在同一个 TC 中时间连续的样本构成 TC 尺度快速扩张 (收缩) 中期事件；最后，RE (RC) 中期事件的第一个时刻之前 24 h 的样本构成 TC 尺度快速扩张 (收缩) 前期事件，最后一个时刻之后 24 h 的样本构成 TC 尺度快速扩张 (收缩) 后期事件 (图 1)。本文研究时段内共筛选出 135 个 RE 事件和 114 个 RC 事件。

2.4 内外核区的划分和轨道的筛选

关于 TC 内核区范围的定义始终没有一个统一的标准。有的研究用 1° (Zawislak et al., 2016)，有的用 3 倍 RMW 以内的区域 (Wang, 2008)，还有的研究用标准化的半径 (Dehart et al., 2014; Tsuji and Nakajima, 2019) 来表示内核区范围。考虑到不同的 TC 之间尺度存在较大的个体差异，本文利用 R17 对 TC 半径 (r) 进行标准化处理 ($R^*=r/R17$)，将 $R^*<1$ 的区域称为内核区，将 $1\leq R^*<2$

的区域称为外核区。

低覆盖面积的扫描带可能会对统计结果产生一定程度的影响。为了使统计结果更加稳定可信，本文将 $R^* < 2$ 范围内的格点数称为总格点数，规定筛选轨道的标准为： $R^* < 2$ 范围内卫星扫过的格点数（包括非降水格点）大于总格点数的 10%。经过挑选，扫过 RE 事件和 RC 事件各阶段的有效轨道数如表 1 所示。

表 1 RE 和 RC 事件前期、中期和后期的有效轨道数

Table1 The effective orbits for RE and RC events during Before, During and Ending periods			
	前期	中期	后期
RE	104	273	236
RC	169	390	228

3 结果分析

3.1 降水的时空演变特征

在 RE 和 RC 事件的演变过程中，近地表降雨率呈现出不同的特征。图 2 为 RE 和 RC 距离 TC 中心 $R^* < 2$ 范围内近地表降雨率的时空分布，图中绝大多数的格点都能通过 95% 显著性 bootstrap 检验 (Efron and Gong, 1983)。本文将降雨率大于 8 mm hr^{-1} 的降水称为强降水。RE 事件前期至后期（图 2a-c），强降水区域逐渐向内收缩且分布更加紧密、对称；对于 RC 而言，前期至后期（图 2d-f）强降水区域也逐渐向内收缩但降水强度和面积明显减小。RE 事件前期强降水区域分布较松散，其最大范围可延伸至约 $1.5R^*$ 半径处的外核区；而 RC 事件前期强降水区域分布较紧凑，且主要围绕 TC 中心分布在内核区，这是区分 TC 尺度快速扩张和快速收缩的一个前期信号。由 RE 和 RC 事件前期（图 2g）的降水差值场可知，在 $R^* < 1$ 的内核区，RE 主要在东北（NE）、东南（SE）方向的降水强度大于 RC，而西北（NW）、西南（SW）方向的降水强度则小于 RC；RE 降水强度在外核区大部分区域大于 RC，其中 $1 < R^* < 1.2$ 区域的差异尤其明显。在中期（图 2h）， $R^* < 0.5$ 范围内 RC 的 NW、NE 方向及 SW 方向靠近 $R^* = 1$ 内侧区域的降水强度大于 RE，其余区域 RE 的降水强度基本都大于 RC。在后期（图 2i），RE 内核区的降水强度在 NE、SE 和 NW 方向的大部分区域大于 RC；RE 外核区

的降水强度在 SE、SW 和 NW 方向的大部分区域大于 RC，但是差值相比于前期和中期来说小得多。Tsuji and Nakajima (2019) 将最大风速半径外，径向风速衰减为 15 m s^{-1} 时的半径距离定义为 TC 尺度，记为 R15。他们的研究表明，对于尺度扩张的 TC，降水在 R15 内外侧都有分布；而对于尺度稳定（不收缩也不扩张）的 TC，降水主要集中在 TC 中心附近。他们的研究结论与本文 RE 和 RC 事件的降水分布特征基本吻合，且都表明 TC 外核区的降水强度对 TC 尺度增长具有重要的作用。

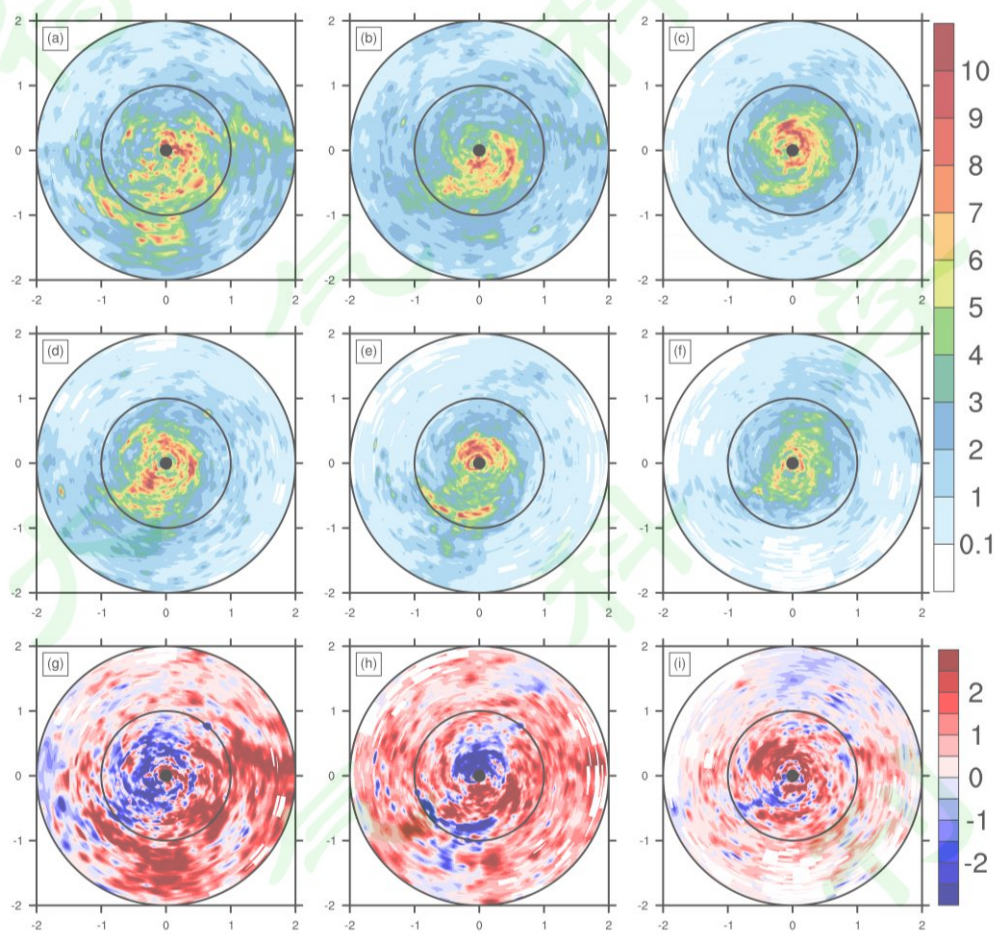


图 2 (a-c) RE 事件、(d-f) RC 事件和 (g-i) RE 与 RC 事件的差值在 (a、d、g) 前期、(b、e、h) 中期、(c、f、i) 后期的近地表平均降雨率（单位： mm hr^{-1} ），黑色圆点代表 TC 中心，大、小黑色圆圈分别表示 $R^*=2$ 和 $R^*=1$ 的边界；降雨率小于 0.1 mm hr^{-1} 、缺测和未通过 95% bootstrap 信度检验的区域用白色表示

Fig.2 The near-surface rainfall rates (mm hr^{-1}) for (a-c) RE events, (d-f) RC events and (g-i) the difference between RE events and RC events during (a, d, g) Before, (b, e, h) During and (c, f, i)

Ending periods, the black dots represent the centers of TC, large and small black circles represent the radii of $R^*=2$ and $R^*=1$, respectively. The areas of rainfall rate with less than 0.1 mm hr^{-1} , missing values and no statistical significance at the 95% level are indicated in white

3.2 外核区对流降水和层云降水的特征

由于 TC 外核区的降水对 R17 变化具有重要的作用,且层云降水和对流降水在 TC 尺度演变的过程中具有不同的动力和热力特征,因此本文将进一步探究不同类型降水云系在 RE 和 RC 事件中 TC 外核区的演变特征。TRMM 和 GPM 卫星数据将降水类型分为层云降水、对流降水和其它类型降水三类,其它类型降水以云砧为主,降雨率几乎为 0,并且所占比例极小,本节不进行讨论。本节将利用三个指标定量地研究 RE 和 RC 事件中 TC 外核区层云降水和对流降水的演变特征,第一个指标为某一类型降水格点数占总格点数(包括非降水格点)的百分比(图 3a, $N_{\text{str/con}}/N_{\text{total}}$),以此表征某一类型降水覆盖面积的大小;第二个指标为近地表条件性降雨率(图 3b, $R_{\text{str/con}}/N_{\text{str/con}}$),计算方法为某一类型降水的总降水率除以该类降水的总格点数,用来表征该类降水的降水强度;第三个指标为近地表非条件性降雨率(图 3c, $R_{\text{str/con}}/N_{\text{total}}$),计算方法为某一类型降水的总降水率除以总格点数(包括非降水格点),亦即第一个指标与第二个指标的乘积,可用来表征该类降水经过标准化后的降雨率。

首先,本节对 RE 和 RC 事件中 TC 外核区层云降水和对流降水覆盖面积比例进行分析。由图 3a 可知,从三个时段的平均来看,RE 中总降水面积(层云降水和对流降水)占总面积的 22.1%,远大于 RC 中的 7.1%,说明 RE 事件中 TC 外核区的总降水面积大于 RC。RE 和 RC 事件三个时段的外核区层云降水面积均大于对流降水,这与 May (1996) 的研究中所发现的 TC 外雨带具有宽广的层云降水区域的结论一致。并且 RE 事件中 TC 外核区层云降水和对流降水覆盖面积的差异较 RC 更为明显,具体表现为 RE 事件三个时段层云降水的平均覆盖率比对流降水高 9.6%,而这个面积覆盖率之差在 RC 中为 5.4%。对于 RE (RC) 来说,无论是层云降水还是对流降水,面积覆盖率都由前期至后期逐渐递减。

其次,本节还对 RE 和 RC 事件中 TC 外核区层云降水和对流降水的降水强度也进行了分析,图 3b 反映了降水强度的条件性平均降雨率。从对流降水和层

云降水在 RE 和 RC 事件中三个时段的平均来看，对流降水的近地表条件性降雨率为 5.0 mm hr^{-1} ，强于层云降水的 2.0 mm hr^{-1} 。在对流降水中，RE 事件中 TC 外核区三个时段的平均近地表条件性降雨率比 RC 大 1.1 mm hr^{-1} 。除了分别讨论 RE 和 RC 事件中 TC 外核区对流降水和层云降水的降水面积（图 3a）和降水强度（图 3b）的特征外，本节还对近地表非条件性降雨率特征进行了讨论（图 3c），近地表非条件性降雨率是降水面积覆盖率（ $N_{\text{str/con}}/N_{\text{total}}$ ）与降水强度（ $R_{\text{str/con}}/N_{\text{str/con}}$ ）的乘积，它综合反映了降水面积和降水强度的影响。虽然 RE 事件中 TC 外核区层云降水的覆盖面积比对流降水大的多（图 3a），但是层云降水的降水强度相对较小（图 3b），因此层云降水的近地表非条件性降雨率在三个时段的平均值比对流降水略大一点，差值为 0.08 mm hr^{-1} （图 3c）。对于 RC 而言，TC 外核区层云降水的覆盖面积（降水强度）比对流降水大（小），层云降水和对流降水的非条件性降雨率数值相当（图 3c）。

总的来说，RE 和 RC 事件中 TC 外核区层云降水和对流降水的共同特征主要表现为：层云（对流）降水的降水强度小（大），降水面积大（小），层云降水和对流降水的标准化降雨率数值相当；而降水差异主要表现为：在对流降水和层云降水中，TC 外核区在 RE 事件前、中、后期的降水面积、降水强度和标准化降雨率都高于 RC。

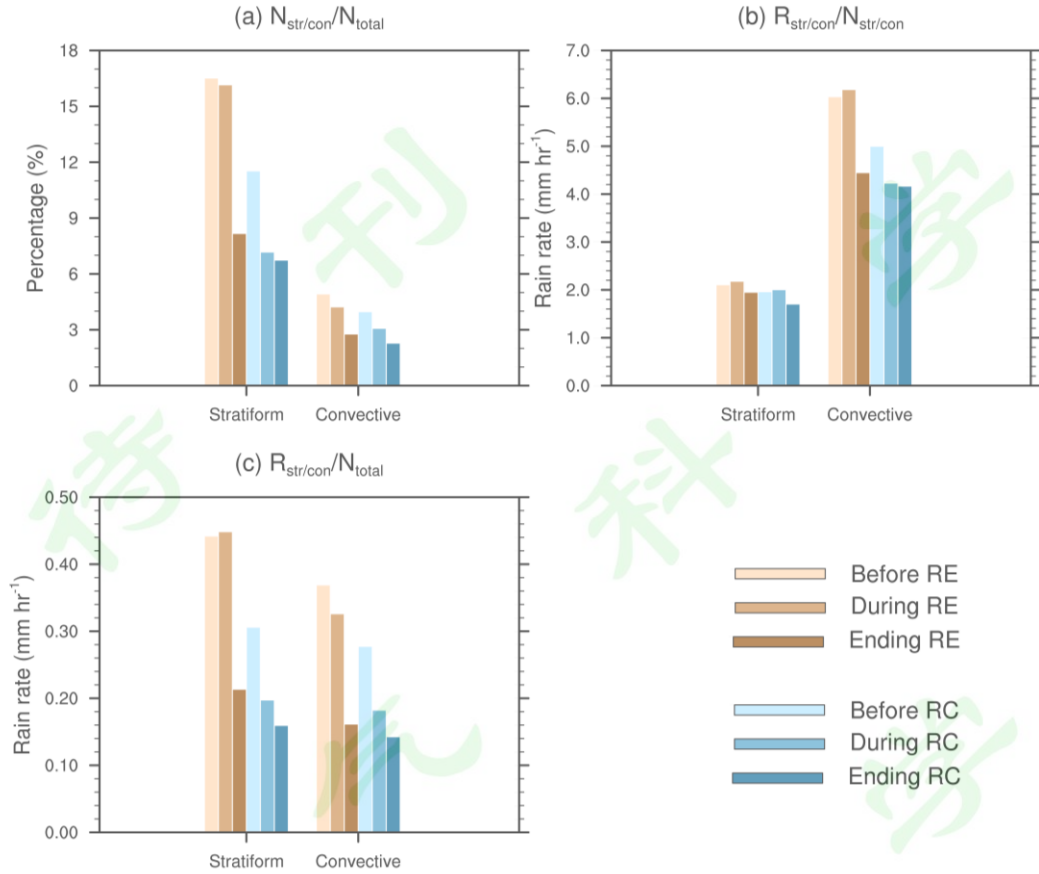


图 3 TC 外核区 (a) 某一类型降水的格点数与所有格点数的比值 ($N_{str/con}/N_{total}$)、(b) 条件性平均近地表降雨率 ($R_{str/con}/N_{str/con}$)、(c) 非条件性平均近地表降雨率 ($R_{str/con}/N_{total}$)；由浅至深的棕（蓝）色柱形分别代表 RE（RC）事件前期、中期、后期

Fig.3 (a) The ratio of the specific precipitation pixels to the total pixels ($N_{str/con}/N_{total}$), (b) the conditional mean near-surface rainfall rates ($R_{str/con}/N_{str/con}$), and (c) the unconditional mean near-surface rainfall rates ($R_{str/con}/N_{total}$) in outer region of TC. The brown (blue) bars with light-to-dark colors represent Before RE (RC) events, During RE (RC) events and Ending RE (RC) events

3.3 潜热垂直廓线

Zagrodnik and Jiang (2014) 指出，通过谱潜热（SLH）算法得到的潜热与 TRMM 降水雷达 (TRMM/PR) 得到的降雨率密切相关，两者的相关系数可达 0.89。为了进一步比较 RE 和 RC 事件中 TC 外核区层云降水和对流降水的垂直结构特征，图 4 展示了 TC 外核区潜热加热率的垂直廓线。无论是 RE 还是 RC，由于固态降水粒子的融化冷却和雨滴的蒸发冷却作用，外核区层云降水的最大潜热加

热高度都在 8 km 左右，约在 5.5 km 高度以下为冷却区。在 5.5 km 高度以上，层云降水由于大的加热率和广阔的覆盖面积（图 3a），因而在中高层大气加热中占主导地位。图 4 显示 RE 和 RC 事件中 TC 外核区对流降水的潜热加热率呈现双峰分布，极值分别出现在大概 4.5 km 和 2 km 高度处，这主要与深对流和浅对流在这两高度出现水汽通量和净凝结极大值，产生强的潜热释放有关（Wang, 2014）。在 TC 尺度快速扩张（图 4a）的过程中，外核区层云降水和对流降水的潜热加热率表现为前期至中期加热率明显增长，中期至后期加热率减小。而在 TC 尺度快速收缩的过程中（图 4b），外核区层云降水和对流降水的潜热加热率则由前期至后期逐渐减小，其中层云降水的前期与中期潜热加热率很相近。

除此之外，RE 事件中 TC 外核区三个时段整层平均的层云降水潜热加热率约为 RC 的 3.0 倍，对流降水潜热加热率约为 RC 的 3.1 倍。以上现象表明，TC 外核区更高的潜热加热有利于 R17 扩张，而较低的潜热加热则会抑制 R17 的发展。这主要是因为非绝热加热强迫出的次级环流有利于增强低层径向入流，使得向内输送的绝对角动量增加，从而有利于 TC 尺度的扩张。目前众多的研究支持这一观点，Fudeyasu and Wang（2011）根据 Sawyer-Eliassen 方程和切向风倾向方程的分析结果表明，外核区非绝热加热产生的次级环流有利于 TC 外核区风速的增加，使得外核区范围增大，即 TC 尺度扩张；Tsuji et al.（2016）通过数值模拟试验表明，对远离 TC 中心但位于 R15 内侧的低惯性稳定度区域进行加热时，所产生的次级环流有利于将绝对角动量输送至 R15 外侧从而有利于 R15 扩张。

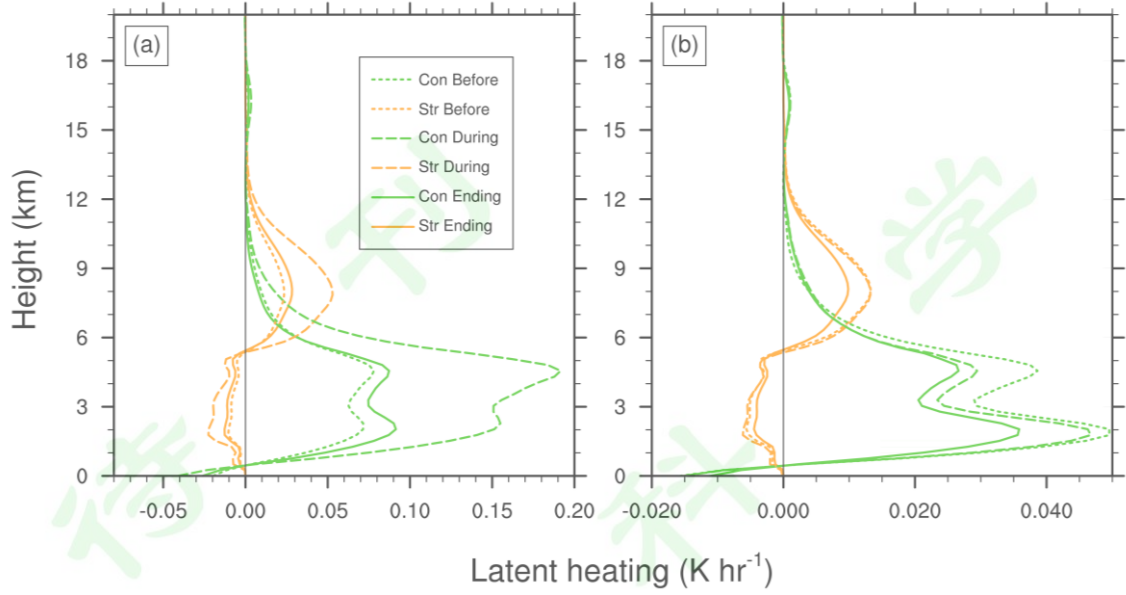


图 4 (a) RE 和 (b) RC 事件中 TC 外核区对流降水 (绿色) 和层云降水 (橙色) 在前期 (点线)、中期 (虚线)、后期 (实线) 的潜热加热率垂直廓线; 注: (a) 和 (b) 横坐标的取值范围不同

Fig.4 The composited vertical profiles of latent heating rates in the outer region of TC for (a) RE events and (b) RC events, convective precipitation (green) and stratiform precipitation (orange) during Before (dotted), During (dashed) and Ending (solid) periods. Note: the abscissa scales in (a) and (b) are different

3.4 惯性稳定度的分布

在 RE 和 RC 事件的演变过程中, 对流单体的产生和汇聚会释放大量潜热, 这些非绝热加热经过平衡调整过程转化为 TC 动能。非绝热加热向动能的转换率与涡旋环流的惯性稳定度 (IS) 成正比, 即 IS 越大, 非绝热加热向动能的转换率越高 (Schubert and Hack, 1982; Hack and Schubert, 1986)。本节将根据 RE 和 RC 事件中 TC 外核区 IS 的分布情况, 进一步探究 TC 尺度变化的物理原因。惯性稳定度 IS 的计算公式 (Rozoff et al., 2012) 如下:

$$IS^2 = \left(f + \frac{2\bar{v}}{r} \right) \left[f + \frac{\partial(r\bar{v})}{r\partial r} \right], \quad (1)$$

其中 f 为科里奥利参数, $\bar{v}$ 为方位平均切向风; r 为距离 TC 中心的半径; $\frac{\partial(r\bar{v})}{r\partial r}$ 是

轴对称的涡度矢量的垂直分量。由图 5（a-c）可知，在前期、中期、后期，RE 事件中 TC 外核区的 IS 明显大于 RC，这说明 TC 外核区非绝热加热向动能的转换率高于 RC。而且由前文（图 4）可知，RE 事件中 TC 外核区的非绝热加热远大于 RC。高的非绝热加热，加之高的非绝热加热向动能的转换率，使得 RE 事件中 TC 外核区的动能高于 RC，有利于 R17 扩张；反之，RC 事件中 TC 外核区的动能较低，则不利于 R17 的发展。此外，动能的增强有利于低层入流的增强，由图 5（d-f）可知，RE 事件中 TC 外核区的低层入流在前、中、后期均大于 RC，一方面，增强的入流促进绝对角动量向内输送，从而有利于 R17 扩张；另一方面，入流的增强有利于对流单体向 TC 中心移动，增强彼此之间的相互作用，进一步促进对流单体的发展和潜热释放。Xu and Wang（2018）通过数值模拟试验表明，RMW 外较大的 IS 有利于外核区边界层入流增强，这和本文的研究结果是相符的。

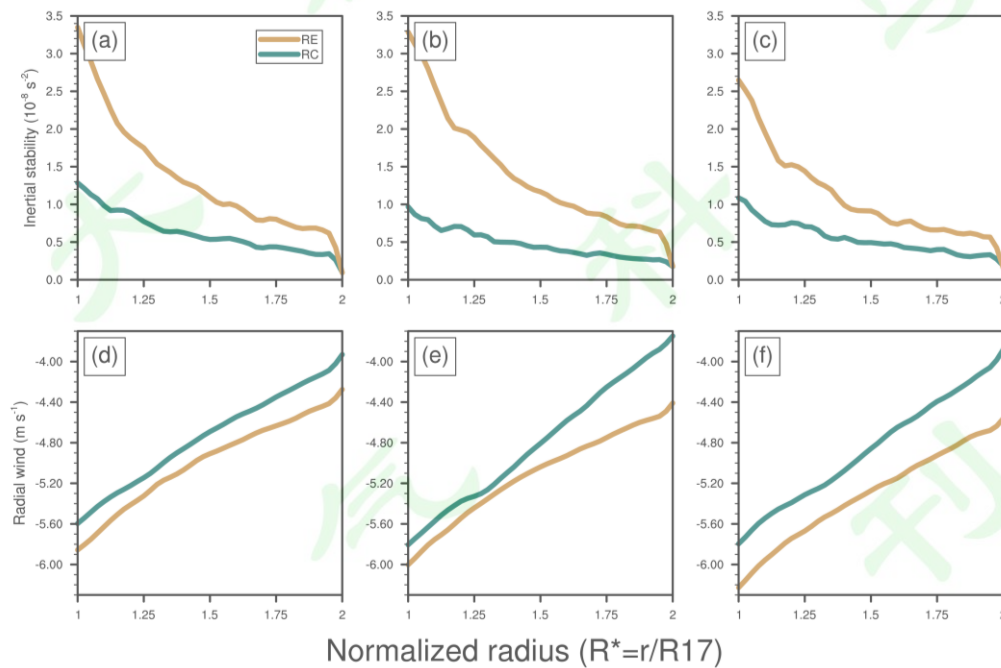


图 5 RE 事件（棕色）和 RC 事件（绿色）在（a、d）前期、（b、e）中期、（c、f）后期外核区 10 m 高度上（a-c）惯性稳定性和（d-f）径向风的径向分布

Fig.5 The radial distribution of (a-c) inertial stability and (d-f) radial wind of RE events (brown) and RC events (green) at the height of 10 m in the outer region during (a, d) Before, (b, e) During and (c, f) Ending periods

4 结论与讨论

本文利用 2007-2016 年 6-11 月的 TRMM 和 GPM 卫星资料及最佳路径 (IBTrACS) 数据集和多平台 TC 风场资料 (MTCSWA), 主要研究 RE 和 RC 事件中 TC 外核区的降水演变特征及影响 R17 变化的物理机制。本文的研究表明, RE 事件中 TC 外核区前、中、后期的降水强度明显高于 RC, 说明 TC 外核区的降水强度对 R17 增长具有重要的作用。RE 事件前期强降水分布较松散; 而 RC 事件前期强降水分布则较紧凑, 且主要围绕 TC 中心分布在内核区, 这是区分 TC 尺度快速扩张和快速收缩的一个前期信号。进一步将 TC 外核区降水类型划分为层云降水和对流降水, 以探究不同类型降水在 TC 尺度变化中的特征。结果表明, RE 和 RC 事件中 TC 外核区两类降水的共同特征表现为: 层云(对流)降水的降水强度小(大), 降水面积大(小), 层云降水和对流降水的标准化降雨率数值相当; 而降水差异主要表现为: 在对流降水和层云降水中, RE 事件中 TC 外核区前、中、后期的降水面积、降水强度和标准化降雨率都高于 RC。由潜热垂直廓线的分布表明, 层云降水主要加热中高层大气, 而对流降水主要加热中低层大气。通过比较 RE 和 RC 事件中 TC 外核区三个时段整层平均潜热加热率的大小可知, RE 的层云降水潜热加热率约为 RC 的 3.0 倍, 对流降水潜热加热率约为 RC 的 3.1 倍, 说明 TC 外核区更高的潜热加热有利于 R17 快速扩张, 而较低的潜热加热则会抑制 R17 的发展。这主要是因为非绝热加热强迫出的次级环流有利于增强低层径向入流, 促进向内输送的绝对角动量增加, 从而有利于 TC 尺度的扩张。动能的变化与风场的变化密切相关, 惯性稳定度与非绝热加热向动能的转化率成正比, 因此本文进一步比较了 RE 和 RC 事件中 TC 外核区惯性稳定度。结果表明, RE 事件中 TC 外核区不仅惯性稳定度大, 即非绝热加热向动能的转换率高, 而且非绝热加热大, 导致动能大而有利于风场扩张; 反之, RC 事件中 TC 外核区的动能较低, 则不利于 R17 的发展。除此之外, 动能的增强也有利于低层入流的增强, 一方面, 增强的入流促进绝对角动量向内输送, 从而有利于 R17 扩张; 另一方面, 入流的增强有利于对流单体向 TC 中心移动, 增强彼此之间的相互作用, 进一步促进对流单体的发展和更强的潜热释放。

本文由 RE 和 RC 事件中 TC 外核区降水、潜热和惯性稳定度的差异出发,

探究了影响 TC 尺度变化的原因,但是外核区降水强度对 R17 变化影响的物理机制还需要利用数值试验进一步深入研究。在 TC 尺度的演变过程中,影响其尺度变化的因素还有很多,在未来的研究中,随着海上观测资料的增多,数据时空分辨率的提高,我们将进一步探究多因素、多时空尺度下影响 TC 尺度变化的原因。

参考文献 (References)

- Arulraj M and Barros A P. 2017. Shallow precipitation detection and classification using multifrequency radar observations and model simulations [J]. *J. Atmos. Ocean. Technol.* 34(9): 1963-1983. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-17-0060.1>
- Bui H H, et al. 2009. Balanced and unbalanced aspects of tropical cyclone intensification [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 135(644): 1715-1731. doi:10.1002/qj.502.
- Caylor I J, et al. 1997. Correction of sampling errors in ocean surface cross-sectional estimates from nadir-looking weather radar [J]. *J. Atmos. Ocean. Technol.* 14(1): 203-210. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(1997\)014<0203:COSEIO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(1997)014<0203:COSEIO>2.0.CO;2)
- Chan K T, et al. 2018. The outer-core wind structure of tropical cyclones [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 96(4): 297-315. doi: 10.2151/jmsj.2018-042
- 陈联寿, 刘式适. 1997. 关于热带气旋尺度变化机制的初步分析 [J]. *热带气象学报*, 13(2): 105-111. Chen Lianshou, Liu Shikuo. 1997. A preliminary analysis on mechanism of size change in tropical cyclone [J]. *Journal of tropical meteorology (in Chinese)*, 13(2): 105-111. doi: 10.16032/j.issn.1004-4965.1997.02.002
- 陈可鑫, 陈光华, 向纯怡, 等. 2020. 基于 MTCSWA 风场资料对西北太平洋热带气旋风场结构的气候统计特征研究 [J]. *气候与环境研究*, 25(6): 588-600. Chen Kexin, Chen Guanghua, Xiang Chunyi, et al. 2020. Statistical Characteristics of Wind Field Structures of Tropical Cyclones over the Western North Pacific Based on MTCSWA Data [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 25(6): 588-600. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2020.19122
- DeHart J C, Houze R A, and Rogers R F. 2014. Quadrant distribution of tropical cyclone inner-core kinematics in relation to environmental shear [J]. *J. Atmos. Sci.*, 71(7): 2713-2732, <https://doi.org/10.1175/JAS-D-13-0298.1>.
- Efron B, and Gong G. 1983. A leisurely look at the bootstrap, the jackknife, and cross-validation [J]. *Am. Stat.*, 37(1): 36-48. doi: 10.1080/00031305.1983.10483087
- Emanuel K A. 2008. The hurricane-climate connection [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 89(5): ES10-ES20. <https://doi.org/10.1175/BAMS-89-5-Emanuel>
- Fiorino M, and Elsberry R L. 1989. Contributions to tropical cyclone motion by small, medium and large scales in the initial vortex [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 117(4): 721-727. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1989\)117<0721:CTTCMB>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1989)117<0721:CTTCMB>2.0.CO;2)
- Fovell R G, Corbosiero K L, and Kuo H C. 2009. Cloud microphysics impact on hurricane track as revealed in idealized experiments [J]. *J. Atmos. Sci.*, 66(6): 1764-1778. <https://doi.org/10.1175/2008JAS2874.1>
- Fritz C, et al. 2016. Vertical structure and contribution of different types of precipitation during Atlantic tropical cyclone formation as revealed by TRMM PR [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 43(2):

- 894-901. doi:10.1002/2015GL067122
- Fudeyasu H, and Wang Y Q. 2011. Balanced contribution to the intensification of a tropical cyclone simulated in TCM4: Outer-core spinup process [J]. *J. Atmos. Sci.*, 68(3): 430-449. <https://doi.org/10.1175/2010JAS3523.1>
- Hack J J, and Schubert W H. 1986. Nonlinear response of atmospheric vortices to heating by organized cumulus convection [J]. *J. Atmos. Sci.*, 43(15), 1559-1573. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1986\)043<1559:NROAVT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1986)043<1559:NROAVT>2.0.CO;2)
- 何会中, 程明虎, 周凤仙. 2006. 0302 号(鲸鱼)台风降水和水粒子空间分布的三维结构特征 [J]. *大气科学*, 30(3): 491-503. He Huizhong, Cheng Minghu, Zhou Fengxian. 2006. 3D structure of rain and cloud hydrometeors for typhoon Kujira (0302) [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 30(3): 491-503. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2006.03.12.
- Hill K A, and Lackmann G M. 2009. Influence of environmental humidity on tropical cyclone size [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 137(10), 3294-3315. <https://doi.org/10.1175/2009MWR2679.1>
- Houze R A Jr. 1997. Stratiform precipitation in regions of convection: A meteorological paradox [J]? *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 78(10): 2179-2196. doi:10.1175/1520-0477(1997)078h2179:SPIROCi2.0.CO;2.
- Kieper M E, and Jiang H Y. 2012. Predicting tropical cyclone rapid intensification using the 37 GHz ring pattern identified from passive microwave measurements [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 39(13): L13804. doi:10.1029/2012GL052115.
- Kimball S K, and Mulekar M S. 2004. A 15-year climatology of North Atlantic tropical cyclones. Part I: Size parameters [J]. *J. Climate*, 17(18): 3555-3575. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2004\)017<3555:AYCONA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017<3555:AYCONA>2.0.CO;2)
- Knaff J A, et al. 2000. An example of temperature structure differences in two cyclone systems derived from the advanced microwave sounder unit [J]. *Wea. Forecasting*, 15(4): 476-483. doi:10.1175/1520-0434(2000)015<0476:AEOTSD>2.0.CO;2
- Knaff J A, et al. 2007. Statistical tropical cyclone wind radii prediction using climatology and persistence [J]. *Wea. Forecasting*, 22(4): 781-791. doi: <https://doi.org/10.1175/WAF1026.1>
- Knapp K R, et al. 2010. The International Best Track Archive for Climate Stewardship (IBTrACS): unifying tropical cyclone data [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 91(3): 363-376. doi:10.1175/2009BAMS2755.1
- 李杭玥, 王咏青, 辛辰. 2015. 飓风 Bonnie 发生发展过程中的强度结构变化和惯性稳定度分析 [J]. *大气科学学报*, 38(1): 27-36. Li Hangyue, Wang Yongqing, Xin Chen. 2015. An analysis of intensity and structural changes in relation to inertial stability during the development of Hurricane Bonnie (1998) [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 38(1): 27-36. doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20130626001.
- Li Q Q, Wang Y Q, and Duan Y H. 2014. Effects of diabatic heating and cooling in the rapid filamentation zone on structure and intensity of a simulated tropical cyclone [J]. *J. Atmos. Sci.*, 71(9): 3144-3163. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-13-0312.1>
- 刘珍圆, 王咏青, 张秀年, 等. 2019. 台风 Chanchu (0601) 变性过程中的强度变化及环境场分析 [J]. *热带气象学报*, 35(4): 528-538. Liu Zhenyuan, Wang Yongqing, Zhang Xiunian, et al. 2019. Intensity Changes and environmental field analysis of extratropical transition for typhoon Chanchu (0601) [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 35(4): 528-538. doi: 10.16032/j.issn.1004-4965.2019.048

- Maclay K S, DeMaria M, and Vonder Haar T H. 2008. Tropical cyclone inner-core kinetic energy evolution [J]. Mon. Wea. Rev., 136(12): 4882-4898. <https://doi.org/10.1175/2008MWR2268.1>
- May P T. 1996. The organization of convection in the rainbands of Tropical Cyclone Laurence [J]. Mon. Wea. Rev., 124(5): 807-815. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1996\)124<0807:TOOCIT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1996)124<0807:TOOCIT>2.0.CO;2)
- Merrill R T. 1984. A comparison of large and small tropical cyclones [J]. Mon. Wea. Rev., 112(7): 1408-1418. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1984\)112<1408:ACOLAS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1984)112<1408:ACOLAS>2.0.CO;2)
- Möller J D, and Shapiro L J. 2002. Balanced contributions to the intensification of Hurricane Opal as diagnosed from a GFDL model forecast [J]. Mon. Wea. Rev., 130(7): 1866-1881, [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2002\)130<1866:BCTTIO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2002)130<1866:BCTTIO>2.0.CO;2)
- Moyer A C, Evans J L, and Powell M. 2007. Comparison of observed gale radius statistics [J]. Meteor. Atmos. Phys., 97(1): 41-55. doi: 10.1007/s00703-006-0243-2
- Nolan D S, Moon Y, and Stern D P. 2007. Tropical cyclone intensification from asymmetric convection: Energetics and efficiency [J]. J. Atmos. Sci., 64(10): 3377-3405. <https://doi.org/10.1175/JAS3988.1>
- Price J F. Upper ocean response to a hurricane, journal of physical oceanography, 1981, 11(2), 153-175. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1981\)011<0153:UORTAH>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1981)011<0153:UORTAH>2.0.CO;2)
- Riehl H, and Malkus J S. 1961. Some aspects of Hurricane Daisy, 1958 [J]. Tellus, 13(2): 181-213. doi:10.1111/j.2153-3490.1961.tb00077.x.
- Rozoff C M, et al. 2012. The roles of an expanding wind field and inertial stability in tropical cyclone secondary eyewall formation [J]. J. Atmos. Sci., 69(9): 2621-2643. doi: 10.1175/JAS-D-11-0326.1
- Schubert W H, and Hack J J. 1982. Inertial stability and Tropical Cyclone Development [J]. J. Atmos. Sci., 39(8): 1687-1697. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1982\)039<1687:ISATCD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1982)039<1687:ISATCD>2.0.CO;2)
- Shapiro L J, and Willoughby H E. 1982. The response of balanced hurricanes to local sources of heat and momentum [J]. J. Atmos. Sci., 39(2): 378-394. doi:10.1175/1520-0469(1982)039,0378:TROBHT.2.0.CO;2.
- Takayabu, et al. 2010. Shallow and deep latent heating modes over tropical oceans observed with TRMM PR spectral latent heating data [J]. J. Clim. 23(8): 2030-2046. doi:10.1175/2009JCLI3110.1
- Tao C, Jiang H Y, and Zawislak J. 2017. The relative importance of stratiform and convective rainfall in rapidly intensifying tropical cyclones [J]. Mon. Wea. Rev., 145(3): 795-809. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-16-0316.1>
- Tsuji H, Itoh H, and Nakajima K. 2016. Mechanism governing the size change of tropical cyclone-like vortices [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 94(3): 219-236. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2016 - 012>
- Tsuji H, and Nakajima K. 2019. Relationship between the change in size of tropical cyclones and spatial patterns of precipitation [J]. J. Geophys. Res.: Atmos., 124(17-18): 9948-9962. <https://doi.org/10.1029/2019JD030404>
- Wang Y Q. 2008. Structure and formation of an annular hurricane simulated in a fully compressible, nonhydrostatic model-TCM4 [J]. J. Atmos. Sci., 65(5): 1505-1527. <https://doi.org/10.1175/2007JAS2528.1>

- Wang Y Q. 2009. How do outer spiral rainbands affect tropical cyclone structure and intensity [J]? *J. Atmos. Sci.*, 66(5): 1250-1273. doi:10.1175/2008JAS2737.1.
- Wang Z. 2014. Role of cumulus congestus in tropical cyclone formation in a high-resolution numerical model simulation [J]. *J. Atmos. Sci.*, 71(5): 1681-1700. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-13-0257.1>
- Wang H, et al. 2019. Tropical cyclone damages in Mainland China over 2005-2016: losses analysis and implications [J]. *Environ. Dev. Sustain.*, 21(6): 3077-3092. <https://doi.org/10.1007/s10668-019-00481-7>
- Wang K, et al. 2020. Comparison of convective and stratiform precipitation properties in developing and nondeveloping tropical disturbances observed by the Global Precipitation Measurement over the western North Pacific [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 98(5): 1051-1067. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2020-056>
- Weatherford C L, Gray W M. 1988a. Typhoon structure as revealed by aircraft reconnaissance. Part I: Data analysis and climatology [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 116(5): 1032-1043. doi:10.1175/1520-0493(1988)116<1032:TSARBA>2.0.CO;2
- Weatherford C L, Gray W M. 1988b. Typhoon structure as revealed by aircraft reconnaissance. Part II: Structural variability [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 116(5): 1044-1056. doi:10.1175/1520-0493(1988)116<1044:TSARBA>2.0.CO;2
- 吴磊. 2013. 西北太平洋热带气旋尺度特征的研究 [D]. 南京大学硕士学位论文, 1-2pp. Wu Lei. 2003. A study on the characteristics of tropical cyclone size over the Western North Pacific [D]. M. S. thesis (in Chinese), Nanjing University, 1-2pp.
- Xu J, and Wang Y Q. 2010a. Sensitivity of tropical cyclone inner core size and intensity to the radial distribution of surface entropy flux [J]. *J. Atmos. Sci.*, 67(6): 1831-1852. <https://doi.org/10.1175/2010JAS3387.1>
- Xu J, and Wang Y Q. 2010b. Sensitivity of the simulated tropical cyclone inner-core size to the initial vortex size [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 138(11): 4135-4157. <https://doi.org/10.1175/2010MWR3335.1>
- Xu J, and Wang Y Q. 2018. Effect of the initial vortex structure on intensification of a numerically simulated tropical cyclone [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 96(2): 111-126. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2018-014>
- Yanai M. 1961. A detailed analysis of typhoon formation [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 39(4): 187-214. https://doi.org/10.2151/jmsj1923.39.4_187
- Zagrodnik J P., and Jiang H Y. 2014. Rainfall, convection, and latent heating distributions in rapidly intensifying tropical cyclones [J]. *J. Atmos. Sci.*, 71(8): 2789-2809. doi:10.1175/JAS-D-13-0314.1
- Zawislak J G, et al. 2016. Observations of the structure and evolution of Hurricane Edouard (2014) during intensity change. Part I: Relationship between the thermodynamic structure and precipitation [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 144(9): 3333-3354. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-16-0018.1>