

姚小娟, 黎伟标, 陈淑敏. 2014. 利用 TMI 反演的水汽凝结物对热带气旋潜热结构分布的探索研究 [J]. 大气科学, 38 (5): 909–923, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1401.13188. Yao Xiaojuan, Li Weibiao, Chen Shumin. 2014. Research on latent heat distributions in tropical cyclones from hydrometeor TMI retrieval data [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38 (5): 909–923.

利用 TMI 反演的水汽凝结物对热带气旋 潜热结构分布的探索研究

姚小娟^{1,2} 黎伟标¹ 陈淑敏¹

¹ 中山大学环境科学与工程学院大气科学系, 广州 510275

² 国家海洋局南海预报中心, 广州 510310

摘 要 本文利用热带测雨卫星 TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) 微波成像仪 TMI (TRMM Microwave Imager) 2A12 水汽凝结物 (Hydrometeor) 反演资料, 对西北太平洋地区从 1998~2009 年的 236 个热带气旋个例的 1776 个“快照” (snapshot) 的水汽凝结物的结构特征进行了分析, 并探讨了水汽凝结物的时空变化与热带气旋强度演变联系。研究表明: (1) TMI 2A12 水汽凝结物资料显示出了热带气旋内部的细致结构及变化特征, 水汽凝结物的峰值集中于数十公里到一百多公里的热带气旋眼壁及云墙区; 在热带气旋发展过程中, 随着热带气旋强度的增强, 水汽凝结物增多且往其中心靠拢, 从发展阶段到成熟阶段, 水汽凝结物的大值中心基本上集中在距离热带气旋中心约 50 km 区域, 而且强度越强的热带气旋, 水汽凝结物的大值中心与热带气旋中心的距离越近; 在热带气旋消亡的过程中, 水汽凝结物不断减弱且往外围扩散, 逐渐扩展到远离中心的区域; (2) 热带气旋强度与水汽凝结物的分布关系密切, 热带气旋强度变化与热带气旋中心附近 200 km 范围内的水汽凝结物含量存在显著的正相关, 而 200 km 以外的外围水汽凝结物含量存在负相关; (3) 热带气旋强度变化与水汽凝结物的变化存在时间差, 水汽凝结物的变化超前于热带气旋强度的变化, 在热带气旋迅速发展之前数小时, 热带气旋中心 0~50 km 环状区域的水汽凝结物含量就已经提前增加了, 在热带气旋减弱前数小时到十数小时, 即使热带气旋还处于它强度的鼎盛时期, 其中心 0~50 km 环状区域的水汽凝结物含量就已经提前显著减少了, 这种水汽凝结物的变化超前于热带气旋强度的变化的现象, 可能是热带气旋强度预报的潜在线索。

关键词 热带气旋结构 热带气旋强度 TMI 反演

文章编号 1006-9895(2014)05-0909-15

中图分类号 P447

文献标志码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1401.13188

Research on Latent Heat Distributions in Tropical Cyclones from Hydrometeor TMI Retrieval Data

YAO Xiaojuan^{1,2}, LI Weibiao¹, and CHEN Shumin¹

¹ Department of Atmospheric Sciences, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275

² South China Sea Marine Prediction Center of the State Oceanic Administration, Guangzhou 510310

Abstract The three-dimensional structure of tropical cyclones (TC) and its relationship to intensity changes are statistically examined, using Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) TMI (TRMM Microwave Imager) retrieval data from 1998 to 2009. A total of 236 TCs over the western North Pacific were observed, providing 1776 “snapshots” of

收稿日期 2013-06-03, 2014-01-23 收修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 2011CB403500, 国家自然科学基金项目 41375050、40875020

作者简介 姚小娟, 女, 1985 年出生, 硕士, 主要从事热带气旋研究。E-mail: yxjenjoy@163.com

通讯作者 黎伟标, E-mail: eeslwb@mail.sysu.edu.cn

instantaneous TC precipitation.

Four types of hydrometeors (precipitable water, precipitable ice, cloud liquid water, cloud ice water) are mainly located around a TC's eyewall areas and the inner edge of the rainbands (<150 km from TC center). During the intensification stage, the hydrometeor contents around TCs are increasing and high-value areas move closer to their center. Maximum hydrometeor content is common at about 50 km from the TC center in its mature stage. The stronger the TC intensity, the closer to the TC center is the maximum hydrometeor content. During the decay stage, the hydrometeor content around the TC decreases and spreads to the outer regions of the TC.

There is a close relationship between TC structure and intensity change. The correlations between TC intensity and hydrometeor content over the inner regions (<200 km from TC center) are positive, however, the correlations between TC intensity and hydrometeor content over a TC's outer regions (>200 km from TC center) are negative.

Hydrometeor variability seems to occur earlier than changes in the TC intensity. The hydrometeor content around the eyewall areas (<50 km from TC center) increases several hours earlier than the rapid intensification of TCs, and decrease several or tens of hours earlier than TC decay.

Keywords Structure of tropical cyclone, Intensity of tropical cyclone, TMI retrieval

1 引言

热带气旋内部结构是热带气旋研究十分重要的内容,已有的研究表明,热带气旋内部结构变化及影响因子复杂,且往往会引起强度、路径和降水等的变化(Chen and Luo, 1995; 贺海晏, 1995; 徐祥德等, 1996; 陈联寿等, 1997),从而使热带气旋的预报变得更加困难。刘式适和杨大升(1980)、陈联寿等(1997)分别从动力学、热力学的角度阐述了热带气旋内部结构特征及其变化,并探讨热带气旋内部结构变化对其活动产生影响的物理机制。陈联寿(2010)总结认为热带气旋结构和结构变化的原因可归纳为环境强迫作用、热带气旋内部动力作用和海洋强迫作用这三方面的作用。热带气旋的结构特征也是国外科学家所关注的热点问题,近年来也有一些新的进展,比如: Rappin et al. (2011)指出,往外流出的环境流对热带气旋的结构有重要影响; Ma et al. (2013)还探讨了海洋的热力过程对热带气旋结构的反馈效应,等等。由于缺乏足够时空分辨率的观测数据,过往的研究多限于动力学及数值模拟分析,对热带气旋内部结构的实际观测事实的分析,尤其是对于远海区域的热带气旋的分析仍然较少。

关于热带气旋内部结构的观测研究,国外通常利用雷达或者是飞机的下投探空所获得的资料来进行。Marks (1985)利用探空雷达研究发现,在飓风眼壁处的方位角平均降水率达 11 mm h^{-1} ,约是眼壁以外 111 km 范围的区域平均降水率的 6 倍。Houze et al. (1992)利用飞机侦察探测飓风内部冰粒子的分布情况,认为冰粒子在眼壁处和层状云降

水集中的外雨带较大,在眼壁处和层状云降水集中的外雨带之间的区域较小,而冰粒子的大小与飓风的垂直上升运动有关。Smith and Glatz (1998)利用飞机探测资料分析飓风的非对称结构,发现不同方位波动是影响飓风不对称结构的重要因子,它与穿过飓风暴雨的平均环流共同对热带气旋的暴雨过程产生影响。Rogers et al. (2013)最近利用数十个飞机下投探空的样本,对热带气旋的内核结构进行了合成分析,发现热带气旋在不同的演变阶段,其内核结构的特征很不相同。由于飞机探测的成本过高,这些资料多限于大西洋区域,对于西北太平洋区域的热带气旋,人们对其内部结构的认识相对更少。

上世纪 90 年代末,热带测雨卫星(Tropical Rainfall Measuring Mission, 简称 TRMM)的发射以及有关资料的开发应用,为热带气旋内部结构的研究提供了一种新的途径。TRMM 卫星上安装了测雨雷达(PR)、可见光/红外扫描仪(VIRS)以及微波成像仪(TMI),这些仪器提供了功能强大的雨云观测。近年来,国内外学者利用 TRMM 观测资料对热带气旋的结构特征展开研究。Masunaga et al. (2002)对比了 TRMM PR 降水与 TMI 2A12 产品中的可降水的估算值,发现在海洋区域,两者的值非常一致,可见 TMI 2A12 中的水汽凝结物反映了降水的实际情况。他们对比了 TMI 和 PR 反演的陆地降水,认为 TMI 在指示降水方面有较好的一致性,尤其是在热带洋面上。因此,利用 TRMM 卫星探测资料研究热带气旋将能够更加直观地反映热带气旋内部的主要特征。Cecil et al. (2002)利用 TRMM 中的 PR 降水资料、TMI 微波成像仪资料

以及 TRMM 携带探测的 LIS 闪电资料定量分析了大西洋飓风眼壁、飓风内雨带以及外雨带结构及闪电特征。Lonfat et al. (2004) 利用 TRMM/TMI 2A12 资料分析了不同海域不同强度的热带气旋的地表降水强度及其分布特征, 认为热带气旋降水的非对称性随热带气旋强度和地理位置的不同而存在差异。Yokoyama and Takayabu (2008) 利用 TRMM 卫星资料统计分析了 1997~2003 年不同强度不同发展阶段热带气旋的降水类型、闪电的分布特征及其与热带气旋降水关系, 认为热带气旋中闪电多发生在对流降水强的内核区域。层状雨要比对流雨分布要多, 强对流雨主要集中在热带气旋内核区域, 而强层状云降水主要集中在热带气旋雨带。最近, 国外学者 (Hence and Houze, 2012; Jiang, 2012; Jiang et al., 2013) 利用 TRMM 资料对热带气旋雨带的垂直结构、内核的对流特征以及眼壁结构等进行了分析。以上基于 TRMM 卫星资料的研究多偏重于热带气旋降水类型或者热带气旋地表降水强度的研究, 对热带气旋内部水汽的时空分布分析相对比较少。近年来, 国内学者也针对西北太平洋台风进行了相关的研究, 马雷鸣和端义宏 (2005) 利用 TRMM 资料对热带气旋“威马逊”的结构及其降水特征进行了分析。何会中等 (2006) 结合 TRMM PR 降水资料和 TMI 2A12 水汽凝结物资料分析研究了 0302 号 (鲸鱼) 台风的降水和水汽凝结物在台风区域的三维结构特征, 分析表明各种水汽凝结物含量随着与台风中心距离的增加而减少。傅云飞等 (2007) 在研究 0413 号 (云娜) 台风时利用 TMI 2A12 资料分析其降水云中云水、冰水和雨水的空间分布, 发现云冰的含量少且相对稳定, 而液态水含量变化大, 认为在台风生成前和初期其中心附近大量的冰、水粒子发生相变而释放潜热产生“暖心”, 从而促进台风形成。

上述基于 TRMM 卫星资料对热带气旋的结构特征的分析研究, 大多针对大西洋区域, 且多着重于热带气旋个例的分析, 尚未有大样本资料的统计分析结果。另外, 已有的研究并没有系统分析热带气旋各个发展阶段的结构变化特征。本文利用 TRMM/TMI 2A12 高分辨率的卫星微波成像仪资料, 对西北太平洋地区的 1998~2009 年共 12 年 236 个热带气旋个例进行统计分析, 着重探讨不同类型的热带气旋以及热带气旋生命史中不同阶段的水汽凝结物三维结构特征, 并分析热带气旋内部的水

汽凝结物结构与热带气旋强度演变的关系, 以加深对热带气旋结构特征及与强度演变的认识, 为预报提供有用线索。

2 资料和方法

2.1 TRMM/TMI 2A12 产品

TRMM 卫星是由美国国家宇航局 (National Aeronautics and Space Administration) 和日本国家空间发展局 (National Space Development Agency) 共同研制的专门用于定量测量热带、亚热带降水的气象卫星 (Kummerow et al., 1998)。TRMM 不仅能提供降落到地面的降水, 同时也是首次提供降水在其下落过程中的变化情况。

TMI (TRMM Microwave Imager) 微波成像仪为 TRMM 卫星搭载的与降水测量密切相关的 3 种科学测量仪器的其中一种。本文使用的 TRMM/TMI 2A12 产品是 TRMM 卫星资料一级产品 TMI 1B11 用一种辐射记数据和云模式混合的廓线算法加工生成的产品 (Kummerow et al., 2000)。TRMM/TMI 2A12 探测的其中一个目的就是通过对水汽凝结物的空间分布结构的探测来获取大气中潜热释放或吸收的信息。TMI 2A12 中的四种水汽凝结物是 GPROF 算法 (Wilheit et al., 1977; 刘奇和傅云飞, 2007) 中云模式的微物理过程部分对降水云系统中水汽凝结物分类的最终输出结果。TMI 2A12 是一种轨道产品, 每天约扫过 16 条轨道, 扫描范围从 38°N 至 38°S 之间区域, 扫描宽度为 750 km, 其水平分辨率为 6.9 km×4.6 km。该产品提供了像元的地表瞬时降水强度、地表瞬时对流降水强度、降水区域及其水汽凝结物、潜热的三维结构信息。TMI 微波低频发射信号和高频散射信号可以较好地指示大气中的水汽凝结物信息, 微波信号反映的是各层气柱水汽凝结物的积分信息。为了分析热带气旋内部水汽结构, 本文采用 TMI 2A12 产品中的水汽凝结物资料, 水汽凝结物包含了云水 (Cloud liquid water)、云冰 (Cloud ice water)、可降水 (Precipitable water)、可降冰 (Precipitable ice)。TMI 2A12 产品记录了垂直方向上从地表至 18 km 不等距高度总共 14 层气柱中的水汽凝结物的积分信息, 这 14 层气柱高度分别为: 地表至 0.5 km、0.5~1.0 km、1.0~1.5 km、1.5~2.0 km、2.0~2.5 km、2.5~3.0 km、3.0~3.5 km、3.5~4.0 km、4.0~5.0 km、5.0~6.0 km、6.0~8.0 km、8.0~10.0 km、10.0~14.0 km、

14.0~18.0 km。

2.2 CMA-STI 热带气旋最佳路径数据集

CMA-STI 热带气旋最佳路径数据集是中国上海研究所受中国气象局委托,在全国各级气象台站的支持下,在每年热带气旋季节过后根据所收集到的常规和非常规气象观测资料整编而成,可网上下下载([http://www.typhoon.gov.cn/\[2011-06-01\]](http://www.typhoon.gov.cn/[2011-06-01]))。CMA-STI 热带气旋最佳路径数据集较为准确的记录了热带气旋每 6 小时的中心经纬度、强度标记、中心最低气压值以及近中心最大风速值等信息。

2.3 方法

CMA-STI 热带气旋最佳路径数据集是根据《热带气旋等级》国家标准(GB/T19201-2006)将热带气旋分为热带低压、热带风暴、强热带风暴、台风、强台风和超强台风六个等级。

本论文根据 CMA-STI 热带气旋最佳路径数据集对热带气旋的分类,以最低中心气压值和近中心最大风速值表征台风强度,仅研究强度在热带风暴以上的热带气旋,并参考 Yokoyama and Takayabu (2008) 对热带气旋分类的做法,将上述的热带风暴与强热带风暴归类为热带风暴,亦即将 TRMM/TMI 2A12 卫星资料探测到的热带气旋分成四种类型,近中心最大风速值为 $17.2\sim 32.6\text{ m s}^{-1}$ 的为热带风暴,近中心最大风速值为 $32.7\sim 41.4\text{ m s}^{-1}$ 的为台风,近中心最大风速值为 $41.5\sim 50.9\text{ m s}^{-1}$ 的为强台风,近中心最大风速值 $\geq 51.0\text{ m s}^{-1}$ 的为超强台风。然后将每种类型的热带气旋发展过程分成发展、成熟和消亡阶段,根据 Yokoyama and Takayabu (2008) 介绍的分类型方法,如果近中心最大风速值达到该台风所有近中心最大风速值中的最大值的 80% 以上,则此阶段定义为成熟阶段,成熟阶段之前和之后分别定义为发展阶段和消亡阶段。最后分别研究各类热带气旋的水汽凝结物在各个发展阶段的径向分布、垂直分布以及其随时间变化情况。在分析热带气旋水汽凝结物径向分布时,以热带气旋中心为原点,在径向方向上 500 km 范围内,每隔 10 km 的环状区域为一档,共分成 50 档,分别计算各档中四种水汽凝结物在单位面积空气柱的总含量,然后分析其径向方向上的分布情况。

为统计分析 TMI 2A12 水汽凝结物与热带气旋强度关系,本论文使用了 CMA-STI 热带气旋最佳路径数据集定义的近中心最低气压值。由于 CMA-STI 热带气旋最佳路径数据集为每 6 小时记录一次,

而 TMI 2A12 资料所捕捉到的热带气旋“快照”(snapshots)时间并非与 CMA-STI 热带气旋最佳路径数据的时间一一对应,因此需要根据扫描到热带气旋个例的 TMI 2A12 轨道资料的时间与 CMA-STI 热带气旋最佳路径数据记录的时间进行订正。参考 Lonfat et al. (2004) 以及 Jiang et al. (2011) 的做法,利用热带气旋最佳路径数据,用线性插值的方法将其时间插值成与 TRMM/TMI 2A12 轨道资料的时间一致,以便分析 TRMM 降水与热带气旋强度的关系。本文将近中心最低气压值线性插值得到 TMI 2A12 捕捉到的热带气旋在该时刻的近中心最低气压值,然后利用该时刻的近中心最低气压值、该时刻后 24 小时的变压值,进而分别研究这两种定义的热带气旋强度与 TMI 2A12 捕捉到的热带气旋三维结构的对应关系。

3 热带气旋三维结构特征

3.1 选取的西太平洋热带气旋个例概况

本文普查并统计了 1998~2009 年 12 年间,TRMM/TMI 2A12 捕捉到的西太平洋地区 236 个热带气旋 1776 个“快照”瞬间。这里给出其中的一个例子,图 1 是 TMI 2A12 扫描到的超强台风“暹芭”Chaba (0416) 的“快照”情况。

由于不同强度的热带气旋,其水汽凝结物的分布在不同发展阶段的径向分布、垂直分布存在差异,为了更好地描述热带气旋的内部水汽凝结物结构,根据 CMA-STI 热带气旋最佳路径数据集中的近中心最大风速强度的差异,将热带气旋分成四种类型,分别为:热带风暴、台风、强台风、超强台风。所研究的 236 个热带气旋中,热带风暴有 75 个,台风有 65 个,强台风有 57 个,超强台风有 39 个。TMI 2A12 所捕捉到的 1776 个“快照”瞬间中,热带风暴的有 364 个,台风的有 447 个,强台风的有 552 个,超强台风的有 413 个,如表 1 所示,这些热带气旋的地理位置分布见图 2。

表 1 TMI 2A12 捕捉到的 1998~2009 年西北太平洋地区的热带气旋数目统计情况

Table 1 The statistical numbers of tropical cyclone snapshots in the western North Pacific from 1998 to 2009 caught from TMI 2A12

	热带风暴	台风	强台风	超强台风	总计
热带气旋个数	75	65	57	39	236
扫描到的“快照”个数	364	447	552	413	1776

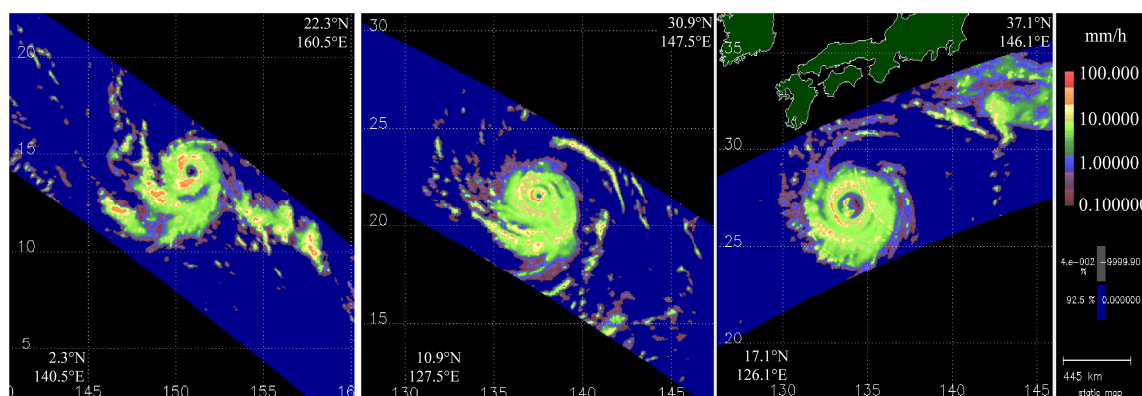


图1 TMI 2A12 扫描到的超强台风“暹芭” Chaba (0416) 的部分“快照”
Fig. 1 Some snapshots of super severe typhoon Chaba (0416) by TMI 2A12

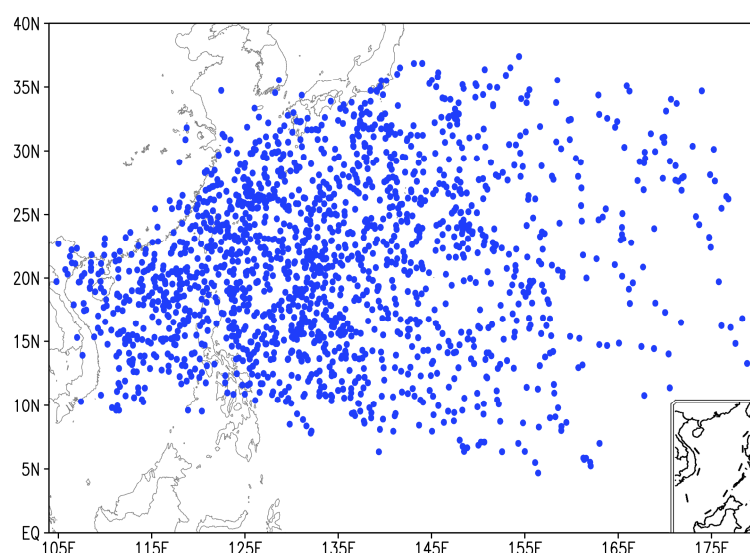


图2 TMI 2A12 扫描到的 1998~2009 年的西北太平洋热带气旋地理分布图
Fig. 2 Tropical cyclone scans in the western North Pacific observed by TMI 2A12 during the period from 1998 to 2009

3.2 热带气旋内部水成物的径向分布特征

下面我们首先分析四种类型热带气旋在不同的发展阶段，水汽凝结物（云水、云冰、可降水、可降冰）的径向分布特征。图3是四种类型热带气旋在不同发展阶段，与热带气旋中心距离为 500 km 范围内，单位面积空气柱的可降水总含量中的最大值在各数值分段的数目占各个发展阶段“快照”数目的百分比分布情况，四种类型热带气旋各自在不同的发展阶段，可降水最大值的数值分布不同，处于成熟阶段的四种类型热带气旋各自的可降水在大值区都较发展阶段的要增加，而处于消亡阶段的四种类型热带气旋各自的可降水最大值大大减少。而且不同类型的热带气旋在同一发展阶段，可

降水最大值的数值分布也会存在差异。

在发展阶段，热带风暴的可降水最大值在 $1\sim2\text{ g m}^{-2}$ 的数值分布最多，台风和强台风的可降水最大值在 $2\sim3\text{ g m}^{-2}$ 的数值分布最多，而强台风的可降水最大值在大于 3 g m^{-2} 的数值分布较台风的多，超强台风的可降水最大值在 $3\sim4\text{ g m}^{-2}$ 的数值分布最多。在成熟阶段，热带风暴和台风的可降水最大值在 $2\sim3\text{ g m}^{-2}$ 的数值分布最多，而台风的可降水最大值在大于 3 g m^{-2} 的数值分布又较热带风暴的多，强台风的可降水最大值在 $4\sim5\text{ g m}^{-2}$ 的数值分布最多，超强台风的可降水最大值在 $5\sim6\text{ g m}^{-2}$ 的数值分布最多。在消亡阶段，热带风暴和台风的可降水最大值在 $1\sim2\text{ g m}^{-2}$ 的数值分布最多，而台

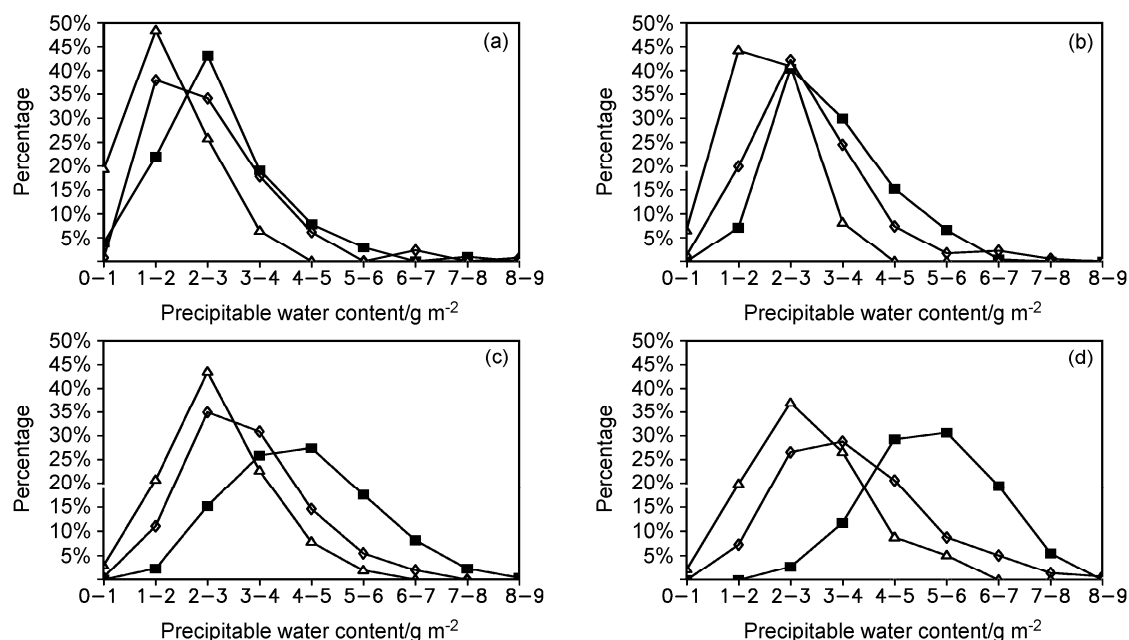


图3 各种类型热带气旋在各个发展阶段,与热带气旋中心距离为500 km范围内,单位面积空气柱的可降水(Precipitable water)总含量中的最大值在各数值分段的数目占各个发展阶段“快照”数目的百分比分布:(a)热带风暴;(b)台风;(c)强台风;(d)超强台风。标记菱形曲线代表发展阶段,标记实心方框曲线代表成熟阶段,标记三角形曲线代表消亡阶段

Fig. 3 The percentage distribution of the maximum precipitable water content in per unit area air column, during the range of 500 km from tropical cyclone center, for different development stages of various types of tropical cyclones: (a) Tropical storm; (b) typhoon; (c) strong typhoon; (d) super severe typhoon

风的可降水最大值在大于 2 g m^{-2} 的数值分布较热带风暴的要多,而强台风和超强台风的可降水最大值在 $2 \sim 3 \text{ g m}^{-2}$ 的数值分布最多,而超强台风的可降水最大值在大于 3 g m^{-2} 的数值分布又较强台风的要多。由此可见,热带气旋区域的水成物的大值区分布与热带气旋强度有着密切联系,不同强度的热带气旋在不同的发展阶段,四种水汽凝结物的不同之处主要表现在较大值区的分布上,说明水汽凝结物与热带气旋强度变化息息相关。下面从径向方向上分别分析各种类型热带气旋在各个发展阶段的水汽凝结物的空间分布。

不同类型的热带气旋在其生命史的不同阶段,水汽凝结物的径向分布特征有很大的差异,下面以可降水的情形展开分析,另外三种水汽凝结物(云水、云冰、可降冰)的特征和可降水类似(图略)。图4是四种不同类型的热带气旋在其发展(绿色虚线)、成熟(黑色实线)和消亡(蓝色短虚线)阶段的可降水在单位面积空气柱中的总含量随与热带气旋中心距离的变化分布图。由图可见,水汽凝结物的峰值集中于数十公里到一百多公里的热带气旋眼壁及云墙区。在热带气旋发展过程中,随着各种类型的热带气旋各自强度的增强,水汽越往中

心位置靠拢,当其发展到成熟阶段,水汽凝结物的大值中心基本上集中在距离热带气旋中心约50 km区域,而且强度越强的热带气旋,水汽凝结物的大值中心与热带气旋中心的距离越近,其最大值随着热带气旋强度的增强而增加。在距离热带气旋中心约50 km以外的区域,水汽凝结物随着与热带气旋中心距离的增加而逐步减少。

3.3 热带气旋内部水成物的垂直分布特征

上一小节分析了水成物在单位面积空气柱中总含量的径向分布,为了能更深入地反映水成物在空间上的分布情况,此节着重从垂直方向分析水成物的空间分布。为了探讨热带气旋区域中各种水汽凝结物在空气中的分布情况,根据CFADs(Contoured frequency by altitude diagrams)方法(Yuter and Houze, 1995),对热带气旋区域半径为500 km范围的四种水汽凝结物在各层高度的数值大小所占的比例进行了统计。由于各类热带气旋水汽凝结物比例分布在各个发展阶段都有比较好的相似性,于是将所有热带气旋合成。图5是热带风暴在发展、成熟和消亡阶段的四种水汽凝结物随与热带风暴中心距离变化的垂直分布图,由图5可见,在发展阶段水汽凝结物的大值区位

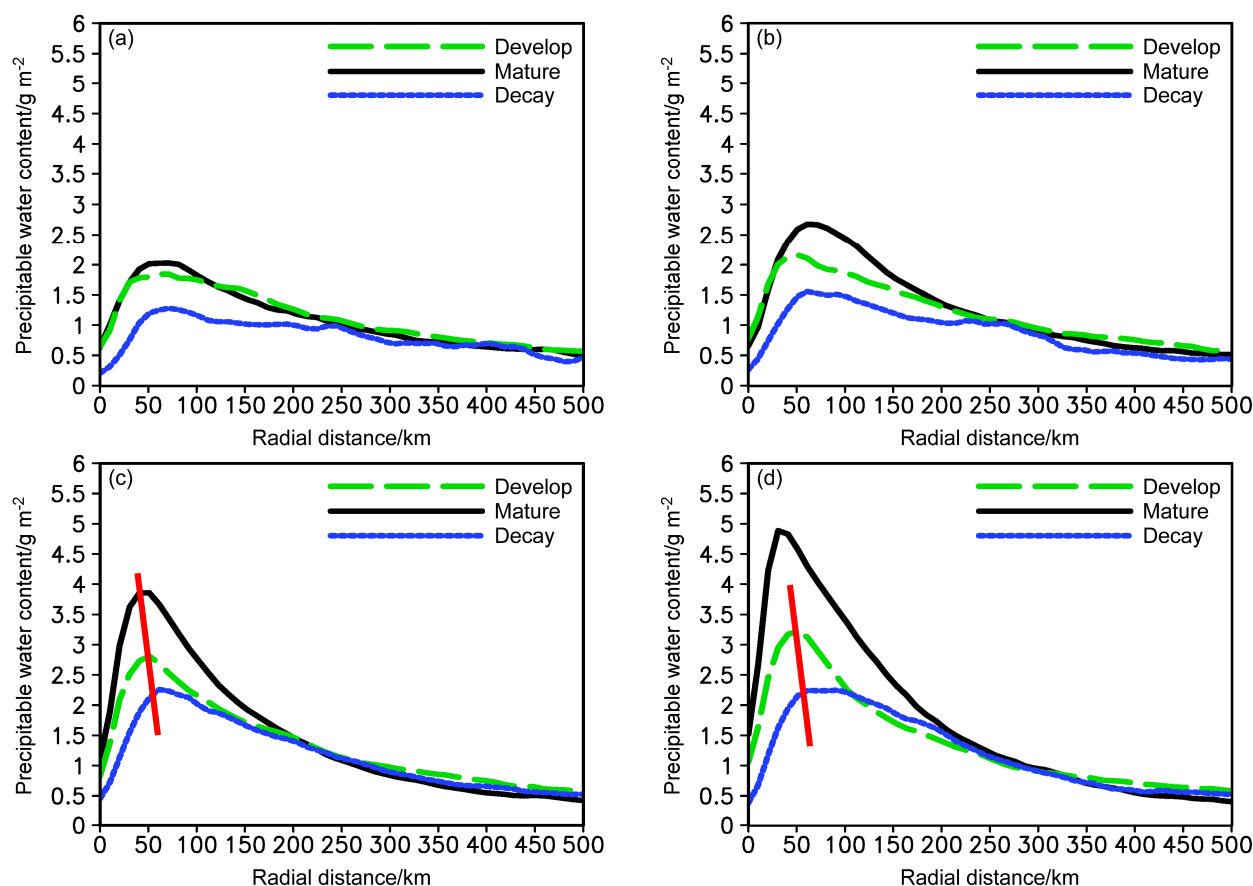


图 4 (a) 热带风暴、(b) 台风、(c) 强台风、(d) 超强台风在发展(绿色虚线)、成熟(黑色实线)和消亡(蓝色短虚线)阶段的可降水在单位面积空气柱中的总含量随与热带气旋中心距离的变化曲线

Fig. 4 The variation of precipitable water content in per unit area air column with the distance from typhoon center in develop (greendashed line), mature (black solid line), and decay (blue short dashed line) stages: (a) Tropical storm; (b) typhoon; (c) strong typhoon; (d) super severe typhoon

于距离中心位置 50~150 km 范围。可降水最大值平均为 0.21 g m^{-3} 以上, 位于 2 km 高度以下, 可降冰最大值平均为 0.24 g m^{-3} 以上, 位于约 6 km 高度上, 云水最大值平均为 0.035 g m^{-3} 以上, 位于约 4 km 高度上, 云冰最大值平均为 0.018 g m^{-3} , 大值中心位于 10~13 km 高度上。而在成熟阶段, 四种水汽凝结物在数量上要比发展阶段的普遍要增加, 大值中心稳定在 50~100 km 范围, 可降水最大值平均可达 0.24 g m^{-3} 以上, 可降冰最大值平均可达 0.24 g m^{-3} 以上, 云水最大值平均为 0.035 g m^{-3} , 云冰最大值平均可达 0.018 g m^{-3} 以上, 图中还发现四种水汽凝结物能够到达的最高高度较发展阶段要稍微抬升。水汽凝结物的不断增加以及能够到达的高度有所抬升说明了热带风暴向中心的风速增加, 垂直上升运动也加剧, 因此向内流入和向上输送的水汽不断增多, 释放的潜热也不断增多, 从而保障了热带风暴发展所需的水汽

和热量条件以及暖心结构。当热带风暴进入消亡阶段, 各种水汽凝结物含量较发展和成熟阶段都大大减少, 同时能够到达的高度也降低, 云冰的大值中心更是从约 14 km 减至 10 km 左右, 而且水成物大值中心在与中心距离更远的区域也有出现。说明在此阶段, 热带风暴的上升区垂直运动大大减弱, 向内和向上输送的水汽大大减少, 高层水汽随着高层辐散气流输送到更远地方而慢慢耗尽。

为了更清楚地看到水汽凝结物垂直分布的演变状况, 我们还进行了个例分析。图 6 为 TMI 2A12 扫描到的强台风“彩云”Choi-wan (0914) 的 7 个“快照”其可降水随与中心距离变化的垂直分布, 7 个“快照”分别处于热带气旋生命史的不同阶段。由图 6 可见, 在 Choi-wan (0914) 发展加强阶段 (“快照”1~4), 可降水大值区逐渐往中心靠拢, 且水汽凝结物增多。“快照”4 处于该热带气旋中心气压值最低的阶段, 其对应的水

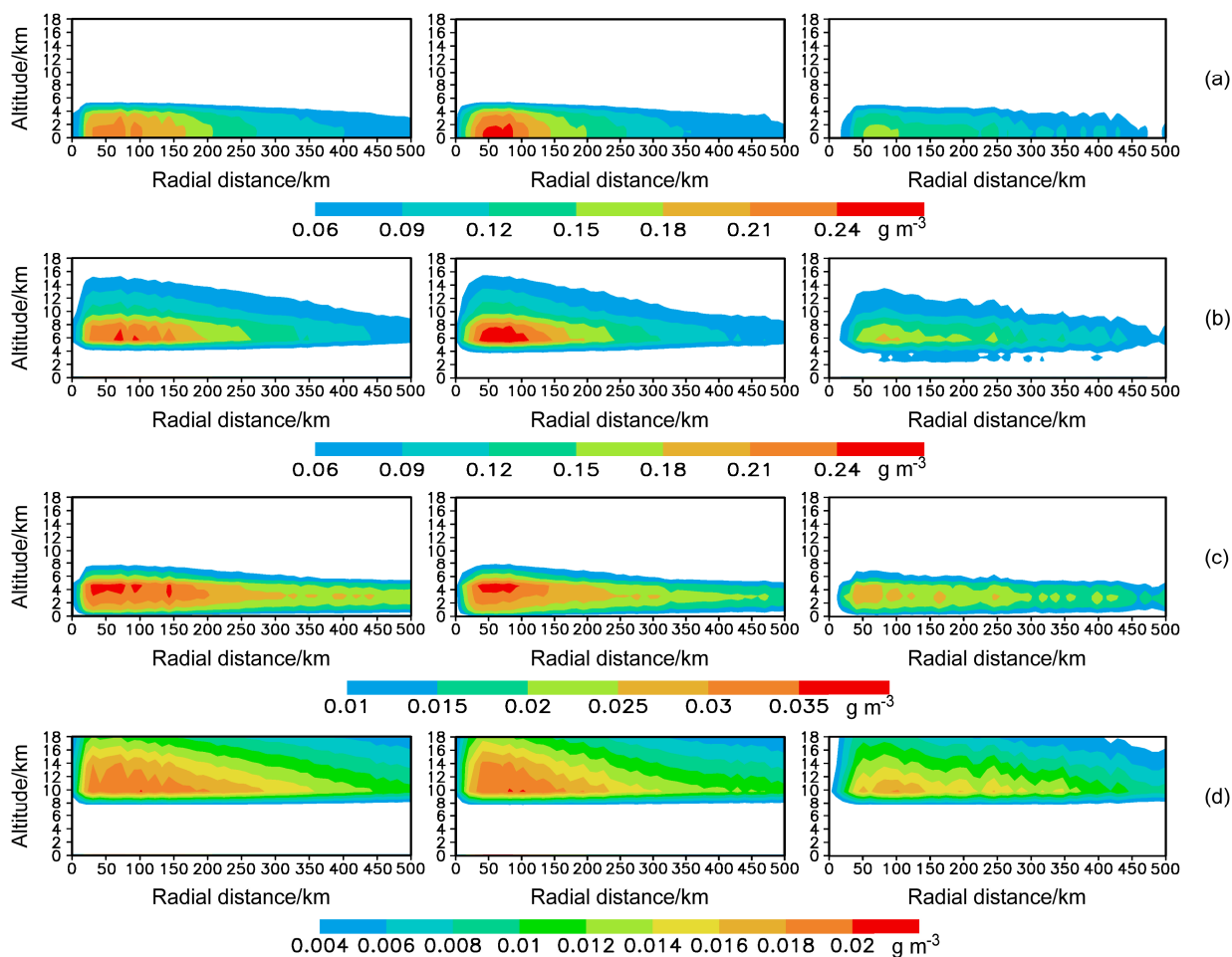


图5 热带风暴在发展(左)、成熟(中)和消亡(右)阶段的四种水汽凝结物含量(单位: g m^{-3}) 随与热带风暴中心距离变化的垂直分布: (a) 可降水 (Precipitable water); (b) 可降水冰 (Precipitable ice); (c) 云水 (Cloud liquid water); (d) 云冰 (Cloud ice water)

Fig. 5 Vertical profiles of the content of (a) precipitable water, (b) precipitable ice, (c) cloud liquid water, and (d) cloud ice water varying with the distance from typhoon center in develop (left), mature (middle), and decay (right) stages of the tropical storm

水汽凝结物大值中心离气旋中心的距离最近, 只有 25 km 左右。而在减弱阶段 (“快照” 5~7), 可降水大值区又沿着径向方向逐渐向四周消散, 到了 “快照” 7 的阶段, 水汽凝结物离散分布于离气旋中心 50~500 km 的范围内, 且水汽凝结物的数值也大大地减少。其他水汽凝结物的变化情况类似于可降水 (图略)。

4 热带气旋结构与强度演变联系

4.1 热带气旋径向结构与其强度的联系

为了能够更精确地反映热带气旋三维结构与强度的联系, 本节着重利用水汽凝结物与对应的热带气旋最低中心气压值来探讨热带气旋内部云水结构与热带气旋演变联系。参照 Dvorak (1984) 以

及 Rao and Macarthur (1994) 的做法, 本节利用 CMA-STI 热带气旋最佳路径数据集中热带气旋的最低中心气压作插值, 得到 “快照” 中扫描到的热带气旋在该时刻的最低中心气压值, 然后再利用 “快照” 所扫描到的热带气旋在该时刻的最低中心气压值量化分析 4 种水汽凝结物与热带气旋强度演变的关系。本节分别普查对比了 TMI 2A12 所捕捉到的热带风暴 364 个 “快照”, 台风 447 个 “快照”, 强台风 552 个 “快照” 以及超强台风 413 个 “快照”, 观察 4 种水汽凝结物单位面积空气柱中的总含量的径向分布, 为了研究方便, 分别在与热带气旋中心距离为 0~50 km、50~100 km、100~200 km、200~300 km、300~400 km、400~500 km 的环状区域作平均。

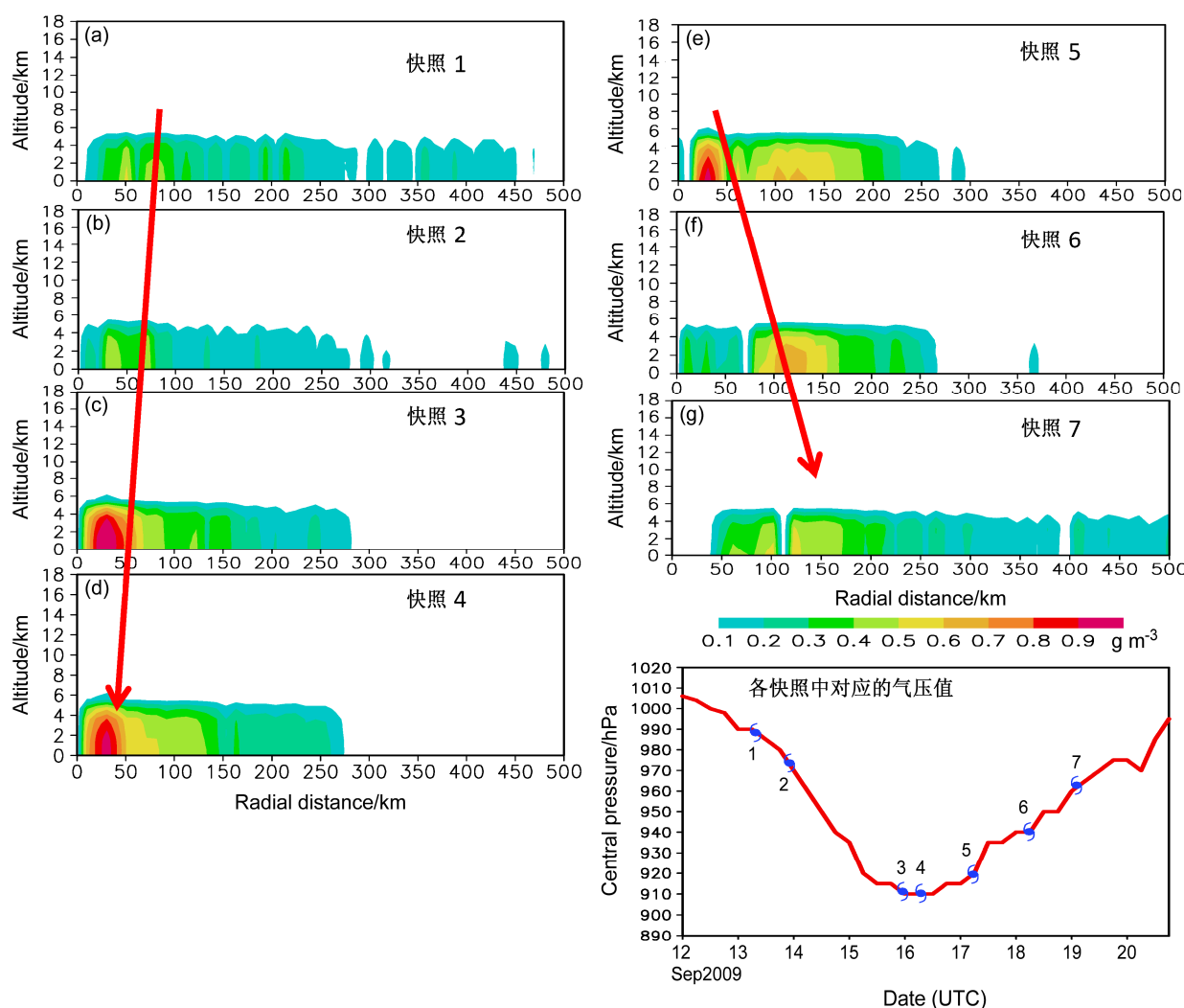


图6 TMI 2A12 中所扫描到的强台风“彩云”Choi-wan (0914) 的7个“快照”的可降水 (Precipitable water) 含量随与中心距离变化的垂直分布。右下角的插图对各“快照”所对应热带气旋中心气压值

Fig. 6 Vertical profiles of precipitable water content of seven snapshots for strong typhoon Choi-wan (0914) varying with the distance from typhoon center, corresponding tropical cyclone central pressure of each snapshot illustrated in the picture in the lower right corner

首先, 我们计算了径向水汽凝结物和热带气旋中心气压值的相关, 强台风和超强台风中各环状区域的水汽凝结物与对应时刻最低中心气压的相关系数分别见如表 2 和表 3 所示, 粗体的为未通过可信度检验。由表 2、3 可以看到, 离热带气旋中心距离越近, 水汽凝结物与热带气旋强度的关系越显著, 热带气旋强度变化与热带气旋中心附近 200 km 范围内的水汽凝结物含量存在显著的正相关, 而 200 km 以外的外围水汽凝结物含量存在一定程度的负相关。为了能够清晰的体现 4 种水汽凝结物与热带气旋强度的联系, 下面用对应时刻的最低中心气压值来分析其与 4 种水汽凝结物大值区的对应关系。

图 7 是与各种类型热带气旋中心距离为 0~50 km 或 50~100 km 的可降水大值区, 可降水在单位面积空气柱的总含量与最低中心气压值的对应关系图。由图 7 可见, 可降水随着热带气旋最低中心气压值的降低而逐渐增加, 强度越强的热带气旋, 可降水与最低中心气压值的对应关系越密切。当最低中心气压值约低于 960 hPa 时, 可降水大值区随着最低中心气压值的不断降低而呈现明显的线性增加, 其中以超强台风最为明显。对应的热带风暴、台风、强台风和超强台风的最低中心气压值与可降水大值中心的相关系数分别为-0.23、-0.39、-0.49 和-0.63。可降冰、云水以及云冰的计算结果与可降水相似 (图略), 但它们和热带气旋强度的关系

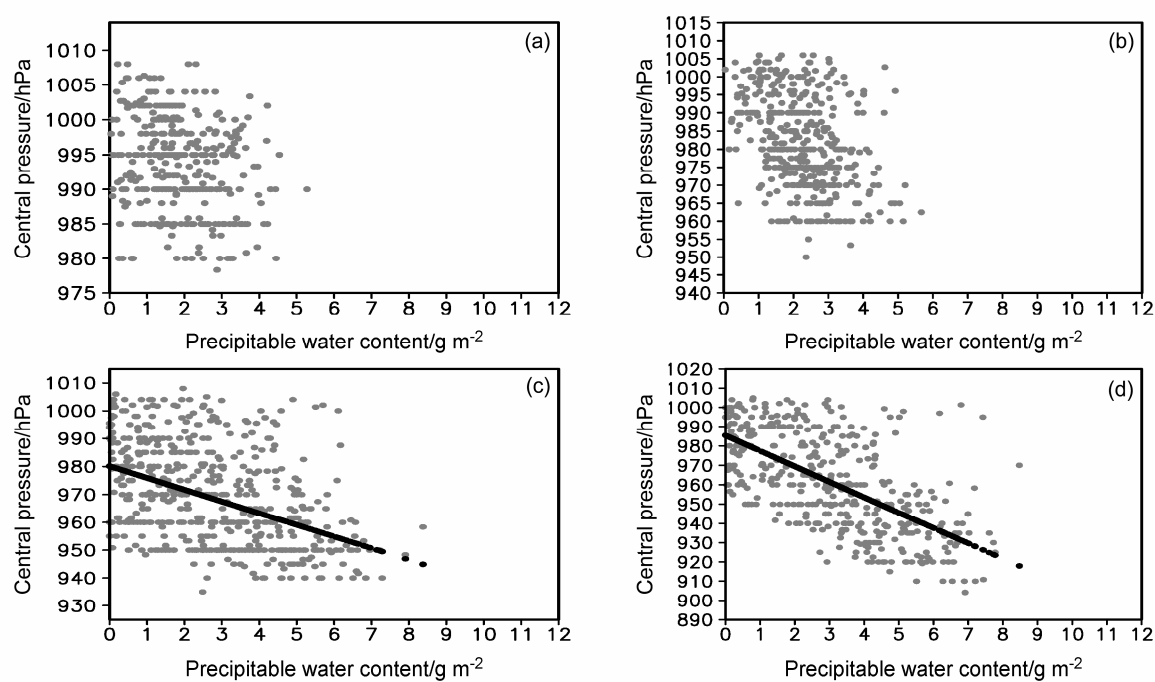


图7 可降水大值中心在单位面积空气柱中的总含量(单位: g m^{-2})和最低中心气压值(单位: hPa)的对应关系的统计分析图: (a) 热带风暴; (b) 台风; (c) 强台风; (d) 超强台风

Fig. 7 The analysis charts of statistical correspondence between the total content of precipitable water in per unit area air column (unit: g m^{-2}) and the minimum typhoon center pressure (unit: hPa) for (a) tropical storm, (b) typhoon, (c) strong typhoon, and (d) super severe typhoon

稍微弱于可降水。

表2 强台风最低中心气压值和离中心距离为 0~50 km、50~100 km、100~200 km、200~300 km、300~400 km、400~500 km 的各个环状区域 4 种水汽凝结物含量的相关系数(粗体为未通过可信度检验)

Table 2 The correlation coefficients between typhoon central pressure for strong typhoon and the contents of four types of hydrometeor during each annular region of 0~50 km, 50~100 km, 100~200 km, 200~300 km, 300~400 km, and 400~500 km from typhoon center (Bold: below 95% confidence level)

范围/km	相关系数			
	可降水	可降冰	云水	云冰
0~50	-0.44	-0.29	-0.38	-0.14
50~100	-0.49	-0.38	-0.35	-0.1
100~200	-0.23	-0.22	-0.04	-0.14
200~300	0.01	0.01	0.12	0.01
300~400	0.08	0.1	0.16	0.12
400~500	0.15	0.094	0.2	0.17

4.2 热带气旋垂直结构与其强度的联系

上述的分析已经指出, 热带气旋在离中心 0~50 km 或 50~100 km 环状区域的水汽凝结物大值中心与最低中心气压值关系最为密切, 为了能描述水

汽在热带气旋区域的具体空间分布与热带气旋强度的联系情况, 后边将主要从垂直方向上来分析水汽凝结物与热带气旋强度关系。

表3 同表2, 但针对超强台风

Table 3 The same as Table 2, but for super severe typhoon

范围/km	相关系数			
	可降水	可降冰	云水	云冰
0~50	-0.63	-0.48	-0.58	-0.33
50~100	-0.59	-0.5	-0.46	-0.14
100~200	-0.46	-0.4	-0.31	-0.29
200~300	-0.12	-0.06	-0.08	-0.11
300~400	-0.02	0.07	-0.06	-0.003
400~500	0.12	0.16	0.09	0.15

图8 是以超强台风为例, 计算得到的热带气旋中心距离为 0~50 km 的环状区域不同最低中心气压值所对应的 4 种水汽凝结物的垂直廓线。由图8 可见, 随着热带气旋中心气压值的降低, 水汽凝结物的含量也迅速增多。可降水的增多集中在 4 km 以下的对流层低层; 可降冰的增多集中在 4~9 km 对流层中上层, 峰值区位于 6 km 处; 云水的增多集中在对流层的中层(4~7 km), 峰值区位于 5 km 处; 而云冰的增加主要发生在对流层高层, 峰值区位于 14 km 处。值得注意的是, 水汽凝结物随着热

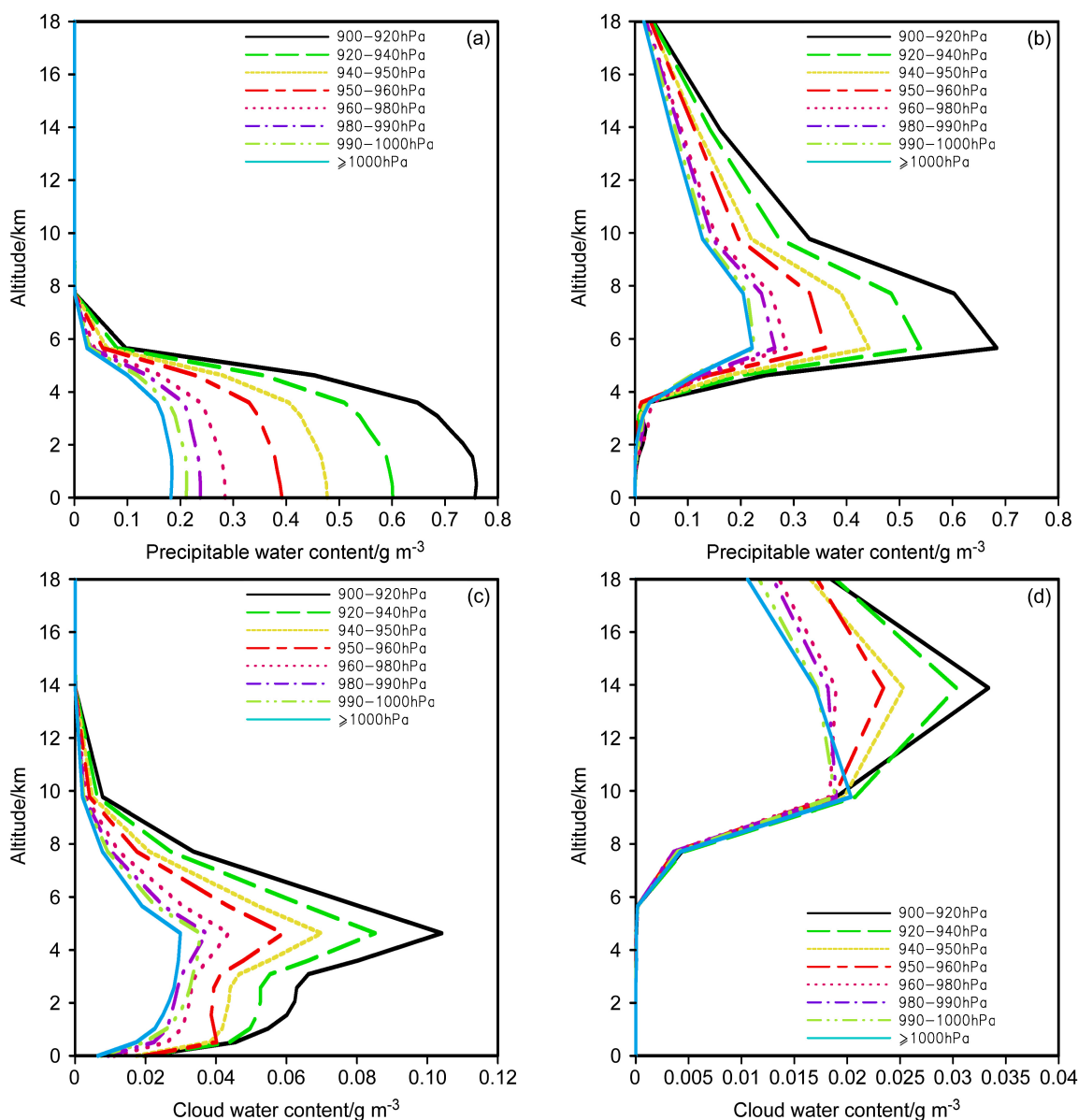


图 8 热带气旋中心距离为 0~50 km 的环状区域不同最低中心气压值所对应的 4 种水汽凝结物含量 (单位: g m^{-3}) 的垂直廓线: (a) 可降水; (b) 可降冰; (c) 云水; (d) 云冰

Fig. 8 The vertical profiles of the content of four types of hydrometeors corresponding to different minimum typhoon central pressure in the annular region of 50 km from typhoon center: (a) Precipitable water, (b) precipitable ice, (c) cloud liquid water, (d) cloud ice water

带气旋中心气压值下降的增加率不是线性增长, 当热带气旋发展到较为强盛的阶段时, 中心气压值每下降 20 hPa 水汽凝结物的增量远远大于热带气旋处于较弱阶段时水汽凝结物的增量。

为了更清楚地了解热带气旋中水汽凝结物的变化与热带气旋强度变化的关系, 我们对热带气旋的个例进行了分析。图 9 为 2001 年的强台风“蝴蝶”(Wutip) 离中心距离为 0~50 km 环状区域的水汽凝结物在单位面积空气柱的总含量随时间变

化状况, 由图可见, 热带气旋的中心气压值和其核心部位的水汽凝结物是反位相变化的, 亦即当热带气旋强度加强时, 水汽凝结物的含量也是增加的, 反之亦然。值得注意的是, 水汽凝结物含量的变化超前于热带气旋强度的变化, 在热带气旋强度迅速加强之前数小时, 水汽凝结物的浓度首先迅速增加, 而且在热带气旋强度减弱之前十几小时, 水汽凝结物的含量就已经开始明显下降了。这或许预示着热带气旋的水汽输送以及潜热释放过程对热带

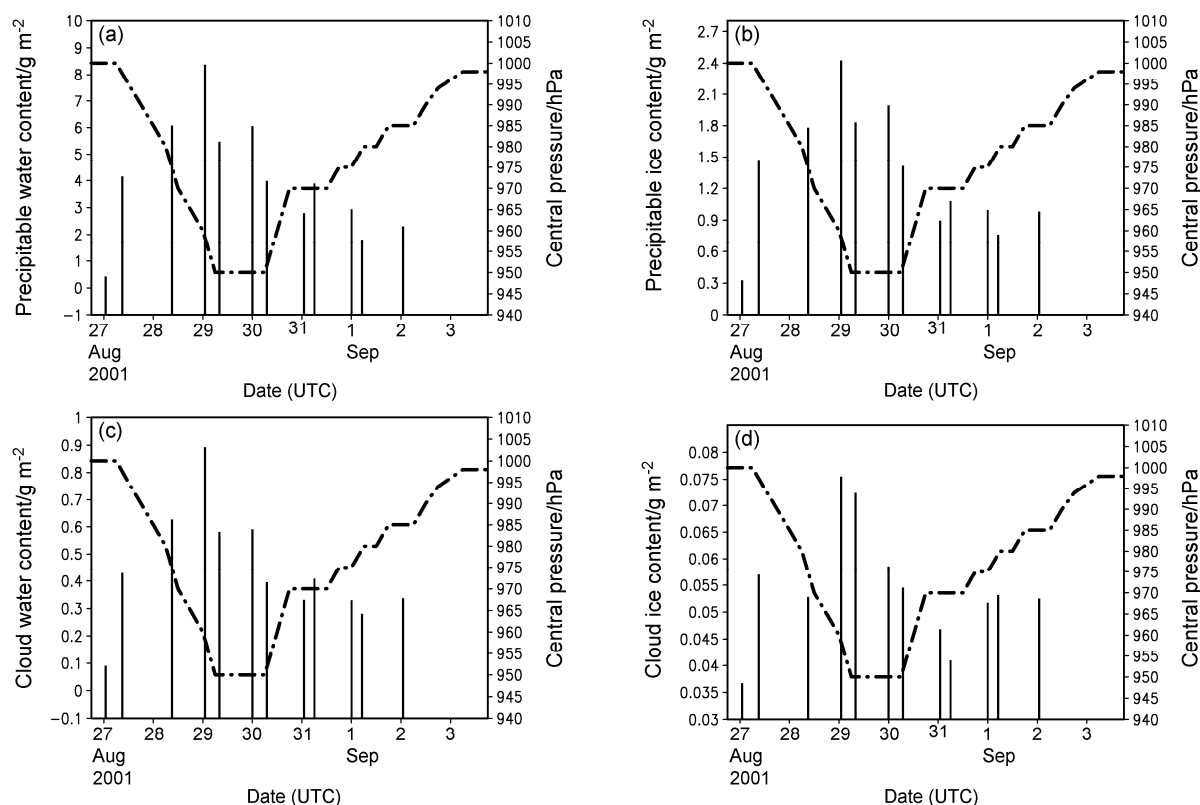


图9 2001年的强台风“蝴蝶”(Wutip)(0112)离中心距离为0~50 km环状区域内单位面积空气柱的水汽凝结物含量(单位: g m^{-2})随时间的变化:(a)可降水;(b)可降冰;(c)云水;(d)云冰。图中点虚线为热带气旋中心气压值的变化

Fig. 9 Time series of total content of each type of hydrometeor in per unit area air column (unit: g m^{-2}) for strong typhoon WUTIP (2001) in the annular region of 50 km from the typhoon center: (a) Precipitable water; (b) precipitable ice; (c) cloud liquid water; (d) cloud ice water. Dash-dotted line represents the change in tropical cyclone central pressure values

气旋强度的变化有指示作用,这是一个十分有趣的现象。如果能弄清楚这种水汽凝结物和热带气旋强度变化的时间差现象的规律和机理,将会对热带气旋强度的预报提供有用的线索。目前为止,尚无查找到这方面研究有关文献。有一些间接证据,或许能一定程度上佐证了这种有趣的现象:潘伦湘等(2010)分析闪电活动和热带气旋强度变化的关系时发现,在TC加强前数小时至十数小时不等,其中心附近80 km半径范围内,闪电会加大。而这些闪电其实是跟的垂直运动以及水汽凝结物是有关联的。这种现象,值得我们深入的探讨。

图10为2004年的超强台风“暹芭”Chaba(0416)离中心距离为0~50 km环状区域的水汽凝结物8个“快照”的垂直分布廓线。“快照”1到“快照”2是属于热带气旋的缓慢发展阶段;“快照”3到“快照”4是属于热带气旋的迅速加强阶段;“快照”4到“快照”7是属于热带气旋在最大强度的维持阶段;“快照”7到“快照”8是属于

于热带气旋的减弱阶段。由图可见,在热带气旋的迅速增强之前的缓慢发展阶段,4种水汽凝结物就已经呈现出较大幅度的增长,这种增长一直持续到“快照”5的阶段而达到峰值。可降水的增长主要位于4 km以下的大气边界层内,可降冰和云水的增长的峰值层约位于5 km的对流层中层,云冰增长的峰值层位于14 km的对流层上层。值得注意的是,在热带气旋减弱之前处于鼎盛时期的“快照”5~7阶段,4种水汽凝结物均已经迅速的减少,超前于热带气旋强度的变化。

5 结论

本文利用TRMM测雨卫星中的TMI 2A12微波成像仪资料分析了西北太平洋地区各种类型热带气旋其内部的三维结构,并且结合热带气旋强度来分析热带气旋内部水汽凝结物的时空分布,试图揭示热带气旋内部结构与强度的联系。所得主要结论如下:

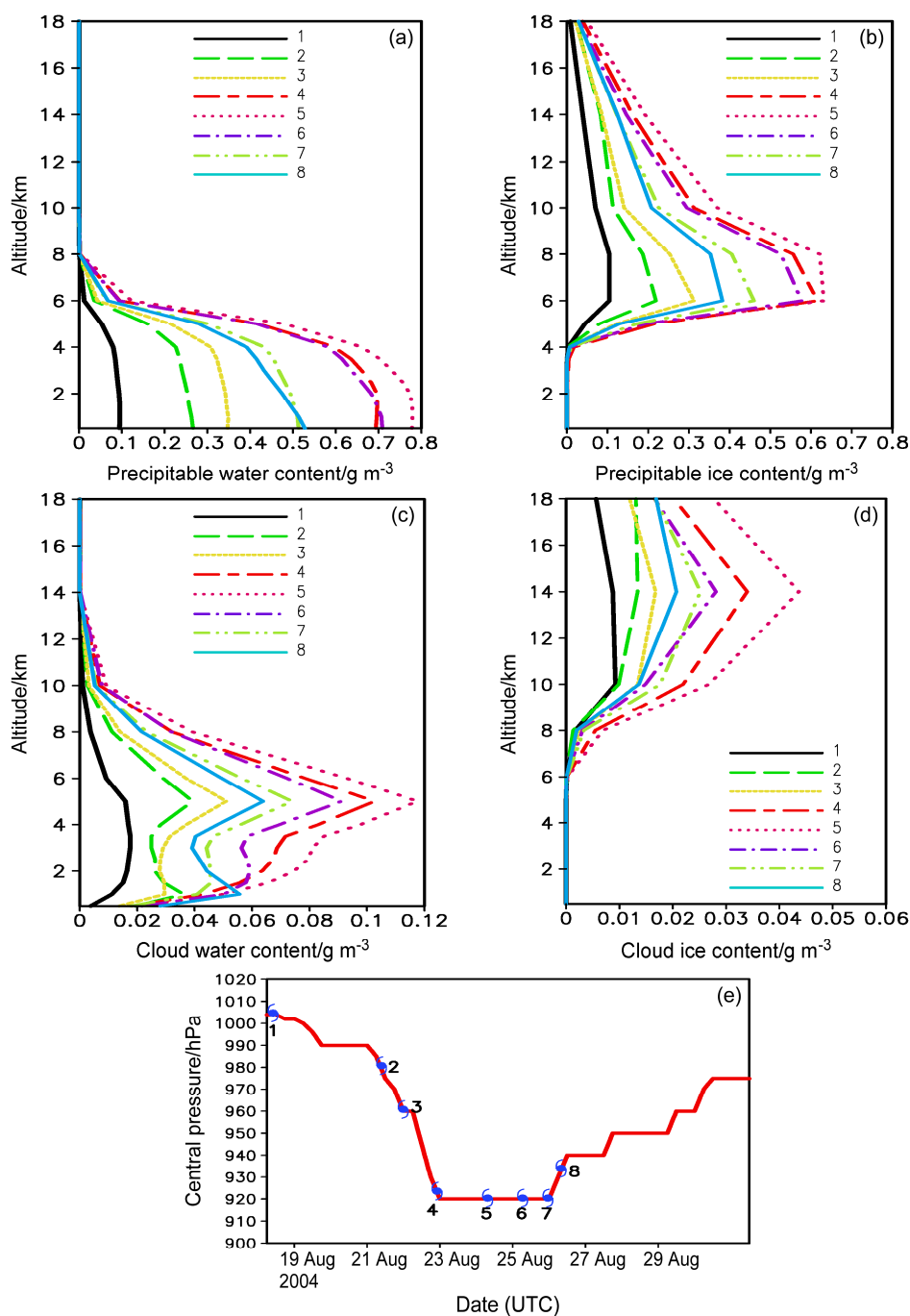


图 10 2004 年的超强台风“暹芭” Chaba (0416) 离中心距离为 0~50 km 环状区域的水汽凝结物含量 (单位: g m^{-3}) 8 个“快照”的垂直分布廓线: (a) 可降水; (b) 可降冰; (c) 云水; (d) 云冰。(e) 为 8 个“快照”所对应热带气旋中心气压值

Fig. 10 Vertical profiles of the content of (a) precipitable water, (b) precipitable ice, (c) cloud liquid water, and (d) cloud ice water for 8 snapshots of strong typhoon Chaba (0416) in the annular region of 50 km from typhoon center; (e) corresponding tropical cyclone central pressure of each snapshot

(1) TMI 2A12 水汽凝结物资料显示出了热带气旋内部的细致结构及变化特征。水汽凝结物的峰值集中于数十公里到一百多公里的热带气旋眼壁及云墙区。在热带气旋发展过程中,随着热带气旋强度的增强,水汽凝结物增多且往其中心靠拢,从

发展阶段到成熟阶段,水汽凝结物的大值中心基本上集中在距离热带气旋中心约 50 km 区域,而且强度越强的热带气旋,水汽凝结物的大值中心与热带气旋中心的距离越近。在热带气旋消亡的过程中,水汽凝结物不断减弱且往外围扩散,逐渐扩展到远离

中心的区域。

(2) 热带气旋内部水汽凝结物的空间分布与热带气旋强度密切相关。4 种水汽凝结物的径向分布和垂直分布由于热带气旋强度的不同, 其分布特征而存在差异。不同强度的热带气旋在不同的发展阶段, 水汽凝结物分布的不同之处主要表现在大值区的分布上。热带气旋强度变化与热带气旋中心附近 200 km 范围内的水汽凝结物含量存在显著的正相关, 而 200 km 以外的外围水汽凝结物含量存在负相关。

(3) 热带气旋强度变化与水汽凝结物的变化存在时间差, 在热带气旋迅速发展之前数小时, 热带气旋中心 0~50 km 环状区域的水汽凝结物含量就已经提前增加了; 在热带气旋减弱前数小时到数十小时, 即使热带气旋还处于它强度的鼎盛时期, 其中心 0~50 km 环状区域的水汽凝结物含量就已经提前显著减少了。这种水汽凝结物的变化超前于热带气旋强度变化的现象, 可能是热带气旋强度预报的潜在线索。

参考文献 (References)

- 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 [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 130: 769–784.
- 陈联寿. 2010. 热带气象灾害及其研究进展 [J]. *气象*, 36 (7): 101–110.
- Chen Lianshou. 2010. Tropical meteorological calamities and its research evaluation [J]. *Meteorological Monthly*, 36 (7): 101–110.
- Chen Lianshou, Luo Zhexian. 1995. Some relations between asymmetric structure and motion of typhoons [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 9 (4): 412–419.
- 陈联寿, 徐祥德, 解以扬, 等. 1997. 台风异常运动及其外区热力不稳定非对称结构的影响效应 [J]. *大气科学*, 21: 83–90.
- Chen Lianshou, Xu Xiangde, Xie Yiyang, et al. 1997. The effect of tropical cyclone asymmetric thermodynamic structure on its unusual motion [J]. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 21: 83–90.
- Dvorak V F. 1984. Tropical cyclone intensity analysis using satellite data [R]. NOAA Technical Report. NESDIS 11, 47.
- 傅云飞, 刘栋, 王雨, 等. 2007. 热带测雨卫星综合探测结果之“云娜”台风降水云与非降水云特征 [J]. *气象学报*, 65: 316–328.
- Fu Yunfei, Liu Dong, Wang Yu, et al. 2007. Characteristics of precipitating and non-precipitating clouds in typhoon Ranan as viewed by TRMM combined measurements [J]. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 65: 316–328.
- 贺海晏. 1995. 台风移动规律的研究. I. 非绝热加热与水平温度分布的影响 [J]. *热带气象学报*, 11: 1–9.
- He Haiyan. 1995. A study on typhoon movement. I. The effect of diabatic heating and horizontal temperature distribution [J]. *J. Trop. Meteor.* (in Chinese), 11: 1–9.
- 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: 491–503.
- He Huizhong, Cheng Minghu, Zhou Fengxian. 2006. 3D structure of rain and cloud hydrometeors for typhoon Kujira (0302) [J]. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 30: 491–503.
- Hence D A, Houze R A Jr. 2012. Vertical structure of tropical cyclone rainbands as seen by the TRMM precipitation radar [J]. *J. Atmos. Sci.*, 69: 2644–2661.
- Houze R A Jr, Marks F D Jr, Black R A. 1992. Dual-aircraft investigation of the inner core of Hurricane Norbert. Part II: Mesoscale distribution of ice particles [J]. *J. Atmos. Sci.*, 49: 943–962.
- Jiang Haiyan. 2012. The relationship between Tropical cyclone intensity change and the strength of inner-core convection [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 140: 1164–1176.
- Jiang Haiyan, Liu Chuntao, Zipser E J. 2011. A TRMM-based tropical cyclone cloud and precipitation feature database [J]. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 50: 1255–1274.
- Jiang Haiyan, Ramirez E M, Cecil D J. 2013. Convective and rainfall properties of tropical cyclone inner cores and rainbands from 11 years of TRMM data [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 141: 431–450.
- Kummerow C, Barnes W, Kozu T, et al. 1998. The Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) sensor package [J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 15: 809–817.
- Kummerow C, Simpson J, Thiele O, et al. 2000. The status of the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) after two years in orbit [J]. *J. Appl. Meteor.*, 39: 1965–1982.
- 刘奇, 傅云飞. 2007. 基于 TRMM/TMI 的亚洲夏季降水研究 [J]. *中国科学 D 辑*, 37: 111–122.
- Liu Qi, Fu Yunfei. 2007. Research on Asian summer rain based on TRMM/TMI [J]. *Science in China (Series D)* (in Chinese), 37: 111–122.
- 刘式适, 杨大升. 1980. 台风的螺旋结构 [J]. *气象学报*, 38: 193–204.
- Liu Shikuo, Yang Dasheng. 1980. The spiral structure of the tropical cyclone [J]. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 38: 193–204.
- Lonfat M, Marks F D Jr, Chen S S. 2004. Precipitation distribution in tropical cyclones using the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) microwave imager: A global perspective [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 132: 1645–1660.
- 马雷鸣, 端义宏. 2005. 利用 TRMM 资料对热带气旋“威马逊”结构及其降水特征的研究 [J]. *海洋学报*, 27: 36–44.
- Ma Leiming, Duan Yihong. 2005. Study on structure and rainfall feature of TC RAMMASUN (2002) using TRMM products [J]. *Acta Ocean Sinica*, 27: 36–44.
- Ma Zhanhong, Fei Jianfang, Liu Lei, et al. 2013. Effects of the cold core eddy on tropical cyclone intensity and structure under idealized air-sea interaction conditions [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 141: 1285–1303.
- Marks F D Jr. 1985. Evolution of the structure of precipitation in Hurricane Allen (1980) [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 113: 909–930.
- Masunaga H, Iguchi T, Oki R, et al. 2002. Comparison of rainfall products derived from TRMM microwave imager and precipitation radar [J]. *J. Appl. Meteor.*, 41: 849–862.
- 潘伦湘, 鄒秀书, 刘冬霞, 等. 2010. 西北太平洋地区强台风的闪电活动特征 [J]. *中国科学: 地球科学*, 40: 252–260.
- Pan Lunxiang, Qie Xiushu, Liu Dongxia, et al. 2010. Characteristics of lightning activities for

- strong typhoon in Northwest Pacific [J]. Science in China: Earth Science, 40: 252–260.
- Rao G V, Macarthur P D. 1994. The SSM/I estimated rainfall amounts of tropical cyclones and their potential in predicting the cyclone intensity changes [J]. Mon. Wea. Rev., 122: 1568–1574.
- Rappin E D, Morgan M C, Tripoli G J. 2011. The impact of outflow environment on tropical cyclone intensification and structure [J]. J. Atmos. Sci., 68: 177–194.
- Rogers R, Reasor P, Lorsolo S. 2013. Airborne Doppler observations of the inner-core structural differences between intensifying and steady-state tropical cyclones [J]. Mon. Wea. Rev., 141: 2970–2991.
- Smith R K, Glatz A. 1998. The detection of hurricane asymmetries from aircraft reconnaissance flight data: Some simulation experiments [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 124: 2715–2728.
- Wilheit T T, Chang A T C, Rao M S V, et al. 1977. A satellite technique for quantitatively mapping rainfall rates over the oceans [J]. J. Appl. Meteor., 16: 551–560.
- 徐祥德, 陈联寿, 解以扬, 等. 1996. TCM-90 现场科学试验台风 FLO “B 陀螺” “通风流” 非对称动力结构特征 [J]. 气象学报, 54: 536–543.
- Xu Xiangde, Chen Lianshou, Xie Yiyang, et al. 1996. The asymmetric and dynamic structure of the “B-TOP” dipole and “ventilation flow” of the target typhoon FLO during TCM-90 field experiment [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 54: 536–543.
- Yuter S E, Houze R A Jr. 1995. Three-dimensional kinematic and microphysical evolution of Florida cumulonimbus. Part I: Spatial distribution of updrafts, downdrafts, and precipitation [J]. Mon. Wea. Rev., 123: 1921–1940.
- Yokoyama C, Takayabu Y N. 2008. A statistical study on rain characteristics of tropical cyclones using TRMM satellite data [J]. Mon. Wea. Rev., 136: 3848–3862.