

韩丁, 严卫, 叶晶, 等. 2013. 基于 CloudSat 卫星资料分析东太平洋台风的云、降水和热力结构特征 [J]. 大气科学, 37 (3): 691–704, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12103. Han Ding, Yan Wei, Ye Jing, et al. 2013. Analyzing cloud, precipitation, and thermal structure characteristics of typhoons in eastern Pacific based on CloudSat satellite data [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (3): 691–704.

基于 CloudSat 卫星资料分析东太平洋台风的云、降水和热力结构特征

韩丁¹ 严卫¹ 叶晶² 刘会发¹

¹ 解放军理工大学气象海洋学院, 南京 211101

² 解放军 95871 部队, 衡阳 421002

摘 要 利用 2006~2010 年的 CloudSat 热带气旋过境数据集资料, 依据风速大小划分为不同演变阶段, 对各阶段内东太平洋台风的云、降水和热力结构进行综合分析。结果表明: 雷达反射率在 5 km 高度上下的分布截然相反, 沿径向回波强度和顶高不断减小。各类云沿径向和垂直方向的分布差异较大, 而深对流云的垂直尺度和发生概率始终较大。有效粒子半径、分布宽度参数和冰水含量随高度减小而粒子数浓度却增大, 沿径向各冰云参数以及降雨率都不断减小。各阶段降雨率总体上夏季大于秋季, 沿纬向各季节在不同阶段的分布各异。内核区降雨率近似服从指数分布且对暖的海面温度 SST 较为敏感, 其与雷达反射率的散点分布集中在三个区域内。内核区 5~10 km 高度存在暖核结构, 其下方恰好对应湿心区, 而 10 km 以上相对湿度距平较大值区对应台风顶部的卷云罩。各阶段 4.5 km 以上为对流性稳定层结而该高度以下的层结特性各异, 此外假相当位温沿径向不断减小。

关键词 CloudSat 台风 雷达反射率 降雨率 热力结构

文章编号 1006-9895(2013)03-0691-14

中图分类号 P426

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12103

Analyzing Cloud, Precipitation, and Thermal Structure Characteristics of Typhoons in Eastern Pacific Based on CloudSat Satellite Data

HAN Ding¹, YAN Wei¹, YE Jing², and LIU Huifa¹

¹ Institute of Meteorology and Oceanography, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101

² Unit No. 95871 of PLA, Hengyang 421002

Abstract Using the CloudSat tropical cyclone crossing dataset from 2006 to 2010 and dividing the data into different evolutionary stages according to wind speed, the cloud, precipitation, and thermal structure characteristics of typhoons at different stages in the eastern Pacific are comprehensively analyzed. The results show that radar reflectivity has opposite distributions above and below 5 km in height, and the echo intensity and top height decrease along the radial direction. Large differences appear between the distribution of different types of clouds along the radial and vertical directions, and the vertical scale and occurrence probability of deep convective clouds are always large. The effective radius, distribution width parameter, and ice water content decrease but the particle number concentration increases as the height increases. Each ice cloud parameter and the rainfall rate decrease gradually along the radial direction. The rainfall rate at each stage in summer is generally larger than that in autumn, and along the latitudinal direction in each season, it varies within different stages. The rainfall rate in the inner core area follows a nearly exponential distribution and is sensitive to warmer sea surface temperatures, and its scatter plot with radar reflectivity converges in three regions. There is a hot core

收稿日期 2012-07-03, 2012-11-30 收修定稿

基金项目 国家自然科学基金资助项目 41076118、41005018

作者简介 韩丁, 男, 1986 年出生, 博士研究生, 主要从事云物理参数的反演与应用研究。E-mail: handing_ok@126.com

structure at 5–10 km in height in the inner core area; below it a wet core area exists, whereas an area with a larger anomaly in the relative humidity corresponds to the cirrus canopy at the top of the typhoon. Atmospheric stratification is convectively stable above 4.5 km in height at each stage; below that, it varies between stages, and the pseudo-equivalent potential temperature decreases along the radial direction.

Keywords CloudSat, Typhoon, Radar reflectivity, Rainfall rate, Thermal structure

1 引言

作为当前最强烈的自然灾害之一,热带气旋常产生于热带或副热带洋面,主要借助水汽的凝结和潜热释放来维持和发展。虽然目前对热带气旋路径和强度的预报以及定位精度在不断提高,但受洋面观测资料匮乏的限制,其准确度仍然不高。同时,资料的缺失也使得无法详细了解热带气旋的内部结构特征,对其研究也仅仅侧重于理论方面,而对实测结果的分析相对较少,导致相关模型的准确建立遇到较大难题(何会中等,2006)。

近年来随着卫星遥感技术的快速发展,利用卫星资料对热带气旋结构分析、中心定位和强度估计的研究逐渐增多。Rodgers et al. (1994)、Rodgers and Pierce (1995) 利用被动微波辐射计(SSM/I)资料分析了西北大西洋和西北太平洋热带气旋降水的时空分布特征。范蕙君等(1996)采用数字云图资料分析热带气旋强度与其内部云系结构的关系,提出了云系结构紧密度因子的概念以及利用云带旋转的圈数来描述热带气旋强度的估计方法。Kovacs and McCormick (2003) 利用 1994 年台风 Melissa 增强和减弱期间星载激光雷达实验(LITE)提供的高分辨率资料分析了眼区、眼墙和卷云罩内气溶胶、云和降水的分布规律。Cecil et al. (2002) 与 Cecil and Zipser (2002) 利用热带降雨卫星(TRMM)探测资料对飓风眼墙和雨带区内雷达反射率、冰散射和闪电特征进行定量描述和对比分析。Wong and Emanuel (2007) 利用云雷达和辐射计测量的从眼墙至外围区云顶高度和温度的径向梯度以及海面与云顶的温差,来估算热带气旋强度大小并取得较好效果,弥补了已有卫星资料强度估计算法的不足,具有较大的应用潜力。刘松涛等(2006, 2007) 利用先进微波辐射计(AMSR-E)探测资料,采用多元线性回归算法建立海洋—大气参数反演模型,并基于反演的海面温度、风速、大气可降水量和云柱含水量等信息初步分析了台风“麦莎”和“泰利”发生发展过程的基本特征等。除此之外,国内不少学者也利用 GPS、TRMM、FY-2 等卫星资料分

析了热带气旋云和降水的三维结构特征(丁金才等, 2004; 何会中等, 2006; 傅云飞等, 2007; 丁德平和李英, 2009), 以及讨论卫星资料同化对台风预报改进的影响(丁伟钰等, 2005; 刘瑞等, 2012) 等等。国内外众多学者的上述研究为卫星资料在热带气旋分析中的应用奠定了坚实基础。

2006 年全球第一颗可对云内部结构进行定量探测的卫星 CloudSat 发射升空,其上搭载有一部 94 GHz 的云廓线雷达(CPR), 不仅可探测从薄云到深厚云的垂直剖面特征,而且可反演剖面各高度层内云的微物理参量,为研究热带气旋的内部结构提供了全新的平台。同时,作为 A-Train 卫星编队中的一员,CPR 与其他卫星搭载的传感器实现多平台协同观测,可提供丰富的高精度宝贵数据。目前利用 CloudSat 相关资料对热带气旋的研究多由国外学者实施,诸如 Mitrescu et al. (2008) 和 Durden et al. (2009) 利用 A-Train 中 AMSR-E、CPR、中分辨率成像辐射光谱仪(MODIS)和云—气溶胶垂直偏振激光雷达(CALIOP)资料对热带气旋内部云的宏微观物理参数进行定量研究,并统计分析了眼墙和层状云降水区雷达反射率因子和冰云微物理参数随高度的变化特征; Luo et al. (2008) 利用 CloudSat 探测的云顶高度和云廓线信息,结合 MODIS 云顶温度建立了台风强度估计模型,与最优路径资料的比较表明该模型具有较高的估测精度; Matrosov (2011) 基于 CloudSat 探测资料研究分析了 2008 年两个登陆飓风系统 Gustav 和 Ike 内云顶高度、冰水路径和降雨率的分布,并将降雨率反演结果与地基天气雷达探测结果进行对比验证等等,而国内的相关研究才刚刚起步。但无论是国外还是国内学者,其众多分析仅针对某些个例而言,对于某一地区所有或达到某种等级热带气旋云、降水和热力结构的统计研究尚未开展。CloudSat 热带气旋过境数据集的发布为此提供了可能,该数据集融合了 A-Train 编队中多个传感器的探测结果、大气模式资料以及台风最优路径数据,集中分布在全球 6 个海洋地区,对深入研究各地区热带气旋的结构特征意义重大。截至目前,国内外的较多

研究主要针对大西洋和西太平洋等台风高发区，而对于东太平洋地区台风结构特征和演变规律的了解相对较少。因此，本文将利用 CloudSat 热带气旋过境数据集 2006~2010 年距离台风中心 500 km 内的资料，以及美国信息系统（Unisys）官方下载的台风数据，定量分析东太平洋地区（0°~40°N、180°W~80°W）台风在不同演变阶段内云、降水和热力结构的分布规律，对于该地区台风的结构分析、强度估计和路径预报具有重要参考意义。

2 数据和方法

2.1 数据描述

CloudSat 热带气旋过境数据集由美国海军研究实验室（NRL）和 CloudSat 数据处理中心（DPC）联合发布，截至 2010 年底共收集到距离气旋中心 1000 km 内的 6348 次 CloudSat 过境记录，其中 50 km 内有 306 次，主要分布在大西洋、东太平洋、西太平洋、太平洋中心、印度洋和南半球 6 个海洋地区。该数据集融合了 A-Train 编队中 CPR、CALIOP、MODIS 和 AMSR-E 的探测资料，以及美国海军全球大气预报模式（NoGAPS）资料和全球各主要气象机构发布的热带气旋路径数据，具体描述如表 1。其中，欧洲中期天气预报中心（ECMWF）提供的温度、气压、比湿等辅助数据主要应用在 CloudSat 的云分类、云相态识别、降水强度和微物理参数反演等方面，本文主要利用该辅助数据计算相对湿度和假相当位温大小，进而分析台风的热力结构特征。

2006~2010 年发生在东太平洋地区的热带气旋共有 100 个，其中 CloudSat 过境的有 84 个共计 1140 轨数据，包括 31 个台风、39 个热带风暴和 14

表 1 CloudSat 热带气旋过境数据集的主要描述

Table 1 The main description of tropical cyclone crossing dataset from CloudSat

数据类型		产品描述
MODIS		MOD06 中的亮温、云顶高度及气压等
AMSR-E		亮温、风速、SST、云水含量、大气水汽含量及降雨率等
CPR	2B-CWC-RO	冰云相关微物理参数
	2B-GEOPROF	高度、雷达反射率、云盖、大气衰减等
	2B-CLDCLASS	常见八种典型云的分类结果
	ECMWF-AUX	ECMWF 提供的温度、气压、比湿等辅助数据
2B-GEOPROF-LIDAR		CPR 与 CALIOP 联合探测多达 5 层云的云边界高度和云量信息
2C-PRECIP-COLUMN		降水强度、底层和顶层云顶高度、凝结降水以及凝结层高度等
CALIOP		532 nm 总衰减后向散射数据
NoGAPS		温度、气压、亮温、风速、海面温度等
BestTrackData		经纬度、最大风速、气压、海面温度及风切变等

个热带低压。为定量分析台风在整个生命过程的不同演变阶段内云、降水和热力结构的演变规律，从 Unisys 台风数据库中下载各台风完整而详细的路径资料（CloudSat 数据集中该资料缺失严重），根据台风整个生命过程内的最大可维持风速、借助萨菲尔-辛普森等级法将其划分为 1~5 个等级，若台风在消亡后再次增强，则以消亡时的最低瞬时可维持风速为界，将其分为前后两个独立台风分别进行研究。由于台风直径通常为 600~1000 km，最大可达 2000 km，最小仅有 100 km 左右（朱乾根等，2007），因此这里取距离中心 500 km 内的台风资料，共得到 31 个台风的 251 轨、179747 条廓线数据，其强度分布如图 1a 所示，图 1b 为 Unisys 台风数据

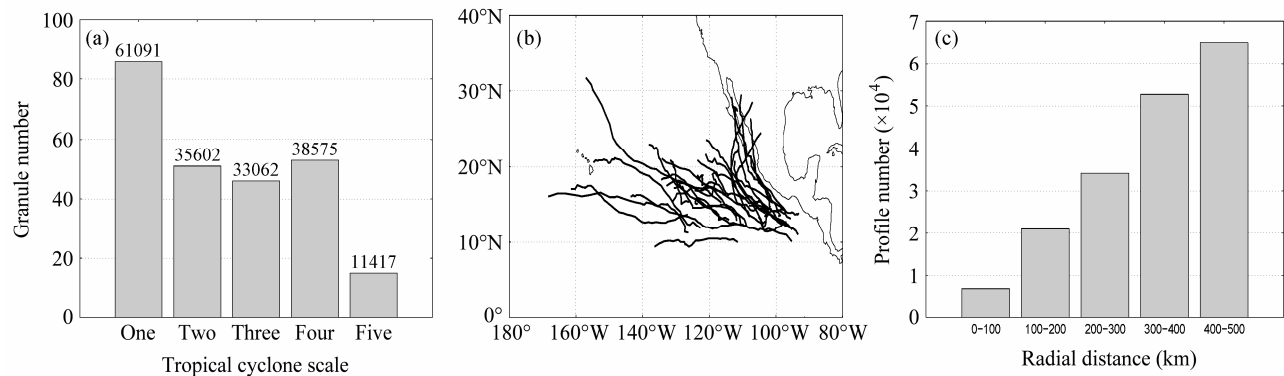


图 1 东太平洋地区所选取时次 (a) 台风强度、(b) 最优路径和 (c) CloudSat 探测廓线的分布特征。图 (a) 中各柱条上的数字代表 CloudSat 廓线数
Fig. 1 The distribution characteristics of collocated (a) tropical cyclone intensities, (b) typhoon best tracks, and (c) CloudSat detecting profiles in the eastern Pacific. The number on each bar in (a) stands for the number of CloudSat profiles

库中下载的 31 个台风的最优路径信息, 图 1c 为不同距离环内 CloudSat 探测廓线的数量分布。从图 1 可知, 各强度、各距离环内都有足够数量的廓线数据来分析台风结构的变化, 从而保证了论文统计结果的有效性和代表性。表 2 为 31 个台风的详细信息, 其中风速和气压为各台风整个生命过程中的最大风速及对应中心气压, 最小距离为 CloudSat 探测轨迹距离台风中心的最近距离。

表 2 东太平洋地区 CloudSat 过境台风的详细信息
Table 2 Detailed information of typhoons overpassed by CloudSat in the eastern Pacific

序号	名称	气压 (hPa)	风速 (kn)	等级	最小距离 (km)
1	ANDRES	988	65	1	23
2	BORIS	988	65	1	80
3	BUD	953	110	3	14
4	CARLOS	972	90	2	163
5	CARLOTTA	981	75	1	22
6	CELIA	926	140	5	74
7	COSME	987	65	1	40
8	DANIEL	933	130	4	37
9	DARBY	960	105	3	111
10	ELIDA	970	90	2	17
11	FAUSTO	975	85	2	38
12	FELICIA	937	120	4	53
13	FLOSSIE	946	120	4	34
14	FRANK	978	80	1	59
15	GENEVIEVE	987	65	1	4
16	GUILLERMO	954	110	3	86
17	HECTOR	970	90	2	14
18	HENRIETTE	972	75	1	2
19	HERNAN	956	105	3	61
20	ILEANA	955	105	3	6
21	IVO	980	70	1	234
22	JIMENA	931	135	4	72
23	JOHN	948	115	4	14
24	KRISTY	987	65	1	81
25	LANE	952	110	3	167
26	LINDA	985	75	1	28
27	MARIE	984	70	1	96
28	NORBERT	948	115	4	38
29	PAUL	967	95	2	46
30	RICK	906	155	5	78
31	SERGIO	965	95	2	10

2.2 分析方法

在分析东太平洋台风的结构特征时, 根据瞬时风速大小将其生命过程分为发展、成熟和消亡三个阶段, 即以 CloudSat 过境时刻瞬时风速达到台风整个生命过程最大风速 80%之前的时间段定义为发

展阶段, 瞬时风速减小至最大风速 80%以后的时间段定义为消亡阶段, 中间过程定义为成熟阶段。这种非常规的分类方法会导致一个探测时次内的较弱台风被归类为较强台风, 原因在于其在随后的演变过程中不断增强。采用此分类方法的目的是为了研究每个潜在增强或减弱的台风在其生命过程的不同阶段内结构特征的演变规律。在分析台风的剖面结构时, X 轴代表径向距离, 间隔为 10 km, Y 轴代表高度, 间隔取为 CloudSat 数据的垂直分辨率 0.24 km。表 3 为不同阶段、不同径向距离环内 CloudSat 过境台风数和相应轨道数组成的数据对。由表可知, 即使对于 0~100 km 的内核区而言, 其在各演变阶段内仍有较多的 CloudSat 过境台风和探测轨道, 沿径向各阶段内的相应数量也在不断增加, 从而保证论文的研究成果具有较高的代表性与可信度。

表 3 东太平洋地区 CloudSat 过境台风数和轨道数在不同阶段、不同距离环内的分布
Table 3 Number distribution of typhoons and granules overpassed by CloudSat at different stages in different radial rings in the eastern Pacific

阶段	距离环 (km)					
	0~100	100~200	200~300	300~400	400~500	0~500
发展	(16, 24)	(24, 45)	(29, 72)	(31, 101)	(31, 120)	(31, 120)
成熟	(6, 8)	(14, 17)	(19, 28)	(22, 36)	(22, 42)	(22, 42)
消亡	(14, 18)	(25, 38)	(26, 47)	(27, 65)	(29, 87)	(29, 87)

注: 括号内左侧数字代表台风数, 右侧数字代表 CloudSat 轨道数。

本研究主要利用 CloudSat 热带气旋过境资料分析东太平洋台风的雷达反射率、云发生概率、冰云参数和降雨率等云和降水结构特征, 以及温度、比湿、相对湿度和假相当位温等热力结构的分布规律。其中, 前三个参量可从 CloudSat 数据产品中直接读取, 降雨率信息 AMSR-E 和 CloudSat 都可提供, 但考虑到数据缺失的原因, 本研究取二者反演结果进行互补, 若同时出现则取较大值。温度和比湿读自辅助数据 ECMWF-AUX, 相对湿度和假相当位温则通过二者计算得到。其中, 在计算相对湿度时, 饱和水汽压的计算采用 Tetens 经验公式。

3 结构特征分析

3.1 云和降水结构

3.1.1 雷达反射率

雷达反射率的大小反映了雷达所接收到云滴或雨滴粒子后向散射能力的强弱, 其分布特征表明台风系统中不同相态、不同粒子大小云的分布规

律。CPR 的标称波长为 3.2 mm, 对于空气分子、气溶胶、沙尘、云滴和小雨滴而言, 适用于 Rayleigh 散射理论; 对于大的雨滴、雪片和冰雹等粒子而言, 适用于 Mie 散射理论。图 2 代表东太平洋地区不同阶段、不同距离环内雷达反射率发生概率的剖面分布。由图 2 可知, 各子图中雷达反射率都以 5 km 高度为拐点呈现截然相反的分布特点, 即 5 km 以下反射率随高度逐渐增大, 5 km 以上则逐渐减小, 尤其在 10 km 以上的减小速度更快。而发生概率的分布各不相同: 发展阶段 0~100 km 的内核区 3~8 km 高度内概率较大, 200~300 km 的雨带区和 400~500 km 的外围区分布相似, 即 5 km 以下和 10 km 以上的概率较大; 成熟阶段内核区 5~10 km

的概率较大, 雨带区和外围区仅在 10 km 以上有较大概率; 消亡阶段各距离环内的概率较大值集中在 5 km 以下, 且雨带区尤为明显, 此时反射率小于 5 dBZ 的回波主要发生在 2 km 以下, 而外围区 10 km 以上较弱回波相对较大的发生概率主要由于台风逐渐走向衰亡、内核区和雨带区的云滴粒子向外扩散所致。5 km 以下近地面附近雷达反射率随高度降低而减小的速度可表明台风内部对流强度的大小 (Durdin et al., 2009), 而 5 km 以上反射率较大的发生概率表明有大量的过冷水滴或冰晶粒子存在 (Matrosov, 2011)。内核区各阶段回波强度大于 0 dBZ 的概率值始终较大, 说明有较强的对流运动产生。雨带区和外围区上下分层特征明显, 表明各种云滴粒子和降

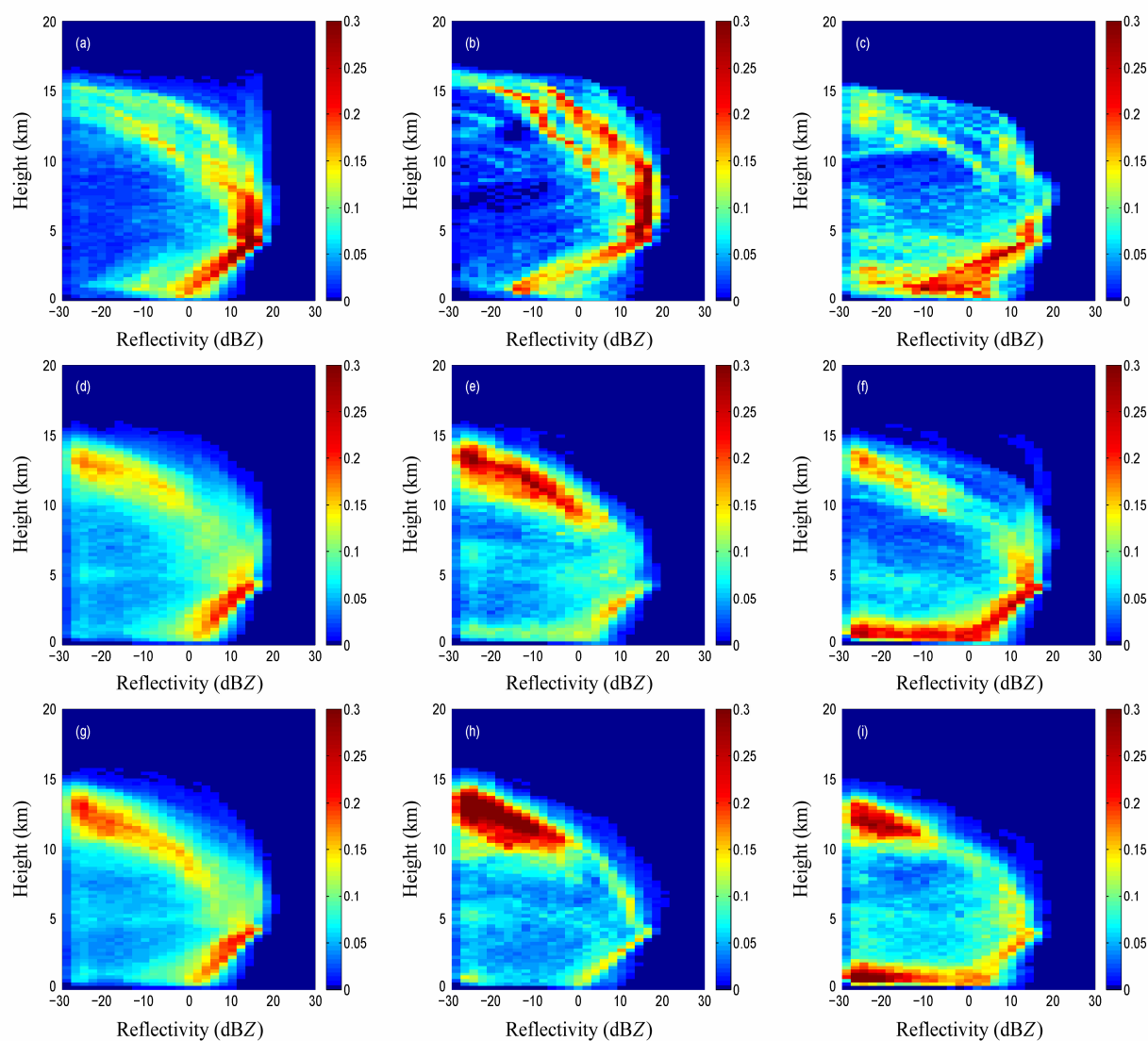


图 2 东太平洋地区不同阶段、不同距离环内雷达反射率发生概率的剖面分布: (a、d、g) 发展阶段; (b、e、h) 成熟阶段; (c、f、i) 消亡阶段。
(a、b、c) 0~100 km; (d、e、f) 200~300 km; (g、h、i) 400~500 km

Fig. 2 The profile distribution of occurrence probability for radar reflectivity at different stages in different radial rings in the eastern Pacific: (a, d, g) Developing stage; (b, e, h) mature stage; (c, f, i) decaying stage. (a, b, c) 0~100 km; (d, e, f) 200~300 km; (g, h, i) 400~500 km

水的存在。此外,发展阶段各距离环内较大的回波强度和发生概率表明台风正在为进一步的增强积蓄能量,而消亡阶段回波强度和发生概率的减小则表明台风逐渐走向衰亡、内部云滴粒子不断扩散减少。

图 3 为雷达反射率沿径向的剖面分布。由图可知,各阶段凝结层高度沿径向几乎不变,始终保持在 5 km 高度附近,而雷达回波在该高度处的亮带特征也表明 0°C 凝结层的存在。凝结降水高度在发展阶段沿径向略有抬升,但成熟和消亡阶段不断降低。回波强度和回波顶高在各阶段沿径向逐渐减小,且成熟阶段要大于发展和消亡阶段。此外,发展和成熟阶段在距离中心 150 km 范围内的 5~10 km 高度回波强度明显偏大,而消亡阶段在 130~230 km 范围内的 7~10 km 高度回波强度较大,表明对流运动和云滴粒子向外扩散,台风走向衰亡。

3.1.2 各类云发生概率

CloudSat 利用云的水平和垂直尺度、云底高、是否含有降水、雷达反射率最大值及对应温度等信息将云分为卷云(Ci)、高层云(As)、高积云(Ac)、层云(St)、层积云(Sc)、积云(Cu)、雨层云(Ns)和深对流云(Deep Convective Clouds)等 8 种基本类型。为了分析台风内部各类云的分布特点,经统计得到图 4 所示不同阶段、不同距离环内各类云发生概率的剖面分布。其中,Deep 代表深对流云,层云由于出现次数极少,未作统计。从图中可以看出,深对流云始终伴随在台风各个演变阶段的每个距离环内,其垂直伸展范围始终最大而发生概率也较高,且内核区尤为明显,向下延伸至离地 0.5 km 以内,向上则伸展至 17 km 附近,发生概率达到 30% 左右,表明台风内部强烈的对流运动主要发生在深对流云内,而沿径向其发生概率和垂直尺度都在不断减小。卷云主要发生在 8~15 km 高度内,其发生概率和垂直尺度沿径向的变化不大。高层云的垂直范围仅次于深对流云,在 7 km 以上发生概率较大。高积云、层积云和积云在各阶段不同距离环内的分布比较均匀,其中层积云的垂直尺度最小。雨层云发生概率虽无较大变化,但其垂直伸展范围在内核区较小,雨带区较大。此外,消亡阶段云层的发生概率和垂直尺度总体上都小于发展和成熟阶段,表明台风云体不断消散、逐渐衰亡。

3.1.3 冰云微物理参数

CloudSat 提供的冰云参数包括冰水含量、有效粒子半径、粒子数浓度以及分布宽度参数等,主要

通过假设粒子谱服从对数正态分布,借助参数的先验信息和 CloudSat 雷达反射率数据,并利用前向物理模式反演得到,主要用于研究冰云内部的微观物理特征(Benedetti et al., 2003)。经过统计东太平洋台风成熟阶段各距离环内冰云参数的分布规律,得到图 5 所示结果。由图可知,冰水含量的概率较大值区主要位于 5~7 km 以及 10~15 km 高度内,且沿径向上层的概率不断增大,但冰水含量的最大值却由 1.3 g/m³ 减小至 0.4 g/m³。有效粒子半径和分布宽度参数都随高度减小,沿径向概率较大值区逐渐向上抬升,说明在距离中心较远处的上层区存在较多小粒子,而大粒子相对较少且主要分布在下层区。冰粒子数浓度随高度逐渐增大,沿径向其最大值由 700 L⁻¹ 减小至 300 L⁻¹,而概率分布沿径向逐渐出现两个较大值区,且上层区概率不断增大,同时其正好对应有效粒子半径的概率较大值区,再次说明有较多的小粒子在台风外围的上层区产生。内核区小粒子在眼墙内形成并抬升,经过二次成核后生成冰晶,并在距离中心较远的区域下沉和聚集后最终形成层状降水,而各向同性小粒子在眼墙附近的冻结也会生成小冰晶粒子。同时,眼墙内上升气流中大粒子拥有相对较大的沉降速度,因此不可能被抬升至较高的高度。上述过程共同导致冰水含量和有效粒子半径随高度不断减小,而在远离眼墙的区域,下沉的冰晶粒子首先经过水汽的凝结增长,当下降至较低、较暖高度处再经过聚集增长,从而产生半径较大而数量较少的冰晶粒子,导致粒子数浓度随高度降低而不断减小。

3.1.4 降雨率

图 6 所示为各阶段降雨率沿径向和季节的变化规律,从左至右各柱条依次代表发展、成熟和消亡阶段。由图 6a 可知,各阶段降雨率沿径向不断减小,Rodgers et al.(1994)与 Rodgers and Pierce(1995)利用 SSM/I 资料对西北大西洋和西北太平洋热带气旋降水的统计分析也得到相同的结论,但其未分析台风各演变阶段的分布特征。距离中心 200 km 范围内成熟阶段的降雨率最大,尤其在内核区高达 7.3 mm/h。沿径向,发展阶段的降雨率逐渐大于成熟和消亡阶段。消亡阶段降雨率在整个区域内始终较小。图 6b 中发展和成熟阶段的降雨率都在秋季的 10 月和 11 月较小,而在夏季的 8 月和 9 月较大。整个夏季发展阶段的降雨率变化较小而成熟阶段却不断增大,消亡阶段降雨率随月份呈增大趋势,

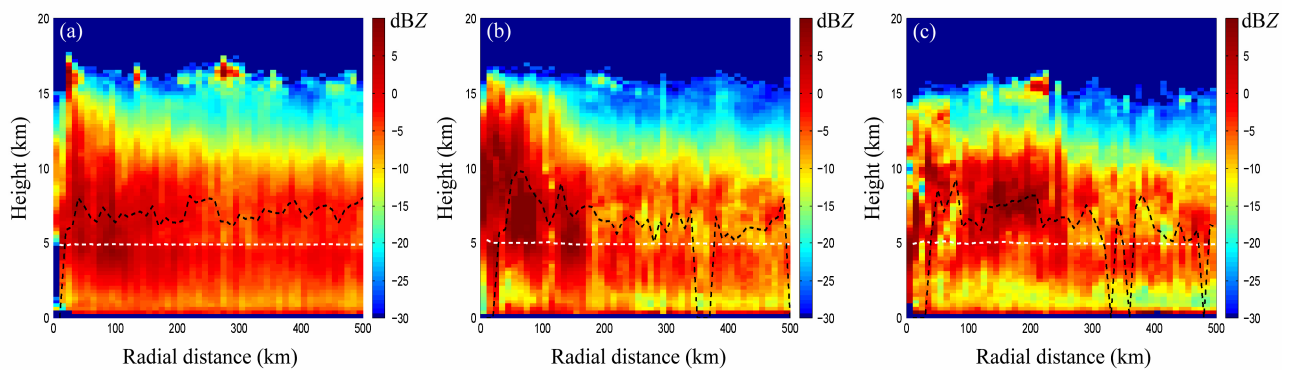


图 3 东太平洋地区 (a) 发展、(b) 成熟、(c) 消亡阶段雷达反射率 (单位: dBZ) 在垂直剖面内沿径向的分布特征。白色和黑色虚线分别代表凝結层高度和凝結降水高度

Fig. 3 The radial distribution of radar reflectivity (unit: dBZ) within vertical profile at (a) developing, (b) mature, and (c) decaying stages in the eastern Pacific. White and black dashed lines stand for freezing level height and frozen precipitation height, respectively

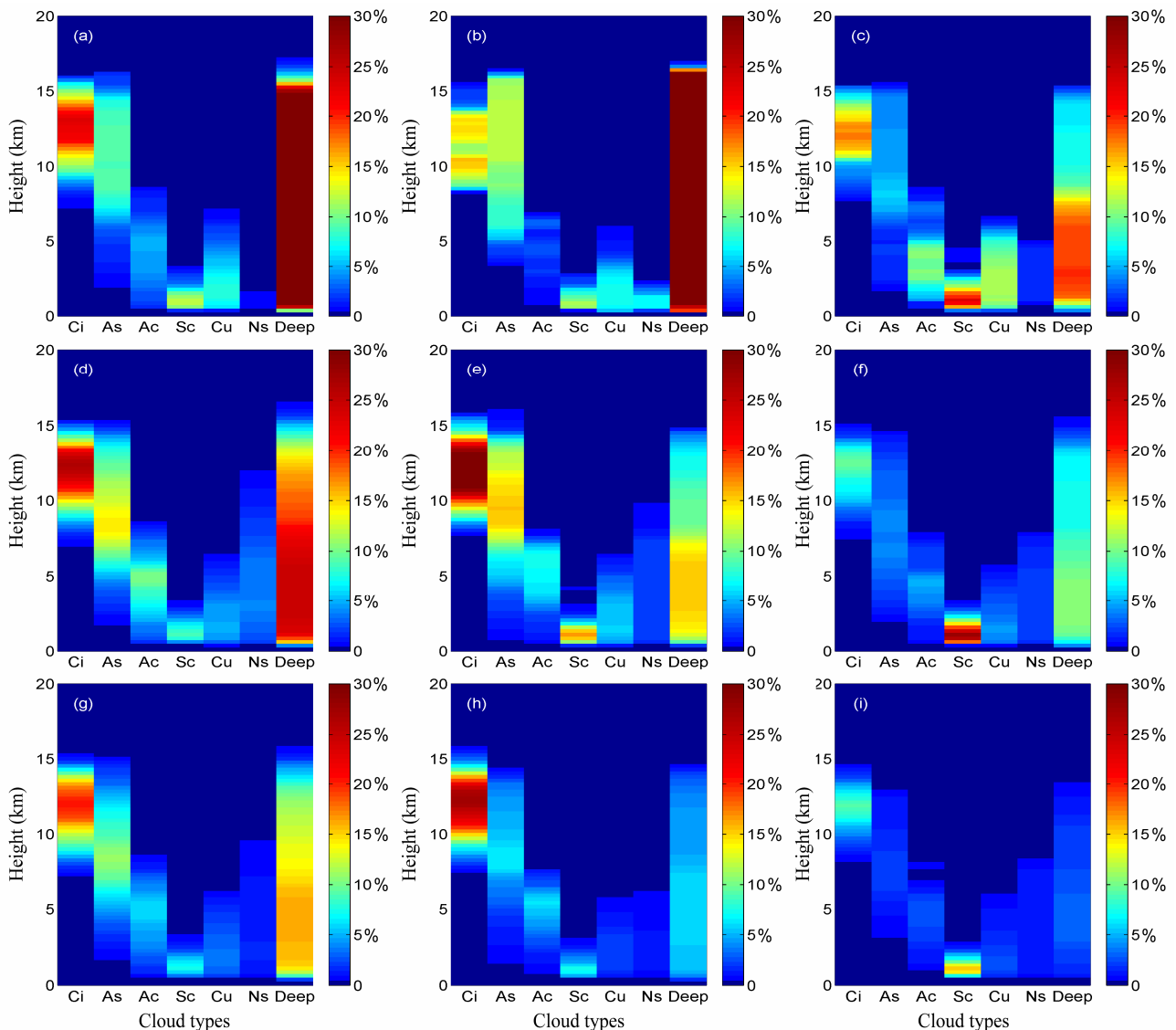


图 4 同图 2, 但为各类云的发生概率

Fig. 4 Same as Fig. 2, but for the occurrence probabilities from different types of clouds: Ci: cirrus; As: altostratus; Ac: altocumulus; Sc: stratocumulus; Cu: cumulus; Ns: nimbostratus; Deep: deep convective clouds

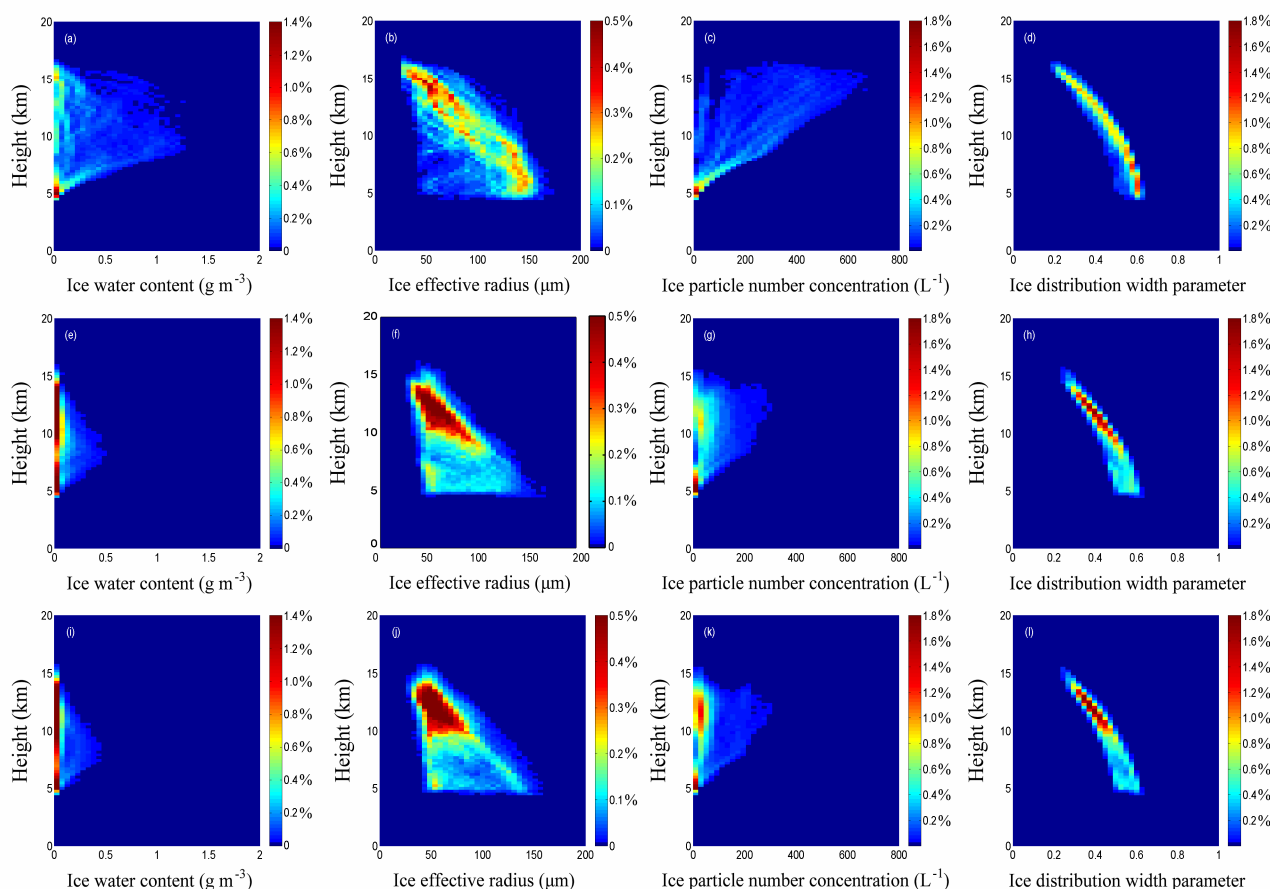


图5 东太平洋地区成熟阶段不同距离环内冰云参数的概率分布: (a、e、i) 冰水含量; (b、f、j) 冰有效粒子半径; (c、g、k) 冰粒子数浓度; (d、h、l) 冰分布宽度参数。(a、b、c、d) 0~100 km; (e、f、g、h) 200~300 km; (i、j、k、l) 400~500 km

Fig. 5 The probability distribution of ice cloud parameters in different radial rings at mature stage in the eastern Pacific: (a, e, i) Ice water content; (b, f, j) ice effective radius; (c, g, k) ice particle number concentration; (d, h, l) ice distribution width parameter; (a, b, c, d) 0–100 km; (e, f, g, h) 200–300 km; (i, j, k, l) 400–500 km

在 10 月份最大达到 2.8 mm/h, 且秋季大于夏季。

图 7 代表各阶段不同月份内降雨率沿纬向的变化。图 7a 说明发展阶段的降雨率在 15°N~25°N 的纬度带内较大, 且整体上 6~9 月的降雨率要大于 10、11 月。在 8、9 月, 成熟阶段的降雨率明显大于发展和消亡阶段, 且在 15°N~25°N 内始终较大, 而 10、11 月降雨仅发生在 20°N 以内。消亡阶段的台风降水, 25°N 以内热带地区主要发生在 10、11 月, 25°N 以上副热带地区则集中在 8、9 月。此外, 8、9 月在各阶段的不同纬度带内都有较大的降雨率, 6、7 月降雨率随台风演变逐渐减小, 10、11 月降雨率在发展和消亡阶段较大且集中发生在 10°N~25°N 以内。

Rodgers and Pierce (1995) 的研究表明热带气旋最大潜在降雨率受海面温度 (SST) 的支配, 为分析 SST 对东太平洋台风降雨率的影响程度, 经统计得到图 8a 所示的内核区降雨率与 SST 的散点分布图, 其中垂直线表示 SST 为 26°C。从图 8a 可知,

内核区降雨率从 23°C 以下的不足 2 mm/h 随 SST 的升高近似以指数形式逐渐增长至 29°C 处的约 23 mm/h, 且其对暖的 SST 变化更为敏感, 但当 SST 大于 29°C 时降雨率受 SST 的影响逐渐减弱, 可能是随着台风强度的不断增强, 不稳定内核区的加热导致台风系统变得更加稳定的缘故。图 8b 为降雨率与雷达反射率的散点分布图, 其中降雨率为 CloudSat 卫星基于路径积分衰减算法 (PIA) 的反演结果。相对于热带地区的强降水而言其值偏小, 但中纬地区由于 CloudSat 较高的灵敏度使其可检测到更多弱降水的存在 (Haynes et al., 2009), 而雷达反射率参照天气雷达的 Z-R 关系 ($Z = AR^b$, A 、 b 为系数, Z 和 R 为雷达反射率和降雨率), 取 1~3 km 高度内的平均值 (Jorgensen and Willis, 1982; 袁晓清等, 2010)。从图 8b 可知, CloudSat 探测的台风内核区降雨率主要集中在三个区域: 0~2 mm/h、3~4 mm/h、6~9 mm/h, 对应雷达反射率位于 -30~

10 dBZ 之间, 其中较大降雨率对应的反射率集中在 $-15 \sim 0$ dBZ 内。很显然, 此时的雷达反射率与降雨率不满足天气雷达的 $Z-R$ 函数关系, 主要原因在于相对于天气雷达而言, 毫米波雷达的波长更短, 探测降水粒子的回波强度要远小于天气雷达, 同时其主要用来探测云以及中等强度降水和弱降水的物理特征, 对于降水强度非常大的强降水反演结果偏

低。上述分析主要为了说明天气雷达中的 $Z-R$ 关系并不适用于毫米波雷达, 无法利用该关系式、基于毫米波雷达反射率来估测台风内部的降水特征。

3.2 热力结构

热带气旋对流层中上部的暖核结构是其在发展演变过程中眼区的下沉气流引起绝热增暖并在对流旺盛区释放潜热形成的, 研究表明该暖核结构

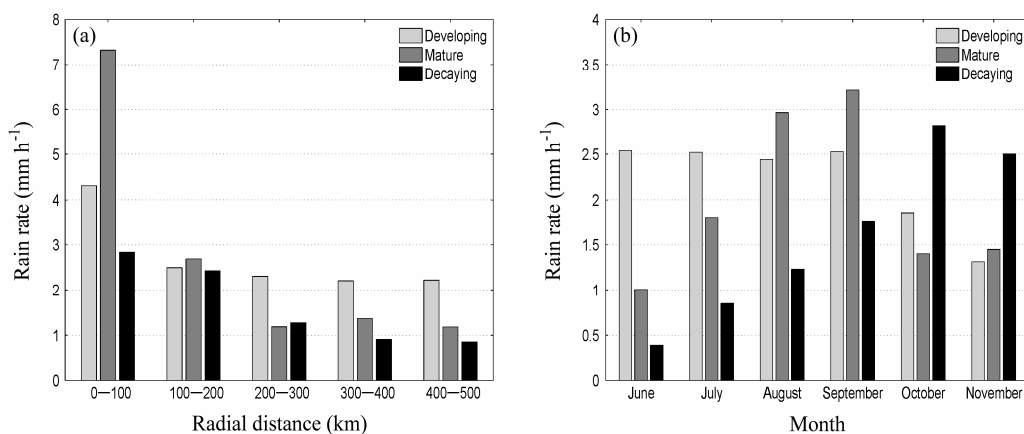


图6 东太平洋地区不同阶段台风降雨率沿 (a) 径向和 (b) 季节的变化规律

Fig. 6 (a) Radial distribution and (b) monthly variation of rainfall rates for typhoons at different stages in the eastern Pacific

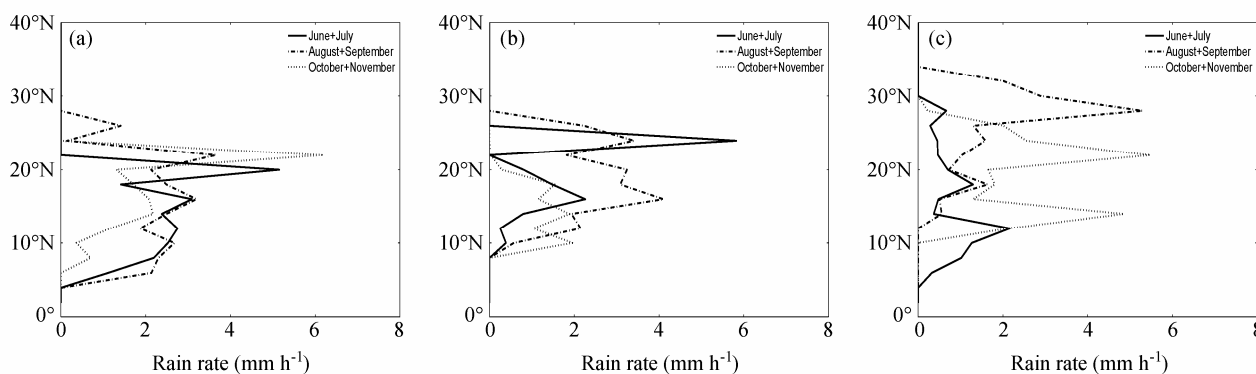


图7 东太平洋地区不同阶段、不同季节内台风降雨率随纬度的变化规律: (a) 发展阶段; (b) 成熟阶段; (c) 消亡阶段

Fig. 7 Variation of rainfall rates of typhoons along latitudinal direction at different stages in different seasons in the eastern Pacific: (a) Developing stage; (b) mature stage; (c) decaying stage

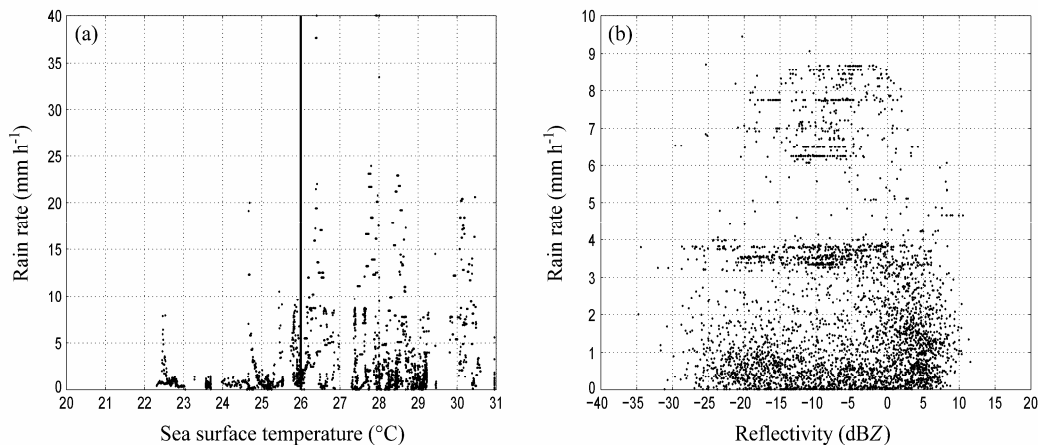


图8 东太平洋地区台风内核区的降雨率与 (a) SST 和 (b) 雷达反射率之间的关系

Fig. 8 The relationship (a) between rainfall rates and SSTs and (b) between rainfall rates and reflectivity of typhoons in inner-core region in the eastern Pacific

与热带气旋中心表面气压场和外围风力有关 (Kidder et al., 1978; Velden et al., 1991)。目前对于热带气旋暖核结构的研究主要借助微波探测器资料、NCEP/NCAR 再分析资料甚至掩星和探空仪资料等, 如邱红等 (2007) 利用 NOAA16/17 卫星的 AMSU 数据对 2003 年发生在西北太平洋多个热带气旋个例的热力结构特征进行分析, 俞玮 (2010) 借助逐日四次的 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ NCEP/NCAR 再分析资料分析了“海棠”台风发展过程中暖核的变化规律, 并剖析了水汽输送、散度、涡度、动能等动力和热力因子对暖核结构的影响; 丁金才等 (2011) 通过气象、电离层及气候卫星探测系统 (COSMIC) 的实测资料对西北太平洋 17 个台风的热力结构特征进行合成分析; 舒守娟等 (2011) 采用高垂直分辨率的 GPS 下投式探空仪资料对比研究了西北太平洋强台风“海棠”的动力和热力结构差异, 等等。CloudSat 卫星由于具有高时空分辨率和全天候探测的优势, 可“切开”云层表面研究其内部详细的宏微观结构特征, 而其辅助数据 ECMWF-AUX 中融合了精细的温度、气压和比湿信息, 借助相关计算可进一步得到相对湿度和假相当位温。因此, 可利用 CloudSat 卫星提供的高精度数据资料分析热带气旋的热力结构特征。

3.2.1 温度

图 9 为台风各阶段温度距平的剖面分布, 其中各格点的温度距平定义为该格点温度与其所处高度层整层的平均温度之差。图中各阶段内核区的 5~10 km 高度存在温度距平大于 0°C 的暖心区, 且随台风的演变该距平值逐渐增大, 消亡阶段达到 2.5°C 以上。暖心作为台风的主要热力结构之一, 研究表明其在台风眼上空的 300~200 hPa 附近最强, 眼区内外温差最大可达 10°C 。由图 9 可知, 各阶段除内核区对流层上部出现暖心区外, 在雨带区同样出现正温度距平的暖心区。其中, 发展阶段在 100~300 km 距离环内 6~12 km 高度出现弱暖心区, 距平值约为 0.5°C ; 成熟阶段内核区的暖心区延伸至 150 km 处, 距平值达到 0.9°C , 而其正下方也存在一个较弱的暖心区; 消亡阶段暖心区的水平范围较小而垂直尺度较大, 且整体向上抬升并延伸至台风顶端附近。内核区之外暖心区的存在说明有较多液态粒子凝结并释放潜热, 而暖心区下方的冷心区可能由于粒子在下落过程中蒸发吸热所致。

3.2.2 比湿

图 10 为基于相似的统计方法得到的比湿距平剖

面分布。由图可知, 各阶段湿心区集中在 7 km 以下, 且对比图 9 和图 10 可以发现, 湿心区恰好位于暖心区下方, 而湿心区辐合聚集的大量水汽通过台风内部的对流作用抬升至对流层中上部, 随后凝结释放潜热形成暖心区。发展阶段内核区 3 km 以下高度存在比湿距平约为 0.8 g/kg 的弱湿心区, 而在距离中心 80~180 km 处的 4~7 km 高度存在距平约为 0.5 g/kg 的更弱湿心区。成熟阶段湿心区的范围和强度明显大于发展和消亡阶段, 水平延伸至 180 km 附近, 且以 100 km 为界分为两个区域, 内核区又以 5 km 高度为界分为上下两个湿心区, 底层的比湿距平较大, 可达 1.6 g/kg , 上层为弱湿心区, 距平值约为 0.9 g/kg 。消亡阶段内核区 7~9 km 高度存在距平小于 0 的干心区, 该区域也恰好对应图 9c 中的冷心区, 其余湿心区集中在 3 km 以下且尺度明显缩小, 表明台风走向衰亡, 内部云滴粒子含量减少、对流运动减弱。

3.2.3 相对湿度

相对湿度大小可综合反映台风内部水汽和温度的分布特点, 是识别云和降水生成的重要物理量, 利用其出入云层时发生突变的物理特性可进行云边界高度的判定 (Wang and Rossow, 1995)。经统计得到图 11 所示的相对湿度剖面分布特征。从图中可以看出, 各阶段内核区 10 km 以上都存在相对湿度距平的较大值区, 对应于对流层上部的卷云罩, 而卷云罩下方相对湿度距平远小于 0 的区域则对应眼区内的晴空少云区, 同时各阶段相对湿度距平的较大值区与图 10 中的湿心区也有较好对应。图 11a 中的距平较大值区集中在雨带区的 4~8 km 高度附近, 沿径向逐渐缩小, 而外围区主要为距平小于 0 的区域, 说明由中心向外台风逐渐开始发展。图 11b 中距离台风中心 280 km 范围内出现上下两个距平较大值区, 上层对应浓厚的卷云罩, 下层从近地面延伸至 8 km 高度附近, 两个较大值区的出现表明台风内部有深厚云层存在, 对流发展旺盛, 台风已演变至最鼎盛时期。图 11c 距离中心 250 km 范围内存在大片的相对湿度低值区, 而 250 km 以外 5 km 以上高度存在较多相对湿度高值区, 说明内核区和雨带区的云层不断向外围区辐散, 台风逐渐消亡。

3.2.4 假相当位温

假相当位温垂直递减率的大小可用来判定大气的对流稳定性, 当其大于 0 时为对流性稳定层结, 小于 0 时为对流性不稳定层结, 否则为中性层结 (盛裴轩等, 2003)。图 12 所示为台风各阶段不同距离

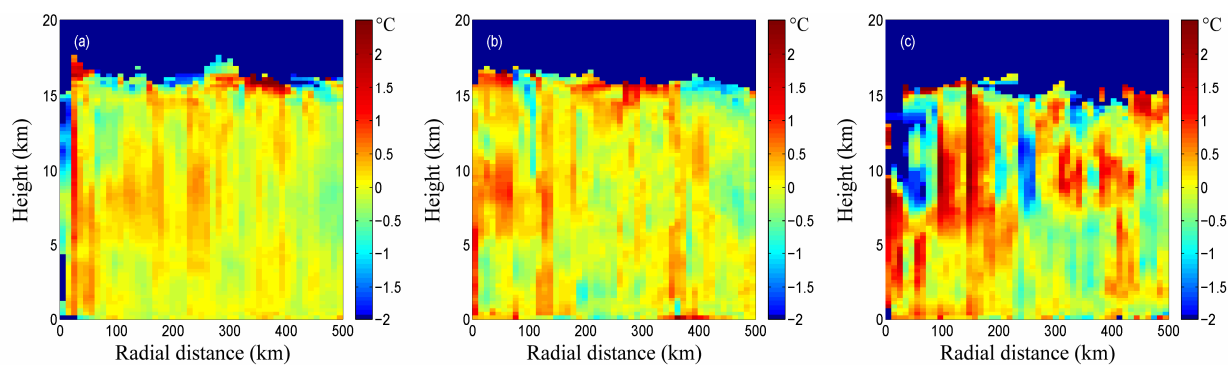


图 9 东太平洋地区台风在 (a) 发展、(b) 成熟和 (c) 消亡阶段温度距平 (单位: $^{\circ}\text{C}$) 的剖面分布

Fig. 9 The profile distribution of temperature anomalies (unit: $^{\circ}\text{C}$) of typhoons at (a) developing, (b) mature, and (c) decaying stages in the eastern Pacific

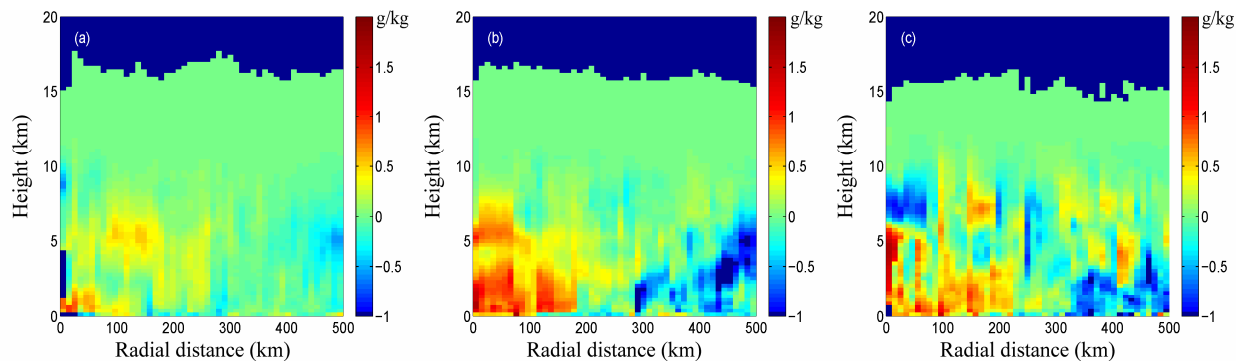


图 10 同图 9, 但为比湿距平 (单位: g/kg)

Fig. 10 Same as Fig.9, but for specific humidity anomalies (unit: g/kg)

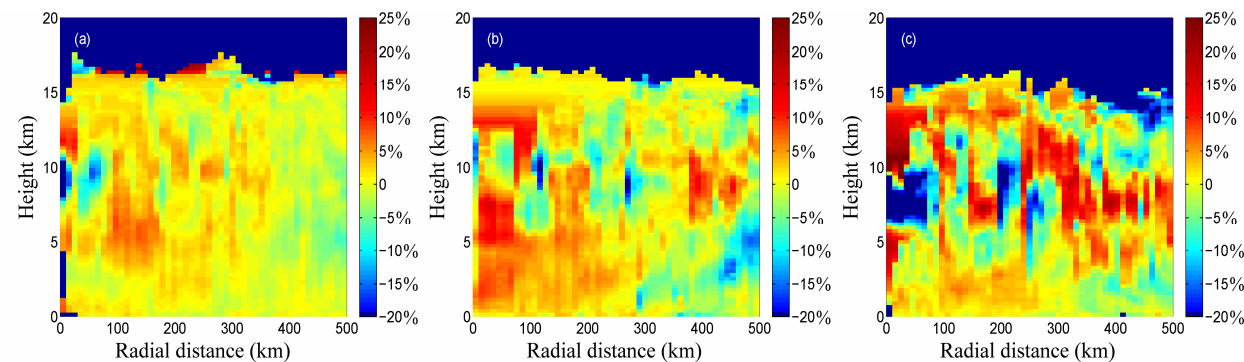


图 11 同图 9, 但为相对湿度距平

Fig. 11 Same as Fig.9, but for relative humidity anomalies

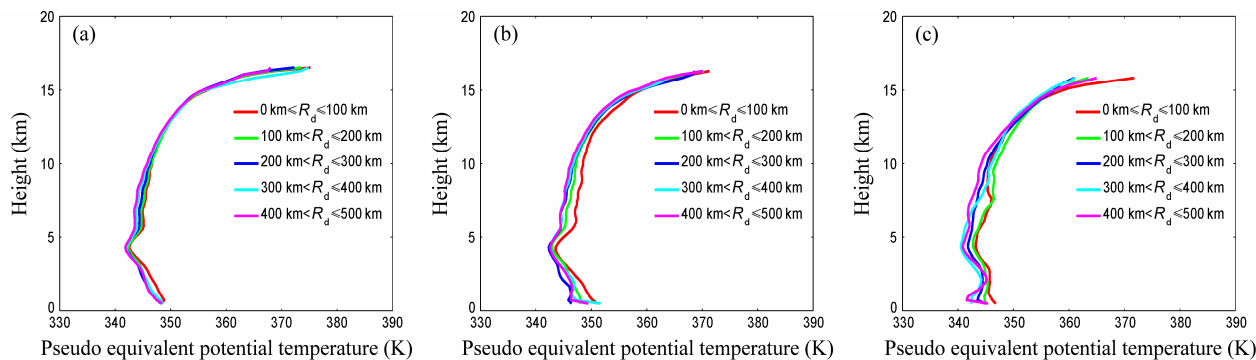


图 12 同图 9, 但为各径向距离环内假相当位温的分布廓线。 R_d 代表台风中心与 CloudSat 探测点的径向距离

Fig. 12 Same as Fig.9, but for distributive profiles of pseudo-equivalent potential temperatures of typhoons in each radial ring. R_d stands for the radial distance between the center of typhoon and the detecting site of CloudSat

环内假相当位温随高度的变化曲线。图中各阶段在 4.5 km 以上假相当位温都随高度不断增大, 即其垂直递减率大于 0, 表明台风内部为对流性稳定层结。在 4.5 km 以下, 发展阶段各距离环内假相当位温的垂直递减率都小于 0, 表明台风内部为对流性不稳定层结, 借助底层的抬升作用将其转化为真正的不稳定层结, 进而形成强烈的对流运动, 并伴随有深厚的对流云产生; 成熟阶段的分布较为复杂, 距离中心 200 km 内为不稳定层结, 200~300 km 以及 400~500 km 距离环内 2~4.5 km 高度及 1 km 以下为不稳定层结, 1~2 km 高度为中性层结, 而 300~400 km 距离环内除 1.5~2 km 为稳定层结外, 其他各高度层都为不稳定层结; 消亡阶段距离中心 300 km 内的 3.5~4.5 km 高度为不稳定层结, 2~3.5 km 为中性层结, 2 km 以下存在部分稳定层结但 1 km 以下都为不稳定层结, 300 km 以外的 2.5~4.5 km 以及 1 km 以下为不稳定层结, 1~2.5 km 为稳定层结, 消亡阶段各距离环内较多稳定层结和中性层结的出现表明台风内部的对流运动已逐渐减弱。虽然假相当位温沿径向的变化不大, 但仍可看出其随径向距离的增大而不断减小, 且成熟阶段各距离环内的数值略大于发展和消亡阶段。

4 结论与讨论

本文利用 2006~2010 年的 CloudSat 热带气旋过境数据集资料, 详细研究了东太平洋 31 个过境台风在其不同演变阶段内的云、降水和热力结构特征, 主要分析了雷达反射率、云发生概率和冰云微物理参数的剖面分布和降雨率沿径向、纬向和季节的变化规律及其与 SST 和雷达反射率的关系, 以及台风内部温度、比湿、相对湿度和假相当位温等热力结构参数的分布特征。结果表明:

(1) 在台风演变的不同阶段内, 雷达反射率都在 5 km 高度上下呈现截然相反的变化规律, 且沿径向在该高度附近存在明显的亮带结构。各阶段内深对流云的垂直尺度和发生概率始终最大, 且沿径向不断减小, 卷云集中在 8~15 km 高度并伴有较大的发生概率, 高积云、层积云和积云在各阶段沿径向的分布相对均匀。沿径向成熟阶段冰水含量与冰粒子数浓度的最大值逐渐减小, 有效粒子半径和分布宽度参数的概率较大值区不断抬升, 发展和消亡阶段的冰云微物理参数也有类似的分布规律。

(2) 各阶段降雨率沿径向不断减小, 但沿纬向

和季节的变化各异。当 SST 小于 29°C 时, 内核区降雨率随 SST 的升高近似服从指数分布, 而当 SST 大于 29°C 时, 降雨率受 SST 的影响不断减弱。内核区降雨率集中在 0~2、3~4、6~9 mm/h 三个区域内, 适用于天气雷达的 $Z = AR^b$ 函数关系无法应用到毫米波雷达降雨率的反演中。

(3) 发展阶段暖心区位于雨带区的 6~12 km 高度处, 内核区 3 km 以下存在弱湿心区, 相对湿度的距平较大值位于雨带区的 4~8 km 高度, 4.5 km 以下各距离环都为不稳定层结。成熟阶段雨带区存在两个暖核结构, 湿心区的范围和强度明显大于其他阶段, 且在内核区存在上下两个湿心区, 相对湿度的两个距平较大值区表明对流发展旺盛, 4.5 km 以下各距离环的层结特性各异。消亡阶段暖心区的水平范围较小而垂直尺度较大, 且沿径向向上抬升, 湿心区范围缩小并伴随有干心区产生, 距离中心 250 km 以内存在相对湿度的低值区而以外则存在高值区, 4.5 km 以下各距离环内多为稳定层结和中性层结。各阶段内不同的热力结构特征揭示了台风在其不同生命阶段内的演变规律。

CloudSat 可剖开云层表面研究其内部结构特征, 其对云雨目标的高灵敏度以及高时空分辨率和全天候探测的优势大大弥补了被动遥感的不足, 而与其他传感器、模式和最优路径资料融合组成的热带气旋过境数据集更是集合了多种资料的优势, 对台风结构的分析研究意义重大。但 CloudSat 有限的探测时次和刈幅宽度仍限制了其对台风大范围区域的连续性监测分析, 而静止卫星的可见光、红外通道资料正好弥补了这一缺陷。因此, 可将静止卫星资料融入 CloudSat 热带气旋过境数据集中, 实现对台风结构特征和演变规律的更深入细致分析以及连续性的监测预报。

致谢 论文采用的 CloudSat 热带气旋过境数据集由美国海军研究实验室 (NRL) 和 CloudSat 数据处理中心 (DPC) 联合发布, 最优路径数据由美国信息系统 (Unisys) 官方发布, 在此谨表感谢!

参考文献 (References)

- Benedetti A, Stephens G L, Haynes J M. 2003. Ice cloud microphysics retrievals from millimeter radar and visible optical depth using an estimation theory approach [J]. *J. Geophys. Res.*, 108: 4335, doi:10.1029/2002JD002693.
- Cecil D J, Zipser E J. 2002. Reflectivity, ice scattering, and lighting characteristics of hurricane eyewalls and rainbands. Part II:

- Intercomparison of observations [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 130: 785–801.
- Cecil D J, Zipser E J, Nesbitt S W. 2002. Reflectivity, ice scattering, and lighting characteristics of hurricane eyewalls and rainbands. Part I: Quantitative description [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 130: 769–784.
- 丁德平, 李英. 2009. 北京地区的台风降水特征研究 [J]. *气象学报*, 67 (5): 864–874. Ding Deping, Li Ying. 2009. A study on rainfall features of Beijing associated with typhoons [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 67 (5): 864–874.
- 丁金才, 黄炎, 叶其欣, 等. 2004. 2002 年台风 Ramasun 影响华东沿海期间可降水量的 GPS 观测和分析 [J]. *大气科学*, 28 (4): 613–624. Ding Jincai, Huang Yan, Ye Qixin, et al. 2004. GPS observation and analysis of precipitable water vapor during typhoon Ramasun in 2002 influencing East China coast [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 28 (4): 613–624.
- 丁金才, 郭英华, 郭永润, 等. 2011. 利用 COSMIC 资料对 17 个台风热力结构的合成分析 [J]. *热带气象学报*, 27 (1): 31–43. Ding Jincai, Guo Yinghua, Guo Yongrun, et al. 2011. The composition analysis of the thermal structure of 17 typhoons by using COSMIC data [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 27 (1): 31–43.
- 丁伟钰, 万齐林, 端义宏. 2005. TRMM 降雨率资料的三维变分同化及其对“杜鹃”(0313) 台风预报的改进 [J]. *大气科学*, 29 (4): 600–608. Ding Weiyu, Wan Qilin, Duan Yihong. 2005. 3D-Var assimilation of TRMM rain rate and its impact on the typhoon Dujuan (0313) forecast [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 29 (4): 600–608.
- Durden S L, Tanelli S, Dobrowolski G. 2009. CloudSat and A-Train observations of tropical cyclones [J]. *Open Atmos. Sci. J.*, 3 (1): 80–92.
- 范惠君, 李修芳, 燕芳杰, 等. 1996. 用数字云图确定热带气旋强度的原理和方法 [J]. *大气科学*, 20 (4): 439–444. Fan H J, Li X F, Yan F J, et al. 1996. A technique to estimate the intensity of tropical cyclone based on S-VISSR data [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 20 (4): 439–444.
- 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 (3): 316–328. Fu Yunfei, Liu Dong, Wang Yu, et al. 2007. Characteristics of precipitation and non-precipitating clouds in typhoon Ranan as viewed by TRMM combined measurements [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 65 (3): 316–328.
- Haynes J M, L'Ecuyer T S, Stephens G L, et al. 2009. Rainfall retrieval over the ocean with spaceborne W-band radar [J]. *J. Geophys. Res.*, 114: D00A22, doi:10.1029/2008JD009973.
- 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 H Z, Cheng M H, Zhou F X. 2006. 3D structure of rain and cloud hydrometeors for typhoon Kujira (0302) [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 30 (3): 491–503.
- Jorgensen D P, Willis P T. 1982. A Z-R relationship for hurricanes [J]. *J. Appl. Meteor.*, 21 (3): 356–366.
- Kidder S Q, Gray W M, Vonder Haar T H. 1978. Estimating tropical cyclone central pressure and outer winds from satellite microwave data [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 106: 1458–1464.
- Kovacs T A, McCormick M P. 2003. Observations of typhoon Melissa during the lidar in-space technology experiment (LITE) [J]. *J. Appl. Meteor.*, 42: 1003–1013.
- 刘瑞, 翟国庆, 王彰贵, 等. 2012. FY-2C 云迹风资料同化应用对台风预报的影响试验研究 [J]. *大气科学*, 36 (2): 350–360. Liu Rui, Zhai Guoqing, Wang Zhanggui, et al. 2012. Impact of application of cloud motion wind data from FY-2C satellite on simulation of typhoon cases [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 36 (2): 350–360.
- 刘松涛, 严卫, 王举. 2006. 利用 AMSR-E 对台风“泰利”的初步分析 [J]. *热带海洋学报*, 25 (5): 26–30. Liu S T, Yan W, Wang J. 2006. A primary analysis of typhoon Talim by AMSR-E [J]. *Journal of Tropical Oceanography (in Chinese)*, 25 (5): 26–30.
- 刘松涛, 张红雷, 严卫. 2007. 星载微波辐射计 AMSR-E 在台风分析中的应用 [J]. *遥感技术与应用*, 22 (3): 351–355. Liu S T, Zhang H L, Yan W. 2007. Applications of AMSR-E in typhoon analysis [J]. *Remote Sensing Technology and Application (in Chinese)*, 22 (3): 351–355.
- Luo Z Z, Stephens G L, Emanuel K A, et al. 2008. On the use of CloudSat and MODIS data for estimating hurricane intensity [J]. *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, 5 (1): 13–16.
- Matrosov S Y. 2011. CloudSat measurements of landfalling hurricanes Gustav and Ike (2008) [J]. *J. Geophys. Res.*, 116: D01203, doi:10.1029/2010JD014506.
- Mitrescu C, Miller S, Hawkins J. 2008. Near-Real-Time applications of CloudSat data [J]. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 47: 1982–1994.
- 邱红, 方翔, 谷松岩, 等. 2007. 利用 AMSU 分析热带气旋结构特征 [J]. *应用气象学报*, 18 (6): 810–820. Qiu Hong, Fang Xiang, Gu Songyan, et al. 2007. The structure of tropical cyclone from advanced microwave sounding unit [J]. *Journal of Applied. Meteorological Science (in Chinese)*, 18 (6): 810–820.
- Rodgers E B, Pierce H F. 1995. A satellite observational study of precipitation characteristics in western North Pacific tropical cyclones [J]. *J. Appl. Meteor.*, 34 (12): 2587–2599.
- Rodgers E B, Chang S W, Pierce H F. 1994. A satellite observational and numerical study of precipitation characteristics in western North Atlantic tropical cyclones [J]. *J. Appl. Meteor.*, 33 (2): 129–139.
- 盛裴轩, 毛节泰, 李建国, 等. 2003. 大气物理学 [M]. 北京: 北京大学出版社, 164pp. Sheng Peixuan, Mao Jietai, Li Jianguo, et al. 2003. *Atmospheric Physics (in Chinese)* [M]. Beijing: Peking University Press, 164pp.
- 舒守娟, 王元, 宋金杰. 2011. 西北太平洋台风“海棠”结构的 GPS 下投式探空仪观测分析 [J]. *气象学报*, 69 (6): 933–944. Shu Shoujuan, Wang Yuan, Song Jinjie. 2011. Observational analysis of the structure of typhoon Haitang (0505) over the western North Pacific by using the GPS dropsonde data [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 69 (6): 933–944.
- Velden C S, Goodman B M, Merrill R T. 1991. Western North Pacific tropical cyclone intensity estimation from NOAA polar-orbiting satellite microwave data [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 119: 159–168.
- Wang J, Rossow W B. 1995. Determination of cloud vertical structure from upper-air observations [J]. *J. Appl. Meteor.*, 34: 2243–2258.
- Wong V, Emanuel K. 2007. Use of cloud radars and radiometers for tropical cyclone intensity estimation [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 34: L12811, doi:10.1029/2007GL029960.
- 俞玮. 2010. 台风暖心结构变化及其影响因子相关分析 [D]. 南京信息

- 工程大学硕士学位论文. Yu Wei. 2010. Related analysis of variety and impact factor of typhoon warm core's construct [D]. M. S. thesis (in Chinese), Nanjing University of Information Science and Technology.
- 袁晓清, 倪广恒, 潘安君, 等. 2010. 基于最优化算法的北京市新一代天气雷达 $Z-R$ 关系研究 [J]. 水文, 30 (1): 1–6. Yuan Xiaoqing, Ni Guangheng, Pan Anjun, et al. 2010. NEXRAD $Z-R$ power relationship in Beijing based on optimization algorithm [J]. Journal of China Hydrology (in Chinese), 30 (1): 1–6.
- 朱乾根, 林景瑞, 寿少文, 等. 2007. 天气学原理和方法(第 4 版) [M]. 北京: 气象出版社, 510pp. Zhu Qian'gen, Lin Jingrui, Shou Shaowen, et al. 2007. Weather Principles and Methods (4th ed) (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 510pp.