

高洋,方翔,2018. 基于 CloudSat 卫星分析西太平洋台风云系的垂直结构及其微物理特征[J]. 气象,44(5):597-611.

基于 CloudSat 卫星分析西太平洋台风云系的垂直结构及其微物理特征^{*}

高 洋 方 翔

国家卫星气象中心,北京 100081

提 要: 基于 2012—2014 年 CloudSat 卫星数据,按照热带气旋强度分类的 6 个等级以及沿台风中心的径向距离,分析西太平洋台风云系的垂直结构及其微物理特征。研究表明:(1)不同强度的台风云系中均是单层云占主导,多层云中双层云出现比例最高;随着台风强度的增强,距离台风中心 250 km 之内,单层云分布位置更加集中且垂直厚度较厚,而 450 km 之外的单层云一直集中在 7~15 km,厚度较薄;随着台风强度的增强,距离台风中心 250 km 之内的双层云中的底层云和顶层云均增厚且分布位置更加趋于集中,云间距变窄,而 450 km 之外顶层云和底层云较薄,云间距一直较大。(2)台风云系中,深对流云、高层云、卷云与其他云类型相比,分布的垂直范围较广,出现频率较高,分布的位置会随着台风强度变化和沿台风中心径向距离的增加有明显的变化。(3)随着台风强度的增强,近台风中心 5 km 以上的回波有明显增强,除此高值区外,发展较为成熟的台风,距台风中心 450 km 之外也会出现多个明显的柱状回波高值区。(4)近台风中心液水含量的值和冰水含量的值随强度变化均有明显增加,但外围云系中也有分散的冰水含量高值中心但分布高度相对较低,在 10 km 附近;液水粒子数浓度的高值区域与液水含量的高值区非常对应,而冰水含量的高值区位于冰粒子数浓度的高值区下方,表明小的冰粒子被较强的对流活动带到了高处,而大的冰粒子集中在云系较低处。

关键词: 西太平洋,台风,垂直结构,微物理特征

中图分类号: P458.1+24

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2018.05.001

Analyses on Vertical Structure and Microphysical Features of Typhoon Cloud in Western Pacific Based on CloudSat Satellite Data

GAO Yang FANG Xiang

National Satellite Meteorological Centre, Beijing 100081

Abstract: In this paper, observations from CloudSat satellite dataset from 2012 to 2014 are used to analyze the vertical structure and microphysical features of typhoon cloud in western Pacific with the six kinds of intensities and radial distances from the center. The main conclusions are summarized as follows: (1) The occurrence frequency of single-layer cloud dominates and double-layer cloud is relatively more common in the multilayer cloud. With the increasing intensity of typhoon, the single-layer cloud is thicker inside the radial distance 250 km, but thinner and mostly concentrated in the range of 7—15 km out of the radial distance 450 km. Similarly, the bottom and top layer clouds of double-layer are thicker, the distance between them is narrow inside the 250 km range, and the feature out of the 450 km range is inversed. (2) The occurrence frequencies of deep convective clouds, cirrus, and altostratus are higher, compared to other

^{*} 公益性行业(气象)科研专项(GYHY2013060171)资助

2017 年 7 月 7 日收稿; 2017 年 10 月 11 日收修定稿

第一作者:高洋,主要从事卫星和模式对云的观测模拟研究. Email: ygao@cma.gov.cn

通信作者:方翔,主要从事天气的卫星遥感研究. Email: fangxiang@cma.gov.cn

clouds, the distributions have obvious changes with the changes of typhoon intensities and the radial distance. (3) The radar reflectivity becomes stronger above the 5 km in the stage of mature typhoon. Meanwhile, there are obvious columnar radar reflectivity areas out of 450 km. (4) The liquid water and ice water contents near the center of typhoon are increased with the change of typhoon intensities. In addition, the high value area of ice water content is always concentrated near 10 km in the outer cloud bands. The distribution of liquid droplet number concentration is consistent with the liquid water content. However, the high value area of ice water content is below the high area of ice droplet number concentration.

Key words: western Pacific, typhoon, vertical structure, microphysical features

引 言

我国是受台风影响较为严重的国家之一,由于地理位置的特殊性,西北太平洋的多数台风会在我国东部沿海和南海登陆,每年汛期都会造成巨大的经济损失,同时也威胁着沿海居民的生命安全。西北太平洋一直是台风的高发区域(陈联寿和孟智勇, 2001),所以,西北太平洋台风路径、强度、登陆地点的预报一直是许多研究人员和预报员关注的重点(雷小途和陈联寿, 2001; Chen et al, 2004; 黄荣辉和陈光华, 2007; 袁金南等, 2008; 许映龙等, 2015; 张守峰等, 2015; 高拴柱等, 2018; 郑艳等, 2018)。随着数值模式的发展,对于台风路径和强度的预报已经有了长足的进步。由于台风在温暖的洋面上生成,所以对于台风的观测和研究最好的数据来源就是卫星资料,多源卫星资料的应用可以对台风提供全方位的观测,是研究人员深入认知台风的发生、发展、成熟、消亡等阶段特征的有力工具。

除了利用卫星对台风定位、定强之外,近年来,许多学者利用多种卫星资料也开展了台风内部结构的研究,有研究人员利用 COSMIC 资料对多个台风的热力结构进行合成分析(丁金才等, 2011),也有研究人员利用 NOAA-16 极轨气象卫星高分辨率的 AMSU 探测资料深入分析了台风对流层中上层热力异常结构的特点,并且结合了湿度场,指出了台风对流层上层暖异常的变化趋势预示着其强度的变化趋势(王瑾和江吉喜, 2005)。Lonfat et al(2004)利用热带测雨卫星 TRMM 分析了不同强度台风降水云的发展; Yokoyama and Takayabu (2008) 用 TRMM 卫星研究了热带气旋降水中对流降水和层云降水的比例;也有许多研究工作是利用该卫星进行热带气旋个例降水云特征的分析(傅云飞等, 2007; 游然等, 2011)。我国的风云气象卫星除了针

对台风提供实时的业务保障外,近年来也越来越多地用于探究台风云系的内部演变(李小青等, 2012; Wang et al, 2015)。

然而,因为受到探测仪器的限制,这些卫星只能提供台风上层较为宏观的分布特征,或者间接分析台风内部结构的分布特征,不能探测台风云系的垂直结构和更为详细的微物理特征演变。值得注意的是,许多研究人员已经认识到台风内部相关物理属性的特征对于台风强度的变化有非常重要的影响(Houze et al, 2006; Jin et al, 2014)。

随着卫星技术的不断发展,2006 年发射的 CloudSat 卫星上搭载的 94 GHz 云廓线雷达(cloud profiling radar, CPR),其灵敏度是标准天气雷达的 1000 倍,它能够接收到大气气柱内各层水凝物的雷达回波功率,对于深厚的对流云有较好的穿透作用(Delanoë and Hogan, 2010),所以,这种特点非常有利于在台风云系研究中的应用。CloudSat 卫星不仅能够提供云的宏观特征,同时也能够提供云内部结构的信息,即云的微物理结构。近年来,已经有国内外研究人员发现 CloudSat 卫星在台风研究中的新优势(Posselt et al, 2008; Sanger et al, 2014; Griffin et al, 2016)。Durden et al(2009)利用该卫星分别分析了 17 个台风的云系、降水率分布特征等; Tourville et al(2015) 利用 CloudSat 分析了垂直风切变的大小对台风结构以及强度的影响。赵姝慧和周毓荃(2010)利用该卫星分析了台风艾云尼的发展演变过程及宏微观结构。张蕾等(2016)利用 CloudSat 卫星探讨了个例台风桑美不同阶段不同部分冰粒子的垂直分布规律。史兰红等(2015)分析了 7 个台风个例,给出了台风眼壁及周围螺旋云带的云微物理属性和降水的分布特征。韩丁等(2013)和严卫等(2013)按照发展、成熟和消亡阶段分析了东太平洋和大西洋的热带气旋云、降水和热力结构特征。

由上述研究成果可知,利用 CloudSat 卫星针对

台风的研究工作虽然得以开展,但大多集中在某个台风或者某几个台风不同阶段的变化,个例分析较多,针对影响我国的西太平洋台风云系的垂直结构和微物理特征的统计工作有待进一步开展。所以本研究是从不同强度和沿台风中心径向距离两方面,深入分析西太平洋台风云系的垂直结构以及微物理特征。真实地再现不同强度台风云系的内部结构有何不同,这对于提高模式对台风的预报能力是非常关键的;同时,也能够为科研业务人员提供预测台风强度变化的参考依据。

1 数据与方法介绍

1.1 数据与典型个例分析

本研究所用的卫星数据来源于 CloudSat 的多种卫星产品,其中热带气旋的数据信息来源于 2D-TC(Level 2-D Tropical Cyclone)数据集,2D-TC 数据集是针对不同海域(大西洋、东太平洋、西太平洋、中太平洋、南半球和印度洋)挑选出 CloudSat 搭载的云廓线雷达通过热带气旋上空且距离热带气旋中心 1000 km 以内的轨道信息。每一条通过热带气旋上空的轨道信息都包含纬度、经度、热带气旋中心附近的最大风速、海平面最低气压、海表温度,以及在大气层不同高度的风切变等具体台风信息。2B-GEOPROF-LIDAR 是 CloudSat 卫星和 CALIPSO 相结合的卫星产品,能够提供云层数信息(0~5 层),以及每层云的云顶、云底高度。云分类产品来源于 2B-CLDCLASS 数据集,根据云的水平和垂直尺度、降水特征、云体温度以及 MODIS 获取的向上的辐射信息相结合,将云分为卷云、高层云、高积云、层云、层积云、积云、雨层云、深对流云 8 种类型,值得注意的是,该分类方法与地面观测的云分类方法存在一定差异,虽然名称相同,但具体含义不完全相同。雷达反射率和云微物理信息分别来源于 2B-GEOPROF 和 2B-CWC-RO 产品,温度比湿来源于 ECM-WF-AUX,降水信息来源于 2C-PRECIP-COLUMN。

首先选取 2014 年在西北太平洋上生成的第 8 号台风浣熊进行个例分析,图 1 为“浣熊”的可见光监测图像,强度为台风级别,云图中眼区清晰可见,西南侧与季风云系相连,水汽供给充足。CloudSat 卫星 43544 号轨道在 12:26—12:30 正好扫描过境经过“浣熊”上空,且横穿台风的中心眼区上空,虽然

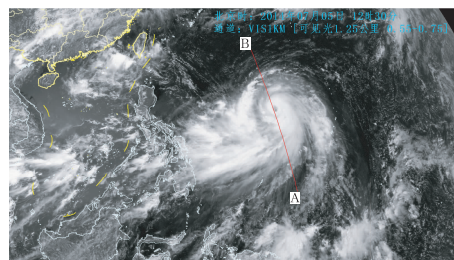


图 1 2014 年 7 月 5 日 12:30 FY-2E 对台风浣熊的可见光监测图像
(红线为 CloudSat 卫星的过境轨迹;
A—B 点,时间为 12:26—12:30)

Fig. 1 Typhoon Neoguri in visible satellite image of FY-2E at 12:30 BT 5 July 2014
(Red line across image is CloudSat track, starting from point A to B from 12:26 BT to 12:30 BT)

该轨迹距离台风中心最近距离为 42.5 km,但还是全面捕捉到“浣熊”的中心以及眼墙、螺旋云带等。结合上述介绍的 CloudSat 该轨道的数据产品,深入分析“浣熊”云系的垂直结构分布特征。

图 2a 为 CloudSat 观测到的“浣熊”垂直剖面的云分类情况,16°N 附近为台风眼区,眼区低层 3 km 以下存在部分积云,眼区上空 10~17 km 的区域被卷云所覆盖,眼墙为深对流云,“浣熊”北侧 17°~20°N 的位置上空为大量卷云覆盖,下方存在部分深对流云、层积云、积云和高积云,北侧螺旋云带的最外侧存在部分高层云。“浣熊”中心的南侧也存在大量深厚的对流云,且两侧眼壁云顶高度均可达 18 km,对流发展非常旺盛,南侧的螺旋云带中 4~16 km 的位置主要为高层云,同时轨道 A 点附近 9~14 km 的位置为卷云,结合可见光云图(图 1)也可以清晰看到向外辐散的卷云羽。结合“浣熊”的雷达回波的剖面特征(图 2b)可以看出,深对流云出现的位置雷达反射率总体较强,但是在垂直方向上高值区主要集中在 5~10 km 的高度,5 km 以下虽为深对流云,但是雷达回波较弱,结合“浣熊”冰水含量和冰粒子数浓度的剖面图(图 2c 和 2d)来看,雷达回波的高值区和冰水含量的高值区位置对应较好,且均集中在 5 km 以上,而台风眼区两侧 13°~18°N 范围内冰粒子数浓度的高值区明显位于冰水含量高值区的上方,这就表明,在深对流云内,较小的冰粒子被强对流抬升到了高处,而大的冰粒子集中在低处。除台风眼区 16°N 中间高度存在部分无云区外,15°N 附近的云内雷达回波也相对周围较弱,此处也正好是冰水含量分布的低值区。从热力结构(图 2e

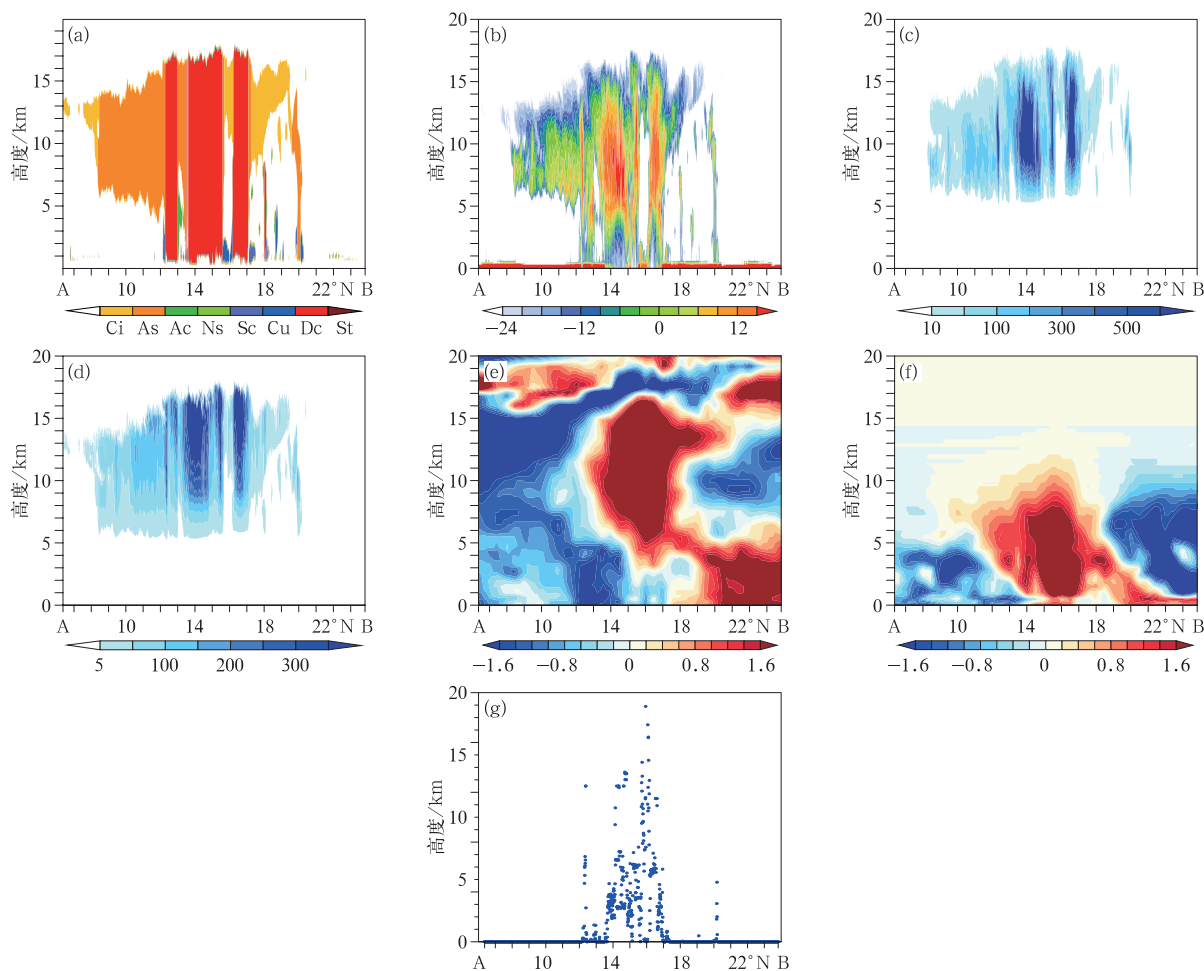


图 2 CloudSat 卫星过境台风浣熊的剖面分布特征

(a) 云类型, (b) 雷达反射率 (单位: dBZ), (c) 冰水含量 (单位: $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$), (d) 冰粒子数浓度 (单位: L^{-1}),
(e) 温度距平 (单位: $^{\circ}\text{C}$), (f) 比湿距平 (单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), (g) 表面降水率 (单位: $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)

Fig. 2 Vertical distribution features of Typhoon Neoguri along the CloudSat orbit

(a) cloud classification, (b) reflectivity (unit: dBZ), (c) ice water content (unit: $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$),
(d) ice particle number concentration (unit: L^{-1}), (e) temperature anomalies (unit: $^{\circ}\text{C}$),
(f) specific humidity anomalies (unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), (g) precipitation rate (unit: $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)

和 2f) 来看, 由于“浣熊”此时正处于发展较为成熟的阶段, 所以暖心范围和湿心范围均较大, 并且暖心发展高度较高。结合 CloudSat 沿轨的降水率 (图 2g) 来看, 降水主要集中在深对流云的下方 $12^{\circ} \sim 17^{\circ}\text{N}$ 。

1.2 方法介绍

通过对台风浣熊的典型个例分析可以看出, CloudSat 卫星能够很好地穿透台风云系揭示不同位置的云系垂直结构特征, 但该卫星属于太阳同步轨道卫星, 每次扫过台风云系的位置不同, 所以按照卫星轨道上的像素点距离台风眼中心的径向距离划分进行云系统计。相关研究表明, 西北太平洋的台风

外围尺度 (8 级风圈半径) 主要集中在 $80 \sim 300 \text{ km}$ (Chan and Chan, 2012), 但是这并不能包含台风云系的全部范围, 特别是对发展较为成熟的台风, 云系发展范围较广, 如上述分析的典型个例“浣熊”, 眼区中心距其南侧外围螺旋云带 A 点可达近 10 个纬度。综上所述, 为了更好地认知台风云系的整体分布特征以及从热带低压到超强台风等不同强度的云系分布变化, 我们选取了距离台风中心 1000 km 之内的轨道进行统计分析, 并且将 CloudSat 卫星扫描过境的热带气旋, 依据其中心附近最大风速再划分为 6 个等级: (1) 热带低压 (TD): 底层中心附近最大平均风速为 $10.8 \sim 17.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; (2) 热带风暴 (TS): 底层中心附近最大风速为 $17.2 \sim 24.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;

(3)强热带风暴(STS):底层中心附近最大风速为 $24.5\sim32.6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; (4)台风(TY):底层中心附近最大风速为 $32.7\sim41.4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; (5)强台风(STY):底层中心附近最大风速为 $41.5\sim50.9\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; (6)超强台风(Super TY):底层中心附近最大风速大于 $51.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

在 2012—2014 年西太平洋上,CloudSat 卫星共扫过台风 83 个,共计轨道 375 条。表 2 为扫过不

同强度台风的轨道数和像素点数,将这些轨道的相关台风路径信息与 CloudSat 卫星多种云宏观微观物理量信息进行匹配和融合处理,得到每一轨道下台风云系的内部结构和微物理信息。从不同强度出发,统计分析西太平洋台风从中心到外围云系的平均径向分布特征,并且对比分析不同强度台风的云系垂直结构和微物理特征有何不同。

表 1 2012—2014 年西太平洋 CloudSat 卫星扫过台风上空轨道信息
Table 1 CloudSat track information over typhoons in western Pacific during 2012—2014

	2012—2014 年过境 轨道数	2012 年过境轨道 像素点数	2013 年过境轨道 像素点数	2014 年过境轨道 像素点数
热带低压	91	24564	60664	39455
热带风暴	103	45931	31258	33159
强热带风暴	59	26833	18480	19292
台风	37	20087	14469	11539
强台风	40	12412	18692	19368
超强台风	45	21614	13736	16815

2 西太平洋台风云系的垂直结构

2.1 不同强度台风云层垂直结构的分布特征

一些学者利用 CloudSat 卫星和 CALIPSO 卫

星相结合的数据产品分析了全球不同区域云的云层数分布情况(Luo et al, 2009; 汪会等,2011;叶培龙等,2014),许多研究表明大部分区域为单层云发生频率最高,而台风云系中是否也是单层云占主导,有待深入研究。图 3 为不同强度台风云层数的分布特征,从图中可以看出,无论何种强度的台风,台风云

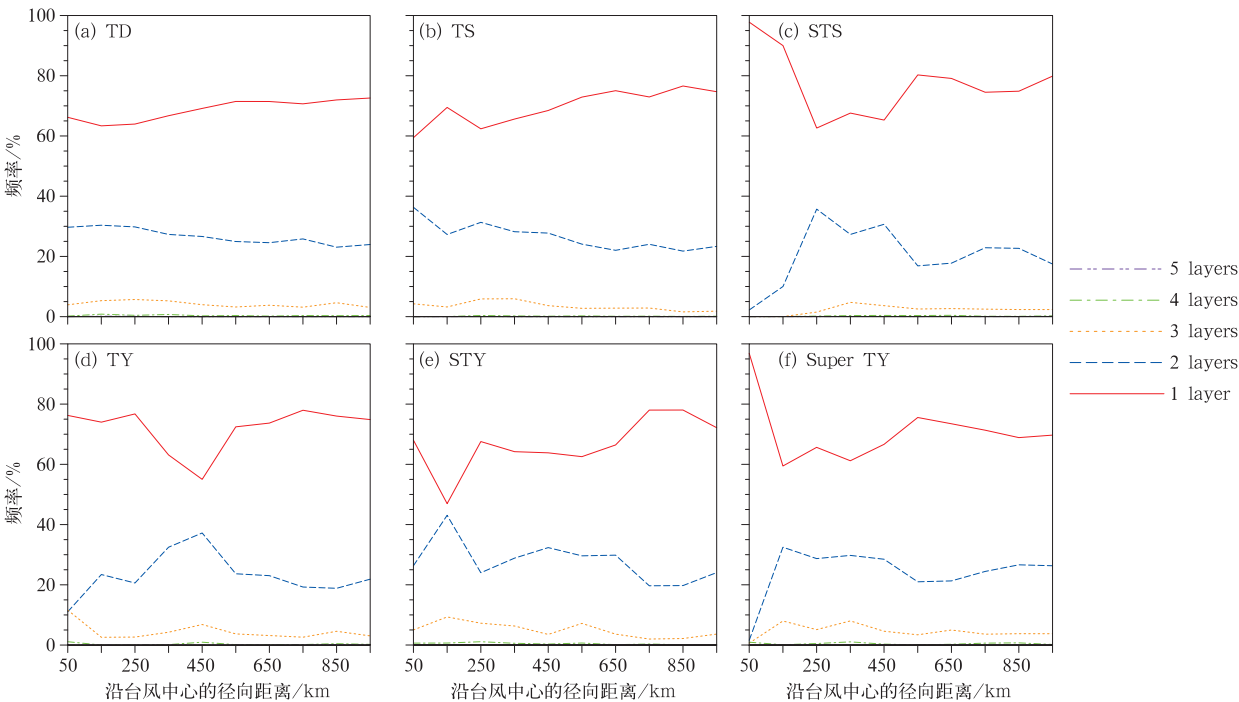


图 3 不同强度台风云层数出现频率(单位:%)的分布特征
(a)热带低压,(b)热带风暴,(c)强热带风暴,(d)台风,(e)强台风,(f)超强台风
Fig. 3 The hydrometeor occurrence frequency (unit: %) of typhoon with different levels
(a) TD, (b) TS, (c) STS, (d) TY, (e) STY, (f) Super TY

系的垂直结构中均是单层云占主导,多层云中双层云出现比例最高,三层云分布所占比例较低,距离台风中心不同径向距离环出现频率仅在5%左右。

由上述分析得知,不同台风强度均是单层云和双层云占主导,下面再来深入探究单层云和双层云垂直分布的位置情况,从图4a~4f可以看出,随着台风强度的增强,单层云分布的位置逐渐变得更为集中。台风、强台风、超强台风时,单层云主要集中在16 km高度以下,距离台风中心250 km范围之内,出现频率高达90%以上,且单层云垂直厚度较厚,这是由于随着台风强度的增强,对流发展旺盛,深对流占据主导。而在距离台风中心450 km之外,单层云主要集中在7~15 km,且云层厚度相对较薄,此处多为台风的流出层,常有大量卷云存在。

对比双层云的垂直分布情况来看(图4g~4l),可以看出与单层云有相似的分布特征,即随着台风强度的增强,距离台风中心250 km之内,双层云分布的高度位置相对更为集中。从云的厚度来看,热带低压、热带风暴时,双层云的底层云主要分布在5 km之下,顶层云分布在10~15 km,且上下两层云的厚度相对较为均匀。随着强度增强,距离台风中心250 km内,底层云和顶层云均有明显增厚,分布位置也更为集中,双层云之间的云间距明显变窄,但是距离台风中心450 km之外,顶层云和底层云厚度一直较薄,云间距依然较大。

2.2 不同强度台风的云类型分布特征

经过统计发现,台风云系中,层云出现频率非常

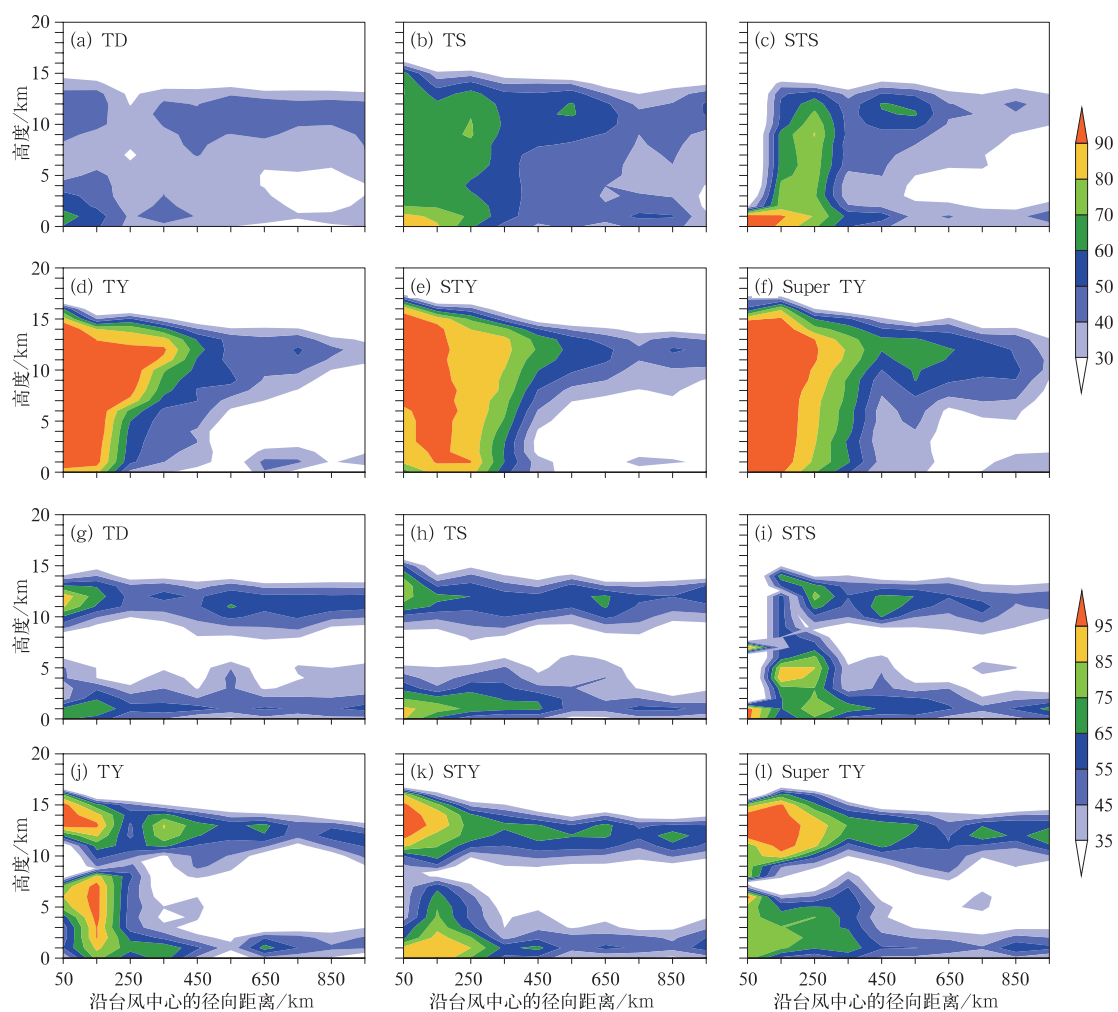


图4 不同强度台风单层云(a~f)和双层云(g~l)不同高度出现频率(单位:%)的分布特征

(a, g)热带低压, (b, h)热带风暴, (c, i)强热带风暴, (d, j)台风, (e, k)强台风, (f, l)超强台风

Fig. 4 The occurrence frequency (unit: %) of single-layer (a—f) cloud and double-layer cloud (g—l)

(a, g) TD, (b, h) TS, (c, i) STS, (d, j) TY, (e, k) STY, (f, l) Super TY

小,所以这里分析除层云外其他7种类型的云在台风云系中的分布情况。

图5为不同强度台风卷云出现频率的剖面分布特征,纵轴为高度,横轴为沿台风中心的径向距离,水平分辨率为50 km,横轴坐标为每一距离环的中心点。从图5可以看出,无论是何种强度,台风云系中卷云的垂直分布高度较广,主要分布在7~17 km。热带低压时(图5a),卷云在距离台风中心的各个距离环内分布较为均匀,10~13 km的高度上,卷云出现的频率达到60%以上;当发展为热带风暴时(图5b),由于台风中心的云系有所发展,卷云在近台风中心附近8~17 km高度出现频率明显增加。随着台风强度的不断增加,卷云出现频率的高值区,距离台风中心越来越远,强热带风暴时(图5c),卷云出现频率大于60%的区域主要集中在距离台风中心400 km之外,台风、强台风、超强台风时(图5d,5e,5f)卷云出现频率的高值区距离台风中心更远,有明显向外围移动的趋势。从上述图中可以看出,当台风强度较弱时,台风云系的卷云在高层的分布较为均匀,随着台风强度的不断增加,当台

风较为成熟时,台风眼区的形成和周围螺旋云带的发展,卷云外流的现象明显,向外辐散的卷云羽不仅更加集中出现在台风云系的高层,同时也非常集中出现在距离台风中心较远的位置。

图6为高层云出现频率的剖面分布特征,与卷云相比,不同台风强度高层云分布的垂直高度范围更广,最常分布在6~11 km。随着强度的不断增强,台风、强台风以及超强台风(图6d,6e,6f)高层云在距离台风中心300~1000 km,10 km高度出现的频率明显增加,除7~11 km高层云较多之外,在17 km附近,外围云系的部分上部高层云出现频率也达到80%以上。相比而言,高积云(图7)主要分布1~6 km,距离台风中心不同径向距离环内出现频率主要在10%~30%,较前两种云显著减少。随着台风强度的增加,高积云在近台风中心200 km内出现的频率有明显减少,除此之外,台风外围云系中高积云的高度分布和出现频率并未随着台风强度的变化有明显改变。

进一步分析层积云出现频率的剖面特征(图8),不同强度的台风,层积云主要分布在台风云

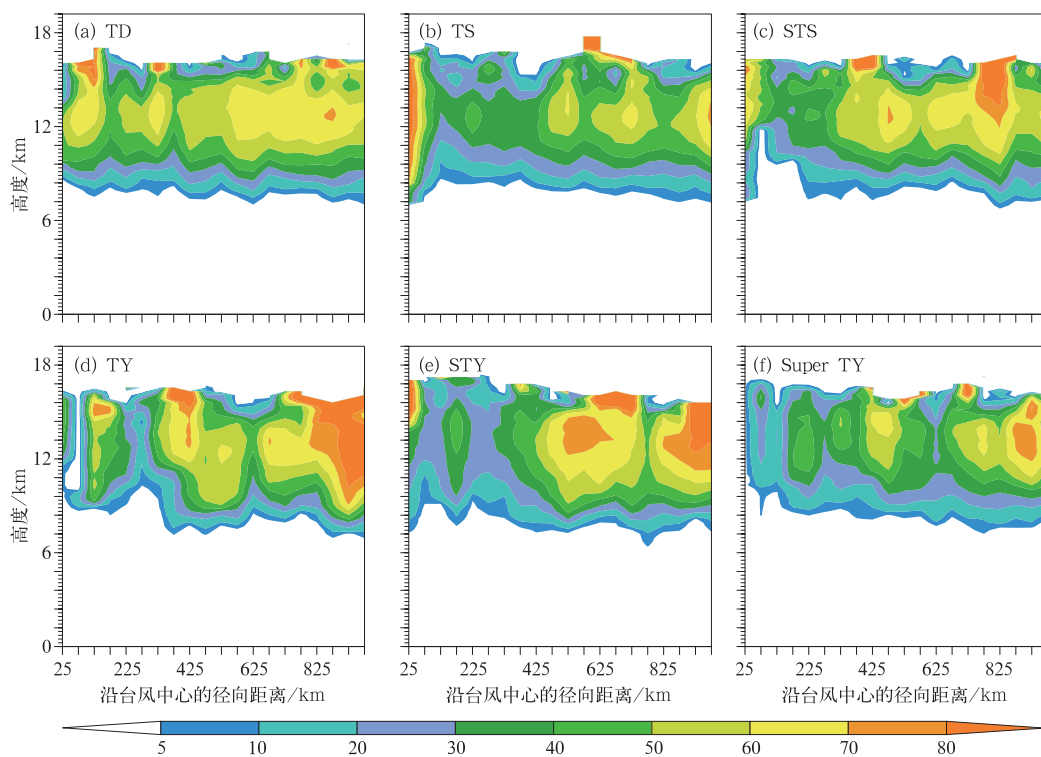


图5 不同强度台风卷云出现频率(单位:%)的剖面分布特征

(a)热带低压,(b)热带风暴,(c)强热带风暴,(d)台风,(e)强台风,(f)超强台风

Fig. 5 The frequency of cirrus occurrence (unit: %) of typhoon with different levels

(a) TD, (b) TS, (c) STS, (d) TY, (e) STY, (f) Super TY

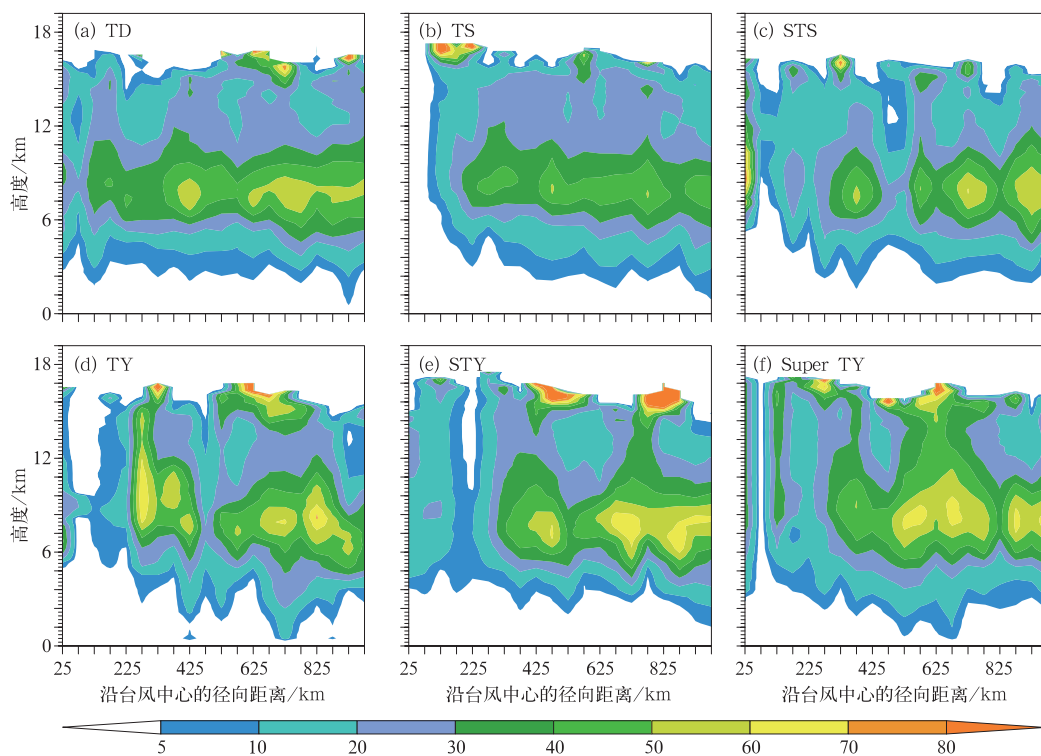


图 6 同图 5, 但为高层云
Fig. 6 Same as Fig. 5, but for the frequency of Altostratus

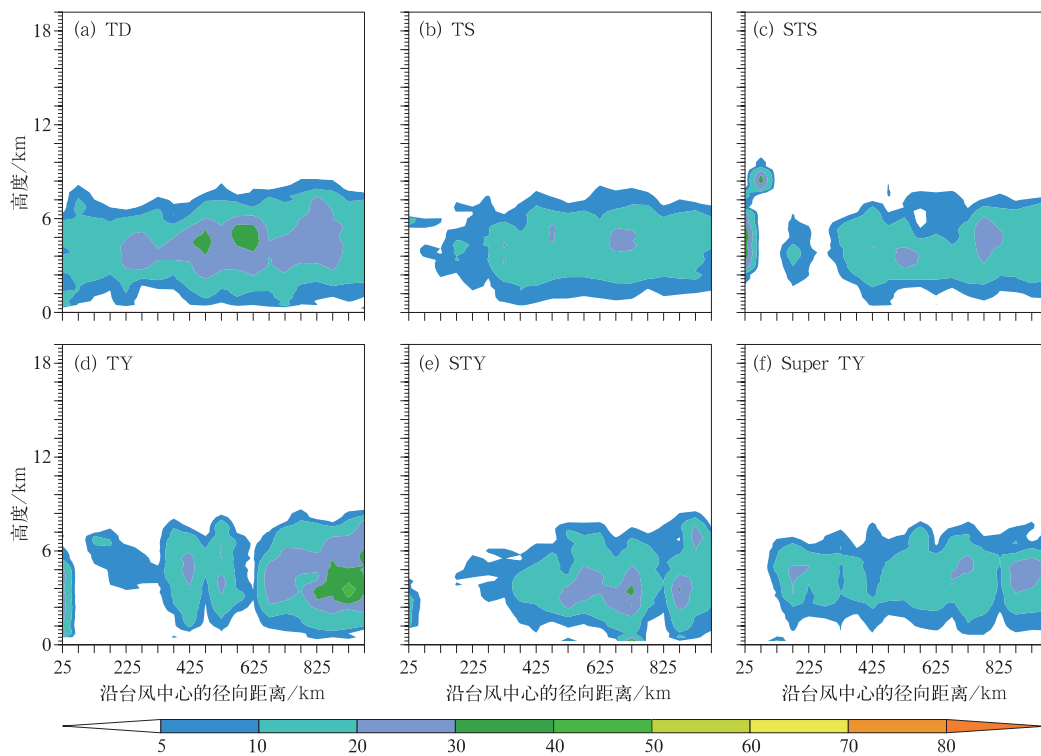


图 7 同图 5, 但为高积云
Fig. 7 Same as Fig. 5, but for the frequency of Altopumulus

系 3 km 以下的位置, 随着台风强度的增加, 近台风中心的层积云出现频率有所降低。积云(图 9)主要

分布在台风云系 6 km 之下, 热带风暴和强热带风暴时, 距离台风中心 100 km 之内, 台风云系中的积

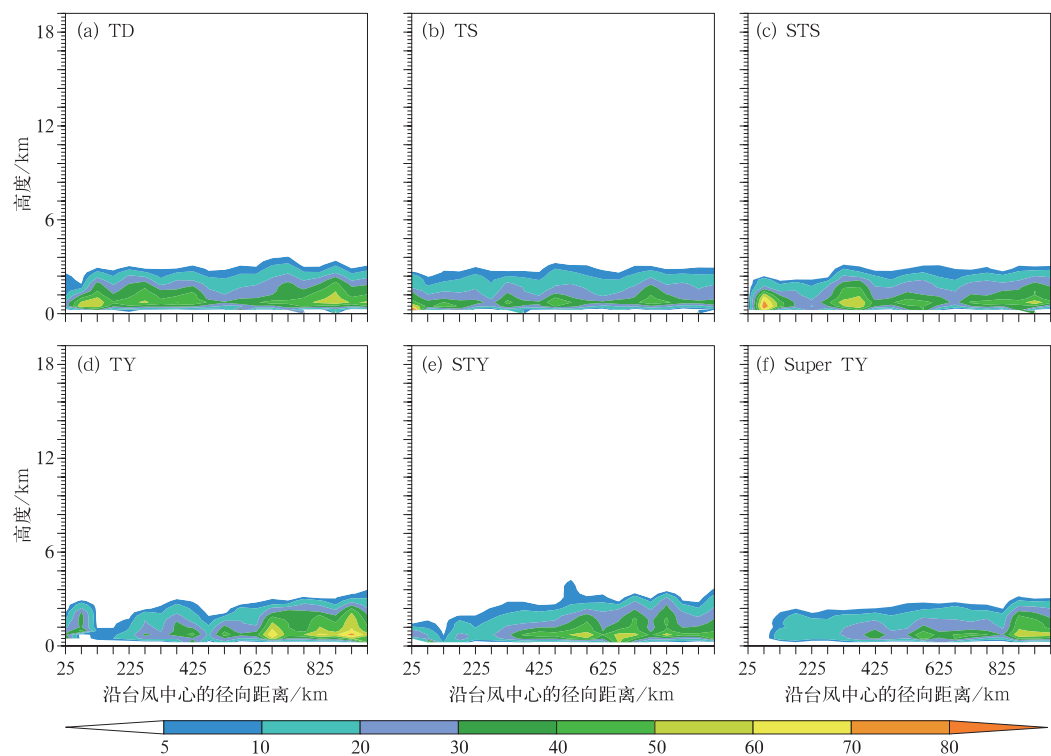


图 8 同图 5, 但为层积云
Fig. 8 Same as Fig. 5, but for the frequency of Stratocumulus

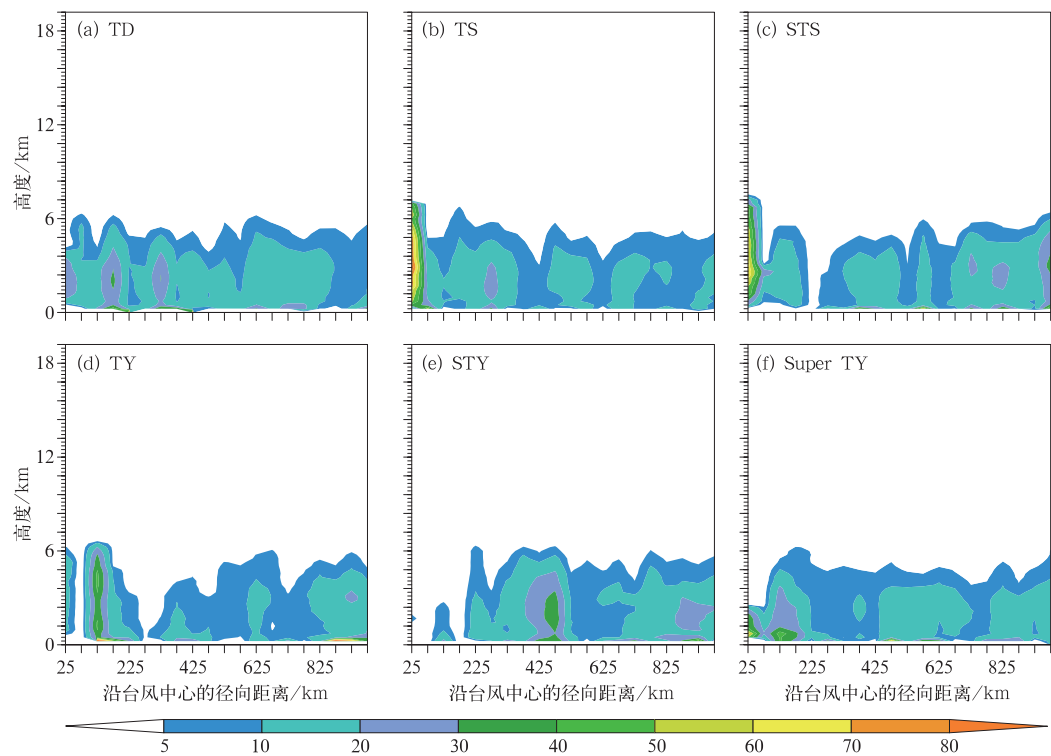


图 9 同图 5, 但为积云
Fig. 9 Same as Fig. 5, but for the frequency of Cumulus

云出现频率有所增加,这是由于台风随着强度的增加,距离台风中心对流活动有所增强,但是,当台风发展的较为成熟时,近台风中心的对流活动非常强,更容易形成一些深厚的对流,所以台风、强台风、超

强台风的时候,距离眼区中心较近的积云又会有所减少。雨层云(图10)相比其他类型云,在不同强度台风云系中的分布最为松散,且总体出现频率较低,总体而言,近台风中心的雨层云垂直高度较低,台风外围云带中的雨层云出现的高度有时又会较高,最高可达17 km附近。这里值得注意的是,世界气象组织定义雨层云属于中云,经常出现在2~8 km,但是有时也会在垂直尺度上有所延伸。王帅辉等(2011)利用CloudSat卫星对云分类的研究中也指出,热带地区的雨层云厚度从1 km到十几千米不等。CloudSat探测的雨层云出现高度位置偏高,也与其云分类方法的定义有直接关系。

图11为深对流云出现频率的剖面分布特征,综合来看,在不同强度的台风云系中,深对流云较之前分析的6种云,分布的垂直高度范围最广且位置最为集中。从图中看出,热带低压时,近台风中心深对流云开始发展。随着台风强度的不断增强,距离台风中心350 km内深对流云明显增强,出现频率可达70%以上,并且水平范围更广,垂直厚度更深。台风、强台风、超强台风时,近台风中心的深厚对流云厚度几乎贯穿整个云层,也就是说台风强度越强,近台风中心大多为深厚对流云占据。但值得注意的是,超强台风时,深厚的对流云的发展反而较强台风

时略有减弱,这也说明当台风达到最大强度时,未来会逐渐走向衰减的过程,所以深对流云的发展会较前几个阶段略有减弱。除热带低压外,也可以看出,随着台风强度的增强,距离台风中心450 km之外也会出现深对流云分布频率的高值区,且呈现出明显的柱状分布特征。

2.3 不同强度台风的雷达回波特征

图12为不同强度台风的雷达反射率剖面分布特征,从图中我们可以看出,台风强度为热带低压时,雷达回波高值区主要集中在距离台风中心450 km之内,高度均在10 km之下,沿径向距离并未有明显变化。随着台风强度的增强,近台风中心5 km以上的回波有明显增强,且高度随着对流的活跃有明显抬升。台风、强台风、超强台风时雷达反射率表现为近台风中心最强,垂直高度可达16 km附近,沿径向距离增加,回波逐渐减弱,同时分布高度逐渐下降。值得注意的是,强度为台风时,距离台风中心450~650 km存在雷达回波柱的高值区,强台风和超强台风的750~850 km,也存在柱状的雷达回波高值区,这与图11成熟台风云带中出现的深对流云的柱状分布也有很好的对应。

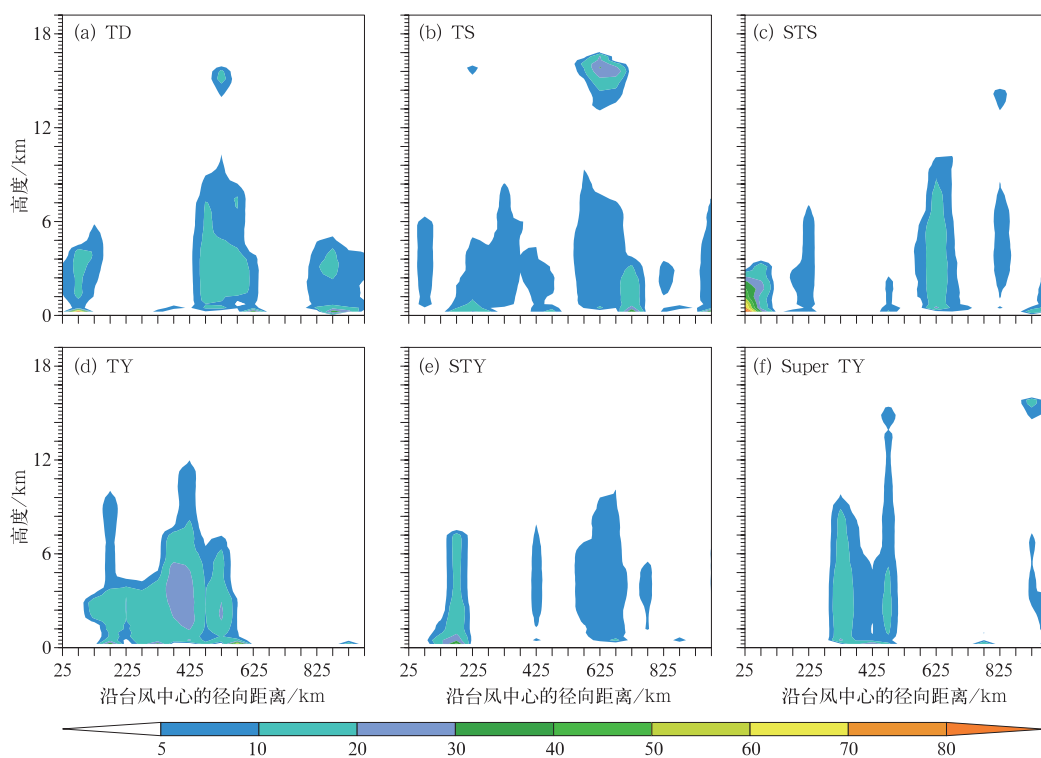


图10 同图5,但为雨层云

Fig. 10 Same as Fig. 5, but for the frequency of Nimbostratus

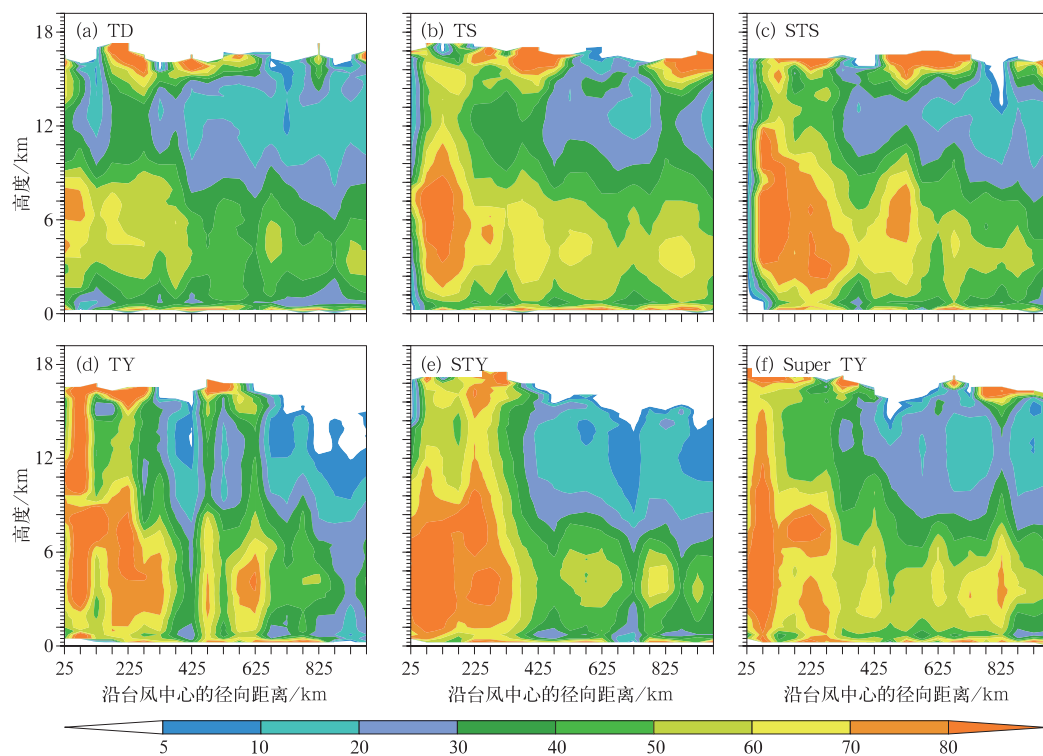


图 11 同图 5, 但为深对流云出现频率

Fig. 11 Same as Fig. 5, but for the frequency of deep convective clouds

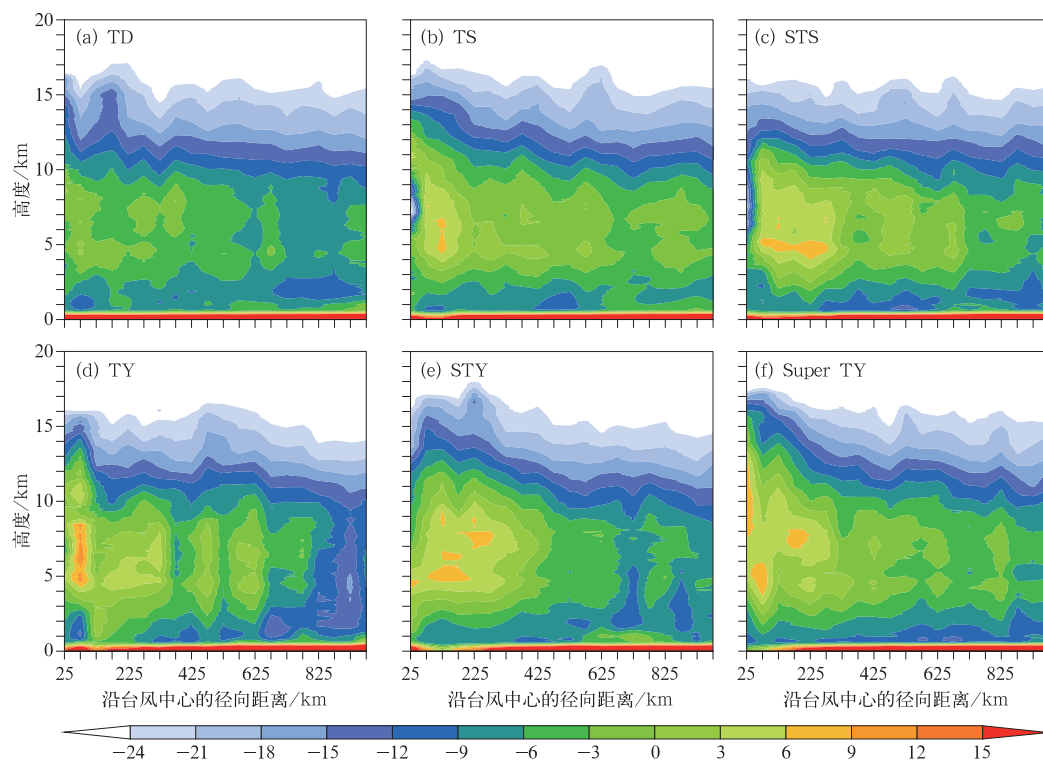


图 12 同图 5, 但为雷达反射率(单位: dBZ)

Fig. 12 Same as Fig. 5, but for the radar reflectivity (unit: dBZ)

3 西太平洋台风的微物理结构

3.1 不同强度台风的液水和冰水含量分布特征

上述对比分析了不同强度台风云系的垂直结构和云系的平均径向分布特征。下文进一步分析不同强度台风云系的微物理结构,以便于更好地从宏观、微观了解西太平洋台风云系的内部结构。图13为不同强度台风液水含量的剖面分布特征,可以看出,热带低压、热带风暴、强热带风暴液水含量主要集中在5 km以下,随着台风强度的增强,在距离台风中心400 km之内的液水含量有所增加,达到 $70 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 以上。台风、强台风和超强台风液水分布的高度有所升高,可达7 km,但是液水含量的值却有所减少,这是由于CloudSat卫星上搭载的CPR探测液水含量出现缺测值较多造成,然而液水和冰水的反演是分别进行的,所以液水含量缺失时,冰水含量依然真实可用。冰水含量的分布与液水含量有明显不同(图14),冰水含量主要分布在5 km以上的高度,热带低压时,冰水含量无明显高值区,随着强度的增强,沿台风中心径向距离300 km之内冰水含

量有显著增长。在垂直分布上,冰水含量的分布随着高度的上升,先增加后减少,除超强台风外,冰水含量的高值区主要集中在10 km附近,可达 $250 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 以上。超强台风8~15 km的冰水含量均超过 $250 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,结合前面的云类型分析,超强台风时,该区域主要受深对流云占主导,对流活动非常强,促使更多的冰粒子被带到更高的高度,且冰相云顶的位置有明显升高,强台风和超强台风时,高度均可上升至18 km。除沿台风中心300 km内存在明显的冰水含量高值区外,随着径向距离的增加,远离中心的位置也会出现分散的高值中心,这主要是由于近中心附近受深对流抬升的冰粒子上升到较高的高度后,向外流出下沉,另一方面是由于外围云系本身对流就偏弱,所以这些冰水含量分散的高值中心均只是集中在10 km高度附近。

3.2 不同强度台风的粒子数浓度分布特征

分析过不同强度台风云系的液水和冰水含量后,进一步分析粒子数浓度的分布情况,图15为液态粒子数浓度分布特征,对比图13可以看出,液态粒子数浓度较高的地方与液水含量的高值区非常对应,证明液态粒子集中分布的地方,液水含量也较

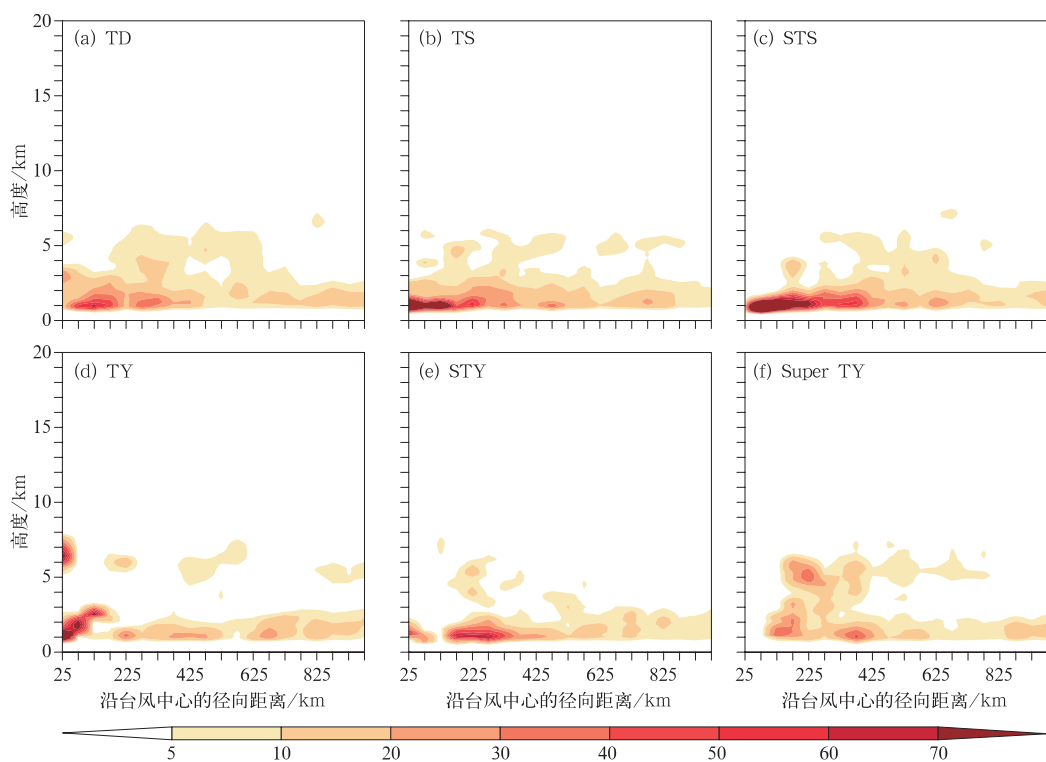
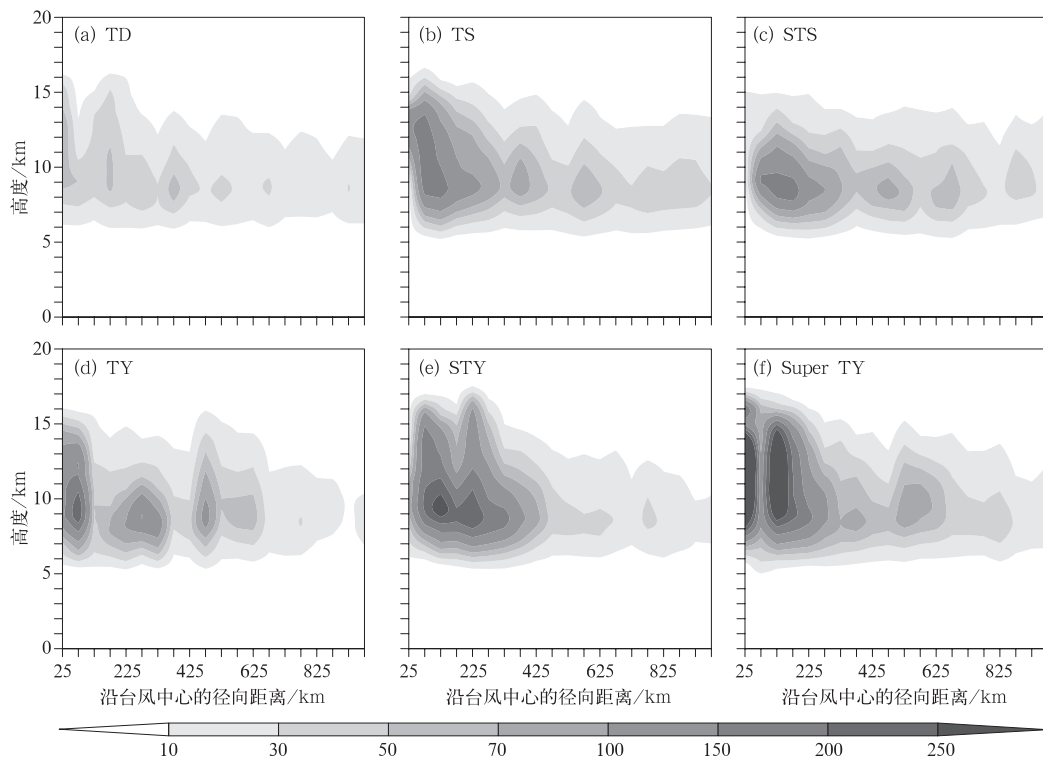
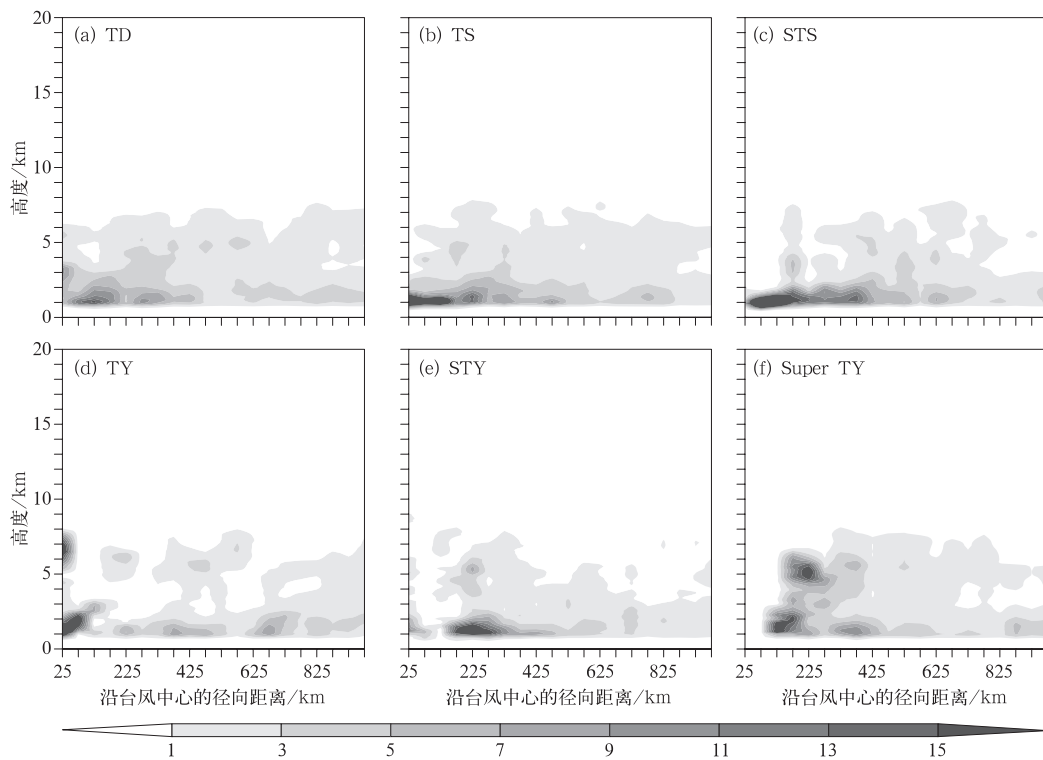


图13 同图5,但为液水含量(单位: $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)

Fig. 13 Same as Fig. 5, but for liquid water content (unit: $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)

图 14 同图 5, 但为冰水含量(单位: $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)Fig. 14 Same as Fig. 5, but for ice water content (unit: $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)图 15 同图 5, 但为液态粒子数浓度(单位: $\text{个} \cdot \text{cm}^{-3}$)Fig. 15 Same as Fig. 5, but for liquid droplet number concentration (unit: cm^{-3})

高。然而,台风云系中冰粒子数的分布(图 16)与液态粒子的分布特征有明显不同。随着台风强度的增

加,近台风中心冰粒子数浓度的分布有明显增加,这一点与冰水含量的变化趋势相同,然而,不同强度的台

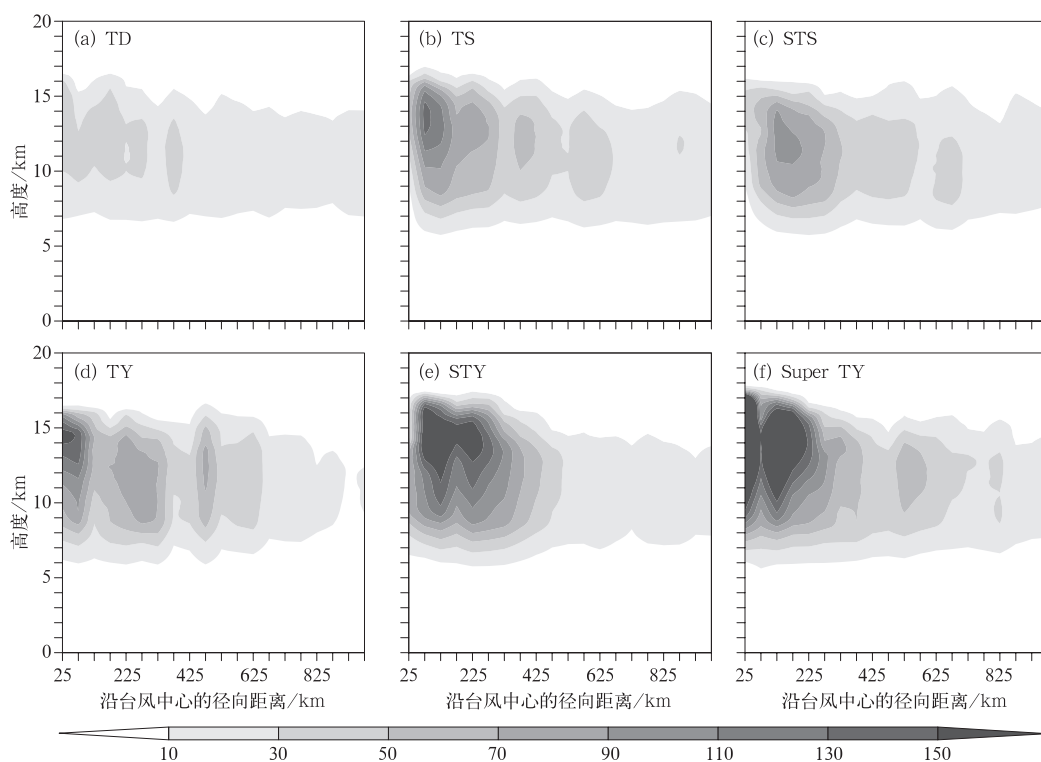


图 16 同图 5, 但为冰粒子数浓度(单位: 个 $\cdot$ L $^{-1}$)

Fig. 16 Same as Fig. 5, but for ice particle number concentration (unit: L $^{-1}$)

风冰水含量的高值区均位于冰粒子数浓度的高值区下方,冰粒子数浓度的高值区均位于 10 km 高度以上,主要集中在 10~15 km。这就说明,随着台风强度的增强,台风中心附近对流活动不断增强,小的冰粒子会带到高处,而大的冰粒子会集中在 9~11 km 附近,所以此高度区域为冰水含量的高值区。

4 结 论

尽管针对西太平洋的台风研究较多,但针对不同强度台风云系垂直结构的系统性分析还有待进一步开展,本研究就从台风云层和云类型的垂直结构分布、微物理结构等多方面对台风进行了分析,分别从不同台风强度和距台风中心不同距离详细分析了西太平洋台风云系的宏微观特征,本文得到的主要结论如下:

(1) 无论何种强度的台风,台风云系中均是单层云占主导,多层云中双层云出现比例最高。随着台风强度的增强,距离台风中心 250 km 之内,单层云分布位置更加集中且垂直厚度较厚,而 450 km 之外的单层云一直集中在 7~15 km,厚度较薄;双层云随着强度增强,在距离中心 250 km 内,底层云和顶层云均增厚且分布位置更加集中,云间距变窄,

而外围云带的顶层云和底层云一直较薄,云间距依然较大。

(2) 通过对比不同强度台风云系中的 7 种云类型分布情况可以看出,深对流云、高层云、卷云分布的垂直范围较广,出现频率较高,分布的位置会随着台风强度变化和沿台风中心径向距离的增加有明显的变化。然而高积云、层积云、积云、雨层云在不同强度台风中沿径向距离的分布较为均匀,且总体出现频率较低,其中雨层云分布的最为松散。

(3) 随着台风强度的增强,近台风中心 5 km 以上的回波有明显增强,且高度随着对流的活跃有明显抬升。随着沿中心径向距离增加,回波逐渐减弱,分布高度逐渐下降,但成熟台风距中心 450 km 外也会出现多个明显的柱状回波高值区。

(4) 在台风云系的微物理特征方面,随着台风强度的增强,近台风中心液水含量的值和冰水含量的值均有明显增加。液水含量的高值区主要集中在距离台风中心 400 km 范围之内。冰水含量的高值区主要分布在距台风中心 300 km 之内,但是由于中心附近对流抬升的冰粒子上升到较高的高度后,向外流出下沉,使得外围云系中也会出现多个分散的高值中心,但由于外围对流相对较弱,所以只是集中在 10 km 高度附近。除此之外,液水粒子数浓度

的高值区域与液水含量的高值区非常对应,而冰水含量的高值区位于冰粒子数浓度的高值区下方,这就表明小的冰粒子被较强的对流活动带到了高处,而大的冰粒子集中在台风云系较低处。

CloudSat 卫星是太阳同步轨道卫星,沿轨分辨率较窄,该卫星的主要优势就是星载雷达 CPR 的穿透能力,但其无法实现对台风的连续监测,未来我们会在此项工作的基础上,结合风云静止气象卫星,对台风云系进行更为深入的研究。

参考文献

- 陈联寿,孟智勇,2001. 我国热带气旋研究十年进展[J]. 大气科学,25(3):420-432.
- 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.
- 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.
- 高拴柱,董林,许映龙,等,2018. 2016 年西北太平洋台风活动特征和预报难点分析[J]. 气象,44(2):284-293.
- 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.
- 黄荣辉,陈光华,2007. 西北太平洋热带气旋移动路径的年际变化及其机理研究[J]. 气象学报,65(5):683-694.
- 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[J]. 气象学报,59(5):602-615.
- 李小青,杨虎,游然,等,2012. 利用风云三号微波成像仪资料遥感“桑达”台风降雨云结构[J]. 地球物理学报,55(9):2843-2853.
- 史兰红,崔林丽,赵兵科,等,2015. 台风眼壁及周围螺旋云带云属性垂直分布研究[J]. 热带气象学报,31(1):51-62.
- 汪会,罗亚丽,张人禾,2011. 用 CloudSat/CALIPSO 资料分析亚洲季风区和青藏高原地区云的季节变化特征[J]. 大气科学,35(6):1117-1131.
- 王瑾,江吉喜,2005. AMSU 资料揭示的不同强度热带气旋热力结构特征[J]. 应用气象学报,16(2):159-166.
- 王帅辉,韩志刚,姚志刚,等,2011. 基于 CloudSat 资料的中国及周边地区各类云的宏观特征分析[J]. 气象学报,69(5):883-899.
- 许映龙,吕心艳,张玲,等,2015. 1323 号强台风菲特特点及预报难点分析[J]. 气象,41(10):1222-1231.
- 严卫,韩丁,周小珂,等,2013. 利用 CloudSat 卫星资料分析热带气旋的结构特征[J]. 地球物理学报,56(6):1809-1924.
- 叶培龙,王天河,尚可政,等,2014. 基于卫星资料的中国西部地区云垂直结构分析[J]. 高原气象,33(4):977-987.
- 游然,卢乃锰,邱红,等,2011. 用 PR 资料分析热带气旋卡特里娜降水特征[J]. 应用气象学报,22(2):203-213.
- 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[J]. 气象学报,66(2):213-223.
- 张蕾,史兰红,徐健,等,2016. 热带气旋“桑美(2006)”冰云微物理属性垂直分布规律[J]. 热带海洋学报,35(3):30-40.
- 张守峰,余晖,向纯怡,2015. 中央气象台台风强度综合预报误差分析[J]. 气象,41(10):1278-1285.
- 赵妹慧,周毓荃,2010. 利用多种卫星研究台风“艾云尼”宏微观结构特征[J]. 高原气象,29(5):1254-1260.
- 郑艳,程守长,蔡亲波,等,2018. 台风鲸鱼(1508)路径和降水业务预报偏差原因分析[J]. 气象,44(1):170-179.
- Chan K T F, Chan J C L, 2012. Size and strength of tropical cyclones as inferred from QuikSCAT data[J]. Mon Wea Rev, 140(3): 811-824.
- Chen Lianshou, Luo Huibang, Duan Yihong, et al, 2004. An overview of tropical cyclone and tropical meteorology research progress [J]. Adv Atmos Sci, 21(3): 505-514.
- Delanoë J, Hogan R J, 2010. Combined CloudSat-CALIPSO-MODIS retrievals of the properties of ice clouds[J]. J Geophys Res, 115(D4): D00H29.
- Durden S L, Tanelli S, Dobrowalski G, 2009. CloudSat and A-train observations of tropical cyclones[J]. Open Atmos Sci J, 3(1): 80-92.
- Griffin S M, Bedka K M, Velden C S, 2016. A method for calculating the height of overshooting convective cloud tops using satellite-based IR imager and CloudSat cloud profiling radar observations [J]. J Appl Meteor Climatol, 55(2): 479-491.
- Houze R A Jr, Cetrone J, Brodzik R, et al, 2006. The hurricane rain-band and intensity change experiment: observations and modeling of hurricanes Katrina, Ophelia, and Rita[J]. Bull Amer Meteor Soc, 87(11): 1503-1521.
- Jin Yi, Wang Shouping, Nachamkin J, et al, 2014. The impact of ice phase cloud parameterizations on tropical cyclone prediction[J]. Mon Wea Rev, 142(2): 606-625.
- 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(7): 1645-1660.
- Luo Yali, Zhang Renhe, Wang Hui, 2009. Comparing occurrences and vertical structures of hydrometeors between eastern China and the Indian monsoon region using CloudSat/CALIPSO data[J]. J Climate, 22(4): 1052.
- Posselt D J, Stephens G L, Miller M, 2008. CLOUDSAT: adding a new dimension to a classical view of extratropical cyclones[J]. Bull Amer Meteor Soc, 89(5): 599-609.
- Sanger N T, Montgomery M T, Smith R K, et al, 2014. An observational study of tropical cyclone spinup in supertyphoon jangmi (2008) from 24 to 27 September[J]. Mon Wea Rev, 142(1): 3-28.
- Tourville N, Stephens G, DeMaria M, et al, 2015. Remote sensing of tropical cyclones: observations from CloudSat and A-train profilers[J]. Bull Amer Meteor Soc, 96(4): 609-622.
- Wang Xin, Fang Xiang, Qiu Hong, 2015. Monitoring tropical cyclone evolution with FY-3C and NOAA satellites microwave observations [C] // 2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Milan, Italy: IEEE, 181-183.
- Yokoyama C, Takayabu Y N, 2008. A statistical study on rain characteristics of tropical cyclones using TRMM satellite data[J]. Mon Wea Rev, 136(10): 3848-3862.