

李香淑, 郭学良, 付丹红, 等. 2011. 南海季风爆发期间中尺度对流云带演变特征与持续性加强的机理研究 [J]. 大气科学, 35 (2): 259–271. Li Xiangshu, Guo Xueliang, Fu Danhong, et al. 2011. Studies of evolution features and persistent development mechanism of mesoscale convective clouds over the northern South China Sea [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35 (2): 259–271.

南海季风爆发期间中尺度对流云带演变特征与持续性加强的机理研究

李香淑^{1,2,4} 郭学良^{2,3} 付丹红² 杨保¹

1 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000

2 中国科学院大气物理研究所云降水与强风暴实验室, 北京 100029

3 中国气象科学研究院, 北京 100081

4 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘 要 南海季风爆发与随后爆发的东亚季风, 与夏季东亚地区旱涝关系密切, 而相伴的南海对流活动与季风爆发的维持和发展存在何种相互关系, 是需要探究的。为此, 利用热带测雨卫星 (Tropical Rainfall Measuring Mission, TRMM) 的雷达 (Precipitation Radar, PR)、微波成像仪 (TRMM Microwave Imager, TMI)、加密探空等综合观测资料, 研究了 1998 年 5~6 月中国南海季风试验 (South China Sea Monsoon Experiment, SCSMEX) 期间南海北部 (15°N~25°N, 108°E~122°E) 中尺度对流云带的结构、演变和降水特征, 探讨了对流有效位能、风切变及相变潜热在对流云带维持和发展中的作用机理。结果表明, 季风爆发前南海北部地区尽管存在较大的对流有效位能 (convective available potential energy, CAPE), 但垂直风切变很小。季风爆发后, 季风环流使对流有效位能和垂直风切变加强和维持, 从而导致南海的对流云呈现维持和加强的态势, 可发展为深厚中尺度对流云, 降水加强。季风爆发期间对流发展产生的水分相变潜热加热率可增加 2 倍以上, 加热、加湿廓线幅度加大、厚度变深, 不仅为南海热量、水汽的向上持续性传输提供了有利条件, 而且频繁持续的对流活动所提供的热力、动力效应对季风环流的发展和维持的是起正作用的。

关键词 中国南海季风试验 (SCSMEX) 中尺度对流云 热带测雨卫星 (TRMM) 结构与降水

文章编号 1006-9895 (2011) 02-0259-13

中图分类号 P426

文献标识码 A

Studies of Evolution Features and Persistent Development Mechanism of Mesoscale Convective Clouds over the Northern South China Sea

LI Xiangshu^{1,2,4}, GUO Xueliang^{2,3}, FU Danhong², and YANG Bao¹

1 Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000

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

3 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

4 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract By using data of Precipitation Radar (PR) and Microwave Imager (TMI) sensors on the Tropical Rainfall Measuring Missions (TRMM), and intensive observational sounding data, the evolution characteristics and long-

收稿日期 2010-03-31, 2010-09-25 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40575003、41005072 和国家科技支撑计划项目 2006BAC12B03

作者简介 李香淑, 女, 1981 年出生, 博士研究生, 研究方向: 云物理、大气探测、卫星遥感资料应用。E-mail: lixiangshu36@163.com

lasting development mechanism of mesoscale convective clouds over the northern South China Sea ($15^{\circ}\text{N} - 25^{\circ}\text{N}$, $108^{\circ}\text{E} - 122^{\circ}\text{E}$) in the South China Sea Monsoon Experiment (SCSMEX) are studied. The results show that the cold frontal cloud band from southern China coastal region started to weaken and dissipate as it entered the South China Sea before onset of the monsoon, and intensified and developed into deeper and long-lasting convective clouds with heavy precipitation after onset of the monsoon. The convective available potential energy (CAPE), wind shear and latent heat were found to play very important roles in maintaining and developing of the intense convective clouds. Before the monsoon onset, though the atmosphere over the northern South China Sea had higher CAPE, the wind shear was too weak, thus, the convective cloud band could not last longer. During the monsoon period, the monsoon circulation maintained the high CAPE and wind shear, and led to a long-lasting development of intense convective cloud system. The heating rate due to latent heat release also increased more than two times during the monsoon period, which provided the favorable condition for upward transportation of energy and water vapor from the ocean.

Key words South China Sea Monsoon Experiment (SCSMEX), mesoscale convective clouds, Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM), structure and evolution

1 引言

南海季风之所以受到广泛的关注,其中一个很重要的原因是,南海季风的爆发与随后全面爆发的东亚季风有密切的联系,与夏季东亚地区旱涝的发生也存在密切的关系(李崇银和屈昕,2000;何有海等,2000;孙淑清和马淑杰,2003;刘长征等,2004;黄荣辉等,2005)。这说明,南海对流活动产生的热量和水汽垂直输送有可能影响东亚区域大气环流的结构及降水系统。

1998年5~6月间进行的中国南海季风试验(South China Sea Monsoon Experiment,简称SCSMEX)提供了南海季风爆发期间对流系统结构、组织和降水的中尺度观测资料(Lau et al., 2000; Ding and Liu, 2001)。一些研究者利用常规和加密探空资料分析了试验期间伴随季风爆发的大、中尺度环流结构(Chan et al., 2000; Ding and Liu, 2001; Johnson and Ciesielski, 2002)。Wang (2004)利用试验期间收集的双多普勒雷达资料分析了东亚季风爆发早期伴随副热带锋面过境时的中尺度对流系统的结构和演变特征。Johnson et al. (2005)采用雷达和加密探空资料分析了试验期间中尺度对流系统中对流线的分布方向与中、低层垂直风切变的关系。这些研究一般侧重南海季风的环流结构和演变特征研究,或雷达观测的对流系统的发展过程研究。在1998年5月5日开始的南海季风试验加强期观测(Intensive Observational Period,简称IOP)试验期间,发现一个很特别的现象,南海季风爆发前,每隔2~4天就有来自中国西北

的冷锋面云带进入沿海地区,锋面南部云带经过我国沿海进入南海后,就会减弱和消散。但5月15日季风爆发后,进入南海的锋面云带系统不但没有减弱,而是出现显著加强和长时间维持情况。产生这种情况的原因显然与季风爆发有关。那么,究竟南海季风爆发与海洋对流云带的维持和发展存在何种关系,有关方面的研究很少,其中一个很重要的原因是缺乏对南海对流云带结构和环流特征的直接观测资料。

有关海洋热带对流的研究表明,垂直风切变和对流有效位能(convective available potential energy,简称CAPE)是影响热带对流组织和结构的两个主要因素(Moncrieff and Green, 1972; Weisman and Klemp, 1986)。一些在其他海洋地区的观测研究(Alexander and Young, 1992; LeMone et al., 1998)也表明,环境风对对流云带的结构、方向和移动具有强烈影响。中低层垂直切变是决定对流云带方向的关键因子,而CAPE主要影响对流云带的厚度和生命期。数值试验结果也支持这一结论(Robe and Emanuel, 2001)。由此可见,热带海洋地区对流系统的形成与大气环流动力结构和热力状况密切相关。一方面,海洋大气的动力、热力状态改变导致了海洋对流的维持和发展,另一方面热带海洋地区的对流系统的发展伴随着水分相变和潜热释放,直接影响到对流的结构和组织,并有可能进一步影响较大范围的大气环流结构和降水系统。

基于以上问题,本文将利用TRMM卫星的测雨雷达(PR)和微波成像仪(TMI)观测资料。这

两种资料可以提供对流云带回波和云物理结构特征, 可以揭示季风爆发前后对流发展和降水演变特征, 再结合加强观测期的加密探空资料, 获取季风爆发前后的对流有效位能和风切变特征, 研究对流云带演变与有效位能、风切变的关系, 目的是进一步探讨南海季风爆发期间对流云带长时间维持和发展的机理。

2 数据资料

1998 年 5~8 月的南海季风综合观测试验为期 4 个月, 包括大气观测、海洋观测、海气界面观测、卫星观测等。在 5 月 5~25 日和 6 月 5~25 日期间分别进行了两次加强观测实验 (Intensive Observational Periods, 简称 IOPs), 加密试验区为南海及附近地区 ($10^{\circ}\text{S}\sim 30^{\circ}\text{N}$, $95^{\circ}\text{E}\sim 130^{\circ}\text{E}$), 设置了南北两个中尺度观测网, 进行了包括探空、无人飞机、双多普勒雷达、辐射、边界层通量及海洋综合观测等。

由南海北部加强观测区 ($0^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$, $80^{\circ}\text{E}\sim 130^{\circ}\text{E}$) 加密探空得到的格点资料, 其水平分辨率为 10 km, 每 6 小时一次, 垂直 40 个等压面, 从 1000 hPa 到 25 hPa。另外, 还有南海北部多边形区域平均后的格点资料。本文采用的 TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission, 简称 TRMM) 降水测量雷达 (Precipitation Radar, 简称 PR) 资料集 (2A25), 是通过雷达反射率因子订正, 反演雨强垂直廓线, 得到降水强度和雷达反射率的三维分布。PR 资料的水平分辨率较低, 为 4.0 km, 垂直分辨率较高, 为 0.25 km, 扫描带宽度为 220 km。采用的微波成像仪 (TRMM Microwave Imager, 简称 TMI) 资料 (2A12) 是在前期资料 (1B11) 基础上, 用辐射计数据和云模式混合的廓线算法加工生成的数据资料, 该数据资料提供了水汽凝结体的垂直廓线, 在垂直方向 14 个高度层上的可降水量、可降云冰量及云水、云冰和相应潜热的空间分布, 还包括瞬时地面降水强度和对流性降水强度。另外, 还使用了 TRMM 3B42 数据集, 是 PR 的 2A25 算法和 TMI 的 2A12 算法融合后的格点产品, 1440×400 的网格是每 3 小时一次地面降水强度值 (单位: mm/h), 为 TRMM 的三级资料产品, 具有较高的准确率。

3 南海季风爆发期间对流云带的演变和云物理结构特征

1998 年 5 月 5 日开始的南海季风试验加强期观测 (IOP) 试验发现, 南海季风爆发前, 每隔 2~4 天就有来自中国西北的冷锋面系统进入沿海地区, 伴随锋面的云带常常从中国南部延伸到其沿海、朝鲜半岛和日本一带。但锋面南部云带经过我国沿海进入南海后, 锋面云带就会减弱和消散。5 月 15 日开始南海北部的低层大气环流开始明显的改变, 低层 850 hPa 副高西侧南海南部为东南风, 而南海北部为西南风, 原来占据南海地区的西太平洋副高东移, 标志着南海季风开始爆发。与此同时, 进入南海的锋面云带系统不但没有减弱, 而是出现显著加强情况 [图 1 (见文后彩图)]。从 5 月 15 日 11:00 时 (北京时, 下同) 的卫星云图 (图 1a) 可以看到, 中国南部沿海地区的锋面云带开始进入南海北部的台湾海峡, 锋面前部并没有减弱, 而是有所加强。到 14:00 (图 1b), 锋面云系前部的对流云带进一步加强。随后云带在向南海中部扩展的同时, 其前部发展为较深厚的对流系统 (图 1c、d)。

图 2 给出了 TRMM 卫星降水测量雷达 (PR) 观测的最大雷达反射率因子和降水率随时间—高度的分布。由图 2a 可以看到, 5 月 15 日之前, 雷达最大回波和回波顶高度都比较小, 说明南海北部地区并没有深厚海洋对流云带产生, 但从 5 月 15 日开始, 南海季风爆发后, 海洋对流发展很快, 回波顶高度达到 20 km 左右。中间因降水过程造成云带强度出现起伏变化, 但总体来说, 对流性系统有长时间的持续性特征, 这和南海季风环流的演变情况基本一致 (李香淑等, 2008)。从雷达反演的降水分布演变情况 (图 2b) 更清楚地看到, 5 月 15 前降水比较小, 5 月 15~21 日之间, 有比较强烈的持续性降水发生, 随后减弱, 6 月 1 日以后降水又迅速增加, 持续降水 10 天左右。因此, 南海季风与南海深厚海洋对流的产生、发展和维持有着非常密切的关系, 季风期间发展的深厚海洋对流会造成强降水过程的发生。

TRMM 卫星搭载的微波成像探头 (TMI) 可实现对云微物理结构的探测, 借助探测资料可实现对海洋对流云中云物理量分布和变化的了解, 实现模式中云物理量的参数化。为了解季风爆发前后海

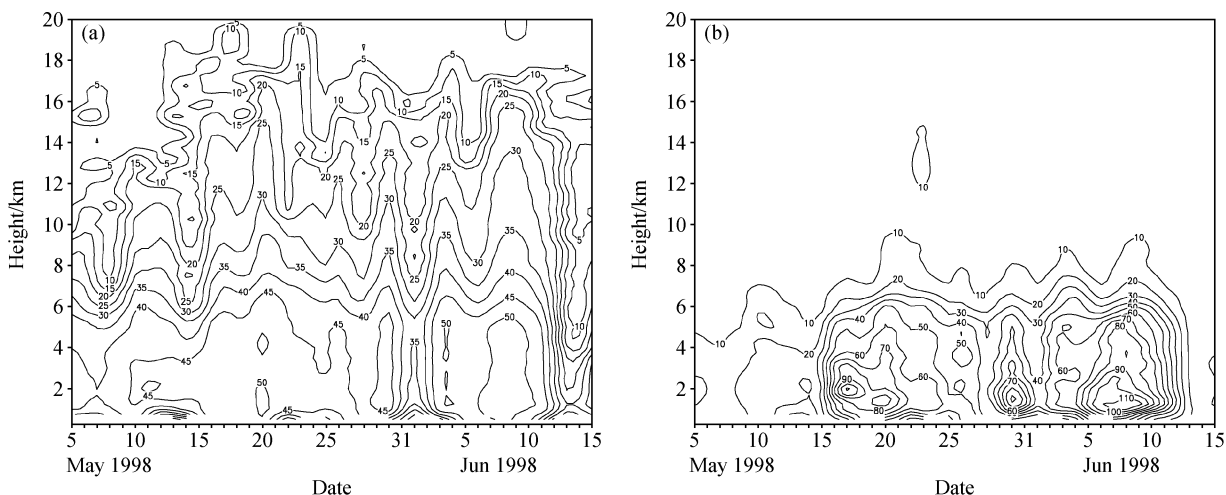


图2 TRMM降水雷达PR观测的南海北部区域($15^{\circ}\text{N}\sim 25^{\circ}\text{N}$, $108^{\circ}\text{E}\sim 122^{\circ}\text{E}$)季风爆发前后(a)最大反射率因子(单位: dBZ)和(b)最大降水率(单位: mm/h)的时间—高度剖面图

Fig. 2 The time-height cross sections of (a) the maximum reflectivity (dBZ) of the cloud systems and (b) the maximum rain rate (mm/h) based on Precipitation Radar (PR) before and after the onset of summer monsoon over the northern SCS ($15^{\circ}\text{N}-25^{\circ}\text{N}$, $108^{\circ}\text{E}-122^{\circ}\text{E}$)

洋对流云中的云的微物理特征,图3给出了卫星探测的对流云中各种云粒子最大含量随时间—高度的分布。可以看到,季风爆发期间对流性云塔发展旺盛,持续时间长(图3a)。 0°C 层高度在5.5 km左右,云塔中具有高云水含量。从云冰的最大含量分布(图3b)看到,季风爆发后,云冰含量显著增加,主要分布在8 km以上,而且很深厚,持续时间长。最大降水性冰粒子和降水性液态水含量分布(图3c、d)也显示出降水的对流特性。最大的降水性冰粒子含量分布在 0°C 层左右。地面总降水和对流性降水强度的时间变化比较一致(图4),说明季风爆发其间总降水显著增加,且主要为持续性对流降水。

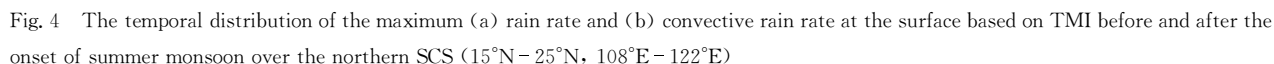
从卫星微波辐射计观测反演的南海北部平均水凝物含量的廓线分布(图5)可以看到季风爆发前后的变化情况。云水含量的廓线(图5a)表明,季风爆发后平均云水含量显著增加,并且到了后期,向高层发展。降水性液态水含量廓线(图5b)显示出,季风爆发后降水性液态水含量显著增加。云冰含量的廓线(图5c)也表现出季风爆发后云冰含量明显增加,并且向高层发展。由于对流的发展,降水性冰粒子含量也出现爆发性增加(图5d),对地面降水的增加起到了重要作用。

下面,利用TRMM卫星微波成像仪(TMI)的观测资料,分别选取了季风爆发初期和爆发期两

次典型对流活动过程,以了解南海季风爆发期间对流云带的微观结构及演变特征。图6(见文后彩图)是TRMM卫星过境时TMI观测的南海北部地区地面降水率分布。5月15日10:40时锋面云系由我国华南地区进入南海北部地区,逐渐发展加强,产生强降水(图6a),中尺度对流云系逐渐向东南方向移动,到17:10时锋面云系移入在南海北部地区,发展具有多个强降水中心的对流云带(图6b)。

图6显示的云带分别沿AB和CD的剖面就可以给出对流云中各种水成物含量的垂直分布(图7和图8)。可以看到中尺度对流云系进入南海地区后云带得到显著加强,多单体特征明显,各种水成物含量明显增加。图7a显示的最大云水含量达到 0.15 g/m^3 ,由于 0°C 层高度在5.5 km左右,因此,云内含有大量过冷云水,这有利于降水粒子的形成。图7b的最大雨水含量为 1.6 g/m^3 ,基本分布在 0°C 层以下,说明主要是冰粒子融化形成的。图7c显示的最大冰晶含量为 0.1 g/m^3 ,位于14 km处,但在18 km以上仍然有冰粒子存在,说明对流云发展比较深厚。图7d的最大降水性冰粒子含量主要分布在 0°C 层附近,达到 1.0 g/m^3 ,是雨水的主要来源。

系统在向南海南部移动过程中,多单体云带不断扩展,在其前方不断产生新的单体,对流云带垂直和水平尺度增大。在17:10时(图8),最大云水



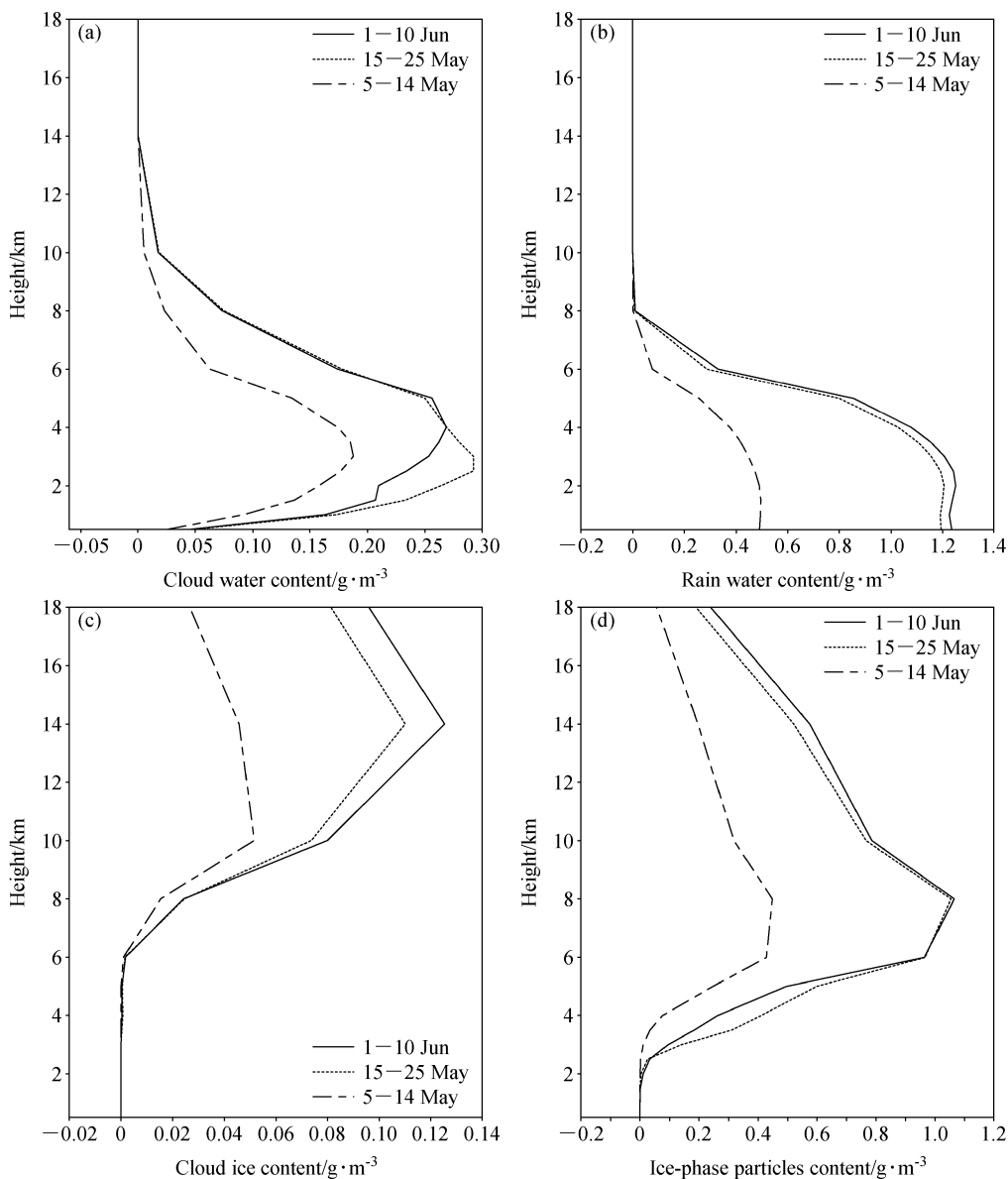


图5 南海季风爆发期间各时期南海北部对流云中平均水凝物的垂直廓线分布:(a)云水;(b)降水性液态水;(c)云冰;(d)降水性固态水

Fig. 5 The vertical cross sections of (a) cloud water, (b) precipitation water, (c) cloud ice, and (d) precipitation ice content based on TMI during the different periods of the onset of the summer monsoon over the northern SCS (15°N–25°N, 108°E–122°E)

含量仍维持在 0.15 g/m^3 。云内雨水含量明显减弱,最大雨水含量为 0.8 g/m^3 。最大冰晶含量减为 0.04 g/m^3 ,最大降水性冰相粒子最大含量为 0.8 g/m^3 。中尺度对流云系在向南海地区移动发展过程中尺度变大,但云内降水性液态粒子逐渐减少。

为进一步验证季风爆发期间从大陆不同区域进入南海的云带是否均出现加强现象,下面给出了5月21~25日期间发生的另一次对流云带演变情况。此次对流活动区域主要集中在南海中、南部及菲律

宾以东的洋面上(图9)。可以看到,从大陆进入洋面的云团也出现显著加强现象。

同样,我们给出了此次过程 TRMM 卫星微波成像仪测量的云带水平和垂直结构演变特征(图10)。5月24日12:43~12:47卫星过境时,云带位于我国西南部和南海西北部地区,呈南北向分布,分布在大陆上的云带降水率比较弱,而进入南海的云带降水率显著增强(图10a)。对流云带向东南洋面移动过程中,产生强降水后减弱(图10b)。

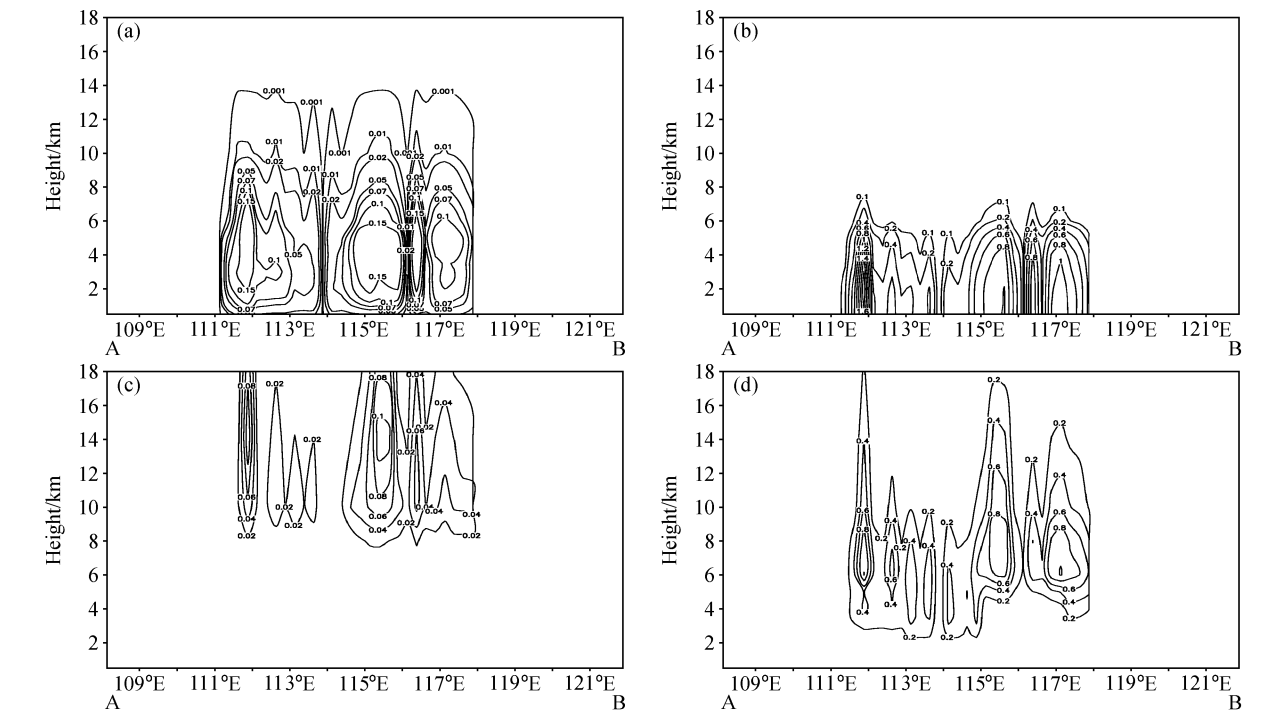


图 7 1998 年 5 月 15 日 2653 轨道 TMI 观测的沿图 6 直线 AB (22. 37°N) 各水成物含量的垂直分布 (单位: g/m^3): (a) 云水含量; (b) 雨水含量; (c) 云冰含量; (d) 降水性冰粒子含量

Fig. 7 The vertical cross sections of hydrometeors content (g/m^3) along line AB (22. 37°N) shown in Fig. 6: (a) Cloud water; (b) precipitation water; (c) cloud ice; (d) precipitation ice

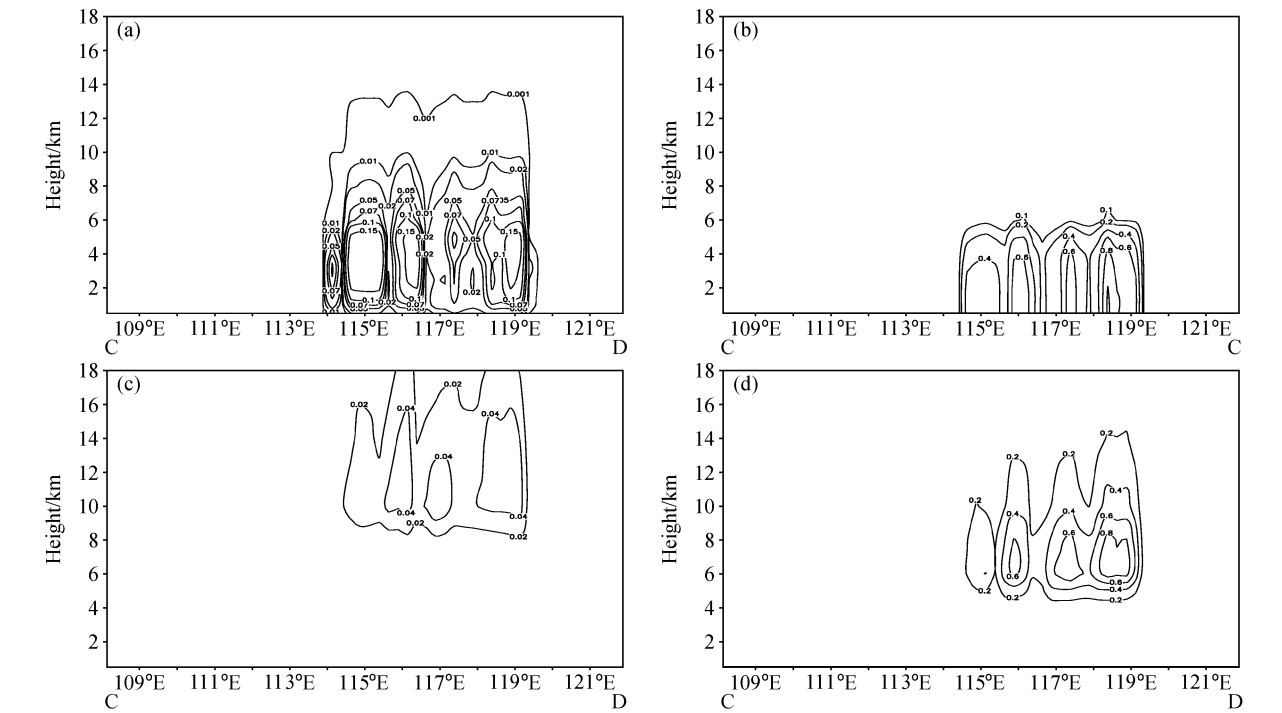


图 8 同图 7, 但为 TRMM 2657 轨道沿图 6 直线 CD 的垂直分布

Fig. 8 Same as Fig. 7, but for the vertical cross sections along line CD shown in Fig. 6

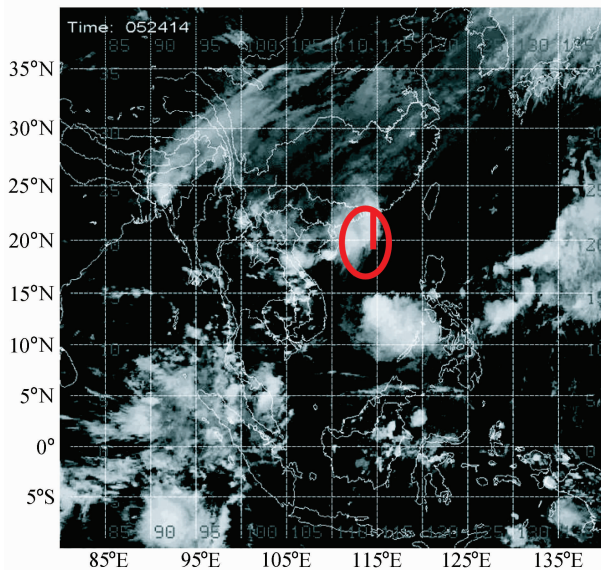


图9 1998年5月24日14:00南海区域(30°N~10°S, 95°E~180°) GMS红外云图分布

Fig. 9 Infrared imagery from GMS-5 at 1400 BJT 24 May 1998 over the South China Sea (30°N–10°S, 95°E–180°)

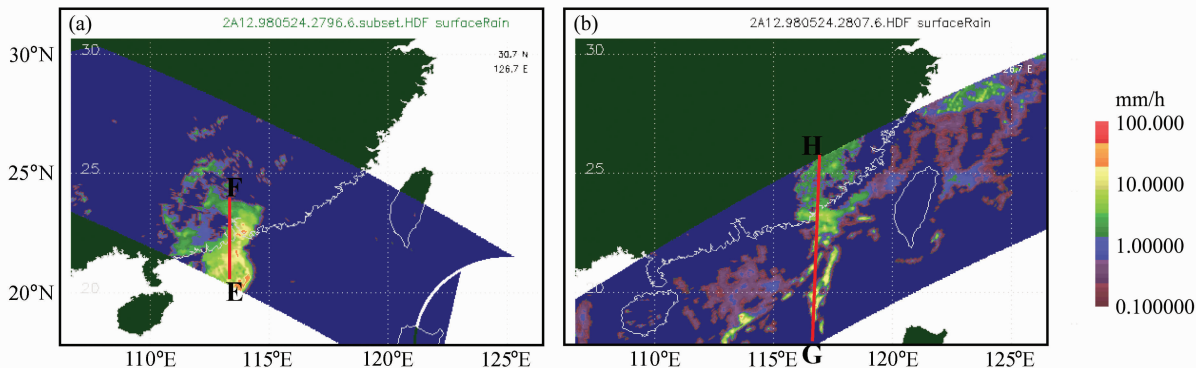


图10 1998年5月24日至25日南海北部季风试验区 TRMM微波成像仪(TMI)地面降水率分布:(a) 2796轨道(约24日12:43~12:47); (b) 2807轨道(约25日05:02~05:06)

Fig. 10 The surface rain rate observed by TMI during 24–25 May: (a) Orbit 2796 (1243–1247 BJT on 24 May); (b) orbit 2807 (0502–0506 BJT on 25 May)

图10中沿EF、GH的剖面显示的云带垂直结构分别由图11和图12给出。大陆一端的云带比较弱,云水含量低,而进入海洋的云带深厚,含水量大,最大云水含量可达 0.15 g/m^3 (图11a)。云内也含有大量过冷云水。进入海洋的云带快速形成雨水,最大雨水含量达到 1.8 g/m^3 ,位于 2.5 km 以下(图11b)。从云冰和降水性冰粒子垂直分布(图11c、d)看到,云团进入海洋后,云的高度显著提高,形成大量的冰晶,最大冰晶含量达到 0.16 g/m^3 ,位于 11.0 km 至 16.0 km 处。大量冰晶的快速生长形成降水性冰粒子,最大降水性冰粒子含量

达到 1.6 g/m^3 ,位于 0°C 层以上的 8.0 km 处。云带向东南移动过程中,由于强降水导致云带减弱(图12)。云内低层云水含量增加,而过冷云水、冰晶和降水性粒子减小。

4 对流有效位能、风切变与相变潜热在南海对流云形成和发展中的作用

在引言中我们曾提到,对流有效位能(convective available potential energy, CAPE)和风切变是影响海洋对流系统的形成、结构和组织的主要因子,为了解对流有效位能和风切变在南海北部对流

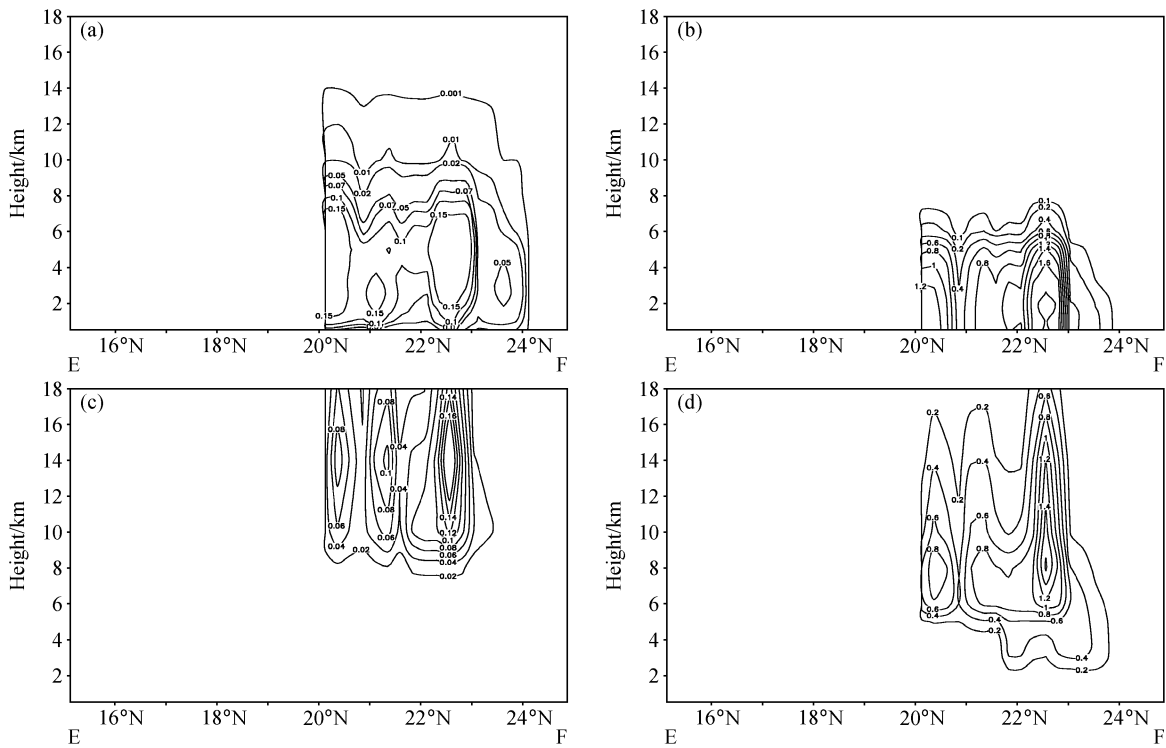


图 11 同图 7, 但为 1998 年 5 月 24 日 TRMM2796 轨道沿图 10 直线 EF 的垂直分布

Fig. 11 Same as Fig. 7, but for the vertical cross sections along line EF shown in Fig. 10 on May 24 1998

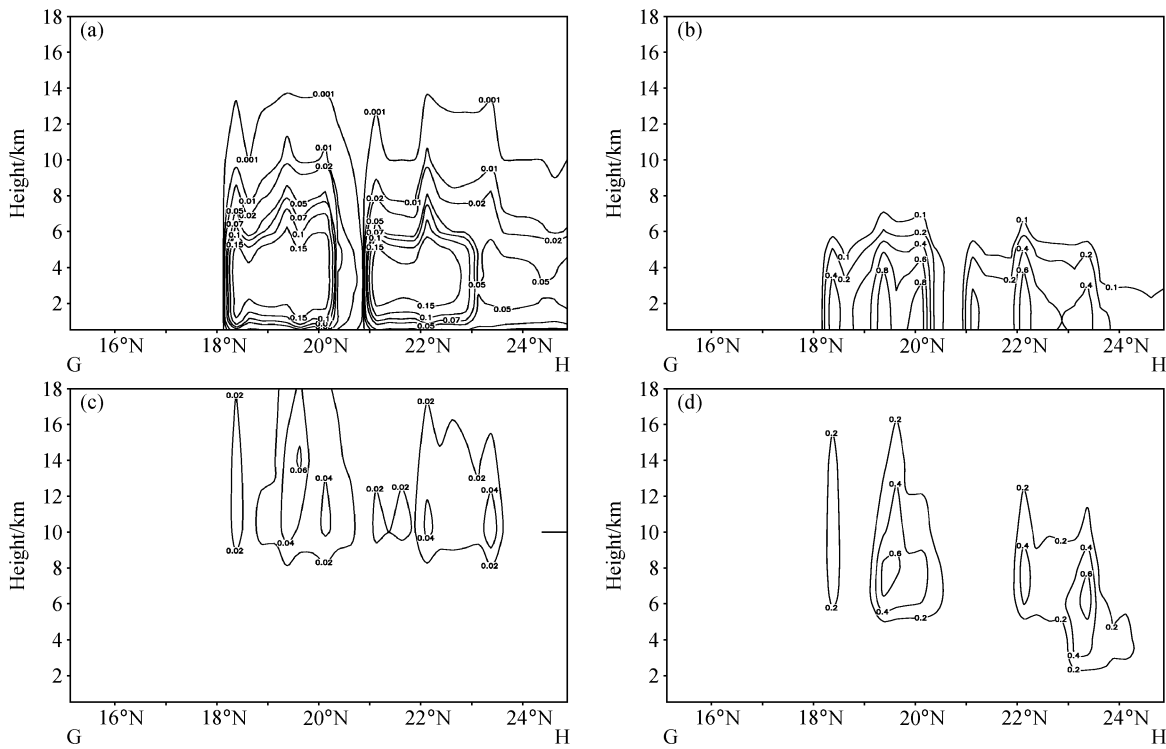


图 12 同图 7, 但为 1998 年 5 月 25 日 TRMM 2807 轨道沿图 10 直线 GH 的垂直分布

Fig. 12 Same as Fig. 7, but for the vertical cross sections along line GH shown in Fig. 10 on May 25 1998

系统形成和发展中的作用,这里给出了季风爆发前后南海北部CAPE和风切变的变化情况。

CAPE的计算方程如下:

$$CAPE = g \int_{L_{FC}}^{E_L} \frac{T_{VP} - T_{VE}}{T_{VE}} dz,$$

其中, E_L (Equilibrium Level) 为平衡高度, L_{FC} (Level of Free Convection) 为自由对流高度, T_{VP} 为气块的虚温, T_{VE} 为环境的虚温。

平均垂直风切变的表达式为:

$$S = \frac{\sqrt{(\bar{u}_{6.0}^2 + \bar{v}_{6.0}^2)} - \sqrt{(\bar{u}_{0.5}^2 + \bar{v}_{0.5}^2)}}{H_{6.0} - H_{0.5}},$$

其中, S 为垂直风切变 (单位: s^{-1}), $\bar{u}_{6.0}$ 和 $\bar{v}_{6.0}$ 为 6 km 的平均水平风 (单位: m/s), $\bar{u}_{0.5}$ 和 $\bar{v}_{0.5}$ 为 0.5 km 近地层平均风。 $H_{6.0}=6000$ m, $H_{0.5}=500$ m。

图 13 和图 14 分别为平均 CAPE 和平均垂直风速切变随时间的变化。可以看到, CAPE 和垂直风速切变在季风爆发前后的几次对流活动中都有明显的变化。5 月 15 日季风爆发之前, 南海北部的 CAPE 较大, 最大值达 1900 J/kg, 但垂直风速切变很小, 对流并没有发展和维持下去, 这是造成进入南海的对流云带减弱消亡的原因。5 月 15 日季风爆发后, CAPE 和垂直风切变虽然也出现多次起伏变化, 除个别几天外, CAPE 值基本维持在 1200 J/kg 至 1400 J/kg, 最大达到 2300 J/kg, 垂直风速切变也比较大, 云内含有大量冰相粒子 (图 3), 地面降水主要为对流性降水 (图 4), 说明对流系统维持和发展的环境条件比较好。实际观测的对流在这一阶段也是最强的, 说明有效位能释放的环境条件也

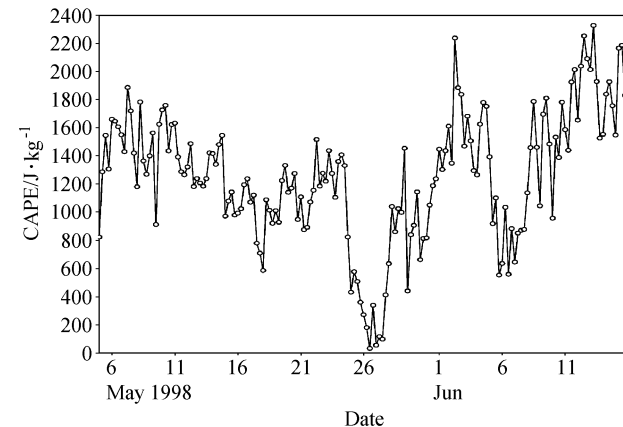


图 13 南海北部 (15°N~25°N, 108°E~122°E) 平均对流有效位能随时间的演变

Fig. 13 Time sequence of averaged convective available potential energy (CAPE) over the northern SCS (15°N–25°N, 108°E–122°E)

非常有利。5 月 24 日南海北部地区的 CAPE 逐渐减弱, 而垂直风切变逐渐增强, 5 月 27 日南海北部地区 CAPE 约为 100 J/kg, 垂直风切变约为 4.0 m/s 左右, 从地面总降水和对流性降水强度的时间变化 (图 4) 可以看到, 地面总降水率为 30 mm/h, 对流性降水为 24 mm/h, 云内水成物含量主要为云水和液态水为主 (图 3), 说明较小的对流有效位能 (CAPE) 不利于对流向高层发展, 使得云内冰相过程减弱, 而较强的低层风切变有利于暖云过程的发展, 进而形成相对较强的地面降水。从 CAPE 的变化可以看到, 南海季风爆发前, 大气中存在高有效位能, 但环境风切变很小, 对流没有维持和发展, 而直到南海季风爆发, 对流才得以维持和发展。这说明 CAPE 和垂直风切变两者缺一不可。已有的研究也表明, 较强的环境风垂直切变有利于增强或延长雷暴的生命史。大量的数值试验也表明, 强对流天气可以发生在弱垂直风切变和强位势不稳定条件下, 也可以产生在相反的环境中。也就是说垂直风切变与位势不稳定两者之间存在着某种平衡关系。

为了解水物质的相变过程所产生的潜热释放对南海对流云带的作用, 图 15 给出了南海北部区域季风爆发前后最大潜热加热率随时间—高度的分布, 可以看到, 南海季风爆发前, 由于海洋对流弱, 水汽发生的相变少, 引起的对流潜热加热率较小, 季风爆发后引起的强烈对流活动使得潜热加热率增加 2 倍以上, 并且部分达到对流层顶部。这种潜热的向上输送是否会局地大气环流的变化, 有待

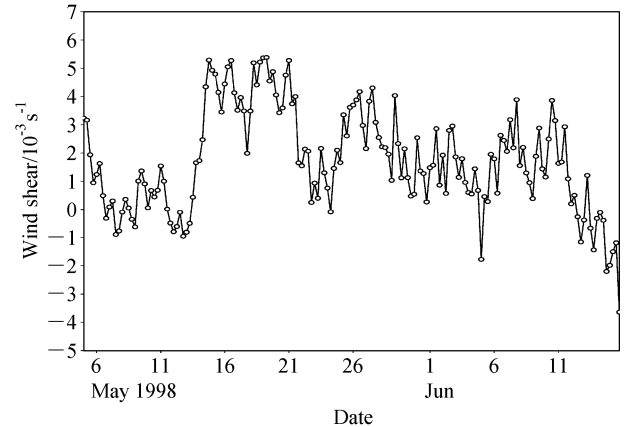


图 14 南海北部 (15°N~25°N, 108°E~122°E) 平均垂直风速度切变随时间的演变

Fig. 14 Time sequence of the domain averaged vertical wind shear over the northern SCS (15°N–25°N, 108°E–122°E)

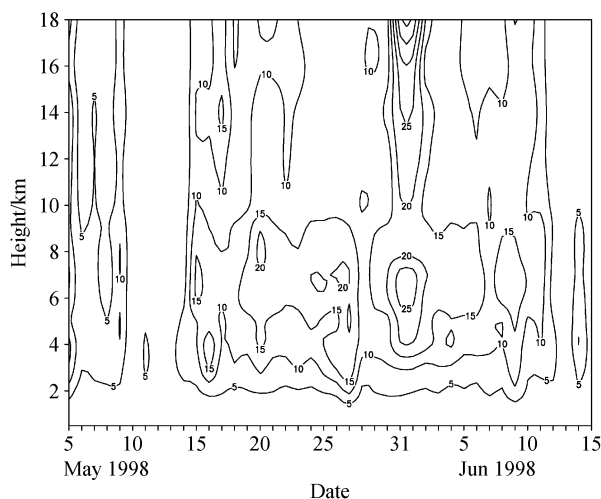


图 15 南海北部区域 ($15^{\circ}\text{N}\sim 25^{\circ}\text{N}$, $108^{\circ}\text{E}\sim 122^{\circ}\text{E}$) 最大潜热加热率 (单位: $^{\circ}\text{C}/\text{h}$) 随时间和高度的变化

Fig. 15 The temporal distribution of the maximum heating rate ($^{\circ}\text{C}/\text{h}$) due to latent heat release based on TMI before and after the onset of summer monsoon over the northern SCS ($15^{\circ}\text{N} - 25^{\circ}\text{N}$, $108^{\circ}\text{E} - 122^{\circ}\text{E}$)

进一步的深入研究。

5 结论

利用热带测雨卫星 (TRMM) 的雷达 (PR)、微波成像仪 (TMI) 及加密探空等综合探测信息, 研究了 1998 年 5~6 月中国南海季风试验 (SCS-MEX) 期间南海北部 ($15^{\circ}\text{N}\sim 25^{\circ}\text{N}$, $108^{\circ}\text{E}\sim 122^{\circ}\text{E}$) 夏季风爆发期间中尺度对流云带的形成和发展演变特征。研究结果表明, TRMM 卫星降水测量雷达 (PR) 观测发现, 季风爆发前, 雷达最大回波和回波顶高度都比较小, 而南海季风爆发后, 海洋对流发展很快, 回波顶高度达到 20 km 左右。雷达反演的降水分布显示出有比较强烈的降水发生。

TRMM 卫星搭载的微波成像探头 (TMI) 反演的云结构显示出季风爆发期间对流云塔发展旺盛, 云冰含量显著增加, 主要分布在 8 km 以上, 而且很深厚。地面总降水在季风爆发其间显著增加, 且主要为对流性降水。

对流有效位能和风切变分析表明, 季风爆发前南海北部地区虽处于大气热力不稳定层结状态, 但垂直风速切变很小, 这不利于强大、生命期长的对流云的发展; 中纬度锋面南部云带经过我国沿海进入南海后, 锋面云带常常减弱和消散。而季风爆发期, 南海北部地区的对流有效位能 (CAPE) 增加,

垂直风速切变增强, 进入南海北部试验区的锋面云带系统不但没有减弱, 而且在南海地区的对流会维持和加强, 发展为较深厚的对流系统, 并伴随着强降水过程发生。季风爆发后期, 南海北部地区 CAPE 逐渐减弱, 垂直环境风切变减小, 云带进入南海北部试验区后逐渐减弱。季风爆发后引起的强烈对流活动使得潜热加热率增加 2 倍以上, 并且部分达到对流层顶部。这种潜热的增加和分布会引起局地大气运动和云型的变化。季风爆发后的云中平均液态水、固态水含量廓线分布显示出显著增加的情况, 并且向高层发展发展成深厚的云体。

参考文献 (References)

- Alexander G D, Young G S. 1992. The relationship between EMEX mesoscale precipitation feature properties and their environmental characteristics [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 120 (4): 554 - 564.
- Chan J C L, Wang Y, Xu J. 2000. Dynamic and thermodynamic characteristics associated with the onset of the 1998 South China Sea summer monsoon [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 78 (4): 367 - 380.
- Ding Y H, Liu Y. 2001. Onset and the evolution of the summer monsoon over the South China Sea during the SCSMEX field experiment in 1998 [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 79 (1B): 255 - 276.
- 何有海, 彭楚明, 关翠华, 等. 2000. 南海季风爆发与大气对流低频振荡的年际变化 [J]. *大气科学*, 24 (6): 758 - 794. He Youhai, Peng Chuming, Guan Cuihua, et al. 2000. Interannual variations of the onset of the South China Sea summer monsoon and low-frequency oscillation of convective activities in the atmosphere [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 24 (6): 758 - 794.
- 黄荣辉, 顾雷, 徐予红, 等. 2005. 东亚夏季风爆发和北进的年际变化特征及其与热带西太平洋热状态的关系 [J]. *大气科学*, 29 (1): 20 - 36. Huang Ronghui, Gu Lei, Xu Yuhong, et al. 2005. Characteristics of the interannual variations of onset and advance of the East Asian summer monsoon and their associations with thermal states of the tropical western Pacific [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 29 (1): 20 - 36.
- Johnson R H, Ciesielski P E. 2002. Characteristics of the 1998 summer monsoon onset over the northern South China Sea [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 80 (4): 561 - 578.
- Johnson R H, Steven L A, Ciesielski P E, et al. 2005. Organization of oceanic convection during the onset of the 1998 East Asian summer monsoon [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 133 (1): 131 - 148.
- Lau K M, Ding Y H, Wang J T, et al. 2000. A report of the field operations and early results of the South China Sea Monsoon Experiment (SCSMEX) [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 81 (6):

1261–1270.

- LeMone M A, Zipser E J, Trier S B. 1998. The role of environmental shear and thermodynamic conditions in determining the structure and evolution of mesoscale convective systems during TOGA COARE [J]. *J. Atmos. Sci.*, 55 (23): 3493–3518.
- 李崇银, 屈昕. 2000. 伴随南海季风爆发的大尺度大气环流演变 [J]. *大气科学*, 24 (1): 1–14. Li Chongyin, Qu Xin. 2000. Large scale atmospheric circulation evolutions associated with summer monsoon onset in the South China Sea [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 24 (1): 1–14.
- 李香淑, 郭学良, 付丹红. 2008. 南海季风爆发期间大气环流结构与对流热量、水汽输送特征 [J]. *气候与环境研究*, 13 (1): 93–101. Li Xiangshu, Guo Xueliang, Fu Danhong. 2008. Atmospheric structure and characteristics of convection transport of heat and moisture during monsoon onset over South China Sea [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 13 (1): 93–101.
- 刘长征, 王会军, 姜大膀. 2004. 东亚季风区夏季风强度和降水的配置关系 [J]. *大气科学*, 28 (5): 700–712. Liu Changzheng, Wang Huijun, Jiang Dabang. 2004. The configurable relationships between summer monsoon and precipitation over East Asia [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 28 (5): 700–712.
- Moncrieff M W, Green J S A. 1972. The propagation and transfer properties of steady convective overturning in shear [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 98 (416): 336–352.
- Robe F R, Emanuel K A. 2001. The effect of vertical wind shear on radiative-convective equilibrium states [J]. *J. Atmos. Sci.*, 58 (11): 1427–1445.
- 孙淑清, 马淑杰. 2003. 海温异常对东亚夏季风及长江流域降水影响的分析及数值试验 [J]. *大气科学*, 27 (1): 36–52. Sun Shuqing, Ma Shujie. 2003. Analysis and numerical experiment on the relationship between the 1998 summer monsoon activities and SSTa in tropical regions [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 27 (1): 36–52.
- Wang J J. 2004. Evolution and structure of the mesoscale convection and its environment: A case study during the early onset of the Southeast Asian summer monsoon [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 132 (5): 1104–1132.
- Weisman M L, Klemp J B. 1986. Characteristics of isolated convection storms [M]//Ray P S. *Mesoscale Meteorology and Forecasting*. Boston: Amer. Meteor. Soc., 331–358.

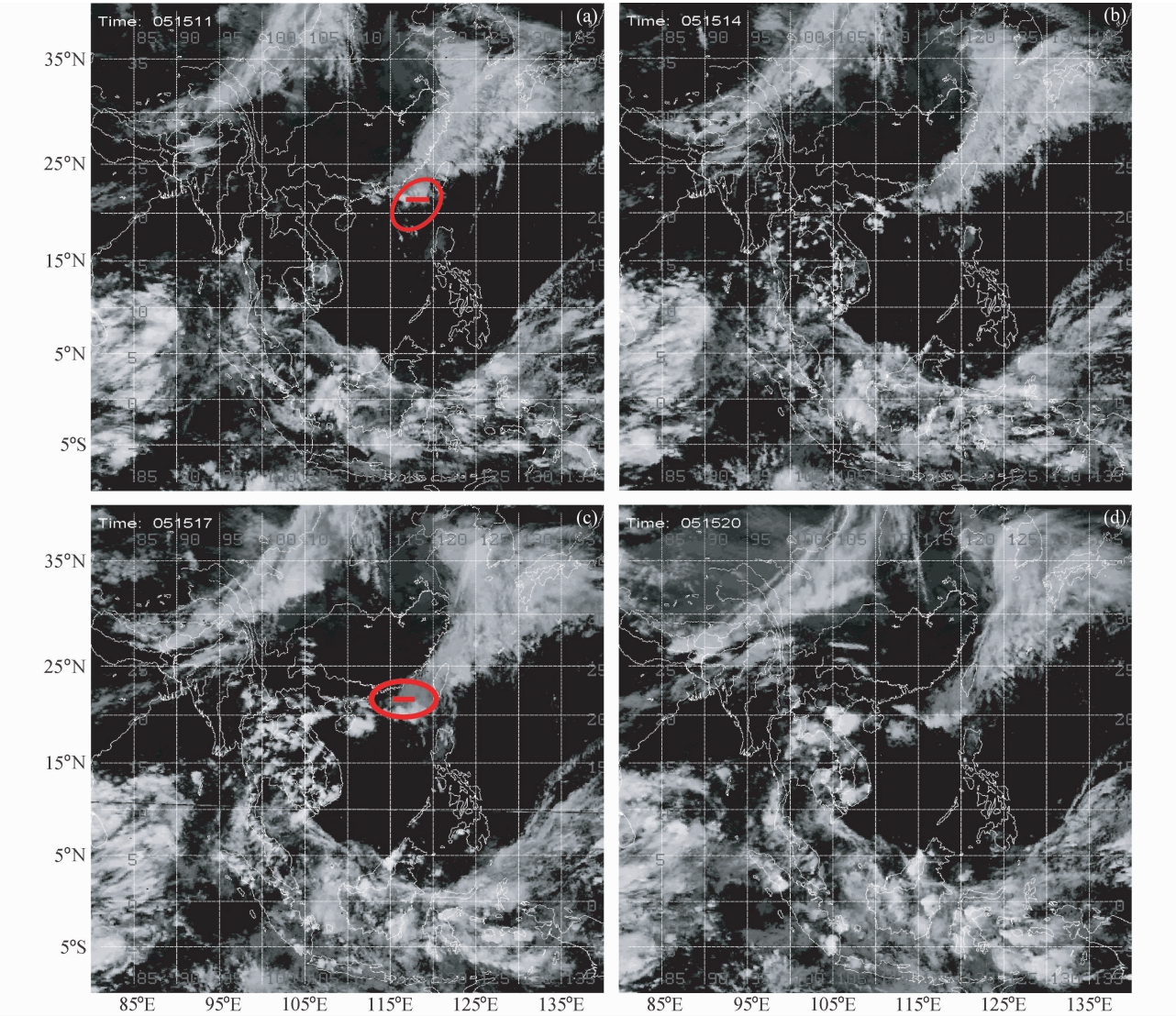


图 1 1998 年 5 月 15 日各时次南海区域 (30°N~10°S, 95°E~180°) GMS 红外云图分布: (a) 11:00; (b) 14:00; (c) 17:00; (d) 20:00
Fig. 1 Infrared imagery from Geostationary Meteorological Satellite-5 (GMS-5) on 15 May 1998 over the South China Sea (SCS) (30°N – 10°S, 95°E – 180°): (a) 1100 BJT (Beijing time); (b) 1400 BJT; (c) 1700 BJT; (d) 2000 BJT

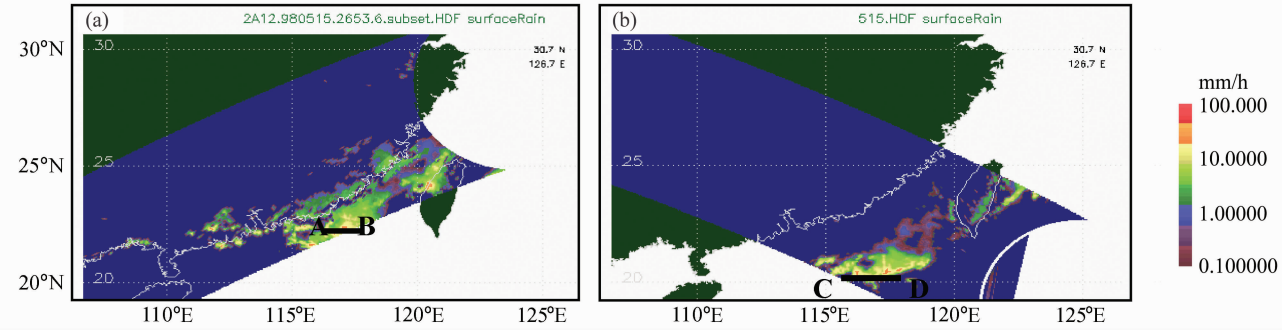


图 6 1998 年 5 月 15 日南海北部季风试验区 TRMM 微波成像仪 (TMI) 地面降水率分布: (a) 2653 轨道 (约 10:41~10:44); (b) 2657 轨道 (约 17:10~17:13)
Fig. 6 The surface rain rate observed by TMI on 15 May over the northern SCS: (a) Orbit 2653 (1041 – 1044 BJT); (b) orbit 2657 (1710 – 1713 BJT)