

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

李香淑^{1,2} 郭学良^{1,3} 付丹红¹

1 中国科学院大气物理所云降水与强风暴实验室, 北京 100029

2 中国科学院研究生院, 北京 100049

3 中国气象科学研究院, 北京 100081

摘要 利用中国南海季风试验(SCSMEX)区1998年5~6月“科学1号”和“实验3号”观测船得到的一天4次加密探空资料,重点分析了南海北部地区(15~25°N, 108~122°E)夏季风爆发前后大气环流的动力、热力和湿度场分布与海洋对流热量和水汽输送特征。结果表明,南海北部季风爆发前后的大气动力场、温湿场出现快速而明显的变化。季风爆发前,南海北部地区高层辐合、低层辐散,以下沉气流为主;季风爆发后,在200 hPa左右高层辐散,而在900~950 hPa左右低层辐合,并出现强上升气流。这种动力场的显著变化引起温度、湿度场的改变,直接导致南海对流的快速发展,对流活动伴随着剧烈的热量和水汽垂直输送和转化。

关键词 中国南海季风试验 季风 动力场 温湿场

文章编号 1006-9585 (2008) 01-0093-09 **中图分类号** P421 **文献标识码** A

Atmospheric Structure and Characteristics of Convection Transport of Heat and Moisture during Monsoon Onset over South China Sea

LI Xiang-Shu^{1,2}, GUO Xue-Liang^{1,3}, and FU Dan-Hong¹

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

2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*

3 *Chinese Academy of Meteorological Science, Beijing 100081*

Abstract Using the sounding data of four times a day in May and June, 1998 collected on two observational ships, that is Kexue 1 and Shiyan 3, during the South China Sea (SCS) Monsoon Experiment (SCSMEX), the structure of dynamics, temperature and moisture, and the characteristics of oceanic convection transport of heat and moisture were analyzed. The results show that the atmospheric dynamics, temperature and humidity experienced a rapid and obvious change after monsoon onset over the SCS. In the period of pre-monsoon, the upper air was convergent and the lower air was divergent showing strong downward air current in the northern SCS. After monsoon onset, the upper air is divergent at 200 hPa and the lower air was convergent between 900 and 950 hPa, showing a strong upward air current. This noticeable change in dynamic field causes the changes of temperature and humidity field, and directly leads to the rapid development of convection over northern SCS, and the convective activity was accompanied by vertically strong transport and transformation of energy and water vapor.

收稿日期 2007-02-13 收到, 2007-11-30 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40575003 和 40333033、国家科技支撑计划 2006BAC12B03 和中国科学院知识创新项目 KZCX3-SW-225

作者简介 李香淑, 女, 1981 年出生, 博士研究生, 主要从事云降水物理、卫星遥感资料应用。E-mail: lixiangshu36@163.com

Key words South China Sea Monsoon Experiment, monsoon, dynamic field, temperature and humidity

1 引言

亚洲季风系统由东亚季风和南亚季风两个既相互独立又相互联系的子系统组成。南海季风是东亚夏季风的一个重要分支,是联系东亚与南亚夏季风系统的纽带,在区域乃至全球能量和水循环过程中具有重要作用。

对南海季风对流系统的研究发现,在梅雨季节(6~7月)到来的一个月前,亚洲东南季风就开始在南海爆发^[1],在中国南部和南海北部形成对流系统^[2~4],该对流系统在季风爆发期间是大气主要降水和非绝热加热源^[5,6]。

1998年5~6月在我国南海季风区域进行了一次国际综合观测试验^[7],旨在更好地了解南海夏季风爆发、维持和变化的关键物理过程。中国南海季风试验(SCSMEX)是首次在该地区开展的一次中尺度季风观测计划,该试验采用了包括大气探空、多普勒雷达、观测船、风廓线仪等多种观测平台。在外场试验期间进行了两次加强期观测,实验得到的有关热带洋面上中尺度对流系统演变、云微物理过程等详尽的资料,有利于提高对季风区对流云结构、组织、动力与微物理等过程的认识。特别是配合加强期观测试验的科学观测船,进行了高分辨率的大气探空观测和详细的地面观测。相对其他国际试验资料的分析研究而言,有关南海季风试验资料的国内外分析研究工作并不是很多^[8~15]。这些研究利用探空资料分析了南海季风爆发的大尺度环流结构和演变特征,利用雷达资料进行了对流云带分布特征的研究。另外,也利用数值模式进行了南海季风爆发期间大气环流特征、中尺度对流结构和降水等方面的研究。Lau等^[3]通过卫星资料发现,在南海季风爆发期间南海北部云量会骤然增加。很早就有研究^[1]指出,亚洲夏季风的爆发最早开始于南海北部,然后向西向北分阶段推进。柳艳菊等^[14]通过南海季风加密探空资料发现,季风爆发在南海北部表现出明显不同于南部的特征,其突然的爆发性(尤其在热力层结上)更为显著,对流层中低层表现出明显不同的层结结构。因此,有必要对

南海北部季风爆发前后的热力动力场相关物理量的时空演变特征进行研究。本文利用中国南海季风试验区1998年5~6月加密格点探空资料分析了南海北部地区(15~25°N, 108~122°E)夏季风爆发前后大气环流的动力、温湿场分布与对流发展的特征,为随后进行的南海季风期间海洋对流云的组织结构、物理特征的可分辨云中尺度数值模拟和积云参数化研究提供背景基础研究。

2 资料

1998年5~8月进行了为期4个月的南海季风试验(SCSMEX),包括大气、海洋、海气界面和卫星观测等综合观测。其间进行了两次加强观测试验(IOPs),即5月5~25日与6月5~25日,加密试验区为南海及其附近地区(10°S~30°N, 95~130°E)。本文的资料采用南海北部加强观测区(0°~40°N, 80~130°E)由加密探空得到的格点资料(水平分辨率为1°,每6h一次,垂直40个等压面,1000~25 hPa)及南海北部多边形区域平均后的加密格点资料(如图1)。

3 中尺度动力场特征

东亚夏季风环流的基本特征是在低层(如850 hPa)盛行西南风,高层(如200 hPa)盛行东北

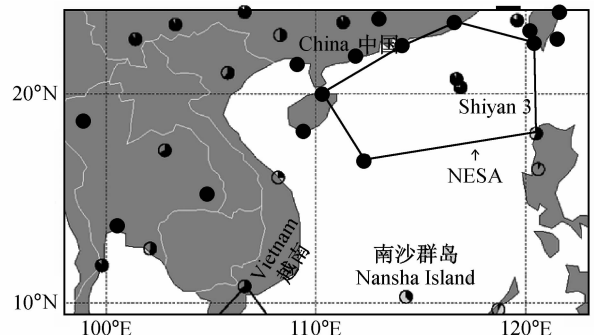


图1 中国南海季风北部试验区(NESA)加强试验期间加密探空站点分布

Fig. 1 Sounding sites and Northern Enhanced Sounding Array (NESA) during the intensified observational periods (IOPs) of SCSMEX

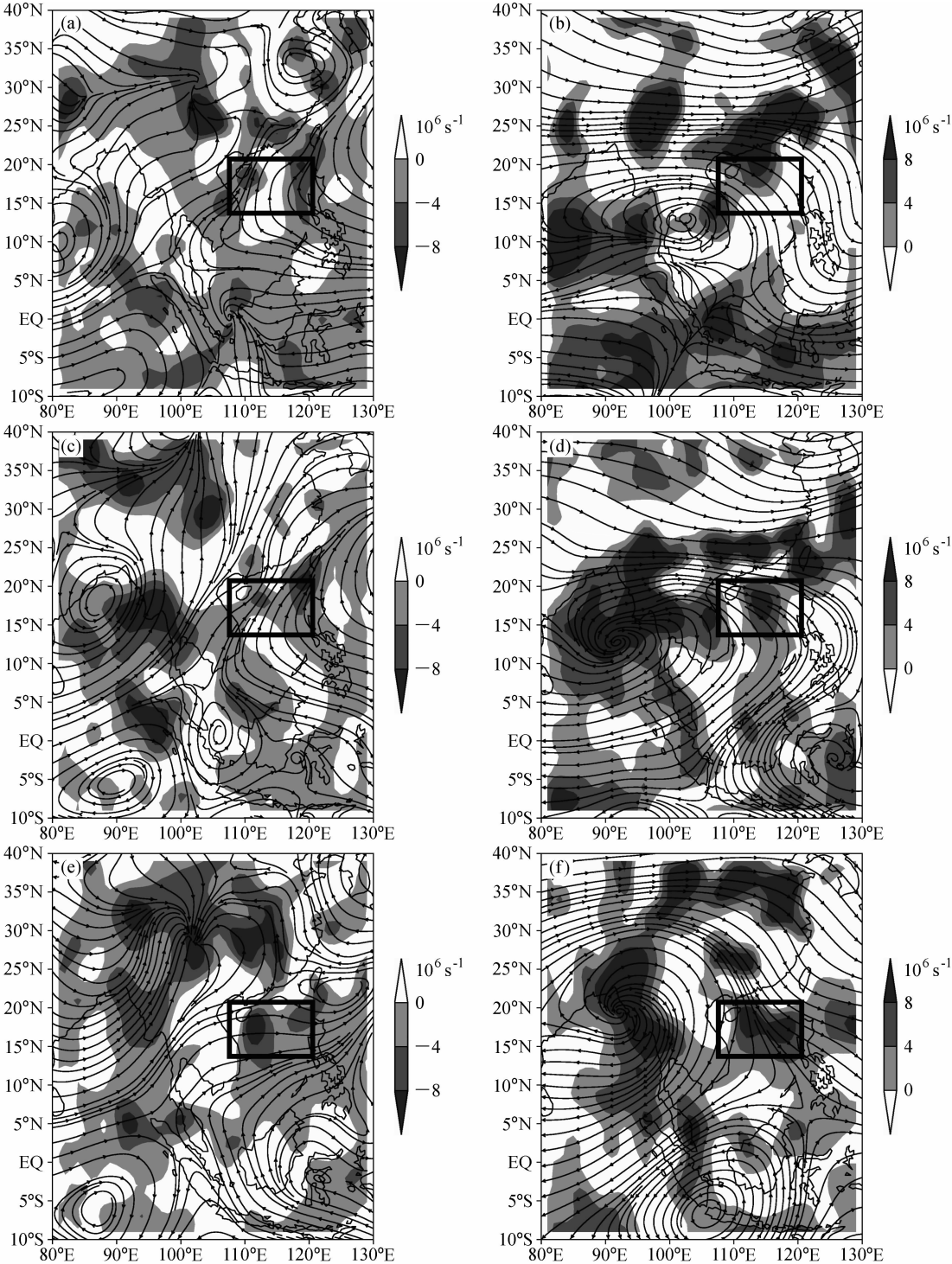


图2 1998年5月中国南海季风爆发前后低层(850 hPa, 左列)和高层(200 hPa, 右列)环流与散度场(阴影)分布: (a)、(b) 14~16日; (c)、(d) 17~19日; (e)、(f) 20~22日; (g)、(h) 23~26日; (h)、(i) 27~29日

Fig. 2 Horizontal distribution of wind field and divergence at 850 hPa and 200 hPa on May 14–16 (a, b), 17–19 (c, d), 20–22 (e, f), 23–26 (g, h), and 23–26 (i, j), 1998. The wind field is shown as the streamline, and the divergence is shaded. The squares denote the domain shown in Fig. 1 (NESA)

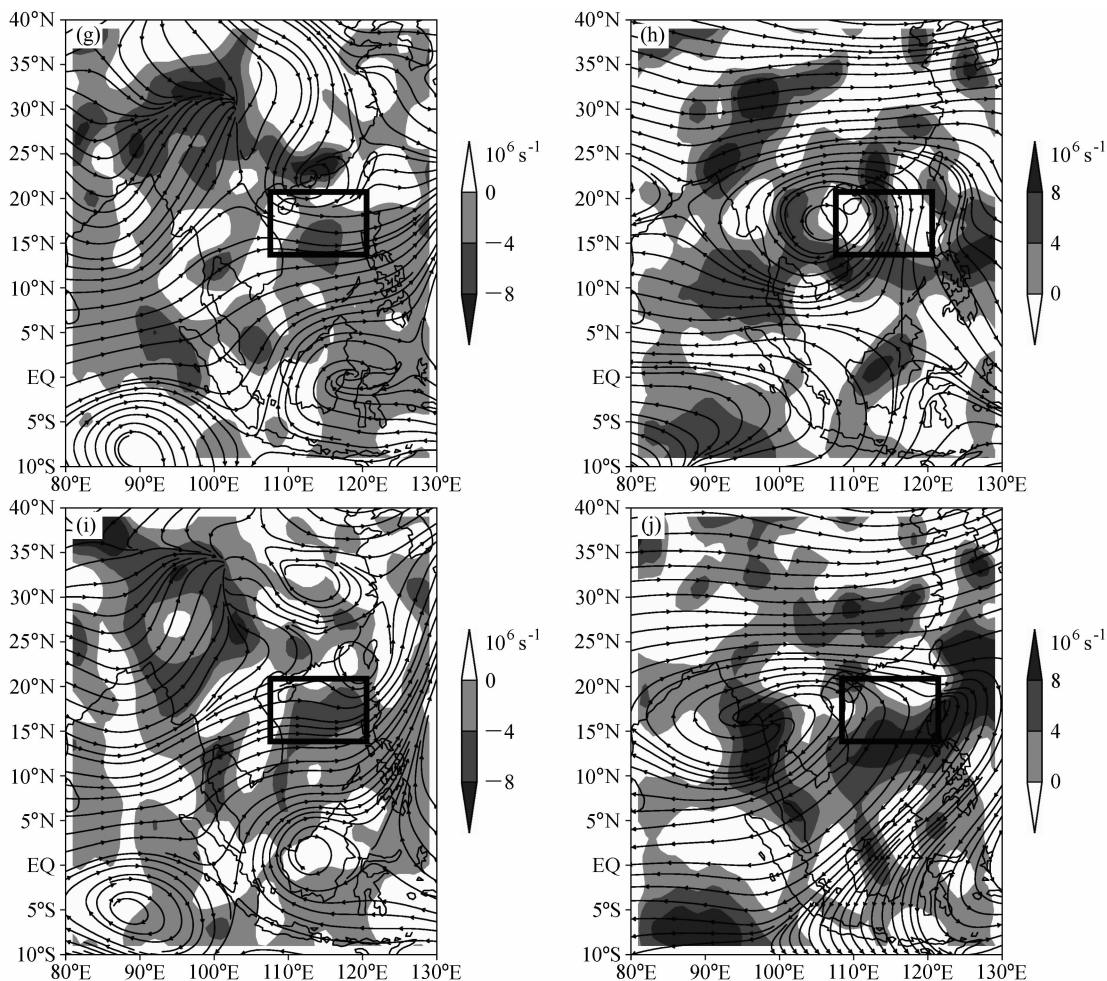


图 2 (续)

Fig. 2 (Continued)

风, 与此夏季风密切相关的后期重要降水过程 (如我国长江流域的梅雨过程) 对我国南方和整个东亚地区具有很重要的影响。图 2 为 1998 年 5~6 月南海季风爆发前后, 高低层大气环流的分布和演变情况。季风爆发前, 中国南海地区主要受西太平洋副高的控制^[9], 受其影响, 5 月 14~16 日 (图 2a) 低层 850 hPa 副高西侧南海南部为东南风、弱辐合区, 而南海北部已经转为西南风 (图 2a 框内区域), 东西两侧出现较强的辐合区。高层 200 hPa (图 2b) 南海地区以西北风为主, 除中国沿海一侧海域有辐散区出现外, 其他区域为辐合区。受副高东移的影响, 5 月 17~19 日 (图 2c) 南海北部地区大气环流在低层整个区域已经表现为明显的西南风, 辐合区域几乎占据整个南海北部地区。另外, 从图 2c 可以明显地看到, 有 3 支气流加入到西南气流中, 一支是来自孟加拉湾气

旋系统的南支气流, 另二支分别是与这个系统对应的赤道南侧的反气旋系统的北支气流和来自澳大利亚地区的跨赤道气流。这 3 支气流组成了东亚夏季风环流^[1]。高层由于受孟加拉湾反气旋环流的影响, 风场结构改变不明显, 但从图 2d 看到, 高层出现的明显强辐散中心有利于深对流的发展。因此, 1998 年的南海季风爆发应首先开始于南海北部地区的低层, 特别是北部的西侧区域, 随副高的东移扩展到整个南海北部区域。尽管高层的季风环流特征不明显, 但辐散区的出现, 有利于深对流的发展。从爆发约 5 天后 (图 2e 和 2f), 低层辐合区和高层的辐散区向南部中部移动, 南海中部低层为西南风, 高层盛行东北风, 属于典型的南海季风环流。从辐合、辐散场可以看到, 5 月 23~26 日 (图 2g 和 2h) 南海中南部地区季风出现减弱现象, 5 月 27~29 日 (图 2i 和

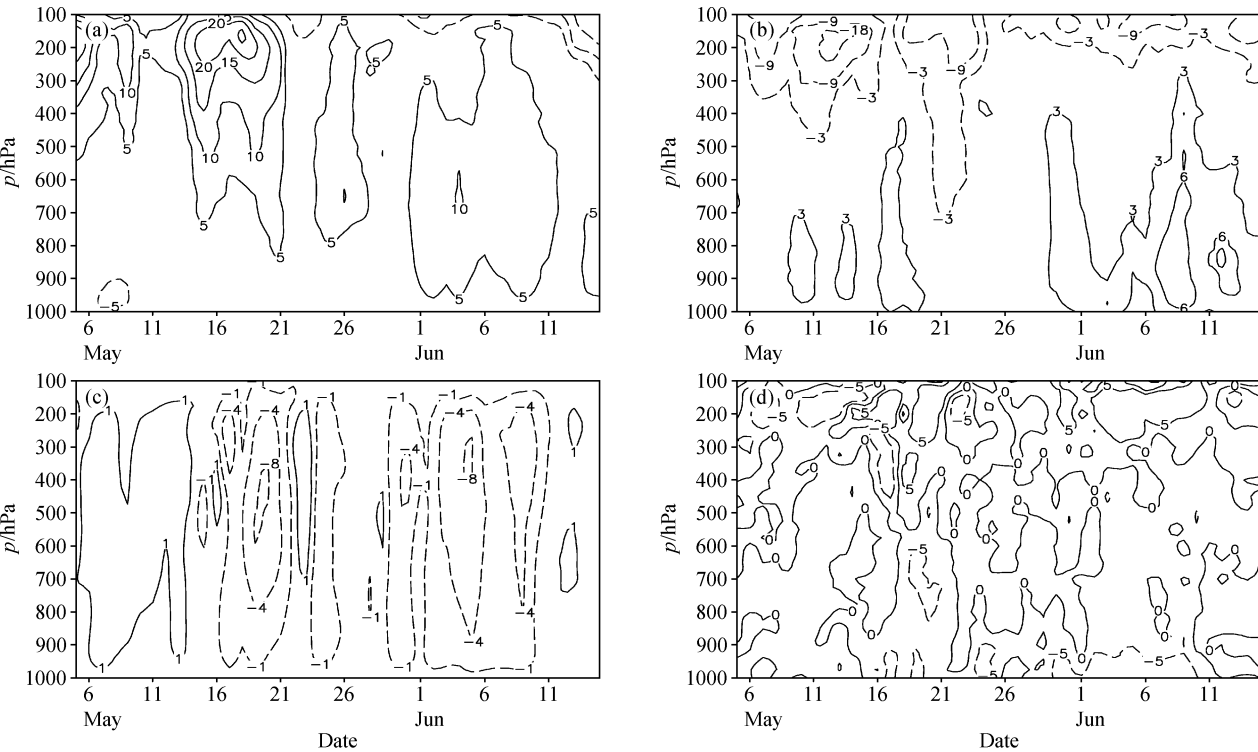


图3 1998年5月5日~6月15日南海北部区域平均动力场及日平均时间-气压分布：(a) u (单位： $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)；(b) v (单位： $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)；(c) 垂直速度 (单位： $\text{hPa} \cdot \text{h}^{-1}$)；(d) 散度 (单位： 10^6s^{-1})

Fig. 3 Time series of the NESA field averaged dynamic field distribution during 5 May—15 Jun 1998: (a) u (units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)；(b) v (units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)；(c) vertical motion (units: $\text{hPa} \cdot \text{hr}^{-1}$)；(d) divergence (units: 10^6s^{-1})

2j) 季风又开始加强，持续约10天左右，低层出现强辐合中心，高层为大面积的辐散区。从环流结构看，似乎标准的季风环流出现在5月20日以后的南海中南部，但从辐散、辐合场结构看，有利于对流发展的结构首先发生在南海北部地区，然后向南扩展。

为了详细了解南海季风爆发前后，各动力场气象要素的变化情况，图3分别给出了根据1998年5~6月SCSMEX期间由6h一次的加密探空资料得到的季风爆发前后（5月5日至6月15日）南海北部地区（NESA）多边形区域平均及日平均的纬向风速 u （图3a）、经向风速 v （图3b）、垂直速度（图3c）、散度（图3d）的时间-气压剖面分布。从图3a可以看到，在5月15日季风爆发之前，高层有强的西风带中心出现，说明中国南海北部的季风爆发与中纬度地区出现的高层强扰动有密切的关系^[9]，高层西风动量下载到中层形成较强的低层西风带，预示着南海北部季风的爆发。高层的西风带被东风带取代，这种高低

层环流带的改变是季风爆发前后明显的环流变化特征。经向平均风速分布显示出（图3b），南海季风爆发前，高层以强北风为主，季风爆发后，高层北风带减弱，6月开始低层南风加强，表明季风降水带由南向北移动。垂直气流的时间变化表明（图3c），5月15日季风爆发前的南海北部地区为下沉气流，季风爆发后有两个明显的深对流发展期，一个开始于5月15日前后，持续10天左右，另一个开始于6月1日前后，持续时间也基本为10天左右。季风期间南海北部的深对流，在高层200 hPa是强的辐散区，低层为强辐合区（图3d），而季风爆发前的高层是辐合区，低层为辐散区，不利于对流的发展。

4 温湿场分布特征

图4为南海北部温度、湿度场与风矢量分布、演变情况。南海季风爆发前期，由于受副高的影响，南海北部大气低层整个区域由一明显的干热

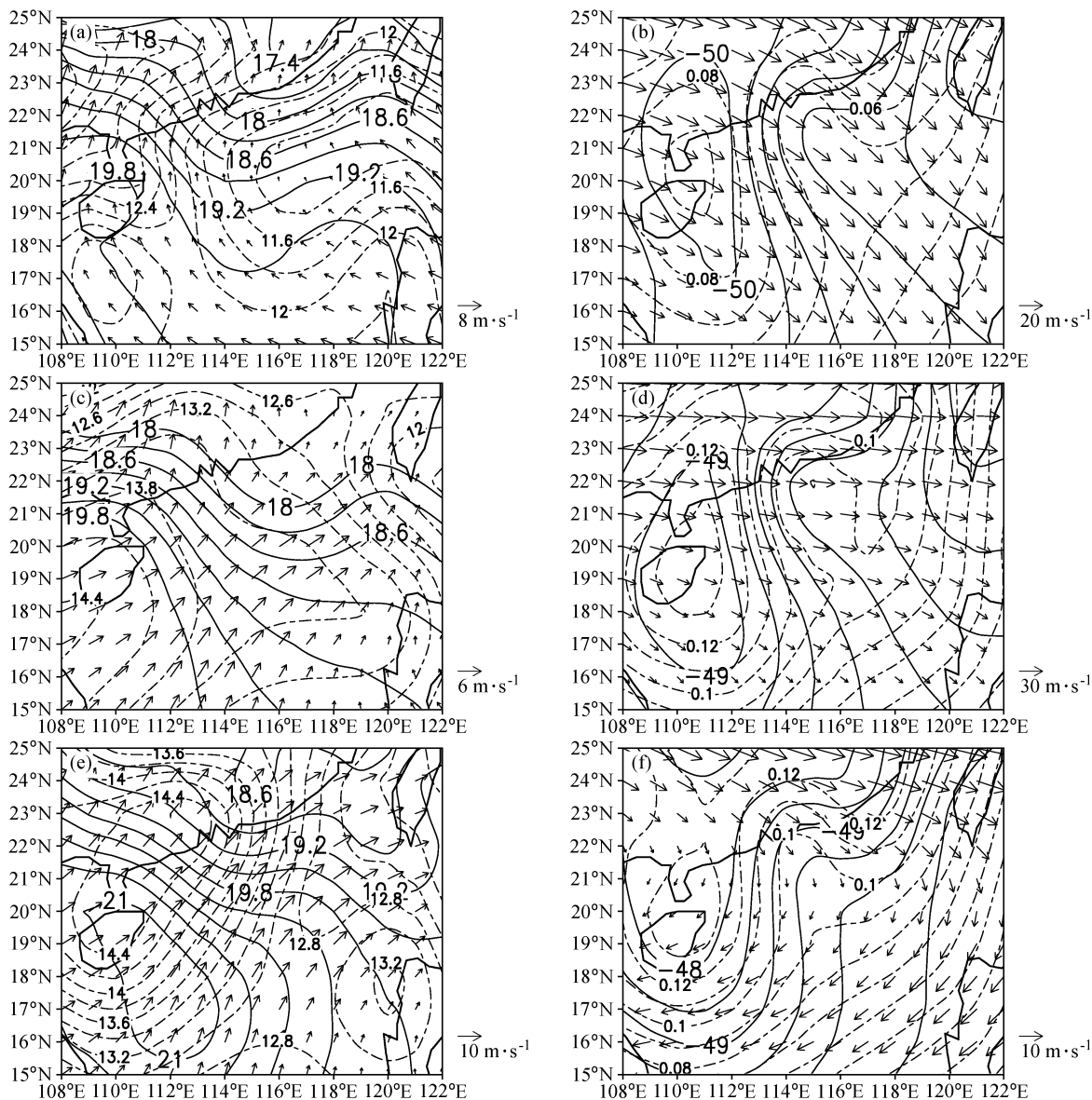


图4 1998年中国南海季风爆发前后南海北部850 hPa(左列)和200 hPa(右列)等压面上平均温度(实线,单位:℃)、平均比湿(虚线,单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)和风矢量(箭头)的分布:(a)、(b)5月5~15日;(c)、(d)5月16~20日;(e)、(f)6月5~15日

Fig.4 Horizontal distribution of mean temperature (solid line, units: $^{\circ}\text{C}$), specific humidity (dashed line, units: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) and the wind field, (vector) at 850 hPa and 200 hPa in 1998; (a)、(b) 5-15 May; (c)、(d) 16-20 May; (e)、(f) 5-15 Jun. Left graphics are at 850 hPa, right are at 200 hPa

舌占据,受反气旋环流的控制(图3a),而高层南海西部有一明显的湿冷中心,南海东部仍以高干热空气为主,风向为西北风(图3b)。季风爆发时,伴随副高东移,低层出现强西南气流带,其携带的高温、高湿空气开始进入南海北部地区(图3c),高层风向由原来的西北气流转为偏西气流。占据南海西边的湿冷空气中心有所加强,并试图向东扩展,尽管原来占据南海地区的干热空

气区域有所缩减,但受副高强干热气团的阻挡作用,湿冷空气中心的移动不是很明显(图3d)。这种低层出现的高温、高湿分布配合高层出现的低温、高湿分布,使大气处于对流潜在不稳定状态,有利于对流的发展,而且由于高层干热气团的阻塞作用,对流活动出现比较长时间的维持作用。6月1日后,低层西南气流带进一步加强,西南高温、高湿中心向南海北部扩展,西南水汽高值区

移入南海北部地区（图 3e），而高层风向由西风转为大范围东南风，有利于对流云带向南海南部扩展，但高层的干热气团的阻塞作用仍然存在，仍然有利于南海对流的维持（图 3f）。

5 热量、水汽输送特征

为了解季风爆发前后热量、水汽输送特征，图 5 给出了依据如下方程计算的南海北部地区平均的视热源（ Q_1 ）和视水汽汇（ Q_2 ）的气压-时间变化以及蒸发（ E ）和降水（ P ）的时间变化。

$$Q_1=c_p\left\{\left[\frac{\partial \bar{T}}{\partial t}+\bar{V} \cdot \nabla \bar{T}+\left(\frac{p}{p_0}\right)^k \bar{\omega} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial p}\right]\right\}, \quad (1)$$

其中， $k=R/c_p$ ， R 为气体常数， c_p 是湿空气的定压比热。其他参数含义同常规定义。水汽平衡方程由下式给出，

$$\left\langle Q_2 \right\rangle=L(P-E), \quad (2)$$

其中，

$$Q_2=-L\left(\frac{\partial \bar{q}}{\partial t}+\bar{V} \cdot \nabla \bar{q}+\bar{\omega} \frac{\partial \bar{q}}{\partial p}\right) \quad (3)$$

是视水汽汇， q 为比湿， L 为汽化潜热， P 为降水率， E 为蒸发率。参数上部横线表示水平平均。

$\langle \quad \rangle=\frac{1}{g} \int_{p_t}^{p_s}(\quad) d p$ ， p_t 和 p_s 分别表示对流层顶和地面气压。

图 5a 和 5b 表示的视热源 Q_1 和水汽汇 Q_2 的分布与南海季风期间两次对流活动时间具有很好的对应关系， Q_1 的高值区位于对流的中上层，而 Q_2

的高值区位于对流的中下部。5 月 15 日季风爆发前， Q_1 和 Q_2 都为负值，说明南海北部无对流活动；5 月 15~25 日是季风爆发后的第一次对流活动期，对应的 Q_1 和 Q_2 都为正值，且具有较深厚的垂直分布；5 月 25~31 日对流活动处于相对停止期；6 月 1~10 日南海又处于对流发展期， Q_1 和 Q_2 表现为深厚的正值分布。从图 6a 和 6b 表示的南海北部洋面平均降水率和蒸发率可以看到，5 月 15 日季风爆发前南海北部地区几乎无降水产生，蒸发率较高，季风爆发后，对流活动使地面降水率迅速增加，受对流云的影响，地面蒸发率出现显著下降；5 月 25~31 日对流活动处于停止阶段，降水率减小，蒸发率又开始增加；6 月 1~10 日第二次对流活动期间，地面降水率迅速增加，地面蒸发率也出现快速减小。由此可见，南海北部地区季风活动期间伴随着快速的能量和水汽垂直输送和交换。

综合以上分析结果可以看出，在季风爆发（5 月 15 日）时，由于受到孟加拉湾东部西南风发展和东移的影响，整体表现为强的西风带，低层东南风突变为西南风，并出现强辐合中心，高层也由西北风转为西风，出现强辐散，对流明显加强。受其影响，水平方向海平面温湿度大值区向西北方向扩展，从孟加拉湾到南海水汽输送加强，给低层带来了大量的暖湿气流，配合高层的干冷空气，进一步促进了垂直对流的发展，热量和水汽的垂直输送项也相应的由负转正，正的转化项与地面蒸发率的突然降低及地面降水率的迅速增大

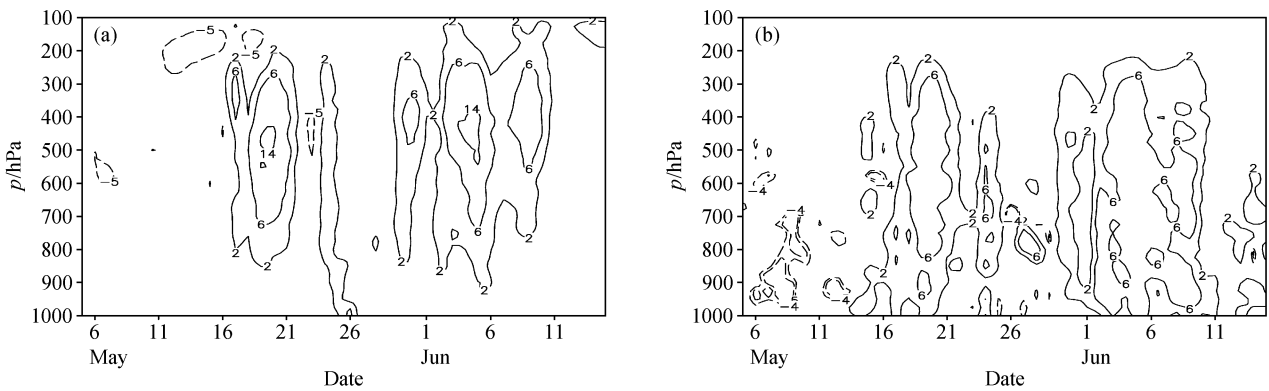


图 5 南海北部区域平均能量、水汽时间-气压分布：(a) 视热源 Q_1 （单位： $^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}^{-1}$ ）；(b) 视水汽汇 Q_2 （单位： $^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}^{-1}$ ）

Fig. 5 Time series of the NESA field averaged energy, water vapor distribution; (a) apparent heat source Q_1 (units: $^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}^{-1}$); (b) apparent moisture sink Q_2 (units: $^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}^{-1}$)

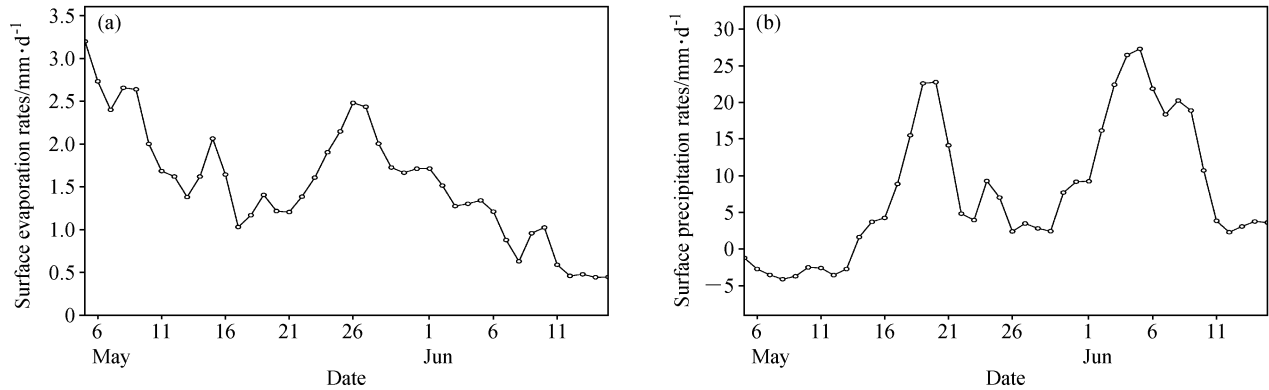


图6 南海北部区域平均能量、水汽时间-气压分布：(a) 地面蒸发率 E_0 ；(b) 地面降水率 P_0

Fig. 6 Time series of the NESA field averaged energy, water vapor distribution; (a) surface evaporation rates E_0 ; (b) surface precipitation rates P_0

相伴而生，总之，各物理量较季风爆发前有显著的变化。经过短暂的停滞期（5月25~31日），6月1日以后，低层西南气流进一步加强，风速明显增大，高温高湿区继续向南海北部扩展，能量和水汽输送进一步加强，有利于南海对流的维持。

随着夏季风的爆发、活跃、中断和维持的变化，动力流场的移动和强度发生了较大改变，导致了温湿场和热量水汽垂直输送的加强，这些物理量的转化对研究季风爆发及其发展过程均有指标性意义，反映了南海夏季风在南海北部的活动规律。

6 结论

利用中国南海季风试验（SCSMEX）区1998年5~6月加密探空资料，分析了南海北部地区（15~25°N，108~122°E）夏季风爆发前后大气环流的动力、温湿场分布及垂直对流热量和水汽输送、转化特征。

南海夏季风爆发之前，高层有强的西风带中心出现，季风爆发与中纬度地区出现的高层强扰动有密切的关系，高层西风动量下传到中低层形成较强的低层西风带，高层的西风带被东风带取代，这种高低层环流带的改变是季风爆发前后明显的环流变化特征。

季风爆发前的南海北部地区为下沉气流，季风爆发后有两个明显的深对流发展期，一个开始于5月15日前后，持续10天左右，另一个开始

于6月1日前后，持续时间也基本为10天左右。季风期间南海北部的深对流，在高层200 hPa是强的辐散区，在低层900~950 hPa左右为强辐合区，而季风爆发前的高层是辐合区，低层为辐散区，不利于对流的发展。

视热源 Q_1 和水汽汇 Q_2 的分布与南海季风期间两次对流活动时间具有很好的对应关系， Q_1 的高值区位于对流的中上层，而 Q_2 的高值区位于对流的中下部。季风爆发前， Q_1 和 Q_2 都为负值，南海北部无对流活动。季风爆发后的对流活动期，对应的 Q_1 和 Q_2 都为正值，且具有较深厚的垂直分布。

在季风爆发前南海北部地区几乎无降水产生，由于空气干燥，蒸发率较高；季风爆发后，对流活动使地面降水率迅速增加，受对流活动的影响，地面蒸发率出现显著下降。南海北部地区季风活动期间伴随着快速的能量和水汽垂直输送及交换。

参考文献 (References)

[1] Tao S Y, Chen L X. A review of recent research on the East Asian summer monsoon in China. In: *Monsoon Meteorology*, Chang C P, Krishnamarti T N, Eds. Oxford: Oxford University Press, 1987. 60~92

[2] Hiragana H, Kato K, Takeda T. Abrupt change in the characteristics of the cloud zone in subtropical East Asia around the middle of May. *J. Meteor. Soc. Japan*, 1995, **73**: 221~239

[3] Lau K M, Yang S. Climatology and interannual variability of the southeast Asian summer monsoon. *Adv. Atmos.*

Sci., 1997, **14** (2): 141~162

[4] Lau K M, Wu H T, Yang S. Hydrologic processes associated with the first transition of the Asian summer monsoon: A pilot satellite study. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1998, **79** (9): 1871~1882

[5] Luo H, Yanai M. The large-scale circulation and heat sources over the Tibetan Plateau and surrounding areas during the early summer of 1979. Part II: Heat and moisture budgets. *Mon. Wea. Rev.*, 1984, **112** (5): 966~989

[6] Yanai M, Tomita T. Seasonal and interannual variability of atmospheric heat sources and moisture sinks as determined from NCEP NCAR Reanalysis. *J. Climate*, 1998, **11** (3): 463~482

[7] Lau K M, Ding Y H, Wang J T, et al. A report of the field operations and early results of the South China Sea Monsoon Experiment (SCSMEX). *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2000, **81** (6): 1261~1270

[8] Ding Y H, Liu Y J. Onset and evolution of the summer monsoon over the south China sea during SCSMEX field experiment in 1998. *J. Meteor. Soc. Japan*, 2001, **79**: 255~276

[9] Ding Y H, Hu J. The variation of the heat sources in East Asia in the early summer of 1984 and their effects on the large-scale circulation in East Asia. *Adv. Atmos. Sci.*, 1988, **6**: 171~180

[10] 丁一汇, 李崇银, 柳艳菊, 等. 南海季风试验研究. 气候与环境研究, 2002, **7** (2): 202~208

Ding Yihui, Li Chongyin, Liu Yanju, et al. South China Sea Monsoon Experiment. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2002, **7** (2): 202~208

[11] 柳艳菊, 丁一汇, 宋艳玲. 1998 年南海夏季风爆发前后南海地区的水汽输送和水汽收支. 热带气象学报, 2005, **21** (1): 55~62

Liu Yanju, Ding Yinhui, Song Yanling. The moisture transport and moisture budget over the South China Sea before and after the summer monsoon onset in 1998. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 2005, **21** (1): 55~62

[12] Johnson R H, Ciesielski P E. Characteristics of the 1998 summer monsoon onset over the northern South China Sea. *J. Meteor. Soc. Japan*, 2002, **80** (4): 561~578

[13] Wang J J. Evolution and structure of the mesoscale convection and its environment: A case study during the early onset of the southeast Asian summer monsoon. *Mon. Wea. Rev.*, 2004, **132** (5): 1104~1132

[14] 柳艳菊, 丁一汇. 南海季风爆发前后大气层结和混合层的演变特征. 气候与环境研究, 2000, **5** (4): 459~468

Liu Yanju, Ding Yihui. Evolution of the atmospheric stratification and mixed layer before and after monsoon onset over the South China Sea. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2000, **5** (4): 459~468

[15] Paul E C, Johnson R H. Contrasting characteristics of convection over the northern and southern South China Sea during SCSMEX. *Mon. Wea. Rev.*, 2006, **134** (4): 1041~1062