

# 孟加拉湾季风爆发对南海季风爆发的影响 I: 个例分析\*

刘屹岷

(中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室,北京,100029)

陈仲良

(香港城市大学物理与材料科学系大气研究实验室大气研究实验室,香港)

毛江玉 吴国雄

(中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室,北京,100029)

## 摘 要

利用南海季风试验分析场和 NCAR 向外长波辐射通量(OLR)资料研究了 1998 年孟加拉湾季风和南海季风爆发期间副热带环流的大尺度和天气尺度特征,探讨了孟加拉湾季风爆发与南海季风爆发之间的物理联系及孟加拉湾季风气旋的对流凝结潜热释放对副热带高压“撤出”南海的影响。结果表明,1998 年 5 月爆发的东亚季风展现出典型的从孟加拉湾地区东传发展到南海地区的过程。随着孟加拉湾季风爆发和对流活动增强、北移,南海北部出现了低层西风和对流活动,领先于副热带高压在南海地区减弱和撤退。结果还显示南海北部地区的对流凝结加热有助于该地区经向温度梯度的反转,在热成风关系的制约下南海上空副热带高压脊面的垂直倾斜由冬季型转向夏季型,季风爆发。

关键词: 孟加拉湾季风, 对流潜热加热, 南海季风, 副热带高压。

## 1 引 言

亚洲季风是地球上最大的环流系统之一。在东南亚地区它从冬到夏的季节转换是以环流的突变为特征。1987 年陶诗言和陈隆勋<sup>[1]</sup>指出亚洲季风最早在南海爆发。20 世纪 90 年代,当更多的观测资料和再分析资料出现以后, Wu 和 Zhang<sup>[2]</sup>发现 1989 年亚洲季风爆发包含 3 个连续的阶段,即首先是孟加拉湾季风的爆发,然后为南海季风,最后是南亚季风<sup>[2]</sup>。南海季风试验开展后, Xu 和 Chen 在对 1998 年的个例研究中也发现了类似的过程<sup>[3]</sup>。另外 Lau 等<sup>[4,5]</sup>观测到在 1997 和 1999 年早于南海季风爆发,孟加拉湾地区有强烈的季风低压出现。在气候平均的意义上亚洲季风这样连续的 3 个阶段特征也被不少工作证实<sup>[6-9]</sup>。

许多工作研究了 1998 年南海季风爆发前后环

流的结构和演变<sup>[10-13]</sup>。1998 年南海季风最早于 5 月 15~17 日在南海北部爆发,然后以大尺度季风环流运动为特征,大约于 20~25 日在整个南海发展起来。Chan 和 Xu<sup>[13]</sup>指出早在 5 月初,经向环流和高的相对湿度已在南海建立。位于孟加拉湾地区的热带气旋提供了传向南海的水汽通道。5 月 21 日以后,低层西风在南海中部和南部盛行,与之相关的是低层副热带高压(以下简称副高)的东撤。这些大尺度环流转换标志着南海季风的全面爆发<sup>[5]</sup>。

然而如果仔细调查环流型就会发现,在南海季风爆发期间,低层副高的中心并没有大的变化,仅副高的西部延伸被减弱了。这一现象和近期的一些研究引发了两个问题。第一,很明显孟加拉湾气旋或孟加拉湾季风爆发在南海季风爆发前,它们之间有无物理上的联系? 第二,对流层低层的副热带高压是真的东撤,还是位于南海上的副高西部减弱了?

\* 初稿时间:2003 年 1 月 28 日;修改稿时间:2003 年 2 月 10 日。

资助课题:国家自然科学基金重点项目(40135020,40023001),中国科学院创新(ZKCX2-SW-210)和香港 Crouch 研究基金。

无论哪种情况,其中包含的物理机制是什么?

表面上这两次季风爆发事件之间的关系也许不是直接的。但近来的一些研究涉及到凝结潜热加热对副热带高压形成和变异的影响(见下面的讨论),与孟加拉湾季风爆发相联系的凝结加热应是一个重要的物理过程。这里有必要回顾这一关系,为下面的讨论提供背景。

北半球冬季在对流层各层上副高脊线都是纬向分布的,形成一个连续的脊面。脊面以南是东风,以北为西风。在热成风关系的制约下,脊面随高度向暖区倾斜。在亚洲地区沿着这个界面冬季南暖,夏季却是北暖。因此随着高度增加脊面在冬季南倾,夏季北倾。某地从冬到夏的季节转换表现为该地区脊面倾斜的消失,好像是垂直竖立的轴,被定义为“季节转换轴”<sup>[8,9]</sup>。季节转换轴的出现伴随着季风的爆发,其东面表现为低层副高的“东撤”。

另一方面,在关于冬夏季低层副热带环流的研究中,Hoskins<sup>[14]</sup>和 Rodwell 认为夏季副高南侧的东风主要是对亚洲季风加热的响应;冬季,纬向平均气流与山脉的相互作用决定了纬向非对称副热带环流的形态。然而他们的工作没有考虑到季节转换期间副高的演变。另外,他们所使用的非绝热加热是从热力学方程得到的,难以把潜热加热的贡献与其他非绝热加热的贡献区分开。Chen 等<sup>[15]</sup>利用一个线性准地转模式也探讨了北半球副高的起源,但研究的仍是夏季。

最近吴国雄等<sup>[16,17]</sup>的研究表明,不同形式的外强迫以及内强迫对副热带高压的形成和变异有着不同的影响。事实上,副高的形成可以按照负涡度的发展来解释。因而导出了全型垂直涡度倾向方程(CVE 方程)<sup>[16]</sup>以研究副高。CVE 方程与 Ertel 位涡方程<sup>[18]</sup>完全等价。它不仅包含动力因子,而且以显式形式包含了如摩擦和非绝热加热等热力因子的作用。当仅考虑非绝热加热的强迫作用时,通过尺度分析,沿副高脊线环流的准定常响应可以被简化为:

$$\beta v \propto \frac{f + \zeta \partial Q}{\theta_z} \quad \theta_z \neq 0 \quad (1)$$

这里  $\theta_z = \partial \theta / \partial z$ ,  $\zeta$  是垂直涡度,  $Q$  是非绝热加热率,  $\beta$  是科氏参数  $f$  随纬度的变化,  $\theta$  是位温。于是深对流凝结加热将在对流层低层加热区的东部强迫出副热带高压<sup>[14-17]</sup>。该副高西侧的南风如果位于洋面上,将携带丰富的水汽到副高的西及西北地区,

对那里的对流活动的发展起作用。如上述情况正发生在季风爆发前而且副高北部的凝结加热累积到一定程度,越过副高脊面冬季型的负的经向温度梯度将改变符号,脊面的倾斜将从冬季型转为夏季型,并将激发季风的爆发及副高的“东撤”。

本研究的目的是利用资料分析和数值试验证实上述假设,并研究与孟加拉湾季风爆发有关的对流凝结加热对南海上空的环流及对南海季风爆发的影响。本文首先给出对 1998 年 5 月东亚地区环流演变的诊断研究,数值试验的工作将在第 2 部分给出。本文所用资料是“南海季风试验(SCSMEX)”北京资料中心提供的 1998 年 5 月 1~31 日的环流场及来自 NCAR 的经过插值的向外长波辐射通量(OLR)。环流场的资料是 11 层(1000, 925, 850, 700, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100 hPa)上 6 h 一次的分析资料,在 10°S~40°N, 70~150°E 区域上水平分辨率为 1 经距×1 纬距。OLR 是 2.5 经距×2.5 纬距逐日的全球资料。事实上,同期 NCEP/NCAR 再分析资料给出了与 SCSMEX 分析资料很相似的环流型。但后者有较高的水平分辨率,因此被用于本文的研究。

## 2 南海地区环流逐日演变

图 1 给出了 1998 年南海季风爆发期间一些变量的演变。本节中对 SCSMEX 资料作了 3 点滑动的时间平滑以滤掉高频的日变化。5 月 20 日以前,在南海的北部已经观察到西风带出现。5 月 20 日西风强度增加,而后迅速向南控制整个南海地区(图 1a)。OLR 的演变(图 1b)指出 5 月 16 日以前,南海大部分地区为晴空天气。在南海北部强的对流活动从 5 月 16 日开始发展,19 日加强,并开始向南快速扩展。同时南海地区 850 hPa 位势高度从 1520 gpm 很快地下降到 1500 gpm(图 1c)。相应地,南海地区 850 hPa 垂直相对涡度在 5 月 22 日从负变到正(图 1d)。

上述 4 个变量在南海地区(7~20°N, 110~120°E)区域平均的时间演变显示 5 月中以前,南海地区的 OLR 稳定在一个较高的数值上(270 W/m<sup>2</sup>),5 月中开始降低(图 2)。5 月 19 日以后低于 230 W/m<sup>2</sup>(230 W/m<sup>2</sup> 相当于每天有 6 mm 的降水率<sup>[19]</sup>),意味着强的对流活动已经开始。西风的增加与 OLR 的降低同步。5 月 19 日以前南海地区盛行东风,但其后盛行西风。位势高度的变化显示,南海地

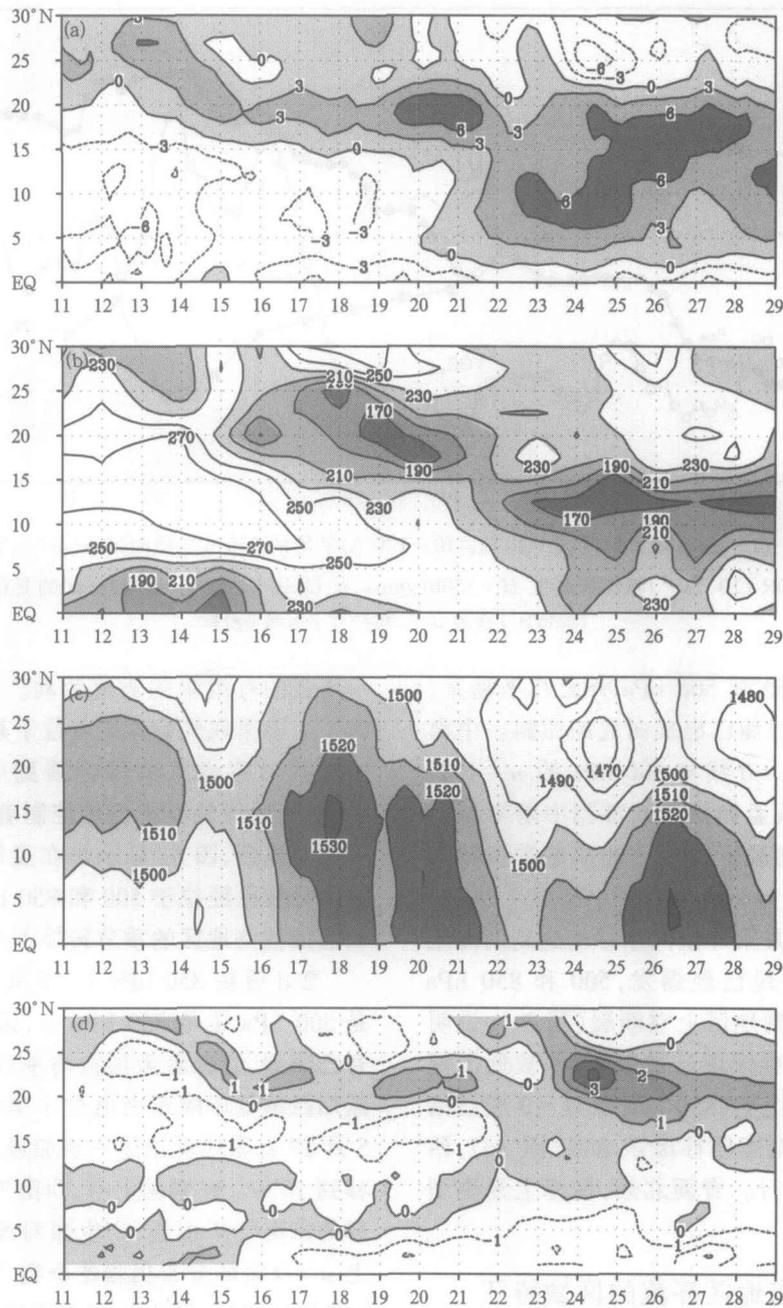


图1 5月11~29日850 hPa纬向风  $u$  (a), OLR (b), 850 hPa 位势高度  $H$  (c) 和相对涡度 VOR (d) 的时间-纬度剖面  
(a, b, c, d 的单位分别是:  $\text{m/s}$ ,  $\text{W/m}^2$ ,  $\text{gpm}$ ,  $10^{-5}\text{s}^{-1}$ , 阴影是相应各物理场的中心区域。对每日4次的  $u$ ,  $v$  和  $H$  作了时间平滑)

区平均位势高度在5月18日达到其最高值,在21日和22日迅速降低。涡度的演变与位势高度的变化正好相反,22日南海地区的涡度急剧地从负增为正值。

图1和图2的结果意味着南海地区副高的减弱伴随着该地区西风入侵以及对流活动的发展,特别是在南海北部地区。

### 3 副热带高压候平均演变特征

亚洲季风爆发前,对流层低层从孟加拉湾、南海到东太平洋都被副热带高压所控制(图3a)。这时(5月第2候)200 hPa的副高脊线位于500和850 hPa脊线以南,为冬季型,在副热带地区脊线是连续的。5月第3候孟加拉湾东部纬向风的垂直切变已

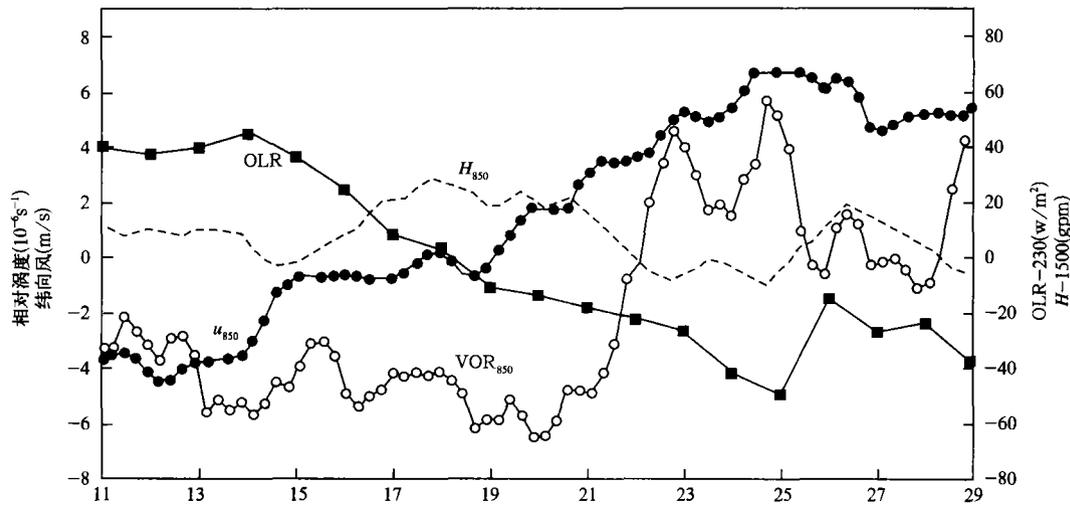


图2 5月11~29日南海地区(7~20°N, 110~120°E)平均的850 hPa纬向风  $u$  (m/s), 相对涡度 VOR ( $10^{-6} \text{s}^{-1}$ ) 和位势高度  $H-1500$  (gpm), 及 OLR-230 ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) 随时间的变化 (对每日4次的  $u$ ,  $v$  和  $H$  作了时间平滑)

经逆转:15°N附近,850到500 hPa脊面几乎垂直,而从500到200 hPa脊面已出现向北的倾斜。中南半岛上,200 hPa的  $u=0$  线与500 hPa的  $u=0$  相交。说明在这一候,从孟加拉湾东部到中南半岛西部,对流层上层的经向温度梯度已经从冬季型转为夏季型。

季节转换轴在5月第4候向东移动达到南海地区。此时孟加拉湾季风已经爆发,500和850 hPa的副高脊线在孟加拉湾地区上空断裂(图3c),说明该地区冬季型副高在中低层已被破坏,并被低压槽所取代。第5候南海上空,850 hPa上  $u=0$  线已南移到赤道地区,显示副高已移出该地区(图3d),西风在整个南海上空盛行。脊面北倾,南海上夏季型已经建立。

#### 4 孟加拉湾和南海地区环流的区域特征

上述讨论已清楚地显示1998年从冬到夏的季节转换于5月第3候出现在孟加拉湾,第5候出现在南海地区。为研究这两次转换之间的联系,下面集中研究环流从第3候到第5候期间的演变。

前人的研究<sup>[11~13]</sup>已经指出了与1998年南海季风爆发有关的值得注意的一重要现象,即位于北印度洋的爆发气旋<sup>[20]</sup>。另外令人感兴趣的是从卫星资料中显示出的1998年的气旋几乎是1997年相应时期逐日卫星观测的气旋的重复<sup>[4]</sup>。如图4a(见封三)所示,5月13日在热带孟加拉湾南部地区有

一增强的有组织的对流活动。它的中心位于5°N, 90°E。该季风气旋伴随着位于其东、北侧的反气旋。一带状对流也从泰国伸展到中国南部。850 hPa上,尽管反气旋环流仍然控制着孟加拉湾的东北部和南海地区,图5a显示出在孟加拉湾东部200 hPa副高脊线已经位于500和850 hPa脊线以北。这说明孟加拉湾地区的季节转换不久将要发生。

2 d后在850 hPa上,季风气旋加深,而且无论是500 hPa还是850 hPa上,孟加拉湾东部的副高脊已断裂,意味着孟加拉湾季风爆发。这时西风从孟加拉湾低压的东南通过中南半岛伸向南海北部。5月17日季风低压进一步加强,中心从15日的8°N移到15°N。在泰国上空,西南气流与南海上副高南部的东南气流相遇,产生强对流。注意到虽然南海上  $u=0$  线的分布仍为冬季型,它们之间的位置比2 d前更加接近(图5c),显示脊面倾斜度减弱了。

5月19日南海北部的对流活动更加活跃,而季节转换轴已位于南海中部,表示经向温度梯度从负转为零,标志着该地区季节转换的开始。2 d以后(5月21日),850 hPa的  $u=0$  线和反气旋已南移到南海的赤道地区(图4e, 5e),气旋式环流在南海北部盛行,西风控制了整个区域(图1)。脊面的倾斜指出了南海地区夏季季风环流型的建立。尽管成熟的夏季风在3 d以后的5月24日被观测到(图4f, 5f),5月21日应被定义为1998年南海季风的爆发日。

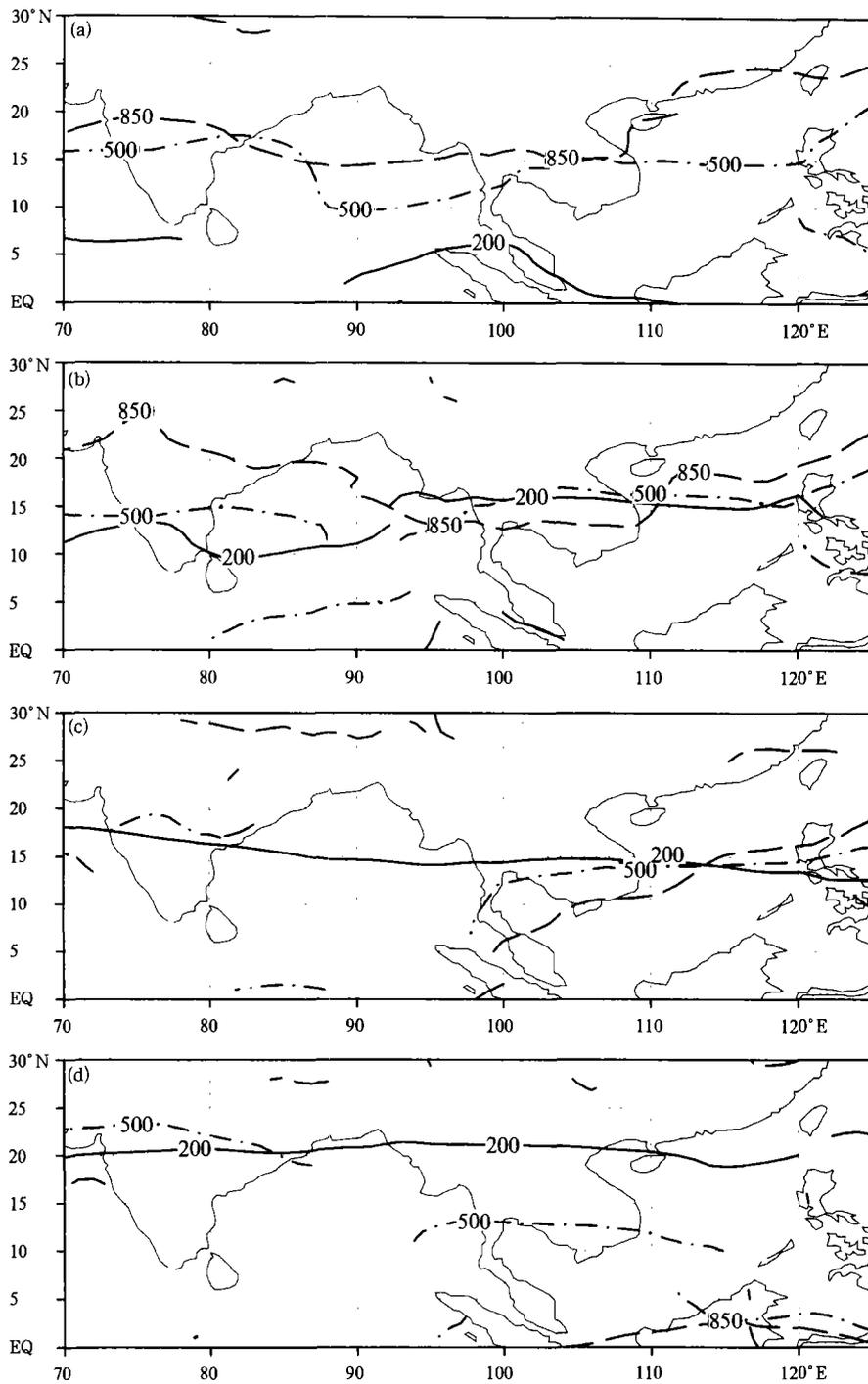


图3 5月第2候到第5候候平均的  $u$  经向梯度为正  
 $u=0$  线在 200, 500 和 850 hPa 的分布  
 (a. 第 2 候, b. 第 3 候, c. 第 4 候, d. 第 5 候)

副高脊面向南倾意味着穿越脊面向上有西风型切变,而向北倾对应于东风型切变。换句话说,季风爆发伴随着越过脊面的温度经向梯度的逆转。按照热成风关系,可以用纬向风的垂直切变来表示温度的经向梯度。这里用 200~850hPa(图 6a)和 200~

500 hPa(图 6b)分别表示整个对流层和上部对流层。图 6 给出其沿副高脊线纬带(11~16°N)平均的时间演变,显示热成风的纬向分量从正到负都首先发生在孟加拉湾东部和中南半岛地区。

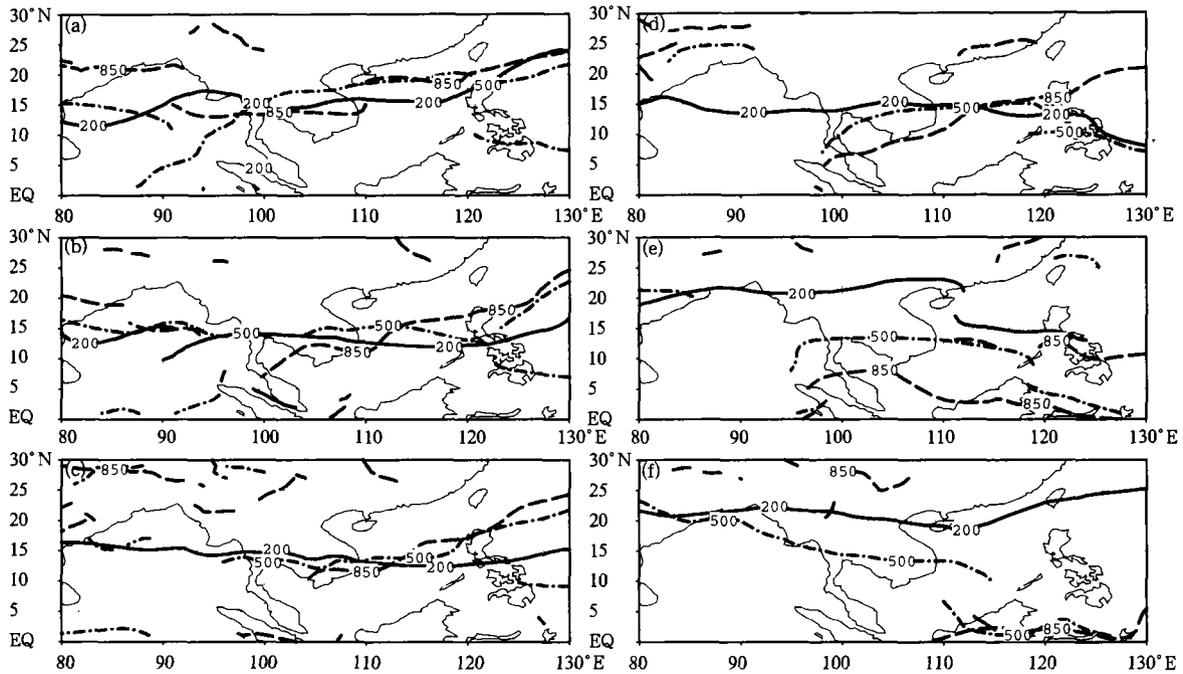


图5 同图4但为 $u$ 经向梯度为正的 $u=0$ 线在200,500和850 hPa的分布

然而如果仔细比较图6a和b发现,南海地区纬向风负的(东风型)垂直切变在对流层上层于5月19日出现,比在对流层整层(20日以后)出现得早。这表明在该地区温度梯度的反转首先出现在对流层中高层,应与南海北部深对流凝结潜热加热有关。这与图4c,d所示以低于 $230 \text{ W/m}^2$  OLR为代表的深对流的分布一致。图4中显示在南海季风爆发前,深对流已在南海北部发展起来。而且该深对流随孟加拉湾季风低压的加强和向北移动而发展。表明孟加拉湾季风爆发期间,其上的对流活动能导致南海北部西风及对流的出现和增强。正是南海北部的凝结加热促使南海地区温度经向梯度逆转。Chan等<sup>[13]</sup>还指出来自中纬度的气旋对南海北部的西风维持起着一定的在作用。这两种过程可能共同作用使南海地区的副高减弱南移。

## 5 总结

文中通过分析南海季风实验环流场的资料和

NCAR插值的OLR,研究了孟加拉湾季风爆发期间该地区的凝结潜热加热对南海季风爆发的影响,以及对流层低层副热带高压在南海季风爆发时减弱并撤出南海的原因。诊断分析的结果表明,1998年东亚地区的季节转换经历了典型的从东到西的发展过程。5月15日孟加拉湾季风爆发后,季节转换轴于5月19日东移到南海中部。表明南海北部低层西风出现和对流持续发展与孟加拉湾季风气旋的凝结加热释放有关。正是南海北部的对流凝结加热使南海地区温度经向梯度逆转,在热成风关系的制约下南海上空低层副热带高压逐渐减弱南移<sup>[21]</sup>。最终,当对流在整个南海地区发展起来时气旋式环流控制该地区,表现为副高东撤到西太平洋上空。

致谢:SCSMEX和HUBEX北京资料管理中心提供了SCSMEX分析资料。NCAR插值的OLR由NOAA-CIRES气候诊断中心提供。

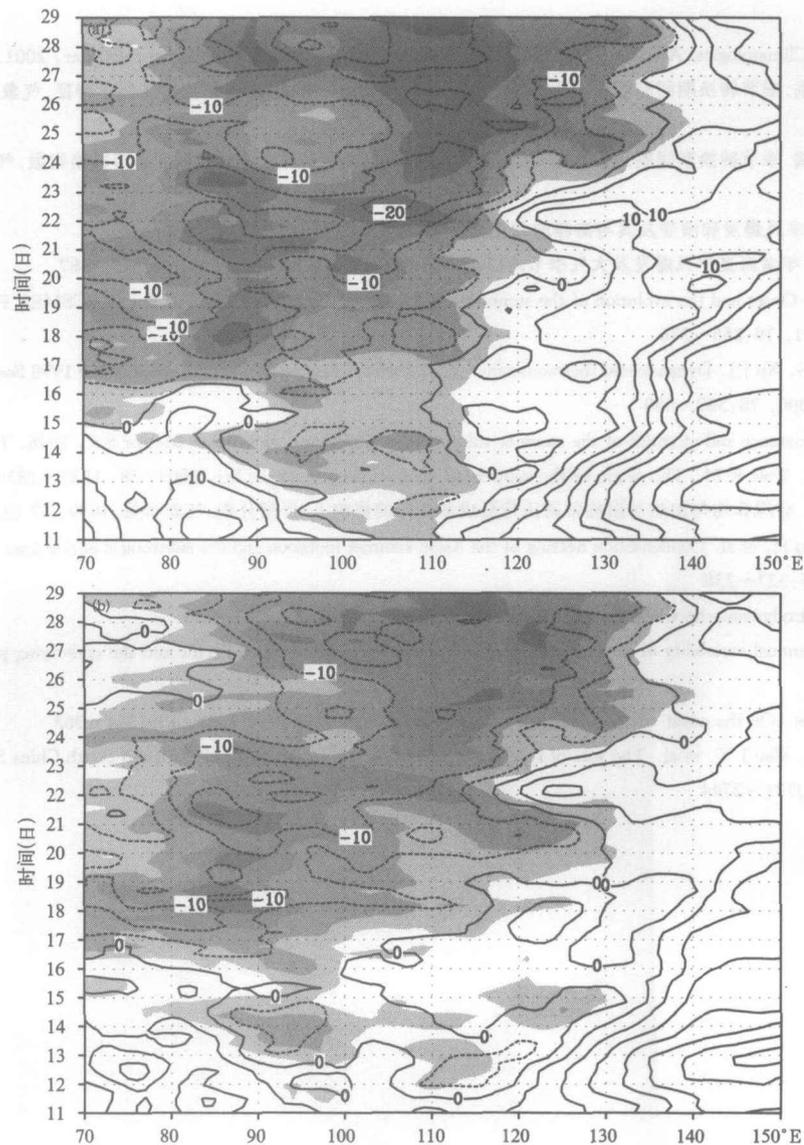


图6 5月11~29日负的位势厚度的经向梯度( $u_T$ , 阴影区)和纬向风垂直切变(等值线)在200 hPa与850 hPa之间(a)以及200 hPa和500 hPa之间(b)沿11~16°N平均的时间-经度剖面(同图1使用了时间平滑以滤掉日变化。等值线间隔:5 m/s)

## 参考文献

- 1 Tao S Y, Chen L X. A review of recent research on the East Asia summer monsoon in China. In: Krishnamuri ed. Monsoon Meteorology. Oxford University Press, 1987. 60~92
- 2 Wu G X, Zhang Y S. Tibetan Plateau forcing and the timing of the monsoon onset over South Asia and the South China Sea. Mon Wea Rev, 1998, 126: 913~927
- 3 Xu J, Chan J C L. First transition of the Asian summer monsoon in 1998 and the effect of the Tibet-tropical ocean thermal contrast. J Meteor Soc Japan, 2001, 79: 241~253
- 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;79:1871~882
- 5 Lau K M, Ding Yihui, Wang Jough-Tai, et al. A report of the field operations and early results of the South China Sea Monsoon Experiment (SC-SMEX). Bull Amer Meteor Soc, 2000, 81: 1261~1270
- 6 张永生, 吴国雄. 关于亚洲夏季季风爆发及北半球季节突变的物理机理的诊断分析 I: 季风爆发的阶段性特征. 气象学报, 1998, 56(5):

513~527

- 7 Fong S K, Wang A Y. Climatological Atlas for Asian Summer Monsoon. Macau: Macau Foundation Publisher, 2001. 318pp
- 8 毛江玉, 吴国雄, 刘屹岷. 季节转换期间副热带高压带形态变异及其机制的研究 I: 副高结构的气候学特征. 气象学报, 2002, 60(4): 400~408
- 9 毛江玉, 吴国雄, 刘屹岷. 季节转换期间副热带高压带形态变异及其机制的研究 II: 亚洲季风区季节转换指数. 气象学报, 2002, 60(4): 409~420
- 10 丁一汇, 李崇银. 南海季风爆发和演变及其与海洋的相互作用. 北京: 气象出版社, 1999. 422 pp
- 11 穆明权, 李崇银. 1998年南海夏季风爆发及大气季节内振荡的活动. 气候与环境研究, 2000, 5: 375~387
- 12 Ding Yihui, Liu Yanju. Onset and the evolution of the summer monsoon over the South China Sea during SCSMEX Field Experiment in 1998. J Meteor Soc Japan, 2001, 79: 255~276
- 13 Chan J C L, Wang Y G, Xu J J. Dynamic and thermodynamic characteristics associated with the onset of the 1998 South China Sea summer monsoon. J Meteor Soc, 2000, 78: 367~380
- 14 Hoskins B J. On the existence and strength of the summer subtropical anticyclones. Bull Amer Meteor Soc, 1996, 77(6): 1287~1292
- 15 Chen P, Hoerling M P, Dole R M. The origin of the subtropical anticyclones. J Atmos Sci, 2001, 58: 1827~1835
- 16 吴国雄, 刘屹岷, 刘平. 空间非均匀加热对副热带高压带形成和变异的影响 I. 尺度分析. 气象学报, 1999, 57(3): 257~263
- 17 Liu Y M, Wu G X, Liu H, et al. Condensation heating of the Asian summer monsoon and the subtropical anticyclone in the Eastern Hemisphere. Climate Dyn, 2001, 17: 327~338
- 18 Ertel H. Ein neuer hydrodynamische wirbelsatz. Meteor Z Braunschweig, 1942, 59: 277~281
- 19 Wu R, Wang B. Interannual variability of summer monsoon onset over the western north Pacific and the underlying processes. J Climate, 2000, 15: 2483~2501
- 20 Krishnamurti T N, et al. On the onset vortex of the summer monsoon. Mon Wea Rev, 1981, 109: 344~363
- 21 Liu Y M, Chan J C L, Mao J Y, et al. The role of Bay of Bengal convection in the onset of the 1998 South China Sea summer monsoon. Mon Wea Rev, 2002, 130: 2731~2744

## IMPACTS OF THE ONSET OF THE BAY OF BENGAL MONSOON ON THE ONSET OF THE SOUTH CHINA SEA MONSOON. PART I: A CASE STUDY

Liu Yimin

(*State Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, CAS, Beijing 100029*)

Johnny C L Chan

(*Laboratory for Atmospheric Research, Department of Physics and Materials Science, City University of Hong Kong*)

Mao Jiangyu Wu Guoxiong

(*State Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, CAS, Beijing 100029*)

### Abstract

SCSMEX assimilative analysis fields and NCAR interpolated outgoing longwave radiation (OLR) have been employed to describe large scale and synoptic features of subtropical circulation during the Bay of Bengal (BOB) monsoon and South China Sea (SCS) monsoon onsets in 1998. The physical linking between the BOB monsoon onset and SCS monsoon onset as well as the impacts of convective condensation heating associated with the BOB monsoon onset on the withdrawal of low level subtropical anticyclone is investigated. Results show that the Asian monsoon onset occurring during May 1998 exhibits a typical eastward development from the BOB region to the SCS domain. The vigorous convection over the BOB during and after the BOB monsoon onset results in the development of westerlies and convection over the north part of SCS. It is shown that the condensation heating is helpful in the overturning of the meridional gradient of temperature over the SCS. As the vertical shear of zonal wind changes in sign, the ridge surface of the subtropical anticyclone tilted northward and the summer pattern was established over the SCS.

**Key words:** BOB monsoon, SCS monsoon, Convective condensation heating, Subtropical anticyclone.

# 刘屹岷等：孟加拉湾季风爆发对南海季风爆发的影响 I：个例分析

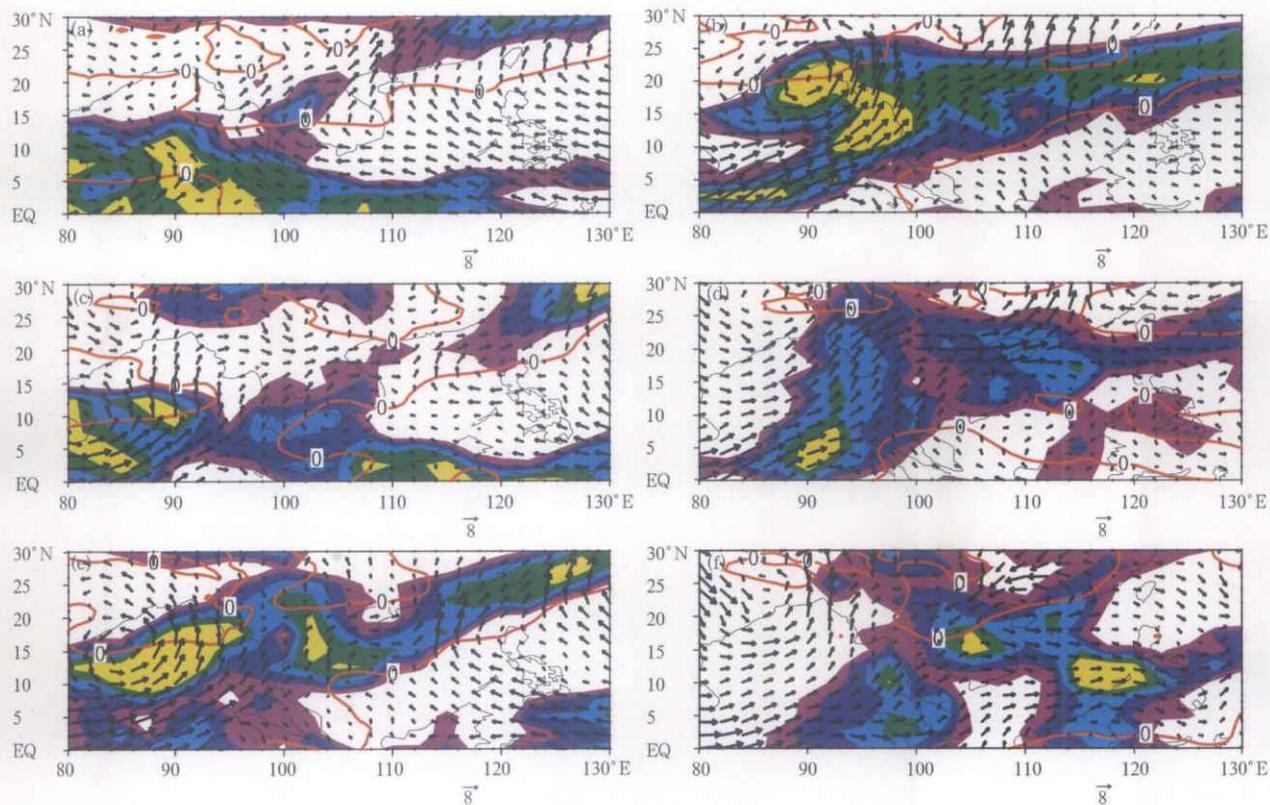


图4 5月13(a),15(b),17(c),19(d),21(e)和24(f)日的850 hPa风矢量场和OLR(阴影,  $20 w/m^2$ )分布  
(a中仅给出小于 $230 w/m^2$ 的OLR分布, 其中粗实线是850 hPa上的 $u=0$ 线)