

印度洋海温异常对西太平洋副热带高压的影响 ——大气中的两级热力适应*

吴国雄 刘平 刘屹岷 李伟平

(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(LASFG), 北京, 100029)

摘 要

利用热力适应理论讨论了印度洋海温异常影响中国天气和西太平洋副热带高压异常的物理机制。结果表明: 通过第一级热力适应, 印度洋上的海温异常形成低层气旋式环流, 并在其东侧的偏南气流中产生对流性降水; 然后通过第二级热力适应, 在 500 hPa 上导致西太平洋副热带高压加强西伸、200 hPa 上南亚高压异常增强。从而证明两级热力适应是导致印度洋海温异常影响中国天气气候异常的重要物理机制。

关键词: 两级热力适应, 过流, 降水异常, 副高异常。

1 引 言

自从 Bjecknes^[1]把 El Niño 和南方涛动(SO) 作为一个整体提出 ENSO 概念以来, 有关 ENSO 对全球气候的影响已有许多的研究。比较一致的看法是: 尽管 ENSO 事件与不同纬度的地面温度存在良好的相关^[2], 但其对降水的影响却主要集中在热带地区^[3]。刘平^[4]的一系列研究则表明, 不管是暖性的 ENSO 事件, 还是冷性的 ENSO 事件期间, 热带地区大气环流的异常主要受到海温异常的空间分布型的影响。其实除了赤道东太平洋外, Folland 等^[5], Nicholls^[6]以及 Ward 和 Folland^[7]等的研究表明, 印度洋、大西洋及西太平洋的海表温度异常均能对邻近地区的降水产生影响。

中国许多学者也曾就 ENSO 与中国降水的联系开展大量的研究^[8], 发现赤道中东太平洋(EEP) 的 SST 异常与中国东部的降水存在一定的相关关系。但是相关并不等于响应, 逻辑学上相关的两种现象常常是通过第三媒介产生因果联系的。为了检验 EEP 区域的 SSTA 与中国的降水是否存在直接的因果关系, 吴国雄和刘还珠^[9]利用 GFDL 的气候模式进行数值试验。他们利用 8 月的模式气候作为背景场, 在图 1a 中的 EEP 海区加进正(负) 2 (区域内部格点为 4) 的 SSTA, 然后进行长达 60 个月的时间积分。图 1a 给出正、负积分中最后 54 个月平均的 950 hPa 流函数的差异分布。其显著特征是在暖性 SSTA 西侧出现一对跨赤道的气旋对, 沿着赤道出现西风异常。这与 Gill^[10]的理论结果一致。降水异常只出现在暖 SSTA 区的西侧, 呈现出邻域响应的特征, 显然对中国的天气没有直接的影响。那么 EEP 的 SSTA 是通过什么媒介与中国的天气和气候发生联系的呢? 吴国雄

* 初稿时间: 1999 年 12 月 23 日; 修改稿时间: 2000 年 2 月 21 日。

资助课题: 国家重点基础研究发展规划 G1998040900 及自然科学基金项目(49635170 和 49823002, 49825504, 49905002)。

等^[11]分析了该区域自 1979 年 1 月至 1988 年 8 月的月平均海表温度异常与中部赤道印度洋 (CEI) 同期海表温度异常的关系。图 1b 显示两者有非常显著的正相关, 其相关系数高达 0.76, 远高于 0.01 的置信水平 (0.24)。有意思的是, 根据吴国雄和刘还珠的数值试验^[9], CEI 海域 1 (区域内部格点为 2) 的海温异常竟能导致中国华南及江南的降水异常 (图 7c), 以及西太平洋副热带高压增强且偏南 (图 1c)。由此看来, EEP 的海温异常与中国天气的相关只是一种表面现象, 而印度洋的 SSTA 与中国的天气异常却存在着直接的因果关系。至于介中机制, 当时尚不得而知。

本研究的目的就是探讨印度洋地区的海温异常是如何导致中国的降水和西太平洋副

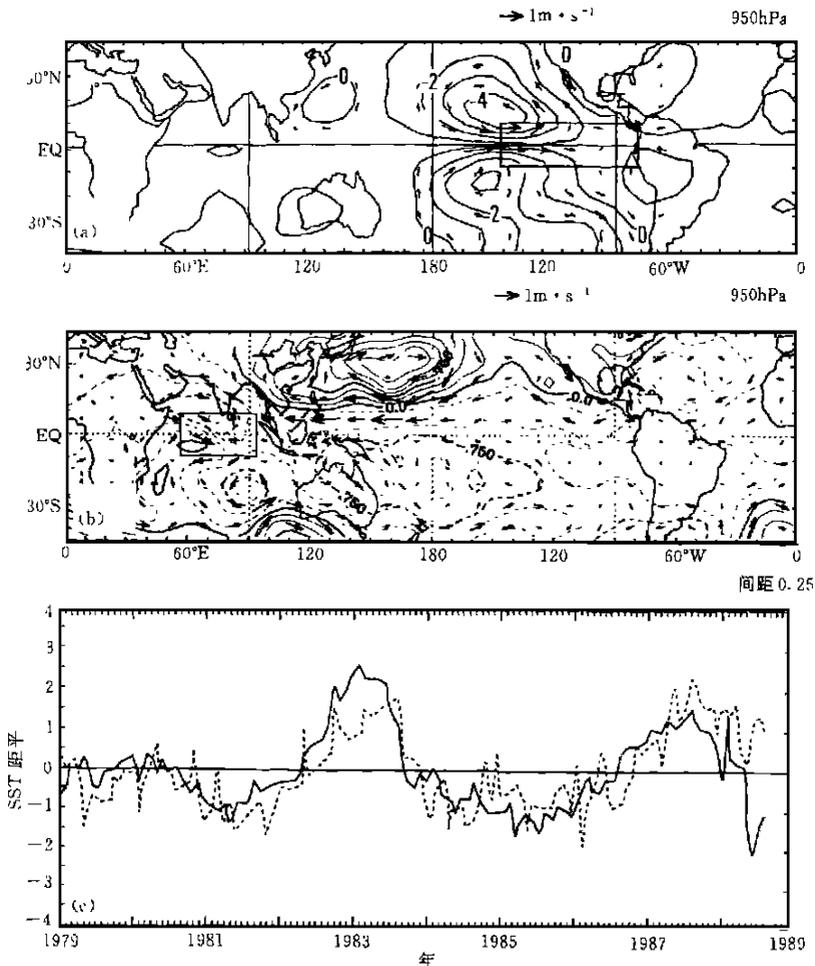


图 1 在 GFDL 低分辨气候模式中, 950 hPa 流函数对东赤道太平洋和中部赤道印度洋给定海域 (图中方框) 正 SSTA 的响应及 1979 年 1 月 ~ 1988 年 8 月给定海区海表温度异常的演变

(a. 东赤道太平洋; b. 中部赤道印度洋; c. 给定海区海温异常演变; 单位: $10^6 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$);

引自文献[9]和[11])

热带高压出现异常的。

2 热力适应和过流

在有关热力适应的研究中^[12], 引进了如下的通量形式的位涡方程

$$\frac{dW}{dt} = F_{\zeta} \cdot \dot{y} \theta + \zeta_{\eta} \cdot \dot{y} Q, \quad (1)$$

其中 F_{ζ} 为三维涡度的摩擦耗散, Q 为非绝热加热,

$$W = \rho P = \zeta_{\eta} \cdot \dot{y} \theta \quad (2)$$

为气块的总位涡; $P = \frac{1}{\rho} \zeta_{\eta} \cdot \dot{y} \theta$ 为 Ertel 位涡(以下简称位涡), 是单位质量流块的三维绝对涡度 ζ_{η} 和位温的三维梯度的标量积; 而通量形式的微分为

$$\frac{d}{dt}(A) = \left[\frac{\partial}{\partial t} + \dot{y} \cdot \mathbf{V} \right] A \quad (3)$$

由此讨论了大气环流向非绝热加热调整, 从而在涡度制造、摩擦耗散及位涡向源区外散逸之间建立平衡的热力适应过程。结果表明, 垂直非均匀加热在加热区低空形成气旋式环流, 在高层形成反气旋式环流的同时, 摩擦通过底边界施加给大气柱负的涡度。它除了补偿气柱中非绝热加热的正涡度产生外, 还通过侧边界的辐散气流及上边界的上冲气流向四周及高层大气排放, 成为大气中的负涡度源。并指出, 过流(overshooting)是热力适应中的伴随现象。在加热层顶以上的高度上, 尽管非绝热加热已消失, 但由于热力适应, 仍然存在上升辐散运动及反气旋式流场, 并伴有冷中心。过流的存在使近地层的加热能够影响高层的环流, 并加速气柱中位涡平衡的建立。因此低层的暖中心和高层的冷中心的出现是热力适应的一个重要表征。

从位涡方程(1)出发可以导得如下的完整形式的涡度方程^[13]:

$$\zeta_{\eta} + \beta v + (f + \zeta_{\eta} \dot{y} \cdot \mathbf{V}) = \rho(P\theta^{-1} - C_d) + \theta^{-1}(F_{\zeta} \dot{y} \cdot \theta + \zeta_{\eta} \dot{y} \cdot Q) \quad (\theta = 0) \quad (4)$$

其中右端的第一项为涡度的内强迫项, 热力学参数 $C_d = \dot{y} \times \mathbf{V} \cdot \dot{y} \theta$ 。第二项为外强迫项。量级分析表明^[14], 垂直非均匀加热是主要的外强迫源, 定常状态的涡度方程(4)可简化为

$$\mathbf{V} \cdot \dot{y} \zeta_{\eta} + \beta v = \theta^{-1}(f + \zeta_{\eta} Q) \quad (\theta = 0) \quad (5)$$

于是当沿着副热带的加热随高度增加时将有南风出现; 当加热随高度减小时将有北风出现。据此刘屹岷等^[15, 16]通过数值模拟表明, 夏季陆面感热加热将使表面副热带高压出现在热源西部, 中部对流层副热带高压出现在热源东部。而副热带深对流加热则使副热带高压在对流层中层出现在热源东部, 在对流层高层出现在热源西部。

3 孟加拉湾海表温度异常对环流的影响——“干大气”试验

试验所用的模式为 LASG 所发展的全球海-陆-气耦合气候模式^[17]。该模式的大气部分为 9 层 15 波菱形截断的全球大气环流模式^[18], 垂直方向采用 σ 坐标。陆面过程采用 SSiB 模式^[19, 20]。辐射过程采用石广玉^[21]的 K-分布方案。海洋部分为 20 层全球海洋环流

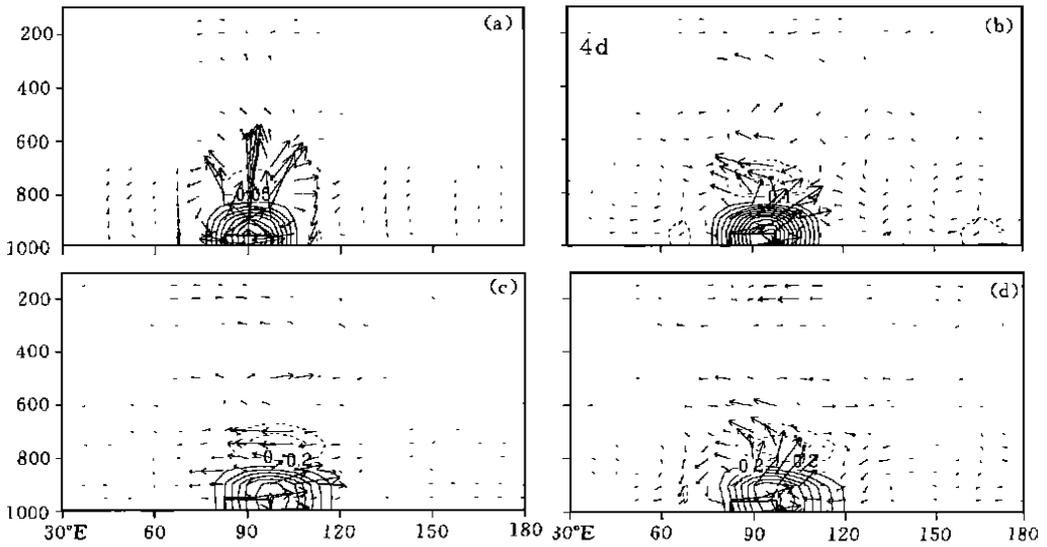


图2 在利用LASG/IAP GOALS气候模式进行的往复7月的“干大气”数值试验中,在孟加拉湾海区加上 1.5°C SSTA后沿 15°N 的位温(单位: K)和风场(u 和 w)的剖面的演变
(a. 第1天; b. 第4天; c. 第7天; d. 第10天)

模式^[22]。在试验中,设定全球为海洋;海洋模式关闭,以给定的7月纬向平均海表温度分布作为大气的下边界。太阳高度角固定为7月15日的值。其它所有外强迫(包括 CO_2 、气溶胶、云量等)及大气状态均取7月纬向平均值。因此模式积分采用的是固定7月的往复式(perpetual)方案。由于在敏感试验中模式调整到准平衡态的时间(spin-up time)约为半年,因此每一试验均积分24个月,然后取后12个月的要素平均作为模式的定常状。为考察大气对局地海温异常的响应,在以下的分析中均采用变量的纬向偏差。

首先假定初始风场为静止风场。为集中研究感热加热对大气环流的影响,在模式的热力学方程中排除凝结加热的作用。这时的模式大气可以看成是一个“干大气”。然后考察当在孟加拉湾地区(见图3方框区域)加进 1.5°C 的SSTA后大气的响应。图2为沿着 15°N 的风场和位温偏差在第1, 4, 7, 10天的垂直剖面分布。近地层的辐合增暖以及850 hPa以上的辐散冷却呈现出明显的感热适应的特征(参见文献[12])。直至第10天,热力适应仍局限在SSTA区域附近(图中方框区)。这时在孟加拉湾地区,1000 hPa为气旋式环流;而850 hPa已变为反气旋式环流(图3)。表明加热场确为浅薄的表面感热加热。

4 孟加拉湾海表温度异常对环流的影响——“湿大气”试验

如果在上述的试验中,模式的热力学方程恢复凝结加热的作用,这时的模式大气就是一个接近真实大气的“湿大气”。其对孟加拉湾相同的SSTA的响应与“干大气”的有显著的差异。这时在SSTA上空出现降水(图4a)。而且由于海温异常所致的表面低压东侧偏南气流的逐渐发展(图4b),降水区也不断东移。至第10天降水区已控制了华南地区

区。在图5所显示的沿15°N的垂直剖面上,积分的第1天,除了低层因感热适应出现的一对位温正、负中心外,在中高层由于降水的凝结加热,还出现另一对位温正、负中心。此后尽管低层的一对位温正、负中心滞留在SSTA上空原地不动,上层的一对位温正、负中心却随着雨区的东移而东移。至第6天以后两对中心已不出现在同一经度上了。也就是说,潜热加热适应的区域已离开了感热适应的区域;深对流加热造成的中、低对流层增暖及对流层顶的过流冷却已到达120°E以东地区。至第10天,降水区已达华南及南海地区,并对应有中低对流层的偏南风发展,反气旋环流出现在降水区东侧(图4)。在200 hPa则有偏北风发展,反气旋环流出现在降水区西侧(图略,参见文献[4]图5.16)。

在定常状态,降水区出现在孟加拉湾至中国东南沿海一带(图6a)。根据式(4),沿着该雨带在200 hPa上有偏北风发展(图6b),在500 hPa和850 hPa上有偏南风发展(图6c, d)。于是异常的副热带高压区域在高对流层出现在中亚和亚曼湾上空,在低层出现在西太平洋上。与文献[16]的结果一致。上述数值试验是以静止风场为初始场进行的。当初始风场采用7月的平均风场时,所得结果非常相似(参见文献[4]图5.20和图5.21)。只不过雨带更向东和东北方向伸展,500 hPa西太平洋副热带高压异常也向中纬地区发展。此外还利用实际的海陆地形分布和6月的平均气候进行相似的试验。所得结果也与图6的相似(参见文献[4]图5.4):在印度洋暖性SSTA区域的东北方向出现500 hPa副热带高压的正异常,与利用GFDL气候模式进行的模拟所得到的结果(图1c)一致。

5 结论和讨论

通过不同的数值试验表明,北印度洋上的海温异常的确能导致西太平洋副热带高压的异常。其影响机制可以根据文献[12]所得的结果,用如图7所示的“两级热力适应”理论予以说明:

(1) 第一级热力适应:感热加热适应。印度洋上的暖性SSTA异常加大了水汽蒸发和海气温差,导致感热加热异常增大,近地层出现气旋式环流。其东部异常发展的偏南风向北输送大量的水汽,产生异常的降水(图7a);

(2) 第二级热力适应:潜热加热适应。异常的降水在向东北方伸展的同时伴有深对流

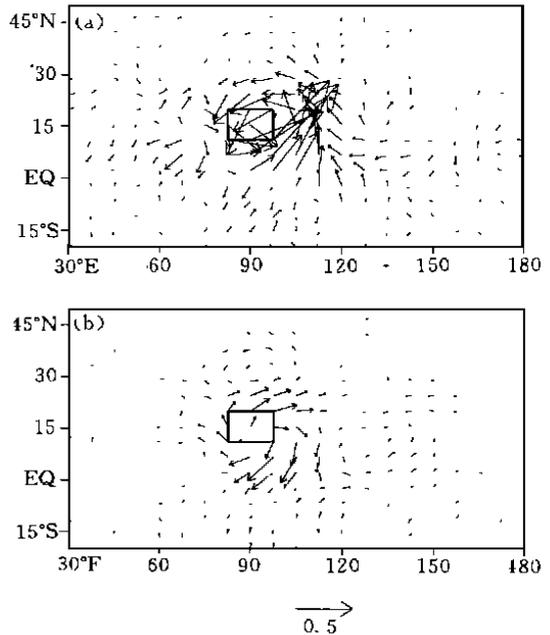


图3 在上述“干大气”数值试验中的第10天的
水平风场
(a. 850 hPa; b. 1000hPa。图中方框区域为施加SSTA的区域)

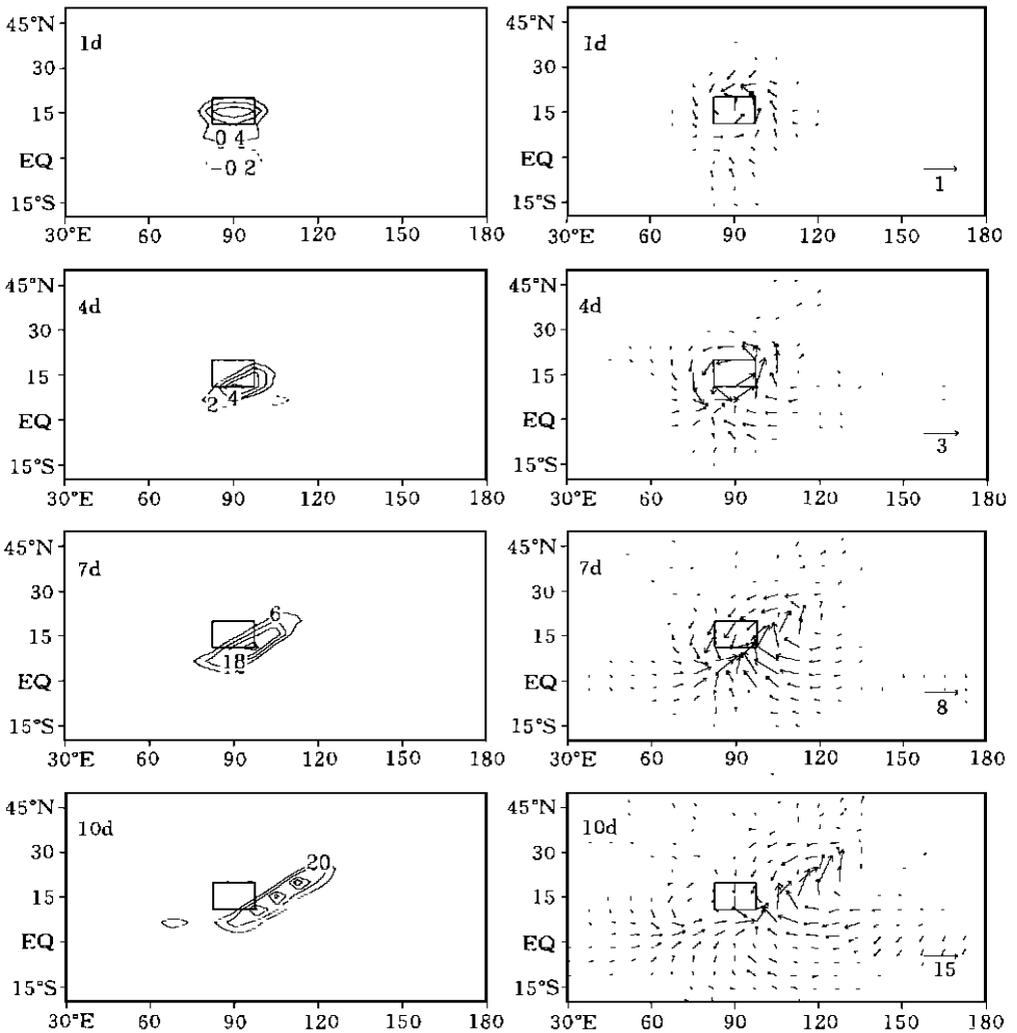


图4 在利用 LASG/IAP GOALS 气候模式进行的往复7月的“湿大气”数值试验中, 在孟加拉湾海区加上 1.5 SSTA 后降水(左列, 单位: $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$) 和 1000 hPa 风场(右列)的演变
(自上至下分别为第 1, 4, 7 和 10 天)

潜热加热。这时在对流层中低层由于加热随高度增加, 南风发展, 副热带高压在加热区东面加强。在对流层上层由于加热随高度减小, 北风发展, 副热带高压在加热区西面加强(图 7b)。

于是当北印度洋出现正的海表温度异常时, 500 hPa 及以下层次上西太平洋副热带高压将异常发展; 200 hPa 上南亚高压也将异常发展。当然异常反气旋环流出现的纬度与印度洋上 SSTA 的位置有关。

研究集中讨论的是大气环流对印度洋 SST 异常的响应。然而 SST 异常经常是以特定

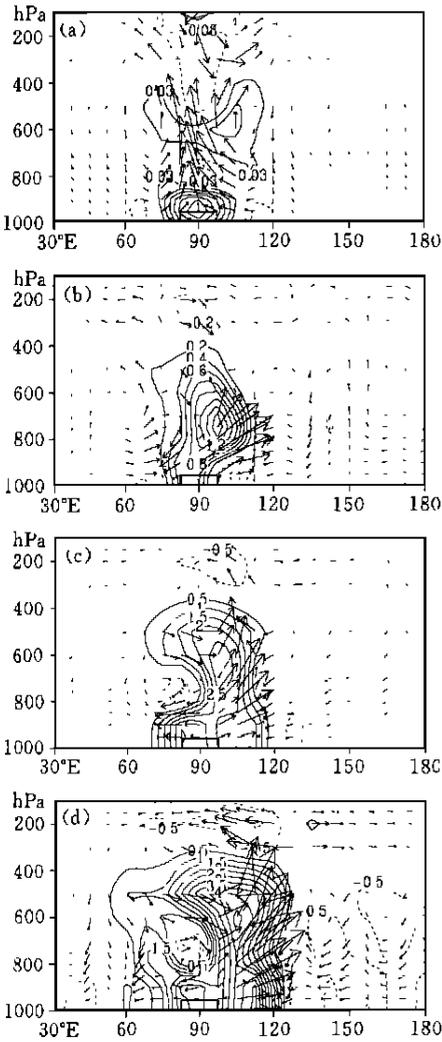


图 5 在利用 LAGS/IAP GOALS 气候模式进行的往复 7 月的“湿大气”数值试验中, 在孟加拉湾海区加上 1.5 SSTA 后沿 15°N 的位温(单位:)和风场(u 和 w)的剖面的演变 (a. 第 1 天; b. 第 4 天; c. 第 7 天; d. 第 10 天)

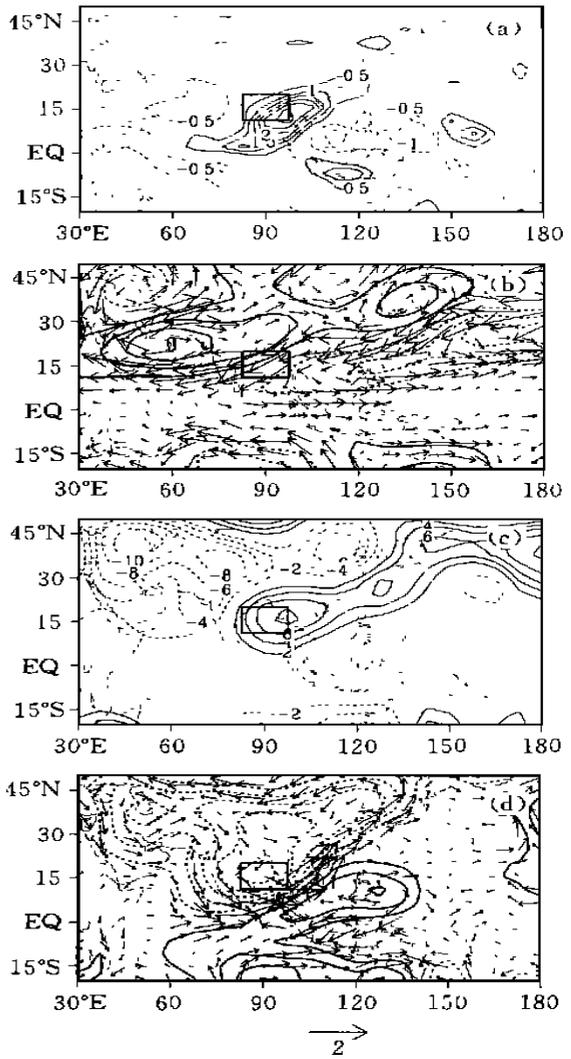


图 6 利用 LAGS/IAP GOALS 气候模式进行的往复 7 月的“湿大气”数值试验的定常态中各要素场的空间分布 (a. 降水, 单位: $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$; b. 200 hPa 风场和高度场; c. 500 hPa 高度场; d. 850 hPa 风场和高度场。高层场的单位为 gpm)

的空间分布型出现的, 其对天气气候的影响是综合性的。也就是说, 特定区域的气候异常往往受不同海区 SST 异常的共同影响。尤其当印度洋 SST 异常较弱时更必须注意与其它海区的海温异常加以综合分析。

图 1 的结果是在实际的 SST、存在地形及海陆分布的背景下得到的; 而本试验是在纬向平均 SST 及“水体行星”(aqueous planet) 的背景下得到的。但两者的结果却大体相似:

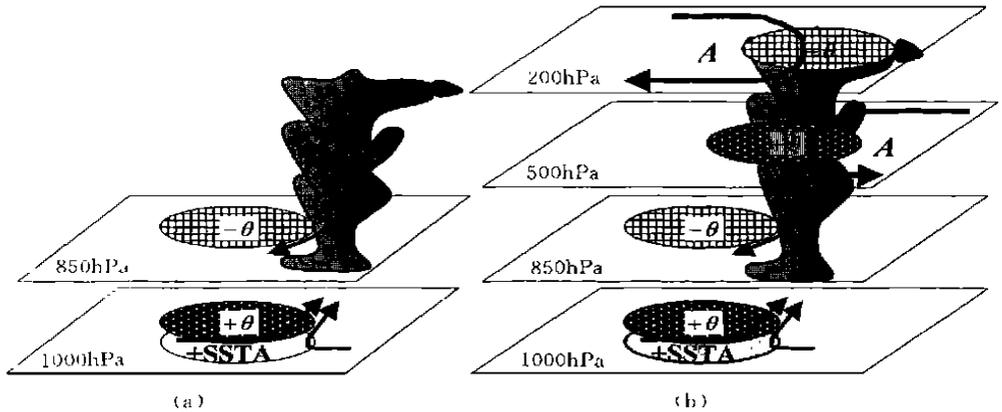


图7 大气环流对印度洋正海表温度异常的“两级热力适应”示意图

(a. 第一级热力适应: 感热加热适应; b. 第二级热力适应: 潜热加热适应)

西太平洋副热带高压均得到增强(图1c、图6d)。这说明了两级热力适应的普适性。但两者还是存在显著差异: 异常的西太平洋副热带高压在存在地形的试验中显著偏北, 中心位于30°N附近(图1c); 而在无地形的试验中显著偏南, 中心位于10°N附近(图6d)。在Hahn和Manabe^[23]所进行的有无地形的对比试验中发现, 在无地形的试验中夏季东亚季风几乎消失, 降水带南移至北印度洋上。这与图6d中副热带高压偏南的结果是一致的。均说明高原的存在会使西太平洋副热带高压及其西侧的降水异常向北移动, 呈现了青藏高原在东亚气候形成中的重要作用。

参考文献

- 1 Bjerknes J. Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific. *Mon Wea Rev*, 1969, 97: 163—172
- 2 Halpert M S, Ropelewski C F. Surface temperature patterns associated with the Southern Oscillation. *J Climate*, 1992, 5: 577—593
- 3 Ropelewski. Global teleconnections during El Niño. *Nature*, 1992, 356: 476—477
- 4 刘平. 副热带、西太副高年际变化特征及其与海表温度异常的理系: [学位论文]. 北京: 中国科学院大气物理研究所, 1999, 166pp
- 5 Folland C K, Palmer T N, Parker D E. Sahel rainfall and worldwide sea temperatures, 1901—85. *Nature*, 1986, 320: 602—607
- 6 Nicholls N. Sea-surface temperature and Australian winter rainfall. *J Climate*, 1989, 2: 965—973
- 7 Ward M N, Folland C K. Prediction of seasonal rainfall in the Northern Nordeste of Brazil using eigenvectors of sea-surface temperatures. *Int J Climatol*, 1991, 11: 711—743
- 8 叶笃正, 黄荣辉等. 长江黄河流域旱涝规律和成因研究. 济南: 山东科学出版社, 1996. 384
- 9 吴国雄, 刘还珠. 降水对热带海表温度异常的邻域响应 I: 数值模拟. *大气科学*, 1995, 19(4): 421—434
- 10 Gill A E. Some simple solutions for heat-induced tropical circulation. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1980, 106: 447—662
- 11 吴国雄, 孙凤英, 王敬方等. 降水对热带海表温度异常的邻域响应 II: 资料分析. *大气科学*, 1995, 19(6): 663—676
- 12 吴国雄, 刘屹崧. 热力适应、过流、频散和副高 I: 热力适应和过流. *大气科学*, 2000, 24(4): 433—446
- 13 吴国雄, 刘还珠. 全型垂直涡度倾向方程和倾斜涡度发展. *气象学报*, 1999, 57(1): 1—15

- 14 吴国雄, 刘屹岷, 刘平. 空间非均匀加热对副热带高压形成和变异的影响 I: 尺度分析. 气象学报, 1999, 57(3): 257 ~ 263
- 15 刘屹岷, 刘辉, 刘平等. 空间非均匀加热对副热带高压形成和变异的影响 II: 陆面感热与东太平洋副高. 气象学报, 1999, 57(4): 385 ~ 396
- 16 刘屹岷, 吴国雄, 刘辉等. 空间非均匀加热对副热带高压形成和变异的影响 III: 凝结潜热加热与南亚高压及西太平洋副高. 气象学报, 1999, 57(5): 525 ~ 538
- 17 吴国雄, 张学洪等. LASG 全球海洋-大气-陆面模式(GOALS/ LASG) 及其模拟研究. 应用气象学报, 1997, 8(增刊): 15 ~ 28
- 18 Wu G X, Liu H, Zhao Y C, et al. A nine-layer atmospheric general circulation model and its performance. Adv in Atmos Sci, 1996, 13, 1—18
- 19 Xue Y K, Sellers P J, Kinter J L, et al. A simplified biosphere model for global climate studies. J Climate, 1991, 4: 345—364
- 20 Liu H, Wu G X. Impacts of land surface on climate of July and onset of summer monsoon: A study with an AGCM plus SSiB. Adv in Atmos Sci, 1997, 14(3): 289—308
- 21 Shi G Y. An accurate calculation and the infrared transmission function of the atmospheric constituents: [dissertation] Dept of Sci. Tohoku University of Japan. 1981 pp. 191
- 22 Zhang X H, Chen K M, Jin X Z, et al. Simulation of thermohaline circulation with a twenty layer oceanic general circulation model. Theo App Cli, 1996, 55, 65—88
- 23 Hahn D G, Manabe S. The role of mountains in the South Asian monsoon circulation. Atmos J Sci, 1975, 32, 1515—1541

IMPACTS OF THE SEA SURFACE TEMPERATURE ANOMALY IN THE INDIAN OCEAN ON THE SUBTROPICAL ANTICYCLONE OVER THE WESTERN PACIFIC— TWO-STAGE THERMAL ADAPTATION IN THE ATMOSPHERE

Wu Guoxiong Liu Ping Liu Yimin Li Weiping

(*State Key Lab of Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics (LASG),
Institute of Atmospheric Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*)

Abstract

The thermal adaptation theory is used to investigate the impacts of the sea surface temperature (SST) anomaly in the Indian Ocean on the weather over southern China and the subtropical anticyclone over the western Pacific Ocean. Results show that through the first stage of the atmospheric thermal adaptation to the SST anomaly in the Indian Ocean, the in situ anomalous cyclonic circulation in the lower layers of the troposphere is formed, and deep convective precipitation to its east is generated due to the development of southerlies. Then through the second stage of the atmospheric thermal adaptation to the latent heating resulting from the precipitation condensation, anomalous anticyclone circulation is produced at 500 hPa over the western Pacific and at 200 hPa over South Asia. It is therefore concluded that the two-stage thermal adaptation is an important mechanism that links the occurrence of the anomalous subtropical anticyclones and climate over the eastern Asian monsoon region to the SST anomaly in the Indian Ocean.

Key words: Two-stage thermal adaptation, Overshooting, Precipitation anomaly, Subtropical anticyclone anomaly.