

刘伯奇, 何金海, 王黎娟. 2009. 4~5 月南亚高压在中南半岛上空建立过程特征及其可能机制 [J]. 大气科学, 33 (6): 1319 - 1332. Liu Boqi, He Jinhai, Wang Lijuan. 2009. Characteristics of the South Asia high establishment processes above the Indo-China Peninsula from April to May and their possible mechanism [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (6): 1319 - 1332.

4~5 月南亚高压在中南半岛上空建立 过程特征及其可能机制

刘伯奇 何金海* 王黎娟

南京信息工程大学江苏省气象灾害重点实验室, 南京 210044

摘 要 利用 NCEP/NCAR 再分析资料, 发现菲律宾群岛以东洋面上空反气旋在 4 月第 5 候分裂成位于中南半岛上空的西部中心和仍位于菲律宾以东洋面上空的东部中心两部分, 其中位于中南半岛上空的反气旋中心加强后形成南亚高压。中南半岛高空反气旋生成加强和菲律宾群岛以东洋面高空反气旋减弱消亡的同时发生是 4~5 月南亚高压在中南半岛上空建立过程的主要特征, 其主要促发因子是亚洲南部大气非绝热加热状态的改变。事实上, 随着对流沿亚澳“大陆桥”北移和中南半岛对流建立, 中南半岛上升运动加强, 高空辐散加剧, 西部中心在中南半岛南部生成, 南亚高压初步建立。随后, 菲律宾群岛以东洋面上热源突然东撤至 150°E 以东, 中南半岛热源成为主导, 在加热区东面对流层高层激发出气旋式环流, 造成西太平洋高压在 120°E 附近分裂。之后, 孟加拉湾-中南半岛夏季风建立, 孟加拉湾-中南半岛对流加强, 在深对流作用下, 中南半岛上空释放大量潜热, 上升运动进一步加强, 西部中心加强北抬。同时, 南海对流开始加强, 其释放的潜热加热会在加热区东部的对流层高层激发出正涡度变率, 令东部中心减弱消亡, 南亚高压在中南半岛上空完全建立。

关键词 南亚高压 中南半岛 垂直非均匀加热

文章编号 1006 - 9895 (2009) 06 - 1319 - 14

中图分类号 P424

文献标识码 A

Characteristics of the South Asia High Establishment Processes above the Indo-China Peninsula from April to May and Their Possible Mechanism

LIU Boqi, HE Jinhai*, and WANG Lijuan

Jiangsu Key Laboratory of Meteorological Disaster, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

Abstract In terms of the NCEP/NCAR daily-mean reanalysis data (1975 - 2005), it is found that the upper troposphere anti-cyclone to the east of the Philippines break into two portions, the west anticyclone is above the Indo-China Peninsula (ICP) while the east one still stays above the ocean to the east of the Philippines. The South Asia high (SAH) forms by the reinforcement of the west anticyclone. The formation and strengthening of the ICP upper anticyclone and the weakening and vanishment of the anticyclone above the ocean to the east of the Philippines occur simultaneously, which composes the chief characteristics of the SAH establishment processes above the ICP from A-

收稿日期 2008 - 09 - 07, 2009 - 04 - 02 收修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展规划项目 2006CB403607, 公益性行业(气象)科研专项项目 GYHY200706005, 国家自然科学基金资助项目 40633018、40975057

作者简介 刘伯奇, 男, 1984 年出生, 硕士, 主要从事季风动力学研究。E-mail: lbqj@qq.com

* 通讯作者 E-mail: hejhnew@jssmail.com.cn

pril to May, while the primary impact factor of the processes is the variation of the diabatic heating condition on the south of the Asian continent. With the northward propagation of the convection along the Asian-Australian “Land Bridge” and the buildup of the ICP convection, the upward motion over the ICP and the upper troposphere divergence strengthen, so that west center forms and the SAH establishes initially. Whereafter the heat source which has been on the ocean to the east of the Philippines withdraws eastward to the east of 150°E suddenly, the ICP heat source becomes the leader, which stimulates a cyclonic circulation to the east of the heating zone in the upper troposphere that results in the abruption of the SAH near 120°E . Then because of the strengthen of the BOB-ICP convection and the establishment of the BOB-ICP summer monsoon (BOB is short for Bay of Bengal), a great deal of latent heat is released above the ICP, which makes the vertical motion enhance so that the west center intensifies and moves northward. The South China Sea (SCS) convection begins strengthening at the same time, and the released latent heating can stimulate the upper-level positive vorticity variety, which makes the east center weaken and disappear, and the SAH establishes completely above the ICP.

Key words South Asia high, the Indo-China Peninsula, vertical heterogeneous heating

1 引言

南亚高压(简称 SAH)是北半球对流层高层除极地涡旋外最强大最稳定的环流系统(Mason and Anderson, 1958),南亚高压从冬到夏位置和强度存在明显的南北位移季节变化,在此期间东亚大气环流也从冬季型转为夏季型,这种明显的季节变化直接影响了北半球大气环流形势,也影响着整个亚洲区域天气、气候(朱福康等, 1981),对东亚大气环流季节变化和亚洲南部夏季风爆发以及我国东部地区旱涝分布具有指示意义。同时,南亚高压南北位移季节性变化存在明显的阶段性,5、6月南亚高压大多为 1 个中心,从我国南海海面上不断西进北上,一直移到高原上空并稳定下来(孙国武, 1984)。已有研究表明(Liu et al., 2000; 吴国雄等, 2002; Qian et al., 2002),南亚高压是热力型高压系统,其形成和高原上空非绝热加热的空间非均匀分布有关,而其季节演变与大气加热作用的变化密切相关,具有“趋热性”特征。目前,对非绝热加热作用的研究主要集中在它对副热带高压的影响上,Cao et al. (2003)认为造成 500 hPa 西太平洋副热带高压位置异常的原因是前期外部的热力强迫的差异,导致了大气产生不同的响应波型;Miyasaka and Nakamura (2005)研究了北太平洋地面副热带高压和北大西洋地面副热带高压(Azores 高压)的三维结构和动力特征,发现这两个地区地面副热带高压形成的主要直接强迫因子是由大陆感热加热和海洋辐射冷却造成的海陆热力对比;Wu and Zhou (2008)则指出西太平洋副热带高压的年

际和年代际变率与来自“海洋大陆”和赤道中东太平洋海表温度(SST)的强迫作用有关;Wu and Liu (2003)和 Liu et al. (2004)提出了“四叶型加热拼图”的副高形成理论,最近吴国雄等(2008)阐明夏季副热带“四叶型”LOSECOD 加热分布型的内涵,在此基础上研究了海陆分布对海气相互作用的调控,揭示了“四叶型”加热形成的物理基础,并进一步阐明“四叶型”加热拼图及其与副热带高压形成和变异的联系。因为南亚高压和副热带高压联系密切,所以我们试图从大气非绝热加热状态变化的角度解释 4~5 月南亚高压在中南半岛上空的建立过程,He et al. (2006)指出,南亚高压中心在 4、5 月份通过高压中心分裂-重建的季节突变过程快速从菲律宾群岛以东洋面上空移至中南半岛上空,而这种季节突变可能与苏门答腊对流的快速北抬以及中南半岛对流的建立有关。至此,我们不禁要问,南亚高压在中南半岛上空建立的过程特征是什么?其机制是什么?本文试图对上述问题作一初步的分析。

2 资料与方法说明

本文使用 NCEP/NCAR 的再分析资料(1975~2005 年),时间取 4~6 月(即春末初夏季节转换时期),水平分辨率 $2.5^{\circ}\times 2.5^{\circ}$,资料包括三维风场、温度场、高度场、比湿场和地面气压场。向外长波辐射(OLR)资料来自 NOAA,时段为 1975~2005 年。其中三维风场、温度场和高度场垂直方向取 1000 hPa 至 100 hPa 共 12 层,湿度场垂直方向取 1000 hPa 至 300 hPa 共 8 层。

为描述南亚高压的变化特征,一方面,我们使用 150 hPa 流场来刻画南亚高压,另一方面,根据南亚高压的性质,定义 150 hPa 上符合

$$\begin{cases} u = 0 \\ \frac{\partial u}{\partial y} > 0 \end{cases}$$

的纬向风零线为南亚高压脊线。

为了进一步反映南亚高压的基本性质,根据 Peixoto and Oort(1995) 的方案,对大气环流进行垂直分解:

正压模:

$$\begin{cases} \bar{u} = \frac{1}{p_s - p_t} \int_{p_t}^{p_s} u dp, \\ \bar{v} = \frac{1}{p_s - p_t} \int_{p_t}^{p_s} v dp, \end{cases} \quad (1)$$

斜压模:

$$\begin{cases} u' = u - \bar{u}, \\ v' = v - \bar{v}, \end{cases} \quad (2)$$

其中, p_s 和 p_t 分别代表地表气压和对流层顶气压(取 100 hPa), 此处称整层平均的风场为正压模, 而其余部分为斜压模(边界层摩擦的影响在这里不予考虑)。正压模反映了整层大气运动的总体趋势, 斜压模是 150 hPa 实际流场和平均层(正压层)之间风的矢量差, 近似代表了这两层流场之间的斜压性, 而大气的斜压性与热力作用关系密切, 因此可以用斜压模来近似地反映热力因子的作用。

本文使用大气视热源来反映大气非绝热加热状况, 其计算方法采用“倒算法”(Yanai et al., 1973), 其公式如下:

$$Q_1 = c_p \left[\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \bar{\mathbf{v}} \cdot \nabla_p \bar{T} + \left(\frac{p}{p_0} \right)^{c_p \bar{\omega}} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial p} \right]. \quad (3)$$

对整层气柱积分, 有

$$\langle Q_1 \rangle = \frac{1}{g} \int_{p_t}^{p_s} Q_1 dp \approx LP + S + \langle Q_R \rangle,$$

其中, p_t 为积分上限取 100 hPa, p_s 为地面气压, L 为凝结潜热释放率, P 为降水量, LP 、 S 、 $\langle Q_R \rangle$ 分别代表潜热加热通量、地表感热通量和垂直积分的辐射加热项。

为了诊断加热场和流场(涡度场)之间的相互作用, 我们使用了吴国雄等(1999)得到的不考虑摩擦耗散和倾斜涡度发展(Slantwise Vorticity Development, SVD)作用, 而仅考虑外热源作用的全型涡度方程为

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \zeta + \beta v = (f + \zeta) (1 - \kappa) \frac{\omega}{P} + \frac{f + \zeta}{\theta_z} \frac{\partial Q_1}{\partial z} - \frac{1}{\theta_z} \frac{\partial v}{\partial z} \frac{\partial Q_1}{\partial x} + \frac{1}{\theta_z} \frac{\partial u}{\partial z} \frac{\partial Q_1}{\partial y}, \quad (4)$$

其中的非绝热加热项为

$$\frac{f + \zeta}{\theta_z} \frac{\partial Q}{\partial z} - \frac{1}{\theta_z} \frac{\partial v}{\partial z} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{1}{\theta_z} \frac{\partial u}{\partial z} \frac{\partial Q}{\partial y}, \quad \theta_z \neq 0. \quad (5)$$

考虑到南亚高压是位于对流层高层的天气尺度系统, 故水平尺度约为 10^6 m, 根据压高公式可得, 南亚高压所在层次的垂直高度约为 15 km 左右, 因此取其垂直尺度约为 10^3 km 是合适的。由尺度分析可知, 加热的水平差异尺度 ($10^{-11} \sim 10^{-12} \text{ s}^{-2}$) 比垂直差异尺度 (10^{-10} s^{-2}) 小得多, 说明对南亚高压而言, 加热水平差异的影响远远弱于其垂直差异的影响, 即加热的垂直差异影响是主要, 因此将方程简化为:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = -\mathbf{v} \cdot \nabla \zeta - \beta v + \frac{f + \zeta}{\theta_z} \frac{\partial Q}{\partial z}, \quad (6)$$

方程右端三项依次为相对涡度平流项、地转涡度平流项和非绝热加热的垂直变化项。需要指出的是, 方程(6)中的相对涡度平流项是由局地平均量和瞬变量组成的, 因此, Yuan et al. (2000) 推导了局地纬向平均经向环流的诊断方程。但是, 由于本文针对的是气候平均状况, 所以在计算时不考虑水平平流的瞬变贡献。

3 南亚高压在中南半岛上空建立的过程特征

图 1 反映了气候平均 150 hPa 流场逐候演变特征。4 月初, 环流中心位于菲律宾以东洋面上, 高压脊线(虚线)位于 7.5°N 附近, 随后高压主体开始西伸, 4 月第 5 候(图 1c) 环流中心一分为二, 出现“双中心”结构, 东西部反气旋中心分别位于菲律宾以东洋面上空和中南半岛东南部上空, 但高压脊线位置变化不大, 高压主体向北运动的趋势不显著。这种“双中心”结构可以维持至 5 月第 1 候(图 1e), 在此期间西部中心明显加强北抬, 对应高压脊线从 7.5°N 北抬至 12.5°N , 说明南亚高压在中南半岛南部上空初步建立, 而东部中心则始终位于菲律宾群岛以东洋面上空并逐渐减弱。之后, 西部中心稳定在中南半岛上空并且继续加强, 而东部环流闭合中心则继续减弱为辐散中心(图 1f、g)。

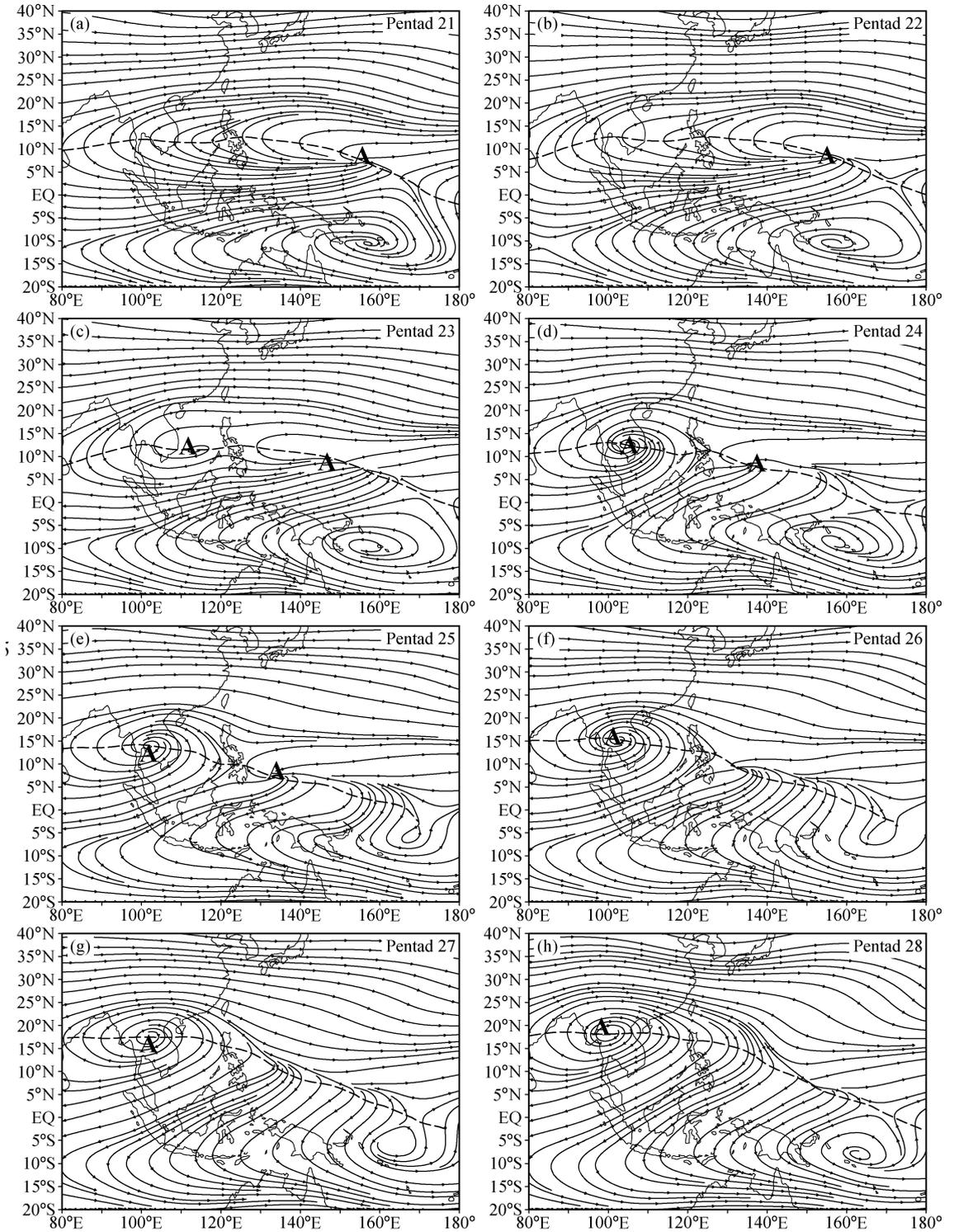


图 1 气候平均场 150 hPa 上流场的逐候演变: (a~h) 4 月第 3 候~5 月第 4 候。虚线: 150 hPa 高压脊线; “A”: 反气旋中心
Fig. 1 The pentad evolution of the climatic mean streamline field at 150 hPa; (a-h) Pentad 3 of Apr to pentad 4 of May. Dashed line: the ridge line of the South Asia high (SAH) at 150 hPa, “A”: the anticyclonic center

在南海夏季风建立当候(图 1h), 菲律宾群岛以东洋面上空的辐散中心完全消失, 南亚高压完全在中

南半岛上空建立, 在此期间高压脊线从 12.5°N 快速北抬至 15°N 附近, 说明在南亚高压建立之前,

高压主体以纬向运动为主,而在南亚高压建立之后,高压主体以经向运动为主。本文将上述反气旋环流中心从菲律宾群岛以东洋面上空移至中南半岛上空的演变过程定义为南亚高压在中南半岛上空的建立过程。此外,我们还分析了 150 hPa 气候平均逐日流场的演变特征(图略),得到与上文一致的结论。

结合气候平均 150 hPa 逐日流场的演变特征,我们将南亚高压在中南半岛上空的建立过程分为 3 个阶段:(1) 南亚高压建立之前(4月1~21日): 高压位于菲律宾以东洋面上空,仅存在一个反气旋中心;(2) 南亚高压初步形成阶段(4月22日~5月5日): 环流中心分裂为东西两个反气旋中心,分别位于中南半岛和菲律宾以东洋面上空;(3) 南

亚高压完全建立阶段(5月6~15日): 南亚高压在中南半岛上空建立,东部反气旋中心完全消失。此外,图1还说明南亚高压在中南半岛上空的建立过程实际上是西部中心生成加强和东部中心减弱消亡同时发生的过程。图2是南亚高压在中南半岛上空建立过程中流场的模态分解结果,从图2中可知,斜压相对涡度(图2阴影区)的大值中心与反气旋中心相对应,在南亚高压初步形成阶段(图2e),斜压相对涡度极大值区位于中南半岛上空,而次极大值区则位于菲律宾群岛以东洋面上空,分别与西部中心和东部中心相对应。随着中南半岛负涡度区的继续加强扩大和菲律宾群岛以东洋面负涡度区的不断减弱收缩,南亚高压完全建立(图2f)。对比图1和图2可知,斜压模分布特征与实际流场的分布十

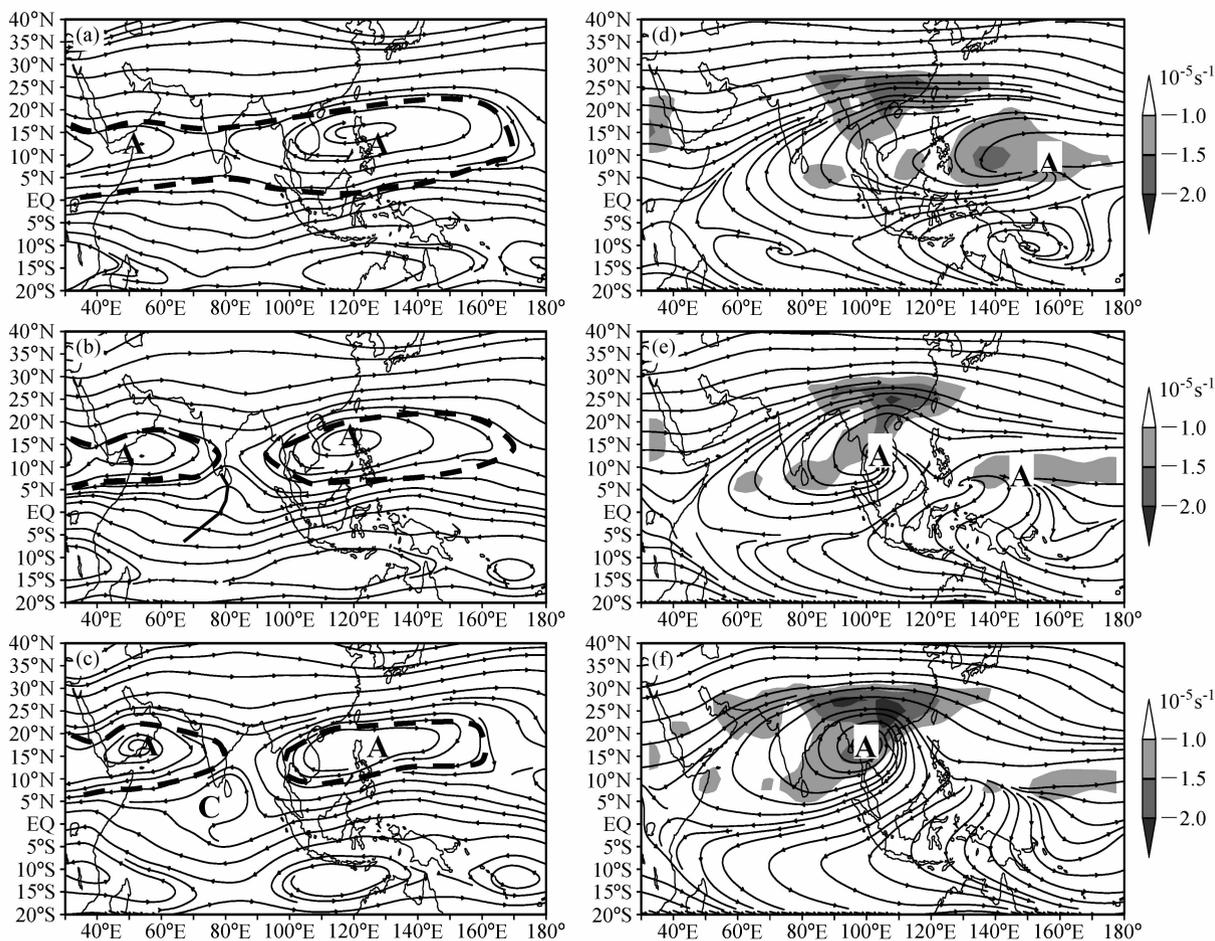


图2 南亚高压在中南半岛上空建立各阶段流场(a~c)正压模和(d~f)斜压模分布特征:(a,d)建立之前;(b,e)初步建立阶段;(c,f)完全建立阶段。(a~c)粗实线:槽线,虚线:副高的主体轮廓;(d~f)阴影:斜压涡度

Fig. 2 Spatial distributions of (a, b, c) the barotropic modes and (d, e, f) the baroclinic modes of streamline field in each phase of the SAH establishing process above the Indo-China Peninsula (ICP): (a, d) Pre-establishment phase; (b, e) initial formation phase; (c, f) complete establishment phase. (a-c) Thick solid line; trough, dashed line; the profile of the subtropical high; (d-f) shading; the baroclinic relative vorticity

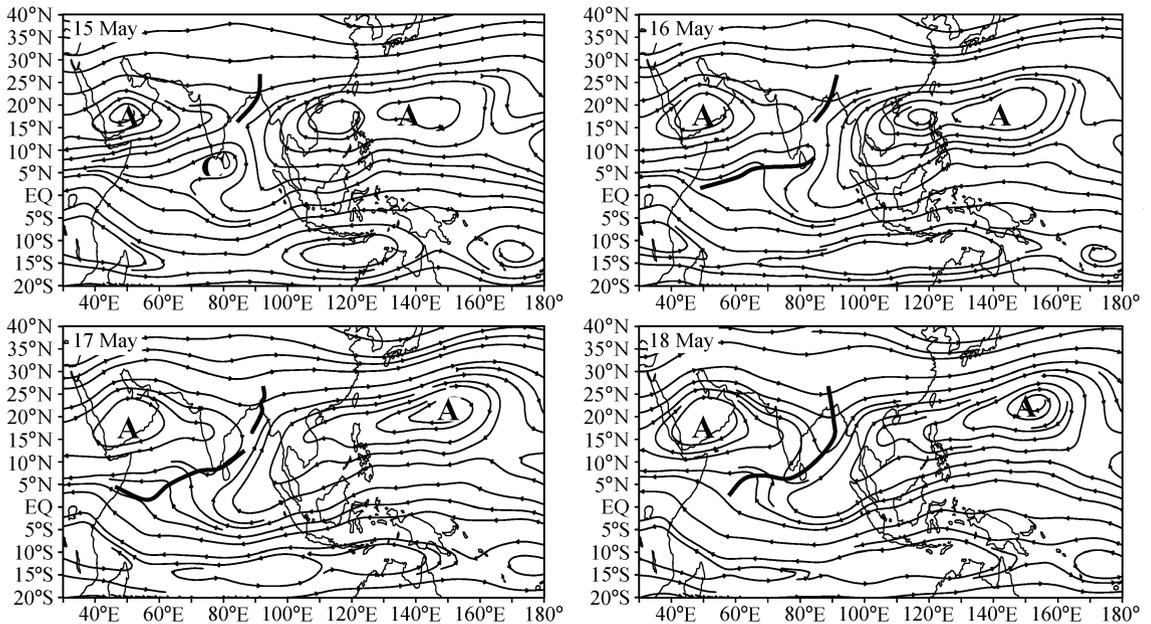


图3 5月16日前后正压流场的逐日演变。“A”：反气旋中心，“C”：气旋中心，实线：槽线

Fig. 3 Daily variation of the barotropic stream field during 15–18 May. The symbol “A” (“C”) denotes the anticyclonic (cyclonic) center; the thick solid line means the trough

分一致，说明南亚高压在中南半岛上空的建立过程主要是受大气热力因子变化影响的。

正压模(图2a~c)则反映了南亚高压在中南半岛上空建立过程中整层大气流场的平均状况。事实上，正压模清晰地反映了副热带高压带的断裂过程。当菲律宾群岛以东洋面上空的反气旋开始分裂时，流场正压模(图2b)表现为在印度半岛东部附近出现倒槽，随后出现闭合的斯里兰卡低涡(图2c)，副热带高压主体开始东撤。5月16日前后(图3)，斯里兰卡低涡与中纬度低槽打通，形成孟加拉湾大槽，副热带高压带在孟加拉湾上空断裂，同时副热带高压主体退出南海区域，南海夏季风建立。

综上所述，4~5月南亚高压在中南半岛上空的建立过程具有如下特征：(1)南亚高压于4月下旬至5月中旬在中南半岛上空建立，整个建立过程中最明显的特征是高空反气旋流场存在纬向“双中心”结构；(2)南亚高压的建立过程实际上是西部中心(即南亚高压)生成加强和东部中心减弱消亡共同进行的过程，是大气热力因子变化的产物；(3)南亚高压初步形成阶段，孟加拉湾-中南半岛夏季风建立，而南亚高压在中南半岛上空完全建立后，南海夏季风建立，说明南亚高压在中南半岛上空的建立过程与东亚夏季风的建立和推进过程紧密

联系。

何金海等(2006)指出，中南半岛对流最早出现在4月中旬，而中南半岛和印度半岛之间的加热差异是导致副热带高压带在孟加拉湾断裂的关键。那么，4~5月南亚高压在中南半岛上空的建立过程是否也与中南半岛对流的爆发有关？如果有关，中南半岛对流又是如何影响这一过程的？已有研究表明(王黎娟等，2004)，中南半岛对流的建立与对流沿澳“大陆桥”的移动密切相关，我们将通过计算和分析大气视热源的演变特征，来揭示中南半岛对流与南亚高压季节突变的可能联系。根据上文的分析，南亚高压在中南半岛上空的建立过程可以概括为三个方面，一是西部中心在中南半岛上空生成并加强，二是高空反气旋在120°E附近分裂，三是东部中心的减弱消亡。下面，我们将逐一讨论。

4 南亚高压在中南半岛上空建立的可能机制

上文已明确指出南亚高压在中南半岛上空的建立过程是大气热力因子变化的产物。事实上，南亚高压建立过程中出现的西部中心和东部中心的相对涡度差和大气视热源差(西部减去东部)时间序列存在显著的反相关特征(图4，相关系数 r 达-0.837，通过了信度为99%的显著性检验)，这说明中南半

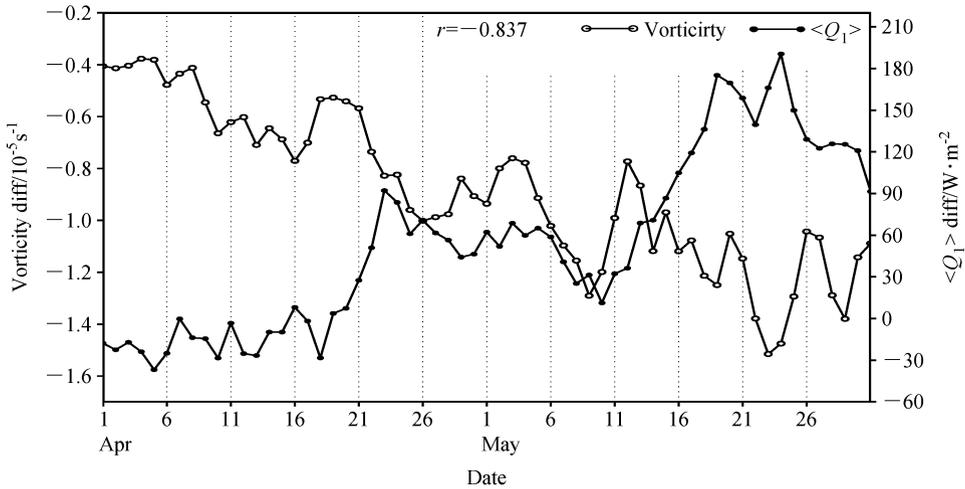


图 4 东部中心 (5°N~15°N, 130°E~145°E) 和西部中心 (10°N~20°N, 95°E~110°E) 相对涡度差与视热源 $\langle Q_1 \rangle$ 差的时间序列
 Fig. 4 Time series of the differences of relative vorticity and visible heat source $\langle Q_1 \rangle$ between the east center (5°N-15°N, 130°E-145°E) and the west center (10°N-20°N, 95°E-110°E)

岛与菲律宾群岛以东洋面上大气非绝热加热的变化是南亚高压在中南半岛上空建立的重要原因。值得注意的是，在南亚高压活动范围内，潜热加热的作用远远强于感热加热的作用。因此，该区域内非绝热加热主要来自于对流释放的潜热加热，而潜热加热是造成非绝热加热垂直差异的主要原因，故我们将进一步分析这两个区域潜热加热变化与南亚高压在中南半岛上空建立过程的联系。

4.1 西部中心生成加强的动力学解释

南亚高压建立之前 (图 5a)，中南半岛上空的两个上升运动中心分别位于 925 hPa 和 400 hPa 附近，说明 4 月上中旬中南半岛上空对流初步建立但不旺盛，在低层感热加热和中层潜热加热的共同作用下产生了两个上升运动中心。这时，孟加拉湾-中南半岛上空的辐散运动较弱，对流层高层盛行偏西风，孟加拉湾-中南半岛夏季风系统还未建立。南亚高压初步形成阶段 (图 5b)，由于中南半岛对流明显加强，该地区上升运动明显加强，上升运动中心位于对流层中部，对流层高层辐散明显加强，西部中心生成。同时，中南半岛高空的偏西风减弱。南亚高压完全建立阶段 (图 5c)，孟加拉湾-中南半岛夏季风建立，中南半岛高空被偏东风控制，孟加拉湾东部转为上升运动，中南半岛高层辐散区域明显西扩，西部中心加强，南亚高压完全建立。可见，西部中心的生成加强与中南半岛上升运动和对流层高层辐散运动的显著加强联系紧密，而上升

运动和对流层高层辐散运动的加强又与中南半岛对流的建立加强密切相关。图 6 利用 OLR 资料给出了南亚高压在中南半岛上空建立过程各阶段中南半岛对流建立加强的过程，可以明显看出对流沿亚澳“大陆桥”北抬至中南半岛，以及中南半岛对流建立加强的过程。在中南半岛对流建立初期 (图 6b)，中南半岛上升运动和对流层高层辐散运动都加强，西部中心生成，南亚高压初步形成；当中南半岛对流旺盛时 (图 6c)，西部中心加强，南亚高压完全建立，同时斯里兰卡低涡生成，副热带高压带开始断裂 (图 2c)，说明南亚高压的建立和副热带高压带的断裂都与中南半岛的对流活动紧密联系。另外，在南亚高压完全建立阶段 (图 6c)，南海地区 OLR 值迅速减小，说明该地区开始有对流发生。

为进一步说明上述联系，我们分析了南亚高压在中南半岛上空建立过程各阶段中南半岛上空大气视热源 $\langle Q_1 \rangle$ 和经向环流的演变特征 (图 7)。南亚高压建立之前，大气非绝热加热中心主要位于苏门答腊群岛上空，因为该处对流层中下部的大气视热源随高度增大而增强，所以其非绝热加热主要是对流活动释放潜热造成的，此时上升运动的大值区与非绝热加热中心相对应，位于苏门答腊群岛上空，而中南半岛上空则以感热加热为主，上升运动不明显 (图 7a)；在中南半岛对流建立之后，中南半岛上空非绝热加热作用迅速加强，大气非绝热加热中心北抬，中南半岛上空出现较强的上升运动，其对流

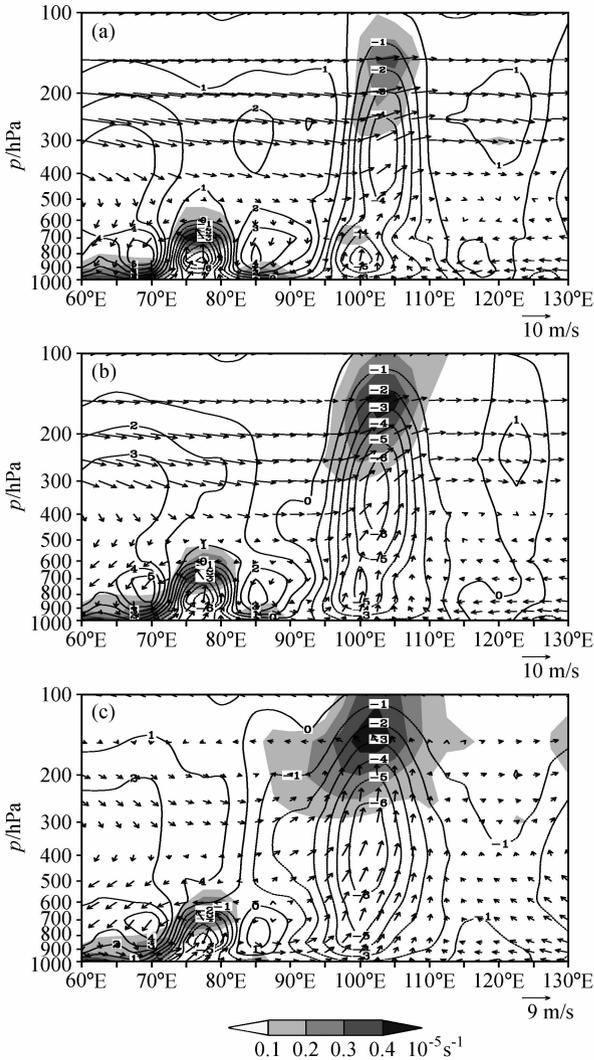


图 5 南亚高压在中南半岛上空建立各阶段沿 $10^{\circ}\text{N}\sim 20^{\circ}\text{N}$ 平均的散度 (阴影, 单位: 10^{-5}s^{-1})、垂直速度 (等值线, 单位: 10^{-2}Pa/s) 和纬向环流 (矢量): (a) 建立前; (b) 初步形成阶段; (c) 完全建立阶段

Fig. 5 Distributions of divergence (shaded), vertical velocity (contours, units: 10^{-2}Pa/s), and zonal circulation (vectors) averaged over $10^{\circ}\text{N}\sim 20^{\circ}\text{N}$ in each phase of the SAH establishing process above the ICP: (a) Pre-establishment phase; (b) initial formation phase; (c) complete establishment phase

层高层辐散运动也加强 (图 7b), 随后西部中心生成, 产生“双中心”的特殊结构, 南亚高压初步形成; 随着中南半岛对流活动的继续加强和孟加拉湾夏季风的建立, 中南半岛-孟加拉湾的非绝热加热作用继续加强, 大气非绝热加热中心移上中南半岛, 中南半岛上升运动和对流层高层辐散运动也相继增强 (图 7c), 西部中心加强, 东部反气旋中心消

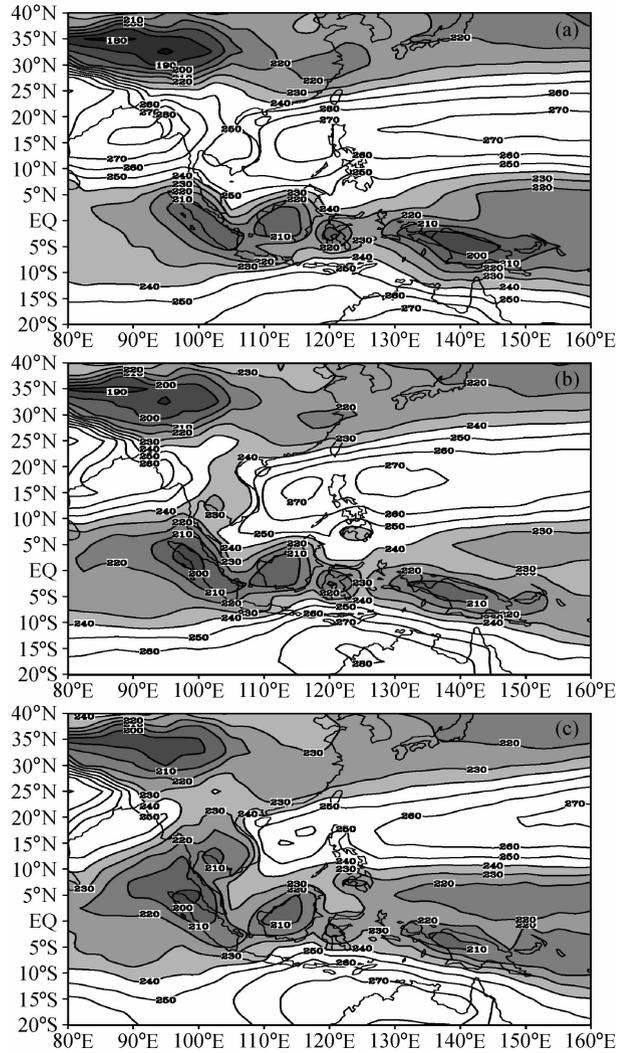


图 6 南亚高压在中南半岛上空建立期间 OLR 演变特征 (单位: W/m^2): (a) 建立前; (b) 初步形成阶段; (c) 完全建立阶段。阴影: $\text{OLR} < 240 \text{ W/m}^2$

Fig. 6 The evolution of OLR (W/m^2) in the process of SAH establishing above the ICP: (a) Pre-establishment phase; (b) initial formation phase; (c) complete establishment phase. Shading: $\text{OLR} < 240 \text{ W/m}^2$

亡, 南亚高压完全建立。

4.2 反气旋环流中心在 120°E 分裂的动力学解释

由于南亚高压在中南半岛上空的建立过程与中南半岛和菲律宾以东洋面上非绝热加热作用的变化密切相关, 我们首先分析南亚高压环流中心分裂前后上述两个区域非绝热加热的演变特征 (图 8a、b)。在南亚高压初步形成的前一候 (第 22 候), 中南半岛对流建立并逐渐加强, 由于潜热的释放, 在其对流层中部出现非绝热加热中心, 同时在菲律宾

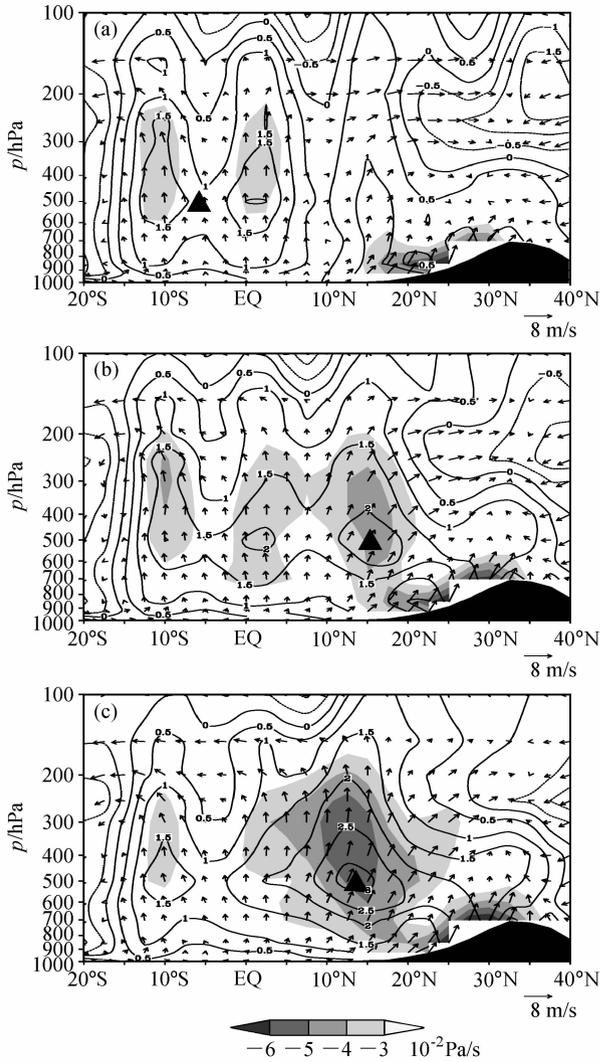


图7 同图5，但为中南半岛（沿95°E~110°E）经圈环流（矢量）、垂直速度（阴影，单位： 10^{-2} Pa/s）和大气视热源 Q_1 （等值线，单位： W/m^2 ）的纬度-高度剖面。▲：非绝热加热中心
Fig. 7 Same as Fig. 5, but for latitude-height cross sections of the meridional circulation (vectors), the visible heat source Q_1 (contours, units: W/m^2), and vertical velocity (shaded) averaged over 95°E-110°E. Symbol “▲” denote the diabatic heating center

群岛以东洋面的对流层中部也存在非绝热加热中心（图8a）。当菲律宾群岛以东洋面上空高压分裂时（第23候），中南半岛的非绝热加热作用明显加强，同时菲律宾群岛以东洋面上的非绝热加热中心突然东撤至150°E以东，使得在南亚高压活动区域内，中南半岛的非绝热加热变为主导（图8b）。同时，120°E附近对流层高层出现明显正涡度变率，低层出现明显负涡度变率（图8c），从而产生附加的下

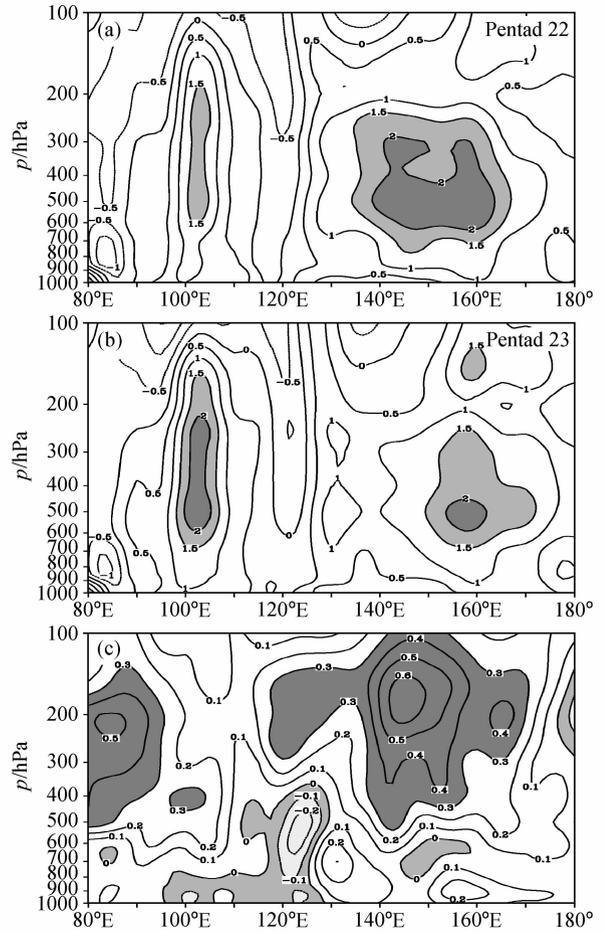


图8 菲律宾群岛以东洋面上空高压中心分裂前后沿7.5°N~15°N平均大气视热源 Q_1 （a, b，单位： W/m^2 ）和沿15°N~22.5°N平均相对涡度变率场（c，单位： $10^{-5} s^{-1}$ ）的高度-经度剖面图
Fig. 8 Height-longitude cross sections of (a, b) the visible heat source Q_1 (W/m^2) averaged over 7.5°N-15°N and (c) the relative vorticity variability field ($10^{-5} s^{-1}$) averaged over 15°N-22.5°N before and after the high abruption in the upper troposphere to the east of the Philippines

沉运动，令该处负涡度迅速减弱，反气旋在该处分裂。对流层高层的正涡度变率最大中心出现在145°E以东区域，这与菲律宾群岛以东洋面上热源东撤引起的“过流”过程（吴国雄和刘屹岷，2000）有关，即在加热层顶以上高度，尽管非绝热加热已经消失，但由于热力适应，仍存在上升辐散运动及反气旋，并伴有冷中心。由于在145°E以东区域大气非绝热加热所能直接影响的层次最高为300 hPa，因此东部中心所在的150 hPa存在“过流”现象，伴有冷中心出现，气柱收缩，造成附加的辐合运

动,在地转偏向力作用下,形成正涡度变率,与热力适应过程中形成的反气旋相平衡。

事实上,随着中南半岛附近加热中心的增强和另一加热中心的减弱,起主导作用的仅仅为 105°E 的加热中心,根据已有的研究成果(刘屹岷等,1999),其在加热区高空及西侧激发出反气旋式环流,在东侧激发出气旋性环流,这与西部中心增强、高空反气旋在 120°E 上空断裂的事实相符。因此,可以推断正是由于加热区在西侧和东侧的对流高层分别激发出的反气旋式和气旋式环流造成了西部中心增强,并使高空反气旋在菲律宾群岛附近分裂。

4.3 东部中心减弱消亡的动力学解释

随着中南半岛对流的加深发展,一方面西部中心不断向西北方向运动并加强,另一方面其东部中心在原地减弱消亡。当东部中心消亡时,南亚高压在中南半岛上空完全建立,因此有必要讨论东部中心减弱消亡的原因。为分析加热场和流场(涡度场)之间的相互作用,我们使用了吴国雄等(1999)得到的仅考虑外热源强迫的全型垂直涡度方程,并进行尺度分析,发现外热源的垂直不均匀分布项量

级比其垂直变化项小一个量级,因此可将方程简化为(6)式,其中右端三项依次为相对涡度平流项、地转涡度平流项和非绝热加热的垂直变化项。图9是(6)式各项的计算结果,由于使用的是气候平均资料,所以在计算中我们并未像覃慧玲等(2004)的工作那样考虑平流项中瞬变量的贡献。

通过计算可知,南亚高压在中南半岛上空建立过程中,150 hPa 反气旋主体活动区域内($5^{\circ}\text{N}\sim 15^{\circ}\text{N}$, $95^{\circ}\text{E}\sim 140^{\circ}\text{E}$) 涡度局地变化项的量级与非绝热加热垂直变化项的量级(10^{-11})相当,但是比相对涡度平流项和地转涡度平流项小一个量级(图9)。非绝热加热垂直变化项量级较小是因为在150 hPa 上大气非绝热加热的直接作用很小。另外,图9d清楚地反映了非绝热加热的水平差异远远小于非绝热加热的垂直变化,这与上文尺度分析的结果一致。由于相对涡度平流项和地转涡度平流项是方程(6)的大项,因此我们重点分析这两项的变化。

图10是南亚高压在中南半岛上空建立过程各阶段150 hPa 相对涡度平流的空间分布特征。不难发现,在西部中心和东部中心附近,由于两个反气旋中心都位于高压脊线上,因此相对涡度平流贡献

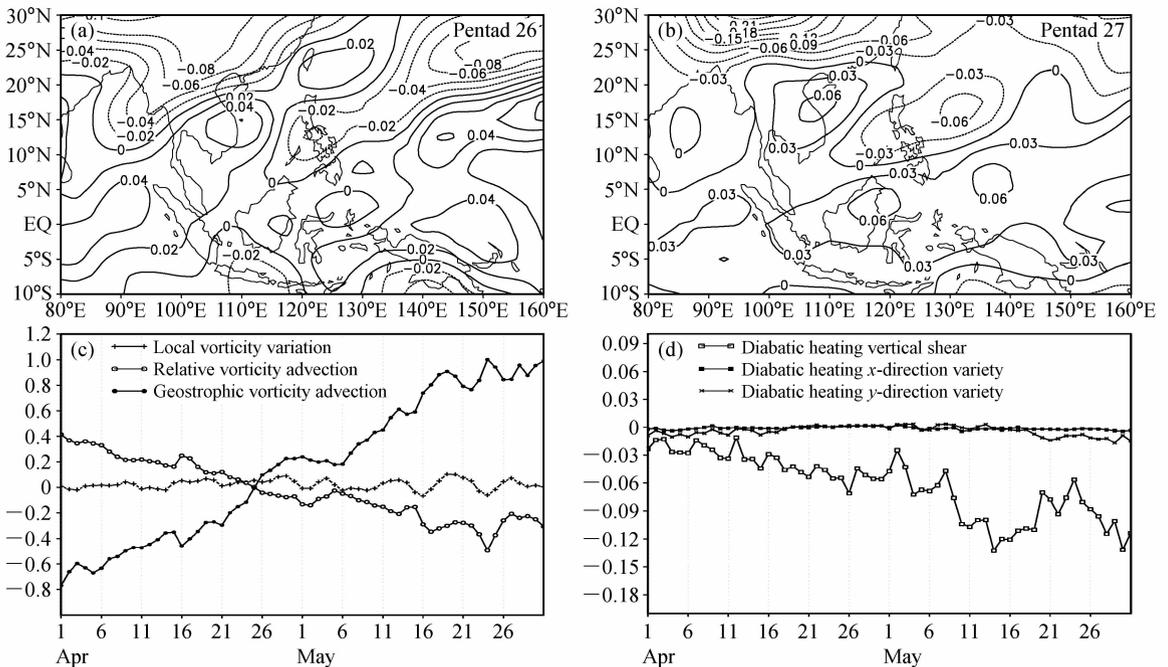


图9 南亚高压完全建立阶段各候涡度局地变化项空间分布(a, b, 单位: 10^{-10}s^{-2})以及4~5月全型涡度方程各项在($5^{\circ}\text{N}\sim 15^{\circ}\text{N}$, $95^{\circ}\text{E}\sim 140^{\circ}\text{E}$)内的时间序列(c, d, 单位: 10^{-10}s^{-2})

Fig. 9 (a, b) Spatial distribution of the local vorticity variation (10^{-10}s^{-2}) in each pentad of the SAH complete establishment phase and (c, d) time series of each term (units: 10^{-10}s^{-2}) of the complete-form vorticity equation averaged over ($5^{\circ}\text{N}\sim 15^{\circ}\text{N}$, $95^{\circ}\text{E}\sim 140^{\circ}\text{E}$) from Apr to May

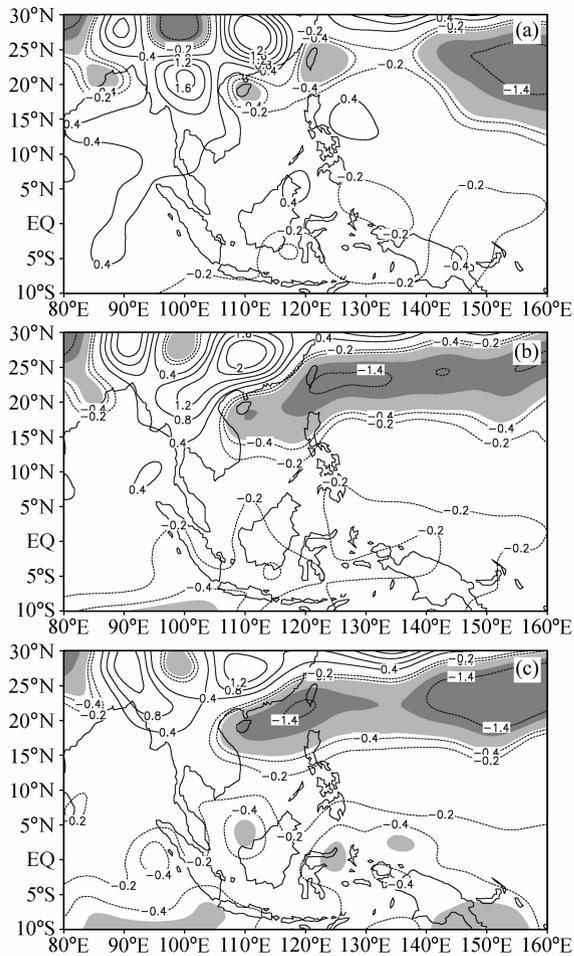


图 10 南亚高压在中南半岛上空建立过程各阶段 150 hPa 相对涡度平流项空间分布 (单位: $10^{-10} s^{-1}$)。其余同图 6
 Fig. 10 Same as Fig. 6, but for the relative vorticity advection ($10^{-10} s^{-1}$) at 150 hPa

很小。相应地, 图 11 是 150 hPa 地转涡度平流的空间分布, 在南亚高压初步形成阶段, 菲律宾群岛附近的地转涡度平流由先前的负平流转为正平流, 使该处负相对涡度减弱, 这种转换与中南半岛对流的加强和菲律宾群岛以东洋面上热源的突然东撤有关, 也与高压在该处分裂的观测事实相符。此时, 东部中心所在区域仍有较弱的负地转涡度平流 (图 11b), 从而维持了东部中心。南亚高压完全建立阶段, 东部中心所在区域的地转涡度平流也转为正平流 (图 11c), 东部中心减弱消亡, 可见, 地转涡度平流的变化是引起东部中心消亡的直接原因, 这与图 9 所反映的情况一致。

为讨论南亚高压完全建立阶段东部中心所在区域地转涡度平流变化的原因, 我们分析了南亚高压

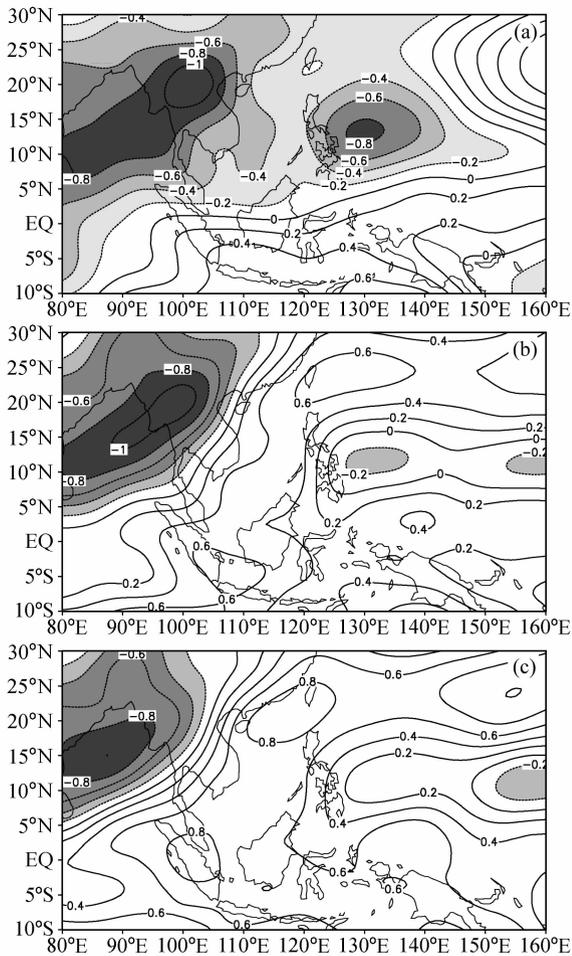


图 11 同图 10, 但为地转涡度平流项
 Fig. 11 Same as Fig. 10, but for the geostrophic vorticity advection

完全建立阶段前后 (5 月第 2 候和 5 月第 4 候) 东部中心所在纬带 ($5^{\circ}N \sim 15^{\circ}N$) 的大气视热源 Q_1 的差值场和经向风差值场 (图 12a), 以及垂直速度差值场和涡度变率场 (图 12b)。图 12a 表明在南亚高压完全建立阶段存在两个潜热释放中心, 分别位于孟加拉湾和南海上空, 说明该阶段孟加拉湾和南海上空的对流运动加强。根据吴国雄等 (1999) 的研究, 在最大加热下方应当在西侧为气旋式环流, 东侧为反气旋式环流, 因此中南半岛对流加强造成的凝结潜热加热在促使西部中心加强的同时, 也促进了中南半岛及其以西地区低空气旋式环流的发展, 而气旋式环流的发展又导致了对流发展旺盛, 造成了对流逐渐向孟加拉湾地区扩展。根据刘屹岷等 (1999) 的研究, 在长时间尺度条件下, 由于 β 项的作用, 最大潜热加热中心下方 (低空) 出现偏南风,

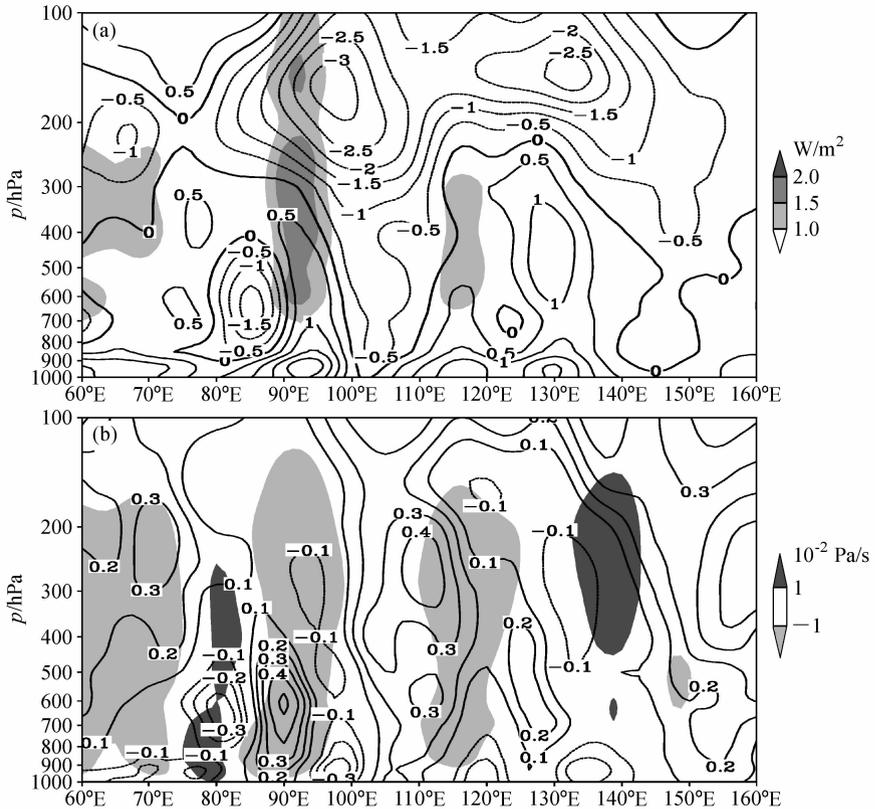


图 12 南亚高压完全建立前后沿 $5^{\circ}\text{N}\sim 15^{\circ}\text{N}$ 平均的主要物理量变化场: (a) 大气热光源差值场 (阴影) 和经向风差值场 (等值线, 单位: m/s); (b) 涡度差值场 (等值线, 单位: 10^{-5} s^{-1}) 和垂直速度差值场 (阴影)

Fig. 12 The difference fields averaged over $5^{\circ}\text{N}\sim 15^{\circ}\text{N}$ before and after the SAH complete establishment: (a) Differences of the visible heat source (shaded) and the meridional wind (contour, units: m/s); (b) differences of vorticity (contour, units: 10^{-5} s^{-1}) and the vertical velocity (shaded)

使气旋式环流出现在热源西侧, 反气旋式环流出现在热源东侧; 而在最大潜热加热中心上方 (高空) 则出现偏北风, 使反气旋式环流出现在热源西侧, 气旋式环流出现在热源东侧, 与对流层中下层形势反位相。上面的计算表明, 候平均基本满足“长时间尺度”条件, 所以孟加拉湾和南海这两个潜热释放中心造成非绝热加热的垂直差异变化, 令低层产生南风变率, 高层产生北风变率 (图 12a), 两个北风变率的极值中心分别与两个潜热释放中心相对应, 同时这两个地区上升运动加强 (图 12b)。这种北风变率较好地解释了南亚高压完全建立阶段 150 hPa 正地转涡度平流的增大 (图 11c)。同时, 当南海上空潜热释放加强时, 其高层的北风变率和低层的南风变率使菲律宾群岛以东洋面 (加热区东侧) 的低层出现负涡度变率, 高层出现正涡度变率, 令该地区对流层高层产生附加的下沉气流 (图 12b), 该下沉气流和高层的正涡度变率都有利于东部反气

旋中心的减弱消亡。

5 结论与讨论

(1) 4 月底至 5 月初, 菲律宾群岛以东洋面对流层高层反气旋通过分裂的方式快速从菲律宾群岛以东洋面西移至中南半岛上空, 这一过程称为 4~5 月南亚高压在中南半岛上空的建立过程。南亚高压在中南半岛上空建立的最主要特征是南亚高压初步建立时存在“双中心”结构, 西部反气旋中心位于中南半岛上空, 东部反气旋中心位于菲律宾群岛以东洋面上空, 南亚高压在中南半岛上空的建立过程实际上是西部中心生成加强、东部中心减弱消亡的过程。

(2) 南亚高压在中南半岛上空建立主要是亚洲大陆南部大气热力因子变化的产物。4 月下旬, 随着对流沿亚澳“大陆桥”北移至中南半岛, 中南半岛对流建立, 中南半岛上升运动加强, 对流层高层

辐散加剧, 西部环流中心产生, 南亚高压初步形成。此时, 菲律宾群岛以东洋面上的潜热加热突然东撤至 150°E 以东, 令 105°E 处的潜热加热成为主导, 在潜热加热区东面对流层高层激发出气旋式环流, 造成南亚高压在 120°E 附近分裂。5月初, 随着中南半岛对流的进一步加深, 在潜热加热区西面对流层低层激发出气旋式环流, 有利于孟加拉湾对流的建立。由于孟加拉湾对流的作用, 在潜热加热区上方产生北风变率, 使孟加拉湾对流层高层转为偏北风, 此时南海对流尚未建立, 因此南海至菲律宾群岛以东洋面地区的对流层高层仍盛行偏南风, 这种对流层高层的风向差异有助于加剧中南半岛的高空辐散, 进而促进了西部中心的加强北抬。5月第2候, 南海对流初步建立并迅速加强, 其释放的潜热会在加热区的对流层高层激发出偏北风, 低层激发出偏南风, 对应菲律宾群岛以东洋面(加热区东侧)高层出现正涡度变率, 中低层出现负涡度变率, 该正负涡度变率配置能够产生对流层上部的局部下沉气流, 在高空正涡度变率和下沉气流的共同作用下, 东部中心减弱消亡, 南亚高压完全建立。西部中心的加强和东部中心的减弱共同组成了南亚高压在中南半岛上空的建立过程。

总之, 南亚高压在中南半岛上空的建立过程与亚洲大陆南部垂直非均匀加热作用密切相关。在南亚高压初步建立阶段(“双中心”阶段), 孟加拉湾-中南半岛夏季风建立, 南亚高压中心完全建立后, 南海夏季风建立。可见, 南亚高压的季节突变与亚洲夏季风的推进过程相联系。Wang et al. (2005) 指出, 对亚洲夏季风而言, 季风区的海气耦合过程十分重要, 其中大气对 SST 的反馈作用尤为关键, 因此不能将季风看成是大气对 SST 强迫响应的产物。由于南亚高压处于亚洲季风区, 因此其建立过程更需要进一步考虑海气耦合过程。另外, 在南亚高压完全建立后, 副热带高压带开始断裂, 南亚高压在中南半岛上空的建立过程对副热带高压带的断裂有何作用, 又是如何影响南海夏季风的建立, 这些都有待进一步研究。

参考文献 (References)

Cao Jie, Huang Ronghui, Xie Yingqi, et al. 2003. Evolution mechanism of the western Pacific subtropical high [J]. *Science in China (Series D)*, 46 (3): 257 - 267.

- 何金海, 温敏, 丁一汇, 等. 2006. 亚澳“大陆桥”对流影响东亚夏季风建立的可能机制 [J]. *中国科学 (D辑)*, 36 (10): 959 - 967.
- He Jinhai, Wen Min, Ding Yihui, et al. 2006. The possible mechanism of the effect of convection over Asia-Australia “Land Bridge” on the East Asian summer monsoon onset [J]. *Science in China (Series D) (in Chinese)*, 36 (10): 959 - 967.
- He Jinhai, Wen Ming, Wang Lijuan, et al. 2006. Characteristics of the onset of the Asian summer monsoon and the importance of Asian-Australian “Land Bridge” [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 23 (6): 951 - 963.
- 刘屹岷, 吴国雄, 刘辉, 等. 1999. 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 [J]. *气象学报*, 57 (5): 525 - 538. Liu Yimin, Wu Guoxiong, Liu Hui, et al. 1999. The effect of spatially non-uniform heating on the formation and variation of subtropical high. Part III: Condensation heating and South Asia high and western Pacific subtropical high [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 57 (5): 525 - 538.
- Liu Xuanfei, Zhu Qian'gen, Guo Pinwen. 2000. Conversion characteristics between barotropic and baroclinic circulations of the SAH in its seasonal evolution [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 17 (1): 129 - 139.
- Liu Yimin, Wu Guoxiong, Ren Rongcai. 2004. Relationship between the subtropical anticyclone and diabatic heating [J]. *J. Climate*, 17: 682 - 698.
- Mason R B, Anderson C E. 1958. The development and decay of the 100 mb summertime anticyclone over southern Asia [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 91: 3 - 12.
- Miyasaka T, Nakamura H. 2005. Structure and formation mechanisms of the Northern Hemisphere summertime subtropical highs [J]. *J. Climate*, 18: 5046 - 5065.
- Peixoto J P, Oort A H. 1995. *Physics of Climate* [M]. New York: Springer-Verlag, 47 - 50.
- Qian Yongfu, Zhang Qiong, Yao Yonghong, et al. 2002. Seasonal variation and heat preference of the South Asia high [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 19 (5): 821 - 836.
- 覃慧玲, 简茂球, 袁卓建, 等. 2004. 1984年南海夏季风经向环流强迫因子的诊断分析 [J]. *热带气象学报*, 20 (1): 39 - 50.
- Qin Huiling, Jian Maoqiu, Yuan Zhuojian, et al. 2004. A numerical diagnosis on the evolution of summer monsoon meridional circulation over South China Sea in 1984 [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 20 (1): 39 - 50.
- 孙国武. 1984. 南亚高压季节性变化的研究[G]//青藏高原气象科学实验文集(二). 北京: 科学出版社, 152 - 158. Sun Guowu. 1984. Study on seasonal variation of the South Asia high [G]// *Papers on the Tibetan Plateau Meteorological Experiment (Part II) (in Chinese)*. Beijing: Science Press, 152 - 158.
- Wang B, Ding Q, Fu X, et al. 2005. Fundamental challenge in simulation and prediction of summer monsoon rainfall [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 32, L15711, doi: 10.1029/2005GL022734.

- Wu B, Zhou T. 2008. Oceanic origin of the interannual and inter-decadal variability of the summertime western Pacific subtropical high [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 35, L13701, doi: 10.1029/2008GL034584.
- 吴国雄, 刘屹岷, 刘平. 1999. 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 [J]. *气象学报*, 57 (3): 257-263.
- Wu Guoxiong, Liu Yimin, Liu Ping. 1999. The effect of spatially non-uniform heating on the formation and variation of subtropical high. I. Scale analysis [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 57 (3): 257-263.
- 吴国雄, 刘屹岷. 2000. 热力适应、过流、频散和副高 I. 热力适应和过流 [J]. *大气科学*, 24 (4): 433-446. Wu Guoxiong, Liu Yimin. 2000. Thermal adaptation, overshooting, dispersion, and subtropical anticyclone. Part I: Thermal adaptation and overshooting [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*: 433-446.
- 吴国雄, 丑纪范, 刘屹岷, 等. 2002. 副热带高压形成和变异的动力学问题 [M]. 北京: 科学出版社, 1-245. Wu Guoxiong, Chou Jifan, Liu Yimin, et al. 2002. Dynamics of the Formation and Variation of Subtropical Anticyclone (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 1-245.
- Wu Guoxiong, Liu Yimin. 2003. Summertime quadruplet heating pattern in the subtropics and the associated atmospheric circulation [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 30 (5), L1201, doi: 10.1029/2002GL016209.
- 吴国雄, 刘屹岷, 宇婧婧, 等. 2008. 海陆分布对海气相互作用的调控和副热带高压的形成 [J]. *大气科学*, 32 (4): 720-740. Wu Guoxiong, Liu Yimin, Yu Jingjing, et al. 2008. Modulation of land-sea distribution on air-sea interaction and formation of subtropical anticyclones [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32 (4): 720-740.
- 王黎娟, 何金海, 管兆勇, 等. 2004. 亚澳“大陆桥”地区降水和对流的季节变化及其与海温的关系. *气象科学*, 24 (4): 379-386. Wang Lijuan, He Jinhai, Guan Zhaoyong, et al. 2004. Seasonal changes of precipitation and convection over Asian-Australian “Land Bridge” areas and its relationship with SST [J]. *Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 24 (4): 379-386.
- Yanai M, Esbensen S, Chu J H. 1973. Determination of bulk properties of tropical cloud clusters from large-scale heat and moisture budgets [J]. *J. Atmos. Sci.*, 30: 611-627.
- Yuan Zhuojian, Wang Tongmei, He Haiyan et al. 2000. A comparison between numerical simulations of forced local Hadley (anti-Hadley) circulation in East Asian and Indian monsoon regions [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 17 (4): 538-554.
- 朱福康, 陆龙骅, 陈咸吉, 等. 1981. 南亚高压 [M]. 北京: 科学出版社, 1-94. Zhu Fukang, Lu Longhua, Chen Xianji, et al. 1981. The South Asia High (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 1-94.