索渺清, 丁一汇. 2009. 冬半年副热带南支西风槽结构和演变特征研究 [J]. 大气科学, 33 (3): 425-442. Suo Miaoqing, Ding Yihui. 2009. The structures and evolutions of the wintertime southern branch trough in the subtropical westerlies [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (3): 425-442.

冬半年副热带南支西风槽结构和演变特征研究

索渺清1,2,3 丁一汇4

- 1 中国气象科学研究院,北京 100081
- 2南京信息工程大学,南京 210044
- 3 中国气象局培训中心,北京 100081
- 4 国家气候中心, 北京 100081

摘 要 南支槽是冬半年副热带南支西风气流在高原南侧孟加拉湾地区产生的半永久性低压槽,本文从气候学角度探讨其结构和演变特征。结果表明:(1)南支槽10月在孟加拉湾北部建立,冬季(11~2月)加强,春季(3~5月)活跃,6月消失并转换为孟加拉湾槽;10月南支槽建立表明北半球大气环流由夏季型转变成冬季型,6月南支槽消失同时孟加拉湾槽建立是南亚夏季风爆发的重要标志之一。(2)南支槽在700hPa表现明显,其槽前干暖平流的输送有利于昆明准静止锋形成和维持,槽后冷湿平流也与孟加拉湾冷涌关系密切。(3)冬季辐散环流下沉支抑制了南支槽前上升运动的发展,这时低层辐合,中层辐散,南支槽前上升运动一般只伸展到对流层中层600hPa左右。春季随着辐散环流减弱,东亚急流入口区南侧辐散中心的出现使得垂直运动向上迅速伸展。(4)从气候平均看冬季水汽输送较弱,上升运动浅薄,无强对流活动,南支槽前降水不明显,雨区主要位于高原东南侧昆明准静止锋至华南一带。春季南支槽水汽输送增大,同时副高外围暖湿水汽输送加强,上升运动发展和对流增强,南支槽造成的降水显著增加,因此春季是南支槽最活跃的时期。

关键词 南支气流 南支槽 结构与演变

文章编号 1006-9895 (2009) 03-0425-18

中图分类号 P434

文献标识码 A

The Structures and Evolutions of the Wintertime Southern Branch Trough in the Subtropical Westerlies

SUO Miaoqing^{1, 2, 3} and DING Yihui⁴

- 1 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081
- 2 Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044
- 3 China Meteorological Administration Training Center, Beijing 100081
- 4 National Climate Center, Beijing 100081

Abstract The structures and evolution characteristics of the wintertime southern branch trough in the subtropical westerlies (WEBTISR), as the semi-permanent trough generated by the subtropical southern branch westerlies (SBW) over the Bay of Bengal, to the south of the Tibetan Plateau, were studied for their climatological significance with the following results: 1) The WEBTISR is generated over the northern Bay of Bengal in October, maintained from November to the following February, and active from March to May, then disappears and transforms to the

Bay of Bengal trough in June. The fact that the WEBTISR is established in October indicates that the northern hemispheric circulation transforms from summer pattern to winter pattern, while its disappearance in June, together with the Bay of Bengal trough establishment, is one of the important indications of summer monsoon onset. 2) The WEBTISR is noticeable at 700 hPa, in front of which the transmission of the warm-dry advection is favorable for the formation and maintenance of the Kunming quasi-stationary front. And the cold-wet advection behind the WEBTISR has a close relationship with the cold surge in the Bay of Bengal, 3) The descending branches of divergence circulation restrain the development of the vertical motion in front of the WEBTISR in winter, with concurrent convergence/divergence at the lower/middle levels, inducing that the ascending parts extend roughly to the middle troposphere at 600 hPa. Conversely the weakening of the divergence circulation in spring, and appearance of the divergence center on the south side of East Asia jet stream inlet lead to rapid upward extension of the vertical motions. 4) Climatologically, water vapor transport is weak; ascending motion is also restrained and there is not severe convection, therefore the precipitation is unobvious in front of the WEBTISR, while the rainfall is mostly over the areas from the Kunming quasi-stationary front to the southeast of the plateau to South China in winter. In spring, water vapor transport strengthens in the WEBTISR, with increased transport of warm-wet moisture outside the subtropical high as well as developing upward motion and convection, leading to a distinct increase in the rainfall produced by the WEBTISR. Therefore, spring is the period the WEBTISR is most active.

Key words southern branch westerlies, wintertime southern branch trough in the subtropical westerlies, structure and evolution

1 引言

冬半年亚洲高空西风带受青藏高原影响分裂为南北两支,在高原南侧位于副热带地区的西风带简称南支西风带,这支西风带在孟加拉湾地区的低压槽称南支槽,是冬半年影响南亚和东亚的主要天气系统。国内外气象学家对南支锋区中的西风扰动作了大量有意义的研究,特别是 20 世纪 50、60 年代最为集中。

Yeh (1950) 第一个发现冬半年副热带西风急流在青藏高原南侧产生"西风分支",即"南支急流",指出 1945 年 10 月中旬南支急流突然在华中及西南生成,并顺流而下。Chaudhury (1950) 在沿 76°E (高原西缘) 剖面图中,也发现了冬季喜马拉雅急流。Ramage (1952) 认为,南支急流的出现和冬季天气的突然开始,是空气机械上升绝热冷却造成的温度梯度加大和雪区增大造成日射加热减少的结果。急流一旦在西北方建立就迅速沿着高原南侧向东南方扩展,并很快的锚定在青藏高原的南面。随着沿高原南缘急流的建立和东风的撤退,印度的西南季风也迅速撤出印度。之后,高空西风扰动沿着喜马拉雅山南麓进入印度上空,把西北方干冷空气带入印度。随着冷空气的南侵,赤道辐合带(ITCZ) 也迅速南移,印度的夏季风结束,并进入

干季。

Yin (1949) 曾观测到 1946 年 6 月南支急流突 然消失,指出印度季风爆发从西风带北移开始,由 于南支西风不再绕喜马拉雅南边流过, 低纬度的平 均槽被迫向西移动,槽线以东产生辐散加上受热差 异造成的气压梯度,使得 ITCZ 明显北移。叶笃正 等(1958)后来发现急流突然减弱消失的现象在整 个北半球都存在,但变化时间以青藏高原内陆地区 最早。5月高原感热加热最强,高原上空大气温度 增加最大,正是在高原加热的影响下,使高原上空 气温急增, 高原南部经向温度梯度减弱, 导致南支 急流突然消失。丁一汇(2005)进一步的总结表 明,随着副热带西风急流突然从高原南侧跳到高原 北侧,南支急流消失;对流层上部反气旋移到西藏 高原, 东风急流在高原以南建立; 西南季风爆发, 这使印度西岸季风雨开始出现,长江流域梅雨和日 本雨季同时爆发。由于南支槽生命期与西风分支和 南支急流的生消密切相关,南支槽的生消也是亚洲 地区冬季大气环流形势建立和夏季风爆发的一个重 要标志。

杨鉴初等(1960)发现冬半年青藏高原对西风 有分支及汇合的作用,迫使高原北边的西风形成动 力性高脊,而南支西风形成动力性低槽。对南支西 风受高原地形影响而新生的南支槽,许多人都进行 过分析(樊平,1955;李家垣等,1987;王恒康等,1991;秦剑等,1997),而陶诗言(1956)认为南支槽并不一定是受地形影响在当地产生,还受到上游西风波动的影响。由于高原屏障作用(顾震潮,1951),冬季从欧洲东移来的长波槽在高原邻近开始减弱,往往分为两段,槽北段继续东移,至贝加尔湖以东才可能重新加强,槽的南段或是切断变成冷涡,停滞少动并渐渐就地减弱,或是绕过高原东移。丁一汇(2005)认为冬季副热带急流从高原南缘通过,西风急流中的低槽可从印度西北里海地区南下,在阿拉伯海北部继续东移,这种低槽也叫西方扰动,主要影响印度北部的天气。当这种低槽在喜马拉雅山南麓东移,移出印度后可到达中国,影响中国的天气,这就是南支槽。

冬季南支槽如无冷空气配合,一般只出现局部阵雨或小到中雨天气,当南支槽与强冷空气结合,则可造成大范围的降温、降雪天气,即低纬高原独特的槽潮天气(秦剑等,1990)。春季,低纬高原和整个华南地区的连阴雨天气皆与南支槽有关。王恒康等(1991)认为春季单一的南支槽会产生冰雹、雷雨和大风等强对流天气,当南支槽与冷空气结合,则会出现全省性的大雨、暴雨,这是有些年份云南雨季开始比夏季风推进到云南要早的原因。秦剑等(1997)则认为如南支槽和孟加拉湾低压活动频繁,则降水多,低纬高原的雨季开始早,若西风带势力强,下沉作用明显,南支槽和孟加拉湾低压不活跃,则雨量少,干旱明显,雨季开始迟。

孟加拉湾地区常年都有低压槽活动,但由于经过高原的气流有显著的季节变化而不同。冬季槽的形成与高原对副热带西风分支有关,夏季青藏高原不在主要的西风带中,不再有西风分支、高空大槽分裂等现象,当西南季风向东北前进时,受到阿拉干山脉和青藏高原的阻挡,被迫作气旋性旋转,形成夏季风槽。何金海等(2002)研究表明,印度半岛的感热加热和中南半岛的潜热加热所激发的气旋性流场在孟加拉湾地区相互叠加,有利于孟加拉湾低涡活动和低槽的形成,夏季孟加拉湾槽加深加强标志着南海夏季风建立。陈艳(2006)发现冬、夏孟加拉湾槽在成因、结构和热力性质上均有明显差异,潘静和李崇银(2006)也发现印度夏季风槽属于热带夏季风系统,具有热带季风辐合带的典型结构。从孟加拉湾涡源中东移的南支急流里的小波

动,我国预报员也称之为南支槽、印缅槽(朱乾根等,2000),为便于区别,我们把冬半年孟加拉湾地区的槽称之为南支槽,夏季称之为孟加拉湾槽。

由以上可见,以往的研究多着眼于南支槽活动的天气形势及天气影响,对南支槽的演变与结构特征尚缺乏从气候角度作系统的研究。另外,从气候的观点,过去对南支槽还没有一个明确的定义,本文首先从天气一气候的观点定义了冬半年南支槽,在此基础上研究南支槽的气候学特征,并探讨南支槽建立、加强、活跃、消失转换及其与夏季风爆发的关系。

2 数据和方法

本文使用 1948 年 1 月 1 日~2005 年 12 月 31 日 58 年 NCEP/NCAR 逐日再分析资料,包括水平 纬向风、经向风、温度、比湿、位势高度、垂直速度 和海平面气压;1979 年 1 月 1 日~2005 年 12 月 31 日 27 年美国 Climate Prediction Center (CPC) 的 CMAP (Climate Prediction Center Merged Analysis of Precipitation) 逐候降水率;1975 年 1 月 1 日~2005 年 12 月 31 日 31 年 NOAA 极轨业务卫星观测的逐日 OLR (Outgoing Longwave Radiation) 向外长波辐射资料。

首先,利用逐日资料算出速度势、辐散风、水汽通量、假相当位温、水汽和温度平流等物理量,进而得到逐候和逐月的多年平均值。所用速度势、辐散风、水汽通量和假相当位温等计算方法均出自丁一汇(1989)。

3 冬半年南支槽的建立、加强、活 跃、消失及转换过程

3.1 南支槽的定义及其指标

杨鉴初等(1960)指出这个动力槽主要表现在1.5~3 km 高度,从多年平均冬半年(10~5月)700 hPa 位势高度场(图1)可以看出,孟加拉湾北部至青藏高原南侧地区(17.5°N~27.5°N,80°E~100°E),冬半年有一个半永久性低压槽存在,因而本文简单地用上述地区700 hPa 平均位势高度定义南支槽。南支槽是由于青藏高原对副热带西风气流分支,南支西风在高原南侧孟加拉湾地区产生的一种地形槽,因此称其为副热带南支西风槽,简称南支槽,它是南支西风上的一种扰动,随副热带南支西风气流生消而生消。

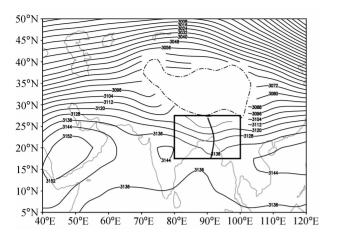


图 1 1948~2005 年平均冬半年 (10~5月) 700 hPa 位势高度 场 (单位: gpm)。粗线: 南支槽; 方框: 槽区 (17.5°N~ 27.5°N, 80°E~100°E); 点划线: 3000 m地形

Fig. 1 Climatological geopotential height (gpm) field at 700 hPa in wintertime (Oct to May) averaged from 1948 to 2005. Thick line: WEBTISR (wintertime southern branch trough in the subtropical westerlies); rectangle: trough area (17.5°N – 27.5°N, 80°E – 100°E); dash-dotted line: 3000-m topography

由于南支槽与青藏高原对西风的分支和南支急 流的生消密切相关,本文首先从南支急流生消的角 度来研究南支槽建立和消失过程。从多年平均相对 涡度沿槽区纬度-高度剖面图可以看出,急流轴两 侧风速迅速减小,分别存在反气旋和气旋性环流, 因此急流轴北侧具有正相对涡度,南侧具有负相对 涡度,急流中心位于正、负相对涡度中心之间。由 于副热带西风急流中心位于对流层高层,而热带西 风急流中心位于对流层低层,因此在对流层低层副 热带西风的涡度远远小于热带西风, 当热带西风急 流取代副热带西风控制高原以南地区时, 涡度场上 表现为正相对涡度的突然增大。由图 2a 可知, 9 月,高原以南对流层中低层为热带西风控制,副热 带西风位于高原北侧; 10月(图 2b), 南支急流在 高原南缘建立,正相对涡度突然到达高原南侧北纬 17.5°N~25°N 附近,表明副热带西风越过青藏高 原; 11月~5月(图 2c), 南支急流增强南压并锚定 在高原南缘上空,副热带南支西风也稳定在孟加拉 湾北部; 6月(图 2d),随着副热带西风急流北跳, 南支急流消失,对流层中低层热带西风取代副热带 西风控制了高原以南地区。由此可知,南支西风10 月在高原南侧建立和6月北跳消失都是突然的,高 原对西风的分支从 10 月开始持续至次年 5 月,也 就是说南支槽在冬半年 10 月~5 月存在于高原南

侧、孟加拉湾北部地区。

图 3 是多年候平均槽区 (85°E~95°E) 700 hPa 相对涡度纬度-时间剖面,可以看出,冬半年 (10 月~5 月) 在高原南侧有一条正相对涡度带,它表明 10 月副热带西风越过青藏高原,南支槽在孟加拉湾北部建立,5 月中下旬随着副热带西风北跳,高原南侧转为热带西风控制,冬半年南支槽转换为夏季孟加拉湾槽。另外,这条正涡度带上有两个大值中心,分别对应南支槽冬季加深、春季活跃时期。冬季南支槽位置偏南,位于 25°N 附近,春季位置偏北,位于 27.5°N 附近,由冬到春有北跳 2°N~3°N 的现象。图 4 是多年候平均槽区 (85°E~95°E) 700 hPa 高度距平 (17.5°N~27.5°N) 和相对涡度 (22.5°N~27.5°N) 随时间演变曲线,它进一步显示了南支槽生命期的演变过程。

由图 4 可知, 10 月相对涡度为正表示副热带西风越过青藏高原, 南支槽在高原南侧建立, 相应高度场逐渐开始降低, 表明夏季较强的孟加拉湾槽开始转换为冬半年的南支槽; 冬季(11~2 月)高度场明显下降, 同时相对涡度增强, 表明南支槽加深; 春季(3~5 月)高度场先升高再下降, 对应相对涡度也先减弱后增强, 表明南支槽先减弱又加深, 尤其是 4 月中旬以后变得活跃起来; 5 月中下旬以后相对涡度持续增加高度场迅速下降, 表明南支槽消失并转换成孟加拉湾槽。据此冬半年南支槽可以分为 10 月建立、冬季(11~2 月)加强、春季(3~5 月)活跃和 6 月消失转换四个阶段, 生命期为 10 月至次年 5 月。

3.2 南支槽建立、维持、活跃及消失转换过程

3.2.1 流场和相对涡度演变特征

杨鉴初等(1960)发现在 1.5 km 高度的流线 图上可以看出南支气流沿高原的南缘前进,只有在 高原东南侧才有显著的气旋性旋转,形成南支槽。 因此,我们首先从 850 hPa 相对涡度和流场的角度 来分析南支槽建立、维持、活跃及消失转换过程。

由图 5a 可知,10 月副热带西风在高原西端分成南北两支,南面一支为西北气流,北面一支为西南气流。南支西风沿着高原南缘东进,在孟加拉湾西北部出现气旋性环流和正涡度中心,标志着南支槽建立;冬季(图 5b)正涡度增强,气旋性环流稳定在孟加拉湾北部,表明南支槽维持;南支西风与中南半岛东南气流在高原东侧相遇形成一辐合线;

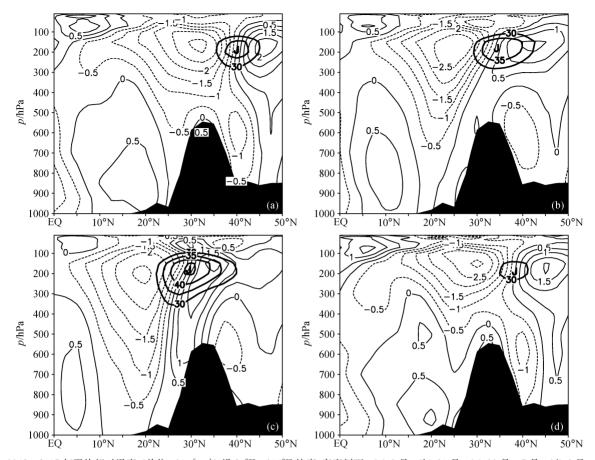


图 2 $1948\sim2005$ 年平均相对涡度 (单位: 10^{-5} s⁻¹) 沿 80° E $\sim100^{\circ}$ E 纬度-高度剖面: (a) 9 月; (b) 10 月; (c) 11 月 ~5 月; (d) 6 月。细实线: 正相对涡度,虚线: 负相对涡度,粗实线: 纬向风 ($u\geqslant30$ m/s); J: 急流中心,阴影: 地形

Fig. 2 Latitude-altitude cross sections of the relative vorticity $(10^{-5} \, \text{s}^{-1})$ along $80^{\circ}\text{E} - 100^{\circ}\text{E}$ in (a) Sep. (b) Oct, (c) Nov-May, and (d) Jun averaged from 1948 to 2005. Thin solid (dashed) lines; the positive (negative) relative vorticity; thick solid lines; zonal wind $(u \geqslant 30 \, \text{m/s})$; J: the jet center; shaded; the topography

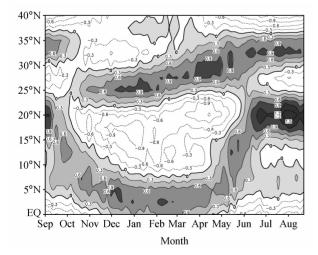


图 3 $1948\sim2005$ 年候平均槽区 $(85^{\circ}E\sim95^{\circ}E)$ 700 hPa 相对涡度 (单位: $10^{-5}\,\mathrm{s}^{-1}$) 纬度—时间剖面

Fig. 3 Latitude – time cross section of the pentad mean relative vorticity ($10^{-5}\,\mathrm{s}^{-1}$) along trough area ($85^{\circ}\mathrm{E}-95^{\circ}\mathrm{E}$) at 700 hPa averaged from 1948 to 2005

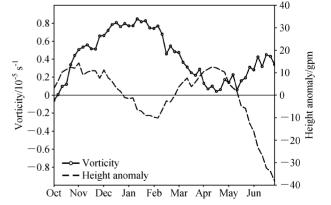


图 4 1948~2005 年候平均槽区 (85°E~95°E) 700 hPa 高度距平 (17.5°N~27.5°N平均) 和相对涡度 (22.5°N~27.5°N平均) 随时间演变

Fig. 4 Time series of the pentad geopotential height anomaly (17.5°N – 27.5°N mean) and relative vorticity (22.5°N – 27.5°N mean) at 700 hPa over trough area (85°E – 95°E) averaged from 1948 to 2005

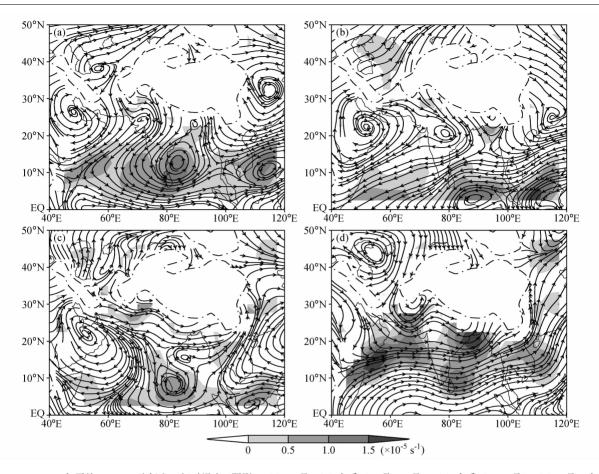


图 5 $1948\sim2005$ 年平均 850 hPa 流场和正相对涡度 (阴影): (a) 10 月; (b) 冬季 (11 月 ~2 月); (c) 春季 ($3\sim5$ 月); (d) 6 月。点划线: 1500 m地形

Fig. 5 Climatological streamline field and positive relative vorticity (shaded areas) at 850 hPa in (a) Oct, (b) winter (Nov to Feb), (c) spring (Mar to May), and (d) Jun averaged from 1948 to 2005. Dash-dotted lines show the 1500-m topography

同时印度西北部出现气旋性曲率对应西方扰动的生成;春季(图 5c)孟加拉湾北部正涡度减弱表明南支槽减弱,随着中南半岛西南气流的加强,高原东侧正涡度中心迅速增强并伴有气旋性旋转,在高原东南侧产生汇合槽。此时 ITCZ 迅速北抬,赤道东印度洋以北的一个涡旋移到斯里兰卡附近;6月(图 5d) 斯里兰卡低涡北上,孟加拉湾北部正涡度突然增强,西南季风气流向东北前进受到青藏高原的阻挡被迫作气旋性旋转,形成孟加拉湾槽。

3.2.2 急流和温度场、气压场、风场演变特征

由图 6a 可以看出,10 月南支急流位于高原南缘,700 hPa 高原南侧 85°E 附近对应有低压槽形成;冬季(图 6b)南支急流增强南压并锚定在高原南缘上空,南支槽加深东移到 93°E 附近,槽后有强冷平流是明显的斜压槽,同时冷空气南侵在 70°E 附近激发出西方扰动;春季(图 6c)随着温度场、气压场调整和南支急流减弱北撤,冷温槽移向下游

阻尼了南支槽发展使得汇合槽生成,南支西风出现三个波动,分别位于阿拉伯海、孟加拉湾和华南,这是南支波动十分活跃的时期,它与春季环流多移动性南支槽影响我国的天气有关(陶诗言,1953);6月(图 6d)随着副热带西风北撤,南支急流消失,ITCZ向北急移,热带西风控制了高原南侧,南支槽消失并转换为孟加拉湾槽,暖性的夏季风槽在90°E附近显著加深,南亚夏季风爆发。由此看来,10月南支槽建立表明北半球大气环流由夏季型转变成冬季型,6月南支槽消失同时孟加拉湾槽建立,是南亚夏季风爆发的重要标志之一。

4 冬季南支槽高度、温度和湿度高低 空配置

由图 4 可知,南支槽在冬季最深,但不知其高度、温度和湿度的高低空配置如何?由图 7a可知:冬季 500 hPa 高度场为北脊南槽形势,高压脊在巴

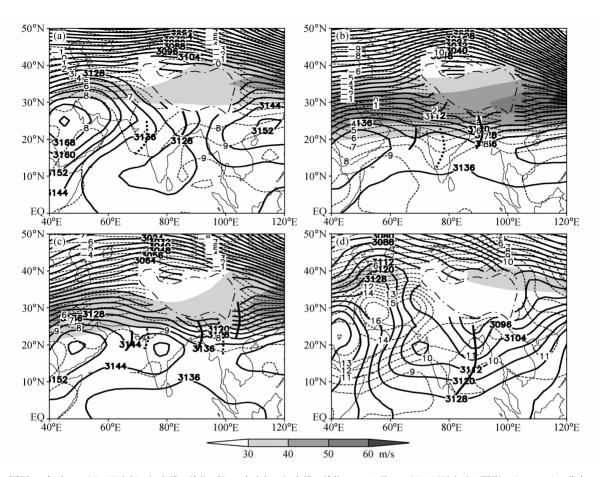


图 6 同图 5,但为 700 hPa 温度场 (细虚线,单位: \mathbb{C})、高度场 (细实线,单位:gpm) 及 200 hPa 西风急流 (阴影, $u \geqslant$ 30 m/s) 分布。粗实线:高度槽;粗虚线:温度槽;点划线:3000 m 地形

Fig. 6 Same as Fig. 5, but for the distributions of geopotential height (thin solid lines, units: gpm) and temperature (thin dashed lines, units: $^{\circ}$ C) at 700 hPa and the 200-hPa westerly jet (shaded areas, $u \geqslant 30 \text{ m/s}$). Thick solid (dashed) lines: height (temperature) troughs; dash-dotted line; 3000-m topography

尔喀什湖附近,孟加拉湾有南支槽,槽较浅位于东经 85°E 附近,温度场北冷南暖,湿度场西北干东南湿,孟加拉湾北部湿度较小。700 hPa (图 7b) 南支槽位于 93°E 附近,有暖温脊配合。阿拉伯海和孟加拉湾北部有两个干中心,印度半岛、中南半岛至华南一带有向北突起的湿舌。850 hPa (图 7c) 南支槽较 700 hPa 弱,槽后有冷平流,孟加拉湾北部仍为干区,高原东南侧冷高压伴有强的冷温槽。在1000 hPa (图 7d) 海平面气压图上,印度半岛至孟加拉湾的西北部为冷高压控制。高原东南侧密集锋区伴有强的冷温槽,高原西侧和东南侧分别有两个明显干区。由此可知,冬季南支槽在 500 hPa 较浅,700 hPa 最明显,850 hPa 稍弱,高空槽后在近地层表现为冷高压;在 850 hPa 以下近地面层,冷空气受到青藏高原的阻挡主要是从高原东南侧南下

影响热带地区,而孟加拉湾的冷空气主要是从高原 西侧沿高原南缘,由南支槽后偏北风向南输送。

由于南支槽在 700 hPa 最明显,我们利用 1948~2005 年逐日 700 hPa 温度、比湿和风场资料,计算逐日温度、湿度平流,进而得到多年候、月平均值,以分析南支槽对温度和水汽的输送特征。

温度平流的计算公式为

$$-\mathbf{V} \cdot \nabla T = -\left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y}\right).$$

当风由温度高的地区流向温度低的地区,此项为正,称之为暖平流;反之,当风由温度低的地区流向温度高的地区,此项为负,称之为冷平流。

湿度平流的计算公式为

$$-\mathbf{V}{\cdot}\nabla q = -\left(u\frac{\partial q}{\partial x} + v\frac{\partial q}{\partial y}\right).$$

当风由比湿高的地区流向比湿低的地区, 此项为

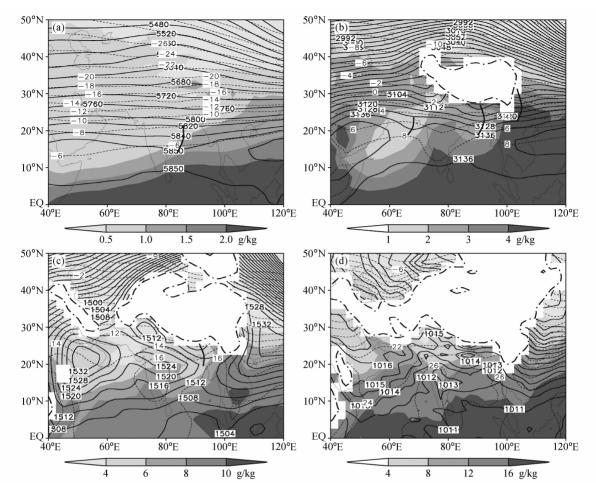


图 7 1948~2005 年冬季 (11 月~2 月) 平均高度 (细实线)、温度 (细虚线) 和比湿 (阴影) 配置: (a) 500 hPa; (b) 700 hPa; (c) 850 hPa; (d) 1000 hPa。点划线: (b) 3000 m、(c) 1500 m 和 (d) 1000 m 地形。其余同图 6

Fig. 7 Configuration of geopotential height (thin solid lines), temperature (thin dashed lines) and specific humidity (shaded areas) in winter (Nov to Feb) at (a) 500 hPa, (b) 700 hPa, (c) 850 hPa, and (d) 1000 hPa averaged from 1948 to 2005. Dash-dotted lines: (b) 3000-m, (c) 1500-m and (d) 1000-m topography. The others are the same as Fig. 6

正,称为湿平流,反之,当风由比湿低的地区流向 比湿高的地区,此项为负,称之为干平流。

图 8a 表明,10 月高原南缘有明显的冷平流,南支槽后偏北气流加强了冷平流的向南输送。冬季(图 8b),随着冷空气加强南下,孟加拉湾北部南支槽后冷平流达到最强,这也说明孟加拉湾的冬季风主要与南支槽后偏北冷空气活动关系密切(丁一汇,1990)。同时,南支槽前有明显的暖平流。春季(图 8c),随着冷空气减弱冷温槽移向下游,南支槽冷暖平流减弱,而高原东侧汇合槽冷暖平流明显加强。6月(图 8d),副热带西风北撤,冷空气沿高原北侧东移,高原南侧的冷平流消失。

由图 9a 可知,10 月,干冷空气从青藏高原西端沿着高原南缘东进,南支槽后湿度明显下降,印

度半岛相对槽区湿度要高,所以在高原西南侧表现为湿平流。冬季(图 9b),南支槽前有明显的干平流,槽后为湿平流。这主要也是由于湿度场分布的特点造成:冬季孟加拉湾为干区(参见图 7 中的比湿分布),而印度半岛和中南半岛至华南一带为相对高湿区,因而在南支槽后西北气流作用下表现为湿平流,南支槽前西南气流作用下为干平流。这种湿度平流的输送是南支槽不同于一般北方高空槽对水汽的输送作用。春季(图 9c),随着印度半岛和中南半岛湿度的明显增大,南支槽前干平流和槽后湿平流明显增强;6月(图 9d),孟加拉湾槽前干平流和槽后湿平流输送均比南支槽明显减弱。

由前述分析可知,700 hPa 南支槽前有干暖平流,槽后有冷湿平流输送。南支槽前干暖平流有助

3期

No. 3

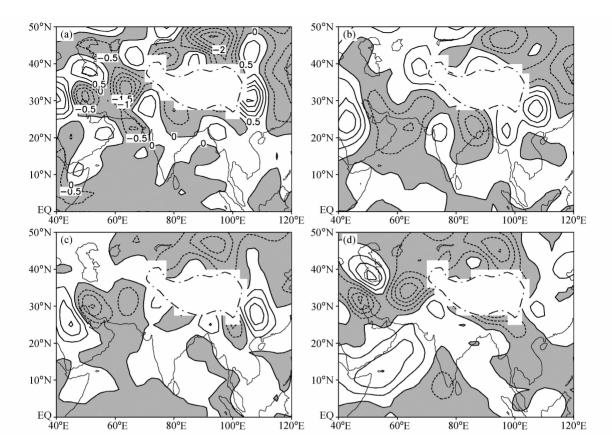


图 8 同图 5, 但为 700 hPa 温度平流 (单位: 10⁻⁵ K/s)。实线: 暖平流; 虚线和阴影: 冷平流; 点划线: 3000 m 地形

Fig. 8 Same as Fig. 5, but for the temperature advection (10⁻⁵ K/s) field at 700 hPa, Solid lines, warm advection; dashed lines and shaded areas: cold advection; dash-dotted line: 3000-m topography

于在高原东侧冷垫上形成上干暖下冷湿的温度结 构,它与昆明准静止锋形成和维持有关(Jong, 1950; 樊平, 1956), 而南支槽后冷湿平流也与孟加 拉湾冷涌关系密切。

行星辐散环流和高空急流对南支槽 垂直运动季节变化的影响

5.1 700 hPa 南支槽及其垂直运动季节变化特征

从图 10a 可知, 10 月南支槽前上升运动中心位 于90°E 附近,20°N 以北至高原南侧地区,槽后有明 显的下沉, 南支槽前上升运动受到行星上升运动的 加强; 冬季 (图 10b) 南支槽前上升运动位于 100°E 附近。此时受行星尺度下沉运动影响,南支槽前上 升运动较弱;春季(图 10c)随着行星尺度上升运动 向北扩张,南支槽前上升运动明显增强;6月(图 10d) 行星尺度上升运动控制了南亚、东亚的大范围 地区,南支槽上升运动明显增强。因此,南支槽垂直 运动受到行星尺度辐散环流季节变化的影响。

辐散环流季节变化特征 5. 2

10月,由于青藏高原对副热带西风的分支作 用, 高原西侧在 700 hPa (图 11a) 出现明显辐散 风,同时 200 hPa (图 11e) 为辐合下沉,在对流层 低层高原西侧辐散风沿高原南缘东南流到赤道西太 平洋辐合上升,到对流层高层辐散向西北流出,至 青藏高原上空辐合下沉,形成一闭合辐散环流圈。 南支槽位于高层辐散环流上升支内,槽前上升运动 得到加强。冬季,在西风分支和高层辐散下沉共同 作用下,700 hPa (图 11b) 在高原西侧辐散加强; 200 hPa (图 11f) 速度势零线移到华南沿海一带, 受行星尺度辐散环流下沉支影响,南支槽前上升运 动受到抑制,而槽后下沉运动得到加强。春季, 700 hPa (图 11c) 高原西侧辐散中心维持,赤道西 太平洋辐合中心西移且强度减弱,200 hPa(图 11g) 辐散中心强度也减弱,速度势零线到达高原 西侧,南支槽转为辐散环流上升支控制之下,槽前 上升运动得到加强。6月,200 hPa (图 11h) 高层

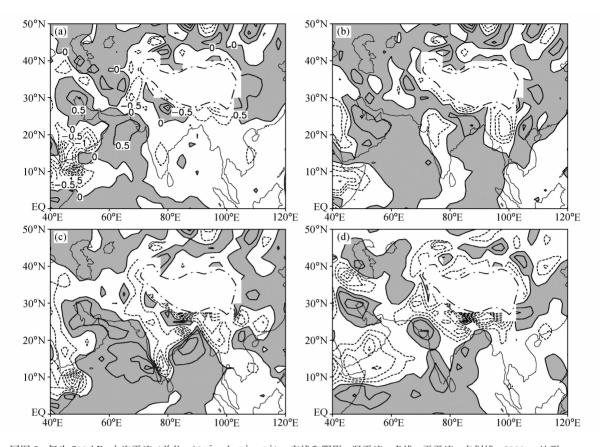


图 9 同图 5, 但为 700 hPa 水汽平流(单位: 10^{-5} g·kg⁻¹·s⁻¹)。实线和阴影:湿平流;虚线:干平流;点划线:3000 m 地形 Fig. 9 Same as Fig. 5, but for moisture advection (10^{-5} g·kg⁻¹·s⁻¹) at 700 hPa. Solid lines and shaded areas: wet advection; dashed lines: dry advection; dash-dotted line: 3000-m topography

辐散中心迅速增强,速度势零线西进到 60°E 附近; 700 hPa (图 11d) 高原西侧的辐散中心消失,西太平洋辐合上升中心增强。对流层低层辐合和高层辐散中心均移到菲律宾附近,使得菲律宾附近的上升运动迅速增强,孟加拉湾北部转为辐散环流上升气流控制。另外,高原西侧对流层低层辐散风沿高原南缘东南流到赤道西太平洋辐合上升,到对流层高层辐散向西北流出,至青藏高原上空辐合下沉,形成一个闭合的辐散环流圈。这个闭合辐散环流圈从西风分支开始建立,持续到西风分支结束。

以上分析表明,10月,南支槽前上升运动仍位于高层辐散环流上升支内,槽前上升运动得到加强;冬季受辐散环流下沉支影响,南支槽前上升运动受到抑制而槽后下沉运动得到加强;春季随着辐散环流减弱,辐散环流上升支为槽前上升运动的向上发展提供了行星尺度背景;6月,孟加拉湾北部转为辐散环流上升气流控制,印度季风槽有整层垂直运动产生。因此从上升运动背景的角度看,春季

是南支槽最活跃的时期。

5.3 行星尺度辐散环流对急流次级环流的影响

在高空西风急流中心人口区运动的气块会得到向左偏(看向下游)的非地转分量(南风),结果在急流北侧产生高层辐合,南侧产生高层辐散,进而北侧出现下沉气流,南侧出现上升气流。低层大气也随之发生质量调整,产生与高层相反的辐散辐合区,从而在急流入口区形成直接的力管环流。类似的,在急流的出口区有间接环流产生(Cressman,1981;丁一汇,2005)。由于冬季南支急流位于辐散环流北缘30°N附近,受行星尺度辐散环流影响,急流的次级环流会发生什么变化颇值关注。

由图 12a 可知,10 月在北非急流出口区北侧有高层辐散,南侧高层辐合,有间接环流产生;东亚急流入口区南侧有高层辐散,北侧高层辐合,有直接的力管环流。冬季(图 12b),随着速度势零线东南移,其左侧的辐散环流下沉运动使得东亚急流入口区表现为一致的高层辐合下沉,急流入口区南侧

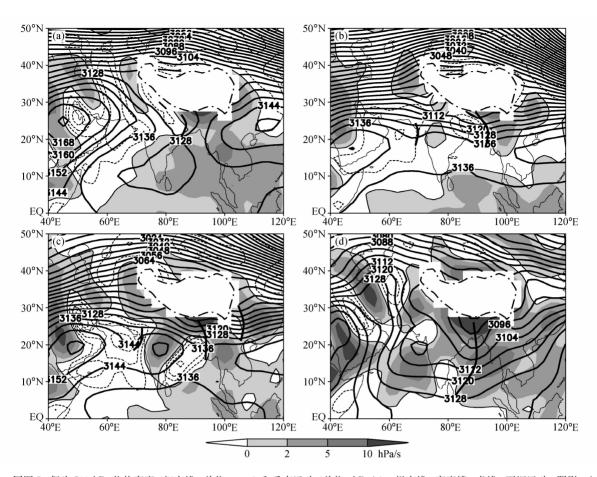


图 10 同图 5,但为 700 hPa 位势高度(细实线,单位:gpm)和垂直运动(单位:hPa/s)。粗实线:高度槽;虚线:下沉运动;阴影:上升运动;点划线:3000 m 地形

Fig. 10 Same as Fig. 5, but for geopotential height (thin solid lines, units; gpm) and vertical motion (hPa/s) at 700 hPa. Thick solid lines; height troughs; dashed lines (shaded areas); descending (ascending) motions; dash-dotted line; 3000-m topography

直接的力管环流受到破坏,进而使槽前上升运动受到抑制,这与陈艳(2006)所得结果一致。关于仲冬急流南方强烈的下沉,Ramage(1952)用西南风汇合理论来解释。春季(图12c),随着辐散环流下沉减弱,东亚急流入口区南侧又出现上升运动,直接力管环流圈重新出现,南支槽前的上升运动受到急流次级环流上升支的加强而向上伸展。6月(图12d),速度势零线西进到60°E附近,阿拉伯海、孟加拉湾和中南半岛等南亚、东南亚均为行星尺度上升区控制,有深厚上升运动发展。

5.4 急流次级环流对南支槽垂直运动的影响

辐散环流为南支槽垂直运动提供了行星尺度背景,但在行星下沉运动的背景下,急流入口区南侧就出现高层辐散中心(图略),这是否提前触发了南支槽前垂直运动的向上发展?

从多年平均西风急流、散度、上升运动和垂直

环流沿 100°E 附近纬度-高度剖面图可以看到, 12 月(图 13a)南支槽散度场为低层辐合,中层辐散, 高层辐合。哈德莱环流在赤道附近上升,北纬30°N 附近下沉。受高层辐合下沉抑制,南支槽前上升运 动只伸展到对流层中层 600 hPa。1 月 (图 13b), 南支急流达到最强, 高层辐合下沉达到最强, 南支 槽前上升运动仍在 600 hPa 附近; 2 月 (图 13c), 南支急流开始减弱,急流南侧高层辐散开始增强, 但南支槽前上升运动仍抑制在 600 hPa 附近; 3 月 (图 13d),随着辐合下沉明显减弱,急流入口区南 侧高层辐散中心加强, 使得南支槽前垂直运动向上 伸展到对流层高层,在急流入口区南侧产生直接的 力管环流。正如朱抱真(1951)发现下沉运动由高 层向下传递一样,上升运动向上伸展也源于高层, 即急流入口区南侧高层辐散的加强使得南支槽前上 升运动向上爆发到对流层高层。

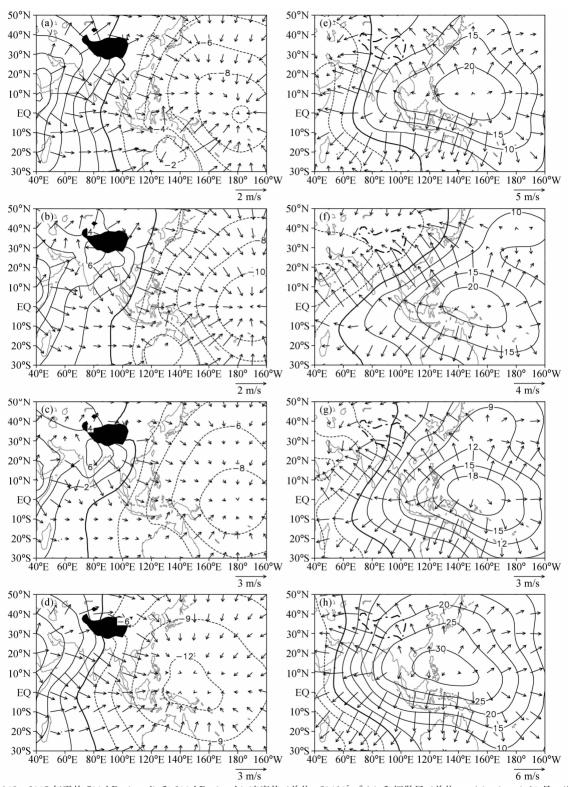


图 11 1948~2005 年平均 700 hPa (a~d) 和 200 hPa (e~h) 速度势 (单位: 5×10^5 m²/s) 和辐散风 (单位:m/s): (a、e) 10 月; (b、f) 冬季 (11 月~2 月); (c、g) 春季 (3~5 月); (d、h) 6 月。细实线/虚线: 正/负速度势等值线; 粗实线: 速度势零线; 阴影 (a~d) 和点划线 (e~h) 表示 3000 m 地形

Fig. 11 Climatology velocity potential $(5 \times 10^5 \, \text{m}^2/\text{s})$ and divergence wind at (a-d) 700 hPa and (e-h) 200 hPa averaged from 1948 to 2005; (a, e) Oct; (b, f) winter (Nov-Feb); (c, g) spring (Mar-May); (d, h) Jun. Thick solid line; zero velocity potential isoline; Shadow (a-d) and dash-dotted line (e-h): 3000-m topography

SUO Miaoqing et al. The Structures and Evolutions of the Wintertime Southern Branch Trough in ...

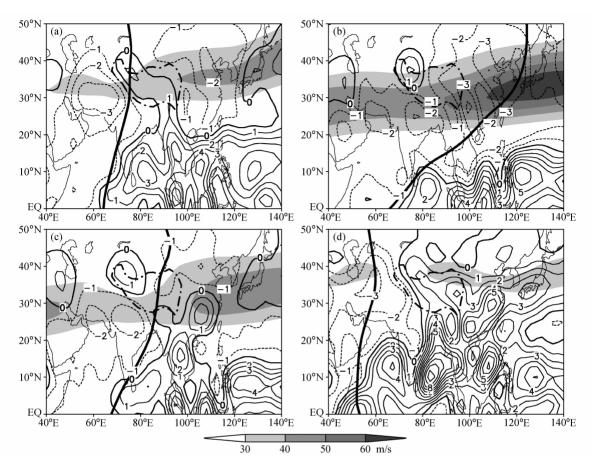


图 12 同图 5, 但为 200 hPa 西风急流、垂直运动和速度势零线分布。细实线/虚线:上升/下沉运动(单位:hPa/s);粗实线:速度势零 线; 阴影: 急流 (u≥30 m/s); 点划线: 3000 m 地形

Fig. 12 Same as Fig. 5, but for distribution of the westerly jet (shaded areas, $u \ge 30 \text{ m/s}$), vertical motion and zero velocity potential isoline (thick solid lines) at 200 hPa. Thin solid (dashed) lines: ascending (descending) velocity (hPa/s); dash-dotted line: 3000-m topography

5.5 大气层结季节变化特征

大气层结是指大气温度和湿度在垂直方向的分 布,由于假相当位温 (θ_{se}) 能同时表征大气热力与 水汽状态, θ_{se} 越大表明温度和湿度越高, 如 θ_{se} 随高 度增加而减小,则存在对流不稳定层结。我们从 θ_{sc} 、急流和垂直运动分布,可以更好地了解南支槽 上空大气层结季节变化特征。

由图 14a 可知, 10 月南支急流在高原南缘建立 时,高原以南对流层低层仍具有较强的对流不稳定 层结,上升运动发展到对流层高层;冬季(图 14b),随着南支急流增强南压,高层辐合下沉增温 使得南支槽上空高层大气层结相当稳定,弱位势不 稳定层结和垂直运动仅出现在 600 hPa 以下层次; 春季(图 14c),随着高层辐合下沉增温减弱,热带 暖湿空气向北扩展,对流层低层 θ_{se} 明显增大,对流

不稳定层结迅速增强,上升运动向上发展使高层稳 定的大气层结受到破坏; 6月(图 14d), 高原南侧 θ_{se}迅速升高表明热带高温高湿大气控制了高原以南 地区,有对流不稳定层结和深厚上升运动发展。

南支槽水汽输送和对流活动的季节 变化

6.1 南支槽水汽输送季节变化特征

图 15 给出了多年平均南支槽生命期从地面积 分到 300 hPa 的水汽输送情况,可以看出,10 月 (图 15a) 副高南侧偏东风水汽输送带西伸使得夏季 西南风水汽输送带断裂,南支槽结合副高外围转向 的西南水汽输送为华南秋季降雨提供主要的水汽来 源。冬季(图 15b),强东风水汽输送带位于 15°N 以南,分别在 40°E 和 105°E 附近出现越赤道水汽

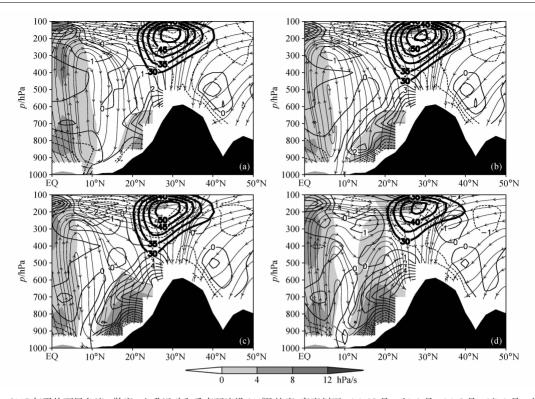
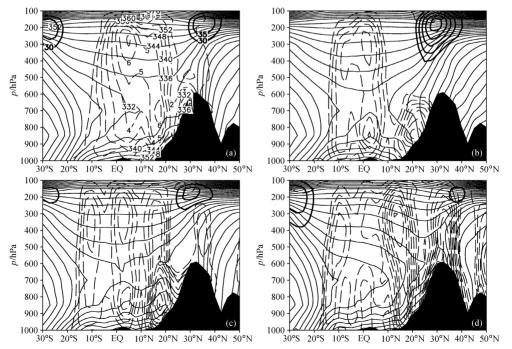


图 13 1948~2005 年平均西风急流、散度、上升运动和垂直环流沿 100°E 纬度-高度剖面: (a) 12 月; (b) 1 月; (c) 2 月; (d) 3 月。粗实线: 等 风速线 (u≥30 m/s); 细实线/虚线: 正/负散度等值线 (单位: 10⁻⁶ s⁻¹); 流线: 垂直环流; 阴影: 上升运动 (单位: hPa/s) 和地形 Fig. 13 Latitude-altitude cross sections of the climatological westerly jet (thick isolines, $u \ge 30 \text{ m/s}$), divergence (thin isolines, units; 10^{-6} s-1), ascending motion (shaded areas) and vertical circulation (streamlines) along 100°E in (a) Dec, (b) Jan, (c) Feb and (d) Mar averaged from 1948 to 2005. Black shaded area: topography



同图 5, 但为假相当位温 (θ_{sc}) 、西风急流和上升运动沿 100° E 纬度-高度剖面。细实线: 等 θ_{sc} 线 (单位: K); 粗实线: 等风速线 (u≥30 m/s); 虚线: 上升运动 (单位: hPa/s); 阴影: 地形

Fig. 14 Same as Fig. 5, but for latitude-altitude cross sections of the pseudo-equivalent potential temperature θ_{sc} (thin solid isolines, units: K), jet (thick solid lines, $u \ge 30 \text{ m/s}$) and ascending motions (dashed lines, units: hPa/s) along 100°E. Shadow: topography

439

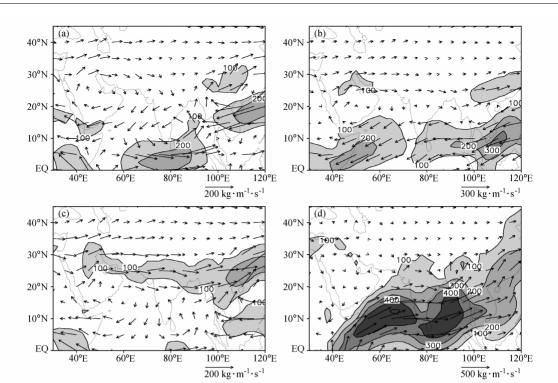


图 15 同图 5, 但为从地面到 300 hPa 水汽输送的垂直积分。阴影: 水汽输送 ≥100 kg·m⁻¹·s⁻¹ Fig. 15 Same as Fig. 5, but for vertically integrated moisture transport (VIMT) from the surface to 300 hPa. Shaded area: VIMT≥ 100 kg·m⁻¹·s⁻¹

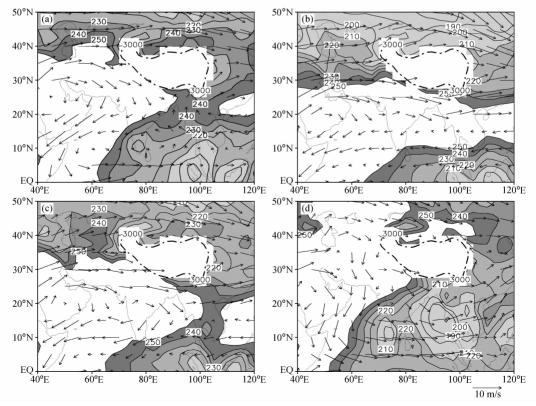


图 16 同图 5, 但为 700 hPa 风场和 1975~2005 年平均向外长波辐射 (阴影: OLR ≤250 W/m²)。点划线: 3000 m 地形 Fig. 16 Same as Fig. 5, but for composite of the wind field at 700 hPa and the 1975 – 2005 climatology of Outgoing Longwave Radiation (OLR, shaded area: OLR ≤250 W/m²). Dash-dotted line: 3000-m topography

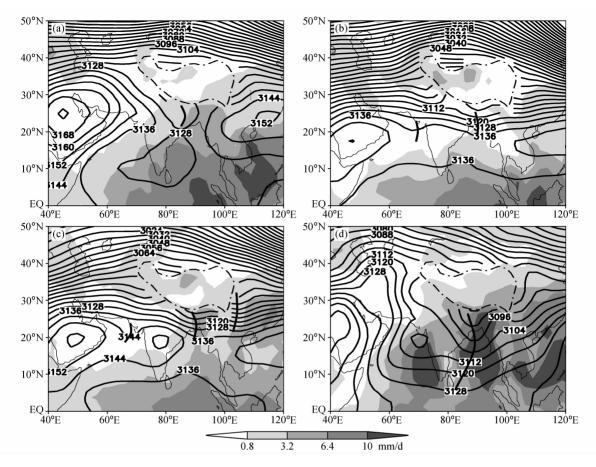


图 17 同图 5, 但为 700 hPa 位势高度 (单位: gpm) 和 1979~2005 年平均 CMAP 降水率 (单位: mm/d)。细/粗实线: 等高线/高空槽; 阴影: 日降水率≥0.8 mm/d; 点划线: 3000 m 地形

Fig. 17 Same as Fig. 5, but for the composite of geopotential height (isolines, units: gpm) at 700 hPa and the 1979-2005 climatology of CMAP precipitation rate (shaded areas: ≥0.8 mm/d). Thick solid lines: upper troughs; dash-dotted line: 3000-m topography

输送。25°N 附近有一条源自阿拉伯海北部绕经高原南侧直至西太平洋的南支西风水汽输送带,是冬季我国西南、华南和长江中下游地区的主要水汽通道,但强度较弱;春季(图 15c),强东风水汽输送带断裂消失,印度洋和孟加拉湾首先出现西风和偏南风水汽输送,南支槽前的西南风水汽输送增大,同时副高外围转向暖湿水汽输送加强,这两条西南风水汽输送带在华南沿海汇合,为华南前汛期提供大量水汽(陈艳等,2006);6月(图 15d),南支西风水汽输送带消失,孟加拉湾北部转为偏南风水汽输送,索马里越赤道气流经阿拉伯海、印度、孟加拉湾、中南半岛,形成由我国南海地区折向北的大值输送带(great moisture river),即 GMR(He et al., 2007)。

6.2 南支槽对流季节变化特征

在多年平均 OLR 和 700 hPa 风场分布图上,

10月(图 16a),由于冷空气南侵,冷暖空气的交汇使得南支槽前对流活跃,但强对流区位于印度低压至副热带高压南侧 10°N 附近;冬季(图 16b),与ITCZ 相对应的强对流带移到赤道附近,南支槽前对流不明显;春季(图 16c)暖湿气流增强,南支槽前有对流发展,另外中南半岛南端有强对流中心出现;6月(图 16d),随着 ITCZ 北抬,南支槽前有强对流迅速发展。因此,对流主要位于南支槽前,且春季比冬季更为活跃,主要的对流区在孟加拉湾北部和中印半岛以及中国南方地区,而槽前的印度地区是少云或晴空条件,这对应于印度的干季。

6.3 南支槽降水季节变化特征

10月(图 17a),南支槽在孟加拉湾北部建立, 此时印度低压仍位于孟加拉湾南部,南支槽和副热 带高压外围偏南气流带来大量水汽,在槽前辐合上 升,在行星尺度上升运动的加强下有深对流发展, 南支槽前有明显降水;冬季(图 17b),槽前西南风 水汽输送弱,上升运动浅薄,无强对流活动,降水 不明显,雨区主要位于高原东南侧昆明准静止锋至 华南一带;春季(图17c),南支槽前水汽输送增大, 特别是副高外围暖湿水汽输送加强,上升运动发展 和对流加强,南支槽造成的降水显著增加;6月 (图 17d), 西南季风水汽输送迅速增强, 对流深厚, 整层上升运动发展使得降水迅猛增长, 印度夏季风 爆发,中国和日本的梅雨开始。

结论

- (1) 10 月, 随着西风气流越过青藏高原, 南支 急流建立, 孟加拉湾西北部南支西风上有气旋性环 流和低压槽生成,标志着南支槽在高原南侧建立: 冬季(11月~2月),南支急流增强南压稳定在孟 加拉湾北部上空,是南支槽加深时期,这时槽后有 强冷平流, 南支槽表现为明显的斜压槽, 这常常伴随 着冷空气在 70°E 附近南侵; 春季 (3~5月), 随着温 压场调整和南支急流减弱北撤,冷温度槽移向下游 阻尼了南支槽发展而使得汇合槽生成。这时南支西 风中出现三个波动,分别位于阿拉伯海、孟加拉湾 和华南;6月,随着副热带西风北跳,南支急流消 失, ITCZ 向北移动, 热带西风控制了孟加拉湾北 部地区,南支槽消失并转换为孟加拉湾槽。由此看 来,10月南支槽建立表明北半球大气环流由夏季 型转变成冬季型,6月南支槽消失同时孟加拉湾季 风槽建立,是南亚夏季风爆发的重要标志之一。
- (2) 冬季南支槽在 500 hPa 较浅、700 hPa 明 显、850 hPa 稍弱, 高空槽后在近地层表现为冷高 压; 850 hPa 以下近地面层, 冷空气受到青藏高原 的阻挡主要是从高原东南侧南下以后向西南扩散而 影响孟加拉地区,另一方面孟加拉湾的冷空气主要 是从高原西侧沿高原南缘,由南支槽后偏北风向南 输送。在 700 hPa 南支槽前从气候平均上表现为干 暖平流的输送,它有利于昆明准静止锋形成和维 持,槽后冷湿平流也与孟湾冷涌关系密切。
- (3) 冬季辐散环流下沉支抑制了南支槽前上升 运动的发展,其产生的下沉逆温使冬季高层大气层 结非常稳定; 低层辐合, 中层辐散, 南支槽前上升运 动一般伸展到对流层中层 600 hPa 左右; 春季随着辐 散环流减弱, 东亚急流入口区南侧高层辐散中心的 出现使得垂直运动向上发展,稳定的大气层结受到

破坏, 整层上升运动开始出现, 同时辐散环流上升支 也为槽前上升运动的加强提供了行星尺度背景。

(4) 冬季南支槽前西南风水汽输送较弱,上升 运动浅薄, 无强对流活动, 南支槽前降水不明显, 雨区主要位于高原东南侧昆明准静止锋至华南一 带;春季南支槽水汽输送增大,特别是副高外围暖 湿水汽输送加强,垂直上升运动发展和对流增强, 南支槽造成的降水显著增加,因此,春季是南支槽 最活跃的时期。

冬季南支槽最深,为明显的斜压槽,槽后有强 冷平流相配合,冷空气活动频繁,但降水不多。春 季冷温槽超前使得南支槽强度不如冬季强, 但降水 增加, 究其原因可能有三: 一是冬季南支西风强, 西风带平直少波动,春季随着西风强度减弱,南支 西风带波动增加,多槽脊活动;二是冬季南支槽上 空为强大的南支急流控制,急流中心人口区右侧强 烈的下沉运动抑制了槽前上升运动的发展, 春季随 着急流减弱北撤,急流入口区南侧的次级环流上升 支使得南支槽垂直运动向上伸展,对流活跃,降水 骤增;三是冬季水汽输送偏弱而春季偏强,特别是 副高外围以及热带气旋和热带云团与南支槽相结合 使槽前暖湿水汽输送增强,这为春季南支槽降水提 供了丰沛的水汽来源。

参考文献 (References)

Chaudhury A.M. 1950. On the vertical distribution of wind and temperature over Indo-Pakistan along the meridian 76°E in winter [J]. Tellus, 2: 56 - 62.

Cressman G P. 1981. Circulation of the West Pacific jet stream [J]. Mon. Wea. Rev., 109: 2450 - 2463.

陈艳. 2006. 东南亚夏季风的爆发与演变及其对我国西南地区天气 气候影响的研究 [D]. 南京信息工程大学博士学位论文, 37-83. Chen Yan. 2006. A study on the Southeast Asian summer monsoon onset, evolution and its influence on the weather and climate over Southwest China [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese). Nanjing University of Information Science and Technology, 37 -83

陈艳,丁一汇,肖子牛,等. 2006. 水汽输送对云南夏季风爆发及初 夏降水异常的影响[J]. 大气科学, 30(1): 25-37. Chen Yan, Ding Yihui, Xiao Ziniu, et al. 2006. The impact of water vapor transport on the summer monsoon onset and abnormal rainfall over Yunnan Province in May [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (1): 25 - 37.

丁一汇. 1989. 天气动力学中的诊断分析方法 [M]. 北京: 科学出

- 版社, 293pp. Ding Yihui. 1989. Diagnostic Analysis Method in Synoptic Dynamics (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 293pp.
- 丁一汇. 1990. 东亚冬季风的统计研究 [J]. 热带气象, 6: 119-128. Ding Yihui. 1990. A statistical study of winter monsoons in East Asia [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 6: 119-128.
- 丁一汇. 2005. 高等天气学 (第二版) [M]. 北京: 气象出版社, 266pp. Ding Yihui. 2005. Advenced Synoptic Meteorology (in Chinese) [M]. 2nd ed. Beijing: China Meteorological Press, 266pp.
- 樊平. 1955. 康藏低槽的初步研究 [J]. 天气月刊 (附刊), 4: 1-9. Fan Ping. 1955. The basic study of Tibet Plateau Trough [J]. Weather Monthly (Attached Periodical) (in Chinese), 4: 1-9.
- 樊平. 1956. 昆明准静止锋 [J]. 天气月刊 (附刊), 3: 14 16. Fan Ping. 1956. The Kumming quasi-stationary front [J]. Weather Monthly (Attached Periodical) (in Chinese), 3: 14 16. 顾震潮. 1951. 西藏高原对东亚环流的影响和他的重要性 [J]. 气
 - 象学报, 22 (1): 283-303. Gu Zhenchao. 1951. The impact of the Tibetan Plateau on East Asia circulation and its importance [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 22 (1): 283-303.
- 何金海,温敏,施晓晖,等. 2002. 南海夏季风建立期间副高带断裂和东撤及其可能机制 [J]. 南京大学学报 (自然科学),38 (3):318-330. He Jinghai, Wen Min, Shi Xiaohui, et al. 2002. Splitting and eastward withdrawal of the subtropical high belt during the onset of the South China Sea summer monsoon and their possible mechanism [J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences) (in Chinese),38 (3):318-330.
- He Jinhai, Sun Chenhu, Liu Yunyun, et al. 2007. Seasonal transition features of large-scale moisture transport in the Asian-Australian monsoon region [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 24 (1): 1-14.
- Jong P C. 1950. The Kunming quasi-stationary front [J]. J. Chinese Geophy. Soc., 2: 87 103.
- 李家垣, 王明. 1987. 高原对新生南支槽影响的分析 [J]. 云南气象, 4: 23-26. Li Jiayuan, Wang Ming. 1987. The analysis of plateau influence on regeneration of southern trough [J]. Yunnan Meteorology (in Chinese), 4: 23-26.
- 潘静, 李崇银. 2006. 夏季南海季风槽与印度季风槽的气候特征之比较 [J]. 大气科学, 30 (3): 377-390. Pan Jing, Li Chongyin. 2006. Comparison of climate characteristics between two summer monsoon troughs over the South China Sea and India [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (3): 377-390.
- 秦剑,潘里娜,石鲁平. 1991. 南支槽与强冷空气结合对云南冬季 天气的影响[J]. 气象,17(3):39-43. Qin Jian, Pan Li'na,

- Shi Luping. 1990. The effects of the combination of strong cold air and the southern westerlies trough on winter weather in Yunnan [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 17 (3): 39 43.
- 秦剑, 琚建华,解明恩,等. 1997. 低纬高原天气气候 [M]. 北京: 气象出版社, 210pp. Qin Jian, Ju Jianhua, Xie Ming'en, et al. 1997. Weather & Climate over Low Latitude Plateau (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 210pp.
- Ramage C S. 1952. The relationship between the atmospheric circulation and the normal weather of the southern Asia and the western Pacific in winter [J]. J. Meteor., 9: 403 408.
- 陶诗言. 1952. 冬季由印缅来的低槽对于华南天气的影响 [J]. 气象学报, 23: 172 192. Dao S Y. 1952. The influence of the trough from Indo-Burma on the weather of southern China in winter [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 23: 172 192.
- 陶诗言. 1956. 冬季中国上空平直西风环流条件下的西风波动 [J]. 气象学报, 27: 345 360. Dao S Y. 1956. The upper air cold trough over China during high index circulation over Far East [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 27: 345 360.
- 王恒康,潘里娜, 余雄鹏. 1991. 春季南支西风槽的天气气候分析 [J]. 云南气象, 3: 1-14. Wang Hengkang, Pan Li'na, Yu Xiongpeng. 1991. The synoptic and climatic analysis of the southern westerlies trough in spring [J]. Yunnan Meteorology (in Chinese), 3: 1-14.
- Yin M T. 1949. A synoptic-aerologic study of the onset of the summer monsoon over India and Burma [J]. J. Meteor., 6: 393 400.
- Yeh Tu-Cheng. 1950. The circulation of the high troposphere over China in winter of 1945 46 [J]. Tellus, 2: 173 183.
- 叶笃正,朱抱真. 1958. 大气环流的若干基本问题 [M]. 北京: 科学出版社, 159pp. Yeh Tu-Cheng, Zhu Baozhen. 1958. Some Elementary Problems of Atmospheric Circulation (in Chinese) [M]. Beijing; Science Press, 159pp.
- 杨鉴初,陶诗言,叶笃正,等. 1960. 西藏高原气象学 [M]. 北京: 科学出版社, 280pp. Yang Jianchu, Tao Shiyan, Yeh Tu-Cheng, et al. 1960. Meteorology of Tibetan Plateau (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 280pp.
- 朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等. 2000. 天气学原理和方法 (第三版) [M]. 北京: 气象出版社, 198-202. Zhu Qian'gen, Lin Jinrui, Shou Shaowen, et al. 2000. Theory and Method of the Synoptic Meteorology (in Chinese) [M]. 3rd, ed. Beijing: China Meteorological Press, 198-202.
- 朱抱真. 1951. 西风急流发展过程中的垂直运动 [J]. 气象学报, 22 (2-3): 127-135. Zhu Baozhen. 1951. The vertical motion of the westerly jet development process [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 22 (2-3): 127-135.