

晚春初夏西太平洋副热带高压南撤过程的气候学特征^{*}

李建平¹ 朱建磊^{1,2}
LI Jianping¹ ZHU Jianlei^{1,2}

1. 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
2. 兰州大学大气科学学院, 兰州, 730000

1. *LASG, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*
2. *College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China*

2008-07-30 收稿, 2008-09-22 改回.

Li Jianping, Zhu Jianlei. 2008. Climatological features of the Western Pacific subtropical high southward retreat process in late-spring and early-summer. *Acta Meteorologica Sinica*, 66(6): 926—939

Abstract Based on the climatological daily mean NCEP/NCAR reanalysis data, NOAA outgoing longwave radiation (OLR) data, and weekly NOAA CAMP precipitation from 1979 to 2006, the variation of the Western Pacific subtropical high (WPSH) ridge during late-spring and early-summer and its relationship with the onset of the Asian summer monsoon is discussed from an climatological view. It is found that there is a remarkable southward retreat process (SRP) of the WPSH during late-spring and early-summer, mainly at both low and high levels of the troposphere, with an approximate two week lifespan. Afterwards, the first northward jump of the WPSH occurs. The end date of the WPSH SRP in the upper troposphere is about 10 days earlier than the beginning of the WPSH SRP in the lower troposphere, showing a meaningful leading signal for predicting the WPSH SRP in the lower troposphere and the subsequent northward jump of the WPSH. The WPSH SRP at tropospheric low levels happens simultaneously with a notable eastward shift of the WPSH. After the WPSH SRP at tropospheric low levels concludes around the end of May, the incline of the WPSH ridge axis turns over due to the change of the meridional gradient of air temperature.

The Asian summer monsoon onset and associated variations of strong convection and rainfall in Asia are closely related to the WPSH SRP during late-spring and early-summer. In the mid and late period of the WPSH SRP at tropospheric high levels around the end of April, the summer monsoon onset takes place in the Andaman Sea and the Bay of Bengal (BOB). Following the start of the WPSH SRP at tropospheric low levels, the South China Sea summer monsoon breaks out (May 14—15). By the end of the WPSH SRP, in the beginning of June, the Indian summer monsoon kicks off. Upon the end of the WPSH return stage, the East Asian summer monsoon begins. The commencement of each component system of the summer monsoon corresponds nicely to a particular stage of the WPSH SRP. This offers valuable information for monsoon onset prediction in different sectors of Asia.

In addition, it is found that there is a typical wet-dry-wet sandwich precipitation pattern, with two rainfall belts in the regions south and north to the WPSH main body, and a dry belt under it. The variation of this rainfall pattern is related to the shift of WPSH ridge.

Key words West Pacific Subtropical High, Southward retreat process, Summer monsoon, Subtropical ridge axis, Meridional air temperature gradient

摘 要 利用 1979—2006 年多年平均逐日 NCEP/NCAR 再分析资料、NOAA 的 OLR 和逐候 CAMP 降水资料, 从气候学角度

^{*} 资助课题: 国家重点基础研究发展规划项目(2006CB403600), 国家自然科学基金资助项目(40821092.40523001)。

探讨了晚春初夏季节转换时期, 西太平洋副热带高压(副高)脊线位置变化及其与亚洲夏季风爆发的关系。发现晚春初夏时期西太平洋副高在向北移动过程中存在一次显著的南撤过程, 之后西太平洋副高发生第一次北跳, 南撤主要发生在对流层高层和低层, 南撤生命期可达 2 周, 且高层的南撤过程结束时间比低层的南撤过程开始时间早约 1 旬, 这为预测低层副高南撤及其第一次北跳提供了有意义的前期信号。低层西太平洋副高南撤的同时伴随着一次显著东退过程。在低层副高南撤结束后(约 5 月底), 由于气温经向梯度的变化使副高脊轴倾斜发生反转。

晚春初夏的西太平洋副高南撤过程与亚洲夏季风爆发、强对流活动和降雨带的移动变化关系密切。在对流层高层西太平洋副高南撤过程的中后期(约 4 月底), 夏季风在安达曼海和临近孟加拉湾爆发。在对流层低层西太平洋副高南撤过程开始后, 南海夏季风开始爆发(5 月 14—15 日); 南撤过程结束后(6 月初), 印度夏季风爆发; 在副高脊线返回日后(6 月中), 东亚夏季风爆发。西太平洋副高南撤过程不同阶段的建立时间为预知亚洲不同地区夏季风的爆发时间提供了非常有用的信息。

此外, 在西太平洋副高主体南北两侧存在两支强的雨带, 与副高主体控制的少雨带构成一个典型的“湿干湿”三明治雨型, 这个雨型的变化与西太平洋副高脊线移动有关。

关键词 西太平洋副热带高压, 南撤过程, 夏季风, 副高脊轴, 气温经向梯度

中图法分类号 P46 P462.4⁺¹

1 引言

西太平洋副热带高压(简称副高)是东亚季风系统中的重要成员之一(Tao, et al, 1987), 其结构、位置、强度等的变化以及与周围系统的相互作用对中国天气和气候异常有十分重要的影响, 尤以夏半年为甚, 可以说西太平洋副高的进退与稳定是影响中国旱涝高温的重要原因之一。因此, 对副热带高压(简称副高)特别是西太平洋副高的活动规律及其变异机理的研究一直是气象学者关注的焦点问题(黄土松等, 1961; 陶诗言等, 1963; 吴国雄等, 2002; 缪锦海等, 1985)。

20 世纪 60 年代陶诗言(1963)、黄土松(1961)等就开展了西太平洋副高变化规律的研究, 指出西太平洋副高存在季节性的南北移动, 由冬到夏, 通常存在两次北跳过程, 与中国夏季雨带的分布和位置移动关系密切。近年来, 许多学者对副高做了进一步研究, 提出了若干新理论, 获得了一些新认识。吴国雄等(1999, 2000, 2002)通过建立“全型涡度方程”, 丑纪范等(2001, 2002)利用东西风交界面来表征副高的位置, 为认识副高的形成和变化规律提供了新的理论和方法。李建平等(1998)从描述副高的简单动力学方程入手论述了副高带断裂的内部动力学原因。毛江玉等(2002, 2003, 2004)分析了季节转换时节副热带高压的变异, 提出了季节转换轴的新概念, 并分析了副高结构和南海季风爆发的关系。占瑞芬等(2004, 2005)提出了副高双脊线的新概念, 研究了其与中国夏季雨带的关联, 在此基础上, 祁莉等(2008)分析了气候平均场上西太平洋副高双脊线

过程的可能成因。陆日宇(2002)对夏季西太平洋副高的表征指数做了讨论, 提出一种新的指数来表征西太平洋副高的位置变化。此外, 关于西太平洋副高位置的季节和年际变化也有一些新的结果(董步文等, 1988; 张庆云等, 1999; 陶诗言等, 2001)。

从前人对副高的研究成果可知, 以往对西太平洋副高位置季节变动的基本认识是由冬到夏西太平洋副高北移, 期间存在北跳过程。不过, 在晚春初夏季节转换时期西太平洋副高脊线的位置变动是否仍然服从上述规律还是另有新的特点, 目前研究较少。而这个问题有着特殊的重要性, 因为它与夏季风的爆发(Mao, et al, 2004)有关。本文正是针对这个问题展开研究的, 我们通过研究发现在晚春初夏季节转换时期西太平洋副高脊线的位置变动存在一次明显的南撤过程, 然后, 维持一段时间后再北进。这是一种与以往西太平洋副高脊线位置季节变动认识上完全不同的新特点, 非常值得深入研究。为此, 本文根据多年的逐日平均资料, 对晚春初夏季节转换时期西太平洋副高南撤过程的基本事实及其相关的气候要素场的基本特征进行了研究, 以期对西太平洋副高变动与夏季风爆发、东亚雨带变动等的关联及影响有进一步的认识。

2 资料和方法

本文使用的主要资料有 NCEP/NCAR(美国国家环境预测中心/国家大气研究中心)的逐日平均再分析资料, 基本的气象要素场为位势高度场(ϕ)、三维风场(u, v, ω)、温度场(T)和相对湿度场(f), 除相对湿度场是 8 层(1000、925、850、700、600、500、

400 和 300 hPa) 外, 前 5 个变量为 12 层(1000、925、850、700、600、500、400、300、250、200、150 和 100 hPa)。此外, 还用到 NOAA(美国国家海洋大气局) 的逐日向外长波辐射(OLR) 资料和 CAMP 全球逐候降水资料。所用资料的水平分辨率均为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 经纬度, 时间段均为 1979 年 1 月—2006 年 12 月。本文主要是讨论晚春初夏西太平洋副高南撤的气候学特征, 所以, 分析的场均是气候平均状况。如不特殊说明, 本文中的气候平均均是指 1979—2006 年 28 年的平均。

采用丑纪范等(2001, 2002) 提出的东西风交界面来表征副高脊线位置的思想, 利用文献(李建平, 1998; 占瑞芬等, 2004) 提出的方法来判断脊线, 即在副热带地区利用 $u=0$ 和 $\frac{\partial u}{\partial y} > 0$ 的线来讨论副高脊线位置的移动特征。为了消除可能的瞬变运动, 对所得的西太平洋副高脊线的时间序列进行了 5 年滑动平均。

3 晚春初夏西太平洋副高脊线变化

图 1 给出了对流层不同高度上气候平均的西太平洋副高脊线逐日位置随时间的变化。由图可见, 在由冬季型向夏季型转变过程中, 西太平洋副高脊线位置变化不是简单的由南向北的持续移动, 而是在 5 月前后, 在对流层不同层次上存在一次突然的南撤过程, 持续一段时间后, 再快速北进。在季节转换期间西太平洋副高脊线突然南撤过程呈现以下几个明显的特征: (1) 这种现象在对流层低层和高层最为显著, 南撤幅度可达 5 个纬度, 而中层(500—400 hPa) 的幅度不大。(2) 高层脊线的南撤过程明显早于低层的, 大约早 20 多天。在 200 hPa, 4 月中旬西太平洋副高脊线大约维持在 12°N 附近, 4 月 24 日之后迅速南撤, 至 5 月 3 日左右达到最南端, 约在 8.5°N 附近, 之后, 迅速北上, 高层副高脊线发生第一次北跳。850 hPa, 在 4 月到 5 月上旬西太平洋副高脊线从 21°N 附近持续缓慢北进至 22.5°N 附近, 5 月 13 日之后迅速南撤, 至 5 月 26 日左右达到最南端, 约 17°N 附近, 南撤达 5.5 个纬度之多。之后, 低层副高脊线发生第一次北跳。(3) 如果把副高脊线南落到最南端的日期定义为南撤过程的结束日, 之后北跳回到南撤前的纬度位置的日期定义为副高脊线的返回日, 那么从图 1 可见 200 hPa 副高脊线南撤过程后

的返回日为 5 月 13、14 日, 正好对应 850 hPa 脊线南撤过程开始。这说明高层脊线南撤过程为低层脊线南撤过程提供很好的预示信号, 是有预报意义的。(4) 对对流层低层来说, 在脊线返回日附近, 副高脊线有一个短暂的停滞, 然后低层副高脊线发生第 2 次北跳。

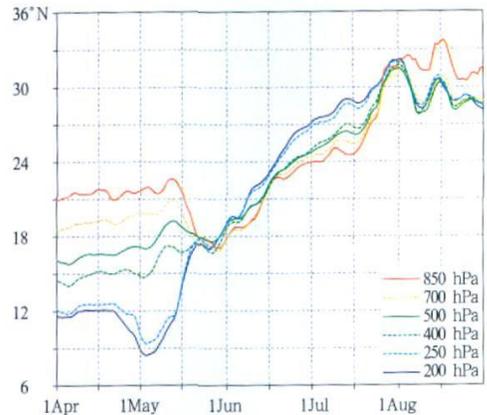


图 1 $120^{\circ}-140^{\circ}\text{E}$ 内对流层不同高度上气候平均(1979—2006 年) 的西太平洋副高脊线逐日位置的时间-纬度剖面

Fig. 1 Time-latitude section of the climatological daily mean latitude of the western Pacific subtropical high (WPSH) ridge over $120^{\circ}-140^{\circ}\text{E}$ at different levels in the troposphere for the period 1979–2006

为了客观和定量地描述副高脊线的南撤过程, 特做如下定义。记 D 表示时间(单位为天), 如果从第 D 天之后副高脊线连续南撤 5 天以上且到达最南端时南撤幅度至少达到 2 个纬度则定义为副高发生了一次南撤过程, 第 D 天为南撤过程的开始日, 此时脊线所在纬度为南撤的起始位置, 脊线达到最南端所对应的纬度定义为南撤边界, 起始位置和南撤边界之差称为南撤幅度, 到达南撤边界的时间为南撤过程的结束日。南撤过程结束日和起始日之差称为南撤过程的生命时间, 南撤过程结束日和脊线返回日的时间长度称为返回期。由于副高南撤过程在不同的层次上有先后, 所以, 具体分析应针对所讨论的层次。

从晚春初夏气候平均西太平洋副高($120^{\circ}-140^{\circ}\text{E}$) 南撤过程特征量统计情况(表 1) 可见, 在气候学意义下, 晚春初夏西太平洋副高南撤过程基本特点是: (1) 南撤过程主要发生在对流层低层和高层。西太平洋副高脊线在对流层中层(500—300 hPa) 存在南北摆动(图略), 但幅度小于 2 个纬度。

(2) 对流层高层内或者低层内南撤过程在时间上有一定的同步性, 上层明显早于下层。在对流层高层内南撤过程基本始于 4 月 21 日左右, 到达最南端的时间即南撤过程的结束日是 5 月 3 日左右, 之后脊线北进, 脊线返回日为 5 月 14 日左右。在低层南撤过程上述时间分别为 5 月 13 日、5 月 29 日和 6 月 14—17 日。高层南撤过程开始时间比低层的早 3 周多。与前面的结果一致, 高层南撤过程返回日即为低层南撤过程的开始。这是非常有意义的信号, 可以用高层南撤过程的时间来对低层南撤过程的变化做出一定

的预测。(3) 低层南撤过程的生命期比高层的略长。高层南撤过程的生命期一般约为 2 周, 低层的则为 2 周多。(4) 无论高层还是低层, 南撤过程的生命期和脊线返回期的时间长度基本是相近的, 这蕴含着利用南撤过程的时间可以对脊线返回日的预测提供一个有用的信息。

根据上面的分析, 在晚春初夏发生的西太平洋副高脊线突然南撤过程是季节转换期间一个非常有趣的现象, 很有必要进一步分析与其有关的一般环流结构及与季节转换的关联。

表 1 晚春初夏气候平均西太平洋副高(120°—140°E)南撤过程特征量统计
Table 1 Climatological statistics on the southward retreat process of the western Pacific subtropical high (120°—140°E) during late-spring and early-summer

层次 (hPa)	起始日 (月. 日)	结束日 (月. 日)	返回日 (月. 日)	起始位置 (°N)	南撤边界 (°N)	生命时间 (d)	返回期 (d)	南撤幅度 (°)
850	5. 13	5. 29	6. 17	22. 6	17. 1	16	19	5. 5
700	5. 13	5. 29	6. 14	20. 8	16. 8	16	16	4. 0
600	5. 13	5. 28	6. 12	20. 3	17. 3	15	15	3. 0
250	4. 21	5. 3	5. 15	12. 6	9. 3	12	12	3. 3
200	4. 21	5. 3	5. 14	12. 0	8. 4	12	11	3. 6
150	4. 19	5. 3	5. 14	12. 0	8. 6	14	11	3. 4

4 晚春初夏西太平洋副高南撤过程的基本气候学特征

4.1 基本特征

图 2a 给出了气候平均的西太平洋地区(120°—140°E)向外长波辐射(OLR)、850 和 200 hPa 西太平洋副高脊线位置的季节变化。由图可见, 除了夏季, 在西太平洋地区近地面空气下沉的中心区位于 850 和 200 hPa 西太平洋副高脊线之间, 而夏季副高脊线则基本位于近地面下沉中心区的北侧。在冬季, 西太平洋地区近地面空气下沉区的南北宽度很宽, 随着季节的发展, 从冬季到初夏, 下沉区向南移动, 直到对流层低层西太平洋副高南撤过程结束, 此时, 近地面下沉中心到达最南端(在 15°N 以南), 然后, 西太平洋地区近地面下沉区的南北宽度变得很窄, 强度也大幅减小, 说明此时在西太平洋地区有较强的对流活动(特别是副高南北两侧), 是南海季风爆发的一个征兆。当下沉中心强度到达最小并再度回升的时候, 西太平洋地区对流层下层副高脊线返回期开始, 低层副高发生第一次北跳。

由图 2b 可知, 在西太平洋地区对流层上层(如 200 hPa)副高的强度在冬季是一年中最弱的, 比较稳定, 介于 1245—1246 dagpm; 进入 4 月份, 在上层

副高南撤过程之前, 其强度迅速增长, 在南撤过程和脊线返回期间保持稳定, 在 1247—1248 dagpm, 之后, 其强度再度迅速增长, 在夏季期间达到最强(1249—1250 dagpm), 随后迅速减弱。在对流层下层西太平洋地区(如 850 hPa)副高的强度则表现出与上述完全相反的季节变化, 在 850 hPa 副高南撤过程前的 4 月和 5 月初 850 hPa 上副高强度迅速减少, 在南撤过程和脊线返回期间保持稳定, 介于 151—152 dagpm, 之后, 其强度再度迅速减少, 在盛夏(7 月中旬—8 月)达到最弱, 149—150 dagpm, 随后又迅速增强。这表明西太平洋地区上下层副高强度有反向的季节变化, 在上下层副高南撤过程前期、同期、返回期和后期都伴随着副高强度的显著变化。此外, 还有一个重要特征是, 在西太对流层低层副高南撤过程之前, 西太平洋地区的副高脊轴随高度向赤道倾斜, 在对流层低层西太平洋副高南撤过程开始时, 高、低层副高脊线相向而行, 位置迅速靠拢, 脊轴的南倾减少, 至 5 月 21 日到低层副高到达南端点日(5 月 29 日), 脊轴几乎垂直, 之后, 脊轴倾斜发生反转, 开始北倾。从后面的分析可知, 西太平洋副高脊轴倾斜方向是由气温经向梯度决定的, 而且这种倾斜方向的季节反转时间比南海季风爆发的时间要晚。

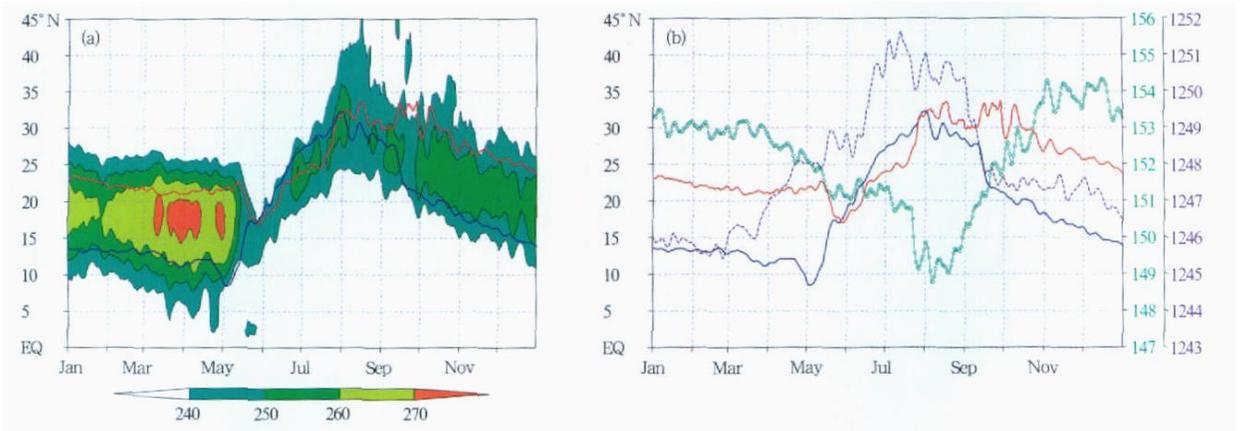


图2 (a) 120°—140°E 内气候平均(1979—2006年)向外长波辐射(OLR, 阴影, 单位: W/m^2)、850 hPa(红线)和 200 hPa(蓝线)西太平洋副高脊线位置的季节变化; (b) 850 hPa 副高脊线(红线)及其上位势高度(圆圈线, 右边第 2 个 y 轴)和 200 hPa 副高脊线(蓝线)及其上位势高度(紫虚线)的季节变化(单位: dagpm, 最右 y 轴)

Fig. 2 (a) Time-latitude section of the climatological daily mean OLR (shaded, unit: W/m^2), 850 hPa WPSH ridge latitude (red line) and 200 hPa WPSH ridge latitude (blue line) over 120°—140°E from 1979 to 2006. (b) Seasonal variation of the 850 hPa WPSH ridge latitude (red line) and the corresponding potential height (unit: dagpm) (open circle line, the right y-axis), and the 200 hPa WPSH ridge latitude (blue line) and the corresponding potential height (purple dashed line, the rightmost y-axis)

为了表明西太平洋副高南撤和其西伸或东退的可能关联, 图 3 给出了 5 月 850 hPa 上 ($115^{\circ}-140^{\circ}E, 15^{\circ}-25^{\circ}N$) 区域内的平均涡度变化。由图可见, 伴随着副高南撤, 该区域内的负涡度从 5 月 11—19 日迅速增加, 并在 5 月 18 日左右达到一个相对稳定的状态。这说明晚春初夏季节变换期间, 低层西太

副高南撤的同时伴随着一次显著东退过程。这与祝从文等(2004)研究初夏季节转换中西太平洋副高有东移的特征一致。因此, 对对流层低层来说这次南撤过程亦可称为南撤东退过程。

4.2 水平环流、对流活动及降水场特征

图 4、5 和 6 分别给出了气候平均的对流层低层副高南撤过程时 850 hPa 的平均流场、OLR 场和 CAMP 降水场的分布。由图可见如下特征:

在 850 hPa 西太平洋副高南撤发生前 1 旬(图 4a), 副高脊线在印度半岛到孟加拉湾一带发生断裂, 在印度半岛和孟加拉湾地区为气旋性环流所控制, 并在印度半岛以东有一强低压槽(印缅槽)存在, 槽呈东北—西南走向, 印度半岛上盛行西北风, 热带赤道印度洋为强的西风气流, 而在安达曼海和孟加拉湾地区盛行西南风, 亚洲夏季风已在该地区爆发。西太平洋副高脊线呈东北—西南走向, 西伸到中南半岛西南部地区, 南海及中南半岛被西太平洋副高所控制, 在南海大部分地区是东南风, 南海季风处于酝酿阶段。在这个时期, 强对流中心 ($OLR < 210 W/m^2$) 出现在苏门答腊岛和安达曼海, 在西太平洋地区 $10^{\circ}S-10^{\circ}N$ 内也是较强对流活动 ($OLR < 240 W/m^2$) 的地区(图 5a), 因此, 对应的雨带中心也出现在上述地区(图 6a)。此外, 平行于西太平洋副

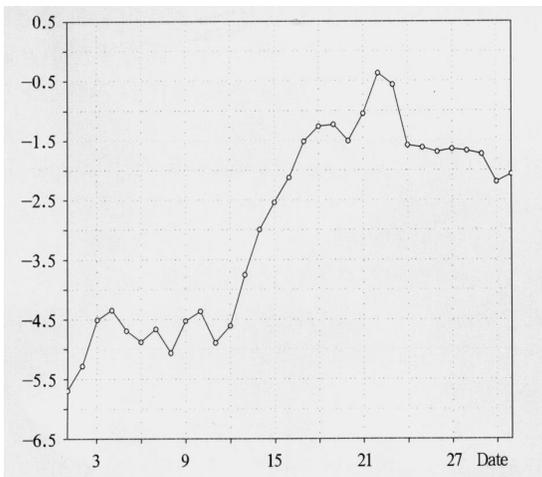


图3 5月 850 hPa ($15^{\circ}-25^{\circ}N, 115^{\circ}-140^{\circ}E$) 区域平均涡度的逐日气候变化(单位: $10^{-5} m^2/s$)

Fig. 3 The climatological daily variation of areal mean vorticity over the area ($15^{\circ}-25^{\circ}N, 115^{\circ}-140^{\circ}E$) in May (unit: $10^{-5} m^2/s$)

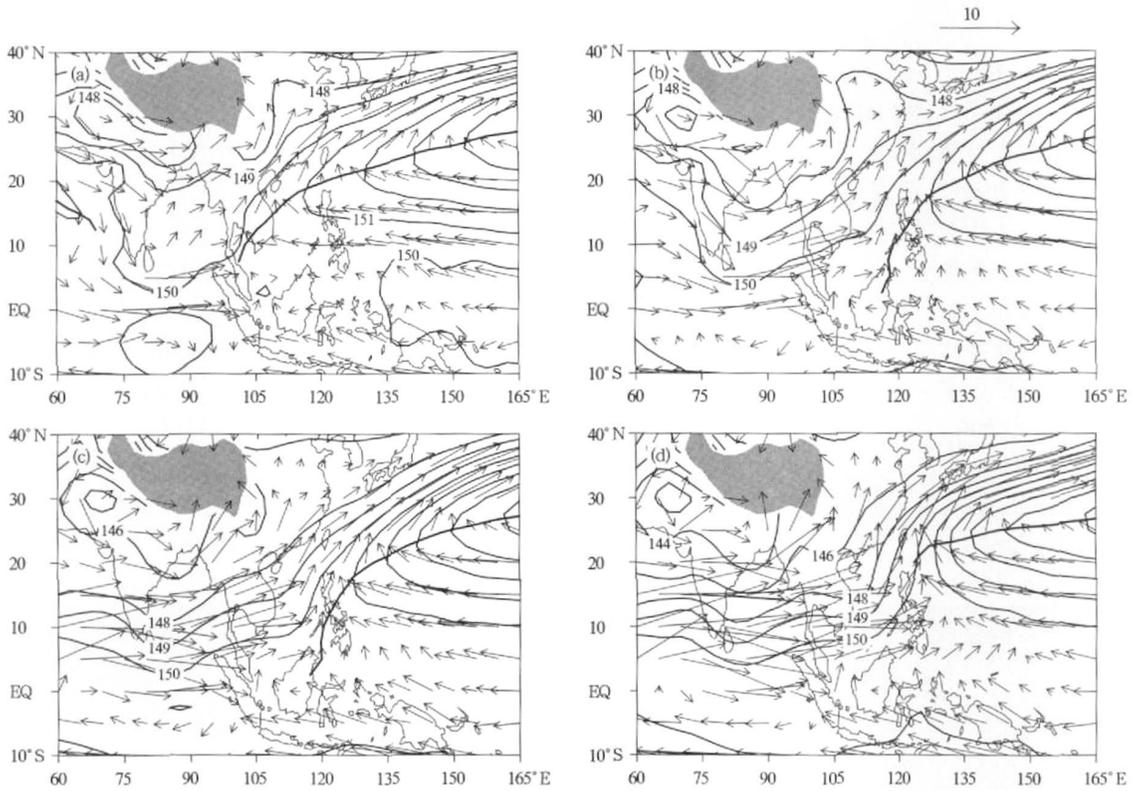


图4 850 hPa 气候平均场上西太平洋副高南撤过程不同时期的环流分布

(a. 5月4—13日, b. 5月14—29日, c. 5月30日—6月17日, d. 6月18—27日; 矢量为风场(单位: m/s), 等值线为位势高度场(单位: dagpm), 粗实线是副高脊线, 阴影区为高度大于3 km的地形)

Fig. 4 Climatological mean 850 hPa horizontal circulation from 1979—2006 for the four periods related to the WPSH southward retreat: (a) the previous period (May 4—13); (b) the southward retreat stage (May 14—29); (c) the return stage (May 30—June 17); (d) the subsequent period (June 18—27)

(The vectors denote winds (unit: m/s), the contours the 850 hPa geopotential height, the thick solid lines the subtropical high ridges, and the shaded area the higher than 3 km terrain)

高脊线以北约10个纬度的地区存在一个较弱的雨带轴线(图6a), 基本位于中国南方顺东南沿海向西北方向延伸到日本以南的西北太平洋。

在850 hPa西太平洋副高南撤期(图4b), 西太平洋副高大幅南撤东退, 副高西伸脊点由中南半岛东移到菲律宾地区, 在南海出现一槽, 呈西北—东南向, 105°E附近的越赤道气流明显增强, 南海地区盛行西南风, 标志着南海季风爆发。同时, 印缅大槽加深, 槽呈南北走向, 处于槽后的印度半岛仍为西北风控制。由图5b可知, 此时, 前期位于苏门答腊岛和安达曼海地区的强对流区向北、向西和向东扩张, 强度变强, 范围扩大, 对应的降雨带明显北移, 在阿拉伯海东南部也有降雨中心(图6b)。南海地区也在

较强的对流活动控制之下, 且在菲律宾及其以西地区有对流活动中心存在(图5b), 并有较强降雨中心(图6b)。随着西太平洋副高的南撤, 其北侧的雨带轴线也明显南移(图6b), 约南移5个纬度; 同时, 由于西太平洋副高南压, 西太平洋地区10°S—10°N内的对流活动明显减弱(图5b), 对应的降雨也明显减弱(图6b)。

在850 hPa西太平洋副高南撤结束后的返回期(图4c), 平均环流总体上也与南撤期非常类似, 只是南海槽加深, 印缅大槽加深, 后者槽向由原来的呈东北—西南变为西北—东南向, 印度夏季风开始爆发。在安达曼海、阿拉伯海东南部、南海地区的对流活动全面扩张、加强、北移, 印度半岛南部也在强的

对流活动控制之下(图 5c), 雨带中心覆盖了整个孟加拉湾、阿拉伯海东南部、印度半岛南部、中南半岛以及中国南海(图 6c)。此外, 在返回期, 随着脊线逐渐北移, 其北侧的雨带轴线北移, 基本回到西太平洋副高南撤前的位置(图 6c), 同时, 西太平洋副高脊线以南的热带地区的对流活动又重新加强(图 5c), 对应雨带也显著增强(图 6c)。

在 850 hPa 西太平洋副高返回期后 1 旬, 西太平洋副高脊线第一次北跳至 20°N , 近乎呈东西走向, 其西部、西北部的西南风进一步加强和稳定维持(图 4 d), 西太平洋副高脊线南北两侧的对流活动都加强并北移, 北侧的一支位于长江中下游向西北延伸至韩国和日本一带(图 5d), 并伴随有强的降雨带(图 6d), 在长江流域中下游、韩国和日本地区东亚夏季风爆发。此外, 西太平洋副高脊线南侧降雨带

的强度加强更为显著, 轴线呈西北—东南走向(图 6d)。

图 7 是 ($90^{\circ}-105^{\circ}\text{E}$) 和 ($105^{\circ}-120^{\circ}\text{E}$) 区域平均纬向西风 4—7 月的气候学演变。很明显, 在对流层高层西太平洋副高南撤过程之中即 4 月底, 夏季风在安达曼海和临近孟加拉湾爆发(图 7a), 而在对流层低层西太平洋副高南撤过程开始后, 南海夏季风开始爆发(5 月 14—15 日), 这与上面的结果一致。

综上所述, 晚春初夏的西太平洋副高南撤过程与亚州夏季风爆发、强对流活动和降雨带的发展、扩张、移动紧密相关。并且, 在西太平洋副高脊线南北两侧均存在两支强的降雨带, 与副高主体控制的少雨带构成一个典型的“湿干湿”三明治雨型, 这个雨型的结构、特征和强度变化也与西太平洋副高脊线的移动有关; 平均而言, 南侧雨带的强度比北侧强。

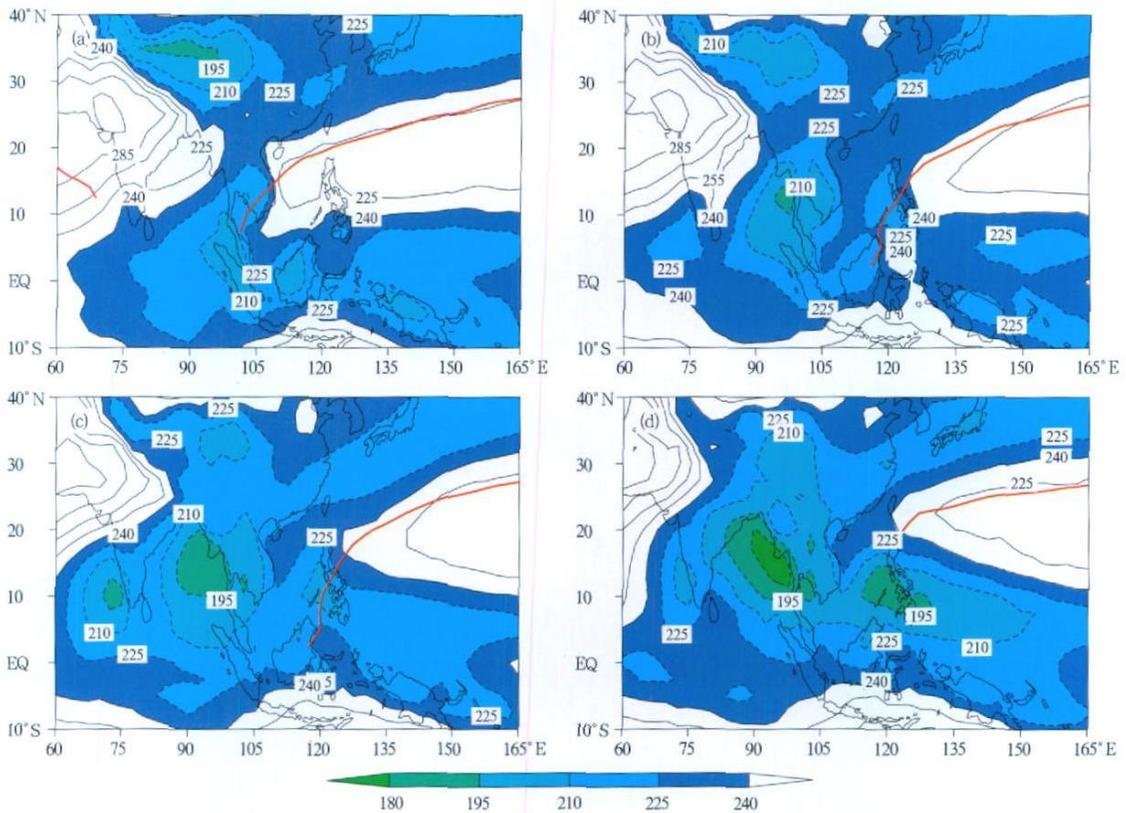


图 5 同图 4, 但对向外长波辐射场(OLR, 单位: W/m^2 ; 红实线为副高脊线)

Fig. 5 As in Fig. 4, but for OLR (unit: W/m^2 ; The thick red lines represent the subtropical high ridge)

4.3 垂直结构

为了进一步了解晚春初夏西太平洋副高 ($120^{\circ}-140^{\circ}\text{E}$) 南撤过程期间副高脊轴随高度的变

化特征, 图 8 给出了晚春初夏与对流层高层 (200 hPa) 和低层 (850 hPa) 西太平洋副高南撤过程相关联的不同时期, $120^{\circ}-140^{\circ}\text{E}$ 内平均副高脊垂

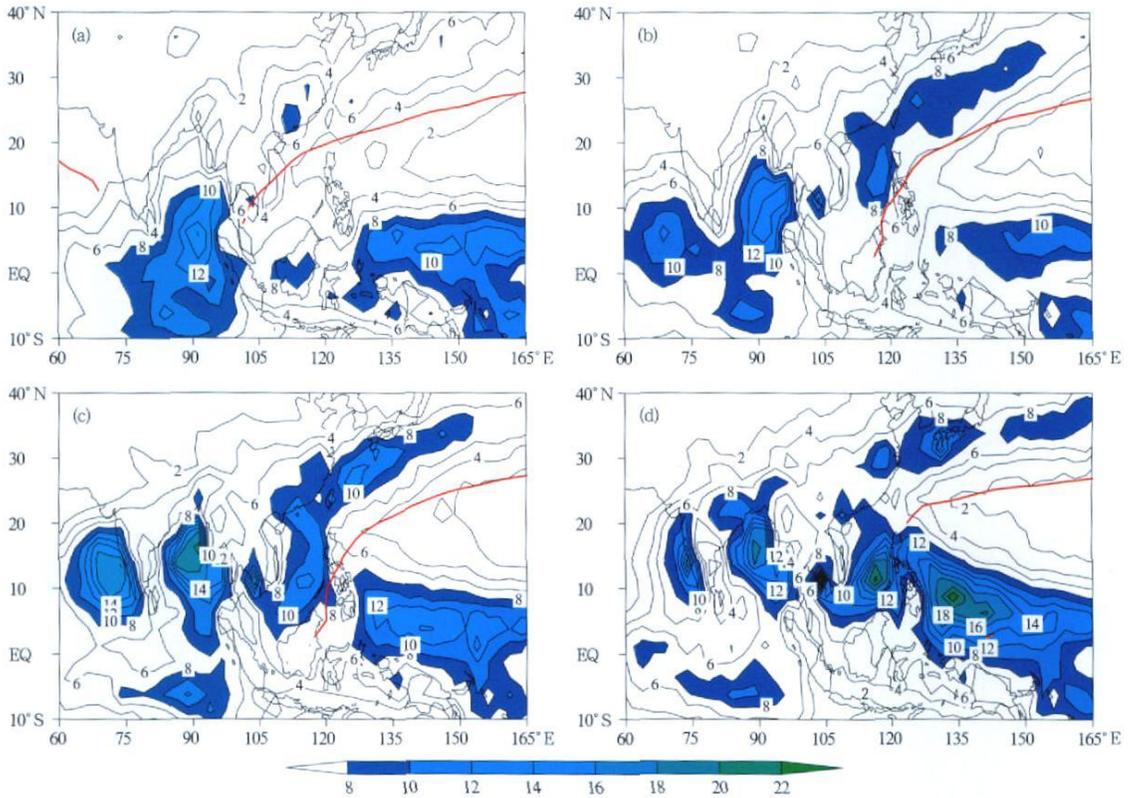


图6 同图5, 但对 CAMP 的降水场(单位: mm/d)

Fig. 6 As in Fig. 5, but for CAMP precipitation (unit: mm/d)

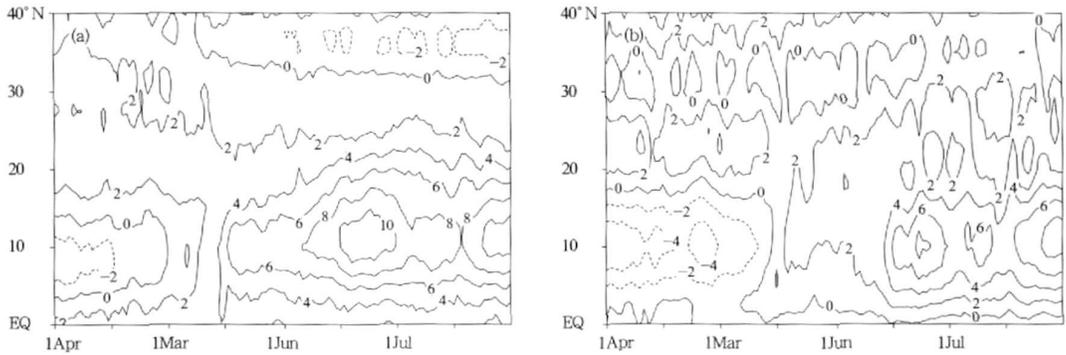


图7 气候平均 850 hPa 场上区域纬向平均纬向西风 4—7 月的时间-纬度剖面

(a. $90^{\circ}-105^{\circ}\text{E}$, b. $105^{\circ}-120^{\circ}\text{E}$)

Fig. 7 Time-latitude section of the 850 hPa climatological mean zonal wind in 1979—2006, averaged zonally over (a) $90^{\circ}-105^{\circ}\text{E}$, and (b) $105^{\circ}-120^{\circ}\text{E}$

直廓线的演变。在对流层高层西太平洋副高南撤前期 4 月 11—20 日, 副高脊垂直廓线位置稳定少变, 并向赤道倾斜。在 200 hPa 副高脊线南撤期(4 月 21 日—5 月 3 日), 对流层上层西太平洋副高南撤明显, 下层基本不动, 同时, 200 hPa 以上副高脊垂直

廓线由南倾变为北倾。在 5 月 4—13 日, 对流层上层西太平洋副高处于返回期, 脊线北进。在 5 月 14—29 日, 以 600—700 hPa 为界, 在上层副高脊线北进的同时, 下层脊线南撤显著, 在 200—850 hPa 副高脊轴随高度接近垂直但稍向南倾。在 5 月 30

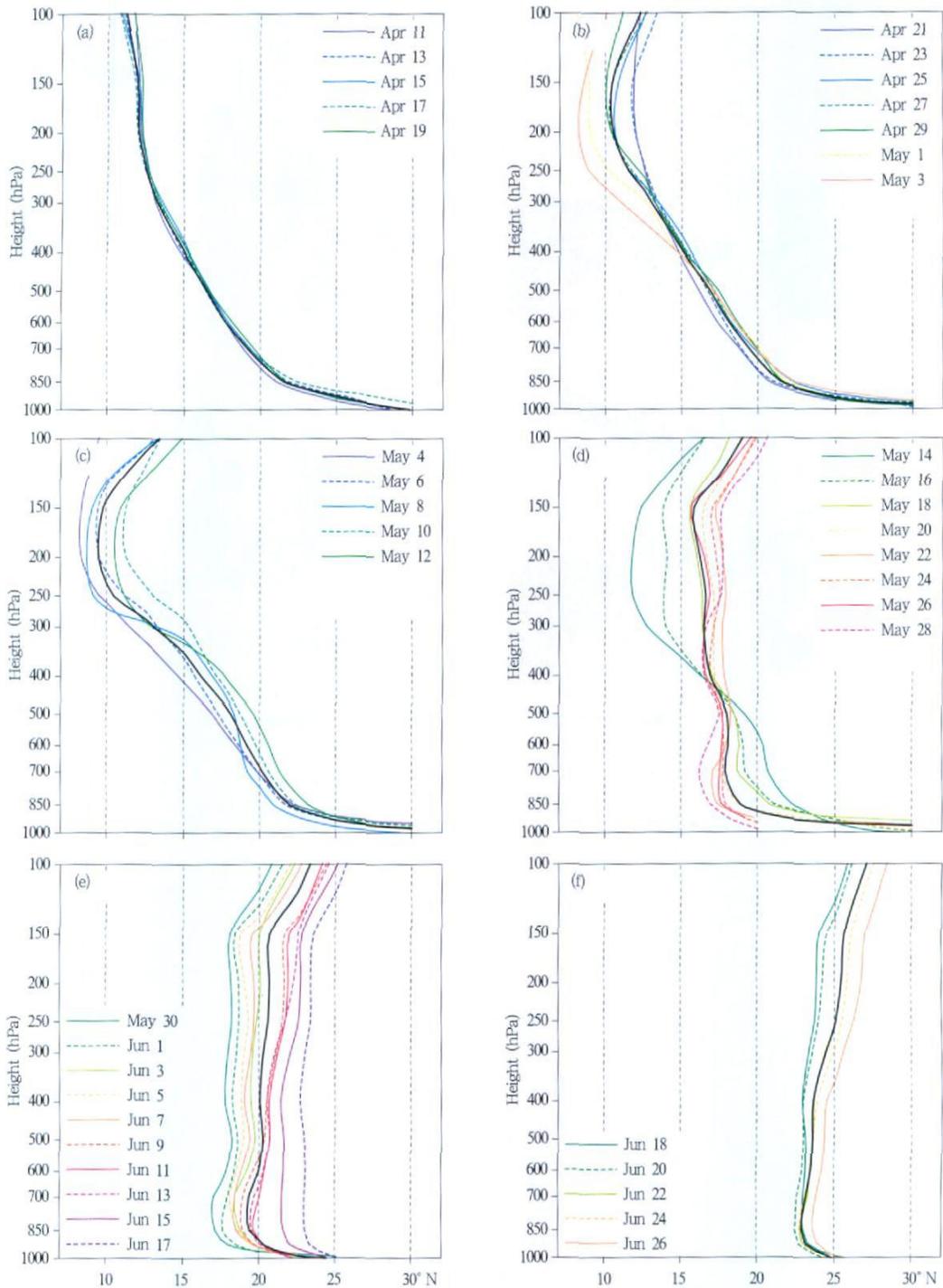


图 8 晚春初夏对流层高层(200 hPa)和低层(850 hPa)西太平洋副高南撤过程的不同时期, 125°—140°E 内副高脊轴的气候学演变(a、b 和 c 分别是 200 hPa 副高脊线南撤前期 4 月 11—20 日、南撤期 4 月 21 日—5 月 3 日、返回期 5 月 4—13 日; d、e 和 f 分别是 850 hPa 南撤期 5 月 14—29 日、返回期 5 月 30 日—6 月 17 日和后期 6 月 18—27 日。图中黑线是对应时期内的平均副高脊轴)

Fig. 8 Climatological evolution of the subtropical high ridge axis over (120°—140°E) in the WPSH southward retreat process during late spring and early summer. (a), (b) and (c) are respectively the previous period April 11—20), southward retreat stage (April 21—May 3) and return stage (May 4—13) of the 200 hPa WPSH southward retreat process; (d), (e) and (f) are respectively the southward retreat stage (May 14—29), return stage (May 30—June 17) and subsequent period (June 18—27) of the 850 hPa WPSH southward retreat process. (The black solid lines are the mean WPSH ridge axis for the corresponding periods)

日—6月17日, 整层副高脊垂直廓线均北移, 并且由南倾向北倾, 副高脊轴倾斜发生反转, 下层脊线南撤结束。在6月18—27日, 即西太平洋副高南撤过程结束后, 副高脊轴随高度明显北倾, 与前期南倾显著不同。此外, 在上述6个阶段中, 对应时期内的平均副高脊垂直廓线基本可以代表该时期内副高脊轴随高度的变化特征。

为了解释西太平洋副高南撤过程期间副高脊轴随高度的变化特征与热力学的关联, 需要揭示副高脊轴随高度的倾斜与热力梯度的关系。现在我们探讨一个普遍性的问题。定义同一种气压系统在各个高度上中心点的连线称为气压系统的中心轴线, 如果是高压系统称为高压脊轴, 低压系统称为低压槽轴。对于热力不对称的气压系统, 在经向切面上, 中心轴线相对于垂直轴的斜率为

$$k_y = \frac{\partial y}{\partial z} = -\frac{1}{T} \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_p \left\| \left(\frac{\partial^2 z}{\partial y^2} \right)_p \right.$$

在纬向切面上可有类似结果, 只不过把上述中所有符号 y 变成 x 即可。对于高压脊轴, $\left(\frac{\partial^2 z}{\partial y^2} \right)_p < 0$, $\left(\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} \right)_p < 0$, 故其向暖区倾斜。对于低压槽轴, $\left(\frac{\partial^2 z}{\partial y^2} \right)_p > 0$, $\left(\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} \right)_p > 0$, 故向冷区倾斜。对热力对称的气压系统, 则其中心轴线是垂直的。值得注意的是上述结论适用于普遍的高压系统和低压系统, 并不限于副高系统。

图9给出了西太平洋地区(120° — 140° E)与图7对应时段的气温经向梯度的纬度—气压剖面。由图可见, 西太平洋副高南撤过程期间副高脊轴随高度的变化与气温经向梯度的分布有很好的对应关系, 当副高脊轴处于不对称的热力系统中, 其脊轴随高度的变化清楚地呈现出向暖区倾斜的特征, 当副高脊轴处于对称的热力系统中即处于高温中心或低温中心处, 其脊轴呈垂直状态。在对流层高层西太平洋副高南撤前1旬(图9a), 在150 hPa以下副高脊处于负温度经向梯度区, 温度梯度零线在其南侧, 约在 0° — 10° N, 表明高温中心在 0° — 10° N, 所以, 副高脊轴向赤道倾斜; 在150—100 hPa, 副高脊与低温中心基本重合, 因此, 呈基本垂直状态。之后(图

9b—f), 200 hPa以上的副高脊处于正温度经向梯度区, 温度梯度零线在其南侧, 表明暖区在北, 因此, 对流层高层西太平洋副高脊轴向北倾斜。在对流层低层西太平洋副高南撤期(图9d), 200 hPa以下高温中心明显北移, 暖轴呈垂直状态, 200 hPa以下副高脊轴处于非常弱的负温度经向梯度区, 也几乎呈垂直状态(有非常弱的南倾), 而在对流层低层西太平洋副高南撤后的返回期(图9e), 200 hPa以下高温中心进一步显著北移, 暖轴随高度呈弱的北倾状态, 此时, 200 hPa以下副高脊轴也呈弱的北倾。在对流层低层西太平洋副高返回期后(图9f), 200 hPa以下高温中心进一步北移, 暖轴随高度呈明显北倾, 此时, 副高脊轴基本都处在正的温度经向梯度区, 而温度梯度零线基本在其北侧, 表明暖区中心在脊线北侧, 因此, 其整体上呈现北倾。看来, 西太平洋副高脊轴由冬季型向夏季型的转变是由气温经向梯度决定的。

图10、图11分别给出了晚春初夏西太平洋副高南撤过程的不同阶段 120° — 140° E平均的垂直环流和相对湿度场经向剖面图。无论在哪个时段, 近地层的副高脊线总是与下沉中心对应(图10)。在西太平洋地区, 在北半球热带、副热带地区(0° — 40° N)内存在两个强的上升中心(图10)和两个湿轴(图11), 除了近地面, 它们分别位于副高体的南北两侧, 两个上升中心分别与两个湿轴对应, 从而在对应的地区有较强的降水, 这与前面图6所得到的西太平洋地区与副高相关联的典型“湿干湿”的三明治降雨型一致。不过, 脊线南侧上升气流强度总是比同时期北侧的强, 这就是为什么前面得到的三明治降雨型中南侧雨带的强度比北侧强(图6)的原因。随着时间的发展, 北侧上升气流的强度逐渐加强, 而南侧上升气流的强度除在对流层低层副高南撤期时有所减弱外(图10d), 也呈增强之势, 这些均与图6中三明治降雨型中雨带强度的变化所对应。此外, 在对流层低层副高南撤过程中及其以前, 北侧的上升轴和湿轴与副高脊轴在近地层内相交(图10a—10d, 图11a—11d); 在低层副高南撤结束后, 脊线南、北两侧的上升轴和湿轴基本与脊轴平行(图10e, 10f; 图11e, 11f)。

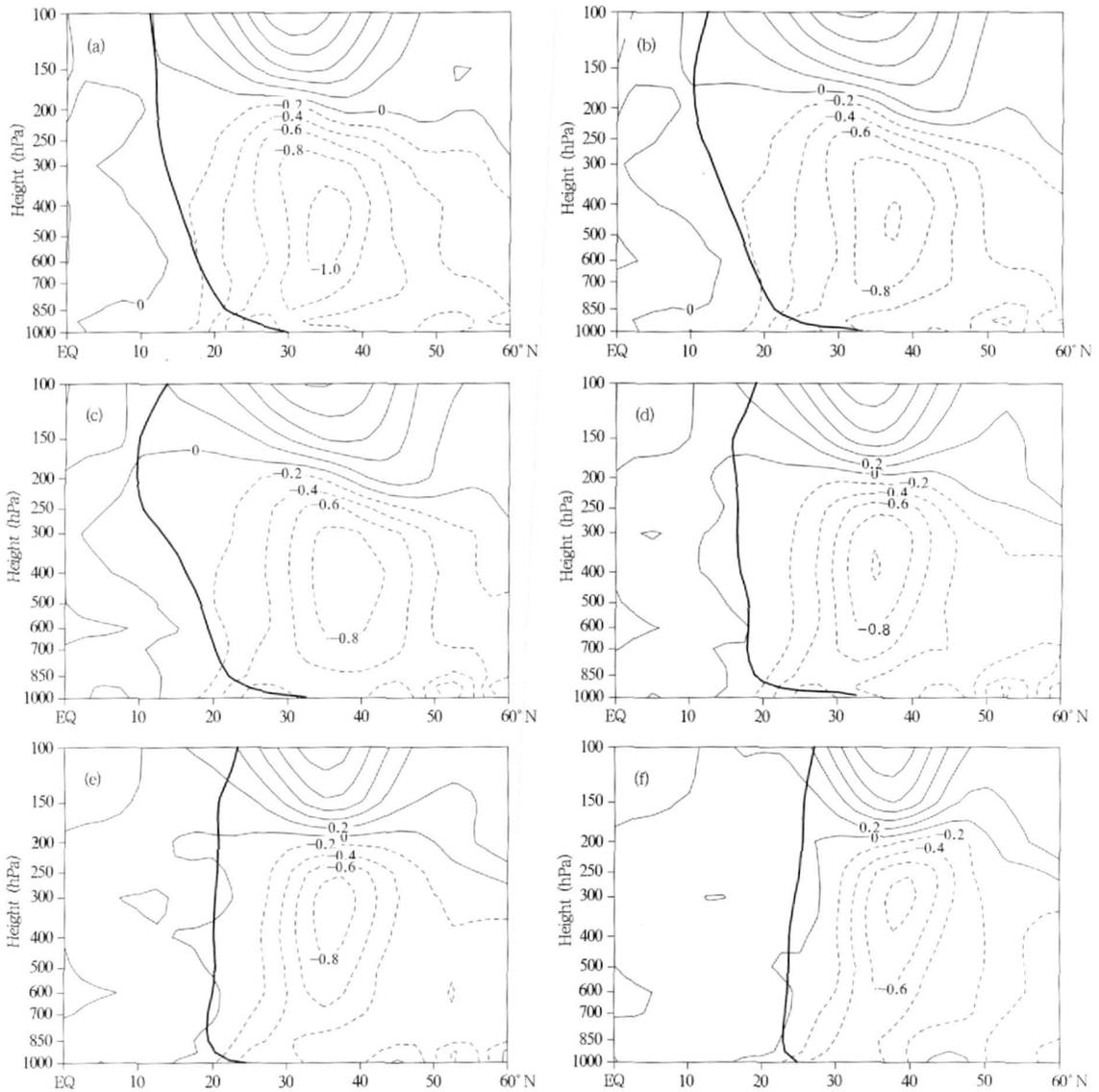


图9 同图8,但对气温的经向梯度场(单位:K;粗黑实线是平均副高脊轴)

Fig. 9 As in Fig. 8, but for the meridional gradient of air temperature (unit: K; The black solid lines represent the mean position of the WPSH ridge axis)

5 结论和讨论

本文利用 NCEP/NCAR 的常规逐日气象资料和 NOAA 的 OLR 与 CAMP 降水资料,从气候学角度探讨了晚春初夏季节转换期间西太平洋副高的活动特征,发现在这个时期西太平洋副高在向北移动过程中存在一次显著的南撤过程,进而研究了这次西太平洋副高南撤过程的基本气候学特征,结果表明:

(1) 晚春初夏西太平洋副高南撤过程在对流层

高层和低层最为显著,低层的南撤幅度可达5个纬度以上,高层则接近4个纬度。高层的南撤过程开始时间比低层的开始时间早3周多,高层的南撤过程结束时间比低层的开始时间早约1旬,这是一个非常有意义的前期信号。低层南撤过程的生命期为2周多,高层约为2周。南撤过程的生命时间和其返回期的长度基本相当。对低层来说,西太平洋副高南撤同时伴随着显著东退,因此,亦可称为南撤东退过程。

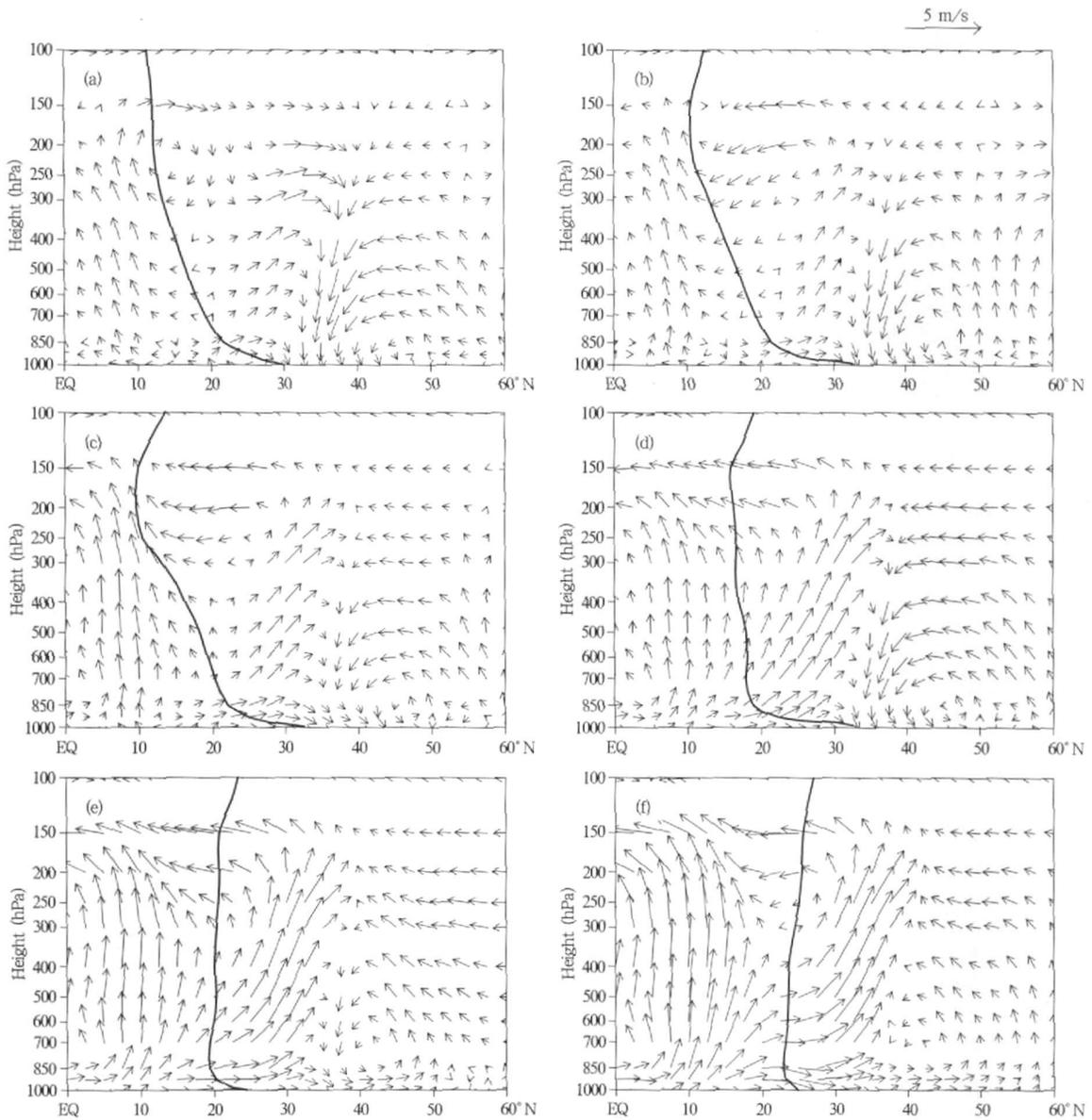


图 10 同图 9, 但对垂直环流场(单位: m/s)

Fig. 10 As in Fig. 9, but for the vertical circulation (unit: m/s).

(2) 晚春初夏西太平洋副高南撤过程的不同阶段都伴随着副高强度、西太平洋地区对流活动的显著变化。在低层副高脊线南撤到最南端时(约 5 月底), 副高脊轴倾斜发生反转, 由原来的南倾变为北倾。西太平洋副高脊轴倾斜方向是由气温经向梯度决定的, 因此, 副高脊轴倾斜的季节反转是由热力结构的季节变化决定的。进一步的理论分析表明: 对热力不对称的气压系统, 高压脊轴向暖区倾斜, 低压槽轴向冷区倾斜。

(3) 晚春初夏的西太平洋副高南撤过程与亚州夏季风爆发、强对流活动和降雨带的移动变化关系密切。在对流层高层西太平洋副高南撤过程的中后期(约 4 月底), 夏季风在安达曼海和临近孟加拉湾爆发, 强对流活动中心和雨带中心位于安达曼海和苏门答腊岛。在对流层低层西太平洋副高南撤过程开始后, 南海夏季风开始爆发(5 月 14—15 日); 在南撤结束后的返回期开始后(6 月初), 印度夏季风爆发; 在返回期之后(6 月中), 东亚夏季风爆发, 长

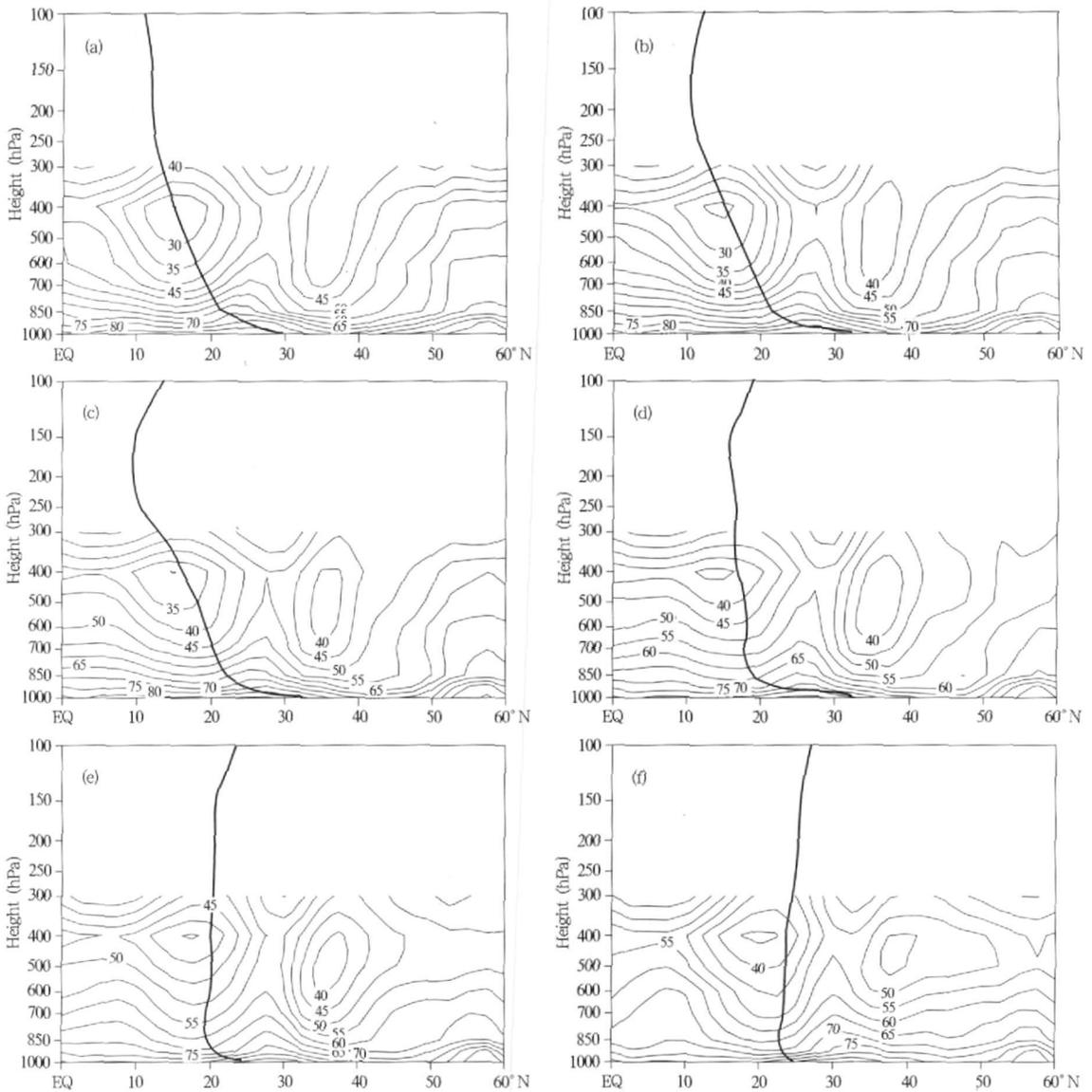


图 11 同图 9, 但对相对湿度场(单位: %)

Fig. 11 As in Fig. 9, but for the relative humidity (unit: %)

江中下游、韩国、日本的雨季开始。西太平洋副高南撤过程不同阶段的建立时间为预知亚洲不同地区夏季风的爆发时间提供了非常有用的信息。

(4) 在西太平洋副高脊线南北两侧约 10 个纬度处存在两支强的上升中心和两个湿轴, 上升中心与湿轴对应, 相应地区存在两支强的降雨带, 南支雨带的强度比北侧强, 与副高主体控制的少雨带构成一个典型的“湿干湿”三明治雨型, 这个雨型的结构、特征和强度变化与西太平洋副高脊线的移动有关。

从气候学角度探讨晚春初夏季节转换期间西太平洋副高南撤过程的事实和特征只是研究这种现象

的第一步, 与此相关的问题还很多, 比如: 副高南撤的动力学机制是什么? 西太平洋副高南撤过程的年际变化是怎样的? 从年际上说, 副高南撤过程的早晚与夏季风爆发早晚的关系如何? 副高南撤过程的典型和非典型个例特征差异如何? 南撤期间上下层副高系统的相互作用是怎样的? 晚春初夏西太平洋副高南撤对盛夏副高的发展以及夏季东亚旱涝有何影响? 晚春初夏期间西太平洋副高脊线南撤过程与秋季西太平洋副高脊线南撤过程的异同如何? 全球其他地区的副高在春夏过渡季节是否也存在着这样一次南撤过程? 大气环流数值模式对这次南撤过程

的模拟性能如何? 等等。这些都是有待于进一步研究的重要问题。

致谢: 感谢刘屹岷、毛江玉等研究员的有益讨论, 感谢冯娟在文字修订方面的帮助。

References

Dong Buwen, Chou Jifan. 1988. Actual analysis and theoretical simulation about position of subtropical highs over Western Pacific. *Acta Meteor Sinica* (in Chinese), 46(3): 361-364

Huang Shisong, Yu Zhihao. 1961. Studies on the structure of subtropical high pressure and a number of issues of associated general circulation. *Acta Meteor Sinica* (in Chinese), 31(4): 339-359

Li Jianping, Chou Jifan. 1998. Dynamical analysis on splitting of subtropical high-pressure zone-Geostrophic effect. *Chinese Sci Bull* (in Chinese), 43(15), 1285-1289

Liu Yimin, Wu Guoxiong. 2000. Reviews on the study of the subtropical anticyclone and new insights on some fundamental problems. *Acta Meteor Sinica* (in Chinese), 58(4): 500-512

Lu Riyu. 2002. Indices of the summertime western north Pacific subtropical high. *Adv Atmos Sci*, 19(6): 1004-1028

Mao Jianguy, Chan J C L, Wu Guoxiong. 2004. Relationship between the onset of the South China Sea Summer Monsoon and the structure of the Asian subtropical anticyclone. *J Meteor Soc Japan*, 82(3): 845-859

Mao Jianguy, Duan Anmin, Liu Yimin, et al. 2003. Change in the tilting of the ridgeline surface of the subtropical anticyclone and the predictability of the onset of the Asian summer monsoon. *Chinese Sci Bull* (in Chinese), 48(Sup2): 55-59

Mao Jianguy, Wu Guoxiong. 2002. Study on medal variation of subtropical high and its mechanism during seasonal transition part I: Climatological features of subtropical high structure. *Acta Meteor Sinica* (in Chinese), 60(4): 400-408

Miao Jinhai, Ding Minfang. 1985. The abrupt change, seasonal variation and subtropical high jump of atmospheric equilibrium state forced by heating. *Sci China (Series B)* (in Chinese), 1: 87-96

Qi Li, Zhang Zuqiang, He Jinhai, et al. 2008. Dynamical diagnosis on possible formation cause of climatological Western Pacific subtropical high double ridges process. *Chinese J Atmos Sci* (in Chinese), 32(2): 395-404

Song Zhenxin, Zhang Peiqun, Chou Jifan. 2001. Three-dimensional structural characteristics on the movement of subtropical ridge line. *Acta Meteor Sinica* (in Chinese), 59(4): 472-479

Tao Shiyan, et al. 1963. On the summer synoptic systems in the subtropics over China(in Chinese). Beijing: Science Press, 14

Tao Shiyan, Chen Longxun. 1987. A review of recent research on the East Asia summer monsoon over China // Chang C P, Krishnamurti T N. *Monsoon Meteorology*. New York: Oxford Univ. Press, 50-92

Tao Shiyan, Zhang Qingyun, Zhang Shunli. 2001. An observational study on the behavior of the subtropical high over the West Pacific summer. *Acta Meteor Sinica* (in Chinese), 59(6): 747-758

Wu Guoxiong, Chou Jifan, Liu Yimin, et al. 2002. Dynamics of the formation and variation of subtropical anticyclone (in Chinese). Beijing: Science Press, 314pp

Wu Guoxiong, Liu Huanzhu. 1999. Complete form of vertical vorticity tendency equation and slantwise vorticity development. *Acta Meteor Sinica* (in Chinese), 57(1): 1-15

Zhan Ruifen, Li Jianping, He Jinhai. 1998. Influence of the double ridges of West Pacific subtropical high on the second Meiyu over the Yangtze river valley during 1998. *Acta Meteor Sinica* (in Chinese), 62(3): 294-307

Zhan Ruifen, Li Jianping, He Jinhai. 2005. Climatological characteristics of the double ridges of subtropical high in the Northern Hemisphere. *Chinese Sci Bull*(in Chinese), 50(20): 2336-2341

Zhang Qingyun, Tao Shiyan. 1999. The study of the sudden northward jump of the subtropical high over the Western Pacific. *Acta Meteor Sinica* (in Chinese), 57(5): 539-548

Zhu Congwen, Chen Longxun, He Jinhai. 2004. The eastward propagating Western Pacific subtropical high and its relationships with large-scale circulation and temperature during spring to summer. *J Tropical Meteor* (in Chinese), 20(5): 493-504

附中文参考文献

董步文, 丑纪范. 1988. 西太平洋副热带高压脊线位置季节变化的实况分析和理论模拟. *气象学报*, 46(3): 361-364

黄土松, 余志豪. 1961. 副热带高压结构及其同大气环流有关若干问题的研究. *气象学报*, 31(4): 339-359

李建平, 丑纪范. 1998. 副热带高压带断裂的动力学分析-地转作用. *科学通报*, 34(3): 434-437

刘屹岷, 吴国雄. 2000. 副热带高压研究回顾及对几个基本问题的再认识. *气象学报*, 58(4): 500-512

毛江玉, 吴国雄, 刘屹岷. 2002. 季节转换期间副热带高压带形态变异及其机制的研究 I: 副热带高压结构的气候特征. *气象学报*, 60(4): 400-408

毛江玉, 段安民, 刘屹岷等. 2003. 副高脊面反转与亚洲夏季风爆发可预报性分析. *科学通报*, 48(增刊 2): 55-59

缪锦海, 丁敏方. 1985. 热力强迫下大气平衡态的突变与季节变化, 副高北跳. *中国科学(B辑)*, 1: 87-96

祁莉, 张祖强, 何金海等. 2008. 气候平均场上西太平洋副热带高压双脊线过程可能成因的动力诊断分析. *大气科学*, 32(2): 395-404

宋振鑫, 张培群, 丑纪范. 2001. 副热带高压脊线移动的三维结构特征. *气象学报*, 59(4): 472-479

陶诗言等. 1963. 中国夏季副热带天气系统若干问题的研究. 北京: 科学出版社, 14

陶诗言, 张庆云, 张顺利. 2001. 夏季北太平洋副热带高压系统的活动. *气象学报*, 59(6): 747-758

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. 北京: 科学出版社, 314pp

吴国雄, 刘还珠. 1999. 全型垂直涡度倾向方程和倾斜涡度发展. *气象学报*, 57(1): 1-15

占瑞芬, 李建平, 何金海. 2004. 西太平洋副热带高压双脊线及其对 1998 年夏季长江流域“二度梅”的影响. *气象学报*, 62(3): 294-307

占瑞芬, 李建平, 何金海. 2005. 北半球副热带高压双脊线的统计特征. *科学通报*, 50(18): 2022-2026

张庆云, 陶诗言. 1999. 夏季西太平洋副热带高压北跳及其异常的研究. *气象学报*, 57(5): 539-548

祝从文, 陈隆勋, 何金海. 2004. 春夏季节转换中西太平洋副热带高压东移与大尺度环流和温度场变化的关系. *热带气象学报*, 20(5): 493-504