

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^{*}

占瑞芬

(南京气象学院大气科学系, 南京, 210044; 中国科学院大气物理研究所, LASG, 北京, 100029)

李建平

何金海

(中国科学院大气物理研究所, LASG, 北京, 100029)

(南京气象学院大气科学系, 南京, 210044)

摘 要

利用 NCEP/NCAR 再分析资料、日本气象厅提供的 TBB 资料研究了 1998 年 7 月西太平洋副热带高压突然偏南的原因。结果表明, 西太平洋副高脊线突然“南撤”有其一定局限性, 事实上应是副热带高压脊线在南侧的一次“重建”过程。针对这次重建, 发现 1998 年 7 月上中旬在西太平洋副热带地区存在南北两个高压脊, 据此本文提出了副热带高压双脊线的概念, 并着重揭示了这次西太平洋副热带高压双脊线的基本演变特征、环流场和温湿场结构、可能的形成机制及其对 1998 年夏季长江流域“二度梅”的影响。分析表明西太平洋副热带高压双脊线时期具有与单脊线时期明显不同的环流特征和温湿场结构, 其北侧脊线附近的特征与传统上单脊线副热带高压的特征较一致, 但南侧脊线附近则更多的具有低纬度系统的特点; 这次双脊线过程与赤道缓冲带北上并与副热带高压打通合并变性及热带对流云团的演变有密切关系。此外, 文中还通过中国台站降水资料探讨了副热带高压双脊线的维持对中国东部雨型的影响, 指出西太平洋副热带高压双脊线的出现改变了原有的水汽输送路径, 从而在中国东部出现两条雨带, 呈倒 7 字型, 分别与副热带高压北、南侧脊线相对应。这些结果为西太平洋副热带高压演变规律和机制的研究提供了新的线索。

关键词: 西太平洋副热带高压, 双脊线, 二度梅, 赤道反气旋, 热带对流云团。

1 引 言

西太平洋副热带高压(简称副高)作为东亚季风环流系统中最重要的成员之一, 其高压脊线的南北位移动和西伸东退与中国的异常天气或气候的关系最为直接和密切。早在 20 世纪 60, 70 年代, 陶诗言等^[1~3]、黄土松等^[4, 5]就研究了副高的变化及其对中国天气的影响, 指出在副高的季节性南北移动中, 不是等速移变过程, 而是具有缓变式移动与跳跃式移动过程及摆动特征; 由冬到夏, 多数年份里副高存在两次北跳, 与中国夏季雨带的位置密切相关。近年来, 吴国雄、刘屹岷等^[6]通过建立“全型涡度方程”, 运用模拟和资料诊断研究了各副高单体的形成机制及其季节和年际变化, 得到了新的认识。丑纪

范及其合作者^[6~8]则利用东西风交界面来表征副高脊面位置, 运用动力模型结合资料分析研究了副高脊面的气候变异特征; 毛江玉等^[9]也通过对副高脊面的研究揭示出副高带断裂与季节转换和季风爆发存在密切的关系; 这些工作为副高的研究提供了一种新的思路。然而综观前人的研究成果, 可以发现, 人们对副高的研究大多只停留在单脊线特征上; 事实上, 在外部环境和周边环流的特定条件下, 在副热带地区同一经度上有时会出现双高压脊线的现象, 并且有的双脊线过程还会持续数天。比如, 1998 年 7 月 11 日, 在东亚—西太平洋副热带地区 500 hPa 层上清楚地呈现出南北两条高压脊线(图 1), 在东亚地区, 北侧的一条脊线位于 30°N 附近, 南侧的一条位于 15°N 附近, 这次双脊线过程出现于 7 月 8

^{*} 初稿时间: 2003 年 9 月 12 日; 修改稿时间: 2003 年 11 月 26 日。

资助课题: 国家自然科学基金项目 40135020 和 40275025。

日, 至 7 月 13 日结束, 持续了 6 d。这种持续现象的出现必然会对副高自身的变异及中国的天气或气候产生一定的影响, 然而副高双脊线现象至今却甚少。

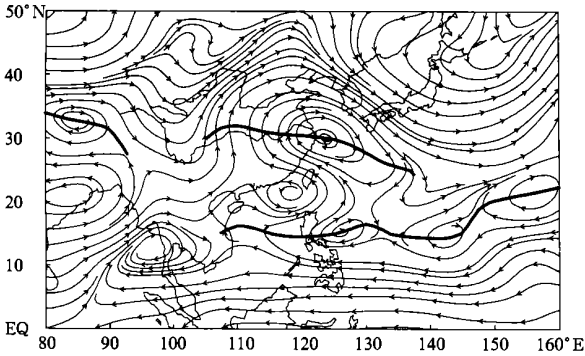


图 1 1998 年 7 月 11 日 500 hPa 流场分布
(粗实线为副高脊线)

Fig. 1 500 hPa stream field on July 11, 1998. The solid lines denote the ridge of subtropical high (SH)

1998 年夏季中国长江流域发生了历史上罕见的特大洪涝灾害, 分析其气候背景和大气环流特征不难发现, 西太平洋副高在这次过程中起了举足轻重的作用: 7 月中下旬副高脊线突然南撤停滞形成的“二度梅”是造成这次大洪水的重要原因之一^[10, 11]。关于 1998 年西太平洋副高异常的特征与原因, 前人已经进行了大量的探索, 取得许多重要的成果。这些研究成果总体上可以分为两类: 一是研究气候背景的异常对西太平洋副高的作用^[12~14], 如 ENSO 事件、青藏高原积雪等; 二是对大尺度大气环流异常特征的研究^[11, 15~19], 如中高纬环流异常、热带对流异常等等。然而, 从 1998 年 7 月逐日天气图上可以看到这样一个有趣的现象: 在“一度梅”结束、“二度梅”形成之前的梅雨间歇期, 西太平洋副高为单脊线结构, 且逐渐加强北抬, 之后由于南侧赤道缓冲带的北上并与副高打通合并, 副高南侧又出现一个新的高压脊线, 即西太平洋副高出现双脊线特征, 继而北侧脊线减弱消失(北侧副高脊线就是传统上的副高单脊线, 其消失认为与前人观点是一致的, 因此本文不作重点探讨), 南侧脊线发展维持, 长江流域开始“二度梅”。经过进一步的资料分析发现^①, 这种副高双脊线现象并不是 1998 年独有的特征, 而是几乎每年都有, 有的年份甚至很常

见, 因此, 副高双脊线是一个普遍存在的现象。那么, 和单脊线情况相比, 双脊线副高的环流结构和演变特征怎样? 有哪些独特的性质? 形成的原因是什么? 对夏季中国东部雨带有何影响? 能否从双脊线形成和消失的角度来分析副高的中短期进退活动? 本文从 1998 年个例出发, 对这些问题进行研究和探讨, 以期对副高的短期变异和 1998 年“二度梅”的形成原因作出新的解释。

2 资料和方法

本文使用的资料主要是 NCEP/NCAR 再分析数据集: 1998 年 7 月逐日 12 层标准等压面常规资料, 水平分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 经纬度, 全球共 144×73 个网格点, 基本要素为位势高度场(ϕ)、三维风场(u, v, ω)、温度场(T)、相对湿度场(RH)。此外, 还使用了日本气象厅提供的 1998 年逐日 TBB 资料(分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 经纬度)和中国气象局提供的中国 740 站逐日降水资料。

水平气压梯度力与水平科氏力保持基本平衡, 即准地转平衡关系是中高纬大尺度大气运动的一个基本性质。资料诊断分析表明^[20], 除了在 $5^\circ \text{S} \sim 5^\circ \text{N}$ 的赤道带, 大尺度大气运动在低纬度也以很高的精度满足经向科氏力与经向气压梯度力基本平衡的地转关系(即半地转关系)。根据这个关系可以确定在东西风交界面处正好是气压极值所在的地方。在赤道带外, 由纬向风所满足的地转关系

$$f u = - \frac{\partial \phi}{\partial y} \quad (1)$$

可知, 在纬向风等于零的地方是位势高度在经向上取得极值的地方, 而极值的性质由二阶导数决定。由式(1)可得

$$f \frac{\partial u}{\partial y} + \beta u = - \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} \quad (2)$$

因此, 在东西风交界面 $u = 0$ 处, 如果 $\frac{\partial u}{\partial y} > 0$ (北侧为西风、南侧为东风), 那么, $\frac{\partial \phi}{\partial y} = 0, \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} < 0$, 此时在经向方向上正是 ϕ 取极大值; 如果 $\frac{\partial u}{\partial y} < 0$ (北侧为东风、南侧为西风), 那么, $\frac{\partial \phi}{\partial y} = 0, \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} > 0$, 此时在经向方向上正是 ϕ 取极小值。因此, 在副热带地区满足

① 关于这方面的研究将另文给出。

$\frac{\partial u}{\partial y} > 0$ 的东西风交界线的位置变化正反映了副高脊线位置的移动特征。本文就利用副热带地区 $u=0$ 且 $\frac{\partial u}{\partial y} > 0$ 的线来讨论副高脊线, 而 $u=0$ 且 $\frac{\partial u}{\partial y} < 0$ 的线来表示槽线的情况。

3 副高双脊线概念的提出

1998 年夏季西太平洋副高变化异常复杂和特殊, 其主要特征之一就是 7 月中旬副高突然大幅度从长江流域南撤^[19]。为了再现这一过程, 文中给出了 110~130°E 内(这是夏季 500 hPa 西太平洋副高对中国最具影响的范围), 1998 年 7 月 500 hPa 副高脊线演变的时间-纬度剖面图(图 2)。由图可见, 7 月 1 日副高脊线位于 26°N 附近, 后随时间逐渐北抬; 7 月 6 日到达 30°N 附近, 此时正值长江中下游梅雨结束; 7 月 14 日, 副高脊线“突然南撤”至 22°N, 其后一直稳定在 20°N 附近, 长江中下游开始“二度梅”。显然这与前人的描述及结论是一致的。

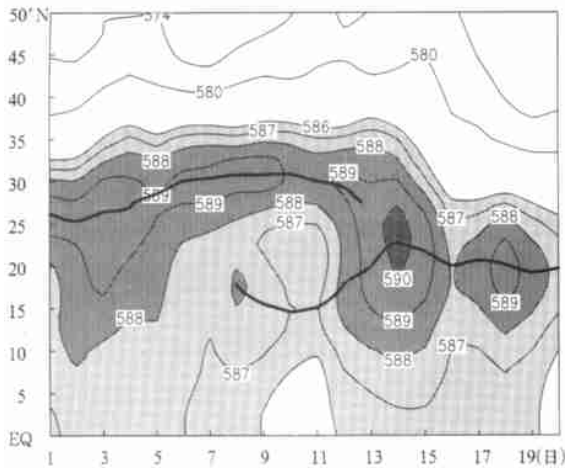


图 2 1998 年 7 月 1~20 日逐日 500 hPa 位势高度的时间-纬度剖面(110~130°E)

(单位: dagpm, 细实线为位势高度等值线, 粗实线为副高脊线)

Fig. 2 Time-latitude cross section (110-130°E) of the daily 500 hPa geopotential height

(in dagpm) during July 1-20, 1998

(The thin solid lines stand for the contour of geopotential height and the thick line for the SH ridge, respectively)

然而除了有上述结论外, 图 2 还展示了另外一

个极其有趣的现象, 即在副高逐渐北抬到“突然南撤”这段时间内, 出现了南北两条 $u=0$ 且 $\frac{\partial u}{\partial y} > 0$ 的线, 本文称之为副高双脊线。事实上, 7 月 8 日除了在 30°N 附近有一条脊线(简称北侧脊线)外, 在其南侧 17°N 附近又出现了另一脊线(简称南侧脊线), 从而呈现两脊线并存的现象, 即双脊线现象^①; 此后北侧脊线稳定维持, 南侧脊线先南撤到 15°N, 后逐渐北抬, 这种双脊线并存的现象维持了数日; 至 7 月 14 日, 副高北侧脊线突然消失, 而南侧脊线稳定维持, 导致双脊线现象消失, 副高恢复单脊线状态, 并稳定地维持在 20°N 附近。因此, 在后面的分析中定义此次副高双脊线过程是在 7 月 8~13 日。

通过以上分析发现, 1998 年 7 月西太平洋副高脊线“突然南撤”是有其局限性的。实际上, 这是一次副高脊线在南侧重建的过程: 北侧脊线逐渐减弱消失, 同时南侧脊线逐渐发展强大, 最终南侧脊线取代北侧脊线且稳定维持, 副高持续偏南, 长江流域出现“二度梅”。也就是说 1998 年副高持续偏南并不是突发性的, 而是有其必然的前期征兆, 这种征兆即是前期双脊线的建立和维持。那么西太副高双脊线维持期的环流特征、温湿场结构及演变情况是怎样的呢? 它对副高偏南的作用如何? 这次双脊线的形成原因又是什么? 下面将着重加以分析。

4 1998 年 7 月西太平洋副高双脊线的若干特征

如前所述, 从 1998 年 7 月 500 hPa 逐日位势高度场和脊线位置的分布图(图略)上可以看出, 西太平洋副高双脊线出现于 7 月 8 日, 结束在 7 月 13 日。为了清楚地表征西太平洋副高双脊线的基本特征, 本文对这一时段作了平均; 此外, 7 月 5~7 日是副高与赤道缓冲带相互作用的阶段, 单脊线特征不典型, 因此, 为了便于比较, 这里给出了单脊线特征较为显著的 7 月 1~4 日(双脊线事件前期)和 7 月 14~19 日(双脊线事件后期)的各场量相应分布图。

4.1 双脊线的环流特征

图 3 是 1998 年 7 月上述 3 个时段 500 hPa 的平均流场分布。由图可见, 双脊线现象十分清晰: 双脊线维持阶段(图 3b), 西太平洋存在大型的闭合反

① 从 500 和 850 hPa 逐日流场图(图略)上分析, 这次副高双脊线过程出现在 7 月 8 日, 因此对于 8 日之前出现的南侧脊线(赤道缓冲带脊线)作者作了处理。

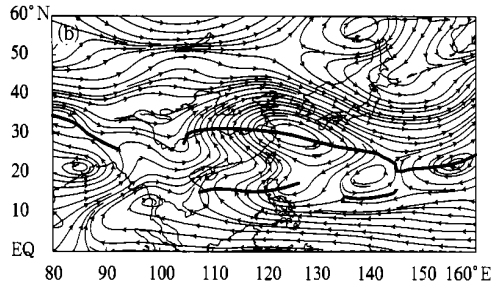
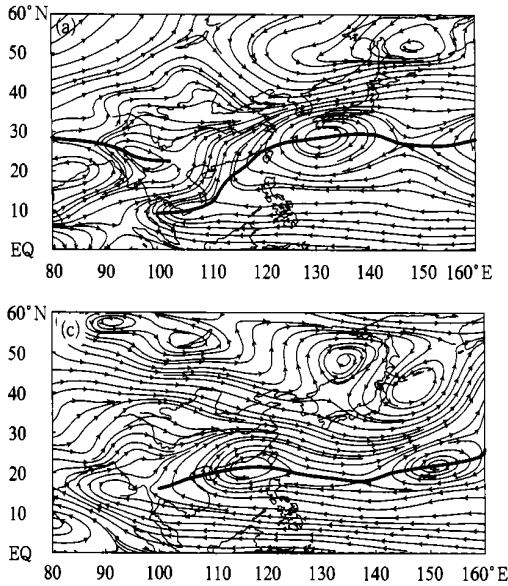


图 3 1998 年 7 月西太平洋副高双脊线事件前期、维持期和后期各典型时段 500 hPa 平均流场分布 (a. 前期 7 月 1~4 日, b. 维持期 7 月 8~13 日, c. 后期 7 月 14~19 日; 粗实线为副高脊线)

Fig. 3 The 500 hPa mean stream fields during July 1998 for the three periods (a. July 1-4 as the previous period, b. July 8-13 as the persistence period, c. July 14-19 as the posterior of the WPSH double ridges. The thick solid lines represent the SH ridge)

气旋性环流, 南北延伸范围广, 且外围有显著的变形; 在 15, 30°N 上分别存在两条高压脊线, 其中偏北的一条穿越反气旋主体, 并与中东太平洋副高脊线相连; 而偏南的一条没有相应的闭合中心与之对应, 且只出现在 127°E 以西。与此相反, 双脊线事件前期(图 3a)和后期(图 3c), 流场上闭合反环流南北范围较小, 外围没有明显的变形, 更为突出的特征是只有一条脊线存在, 且后期西太平洋副高脊线整体都异常偏南。由此可见, 这次西太平洋副高非季节性异常偏南与副高双脊线的形成和存在可能有一定的联系。

下面从 120°E 垂直经向剖面上来进一步分析西太平洋副高双脊线的环流特征。取这条剖面是基于下面的考虑: 夏季西太平洋副高脊面随高度向西向

北倾斜, 但无论哪个层次上, 120°E 附近均是其相当活跃的地方。图 4 为 1998 年 7 月 3 个时段平均的垂直流场经向剖面, 从图中看出: 在副高双脊线事件前期(图 4a), 副高为单脊轴结构, 925 hPa 以上脊轴随高度向北倾斜, 但倾度较小; 热带是大范围的上升区, 脊轴附近也为弱的上升运动(主要是来自热带地区的上升气流), 下沉区主要位于 40°N 附近; 此外 28°N 附近地区高层(300~150 hPa)有一个小的闭合垂直环流出现, 副高脊轴穿过这个闭合环流中心。在副高双脊线阶段(图 4b), 环流特征最显著的不同是存在两条副高脊轴, 相对于前期的脊轴来说, 一条偏南, 一条偏北; 偏南的一条仅出现在 400 hPa 以下, 随高度往北倾斜, 高低层相距约 12 个纬距, 且处于上升运动区中; 偏北的一条与前期脊轴类似, 在

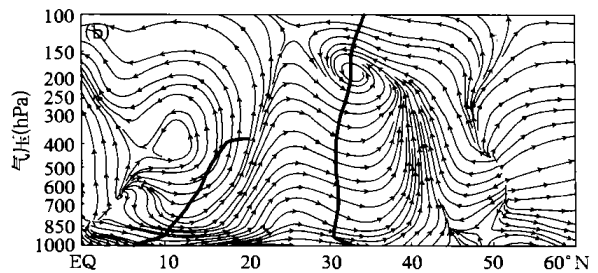
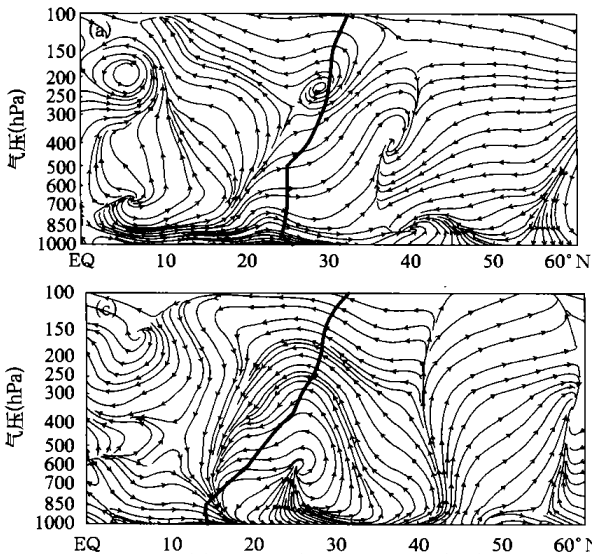


图 4 同图 3, 但为 120°E 内平均垂直流场经向剖面 (粗实线为副高脊轴)

Fig. 4 The same as in Fig. 3, except for latitude - height cross section of mean vertical circulations ($v, -\omega \times 70$) along 120°E (Units: v in m/s; ω in Pa/s. The thick solid lines represent the SH ridge axis)

925 hPa 以下随高度向赤道倾斜, 925 hPa 以上则随高度向北倾斜; 此外, 先前位于 28°N 附近地区的垂直闭合环流向北移动了约 5 个纬度, 中心略有上移, 强度大大加强, 来自热带地区的向北向上的上升运动在 25°N 附近到达一定高度就转为下沉, 这样北侧脊轴附近在 200 hPa 以下层就为大范围的下沉区了, 因此副高脊的动力性质与前期发生了根本的变化; 同时使得前期位于 40°N 附近的强的下沉区不复存在, 而变成大范围的上沉区。在副高双脊线事件后期(图 4c), 副高脊轴又变为一条, 但显然向北倾斜的程度大大加强, 且其附近高层为上升运动, 中低层为下沉运动; 同时高空垂直闭合环流较双脊线时期向南移动了约 7 个纬度, 中心下移到 600 hPa, 而低纬度的 Hadley 环流的上升支大大向南退缩, 原来在 $10 \sim 20^{\circ}\text{N}$ 内的强大上升区变为强大的下沉运动区。

从垂直环流特征不难看出, 副高双脊线系统是极其深厚的, 不仅出现在 500 hPa 层上, 而且显著地贯穿于整个对流层中低层; 另外还需要指出的是双脊线维持阶段, 南、北两侧脊轴的环流性质完全不同, 南侧脊轴位于大范围的上沉区中, 且向北倾斜度大, 而北侧脊轴则主要位于下沉区中, 且倾斜度较

小。这可能在一定程度上说明了南、北侧脊轴维持机制的不同。

4.2 双脊线的温湿场结构

1998 年 7 月西太平洋副高双脊线事件前期、维持期和后期 500 hPa 平均温度场如图 5 所示。副高双脊线事件前期(图 5a), 在东亚-西太平洋副热带地区温度场在东西向呈现暖冷暖冷的波列分布, 其中 1 个巨大的暖中心位于青藏高原及其南侧上空, 中心强度大于 $+2^{\circ}\text{C}$, 另 1 个暖中心位于中国东南沿海以东的洋面上, 强度较弱, 仅大于 -5°C ; 而两个冷中心则分别位于中国台湾地区和日本东南侧的西北太平洋地区, 其中前者较后者弱, 但值得注意的是暖轴基本位于副高脊线以北。在双脊线阶段(图 5b), 青藏高原上空的暖中心强度减弱且偏南, 但暖舌强烈向东扩张, 与另一暖区衔接, 从而前期的两个冷中心消失, 东亚-西太平洋副热带地区为一广阔的暖区控制; 此时北侧副高脊线与暖轴重合。在副高双脊线事件后期, 青藏高原的暖中心强度再次加强, 面积持续扩大, -4°C 线向东延伸可至 160°E 处, 此时副高虽为大范围的暖区包围, 但暖中心仍然位于副高脊线以北。

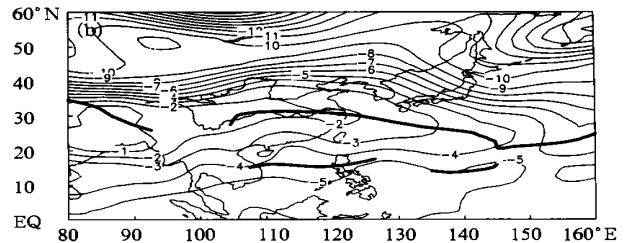
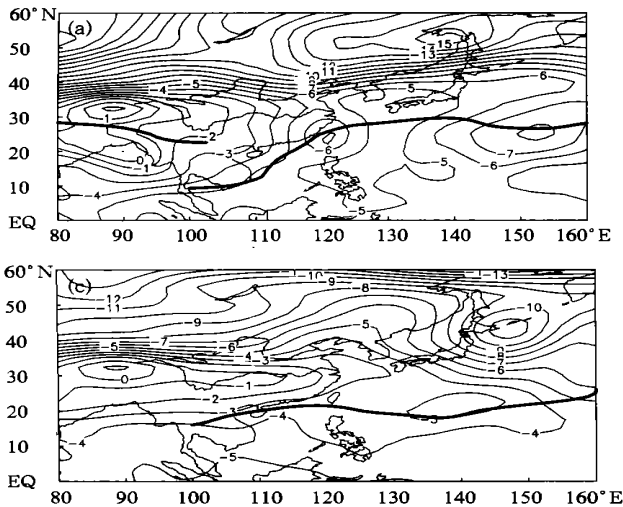


图 5 同图 3, 但为 500 hPa 平均温度场(单位: $^{\circ}\text{C}$)
Fig. 5 As in Fig. 3, but for the 500 hPa mean temperature fields(Units: $^{\circ}\text{C}$)

黄土松等^[21] 研究认为, 200 hPa 以下温度脊轴基本位于高压脊轴的向极一侧。从以上分析可知, 副高双脊线事件的前期和后期温压场的配置与此结论是一致的, 但是在双脊线阶段, 副高北侧脊线与暖轴却重合, 这是值得关注的事实。由热成风关系知道, 双脊线阶段副高北侧脊轴随高度倾斜度较小(图 4b), 与这种配置是有关的。任荣彩^[17] 认为南亚高

压在东伸过程中, 由热力性质转变为动力性质, 强迫高压单体内动力下沉, 绝热加热, 从而高原上空暖气团得以东伸和维持。那么这种完全吻合的配置关系是否就是南亚高压东伸作用的结果呢? 这些还有待于进一步研究。

从相应相对湿度场的分布(图 6)可见: 一般来说, 500 hPa 层大陆上的相对湿度远大于海洋, 并且

等相对湿度线较密集; 副高主体区与干区相对应, 脊线穿越干区中心; 但前期 122.5°E 以西副高区不干, 那里对应上升运动(图略)。在东亚地区, 副高脊线以北约 10 个纬距的地方是相对湿度极大值轴线所在的位置, 这与雨带分布大致相对应。需要指出的

是, 在双脊线时期南北两条脊线之间存在一个相对湿度极大值地区, 而且南侧的脊线所穿越的区域相对来说还是比较湿的, 这一方面反应了南侧脊线处副高强度较弱, 另一方面也是南侧脊线处于动力上升区而北侧脊线处于动力下沉区的结果。

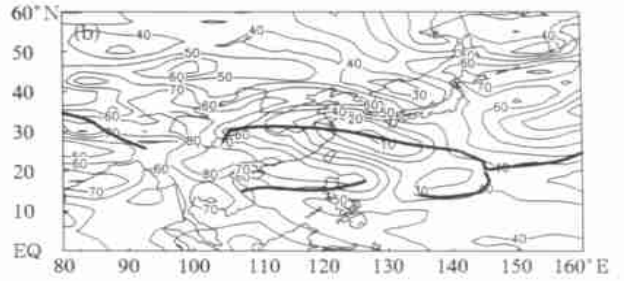
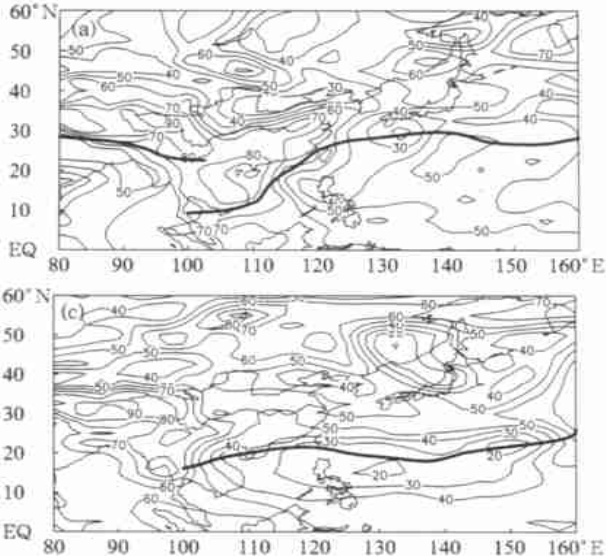


图 6 同图 3, 但为 500 hPa 平均相对湿度场(单位: %)
 Fig. 6 As in Fig. 3, except for the 500 hPa mean relative humidity fields(Units: %)

5 1998 年 7 月西太平洋副高双脊线的发生发展及对夏季长江流域“二度梅”的作用

流场上的天气系统常常表现为一个个旋单体的形式, 并且在大尺度运动的数值预报以及有关的

动力学问题中, 一般都直接采用涡度方程作为基本方程, 因此下面就从涡度观点来探讨系统发生发展的过程和机制。

图 7 给出了 1998 年 7 月 500 hPa(110~130°E) 和 850 hPa(120~140°E^①) 相对涡度的时间-纬度演

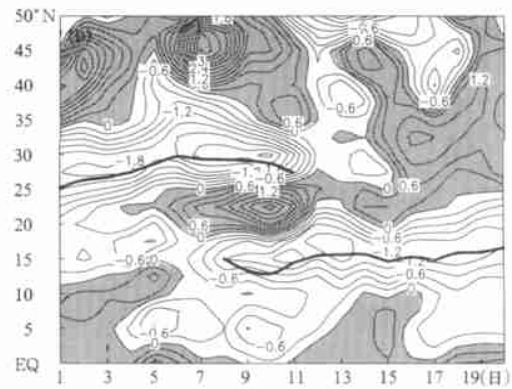
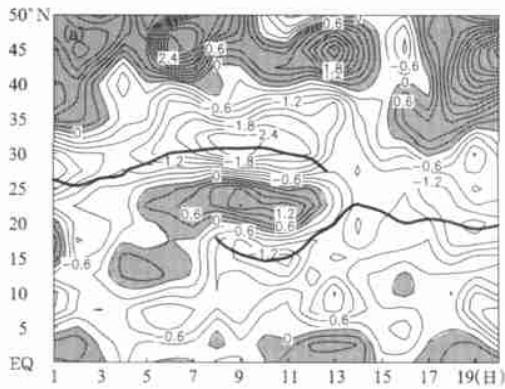


图 7 1998 年 7 月 1~20 日逐日相对涡度场的时间-纬度剖面

(a. 500 hPa(110~130°E), b. 850 hPa(120~140°E) 单位: $10^{-5} s^{-1}$, 阴影部分为正涡度区, 细实线为等涡度线, 粗实线为副高脊线)

Fig. 7 As in Fig. 2 but for the relative vorticity (in $10^{-5} s^{-1}$) distributions averaged (a) over 110~130°E at 500 hPa and (b) over 120~140°E at 850 hPa. The shaded areas stand for positive relative vorticity, thin solid lines for vorticity contours and thick solid lines for the SH ridge, respectively

① 西太平洋副高脊面随高度向西向北倾斜, 所以对于中层 500 hPa 本文取 110~130°E 纬向平均, 而对于低层 850 hPa 本文则取 120~140°E 平均。

变情况,从500 hPa图(图7a)上清晰可见,涡度大致呈一十的相间分布:北侧脊线位于一负涡度区中,且随时间北移加强;在其相邻的南侧有一正涡度带,4日位于 $10\sim 15^{\circ}\text{N}$, 10°N 以南存在另一负涡度带,值得关注的是5日在 $20\sim 25^{\circ}\text{N}$ 出现了一新的正涡度带。7日随着 $10\sim 15^{\circ}\text{N}$ 的正涡度带的消失,南侧负涡度迅速北上至 15°N 。此后,南北正负涡度带均在各自纬度持续加强维持,北侧负涡度带于9日出现极值中心,后迅速减弱;正涡度带及南侧负涡度带在11日发展到最盛,随后减弱,于13日左右完全消失。13日以后,北侧脊线消失,只有南侧脊线发展和维持,在 $5\sim 30^{\circ}\text{N}$ 内的广大地区均为负涡度区。850 hPa图(图7b)则更清楚地表明南侧涡度的北上合并即北侧负涡度的减弱消失。先是在 10°N 以南出现正涡度,且随时间向北传播,两天后,正涡度带以南出现了负涡度,而在 22°N 左右则有另一正涡

度带存在。6日 10°N 以南的正涡度迅速消失,而南侧负涡度则迅速北上到 15°N 左右,此后南北正负涡度呈一致加强的趋势,10日达极值,随后只有南侧负涡度持续加强维持,其他涡带均减弱消失。

以上分析表明,南侧脊线的出现和维持与南侧负涡度中心的出现、迅速北上合并及正涡度的演变相联系,即与热带系统的作用密切相关。由此看出,正、负涡度的发生、发展和消亡能较好地刻画这次双脊线过程,因此我们有必要对正、负涡度所对应的热带系统作进一步分析,以期能深入了解双脊线的形成原因及演变规律。

5.1 赤道反气旋与双脊线的发生

图8给出7月5~8日500 hPa逐日流场图。5日(图8a)强大的副高反气旋性环流位于西太平洋地区,中心在(30°N , 132.5°E);南海西部有一赤道反气旋维持,呈西南—东北走向,同时菲律宾南部也

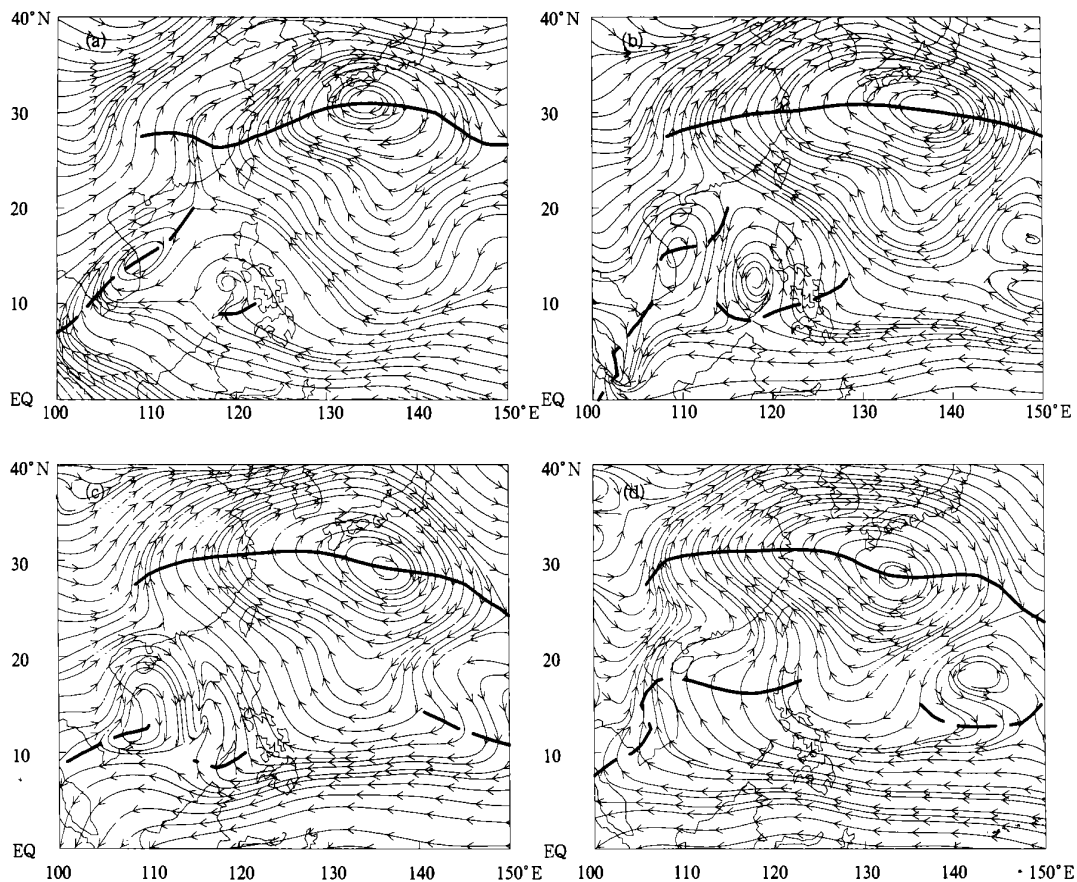


图8 1998年7月5~8日500 hPa逐日流场

(a. 5日, b. 6日, c. 7日, d. 8日; 粗实线为副高脊线, 粗虚线为赤道缓冲带或赤道反气旋脊线)

Fig. 8 The 500 hPa daily stream fields on July 5(a); July 6(b); July 7(c); July 8(d), 1998
(The heavy solid lines stand for the SH ridge, and the thick dashed lines for the ridge of equatorial anticyclone)

出现了赤道缓冲带。此后, 副高反气旋缓慢北抬东撤, 赤道反气旋向南北方向伸展, 而赤道缓冲带则逐渐加强西伸。7 日(图 8c)赤道反气旋和菲律宾南部的赤道缓冲带合并, 而此时副高南部环流已大大向西扩展。8 日(图 8d)位于南海西部的赤道反气旋急剧减弱, 闭合中心消失, 随之迅速北抬与副高反气旋打通合并; 此时南侧脊线所在的反气旋环流已不全是由越赤道气流顺转而成, 特别是 120°E 以东, 南侧脊线明显为副热带反气旋变形的结果; 500 hPa 高度场和 OLR 场(图略)显示, 该日 ITCZ 不存在, 587 dagpm 等值线可以认为是副高的边缘线, 它和 OLR 的 220 线配合得很好, 而南侧脊线正好穿越了副高区, 从而副高呈现双脊线现象。

此外, 从 120°E 逐日纬向风的高度-纬向剖面图(图 9)上, 也能清晰地看到这次合并过程: 7 日(图 9a)垂直场上存在 3 条脊轴, 一条位于 $27\sim 35^{\circ}\text{N}$, 且从地面一直向上伸展到对流层顶; 一条处在 $15\sim 20^{\circ}\text{N}$, 但仅出现在对流层高层(400 hPa 以上); 一条

存在于 10°N 附近的对流层低层。结合高度场和流场, 本文认为前两条脊轴是副高脊轴, 而第 3 条脊轴属于赤道反气旋脊轴。8 日(图 9b), 位于 $27\sim 35^{\circ}\text{N}$ 的副高脊轴变化不大, 但是其南侧的脊轴却发生了重大调整: 原先的赤道反气旋脊轴迅速北移且向上伸展, 与对流层高层向下伸展的副高脊轴合为一体, 从而由地面一直到达 150 hPa 以上。喻世华等^[22]指出, 赤道反气旋环流主要位于 500 hPa 以下, 赤道辐合带也只活动在对流层中下部。据此可以判断, 此时南侧脊线已不是赤道缓冲带脊线, 而属副高脊线性质, 即赤道缓冲带与副高之间的打通合并已完成, 副高呈现双脊轴结构。14 日(图 9c), 副高又恢复为单脊轴结构, 但较 7 日相比, 脊轴南北跨越幅度大。以上分析说明了赤道缓冲带(赤道反气旋)北上与副高打通合并是此次副高双脊线出现的主要原因之一。另外也可以看出, 高层环流系统对 500 hPa 副高双脊线的形成有一定作用。

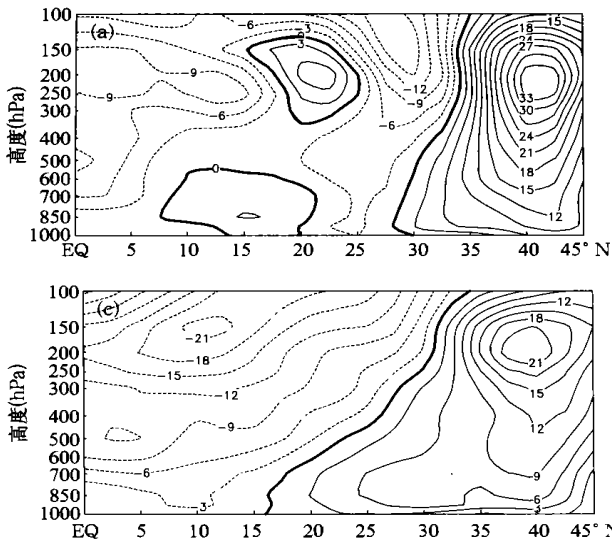


图 9 1998 年 7 月 120°E 逐日纬向风的高度-纬向剖面

(a. 7 日, b. 8 日, c. 14 日; 粗实线为副高脊轴)

Fig. 9 The daily height-latitude cross sections of zonal wind along 120°E on July 7(a); July 8(b); July 14(c), 1998
(The thick solid lines denote the SH ridge axis)

Fujita 等^[23]的研究结果表明, 东太平洋上赤道反气旋的形成、发展、西移可使太平洋副高脊南落。Sadle 等^[24]指出南海及西太平洋缓冲带北上形成的一系列反气旋将会导致西太平洋副高西伸加强。这与本文上述的结果是吻合的, 不同的是, 在这次过程中赤道缓冲带(赤道反气旋)与副高打通合并后, 副高并没有迅速南落, 而是先呈现双脊线状态, 之后在中高纬环流的作用下, 北侧脊线逐渐消失, 南侧脊线加强维持, 最终副高脊线维持在南侧。

5.2 热带对流云团与双脊线的发生发展

TBB 场的分布在相当程度上能反映中低纬的环流系统, 一般低值区为多云区, 低值中心常表示强对流中心。通过分析 TBB 场可以了解中低纬正涡度的演变^[25]。图 10 给出了 TBB 极值中心 ($\leq 250\text{K}$) 的坐标分布线(图 10a)和以此线为剖面的时间演变情况(图 10b)。图 10b 中显示, 这次过程主要对应两个强的 TBB 低值区, 即对流云团的运动。二者均出现于 1998 年 7 月 4 日, 一个位于菲律宾群岛

(以 10°N , 120°E 为中心)附近, 一个来自中太平洋(以 10°N , 145°E 为中心)地区。10 日以前, 位于菲律宾的对流云团稳定少动, 基本在原地维持, 而中太平洋地区的对流云团, 则是以每天约 4 个经度的速度有规律地向西略偏北挺进, 至 10 日, 二者合并, 12

日移到 112°E , 此后迅速减弱消失。由以上分析得知, 正涡度的发生发展主要受到两个热带对流云团的作用, 一个来自中太平洋地区, 一个位于菲律宾群岛附近。因此, 热带对流云团在这次双脊线过程中也扮演了极为重要的角色。

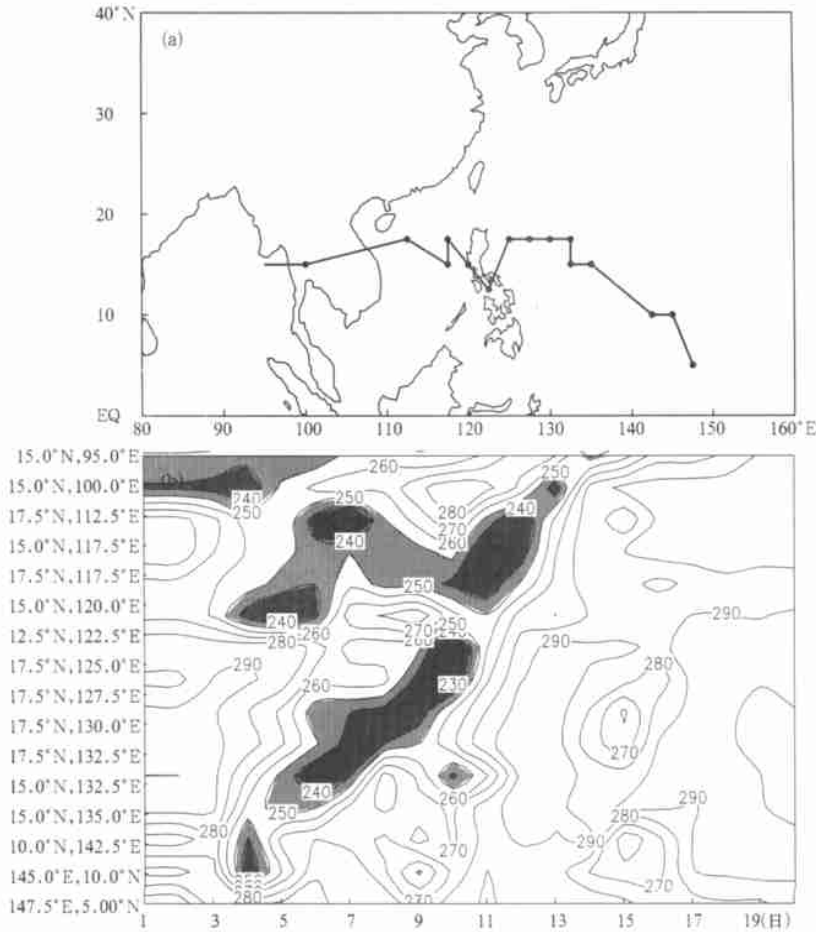


图 10 西太平洋 TBB 极值中心坐标分布(a)及其以此线为剖面的时间演变(b)
(单位: K, 阴影为 ≤ 250 K)

Fig. 10 The observed coordinates(a) and the daily evolution(b) of TBB (Units: K) maximal cores over the western Pacific. The area of TBB greater than 250 K is suppressed

以上主要对水平场进行了分析, 但是大气是三维结构的, 与此直接联系的是涡度场的垂直演变, 而且 5.1 节(图 9)中分析指出高层环流系统对 500 hPa 副高双脊线的形成有一定作用。为此, 图 11 给出 22.5°N (代表中间槽线)区域纬向平均 ($110 \sim 130^{\circ}\text{E}$) 涡度垂直分布随时间的演变。图中最显著的特征是高层对中低层的“诱导”效应, 即高层涡度变化超前于中低层。具体来说: 5 日之前, 高层(大约

400 hPa 以上)是正涡度区, 中低层(400 hPa 以下)为大片负涡度区, 两者呈反位相; 5 日中低层的负涡度消失, 从高层到低层为一致的正涡度控制; 对于高层, 5 日以后正涡度随时间迅速增强, 并于 8 日达到最大值; 相应地, 中低层的正涡度也逐渐加强, 在 10 日达最强, 而此时高层已经由正涡度转为负涡度; 此后, 中低层的正涡度逐渐减弱消失, 13 日以后, 从高层到低层变为一致的负涡度区。总之, 这一地区的

正涡度首先出现在高层, 之后“诱导”中低层涡度发生变化, 说明这一地区高层系统对中低层双脊线的

出现和维持有一定的贡献。

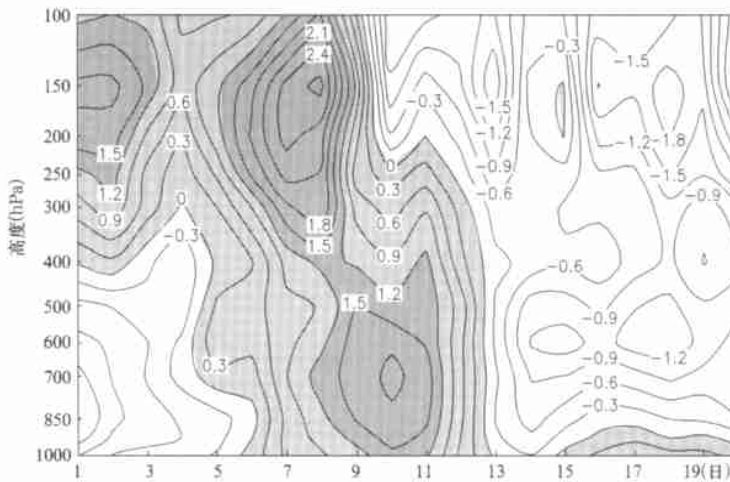


图 11 1998 年 7 月 22.5°N, 110~130°E 范围内平均相对涡度的高度-时间剖面

(单位: 10^{-5}s^{-1} , 阴影部分为正涡度)

Fig. 11 Height-time cross section (110—130°E) of mean relative vorticity along 22.5°N during July 1998. The positive vorticities are indicated with shaded areas. Units: 10^{-5}s^{-1}

总之, 在高层正涡度源的“诱导”下, 由于热带对流云团的强烈作用, 赤道缓冲带(赤道反气旋)北上与副高打通合并, 对流层中低层出现了副高脊线重建的过程, 而双脊线现象就始终贯穿于这一过程中。最终, 在中高纬环流的共同作用下, 双脊线消失, 副高脊线重建完成; 之后副高在较低纬度持续维持, 形成长江流域较长的二度梅雨期。

6 西太平洋副高双脊线的维持对中国东部雨型的影响

赵振国^[26]根据 1951 年以来中国夏季(6~8 月)降水距平百分率分布图, 把中国东部雨型主要划分为三类, 即北方型、中间型和南方型。陈兴芳、赵振国^[27]等则进一步研究指出, 副高脊线位置变化对中国降水的雨带位置影响最大。前人的这些结论都是基于副高单脊线情况下得出的, 然而, 如果出现了副高双脊线, 那么中国东部雨型会有什么相应的变化呢?

图 12 是 1998 年 7 月西太平洋副高出现双脊线时中国 740 站的降水分布。不难看出, 雨带与双脊线匹配得很好: 沿着双脊线的走势呈倒 7 字型。具

体来说, 有两条雨带, 一条从长江中上游出发, 向东北方向延伸, 途经黄淮中上游, 后至中国东北地区; 另一条则往东南方向伸展, 主要控制中国华南地区。这两条雨带分别与副高北、南侧脊线相对应。显然, 这种雨型分布与通常的西太平洋副高单脊线的情况是不同的。

下面给出与此雨带分布相关的整层水汽输送矢量及水汽通量散度的时间-纬度剖面图(图 13)。可以看到, 单脊线时期, 脊线以北始终对应一来自西南的水汽输送大值带, 这与经典雨带的位置基本一致; 双脊线时期, 除了北侧脊线以北存在一水汽输送大值带以外, 由于南侧脊线的建立, 使得两脊线之间出现了另一来自西南的水汽输送带, 这正好与华南地区的雨带相对应, 但强度较小。以上分析表明, 双脊线的出现改变了原有的水汽输送方式, 使得水汽沿两条路径北上, 从而分别在两脊线以北辐合形成两条显著的雨带。因此, 我们认为双脊线出现时, 必然有两条雨带与之对应, 且分别位于南北脊线的北侧。然而需要指出的是, 雨带与双脊线的这种配置关系是不是唯一的, 还有待于进一步研究。

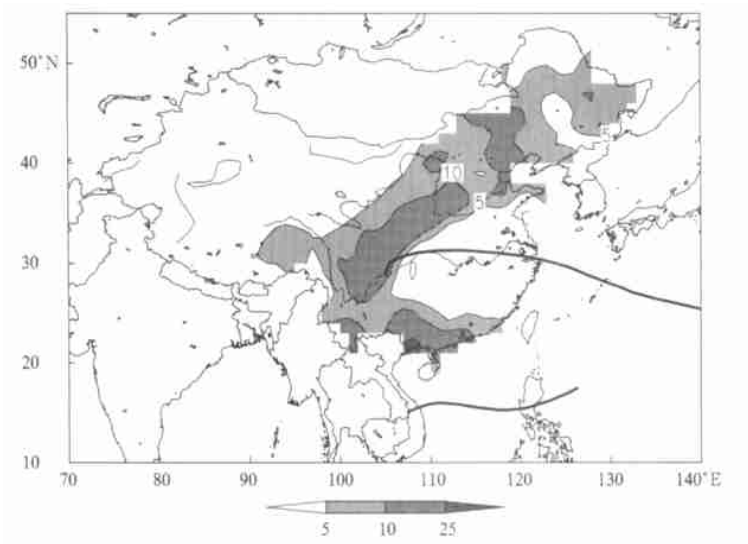


图 12 1998 年 7 月副高双脊线维持期(7 月 8~13 日)

中国平均日降水量分布

(单位: mm/d, 粗实线为副高脊线)

Fig. 12 The pattern of mean rainfall during July 1998 in the persistence period (July 8—13) of SH double ridges in China

(The thick solid line signifies the SH ridge line. Units: mm/day)

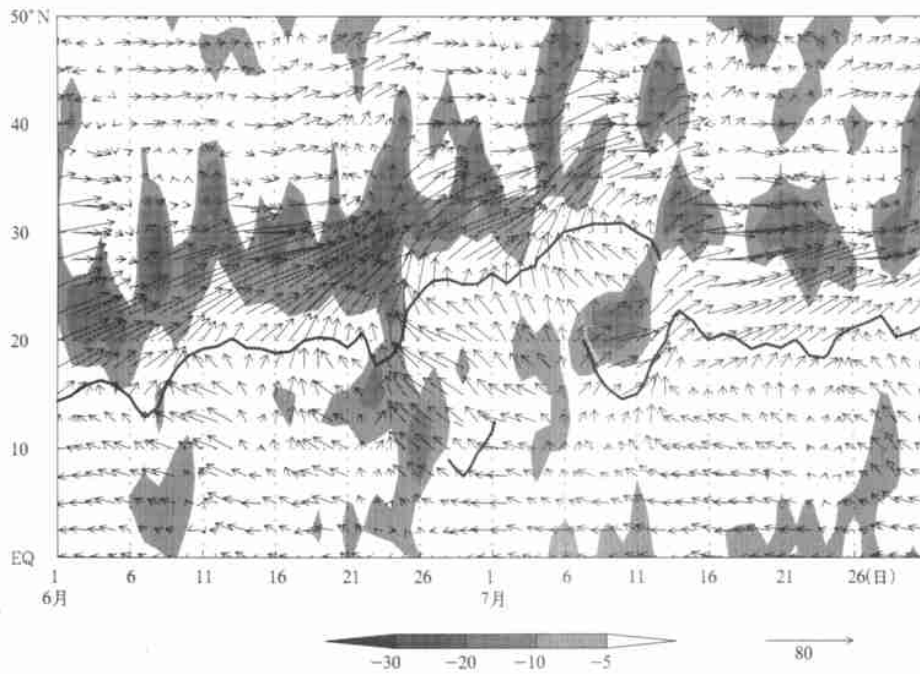


图 13 1998 年大气整层水汽输送通量矢量(图中箭头, 单位: $10^{-1} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)

和水汽通量散度(单位: $10^{-7} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 阴影为 $< -5 \times 10^{-7} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)

的时间-纬度剖面(110~130°E)(实线为副高脊线)

Fig. 13 Time-latitude cross section (110—130°E) of the vapor flux vectors (shown as arrows, units: $10^{-1} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$) and vapor flux divergence (units: $10^{-7} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; shaded areas for $< -5 \times 10^{-7} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$) integrated from 1000 to 300 hPa during June~July 1998

(The solid lines denote the SH ridges)

7 结 语

本文对 1998 年夏季梅雨间歇期西太平洋副热带高压活动的异常特征现象和演变特征进行了再探讨, 发现了两个新的事实, 即认为这一时期西太平洋副高脊线突然“南撤”有其一定局限性, 实际上应是副高脊线在“重建”的过程; 首次提出副高双脊线的概念, 认为在一定的外在环境和环流背景场下, 副高可以出现双脊线现象, 即在副热带地区同时存在南北两条 $u=0$ 且 $\frac{\partial u}{\partial y} > 0$ 的线。

分析表明, 西太平洋副高双脊线时期具有与单脊线时期明显不同的环流特征和温湿场结构。双脊线时期, 在水平流场上, 副高反气旋环流外围严重变形, 北侧脊线穿越反气旋主体, 南侧脊线则无相应的闭合环流中心对应; 在垂直流场上, 两条副高脊轴位于不同的垂直运动区中, 即北侧脊线位于下沉区中, 南侧脊线则处于上升区中; 在温度场上, 北侧脊线与暖轴重合, 这是不同与单脊线时暖轴大致位于脊线以北的特性的, 而南侧脊线处温度场分布较均匀; 在湿度场上, 北侧脊线仍然位于干区内, 但南侧脊线处, 湿度较大, 这与北侧脊线处于下沉区、南侧脊线位于上升区有关。总之, 在双脊线阶段, 西太平洋副

高北侧脊线附近的特征与前人的研究结果, 即传统单脊线副高的特征较一致, 但南侧脊线附近则更多的具有低纬度系统的特点。

本文从逐日流场图、涡度演变角度和 TBB 资料出发, 着重分析了南侧副高脊线的发生发展。结果表明, 南侧脊线的出现和维持与来自低纬度地区的正、负涡度中心的出现、加强相联系, 即与赤道缓冲带(赤道反气旋)加强北上、与副高打通合并密切相关; 而正涡度的演变则主要是热带对流云团的作用; 另外, 北侧脊线的消失也与正涡度的消失, 即对流云团的消退有一定关系。

此外, 我们还指出, 西太平洋副高双脊线的出现改变了原有的水汽输送路径, 从而使中国东部存在两条雨带, 呈倒 7 字型, 分别与副高北、南侧脊线相对应。

应该看到, 本文仅仅对副高双脊线作了初步研究, 得到了一些有意义的结果。其间还有许多问题尚未揭示, 如双脊线形成的动力机制、双脊线与雨带的必然关系、双脊线的气候特征等等, 所有的这些都亟待进一步研究。

致谢: 吴国雄院士、刘屹岷博士及两位审稿专家为本文提出了宝贵意见, 潘静博士、颜京辉博士、王在志博士、温敏博士为本文提供了部分资料和帮助, 特此致谢!

参考文献

- 1 陶诗言, 徐淑英. 夏季江淮流域持久性旱涝现象的环流特征. 气象学报, 1962, 32 (1): 1~8
- 2 陶诗言, 徐淑英, 郭其蕴. 夏季东亚热带和副热带地区经向和纬向环流的特征. 气象学报, 1962, 32 (1): 91~102
- 3 陶诗言, 王作述, 朱福康等. 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, 1963. 145pp
- 4 黄土松, 汤明敏等. 副热带高压位置一年中南北变动的一些特征及其意义. 南京大学学报(气象学), 1962, (2): 41~56
- 5 黄土松. 有关副热带活动及其预报问题的研究. 大气科学, 1978, 2 (2): 159~168
- 6 吴国雄, 丑纪范, 刘屹岷等. 副热带高压形成和变异的动力学问题. 北京: 科学出版社, 2002. 1~294
- 7 张培群. 副热带高压脊线位置移动的力学方程及其诊断研究. [博士论文]. 兰州: 兰州大学大气科学系, 1997
- 8 宋振鑫, 张培群, 丑纪范等. 副热带高压脊线移动的三维结构特征. 气象学报, 2001, 59 (4): 472~479
- 9 毛江玉, 吴国雄, 刘屹岷. 季节转换期间副热带高压带形态变异及其机制的研究 I: 副热带高压结构的气候学特征. 气象学报, 2002, 60 (4): 400~408
- 10 陶诗言, 倪允琪, 赵思雄等. 1998 年夏季中国暴雨的形成机理与预报研究. 北京: 气象出版社, 2001. 19~31
- 11 廖移山, 杨荆安, 沈铁元. 1998 年二度梅雨期西太平洋副热带高压活动的诊断分析. 应用气象学报, 2002, 13 (3): 269~276
- 12 黄荣辉, 徐予红, 王鹏飞等. 1998 年夏长江流域特大洪涝特征及其成因探讨. 气候与环境研究, 1998, 3 (4): 300~313
- 13 孙淑清, 马淑杰. 西太平洋副热带高压异常及其与 1998 年长江流域洪涝过程关系的研究. 气象学报, 2001, 59(6): 719~729
- 14 陈烈庭. 青藏高原异常雪盖和 ENSO 在 1998 年长江流域洪涝中的作用. 大气科学, 2001, 25 (2): 184~192
- 15 徐晨海, 倪允琪, 朱福康. 1998 年 7 月西太平洋副高显著南落的原因. 气象, 2000, 26 (8): 6~9
- 16 何敏, 徐力, 李维京等. 热带环流异常对 1998 年长江流域特大洪涝灾害的影响. 南京气象学院学报, 2001, 24 (4): 467~475
- 17 任荣彩. 夏季西太副高结构及短期变异机制的个例和数值试验研究. [博士论文]. 北京: 中国科学院大气物理研究所, 2002
- 18 He Jinhai, Zhou Bing, Wen Min, et al. Vertical circulation structure, Interannual variation features and variation mechanism of Western Pacific Subtropical High. Adv Atmos Sci, 2001, 18 (4): 497~510

- 19 温敏. 西太平洋副热带高压的结构和变化特征及其与东亚夏季风的关系: [博士论文]. 南京: 南京气象学院, 2002
- 20 李建平, 丑纪范. 副热带高压带断裂的动力学分析-地转作用. 科学通报, 1998, 34 (3): 434~437
- 21 黄士松, 余志豪等. 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, 1962, 31 (4): 339~359
- 22 喻世华, 陆胜元. 热带天气学概论. 北京: 气象出版社, 1986. 107, 126
- 23 Fujita T T, Watanabe K, Eawa T I. Formation and structure of equatorial anticyclone caused by large scale cross-equatorial flows determined by ATS-1 photographs. J Appl Meteor, 1969, 8(4): 649~667
- 24 Sadler J C, et al. 1968. Forecasting minimum cloudiness over the Red River Delta during the summer monsoon. In: Atkinson G D, ed. Forecaster's Guide to Tropical Meteorology. 1971, 7, 14~7. 16
- 25 何金海, 朱乾根, Murakami M. TBB资料揭示的亚澳季风区季节转换及亚洲夏季风建立的特征. 热带气象学报, 1996, 12 (1): 34~42
- 26 赵振国. 中国夏季旱涝及环境场. 北京: 气象出版社, 1999. 312pp
- 27 陈兴芳, 赵振国. 中国汛期降水预测研究及应用. 北京: 气象出版社, 2000. 21~28

INFLUENCE OF THE DOUBLE RIDGES OF WEST PACIFIC SUBTROPICAL HIGH ON THE SECOND MEIYU OVER THE YANGTZE RIVER VALLEY DURING 1998

Zhan Ruifen

*(Department of Atmospheric Science, Nanjing Institute of Meteorology, Nanjing 210044;
LASG, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Science, Beijing 100029)*

Li Jianping

(LASG, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Science, Beijing 100029)

He Jinhai

(Department of Atmospheric Science, Nanjing Institute of Meteorology, Nanjing 210044)

Abstract

Based on the NCEP/NCAR reanalysis data and the TBB data from Meteorological Institute Research of Japan, the reason that the ridge of the west Pacific subtropical high (WPSH) in July 1998 suddenly locates much more southward than its normal position is investigated. The results show that the view point on the sudden retreat southward of the WPSH ridge has its limit to some extent. This is in fact a rebuilding process of the WPSH ridge in the south. It is found that there simultaneously exist two WPSH ridges in the same longitude over the west Pacific subtropical region in the first and middle of ten days of July 1998. Accordingly, a new conception, the double WPSH ridges, is presented. Especially, the basic evolution features, circulation field structures, temperature and relative humidity field signatures, and the possibly formative mechanism of the double WPSH ridges in July 1998 are investigated, and its influence on the second MeiYu over the Yangtze River valley in 1998 is explored as well. It is clear that the circulation features and the temperature and relative humidity patterns during the period of the double WPSH ridges in July 1998 markedly differ from those during the single WPSH ridge in other times. During the double WPSH ridges, the features around the northern ridge are consistent with the ones about the single ridge in tradition, while around the southern ridge, there possess more features of the systems in the low latitudes. Moreover, this process is closely relative with the northward movement, the through-get and consolidation of the equatorial buffer band with the WPSH, and the tropical convective cloud cluster as well. Besides, the influence of the maintenance of the double WPSH ridges on the rainband in the East China is studied by using of China 740 station precipitation data. The original paths conveying the water vapor are changed by the occurrence of the double WPSH ridges, consequently, there appear two rainbands taking on the shape of reverse 7, which correspond to the northern and southern ridges of the WPSH respectively. These results provide a new clue for the study of the variation mechanism of the WPSH.

Key words: West Pacific subtropical high, Double ridges, Second MeiYu period, Equatorial anticyclone, Tropical convective cloud cluster.