

韦道明, 李崇银, 谭言科. 2011. 夏季西太平洋副热带高压南北位置变动特征及其影响 [J]. 气候与环境研究, 16 (3): 255–272. Wei Daoming, Li Chongyin, Tan Yanke. 2011. Variation features and the impact of the latitudinal position of the western Pacific subtropical high in summer [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 16 (3): 255–272.

夏季西太平洋副热带高压南北位置变动特征及其影响

韦道明¹ 李崇银^{1, 2} 谭言科¹

1 中国人民解放军理工大学气象学院, 南京 211101

2 中国科学院大气物理研究所大气科学与地球物理流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

摘 要 使用 ECMWF 再分析数据集资料中的位势高度场、三维风场、温度场、相对湿度场、海温场以及中国气象局 730 站地面降水资料和日最高温度资料, 对比分析研究了 7 月份西太平洋副高位置偏南和偏北过程 (持续满足南、北位置指标 6 天以上定义为一次南、北部型过程) 所对应的动态气候特征及其演变。分析首先揭示出了西太平洋副高的南北位置变化存在季节内振荡特征; 从西太平洋副高偏南、偏北位置所对应的各层环流特征、中国东部降水分布、中国日最高温度的分布, 研究了西太平洋副高南北位置对东亚及西北太平洋地区天气气候的影响。结果表明, 尽管同在 7 月份, 西太平洋副高南北位置的不同对大气环流和天气气候的影响却有显著的差异, 需要从大气系统变化的角度研究和认识某时期的天气气候特征。针对两类过程的演变, 分析了西太平洋副高南、北位相过程开始的前兆气候特征, 过程中的变化特征以及过程结束后的后延影响, 揭示出了一些以前研究所忽略的气候演变特征及其差异。

关键词 西太平洋副高 合成分析 动态气候 南、北位相过程

文章编号 1006-9585 (2011) 03-0255-18 **中图分类号** P434 **文献标识码** A

Variation Features and the Impact of the Latitudinal Position of the Western Pacific Subtropical High in Summer

WEI Daoming¹, LI Chongyin^{1,2}, and TAN Yanke¹

1 Meteorological College, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101

2 State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract The geopotential height, wind field (u , v , w), temperature, relative humidity, maximum temperature, and SST fields in the ECMWF reanalysis data sets and the observational precipitation data in China are used to study the dynamic climate features and the evolution of subtropical high over the northwestern Pacific in July. Two processes which describe the south and north positions of subtropical high are defined (south or north position lasting for more than six days is defined as one process) and the correspondence composite analysis are completed. The results show that the intraseasonal oscillation is obvious both in the south and north processes, and the most typical oscillation occurs in July. Corresponding to the south and north processes of the subtropical high, there are evident different features and evolutions in atmospheric circulation, the distribution of precipitation, the maximum tempera-

收稿日期 2009-07-13 收到, 2011-03-01 收到修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展计划项目 2007CB411805, 国家基金委-云南省联合重点基金 U0833602

作者简介 韦道明, 女, 博士, 主要从事东亚气候研究。E-mail: weidaoming-nj@163.com

ture in China, and the SST anomaly in the northwestern Pacific. This means that it is necessary to study and understand the dynamic characteristic of weather and climate based on the variability of the atmospheric system even though just in July as a short period. Through the analysis of process evolutions, some interesting results on the premonition characteristic, variation features during and after the north, south processes of subtropical high are indicated, which are undiscovered in previous studies.

Key words western Pacific subtropical high, composite analysis, dynamic characteristic, north/south processes

1 引言

西太平洋副热带高压（简称西太平洋副高）是出现在西北太平洋上主要呈纬圈分布的深厚暖性高压系统，它是联结中纬度西风带天气系统和低纬度东风带天气系统的纽带（朱乾根等，1992）。西太平洋副高在夏季的活动与中国东部天气有十分密切的关系，其东西位置、北跳或南撤以及它的持续停留，直接决定了中国华南、长江流域及华北地区的雨带长短或旱涝情况。研究表明（陈烈庭和吴仁广，1998；卫捷等，2004；杨辉等，2006），西太平洋副高持续偏西、偏南时长江流域梅雨期偏长，降水明显偏多；而西太平洋副高偏东的年份则容易引起长江梅雨的减少甚至干旱。在冬季，西太平洋副高的异常状态、结构以及其位置偏强、偏西可能造成我国南方雨雪冰冻异常天气（李崇银等，2008；施宁等，2008）。关于夏季西太平洋副热带高压脊的西伸北跳或南撤东退对我国东部旱涝与气温的影响机理，有研究（陶诗言和卫捷，2006）指出，当高空副热带急流中有准静止 Rossby 波的能量传播（频散）到东亚沿海（ $115^{\circ}\text{E}\sim 130^{\circ}\text{E}$ ）上空时，会激发出一个具有准正压结构的静止高空脊（下游效应）。这时副高和青藏高原高压向这个高压脊方向伸展，表现为这两个系统的“相向”而行，副高表现为西伸北跳。当沿海岸上空激发出一个低压槽时，副高南撤东退，青藏高原恢复为一个单体高压。如果在沿海岸附近有多次静止 Rossby 波的能量传播过来，造成副高持续停留在华东地区，将造成长江中下游的高温酷暑天气。

过去与副高有关的气候研究大多是建立在月平均资料上的，差异研究是以年为单位，这对于一个气候系统来讲还不够。而精确定位副高系统在不同时间的位置差异将帮助我们更加深入、细

致地了解西太平洋副高的东西和南北位相特征及其对我国东部天气的影响，这是一个十分重要的课题。平均而言，7 月份西太平洋副高对我国天气的影响相对稳定而显著。本文利用地转平衡关系中的副高脊面定义方法，针对副高南北位置的不同来揭示 7 月份副高不同位相过程的活动特征及影响。

在一些研究和实际应用中，人们往往会提到某个月或某个季节的气候情况，这无疑是描写气候的经典办法。但是，仅仅到这一步还是很不够的，本研究针对 7 月的情况，分析发现在西北太平洋副高位置有差异时东亚和西北太平洋地区的大气环流及气候都存在着极其明显的不同。说明要深入认识气候特征、做好气象保障服务，有必要进行动态气候分析，揭示更为细致的气候变化形势。

很多的研究表明（Annamalai et al., 1999; Bromwich and Fogt, 2004; Inoue and Matsumoto, 2004; 陈雯和智协飞，2008），ECMWF 再分析资料在很多方面优于 NCEP/NCAR 再分析资料，如，ECMWF 再分析资料在季节平均的某些气候特征方面要优于 NCEP/NCAR 再分析资料，并且利用 NCEP/NCAR 再分析资料所分析的海平面气压的年代际变化在某些区域存在着过分夸大的现象，另外，由 NCEP/NCAR 再分析资料所得出的副高的年代际变化可能是不真实的。因此，本文利用 ECMWF 再分析资料进行研究。

2 资料和方法

本文使用的资料主要是 ECMWF 再分析数据集：1958~2002 年每日 4 次 23 层大气要素资料，水平分辨率为 2.5° （纬度） $\times 2.5^{\circ}$ （经度），全球共 144×73 个网格点，基本要素为位势高度场、三维风场、温度场、相对湿度场以及中国气

象局 730 站地面降水资料和日最高温度资料。所用的诊断方法有小波分析、合成分析和相关分析。

前人的研究大多采取月平均资料进行，挑选副高位置不同的年份进行对比研究。而本文针对 7 月份的情况，从副高系统着手，采用日平均资料，挑选出位相不同的各个副高异常过程（持续 6 天以上）来进行合成分析对比研究。

3 西太平洋副热带高压南北部型过程的特征

3.1 西太平洋副热带高压南北部型过程的表示方法

所谓西太平洋副热带高压的南北位相，就是指副高脊线位置的偏南或偏北情况。副高脊线位置偏南（偏北）、并持续一定时间，就认为西太平洋副热带高压处于南（北）部型位相。资料诊断分析表明，除了在 5°S~5°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。本文就利用副热带地区 $u=0$ ，且 $\partial u/\partial y>0$ 线来确定副高脊线的南北位置（李建平和丑纪范，1998），从而进一步讨论副高的南北位相。

参照罗玲等（2005）的研究，由于 110°E~130°E 经度范围为夏季 500 hPa 西太平洋副高对我国影响最大的范围，所以本文根据（0°~60°N，110°E~130°E）范围内平均的副高脊线演变的时间—纬度剖面图对副高过程进行研究。考虑到副高南部型、北部型过程的稳定性、完整性，以及合成分析的可行性，选取了持续时间足够长（持续 6 天以上），但又不是太长（一个过程最多选取 8 天）的副高过程来进行研究。另外，为了在选取南部型和北部型过程时尽量使它们的位置差异大，我们分别选取了副高脊线位于 25°N 以南作为南部型过程，35°N 以北作为北部型过程。

挑选出的 22 次副高南部型过程（持续 6 天以上脊线位于北纬 25°N 以南）如表 1 所示，11 次副高北部型过程（持续 6 天以上脊线位于北纬 35°N 以北）如表 2 所示。

表 1 22 次副高南部型过程的时间
Table 1 The cases of south process chosen for composite analysis

年份	日期（7 月）	年份	日期（7 月）
1958	1~12 日	1981	8~14 日
1959	1~6 日	1984	16~27 日
1960	4~10 日	1985	15~30 日
1963	3~10 日	1986	11~17 日
1966	1~11 日	1987	1~9 日
1967	1~5 日	1991	1~10 日
1968	1~6 日	1992	1~7 日
1969	1~15 日	1993	1~8 日
1973	10~22 日	1998	1~8 日
1975	22~30 日	1999	4~18 日
1976	1~12 日	2001	12~18 日

表 2 11 次副高北部型过程的时间
Table 2 The cases of north process chosen for composite analysis

年份	日期（7 月）	年份	日期（7 月）
1958	13~20 日	1981	17~24 日
1960	17~27 日	1987	23~30 日
1967	23~28 日	1994	19~26 日
1968	22~28 日	1998	19~25 日
1973	3~9 日	1999	23~29 日
1979	24~30 日		

我们将上面两个表中所列的副高南、北部型过程中关键区平均的 500 hPa 位势高度值分别进行合成分析，以揭示副高在不同位置时的普遍特征。合成时将副高南部型（北部型）过程第一天定为 1 d，过程开始的前一天记为 0 d，为过程发生的临界点，之前的时间定为负，过程开始之后的时间定为正。南、北部型过程分别都截取了前 8 天进行合成，所以从第 9 天之后的时间即为南、北部型过程结束后的时间。图 1 给出了合成的南部型过程的关键区 500 hPa 位势高度随时间的变化。由图可见，-3 d~0 d 期间的副高脊线逐渐南压，1 d~8 d 期间副高南部型过程中副高脊线稳定于 25°N 附近，其后在 9 d~13 d 期间，副高脊线又逐渐北抬。图 2 给出了合成的北部型过程的关键区 500 hPa 位势高度值随时间的变化，由图可见，-3 d~0 d 期间的副高脊线逐渐北抬，1 d~8 d 期间副高北部型过程中副高脊线达到并稳

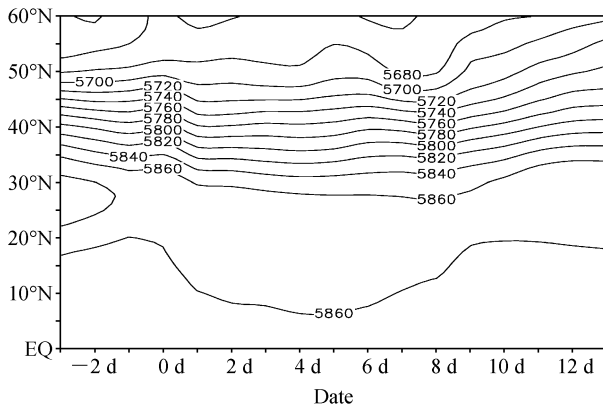


图1 以西太平洋副高南部型过程开始之日作为1 d合成的110°E~130°E关键区500 hPa位势高度值(单位: gpm)逐日变化图

Fig. 1 Composite daily geopotential height (gpm) at 500 hPa in the key area (110°E~130°E) of the 22 south processes, the first day of the processes is defined as 1 d

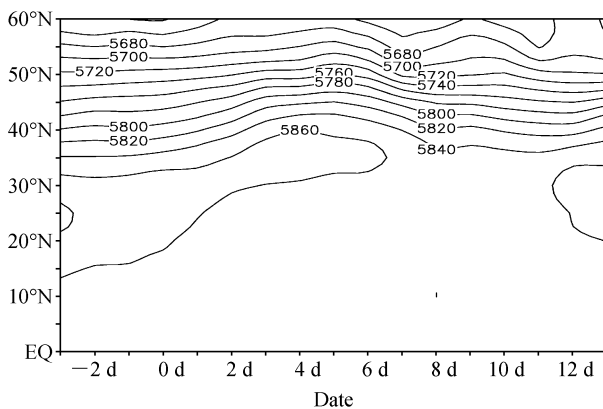


图2 同图1, 但为西太平洋副高北部型

Fig. 2 Same as Fig. 1, but for the 11 north processes

定于35°N附近,其后在9 d~13 d期间,副高脊线又逐渐南退。比较两幅图可见,500 hPa位势高度合成形势在南部型过程和北部型过程中有几乎相反的特征及演变。

3.2 西太平洋副热带高压南北部型过程的变化周期分析

西太平洋副高在夏季的位置偏北、偏南是否存在规律?如果存在的话,在频谱上有多少天的振动,其变化周期是多少?为了研究西太平洋副高的位置规律,我们首先给出了1958~2002年500 hPa在(110°N~130°N)区域平均的5天滑动平均副高脊线位置演变图(图3)。该图非常清晰地显示出夏季(6~8月)西太平洋副高的北进

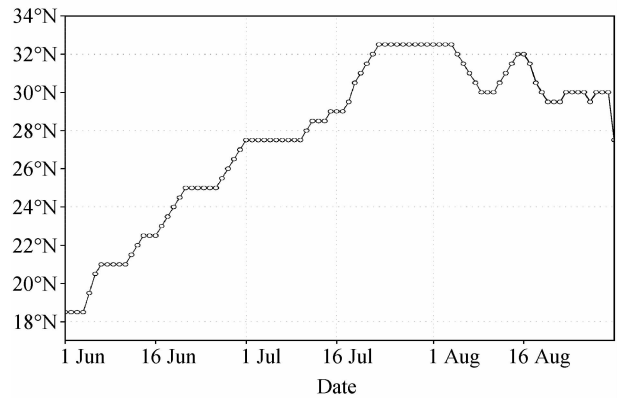


图3 1958~2002年平均110°E~130°E区域5天滑动平均副高脊线位置演变

Fig. 3 Daily evolution curves of 5-day moving averaged ridge line of subtropical high averaged over 110°E~130°E during 1958~2002

情况,整个北进阶段副高有3次稳定在某一纬度附近。据此可将副高的活动(北跳)分为4个时段,第一时段在6月中旬左右,副高北跳到25°N附近,并在此维持6天左右;第二时段在6月下旬到7月上旬,副高北跳到27°N附近,并在此维持9天左右;第三时段北跳在7月中旬左右,副高北跳越过30°N到达最北位置;副高到达最北位置后,受冷空气的影响,开始南撤。同时,从图3上可以发现在副高的北进阶段,低频振荡十分明显,说明副高的北进可能与低频波的活动有关。

通常认为大气的低频振荡有10~20天(准双周振荡)和30~60天(季节内振荡)两个频带。为了寻找副高位置偏北和偏南的周期变化情况以及在6~8月南北位置变化的不同周期随时间的演变特征,我们采用小波分析方法对历史平均的6~8月500 hPa副高脊线位置进行分析。小波分析是一种可以把信号在时间和频率上展开的方法,该方法最大的优点在于能够得到频率变化的局部化信息。我们对1958~2002年45年6~8月脊线位置序列进行了以Morlet为母小波函数的小波变换,为了消除头部影响,变换前先将92天的序列进行头尾对称延伸,得到276天的时间序列。图4是该序列的波谱能量分析结果,横坐标为时间(第93天至第184天,即本研究所关注的6~8月92天的时间序列),纵坐标为傅里叶周期,单位为天。该图清楚地反映出西太平洋副高南北位置指数的各个周期成分的强度随时间的变化。由图

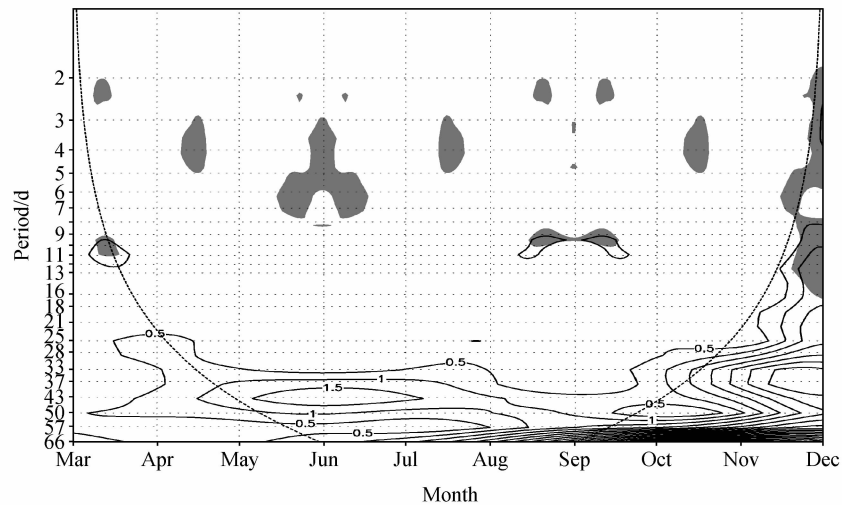


图 4 500 hPa 副高逐日脊线位置的小波局地功率谱, 阴影区表示通过 95% 信度检验的区域

Fig. 4 Energy spectrum of north-south position index of subtropical high at 500 hPa, regions above 95% confidence level are shaded

可见 (第 93 天至第 184 天), 10~20 天周期成分在 6 月中上旬强度较大, 随着时间的推移, 强度逐渐减小, 到 8 月下旬又重新加强, 并且信度较高。30~60 天的周期成分在 6 月中上旬强度较大, 随着时间的推移, 强度逐渐减小, 但是信度较低。由以上分析可见, 西太平洋副高南北位置异常变动在夏季存在非常明显的低频变化特征。

3.3 西太平洋副热带高压的南北位相过程所对应的环流特征

3.3.1 200 hPa 环流特征

庄世宇和纪立人 (1997) 研究指出, 夏季副热带西太平洋大气环流异常对我国广大地区影响很大, 尤其是东亚到鄂霍次海一带的 200 hPa 大气环流对华北夏季降水异常的影响显著 (马京津等, 2006)。我们分析了西太平洋副高南部型、北部型过程所对应的 200 hPa 风场从 -3 d~13 d 的合成结果。从合成分析结果可以看到 (图 5 仅给出部分合成图), -3 d~-2 d 期间, 南部型的南亚高压主体强大, 中心位于 (30°N , 100°E) 附近, 副高的东侧环流伸展到黄海。北部型的南亚高压主体位置偏西, 中心位于 (30°N , 80°E) 附近, 其东侧伸展到 140°E 附近, 太平洋上为一个大的鞍形场。-1 d~0 d 期间, 南部型的南亚高压向东扩展加强, 其东侧脊扩展至 145°E 附近。北部型的南亚高压东侧脊减弱西收。西太平洋上的鞍形场减弱。1 d~3 d 期间, 南部型的南亚高

压继续向东扩展, 占据了 60°E ~ 150°E 的中纬度地区。北部型的南亚高压主体西撤, 其东侧的脊减弱消失。4 d~5 d 期间, 两个位相基本保持之前的态势: 南部型的南亚高压东西范围很大, 东扩至 150°E 附近; 北部型的南亚高压范围很小, 中心位于 85°E 附近。西北太平洋上为一股大范围的偏北气流, 这是来自高纬度的西风带的分支, 这个北风分支一直穿过西太平洋, 越过菲律宾, 以较强劲的势头成为越赤道气流。南海吹强劲的东北风。6 d~8 d 期间, 南部型的南亚高压减弱西撤, 南海变成了东北风。北部型的南亚高压有略微的向东扩展加强。9 d~13 d 期间, 两个位相过程之后的南亚高压的东西位置和范围都非常相似, 只是南北位置稍有差异: 南部型之后的南亚高压中心位置保持偏南, 位于 30°N 附近, 而北部型之后的南亚高压中心位置保持偏北, 位于 30°N 以北。可见在 200 hPa 上西太平洋副高南部型的演变主要对应着南亚高压的向东扩展加强, 而北部型的演变对应着南亚高压的减弱西收。

为了更清楚地比较西太平洋副高在南部型和北部型过程中 200 hPa 的环流差异, 我们分别给出了副高南部型、北部型过程所对应的 200 hPa 风场在 8 天维持时间的合成结果 (见图 6)。由图可见, 当西太平洋副高位置偏南时, 南亚反气旋范围非常大, 东扩至 150°E 附近; 我国南部及台湾地区偏北风明显。西太平洋副高北部型过程所

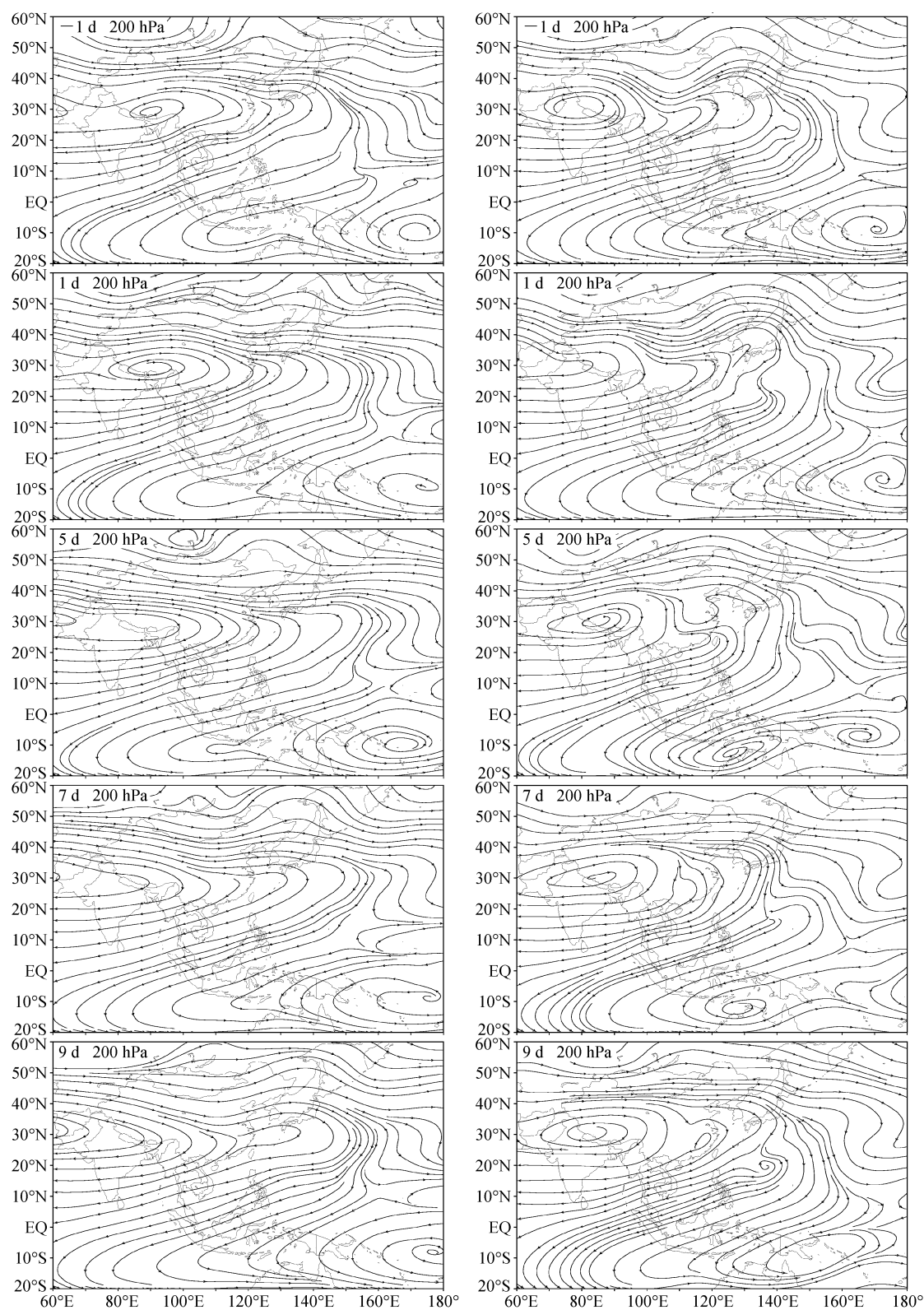


图 5 西太平洋副高南部型(左列)和北部型(右列)过程的 200 hPa 合成风场的演变,合成以过程开始的前一天为 0 d,之前为负,之后为正

Fig. 5 Composite daily wind field evolution at 200 hPa for the south (left column) and north (right column) processes, the first day of the processes is defined as 1 d

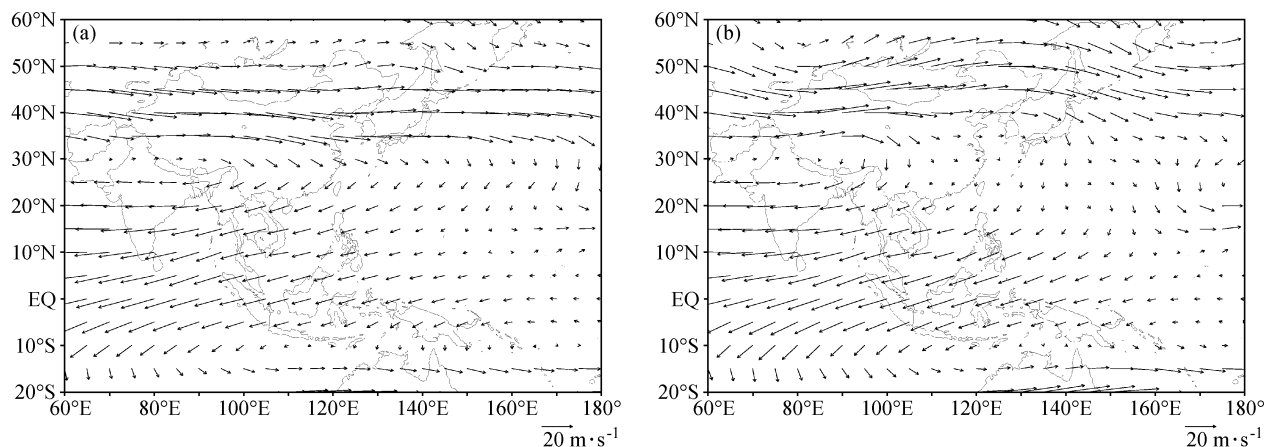


图6 西太平洋副高 (a) 南部型和 (b) 北部型过程 200 hPa 风场在 8 天维持时间的合成图

Fig. 6 Composite 200-hPa wind field for the (a) south and (b) north process of subtropical high during the 8-d persistent period

对应的南亚反气旋范围小，位置非常偏西，中心位于 85°E 附近；我国南部及台湾地区风速很弱。

3.3.2 500 hPa 风场形势

用同样方法对 500 hPa 风场进行了合成，这个高度上的风场体现的是西太平洋副高的环流形势（图 7 仅给出部分合成图）。 $-3\text{ d}\sim-2\text{ d}$ 期间，南部型的副高位于我国东部大陆及以东洋面上。长江流域在副高的控制下吹西南风，南海地区由于受西太平洋副高西南侧环流的影响而吹东南风；北部型的副高主体位置偏南，南海的东南风较弱。两种情况下的西风带都在我国东北到日本海出现脊形波动。 $-1\text{ d}\sim 0\text{ d}$ 期间，南部型的副高在原来的位置附近加强、范围扩大，南海的东南风减弱。西风带变得较平直。北部型的副高中心消失，长江流域被较强的西南风控制。西风带出现剧烈波动，深槽纵深至我国西南部，脊仍然位于日本海附近。 $1\text{ d}\sim 3\text{ d}$ 期间，南部型的副高主体南移东扩，占据西太平洋的大部分区域，中心位于 25°N 附近。南海和菲律宾在副高的控制下吹较强的东南风。西风带在较高纬度出现波状。北部型在 35°N 附近重新形成了副高中心，较南部型的位置明显偏北偏西。西风带的槽脊都减弱。在 3 d 时，北部型在台湾地区附近出现了气旋性环流，表明西太平洋副高北部型过程平均在第 3 天会受到台湾地区附近的气旋式环流的影响。此时的菲律宾地区由于气旋式环流的影响而吹西南风。 $4\text{ d}\sim 5\text{ d}$ 期间，南部型的副高势力强，范围大，位于 30°N 以南的西太平洋上，南海在它的控

制下继续吹东南风。较平直的西风带以北，蒙古国的北方出现一个气旋性环流；北部型的副高强度非常弱，位置保持偏北，台湾地区的气旋性环流减弱，南海为西南风，我国西北方出现深槽。 $6\text{ d}\sim 8\text{ d}$ 期间，南部型的副高中心有所北抬，范围仍然非常大，占据了西太平洋大部分地区；北部型的副高强度弱，继续维持在较高纬度，但位置有所东移。台湾地区的气旋性环流消失，南海地区被西南风取代。两种情况下的西风带都重新在日本海附近出现脊。 $9\text{ d}\sim 13\text{ d}$ 期间，副高南部型和北部型的环流向相似的形势演变：南部型的副高的中心位置北抬，逐渐回到气候平均的 30°N 左右，且环流强度也有所减弱；北部型的弱的偏北环流逐渐加强南移。在 13 d 时，西太平洋副高的中心向西南方移动到 $(30^{\circ}\text{N}, 150^{\circ}\text{E})$ 附近，环流形势已经非常接近西太平洋副高南部型了。

上面的分析表明，逐日资料可以揭示出 500 hPa 副高活动较为细致的动态气候特征。在 500 hPa 高度，西太平洋副高南部型过程开始时西太平洋副高中心位置偏西偏北，并且范围逐渐南移东扩。长江流域在西太平洋副高的控制下吹西南风，南海吹东南风，过程结束后强度减弱。而北部型的西太平洋副高在过程开始前位置偏南，后来副高中心消失，过程开始后在 35°N 附近重新形成了副高中心，位置偏北偏西。在气候平均的第 3 天，在台湾地区出现一个气旋性环流。长江流域被较强的西南风控制。过程中北部型的副高势力弱，位置保持偏北，台湾地区的气旋性环流减弱。

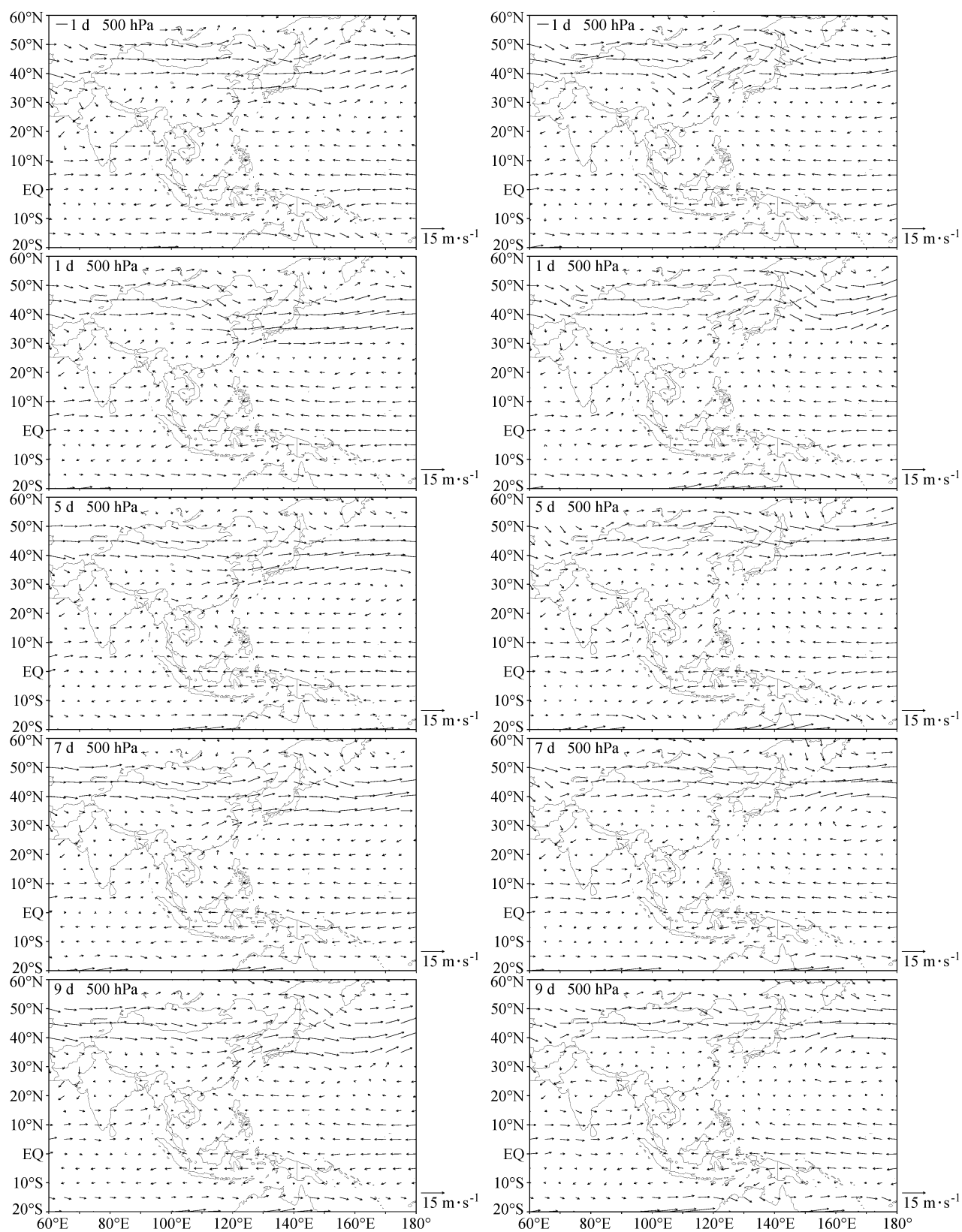


图7 同图5, 但为500 hPa合成风场演变

Fig. 7 Same as Fig. 5, but for 500-hPa wind field evolution

过程的后期，副高向东移。台湾地区的气旋性环流消失，南海地区被西南风取代。

过程结束后，副高两个位相过程的环流形势开始向相似的形势演变：南部型的副高的中心位置北抬，回到 30°N 左右，强度减弱；北部型的很弱的偏北环流逐渐加强南移。

为了更清楚地比较西太平洋副高在南部型过程和北部型过程中的 500 hPa 环流差异，我们同样给出了副高南部型、北部型过程所对应的 500 hPa 风场 8 天维持时间的合成结果（见图 8）。由图可见，西太平洋副高南部型对应的副高强度大、范围广，其脊线位于 25°N 附近，副高的西侧环流控制我国东南沿海地区，南海吹东南风；西太平洋副高北部型对应的副高强度弱、位置偏北，副高主体位于距我国较远的洋面上，台湾地区存在一个弱的气旋性环流，南海西南风较弱。

3.3.3 850 hPa 环流形势

通过 850 hPa 风场的分析可以考察副高南北位置与东亚夏季风的关系（见图 9）：南部型过程中环流形势变化比较少，西太平洋副高位置比较稳定，中心位于西太平洋偏南位置（约 25°N ），我国江淮流域受副高的控制吹西南风，南海地区被强劲的西南季风控制，菲律宾以西地区受到西太平洋副高西南侧的影响而吹西南风，菲律宾以东地区吹东南风；北部型过程中环流形势变化较大，但是过程中西太平洋副高环流一直较弱，大体维持在西太平洋东北部，在过程开始之前，我国的江淮流域至南海地区受到西南季风的控制而

吹西南风。菲律宾以东地区有一个气候学意义上的热带气旋。过程开始之初，该热带气旋往西北方向移到台湾地区附近，此时我国长江流域受到热带气旋的影响而吹东南风，南海地区的西南风范围南撤缩小。菲律宾地区受热带气旋的影响也吹西南风，该形势从西太平洋副高北部型过程的第 1 天持续到第 5 天，之后热带气旋环流消失，南海地区重新被西南季风占据。当西太平洋副高南部型和北部型过程结束后，两个位相过程的风场逐渐恢复到气候平均状况，形势变得相似。

综合可见，西太平洋副高南部型和北部型过程中 850 hPa 流场最大的区别在于：南部型过程中西太平洋副高的范围大，势力强，环流形势稳定少变，基本维持在偏南的位置，菲律宾和南海地区始终保持吹东南风；北部型过程中的西太平洋副高的环流始终较弱，位置偏北偏东，在其过程的中间时段台湾地区附近出现一个气旋性环流过程，该气旋性环流在气候平均意义上是在西太平洋副高北部型过程的第 3 天出现，持续 3、4 天后消失。此间的菲律宾附近以及南海保持西南风。

为了更清楚地比较西太平洋副高在南部型过程和北部型过程对应的 850 hPa 环流差异，我们同样给出了副高南部型、北部型过程所对应的 850 hPa 风场在 8 天维持时间的合成结果（见图 10）。由图可见，在西太平洋副高南部型过程中，副高位置偏南、偏西，脊线位于 30°N 附近；我国东南部地区为副高西部控制，那里及南海为强劲的西南季风。对应副高北部型过程，副高位置偏北、

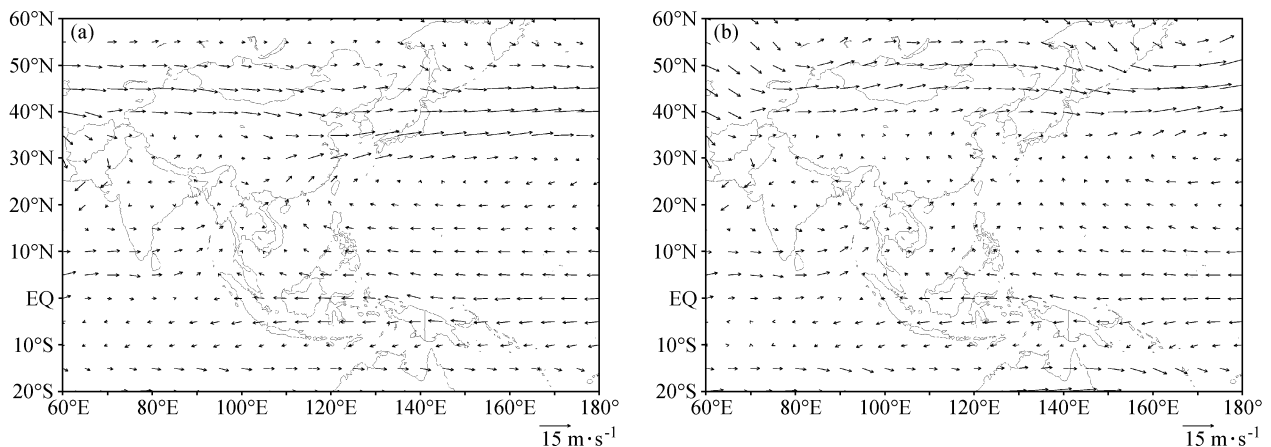


图 8 同图 6，但为 500 hPa 合成风场

Fig. 8 Same as Fig. 6, but for 500-hPa wind field

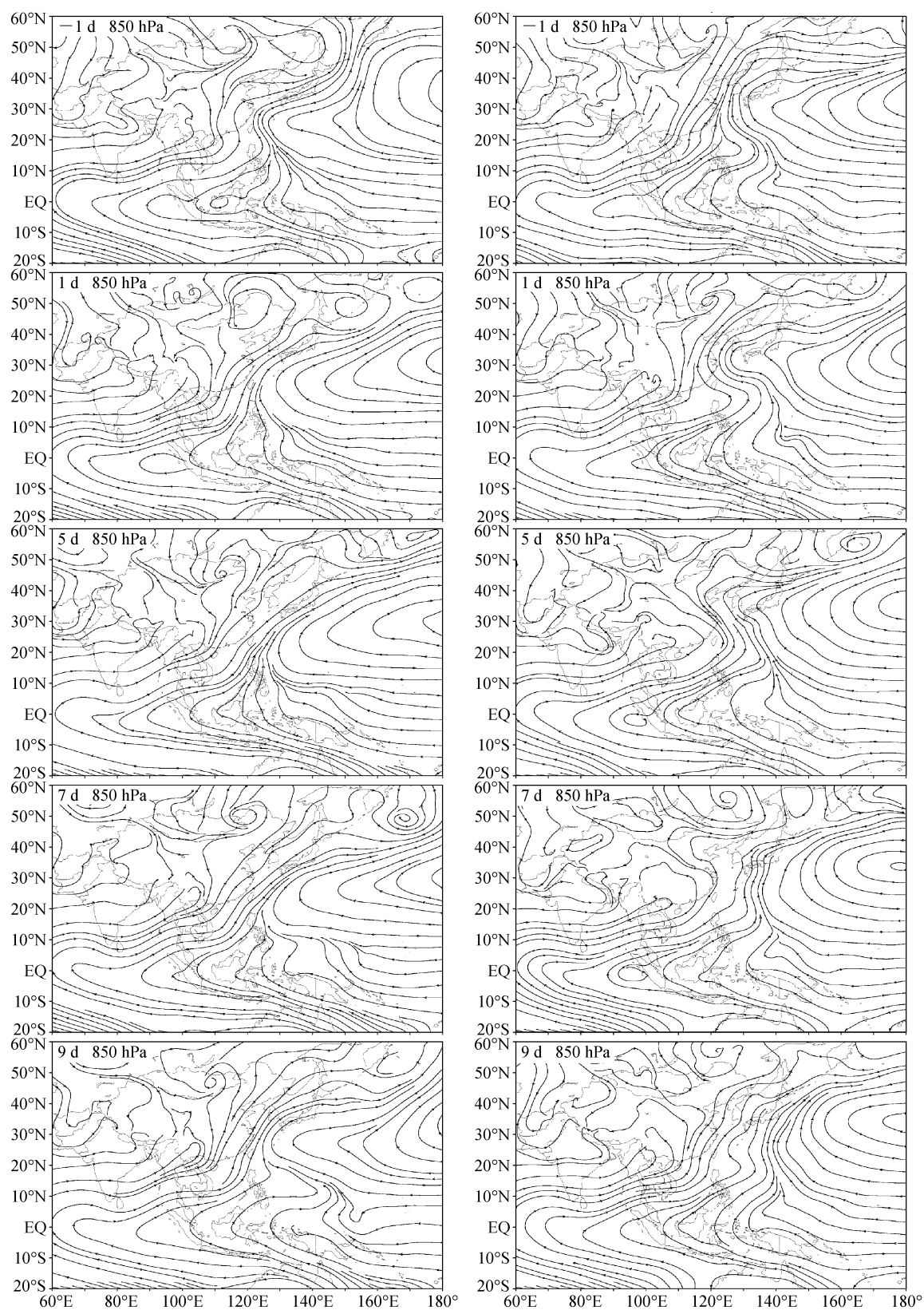


图9 同图5, 但为850 hPa合成风场演变

Fig. 9 Same as Fig. 5, but for 850-hPa wind field evolution

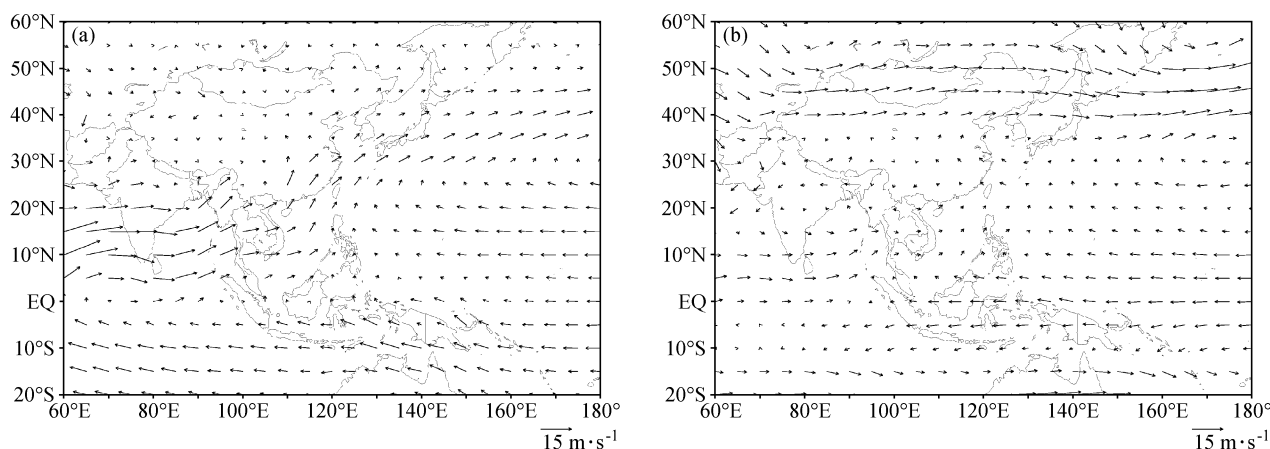


图 10 同图 6，但为 850 hPa 合成风场

Fig. 10 Same as Fig. 6, but for 850-hPa wind field

偏东，脊线位于 40°N 附近；台湾附近存在一个弱的气旋性环流，南海主要为偏西风。

4 西太平洋副高南北位置异常对中国东部降水的影响

西太平洋副热带高压的南北位置关系到东亚季风的的活动、我国东部降水的多寡以及气温的高低等。沙万英和郭其蕴（1998）的研究发现，副高脊线与汛期降水关系最好，并且从以上各节的讨论可以看出，在西太平洋副热带高压的南北位置不同时，夏季风的强度及位置都将发生变化，

这些变化必将影响到我国的降水。我们分析文中所定义的副高脊线的南北位置指数（截取 1958～2000 年共 43 年的 7 月份月平均值，共 43 个样本）与我国降水（1958～2000 年共 43 年的 7 月份月平均值，共 43 个样本）的相关情况，图 11 是其相关系数的分布特征。从相关图上可见，从东北地区中部到辽东半岛、山东半岛一直到长江入海口一带都为通过 95% 信度检验的正相关区，长江中下游地区为数值较小的正相关区，说明副高偏北时这些地区降水偏多；而当副高偏南时这些地区降水则较少。淮河流域和长江入海口以南的我国东南沿海地区为负相关区，说明在副高位置偏北

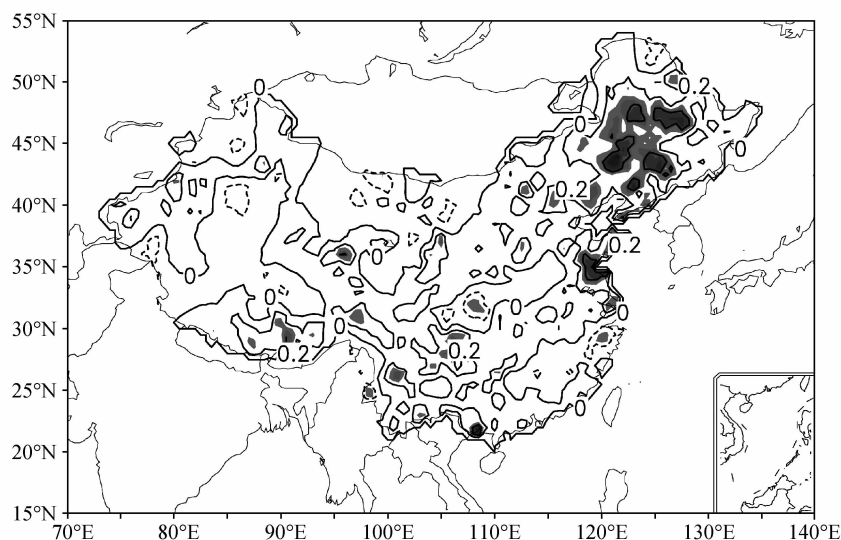


图 11 副高脊线位置指数与降水距平相关图（阴影区代表通过 95% 信度检验）

Fig. 11 The correlation map of the subtropical high ridge position index and precipitation, regions above 95% confidence level are shaded

时这些地区降水偏少。该相关图与王黎娟等(2005)所得到的研究结果吻合非常好,尽管我们的研究并不是用月平均资料进行的,但同样反映了西太平洋副热带高压的南北位置变化对我国夏季降水的重要影响。

降水在西太平洋副高北部型和南部型过程中的不同时段有怎样的具体情况呢?这可以从西太平洋副高南部型和北部型过程之前到过程结束之后中国降水距平的演变情况看到(图略)。在-3 d时,南部型和北部型在长江流域的降水距平分布形势正好相反,南部型有较大的正距平区,而北部型为负距平区。这时北部型在淮河流域的上、中游为正距平。到-2 d,南部型在长江流域的正距平区缩小南退,淮河流域出现负距平;北部型在江淮流域都变为负距平。在0 d时,南部型的淮河流域和长江流域中上游地区直至华南大部分地区呈现南北正距平带,长江下游地区为负距平;北部型的淮河流域为负距平,长江流域为正距平。到1 d,南部型的距平分布正负不明显,说明在气候平均意义上,在南部型过程的第一天,中国的降水受西太平洋副高南北位置的影响不明显;北部型保持前一天的形势。2 d~3 d期间,两个位相过程在长江流域都是降水偏少,但是此时北部型在长江以南的大部分地区都是正距平。到过程的中后期(4 d~8 d)时,两个位相过程的演变形势差异较大:南部型,4 d~7 d期间一直没有明显的正负距平分布,到8 d时,在长江流域出现正距平大值区;北部型,4 d~5 d期间,江淮流域下游地区为负距平,从华南到内陆大部一直延伸到东北地区为一条正距平带。在6 d,降水距平也没有明显的正、负分布。7 d~8 d期间,江淮流域中游地区为负距平,江淮流域下游以及华南大部分地区都呈现正距平,而之前的南北正距平带全部变为负距平。两个位相过程在结束时(8 d)的降水形势和500 hPa风场形势配合非常好:南部型时,500 hPa高度上东亚高纬鄂霍次克海区域出现阻塞型,高纬冷空气直达东亚中纬度地带,梅雨锋扰动加强,江淮流域降水偏多,而北部型时形势正好相反,鄂霍次克海区域没有出现阻塞型,冷空气路径沿着高纬向东传,扰动减弱,江淮流域降水偏少。在过程结束后的9 d~13 d期间,南部型在长江及江南地区保持正距平;北部

型在长江流域为负距平而江南为正距平。可见在西太平洋副高南北不同位置影响下,两个位相过程对我国降水的后滞影响非常明显而且持久。

由上面的分析可见,在副高南部型过程的前半段时间里,逐日的降水特征和气候相关图吻合得并不很好,这表明动态气候分析结果能揭示在西太平洋副高南、北部过程的开始前和过程中的细节演变特征,这些动态气候特征是以往的研究中所忽略的。待到过程的中期以后以及过程结束后的后延影响期,降水分布和相关图吻合较好。

为了比较副高南、北部型过程对我国降水总体影响的差异,我们同样给出了副高南部型、北部型过程所对应的降水距平场在8天持续时间的合成结果(图12)。由图可见,对应西太平洋副高的南部型过程,我国长江以北包括淮河流域为降水负距平,降水较气候平均少;长江下游、江南地区包括华南沿海大部分地区以及我国东北都为正距平,说明当副高偏南时那些地区降水增多。对应西太平洋副高的北部型过程,我国江南地区为正距平;华北西部到四川有另外一个正距平带;而东北到山东及淮河流域一带为负距平。对应两个不同的副高位相过程,降水的最大差异主要表现在长江流域:在西太平洋副高为南部型时长江流域降水量偏少,在西太平洋副高为北部型时长江流域降水量偏多;同时,在西太平洋副高为南(北)部型时,华北地区也将少雨(多雨)。

5 西太平洋副高南北位置异常对中国日最高温度的影响

夏季酷暑也是一种灾害,而最能够体现夏季酷暑的物理量是日最高温度。图13用类似降水相关图的方法给出了7月我国日最高温度与副高南北指数的相关系数分布图。从图上可以看到,除在东北大部分地区和云贵高原地区为负相关区外,我国其它大部分地区基本都为正相关区,而且长江入海口和东南沿海地区、秦岭一带和祁连山一带都通过了95%的信度检验。说明副高偏南、偏北的位置变化和我国大部分地区的日最高温度之间存在非常明显的相关关系,西太平洋副高的位置变化对日最高温度的影响非常明显。当副高位置偏北时,除东北和云贵高原地区外的全国大部

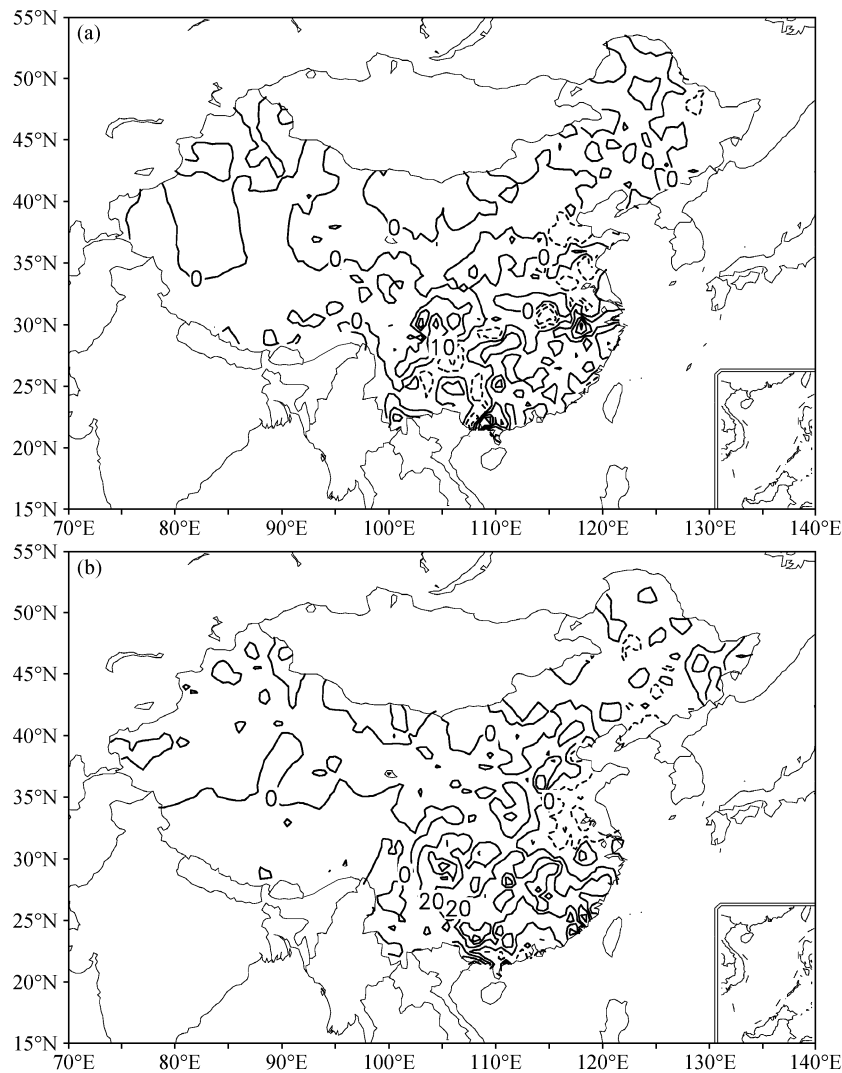


图 12 对应西太平洋副高 (a) 南部型和 (b) 北部型的降水距平在 8 天持续时间的合成图 (单位: mm)

Fig. 12 Composite precipitation anomalies (mm) for the south (a) and north (b) processes of subtropical high during the 8-d persistent period

分地区的日最高温度都偏高, 会出现高温酷暑; 而当副高偏南时情况相反。

那么, 在副高处于南部型、北部型过程期间, 日最高温度是如何变化的呢? 为回答这个问题, 我们分析了副高处于南部型、北部型过程期间的日最高温度情况。在挑选出的 22 次南部型过程中, 有 18 次发生在 7 月的上半月; 11 次北部型过程中有 10 次发生在 7 月的下半月, 这进一步验证了西太平洋副高在 7 月中旬有一次北跳过程。所以不能简单地把整个 7 月作平均来讨论气候特征, 因为在这同一个月里副高的南北位置其实有很大差异, 继而我国的气温也将受到不同的影响。为了弄清楚这个问题, 我们分析了副高南、北部型

过程所对应的日最高温度距平的逐日演化 (图略), 其结果表明: 在 -3 d, 南部型在长江流域为负距平, 而在长江口以南的东南沿海地区、我国西部、青藏高原及其北部地区、东北北部为正距平; 北部型几乎呈相反形势。-2 d~0 d 期间, 南部型从长江流域到东南沿海地区都为负距平, 淮河到越南边境的东北、西南方向的带状区域以及内蒙地区、青藏高原及以西大部分地区为正距平。北部型在江淮及东南沿海地区为正距平, 蒙古高原为负距平。可见过程开始之前, 两个过程的温度距平分布形势在中国东部大部分地区都相反, 在西部大部分地区相似。在 1 d, 南部型的长江流域、西北地区、东北地区都变为负距平。华

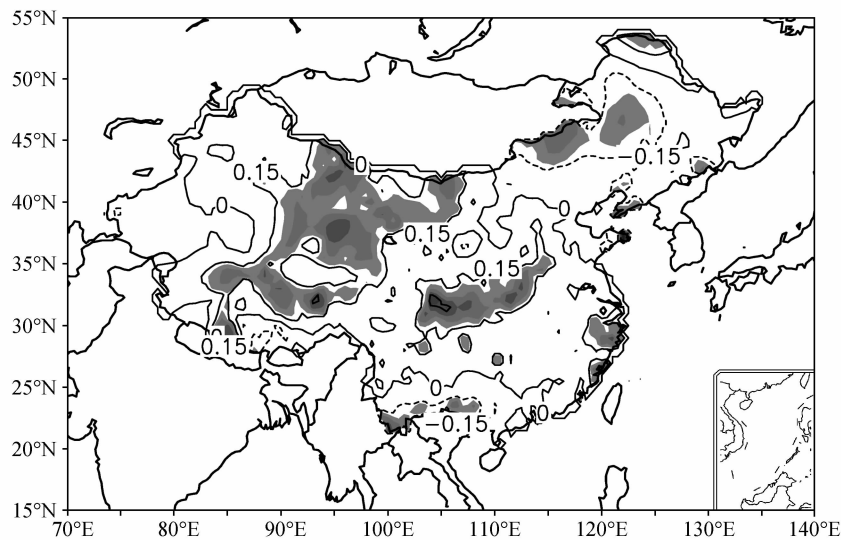


图 13 副高脊线南北指数与日最高温度相关图, 阴影区代表通过 95% 信度检验

Fig. 13 The correlation map of the subtropical high ridge position index and daily maximum temperature, regions above 95% confidence level are shaded

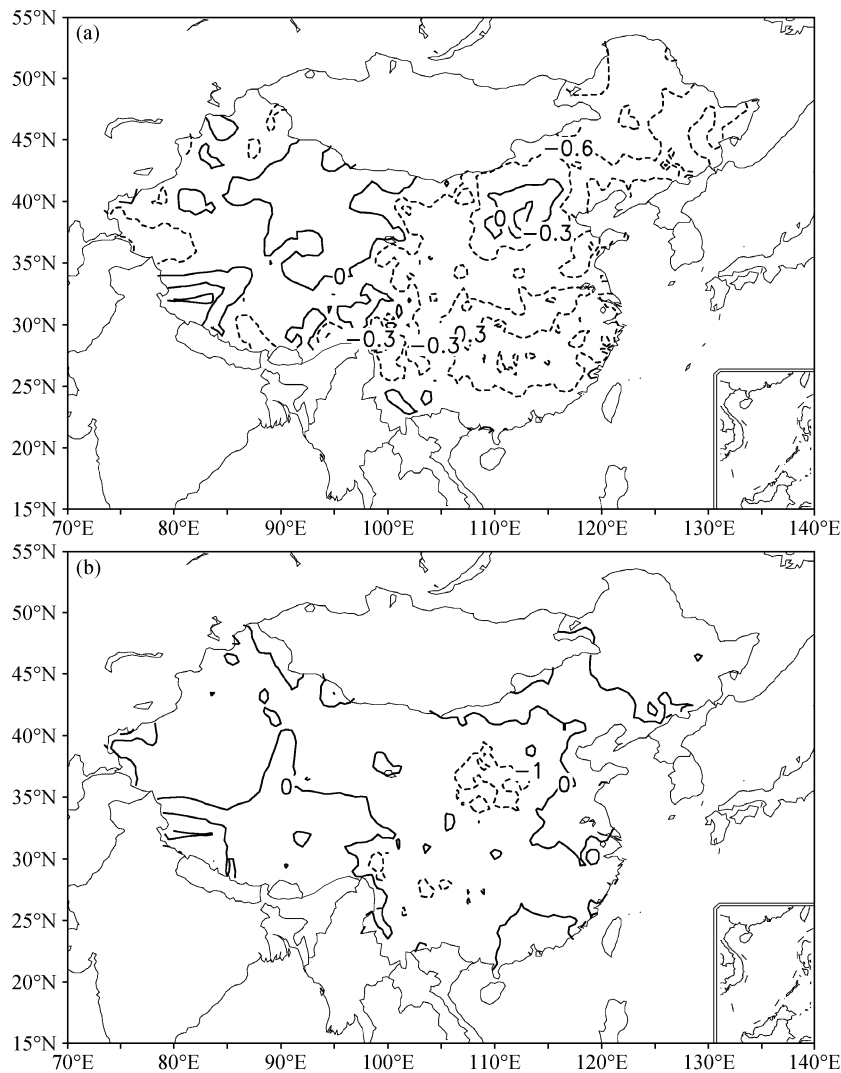
南沿海、淮河流域、蒙古高原都为正距平大值区。北部型在华南沿海地区、淮河流域到昆明之间出现东北、西南向的带状正距平区, 东北地区也为正距平。全国其余大部分地区都为负距平。可见此时两个位相过程在长江流域及东南地区分布形势相似, 在其它大部分地区的分布形势几乎相反。2 d~3 d 期间, 南部型在长江流域和青藏高原、东北地区东南部均为正距平, 出现了高温酷暑, 而北部型的分布形势几乎相反。到 4 d, 南部型在长江流域的正距平范围和强度都有所减小, 北部型在东南沿海地区的负距平范围有所扩大, 青藏高原、我国西部的大范围地区由前一天的负距平变为正距平。5 d, 南部型的距平分布形势和前一天相似, 但是强度加大; 北部型在东南沿海地区的负距平范围往西部扩展, 而我国中部的负距平区范围缩小。6 d~7 d 期间, 南部型的长江流域变为负距平, 东北地区变为正距平。北部型的黄土高原地区由负距平变为正距平。到 8 d, 南部型在江淮流域的负距平量值加大, 华南地区出现正距平。东北北部由正变负。北部型在长江以南地区的负距平区往南北方向扩展。到 9 d~10 d, 南部型的江淮流域负距平区东撤南移, 华南沿海和东北大部变为负距平。北部型的东南沿海地区、西北地区都为负, 东北大部都为正。到 11 d, 南部型的正距平区范围扩大, 值变小。北部型的正

距平区范围扩大, 囊括了江淮流域。到 12 d, 南部型的东南部都变为负距平, 北部型在东南沿海地区重新出现了负距平。

通过上面针对副高南部型和北部型过程所作的日最高温度分析, 我们可以看到两种不同位相过程所对应的逐日温度场形势演变有非常明显的差异。为了进一步更清楚地比较西太平洋副高在南部型过程和北部型过程中所对应的日最高温度的差异, 图 14 给出了副高南部型、北部型过程所对应的日最高温度距平场在 8 天持续时间的合成结果。由图可见, 对应西太平洋副高南部型过程, 除河套地区、中国西部地区外的全国绝大部分地区都为温度负距平, 天气相对凉爽; 对应西太平洋副高北部型过程, 华南沿海地区和淮河流域、东北地区为正距平, 会出现高温酷暑天气, 其它大部分地区都为凉爽的天气。可见, 从过程平均的意义来讲, 两个位相过程在长江流域的温度距平相同, 其它地区几乎都相反。

6 西太平洋副高南北位置对应的西北太平洋海温异常的特征

由于海表温度资料时间分辨率的限制, 无法进行副高南、北位相过程的每日海温变化研究, 我们这里只好用月平均资料来分析对应副高的南、

图 14 同图 12, 但为日最高温度距平合成图 (单位: $^{\circ}\text{C}$)Fig. 14 Same as Fig. 12, but for daily maximum temperature anomalies ($^{\circ}\text{C}$)

北位相西北太平洋海温的不同异常形势。这样一来, 本文只能挑选 7 月份副高只出现南部型过程和只出现北部型过程的年份进行合成分析, 其结果如图 15 所示。副高南部型过程在 20°N 以南的热带太平洋地区对应较弱的海温正距平, 中纬度太平洋从西部沿海到东部沿海对应明显的西南—东北波列式的依次负、正、负距平分布; 高纬度对应负的海温异常。而对于副高北部型过程, 在热带中东太平洋对应海温负异常, 说明副高北部型过程可能与 La Niña 现象有一定联系; 在热带太平洋中部对应的是正海温异常, 而从 20°N 往北的太平洋上依次对应负、正、负的波列式海温距平 (西北—东南向)。在日本海到菲律宾以东

的西太平洋, 与西太平洋副高南部型过程相对应为负 SSTA; 而与西太平洋副高北部型过程相对应为正 SSTA。可见西太平洋副高南部型和北部型对应有不同的太平洋 SSTA 分布特征, 尤其是在日本海到菲律宾以东海区 (西太平洋副高的主要活动区), 这在一定程度上表明了副高的不同位置所对应的海温异常的特征。

7 结论和讨论

本文用多年日平均资料, 着眼于西太平洋副高系统进行的动态气候分析研究表明, 虽然在时间上同为 7 月份, 但在西太副高南、北位置不同

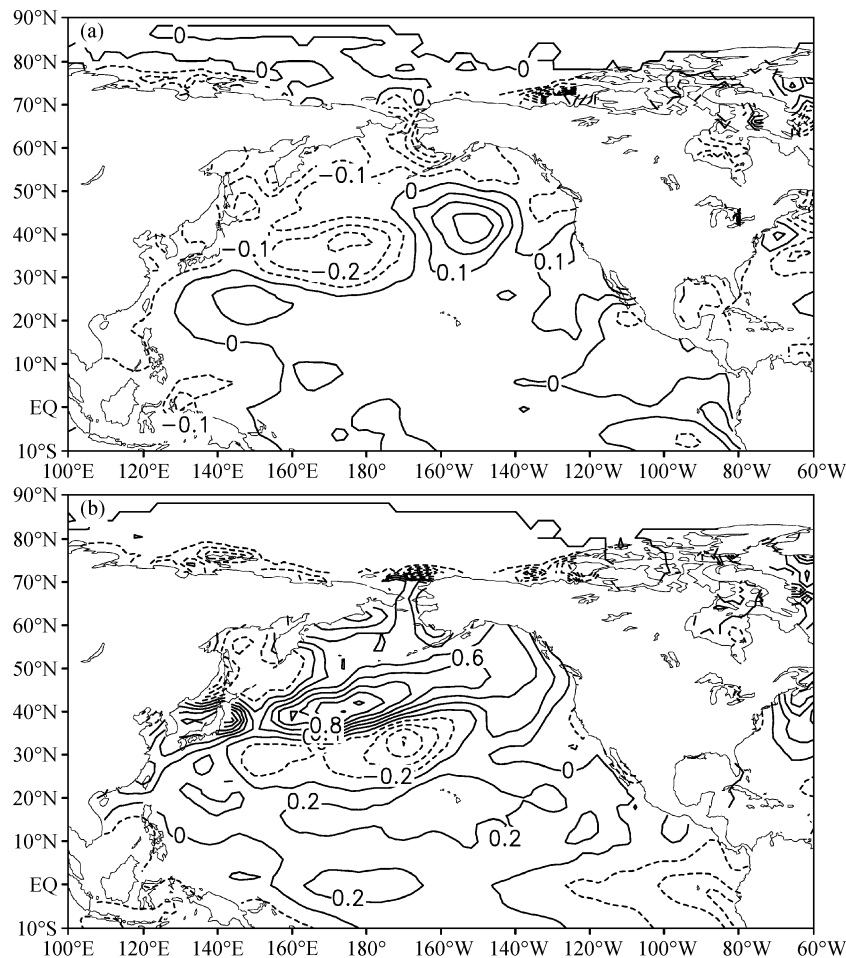


图 15 副高 (a) 南部型过程和 (b) 北部型过程所对应海温异常 (单位: $^{\circ}\text{C}$) 的合成结果

Fig. 15 Composite SST anomalies ($^{\circ}\text{C}$) for the (a) south processes and (b) north processes of subtropical high

的情况下, 西北太平洋和东亚地区的大气环流和气候 (温度和降水等) 都出现了显著的不同异常形势。我们在谈论和应用气候背景 (包括环流) 时, 需要尽可能考虑到大气系统的可能变化, 作动态气候分析, 以得到较为真实的形势或模式。

本文的研究揭示出了以下气候变化特征:

(1) 对于东亚和西北太平洋地区 7 月的气候及其变化来讲, 如果西太平洋副高这个重要系统的南北位置不同, 这一区域的大气环流和天气气候都有显著的差异。要深入认识气候及其变化的特征、做好气象保障服务, 有必要考虑气候系统的变化, 进行动态气候分析, 揭示出更为细致的气候变化形势。

(2) 西太平洋副高的南、北位置异常变动在夏季存在非常明显的低频变化特征, 在 6~8 月存在两个周期成分, 10~20 天的周期成分在 6 月中

上旬强度较大, 随着时间的推移, 强度逐渐减小, 到 8 月下旬又重新加强, 并且信度较高。30~60 天的周期成分在 6 月中上旬强度较大, 随着时间的推移, 强度逐渐减小, 但是信度较低。由以上分析可见, 西太平洋副高南北位置异常变动在夏季存在非常明显的低频变化特征。

(3) 西太平洋副高南部型和北部型所对应的环流特征有极为明显的差异: 在 200 hPa 上, 西太平洋南部型过程对应的南亚高压主体强大、位置偏东, 我国南部及台湾地区偏北风明显; 西太平洋副高北部型过程所对应的南亚高压范围小, 位置非常偏西, 中心位于 85°E 附近; 我国南部及台湾地区风速很弱。500 hPa 上, 西太平洋副高南部型对应的副高强度大、范围广, 其脊线位于 25°N 附近, 副高的西侧环流控制我国东南沿海地区, 南海吹东南风; 西太平洋副高北部型对应的副高

强度弱、位置偏北, 副高主体位于距我国较远的洋面上, 台湾地区存在一个弱的气旋性环流, 南海西南风较弱。850 hPa 上, 西太平洋副高南部型过程对应的副高位置偏南、偏西, 脊线位于 30°N 附近, 我国东南部地区为副高西部控制, 那里及南海为强劲的西南季风; 对应副高北部型过程, 副高位置偏北、偏东, 脊线位于 40°N 附近, 台湾附近存在一个弱的气旋性环流, 南海主要为偏西风。

在西太平洋副高南部型和北部型的演变过程中, 它们所对应的大气环流形势也各有其不同的演变特征。以 500 hPa 为例, 西太平洋副高南部型过程开始时西太平洋副高中心位置偏西偏北, 并且范围逐渐南移东扩, 长江流域在西太平洋副高的控制下吹西南风, 南海吹东南风, 过程结束后强度减弱。而北部型的西太平洋副高在过程开始前位置偏南, 后来副高中心不明显, 过程开始后在 35°N 附近重新形成了副高中心, 其位置偏北偏西; 在过程开始后的第 3 天, 在台湾地区出现一个气候平均意义上的热带气旋, 长江流域被较强的西南风控制; 过程的后期, 副高的位置向东移; 台湾地区的气旋性环流消失, 南海地区被西南风取代。在过程结束后, 两个副高位相过程的环流形势开始向相似的形势演变, 南部型的副高的中心位置北抬, 回到 30°N 左右, 强度减弱; 北部型的很弱的偏北环流逐渐加强南移, 两种位相过程的环流形势已经非常接近了。

(4) 对应西太平洋副高的南部型过程, 我国长江以北包括淮河流域为降水负距平, 降水较气候平均少; 长江下游、江南地区包括华南沿海大部分、东北地区都为正距平, 说明当副高偏南时那些地区降水增多; 对应西太平洋副高的北部型过程, 我国江南地区为正距平, 华北西部到四川有另外一个正距平带, 而东北到山东及淮河流域一带为负距平。对应两个不同的副高位相过程, 降水的最大差异主要表现在长江流域: 在西太平洋副高为南部型时长江流域降水量偏少, 在西太平洋副高为北部型时长江流域降水量偏多; 同时, 在西太平洋副高为南(北)部型时, 华北地区也将少(多)雨。

(5) 针对副高南、北部型过程所作的日最高温度分析表明, 对应西太平洋副高南部型, 除河套地区、中国西部地区外的全国绝大部分地区都

为温度负距平, 天气相对凉爽; 对应西太平洋副高北部型, 华南沿海地区和淮河流域、东北地区为正距平, 会出现高温酷暑天气, 其它大部分地区都为凉爽天气。可见, 从过程平均的意义来讲, 两个位相过程在长江流域的温度距平相同, 其它地区几乎都相反。

我们还可以看到, 在两种不同位相的演变过程中所对应的温度场形势变化有非常明显的差异: 南部型在过程开始之前, 长江流域温度距平由负变正, 我国西北部为正距平; 过程开始后淮河流域、东北地区西部为正距平, 长江流域、黄河中上游地区、华北和东北地区的东部为负距平, 西部地区的负距平值变大; 到过程中期, 长江以北、东北地区东部为正, 长江以南、我国西部、华北为负距平; 到过程的后期, 长江流域、我国西部绝大部分地区、华北、黄河中上游地区和西部地区都为正距平, 东北地区东部为负距平; 过程结束后的一段时间里的后延影响都是长江流域及以南的东南地区、我国东北地区的大部分都为负距平, 相对凉爽, 西部地区、华北保持正距平。而北部型在过程开始前, 中国东南部地区、长江流域和我国西部地区为正距平; 过程开始后东南部地区、长江流域出现负距平, 淮河流域及华南、华东地区都为正距平; 过程的中间阶段, 淮河流域为正距平, 长江流域、整个西部地区都为负距平; 过程结束后东南沿海地区、西部地区为负距平。

(6) 分析西太平洋副高南北位置与西北太平洋海温异常的关系表明, 副高南部型过程在 20°N 以南的热带太平洋地区对应有较弱的海温正距平, 中纬度太平洋从西部沿海到东部沿海对应有明显的西南—东北波列式的依次负、正、负距平分布; 高纬度对应有负的海温异常。而对于副高北部型过程, 在热带中东太平洋对应海温负异常, 说明副高北部型过程可能与 La Niña 现象有一定联系; 在热带太平洋中部对应的是正海温异常, 而从 20°N 往北的太平洋上依次对应负、正、负的波列式海温距平(西北—东南向)。在日本海到菲律宾以东的西太平洋, 与西太平洋副高南部型过程相对应为负 SSTA; 而与西太平洋副高北部型过程相对应为正 SSTA。可见西太平洋副高南部型和北部型对应有不同的太平洋 SSTA 分布特征, 尤其是在日本海到菲律宾以东海区(西太平洋副

高的主要活动区),这在一定程度上表明了副高的不同位置所对应的海温异常的特征。

参考文献 (References)

- Annamalai H, Slingo J M, Sperber K R. 1999. The mean evolution and variability of the Asian summer monsoon; Comparison of ECMWF and NCEP/NCAR reanalysis [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 127 (6): 1157–1186.
- Bromwich H D, Fogt R L. 2004. Strong trends in the skill of the ERA-40 and NCEP/NCAR reanalysis in the high and midlatitudes of the Southern Hemisphere, 1958–2001 [J]. *J. Climate*, 17 (23): 4603–4619.
- 陈烈庭, 吴仁广. 1998. 太平洋各区海温异常对中国东部夏季雨带类型的共同影响 [J]. *大气科学*, 22 (5): 718–726.
- Chen Lieting, Wu Renguang. 1998. The joint effects of SST anomalies over different pacific regions on summer rainbelt patterns in eastern China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 22 (5): 718–726.
- 陈雯, 智协飞. 2008. 太平洋副热带高压及南亚高压在 NCEP/NCAR 和 ECMWF 再分析资料中的对比研究 [J]. *热带气象学报*, 24 (2): 189–194.
- Chen Wen, Zhi Xiefei. 2008. Comparisons of the West Pacific subtropical high and of the South Asia high between NCEP/NCAR and ECMWF reanalysis datasets [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 24 (2): 189–194.
- Inoue T, Matsumoto J. 2004. A comparison of summer sea level pressure over East Eurasia between NCEP-NCAR reanalysis and ERA-40 for the period 1960–99 [J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 82 (3): 951–958.
- 李崇银, 杨辉, 顾薇. 2008. 中国南方雨雪冰冻异常天气原因的分析 [J]. *气候与环境研究*, 13 (2): 113–121.
- Li Chongyin, Yang Hui, Gu Wei. 2008. Cause of severe weather with cold air, freezing rain, and snow over South China in January 2008 [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 3 (2): 113–121.
- 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 [J]. *科学通报*, 43 (4): 434–437.
- Li Jianping, Chou Jifan. 1998. Dynamics in the splitting of subtropical high belt-geostrophic effect [J]. *Chinese Science Bulletin (in Chinese)*, 43 (4): 434–437.
- 罗玲, 何金海, 谭言科. 2005. 西太平洋副热带高压西伸过程的合成特征及其可能机理 [J]. *气象科学*, 25 (5): 464–472.
- Luo Ling, He Jinhai, Tan Yanke. 2005. The composite features and possible mechanisms during the westward extension of subtropical high in the western Pacific [J]. *Scientia Meteorologica Sinica*, 25 (5): 464–472.
- 马京津, 高晓清, 曲迎乐. 2006. 华北地区春季和夏季降水特征及与气候相关的分析 [J]. *气候与环境研究*, 11 (3): 321–329.
- Ma Jingjin, Gao Xiaqing, Qu Yingle. 2006. The character of precipitation and its relation to climate change over North China in spring and summer [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 11 (3): 321–329.
- 沙万英, 郭其蕴. 1998. 西太平洋副热带高压脊线变化与我国汛期降水的关系 [J]. *应用气象学报*, 9 (suppl.): 31–38.
- Sha Wanying, Guo Qiyun. 1998. Variations of summer rainfall over China in relation to the geographical locality of subtropical high ridge over West Pacific [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 9 (suppl.): 31–38.
- 施宁, 布和朝鲁, 纪立人, 等. 2008. 2008 年初我国南方雨雪低温天气的中期过程分析 II: 西太平洋副热带高压的特征 [J]. *气候与环境研究*, 13 (4): 434–445.
- Shi Ning, Bueh Cholaw, Ji Liren. 2008. On the medium-range process of the rainy, snowy, and cold weather of South China in early 2008 Part II: Characteristics of the western Pacific subtropical high [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 13 (4): 434–445.
- 陶诗言, 卫捷. 2006. 再论夏季西太平洋副热带高压的西伸北跳 [J]. *应用气象学报*, 17 (5): 512–523.
- Tao Shiyan, Wei Jie. 2006. The westward, northward advance of the subtropical high over the West Pacific in summer [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 17 (5): 512–523.
- 王黎娟, 罗玲, 张兴强, 等. 2005. 西太平洋副热带高压东西位置变动特征分析 [J]. *南京气象学院学报*, 28 (5): 577–585.
- Wang Lijuan, Luo Ling, Zhang Xinqiang, et al. 2005. Variation features of the longitudinal position of the western Pacific subtropical high [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese)*, 28 (5): 577–585.
- 卫捷, 杨辉, 孙淑清. 2004. 西太平洋副热带高压东西位置异常与华北夏季酷暑 [J]. *气象学报*, 62 (3): 308–316.
- Wei Jie, Yang Hui, Sun Shuqing. 2004. Relationship between the anomaly longitudinal position of subtropical high in the western Pacific and severe hot weather in North China in summer [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 62 (3): 308–316.
- 杨辉, 孙淑清, 卫捷. 2006. 夏季西太平洋副热带高压的东西变化及其对气候的影响 [C] // 吴国雄, 等. 夏季副热带高压变化研究的新进展. 北京: 气象出版社, 44–55.
- Yang Hui, Sun Shuqing, Wei Jie. 2006. Variation features and the impact of the longitudinal position of the western Pacific subtropical high in summer [C] // Wu Guoxiong, et al. New Advance of the Research on Subtropical High in Summer (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 44–55.
- 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等. 1992. 天气学原理和方法 [M]. 北京: 气象出版社, 649pp.
- Zhu Qiangen, Lin Jinrui, Shou Shao-wen, et al. 1992. Principle and Approach of the Synoptic [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 649pp.
- 庄世宇, 纪立人. 1997. 夏季副热带西太平洋大气环流持续异常 [J]. *科学通报*, 42 (2): 2196–2199.
- Zhuang Shiyu, Ji Liren. 1997. The persistent abnormality of the atmospheric circulation over western Pacific in summer [J]. *Chinese Science Bulletin (in Chinese)*, 42 (2): 2196–2199.