# 2003 年夏季淮河流域梅雨期西太平洋副高结构和 活动特征及动力机制分析

赵兵科1,2 姚秀萍1,3 吴国雄1

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 中国科学院研究生院,北京 100039
 3 中国气象局培训中心,北京 100081

**摘 要** 通过资料分析和诊断,揭示了在 2003 年 6~7 月淮河流域暴雨期间,西太平洋副高相对偏北并且呈现南 北变化相对稳定、东西变化明显的特征;强劲而稳定少动的中纬度西风急流使得西太平洋副高难以北抬,从而造 成了淮河流域降雨带的稳定少动。同时,分析表明每一次雨锋的出现伴有高层南亚高压的东伸,并诱发 500 hPa 西太平洋副高西伸至我国沿海,导致淮河流域多雨,江南干旱高温。分析还发现高、低空副热带高压影响天气系 统发展的如下机制:(1)沿 30°N 东伸的高层南亚高压脊在东部 30°N 以北地区引起辐散和上升,在 30°N 以南地 区引起辐合和下沉;(2)江南高层的辐合下沉气流在中低空的辐散增强了局地的负涡度,诱发西太平洋副高西 伸;(3)沿增强了的西太平洋副高西北侧的偏西南气流在 30°N 以北辐合,增强了局地的上升运动,为暴雨的产生 创造了大尺度的背景流场;(4)副高西北侧的暴雨加强了低空的南风和高层的北风,从而使高层东伸的南亚高压 和低层西伸的西太平洋副高在我国东部稳定维持。

关键词 西太平洋副高 南亚高压 暴雨 西风急流 阻塞高压
 文章编号 1006 - 9895(2005)05 - 0771 - 09
 中图分类号 P461
 文献标识码 A

# The Structure and Activity Characteristics of the Western Pacific Subtropical Anticyclone and Its Dynamical Mechanism During the Meiyu Period over the Huaihe River Basin in 2003

ZHAO Bing-Ke<sup>1, 2</sup>, YAO Xiu-Ping<sup>1, 3</sup>, and WU Guo-Xiong<sup>1</sup>

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

2 Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039

3 China Meteorological Administration Training Center, Beijing 100081

Abstract The routine NCEP/NCAR reanalysis data were used for analyzing the characteristics of the western Pacific subtropical anticyclone (WPSA) during the Meiyu period in 2003. It is found that the WPSA is characterized by northward and stable relative to that of the climate mean, as well as the obvious east-west oscillation. The northward moving of the WPSA is prevented by the strong and stable western jet in mid-latitudes, thus causes the stable rainband over the Huaihe River basin. Meanwhile, the results show that the occurrence of each torrential rain is almost accompanied by the eastward moving of the South Asia high in upper-layer, and the westward extension of the 500 hPa WPSA to west coast of China. As a result, the high temperature and drought occur over the south of the

**收稿日期** 2004-09-07, 2005-03-23 收修定稿

基金项目 国家自然科学基金资助项目 40135020、40375022 和 40205008

作者简介 赵兵科,男,1964年出生,博士生,目前主要从事天气、气候动力学研究。E-mail: zhaobk@mail. iap. ac. cn

Yangtze River. The possible mechanisms of the subtropical anticyclone in the higher and lower layer triggering the development of the weather system are summarized as follows: (1) The ridge of the eastward South Asia high along 30°N causes the divergence and ascent motion to the north of 30°N while the convergence and descending motion to the south of 30°N over the Huaihe River basin. (2) The divergence of the convergence and descending airflow further enhances the local negative vorticity in the lower layer, which leads to the westward extending of the WPSA. (3) The convergence of the southwesterly to the north of 30°N along the northwest of the WPSA strengthens the local ascending motion, which provides a large-scale background favorable for the torrential rain. (4) The torrential rain to the northwest of the WPSA intensifies the southerly in the lower layer and the northerly in the higher layer, and it makes the eastward South Asia high and the WPSA stably maintain over the area.

Key words the western Pacific subtropical anticyclone, South Asia high, torrential rain, western jet, blocking anticyclone

### 1 引言

西太平洋副热带高压(简称西太副高)因为其所 在的特定地理位置,成为连接中高纬度和低纬地区 环流系统的中间纽带,它的活动直接影响着中国的 气候和天气变化,尤其对江淮流域梅雨的维持和发 展产生极大影响。1991年和1998年夏季特大洪水 就是典型例子,而2003年淮河流域特大暴雨的持 续发展和维持无疑又与西太副高有着密切的关系。

对于西太副高的研究一直是气象学者关心的热 点问题,尤其是西太副高的南北进退、东撤和西伸 以及强度变化这些直接与中国天气和气候有关的问 题。关于西太副高对天气气候的影响,陶诗言 等<sup>[1,2]</sup>和黄士松<sup>[3]</sup>已进行了一系列的研究,他们的 成果表明副高季节性北跳的特征以及与江淮流域梅 雨的关系,成为副高研究和预报的理论基础。之 后,毕慕莹<sup>[4]</sup>和喻世华等<sup>[5,6]</sup>又系统研究了副高东 西振荡的特征,认为在降水异常特别是区域性暴 雨、特大暴雨大尺度环流背景分析时普遍认为副高 短期变异起着关键性作用。

吴国雄和刘屹岷等<sup>[7~10]</sup>关于西太副高形成和 变异方面的一系列研究成果,从理论分析、诊断计 算和数值试验等方面证实空间非均匀非绝热加热是 决定西太副高位置和强度的关键因素,副高与雨带 具有相互作用。任荣彩等<sup>[11]</sup>的研究表明西太副高短 期变异的动力和热力机制与南亚高压的异常活动和 中高纬度环流系统的异常有着密切的联系。何金海 等<sup>[12]</sup>关于西太副高的垂直环流结构和年际变动特征 及其机制研究指出在副高北侧东亚副热带季风雨带 上有暴雨发生时,其凝结潜热激发的经圈环流对相 应经度上的副高脊线附近的下沉气流有显著贡献,

#### 表明副高是中高纬和低纬度系统相互作用的纽带。

本文利用 NECP 逐日 2.5×2.5 的再分析资料 以及我国的实况降水资料,分析 2003 年淮河流域 暴雨期间西太副高的演变特征,以及与其有着相互 作用的环流系统的演变特征,以期探讨 2003 年西 太副高异常的机理。

### 2 淮河流域暴雨过程概况

2003年入梅后, 6月下旬至7月上旬, 淮河流 域出现了1954年以来最强的大洪水,雨量集中, 降水强度大,主要雨带在淮河流域长期停滞,呈准 静止状态。6月21日0000UTC~7月22日0000 UTC累计雨量如图1a所示,降水总量一般在 200~700mm,其中安徽北部和江苏的中北部达到 700mm以上。图1b为2003年6~7月淮河流域 (31°N~34°N,115°E~120°E)平均的逐日雨量演变 图,从图中可以看出,从6月下旬初至7月下旬初 整整一个月的时间淮河流域降水过程频繁,一共出 现了6次暴雨过程:6月21~23日、6月27日、6 月30~7月6日、7月9~14日、7月17~18日和 7月20~22日。

### 3 西太平洋副高的结构和活动特征与 淮河流域暴雨的关系

#### 3.1 西太平洋副高的结构特征

图 2a(见文后彩图)是淮河暴雨期间 500 hPa 逐 候的西太副高脊线 (u=0,且 $\partial u/\partial y>0$ )的分布,可 以看出,从西太平洋到我国沿海西太副高脊线位于 20°N~26°N之间。6月下旬主要在 20°N~23°N,7 月上中旬主要在 23°N~26°N 振荡,表现了西太副 高较为稳定的结构。同时,从 115°E~120°E 平均的

772

西太副高脊线垂直分布[图 2b(见文后彩图)]来看, 在垂直方向上表现为随高度增高向高纬倾斜的结构, 在对流层底层西太副高脊线位于  $15^{\circ}N \sim 27^{\circ}N$  之间, 到了高层的 100 hPa 位于  $25^{\circ}N \sim 33^{\circ}N$  之间,在 500 hPa 高度上介于  $20^{\circ}N \sim 26^{\circ}N$  之间。

从暴雨期间介于115°E~120°E平均的西太副 高单体的剖面图(图略)上可以看到,在西太副高脊 线附近上升运动一般位于北侧,最大中心介于 700~200 hPa之间,脊线或脊线南侧一般为一致的 下沉气流。最大降水位于副高北侧经圈环流的上升 支所在的区域。图 2c(见文后彩图) 仅给出 2003 年 7 月 1 日介于 115°E ~120°E 平均的经圈环流剖面。

773

从 2003 年 6~7 月西太副高单体内(22.5°N ~ 27.5°N, 115°E ~ 125°E)涡度垂直变化的时间演变 [图 2d(见文后彩图)]可知, 6 月上中旬, 对流层中 低层为正涡度, 高层为负涡度, 6 月下旬以后对流 层整层基本上为负涡度所控制, 与副高单体在 6 月 下旬出现了北抬有关。

#### 3.2 西太平洋副高的演变特征

图 3 是西太副高经向和纬向高度场的演变。



图 1 (a) 2003 年 6 月 21 日 0000 UTC~7 月 22 日 0000 UTC 累计雨量的分布,等值线间隔为 100 mm; (b) 2003 年 6~7 月淮河流域平均 的逐日雨量的演变

Fig. 1 (a) Distribution of accumulative precipitation from 0000 UTC 21 Jun to 0000 UTC 22 Jul 2003 with a contour interval of 100 mm; (b) the evolution of average daily precipitation of the Huaihe River basin during Jun and Jul 2003



Fig. 3 Time-latitude (longitude) cross section of geopotential height at 500 hPa from Jun to Jul 2003 (units: dagpm): (a) Averaged between 120°E and 140°E; (b) along 25°N

由图 3a 发现, 2003 年 6~7 月西太副高 588 等高 线所在的范围基本上稳定在 15°N~30°N 之间, 尤其是6月下旬后期到7月中旬初,西太副高 588 北界线一直稳定在 29°N 附近。在这段时间 内,淮河流域正好位于副高北侧或西北侧,这是 造成较大降水区在淮河流域而不在长江流域的主 要原因。而在此之前,西太副高不稳定,因此,6 月11日和21~23日的降水为过程性的降水,7 月14日至19日西太副高略偏南,使得降水位置 略偏南。副高的南北移动决定了雨区的南北移 动。为了进一步揭示出西太副高南北变化的特征, 我们计算了1981~2003年7月500 hPa 120°E~140° E平均的副高脊线的最高纬度、平均纬度、最低纬 度及均方差(表 1),由此可知,23 年 7 月份 120°E ~140°E平均的副高脊线平均纬度为24.7°N,平均 最高纬度为 36.54°N, 平均最低纬度为 11.8°N, 平 均均方差为 6.1°N。而 2003 年 7 月平均纬度为 25.4°N,比多年平均略偏北,但最高纬度为 29.2°N,比多年平均明显偏南,最低纬度为 20.0°N,比 多年平均明显偏北,均方差为 2.1°N,远远比多年 平均值要小,且在 23 年中为最小,从此也表明了 2003 年 7 月副高南北变化是 1981 年以来最稳定的。

副高除了南北移动外,还存在东西方向的进 退。从沿 25°N 经向的 500 hPa 高度场的演变图(图 3b)可以看出,2003 年副高东西进退较为显著。6 月下旬至 7 月下旬初,副高存在 4 次明显的向西伸 展,西伸均超过 120°E,其中 7 月中旬的西伸达到 70°E,这 4 次明显的西伸过程都对应着暴雨过程, 副高东退对应着暴雨过程的间歇期,7 月 2 日前后 副高达到最强。

总之,2003年6月下旬至7月下旬副高以南北方 向准静止而东西方向振荡活动为主,位置相对偏北。

表1 1	$1981 \sim 2003$	年7月	500 h	Pa 西太副	高脊线统	计特征
------	------------------	-----	-------	--------	------	-----

Table 1	Statistics c	haracteristics of	WPSA	ridge	lines at	500	hPa	in J	ul from	1981	to	2003
I HOIC I	Statistics e	indi deter ibereb or		1 Iuge	mics at	000			ui ii om	1,01	•••	-000

年	最高纬度(°N)	最低纬度(°N)	平均纬度(°N)	均方差(°N)
Year	Highest latitude (°N)	Lowest latitude (°N)	Averaged latitude (°N)	Standard error (°N)
1981	41.2	11.0	25.5	7.9
1982	32.1	11.9	22.7	5.3
1983	31.2	10.4	24.7	4.5
1984	31.6	11.6	21.1	6.2
1985	37.1	18. 2	24.2	4.5
1986	34.2	10.0	26.9	4.4
1987	33.3	11.9	23.6	5.1
1988	41.2	10.0	24.9	7.8
1989	32.4	11.6	22.4	5.5
1990	45.0	11.1	23.9	7.5
1991	30.8	10.8	24.6	5.8
1992	42.5	15.7	26.6	5.1
1993	40.0	10.6	23. 3	5.1
1994	38.2	10.5	29.4	7.6
1995	34.4	10.3	26.3	5.6
1996	35.4	10.3	25.2	7.0
1997	42.2	10.5	25.6	7.3
1998	31.1	10.5	22.4	4.9
1999	35.0	12.1	22.9	6.4
2000	41.5	11.7	24.8	7.8
2001	34.7	10.0	25.7	6.8
2002	46.1	10.2	25.4	9.4
2003	29.2	20.0	25.4	2.1
平均 Average	36.5	11.8	24.7	6.1

# 4 中纬度系统的活动特征及其与西太 平洋副高活动的关系

根据中高纬度阻塞高压的分布(图略),从沿 60°N 的 500 hPa 高度场的经向-时间演变(图 4a)可 以发现,6月第2候阻塞高压在贝加尔湖以北地区 建立,至6月16日一直稳定少动,此时东半球为单 阻型。尔后,阻塞高压减弱,到了6月23日,在乌 拉尔山以东地区又有阳高重建,此时对应于西太副 高的西伸和第一次大暴雨过程。此后,阻高逐渐西 移,至7月1日开始东移,同时在鄂霍次克海附近 有一阳高开始建立,东亚中纬度出现稳定的双阳形 势,在两阻高之间为低槽区,这一阶段对应着西太 副高的西伸发展期,淮河流域经历了一次强而持久 的降水过程。7月11日开始双阻均向西移动,主体 位于 30°E 和雅库茨克海附近, 在乌拉尔山附近为 一深槽发展, 冷空气的南下引起加深的高空槽后高 压脊的发展,常常会导致西太副高的一次加强和发 展过程[11]。

同时,从高空西风急流的演变(图 4b)可以看 出,6月上旬西风急流分别在 60°E(里海附近)和 150°E建立,前支西风急流在6月14日一度减弱, 到了6月17日再度重建,然后一直维持到7月上 旬中期;而后支西风急流在6月中旬减弱。6月下 旬至7月上旬西风急流一直维持在40°E~160°E的 范围内,由于西风急流的强劲以及稳定少动,使得 副热带高压很难向北抬,从而造成了6月下旬至7 月上旬淮河流域稳定少动的降雨带。另外,我们也 做了2003年淮河流域梅雨期间115°E~140°E西 风急流中心与西太副高脊线的南北变化关系(图 略),可以看出梅雨期间西风急流比较稳定,急流 中心位于33°N~41°N之间,西太副高脊线的南北 变化趋势与西风急流中心的变化趋势基本一致。

775

# 5 对流层高层南亚高压的演变特征及 其对副高的作用

任荣彩和吴国雄的分析<sup>[11]</sup>证实了陶诗言<sup>[13]</sup>所 发现的南亚高压的东西进退与中低层西太副高进退 的密切关系,并且揭示了南亚高压对西太副高短期 变化的影响。

从 2003 年夏季 200 hPa 南亚高压的演变[图 5a (见文后彩图)]上可以看出,南亚高压发展加强于 6 月下旬以后,其主体基本稳定于 60°E 附近,中心偏 西,强度偏强。但是在梅雨期间,南亚高压的伸展 异常偏东,1256 dagpm 的等高线可达到 120°E 以 东,从 6 月下旬初到 7 月下旬初共有 4 次明显的东 伸过程,从对应的散度场和淮河流域降水来看,每 一次雨峰都对应着一次辐散区的东移过程(见图中 的箭头),且在淮河流域上空辐散达到最强;而从 此层的涡度场变化[图 5b(见文后彩图)]看出,每



图 4 2003 年 6~7 月的经度-时间剖面: (a) 沿 60°N 的 500 hPa 高度场(单位: dagpm); (b) 沿 40°N 的 200 hPa 纬向风(单位:m•s<sup>-1</sup>) Fig. 4 Time-longitude cross section during Jun to Jul 2003; (a) Geopotential height at 500 hPa along 60°N (units: dagpm); (b) zonal wind at 200 hPa along 40°N (units: m•s<sup>-1</sup>)

一次暴雨对应着一次负涡度的东移过程。从对流层 中层的 500 hPa 高度场和涡度场变化 [图 5c(见文后 彩图)]来看,与高层对应在梅雨期间西太副高共有 4次明显的西伸过程,而目每次西伸都伴随着负涡 度的西移。为了进一步了解梅雨期间副高及其两侧 系统的变化,我们做了沿115°E 散度场和流场的垂 直剖面,可以看出每次暴雨过程期间,在对流层高 层 200 hPa 高压脊线(30°N 附近)北侧的淮河流域 为较强的辐散区,而在其南侧的江南为较强的辐合 区。这两个区可以从 400 hPa 附近一直到平流层底 层, 而在 400 hPa 以下散度场呈现两种分布形式, 一种是与上述两区上下中心相对应,但符号相反, 即在淮河流域为强的辐合,江南为强的辐散;另一 种是 750 hPa 以上与第一种形式分布一样, 而在 750 hPa 以下又存在一种与高空完全一样的散度分 布形式,即在淮河流域从高空到地面散度分布为辐 散-辐合-辐散-辐合,而在江南分布与此相反,为辐 合-辐散-辐合-辐散,从而形成了一种接力式上下 大气运动形式「如图 5e(见文后彩图)]。6月 21~ 23 日和6月底到7月初的暴雨过程, 散度场的分布 形式都是上述第二种分布形式。但是,不管是那种 形式,这种分布都有利于江南到淮河流域高空(低 空)北风(南风)的发展。从流场上看北边有冷干空 气下沉南下,南边有暖湿空气北上,在淮河流域交 绥,其上空为很强的上升运动,图 5d(见文后彩图) 仅给出了7月1日散度场和流场的分布形式。因此 可以认为对流层高层南亚高压的东伸, 使得高层的 辐散流场东伸,垂直下沉运动的范围也东伸,有利于 西太副高的西伸加强,有利于低层暴雨的产生发展 和加强,南亚高压的东伸是副热带高压西伸加强的 一个动力原因。

南亚高压影响西太副高的动力原因何在,根据 *p*坐标中的准地转涡度方程:

 $\frac{\partial \boldsymbol{\zeta}}{\partial t} + \boldsymbol{v}_{\rm h} \boldsymbol{\cdot} \nabla_{\rm h} \boldsymbol{\zeta} + \boldsymbol{\beta} \boldsymbol{\upsilon} = -f \nabla_{\rm h} \boldsymbol{\cdot} \boldsymbol{v},$ 

在不考虑涡度的局地变化时,利用连续方程, 有

$$\mathbf{v}_{\mathrm{h}} \cdot \nabla_{\mathrm{h}} \boldsymbol{\zeta} + \beta \boldsymbol{v} = f \frac{\partial \boldsymbol{\omega}}{\partial \boldsymbol{p}} \,.$$

上式对 p 求导,得:

$$\frac{\partial}{\partial p}(\mathbf{v}_{\mathrm{h}}\cdot\nabla_{\mathrm{h}}\zeta)+\beta\frac{\partial v}{\partial p}=f\frac{\partial^{2}\omega}{\partial p^{2}},$$

如果ω为波动函数,那么

即有

$$\omega \propto \frac{\partial}{\partial p} (- \mathbf{v}_{\rm h} \cdot \nabla_{\rm h} \zeta).$$

 $f \frac{\partial^2 \omega}{\partial \mu^2} \propto -f \sigma \omega$ ,

由此式可见,涡度平流随高度的变化决定着垂 直方向运动的性质。当中高层涡度平流随高度减小 时,可激发下沉运动。在中低层气柱被压缩,于是 反气旋环流发展,西太副高发展西伸。所以,如果 南亚高压附近有强的负涡度平流时,就可使中高层 出现ω>0,即出现下沉运动,从而使西太副高发展 加强。通过计算此次梅雨期间几次暴雨过程的中高 层涡度平流随高度变化(图略),可以看出,在这几 次暴雨发生前,在长江流域中下游地区附近都有一 片范围不小的负值区域出现,表明在暴雨发生前, 确实在该区域的中高层涡度平流随高度减小,从而 使西太副高发展加强。

从以上分析,得到南亚高压东移诱发西太副高 发展和淮河流域暴雨的概念示意图[图 6(见文后彩 图)],可归纳如下:(1)南亚高压东移在东部 30°N 以北地区引起辐散和上升,在 30°N 以南地区引起 辐合和下沉;(2)南边辐合下沉的气流在中低空辐 散增强了局地的负涡度,诱发西太副高西伸;(3) 北边西太副高西北侧的偏西南气流在 30°N 以北辐 合,增强了局地的上升运动,为暴雨的产生创造了 大尺度的背景流场;(4)副高西北侧的暴雨加强了 低空的南风和高层的北风,从而使高层东伸的南亚 高压和低层西伸的西太副高在我国东部稳定维持。

### 6 结论

本文分析了 2003 年淮河流域暴雨期间西太副 高的活动和演变特征及其相互作用的环流系统的特 征。结果表明:

(1) 2003 年 6~7 月, 副高在南北方向准静止 而在东西方向上东西振荡, 西太副高相对偏北并且 相对稳定。对流层高层的南亚高压与中层的西太副 高相向运动时, 对应着淮河流域的一次大降水过程。

(2)中纬度西风急流呈现强劲而稳定少动的特征,使得西太副高难以北抬,从而造成了6月下旬至7月上旬淮河流域稳定少动的降雨带。

(3)南亚高压东伸是 500 hPa 西太副高加强西 伸的重要原因,高、低空副热带高压影响重大天气 发展有如下机制:① 沿 30°N 东伸的高层南亚高压 脊在东部 30°N 以北地区引起辐散和上升,在 30°N 以南地区引起辐合和下沉;② 江南高层的辐合下沉 气流在中低空的辐散增强了局地的负涡度,诱发西 太副高西伸;③ 沿增强了的西太副高西北侧的偏 西南气流在 30°N 以北辐合,增强了局地的上升运 动,为暴雨的产生创造了大尺度的背景流场;④ 副 高西北侧的暴雨加强了低空的南风和高层的北风, 从而使高层东伸的南亚高压和低层西伸的西太副高 在我国东部稳定维持。

#### 参考文献(References)

[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,1962,30(1):1~10
 Tao Shiyan, Xu Shuying. Some aspects of the circulation

during the periods of the persistent drought and flood in Yangtze and Hwai-Ho vallegs in summer. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 1962, 30(1): 1~10

- [2] 陶诗言等.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,1963,106~123
   Tao Shiyan, et al. Some Studies on Subtropical Synoptic Systems over China in Summer (in Chinese). Beijing: Science Press, 1963, 106~123
- 【3】 黄士松、副热带高压东西向移动及其预报的研究、气象学报,1963,33(3):320~332
  Huang Shisong. A study of the longitudinal movement and its forecasting of subtropical anticyclone. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 1963, 33(3): 320~332
- [4] 毕慕莹.夏季西太平洋副热带高压的振荡.气象学报, 1989, 47(4):467~474
  Bi Muying. The oscillation of the subtropical high over the NW Pacific in the summer. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 1989, 47(4):467~474
- [5] 喻世华,杨维武.季节内西太平洋副热带高压异常进退的诊断研究.热带气象学报,1995,11(3):214~222
   Yu Shihua, Yang Weiwu. Diagnostic study of intrerseasonal anomalous progression and retrogression of subtropical high over western Pacific. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 1995, 11(3):214~222
- [6] 喻世华,张韧,杨维武.副热带高压进退机理研究.北京: 解放军出版社,1999.47~53

Yu Shihua, Zhang Ren, Yang Weiwu. A Study of the Mechanism of Progression and Retrogression of Subtropical High (in Chinese). Beijing: Chinese People's Liberation Army Press, 1999. 47~53

[7] 吴国雄,刘屹岷,刘平.空间非均匀加热对副热带高压带形成和变异的影响.I:尺度分析. 气象学报,1999,57(3): 257~263

> Wu Guoxiong, Liu Yimin, Liu Ping. The effect of spatially nonuniform heating on the formation and variation of subtropical high I. Scale analysis. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1999, **57**(3): 257~263

777

[8] 刘屹岷,刘辉,刘平,等.空间非均匀加热对副热带高压形成和变异的影响.II:陆面感热与东太平洋副高.气象学报, 1999,**57**(4):385~396

Liu Yimin, Liu Hui, Liu Ping, et al. The effect of patially nonuniform heating on the formation and variation of subtropical High II: Land surface sensible heating and East Pacific subtropical high. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1999, **57**(4): 385~396

- [9] 刘屹岷,吴国雄,刘辉,等.空间非均匀加热对副热带高压 形成和变异的影响.III:凝结潜热加热与南亚及西太平洋副 高.气象学报,1999,57(5):525~538
  Liu Yimin, Wu Guoxiong, Liu Hui, et al. The effect of spatially nonuniform heating on the formation and variation of subtropical high III: Condensation heating and south Asia high and western Pacific subtropical high. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 1999, 57(5): 525~538
- [10] 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.第六章
  Wu Guoxiong, Chou Jifan, Liu Yimin, et al. Dynamics of the Formation and Variation of Subtropical Anticyclone (in Chinese). Beijing: Science Press, 2002. Chapter 6
- [11] 任荣彩,吴国雄. 1998 年夏季副热带高压的短期结构特征及 形成机制. 气象学报, 2003, 61(2): 180~195
  Ren Rongcai, Wu Guoxiong. On the short-term structure and formation of the subtropical anticyclone in the summer of 1998. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 2003, 61 (2): 180~195
- [12] He Jinhai, Zhou Bing, Wen Min, et al. Vertical circulation structure, interannual variation features and variation mechanism of western Pacifics subtropical high. Adv. Atmos. Sci., 2001, 18(4): 497~510
- [13] 陶诗言,朱福康.夏季亚洲南部 100 毫巴流型的变化及其与 西太平洋副热带高压进退的关系.气象学报,1964,34(4): 385~395

Tao Shiyan, Zhu Fukang. The 100 mb flow patterns in Southern Asia in summer and its relation to the advance and retreat of the West-Pacific subtropical anticyclone over the Far East. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 1964, **34** (4): 385~395



图 2 2003 年 6、7 月西太副高特征: (a) 6 月 21 日~7 月 20 日逐候的 500 hPa 西太副高脊线; (b) 6 月 21 日~7 月 20 日逐候的西太副高 脊线(115°E~120°E平均)垂直剖面; (c) 7 月 1 日 115°E~120°E平均的经圈环流剖面, 红粗线为副高脊线, 绿柱条是降水量; (d) 6~7 月(115°E~125°E, 22.5°N~27.5°N)副高区涡度(单位: 10<sup>-5</sup>s<sup>-1</sup>)随时间的演变

Fig. 2 Activity characteristics of the western Pacific subtropical anticyclone (WPSA) during Jun to Jul 2003: (a) Pentad WPSA ridge lines at 500 hPa from 21 Jun to 20 Jul; (b) cross section of pentad WPSA ridge lines (averaged between  $115^{\circ}$ E and  $120^{\circ}$ E) from 21 Jun to 20 Jul; (c) cross section of averaged meridional circulations between  $115^{\circ}$ E and  $120^{\circ}$ E on 1 Jul, red thick line is the WPSA ridge line and green bar is the precipitation; (d) evolution of vorticity (units:  $10^{-5}$ s<sup>-1</sup>) in the subtropical anticyclone area ( $115^{\circ}$ E -  $120^{\circ}$ E, 22. 5°N - 27. 5°N) from Jun to Jul



图 6 南亚高压东移诱发西太副高发展和淮河流域暴雨的概念示意图

Fig. 6 Schematic diagram of WPSA evolution and torrential rain in the Huaihe River basin induced by eastward moving of South Asian high



图 5 2003 年 6~7 月的经度一时间剖面: (a) 沿 32.5°N 200 hPa 高度场(单位: dagpm,下同)和散度场(阴影); (b) 沿 32.5°N 200 hPa 高度场和涡 度场(阴影); (c) 沿 25°N 500 hPa 高度场和涡度场; (d) 7 月 1 日沿 115°E 散度场和流场的垂直剖面; (e) 沿 115°E 散度场垂直分布的两种方式 Fig. 5 Time-longitude cross section during Jun and Jul 2003: (a) Geopotential height (units: dagpm, the same below) and divergence (shaded) at 200 hPa along 32.5°N; (b) geopotential height and vorticity (shaded) at 200 hPa along 32.5°N; (c) geopotential height and vorticity at 500 hPa along 25°N; (d) vertical cross section of divergence and wind vectors along 115°E on 1 Jul; (e) two types of profiles for divergence along 115°E