

# 副热带高压研究进展及展望<sup>\*</sup>

吴国雄<sup>1)</sup> 丑纪范<sup>2)</sup> 刘屹岷<sup>1)</sup> 张庆云<sup>1)</sup> 孙淑清<sup>1)</sup>

1) (中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

2) (中国气象局培训中心, 北京 100081)

**摘 要** 介绍了国家自然科学基金委员会九五重点项目“副热带高压形成和变异的机理”的研究成果。该项目的研究纠正了对副热带高压成因的若干传统认识, 揭示了副热带高压脊线年际变化的新事实, 发展了脊线这一东西风交界面的动力模型, 建立了“全型涡度方程”、“热力适应”理论及“两级热力适应”模式, 并通过模拟和资料诊断研究了各副热带高压单体的形成机制及其季节和年际变化, 在西太平洋副热带高压变化的规律和机制的研究中得到了新的认识。

**关键词:** 副热带高压; 研究进展; 研究展望

## 1 引言

副热带高压(简称副高)及其动力学一直是气象学研究的主题。早在 20 世纪 60 年代, 陶诗言和合作者<sup>[1~3]</sup>研究了副高的季节变化, 指出 500 hPa 的西太平洋副热带高压和对流层上层的青藏高压对东亚天气有重要影响。黄土松等<sup>[4,5]</sup>详细地研究了高压脊位置、温湿场分布、风场、涡散场、垂直运动及经圈环流等诸多方面, 发现副高的结构非常复杂, 各个单体之间存在差异。后来国内出现很多后续研究(参阅文献[6])。基于副高和非洲、亚洲和西太平洋环流之间的关系的研究表明, 副热带高压对亚非季风区天气和气候异常有着重要作用<sup>[7~13]</sup>。

然而这些研究中大多数是诊断分析。由于以往工作中资料的缺乏和学科发展的限制, 对副高的认识仍非常有限, 其形成机理尚不清楚。与纬向平均或局地 Hadley 环流下沉支相关的下沉运动通常被认为是副高形成和变异的原因。上世纪 90 年代以来, 由于 NCEP/NCAR 再分析资料<sup>[14]</sup>的出现和气候系统模式 LASG/IAP GOALS<sup>[15,16]</sup>的发展, 使深入分析和研究副高的形成成为可能。1995 年国家自然科学基金委员会设立了一个重点项目“副热带高压形成和变异的机理”。从 1996~1999 年, 十余位科学家从如下三个方面进行了集中研究:

- (1) 副热带高压带形态及其年际变动的形成机理。
- (2) 东半球副高中心相对强度的变动规律及其对季节变化的影响。
- (3) 西太平洋副热带高压季节变化的规律。

2003-01-06, 2003-03-18 收到修改稿

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金资助项目 40135020、40221503、40023001 和中国科学院重要方向项目 ZKCX2-SW-210 共同资助

针对上述研究内容采用不同的研究方法。第一方面主要应用动力理论结合资料分析, 假定副高脊线的季节变动是气候系统中的稳定分量; 天气尺度为混沌分量或噪音, 进而建立“过滤模型”去研究脊线的移动。于是可把脊线这一东西风交界面 (WEB) 当成活动边界, 建立动力模型进行研究。还通过引进高度经向偏差的新方法, 结合传统的纬向偏差法, 揭示了副高脊线年际变化的新事实。第二方面主要应用 Ertel 位涡理论, 建立了“全型涡度方程”、“热力适应”理论及“两级热力适应”模式, 通过模拟和资料诊断来研究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<sup>[17]</sup>。第三方面通过建立拓展的“Lindzen-Nigam”理论, 并应用模拟和资料分析去揭示西太副高变化的规律和机制。本文第 2~5 节将对这些研究成果作概要介绍。

2 开拓高、低纬环流间的活动界面 (副高脊面即 WEB) 的动力学研究

大气环流最基本的状态是盛行纬向气流, 总体上看, 中、高纬度地区盛行西风, 低纬度地区盛行东风, 在东、西风带之间存在一个东西风交界面 (WEB)。丑纪范及其合作者<sup>[18]</sup>证明这个交界面就是副高脊面。其所在位置的余纬  $\theta_s$  是经度  $\lambda$ 、高度  $\zeta$  和时间  $t$  的函数:

$$\theta_s(\lambda, \zeta, t) = \varphi(\lambda, \zeta, t).$$

利用 NCEP/NCAR 提供的 1958~1997 年再分析月平均风场资料可确定东西风交界面所在的纬度位置。图 1 给出北半球东西风交界面位置季节平均的气候特征, 从图 1a 可以看出, 北半球冬季, 副热带高压脊面保持随高度增加由北向南倾斜的特性, 尤

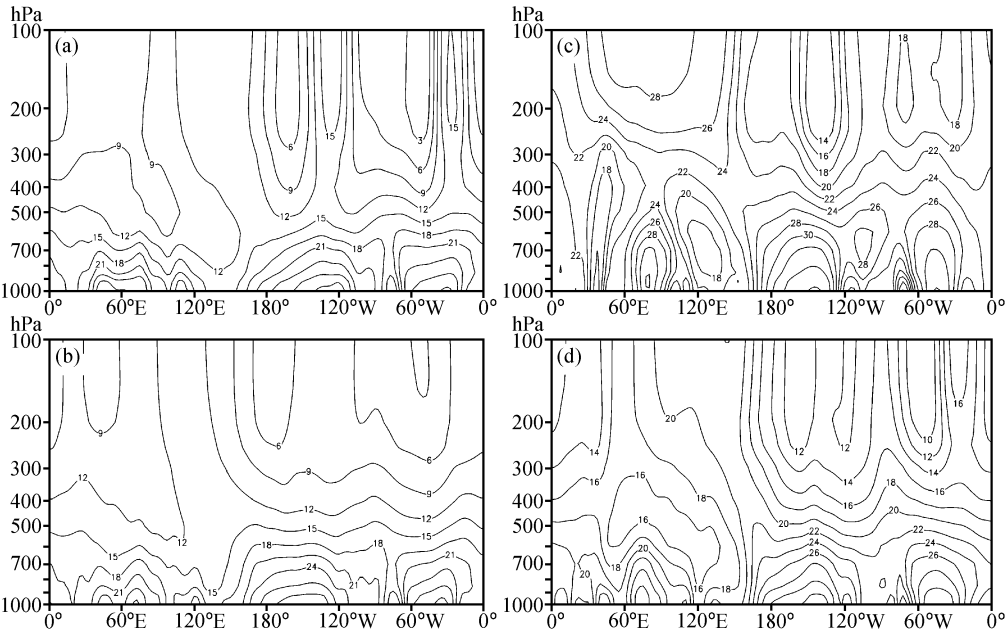


图 1 北半球东西风交界面位置多年季节平均的气候特征 (引自文献 [17] 图 9.10)

(a) 冬季; (b) 春季; (c) 夏季; (d) 秋季

其是中、东太平洋和北非地区这种特性比较明显，东太平洋上空和北非上空在对流层低层出现纬度极大值中心，在对流层高层分别有纬度极小值中心出现。在夏季，副热带高压脊面呈现较冬季更复杂的特征，从图 1c 中可以看出，夏季日界线东西两侧，副热带高压的垂直结构明显不同。日界线以西的大部分地区副热带高压脊面纬度位置从低层到高层逐渐增大，呈现出由南向北倾斜的特征；而在日界线以东的东太平洋、大西洋和北非上空，副热带高压脊面的纬度位置随高度增加而减小，呈现出由北向南倾斜的特征，夏季北半球副热带高压脊面的这种垂直结构和冬季有显著的不同，这是由于其形成的物理机制不同所致，因为副高脊线随高度增加总是向暖区倾斜。在过渡季节秋季（图 1d），其变化特点接近夏季，只是纬度位置减小，强度减弱。在春季（图 1b），副热带高压脊面的变化规律接近冬季，随高度增加，其纬度位置减小，呈现出由北向南倾斜的特征<sup>[19]</sup>。

在纬向平均意义上，两半球副高带之间的热带地区是东风带，盛行 Hadley 和 Walker 环流，物理量分布较均匀，运动不再是准地转和无辐散的，驱动大气运动的能源主要是潜热释放。中高纬地区则是西风带，盛行 Rossby 环流，运动是准地转无辐散的，驱动大气运动的能源主要是斜压不稳定能量的释放。由于自转地球上东西风带的平衡受角动量守恒的制约，因此副高带的南北移动受到物理规律的约束。该研究第一次把大气中东、西风盛行区的背景流场和 WEB 两者之间的耦合关系转化成两种动力学问题的解的制约关系，已获得 14 个未知量及相应的 14 个方程，提出了在数学上封闭的求解问题。发展了最简化模型，对低纬东风区采用  $\beta$ -平面半地转准定常近似，对中、高纬西风区采用准地转近似进行简化，由此建立了决定副高脊面变化的“过滤”模式。

### 3 研究了西太平洋副高年际和年代际变化及其持续异常对江淮天气气候的影响

#### 3.1 建立“Lindzen-Nigam”拓广理论去研究 SST 异常影响副高异常的机理

刘平<sup>[20]</sup>把 Lindzen-Nigam 关于热带平均海表温度影响平均低空环流的理论拓广到 SSTA 的影响中，证明是由于 SSTA 的“空间分布型”影响着低纬地区对流降水及副高的异常。与此同时，孙淑清等<sup>[21,22]</sup>和应明等<sup>[23]</sup>利用资料分析研究了西太平洋副高强度异常与热带环流特别是亚洲季风的关系，及它对同期及前期海温异常的响应，从而研究海气相互作用对副热带高压影响的物理过程。通过对强、弱副高年 OLR、风场、海温及垂直环流圈等的对比分析，研究了冬、夏季副热带高压异常时热带环流及对流活动的相应变化，副热带高压异常对不同海域海温异常的响应，特别是东太平洋海温的持续异常对副高变异的重要作用。并以 1998 年江淮流域洪涝过程为例探讨了当年海温状况对副高活动的影响<sup>[23]</sup>。图 2 是应明等<sup>[23]</sup>制作的 7 月副高强度和前冬 2 月、前春 4 月和 6 月海温所作的相关分布，由图可见，7 月副高与其前期 2 月海温的主要正相关分布在热带的中、东太平洋、印度洋和南海以及中纬的黑潮海区，几个热带海区的中心相关系数普遍高于 0.45，黑潮区为 0.3；负相关位于北太平洋西风漂流区和西太平洋菲律宾以东，中心值在 0.3 以上。随着时间变化，热带的正相关区强度较为稳定，南海和菲律宾海区的正相关区明显扩大；黑潮区则由正相关变成负相关。因此，夏季

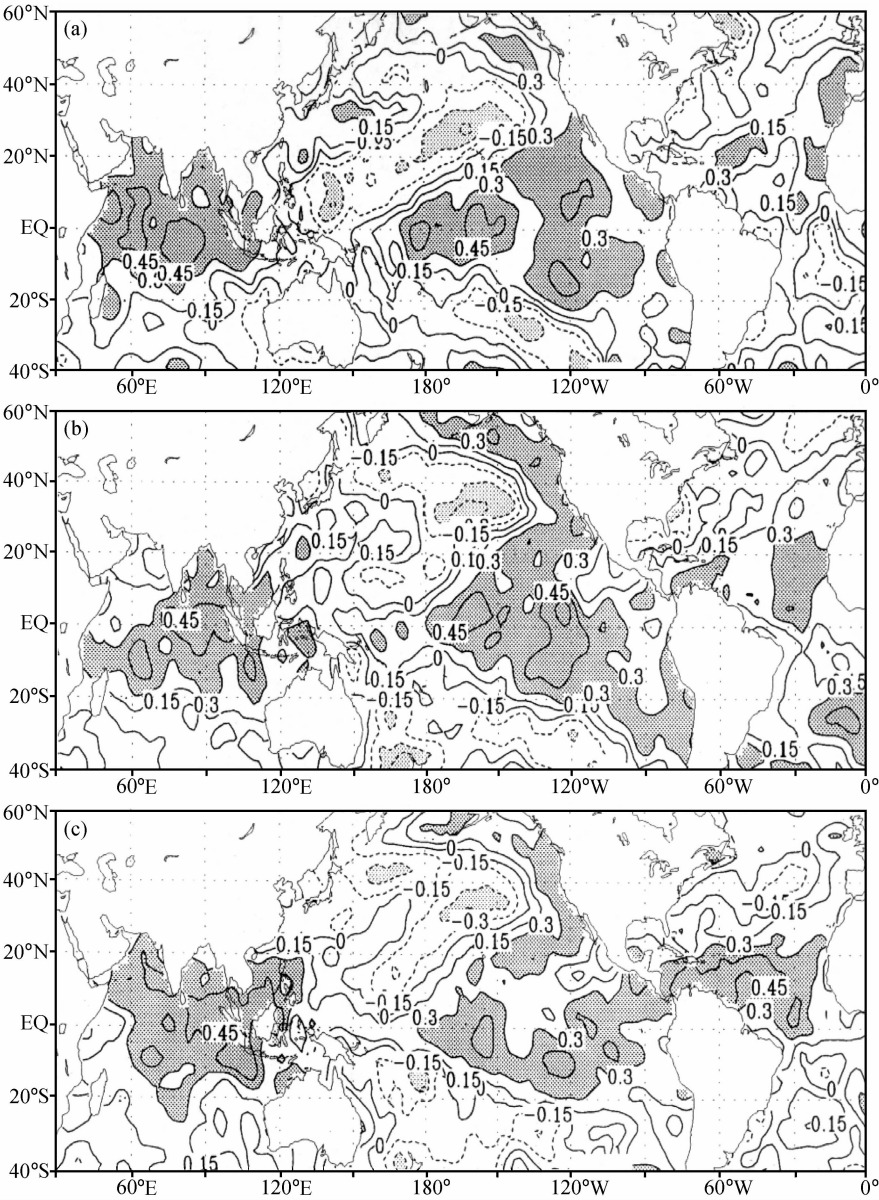


图 2 7 月西太平洋副高强度与前期海温的相关分布 (引自文献 [23])  
(a) 2 月; (b) 4 月; (c) 6 月, 阴影区为达到 0.05 信度水平的区域

副高偏强时, 前期的热带中、东太平洋和印度洋海区的海温持续偏高, 相关强度在海温超前副高 3 个月左右时达到最强。这说明海气相互作用的强度具有季尺度的特征; 而南海及菲律宾附近相关符号的转变, 则说明西太平洋海温与副高强度的关系随季节而不同。

3.2 揭示西太平洋副热带高压年际、季节、季内及 5~10 天变化的新现象

由于亚洲夏季风的建立, 北半球副热带高压系统在东经 60~120°E 的亚洲季风区内出现断裂, 夏季北半球副热带高压的年际、季节和季内变化在亚洲季风区表现最为

显著。陶诗言等<sup>[24]</sup>的研究表明,夏季西太平洋副热带高压的年际变化反映了东亚夏季风强弱的变化,强夏季风年 500 hPa 西太副高脊线位于  $30^{\circ}\text{N}$  以北,并分裂成两个中心,印度低压强。弱季风年西太平洋副热带高压脊线位于  $30^{\circ}\text{N}$  以南,表现为太平洋中部高压中心向西伸展的高压脊,印度低压弱。

西太平洋副热带高压脊线和西端脊点有显著的季节变化。西太平洋副热带高压脊线位置 2 月最南,平均位于  $12.7^{\circ}\text{N}$ , 8 月最北平均位于  $27.5^{\circ}\text{N}$ , 盛夏以后脊线由北向南退。西太平洋副热带高压西端脊点位置 1 月最东,平均位于  $133.5^{\circ}\text{E}$ , 10 月最西平均位于  $109.3^{\circ}\text{E}$ 。1 月到 5 月西太平洋副热带高压西端脊点向西伸展,6~8 月(东亚夏季风期间)西太平洋副热带高压西端脊点东退,6~8 月平均的西太副高西端脊点位于  $120^{\circ}\text{E}$ 。

夏季西太平洋副热带高压的季内活动有二种模态:第一种表现为副高系统以 20~30 天的周期从北太平洋中部的副高中心一次次的向西扩张到  $120^{\circ}\text{E}$  以西,这类过程大多出现在亚洲夏季风强度偏弱年(如 1998、1996 和 1954 年);第二种模态表现为副高系统以 20~30 天的周期一次次的由东向西扩充时,在东经  $125^{\circ}\sim 155^{\circ}\text{E}$  之间停滞,这类过程大多出现在亚洲夏季风强度偏强年(如 1999、1997 和 1994 年)。夏季江淮流域梅雨锋的活跃、中断和结束与北太平洋副热带高压系统 20~30 天季内振荡有关。西太平洋副热带高压 5~10 天的短期活动受  $35^{\circ}\sim 45^{\circ}\text{N}$  西风带活动的影响,当西风槽在中国沿海和西太平洋地区向南伸展到  $30^{\circ}\text{N}$  以南后,西太平洋副热带高压有一次加强活动。

### 3.3 揭示夏季西太平洋副热带高压异常与热带、西风带环流关系

副热带高压强度异常与西风急流的异常有密切关系。副高偏强时,冬夏季的中高纬度环流表现为东亚大槽和贝加尔湖脊均偏强,是经向型的环流,副高偏弱时则相反。在副高强年,不论冬夏季急流风速均增强,中心向南扩,副高南侧的东风急流也加强;弱年则相反。变化最大的部位在急流的出口区。

张庆云和陶诗言<sup>[25]</sup>研究指出,夏季西太平洋副高脊线两次北跳与低层赤道西风两次北跳及赤道对流向北推移密切相关。初夏西太平洋地区低层赤道西风爆发后,赤道对流加强,随着赤道西风和赤道强对流北上,热带对流加强。夏季,东亚—西太平洋区域赤道强对流北移不显著时,热带地区对流较弱,则西太平洋副热带高压脊线相对偏南;当赤道强对流北移显著时,热带对流加强,则西太平洋副热带高压脊线相对偏北。夏季赤道强对流北移状况与 200 hPa 异常西风传播方向有关,当中高纬纬向环流较强时,异常西风由高纬向低纬方向传播,赤道强对流北移不显著,热带对流偏弱,西太副高脊线相对偏南;当低纬环流较强时,异常西风由低纬向高纬方向传播,赤道对流显著北移,热带对流加强,西太平洋副热带高压脊线相对偏北。

张庆云和陶诗言<sup>[26~28]</sup>进一步研究了夏季位于西太平洋副热带高压南侧的东亚热带季风以及北侧梅雨锋强弱与西太平洋副热带高压脊线位置异常的关系。夏季西太平洋副热带高压脊线位置异常偏北时,东亚热带季风区上升运动加强、梅雨锋区上升运动减弱;夏季西太平洋副热带高压脊线位置异常偏南时,热带季风区上升运动减弱、梅雨锋区上升运动加强。

图 3 是 6 月西太平洋副热带高压脊线位置偏北、偏南时北半球 500 hPa 位势高度距平合成图。图 3a 为西太平洋副热带高压脊线位置偏北时 500 hPa 位势高度距平场特征,

西太平洋低纬地区 ( $25^{\circ}\text{N}$  以南) 为负距平, 中纬度地区 ( $25\sim45^{\circ}\text{N}$ ) 是正距平区, 鄂霍次克海区域是负距平区, 东亚沿海和西太平洋地区从低纬到高纬呈南、北向排列的一十一的距平波列; 亚洲中高纬乌拉尔山至鄂霍次克海区域呈现一个东、西向排列的一十一的波列, 即夏季西太平洋副热带高压脊线偏北时,  $500\text{ hPa}$  位势高度距平场亚洲地区出现两支一十一距平波列, 东亚夏季风偏强。

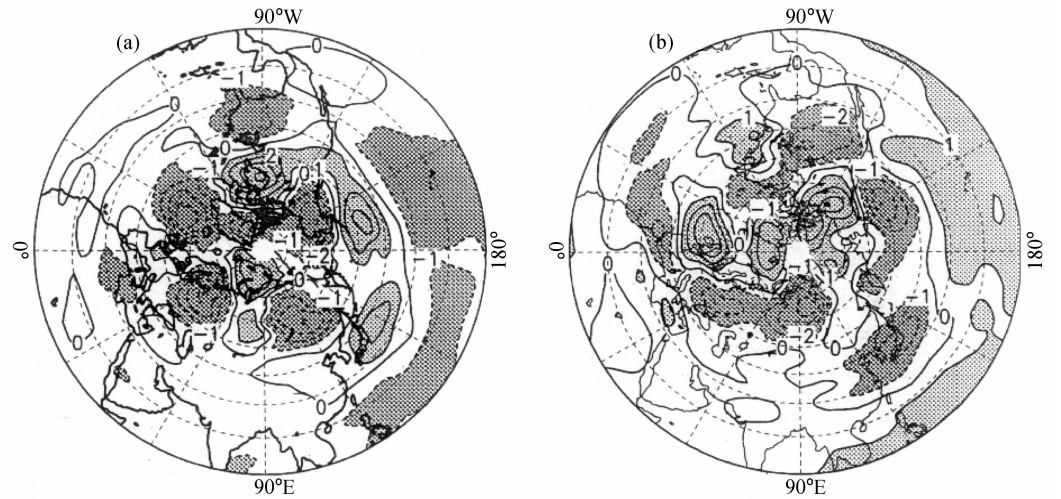


图 3 6 月西太平洋副高脊线异常年北半球  $500\text{ hPa}$  位势高度距平合成图 (引自文献 [17] 图 3.24)  
(a) 偏北; (b) 偏南

图 3b 是 6 月西太平洋副高脊线位置偏南情况,  $500\text{ hPa}$  位势高度距平场上, 西太平洋的低纬地区 ( $25^{\circ}\text{N}$  以南) 为正距平, 中纬度地区 ( $25\sim45^{\circ}\text{N}$ ) 是负距平区, 鄂霍次克海区域是正距平区, 东亚沿海和西太平洋区域从低纬到高纬出现南、北向排列的十一十距平波列; 亚洲中高纬乌拉尔山到鄂霍次克海区域呈现一个东、西向排列的十一十波列, 即夏季西太平洋副高脊线偏南时,  $500\text{ hPa}$  位势高度距平场亚洲地区出现两支十一十距平波列, 东亚夏季风偏弱。

3.4 探讨了夏季西太平洋副高脊线位置的异常与我国降水异常的关系。

张庆云和陶诗言<sup>[27,28]</sup>对西太副高的变异及其天气气候效应进行了深入的研究, 指出中国东部汛期降水异常与西太平洋副热带高压脊线位置的异常密切相关。夏季西太副高脊线位置偏南, 低纬西太平洋地区和高纬鄂霍次克海区域位势高度偏高,  $500\text{ hPa}$  高度上东亚高纬鄂霍次克海区域出现阻塞型, 高纬冷空气可直达东亚中纬度地区 (图略), 梅雨锋扰动加强, 江淮流域汛期降水偏多。夏季西太平洋副高脊线位置偏北, 低纬西太平洋地区和高纬鄂霍次克海区域位势高度偏低,  $500\text{ hPa}$  高度上东亚高纬鄂霍次克海区域没有阻塞型, 冷空气路径沿着高纬向东传 (图略), 梅雨锋扰动减弱, 江淮流域汛期降水偏少。

4 南亚高压的双模态及其天气、气候意义

利用 40 年月平均气候资料, 张琼<sup>[29]</sup>揭示出夏季南亚高压的年际变化特征具有双模

态分布，即南亚高压分别稳定维持于青藏高原和伊朗高原上空，呈现为青藏高压模态和伊朗高压模态（图略），它与地形热力作用密切相关。而且不同的模态对应着不同的气候异常。图 4 是自 1958 年以来长江流域大涝年份（1969、1980、1991、1996、1998、1999）和大旱年份（1959、1961、1966、1978、1985）时的 100 hPa 高度场合成分布，整个亚洲季风区均在强大的南亚高压控制之下。高层南亚高压由于流型简单，其高压中心位置的异常更明显。涝年南亚高压脊线偏南，主要高压中心位于青藏高原上空，呈青藏高压模态（图 4a）；旱年南亚高压脊线偏北，主要高压中心在 60°E 附近，呈伊朗高压模态（图 4b）。相比之下，涝年时南亚高压强度强于旱年时高压的强度。计算旱涝年夏季平均的南亚高压强度距平，涝年为正距平（标准化值为 0.8），旱年为负距平（标准化值为 -0.4）。可见，当夏季南亚高压为青藏高压型时，高压偏南偏强，这时相应的低层西太平洋副热带高压也偏南偏强，造成长江流域多雨；当夏季南亚高压为伊朗高压型时，高压偏北偏弱，这时相应的低层西太平洋副热带高压也偏北偏弱，并且西伸明显，使得长江流域在高压控制下，干旱少雨。

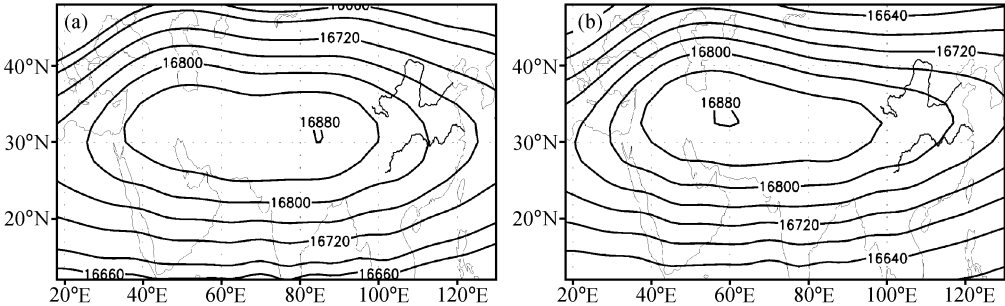


图 4 长江流域旱涝年时 100 hPa 位势高度场合成（引自文献 [17] 图 3.47）  
(a) 涝年；(b) 旱年，单位：位势米

5 副热带高压形成和变异的动力学研究

5.1 建立“热力适应”理论去揭示外热源激发大气环流异常的机理

自从 20 世纪 30 年代和 40 年代 Rossby 和奥布霍夫相继提出地转适应理论以来，我国气象学家叶笃正和李麦村<sup>[30]</sup>、曾庆存<sup>[31~33]</sup>和巢纪平<sup>[34]</sup>等进行了大量研究，使之不断发展完善。该理论研究的是大气运动“内部”风场和质量场相互调整和适应的规律。为研究大气流场对“外部”加热场的响应，本研究根据全型涡度方程提出了热力适应原理<sup>[35]</sup>。利用位涡的特性，研究并模拟了大气流场在短时间尺度上对非绝热加热的响应，并提出了“过流”的概念：在加热层顶，即使非绝热加热消失，仍存在上升运动、反气旋涡度环流和冷中心。证明“过流”现象是加热层顶保持涡度平衡所需要的一种过程，能很好地解释为何近地层的感热加热在 24 小时内即可影响到对流层上层的环流，为副高动力学研究提供理论依据。

5.2 全型垂直涡度方程和副高的形成机制

大气中的副高以大范围的负涡度为特征。副高的形成和变异本质上是负涡度中心

的形成和变异,可以用涡度方程予以描述。传统的涡度倾向方程是对涡度向量方程求标量积得到的,具有动力学特征,严格地说仅适于研究水平运动过程。本项目在位涡理论的基础上,导得全型垂直涡度方程,或简称全型涡度方程<sup>[36]</sup>,它不仅具有传统方程的动力项,还包括了大气热力结构的内强迫项和加热及摩擦的外强迫项。由于副高的形成和变异在很大的程度上取决于外部热源的变异和分布,因此全型涡度方程的导出为认识副高的形成和变异提供了有效的工具。

### 5.3 证明垂直非均匀加热和地球自转效应是决定副高形态的基本因子

吴国雄等<sup>[37]</sup>通过尺度分析表明,对副热带地区气候平均态而言,在不考虑摩擦时全型涡度方程一般可写成

$$u \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \beta v \propto \frac{f + \zeta}{\theta_z} \frac{\partial Q}{\partial z}.$$

因此,地球自转( $\beta$ 效应)及外部加热( $Q$ )的垂直分布形态是影响大气中副高基本形态的重要因子。在深对流加热的场合(图 5a),涡度平流较弱,上述方程简化为

$$\beta v \propto \frac{f + \zeta}{\theta_z} \frac{\partial Q}{\partial z}.$$

于是在最大潜热热源的下方,有 $v > 0$ ,在 $\beta$ 项作用下,热源中心下方出现向极流,使气旋式环流出现在热源西侧,反气旋式环流出现在热源东侧。在最大潜热加热中心上方,则有 $v < 0$ ,于是 $\beta$ 效应将使热源区上方出现向赤道流,因此反气旋式环流出现在热源西侧,气旋式环流出现在热源东侧。在感热加热的场合(图 5b),强烈的表面加热随高度迅速减少,表层出现强烈的向赤道气流,反气旋环流出现在加热区的西侧;再往上,平流作用加强,反气旋环流出现在加热区的下游方向(图 5b 上部)。

刘屹岷等<sup>[38]</sup>利用 LASG/IAP GOALS 模式<sup>[16,39]</sup>,通过系统的数值试验,证明陆面感热加热是形成对流层低层两个强大的洋面副高的关键因素。陆面感热还对对流层中层三个陆地上的副高:北美副高、北非副高和伊朗副高的形成作出重要贡献。凝结潜热加热对其位置和强度有所修正。他们还通过模拟,证明季风降水对东亚区域副高形成的贡献,指出中低对流层西太平洋副高的形成则主要是由于季风降水引起的凝结潜热的作用(图 6c、d)<sup>[40]</sup>。对流层上层的南亚高压的形成既与季风的潜热释放有关(图 6a、b),也与青藏高原的感热加热有关。

通过对 NCEP/NCAR 16 年再分析资料的诊断发现<sup>[41]</sup>:7 月北美的陆面感热加热与低层东太平洋副高东侧的偏北风在年际变化上存在显著的正相关;7 月亚洲季风区深对流加热和 200 hPa 上南亚高压东侧的偏北风在年际变化上也存在显著的正相关;春季华南降水异常增多会导致西太平洋副高加强西伸等。从而验证了关于非绝热加热影响副热带高压形成的理论。

### 5.4 副热带水平非均匀加热、中纬度的负涡源及北半球的气候异常

刘屹岷等<sup>[43,44]</sup>利用全型涡度方程并借助模拟,证明副热带深对流加热不仅能导致副高异常,还通过水平非均匀加热在热源区外的中纬度西风带中激发出负涡源。它借助 Rossby 波向外频散而影响北半球的气候异常。从而把空间非均匀加热、热力适应和能量频散联结成一个整体,并把副高异常与北半球的气候异常联系起来。

### 5.5 建立“两级热力适应”模型揭示热带 SST 影响副高异常的机理

热带海表温度异常(SSTA)与西太平洋副高异常之间存在很好的相关,这是已为

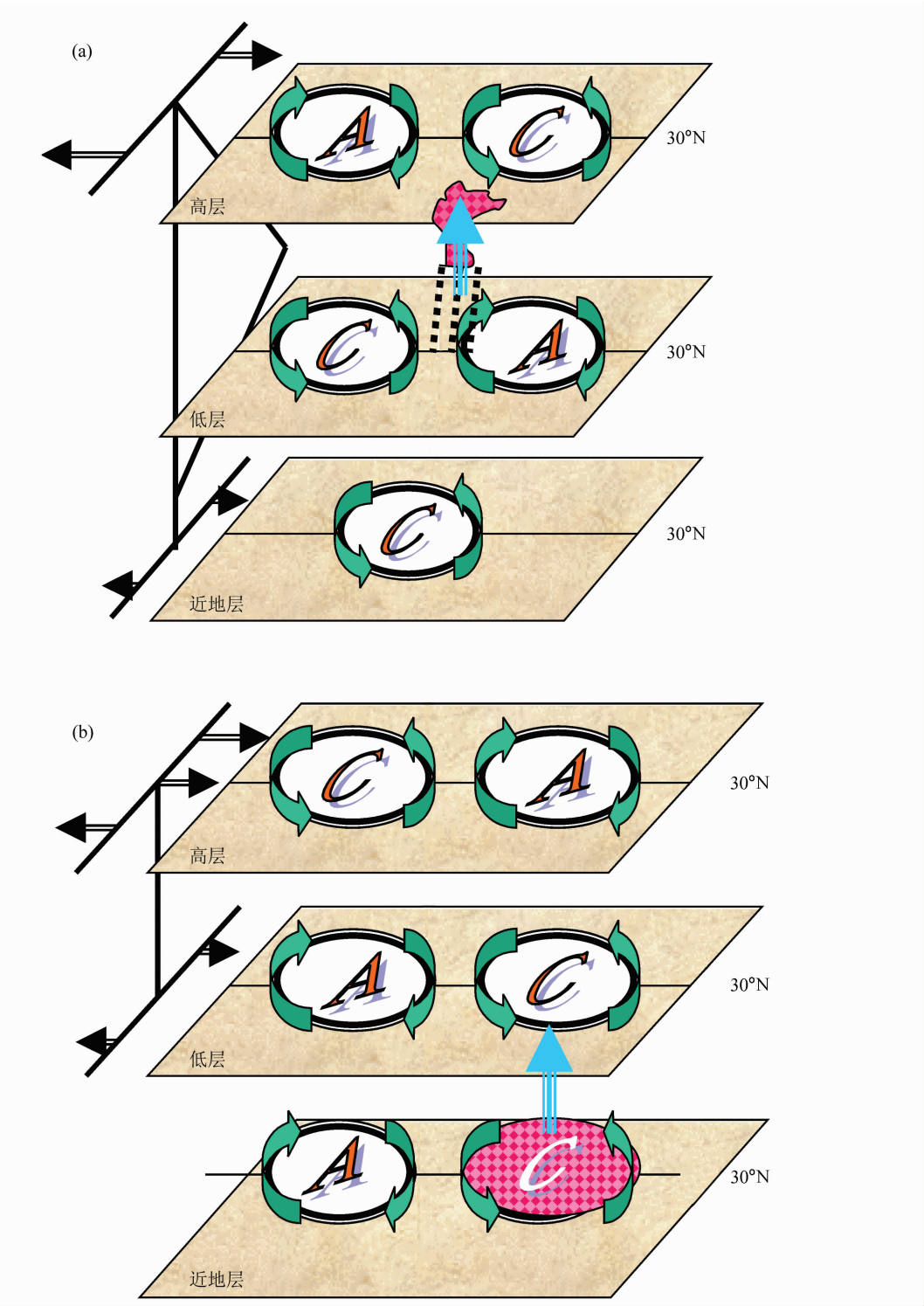


图5 (a) 沿副热带(30°N)凝结潜热加热( $Q_{co}$ )的垂直分布对副热带高压带形态变异的影响(红色区域为加热中心,“A”和“C”分别表示“ $Q_{co}$ ”所激发的反气旋和气旋偏差环流,左侧箭头表示纬向平均流场空间分布)  
(b) 同(a),但为表面感热加热( $Q_{sh}$ )垂直分布的影响(引自文献[37])

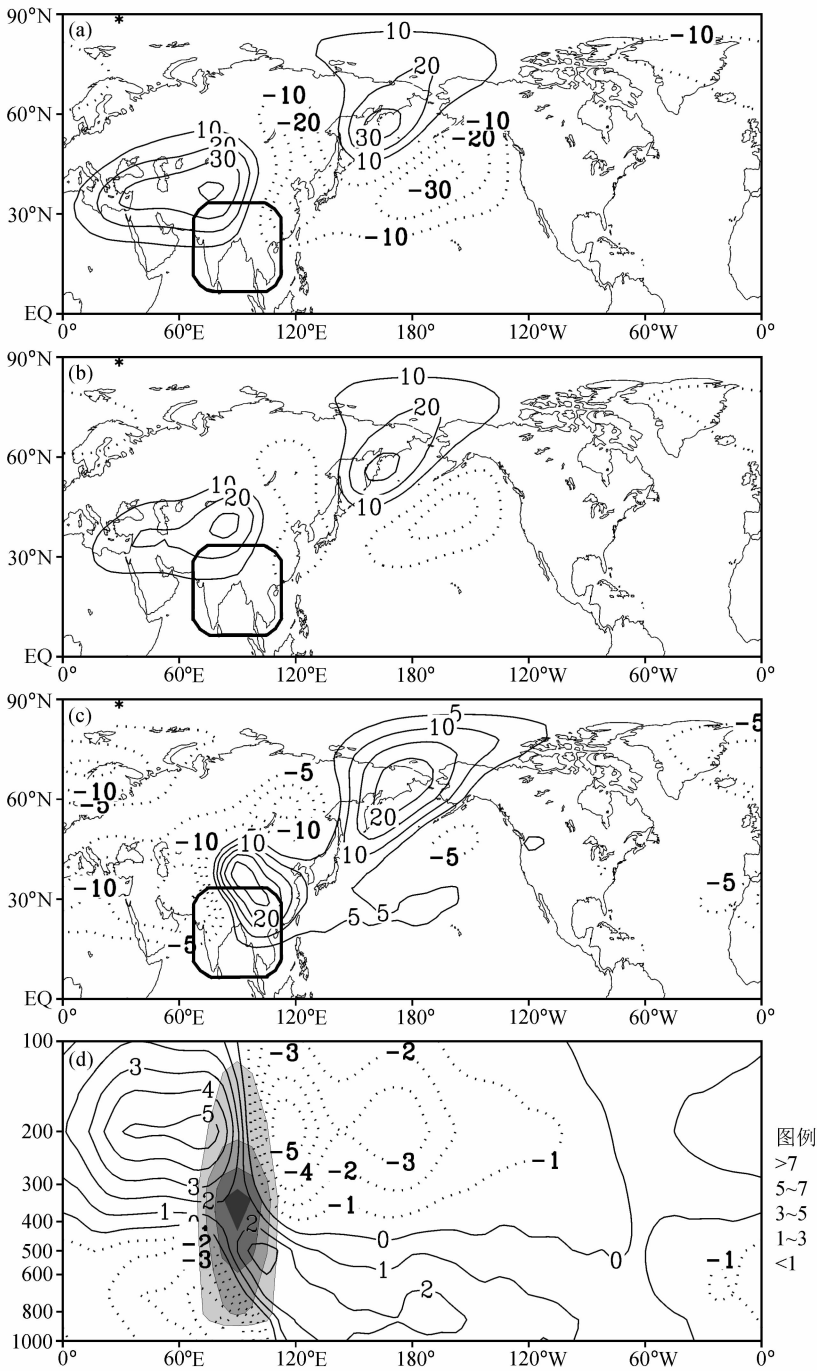


图 6 理想潜热加热试验积分第 13~24 个月平均的位势高度纬向偏差的空间分布 (引自文献 [40])

(a) 200 hPa; (b) 300 hPa; (c) 500 hPa (单位: 位势米); (d) 沿 30°N 流函数垂直剖面 (单位:  $10^5 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ )

阴影区为热源垂直廓线 (单位:  $\text{K d}^{-1}$ ), 方框界定最大加热层 ( $\sigma=0.336$ ) 上加热为  $1 \text{ K d}^{-1}$  的区域

众多资料分析所证明的事实, 但两者相关的机制却没有明确结论。刘平<sup>[20]</sup>、吴国雄等<sup>[44]</sup>的研究证明, 由于大气环流对热带、副热带暖性 SSTa 表层异常感热加热的热力

适应，在其东部出现南风及对流降水；进而由于大气对该对流凝结加热的适应，在其东部出现副高异常，从而证明热带和副热带 SSTA 可以通过“两级热力适应”去影响副热带高压的异常。他们利用 IAP/LASG GOALS 全球气候系统模式，在孟加拉湾强加 1.5℃ 的 SST 异常，进行一组往复 7 月的干、湿大气的对比试验。模式的降水对大气的潜热加热只出现在湿大气试验中，但不容许出现在干大气中。结果表明，干大气的响应从一开始就局限在 SST 异常区附近（见文献 [17] 彩图 6.13），在定常态为显著的非对称加热的 Gill 型环流。湿大气的响应则从一开始就呈现感热加热和潜热加热两种不同的分布。对感热加热的响应一直停留在 SST 异常区附近，与干大气情况相似。对潜热加热的响应从第一天开始就随着降水区的东移而向东扩展，从第三天开始异常东南风已到达我国东部海岸（见文献 [17] 彩图 6.16），其定常态的响应如图 7 所示。降水异常区从我国东南沿海向西南延伸到赤道印度洋（图 7a）；与该雨区相对应，高空为偏北风，副热带高压出现在其西部（图 7b）；低空为偏南风，副热带高压出现在其东部（图 7d）。这些结果与图 5a 所示的潜热加热和高、低空副热带高压的分布一致，证实了上述热力适应理论的正确性。

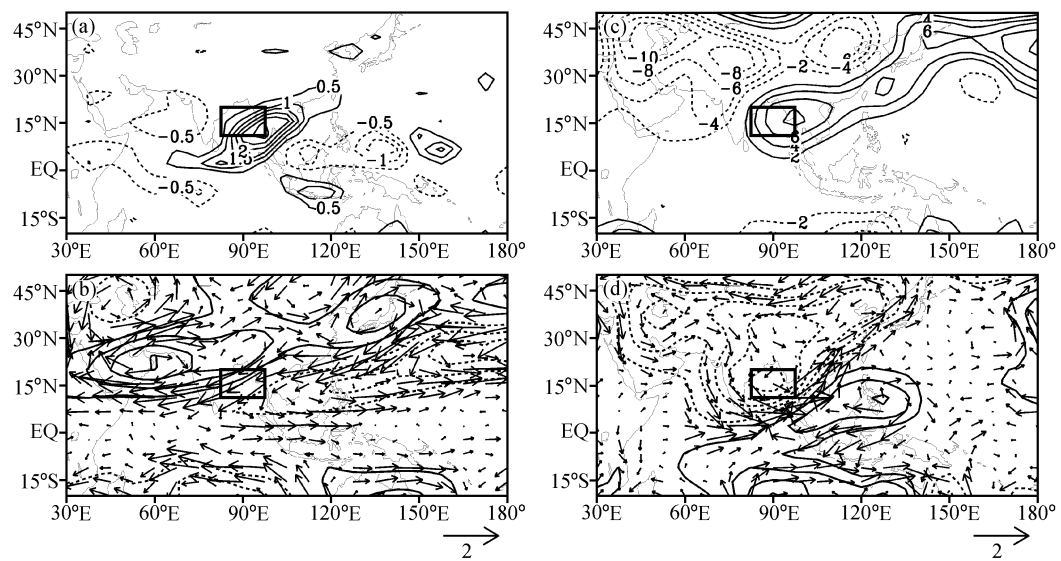


图 7 在利用 LASG/IAP GOALS 气候模式进行的往复 7 月的“湿大气”数值试验的定常态中各要素场的空间分布（引自文献 [20]）

(a) 降水（单位： $\text{mm d}^{-1}$ ）；(b) 200 hPa 风场和高度场；(c) 500 hPa 高度场；  
(d) 850 hPa 风场和高度场，高度场的单位为位势米，方框为施加 SSTa 的区域

5.6 副高和下沉

传统上认为副高是由于下沉运动造成的。Hoskins<sup>[45]</sup>曾对此提出质疑，指出在冬季 Hadley 环流最强时副高最弱，在夏季 Hadley 环流最弱时副高最强。刘屹岷等<sup>[6]</sup>发现，即使在三维空间，也不能用下沉运动去解释副高的形成。图 8 表明，夏季在副热带大洋东部为下沉运动，西部为上升运动。在北太平洋区域，165°E 以西受上升运动控制，因此夏季西太副高在 500 hPa 上对应着大范围的上升运动，而不是下沉运动。在后来的研究中<sup>[46]</sup>，他们证明大气在大洋表面副高东部的下沉以及在西部的上升是由大气的动

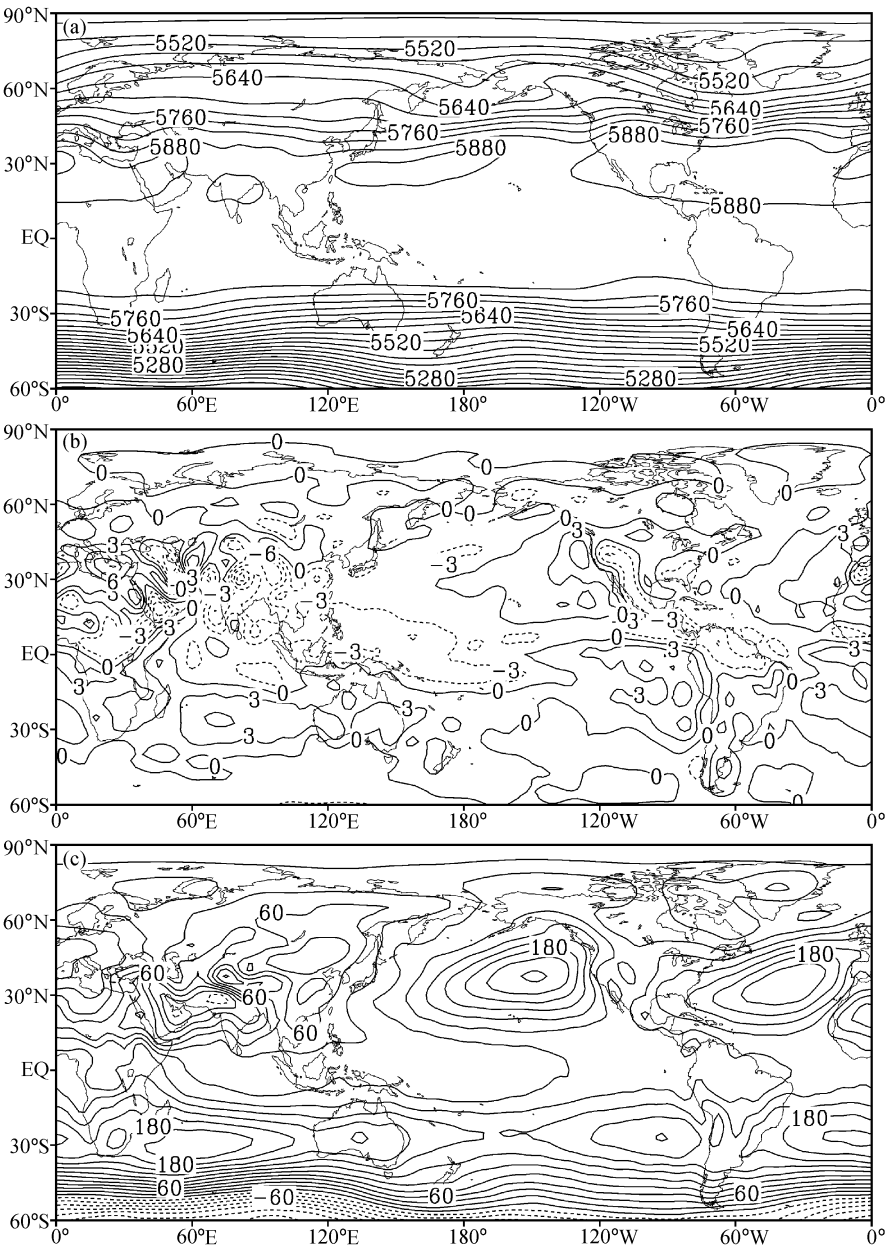


图 8 由 NCEP/NCAR 1980~1995 年资料计算得到的 7 月月平均 (引自文献 [6])  
(a) 500 hPa 位势高度场; (b) 500 hPa 垂直速度  $\omega \times 100$ ; (c) 1000 hPa 位势高度场  
(a) 和 (c) 的单位: gpm;  $\omega$  的单位:  $\text{Pa s}^{-1}$

力和热力特征决定的。它们反过来也对洋面低层副高的形成起重要的作用。

6 讨论

把副高脊面视为高、低纬环流间的活动界面 (WEB) 并建立其计算和预报方程无

疑是开拓了大气动力学研究的新方向。由于引进了摩擦和加热效应，Ertel 位涡理论及由此导出的全型涡度方程和所建立的“热力适应”理论对揭示外源激发大气环流异常的机理也具有重要的应用价值。

上述关于副高研究的许多理论成果具有重要的天气和气候应用意义，其重要之处是纠正了对副高成因的若干传统认识。例如，不能用下沉运动去解释气候平均态的副高的形成。又如习惯上认为西太平洋副热带高压支配着我国夏季的降水，两者似乎是一种主从的关系，因此常常通过预报副高的异常去进行降水异常的预测。本研究结果证明，我国夏季风降水和西太平洋副热带高压之间是一种相互作用的关系，必须通过大气外热源的异常去预测夏季的气候异常，等等。因此，这些成果对改善关于西太平洋副热带高压的天气预报和气候预测有重要的实际意义。

对于西太平洋副热带高压和南亚高压的研究成果更有直接的天气气候应用价值。其中关于西太平洋副热带高压年代际、年际、季节、季内及 5~10 天变化的研究揭示了副高的一般活动规律。而西太平洋副热带高压异常与热带、西风带环流关系的研究揭示了高低纬度环流的相互作用对副高异常的影响。另外，夏季西太平洋副高脊线位置的异常与我国降水异常的关系的研究对灾害气候的预测有直接的参考价值。值得一提的是关于热带 SST 异常与副高异常的联糸的研究不仅为副高预测提供重要因子，而且揭示了冬春季西太平洋副热带高压异常对 ENSO 事件形成的可能影响。这无论对开展 ENSO 动力学研究，还是对开展 ENSO 预测无疑都是非常重要的。

上述成果自 1997 年以来已陆续在国内外发表，并先后在大陆、台湾、英国、美国等举办的国际会议上交流，已得到大气界的好评和应用。但随着研究的深入，也提出了一些非常值得进一步深入研究的问题和课题。较为突出的是不同形式的加热强迫对副热带高压带形成起什么样的不同作用。更为突出的是副高的短时变动与西风带系统和热带波动相互作用的规律问题，它更多地涉及大气内部流场的相互作用，与气候问题中强调外源强迫有较大差别，而且对中、短期天气预报有直接的影响，特别是对我国的天气预测尤为重要。因此，国家自然科学基金委员会在“十五”期间又开设新的重点课题，对副高演变开展持续、深入的研究，以期取得更新的结果。

**致谢：**本研究得到项目科学顾问叶笃正先生和陶诗言先生自始至终的指导。

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），1~18。  
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流型的特征，气象学报，1962，**32**（1），91~102。  
3 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，1963，145 pp。  
4 黄土松、余志豪，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。  
5 黄土松，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。  
6 刘屹岷、吴国雄，副热带高压研究回顾及对几个基本问题的认识，气象学报，2000，**58**（4），501~512。  
7 Beer, T., G. K. Greenhut, and S. E. Tandoh, Relations between the Z criterion for the subtropical high, Hadley cell parameters, and the rainfall in northern Ghana, *Monthly Weather Review*, 1977, **105**, 849~855.

- 8 Greenhut, G. K., New criterion for locating the subtropical high in West Africa, *Journal of Applied Meteorology*, 1977, **16**, 727~734.
- 9 Ueki, K., N. Zinkawa, and Y. Shiota, Relationship between the characteristics of the two hemispheric circulations and the behavior of the subtropical high in Asia to the Pacific Ocean, *Journal of Meteorological Research*, 1978, **30**, 125~132.
- 10 Dyer, T. G. J., Rainfall along the east coast of southern Africa, the Southern Oscillation, and the latitude of the subtropical high pressure belt, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1979, **105**, 445~451.
- 11 Aoki, T., M. Kawahara, and S. Yamada, Relationship in 500-mb geopotential height field between summer subtropical high in the western North Pacific and winter Southern Hemisphere, *Journal of Meteorological Research*, 1986, **38**, 203~208.
- 12 Kurihara, K., Climatological study on the relationship between the Japanese summer weather and the subtropical high in the western North Pacific, *Geophysical Magazine*, 1989, **43**, 45~104.
- 13 Kato, K., Synoptic features on moisture field and shallow convection in the subtropical high area around Japan in early July of 1988, *J. Meteor. Soc. Japan*, 1992, **70**, 757~768.
- 14 Kalnay, E., and co-authors, The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1996, **77**, 437~471.
- 15 吴国雄、张学洪等, LASG 全球海洋—大气—陆面模式 (GOALS/LASG) 及其模拟研究, 应用气象学报, 1997, **8** (增刊), 15~28.
- 16 Zhang Xuehong, Shi Guangyu, Liu Hui et al., *IAP Global Ocean—Atmosphere-Land system model*, Science Press, Beijing, New York, 2000, 252pp.
- 17 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, 314pp.
- 18 张培群, 副热带高压脊线位置移动的动力学方程及其诊断研究, 兰州大学大气科学系博士学位论文, 1997.
- 19 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**, 472~479.
- 20 刘平, 副高带、西太副高年际变化特征及其与海表温度异常的联系, 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 1999.
- 21 Sun Shuqing, and Ying Ming, Subtropical high anomalies over the western Pacific and its relations to the Asia monsoon and SST anomaly, *Adv. Atmos. Sci.*, 1999, **16** (4), 559~568.
- 22 孙淑清、马淑杰, 西太平洋副高异常及其与 1998 年长江流域洪涝过程关系的研究, 气象学报, 2001, **59** (6), 719~729.
- 23 应明、孙淑清, 西太平洋副热带高压对热带海温异常响应的研究, 大气科学, 2000, **24**, 2, 193~206.
- 24 陶诗言、张庆云、张顺利, 夏季北太平洋副热带高压系统的活动, 气象学报, 2001, **59** (6), 747~758.
- 25 张庆云、陶诗言, 夏季西太平洋副热带高压北跳及异常的研究, 气象学报, 1999, **57** (4), 539~548.
- 26 张庆云、陶诗言, 夏季东亚热带和副热带季风与中国东部汛期降水, 应用气象学报, 1998, **9** (增刊), 16~23.
- 27 张庆云、陶诗言, 夏季西太平洋副热带高压异常时的东亚大气环流特征, 大气科学, 2003, **27** (3), 369~380.
- 28 张庆云、陶诗言, 亚洲中高纬度环流对东亚夏季降水的影响, 气象学报, 1998, **56** (2), 199~211.
- 29 张琼, 南亚高压的演变规律、机制及其对区域气候的影响, 南京大学博士学位论文, 1999.
- 30 叶笃正、李麦村, 大气运动中的适应问题. 北京: 科学出版社, 1965.
- 31 曾庆存, 初始扰动结构对适应过程的影响及观测风场的应用, 气象学报, 1963, **33**, 37~50.
- 32 曾庆存, 大气中的适应过程和发展过程 (一), 气象学报, 1963, **35**, 163~174.
- 33 曾庆存, 大气中的适应过程和发展过程 (二), 气象学报, 1963, **35**, 181~189.
- 34 巢纪平, 关于“大气各类运动的多时间尺度特征”的讨论, 第二次全国数值天气预报会议论文集, 中央 3 气象局气象科学研究所编, 北京: 科学出版社, 1980, 193~195.
- 35 吴国雄、刘屹岷, 热力适应、过流、频散和副高 I. 热力适应和过流, 大气科学, 2000, **24**, 433~446.
- 36 吴国雄、刘还珠, 全型垂直涡度倾向方程和倾斜涡度发展, 气象学报, 1999, **57**, 129~142.

37 吴国雄、刘屹岷、刘平等, 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.

38 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.

39 吴国雄、张学洪等, LASG 全球海洋—大气—陆面模式 (GOALS/ LASG) 及其模拟研究, 应用气象学报, 1997, **8** (增刊), 15~28.

40 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高压及西太平洋副高, 气象学报, 1999, **57** (5), 525~538.

41 刘屹岷, 非绝热加热影响北半球夏季副热带高压形态变异的物理机制, 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 1998, 135pp.

42 Liu Yimin, Wu Guoxiong, Liu Hui et al., Condensation heating of the Asian summer monsoon and the subtropical anticyclone in the Eastern Hemisphere, *Climate Dyn.*, 2001, 327~338.

43 刘屹岷、吴国雄、宇如聪等, 热力适应热力适应、过流、频散和副高 II. 水平非均匀加热与能量频散, 大气科学, 2001, **24** (4), 317~328.

44 吴国雄、刘平、刘屹岷等, 印度洋海温异常对西太副高的影响—大气中的两级热力适应, 气象学报, **58** (5), 513~522.

45 Hoskins, B. J., On the existence and strength of the summer subtropical anticyclones, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1996, **77**, 1287~1292.

46 吴国雄、刘屹岷、刘平等, 纬向平均副热带高压和 Hadley 环流下沉支的关系, 气象学报, 2002, **60** (5), 635~636.

Review and Prospect of the Study on the Subtropical Anticyclone

Wu Guoxiong<sup>1)</sup>, Chou Jifan<sup>2)</sup>, Liu Yimin<sup>1)</sup>, Zhang Qingyun<sup>1)</sup>, and Sun Shuqing<sup>1)</sup>

1) (*Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*)

2) (*Centres for Advanced Training of Meteorologists, Chinese Meteorological Administration, Beijing 100081*)

**Abstract** The studies of a Key Project, entitled “Formation and variation of subtropical anticyclone”, supported by National Natural Science Foundation of China from 1997 to 2000 are reviewed. The results derived from this project have improved some traditional understandings on the mechanism of the formation and variation of the subtropical anticyclones. Some new facts of the interannual variability of subtropical high ridge have been revealed. A dynamic model of the ridge surface that is defined by the boundary surface between easterlies and westerlies has been developed. The complete vorticity equation was developed; the thermal adaptation theory and a model of two-stage thermal adaptation in the atmosphere have been constructed. Moreover, the mechanism of the formation of the subtropical anticyclone, as well as its seasonal and interannual variability have been explored by data diagnosis and numerical simulation. New insights obtained on the variation mechanism of the subtropical anticyclone over the western Pacific.

**Key words:** the subtropical anticyclone; review; prospect