

副热带高压研究回顾及对几个基本问题的再认识^{*}

刘屹岷 吴国雄

(中国科学院大气物理研究所, LASG, 北京, 100029)

摘 要

文中在回顾有关副热带高压研究的基础上, 指出传统的观念在东太平洋副热带高压和西太平洋副热带高压的关系、下沉运动和副热带高压的形成、热带加热异常与副热带高压异常的关系、副热带高压与其周边系统的关系等问题上存在一定的局限。并根据近期的研究成果对上述问题给出新的认识。最后文中展望了在副热带高压的研究中需进一步深入的几个方面: 不同纬度相互作用、青藏高原的作用、时间尺度—内部动力过程和外界强迫的相对重要性、非线性过程和角动量平衡问题。

关键词: 副热带高压, 下沉运动, 外界强迫, 时间尺度, 动量平衡。

1 引 言

在南北半球的副热带地区, 存在副热带高压带。山脉的存在、海气相互作用、海陆热力差异、陆面过程、乃至海冰、冰川和积雪等外部强迫过程改变了大气的能量收支, 造成了副热带高压带断裂为若干个区域高压中心, 支配着副热带天气系统的运动和水汽的传输, 强烈地影响着热带、副热带及其邻近地区的天气和气候变化, 它也是影响中国持续异常的天气气候的主要大气环流系统之一。因此研究副热带高压, 特别是西太平洋副高的活动规律一直是中国气象学家的重要课题。本文基于对副高研究工作的回顾, 指出通常存在的几个观念上的问题。最后讨论和展望了需进一步研究的几个方面。

2 副热带高压研究的历史和现状

概观大气科学家特别是中国学者对副热带高压的研究, 总体上可分为两大类: 一类是研究副高自身结构、活动规律及其对天气气候的作用; 另一类是对影响副高活动因子的研究。

2.1 第一类的工作以观测研究为主

中国气象学家陶诗言^[1~3]、黄土松^[4,5]首先就西太平洋副高和青藏高压的变化对中国天气的影响进行了一系列的研究, 其成果已成为我国天气预报和短期气候预测的指南。他们的研究表明太平洋副高长年存在, 是一个稳定而少动的暖性系统, 其冬夏强度和范围差异很大。夏季, 太平洋副高特别强大, 几乎占北半球面积的 $1/5 \sim 1/4$; 冬季其强度减弱, 范围也小得多。黄土松和余志豪^[4]从高压脊位置、温湿场分布、风场、涡散场、垂直运动及经圈环流等诸多方面对副高作了比较详细的研究, 指出副高的结构远非一般高压那样简

^{*} 初稿时间: 1999 年 5 月 28 日; 修改稿时间: 1999 年 7 月 21 日。

资助课题: 自然科学基金重点项目 (49635170, 49823002, 49825504 和 49905002) 及 国家重点基础研究发展规划《G 1998040904 的联合支持。

单,而是非常复杂。不但各个单体之间有不同,一个高压单体内部亦不同。特别指出,副高并非一个纯粹动力性质的系统,尤其是移近大陆或位于大陆上的高压。顾平^[6],潘春生和喻世华^[7]分析了海上副高主体和陆上副高主体动能收支上的差异和北抬过程中动能的变化。许金镜^[8]、Kato^[9]研究了副热带地区的环流特征。目前,观测资料及研究手段已有很大进步,关于副高结构方面仍需要进行大量、细致的工作。

副热带高压活动最为显著的特征是季节性的南北进退,一般认为这是太阳辐射的季节性变化引起经向的加热差异所致。研究表明,北半球各个副热带高压单体之间强弱的变化通常是整个半球范围内的普遍强或普遍弱,而季节性的进退则在整个北半球不平衡,随地区而异^[10]。对西太平洋副热带高压气候学的研究表明,由冬到夏,副高存在两次北跳,与中国夏季雨带的位置密切相关^[3]。这两次北跳的形成与东亚地区的气候突变有关^[11,12]。另外,副高还具有半月左右的准周期振荡^[13~16],30~50天的低频振荡^[17]和年际时间尺度的长期变化。严中伟^[18]发现1960年代副高存在跃变现象。西北太平洋副高与日本的天气同样密切相关^[19~21]。

2.2 第二类研究涉及影响副高的活动因子

2.2.1 环流因子

作为一个过渡带,副热带高压带与邻近的热带和中高纬环流系统之间有着密切而复杂的关系。陶诗言与朱福康^[22]提出,大陆东部副高脊的进退与北半球范围内的长波调整有关,进而也与高纬的环流调整相联系。西风急流北跳比副高脊北跳迟1~2个候,而副热带高压脊的北跳则往往比ITCZ的移动晚3~4候^[23]。朱福康^[24]和袁恩国^[25]研究了盛夏西风带南面的暖高压,中纬度经圈间接环流和赤道缓冲带与副高的关系。张先恭与魏凤英^[26]、廖荃荪与赵振国^[27]分别从北半球极涡和东亚阻塞形势对副热带高压的影响进行了分析,结果表明,夏季极涡面积扩张时,西太平洋副热带高压强度减弱,位置南移,脊点西伸。极涡面积缩小时则相反。当夏季东亚阻塞形势持久稳定时,西太副高位置偏南。

在冬季,对流层上层大型扰动所造成的涡度输送是维持冬季反气旋涡度的主要因子^[28]。冬季引起副热带高压断裂的强对流过程与北方冷空气的爆发有关^[29]。已有的结果告诉我们,中高纬系统与副热带有着密切的联系,这种联系不仅在冬季存在,而且在热带的影响显得更为重要的夏季也存在。

副热带高压的变异与热带的系统有密切的关系^[30~32]。王建德^[33]曾分析过南海对流活动的作用,发现南海对流活动增强将促使西太副高北抬。叶笃正和邓根云^[34]通过角动量输送的计算明确指出,副高脊轴南侧存在平均经圈逆环流,Phillips^[35]的数值试验和黄士松等^[4]的资料分析说明这一现象并不限于平均的环流,而在夏季每天环流过程中都存在。它对副高变异的影响也需进一步研究。

南半球环流的影响也为人们所关注。杨修群和黄士松^[36]的数值模拟研究表明,南半球马斯克林高压和澳大利亚高压的发展加强,使越赤道气流加强,进而增强菲律宾周围的对流活动,最终使局地Hadley环流发展从而导致西太平洋副高增强。

2.2.2 高原作用

陶诗言^[22]、Krishnamurti^[37]、高由禧^[38]和叶笃正^[39]的研究表明高原对副高的影响相当重要。他们认为青藏高压是一个暖性反气旋,与加热过程有关。一般的结论是高原热源

作用有利于青藏副高夏季加强, 热源减弱时不利于其发展。

在纪立人等^[40]的有限区域数值试验中, 当只有青藏高原纯动力作用时, 高空没有断裂出反气旋。只有在引进加热作用后 200hPa 才出现反气旋环流。但骆美霞、朱抱真^[41]的数值试验表明, 纯大地形的动力作用可使北半球副热带高压带断裂成多个单体。董步文、丑纪范^[42]的数值分析考虑了这种地形的动力作用与热力作用, 认为在一定的地形和一定的经向热力强迫作用下, 较明显的纬向海陆热力差异形成副高的两次北跳。较弱的纬向海陆热力差异形成副高的一次北跳。这是一维正压模式, 没有考虑强迫源和流场的非线性相互作用。而当山体高度超过 1 km 这一临界高度时, 大气对地形的响应就是非线性的。地形的动力与热力的联合作用同样是非线性的^[43]。因此, 需要借助于陆气耦合环流模式进行深入研究。

2.2.3 东亚季风

通常认为副高的季节性跳跃及季节内进退是东亚大陆雨带变化的原因。但湿过程显著地增强了副高及气流的经向发展^[44]。喻世华^[45]、钱贞成等^[46]和张韧^[47]提出西太平洋副高与东亚雨带之间是一种彼此相互作用与制约的关系: 雨带凝结加热支持一向南运行的次级辐散环流, 与 Haldley 环流在东亚副热带大陆上空汇合成一支下沉辐散环流, 诱导副高西伸。副高的西伸先促使雨带加强和向西发展; 随着副高进一步西伸, 切断西南气流, 大陆雨带减弱, 副高随之退出大陆。强调了雨带的热力强迫作用和东亚环流的背景作用对副高活动的制约。Nikaidon^[48]也认为副高增强是发生在热带西太平洋的降水增加之后。Hoskins^[49]推测, 北半球夏季副热带高压的存在和增强的基本原因, 是其东部陆地上的季风潜热释放而产生的暖性 Rossby 波与西风气流作用造成的下沉运动。在这下沉下面, 是一反气旋性向赤道方向运动的气流。

何金海等^[50]用 TBB 资料分析则认为, 南海-西太平洋地区夏季风的建立与中印半岛对流的活跃及副热带 TBB 高值带(相应于西太平洋副高)的连续东撤密切相关。

2.2.4 海温

海温作为重要影响因子, 它与副高活动有密切联系。研究指出, 赤道太平洋海面温度的变异, 与西太平洋副高的强弱趋势变化密切相关^[51~53]。ENSO 循环作为海气相互作用的强信号, 被认为是引起气候异常的重要因子。符淙斌、滕星林^[54]的研究指出, 多数 ENSO 爆发年(西太平洋)副热带高压强度偏弱, 位置偏东, 次年夏季则有明显的副高强度偏强, 位置偏西。但他们认为赤道东太平洋海温异常对西太平洋副高的位置和强度变化无直接的、物理上的贡献, 可能是伴随 ENSO 而变化的西太平洋对流活动引起了 ENSO 年西太平洋副高相应的变化。

黄荣辉等^[55~57]和蒲书箴等^[58]对西太平洋暖池区热状况进行了研究, 指出当热带西太平洋暖池增温时, 从菲律宾周围经南海到中印半岛上空的对流活动将增强, 西太平洋副高的位置偏北; 从东南亚经东亚到北美西海岸上空大气环流的异常呈现出一个遥相关型——东亚太平洋型。强调了热力强迫产生的准定常波的影响^[48, 59, 60]。这里海温可以是海洋表面温度, 也可能是海洋次表层温度。但是, 西太平洋暖池的作用也有不确定的方面。Nitta^[61]指出 1988 年日本的天气不适用‘暖池冷海温→菲律宾周围对流活动弱→西太平洋副热带高压发展不强→日本冷夏多雨’的一般规律。实际上日本出现冷夏的 1988 年是一个强 La Nina 年, 西太平洋暖池区的海温距平达 0.5~1。与此同时, 印度洋的海温距

平也达 1。可见, 印度洋与赤道东太平洋的 SST 变化并不总是一致的。太平洋热带海域 SST 对西太平洋副高产生影响的同时, 印度洋的 SST 可能会起相反的作用。

关于印度洋海温的作用, 也有学者作过相关的工作, 如罗绍华^[62]、金祖辉^[63]和蒋国荣^[64]等。结果表明冬春及梅雨期北印度洋和南海海区海温偏暖, 有利于梅雨期西太平洋副热带高压偏强与西伸。Wu 和 Liu^[65]通过数值试验和资料^[66]证明同期印度洋正的海温异常能加强西太平洋副高。

2.2.5 海冰

在高纬地区的海气相互作用中, 极地海冰有着突出贡献。极地海冰不仅具有明显的局地效应, 而且通过冷流作用影响海温或陆地降雪, 进而影响副高的活动^[67~69]。武炳义^[70]的研究认为, 冬季喀拉海、巴伦支海海冰偏多时有利于西太平洋副热带高压北上, 且范围偏大, 强度偏强。冬季海冰少时则相反。北极海冰通过影响欧亚大陆和西太平洋高纬度地区高度场和东亚季风, 南海海温及其上空的对流活动, 从而影响副热带高压的强度。

2.2.6 太阳辐射

影响大气运动的外部因子中, 主要的是太阳辐射。徐群^[71]研究了太阳活动与副高的耦合振荡。蒋全荣等^[72]分析了实际的净太阳射入辐射的资料, 认为太阳辐射的第二特征向量及其时间变化与西北太平洋副高南北移动和季节性北跳存在显著的相关, 两者同步。第四特征向量及其变化与副高季节性东西进退密切相关, 且太阳辐射超前一个月。杨义文^[10]、廖荃荪^[73]和赵振国等^[74]推测, 西太平洋副高脊线存在 11 a 的变化周期, 与太阳黑子活动的 11 a 周期有关。

2.2.7 地球自转速度

彭公柄等^[75]分析 1870~1962 年共 90 a 的观测资料, 认为由于地球自转速度由春到夏加快, 根据角动量守恒的原理, 北半球中纬西风指数要降低或作为大气密度较大地区的低层副热带高压北移。这与由春到夏大气环流形势的演变相一致。钱维宏^[76]在一个两层大气模式下推导地转速度变化作用于超长波活动的相速公式, 从理论上说明地转变速对副高脊线南北进退的作用。但是他们的工作并没能解释为什么地球自转速度在夏季会增加。事实上这很可能是大气对地球的作用。因为从春到夏, 太阳直射地球的纬度北移, 北半球南北温差减少, 气压梯度力降低, 因而中纬西风减速。副高北移则是太阳加热地面产生的感热通量的季节变化的结果^[77]。在角动量守恒原理的约束下, 地球自转速度因之加快。

总之, 有关副高的研究所取得的成果, 对提高副高的预报水平有相当的帮助。

3 对若干传统观念的再认识

上节回顾了的有关副高的研究工作。由于以往工作中缺乏完备的资料, 使副高的研究面临许多困难。另外根据气候动力学理论, 如果不从气候系统各圈层的相互作用出发, 仅从大气环流的变化对副高进行研究就可能存在局限性。随着观测资料的增加及数值试验手段的改进, 必须对传统的工作进行检验, 改善对副高性质和变异机理的认识。基于此观念, 本节对几个有关副高的基本概念进行讨论。

3.1 东太平洋副高和西太平洋副高的关系

北半球夏季在对流层低层为强大的太平洋副高, 其中心位置位于东太平洋; 中层东亚-

太平洋地区 500 hPa 上副高中心则位于西太平洋。过去有些学者把东太平洋副高和西太平洋副高视为一个整体,认为西太平洋副高是东太平洋副高向西的延伸,因此可通过后者的变化去预测前者的变化。但最近吴国雄和丑纪范主持的国家自然科学基金重点项目“副热带高压带的变异机理”的研究成果^[77~79]指出,两者的形成机制有很大差别。理论分析(图 1, 2 略, 分别参见《气象学报》1999 年 57 卷第 3 期 P259 中图 1 和 P260 中图 2)、资料诊断和数值试验均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,凝结潜热加热对其位置和强度有所修正。东太平洋副高主要是北美大陆强大的陆面感热加热所致(图 1b, c)。西太平洋副热带高压的形成要比东太平洋副热带高压的形成复杂得多。通过一系列的数值试验,证明凝结潜热是决定东半球夏季副热带高压位置和强度的关键因素:东亚季风降雨所致凝结潜热加热使高层南亚高压位于加热中心西侧,中层西太平洋副高位于加热中心东侧(图 2a, b)。陆面感热起着减弱 500 hPa 西太平洋副高但增强南亚高压的作用^[79]。因此不能将对流层低层的东太平洋副高和中层的西太平洋副高视为统一的整体。

3. 2 下沉运动和副高的形成

经典理论认为,净太阳辐射的南北梯度和地球旋转速率的大小决定了大气的平均经圈环流。在 Hadley 环流圈中,暖而轻的湿空气在赤道地区上升,较冷且重的空气在副热带下沉,该下沉气流在中低空引起辐散,从而形成了副热带高压带^[80]。

Hoskins^[81]从观测分析中指出,在北半球纬向平均图上,冬季 Hadley 环流最强,但海平面副热带高压最弱;夏季 Hadley 环流最弱,但海平面副热带高压最强。对最新的美国国家气候和环境预报中心/国家大气研究中心(NCEP/NCAR) 16 a 平均资料进行分析所得到的结果证实了 Hoskins 的观点。图 3 和图 4 是根据 NCEP/NCAR 再分析资料计算

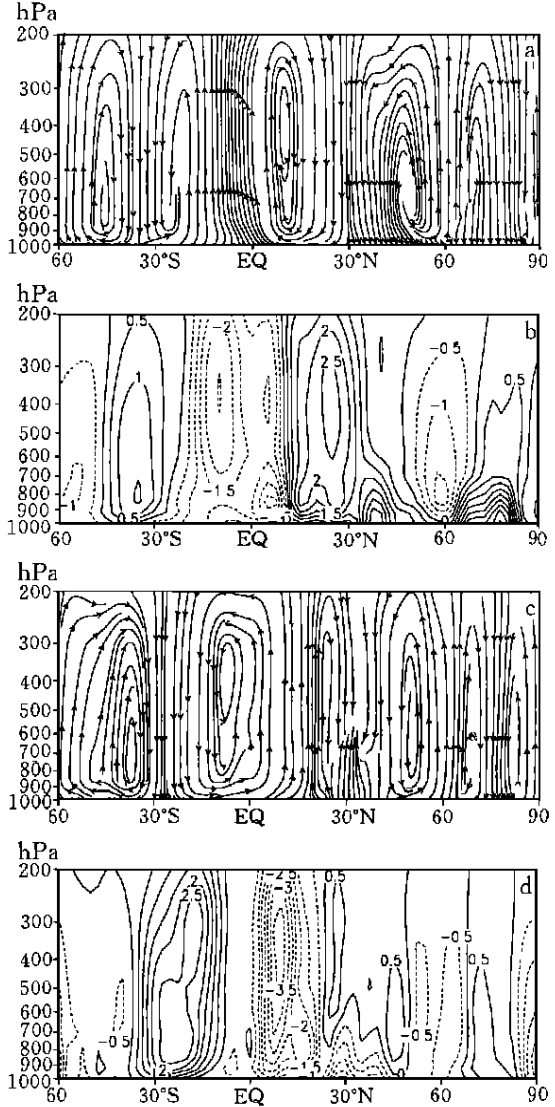


图 3 由 NCEP/NCAR 1980~1995 年资料计算得到的月平均的纬向平均场

(a 和 c 为径向风 v 和垂直速度 $-\omega \times 100$ 的流线; b 和 d 为 $\omega \times 100$ 。a 和 b 为 1 月, c 和 d 为 7 月。

单位: v 是 ms^{-1} , ω 是 Pa s^{-1})

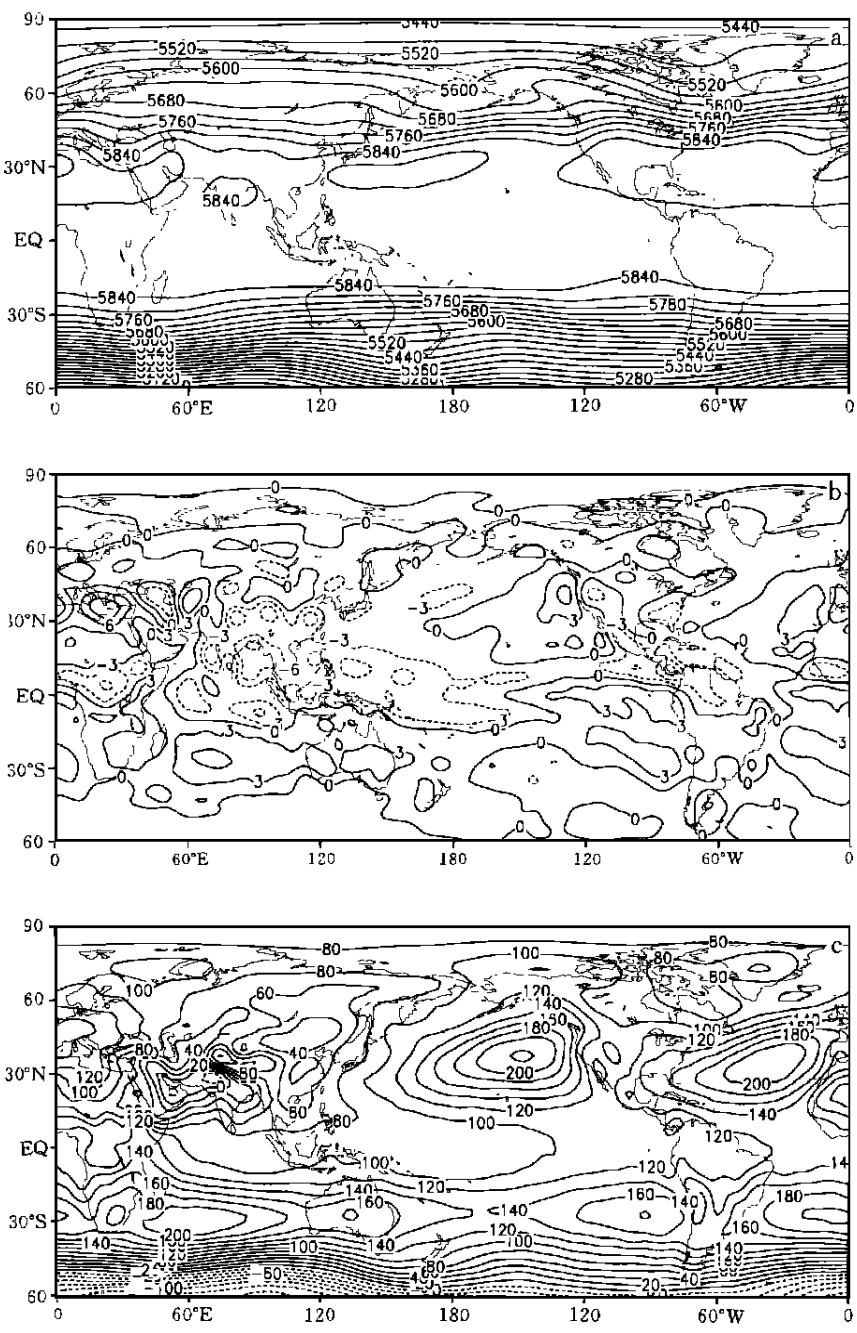


图 4 由 NCEP/NCAR 1980~1995 年资料计算得到的 7 月月平均
(a) 500 hPa 位势高度场, (b) 500 hPa 垂直速度 $\omega \times 100$ 和 (c) 1000 hPa 位势高度场。
(单位: a 和 c 是 gpm, b 中的 ω 是 Pa s^{-1})

得到的环流形势场。在纬向平均剖面图 3 中, 北半球 1 月 Hadley 环流最强 (图 3a), 副热带的下沉运动也最强, 达 $2.5 \times 10^{-4} \text{hPa s}^{-1}$ (图 3b); 7 月 Hadley 环流最弱 (图 3c), 副热带的

下沉运动也最弱, 仅为 $0.5 \times 10^{-4} \text{hPa s}^{-1}$ (图3d)。而北半球7月副热带高压远强于1月份的, 的确这是经典理论所无法解释的。

即使在三维空间上, 下沉运动也并不与副高主体相对应。图4c中, 7月1000 hPa层上, 北太平洋和北大西洋副高的上空虽对应有500 hPa的下沉运动(图4b), 但下沉运动中心出现在高压东部的偏北气流中, 并不与副高中心相对应。而两大洋的西部均对应着上升运动。500 hPa上的西太副高和北美副高(图4a)的西部也为上升运动区(图4b)。显然用经典的下沉运动去解释副高的形成至少是存在局限性。

其实, 对副高形成起动力作用的是流体的辐散效应。由连续方程和状态方程知

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = \frac{1}{\alpha} \frac{d\alpha}{dt} = - \frac{1}{p} \frac{dp}{dt} + \frac{1}{T} \frac{dT}{dt} \tag{1}$$

因此下沉增压本身并不能引起膨胀辐散和副高的发展, 后者是由下沉加热的间接效应造成的。假设气块从400 hPa绝热下降至800 hPa, 其平均气温为250 K, 则估得式(1)右端两项之比为 -10^{-3} 。也就是说, 气块下沉的增压效应大于绝热增温效应, 引起收缩(辐合)。

如果从涡度倾向方程考虑, 涡度的变化正比于辐合:

$$\frac{d\zeta}{dt} = (f + \zeta \nabla \cdot \mathbf{V}) \tag{2}$$

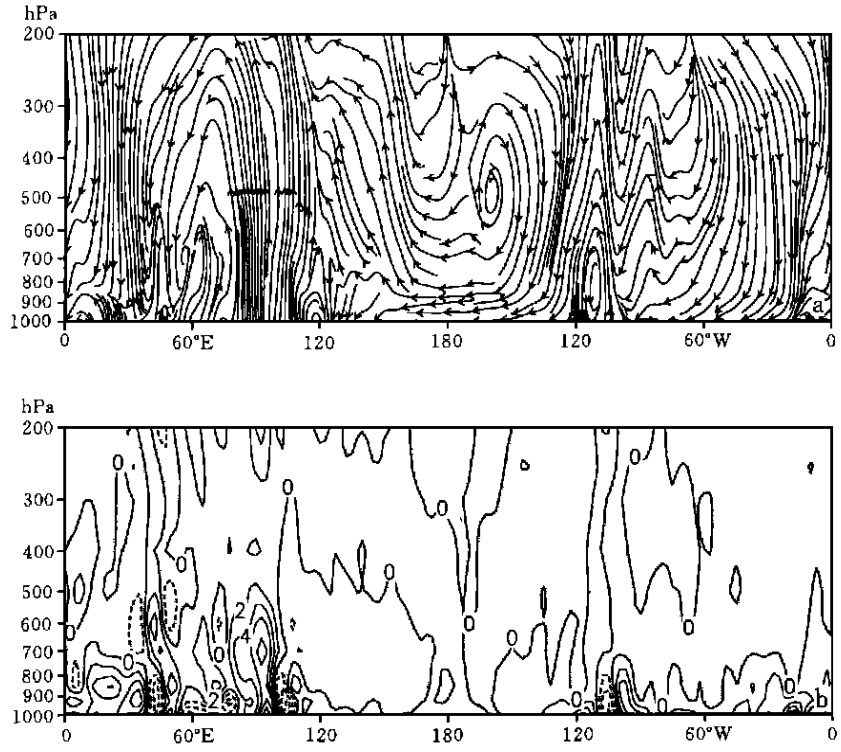


图5 由NCEP/NCAR 1980~1995年资料计算得到的7月纬向风 u 和垂直速度 $-\omega \times 100$ 的流线(a)和散度场 $D \times 10^6$ (b)沿 26°N 的垂直分布
(b中阴影表示负值。单位: a中 u 为 ms^{-1} , ω 为 Pa s^{-1} , b中 D 为 s^{-1})

利用连续方程 $\frac{d\alpha}{dt} = \alpha \nabla \cdot \mathbf{V}$ 可得

$$\frac{d\zeta}{dt} (1 - \kappa) (f + \zeta \frac{\omega}{p} - (f + \zeta \frac{1}{\theta} \frac{d\theta}{dt} \tag{3}$$

因此, 下沉本身只引起正涡度发展, 只有位温增加才能导致负涡度的发展。由此看来, 简单地用下沉运动本身去解释涡度的发展和副高的形成是有片面性的。日常天气图上, 西太平洋副高西伸所到之处, 一般说来对应的是晴天。这是因为对应于西太平洋副高的位置, 对流层低层是弱的辐散。图 5 给出由 NCEP/NCAR 1980~1995 年资料计算得到的 7 月月平均纬向风 u 和垂直速度的流线和散度场 D 沿 7 月西太平洋副高脊线位置 26°N (见图 4a) 的垂直分布。可见在西太平洋和中国沿海地区, 800 hPa 以上是弱的辐合及上升运动, 但在近地层及 400 hPa 以上的高层为弱的辐散和下沉运动。这种低空流场配置有利于局地湿度减少, 这就是西太平洋副高区为晴天的原因。

3.3 热带加热异常与副高异常的关系

1966 年 Bjerknes^[82] 分析了 1957/ 1958 年 El Nino 期间中太平洋异常的暖水, 提出了如下假设: 这种增暖可使该经度域内的 Hadley 环流比常年更强, 在副热带上空下沉的连续角动量通量将比常年更强。有的学者将其讨论引用到西太平洋地区, 认为热带暖池地区如有较强的的对流活动, 则局地 Hadley 环流将加强。这时在其北部副热带地区产生较强的下沉运动, 因此西太平洋副高偏强。

上一小节的讨论已指出, 局地副高的加强不能用下沉运动去解释。根据式(3), 上升运动才能导致负涡度发展。那么是什么原因使热带加热异常能导致副热带高压异常呢? 刘

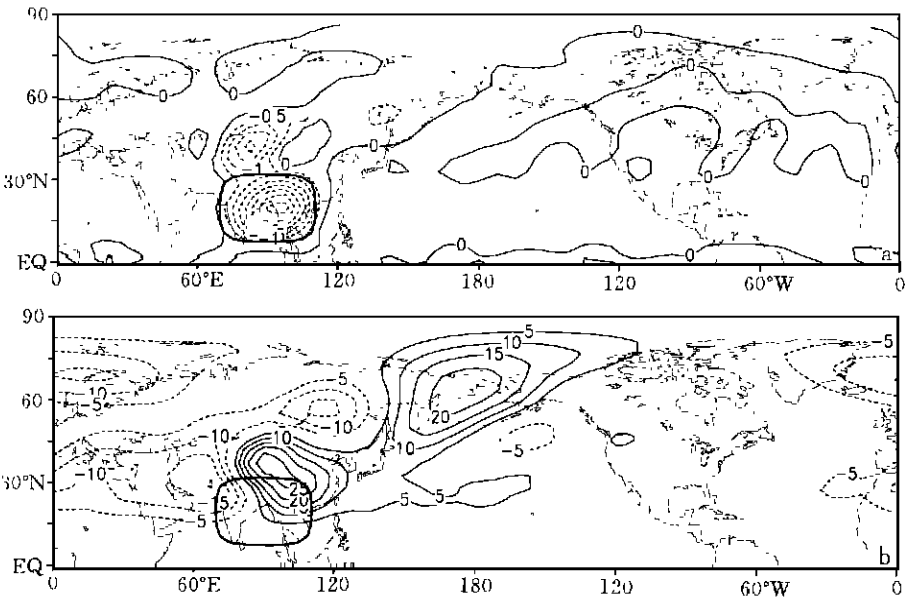


图 6 固定 7 月理想热源试验积分第 13~24 个月平均的 500 hPa 垂直速度
 $\omega \times 100$ (a) 和高度 (b) 纬向偏差场的空间分布
(单位: a 中 ω 是 Pas^{-1} ; b 是 gpm , 引自刘屹岷等 1999^[79])

屹岷等^[79]的研究指出,位于东风带中的对流加热在 f -效应和 β -效应以及水平非均匀加热效应的共同作用下,使得热源区及其北侧西风带中均存在上升运动(图 6a),在热源区北侧激发出附加的负涡度源,因而在 β -效应作用下,对流加热区北面出现北风,副热带地区出现高压异常(图 6b),同时在西风带中激发出 Rossby 波列。由此可见热带对流加热增加导致副高增强的机制并非是局地 Hadley 环流的加强,而是 f -效应和 β -效应使加热区北侧出现附加的负涡度源所致。

3.4 副高与其周边系统的关系

以往的工作偏重于研究副高的中短期演变。人们往往把西太平洋副高视为一个控制系统,其周围的台风、雨带、西风槽脊等的移动受副高所支配和制约。但在气候尺度上,西太平洋副高显然受到季风降雨的强烈影响。由此看来,副高与周边天气系统并不是一种“主从”关系,而是相互作用的关系。事实上,每当一次长波槽移入东亚大陆上空,往往对应一次较强的冷空气活动,它和西南季风气流之间的辐合造成一次强降水过程,释放的潜热引导南亚高压由西部型转为东部型,向东伸展,西太平洋副高向西推进^[39,45]。薛纪善等(1997, 个人交流)关于有无陆面潜热的 48 h 副高活动对比试验显示,由于略去了陆面潜热,大陆降水减少,西太平洋副高原来的西伸被大大削弱。事实上,根据吴国雄等^[78]的估计,每天 10mm 的降水产生 $1 \sim 2 \times 10^{-10} \text{ s}^{-2}$ 的涡度制造率,它在低空激发的南风及在高空激发的北风可达 $6 \sim 12 \text{ ms}^{-1}$,足可诱发 500 hPa 西太平洋副高显著的西伸及 200 hPa 南亚高压显著的东伸。这些均表明,即使在天气尺度上,西太平洋副高和其西侧的降水也存在相互作用,而不是控制与被控制的关系。

4 讨论与展望

4.1 不同纬度相互作用问题

如第 2 节中所述,中高纬环流系统及其与热带环流的相互作用也会影响副热带高压的变异。在日常天气图上常常可以看到西风带槽脊的移动以及东风带系统的移动引起副高变化的例子。这种不同纬带的环流是如何相互作用的?这些相互作用是如何影响副高的变化?这种影响在短期尺度及气候尺度上有什么差别?这都是副高动力学所必须面对的问题。这方面的工作有待进行深入研究。

4.2 青藏高原作用的问题

现在的研究已表明,夏季青藏高原表面强大的感热加热对高层南亚高压的形成非常重要。从数值试验的结果看,地形的动力强迫对西太平洋副高的强度也有一定的影响。至于青藏高原通过怎样的机制对副高的变异产生影响,尚无明确的理论解释,这是另一个需要进一步深入的研究课题。

4.3 时间尺度:内部动力过程和外界强迫的相对重要性问题

吴国雄、刘屹岷^[77-79]等主要研究了定常的副热带高压的形成和季节变化,没有讨论瞬时或天气时间尺度副高的变化规律。这两种不同时间尺度副高的演变机制应当存在很大差别。其中的一个主要差异是大气内部斜压过程和外部强迫的相对重要性。在天气尺度上,大气内部的斜压不稳定及与之相联系的初值问题显得非常重要。另一个主要差异如前所述,是在短期天气实践中,人们往往把西太平洋副高视为一个控制系统,因此,在短时间尺度上,大气内部过程及外部强迫如何影响副高的东西和南北进退是一个更为复杂,更具挑战性,以及更具天气应用意义的重要课题,必须在今后深入研究。

4.4 非线性问题

沿副高脊线 $u=0$, 在波动力学上被称为“临界纬度”。在这里, 向南传播的波动被吸收、反射或截陷, 呈现出复杂的非线性行为。波动在副高脊线附近的形变反过来改变了 u 和 v 的相关, 影响了涡动动量输送 ($\overline{\rho u'v}$ 和 $\overline{\rho u'^*v'^*}$), 从而又改变了时间平均西风带的强度。这种强非线性行为非常复杂, 至今尚无完美的研究和结论。而其对天气形势及气候态的形成的重要性又毋庸置疑, 这也是今后必须集中研究的课题。

4.5 角动量平衡问题

副高轴的北面是西风带, 南面是东风带。张培群^[83]提出了“东西风交界面(WEB)”的概念, 以研究大气中的角动量平衡。副高带的向极推进和向赤道南撤分别引起大气西风带范围的减少和增加。此外地面副高中心还可视为大气质量较集中的区域。其向极移意味着大气质量中心向地转轴靠近。总的来说, 副高的向极移导致大气角动量减少。在地-气这一相对封闭的系统中, 大气角动量的这一变化必须由地转速度改变所补偿。彭公炳等^[75]的研究已证实了这一事实。在短时期内, 如果地转速度不变, 则这一地区副高的北进可能伴有另一地区副高的南撤。因此角动量平衡的制约如何影响副高的短期变化也是一个极为吸引人的研究课题。

概言之, 在中高纬地区, Burger 数很小 (< 0.1), 平流过程是热量平衡的主要过程。在热带地区, Burger 数很大 (> 10), 绝热过程是热量平衡的重要过程^[84]。在这些地区, 大气运动的动力过程相对地要简单一些。在副热带地区, Burger 数接近 1, 平流过程和绝热过程在热量平衡中都很重要。这就使得副热带大气的动力学变得非常复杂。因此副热带高压的动力学研究无论在天气意义上还是在气候意义上都是非常重要和富有挑战性的课题。文献[77~79]等的研究尽管在气候意义上, 从非均匀非绝热的角度阐明了外强迫在副高带断裂中的重要作用, 取得了若干突破, 但对于复杂的副高动力学来说仅仅是一个开始。大量和深入的研究工作正等待着广大气象工作者去进行。

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
- 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 顾平等. 夏季西太平洋副热带高压北抬过程动能变化分析. 热带气象, 1987, 3(4): 337~342
- 7 潘春生, 喻世华. 夏季西太平洋副热带高压海上主体与大陆脊内能收支的对比分析. 热带气象, 1991, 7: 33~38
- 8 许金镜. 应用车贝雪夫多项式研究太平洋副高活动区域的环流. 热带气象, 1987, 3(3): 245~251
- 9 Kato K. Synoptic features on moisture field and shallow convection in the subtropical high area around Japan in early of 1988. J Meteor Soc Japan, 1992, 70: 757~768
- 10 杨义文, 陈兴芳. 北半球副高脊线变化的若干规律. 见: 长期天气预报论文集. 北京: 气象出版社, 1990. 198~204
- 11 叶笃正, 朱抱真. 大气环流的若干基本问题. 北京: 科学出版社, 1958
- 12 叶笃正, 陶诗言, 李麦村. 在六月和十月大气环流的突变现象. 气象学报, 1958, 29: 249~263
- 13 汤明敏, 陆森娥, 黄土松. 西太平洋副热带高压位置强度变化特点. 热带环流和系统学术会论文集. 北京: 海洋出版社, 1982. 81~104

- 14 周静亚, 杨大升. 夏季副热带环流系统周期振荡与中国降水的功率谱分析. 热带气象, 1986, 2(3): 195 ~ 203
- 15 毕慕莹. 夏季西太平洋副热带高压的振荡. 气象学报, 1989, 47: 468 ~ 474
- 16 喻世华, 钱贞成. 东亚夏季环流的中期变动特征和可能机制. 应用气象报, 1992, 3(1): 114 ~ 119
- 17 谢安, 叶谦. OLR 低频振荡与西太平洋台风的发生. 应用气象学报, 1994, 5: 143 ~ 150
- 18 严中伟等. 60 年代北半球夏季气候跃变. 中国科学 B, 1990, 1: 97 ~ 103
- 19 Kurihara K, Tsuyuki T. Development of the barotropic high around Japan and its association with Rossby wave-like propagations over the North Pacific: Analysis of August 1984. J Meteor Soc Japan, 1987, 65: 237~ 246
- 20 Kurihara K. A climatological study on the relationship between the Japanese summer weather and the subtropical high in the western northern Pacific. Geophy Mag, 1989, 43: 45~ 104
- 21 Nikaidou Y. Effects of high SST anomaly over the tropical western Pacific on climates predicted in 4-month integrations of the global spectral model T42 research activities in atmosphere and ocean modeling. G. J. Boer Ed, 1988, WM O/ TD No. 263, 7: 19~ 20
- 22 陶诗言, 朱福康. 夏季亚洲南部 100 百帕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 ~ 39
- 23 黄士松. 有关副热带活动及其预报问题的研究. 大气科学, 1978, 2: 159 ~ 168
- 24 朱福康. 南亚高压. 北京: 科学出版社, 1980
- 25 袁恩国. 夏季经圈环流的调整和西太平洋副热带高压活动的关系. 大气科学, 1981, 5: 60 ~ 67
- 26 张先恭, 魏凤英. 北半球极涡与副热带高压的相互关系. 长期天气预报论文集. 北京: 气象出版社, 1990
- 27 廖荃荪, 赵振国. 东亚阻塞形势与西太平洋副高的关系及其对我国降水的影响. 长期天气预报论文集. 北京: 气象出版社, 1990. 125 ~ 134
- 28 陈秋士, 林本达. 北半球冬季副热带高压维持的涡度机制. 气象学报, 1965, 35(3): 364 ~ 376
- 29 陈隼. 东亚冬季风异常与全球大气环流变化: [学位论文]. 北京: 中国科学院大气物理研究所, 1996
- 30 丁一汇, 赵深铭, 张键. 北半球夏季全球热带和副热带 200 hPa 平均辐散环流的研究. 气象学报, 1987, 45: 120 ~ 127
- 31 杨维武, 喻世华. 夏季南亚季风系统中中期变动过程中的 200 hPa 辐散环流. 海洋学报, 1993, 15: 44 ~ 52
- 32 Luo J, Yu S H. CEOF analysis of atmospheric low frequency oscillation in lower latitude region and frequency modulation phenomena of low frequency signals. ACTA Meteor Sinica, 1995, 9: 199~ 206
- 33 王建德, 唐东升. 夏季南海对流活动对北半球中低纬大气环流的影响及其可能途径. 热带气象, 1994, 10: 78 ~ 84
- 34 叶笃正, 邓根云. 1950 年平均经圈环流与角动量的平衡. 气象学报, 1956, 27: 307 ~ 322
- 35 Phillips N A. The general Circulation of atmosphere, a numerical experiment. Quart J Roy Meteor Soc, 1956, 82: 123~ 164
- 36 杨修群, 黄士松. 马斯克林高压的强度变化对大气环流影响的数值试验. 气象科学, 1989, 9: 125 ~ 138
- 37 Krishnamurti T N. Tibetan high and upper tropospheric tropical circulation during northern summer. Bull Amer Meteor Soc, 1973, 54: 1234~ 1249
- 38 高由禧. 海陆分布和青藏高原对我国气候的影响. 见: 青藏高原气象论文集(1975 ~ 1976). 高由禧主编. 北京: 科学出版社, 1977. 34 ~ 46
- 39 叶笃正, 高由禧. 青藏高原气象学. 北京: 科学出版社, 1979. pp278
- 40 纪立人, 沈如金, 陈于湘. 青藏高原气象科学试验文集(二). 北京: 科学出版社, 1984. 236 ~ 244
- 41 骆美霞, 朱抱真, 沈如金. 大地形对夏季北半球副热带高压形成作用的数值试验. 大气科学, 1986, 10: 258 ~ 264
- 42 董步文, 丑纪范. 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, 1988, 46(3): 361 ~ 363
- 43 Wu G X. The Nonlinear response of the atmosphere to large-scale mechanical and thermal forcing. J Atmos Sci, 1984, 41: 2456~ 2476
- 44 Li M Ch, Luo Z X. Effects of moist process on subtropical flow patterns and multiple equilibrium states. Sci Sinica (B), 1988, 31(11): 1352~ 1361

- 45 喻世华, 王绍龙. 西太平洋副热带高压中期进退的环流机制. 海洋学报, 1989, 11(3): 370 ~ 377
- 46 钱贞成, 喻世华. 东亚地区凝结加热的中期变化与西太平洋副高准双周振荡的关系. 热带气象, 1991, 7: 259 ~ 267
- 47 张韧, 史汉生, 喻世华. 西太平洋副热带高压非线性稳定性问题的研究. 大气科学, 1995, 19(6): 687 ~ 700
- 48 Nikaidou Y. The PJ-like north-south oscillations found in 4-month integrations of the global spectral model T42. J Meteor Soc Japan, 1989, 67: 687- 604
- 49 Hoskins B.J. On the existence and strength of the summer subtropical anticyclones. Bull Ame Meteor Soc, 1996, 77(6): 1287- 1292
- 50 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: 34 ~ 42
- 51 符淙斌. 太平洋海面温度的长期变化及其对副热带高压的影响. 地理集刊, 1979, 11: 146 ~ 157
- 52 王柏钧. 北太平洋海温与 500 hPa 西太平洋副热带高压和极涡相互作用 的统计分析. 大气科学, 1992, 16(3): 263 ~ 268
- 53 应明. 西太平洋副热带高压的变异与环流及海温异常的关系: [学位论文]. 北京: 中国科学院大气物理研究所硕士学位论文, 1998. pp54
- 54 符淙斌, 滕星林. 我国夏季的气候异常与埃尔尼诺/南方涛动现象的关系. 大气科学(特刊), 1988, 133 ~ 141
- 55 黄荣辉, 李维京. 夏季热带西太平洋上空的热源异常对东亚上空副热带高压的影响及其物理机制. 大气科学(特刊), 1988, 107 ~ 116
- 56 黄荣辉, 孙风英. 北半球夏季大气环流流相关型的年际变化及其数值模拟. 大气科学, 1992, 16: 52 ~ 61
- 57 黄荣辉, 孙风英. 热带西太平洋暖池的热状态及其上空的对流活动对东亚夏季异常的影响. 大气科学, 1994, 18(2): 141 ~ 151
- 58 蒲书箴, 于惠苓. 热带西太平洋上层热结构和海流异常及其对副高的影响. 海洋学报, 1993, 15(1): 31 ~ 43
- 59 Nitta T. Long-term variations of tropospheric circulation in the western Pacific region. J Meteor Soc Japan, 1986, 64: 373- 390
- 60 Nitta, T. Convective activities in the tropic western Pacific and their impact on the Northern Hemisphere summer circulation. J. Meteor. Soc. Japan, 1987, 65: 373- 390
- 61 Nitta, T. Unusual summer weather over Japan in 1988 and its relationship to the tropics. J Meteor Soc Japan, 1990, 68: 575- 587
- 62 罗绍华, 金祖辉. 北印度洋和南海海温异常与季风环流及长江中下游梅雨期旱涝关系的探讨. 气象科学技术集刊(季风论文专集). 国家气象局气象科学研究院, 1987, 10
- 63 金祖辉, 沈如桂. 长江中下游旱梅和涝梅年海温场及大气环流系统的特征. 气象科学技术集刊(季风论文专集). 国家气象局气象科学研究院, 1987, 10: 41 ~ 50
- 64 蒋国荣, 沙之钰, 蔡剑平. 印度洋海温和西太平洋副高的时空分布及两者的相互影响. 热带气象, 1992, 8(1): 71 ~ 82
- 65 Wu G X, Liu H ZH. Atmospheric precipitation on response to equatorial and tropical sea surface temperature anomalies. J Atmos Sci, 1992, 48: 2236- 2255
- 66 吴国雄等. 降水对热带海表温度异常的邻域响应: II 资料分析. 大气科学, 1995, 19(6): 663 ~ 676
- 67 方之芳等. 北半球副热带高压与极地海冰的相互作用. 科学通报, 1986, 31(4): 286 ~ 289
- 68 方之芳等. 极地海冰对北太平洋副热带高压影响的可能途径. 海洋学报, 1986, 8(5): 558 ~ 565
- 69 Peng G B. Connections of the west Pacific subtropical high and snow hydroclimatical regions in China with Antarctic ice-snow indices. Meteor & Atmos Phy, 1987, 37(2): 61- 71
- 70 武炳义. 北极海冰变化及其对东亚与全球气候的影响: [学位论文]. 北京: 中国科学院大气物理研究所, 1997
- 71 徐群. 太阳活动与北半球副热带高压强度的耦合振荡. 大气科学, 1986, 10(2): 204 ~ 211
- 72 蒋全荣, 王邦宁. 太阳辐射与西太平洋副高季节性移动关系的研究. 热带气象, 1989, 5: 289 ~ 294
- 73 廖荃荪, 赵振国. 7- 8 月西太平洋副热带高压的南北位置异常变化及其对我国天气的影响. 见: 长期天气预报和日地关系研究. 章基嘉, 黄荣辉主编. 北京: 海洋出版社, 1992. 131 ~ 139

- 74 赵振国, 陈国珍. 初夏西太平洋副热带高压位置长期变化的成因及预报. 热带气象学报, 1997, 11: 223 ~ 229
- 75 彭公炳, 陆巍, 殷延珍. 气候及其环流因子对地球自转速度变化的若干响应. 气象学报, 1982, 40: 209 ~ 218
- 76 钱维宏. 地球自转速度变化对副高脊线南北进退的作用. 气象学报, 1991, 49(2): 239 ~ 243
- 77 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: 陆面感热加热与东太平洋北美副高. 气象学报, 1999, 57(4): 385 ~ 396
- 78 吴国雄, 刘屹岷, 刘平. 空间非均匀加热对副热带高压形成和变异的影响. I. 尺度分析. 气象学报, 1999, 57(3): 257 ~ 163
- 79 刘屹岷, 吴国雄, 刘辉, 刘平. 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
- 80 Peixoto J P, Oort A H. Physics of climate. New York: American Institute of Physics Press, 1992. 520pp
- 81 Hoskins B J. On the existence and strength of the summer subtropical anticyclones. Bull Ame Meteor Soc, 1996 (77): 1287- 1292
- 82 Bjerknes J. A possible response of the atmospheric Hadley circulation to equatorial anomalies of ocean temperature. Tellus, 1966, 18: 824- 829
- 83 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: [学位论文]. 兰州: 兰州大学大气科学系, 1997
- 84 Hoskins B J. Diagnosis of forced and free variability in the atmosphere. In: Atmospheric and oceanic variability. Ed: H Cattle, Bracknell. UK: James Glaisher House, 1987. 57- 73

REVIEWS ON THE STUDY OF THE SUBTROPICAL ANTICYCLONE AND NEW INSIGHTS ON SOME FUNDAMENTAL PROBLEMS

Liu Yimin Wu Guoxiong

(State Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics
(LASG) Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Science, Beijing, 100029)

Abstract

The studies on the subtropical anticyclone are reviewed. It is pointed out that some traditional concepts in this field are inadequate and need to be re-considered. These include the relationships between the eastern Pacific subtropical anticyclone and the western Pacific subtropical anticyclone, the vertically sinking motion and the formation of the subtropical anticyclone, the anomalous heating in the tropical area and the anomalies of the subtropical anticyclone, and the western Pacific subtropical anticyclone and its surrounding systems etc. Some important issues for further studies in understanding and predicting the variations of the subtropical anticyclone are raised. These include the circulation interactions among different latitudes, the roles of the Tibetan Plateau, the relative importance of internal forcing and external forcing in different time scales, the nonlinear processes along the ridges of subtropical anticyclone and the constrain of the conservation of angular momentum.

Key words: Subtropical anticyclone, Vertical sinking motion, External forcing, Time scale, Conservation of angular momentum.