

毕 云. 夏季北极平流层大气基本结构特征. 地球物理学报, 2011, **54**(10): 2468~2476, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.10.004

Bi Y. Basic structure features of the Arctic stratospheric atmosphere in summer. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, **54**(10): 2468~2476, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.10.004

夏季北极平流层大气基本结构特征

毕 云

中国科学技术大学地球与空间科学学院, 合肥 230026

摘 要 北极地区($60^{\circ}\text{N}\sim 90^{\circ}\text{N}$)平流层纬向风和气压场有明显的季节变化,不同高度层季节变化的时间有差异. 北极平流层从冬至夏,季节转换从上向下推进,从夏至冬,季节转换从下向上推进. 以 20 hPa 为例,平均而言,4 月上旬以前,北极被极涡控制;4 月中旬北极地区高压的势力开始超过低压,5 月上旬,北极高压正式建立;7 月份达到最强,8 月份开始减弱,8 月底结束. 北极高压中心位置随时间的变化可分为北美型、欧亚型和过渡型三种. 平流层下层,气压场和风场的结构与平流层中上层有明显不同,而且南亚高压与北极高压连在一起;从垂直结构看,北极高压从上至下与 100 hPa 的南亚高压连在一起,高压中心轴线是倾斜的.

关键词 北极平流层大气, 北极高压, 南亚高压, 极涡

DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.10.004

中图分类号 P421

收稿日期 2010-10-12, 2011-08-30 收修定稿

Basic structure features of the Arctic stratospheric atmosphere in summer

BI Yun

School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

Abstract The influence of stratospheric process on troposphere is one of the hot scientific issues in the present. However, the changes of the summer stratospheric atmospheric circulation in the Arctic and its impact on troposphere have hardly been studied in China. In this paper, NCEP/NCAR reanalysis data are used to analyze the basic structure characteristics of the summer Arctic stratosphere. Results show that there are significant seasonal changes in both stratospheric zonal wind and pressure in the Arctic area ($60^{\circ}\text{N}\sim 90^{\circ}\text{N}$); moreover, seasonal changes in different altitudes begin at different times. Seasonal transition from winter to summer in the Arctic stratosphere is progressed from top to bottom, while that reverses (from bottom to top) from summer to winter. To take 20 hPa for an example, averagely, the Arctic region is controlled by the polar vortex before the beginning of April; in the middle third of April, the power of high begins to exceed that of low; then the Arctic high completely establishes in the beginning of May, and it is the strongest in July, begins to weaken in August, and terminates in the end of August. The variations of center position of the Arctic high can be divided into three types: North American pattern, Eurasian pattern, and transitional pattern. The structures of wind and pressure in the lower stratosphere are different from those in the middle and upper stratosphere, and the South Asia high is integrated with the Arctic high in the lower stratosphere; in vertical direction, the Arctic high joints the South Asia high at 100 hPa from top to bottom, and the

central axis in high is tilted. This study lays a good foundation for the next analyses which include the intraseasonal, interannual and interdecadal variations of the Arctic high strength and summer stratospheric circulation as well as the impact of summer stratospheric anomalies to troposphere.

Keywords Arctic stratospheric atmosphere, The Arctic high, The South Asia high, The polar vortex

1 引 言

大气平流层指的是处于对流层之上的主要中性大气层(就其电离特性而言),其高度大约是 10~50 km,平流层大气质量只占地球大气总质量的 15%。由于平流层大气质量不到对流层大气质量的 1/5,在很长时间内,大气科学界认为平流层仅被动地接受对流层变化的影响,而很难对对流层天气和气候产生重要影响。所以,过去人们在研究天气和气候变化时主要关心的是对流层的变化以及对流层变化对平流层的影响,过去几十年在这方面已有大量的理论研究和实际观测;相比之下,科学界较少关心平流层变化对对流层的影响。可是,这种“平流层仅被动地接受对流层变化的影响”的传统观点,由于近些年的研究进展而发生了改变^[1~6]。尽管具体的物理机制还不完全清楚,但大量的研究表明平流层大气环流重大异常过程(如平流层爆发性增温)对于对流层天气气候过程有着重要影响和对预报有着指示作用^[7,8]。发生在平流层强的环流异常经常会向下传播,和对流层甚至地表的极端天气事件相联系。2008 年 1 月在我国南方出现了历史罕见的低温、雨雪和冰冻灾害,这次灾害性天气不但与对流层大气环流的变化有关,也与平流层极涡的变化有关,而且平流层极涡的变化(异常加深)超前了一个多月^[9~11]。2009 年 12 月份,北欧大陆、东亚和北美等地月气温异常偏低,极端低温日数较常年异常偏多。分析表明,这些地区的气候异常与来自平流层并向下传播的异常(极涡减弱)关系密切;研究还指出,一些相对较弱的平流层异常也可以向下传播并影响对流层^[12]。平流层“天气过程”具有时空尺度大的特征,时间尺度大约 1~2 个月,空间尺度以 1~2 波的行星波为主;而对流层天气系统的时空尺度要小得多,周期 1 周左右,空间尺度一般在几千公里以下。因此,平流层异常过程的信号有可能对预报对流层天气系统的演变有先兆性指示作用^[13]。

平流层大气对对流层的影响已经成为当前的一

个研究热点,然而相关研究多集中于冬季极涡异常对对流层的影响。我们不仅要问,极地平流层大气过程还有其他值得关注的方面吗?平流层大气对对流层的影响仅限于冬季吗?其实,国内学者也曾对平流层中下层环流场的气候特征及其与亚洲夏季风和我国夏季降水关系进行过分析^[14~19]。这些分析认为,在北半球,高、低纬地区是平流层大气环流的启动区,而中纬度则是结束区。北半球平流层中下层从冬至夏,大气环流的季节变化在 3~4 月份就已经开始,东风首先在东半球的极区建立,然后逐渐向南扩展。春季,高层环流早于低层(50 hPa 早于 500 hPa),50 hPa 的环流变化与 100 hPa 基本一致。东亚夏季风具有明显的三度空间斜压结构,尤其是在低空季风“爆发”之前,平流层早已有强的环流突变,季节调整完成,然后突变向下延伸(虽然强度大减),跟着就有当地的低空季风建立。亚洲夏季风强弱与前期冬季平流层环流有密切关系;我国江南和华南夏季降水与春季 50 hPa 平均环流的相关关系较好;中国的梅雨异常可能受到平流层大气环流异常的影响,而这种影响是通过北极涛动来实现的。中高纬平流层环流场和温度场的异常对 El Nino 和 La Nina 事件有一定的前兆性指示作用^[20,21]。这些研究成果说明东亚夏季风及降水的长期预报可从更大的空间和时间尺度上选择预报因子。国外学者也做过类似的研究^[22,23],认为前期冬春季平流层高度场和温度场变化与后期印度夏季风及其降水有明显的相关性,这些先兆信号可用于该地区夏季风降水的长期预报。但同时我们也看到,前人这些研究(包括极涡)没有涉及到夏季平流层大气环流的季节内变化、年际、年代际变化以及夏季平流层大气环流变化对对流层天气气候的影响。

早在 1990 年,瞿章等^[24]就分析认为夏季 50 hPa 平均环流在 30°N 纬圈 90°E~120°E 上存在着可能是青藏高原影响的强高压脊。2008 年,Krishnamurti 等^[25]通过对 1988 年 8 月份资料的分析,提出了一个非常新颖的观点:200 hPa 青藏高原的反气旋流场向上发展与 10 hPa 以极地为中心的北极反气旋

连接在一起,呈一个倾斜的圆锥形状,把亚洲的夏季风与 10 hPa 高压联系起来.由此可以推测,青藏高原的变化势必会影响到北极高压,那么北极高压的变化是否也会影响到青藏高原呢?在平流层与对流层相互作用的研究中,这两个方面显然也是非常值得关注和深入分析的,但目前在国内还未见类似分析.在分析这两个问题之前,有必要先分析夏季北极平流层大气基本结构特征,在此基础上再进一步分析北极高压的变化及其与南亚高压的相互影响.因此,本文利用 NCEP/NCAR 逐日和逐月再分析资料,从风场、气压场以及温度场变化等情况,讨论了北半球特别是夏季北极地区平流层大气基本结构特征.

2 北极平流层大气基本气候特征

在两极地区,由于“极夜”和“极昼”现象的出现,日照时间的变化影响了臭氧对太阳紫外线的吸收,因此平流层冬夏温度分布是截然不同的.在北半球,冬季北极是一个冷中心,夏季是一个暖中心.相应于不同的温度水平分布,北半球平流层环流有明显的季节变化,冬半年为强大的极涡控制,盛行西风;夏半年极区则为绕极反气旋环流,盛行东风.明显的季节转换是平流层大气环流的一个基本特征,不像对流层中高层,南北极冬夏均为气旋式环流.

2.1 风场

为了更细致地了解北极地区风场的季节变化,本文利用逐日 NCEP/NCAR 再分析资料,给出了 30 年(1971~2000 年)平均的纬向风随时间的变化(图 1),北极地区取 $60^{\circ}\text{N}\sim 90^{\circ}\text{N}$.图 1 表明,在 20 hPa,12~2 月份,西风风速呈振荡形势,3 月份开始,西风不断减小,虽然中间也有一些起伏,但都不大.4 月上旬,西风减至零,转为东风,此后东风不断增大,6 月份达到最大,7 月份以后,东风则开始减小,至 8 月下旬东风转为西风,此后西风不断增加.30 hPa 和 10 hPa 的变化与 20 hPa 类似,只是东西风转变的时间稍有几天偏差.具体讲,30 hPa 西风转东风在 4 月 10~12 日,20 hPa 是 4 月 7~8 日,10 hPa 是 4 月 5~6 日.30 hPa 东风转西风在 8 月 21~22 日,20 hPa 是 8 月 25~26 日,10 hPa 是 8 月 27~28 日.20 hPa 基本代表了平流层中层的情况,在平流层中下层,情况并不如此.100 hPa,由于极涡常年存在于极区,所以极区一直是西风,只是西风风速有季节性的改变.100~50 hPa,在冬季 12~2 月

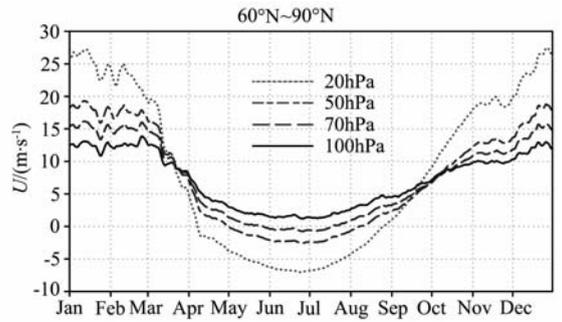


图 1 1971~2000 年平均的北极地区纬向风随时间的变化 (正值代表西风,负值代表东风)

Fig. 1 Time-variation of zonal wind averaged from 1971 to 2000 over the Arctic region

(Positive value; west wind, negative value; east wind)

份,西风都呈振荡形势,3~4 月份西风风速都很快减小,9~10 月份西风风速都很快增加.70~50 hPa,6~7 月份东风达到最大;70 hPa,西风转变为东风的时间是 5 月下旬,东风转西风的时间在 7 月中旬;50 hPa,西风转变为东风的时间是 4 月底 5 月初,东风转西风的时间在 8 月上旬.可见北极平流层从冬至夏,季节转换是从上向下推进的,而且 20 hPa,50 hPa 的季节变化都早于亚洲夏季风的建立(亚洲夏季风建立过程开始于 5 月中旬前后);从夏至冬,季节转换从下向上推进,而且平流层中下层的季节转换早于亚洲夏季风的撤退(亚洲夏季风撤退过程开始于 8 月下旬末).冬半年,西风的起伏振荡说明极涡的强弱变化很大,主要是因为冬季行星波活动强烈,对流层的行星波上传到平流层后直接影响极涡强弱.而当平流层出现东风时,对流层的行星波就不能上传,也不会对北极气压场造成影响.

2.2 气压场

在北极地区,伴随着东风的建立和增强,北极高压开始建立和发展.由于夏季北极是一个暖中心,因此在垂直方向上,越到平流层高层北极高压越强.30~10 hPa,北极高压随时间的变化基本一致,这里我们以 20 hPa 为代表,看一看北极高压的建立、发展和结束.从 1971~2000 年平均看,4 月 7 日,北极地区($60^{\circ}\text{N}\sim 90^{\circ}\text{N}$)西风减至 0,4 月 8 日出现东风,此时北半球气压场分布如图 2a.从图 2a 可以看出,此时极涡中心已经偏离极地,在北美大陆 $60^{\circ}\text{N}\sim 70^{\circ}\text{N}$ 附近出现闭合反气旋,此后这个反气旋范围不断扩大,强度逐渐增强,中心逐渐向极区靠近.4 月 15 日前后,北极地区高压的势力开始超过低压,5 月上旬,高压已经控制整个北极地区,此时北极高压正式建立(图 2b).此后北极高压的中心基本在极区,

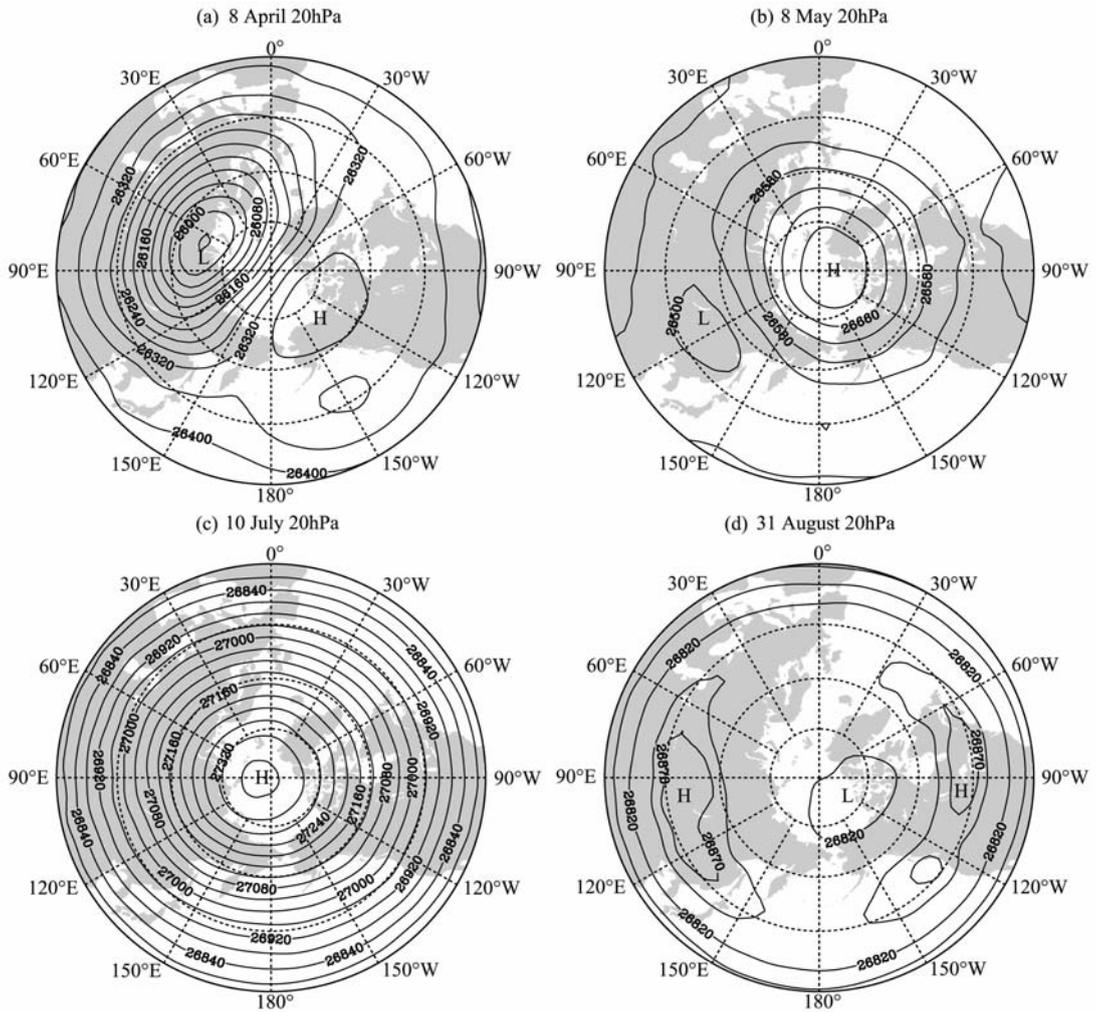


图 2 1971~2000 年平均的平流层 20 hPa 位势高度场随时间的变化
(等值线间隔 40 gpm, 纬度范围: 30°N ~ 90°N, H: 高压, L: 低压)

Fig. 2 Time-variation of geopotential height averaged from 1971 to 2000 at 20 hPa in the stratosphere
(The interval of isolines is 40 gpm, latitude range: 30°N~90°N, H: high, L: low)

范围则向中纬度延伸,5月下旬至8月中旬,整个北半球都被以极地为中心的高压控制.5月上旬北极高压正式建立时,北极平流层大气环流形势完全从冬季型转为夏季型,此时北极地区平均东风风速可达 5 m/s.6月份北极地区东风达到最大(图 1),高压中心强度在7月份达到最强(图 2c).8月26日,极区转为西风,27日,高压中心明显偏离极地,29~30日极地出现低压,北极高压结束(图 2d).此时低压范围不大,但此后低压强度逐渐加强,范围不断加大.5~8月份(平流层夏季),北极高压中心位置随时间有明显变化,大体可分为三种.第一种是高压脊明显向北美大陆伸展,可以称之为北美型;第二种是高压脊明显向欧亚大陆北部伸展,称之为欧亚型;第三种是介于前两者之间,称之为过渡型.欧亚型和北美型出现时,60°N以北表现为1波活动,过渡型出

现时,流场有时表现为明显的2波,有时波动不明显,环流基本沿纬圈分布.北极高压的年际变化非常明显(将在另文详细讨论),有些年份北极高压建立的早,有些年份则偏晚;不同年份北极高压强弱有明显差异;不同年份北极地区波动有明显差异.

3 北极平流层气压场三维空间结构

从多年平均情况看,平流层 30 hPa 以上,1月份极涡最强,2、3月份极涡有所减弱,4月份极涡明显减弱并偏离极地位于亚欧大陆,5月份北极高压建立,6月份北极高压进一步加强,7月份达到最强,8月份开始减弱,9月份极区出现低压,此后低压进一步加深.但 50 hPa 和 70 hPa 的情况与 30 hPa 以上有明显差异.

50 hPa 气层, 1~4 月份极涡的变化与 30 hPa 基本一致. 5 月份, 北极虽有反气旋环流出现, 但范围不大, 低压涡旋移到亚洲东北部, 势力依然较强; 中低纬度地区, 高压中心位于南亚地区, 且与极区高压连接, 此时南亚高压比北极高压强大(图 3a). 6 月份, 北极地区完全被北极高压所占据, 北极高压有高压脊分别伸向亚洲、欧洲和北美(图 3b). 7 月份北极高压达到最强(图 3c), 8 月份开始减弱, 高压中心转移至亚欧大陆, 极涡势力开始增强(图 3d), 9 月份极涡控制整个极区, 此后进一步增强. 同时也表明, 4~5 月份南亚高压在垂直方向上可以伸展到 50 hPa, 6 月份以后北极高压增强, 南亚高压并入北极高压. 中心位于极地.

70 hPa 气层, 1~4 月份位势高度场的变化与 50 hPa 类似. 5 月份, 极涡中心离开极地偏向欧亚大

陆, 南亚高压明显, 东半球表现为一低一高形势(图 4a); 6 月份, 南亚高压明显北移, 其西北方有高压脊伸向极地(图 4b), 极涡分裂为两个低压中心, 分别位于太平洋和北美上空; 7 月份南亚高压继续北移, 其伸向极区的高压脊变得宽广, 此时极区会有反气旋环流出现, 南亚高压与北极高压连接在一起, 但南亚高压强于北极高压(图 4c). 8 月份, 南亚高压减弱, 极涡卷土重来控制极区(图 4d), 9 月份南亚高压继续减弱南移, 极涡不断增强. 10 月份南亚高压已经退到太平洋上空. 从 70~50 hPa 位势高度场变动情况可以看出, 在平流层下层, 南亚高压与北极高压是连在一起的, 从垂直结构看, 北极高压从上至下与 100 hPa 的南亚高压连在一起, 高压中心轴线是倾斜的.

南亚高压中心从南向北移动以及和北极高压

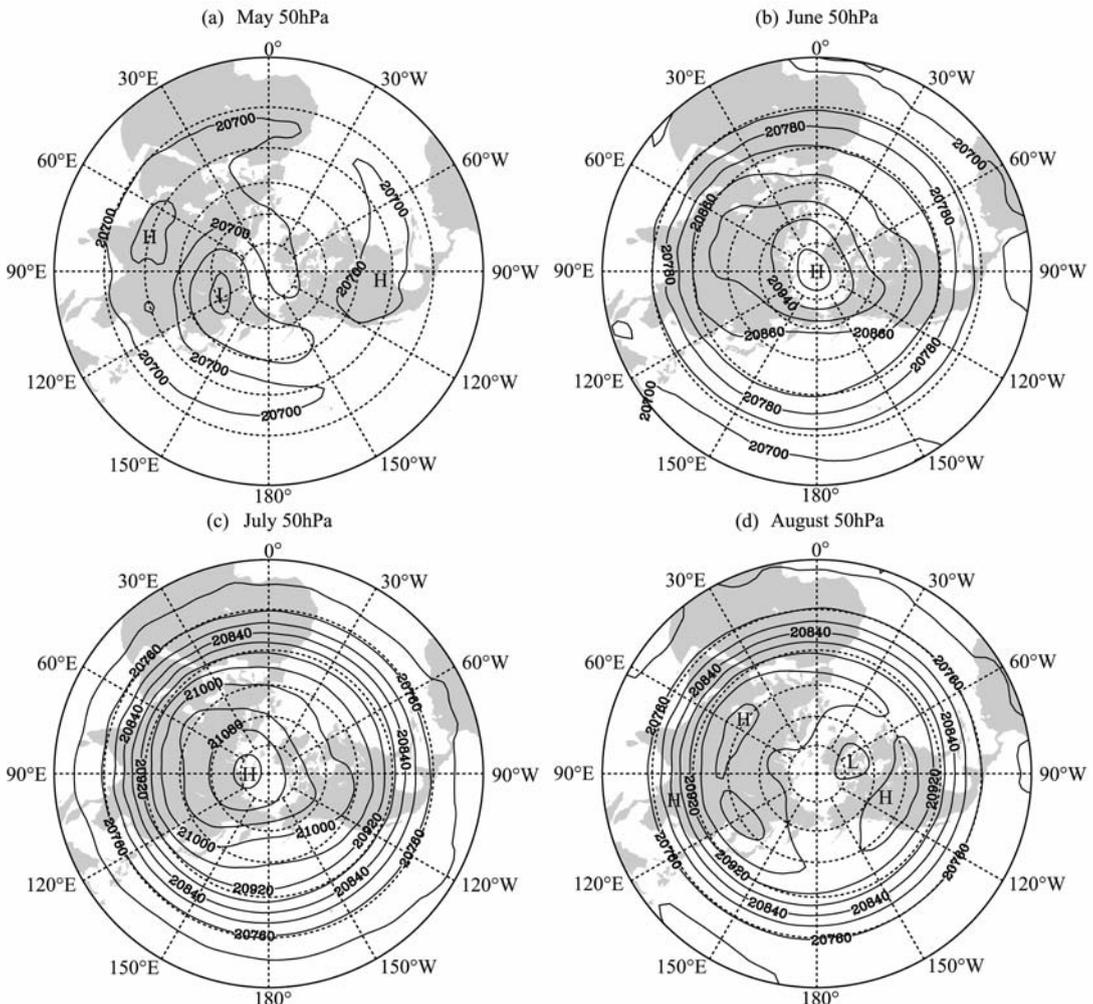


图 3 1971~2000 年平均的平流层 50 hPa 位势高度场
(等值线间隔 40 gpm, 纬度范围: 0°~90°N, H: 高压, L: 低压)

Fig. 3 Geopotential height at 50 hPa averaged from 1971 to 2000 in North Hemispheric stratosphere
(The interval of isolines is 40 gpm, latitude range: 0°~90°N, H: high, L: low)

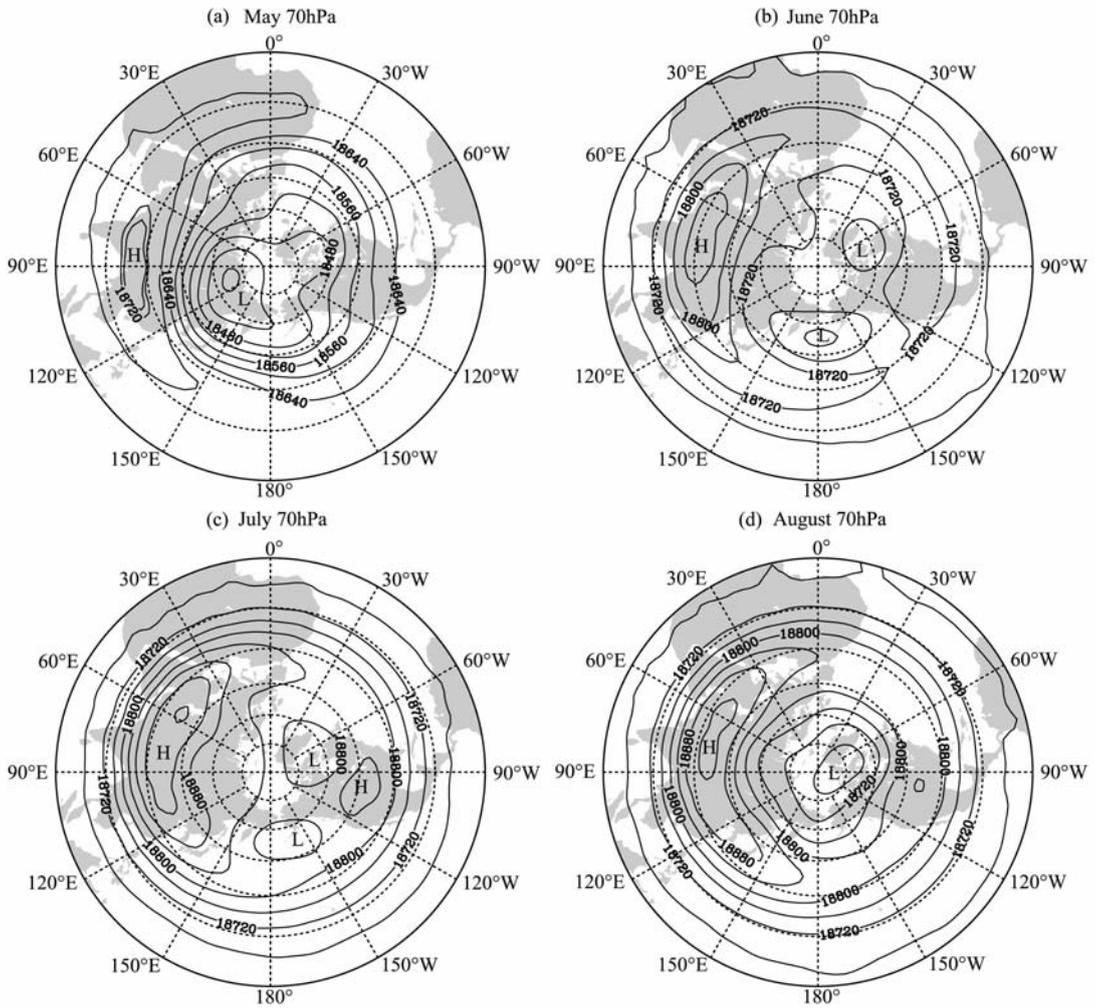


图 4 1971~2000 年平均的平流层 70 hPa 位势高度场

(等值线间隔 40 gpm, 纬度范围: $0^{\circ}\sim 90^{\circ}\text{N}$, H: 高压, L: 低压)

Fig. 4 Geopotential height at 70 hPa averaged from 1971 to 2000 in North Hemispheric stratosphere

(The interval of isolines is 40 gpm, latitude range: $0^{\circ}\sim 90^{\circ}\text{N}$, H: high, L: low)

的连接,与北半球温度垂直分布和水平温度场随时间的变化有关,本文仅以 7 月份为例阐述其原因.在 300 hPa,北半球有一个冷中心和一个暖中心,分别位于北极和青藏、伊朗高原地区(图 5a),根据热成风原理和准地转理论,这样的温度分布使得南亚高压和极涡从 300 hPa 向上还会继续加强.到 200 hPa,北半球的温度分布有了明显变化(图 5b),出现了两个暖中心,最强的暖中心位于北极,原来位于青藏和伊朗高原的暖中心相对偏弱,且较 300 hPa 有所北移.冷中心位于中纬度大洋上空.同理,北极地区较强暖中心的出现不利于极涡向上发展,但有利于反气旋的生成.青藏、伊朗高原的暖中心北移有利于南亚高压中心北移.到 100 hPa(图 5c),北半球只有一个暖中心位于极地,原来位于青藏和伊朗高原的暖中心已经不存在,因此从 100 hPa 向上,东半球广大中高

纬度地区的西风随高度升高将逐渐减弱,南亚高压也逐渐减弱北移,正如图 4c 中所示,70 hPa 南亚高压北部的高压脊已经位于极地.到 70 hPa 气层(图 5d),暖中心在极地,青藏、伊朗高原地区是冷中心.同理,这样的温度分布使得 50 hPa 南亚高压已经完全并入北极高压.前面的分析表明,5 月份南亚高压在 50 hPa 依然非常明显,而 6~7 月,南亚高压向上只到 70 hPa,这种情况也是与温度场变化有关.因为在 5 月份,70 hPa 气层冷中心范围很小,主要位于 20°N 以南的 $90^{\circ}\text{E}\sim 120^{\circ}\text{E}$ 地区(图略),到 6~7 月份冷中心大范围地向西向北扩展,7 月份时冷中心位于青藏和伊朗高原地区,温度场的变化削弱了南亚高压同时促使南亚高压并入北极高压.以上分析同时可以看出,南亚高压与极涡的相互影响明显,二者的关系值得进一步分析.

大气环流的季节内、年际和年代际变化做了铺垫,也为下一步分析夏季平流层异常对对流层的影响奠定了基础。主要结论如下:

(1) 北极平流层风场有明显的季节变化。70 hPa 以上, 12~2 月份, 西风风速在全年最大; 3~4 月份, 西风很快减小, 然后转变为东风, 维持一段时间后, 东风再次转变为西风; 9~10 月份, 西风很快增加。但不同高度, 风场的变化时间有明显不同。平流层中层 30~10 hPa 的变化基本一致, 西风转东风在 4 月上旬, 东风转西风在 8 月下旬。但在 50 hPa, 西风转东风在 4 月底 5 月初, 东风转西风的时间在 8 月上旬; 70 hPa, 西风转东风是 5 月下旬, 东风转西风在 7 月中旬; 100 hPa, 极区一直是西风, 只是风速有季节性的改变。北极平流层从冬至夏, 季节转换从上向下推进, 从夏至冬, 季节转换从下向上推进。

(2) 北极平流层气压场有明显的季节变化。以 20 hPa 为例, 4 月上旬以前, 北极被极涡控制, 4 月中旬北极地区高压的势力开始超过低压, 5 月上旬, 北极高压建立。此后高压不断增强, 7 月份达到最强, 8 月份开始减弱, 8 月底北极高压结束。北极高压中心位置随时间的变化通常可分为北美型、欧亚型和过渡型。

(3) 平流层下层, 气压场和风场的结构与平流层中上层有明显不同。从 70~50 hPa 气压场变动情况可以看出, 在平流层下层, 南亚高压与北极高压连在一起。从垂直结构看, 北极高压从上至下与 100 hPa 的南亚高压连在一起, 高压中心轴线倾斜。北极高压随高度升高而增强, 6~7 月份, 其底端在 70~50 hPa 之间。

南亚高压、南亚高压北侧和南侧的西风 and 东风急流、副高以及季风槽构成了亚洲夏季环流系统。南亚高压跃上青藏高原标志着东亚夏季环流形势的完全建立。可见南亚高压在亚洲夏季天气系统中是一个非常重要的角色。南亚高压的中期变化即东西振荡影响着对流层中高层西风带大槽的位置和强度, 对东亚天气的影响非常重要。南亚高压有明显的年际和年代际变化, 我国异常旱涝事件的发生与南亚高压关系密切^[26]。对流层里, 高压(低压)在垂直方向上都有一定的伸展高度, 而且上下层流场会相互作用。例如, 中高纬度温带锋面气旋的生成和发展, 往往是对流层中上层波动与地面低压扰动相互作用的结果^[27]。北极高压与南亚高压有密切的联系, 二者也可能会相互影响, 具体情况如何, 北极高压还有哪些变化特征都值得深入研究。2010 年夏

季, 我国乃至世界许多国家和地区都经历了历史罕见的高温干旱或洪涝灾害, 这些异常在平流层有无反应或先兆, 北极高压的变化是否会通过南亚高压对亚洲地区天气气候有影响呢? 北极高压的变化是否会通过极涡影响对流层的天气气候呢? 这些问题我们将在另文中继续深入分析。

致 谢 感谢美国国家环境预测中心提供的 NCEP/NCAR 数据资料, 感谢审稿专家对本文的评审, 同时也感谢郭静超同学在图形绘制上的帮助。

参考文献(References)

- [1] Holton J R. An Introduction to Dynamic Meteorology. 4th Edition. International Geophysical Series, 48. San Diego: Elsevier Academic Press, 2004. 535
- [2] Charlton A J, O'Neill A, Lahoz W A, et al. Sensitivity of tropospheric forecasts to stratospheric initial conditions. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 2004, **130**(600): 1771~1792
- [3] Baldwin M P, Thompson D W J, Shuckburgh E F, et al. Weather from the stratosphere? *Science*, 2003, **301**(5631): 317~319
- [4] Christiansen B. Downward propagation of zonal mean zonal wind anomalies from the stratosphere to the troposphere: Model and reanalysis. *J. Geophys. Res.*, 2001, **106**(D21): 27307~27322
- [5] Kodera K. On the origin and nature of the interannual variability of the winter stratospheric circulation in the northern hemisphere. *J. Geophys. Res.*, 1995, **100**(D7): 14077~14088
- [6] Kodera K, Yamazaki K, Chiba M, et al. Downward propagation of upper stratospheric mean zonal wind perturbation to the troposphere. *Geophys. Res. Lett.*, 1990, **17**(9): 1263~1266
- [7] Deng S M, Chen Y J, Luo T, et al. The possible influence of stratospheric sudden warming on East Asian weather. *Adv. Atmos. Sci.*, 2008, **25**(5): 841~846
- [8] 李 琳, 李崇银, 谭言科等. 平流层爆发性增温对中国天气气候的影响及其在 ENSO 影响中的作用. *地球物理学报*, 2010, **53**(7): 1529~1542
Li L, Li C Y, Tan Y K, et al. Stratospheric sudden warming impacts on the weather/climate in China and its role in the influences of ENSO. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2010, **53**(7): 1529~1542
- [9] 陈月娟, 周任君, 邓淑梅等. 2008 年雪灾同平流层环流异常的关系. *中国科学技术大学学报*, 2009, **39**(1): 15~22
Chen Y J, Zhou R J, Deng S M, et al. Relationship between stratospheric circulation anomalies and extended snow storm. *Journal of University of Science and Technology of China* (in Chinese), 2009, **39**(1): 15~22
- [10] 刘 毅, 赵燕华, 管兆勇. 平流层环流异常对 2008 年 1 月雪

- 灾过程的影响. 气候与环境研究, 2008, **13**(4): 548~555
- Liu Y, Zhao Y H, Guan Z Y. Influences of stratospheric circulation anomalies on tropospheric weather of the heavy snowfall in January 2008. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2008, **13**(4): 548~555
- [11] 易明建, 陈月娟, 周任君等. 2008 年中国南方雪灾与平流层极涡异常的等熵位涡分析. 高原气象, 2009, **28**(4): 880~888
- Yi M J, Chen Y J, Zhou R J, et al. Analysis on isentropic potential vorticity for the snow calamity in South China and the stratospheric polar vortex in 2008. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2009, **28**(4): 880~888
- [12] Wang L, Chen W. Downward Arctic Oscillation signal associated with moderate weak stratospheric polar vortex and the cold December 2009. *Geophys. Res. Lett.*, 2010, **37**: L09707, doi: 10. 1029/2010GL042659
- [13] 胡永云. 关于平流层异常影响对流层天气系统的研究进展. 地球科学进展, 2006, **21**(7): 713~720
- Hu Y Y. On the influence of stratospheric anomalies on tropospheric weather systems. *Advances in Earth Science* (in Chinese), 2006, **21**(7): 713~720
- [14] 陶诗言. 北半球平流层中下部大气环流的季节变化. 见: 平流层大气环流及太阳活动对大气环流影响的研究. 北京: 科学出版社, 1964. 27~45
- Tao S Y. Seasonal variation of atmospheric circulation in the middle-lower stratosphere in NH. In: *The Influence of stratospheric atmospheric circulation and solar activity on atmospheric circulation* (in Chinese). Beijing: Science Press, 1964. 27~45
- [15] 刘晓东, 瞿章. 北半球平流层环流与亚洲夏季风关系的初步分析. 气象学报, 1991, **49**(2): 244~248
- Liu X D, Qu Z. An analysis for the relationship between stratospheric circulation over northern hemisphere and Asia summer monsoon. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1991, **49**(2): 244~248
- [16] 田荣湘, 高由禧, 瞿章. 1979 年平流层大气环流季节变化的研究. 高原气象, 1992, **11**(2): 170~177
- Tian R X, Gao Y X, Qu Z. Seasonal variation of global atmospheric circulation during January to July in stratosphere in 1979. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 1992, **11**(2): 170~177
- [17] 艾悦秀, 陈兴芳. 北半球 50 hPa 平均环流场的气候特征及其与我国夏季降水关系的初步分析. 高原气象, 2000, **19**(1): 66~74
- Ai Y X, Chen X F. The primary analysis of climatic feature of 50 hPa mean circulation in NH and its relationship with summer rainfall in China. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2000, **19**(1): 66~74
- [18] 曾庆存, 张东凌, 张铭等. 大气环流的季节突变与季风的建立 I 基本理论方法和气候场分析. 气候与环境研究, 2005, **10**(3): 285~302
- Zeng Q C, Zhang D L, Zhang M, et al. The abrupt seasonal transitions in the atmospheric general circulation and the onset of monsoons part I: Basic theoretical method and its application to the analysis of climatological mean observations. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2005, **10**(3): 285~302
- [19] 李崇银, 顾薇, 潘静. 梅雨与北极涛动及平流层环流异常的关联. 地球物理学报, 2008, **51**(6): 1632~1641
- Li C Y, Gu W, Pan J. Mei-yu, Arctic Oscillation and stratospheric circulation anomalies. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, **51**(6): 1632~1641
- [20] 顾润源, 顾伟宗, 李志军. El Nino/La Nina 与平流层温度场变化关系分析. 青岛海洋大学学报, 2008, **38**(2): 178~182
- Gu R Y, Gu W Z, Li Z J. Analysis of relationship between El Nino/La Nina events and characteristics of the stratosphere temperature. *Periodical of Ocean University of China* (in Chinese), 2008, **38**(2): 178~182
- [21] 葛玲, 章基嘉, 李川. 北半球平流层环流在厄尔尼诺年和反厄尔尼诺年的异常. 南京气象学院学报, 1991, **14**(S1): 449~454
- Ge L, Zhang J J, Li C. Northern stratospheric circulation anomalies during El Nino and anti-El Nino years. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 1991, **14**(S1): 449~454
- [22] 瞿章, 张海俊, 贺慧霞. 北半球 50 hPa 平均环流的若干特征及其与 500 hPa 的某些关联. 高原气象, 1990, **9**(4): 425~431
- Qu Z, Zhang H J, He H X. Some features of 50 hPa mean circulation and their some correlativity with 500 hPa circulation. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 1990, **9**(4): 425~431
- [23] Rohilla A K, Pai D S, Rajeevan M. Relationship between lower stratospheric circulation and Indian summer monsoon rainfall: Implication for long range forecasts. *Mausam*, 2008, **59**(2): 173~184
- [24] Bansod S D, Prasad K D, Singh S V. Stratospheric zonal wind and temperature in relation to summer monsoon rainfall over India. *Theoretical and Applied Climatology*, 2000, **67**(3-4): 115~121
- [25] Krishnamurti T N, Biswas M K, Rao D V B. Vertical extension of the Tibetan high of the Asian summer monsoon. *Tellus Series A-Dynamic Meteorology and Oceanography*, 2008, **60**(5): 1038~1052
- [26] 张琼. 南亚高压的演变规律、机制及其对区域气候的影响 [博士论文]. 南京: 南京大学大气物理系, 1999. 90~127
- Zhang Q. Development regularity and mechanism of the South Asia High and its influence on regional climate [Ph. D. thesis] (in Chinese). Nanjing: Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University, 1999. 90~127
- [27] 伍荣生. 现代天气学原理. 北京: 高等教育出版社, 1999. 107~168
- Wu R S. Principles of Modern Synoptic Meteorology (in Chinese). Beijing: Higher Education Press, 1999. 107~168