0577-6619/2011/69(6)-1046-61 *Acta Meteorologica Sinica* 气象学报

月内尺度北半球环状模水平和垂直活动特征分析*

李晓峰[1,2] 李建平[1]
LI Xiaofeng[1,2] LI Jianping[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，北京，100049
1. *LASG, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Science, Beijing* 100029, *China*
2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*

2009-03-06 收稿，2009-05-30 改回.

Li Xiaofeng, Li Jianping. 2011. Meridional and vertical propagation characteristics of the submonthly Northern Hemisphere Annular Mode. *Acta Meteorologica Sinica*, 69(6): 1046-1061

Abstract From a "troposphere view", the related horizontal and vertical circulation anomalies propagation characteristics of the Northern Hemisphere Annular Mode (NAM) in submonthly timescales (5－30 d) are studied by using the NCEP/NCAR reanalysis daily data and Li and Wang's new NAM index, which can express better variation structure of the NAM. The results show that in the horizontal direction, the temperature anomaly shows intense southward propagation in the troposphere from the polar region and high latitudes to the equator, especially in the surface layer, while it shows weak northward propagation in the stratosphere from the mid-low latitudes to the high latitudes. And the zonal wind anomaly exhibits obviously southward propagation characteristics from the high latitudes to the equator nearly in all levels. In the vertical direction, the temperature anomaly shows upward propagation from the troposphere to the stratosphere in the middle latitudes and downward propagation from the stratosphere to the troposphere in the high and low latitudes. And the zonal wind anomaly propagates upward nearly in all the latitudes in the Northern Hemisphere. The horizontal propagation characteristics are similar on the main submonthly character time scales (quasi-week, quasi-two-week and quasi-three-week), but the vertical propagation characteristics are similar on quasi-week and quasi-two-week, but the vertical circulation anomalies propagation on quasi-three-week is different from the other two submonthly character time scales.

The atmosphere general circulation anomalies related to the NAM propagate strongly from the polar region to the equator in the troposphere of the Northern Hemisphere on submonthly timescales, which implies that the atmosphere anomalies in the mid-high latitudes may have predictive skills to atmospheric anomalies in the mid-low latitudes on the relative short timescales; and the characteristics of upward propagation of the temperature and zonal wind anomalies on submonthly timescales implies that the circulation signals related to the NAM are not absolutely originated in the upper stratosphere, while the signals in the troposphere can propagate upward into the stratosphere on relative short timescales.

Key words Northern Hemisphere Annular Mode, Submonthly timescales, Meridional propagation, Vertical propagation

摘 要 采用李建平等定义的更好表征北半球环状模变化的指数，利用 NCEP/NCAR 逐日再分析资料，从对流层的角度分析了北半球环状模在月内时间尺度上的相关环流的垂直和水平传播特征。结果表明，在水平方向上，温度异常在对流层，尤其是近地层，表现为由极区和高纬度地区向中低纬度地区强的南传特征，而在平流层则为由中低纬度地区向高纬度地区弱的北

* 资助课题：中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-Q11-01)、国家重点基础研究发展规划项目(2010CB950400)、国家自然科学基金资助项目(40905040)、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自由探索项目。

作者简介：李晓峰，主要从事环状模的研究。E-mail: lixiaofeng@mail.iap.ac.cn
通讯作者：李建平，E-mail: ljp@lasg.iap.ac.cn

传特征;纬向风场异常则表现为整层由高纬度地区向中低纬度地区的南传特征。垂直方向上,温度异常在中纬度地区具有较强的自下对流层向平流层上传现象,在高纬度和热带地区则为下传特征;纬向风异常在北半球大部分地区都表现为明显的上传特征。在水平方向上,与北半球环状模月内主要特征尺度(即准1周、准2周和准3周)上相关的环流传播特征比较相似;在垂直方向上,北半球环状模准1周和准2周时间尺度上的环流传播特征较为相似,而准3周尺度上的环流传播特征与它们差异稍大。在对流层中低层,上述环流异常较强的南传特征表明,在月内时间尺度上中高纬度环流异常对中低纬度环流异常可能具有重要的预测意义;而在北半球中纬度地区月内北半球环状模对应温度异常和纬向风场异常信号存在明显的上传特征表明,与北半球环状模异常活动相关的天气变化并非完全源于平流层,在较短时间尺度上,对流层的信号可以突破对流层顶,上传达到平流层。

关键词 北半球环状模,月内时间尺度,水平传播,垂直传播

中图法分类号 P434

1 引 言

北极涛动(Arctic Oscillation,简称AO)概念由Thompson等(1998, 2000a)通过经验正交函数分析引入,是用来描述北半球热带外气候变率最主要的模态,也被称为北半球环状模(Northern Hemisphere Annular Mode, 简称NAM)(Limpasuvan, et al, 1999; Thompson, et al, 2000a, 2000b, 2002; Baldwin, 2001)。其实,这一现象最先是由Lorenz(1951)注意到的,但他没有给出命名。Gong等(1999)则提出在南半球也有类似的模态,称为南极涛动(Antarctic Oscillation,简称AAO)或南半球环状模(Southern Hemisphere Annular Mode, 简称SAM)(Nan, et al, 2003)。"大气环状活动带"(Annular Belts of Action,简称ABAs)的概念则由Li等(2003)首次提出,用于描述中高纬度大气环流中具有相似变动性的状态在空间上呈现出沿纬圈带状分布(大气活动具有纬向带状分布)的特点(范丽军等, 2003)。Li等(2003)和李建平(2005)还明确指出中纬度和高纬度大气环状活动带存在的"跷跷板"现象实际上就是北极涛动或北半球环状模,月际、季节、年际和年代际等较长时间尺度的北半球环状模活动在垂直环流场中实质上对应着费雷尔环流异常,并给出了清晰的物理图像。

目前,关于北半球环状模信号垂直传播特征的研究主要认为环状模异常信号首先出现在平流层,然后突破对流层顶向下传播到对流层甚至地面,即所谓的北半球环状模信号"下传"现象(Baldwin, et al, 1999, 2001, 2003b; Cai, et al, 2006; 胡永云, 2006)。然而,也并非所有人都支持这一观点,Polvani等(2004)认为,Baldwin等(1999, 2001, 2003b)关于对流层北极涛动异常或天气变化源于平流层高层的观点存在误导(胡永云, 2006)。在北半球环状模水平传播特征方面,有研究认为,在逐日活动上呈现为罗斯贝波破碎特征(Benedict, et al, 2004; Woollings, et al, 2008)。最近,Cai等(2006)采用平流层位涡指数,从平流层的角度描述了环状模的活动,并认为在116 d左右的较长时间尺度上北半球环状模对应的温度、风场异常在平流层具有很强的下传和向极地传播特征,而在对流层热带外地区则有弱南传特征。

然而,上述关于环状模的水平和垂直传播特征却多从平流层角度来研究,即采用表征环状模平流层信号较好的环状模指数来研究其水平和垂直活动特征(Baldwin, et al, 1999, 2001, 2003b; Cai, et al, 2006),并得到了许多有意义的结果。众所周知,环状模现象首先是从对流层资料中被发现和命名的(Thompson, et al, 1998, 2000a; Gong, et al, 1999),本质上代表了中高纬度大气质量间的相互转换(Gong, et al, 1999; Li, et al, 2003)。那么,如果从对流层角度来研究,其水平传播特征是否与以往结果完全相同呢?在垂直方向上,环状模信号究竟是不是起源于平流层呢?基于上述问题,本文采用描述对流层信号较好的新的环状模指数(Li, et al, 2003; 李晓峰等, 2009),从对流层的角度对月内尺度(5—30 d)北半球环状模活动的水平和垂直传播特征进行对比研究。

基于李晓峰等(2009)的研究,新的北半球环状模指数所描述的环状模信号在月内尺度(5—30 d)上具有明显的准周期性,且其月内特征时间周期以准2周(10—20 d)和准1周(5—10 d)为主,准3周相对次要。因此,本文首先描述了月内时间尺度北半球环状模正、负位相气候平均特征,然后挑选北半球环状模正、负位相事件进行等位相合成,分析北半

球环状模月内活动的水平和垂直方向上纬向平均风场异常及温度场异常的传播过程及传播特征。

2 资料和方法

本文所使用的资料主要为美国国家环境预测中心/国家大气研究中心日平均再分析资料(Kalnay et al, 1996),分辨率为 2.5°×2.5°,资料时段从1948年1月1日至2005年12月31日。为方便处理,闰年2月29日均已略去。北半球环状模指数(NAMI)采用 Li 等(2003)的定义,即采用北半球中纬度和高纬度的两个大气环状活动带的中心纬度35°和65°N上的标准化纬向平均海平面气压差,正如 Angell(2006)所指出,这个指数在表征北半球环状模的空间特征方面明显优于 Thompson 等(1998)的经验正交函数指数,且物理意义清晰。在分尺度研究北半球环状模的活动特征之前,本文对逐日北半球环状模指数及逐日资料场进行401点 Lanczos 带通滤波(Duchon, 1979)。其中,逐日资料场均已扣除年循环,计算基准时段取为1958—2000年。

在分尺度挑选北/南半球环状模的正负位相事件时,文中定义月内某一特征时间尺度环状模指数不小于2倍全年方差(不大于-2倍方差)的连续天数超过其1/4倍最小周期为发生一次该尺度环状模正位相(负位相)事件;事件选取时段为北半球冬季11—3月,对于伸展到该时段以外的事件未做统计。为了考察环状模的垂直和水平传播特征,本文采用类似 Maloney 等(1998)的方法进行分位相合成,其中,一个完整的生命循环过程被分为17个位相,4(12)位相对应正(负)位相最强,而0、8、16位相为转换位相,强度最弱。

3 冬季月内北半球环状模正、负位相气候平均态

北半球环状模在月内及月内各主要特征尺度上正、负位相的气候平均特征,就是北半球环状模正、负位相气候平均态,简称为气候态。如李晓峰等(2009)所述,北半球环状模活动在冬季11—3月最为活跃。分别挑选1948—2005年历年冬季(11—3月)月内(5—30 d)及其主要特征时间尺度(包括准1周、准2周、准3周)上环状模指数大于2.0倍全年方差(小于-2.0倍方差)的所有公历日计算温度、位势高度和水平及垂直风场平均,得到该特征尺度环状模正、负位相的气候平均。月内及其各特征尺度上挑选的环状模事件数量(样本量)如表1所示。其中,5—30 d尺度的情况可以代表月内环状模的总体或者平均的活动特征,而对准1周、准2周和准3周尺度上的特征分析则有利于更加细致地了解月内主要特征时间尺度上的活动特征。下面首先分析月内尺度(5—30 d)北半球环状模平均气候态特征,包括位势高度场、纬向风、气温和垂直环流异常的气候平均,然后分尺度(准1、2、3周)讨论各自异同特点。

表1 月内尺度北半球环状模及月内各特征尺度正负位相气候平均的样本量

Table 1 The climatological mean sample size of the NAM in positive and negative phase on submonthly and its main characteristic time scales

	正位相	负位相
月内(5—30 d)	453	384
准1周(5—10 d)	367	383
准2周(10—20 d)	422	414
准3周(20—30 d)	348	370

3.1 月内尺度北半球环状模气候平均特征

首先分析月内尺度上北半球环状模正、负位相对应高度场异常气候态特征(图1a、b),位势高度场异常呈现为明显的准正压性质,自对流层到平流层中下层为性质相同的高度异常变化,并约以50°N为界在北半球呈现为南北异常相反分布特征。当北半球环状模处于正(负)位相时,50°N以南的中低纬度位势高度场异常偏高(低),而50°N以北的高纬度地区位势高度场异常偏低(高)。在高纬度地区存在明显高度异常中心,并且以高纬度对流层和极区下平流层最强,极区对流层也有弱中心存在。

其次,月内北半球环状模正、负位相纬向风异常呈现为完全相反特征,且以中纬度变化最为强烈(图2a、b)。北半球环状模正(负)位相时,在中纬度地区(40°—70°N)对流层有强的西风(东风)异常存在,并且该西风(东风)异常自对流层向上扩展到40°N以北平流层中低层,这对应着一个加强(减弱)的中纬度西风急流和增强(减弱)的极涡,与前面的位势高度场异常分布(图1a、b)一致;而低纬度(10°—40°N)地区对流层及平流层低层主要为东风(西风)异常,对应着一个减弱(加强)的副热带高空急流;高纬度(70°N以北)的情况和低纬度类似,只是东风

(西风)异常向上伸展高度不及低纬度。另外,就月内平均状况来讲,纬向风异常中心均出现在对流层顶附近,这表明对流层顶可能是月内北半球环状模纬向风异常变化最为敏感的层次。

另外,月内北半球环状模对应的费雷尔环流异常是其最显著的垂直环流特征(图 2a、b 和图 3a、b),这与月际等较长时间尺度北半球环状模对应异常费雷尔环流的情况相似。当北半球环状模处于正(负)位相时,中纬度(30°—50°N)垂直气流异常下沉(上升),中纬度对流层低层经向环流异常向北(南),高纬度地区(60°—70°N)附近垂直气流异常上升(下沉),而在对流层上层及对流层顶经向环流异常向南

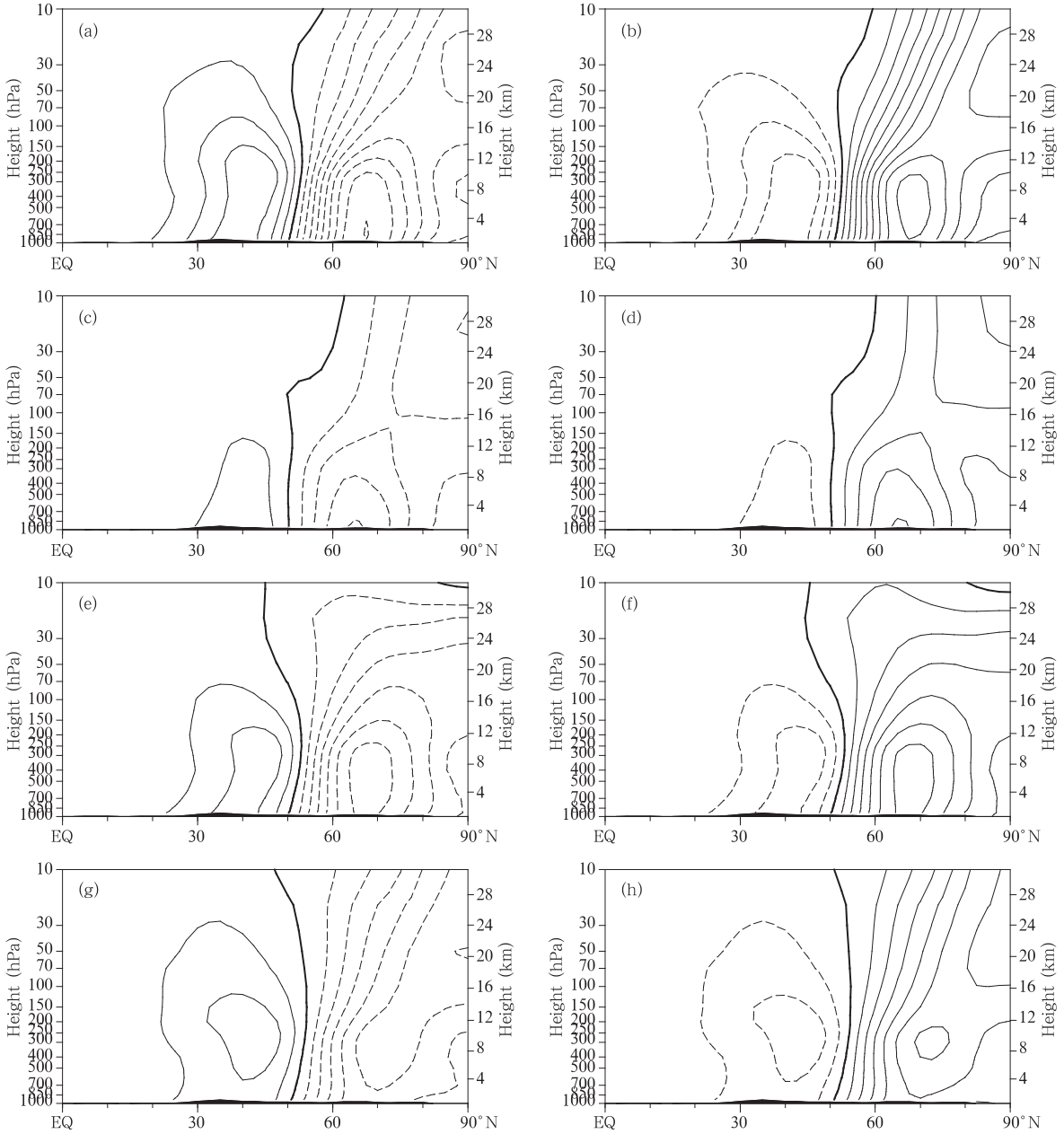


图 1 月内尺度(a、b)及准 1 周(c、d),准 2 周(e、f),准 3 周(g、h)上纬向平均的北半球环状模正负位相位势高度异常气候平均(a、c、e、g 为正位相情况,其余为负位相;等值线间隔为 5 gpm)

Fig. 1 Climatological zonal mean geopotential height anomalies of the NAM on submonthly (a) – (b), quasi-one-week (c) – (d), quasi-two-week (e) – (f) and quasi-three-week (g) – (h) time scales Left panels are in positive phase and right panels are in negative phase. The contour interval is 5 gpm

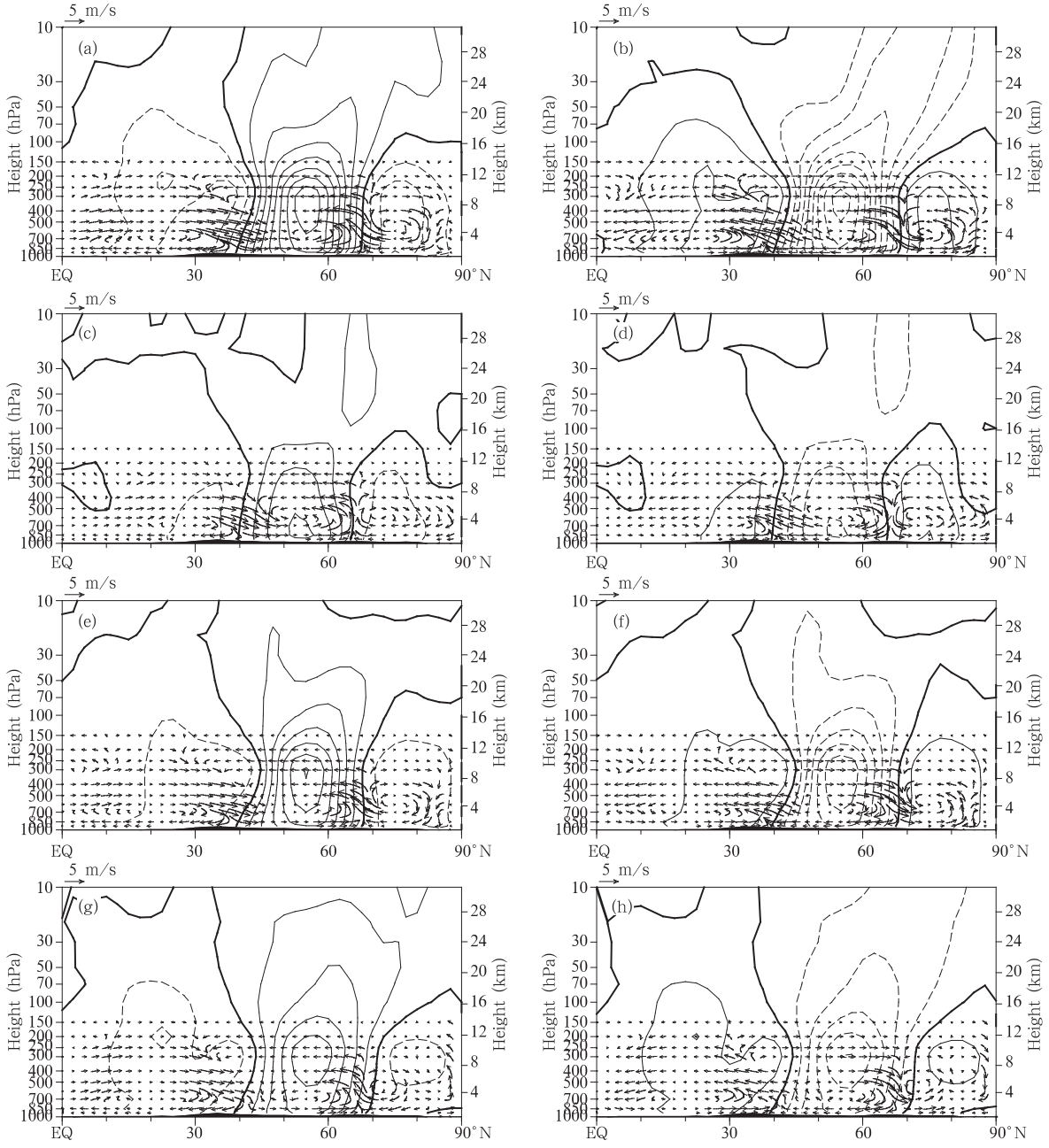


图 2 月内尺度(a、b)及准 1 周(c、d),准 2 周(e、f),准 3 周(g、h)上纬向平均的北半球环状模正负位相纬向风异常(等值线,间隔为 0.4 m/s)和垂直环流异常(矢量)气候平均(a、c、e、g 为正位相情况,b、d、f、h 为负位相)

Fig. 2 As in Fig. 1 but for the zonal wind component anomalies (contours, 0.4 m/s per contour interval) and vertical meridional cell anomalies of the NAM

(北),对流层下层经向环流异常向北(南),由此构成了正(反)费雷尔环流异常。同时,还注意到与费雷尔环流异常相联系的极地经圈环流异常和次级哈德莱环流异常均增强(减弱)。

最后,月内尺度北半球环状模对应温度异常则呈现为约以对流层顶为界上下相反"成对"出现的特点,并且,中纬度温度异常与高纬度、低纬度的温度异常相反(图 3a、b)。在北半球环状模正位相时,中纬度平流层为正温度异常、对流层负温度异常,而高纬度和低纬度平流层为负异常、对流层为正异常;北半球环状模负位相时,情况相反。近地面层温度异常沿纬度分布的情况与平流层类似,北半球环状模

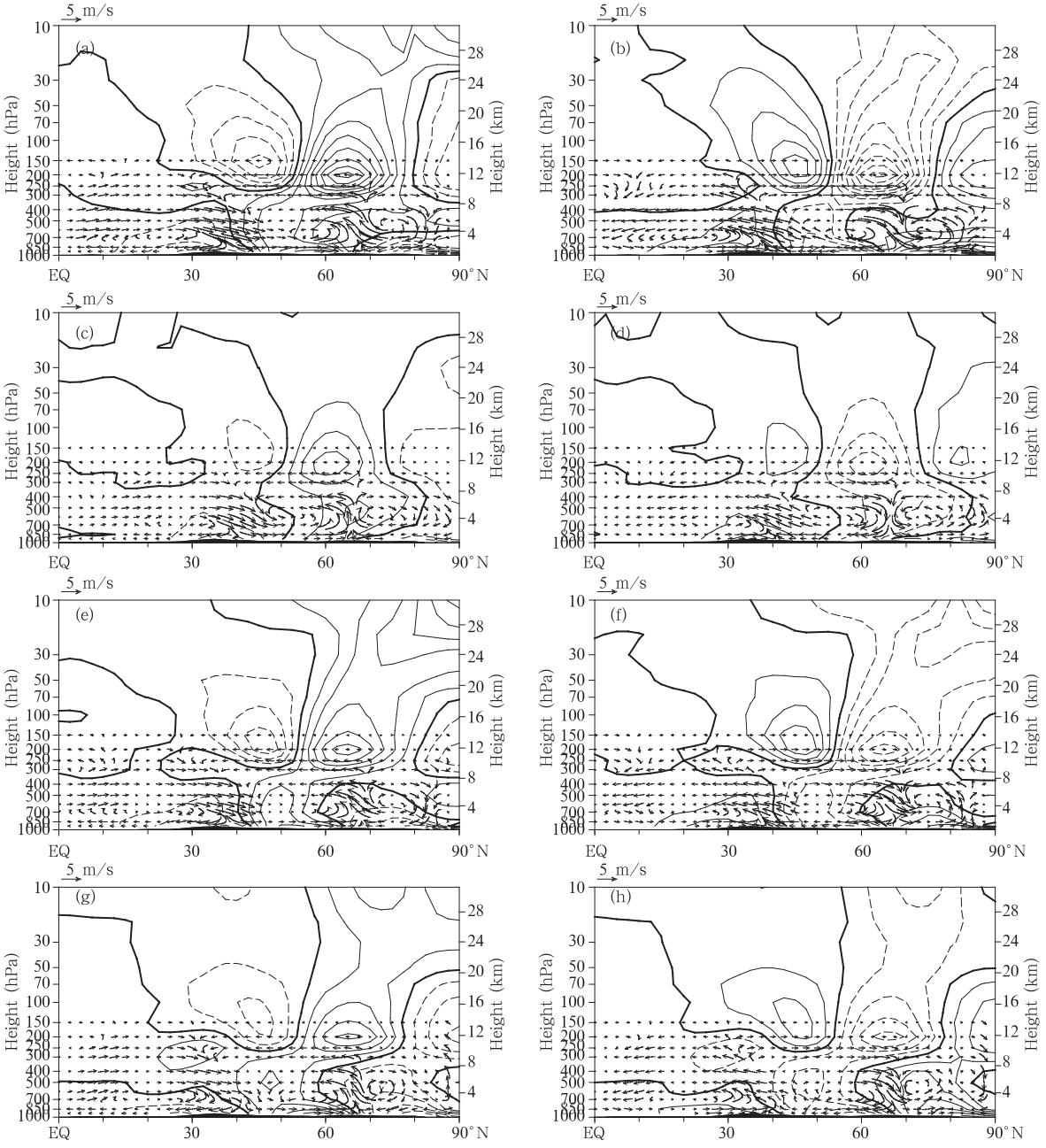


图 3　月内尺度(a、b)及准 1 周(c、d),准 2 周(e、f),准 3 周(g、h)上纬向平均的北半球环状模正、负位相温度异常(等值线,间隔为 0.25℃)和垂直环流异常气候(矢量)平均
(a、c、e、g 为正位相情况,b、d、f、h 为负位相;等值线间隔为 0.25℃/s)

Fig. 3　As in Fig. 1 but for the temperature anomalies (contours, 0.25℃ per contour interval) and vertical meridional cell anomalies of the NAM

正(负)位相时,中纬度为正(负)的温度异常,高纬度和低纬度为负(正)的温度异常。对比经向大气异常环流,近地面温度异常和冷暖平流联系紧密。其中,温度异常以对流层顶为界上下相反的特征表明,采用一个层次(如对流层顶)的温度变化来描述北半球环状模的整个温度变化特征欠妥当。

月内北半球环状模总体上具有典型的气候态特征。与月际北半球环状模气候平均特征(Thompson ,et al, 2000a; Li, et al, 2003)相比,月内北半球环状模的纬向风、位势高度场异常的大值区偏向

对流层,而月平均北半球环状模的纬向风、位势高度场异常活动中心则偏向于平流层,这表明月内尺度北半球环状模活动更多地反映了对流层北半球环状模的活动特征。月内尺度北半球环状模在垂直环流场上实质上对应着费雷尔环流异常,这与月际、季节、年际和年代际等较长时间尺度北半球环状模的情况类似(Li, et al, 2003)。温度场异常约以对流层顶为界上下相反"成对"出现,说明在研究环状模现象的过程中,尤其是研究短时间尺度环状模现象的过程中,不能仅采用对流层顶的温度异常来表征整层的情况,而应当结合上下层的情况综合考察。另外,强纬向风异常中心主要位于对流层顶附近,风场与温度场异常的这种配置是受到热成风原理制约的结果。综合高度场异常和风场异常,可以看到异常中心同时存在于中高纬度对流层和极地平流层,这说明极涡异常与对流层环状模信号在月内尺度上具有明显的耦合特征。

3.2 月内主要特征尺度气候平均特征

对于月内主要特征尺度北半球环状模(图 1c—h),其对应的高度场异常强度以准 2 周最强、准 1 周最弱,并且中高纬度高度异常随着时间尺度增长,自对流层向极地平流层伸展,极地平流层高度异常随之加强。在对流层,准 1 周尺度北半球环状模对应中纬度和高纬度的变高中心约分别位于 40°和 65°N 的近地层;在准 2 周尺度上,近地层活动中心抬升扩展到对流层顶附近,且整个对流层表现出准正压性,高度异常强度增加;而在准 3 周尺度上,高纬度和中纬度对流层的变高中心抬升到对流层顶附近,强度有所减弱,且低纬度高度异常有向南扩展倾向。另外,极地下平流层的高度异常(极涡异常)活动中心与高纬度对流层活动中心的耦合也值得注意:准 1 周尺度上,高纬度对流层中心位于近地层,极区下平流层中心位于 20—10 hPa,两者独立性较好;准 2 周尺度上,高纬度对流层中心加强并向上伸展,极地下平流层中心不明显,此时对流层活动中心占主导地位;准 3 周尺度上,高纬对流层中心抬升到对流层顶附近,并与极区下平流层高度异常中心耦合在一起,形成自极地下平流层向下、向南伸展到高纬度对流层的高度异常中心。

垂直方向上主要特征尺度纬向风异常几乎在北半球所有地区均具有明显的随着时间尺度增长向上扩展的特征(图 2c—h);中纬度纬向风异常随时间尺度增强向上伸展的同时,在水平方向上向北极下平流层伸展,而热带地区纬向风异常随时间尺度增强的同时,向南扩展增强;就强度而言,在热带外对流层地区以准 2 周尺度上最强,准 1 周最弱,在低纬地区以及热带外平流层则是准 3 周最强,准 1 周最弱。具体来讲,中纬度、低纬度和高纬度地区纬向风异常在准 1 周尺度上主要集中在 150 hPa 以下的对流层,平流层纬向风异常较弱,异常风速中心位于对流层底层。在准 2 周尺度上,中纬度地区纬向风异常加强并向上扩展至平流层下层,强度达到最强,而高纬度地区纬向风异常也加强并扩展到平流层底层,低纬度地区纬向风则向上、向赤道扩展,中纬度、低纬度和高纬度的纬向风异常中心上抬至对流层顶附近。而在准 3 周尺度上,低纬度地区纬向风异常继续向上、向赤道扩展,达到最强,并在 20°N 对流层顶附近形成新的异常风速中心;中纬度纬向风异常继续向上并向极地扩展,但中心强度有所减弱;相应地,高纬度地区纬向风异常被压缩,并且强度略有减弱。

在垂直环流场上(图 2c—h 和图 3c—h),各主要特征尺度差异主要有 2 个:一个是费雷尔环流在准 2 周尺度上最强,比准 1 周有明显的加强和向南扩展;另一个是准 3 周极地环流位置偏南,而准 1 周极地环流位置偏北,准 2 周极地环流位置则介于前二者之间。

在温度场异常上(图 3c—h),高纬度(70°—90°N)对流层、极地平流层下层以及低纬度(30°N 附近)对流层上层温度异常以准 3 周最强,其余地区温度异常则以准 2 周尺度最强。

如上所述,月内各主要特征尺度上北半球环状模气候态特征存在差异,随着月内时间周期的增加,位于对流层下层的位势高度、风场和温度场异常活动中心向上抬升到对流层顶,即时间尺度较长的变化在垂直方向上倾向与平流层相联系。特别值得一提的是,极地下平流层极涡信号在准 3 周尺度上,其强度明显大于对流层环状模信号;在准 2 周尺度上,对流层环状模信号明显强于平流层极涡信号;而在准 1 周尺度上,对流层与极地平流层的活动中心强度相当。Baldwin 等(2003a)认为平流层时间尺度长于对流层,这一观点与本文上述结论存在一致的地方。同时,还注意到,随着时间尺度增长,位势高度、纬向平均风和纬向平均温度场异常在低纬度地

区向热带伸展,这说明热带地区的信号也倾向与较长时间尺度相联系。

4 冬季月内北半球环状模事件对应温度和纬向风异常传播特征

为了分析月内北半球环状模对应的水平和垂直方向上的时间演变特征,本文挑选了正、负位相月内尺度北半球环状模事件,并分 17 位相进行了如第 2 节所述的等位相合成分析,选取的正、负位相北半球环状模事件数量如表 2 所示。

表 2 月内尺度北半球环状模及月内各特征尺度正、负位相事件

Table 2 The sample size of positive and negative phase events of the NAM on submonthly and its main characteristic time scales

	正位相	负位相
月内(5—30 d)	142	119
准 1 周(5—10 d)	102	115
准 2 周(10—20 d)	89	74
准 3 周(20—30 d)	39	39

4.1 水平传播特征

考虑到北半球环状模的温度场异常具有约以对流层顶为界上下层各有不同的特征,在垂直方向上依次分析了 1000—850、700—400、250—50、30—10 hPa 等各主要层次的温度异常和纬向平均风异常的传播特征。以下给出了月内总体及月内各个特征时间尺度上的情况。

4.1.1 月内尺度平均水平传播特征

从月内尺度温度和纬向风水平传播的总体特征(图 4)可以看到,温度异常在对流层和下平流层以较强的水平南传特征为主,而在平流层则为弱的北传特征——即在近地面(1000—850 hPa)存在比较强的自极地向赤道方向传播的冷暖异常,其中,75°—90°N 的极区冷暖温度异常向南经过 1—1.5 个北半球环状模生命位相(北半球环状模生命循环分为 0—16 共 17 个位相)可传播到热带地区;在对流层中层(700—400 hPa),温度异常随北半球环状模位相可自 70°N 左右高纬度地区经过0.5—0.75 个生命位相传播到热带地区,70°N以北极区温度异

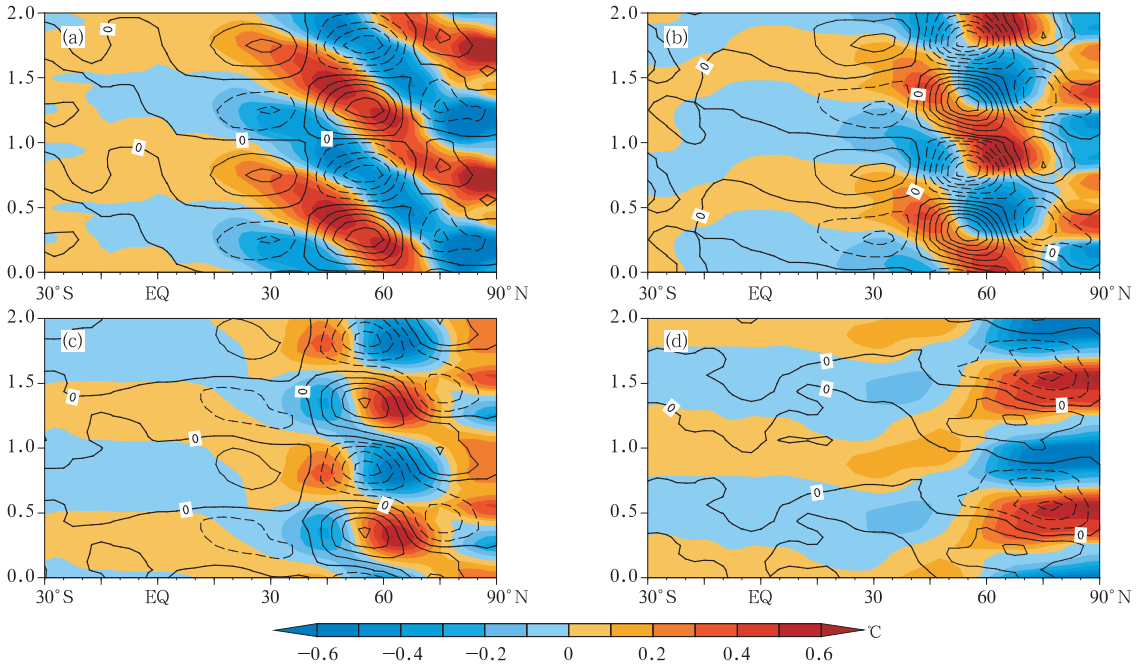


图 4 月内尺度北半球环状模纬向平均风场(等值线,间隔为 0.5 m/s)及温度异常(阴影)水平传播(a. 1000—850 hPa 平均,b. 700—400 hPa 平均,c. 250—50 hPa 平均,d. 30—10 hPa 平均;纵轴数字 1 代表一个完整的生命循环)

Fig. 4 Submonthly meridional propagation of the anaomlies of NAM zonal mean zonal wind (contours at 0.5 m/s intervals) and zonal mean temperature (shadings), averaged between (a) 1000 − 850 hPa, (b) 700 − 400 hPa, (c) 250 − 50 hPa, and (d) 30 − 10 hPa. The *y*-axis denotes the life cycle of NAM with "1" meaning a complete cycle

常则为向北传播;在下平流层(250—50 hPa),温度异常也以南传特征为主,特征与近地层相似,只是强度稍弱;而平流层(30—10 hPa)温度异常以向北传播为主,在30°—60°N的中纬度地区北传特征最为明显,这与对流层及下平流层温度异常的传播方向相反。对比平流层(包括平流层中层和下平流层)和对流层(包括近地面层和对流层)的温度异常,可以看到,对流层的温度异常传播强度明显强于平流层,这与Cai等(2006)采用平流层位涡指数观察到平流层温度异常传播强于对流层温度异常的特征正好相反,月内尺度北半球环状模更多的反映了对流层温度异常传播情况。

纬向风异常在水平方向表现为整层南传的特征。在近地面层(1000—850 hPa)、对流层中层(700—400 hPa)、下平流层(250—50 hPa)中高纬度地区以及平流层中层(30—10 hPa)热带外地区,纬向风异常均表现为明显的南传特征;其中,对流层顶附近纬向风异常及其水平传播强度大于其他层次。对比纬向风异常与温度异常传播特征,可以看到在近地面层到平流层中层,温度异常与纬向风异常传播特征比较一致,而在平流层两者传播方向相反。另外,纬向风异常的传播与温度异常传播存在空间位相的差异,这主要是由于中高纬度地区温度与纬向风受到热成风原理制约的结果。

由上述分析可看到,月内尺度北半球环状模对应的温度异常的传播特征主要表现为低层强的由极地向赤道南传、高层弱的由中低纬度向极地北传的特征,并且对流层南传强度大于平流层北传,这表明月内北半球环状模对应温度异常传播特征更多地反映了对流层的情况。而纬向风异常传播则表现为整层的由极地向赤道南传特征。这种温度异常和风场异常在对流层存在明显南传特征表明,对流层中高纬度的气温、纬向风异常在月内时间尺度可先于中低纬度出现。因此,月内北半球环状模对应的中高纬度温度异常和纬向风场异常对低纬度可能具有较好的预示作用。

4.1.2 月内主要特征尺度上水平传播特征

对于准1周、准2周和准3周尺度温度异常的传播特征而言,在近地层(1000—850 hPa)均为明显的南传,而在平流层中层(30—10 hPa)均为明显的北传。在对流层中层(700—400 hPa)和平流层下层(250—50 hPa),准2周(图6)和准3周(图7)传播特征比较一致,均表现为以南传特征为主,准1周尺度北半球环状模(图5),在这两个层次上中高纬度地区则对应以向北传播特征为主。其中,准2周温度异常传播强度在各个层次都最强,而准1周和准

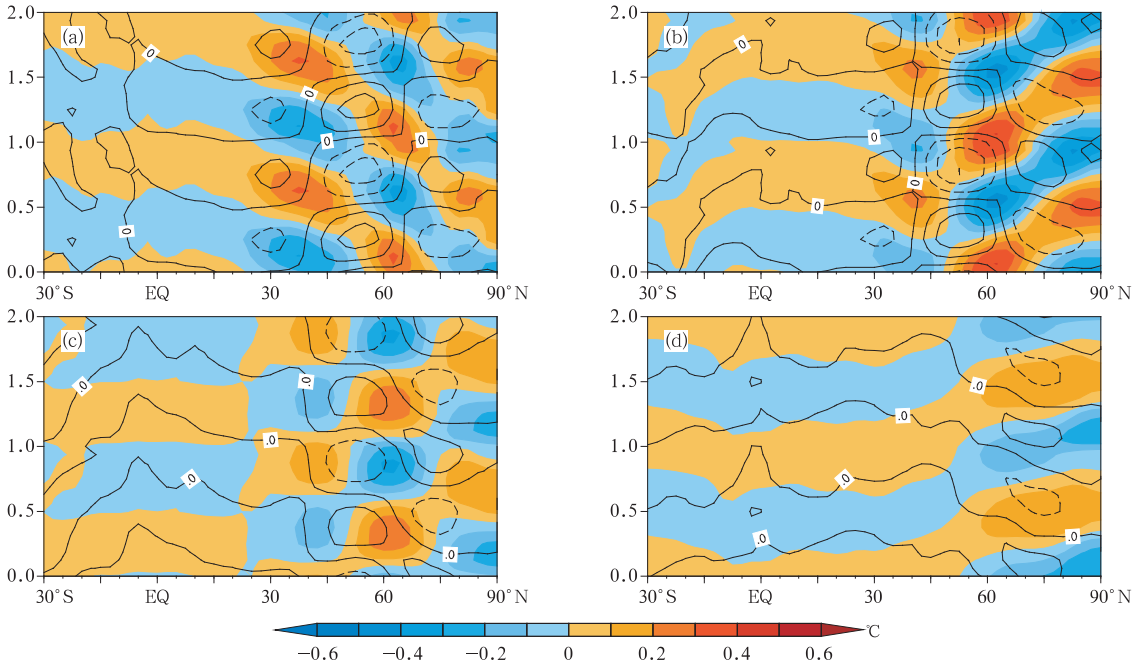


图5 同图4,但为5—10 d尺度情况

Fig. 5 As in Fig. 4 but for the case of quasi-one-week

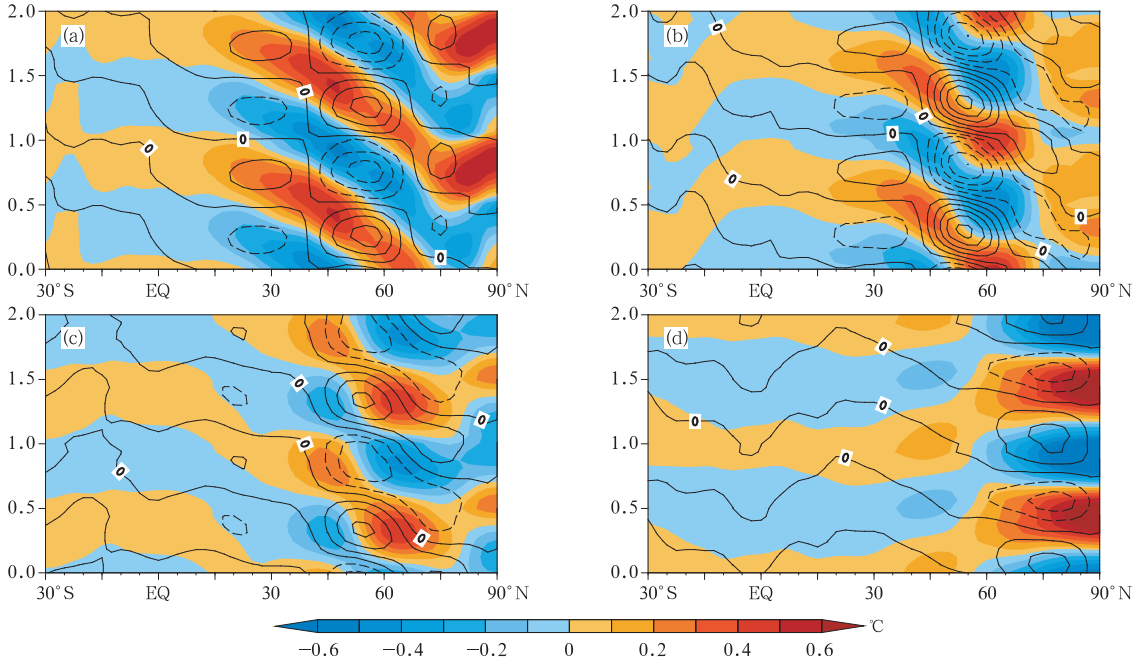


图 6 同图 4,但为 10—20 d 尺度情况

Fig. 6 As in Fig. 4 but for the case of quasi-two-week

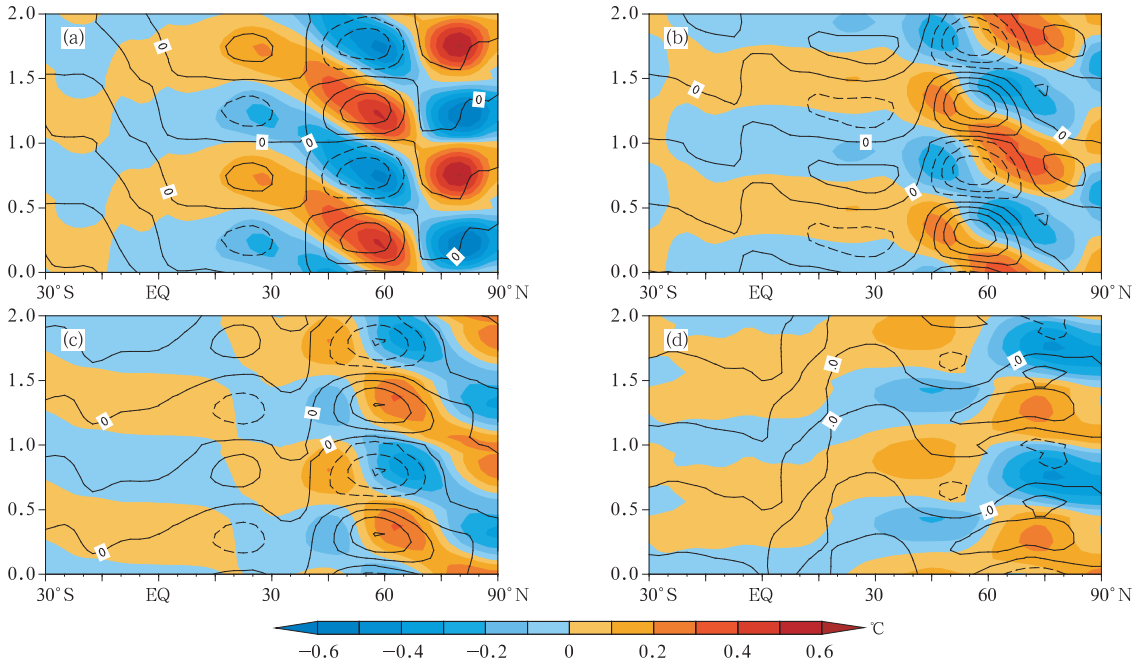


图 7 同图 4,但为 20—30 d 尺度情况

Fig. 7 As in Fig. 4 but for the case of quasi-three-week

2 周水平传播强度相对较弱。

比较月内各特征时间尺度上纬向风异常随时间传播的特征,可以看到,准 2 周尺度(图 6)纬向风异常强度最强,并且在高、低各层以明显的南传特征为主;准 3 周尺度(图 7)纬向风异常则几乎在各层均表现为明显的驻波形式,传播特征不明显;准 1 周尺度(图 5)纬向风异常在平流层以南传特征为主,在对流层大约 50°N 以北的高纬度地区南传、以南的

低纬度地区为弱的北传,而近地层均为北传。

由上可知,环状模对应温度异常在月内各主要特征尺度上的近地层均为明显的由极地向赤道的南传特征,而在平流层中层均为由中低纬度向极地的北传特征;在对流层和下平流层,准3周和准2周南传明显,而准1周北传明显。纬向风场异常传播以准2周尺度上整层由极地向赤道南传的特征最明显,强度最大;而在准3周尺度上纬向风异常主要表现为驻波形式,传播特征不明显。

4.2 垂直传播特征

关于北半球环状模的垂直传播特征,目前主要认为信号首先出现在平流层,然后下传到对流层(Baldwin, et al, 1999, 2001, 2003b)。那么,对于月内时间尺度的北半球环状模其垂直传播是否也存在相同的特征呢?本节详细分析了从低纬度到高纬度的垂直传播特征,根据环状模垂直气候态特征,在北半球沿纬度分为6个区域进行分析:0°—20°、20°—40°、40°—55°、55°—70°、70°—80°、80°—90°N。

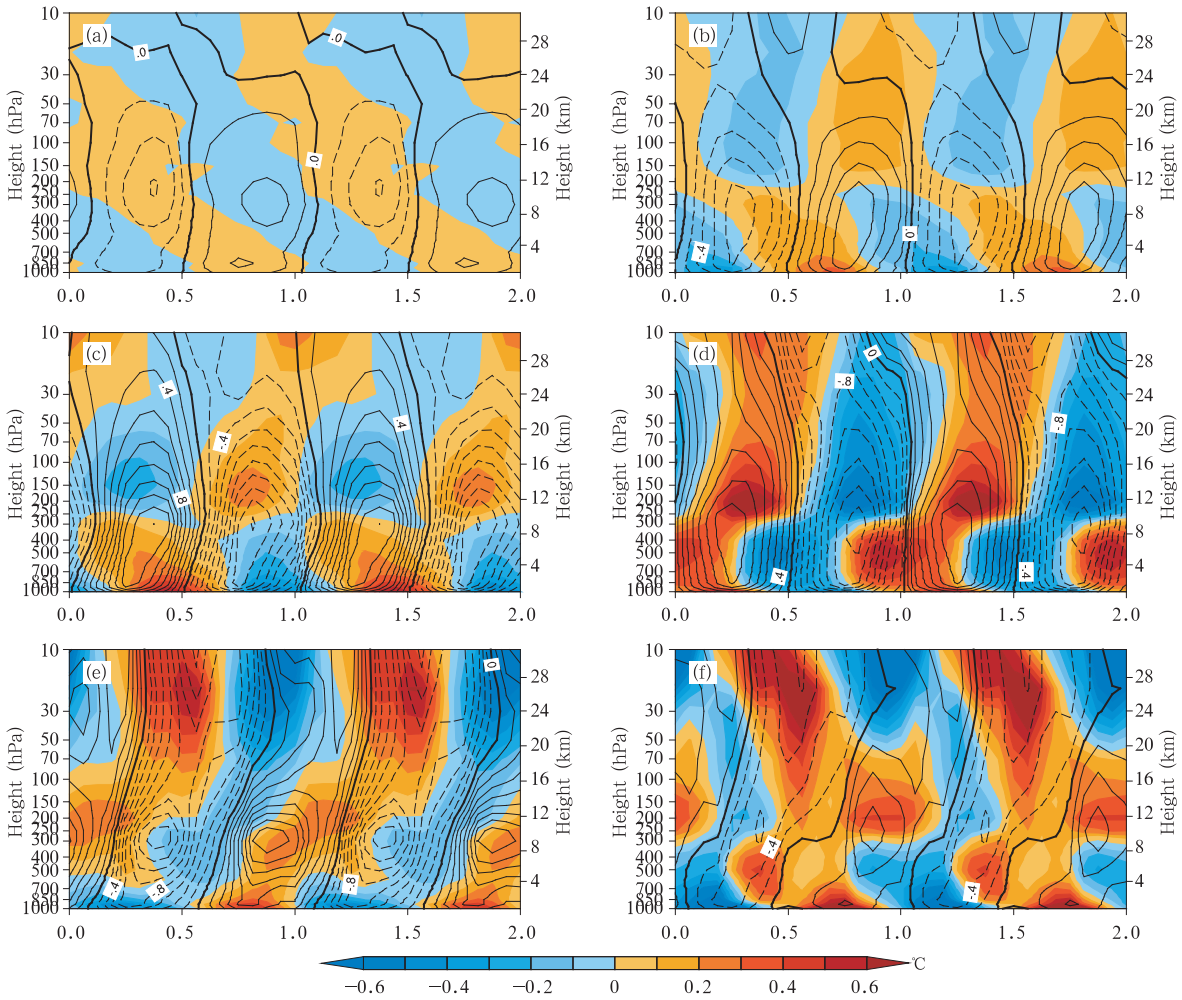


图8 月内尺度北半球环状模纬向风场(等值线,间隔为0.2 m/s)及温度异常(阴影)的垂直传播(a. 0—20°N平均,b. 20°—40°N平均,c. 40°—55°N平均,d. 55°—70°N平均,e. 70°—80°N平均,f. 80°—90°N平均;横轴数字1代表一个完整的生命循环)

Fig. 8 Submonthly vertical propagation of the NAM zonal wind (contours at 0.2 m/s intervals) and temperature (shadings) anomalies averaged between (a) 0°–20°N, (b) 20°–40°N, (c) 40°–55°N, (d) 55°–70°N, (e) 70°–80°N, and (f) 80°–90°N. The *x*-axis denotes the life cycle of NAM with "1" meaning a complete cycle

4.2.1 月内平均垂直传播特征

月内尺度温度和纬向风异常在垂直方向上,不仅存在明显的下传特征,自对流层向平流层的向上传播特征也很明显(图 8)。先来看纬向风异常的垂直传播特征,纬向风异常在 80°—90°、70°—80°N 为明显的自对流层低层向上一直传播到平流层中层,在 55°—70°、40°—55°、20°—40°N 以及 0°—20°N 地区的对流层也存在明显的向上传播特征。而温度异常则表现为中纬度地区上传,极地和热带地区下传的特征:在 55°—70°N 温度异常上传特征最为明显,40°—55°N 地区也有明显上传特征;而在 80°—90°N 的极区和 0°—20°N 的热带地区温度异常为明显下传特征;而在 20°—40°N 温度异常似乎首先出现在对流层顶,然后分别向平流层和对流层传播。

以上事实表明,环状模信号并非完全是源自于平流层的。在较短时间尺度上,尤其是月内尺度上,温度异常和风场异常不仅存在自平流层下传到对流层的现象,也存在明显的自对流层上传到平流层的特征,这与以往强调的月际、季节、年际和年代际环状模的单一下传特征是不同的(Baldwin, et al, 1999, 2001, 2003b; Cai, et al, 2006)。

4.2.2 月内主要特征尺度垂直传播特征

准 1 周(5—10 d)温度和纬向风垂直传播情况如图 9。纬向风异常在 80°—90°、70°—80°、40°—55°N为明显的由对流层向平流层上传特征,仅在 55°—70°N 为明显下传,20°—40°N 对流层上传和平流层下传都可看到,并交汇于对流层顶附近。而温度异常 55°—70°N 也为明显的上传特征,70°—90°、0°—20°N 为明显下传特征;80°—90°N 温度异常的上传和下传交汇于对流层顶;40°—55°N温度异常

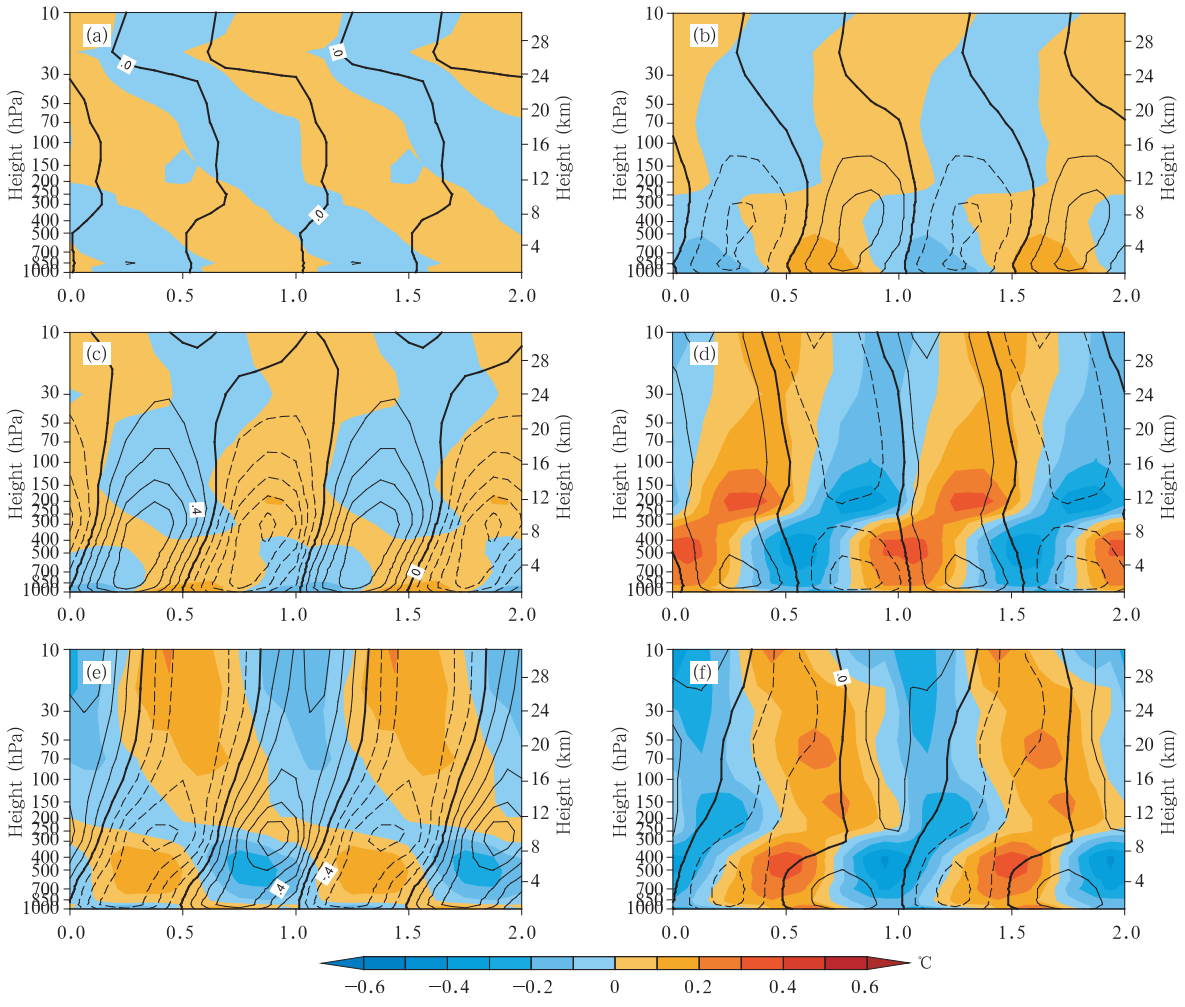


图 9 同图 8,但为 5—10 d 尺度情况

Fig. 9 As in Fig. 8 but for the case of quasi-one-week

首先出现在对流层顶,然后分别同时向平流层上传和向对流层下传;20°—40°N 温度异常下传明显,但对流层顶以上和对流层以下的温度异常出现反号。

准 2 周(10—20 d)(图 10)纬向风异常 70°—80°和 20°—40°N 上传明显;80°—90°和 40°—55°N 纬向风上传和下传都存在,交汇于对流层顶附近。温度异常 70°—80°、55°—70°及 40°—55°N 上传明显,80°—90°和 0°—20°N 有明显下传,而 20°—40°N 的温度异常最先出现在对流层顶附近,然后分别向平流层上传和向对流层下传。

准 3 周尺度(20—30 d)上(图 11),纬向风异常 70°—80°、55°—70°N 上传明显;80°—90°N 为驻波,传播不明显;而 40°—55°和 20°—40°N 上传和下传均存在,交汇于对流层顶附近。温度异常 70°—80°、55°—70°N 具有明显的上传特征;70°—90°、0°—20°N 温度异常最先出现在对流层顶,然后分别向平流层上传和向对流层下传;20°—40°和 0°—20°N 相似,温度异常最先出现在对流层顶,然后分别上传和下传,但是对流层顶以上和以下的温度异常反号;40°—55°N 的温度异常总体以下传为主,但过平流层后温度异常反号。

由上述分析可知,在月内各主要特征尺度上,温度异常和纬向风异常信号自对流层"上传"到平流层的特征明显。其中,对流层纬向风异常在北半球大部分地区以向上传播特征为主,尤其在极区及其附近,纬向风异常可以自近地层向上突破对流层顶一直传播到平流层中层;温度异常特征较为复杂,总体来看在中高纬度地区为明显的上传,而在极地和热带地区以下传特征为主;在月内主要时间特征尺度上,以准2周、准1周情况最为类似,而准3周时间

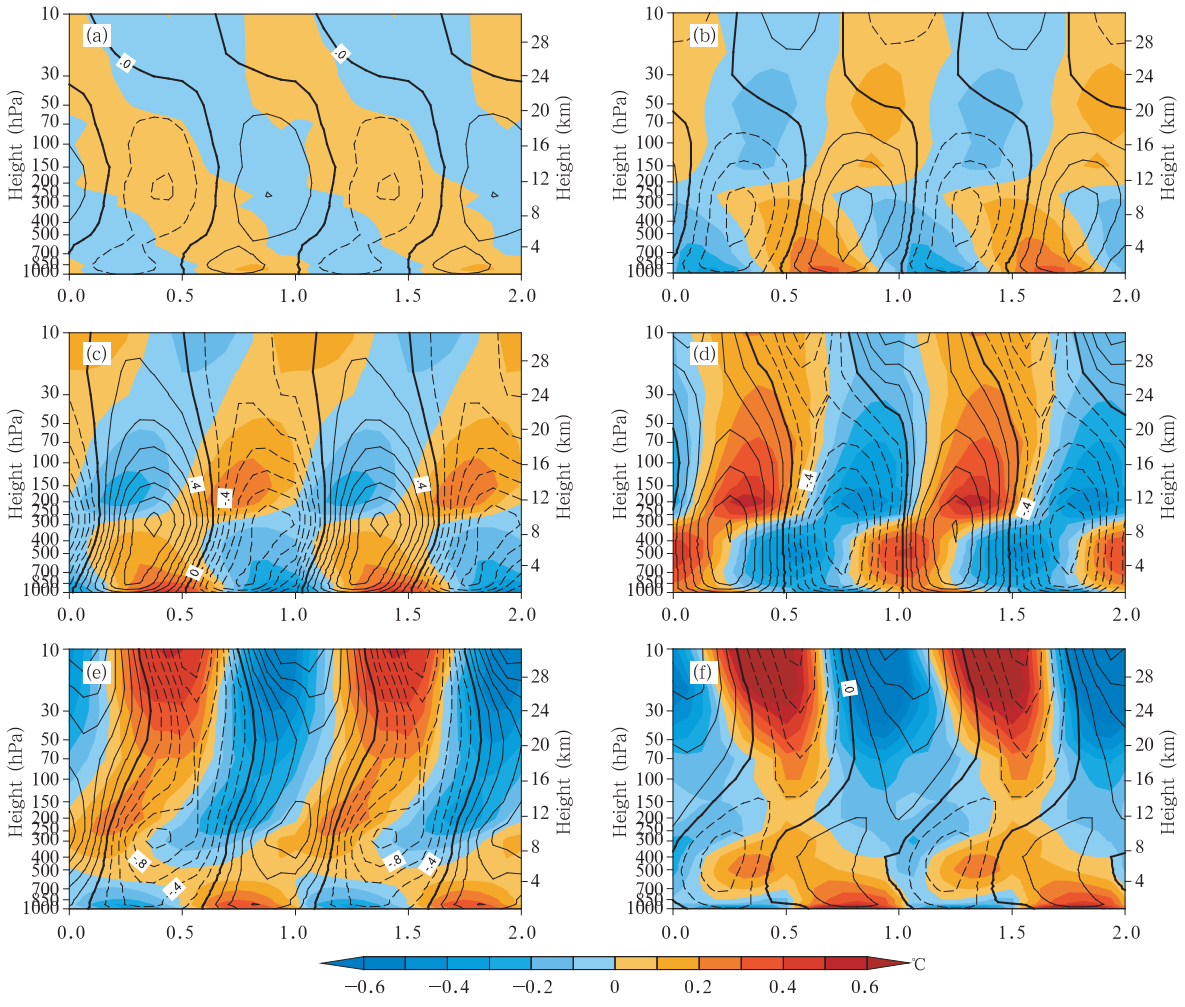


图 10 同图 8,但为 10—20 d 尺度情况

Fig. 10 As in Fig. 8 but for the case of quasi-two-week

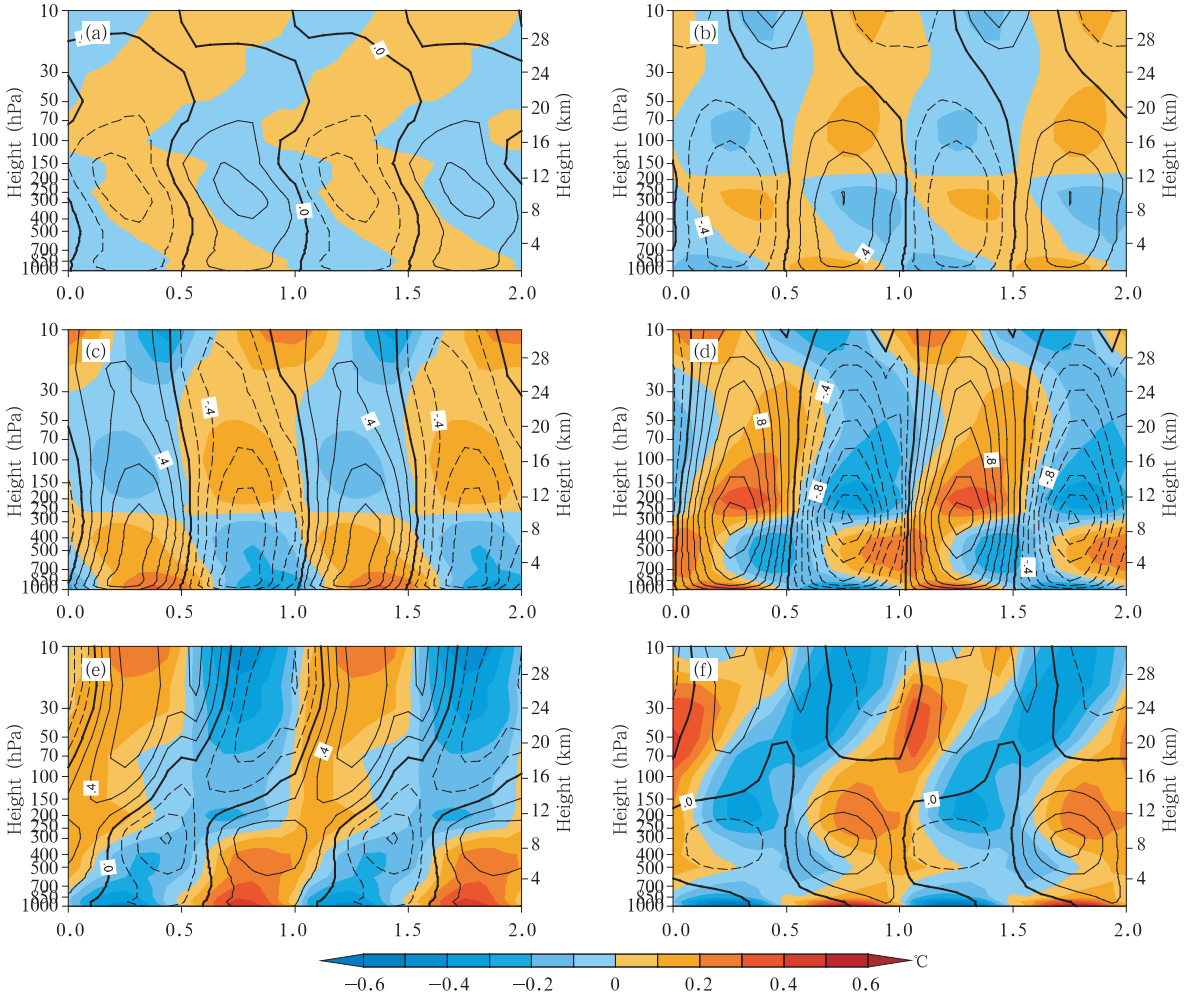


图 11 同图 8,但为 20—30 d 尺度情况

Fig. 11 As in Fig. 8 but for the case of quasi-three-week

尺度上的垂直传播特征与其余月内特征时间尺度上的情况差异较大。

5 结论与讨论

本文通过等位相合成分析的方法主要研究了月内尺度及月内各主要特征时间尺度上北半球环状模的水平与垂直活动特征。

(1) 月内尺度北半球环状模正、负位相气候态具有典型特征。首先,与月际、季节、年际和年代际等较长时间尺度北半球环状模活动相比,其更多地反映了北半球环状模在对流层的活动特征:位势高度异常大约以 50°N 为界南北相反,呈“跷跷板”结构,异常大值区主要位于对流层。其次,月内尺度上,对流层环状模信号与平流层极涡活动是明显耦合在一起的:极地平流层附近存在局地变高中心,并与从中纬度对流层向极地平流层伸展的风场异常相对应。另外,月内尺度环状模温度异常在垂直方向上具有以对流层顶为界上下相反“成对”出现的特征,这与垂直风场在对流层顶附近存在极大值相对应,满足热成风关系。这种温度异常大约以对流层顶为界上下相反的特征提示我们,在研究环状模时,尤其是短时间环状模,仅采用对流层顶温度异常情况来代替整层温度异常情况是不合理的,在研究中应当综合考虑高层和低层的情况。最后,在纬向平均的垂直环流异常场上,月内尺度北半球环状模正(负)位相实质上对应着正(反)费雷尔环流异常,这与 Li 等(2003)在月际、季节、年际和年代际等较长时间尺度上得到的结论是一致的。

(2) 月内各主要特征尺度上北半球环状模气候态特征存在差异,随着月内特征时间周期的增长,位

于对流层下层的位势高度、风场和温度场异常活动中心向上抬升到对流层顶,即时间尺度较长的变化在垂直方向上倾向与平流层相联系。在中高纬度地区,极地下平流层极涡信号在准3周尺度上,其强度明显大于对流层环状模信号;在准2周尺度上,对流层环状模信号明显强于平流层极涡信号;而在准1周尺度上,对流层与极地平流层的活动中心强度相当。Baldwin等(2003a)认为平流层时间尺度长于对流层,这一观点与本文结论吻合,Holton等(1976)也曾根据理想模式的结果对平流层中存在较长周期振荡这一问题给出了清楚的解释。同时,随着时间尺度增长,位势高度、纬向平均风和纬向平均温度场异常在低纬度地区向热带伸展,这说明热带地区的信号也倾向与较长时间尺度相联系。

(3)月内尺度北半球环状模对应温度异常在水平方向上具有低层强的由极地向赤道南传、高层弱的由赤道向极地北传的水平传播特征:近地层温度异常为较强的自极地向赤道地区的一致传播;平流层下层和对流层的温度异常在中低纬度主要以向赤道传播为主,高纬度地区有向极地传播特征;而在平流层中层,温度异常表现为一致向极地的传播,与对流层和近地层的传播方向相反且强度弱。而月内北半球环状模对应纬向风异常水平传播则表现为对流层和平流层的整层较为一致的由极地和高纬度向中低纬度南传特征,并以对流层顶附近纬向风异常传播最明显、强度也最大。分尺度来看,在月内各主要特征尺度上,环状模对应温度异常在月内各个特征尺度上的近地层均为明显的南传特征,而在平流层中层均为北传;在对流层和下平流层,准3周和准2周南传明显,而准1周北传明显。纬向风场异常传播以准2周尺度上整层南传特征最明显,强度最大;而在准3周尺度上纬向风异常主要表现为驻波形式,传播特征不明显。

(4)月内尺度北半球环状模对应温度和风场异常在北半球中纬度地区存在明显的上传特征。纬向风异常在整个北半球热带外地区均存在明显上传特征。而温度异常在垂直方向上传和下传现象均存在:在中纬度地区可自近地层向上传播,突破对流层顶,一直传播到平流层中下层;在极地地区,温度异常自平流层向下传播,可达到近地面层;在热带地区,温度异常较弱,也表现为下传特征。分尺度来看,在月内主要时间特征尺度上,以准2周、准1周情况最为类似,而准3周时间尺度差异较大。

在以往研究中,研究者更多的强调平流层活动信号,如在环状模信号的垂直传播特征的研究中认为北半球环状模在较长时间尺度上具有以信号下传为主的传播特征(Baldwin, et al, 1999, 2001, 2003b);在环状模活动的水平传播特征的研究中强调平流层信号较强的北传特征(Cai, et al, 2006)。而本文从北半球环状模在对流层信号活跃的月内时间尺度入手,获得了与以往结论不同的新认识。

在水平传播特征方面,环流异常信号在对流层具有较强水平南传现象,这表明冬季北半球中高纬度环流异常对中低纬度可能具有预测意义,值得进一步研究。

在垂直传播特征方面,月内尺度温度异常和风场异常在北半球中纬度地区具有强烈的上传特征,这是与长时间尺度北半球环状模活动不同的特点。这种月内北半球环状模对流层信号的强烈上传的特征则为对流层环状模信号与平流层极涡活动之间耦合过程提供了新的证据,即短时间尺度的环状模信号可以上传影响平流层极涡信号,这一事实同时也回答了环状模信号是否起源于平流层的问题:北半球环状模的信号并非完全源于平流层,在较短时间尺度上,对流层信号可以向上传播突破对流层顶达到平流层。这些新的观测事实对于全面认识平流层和对流层间的耦合过程研究具有启示性的意义。

参考文献

范丽军, 李建平, 韦志刚等. 2003. 北极涛动和南极涛动的年变化特征. 大气科学, 27(3):419-424

胡永云. 2006. 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, 21(7):713-721

李建平. 2005. 北极涛动的物理意义及其与东亚大气环流的关系// 俞永强, 陈文. 海-气相互作用对我国气候变化的影响. 北京: 气象出版社, 169-176

李晓峰,李建平. 2009. 南、北半球环状模月内活动的主要时间尺度. 大气科学, 33(2): 215-231

Angell J K. 2006. Changes in the 300-mb North Circumpolar Vortex, 1963-2001. J Climate, 19(12): 2984-2994

Baldwin M P, Dunkerton T J. 1999. Propagation of the Arctic Oscillation from the stratosphere to the troposphere. J Geophys Res, 104(D24): 30937-30946

Baldwin M P. 2001. Annular modes in global daily surface pressure. Geophys Res Lett, 28(21): 4115-4118

Baldwin M P, Dunkerton T J. 2001. Stratospheric harbingers of anomalous weather regimes. Science, (5542): 581-584

Baldwin M P, Stephenson D B, Thompson D W J. 2003a. Stratospheric memory and skill of extended-range weather forecasts. Science, (5633): 636-640

Baldwin M P, Thompson D W J, Shuckburgh E F. 2003b. Weather from the stratosphere. Science, (5631): 317-319

Benedict J J, Lee S, Feldstein S B. 2004. Synoptic view of the North Atlantic Oscillation. J Atmos Sci, 61(2): 121-144

Cai M, Ren R C. 2006. 40—70 day meridional propagation of global circulation anomalies. Geophys Res Lett, 33: L06818, Doi:10.1029/2005GL025024

Duchon C E. 1979. Lanczos filtering in one and two dimensions. J Appl Meteor, 18(8): 1016-1022

Gong D, Wang S. 1999. Definition of Antarctic Oscillation index. Geophys Res Lett, 26(4): 459-462

Holton J R, Mass C. 1976. Stratospheric vacillation cycles. J Atmos Sci, 33(11): 2218-2225

Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. Bull Amer Meteor Soc, 77(3): 437-471

Li J, Wang J X L. 2003. A modified zonal index and its physical sense. Geophys Res Lett, 30(12): 16-32

Limpasuvan V, Hartmann D L. 1999. Eddies and the annular modes of climate variability. Geophys Res Lett, 26(20): 3133-3136

Lorenz E N. 1951. Seasonal and irregular variations of the Northern Hemisphere sea-level pressure profile. J Meteor, 8(1): 52-59

Maloney E D, Hartmann D L. 1998. Frictional moisture convergence in a composite life cycle of the Madden-Julian Oscillation. J Climate, 11(9): 2387-2403

Nan S, Li J. 2003. The relationship between the summer precipitation in the Yangtze River valley and the boreal spring Southern Hemisphere annular mode. Geophys Res Lett, 30(24): 2266, Doi:10.1029/2003GL018381

Polvani L M, Waugh D W. 2004. Upward wave activity flux as a precursor to extreme stratospheric events and subsequent anomalous surface weather regimes. J Climate, 17(18): 3548-3554

Thompson D W J, Wallace J M. 1998. The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields. Geophys Res Lett, 25(9): 1297-1300

Thompson D W J, Wallace J M. 2000a. Annular modes in the extratropical circulation. Part I: Month-to-month variability. J Climate, 13(5): 1000-1016

Thompson D W J, Wallace J M, Hegerl G C. 2000b. Annular modes in the extratropical circulation. Part II: Trends. J Climate, 13(5): 1018-1036

Thompson D W J, Lee S, Baldwin M P. 2002. Atmospheric processes governing the Northern Hemisphere annular mode/North Atlantic Oscillation. From the AGU monograph on the NAO. AGU, 81-112

Woollings T, Hoskins B, Blackburn M. 2008. A new Rossby wave-breaking interpretation of the North Atlantic Oscillation. J Atmos Sci, 65(2): 609-626