

北半球准定常行星波气候平均态的 资料分析和数值模拟

杨 蕾 陈 文 黄荣辉

中国科学院大气物理研究所, 北京 100080

摘 要 利用 NCEP/NCAR 再分析资料和大气环流模式(CCSR/NIES AGCM Ver 5.6), 对北半球准定常行星波的气候平均态分布进行分析和模拟。再分析资料分析的结果表明: 北半球冬季, 准定常行星波沿两支波导上传传播, 其中一支在对流层上层转向中低纬度传播, 另外一支折向高纬度, 通过极地波导上传到平流层。其中, 1 波和 2 波可以上传到平流层, 因而其振幅分布除在中低纬的对流层上层出现一个次大值外, 在高纬度平流层中上层会出现一个最大值, 3 波则主要限制在对流层, 其振幅分布除在副热带对流层上层出现一个次大值外, 最大值出现在中纬度对流层上层。北半球夏季, 整个平流层为东风环流, 极地波导不存在, 行星波不能上传到平流层, 在对流层活动也较弱, 1 波、2 波、3 波的传播情况大致相似, 表现为在对流层上层由中纬度向赤道地区的传播。相应的振幅分布是, 对 1 波和 2 波而言, 最大值出现在中低纬对流层顶附近, 同时在中高纬对流层上层出现一个次大值, 而 3 波的振幅分布正好相反, 最大值出现在中高纬对流层上层, 次大值则在中低纬对流层顶附近。利用大气环流模式进行的数值模拟表明, 模式可以比较好地模拟冬夏季准定常行星波的传播路径, 但模拟的北半球冬季沿极地波导上传到平流层的传播明显偏弱, 其结果是对 1 波、2 波而言, 高纬度平流层中上层的振幅最大值明显小于再分析资料的数值。文中还讨论了数值模拟与资料分析中行星波的差异可能对大气环流模拟的影响。

关键词 准定常行星波 EP 通量 振幅 位相

文章编号 1006-9895(2006)03-0361-16

中图分类号 P433

文献标识码 A

The Data Analysis and Numerical Simulation of the Climatology of Quasi-Stationary Planetary Waves in the Northern Hemisphere

YANG Lei, CHEN Wen, and HUANG Rong-Hui

Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080

Abstract Recent study indicates that the stratospheric and tropospheric circulations are not isolated, and are dynamically linked in fact, especially in winter. There is evidence showing that the troposphere-stratosphere coupling interaction is closely associated with the quasi-stationary planetary wave activity. For the study of the variation of quasi-stationary planetary wave activity, it is necessary to find out the basic characters of the quasi-stationary planetary wave distribution. But in recent years, the research on the distribution of planetary wave in winter and summer, especially the study based on the observation data and simulation by using AGCM, is very absent. So in this paper, the climatology of quasi-stationary planetary wave in the Northern Hemisphere is analyzed by using NCEP/NCAR reanalysis data and the simulation with the CCSR/NIES AGCM Ver. 5.6. By expanding geopotential height into their zonal Fourier harmonics, their zonal mean values and wave amplitudes and phases are gotten at any wave-numbers. Here the sum of zonal wavenumber 1 to wavenumber 3 is used to represent quasi-stationary planetary

收稿日期 2005-05-08, 2005-07-11 收修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展规划项目 2004CB418303, 国家自然科学基金资助项目 40231005、40375021

作者简介 杨蕾, 女, 1979 年出生, 硕士, 研究方向: 气候动力学。E-mail: yanglei@cma.gov.cn

wave activity. The Eliassen-Palm flux (EP flux) is used as a diagnostic tool, which is a measure of the wave activity propagation. The reanalysis data indicate the planetary wave propagates along two waveguides in winter. One branch bends equatorward in the upper troposphere, the other turns to the high latitudes and propagates upward into the stratosphere along the polar waveguide. The wavenumber 1 and wavenumber 2 can propagate upward into the stratosphere, so the maximum of amplitude appears in the mid-upper stratosphere of high latitudes, and the secondary maximum appears in the upper troposphere of mid-low latitudes. But the wavenumber 3 is restricted in the troposphere, so the amplitude maximum appears in the upper troposphere of middle latitudes, and the secondary maximum is in the upper subtropical troposphere. In summer, there is no polar waveguide because of the easterlies in stratosphere. Hence, the planetary wave activity is confined in the troposphere and weaker than its in winter. The propagations of wavenumbers 1, 2 and 3 are similar, and all of them display the propagation from the middle latitudes to tropics in the upper troposphere. The amplitude maximums of wavenumber 1 and wavenumber 2 both appear about tropopause of mid-low latitudes, the secondary maximums appear in the upper troposphere of mid-high latitudes. On the contrary, the amplitude maximum of wavenumber 3 is located in the upper troposphere of mid-high latitudes, the secondary maximum is located about the tropopause of mid-low latitudes. The climatological zonal-mean flow is well simulated by the AGCM. And the simulations also shows that the quasi-stationary planetary wave in the Northern Hemisphere winter propagates along two waveguides as the reanalysis data indicated, with the wavenumbers 1 and 2 propagating upward into the stratosphere and the wavenumber 3 confined in the troposphere. The strength of wave propagation is somewhat different from the reanalysis with a little stronger in the troposphere and smaller in the stratosphere. In summer, the simulations are very similar with the reanalysis results. The data analysis and numerical simulation of the climatology of quasi-stationary planetary waves in the Northern Hemisphere show that planetary wave activities have obvious effect on the stratosphere-troposphere interaction in winter, however the influence is very feeble in summer.

Key words quasi-stationary planetary wave, EP flux, amplitude, phase

1 引言

自 20 世纪 30 年代罗斯贝^[1]发现大气长波以后,叶笃正^[2]提出罗斯贝波能量频散理论,以及随后有关大气动力不稳定理论的研究,奠定了现代大气动力学和数值天气预报的理论基础。到 20 世纪 70 年代,大气科学的一个重要进展就是认识到气候系统的概念,并开始关注时间尺度为两周以上的短期气候变化。一系列的研究表明短期气候变化与大气行星波动力学有密切关系^[3]。行星波是一种波长与地球半径相当或大于地球半径的大尺度波动,通常是指纬向波数为 1 波、2 波、3 波的波动。由于其空间尺度大,演变周期长,具有准定常性,因而它的形成和演变对大气环流具有十分重要的影响,是产生短期气候变化的重要物理机制。准定常行星波的传播实际上是波能的频散,且其传播与演变是与波流相互作用联系在一起的动力过程。Eliassen 等^[4]和 Andrew 等^[5]引入了波作用通量(EP 通量)的概念,黄荣辉^[6]证明了 EP 通量平行于子午面内行星波的群速度,可以很好地描述行星波的传

播。上传行星波在一定条件下还会与基本气流发生相互作用,根据变换欧拉平均方程,可以用 EP 通量散度来诊断波流相互作用^[5]。

黄荣辉和岸保堪三郎^[7]应用波在缓变媒质中的传播理论,系统研究了对流层地形与定常热源强迫产生的定常行星波在大气中的传播规律,给出了等温大气情况下定常行星波的传播方程,指出准定常行星波在冬季通过两支波导分别传播到平流层及低纬度对流层上层,而夏季行星波不能向上传播到平流层,只能在对流层传播。

研究还发现,平流层大气运动与对流层大气运动是相互影响的,尤其是冬季,准定常行星波在对流层产生后向上传播,其中一支折射向极地穿过对流层顶而进入平流层^[8],使得平流层与对流层动力耦合在一起。也有研究发现,平流层扰动可能会通过反射而向下传播,使得对流层大气产生异常,许多极端天气事件与此有关^[7, 9~12]。以前的研究多侧重于行星波的垂直传播,强调对流层对平流层的影响。从 20 世纪 90 年代以后,特别是世界气候研究计划(WCRP)建立了“平流层过程及其对气候的作

用(SPARC)”后,更多的研究注意到了平流层和对流层之间的相互作用,但是,目前关于这种耦合作用的机制并不十分清楚,普遍的观点认为这一作用是与准定常行星波的传播变化相联系的^[13~17]。

此外,研究还表明行星波在平流层对臭氧有重要的输运作用^[18~21],然而,目前有关行星波分布的观测资料分析还是基于 Van Loon 等早期的工作^[22],而对行星波的模拟工作多是理想情况下的简单模拟。大气环流模式(AGCM)能够比较好地模拟天气尺度的罗斯贝波是我们成功进行天气预报的保证,同样,AGCM 对行星波的模拟能力是我们进行短期气候预测的基础。近年来,大气资料的质量和时空范围均有长足的发展,但是关于行星波冬季气候态分布的研究,特别是基于实际资料的研究非常缺乏,还几乎未见同时利用 AGCM 对行星波的模拟研究。而且在研究行星波的变化之前,有必要首先搞清楚行星波的基本分布特征。因此,本文将分别利用 NCEP/NCAR 的再分析资料和大气环流模式输出资料,对北半球冬季准定常行星波的气候态分布特征进行分析和模拟。

2 资料及分析方法

本文利用的资料是 NCEP/NCAR 全球再分析资料^[23]。由于在 1958 年以前,100 hPa 以上的高层缺乏足够的观测,因而 1958 年以前的平流层再分析资料并不可靠^[24],所以,本文利用的是 NCEP/NCAR 从 1958~1998 年共 41 年的月平均等压面网格资料,垂直方向从 1000 hPa 到 10 hPa 共 17 层,水平网格距为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$,包含四个要素:风的纬向分量 u (单位: m/s)、经向分量 v (单位: m/s),温度 T (单位: $^\circ\text{C}$),位势高度 H (单位: gpm)。

数值模拟部分使用日本东京大学气候系统研究中心(CCSR)和日本国立环境研究所(NIES)发展的全球大气环流模式(CCSR/NIES AGCM Ver. 5. 6)。模式在水平方向采用三角截断到 42 波,垂直为 21 层(T42L21)。模式上边界为 1 hPa,在本文中 NCEP 再分析资料对比时只取到 10 hPa。关于模式的详细介绍参阅文献^[25]。在本文中,利用气候平均的海表面温度作为初始强迫场,进行控制实验,从静止等温状态开始积分 42 年,去掉第 1 年,将后 41 年的结果用于分析。

对位势高度场作纬向谐波分析,可以得到相应纬向平均场和任意波数的扰动振幅以及位相分布:

$$H_m = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(nm\Delta\lambda) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(nm\Delta\lambda),$$

$$m = 1, \dots, M, \quad (1)$$

其中, M 为该纬圈上的网格点数,网格距 $\Delta\lambda = 2\pi/M$,

$$a_0 = \frac{1}{2\pi} \sum_{m=1}^M H_m \Delta\lambda = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M H_m, \quad (2)$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \sum_{m=1}^M H_m \cos(nm\Delta\lambda) \Delta\lambda =$$

$$\frac{2}{M} \sum_{m=1}^M H_m \cos(nm\Delta\lambda), \quad (3)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \sum_{m=1}^M H_m \sin(nm\Delta\lambda) \Delta\lambda =$$

$$\frac{2}{M} \sum_{m=1}^M H_m \sin(nm\Delta\lambda). \quad (4)$$

这样,就可以求出各波数的振幅值:

$$C_n = (a_n^2 + b_n^2)^{\frac{1}{2}}. \quad (5)$$

根据 a_n, b_n 的符号及它们的比值,可以求出各波数的位相 α_n 。

本文中取纬向波数 1~3 来表征准定常行星波的活动。而准定常行星波在经圈平面上的传播可以用 Eliassen-Palm 通量(EP 通量)矢量 $\mathbf{F}$ 来描述。在球面对数压力坐标下,准地转变化下 $\mathbf{F}$ 的表达式^[26]为

$$\mathbf{F} = \left(-\rho_0 a \cos\phi \overline{v' u'}, \rho_0 a \cos\phi f \frac{\overline{v' \theta'}}{\theta_p} \right), \quad (6)$$

其中, ρ_0 为空气密度, θ_p 为参考位温对气压 p 的导数, a 为地球半径, ϕ 为纬度, f 为科里奥利参数, u', v' 和 θ' 为准定常行星波引起的风场和温度场的对应扰动量。

$$\nabla \cdot \mathbf{F} = \frac{1}{a \cos\phi} \frac{\partial}{\partial \phi} (F^{(\phi)} \cos\phi) + \frac{\partial F^{(z)}}{\partial z}, \quad (7)$$

其中, $F^{(\phi)}$ 和 $F^{(z)}$ 分别为 $\mathbf{F}$ 在经圈和垂直方向的分量[参见(1)式]。因此,平均纬向风速 $\bar{u}$ 的变换欧拉平均方程取如下形式:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} - f \bar{v}^* - \bar{X} = \frac{1}{\rho_0 a \cos\phi} \nabla \cdot \mathbf{F} = \mathbf{D} \cdot \mathbf{F}, \quad (8)$$

其中, $\bar{v}^*$ 为剩余平均经向速度, $\bar{X}$ 为摩擦等其他强迫项的纬向平均分量, $\mathbf{D} \cdot \mathbf{F}$ 为 EP 通量的散度。

本文分别用 1 月和 7 月来表征冬季和夏季,观测资料和数值模拟部分都是以 40 年平均作为气候

平均场。

3 冬季准定常行星波的分布

首先,看纬向平均流场的分布情况(如图1所示)。再分析资料的结果表明(图1a),北半球冬季纬向平均风场的基本形势是:对流层存在极锋急流,平流层存在极夜急流,另外在赤道平流层有一个强度较小的东风环流。图1b给出 AGCM 模拟的

40 个冬季平均的纬向风场分布,可以看到模式对于风场的模拟是非常好的,整个形势与再分析结果完全一致,对于极锋急流,极夜急流以及热带平流层的东风环流都给出了很好的模拟,只是在强度上略有差别。模式对中低纬度对流层急流的模拟比再分析资料大,其最大值超过了 50 m/s;而对平流层的模拟则偏小,模拟的极夜急流最大值约为 25 m/s,而再分析资料则可超过 30 m/s。就纬向平均温度

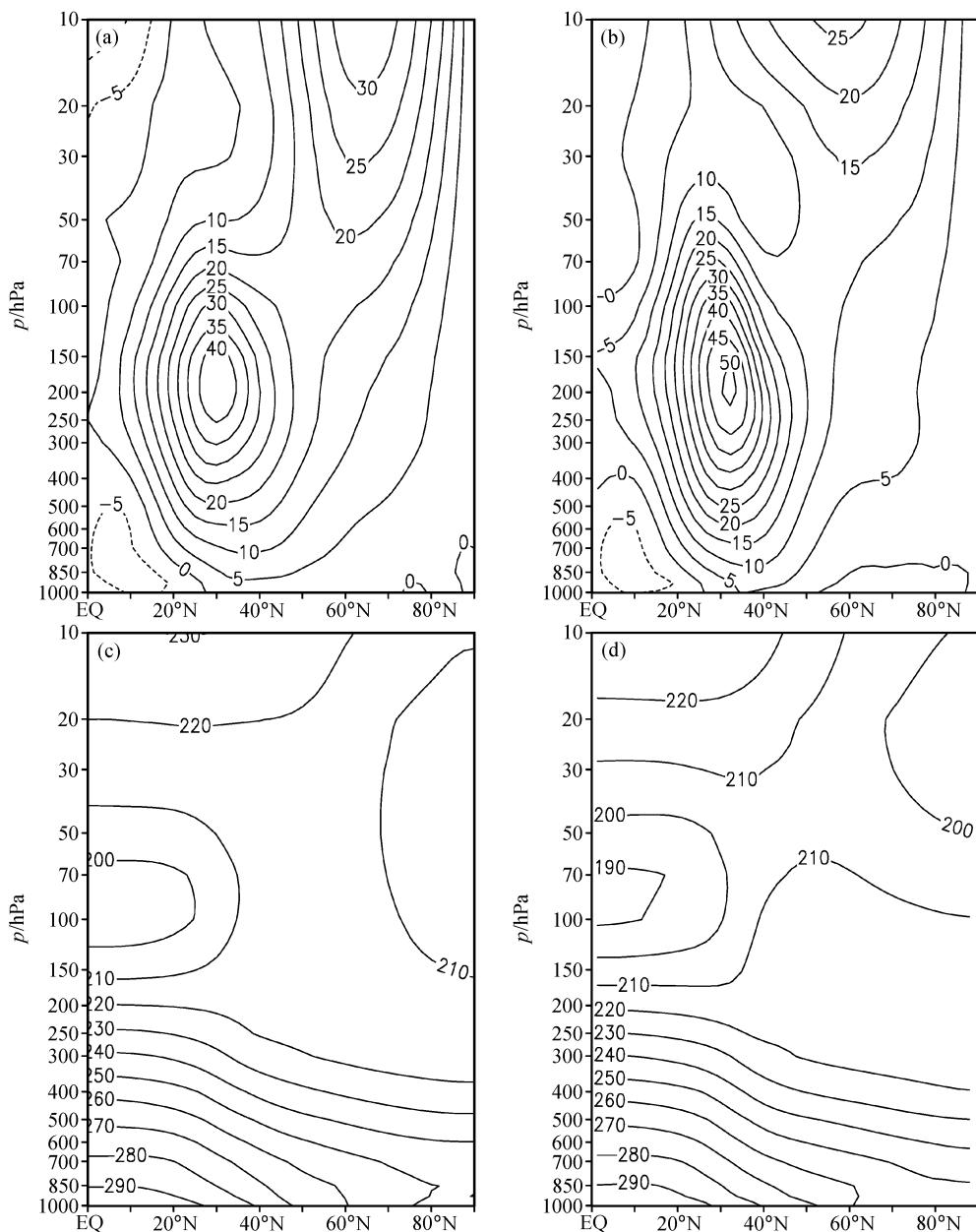


图1 北半球40年气候平均1月纬向平均风场(单位: m/s)和温度场(单位: K): (a) NCEP 风场; (b) 模拟风场; (c) NCEP 温度场; (d) 模拟温度场

Fig. 1 The climatological zonal-mean zonal wind (m) and temperature (K) in Jan in the Northern Hemisphere during the 40 years; (a) Wind in NCEP reanalysis; (b) wind in the model; (c) temperature in NCEP reanalysis; (d) temperature in the model

场(图 1c)而言, 水平方向上等温线随纬度倾斜, 温度向着极地降低, 在极区平流层有一个极小值区; 垂直方向上温度随高度递减, 在对流层顶附近达到最小。模式的模拟(图 1d)与观测也非常一致, 对两个低值中心都作出了很好的模拟, 具体数值略有差异, 模拟结果在平流层偏小大约为 5%, 对应了一

个偏冷的平流层。
以下, 我们将分别对再分析资料和模式模拟的冬季北半球准定常行星波的传播、振幅、位相作具体分析。

3.1 NCEP 再分析资料计算得到的准定常行星波
图 2 是由 NCEP/NCAR 再分析资料计算得到

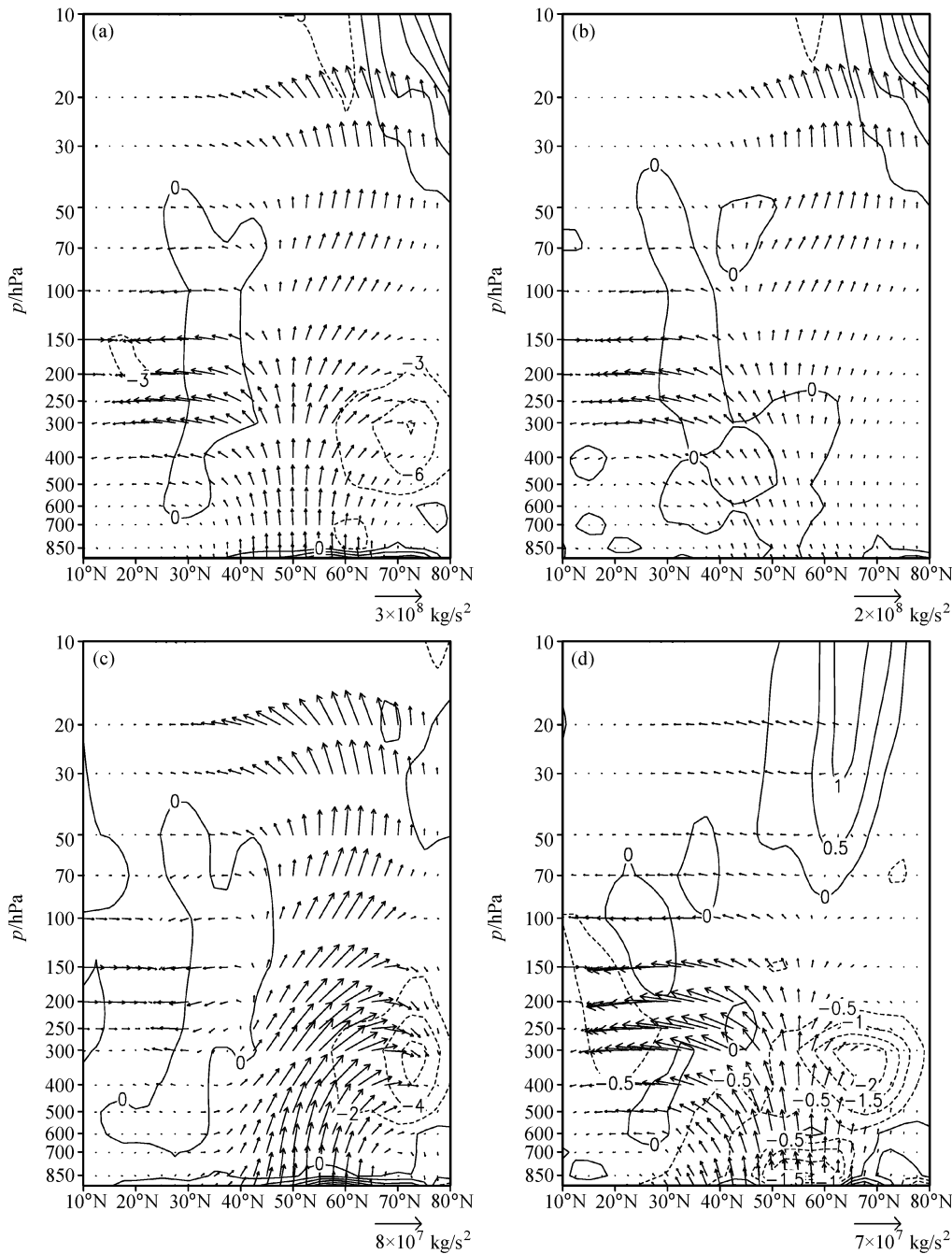


图 2 1959 年~1998 年 40 年平均北半球 1 月行星波 EP 通量(单位: kg/s^2)及其散度(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)的分布: (a) 波数 1~3 合成; (b) 波数 1; (c) 波数 2; (d) 波数 3
Fig. 2 The average EP flux (kg/s^2) and its divergence of planetary wave ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$) in Jan in the Northern Hemisphere during the 40 years from 1959 to 1998: (a) For the sum of zonal wavenumber 1 to 3; (b) for wavenumber 1; (c) for wavenumber 2; (d) for wavenumber 3

的气候平均北半球 1 月准定常行星波 EP 通量及其散度的分布。由图 2a(波数 1~3 的合成)可以清楚地看到,准定常行星波的传播在北半球冬季有两条路径。行星波从中纬度附近的对流层低层向上传播,并逐渐分成两支,其中一支折向赤道传播到低纬度对流层顶附近;另一支先折向高纬度地区并向上传播到平流层,然后再折向中低纬度。这与黄荣辉和岸保堪三郎^[7]所指出的两支波导是一致的,也是与纬向平均风场的分布相对应的。EP 通量散度场分布形势为高纬度对流层辐合,而在极区平流层是强的辐散,其南侧有较弱的辐合,此外,在低纬度对流层顶附近还有一个很弱的辐合区,以上辐合辐散形势是与行星波传播相一致的。具体到各波数来看,1 波(图 2b)对于整个行星波扰动贡献最大,也沿两支波导传播,其分布形势与 1~3 波合成的结果非常相似,但平流层略大,对流层略小,其散度场主要表现为高纬度平流层有强的辐散。可见,图 2a 中平流层的辐散形势基本来自 1 波。2 波(图 2c)基本上沿极地波导向上传播到平流层,然后折向中低纬度,向中低纬度对流层上层的传播非常弱,EP 通量在高纬度对流层有较大的辐合区。3 波(图 2d)则主要折向中低纬度,传播到对流层顶附近,向高纬度的传播非常弱,可见,3 波基本被限制在对流

层,对于平流层的行星波扰动贡献非常小;3 波在低纬度和高纬度对流层辐合,相对于 1 波和 2 波而言活动较弱。图 2a 中高纬度的辐合形势主要来自 2 波和 3 波贡献。

下面,对行星波各波数的振幅和位相分布情况进行分析,并且为了更清楚地看到位相的变化,还具体分析了几个主要等压面上的位相分布情况。1 波(图 3a)扰动振幅最大,扰动主要集中在中高纬度平流层,在高纬度平流层达到最大,约为 800 m,此外在对流层 45°N 附近有一个次大值,但平流层的扰动显然是最主要的。从位相的分布(图 4a)来看,在 1 波的主要活动区域,即中高纬度(50°N~70°N)平流层,位相随高度增加逐渐向西倾斜,水平方向上大致随纬度向西倾斜。2 波(图 3b)扰动主要集中在中高纬度,贯穿整个对流层和平流层,最大值位于 20 hPa、65°N 附近,约为 260 m,在对流层约 25°N 附近也有一个振幅的次大值。从位相分布(图 4b)来看,在 2 波的主要活动区域(50°N~70°N),100 hPa 以下随高度变化不明显,100 hPa 以上随高度增加向东倾斜,水平方向随纬度向西倾斜。3 波(图 3c)的扰动集中在对流层中下层,振幅明显小于 1 波和 2 波,在 300 hPa、50°N 附近达到最大,约为 120 m,在低纬度接近对流层顶附近有一个次大值,约为

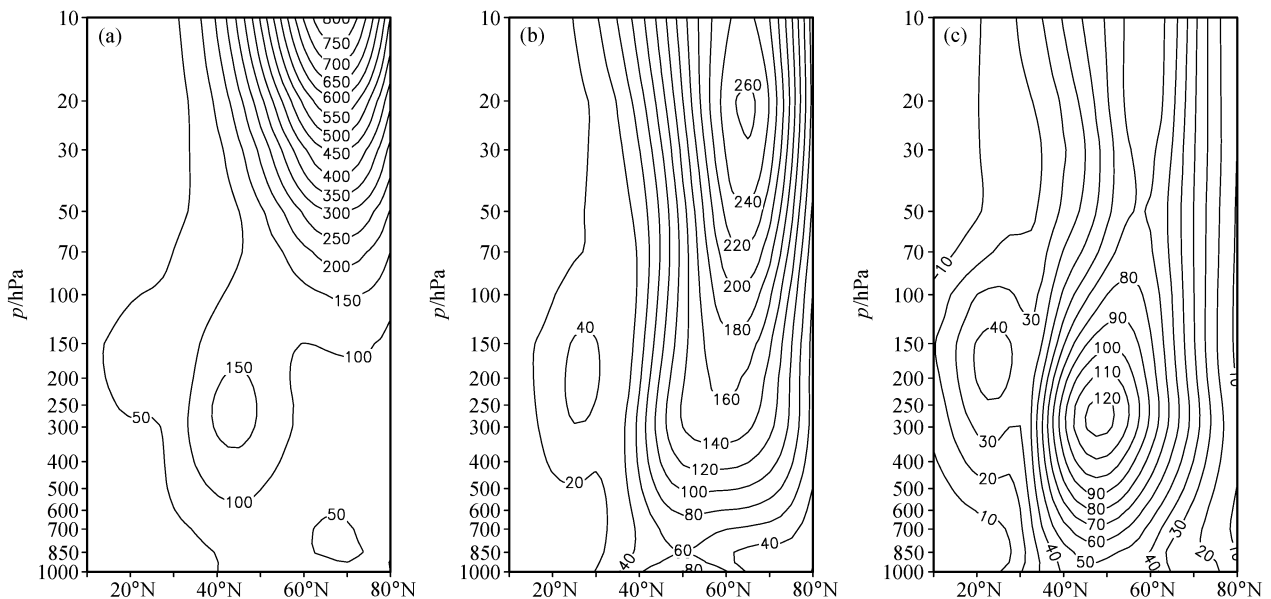


图 3 1959 年~1998 年 40 年平均北半球 1 月行星波振幅的分布 (单位: m): (a) 波数 1; (b) 波数 2; (c) 波数 3

Fig. 3 The average amplitudes (m) of planetary wave in Jan in the Northern Hemisphere during the 40 years from 1959 to 1998: (a) For wavenumber 1; (b) for wavenumber 2; (c) for wavenumber 3

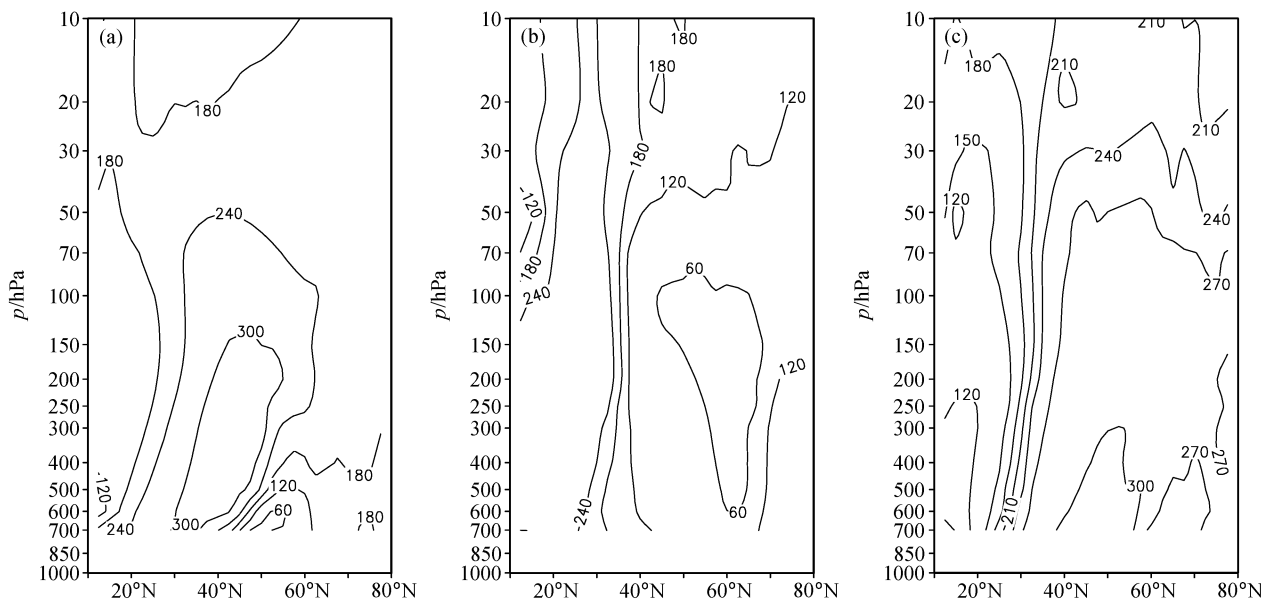


图 4 1959 年~1998 年 40 年平均北半球 1 月行星波位相的分布：(a) 波数 1；(b) 波数 2；(c) 波数 3

Fig. 4 The average phase of planetary wave in Jan in the Northern Hemisphere during the 40 years from 1959 to 1998: (a) For wavenumber 1; (b) for wavenumber 2; (c) for wavenumber 3

40 m 左右。波的位相(图 4c)在中纬度附近(40°N~60°N)随高度增加向西倾斜,水平方向上随纬度变化不大;而在低纬度(20°N~30°N)附近却表现为随高度变化不大,但随纬度向东倾斜。

3.2 模式模拟计算得到的准定常行星波

图 5 给出模式模拟 40 年平均的 1 月准定常行星波 EP 通量及其散度分布情况,由图可见,模式成功地模拟了冬季准定常行星波沿两支波导传播,EP 通量在极地平流层辐散,在高纬度对流层辐合,以及 1 波和 2 波可以上传到平流层,3 波活动限制在对流层这一基本形势,但在强度上略有不同。模拟结果与再分析结果的差异具体表现为,由 1~3 波合成的行星波沿着极地波导传播的一支波导明显偏小,尤其是在平流层,偏小 50% 左右,EP 通量在高纬度平流层的辐散强度也明显偏小。1 波在平流层强度较小,偏差最大处偏小大约 70%;2 波的两支波导形势比再分析结果更为明显,向低纬度对流层上层的传播清晰可见,沿极地波导的传播则偏弱一些;3 波的模拟稍差一些,可以看到中纬度产生的行星波向上传播,但是到了 300 hPa 以后形势显得比较散乱,沿另一支波导向低纬度对流层上层的传播也不太清晰。但是总的来看,模式对于准定常行星波气候态的模拟是比较理想的,对于强度上存在的偏差,

考虑到波的传播与纬向风的结构有密切关系,因而,我们推测这种偏差可能是由于模式对极地波导从对流层向平流层传播的路径中纬向风模拟不好,即对平流层下层 60°N~70°N 附近的纬向风的切变模拟比较差所导致。

从准定常行星波的振幅分布来看,模式对于 1 波、2 波、3 波的扰动中心、扰动强弱分布以及位相变化都作出了很好的模拟:1 波振幅(图 6a)最大,扰动集中在中高纬度平流层,在高纬度平流层达到最大,同时在中纬度对流层有一个扰动的次大值区;位相(图 7a)在中高纬度平流层,垂直方向随高度向西倾斜,水平方向随纬度略向西倾斜。2 波扰动(图 6b)以中高纬度为主,贯穿整个对流层和平流层,最大值位于高纬度平流层;位相(图 7b)在主要活动区域(40°N~65°N 附近),对流层随高度增加变化不大,在平流层随高度增加向东倾斜,水平方向随纬度增加向西倾斜。3 波扰动(图 6c)主要限制在对流层中下层,振幅较小,在 300 hPa、50°N 附近达到最大,位相(图 7c)在中纬度(40°N~50°N 附近)随高度增加向西倾斜。上述模拟的形势与再分析结果是完全一致的,但在数值大小上有所差异,模拟的 1 波最大值约 270 m,比再分析结果偏小 60% 左右;2 波最大振幅为 160 m,偏小约 40%,但在对流层振幅

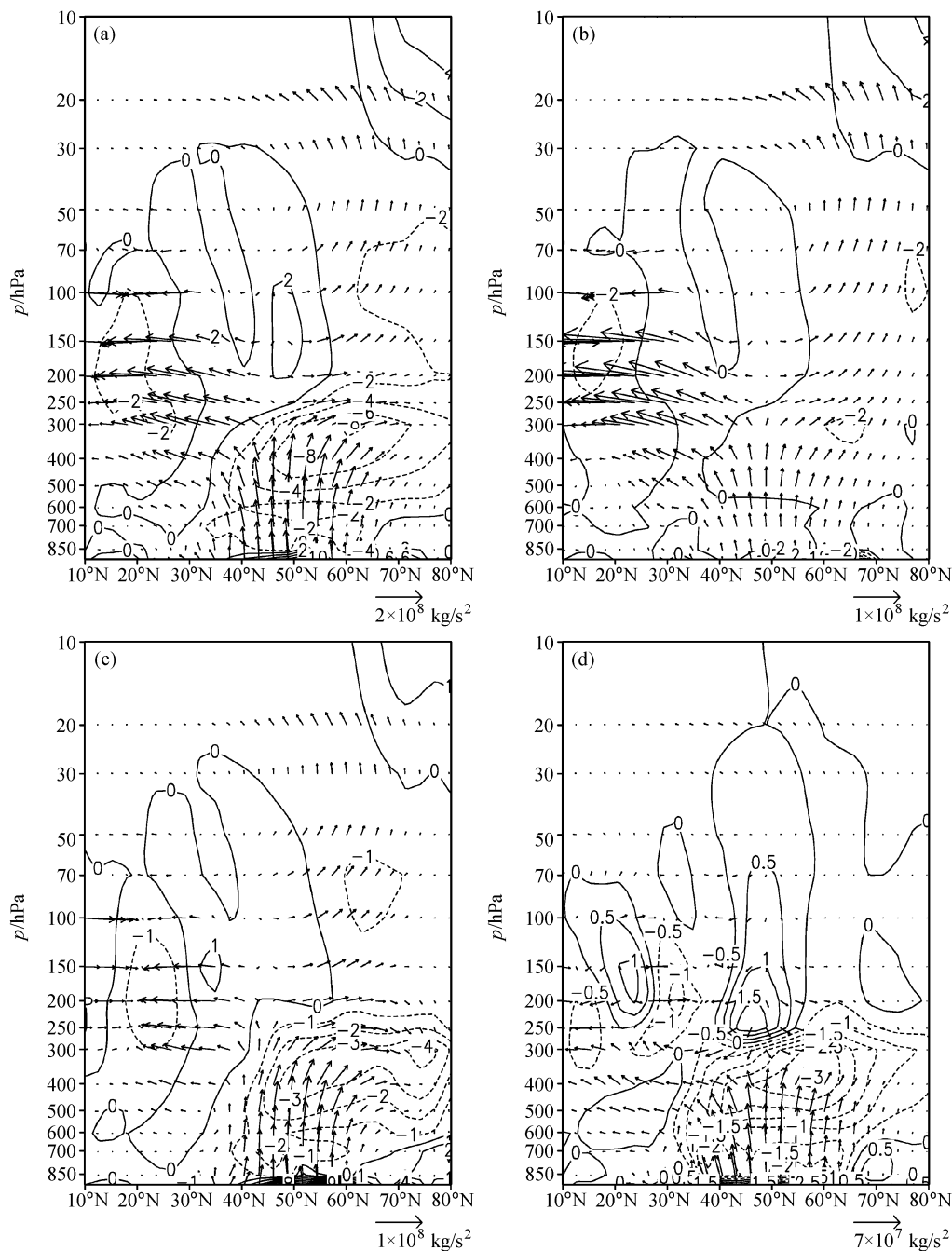


图 5 模式模拟 40 年平均的北半球 1 月行星波 EP 通量(单位: kg/s^2)及其散度(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)的分布: (a) 波数 1~3 合成; (b) 波数 1; (c) 波数 2; (d) 波数 3

Fig. 5 The average EP flux (kg/s^2) and its divergence of planetary wave ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$) in Jan in the Northern Hemisphere during the 40 years in the model: (a) For the sum of zonal wavenumber 1 to 3; (b) for wavenumber 1; (c) for wavenumber 2; (d) for wavenumber 3

略有偏大; 3 波振幅大小与再分析结果非常接近, 但位相变化略有不同, 有随纬度向西倾斜的趋势。

由以上分析可以看到, 就气候平均态而言, 模式成功地模拟出了北半球冬季大气环流的基本形

势, 但在具体数值上有所差异。模式对于中高纬度对流层的模拟最好, 基本形势和数值大小都与再分析资料结果几乎相同, 但过于强调了低纬度对流层的活动, 数值偏大。模式对于平流层的基本形势也能给出很好的模拟, 但在强度上有所削弱, 平均来

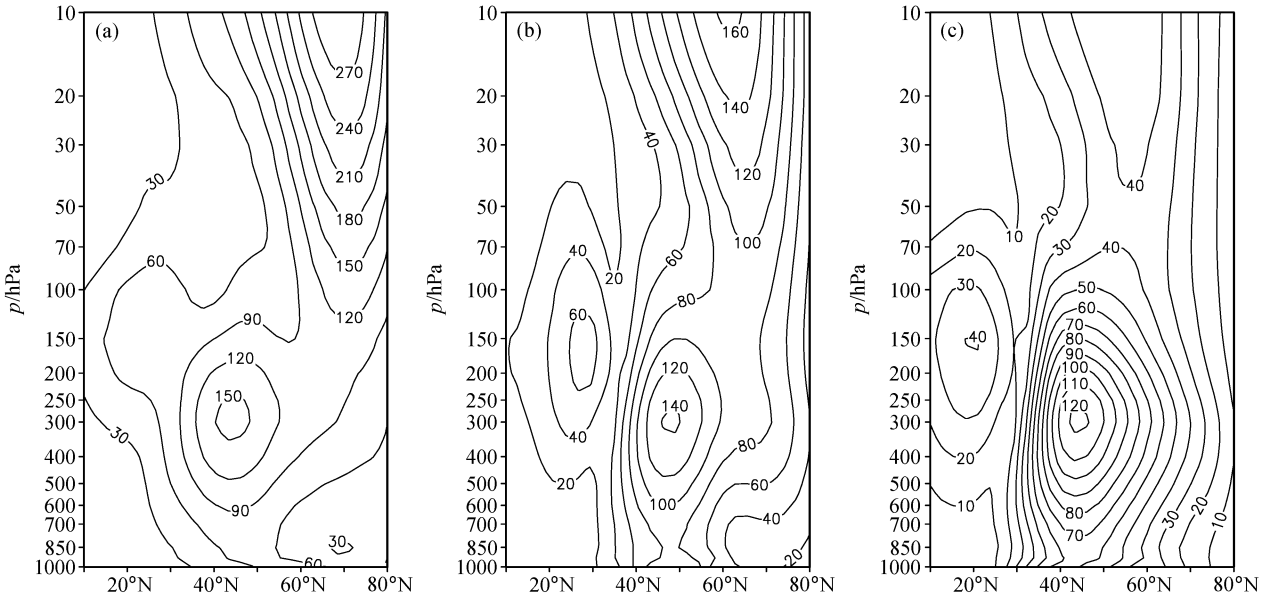


图 6 模式模拟 40 年平均的北半球 1 月行星波振幅分布 (单位: m): (a) 波数 1; (b) 波数 2; (c) 波数 3
Fig. 6 The average amplitudes (m) of planetary wave in Jan in the Northern Hemisphere during the 40 years in the Model: (a) For wave-number 1; (b) for wavenumber 2; (c) for wavenumber 3

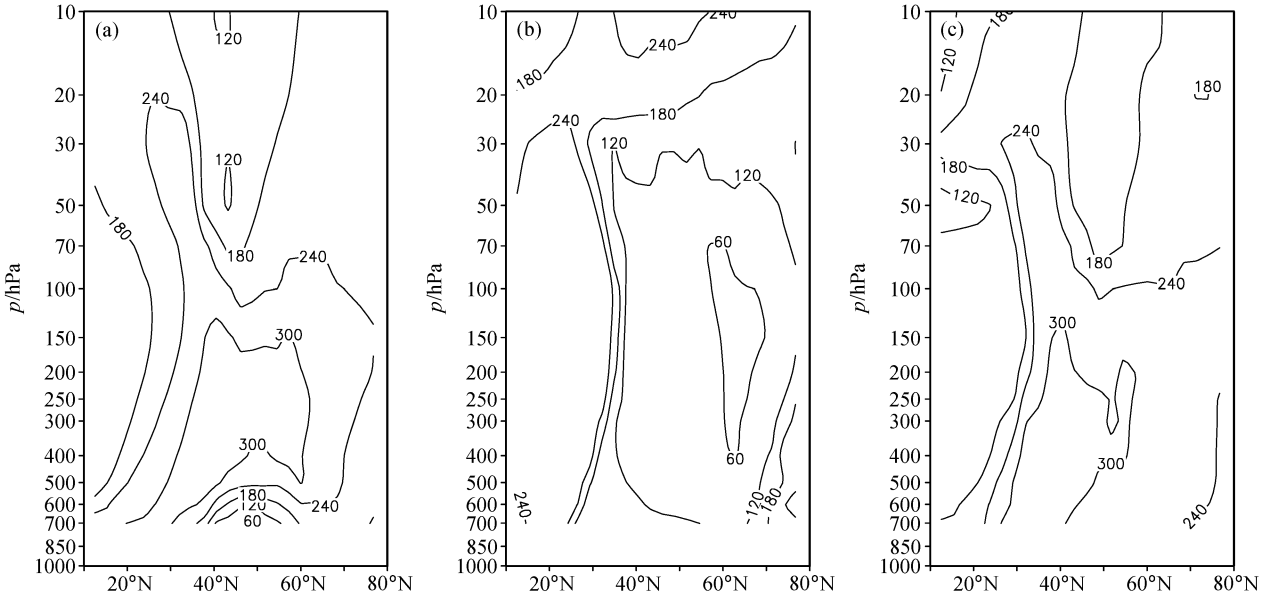


图 7 模式模拟 40 年平均的北半球 1 月行星波位相分布: (a) 波数 1; (b) 波数 2; (c) 波数 3
Fig. 7 The average phase of planetary wave in Jan in the Northern Hemisphere during the 40 years in the model(m): (a) For wavenumber 1; (b) for wavenumber 2; (c) for wavenumber 3

看比再分析资料结果偏小 50%左右, 并且随着高度增加, 这种削弱更加明显。

4 夏季准定常行星波的分布

以下, 我们将对北半球夏季的行星波系统进行分析。首先考察纬向平均基本流场, 如图 8 所示,

夏季北半球纬向平均风场的基本形势为, 整个平流层均为东风环流, 并向下延伸到低纬度对流层, 而从中纬度一直到极地的对流层均为西风环流。模式的模拟结果与再分析资料的结果相比, 形势是完全相同的, 只是模拟的东风环流场数值略偏小。再来看纬向平均的温度场, 从水平方向上看, 在对流

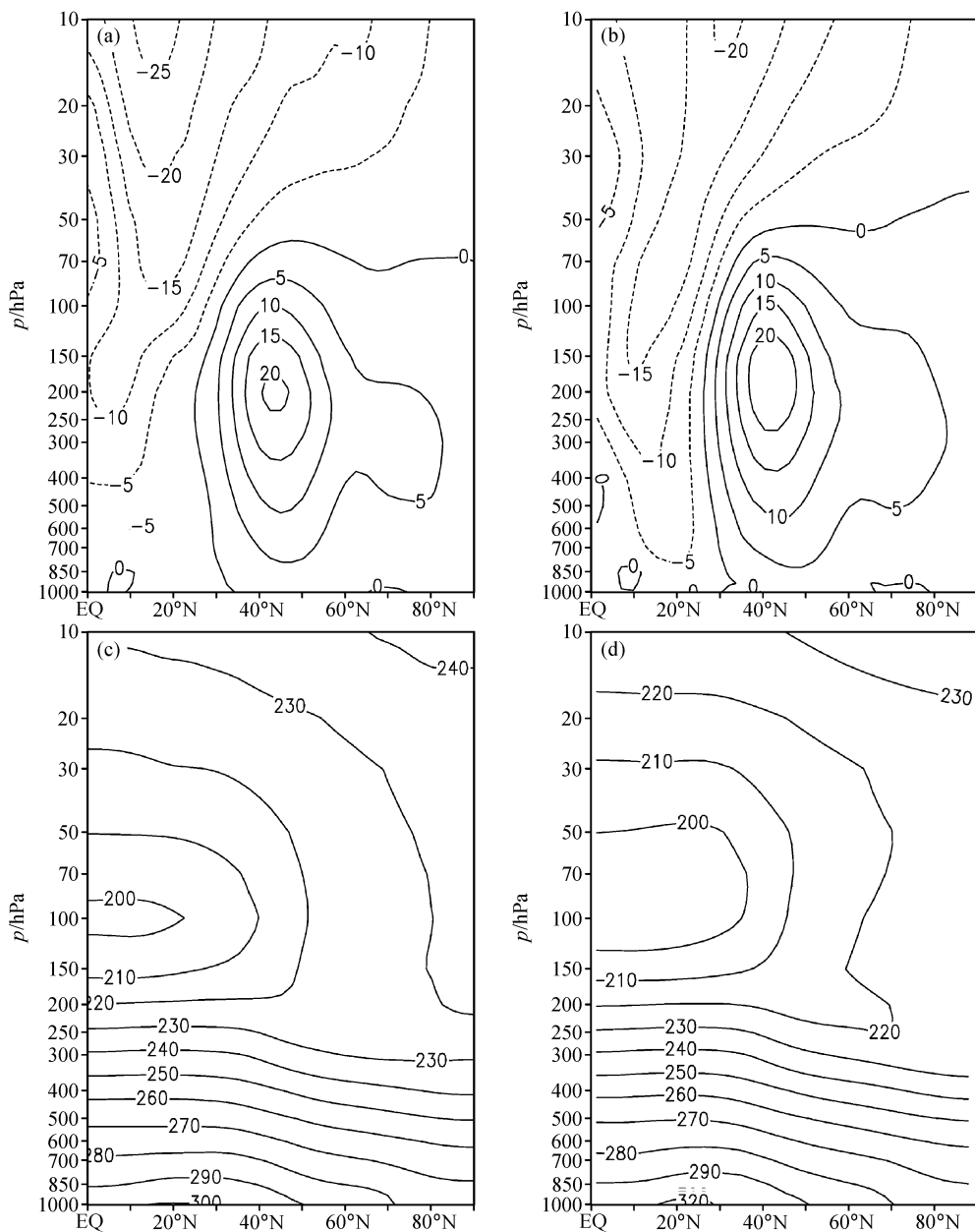


图 8 北半球 40 年气候平均 7 月纬向平均的风场 (单位: m/s) 和温度场 (单位: K): (a) NCEP 风场; (b) 模拟风场; (c) NCEP 温度场; (d) 模拟温度场

Fig. 8 The climatological zonal-mean zonal wind (m/s) and temperature (K) in Jul in the Northern Hemisphere during the 40 years: (a) Wind in NCEP reanalysis; (b) wind in the model; (c) temperature in NCEP reanalysis; (d) temperature in the model

层, 温度向着极地降低, 而在平流层, 则向着极地增加; 垂直方向上温度随着高度递减, 在赤道平流层顶附近达到最小。模式模拟的形势完全相同, 只是平流层温度稍偏小, 即对应一个略偏冷的平流层。

4.1 NCEP 再分析资料计算得到的准定常行星波

图 9 是 1959 年~1998 年 40 年平均的北半球 7

月准定常行星波 EP 通量及其散度的分布。如图 9a 所示, 夏季准定常行星波基本被限制在对流层, 强度远小于冬季, 其传播表现为非常明显地向低纬度的传播, 特别是在大约 40°N 的对流层上层, EP 通量的值比较大, 并且呈现出分为两支的趋势, 一支继续向上传播到热带对流层顶, 而另一支有很弱的折向上传播的趋势。EP 通量散度的分布是与行星

波传播相一致的,夏季平流层基本没有行星波的辐合辐散。在对流层低层基本上是辐散的,35°N 附近的对流层中上层辐散,更高一点的低纬度对流层辐合;高纬度对流层中层有一个弱的辐散区,而在极地附近是辐合的。具体分析各波数,可以发现 1

波(图 9b)形势与合成结果大致相似,就 1 波自身而言,到达对流层上层以后,折向下传播的趋势是比较清晰可见的,由此可知,夏季行星波的这种折向下传播主要来自 1 波的贡献。2 波(图 9c)的垂直上传则比较显著,垂直分量与水平分量基本相当,因

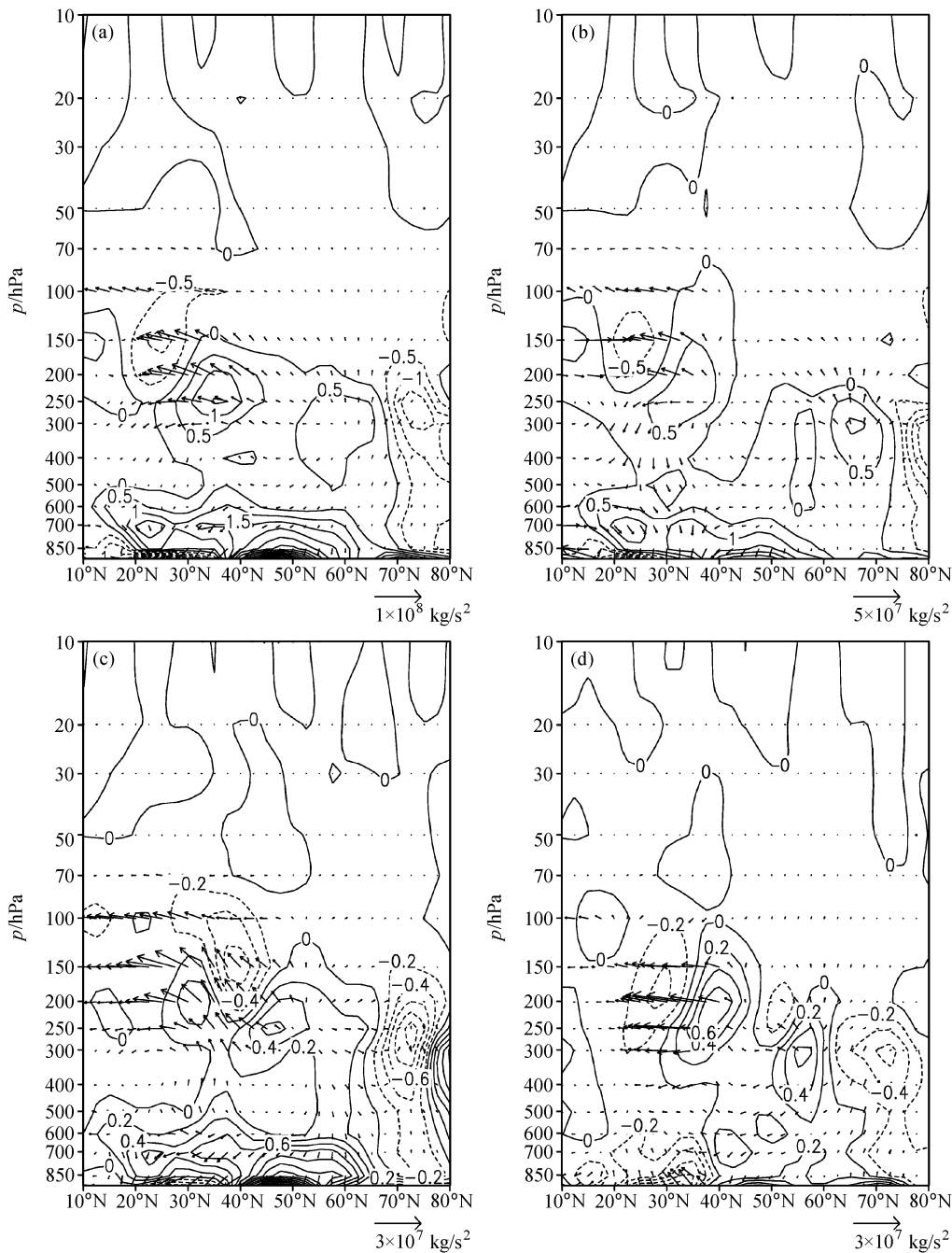


图 9 1959 年~1998 年 40 年平均北半球 7 月行星波 EP 通量(单位: kg/s^2) 及其散度(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$) 的分布: (a) 波数 1~3 的合成; (b) 波数 1; (c) 波数 2; (d) 波数 3

Fig. 9 The average EP flux (kg/s^2) and its divergence of planetary wave ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$) in Jul in the Northern Hemisphere during the 40 years from 1959 to 1998; (a) For the sum of wavenumber 1 to wavenumber 3; (b) for wavenumber 1; (c) for wavenumber 2; (d) for wave-number 3

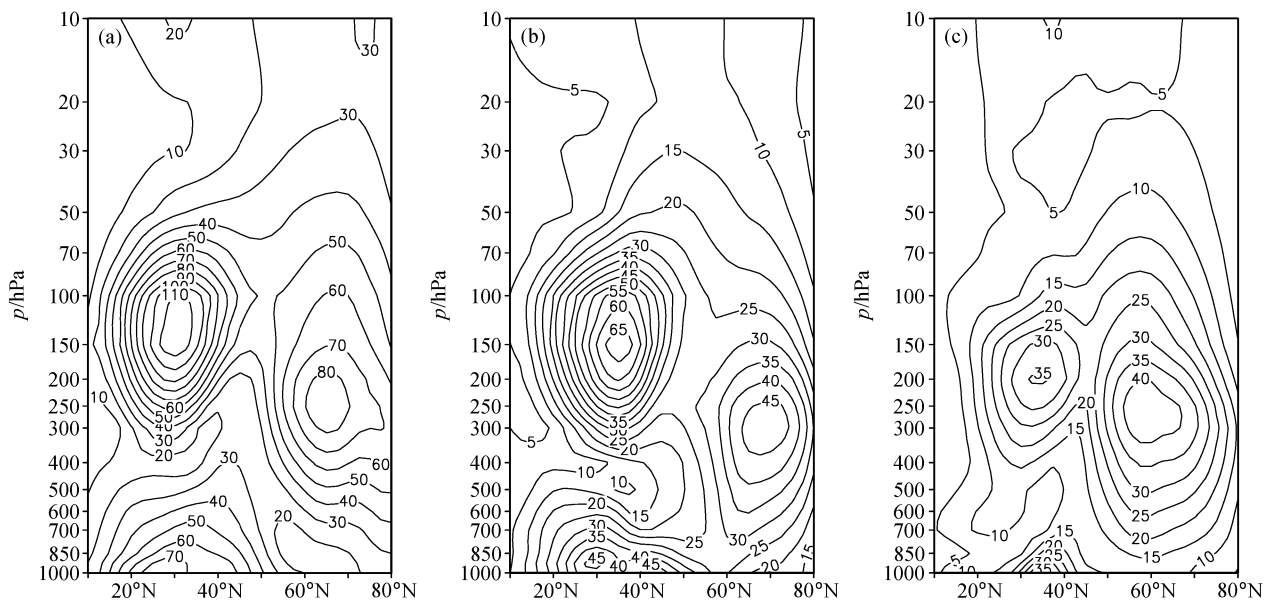


图 10 1959 年~1998 年 40 年平均北半球 7 月行星波振幅的分布 (单位: m): (a) 波数 1; (b) 波数 2; (c) 波数 3

Fig. 10 The average amplitudes (m) of planetary wave in Jul in the Northern Hemisphere during the 40 years from 1959 to 1998: (a) For wavenumber 1; (b) for wavenumber 2; (c) for wavenumber 3

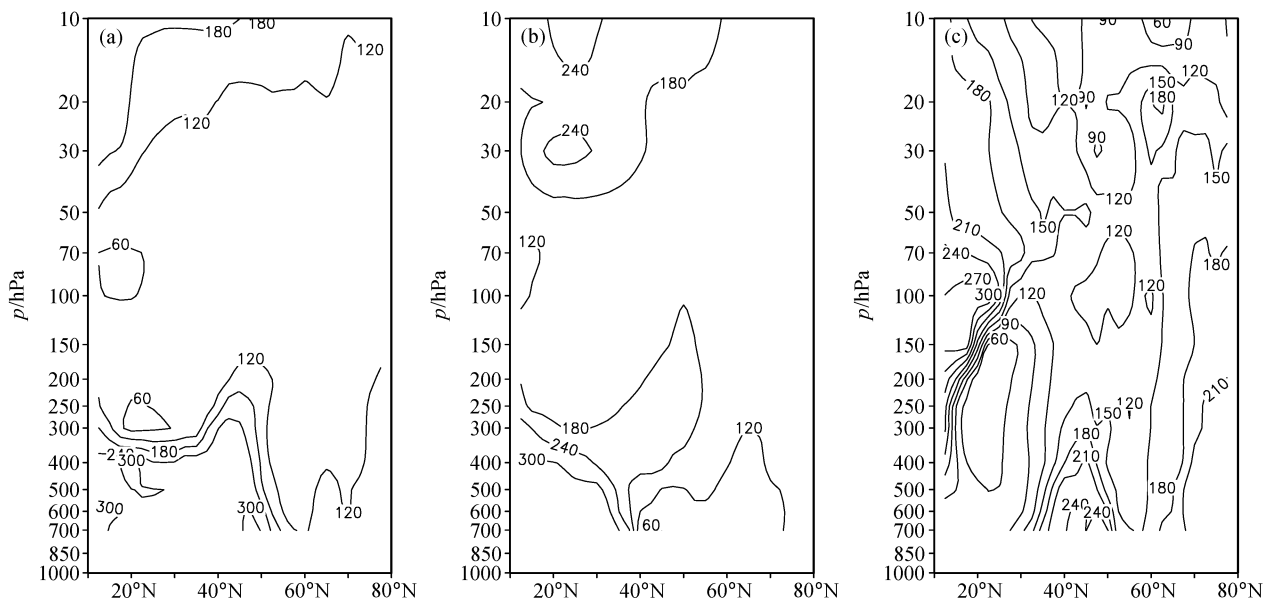


图 11 1959 年~1998 年 40 年平均北半球 7 月行星波位相的分布: (a) 波数 1; (b) 波数 2; (c) 波数 3

Fig. 11 The average phase of planetary wave in Jul in the Northern Hemisphere during the 40 years from 1959 to 1998: (a) For wavenumber 1; (b) for wavenumber 2; (c) for wavenumber 3

此, EP 通量散度在中低纬度对流层中上层有一个上下叠置的辐合、辐散形势, 上层辐合, 下层辐散。3 波(图 9d)则是基本沿水平路线向热带传播, 垂直传播很小; 其 EP 通量散度在中低纬度以大约 30°N 为中心, 呈现一个偶极子形势, 以南辐合, 以北辐散, 与 3 波的水平传播特征相对应。

下面来看各波数振幅和位相的分布特点。如图 10a 所示, 1 波扰动以对流层为主, 在低纬度和高纬度各有一个大值区, 在低纬度对流层上层达到最大, 约为 110 m; 其位相(图 11a)在扰动集中区域随高度增加向西倾斜, 随纬度变化不大。2 波的振幅(图 10b)分布与 1 波非常类似, 同样是在低纬度和

高纬度各有一个大值区，但振幅比 1 波小，最大值约为 65 m；2 波位相(图 11b)分布与 1 波比较相似，但在高纬度对流层随高度变化比 1 波明显，有随高度增加向东倾斜的趋势。3 波振幅分布(图 10c)同样也具有两个大值区，但与 1 波、2 波相反，最大值位于高纬度，约为 40 m；其位相(图 11c)在高纬

度(60°N 附近)对流层随高度、纬度增加向西倾斜；而在低纬度(30°N~40°N)对流层则随纬度增加向东倾斜，随高度增加向西倾斜。

4.2 模式模拟计算得到的准定常行星波

如图 12 所示，模式模拟得到的 7 月行星波 EP 通量及其散度的分布情况与再分析结果大致相同，波动

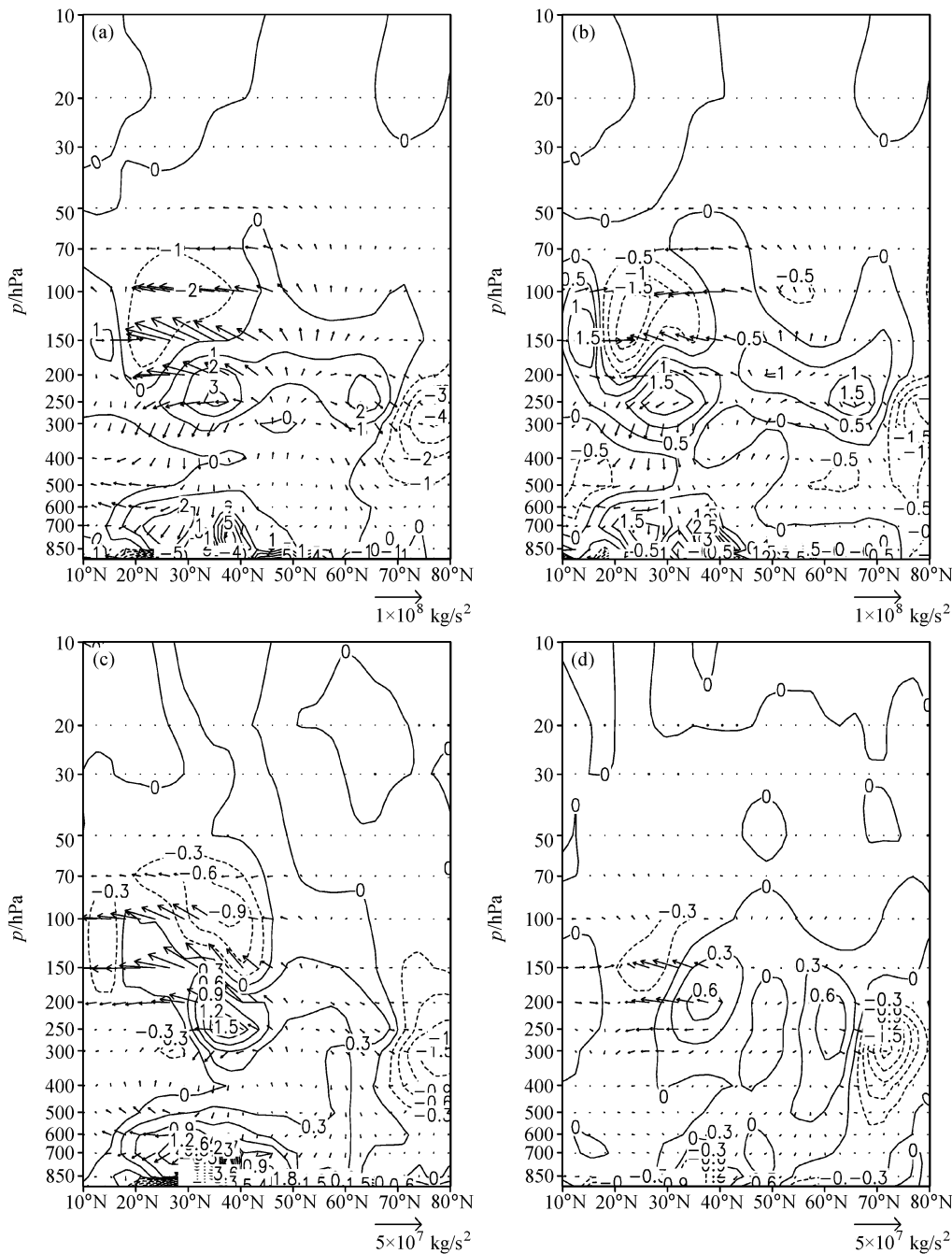


图 12 模式模拟 40 年平均的北半球 7 月行星波 EP 通量(单位: kg/s^2) 及其散度(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$) 的分布: (a) 波数 1~3 合成; (b) 波数 1; (c) 波数 2; (d) 波数 3

Fig. 12 The average EP flux (kg/s^2) and its divergence of planetary wave ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$) in Jul in the Northern Hemisphere during 40 years in the model; (a) For the sum of wavenumber 1 to wavenumber 3; (b) for wavenumber 1; (c) for wavenumber 2; (d) for wavenumber 3

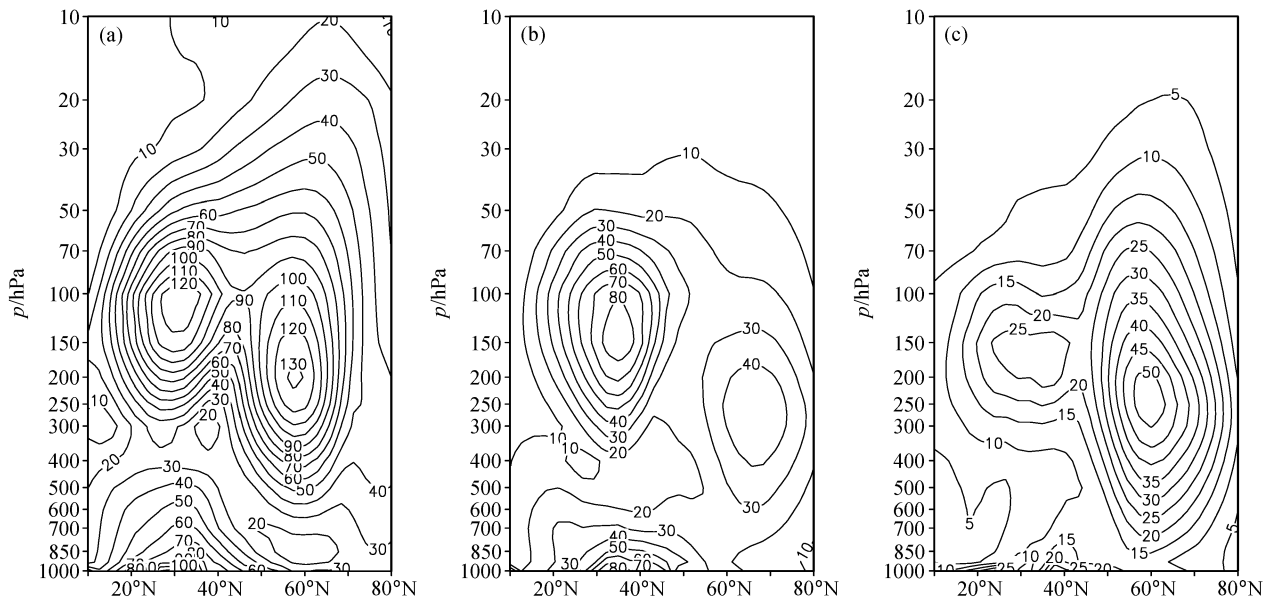


图 13 模式模拟 40 年平均的北半球 7 月行星波振幅的分布 (单位: m): (a) 波数 1; (b) 波数 2; (c) 波数 3

Fig. 13 The average amplitudes (m) of planetary wave in Jul in the Northern Hemisphere during the 40 years in the model: (a) For wave-number 1; (b) for wavenumber 2; (c) for wavenumber 3

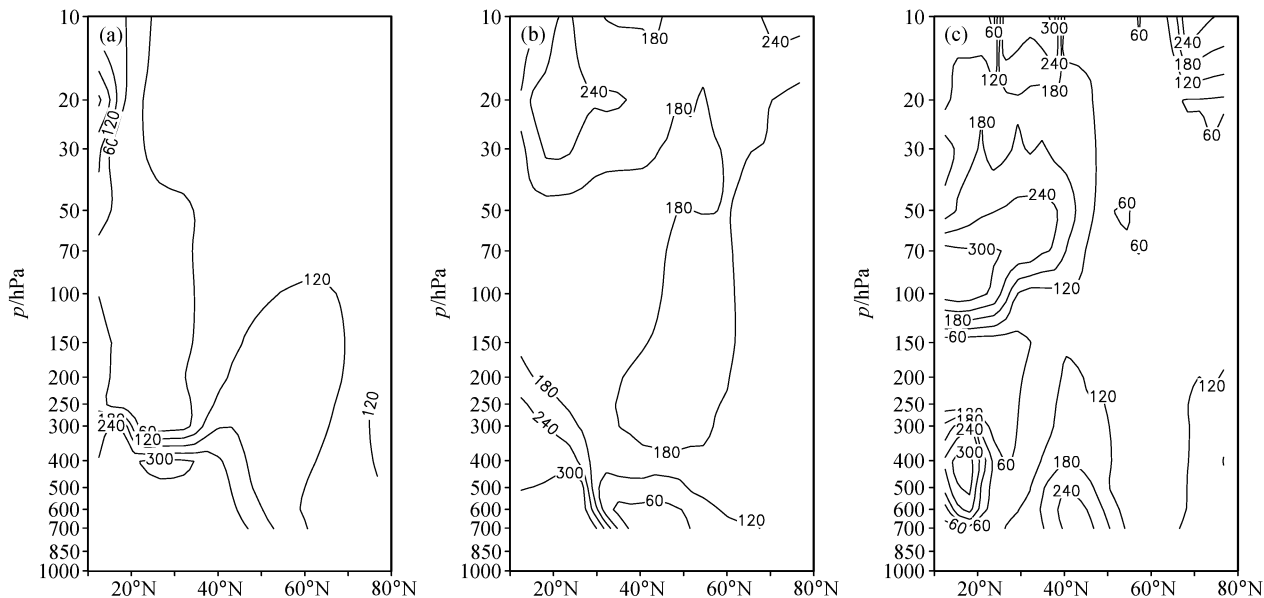


图 14 模式模拟 40 年平均的北半球 7 月行星波位相的分布: (a) 波数 1; (b) 波数 2; (c) 波数 3

Fig. 14 The average phase of planetary wave in Jul in the Northern Hemisphere during the 40 years in the model: (a) For wavenumber 1; (b) for wavenumber 2; (c) for wavenumber 3

基本限制在平流层,波沿两支路径传播,以向中低纬度对流层上层的传播为主,而向高纬度的传播较弱。但在具体数值上,模式结果较再分析结果偏大。

从振幅(图 13)和位相(图 14)来看,模式对 1 波振幅的模拟在低纬度大致与再分析结果相同,但在中高纬度偏大,使得振幅的最大值由低纬度移到

了高纬度,约为 130 m,偏大 50%左右;位相变化情况也大致相似,只是在高层的变化更加明显。模拟的 2 波振幅形势相同,在中低纬对流层偏大,而在平流层偏小;位相变化情况也大致相同,低层随纬度变化的起伏更大一些。3 波振幅形势也与再分析结果相似,数值略有偏差,平流层部分模拟偏

小; 位相变化同样比较散乱, 随高度随纬度变化都有比较大的起伏, 特别是在中低纬度, 但从大致形势上来看与再分析资料的结果还是比较相近的。

可以看到, 模式对于夏季基本流场和行星波的模拟是比较准确的, 在基本形势上几乎完全相同, 具体数值上虽有差异, 但幅度不大, 与冬季相比效果要好, 原因可能是因为夏季行星波活动集中在对流层, 平流层扰动很小, 差别也就不明显, 这也再次说明模式对于对流层的模拟情况更为理想。

5 结论

本文主要利用 NCEP/NCAR 再分析资料 and 大气环流模式(CCSR/NIES AGCM Ver. 5. 6), 对北半球准定常行星波的气候态分布情况进行了分析和模拟。NCEP/NCAR 再分析资料的诊断分析表明北半球准定常行星波的基本分布特征为: 冬季, 行星波沿两支波导向上传播, 其中一支在对流层上层转向中低纬度传播, 另外一支折向高纬度, 并通过极地波导上传到平流层, 在平流层扰动最大。对纬向波数 1 波、2 波和 3 波的分析发现, 1 波和 2 波可以向上传播到平流层, 3 波则主要限制在对流层, 这些分析结果与以前观测、理论和模拟的结果是一致的。具体来看, 1 波扰动集中在中高纬度平流层, 在高纬度平流层达到最大, 约为 800 m; 2 波扰动集中在高纬度, 贯穿对流层和平流层, 在高纬度平流层达到最大, 约为 260 m; 3 波扰动集中于对流层中下层, 在中纬度对流层上层达到最大值 120 m。本文给出的准定常行星波气候态分布可以为大气环流模式对大气环流模拟的评估提供重要的参考。夏季, 整个平流层为东风环流, 极地波导不存在, 行星波不能上传到平流层, 在对流层的活动也较小, 因而可以推测夏季准定常行星波对平流层-对流层系统的耦合作用影响是比较小的。

利用 CCSR/NIES AGCM Ver. 5. 6 对北半球大气环流和准定常行星波的 40 年模拟结果表明, 模式可以较好地模拟北半球冬季准定常行星波沿两支波导传播, 1 波和 2 波可以上传到平流层, 而 3 波主要限制在对流层, 以及 EP 通量散度在高纬度平流层辐散而在高纬度对流层辐合这一基本形势, 但模拟的北半球冬季沿极地波导向平流层的传播明显偏弱, 其结果对 1 波、2 波而言, 高纬度平流层中上层的振幅最大值明显小于再分析资料的数值,

偏小 50% 左右。这种差异很可能是大气环流模式共有的缺陷。最近的研究发现北半球冬季准定常行星波传播的两支波导之间存在密切的关系^[27, 28], 而平流层大气环流的变化可以对对流层产生重要的影响^[29], 因此, 我们在利用大气环流模式研究气候变化时不仅要注意对流层的情形, 还要重视平流层, 特别是准定常行星波的模拟偏差可能对模拟结果的影响。

从本文的分析中可以看到, 冬季准定常行星波对对流层-平流层系统的耦合作用具有显著的影响, 而在夏季这种影响很弱, 因此在进一步分析对流层-平流层耦合系统中准定常行星波的年际变化时, 可以侧重于冬季的行星波活动。

参考文献 (References)

- [1] Rossby C G. On the propagation of frequencies and energy in certain types of oceanic and atmospheric waves. *J. Atmos. Sci.*, 1945, **2**: 187~204
- [2] Yeh T C. On energy dispersion in the atmosphere. *J. Meteor.*, 1949, **6**: 1~16
- [3] 叶笃正, 曾庆存, 郭裕福. 当代气候研究. 北京: 气象出版社, 1991. 353pp
Ye Duzheng, Zeng Qingcun, Guo Yufu. *Current Research on Climatology* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1991. 353pp
- [4] Eliassen A, Palm E. On the transfer of energy in stationary mountain waves. *Geofysiske Publikasjoner*, 1961, **22**: 1~23
- [5] Andrews D G, McIntyre M E. Planetary waves in horizontal and vertical shear; the generalized Eliassen-Palm relation and the mean zonal acceleration. *J. Atmos. Sci.*, 1976, **33**: 2031~2048
- [6] 黄荣辉. 球面大气定常行星波的波作用守恒方程与用波作用通量所表征的定常行星波传播波导. 中国科学(B辑), 1984, **8**: 766~775
Huang Ronghui. The equation of wave action conservation and the stationary planetary waveguide expressed by wave action flux in the spherical Hemisphere. *Science in China (Series B)* (in Chinese), 1984, **8**: 766~775
- [7] 黄荣辉, 岸保勘三郎. 关于冬季北半球定常行星波传播另一支波导的研究. 中国科学(B辑), 1983, **10**: 940~950
Huang Ronghui, Gambo. The study about another waveguide of stationary planetary wave propagation in the Northern Hemisphere winter. *Science in China (Series B)* (in Chinese), 1983, **10**: 940~950
- [8] 黄荣辉, 邹捍. 球面斜压大气中上传行星波与纬向平均气流的相互作用. 大气科学, 1989, **13**: 383~392
Huang Ronghui, Zou Han. Interaction between upward

- propagating planetary waves and zonal mean flow in a spherical baroclinic atmosphere. *Chinese J. Atmos. Sci. (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1989, **13**: 383~392
- [9] Hines C O. A possible mechanism for the production of sun-weather correlations. *J. Atmos. Sci.*, 1974, **31**: 589~591
- [10] Geller M A, Alpert J C. Planetary wave coupling between the troposphere and the middle atmosphere as a possible sun-weather mechanism. *J. Atmos. Sci.*, 1980, **37**: 1197~1215
- [11] Schmitz G, Grieger N. Model calculations on the structure of planetary waves in the upper troposphere and lower stratosphere as a function of the wind field in the upper stratosphere. *Tellus*, 1980, **32**: 207~214
- [12] Chen Wen, Huang Ronghui. The propagation and transport effect of planetary waves in the Northern Hemisphere winter. *Adv. Atmos. Sci.*, 2002, **19**: 1113~1126
- [13] Kuroda Y, Kodera K. Role of planetary waves in the stratosphere-troposphere coupled variability in the Northern Hemisphere winter. *Geophys. Res. Lett.*, 1999, **26**: 2375~2378
- [14] Dunkerton T J. Midwinter deceleration of the subtropical mesospheric jet and interannual variability of the high-latitude flow in UKMO analyses. *J. Atmos. Sci.*, 2000, **57**: 3838~3855
- [15] Perlwitz J, Graf H-F. Troposphere-stratosphere dynamic coupling under strong and weak polar vortex conditions. *Geophys. Res. Lett.*, 2001, **28**: 271~274
- [16] Christiansen B. Downward propagation of zonal mean zonal wind anomalies from the stratosphere to the troposphere; Model and reanalysis. *J. Geophys. Res.*, 2001, **106**: 27307~27322
- [17] Perlwitz J, Harnik N. Observational evidence of a stratospheric influence on the troposphere by planetary wave reflection. *J. Climate*, 2003, **16**: 3011~3026
- [18] 陈文, 黄荣辉. 准定常行星波对大气中臭氧输运的动力作用. *大气科学*, 1995, **19**: 513~524
Chen Wen, Huang Ronghui. The dynamics of planetary wave transport on ozone in the atmosphere. *Chinese J. Atmos. Sci. (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1995, **19**: 513~524
- [19] 陈文, 黄荣辉. 中层大气行星波在臭氧的季节和年际变化中输运作用的数值研究 I. 恒定流的情况. *大气科学*, 1996, **20**: 513~523
Chen Wen, Huang Ronghui. The numerical study of seasonal and interannual variabilities of ozone due to planetary wave transport in the middle atmosphere. Part I: The case of steady mean flows. *Chinese J. Atmos. Sci. (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1996, **20**: 513~523
- [20] 陈文, 黄荣辉. 中层大气行星波在臭氧的季节和年际变化中输运作用的数值研究 II. 波流相互作用的情况. *大气科学*, 1996, **20**: 703~712
Chen Wen, Huang Ronghui. A numerical study of seasonal and interannual variabilities of ozone due to planetary wave transport in the middle atmosphere. Part II: The case of wave-flow interaction. *Chinese J. Atmos. Sci. (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1996, **20**: 703~712
- [21] Fusco A C, Salby M L. Interannual variations of total ozone and their relationship to variations of planetary wave activity. *J. Climate*, 1999, **12**: 1619~1629
- [22] van Loon H, Jenne R L, Labitzke K. Zonal harmonic standing waves. *J. Geophys. Res.*, 1973, **78**: 4463~4471
- [23] Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1996, **77**: 437~471
- [24] Kistler R, Collins W, Suranjana S, et al. The NCEP/NCAR 50-year reanalysis: Monthly means CD-ROM and documentation. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2001, **82**: 247~267
- [25] Numaguti A, Takahashi M, Nakajima T, et al. Description of CCSR/NIES atmospheric circulation model. CGER's Supercomputer Monograph Report, Center for Global Environmental Research. National Institute for Environmental Studies, 1997, **3**: 1~48
- [26] Andrews D G, Holton J R, Leovy C B. *Middle Atmospheric Dynamics*. New York: Academic Press, 1987. 489pp
- [27] Chen W, Takahashi M, Graf H-F. Interannual variations of stationary planetary wave activity in the northern winter troposphere and stratosphere and their relations to NAM and SST. *J. Geophys. Res.*, 2003, **108**(D24), 4797, doi: 10.1029/2003JD003834
- [28] 陈文, 黄荣辉. 北半球冬季准定常行星波的三维传播及其年际变化. *大气科学*, 2005, **29**: 137~146
Chen Wen, Huang Ronghui. The three-dimensional propagation of quasi-stationary planetary waves in the Northern Hemisphere winter and its interannual variations. *Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 2005, **29**: 137~146
- [29] Black R X. Stratospheric forcing of surface climate in the Arctic Oscillation. *J. Climate*, 2002, **15**: 268~277