

北半球冬季准定常行星波的三维传播及其年际变化

陈 文 黄荣辉

中国科学院大气物理研究所, 北京 100080

摘 要 作者回顾了应用叶笃正先生所创立的 Rossby 波频散理论, 来研究准定常行星波在三维大气的能量频散以及在北半球冬季三维大气中的传播规律, 并应用 NCEP/NCAR 再分析资料和由大气环流数值模拟所得的模式资料的 40 年风场、温度场资料计算了冬季北半球准定常行星波的 E-P 通量。计算结果表明了北半球冬季准定常行星波在三维大气传播具有沿两支波导的传播特征, 这与从理论分析所得的结果相吻合。作者还分析了冬季准定常行星波的 E-P 通量分布的年际变化, 分析结果表明了准定常行星波在北半球冬季三维大气中传播的这两支波导有明显的年际振荡; 并且, 从冬季准定常行星波的 E-P 通量辐散辐合的年际变化与北极涛动的年际变化相比较, 发现准定常行星波两支波导的年际振荡直接影响着北极涛动 (AO), 因而说明了准定常行星波活动的年际变化可以影响对流层的气候变化。

关键词 准定常行星波 波导 E-P 通量 年际变化 北极涛动

文章编号 1006-9895 (2005) 01-0137-10

中图分类号 P433

文献标识码 A

The Three-Dimensional Propagation of Quasi-Stationary Planetary Waves in the Northern Hemisphere Winter and Its Interannual Variations

CHEN Wen and HUANG Rong-Hui

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

Abstract A review is firstly given on the energy dispersion and the winter propagation of quasi-stationary planetary waves in global three-dimensional atmosphere, which were studied based on the energy dispersion of Rossby-waves formulated by Prof. Ye Duzheng. Then based on the NCEP/NCAR reanalysis data and the AGCM simulation data, the E-P flux of quasi-stationary planetary waves is calculated from 40 years winter wind and temperature data. The feature of E-P flux indicated that the quasi-stationary planetary waves propagate along two wave guides in the Northern Hemisphere winter. This is consistent with our theoretical analysis. The interannual variations of E-P flux are also studied for the quasi-stationary planetary waves, and the results present that the two wave guides for the quasi-stationary planetary waves evidently have interannual oscillation. Moreover, by comparing the interannual variations between the E-P flux divergence for the quasi-stationary planetary waves and the Arctic Oscillation, it is found that the oscillation of two wave guides for the quasi-stationary planetary waves has close influence on the Arctic Oscillation on the interannual timescale. Therefore, the interannual variations of quasi-stationary planetary wave activity can have an impact on the tropospheric climate variability.

Key words quasi-stationary planetary wave, wave guide, E-P flux, interannual variation, Arctic Oscillation

1 引言

自从 20 世纪 40 年代罗斯贝^[1]提出大气长波以

后, 叶笃正^[2]将群速度引入到大气扰动演变的研究中, 他详细地讨论了有刚盖的均匀不可压缩大气、自由表面的均匀不可压缩大气、有刚盖的均匀南北密度

梯度不可压缩大气和自由表面的均匀南北密度梯度均匀不可压缩大气等四种大气模型中扰动的相速度、群速度和波频率之间的关系,指出了大尺度扰动能量是以波的群速度而传播,并与它的频率密切相关,从而提出罗斯贝波能量频散理论。这个理论在天气预报和大尺度大气扰动动力学的研究中得到了广泛的应用,它不仅清楚地解释了大尺度扰动在纬向气流的上下游效应^[21],而且为现代大气环流二维和三维遥相关动力学奠定了坚实的理论基础,因此被认为是大气动力学最重要的经典理论之一。

20 世纪 60 年代以后,一些气象学家开始关注平流层波动的形成以及对流层扰动在垂直方向上的传播和能量频散。Charney 和 Drazin^[3]以及 Eliassen 和 Palm^[4]分别研究了准定常行星波在有垂直切变的理想基流下的垂直传播,而 Matsuno^[5,6]研究了非常接近于实际气流的理想气流下准定常行星波从对流层向平流层的传播,并提出平流层爆发性增温的机制。然而,所有这些研究都没有涉及到波动在经向上的传播与演变。Longuet-Higgins^[7]首先将叶笃正先生的频散理论推广到二维情形。但真正结合观测事实来研究准定常行星波在球面大气中的传播理论是从 20 世纪 80 年代初开始的。Wallace 和 Gutzler^[8]通过研究海平面气压场和 500 hPa 高度场,发现北半球大气环流的异常存在一些遥相关型,如太平洋北美型(PNA)和欧亚型(EU)遥相关。这些遥相关型表明大气环流在某一个地区的异常可以影响另一个地区的环流异常。Hoskins 和 Karoly^[9]的工作则将叶笃正先生建立的 Rossby 波在纬向上的能量频散理论推广到了二维球面大气中,从而从理论上很好地解释了大气环流遥相关的物理机制。自此以后,能量频散理论在大气环流变异的研究中得到了广泛应用。随着更多观测事实的揭露,人们越来越关注三维球面大气中大尺度扰动在非均匀基流上的传播及其与基本气流的相互作用。20 世纪 80 年代初, Huang 和 Gambo^[10-14]从波在非均匀缓变媒层的传播理论、观测事实和数值模拟,深入研究了准定常行星波在北半球冬、夏季的三维传播特征,他们把叶笃正先生所建立的 Rossby 波频散理论推广到冬、夏季球面三维大气中,并从理论、数值模拟和观测事实上提出准定常行星波在北半球冬季的传播存在两支波导,分别被称之为极地波导和低纬度波导。

准定常行星波的形成,主要是由大尺度地形的动力强迫作用和海陆分布所引起的纬向不均匀热力强迫作用所产生的。它的演变、传播和异常是大尺度大气

动力学,同时也是气候动力学中一个非常重要的科学问题。比如,由于天气尺度的波动多被限制在对流层,而行星波就成为平流层最主要的波动^[15],它对臭氧(O₃)的输运作用一直是平流层研究的中心课题之一。陈文和黄荣辉^[16]从拉格朗日平均环流的观点讨论了行星波对大气中 O₃ 的输运作用,他们的分析结果表明,定常保守的行星波对大气 O₃ 没有输运作用,而瞬变耗散的行星波对大气 O₃ 有明显的输运作用,并且,利用波一流耦合模式所模拟的结果表明:行星波传播和相应的对 O₃ 的输运作用都有明显的季节变化和年际变化^[17,18],而具有年际变化特征的热带纬向风的 QBO 不仅通过影响东、西风切变可以引起热带 O₃ 的年际变化,而且通过影响行星波的传播可以引起行星波对 O₃ 输运的年际变化^[19,20]。

近十几年来,尤其是从 1992 年起,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。特别是 Thompson 和 Wallace^[21,22]发现北极涛动(AO)后,一些与北极涛动相关的研究表明平流层环流的异常在一定条件下会向下传播影响到对流层大气^[23,24];并且,有些研究表明平流层对对流层的影响与准定常行星波的活动联系在一起^[25-27]。但是,目前关于这种影响的机理还不清楚。既然在冬季准定常行星波的垂直传播使得平流层与对流层从动力上耦合在一起,而上述的研究缺乏直接对准定常行星波活动的年际变化及其与 AO 振荡关联的物理过程进行分析。因此,本文将在系统回顾准定常行星波传播理论研究的基础上,利用 NCEP/NCAR 的 40 年再分析资料和全球大气环流模式(AGCM)模拟资料,分析研究北半球冬季准定常行星波活动的年际变化,并探讨准定常行星波活动的年际变化与对流层北极涛动的关系。

2 准定常行星波的三维传播

2.1 波的折射指数平方与准定常行星波传播波导

Gambo 和 Kudo^[28]发现冬季纬向高度异常在中纬度对流层低层和低纬度对流层高层之间有显著的三维相关后, Huang 和 Gambo^[10-14]应用波在缓变媒质中传播理论,系统地研究了对流层地形与定常热源强迫产生的准定常行星波在三维球面大气中的传播规律,指出波的传播路径变化遵从下列方程:

$$\frac{d_g \tilde{\alpha}}{dt} = \frac{1}{Q_k} \mathbf{i} \cdot \mathbf{C}_g' \times \nabla Q_0, \quad (1)$$

其中, $\tilde{\alpha}$ 为波在传播中的路径与水平方向所成的角,

d_g/dt 表示随群速度移动的随体微商， i 是 λ 方向的单位矢量， Q_k 是波数为 k 的准定常行星波的折射指数平方， Q_0 可以看成是波数为零的波的折射指数， C'_g 是群速度在经圈面上的投影。 Q_k 和 Q_0 分别为

$$Q_k = Q_0 - \frac{k^2}{\cos^2 \varphi}, \quad (2)$$

$$Q_0 = \left[\alpha \Omega_0 + \hat{\Omega} \right] - \frac{\partial^2 \hat{\Omega}}{\partial \varphi^2} + 3 \tan \varphi \frac{\partial \hat{\Omega}}{\partial \varphi} - l^2 \sin^2 \varphi \left(\frac{\partial^2 \hat{\Omega}}{\partial z^2} - \frac{1}{\tilde{H}_0} \frac{\partial \hat{\Omega}}{\partial z} \right) / \hat{\Omega} - l^2 \sin^2 \varphi \frac{1}{4\tilde{H}_0^2}, \quad (3)$$

并且， $l = 2\Omega_0 a/N$ ， Ω_0 是地球自转角速度， N 是伯朗特-维萨拉频率， $\hat{\Omega} = \bar{U}(a \cos \varphi)$ 是基本气流角速度， \tilde{H}_0 是大气的标高。方程 (1) 说明行星波传播路径的变化是由 Q_k 及与基本气流有关的 Q_0 梯度决定的，并且传播路径总是向着 Q_0 的梯度方向折射。

由大气基本气流的结构及公式 (1) 就可以确定波的传播规律。图 1 是由北半球冬季气候平均的纬向风并根据 (3) 式计算而得到的 Q_0 的分布，从图 1 可以看到在高纬度平流层上层有一个 Q_0 最小值的区域，并且在低纬度平流层下层也存在一个最小值的区域，而在高纬度和低纬度地区分别有 Q_0 值相对大的区域。这个分布可用一个简单示意图 (见图 2a) 表示，在图中极地是一刚壁，假设有一强迫源所产生的定常行星波向上传播时，波沿 Q_0 的梯度方向折射，即它要向高纬度 Q_0 大的区域折射，但它受极地刚壁

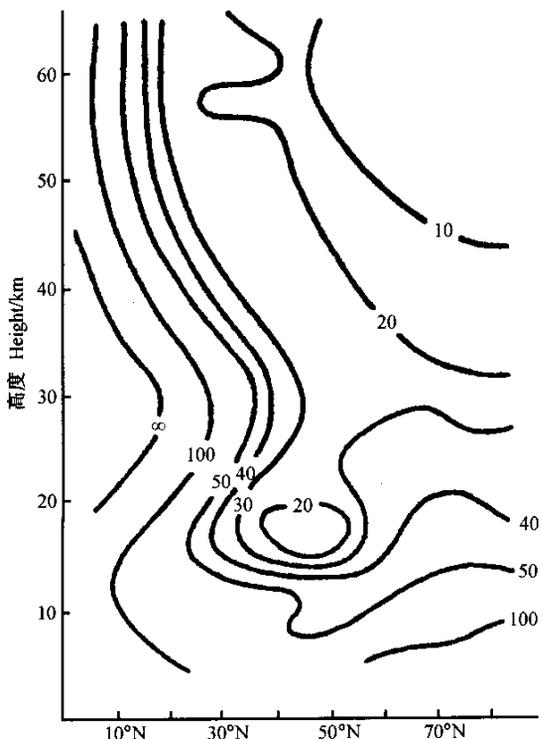


图 1 北半球冬季 Q_0 的分布

Fig. 1 The distribution of Q_0 in the Northern Hemisphere winter

的反射，这样波将会聚焦在高纬度地区而向平流层传播，因此，高纬度地区上空成为行星波向平流层传播的一个通道，当然，波传播到平流层时，它同样向 Q_0 大的方向折射，即波将向着赤道方向传播；另一方面，由于在中纬度平流层下层是一个 Q_0 最小值的

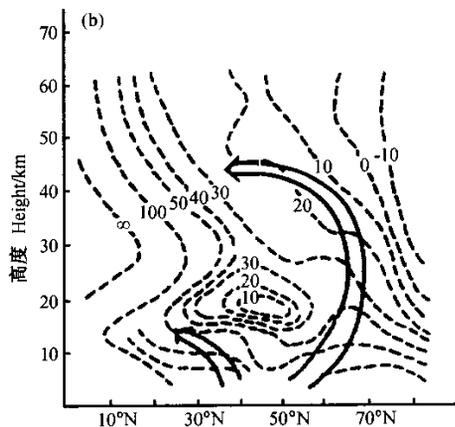
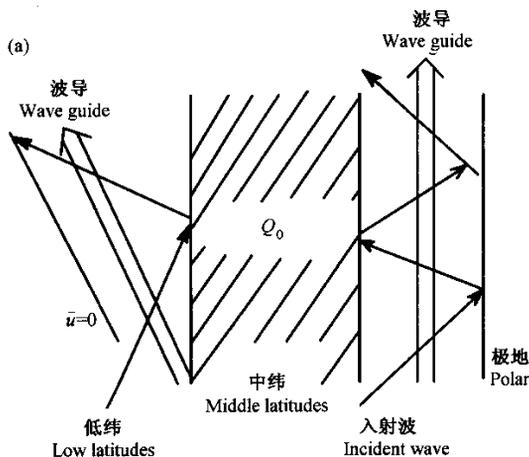


图 2 (a) 波导示意图；(b) 理想地形强迫产生的波数为 1 的定常行星波传播波导示意图 (实箭头)，虚线表示定常行星波 1 波折射指数平方的分布

Fig. 2 (a) Sketch map of the wave guides in the Northern Hemisphere winter ;(b) Sketch map of the propagation (solid arrow) of stationary wave 1 forced by ideal topography , and the dashed contours represent the distribution of the refractive index square of wave for zonal wave number 1

区域，而低纬度对流层是一个 Q_0 大的区域，因而波也会向低纬度方向折射，但是冬季在低纬度地区有一个东西风交界处 ($\bar{U} = 0$)，在线性分析情况下，波一般不会越过此线传播到东风区。因此，在低纬度地区也存在着一支波导，即波要从中、高纬度的对流层下层通过对流层向低纬度的对流层顶附近传播。

从以上分析可以看到，在冬季球面三维大气中准定常行星波可以沿两支波导传播。正如图 2b 所示，一支是波在高纬度地区从对流层垂直传播到平流层，并在平流层向赤道方向传播，称之为极地波导；另一支是波能够从中纬度对流层下层向低纬度对流层顶传播。这些都表明准定常行星波不能直接从中纬度对流层传播到平流层。

2.2 E-P 通量与准定常行星波的三维传播

Eliassen 和 Palm^[4]在研究波的垂直传播时，把波的角动量输送和热量输送作为一个矢量的两个分量，这个矢量被 Andrew 和 McIntyre^[29]所推广，并被后人称之为广义 Eliassen-Palm 通量（简称 E-P 通量）。广义 E-P 通量的概念被提出后，被广泛应用到大气环流演变的诊断研究中，特别是应用于纬向平均流的加速或减速的诊断分析中。Andrews 和 McIntyre^[29]只是在 β

平面近似下证明了波作用密度在波传播中具有守恒的性质，提出了波作用守恒方程。然而，对于行星尺度的波动，波的经向波长是从高纬度地区一直到低纬度，显然 β 平面是不成立的，因此，必须把波作用守恒方程和波作用量推广到球面大气中。Edmon 等^[30]提出，当科里奥利参数的变化与科里奥利参数之比（即 $\Delta f/f$ ）是小的， β 平面的波作用守恒方程可以推广到球面上。但是，Edmon 等^[30]的假设在低纬度是不适宜的，因为这个地区的 $\Delta f/f$ 并不小，因此，有必要正确推导球面波作用守恒方程。为此，黄荣辉^[31]考虑了准定常行星尺度扰动所产生的辐散风分量对位涡度平流的贡献，并利用小扰动渐近展开（WKBJ）方法正确地证明了在球面大气中准定常行星波的波作用密度守恒，提出球面大气准定常行星波的波作用守恒方程，并得到球面大气中行星波波作用量与群速度有下面关系式：

$$F = A_m C'_g, \tag{4}$$

其中， C'_g 是准定常行星波的群速度在经圈面上的投影， A_m 是由于考虑了辐散风分量对位涡度平流的贡献而得到的准定常行星波修正位涡度， F 是 E-P 通量，它可以写成下式：

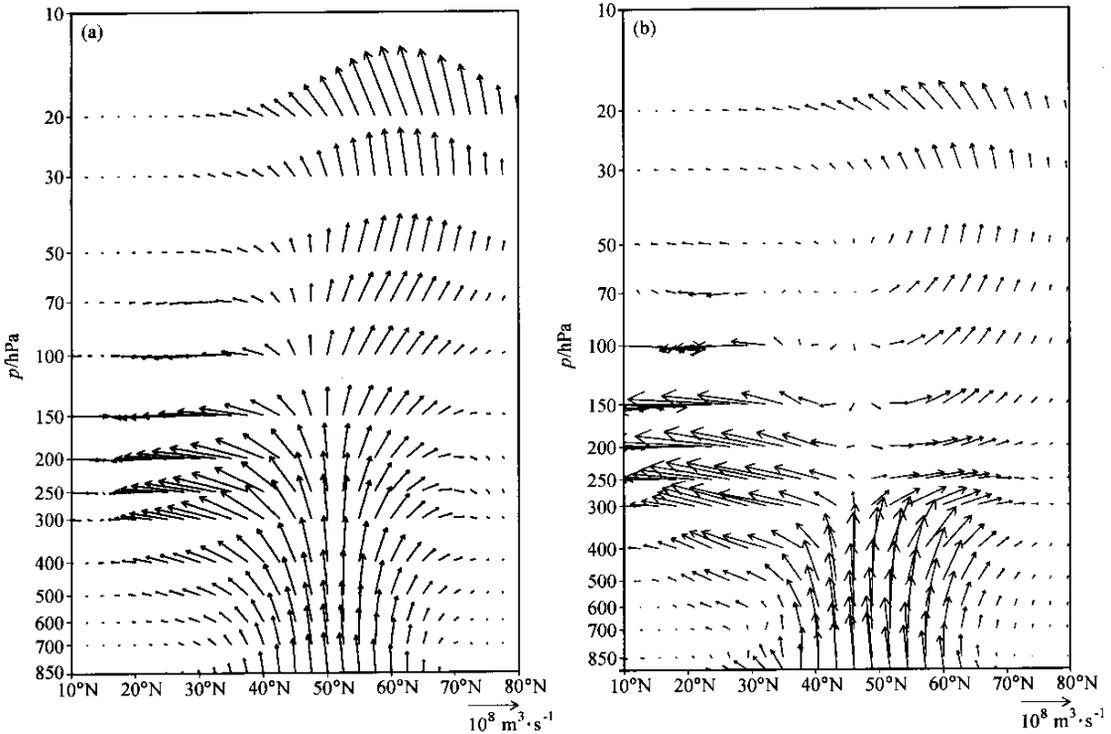


图3 (a) 利用 NCEP/NCAR 再分析资料计算的 40 个冬季平均的准定常行星波 E-P 通量分布；(b) 全球大气环流模式模拟的冬季气候平均的准定常行星波的 E-P 通量分布

Fig. 3 (a) E-P flux cross sections of quasi-stationary planetary waves averaged for 40 winters from the NCEP/NCAR reanalysis data；(b) the winter climatology of E-P flux cross sections of quasi-stationary planetary waves with a simulation of AGCM

$$F = [F(\varphi), F(p)] = (-a \cos \varphi \overline{u'v'}, f a \cos \varphi \overline{\theta'v'} / \bar{\theta}_p). \quad (5)$$

(4) 式说明了准定常行星波的波作用量 (即 E-P 通量) 平行于子午面内准定常行星波的群速度, 因此, E-P 通量可以作为很好诊断准定常行星波在三维大气中传播的一个物理量。

本研究利用 NCEP/NCAR 全球再分析资料中 1958 ~ 1998 年冬季 (12 月 ~ 2 月) 平均纬向风和温度场资料, 应用 (5) 式计算而得到 40 年平均的准定常行星波的 E-P 通量分布, 并且用纬向波数为 1、2 和 3 的波叠加起来表征准定常行星波。图 3a 是利用 NCEP/NCAR 再分析资料计算的 40 个冬季平均的准定常行星波 E-P 通量的分布。从图 3a 可以清楚地看到, 在北半球冬季准定常行星波的传播明显具有两条路径, 即两支波导。正如图 3a 所示, 行星波首先从中纬度附近的对流层低层向上传播, 然后逐渐分成两支, 其中一支先折向高纬度地区并向上传播到平流层, 最后再折向中低纬度平流层; 另一支在对流层折向赤道传播到低纬度对流层顶附近。这与上节理论研究中指出的两支波导是一致的, 同时也与简单的描述行星波的机制模式的模拟一致^[11, 12]。此外, 最近我们还利用日本东京大学气候系统中心和日本国立环境研究所共同发展的全球大气环流模式 (CCSR/NIES AGCM), 在气候平均的海表面温度的强迫下进行了模拟试验, 由模拟资料分析得到 40 个冬季气候平均的准定常行星波的 E-P 通量 (图 3b)。从图 3b 也能看到准定常行星波沿两支波导传播, 只是对流层低纬度波导有所偏弱, 而极地波导明显偏弱。这表明了大气环流模式可以成功地模拟气候态下的准定常行星波传播的两支波导。

从上面计算结果, 我们看到 E-P 通量可以更清

楚、更直观地表述准定常行星波在三维大气的传播。由 40 年冬季 E-P 通量的平均分布清楚地看到北半球冬季准定常行星波可以沿两支波导传播, 这与波的折射指数所得到波的传播图像和大气环流数值模拟所得的图像是一致的。

3 准定常行星波异常传播的年际振荡

前面一节通过理论研究和数值模拟表明了在北半球冬季准定常行星波的传播存在两支波导, 这只是气候态下对准定常行星波活动的描述。准定常行星波的活动具有明显的年际变化特征, 为此, 本节将讨论行星波传播异常的年际变化。

由于行星波在三维大气中传播发生异常, 必然会引起 E-P 通量的辐合或辐散, 从而产生波与流的相互作用。陈文等^[32, 33]将 Wallace 等^[8]所发现的大气环流遥相关型的方法应用到经圈上的 E-P 通量散度场上, 从而提出了行星波活动异常在经圈平面上引起的遥相关, 并定义了准定常行星波活动指数。本研究利用 NCAR/NCEP 再分析资料和上述定义, 计算了 1958 年 ~ 1998 年各年冬季平均的行星波活动异常的指数变化 (图 4)。这种变化对应着行星波 E-P 通量散度场的 EOF 的第一主分量, 因而它描述了准定常行星波活动的主要模态^[34]。由图 4 可见, 准定常行星波活动有明显的年际变化, 并且与此相对应的行星波传播的年际异常可以用对该指数线性回归的 E-P 通量矢量来描述。图 5a 给出了线性回归的 E-P 通量分量的系数矢量分布, 其分布表明: 对应于准定常行星波活动的高指数时, 在对流层有异常强的从中高纬度向低纬度对流层顶附近的行星波传播, 而通过极地波导向平流层的传播明显减弱; 另一方面, 对应于行星波活动

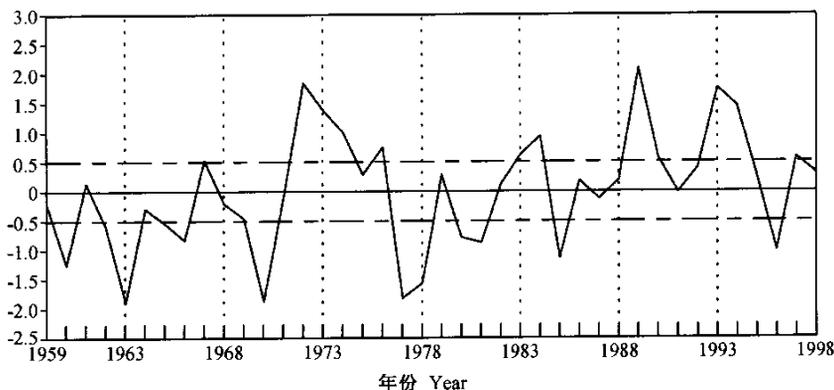


图 4 利用冬季行星波的 E-P 通量散度场的遥相关所定义的准定常行星波活动指数标准化后的年际变化

Fig. 4 The interannual variations of normalized index for the wintertime planetary wave activity defined with the teleconnectivity of E-P flux divergence

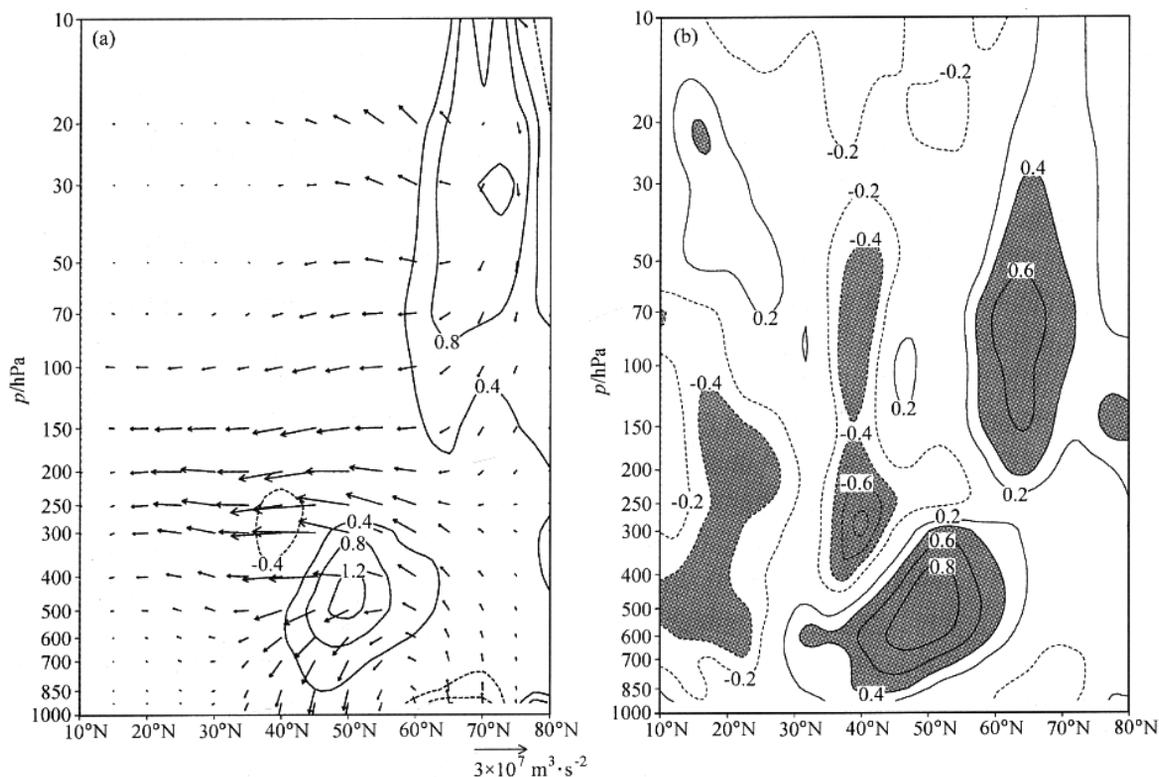


图5 (a)对行星波活动指数线性回归的E-P通量分量的系数矢量分布和E-P通量散度系数分布,等值线表示回归的E-P通量散度系数,间隔为 $0.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$,零等值线已被去掉; (b)E-P通量散度异常和行星波活动指数的相关图,等值线间隔为0.2,零等值线已被去掉,阴影部分表示绝对值大于或等于0.4的区域

Fig. 5 (a) EP flux cross sections (vectors) and its divergence (contours) regressed on the normalized planetary wave activity index. Contour interval is $0.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$. The zero contour line has been suppressed and the dashed lines indicate negative values. (b) The correlation coefficients between the EP flux divergence anomalies and the planetary wave activity index. Contour interval is 0.2. The zero contour line has been suppressed and the dashed lines indicate negative values. The areas are shaded in (b) for absolute values of correlation coefficients ≥ 0.4

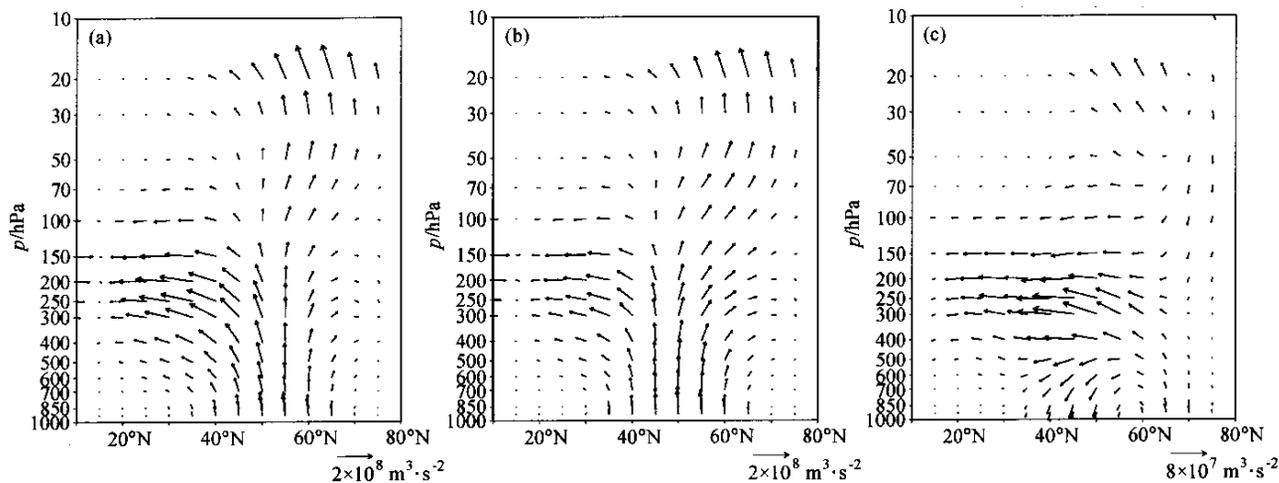


图6 合成的冬季行星波活动高指数年(a)和低指数年(b)E-P通量矢量的分布以及它们的差(c)

Fig. 6 Composite E-P flux cross sections in winter (DJF) for high (a), low (b) index for planetary wave activity and the difference with high minus low (c)

的低指数时,则有相反的行星波传播的异常,即通过极地波导向平流层传播加强,而在对流层向低纬度对流层顶附近传播明显减弱。并且,对应于行星波传播的异常,在对流层中纬度出现北正南负的 E-P 通量散度的分布,即北边辐散、南边辐合,同时极地平流层下层也出现异常的辐散。E-P 通量散度的异常分布通过计算其散度和行星波活动指数的相关系数(见图 5b)可发现,这些异常已超过了 99% 的统计信度检验。因为如果 40 个冬季场彼此互相独立,则对应于 95% 和 99% 的显著性水平的临界相关分别为 0.31 和 0.40。所以,北半球冬季准定常行星波传播的两支波导在其年际变化上存在着反相振荡关系,当其中一支有异常增强时,另外一支会有异常的减弱。

上述行星波传播异常的年际变化还可以用合成分析的方法更加清楚地加以描述。由图 4 中以 ± 0.5 为门槛值,分别挑选出 12 个行星波活动的高指数冬季和 12 个低指数冬季。从合成后的 E-P 通量分布(图 6a 和 b),可以明显看到准定常行星波都是以两支波导的方式传播。但用高指数减去低指数的差(图 6c)就可以看到,相对于低指数的冬季,高指数的冬季行星波向低纬度的传播波导有非常明显的增强,而沿极地波导的传播则相应减弱了。由此可以认为:当对流层行星波活动处于高指数时,行星波能量主要局限在对流层;而处于低指数时则有更多的行星波能量传播到平流层。

4 北极涛动与准定常行星波异常传播的关系

正如引言所述,北极涛动严重影响着北半球冬季

的气候,而北极涛动与中高纬度的纬向环流变化密切相关,并且,由于准定常行星波的活动发生变化时,它将会产生 E-P 通量散度的异常辐散或辐合,这必然会导致相应的纬向平均流的变化^[15]。为此,有必要分析北极涛动与准定常行星波异常传播的关系。图 7 给出了纬向平均的纬向风场在行星波活动的高指数、低指数的冬季以及它们的差的分布。从图 7a 和 b,可以很清楚地看出对流层的副热带急流和平流层的极夜急流,并且可以分辨出相对于低指数的冬季,在高指数的冬季副热带急流有所减弱而极夜急流明显增强。事实上,如图 7c 所示,两者之差表明这种北正南负的差异一直伸展到整个对流层和平流层,而且纬向风的差由 t 检验表明,在中纬度地区大都超过了 99% 的信度检验。应该指出的是,这种纬向风的深厚的南北偶极子形态也是纬向风年际变异的 EOF 的第一主分量^[34]。而且,在 Thompson 和 Wallace^[21]发现北半球海平面气压在极地和 中高纬度之间存在一种反相的“跷跷板”形式的振荡并命名为北极涛动(AO)后,一些研究指出 AO 与热带外纬向风的指数循环是联系在一起的,而中纬度地区南北方向上西风强度的“跷跷板”现象也被称为北半球环状模(NAM),北极涛动实际上是北半球环状模近地面的部分^[22,35]。图 8 分别给出了行星波活动指数和 AO 指数的年际变化,由于这两个指数都有显著的线性趋势,因此,图 8 是去除了线性趋势项后的时间序列。由图 8 可见,两个指数的变化在年际时间尺度上有很好的 consistency,它们之间的相关系数达到 0.69,远远超过了 99% 的信度检验。因此,可以认为准定常行星波传播的两个波导之间的振荡与北极涛动是密不可分的。

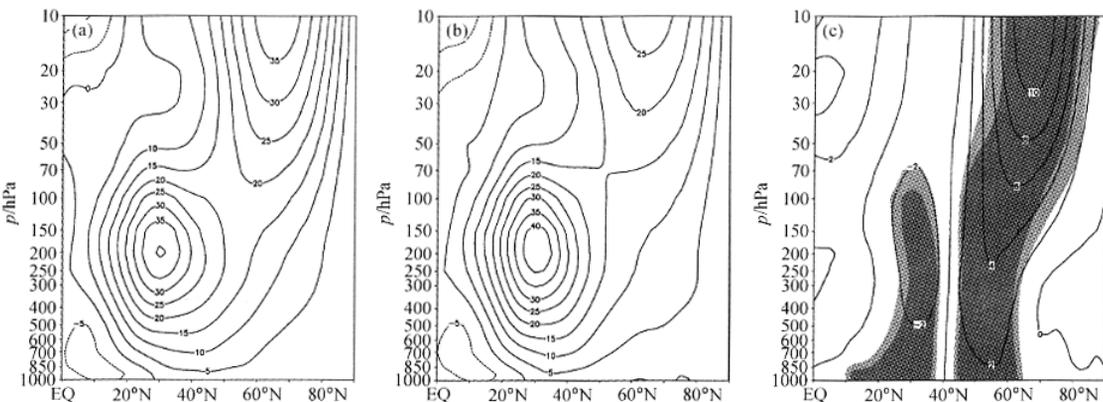


图 7 纬向平均的纬向风场在行星波活动高指数(a)、低指数(b)的冬季以及它们的差(c)的分布(单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)。图 c 中浅阴影和深阴影区分别表示纬向风差异的显著性达到了 95% 和 99% 的信度

Fig. 7 Composite zonal mean zonal winds (units: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) in winter (DJF) for high (a), low (b) index for planetary wave activity and the difference with high minus low (c). Heavy and light shadings in (c). indicate significant differences at the 99% and 95% levels, respectively

从图 7 中可以看到，显著的纬向风异常在中低纬处只能到达对流层顶附近，而在高纬则可以一直伸展到高纬度平流层上层，很显然这与准定常行星波极地波导的传播有关。这种现象在纬向平均温度场的分布上也有清楚的表现（图 9）。合成的高指数和低指数的冬季纬向平均温度都有类似的基本特征，即温度从热带地面附近向上和向极地均有减小，在热带对流层顶附近有一个冷中心，而在极地平流层顶附近有一个暖中心。它们之间最大的差异出现在极地平流层（图 9c）。对应于高的行星波活动指数，有明显的偏冷极

涡出现，此时也有偏强的绕极西风（图 7c）。这些异常可以很好地用波一流相互作用来解释，当行星波活动处于高指数时，极地波导偏弱，从而影响平流层极涡的扰动也偏弱，使得平流层极涡比较稳定，这导致绕极西风较强，同时涡动输送的热量也少，这样极涡就偏冷。

研究表明，北极涛动现象可以利用大气环流模式在气候海温的强迫下模拟出来，因而它被认为是大气中内部固有的模态^[36, 37]。本研究清楚地表明，行星波传播的年际变化与平均纬向风的南北振荡（即北极涛

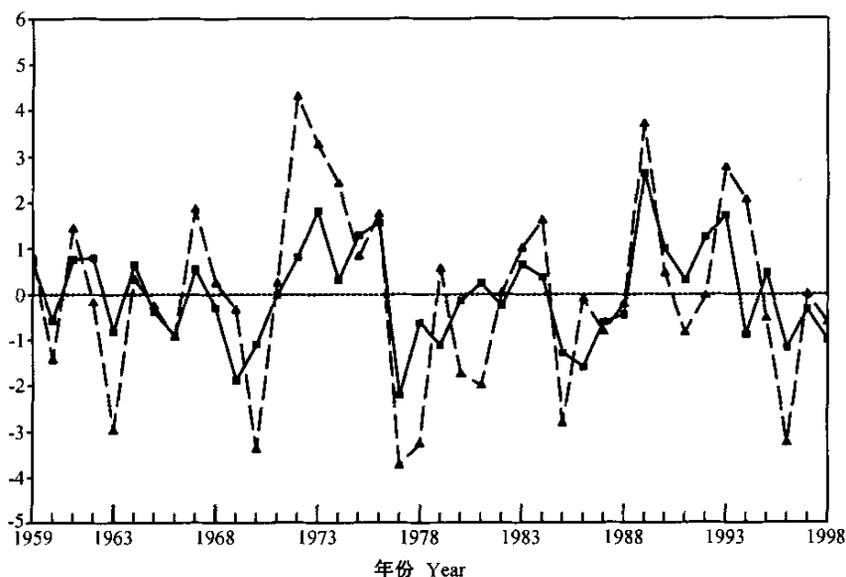


图 8 去掉线性趋势项后的准定常行星波活动标准化指数（实线）和北极涛动标准化指数（虚线）的年际变化

Fig. 8 The interannual variations of normalized planetary wave activity index (solid line) and normalized AO index (dashed line) after removing linear trend

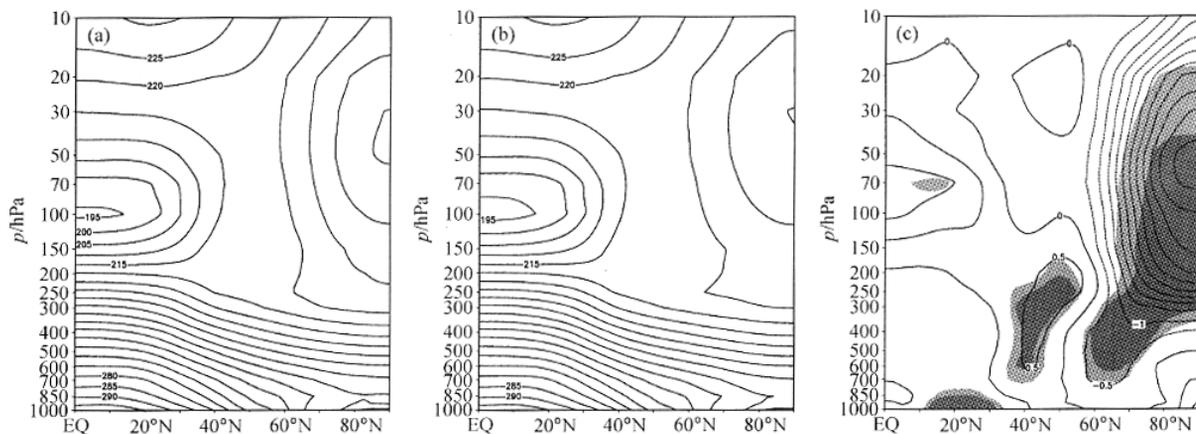


图 9 纬向平均的温度场在行星波活动高指数 (a)、低指数 (b) 的冬季以及它们的差 (c) 的分布 (单位: K)。图 c 中浅阴影区和深阴影区分别表示温度差异的显著性达到了 95% 和 99% 的信度

Fig. 9 Composite zonal mean temperature (units: K) in winter (DJF) for high (a), low (b) index for planetary wave activity and the difference with high minus low (c). Heavy and light shadings in (c) indicate significant differences at the 99% and 95% levels, respectively

动) 关系密切。因此, 本研究也证明了北极涛动主要是由大气内部的波—流相互作用所产生的。利用大气环流模式对北半球冬季准定常行星波活动的年际变化的模拟研究也表明, 在对流层中下层准定常行星波的年际变化所对应的纬向平均流场的异常分布也与北极涛动下的异常形势非常相似。也就是说, 大气环流模式在对流层中下层可以很好地模拟准定常行星波的年际变化以及北极涛动形势, 并且二者同样密切相关。但是, 大气环流模式还不能很好地模拟行星波经极地波导向平流层传播的异常的年际变化, 这也是我们在利用大气环流模式模拟气候变化时应该注意的问题。

5 结论

本研究回顾了应用叶笃正先生所创立的 Rossby 波频散理论, 来研究准定常行星波的能量频散及其在三维大气中的传播规律, 并应用 NCEP/NCAR 再分析资料集与由 CCSR/NIES 大气环流数值模式所产生的模式资料的 40 年风场、温度场资料, 计算了冬季北半球准定常行星波的 E-P 通量, 表明了北半球冬季准定常行星波在三维大气传播具有沿两支波导的传播特征, 这与从理论分析所得的结果相吻合。本文还分析了冬季准定常行星波的 E-P 通量分布的年际变化, 分析结果表明了这两支波导有明显的年际振荡; 并且, 本文还从冬季准定常行星波的 E-P 通量辐散辐合的年际变化与北极涛动的年际变化相比较, 发现准定常行星波两支波导的年际振荡直接影响着北极涛动(AO), 因而说明了准定常行星波活动的年际变化将影响对流层的气候变化。

参考文献

- [1] Rossby C G. On the propagation of frequencies and energy in certain types of oceanic and atmospheric waves. *J. Meteor.*, 1945, **2**: 187 ~ 204
- [2] Yeh T C. On energy dispersion in the atmosphere. *J. Meteor.*, 1949, **6**: 1 ~ 16
- [3] Charney J G, Drazin G. Propagation of planetary-scale disturbances from the lower into the upper atmosphere. *J. Geophys. Res.*, 1961, **66**: 83 ~ 109
- [4] Eliassen A, Palm E. On the transfer of energy in stationary mountain waves. *Geophys. Publ.*, 1961, **22**: 1 ~ 23
- [5] Matsuno T. Vertical propagation of stationary planetary waves in the winter Northern Hemisphere. *J. Atmos. Sci.*, 1970, **27**: 871 ~ 883
- [6] Matsuno T. A dynamical model of the stratospheric sudden warming. *J. Atmos. Sci.*, 1971, **28**: 1479 ~ 1494
- [7] Longuet-Higgins M S. Planetary waves on a sphere. *Proc. Roy. Soc.*, 1964, **A279**: 446 ~ 473
- [8] Wallace J M, Gutzler D S. Teleconnections in the geopotential height

- field during the northern hemisphere winter. *Mon. Wea. Rev.*, 1981, **109**: 784 ~ 812
- [9] Hoskins B J, Karoly D J. The steady linear response of a spherical atmosphere to thermal and orographic forcing. *J. Atmos. Sci.*, 1981, **38**: 1179 ~ 1196
- [10] Huang R H, Gambo K. The response of a model atmosphere in middle latitude to forcing by topography and stationary heat sources. *J. Meteor. Soc. Japan*, 1981, **59**: 220 ~ 237
- [11] Huang R H, Gambo K. The response of a hemispheric multi-level model atmosphere to forcing by topography and stationary heat sources. Part I. Forcing by topography. *J. Meteor. Soc. Japan*, 1982, **60**: 78 ~ 92
- [12] Huang R H, Gambo K. The response of a hemispheric multi-level model atmosphere to forcing by topography and stationary heat sources. Part II. Forcing by stationary heat sources and forcing by topography and stationary heat sources. *J. Meteor. Soc. Japan*, 1982, **60**: 78 ~ 108
- [13] Huang R H, Gambo K. The response of a hemispheric multi-level model atmosphere to forcing by topography and stationary heat sources in summer. *J. Meteor. Soc. Japan*, 1983, **61**: 495 ~ 509
- [14] Huang R H, Gambo K. On other wave guide in stationary planetary wave propagations in the winter Northern Hemisphere. *Science in China*, 1983, **26**: 940 ~ 950
- [15] Andrews D G, Holton J R, Leovy C B. *Middle Atmospheric Dynamics*. Academic Press, 1987, 489pp
- [16] 陈文, 黄荣辉. 准定常行星波对大气中臭氧运输的动力作用. *大气科学*, 1995, **19**: 513 ~ 524
Chen Wen, Huang Ronghui. The dynamical effect of planetary waves transport on ozone in the atmosphere. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 1995, **19**: 513 ~ 524
- [17] 陈文, 黄荣辉. 中层大气行星波在臭氧的季节和年际变化中运输作用的数值研究 I. 常定流的情况. *大气科学*, 1996, **20**: 513 ~ 523
Chen Wen, Huang Ronghui. A numerical simulation of the transport effect of planetary waves on the seasonal and interannual variations of ozone in the middle atmosphere Part I. In the case of stationary flow. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 1996, **20**: 513 ~ 523
- [18] 陈文, 黄荣辉. 中层大气行星波在臭氧的季节和年际变化中运输作用的数值研究 II. 波流相互作用的情况. *大气科学*, 1996, **20**: 703 ~ 712
Chen Wen, Huang Ronghui. A numerical simulation of the transport effect of planetary waves on the seasonal and interannual variations of ozone in the middle atmosphere Part II. In the case of wave-flow interaction. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 1996, **20**: 703 ~ 712
- [19] 陈文, 黄荣辉. The modulation of planetary wave propagation by the tropical QBO zonal winds and the associated effects in the residual meridional circulation. *Contrib. Atmos. Phys.*, 1999, **72**: 187 ~ 204
- [20] 陈文, 杨蕾, 黄荣辉, 等. 热带准两年振荡影响北半球冬季大气环流的诊断分析. *大气科学*, 2004, **28**: 161 ~ 173
Chen Wen, Yang Lei, Huang Ronghui, et al. Diagnostic analysis of

- the impact of tropical QBO on the general circulation in the Northern Hemisphere winter. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 2004, **28** : 161 ~ 173
- [21] Thompson D W J , Wallace J M . The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields. *Geophys. Res. Lett.* , 1998 , **25** : 1297 ~ 1300
- [22] Thompson D W J , Wallace J M . Annular modes in the extratropical circulation. *J. Climate* , 2000 , **13** : 1000 ~ 1016
- [23] Black R X . Stratospheric forcing of surface climate in the Arctic Oscillation. *J. Climate* , 2001 , **15** : 268 ~ 277
- [24] 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
- [25] Dunkerton T J . Midwinter deceleration of the subtropical mesospheric jet and interannual variability of the high latitude flow in UKMO analysis. *J. Atmos. Sci.* , 2000 , **57** : 3838 ~ 3855
- [26] Perlwitz J , Graf H-F . Troposphere-stratosphere dynamic coupling under strong and weak polar vortex conditions. *Geophys. Res. Lett.* , 2001 , **28** : 271 ~ 274
- [27] Perlwitz J , Harnik N . Observational evidence of a stratospheric influence on the troposphere by planetary wave reflection. *J. Climate* , 2003 , **16** : 3011 ~ 3026
- [28] Gambo K , Kudo K . Three-dimensional teleconnection in the zonally asymmetric height field during the Northern Hemisphere winter. *J. Meteor. Soc. Japan* , 1983 , **61** : 36 ~ 50
- [29] 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
- [30] Edmon M J , Hoskins B J , McIntyre M E . Eliassen-Palm sections for the troposphere. *J. Atmos. Sci.* , 1980 , **37** : 2600 ~ 2617
- [31] Huang R H . Wave action conservation equation for planetary wave in a spherical atmosphere and waveguides of stationary planetary wave propagations shown by wave action flux. *Science in China* , 1984 , **27** : 766 ~ 775
- [32] Chen W , Graf H F , Takahashi M . Observed interannual oscillations of planetary wave forcing in the Northern Hemisphere winter. *Geophys. Res. Lett.* , 2002 , **29** : 2073 , doi : 10. 1029/2002GL016062
- [33] 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
- [34] 杨蕾 . 北半球准定常行星波活动及其变化 : 资料分析和模拟研究 . 中国科学院大气物理研究所硕士学位论文 . 2004
Yang Lei . Activity and variability of quasi-stationary planetary waves in the Northern Hemisphere : Data analysis and simulation study . M. S. thesis (in Chinese) , Institute of Atmospheric Physics , Chinese Academy of Sciences . 2004
- [35] Baldwin M P , Dunkerton T J . Propagation of the Arctic Oscillation from the stratosphere to the troposphere. *J. Geophys. Res.* , 1999 , **104** : 30937 ~ 30946
- [36] DeWeaver E , Nigam S . Do stationary waves drive the zonal-mean jet anomalies of the Northern Winter ? *J. Climate* , 2000 , **13** : 2160 ~ 2176
- [37] Limpasuvan V , Hartmann D L . Wave-maintained annular modes of climate variability. *J. Climate* , 2000 , **13** : 4414 ~ 4429