

热带准两年振荡影响北半球 冬季大气环流的诊断分析^{*}

陈 文¹⁾ 杨 蕾¹⁾ 黄荣辉¹⁾ 邱启鸿²⁾

1) (中国科学院大气物理研究所, 北京 100080)

2) (北京市环境保护监测中心, 北京 100044)

摘 要 利用 NCEP/NCAR 再分析资料, 首先讨论了热带纬向风准两年振荡 (QBO) 的东、西风位相的划分标准。结果发现, 赤道 50 hPa 的风与西风厚度关系最密切, 即赤道 50 hPa 的纬向平均风为西 (东) 风时往往代表平流层下层为一层深厚的西 (东) 风。在此基础上诊断分析了 1958/1959~1997/1998 年共 40 个冬季中热带纬向风 QBO 对北半球中高纬度地区纬向平均环流和准定常行星波传播的影响。诊断分析表明, 热带 QBO 对北半球冬季大气环流的影响主要表现在平流层和对流层上层。热带 QBO 的东风位相年与西风位相年相比, 中高纬度地区的绕极西风环流明显减弱, 中低纬度地区则出现相反变化, 从而在平流层的纬向平均环流分布上呈现偶极子形式。纬向平均流的这种年际变化可以很好地用中高纬度准定常行星波传播的异常加以解释, QBO 的东风位相年和西风位相年相比, 中高纬准定常行星波向极地的传播更强, 从而在高纬度平流层产生异常的 E-P 通量辐合, 波一流相互作用的结果使得西风减弱。但是热带纬向风 QBO 的影响在 1958/1959~1997/1998 年的前后 20 年有所差异。后 20 年相对于前 20 年而言, 东西风位相的差异有所减小, Holton-Tan 振荡明显减弱; 就行星波传播而言, 东风位相年下, 前 20 年行星波向上传播较弱, 而后 20 年则以大约 70°N 为分界点, 以南向上传播较强, 以北向上传播较弱。这种差异可能跟中高纬度纬向西风的自身变化有关。

关键词: 准两年振荡; 西风厚度; 纬向平均环流; 准定常行星波传播

文章编号 1006-9895 (2004) 02-0161-13 **中图分类号** P434 **文献标识码** A

1 引言

早在 20 世纪 60 年代初人们就认识到热带平流层纬向风存在准两年周期的振荡^[1,2]。这种长周期的变化并不与季节变化直接相联系且有一定程度的不规则性, 其周期平均而言约为 27 个月, 因此被称为准两年振荡 (QBO)^[3]。随后 Lindzen 和 Holton 等^[4,5]提出了它的形成机理, 指出热带西传的混合 Rossby 重力波和东传的 Kelvin 波在垂直传播过程中与纬向风相互作用, 从而产生了东西风交替出现的现象。在中高纬度地区平流层大气环流同样具有准两年周期的振荡, Holton 和 Tan^[6,7]从观测资料的分析中发现, 北半球冬季极涡在热带 QBO 为西风时比热带 QBO 为东风时更强、更深厚。

2002-12-11 收到, 2003-04-08 收到修改稿

^{*} 国家自然科学基金资助项目 40231005、中国科学院知识创新工程重要方向性项目 KZCX3-SW-218 和 ZKXC2-SW-210 共同资助

但是热带外地区 QBO 的机制并不清楚,它也是 20 世纪 90 年代以来大气科学研究的一个前沿课题。

进一步的研究发现,不但北半球冬季极涡的强度,而且平流层爆发性增温的发生、臭氧总量的变化以及准定常行星波的活动等都与热带平流层 QBO 有密切的关系。OSullivan 和 Salby 通过数值模拟发现^[8],当热带平流层 QBO 为东风位相时,由于零风速线移到了冬半球,这时中高纬的扰动增强,准定常行星波的涡旋输送作用大,使得极涡减弱;与此相反的是,当热带平流层 QBO 为西风位相时,由于零风速线移到了夏半球,冬半球中高纬的扰动幅度小,准定常行星波的涡旋输送作用也小,因此极涡较强且稳定。Dunkerton 和 Baldwin 的观测研究则发现^[9],热带纬向风的 QBO 可以影响中高纬度行星波的活动。从对流层上传的准定常行星波是平流层的主要波动,因此人们推测行星波可能提供了热带和中高纬联系的一个机制。Balachandran 和 Rind^[10]通过 GCM 试验指出,热带纬向风的 QBO 改变了零风速线的位置和中低纬地区纬向风的水平切变,从而影响了行星波的传播。陈文和黄荣辉^[11]则利用一个行星波—平均流耦合的机制模式进一步指出,热带纬向风的 QBO 通过调制行星波的传播还可以影响中高纬地区的行星波与平均流的相互作用。在从理论上分析了行星波的动力输运作用^[12]的基础上,陈文和黄荣辉^[13,14]还模拟了行星波输运引起的中高纬地区臭氧的年际变化,并讨论了热带纬向风 QBO 对行星波的动力输运作用的影响。

然而,近十几年来的研究主要集中在数值模拟方面,而对于实际观测资料的分析还多以 Holton 和 Tan 在 20 世纪 80 年代初的工作^[6,7]为参照。目前的 NCEP 再分析资料已包括了平流层中下层,因此可以用来分析热带纬向风 QBO 对中高纬大气环流的影响。并且以前的分析研究都用一层的风表示 QBO,但有人用 30 hPa,也有人用 50 hPa 或 70 hPa。事实上,McIntyre^[15]就曾推测用西风或东风的厚度来描述纬向风的 QBO 较好。后来的数值模拟研究常常都是在热带纬向风场上叠加上一层深厚的西风或东风^[8,11]。因此,对资料的诊断分析首先就要弄清哪一层风能够比较好地表示纬向风的厚度,这样得到的诊断结果才可以与数值模拟结果相对比。

本文将先介绍所用的资料和分析方法,然后在讨论如何划分 QBO 东、西风位相年的基础上,分别研究北半球中高纬度地区纬向平均流和准定常行星波的异常与热带 QBO 的关系。

2 资料、分析方法及 QBO 东西风位相年的划分

本文分析中采用的资料是 NCEP/NCAR 全球再分析资料。由于在 1958 年以前,100 hPa 以上的高层缺少足够的观测,因而 1958 年以前的平流层再分析资料并不可靠^[16]。我们利用的是从 1958/1959~1997/1998 年共 40 个冬季的月平均压力层网格资料。垂直方向从 1000 hPa 到 10 hPa 共 17 层,水平网格距为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 。共有 4 个要素:风的纬向分量 u (m s^{-1}),风的经向分量 v (m s^{-1}),温度 T ($^{\circ}\text{C}$) 和位势高度 H (位势米)。季节平均场由 12 月、1 月和 2 月的平均值得到。同时,为了避免 NECP/NCAR 再分析模式的上边界影响,我们的分析限制在 20 hPa 以下。

对任一物理量作纬向谐波分析可得到相应纬向平均场和任意波数的扰动振幅及位

相分布，本文取 1~3 波表示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，准地转变换下的 $\mathbf{F}$ 的表达式^[3]为

$$\mathbf{F} = (0, -\rho_0 a \cos \phi \overline{v' u'}, \rho_0 a \cos \phi f \overline{v' \theta'} / \theta_0) \tag{1}$$

其中， ρ_0 和 θ_0 为只随高度变化的空气密度和参考位温， 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。相应的 EP 通量的散度为

$$\nabla \cdot \mathbf{F} = \frac{1}{a \cos \phi} \frac{\partial}{\partial \phi} (F^{(\phi)} \cos \phi) + \frac{\partial F^{(z)}}{\partial z}, \tag{2}$$

其中， $F^{(\phi)}$ 和 $F^{(z)}$ 分别为 $\mathbf{F}$ 在经圈和垂直方向的分量，可参见 (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：

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} - f \bar{v}^* - \bar{X} = \frac{1}{\rho_0 a \cos \phi} \nabla \cdot \mathbf{F}, \tag{3}$$

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水平分量，方程右边项表示波动引起的强迫项。

关于 QBO 东、西风位相年的划分，我们先看看哪一层纬向风与 QBO 风场的深厚程度有更密切的相关。为此选取赤道平流层 100 hPa 到 20 hPa 的纬向风场资料，将赤道上空每一个等压面上的风速值求纬向平均，就得到赤道上空由 100 hPa 到 20 hPa 共 5 层的平均纬向风。利用大气的静力平衡得到的压高公式计算后，可将大气重新分层，从 19 km 到 31 km 分成 12 层，间距为 1 km。考虑到线性插值虽然简单，但是误差比较大，因此采用拉格朗日方法进行插值。这样将原有 5 层上的风速插值到新的 12 层上，从而可定义赤道处 100 hPa 到 20 hPa 大气层的西风深度为：(西风层数/12)×100%。图 1a 给出了赤道上空 100 hPa 到 20 hPa 大气层从 1958/1959~1997/1998 年共 40 个冬季的西风深度，图中的 1959 表示的是 1958/1959 冬季，其余类推。将该量与赤道上空各层的纬向平均风作比较，结果发现 50 hPa 的风与西风深度关系最密切。图 1b 给出了赤道上空 50 hPa 纬向平均风从 1958/1959~1997/1998 年共 40 个冬季的大小分布，它与图 1a 中的西风深度的相关系数达到 0.87，超过了 99% 的信度。

根据上述分析，并且考虑到划分标准的简单可行性，我们可以选择赤道平流层下

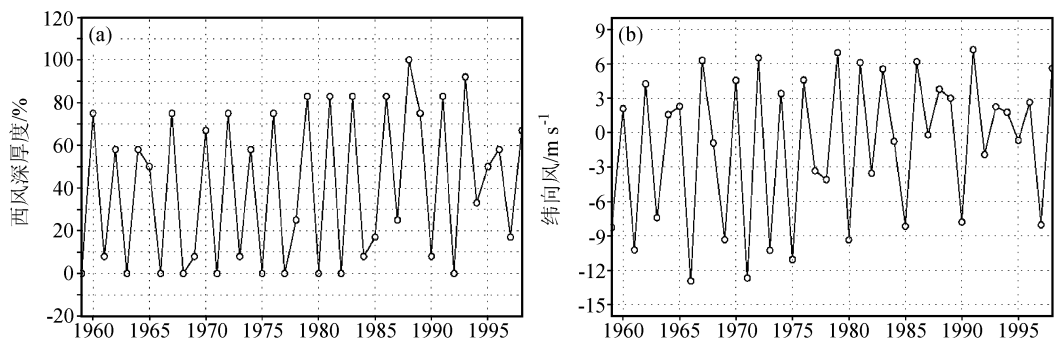


图 1 1958/1959~1997/1998 年 40 个冬季赤道上空纬向平均风分布图
(a) 100~20 hPa 的西风深度；(b) 50 hPa 的纬向平均风

层 50 hPa 的纬向平均风作为划分 QBO 东西风位相年的标准。由最新的关于 NCEP/NCAR 资料的介绍^[16]，在 1979 年以后大量使用了人造卫星资料，从而引起资料尤其是在热带地区的不连续^[17]。为了避免这种观测系统的变化对资料的影响，本文在以后分析冬季平流层的年际变化时将资料分成前 20 个冬季和后 20 个冬季，即从 1958/1959 到 1977/1978 和 1978/1979 到 1997/1998。根据图 1b，前 20 个冬季中 1959、1961、1963、1966、1968、1969、1971、1973、1975、1977、1978 共 11 年为东风位相年，其余为西风位相年；而后 20 个冬季中 1980、1982、1984、1985、1987、1990、1992、1995、1997 共 9 年为东风位相年，其余 11 年为西风位相年。

3 热带纬向风 QBO 对北半球冬季纬向平均环流的影响

图 2 是前 20 个冬季分别合成的东风位相年、西风位相年以及东风位相年减去西风位相年北半球冬季平均纬向风的分布。从图 2a、b 可以看到，北半球冬季对流层存在着极锋急流，平流层存在极夜急流，这是北半球冬季纬向风分布的特点，无论东西风位相年均如此。但在图 2a 中热带地区上空平流层下层是一深厚的东风环流，而图 2b 中则是一深厚的西风环流。因此，东风位相年减去西风位相年后的平均纬向风的分布在热带地区平流层下层是非常强的异常东风环流（图 2c）。并且这一层深厚的纬向风异常与赤道上空 50 hPa 的纬向风有非常好的相关，这个相关在热带平流层下层超过了 99% 的信度。另一方面，热带纬向风 QBO 的东风位相年和西风位相年相比，北半球冬季约 40°N 以北的平流层下层，平均纬向西风偏弱，与此相反的是从 20°N 到 40°N 的副热带平流层下层平均纬向西风略偏强。平均纬向西风在热带纬向风 QBO 的不同位相年的分布在热带外区域成偶极子型，这就是所谓的“Holton-Tan 振荡”^[7]。

图 3 则是后 20 个冬季分别合成的东风位相年、西风位相年以及东风位相年减去西风位相年北半球冬季平均纬向风的分布。显然，纬向风及其差异的分布与图 2 基本相似，但热带平流层下层平均纬向风的差在后 20 年中不如前 20 年那样大（见图 2c 和图 3c），并且后 20 年的高纬度平流层下层的偶极子分布型的强度也明显减弱。特别地，尽管图 3c 中热带平流层下层的纬向风与赤道上空 50 hPa 的纬向风相关与图 2c 一样达到 99% 的信度，但是图 3c 中的中高纬度的纬向风与赤道上空 50 hPa 的纬向风相关并没有达到 95% 的信度，也就是说“Holton-Tan 振荡”在后 20 年明显减弱了。

从上述热带平流层下层纬向风的 QBO 对中高纬度纬向风的影响的分析中可见，其影响主要表现在平流层和对流层上层，这与 Baldwin 等^[18]的结果也是一致的。QBO 的东风位相年和西风位相年相比，中高纬地区的绕极西风环流明显减弱，与此对应，在中低纬地区则出现相反的变化，从而在平流层的纬向平均环流分布上呈现出偶极子式的分布。这种变化在 1959 至 1978 年间的冬季非常显著，其时间跨度也与 Holton 和 Tan^[6]分析的资料比较一致，因此我们的结果从统计信度上证实了 Holton 和 Tan 的结论；然而在 1979 至 1998 年的 20 年间，这种变化并不显著，这说明热带纬向风的 QBO 对中高纬度大气环流的影响并不是稳定的，或许这种影响要受到更长周期的气候变化的调制。

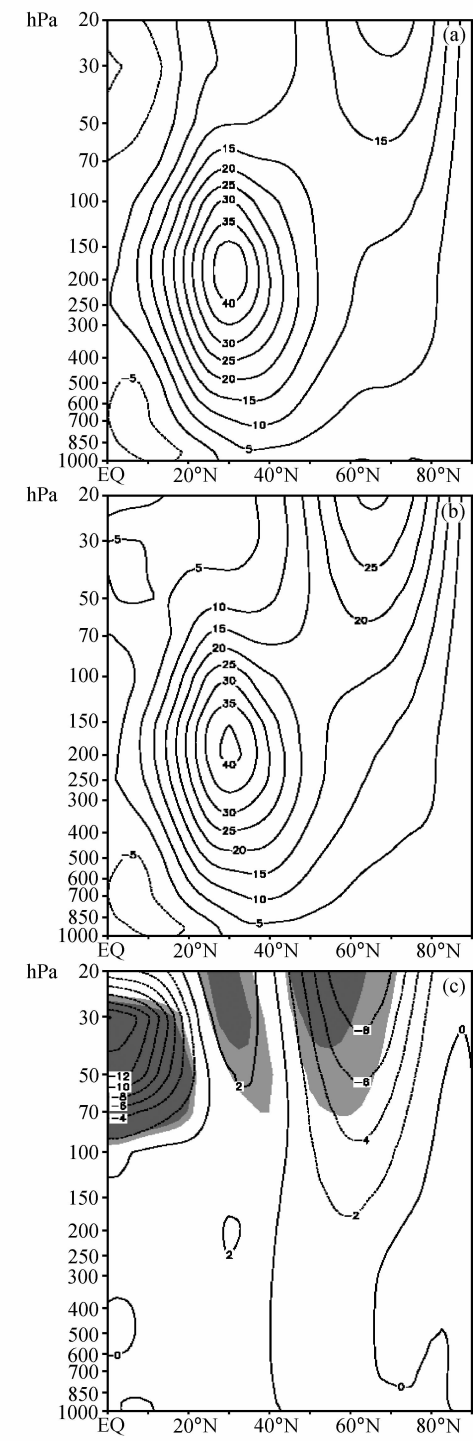


图 2 前 20 个冬季按照热带纬向风 QBO 不同位相合成的北半球纬向平均风场分布 (单位: m s^{-1}) (a) 东风位相年; (b) 西风位相年; (c) 东风位相年减去西风位相年。浅、深阴影分别表示纬向风与赤道上空 50 hPa 纬向风的相关达到了 95%、99% 的信度

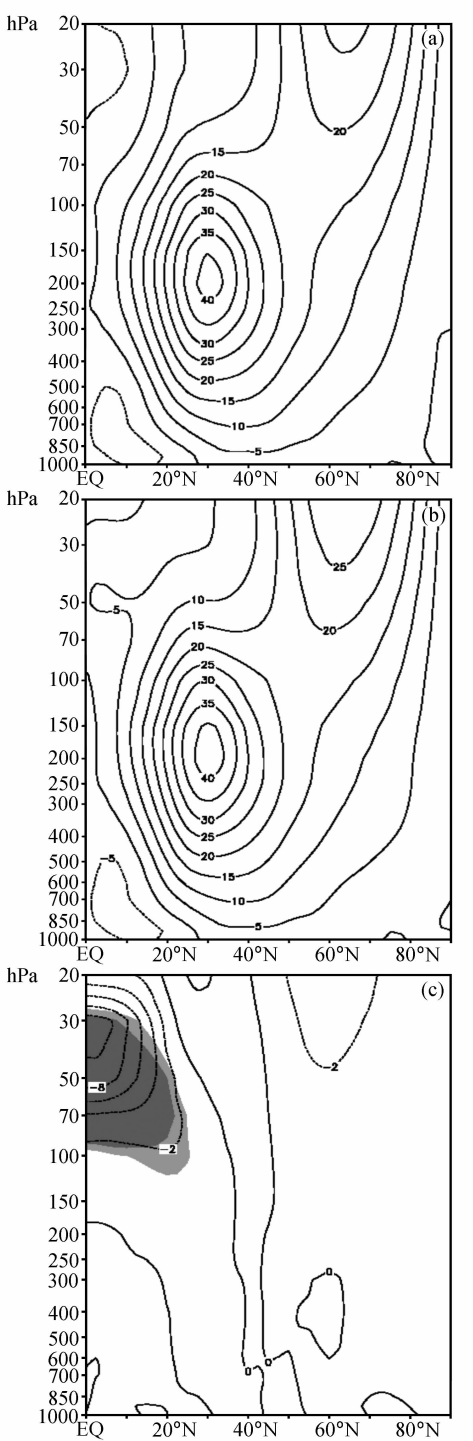


图 3 同图 2, 但为后 20 个冬季

4 热带纬向风 QBO 对北半球冬季准定常行星波传播的影响

下面我们用谐波分析得到的 1~3 波叠加在一起表征准定常行星波,从而研究北半球冬季准定常行星波的传播以及它与纬向平均流的相互作用的年际异常。图 4 是前 20 年按照热带 QBO 的不同位相进行合成所得的北半球冬季准定常行星波 EP 通量的分布。无论在热带平流层下层 QBO 的东风位相年还是西风位相年,准定常行星波的传播在北半球冬季总是有两条路径(见图 4a 和 b)。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 Huang 和 Gambo 的理论工作^[19]所指出的两支波导是一致的,也与数值模拟的结果^[11]相吻合。图 4c 是用东风位相年减去西风位相年行星波 EP 通量的差值分布,由图 4c 可以看到,热带平流层下层 QBO 的东风位相年和西风位相年相比,沿极地波导传播的准定常行星波更多地折向高纬地区,而且行星波在 20~30 hPa 向上的传播明显减弱。图 5 是与图 4 相对应的北半球冬季准定常行星波 EP 通量的散度分布。由图 5a 和图 5b 可以看到,北半球冬季准定常行星波的 EP 通量散度在热带 QBO 的东风位相年和西风位相年有类似的分布型,即在高纬度平流层辐散,而在中纬度平流层和对流层辐合,这与行星波从对流层折向平流层传播是一致的。从它们的差(图 5c)可以看到,最大的异常出现在高纬度的平流层,即热带 QBO 的东风位相年和西风位相年相比,北半球冬季准定常行星波的 EP 通量在高纬度平流层有明显偏弱的辐散。由方程(3)知道,异常的辐散会使得纬向平均西风增强,异常的辐合会使得纬向平均西风减弱。因此,热带 QBO 的东风位相年北半球冬季准定常行星波的 EP 通量在高纬度平流层会有异常的辐合,从而高纬度平流层的绕极西风环流减弱,导致极涡也减弱;与此相反,热带 QBO 的西风位相年北半球冬季准定常行星波的 EP 通量在高纬度平流层会有异常的辐散,从而高纬度平流层的绕极西风环流增强,极涡更加深厚。由此可见,前 20 年资料分析的结果与 Holton 和 Tan^[6]的结论一致,同时也揭示出热带 QBO 影响中高纬大气环流的过程,即热带平流层下层的东风可以调制中高纬度准定常行星波的传播,使得行星波向极地的传播增强,在高纬度平流层产生异常的 EP 通量辐合,根据行星波与纬向平均流的相互作用理论会有西风急流减弱,导致极涡也减弱;而热带平流层下层的西风可以通过相反的过程导致极涡增强。

然而,后 20 年按照热带纬向风 QBO 的不同位相年进行合成后,东风位相年与西风位相年之差显示出与前 20 年不完全相同的结果。后 20 年 EP 通量的东风位相年与西风位相年的差值(图 6c)显示,中高纬度平流层准定常行星波在东风位相年向极地的传播更强,这与前 20 的结果是一致的,即热带纬向风 QBO 的西风使得准定常行星波可以更多地传播到低纬度,而东风使得行星波限制在较高纬度。这一结果也使得后 20 年准定常行星波的 EP 通量散度在热带纬向风 QBO 的东风位相年与西风位相年之差(图 7c)呈现与前 20 年相同的结构。与前 20 年有所差别的是,后 20 年的东风位相年与西风位相年相比,中高纬度平流层中下层准定常行星波在大约 70°N 以南有增强的向上传播,而在 70°N 以北则是减弱的向上传播。

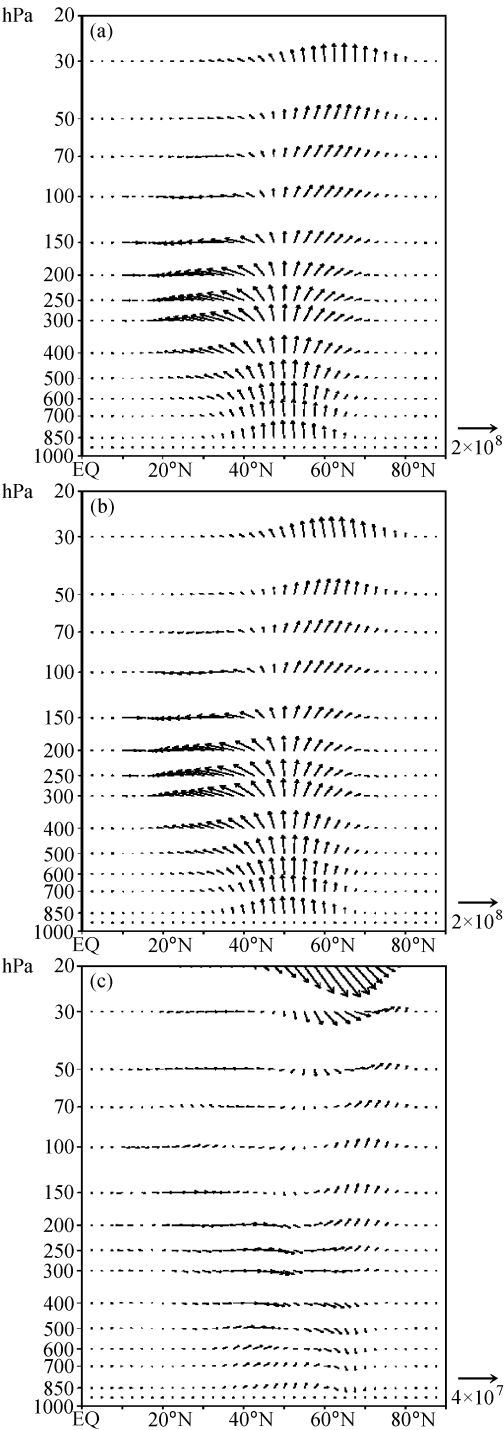


图 4 前 20 个冬季按热带纬向风 QBO 不同位相合成的北半球准定常行星波 EP 通量分布
(a) 东风位相年；(b) 西风位相年；
(c) 东风位相年减去西风位相年

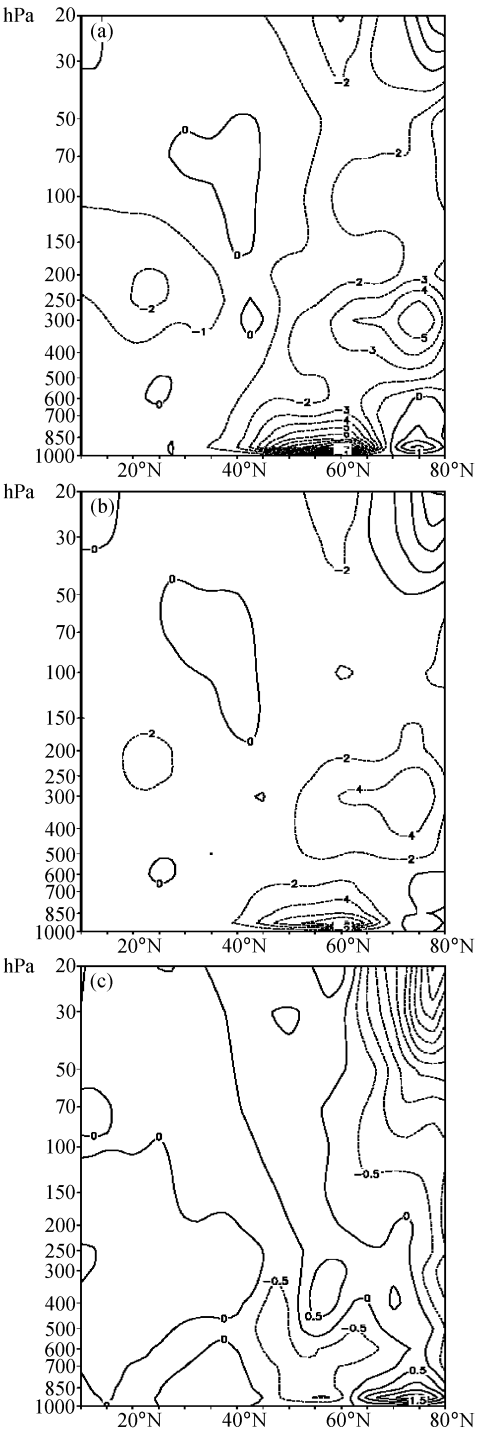


图 5 前 20 个冬季按热带纬向风 QBO 不同位相合成的北半球准定常行星波 EP 通量散度分布
(单位: $\text{m s}^{-1} \text{d}^{-1}$)
(a) 东风位相年；(b) 西风位相年；
(c) 东风位相年减去西风位相年

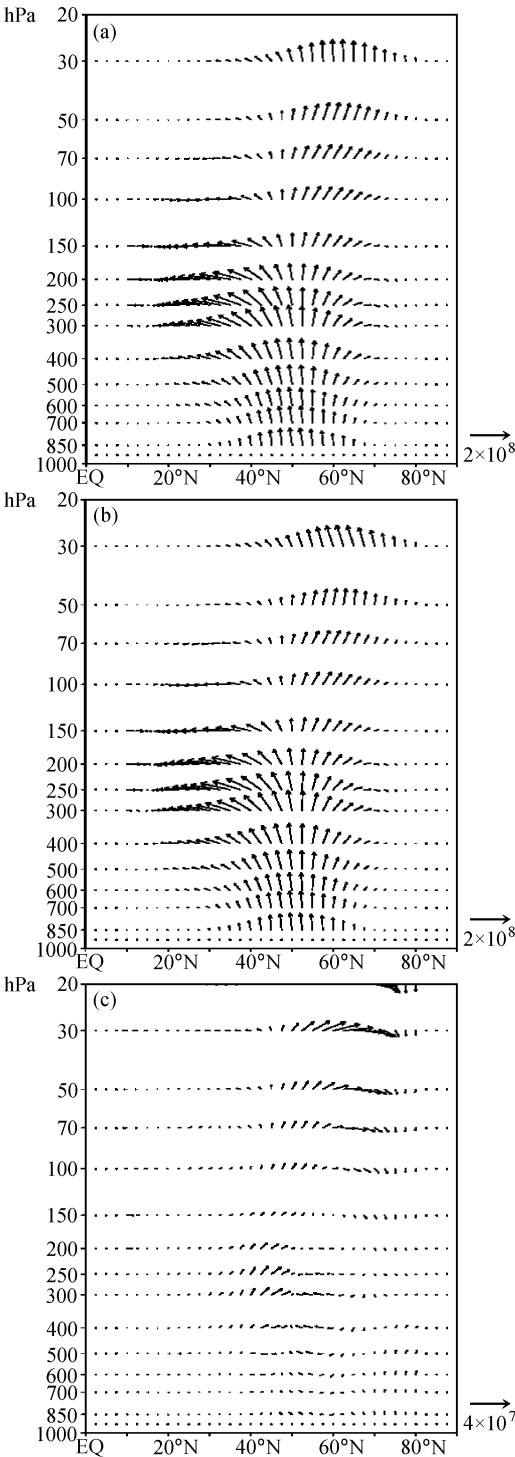


图 6 同图 4，但为后 20 个冬季

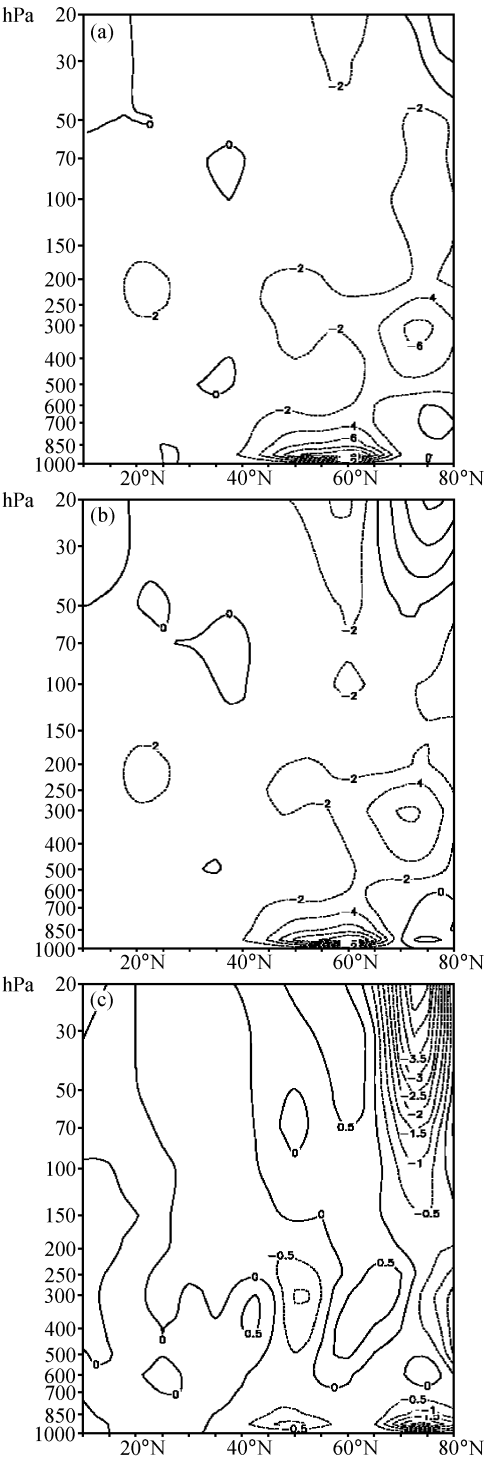


图 7 同图 5，但为后 20 个冬季

5 关于 QBO 影响中高纬大气环流的变化讨论

以上对热带纬向风 QBO 对北半球冬季纬向平均环流和准定常行星波传播的影响进行了分析，由分析中可以看到，这种影响的表现在 1959 年到 1978 年和 1979 年到 1998 年前后两个 20 年间并不完全相同，本节将侧重于讨论其差异的可能原因。

图 8 是 40 个冬季的 50 hPa 纬向平均风进行 5 年滑动平均后的分布情况，从图中可以很明显的看到，热带副热带地区 50 hPa 纬向平均风有着明显的年代际变化，大致以 1978 年为分界点，前 20 年主要为东风位相，后 20 年主要为西风位相。图 9 是前后 20 年平均纬向风及其差值的分布情况，由图来看，后 20 年大部分区域西风明显增强，尤其是在热带地区平流层下层和中高纬 60°N 附近的平流层有两个极大值区。也就是说，从热带地区平流层风场的 QBO 来看，可能还存在着年代际尺度的变化。在我们考虑的 1958/1959~1997/1998 年的 40 年间，表现为前 20 年主要为东风位相，而后 20 年主要为西风位相。同时，中高纬度地区西风明显增强，而极地附近的绕极西风环流则减弱。

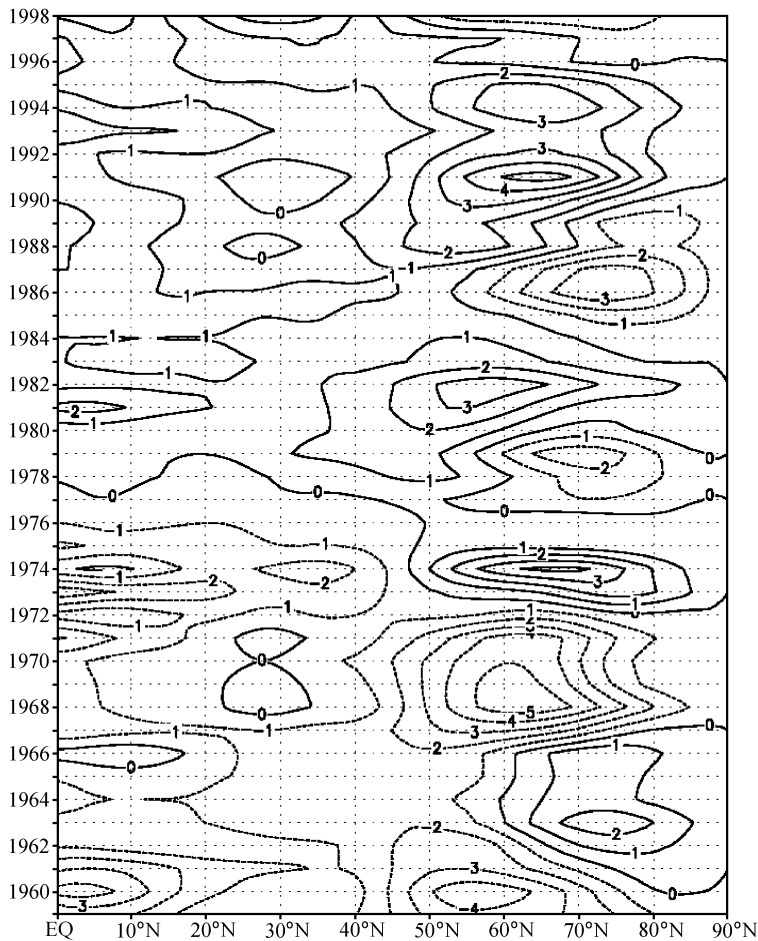


图 8 对 50 hPa 纬向平均风进行 5 年滑动平均后的分布情况

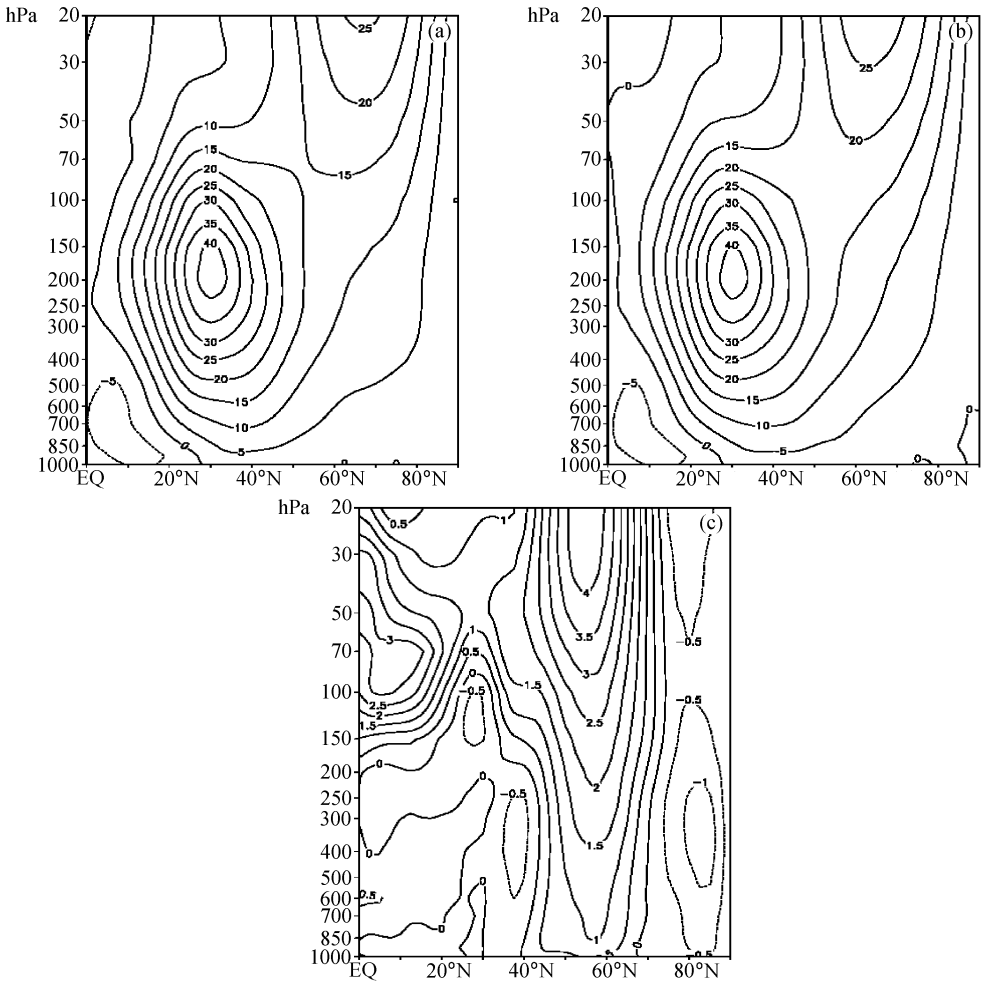


图 9 前后 20 年的纬向平均风及其差值分布

(a) 1959~1978 年纬向平均风；(b) 1979~1998 年纬向平均风；(c) 后 20 年与前 20 年的差值

并且上面提到的风场的这种长时间尺度的变化在计算纬向风 $\bar{u}$ 的 40 年的线性变化趋势时都通过了 95% 的信度检验 (图 10)。但是, 在年代际尺度的变化上, 热带大气和中高纬大气环流的演变不遵循年际尺度的 “Holton-Tan 振荡”, 这说明中高纬大气环流的变化还受到其他因素的影响。

前面的分析已经指出, 热带纬向风 QBO 对于北半球冬季大气环流的影响在 1959~1978 的前 20 年中是十分显著的, 并且与 Holton 和 Tan 在 80 年代初期利用类似时段资料所做工作结果也是相互一致的; 而在 1979~1998 的后 20 年中, 这种影响虽然存在, 但是明显减弱。我们认为这极有可能与中高纬度的纬向风场的长时间尺度变化有关。最近, 陈文^[20]通过分析指出了中高纬度准定常行星波活动的异常存在其自身的变化, 它与中高纬度纬向平均流相互作用, 形成大气内部的固有振荡, 并表现出年际、年代际尺度的变率。具体而言, 就是从年代际尺度的变化上来看, 后 20 个冬季主要为热带平流层的西风位相年, 但是绕极西风并不象 Holton-Tan 振荡那样增强, 而是有所减

弱，且中高纬度的纬向西风明显增强，hPa 20 即中高纬度纬向风场自身的年代际变化削弱了热带纬向风 QBO 的影响。

6 结论

本文利用 NCEP/NCAR 再分析资料，在讨论了如何划分热带纬向风 QBO 的东、西风位相的基础上，诊断分析了热带纬向风的 QBO 对北半球冬季纬向平均环流和中高纬度准定常行星波传播的影响。主要结论有以下几点：

(1) 赤道 50 hPa 的纬向平均风可以很好地表示热带 QBO 不同位相的东、西风厚度，即赤道 50 hPa 的纬向平均风为西风时往往代表一层深厚的西风，而赤道 50hPa 为东风时则往往代表一层深厚的东风。

(2) 热带平流层下层纬向风的准两年周期振荡对北半球冬季纬向平均流的影响主要表现在平流层和对流层上层。

QBO 的东风位相年和西风位相年相比，中高纬地区的绕极西风环流明显减弱，中低纬地区则出现相反变化，从而在平流层的纬向平均环流分布上呈现偶极子分布。这与 Holton 和 Tan^[6]的结果一致。但是 QBO 的影响在从 1958/1959~1997/1998 年的前后 20 年中不尽相同，其中前 20 年的影响十分显著，其相关达到了 99% 的信度；而后 20 年这种偶极子分布明显减弱，且其相关达不到 95% 的信度。

(3) 热带平流层下层纬向风的准两年周期振荡会影响中高纬准定常行星波的传播。QBO 的东风位相年和西风位相年相比，在中高纬度平流层准定常行星波向极地的传播更强，从而在高纬度地区产生异常的 EP 通量辐合。这在从 1958/1959~1997/1998 年的前后 20 年中均是如此。并且，热带 QBO 对准定常行星波传播的影响可以很好地解释北半球冬季纬向平均流的异常：根据行星波与纬向平均流的相互作用理论，异常的 EP 通量辐合会使得西风急流减弱，因此极涡也减弱。但是，QBO 东西风位相下准定常行星波的垂直传播在前后 20 年有所不同，东风位相年下，前 20 年中高纬度平流层行星波向上传播较弱，而后 20 年则以约 70°N 为界，以南向上传播较强，以北向上传播较弱。

(4) 热带平流层下层风场的 QBO 可能还存在着年代际尺度的变化。在 1958/1959~1997/1998 年的 40 个冬季中，前 20 年主要为东风位相，后 20 年主要为西风位相。而中高纬度的纬向平均风存在着独立于热带的自身的变化，在 40 年间，北半球冬季的纬向风在中高纬度明显增强，而在极地附近则减弱，这种变化可能是削弱热带 QBO 风

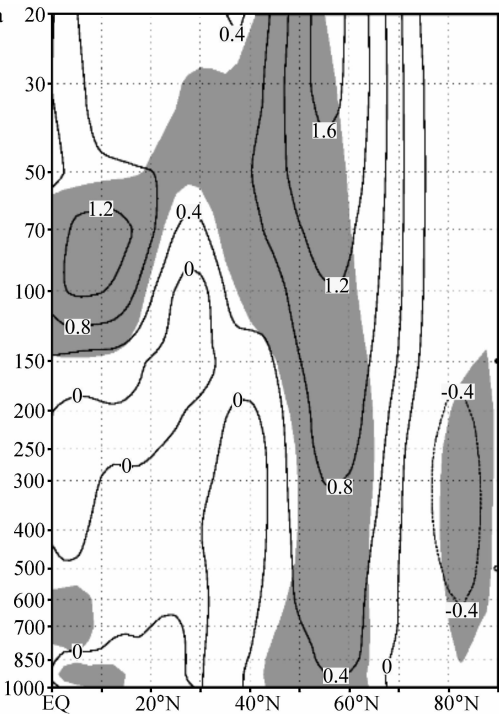


图 10 纬向风 $\bar{u}$ 40 年的线性变化趋势分布
[单位： $\text{m s}^{-1} (10\text{a})^{-1}$]
阴影区表示通过了 95% 的信度检验

场对中高纬大气环流的影响的重要原因。

准定常行星波的形成主要是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。它的分布不仅与外源强迫有关,还与气流的垂直和水平结构有密切关系^[21]。因此,除了热带纬向风的 QBO 外,还有很多其他因素,比如 ENSO、太阳辐射等,都可以通过影响非绝热加热过程而引起准定常行星波的传播异常;而大气内部的非线性相互作用,比如波一波相互作用,也可以影响行星波的分布。所以,在研究热带纬向风的 QBO 对中高纬平流层大气环流的影响时,要滤去其他的因素还需要一套时间更长、包含更多平流层层次的观测资料。

参 考 文 献

- 1 Reed, R. J., W. J. Campbell, L. A. Rasmussen et al., Evidence of the downward-propagating annual wind reversal in the equatorial stratosphere, *J. Geophys. Res.*, 1961, **66**, 813~818.
- 2 Veryard, R. G., and R. A. Ebdon, Fluctuations in tropical stratospheric winds, *Meteor. Mag.*, 1961, **90**, 125~143.
- 3 Andrews, D. G., J. R. Holton, and C. B. Leovy, *Middle Atmospheric Dynamics*, Academic Press, 1987, 489pp.
- 4 Lindzen, R. S., and J. R. Holton, A theory of the quasi-biennial oscillation, *J. Atmos. Sci.*, 1968, **25**, 1095~1107.
- 5 Holton, J. R., and R. S. Lindzen, An updated theory for the quasi-biennial cycle of the tropical stratosphere, *J. Atmos. Sci.*, 1972, **29**, 1076~1080.
- 6 Holton, J. R., and H.-C. Tan, The influence of the equatorial quasi-biennial oscillation on the global circulation at 50 mb, *J. Atmos. Sci.*, 1980, **37**, 2200~2208.
- 7 Holton, J. R., and H.-C. Tan, The quasi-biennial oscillation in the Northern Hemisphere lower stratosphere, *J. Meteor. Soc. Japan*, 1982, **60**, 140~148.
- 8 O'Sullivan, D., and M. L. Salby, Coupling of the quasi-biennial oscillation and the extratropical circulation in the stratosphere through planetary wave transport, *J. Atmos. Sci.*, 1990, **47**, 650~673.
- 9 Dunkerton, T. J., and M. P. Baldwin, Quasi-biennial modulation of planetary wave fluxes in the Northern Hemisphere winter, *J. Atmos. Sci.*, 1991, **48**, 1043~1061.
- 10 Balachandran, N. K., and D. Rind, Modeling the effects of UV variability and the QBO on the troposphere-stratosphere system, Part I: the middle atmosphere, *J. Climate*, 1995, **8**, 2058~2079.
- 11 Chen Wen, and Huang Ronghui, 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.
- 12 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** (5), 513~524.
- 13 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. 常定流的情况, *大气科学*, 1996, **20**, 513~523.
- 14 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.
- 15 McIntyre, M. E., How well do we understand the dynamics of stratospheric warmings? *J. Meteor. Soc. Japan*, 1982, **60**, 37~65.
- 16 Kistler, R., et al., The NCEP-NCAR 50-year reanalysis: Monthly means CD-ROM and documentation, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2001, **78**, 2539~2558.
- 17 Pawson, S., and M. Fiorino, A comparison of reanalysis in the tropical stratosphere. Part 3: inclusion of the pre-satellite data era, *Climate. Dyn.*, 1999, **15**, 241~250.

- 18 Baldwin, M. P., X. Cheng, and T. J. Dunkerton, Observed correlations between winter-mean tropospheric and stratospheric circulation anomalies, *Geophys. Res. Lett.*, 1994, **21**, 1141~1144.
- 19 Huang Ronghui, and K. Gambo, On other wave guide in stationary planetary wave propagations in the winter Northern Hemisphere, *Science in China*, 1983, **26**, 940~950.
- 20 Chen Wen, H. F. Graf and M. Takahashi, Observed interannual oscillations of planetary wave forcing in the Northern Hemisphere winter, *Geophys. Res. Lett.*, 2002, **29**, 30-1 ~34-4.
- 21 Huang Ronghui, and K. Gambo, The response of a hemispheric multi-level model atmosphere to forcing by topography and stationary heat sources, Part I, II, *J. Meteor. Soc. Japan*, 1982, **60**, 78~108.

Diagnostic Analysis of the Impact of Tropical QBO on the General Circulation in the Northern Hemisphere Winter

Chen Wen¹⁾, Yang Lei¹⁾, Huang Ronghui¹⁾ and Qiu Qihong²⁾

1) (*Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080*)

2) (*Beijing Monitoring Center of Environmental Protection, Beijing 100044*)

Abstract By using NCEP/NCAR reanalysis data the criterion for dividing the easterly and the westerly phase of tropical QBO is firstly discussed. The results indicate that the wind at 50 hPa is most closely associated with the depth of westerly. The westerly (easterly) at 50 hPa over equator generally represents a deep westerly (easterly) in the lower stratosphere. Then the impacts of tropical QBO on the zonal mean circulation and the propagation of quasi-stationary planetary waves in the middle and high latitudes of the Northern Hemisphere are studied with 40 winters from 1959 to 1998. The diagnostic results show that the impacts of tropical QBO on the general circulation in the Northern Hemisphere winter are mainly displayed in the stratosphere and the upper troposphere. Comparing with the westerly phase of tropical QBO, in the easterly phase westerly polar vortex in the middle and high latitudes is much decreased, however, flow in the subtropics is increased. These interannual variations of zonal mean flows can be interpreted well with the anomalous propagation of quasi-stationary planetary waves in the middle and high latitudes. Comparing with the westerly phase of tropical QBO, in the easterly phase the quasi-stationary planetary waves in the middle and high latitudes propagate more poleward. As a consequence, there is the anomalous convergence of EP flux in the stratosphere over high latitudes. With the interaction between waves and mean flows the zonal mean westerlies are decreased. But the impacts of tropical QBO is different between the former twenty years and the latter twenty year of 1959~1998. Comparing with the former twenty years, in the latter twenty years the difference between easterly phase and westerly phase is somewhat weak, and the "Holton-Tan oscillation" becomes much weaker. In the easterly phase, the quasi-stationary planetary waves propagate less upward in the former twenty years; however, in the latter twenty years, propagation in south of 70°N is more upward, and in north of 70°N is less upward. The difference may be associated with the variability of zonal wind in the middle and high latitudes.

Key words: quasi-biennial oscillation; depth of westerly; zonal-mean circulation; propagation of quasi-stationary planetary wave