

陶梦初, 何金海, 刘毅. 2012. 平流层准零风层统计特征及准两年周期振荡对其影响分析 [J]. 气候与环境研究, 17 (1): 92-102, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2011.10087. Tao Mengchu, He Jinhai, Liu Yi. 2012. Analysis of the characteristics of the stratospheric quasi-zero wind layer and the effects of the quasi-biennial oscillation on it [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17 (1): 92-102.

平流层准零风层统计特征及准两年周期振荡 对其影响分析

陶梦初¹ 何金海¹ 刘毅²

1 南京信息工程大学大气科学学院, 南京 210044

2 中国科学院大气物理研究所中层大气和全球环境探测重点实验室, 北京 100029

摘要 根据形成机制的不同将平流层准零风层 (Quasi-Zero Wind Layer, QZWL) 划分为由平流层准两年周期振荡 (Quasi-Biennial Oscillation, QBO) 各高度处于不同位相形成的第一类 QZWL 和由于平流层低层经向温度梯度逆转而形成的第二类 QZWL; 利用 ERA-40 再分析资料分析了两类 QZWL 在不同季节中空间结构的变化规律, 讨论了平流层 QBO 对两类 QZWL 年际变化产生的影响。研究表明: 第一类 QZWL 集中出现在冬季赤道附近地区, 第二类 QZWL 在夏季热带外地区和冬季 20°N~40°N 太平洋地区上空; QZWL 夏季高度比冬季低约 3 km, 夏季 QZWL 出现高度比冬季稳定, 约在 50~70 hPa 之间; 由于受到 QBO 的直接影响, 第一类 QZWL 出现的高度和纬度范围存在明显的年际变化, 第二类 QZWL 受到 QBO 的影响主要体现在 QBO 西风位相年和东风位相年相比, 冬季 20°N~40°N 范围内存在第二类 QZWL 的概率较高。

关键词 平流层准零风层 准两年周期振荡 年际变化

文章编号 1006-9585 (2012) 01-0092-11 **中图分类号** P421.32 **文献标识码** A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2011.10087

Analysis of the Characteristics of the Stratospheric Quasi-Zero Wind Layer and the Effects of the Quasi-Biennial Oscillation on it

TAO Mengchu¹, HE Jinhai¹, and LIU Yi²

1 *Department of Atmospheric Science, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044*

2 *Key Laboratory for Middle Atmosphere and Global Environmental Observation, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

Abstract According to the different forming mechanisms, the stratospheric Quasi-Zero Wind Layers (QZWL) are classified into two categories. The first kind of QZWL is due to the transition between two phases of the Quasi-Biennial Oscillation (QBO), and the second kind of QZWL is caused by the reversal of meridional temperature gradient in lower stratosphere. Then based on the ERA-40 reanalysis data, the three-dimension structures of the two

收稿日期 2010-06-24 收到, 2011-11-29 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40633015

作者简介 陶梦初, 女, 1986 年出生, 硕士, 主要从事中层大气方面的研究。E-mail: alwaysyawl@hotmail.com

通讯作者 刘毅, E-mail: liuyi@mail.iap.ac.cn

kinds of QZWL in different seasons are analyzed, further the influence of QBO on them are studied. The results show that the first kind of QZWL can be found at tropical zone in winter, whereas the second kind exists at extratropical areas in summer and over the Pacific Ocean in middle and lower latitude ($20^{\circ}\text{N} - 40^{\circ}\text{N}$) in winter. The height of QZWL in summer is lower and more stable than that in winter. The barometric heights of it in summer are settled from 70 hPa to 50 hPa. Because of the direct effect of QBO, the first kind of QZWL has an obviously interannual variation. The influence of QBO on the second kind of QZWL is that the frequency of QZWL occurring within $20^{\circ}\text{N} - 40^{\circ}\text{N}$ in winter in the westerly phase of QBO is more than in the easterly phase of QBO.

Key words stratospheric quasi-zero wind layer, quasi-biennial oscillation, interannual variation

1 引言

1975年, Belmont et al. (1975) 就提出了零风层、弱风层的概念, 它是指平流层冬夏转换期间东西风发生翻转, 在东风区和西风区之间往往存在空间范围较大、时间上比较稳定的纬向风转换层。随着科学技术的不断进步, 临近空间已经成为 21 世纪人类开发利用的重点空间资源。多种临近空间飞行器的研制开发, 也成为各国关注的焦点, 其中包括平流层飞艇、高空气球等, 具有长滞空时间的优点, 可以实现准定点观测, 满足对特定地区、特定目标、特定事件的连续观测 (吕达仁等, 2002)。然而, 平流层飞行器的这种优点同时对其运行环境提出了很高的要求。在 $20 \sim 22$ km 高度处, 存在一个风速较小和温度相对稳定、基本无垂直运动的区域, 该区域是目前平流层飞行器驻空的理想高度。据此, 吕达仁等 (2002) 提出了零风层的概念, 平流层准零风层 (Quasi-Zero Wind Layer, QZWL) 一般是指平流层下层 20 km 高度附近的大气层, 上下层纬向风风向相反, 同时南北风分量亦很小。平流层准零风层的研究可以为平流层飞行器提供更好的环境参考, 平流层准零风层附近的大气风场是影响平流层飞行器的飞行姿态和动力控制的重要因素。随着平流层 QZWL 概念的提出, 一部分学者对其进行了初步的统计分析。肖存英等 (2008) 首次利用 ECMWF 提供的 1999 年和 2000 年的 ERA-40 再分析风场资料分析了中国上空准零风层的特点及其随季节和地理位置的变化特征, 同时通过对这两个准两年周期振荡 (Quasi-Biennial Oscillation, QBO) 典型年的分析, 分析了 QBO 对 QZWL 年际变化的影响。

近年来, 众多学者的研究证明, 平流层风场年际尺度的影响因子众多, QZWL 是由于平流层风场中上下层纬向风逆转形成的, 是存在于平流层风场的一种特殊现象, 因此 QZWL 的年际变化也受到众多因素的影响。赤道平流层的 QBO 是指热带平流层中低层纬向平均风场东、西风交替出现的现象, 其变化周期在两年左右。QBO 现象是重力波与赤道平流层纬向风之间相互作用的结果 (Wallace and Holton, 1968; Holton and Lindzen, 1972)。QBO 是平流层大气中最为重要的大气年际变率, 国内外大量研究表明 QBO 通过调制平流层行星波可以影响平流层中高纬风场 (Holton and Tan, 1980; Chen and Huang, 2002; Chen and Li, 2007)。同时, 研究表明, 平流层风场还受到众多因子的影响, 其中主要有太阳活动 (Labitzke, 2005; Camp and Tung, 2007b; Lu et al., 2009; 刘毅和陆春晖, 2010) 和 ENSO (Chen et al., 2003; Sassi et al., 2004; Camp and Tung, 2007a; Garfinkel and Hartmann, 2007)。近年来, 平流层对对流层大气环流的影响研究也受到广泛的关注, 特别是在 2008 年冬季的南方暴雪的相关研究中, 刘毅等 (2008) 强调了平流层环流异常对对流层环流异常的影响。

由于观测数据的不足, 目前国内针对平流层 QZWL 的研究有待深入, 除了缺少观测数据外还存在统计工作未系统化、影响因素不清楚等问题。本文将用 ECMWF 提供的 ERA-40 再分析全球资料, 分别从 QZWL 的季节分布和作为平流层低层最强的年际变化信号的 QBO 入手, 分析其在不同季节对 QZWL 产生的影响。

2 资料

本文采用的数据是 ECMWF 提供的 1979~

2001年的ERA-40再分析格点风场资料。该资料水平分辨率为 2.5° (纬度) \times 2.5° (经度), 垂直方向从1000 hPa至1 hPa共23层。ERA-40是ECMWF运用现代同化方法于2003年完成的第二代再分析资料数据集, 相较于第一代再分析资料, ERA-40具有更长的时间尺度、更精确的空间分辨率, 特别是更细化的垂直分层, 对于研究有关平流层中上层的要素场的问题具有优势。

3 QZWL形成机制分析及分类

如前所述, QBO是平流层中最重要的大气年际变率, 而QBO中的东、西风振荡现象以约1 km每月的速度从30 km的高度向下传播 (Ebdon and Veryard, 1961; Reed et al., 1961)。因此在赤道地区, QBO东西风在垂直方向上的交界就会形成符合前文定义的QZWL (吕达仁等, 2002), 我们将这种在热带地区, 由于QBO东西风位相在垂直方向上交界而形成的QZWL称为第一类QZWL。

首先引入对数压力系下的垂直坐标:

$$z = -H \ln(p/p_s), \quad (1)$$

其中, z 是对数压力高度; 高度 $H = RT_s/g_0$, R 为干空气比气体常数, T_s 为全球平均参考温度, g_0 为重力加速度; p 和 p_s (一般取1000 hPa) 分别为气压和参考气压。该垂直坐标可反映温度随高度的变化, 较适用于研究中层大气的相关问题。文中若无特殊说明, 均为垂直坐标。

在对数压力坐标系中, 可导出对数压力坐标下的热成风方程为

$$\frac{\partial \bar{u}_g}{\partial z} = -\frac{R}{fH} \cdot \frac{\partial \bar{T}}{\partial y}, \quad (2)$$

其中, f 表示科里奥利力参数, \bar{u}_g 表示平均地转纬向风, \bar{T} 表示两层大气间的平均温度。根据公式(2), 若两层大气间平均温度的经向梯度 $\partial \bar{T} / \partial y < 0$, 即纬圈平均温度梯度从高纬指向低纬, 则有 $\partial \bar{u}_g / \partial z > 0$, 即地转纬向风随高度的增加而增加; 反之纬圈平均温度梯度从低纬指向高纬, 则平均地转纬向风随高度的增加而减小。

平流层的大气环流与对流层有很大差别, 对流层大气温度主要受下垫面和太阳辐射的影响, 热带外地区纬圈的平均温度梯度始终从高纬指向低纬, 冬季纬圈平均温度梯度较大, 而夏季较小。

因此根据热成风公式(2), 热带外地区对流层大气环流全年以西风为主, 冬季西风强于夏季。而在平流层中大气温度主要受到 O_3 吸收紫外线辐射增温的影响, 热带外地区纬圈平均温度梯度冬季从高纬指向低纬, 夏季则相反, 根据热成风公式(2), 冬季平流层为西风环流, 夏季为东风环流。根据本文已阐明的QZWL的定义 (吕达仁等, 2002), 从大气环流的角度分析, 在热带外地区, 夏季存在下层为西风、上层为东风的QZWL, 而冬季上下层都为西风环流, 没有此类QZWL存在。本文将在热带外地区形成的下层为西风、上层为东风的QZWL称为第二类QZWL。根据热成风公式(2), 第二类QZWL一方面与对流层上层的纬向风有关, 另一方面与平流层中低层平均温度经向梯度有关。

4 QZWL季节变化特征

4.1 随纬度分布

由于平流层中低层的经向风速较纬向风速小很多, 本文把讨论的重点放在纬向风上, 对经向风暂不作讨论。从图1可以看出1月、4月和10月都存在第一类QZWL, 在图1中表现为一条低纬地区上空东西纬向风的交界线 (粗实线), 且在不同季节分布的纬度范围不同。平流层1月热带外地区形成绕极西风环流, 平流层中低层 $0^\circ \sim 20^\circ N$ 存在东西纬向风交界的零风线, 这是由于各气压层处于不同QBO位相造成的 (如图1a所示); $20^\circ N \sim 35^\circ N$ 虽然不存在零风线, 但由于冬季平流层低层中纬度地区存在一个相对温度大值区, 从赤道到中纬度温度梯度逆转, 使得该纬度范围内纬向风速随高度减小, 从而形成一个风速较小的区域, 且该区域会随QBO的东西风位相而变化, 这个将在后面予以讨论。4月平流层处于冬季向夏季环流转换的时期, 低纬地区的第一类QZWL依然维持, 而由于高低纬间热力状况的翻转, 使中高纬地区的热成风转为东风, 因此第二类QZWL基本贯穿于北半球中高纬地区 (如图1b所示)。7月伴随着极地非绝热加热的进一步增加, 以及平流层低层赤道至极地整体温度梯度的逆转, 第二类QZWL出现在 $25^\circ N$ 以北的纬度内 (如图1c所示)。10月西风环流逐渐恢复, 零风线在高

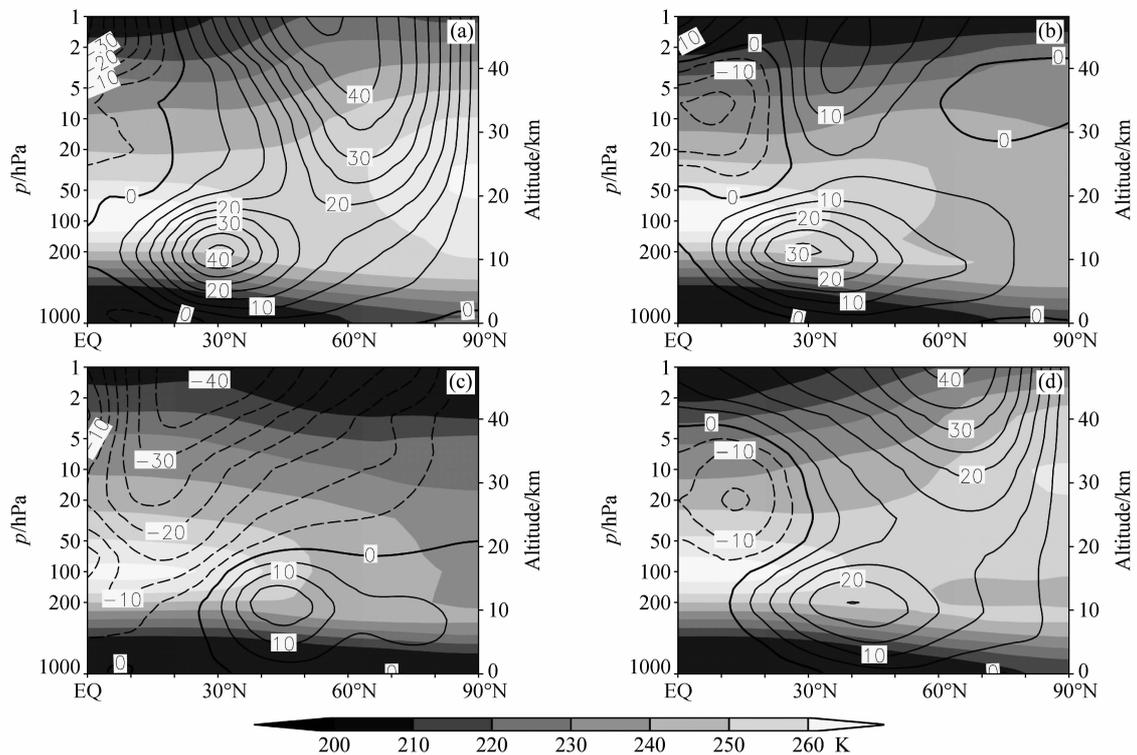


图 1 1979~2001 年气候平均的纬向平均温度 (阴影) 和纬向风 (等值线, 单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) 的纬度-高度分布: (a) 1 月; (b) 4 月; (c) 7 月; (d) 10 月。加粗实线为零风速线

Fig. 1 Latitude-height sections of zonal mean temperature (shaded) and zonal wind (contour, units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) averaged from 1979 to 2001 in (a) Jan, (b) Apr, (c) Jul, and (d) Oct. The contours of zero are thickened

纬地区消失, 转而又向低纬地区推进 (如图 1d 所示)。从逐候的平均纬向风风场分布 (图略) 可以看出, 零风线的分布也存在冬夏两个较长时间的分布状态和短暂的过渡时期: 10 月底至次年 4 月初, QZWL 在低纬度地区存在, 而高纬地区不存在 QZWL, 这是典型的冬季 QZWL 分布特征, 5 月下旬至 9 月初呈中高纬地区存在 QZWL、低纬地区无 QZWL 的夏季分布形式, 冬夏分布形式间的过渡时间大约为一个月。

4.2 随高度分布

为了进一步准确直观地表示不同季节 QZWL 在各高度出现的概率, 根据第 3 节中 QZWL 的定义, QZWL 出现的条件有两个: 1) 100~20 hPa (高度约 16~27 km) 间; 2) 上下两层气压层的纬向风风向相反。将 P 定义为资料中某年某月北半球 QZWL 出现在某一高度占 100~20 hPa 高度中出现总天数的比值, N 定义为该月中 QZWL 出现在北半球 100~20 hPa 总天数, N_Q 定义为该月 QZWL 出现在北半球某一高度上的总天数, 则有

$$P = N_Q / N. \quad (3)$$

本文所用资料共有 23 年, 统计出各月各高度 23 年的气候平均值 (见表 1), 可以看出除 6 月和 7 月以外, QZWL 较多出现于 30~50 hPa, 6 月和 7 月 QZWL 出现的高度比其他月份更为集中, 一般出现在 50~70 hPa, 说明夏季 QZWL 的高度低于冬季。冬季 QZWL 高度受到 QBO 位相的影响, 没有出现 QZWL 在某一高度上特别集中的现象。

4.3 随经度分布

虽然相比于对流层, 平流层风场较平直, 但对流层的行星波在一定条件下会上传到平流层 (Chen and Huang, 2002), 因此平流层风场具有一定的纬向非均匀性。从图 2 可见, 1 月低纬地区 (15°N) 和夏季 (7 月为代表) 中高纬地区 (45°N、60°N、75°N) 存在的 QZWL 都具有较好的纬向一致性, 特别是夏季中高纬地区的 QZWL, 各纬度 QZWL 所在高度均在 18 km 左右, 偏差不超过 ± 2 km。冬季低纬地区除中、西太平洋上空 (120°E~160°W) QZWL 高度约在 17 km 以外, 其他地

表 1 1979~2001 年气候平均北半球 QZWL 出现概率各月份各高度层的分布

Table 1 The climatic averaged probability of QZWL occurring over the North Hemisphere at each level in each month during 1979 - 2001

月份	高度层			
	100~70 hPa	70~50 hPa	50~30 hPa	30~20 hPa
1 月	21.8%	20.2%	33.8%	24.2%
2 月	22.2%	17.0%	37.0%	23.8%
3 月	21.9%	18.3%	38.2%	21.6%
4 月	23.0%	24.4%	33.5%	19.1%
5 月	20.4%	28.0%	36.4%	15.2%
6 月	22.2%	45.3%	25.1%	7.4%
7 月	24.5%	44.8%	19.1%	11.5%
8 月	17.0%	27.2%	36.7%	19.1%
9 月	24.9%	23.8%	31.6%	19.6%
10 月	29.5%	24.0%	29.7%	16.7%
11 月	27.0%	21.5%	30.1%	21.5%
12 月	24.9%	21.0%	30.3%	24.9%

区的 QZWL 高度均在 21 km 左右,比夏季的 QZWL 高度约高 3 km。需要注意的是,冬季中低纬地区 (30°N~45°N) 的纬向一致性较差,太平洋上空 (120°E~120°W) 约 20~27 km 存在 QZWL,这是由于冬季平流层阿留申高压的存在,副热带太平洋地区存在东风带,从热成风原理的角度解释:冬季太平洋上空平流层低层 50°N 附近存在一个暖中心,使温度梯度在赤道至暖中心区域内逆转,热成风为东风,导致上下层纬向风的逆转,从而在该区域内形成了 QZWL,因此这里的零风线应归为第二类 QZWL。

5 QBO 对 QZWL 影响分析

如前所述, QBO 可能是影响平流层中低层风场的最重要因素之一,那么 QBO 对 QZWL 是否有一定的影响?若有,这种影响随着不同的季节有怎样的变化?第 3 节指出 QZWL 在一年中存在冬夏两个持续时间较长的稳定态和两个短暂的过渡期,因此在下面的分析中,主要关注 QBO 在冬季和夏季两个稳定态时对 QZWL 的影响。

5.1 QBO 东西风位相年的划分

关于赤道纬向风 QBO 东西风位相的划分,以往的研究一般采用某一等压面上的风表示,但采用的等压面有所不同,大多采用 30 hPa (Gray,

1984) 或 50 hPa (Yasunari, 1989)。陈文等 (2004) 研究指出,50 hPa 纬向风与 QBO 风场的深厚程度相关最密切,且本文通过分别用 ERA-40 再分析资料 30 hPa 和 50 hPa 赤道上空纬向风分别进行了 QBO 东西风位相年的划分结果也显示,不论冬季 (上年 12 月、1 月、2 月) 或者夏季 (6 月、7 月、8 月) 用 50 hPa 纬向风划分出的东西风位相年的样本数更平均,因此本文选择月平均赤道上空 50 hPa 纬向平均的纬向风作为划分 QBO 东西位相年的指数,分别选取指数最大和最小的 8 年进行合成分析 (按指数由大到小排列): 冬季东风位相年有 1980 年、1997 年、1990 年、1999 年、1985 年、1982 年、1992 年、1995 年,西风位相年有 2000 年、1981 年、1986 年、1989 年、1991 年、1983 年、1998 年、1988 年; 夏季东风位相年有 1994 年、1992 年、1982 年、1987 年、1984 年、1998 年、1996 年、2001 年,西风位相年有 1983 年、1997 年、1988 年、1986 年、2000 年、1993 年、1985 年、1995 年。

5.2 合成分析结果

从图 3 左列可以看到,1 月,不同 QBO 位相时,北半球平流层下层风场的分布有明显差异:虽然东西位相年在冬季热带地区都存在第一类 QZWL,但西风位相年第一类 QZWL (即图中低纬地区的零风线只有一条) 下层为西风、上层为东风,处在约 25 km 的高度上;而东风位相年从 100 hPa 到 20 hPa 高度内夹着一层东风,其上下均为西风,因此存在两条零风线,分别位于 18 km 和 25 km 左右的高度上;西风位相年 20°N 以北的中低纬地区存在第二类 QZWL,从图 3c1 可明显看出“Holton-Tan 振荡”的形式,也就是西风位相年与东风位相年相比约 40°N 以北的平流层下层平均纬向西风偏强,与此相反的是 20°N~40°N 的副热带平流层下层平均纬向西风略偏弱,致使西风位相年第二类 QZWL 区域所跨纬度范围约至 38°N,且西风位相年平流层下层中低纬地区的等风速线更稀疏,风速的垂直和纬向梯度都比较小,而东风位相年冬季基本不存在第二类 QZWL。

从 7 月的合成图 (图 3 右列) 可看出,不论东风位相还是西风位相年,夏季中高纬地区都存在第二类 QZWL,且 QBO 对热带外风场的影响不如冬季显著,主要影响区域集中在 100 hPa 以

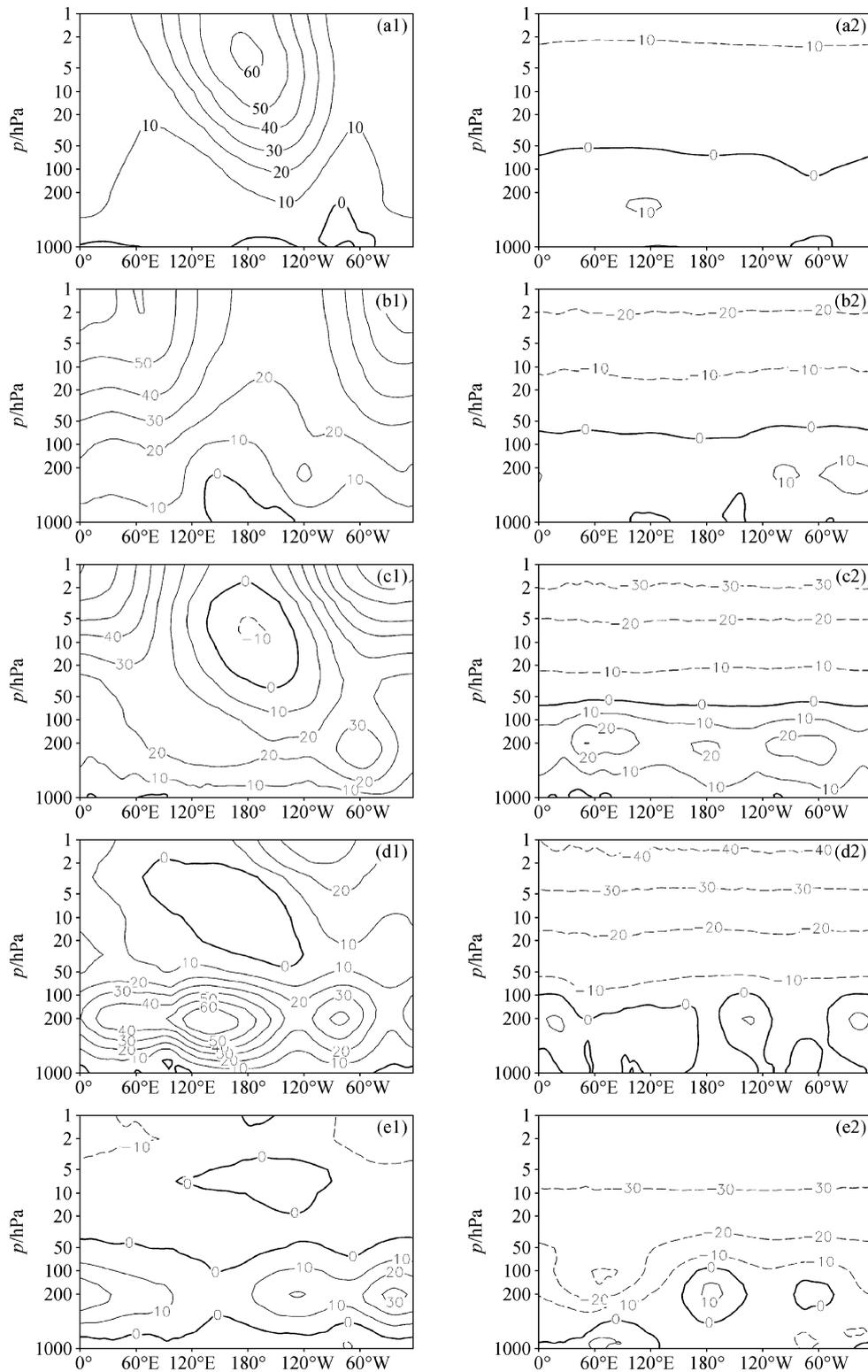


图 2 1979~2001 年 1 月 (左列) 和 7 月 (右列) 气候平均纬向风沿着特定纬圈的经度-高度分布 (单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, 粗实线为零风线): (a1, a2) 15°N ; (b1, b2) 30°N ; (c1, c2) 45°N ; (d1, d2) 60°N ; (e1, e2) 75°N

Fig. 2 Longitude-height sections of monthly zonal wind ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) averaged from 1979 to 2001 along (a1, a2) 15°N , (b1, b2) 30°N , (c1, c2) 45°N , (d1, d2) 60°N , (e1, e2) 75°N in Jan (left panel) and Jul (right panel). The contours of zero are thickened

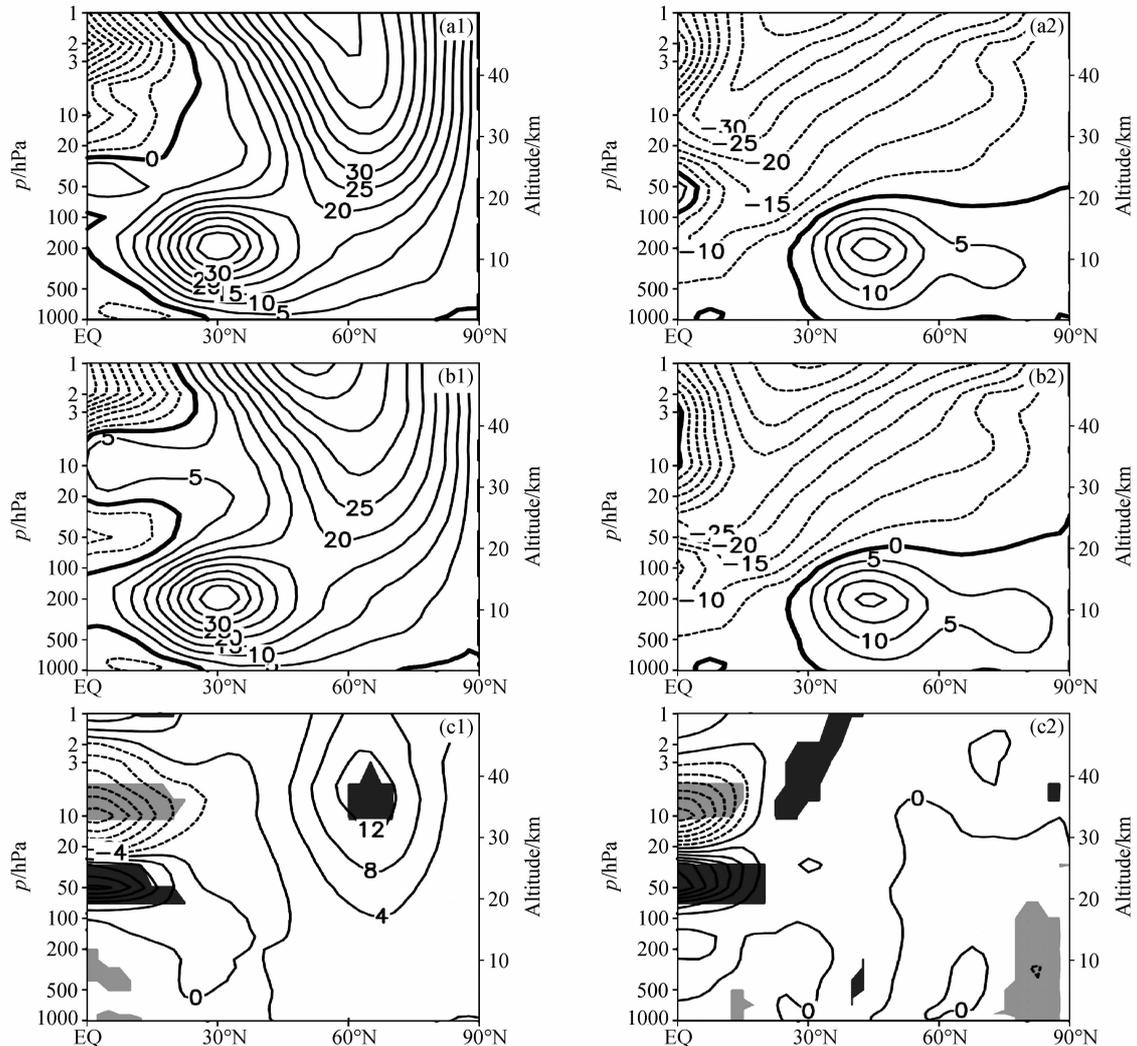


图3 1月(左列)和7月(右列)QBO(a1、a2)西风(b1、b2)东风位相最强8年的合成以及(c1、c2)二者之差纬向风的合成(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)。阴影区域表示通过90%信度 t 检验(浅色为正值区, 深色为负值区)

Fig. 3 Composite zonal wind ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) sections: eight stronger (a1, a2) westerlies and (b1, b2) easterlis phases of the QBO years and (c1, c2) their difference in Jan (left panel) and Jul (right panel). The shading areas are above 90% confidence level of t -test (the light and dark shadings are positive and negative values, respectively)

下的对流层中层, 我们注意到以 50°N 为界, 50°N 以南的对流层热带外地区, 西风位相相较于东风位相年西风略偏强, 50°N 以北西风位相年的纬向西风略偏弱, 这样的差别造成西风位相年 50°N 以南的第二类 QZWL 略高于东风位相年, 而 50°N 以北则相反。

5.3 QBO 异常典型年 QZWL 特征

引言中已经提到, 目前许多研究表明影响平流层中低层风场的主要因素有 QBO、ENSO 和太阳活动, 因此选定 QBO 异常典型年时, 要尽量排除 ENSO 和太阳活动的影响。原则上将 Nino3 指

数和太阳活动指数的标准化距平接近于 0 且 QBO 指数距平绝对值较大的年份选为典型年。据此, 本文选择 1980 年和 1981 年为冬季 QBO 典型东风位相年和典型西风位相年, 1992 年和 1983 年为夏季 QBO 典型东风位相年和典型西风位相年。

从图 4 可以看出, 4 个典型年的 QZWL 符合合成分析中 QZWL 受到 QBO 影响的主要结论。1980 年 1 月, QBO 处于东风位相, QZWL 存在于 $0^\circ \sim 25^\circ\text{N}$ 纬度范围内, 且存在上下两条零风线, 1981 年冬季作为典型的冬季西风位相年, $0^\circ \sim 35^\circ\text{N}$ 范围内存在 QZWL, 且零风线只有一条,

在 50~20 hPa 间；夏季 QBO 处于东风位相的 1992 年和 QBO 处于西风位相的 1983 年，7 月纬向风场分布的区别不如上两年 1 月的差别明显，其 QZWL 的纬度分布范围基本相同，都出现在 25°N 以北，而 1992 年 QZWL 所在高度随纬度有一些起伏，25°N~45°N QZWL 随纬度升高，QZWL 在西风急流轴对应的纬度处于 22 km 左右的高度，之后随纬度略有降低，65°N 以北随纬度升高。而 1983 年 7 月 QZWL 在西风急流轴以北其高度随纬度的变化不大，基本稳定在 20 km 左右。

结合上面的分析，针对合成分析和典型年分析中，冬季中低纬地区 QZWL 受到 QBO 影响存在明显的年际变化这一特征，下面将 1980 年和 1981 年两年 25°N、30°N 和 35°N 的纬向风随经度高度的分布对比分析（图 5）。如 4.3 节所分析，这两个典型年冬季中低纬地区平流层下层风场都具有纬向不一致性，并不是整个纬圈都存在 QZWL、而是一定经度范围内存在。1980 年作为典型东风位相年，中低纬度上 QZWL 分布在太平洋上空（120°E~120°W），而 1981 年是典型的西

风位相年，在中低纬过渡地区，QZWL 的分布经度范围明显大于 1980 年。图 5b1 中 QZWL 几乎覆盖整个 25°N 纬圈，这两年的 QZWL 分布差异最明显存在于欧亚大陆上空（0°~120°E），1980 年无 QZWL 而 1981 年该范围内存在 QZWL。结合 1980 年和 1981 年 1 月的 30 hPa 位势高度场和温度场（图 6）可以看出，1980 年 1 月 30 hPa 中纬度的相对温度大值区在太平洋上空，而 1981 年的相对温度大值区西至欧亚大陆东至北美西部，跨越大半纬圈，这就造成 1981 年 1 月从赤道至极地的温度梯度逆转区域经度范围更广，导致了中纬度更大范围 QZWL 的形成。

5.4 QBO 对 QZWL 影响的讨论

在引言中已经提到，众多因素影响着平流层低层风场的分布，QBO 只是其中之一，其他因素有太阳活动、ENSO 等，这些因素之间存在着复杂的非线性相互作用，下面将进一步分析上文提到的 QBO 对赤道外 QZWL 的影响的一个主要特征，即冬季 QBO 西风位相年比东风位相年在 20°N~40°N 范围内更容易出现 QZWL。下面将 5.1 节中

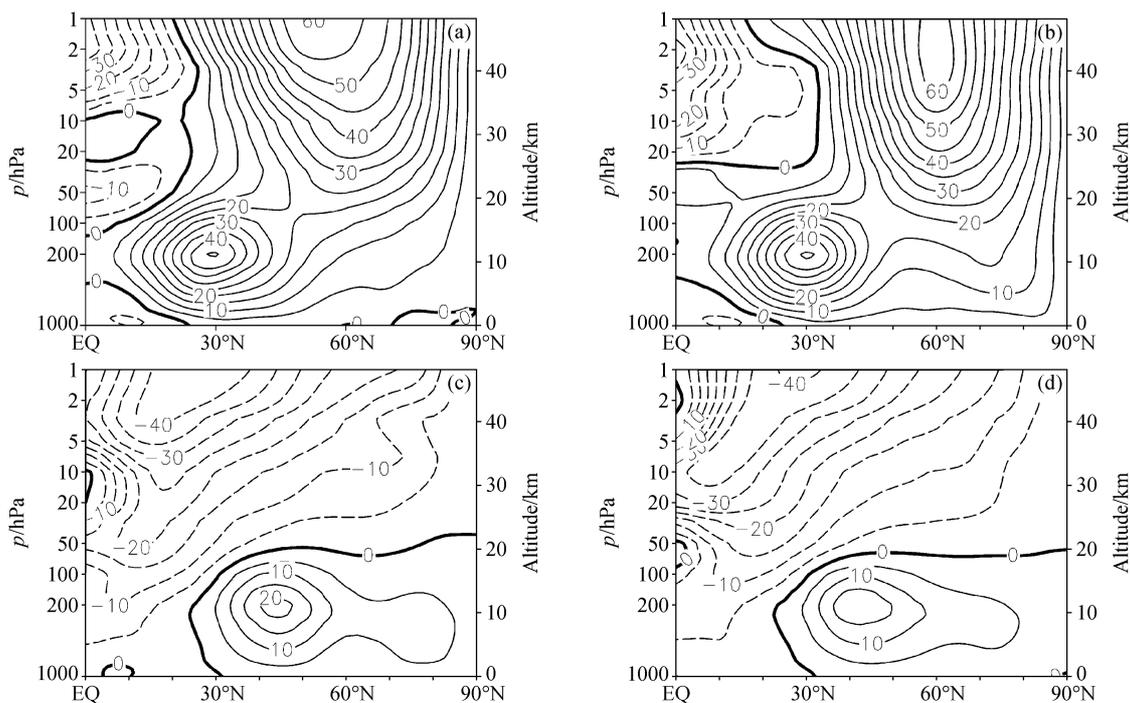


图 4 纬向平均纬向风纬度-高度分布（单位： $m \cdot s^{-1}$ ，粗实线为零风线）：(a) 1980 年 1 月；(b) 1981 年 1 月；(c) 1992 年 7 月；(d) 1983 年 7 月

Fig. 4 Latitude-height sections of zonal wind ($m \cdot s^{-1}$): (a) Jan of 1980; (b) Jan of 1981; (c) Jul of 1992; (d) Jul of 1983. The contours of zero are thickened

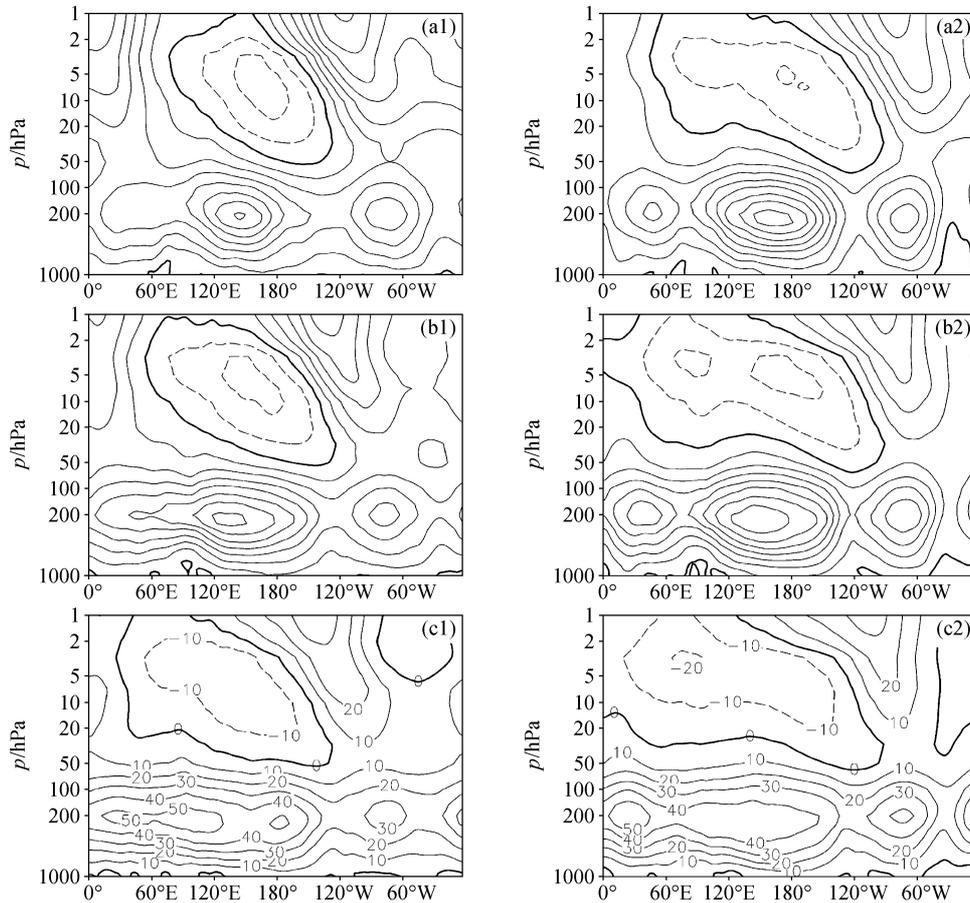


图5 1980年(左列)和1981年(右列)1月北半球纬向平均纬向风沿特定纬圈的经度-高度分布(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$): (a1, a2) 35°N ; (b1, b2) 30°N ; (c1, c2) 25°N

Fig. 5 Longitude-height sections of zonal wind ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) along (a1, a2) 35°N , (b1, b2) 30°N , and (c1, c2) 25°N in Jan of 1980 (left panel) and 1981 (right panel)

选出的QBO典型年分为两组 [QBO信号最强的4年(2000年、1981年、1986年、1989年)和次强的4年(1980年、1997年、1990年、1999年)], 将两组所对应的1月QZWL出现概率(具体计算方法见4.2节)分别进行了合成。对比图7a和7b可以发现, QZWL出现概率最大区都在中纬度太平洋地区, 而QZWL的概率大值区在西风位相年比东风位相年向东和向西扩展了, 整个中纬度地区西风位相年都比东风位相年QZWL出现概率要大, 而其他年份中中纬度QZWL存在概率在西风位相年和东风位相年的差异则不大。这是因为图7a和7b反映的是QBO信号最强的4年, QBO对QZWL的影响占主要地位。但在QBO信号较弱的年份中, 其他因素和QBO信号相互作用, 对QZWL的影响更为复杂。因此, 如何将各影响因子有效的分离, 并了解它们有怎样

的相互作用是一个值得探讨的问题。

另外1月北半球高纬度地区在冬季有约10%的概率出现QZWL, 这与平流层爆发性增温(Stratospheric Sudden Warming, SSW)有关。在SSW期间, 高低纬间温度梯度发生了反转, 根据热成风关系式(2), 纬向风随着高度的增加而减小, 当减小到负值时, 西风转为东风, 就形成了QZWL。但由于SSW出现的时间较短, 且强度较弱的SSW不能引起纬向风的转向, 所以由于SSW的出现而形成的QZWL出现的概率较小。

6 结论

利用ECMWF提供的ERA-40再分析资料, 在讨论了QZWL两种形成机制前提下, 将QZWL划分为两类, 然后分析了两类QZWL的季节变化

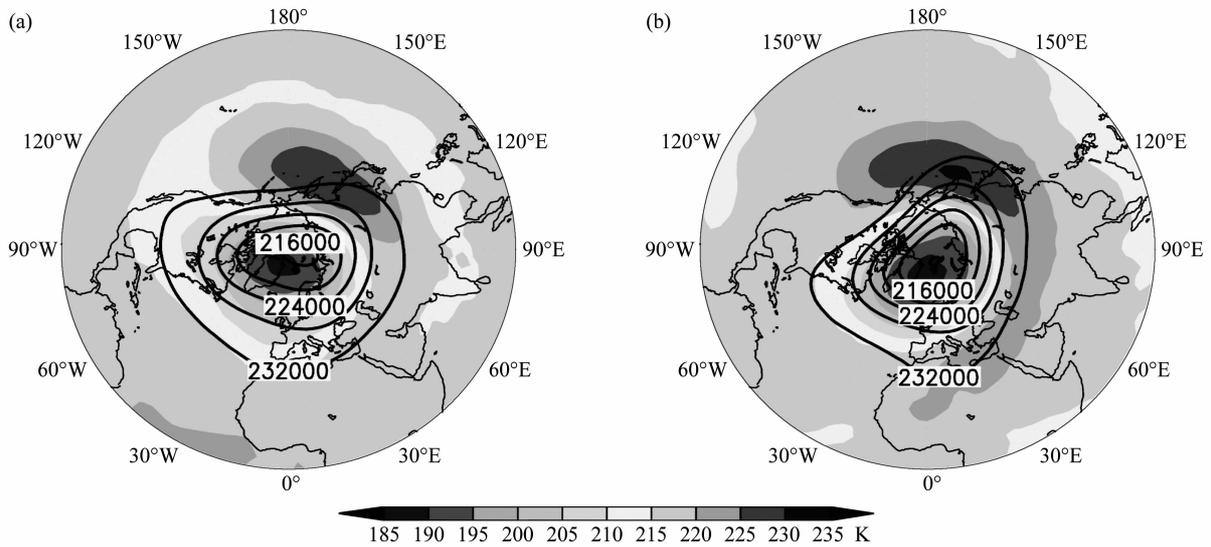


图 6 (a) 1980 年和 (b) 1981 年 1 月北半球 30 hPa 温度场和位势高度场的水平分布 (阴影为温度场; 等值线为位势高度场, 单位: gpm)

Fig. 6 The spatial distribution of the temperature (shaded) and geopotential height (contours, units: gpm) in Jan of (a) 1980 and (b) 1981 over the North Hemisphere at 30 hPa

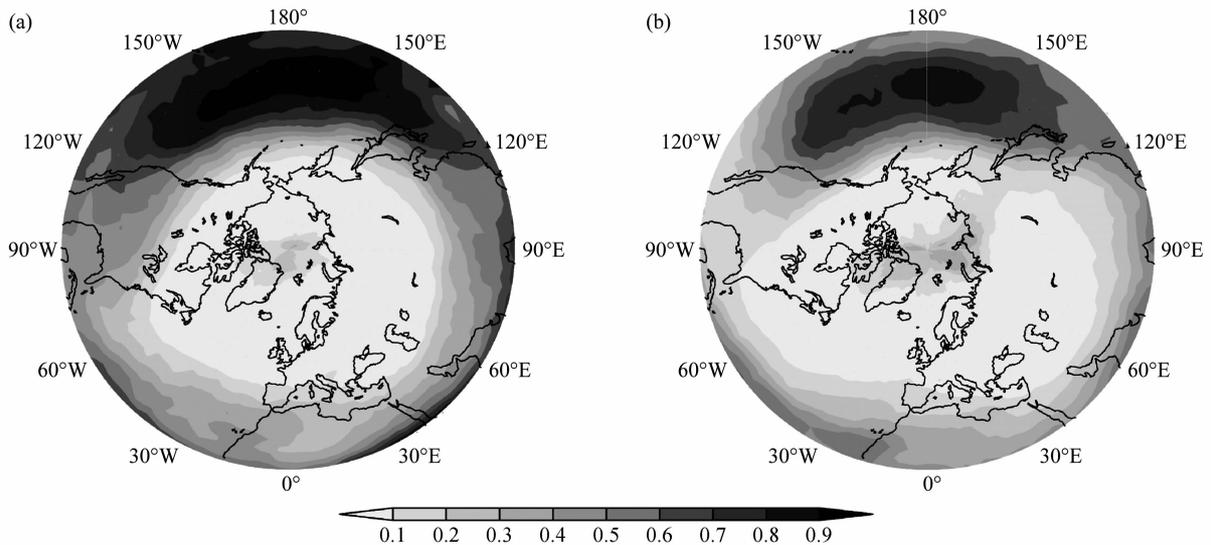


图 7 (a) 西风相和 (b) 东风相年 QBO 指数最强 4 年的平均 1 月北半球 (最外纬圈 20°N) 100~20 hPa 存在 QZWL 的概率

Fig. 7 The QZWL frequency occurring at 100 - 20 hPa over the North Hemisphere in Jan of the four strongest (a) westerly phase and (b) easterly phase of QBO years

特征, 并讨论了 QBO 东西风位相年划分方法, 通过合成分析和 QBO 典型异常年的分析讨论了冬夏两季 QBO 对两类 QZWL 的影响, 得出的结论如下:

(1) 根据 QZWL 的形成机制可将其分为两类, 第一类的形成机制是平流层中低层热带地区的 QBO 各高度上的位相差; 第二类是由于平流层

中低层热带外地区经向温度梯度逆转而形成的。第一类 QZWL 出现在平流层冬季和冬夏过渡时期的低纬地区, 第二类 QZWL 冬季出现在中低纬度 (20°N ~ 40°N) 太平洋地区上空, 夏季和冬夏过渡时期出现在中高纬地区。

(2) QZWL 出现的高度大约在 100 ~ 20 hPa 即约 16 ~ 27 km 之间。夏季 QZWL 分布高度比冬

季低约 3 km, 夏季 QZWL 的分布高度比冬季稳定, 约在 20 km; 冬季 QZWL 由于 QBO 的影响分布高度存在明显的年际变化, 东风位相时可能存在上下两个零风层, 西风位相年 QZWL 约在 20 ~ 25 km 之间。

(3) 无论冬季、夏季, QBO 都会对 QZWL 产生影响, 冬季 QBO 对 QZWL 的影响更明显, 主要体现在冬季相较于 QBO 东风位相年, QBO 西风位相年在 20°N ~ 40°N 的纬度范围内出现 QZWL 的概率更高, 但在 QBO 位相不显著或其他影响因子较强的年份, 该规律则不明显。

参考文献 (References)

- Belmont A D, Dartt D G, Nastrom G D. 1975. Variations of stratospheric zonal winds, 20–65 km, 1961–1971 [J]. *J. Appl. Meteor.*, 14 (4): 585–594.
- Camp C D, Tung K K. 2007a. Stratospheric polar warming by ENSO in winter; A statistical study [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 34: L04809, doi: 10.1029/2006GL028521.
- Camp C D, Tung K K. 2007b. Surface warming by the solar cycle as revealed by the composite mean difference projection [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 34: L14703, doi: 10.1029/2007GL030207.
- Chen Wen, Huang Ronghui. 2002. The propagation and transport effect of planetary waves in the Northern Hemisphere winter [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 19 (6): 1113–1126.
- Chen Wen, Takahashi M, Graf H F. 2003. Interannual variations of stationary planetary wave activity in the northern winter troposphere and stratosphere and their relations to NAM and SST [J]. *J. Geophys. Res.*, 108 (D24): 4797, doi: 10.1029/2003JD003834.
- Chen W, Li T. 2007. Modulation of Northern Hemisphere wintertime stationary planetary wave activity; East Asian climate relationships by the quasi-biennial oscillation [J]. *J. Geophys. Res.*, 112: D20120, doi: 10.1029/2007JD008611.
- 陈文, 杨蕾, 黄荣辉, 等. 2004. 热带准两年振荡影响北半球冬季大气环流的诊断分析 [J]. *大气科学*, 28 (2): 161–163.
- Chen Wen, Yang Lei, Huang Ronghui, et al. 2004. Diagnostic analysis of the impact of tropical QBO on the general circulation in the Northern Hemisphere winter [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 28 (2): 161–163.
- Ebdon R A, Veryard R G. 1961. Fluctuations in equatorial stratospheric winds [J]. *Meteor. Mag.*, 90: 125–143.
- Garfinkel C I, Hartmann D L. 2007. Effects of the El Niño–Southern Oscillation and the quasi-biennial oscillation on polar temperatures in the stratosphere [J]. *J. Geophys. Res.*, 112: D19112, doi: 10.1029/2007JD008481.
- Gray W M. 1984. Atlantic seasonal hurricane frequency. Part I: El Niño and 30 mb quasi-biennial oscillation influences [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 112: 1694–1668.
- Holton J R, Lindzen R S. 1972. An updated theory for the quasi-biennial cycle of the tropical stratosphere [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 29: 1076–1080.
- Holton J R, Tan H C. 1980. The influence of the equatorial quasi-biennial oscillation on the global circulation at 50 mb [J]. *J. Atmos. Sci.*, 37 (10): 2200–2208.
- Labitzke K. 2005. On the solar cycle-QBO-relationship; A summary [J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 67 (1–2): 45–54.
- 刘毅, 陆春晖. 2010. 冬季太阳 11 年周期活动对大气环流的影响 [J]. *地球物理学报*, 53 (6): 1269–1277.
- Liu Yi, Lu Chunhui. 2010. The influence of the 11 year sunspot cycle on the atmospheric circulation during winter [J]. *Chinese Journal Geophysics (in Chinese)*, 53 (6): 1269–1277.
- 刘毅, 赵燕华, 管兆勇. 2008. 平流层环流异常对 2008 年 1 月雪灾过程的影响 [J]. *气候与环境研究*, 13 (4): 548–555.
- Liu Yi, Zhou Yanhua, Guan Zhaoyong. 2008. Influences of stratospheric circulation anomalies on tropospheric weather of the heavy snowfall in January 2008 [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 13 (4): 548–555.
- 吕达仁, 孙宝来, 李立群. 2002. 零风层与我国首次高空气球停留试验 [J]. *目标与环境特性研究*, 22 (1): 45–51.
- Lü Daren, Sun Baolai, Li Liqun. 2002. Zero wind layer and the first dwell experiment of high-altitude balloon in China [J]. *Target Environment Feat (in Chinese)*, 22 (1): 45–51.
- Lu H, Gray L J, Baldwin M P, et al. 2009. Life cycle of the QBO-modulated 11-year solar cycle signals in the Northern Hemisphere winter [J]. *Quart. J. Royal Meteor. Soc.*, 135 (641): 1030–1043.
- Reed R J, Campbell W J, Rasmussen L A, et al. 1961. Evidence of a downward-propagating, annual wind reversal in the Equatorial stratosphere [J]. *J. Geophys. Res.*, 66 (3): 813–818.
- Sassi F, Kinnison D, Boville B A, et al. 2004. Effect of El Niño–Southern Oscillation on the dynamical, thermal, and chemical structure of the middle atmosphere [J]. *J. Geophys. Res.*, 109, D17108, doi: 10.1029/2003JD004434.
- Wallace J M, Holton J R. 1968. A diagnostic numerical model of the quasi-biennial oscillation [J]. *J. Atmos. Sci.*, 25 (2): 280–292.
- 肖存英, 胡雄, 龚建村, 等. 2008. 中国上空平流层准零风层的特征分析 [J]. *空间科学学报*, 28 (3): 230–235.
- Xiao Cunying, Hu Xiong, Gong Jiancun, et al. 2008. Analysis of the characteristics of the stratospheric quasi-zero wind layer over China [J]. *Chinese Journal of Space Science (in Chinese)*, 28 (3): 230–235.
- Yasunari T. 1989. A possible link of the QBOs between the Stratosphere, Troposphere and sea-surface temperature in the tropics [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 67 (3): 483–493.