

# 对流层大气环流的甚低频振荡\*

吴晓红 王绍武

(北京大学地球物理系,北京,100871)

## 摘要

对1951—1992共42a 500hPa北半球高度场的月平均资料进行了纬圈谐波分析,计算了35°N与55°N超长波振幅及位相,以及35—55°N北半球月平均纬向风距平百分比。对超长波振幅及纬向风距平百分比做了小波转换。结果表明,对流层大气环流变化中存在3种准周期性的甚低频振荡:1.年代际的振荡;2.准2a周期振荡(QBO);3.半年韵律。同时发现对流层QBO和平流层赤道纬向风QBO之间可能没有联系。

**关键词:**大气环流,年际变率,气候诊断。

## 1 引言

气候异常作为气候研究的重要目标越来越为人们所重视,对形成气候异常直接原因的大气环流异常的研究亦越来越广泛和深入。早在本世纪40年代,Namias<sup>[1]</sup>就提出使用月平均环流作气候预报(即长期预报),并证明:(1)月平均环流与月平均气温及月总降水量有密切关系;(2)月平均环流的演变是有规律可寻的;(3)海温异常对大气环流异常有巨大影响,而且海洋与大气环流异常经常处于相互作用之中。Namias的一系列工作指明了气候预报应该走的道路。随着中期数值预报的发展,大气环流模式的改进,月平均环流的数值预报已成为当前气候预报的一个重要环节<sup>[2]</sup>。

不过,Namias虽然指出月平均环流演变是有规律可寻的,但却没有说明有什么规律。近三四十年来人们对大气环流变化所进行的研究主要涉及3种时间尺度,即月-季尺度,年际尺度及年代际尺度。当然,大气环流也应该有世纪尺度的变化,但由于资料不足,所以研究的不多。

关于年际变化,亦称年际变率(interannual variability)的研究,过去主要集中在准2a振荡(QBO)及ENSO上。1950年代末人们就发现了赤道平流层纬向风中的QBO<sup>[3,4]</sup>。后来证实在地面气候要素变化中也普遍存在QBO<sup>[5,6]</sup>。海平面气压<sup>[7]</sup>与大气活动中心<sup>[8]</sup>以及对流层中纬度西风<sup>[9]</sup>亦可能有QBO。但均未能证明地面气候要素和对流层环流中的QBO与赤道平流层纬向风的位相是否有关。只有Miller<sup>[10]</sup>指出1962—1971年对流层的能量变化可能与赤道平流层纬向风有关,但序列太短。到目前为止,能够认为可能与赤道

\* 初稿时间:1994年12月19日;修改稿时间:1995年5月22日。

资助课题:《气候动力学和气候预测理论研究》项目第七课题。

平流层纬向风有关的只有热带气旋和印度季风降雨<sup>[11]</sup>。

至于 ENSO, Berlage<sup>[12]</sup>曾指出有 2—3a 的周期。后来人们一般认为周期在 2—7 年之间。近来的工作<sup>[13]</sup>表明 ENSO 的谱可能有两个峰, 一个在 2a 左右, 一个在 4—5a 左右。因此, 有的学者强调 ENSO 可能与平流层纬向风的位相有关系, 且 EL Nino 多发生于东风位相<sup>[14]</sup>。

对于 10a 或 20—30a 的振荡, 目前通称年代际变率(inter-decadal variability)。过去的研究表明, 22—23a 周期及 35—36a 周期较为突出。前者可能与太阳活动有关, 后者有时称为 Brückner 周期<sup>[6]</sup>。Brier<sup>[15]</sup>及 Wagner<sup>[7]</sup>也分析出海平面气压可能有 22a 周期。但是对流层环流的年代际振荡目前还研究的不多。

## 2 资料与分析方法

采用的资料为 1951—1992 年共 42a 的 500hPa 北半球月平均高度场, 纬度范围: 20—85°N。网格为 5°(纬度)×10°(经度)。

目前国内外采用的分析大气环流的方法有 3 种: 经验正交函数(EOF)分析方法及其进一步的发展转动经验正交函数(REOF)和复经验正交函数(CEOF); 遥相关分析方法; 以及针对某个地区或纬度带计算的环流指数。这里, 我们采用的是另一种分析方法, 即沿纬圈作谐波分析来研究大气环流中的超长波变化。因为本文采用的是 500hPa 月平均资料, 已滤掉了大部分移动性的波动, 保留下来的主要是准稳定的大气超长波<sup>[2]</sup>。所以, 用纬向谐波分析能较好地反映对流层大气环流的特征。另外, 本文在大气环流振荡的分析中不仅用了一般通用的功率谱分析方法, 还采用了一种较新的分析方法, 即小波分析方法。这种方法能把一维时间序列展开在时间和频率两个方向上, 同时给出在各个频率段随时间的变化, 而且能反映不同频率之间的关系<sup>[16]</sup>。

文中集中讨论了两个有代表性的纬度, 55°N(代表中纬度)和 35°N(代表副热带)<sup>[17]</sup>。将其高度振幅转换为相对于 1961—1990 年 30a 平均的振幅距平百分比, 建立起稳定且消弱了序列的季节变化超长波时间序列。在建立 500hPa 月平均图上 35—55°N 之间纬向地转风的时间序列时, 也采用了同样的方式。

## 3 大气超长波的概况

自从 1930 年代末 Rossby<sup>[18]</sup>提出大气长波理论后, 随着对流层观测资料的不断增加, 大气环流的研究重点转到了对流层中层。在这一层的月平均环流图上, 尤其是在中高纬度, 大气超长波的 1 到 3 波约占大气环流纬向距平总方差的 90%<sup>[16]</sup>因此, 大气超长波的变化基本上描述了大气平均环流的主要特征。

### 3.1 大气超长波的年变程

1960 年代初, 王绍武<sup>[17]</sup>曾用 1951—1960 年的北半球 500hPa 月平均图分析过大气超长波的变化。这里采用 1961—1990 年 30a 500hPa 月平均图, 对超长波的年变程进行分析。选取这 30a 是由于 WMO 最新建议一切气候要素均取这一段时间平均作为标准值(normal), 所以文中所谈到距平都是指对这段时间平均的偏差。

图 1 是 55°N(实线)和 35°N(虚线)大气超长波 1—3 波相对振幅的年变程, 其特点为:



相关分析。图 4 给出了 55°N(实线)和 35°N(虚线)的落后相关系数,其最突出的特点是 55°N 在 3—4 月和 9—10 月各有一个低点,且冬季的持续性高于夏季。在 35°N,则高点 and 低点均不稳定。不论在 55°N 还是 35°N 冬季 1 波与 2 波的持续性较为突出,但在 3—4 月份有突变的迹象。而 3 波在夏季持续性较高。可见大气超长波异常有一定持续性,其持续性随季节的变化而改变,春秋季节,特别在中纬度大气环流异常容易改变,这与过去对 500hPa 高度场直接分析的结果<sup>[19]</sup>一致。

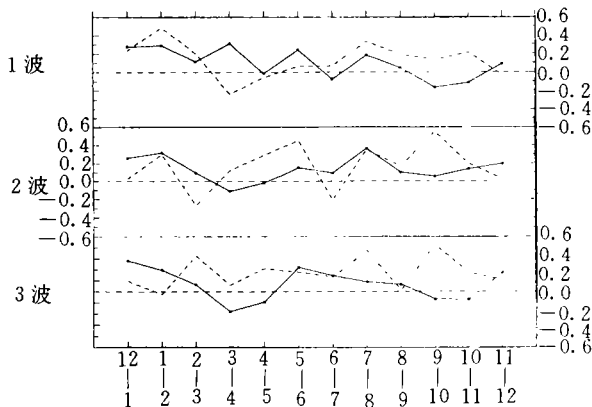


图 4 大气超长波相对振幅的落后 1 个月相关  
(实线为 55°N,虚线为 35°N)

对大气超长波序列以及 35°N 和 55°N 之间地转纬向风的功率谱分析也表明,大气环流的年际变化确实是有规律可寻的。图 5 为在 35°N 和 55°N 1—3 波及其之间纬向风序列的功率谱图。从图中可以看出这些序列中存在着 3 种周期的甚低频振荡;(1)年代际的长周期;(2)2.5—2.6a 的年际周期(QBO);(3)1 年周期。下面就这 3 种周期的甚低频振荡分别进行讨论。

#### 4 大气超长波中的年代际变率

早在 1940 年代期间,Brier<sup>[15]</sup>利用 1899—1939 年北半球表面气压资料,通过计算大气总体质量分析出表面气压资料中存在 40a 左右的年代际变化周期。以后随着观测资料的不断丰富,Namias<sup>[20]</sup>等在大气环流的信号中陆续分析了年代际的变化,只是周期的时间长度有所不同。

从图 5a 35°N 功率谱中可以发现,副热带地区的 1 波和 3 波都存在年代际的强周期谱峰值;1 波有直线趋势,而 3 波在 21a 处有很强的谱峰值。不过资料仅 42 年,因此不可能精确的指出年代际振动的周期长度,况且功率谱分析在低频部分分辨率较低,所以这里无论直线趋势还是 21a 周期都只能认为是一个粗劣的估计。如图 6 所示,35°N 1 波的年代际周期可能约为 30—40a。Wagner<sup>[7]</sup>在对北半球 1899—1964 年共 66a 海平面气压资料的可信度做了充分分析后认为,在低纬度或接近副热带地区或季风环流优势区,海平面气压有一长期减弱趋势。中国上海站近 500a 旱涝级别的功率谱分析中也出现了 36a 左右的年代际周期<sup>[21]</sup>,这可能与副热带的超长波变化有关。如 1950 年代及 1980 年代长江中下游多雨,而这时 35°N 1 波的振幅也较高。图 5a 中 3 波表现出的 21a 左右谱峰值在许多大气环流的要素资料序列中都出现过。Wagner<sup>[7]</sup>在海平面气压资料中得到的另一年代际周期的长度为以 21a 为中心的强功率谱带,具有这一长周期的区域分布是和北半球表面的沙漠与半干旱地区相对应的,而且在亚洲较低的中纬度地区 21 年功率谱值最大。Yamagata<sup>[22]</sup>发现亚洲季风系统有年代际时间尺度的变化,进一步证明了副热带存在 21a 左右周

期的可能性。Willet<sup>[23]</sup>在分析美国中西部降水资料中也得出了近 20a 的变化周期。显然,这些都和副热带的年代际振荡相关联。

## 5 大气超长波的年际变率

大气环流的准 2a 振荡(QBO)变化首先是在平流层发现的。1960 年代初,Ebdon<sup>[24]</sup>指出平流层赤道附近存在 2a 的周期振荡,自此以后对平流层大气环流的研究表明,赤道平流层纬向风的年际变化为准 2a 的周期振荡,其周期平均为 26—27 个月<sup>[3]</sup>。对流层大气环流的 QBO 也早已引起人们的重视,并证明了它的普遍存在性。Landsberg<sup>[5]</sup>就地球表面温度的分析提出,资料中的稍大于 2a 的周期是世界范围的。Angell<sup>[8,25]</sup>等在对流层环流参量,如中纬度海平面纬向风及北半球大气活动中心位置、强度等的分析中也发现了 QBO,并指出周期的长短是有差异的。不过对流层大气中的 QBO 并不象赤道平流层中所表现的那么一目了然。而且,由于受资料长度的限制,这方面的工作大都限于海平面资料。使用这种资料具有一定的局限性;因受下垫面的影响,其对大气环流的反映要差一些。同时,对许多高海拔地区所进行的资料订正也减弱了资料的可信度。而对流层中层 500hPa 的资料对对流层大气环流的反映要好得多。本文在利用这一层的资料分析中发现,大气环流在 55°N 的超长波序列及 35—55°N 之间的纬向风距平百分比序列的功率谱图上有突出准 2a 谱峰值,见图 5 的 b 和 c。除 55°N1 波外,准 2a 谱峰值位于 2.5—2.6a 的频率上,并且都超过了 95% 的信度标准。Wagner<sup>[7]</sup>对海平面气压资料的分析中同样发现了 2.5a 的准周期,并指出 2.5a 的准周期振荡和地球上气旋生成及活动区相关,与这里分析的结果一致。Wagner 在其分析中还得到了另一个准 2a 周期,即 2.2a 左右的周期,并发现这一准 2a 周期的振荡是和地球上反气旋生成及活动区相关的,并指出在中高纬强反气旋生成及路径区谱峰值很强。在 55°N1 波中 2.1a 左右的准 2a 谱峰值是否是和 Wagner 分析出的后一种准 2a 周期有关,这一问题还需要进一步研究。

下面研究对流层中层中高纬度大气超长波中存在的 QBO 是否与赤道平流层纬向风中的 QBO 相关联。尽管平流层纬向风的观测资料从 1951a 就有,但就同一个站而言没有一个自 1951 年至今的完整观测资料序列。所以,本文采用 CAC 发布的 Balboa (9°N)

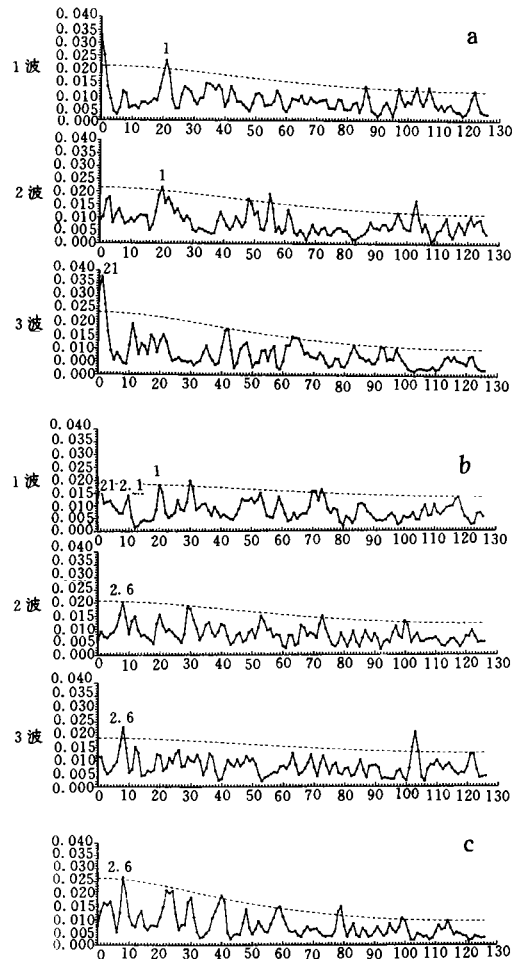


图 5 大气超长波的功率谱

(a, 35°N; b, 55°N; c, 35—55°N 之间的地转风距平)

30hPa 纬向风距平曲线(1951—1985)和 Singapore (1°N) 30hPa 纬向风距平曲线(1974—1993)来建立一从 1951—1993 年 30hPa 纬向风距平序列。如图 7 中虚线所示。从图中可以看出,平流层纬向风中的准 2a 周期振荡正如 Angell(1986)<sup>[26]</sup>所言,不仅周期长度有变化,而且东西风的半周期也有变化,且并非对称。利用本文建立的最近 43a 赤道平流层 30hPa 纬向风距平序列所作的功率谱分析得到其周期为 28 个月(2. 2a),这表明赤道平流层 QBO 的平均周期比 1950 年代末到 1960 年代初得到的结果有所增长。

首先,分析标准周期内平流层纬向风中的 QBO 与对流层中层 35—55°N 纬向风中

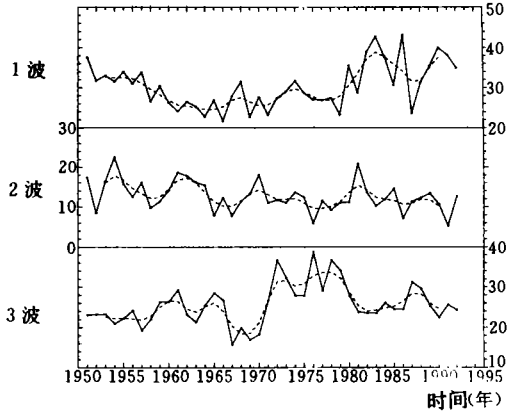


图 6 35°N 大气超长波相对振幅的年平均变化(虚线为 5 点平滑结果,纵坐标为相对振幅百分比)

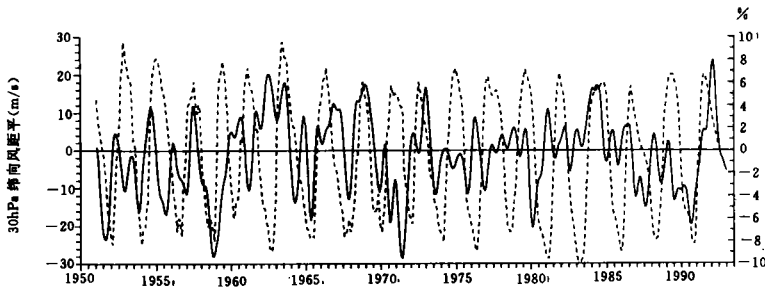


图 7 赤道平流层纬向风距平(虚线)和低滤波的对流层纬向风距平百分比(实线)

的 QBO 之间的关系。所谓标准周期即把平流层纬向风距平按 28 个月的 QBO 平均周期及东西风极值位相排列,并对 42a 中的 18 个周期求平均,计算出平流层纬向风距平 QBO 标准周期的平均变化。同时,按此格式计算出对流层中层纬向风距平百分比在 28 个月标准周期中的平均变化。图 8 为两者的变化曲线。如果两者有关系,则其相位差应为一定值,但图 8 中的两条曲线的位相没有显示出什么规律性。

其次,为了进一步探讨这一问题,本文将对流层中层纬向风距平百分比的低滤波序列和平流层纬向风距平序列进行了比较。从图 7 中可以看到,平流层纬向风的 QBO 为 27—28 个月,而对流层纬向风的 QBO 约为 30 个月(2. 5a)。这样,对流层纬向风中的 QBO 一个周期就比平流层纬向风中的 QBO 长 2 个月,五个周期以后,两者的位相差就达到了 10 个月。即使开始时两者位相相同,而 5,6 个周期后其位相就开始相反了。由此可见,两者之间没有什么明显的联系。这一点从两者的相关系数中得到了进一步的证明。表 1 给出了平流层纬向风序列与对流层纬向风及 55°N 超长波序列的序列相关值。从表中可以看到,平流层纬向风序列与低滤波后的对流层纬向风序列之间的相关系数只有 -0. 114。同样,其与对流层中层 55°N 大气超长波低滤波序列的相关系数也很低。因此,从

本文的分析结果看,平流层纬向风的 QBO 与对流层中层中纬度纬向风及中高纬的大气

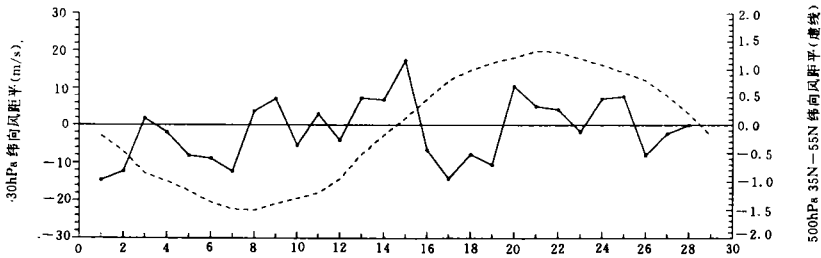


图 8 28 个月周期平均的赤道 30hPa 纬向风距平(虚线)和 500hPa 35°—55°N 纬向风距平(实线)

超长波的 QBO 之间可能没有什么确定的关系。

表 1 平流层纬向风与对流层纬向风及 55N 超长波之间的相关系数

对流层	纬向风	55°N1 波	55°N2 波	55°N3 波
平流层纬向风	-0.114	0.156	-0.258	0.103

## 6 大气超长波的半年韵律

在图 5 的功率谱中可以看到,1a 左右的谱峰值在对流层的一些大气超长波及纬向风序列中有所表现,且接近或超过了 95% 的信度检验。这种周期的振荡在序列经小波放大后在纬向风、55°N 和 35°N 的 1 波中表现的更为突出。因为这里所用的资料序列已进行过距平百分比处理,基本上去掉了周期为 1a 的季节变化,故大气环流中存在的这种 1a 左右周期的振荡反映了一种特殊的季节变化,例如一段时间或一些年冬季 1 波强,夏季 1 波

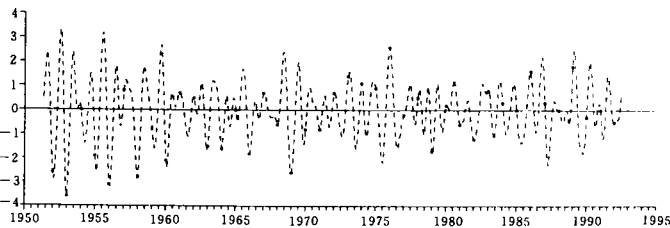


图 9 35°N 1 波在 1 年频率上的小波转换(实点代表 1 月值)

弱,而另一段时期或另一些年则冬季 1 波弱,夏季 1 波强。这种关系有时人们称之为韵律。图 9 给出了 35°N1 波序列经小波放大后在 1a 周期处的相对振幅变化情况。从图中可以看出,35°N1 月份 1 波的相对振幅(黑点所示)有连续几年处于极大或极小振幅的特点。这一特点也存在于 55°N1 波及纬向风序列的 1a 小波图上(未给出)。河原等<sup>[27]</sup>在分析日本最近 10a 的气候时发现,日本的暖冬有连续几年发生的现象。为进一步分析 35°N1 波的小波转换结果,将图 9 以 1 月为准取头 10 个极大和极小值年份,并分别将这些年份的各月值

按月求平均,结果如图 10 所示。图 10 表明:异常在前 4 个月保持同一符号,但在以后的 6 个月变为相反符号,而在第 6—7 个月相反符号的异常达到极大值,这似乎构成一个接近正弦波的波形。不过如果仔细分析后会发现到第 11—12 个月距平已接近零。所以,图 10 并不意味着 1a 波而只是隔半年异常符号相反的韵律现象。

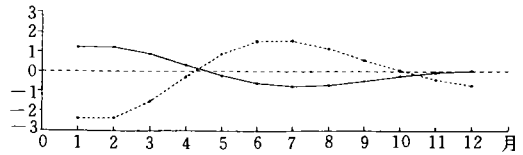


图 10 35°N 1 波小波转换的 12 个月平均  
(实线为极大值平均,虚线为极小值平均)

## 7 讨 论

对流层中层 500hPa 大气超长波变化的分析表明,这一层上的大气超长波具有明显的年代际及年际变率。年代际变率集中表现在副热带的 1,3 波中,中高纬也有一较强的谱峰值。2.5—2.6a 准 2a 周期的年际变率存在于中高纬超长波及其纬向风变化中,并都达到了 95% 的信度。另外,大约 1a 左右的周期振荡在大气环流中也普遍存在。分析表明这与半年韵律有关。

对于大气环流中这些甚低频变率存在原因的研究表明可能有外界强迫,也有地球系统内部的调整。在外界强迫中太阳活动是一个经常提到的因子<sup>[6]</sup>。但是在以上所提到的周期中只有 20a 左右的周期可能与之有关。30 多年的周期,2.5a 周期以及在一定时间出现的 1a 周期都可能是地球系统内部调整的结果,可能属于气候系统的自身振荡,即因海、陆、气之间的相互作用而产生,至少目前还没有发现存在完全类似周期的外界强迫源。显然,对这些周期及其形成原因还有待于进一步研究。无论如何,对大气环流甚低频振荡的研究可能为气候预测提供重要的线索。

## 参考文献

- [1] Namias J. Thirty-day forecasting; a review of a ten-year experiment. *Meteorological Monography*, 1953, 2(6).
- [2] 王绍武, 林本达等. 气候预测与模拟研究. 北京: 气象出版社, 1993.
- [3] Vergard R G and Ebdon R A. The 26 month tropical stratospheric wind oscillation and possible cause. *Meteor Abhand*, 1963, 225—244.
- [4] Reed R L. The present status of the 26 month oscillation. *Bull Amer Meteorol Soc*, 1965, 46: 374—387.
- [5] Landsberg H E, Mitchell J M, Crutcher H L et al. Surface signs of biennial atmospheric plus. *Mon Wea Rev*, 1963, 191: 549—556.
- [6] 王绍武, 赵宗慈. 长期天气预报基础. 上海: 上海科技出版社, 1987.
- [7] Wagner J A. Long period variation in sea-level pressure over the Northern Hemisphere. *Mon Wea Rev*, 1971, 99(1): 49—66.
- [8] Angen J K, Korshover J and Collen G F. Quasi-biennial variations in the "center of action". *Mon Wea Rev*, 1969, 97: 367—372.
- [9] 王绍武. 北半球 500 毫巴月平均环流特征及演变规律的研究——西风指数. *气象学报*, 1963, 33(3): 361—374.
- [10] Miller A J, Angell J K and Korshover J. Quasi-biennial oscillation and its association in tropospheric energy. *Mon Wea Rev*, 1974, 102: 390—393.
- [11] Knaff J A, Gray W M and Sheaffer J D. Modulation of monsoon intensity by the QBO. *Proceedings of the Sev-*



- enth Annual Climate Diagnostics Workshop, 1992; Oct, 19-23, 306-311.
- [12] Berlage H P. The Southern Oscillation a 2-3 year fundamental oscillation of world wide significance. IUGG 10th general assembly Rome 1954. Scientific Proc, Int Assco of Meteorology, London, IUGG, 1955, 336-346.
- [13] Write P B, Wallace J M and Mitchell T P et al. Correlation structure of the El Nino Southern Oscillation phenomenon. J Climate, 1988, 1: 608-625.
- [14] Gray W M, Sheaffer J D and Knaff J A. Influence of the stratospheric QBO on ENSO variability. J Meteor Soc Japan, 1992, 70: 975-995.
- [15] Brier G W. 40-year Trends in Northern Hemispheric surface pressure. Bull Amer Meteor Soc, 1947, 28(5): 237-247.
- [16] 王绍武. 气候系统引论. 北京: 气象出版社, 1994.
- [17] 王绍武. 北半球 500 毫巴月平均环流特征及演变规律的研究——超长波. 气象学报, 1964, 34: 316-327.
- [18] Rossby, C-G and Collaborators. Isentropic analysis. Bull Amer Meteor Soc, 1937, 18: 201.
- [19] 王绍武等. 月平均环流异常的持续性与韵律性和海气相互作用. 气象学报, 1964, 34: 316-327.
- [20] Namias J, Yuan X and Cayan D R. Persistence of North Pacific sea surface temperature and atmospheric flow pattern. J Climate, 1988, 1: 628-703.
- [21] 王绍武, 赵宗慈. 我国旱涝 36 年周期及其产生的机制. 气象学报, 1988, 41: 33-41.
- [22] Yamagata T, Masumoto Y. Interdecadal natural climate variability in the Western Pacific and its implication in global warming. J Meteor Soc Japan, 1992, 70: 167-175.
- [23] Willet, H C. The pattern of climatic relationship. Annual of New York Academy of Science. 1961, 95: 89-106.
- [24] Ebdon R A. Notes on the wind flow at 50mb in tropical and subtropical regions in January 1957 and January 1958. Quart J R Met Soc, 1960, 86: 540-542.
- [25] Angell J K and Korshover J. Addition evidence for quasi-biennial variations in tropospheric parameter. Mon Wea Rev, 1968, 96: 778-784.
- [26] Angell J K. On the variation in period and amplitude of quasi-biennial oscillation in the equatorial stratosphere. Mon Wea Rev, 1986, 117: 483-493.
- [27] 河原幹雄. 寒候期预报的解说. 气象(日本), 1993, 11: 12878-12880.

## VERY LOW FREQUENCY OSCILLATIONS IN THE VARIATIONS OF TROPOSPHERIC ATMOSPHERIC GENERAL CIRCULATION

Wu Xiaohong Wang Shaowu

(*Department of Geophysics, Peking University, Beijing, 100871*)

### Abstract

Based on the monthly mean 500hPa maps over the Northern Hemisphere for 42 years (1951—1992), zonal harmonic analysis at 35°N and 55°N were carried out and westerly intensities between 35—55°N were calculated. Meanwhile, wavelet transform of percentage departures of westerlies and relative amplitudes of ultra-long wave were analyzed. Then, three kind of very low frequency oscillations were identified in the variations of tropospheric general circulation. 1. Interdecadal oscillation; 2. Interannual oscillation (QBO) and 3. One-year oscillation. Interdecadal oscillation maybe exists in wave-1 with 30-40 year oscillation and wave-3 with 20-year oscillation at 35°N. QBO with 2.5—2.6 year oscillation were showed in westerlies as well as wave-2 and wave-3 at 55°N, but no any direct relationship with stratospheric QBO (2.2 year) was found out. Maybe, the QBO in middle troposphere is caused by the interactions between the atmosphere and ocean or between the atmosphere and land surface. It may belong to auto-oscillation of the climate system. After wavelet transform, the one-year oscillation in some ultra-long waves and westerlies were more outstanding. It reflects a kind of rhythm in atmosphere, such as warm-winter and cool-summer and vice versa. It is also an adjustment inner the climate system, which closely relates to the seasonal course of the general circulation.

**Key words:** General circulation, Interannual variability, Climate diagnostics.