周昕家，陈洪滨，卞建春. 2011. 北半球平流层中低层纬向风季节转换及转换层特征的分析研究 [J]. 气候与环境研究，16 (5)：565－576.
Zhou Xinjia，Chen Hongbin，Bian Jianchun. 2011. Analysis of the characteristics of zonal wind reverse layer in the lower and middle stratosphere of the Northern Hemisphere and its seasonal variation [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese)，16 (5)：565－576.

北半球平流层中低层纬向风季节转换及转换层特征的分析研究

周昕家　陈洪滨　卞建春

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　使用1979～2005年NCEP/NCAR再分析数据，分析了北半球平流层中低层（300 hPa至10 hPa）纬向风的季节转换规律，并采用二维空间场相似性方法确定了平流层的季节过渡日期。分析表明，平流层大气环流基本为冬夏二元状态，冬夏转换具有突变性；其季节过渡在纬向是接近同步进行的，而在经向则有时间差异，无论是冬夏转换还是夏冬转换高纬都要早于低纬。在平流层中部（10～70 hPa）季节过渡是自上而向下进行的；而在平流层下部（100～200 hPa）季节过渡的上下传递关系则比较复杂，在不同的纬度带有不同的表现。在北半球热带外地区，平流层中部东风期的起止日期与相似性方法计算得到的平流层季节过渡日期之间具有较好的对应关系，在东风期之前和之后往往各存在持续10天左右的零风—弱风期。

关键词　平流层中低层　纬向风转换层　零风层　平流层季节转换

文章编号　1006－9585（2011）05－0565－12　　**中图分类号**　P425　　**文献标识码**　A

Analysis of the Characteristics of Zonal Wind Reverse Layer in the Lower and Middle Stratosphere of the Northern Hemisphere and Its Seasonal Variation

ZHOU Xinjia，CHEN Hongbin，and BIAN Jianchun

Key Laboratory of Middle Atmosphere and Global Environment Observation，Institute of Atmospheric Physics，Chinese Academy of Sciences，Beijing　100029

Abstract　The zonal wind variation in the lower and middle stratosphere (from 300 hPa to 10 hPa) of the Northern Hemisphere (NH) is analyzed using the NCEP/NCAR reanalysis data during 1979－2005. Because the reversal of zonal wind direction mainly occurs during the stratospheric seasonal transition period，the classification of the seasonal change in stratosphere is necessary. To determine the seasonal transition in stratosphere，a method named similarity coefficient is used. The atmospheric general circulation in the stratosphere is of bimodal，i. e. winter and summer modes，with abrupt change during the winter－summer transition. Analyses show that in the zonal direction，the seasonal transition is synchronous；in the meridional direction，however，it is non-synchronous，and the winter－summer and summer－winter transitions are both earlier in higher latitudes than that in lower latitudes. In

收稿日期　2009－12－28收到，2011－06－15收到修定稿

资助项目　国家自然科学基金重点项目40830102

作者简介　周昕家，男，1978年出生，硕士，主要从事中层大气与大气遥感研究。E-mail：xinjiaz@ucar.edu

通讯作者　陈洪滨，E-mail：chb@mail.iap.ac.cn

the middle stratosphere (10－70 hPa) the seasonal change begins from the higher levels downward to the lower levels, but the seasonal transition in lower stratosphere (100－200 hPa) is complex. In the extra-tropical stratosphere of the NH, the onset date and withdrawal date of stratospheric easterly have good correlation with the seasonal transition date in stratosphere determined by the measure of similarity coefficient. In general, there is a period of ten days with zero zonal wind (weak wind) before and after stable easterly period in the middle stratosphere.

Key words lower stratosphere, zonal wind transition, zero zonal wind, seasonal transition in stratosphere

1 引言

在热带尤其是赤道地区，平流层中存在着准两年振荡（QBO）现象，即东西风以大约25～27个月为周期的准两年振荡性转换。在热带外地区的平流层中低层，则存在着显著的东西风季节变化，通常是冬季盛行西风，夏季转为东风（陶诗言和陈隆勋，1957；叶笃正等，1958）。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（Belmont et al.，1975），通常被称做零风层、弱风层或东西风交界面（WEB），它是高空流型季节变化的一个指示性标志。为了解释平流层爆发性增温机制，Matsuno（1971）认为增暖是垂直向上传播的波动与纬向平均气流$[u]$相互作用的结果，其中纬向平均风速为零的临界层造成的临界层效应是很重要的。行星波自对流层向上传播，波能只能在$[u]=0$的临界层以下的西风区垂直传播，而不能在其上的东风区传播，因此临界层具有吸收波能的效应。吕达仁等（2002）指出，利用零风层的特点，在北半球中纬度地区可以实现高空气球较长时间的准定点观测，满足对特定地区、特定目标和特定事件的大气/地表背景的连续观测，从而获得宝贵的连续资料。了解平流层风场变化规律和确定预报零（弱）风层出现的时间和高度范围，对于平流层中低速飞行运载平台的设计、试验和运行十分重要。

本文将利用NCAR/NCEP再分析资料研究北半球零风层的分布和季节变化特征。第2节介绍使用的数据和计算分析方法，第3节计算平流层中的季节转换期，第4节分析平流层纬向风的基本情况、稳定东风期的出现以及与平流层中低层季节转换相关的环流特性，最后一节进行总结，并对下一步工作进行展望。

2 数据和方法

本文使用1979～2005年NCAR/NCEP再分析资料的日平均温度场、风场和位势高度场，水平分辨率为2.5°（纬度）×2.5°（经度），垂直方向从1000 hPa到10 hPa共17个标准气压层（Kalnay et al.，1996）。本文主要分析300 hPa高度以上10个标准气压层上的纬向风场（环流）变化特征。NCAR/NCEP再分析资料的日平均数据产品中，各变量场在平流层范围内的潮汐波成分已经被过滤掉，因此对本文中判断季节转变不会造成影响。

为了分析平流层的季节变化，我们采用曾庆存和张邦林（1992）及Xue and Zeng（1999）提出的一个建立在客观定量基础之上的气候场相似性方法。即，存在随时间t和经纬度$(\theta,\lambda)\in S$及高度（气压p）变化的空间场$F(\theta,\lambda,p,t)$（F可以是标量函数，如温度、等压面高度等，也可以是矢量函数），在某个给定的区域$(\theta,\lambda)\in S$，记t_1时刻和t_2时刻的函数各为$F_1(\theta,\lambda,p,t_1)$和$F_2(\theta,\lambda,p,t_2)$，则函数的内积$(F_1,F_2)$和范数$\|F\|$如下：

$$(F_1,F_2)\equiv\frac{1}{S}\iint_S F_1\cdot F_2\,\mathrm{d}S, \tag{1}$$

$$\|F\|\equiv(F,F)^{1/2}, \tag{2}$$

其中，S表示积分的区域或面积。如果F是标量场，则（1）式中的点乘表示F_1和F_2对应元素的乘积；如果F是矢量场，则表示F_1和F_2对应矢量的标量积。由于NCEP/NCAR再分析资料是离散的格点资料，因此在积分中需要把面积分改为求和。则F_1和F_2场的相似性可定义为：

$$R\equiv(F_1,F_2)/[\|F_1\|\cdot\|F_2\|]. \tag{3}$$

根据（1）、（2）式的性质可以证明$-1\leqslant R\leqslant+1$。当两个场完全相似，即$F_1=\alpha\cdot F_2$、$\alpha>0$时，有

$R=+1$；当两个场完全反相似，即 $F_1=\alpha\cdot F_2$、$\alpha<0$时，有 $R=-1$；当两个场完全无关时，有 $R=0$。

应注意，如果场 F_1和 F_2退化为一维向量，那么公式（3）跟时间序列的相关系数公式有些相似，两者的区别在于公式（3）没有减掉均值。这个性质造成的结果是，空间场型不变，统一改变场值的大小也会导致相似性的变化。这样的性质对于描述气象要素场的变化是恰当的。

取 F_w为函数 F 的典型冬季场，F_s为函数 F 的典型夏季场，一般情况下 F_w与 F_s的相似性并不等于-1。为了凸显两者的差异，需要先消去共同的部分：

$$F^*=\frac{1}{2}(F_w+F_s). \tag{4}$$

此时得到

$$\begin{cases} F_w'=F_w-F^*, \\ F_s'=F_s-F^*=-F_w', \\ F'(\theta,\lambda,p,t)=F(\theta,\lambda,p,t)-F^*, \end{cases} \tag{5}$$

计算 $F'(\theta,\lambda,p,t)$ 与 F_w'和 F_s'的相似性 $R_w(t)$、$R_s(t)$，

$$R_w\equiv(F_w',F')/[\|F_w'\|\cdot\|F'\|], \tag{6}$$

$$R_s\equiv(F_s',F')/[\|F_s'\|\cdot\|F'\|], \tag{7}$$

显然，去掉公共部分之后，$R_w\equiv -R_s$，即两者只是简单的反相关系。在后面的计算分析中统一使用 R_w。

3　平流层中低层的季节转换

北半球平流层中低层（不包括热带地区）冬季环流特征是环极西风，夏季环流特征是环极东风。在每年的 4、5 月由冬季环流转为夏季环流，到 9 月再转回冬季环流。除了这个稳定的季节转换之外，在冬季平流层爆发性增温（SSW）期间，也会出现环极东风，维持时间大概几天到十几天。在东西风的季节转变过程中，纬向风转换层出现概率高，维持时间长，出现范围大，因此判断平流层何时出现季节转换，对于研究纬向风转换层是重要的。下面通过纬向 u 风场、温度场和位势高度场的变化计算平流层季节转换日期。

3.1　季节划分的标准

使用公式（1）和（2），以 1995 年 10 hPa 等压面为例计算每天的温度场、位势高度场和 u 风场跟冬季典型场的相似性系数，得到 3 个时间序列，如图 1 所示。可见，3 个变量场相似性的变化并不相同，高度场相似性一年只有两次过 0，一次位于 5 月上旬，一次位于 10 月初，可以分别代表春季转换期和秋季转换期；温度场相似性有 4 次过 0，前两次位于 1 月底和 2 月初，表示北半球冬季平流层增温（1995 年并不是爆发性增温年，即本次增温的强度没有达到爆发性增温定义所要求的程度），后两次位于 4 月初和 9 月上旬，表示季节转换；风场相似性有 6 次过 0，其中前 2 次与温度相似性的前两次相同，对应冬季平流层增温，第 3 次和第 4 次位于 3 月下旬，同第 5 次过 0 一起表示春季转换期间相似性振荡反复的过程。从逐年逐高度的相似性时间序列（图略）分析，将春季转换日期定义为相似性系数 R_w在春季最后一次由正值变为负值的日期，秋季转换日期定义为相似性系数 R_w在秋季第一次由负值变为正值的日期是合适的，在数学处理上也是简明的。在此定义下，1995 年 10 hPa 高度场春季转换期比温度场和风场晚 1 个多月；高度场秋季转换期比温度场晚大半个月，比风场晚几天。

据此，以下进一步计算分析 1979～2005 年平流层低层季节转化日期。为了避免低纬度的 QBO 信号对季节变化的干扰，选取 20°N～87.5°N 作为计算范围。采用 27 年 12、1、2 月平均作为冬季典型场型，6、7、8 月平均作为夏季典型场型。

3.2　季节过渡日期随经度的变化

为了分析不同经度的季节转变日期是否一致，将此范围按照经度平均分为 8 块，分别计算春、秋季转换日期及其 27 年标准差，区域 1～8 分别为 0°E～42.5°E、45°E～87.5°E、90°E～132.5°E、135°E～177.5°E、180°W～137.5°W、135°W～92.5°W、90°W～47.5°W、45°W～2.5°W。

图 2 显示 8 个区域平流层温度场、高度场和风场春季转换日期随高度（300 hPa 至 10 hPa）的分布。可以看到，使用空间场相似性方法计算平流层季节转换日期，由 3 个变量场得到的结果并不完全同步。图 2 的 8 个子图可以分为两类，图 2a、2b、2c、2g、2h 对应非太平洋区，图 2d、2e、2f 对应太平洋区。在非太平洋区，温度场的季节变化最早，10～100 hPa 范围基本保持同步，

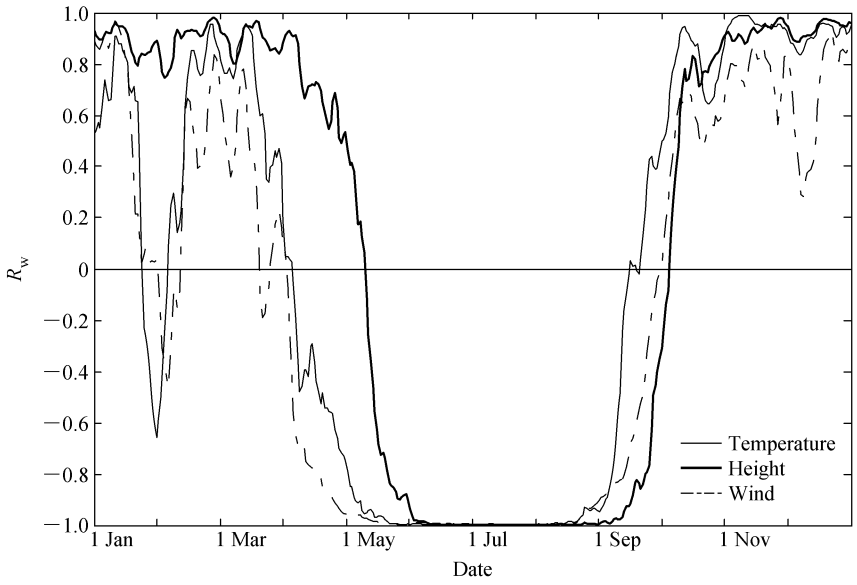

图 1 1995 年 10 hPa 等压面上温度场、高度场和风场空间场相似性度量 R_w

Fig. 1 The similarity coefficient R_w of temperature, height, and wind at 10 hPa in 1995

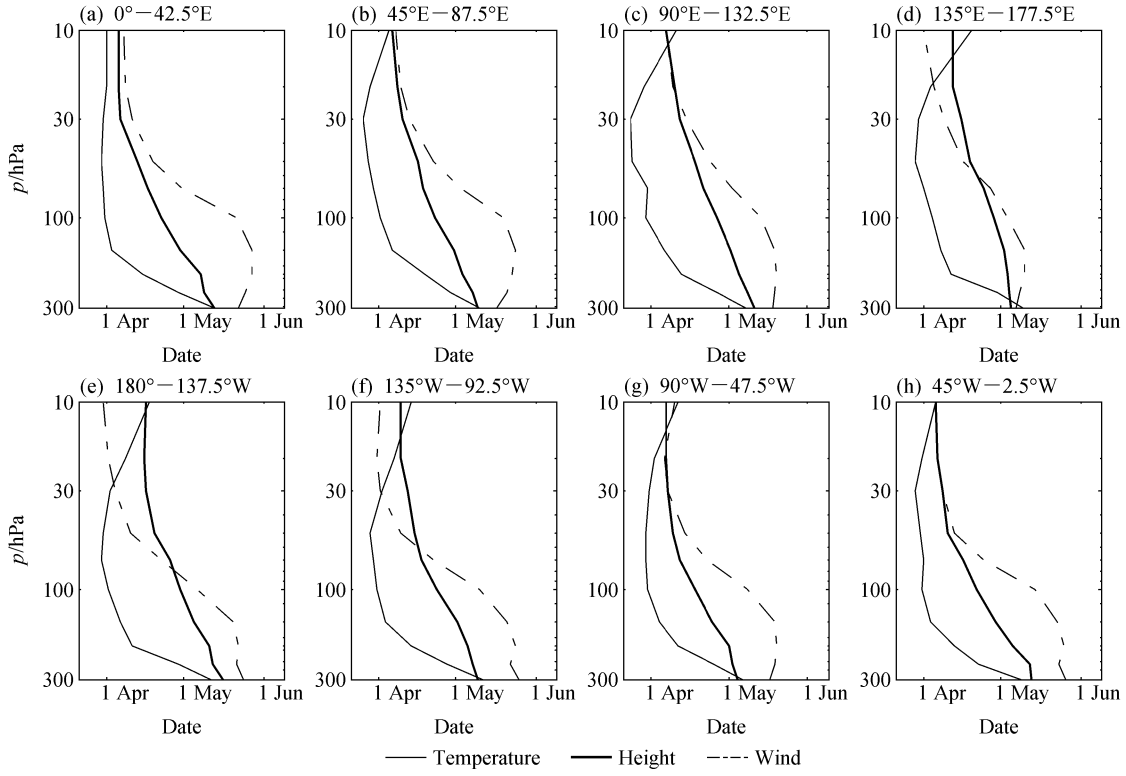

图 2 北半球不同经度范围平流层温度场、高度场和风场春季转换日期随高度的分布

Fig. 2 Spring seasonal mean transition period in stratosphere indicated using temperature, height, and wind over different longitude bands in the North Hemisphere

在 4 月初转变为夏季型，100～300 hPa 范围季节变化日期随高度降低而滞后，300 hPa 最迟，在 5 月上旬转变为夏季型。高度场的季节变化落后于温度场，在整个平流层中下部呈现逐层下传的特点，10 hPa 和 300 hPa 等压层的季节转变同温度场一致，而 150 hPa 等压层的季节转变同温度场

差别最大，可以达到 30 天。环流场的季节过渡最迟，10 hPa 处同温度场和高度场差别不大，随高度降低落后日期增加，在 150 hPa 处落后时间最长，比高度场落后 20 天，比温度场落后 50 天。在太平洋区，3 个变量场的前后关系要复杂一些。10～30 hPa 高度范围环流场的季节变化最早，温度场和高度场大致相等，落后环流场 5～10 天左右。30～70 hPa 范围温度场最早，环流场次之，高度场最迟。70 hPa 以下高度同非太平洋区一致，3 个场在 150 hPa 处达到的季节变化的最大日期差。

图 3 为北半球平流层不同经度范围春季转换日期标准差随高度的分布。可见，在 1979～2005 的 27 年中，温度场的春季变化日期年际差别最大，大概在 15～20 天之间，环流场跟高度场的差别小一些，为 10 天左右。这是因为在 SSW 爆发时温度场受影响最大，变化也最剧烈，在冬末出现的爆发性增温结束之后温度场往往依然保持极区热—中低纬冷的梯度指向，直至正式进入夏季，使得春季过渡期被提前。

图 4 为北半球不同经度范围温度、高度和纬向风场秋季转换日期的垂直分布。同春季转换日期分布一样，也分为太平洋区和非太平洋区。非太平洋区 3 个变量的季节过渡期差别小，尤其是在 70 hPa 以下三者保持同步变化。而在太平洋区，三者之间的差别要大一些。特别是，整个北半球温度场的秋季过渡日期并不在全部高度上随高度的降低而单调滞后，在 100 hPa 处达到滞后最大，之后随高度降低季节转变期提前，在 200 hPa 处达到极大值，较之 100 hPa 处提前约 10～20 天。从图 5 可以看到，秋季转换日期的标准差的比春季小，说明其年际差异小，即秋季转换出现的日期更集中，而且在秋季上下层转换同步性更高。

根据公式（4）、（5）的原理分析，冬季典型场型与夏季典型场型的共性越小，则计算得到的相似性越有效。在平流层中部（10～70 hPa），冬季为低纬冷、高纬暖、西风环流，而夏季为低纬

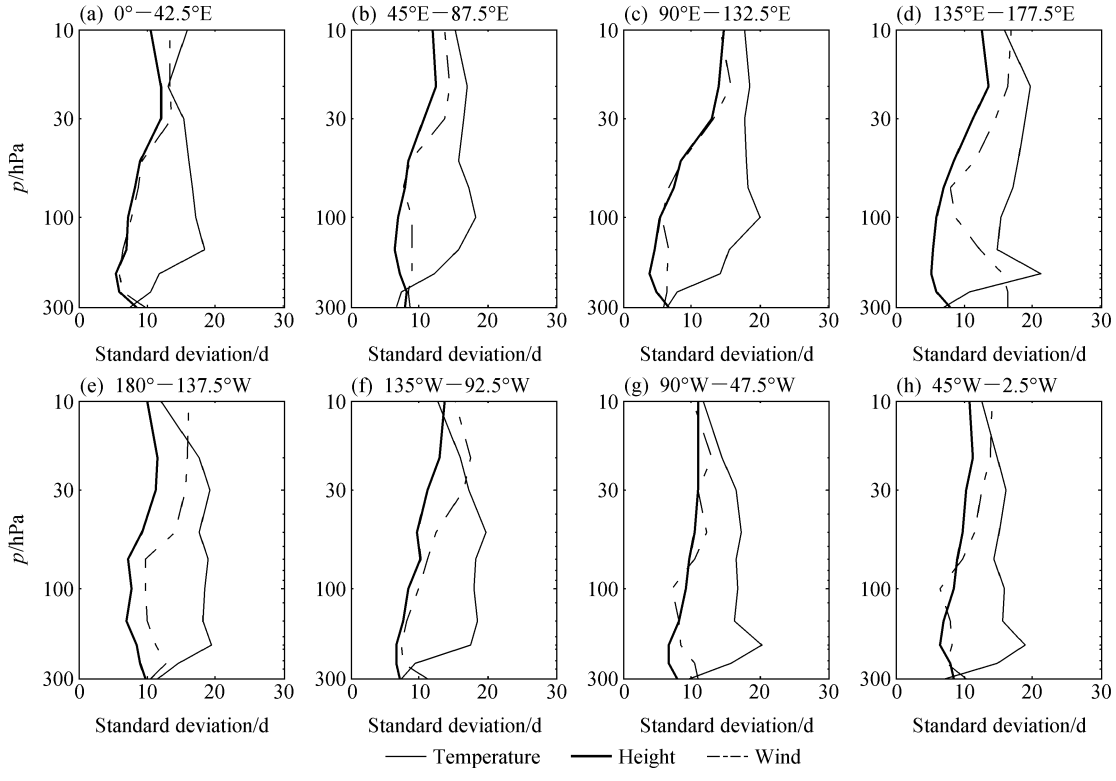

图 3　北半球不同经度范围平流层温度场、高度场和风场春季转换日期标准差随高度的分布

Fig. 3　Standard deviation of spring seasonal transition period in stratosphere indicated using temperature, height, and wind over different longitude bands in the Northern Hemisphere

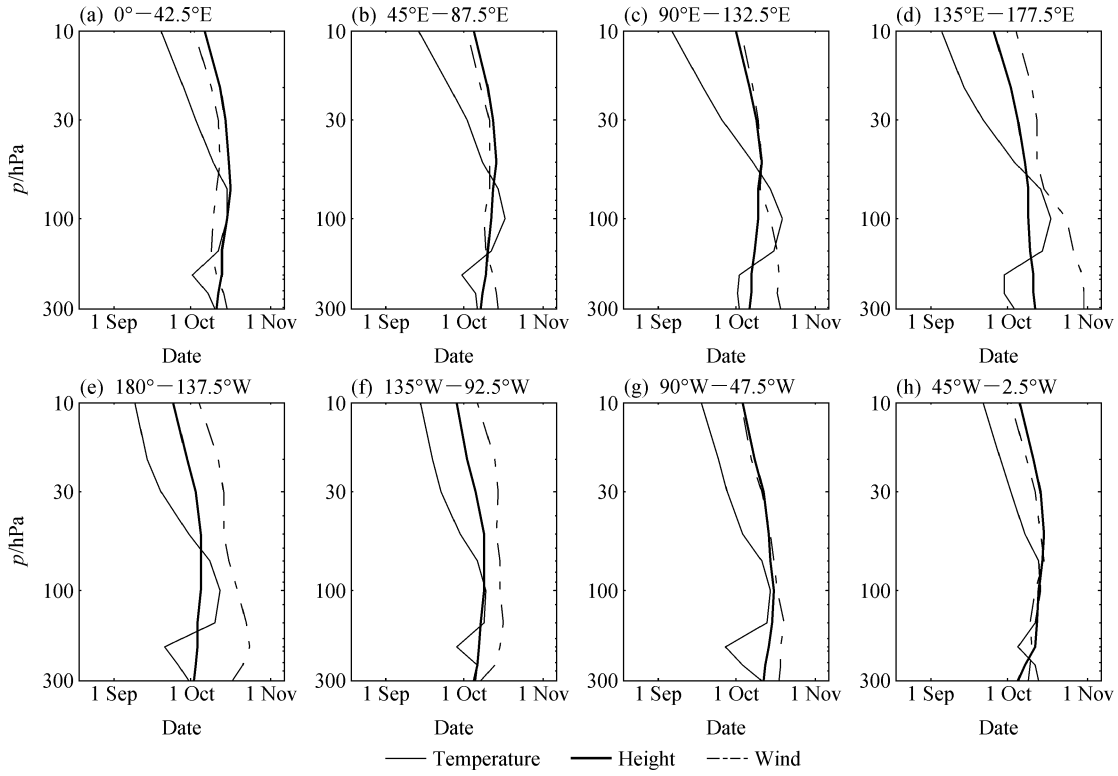

图 4 同图 2，但是为秋季转换日期

Fig. 4 Same as Fig. 2 but in autumn

暖、高纬冷、东风环流，冬、夏季场型之间几乎是反相关系，因此相似性系数的有效性较高。在平流层低层到对流层顶范围（100～300 hPa），冬夏季均为低纬暖、高纬冷，西风环流占优，冬夏季场型之间共性较大，因此相似性的有效性较低，得到的季节差别不明显。特别是在西风急流面附近（约 200 hPa）纬向温度梯度较小，温度场的变化主要反映天气尺度变化而使得计算得到的季节转换受到太多来自小尺度的影响，不再适用于判断半球范围内大气的季节变化。

总体来看，在平流层中部（10～70 hPa）的季节转换是自上而下传递进行的，这从高度场转换特别是在由冬向夏的转换过程中看最为明显；而在平流层下部（100～300 hPa）季节转换在垂直方向的传递关系复杂一些，不能看作简单的从上向下或者从下向上传递。在春季，一般温度场最先变化，高度场次之，环流场最迟；在 10 hPa 和 300 hPa 高度三者差别最小，150 hPa 处三者间的差别最大。在秋季，70 hPa 以上温度场最先变化，高度场和环流场的转换时间很接近。北半球平流层根据季节变化大体可以分为两个区域，太平洋区和非太平洋区，两者间的差别并不是很大，即季节过渡一般在整个纬圈同步进行。

3.3 季节过渡日期随纬度的变化

为了分析平流层中低层季节转换随纬度的变化，将计算范围按照纬度平均分为 4 块，分别计算春秋季转换日期。4 个区域分别为 87.5°N～72.5°N（区域 1）、70°N～55°N（区域 2）、52.5°N～37.5°N（区域 3）、35°N～20°N（区域 4）。

图 6 是北半球不同纬度区春季时季节转换日期和标准差随气压高度的分布。可以看到，由高度场计算得到的北半球平流层春季过渡日期随纬度变化最不显著，区域 1 和区域 2 为从上向下传递，且斜率保持一致，区域 3 总体上下各层同步过渡，在 150～300 hPa 的小段范围内为从下向上传递，区域 4 总体为从上向下传递，在 150～300 hPa 的小段范围内为从下向上传递。上下各层的过渡日期差别在一个月以内，最早出现在 4 月初，最迟出现在 5 月中旬，尤其是在 52.5°N～37.5°N 区间（区域 3），上下各层的差别只有 10 天左右，

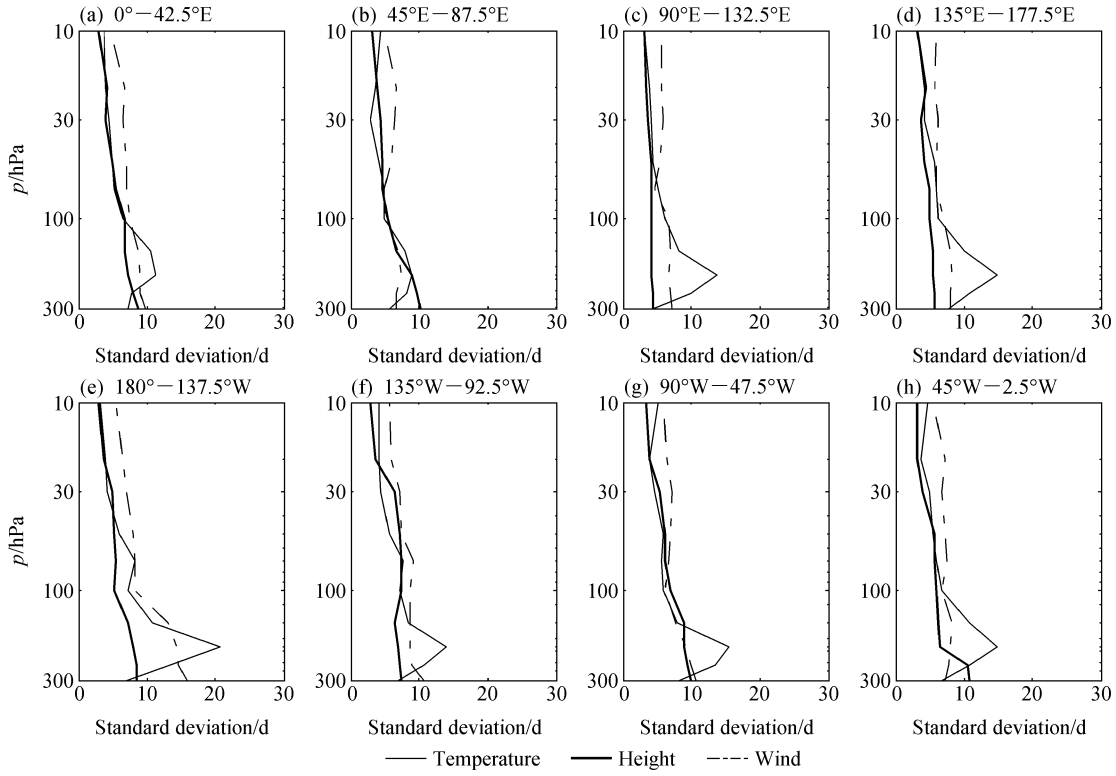

图 5　同图 3，但是为秋季转换日期

Fig. 5　Same as Fig. 3 but in autumn

同步性非常好。由风场计算得到的过渡日期空间分布要复杂一些。区域 1、2、3 上下各层差别很大，在 100～150 hPa 有一个分界点，分界点以下斜率较大，而分界点以上斜率较小，特别是在区域 3，分界点以上基本保持同步。区域 4 在 150 hPa 也存在分界点，分界点以下为从下向上传递，分界点以上各层基本保持同步。根据温度场计算得到的春季过渡日期更为复杂。区域 1、2 的春季过渡日期最早发生在 100 hPa，随后向上下两个方向传递。在区域 3、4 的过渡日期线更是显示为多段折线。

从春季转换日期的多年标准差来看，区域 1、2、3 中位势高度场标准差最小，温度场和风场接近，区域 4 位势高度场和风场差不多，温度场较大。

由这 3 个变量计算得到的秋季转换日期和标准差随气压的分布（图 7）跟春季类似，不再详述。

总的来看，平流层季节转换日期随纬度的变化是比较明显的。北方地区平流层季节过渡较早，南方地区较晚，这一点在平流层中部 10～100 hPa 之间尤为明显。

3.4　确定平流层季节过渡日期的方法

从以上分析中可以看到，通过位势高度场、风场和温度场得到的平流层季节转换日期并不相同，在有些标准气压层甚至会相差很远。造成这个结果的原因主要有两个。第一个原因是各变量场确实不是同步变化的，我们选取的 3 个变量场对大气环流调整过程的敏感性不一样，在类似弱 SSW 事件，温度场最为敏感，首先发生翻转，风场次之，位势高度场最稳定，这样就导致了三者之间存在较大的差异。第二个原因，也是最主要的原因在于平流层中各物理场的季节变化虽然比对流层中要显著和鲜明的多，但各年份的突变程度并不相同，有的年份接近理想突变，而有的年份在过渡期存在一个振荡、反复、渐变的过程。所以把 R_w 发生正负反转作为季节过渡的标准，必然出现很多分歧。尽管如此，简明的数学处理和清晰的物理意义，使得这个方法仍然不失为一个合理的好方法。

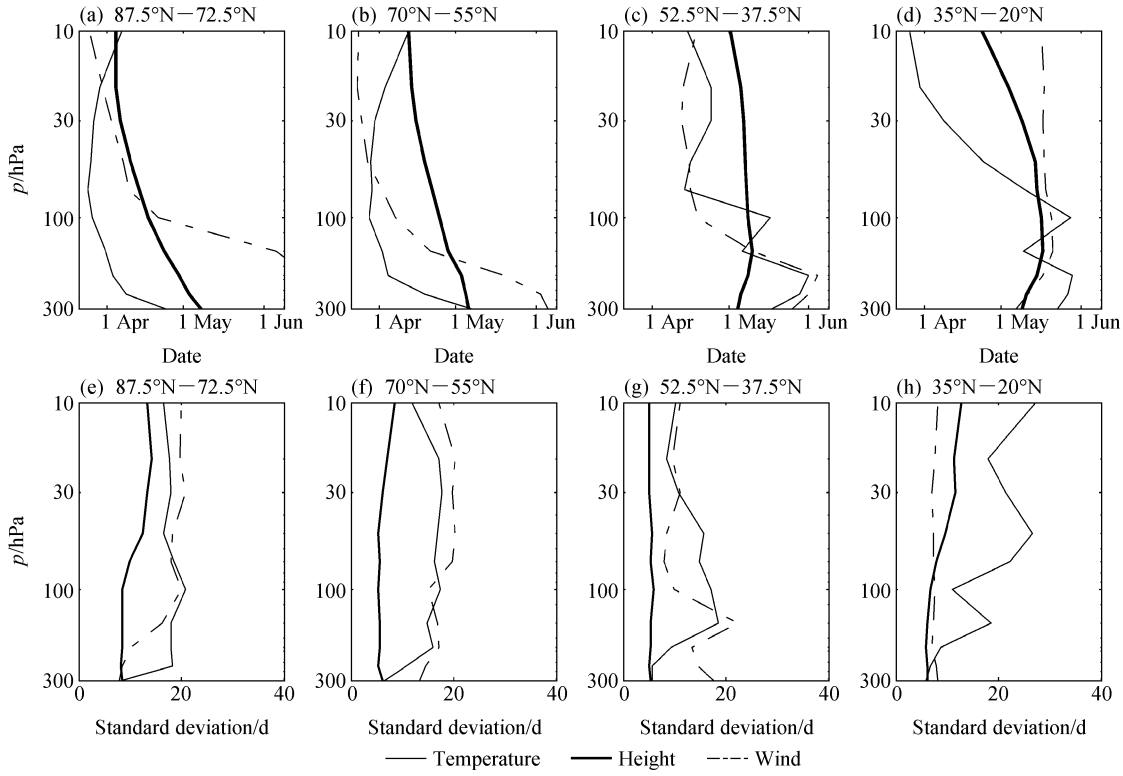

图6 北半球不同纬度平流层春季（a、b、c、d）转换日期及其（e、f、g、h）标准差随高度的分布

Fig. 6 (a, b, c, d) Spring mean and (e, f, g, h) standard deviation of seasonal transition period in stratosphere indicated using temperature, height, and wind in different latitude bands in the Northern Hemisphere

通过对逐年逐气压高度 R_w 时间序列的仔细分析，在平流层中下部 10～70 hPa 范围内温度场、高度场和风场的变化同步性高，突变性强，不同纬度间差别小，温度、高度、风场均可作为判断季节变化的变量。而在平流层下部 100～300 hPa，不同纬度之间和不同变量之间的差异较大。在高纬地区，风场已经不能用来判断季节变化，因为环流场中的小尺度结构掩盖了整体变化，使得由公式（5）计算得到的相似性被噪声所淹没，不再具有整体代表性。在高纬地区温度场和高度场保证同步变化，均可用于判断季节变化。低纬地区高度场依然保持突变性，温度场和风场则起伏不定，不宜用作判断标准。

综合以上分析，位势高度场最适合用来判断平流层中下层的季节过渡日期。利用逐日位势高度场数据，通过计算空间场相似性时间序列来判断平流层季节过渡日期是最为合适的方法，使用此方法可以将北半球平流层大气做为一个整体进行考虑，避免了小尺度结构的干扰，特别是在极涡崩溃期间辐射加热和波动上传共同作用带来的风场与温度场的复杂变化（魏科等，2007）。

平流层大气环流的季节过渡在纬向是接近同步进行的，而在经向则不同步，无论是春季还是秋季北方地区一般都早于南方地区。平流层中部（10～70 hPa）季节过渡是从上向下进行的，而平流层下部（100～200 hPa）季节过渡的上下传递关系则比较复杂，在不同的纬度、不同的季节有可能从上向下传递，也有可能从下向上传递。而且在平流层下部冬季环流与夏季环流之间的共性较大，季节突变性较低，通过二维相似性方法计算得到的季节转换日期的有效性不如平流层中部。

4 平流层中低层纬向风的季节变化

由 3.2 节和 3.3 节的分析可知，在中纬度地区平流层特别是平流层中部，地转风的季节变化在宽度大致为 15°的纬带范围内并没有太大差异。因此，我们选择北京地区（40°N）和福建地区

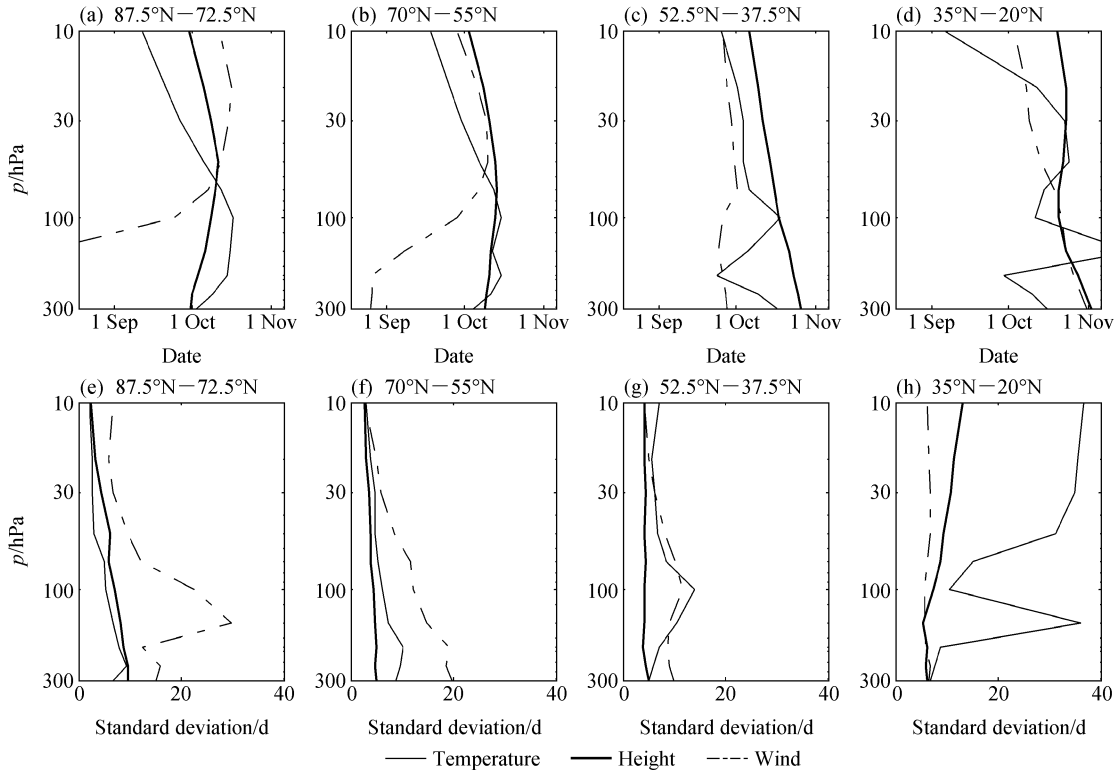

图 7　同图 5，但为秋季

Fig. 7　Same as Fig. 5, but in autumn

(25°N) 分别代表 52.5°N～37.5°N 和 35°N～20°N 纬带进行研究，以了解风场变化的详细情况。

图 8 显示北京地区 27 年 10～300 hPa 各高度上纬向风的离散状况。每幅图中有 6 条线，中间两条线一条为中值，一条为平均值，两者非常接近。中值线外侧的两条线分别为 75%和 25%，最外端的两条线为上界线和下界线。图中添加的两条竖线为通过 52.5°N～37.5°N（3.3 节中所划分的区域 3）纬带位势高度场相似性计算得到的平流层季节过渡日期。从图中可见，平流层中低层纬向风的离散状况随高度具有很大的不同。10～50 hPa 范围内冬季东西风都可能出现，平均值为西风，在冬至（即平流层冬季典型场出现的日期）前后西风的优势程度也不相同，冬至之前西风的优势程度较冬至之后更强，这可能是由于平流层冬季增温较多出现在上半年的缘故。冬季纬向风各年份之间差异很大，而且高度越高差异越大。在 10 hPa 等压面，冬季有些年份会出现接近甚至超过 50 $m \cdot s^{-1}$ 的强西风。10～50 hPa 范围内夏季期间均以东风为主，6、7、8 月为纯粹的东风期，各年份之间东风风速的差异较小，且各层的离散程度接近。从纬向风的年际离散程度的角度来讲，70 hPa 可做为平流层中部和下部的过渡层，70 hPa 等压面以上，离散程度的季节变化明显，冬季离散程度大，夏季纬向风离散程度小，且高度越高离散程度越大；70 hPa 等压面以下，离散程度无明显季节变化，而且高度越低，离散程度越大，全年均以西风为主，只有个别年份夏季出现弱东风。

图 9 给出福建地区 27 年 10～300 hPa 纬向风离散状况。可以看出，福建地区和北京地区相差 15 个纬度，两地纬向风的年际离散状况具有较为明显的差别。两个最明显的区别是，在 10～300 hPa 范围内，冬季福建地区的纬向风的年际离散程度都比北京地区小，东风优势程度都比北京地区大。值得注意的是，在福建地区 200 hPa 和 300 hPa 等压面上，夏季 6、7、8 月份纬向风中值线与零值线非常接近。

图 8 中 10、20、30 hPa 的 3 幅子图（图 8a－c）里面指示平流层春季过渡日期的竖线比 27 年

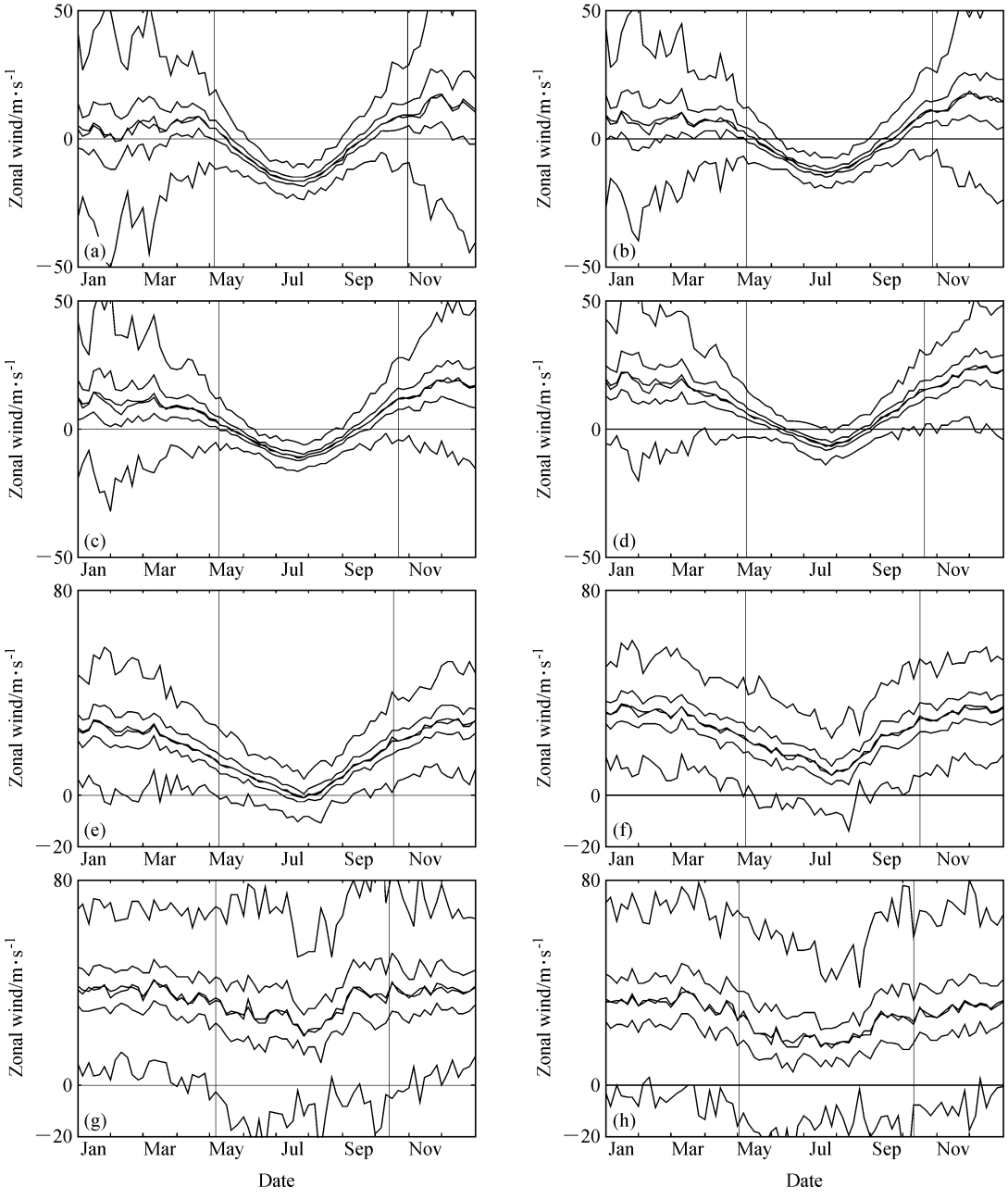

图 8 北京地区 27 年平流层中低层（10～300 hPa）纬向风离散状况。图中添加的竖线为通过 52.5°N～37.5°N 纬带位势高度场相似性计算得到的平流层季节过渡日期：(a) 10 hPa；(b) 20 hPa；(c) 30 hPa；(d) 50 hPa；(e) 70 hPa；(f) 100 hPa；(g) 200 hPa；(h) 300 hPa

Fig. 8 Zonal wind dispersion in middle and lower stratosphere (10－300 hPa) in Beijing area. The vertical lines show the seasonal transit period in stratosphere indicated by similarity coefficient of height in 52.5°N－37.5°N latitude band: (a) 10 hPa; (b) 20 hPa; (c) 30 hPa; (d) 50 hPa; (e) 70 hPa; (f) 100 hPa; (g) 200 hPa; (h) 300 hPa

平均东风期开始日期提前约 5～10 天，50 hPa 子图里面前者比后者提前约 1 个月。10～50 hPa 的 4 幅子图（图 8a－d）中表示平流层秋季过渡日期的竖线比 27 年平均东风期结束日期落后约 40 天。图 9 中 10、50 hPa（图 9a、9d）的 2 幅子图里面表示平流层春季过渡日期的竖线比 27 年平均东风期开始日期落后约 5 天，20、30 hPa 的 2 幅子图（图 9b、9c）中前者比后者落后 1 个月，而在 70 hPa 子图（图 9e）里面两者几乎重合。20～50 hPa 的 3 幅子图（图 9b－d）中表示平流层秋季过

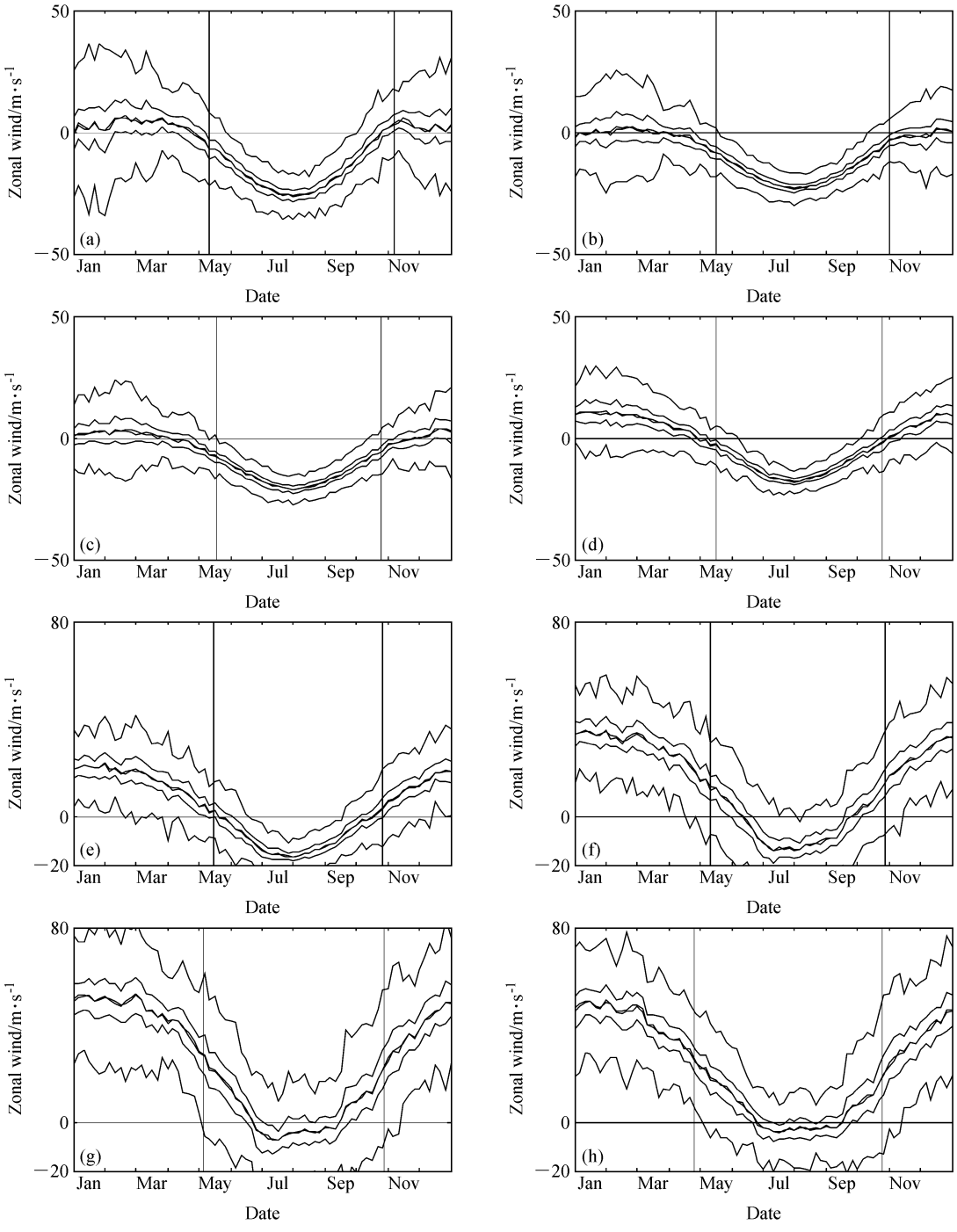

图 9　同图 8，但为福建地区的情况

Fig. 9　Same as Fig. 8，but for Fujian area

渡日期的竖线比 27 年平均东风期结束日期提前约 5～10 天，10 hPa 和 70 hPa 的 2 幅子图（图 9a、9e）中前者比后者落后约 5 天。

由此可以看到，除了北京地区平流层中部东风期结束日期与秋季过渡日期相差较大之外（约 40 天），北京地区春季及福建地区春秋季平流层中部东风期起止日期跟平流层季节过渡日期之间的差别均在 10 天以内，即平流层中部东风期的起止日期与纬带位势高度场相似性计算得到的平流层季节过渡日期之间具有较好的对应关系。

总的来看，在夏季北半球中纬度地区平流层10～100 hPa层存在稳定东风期，高度越高则东风期越长且东风越强。南部地区的东风期较北部地区更长，出现范围也更深厚。在特定高度上的东风期前后往往均存在持续10天左右的弱风期。值得注意的是，在南部地区（20°N～30°N）200～300 hPa层夏季均为东西风周期出现、大致对称的弱风期。

5 结论和讨论

本文使用空间场相似性方法，通过温度场、位势高度场和风场分析平流层季节划分，得到平流层中季节过渡日期随地域和高度的变化特征，并分析季节过渡与纬向风转换层之间的关系。本文的主要结果有：

（1）使用空间场相似性方法计算平流层的季节划分，最合适的变量场是位势高度场。平流层中部（10～50 hPa）的季节过渡是从高向低传递的，季节过渡日期在经向（即同一纬度区）基本保持一致，在纬向则大致为从北向南传递。在平流层低层（100 hPa至对流层顶）的季节过渡比较复杂，不能看作简单的单向传递。

（2）北半球中纬度地区平流层中部（10～100 hPa）在夏季存在稳定东风期，高度越高则东风期越长且东风越强。南部地区的东风期较北部地区更长，出现范围也更深厚。东风期的起止日期与平流层季节转换期之间存在较好的对应关系，两者的差别一般在十几天以内，最大为40天左右。在特定高度上的东风期前后往往均存在持续10天左右的弱风期，特别是在南部地区（20°N～30°N）平流层下部至对流层上部（200～300 hPa）整个夏季均为东西风大致对称的弱风期。

由于NCEP/NCAR再分析数据的空间和时间分辨率尤其是垂直分辨率比较比较粗，因此用它的数据计算得到的转换位置和时间不是非常精确，但是对于气候学意义上的研究，其分辨率是足够的。

下一步工作考虑将平流层纬向风转换与对流层风场转型（如冬夏季风、副热带高压进退等）联系起来分析研究；考察平流层零风层维持时间和厚度的年际变化及其可能与对流层某些特征变化的关联，特别是纬向风转换异常与对流层环流和极端事件的关联；研究平流层经向风转换空间分布和变化特征及其与纬向风转换的关联。

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: 585－594.

Kalnay E, Knanmitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 77 (3): 437－471.

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.

Matsuno T. 1971. A dynamical model of the stratospheric sudden warming [J]. J. Atmos. Sci., 28 (8): 1479－1494.

陶诗言，陈隆勋. 1957. 夏季亚洲大陆上空大气环流的结构 [J]. 气象学报，28 (3)：234－247. Tao Shiyan, Chen Longxun. 1957. The structure of general circulation over continent of Asia in summer [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 28 (3): 234－247.

魏科，陈文，黄荣辉. 2007. 北半球平流层极涡崩溃过程的动力诊断分析 [J]. 中国科学（D辑），37 (8)：1110－1119. Wei Ke, Chen Wen, Huang Ronghui. 2007. Dynamic diagnosis of the Northern Hemispheric stratospheric polar vortex collapse [J]. Science in China (Ser. D) (in Chinese), 37 (8): 1110－1119.

Xue F, Zeng Q C. 1999. Diagnostic study on seasonality and interannual variability of wind field [J]. Adv. Atmos. Sci., 16 (4): 537－543.

叶笃正，陶诗言，李麦村. 1958. 在六月和十月大气环流的突变现象 [J]. 气象学报，29 (4)：249－263. Ye Duzheng, Tao Shiyan, Li Maicun. 1958. The abrupt change of circulation over Northern Hemisphere during June and October [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 29 (4): 249－263.

曾庆存，张邦林. 1992. 论大气环流的季节划分和季节突变 I. 概念和方法 [J]. 大气科学，16 (6)：641－647. Zeng Qingcun, Zhang Banglin. 1992. On the seasons of general atmospheric circulation and their abrupt changes Part I: General concept and method [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 16 (6): 641－647.