

全球 500hPa 角动量与 EP 通量的季节变化*

魏民 仇永炎

(北京大学地球物理系, 北京, 100871)

摘 要

利用 ECMWF 提供的 9a(1980—1988)资料,从定性和定量角度分析 500hPa 全球东西风带的角动量和 EP 通量的季节过渡。结果发现:不仅角动量存在明显的季节性急变,而且反映波活动的 EP 通量也存在相应的季节性急变。另外,季节性急变的发生时间在东西风带亦有所不同。

关键词: 角动量, EP 通量, 季节变化。

1 引 言

季节变化是大气环流研究的重要课题之一,中国学者对此曾进行过大量的研究,其中的许多研究与叶笃正等^[1]1958 年指出的 6 月和 10 月突变的特征相联系。最近,仇永炎等在过去从动能角度论证夏冬过渡和冬春过渡的基础上^[2,3],讨论了全球大气环流的季节性急变问题^[4-6],指出北半球大气环流的急变主要发生在 3—4 月和 9—10 月前后,而不在 5—6 月,而且急变现象主要表现在纬向平均动能的变化上。本文分析了环流西风动量或角动量的季节性急变。考虑到欧拉变型动量(或角动量)方程,动量(或角动量)变化是同反映行星波活动的 EP 通量的散度紧密相关,因此,亦选用 EP 通量来进行研究。本文利用 9a 资料着重研究对流层中层大气的代表层次 500hPa,首先定性然后定量进行分析。

2 资料 and 计算方法

利用欧洲中期数值预报中心(ECMWF)提供的 1980—1988 年每天 12:00GMT 500hPa 全球风场和温度场资料(网格距为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$),计算由 87.5°N 到 87.5°S 的纬向平均东西风、涡动动量通量及涡动感热通量。根据所算得的纬向平均东西风,用线性内插法求出东西风带分界线即零风速线所在的纬度位置。由此零风速线,并考虑纬度的权重因子,分别计算角动量及 EP 通量在东西风带中的总值,所用的计算公式如下:

(1) 积分 1hPa 厚的相对角动量

$$A = \frac{2\pi a^3}{g} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \cos^2 \varphi \bar{u} d\varphi \quad (1)$$

(2) EP 通量

* 1993 年 3 月 22 日收到原稿,1993 年 10 月 8 日收到修改稿。该工作得到高等学校博士点科研基金资助。

$$\begin{aligned}\vec{E} &= \{E(\varphi), E(p)\} \\ &= 2\pi a^2 g^{-1} \cos\varphi \left\{ -\cos\varphi \overline{u'v'}, f a \cos\varphi \frac{\overline{\theta'v'}}{\theta_p} \right\}\end{aligned}\quad (2)$$

(3) 积分形式的变型欧拉角动量方程

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{v^*}{a} A = \nabla \cdot \vec{E}\quad (3)$$

上述各式的符号: a 为地球半径, g 为重力加速度, φ_1 为南界纬度, φ_2 为北界纬度; “—” 表示沿纬圈平均, “'” 表示纬向偏差, θ_p 为静力稳定度; v^* 为残差经圈环流。其它为常用符号。

在式(1)中, 若 φ_1 取零, φ_2 取零风速线所在的纬度, 即得东风带的角动量总值; 若 φ_1 取零风速线所在的纬度, φ_2 取南半球或北半球的 85° 处, 即得西风带的角动量总值。

式(2)表明, EP 通量的水平分量 $E(\varphi)$ 表示涡动动量通量部分, 垂直分量 $E(p)$ 为涡动感热输送部分。

根据方程(3), 通过 $\nabla \cdot \vec{E}$ 的分布, 可以诊断涡动输送在角动量季节变化中的作用。

此外, 本文所计算的物理量都用 3 个大写英文字母表示: 第 1 个字母表示物理量, A 表示角动量, M 表示涡动动量通量, Q 表示涡动热量通量; 第 2 个字母 E 、 W 代表东西风带; 第 3 个字母 S 、 N 表示南北半球。

3 季节变化的定性分析

众所周知, 对流层高层东西风带的突然向北或向南推移及由此产生的低层天气过程, 是北半球大气环流季节过渡的主要特征。我们分析对流层中层即 500hPa 东西风的分界线位置变化特征, 并在此基础上研究最大西风强度减弱和位置季节性急变的时间从何时开始; 大气环流的急变是整个北半球的现象, 还是局部纬度带的现象; 南半球是否存在急变现象。

3.1 纬向平均西风的季节变化特征

图 1 是全球 1980—1988 年 9a 平均的逐日纬向平均西风时间-纬度剖面图。可以看到: 东风带的覆盖面积在北半球冬季(11 月至次年 4 月)与南半球冬季(4 月至 10 月)相差不多, 都位于 0 至南北纬 12 度的范围内。而各个半球在夏季相差较大, 北半球夏季零风速线达到 30°N 附近, 南半球夏季只到 $22-23^\circ\text{S}$, 就零风速线的变化来看, 北半球 5—6 月变化大, 南半球 2—3 月变化大。南北半球西风带, 西风最大风速强度和位置, 有如下特征: 在北半球, 冬半年西风风速强, 夏半年西风风速弱。从冬到夏, 最大风速由 20ms^{-1} 以上减弱到 10ms^{-1} 左右, 轴线从 $30-35^\circ\text{N}$ 跳跃到 40°N 以北, 这两个变化都发生在 3—4 月。从夏到冬, 风速增加和轴线南移比冬到夏缓慢。若仅从风速增加 5ms^{-1} 考虑, 夏到冬的季节过渡发生在 9、10 月; 若同时考虑风速增加和轴线南移, 则季节过渡发生在 11 月; 在南半球, 夏半年最大风速(略高于 20ms^{-1})比冬半年(在 $15-20\text{ms}^{-1}$)强, 可是夏半年强风速带比较集中, 冬半年比较宽广, 以 15ms^{-1} 等风速线为例, 夏半年其南北跨度只有 20—25 个纬距, 冬半年竟达到 35 个纬距。总的来看, 南半球西风最大风速轴的位置年变化不如北半球明显, 季节变动不如北半球大。如考虑零风速线的急变, 夏到冬发生在 2—3 月, 冬到夏不明显; 如从西风最大风速考虑, 夏到冬的季节性急变发生在 4 月, 冬到夏在 10 月。

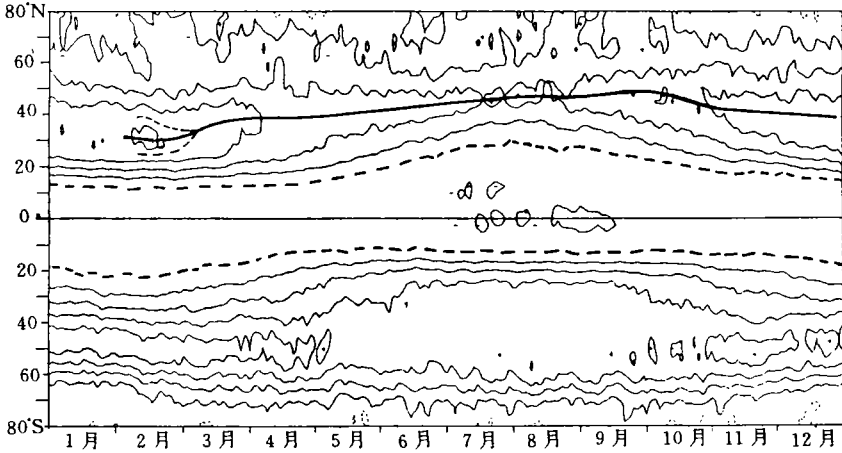


图1 500hPa 9a 平均的纬向平均西风时间-纬度剖面图

(粗线代表最大风速线,虚线代表零风速线,虚长线为 17.5ms⁻¹ 风速线。等值线间隔 5ms⁻¹)

因此,不同物理因素,发生急剧变化的时间有差异,这种差别在下面的 EP 通量分析中还可以看到。但是大多数因子发生急剧变化的时间是相对较集中的。我们将在文后列表统计,求出季节过渡的急变月份。

3.2 南北半球 EP 通量在季节变化中的特点

为了度量 EP 通量在经圈剖面上波活动的情况,在图 2 和图 3 中,选取矢量指向图的上(下)方表示波向赤道(极地)的传播,矢量指向图的左(右)方表示波向高(低)层的传播。

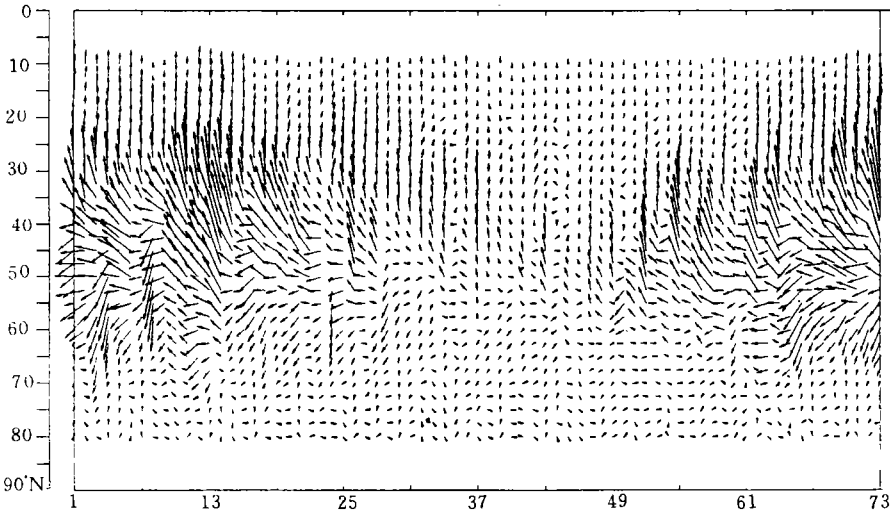


图2 1985 年北半球 500hPa EP 通量的纬度-候剖面图

(横坐标为候序)

文中 EP 通量图的计算年份,不含 1983 和 1987 两次 ENSO 年,因此可反映一般年份

的普遍情况。这里只考察带有季节尺度变化的特点。冬半年,波在热带和极区活动都很微弱,在中纬度 40—50°N 处有一波源,它既向高层传播,还在南北方向各射出一束波,传向赤道和极地。值得注意的是传向赤道的波比较定常,而传向极地的波束则时强时弱。在整个夏季(6、7、8 月),波活动虽处于很微弱阶段,但仔细观察,可以发现波有往南往北的活动,还能看出,波时而往高层时而向低层(矢量指向图的右边)活动。上述这些 EP 通量特征,与 Edman 等^[7](1980)或叶笃正等^[8](1991)所述的冬夏月平均图的情况一致,而且这些特征与冬夏涡动动量和感热通量在纬度上的分布相一致。

从图 2 上考察波活动的季节过渡可看到,在从冬到夏期间,波活动强度(不论是在 φ 方向上还是在 p 方向上)3 月份有一次很明显地季节性衰减,之后不断减弱,到 5、6 月之间波活动进一步减弱,夏季之后,从 9 月下旬波活动开始活跃起来,到 11 月进一步加强到冬季的水准,而且往南往北两束波也很清楚。从这种演变来看,可以说一年共有 4 次季节性过渡,冬到夏是在 3—4 月和 5—6 月,夏到冬是在 9 月和 11 月。

顺便指出,不论在季节内还是在季节过渡期,沿 φ 方向波活动还存在 3、4 候时间间隔的变动,其表现为时而向极一束盛行,时而向赤道一束盛行。M. Shiotani 等^[9](1985)也指出过平流层波活动有两周左右的周期,表现在向赤道的波速增加和减少上。波的这种变动与季节过渡的关系,值得以后专门讨论。

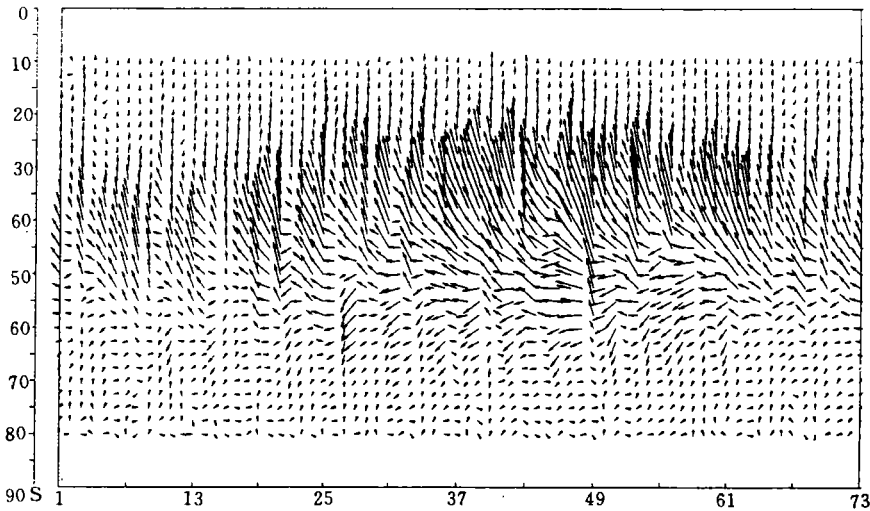


图 3 1988 年南半球 500hPa EP 通量的纬度-候剖面图
(横坐标为候序)

本文图 3 为 1988 年南半球的 EP 通量剖面图。在 50°S 附近波活动也有分两支的现象,然而向赤道的一束远比向南极的一束要强得多,即使在夏季也能识别出向赤道活动的特点,亦即在南半球一年 4 季波活动的特点是都指向赤道。就季节演变来看,由夏到冬,在 3—4 月份波向赤道传播、向高层传播的强度都有所加强,从 6 月下半月到 9 月初达到鼎盛之后逐渐减弱;在冬到夏的过渡中,看不出明显的季节性急变现象。

除去用候平均资料绘制 EP 矢量外,我们还分析了逐日的 EP 矢量图(图略)。从这种图上所看到的西风带上波源射出的两束波,要比图 2、图 3 清楚得多。特别是在季节过渡

时, EP 矢量在 φ 方向和 p 方向上的变化非常明显。比如北半球从冬到夏的季节过渡: 在 φ 方向上, 波源附近指向极地的 E_{φ} 分量突然增强, 而指向赤道的 E_{φ} 分量强度变化不大, 这就表明 EP 通量在 φ 方向的散度为负值, 按照变型角动量方程式(3)来看, 波源所在的中纬度纬向西风将减弱。实际上我们在分析图 1 时已经指出, 对应的纬向平均西风多年平均值由 20ms^{-1} 以上减弱到 10ms^{-1} 左右。

必须指出, 根据本节与上节的讨论, 反映波活动的 EP 通量和纬向平均西风, 不论在北半球还是在南半球, 它们两者的季节性急变的趋势与时间有一定的关系, 这种关系可以按欧拉变型的角动量方程(3)说明波纬的相互作用。由于本文只用一层资料进行分析, 故把这种相互作用问题留待以后讨论。

3.3 东西风带角动量与 EP 通量的逐年变化

研究物理量的年循环, 有助于区分一年中有几次季节性过渡。当年循环中年波占主要成份时, 全年仅有 1 个高值区和 1 个低值区, 高低值区之间出现两次季节性急变的可能性较大; 如年循环中半年波贡献显著时, 全年有两高两低变化, 可出现多于两次的季节性急变。限于篇幅, 本文仅考虑年波盛行的季节性急变, 对两高两低的年循环, 暂不作具体分析。

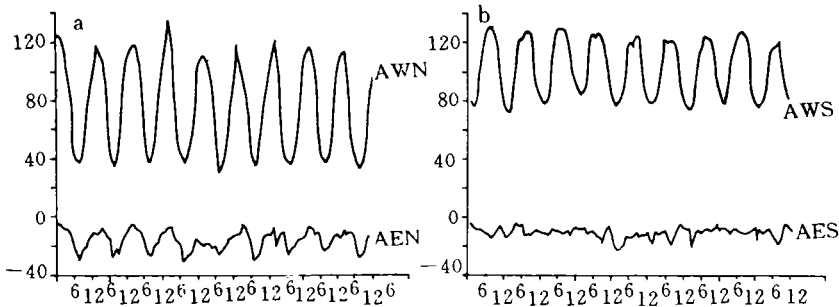


图 4 1980—1988 年角动量的年循环

(横坐标的“6”、“12”从左至右依次表示 1980—1988 年诸年的 6 月、12 月。

a. 北半球西(AWN)、东(AEN)风角动量; b. 南半球西(AWS)、东(AES)风角动量, (单位: $10^{19}\text{m}^3 \cdot \text{hPa} \cdot \text{s}$)

图 4 是南北半球东西风带角动量 9a 逐年各月平均值的演变图, 可以明显看到的是西风带的年循环要比东风带清晰。就两半球西风带而言, 北半球的年较差值比南半球大 1 倍以上。显而易见, 北半球发生季节性急变的程度要比南半球大。东风带的情况也不例外, 北半球的年循环和季节过渡都比南半球清楚。此外, 还有一个明显特征, 即北半球东风带和南半球西风带的峰值一般都比较宽, 这显然是与海陆分布有关。

从图 5 中可看出, EP 通量的垂直分量即涡动热量通量年循环很有规律, 但涡动动量通量除年周期外, 还有很多较短周期的变动。我们在以下定量分析中, 暂不考虑逐年涡动动量通量季节过渡, 仅考虑其 9a 平均的气候季节性急变。

4 季节性急变的定量分析

虽然大气环流的季节性急变是大气环流中一个重要现象, 但是迄今为止还没有一个

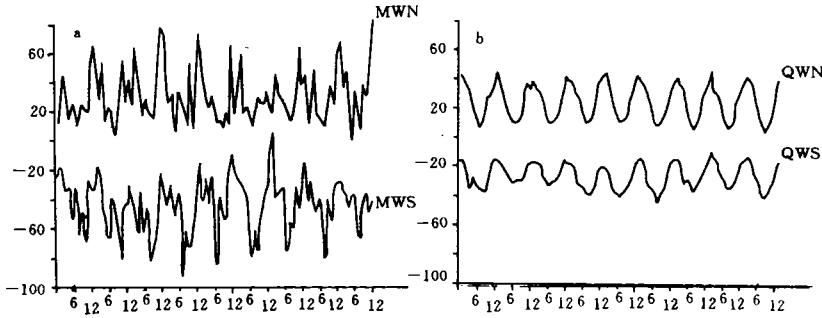


图 5 1980—1988 年 EP 通量分量的年循环

(a. 西风带南、北半球(MWS、MWN)涡动动量通量; (单位: $10^5 \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)

b. 西风带南、北半球(QWS、QWN)涡动热量通量(单位: $10^5 \text{K} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$), 横坐标说明同图 4)

严格的定义和判据, 不论是动力的、统计的、还是经验的。根据经验, 我们取两种方法判别季节性急变的发生: 一种是利用月平均值相对变化率的方法, 另一种是用统计 T 检验的方法。前者一般适用于年波盛行的物理量, 如图 4 和 5 中的 AWN、AEN、AWS、QWN、QWS 等, 后者对其他情况, 如 MWN、MWS、AES 等较为合适(这些字母代表的意思可见第 2 节)。

4.1 月平均值相对变化率判别法

求某量月平均值的相对变化率法, 首先是考虑发生急变的月份, 应满足物理量的月际差(往前差)大于年较差的 $1/4$, 其次是考虑月际差与月际平均值之比的变化率, 当其值大于一定的临界值, 则表明该月有季节性急变。因此, 月际差越大, 相对变化率越大, 急变则越剧烈。

在表 1 中, 凡月际差小于年较差 $1/4$ 的月份, 都以零赋值。未赋零的月份, 则代表了季节急变发生的月份, 由表中可见如下结果:

(1) 北半球西风带角动量, 从冬到夏的季节急变, 最常发生在 4 月份, 其次在 3 月份, 9a 平均也在 4 月份。从夏到冬的季节急变, 最常出现在 10 月份。

(2) 北半球东风带角动量, 从冬到夏的季节急变以 5—6 月出现的频数最大。这一时间比北半球西风带晚了近 2 个月。从夏到冬的季节急变, 逐年资料并不集中, 而 9a 平均资料是在 9 月份。所以若以 9 月为最常出现季节转换的月份, 这又比西风带约早了 1 个月的时间。

(3) 南半球西风带从夏到冬的季节急变, 集中出现在 3—4 月, 而从冬到夏的季节急变, 通常出现在 10 月。但是对比南北半球相对月际变化率的数值来看, 无论是角动量, 还是 EP 通量的两个分量, 虽然都在 4 月和 10 月急变, 但南半球的远不如北半球显著, 就对应的物理量来看, 北半球的相对变化率约为南半球的 1.5 倍到 2 倍。

4.2 统计 T 检验判别法

表1 角动量与EP通量分量的相对月际变化率

年份	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	
AWN	1980:	0	0	0	-28	-40	0	0	37	0	0	0	
	1981:	0	0	-27	0	0	0	0	0	31	0	0	
	1982:	0	0	0	-32	0	0	0	0	28	0	0	
	1983:	0	0	-24	-34	0	0	0	0	33	0	0	
	1984:	0	0	0	-30	-43	0	0	0	33	0	0	
	1985:	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	1986:	0	0	-26	0	0	0	0	0	0	24	0	
	1987:	0	0	-21	-31	0	0	0	0	0	30	0	0
	1988:	0	0	0	-33	0	0	0	0	0	31	0	0
出现次数:			4	7	2				1	6	1		
平均:	0	0	0	-30	0	0	0	0	0	29	0	0	
MWN	平均:	-33	0	0	-61	0	0	0	0	48	0		
QWN	1980:	0	0	0	-53	0	0	76	37	0	32	0	
	1981:	0	0	0	-43	0	0	0	56	28	0	0	
	1982:	0	0	0	-60	0	0	0	0	35	26	0	
	1983:	0	0	0	-44	0	0	0	37	30	0	0	
	1984:	0	-27	0	-46	0	0	0	61	0	28	0	
	1985:	0	0	0	0	0	0	0	78	0	0	0	
	1986:	0	0	0	-65	0	0	0	0	51	0	24	
	1987:	-35	0	0	-76	0	0	0	0	63	0	0	
	1988:	0	-26	0	-53	0	0	0	0	44	34	0	0
出现次数:	1	2		8				3	6	4	3	1	
平均:	0	0	0	-53	0	0	0	0	42	0	0	0	
AEN	1980:	0	0	0	0	-38	-27	0	29	0	24	32	0
	1981:	0	0	0	-36	0	-54	21	0	39	0	51	0
	1982:	0	0	0	-43	0	-36	0	31	0	43	0	0
	1983:	0	0	-75	0	-26	-36	15	0	0	44	0	0
	1984:	0	0	0	0	0	-21	0	0	0	0	0	0
	1985:	0	78	0	-65	-25	-43	0	0	52	0	0	0
	1986:	49	-89	59	0	-70	-18	20	0	0	0	0	0
	1987:	66	0	-52	0	-34	-41	0	20	0	0	0	0
	1988:	43	0	0	0	-59	-23	0	0	41	0	0	0
出现次数:	3	2	3	3	6	9	3	3	3	3	2		
平均:	0	0	0	0	-31	-33	0	0	24	0	0	0	
AWS	1980:	0	0	15	15	0	0	0	0	-15	-1	0	
	1981:	0	0	20	12	0	0	0	0	-21	-15	0	
	1982:	0	0	21	17	0	0	0	0	0	-16	0	0
	1983:	0	0	15	0	11	0	0	0	-12	0	0	0
	1984:	0	0	15	0	0	0	0	0	-12	-12	-18	0
	1985:	0	0	0	19	11	0	0	0	0	-14	0	-16
	1986:	0	0	19	16	0	0	0	0	0	-18	-14	0
	1987:	0	0	0	13	11	0	0	0	0	-12	-15	0
	1988:	0	0	0	20	0	0	0	0	0	0	-17	0
出现次数:			6	7	3				2	7	6	1	
平均:	0	0	15	15	0	0	0	0	0	-15	0	0	
MWS	平均:	0	0	-32	0	0	-25	0	0	32	27	0	
QWS	1980:	0	-48	-28	21	-20	0	0	17	42	0	0	
	1981:	0	0	0	0	0	0	0	0	35	0	0	
	1982:	0	0	-35	0	0	0	0	0	22	0	42	0
	1983:	0	0	-46	0	0	0	0	0	24	30	0	0
	1984:	0	0	-25	0	0	0	0	0	0	33	0	0
	1985:	0	0	-36	0	0	-18	0	0	28	48	0	0
	1986:	0	-46	-31	0	0	-18	0	0	20	0	37	0
	1987:	0	0	-45	0	0	0	0	0	0	25	34	0
	1988:	0	0	-46	0	-20	-20	0	27	0	31	32	0
出现次数:		2	8	1	2	3		1	5	6	4		
平均:	0	0	-34	0	0	0	0	0	0	32	0	0	

统计 T 检验的方法主要是求出急变月份的可信程度。经计算统计量 $T^{[10]}$, 对于给出的信度 α , 查表可求得对应的临界值 T_α , 当 $|T| > T_\alpha$ 时, 说明序列存在显著性差异。

表 2 是东西风带 9α 平均的角动量与 EP 通量两个分量的 T 检验结果。为了与月平均的结果相对应, 我们取样本时间间隔为 $30d$, α 若取 0.01 的信度, 查表可得 $T_\alpha = 2.66$ 。对于不同的物理量, T 值相差较大, 因此我们取 $T_\alpha > 4T_\alpha$ 作为判断角动量发生急变的依据, 取 $T > 2T_\alpha$ 作为判断 EP 通量分量发生急变的判据, 凡达到这些判据的月份, 在表中用符号“+”表示。

表 2 全球角动量与 EP 通量的 T 检验

	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
AWN				+		+	+		+			+
MWN	+			+		+						+
QWN				+				+	+	+		
AEN				+		+			+	+		
MEN				+	+	+						
QEN					+	+				+		+
AES				+		+			+			+
MES			+	+								+
QES												+
AWS			+	+								+
MWS												+
QWS			+	+		+			+	+	+	

与上述月平均场法求出的结果一样, 我们发现西风动量和 EP 通量全年发生急变的月份主要集中在 4、6、9 和 11 月。它们在各纬度的分布为, 4 月急变在全球各纬度都可出现, 6 月急变在北半球出现频数很高, 9 月急变集中在北半球, 11 月急变则集中在南半球, 因此这 4 种急变中, 以 4 月急变的分布范围最广泛。

5 结果与讨论

本文从定性和定量两方面考察了南北半球东西风带角动量与 EP 通量的季节过渡, 结论是:

(1) 在对流层中层, 不仅纬向平均西风存在明显的季节性急变, EP 通量也存在季节性急变。两者之间的季节性急变时间近似一致。因此可以用 EP 通量度量行星波活动的季节性急变。

(2) 年波盛行的东西风带动量和 EP 通量的季节性急变, 在一年中最常出现两次。即从冬到夏的季节性急变和从夏到冬的季节性急变。然而每次季节性急变, 在不同的纬度带上出现时间不同。

(3) 西风带季节性急变发生在 4 月和 10 月, 并且北半球西风带比南半球显著, 东风带季节性急变只发生在 6 月, 而且在南半球此现象并不明显。

上述结果是从对流层中层大气分析得到的。这个层次的季节急变很有意义, 值得进一步探讨其原因, 也值得中长期预报参考。但整个对流层, 甚至于平流层的季节性急变, 以及

层次之间的联系,也是很重要的课题。所以本文的工作还需要推广到其它层次。

致谢:本文在写作过程中,曾同北京大学地球物理学系张谭教授讨论,得到多次指点,特此致谢。

参考文献

- [1] 叶笃正等. 在六月和十月大气环流的突变现象. 气象学报, 1958, 29: 249—263.
- [2] 赵其庚, 仇永炎. 从 500 毫巴正压能量学来研究大气环流由夏到冬的季节变化. 全国寒潮中期预报文集. 北京大学出版社, 1983. 76—84.
- [3] 仇永炎, 赵其庚. 1978 年 10 月寒潮前后的正压能量学与季节过度. 气象学报, 1980, 41: 159—166.
- [4] Qiu Yongyan. On the seasonal transition and the interannual variability in the global kinetic energy at 500hPa. A A S. 1993. (3).
- [5] 孙继松, 仇永炎. 对流层中层动能的全球性季节过渡与季节性急变. 气象学报, 1994, 1: 33—39.
- [6] 孙继松, 仇永炎. 热带 500 毫巴动能的基本特征与季节变化. 热带气象, 1992, 8: 35—45.
- [7] Edmon H J et al. Eliassen-Palm cross sections for the troposphere. J A S. 1980, 37: 2600—2616.
- [8] 叶笃正等. 当代气候研究. 北京: 气象出版社, 1991. 59—66.
- [9] Shiotani M, Hirota I. Planetary wave-mean flow interaction in the stratosphere: a comparison between Northern and Southern Hemispheres. Q J R M S. 1985, 111: 309—334.
- [10] 陈家鼎等. 概率统计讲义. 高等教育出版社, 1983. 207—211.

ON THE SEASONAL TRANSITION IN GLOBAL ANGULAR MOMENTUM AND EP-FLUX AT 500HPA

Wein Min Qiu Yongyan

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

Abstract

Utilizing the daily data set from ECMWF for nine years of 1980—1988, the seasonal transition of angular momentum and EP-flux for the easterlies and westerlies in Northern and Southern Hemispheres are analyzed by qualitative and quantitative means. The following results are found:

(1) In the westerlies, there are remarkable seasonal rapid changes happened generally in April and in October, and this phenomenon in Northern Hemisphere is more obvious than that in Southern Hemisphere.

(2) In the easterlies, there is a sudden change occurring in June over Northern Hemisphere, yet over Southern Hemisphere the seasonal transition of the easterlies is not obvious. On the basis of this evidence the difference of factors affecting the rapid changes of April and June is discussed.

Key words: Angular momentum, EP-flux, Seasonal transition.