

李晓峰, 李建平. 2012. 南半球环状模事件的准地转调整过程分析 [J]. 大气科学, 36 (4): , doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11142. Li Xiaofeng, Li Jianping. 2012. Analysis of the quasi-geostrophic adjustment process of the Southern Hemisphere annular mode [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (4): .

南半球环状模事件的准地转调整过程分析

李晓峰 李建平

中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

摘 要 本文利用 NCEP/NCAR 逐日再分析资料, 分析了南半球环状模 (SAM) 事件生命过程中的准地转调整过程。由于 SAM 沿纬圈的水平尺度远远大于临界尺度罗斯贝变形半径, 因此要求纬向风场在地转调整过程向气压场适应以达到地转平衡。研究结果表明, 在纬向平均环流中, 异常 Ferrel 环流强度的变化超前于 SAM 强度变化约 2/16 位相, 异常 Ferrel 环流能够通过超前的整层大气质量的经向输运, 改变中高纬度的质量分布状况, 导致中、高纬度地区间的位势高度梯度异常变化, 而中、高纬度地区间的位势高度梯度异常发生变化就意味着 SAM 强度和位相发生变化; 而当 SAM 强度和位相发生改变后, 即中、高纬度地区南北方向上的位势高度梯度发生变化后, 可破坏中纬度地区纬向风场与位势高度场之间的地转平衡, 产生地转偏差; 地转偏差产生后, 又可驱动经向散度风场, 造成 Ferrel 环流异常的变化, 由此形成一个自我内部循环调整过程。

关键词 南半球环状模 地转调整 地转平衡

文章编号 1006-9895(2012)04-0000-00

中图分类号 P426

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11142

Analysis of the Quasi-geostrophic Adjustment Process of the Southern Hemisphere Annular Mode

LI Xiaofeng and LI Jianping

State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract The quasi-geostrophic adjustment process of the circulations associated with the Southern Hemisphere Annular Mode (SAM) is studied by employing the NCEP/NCAR reanalysis daily data. To SAM, which is a planetary scale system with the space scale along the latitude larger than the Rossby deformation radius, the wind field inclines to change itself so as to fit the pressure field in the process of geostrophic adjustment. The results show that the evolution of SAM lags behind the variation of the Ferrel cell anomaly about 2/16 phases, indicating the Ferrel cell changes the geopotential height anomalies in middle and high latitudes through its meridional transporting of the atmosphere mass. As the changing of the geopotential height anomalies in middle and high latitudes means the temporal evolution of SAM, SAM's transition from positive to negative phases is demonstrated to be driven by the leading mass transportation of Ferrel cell. When the SAM changes or the meridional geopotential height gradient in middle latitudes changes, it then destroys the geostrophic equilibrium between the zonal wind field and the geopotential height anomaly in middle latitudes, causing the geostrophic deviation; then the geostrophic deviation drives the meridional wind field, changing the anomalous Ferrel cell, and forming

收稿日期 2011-08-12, 2012-03-01 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金重点项目 41030961, 国家重点基础研究发展规划项目 2010CB950404, 国家自然科学基金资助项目 40905040, 中国科学院知识创新工程重要方向项目 KZCX2-YW-Q11-01, 大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室自由探索

作者简介 李晓峰, 男, 1979 年出生, 助理研究员, 主要从事大气环流及气候动力学的相关研究。E-mail: lixiaofeng@mail.iap.ac.cn

通讯作者 李建平, E-mail: ljpl@lasg.iap.ac.cn

a self-adjustment internal process cycle.

Key words Southern Hemisphere annular mode, geostrophic adjustment, geostrophic equilibrium

1 引言

南半球环状模 (Southern Hemisphere Annual Mode, 简称 SAM), 作为南半球热带外大气最主要的变率 (Gong and Wang, 1999; Thompson and Wallace, 2000), 也是对发生在南半球中、高纬度环状活动带之间大气质量变化的全球尺度范围涛动的一种量度。相似的环状模现象在北半球也存在, 被称为北半球环状模 (Northern Hemisphere Annual Mode, 简称 NAM) (Thompson and Wallace, 1998, 2000)。然而, 在纬向空间结构上, 由于南半球海陆地形沿纬圈分布较为均匀, 使得 SAM 的纬向环状结构相对于 NAM 而言更加典型。虽然 SAM 首先是在逐月尺度的海平面气压场资料中被发现和定义的 (Gong and Wang, 1999; Thompson and Wallace, 2000), 但这并不意味着 SAM 在时间域中只存在于月际尺度上, 它实际上具有广谱特征, 其时域频谱可覆盖从逐日、逐月、季节内、季节、年际甚至年代际的各种尺度。其中, 以 10 天左右为中心的次月尺度是 SAM 事件的本征时间尺度 (Hartmann and Lo, 1998; Lorenz and Hartmann, 2001; 李晓峰和李建平, 2009), 而月季、季节等较长时间尺度上的信号可通过一次一次的 SAM 事件积累而成。Li and Wang (2003) 很早就注意到包括 SAM 在内的南、北半球环状模活动在垂直环流场中实质上对应着 Ferrel 环流异常, 并给出了清晰的物理概念图 (李建平, 2005)。

由于 SAM 在空间上沿纬圈具有全球尺度, 它不仅能够影响南半球大气环流异常 (Gupta and England, 2006; 李晓峰和李建平, 2010), 而且对位于北半球的我国大气环流异常也具有明显的影响作用。研究表明, 春季 SAM 同夏季长江中下游降水之间存在显著的正相关关系 (Nan and Li, 2003; Nan et al., 2009; 李建平, 2011), 且前期春季 SAM 表现为正位相时, 随后的夏季长江降水偏多的概率比较大, 反之, 长江中下游降水偏少的概率较大。南素兰和李建平 (2005) 认为印度洋、南海海温是春季 SAM 影响夏季长江中下游降水的一个“桥梁”, 孙建奇等 (2009) 则认为澳大利亚北部的对流活动起到“桥梁”作用; Wu et al. (2009) 则指

出秋季的 SAM 对冬季中国季风有重要影响。可见, 深入了解 SAM 的基本活动规律对于我国气候学研究具有重要意义。

现有的观测分析及数值模拟试验 (Limpasuvan and Hartmann, 2000) 表明, 环状模 (NAM/SAM) 可以理解为一个不需外强迫可以自发生和自维持的波流相互作用现象。由于瞬变波动可以看作平均急流的直接驱动力, 不少有意义的工作 (Feldstein, 2003; Benedict et al., 2004; Luo and Gong, 2006; Woollings et al., 2008) 尝试从分析瞬变涡动与环状模所对应的中纬度急流之间波流相互作用的角度来研究环状模的内部演变规律。在旋转地球上, 中高纬度地区科氏力作用明显, 对于大尺度的环流现象的运动, 罗斯贝数 $R_0 < 1$, 要求风场和气压场通过地转调整过程达到地转平衡。叶笃正 (1957) 早已指出, 地转适应存在尺度问题, 即地转适应过程中是风场适应气压场还是气压场适应风场的问题取决于非地转扰动的水平尺度: 当非地转扰动的水平尺度 $L > L_0$ (即罗斯贝变形半径) 时, 风场发生显著改变去适应气压场; 反之亦然。曾庆存 (1963a; b; c) 则从数学上严格证明了这一理论。由于 SAM 现象具有典型的纬向对称结构, 且在沿纬圈方向具有半球尺度, 远远大于临界尺度罗斯贝变形半径 L_0 。依照上述理论, SAM 在其对应的准地转调整过程中要求风场, 尤其是纬向风场, 显著的改变去适应气压场, 换而言之, 要求 SAM 对应的中纬度西风场向南北气压场调整。这与前人试图先解释中纬度西风变率, 然后解释环状模变化的思路显然不同。那么, 在 SAM 事件的演化过程中, 这种风场与气压场之间的地转平衡关系到底如何维持? 内部环流调整过程究竟怎样? 其自维持过程又如何? 本文将尝试以 SAM 为例, 从准地转调整的角度展开研究, 来加深我们对于环状模现象的内部演变规律的理解。

2 资料和方法

文中使用的资料主要为美国国家环境预测中心/国家大气研究中心 (NCEP/NCAR) 日平均再分析资料 (Kalnay et al., 1996), 分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$, 资料时段从 1948 年 1 月 1 日至 2005 年 12 月 31 日。

为方便处理, 闰年 2 月 29 日均已略去。SAM 逐日指数 (SAMI) 采用了 (李晓峰和李建平, 2009; 2010) 中的定义, 即采用南半球中纬度和高纬度的两个大气环状活动带的中心纬度 40°S 和 70°S 上的标准化纬向平均海平面气压差。其中, 逐日资料场均已扣除年循环, 计算基准时段取为 1958~2000 年。

由于 SAM 事件时间尺度为 10 天左右次月尺度, 为了避免高频和低频噪音的影响, 本文主要考察时间尺度介于 5~30 天的 SAM 事件。逐日 SAMI 及逐日资料场的 5~30 天变率通过 401 点 Lanczos 带通滤波 (Duchon, 1979) 提取得到。在挑选 SAM 的正负位相事件时, 文中定义月内时间尺度环状模指数大于等于 2 倍 (小于等于 -2 倍) 全年方差的连续天数达到其 1/4 倍最小周期以上为发生一次该尺度环状模正位相 (负位相) 事件; 事件选取时段为南半球冬半年 5~9 月, 对于伸展到该时段以外的事件未做统计。为了考察环状模的时间演化特征, 本文采用类似 Maloney et al. (Maloney et al., 1998) 的方法进行了分位相合成, 其中一个完整的生命循环过程被分为 17 个位相, 1 (9) 至 7 (15) 位相为 SAM 正 (负) 位相, 而 0、8、16 位相为转换位相, 而 4 (12) 位相对应最强 SAM 事件正 (负) 位相中的最大正负。

3 SAM 事件生命过程与南半球中、高纬度间大气质量涛动

环状模现象首先从海平面气压场上被发现和定义 (Thompson and Wallace, 1998; Gong and Wang, 1999; Thompson and Wallace, 2000; Li et al., 2003), 实质上代表热带外中、高度间大气质量变化存在的一种纬向对称的、全球尺度的南—北向大气质量涛动, 或“跷跷板”结构。考虑到 SAM 良好的纬向对称特征, 采用纬向平均的方式不仅可以更加简洁的代表其对应的环流演化总体特征, 而且可以方便地表征南半球中、高纬度间大气质量变化。

图 1 为南半球冬季 (5~9 月) SAM 生命循环对应的纬向平均的位势高度、纬向风场及垂直环流异常, 从图中可以清楚地看到 SAM 生命循环的概况。从阴影区所示的位势高度场变化来看, SAM 事件的演化过程实际上对应着以 55°S 左右为界的、南半球中高纬度之间的纬向对称的、准正压的大气质量涛动 (或“跷跷板”结构) 的变化过程。0~3 位相,

负的位势高度异常在 55°S 以南的极地近地层减弱并向上扩展; 相应地, 正位势高度异常则相应的在以大约 45°S 为中心的南半球中纬度地区近地层增强且向上伸展。这种位势高度异常的变化, 对着南半球中高纬度间大气质量涛动增强: 中纬度质量堆积, 而高纬度质量耗散。第 4 位相时, 这一南北大气质量涛动振幅达到最大, 且相同性质的位势高度异常可自近地层一直伸展到下平流层, 准正压结构非常明显。5~7 位相, 55°S 以南负的位势高度异常增加, 而 55°S 以北极地地区正的位势高度异常减弱, 造成中高纬度大气质量涛动振幅减弱。在 8~16 位相, 整个大气质量“跷跷板”结构反向增强之后再减弱, 与正位相的情况相反。与此同时地, 纬向风异常 (如图 1 等值线所示) 也产生相应的变化, 以维持中高纬度地区风场与位势高度之间的准地转平衡。0~3 位相时, 随着南半球中高纬度地区位势高度异常的加强和向上伸展, 形成了以 60°S 为中心的西风异常和以 35°S 为中心的东风异常分别加强和向上伸展。第 4 位相时, 中高纬度地区的异常风场达到最强, 并且随着极地位势高度极值区域的北移, 生成了以 80°S 为中心的新的异常东风带。5~7 位相, 异常风场减弱且风速中心上抬。8~16 位相, 风带分布则完全相反。垂直经向环流上, 正的 Ferrel 环流异常大致对应 SAM 正位相, 而负的 Ferrel 环流异常则大致对应 SAM 负位相。可见, SAM 生命循环对应着南半球中高纬度间的纬向对称的、准正压的大气质量涛动 (或“跷跷板”结构) 的转换; 且在此过程中, 异常的纬向风场始终与位势高度异常大致保持准地转平衡的状态, 而异常 Ferrel 环流亦伴随 SAM 的演变发生变化。

4 异常 Ferrel 环流的超前变化在 SAM 位相转换中的作用

Li et al. (2003) 很早就注意到 SAM 在垂直环流场中实质上对应着 Ferrel 环流异常。这种紧密的对应关系在 SAM 事件演变过程中亦可以被明确的观察到。然而, 到目前为止, 尚很少有研究注意到异常 Ferrel 环流随时间的强度变化及其位相转换相对于环状模具有超前关系, 而异常 Ferrel 环流的这种超前变化在 SAM 位相转换中的可能作用更是很少被人提及。

4.1 超前的 Ferrel 环流变化

通过对比 Ferrel 环流异常与 SAM 变化, 我们

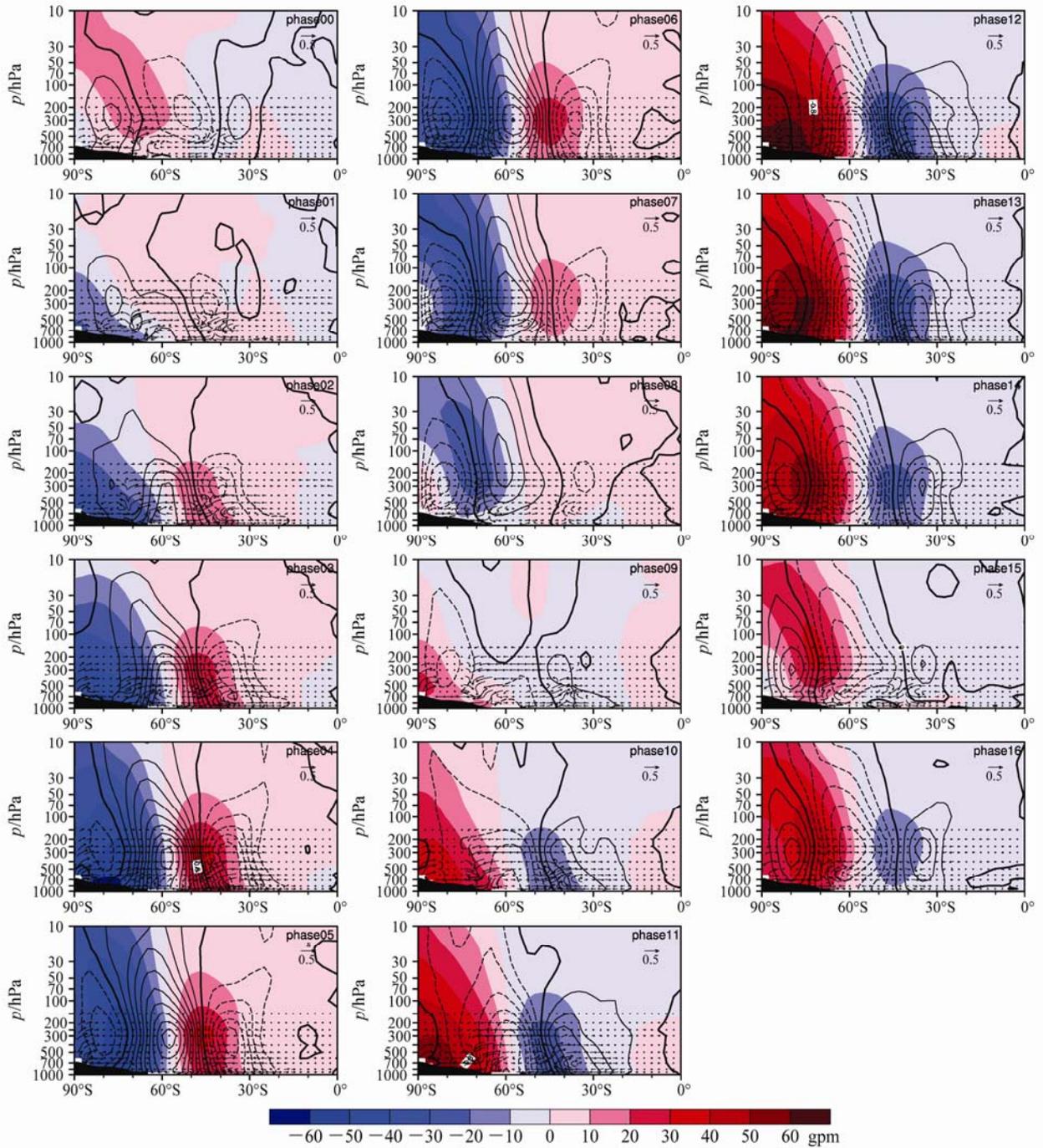


图1 南半球冬季(5~9月)SAM对应纬向平均的高度场异常(彩色阴影)、纬向风异常(等值线,间隔为0.4 m/s)及垂直环流异常随位相(0~16)演变

Fig. 1 Temporal evolution of the zonal-averaged geopotential height anomaly (color shading), zonal wind anomaly (contours with 0.4 m/s interval), and vertical meridional cell anomaly (vector) associated with SAM phases (0–16) in the Southern winter (May–Sep)

发现 Ferrel 环流异常和 SAM 强弱随时间的变化并不一致: Ferrel 环流异常的位相变化是明显超前于 SAM 位相变化的。根据环状模时间位相的定义, SAM 在 0、8、16 位相时强度最弱,而在 4、12 位相时最强。如图 1,在 0、8、16 位相时,中高纬度

1000 hPa 位势高度异常最小,此时,中高纬度之间高度梯度及纬向风异常最小, SAM 强度最弱;而第 4、12 位相时,中高纬度 1000 hPa 位势高度异常最大,相对应地,中高纬度的高度梯度及纬向风异常此时也达到最大, SAM 强度最大。如果对比 Ferrel

异常与 SAM 强度及位相演变 (如图 1), 可看到: 在 2~3 位相时, 正的 Ferrel 环流异常已达到最大, 之后的第 4 位相 SAM 才达到正位相最强, 而 10~11 位相时, 负的 Ferrel 环流异常达到最大, 其后第 12 位相 SAM 负位相最强; Ferrel 在 5~6 位相由正异常转为负异常, 13~14 位相由负异常转为正异常, 而与之对应的 SAM 反向分别发生在第 8 和第 16 位相。以上定性分析表明, 正 (负) Ferrel 环流达到最强的位相提前正 (负) SAM 达最强约一个位相, Ferrel 环流异常的转向也提前 SAM 正负位相转换约 2/16 个位相。

为了更加定量的分析 Ferrel 环流异常的变化特征, 我们可采用垂直速度 (Oort and Yienger, 1996; Wang, 2002a, b) 和上下层经向风切变 (Oort and Yienger, 1996; Quan et al., 2004; 马杰, 2007) 这两个定量的指标来刻画 SAM 事件对应的 Ferrel 环流异常的强度变化。考虑到 Ferrel 环流在反向过程中并不稳定, 本节将采用整层平均的经向风切变和垂直速度来代表异常 Ferrel 环流强度。如图 2a 为南半球

冬季 SAM 事件对应 1000~100 hPa 整层平均的纬向平均垂直速度 $[w]$ 沿纬度随时间的演变特征。可以看到, 图中垂直速度大值区主要位于大约 60°S~70°S 和 35°S~50°S 的中纬度地区, 正好对应南半球 Ferrel 环流异常两支。以上两个区域平均的垂直速度之差 (北支垂直速度减南支垂直速度) 即可代表南半球 Ferrel 环流异常的强度, 如图 2b 所示, Ferrel 异常环流南北垂直速度切变在 2 位相达到正的最大, 对应 Ferrel 环流异常达到正的最大; 5~6 位相时, 垂直速度切变为减小并反向, 此时对应 Ferrel 环流异常由正转负, 强度最小; 11 位相, 垂直速度切变达到负最大, 此时对应反 Ferrel 环流异常强度达到最大; 13~14 位相时, 垂直速度再次最小, 对应 Ferrel 即由负转正, 强度最小。可见, Ferrel 环流对应的整层平均的垂直速度切变的强度及正负位相转换均超前于 SAM 强度变化。

如图 3a 南半球冬季 SAM 对应 700~400 hPa 整层平均的纬向平均经向风垂直切变 $\partial[v]/\partial p$ 沿纬度随时间的演变特征, 这种变化与图 2 是相似的。图

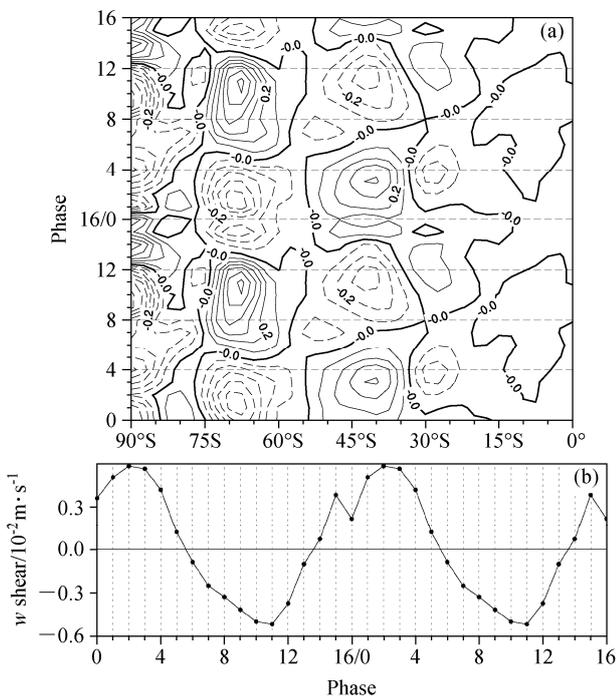


图 2 南半球冬季 (5~9 月) SAM 对应 1000~100 hPa 整层纬向平均垂直速度异常沿纬度随位相演变特征 (a) 以及 60°S~70°S 和 35°S~50°S 整层平均的纬向平均垂直速度异常切变随位相演变特征 (b, 横轴数字代表时间位相)。垂直速度单位: 10^{-2} m/s

Fig. 2 Temporal evolution of (a) column integrated vertical velocity anomaly, (b) meridional shear of column integrated vertical velocity anomaly in area 60°S~70°S and area 35°S~50°S between 1000 hPa and 100 hPa associated with SAM phases (0~16) in the Southern winter (May~Sep)

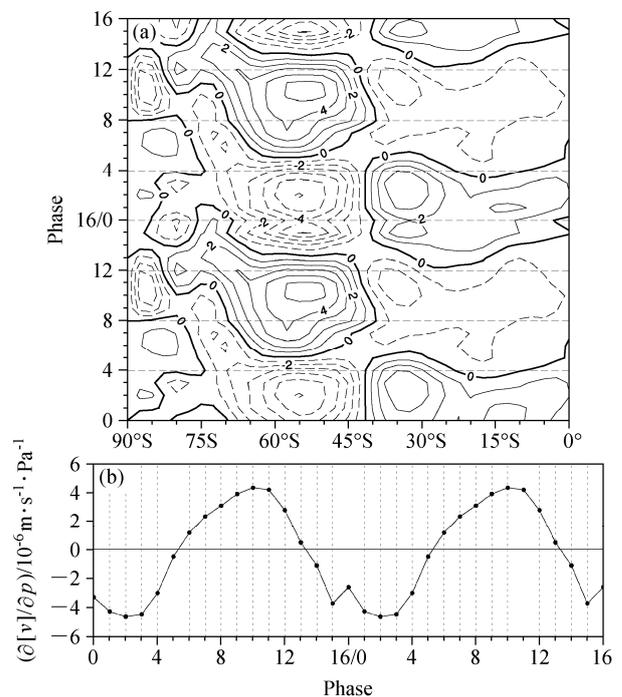


图 3 南半球冬季 (5~9 月) SAM 对应 700~400 hPa 整层纬向平均经向速度切变 ($\partial[v]/\partial p$) 沿纬度随位相演变特征 (a) 以及 45°S~65°S 整层平均的纬向平均经向速度切变 ($\partial[v]/\partial p$) 随位相演变特征 (b, 横轴数字代表时间位相)。经向速度切变单位: 10^{-6} m/s \cdot Pa $^{-1}$

Fig. 3 Temporal evolution of (a) column integrated meridional velocity shear ($\partial[v]/\partial p$), (b) vertical shear of column integrated meridional velocity averaged over 45°S~65°S between 700 hPa and 400 hPa associated with SAM phases (0~16) in the Southern winter (May~Sep)

3a 中可以看到, 在 Ferrel 异常环流盛行的区域垂直切变较大。45°N~65°N 区域平均的垂直切变的时间演变(图 3b)表明, 经向风垂直切变的演变也落后于 SAM 位相变化: 在 2 位相经向风垂直切变达到正的最强, 即正的 Ferrel 环流异常达到最强; 在 5~6 位相垂直经向风切变由正转负, 即 Ferrel 环流异常由正变负; 10~11 位相垂直经向风切变达到负的最强, 即负的 Ferrel 环流异常达到最强; 13~14 位相垂直经向风切变由负变正, 即 Ferrel 环流异常翻转, 由负变正。这说明, 月内 SAM 对应 Ferrel 环流异常的演变也是超前于月内 SAM 的生命循环大约 2/16 位相发生变化的。由此, Ferrel 环流对应的整层平均的经向风切变超前于 SAM 强度变化。

根据垂直速度切变和经向风切变的两种不同强度定义来看, SAM 对应 Ferrel 异常环流强度的变化均明显的超前于 SAM 的位相变化。这种 Ferrel 环流异常超前环状模强度变化的特征非常值得我们注意。

4.2 异常 Ferrel 环流对应的大气质量经向输运作用

采用质量流函数方法 (Oort and Rasmusson, 1970; 吴国雄和 Tibaldi, 1988; Waliser et al., 1999; 李建平, 2001; Dima and Wallace, 2003; 秦育婧等, 2006; Ma and Li, 2008; Feng et al., 2011; 冯然等, 2011) 可以定量地衡量经圈环流对大气质量经向输送的强弱。根据 Peixoto and Oort (1992) 的工作, 定义斯托克斯 (Stokes) 流函数或者质量流函数 ψ , 使得

$$[v] = \frac{g}{2\pi a \cos \varphi} \frac{\partial \psi}{\partial p}, \quad (1)$$

$$[w] = \frac{g}{2\pi a^2 \cos \varphi} \frac{\partial \psi}{\partial \varphi}, \quad (2)$$

其中, $[v]$ 为纬向平均经向风, $[w]$ 为纬向平均垂直速度, a 为地球半径, φ 为纬度, g 为地球重力常数。假定大气层顶 $\psi = 0$, 可通过积分 (1) 式并从 $[v]$ 分布可得到 ψ :

$$\psi(\varphi, p) = \frac{2\pi a \cos \varphi}{g} \int_p^{p_s} [v(\varphi, p)] dp.$$

对于给定纬度 φ 和等压面 p 上的流函数 $\psi(\varphi, p)$, 其值代表了从地表面 (p_s) 到等压面 p 的整层大气质量经向输送通量。实际计算为简便起见, 取 $p_s = 1000$ hPa。正的质量流函数代表由南向北净输送大气质量, 负的质量流函数代表由北向南净输送大气质量。

南半球冬季 SAM 对应的 Ferrel 环流异常实际上代表了南半球中纬度地区大气质量在南北方向上的整层异常输送。如图 4 所示, 我们计算了南半球冬季 SAM 事件生命循环对应的质量流函数异常, 从图中可以看到, 质量流函数与经圈环流的分布位置及强度变化相一致, 并且当 Ferrel 环流异常为正时, 对应质量流函数在整个对流层均为负, 代表自中高纬地区向中低纬地区的质量的整层输送; 相反地, 当 Ferrel 环流异常为负时, 对应质量流函数在对流层为正, 代表自中低纬向中高纬地区整层输送质量。从图 5a 可以看到, Ferrel 环流异常对应的中纬度质量输送最为强烈, 低纬度虽然也存在与次级 Haddley 环流异常相关联的质量输送, 但强度较弱。而对于 SAM 对应的中纬度地区 Ferrel 环流异常而言, 其质量输送可采用中纬度地区 (45°S~65°S) 区域平均的 400~700 hPa 质量流函数来表征。如图 5b 所示, Ferrel 环流异常对应大气质量经向输送在大约第 2~3 位相达到最大的向赤道输送, 在 5~6 位相由向赤道输送变为向南极输送, 在 10~11 位相达到最大向南极输送, 13~14 位相由向南极输送转为向赤道输送。从上面分析看来, 中纬度地区 Ferrel 环流异常对应的大气质量异常输送的位相变化具有超前 SAM 大约 2/16 位相的特征。

4.3 超前的经向大气质量输运在 SAM 位相转换中的作用

Ferrel 环流异常位于中纬度地区, 横跨 55°S 这一分界, 两端正好分别连接着 SAM 所对应的南北半球热带外大气质量涛动 (或“跷跷板”结构) 的极地的高纬度活动中心和中纬度活动中心。Ferrel 环流异常所对应的异常经向质量输送可将高纬地区的大气质量输送到低纬, 或者反之。那么, 中纬度 Ferrel 环流异常对应的这种大气质量的经向输送与 SAM 的强度变化及位相转换是如何联系起来的?

如图 4 所示, 在 0 位相时, 南半球中、高纬度间整层的大气质量差异较小, 但此时中纬度地区已存在正的 Ferrel 环流异常, 开始将大气质量从 55°S 以北的高纬度地区输送到 55°S 以南的中纬度地区; 1~3 位相时, 随着正的 Ferrel 环流异常持续将高纬度大气质量输运到中纬度地区, 使得大气质量在 55°S 以南的高纬地区异常减少、而在 55°S 以北中纬度地区异常增多, 并且大气质量首先从地面开始向上堆积或辐散, 因此表现位势高度场上则为在中纬度正的位势高度异常持续增强且向上伸展、高纬

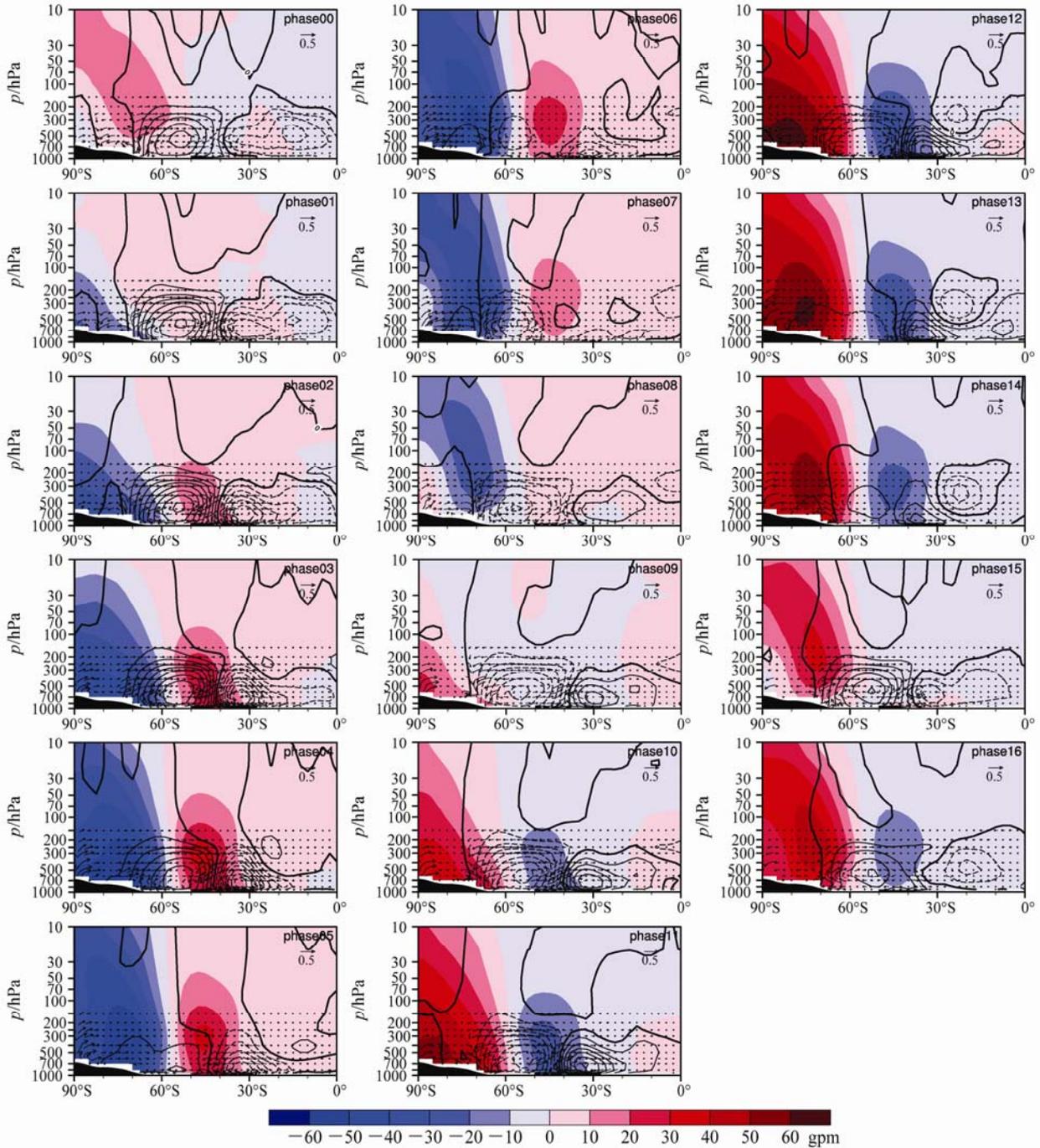


图4 南半球冬季(5~9月) SAM 对应纬向平均的高度场异常(阴影)、质量流函数异常(等值线)及垂直环流异常随位相(0~16)演变。等值线间隔： $0.2 \times 10^{10} \text{ kg/s}$

Fig.4 Temporal evolution of the zonal-averaged geopotential height anomaly (color shading), mass stream function anomaly (contours with $0.2 \times 10^{10} \text{ kg/s}$ interval), and vertical meridional cell anomaly associated with SAM phases (0~16) in the Southern winter (May~Sep)

度负的位势高度异常持续减弱且向上伸展，即正位相 SAM 增强；4~5 位相，由于正的 Ferrel 环流异常开始减弱，由高纬到低纬的大气质量输送也相应减弱，使得 SAM 强度在第 4 位相达到极值后也开始减弱；6 位相，Ferrel 环流异常由正变负，其对应的

大气质量输送也变为将堆积到 55°S 以北中纬地区的大气质量往回输运到 55°S 以南的高纬地区；7~8 位相时，由于负的 Ferrel 环流异常的持续向南输运，使得堆积在中纬异常的大气质量继续较小，而高纬度大气质量增加，直到中高纬度整层大气质量近似

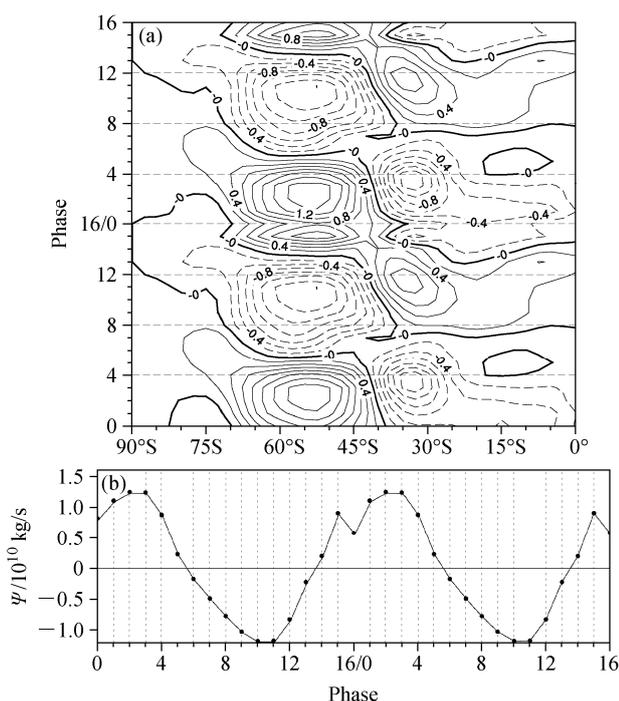


图5 同图3, 但为质量流函数异常(单位: 10^{10} kg/s)
Fig.5 Same as Fig.3, but for the column integrated zonal mean mass stream function anomaly (units: 10^{10} kg/s)

相等, 此时 SAM 由正振幅减弱到零振幅; 9~10 位相, 随着负的 Ferrel 环流继续由中纬向高纬输送质量, 中纬度大气质量异常偏少, 位势高度异常转负并继续减小, 高纬大气质量异常偏多, 位势高度异常转正并继续增加, 此时负位相 SAM 增强; 11~13 位相, 负的 Ferrel 环流开始减弱, 中纬度向高纬度的大气质量输送减弱, 使得负位相 SAM 在第 12 位相达到最强后开始转弱; 14 位相, 负的 Ferrel 环流异常转向正 Ferrel 环流异常, 重新将堆积在高纬的大气质量向中纬度输送, 如此开始新一轮的循环。

在上面循环中, 我们可以看到中纬度 Ferrel 环流异常通过对南半球中高纬度之间的大气质量的超前于 SAM 变化 1~2 位相的经向输送, 直接改变大约以 55°S 为界的南北两侧上大气质量分布, 造成相应的位势高度异常场产生变化甚至反向。而南半球中、高纬度地区的位势高度异常发生变化或者反向, 就意味着 SAM 的强度发生变化或反向。因此, 在垂直纬向平均环流中, 南北半球中纬度 Ferrel 环流异常对大气质量的南北超前输运作用是导致 SAM 强度变化和正、负位相转换的直接原因。

5 SAM 生命循环对应的准地转调整过程

如上所述, Ferrel 环流异常通过对大气质量的

超前经向输送, 改变南半球中纬度和高纬度地区的大气质量分布, 造成中高纬度间的位势高度梯度场发生变化, 而中高纬度间的位势高度梯度生变化就意味着 SAM 的强度和位相发生变化。那么, SAM 强度产生变化后能否反过来调制 Ferrel 环流异常的强度和变化, 形成自我调制的内部过程?

5.1 水平散度与 Ferrel 环流异常

图 6 给出了南球冬季 SAM 事件对应的纬向平均散度 $[D]$ 及垂直环流的分布, 从图中可以看到, 实际计算得到的散度场的分布及变化与 Ferrel 环流异常的变化非常一致。在采用实际再分析资料的计算中, 我们注意到 SAM 事件对应纬向平均经向风 $[v]$ 与纬向平均经向散度风 $[v_\phi]$ 几乎完全相等的 (图略)。在不考虑变形场 (实际情况中量值较小可忽略不计) 的情况下, 简单的推导即可证明纬向平均的经向风 $[v]$ 和纬向平均的经向散度风 $[v_\phi]$ 是严格相等的。根据 Helmholtz 定理, 速度场 \mathbf{V} 可以分解为散度风 \mathbf{V}_ϕ 和涡度风 \mathbf{V}_ψ 的叠加 (Holton, 2004):

$$\mathbf{V} = \mathbf{V}_\psi + \mathbf{V}_\phi, \quad (4)$$

其中, ψ 为流函数, ϕ 为势函数。若仅考虑经向风分量 v , 则有

$$v = v_\psi + v_\phi, \quad (5)$$

其中, v_ψ 为涡旋风经向风分量, v_ϕ 为散度风经向风分量, 且

$$\begin{cases} v_\psi = \frac{1}{a \cos \phi} \frac{\partial \psi}{\partial \lambda}, \\ v_\phi = -\frac{1}{a} \frac{\partial \phi}{\partial \phi}, \end{cases} \quad (6)$$

ϕ 为纬度, λ 为经度, a 为地球半径。于是, 纬向平均的经向风 $[v]$ 可写为:

$$[v] = [v_\psi] + [v_\phi], \quad (7)$$

$$\because [v_\psi] = \frac{1}{a \cos \phi} \left[\frac{\partial \psi}{\partial \lambda} \right] = 0, \quad (8)$$

$$\therefore [v] = [v_\phi], \quad (9)$$

由此证明, 纬向平均的经向风 $[v]$ 就是纬向平均的经向散度风 $[v_\phi]$ 。而散度风即辐合辐散分量风, 因此, 纬向平均的经向风 $[v]$ 主要为纬向平均的经向辐合、辐散风分量。

由水平散度的定义可直接将纬向平均的经向风 $[v]$ 和纬向平均的水平散度 $[D]$ 关联在一起。水平

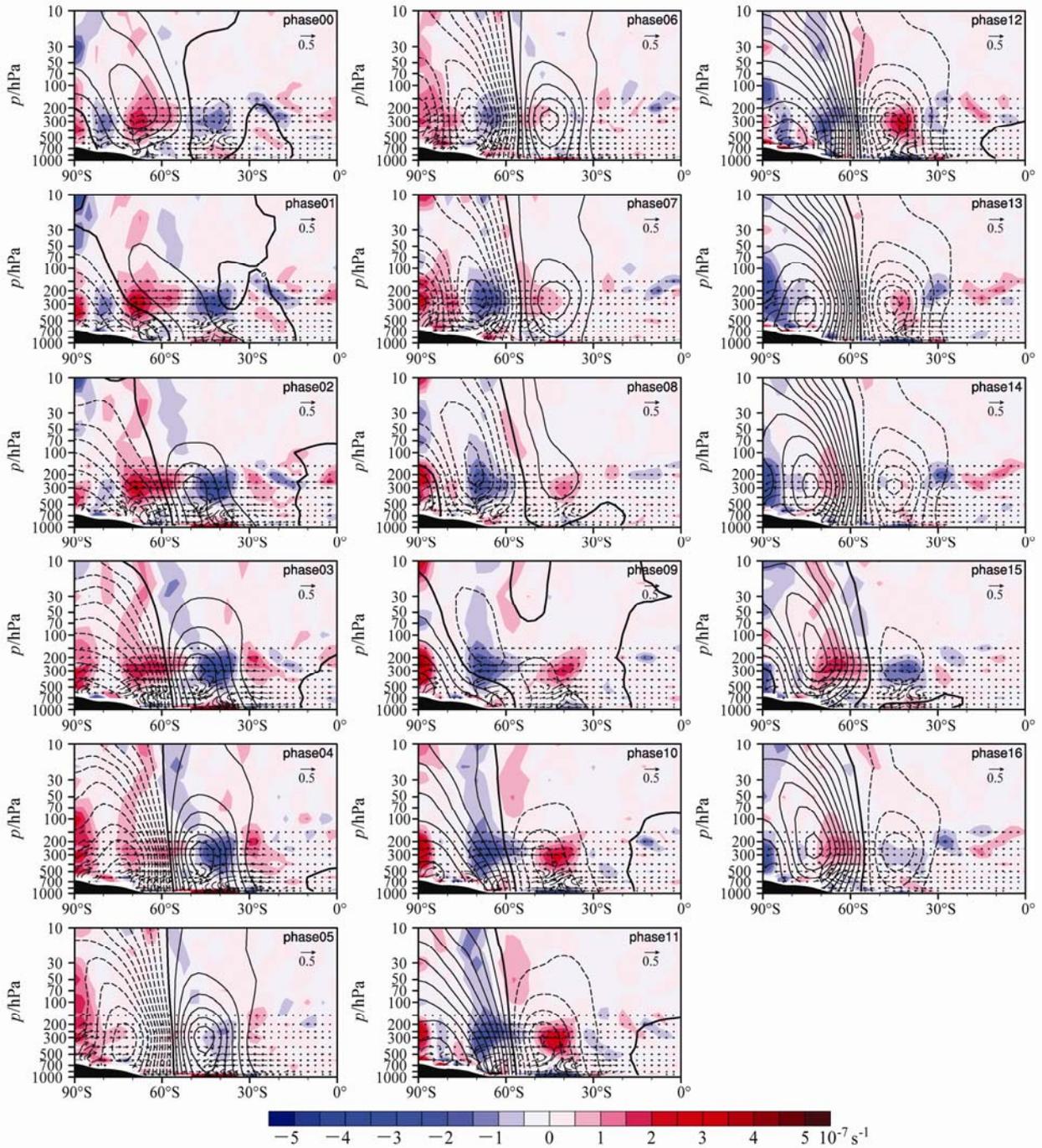


图6 南半球冬季(5-9月) SAM 对应纬向平均的水平散度异常(彩色阴影)、位势高度异常(等值线)及垂直环流异常随位相(0-16)演变。水平散度异常单位: 10^{-7} s^{-1} ; 等值线间隔: 5 gpm

Fig. 6 Temporal evolution of the zonal-averaged horizontal divergence anomaly (color shading), geopotential height anomaly (contours with 5 gpm interval), and vertical meridional cell anomaly (vector) associated with SAM phases (0-16) in the Southern winter (May-Sep)

散度可写为速度势 ϕ 的拉普拉斯算子形式:

$$D = -\nabla^2 \phi, \quad (10)$$

$$[D] = \frac{1}{a^2} \frac{\partial^2 [\phi]}{\partial^2 \varphi} = \frac{1}{a} \frac{\partial [v_\phi]}{\partial \varphi} = \frac{1}{a} \frac{\partial [v]}{\partial \varphi}, \quad (11)$$

则纬向平均速度 $[v(\varphi, p)]$ 可写为纬向平均水平散度的积分形式:

$$[v(\varphi, p)] = a \int [D(\varphi, p)] d\varphi. \quad (12)$$

在假定大气不可压缩的前提下, 水平的辐合辐散变

化对应垂直速度的变化。根据质量连续方程, 纬向平均的垂直速度 $[w]$ 与水平散度 $[D]$ 密切关联:

$$\frac{1}{a \cos \varphi} \frac{\partial u}{\partial \lambda} + \frac{1}{a} \frac{\partial v}{\partial \varphi} = \frac{\partial w}{\partial p}, \quad (13)$$

$$[D] = \frac{\partial [w]}{\partial p}, \quad (14)$$

故有,

$$[w(\varphi, p)] = \int [D(\varphi, p)] dp. \quad (15)$$

需要注意的是, 纬向平均的垂直速度比纬向平均的水平速度小 2 个量级 (可在实测资料计算中得到验证), 因此属于相对小量。可见, 在纬向平均环流中构成 Ferrel 环流异常上支和下支的重要组成部分的经向风分量 $[v]$, 以及 Ferrel 环流异常的南北两支的垂直风分量 $[w]$, 都与南北方向上纬向平均散度 $[D]$ 的分布密切关联的, 且属于辐散风。

5.2 地转偏差与 Ferrel 环流异常

如前所述, 在环状模生命循环过程中, 由于 Ferrel 环流异常在南北方向经向输送大气质量, 造成 SAM 位相发生变化, 即造成中纬度地区南北方向上的位势高度梯度发生变化。中纬度地区南北方向上的位势高度梯度发生变化, 实际上意味着中纬度地区纬向风场与位势高度场之间的地转平衡将遭到破坏, 即产生地转偏差。Holton (2004) 的研究早已指出, 不考虑柯里奥利参数随纬度的微小变化, 地转风是无辐散的, 由此可推得水平散度可主要由实际风与地转风之间的差异 (即地转偏差) 造成。换句话说, 地转偏差导致可致辐散风。因此, SAM 生命循环中, 由于异常 Ferrel 南北输运质量导致沿纬圈方向的地转偏差产生后, 可驱动辐散风, 反过来造成 Ferrel 环流异常的变化, 由此形成一个自我循环的调整过程。

在等压坐标系中, 纬向平均地转纬向风 $[u_g]$ 可表达为:

$$[u_g] = -\frac{1}{fa} \frac{\partial [\Phi]}{\partial \varphi}, \quad (16)$$

其中, Φ 为位势高度, φ 为纬度, a 为地球半径, f 为地转参数。那么, 地转偏差 $[u_a]$ 为:

$$[u_a] = [u_g] - [u]. \quad (17)$$

在旋转地球上, 中高纬度地转偏差 $[u_a]$ 受到地转参数的作用, 产生地转偏差力 $[F_a]$:

$$[F_a] = f[u_a] = -\frac{1}{a} \frac{\partial [\Phi]}{\partial \varphi} - f[u], \quad (18)$$

$$[F_a] = [G] + [C], \quad (19)$$

其中, $[u]$ 为纬向平均纬向风。 $[G] = -\partial[\Phi]/a\partial\varphi$ 为纬向平均的南北方向上位势高度梯度力, 而 $[C] = -f[u]$ 为纬向平均风受到的纬向平均科氏力。达到地转平衡状态意味着地转偏差 $[u_a]$ 或地转偏差力 $[F_a]$ 近似为零。

图 7 为南半球冬季 (5~9 月) 月内 SAM 对应地转偏差力 F_a 随位相变化。0 位相时, 中纬度地区上对流层和下平流层为明显的向南的地转偏差力, 这利于中纬度 Ferrel 环流异常的加速。1 位相时, 由于 Ferrel 环流异常持续将大气质量从中高纬输送到中低纬, 大气质量在中纬度由底层向上堆积, 高纬大气质量则由底层向上减少; 于是, 底层向南的位势高度梯度增加, 地转偏差变为负值, 加速 Ferrel 环流异常下层水平支; 同时, 中纬度上对流层的位势高度梯度减小, 地转偏差力减小, 但仍然指向南方, 加速 Ferrel 环流异常。2 位相时, 随着南北正负位势高度异常的抬升加强, 中低纬上对流层位势高度梯度增大, 地转偏差力减小, 在约 50°S 以北的中纬度地区, 向南的位势高度梯度开始大于中纬度西风产生的向北的科氏力, 此处地转偏差力已转为向南, 此时 Ferrel 环流异常达到最强。3~4 位相, 随着 Ferrel 环流异常的继续由南向北净输送质量, 南北正负位势高度异常的抬升加强, 中低纬上对流层位势高度梯度增大, 上对流层地转偏差力方向完全转为向南, Ferrel 环流减速。5 位相时, 上对流层向南的地转偏差力达到最强, Ferrel 环流异常最弱, 即将发生转向。6~9 位相, Ferrel 环流异常发生转向, 变为反 Ferrel 环流异常并增强, 开始将大气质量由北向南净输送, 上对流层向南的位势高度减小并反向, 向南的地转偏向力减小, 反的 Ferrel 环流异常则持续受力加速。10 位相, 上对流层指向北的位势高度梯度增加, 地转偏差力由向南转为向北, 反的 Ferrel 环流异常达到最大。11~12 位相, 上对流层以向北位势高度梯度增强, 向北的地转偏地转偏差力使反 Ferrel 环流异常减速。13~14 位相, 向北的地转偏地转偏差力达到最大, 负 Ferrel 环流异常减速为 0 并反向。15~16 位相, 向北的地转偏地转偏差力减小, 正的 Ferrel 环流异常加速。

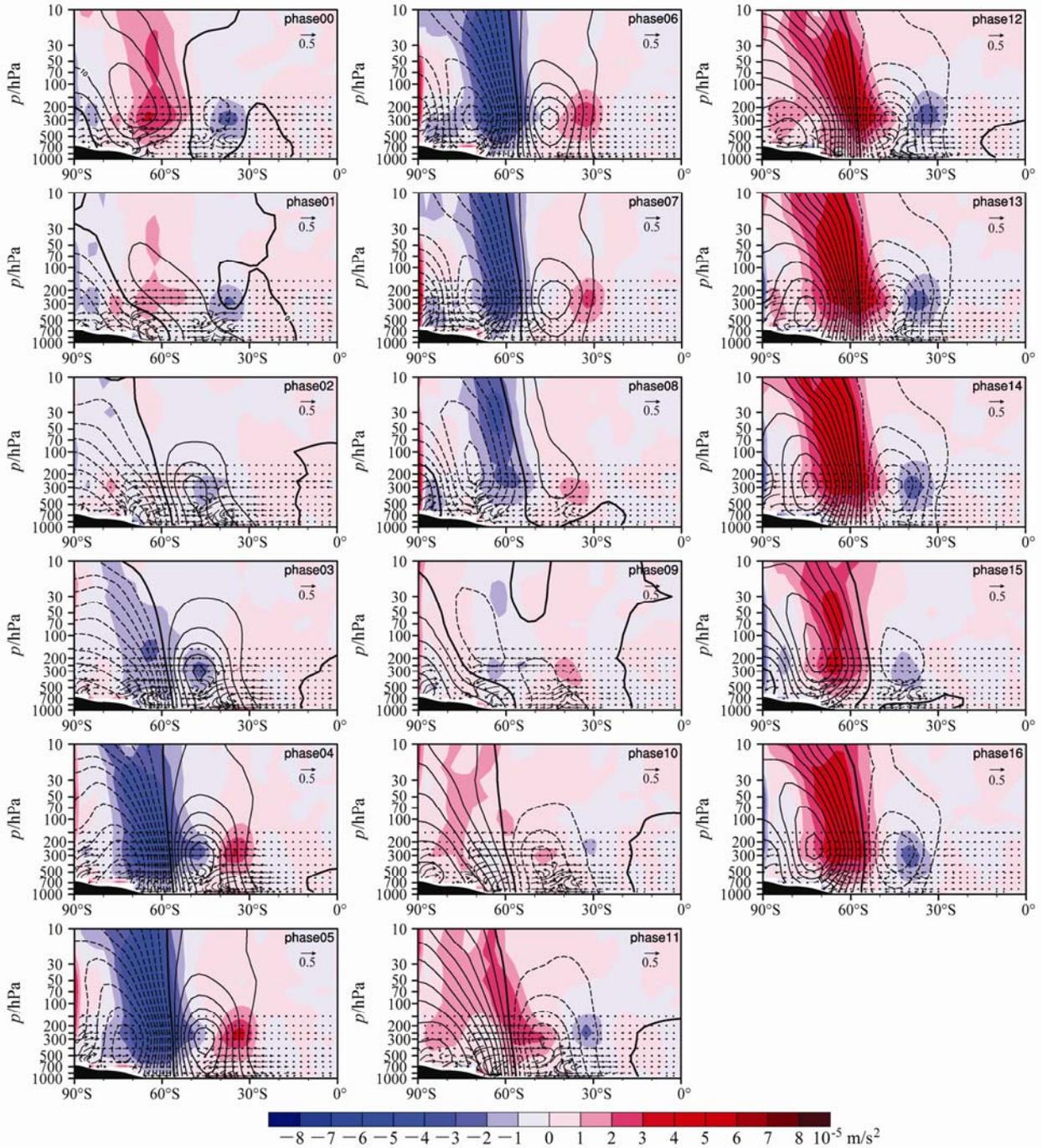


图 7 南半球冬季 (5~9 月) SAM 对应纬向平均的地转偏差力异常 (阴影)、位势高度异常 (等值线) 及垂直环流异常随位相 (0~16) 演变。地转偏差力异常单位为 10^{-5} m/s^2 ; 等值线间隔为 5 gpm

Fig. 7 Temporal evolution of the zonal-averaged geostrophic deviation force anomaly (color shading), geopotential height anomaly (contours with 5-gpm interval), and vertical meridional cell anomaly (vector) associated with SAM phases (0-16) in the Southern winter (May-Sep)

图 8a 给出了南半球冬季 SAM 事件对应 700~200 hPa 平均的地转偏差力垂直切变 $\partial F_a / \partial p$ 。这里将有利于加速南半球正的 Ferrel 环流异常的地转偏差力垂直切变叫做正的地转偏差力垂直切变, 否则为负的地转偏差力垂直切变。从图 8a 中可以看到,

在中纬度地区, 正负地转偏差力垂直切变交替出现。图 8b 给出了南半球冬季 SAM 对应中纬度地区 $40^{\circ}\text{S}\sim 70^{\circ}\text{S}$ 平均 $\partial F_a / \partial p$ 的大小, 可表征地转偏差力对 Ferrel 环流异常上支和下支总的加速和减速作用。从图 8b 中可以看到南半球冬季 SAM 对应中纬

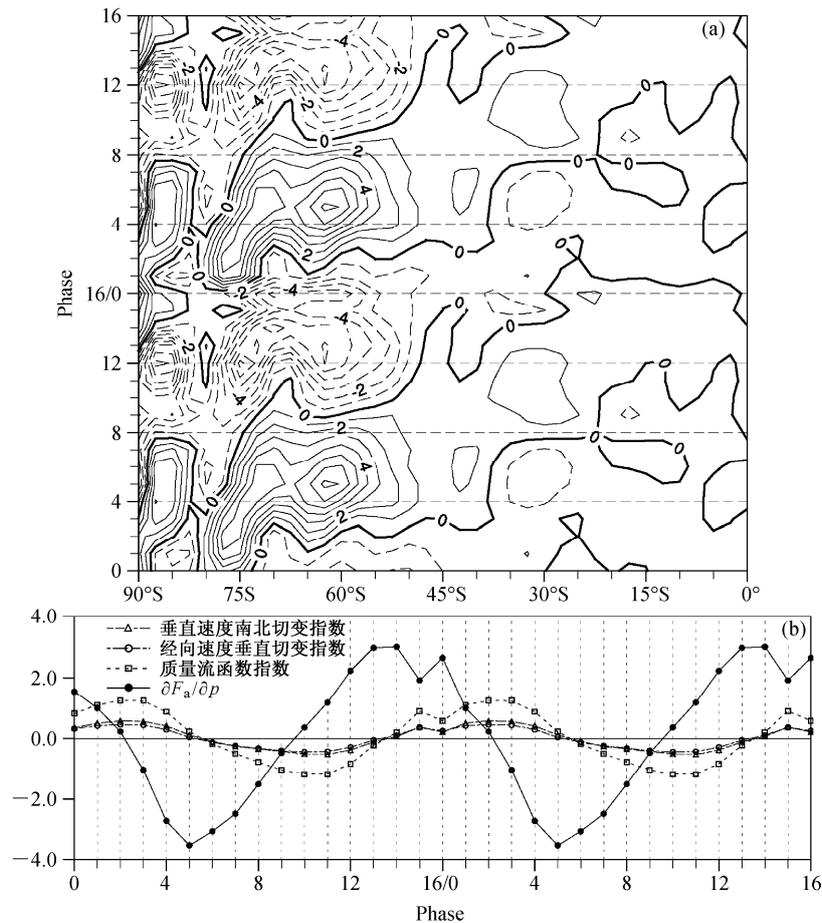


图8 南半球冬季(5~9月)SAM事件对应700~200 hPa (a) 整层纬向平均的地转偏差力垂直切变 $\partial F_g / \partial p$ (单位: $10^{-10} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{Pa}^{-1}$) 沿纬度随位相演变特征和 (b) $40^\circ\text{S} \sim 70^\circ\text{S}$ 整层纬向平均的 $\partial F_g / \partial p$ 以及3种不同的Ferrel环流异常强度指数随位相(0~16)演变特征。垂直速度南北切变指数单位: m/s , 经向速度垂直切变指数(乘以-1, 以便与其它曲线比较)单位: $10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$, 质量流函数指数单位: 10^{10} kg/s

Fig.8 Temporal evolution of (a) column integrated zonal-averaged geostrophic deviation force ($\partial F_g / \partial p$, units: $10^{-10} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{Pa}^{-1}$), (b) column integrated zonal-averaged geostrophic deviation force ($\partial F_g / \partial p$) averaged over $40^\circ\text{S} \sim 70^\circ\text{S}$ and three different indexes of the anomalous Ferrel cell intensity between 700 hPa and 200 hPa associated with SAM phases (0~16) in the Southern winter (May~Sep). The units of $\partial F_g / \partial p$ are $10^{-10} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{Pa}^{-1}$; units of meridional shear of vertical velocity are m/s ; units of integrated vertical shear of meridional velocity (multiplied by -1 for the comparison with other lines) are $10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$; units of mass stream function are 10^{10} kg/s

度 Ferrel 环流异常变化和地转偏差力的时间位相具有较好的对应关系: 0~1 位相, 南半球冬季 SAM 对应中纬度 Ferrel 环流异常为正, 此时受到的地转偏差力切变为正, Ferrel 环流异常加速; 2~3 位相, 地转偏差力切变最小并反向, Ferrel 环流异常达到正的最强并开始减弱; 4 位相, 地转偏差力切变为负并增强, 正的 Ferrel 环流异常减速; 5 位相, 地转偏差力切变达到负的最强, 正的 Ferrel 环流异常减速到 0 附近; 6~8 位相, 负的地转偏差力切变减弱, Ferrel 环流异常反向并加速; 9~10 位相, 负地转偏差力切变转为正, 负的 Ferrel 环流异常达到最强并开始减速; 11~12 位相, 正的转偏差力切变增强, 负的 Ferrel 环流异常减速; 13~14 位相, 正的

转偏差力切变达到最强, 负的 Ferrel 环流异常减速为 0 并反向; 15~16 位相, 正的转偏差力切变达到减弱, 反向之后的正 Ferrel 环流异常加速。由此看来, SAM 对应南半球中纬度 Ferrel 环流异常由于直接受到地转偏差力的作用而加速、减速和转换正、负位相的。由上所述, 月内尺度环转模对应的 Ferrel 环流异常强弱的变化及位相的转换实际上是直接受到了地转偏差力的作用而导致的。

6 结论与讨论

本文尝试从风场适应气压场的准地转调整角度, 解释环状模强度变化和正负位相转换的物理过程。由于环状模现象在沿纬圈方向具有半球尺度,

显然大于临界尺度罗斯贝变形半径 L_0 , 在地转适应过程中, 由于科氏力的强迫, 必然要求风场显著的改变去适应气压场, 即风场向气压场适应。因此, 从南北气压场的改变导致中纬度风场向其适应的角度来理解环状模变化的内部物理过程是本文的切入点。文中的分析表明, 正反 Ferrel 异常具有在南北方向上输运异常大气质量的能力, 并且 Ferrel 环流异常强度的变化超前于 SAM 强度变化约 $1/16 \sim 2/16$ 位相, 因此与 Ferrel 环流异常对应的大气质量的输运在环状模强度的变化和位相的转换过程中起到了关键作用。SAM 强度的变化意味着中纬度地区的气压梯度力发生变化, 气压梯度力的变化又会使得这一地区的地转偏差力发生变化, 变化后的地转偏差力反过来又可以调制 Ferrel 环流异常的变化, 从而形成一套自我调制和循环的内部动力过程。下面对其进行简要总结。

SAM 正 (负) 位相时, 中纬度高层有较强地转偏差指向赤道 (极区), 加速正 (反) 的 Ferrel 环流异常; 正 (反) 的 Ferrel 环流异常将大气质量从高纬 (低纬) 输运到低纬 (高纬), 使得大气质量以中纬度为界, 在低纬异常增加 (减少), 在高纬异常减少 (增加), 中纬度指向极地 (赤道) 的气压梯度力增强, 西风 (东风) 通过向气压场的适应而加强, 正 (负) 位相环状模强度增加; 大气质量在被输运的过程中, 在低纬从低层向上堆积 (减少), 在高纬从低层向上减少 (增加), 指向极区 (赤道) 方向的气压梯度力自下向上不断增加, 上对流层地转偏差由指向赤道 (极地) 转变为指向极地 (赤道) 方向并加强, 造成正 (反) Ferrel 环流异常减速并反向成为反 (正) 的 Ferrel 环流异常, 然后, 反 (正) 的 Ferrel 环流异常被加速; 接着, 反 (正) Ferrel 环流异常开始将堆积在低纬 (高纬) 的大气质量输运回到高纬 (低纬) 地区, 中纬度指向极地 (赤道) 的气压梯度力减少, 西风 (东风) 异常随之减弱, 正 (负) 位相环状模强度减弱。

由此, 我们认为 Ferrel 环流异常对应的大气质量的输送在环状模强度改变和位相转换起到了关键的作用, 而由于环状模作为半球尺度的环流现象, 在旋转地球上要求满足准地转平衡, 是环状模位相变化被地转偏差力动力调制的内在原因。换句话说, 从环状模对应的纬向平均环流之间的地转调整过程, 我们可以看到环状模活动在强度的增强、减弱以及位相翻转的过程中, 可完全是由内部物理

过程之间的相互反馈形成自我调制的结果。这与前人从波流相互作用角度考察得到的环状模活动可自循环的结果是相呼应的 (Yamazaki and Shinya, 1999; Limpasuvan and Hartmann, 2000)。实际上, 相似的准地转自调整过程在北半球环状模 NAM 的演化中也存在, 由于 SAM 沿纬圈的空间结构比 NAM 更加接近环状, 本文仅仅以 SAM 为例进行讨论。然而, 本文讨论中并未探究环状模循环过程中的包括热力过程在内的能量来源与耗散问题, 这些都有待我们进一步地深入研究下去。

参考文献 (References)

- Benedict J J, Lee S, Feldstein S B. 2004. Synoptic view of the North Atlantic Oscillation [J]. *J. Atmos. Sci.*, 61 (2): 121–144.
- Dima I M, Wallace J M. 2003. On the seasonality of the Hadley Cell [J]. *J. Atmos. Sci.*, 60 (12): 1522–1527.
- 冯然, 李建平, 王金成. 2011. 北半球夏季 Hadley 环流的主导模态及其变率 [J]. *大气科学*, 35 (2): 201–206. Feng Ran, Li Jianping, Wang Jingcheng. 2011. The principal modes of variability of the boreal summer Hadley circulation and their variations [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 35 (2): 201–206.
- Feldstein S B. 2003. The dynamics of NAO teleconnection pattern growth and decay [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 129 (589): 901–924.
- Feng R, Li J P, Wang J C. 2011. Regime change of the boreal summer Hadley circulation and its connection with the tropical SST [J]. *J. Climate*, 24 (15): 3867–3877.
- Gong D Y, Wang S W. 1999. Definition of Antarctic oscillation index [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 26 (4): 459–462.
- Gupta A S, England M H. 2006. Coupled ocean–atmosphere–ice response to variations in the southern annular mode [J]. *J. Climate*, 19 (18): 4457–4486.
- Hartmann D L, Lo F. 1998. Wave-driven zonal flow vacillation in the Southern Hemisphere [J]. *J. Atmos. Sci.*, 55 (8): 1303–1315.
- Holton J R. 2004. *An Introduction to Dynamic Meteorology* [M]. Burlington, MA: Elsevier Academic Press.
- 李建平. 2001. 全球大气环流气候图集 I. 气候平均态 [M]. 北京: 气象出版社, 279pp. Li Jianping. 2001. *Atlas of Climate of Global Atmospheric Circulation I. Climatological Mean State (in Chinese)* [M]. Beijing: China Meteorological Press, 279pp.
- 李建平. 2005. 海气耦合涛动与中国气候变化 [C]// 秦大河. 中国气候与环境演变 (上卷). 北京: 气象出版社, 324–333. Li Jianping. 2005. Coupled air-sea oscillations and climate variations in China [C]// Qin D K. *Climate and Environmental Evolution in China (in Chinese)*. Beijing: China Meteorological Press, 324–333.
- Li J P, Wang J X L. 2003. A modified zonal index and its physical sense [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 30 (12): 1632.
- 李建平, 吴国雄, 胡敦欣. 2011. 亚印太交汇区海气相互作用及其对我国短期气候的影响 [M]. 北京: 气象出版社, 358–377. Li Jianping, Wu

- Guoxiong, Hu Dunxin. 2011. Ocean-Atmosphere Interaction over the Joining Area of Asia and Indian-Pacific Ocean and Its Impact on the Short-Term Climate Variation in China (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 358-377.
- 李晓峰, 李建平. 2009. 南、北半球环状模月内活动的主要时间尺度 [J]. 大气科学, 33 (2): 215-231. Li Xiaofeng, Li Jianping. 2009. Main submonthly timescales of Northern and Southern Hemispheres annual modes [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (2): 215-231.
- 李晓峰, 李建平. 2010. 月内尺度南半球环状模对应的大气环流异常传播特征 [J]. 大气科学, 34 (6): 1099-1113. Li Xiaofeng, Li Jianping. 2010. Propagation characteristics of atmospheric circulation anomalies of sub-monthly Southern Hemisphere annular mode [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (6): 1099-1113.
- Limpasuvan V, Hartmann D L. 2000. Wave-maintained annular modes of climate variability [J]. J. Climate, 13 (24): 4414-4429.
- Lorenz D J, Hartmann D L. 2001. Eddy-zonal flow feedback in the Southern Hemisphere [J]. J. Atmos. Sci., 58 (21): 3312-3327.
- Luo D H, Gong T T. 2006. A possible mechanism for the eastward shift of interannual NAO action centers in last three decades [J]. Geophys. Res. Lett., 33: L24815.
- 马杰. 2007. 大气环流圈变化特征以及与 ENSO 的关系 [D]. 兰州大学大气科学系博士学位论文, 434pp. Ma Jie. 2007. Characteristics of atmospheric meridional circulation and its connections to the ENSO [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Department of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, 434pp.
- Ma J, Li J P. 2008. The principal modes of variability of the boreal winter Hadley cell [J]. Geophys. Res. Lett., 35: L01808, doi: 01810.01029/02007GL031883.
- Nan S L, Li J P. 2003. The relationship between the summer precipitation in the Yangtze River valley and the boreal spring Southern Hemisphere annular mode [J]. Geophys. Res. Lett., 30 (24): 2266.
- 南素兰, 李建平. 2005. 春季南半球环状模与长江流域夏季降水的关系 II. 印度洋和南海海温的“海洋桥”作用 [J]. 气象学报, 63 (6): 847-856. Nan Sulan, Li Jianping. 2005. The relationship between the summer precipitation in the Yangtze River valley and the boreal spring Southern Hemisphere annular mode. II. The role of the Indian Ocean and South China Sea as an “oceanic bridge” [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 63 (6): 847-856.
- Nan S L, Li J P, Yuan X J, et al. 2009. Boreal spring Southern Hemisphere annular mode, Indian Ocean SST and East Asian summer monsoon [J]. J. Geophys. Res., 114: D02103, doi: 10.1029/2008JD010045.
- Oort A H, Rasmusson E M. 1970. On the annual variation of the monthly mean meridional circulation [J]. Mon. Wea. Rev., 98 (6): 423-442.
- Oort A H, Yienger J J. 1996. Observed interannual variability in the Hadley circulation and its connection to ENSO [J]. J. Climate, 9(11): 2751-2767.
- Peixoto J P, Oort A H. 1992. Physics of Climate [M]. New York, USA: American Institute of Physics, 520.
- 秦育婧, 王盘兴, 管兆勇, 等. 2006. 两种再分析资料的 Hadley 环流比较 [J]. 科学通报, 51 (12): 1469-1473. Qin Yujing, Wang Panxing, Guan Zhaoyong, et al. 2006. Comparison of Hadley cell in two kinds of analysis datasets [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 51 (12): 1469-1473.
- Quan X W, Diaz H F, Hoerling M P. 2004. Changes of the Hadley circulation since 1950 [C]// Diaz H F, Bradley R S. The Conference on the Hadley Circulation: Present, Past and Future. Springer, 85-120.
- Sun J Q, Wang H J, Yuan W. 2009. A possible mechanism for the co-variability of the boreal spring Antarctic Oscillation and the Yangtze River valley summer rainfall [J]. Int. J. Climatol., 29 (9): 1276-1284.
- Thompson D W J, Wallace J M. 1998. The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields [J]. Geophys. Res. Lett., 25 (9): 1297-1300.
- Thompson D W J, Wallace J M. 2000. Annular modes in the extratropical circulation. Part I: Month-to-month variability [J]. J. Climate, 13 (5): 1000-1016.
- Waliser D E, Shi Z X, Lanzante J R, et al. 1999. The Hadley circulation: Assessing NCEP/NCAR reanalysis and sparse in-situ estimates [J]. Climate Dyn., 15 (10): 719-735.
- Wang C Z. 2002a. Atmospheric circulation cells associated with the El Niño-Southern Oscillation [J]. J. Climate, 15 (4): 399-419.
- Wang C Z. 2002b. Atlantic climate variability and its associated atmospheric circulation cells [J]. J. Climate, 15 (13): 1516-1536.
- Woollings T, Hoskins B, Blackburn M, et al. 2008. A new Rossby wave-breaking interpretation of the North Atlantic Oscillation [J]. J. Atmos. Sci., 65 (2): 609-626.
- 吴国雄, Tibaldi S. 1988. 关于大气平均经圈环流的一种计算方案 [J]. 中国科学 B 辑, (4): 442-450. Wu Guoxiong, Tibaldi S. 1988. A computational schemes of mass stream function of the zonally mean meridional circulation [J]. Science in China (Series B) (in Chinese), (4): 442-450.
- Wu Z W, Li J P, Wang B, et al. 2009. Can the Southern Hemisphere annular mode affect China winter monsoon [J]. J. Geophys. Res., 114: D11107.
- Yamazaki K, Shinya Y. 1999. Analysis of the Arctic Oscillation simulated by AGCM [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 77 (6): 1287-1298.
- Yeh T C. 1957. On the formation of quasi-geostrophic motion in the atmosphere [J]. J. Meteor. Soc. Japan, The 75th Anniversary Volume of the Meteorological Society of Japan: 130-134.
- 曾庆存. 1963a. 大气中的适应过程和发展过程 (一) 物理分析和线性理论 [J]. 气象学报, 33 (2): 163-174. Zeng Qingcun. 1963a. The adaptation and development process in the atmosphere. I. Physical analysis and the linear theory [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 33 (2): 163-174.
- 曾庆存. 1963b. 大气中的适应过程和发展过程 (二) 非线性问题 [J]. 气象学报, 33 (3): 281-289. Zeng Qingcun. 1963b. The adaptation and development process in the atmosphere. II. Nonlinear theory [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 33 (3): 281-289.
- 曾庆存. 1963c. 扰动特性对大气适应过程的影响和测风资料的使用问题 [J]. 气象学报, 33 (1): 37-50. Zeng Qingcun. 1963c. The influence of disturbance characteristics on adaptation process in atmosphere and the utilization problem of wind data [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 33 (1): 37-50.