

李晓峰, 李建平. 2010. 南半球环状模月内时间尺度传播特征分析 [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.

月内尺度南半球环状模对应的大气环流异常传播特征

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 (Southern Hemisphere Annular Mode, 简称 SAM) 在月内时间尺度 (sub-monthly timescales, 5~30 天) 上相关环流的垂直和水平传播特征。结果表明, 月内 SAM 对应的纬向风异常和温度异常具有明显自南极地区向南半球中纬度地区水平传播特征; 在垂直方向上, 纬向风异常为明显上传特征, 温度异常则具有在极地和高纬度地区明显上升、低纬度地区下沉的特点。月内 SAM 对应的南半球中高纬度地区上传信号表明, 在较短的月内时间尺度上, 对流层信号可以突破对流层顶, 上传达到平流层; 而月内 SAM 对应的整层南传信号表明, 南极地区环流变化超前于中高纬度地区, 因此在 1~3 周的月内时间尺度上, 极区信号可能对中高纬地区信号具有指示意义。

关键词 南半球环状模 月内时间尺度 水平传播 垂直传播

文章编号 1006-9895 (2010) 06-1099-15

中图分类号 P434

文献标识码 A

Propagation Characteristics of Atmospheric Circulation Anomalies of Sub-monthly 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 related horizontal and vertical propagation characteristics of the Southern Hemisphere Annular Mode (SAM) on the sub-monthly timescales (5–30 days) is studied by employing the NCEP/NCAR reanalysis daily data. The results show that the zonal mean zonal wind anomalies and temperature anomalies propagate horizontally from the Antarctic regions to the middle and high latitudes of the Southern Hemisphere; in the vertical direction, the zonal mean zonal wind anomalies mainly propagate upward, and the temperature anomalies propagate upward in the polar regions and propagate downward in the low latitudes. The characteristics of upward propagation of the sub-monthly SAM signals imply that the tropospheric SAM signals can propagate upward into the lower stratosphere on relative short timescales. And the northward propagation of the sub-monthly SAM signals suggests that the variation of circulation in the Antarctic region leads to the variations in the middle and high latitudes of the Southern Hemisphere. So, the Antarctic signals may have prediction skills to those in middle and high latitudes of the Southern Hemisphere on the timescales from one week to three weeks.

收稿日期 2009-12-21, 2010-02-25 收修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展计划项目 2010CB950400, 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

作者简介 李晓峰, 男, 1979 年出生, 助研, 主要从事环状模相关研究。E-mail: lixiaofeng@mail.iap.ac.cn

通讯作者 李建平, E-mail: ljpl@lasg.iap.ac.cn

Key words Southern Hemisphere annular mode, sub-monthly timescales, meridional propagation, vertical propagation

1 引言

南极涛动 (Antarctic Oscillation, 简称 AAO) 由我国气象学者龚道溢和王绍武首先命名 (Gong and Wang, 1999), 也被称为南半球环状模 (Southern Hemisphere Annual Mode, 简称 SAM) (Thompson and Wallace, 2000; Nan and Li, 2003; Nan et al., 2009; Wu et al., 2009), 用于描述南半球热带外气候变率最主要的模态, 实际上是一种具有环状对称结构和准正压结构的半球尺度大气遥相关现象, 代表了南半球中纬和高纬地区大气质量间的“翘翘板”变化, 在月际、季节、年际和年代际等较长时间尺度上, SAM 活动在垂直环流场中实质上对应着 Ferrel 环流异常 (Li and Wang, 2003; 李建平, 2005)。北半球存在相似的模态, 即北极涛动 (Arctic Oscillation, 简称 AO) 或北半球环状模 (Northern Hemisphere Annual Mode, 简称 NAM)。早在 1928 年, SAM 作为南半球中高纬对称模态就曾引起了 Walker (1928) 的注意, 其后被一些作者在不同的观测与再分析资料场中发现 (Rogers and van Loon, 1982; Szeredi and Karoly, 1987; Yoden et al., 1987; Kidson, 1988a, 1988b; Karoly, 1990; Shiotani, 1990; Hartmann and Lo, 1998)。1999 年, Gong and Wang (1999) 提出该现象是大气环流中继“三大涛动”之后又一个重要的大尺度遥相关现象, 并重新命名为“南极涛动。这一命名在许多研究中被采用。Kidson and Watter-son (1999) 也将该现象称为“高纬模” (High-Latitude Mode)。2000 年, Thompson and Wallace (2000) 考虑到南极涛动和北极涛动具有相似性, 并将“南、北极涛动” (AAO/AO) 称为“南、北半球环状模” (SAM/NAM)。

环状模信号传播是近来一个备受关注的问题。自 Baldwin 发现 NAM 信号具有自平流层下传播的特征之后 (Baldwin and Dunkerton, 1999, 2001; Baldwin et al., 2003a), SAM 平流层信号也被发现在 11~12 月具有下传特点 (Thompson and Solomon, 2002; Baldwin et al., 2003b; Thompson et al., 2005)。然而, 上述研究主要强调季节及其以上较长时间尺度上的传播特征。我们知道, SAM 的

月内尺度变化也是很重要的变率 (Thompson et al., 2003; 李晓峰和李建平, 2009), 在整个频谱上 5~30 天的月内时间尺度方差可占到总方差的一半以上 (全年占 53.07%, 5~9 月占 53.07%, 11~3 月占 52.42%)。最新研究 (李晓峰和李建平, 2009a) 表明, 在较短的月内 (5~30 天) 时间尺度上, NAM 信号虽然在极区仍旧存在下传特征, 却在中高纬度出现显著上传现象, 这一结果与 Polvani and Waugh (2004) 的观点是相一致的, 它是环状模信号并非源于平流层的新证据。SAM and NAM 具有明显的相似性 (Thompson and Wallace, 2000), 那么, 对于较短的月内时间尺度 SAM 信号, 其传播特征如何? 又是否与月内 NAM 情况完全一致? 这是我们感兴趣的问题。本文聚焦月内时间尺度的 SAM 活动, 从观测分析的角度对其正、负位相事件生命循环对应的传播特征进行了详细的研究, 结果显示月内尺度 SAM 与 NAM 的传播特征虽然存在一定程度的相似之处, 但是其自身的独特特征也是非常明显和不容忽视的, 这一研究增加了我们对 SAM 活动的了解, 为进一步深入和全面了解 SAM 活动的内部动力过程提供了必要的事实依据。

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) 的计算采用了 Nan and Li (2003) 逐月指数的方法, 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。在分尺度研究 SAM 的活动特征之前, 本文对逐日 SAMI 及逐日资料场进行 401 点 Lanczos 带通滤波处理 (Duchon, 1979)。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。

在分尺度挑选 SAM 的正负位相事件时, 文中定义月内某一特征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 月以及南半球夏半年 11~3 月，对于伸展到该时段以外的事件未作统计。为了考察环状模的垂直和水平传播特征，本文采用类似 Maloney and Hartmann (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，4 (12) 位相对应正（负）位相最强，而 0、8、16 位相为转换位相，强度最弱。

3 月内南半球环状模正、负位相气候平均态

SAM 具有明显的季节变化，呈现出准半年变化特征，其正、负位相事件活跃与非活跃期分布不如 NAM 对称，总的来说，SAM 活跃期主要分布在南半球冬季（5~9 月）和夏季月份（11~3 月）（李晓峰和李建平，2009a）。为了方便比较，本文分别挑选 1948~2005 年历年南半球冬季和夏季月内（5~30 天）及其主要特征时间尺度（包括准单周、准双周、准三周）（李晓峰和李建平，2009a）上环状模指数大于 2.0 倍（小于 -2.0 倍）全年方差的所有公历日计算温度、位势高度和水平及垂直风场平均，得到该特征尺度环状模正（负）位相的气候平均。南半球冬夏季月内及其主要特征尺度上挑选的环状模事件数量（样本量）如表 1 所示。下面将详细分析这些尺度上 SAM 正、负位相对应的位势高度场、纬向风、气温和垂直环流异常的气候平均特征。

3.1 月内尺度南半球环状模气候平均特征

如图 1a、b，图 2a、b，图 3a、b，图 4a、b 所示，月内 SAM 冬季（5~9 月）和夏季（11~3 月）的正、负位相沿纬圈平均的气候态特征较为一致。

月内尺度 SAM 对应高度场异常南北方向上大约以 55°S 为界，呈现为南北反相的变化特征，且具有明显的准正压性质，即自对流层到平流层中、下层大致为相同性质的异常变化（图 1a、b 和图 2a、b）。当 SAM 处于正（负）位相时，55°S 以北中纬度势高度场异常偏高（低），而 55°S 以南的高纬度位势高度场异常偏低（高）。值得注意的一点是，虽然相同纬度的高低层位势高度异常性质大致相同，但变高中心依然存在，且主要位于中纬度对流层顶附近，月内尺度 NAM 也有相似的特点（李晓峰和李建平，2009）。

月内尺度 SAM 对应纬向风异常在南半球呈现为中高纬与极地、中低纬度地区反相变化的三极型分布。如图 3a、b 和图 4a、b 中的等值线所示，纬向风异常强度以中高纬度最为强烈，中低纬度次之，极地纬向风异常相对中低纬度和中高纬度而言较弱。当 SAM 处在正（负）位相时，中纬度地区（位于约 55°S~75°S 之间）对流层有强的西风（东风）异常存在，风速异常中心位于约 60°S 左右对流层顶附近，该西风（东风）异常一直向上、向南扩展到南极地区上空平流层中低层，对应一个加强（减弱）的中纬度西风急流和增强（减弱）的极涡；而低纬（20°S~55°S）的对流层及平流层低层主要为东风（西风）异常，并对应减弱（加强）的副热带高空急流；南半球高纬（主要位于 70°S 以南）的情况和低纬类似，但东风（西风）异常向上伸展高度不及低纬。其中，SAM 对应纬向风异常中心均出现在对流层顶附近，大致与位势高度异常场中心对应，说明对流层顶是月内 SAM 异常活动的在对流层顶比较敏感。与月际尺度 SAM（Thompson and Wallace, 2000）相比，月内 SAM 对应的纬向风、位势高度场异常的大值区偏向对流层，表明对流层活动信号在月内尺度上比较活跃。

表 1 南半球冬、夏季月内尺度 SAM 及月内主要特征尺度正负位相气候平均的样本量（单位：d）
Table 1 The climatological mean sample sizes of the SAM in positive and negative phases on sub-monthly time scale and its main characteristic time scales in the austral winter and summer (units: d)

	南半球冬季（5~9 月）气候平均的样本量				南半球夏季（11~3 月）气候平均的样本量			
	月内 （5~30 天）	准单周 （5~10 天）	准双周 （10~20 天）	准三周 （20~30 天）	月内 （5~30 天）	准单周 （5~10 天）	准双周 （10~20 天）	准三周 （20~30 天）
正位相	267	264	285	279	117	104	144	117
负位相	300	274	292	308	122	112	138	132

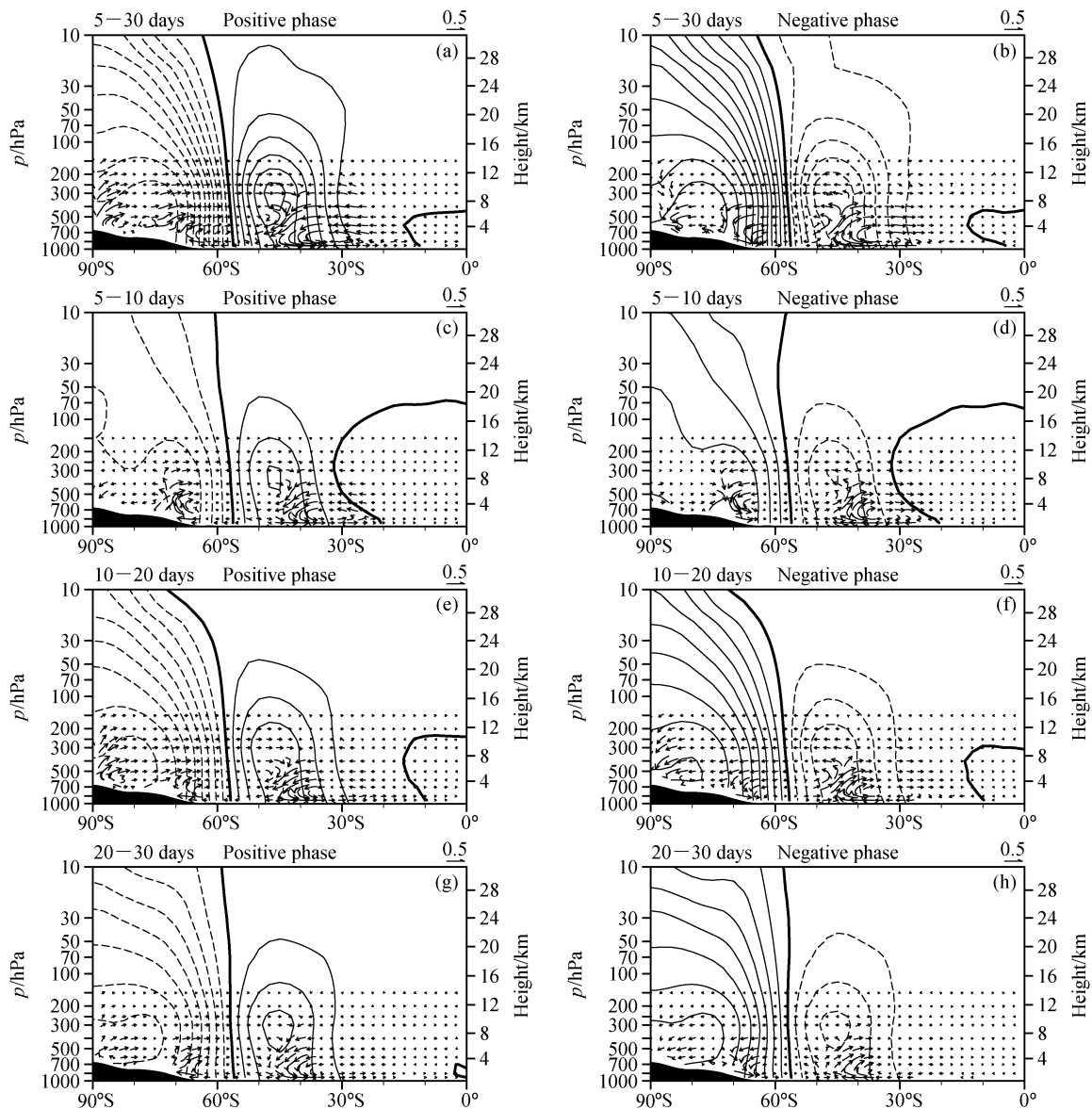


图1 南半球冬季(5~9月)(a、b)月内尺度及(c、d)准单周、(e、f)准双周、(g、h)准三周SAM(a、c、e、g)正位相、(b、d、f、h)负位相上纬向平均的位势高度异常(等值线)和垂直环流异常气候平均。等值线间隔为5 gpm

Fig. 1 Climatological zonal mean geopotential height anomaly (contours with 5-gpm interval) and vertical meridional cell anomaly of the SAM on (a, b) sub-monthly, (c, d) quasi-one-week, (e, f) quasi-two-week, and (g, h) quasi-three-week time scales in the austral winter (May – Sep)

纬向平均垂直环流异常中,费雷尔环流异常是最为显著的垂直环流特征(如图1a、b和图2a、b的矢量)。当SAM处于正(负)位相时,以45°S左右的南半球中低纬度地区垂直环流异常下沉(上升),在以70°S为中心的南半球中高纬地区垂直环流异常上升(下沉),相应地,中纬度地区对流层低层经向水平环流异常向南(北),在对流层上层及对流层顶经向水平环流异常向北(南),由此

构成正(反)费雷尔环流异常。同时,与费雷尔环流异常相联系的极地环流异常和次级哈德莱环流异常(中心位于30°S左右)增强(减弱)。其中,次级哈德莱环流异常位于低纬度地区的上升(下沉)支不太明显;而极地经圈环流异常则闭合不明显,这与月内NAM的情况很不相同(李晓峰和李建平,2010),原因可能是由于南极地形较高、对流层较薄的影响。以上事实表明,南半球环状模在月内尺

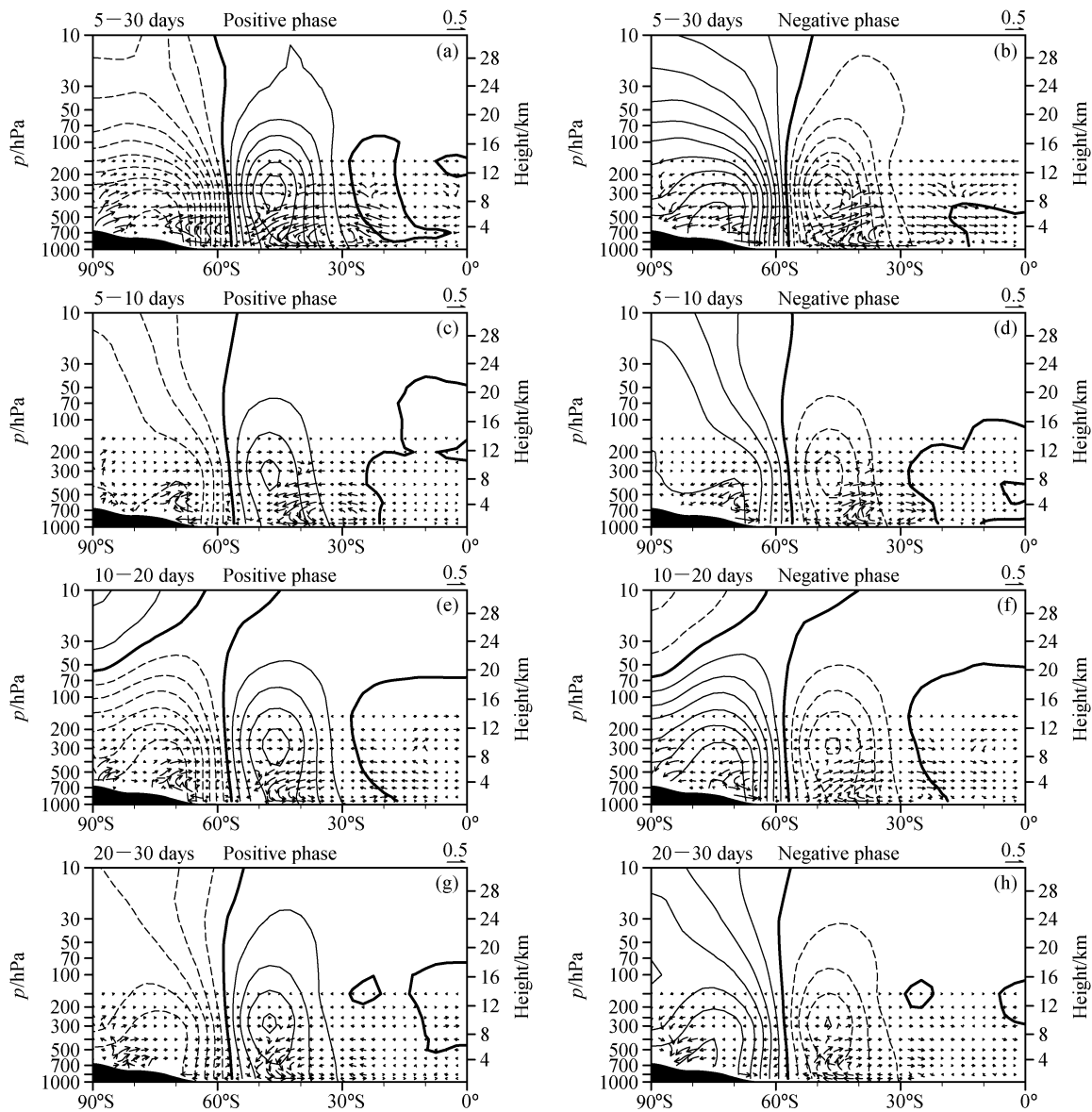


图 2 同图 1，但为南半球夏季 (11~3 月)

Fig. 2 Same as Fig. 1, except for the austral summer (Nov - Mar)

度实质上也对应着异常 Ferrel 环流 (Li and Wang, 2003; 李建平, 2005)。

纬向平均温度场异常大约以对流层顶为界上下相反、“成对”出现，且中纬度温度异常和高、低纬度相反 (图 3a、b 和图 4a、b 的彩色阴影)。对比温度异常和纬向风异常在中高纬度的分布，我们注意到纬向风异常大值中心也位于对流层顶附近，且对流层顶同时也是温度异常在垂直方向上的分界，进一步分析表明这种配置正好满足热成风关系，即温度异常的水平梯度正比于纬向风的垂直梯度 (图略)。

由上所述，月内尺度 SAM 对应的位势高度异

常呈现为中高纬度和中低纬度相反的“翘翘板”结构，垂直环流常为明显的费雷尔异常，而温度异常大约以对流层顶为界上下相反“成对”出现，并与纬向风异常的配置满足热成风关系。月内尺度 SAM 与月际尺度 (Thompson and Wallace, 2000) 相比，月内 SAM 的纬向风、位势高度场异常的大值区则偏向对流层，而月平均 SAM 的纬向风、位势高度场异常活动中心则偏向于平流层，这表明对流层 SAM 的活动在月内尺度比较活跃。

3.2 月内主要特征尺度南半球环状模气候平均特征
南半球冬季和夏季 SAM 在月内主要特征时间

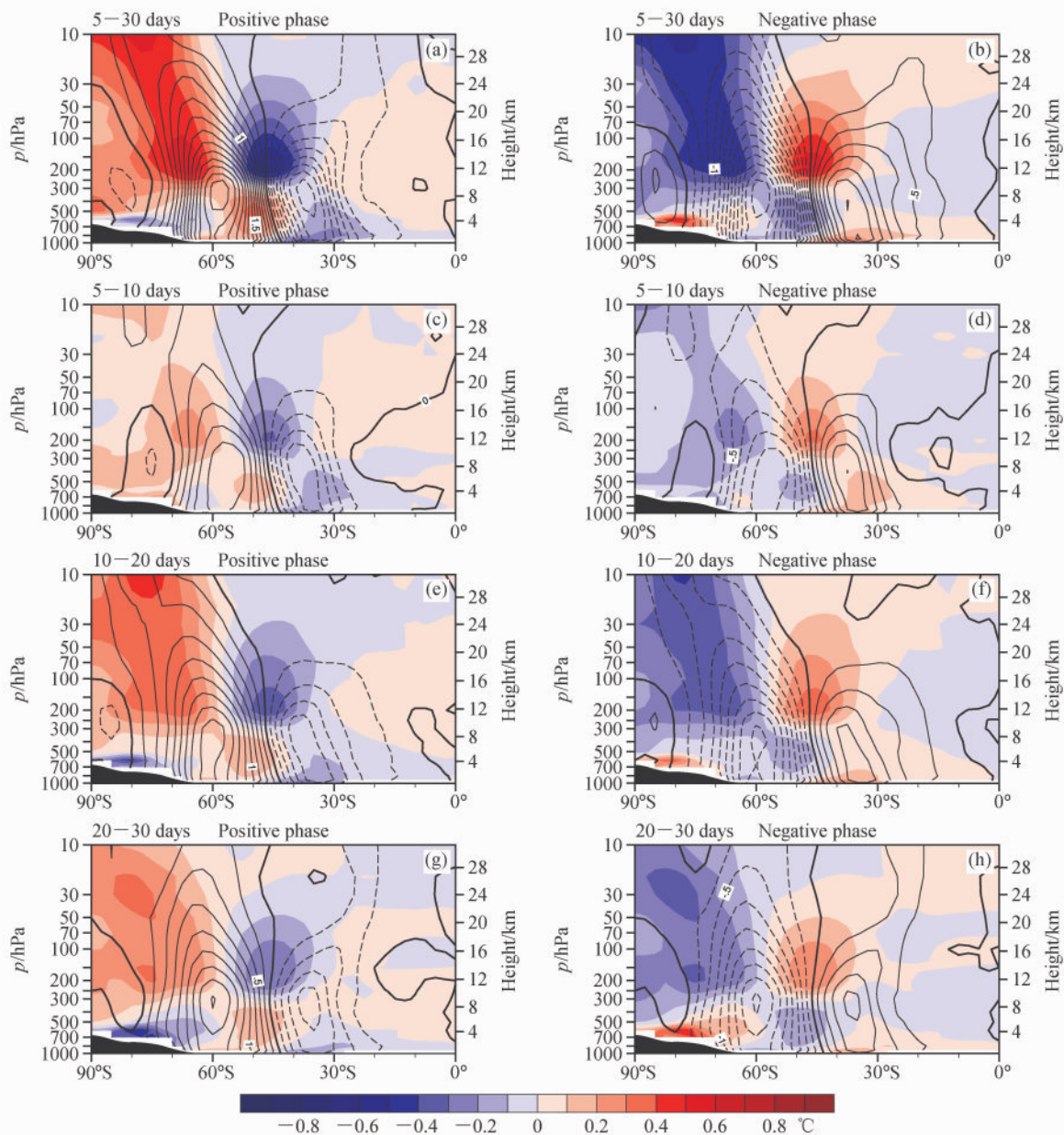


图3 同图1, 但为纬向平均的温度异常(彩色阴影区)和纬向风场(等值线, 间隔为0.4 m/s) 气候平均

Fig. 3 Same as Fig. 1, except for the climatological zonal mean temperature anomaly (color shaded area) and zonal wind (contours with 0.4 m/s interval)

尺度(5~10、10~20、20~30 天尺度)上的特征也值得注意。

对比上述时间尺度 SAM 对应的纬向平均高度场异常, 可看到中高纬度地区准双周尺度 SAM 位势高度异常强度最大, 中低纬地区 SAM 的经向尺度以及平流层 SAM 信号则随时间尺度增加而增强。南半球冬季(图 1c~h 等值线), 在大约 30°S 以南的中高纬地区, 准双周高度异常, 尤其是对流层的高度异常, 明显强于准三周和准单周尺度; 南

半球夏季(图 2c~h), 情况类似, 但准双周尺度上极地下平流层出现与对流层相反的高度异常。在 30°S 以北的低纬地区, 观察位势高度零线随时间尺度的变化, 可看到南半球冬季(5~9 月) 准三周 SAM 对应的中心位于 45°S 附近中低纬活动带的北边界已伸展到 20°S 以北的热带地区, 甚至到达赤道附近, 其经向尺度最大, 而准双周经向尺度次之, 准单周尺度最小; 南半球夏季, SAM 经向尺度在准三周尺度上最大。南半球冬季(图 2c~h 等值

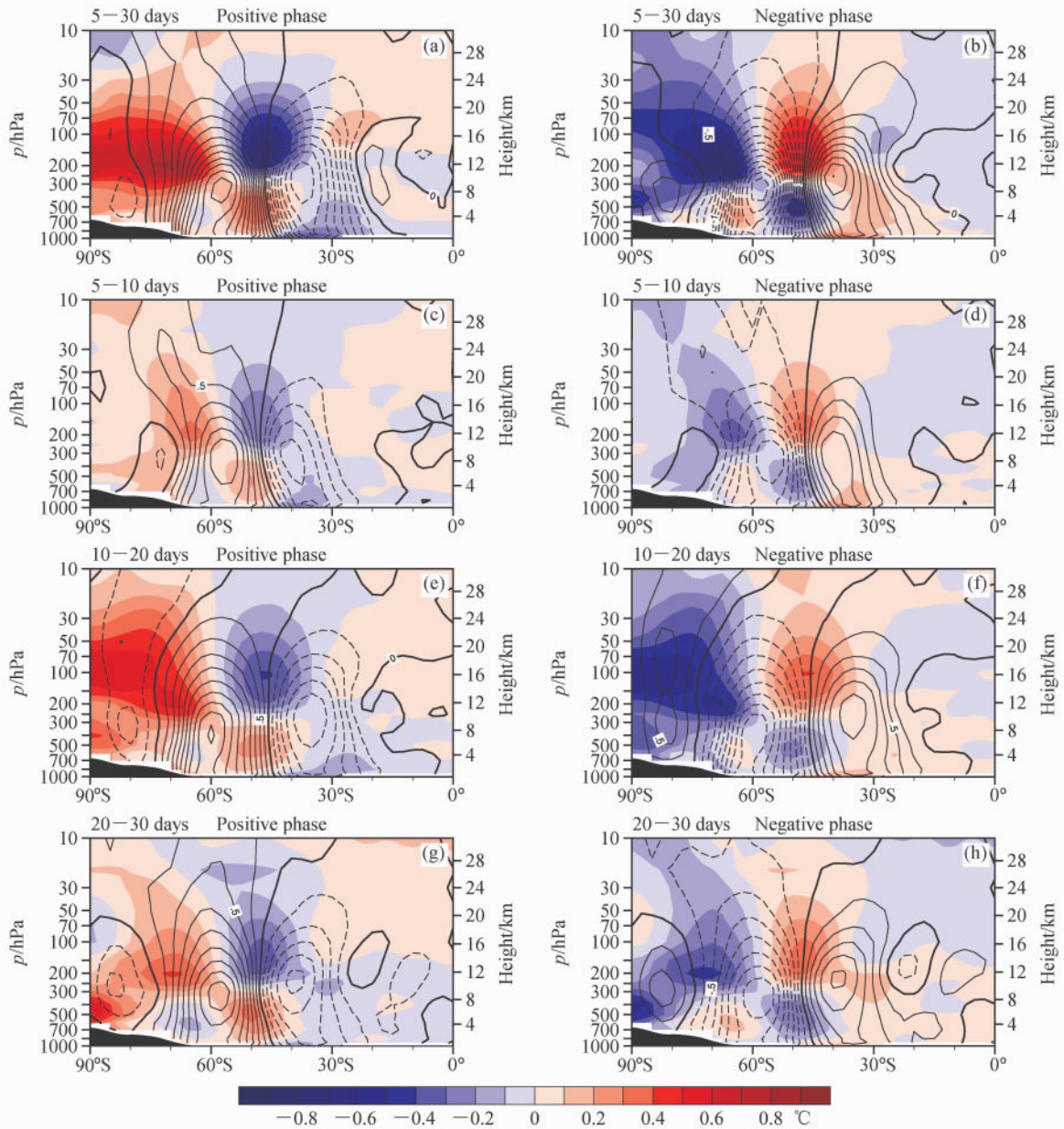


图 4 同图 3，但为南半球夏季（11~3 月）

Fig. 4 Same as Fig. 3, except for the austral summer (Nov - Mar)

线)，平流层的位势高度异常具有随时间尺度增加向上伸展的特点，南半球夏季情况大致类似，准三周尺度信号最强，只是准双周尺度上平流层出现较强的与对流层相反的异常信号。可见，在中高纬地区，SAM 对应高度异常信号在准双周时间尺度上最强；在中低纬度地区，月内特征时间尺度越大，SAM 对应的热带地区高度异常越强，SAM 对应经向尺度也就越大。这表明热带地区信号时间尺度较长，其变化相对中高纬度地区慢；而平流层位势高

度异常在较长的时间尺度上强度较大，表明平流层时间尺度长于对流层。

如图 1c~h 和图 2c~h 所示，在垂直环流场上，准双周和准单周对应中纬度地区 Ferrel 环流异常较准三周明显。

月内主要特征尺度 SAM 对应纬向风异常（图 3c~h、图 4c~h 中的等值线）也以准双周尺度最强，准单周最弱，且南半球冬夏季中高纬地区的纬向风异常具有随时间尺度增长，向上扩展，平流层

纬向风异常加强。

SAM 正、负位相对应温度异常以准双周尺度最强, 准单周和准三周次之。就水平尺度而言, 南半球冬季(5~9 月) 由于准单周极地纬向风异常位置较其它尺度偏赤道地区, 与之相适应的水平温度异常分布与其它尺度差异较大, 在 70°S~90°S 近地层的温度异常与准双周和准三周性质相反。

总体来讲, 对流层位势高度场异常、纬向风异常及温度异常均以准双周最强, 准单周和准三周次之, 说明准双周是月内 SAM 能量最集中的谱段; 在平流层, 纬向风异常具有随时间尺度增长, 向上伸展的特征, 这说明平流层异常变化的主要时间尺度长于对流层, 与 Baldwin et al. (2003b) 的研究一致。

4 月内南半球环状模事件对应温度和纬向风异常传播特征

为了分析月水平和垂直方向上的时间演变特征, 本文挑选了正、负位相月内尺度 SAM 事件, 并进行了如第 2 节所述的等位相合成分析, 如表 2 所示为选取的南半球冬季和夏季正、负位相 SAM 事件数量。

4.1 月内南半球环状模垂直传播特征

目前, 国际上的研究主要强调南半球晚春季节(11~12 月) 南半球环流平流层信号在季节尺度上可“下传”到对流层并影响近地层气候, 因此平流层信号可以用来预测对流层环流异常(Thompson and Solomon, 2002; Baldwin et al., 2003a, 2003b; Gillett and Thompson, 2003; Thompson et al., 2005)。那么, 月内尺度 SAM 信号垂直传播特征如何? 根据南半球冬季和夏季 SAM 垂直气候态特征, 将沿纬度分为 6 个区域(0°~20°S、20°S~35°S、35°S~45°S、45°S~60°S、60°S~80°S、80°S~90°S),

分别讨论其垂直方向上的时间演变特征。

4.1.1 南半球冬季

图 5 为南半球冬季月内尺度 SAM 纬向平均的温度异常和纬向风异常的垂直时间演变特征, 从图中可以看到, 纬向风异常几乎在所有纬度均以明显的自对流层中下层上传到平流层的特征为主, 并以中高纬度地区(45°S~60°S 及 60°S~80°S) 的上传现象最强, 而极地(80°S~90°S) 和热带(0°~20°S) 地区上传相对较弱。温度异常在垂直方向上同时存在上传和下传现象: 高纬地区(包括 80°S~90°S 及 60°S~80°S) 以上传为主; 低纬度地区(0°~20°S 和 20°S~35°S) 具有下传的特征; 而中纬度地区(35°S~45°S 和 45°S~60°S) 高、低层温度异常性质相反, 其穿越对流层顶的垂直传播特征不如高纬地区明显。

以上事实表明, 低纬地区温度异常具有弱的自平流层下传到对流层的特征, 而高纬度地区以较强的自对流层上传到平流层特征为主, 纬向风异常在几乎所有纬度(尤其是中纬度) 地区均以自对流层向平流层上传传播特征为主, 这与以往强调的晚春季节南半球环状模信号的下传(“downward propagation”) 特征(Thompson and Solomon, 2002; Baldwin et al., 2003a, 2003b) 不同。上述观测事实表明, 在较短的月内时间尺度上, 中高纬度南半球环状模对流层信号可以突破对流层顶影响平流层信号, 这是“环状模信号并非源自于平流层”(Polvani and Waugh, 2004) 观点的又一个新的观测证据。

4.1.2 南半球夏季

图 6 为南半球夏季月内尺度 SAM 的情况, 其垂直传播特征与南半球冬季特征大致相似。如图 6 所示, 纬向风异常在 20°S~35°S、45°S~60°S 及 60°S~80°S 上传明显, 而在极地(80°S~90°S) 和热带(0°~20°S) 地区垂直传播特征较弱。温度异

表 2 南半球冬、夏季月内尺度 SAM 及月内主要特征尺度正负位相事件的样本量 (单位: d)

Table 1 The sample sizes of the SAM events in positive and negative phases on sub-monthly time scale and its main characteristic time scales in the austral winter and summer (units: d)

	南半球冬季 (5~9 月) 样本量				南半球夏季 (11~3 月) 样本量			
	月内	准单周	准双周	准三周	月内	准单周	准双周	准三周
	(5~30 天)	(5~10 天)	(10~20 天)	(20~30 天)	(5~30 天)	(5~10 天)	(10~20 天)	(20~30 天)
正位相	81	74	55	29	38	21	22	8
负位相	96	78	52	32	39	28	22	8

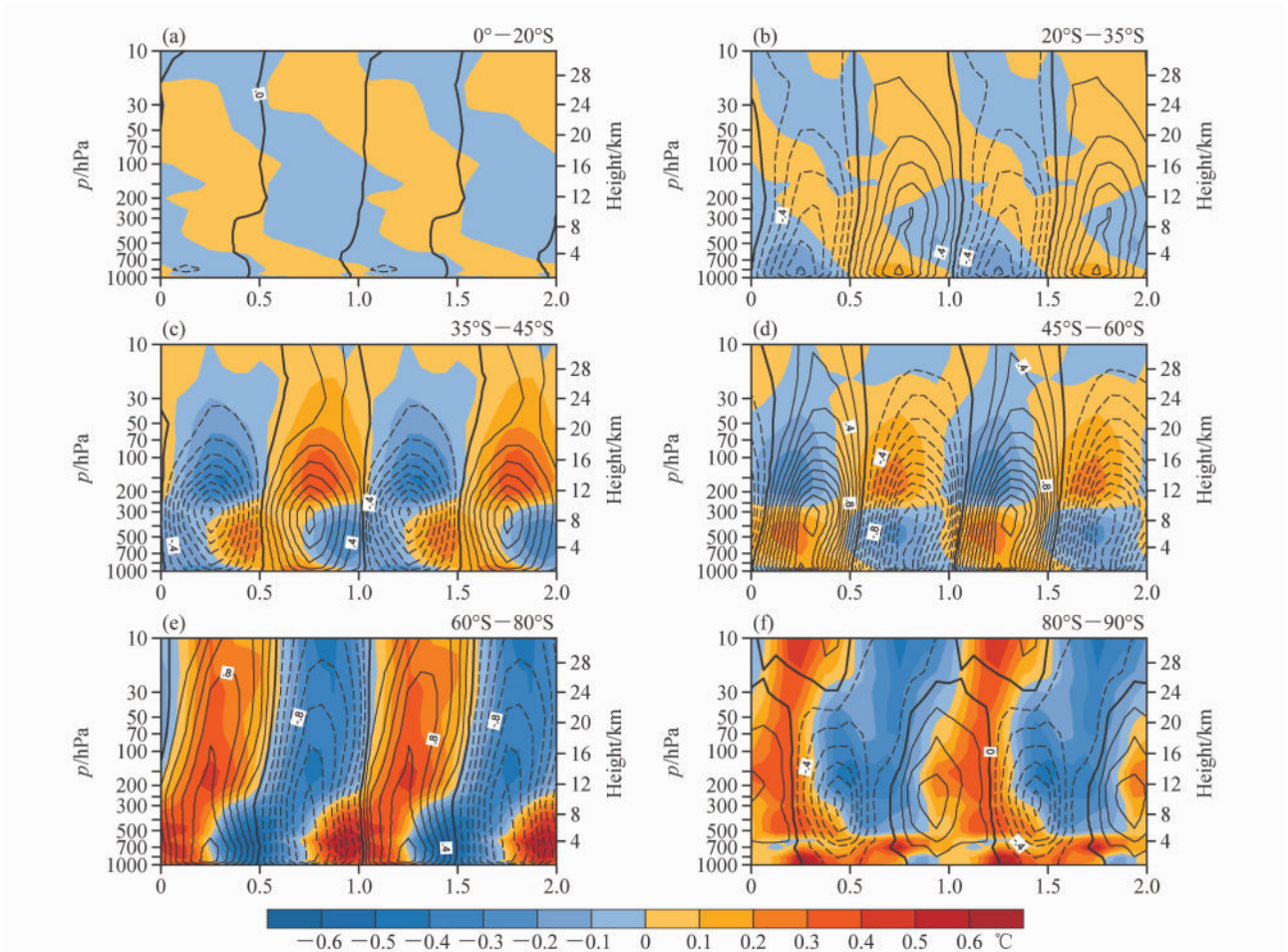


图 5 南半球冬季 (5~9 月) 月内尺度 SAM 纬向风场异常 (等值线, 间隔为 0.2 m/s) 及温度异常 (彩色阴影) 的垂直传播: (a) 0°~20°S 平均; (b) 20°S~35°S 平均; (c) 35°S~45°S 平均; (d) 45°S~60°S; (e) 60°S~80°S; (f) 80°S~90°S 平均。横坐标轴数字 0 代表生命循环开始, 1 (2) 代表一个 (两个) 完整生命循环结束, 0.5 和 1.5 代表正位相结束/负位相开始

Fig. 5 The composites of temperature anomalies (color shading) and zonal wind anomalies (contours with 0.2 m/s interval) as functions of pressure and lifecycle phase of the SAM on sub-monthly time scale in the austral winter (May–Sep), averaged over (a) 0°–20°S, (b) 20°S–35°S, (c) 35°S–45°S, (d) 45°S–60°S, (e) 60°S–80°S, and (f) 80°S–90°S. 0 on the abscissa axis means the start of the life cycle of SAM events, 1 (2) means the accomplishment of one complete life cycle (two complete life cycles) of SAM events, 0.5 and 1.5 mean the end of the positive phase or the start of the negative phase of SAM events

常在 35°S~45°S、45°S~60°S 和 60°S~80°S 上传明显, 极区 (80°S~90°S) 冷异常的上传也是明显的, 而在热带及低纬地区 (包括 0°~20°S 和 20°S~35°S) 为弱的下传特征。总之, 南半球夏季月内 SAM 对应的中高纬度地区温度和纬向风异常、低纬纬向风异常在垂直方向上均以上传为主, 仅低纬及热带地区温度异常为弱的下传特征。

由上可知, 南半球夏季月内 SAM 对应温度异常和纬向风异常信号传播特征与南半球冬季情况类似, 以自对流层“上传”到下平流层为最主要的特征。其中, 对流层纬向风异常在北半球大部分地区以向上传播特征为主, 尤其在高纬地区, 纬向风异

常可以自近地层向上突破对流层顶一直传播到平流层中层; 温度异常在中高纬度和极地地区为明显的上传, 而在低纬度和热带地区以弱的下传特征为主。

4.2 月内南半球环状模水平传播特征

SAM 的水平传播特征也是一个值得关注的问题。考虑到 SAM 的温度场异常具有大约以对流层顶为界、高低层性质相反的特征, 本节在垂直方向上依次选取了近地层 (1000~850 hPa)、对流层中层 (400~700 hPa)、平流层下层 (250~50 hPa) 和平流层中层 (30~10 hPa) 来分析纬向平均的温度异常和纬向风异常传播特征。以下给出了南半球

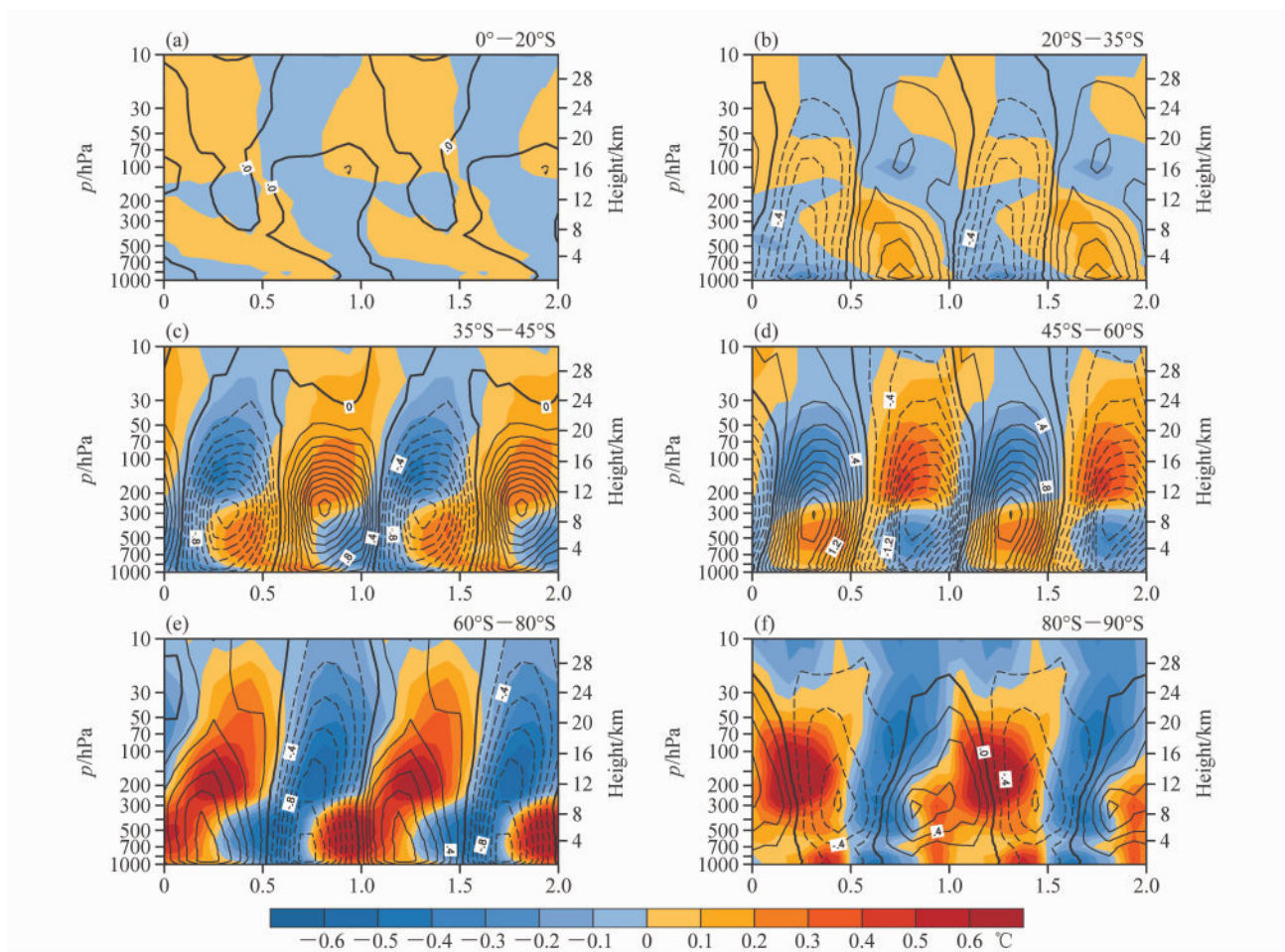


图 6 同图 5, 但为南半球夏季 (11~3 月)

Fig. 6 Same as Fig. 5, except for the austral summer (Nov–Mar)

冬、夏季月内及月内主要特征时间尺度上的情况。

4.2.1 南半球冬季

比较南半球冬季 (5~9 月) 月内尺度 SAM (图 7) 对应的水平温度异常及风场异常传播, 最明显的特征就是自极地向赤道地区的整层水平传播。就温度场异常而言, 在近地面层 70°S~20°S 以北、对流层中层 75°S~25°S、平流层下层 90°S~30°S、平流层中层 90°S~55°S 的区域内, 温度异常随 SAM 位相变化由极地向赤道方向传播; 而在热带地区, 温度异常较弱且向极地传播特征不如中高纬明显, 除近地层的温度异常可传播到 20°S 以北外, 近地层和对流层中层温度异常甚至变为由赤道向极地传播。纬向平均风场异常在近地面层 70°S~30°S、对流层中层 90°S~30°S、平流层下层 90°S~35°S、平流层中层 90°S~40°S 的区域内向赤道方向传播; 在热带地区, 这种纬向风的向赤道传播减弱, 近地面层和对流层中层出现反向传播。

由上可以看到, 南半球冬季月内尺度 SAM 对应的水平温度异常和纬向风异常在中高纬度地区表现出较为一致的整层由极地向赤道传播特征, 其中近地层的温度异常和平流层下层纬向风异常的向赤道传播最强。

4.2.2 南半球夏季

南半球夏季 (图 8) 与冬季相比, 中高纬度地区整层向赤道传播特征依然明显, 尤其是温度场异常, 而不同的特征是自赤道地区向中纬度传播纬向风异常和温度异常明显加强。

对温度场异常而言, 在近地面层 70°S~25°S、对流层中层 60°S~25°S、平流层下层 90°S~45°S、平流层中层 55°S~0°的区域内, 温度异常由南极向赤道方向传播; 在近地层热带地区 (30°S~30°N)、对流层中层热带 (30°S~30°N) 及极区 (90°S~60°S)、平流层下层热带地区 (45°S~30°N) 的温度异常由赤道向南极方向传播。

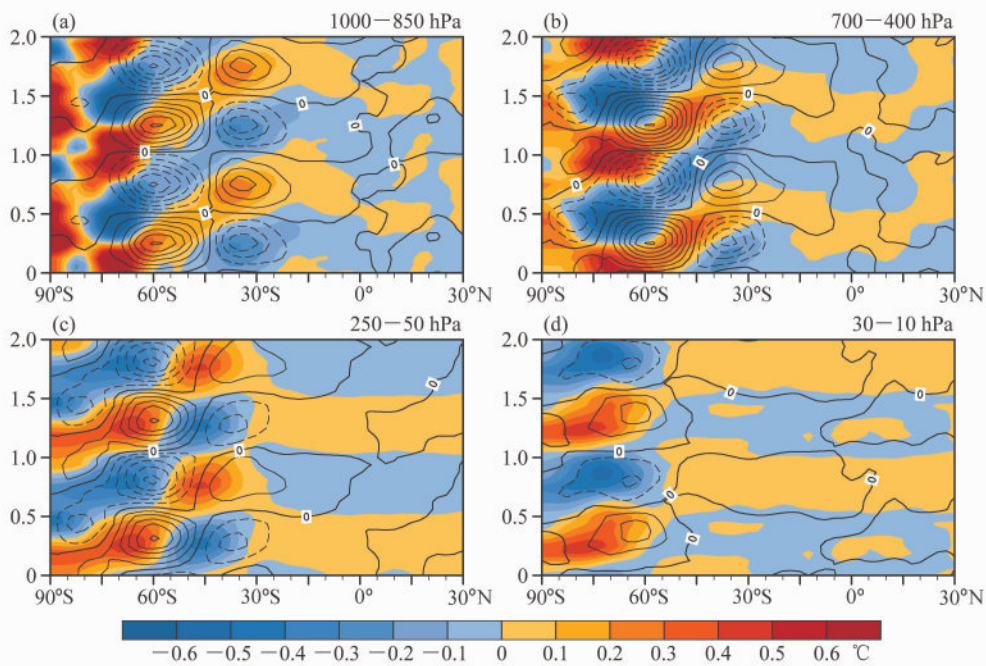


图 7 南半球冬季 (5~9 月) 月内尺度 SAM 纬向平均风场异常 (等值线, 间隔为 0.5 m/s) 及温度异常 (彩色阴影) 水平传播: (a) 1000~850 hPa 平均; (b) 700~400 hPa 平均; (c) 250~50 hPa 平均; (d) 30~10 hPa 平均。纵坐标轴数字 0 代表生命循环开始, 1 (2) 代表代表一个 (两个) 完整生命循环结束, 0.5 和 1.5 代表正位相结束/负位相开始

Fig. 7 The composites of temperature anomalies (color shading) and zonal wind anomalies (contours with 0.5 m/s interval) as functions of latitude and life cycle phase of SAM on sub-monthly time scale in the austral winter (May–Sep), averaged between (a) 1000–850 hPa, (b) 700–400 hPa, (c) 250–50 hPa, and (d) 30–10 hPa. 0 on the ordinate axis means the start of the life cycle of SAM events, 1 (2) means the accomplishment of one complete life cycle (two complete life cycles) of SAM events, 0.5 and 1.5 mean the end of the positive phase or the start of negative phase of SAM events

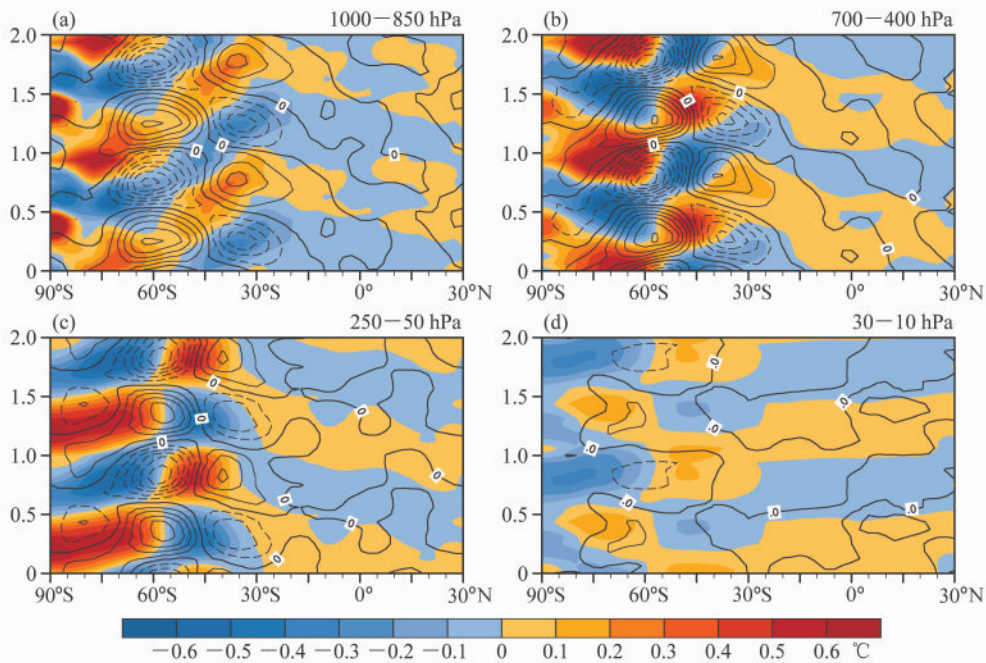


图 8 同图 7, 但为南半球夏季 (11~3 月)

Fig. 8 Same as Fig. 7, except for the austral summer (Nov–Mar)

纬向平均纬向风异常在对流层及下平流层高纬度地区向赤道方向传播明显,而在中低纬度地区则向极地传播特征明显,中纬度地区为两种信号的交汇。具体来讲,在近地面层中低纬度($60^{\circ}\text{S}\sim 0^{\circ}$)纬向风异常向极地方向传播;对流层中层极区($90^{\circ}\text{S}\sim 55^{\circ}\text{S}$)纬向风异常由极地向赤道传播,而在中低纬度地区($55^{\circ}\text{S}\sim 30^{\circ}\text{S}$)纬向风异常由热带向极地方向传播;在平流层下层,极区($90^{\circ}\text{S}\sim 60^{\circ}\text{S}$)纬向风异常由极地向赤道传播,而在中低纬度地区($60^{\circ}\text{S}\sim 25^{\circ}\text{S}$)纬向风异常自热带向极地地区传播;在平流层中层热带地区($30^{\circ}\text{S}\sim 30^{\circ}\text{N}$),纬向风异常较弱,且倾向于自极地向热带地区传播。

由以上分析可知,南半球夏季月内 SAM 对应的温度、纬向风异常在中高纬度地区向赤道传播明显,而在中低纬度地区存在明显自热带向极地信号传播,这可能是由于南半球夏季热带地区的信号较为强烈的原因。

5 月内南半球环状模生命循环对应温度、纬向风异常整体演变特征

以上研究分别给出了水平和垂直方向上 SAM 信号的传播特征,那么将垂直和水平传播结合起来考虑,整体信号传播及演变图像如何呢?如图 9 给出的是南半球冬季月内尺度 SAM 生命循环(0~16 位相)对应纬向平均的纬向风异常和温度异常整体演变情况,从图中可以看到 SAM 生命循环从 0 位相到第 16 位相时温度和纬向风异常在垂直剖面上整体演变特征。

温度异常的演变在纬向平均垂直剖面上具有明显的上传和整层北传的特征。0 位相时,自 50°S 以南高纬度地区对流层到极地平流层均为温度正异常,温度异常中心有两个,分别位于 70°S 对流层中下层和极地上空 150 hPa 区域。1~3 位相,极区的温度异常向上传播到平流层下层,同时,该温度异常与原来位于高纬度对流层下层的温度异常一起向赤道方向整层传播,平流层正的温度异常到达 60°S 附近,对流层温度异常到达 45°S 附近。4~6 位相时,正温度异常继续向南推进,对流层正温度异常到达 35°S ,平流层温度异常到达 65°S ;与此同时,高纬对流层和极地平流层出现负的温度异常,并向上向南扩展,连接成整片负的温度异常。7~12 位相,正温度异常继续向赤道方向整层推进,其温度

异常中心在平流层达到 45°S 附近,在对流层到达 35°S 附近,而温度异常的前缘在对流层中下层和平流层已可到达赤道地区;同时,高纬度的冷异常也整层向赤道推进。13~16 位相时,位于中高纬度的负温度异常整层向赤道传播,主体部分平流层可达到 50°S 附近,在对流层可到达 30°S ;此时,原来传播到热带地区的正温度异常减弱,对流层上层正异常消失,平流层正异常减弱并下传;而在南极地区新一轮的正温度异常正在生成并向赤道传播。由此,周而复始,正、负温度异常一次一次随着 SAM 位相的演变自高纬和极地向赤道传播。

纬向风异常的向上传播特征和向赤道方向传播特征明显。0~8 位相,可以看到一次完整的西风异常自极地传播到中纬度地区并向上伸展到下平流层的完整过程:0~5 位相,中心位于 80°S 极地附近的西风异常减弱,而位于中纬度地区 60°S 附近的西风异常增强并向上伸张,于是西风异常中心北移至中纬度地区,并且西风异常还在中纬度地区向上扩展,2 位相时达到平流层顶附近,之后伸展到下平流层;5~6 位相时中纬度西风异常最强;7~8 位相时中纬度西风异常减弱。同样,在 8~15 位相,可以看到一次完整的东风异常自极地传播到中纬度地区并向上伸展到下平流层的完整过程:8~9 位相时,极地东风异常减弱,中纬度西风异常也减弱并首先在下对流层出现东风异常;10 位相时,极地东风异常中心消失,中纬度地区东风异常加强并向上伸展,此时极地东风异常中心已转移到中纬度地区;11~14 位相,中纬度东风异常继续加强并伸展;15~16 位相,中纬度东风异常减弱。

从以上分析可以看到,对于月内尺度 SAM 而言,其对应温度异常和风场异常的下传特征并不明显,相反温度异常、风场异常的上传特征非常明显;另外,在水平方向上,温度异常和风场异常还具有整层向赤道方向传播的特征。在南半球夏季,情况大致类似(图略)。

6 结论与讨论

本文研究了月内时间尺度上 SAM 的水平与垂直活动特征,主要结论如下:

(1) 月内尺度 SAM 正、负位相气候态具有典型特征。在纬向平均的垂直环流异常场上,正(负)位相 SAM 实质上对应着费雷尔环流(反费雷

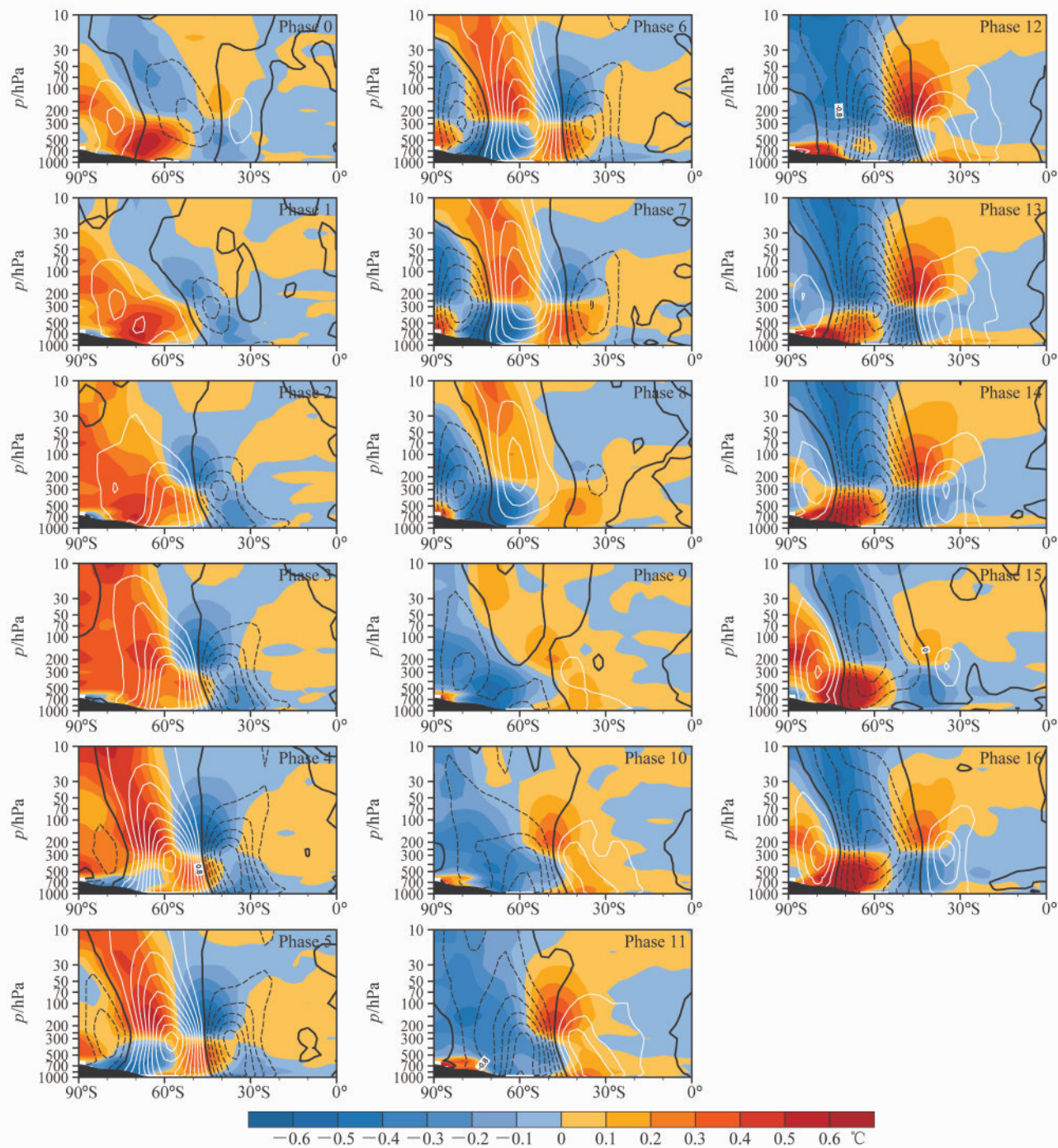


图9 南半球冬季(5~9月)月内(5~30天)SAM对应温度异常(彩色阴影)及纬向风异常(等值线,间隔为0.2 m/s)随位相(0~16)演变

Fig. 9 Composite evolutions of zonal mean temperature anomalies (color shading) and zonal mean zonal wind anomalies (contours with 0.2 m/s interval) from phases 0 to 16 during the life cycles of SAM events on the sub-monthly time scales in the austral winter (May - Sep)

尔)异常环流;纬向风异常在中纬度与高纬、极地风向相反,强风中心在对流层顶附近;在位势高度异常场上,环状模对应的位势高度异常在中纬度和极地呈现为整层的反位相变化,正负位势高度异常在南半球大约以 55°S 为界,变压中心在对流层顶附近;月内尺度SAM对应温度场异常在垂直方向上具有以对流层顶为界上下相反“成对”出现的特征,垂直方向上温度场异常和纬向风场异常满足热

成风关系。另外,对流层位势高度场异常、纬向风异常即温度异常均以准双周最强,准三周和准单周最弱,说明准双周是月内 SAM 能量最集中的谱段;在中低纬度地区,月内特征时间尺度越大, SAM 对应的热带地区高度异常越强,表明热带地区信号时间尺度比中高纬地区长;而在平流层,纬向风异常具有随时间尺度增长,向上伸展的特征,说明平流层的异常变化主要时间尺度比对流层长。SAM 气候平均特征与 NAM (李晓峰和李建平, 2010) 极为相似,表明其为环状模现象所共有。

(2) 南半球冬夏季月内 SAM 对应的水平传播特征较为相似,中高纬度温度异常和纬向风异常的向赤道方向传播特征明显。而南半球冬季和夏季 SAM 对应传播特征也有不同:南半球夏季中低纬度地区的纬向风和温度异常向极地方向的传播明显。这可能是由于 11~3 月份南半球热带地区大气活动旺盛,易于影响中高纬度大气活动的原因造成。

(3) 月内 SAM 对应的纬向风场异常在各个纬度都具有明显的上传特征,温度异常则在高纬上升、低纬下沉。以往研究强调的南半球下传仅发生在特定的季节——南半球晚春,因此具有明显的季节性 (Thompson and Solomon, 2002; Baldwin et al., 2003b; Thompson et al., 2005), 而月内尺度 SAM 对应的这种信号自对流层“上传”到平流层的特征在其较活跃的冬季和夏季均存在,说明垂直上传是 SAM 在较短的月内时间尺度上更为一般的特征。

上述结果对南半球冬季和夏季月内尺度 SAM 的气候平均及传播特征给出了比较全面的描述。比较有趣的发现是,月内 SAM 对应的温度和风场异常的下传特征并不明显,相反,温度异常和风场异常的上传却很明显。这种上传特征表明在较短时间尺度上,对流层下层 SAM 信号变化是超前于平流层信号的,并可以向上传播到平流层,这丰富了我们对于 SAM 活动的了解,同时也是“环状模信号并非源自于平流层” (Polvani and Waugh, 2004) 观点的又一个观测证据。另外,在中高纬度地区,月内尺度 SAM 对应的纬向风和温度的整层北传特征表明,极地信号变化是超前于中高纬度信号变化的,因此极区信号对中高纬度信号可能具有一定预测意义。我们知道,1~3 周的延时预报是

目前天气、气候预测中的难点,而本文的研究说明月内尺度 SAM 的活动在该尺度上对南半球中高纬环流具有重要的预示作用,给出的观测事实具有启示性的意义。

在研究过程中,我们还发现一些新问题,有待进一步探索。例如,上述研究表明,月内 SAM 与月内 NAM 在各自半球冬季垂直和水平特征 (李晓峰和李建平, 2010) 存在明显差异,那么,既然 SAM 和 NAM 被认为是具有共同物理实质的现象,它们之间的差异又是由何种原因导致? 再例如,同是 SAM,在南半球中纬度地区,冬季和夏季纬向风异常传播也明显不同,11~3 月为向赤道传播,而 5~9 月则为由赤道向极地传播,为什么冬、夏季会有如此大的差异? ENSO 现象在这种冬夏季传播差异中是否起到作用,如何作用? 这些问题都值得我们作进一步研究和讨论。

参考文献 (References)

- Baldwin M P, Dunkerton T J. 1999. Propagation of the Arctic Oscillation from the stratosphere to the troposphere [J]. *J. Geophys. Res.*, 104 (D24): 30937–30946.
- Baldwin M P, Dunkerton T J. 2001. Stratospheric harbingers of anomalous weather regimes [J]. *Science*, 294 (5542): 581–584.
- Baldwin M P, Thompson D W J, Shuckburgh E F, et al. 2003a. Weather from the stratosphere? [J]. *Science*, 301 (5631): 317–319.
- Baldwin M P, Stephenson D B, Thompson D W J, et al. 2003b. Stratospheric memory and skill of extended-range weather forecasts [J]. *Science*, 301 (5633): 636–640.
- Duchon C E. 1979. Lanczos filtering in one and two dimensions [J]. *J. Appl. Meteor.*, 18 (8): 1016–1022.
- Gillett N P, Thompson D W J. 2003. Simulation of recent Southern Hemisphere climate change [J]. *Science*, 302 (5643): 273–275.
- Gong D, Wang S. 1999. Definition of Antarctic oscillation index [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 26 (4): 459–462.
- Hartmann D L, Lo F. 1998. Wave-driven zonal flow vacillation in the Southern Hemisphere [J]. *J. Atmos. Sci.*, 55 (8): 1303–1315.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77 (3): 437–471.
- Karoly D J. 1990. The role of transient eddies in low-frequency zonal variations of the Southern Hemisphere circulation [J]. *Tellus*, 42A: 41–50.
- Kidson J W. 1988a. Interannual variations in the Southern Hemisphere circulation [J]. *J. Climate*, 1 (12): 1177–1198.

- Kidson J W. 1988b. Indices of the Southern Hemisphere zonal wind [J]. *J. Climate*, 1 (2): 183–194.
- Kidson J W, Watterson I G. 1999. The structure and predictability of the “high-latitude mode” in the CSIRO9 General Circulation Model [J]. *J. Atmos. Sci.*, 56 (22): 3859–3873.
- 李建平. 2005. 北极涛动的物理意义及其与东亚大气环流的关系 [M]//俞永强, 陈文, 等. 海—气相互作用对我国气候变化的影响. 北京: 气象出版社, 169–176. Li Jianping. 2005. Physical nature of the Arctic Oscillation and its relationship with East Asian atmospheric circulation [M]//Yu Y Q, Chen W, et al., Ed. Air–Sea Interaction and Its Impacts on China Climate. Beijing: China Meteorological Press, 169–176.
- 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 X, Li J. 2009. Main submonthly timescales of Northern and Southern Hemispheres annual modes [J]. *Chinese J. Atmos. Sci.*, 33 (2): 215–231.
- 李晓峰, 李建平. 2010. 月内尺度北半球环状模水平和垂直活动特征分析 [J]. *气象学报*, 待发表. Li X and Li J. 2010. Meridional and vertical propagation characteristics of sub-monthly Northern Hemisphere annual mode [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, in press.
- Li J, Wang J X L. 2003. A modified zonal index and its physical sense [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 30 (12): 1632.
- Maloney E D, Hartmann D L. 1998. Frictional moisture convergence in a composite life cycle of the Madden-Julian Oscillation [J]. *J. Climate*, 11 (9): 2387–2403.
- Nan S, Li J. 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.
- Nan S, Li J, Yuan X, et al. 2009. Boreal spring Southern Hemisphere annular mode, Indian Ocean sea surface temperature, and East Asian summer monsoon [J]. *J. Geophys. Res.*, 114, D02103, doi: 10.1029/2008JD010045.
- Polvani L M, Waugh D W. 2004. Upward wave activity flux as a precursor to extreme stratospheric events and subsequent anomalous surface weather regimes [J]. *J. Climate*, 17 (18): 3548–3554.
- Rogers J C, van Loon H. 1982. Spatial variability of sea level pressure and 500 mb height anomalies over the Southern Hemisphere [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 110 (10): 1375–1392.
- Shiotani M. 1990. Low-frequency variations of the zonal mean state of the Southern Hemisphere troposphere [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 68: 461–471.
- Szeredi I, Karoly D J. 1987. Horizontal structure of monthly fluctuations of the Southern Hemisphere troposphere from station data [J]. *Austr. Meteor. Mag.*, 35: 119–129.
- 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.
- Thompson D W J, Solomon S. 2002. Interpretation of recent Southern Hemisphere climate change [J]. *Science*, 296 (5569): 895–899.
- Thompson D W J, Lee S, Baldwin M P. 2003. Atmospheric processes governing the Northern Hemisphere Annular Mode/North Atlantic Oscillation [M]//Hurrell J W, Kushnir Y, Visbeck M, et al. The North Atlantic Oscillation: Climatic Significance and Environmental Impact. Washington DC: American Geophysical Union, 81–112.
- Thompson D W J, Baldwin M P, Solomon S. 2005. Stratosphere–troposphere coupling in the Southern Hemisphere [J]. *J. Atmos. Sci.*, 62 (3): 708–715.
- Walker G T. 1928. World weather [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 54 (226): 79–87.
- Wu Z, Li J, Wang B, et al. 2009. Can the Southern Hemisphere annular mode affect China winter monsoon? [J]. *J. Geophys. Res.*, 114, D11107, doi: 10.1029/2008JD011501.
- Yoden S, Shiotani M, Hirota I. 1987. Multiple planetary flow regimes in the Southern Hemisphere [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 65: 571–586.