

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.

南、北半球环状模月内活动的主要时间尺度

李晓峰^{1, 2} 李建平¹

1 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体动力学国家重点实验室, 北京 100029

2 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘 要 基于“大气环状活动带”的概念, 利用逐日再分析资料对南、北半球环状模 (简称 SAM、NAM) 的季节活动特征及月内活动的主要时间尺度 (Submonthly timescales) 进行了研究, 结果表明, NAM 具有冬季强、夏季弱的年循环特征, 而 SAM 则表现出明显的准半年循环特征。并且, 逐年的功率谱分析进一步显示: NAM 的月内活动的主要时间尺度以准 1 周和准 2 周为主, 且它们具有共生性, 准 3 周为相对次要的周期; 而 SAM 的月内活动周期与 NAM 相似, 准 2 周和准 1 周较强, 准 3 周次之。NAM 和 SAM 的月内活动在不同特征时间尺度上的空间特征及其时间演变值得进一步研究。

关键词 大气环状活动带 南、北半球环状模 月内时间尺度

文章编号 1006-9895 (2009) 02-0215-17

中图分类号 P433

文献标识码 A

Main Submonthly Timescales of Northern and Southern Hemispheres Annual Modes

LI Xiaofeng^{1, 2} and LI Jianping¹

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

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract Based on the conception of “Annular Belts of Action (ABAs)”, characteristics of the seasonal variation and main submonthly timescales of Northern and Southern hemispheres annular modes (SAM and NAM) are studied in this paper using NCEP/NCAR reanalysis daily data. The results show that NAM is strong in winter and weak in summer while SAM’s intensity has semi-annual cycle. Furthermore, power spectrum analysis is applied year by year to detect the main submonthly timescales of annular modes, the result shows that NAM has quasi-week period and quasi-two-week period variability, which are inclined to accompany each other, the quasi-three-week period is the following time scale; and SAM exhibits similarity of the main submonthly timescales to NAM, that is, the quasi-two-week period and the quasi-week period are the main periods and the quasi-three-week period is the second period. Both the spatial characteristics of NAM and SAM with different submonthly timescales and their temporal evolution are worth further researching.

Key words annular belts of action, Northern and Southern hemispheres annual modes, submonthly timescales

收稿日期 2007-08-20, 2007-11-20 收修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展规划项目 2006CB403600, 国家自然科学基金资助项目 40675046、40528006

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

1 引言

近年来,随着北极涛动和南极涛动概念的提出,与其相关的研究已逐渐成为国际上关注的焦点。北极涛动(Arctic Oscillation,简称AO)概念首次由Thompson et al. (1998, 2000a)通过EOF分析引入,用于描述北半球气候变率的主要模态。在南半球,Gong et al. (1999)将海平面气压(SLP)的EOF第一模态命名为南极涛动(Antarctic Oscillation,简称AAO)。AO和AAO也被称为北半球环状模(Northern Hemisphere Annual Mode,简称NAM)和南半球环状模(Southern Hemisphere Annual Mode,简称SAM)(Limpasuvan et al., 1999; Thompson et al., 2000a; Thompson et al., 2000b; Baldwin, 2001; Thompson et al., 2002)。Thompson et al. (2000a)系统分析了NAM和SAM的特征,发现它们具有极大的相似性:均为深厚的、高度纬向对称的环状结构,极地和中高纬度呈反相变化;“环状模”在南半球和北半球整年存在,是具有半球尺度的大气环流遥相关现象。

虽然对SAM现象的观点较为一致,但对于NAM现象却存在一些争论(Kerr, 1999; Deser, 2000; Wallace, 2000; Ambaum et al., 2001; Dommenget et al., 2002; Wallace et al., 2002)。其中,对EOF这个数学方法的质疑成为争论的焦点之一,这导致人们怀疑AO/NAM是由EOF这个数学方法产生的人造现象而非真实存在的物理现象。李建平等(Li et al., 2003; 李建平等, 2005a, 2005b; 南素兰等, 2005)避开使用EOF方法,对AO/NAM真实性及其物理本质进行了研究,发现中高纬大气环流中具有相似变动性的状态在空间上呈现为沿纬圈带状分布(大气活动具有纬向带状分布的特点),由此提出大气环状活动带(Annular Belts of Action,简称ABAs)的概念。而中纬度和高纬度大气环状活动带存在显著的负相关,呈现“翘翘板”现象,这实际上就是AO/NAM现象,这一发现说明AO/NAM并非是依赖于EOF方法而存在的人造现象,而是真实存在的物理现象;文中(Li et al., 2003)还明确指出NAM的物理实质是异常的费雷尔(Ferrel)环流,并给出了清晰的物理概念图(文献(Li et al., 2003)图3c)。

基于“大气环状活动带”的概念, Li et al.

(2003)采用北半球中纬度和高纬度的两个大气环状活动带的中心纬度 35°N 和 65°N 上的标准化纬向平均海平面气压差构造出一个新的北极涛动指数(AOI/NAMI),新的指数在表征AO/NAM的空间特征方面明显优于Thompson et al. (1998)的EOF指数,且计算简便,并避免了关于EOF方法的争论。

“大气环状活动带”在南半球也存在,它实际上对应我们所熟悉的AAO/SAM现象(Gong et al., 1999; Thompson et al., 2000a)。南素兰等(2005)将Gong et al. (1999)的南极涛动指数进行了改进,采用 40°S 和 70°S 标准化的纬向平均SLP之差作为AAO/SAM指数(简称AAOI/SAMI)。

采用两个纬度的纬向平均SLP异常差来描述NAM/SAM的强度,其物理意义非常明确:它是对发生在北(南)半球中、高纬度环状活动带之间大气质量变化的半球尺度范围涛动的一种量度。目前,关于NAM和SAM的研究主要集中在季节、年际、年代际等较长时间尺度上,而短时间尺度上的研究相对较少。NAM和SAM是全球范围内的大尺度气候现象,研究其短时间尺度上的时空特征可为我们研究和预测短时间尺度局地现象提供背景场。因此,加强对短时间尺度NAM和SAM的研究将对我们认识和预测短时间尺度局地天气和气候现象有着重要的意义。本文主要借助功率谱分析方法来研究NAM和SAM月内活动的时间周期。

2 资料和方法

本文所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)日平均海平面气压(SLP)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。为了对比分析,本文还采用了美国海洋大气管理局气候预测中心(CPC/NOAA)的AO/NAM逐日指数和AAO/SAM逐日指数(<ftp://ftp.cpc.ncep.noaa.gov/cwlinks/>),指数时段分别为从1950年1月1日至2006年3月31日和从1979年1月1日至2006年3月31日。为方便处理,闰年2月29日均已略去,即每年取365日。

为了了解NAM和SAM活动周期的总体特征,本文提出了标准化功率谱的合成分析方法。通

常来讲,时间尺度变率具有红谱趋势,即较长周期现象倾向于与较高振幅相联系 (Peixoto et al., 1992),而本文 NAMI/SAMI 的功率谱分析(图略)也表明其存在明显的红谱趋势。为了分析显著时间周期在不同时间段中的相对重要性,抵消红谱趋势的影响,本文提出标准化功率谱 R^* (Standard Power, 简称 SP),即功率谱被其对应频率的 95% 红噪置信度上限标准化。具体定义如下:

$$R^* = \frac{S^*}{S_{95}}, \quad (1)$$

其中, S_{95} 为 95% 红噪置信上限, S^* 为通过 95% 红噪置信上限的功率谱:

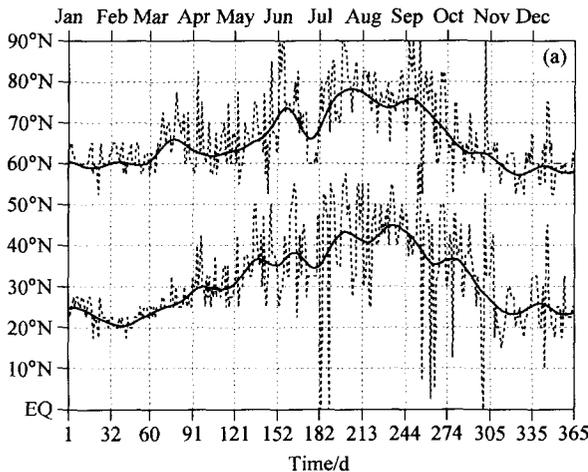
$$S^* = \begin{cases} S, & S \geq S_{95}, \\ 0, & S < S_{95}. \end{cases} \quad (2)$$

NAMI/SAMI 的多年标准化功率谱的合成(平均) $\overline{R^*}$ (Mean Standard Power, 简称 MSP) 可反映其活动时间周期的平均分布状况,具体定义如下:

$$\overline{R^*} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (R^*)_i, \quad (3)$$

其中, n 为年份总数。对应时间周期上功率谱超过 95% 红噪置信度上限年份总数 N , 也可作为反映 NAM/SAMI 活动时间周期平均分布状况的一个指标,其定义为:

$$N = \sum_{i=1}^n k_i, \quad k_i = \begin{cases} 1, & S \geq S_{95}, \\ 0, & S < S_{95}. \end{cases} \quad (4)$$



3 NAM 与 SAM 逐日指数的合理性

本文将 Li et al. (2003) 以及南素兰等 (2005) 的 NAM 和 SAM 逐月指数的计算方法直接运用在逐日指数的计算中,它们是对发生在南、北半球中高纬度环状活动带之间大气质量变化的半球尺度范围涛动的一种量度。下面将验证这种逐日指数的合理性。

计算南(北)半球纬向平均的日平均 SLP 场逐年序列各个纬度之间的交叉相关系数,其中最大负相关值所对应的两个纬度的逐日变化,可以很好地反映 NAM (SAM) 的涛动中心位置随季节的变化规律(图 1)。由图 1 可见,首先, NAM 和 SAM 的两个大气环状活动带的位置具有同步变化的特征,夏季两个大气环状活动带的位置偏北,而冬季位置偏南,这可能与太阳辐射分布的季节变动有关(范丽军等, 2003);其次, NAM 和 SAM 的高纬大活动带中心位置的季节变化幅度比中纬度大;最后,对比 NAM 和 SAM 两个活动带可发现, SAM 的活动带位置季节变化均比 NAM 平缓,这可能是因为南半球下垫面以海洋为主,地形起伏较北半球平缓 (Fan et al., 2003)。

表 1 给出了大气环状模活动带逐日中心的平均位置,可知北半球的两个大气环状活动带中心的平均位置分别在 35°N 和 65°N 附近,南半球大气环状活动带中心位置在 40°S 与 70°S 附近。因此,采用北半球中纬度和高纬度的两个大气环状活动带的中

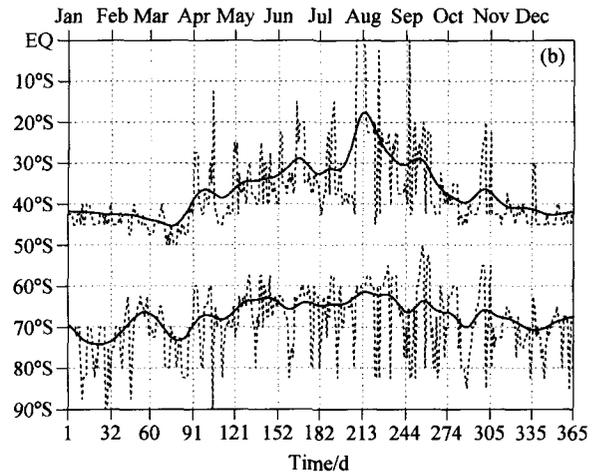


图 1 1948~2005 年北半球 (a) 和南半球 (b) 逐日纬向平均 SLP 各纬度之间交叉相关中最大负相关系数对应的两个纬度的年变化。粗实线: 31 天 Gauss 平滑序列

Fig. 1 The annual variations of corresponding two latitudes with the biggest negative values of cross correlation coefficients of the daily zonal mean sea level pressures (SLPs) in the (a) Northern and (b) Southern hemispheres from 1948 to 2005. The solid line is 31-day Gaussian smooth series

表 1 大气环状活动带中心的日平均位置

Table 1 The variations of daily mean positions of Annular Belts of Action

| | 高纬度大气环状活动带 中心位置 | 中纬度大气环状活动带 中心位置 |
|-----|--------------------|--------------------|
| 北半球 | 67.29°N (取为 65°N) | 32.10°N (取为 35°N) |
| 南半球 | 69.01°S (取为 70°S) | 37.41°S (取为 40°S) |

心纬度 35°N 和 65°N 上的标准化纬向平均海平面气压差可构造逐日的北半球环状模指数 (NAMI); 而逐日的南半球环状模指数 (SAMI) 取为 40°S 与 70°S 的标准化纬向平均海平面气压差。

4 NAM 和 SAM 的季节变化及其活跃期

4.1 强度和标准差的季节变化

南(北)半球逐日纬向平均 SLP 逐年序列各个纬度之间交叉相关中最大负相关系数, 可以很好地反映 NAM (SAM) 强度的季节变化规律 (图 2a、b), 而 NAMI (SAMI) 的逐日标准差的年变化可以反映其年际变化幅度的大小 (如图 2c、d)。

北半球环状模的强度 (图 2a) 在 11~3 月最强, 6~9 月偏弱, 4~5 月和 10 月为过渡季节; 南半球环状模强度随季节的变化相对平缓 (图 2b), 呈现为准半年循环特征, 即 12~1 月偏强, 3~4 月偏弱, 6~7 月偏强, 9~10 月偏弱 (其中 9 月末 10 月初有短时偏强), 即冬、夏季 SAM 较强, 春、秋季较弱。相应的, NAMI/SAMI 日标准差呈现为与 NAM/SAM 强度相似的季节变化特征: NAMI 的日标准差在 12~3 月较大, 6~9 月较小, 而 4~5 月和 10 月为过渡季节; SAMI 的日标准差呈现为冬夏强、春秋弱的准半年循环特征。

对比图 2a、b 和图 2c、d, 可发现图 2a 和图 2c、图 2b 和图 2d 呈现为反相关的变化关系, 这表明环状活动带之间的负相关越强环状模的年际变化越大, 反之亦然。

4.2 正、负位相强度的季节变化

若 NAM/SAM 持续一段时间处于正(负)位相, 则定义该时段为 NAM/SAM 的一次正(负)位相事件。对于不同年份中的同一公历日, 南、北半球环状模可能处在正位相, 也可能处在负位相。将正、负位相的 NAMI 和 SAMI 分别求平均, 可得到正、负位相 NAMI/SAMI 日平均强度的年变化曲

线 (图 2e、f)。

对于 NAM 而言 (图 2e), 其正负位相强度变化较为一致, 即 11~3 月 NAM 正、负位相平均强度均偏强, 4~5、10 月份偏弱, 6~9 月份最弱, 即冬季 NAM 正、负位相事件活动偏强, 夏季偏弱, 春秋两季为过渡季节。

SAM 全年正、负位相平均强度的季节变化相对 NAM 较平缓 (图 2f), 其正、负位相强度随时间的变化也不如 NAM 一致。SAM 正、负位相强度的年变化以 6 月为界呈现明显的准半年循环特征: 正位相平均强度 5、7、12 月偏强, 其余月份偏弱, 其中 2~3 月及 10 月底 11 月初最弱; 负位相 SAMI 在 5、7~8、12 月偏强, 其余月份偏弱, 其中 2~3 及 10 月底 11 月初最弱。

4.3 正、负位相活跃期

以 1948~2005 年逐日 NAMI/SAMI 标准差作为临界值, 定义 58 年中某一日的 NAMI/SAMI 正(负)位相强度绝对值超过该临界值的概率为该日的正(负)位相活跃指数。若正(负)位相活跃指数大于 20%, 则称该日为 NAM/SAM 正(负)位相活跃日。活跃日比较集中的时段则可定义为正(负)位相活跃期。类似的, 若某一 NAMI/SAMI 正(负)位相活跃指数低于 10%, 则称该日为 NAM/SAM 正(负)位相非活跃日。非活跃日比较集中的时段则称为正(负)位相非活跃期。

如图 3 所示, NAM 正、负位相事件的活跃期和非活跃期分布比较一致: 11~3 月为正负位相活跃期, 而 5~9 月为非活跃期, 4 月和 10 月为过渡期。相比而言, SAM 的正、负位相事件的活跃与非活跃期分布不如 NAM 对称。SAM 正位相事件活跃期与非活跃期分布呈现为半年循环, 其中两个活跃期: 5~8 月和 12 月, 两个非活跃期: 1~3 月和 10~11 月; SAM 负位相事件的半年循环特征不如正位相事件明显, 且下半年 (7~12 月) 没有明显的非活跃期: 全年来看, 其活跃期为 1、5、12 月和 7~8 月及 9 月末、11 月中, 非活跃期为 2~4 月。SAM 正、负位相事件的活跃变化的不对称性值得进一步研究。

5 NAM 与 SAM 月内活动的主要时间尺度

基于前一节对 NAM/SAM 的季节变化的分

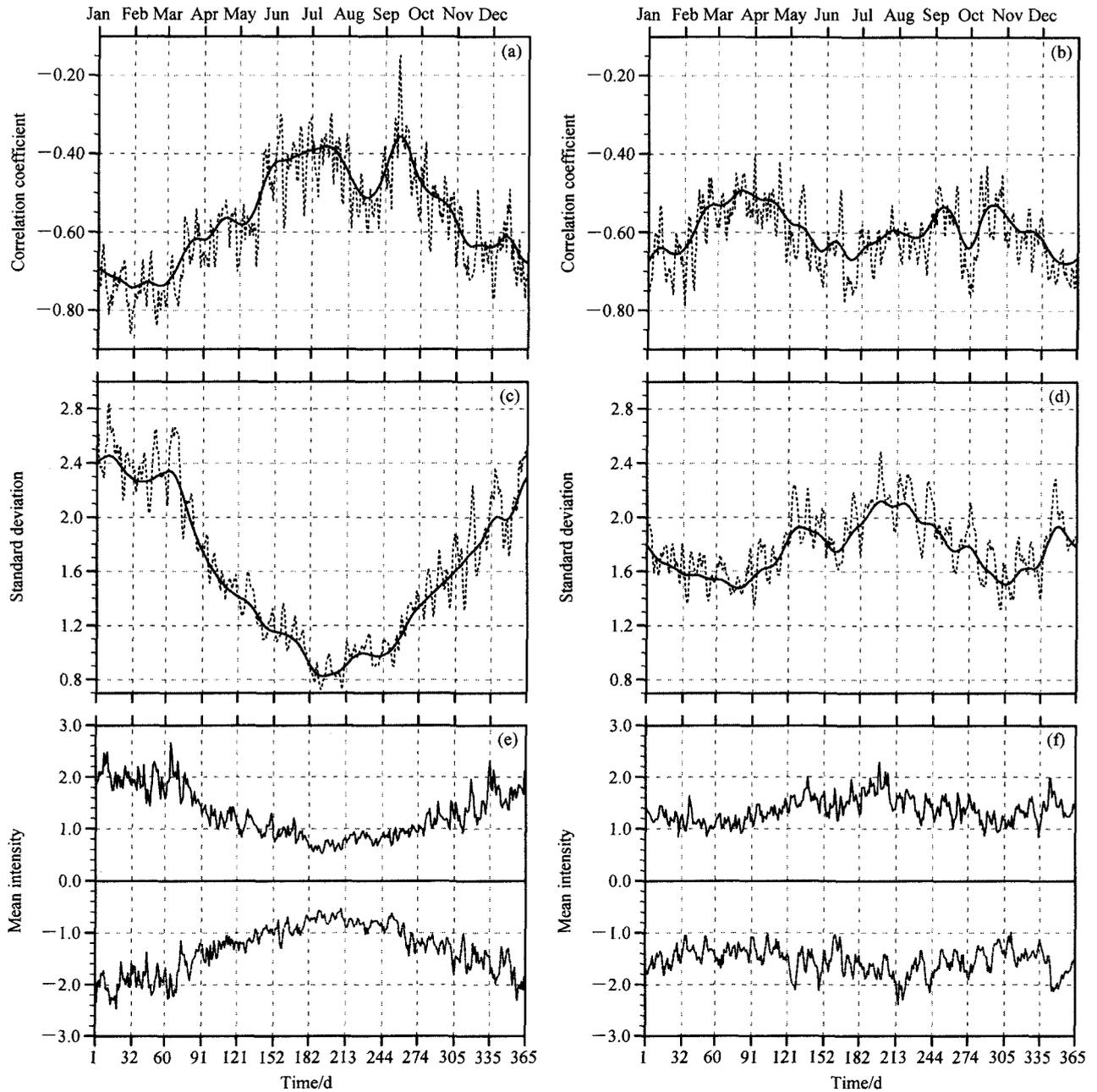


图2 1948~2005年 (a) 北半球和 (b) 南半球逐日纬向平均 SLP 各纬度之间交叉相关中最大负相关系数的年变化; (c) NAMI 和 (d) SAMI 逐日标准差年变化; (e) NAMI 和 (f) SAMI 正 (实线)、负 (虚线) 位相平均强度的年变化。(a~d) 粗实线为 31 天 Gaussian 平滑序列
 Fig. 2 The annual variations of the biggest negative cross correlation coefficients of the daily zonal mean SLPs in the (a) Northern and (b) Southern hemispheres; the standard deviations of (c) the Northern Hemisphere Annual Mode Index (NAMI) and (d) the Southern Hemisphere Annual Mode Index (SAMi); (e) the mean intensity of positive phase (solid line) and negative phase (dashed line) of NAMI; (f) same as (e), but for SAMI. The solid lines in (a)-(d) are 31-day Gaussian smooth series

析, 本节将讨论其月内活动的主要时间尺度。

5.1 NAMI 和 SAMI 功率谱分析

考虑到 NAM 具有明显的活跃期和非活跃期, SAM 为准半年循环特征, 本文不仅对历年南、北

半球环状模指数全年做了功率谱分析, 还对历年 NAM 活跃期与非活跃期、SAM 前后半年的强度指数分别进行了功率谱分析。它们历年月内活动的通过 95% 置信水平的显著谱峰对应的周期统计如图 4

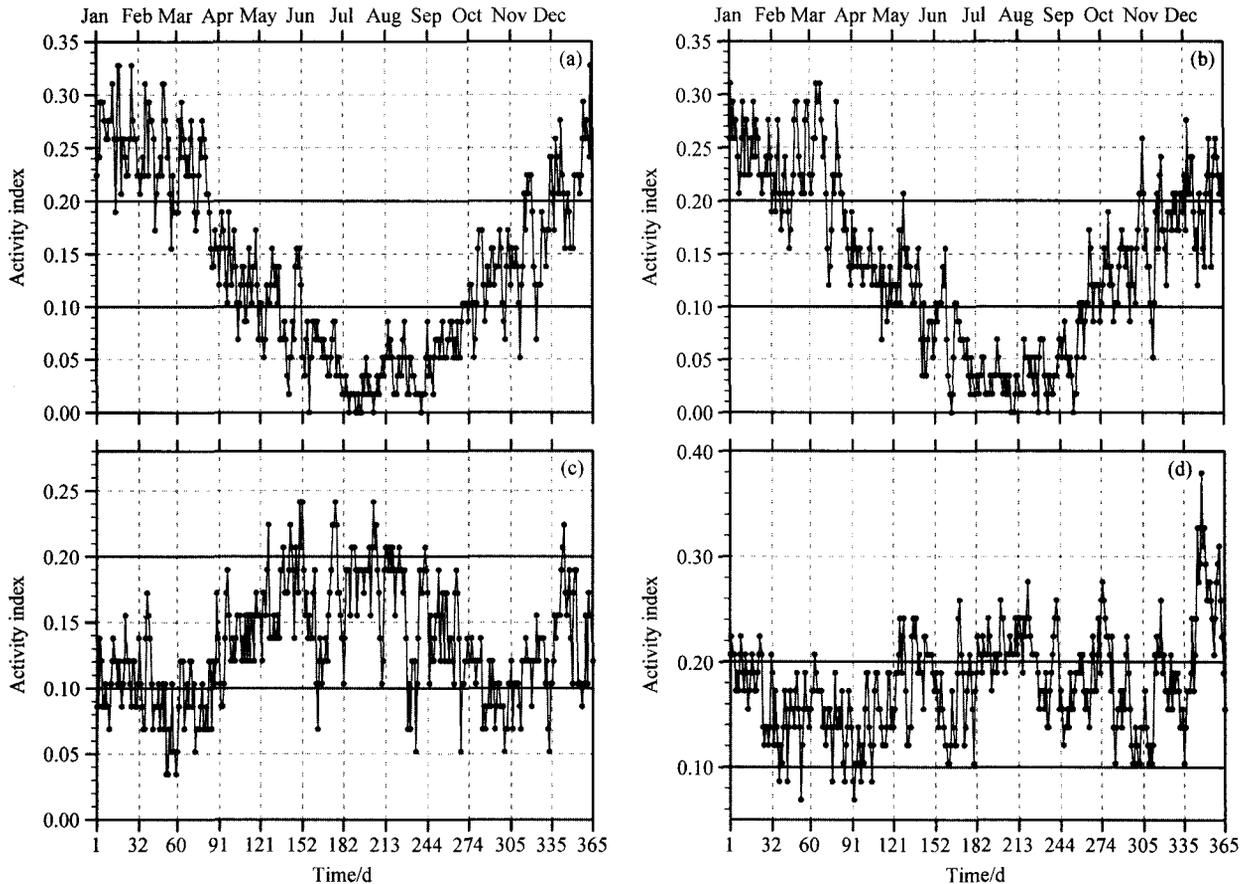


图3 NAM (a, b) 和 SAM (c, d) 的活跃指数年变化: (a, c) 正位相; (b, d) 负位相

Fig. 3 The annual variations of activity indexes in (a, c) the positive phase and (b, d) the negative phase of (a, b) NAM and (c, d) SAM

所示, 详细数据见表 2~3。

由图 4 可以看到, 不论是全年的 NAMI/SAMI 还是一年中的不同阶段 (NAM 活跃与非活跃期, SAM 前、后两个半年), 历年均具有显著的时间周期, 且月内活动的显著谱峰主要集中在三个谱段: 准 1 周 (5~10 天, 简称准 1 W), 准 2 周 (10~20 天, 简称准 2 W) 和准 3 周 (20~30 天, 简称准 3 W)。

5.2 NAMI 和 SAMI 标准化功率谱合成分析

以上分析主要从历年显著谱峰的分布情况分析了环状模的月内时间尺度, 下面将进一步分析 NAMI 和 SAMI 的标准化功率谱合成分析。

5.2.1 NAMI 全年标准化功率谱合成分析

图 5 为 NAMI 全年标准化功率谱合成及对应周期上显著功率谱的年份统计图, 由图中可见, 最强的谱段集中在准 2 W, 稍弱的谱段集中在准 1 W, 呈现双峰结构, 而准 3 W 的周期上的标准化

功率谱强度最弱 (图 5a); 若不考虑含有准 3 W 周期的年份, 将剩余年份合成, 则这种以准 1 W 和准 2 W 为主的双峰结构更加明显 (图 5b)。相对应的, 准 1 W 和准 2 W 周期上通过 95% 置信水平的年份数目较多, 而准 3 W 周期上显著年份相对较少 (图 5a 虚线), 显著年份总数也呈现为以准 2 W 周期上最多而准 1 W 次之的双峰结构; 若不考虑含准 3 W 的年份, 这种以准 1 W 和准 2 W 为主的双峰结构更加明显 (图 5b 虚线)。可见, NAM 的月内活动周期以准 2 W 和准 1 W 最强, 而准 3 W 周期上标准化功率谱强度相对较弱。

合成所有含有准 1 W 周期年份的标准化功率谱可知, 将伴生明显的准 2 W 左右周期的谱段 (图 5c); 而合成所有含有准 2 W 周期年份的标准化功率谱, 也将伴生明显的准 1 W 周期的谱段 (图 5e); 且这两种合成的结果与同时含有准 1 W 和准 3 W 年份的合成效果 (图 5g) 相似。这说明, 准 1 W 和准

表 2 1948~2005 年 NAMI 通过 95% 置信水平的显著谱峰对应的周期分布 (单位: d)

Table 2 The distribution of periods (d) corresponding to marked spectrum peaks (95% confidence level) of NAMI from 1948 to 2005

| | 全年 (1~12 月) | | | 活跃期 (11~3 月) | | | 非活跃期 (5~9 月) | | |
|--------|-------------|---------|--------|--------------|---------|--------|--------------|---------|--------|
| | 20~30 d | 10~20 d | 5~10 d | 20~30 d | 10~20 d | 5~10 d | 20~30 d | 10~20 d | 5~10 d |
| 1948 年 | | 15.5 | 8.5 | | 10.5 | 7.5 | | 17 | 8 |
| 1949 年 | | 12.5 | 7.5 | | 12.5 | 8.5 | | 18 | 7.5 |
| 1950 年 | | 15.5 | 8.5 | | 14.5 | 8.5 | | 15 | 7 |
| 1951 年 | 23 | 11.5 | 6.5 | | 12.5 | 7.5 | 25 | 10.5 | |
| 1952 年 | 20 | 14 | 9.5 | | | 9.5 | | | 8 |
| 1953 年 | | 11 | 7.5 | | 12.5 | | | 11 | 7.5 |
| 1954 年 | | 13 | 9 | | | 9 | 25 | | 9.5 |
| 1955 年 | | 13.5 | 6.5 | 24 | 12.5 | 5.5 | | 12.5 | 6 |
| 1956 年 | | 11.5 | 7.5 | | | | | 10.5 | |
| 1957 年 | | 15.5 | 5 | | 12.5 | 7.5 | | 12.5 | 5.5 |
| 1958 年 | | 13 | 6.5 | | | 6.5 | | 15 | 9 |
| 1959 年 | 28 | 12.5 | 7.5 | 24 | 10.5 | | | 15 | 7.5 |
| 1960 年 | 23 | | 9.5 | | | 9.5 | | | 8.5 |
| 1961 年 | | 13 | 9.5 | | 12.5 | | | | 7.5 |
| 1962 年 | 23 | 12.5 | 6 | | | 8.5 | | 18 | 9.5 |
| 1963 年 | | 10 | | | 14.5 | 8 | | 10.5 | 7 |
| 1964 年 | | 14 | 8 | 25 | | 8 | | | 6 |
| 1965 年 | 28 | 11.5 | 7 | | 14.5 | | | 15 | 7.5 |
| 1966 年 | | 15.5 | 6 | | 12.5 | | | 15 | 7.5 |
| 1967 年 | | 15.5 | 8.5 | | 12.5 | 6 | | 19 | 9 |
| 1968 年 | 20 | 11 | 6.5 | 25 | | 8 | | 15 | 7.5 |
| 1969 年 | | | 9 | | 12.5 | | | | 9 |
| 1970 年 | | 14.5 | 5 | | 12.5 | 7.5 | | 15 | |
| 1971 年 | | 15.5 | 8 | | 10.5 | 5.5 | | 15 | 8.5 |
| 1972 年 | | 18 | 6.5 | | 10.5 | 6.5 | | | 8.5 |
| 1973 年 | 28 | 15.5 | 9.5 | | 18 | 7 | 25 | | 9.5 |
| 1974 年 | | 18 | 7 | 25 | | 9.5 | | 10.5 | 7 |
| 1975 年 | 23 | 10 | 7 | | 10.5 | 6 | | 10.5 | |
| 1976 年 | | 12.5 | | | 12.5 | 7.5 | | 19 | 6.5 |
| 1977 年 | | 15.5 | 7 | | | 9.5 | | 10.5 | |
| 1978 年 | 28 | 11 | 5.5 | | 10.5 | 6 | | 12.5 | 7.5 |
| 1979 年 | | 15.5 | 8.5 | | 19 | 8.5 | | 10.5 | 5.5 |
| 1980 年 | 23 | 11 | 6 | 25 | | | | 10.5 | 6 |
| 1981 年 | | 18 | | 25 | | 7.5 | | 14.5 | 8 |
| 1982 年 | | 11 | 7 | | 18 | 9.5 | | 12.5 | 8 |
| 1983 年 | 28 | 17 | 8 | | | 8 | | 18.5 | 9 |
| 1984 年 | | 11.5 | 7.5 | | 12.5 | | | 18 | 9 |
| 1985 年 | 20 | 11.5 | 8 | | | 7.5 | 25 | | 7.5 |
| 1986 年 | | | 7 | | 12.5 | 6.5 | | 10.5 | 6.5 |
| 1987 年 | | 11.5 | 6.5 | | 12.5 | 8.5 | | 12.5 | 6.5 |
| 1988 年 | | 15.5 | 9.5 | | 15 | 6 | | 18.5 | 9.5 |
| 1989 年 | | 14 | 7.5 | | | 5 | | 15 | |
| 1990 年 | 20 | | 9 | | 19 | | | | 7 |

表 2 (续)

Table 2 (Continued)

| | 全年 (1~12 月) | | | 活跃期 (11~3 月) | | | 非活跃期 (5~9 月) | | |
|----------------|-------------|---------|--------|--------------|---------|--------|--------------|---------|--------|
| | 20~30 d | 10~20 d | 5~10 d | 20~30 d | 10~20 d | 5~10 d | 20~30 d | 10~20 d | 5~10 d |
| 1991 年 | | 19 | 7 | | 18 | 8.5 | | 18 | 9.5 |
| 1992 年 | 20 | | 8.5 | | 19 | 9 | 25 | | 8.5 |
| 1993 年 | | 12.5 | 5.5 | | 12.5 | | | 19 | 8.5 |
| 1994 年 | | 13.5 | 7.5 | | 15 | 9.5 | | | 9.5 |
| 1995 年 | | 15.5 | 9.5 | | | 9 | | 19 | 6 |
| 1996 年 | | 15.5 | 9 | | 10.5 | 6 | | 18 | 8 |
| 1997 年 | | 18 | 6.5 | | 12.5 | | | | 9.5 |
| 1998 年 | | 15.5 | 7.5 | | 10.5 | | | 15 | 7.5 |
| 1999 年 | 20 | 10 | 6 | | 19 | 8 | | | 9.5 |
| 2000 年 | 28 | 15.5 | 8 | 25 | | 9 | 25 | | 7.5 |
| 2001 年 | 24 | | 9 | | 15 | 8 | | | 8 |
| 2002 年 | | 13 | 9 | | 15 | 6.5 | 25 | | 8 |
| 2003 年 | | 17 | 8 | | 15 | | | 19 | 5 |
| 2004 年 | | 14 | 7 | | 11 | 7.5 | | | 9.5 |
| 2005 年 | | 11.5 | 7 | | 10.5 | 7 | | 12.5 | |
| 平均周期/d | 22.40 | 13.84 | 7.55 | 24.75 | 13.51 | 7.68 | 25.00 | 14.60 | 7.82 |
| 显著周期年数 | 18 | 52 | 55 | 8 | 41 | 44 | 7 | 40 | 51 |
| 显著周期 年数/总年数 | 31.03% | 89.66% | 94.83% | 13.79% | 70.69% | 75.86% | 12.07% | 68.97% | 87.93% |

表 3 1948~2005 年 (58 年) SAMI 通过 95% 置信水平的显著谱峰对应的周期分布 (单位: d)

Table 3 The distribution of periods (d) corresponding to marked spectrum peaks (95% confidence level) of SAMI from 1948 to 2005

| | 全年 (1~12 月) | | | 上半年 (1~6 月) | | | 下半年 (7~12 月) | | |
|--------|-------------|---------|--------|-------------|---------|--------|--------------|---------|--------|
| | 20~30 d | 10~20 d | 5~10 d | 20~30 d | 10~20 d | 5~10 d | 20~30 d | 10~20 d | 5~10 d |
| 1948 年 | 28 | 17 | 8.5 | 21 | | 8.5 | | 17 | 6.5 |
| 1949 年 | | 15.5 | 8.5 | | | 8.5 | | 17 | 6 |
| 1950 年 | | 19 | 9.5 | 21 | 12 | | | 14 | 9.5 |
| 1951 年 | | | 6 | 28 | 17 | 7.5 | 28 | 12 | 5.5 |
| 1952 年 | 20 | 10.5 | 6.5 | | 12 | 5.5 | | 10.5 | 6.5 |
| 1953 年 | | 10.5 | 6 | | 10.5 | 5.5 | 28 | 10.5 | 6 |
| 1954 年 | | 13 | 9.5 | | | 9 | | 14 | 7 |
| 1955 年 | | 14.5 | 7.5 | | 17 | 7.5 | | 14 | 5.5 |
| 1956 年 | 23 | 11.5 | 7.5 | | 10.5 | | 21 | 12 | 6.5 |
| 1957 年 | | 19 | 9 | | 17 | 9.5 | | 17 | 9.5 |
| 1958 年 | | 12.5 | 6.5 | | 14 | 6 | 21 | | 7 |
| 1959 年 | 23 | 12.5 | 8 | 21 | 12.5 | 8.5 | | 17 | 8.5 |
| 1960 年 | 20 | 12.5 | 7.5 | 21 | 10.5 | | | 14 | 5 |
| 1961 年 | | 14 | 6 | | 14 | 7.5 | | 14 | 6 |
| 1962 年 | 28 | 12.5 | 8.5 | 28 | 12 | 6 | 21 | 12 | 8.5 |
| 1963 年 | 23 | 11.5 | | | 17 | | 21 | 10.5 | |
| 1964 年 | 20 | | 9 | | 14 | 9.5 | 21 | | 8.5 |
| 1965 年 | | 11.5 | 5.5 | | 10.5 | | | 12 | 5.5 |

表 3 (续)

Table 3 (Continued)

| | 全年 (1~12 月) | | | 上半年 (1~6 月) | | | 下半年 (7~12 月) | | |
|----------------|-------------|---------|--------|-------------|---------|--------|--------------|---------|--------|
| | 20~30 d | 10~20 d | 5~10 d | 20~30 d | 10~20 d | 5~10 d | 20~30 d | 10~20 d | 5~10 d |
| 1966 年 | 20 | 11.5 | 7.5 | | 12 | 7.5 | 21 | 10.5 | 5.5 |
| 1967 年 | | 11 | 6 | | 10.5 | 6 | | | 8.5 |
| 1968 年 | 23 | 12.5 | 7.5 | 21 | 12 | 5.5 | 28 | 14 | 7 |
| 1969 年 | | 14 | 7.5 | | 10.5 | 7 | | 14 | 8.5 |
| 1970 年 | | 14 | 7 | | 12.5 | 7 | 21 | | 7 |
| 1971 年 | 23 | 13 | 8 | | 14 | 8.5 | 21 | 12 | 7.5 |
| 1972 年 | 20 | | 8 | | | 9.5 | 21 | 10.5 | 5 |
| 1973 年 | 28 | 15.5 | 9 | | 14.5 | 8.5 | 28 | | 8.5 |
| 1974 年 | 23 | 10 | 5.5 | 21 | 10.5 | 5.5 | 21 | 10.5 | |
| 1975 年 | | | 7.5 | | | 9.5 | | | 7.5 |
| 1976 年 | | 12 | 7.5 | 21 | 10.5 | 7.5 | | 12 | 8.5 |
| 1977 年 | | 15.5 | 7.5 | | 14 | 7 | | 17 | 7.5 |
| 1978 年 | 20 | 12.5 | 8.5 | | | 6.5 | | 12 | 8.5 |
| 1979 年 | | | 8.5 | | | 8.5 | 21 | | 7.5 |
| 1980 年 | | | 9 | | 14 | 9.5 | | | 9 |
| 1981 年 | | | 9 | 28 | | 8.5 | | 17 | 9.5 |
| 1982 年 | | 18 | 9.5 | | 17 | 9.5 | | | 9.5 |
| 1983 年 | 28 | 11.5 | | 28 | 10.5 | | | 10.5 | |
| 1984 年 | | 17 | 9 | | 10.5 | 6.5 | | | 8.5 |
| 1985 年 | | 15.5 | 6.5 | | 17 | 6.5 | | 14 | 8.5 |
| 1986 年 | | 18 | 6 | | 14 | 7.5 | | 17 | |
| 1987 年 | 20 | | 7.5 | | 17 | 7 | 21 | | 8.5 |
| 1988 年 | 20 | 11.5 | 6.5 | | 12 | 6.5 | 21 | 12 | 5.5 |
| 1989 年 | 20 | 11.5 | 7 | | 12 | 7 | 21 | 12 | |
| 1990 年 | | 11.5 | 6.5 | 28 | 12 | 6.5 | 21 | | 9.5 |
| 1991 年 | | 11.5 | 7.5 | | 10.5 | | | 17 | 7 |
| 1992 年 | | 15.5 | 7 | | 14 | 7 | | 17 | 8.5 |
| 1993 年 | | 14.5 | 7.5 | | 14 | | | 14 | 7.5 |
| 1994 年 | 28 | 14 | 7.5 | 28 | 10.5 | 7 | | | 8.5 |
| 1995 年 | | 15.5 | 9.5 | 21 | | 9.5 | | 14 | 9.5 |
| 1996 年 | | 17 | 8 | | 17 | 6 | | 14 | 5.5 |
| 1997 年 | | 10 | 5.5 | | 17 | 5.5 | | 10.5 | |
| 1998 年 | | 13 | 6.5 | | 14 | 6.5 | | 10.5 | 5 |
| 1999 年 | | 18 | 8.5 | | | 6 | 21 | | 7.5 |
| 2000 年 | | 12.5 | 8 | 28 | 12 | 5.5 | | 17 | 5.5 |
| 2001 年 | | 11 | 7.5 | | 14.5 | 5.5 | | 10.5 | 7 |
| 2002 年 | | 15.5 | 8.5 | | 17 | 7 | | 14 | 8.5 |
| 2003 年 | 23 | 14 | 9 | | 14 | 6 | 21 | 10.5 | |
| 2004 年 | 28 | 14 | 9 | 28 | | 9.5 | 28 | 14 | 6 |
| 2005 年 | | 15.5 | 6 | | 17 | 8.5 | | 10.5 | |
| 平均周期/d | 23.14 | 13.70 | 7.63 | 24.50 | 13.38 | 7.35 | 22.59 | 13.32 | 7.38 |
| 显著周期年数 | 22 | 50 | 56 | 16 | 47 | 50 | 22 | 44 | 50 |
| 显著周期 年数/总年数 | 37.29% | 86.21% | 96.55% | 27.57% | 81.03% | 86.21% | 37.93% | 75.86% | 86.21% |

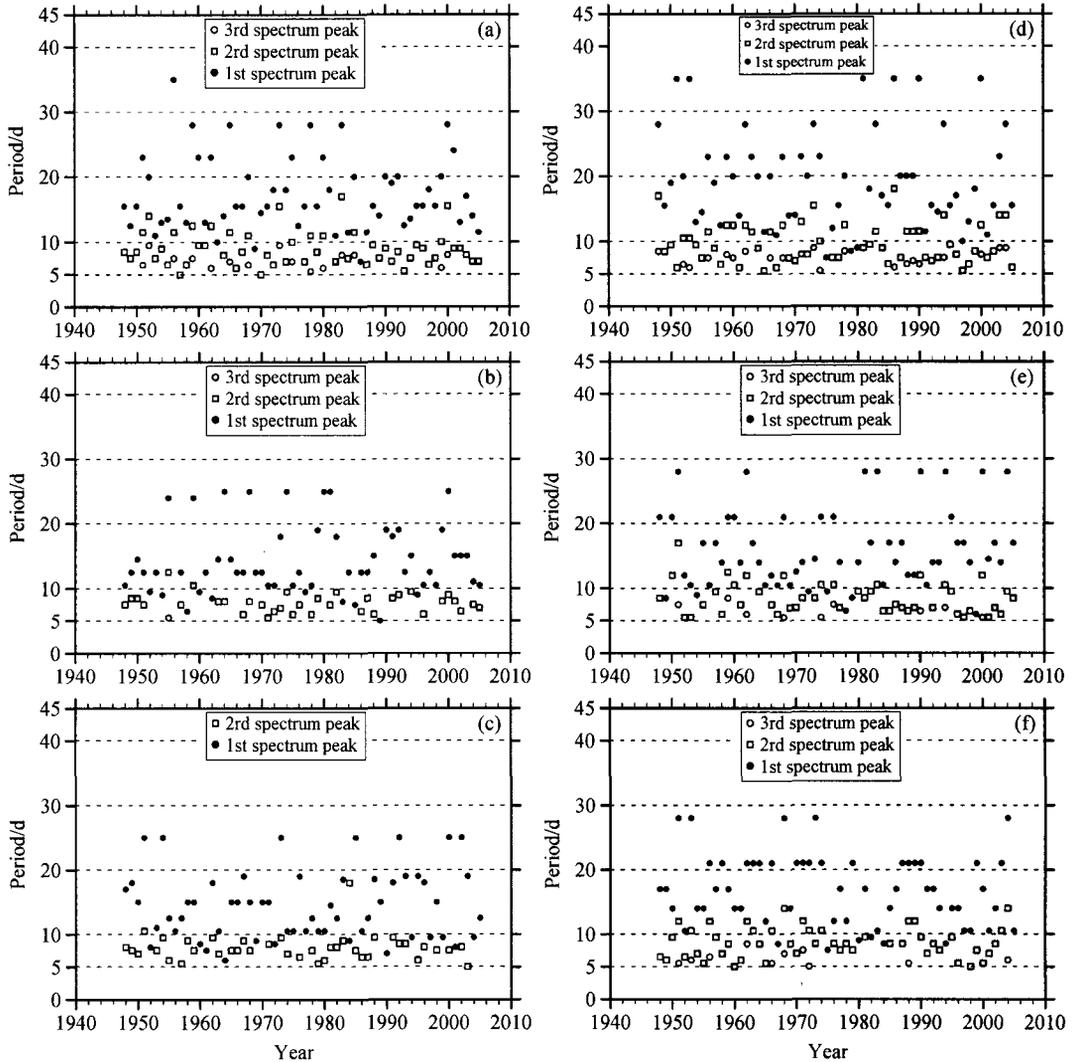


图4 1948~2005年功率谱分析显著谱峰对应的周期分布: (a) NAMI全年; (b) NAMI活跃期; (c) NAMI非活跃期; (d) SAMI全年; (e) SAMI前半年; (f) SAMI后半年

Fig. 4 The distribution of periods corresponding to marked spectrum peaks of submonthly activity for the period 1948 - 2005: (a) NAMI in the whole year; (b) NAMI in the active period; (c) NAMI in the non-active period; (d) SAMI in the whole year, (e) SAMI in the first half year; (f) SAMI in the second half year

2 W 倾向于在同一时段中出现, 具有伴生的性质。若不考虑含准 3 W 周期的年份 (图 5d、f、h), 这种准 1 W 和准 2 W 伴生的性质更加明显。观察对应周期上显著功率谱年份统计图 (图 5c~h 中虚线), 可看到相同的特征。

最后, 无论从标准化功率谱合成的强度还是显著年份总数来看, 准 3 W 都是一个相对较弱的周期。它在一些年份不出现, 在一些年份伴随准 1 W 和准 2 W 出现, 但伴随准 1 W 出现的趋势似乎要

强于伴随准 2 W (图 5l、j、k 中实线, 图 8l、j、k 中虚线)。

由上面分析可以发现, NAM 的月内活动周期主要以准 1 W 和准 2 W 左右两个具有共生性质的时间周期为主, 其中准 2 W 比准 1 W 略强; 而准 3 W 则是相对次要的时间周期。

5.2.2 NAMI 活跃期和非活跃期标准化功率谱合成分析

图 6 和图 7 分别为 NAM 活跃期和非活跃期的

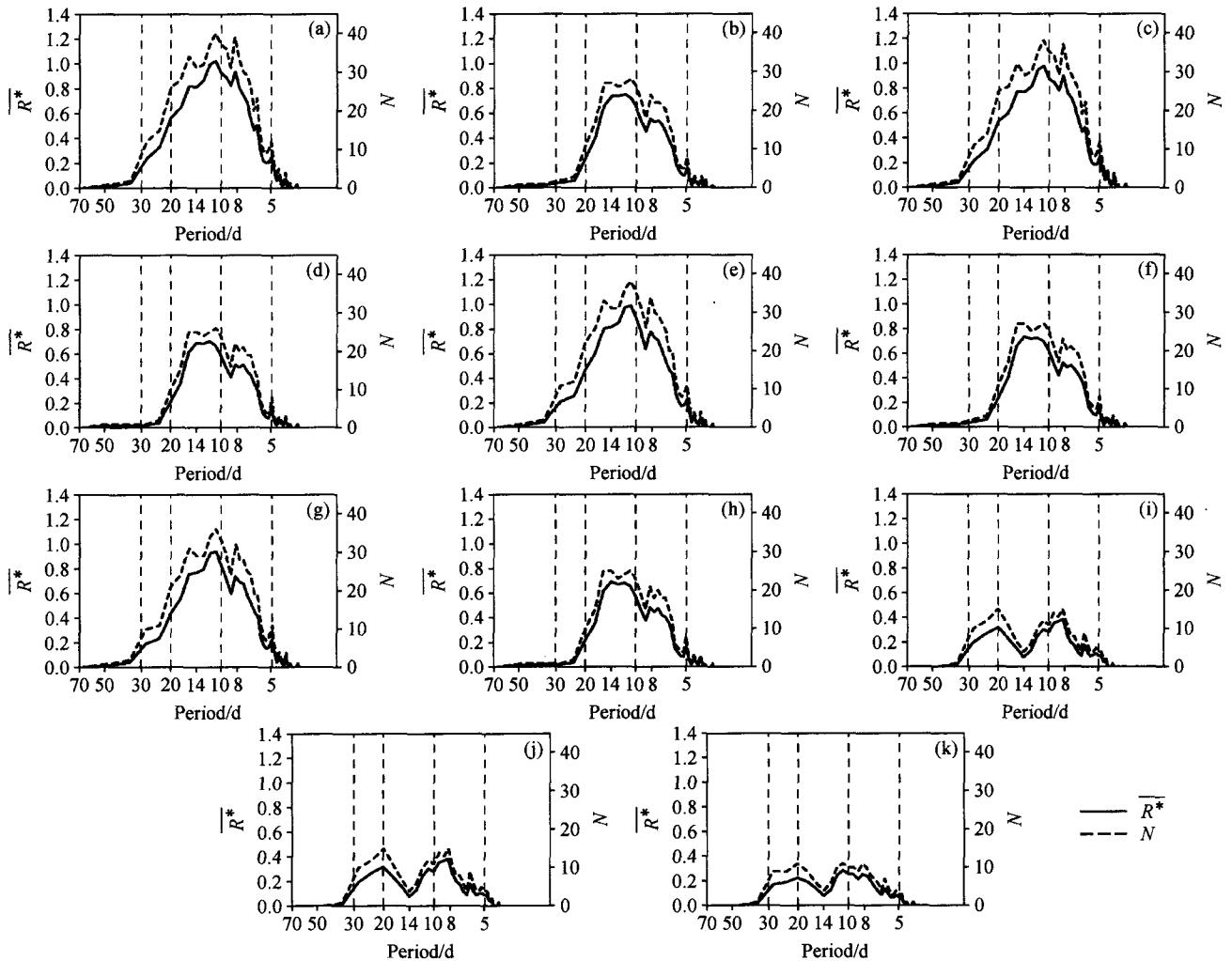


图5 1948~2005年NAMI全年(365天)标准化功率谱 $\overline{R^*}$ 合成及对应周期上功率谱通过显著性检验的年份总数统计 N : (a) 所有年份; (b) 所有不含准3W的年份; (c) 所有含准1W的年份; (d) 含准1W、无准3W的年份; (e) 所有含准2W的年份; (f) 含准2W、无准3W的年份; (g) 既有准1W又有准2W的所有年份; (h) 既有准1W又有准2W年份, 但无准3W的年份; (i) 含有准3W的所有年份; (j) 既有准1W又有准3W的所有年份; (k) 既有准2W又有准3W的所有年份

Fig. 5 The composite standardized power spectra ($\overline{R^*}$) of NAMI in an entire year and the total number of years (N) for the significant spectrum period from 1948 to 2005: (a) All of years; (b) the years not including quasi-three-week period; (c) the years including quasi-week period; (d) the years including quasi-week period but not including quasi-three-week period; (e) the years including quasi-two-week period; (f) the years including quasi-two-week period and not including quasi-three-week period; (g) the years including both quasi-week period and quasi-two-week period; (h) the years including both quasi-week period and quasi-two-week period but not including quasi-three-week period; (i) the years including quasi-three-week period; (j) the years including both quasi-week period and quasi-three-week period; (k) the years including both quasi-two-week period and quasi-three-week period

合成功率谱分析及显著年份统计, 由图可见, NAM活跃期和非活跃期的月内活动周期均以准2W和准1W的周期最为突出, 准3W的周期次之; 准1W与准2W具有明显伴生性质; 而准3W较弱、出现年份较少, 且倾向与伴生准1W周期出现。其中, NAM非活跃期情况与NAM全年情况

较为相似。而NAM活跃期(图6)在10天左右周期上的标准化功率谱偏强、显著年份总数偏多, 这与NAM全年情况(图5)相比略有不同。检查逐年功率谱图(略), 可发现这种突出的10天周期可能是由于不同年份的准1W和准2W谱峰相邻两侧的显著谱段相叠加而造成的。

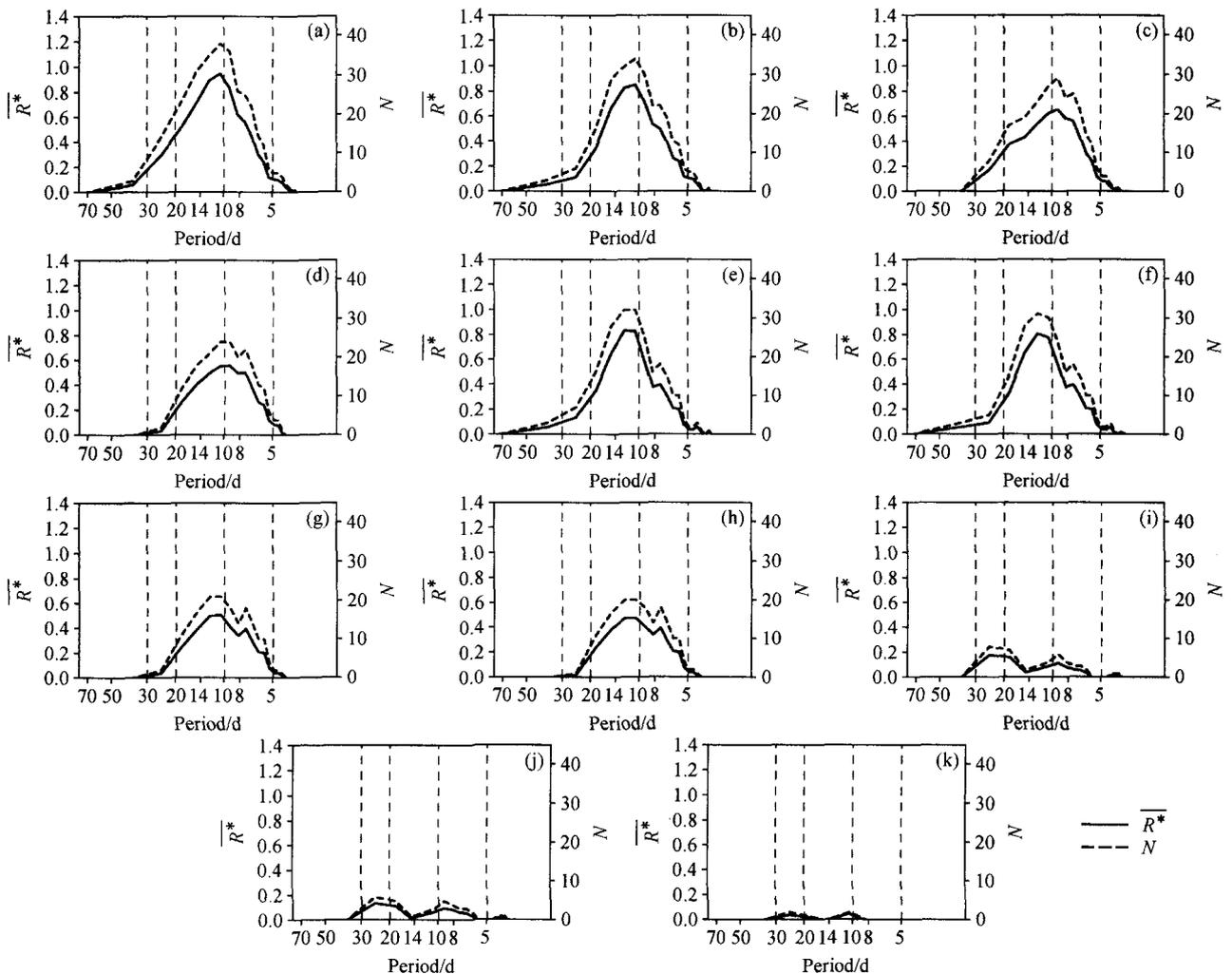


图6 同图5, 但为MAMI活跃期(11~3月)

Fig. 6 Same as Fig. 5, except for MAMI in the active period (from Nov to Mar)

5.2.3 SAMI 全年标准化功率谱合成分析

图8为SAMI全年标准化功率谱合成及对应周期上存在显著功率谱的年份统计。与NAMI全年情况(图5)相类似的,其月内活动周期以准2W和准1W的周期最为突出,准3W的周期次之;准1W与准2W具有明显伴生性质;而准3W较弱、出现年份较少,但倾向于伴随准2W周期出现。合成的标准化功率谱及显著年份数在10天左右的周期突出,原因与上节相同,可能是由于不同年份的准1W和准2W周期谱峰相邻两侧的显著谱段相叠加而造成的。

5.2.4 SAM 前半年(1~6月)和后半半年(7~12月)标准化功率谱合成分析

图9和图10为SAM前半年的合成功率谱分

析及显著年份统计。与前面分析相似,其月内活动周期以准2W和准1W的周期最为突出,准3W的周期次之。准2W和准1W的周期具有伴生性质,准3W的周期倾向于伴生准2W周期出现。

5.2.5 CPC的SAM和NAM逐日指数的合成分析

为了对比分析,下面采用CPC的NAM指数(简称CPC-NAMI)和SAM指数(简称CPC-SAMI)进行合成分析(如图11所示)。从下面的分析中,我们会发现采用CPC环状模指数得到关于月内时间尺度的结果与上面的结果是大体相似的。

CPC-NAMI的标准化功率谱合成(图11a实线)分析显示,其主要时间周期为准1W和准2W的两个周期,而准3W相对较弱;对应周期上功率

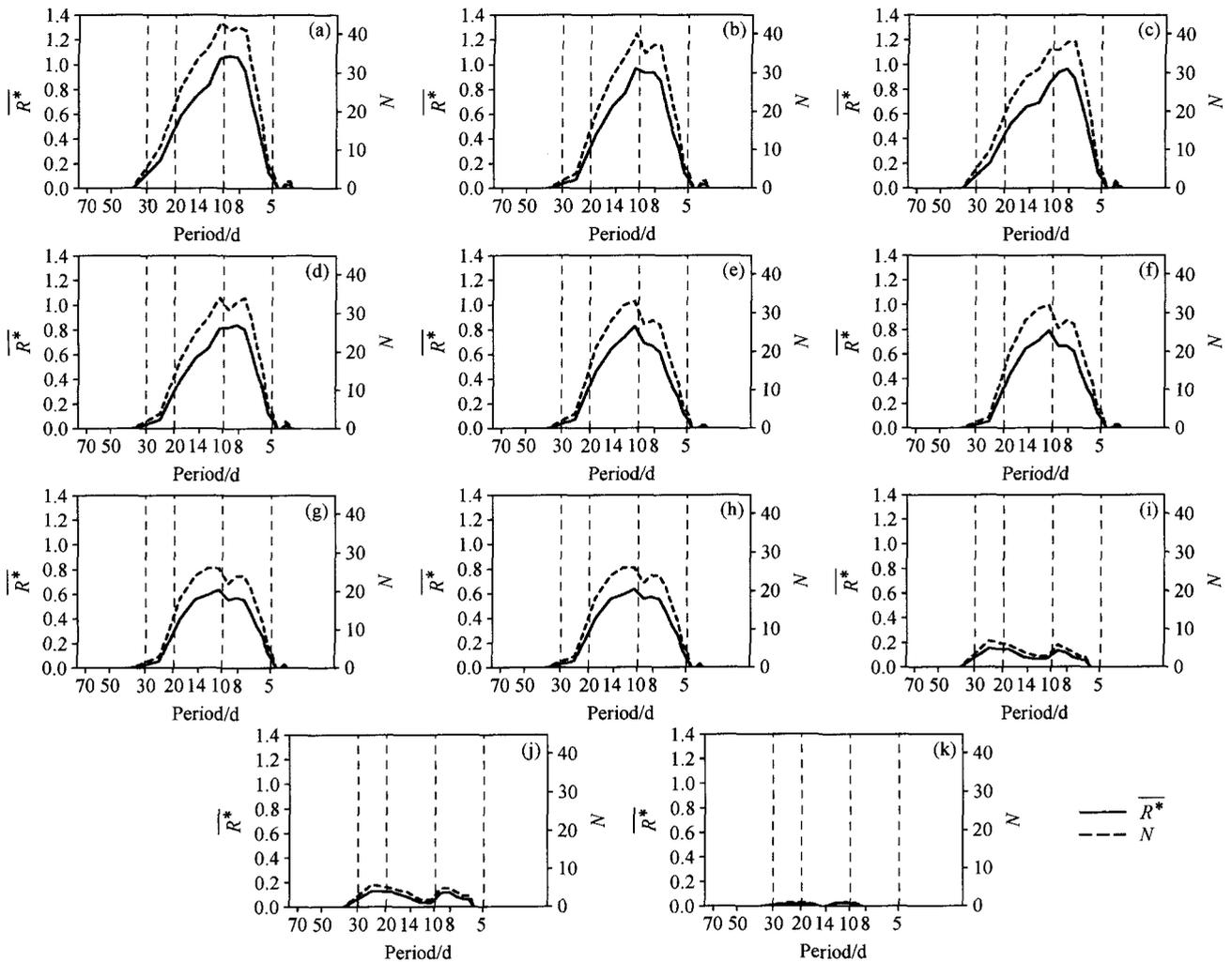


图7 同图5, 但为NAMI非活跃期(5~9月)
 Fig. 7 Same as Fig. 5, except for NAMI in the non-active period (from May to Sep)

谱通过显著性检验的年份也主要集中在准1W和准2W周期上, 而准3W周期上的年数相对较少(图11a虚线)。这说明CPC-NAMI的结果与我们的逐日NAMI分析结果相一致。

CPC-SAMI的标准化功率谱合成(图11d)分析显示, 其主要时间周期在准1W和准2W, 准3W相对较弱。这与我们的逐日SAMI分析结论也是相符合的。

图11b、c为CPC-NAMI在活跃期与非活跃期的情况。就显著谱峰年数来说, 月内活动周期集中在准1W和准2W的年份最多, 呈现明显的双峰结构, 而准3W周期的年数也较多(图11b、d虚线)。相对应的, 标准化功率谱合成(图11实线)显示, 最强的谱段在准1W和准2W, 准3W相对

较弱, 且CPC-NAMI在非活跃期以准1W和准2W为主的双峰结构明显, 而CPC-NAMI在活跃期中准10天左右的周期突出, 呈现单峰形状, 这可能是由于不同年份的准1W和准2W周期谱峰两侧的显著谱段相叠加而造成的。这与4.2.2节中NAMI的活跃与非活跃期分析结果极为相似。

图11e、f为CPC-SAMI在前后两半年的情况。CPC-SAMI上半年, 准2W和准3W周期上标准化功率谱最强、显著年数最多, 而准1W周期上标准化功率谱相对较弱、显著年数较少; CPC-SAMI下半年, 准2W周期上标准化功率谱最强、显著年数最多, 而次强谱段在准3W, 而准1W周期谱段上强度最弱、显著年数最少。这与我们上面的分析结果略有不同。

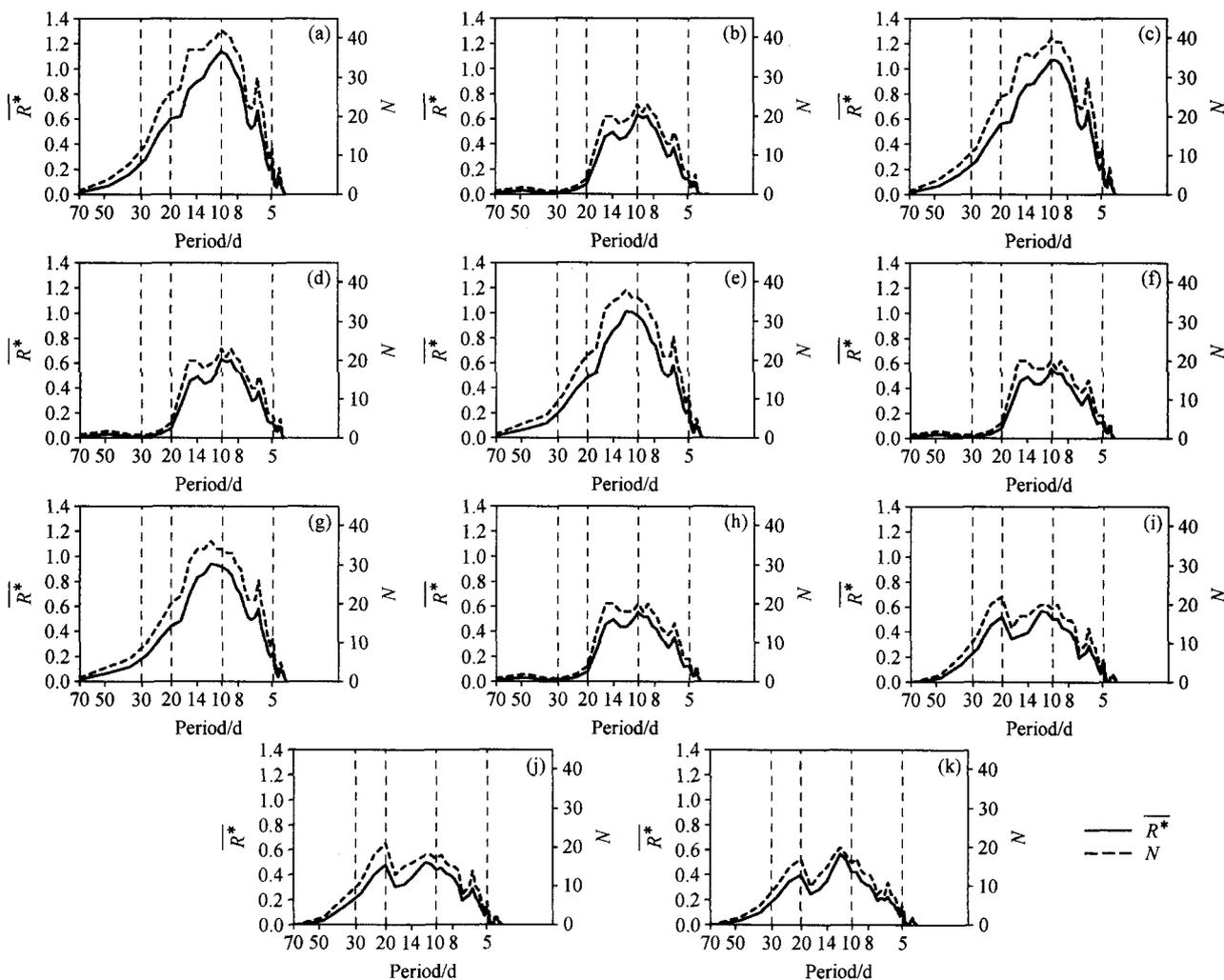


图8 同图5, 但为 SAMI 全年 (365 天)

Fig. 8 Same as Fig. 5, except for SAMI in the entire year (365 days)

如上所述, 采用 CPC 的 NAM 指数和 SAM 指数对比分析时, CPC-NAMI 的全年、活跃期、非活跃期和 CPC-SAMI 全年的情况与我们上几节的结果相似, 而 CPC-SAMI 的前后两半年的结果与我们的结论略有不同, 其准 3 W 的周期较为突出。其原因可能是由于 CPC-SAMI 指数在计算时考虑地形高度而采用 700 hPa 高度场的资料, 而本文 SAMI 计算均采用 40°S 和 70°S SLP 场。

6 结论与讨论

本文主要研究了 NAM 和 SAM 月内活动的主要时间尺度, 结果表明其具有明显的月内周期性活动特征, 主要结论如下:

(1) NAM 活动的强度, 正、负位相的强度及

NAMI 标准差的年变化均呈现明显的季节循环特征: 冬季强, 夏季弱, 春、秋为过渡季节。而 SAM 活动的强度, 正负位相的强度及 SAMI 标准差的年变化均呈现为夏冬季偏强、春秋季节偏弱的半年循环特征。

(2) NAM 的正负位相事件的活动期与非活跃期分布较为一致, 全年有一个活跃期和一个非活跃期, 分别为 11~3 月和 5~9 月。SAM 全年有两个活跃期和非活跃期, 其正位相事件与负位相事件的活动期不如 NAM 对称, 其中, 正位相事件活动期为 5~8 月和 12 月, 非活跃期为 1~3 和 10~11 月; 负位相事件活跃期为 1、5、12 和 7~8 月及 9 月末、11 月中, 非活跃期为 2~4 月。SAM 正、负位相事件的活跃变化的不对称性值得进一步研究。

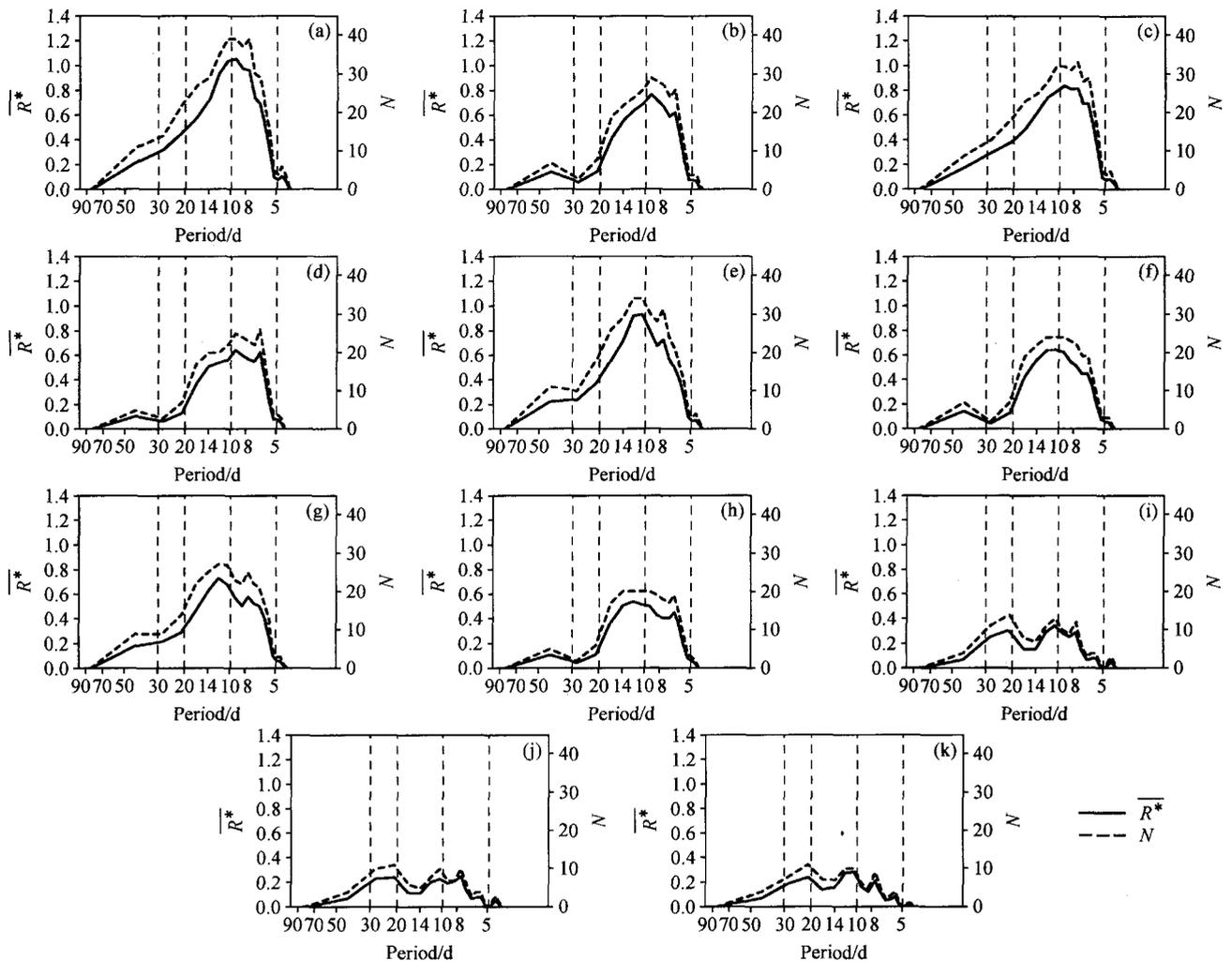


图9 同图5, 但为 SAMI 前半年(1~6月)

Fig. 9 Same as Fig. 5, except for SAMI in the first half year (from Jan to Jun)

(3) NAM 月内活动时间尺度呈现出以准 1 周和准 2 周两个具有共生性质的时间周期为主; 而准 3 周的时间周期是相对次要的周期, 且倾向于伴随准 1 周。

(4) SAM 的月内活动时间尺度与 NAM 相似, 表现为准 2 周最强, 准 1 周次之; 此外, 准 3 周的时间周期也是明显的, 且倾向于伴随准 2 周出现; 与 NAM 相比, 其 10 天左右的时间周期较强, 但其原因可能是由于不同年份准 1 W 和准 2 W 谱峰两侧的显著谱段相叠加而造成的。

(5) 采用 CPC 的 NAM 和 SAM 指数对比发现, CPC-NAMI 的全年、活跃期、非活跃期和 CPC-SAMI 全年的情况与本文采用的 NAMI 和 SAMI 指数的结果相似, 而 CPC-SAMI 的前、后两

半年的结果与我们的结论略有不同, 其准 3 W 的周期较为突出。不同的原因可能是由于 CPC-NAMI 指数在计算时采用 1000 hPa 高度场资料, 而 CPC-SAMI 采用 700 hPa 位势高度场资料计算, 而本文环状模指数计算均采用了 SLP 场。

本文发现 NAM 和 SAM 的月内活动周期以准 1 周和准 2 周为主, 而准 3 周的周期相对次要, 这与以往的研究 (1998, Feldstein, 2000, Lorenz et al., 2001, 2003) 认为 NAM 和 SAM 活动具有 10 天左右的 e 折 (e-folding) 特征时间尺度不同。那么, 准 1W 和准 2W 这两个周期对应的 NAM 和 SAM 的正、负位相事件的物理实体是什么? 其空间结构是怎样的? 其时间演变特征又如何呢? 这些问题还有待于我们进一步研究。

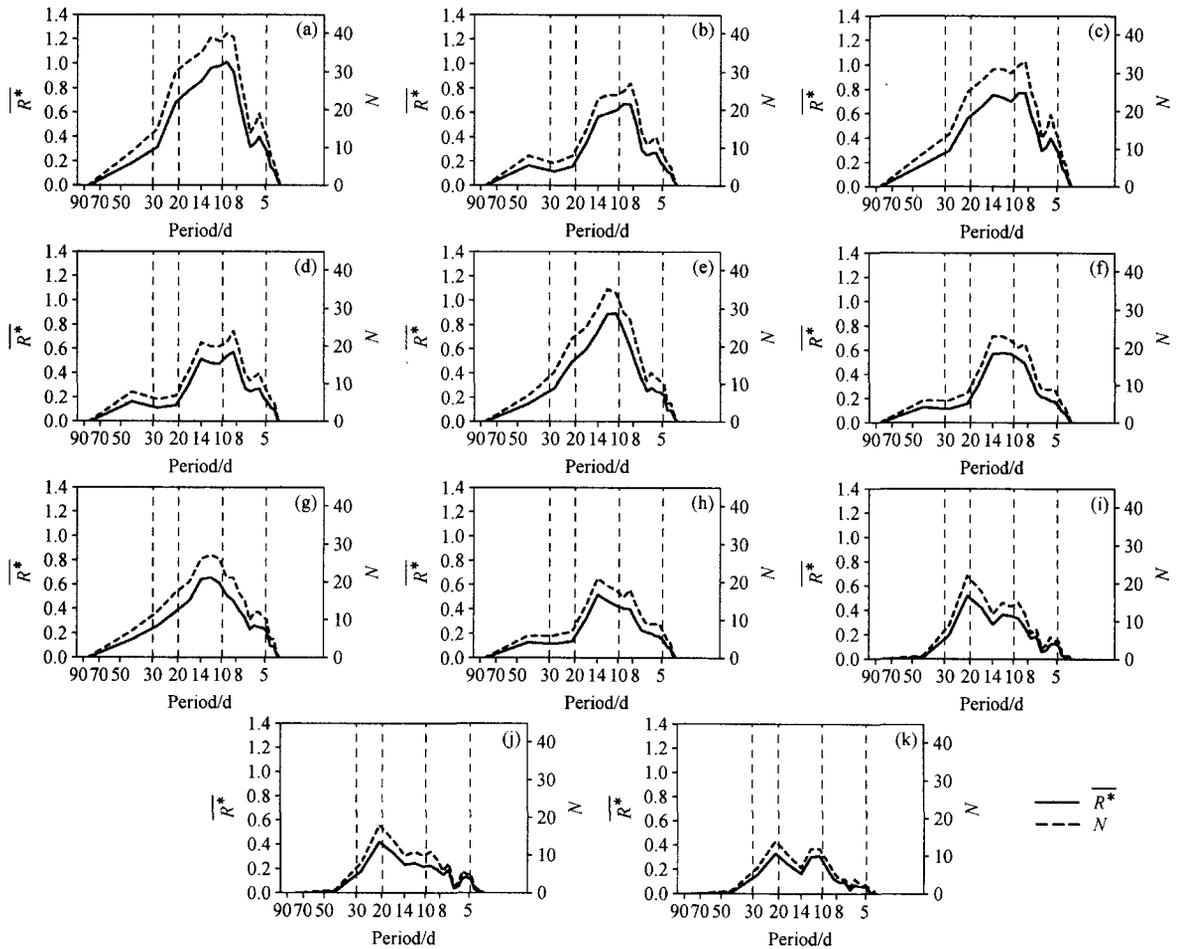


图 10 同图 5, 但为 SAMI 后半年 (7~12 月)

Fig. 10 Same as Fig. 5, except for SAMI in the second half year (from Jul to Dec)

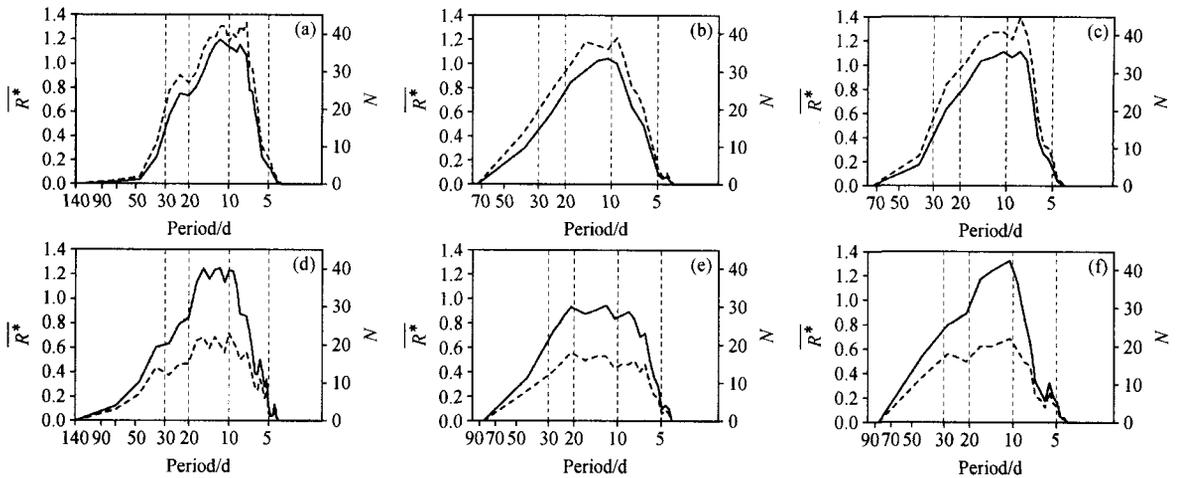


图 11 CPC-NAMI (1950~2005 年) (a) 全年、(b) 活跃期、(c) 非活跃期和 CPC-SAMI (1979~2005 年) (d) 全年、(e) 前半年、(f) 后半年标准化功率谱 $\overline{R^*}$ 合成及对应周期上功率谱通过显著性检验的年份总数统计 N

Fig. 11 The composite standardized power spectra ($\overline{R^*}$) and the total number of years (N) in the significant spectrum period: CPC-NAMI (1950-2005) (a) in the entire year, (b) in the active period, (c) in the non-active period; CPC-SAMI (1979-2005) (d) in the entire year, (e) in the first half year, (f) in the second half year

参考文献 (References)

- Ambaum M H P, Hoskins B J, Stephenson D B. 2001. Arctic oscillation or North Atlantic oscillation? [J]. *J. Climate*, 14 (16): 3495 - 3507.
- Baldwin M P. 2001. Annular modes in global daily surface pressure [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 28 (21): 4115 - 4118.
- Deser C. 2000. On the teleconnectivity of the "Arctic oscillation" [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 27 (6): 779 - 782.
- Dommenget D, Latif M. 2002. A cautionary note on the interpretation of EOFs [J]. *J. Climate*, 15 (2): 216 - 225.
- 范丽军, 李建平, 韦志刚, 等. 2003. 北极涛动和南极涛动的年变化特征 [J]. *大气科学*, 27 (3): 419 - 424. Fan Lijun, Li Jianping, Wei Zhigang, et al. 2003. Annual variations of the Arctic oscillation and the Antarctic oscillation [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 27 (3): 419 - 424.
- Fan L, Li J P, Wei Z G, et al. 2003. Annual variations of the Arctic oscillation and the Antarctic oscillation [J]. *Chinese J. Atmos. Sci.*, 27 (4): 352 - 358.
- Feldstein S B. 2000. The timescale, power spectra, and climate noise properties of teleconnection patterns [J]. *J. Climate*, 13 (24): 4430 - 4440.
- 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.
- Kerr R A. 1999. A new force in high-latitude climate [J]. *Science*, 284 (5412): 241 - 242.
- 李建平. 2005a. 北极涛动的物理意义及其与东亚大气环流的关系 [C]//俞永强, 陈文. 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. 2005a. Physical nature of the Arctic Oscillation and its relationship with East Asian atmospheric circulation [C]// Yu Yongqiang, Chen Wen. Air - Sea - Land Interactions in Asia Monsoon Region and Their Impacts on the Climate Variation in China (in Chinese). Beijing, China Meteorological Press, 169 - 176.
- 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 Dahe. Climate and Environmental Evolution in China (First Volume) (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press: 324 - 333.
- Li J, Wang J X L. 2003. A modified zonal index and its physical sense [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 30 (12): 1632.
- Limpasuvan V, Hartmann D L. 1999. Eddies and the annular modes of climate variability [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 26 (20): 3133 - 3136.
- Lorenz D J, Hartmann D L. 2001. Eddy - zonal flow feedback in the Southern Hemisphere [J]. *J. Atmos. Sci.*, 58 (21): 3312 - 3327.
- Lorenz D J, Hartmann D L. 2003. Eddy - zonal flow feedback in the Northern Hemisphere winter [J]. *J. Climate*, 16 (8): 1212 - 1227.
- 南素兰, 李建平. 2005. 春季南半球环状模与长江中下游夏季降水的关系 I. 基本事实 [J]. *气象学报*, 63 (6): 837 - 846. Nan S, Li J. 2005. The relationship between the summer precipitation in the Yangtze River valley and the boreal spring Southern Hemisphere annular mode. I: Basic facts [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 63 (6): 837 - 846.
- Peixoto J P, Oort A H. 1992. *Physics of Climate* [M]. New York, USA: American Institute of Physics, 520.
- 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. 2000a. Annular modes in the extratropical circulation. Part I: Month-to-month variability [J]. *J. Climate*, 13 (5): 1000 - 1016.
- Thompson D W J, Wallace J M, Hegerl G C. 2000b. Annular modes in the extratropical circulation. Part II: Trends [J]. *J. Climate*, 13 (5): 1018 - 1036.
- Thompson D W J, Lee S, Baldwin M P. 2002. Atmospheric processes governing the Northern Hemisphere annular mode/North Atlantic oscillation [M]. From the AGU Monograph on the NAO. AGU, 81 - 112.
- Wallace J M. 2000. North Atlantic oscillation/annular mode: Two paradigms-one phenomenon [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 126 (564): 791 - 805.
- Wallace J M, Thompson D W J. 2002. The Pacific center of action of the Northern Hemisphere annular mode: Real or artifact? [J]. *J. Climate*, 15 (14): 1987 - 1991.