

王瑞丽, 肖子牛, 朱克云, 等. 2015. 太阳活动变化对东亚冬季气候的非对称影响及可能机制 [J]. 大气科学, 39 (4): 815–826. Wang Ruili, Xiao Ziniu, Zhu Keyun, et al. 2015. Asymmetric impact of solar activity on the East Asian winter climate and its possible mechanism [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 39 (4): 815–826, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1410.14211.

太阳活动变化对东亚冬季气候的非对称影响及可能机制

王瑞丽¹ 肖子牛^{1,2} 朱克云¹ 高枏亭³

¹ 成都信息工程学院大气科学学院, 成都 610225

² 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 (LASG), 北京 100029

³ 中国气象局中高纬度环流系统与东亚季风研究开放实验室, 长春 130062

摘 要 基于 1959~2013 年的观测和再分析资料以及 10.7 cm (2800 MHz) 太阳射电通量资料, 本文分析了太阳活动变化与东亚冬季气候的相关关系, 分析结果表明: 太阳活动变化与东亚冬季大气环流有较好的相关性, 且在太阳活动的强、弱时期该相关关系存在很大差异, 在强太阳活动时期太阳活动变化与东亚冬季气候的联系更为显著, 而在弱太阳活动时期二者之间的直接联系微弱, 这表明太阳活动变化对东亚冬季气候的影响具有非对称性特征。在太阳活动较强的时期, 随着太阳活动的增强, 东亚中高纬对流层中层的大气环流倾向纬向型, 东亚大槽减弱, 850 hPa 出现异常偏南风, 地面上西伯利亚高压以及冬季风减弱, 东亚大部分地区气温显著偏高; 而在太阳活动较弱的时期, 太阳活动的年际差异与东亚冬季大气环流之间几乎不存在显著联系。分析太阳活动较强和较弱时期纬向平均纬向风的差异发现, 其间平流层行星波活动、热带西北太平洋海表温度的差异可能是造成这种非对称影响的重要原因。在强太阳活动时期, 平流层行星波在太阳活动的异常增强年有异常的从极地向赤道的水平传播, 高纬地区 E-P 通量 (Eliassen-Palm flux) 异常辐散, 导致中高纬西风及北极涛动 (AO) 增强, 同时热带西北太平洋海温异常偏冷, 海陆热力差异缩小, 大气环流经向度减弱, 东亚冬季风偏弱。

关键词 太阳活动强弱 非对称影响 东亚大槽 冬季风 行星波

文章编号 1006-9895(2015)04-0815-12

中图分类号 P461

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1410.14211

Asymmetric Impact of Solar Activity on the East Asian Winter Climate and Its Possible Mechanism

WANG Ruili¹, XIAO Ziniu^{1,2}, ZHU Keyun¹, and GAO Zongting³

¹ College of Atmospheric Science, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225

² State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics (LASG), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

³ Laboratory of Research for Middle-High Latitude Circulation System and East Asian Monsoon, China Meteorological Administration, Changchun 130062

Abstract The relationship between solar activity and the East Asian Winter Climate (EAWC) was investigated using observation and reanalysis data and solar 10.7 cm radio flux data from 1959 to 2013. The results show that solar activity

收稿日期 2014-06-17; 网络预出版日期 2014-10-20

资助项目 国家重大科学研究计划项目 2012CB957804, 国家自然科学基金项目 41175051

作者简介 王瑞丽, 女, 1989 年出生, 硕士研究生, 主要从事气候变化与气候模拟方面的研究。E-mail: WangRL_06@163.com

通讯作者 肖子牛, E-mail: xiaozn@lasg.iap.ac.cn

correlates well with the winter atmospheric circulation over East Asia (EA). However, interestingly, this relationship exhibits large differences between strong and weak solar activity periods, suggesting an asymmetric solar influence on the EAWC. Further investigation indicates that the linkage between solar activity and the EAWC is robust during active solar periods, while during inactive phases, the connection is fairly weak in comparison. During the active solar period, with strengthening of solar activity, the geopotential height in the mid-troposphere increases significantly over the mid-latitudes of the EA, resulting in a weakened East Asian Trough (EAT). Meanwhile, southerly anomalies exist at 850 hPa over EA, and the Siberian high is weakened in addition to the East Asian Winter Monsoon (EAWM) at the surface, giving rise to significantly positive temperature anomalies in most parts of the EA. Nevertheless, during inactive solar periods, there is almost no obvious link between the interannual variability of solar activity and the East Asian winter atmospheric circulation. Comparison of the strong solar period with the weak period shows that the abnormal planetary wave activity and Sea Surface Temperature (SST) anomalies over the northwestern Pacific could be crucial for such an asymmetric solar influence. During the active solar period, when solar activity becomes stronger, planetary waves in the stratosphere propagate toward the equator abnormally, resulting in the divergence of the Eliassen-Palm flux in high-latitude areas and enhancement of the Arctic Oscillation and high-latitude westerlies. Meanwhile, the SST in the tropical northwestern Pacific decreases with the increase in solar activity, which reduces the thermal contrast between the Eurasian continent and the Pacific, and weakens the meridional flow patterns, resulting in an inactive EAWM.

Keywords Active and inactive solar activity, Asymmetric influence, EAT, EAWM, Planetary waves

1 引言

东亚地处世界上最显著的季风区, 冬季气候变率十分复杂, 冬季风的增强常伴随着寒潮/暴风雪等灾害性天气的发生(黄荣辉等, 2007; 李崇银等, 2008)。长期以来, 围绕着东亚冬季气候的变化特征及其与中高纬环流和热带海温异常的联系国内外开展了一系列分析研究(Zhang et al., 1997; Gong et al., 2001; Wen, 2002; 康丽华等, 2006; 王遵娅和丁一汇, 2006), 但东亚地区冬季气候的变异机理及其预测依旧是个难题。自上个世纪末以来, 人们逐渐关注到平流层—对流层动力耦合对北半球(尤其是对东亚地区)冬季气候具有重要影响(Baldwin et al., 2003; 陈文和魏科, 2009), 而另一些研究指出, 平流层的环流异常及平流层与对流层的动力耦合深受太阳活动的调制(Chandra and McPeters, 1994; Shindell et al., 1999; Baldwin and Dunkerton, 2005; Haigh and Blackburn, 2006), 因此, 研究太阳活动变化与东亚大气环流异常之间的关联, 将有助于提高东亚冬季气候的可预报性。

由于北极涛动/北大西洋涛动(AO/NAO)在平流层—对流层耦合中有重要的作用(陆春晖和丁一汇, 2013; Gerber et al., 2010; Kodera and Kuroda, 2000; Baldwin and Dunkerton, 1999), 人们分析了AO/NAO对东亚冬季气候的影响(Chen and Zhou, 2012), 此外还进一步研究了AO/NAO对太阳活动

的响应(Ruzmaikin and Feynman, 2002)。这些研究结果表明, 在太阳活动峰值及其随后的几年内, AO/NAO倾向增强, 使得大西洋和欧洲地区出现显著的气候异常(Huth et al., 2007; Scaife et al., 2013), 而太阳活动较弱的时期, 往往伴随着低指数的AO/NAO(Weng, 2012), 此时冬季大西洋东部阻塞高压活动增强(Barriopedro et al., 2008)。一些分析认为, 这是造成蒙德极小期(Luterbacher et al., 2001; Shindell et al., 2001; Mann et al., 2009)及最近几年欧洲和北半球许多地区冬季严寒天气的重要原因(Lockwood et al., 2010)。进一步的分析发现, AO/NAO与太阳活动变化的关联在太阳活动强、弱时期并不一致, 存在非对称性。Kodera(2002)和Gimeno et al.(2003)的研究均表明, 当太阳活动活跃时, NAO与北半球海平面气压相关系数场的空间结构更接近AO, 具有半球尺度特征, 且信号从对流层垂直伸展至平流层; 而当太阳活动偏弱时, 这种信号被限制在对流层的北大西洋地区。Ogi et al.(2003)的研究也发现, 冬季NAO与来年春季气候的相关性在太阳活动高值年强于太阳活动低值年。Woollings et al.(2010)也注意到, 在太阳活动高值年, 欧亚冬季气候的太阳活动信号更强一些。Kodera and Kuroda(2002, 2005)对产生这类现象的原因进行了系统地研究, 认为太阳活动高值年的冬季早期, 平流层顶的副热带急流因辐射作用加强, 这种异常信号随季节的推进向极向下传播, 并通过与行星波的相互作用, 引起中高纬地区显著的

纬向风异常, 使 AO 更加活跃, 而在太阳活动低值年, 平流层纬向风异常的下传较弱, 对流层 AO 信号被限制在区域尺度上。因此, AO 对于东亚气候的影响也必将受到太阳活动的调制, Chen and Zhou (2012) 通过观测研究验证了这一点, 在太阳活动峰值年, 高指数 AO 能引起东北亚显著增暖, 而在太阳活动低值年, 增暖信号明显减弱。而另一方面, ENSO (El Niño/Southern Oscillation) 的变率及演变特征在太阳活动高低值年也不同 (Kryjov and Park, 2007; Calvo and Marsh, 2011; 周群和陈文, 2012), 通过调节 Walker 环流异常和西北太平洋异常反气旋的位置, 太阳活动的强弱变化可能调制 ENSO 与东亚冬季气候的联系 (Zhou et al., 2013)。

由以上的回顾不难发现, 前人关于太阳活动对北半球冬季气候具有非对称影响的研究主要集中在太阳活动对区域气候模态 (AO/NAO、ENSO 等) 与欧亚冬季气候关系的调制上, 而有关太阳活动强、弱时期太阳活动与东亚冬季气候直接关联的非对称性及其可能成因这一领域的阐述较少。为此, 本文首先分析了太阳活动变化与东亚冬季气候的联系, 然后根据太阳活动的强、弱时期分类, 分别分析了 10.7 cm 太阳射电通量与对流层海平面气压场、高度场、风场、近地面气温以及降水的联系。最后通过分析纬向平均纬向风、行星波以及海表温度对太阳活动的非对称响应, 初步解释了太阳活动与东亚冬季气候非对称联系的可能成因。

2 资料和方法

文中所使用的数据资料包括: (1) 美国国家海洋局 (NOAA) 数据中心 (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/correlation/solar.data> [2014-09-05]) 提供的 10.7 cm (2800 MHz) 太阳射电通量 (简称为 F10.7 cm), 它作为反映太阳活动强弱的指标被广泛应用, 其单位为 s.f.u. ($1 \text{ s.f.u.} = 10^{-22} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$); (2) 美国国家环境预测中心/国家大气研究中心 (NCEP/NCAR) 的再分析资料 (Kalnay et al., 1996), 包括月平均高度场、海平面气压场、风场 (u, v)、近地面气温和海表面温度场; (3) 全球降水气候中心 (GPCC) 的月平均降水合成数据 (<http://www.cgd.ucar.edu/cas/catalog/surface/precip/gpcc.html> [2014-09-05]); (4) 气候预测中心 (CPC) 提供的 AO 指数; (5) 我国国家气候中心 (CMA) 提供的 74 项环流指数中的月平均东亚大槽强度指数 (I_{CQ}), 杨

桂英和章淹 (1994) 指出 I_{CQ} 是根据东亚大槽所在区域的月平均 500 hPa 位势高度场得到的, 其计算公式为

$$I_{\text{CQ}} = \sum_{i=1}^5 H_i - (H_{\text{max}} - H_{\text{min}}),$$

其中, 右端第一项为沿槽线 $35^{\circ} \sim 55^{\circ} \text{N}$ 范围内的每隔 5 个纬度所读的高度值 (网格点上最小值, 略去百位数) 之和, 第二项为最大高度值与最小高度值之差。按定义可知, I_{CQ} 值越大 (小) 代表东亚大槽强度越弱 (强)。

在 1958 年以前, 由于平流层缺乏足够的观测, 平流层再分析资料并不可靠 (Kistler et al., 2001)。据此, 本研究选用 1959~2013 年共 55 年的资料进行统计分析, 并按惯例将 12 月和次年 1、2 月作为冬季, 1959 年代表 1958/1959 年冬季, 依次类推。此外, 分析中各要素均进行了冬季平均。对冬季平均资料进行了纬向谐波分析, 用纬向波数 1~3 波之和代表准定常行星波, 行星波活动的传播用 E-P 通量 (Eliassen-Palm flux) 来描述 (Andrews et al., 1987)。文中还采用了相关分析方法, 并利用 t 检验来验证其显著性。

3 太阳活动变化与东亚冬季气候的联系

首先我们通过相关分析考察太阳活动与东亚冬季气候的普遍联系, 图 1 给出了北半球冬季 F10.7 cm 与主要气象要素场相关系数的空间分布, 在 500 hPa 高度场上 (图 1a), 太阳活动与东亚中纬度地区的位势高度呈正相关, 而在亚洲北部为负相关, 其中日本上空通过显著性检验, 这意味着增强的太阳活动使东亚大槽减弱, 造成欧亚大陆上空南北气压梯度增强, 纬向环流更为活跃, 低层冷性高压的发展将会受到抑制。与对流层中层环流异常相匹配, 在 850 hPa 风场上 (图 1b), 日本以东洋面上存在显著的反气旋性环流, 东亚大部地区存在异常偏南风, 东亚冬季风随着太阳活动的增强而减弱。同时, 在海平面气压场上 (图 1c), 随着太阳活动的增强, 欧亚大陆西部气压减弱, 而东亚沿海区域气压呈升高态势, 对流层低层海陆气压差的减弱会导致不活跃的东亚冬季风。东亚大槽偏弱, 冬季风偏弱的环流背景不利于冷空气自高纬向南入侵, 因此在近地面气温场上 (图 1d), 包括我国东北和西北地区在内的东亚中纬度地区以及日本以

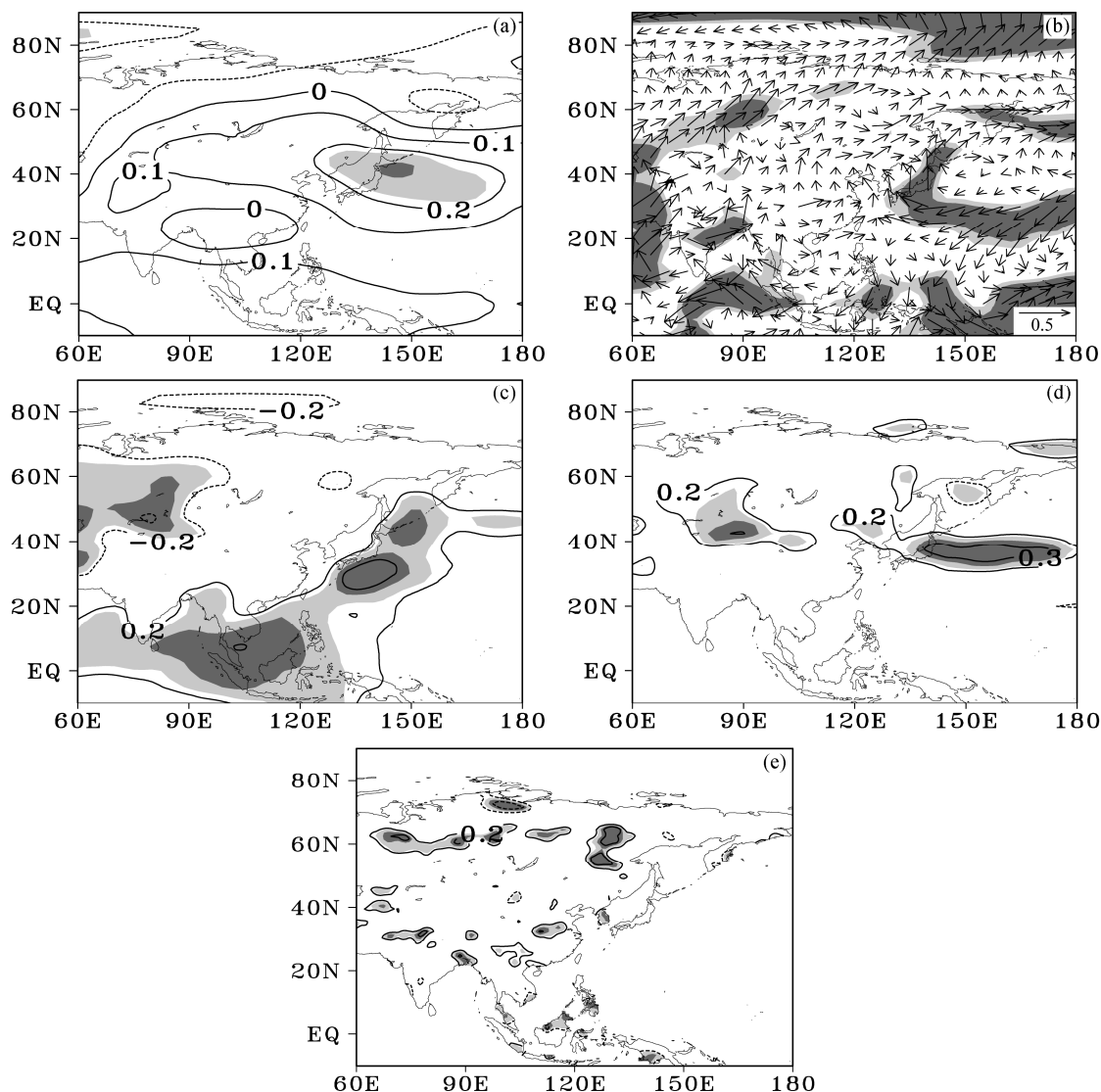


图1 1959~2013年冬季平均的(a) 500 hPa高度场、(b) 850 hPa风场、(c) 海平面气压场、(d) 近地面气温场、(e) 降水量场与F10.7 cm的相关系数分布。等值线间隔: 0.1 (c、d、e已略去绝对值小于0.2的等值线); 实线表示正相关, 虚线表示负相关; 浅色和深色阴影区域分别通过了90%、95%的信度检验

Fig. 1 Correlation between (a) 500-hPa geopotential height, (b) 850-hPa winds, (c) sea level pressure, (d) near-surface air temperature, (e) precipitation with the solar 10.7 cm radio flux (F10.7 cm) averaged for December-January-February (DJF) from 1959 to 2013. Contour interval is 0.1 (only contours with the absolute values more than 0.1 have been plotted in Figs. c, d, and e), and dashed lines indicate negative values. Light and heavy shadings indicate the correlations exceeding the 90% and 95% confidence levels, respectively

东洋面(40°N附近)的气温均与太阳活动呈显著正相关。此外, 由于中、高纬西风的增强有利于大西洋水汽向欧亚大陆输送, 在欧亚大陆60°N附近存在带状的降水正相关区域(图1e)。从上述分析可见, 太阳活动变化与东亚地区冬季气候要素具有广泛的联系。

虽然太阳活动变化与东亚冬季大气环流有较好的相关性, 但是我们也注意到, 太阳活动变化与东亚冬季环流的联系仅在有限区域显著。事实

上, 过去的一些研究也指出(段长春和孙绩华, 2006), 尽管太阳活动变化与我国大部地区冬季气温呈正相关, 但仅有北方的少部分地区能通过显著性检验。值得注意的是, Kodera (2002) 和 Kodera and Kuroda (2005) 发现在太阳活动较强的年份, AO/NAO的信号更为活跃, 空间尺度更大, 其信号可延伸至欧亚东部及其下游区域, 而 Chen and Zhou (2012) 也注意到AO与我国冬季气候的联系在强太阳活动时期更密切。这些研究表明, 太阳

活动变化与东亚冬季天气气候的联系可能在太阳活动活跃时期更为紧密。

东亚大槽是东亚地区冬季的主要环流系统之一，其强弱变化与东亚冬季风的异常活动高度相关（高辉，2007），极大地影响着广大区域的气温和降水。因此，我们选取 I_{CQ} 表征东亚大槽强度，分别分析在太阳活动强、弱时期 I_{CQ} 与 F10.7 cm 的变化特征以及二者之间的关系。图 2a 为 1959~2013 年北半球冬季平均 F10.7 cm 和 I_{CQ} 的时间序列，可以看到太阳活动具有显著的 11 年周期，同时也存在年际变化，这 55 年冬季平均 F10.7 cm 与 I_{CQ} 的相关系数为 0.297，通过了 95% 的信度检验。为了比较太阳活动强、弱时期二者相关关系的差别，我们以 F10.7 cm 值 1350 s.f.u. 为界，取大于该值的年份作为太阳活动高值（High Solar, HS）年，小于该值的年份则视为太阳活动低值（Low Solar, LS）年，分别得到 21 个 HS 年（强太阳活动时期）和 34 个 LS 年（弱太阳活动时期）。图 2b 给出了 F10.7 cm 和 I_{CQ} 的散点分布图，我们注意到 HS 年冬季平均 F10.7 cm 与 I_{CQ} 的方差都远大于其在 LS 年的方差，即相比于 LS 年，HS 年的太阳活动与东亚大槽都具有更大的

变率。而且很显然，太阳活动变化对东亚大槽的影响在强、弱太阳活动时期是不同的（表 1），在太阳活动较弱的时期 F10.7 cm 的变化与 I_{CQ} 的相关系数仅为 0.042，不能通过显著性检验，而在太阳活动相对较强的时期，F10.7 cm 的变化与 I_{CQ} 的相关系数高达 0.609，通过了 99% 的信度检验，即随着太阳活动增强，东亚大槽显著减弱。因此，太阳活动的变化与东亚大槽的联系在太阳活动强、弱时期是非对称的，在强太阳活动时期，太阳活动变化对东亚大槽的强度具有显著影响，而在弱太阳活动时期，二者之间的联系微弱。

表 1 1959~2013 年期间 HS 年和 LS 年 F10.7cm、 I_{CQ} 、AO 的相关系数

Table 1 Correlation coefficient between F10.7 cm, I_{CQ} , and Arctic Oscillation (AO) in HS and LS years for the period of 1959–2013

太阳活动年份	相关关系		
	F10.7 cm 与 I_{CQ}	F10.7 cm 与 AO	AO 与 I_{CQ}
1959~2013 年	0.297**	0.238*	0.363***
HS 年	0.609***	0.395*	0.465**
LS 年	0.042	0.265	0.258

*, **, *** 依次表示相关系数通过 90%、95%、99% 的信度检验。

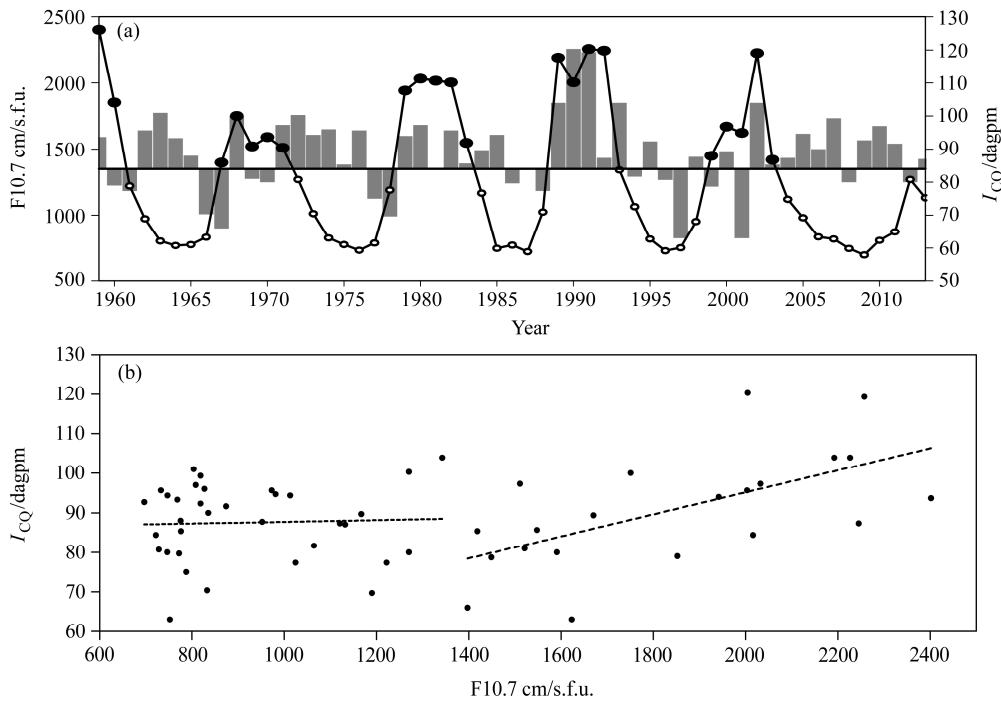


图 2 1959~2013 年冬季平均的 F10.7 cm 与 I_{CQ} 的 (a) 时间序列图，(b) 散点图及其分段线性趋势线。在图 (a) 中折线表示 F10.7 cm，柱状表示 I_{CQ} ，实心圆和空心圆分别表示 HS、LS 年

Fig. 2 The DJF-mean F10.7 cm and the intensity of East Asia Trough (EAT) (I_{CQ}) for the period of 1959–2013: (a) Time series; (b) scatter diagram and its piecewise linear regression. In (a), the polyline represents F10.7 cm, histogram represents I_{CQ} , and the filled/unfilled circles represent High/Low Solar (HS/LS) years, respectively

4 太阳活动变化对东亚冬季气候的非对称影响

上节对太阳活动变化与东亚大槽强度关系的分析初步表明,在太阳活动较强和较弱的时期其变化与东亚冬季气候联系的紧密程度可能是不同的。下面我们将从环流、气温、降水等方面进一步分析太阳活动变化与东亚冬季气候关系的非对称特征。图3给出了太阳活动强、弱时期500 hPa高度场、850 hPa风场以及海平面气压场与冬季平均F10.7 cm的相关系数的空间分布图,显而易见,强

太阳活动时期东亚冬季环流与太阳活动的联系远强于弱太阳活动时期。此外,相比于1959~2013年的普遍联系(图1),强太阳活动时期太阳活动年际变化与东亚区域各气象要素场的关系也更为密切。在强太阳活动时期太阳活动变化与500 hPa高度场相关系数的空间分布图上(图3a),太阳活动变化与整个东北亚地区的高度场呈显著的正相关,而与高纬度极地则呈相反地变化趋势,这意味着当太阳活动变化异常偏强时,东北亚为正的位势高度异常控制,东亚大槽减弱,而高纬度极地为负异常,极地低压增强,纬向环流倾向于增强,而太阳活动

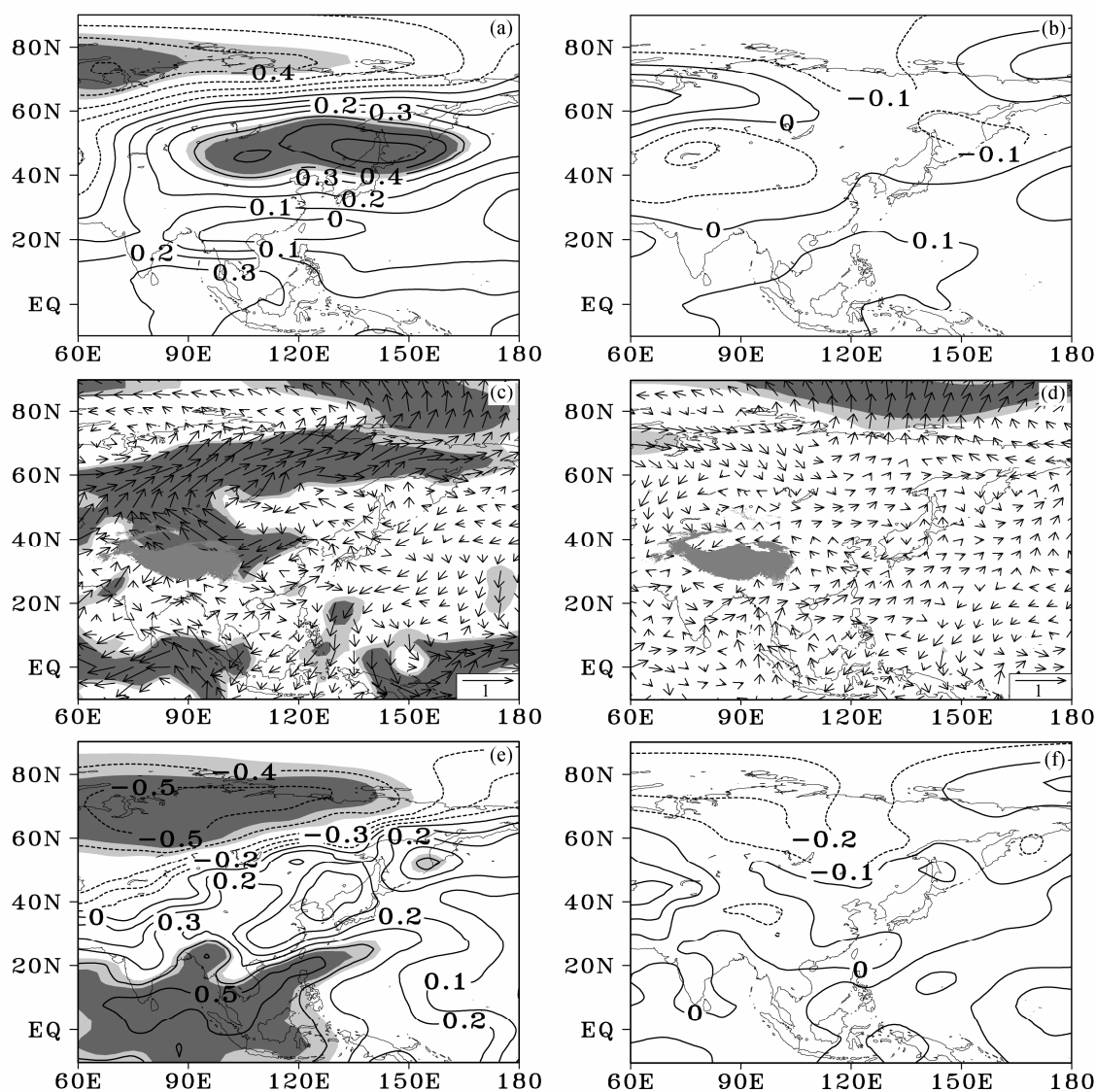


图3 HS年(左列)和LS年(右列)冬季平均气象要素场与F10.7 cm的相关系数空间分布:(a、b) 500 hPa高度场;(c、d) 850 hPa风场;(e、f) 海平面气压场。等值线间隔:0.1,实线表示正相关,虚线表示负相关;浅色和深色阴影区域分别通过了90%、95%的信度检验

Fig. 3 Correlation between (a, b) 500-hPa geopotential height, (c, d) 850-hPa winds, (e, f) sea level pressure averaged for DJF from 1959 to 2013 and F10.7 cm. HS years (left), and LS years (right). Contour interval is 0.1, solid/dashed lines indicate positive/negative correlation. Light and heavy shadings indicate the correlations exceeding the 90% and 95% confidence levels, respectively

较弱时期二者之间没有显著的直接联系(图 3b)。与之相对应,在 850 hPa 风场上(图 3c),强太阳活动时期 F10.7 cm 增强年份亚洲中高纬地区由显著的偏南风距平控制,这表明增强的太阳活动可能导致冬季风的减弱,同时,当太阳活动异常偏强时,热带西北太平洋地区为显著的西风异常,东北信风减弱。这种中、高纬强于低纬的环流异常型类似于 Wang et al. (2010) 提出的东亚冬季风的北方模式,该模式受中高纬环流异常影响较大,与 AO/NAO 存在较高的相关。有所不同的是,北方模式被认为主要是由前期秋季的雪盖异常以及北大西洋和印度洋的海温异常引起的,而我们的研究则揭示其变化也可能受到增强的太阳活动的调制。此外,与图 1b 比较可以注意到,在太阳活动活跃期,太阳活动变化与风场的联系无论是在空间范围上还是在强度上都远远强于二者在近 55 年来平均状况下的联系,而太阳活动较弱时期,相关性仅仅局限于北极附近(图 3d)。图 3e 给出了强太阳活动时期 F10.7 cm 与海平面气压场的相关,可以看到,亚洲海平面气压随着太阳活动的增强呈现南北偶极子型变化趋势,中高纬度气压与太阳活动呈显著的负相关,负相关中心位于亚洲西北部,同时,热带洋面上气压与太阳活动为显著的正相关,最大相关系数高于 0.5。这意味着当太阳活动变化为正异常时,西伯利亚高压会明显偏弱,与此同时热带洋面上气压偏高,这种气压配置会抑制冬季风和冷涌活动。而在太阳活动不活跃的时期(图 3f),海平面气压与太阳活动变化几乎不存在明显的相关关系。

从上面的讨论我们发现,太阳活动变化与东亚

冬季大气环流的关联在强太阳活动时期非常密切,而在弱太阳活动时期这种关系相当微弱,太阳活动变化与大气环流联系的这种非对称性也体现在其与近地面气温和降水的相关关系中。在太阳活动较强的时期(图 4a),随着太阳活动增强而减弱的冬季风会使得东亚地区气温偏高,因此 F10.7 cm 与东亚大部分地区的气温呈显著的正相关,在中纬地区的相关系数普遍达到 0.4 以上,最高相关系数甚至达到 0.7 以上,同时与低纬度减弱的东北信风相匹配(图 3c),东南亚的部分地区有降温出现, F10.7 cm 与该区域气温呈负相关。而在太阳活动相对较弱时期(图 4b),尽管 F10.7 cm 与东亚高纬度气温呈正相关而与低纬度气温呈负相关,但基本未能通过显著性检验。Miyazaki and Yasunari (2008) 曾系统地分析了东亚冬季气候变率的各个模式及其与环流异常和外强迫的关系,发现其中的第二模式,也就是所谓的“亚洲内部模式”,呈现出明显的年代际振荡,并与太阳活动 11 年周期密切相关。我们注意到,“亚洲内部模式”在中高纬与图 4a 给出的太阳活动变化与地面气温的相关分布较为相似,但这种联系仅在强太阳活动时期成立,弱太阳活动时期东亚的气温和环流与太阳活动变化并无密切联系(图 4b)。

图 5a、b 分别给出了欧亚地区太阳活动强、弱时期其变化与降水相关关系的空间分布,从图 5a 中可以发现,在强太阳活动时期,欧亚大陆 60°N 附近的降水与太阳活动变化呈显著正相关,青藏高原的西侧至南侧以及我国淮河至华南区域的冬季降水也呈现与太阳活动一致的变化趋势,与此同

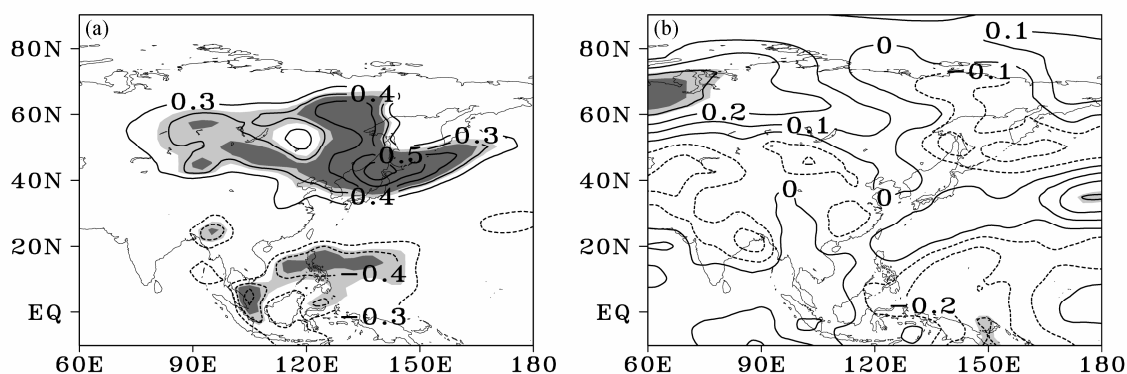


图 4 冬季平均近地面气温场与 F10.7 cm 的相关系数空间分布: (a) HS 年, 已略去绝对值小于 0.3 的等值线; (b) LS 年。等值线间隔为 0.1。实线表示正相关, 虚线表示负相关; 浅色和深色阴影区域分别通过了 90%、95% 的信度检验

Fig. 4 Correlation between the near-surface air temperature averaged for DJF and F10.7 cm: (a) HS years, only contours with the absolute values more than 0.2 have been plotted; (b) LS years. Contour interval is 0.1, and solid/dashed lines indicate positive/negative correlation. Light and heavy shadings indicate the correlations exceeding the 90% and 95% confidence levels, respectively

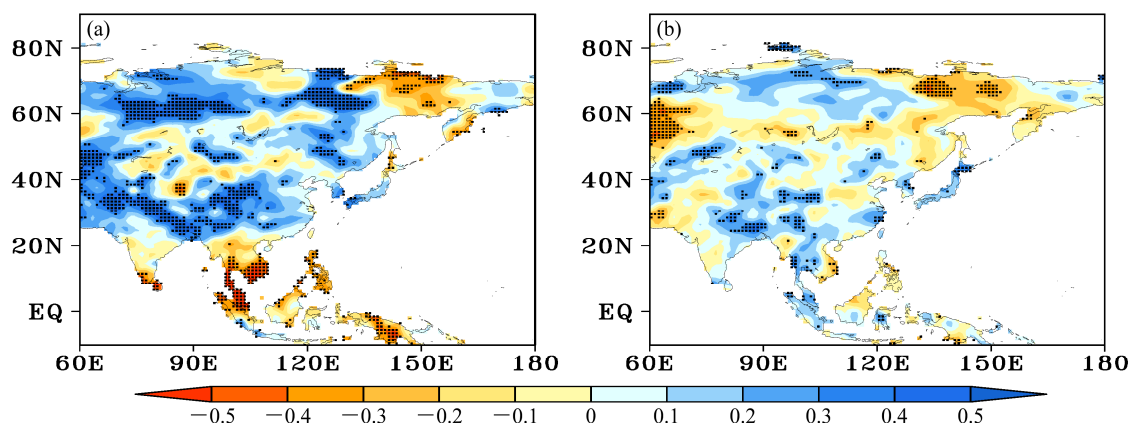


图5 冬季平均降水量场与F10.7 cm的相关系数空间分布: (a) HS年; (b) LS年。打点区域通过了90%的信度检验

Fig. 5 Correlation between the precipitation averaged for DJF and F10.7 cm: (a) HS years; (b) LS years. The dotted areas denote correlations above the 90% confidence level

时,海洋性大陆大部分地区的降水与太阳活动变化呈显著负相关。然而在太阳活动较弱的时期(图5b),整个东亚仅零星区域的降水与F10.7 cm有显著相关,这可能与这期间太阳信号较弱,降水更多地受到太阳活动以外其他因素的影响有关(何溪澄等,2006;房巧敏等,2007;况雪源等,2008)。由此可见,与大气环流的情形相对应,太阳活动变化与欧亚冬季温度和降水的联系在太阳活动强、弱时期也显示了非对称的特征。

5 可能机制讨论

太阳对气候影响的重要途径之一是通过臭氧的光化学作用导致平流层温度和环流异常,进而通过平流层—对流层耦合将异常信号传播到对流层(Gray et al., 2010)。当太阳活动较强时,热带平流层上层温度显著升高(Crooks and Gray, 2005; Frame and Gray, 2010),从而加强了平流层的经向温度梯度,使得平流层副热带地区西风加强,西风急流增强通过调制行星波活动造成中高纬地区平流层—对流层的动力耦合更加强烈,AO亦随着太阳活动的增强更为活跃(Kodera and Kuroda, 2002; Baldwin and Dunkerton, 2005; Kodera and Kuroda, 2005; Chen and Zhou, 2012)。因此,以下我们将通过分析纬向风场来初步探讨太阳活动强、弱时期其变化与东亚冬季气候非对称联系的可能成因。

图6给出了太阳活动强、弱时期冬季平均F10.7 cm与北半球纬向平均纬向风的相关关系在纬度和高度剖面上的分布,从图6a可见,在强太阳活动

时期60°N附近的纬向风与太阳活动变化呈显著正相关,即当太阳活动变化为正异常时,极锋急流增强,表现出AO正位相特征,且这种信号从对流层一直延伸到平流层低层,陈文等(2013)指出平流层绕极西风急流随太阳活动的变化可能是导致冬季欧亚区域温度异常南北反相变化的原因。同时副热带纬向风随着太阳活动的增强而减弱,对流层副热带急流的变化体现了欧亚大陆与西太平洋热力差异的异常(况雪源等,2008)。而太阳活动相对较弱时期(图6b),无论平流层还是对流层纬向风与太阳活动变化的相关关系均不显著。

图7是北半球冬季平均F10.7 cm与E-P通量(箭头)及其散度(等值线)的相关系数分布图,进一步展示了太阳活动强、弱时期其年际变化与行星波传播的联系特征。在太阳活动活跃时期(图7a),平流层E-P通量的水平分量与F10.7 cm呈显著的负相关,即随着太阳活动的增强平流层的行星波活动活跃,在水平方向上存在从极地向赤道的显著异常传播。同时,E-P通量散度在中纬度与太阳活动变化呈显著负相关,而在高纬度平流层呈正相关,意味着当太阳活动变化呈正异常时,伴随着行星波水平向赤道传播的增强,高纬度地区出现E-P通量的异常辐散,从而波动强迫促使纬向西风增强,而中纬度地区出现E-P通量的异常辐合,造成该区域纬向风减弱,这与图6a中副热带急流的减弱以及高纬度西风的增强对应。而在弱太阳活动时期(图7b),E-P通量与10.7 cm太阳射电通量之间的联系微弱,无大范围显著相关区,这可能是由于

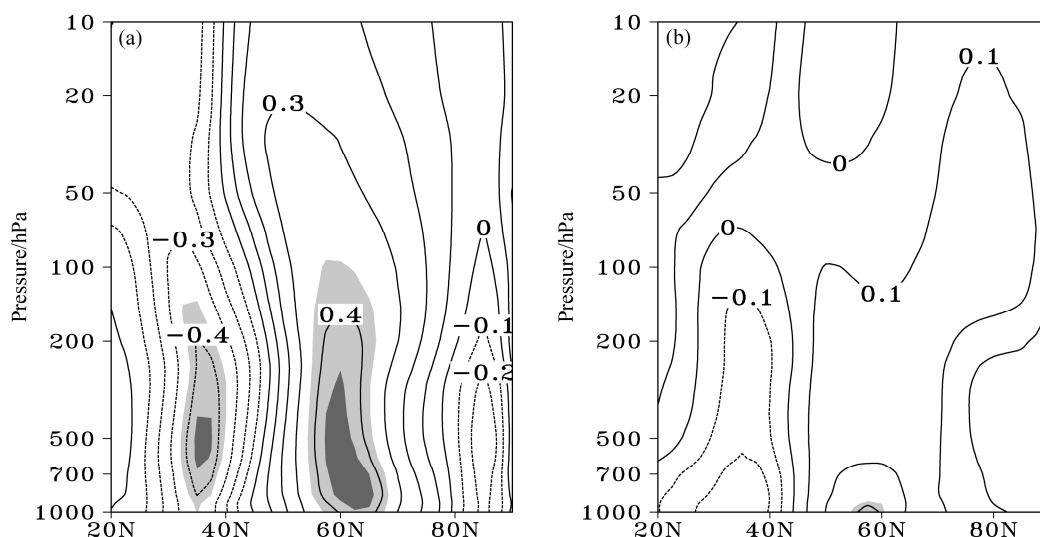


图6 冬季平均 F10.7 cm 与纬向平均纬向风的相关系数分布: (a) HS 年; (b) LS 年。等值线间隔 0.1, 实线表示正相关, 虚线表示负相关。浅色和深色阴影区域分别通过了 90%、95% 的信度检验

Fig. 6 Correlation between F10.7 cm averaged for DJF and the zonal-mean zonal winds: (a) HS years; (b) LS years. Contour interval is 0.1, and solid/dashed lines indicate positive/negative correlation. Light and heavy shadings indicate the correlations exceeding the 90% and 95% confidence levels, respectively

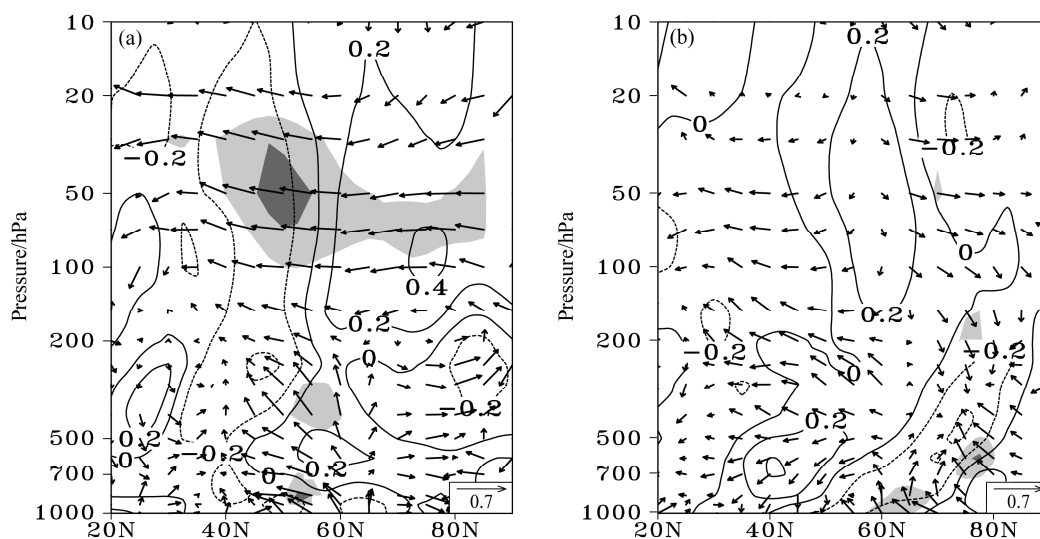


图7 冬季平均 F10.7 cm 与 E-P 通量(箭头)及其散度(等值线)的相关系数分布: (a) HS 年; (b) LS 年。等值线间隔 0.2, 实线表示正相关, 虚线表示负相关。浅色和深色阴影区域表示 E-P 通量通过了 90%、95% 的信度检验

Fig. 7 Correlation between F10.7 cm averaged for DJF and the Eliassen-Palm (E-P) flux (vector), its divergence (contour): (a) HS years; (b) LS years. Contour interval is 0.2, and solid/dashed lines indicate positive/negative correlation. Light and heavy shading indicate the correlations exceeding the 90% and 95% confidence levels, respectively

太阳活动弱的时期行星波更多的受其他因素的调制(傅晓卫和许有丰, 1994; 刘毅等, 2009; 陆春晖, 2011)。

以上讨论表明, 由于平流层行星波的传播在太阳活动强、弱时期与太阳活动变化之间联系的非对称性, 平—对流层 AO 对太阳活动的响应也存在明

显差异。AO 与太阳活动变化在太阳活动活跃时期呈显著正相关, 并通过平—对流层动力耦合使得大气纬向环流对太阳活动变化产生响应, 从而引起对流层冬季季风和气候的异常变化; 而在弱太阳活动时期这种联系不明显, 表 1 中 F10.7 cmAO 指数的关系也支持这一结论, 此外 AO 与东亚大槽

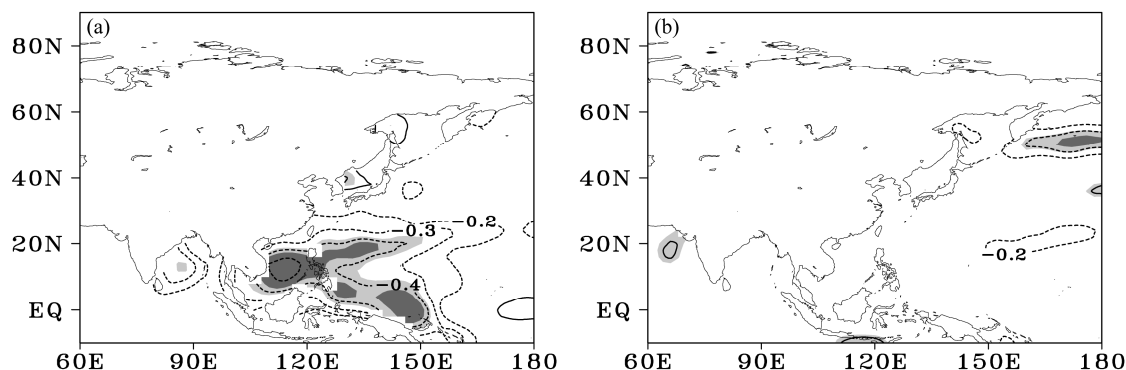


图8 冬季平均 F10.7 cm 与海表面温度的相关系数空间分布: (a) HS 年; (b) LS 年。等值线间隔 0.1, 绝对值小于 0.2 的等值线已略去。实线表示正相关, 虚线表示负相关。浅色和深色阴影区域分别通过了 90%、95% 的信度检验

Fig. 8 Correlation between F10.7 cm averaged for DJF and the sea surface temperature: (a) HS years; (b) LS years. Contour interval is 0.1, only contours with the absolute values more than 0.1 have been plotted, and solid/dashed lines indicate positive/negative correlation. Light and heavy shadings indicate the correlations exceeding the 90% and 95% confidence levels, respectively

的联系也与之一致。因此, 在强、弱太阳活动时期 AO 信号与太阳活动变化联系的差异性, 是太阳活动与东亚冬季气候存在非对称性联系的重要原因。

过去的研究表明, 除了中、高纬大气环流异常外, 海洋热力差异的改变 (尤其是热带地区海温的异常) 对东亚冬季气候也存在显著影响, 布和朝鲁和纪立人 (1999) 的研究表明强 (弱) 东亚冬季风年的热带中西太平洋海表温度为正 (负) 距平, 海温的异常作为热力强迫, 作用于热带外地区, 会影响到东亚冬季风的活动。我们注意到太阳活动与冬季西北太平洋海温也有联系 (图略), 并且在太阳活动强、弱时期该区域海表温度与太阳活动变化的相关关系也具有差异性。图 8a、b 分别给出了太阳活动强、弱时期其变化与海表温度相关系数的空间分布, 在强太阳活动时期 (图 8a), 热带西北太平洋到中国南海为显著负相关区, 而在太阳活动不活跃的时期 (图 8b), 热带西北太平洋海温与太阳活动变化没有显著的相关关系, 这与近地面气温对太阳活动的响应一致 (图 4)。如果用本文前面所用的 I_{CQ} 高低值的典型年份做合成海温场 (图略), 同样可以看到在中国南海和西北太平洋热带地区为显著的海温负异常, 即东亚冬季风弱年 (相对于东亚冬季风强年) 热带西北太平洋海温异常偏低, 而北太平洋海温偏高 (李崇银, 1988)。然而, 热带西北太平洋暖池海温的变化究竟是冬季风异常造成的后果还是太阳活动对低纬度地区海温的直接影响, 目前尚不清楚, 还需要进一步的研究分析。

6 小结

本文在讨论了太阳活动变化与东亚冬季大气环流相关关系及其气候效应的基础上, 根据 10.7 cm 太阳射电通量的高、低分析了强、弱太阳活动时期太阳活动变化与东亚冬季气候联系的非对称性, 并对其可能机制进行了探讨。主要得出如下结论:

(1) 太阳活动变化与东亚冬季大气环流存在较好的相关关系, 而且事实上太阳活动强、弱时期其变化与东亚冬季大气环流的联系具有显著的非对称性特征, 太阳活动变化与东亚冬季气候的相关性在太阳活动较强时期明显强于太阳活动较弱时期, 这种相关关系仅在太阳活动较强的时期显著。

(2) 在强太阳活动时期, 随着太阳活动的增强, 冬季东亚中高纬对流层中层的大气环流倾向纬向型, 东亚大槽减弱, 冷空气活动较弱, 东亚大部地区气温显著偏高, 中高纬降水增多; 而在弱太阳活动时期, 太阳活动的年际差异并不对应东亚冬季大气环流的显著不同, 二者之间几乎不存在显著联系。

(3) 强、弱太阳活动时期平流层行星波活动、热带西北太平洋海表温度的差异可能是造成这种非对称影响的重要原因。在强太阳活动时期, 平流层行星波的水平传播与太阳活动变化具有显著的相关关系, 随着太阳活动的异常增强, 高纬地区 E-P 通量辐散增强, 平流层—对流层耦合导致中高纬度西风及 AO 出现一致的正异常响应, 使得东亚大槽、西伯利亚高压等冬季风系统成员显著偏弱, 同时

热带西北太平洋海温异常偏冷, 海陆热力差异缩小, 大气环流经向度的减弱, 东亚冬季风偏弱。

本文虽然揭示了太阳活动强、弱时期太阳活动变化与东亚冬季气候的联系具有显著非对称性的客观事实, 但对其机制仅仅进行了初步讨论, 一些问题还有待深入探讨, 如太阳活动对热带海温的影响过程究竟如何, 还需要做进一步的研究和探索。

参考文献 (References)

- Andrews D G, Holton J R, Leovy C B. 1987. Middle Atmosphere Dynamics [M]. Reeding: Academic press, 133–136.
- 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. 2005. The solar cycle and stratosphere–troposphere dynamical coupling [J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 67 (1–2): 71–82.
- Baldwin M P, Thompson D W J, Shuckburgh E F, et al. 2003. Weather from the stratosphere? [J]. *Science*, 301 (5631): 317–319.
- Barriopedro D, Garcia-Herrera Ro, Huth R. 2008. Solar modulation of Northern Hemisphere winter blocking [J]. *J. Geophys. Res.*, 113 (D14): D14118, doi:10.1029/2008JD009789.
- 布和朝鲁, 纪立人. 1999. 东亚冬季风活动异常与热带太平洋海温异常 [J]. *科学通报*, 44 (3): 252–259. Bueh Cholaw, Ji Liren. 1999. East Asian winter monsoon anomalies and anomaly tropical Pacific SST [J]. *Chinese Science Bulletin (in Chinese)*, 44 (3): 252–259.
- Calvo N, Marsh D R. 2011. The combined effects of ENSO and the 11 year solar cycle on the Northern Hemisphere polar stratosphere [J]. *J. Geophys. Res.*, 116 (D23), doi:10.1029/2010JD015226.
- Chandra S, McPeters R D. 1994. The solar cycle variation of ozone in the stratosphere inferred from Nimbus 7 and NOAA 11 satellites [J]. *J. Geophys. Res.*, 99 (D10): 20665–20671.
- 陈文, 魏科. 2009. 大气准定常行星波异常传播及其在平流层影响东亚冬季气候中的作用 [J]. *地球科学进展*, 24 (3): 272–285. Chen W, Wei K. 2009. Anomalous propagation of the quasi-stationary planetary waves in the atmosphere and its roles in the impact of the stratosphere on the East Asian winter climate [J]. *Advances in Earth Sciences (in Chinese)*, 24 (3): 272–285.
- 陈文, 魏科, 王林, 等. 2013. 东亚冬季风气候变异和机理以及平流层过程的影响 [J]. *大气科学*, 37 (2): 425–438. Chen W, Wei K, Wang L, et al. 2013. Climate variability and mechanisms of the East Asian winter monsoon and the impact from the stratosphere [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 37 (2): 425–438.
- Chen W, Zhou Q. 2012. Modulation of the Arctic Oscillation and the East Asian winter climate relationships by the 11-year solar cycle [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 29 (2): 217–226.
- Crooks S A, Gray L J. 2005. Characterization of the 11-year solar signal using a multiple regression analysis of the ERA-40 dataset [J]. *J. Climate*, 18 (7): 996–1015.
- 段长春, 孙绩华. 2006. 太阳活动异常与降水和地面气温的关系 [J]. *气象科技*, 34 (4): 381–386. Duan C C, Sun J H. 2006. Relationship between abnormal solar activities and precipitation and temperature in China [J]. *Meteorological Science and Technology (in Chinese)*, 34 (4): 381–386.
- 房巧敏, 龚道溢, 毛睿. 2007. 中国近 46 年来冬半年日降水变化特征分析 [J]. *地理科学*, 27 (5): 711–717. Fang Q M, Gong D Y, Mao R. 2007. Changes of daily precipitation of China in wintertime during the last 46 years [J]. *Scientia Geographica Sinica (in Chinese)*, 27 (5): 711–717.
- Frame T H A, Gray L J. 2010. The 11-yr solar cycle in ERA-40 data: An update to 2008 [J]. *J. Climate*, 23 (8): 2213–2222.
- 傅晓卫, 许有丰. 1994. 地形和热源对冬季定常行星波形成的影响 [J]. *大气科学*, 18 (1): 1006–9895. Fu X W, Xu Y F. 1994. The effects of topography and heat source on the formation of the standing planetary waves in winter [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 18 (1): 1006–9895.
- 高辉. 2007. 东亚冬季风指数及其对东亚大气环流异常的表征 [J]. *气象学报*, 65 (2): 272–279. Gao H. 2007. Comparison of four East Asian winter monsoon indices [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 65 (2): 272–279.
- Gerber E P, Baldwin M P, Akiyoshi H, et al. 2010. Stratosphere–troposphere coupling and annular mode variability in chemistry–climate models [J]. *J. Geophys. Res.*, 115 (D3), doi:10.1029/2009JD013770.
- Gimeno L, de la Torre L, Nieto R, et al. 2003. Changes in the relationship NAO–Northern Hemisphere temperature due to solar activity [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 206 (1–2): 15–20.
- Gong D Y, Wang S W, Zhu J H. 2001. East Asian winter monsoon and arctic oscillation [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 28 (10): 2073–2076.
- Gray L J, Beer J, Geller M, et al. 2010. Solar influences on climate [J]. *Rev. Geophys.*, 48 (4), doi:10.1029/2009RG000282.
- Haigh J D, Blackburn M. 2006. Solar influences on dynamical coupling between the stratosphere and troposphere [J]. *Space Sci. Rev.*, 125 (1–4): 331–344.
- 何溪澄, 丁一汇, 何金海, 等. 2006. 中国南方地区冬季降水异常的分析 [J]. *气象学报*, 64 (5): 594–604. He X C, Ding Y H, He J H, et al. 2006. An analysis on anomalous precipitation in southern China during winter monsoons [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 64 (5): 594–604.
- 黄荣辉, 魏科, 陈际龙, 等. 2007. 东亚 2005 年和 2006 年冬季风异常及其与准定常行星波活动的关系 [J]. *大气科学*, 31 (6): 1033–1048. Huang R H, Wei K, Chen J L, et al. 2007. The East Asian winter monsoon anomalies in the winters of 2005 and 2006 and their relations to the quasi-stationary planetary wave activity in the Northern Hemisphere [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 31 (6): 1033–1048.
- Huth R, Bochniček J, Hejda P. 2007. The 11-year solar cycle affects the intensity and annularity of the Arctic Oscillation [J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 69 (9): 1095–1109.
- 康丽华, 陈文, 魏科. 2006. 我国冬季气温年代际变化及其与大气环流异常变化的关系 [J]. *气候与环境研究*, 11 (3): 330–339. Kang L H, Chen W, Wei K. 2006. The interdecadal variation of winter temperature in China and its relation to the anomalies in atmospheric general circulation [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 11 (3): 330–339.
- Kistler R, Collins W, Saha S, et al. 2001. The NCEP-NCAR 50-year

- reanalysis: Monthly means CD-ROM and documentation [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 82 (2): 247-267.
- Kodera K. 2002. Solar cycle modulation of the North Atlantic Oscillation: Implication in the spatial structure of the NAO [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 29 (8): 59-51-59-54.
- Kodera K, Kuroda Y. 2000. Tropospheric and stratospheric aspects of the Arctic Oscillation [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 27 (20): 3349-3352.
- Kodera K, Kuroda Y. 2002. Dynamical response to the solar cycle [J]. *J. Geophys. Res.*, 107 (D24): ACL 5-1-ACL 5-12, 27.
- Kodera K, Kuroda Y. 2005. A possible mechanism of solar modulation of the spatial structure of the North Atlantic Oscillation [J]. *J. Geophys. Res.*, 110 (D2), doi:10.1029/2004JD005258.
- Kryjov V N, Park C K. 2007. Solar modulation of the El-Niño/Southern Oscillation impact on the Northern Hemisphere annular mode [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 34 (10): 10701, doi:10.1029/2006GL028015.
- 况雪源, 张耀存, 刘健. 2008. 对流层上层副热带西风急流与东亚冬季风的关系 [J]. *高原气象*, 27 (4): 701-712. Kuang X Y, Zhang Y C, Liu J. 2008. Relationship between subtropical upper-tropospheric westerly jet and East Asian winter monsoon [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 27 (4): 701-712.
- 李崇银. 1988. 频繁的强东亚大槽活动与 El Niño 的发生 [J]. *中国科学 (D 辑)*, 18 (6): 667-674. Li C Y. 1988. Frequent strong East Asian trough activity and the occurrence of El Niño [J]. *Science in China (Series D) (in Chinese)*, 18 (6): 667-674.
- 李崇银, 杨辉, 顾薇. 2008. 中国南方雨雪冰冻异常天气原因的分析 [J]. *气候与环境研究*, 13 (2): 113-122. Li C Y, Yang H, Gu W. 2008. Cause of severe weather with cold air, freezing rain and snow over South China in January 2008 [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 13 (2): 113-122.
- 刘毅, 刘传熙, 陆春晖. 2009. 平流层爆发性增温中平流层环流及化学成分变化过程研究 [J]. *地球科学进展*, 24 (3): 298-307. Liu Y, Liu C X, Lu C H. 2009. Impacts of the stratospheric sudden warming on the stratospheric circulation and chemical tracers [J]. *Advances in Earth Science (in Chinese)*, 24 (3): 298-307.
- Lockwood M, Harrison R G, Woollings T, et al. 2010. Are cold winters in Europe associated with low solar activity? [J]. *Environ. Res. Lett.*, 5 (2): 024001, doi:10.1088/1748-9326/5/2/024001.
- 陆春晖. 2011. 平流层环流的变化特征及其对 ENSO 海温异常和太阳周期活动的响应 [D]. 中国科学院研究生院博士学位论文, 73pp. Lu C H. 2011. Variation of stratospheric circulation and its response to ENSO sea surface temperature anomalies and the solar cycle activity [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 73pp.
- 陆春晖, 丁一汇. 2013. 平流层与对流层相互作用的研究进展 [J]. *气象科技进展*, 3 (2): 6-21. Lu C H, Ding Y H. 2013. Progress in the study of stratosphere-troposphere interaction [J]. *Advances in Meteorological Science and Technology (in Chinese)*, 3 (2): 6-21.
- Luterbacher J, Rickli R, Xoplaki E, et al. 2001. The late Maunder minimum (1675-1715)—A key period for studying decadal scale climatic change in Europe [J]. *Climatic Change*, 49 (4): 441-462.
- Mann M E, Zhang Z H, Rutherford S, et al. 2009. Global signatures and dynamical origins of the little ice age and medieval climate anomaly [J]. *Science*, 326 (5957): 1256-1260.
- Miyazaki C, Yasunari T. 2008. Dominant interannual and decadal variability of winter surface air temperature over Asia and the surrounding oceans [J]. *J. Climate*, 21 (6): 1371-1386.
- Ogi M, Yamazaki K, Tachibana Y. 2003. Solar cycle modulation of the seasonal linkage of the North Atlantic Oscillation (NAO) [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 30 (22), doi:10.1029/2003GL018545.
- Ruzmaikin A, Feynman J. 2002. Solar influence on a major mode of atmospheric variability [J]. *J. Geophys. Res.*, 107 (D14): ACL 7-1-ACL 7-11.
- Scaife A A, Ineson S, Knight J R, et al. 2013. A mechanism for lagged North Atlantic climate response to solar variability [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 40 (2): 434-439.
- Shindell D, Rind D, Balachandran N, et al. 1999. Solar cycle variability, ozone, and climate [J]. *Science*, 284 (5412): 305-308.
- Shindell D T, Schmidt G A, Mann M E, et al. 2001. Solar forcing of regional climate change during the Maunder minimum [J]. *Science*, 294 (5549): 2149-2152.
- Wang B, Wu Z W, Chang C P, et al. 2010. Another look at interannual-to-interdecadal variations of the East Asian winter monsoon: The northern and southern temperature modes [J]. *J. Climate*, 23 (6): 1495-1512.
- 王遵亲, 丁一汇. 2006. 近 53 年中国寒潮的变化特征及其可能原因 [J]. *大气科学*, 30 (6): 1068-1076. Wang Z Y, Ding Y H. 2006. Climate change of the cold wave frequency of China in the last 53 years and the possible reasons [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 30 (6): 1068-1076.
- Wen C. 2002. Impacts of El Niño and La Niña on the cycle of the East Asian winter and summer monsoon [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 26 (5): 595-610.
- Weng H Y. 2012. Impacts of multi-scale solar activity on climate. Part I: Atmospheric circulation patterns and climate extremes [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 29 (4): 867-886.
- Woollings T, Lockwood M, Masato G, et al. 2010. Enhanced signature of solar variability in Eurasian winter climate [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 37 (20), doi:10.1029/2010GL044601.
- 杨桂英, 章淹. 1994. 冬季东亚大槽异常与 El Niño 的关系 [J]. *应用气象学报*, 5 (1): 114-118. Yang G Y, Zhang Y. 1994. The relationship between anomalous trough over East Asia and El Niño [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 5 (1): 114-118.
- Zhang Y, Sperber K R, Boyle J S. 1997. Climatology and interannual variation of the East Asian winter monsoon: Results from the 1979-95 NCEP/NCAR reanalysis [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 125 (10): 2605-2619.
- 周群, 陈文. 2012. 太阳活动 11 年周期对 ENSO 事件海温异常演变和东亚降水的影响 [J]. *大气科学*, 36 (4): 851-862. Zhou Q, Chen W. 2012. Influence of the 11-year solar cycle on the evolution of ENSO-related SST anomalies and rainfall anomalies in East Asia [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 36 (4): 851-862.
- Zhou Q, Chen W, Zhou W. 2013. Solar cycle modulation of the ENSO impact on the winter climate of East Asia [J]. *J. Geophys. Res.*, 118 (11): 5111-5119.