

# 太阳活动影响气候的放大过程之时空选择性

肖子牛<sup>1</sup> 霍文娟<sup>1,2</sup>

(1 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;

2 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 太阳是形成地球气候的原始驱动力之一, 但太阳活动变化对气候的影响究竟有多大, 其机制和途径是什么, 是否存在放大效应, 一直是有争议的一个问题。结合国家重大科学研究计划“天文与地球运动因子对气候变化的影响研究”一些研究进展, 综合归纳了太阳活动变化对气候系统一些关键环节的影响和作用, 阐述了气候系统对太阳活动的响应具有显著的时空选择性。指出太阳活动通过季风活动通道, 可能将太阳活动对极区和西太平洋热带对流区的影响放大, 并最终影响全球气候。

**关键词:** 太阳活动, 气候, 时空选择性

**DOI:** 10.3969/j.issn.2095-1973.2016.03.019

## Influences of Solar Activity on Climate: the Spatio-temporal Selectivity of the Amplification Process

Xiao Ziniu<sup>1</sup>, Huo Wenjuan<sup>1,2</sup>

(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 University of Chinese Academy of Sciences,

Beijing 100049)

**Abstract:** Solar is one of the original driving forces for the earth climate formation, however, how much influence does the solar activity on the earth climate? What are the mechanisms and modes involved in the progresses? And the amplification effect proposed by predecessors is still on debate. Based on the advances in the national basic research program of China that “a study of impacts of astronomical and earthly motility factors on climate change”, this paper provides an overview of the influence and effect of solar variability on some critical components of climate system. The spatio-temporal selectivity in the climate system responses to solar activity forcing is described. We point out that the solar activity effect on polar region and convective region over tropical Pacific Ocean can be amplified by the monsoon activity, and ultimately affect the global climate.

**Keywords:** solar activity, climate, spatio-temporal selectivity

### 0 引言

太阳进入目前所处的第24太阳活动周期以来, 太阳活动异常平静, 全球温度的变暖趋势放缓, 而同时全球许多地区出现异常严寒极端事件<sup>[1-3]</sup>。人们认为, 这很可能与异常弱的太阳活动导致了北大西洋涛动 (NAO) 或北极涛动 (AO) 的异常有关系<sup>[1-6]</sup>。虽然IPCC 第五次评估报告已比较确定地将太阳总辐射 (solar irradiance) 波动对气候系统的外强迫效应置于较低的水平, 但同时也明确指出, 太阳活动有可能通过一些放大过程对气候变化产生显著影响<sup>[7]</sup>。因此, 也有人认为, 太阳活动对当前全球气候变化的影响是

不可忽视的<sup>[8]</sup>, 最近的低太阳活动可能是1998年以来气候变暖减缓的原因之一<sup>[9-12]</sup>。但迄今为止, 尽管人们在气候系统的很多方面均发现了显著的太阳活动信号, 由于太阳活动对大气的作用机制仍然不清楚, 太阳活动对气候影响究竟如何仍然是一个需要科学界继续关注的未解难题。本文将围绕太阳活动影响的时空差异性, 综合近年来的研究进展, 从气候系统对太阳活动变化的响应过程出发, 探索太阳活动不同机制影响区域气候和全球气候的协同作用效应, 提出太阳活动影响气候系统及可能存在放大过程的途径。

### 1 太阳活动影响气候的时空差异性

太阳辐射变化影响全球气温的幅度是很小的, 卫星监测数据显示, 近几个太阳周, 太阳总辐照度 (total solar irradiance, TSI) 的变化量仅为 $1.3\text{W/m}^2$ ,

收稿日期: 2016年2月18日; 修回日期: 2016年3月29日

第一作者: 肖子牛 (1965—), Email: xiaozn@lasg.iap.ac.cn

资助信息: 国家重大科学研究计划项目 (2012CB957804)

约占太阳总辐射的0.1%，其引起的地球表面温度变化不超过0.1℃，不足以引起显著的气候变化<sup>[13]</sup>。但过去众多的研究表明，太阳活动与气候现象具有广泛的联系<sup>[14-23]</sup>。不过，太阳活动在全球的影响并不完全一致，具有很大的差异性，在一些特殊的地区和大气环流系统中，对太阳活动的变化更为敏感。在这些关键的环节中，太阳活动变化可能具有放大的气候效应。

### 1.1 太阳活动对极地大气环流的影响

一些研究表明，太阳活动与AO或NAO的相位有密切的联系<sup>[24-25]</sup>，在太阳活动峰值及其随后的几年内，AO/NAO倾向增强，给大西洋和欧洲地区带来显著的气候异常<sup>[26-27]</sup>，而太阳活动较弱的时期，往往伴随着低指数的AO/NAO<sup>[28]</sup>，此时冬季大西洋东部阻塞高压活动增强<sup>[29]</sup>。同时，太阳活动与极地环流型的存在非对称性，在太阳活跃期，北半球海平面气压变化的空间结构更接近AO，具有半球特征，而在太阳非活跃期，信号被局限在大西洋地区，AO较弱，更像NAO型<sup>[26, 30-33]</sup>。丁一汇等<sup>[34]</sup>指出，在年代际尺度上，AO和太平洋年代际振荡处于负（正）位相，东亚冬季风偏强（弱），中国冬季气温偏低（高）。由于AO或NAO对北半球的气候，尤其是东亚冬季风有重要的影响<sup>[35]</sup>，因此，AO或NAO对太阳活动的响应可能是太阳影响气候异常的重要环节<sup>[25, 36]</sup>。

Zhao等<sup>[37]</sup>研究发现，北半球冬季中高纬存在一种稳定的行星尺度的雪气耦合模态——SNAO模态，统计检测分析表明，该模态与前秋和后春的大气环流模和积雪之间存在密切的关系。利用近140年来的长时间序列资料，进一步检测分析该模态与自然因子（AO、AAO、西伯利亚高压、太阳周期活动和火山活动）同人类活动（温室气体等）的关系，可以发

现，欧洲积雪异常和极涡异常分别是SNAO模态中的积雪和大气中的关键因子。

王瑞丽等<sup>[38]</sup>利用10.7cm太阳射电通量资料研究分析了太阳活动变化与AO的关系，发现两者的联系主要体现在太阳活动强的时期，而在太阳活动弱的时期两者并没有显著的关系（表1）。表1给出了太阳射电通量F10.7cm、东亚大槽 $I_{CO}$ 和AO的相互关系，可以看到，AO对东亚冬季风的影响事实上也只有太阳活动比较强的时候才是显著的，而有可能最终在太阳活动强的时期，太阳活动射电通量与东亚冬季风活动（用东亚大槽 $I_{CO}$ 表征）具有了高度相关的关系，其信度超过了99%显著性水平。因此，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显著相关性仅存在于太阳活动较强的时期。

表1 1959—2013年期间HS年（强太阳活动时期）和LS年（弱太阳活动时期）F10.7cm、 $I_{CO}$ 、AO的相关系数  
Table 1 Correlation coefficient between F10.7 cm,  $I_{CO}$ , 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 $I_{CO}$	F10.7 cm与AO	AO与 $I_{CO}$
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

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

在年际尺度上，太阳活动对冬季东亚气候的影响主要体现在AO的强弱以及中高纬度环流型形态，当强太阳活动时期，随着太阳活动的增强，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，冬季东亚中高纬

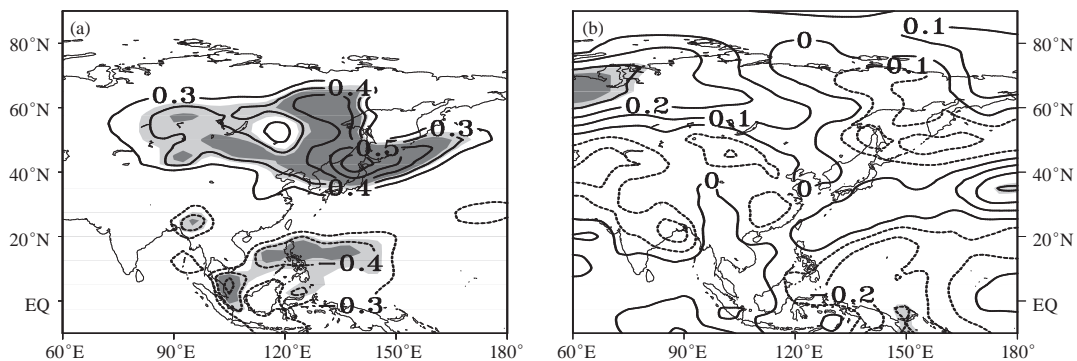


图1 冬季平均近地面气温场与F10.7cm的相关系数空间分布：（a）HS年，已略去绝对值小于0.3的等值线；（b）LS年，等值线间隔为0.1。实线表示正相关，虚线表示负相关；浅色和深色阴影区域分别通过了90%、95%的信度检验  
Fig. 1 Correlation coefficients between the near-surface air temperature averaged for DJF and F10.7 cm: (a) HS years, only contours with the absolute values more than 0.2 have been plotted; (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

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，东亚大部分地区气温显著偏高，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对东亚冬季大气环流并没有显著影响。当然，太阳活动对东亚冬季气候的影响，除了对中高纬度的环流型的作用途径以外，对热带西北太平洋海表温度影响是另外一个重要的途径。强太阳活动时期，热带西北太平洋海温倾向异常偏冷，海陆热力差异缩小，也会使得东亚冬季风偏弱，东亚冬季风活动地区气温偏高。

对东亚冬季风典型区域的冬季气温的年代际差异的分析，也显示了其与太阳活动有密切关联。冬季中国东北地区气温年代际偏低阶段（1976—1988年）平均太阳通量 $10.7\text{cm}$ 为130.55，冬季东北气温年代际偏暖阶段（1988—1999年）平均太阳通量 $10.7\text{cm}$ 为140.35。数值模拟试验结果的分析也发现，太阳黑子数峰（谷）年，北太平洋中纬度海温易呈现偏暖（冷），北太平洋中纬度海温正（负）异常使得东亚—太平洋中纬度出现异常反气旋（气旋）性环流，从而有利于东北地区冬季温度呈现正（负）异常。宋燕等<sup>[39]</sup>统计分析了太阳活动参数与青藏高原冬春季积雪深度和积雪日数的多时间尺度相关特征，发现在年代际尺度上春季积雪日数与太阳活动在各时间尺度上无论是同期还是滞后都有显著和稳定的相关关系，而积雪深度从正相关到负相关的年代际转折与太阳活动的周期相吻合。

Wei等<sup>[40]</sup>统计了工业革命之前的上万年间，太阳黑子数（SSN）与南极Vostok台站局地温度的千年周期分量的变化，可见二者之间存在稳定且持续的负相关关系，太阳活动强时Vostok台站温度低，反之亦然；分析二者之间的相关系数随黑子数领先温度时间的变化，发现当黑子数领先温度变化30~40年时，二者之间的相关性最强，相关系数可达-0.85。考虑到南极局部温度的变化与全球趋势是相反的，因此至少在工业革命以前（无近代温室气体影响），太阳活动是驱动全球气候变化的重要自然驱动力之一。

## 1.2 太阳活动对热带海气系统的影响

大气和海洋的耦合是气候系统中最重要物理和动力过程，其中热带海气系统对全球气候具有最为重要的影响。研究太阳活动对热带海气系统的调制作用，有助于理解太阳活动对气候变化的作用机制。

中高纬度大气系统在冬季对太阳活动的响应最为明显，与此不同，热带大气系统与太阳活动在夏季有更显著关联。Li等<sup>[41]</sup>系统研究了太阳活动与西太平

洋副热带高压的关系，发现在太阳活动的峰值年和谷值年，夏季西太平洋副热带高压的强度和位置有所不同。与太阳活动谷值年相比，在太阳活动峰值年，副高脊线偏南、西伸脊点偏西、面积偏大。

Xiao等<sup>[42]</sup>系统分析研究了太阳活动强度对北半球夏季热带西太平洋对流活动的影响。分析发现热带西太平洋OLR对于 $10.7\text{cm}$ 太阳辐射通量指数逐月资料（F10.7）存在1~2年的显著滞后相关。相对于太阳活动低值年，在太阳活动高值年之后的1~2年，热带西太平洋—海洋性大陆的对流异常表现出东正西负的偶极子模态（图2），这种相关关系也是夏季显示出更高的相关性。在去掉ENSO信号后，该地区OLR场的EOF的第一模态也为类似的分布型，而且这种分布型的周期分析显示了和太阳活动类似的准11年的显著周期。进一步分析表明，由于热带太平洋海气系统的耦合作用，海洋中的太阳活动信号有利于激发滞后的海洋性大陆—西太平洋对流偶极型。

对地球气候而言，太阳辐射是一个外源强迫加热，因此，气候系统对太阳10年以上长周期的外强迫变化有很好的滞后相关是容易理解的。Friis-Christensen等<sup>[43]</sup>发现，每个太阳周的时间长度和全球

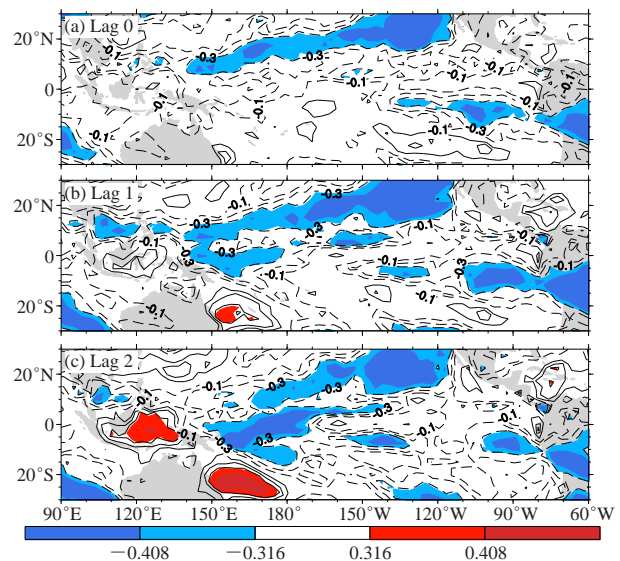


图2 去除ENSO信号后，北半球夏季平均OLR与F10.7的相关系数分布图 (a) 同期相关；(b) OLR滞后F10.7指数1年；(c) OLR滞后F10.7指数两年。浅色阴影通过了95%信度检验，深色阴影通过了99%信度检验

Fig. 2 After removing ENSO signal, the correlation coefficients between JJA mean F10.7 index and OLR. (a) Contemporaneous correlation coefficients; (b) OLR lags F10.7 by one year; (c) OLR lags F10.7 by two years. The areas with light shadings exceed the 95% confidence level, heavy shadow exceed the 99% confidence level. Blue shaded areas indicate negative values and red shaded areas indicate positive values

地表温度有密切联系。最近, Maliniemi等<sup>[44]</sup>指出, 北半球的冬季气温异常型在太阳周的不同相位(谷值期、上升期、峰值期和下降期)有显著的差异, 尤其在下降时期有明显的一致性特征。我们对热带太平洋海温分布型的年代际变化分析发现, 其年代际变化与太阳活动周所处的相位有较好的关联, 分析海洋热含量(OHC)与TSI的关系, 发现在热带太平洋存在东、西两个相关系数相反的区域, 最大相关出现在OHC滞后TSI两年, 且该区域内的OHC具有显著的11年周期。利用7年低通滤波去除年际变化的信号后, 热带西太平洋OHC在太阳活动的上升位相表现为正异常, 而在中东太平洋呈现为负异常的OHC分布; 而在太阳活动周的下降位相期间, OHC异常型分布型显示出几乎完全与之相反的异常模态(图3)。

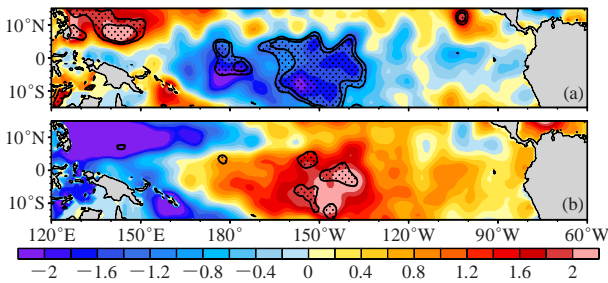


图3 太阳上升位相(上图)和下降位相(下图)热含量异常(单位:  $10^{18} \text{J}$ )。打点区域代表通过95%的信度水平(t检验)  
Fig. 3 Composite OHC anomalies during the ascending phase (top) and declining phase (bottom) of TSI cycle (unit:  $10^{18} \text{J}$ ). Black dot shade regions represent the confidence level above 95% (student's t test)

### 1.3 太阳活动对 ENSO 气候影响的调制作用

ENSO是气候系统中最重要的气候异常信号之一, ENSO事件具有明显的年际和年代际变化特征。在ENSO事件发生期间, 热带太平洋海温异常通常会产生一个PNA的异常波列, 从而对太平洋和北美的大气环流和气候产生重要的影响。Haigh等<sup>[45]</sup>曾经指出, 增强的太阳活动可以引起 ENSO系统发生变化。进一步研究工作显示, 当太阳活跃时辐射作用使热带太平洋趋向于暖海温<sup>[46]</sup>, 而太阳活动很可能是通过改变云和辐射的反馈作用影响 ENSO的<sup>[47-48]</sup>。

利用太阳辐射通量F10.7的观测资料以及NECP/NCAR再分析资料, 发现太阳活动对Niño3.4的海温与PNA环流异常型的关系具有明显的调制作用。当太阳辐射通量偏强时, Niño3.4与PNA的联系将得到加强, 且在对流层高层更为明显。此外, 在太阳辐射通量强弱不同的时期, PNA对Niño3.4的响应空间分布型也有所不同(图4)。当太阳辐射通量较强时, 500hPa高度场的异常响应主要出现在东北太平洋和北美大陆;

而当太阳辐射通量较弱的时期, 异常响应场主要位于北太平洋、北美大陆和大西洋。由于太阳活动对对流层大气的影响可能存在不对称性, 其影响主要表现为强太阳活动对环流的影响, 而弱太阳活动时期影响不明显。由于太阳活动的影响表现为一个弱的类似PNA模态, 但其空间分布与Niño3.4的影响有所不同, 在ENSO暖事件年, 太阳活动强年加强了东北太平洋地区对Niño3.4的响应, 而在ENSO冷事件年, 太阳活动强年则加强了北美大陆南部地区对Niño3.4的响应。太阳活动主要通过影响高层纬向风场, 调制了热带海洋ENSO异常与中高纬度PNA的联系, 并进一步影响中高纬度地区冬季的气候。

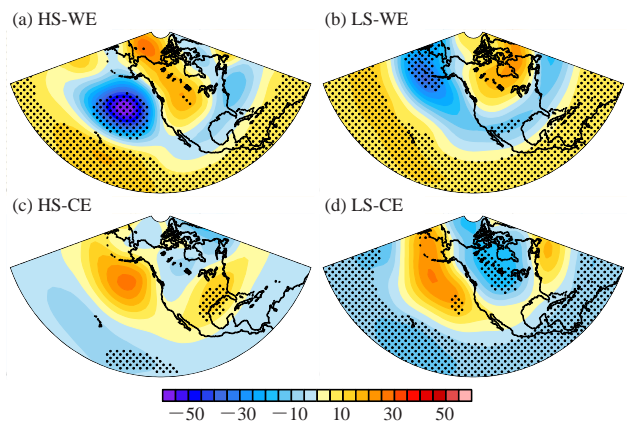


图4 赤道东太平洋冷、暖时期太阳活动强、弱年冬季500hPa异常高度场

Fig. 4 Geopotential height anomaly during Northern hemisphere winter in (a) High solar and warm eastern equatorial Pacific period (HS-WE); (b) Low solar and warm equatorial Pacific period (LS-WE); (c) High solar and cold eastern equatorial Pacific period (HS-CE); (d) Low solar and cold equatorial Pacific period (LS-WE)

分析太阳活动与热带海温和对流活动的关系后发现, 热带太平洋是太阳活动影响气候系统的关键区域, 而热带海气系统对太阳活动的响应具有明显的滞后效应。即在强太阳辐射期之后, 中东太平洋海温呈现正异常。对比这种异常海温的空间结构可以注意到, 这种海温异常型不同于传统的El Niño-like事件中的东太平洋增暖, 而类似于El Niño Modoki事件。事实上, 太阳活动强弱的变化确实与El Niño Modoki指数(EMI)存在显著的相关性, 并在滞后两年达到最大的相关关系。进一步的周期分析显示, EMI指数也存在着显著的准11年周期特征。分析统计EMI>0.7的El Niño Modoki事件, 发现在太阳辐射峰值当年或之后1~2年, 存在有利于El Niño Modoki事件发生的条件(图5)。

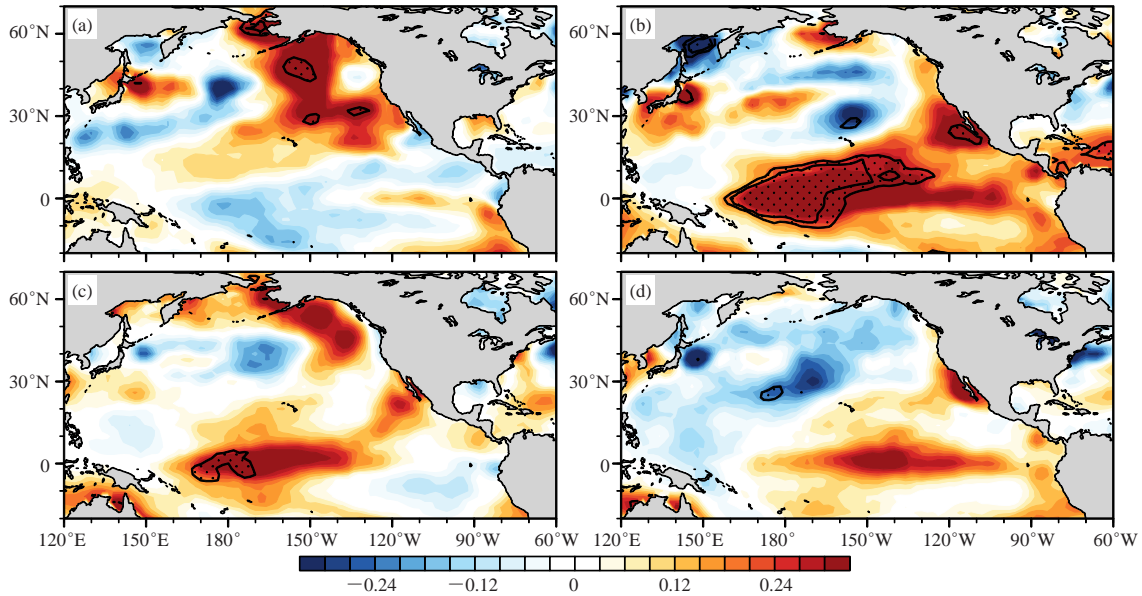


图5 太阳辐射峰值当年 (a) 及之后1~3年 (b, c, d) 的SST距平合成图 (单位: °C), 其中打点区域为通过90%的信度水平 (t 检验)

Fig. 5 Composites of annual sea surface temperature anomaly (SSTA) during the peak year (a) and following 1, 2, 3 year (b, c, d) (unit: °C). Black dot shade regions represent the result in these areas is above the 90% confidence level (student's t test)

## 2 太阳活动影响气候放大机制的可能途径

尽管人们一直在试图解释太阳活动影响气候的放大机制, 但迄今为止, 仍然难以有明确答案。但可以肯定的是, 气候系统的一些特殊的区域和环节, 确实可以检测到显著的太阳活动的信号, 其变率强度和振幅, 远远大于我们通常用辐射强迫得到的气候效应。也就是说, 太阳活动影响气候的放大机制, 可能是通过气候系统中复杂的非线性作用实现的。同时, 可以注意到, 气候系统对太阳活动在中高纬度的响应通常是发生在冬季, 而在夏季气候系统的响应更多地来自热带低纬度地区, 而全球重要的季风系统有可能是太阳信号在赤道和极地间传播的通道。

图6给出了太阳活动影响气候可能途径的综合框图。如果以北半球冬季为季节的时间参考, 通过各种独立的研究分析已经知道, 当冬季太阳活动偏强的时候, 通过对AO的调制作用, 北半球中高纬度地区纬向环流加强, 中纬度季风地区地面温度偏高, 热带海温和地面温度偏低, 东亚冬季风减弱。与此同时, 热带对流偏弱将使得另一个半球的Hadley环流减弱, 南半球中高纬度夏季风极向推进弱, 中高纬度云量减少, 温度升高, 从而造成季风区全球中高纬度温度异常偏高。而在另外一个方面, 在随后夏季热带海温将继续偏低, 对流偏弱, 逐步形成热带西太平洋对流活动东强西弱的偶极模态, 西太平洋热带对流中心偏

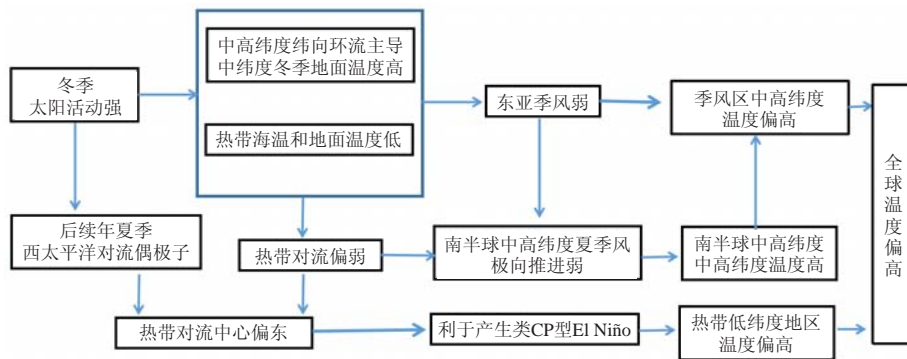


图6 太阳活动影响气候的可能途径

Fig. 6 Possible approaches of solar activity affecting Earth's climate

东, 有利于产生CP型的El Niño暖海温异常型, 使得最终热带低纬度温度偏高。综上两个方面, 较强的太阳活动将在当年和滞后2~3年, 造成对全球大范围气候的影响, 有利于形成异常的偏暖。

这样一个太阳活动影响全球气候的框架模型是否合理, 还需要多方面的研究和验证。但已有的研究结果说明, 太阳活动对季风活动和与之相关的热带对流、副热带高压和Hadley环流等系统有重要的影响和调制作用。例如, 印度季风<sup>[21, 49]</sup>、Hadley环流、Ferrel环流和副热带急流<sup>[50-53]</sup>, 在太阳高年倾向于向极地偏移或扩展, 而在太阳低年倾向于向赤道偏移。这些系统位置的偏移, 会直接导致系统边缘地区气候的急剧变化<sup>[52, 54]</sup>。Wang等<sup>[55]</sup>的研究也表明了东亚季风对太阳活动的响应往往在其边缘处更为显著, 但太阳活动较强时, 东亚夏季风的北界将推进到更北的纬度。

### 3 小结

通过对最近一些研究成果的梳理, 可以发现, 太阳活动对气候的显著影响具有很强的时空选择性。在空间上, 太阳活动对极地大气环流和热带海气系统具有明显的影响, 表现为太阳活动较强时期强AO活动的气候影响, 以及对热带对流与ENSO事件气候影响的调制作用。在时间上, 太阳活动对气候系统的影响具有不对称性特征, 其影响主要是在强太阳时期得以体现, 在太阳活动较弱的时期则基本上难以监测到太阳信号。其中, 对中高纬度地区的影响主要在冬季, 对热带低纬地区的影响主要在夏季。考虑到以上时空特征, 我们认为显著的太阳信号主要包含在季风区以及和季风相关的气候子系统中, 季风活动区是太阳活动影响地球气候的主要区域和放大传播的通道。同时, 由于太阳活动对气候系统的影响具有明显的滞后效应, 多时间尺度影响的相互作用使得其影响的气候效应非常复杂, 其对全球气候的影响, 还需要进一步的研究和验证。

#### 参考文献

- [1] Lockwood M, Harrison R G, Woollings T, et al. Are cold winters in Europe associated with low solar activity? *Environ Res Lett*, 2010, 5: 024001.
- [2] Woollings T, Lockwood M, Masato G, et al. Enhanced signature of solar variability in Eurasian winter climate. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37: L20805.
- [3] Ineson S, Scaife A A, Knight J R, et al. Solar forcing of winter climate variability in the Northern Hemisphere. *Nature Geoscience*, 2011, 4(11): 753-757.
- [4] 王绍武, 葛全胜, 王芳, 等. 全球气候变暖争议中的核心问题. *地球科学进展*, 2010, 25(6): 656-665.
- [5] 王绍武, 闻新宇, 黄建斌. 不久的将来气候会变冷吗? *科学通报*, 2010, 55(30): 2980-2985.
- [6] 王绍武, 闻新宇, 黄建斌. 一个新的太阳活动极小期即将到来吗? *气候变化研究进展* 2012, 8(2): 154-156.
- [7] Intergovernmental Panel on Climate Change. Key dates in the AR5 schedule. 2013, Available: [http://www.ipcc.ch/activities/key\\_dates\\_AR5\\_schedulepdf.pdf](http://www.ipcc.ch/activities/key_dates_AR5_schedulepdf.pdf)
- [8] Gray L J, Beer J, Geller M, et al. Solar influences on climate. *Reviews of Geophysics*, 2010, 48, RG4001.
- [9] Kerr R A. What happened to global warming? Scientists say just wait a bit. *Science*, 2009, 326(5949): 28-29.
- [10] Knight J, Kennedy J J, Folland C, et al. Do global temperature trends over the last decade falsify climate predictions? *Bull Am Meteorol Soc*, 2009, 90(8): 22-23.
- [11] Fyfe J C, Gillett N P, Zwiers F W. Overestimated global warming over the past 20 years. *Nature Climate Change*, 2013, 3(9): 767-769.
- [12] Curry J. Climate science: Uncertain temperature trend. *Nature Geoscience*, 2014, 7(2): 83-84.
- [13] Foukal P, Frohlich C, Spruit H, et al. Variations in solar luminosity and their effect on the Earth's climate. *Nature*, 2006, 443: 161-166.
- [14] 竺可桢. 我国历史上气候的脉动. *科学汇刊*, 1926, 16(2): 274-282.
- [15] 王绍武. 大气活动中心的多年变化的多年变化与我国的气候振动. *气象学报*, 1962, 32(1): 19-36.
- [16] 徐群, 金龙. 太阳活动与北半球副热带高压强度的耦合振荡. *大气科学*, 1986, 10(2): 204-211.
- [17] 徐群, 王冰梅. 太阳辐射变化对我国中东部和西非夏季降雨量的影响. *应用气象学报*, 1993, 4(1): 38-44.
- [18] Perry C A. Solar irradiance variations and regional precipitation fluctuations in the Western USA. *International Journal of Climatology*, 1994, 14(9): 969-983.
- [19] Currie R G, Vines R G. Evidence for luni-solar Mn and solar cycle Sc signals in Australian rainfall data. *International Journal of Climatology*, 1996, 16(11): 1243-1265.
- [20] Cook E R, Meko D M, Stockton C W. A new assessment of possible solar and lunar forcing of the bidecadal drought rhythm in the western United States. *Journal of Climate*, 1997, 10(6): 1343-1356.
- [21] Kodera K. Solar influence on the Indian Ocean Monsoon through dynamical processes. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31: L24209.
- [22] 魏凤英. 长江中下游夏季降水异常变化与若干强迫因子的关系. *大气科学*, 2006, 30(2): 202-211.
- [23] 赵平, 周秀骥, 刘昶. 夏季亚洲-太平洋热力差异年代-百年尺度变化与太阳活动. *科学通报*, 2011, 56(25): 2068-2074.
- [24] Shindell D T, Schmidt G A, Mann M E, et al. Solar forcing of regional climate change during the Maunder Minimum. *Science*, 2001, 294(5549): 2149-2152.
- [25] Ruzmaikin A, Feynman J. Solar influence on a major mode of atmospheric variability. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107(D14): 4209.
- [26] Huth R, Bochníček J, Hejda P. The 11-year solar cycle affects the intensity and annularity of the Arctic Oscillation. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2007, 69(9): 1095-1109.
- [27] Scaife A A, Ineson S, Knight J R, et al. A mechanism for lagged North Atlantic climate response to solar variability. *Geophys Res Lett*, 2013, 40: 434-439.
- [28] Weng H Y. Impacts of multi-scale solar activity on climate. Part I: Atmospheric circulation patterns and climate extremes. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2012, 29 (4): 867-886.
- [29] Barriopedro D, García-Herrera Ro, Huth R. Solar modulation of Northern Hemisphere winter blocking. *J Geophys Res*, 2008, 113 (D14): D14118.
- [30] Slonosky V C, Jones P D, Davies T D. Instrumental pressure observations and atmospheric circulation from the 17th and 18th centuries: London and Paris. *International Journal of Climatology*, 2001, 21(3): 285-298.
- [31] Kodera K, Kuroda Y. Dynamical response to the solar cycle. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107(D24): 4749.
- [32] Ogi M, Yamazaki K, Tachibana Y. Solar cycle modulation of the seasonal linkage of the North Atlantic Oscillation (NAO). *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(22): 2170.
- [33] Mann M E, Zhang Z H, Rutherford S, et al. Global signatures

- and dynamical origins of the Little Ice Age and Medieval Climate Anomaly. *Science*, 2009, 326(5957): 1256-1260.
- [34] 丁一汇, 柳艳菊, 梁苏洁, 等. 东亚冬季风的年代际变化及其与全球气候变化的可能联系. *气象学报*, 2014, 72(5): 835-852.
- [35] 周群, 陈文. 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. *大气科学*, 2012, 36(4): 851-862.
- [36] Ruzmaikin A. Effect of solar variability on the Earth's climate patterns. *Advances in Space Research*, 2007, 40(7):1146-1151.
- [37] Zhao L, Zhu Y X, Liu H W, et al. A stable snow-atmosphere coupled mode. *Climate Dynamics*, 2016. doi: 10.1007/s00382-015-2952-z.
- [38] 王瑞丽, 肖子牛, 朱克云, 等. 太阳活动变化对东亚冬季气候的非对称影响及可能机制. *大气科学*, 2015, 39(4): 815-826.
- [39] 宋燕, 李智才, 肖子牛, 等. 太阳活动与冬季青藏高原积雪以及东亚环流的年代际相关分析. *高原气象*, 2016, 待刊.
- [40] Wei M, Qiao F L, Deng J. A quantitative definition of global warming hiatus and 50-year prediction of global-mean surface temperature. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2015, 72(8): 3281-3289.
- [41] LI C, Zhang Q Y. An observed connection between wintertime temperature anomalies over Northwest China and weather regime transitions in North Atlantic. *J Meteor Res*, 2015, 29(2): 201-213.
- [42] Xiao Z, Liao Y, Li C. Possible impact of solar activity on the convection dipole over the tropical pacific ocean. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2016, 140: 94-107.
- [43] Friis-Christensen E, Lassen K. Length of the solar cycle: an indicator of solar activity closely associated with climate. *Science*, 1991, 254: 698-700.
- [44] Maliniemi V, Asikainen T, Mursula K. Spatial distribution of Northern Hemisphere winter temperatures during different phases of the solar cycle. *J Geophys Res: Atmos*, 2014, 119: 9752-9764.
- [45] Haigh J D. The impact of solar variability on climate. *Science*, 1996, 272: 981-984.
- [46] Misios S, Schmidt H. Mechanisms involved in the amplification of the 11-yr solar cycle signal in the tropical Pacific Ocean. *Journal of Climate*, 2012, 25: 5102-5118.
- [47] Farrar P D. Are cosmic rays influencing oceanic cloud coverage or is it only El Niño? *Climatic Change*, 2000, 47(1-2): 7-15.
- [48] Marsh N, Svensmark H. Galactic cosmic ray and El Niño-Southern Oscillation trends in International Satellite Cloud Climatology Project D2 low-cloud properties. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2003, 108(D6): 4195.
- [49] van Loon H, Meehl G A. The Indian summer monsoon during peaks in the 11 year sunspot cycle. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39: L13701.
- [50] Haigh J D. The effects of solar variability on the Earth's climate. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2003, 361(1802): 95-111.
- [51] Gleisner H, Thejll P. Patterns of tropospheric response to solar variability. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30: 1711.
- [52] Haigh J D, Blackburn M, Day R. The response of tropospheric circulation to perturbations in lower-stratospheric temperature. *Journal of Climate*, 2005, 18(17): 3672-3685.
- [53] Brönnimann S, Ewen T, Griesser T, et al. Multidecadal signal of solar variability in the upper troposphere during the 20th century. *Space Science Reviews*, 2006, 125: 305-317.
- [54] Verschuren D, Laird K R, Cumming B F. Rainfall and drought in equatorial east Africa during the past 1,100 years. *Nature*, 2000, 403: 410-414.
- [55] Wang J S, Zhao L. Statistical tests for a correlation between decadal variation in June precipitation in China and sunspot number. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2012, 117, D23117.

## 关于中国雷达数据质量问题的思考

### ——赴美国国家大气研究中心研修的体会

■ 王秀明

作者于2015年7月—2016年1月赴美国国家大气研究中心(NCAR)研修,访问任务为基于国内的多普勒天气雷达资料和地面加密资料,利用NCAR的多普勒天气雷达四维变分同化分析系统(Variational Doppler Radar Analysis System, VDRAS)进行华南大风等灾害性强对流案例的数值模拟实验。研修有期间,有相当长一段时间在处理雷达资料质量控制问题。

通过此次雷达资料处理,深刻体会到国内雷达数据的质量问题亟待解决,以下列举几个雷达数据质量问题:(1)梧州雷达的挡角问题,在1.5°仰角上非常清晰的强回波在0.5°仰角上基本不可见。在1.5°仰角上亦有明显挡角,雷达站南侧的此强回波带由于挡角出现了时间上不连续的问题。(2)广州雷达站的雷达径向速度数据的质量问题,有很多非气象回波造成的不连续的径向速度孤点,VDRAS雷达数据质量控制把这些孤点剔除,剔除后的速度图出现了明显的不连续,进而导致速

度退模糊出现问题。(3)两个雷达探测的同一强对流回波的组合反射率因子显示两者的回波强度有显著差异。后两个问题显示的雷达数据问题源自雷达硬件参数设定。

基于中国多普勒天气雷达质量问题较多,雷达资料质量控制难度大,一些在美国业务应用的数据质量控制模块不能很好地解决中国雷达数据质量问题。以科研为目的,用某些特别设计的处理方案,针对某一个或一类雷达的问题,确实可以解决某一雷达的质量问题。但当同化多个雷达时,每个雷达的质量问题各不相同,一套资料处理软件常常无法完成所有的问题,而且即使完成也需要较长的处理时间,而预报时效短本就是雷达变分同化业务化的难题之一,因此,雷达数据质量控制增加了雷达数据同化及其业务应用的难度。

(作者单位:中国气象局气象干部培训学院)