

# Advances of Impact of Solar Ultraviolet Radiation on the Winter Climate of East Asia

Qi Zhong<sup>1</sup>, Yuefeng Li<sup>1</sup>, Liang Zhao<sup>2</sup>, Shi Dong<sup>1</sup>, Yichang Hu<sup>1</sup>

<sup>1</sup>China Meteorological Administration Training Center, Beijing

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

Email: zhongq@cma.gov.cn

Received: Apr. 8<sup>th</sup>, 2018; accepted: Apr. 21<sup>st</sup>, 2018; published: Apr. 28<sup>th</sup>, 2018

---

## Abstract

The response and potential amplify mechanism of earth climate at certain regions to the solar activity are one of the most important scientific issues in the modern climate research. This study reviews the advancements of satellite observation of solar spectrum and the reconstruction of dataset based on that. Then the key processes of the solar ultraviolet impacting the winter climate in East Asia are summarized. Generally, it includes the direct impacts of solar ultraviolet on the distribution of stratospheric ozone, the temperature and circulation. Then the signal is transported downward and poleward by the interaction of stratosphere and troposphere, and modulates the phase of the Arctic Oscillation (AO), which further impact the circulation and the winter climate of East Asia. The current studies show that the enhancement (reduce) of the solar ultraviolet tends to arouse the positive (negative) phase of AO, and then cause the warm (cold) winter in East Asia. Finally, the paper points out that quantitative study of these impacts based on the full coupled earth system model will be one key of breakthrough in this area.

## Keywords

Ultraviolet Forcing, East Asia, Winter Climate, Arctic Oscillation, Stratosphere-Troposphere Interaction

---

# 太阳紫外辐照度影响东亚冬季气候的研究进展

钟琦<sup>1</sup>, 李跃凤<sup>1</sup>, 赵亮<sup>2</sup>, 董仕<sup>1</sup>, 胡宜昌<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国气象局气象干部培训学院, 北京

<sup>2</sup>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

Email: zhongq@cma.gov.cn

收稿日期: 2018年4月8日; 录用日期: 2018年4月21日; 发布日期: 2018年4月28日

## 摘要

特定区域气候系统对太阳分光谱辐射的响应和放大机制是当代气候和气候变化研究的热点科学问题之一。本文聚焦太阳紫外辐射和东亚地区, 阐述近年来太阳紫外辐射的卫星观测和数据重建进展, 总结太阳紫外辐射影响东亚冬季气候的途径和关键环节, 即太阳紫外辐射直接作用于平流层臭氧, 通过改变臭氧分布影响平流层大气的温度和环流场, 进而通过平流层-对流层的耦合作用将太阳活动信号向对流层和极地传播, 并通过调制北极涛动等大气遥相关型的位相影响东亚大气环流, 实现对东亚冬季气候的间接作用。目前的研究认为太阳紫外辐射增强(减弱)常易激发正位相(负位相)北极涛动, 对应东亚冬季暖冬(寒潮低温)。最后, 展望了该领域未来的研究重点, 即基于大气-海洋-化学耦合的气候系统模式开展太阳紫外辐射影响东亚冬季气候的量化评估和研究。

## 关键词

太阳紫外辐射, 东亚, 冬季气候, 北极涛动, 平流层-对流层相互作用

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

太阳是地球气候形成和变化的根本因素之一, 其活动和变化对地球气候的影响一直是日地科学研究的基础和重要内容。研究认为太阳变化是长期气候变化最重要的驱动因子[1] [2] [3] [4] [5]。在年代际和百年尺度气候变化中也体现出太阳活动的重要作用[6] [7] [8] [9] [10], 且显著的年代际太阳信号通常在特定区域的气候异常信号中检测到[11] [12] [13] [14]。一些区域的地表温度[15] [16], 海洋和大气环流特征[17] [18] [19]以及云量、降水和季风[20] [21] [22] [23]的变化中均发现有年代际太阳活动的信号。近年来的研究显示, 某些区域的气象要素在一个太阳周内的变化往往比全球平均大一个量级[13], 这可能是由于局地气候系统及其非线性动力过程放大了太阳活动的信号。东亚地区的气温, 长江和黄河流域的平均降水量(旱涝)的长期变化与太阳活动均有密切的关系[24] [25]。近几十年卫星观测数据表明, 准 11 年太阳活动周期中总辐射变化强度仅约为 0.1% [26]。这微小的能量变化是否能引起显著的气候效应? 气候系统是否对太阳辐射变化在某些特定区域具有响应和放大作用? 成为当代气候和气候变化研究的热点问题。Gray [10], 肖子牛等[8] [27]对年代际尺度太阳活动影响地球气候的机制研究, 尤其是“自上而下”的紫外辐射机制和“自下而上”的宇宙射线-云机制进行了很好的综述, 指出太阳紫外辐射直接作用于平流层臭氧, 进而影响平流层和对流层大气的物理过程, 以及太阳宇宙射线作用于云微物理过程, 进而影响大气云的分布、能量平衡和气候变化, 可能是地球气候系统响应和放大太阳活动信号的重要物理途径。但前人的工作大多关注太阳总辐射或紫外辐射对全球尺度气候变化的影响, 一些工作应用气候数值模式探讨了紫外辐射机制对区域气候(如欧美大陆, 东亚)的影响和作用。而紫外辐射变化影响东亚冬季气候的综合细致的物理过程尚不清晰, 近年来卫星分光谱观测数据和高分辨率的气候系统模式的发展为这一研究提供了基础和可能。本文首先介绍太阳光谱辐照度的卫星观测和数据重建进展。然后介绍近年来太阳紫外辐射影响东亚冬季气候的途径研究进展。最后进行总结和展望。

## 2. 太阳紫外辐照度观测和数据进展

太阳辐射的卫星观测始于 1978 年, 因为排除了大气的吸收和反射等影响, 卫星测量结果相比地面观测更能准确反映地球接受的太阳总辐射和分光谱辐照度的实际变化。近三十多年的卫星观测显示太阳总辐射存在年代尺度的上升趋势[28]。美国国家航空航天局(NASA)太阳辐射与气候实验 2003 年开展了 SORCE 卫星观测计划[29], 揭示出与当前普遍认为的太阳分光谱活动显著不同的变化。如, SORCE 卫星上总辐射监视器(TIM)数据显示, 在 2008 年太阳活动极小周期内, 总的太阳辐射最精确值为  $1360.8 \pm 0.5 \text{ Wm}^{-2}$ , 明显低于当前能量平衡计算和气候模式中广泛认可和使用的权威数值  $1365.4 \pm 1.3 \text{ Wm}^{-2}$  [30]。SORCE 卫星的 SIM 光谱辐射探测仪给出的测量结果则显示出更大幅度的变化, 即在 2004~2007 年太阳活动下降期间, 紫外辐射的减小幅度比之前的估计大 4~6 倍[31]。卫星观测与之前普遍使用的估计值之间的大幅差异是否带来太阳活动作用于地球气候的机制研究新认识成为气候学家关注的问题。上述紫外谱段的辐射观测数据已被应用于目前最广泛使用和测试的美国海军研究实验室(NRL)太阳光谱辐射数据集 NRLSSI [30] [32], 但该套数据的生成对太阳分光谱辐射(SSI)模式依赖过重, 观测权重较小。欧洲 FP7 太空项目基于近三十年的卫星观测制作了首个欧洲太阳光谱观测探索数据集(SOLID), 该数据未采用任何 SSI 模式信息, 仅整合了卫星观测资料[33], 但该套资料覆盖时间较短。Matthes 等[34]基于 NRLSSI2 和 SATIRE 两套数据集, 进行多模式算术平均, 并补充了极紫外波段(10~121 nm)的资料重建, 生成了一套应用于气候模式比较计划(CMIP6)的数据集资料。

上述紫外辐射的观测和重建数据集被广泛应用于气候系统模式中, 以探索紫外辐射变化作用于地球气候系统的动力和物理机制。Ermolli [35]对比了 NRLSSI 和 SORCE 观测对气候模拟的影响, 指出使用 SORCE 卫星的新观测时, 平流层的臭氧、温度和环流对太阳的响应更大, 相应导致更显著的地面响应。Cahalan 等[36]就大气中层臭氧, Merkel 等[37]就年代际温度对 SORCE 紫外辐射观测的响应进行的数值模拟, 获得了类似结论。研究应用大气-海洋耦合气候模式[38]和辐射-光化学模式[39]模拟均发现新观测的紫外强迫能激发与观测更为接近的大气响应。Ineson 等[38]指出 SORCE 紫外辐射观测到的太阳活动低值是近年来欧洲和北美大陆冷冬形成的重要驱动因素, 虽然全球平均温度仅受很小的直接影响。

## 3. 太阳紫外辐射信号影响东亚冬季气候的途径

太阳活动对地球气候的作用机制主要有太阳总辐射作用、太阳紫外辐射作用、太阳能量粒子的作用、宇宙射线作用云生成等[40] [41], 但受限于早期观测和认识的局限这些作用和途径没有得到很好的支持更无法量化。近年来, 随着太阳活动的观测和气候系统模式的发展, 越来越多的证据显示出微小的太阳活动周期信号作用于气候系统, 经过其内部一系列非线性动力和物理过程被放大。其中最值得关注的是不再笼统地考虑太阳总辐射的作用机制, 而将可见光和紫外辐射对气候系统的影响剥离出来, 并且更多的研究了特定区域对太阳活动信号的响应和放大作用。虽然紫外辐射只占太阳辐射能量的 9%, 但其变化量却占总辐射变化量的 32% [42], 太阳紫外辐射的影响可能是太阳活动作用于地球气候的重要环节。迄今研究显示, 紫外辐射影响东亚地区冬季气候的途径包括以下关键环节: 首先是紫外辐射直接作用于平流层臭氧, 通过臭氧分布的二次调整, 进而促进平流层大气的热力和动力场调整, 将紫外辐射的这种影响在平流层内传播(包括从赤道到极地, 从平流层高层到低层); 然后通过平流层-对流层的耦合作用将紫外辐射在平流层的影响下传至对流层, 并调制北半球高纬度大气环流异常(Haigh [43]); 进而通过高纬度大气活动中心 and 大气遥相关型调制东亚冬季气候, 实现紫外辐射的间接影响。

### 3.1. 太阳紫外辐射作用于平流层大气

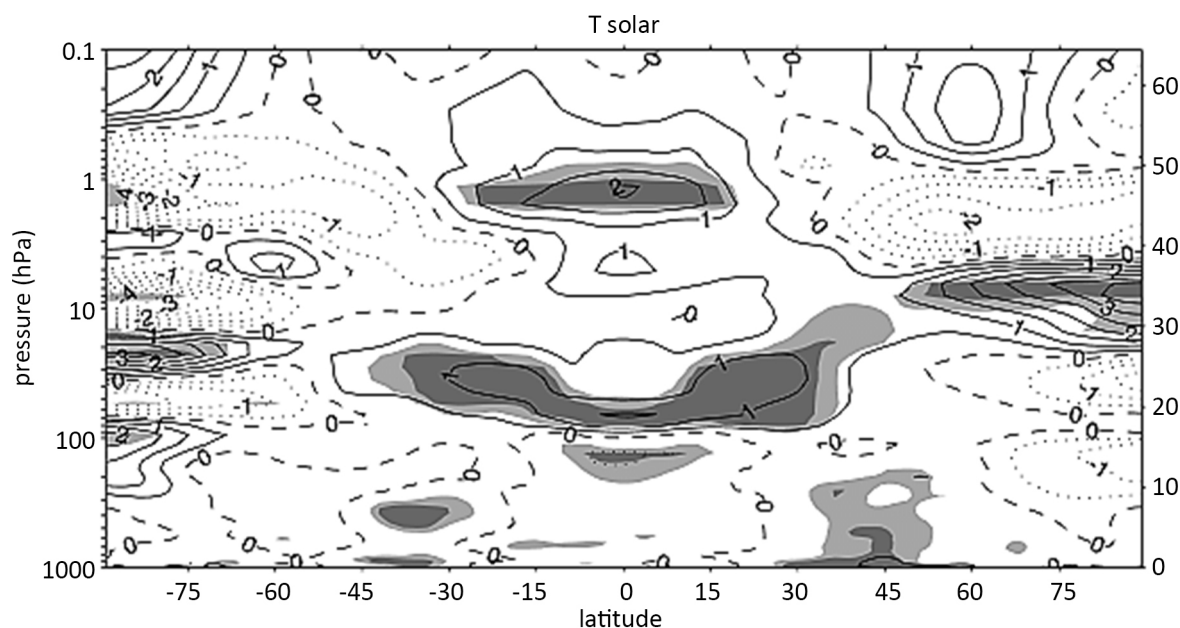
得益于过去三十多年卫星观测技术的发展, 紫外辐射变化对平流层臭氧的直接影响得到大量观测数

据的证明。平流层气溶胶和大气试验(Stratospheric Aerosol and Gas Experiment, SAGE)卫星资料(1985~2003)的统计分析表明,紫外辐射可直接影响平流层臭氧的产生率[44] [45]。而进入极区的太阳能量粒子可间接影响平流层臭氧的浓度[46]。紫外辐射对平流层臭氧浓度的这种直接和间接作用引起的间接环流和臭氧输送进一步改变平流层臭氧的分布[47] [48]。

臭氧含量变化引起的加热作用,进而改变平流层高层的经向温度梯度,并引起平流层风场的改变。这一作用途径通过分析和观测到的平流层温度场和风场 11 年太阳周期活动信号得以证明。欧洲中期天气预报中心 ERA-40 再分析资料[49] [50]显示平流层温度场对太阳活动的响应强度和分布与平流层臭氧分布具有很好的一致性,赤道平流层高层(1 hPa)臭氧生成率的最大响应区存在温度场的最大响应(约 2 K);赤道和副热带上空平流层低层(20 hPa 以下)存在统计显著的次响应大值,与臭氧在平流层低层的次极大值分布一致(见图 1)。温度场的响应继而导致平流层风场上结构一致的变化[49] [51]。再分析资料的统计结果得到了极轨卫星垂直探测(TOVS)资料的验证,两者显示出[52]类似的分布结构,但由于其较低的垂直分辨率导致响应强度较再分析资料结果明显偏弱(平流层高层极大值中心温度响应约 1.1 K)。平流层风场的改变将影响冬半球平流层高层行星波的传播[53]。在太阳活动高值年期间,冬半球副热带平流层高层发展西风异常,由于行星波传播对背景风场的敏感,产生正反馈,使风场异常向极地和向下层传播[54]。

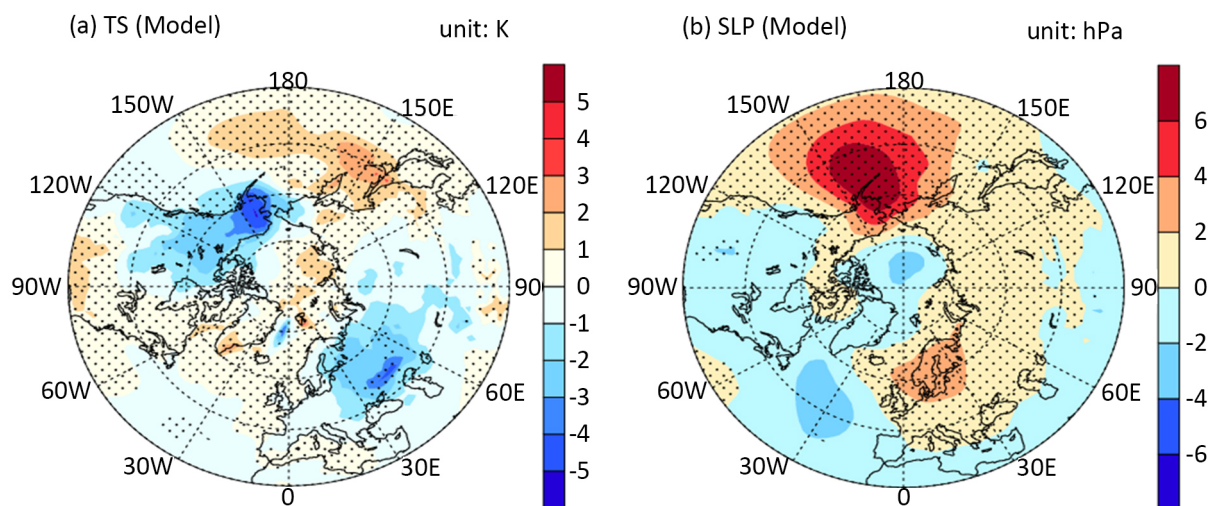
### 3.2. 平流层-对流层耦合作用对紫外辐射信号的传输

平流层大气温度场和风场对太阳紫外辐射对的响应进而通过平流层-对流层耦合作用向下传播到对流层大气,异常信号可影响对流层北半球环状模(NAM)和北极涛动(AO)。这一作用途径得到了大量分析研究[55] [56] [57] [58]和观测资料[59]的验证。范丽军等[60]的研究发现北极涛动(AO)中心的季节性移动和太阳辐射的季节性移动有关。Matthes 等[61]指出在太阳活动高值年的 12 月、1 月对流层会发展成一个类北极涛动(AO)的形态。Ineson 等[38]模拟了第 23 个太阳周紫外线变化对地球表面气候的影响,发现在



**Figure 1.** Annual average estimate of  $S_{max} - S_{min}$  temperature difference (K) derived from a multiple regression analysis of the European Centre for Medium Range Weather Forecasts (ECMWF) Reanalysis (ERA-40) data set (adapted from Frame and Gray [49]). Dark and light shaded areas denote statistical significance at the 1% and 5% levels, respectively  
**图 1.** 太阳活动高值年和低值年的年平均温度差估值(引自 Frame and Gray [49])。分析数据来自对欧洲中期天气预报中心再分析资料的多元回归分析,图中深色和浅色阴影分别表示统计显著性为 1% 和 5% 的区域





**Figure 2.** The 10-year mean of winter (a) surface temperature difference (unit: K) and (b) sea level pressure difference (unit: hPa) between the sensitivity experiment with UV enhanced by 5% and the control experiment. The dotted regions indicate significant difference at the 90% confidence level (adapted from Dong [62])

**图 2.** 十年平均北半球冬季(DJF) (a)地表温度(单位: K)和(b)海表气压(单位: hPa)控制试验与紫外辐射增强 5%敏感试验的差值图(引自董仕[62])

太阳活动低值期, 呈现负相位的北极涛动或北大西洋涛动, 模拟结果与实际观测非常相近。董仕[62]的数值试验表明, 紫外线的改变造成全球平均表面温度的变化很小, 但东亚区域的响应十分明显。紫外线增强敏感数值试验显示, 冬季北半球中高纬度地区风场受紫外线异常调制, 在北半球高纬度海平面形成一个类北极涛动的正位相(见图 2)。这些影响途经可部分地解释对流层中观测到的区域响应的太阳活动信号。

### 3.3. 北半球大气遥相关型异常作用于东亚冬季气候的途径

太阳活动对北半球大气活动中心及大气遥相关型等大气环流异常的调制进而影响东亚气候的异常变化。张庆云等[63]发现, 东北亚是响应太阳活动的显著区域, 太阳活动对东北亚冬季升温有明显贡献。冬季大气在太阳活动峰(谷)年的极涡和欧亚波列均表现出不同特征, 造成我国东北地区冬季降水在太阳活动峰值年显著增多。而我国夏季降水通过东亚高空急流的异常受到太阳活动的调制。王瑞丽等[64]发现, 太阳活动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 通量异常幅散, 导致中高纬西风及北极涛动异常增强, 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, 东亚冬季风减弱。Chen 等[65]发现了太阳 11 年周期对 AO 与东亚冬季风关系的调制作用。大量研究表明, 年代际尺度下, 当 AO 处于正位相时, 东亚地区 200 hPa 的急流明显北跳, 东亚大槽显著减弱, 东亚冬季风偏弱, 西风带上天气尺度斜压波动的减少和减弱, 从而导致我国中高纬度寒潮事件的减少, 容易出现暖冬, 同时降水偏多[66] [67] [68] [69] [70]。当冬季 AO 负位相时, 东亚冬季风偏强, 北半球中高纬度地区容易发生阻塞天气, 导致寒潮、强风、低温等极端天气[71]。黄荣辉等[72]的研究证实, AO 和北半球环状模的相反变化分别导致了 2005/2006 年冬季欧亚大陆中高纬度地区气温偏低, 而 2006/2007 年冬季欧亚大陆中、高纬地区气温偏高, 出现异常暖冬。

除了北极涛动的同期影响, 太平洋对东亚地区气候的影响也十分关键[73]。东亚冬季温度和降水异常显著依赖于 ENSO 和 AO 的不同位相配置[74]。He 等[75]发现 11 月、12 月 AO 与 1 月东亚表面温度相关关系都是最为显著的, 并发现 11 月和 12 月罗斯贝波由高纬度向东南传播的现象, 在 1 月份移至东亚地区, 从而使 AO 的信号可持续到 1 月份。董仕[76]分析了冬季逐月 AO 与东亚冬季温度的关系, 发现 1 月、2 月 AO 分别和东亚表面温度的相关关系皆可持续 2 个月以上; AO 正相位时, 西太平洋海表面温度升高,

而海洋运动和变化的缓慢性持续性, 致使西太平洋海温可以承载长达 4 个月 AO 的信号, 进而持续影响东亚地区的温度。

#### 4. 总结与展望

近年来, 随着太阳分光谱辐射卫星观测和高分辨率气候模式的发展, 年代际尺度区域气候对太阳活动的响应得到越来越多关注[8] [10] [77], 太阳紫外辐射作用于地球气候系统的途径和机制研究具有越来越丰富的数据基础和研究平台。本文对这一热点领域近年取得的重大研究进展和关键环节进行了概括性总结, 内容包括: 1) 卫星观测的紫外辐射变化新认识, 基于观测的太阳紫外辐射数据集研发, 及气候系统对其的响应; 2) 太阳紫外辐射直接作用于大气平流层臭氧、温度和环流场, 并通过平流层 - 对流层大气耦合作用将太阳活动的影响信号向对流层和向极地传播, 进而通过北极涛动等大气遥相关型异常影响东亚冬季风和大气环流, 实现对东亚冬季气候的间接影响和作用。通过上述作用机制, 目前的研究认为太阳紫外辐射增强(减弱)常易激发正位相(负位相)北极涛动, 对应东亚冬季暖冬(寒潮低温)。

连续精确的太阳紫外辐射观测, 以及高精度长序列的太阳紫外辐射数据重建仍然是未来研究的基础, 而综合运用新的太阳光谱辐照度观测资料, 海 - 气 - 化学耦合的数值模式工具, 从太阳分光谱作用的角度研究气候系统对太阳活动信号的响应和放大机制是目前和将来气候变化和日地研究的前沿领域。东亚地区由于其特殊的季风气候, 太阳活动的影响途径和物理过程更为复杂, 认识更为不清晰, 恰恰对我国的极端天气和气候预测具有更大影响。基于气候系统模式完善太阳光谱辐照度变化对东亚气候的物理过程和作用机制研究, 量化评估太阳光谱辐照度周期变化对东亚年代际气候变化的贡献, 探讨太阳活动异常与东亚极端气候事件的关联, 为未来适应、应对和减缓气候变化提供科学依据, 也是该领域未来的一个研究重点。

#### 基金项目

本研究由国家自然科学基金(编号 41505079, 41675095, 41790471, 41305131)资助。

#### 参考文献

- [1] Bond, G., Kromer, B., Beer, J., Muscheler, R., Evans, M.N., Showers, W., Hoffmann, S., Lotti-Bond, R., Hajdas, I. and Bonani, G. (2001) Persistent Solar Influence on North Atlantic Climate during the Holocene. *Science*, **294**, 2130-2136. <https://doi.org/10.1126/science.1065680>
- [2] Fleitmann, D., Burns, S.J., Mudelsee, M., Neff, U., Kramers, J., Mangini, A. and Matter, A. (2003) Holocene Forcing of the Indian Monsoon Recorded in a Stalagmite from Southern Oman. *Science*, **300**, 1737-1739. <https://doi.org/10.1126/science.1083130>
- [3] Lean, J. and Rind, D. (1998) Climate Forcing by Changing Solar Radiation. *Journal of Climate*, **11**, 3069-3094. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1998\)011<3069:CFBCSR>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1998)011<3069:CFBCSR>2.0.CO;2)
- [4] Milankovič, M. (1998) Canon of Insolation and the Ice-Age Problem: Zavod za udžbenike i nastavna sredstva.
- [5] Zhou, X., Zhao, P., Liu, G. and Zhou, T. (2011) Characteristics of Decadal-Centennial-Scale Changes in East Asian Summer Monsoon Circulation and Precipitation during the Medieval Warm Period and Little Ice Age and in the Present Day. *Chinese Science Bulletin*, **56**, 3003-3011.
- [6] 钱维宏, 林祥. 大气科学的热点问题[J]. 现代物理知识, 2011(3): 3-12.
- [7] 王绍武, 罗勇, 赵新慈, 闻新宇, 黄建斌. 全球气候变暖原因的争议[J]. 气候变化研究进展, 2011, 7(2): 79-84.
- [8] 肖子牛, 钟琦, 尹志强, 等. 太阳活动年代际变化对现代气候影响的研究进展[J]. 地球科学进展, 2013, 28(12): 1335-1348.
- [9] Friis-Christensen, E. and Lassen, K. (1991) Length of the Solar Cycle: An Indicator of Solar Activity Closely Associated with Climate. *Science*, **254**, 698-700. <https://doi.org/10.1126/science.254.5032.698>
- [10] Gray, L., Beer, J., Geller, M., Haigh, J., Lockwood, M., Matthes, K., Cubasch, U., Fleitmann, D., Harrison, G. and Hood, L. (2010) Solar Influences on Climate. *Reviews of Geophysics*, **48**, RG4001.

- <https://doi.org/10.1029/2009RG000282>
- [11] Le Mouel, J.-L., Blanter, E., Shnirman, M. and Courtillot, V. (2009) Evidence for Solar Forcing in Variability of Temperatures and Pressures in Europe. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, **71**, 1309-1321. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2009.05.006>
- [12] Le Mouel, J.-L., Kossobokov, V. and Courtillot, V. (2010) A Solar Pattern in the Longest Temperature Series from Three Stations in Europe. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, **72**, 62-76. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2009.10.009>
- [13] Lean, J.L. (2010) Cycles and Trends in Solar Irradiance and Climate. *Wiley Interdisciplinary Reviews-Climate Change*, **1**, 111-122. <https://doi.org/10.1002/wcc.18>
- [14] 王瑞丽, 肖子牛, 赵亮, 等. 天气气候中太阳活动信号的敏感区域[J]. 气象科技进展, 2014, 4(4): 19-27.
- [15] Camp, C.D. and Tung, K.-K. (2007) The Influence of the Solar Cycle and QBO on the Late-Winter Stratospheric Polar Vortex. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **64**, 1267-1283. <https://doi.org/10.1175/JAS3883.1>
- [16] Tung, K.K. and Camp, C.D. (2008) Solar Cycle Warming at the Earth's Surface in NCEP and ERA-40 Data: A Linear Discriminant Analysis. *Journal of Geophysical Research—Atmospheres*, **113**, D05114. <https://doi.org/10.1029/2007JD009164>
- [17] Meehl, G.A., Arblaster, J.M., Branstator, G. and van Loon, H. (2008) A Coupled Air-Sea Response Mechanism to Solar Forcing in the Pacific Region. *Journal of Climate*, **21**, 2883-2897. <https://doi.org/10.1175/2007JCLI1776.1>
- [18] White, W.B. and Liu, Z. (2008) Non-Linear Alignment of El Nino to the 11-yr Solar Cycle. *Geophysical Research Letters*, **35**, L19607. <https://doi.org/10.1029/2008GL034831>
- [19] White, W.B. and Liu, Z. (2008) Resonant Excitation of the Quasi-Decadal Oscillation by the 11-Year Signal in the Sun's Irradiance. *Journal of Geophysical Research—Oceans*, **113**, C01002. <https://doi.org/10.1029/2006JC004057>
- [20] Bhattacharyya, S. and Narasimha, R. (2005) Possible Association between Indian Monsoon Rainfall and Solar Activity. *Geophysical Research Letters*, **32**, L05813. <https://doi.org/10.1029/2004GL021044>
- [21] Lambert, F.H. and Allen, M.R. (2009) Are Changes in Global Precipitation Constrained by the Tropospheric Energy Budget? *Journal of Climate*, **22**, 499-517. <https://doi.org/10.1175/2008JCLI2135.1>
- [22] Verschuren, D., Damsté, J.S.S., Moernaut, J., Kristen, I., Blaauw, M., Fagot, M., Haug, G.H., van Geel, B., De Batist, M. and Barker, P. (2009) Half-Precessional Dynamics of Monsoon Rainfall near the East African Equator. *Nature*, **462**, 637-641. <https://doi.org/10.1038/nature08520>
- [23] Wasko, C. and Sharma, A. (2009) Effect of Solar Variability on Atmospheric Moisture Storage. *Geophysical Research Letters*, **36**, L03703. <https://doi.org/10.1029/2009GL039124>
- [24] Wang, Y., Cheng, H., Edwards, R.L., He, Y., Kong, X., An, Z., Wu, J., Kelly, M.J., Dykoski, C.A. and Li, X. (2005) The Holocene Asian Monsoon: Links to Solar Changes and North Atlantic Climate. *Science*, **308**, 854-857. <https://doi.org/10.1126/science.1106296>
- [25] 段长春, 孙绩华. 太阳活动异常与降水和地面气温的关系[J]. 气象科技, 2006, 34(4): 381-386.
- [26] Willson, R.C. (1997) Total Solar Irradiance Trend during Solar Cycles 21 and 22. *Science*, **277**, 1963-1965. <https://doi.org/10.1126/science.277.5334.1963>
- [27] Xiao, Z.N., Li, D.L., Zhou, L.M., et al. (2017) Interdisciplinary Studies of Solar Activity and Climate Change. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, **10**, 325-328. <https://doi.org/10.1080/16742834.2017.1321951>
- [28] Lockwood, M. and Fröhlich, C. (2008) Recent Oppositely Directed Trends in Solar Climate Forcings and the Global Mean Surface Air Temperature. II. Different Reconstructions of the Total Solar Irradiance Variation and Dependence on Response Time Scale. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Science*, **464**, 1367-1385.
- [29] Rottman, G. (2005) The SORCE Mission. *Solar Physics*, **230**, 7-25. <https://doi.org/10.1007/s11207-005-8112-6>
- [30] Kopp, G. and Lean, J.L. (2011) A New, Lower Value of Total Solar Irradiance: Evidence and Climate Significance. *Geophysical Research Letters*, **38**, L01706. <https://doi.org/10.1029/2010GL045777>
- [31] Harder, J.W., Fontenla, J.M., Pilewskie, P., Richard, E.C. and Woods, T.N. (2009) Trends in Solar Spectral Irradiance Variability in the Visible and Infrared. *Geophysical Research Letters*, **36**, L07801. <https://doi.org/10.1029/2008GL036797>
- [32] Lean, J.L., Woods, T.N., Eparvier, F.G., Meier, R.R., Strickland, D.J., Correia, J.T. and Evans, J.S. (2011) Solar Extreme Ultraviolet Irradiance: Present, Past, and Future. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, **116**, A01102. <https://doi.org/10.1029/2010JA015901>
- [33] Haberreiter, M., Schöll, M., Dudok de Wit, T., Kretschmar, M., Misios, S., Tourpali, K. and Schmutz, W. (2017) A New Observational Solar Irradiance Composite. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, **122**, 5910-5930.

- [34] Matthes, K., Funke, B., Andersson, M.E., *et al.* (2017) Solar Forcing for CMIP6(V3.2). *Geoscientific Model Development*, **10**, 2247-2302. <https://doi.org/10.5194/gmd-10-2247-2017>
- [35] Ermolli, I., Matthes, K., DudokdeWit, T., Krivova, N.A., Tourpali, K., Weber, M., Unruh, Y.C., Gray, L., Langematz, U., Pilewskie, P., Rozanov, E., Schmutz, W., Shapiro, A., Solanki, S.K. and Woods, T.N. (2013) Recent Variability of the Solar Spectral Irradiance and Its Impact on Climate Modelling. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **13**, 3945-3977. <https://doi.org/10.5194/acp-13-3945-2013>
- [36] Cahalan, R.F., Wen, G., Harder, J.W. and Pilewskie, P. (2010) Temperature Responses to Spectral Solar Variability on Decadal Time Scales. *Geophysical Research Letters*, **37**, L07705. <https://doi.org/10.1029/2009GL041898>
- [37] Merkel, A.W., Harder, J.W., Marsh, D.R., Smith, A.K., Fontenla, J.M. and Woods, T.N. (2011) The Impact of Solar Spectral Irradiance Variability on Middle Atmospheric Ozone. *Geophysical Research Letters*, **38**, L13802. <https://doi.org/10.1029/2011GL047561>
- [38] Ineson, S., Scaife, A.A., Knight, J.R., Manners, J.C., Dunstone, N.J., Gray, L.J. and Haigh, J.D. (2011) Solar Forcing of Winter Climate Variability in the Northern Hemisphere. *Nature Geoscience*, **4**, 753-757. <https://doi.org/10.1038/ngeo1282>
- [39] Haigh, J.D., Winning, A.R., Toumi, R. and Harder, J.W. (2010) An Influence of Solar Spectral Variations on Radiative Forcing of Climate. *Nature*, **467**, 696-699. <https://doi.org/10.1038/nature09426>
- [40] 杨鉴初. 近年来国外关于太阳活动对大气环流和天气影响的研究[J]. 气象学报, 1962(2): 177-194.
- [41] 石广玉. 大气辐射学[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [42] Lean, J. (1989) Contribution of Ultraviolet Irradiance Variations to Changes in the Sun's Total Irradiance. *Science*, **244**, 197-200. <https://doi.org/10.1126/science.244.4901.197>
- [43] Haigh, J.D. (2007) The Sun and the Earth's Climate. *Living Reviews in Solar Physics*, **4**, 1-64.
- [44] Randel, W.J. and Wu, F. (2007) A Stratospheric Ozone Profile Data Set for 1979-2005: Variability, Trends, and Comparisons with Column Ozone Data. *Journal of Geophysical Research—Atmospheres*, **112**, D08308. <https://doi.org/10.1029/2006JD007339>
- [45] Soukharev, B.E. and Hood, L.L. (2006) Solar Cycle Variation of Stratospheric Ozone: Multiple Regression Analysis of Long-Term Satellite Data Sets and Comparisons with Models. *Journal of Geophysical Research—Atmospheres*, **111**, D20314. <https://doi.org/10.1029/2006JD007107>
- [46] Randall, C., Harvey, V., Singleton, C., *et al.* (2007) Energetic Particle Precipitation Effects on the Southern Hemisphere Stratosphere in 1992-2005. *Journal of Geophysical Research*, **112**, D08308. <https://doi.org/10.1029/2006JD007696>
- [47] Gray, L.J., Rumbold, S.T. and Shine, K.P. (2009) Stratospheric Temperature and Radiative Forcing Response to 11-Year Solar Cycle Changes in Irradiance and Ozone. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **66**, 2402-2417. <https://doi.org/10.1175/2009JAS2866.1>
- [48] Shindell, D.T., Faluvegi, G., Miller, R.L., *et al.* (2006) Solar and Anthropogenic Forcing of Tropical Hydrology. *Geophysical Research Letters*, **33**, L24706. <https://doi.org/10.1029/2006GL027468>
- [49] Frame, T.H.A. and Gray, L.J. (2010) The 11-Yr Solar Cycle in ERA-40 Data: An Update to 2008. *Journal of Climate*, **23**, 2213-2222. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI3150.1>
- [50] Shibata, K. and Deushi, M. (2008) Long-Term Variations and Trends in the Simulation of the Middle Atmosphere 1980-2004 by the Chemistry-Climate Model of the Meteorological Research Institute. *Annales Geophysicae*, **26**, 1299-1326. <https://doi.org/10.5194/angeo-26-1299-2008>
- [51] Crooks, S.A. and Gray, L.J. (2005) Characterization of the 11-Year Solar Signal using a Multiple Regression Analysis of the ERA-40 Dataset. *Journal of Climate*, **18**, 996-1015. <https://doi.org/10.1175/JCLI-3308.1>
- [52] Randel, W.J., Shine, K.P., Austin, J., *et al.* (2009) An Update of Observed Stratospheric Temperature Trends. *Journal of Geophysical Research—Atmospheres*, **114**, D02107. <https://doi.org/10.1029/2008JD010421>
- [53] Balachandran, N.K. and Rind, D. (1995) Modeling the Effects of UV Variability and the Qbo on the Troposphere-Stratosphere System. 1. The Middle Atmosphere. *Journal of Climate*, **8**, 2058-2079. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1995\)008<2058:MTEOUV>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1995)008<2058:MTEOUV>2.0.CO;2)
- [54] Kodera, K. and Kuroda, Y. (2002) Dynamical Response to the Solar Cycle. *Journal of Geophysical Research—Atmospheres*, **107**, 4749. <https://doi.org/10.1029/2002JD002224>
- [55] Baldwin, M.P. and Dunkerton, T.J. (2005) The Solar Cycle and Stratosphere-Troposphere Dynamical Coupling. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, **67**, 71-82. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2004.07.018>
- [56] Kodera, K. (2002) Solar Cycle Modulation of the North Atlantic Oscillation: Implication in the Spatial Structure of the NAO. *Geophysical Research Letters*, **29**, 59-51-59-54. <https://doi.org/10.1029/2001GL014557>



- [57] Kodera, K. (2003) Solar Influence on the Spatial Structure of the NAO during the Winter 1900-1999. *Geophysical Research Letters*, **30**, 1175. <https://doi.org/10.1029/2002GL016584>
- [58] Ruzmaikin, A., Feynman, J., Jiang, X., *et al.* (2004) The Pattern of Northern Hemisphere Surface Air Temperature during Prolonged Periods of Low Solar Output. *Geophysical Research Letters*, **31**, L12201. <https://doi.org/10.1029/2004GL019955>
- [59] Thompson, D.W.J., Baldwin, M.P. and Solomon, S. (2005) Stratosphere-Troposphere Coupling in the Southern Hemisphere. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **62**, 708-715. <https://doi.org/10.1175/JAS-3321.1>
- [60] 范丽军, 李建平, 韦志刚, 等. 北极涛动和南极涛动的年变化特征[J]. 大气科学, 2003, 7(3): 419-424.
- [61] Matthes, K., Kuroda, Y., Kodera, K., *et al.* (2006) Transfer of the Solar Signal from the Stratosphere to the Troposphere: Northern Winter. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **111**, D6. <https://doi.org/10.1029/2005JD006283>
- [62] 董仕. 太阳紫外线异常变化对气候系统影响的数值模拟[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国气象局气象科学研究所, 2015.
- [63] 张庆云. 夏季长江淮河流域异常降水事件环流差异及机理研究[J]. 大气科学, 2014, 38(4): 656-669.
- [64] 王瑞丽, 肖子牛, 朱克云. 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, 2015, 39(4): 815-826.
- [65] Chen, W. and Zhou, Q. (2012) Modulation of the Arctic Oscillation and the East Asian Winter Climate Relationships by the 11-year Solar Cycle. *Advances in Atmospheric Sciences*, **29**, 217-226. <https://doi.org/10.1007/s00376-011-1095-3>
- [66] Gong, D.Y., Wang, S.W. and Zhu, J.H. (2001) East Asian Winter Monsoon and Arctic Oscillation. *Geophysical Research Letters*, **28**, 2072-2076. <https://doi.org/10.1029/2000GL012311>
- [67] Wu, B. and Wang, J. (2002) Possible Impacts of Winter Arctic Oscillation on Siberian High, the East Asian Winter Monsoon and Sea-Ice Extent. *Advances of Atmospheric Sciences*, **19**, 297-320. <https://doi.org/10.1007/s00376-002-0024-x>
- [68] 毛睿, 龚道溢, 房巧敏. 冬季东亚中纬度西风急流对我国气候的影响[J]. 应用气象学报, 2007, 18(2): 137-146.
- [69] 琚建华, 任菊章, 吕俊梅. 北极涛动年代际变化对东亚北部冬季气温增暖的影响[J]. 高原气象, 2004, 23(4): 429-434.
- [70] 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[J]. 气象学报, 2014, 72(5): 835-852.
- [71] 武炳义, 卞林根, 张人禾. 冬季北极涛动和北极海冰变化对东亚气候变化的影响[J]. 极地研究, 2004, 16(3): 211-220.
- [72] 黄荣辉, 魏科, 陈际龙, 陈文. 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, 2007, 31(6): 1033-1048.
- [73] 李春晖, 管兆勇, 何金海, 等. 西太平洋海温和南方涛动与中国冬季气候异常关系年代际变化的对比分析[J]. 应用气象学报, 2005, 16(1): 105-113.
- [74] 陈文, 兰晓青, 王林, 等. ENSO 和北极涛动对东亚冬季气候异常的综合影响[J]. 科学通报, 2013, 58(8): 634-641.
- [75] He, S. and Wang, H.J. (2013) Impact of the November/December Arctic Oscillation on the following January Temperature in East Asia. *Journal of Geophysical Research*, **118**, 12981-12998.
- [76] 董仕, 肖子牛. 冬季北极涛动对东亚表面温度的持续异常影响[J]. 应用气象学报, 2015, 26(4): 422-431.
- [77] 赵亮, 徐影, 王劲松, 丁一汇, 肖子牛. 太阳活动对近百年气候变化的影响研究进展[J]. 气象科技进展, 2011, 1(4): 37-48.

**知网检索的两种方式：**

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2163-3967，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：[ag@hanspub.org](mailto:ag@hanspub.org)