

# Research Progress of the Tibetan Plateau Snow's Response and Amplification Mechanism to the Solar Activity

Lin Suo<sup>1</sup>, Yan Song<sup>2</sup>, Tiangui Xiao<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu Sichuan

<sup>2</sup>China Meteorological Administration Training Center, Beijing

Email: i\_sunshine\_081002@yeah.net

Received: Jan. 30<sup>th</sup>, 2019; accepted: Feb. 12<sup>th</sup>, 2019; published: Feb. 20<sup>th</sup>, 2019

---

## Abstract

This paper briefly reviewed the spatio-temporal change of the snow over the Tibetan Plateau and its links to regional climate and the East Asian monsoon. Based on reviews on the weather systems and regional climatic modes in response sensitive areas to the sun, *i.e.* the North Pole and the northern Atlantic Ocean, tropical and monsoon regions, with two impact mechanisms of the solar activity on the climate change, that is sea-air couple and stochastic resonance, the response mechanism of plateau snow to the solar activity and its amplification were discussed, and the future research route was exhibited.

## Keywords

The Solar Activity, The Snow over the Tibetan Plateau, Amplification Mechanism, Research Progress

---

# 青藏高原积雪对太阳活动的响应及放大机制研究进展

索琳<sup>1</sup>, 宋燕<sup>2</sup>, 肖天贵<sup>1</sup>

<sup>1</sup>成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都

<sup>2</sup>中国气象局气象干部培训学院, 北京

Email: i\_sunshine\_081002@yeah.net

收稿日期: 2019年1月30日; 录用日期: 2019年2月12日; 发布日期: 2019年2月20日

**文章引用:** 索琳, 宋燕, 肖天贵. 青藏高原积雪对太阳活动的响应及放大机制研究进展[J]. 气候变化研究快报, 2019, 8(2): 144-153. DOI: 10.12677/ccrl.2019.82016

## 摘要

简要回顾了青藏高原积雪的时空演变特征及其与区域气候模态和季风活动等的联系, 基于太阳活动信号敏感区北极-北大西洋、热带、季风活动区的天气系统以及区域气候模态, 以太阳活动影响气候变化的两种机制, 即海气耦合和随机共振, 讨论青藏高原积雪对太阳活动的响应及其可能的放大机制, 给出了未来的研究路线。

## 关键词

太阳活动, 高原积雪, 放大机制, 研究进展

Copyright © 2019 by author(s) 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

全球气候经历了无数个冷暖交替的时期, 近 100 年最引人关注的是温室效应[1]引发的全球变暖, IPCC 第 5 次报告([http://www.ipcc.ch/activities/key\\_dates\\_AR5\\_schedulepdf.pdf](http://www.ipcc.ch/activities/key_dates_AR5_schedulepdf.pdf))指出, 全球平均气温 1880~2012 年大约升高了 0.85℃。但是, IPCC 报告中对太阳活动引发气候异常的放大作用考虑较少, 作为自然变率要素之一的太阳活动对气候变化的影响引起广泛关注[2]。

太阳辐射是驱动大气运动的总能量, 与气候变化密切相关, 地球表面的重要气候要素——降水[3]-[8]、气温[9]-[20], 以及各地区的旱涝格局[21]-[31], 普遍显示出与太阳 11 a 或 22 a 周期的密切相关性; 大气活动中心如副热带高压[32] [33] [34] [35] [36], 区域模态如 AO [37], NAO [38] [39], PDO [40], ENSO [41] [42] [43]等, 也检测出普遍含有太阳 11 a 或 22 a 周期信号。虽然实际观测到的太阳辐射的变化很微弱[44], 被认识是不足以引起气候变化[45] [46]。但是, 太阳活动能驱动气候变化, 那么必然有一个信号放大的过程, 一般认为这个过程是非线性的[47]。

近年来研究结果表明太阳活动影响气候变化的途径有三种: 太阳总辐射机制(Total Solar Irradiance, 简称 TSI) [48] [49], 太阳短波辐射变化机制(Ultraviolet, 简称 UV) [50]和来自于宇宙射线的能量粒子机制(Galactic Cosmic Radiation, 简称 GCR) [51] [52]。其中, TSI 机制[45] [53]是公认最直接和最常用的太阳辐射影响气候变化的机制, 其影响气候变化的方式有三种: 海气耦合, 随机共振和温盐环流。温盐环流是由密度梯度驱动的深层洋流, 很好地解释了古气候中的新仙女木事件, 证明了温盐环流是高、低纬间热量传递的纽带。但是, 在气候变化对太阳活动的响应研究中, 它的影响因子相对复杂, 且由于观测资料的匮乏使得其机制研究更多地源自气候模式研究。因而, 从海气耦合和随机共振的角度来讨论太阳活动信号, 可能得到更多的观测事实。

青藏高原积雪作为冰冻圈最活跃的分量之一, 也是气候变化敏感的指示器。数值模拟研究表明, 高原积雪主要是通过大气环流作用于亚洲季风, 从而对区域降水及其分布造成影响[54]。研究表明, 冬季青藏高原积雪偏多会造成高原地面热源减弱, 从而导致冬季风偏强; 而春季积雪融化后的“湿土壤”会延长高原积雪对天气气候的影响过程, 从冬季持续到夏季, 从而也会导致东亚夏季风和南亚夏季风的减弱[55], 使得西太平洋副热带高压偏南, 长江中下游多雨[56] [57] [58] [59], 华南和华北降水减少[60]。与

此同时, 高原积雪受到 ENSO 的影响[61], 与 ENSO 一起共同对我国夏季降水异常产生显著影响[62]。

宋燕等[63]研究发现青藏高原积雪雪深与 11 a 周期的太阳活动间具有滞后相关, 与积雪相关的东亚冬季风以及北半球冬季最强的信号北极涛动 AO 之间也有滞后相关, 其中积雪深度中的太阳射电通量信号滞后 2~6 年, AO 中滞后 6~9 年, 而东亚冬季风中滞后 4~9 年, 同时, 高原积雪超前于北极涛动和东亚冬季风, 北极涛动又超前于东亚冬季风, 这也意味着, 在高原积雪中的太阳活动信号逐渐传递给 AO 再同时或随后传递给东亚冬季风, 太阳活动的信号在其中有传递的过程, 并且放大了它的作用, 而太阳活动信号是怎样在其中传递? 如何被放大的? 我们知道, 青藏高原积雪影响气候变化有两种途径, 一种是通过反射率, 改变辐射平衡, 二是融雪效应, 改变高原热源分布, 从而引起气候变化。那么高原积雪的哪种影响途径对响应关系更为重要? 高原积雪是气候变化的外强迫之一, 它与大气活动中心、区域气候模态存在遥相关关系, 太阳活动信号与它们也有响应关系, 那么高原积雪与这些模态的相互作用中, 是否有太阳活动的调制作用? 这些都是亟待研究的科学问题。

本文将围绕青藏高原积雪的观测事实, 综合近年来与太阳活动相联系的气候要素、气候系统或气候模态的研究进展, 结合高原积雪与它们之间的关系, 从青藏高原积雪对太阳活动变化的响应可能通过海气耦合、随机共振的方式放大太阳活动信号的研究思路出发, 探索高原积雪对太阳活动响应的物理过程及可能的放大机制的一种研究思路。

## 2. 青藏高原积雪时空演变及其对太阳活动的响应

基于青藏高原站点资料, 分析 20 世纪 60 年代至 21 世纪 10 年代的青藏高原积雪的演变特征, 研究结果普遍认为, 20 世纪 70 年代前后积雪偏少, 20 世纪 80 年代前后偏多, 20 世纪 90 年代末又转为偏少, 这种偏少一直延续至 21 世纪 10 年代。总体来看, 高原积雪经历了“偏少 - 偏多 - 偏少”的演变过程[64] [65] [66] [67] [68]。基于被动微波遥感数据反演的积雪深度资料研究发现, 在 20 世纪 80 年代至 21 世纪 10 年代, 高原积雪呈显著增长趋势[69]。若未经过 5 a 滑动平均, 积雪深度反演资料分析表明 1988 年之后整体上青藏高原雪深是减少趋势, 而积雪日数则是增加趋势[70], 形成争议结果, 这可能与资料特点有关, 站点资料的不均匀分布与含有 10% 精度误差却覆盖整个高原的反演资料可能造成不同结果。

讨论不同季节的高原积雪年代际变化, 发现 1961~2006 年冬、春季积雪呈弱增加趋势[71], 1981~2010 年, 冬季减少幅度最大, 春季次之[72]。2000 年以后, 秋季显著增加, 春季明显减少[73], 但积雪最大值仍然在春季[74]。这表明高原积雪虽然在年际变化上有较为一致的“少 - 多 - 少”的结论, 但是在讨论季节上的同一时间序列得出的结论并不一致。Oerlemans *et al.* [75]对比反照率与雪深的关系, 发现冬季积雪的反照率大于春季, 夏季最低, 然后缓慢增加, 积雪反照率随太阳高度角的增加而降低(图 1)。由此, 可以利用日反照率时间序列来表示冰雪面反照率的季节变化特征[77], 从而建立与青藏高原积雪的关系, 讨论不同季节的高原积雪对太阳活动的响应是否一致。

高原积雪影响气候变化的另一个因素是热源异常。青藏高原是中国夏季最强的热源, 冬季则是相对冷源, 其造成的热力异常与东亚大气环流和我国降水带的变化相联系。许多观测事实[78] [79] [80] [81]反映了高原热源异常对东亚和太平洋地区的大气环流有很大的影响, 高原积雪也有可能是通过热源异常与太阳活动变化产生联系。高原热源的季节变化显著, 那么进一步细化讨论由它引起的环流异常和气候变化是非常有必要的。

青藏高原积雪的空间分布基本与山脉走向一致, 多处于海拔较高的山区, 呈四周大, 中间小的格局[73] [82] [83], 腹地的高山山脉上也有较大的分布[84], 积雪大值中心常集中在高原西南缘和东南地区, 其中东南部是雪深大值区, 也是季节、年际和年代际变化最显著的地区。积雪较少的区域分布在中部沿东北 - 西南走向的条形地带[69], 即柴达木盆地及高原上多处河谷地带[72] [73] [85], 一般认为可能由于

南北两侧的高山阻挡湿空气的输送所致[72] [86]。高原积雪空间的不均匀分布, 导致对气候变化响应的敏感区也有显著的空间差异[87], 当青藏高原积雪分东、西部[88]模拟研究发现西部积雪对东部积雪有促进作用, 南、北部[89]分区讨论与东亚降水的关系时, 呈现出北部积雪影响时间更长的特征, 这也意味着, 不同区域的积雪对太阳活动的响应可能不同, 值得进一步研究。

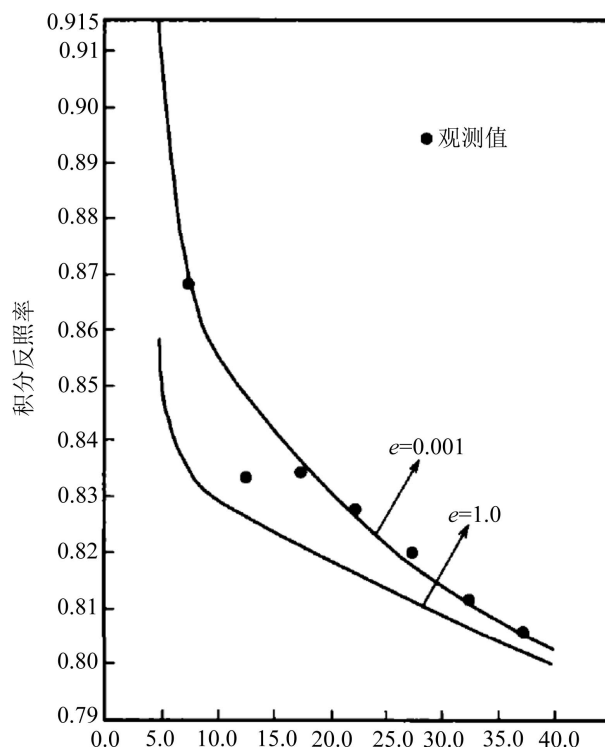


Figure 1. Dependence of integrated albedo on solar elevation [76]

图 1. 积雪反照率 - 太阳高度角曲线[76]

### 3. 太阳活动信号的放大机制

近些年的研究, 探讨太阳活动信号放大的机制研究日益成为重点, 相较太阳活动信号与气候要素、大气活动中心或者区域气候模态间的相互关系, 越来越重视它们产生联系的物理过程的探讨。肖子牛等[47] [53]认为在一些特殊的地区和大气环流系统中, 对太阳活动的变化响应更为敏感, 并且中高纬大气环流对太阳活动响应在冬季最为明显, 热带大气环流与太阳活动在夏季有更显著的关联。由这一观测事实, 引伸为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, 相应地有许多相关的大气活动中心或区域气候模态可能参与其中, 即太阳活动响应的敏感区在北极 - 北大西洋、热带以及季风活动区。海 - 气耦合和随机共振方式在季风活动中普遍存在, 这意味着从这两个角度出发, 可能获得高原积雪对太阳活动响应放大机制的有益认识。

#### 3.1. 海 - 气耦合机制

北大西洋涛动(NAO)是北极涛动(AO)的一种形式, 是冬季中高纬地区重要的气候模态。研究表明, AO/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[90] [91]。太阳活动与极地环流型的关系存在非对称性, 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, 更像 NAO 型[37] [92] [93] [94] [95]。王瑞丽等[96]利用 10.7 cm

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,AO 对东亚冬季风的影响在太阳活动强的时候才是显著的。吴玲玲等[97]发现在太阳活动活跃期,NAO 空间结构与中东急流轴线的空间形态的关系,也存在类似的不对称性,证明了太阳活动对 NAO 与中东急流轴之间的关系存在着调制作用。宋燕等[63]通过讨论青藏高原积雪与 AO、东亚冬季风之间所具有的显著的滞后相关关系,发现在高原积雪偏多时期,AO 处于正位相,东亚冬季风偏弱,并且结合 2012/2013 年冬季高原积雪偏少、北极涛动负位相以及东亚冬季风偏强的观测事实证实了这个结论,认为青藏高原积雪异常超前调节北极涛动的异常和东亚冬季风的强弱。这样将太阳活动、高原积雪、东亚季风环流相联系,为探索太阳活动在其中的调制作用,以及可能具有的放大机制验证了可能性。

### 3.2. 随机共振机制

ENSO 是热带海洋上最强的年际信号,与东亚大气环流、季风和降水密切相关。

董林垚[98]研究太阳黑子运动和厄尔尼诺(ENSO)对日本吉野川流域降雨影响时发现,太阳活动信号通过 ENSO 作用于流域降水。周群[99]研究太阳活动 11 年周期对 ENSO 年海温异常演变以及与之相联系的东亚降水的影响,发现在 ENSO 发展期秋季,随着赤道东太平洋海温的增暖,太阳活动低年印度洋海温明显升高,并在随后的 ENSO 盛期印度洋海温正异常明显偏强,呈现出太阳活动影响的不对称响应,这与太阳活动对热带海温的影响有关,强(弱)年时会在太平洋强迫出类 La Nina (El Nino)的海温异常,导致在热带中东太平洋上升并在热带西太平洋下沉的异常 Walker 环流明显偏弱(偏强)。ENSO 发展期秋季东亚地区降水异常更为显著,这与位于菲律宾附近的反气旋和我国华北北部的气旋的强度在太阳活动高、低年有显著差异有关。这些研究结果表明 ENSO 可以将太阳活动信号传递并放大。青藏高原积雪与 ENSO 相联系并调制降水分布的研究[62] [100] [101] [102]也很多,那么高原积雪与 ENSO 协同对太阳活动响应值得进一步研究。

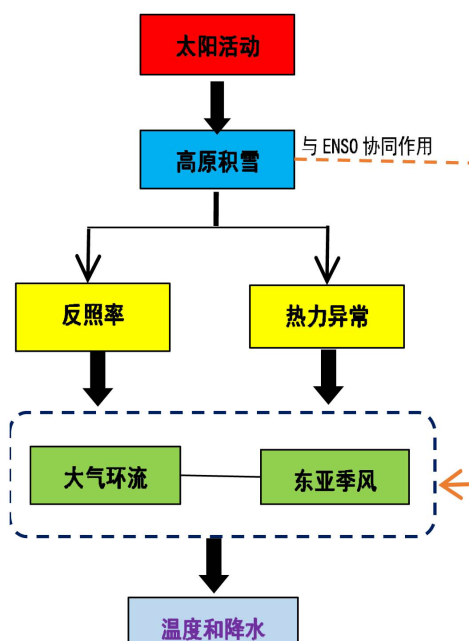
### 3.3. 高原积雪、太阳活动与东亚冬季风 - 夏季风的响应关系

与大尺度的夏季风、冬季风有关的天气系统和过程很多。从全球范围来讲,季风活动中的主要系统构成了复杂的局地 Hadley 环流[103]。东亚冬季风和夏季风是复杂的气候系统达到平衡的结果,作为气候要素的降水与温度可以反映它们的强度。

根据宋燕等[104]的研究,高原积雪可以直接响应太阳活动,在太阳活动周期的不同位相,中国夏季雨带位置呈现不同的空间变化,这意味着,在太阳活动的调制作用下,高原积雪通过改变大气环流而影响中国雨带分布,呈现出高原积雪对太阳活动响应的放大作用,而这一放大作用可能与东亚季风相联系。Zhao [105]通过对 11 a 周期太阳黑子与东亚地区 6 月降水带分布的分析,认为东亚地区在梅雨期的平均降水纬度分布受到太阳活动变化的调制作用,太阳活动强(弱),雨带偏北(南),进一步认为这是东亚夏季风北部边界作为太阳活动变化敏感区的一个观测事实。程国生[106]基于江淮梅雨与太阳活动 11 a 周期的相关性,认为太阳活动与江淮梅雨间存在太阳活动 - 西太平洋副高 - 江淮梅雨这一过程链。

ENSO 一般在春季开始发展,到冬季达到增温最强,再到次年春季开始衰减,信号是跨年的。青藏高原积雪与冬季风、夏季风间的关系也有类似的以大气环流作为桥梁的跨年联系。周群等[107]研究发现,在太阳活动偏低年,西北太平洋附近的异常反气旋明显增强,范围扩大,其西北侧的西南气流强度偏强并向北延伸,从而使春季多雨地区绵延到内蒙古乃至西北地区;而夏季降水主要集中在长江流域中游。在太阳活动偏高年的次年春、夏季,不论是环流异常还是降水场的异常都明显偏弱,呈现一种不对称的响应结果。同时,太阳活动偏低年,从冬季至夏季与 ENSO 有关的东亚冬季风异常相联系的印度洋及热带西太平洋海温正相关范围明显偏大,赤道东太平洋的显著正海温异常衰减迅速,即东亚冬、夏季风之

间的联系主要来自于与 ENSO 有关的东亚冬季风异常。高原积雪信号也可能通过这一过程将信号传递至夏季, 实现隔季相关。



**Figure 2.** Technical diagram of research on mechanism of snow response over the Tibetan Plateau to the solar activity and amplification

**图 2.** 高原积雪对太阳活动响应及其放大机制的研究路线

#### 4. 结语

太阳活动影响气候变化, 还有许多问题值得探讨。青藏高原积雪对太阳活动的响应是其中重要的一部分, 二者在北极-北大西洋、热带气候模态、季风活动中都有联系, 高原积雪对太阳活动响应过程中基于放大机制的探讨, 一方面可以补充必要的观测事实, 一方面有利于理解自然变率对气候变化的影响过程, 建立更为全面的气候和气候变化预报模型。这样在太阳活动自身变化、影响气候变化的研究进展中, 有利于进一步探讨气候变化的原因和规律, 正确地评估人类活动对气候变化的影响。

未来的研究方向可以从高原积雪对太阳活动的响应着手, 重点分析在太阳活动调制下积雪反照率和热力异常对东亚大气环流、东亚季风和中国降水的影响, 比较高原积雪响应太阳活动的两种途径对气候变化影响的重要性, 并且进一步研究太阳活动对高原积雪与 ENSO 协同作用影响东亚气候异常的物理现象、过程和机制, 研究结果将对研究自然变率引致气候变化的机制提供参考。研究路线如图 2 所示。

#### 致 谢

本文在宋燕高级工程师的悉心指导下得以完成, 在此向宋燕老师致以诚挚的感谢!

#### 参考文献

- [1] 张志华, 陈幸荣, 蔡怡. 自然气候变率对近百年气候变化的影响研究进展[J]. 海洋预报, 2013, 30(3): 78-85.
- [2] 陈幸荣, 张志华, 蔡怡. 近百年气候变化及可能的自然影响因素研究进展[J]. 海洋预报, 2013, 30(1): 78-85.
- [3] 张肖南, 史兴民, 杨尚英. 西安夏、秋季降水与太阳黑子的关系[J]. 干旱区研究, 2013, 30(3): 485-490.
- [4] 谭亮成, 蔡演军, 安芷生. 陇西地区 2000 年来降雨变化及其驱动因子分析[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(5):

109-116.

- [5] 池俊成, 顾光琴. 太阳活动对京津冀地区旱涝的影响[J]. 高原气象, 2009, 28(5): 1175-1180.
- [6] 程国生, 杜亚军, 陈烨. 近 52 年太阳活动与江淮梅雨异常关系分析[J]. 自然灾害学报, 2012, 21(4): 161-167.
- [7] 李可军, 向福元, 李建勇, 等. 中纬度地区的洪水与太阳活动关系的研究[J]. 云南天文台台刊, 2000(2): 34-38.
- [8] 潘静, 李崇银, 顾薇. 太阳活动对中国东部夏季降水异常的可能影响[J]. 气象科学, 2010, 30(5): 574-581.
- [9] Camp, C.D. and Tung, K.K. (2007) Surface Warming by the Solar Cycle as Revealed by the Composite Mean Difference Projection. *Geophysical Research Letters*, **34**, L14703. <https://doi.org/10.1029/2007GL030207>
- [10] Raspopov, O.M., Dergachev, V.A. and Kolstrom, T. (2004) Periodicity of Climate Conditions and Solar Variability Derived from Dendrochronological and Other Palaeo Climatic Data in High Latitudes. *Palaeogeography*, **209**, 127-139. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2004.02.022>
- [11] 刘栋杉, 延军平, 李双双. 太阳活动和大气涛动对天山南北气温波动的综合影响[J]. 资源科学, 2014, 36(3): 502-511.
- [12] 曲维政, 陈璐, 黄菲, 等. 南半球对流层气候年代际变化及其与太阳活动的联系[J]. 地球科学进展, 2005, 20(7): 794-803.
- [13] 赵新华, 冯学尚. 太阳活动与地球表面温度变化的周期性和相关性[J]. 科学通报, 2014, 59(14): 1284-1292.
- [14] 刘毅, 陆春晖. 冬季太阳 11 年周期活动对大气环流的影响[J]. 地球物理学报, 2010, 53(6): 1269-1277.
- [15] 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.
- [16] 刘复刚, 曲维政, 王建, 等. 太阳轨道运动——太阳磁场变化与地球高层大气温度准 22 年周期循环的联系[J]. 地球物理学进展, 2014, 29(2): 512-517.
- [17] 李慧芳, 殷淑燕. 不同区域冬季气温与太阳黑子活动的关系[J]. 干旱区研究, 2016, 33(2): 345-352.
- [18] 杨春霞, 伍宏发, 胡丹婷. 短中时间尺度上的气温变化和太阳辐射之间的关系研究[J]. 中国科学: 地球科学, 2011, 41(3): 413-424.
- [19] 张晓芳, 刘松涛, 查石祥, 等. 太阳活动 11 年周期对气象参数影响[J]. 地球物理学进展, 2011, 26(1): 172-181.
- [20] 贾朋群, 陆龙骅, 薛正夫, 等. 火山喷发和太阳活动对我国温度影响的研究[J]. 气候与环境研究, 1999(2): 58-66.
- [21] 窦睿音, 延军平. 关中平原太阳黑子活动周期与旱涝灾害的相关性分析[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(8): 76-82.
- [22] 孙长安, 杨本有. 太阳活动与长江中下游地区旱涝的规律[J]. 天文学报, 1992(2): 179-185.
- [23] 阮雪琴, 马福慧. 太阳活动、黑潮海温年季变化与长江中游旱涝灾害[J]. 空间科学学报, 1995(4): 326-332.
- [24] 李春晖, 杨志峰. 太阳活动与黄河流域降水关系分析[J]. 气象, 2005(11): 43-45.
- [25] 刘广深, 米家榕, 戚长谋, 等. 东北地区降水周期与太阳活动的关系[J]. 长春地质学院学报, 1996(4): 63-68.
- [26] 曹永强, 刘佳佳, 高璐. 近 54 年来辽西北地区降水与太阳黑子关系研究[J]. 地理科学, 2015, 35(8): 1027-1032.
- [27] 郑晓东, 鲁帆, 马静. 近 50 年淮河流域旱涝与太阳黑子的关系研究[J]. 水电能源科学, 2013, 31(2): 1-4+241.
- [28] 王璐璐, 延军平, 韩晓敏. 环渤海地区旱涝灾害与太阳黑子活动 ENSO 关系的统计研究[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2016, 55(1): 123-130.
- [29] 蔡学湛, 张容焱. 东南沿海地区旱涝气候准周期振荡特征及其变化趋势[J]. 热带地理, 1997(4): 371-377.
- [30] 吴梦初, 延军平. 太阳活动与 ENSO 事件对云南省旱涝灾害的影响[J]. 水土保持通报, 2014, 34(4): 280-284.
- [31] 姜彤, 张强, 王苏民. 近 1000 年长江中下游旱涝与气候变化关系[J]. 第四纪研究, 2004(5): 518-524.
- [32] 徐群, 杨秋明. 北半球副热带高压强度对太阳活动的响应[J]. 气象科学, 1994(3): 225-232.
- [33] 徐群, 李瑞芸, 曹鸿兴. 太阳活动对夏季副热带高压强度的显著影响[J]. 气象科学, 1984(1): 1-11.
- [34] 徐群, 金龙. 太阳活动与北半球副热带高压强度的耦合振荡[J]. 大气科学, 1986(2): 204-211+170.
- [35] 张先恭. 西太平洋副热带高压的气候振动[J]. 气象科学研究院院刊, 1988(1): 1-9.
- [36] Li, C. and Zhang, Q.Y.J. (2015) An Observed Connection between Wintertime Temperature Anomalies over Northwest China and Weather Regime Transitions in North Atlantic. *Journal of Meteorological Research*, **29**, 201-213. <https://doi.org/10.1007/s13351-015-4066-2>
- [37] 曲维政, 李艳芳, 李春, 等. 北极涛动低空大气环流特征及其与太阳活动的联系[J]. 地球物理学报, 2014, 57(5):

1377-1386.

- [38] Kodera, K.J. (2002) Solar Cycle Modulation of the North Atlantic Oscillation: Implication in the Spatial Structure of the NAO. *Geophysical Research Letters*, **29**, 1218. <https://doi.org/10.1029/2001GL014557>
- [39] Ogi, M., Yamazaki, K. and Tachibana, Y.J. (2003) Solar Cycle Modulation of the Seasonal Linkage of the North Atlantic Oscillation (NAO). *Geophysical Research Letters*, **30**, 2170. <https://doi.org/10.1029/2003GL018545>
- [40] 曲维政, 黄菲, 赵进平, 等. 北太平洋年代际涛动与太阳活动的联系[J]. 海洋与湖沼, 2008, 39(6): 552-560.
- [41] Meehl, G.A., Arblaster, J.M., Branstator, G., et al. (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>
- [42] 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>
- [43] 贺祥, 林振山. 日食、太阳黑子与地球自转对 El Nino(La Nina)影响与预测[J]. 地球物理学进展, 2016, 31(1): 44-53.
- [44] Willson, R.C.J. (1997) Total Solar Irradiance Trend during Solar Cycle 21 and 22. *Science*, **277**, 1963-1965. <https://doi.org/10.1126/science.277.5334.1963>
- [45] 周立旻, Tinsley, B.A., 郑祥民, 等. 太阳活动驱动气候变化空间天气机制研究进展[J]. 地球科学进展, 2007(11): 1099-1108.
- [46] 秦大河, 罗勇. 全球气候变化的原因和未来变化趋势[J]. 科学对社会的影响, 2008(2): 16-21.
- [47] 肖子牛, 霍文娟. 太阳活动影响气候的放大过程之时空选择性[J]. 气象科技进展, 2016, 6(3): 141-147.
- [48] Wetherald, R.T. and Manabe, S. (1975) The Effects of Changing the Solar Constant on the Climate of a General Circulation Model. *Atmospheric Science*, **32**, 2044-2059. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1975\)032<2044:TEOCTS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1975)032<2044:TEOCTS>2.0.CO;2)
- [49] 赵亮, 徐影, 王劲松, 等. 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.
- [50] Lean, J., Beer, J. and Bradley, R. (1995) Reconstruction of Solar Irradiance since 1610: Implications for Climate Change. *Geophysical Research Letters*, **22**, 3195-3198. <https://doi.org/10.1029/95GL03093>
- [51] Ney, E.P.J. (1959) Cosmic Radiation and the Weather. *Nature*, **183**, 451-452. <https://doi.org/10.1038/183451a0>
- [52] Tinsley, B.A.J. (2000) Influence of Solar Wind on the Global Electric Circuit, and Inferred Effects on Cloud Microphysics, Temperature, and Dynamics in the Troposphere. *Space Science Reviews*, **94**, 231-258. <https://doi.org/10.1023/A:1026775408875>
- [53] 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.
- [54] 王叶堂, 何勇, 侯书贵. 青藏高原冬春季积雪对亚洲夏季风降水影响的研究[J]. 冰川冻土, 2008(3): 452-460.
- [55] 朱玉祥, 丁一汇, 刘海文. 青藏高原冬季积雪影响我国夏季降水的模拟研究[J]. 大气科学, 2009, 33(5): 903-915.
- [56] 韦志刚, 陈文, 黄荣辉. 青藏高原冬春季积雪异常影响中国夏季降水的数值模拟[J]. 高原山地气象研究, 2008(1): 1-7.
- [57] 朱玉祥, 丁一汇. 青藏高原积雪对气候影响的研究进展和问题[J]. 气象科技, 2007(1): 1-8.
- [58] 陈兴芳, 宋文玲. 欧亚和青藏高原冬春季积雪与我国夏季降水关系的分析和预测应用[J]. 高原气象, 2000(2): 214-223.
- [59] 柏晶瑜, 徐祥德, 周玉淑, 等. 春季青藏高原感热异常对长江中下游夏季降水影响的初步研究[J]. 应用气象学报, 2003(3): 363-368.
- [60] 王红军, 潘维玉. 2008 年华南前汛期异常降水的大尺度环流特征及成因分析[J]. 热带地理, 2009, 29(3): 219-224.
- [61] 徐小玉, 王亚非. ENSO 对青藏高原雪深的影响及持续性分析[J]. 高原气象, 2016, 35(1): 1-12.
- [62] 陶亦为, 孙照渤, 李维京, 等. ENSO 与青藏高原积雪的关系及其对我国夏季降水异常的影响[J]. 气象, 2011, 37(8): 919-928.
- [63] 宋燕, 李智才, 肖子牛, 等. 太阳活动与高原积雪及东亚环流的年代际相关分析[J]. 高原气象, 2016, 35(5): 1135-1147.
- [64] 臧海佳, 周自江. 青藏高原区域性积雪增量序列及其变化特征[J]. 气象, 2009, 35(6): 77-81.
- [65] 马丽娟, 秦大河. 1957-2009 年中国台站观测的关键积雪参数时空变化特征[J]. 冰川冻土, 2012, 34(1): 1-11.
- [66] 除多, 杨勇, 罗布坚参, 等. 1981-2010 年青藏高原积雪日数时空变化特征分析[J]. 冰川冻土, 2015, 37(6):

- 1461-1472.
- [67] 胡豪然, 伍清. 近 44 年青藏高原东部积雪的年代际变化特征及其与降雪和气温的关系[J]. 高原山地气象研究, 2016, 36(1): 38-43.
- [68] 宋燕, 张菁, 李智才, 等. 青藏高原积雪年代际变化及其对我国夏季降水的影响[J]. 高原气象, 2011, 30(4): 843-851.
- [69] 白淑英, 史建桥, 高吉喜, 等. 1979-2010 年青藏高原积雪深度时空变化遥感分析[J]. 地球信息科学学报, 2014, 16(4): 628-637.
- [70] 田柳茜, 李卫忠, 张尧, 等. 青藏高原 1979-2007 年间的积雪变化[J]. 生态学报, 2014, 34(20): 5974-5983.
- [71] 李锡福, 唐红玉. 青藏高原积雪日数的空间分布及变化分析[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2016, 38(5): 153-160.
- [72] 除多, 洛桑曲珍, 林志强, 等. 近 30 年青藏高原雪深时空变化特征分析[J]. 气象, 2018, 44(2): 233-243.
- [73] 杨志刚, 达娃, 除多. 近 15a 青藏高原积雪覆盖时空变化分析[J]. 遥感技术与应用, 2017, 32(1): 27-36.
- [74] 王叶堂, 何勇, 侯书贵. 2000-2005 年青藏高原积雪时空变化分析[J]. 冰川冻土, 2007(6): 855-861.
- [75] Choudhury, B.J. (1981) Radiative Properties of Snow for Clear Sky Solar Radiation. *Cold Regions Science and Technology*, **4**, 103-120. [https://doi.org/10.1016/0165-232X\(81\)90015-X](https://doi.org/10.1016/0165-232X(81)90015-X)
- [76] Oerlemans, J. and Knap, W.H.J. (1998) A 1 Year Record of Global Radiation and Albedo in the Ablation Zone of Morteratschgletscher, Switzerland. *Journal of Glaciology*, **44**, 231-238. <https://doi.org/10.1017/S0022143000002574>
- [77] 蒋熹. 冰雪反照率研究进展[J]. 冰川冻土, 2006(5): 728-738.
- [78] 罗会邦, 陈蓉. 夏半年青藏高原东部大气热源异常对环流和降水的影响[J]. 气象科学, 1995(4): 94-102.
- [79] 王跃男, 张博, 陈隆勋, 等. 夏季青藏高原大气热源与东亚大气热源及环流的关系[J]. 科学通报, 2008(15): 1842-1848.
- [80] 李婧媛, 郭胜利, 焦铂洋, 等. 夏季青藏高原东部热源异常与环流场和降水的关系[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(7): 7-17.
- [81] 李永华, 卢楚翰, 徐海明, 等. 夏季青藏高原大气热源与西南地区东部旱涝的关系[J]. 大气科学, 2011, 35(3): 422-434.
- [82] 唐志光, 王建, 王欣, 等. 基于 MODIS 数据的青藏高原积雪日数提取与时空变化分析[J]. 山地学报, 2017, 35(3): 412-419.
- [83] 郭建平, 刘欢, 安林昌, 等. 2001-2012 年青藏高原积雪覆盖率变化及地形影响[J]. 高原气象, 2016, 35(1): 24-33.
- [84] 韦志刚. 青藏高原积雪异常的持续性研究[J]. 冰川冻土, 2001(3): 225-230.
- [85] 韦志刚, 黄荣辉, 陈文, 等. 青藏高原地面站积雪的空间分布和年代际变化特征[J]. 大气科学, 2002(4): 496-508.
- [86] 柯长青, 李培基. 青藏高原积雪分布与变化特征[J]. 地理学报, 1998(3): 19-25.
- [87] 伯玥, 李小兰, 王澄海. 青藏高原地区积雪年际变化异常中心的季节变化特征[J]. 冰川冻土, 2014, 36(6): 1353-1362.
- [88] 刘华强, 孙照渤, 王举, 等. 青藏高原东西部积雪效应的模拟对比分析[J]. 高原气象, 2005(3): 357-365.
- [89] 杨凯, 胡田田, 王澄海. 青藏高原南、北积雪异常与中国东部夏季降水关系的数值试验研究[J]. 大气科学, 2017, 41(2): 345-356.
- [90] Ruzmaikin, A. and Feynman, J.J. (2002) Solar Influence on a Major Mode of Atmospheric Variability. *Journal of Geophysical Research*, **107**, 4209. <https://doi.org/10.1029/2001JD001239>
- [91] Ruzmaikin, A.J. (2007) Effect of Solar Variability on the Earth's Climate Patterns. *Advances in Space Research*, **40**, 1146-1151. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2007.01.076>
- [92] Huth, R., Bochníček, J. and Hejda, P.J. (2007) The 11-Year Solar Cycle Affects the Intensity and Annularity of the Arctic Oscillation. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, **69**, 1095-1109. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2007.03.006>
- [93] Slonosky, V.C., Jones, P.D. and Davies, T.D.J. (2001) Instrumental Pressure Observations and Atmospheric Circulation from the 17th and 18th Centuries: London and Paris. *International Journal of Climatology*, **21**, 285-298. <https://doi.org/10.1002/joc.611>
- [94] Kodera, K. and Kuroda, Y.J. (2002) Dynamical Response to the Solar Cycle. *Journal of Geophysical Research*, **107**, 4749. <https://doi.org/10.1029/2002JD002224>
- [95] Mann, M.E., Zhang, Z.J., Rutherford, S., et al. (2009) Global Signatures and Dynamical Origins of the Little Ice Age

- and Medieval Climate Anomaly. *Science*, **326**, 1256-1260. <https://doi.org/10.1126/science.1177303>
- [96] 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[J]. 大气科学, 2015, 39(4): 815-826.
- [97] 吴玲玲, 张建伟, 邓伟涛, 等. 太阳活动对 NAO 与冬季中东急流轴线位置之间关系的调制作用[J]. 大气科学学报, 2018, 41(1): 93-102.
- [98] 董林垚, 张平仓, 刘纪根, 等. 太阳黑子和 ENSO 对日本吉野川流域水文要素影响[J]. 水科学进展, 2017, 28(5): 671-680.
- [99] 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[J]. 大气科学, 2012, 36(4): 851-862.
- [100] 占瑞芬, 丁一汇, 吴立广, 等. ENSO 在青藏高原积雪与西北太平洋热带气旋生成频数关系中的作用[J]. 中国科学: 地球科学, 2016, 46(10): 1358-1370.
- [101] 彭京备, 陈烈庭, 张庆云. 青藏高原异常雪盖和 ENSO 的多尺度变化及其与中国夏季降水的关系[J]. 高原气象, 2005(3): 366-377.
- [102] 赵振国, 蒋伯仁, 陈国珍, 等. ENSO 事件与青藏高原积雪和东亚大气环流的可能联系[J]. 山东气象, 1999(4): 1-8.
- [103] 丁一汇. 高等天气学[M]. 北京: 气象出版社, 2005: 214.
- [104] 宋燕, 李智才, 张菁, 等. 太阳活动对高原积雪和东亚夏季风调制影响的回顾和进展[J]. 气象科技进展, 2016, 6(3): 148-154.
- [105] Zhao, P., Song, Y. and Yu, R.C.J. (2010) Long-Term Changes in Rainfall over Eastern China and Large-Scale Atmospheric Circulation Associated with Recent Global Warming. *Journal of Climate*, **23**, 1544-1562. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2660.1>
- [106] 程国生, 苍中亚, 杜亚军, 等. 江淮梅雨长期变化对太阳活动因子的响应分析[J]. 高原气象, 2015, 34(2): 478-485.
- [107] 周群, 陈文. 太阳活动 11 年周期对东亚冬季风与随后东亚夏季风关系的影响及其过程[J]. 气候与环境研究, 2014, 19(4): 486-496.

### 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: 2168-5711, 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: [ccrl@hanspub.org](mailto:ccrl@hanspub.org)