

# 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

宋燕<sup>1</sup> 李智才<sup>1,2</sup> 张菁<sup>3</sup> 肖子牛<sup>4</sup>

(1 中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081; 2 山西气候中心, 太原 030006;

3 沈阳市气象局生态与农业气象中心, 沈阳 110168; 4 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

**摘要:** 回顾了太阳活动、高原积雪和东亚季风之间关系的研究, 指出了国内外有关积雪对太阳活动响应研究的匮乏性和必要性, 以及太阳活动对高原积雪与东亚季风关系调节作用研究的前景和价值, 并讨论了未来相关研究的难点和方向。高原积雪对太阳活动响应的不同时间尺度相关分析表明, 在年代际时间尺度上两者可能存在较为显著的滞后相关, 太阳活动对高原积雪与中国夏季降水的关系存在值得关注的调节作用。

**关键词:** 太阳活动, 高原积雪, 东亚夏季风, 多时间尺度相关, 回顾和进展

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2016.03.020

## Review of Progress in Modulation Effects of Solar Activity on Snow depth over the Tibetan Plateau and East Asian Summer Monsoon

Song Yan<sup>1</sup>, Li Zhicai<sup>1,2</sup>, Zhang Jing<sup>3</sup>, Xiao Ziniu<sup>4</sup>

(1 Training Centre, China Meteorological Administration, Beijing 100081 2 Shanxi Climate Centre, Taiyuan 030006

3 Zoology and Agricultural Meteorological Centre of Shenyang Meteorological Administration, Shenyang 110168

4 Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

**Abstract:** Research on influence of solar activity on global climate system is gradually paid more attention in recent years. This paper reviewed studies of solar activity, snow over the Tibetan Plateau and East Asian Summer Monsoon, then pointed out the lack and necessity of explores on response of snow and East Asian Summer Monsoon to solar activity, and explored and demonstrated simultaneously the difficulty and direction of researches in this scientific area. Multi-time scales analysis indicated that the winter snow over the Tibetan Plateau had significant time-lag correlation with solar activity on interdecadal time scale. It should be paid more attention on effect of solar activity's modulation on the winter snow over the Tibetan Plateau and summer precipitation in China.

**Key words:** solar activity, snow over Tibetan Plateau, East Asian Summer Monsoon, correlation on multi-time scales, review and progress

### 0 引言

青藏高原是地球上面积最大、海拔最高的高原, 素有“第三极”之称, 它对东亚气候乃至全球气候都有深远的影响。研究表明, 青藏高原动力和热力作用在亚洲季风爆发<sup>[1-6]</sup>、东亚季风降水年际和年代际变化<sup>[6-8]</sup>中扮演着重要的角色。高原积雪可以通过影响太阳辐射反照率而改变地面和大气的加热状况, 进而引起东亚地区大气环流异常, 调制亚洲与其周边海域的海陆热力差异, 最终影响东亚季风和中国夏季降

水<sup>[8-14]</sup>。在全球变暖背景下, 与全球温度一致上升不同, 青藏高原积雪于1960—2000年呈现出明显增加的趋势<sup>[8, 11]</sup>。但是, 从2000年开始进入减少阶段(图1)。显然, 随着全球温度的升高, 高原积雪并没有一直减少, 而是有自身独特的年代际振荡特征, 这是导致中国东部夏季雨型从20世纪60—70年代到20世纪80—90年代出现“北涝南旱”向“南涝北旱”转变的直接原因<sup>[8]</sup>。由此可见, 青藏高原积雪是预测我国夏季降水年代际变化的重要物理因子。

太阳是地球气候系统能量的主要来源, 全面客观地认识太阳活动对地球气候系统的影响, 是做好气候预测和气候变化归因的重要环节。尽管全球变暖主要由人类活动引起<sup>[15]</sup>, 但自然因子在其中所起的作用并没有被研究清楚, IPCC第五次评估报告所采用的诸多

收稿日期: 2015年9月5日; 修回日期: 2016年3月21日  
第一作者: 宋燕(1965—), Email: songyan@cma.gov.cn  
资助信息: 国家自然科学基金项目(41575091); 国家重大科学  
学研究计划项目(2012CB957803, 2012BC957804)

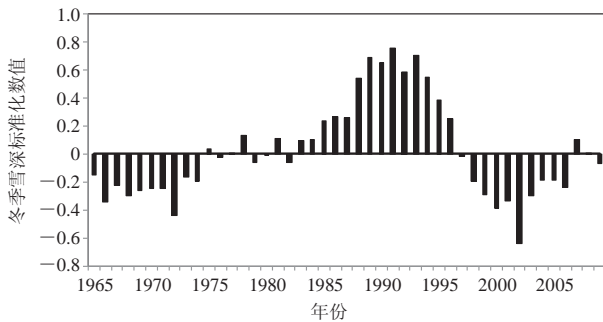


图1 1961—2013年青藏高原冬季雪深标准化序列年代际变化(9年滑动平均)

Fig. 1 Interdecadal change of standardized winter snow depth over Tibetan Plateau for 1961–2013 (9-yr running mean)

模式也只考虑了太阳总辐射度对气候系统单方面的影响,并没有考虑不同的太阳活动参数对气候系统在不同时间尺度上的影响,更没有考虑气候系统某些分量响应太阳活动后对大气产生的反馈放大作用,这种放大机制很有可能存在<sup>[16-17]</sup>,而考虑了放大作用后的结果很可能会有所不同。

迄今为止,对太阳活动的研究主要集中在太阳活动数据与气候参数之间的相关分析上面,例如宇宙射线、紫外线、太阳总辐射量、地磁指数或者太阳黑子数等与地表温度、云、遥相关或者环流型之间的相关分析<sup>[18]</sup>,这些研究结果证明了太阳活动是驱动地球气候系统变化的重要因子<sup>[19-21]</sup>,但仍缺乏相应的物理过程研究。目前,国际上对太阳活动的研究还停留在初级阶段,进一步探索太阳活动对气候系统各分量影响的物理过程很有必要。青藏高原积雪作为影响东亚气候的重要物理因子<sup>[22]</sup>,对太阳活动响应的相关研究至今几乎为零,因此,开展相关研究非常有价值。

高原积雪一方面可以直接地响应太阳活动的影响,另一方面,可以通过热力作用影响东亚季风和雨带分布,而这种影响在不同的年代际背景不尽相同<sup>[15]</sup>。造成这种差别的原因何在?这是目前人们一直在探索的问题,太阳活动对两者之间关系的调节作用是什么?是否造成这种差别的主要外强迫因子?这值得去研究。本文回顾了高原积雪对东亚夏季风影响以及太阳活动对东亚夏季风影响的相关研究,指出了未来研究高原积雪对太阳活动的响应、太阳活动调节高原积雪与东亚季风之间关系的可能性和必要性。

## 1 太阳活动与高原积雪和东亚夏季风关系的研究回顾

### 1.1 积雪对季风和降水的影响

青藏高原地区积雪的消融期较晚<sup>[6]</sup>,高原积雪可

以增加地表的反照率,降低高原的地表温度;而且,融化积雪消耗更多的热量从而使地表面降温,融化的雪水还可以增加土壤的湿度,使土壤变为“湿土壤”,“湿土壤”增强了对积雪的“记忆”,改变青藏高原和太平洋附近对流层中上层大气温度和位势高度,从而影响陆海之间大气温度的差异,进而对亚洲夏季风产生重要影响<sup>[14, 23-25]</sup>。由于青藏高原积雪对中国气候异常有明显的影 响,因而,高原积雪对东亚夏季风和降水在年际时间尺度上的影响研究得到广泛的关注<sup>[10, 14, 23-28]</sup>。这些研究结果可以总结为,冬春季高原积雪多(少)的年份,东亚夏季风或南海夏季风爆发迟(早),东亚夏季风弱(强),江淮流域偏涝(旱),雨带呈“南涝北旱(北多南少)型”分布。可以解释为,前期冬春季高原积雪偏多(少)的年份,由于增加(减少)了土壤的湿度,进入夏季后,湿土壤对积雪偏多的记忆减小(增加)了高原地区和海洋之间的温度对比,造成东亚夏季风偏弱(强),江淮地区降水偏多(少),而华北地区降水偏多(少),雨带呈“北少南多型(北多南少型)”分布。

高原积雪和东亚夏季风都具有显著的年代际变化特征<sup>[22]</sup>。近年来,年代际时间尺度上积雪与东亚夏季风关系的研究越来越受到重视。有的学者认为近几十年来东亚夏季风的减弱与青藏高原积雪的增多有关联<sup>[12]</sup>,青藏高原冬春季积雪的年代际异常对中国东部地区夏季雨型的改变起着重要作用<sup>[6, 8]</sup>。

研究表明,在年代际时间尺度上,积雪与季风之间的关系并非一直稳定不变。自1884年Blanford<sup>[29]</sup>提出喜马拉雅山冬春积雪和印度夏季降水的反位相关关系之后,Walker<sup>[30]</sup>认为可以将积雪作为季风降水的预报因子。但是,在以后的几十年里,积雪和季风之间的关系变得很弱,积雪丧失了作为预报因子的作用<sup>[31]</sup>。还有,Hahn等<sup>[32]</sup>、Dey等<sup>[33]</sup>发现欧亚大陆春季雪盖和印度夏季风之间存在负相关关系,Dickson<sup>[34]</sup>、Sankar-Rao等<sup>[35]</sup>验证了这一关系。然而,欧亚春季积雪与全印度夏季降水之间这种相关特征于1970s中期发生了改变<sup>[36]</sup>。这些研究说明积雪作为预报季风降水的物理因子,它与降水的关系会发生改变。宋燕等<sup>[22]</sup>的研究证明,在不同的年代际背景下,高原冬季雪深与中国夏季降水的相关分布型具有较大的差异。以上研究表明,高原积雪与季风的 关系会受到其他物理因子的影响,从而使两者之间的关系变得不稳定,这值得进一步探究。太阳是地球气候系统重要的外强迫因子,有研究表明太阳活动与东亚在夏季风和雨带之间

有较为密切的关系,那么,太阳活动是否会对两者关系有调节作用呢?这值得深入研究。有一点可以肯定,在某些年份,利用高原积雪作为预报因子预报东亚夏季风和中国降水需要同时考虑其他强迫因子的影响。

## 1.2 太阳活动对东亚夏季风的影响

太阳活动对季风有较为明显的影响<sup>[37-41]</sup>,季风降水的长期变率可能受到太阳强迫的影响,而在不同时期有所差别<sup>[42]</sup>。数值模式结果显示,在太阳活动偏弱的小冰期,全球季风降水总体偏弱;而中世纪暖期,全球季风总体偏强<sup>[43]</sup>。太阳活动活跃期, Hadley 环流扩大,副热带干旱区向北扩展,北半球季风位置偏北,全球大多数陆面地区由于季风加强而降水偏多<sup>[44-49]</sup>。由于敏感地区对太阳活动的响应往往比全球响应大一个量级,并且水循环对太阳驱动的反应更为敏感<sup>[50]</sup>。因此,区域性降水对太阳活动的响应信号应该更强。

最近的研究显示,亚洲季风强度受到太阳活动周期的控制<sup>[51-52]</sup>,东亚夏季风爆发期,季风区雨带纬度位置的年代际变化依赖于太阳黑子周期位相,长江以南和以北地区的降水量与太阳周期关系相反,应用初夏西南季风强度和北界位置与太阳黑子周期的年代际锁相关系可以解释这个现象<sup>[53]</sup>。另外,东亚广义梅雨季是东亚季风雨带纬度(MLRB)与太阳周之间最强相关系数所对应的时段。在太阳活动的高年,这一梅雨雨带偏北 $1.2^{\circ}$ ,并且具有更大的年际变率<sup>[38]</sup>。另外,太阳活动11年周期对东亚降水演变与ENSO关系、春季NAO与东亚夏季降水关系以及东亚冬季风与随后夏季风关系等具有调制作用<sup>[54]</sup>。在太阳活动偏低年,ENSO与东亚冬季风的关系更为密切,东亚冬季风与随后夏季风的关系在太阳活动偏低年要比偏高年更紧密。这些结果表明了太阳活动周期对海气相互作用和大气内部系统之间的相互作用的显著影响。高原冬春季积雪与东亚夏季风及中国夏季东部雨带都有显著的相关关系,那么,这种关系是否受到太阳活动的调制呢?这值得进一步探讨。

## 1.3 高原积雪对太阳活动的响应

国内外关于积雪对太阳活动响应方面的研究成果非常少,主要集中在不同波段的太阳光谱对积雪反照率和融化率的影响方面<sup>[55-57]</sup>。而高原积雪对太阳活动的响应及其放大作用机制方面的研究是一个空白,有关领域的研究工作亟待开展,这对研究中国夏季气候异常的原因和高原积雪与东亚夏季风的关系具有重要价值。

作者前期工作表明,近50年来高原冬季积雪在

年代际时间尺度上对太阳活动有较为显著的滞后响应<sup>[58]</sup>,并且太阳活动与东亚冬季风和北极涛动也具有较为显著的年代际滞后相关,高原积雪与后两者也有显著的年代际相关,这表明了太阳活动与高原积雪以及东亚气候之间可能存在某些关联,揭示其中的物理过程对提高中国气候预测水平和气候变化归因有所帮助。研究表明,太阳活动可以通过调节紫外线而影响平流层臭氧含量和分布,改变平流层大气热力平衡状态和热带平流层大气温度场,然后向极向下传播,调整北半球地面环状模,导致北半球一些地区气候发生异常<sup>[59]</sup>。由此推断,高原积雪在某种程度上可能确实存在着对太阳活动的直接或间接响应,并且进一步影响东亚地区的大气环流和天气气候。

## 2 太阳活动与高原积雪和东亚夏季风的研究进展

### 2.1 太阳活动与高原积雪的多时间尺度相关

作为研究青藏高原积雪对太阳活动响应的第一步,就是检验两者之间有无显著的统计相关关系,然后再探索其中可能存在的物理过程。在此,采用国家气象信息中心提供的逐日地面积雪深度站点数据资料(1951—2011年),消除青藏高原地区单站的日积雪深度观测资料的不连续现象,对原始资料进行筛选和适量的插补,最后得到51个站点1961—2011年逐月连续积雪资料,青藏高原冬季雪深(WSD)定义为本年12月与次年1、2月积雪深度累加。

表征太阳活动的参数有多个,其中,10.7cm太阳射电通量(SRF)和太阳黑子数(SSN)较为常用,SRF与太阳活跃区的磁性以及紫外线关系密切,而SSN反映了太阳磁场的强弱,虽然不能直接表示太阳辐射的大小,但是可以反映太阳活动的强弱。表1和表2分别计算了SRF和SSN与高原WSD之间的多时间尺度相关,其中原始序列相关的显著性检验采用Pearson显著性检验,9和11年滑动平均序列采用Monte-Carlo显著性检验,具体方法详见参考文献[58]。

从表1和表2可以看出,尽管滑动平均后两者的相关有明显的提高。但是,在不同时间尺度上,冬季高原雪深与太阳活动并不存在显著的同期相关。高原积雪与SRF和SSN之间在不同时间尺度上的相关分布规律非常相似,说明积雪对太阳活动不同参数的响应规律接近,有可能存在相同的物理过程。计算表明,高原积雪与SRF的原始序列不存在非常显著的相关关系,只有在滞后6~7年(SRF)和6年(SSN)时才存在通过0.1显著水平的显著相关;9年滑动平均后的序列不存在显著相关;但是,值得注意的是11年滑动平

表1 高原冬季雪深 (WSD) 与太阳射电通量 (SRF) 之间的多时间尺度相关

Table 1 The contemporary and time-lag correlation coefficients between SRF and WSD on multi-time scale from 1961 to 2011

WSD与SRF的时滞关系	原始数据	9年滑动	11年滑动
滞后0年	-0.104	0.3659	0.6356
1年	-0.082	0.4345	0.6928
2年	-0.078	0.5	0.7241*
3年	-0.002	0.5505	<b>0.7675*</b>
4年	0.183	0.6030	<b>0.8013**</b>
5年	0.165	0.5973	<b>0.7868*</b>
6年	0.274*	0.5866	<b>0.7736*</b>
7年	0.290*	0.5346	0.7132
8年	-0.036	0.4111	0.5755
9年	-0.047	0.3222	0.4622
10年	-0.071	0.2164	0.3267

注: \*表示超过0.1显著水平, \*\*表示超过0.05的显著水平。

均在滞后SRF (SSN) 2~6年 (3~6年) 时出现了显著相关, 其中滞后SRF 4年时的相关通过了0.05的显著水平检验。说明在年代际时间尺度上高原积雪与太阳活动之间存在某种较为显著的滞后关系。功率谱分析表明 (图略), 经过11年滤波后的积雪和太阳活动都存在显著的32年周期信号, 表明在较长的年代际时间尺度上, 高原积雪可能跟太阳活动存在某些联系, 这种关系经过时间滞后的积累效应以后逐渐变强, 呈现出较为显著的相关。

以上研究初步表明了年代际时间尺度上高原积雪对太阳活动的响应可能通过一种滞后效应实现, 经过几年的积累后这种响应机制的累加效果达到最大。但是, 其中的物理过程还需要进一步的工作来说明。

众所周知, 表征高原积雪的因子不仅仅是冬季雪深一个, 高原积雪日数和积雪面积也是在研究和业务中常用的积雪因子, 而且, 又分为冬季积雪因子和春季积雪因子, 其他的积雪因子是否同样存在对太阳活动的显著响应呢? 这也值得进一步探讨。同样, 表征太阳活动的参数也不只是射电通量和黑子数, 所以, 若想进一步研究高原积雪对太阳活动的响应, 必须普查不同高原积雪因子与不同的太阳活动参数之间的多时间尺度相关关系, 从中选取对太阳活动响应较为敏感的因子加以着重研究, 能更加准确地描述高原积雪对太阳活动响应的物理过程。

## 2.2 太阳活动对高原积雪影响东亚夏季风的调节作用

高原积雪是影响东亚夏季风和中国汛期雨带的重要物理因子, 也是国家气候中心常用的预测因子。图2给出冬季高原雪深与中国夏季降水的相关分布, 其

表2 高原冬季雪深 (WSD) 与太阳黑子数 (SSN) 之间的多时间尺度相关

Table 2 The contemporary and time-lag correlation coefficients of SSN with WSD on multi-time scale from 1961 to 2011

WSD与SSN的时滞关系	原始数据	9年滑动	11年滑动
滞后0年	-0.090	0.3557	0.606
1年	-0.115	0.4073	0.644
2年	-0.070	0.4655	0.684
3年	0.070	0.5456	0.7346*
4年	0.183	0.5834	0.7655*
5年	0.212	0.6047	0.7748*
6年	0.2929*	0.6020	0.7564*
7年	0.164	0.5508	0.694
8年	-0.012	0.4566	0.582
9年	-0.068	0.3723	0.476
10年	-0.1581	0.2765	0.358

注: \*表示超过0.1显著水平, \*\*表示超过0.05的显著水平。

中黑点代表超过0.05显著水平的区域。图中显示正相关显著区域主要分布在长江流域和广西地区, 通过显著性检验; 而淮河地区呈现负相关, 但是没有通过显著性检验。这说明高原积雪多 (少) 的年份, 长江流域和广西地区降水偏多 (少), 而淮河地区降水偏少 (多), 这与大多数的研究结果一致。

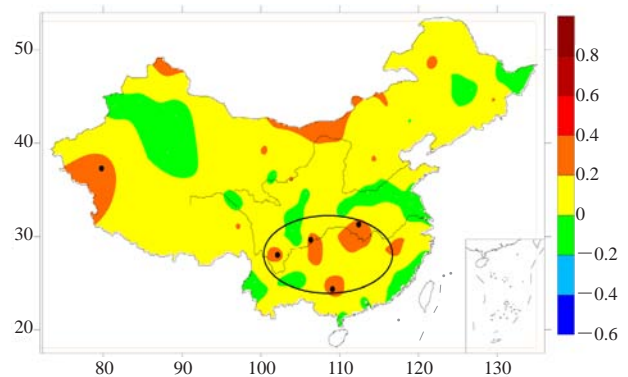


图2 高原冬季雪深与中国夏季降水的相关 (1961—2011年) (阴影区黑点表示超过0.05显著水平)

Fig. 2 Correlation of the winter snow depth over Tibetan Plateau with summer precipitation in China for 1961-2011 (black dots in shadow indicate significance level above 0.05)

图3给出太阳射电通量SRF的标准化时间序列, 可以看出, 太阳活动有着11年周期的显著信号。选取太阳活动较强的年份为: 1955—1959, 1966—1970, 1978—1982, 1988—1992和1998—2002年; 太阳活动较弱的年份为: 1960—1965, 1972—1977, 1983—1987, 1993—1997和2003—2008年。分别计算SRF强年与弱年高原积雪与中国夏季降水的相关 (图4)。可以看到, 在太阳活动强的年份 (图4a), 与图2相比, 显著正相关的区域从长江流域北移到了江淮地区 (图中

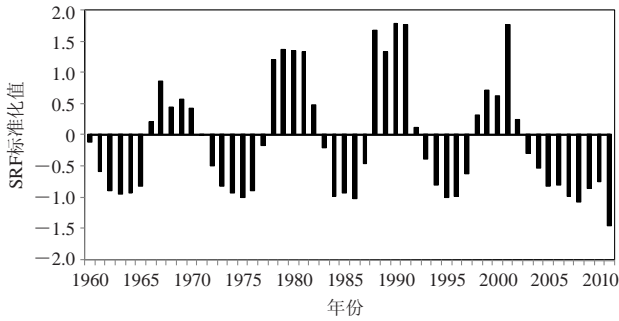


图3 太阳射电通量 (SRF) 的标准化时间序列  
Fig. 3 Time series of standardized Solar Radiation Flux (SRF)

黑色方框), 华北北部到内蒙古东部地区 (红色方框地区) 呈现显著的负相关, 东北呼伦贝尔高原到大兴安岭一带 (紫色方框) 有显著的正相关。说明在太阳活动强的年份, 如果前期高原积雪偏多, 则江淮地区降水偏多, 而华北北部到内蒙古东部地区降水偏少。在太阳活动弱的年份 (图4b), 高原积雪与降水的相关分布与图4a相比有较为明显的差异, 江淮地区的正

相关区域明显偏南, 显著的正相关区域南移到了贵州、江南至长江中游地区 (黑色方框), 华北北部到内蒙东部地区 (红色方框地区) 呈现显著的正相关区域, 河套东部地区也呈现显著的正相关, 长江以南的福建和浙江地区存在显著的负相关, 东北的呼伦贝尔高原地区也存在较弱的负相关, 这些现象与太阳活动强的年份相差很明显。说明在太阳活动弱的年份, 如果前期高原积雪偏多, 则江南至长江中游地区降水偏多, 华北北部到内蒙古东部地区降水也偏多, 而江南东部地区降水偏少。以上分析说明, 在太阳活动11年周期不同的位相, 即太阳活动强的年份与弱的年份里, 高原积雪与中国夏季降水的相关分布存在较大的差异, 太阳活动周期对两者关系存在显著的调节作用, 在太阳活动较强的年份里季风雨带偏北, 主要在淮河流域地区; 而在太阳活动较弱的年份里季风雨带偏南, 在长江中游至江南地区。这些结论与Zhao等<sup>[38, 53]</sup>的研究结果相一致, 但是本文考虑了高原积雪对雨带的影响, 其中的机理和物理过程还需要进一步的研究。

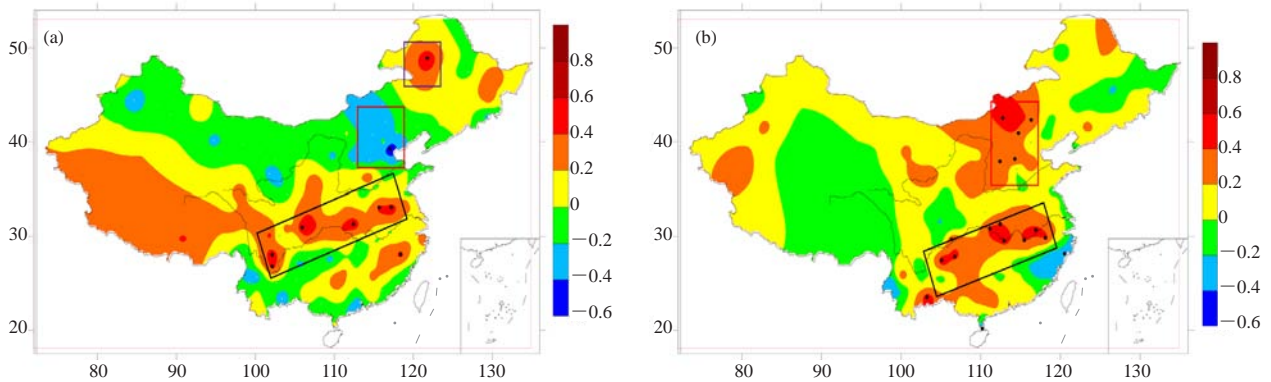


图4 太阳活动强年 (a) 和弱年 (b) 高原冬季雪深与中国夏季降水的相关 (1961—2011年)  
(阴影区表示超过0.05显著水平)

Fig. 4 Correlation of the winter snow depth over Tibetan Plateau with summer precipitation in China for 1961–2011 in high solar years (HS) (a) and in low solar years (LS) (b) (black dots in shadow indicate significance level above 0.05)

### 3 小结和讨论

本文回顾了前期高原积雪在年际和年代际时间尺度上对东亚夏季风的影响研究, 指出了积雪与夏季风在年代际时间尺度上关系的不稳定性, 这种不稳定性很可能是受到了其他物理因子的影响, 太阳活动也可能是造成两者关系不稳定的因子。还回顾了太阳活动对东亚夏季风影响的研究, 指出太阳活动对东亚季风雨带的进退有调节作用。

对冬季高原雪深与太阳活动不同参数之间的多时间尺度相关进行了分析, 表明高原冬季积雪对太阳活动的响应在年代际时间尺度上存在较为显著的滞后正

相关关系, 当太阳活动较强时, 高原冬季积雪偏多。这种滞后相关机制至今还处于研究阶段, 不能给出定论和相应的物理过程, 需要进一步的探索。

一些研究表明, 太阳紫外辐射异常对平流层臭氧可以产生较为显著的影响, 由此破坏平流层大气热平衡从而改变温度分布, 造成环流的变化<sup>[16, 60]</sup>。同样, 对流层大气中也存在较为显著的阳光活动信号<sup>[16, 60]</sup>。中高层大气与对流层大气可以发生耦合的相互作用, 使得对流层大气环流发生变化<sup>[37, 60]</sup>。太阳活动还可以通过非线性机制放大对气候系统的作用<sup>[60]</sup>, 一些研究发现在热带海洋循环和El Niño的变化中存在太阳强迫

的间接放大作用，这些被放大后的作用很可能通过再次强迫大气从而第二次改变大气环流。因此，高原积雪对太阳活动的滞后响应机制很可能是通过一种积累放大效应产生的。

太阳活动影响高原积雪的途径初步推测为两种：一种是较短时间尺度（如季节时间尺度），属于较快的过程，太阳活动强弱通过影响平流层大气热平衡而改变大气环流，然后再经过平流层与对流层大气之间的相互作用改变对流层大气环流状况，从而影响高原积雪；第二条路径是较长时间尺度，属于慢过程，太阳活动通过改变海洋热力状况（如热带太平洋海温），经由海-气相互作用，再进一步改变大气环流状况，导致高原积雪异常。这个过程可能需要几年的时间。以上两种物理过程的物理图像可用图5体现。高原积雪对太阳活动响应研究的问题和难点基本上可以归纳为以上两类，这是未来研究的主要方向。

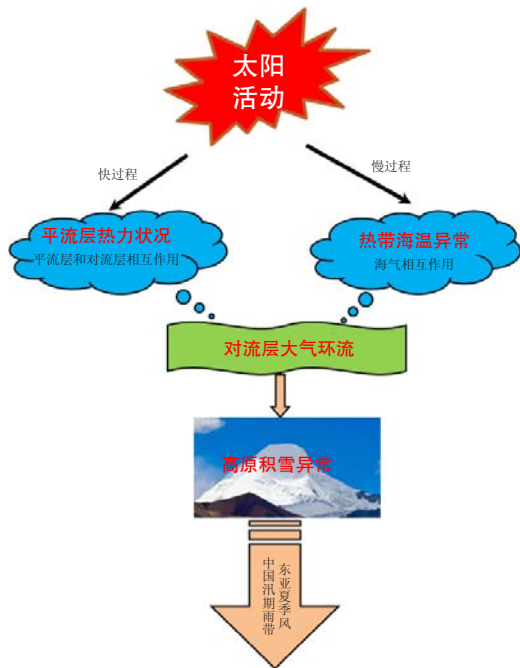


图5 高原积雪响应太阳活动并影响东亚夏季风的物理图像  
Fig. 5 Physical sketch-map of response of the snow over Tibetan Plateau to solar activity and influence on East Asian Summer Monsoon

本文初步研究了太阳活动对高原积雪和东亚夏季风/中国夏季雨带相关的调节作用，发现在太阳活动强的年份和太阳活动弱的年份，高原积雪和中国夏季降水的关系有较大的差异，这意味着两者之间的关系很可能受到了太阳活动的调制作用，需要进一步地研究其中的物理过程。研究显示，太阳活动强的年份，高原积雪导致的中国汛期主雨带的位置偏北，而太阳活动弱的年份雨带偏南。这也提示在应用高原前期积雪

因子预测东亚夏季风和中国夏季降水时，需要适时考虑太阳活动的调节作用。

总之，太阳活动对高原积雪与东亚夏季风/中国汛期降水的调制作用非常值得进一步探讨，有较为广泛的研究和应用前景。

#### 参考文献

- [1] Luo H, Yanai M. The Large-scale circulation and heat source over the Tibetan Plateau and surrounding Areas during the early summer of 1979. Part 1: Precipitation and kinematic analyses. *Mon Wea Rev*, 1984, 111: 922-944.
- [2] He H Y, McGinnis J W, Song Z S, et al. Onset of the Asian summer monsoon in 1979 and the effect of the Tibetan Plateau. *Mon Wea Rev*, 1987, 115: 1966-1995.
- [3] Yanai M, Li C F, Song Z S. Seasonal heating of the Tibetan Plateau and its effects on the evolution of the Asian summer monsoon. *J Meteor Soc Japan*, 1992, 70: 319-351.
- [4] 吴国雄, 张永生. 青藏高原的热力和机械强迫作用以及亚洲季风的爆发. *大气科学*, 1998, 22(6): 825-838.
- [5] Wu G X, Zhang Y. Tibetan Plateau forcing and the timing of the monsoon onset over South Asia and the South China Sea. *Mon Wea Rev*, 1998, 126: 913-927.
- [6] 周秀骥, 赵平, 陈军明, 等. 青藏高原热力作用对北半球气候影响的研究. *中国科学 (D辑)*, 2009, 39(11): 1473-1483.
- [7] 赵平, 陈隆勋. 35年来青藏高原大气热源气候特征及其与中国降水的关系. *中国科学 (D辑)*, 2001, 31(4): 327-332.
- [8] Zhao P, Yang S, et al. Long-term changes in rainfall over Eastern China and large-scale atmospheric circulation associated with recent global warming. *J Climate*, 2010, 23(6): 1544-1562.
- [9] 韦志刚, 罗四维, 董文杰, 等. 青藏高原积雪资料分析及其与我国夏季降水的关系. *应用气象学报*, 1998, 9(增刊): 39-46.
- [10] 郑益群, 钱永甫, 苗曼倩, 等. 青藏高原积雪对中国夏季季风气候的影响. *大气科学*, 2000, 24 (6): 761-774.
- [11] Wu T W, Qian Z. The relation between the Tibetan winter snow and the Asian summer monsoon and rainfall: an observational investigation. *J Climate*, 2003, 16: 2038-2051.
- [12] Zhang Y S, Li T, Wang B. Decadal change of the spring snow depth over the Tibetan Plateau: The associated circulation and influence on the East Asian summer monsoon. *J Climate*, 2004, 17: 2780-2793.
- [13] 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. *高原气象*, 2005, 24(3): 366-376.
- [14] Zhao P, Zhou Z J, Liu J P. Variability of Tibetan spring snow and its associations with the hemispheric extratropical circulation and east Asian Summer Monsoon rainfall: An observation investigation. *J Climate*, 2007, 20: 3942-3955.
- [15] IPCC. *Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013.
- [16] Gray L J, Beer J, Geller M, et al. Solar influences on climate. *Rev Geophys*, 2010, 48: RG4001.
- [17] Lockwood M, Bell C, Woollings T, et al. Top-down solar modulation of climate: evidence for centennial-scale change. *Environ Res Lett*, 2010, 5: 034008.
- [18] Sfiçã L, Voiculescu M. Possible effects of atmospheric teleconnections and solar variability on tropospheric and stratospheric temperatures in the Northern Hemisphere. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2014, 109: 7-14.
- [19] Haigh J D. The impact of solar variability on climate. *Science*, 1996, 272: 981-985.
- [20] Svensmark H. Cosmoclimatology: A new theory emerges. *Astron Geophys*, 2007, 48: 118-124.
- [21] 蒋祥明, 彭光雄, 邵小东. 自然驱动是全球气候变化的重要因素.

- 气象与环境科学, 2011, 34: 7-13.
- [22] 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. 高原气象, 2011, 30(4): 843-851.
- [23] 钱永甫, 张艳, 郑益群. 青藏高原春季积雪异常对中国春夏季降水的影响. 干旱气象, 2003, 21(3): 1-7.
- [24] 韦志刚, 陈文, 黄荣辉. 青藏高原冬春积雪异常影响中国夏季降水的数值模拟. 高原山地气象研究, 2008, 28(1): 1-7.
- [25] Bamzai A S, Marx L. COLA AGCM simulation of the effect of anomalous spring snow over Eurasia on the Indian summer monsoon. *Quart J Roy Meteor Soc*, 2000, 126: 2575-2584.
- [26] 吴统文, 钱正安. 青藏高原冬春积雪异常与我国东部地区夏季降水关系的进一步分析. 气象学报, 2000, 58(5): 570-581.
- [27] 陈兴芳, 宋文玲. 欧亚和青藏高原冬春积雪与我国夏季降水关系的分析和预测应用. 高原气象, 2000, 19(2): 215-223.
- [28] Barnett T P, Dümenil L, Schlese V, et al. The effort of Eurasian snow cover on regional and global climate variations. *J Atmos Sci*, 1989, 46: 661-685.
- [29] Blanford H F. On the connexion of the Himalaya snowfall with dry winds and seasons of drought in India. *Proc Roy Soc London*, 1884, 37: 1-23.
- [30] Walker G T. On the meteorological evidence for supposed changes of climate in India. *Indian Meteor Memo*, 1910, 21(Part I): 1-21.
- [31] Fasullo J A. Stratified diagnosis of the Indian monsoon Eurasian snow cover relationship. *Journal of Climate*, 2004, 17(5): 1110-1122.
- [32] Hahn D G, Shukla J. An apparent relationship between Eurasian snow cover and Indian monsoon rainfall. *J Atmos Sci*, 1976, 33: 2461-2462.
- [33] Dey B, Kumar B O S R U. An apparent relationship between Eurasian spring snow cover and the advance period of the Indian summer monsoon. *J Appl Meteor*, 1982, 21: 1929-1932.
- [34] Dickson R R. Eurasian snow cover versus Indian monsoon rainfall. A extension of Hahn & Shukla results. *J Climate Appl Meteor*, 1984, 23: 171-173.
- [35] Sankar-Rao M, Lau K M, Yang S. On the relationship between Eurasian snow cover and the Asian summer monsoon. *International Journal of Climatology*, 1996, 16: 605-616.
- [36] 吴国雄. 副热带高压形成和变异的动力学问题. 北京: 科学出版社, 2002.
- [37] 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. 气象科技进展, 2011, 1(4): 37-48.
- [38] Zhao L, Wang J S. Robust response of the East Asian monsoon rainband to solar variability. *Journal of Climate*, 2014, 27(8): 3043-3051.
- [39] Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, et al. The Holocene Asian Monsoon: links to solar changes and North Atlantic climate. *Science*, 2005, 308: 854-857.
- [40] Kerr R A. Changes in the sun may sway the tropical monsoon. *Science*, 2005, 308: 787.
- [41] Verschuren D, Damste J S S, Moernaut J, et al. Half-precessional dynamics of monsoon rainfall near the East African Equator. *Nature*, 2009, 462: 637-641.
- [42] Wasko C, Sharma A. Effect of solar variability on atmospheric moisture storage. *Geophys Res Lett*, 2009, 36, L03703.
- [43] Liu J, Kuang X, Wang B, et al. Centennial variations of the global monsoon precipitation in the last millennium: Results from ECHO-G model. *J Clim*, 2009, 22: 2356-2371.
- [44] Hoyt D V, Schatten K H. *The Role of the Sun in Climate Change*. New York: Oxford University Press, 1997.
- [45] Haigh J D, Blackburn M, Day R. The response of tropospheric circulation to perturbations in lower-stratospheric temperature. *J Clim*, 2005, 18: 3672-3685.
- [46] Kodera K. Solar influence on the Indian Ocean monsoon through dynamical processes. *Geophys Res Lett*, 2004, 31, L24209.
- [47] Haigh J D. The effects of solar variability on the Earth's climate. *Philos Trans R Soc London Ser A*, 2003, 361: 95-111.
- [48] Kushner P J, Polvani L M. Stratosphere-troposphere coupling in a relatively simple AGCM: Impact of the seasonal cycle. *J Clim*, 2006, 19: 5721-5727.
- [49] Haigh J D, Blackburn M. Solar influences on dynamical coupling between the stratosphere and troposphere. *Space Sci Rev*, 2006, 125: 331-344.
- [50] Lean J L. *Cycles and trends in solar irradiance and climate*. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, 2010, 1(1): 111-122.
- [51] Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, et al. The Holocene Asian Monsoon: links to solar changes and North Atlantic climate. *Science*, 2005, 308: 854-857.
- [52] Tan L, Cai Y, An Z, et al. Precipitation variations of Longxi, northeast margin of Tibetan Plateau since AD 960 and their relationship with solar activity. *Climate of the Past*, 2008, 4: 19-28.
- [53] Zhao L, Wang J S, Zhao H J. Signature of the solar cycle on decadal variability in monsoon precipitation over China. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 2012, 90(1): 1-9.
- [54] 周群. 太阳活动11年周期对东亚气候的影响及其机理. 北京: 中国科学院大气物理研究所, 2013.
- [55] Li W, Sun S, Wang B, et al. Numerical simulation of sensitivities of snow melting to spectral composition of the incoming solar radiation. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2009, 26(3): 403-412.
- [56] Meinander O, Wuttke S, Seckmeyer G, et al. Solar zenith angle asymmetry cases in polar snow UV albedo. *Geophysica*, 2009, 45(1-2): 183-198.
- [57] Grenfell T C, Warren S G, Mullen P C. Reflection of solar radiation by the Antarctic snow surface at ultraviolet, visible, and near-infrared wavelengths. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99(D9): 18669-18684.
- [58] 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, 待刊出
- [59] Ineson S, Scaife A A, Knight J R, et al. Solar forcing of winter climate variability in the Northern Hemisphere. *Nature Geosci*, 2011, 4: 753-757.
- [60] 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. 地球科学进展, 2013, 28(12): 1335-1348.