

高原积雪对太阳活动响应及其放大作用的研究进展

宋燕¹ 周雅清² 李智才³ 张薇⁴ 孙必云⁵ 索琳⁶ 毕训强⁵ 肖天贵⁶ 张红英⁷

(1 中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081; 2 山西晋中市气象局, 晋中 030600;

3 山西气候中心, 太原 030006; 4 北京市房山区气象局, 北京 102488; 5 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029;

6 成都信息工程大学, 成都 610225; 7 山西长治市气象局, 长治 046000)

摘要: 高原积雪对太阳活动的响应研究是一个较新的领域, 在对前期研究成果进行回顾和梳理的基础上, 展示了最新的研究成果。研究表明, 高原积雪时空分布对太阳活动有较为显著的响应, 其机理是太阳活动通过bottom-up机制和top-down机制共同作用影响高原积雪。太阳活动可以引起全球0~200 m海温异常和潜热通量异常, 通过改变海气相互作用进一步影响高原降水(积雪)异常, 放大太阳活动的作用; 另一方面, 太阳活动通过影响平流层大气温度和环流, 影响平流层和对流层大气之间的相互作用, 进而改变对流层大气环流和风场, 导致高原积雪异常。对未来的研究工作进行了展望, 研究表明: 数值试验模拟太阳活动影响高原积雪的关键在于气候系统模式需要包含细致的高层大气化学过程和海气耦合过程。

关键词: 高原积雪, 太阳活动, 放大作用, bottom-up和top-down机制, 中国降水

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2021.06.004

Advances on Response and Amplification of Snow over the Tibetan Plateau to Solar Activity

Song Yan¹, Zhou Yaqing², Li Zhicai³, Zhang Wei⁴, Sun Biyun⁵, Suo Lin⁶,
Bi Xunqiang⁵, Xiao Tianguai⁶, Zhang Hongying⁷

(1 China Meteorological Administration Training Centre, Beijing 100081

2 Jinzhong Meteorological Service, Jinzhong 030600 3 Shanxi Climate Center, Taiyuan 030006

4 Fangshan District Meteorological Bureau, Beijing 102488 5 Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences,

Beijing 100029 6 School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225

7 Changzhi Meteorological Service, Changzhi 030600)

Abstract: The research on the response of plateau snow cover to solar activity is a relatively new field, and there are few related researches about this topic internationally. The snow cover over the Tibetan Plateau in winter and spring has an important influence on the East Asian monsoon and precipitation in China. Therefore, it is of great significance to study the influence and amplification of solar activity on the snow cover over the Tibetan Plateau. On the basis of reviewing the previous research results, this paper gives the recent research results, and prospects of the further research work in the future. The results showed that the temporal and spatial distributions of plateau snow cover have significant responses to the solar activity, and the mechanism is that the solar activity could cause the abnormal snow cover over the Tibetan Plateau through the joint action of bottom-up mechanism and top-down mechanism. Solar activity can cause anomalous 0–200 m global sea surface temperature and latent heat flux over the Pacific Ocean, which could change the air-sea interaction, further to affect the precipitation of China and plateau snow, amplifying the influence of solar activity. On the other hand, through affecting stratospheric temperature and circulation, solar activity alters interaction of stratospheric and tropospheric atmosphere and wind field to induce anomalous plateau snow. In this paper, the future research work is prospected, and it is pointed out that the key to simulate the influence of solar activity on plateau snow is that the climate system model should include detailed chemical process in upper atmosphere and air-sea coupling process.

Keywords: plateau snow, solar activity, amplification, bottom-up and top-down mechanisms, precipitation in China

收稿日期: 2021年2月19日; 修回日期: 2021年7月16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); 国家重大科学研究计划(2012CB957803); 中国气象局气象干部培训学院科研项目(中国区域气候影响因子研究)

0 引言

太阳辐射是地球气候系统和大气环流的重要能量来源, 研究表明, 太阳活动对天气和气候有重要的影响^[1-11]。近代太阳活动对全球气候系统显著影响的例子就是小冰期, 由于太阳活动的减弱, 太阳黑子减

少,使得12世纪中期到19世纪末期,全球气候在世界不同的区域出现了明显的变冷,发生气候异常^[12-16]。

太阳活动对全球气候系统的影响在某些区域更为显著,也即具有区域性选择^[17-20]。有研究表明,东亚季风区是对太阳活动响应的显著区域^[17, 20],太阳活动的强弱影响东亚夏季风北部边缘所在纬度,太阳活动强(弱),东亚夏季风区域南风更加偏北(南),雨带位置偏北(南)^[20-21]。冬季太阳射电通量(SRF)强(弱),东亚冬季风较弱(强),东北亚地区冬季降水偏多(少)^[18]。

在年代际时间尺度上,通过相关分析和显著性检验,宋燕等^[22]指出,太阳活动对高原冬季雪深和东亚冬季风的影响在滞后2~6 a里达到最强,进一步说明了东亚地区是响应太阳活动的显著地区,高原积雪对太阳活动有明显的响应。

关于高原积雪对太阳活动的响应机制研究,近期研究表明,太阳活动通过bottom-up(太阳总辐照度(TSI))机制,影响太平洋、大西洋和印度洋地区0~200 m海温异常和潜热通量异常^[23-24],在异常的海气相互作用下,进一步造成东亚冬季和夏季降水异常^[18, 23],当海温异常指数高(低)时,高原夏季降水偏少(多),冬季降水偏多(少)。计算表明,高原地区的冬季降水与雪深相关性较高(达到99.9%),因此,高原冬季降水量反映积雪的多少。这项研究成果说明海洋对太阳活动的响应后的热力异常分布,通过影响海气相互作用中的热量通量,进而影响到高原积雪的异常;并且,由太阳活动造成的高原积雪异常,通过陆面过程和陆气相互作用,进而影响接下来夏季的东亚夏季风,造成中国夏季降水异常,在太阳活动强(弱)年,中国东部地区降水雨带偏北(南)。这证明太阳活动对高原积雪和中国夏季降水的关系有明显的调制作用,放大了太阳活动的影响。这些研究成果首次揭示了太阳活动影响高原积雪的物理过程,以及高原积雪对太阳活动的放大作用。

太阳活动主要通过两种物理途径影响气候系统,其一是top-down(自上而下)机制,又称为紫外线(UV)机制;其二是bottom-up(自下而上)机制,又称为TSI机制^[9, 25-30]。由于太阳辐射中的紫外辐射引起的能量变化,会在地球大气中引起较为显著的影响,尤其是紫外辐射可以直接作用于平流层大气中的臭氧,促使平流层大气中臭氧量增加、热量在不同纬度重新分配,改变热力平衡而造成大气环流的变化,再由平流层和对流层大气之间的相互作用、大气中长波垂直传播影响对流层大气环流和气候现象^[9-11],这种机制即是所谓的top-down机制。太阳活动影响气候

系统的另一个机制是bottom-up机制,指的是太阳总辐射(TSI)的变化直接影响地球表面的热量分布,尤其是晴空无云的海洋,由于海洋表面热量吸收增多,造成海温异常分布,再通过海气相互作用影响水汽蒸发和大气中的水分含量,改变Hadley环流和Walker环流^[26, 30-35],引起副热带地区垂直运动和云量的变化,促使更多的水汽向ITCZ降水区辐合^[9],这两种机制的作用是正向一致的^[27, 36],从而放大了太阳活动的影响。本文在总结前人研究结果的基础上,探索太阳活动通过两种机制影响高原积雪和东亚季风,进一步放大太阳活动影响的物理过程。

目前尚缺乏有关太阳活动影响高原积雪异常的数值模拟研究,主要的难点在于需要选取可以描述高层大气化学过程、以及0~700 m海洋各层热力过程的气候系统模式,能够同时体现太阳活动影响气候系统的top-down和bottom-up两种机制,才能模拟出太阳活动影响大气的热力和动力过程以及非线性放大效应,得到太阳活动影响高原积雪的物理图像。这对气候系统模式的要求比较高。Meehl等^[27]的工作表明,需要同时考虑太阳活动两种机制综合的影响,才能与实际观测更加接近。

1 研究结果

研究表明,在年代际时间尺度上,太阳射电通量(Solar Radio Flux, SRF)与高原冬季雪深呈较为显著的正相关关系,并且,太阳活动调节着高原冬季雪深与中国夏季降水之间的关系^[21-22]。太阳活动对东亚夏季风的北缘位置以及6月淮河降水量都有重要的指示意义^[19-20]。然而,在年际时间尺度上,高原积雪对太阳活动响应的时空特征,以及对太阳活动响应的放大作用研究成果甚少,而高原积雪对东亚地区气候的影响深远且意义重大,因此,相关研究很有必要。

1.1 冬季高原积雪对太阳活动的时空响应特征

利用1951—2017年20世纪再分析资料数据集第二版(20CRv2)的月平均水等效积雪深度格点资料代替积雪测站资料(该数据是单位面积上的积雪换算为融化后的水的质量,单位是 kg/m^2 ,分辨率为 $2^\circ \times 2^\circ$),分析冬季高原积雪空间分布对太阳活动响应的同期和滞后相关(图1),发现高原积雪与太阳活动信号有同期和滞后1~2 a的显著相关。高原整体积雪与太阳射电通量基本呈现正相关,仅在高原的西端、东北部和东南部有局部的负相关。其中,显著相关区域集中在高原中部地区,唐古拉山脉—念青唐古拉山脉—横断山脉一线以及巴颜喀拉山脉东段和阿尼玛卿山脉。随着滞后时间的延长,正相关的区域逐渐减小,高

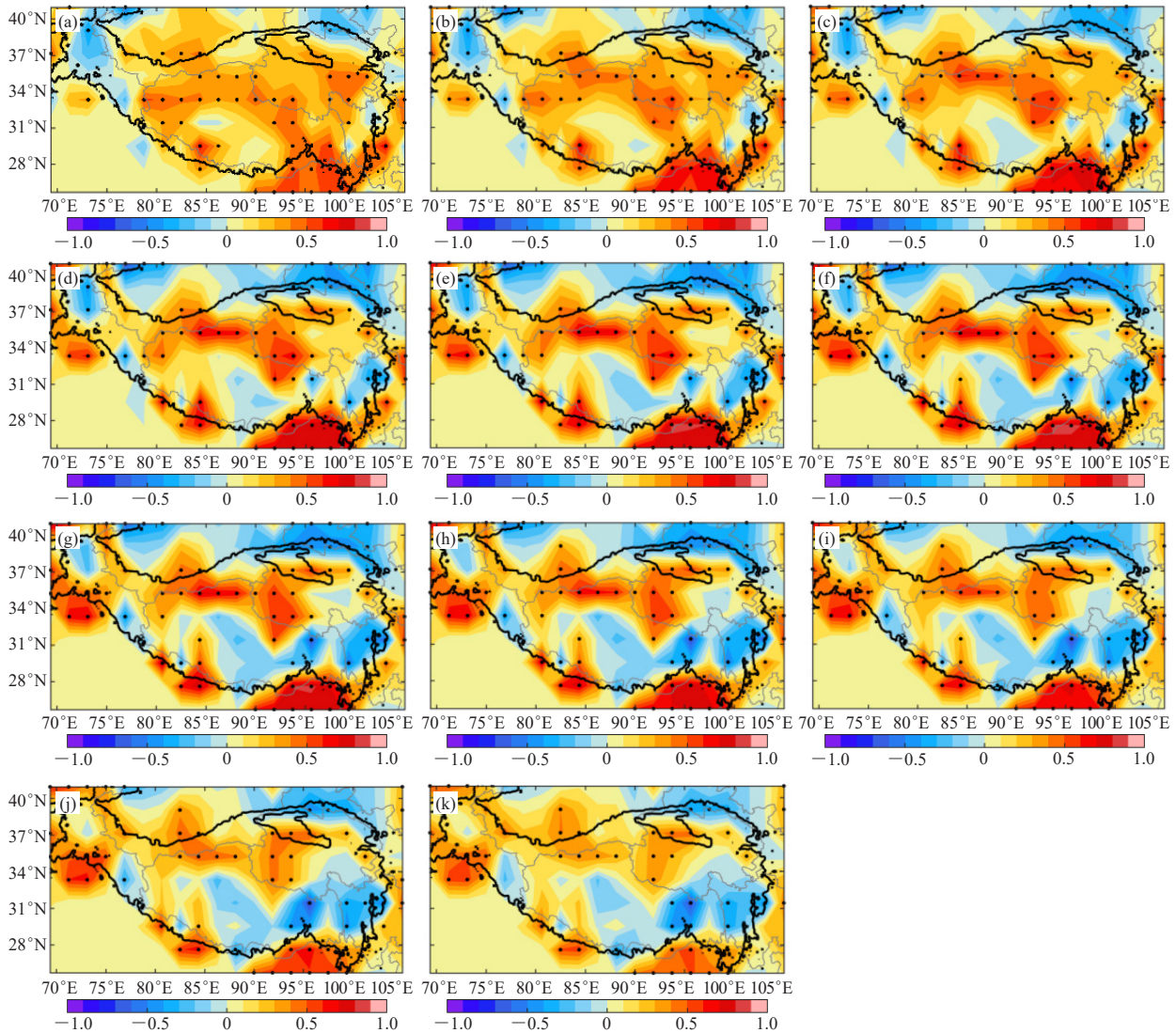


图1 1951—2017年青藏高原冬季积雪与太阳射电通量同期和滞后相关的空间分布，依次为同期 (a) 和分别滞后1~10 a (b~k) (黑点表示通过0.05的显著性检验)

Fig. 1 Spatial distribution of winter snow over the Tibetan Plateau during 1951–2017 for the same period and lag of solar radio flux

(a) in the same period, (b)–(k) in the lag of 1–10 years
(Stippling indicates gridpoint where the difference is significant at 0.05 significance level)

原南部负相关的区域逐渐增大。说明在年际时间尺度上，冬季高原积雪空间分布对太阳活动有明显的同期和滞后相关。

对冬季高原积雪进行旋转经验正交函数分解 (REOF) 展开 (图2)，第一旋转特征向量表现为以唐古拉山脉—念青唐古拉山脉为界的东北—西南反位相特征 (图2a)；第二旋转特征向量表现为沿纬向的“- + -”的分布特征 (图2b)；在第三旋转特征向量呈现南北反位相的分布特征 (图2c)；第四个旋转特征向量近似地以90°E为界，呈现东西反位相的分布特征 (图2d)。

计算冬季高原积雪REOF各模态时间系数与SRF

的相关系数 (表1)，显示PC1、PC2、PC3与SRF之间存在显著的同期相关，PC2与SRF的同期相关最显著 (0.5571)。各模态的时间系数与SRF之间都存在显著的滞后相关。PC1与SRF除了滞后第7年未达到显著性水平之外，其余滞后年份均表现出显著的滞后相关。两者在同期至滞后7年时间段里均呈正相关，滞后8~10 a转为负相关，其中滞后第3年呈最大正相关 (0.6344)。前3个模态与SRF均有显著的同期和滞后相关，说明太阳活动对冬季高原积雪的影响是显著的。

以上研究结果均表明，太阳活动对冬季高原积雪时空分布具有同期和滞后显著的影响，高原地区是对太阳活动响应的敏感地区。

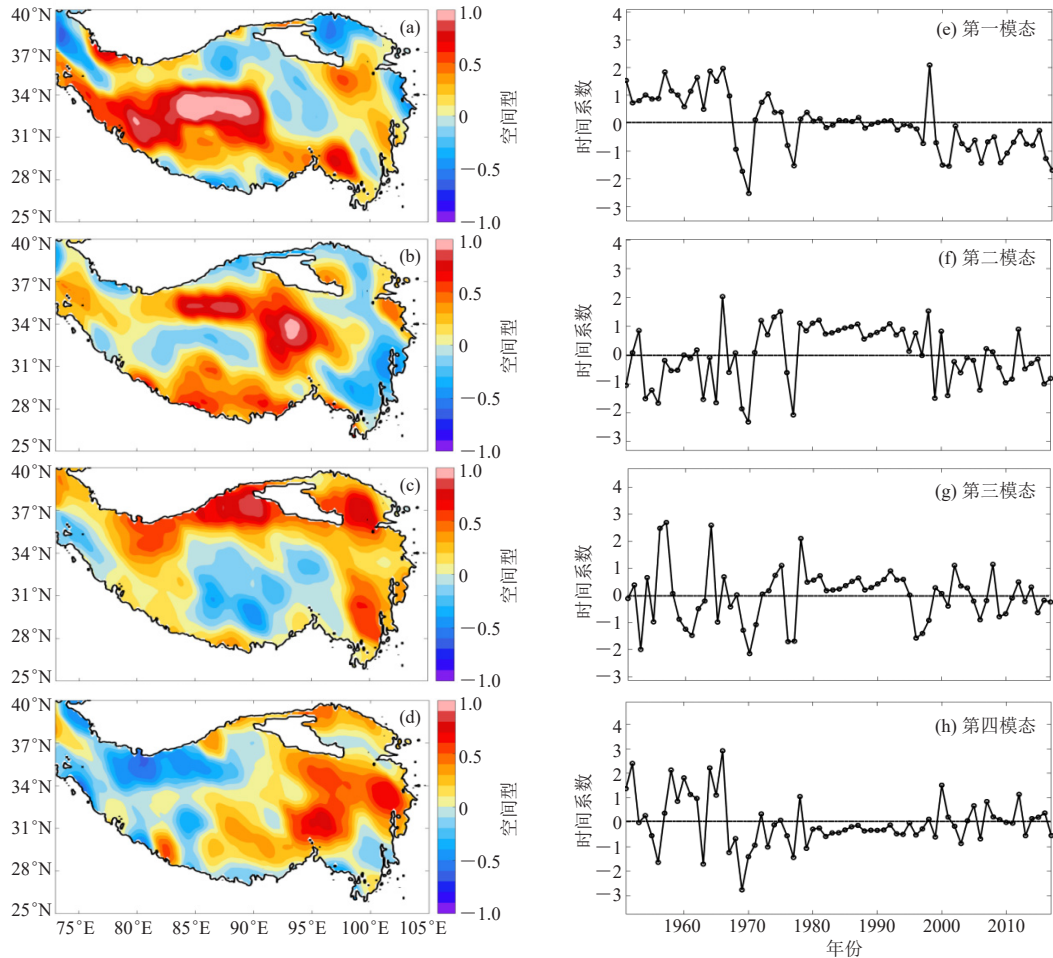


图2 1951—2017年冬季高原积雪经REOF分解后的第1~4模态特征向量的空间分布, 依次为第1模态 (a, 解释方差为23.59%)、第2模态 (b, 解释方差为16.34%)、第3模态 (c, 解释方差为14.44%)、第4模态 (d, 解释方差为12.27%) 以及各模态主成分时间系数, 依次为PC1 (e)、PC2 (f)、PC3 (g)、PC4 (h)

Fig. 2 Spatial distribution of the eigenvectors of the first to fourth modes after REOF decomposition from 1951 to 2017. The first mode (a, variance is 23.59%), the second mode (b, variance is 16.34%), the third mode (c, variance is 14.44%), the fourth mode (d, variance is 12.27%), and the time coefficients of the principal components of PC1 (e), PC2 (f), PC3 (g) and PC4 (h)

表1 1951—2017年冬季高原积雪REOF时间系数与SRF的同期和滞后相关系数

Table 1 Correlation coefficients between time coefficient of the principal components of snow and SRF from 1951 to 2017

滞后时间	PC1	PC2	PC3	PC4
0年	0.4815*	0.5571*	-0.244*	0.1055
1年	0.5749*	0.4055*	-0.2133*	0.1591
2年	0.6303*	0.2489*	-0.1826	0.1781
3年	0.6344*	0.0996	-0.1631	0.1599
4年	0.5774*	-0.0339	-0.162	0.1066
5年	0.4529*	-0.1443	-0.1809	0.0252
6年	0.2637*	-0.2246*	-0.2145*	-0.0716
7年	0.0291	-0.2694*	-0.2512*	-0.1648
8年	-0.216*	-0.2796*	-0.2769*	-0.2347*
9年	-0.4361*	-0.2639*	-0.2818*	-0.269*
10年	-0.6087*	-0.2346*	-0.262*	-0.2654*

注: *表示通过0.05显著性水平检验。

1.2 高原积雪对太阳活动响应的非线性放大影响

太阳活动对高原冬季积雪的影响, 在峰值年和谷值年表现得更为突出。选取冬季SRF峰值年: 1957/58, 1967/68, 1979/80, 1990/91和2001/02, 谷值年为: 1963/64, 1975/76, 1986/87, 1995/96和2008/09。图3是SRF和谷值年中国冬季降水差值场, 从图中可见, 在太阳活动峰(谷)值年, 高原地区冬季降水显著偏多(少), 并且通过了0.05的显著性检验。不仅如此, 从我国东北经过河套地区, 到青藏高原地区, 降水异常分布呈现出东北-西南走向的“+-”的分布特征。

根据太阳活动对地球气候系统影响的TSI机制(bottom-up), 太阳活动短波辐射影响海洋热量的吸收, 从而造成海气相互作用的异常, 这种异常可以反映在潜热通量和感热通量的响应上面。图4是太阳射

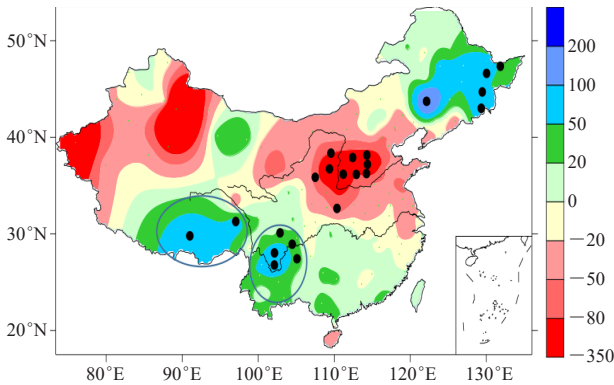


图3 SRF峰值年和谷值年中国冬季降水差值场 (黑点表示通过0.05显著性检验的站点)^[18]

Fig. 3 Difference of winter precipitation in China between peak and valley years of SRF (Stippling indicates stations where is at 0.05 significance level^[18])

电通量11 a周期峰值年和谷值年潜热通量的差值场。可以看出，太平洋存在4个显著的潜热通量异常区A、B、C和D区（图4），具体范围如表2所描述。通过验证分析发现，B区和C区的潜热通量异常值，与高原冬季降水有密切的关系，对高原地区冬季降水的贡献最大。因此，利用B区和C区潜热通量异常数值定义一个指数 $I_{\text{latent}}=L_B+L_C$ ，其与中国冬季降水的空间相关分布如图5所示。可以看出，高原地区降水异常分布与图3非常相似，说明副热带太平洋中部和西部地区的潜热通量异常对高原地区冬季降水有重要的贡献。高原积

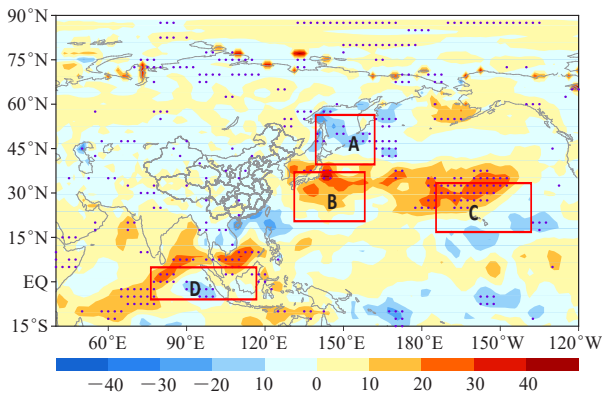


图4 太阳射电通量峰值年与谷值年冬季潜热通量差值图 (紫点为通过0.05显著性检验的格点)^[18]

Fig. 4 Difference of latent heat flux between peak year and valley year of SRF in winter. (Stippling is gridpoints at 0.05 significance level^[18])

表2 潜热通量异常区的空间范围

Table 2 Regional extent of latent heat flux anomaly

区域	范围	符号
A	44°—58°N, 140°—158°E	负
B	27°—40°N, 130°—155°E	正
C	2.5°—7.5°N, 85°—110°E	正
D	23°—35°N, 180°—210°E	正

雪异常，又会在接下来的夏季对中国降水产生影响，从而持续放大了太阳活动的作用。相比较而言，由太阳活动造成的感热通量异常对高原地区冬季降水的影响较小（图略）。

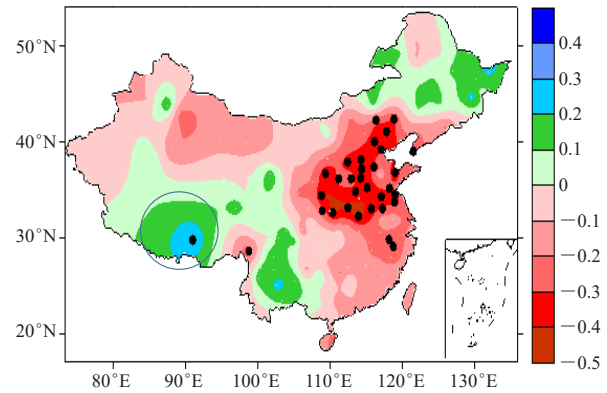


图5 潜热通量异常指数与中国冬季降水的相关 (黑点表示通过0.05显著性检验的站点)

Fig. 5 Correlation between latent heat flux anomaly index and winter precipitation in China (Stippling indicates stations where the difference is at 0.05 significance level)

太阳活动还可以通过影响0~200 m全球海洋温度距平，经由海气相互作用，进而影响高原冬夏季降水，从而放大太阳活动的作用。利用美国国家海洋地理数据中心（NOEC）0~700 m海温距平资料WOD09数据集（World Ocean Atlas, NCAR Climate Data Guide）（1955—2016年）（格点分辨率为1°×1°），将垂向各层次的海温距平资料进行5 a滑动平均，以去除ENSO信号。计算表明，0~200 m的海温异常对太阳射电通量的响应比较显著，将0~200 m层海温异常累加起来分析其对太阳射电通量高值年和低值年响应的合成差场，结果如图6所示。经过功率谱分析和红噪声显著周期检验，图中共6个显著的响应区A~F均对太阳活动有显著的响应，其具体空间范围和显著周期如表3所示。

经过检测，全球6个显著的响应区域（A、B、C、D、E、F）均具有与太阳活动周期相近的11.3 a显著周期，并且都通过了红噪声95%的信度检验。为了进一步检测这6个区域海温异常确实是由太阳活动激发而产生，对每个区域进行海温距平时间-经向剖面图分析（图略），可以看到这6个区域确实存在近似11 a的显著周期。

利用这6个区的海温异常值定义海温异常指数： $Z=ST_B+ST_F-ST_A-ST_C-ST_D-ST_E$ ，与SRF求相关得到相关系数为0.473，通过了0.001的显著性检验（图7），去趋势后两者的相关性更加显著。说明海温异常指数Z可以较好地反映对太阳射电通量响应的强度和位相变化。

海温异常指数Z与冬季和夏季格点降水分别计算同期相关，可以发现，在高原地区都存在较为显著的

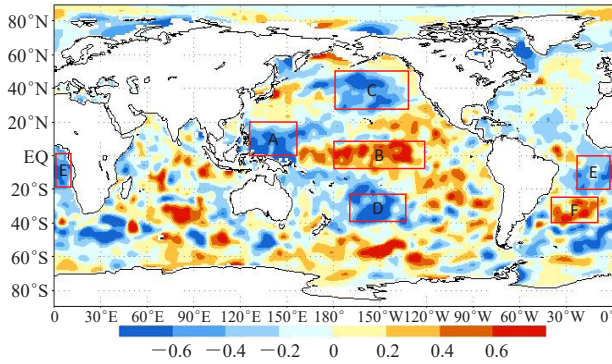


图6 经过5 a滑动平均后的全球海洋0~200 m年平均海温距平累加对SRF响应的合成差场(A~F区域分别是海温对太阳辐射响应显著的区域,暖色为正响应,冷色为负响应,均通过红噪声0.05的显著性检验)

Fig. 6 Composite of 0~200 m accumulated annual sea surface temperature anomaly response to SRF after 5 years running mean (A~F regions have significant responses, warm color indicates a positive response, and cold color means a negative response, all of which are at 0.05 significance level of red noise)

表3 全球海洋0~200 m年平均海温距平累加对SRF响应的显著区域空间范围和显著周期

Table 3 Range and significant period of 0~200 m accumulated annual sea surface temperature anomaly response to SRF

显著区域	范围	响应的符号	显著周期/a
A	120°—160°E, 0°—20°N	-	17, 11.3, 8.5
B	120°—180°W, 10°S—10°N	+	11.3, 8.5
C	130°—180°W, 25°—50°N	-	17, 11.3
D	130°—170°W, 25°—40°S	-	11.3, 8.5
E	20°W—10°E, 20°S—0°	-	11.3, 8.5
F	10°—40°W, 25°—40°S	+	11.3, 8.5

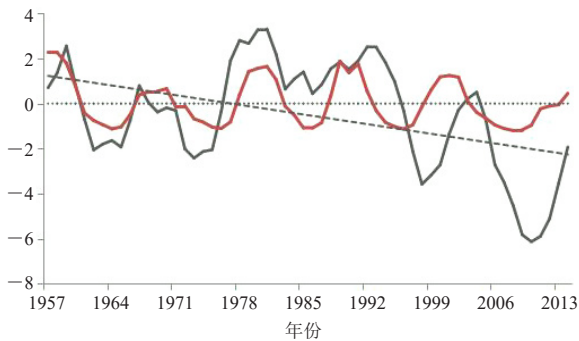


图7 海温异常指数Z的标准化曲线(黑色实线)和SRF标准化序列(红色实线)(虚线为Z的趋势线)

Fig. 7 Normalized time series of SSTA index Z (black solid line) and SRF (red solid line) (Dashed line is the tendency of Z)

相关(图8)。当海温异常指数Z数值较大(小)的时候,冬季高原地区降水显著偏多(少),而夏季高原地区的降水显著偏少(多)。滞后1 a的相关分布与同期相关很相似(图略)。说明全球海温异常传递了太阳活动的信号,对高原地区的降水产生明显影响,从

而放大了太阳活动的作用。冬季高原降水与积雪的高相关可以说明,冬季高原积雪对海温异常指数Z具有显著相关的特征,而高原积雪又可以影响大气环流和东亚夏季风,因此,太阳活动所产生的影响会通过非线性海气相互作用的链条反应,对东亚气候产生深刻而久远的影响。

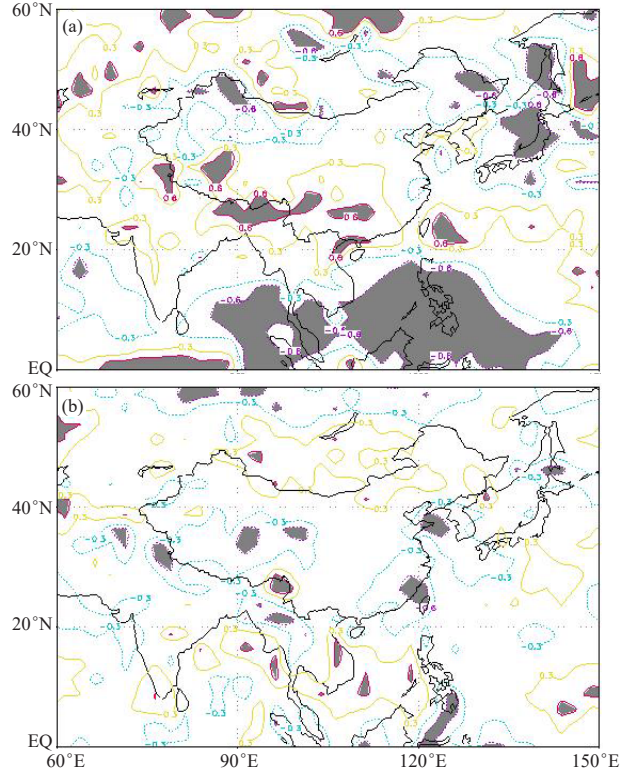


图8 海温异常指数Z与东亚地区冬季降水率(a)和夏季降水率(b)的相关系数(其中阴影区是达到0.1显著水平的异常区,实线是0.5等值线,虚线是-0.5等值线)

Fig. 8 Correlation of SST anomaly index Z and winter precipitation rate (a), and summer precipitation rate (b) in East Asia. (Shading indicates 0.1 significance level, solid contour interval is 0.5%, and dotted contour interval is -0.5%)

太阳活动造成的海温异常指数对中国冬季降水的影响主要集中在某些地区,比如当指数Z数值大时,华南地区广西和广东西部一带降水增多,东北地区降水减少,青藏高原地区降水显著增加;对中国地区夏季降水的显著影响集中在江南东部地区福建、浙江和台湾地区一带、山东半岛、青藏高原中部和东北部地区,这些都是降水减少比较显著的区域。说明海温异常在这些地区可以放大太阳活动的信号使得降水减少。在做短期降水预测时,应该注意在这些地区降水异常中的太阳活动信号。

以上讨论了太阳活动对全球和东亚地区海洋热力异常和降水的影响和放大作用,这只是太阳活动影响气候系统的一部分,实际上,在气候系统的许多领域还没有涉

及对太阳活动响应的研究,需要人们进一步去探索。

1.3 太阳活动影响高原积雪的机制研究

一般认为,太阳活动影响气候系统的机制有两种:一种是bottom-up机制,也就是太阳总辐射机制(TSI机制),太阳活动总辐射的变化,直接影响地球表面与大气之间的热通量和大气温度,改变大气环流,进而导致地球气候异常,驱动气候变化;另一种机制是top-down机制(UV机制),即太阳短波辐射中的紫外波段的强度变化能影响地球中高层大气化学过程,改变热平衡,进而影响平流层大气环流,并通过行星波的垂直传播影响到对流层大气,引起某些区域气候变化。研究表明,两种机制的作用是同相的,可以共同影响某些区域的气候异常,并且, top-down机

制要比bottom-up机制的贡献要大^[27]。这是太阳活动非线性影响气候异常的重要物理机制。

前面1.2节所讨论的物理过程体现了bottom-up机制的作用。太阳活动对高原积雪的影响是否也可以通过top-down机制得以体现?我们尝试从top-down机制分析太阳活动对高原积雪的影响。

图9给出了冬季SRF峰值年与谷值年冬季温度异常的垂直剖面图和位势高度异常剖面图,可以看出,太阳活动峰值年400~100 hPa北极地区降温,中纬度地区升温,与这种指向极地的温度梯度相匹配,有利于中纬度地区西风加强,北极涛动呈现正位相,中纬度地区西风加强(图略)。在太阳活动谷值年,这种特征相反。

平流层大气的这种环流异常可以通过大气长波的

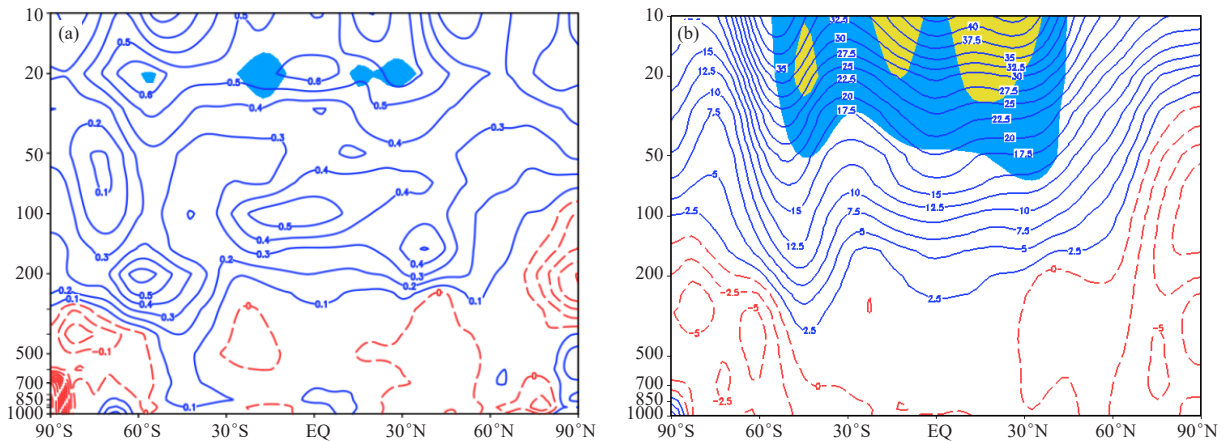


图9 冬季太阳射电通量峰值年与谷值年纬向平均数值的纬度—高度剖面差值

(a) 冬季温度 (单位: °C), (b) 冬季位势高度 (单位: gpm)

Fig. 9 Difference of latitude—height profile of zonal mean value between peak and valley years of winter solar radio flux. (a) Winter temperature (unit: °C), (b) winter geopotential height (unit: gpm)

垂直传播,传递到对流层大气。太阳射电通量高低年的EP通量(图10)显示,太阳活动高年,高纬度地区60°—80°N,从平流层到对流层存在一致的EP通量下传的现象,表明波动下传,将太阳活动的影响下传到对流层。平流层感热通量由极地指向低纬度,热量向中纬度输送,有利于中纬度温度升高,高纬度温度降低,产生由南指向极地的温度梯度,利于西风加强。沿经向方向,平流层EP通量箭头由极地指向赤道,有向北的动量输送,因此,在平流层45°—70°N存在强的EP通量的辐散,纬向西风加强;而其以南地区和极地地区,存在EP通量的辐合,纬向西风减弱,东风加强。这种纬向风随纬度的经向分布特征反映了环状模(北极涛动)的正位相。同样,对流层50°—60°N地区850 hPa以上存在EP通量的辐散,有利于西风加强。太阳活动低年,则情况相反。

平流层与对流层大气之间的相互作用改变了对流

层大气环流场分布。太阳活动高年的500 hPa纬向风场显示,高原地区有显著的东风异常,而其南侧的印度半岛、孟加拉湾和阿拉伯海上空存在较强的西风异常,西风气流加强(图11a)。这种纬向风异常随纬度的经向变化,产生正的涡度异常,易在高原地区产生异常的气旋,有利于加强降水,从而造成高原积雪的增多(图11b)。经过计算,SRF高年的冬季积雪日数平均每年比低年多出50 d。并且,由太阳活动造成的这种异常的纬向风可以一直持续到春季(图略),从而影响高原春季积雪。计算显示,SRF高年的春季积雪日数平均每年比低年多出57 d。

以上研究结果揭示了太阳活动影响高原积雪的top-down物理过程,证明了太阳活动通过两种物理机制(bottom-up和top-down)共同影响高原积雪。

2 讨论和结论

以上的研究从观测事实的角度揭露了高原积雪对

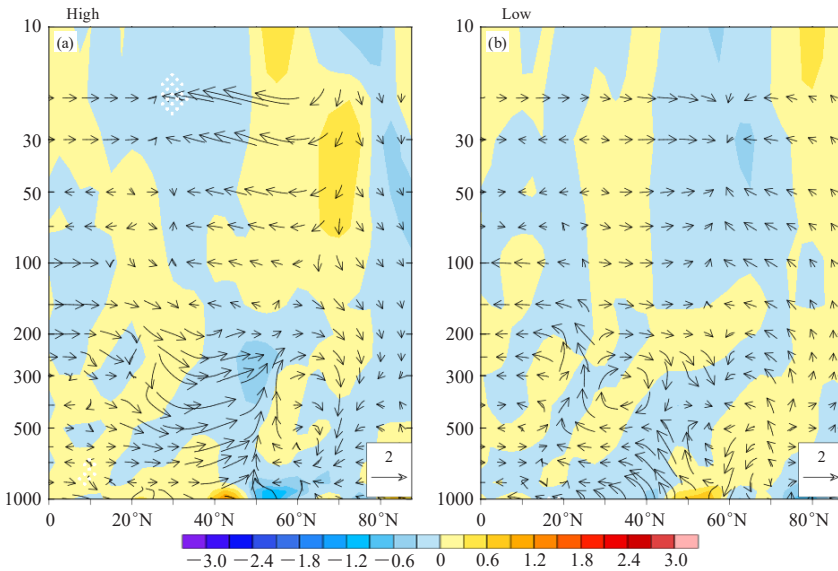


图10 冬季SRF高(a),低(b)年EP通量(箭头)和散度(阴影)(白点表示通过0.1显著性水平检验)

Fig. 10 EP flux (arrow) and divergence (shading) in winter of (a) high SRF years and (b) low SRF years. (Stippling indicates gridpoints where are at 0.1 significance level)

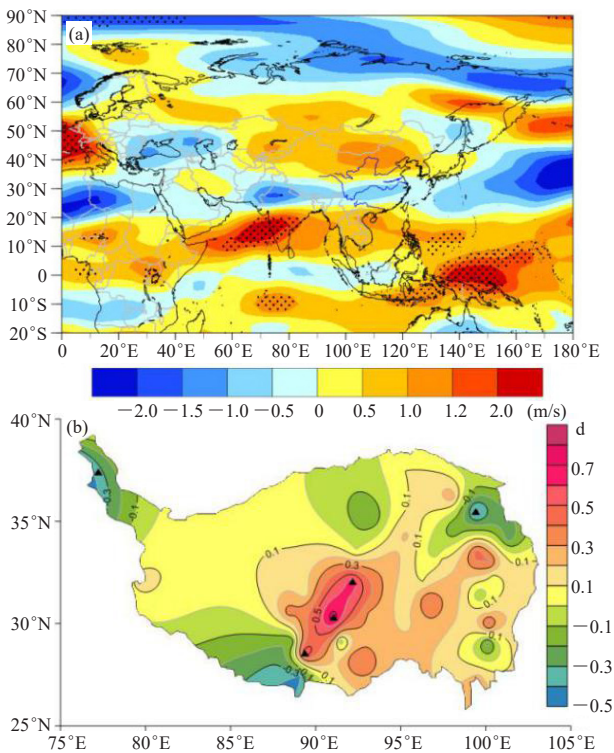


图11 冬季太阳射电通量高低年差值场

(a) 500 hPa纬向风场(紫色点表示通过0.1显著性水平检验), (b)高原冬季积雪日数(▲表示通过0.1显著性水平检验)

Fig. 11 Difference of high solar radio flux years and low years in winter

(a) 500 hPa zonal wind field (stippling means gridpoints where are at 0.1 significance test level), (b) snow days number in winter over the plateau (▲ means station with 0.1 significance level)

太阳活动响应的时空特征和物理过程,我们也尝试从数值试验的角度研究太阳活动对高原积雪的影响。这需要气候模式包含更为细致的高层大气的化学过程,以及海气耦合系统,这样更容易从top-down和bottom-up两种机制的共同作用下看到太阳活动对高原积雪的影响。

2.1 高原积雪对太阳活动响应的数值试验

选用美国大气科学中心的地球系统模式(NCAR CESM2.1.1)版本进行了包含有年变化的太阳辐射强度(Total Solar Irradiance, TSI) 1979—2009年的全耦合的数值积分试验,分析了1979—2009年期间地球气候系统的变化。大气水平分辨率为 $1.9^{\circ} \times 2.5^{\circ}$,具体模式参数设置如表4。

表4 模式参数设置

Table 4 Mode parameters

各分量模式组成		物理参数化方案
大气	CAM6	深对流 ZM (Zhang and McFarlane)
陆面	CLM5	浅对流 CLUBB (Cloud Layers Unified by Binormals)
海洋	POP2	云微物理 MG 2.0 (Morrison and Gettelman)
海冰	CICE5	云宏物理 CLUBB (Cloud Layers Unified by Binormals)
陆冰	CISM2	边界层 CLUBB (Cloud Layers Unified by Binormals)
河流径流	MOSART	辐射 RRTMG (Rapid Radiative Transfer Method)

根据模式中1979—2009年太阳辐射强度(TSI)的变化,选取 $TSI > 1.0$ 标准差的TSI高值年:1979, 1980, 1981, 1989, 1990, 2000, 2001, 2002年,总共8 a;小于 -1.0 标准差的TSI低值年:1985, 1986, 1995, 1996, 1997, 2007, 2008, 2009年,总共8 a。

图12是太阳活动高低年参考高度温度(TREHFT)(2 m气温)和顶层净太阳通量(FSNT)的空间分布。可以看出,太阳活动高值年高原地区大气层顶太阳通量明显较强,近地面大气温度更高,均通过了0.05的显著性水平检验。说明太阳活动强,高原地区进入大气层顶的热量高,近地面气温偏高。

图13是太阳活动高低年高原降雪率差值场,可以看到,太阳活动高(低)年,高原主体的降雪率偏多(少);高原以西和以北均表现为降雪率偏低(高)。说明太阳活动强(弱)时,高原主体冬春季积雪偏多(少)。这与1.1节所得到的结论一致,也与宋燕等^[21-22]研究结果较为一致。数值模拟的结果与诊

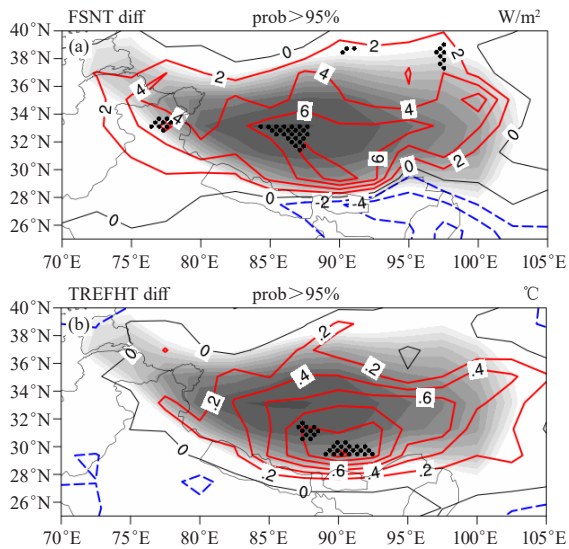


图12 太阳活动高低年差值场分布

(a) 年平均顶层大气净太阳通量; (b) 参考高度温度 (黑色点为通过0.05显著性水平检验, 阴影区是高原地区)

Fig. 12 Difference in high and low solar activity years of annual net solar flux at top of atmosphere (a), annual temperature at reference height (b) (stippling indicates gridpoints where are at 0.05 significance level, and shading are plateau areas)

断分析结果相一致。

环流场分析表明, 太阳活动高年500 hPa高原主体上空存在异常气旋和上升运动, 有利于产生降水; 高原主体上空100 hPa存在异常反气旋, 配合500 hPa异常气旋, 存在异常上升气流, 有利于降雪增多。以上环流异常有利于太阳活动强的年份高原降雪率增多; 太阳活动低的年份则相反(图略)。

以上数值试验结果证明了高原地区是对太阳活动响应的敏感地区, 包括温度场、降雪率和环流场(图略)都存在异常响应。但是, 模式中的平流层大气在中纬度地区没有出现纬向风的加强, 环状模没有明显的加强, EP通量分析表明平流层和对流层大气的相互作用也非常弱。究其原因, 有可能是模式中平流层大气的化学过程不完善造成的。在下一步的研究工作中, 拟选择包含较完整化学过程(主要是臭氧响应太阳辐射)的气候模式, 继续研究太阳活动对高原积雪异常影响的物理机制。

2.2 结论

本文回顾和梳理了近期高原积雪对太阳活动响应以及放大作用的研究成果, 给出了最新的研究结果, 具体结论如下。

1) 1951—2017年青藏高原冬季积雪与太阳射电通量同期和滞后空间相关分析表明, 高原积雪对太阳活动具有显著的空间响应, 同期和滞后1~2 a为显著

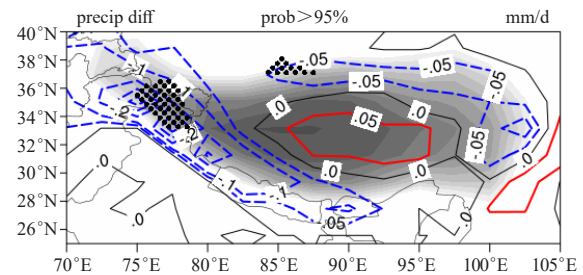


图13 太阳活动高低年年平均降雪率差值场的空间分布 (黑色点为通过0.05显著性水平检验, 阴影区是高原地区)

Fig. 13 Spatial distribution of difference of annual average snowfall rate between high and low solar activity years (stippling indicates gridpoints where are at 0.05 significance level, and shading are plateau areas)

的正相关, 主要集中在昆仑山脉—唐古拉山脉—念青唐古拉山脉—横断山脉一线。2年以后相关分布型发生显著的变化, 以32°N为界, 逐渐向“北正南负”的分布型发展, 高原北部积雪呈正相关, 85°E以西高原西部积雪呈正相关。

2) 高原积雪旋转经验正交分解(REOF)分析表明, 高原积雪的不同空间模态对太阳活动的响应有不同的分布型, 前3个模态对太阳活动都有显著的同期和滞后响应, 都通过了0.05的显著性水平检验, 其中第一模态响应最为显著。响应的敏感区集中在高原主体上的高山区域, 这里的积雪偏多, 对太阳活动的响应更为敏感。第四模态响应最弱。

3) 太阳活动通过影响海气相互作用, 导致冬季太平洋上的潜热通量显著异常, 以及太平洋和大西洋0~200 m海温显著异常, 海洋与大气异常的热量交换使得高原地区降水显著异常。一般来说, 太阳活动峰(谷)值年, 高原地区冬季降水偏多(少); 太阳活动高(低)年, 海温异常指数偏高(低), 高原地区冬季降水偏多(少), 夏季降水偏少(多)。以上是太阳活动影响高原积雪异常的bottom-up(TSI)机制。受太阳活动影响的高原积雪异常, 又会通过雪气相互作用, 进一步影响中国夏季降水, 从而放大了太阳活动的非线性影响。

4) 对太阳活动影响高原积雪的机制研究表明, 除去bottom-up机制之外, 还存在top-down机制(UV机制)的影响。太阳活动峰(谷)值年, 平流层北极地区降(升)温, 中纬度地区升(降)温, 由南指向北的温度梯度使得中纬度地区西风加强, 北极涛动正(负)位相。太阳活动高(低)年, 存在长波的垂直下(上)传, 在平流层45°—70°N存在强的EP通量的辐散(合), 纬向西风加强(减弱); 而45°—70°N以南地区和以北地区, 存在EP通量的辐合(散), 纬

向西风减弱（加强），东风加强（减弱），北极涛动正（负）位相。高原地区有显著的东（西）风异常，而其以南印度半岛、孟加拉湾和阿拉伯海上空存在较强的西（东）风异常，这种纬向风的经向切变呈现出正（负）涡度异常，易产生异常（反）气旋，有利于高原地区降水偏多（少），从而造成高原积雪的增多（减少）。由太阳活动造成的这种异常的纬向风可以一直持续到春季，影响高原春季积雪。

5) 数值模拟结果显示，在太阳活动高（低）值年份，高原地区大气层顶太阳通量更强（弱），近地面大气温度更高（低），高原主体的降雪率偏多（少）；高原主体500 hPa存在异常（反）气旋，100 hPa存在异常反（正）气旋，高原地区上升（下沉）运动增强，（不）有利于产生降水，降雪率增多（减少）。

致谢：感谢广东海洋大学海洋与气象学院李德琳博士为本文做图。

参考文献

- [1] Herman J R, Goldberg R A. Sun, weather and climate. NASA, 1978.
- [2] Herschel W. Observations tending to investigate the nature of the sun, in order to find the causes or symptoms of its variable emission of light and heat: with remarks on the use that may possibly be drawn from solar observations. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1801, 91: 265-318, doi: 10.1098/rstl.1801.0015.
- [3] Hines C O. A possible mechanism for the production of sun: weather correlations. Journal of the Atmospheric Sciences, 1974, 31: 589-591, doi: 10.1175/1520-0469(1974)031<0589:APMFTP>2.0.CO;2.
- [4] Sfića a 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.
- [5] Haigh J D. The impact of solar variability on climate. Science, 1996, 272: 981-985.
- [6] Ineson S, Scaife A A, Knight J R, et al. Solar forcing of winter climate variability in the Northern Hemisphere. Nature Geoscience, 2011, 4: 753-757, doi: 10.1038/ngeo1282.
- [7] Lockwood M, Harrison R G, Woollings T J, et al. Are cold winters in Europe associated with low solar activity? Environmental Research Letters, 2010, 5 (2): 024001.
- [8] Woollings T, Lockwood M, Masato G, et al. Enhanced signature of solar variability in Eurasian winter climate. Geophysical Research Letters, 2010, 37: L20805, doi: 10.1029/2010GL044601.
- [9] Gray L J, Beer J, Geller M, et al. Solar influences on climate. Reviews of Geophysics, 2010, 48: RG4001, doi: 10.1029/2009RG000282.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Elizabeth N R. The Maunder minimum and the deepest phase of the little ice age. Solar Output and Climate during the Holocene. German: 14th EPC/ESF Workshop, 1995: 131-144.
- [13] Kunitomo S, Mikami T. Solar activity during the Little Ice Age. Proceedings of the International Symposium on the Little Ice Age Climate. Tokyo, Japan: Tokyo Metropolitan University, Department of Geography, 1992: 337-340.
- [14] Eddy J A. The maunder minimum. Science, 1976, 192(4245): 1189-1202.
- [15] Eddy J A. Climate and the changing sun. Climatic Change, 1977, 1(2):173-190.
- [16] 宋燕, 季劲钧, 王月宾, 等. 小冰期气候研究回顾和机理探寻. 气象, 2003, 29(7): 3-6.
- [17] 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. 气象科技进展, 2014, 4(4): 19-27.
- [18] Song Y, Li Z C, Gu Y, et al. The effect of solar cycle on climate of Northeast Asia. Journal of Meteorological Research, 2019, 33(5): 885-894, doi: 10.1007/s13351-019-8132-z.
- [19] 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, 2012, 117: D23117, doi: 10.1029/2012JD018074.
- [20] Zhao L, Wang J S. Robust response of the East Asian monsoon rainband to solar variability. Journal of Climate, 2014, 27: 3043-3051.
- [21] 宋燕, 李智才, 张菁, 等. 太阳活动对高原积雪东亚夏季风调制影响的回顾和进展. 气象科技进展, 2016, 6(3): 148-154.
- [22] 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. 高原气象, 2016, 35(5): 1135-1147.
- [23] 周雅清, 宋燕, 肖子牛, 等. 全球海温对太阳射电通量异常的响应及其对降水的影响. 地球物理学报, 2021, 64(5): 1518-1530.
- [24] Wang G, Yan S X, Qiao F L. Decadal variability of upper ocean heat content in the Pacific: responding to the 11-year solar cycle. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2015, 135: 101-106.
- [25] Meehl G A, Washington W M, Wigley T M L, et al. Solar and greenhouse gas forcing and climate response in the 20th century. Journal of Climate, 2003, 16: 426-444, doi: 10.1175/1520-0442(2003)016<0426:SAGGFA>2.0.CO;2.
- [26] Meehl G A, Arblaster J M, Branstator G, et al. A coupled air-sea response mechanism to solar forcing in the Pacific region. Journal of Climate, 2008, 21(12): 2883-2897.
- [27] Meehl G A, Arblaster J M, Matthes K, et al. Amplifying the Pacific climate system response to a small 11 year solar cycle forcing. Science, 2009, 325(5944): 1114-1118, doi: 10.1126/science.1172872.
- [28] Haigh J D. A GCM study of climate change in response to the 11-year solar cycle. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1999, 125: 871-892, doi: 10.1002/qj.49712555006.
- [29] Kodera K, Kuroda Y. Dynamical response to the solar cycle: winter stratopause and lower stratosphere. Journal of Geophysical Research, 2002, 107(D24): 4749, doi: 10.1029/2002JD002224.
- [30] Kodera K. Solar influence on the Indian Ocean Monsoon through dynamical processes. Geophysical Research Letters, 2004, 31(24), doi: 10.1029/2004GL020928.
- [31] van Loon H, Meehl G A, Arblaster J M. A decadal solar effect in the tropics in July-August. Journal of Atmospheric and Solar: Terrestrial Physics, 2004, 66(18): 1767-1778.
- [32] van Loon H, Meehl G A, Shea D J. Coupled air-sea response to solar forcing in the Pacific region during northern winter. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2007, 112 (D2). doi: 10.1029/2006JD007378.
- [33] Lee J N, Shindell D T, Hameed S. The influence of solar forcing on tropical circulation. Journal of Climate, 2009, 22(22): 5870-5885.
- [34] White W B, Liu Z. Resonant excitation of the quasi-decadal oscillation by the 11-year signal in the Sun's irradiance. Journal of Geophysical Research Oceans, 2008, 113(C1), doi: 10.1029/2006JC004057.
- [35] White W B, Liu Z. Non-linear alignment of El Nino to the 11-yr solar cycle. Geophysical Research Letters, 2008b, 35(19), doi: 10.1029/2008GL034831.
- [36] Rind D, Lean J, Lerner J, et al. Exploring the stratospheric/tropospheric response to solar forcing. Journal of Geophysical Research, 2008, 113: D24103, doi: 10.1029/2008JD010114.