

天气气候中太阳活动信号的敏感区域

王瑞丽^{1, 2} 肖子牛¹ 赵亮³ 周立旻⁴ 张庆云⁵

(1 中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081; 2 成都信息工程学院, 成都 610225;

3 总参气象水文空间天气总站, 北京 100081; 4 华东师范大学地理信息科学教育部重点实验室, 上海 200062;

5 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)

摘要: 太阳活动是地球气候形成的重要驱动因子, 与地球气候变化有密切的联系, 但研究分析发现, 地球气候对太阳活动变化的响应具有较大的空间差异, 地球上某些区域的天气气候对太阳活动更加敏感。主要介绍了对太阳活动变化特别敏感的三个响应区域, 即极地—北大西洋区域、热带地区和季风区的天气气候变化与太阳活动变化的联系。从不同的时间尺度上总结了太阳活动对极地—北大西洋区域的影响事实和可能机制, 指出了太阳活动对云微物理过程/平流层—对流层耦合的调制在其中扮演重要角色, 回顾了热带地区对流活动、海表温度以及ENSO循环中明显的太阳活动信号, 归纳了亚洲季风系统活动的边缘地区变率对太阳活动的响应。最后提出了未来关于天气气候中太阳活动信号的敏感区域研究中需要关注的一些科学问题。

关键词: 太阳活动, 天气气候, 敏感区, 北大西洋涛动 (NAO), ENSO, 亚洲季风

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2014.04.004

The Regions with Sensitive Signals of Solar Activities in Weather and Climate

Wang Ruili^{1, 2}, Xiao Ziniu¹, Zhao Liang³, Zhou Limin⁴, Zhang Qingyun⁵

(1 China Meteorological Administration (CMA) Training Centre, Beijing 100081 2 Chengdu University of Information

Technology, Chengdu 610225 3 Meteorological, Hydrological and Space Weather Observatory of General Staff, Beijing

100081 4 Key Laboratory of Geographic Information Science, Education Ministry, East China Normal University,

Shanghai 200062 5 State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid

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

Abstract: Solar activity is an important factor driving the formation of the Earth's climate, and is closely linked with global climate change. Studies found that the response of the Earth's climate change to solar activities is inhomogeneous in space. Weather and climate of certain regions on Earth are found more sensitive to solar activities. In this paper, we concentrate on sensitive responses to solar activity in the Arctic-North Atlantic, tropical and monsoon regions. The fact that solar activities have a great influence on polar-North Atlantic regions on different time scales is presented, and we believe that cloud microphysical processes and the stratosphere-troposphere coupling play an important role in modulating relationships as aforementioned. Then we reviewed significant solar signals in convection, sea surface temperature and the ENSO cycle in the tropics. The responses of monsoon regions, especially the Asian monsoon, to solar activities are summed up, the response being particularly active in the marginal areas of monsoon. Finally, scientific issues which need to be focused on are put forward for future investigation on the regions with sensitive signals of solar activities in weather and climate.

Keywords: solar activity, weather and climate, sensitive regions, NAO, ENSO, Asian monsoon

1 引言

太阳是一颗基本稳定的恒星, 但同时, 观测事实^[1-4]也表明它一直处于变化中, 即存在“太阳活动”。太阳活动是太阳大气层中一切活动现象的总

称, 主要包括太阳黑子、光斑、谱斑、耀斑、日珥和日冕瞬变事件等。作为太阳系唯一的恒星, 太阳是地球气候系统主要的能量来源, 太阳活动对地球天气气候变化的影响一直广受关注^[5-8]。长久以来, 人们对太阳活动和地球气候的关系开展了大量研究, 揭示了太阳活动影响天气气候变化的大量事实^[8-10]。与此同时, 人们注意到太阳活动对地球气候系统的影响在空间上是不均匀的, 存在一些敏感区域^[7, 11], 这可能与气候系统内部复杂的反馈过程有关^[12]。

收稿日期: 2013年12月14日; 修回日期: 2014年4月10日

第一作者: 王瑞丽 (1989—), Email: WangRL_06@163.com

通信作者: 肖子牛 (1965—), Email: xiaozn@cma.gov.cn

资助信息: 国家重大科学研究计划项目 (2012CB957804)

近年来,人们分析发现,地球气候系统对太阳活动的响应在极地—北大西洋、热带以及季风活动区域相当明显,这三个区域即我们关注的太阳活动响应敏感区。太阳活动信号与北大西洋涛动(North Atlantic Oscillation, NAO)和北极涛动(Arctic Oscillation, AO)有极为密切的联系^[11, 13]。在极地和北大西洋北部,一方面,由于受到地磁极的影响,来自宇宙的高能带电粒子会在这里发生复杂的物理及化学变化,最终通过复杂的云微物理过程调节云量而影响北大西洋气旋的活动;另一方面,这里是平流层—对流层耦合最活跃的地区,由太阳紫外辐射变化引起的平流层异常信号可通过平流层—对流层的动力耦合下传到对流层,调节对流层AO、NAO的强度及变率,进而影响更广泛区域的天气气候^[13-15],因此,极地—北大西洋区域可以看作是太阳影响地球天气气候的“敏感区域”之一。其次,热带地区的太阳活动信号主要体现在热带对流活动和海温的变化中^[16],在热带平流层,由于高臭氧含量,其温度和环流对太阳活动很敏感,太阳活动引起的平流层异常信号也可向下传播影响到热带对流层环流、热带海洋热容量、热带辐合带的活动以及ENSO等系统,这使得热带太平洋成为太阳活动影响气候的另一“敏感区域”。最后,最近的一些研究表明,季风活动区和气候类型的边缘地带(尤其是降水异常和旱涝带位置)包含有明显的太阳活动信号,其年代际变化可能受到太阳活动周期的影响和调制^[17-18]。确证这些特殊气候敏感区对太阳活动的响应过程,并探索这种敏感响应的原因,不仅有助于理解气候变化的原因,对气候预测也具有重要的应用价值。在“敏感区域”内,太阳活动对区域气候的影响可能通过大气内部动力作用(如遥相关等)传递到全球。因此,“敏感区域”可能是太阳活动影响全球气候的“中转站”,研究太阳活动对这些区域的影响具有重要意义。

有关天气气候中太阳活动信号的敏感区域的研究由来已久,本文首先总结回顾了太阳活动对极地—北大西洋区域的影响,并从不同的时间尺度介绍了影响事实和可能机制(第2节),之后在第3、第4小节分别讨论了热带地区、季风活动区对太阳活动的响应,最后在第五部分给出了全文的总结和讨论。

2 极地—北大西洋区域天气气候中的太阳活动信号

2.1 极地—北大西洋地区中太阳信号的观测事实

诸多研究^[19-21]表明,太阳活动对极地—北大西洋地区具有不可忽视的影响,该区域不仅是天气气候对

太阳活动响应的敏感区还是关键区,太阳活动的信号可能通过该区域传递到整个北半球。因此,为了更好地把握太阳活动对地球气候的影响,有必要明确认识太阳活动在不同时间尺度上影响极地—北大西洋区域的事实。

最近的一些研究^[22-25]发现,太阳活动可能在天气尺度上直接对极区—北大西洋大气低层的状况和环流产生影响,分析到两者之间直接关联的证据可以说明这一点。黄静等^[26]对冬季太阳风短时降速与AO等北半球中高纬度环流指数的时序进行重叠分析,发现短时太阳风降速会导致向亚极光带沉降的辐射带高能电子通量显著下降,同时,AO出现迅速的响应。该现象预示了太阳风与北半球中高纬大气环流可能存在快速的联系链。进一步分析关键天前后的地表气压差值场,发现在冬季,北半球极区是地面气压对太阳风速度变化响应的敏感区域。

在年际尺度上,对太阳风速度、太阳风电场、太阳辐射(含紫外线)的检测表明^[26-27],太阳风速度变化与北半球冬季中高纬度环流有密切联系,且与另两者的联系模式有明显差异。我们的工作也表明,太阳风速度与对流层的联系最为密切,超过信度检验的区域最大在极地和北大西洋上空,且随着高度的增加高相关区域逐渐收缩,说明太阳风速度的影响可能是直接作用于对流层的。Lu等^[28]指出在太阳极大期,12月—次年1月的太阳风动力气压(P_{swDJ})与中、后冬的北半球环状模(Northern Hemisphere Annular Mode, NAM)有显著的正相关,这种强相关从地面一直延伸到20hPa,这说明极涡增强,Brewer-Dobson(B-D)环流减弱,平流层—对流层耦合增强。而在太阳极小期, P_{swDJ} 与NAM呈负相关,且这种相关仅出现在春季平流层。此外,Boberg等^[29]的研究也表明太阳风通过地磁活动影响地球环境、太阳风电场与NAO存在某种物理联系。Bochniček等^[30]则从不同的物理量(气压、温度、盛行风分布)上都证实了太阳活动和地磁活动对冬季NAO的影响,其中地磁活动强(弱)年常常与NAO正(负)位相联系在一起。Kodera^[31]研究表明,在北半球冬季,NAO的空间结构受到太阳活动调制,在太阳活跃期,NAO具有半球特征,且这种特征从对流层一直延伸至平流层,这种空间结构与AO类似,而在太阳非活跃期,NAO信号被局限在对流层北大西洋(图1)。Keckhut等^[32]的研究部分验证了该结论,但更倾向于认为NAO在太阳活动低年(非最小年)较弱。此外,Ogi等^[33]认为,在太阳活动高年,冬季NAO与春、夏季气候有相当好的相关关系,

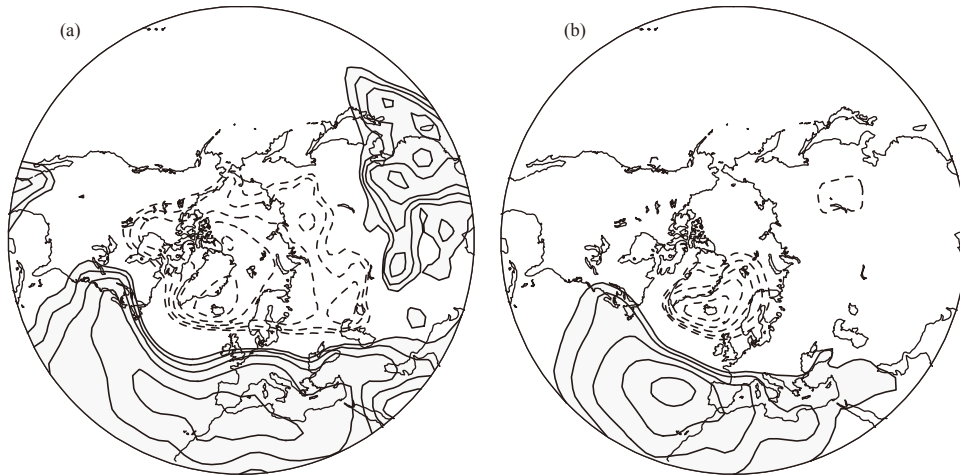


图1 1959—1997年间的太阳活跃期 (a) 和太阳非活跃期 (b) 12—3月平均NAO指数与海平面气压 (SLP) 相关图。等值线间隔0.1, 绝对值低于0.5的等值线省略, 正 (虚) 线表示正 (负) 值^[31]

冬季的NAO会影响到春季欧亚大陆的雪盖以及巴伦支海的海冰, 夏季NAO仍呈现出半球尺度的特征, 而在太阳活动弱年, 这种从冬至夏的联系则很弱。即在年际尺度上, 无论是在空间结构还是在时间持续性上, 极地—北大西洋气候对太阳活动的变化都相当敏感。

综上所述, 无论是在天气尺度还是在年际尺度上, 极地—北大西洋天气气候都会对太阳活动产生灵敏的响应, 且灵敏程度在太阳活动强弱年并不是对称的, 这可能与其作用机制和作用过程有关。有关作用机制的研究是目前重要的研究热点, 下面我们将讨论机制研究中的一些新进展。

2.2 太阳活动影响极地—北大西洋的可能机制

目前在太阳活动驱动气候变化的机制中, 空间天气机制是唯一能在短时间尺度上引起气象要素 (如气压、降水等) 变化的机制, 该机制认为太阳活动通过影响空间天气 (主要影响空间环境中的各种粒子通量), 通过对特定区域 (如北大西洋区域) 云微物理过程的影响, 导致云层宏观特征变化, 引起全球辐射平衡变化, 最后驱动气候变化^[28, 34]。Tinsley等^[35]对1953—1985年间太阳日冕物质抛射 (Coronal Mass Ejection, CME) 事件引起的“福布希下降 (Forbush Decrease, FD)”事件与同期北半球高纬度冬季气旋的涡度进行了统计, 研究表明, 在40°—60°N海洋上的冬季气旋涡度变化与FD事件有很好的相关性, 冬季气旋涡度变化的强度与FD的强度成反比。近年来, 有诸多研究关注^[24-25]高能太阳质子事件 (Solar Proton Event, SPE) 在北大西洋地区的大气响应。Veretenenko等^[24-25]的研究表明, SPE事件期间的北大西洋冬季气旋涡度对太阳能量粒子通量变化有显著的

响应, 即随能量粒子通量上升气旋涡度明显的增强。SPE事件加剧会引起平流层格陵兰岛南部东海岸等压面的显著下降, 同时伴随着北大西洋气旋涡度的增长, 从而影响气旋的发展和再生, 其物理机制可能涉及辐射强迫和云量变化。

直接用太阳辐射的微小变化来解释太阳变率对极地—北大西洋年代际变化的影响存在很多困难, 这迫使人们寻找一种合理的信号放大机制来解释太阳活动是如何驱动气候变化的, 太阳紫外辐射—臭氧机制无疑是一种很好的途径。首先, 在一个黑子周期内, 太阳紫外辐射有较大变化, 因此臭氧浓度也随之变化^[36], 通过正反馈作用, 这种太阳活动引起的辐射—光化学过程会被进一步放大, 并在平流层温度场和环流场上产生显著的太阳活动信号, 尤其是在热带平流层的上部和下部^[37]。其次, 平流层—对流层存在活跃的动力耦合: 无论是观测和模式, 均表明通过行星波活动引发动量传输, 位于平流层中上层的异常信号可向极和向下传播^[38-41], 从而作用于对流层极地—北大西洋区域。这两个事实把太阳—平流层关系和平流层对流层耦合过程串联起来, 能合理解释极地—北大西洋对太阳活动的敏感响应。正如前文所述, 在太阳活动强年NAO较活跃, 这体现了更强烈的北半球平流层—对流层耦合。对于太阳活动强年平流层—对流层耦合更加活跃的原因, 以Kodera为代表的国外学者展开了系统地研究, 认为行星波活动和传播的异常起到了重要作用^[38, 42-43]。认识平流层环流季节演变特征是理解这一问题的基础: 在平流层的冷季, 大气环流存在辐射控制和动力控制两个阶段, 冬季早期平流层环流呈辐射控制特征, 由于太阳辐射不

均匀引起的经向温度梯度较大，在副热带平流层顶产生一支急流；随着季节的推移，隆冬和后冬阶段太阳辐射加热作用减弱，此时平流层西风急流的强弱变化主要由对流层上传的行星波强度调节，称为动力控制阶段^[36]。太阳活动强年强的平流层—对流层耦合与辐射控制阶段的显著延长有关，季节演变的推迟使得冬季副热带平流层顶西风增强，严重阻碍了来自对流层中高纬行星波的垂直传播。众所周知，冬季来自对流层向上传播的行星波具有两支波导，分别具有明显的水平分量和垂直分量^[44]，当垂直传播受到阻碍时，在西风急流对波的折射作用下，行星波水平传播活跃，由此产生的强烈的Eliassen-Palm (E-P) 通量散度对纬向平均纬向风产生显著影响，热带外纬向风异常呈经向偶极子分布，而且这种偶极子分布从平流层一直延伸到对流层，最终导致了NAO发展成为半球尺度结构且更加活跃(图2)。综上，太阳活动通过影响平流层大气的热力和动力结构，进而调节准定常行星波的传播路径，使得平流层—对流层耦合发生剧烈变化，最终对极地—北大西洋区域气候产生显著影响。

3 热带地区的太阳活动信号

太阳活动信号在热带地区主要体现在热带对流活动和海温变化中，尤其表现在对ENSO事件的调制和影响上。

诸多研究^[45-47]表明，太阳活动与热带对流活动的

强弱变化有密切联系。统计分析表明，当宇宙线出现FD时，全球雷电活动也相应的下降约20%~30%。进一步的分析发现，雷电活动对宇宙线FD事件的响应没有明显的延迟，其响应过程在1天左右即可发生，并可持续3天，说明这个响应很可能是太阳活动的直接作用。对不同纬度带FD现象的统计分析发现，该现象在热带地区最为明显。此外，最近我们在分析热带大气活动的一些系统时，发现其中存在对太阳活动明显的响应信号，在6—8月夏季太阳黑子峰年和谷年的西太平洋热带区域射出长波辐射(Outgoing Long-wave Radiation, OLR)合成场存在明显的差异。在太阳黑子峰年该区域的OLR为负异常，说明对流活动较强，而在太阳黑子谷年该区域为正异常，说明该区域对流活动较弱。

热带海洋中也存在明显的太阳活动信号。近期，我们在西太平洋暖池区域、赤道东太平洋区域海洋700m深热容量的时间演变上均发现了较为明显的11年和准20年周期，说明这些区域的热容量演变中含有明确的太阳周活动信号。在太阳活动与海温的关系上，不同的研究得到不同甚至相反的观点。从观测分析的角度，van Loon等^[48]发现在太阳活动峰值年，热带太平洋海温呈拉尼娜(La Niña)型分布(图3)。进一步，ENSO信号可以通过大气遥相关传播到副热带。Meehl等^[9]发现在太阳活动峰值年的冬季，北太

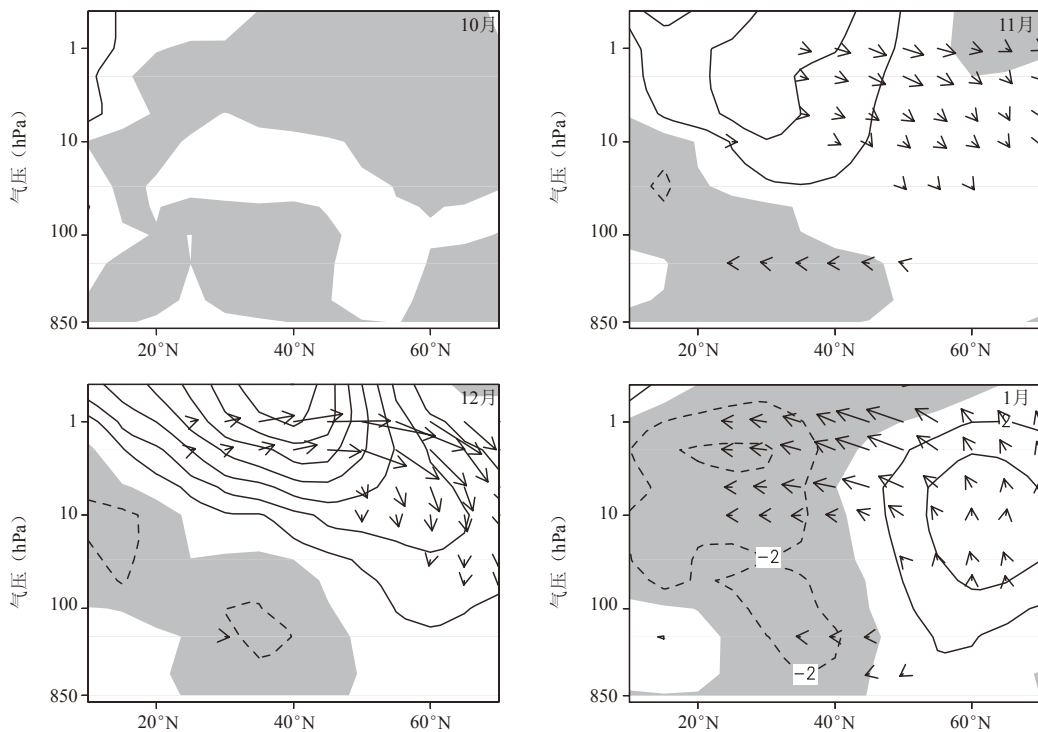


图2 10, 11, 12, 1月太阳活动强弱年北半球E-P通量(箭头)和纬向平均纬向风(等值线间隔 $2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)合成差值。零等值线省略，大于(小于)零的等值线为实(虚)线，阴影区为负值^[38]

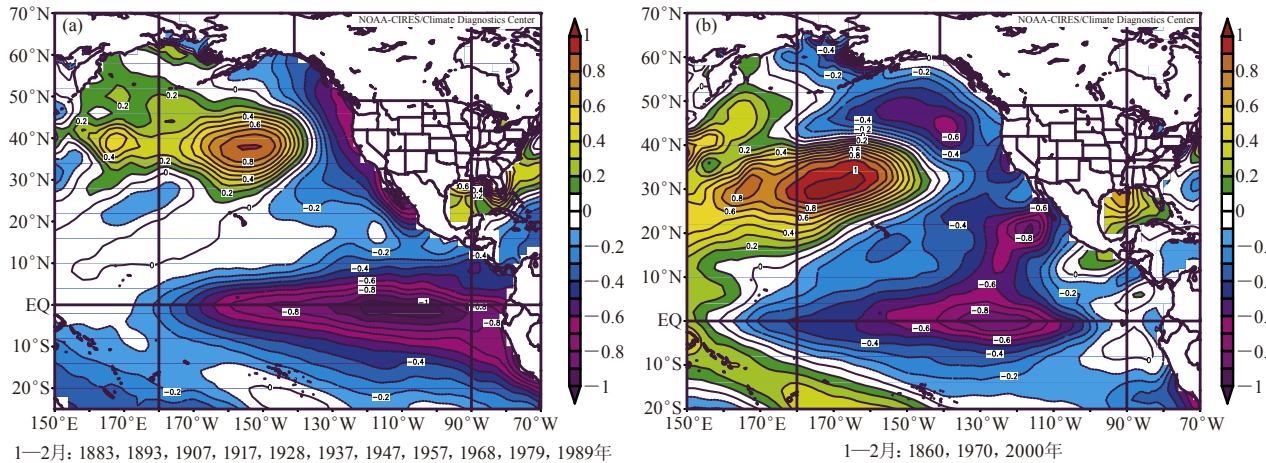


图3 (a) 1880—1990年太阳活动峰值年冬季平均海表温度异常合成 (单位: $^{\circ}\text{C}$), 绝对值大于0.5的区域通过置信水平为95%的信度检验。(b) 同图(a), 但是为针对没包含在其中的太阳活动峰值年: 1860, 1870, 2000年^[48]

平洋上空存在异常反气旋, 阿留申低压减弱, 这显然和La Niña现象激发的太平洋—北美型 (Pacific-North American Pattern, PNA) 遥相关是密切相关的。然而White等^[49]通过数值模拟却得到了恰恰相反的结论, 他们发现太阳活动峰值年常与ENSO暖位相匹配, 滤波后的海温证实了这一结果。此外, 他们还提出非线性位相锁定能够解释赤道东太平洋海表温度 (SST) 变率的重要部分。那究竟是什么造成这两种完全不同的结果呢? 事实上, van Loon等^[48]仅仅选取了太阳活动的峰值年进行了合成, 样本长度有限, 若对比更多的太阳活动偏强和偏弱年份, 可发现太阳活动偏强时赤道中东太平洋存在弱的厄尔尼诺 (El Niño) 现象。这可能是因为在太阳活动峰值年附近若有La Niña事件发生, 紧随其后往往就有El Niño发生, 平均起来, 海温更接近ENSO暖位相。有趣的是, 尽管Roy等^[50]得到了与van Loon等^[48]相反的海温型, 但他们依然发现北太平洋存在异常高压, 说明这个系统很可能是独立于ENSO和PNA而存在的, 因此他们认为这个高压系统可能和平流层—对流层的耦合作用有关, 在太阳活动峰值年, 由于Hadley环流向北扩展, 太平洋上空的副热带高压位置更偏北, 造成北太平洋的气压偏高; 同时副高位置的偏北, 也导致信风减弱, 从而触发El Niño。

从物理机制上讲, 太阳活动影响ENSO至少有两种方式: 一种是通过平流层—对流层耦合作用, 另一种是通过云—辐射机制。对于平流层—对流层耦合作用, Haigh^[51]通过数值模拟发现, 增强的太阳活动可以引起平流层变暖, 从而引起平流层风场和对流层Hadley环流下沉支向高纬移动, 导致ENSO系统发生变化。对于云—辐射机制, Farrar^[52]发现太平洋中部

的云量与NINO3指数有高相关关系。Marsh等^[53]根据国际卫星云气候学计划 (International Satellite Cloud Climatology Project, ISCCP) 数据, 得出低云量受太阳活动调制的结论, 尽管该结论受到争议, 但它提供了太阳活动影响ENSO的一种可能途径。此外, Ruzmaikin^[54]认为, ENSO可能并不只是单一地响应外部强迫, 而且还通过随机共振机制激发大气异常状态 (如PNA), 从而放大太阳强迫对天气气候的影响。

综上所述, 热带也是天气气候对太阳活动响应的一个重要的敏感区, 热带对流活动、海温 (ENSO事件) 对太阳活动的变化有明显的响应, 这种响应的机制现在虽然还不完全清楚, 但可能与太阳活动对平流层—对流层耦合、云过程的影响有关。

4 季风活动区的太阳活动信号

自1801年英国科学家Herschel^[55]首先发现太阳黑子与降水的关系间接控制着伦敦小麦的价格后, 200多年来, 许多科学家不断努力探索季风气候与太阳变率的关系。近年来, 一些研究表明, 太阳强迫效应在某些特定条件下显示出很强的信号^[56-61], 特别是在一些季风活动区其信号特征更为明显。例如, 北美的干旱周期^[56, 62-64], 非洲^[56, 65-67]、大洋洲和南美洲^[68-69]的降水, 印度和阿拉伯半岛的季风^[70-74], 都展现出了与太阳活动变化的一致性 or 相关性, 在年代际尺度上尤为明显。而且, 还发现相邻的区域可能出现相反的响应特征或者没有响应^[17, 59, 69], 这暗示太阳活动对季风的年代际调制作用存在明显的区域差异。

气候带边界受太阳活动调制是季风敏感响应区域形成的重要原因。太阳作为整个地球的能量源, 为什么地球气候对它的响应存在区域性差异? 最近一些相互独立的研究都发现, 对流层内气候系统对外部强迫

的动力响应往往在其边缘处可以被检测到：一些重要的气候系统或大气环流边界在太阳活动高年，倾向于向极地偏移或扩展，比如，印度季风^[73, 75]、Hadley环流、费雷尔（Ferrel）环流和副热带急流^[76-79]；在太阳活动低年，倾向于向赤道偏移，例如，北大西洋风暴路径^[80]。这些研究指出，太阳活跃期，Hadley环流扩大，导致副热带干旱区向北扩展，使得某些地区脱离原先的季风区，降水量反而偏少，而某些陆地地区由于季风的加强而降水偏多^[66, 78]。对东亚季风区的分析发现，气候的响应有显著的区域性特征。太阳黑子数极大（极小）年的东亚地区的动力、热力场分布有显著不同，如东亚东部高纬气温出现负（正）异常，东亚东部中纬降水呈现负（正）异常，而东亚东部低纬对流场呈现负（正）异常等。这启发我们，局地气候系统边界可能是研究气候与太阳活动关系的一个重要切入点，将局地气候系统边缘区和中心区分开，分别加以研究，并进行对比，可能会得到比较好的效果。

作为东亚季风区域的一部分，中国大陆可分为季风区、西风区以及它们的交界区^[81]，这一交界区（东亚夏季风北界区域）是气候敏感带^[82]，许多旱涝异常、气候灾害事件都发生在这一区域^[81, 83]。最近，赵亮等^[84]、Zhao等^[17]发现这一区域确实对太阳活动11年周期的响应相当敏感，这里的太阳信号相对于季风区内部和西风控制区显著偏强。Wang等^[18]进一步揭示了这里成为太阳活动响应敏感区域的原因，图4分别给出了低层700hPa水平环流和垂直环流在太阳活动的强年和弱年的差值，东亚夏季风前沿（北边缘，30°N以北地区）位置存在较大差异。太阳黑子数高年6月

东亚夏季风能够更强地影响到更北的地区，北至淮河流域大部分地区的降水中都可以发现显著的太阳周期变化信号。此外，东亚夏季风北界存在明显的年代际变化，这种年代际变化主要受太阳活动调制，在太阳活动强年，季风北界偏北，季风影响范围大，使交界区受季风控制，降水偏多，易发生洪涝、泥石流等灾害；而在太阳活动相对较弱年，季风北界偏南，季风影响不到这里，该区域受西风带控制，降水偏少，易发生干旱。除了夏季风，东亚冬季风也受到太阳活动的调制^[27]，Chen等^[85]发现太阳活动可以调节AO与东亚气温之间相关的强弱：太阳活动强年，AO正位相下亚洲北部增暖明显，东亚为显著反气旋控制，东亚大槽显著减弱，而在太阳活动偏弱年，AO和东亚气候的关联则不那么显著。而在季风中心区（西风主控区），无论太阳高年还是低年，都受（不受）季风影响，所以这里的太阳信号比交界区弱也就可以理解了。这暗示东亚季风系统可能在太阳活动影响气候要素年代际变化过程中起到重要的修改（放大或缩小）信号的作用。

5 结论与讨论

地球气候系统对太阳活动的响应是当前大气科学领域中的一个热点和前沿问题，本文主要介绍了其中对太阳活动响应的几个敏感区域及其可能机制。首先，讨论了太阳活动在不同时间尺度上对极地—西太平洋区域的影响，在天气尺度上，太阳活动通过影响空间天气对该区域云微物理过程的调制，引起北半球中高纬大气环流的快速响应；在年际尺度上，太阳活动通过影响平流层的季节进程，改变行星波

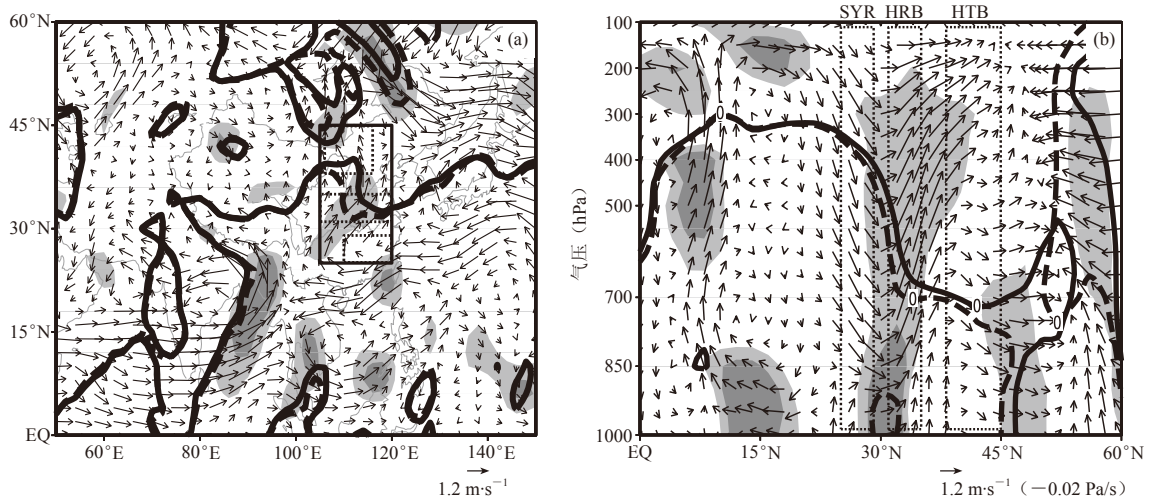


图4 1901—2006年6月太阳活动的强年和弱年的 (a) 700hPa大气水平风 (单位: $1.2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) 和 (b) 沿着经度110°E的剖面上的经向风 (单位: $1.2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) 与垂直风压 (单位: -0.02Pa/s , 向上为正) 的合成差值场。图中的粗实/长虚线分别为太阳活动强/弱年平均南风速度为 $0\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 轮廓, 代表东亚夏季风的边缘。较暗和较亮阴影部分分别表示经向风差值通过置信水平为95%和80%的信度检验^[18]

的传播,使平流层—对流层耦合在太阳活动强年更强,NAO/AO活跃,极地—北大西洋区域受太阳活动影响更强。其次,热带地区是天气气候对太阳活动响应的另外一个重要的敏感区,热带对流活动、海温(ENSO)对太阳活动的变化都有明显的响应,这可能也与太阳活动调节云微物理过程有关。此外,还提出季风系统边界可能是研究气候与太阳活动关系的一个重要切入点,总结了太阳对季风活动区的影响,尤其关注东亚季风区,认为东亚夏季风北界区域是气候敏感带,其年代际变化主要受太阳活动调制,在太阳高(低)年,季风北界偏北(南);而在季风中心区(西风主控区),无论太阳高年还是低年,都受(不受)季风影响。

从上述对太阳活动响应的三个敏感区的研究工作总结中可以发现,三个敏感区的大气环流和气候系统中都存在不同时间尺度的太阳活动信号,但是其作用的机理还有待于进一步的揭示和验证。现有的研究主要以观测分析为主,这些工作还不能有效地揭示太阳活动对敏感区影响的物理机制,数值模拟可以帮助澄清这些问题。更重要的是,这些敏感区对太阳活动响应的结果如何在气候系统的非线性相互作用中产生影响,进而直接或间接地对全球气候产生影响?敏感区这些强烈的太阳活动信号,会随着时间耗散掉,还是会触发全球的气候振荡和变化?这都是急需深入研究的问题。

参考文献

- [1] Gleissberg W. A table of secular variations of the solar cycle. *Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity*, 1944, 49(4): 243-244.
- [2] Eddy J A. The maunder minimum. *Science*, 1976, 192(4245): 1189-1202.
- [3] Benestad R E. *Solar activity and Earth's climate*. Berlin: Springer, 2002.
- [4] Svalgaard L. Solar activity—past, present, future. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 2013, 3: A24.
- [5] Reid G C. Influence of solar variability on global sea surface temperatures. *Nature*, 1987, 129: 142-143.
- [6] Tinsley B A. Influence of solar wind on the global electric circuit, and inferred effects on cloud microphysics, temperature, and dynamics in the troposphere. *Space Science Reviews*, 2000, 94(1-2): 231-258.
- [7] Gray L J, Beer J, Geller M, et al. Solar influences on climate. *Reviews of Geophysics*, 2010, 48, RG4001, doi:10.1029/2009RG000282.
- [8] 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(4): 37-48.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Boberg F, Lundstedt H. Solar wind electric field modulation of the NAO: a correlation analysis in the lower atmosphere. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(15): 1825.
- [12] Rind D. The Sun's role in climate variations. *Science*, 2002, 296(5568): 673-677.
- [13] Chandra S, McPeters R. The solar cycle variation of ozone in the stratosphere inferred from Nimbus 7 and NOAA 11 satellites. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1994, 99(D10): 20665-20671.
- [14] Shindell D T, Schmidt G A, Miller R L, et al. Northern Hemisphere winter climate response to greenhouse gas, ozone, solar, and volcanic forcing. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2001, 106(D7): 7193-7210.
- [15] Carslaw K, Harrison R, Kirkby J. Cosmic rays, clouds, and climate. *Science*, 2002, 298(5599): 1732-1737.
- [16] Klein S A, Soden B J, Lau N-C. Remote sea surface temperature variations during ENSO: Evidence for a tropical atmospheric bridge. *Journal of Climate*, 1999, 12(4): 917-932.
- [17] Zhao L, Wang J, Zhao H. Solar cycle signature in decadal variability of monsoon precipitation in China. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 2012, 90(1): 1-9.
- [18] 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(D23), doi: 10.1029/2012JD018074.
- [19] 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.
- [20] Brugnara Y, Brönnimann S, Luterbacher J, et al. Influence of the sunspot cycle on the Northern Hemisphere wintertime circulation from long upper-air data sets. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 2012, 12(11): 30371-30407.
- [21] Weng H. 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.
- [22] Zhou L, Tinsley B, Huang J. Effects on winter circulation of short and long term solar wind changes. *Advances in Space Research*, 2013, doi: 10.1016/j.asr.2013.09.017.
- [23] Artamonova I, Veretenenko S. Cosmic ray variation influence on the duration of elementary synoptic processes. In *Proceedings of 8-th Int. Conf. Problems of Geocosmos*, 2010.
- [24] Veretenenko S, Thejll P. Cyclone regeneration in the North Atlantic intensified by energetic solar proton events. *Advances in Space Research*, 2005, 35(3): 470-475.
- [25] Veretenenko S, Thejll P. Effects of energetic solar proton events on the cyclone development in the North Atlantic. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2004, 66(5): 393-405.
- [26] 黄静,周立昱,肖子牛,等.天气尺度到气候尺度太阳风变速对中高纬大气环流的影响. *空间科学学报*, 2013, 33(6): 637-644.
- [27] 周立昱, Tinsley B, 郑祥民,等.太阳活动驱动气候变化空间天气机制研究进展. *地球科学进展*, 2007(11): 1099-1108.
- [28] Lu H, Jarvis M J, Hibbins R E. Possible solar wind effect on the northern annular mode and northern hemispheric circulation during winter and spring. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2008, 113(D23), doi: 10.1029/2008JD010848.
- [29] Boberg F, Lundstedt H. Solar wind variations related to fluctuations of the North Atlantic Oscillation. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(15): 13-1-13-4.
- [30] Bochníček J, Hejda P. The winter NAO pattern changes in association with solar and geomagnetic activity. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2005, 67(1): 17-32.
- [31] Kodera K. Solar cycle modulation of the North Atlantic Oscillation: implication in the spatial structure of the NAO. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(8): 59-1-59-4.
- [32] Keckhut P, Cagnazzo C, Chanin M L, et al. The 11-year solar-cycle effects on the temperature in the upper-stratosphere and mesosphere: Part I—assessment of observations. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2005, 67(11): 940-947.
- [33] 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), doi: 10.1029/2003GL018545.

- [34] 张亮, 王赤, 傅绥燕. 太阳活动与全球气候变化. 空间科学学报, 2011, 31(5): 549-566.
- [35] Tinsley B A, Deen G W. Apparent tropospheric response to MeV-GeV particle flux variations: a connection via electrofreezing of supercooled water in high-level clouds? *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1991, 96(D12): 22283-22296.
- [36] Haigh J D. The role of stratospheric ozone in modulating the solar radiative forcing of climate. *Nature*, 1994, 370(6490): 544-546.
- [37] Frame T H, Gray L J. The 11-yr solar cycle in ERA-40 data: An update to 2008. *Journal of Climate*, 2010, 23(8): 2213-2222.
- [38] Kodera K, Kuroda Y. Dynamical response to the solar cycle. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107(D24): 4749.
- [39] Kodera K, Yamazaki K, Chiba M, et al. Downward propagation of upper stratospheric mean zonal wind perturbation to the troposphere. *Geophysical Research Letters*, 1990, 17(9): 1263-1266.
- [40] Dunkerton T J. Midwinter deceleration of the subtropical mesospheric jet and interannual variability of the high-latitude flow in UKMO analyses. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2000, 57(23): 3838-3855.
- [41] Gray L, Sparrow S, Juckes M, et al. Flow regimes in the winter stratosphere of the northern hemisphere. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2003, 129(589): 925-945.
- [42] Baldwin M P, Dunkerton T J. The solar cycle and stratosphere-troposphere dynamical coupling. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2005, 67(1): 71-82.
- [43] Kodera K, Kuroda Y. A possible mechanism of solar modulation of the spatial structure of the North Atlantic Oscillation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2005, 110(D2), doi: 10.1029/2004JD005258.
- [44] Wen C, Ronghui H. The propagation and transport effect of planetary waves in the Northern Hemisphere winter. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2002, 19(6): 1113-1126.
- [45] Dickinson R E. Solar variability and the lower atmosphere. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1975, 56(12): 1240-1248.
- [46] Bering E. The global circuit: Global thermometer, weather by-product or climatic modulator? *Reviews of Geophysics*, 1995, 33(S2): 845-862.
- [47] Bhattacharya A, Kar S, Bhattacharya R. Response of thunderstorm and lightning activity to solar modulation of atmospheric electrification. *Theoretical and Applied Climatology*, 1997, 58(1-2): 95-103.
- [48] 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*, 2007, 112(D2): D02108.
- [49] White W B, Liu Z. Non-linear alignment of El Niño to the 11-yr solar cycle. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(19), doi: 10.1029/2008GL034831.
- [50] Roy I, Haigh J D. Solar cycle signals in sea level pressure and sea surface temperature. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, 10(6): 3147-3153.
- [51] Haigh J D. The impact of solar variability on climate. *Science*, 1996, 272(5264): 981-984.
- [52] Farrar P D. Are cosmic rays influencing oceanic cloud coverage—or is it only El Niño? *Climatic Change*, 2000, 47(1-2): 7-15.
- [53] 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), doi: 10.1029/2001JD001264.
- [54] Ruzmaikin A. Can El Niño amplify the solar forcing of climate? *Geophysical Research Letters*, 1999, 26(15): 2255-2258.
- [55] 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.
- [56] Currie R G. Variance contribution of luni-solar (Mn) and solar cycle (Sc) signals to climate data. *International Journal of Climatology*, 1996, 16(12): 1343-1364.
- [57] Sud Y, Walker G, Mehta V, et al. Relative importance of the annual cycles of sea surface temperature and solar irradiance for tropical circulation and precipitation: A climate model simulation study. *Earth Interactions*, 2002, 6(2): 1-32.
- [58] Lambert F H, Stott P A, Allen M R, et al. Detection and attribution of changes in 20th century land precipitation. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(10), doi: 10.1029/2004GL019545.
- [59] 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.
- [60] Liu J, Wang B, Ding Q, et al. Centennial variations of the global monsoon precipitation in the last millennium: results from ECHO-G model. *Journal of Climate*, 2009, 22(9): 2356-2371.
- [61] Wasko C, Sharma A. Effect of solar variability on atmospheric moisture storage. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(3), doi: 10.1029/2008GL036310.
- [62] Stockton C, Mitchell Jr J, Meko D. A reappraisal of the 22-year drought cycle. in *Weather and Climate Responses to Solar Variations*, edited by McCormac B M. Boulder: Colorado Associated Universities Press, 1983.
- [63] Perr C A. Solar-irradiance variations and regional precipitation fluctuations in the Western USA. *International Journal of Climatology*, 1994, 14(9): 969-983.
- [64] 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.
- [65] Currie R G. Luni-solar 18.6- and 10 ~ 11-year solar cycle signals in South African rainfall. *International Journal of Climatology*, 1993, 13(3): 237-256.
- [66] Verschuren D, Laird K R, Cumming B F. Rainfall and drought in equatorial east Africa during the past 1,100 years. *Nature*, 2000, 403(6768): 410-414.
- [67] Verschuren D, Damsté J S S, Moernaut J, et al. Half-precessional dynamics of monsoon rainfall near the East African Equator. *Nature*, 2009, 462(7273): 637-641.
- [68] 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.
- [69] Thresher R E. Solar correlates of Southern Hemisphere mid-latitude climate variability. *International Journal of Climatology*, 2002, 22(8): 901-915.
- [70] Neff U, Burns S, Mangini A, et al. Strong coherence between solar variability and the monsoon in Oman between 9 and 6 kyr ago. *Nature*, 2001, 411(6835): 290-293.
- [71] Burns S J, Fleitmann D, Mudelsee M, et al. A 780-year annually resolved record of Indian Ocean monsoon precipitation from a speleothem from south Oman. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107(D20): 4434.
- [72] Fleitmann D, Burns S J, Mudelsee M, et al. Holocene forcing of the Indian monsoon recorded in a stalagmite from southern Oman. *Science*, 2003, 300(5626): 1737-1739.
- [73] Kodera K. Solar influence on the Indian Ocean Monsoon through dynamical processes. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(24), doi: 10.1029/2004GL020928.
- [74] Bhattacharyya S, Narasimha R. Possible association between Indian monsoon rainfall and solar activity. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(5), doi: 10.1029/2004GL021044.
- [75] Loon H, Meehl G A. The Indian summer monsoon during peaks in the 11 year sunspot cycle. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(13), doi: 10.1029/2012GL051977.
- [76] 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.
- [77] Gleisner H, Thejll P. Patterns of tropospheric response to solar variability. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(13), doi: 10.1029/2003GL017129.

- [78] 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.
- [79] 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(1-4): 305-317.
- [80] Martin-Puertas C, Matthes K, Brauer A, et al. Regional atmospheric circulation shifts induced by a grand solar minimum. *Nature Geoscience*, 2012, 5(6): 397-401.
- [81] Qian W, Ding T, Hu H, et al. An overview of dry-wet climate variability among monsoon-westerly regions and the monsoon northernmost marginal active zone in China. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2009, 26(4): 630-641.
- [82] 孙国武, 汤绪, 李江萍. 夏季风北边缘与沙尘暴的研究. *高原气象*, 2008, 27(5): 1088-1093.
- [83] 黄荣辉, 周连童. 我国重大气候灾害特征、形成机理和预测研究. *自然灾害学报*, 2002, 11(1): 1-9.
- [84] 赵亮, 王劲松. 106年来太阳黑子数与全球夏季风降水的统计关系// 中国气象学会第五届副热带气象学术业务研讨会论文集, 2009.
- [85] Chen W, Zhou Q. Modulation of the Arctic Oscillation and the East Asian winter climate relationships by the 11-year solar cycle. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2012, 29: 217-226.

新书架 NEW BOOK

感兴趣的读者可以到中国气象局图书馆查阅



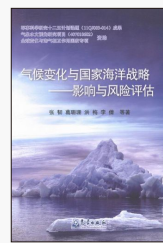
《气象与健康: 应用气象心理学分析》

编著者: 姜海如, 闻新闻
出版者: 气象出版社
出版年: 2014



《气象信息技术》

编著者: 孔璐, 等
出版者: 国防工业出版社
出版年: 2014



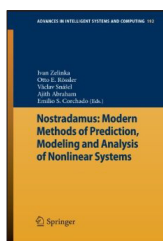
《气候变化与国家海洋战略——影响与风险评估》

编著者: 张韧, 等
出版者: 气象出版社
出版年: 2014



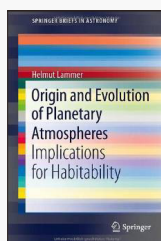
《气候与气候变化基础知识》

编著者: 肖子牛
出版者: 气象出版社
出版年: 2014



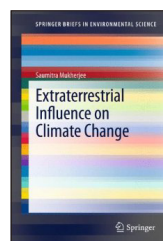
Nostradamus: Modern Methods of Prediction, Modeling and Analysis of Nonlinear Systems
《预言者: 非线性系统预测、模拟和分析的现代方法》

编著者: Ivan Zelinka等
出版者: Springer
出版年: 2012



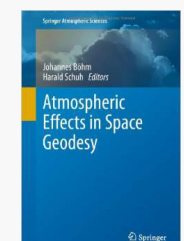
Origin and Evolution of Planetary Atmospheres: Implications for Habitability
《行星大气的起源与演化: 对宜居性的影响》

编著者: Helmut Lammer
出版者: Springer
出版年: 2012



Extraterrestrial Influence on Climate Change
《地外因素对气候变化的影响》

编著者: Saumitra Mukherjee
出版者: Springer
出版年: 2012



Atmospheric Effects in Space Geodesy
《空间大地测量学中的大气影响》

编著者: Johannes Böhm等
出版者: Springer
出版年: 2013