

# 太阳活动对近百年气候变化的影响研究进展

赵亮<sup>1</sup> 徐影<sup>2</sup> 王劲松<sup>1</sup> 丁一汇<sup>2</sup> 肖子牛<sup>3</sup>

(1 国家卫星气象中心/国家空间天气监测预警中心, 中国气象局, 北京 100081; 2 国家气候中心, 中国气象局, 北京 100081; 3 中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081)

**摘要:** 主要参阅了近十年来的有关文献, 回顾和总结了太阳活动对近百年气候变化影响的研究进展。首先, 回顾了太阳活动对全球和区域尺度的温度、季风和降水影响的最新观测证据和模拟结果; 其次, 从北极涛动(AO)、北大西洋涛动(NAO)、ENSO、准两年振荡(QBO)等方面总结了太阳活动对各气候模态的可能影响; 然后归纳了太阳活动影响气候变化的三种可能机制(太阳总辐射机制、太阳短波辐射变化机制和能量粒子机制)的研究进展。最后提出了该领域一些重要而未解决的科学问题, 对未来的研究提出了一些展望, 并简要阐述了太阳—气候研究这一交叉学科的重要意义。

**关键词:** 太阳活动, 气候变化, 太阳总辐射, 紫外辐射, 银河宇宙射线

## Progress in Studies on the Influence of Solar Activity on Climate Change during the Last 100 Years

Zhao Liang<sup>1</sup>, Xu Ying<sup>2</sup>, Wang Jingsong<sup>1</sup>, Ding Yihui<sup>2</sup>, Xiao Ziniu<sup>3</sup>

(1 National Satellite Meteorological Center /National Center for Space Weather, China Meteorological Administration, Beijing 100081 2 National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081 3 CMA Training Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081)

**Abstract:** Progress in studies for the last decade on the relationship between solar activity and decadal climate change, is reviewed. First, recent observations and simulations for the influences of solar activity on the global and regional temperature, monsoon and precipitation, and the regional climatic modes including the Atlantic Oscillation (AO), the North Atlantic Oscillation (NAO), ENSO, and the Quasi Biennial Oscillation (QBO) are reviewed and summarized. Second, three mechanisms proposed to explain these climate observations are described, including the effects of variations in total solar irradiance, ultraviolet radiation and energetic particles. Finally, we have presented some important and unsolved problems for future research.

**Key words:** solar activity, climate change, total solar radiation, UV radiation, galactic cosmic rays

### 1 引言

新太阳活动周(第24太阳周)已经到来, 并可能将在2013—2014年前后到达新的最强期, 这段时间太阳活动将日趋活跃, 空间天气事件将日渐频繁。这可能提供给科学界一个重要机会: 分离源于太阳和人类的气候效应<sup>[1]</sup>。另一方面, 近年来太阳活动的一些异常表现(如异常长的太阳极小期)暗示其内部可能已发生了某种未知的变化, 同时也预示1920年以来的强太阳活动期(现代极大期)可能即将或已经结束<sup>[2]</sup>, 这究竟会不会对未来地球环境和气候产生影响, 已引起科学家的高度关注和警觉。

太阳作为离地球最近的恒星, 向地球提供着光和热, 是地球气候系统最基本的能量源, 同时, 它也是空间天气扰动的主要源头<sup>[3]</sup>。46亿年来, 其长期变化对地球气候的形成和演变有着重要影响, 这一点已有

广泛共识, 但在百年和十年这样相对较短的时间尺度上, 对气候的影响, 尤其对近一百年来气候变暖的影响和贡献如何, 却一直存在争议<sup>[4-7]</sup>, 然而, 没有争议的问题常常会趋向于被边缘化, 存有争议往往说明其具有研究价值。自从1801年, Herschel<sup>[8]</sup>首先研究并发现了太阳黑子与降雨的关系间接支配着伦敦小麦价格以来的200年间, 尽管困难重重, 但科学家们始终坚持不懈地探索着太阳活动等空间天气事件影响地球天气气候的确凿证据和令人信服的机制(可参见文献[9, 10]), 这主要是因为这方面的研究成果不仅有利于深入理解和认识日地关系和气候变化规律, 更有助于发展气候预测, 甚至天气预报的新方法。

在刚过去的第23太阳周(1996—2008年)和刚开始的第24太阳周(2009—)的十多年里, 随着人类空间探测水平的提高和大量相关研究的深入进行, 国内外在太阳—气候方面的研究取得了许多重要进展。本文主要针对太阳活动对近百年气候变化影响的近十年研究成果进行梳理和总结, 对前沿和争议问题进行归纳和讨论, 并在此基础上对未来的发展方向提出一些展望。

收稿日期: 2011年10月10日; 修回日期: 2011年11月13日

第一作者: 赵亮(1978—), Email: zhaol@cma.gov.cn

资助信息: 国家自然科学基金(40931056, 40875083); 国家重点基础研究发展规划项目(2010CB950102); (中-英-瑞)“中国适应气候变化项目—气候科学”

## 2 太阳活动对气候变化的影响——观测事实

自19世纪法国科学家Claude Pouillet和英国科学家John Herschel应用各自的测量装置测得太阳常数值后,对太阳辐射和太阳活动对地球大气的影响逐渐成为多种学科交叉的重要研究领域。

### 2.1 温度

目前,全球气候变暖是国内外研究的热点问题,也是具有争议的问题,尤其是关于气候变暖的原因<sup>[7]</sup>。争议的存在是因为现在人们对某些气候强迫因子的认知水平还不够,太阳活动就是其中之一。

#### 2.1.1 全球尺度

从全球尺度来看,随着新的探测手段的出现,人们发现在一个太阳黑子周期相位内,地球接受的太阳总辐射量(TSI)变化仅约千分之一,一些学者认为,它最可能导致0.1℃的地球表面气温变化<sup>[11, 12]</sup>,这相对于百年来(1906—2005年)0.74℃的增暖<sup>[13]</sup>而言,小了许多。但许多其他太阳参数和太阳活动具有明显的周期性变化和更大的变率,其与气温的关系是值得深入研究的。最近,Tung和Camp<sup>[14]</sup>发现,去趋势化的全球年平均表面气温的年际变化与太阳周期呈正相关(相关系数0.48),达到95%以上的信度水平(如图1);另一方面,他们利用不同来源的再分析数据,获得了与太阳活动有关的全球增暖空间型,其大约有0.2K的变化幅度,且高纬比低纬强,陆面比海洋强。信号分离是这方面研究的关键,Ramaswamy等<sup>[15]</sup>发现,尽管地球表面对太阳和温室气体强迫的响应是相似的,但平流层和对流层对温室气体的响应是相反的,这对从噪音中分离太阳信号是有益的。

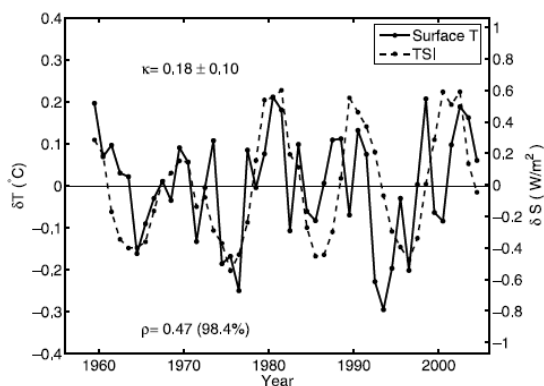


图1 全球年平均NCEP表面气温(实线)和年平均太阳总辐照度(TSI)时间序列。 $\kappa$ 是太阳常数每变化 $1\text{W}/\text{m}^2$ 全球平均温度响应的回归值( $\text{K}/(\text{W}/\text{m}^2)$ ), $\rho$ 是两者的相关系数,括号中值为信度水平<sup>[14]</sup>

#### 2.1.2 区域尺度

从区域的角度来看,学者们从全球不同地区和不同高度检测出太阳周期信号。例如,有学者指出,蒙德极小期欧洲的气候变率可能与外部强迫如太阳辐

射有关<sup>[16]</sup>。Raspopov等<sup>[17]</sup>利用实测温度记录和欧亚高纬地区的树轮序列初步证实了欧亚高纬气候系统可能存在类似太阳活动周期的准90、准22和准11年周期。Mendoza等<sup>[18]</sup>分析了墨西哥中部在1920—1990年的温度变化情况,发现温度变化不仅与地磁场存在相关性,而且与太阳黑子数、太阳磁周期、宇宙线流量均具有相似的周期。Alvarez等<sup>[19]</sup>研究了1889—1991年间热带哈瓦那地区的平均温度和太阳周期长度之间的关系,发现它们之间存在很强的相关性。在东亚,Soon等<sup>[20]</sup>用多种实测和再分析资料确认了20世纪中国陆面气温与太阳辐射存在不容忽视的关系。近些年,许多学者将注意力放到整个对流层及其之上的大气辐射和环境变化上,例如曲维政等<sup>[21]</sup>发现南半球大气温度场从地面层直至对流层顶广泛盛行与太阳磁场磁性22年周期变化相一致的变化周期;太阳磁场22年周期变化对对流层大气高层的影响比低层影响大,对平流层影响更大,而太阳活动11年周期对地面层大气气候影响最明显,对对流层中上层影响较弱。最近需要特别关注的是有关欧美严冬与太阳活动周关系的研究,Rutgers大学全球积雪实验室曾确认2010年第7周北半球雪盖面积达44年来第二高,英国中部2010年12月是近350年以来第二冷的12月,且出现了连续3年的冷冬,这一现象非常罕见<sup>[22]</sup>。Ineson等<sup>[23]</sup>根据最新的卫星光谱辐射监测仪探测到的最近(2004年至今)太阳紫外辐射变化结果——此太阳活动下降期紫外辐射下降幅度比之前的研究结果大4~6倍(详见3.2节),将这一强迫首次应用到一个完整的海洋—对流层—平流层—中间层气候模式中,发现在这样的低太阳活动期冬季,作为对太阳紫外辐射减少而导致的臭氧加热减少的响应,热带平流层上空形成强的冷空气,伴随同期中纬度平流层高层东风异常逐渐发展并向极地向下传播,使近地面气压和气温形成类似北大西洋涛动(NAO)或北极涛动(AO)的负位相特征,导致北欧和美国出现严冬,南欧和加拿大出现温暖冬季,并认为此过程中行星波的传播是导致东风异常传播和扩大的原因。这一结果与Lockwood等<sup>[24]</sup>和Woollings等<sup>[25]</sup>的结论基本一致。最近的欧美严冬是否真的与太阳活动有关,可能会在未来几年新太阳峰年到来时得到检验。

在海温方面,White等<sup>[26]</sup>在研究太平洋、大西洋和印度洋海表温度(SST)时,利用两种独立的SST数据,检测出滞后于太阳活动1~2年的海洋温度变化,其中每一个大洋的SST变化或全球海洋平均SST变化,在数十年至数百年尺度上,其相位与太阳黑子11年周期变化近似一致,温度变化的量级与太阳总

辐射11年变化的量级也相当。但后来White等<sup>[27]</sup>又证实,全球上层海洋年代际尺度的增暖,并不是由于太阳辐射强迫直接引起的。关于ENSO与太阳活动的关系,详见2.3.3。

对于太阳强迫和人类强迫对温度影响的相对重要性方面,Lean等<sup>[28]</sup>曾经在1995年利用重建的太阳辐射资料,分析得出太阳强迫可能贡献了1860年以来0.55℃的全球增暖的一半。最近的模式研究结果表明,20世纪上半叶,全球增暖主要归因于自然因素,其中相当程度上源于太阳强迫的增加;而20世纪下半叶和21世纪初,增暖主要由于温室气体排放<sup>[13, 29, 30]</sup>。而对于最近20年的情景,有的研究认为,太阳强迫可能对气候起到一个弱的降温作用<sup>[31]</sup>。

## 2.2 季风和降水

相对于气温而言,降水的空间变率更大,这对于捕捉气候系统中的太阳周期信号可能是有利的。另一方面,由于直接影响降水的因子一般是一些天气气候系统,例如季风,这对于揭示太阳影响气候的物理机制也是有利的。最近有一些研究正是从这一点出发,得到了一些有益的结果<sup>[32-34]</sup>。

### 2.2.1 全球尺度

在年代际尺度上,较早的关于全球陆面降水分布的研究结论,大致是:在太阳黑子峰年,赤道低纬地区雨量较多,中纬度(20~40°)较少,40°以上又重新偏多<sup>[35]</sup>。最近的有关研究与之前的结论有所不同,Meehl等<sup>[36]</sup>的研究显示,11个太阳峰年合成的异常SST分布更接近ENSO冷事件(La Niña),与之匹配的全球(陆面和海洋)降水异常型是热带太平洋地区降水偏少,其南北两侧降水偏多,这种降水型与同纬度的陆面降水有很大差别,不过由于他们使用的观测降水样本只有3个太阳峰年,海洋降水资料也比较匮乏,所以其结果还有待确认。

关于太阳活动在众多的降水强迫因子中的相对重要性,Currie曾进行了一系列工作(例如文献[37-39]等),他利用全球各大洲不同的气温、降水、树轮等资料,采用最大熵谱等方法,在多种要素中检测出了太阳和月亮周期信号,并计算了方差贡献,认为总体上太阳活动对降水的影响小于月球潮汐的影响,但在年代际尺度上是重要的。Lambert<sup>[40]</sup>使用最优指纹法,通过比较实测降水与短波、长波强迫因子时间序列,发现多数降水的变率更接近于受自然短波强迫驱动,而非人类有关的长波强迫。Wasko和Sharma<sup>[41]</sup>也发现全球大气水分含量有一个明显的接近太阳周期的11年小波谱峰。季风降水的长期变率可能是季风对太阳强迫或其他强迫响应的直接结果,不同时期强迫因

子的重要性可能不同,Liu等<sup>[42]</sup>对全球季风降水的研究显示,在工业时代之前,太阳直接辐射和火山强迫能很好地解释全球季风降水变率,而在20世纪全球季风强度变化有一个不同于中世纪暖期的空间分布,这说明工业时代以来,全球变暖对季风降水的影响,一方面源自大气温室气体的增加,另一方面源自太阳辐射输入的增加。其模式研究结果还显示,在太阳活动偏弱的小冰期(1450—1850年),全球季风降水也偏弱,相反,在中世纪暖期,全球季风偏强。这似乎与Verschuren等<sup>[43]</sup>和Zhao等<sup>[44]</sup>的研究结果(东非和中国华南地区降水与太阳辐射呈反相关)有些矛盾,但根据之前的结论和Haigh等<sup>[45]</sup>的研究结论仔细分析可发现,两者可能并不矛盾,因为多数研究的结果显示,太阳活跃期,Hardley环流扩大,导致副热带干旱区向北扩展,北半球季风北界位置偏北,使得某些地区脱离原先的季风区,降水量反而偏少,而全球大多数陆面地区由于季风的加强而降水偏多。可见,全球变化和区域变化可能是不一致的,由于各地区局地气候系统不同,全球变化不可能完全代表区域变化。

### 2.2.2 区域尺度

研究显示,特定地点的最强响应往往比全球平均响应要大1个量级,例如,第23太阳周某些地方的温度增加可达1℃,远大于全球平均值,水循环(例如季风、降水、干旱等)对太阳驱动的气候变化显然更为敏感<sup>[6]</sup>。所以,区域性降水对太阳活动的响应信号可能是较强的。

在北美,关于天文因子与干旱的研究由来已久(可参见文献[9]),上个太阳周(第23太阳周)以来,这方面的研究取得一定进展。Cook<sup>[46]</sup>利用一个高质量的干旱重建资料,重新评估了美国西部干旱周期的强迫因子,最终确认,太阳和月球的影响相互作用,共同调制着最近200年来美国西部的干旱周期。Woodhouse和Overpeck<sup>[47]</sup>系统地总结了导致美国中西部准20年干旱周期的3个可能机制,其中之一就是太阳一月亮周期的调制作用。但是,Perry<sup>[48]</sup>的研究增加了这种关系的复杂性,发现美国许多地区的降水变化并不同步于太阳辐射变化,而是明显滞后于太阳辐射变化数年。另一方面,关于千年周期的研究虽不属于近百年气候变化,但其取得的成果有助于认识近百年的气候变化。Bond等<sup>[49]</sup>在2001年发现了北大西洋地区1500年的气候周期(Bond周期),Li等<sup>[50]</sup>利用美国东北部湖面记录代替降水量,得出的一些结论与Bond相似,发现千年尺度上大西洋和北美地区存在干—冷的相关关系,并与其他一些学者<sup>[49, 51]</sup>一样,指出在千年尺度上,太阳强迫是一种较合理的调制AO/

NAO的机制。根据他们的研究结论，如果中世纪暖期处于上一个Bond周期的上升位相，那么现在可能就处于另一个Bond周期的上升期，这样，如果不考虑温室气体的作用，未来北美西南部的干旱可能会加剧，而亚洲季风区可能会变得更为湿润。

在非洲，Stager等<sup>[52]</sup>发现东非地区降水与蒸发之比存在类似Bond周期的振荡，Verschuren等<sup>[43]</sup>的研究支持了Stager的观点，利用3个不同的代用资料分析发现，过去千年里，从十年到百年尺度上，赤道东非的降水与太阳辐射都基本呈反相关，中世纪暖期较干，小冰期（1270—1850年）相对较湿，降水最盛期被推测发生在蒙德极小期（1645—1715年），但是，小冰期又被3个严重的干早期所打断，每个都长达几十年，并且，研究发现这几次干旱都比20世纪记录的任何干旱更为严重，这也许对CO<sub>2</sub>增加背景下的现代气候变化和极端气候事件的研究有所启示。

在阿拉伯地区和南亚地区，强降水量的直接原因被解释为太阳活跃期较强的低层南风<sup>[53]</sup>，Neff等<sup>[54]</sup>也认为，太阳变率虽然微小，但大气和海洋环流可能会放大这种原始输入，使夏季风北界远离原始位置，导致非洲撒哈拉地区、阿拉伯地区和印度地区的旱涝发生显著变化，这已经被一些模式研究所证实<sup>[55]</sup>。Kodera<sup>[56]</sup>、Bhattacharyya和Narasimha<sup>[57]</sup>指出，阿拉伯和印度地区降水量偏多对应高太阳活动年。Kodera<sup>[56]</sup>还进一步指出，太阳活动影响季风并不是通过对流层的辐射加热，而是通过平流层对赤道对流的上升支的调制完成的，这一过程产生了印度洋对流层活动呈南北向的“跷跷板”效应。

在东亚和中亚地区，早在20世纪上半叶，竺可桢<sup>[58]</sup>和涂长望<sup>[59]</sup>就对太阳和中国气候做了开拓性的研究。杨鉴初<sup>[60]</sup>和王绍武<sup>[61]</sup>等把日地关系的研究推广和深化，并把太阳黑子相对数应用到气象台站的业务预报中。对于降水与太阳活动的关系问题，Chen<sup>[62]</sup>、徐群和金龙<sup>[63]</sup>、屠其璞<sup>[64]</sup>等人进行了大量研究，得出许多有

应用价值的结论。近些年，由于探测手段的增加、数据的更新扩展和代用资料的使用，有关中国地区降水变化与太阳变率关系的问题，得到学者们进一步的认识和证实<sup>[65-74]</sup>。研究东亚地区降水与太阳活动的关系问题，需充分考虑东亚季风系统和这里特殊的地理环境，因为它很可能对揭示物理机制有所帮助。近年来，这方面的研究有一定进展，需给予重视，它对于完整地理解和验证太阳—气候的关系和作用机理有重要意义。Wang等<sup>[32]</sup>和Tan等<sup>[75]</sup>利用代用资料和文献记录，分析古气候的亚洲季风降水时，都指出季风强度受太阳活动周期控制。最近，Zhao等<sup>[44]</sup>对近百年来中国夏季降水与太阳活动的关系做了严格检验，确认了东亚夏季风爆发期季风区雨带纬度位置年代际变化一定程度上依赖于太阳黑子周期位相，它是导致长江以南和以北地区降水量与太阳周期关系相反的直接原因，并发现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合理地解释这种现象（图2）。

在南半球，同样有研究证实了太阳—降水之间的关系。Thresher<sup>[76]</sup>检测了澳大利亚、南非和南美地区的相关数据，发现南半球的海平面气压、降水与太阳黑子周期有较明显的相关，指出这种同步性可能与南半球纬向西风北界位置的年代际振荡有密切关系。Nordemann等<sup>[77]</sup>通过小波交叉谱等方法揭示出巴西和智利地区降水代用资料中显著的200年（DeVries-

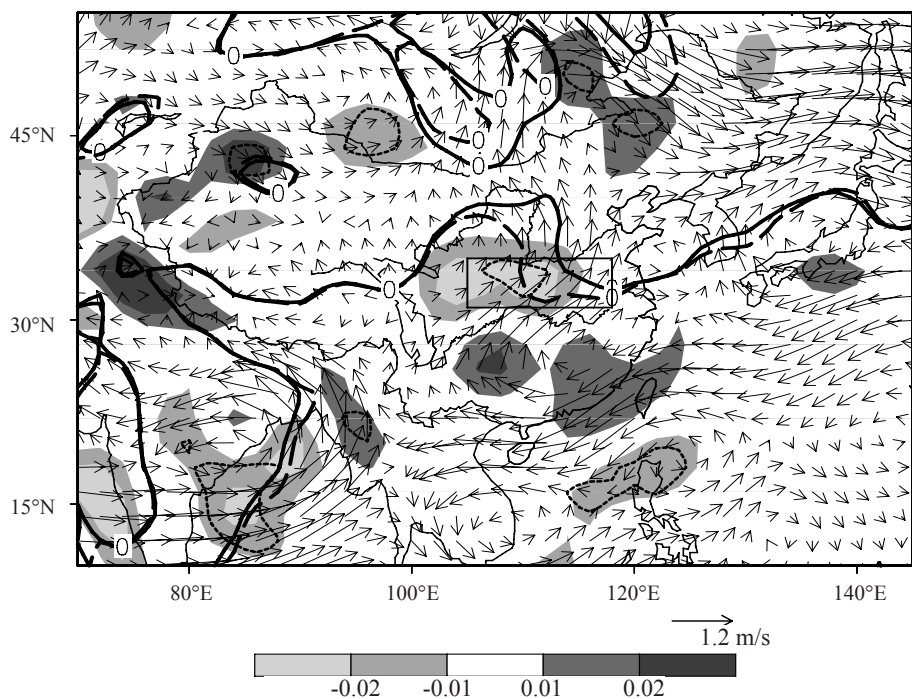


图2 106年（1901—2006年）内太阳高年和低年的6月700hPa风场之差的南北风分界线，箭头：水平风（单位：m/s）；阴影：垂直速度（单位：Pa/s），其负（正）值表示上升（下沉）速度；粗实线/粗长虚线代表太阳高/低年平均南风0线；短虚线包围的区域是垂直速度通过95%信度水平的区域（使用Monte Carlo检验）；矩形框表示淮河地区<sup>[44]</sup>

Suess周期)、80年(Gleissberg周期)、22年(Hale周期)和11年(Schwabe周期)的太阳活动周期。

## 2.3 区域性气候模态

区域性气候模态,例如,北极涛动(AO)、北大西洋涛动(NAO)、ENSO、准两年振荡(QBO)、太平洋年代际振荡(PDO)、太平洋—北美型(PNA)等,在气候系统中的作用是十分重要的,它们受气候系统的影响,同时,也对气候本身施加影响<sup>[78]</sup>。有关太阳—气候变化关系中的一个重要问题是这些气候模态是否对太阳变率产生响应,从而传递甚至放大或修改太阳信号,最终影响气候变化。近些年的有关研究主要集中在AO、NAO、QBO和ENSO等方面。

### 2.3.1 太阳活动对AO和NAO的影响

已有的研究大多认为,太阳活动对中层大气的物理化学等过程有重要影响,对地面气候影响的直接证据较少,而AO在平流层与对流层的耦合中可能有重要作用,因而许多研究对AO给予了特别的关注。NAO常被认为是一个区域性的AO<sup>[78]</sup>。Shindell<sup>[79]</sup>使用一个气候模式研究发现,太阳活动影响着AO,并指出蒙德极小期,气候的区域性差异主要与AO和NAO的低指数状态有关。Kodera<sup>[80]</sup>和Ogi等<sup>[81]</sup>的研究表明,北半球海平面气压变化的空间结构受太阳活动强弱影响,在太阳活跃期,这种空间结构更接近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。Huth等<sup>[82]</sup>部分地验证了该结论,但更倾向于认为太阳活动低年(非最小年),AO较弱。不过,关于蒙德极小期NAO的特征,大部分研究较为一致地认为,期间减弱的太阳辐射对应一个负的NAO型<sup>[83, 84]</sup>。最近有学者用NAO对太阳活动周的响应来解释近几年的欧美冷冬<sup>[23, 25]</sup>。尽管不同的研究结果在细节上有些差异,但大多认为AO或NAO对太阳活动的响应可能是太阳影响在气候变化机制中的重要环节,近来有研究发现太阳影响气候变化是通过激发这种模态而实现的,并初步提出了太阳活动通过这种环状模结构引起气候异常的机制<sup>[85-86]</sup>。

### 2.3.2 太阳活动对QBO的影响

Labitzke<sup>[87]</sup>在1987年首先发现了北极地区平流层温度与太阳活动和QBO存在一定的非线性关系后,许多学者开始重视QBO与太阳活动的关系。近些年,一些研究<sup>[85, 88, 89]</sup>指出, AO指数在不同高度上受太阳变率的影响依赖于热带平流层QBO的时间和位相。Gray等<sup>[90]</sup>提出,太阳黑子周期与QBO的相互作用可能是由于平流层高层风异常的相互作用影响平流层爆发性增

温的演变和爆发时间所致,后来,Matthes等<sup>[91]</sup>用数值模拟初步验证了这一点。最近的研究已经显示,平流层内由太阳辐射而带来的直接变化能够改变向上的行星波传播,并通过极夜急流的调制和Brewer-Dobson(BD)环流的变化导致低层大气的间接反馈<sup>[92]</sup>,这种反馈可能是由于非绝热加热<sup>[93]</sup>,最终影响QBO的周期<sup>[94]</sup>。

### 2.3.3 太阳活动对ENSO的影响

Haigh<sup>[55]</sup>的模拟研究曾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。另一种太阳影响ENSO的可能方式是通过改变云和辐射。Farrar<sup>[95]</sup>发现太平洋中部的云量与NINO3指数的高相关关系。Marsh和Svensmark<sup>[96]</sup>根据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。与前面的观点不同,Ruzmaikin<sup>[97]</sup>认为,ENSO可能并不只是单一地响应外部强迫,而是通过随机共振机制激发大气异常状态(如PNA型),从而放大太阳强迫对气候的影响。

而关于ENSO位相与太阳黑子周期位相的关系,最近的一些研究结论是有差异的。White和Liu<sup>[98]</sup>注意到ENSO暖事件常与太阳峰年匹配,并且提出非线性位相锁定能够解释赤道东太平洋SST变率的重要部分。但是,Meehl等<sup>[99]</sup>研究发现太阳黑子峰年,对应La Niña位相(ENSO冷事件)。Roy和Haigh<sup>[100]</sup>认为,这种分歧的原因可能是由于太阳黑子峰年一般超前于年代际的太阳辐射峰年一年左右。

## 3 太阳活动对气候变化的影响——机制研究

关于太阳活动影响气候变化的可能机制,至少有三种<sup>[101, 102]</sup>(如图3): (1)太阳总辐射机制(TSI机制),该机制认为太阳活动引起的太阳常数(即日地平均距离处的太阳总辐照度)变化,直接驱动了气候变化。(2)太阳短波辐射变化机制(UV机制),该机制认为太阳紫外辐射变化能引起地球中高层大气物理化学性质的变化(比如臭氧的变化),通过行星波作用等将变化传递到对流层,引起天气气候变化。(3)能量粒子(包括太阳能量粒子(SEP)和银河宇宙射线(GCR))机制,该机制认为太阳活动影响地球空间天气(主要影响空间环境中的各种粒子通量),通过对特定区域云微物理过程的影响,导致云层宏观特征变化,在短时间尺度上引起气象要素变化,长时间尺度上引起全球云量变化和云寿命变化,导致全球辐射平衡变化,从而驱动气候变化。前两种都与太阳辐射有关(前者与总辐射有关,后者

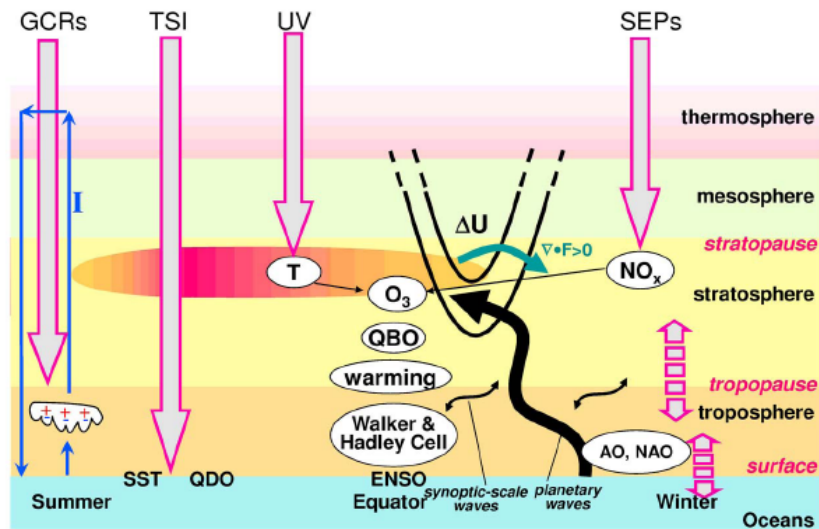


图3 太阳影响气候概念图，图中显示了通过太阳辐射变化（TSI和UV）和微粒辐射效应（SEP和GCR）直接和间接地影响气候。两个虚箭头表示平流层与对流层的耦合和海气耦合<sup>[103]</sup>

主要与紫外辐射有关），第三种则与能量粒子有关<sup>[103]</sup>。另外，还有太阳活动通过影响地磁场来影响地球气候等机制。近些年的机制研究，尤其是UV机制和能量粒子机制研究较为活跃，主要是围绕输入地球的微小的能量变化怎样能与地球气候系统中大的能量变化联系在一起这一主要科学问题展开的。

### 3.1 太阳总辐射机制（TSI机制）

20世纪80年代，人们认识到，太阳常数并非一个真正的常数，其变化周期与太阳黑子数有密切关系<sup>[104]</sup>，因此，现在越来越多的科学家采用太阳辐照度这个更为严谨的名词<sup>[105]</sup>。许多研究（例如古气候研究）认为，太阳辐照度的变化是导致地球长期气候变化的主因。然而，对于较短的时间尺度，其变化是否直接影响地球气候，存在不少争议，因为卫星监测数据显示，近几个太阳周，TSI的变化量仅为 $1.3\text{W/m}^2$ ，约占太阳总辐射的0.1%<sup>[106]</sup>。2006年，Foukal<sup>[11]</sup>进一步证实，在11年太阳黑子周期期间，太阳总能量输出的变化是由于太阳面上暗的和亮的结构变化引起的，并认为自1978年以来由航天器测量到的变化太小而不能对过去30年加速的全球变暖做出大的贡献，太阳变亮应该不可能直接对17世纪以来的全球变暖有显著影响，但是，太阳紫外线和磁等离子体输出的变化对气候的强迫作用不能被排除。不过，海洋对TSI直接吸收的变化可能是重要的，因为海洋具有大的热容量，能“积分”长时间的和微小的热输入量的变化<sup>[103]</sup>，这一方面值得深入研究。最近，有关TSI的测量有了新进展，Kopp和Lean的研究<sup>[107]</sup>尤其需要关注，他们给出了一个较低的TSI数值（ $1360.8 \pm 0.5\text{W/m}^2$ ），比之前公认的数值低了近 $5\text{W/m}^2$ ，并认为散射光是导

致上一代太阳辐射计测量值偏高的原因，而新一代辐射计（TIM）的特殊设计限制了漫射光进入放有仪器的空腔。

虽然，TSI机制饱受争议，但近些年太阳物理学界对未来太阳活动总体趋势的预测是值得关注的，尤其第23太阳周异常长的极小期已引起学者们的高度关注和警觉。Svalgaard等<sup>[108]</sup>和Schatten<sup>[109]</sup>2005年曾预测第24太阳周将是一个弱的太阳周，甚至可能是百年来最弱的。后来，Penn和Livingston<sup>[110, 111]</sup>利用Zeeman splitting方法研究太阳黑子磁场强度衰减趋势，对未来几十年太阳周强弱做出大胆推测（更为具体的文章“Sunspots may vanish by 2015”在著名科学博客WUWT发表），他们推测，如果按1995年之后的趋势发展下去，到2015年，太阳黑子磁场可能就会跌至1500高斯，届时，黑子恐将很难产生。也就是说，现在的第24太阳周可能将会是未来几十年内最后一个有黑子产生的太阳周。这一结果引起学界的广泛讨论。然而，Dikpati<sup>[112]</sup>在2006年根据修改的通量输送动态模式预测第24太阳周将是较强的一个太阳周（比前一个强30%~50%）。不过，最近在2011年6月的美国天文学会太阳物理学分会上，3个独立研究项目分别从太阳黑子磁场强度减弱趋势、向低纬迁移的纬向流（扭转振荡）信号是否出现、日冕极向漂移速度的角度分析并预测了未来的太阳活动趋势，并得出一个共同的结论：太阳有可能将进入休眠期。Lockwood从历史统计的角度推测，在未来50年，宇宙射线有8%的概率重新恢复到蒙德极小期水平<sup>[113]</sup>，并证实欧洲地区的冷冬与太阳活动偏弱有关<sup>[22]</sup>。未来太阳进入休眠期究竟是大概率还是小概率事件？以上证据可能还并不充分，现在得出结论还为时尚早，但有关研究应该予以重视。另一方面，如果太阳真的进入第二个“蒙德极小期”，那么地球气候会发生什么变化呢？许多学者认为这不会对现代气候变暖的趋势有太大影响，不会进入“小冰期”。不过，果真如此吗？最近Feulner和Rahmstorf<sup>[114]</sup>的初步研究指出，它可能会使全球变暖减缓 $0.3\text{C}$ ，而欧洲的平均温度可能会降低 $1\sim 2\text{C}$ 。

致上一代太阳辐射计测量值偏高的原因，而新一代辐射计（TIM）的特殊设计限制了漫射光进入放有仪器的空腔。

### 3.2 太阳短波辐射变化机制（UV机制）

直接用太阳总辐射的微小变化来解释太阳变率对气候年代际变化的影响遇到很多困难，这迫使人们需要找到一种合理的信号放大机制来间接解释太阳变率

如何驱动气候变化，UV机制被认为是一种可能的机制。这种机制认为，作为太阳总辐射的一部分，太阳紫外辐射有着较大的变率，能够影响和改变中高层大气（如平流层臭氧）的许多性质，通过某种转移（换）机制引起对流层大气环流发生改变，最终影响气候。这种机制的关键有两方面：一方面，太阳辐射（如紫外辐射部分）对中高层大气（如臭氧）的影响；另一方面，中高层大气与对流层大气的耦合和相互作用。

尽管紫外吸收只占总的太阳能量输入的一小部分，但是它有着相对大的11年太阳周期变率，可达6%~8%的变化<sup>[115]</sup>，可以占总太阳辐射变化的15%<sup>[116]</sup>。这比起同期TSI约0.1%的变化而言，要大得多，且最近的测量结果更出乎人们意料，NASA2003年发射的“太阳辐射和气候实验”（Solar Radiation and Climate Experiment, 简称SORCE）卫星提供了第一个从X射线到近红外的完整太阳分光辐照度监测结果，它显示在太阳周期的下降期（2004—2007年），UV辐射下降幅度比之前的结果大得多，有4~6倍的下降，不过它部分地被可见光辐射增加所补偿<sup>[117]</sup>。Lockwood<sup>[118]</sup>的最新研究针对同一时间的两种卫星数据，发现当校准不同来源的数据后，第23太阳周的极小期UV辐射确实比前一个太阳极小期有显著下降，而不进行数据校准时只有小的变化。但是，2003年之前的UV辐射测量是否也像TSI测量一样，存在Kopp和Lean<sup>[107]</sup>认为的仪器设计上的缺陷，而导致测量结果存在较大偏差呢？这是一个十分重要的问题，因为UV辐射对平流层加热和臭氧尤其重要，如果下降4~6倍的结果是正确的，那么与之联系的温度和臭氧的响应，对流层顶的太阳辐射强迫，以及太阳对气候变化的影响，都完全有必要重新评估<sup>[119]</sup>。最近，已有研究将最新的UV辐射测量结果应用于气候模式，来评估大气响应<sup>[120, 121]</sup>。

另一方面，从辐射强迫的角度来看，臭氧由太阳短波辐射产生，而一定程度上受长波辐射所破坏<sup>[122]</sup>。另外，高纬地区的高能带电粒子也能破坏臭氧，目前，它们的净效应的变化幅度，甚至符号仍然不十分确定，由太阳引起的臭氧净辐射强迫估计范围从约-25%<sup>[123]</sup>到+45%<sup>[124]</sup>，并且很大程度上依赖于臭氧增加量的分布状况。不过较近的研究<sup>[122]</sup>表明，由于太阳紫外辐射的变率幅度较大，使臭氧量更强烈地受太阳活动所调制，而不是破坏，这导致太阳高年，平流层臭氧的净增加，最大幅度在2%左右，但是其结果还需要更严格的统计检验。

这一机制中，平流层和对流层的耦合与相互作用

是一个重要方面。平流层臭氧的变化，可能通过一种与臭氧有关的反馈机制放大信号强度<sup>[125]</sup>，引起平流层加热场改变，在赤道平流层顶出现最大值（可产生约2K的温度变化），平流层下部出现次大值<sup>[126]</sup>，再通过平流层与对流层的耦合引起大气环流（尤其对流层大气环流）的变化。关于大气环流和太阳活动周期的关系，较为公认的认识是：在太阳黑子高年，有更多的能量进入地球，导致Hardley环流扩张和赤道辐合带（ITCZ）的增强，从而导致降水增多和平均表面气压降低，结果沙漠区将向极地方向移动，大多数地区降水增加，而沙漠地区（多位于副热带地区）变得更干<sup>[9]</sup>，这一观点的一些环节近年逐渐被证实<sup>[45, 56, 127]</sup>。最近，一些学者通过大气环流模式研究这种耦合机制<sup>[45, 128, 129]</sup>。Haigh等<sup>[45]</sup>的模式研究显示，从低纬到高纬递减的加热分布，会使急流和Hadley环流减弱并向极地移动。在Haigh和Blackburn<sup>[129]</sup>的实验里，对流层顶静力稳定度改变的初始效应是减少那里的涡旋动量通量辐合，从而导致通量强迫异常的垂直输送和其下方的动力异常，也就是说，太阳对平流层的加热可以使对流层环流发生变化，其中平流层变化对波传播的影响是这种机制的关键。北半球冬季平流层的热扰动可以调制行星波的垂直传播，通过极夜急流和BD环流反馈过程向下影响到低层<sup>[92]</sup>，有研究显示它可能会促使AO进入正位相状态<sup>[130]</sup>。这些工作对理解太阳辐射的微小变化怎样显著地影响低层大气环流提供了理论路径。

### 3.3 能量粒子机制（SEP和GCR机制）

SEP机制认为，太阳质子事件时太阳高能粒子能够在极区进入地球磁场，沉降到热层、中间层和平流层高层，引起的电离和分解作用能在天和月的尺度上明显影响那里的大气化学成分（如HO<sub>x</sub>，NO<sub>x</sub>和臭氧等），最终间接影响对流层气候<sup>[131, 132]</sup>。已有研究发现，SEP产生的NO<sub>x</sub>能够在极区向下输送到冬季平流层，影响臭氧量<sup>[131]</sup>。最近，有研究发现，南半球NO<sub>x</sub>总量的一部分（可达10%）可归因于SEP<sup>[133]</sup>。但是，目前这种机制仍缺乏的证据是，与之有关的臭氧的变化是否可以在气候尺度上改变那里的大气温度和环流（比如，极涡），而不只停留在几个非常大的太阳质子事件发生之后。

GCR机制认为，宇宙射线能直接影响天气气候<sup>[103]</sup>。1959年，Ney最早提出宇宙射线可能通过对云的调制来直接影响气候<sup>[134]</sup>。Dickinson等<sup>[135]</sup>进一步指出，宇宙射线的电离作用可能使平流层下部和对流层上部存在大的离子簇，有利于硫酸盐气溶胶（一种重要的成云凝结核）的生成。最初，这种机制能较好地

解释总云盖与宇宙射线间的关系<sup>[136]</sup>，但后来人们发现宇宙射线与低云量，而不是总云量，存在强相关关系<sup>[96]</sup>，但这种机制不能解释这种关系。

近些年，一种新的关于GCR—云之间的联系机制是通过全球大气电路实现的<sup>[137]</sup>。全球大气电路引起平静天气（非雷暴天气）时垂直电流密度在电离层和地面之间循环流动，层云可引起局地水滴和气溶胶在其上下边界处充电，从而改变云的微物理结构，由于电流密度受宇宙射线离子产量的调制，所以，全球电路提供了太阳变率和云之间的一种可能联系，它可以较好地解释全球低云量与宇宙射线之间的相关关系。然而，相比于UV机制，这种机制还处于“婴儿期”，目前刚开始定量化研究。初步结论是，在太阳高年，GCR的作用是减弱低纬地区的云，产生增暖效果，这与TSI的直接调制作用效果一致<sup>[103]</sup>。目前，传导电流密度对云影响的研究集中于水平层云，因为其往往具有强烈的空气电导率梯度，使空间电荷能够被积累<sup>[138]</sup>，同时，由于静电力的作用，电荷能够抑制蒸发，影响粒子与粒子和粒子与水滴间的碰撞，且在低空更为明显<sup>[137, 139, 140]</sup>。

最近的一些研究对云和GCR的联系提供了重要证据，但另一些研究却提出了异议。Marsh和Svensmark<sup>[96]</sup>曾考虑卫星间的相互校准问题，对国际卫星云气候计划（ISCCP）D2云数据进行了技术调整，从而发现低云量与GCR之间强烈的正相关。然而，根据现有研究结果，校准方式不同得出的云数据序列存在巨大差异<sup>[103]</sup>，甚至有些研究认为，ISCCP数据很可能不适合长期趋势和变率的研究<sup>[141]</sup>。但是，如果使用短期的（如3小时）ISCCP云数据，去除长期趋势，低云—GCR之间的正相关是显著的<sup>[142]</sup>。利用其他云量数据（如船基、陆基和其他卫星监测设备等），一些学者发现了云—GCR之间的某些联系<sup>[143, 144]</sup>，但也有一些学者给予了否定或部分否定<sup>[145-148]</sup>。

#### 4 讨论和小结

目前，太阳—气候变化之间的关系，虽然存在很多争议和问题，但正是这些争议和问题，指明了这一领域未来的研究方向。

在观测方面，最近关于SORCE卫星提供的TSI较低的测量值和UV辐射出乎意料的下降幅度，需要进一步给予确认并给出合理的解释和评估其重要意义。关于在蒙德极小期，TSI究竟减少到什么程度，以及期间的变冷是全球特征还是区域性特征，也还存在争论。另一方面，太阳的能量输入是一个全球信号，为何很多研究的结果表明，气候响应有明显的区域性差

异？不少科学家认为这可能涉及到信号放大机制和系统敏感性问题。因此，在区域尺度上，今后的研究需高度重视局地气候系统的作用，比如研究东亚地区气候与太阳变率关系问题时，需关注季风系统的作用，如能检测到太阳周期信号是否和怎样被季风系统所修改甚至放大，那么对太阳—气候关系的研究将有重要贡献。但这一工作并不容易，因为其关键是信号的分离工作，前提是各种要素数据自身有严格的质量保证（足够的时间跨度和时空精度），对某些要素而言，这一要求目前很难达到。另外，一些强迫因子会产生相似的气候响应，使信号分离工作更加复杂。另外，关于臭氧对太阳辐射的响应程度和放大过程目前存在大的变化范围和不确定性，IPCC第四次评估报告中，关于对流层顶辐射通量变化的定义是瞬时的，它假设了平流层已经对辐射强迫做出了调整，这会造成辐射强迫的减少，因为作为响应出现的平流层分子氧和臭氧减少了到达对流层顶的太阳辐射；另一方面，增加的臭氧减少短波辐射，但是增加长波辐射。

在机制解释方面，最重要的问题是，太阳微小的变化是否和如何被放大最终导致气候变化的。从太阳到地球大气层顶，再到地球表面甚至地球内部，这一复杂的“链条”当中，是否存在一个（些）环节发挥着关键的修改信号的作用，找出这个（些）中间环节是理论突破的关键。关于TSI机制，根据最近的探测和研究结果，之前认为的一个太阳周TSI只有 $1.3\text{W}/\text{m}^2$ 的变化量可能是有疑问的，需要新一代辐射计和新太阳峰年的验证，而且由于可能存在的非线性气候系统的复杂性，微小的变化量也不能完全否定太阳—气候之间的联系。关于UV机制，一些研究认为平流层低层的加热及其空间分布是导致副热带急流北移和热带Hadley环流扩张的原因，但对于平流层低层出现的温度变化次大值，至今没有很好的解释，而且这种平流层与对流层的耦合原理以及行星波在其中的作用仍亟待研究。关于GCR—云关系也存在几个问题：一些研究结果反映出云量变化滞后于GCR数月时间，这是不能得到GCR—云机制的合理解释的。因为云对GCR的响应时间（考虑云凝结核对GCR的响应时间和云本身的生命期）应是几天之内，而不是几个月。另一方面，目前卫星观测到的低云量数据（除了红外探测外），大多可信度不够，因为中高云会遮挡低云，并且不同云类型的变化范围往往可达百分之几，而百分之几的误差就完全可以破坏先前明显的一致性，所以其探测结果广受争议。另外，20世纪90年代卫星云数据的调整和对缺失数据的处理，导致GCR—云机制的验证存在困难。这些问题的存在，一方面，需要继续

应用简单模式来考察特定机制，比如宇宙射线对云的影响。另一方面，需要发展和采用考虑相应物理、化学过程的海洋—对流层—平流层耦合的气候模式，准确评估太阳信号。

由于新太阳周的到来，太阳活动最近几年将日渐活跃，这会使灾害性空间天气事件逐年增加，但是，它也提供了一个区分源于太阳和人类的气候效应的可能机会，也为有关物理机制的验证、模式的评估等许多重要科学问题的解决创造了良好时机，例如监测新太阳峰年黑子数等参数来检验预报模式和预测理论，利用新一代辐射计获取完整太阳周TSI数值和UV辐射变化值，利用该时机验证欧美严冬与太阳活动的关系等。如果能够发现并确认太阳—气候之间关系的某种规律，对于气候预测将产生重要突破。关于第23太阳周异常长的衰减期和第24太阳周的推迟到来，许多科学家已预测错了，这说明太阳内部可能已经发生了一些微妙变化，但是这些变化到底是什么？对未来的地球是否会有影响？人类还没有足够的认识和理解。因此，加强这一多学科交叉领域的研究对于认识气候变化和防灾减灾有着重要和深远的影响，我们需要对即将到来的太阳峰年作好准备，而不应该像过去那样再从教训中重新学习一遍。

致谢：承蒙评审专家提出宝贵意见，特此致谢。

#### 参考文献

- [1] Russell C T, Luhmann J G, Jian L K. How unprecedented a solar minimum? *Rev Geophys*, 2010, 48, RG2004, doi:10.1029/2009RG000316.
- [2] 王绍武, 闻新宇, 黄建斌. 不久的将来气候会变冷吗? *科学通报*, 2010, 55(30): 2980-2985.
- [3] 吕建永, 杨亚芬, 牡丹, 周全, 毛田. 空间天气研究进展. *气象科技进展*, 2011, 1(4):26-36.
- [4] Rind D. The Sun's Role in Climate Variations. *Science*, 2002, 296: 673-677.
- [5] 李崇银, 翁衡毅, 高晓清, 等. 全球增暖的另一可能原因初探. *大气科学*, 2003, 27(5): 789-797.
- [6] Lean J L. Cycles and trends in solar irradiance and climate. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2010, 1(1): 111-122.
- [7] 王绍武, 葛全胜, 王芳, 等. 全球气候变暖争议中的核心问题. *地球科学进展*, 2010, 25(6): 656-665.
- [8] 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. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1801, 91: 265-318.
- [9] Hoyt D V, Schatten K H. *The Role of the Sun in Climate Change*. New York: Oxford University Press, 1997.
- [10] Herman J R, Goldberg R A. *Sun, Weather and Climate*. Honolulu, Hawaii: University Press of the Pacific, 2005.
- [11] Foukal P, Frohlich C, Spruit H, Wigley T M L. Variations in solar luminosity and their effect on the Earth's climate. *Nature*, 2006, 443: 161-166.
- [12] Benestad R E, Schmidt G A. Solar trends and global warming. *J Geophys Res*, 2009, 114, D14101, doi:10.1029/2008JD011639.
- [13] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), in *Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC (AR4)*, edited by S. Solomon et al. Cambridge, United Kingdom and New York: Cambridge University Press, 2007.
- [14] Tung K K, Camp C D. Solar cycle warming at the Earth's surface in NCEP and ERA-40 data: A linear diskriminant analysis. *J Geophys Res*, 2008, 113, D05114, doi:10.1029/2007JD009164.
- [15] Ramaswamy V, Hurrell J W, Meehl G A. Why do temperatures vary vertically (from the surface to the stratosphere) and what do we understand about why they might vary and change over time? in *Temperature Trends in the Lower Atmosphere: Steps for Understanding and Reconciling Difference*, edited by T. R. Karl et al. U.S. Clim Change Sci Program, Washington, D. C., 2006.
- [16] Luterbacher J, Rickli R, Xoplaki E, Tinguely C, Beck C, Pfister C, Wanner H. The late Maunder Minimum (1675-1715)—A key period for studying decadal scale climatic change in Europe. *Clim Change*, 2001, 49: 441-462, doi:10.1023/A:1010667524422.
- [17] Raspopov O M, Dergachev V A, Kolstrom T. Periodicity of climate conditions and solar variability derived from dendrochronological and other palaeoclimatic data in high latitudes. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2004, 209: 127-139.
- [18] Mendoza B, Lara A, Maravilla D, Jáuregui E. Temperature variability in central México and its possible association to solar activity. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2001, 63: 1891-1900.
- [19] Alvarez Pomares O, Pérez Doval J, Cárdenas Pérez P A, Vega González R. Solar Variability Manifestation on Earth Climate Parameters Registered at a Tropical Location. 24 meeting of IAU. The Sun and Weather. Manchester: Joint Discussion 7, August 2000.
- [20] Soon W, Dutta K, Legates D R, Velasco V, Zhang W. Variation in surface air temperature of China during the 20th century. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2011, 73(16), 2331-2344.
- [21] 曲维政, 陈璐, 黄菲, 张微, 朱小洁, 邓声贵, 杜凌. 南半球对流层气候年代际变化及其与太阳活动的联系. *地球科学进展*, 2005, 20(7): 794-803.
- [22] Lockwood M, Harrison R G, Owens M J, et al. The solar influence on the probability of relatively cold UK winters in the future. *Environmental Research Letters*, 2011, 6 (3), 034004.
- [23] 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, doi:10.1038/ngeo1282.
- [24] Lockwood M, Harrison R G, Woollings T J, Solanki S K. Are cold winters in Europe associated with low solar activity? *Environmental Research Letters*, 2010, 5 (2), 024001.
- [25] Woollings T, Lockwood M, Masato G, Bell C, Gray L. Enhanced signature of solar variability in Eurasian winter climate. *Geophys Res Lett*, 2010, 37, L20805, doi:10.1029/2010GL044601.
- [26] White W B, Lean J, Cayan D R, et al. Response of global upper ocean temperature to changing solar irradiance. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102: 3255-3266.
- [27] White W B, Dettinger M D, Cayan D R. Sources of global warming in the upper-ocean on decadal period scales. *J Geophys Res*, 2003, 108(C8), 3248, doi:10.1029/2002JC001396.
- [28] Lean J, Beer J, Bradley R. Reconstruction of solar irradiance since 1610: Implications for climate change. *Geophys Res Lett*, 1995, 22(23), 3195-3198.
- [29] Tett S F B, Jones G S, Stott P A, et al. Estimation of natural and anthropogenic contributions to 20th century temperature change. *J Geophys Res*, 2002, 107(D16), 4306, doi:10.1029/2000JD000028.
- [30] Meehl G A, Washington W M, Amman C M, et al. Combinations of natural and anthropogenic forcings and 20th century climate. *J Clim*, 2004, 17: 3721-3727.
- [31] Lockwood M, Fröhlich C. Recent oppositely directed trends in solar climate forcings and the global mean surface air temperature. *Proc R Soc A*, 2007, 463(2086): 2447-2460.
- [32] 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.
- [33] Kerr R A. Changes in the sun may sway the tropical monsoon. *Science*, 2005, 308: 787.
- [34] 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.

- [35] Clayton H H. World Weather, New York: MacMillan, 1923.
- [36] 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: 1114-1118.
- [37] Currie R G. Luni-solar 18.6- and 10-11-year solar cycle signals in South African rainfall. *Int J Climatol*, 1993, 13: 237-256.
- [38] Currie R G. Luni-solar and solar cycle signals in Chinese dryness/wetness indices. *Int J Climatol*, 1995, 15: 497-515.
- [39] Currie R G. Variance contribution of luni-solar (Mn) and solar cycle (Sc) signals to climate data. *Int J Climatol*, 1996, 16: 1343-1364.
- [40] Lambert F H, Stott P A, Allen M R, et al. Detection and attribution of changes in 20th century land precipitation. *Geophys Res Lett*, 2004, 31, L10203, doi: 10.1029/2004GL019545.
- [41] Wasko C, Sharma A. Effect of solar variability on atmospheric moisture storage. *Geophys Res Lett*, 2009, 36, L03703, doi:10.1029/2008GL036310.
- [42] Liu J, Kuang X, Wang B, Ding Q, Soon W, Zorita E. Centennial variations of the global monsoon precipitation in the last millennium: Results from ECHO-G model. *J Clim*, 2009, 22: 2356-2371.
- [43] Verschuren D, Laird K R, Cumming B F. Rainfall and drought in equatorial east Africa during the past 1100 years. *Nature*, 2000, 403: 410-414.
- [44] 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), in press.
- [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, doi:10.1175/JCLI3472.1.
- [46] 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. *J Clim*, 1997, 10: 1343-1356.
- [47] Woodhouse C A, Overpeck J T. 2000 years of drought variability in the central United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1998, 79: 2693-2714.
- [48] Perry C A. Solar-irradiance variations and regional precipitation fluctuations in the western USA. *International Journal of Climatology*, 1994, 14: 969-984.
- [49] Bond G, Kromer B, Beer J, et al. Persistent solar influence on North Atlantic climate during the Holocene. *Science*, 2001, 294: 2130-2136.
- [50] Li Y-X, Yu Z, Kodama K P. Sensitive moisture response to Holocene millennial-scale climate variations in the Mid-Atlantic region, USA. *The Holocene*, 2007, 17: 3-8.
- [51] Hu F S, Kaufman D, Yoneji S, et al. Cyclic variation and solar forcing of Holocene climate in the Alaskan subarctic. *Science*, 2003, 301: 1890-1893.
- [52] Stager J C, Cumming B F, Meeker L D. A 10,000-year high-resolution diatom record from Pilkington Bay, Lake Victoria, East Africa. *Quaternary Research*, 2003, 59: 172-181.
- [53] 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: 1737-1739.
- [54] Neff U, Burns S J, Mangini A, et al. Strong coherence between solar variability and the monsoon in Oman between 9 and 6 kyr ago. *Nature*, 2001, 411: 290-293.
- [55] Haigh J D. The impact of solar variability on climate. *Science*, 1996, 272: 981-984.
- [56] Kodera K. Solar influence on the Indian Ocean monsoon through dynamical processes. *Geophys Res Lett*, 2004, 31, L24209, doi: 10.1029/2004GL020928.
- [57] Bhattacharyya S, Narasimha R. Possible association between Indian monsoon rainfall and solar activity. *Geophys Res Lett*, 2005, 32, L05813, doi: 10.1029/2004GL021044.
- [58] 竺可桢. 我国历史上气候的脉动. *科学汇刊*, 1926, 16(2): 274-282.
- [59] 涂长望. 东亚活动中心与我国水旱灾之关系. *气象杂志*, 1936, 12: 600-619.
- [60] 杨鉴初. 近年来国外关于太阳活动对大气环流和天气影响的研究. *气象学报*, 1962, 32(2): 172-194.
- [61] 王绍武. 东亚大气活动中心的多年变化与我国的气候振动. *气象学报*, 1962, 32(1): 20-36.
- [62] Chen J Y. Tendency prediction of precipitation and inundation in July in the Sichuan basin, China. *International Journal of Climatology*, 1984, 4: 521-529.
- [63] 徐群, 金龙. 太阳活动与北半球副热带高压强度的耦合振荡. *大气科学*, 1986, 10(2): 204-211.
- [64] 屠其璞. 近百年来我国降水量的变化. *南京气象学院学报*, 1987, 10(2): 177-187.
- [65] 郭增建, 秦保燕. 黄河巨洪发生时间规律的讨论. *自然灾害学报*, 1992, 1(3): 101-105.
- [66] 冯松, 汤懋苍. 太阳活动百年尺度的跃变与气候跃变的相关分析. *高原气象*, 1998, 17(3): 266-270.
- [67] 赵娟, 韩延本. 太阳活动, El Nino 对北京地区降雨的影响及预测. *地球物理学进展*, 1999, 14(1): 123-126.
- [68] 卫捷, 汤懋苍, 冯松, 等. 亚洲季风年代际振荡及与天文因子的相关. *高原气象*, 1999, 18(2): 179-184.
- [69] 李可军, 向福元. 中纬度地区的洪水与太阳活动关系的研究. *云南天文台刊*, 2000, (2): 34-38.
- [70] Li X D, Zhu Y F, Qian W H. Spatiotemporal variations of summer rainfall over eastern China during 1880-1999. *Advances in Atmospheric sciences*, 2002, 19(6): 1055-1068.
- [71] 张家武, 金明, 陈发虎, 等. 青海湖沉积岩芯记录的青藏高原东北部过去800年以来的降水变化. *科学通报*, 2004, 49(1):10-14.
- [72] 姜彤, 张强, 王苏民. 近1000年长江中下游旱涝与气候变化关系. 第四纪研究, 2004, 24(5): 518-524.
- [73] 黄磊, 邵雪梅. 青海德令哈地区近400年来的降水量变化与太阳活动. 第四纪研究, 2005, 25(002): 184-192.
- [74] 段长春, 孙绩华. 太阳活动异常与降水和地面气温的关系. *气象科技*, 2006, 34(4): 381-386.
- [75] Tan L, Cai Y, An Z, Ai L. 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.
- [76] Thresher R E. Solar correlates of southern hemisphere mid-latitude climate variability. *Int J Climatol*, 2002, 22: 901-915.
- [77] Nordemann D J R, Rigozo N R, de Faria H H. Solar activity and El-Niño signals observed in Brazil and Chile tree ring records. *Advances in Space Research*, 2005, 35: 891-896.
- [78] Benestad R E. *Solar Activity and Earth's Climate* (2nd edition). Berlin, Heidelberg, New York: Springer praxis publishing, 2006.
- [79] Shindell D T, Schmidt G A, Mann M E, Rind D, Waple A. Solar forcing of regional climate change during the Maunder minimum. *Science*, 2001, 294: 2149-2152.
- [80] Kodera K. Solar cycle modulation of the North Atlantic Oscillation: Implication in the spatial structure of the NAO. *Geophys Res Lett*, 2002, 29(8), 1218, doi:10.1029/2001GL014557.
- [81] Ogi M, Yamazaki K, Tachibana Y. Solar cycle modulation of the seasonal linkage of the North Atlantic Oscillation (NAO). *Geophys Res Lett*, 2003, 30(22), 2170, doi:10.1029/2003GL018545.
- [82] Huth R, Bochník J, Hejda P. The 11-year solar cycle affects the intensity and annularity of the Arctic Oscillation. *J Atmos Sol -Terr Phys*, 2007, 69: 1095-1109.
- [83] Slonosky V C, Jones P D, Davies T D. Instrumental pressure observation from the 17th and 18th centuries: London and Paris. *Int J Climatol*, 2001, 21: 285-298, doi:10.1002/joc.611.
- [84] Mann M E, Zhang Z, Rutherford S, et al. Global signatures of the Little Ice Age and Medieval climate anomaly and plausible dynamical origins. *Science*, 2009, 326: 1256-1260, doi:10.1126/science.1177303.
- [85] Ruzmaikin A, Feynman J. Solar influence on major mode of atmospheric variability. *J Geophys Res*, 2002, 107(D14), 4209, doi:10.1029/2001JD001239.
- [86] Ruzmaikin A. Effect of solar variability on the Earth's climate patterns. *Adv Space Res*, 2007, 40(7): 1146-1151, doi:10.1016/j.asr.2007.01.076.
- [87] Labitzke K. Sunspots, the QBO, and the stratospheric temperature in the north polar region. *Geophys Res Lett*, 1987, 14(5): 535-537, doi:10.1029/GL014i005p00535.
- [88] Lu H, Gray L J, Baldwin M P, Jarvis M J. Life cycle of the QBO-modulated 11-year solar cycle signals in the Northern Hemispheric winter. *Q J R Meteorol Soc*, 2009, 135: 1030-1043.

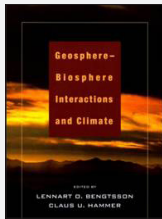
- [89] 刘毅, 陆春晖. 冬季太阳11年周期活动对大气环流的影响. 地球物理学报, 2010, 53(6): 1269-1277, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2010.06.004.
- [90] Gray L J, Phipps S J, Dunkerton T J, et al. A data study of the influence of the equatorial upper stratosphere on Northern Hemisphere stratospheric sudden warmings. Q J R Meteorol Soc, 2001, 127: 1985-2003, doi:10.1002/qj.49712757607.
- [91] Matthes K, Langematz U, Gray L J, et al. Improved 11 - year solar signal in the Freie Universität Berlin Climate Middle Atmosphere Model (FUB - CMAM). J Geophys Res, 2004, 109, D06101, doi:10.1029/2003JD004012.
- [92] Kodera K, Kuroda Y. Dynamical response to the solar cycle. J Geophys Res, 2002, 107(D24), 4749, doi:10.1029/2002JD002224.
- [93] Gray L J, Rumbold S T, Shine K P. Stratospheric Temperature and Radiative Forcing Response to 11-Year Solar Cycle Changes in Irradiance and Ozone. J Atmos Sci, 2009, 66: 2402-2417.
- [94] McCormack J P. The influence of the 11-year solar cycle on the quasi-biennial oscillation. Geophys Res Lett, 2003, 30(22), 2162, doi:10.1029/2003GL018314.
- [95] Farrar P D. Are cosmic rays influencing oceanic cloud coverage-or is it only El Nino? Climatic Change, 2000, 47 (1-2): 7-15.
- [96] Marsh N, Svensmark H. Galactic cosmic ray and El Nino Southern Oscillation trends in International Satellite Cloud Climatology Project D2 low - cloud properties. J Geophys Res, 2003, 108(D6), 4195, doi:10.1029/2001JD001264.
- [97] Ruzmaikin A. Can El Niño amplify the solar forcing of climate? Geophys Res Lett, 1999, 26(15), 2255-2258.
- [98] White W B, Liu Z. Non - linear alignment of El Nino to the 11-yr solar cycle. Geophys Res Lett, 2008, 35, L19607, doi:10.1029/2008GL034831.
- [99] Meehl G A, Arblaster J M, Branstator G, et al. A coupled air - sea response mechanism to solar forcing in the Pacific region. J Clim, 2008, 21: 2883-2897, doi:10.1175/2007JCLI1776.1.
- [100] Roy I, Haigh J D. Solar cycle signals in sea level pressure and sea surface temperature. Atmos Chem Phys, 2010, 100: 3147-3153.
- [101] Pekarek A H. Solar Forcing of Earth's Climate. Environmental Geosciences, 2000, 7: 215, doi: 10.1046/j.1526-0984.2000.74003-7.x
- [102] 周立旻, Tinsley B A, 郑祥民, 王世杰. 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, 22(011): 1099-1108.
- [103] Gray L J, Beer J, Geller M, et al. Solar influences on climate. Rev Geophys, 2010, 48, RG4001, doi: 10.1029/2009RG000282.
- [104] Smith E A, Harr T H V, Hickey J R, et al. The nature of the short period fluctuations in the solar irradiance received by the Earth. Climatic Change, 1983, 5: 211-235.
- [105] 王绍武. 太阳常数. 气候变化研究进展, 2009, 5(1): 61-62.
- [106] Willson R. Total solar irradiance trend during solar cycle 21 and 22. Science, 1997, 277: 1963-1965.
- [107] Kopp G, Lean J L. A new, lower value of total solar irradiance: Evidence and climate significance. Geophys Res Lett, 2011, 38, L01706, doi:10.1029/2010GL045777.
- [108] Svalgaard L, Cliver E W, Kamide Y. Sunspot cycle 24: Smallest cycle in 100 years. Geophys Res Lett, 2005, 32, L01104, doi:10.1029/2004GL021664.
- [109] Schatten K H. Fair space weather for solar cycle 24. Geophys Res Lett, 2005, 32, L21106, doi:10.1029/2005GL024363.
- [110] Penn M J, Livingston W. Temporal Changes in Sunspot Umbral Magnetic Fields and Temperatures. Astrophys Journal, 2006, 649, L45-L48.
- [111] Penn M J, Livingston W. Long-term Evolution of Sunspot Magnetic Fields. Proceedings of the International Astronomical Union, 2010, 6: 126-133, doi: 10.1017/S1743921311015122.
- [112] Dikpati M, de Toma G, Gilman P A. Predicting the strength of solar cycle 24 using a flux-transport dynamo-based tool. Geophys Res Lett, 2006, 33, L05102, doi:10.1029/2005GL025221.
- [113] Lockwood M. Solar change and climate: an update in the light of the current exceptional solar minimum. Proc R Soc A, 2010, 466: 303-329.
- [114] Feulner G, Rahmstorf S. On the effect of a new grand minimum of solar activity on the future climate on Earth. Geophys Res Lett, 2010, 37, L05707, doi:10.1029/2010GL042710.
- [115] Chandra S, McPeters R D. The solar cycle variation of ozone in the stratosphere inferred from Nimbus 7 and NOAA 11 satellites. J Geophys Res, 1994, 99: 20665-20671.
- [116] Lean J, Rottman G, Kyle H, Woods T, Hickey J, Puga L. Detection and parameterization of variations in solar mid - and near - ultraviolet radiation (200-400 nm). J Geophys Res, 1997, 102(D25), 29939-29956.
- [117] Harder J W, Fontenla J M, Pilewskie P, et al. Trends in solar spectral irradiance variability in the visible and infrared. Geophys Res Lett, 2009, 36, L07801, doi:10.1029/2008GL036797.
- [118] Lockwood M. Was UV spectral solar irradiance lower during the recent low sunspot minimum? J Geophys Res, 2011, 116, D16103, doi:10.1029/2010JD014746.
- [119] Haigh J D, Winning A R, Toumi R, et al. An influence of solar spectral variations on radiative forcing of climate. Nature, 2010, 467: 696-699, doi: 10.1038/nature09426.
- [120] Cahalan R F, Wen G, Harder J W, Pilewskie P. Temperature responses to spectral solar variability on decadal time scales. Geophys Res Lett, 2010, 37, L07705, doi:10.1029/2009GL041898.
- [121] Merkel A W, Harder J W, Marsh D R, Smith A K, Fontenla J M, Woods T N. The impact of solar spectral irradiance variability on middle atmospheric ozone. Geophys Res Lett, 2011, 38, L13802, doi:10.1029/2011GL047561.
- [122] Haigh J D. The Sun and Earth 's Climate, Living Rev. Solar Phys, 4, lrsp-2007-2, <http://solarphysics.livingreviews.org/Articles/lrsp-2007-2/>, last access: 30 March 2011, 2007.
- [123] Wuebbles D J, Wei C F, Patten K O. Effect on stratospheric ozone and temperature during the Maunder Minimum. Geophys Res Lett, 1998, 25: 523-526.
- [124] Larkin A, Haigh J D, Djavidnia S. The effect of solar UV irradiance variations on the Earth' s atmosphere. Space Sci Rev, 2000, 94: 199-214.
- [125] Haigh J D. The role of stratospheric ozone in modulating the solar radiative forcing of climate. Nature, 1994, 370: 544-546, doi:10.1038/370544a0
- [126] Frame T H A, Gray L J. The 11 - year solar cycle in ERA - 40 data: An update to 2008. J Clim, 2010, 23: 2213-2222, doi:10.1175/2009JCLI3150.1.
- [127] Haigh J D. The effects of solar variability on the Earth's climate. Philos Trans R Soc London Ser A, 2003, 361: 95-111, doi:10.1098/rsta.2002.1111.
- [128] 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, doi:10.1175/JCLI4007.1.
- [129] Haigh J D, Blackburn M. Solar influences on dynamical coupling between the stratosphere and troposphere. Space Sci Rev, 2006, 125: 331-344, doi:10.1007/s11214-006-9067-0.
- [130] Shindell D T, Schmidt G A, Miller R L, Rind D. Northern Hemisphere winter climate response to greenhouse gas, ozone, solar, and volcanic forcing. J Geophys Res, 2001, 106, 7193-7210, doi:10.1029/2000JD900547.
- [131] Solomon S, Crutzen P J, Roble R G. Photochemical coupling between the thermosphere and the lower atmosphere: 1. Odd nitrogen from 50 to 120 km. J Geophys Res, 1982, 87: 7206-7220, doi:10.1029/JC087iC09p07206.
- [132] Jackman C H, et al. Short - and medium - term atmospheric constituent effects of very large solar proton events. Atmos Chem Phys, 2008, 8: 765-785, doi:10.5194/acp-8-765-2008.
- [133] Funke B, López - Puertas M, Gil - López S, et al. Downward transport of upper atmospheric NOx into the polar stratosphere and lower mesosphere during the Antarctic 2003 and Arctic 2002/2003 winters. J Geophys Res, 2005, 110, D24308, doi:10.1029/2005JD006463.
- [134] Ney E P. Cosmic radiation and the weather. Nature, 1959, 183: 451-452, doi:10.1038/183451a0.
- [135] Dickinson R E. Solar variability and the lower atmosphere. Bulletin of the American Meteorological Society, 1975, 56(12): 1240-1248.
- [136] Svensmark H, Friis-Christensen E. Variation of cosmic ray

- flux and global cloud coverage—a missing link in solar-climate relationships. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 1997, 59 (11): 1225-1232.
- [137] Tinsley B A, Rohrbaugh R P, Hei M, et al. Effects of image charges on the scavenging of aerosol particles by cloud droplets and on droplet charging and possible ice nucleation processes. *J Atmos Sci*, 2000, 57: 2118-2134.
- [138] Zhou L, Tinsley B A. Production of space charge at the boundaries of layer clouds. *J Geophys Res*, 2007, 112, D11203, doi:10.1029/2006JD007998.
- [139] Tinsley B A, Rohrbaugh R P, Hei M. Electroscavenging in clouds with broad droplet size distributions and weak electrification. *Atmos Res*, 2001, 59-60: 115-135, doi:10.1016/S0169-8095(01)00112-0.
- [140] Khain A, Arkipov V, Pinsky M, et al. Rain enhancement and fog elimination by seeding with charged droplets. Part I: Theory and numerical simulations. *J Appl Meteorol*, 2004, 43: 1513-1529, doi:10.1175/JAM2131.1.
- [141] Evan A T, Heidinger A K, Vimont D J. Arguments against a physical long-term trend in global ISCCP cloud amounts. *Geophys Res Lett*, 2007, 34, L04701, doi:10.1029/2006GL028083.
- [142] Brown B H. Short-term changes in global cloud cover and in cosmic radiation. *J Atmos Sol Terr Phys*, 2008, 70(7): 1122-1131, doi:10.1016/j.jastp.2008.02.003.
- [143] Harrison R G, Stephenson D B. Empirical evidence for a nonlinear effect of galactic cosmic rays on clouds. *Proc R Soc A*, 2005, 462: 1221-1233, doi:10.1098/rspa.2005.1628.
- [144] Svensmark H, Bondo T, Svensmark J. Cosmic ray decreases affect atmospheric aerosols and clouds. *Geophys Res Lett*, 2009, 36, L15101, doi: 10.1029/2009GL038429.
- [145] Sun B, Bradley R S. Solar influences on cosmic rays and cloud formation: A reassessment. *J Geophys Res*, 2002, 107(D14), 4211, doi:10.1029/2001JD000560.
- [146] Sloan T, Wolfendale A W. Testing the proposed causal link between cosmic rays and cloud cover. *Environ Res Lett*, 2008, 3, 024001, doi:10.1088/1748-9326/3/2/024001.
- [147] Kristjánsson J E, Stjern C W, Stordal F, Fjaeraa A M, Myhre G, Jonasson K. Cosmic rays, cloud condensation nuclei and clouds—A reassessment using MODIS data. *Atmos Chem Phys*, 2008, 8(24): 7373-7387.
- [148] Calogovic J, Albert C, Arnold F, Beer J, Desorgher L, Flueckiger E O. Sudden cosmic ray decreases: No change of global cloud cover. *Geophys Res Lett*, 2010, 37, L03802, doi:10.1029/2009GL041327.

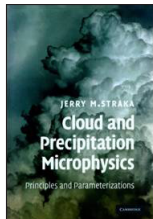
## 新书架

### NEW BOOK

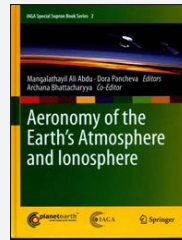
 感兴趣的读者可以到中国气象局图书馆阅览室阅读或凭索书号借阅



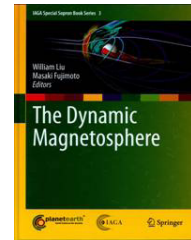
Geosphere-Biosphere Interactions and Climate  
《地圈—生物圈的相互作用及气候》  
编著者: Lennart O. Bengtsson等  
出版者: Cambridge University Press  
出版年: 2010



Cloud and Precipitation Microphysics  
《云和降水的微观物理学》  
编著者: Jerry M. Straka等  
出版者: Cambridge University Press  
出版年: 2011



Aeronomy of the Earth's Atmosphere and Ionosphere  
《高层大气物理学——地球大气层和电离层》  
编著者: Mangalathayil Ali Abdu等  
出版者: Springer  
出版年: 2011



The Dynamic Magnetosphere  
《磁层动力学》  
编著者: William Liu等  
出版者: Springer  
出版年: 2011