0254-6124/2011/31(5)-549–18 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Zhang Liang, Wang Chi, Fu Suiyan. Solar variation and global climate change. *Chin. J. Space Sci.*, 2011, **31**(5): 549-566

太阳活动与全球气候变化 *

张 亮[1,2] 王 赤[1] 傅绥燕[3]

1(中国科学院空间科学与应用研究中心 空间天气学国家重点实验室 北京 100190)

2(中国科学院研究生院 北京 100049)

3(北京大学地球与空间科学学院 北京 100871)

摘 要 太阳不断向地球辐射电磁波和粒子, 太阳辐射是地球气候系统最主要的能量来源. 地球气候系统对太阳活动的响应是一个复杂的过程, 包括辐射过程、动力学过程以及微观物理过程等. 根据太阳辐射的卫星观测结果和重建结果, 例举了古气候、温度、大气环流和云量等方面太阳影响气候的观测证据, 论述了太阳影响气候的三种可能机制, 即太阳总辐射变化可以影响地表温度, 并通过海–气耦合改变大气环流; 太阳紫外辐射通过调制平流层的温度和风场影响下面的对流层; 太阳通过行星际磁场调制银河宇宙线, 而银河宇宙线通过电离大气影响云量, 进而改变地球的能量收支.

关键词 太阳辐射总剂量 (TSI), 太阳紫外辐射 (SUR), 银河宇宙线 (GCR), 气候变化

中图法分类号 P 353

Solar Variation and Global Climate Change

ZHANG Liang[1,2] WANG Chi[1] FU Suiyan[3]

1(*State Key Laboratory of Space Weather, Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

2(*Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049)

3(*School of Earth and Space Science, Peking University, Beijing* 100871)

Abstract The Sun continually radiates electromagnetic wave and particles to Earth, and the solar radiation is the main energy resource for the Earth's climate system. The response of climate system to the solar variation is very complex, including radiative process, dynamic process and microphysics process. This paper reviews the measurements from satellites and reconstruction results by other proxies of the solar irradiance variation, enumerates some climate observational evidence in the fields of paleoclimate, temperature, atmospheric circulations and clouds affected by the solar activity. The three main possible mechanisms by which the solar variation may influence the global climate include: the variability of total solar irradiance could change the earth surface temperature, and thus change the atmospheric circulation via the ocean-atmosphere couple; the solar ultra violet radiations modulate the stratospheric temperature and wind field by heating ozone, and the stratosphere response could then affect the lower troposphere by stratosphere troposphere coupling; the solar modulates

* 国家重点实验室专项经费和海洋公益性行业专项经费 (201005017-3) 共同资助

2011-05-27 收到原稿, 2011-07-12 收到修定稿

E-mail: cw@spaceweather.ac.cn

galactic cosmic ray through interplanetary magnetic field, and galactic cosmic ray may change the cloud cover via ionizing the atmosphere, which could further change the Earth's energy budget.

Key words Total Solar Irradiance (TSI), Solar Ultraviolet Radiation (SUR), Galactic Cosmic Ray (GCR), Climate change

1 引言

太阳辐射作为地球气候系统最主要的能量来源, 决定了地球的能量收支. 如图 1 所示 [1], 太阳直接辐射到地球总能量的约 30% 会被云和地表反射回太空, 20% 被大气吸收, 最终仅约 50% 被地表吸收. 地表能量主要以热辐射方式向外散失, 但除小部分直接穿过大气辐射出去, 大部分将被云和温室气体吸收然后辐射回地表. 还有一部分地表能量以热传导和潜热方式传输到大气中, 这部分能量可以驱动大气流动和降水, 对天气过程具有重要作用. 在地球的能量平衡过程中, 云和地表冰雪可以影响能量收入, 云和温室气体控制着地球的能量支出, 其作为影响能量平衡的间接因素受到很大关注. 地球的能量平衡过程决定了天气和气候变化, 而太阳辐射是这一过程的直接能量来源, 太阳活动必然会对气候变化产生重要影响.

Herschel 在 1801 年首次提出太阳活动可能影响气候系统, 他推测太阳黑子和英国的局地气候可能存在联系 [2]. 早期对太阳变化规律和气候变化规律了解很少, 此后两百年间, 人们继续投入大量工作进行这方面的研究, 但对于太阳和气候的关系一直没有得到明确的结论. 在近两个世纪中, 尤其是最近半个世纪以来, 全球气候发生了显著的变化. 为了评估有关气候变化问题的科学信息, 1988 年成立了政府间气候委员会 (IPCC). 图 2 显示了 IPCC 第四次报告发布的已观测到的气候变化 [3], 从图 2(a) 中可以看出, 最近 150 年来全球平均温度明显上升, 而近 50 年 (1956–2005 年) 来的变暖趋势几乎是近 100 年 (1906–2005 年) 的两倍, 而全球海平面上升 (见图 2b) 及大范围积雪和冰融化 (见图 2c) 都表明全球正在变暖. 伴随全球变暖, 地球大气层的 CO_2 浓度从 18 世纪中期的约 575 mg/m^3 上升到现在的约 780 mg/m^3, 其他温室气体浓度, 例如 CH_4, N_2O 等也显著上升. IPCC (2007 年) 认为, 自从 20 世纪中期以来, 大部分观测到的全球平均温度的升高很可能是由于人为温室气体浓度的增加所导致的. 但是关于气候变化过程中人为因素的作用, 目前存在非常大的争议, 例如 Scafetta 认为 1970 年以来的全球变暖至少 60% 可以归因于太阳周期活动的变化 [4]. 为了评估人类活动和太阳活动对气候的贡献, 有必要了解

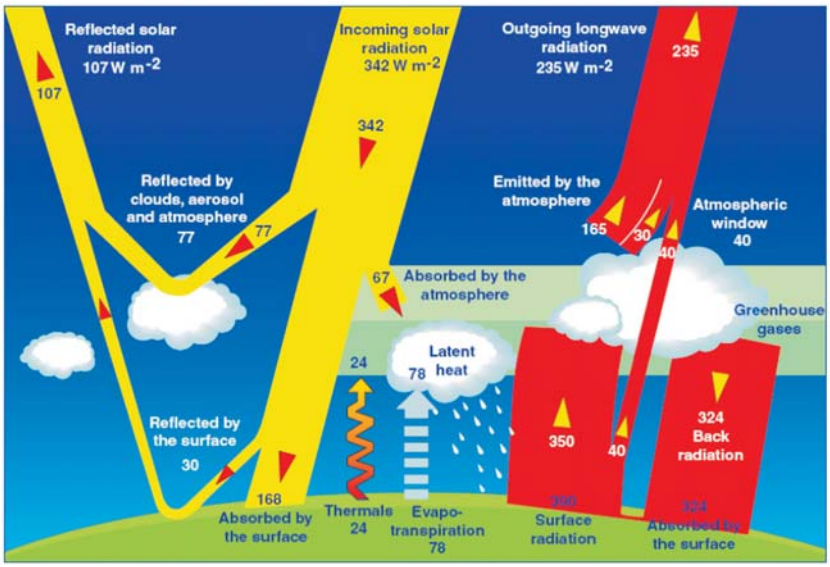


图 1 全球平均大气能量收支 [1]

Fig. 1 Globally average energy budget of the atmosphere[1]

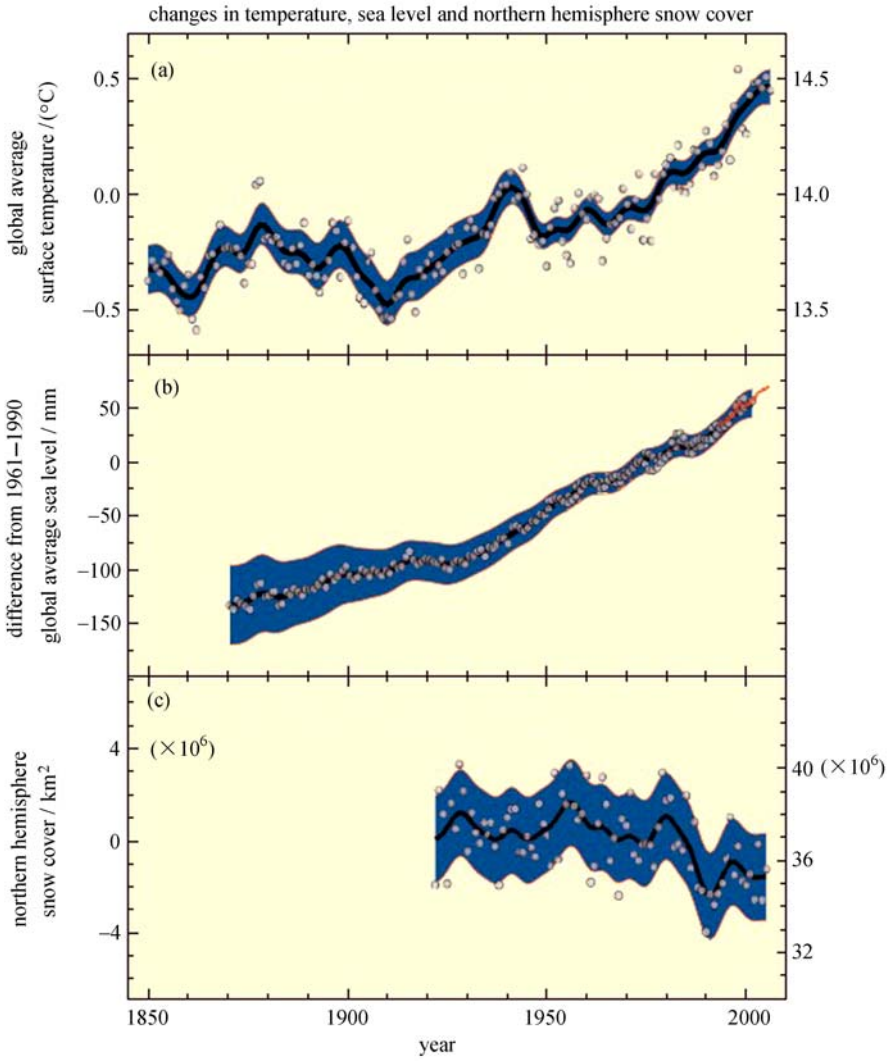


图 2 已观测到的全球平均地表温度、全球平均海平面及 3–4 月北半球积雪的变化 (所有变化差异均相对于 1961–1990 年的相应平均值. 各平滑曲线表示 10 年平均值, 各圆点表示年平均值)[3]

Fig. 2 Observed changes in global average surface temperature, global average sea level, and Northern Hemisphere snow cover from March to April (All differences are relative to corresponding averages for the period of 1961–1990. Smoothed curves represent decadal averaged values while circles show yearly values)[3]

太阳活动对气候的影响机制, 近些年这方面的研究已有很大进展.

根据卫星对太阳辐射的观测, 到达地球的总太阳辐射剂量 (Total Solar Irradiance, TSI) 约为 342 $W\cdot m^{-2}$, 考虑到云层和地表反射, 实际被地表和大气吸收的太阳能量约 239 $W\cdot m^{-2}$. 太阳黑子的活动具有 11 年周期, TSI 同样也有 11 年周期变化. 在太阳黑子极大年 (sunspot cycle maximum) 和太阳黑子极小年 (sunspot cycle minimum) 之间, 太阳辐射总剂量的变化幅度约 0.17 $W\cdot m^{-2}$, 仅为 0.07%. 如果太阳辐射变化 1 $W\cdot m^{-2}$ 能导致温度变化 0.5 K[3], 那么太阳辐射总剂量的 11 年周期变化仅能引起地球温度发生 0.07 K 的变化. 但事实上, 最近 100 年 (1906 年到 2006 年) 的全球温度变化的线性趋势为 0.74 K[3], 特别是 1975 年以来, 全球表面温度每十年增长 0.2 K[5], 这些观测结果很难用温度对太阳辐射变化的线性响应来解释. 如果气候变化主要源于太阳活动, 那么这种反差说明目前对太阳变化规律的认识还很不全面, 而且气候系统对太阳可能并非简单的线性响应机制. 因此, 需要增加对太阳辐射变化的了

解, 并且需要寻找可能存在的更复杂的非线性响应机制.

人类大约在 400 年前开始对黑子进行观测, 对太阳的变化规律有了一些科学的认识. 到目前为止, 太阳辐射的卫星观测仅仅有 30 多年的历史, 虽然存在不同卫星数据的校准问题, 但还是已经使用各种方法利用卫星数据建立了最近 30 多年的太阳辐射变化模式. 通过卫星数据, 目前对一个太阳 11 年活动周期内的短期辐射变化已经比较了解, 但是对更长期的变化还有很大争议. 对于卫星观测之前的太阳辐射, 需要根据各种代用指标来重建, 比如宇宙线同位素、太阳黑子数、太阳周期长度和太阳磁场等. 最近几个世纪的太阳辐射总剂量变化已经被重建出来 [6−7], 但是这些重建结果彼此并不统一, 尚不能准确表达历史上的太阳辐射变化.

目前已经提出多种太阳活动影响气候的可能机制, 这些机制通过辐射过程、动力学过程和微观物理过程等将太阳活动与气候变化联系起来. 大量观测表明, 太阳辐射总剂量的 11 年周期的微小变化会引起大气和海洋显著的响应 [8−13], 模型结果也表明可以通过海–气耦合放大 TSI 对局地气候的影响 [14]. 太阳紫外辐射 (UV) 在平流层被臭氧吸收, 太阳紫外辐射能够通过光化学反应控制臭氧的产生速率. 尽管太阳紫外辐射的能量只占 TSI 的很小一部分, 但太阳紫外辐射的 11 年周期变化幅度却很大, 太阳紫外辐射的变化可以对平流层的温度和风场产生重要影响. 观测发现, 赤道平流层顶对太阳紫外辐射的 11 年周期变化有一个约 2 K 的响应, 同时在赤道下平流层也有一个响应区域 [15]. White 等发现, 热带下对流层温度异常 (约 0.2 K) 大于热带洋面温度异常, 热带中上层对流层温度异常更大, 达到约 0.5 K, 热带平流层下层温度异常大约 1 K, 即越往高处温度异常越大, 他们据此认为可能存在一种自上而下的通过太阳紫外辐射影响平流层进而影响对流层的机制 [16−17]. 太阳可以通过太阳磁场调制银河宇宙线 (GCR), 太阳磁场对银河宇宙线具有屏蔽作用, 因而银河宇宙线通量与太阳黑子 11 年活动周期具有明显的反相关性. 银河宇宙线通量在太阳黑子奇数活动周和偶数活动周不同, 因此银河宇宙线还具有 22 年的周期性 [18]. 此外, 太阳活动还可以通过 CME 事件产生持续十几天左右的 Forbush 下降事件 [19] 以及通过行星际磁场的各向异性导致银河宇宙线具有日变化特征 [20]. 银河宇宙线由于能量较高, 到达地球后能电离大气, 进而影响全球大气电过程. Ney 在 1959 年首先提出宇宙线可能会影响气候 [21], Dickinson 和 Tinsley 又分别提出, 银河宇宙线可以通过电离大气产生离子和通过调节全球电流影响云量 [22−23].

关于太阳与气候系统的关系已有很多研究工作 [1,24−31], 本文所综述的是目前对太阳活动与地球气候系统关系的最新认识.

2 太阳辐射变化及其重建工作

太阳常数经常被用来描述太阳辐射强度, 但实际上太阳辐射强度并不是一个常数, 无论是总辐射强度还是谱段辐射强度, 都存在各种时间尺度的变化.

太阳的黑体辐射温度约 5770 K, 表面分为宁静区和活动区, 宁静区温度约 6050 K. 太阳活动高年, 活动区黑子数增加, 黑子温度约 5420 K, 这会降低太阳辐射强度, 但耀斑面积也会增加, 耀斑温度约 6200 K, 这会增加太阳辐射强度. 太阳黑子和耀斑的作用相反, 总的效果是使太阳辐射总剂量在太阳活动高年增加而在太阳活动低年下降, 太阳辐射总剂量的 11 年周期变化幅度约 0.1%. 伴随太阳 27 天自转, 太阳辐射总剂量还有 27 天变化, 幅度约 0.2%. 在更短的时间尺度, 存在幅度约 0.003% 的 5 min 太阳辐射总剂量波动. 此外, 大的耀斑中太阳辐射总剂量可以增加 0.015%[32].

太阳辐射总剂量的卫星观测始于 1978 年, 因能排除大气的影响, 卫星测量相比地面观测更加准确. 虽然由于卫星寿命原因, 先后使用不同卫星进行测量, 但不同卫星覆盖了全部时间段, 这使建立完整的太阳辐射总剂量变化曲线成为可能. 太阳辐射总剂量在太阳活动 11 年周期内的变化幅度约 1 $W\cdot m^{-2}$, 而不同仪器观测结果相差却可以达到 5 $W\cdot m^{-2}$ (见图 3), 如何校准不同卫星的数据成为一个新的问题. 事实上, 目前重建的太阳辐射总剂量模型并不唯一. 由于不同方法得到的结果并不完全一致, 尚不能确定太阳辐射总剂量的长期变化趋势. 但这 30 年的卫星观测大大提升了对太阳辐射短期变化的认识, 更重要的是为其他重建太阳辐射的方法提供了标准.

目前利用卫星数据建立的三种太阳辐射总剂量模型是 IRMB, ACRIM 和 PMOD[34−36]. 对于 1996 年之前的太阳辐射总剂量, 三种方法采用的数据来源

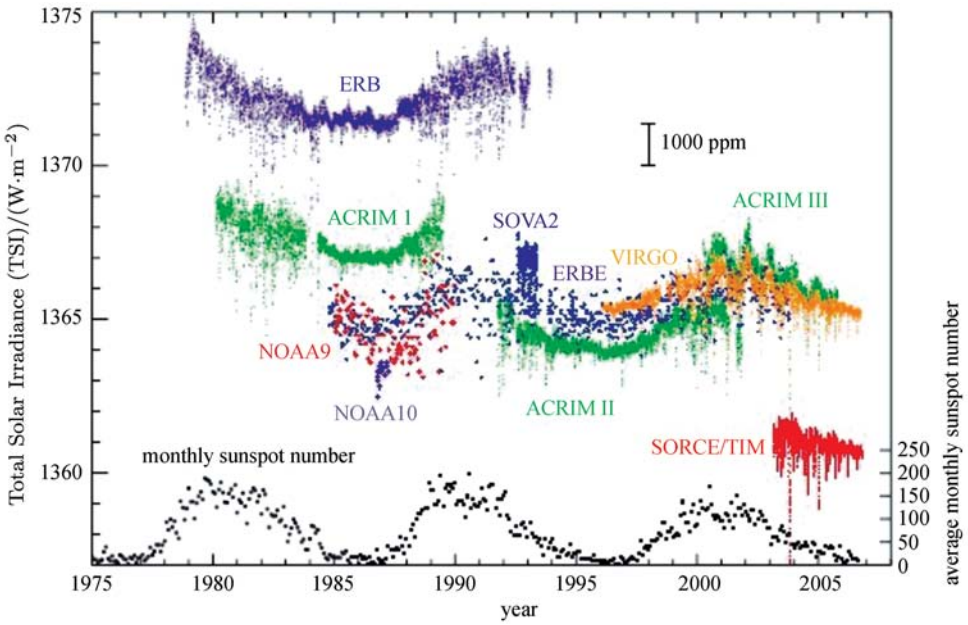


图 3 1978 年以来不同卫星上的辐射探测计日平均太阳辐射总剂量的比较 [33]

Fig. 3 Daily mean TSI from radiometer on different satellites since 1978[33]

相同, 但组织方式和校准方法不同, 1996 年之后分别使用了不同卫星的观测数据, 三种重建结果如图 4 所示. 在图 4 中, 比较 1985 年和 1996 年这两个太阳黑子极小年的太阳辐射总剂量, 可以看到 ACRIM 呈上升趋势, 而 PMOD 则基本没有变化. 这两种结果的差异引发了很大的争论, 并给判断太阳辐射总剂量的长期变化带来了困难. Willson 等 [35] 认为, PMOD 的结果是校准卫星数据时人为因素影响的, 他们赞同 ACRIM 关于太阳辐射总剂量存在每 10 年上升 0.05% 趋势的结论.

Lockwood 等 [37] 根据太阳辐射与宇宙线的反相关性对三种太阳辐射总剂量重建结果进行了检验, 发现 PMOD 更可靠, 不支持 ACRIM 的结果. 而 Scafetta 等 [38] 的最新模型结果再一次支持 ACRIM 在 1986 和 1996 的连续两个太阳黑子极小年间太阳辐射总剂量明显上升 (约 0.033%) 的结论.

但是根据太阳表面附近的磁力线图重建的太阳辐射总剂量与 ACRIM 结果符合得不好, 而与 PMOD 符合得很好 [39−40]. 当前的气候模型一般都假定过去 30 年间太阳辐射总剂量没有发生显著变化, 如果太阳辐射总剂量确实存在一个明显的上升趋势, 那么太阳对气候的影响很可能被低估了. 由于目前这三种重建结果对于太阳辐射总剂量的长期变化存在很大争论, 这给我们判断太阳辐射总剂量对气候的影响带来了很大的障碍.

除了利用直接卫星观测数据外, 还可以通过其他方法间接重建历史上的太阳辐射. 千万年以上的时间尺度的太阳辐射强度变化主要源于恒星内部的演化, 而短时间尺度的太阳辐射变化主要源于太阳表面磁场的变化. 早期曾用恒星比较的方法重建太阳辐射, 这曾是估计太阳辐射长期变化的主要方法. 但这种方法建立在一定假设基础上, 物理机制不很明显, 而且人为因素很强, 后来逐渐被取代 [41]. 目前主要利用太阳表面附近的磁力线图、太阳黑子数以及宇宙线同位素等重建太阳辐射强度, 它们分别对应几个太阳活动周期、几百年以及千年以上的时间尺度.

几百年时间尺度的太阳辐射总剂量一般从蒙德极小期开始重建, 蒙德极小期处于 1645–1715 年期间. 一方面是因为重建太阳辐射总剂量需要黑子观测数据, 系统的黑子观测直到望远镜被发明 (1610 年左右) 之后才成为可能; 另一方面是因为蒙德极小期期间不但太阳黑子数非常少, 而且气温也比现在低, 这段时期对研究太阳变化和气候变化都具有重要意义. 早期的重建工作认为, 蒙德极小期以来太阳辐射总剂量增加了 0.05%∼0.5%[42−43], Fligge 和 Solanki 的计算结果显示, 1700 年以来太阳紫外辐

射增加了 0.31%, 紫外波段增加了 3.0%[44], 而 Lean[6] 的计算结果显示 1675 年以来太阳紫外辐射增加了约 0.2%, 紫外波段增强了约 0.7%. 以上这些方法都是通过恒星比较来估计太阳辐射长期变化的, Solanki 等 [45−46] 提出一个基于开放磁通量的太阳辐射长期变化机制, 开放磁通量可以通过黑子计算得到. Krivova 等 [47] 采用 Solanki 等的方法重新计算了 1700 年以来太阳辐射总剂量的变化, 他们的结果显示太阳辐射总剂量增加了约 1.3 $W\cdot m^{-2}$ 左右 (约 0.1%), 比之前的结果小很多. 图 5 显示了使用不同重建方法所得到的蒙德极小期以来的太阳辐射总剂量变化曲线 [30], 虽然不同方法得到的太阳辐射总剂量变化幅度不同, 但都一致显示当前的太阳辐射总剂量强度是最近 400 年以来的最大值.

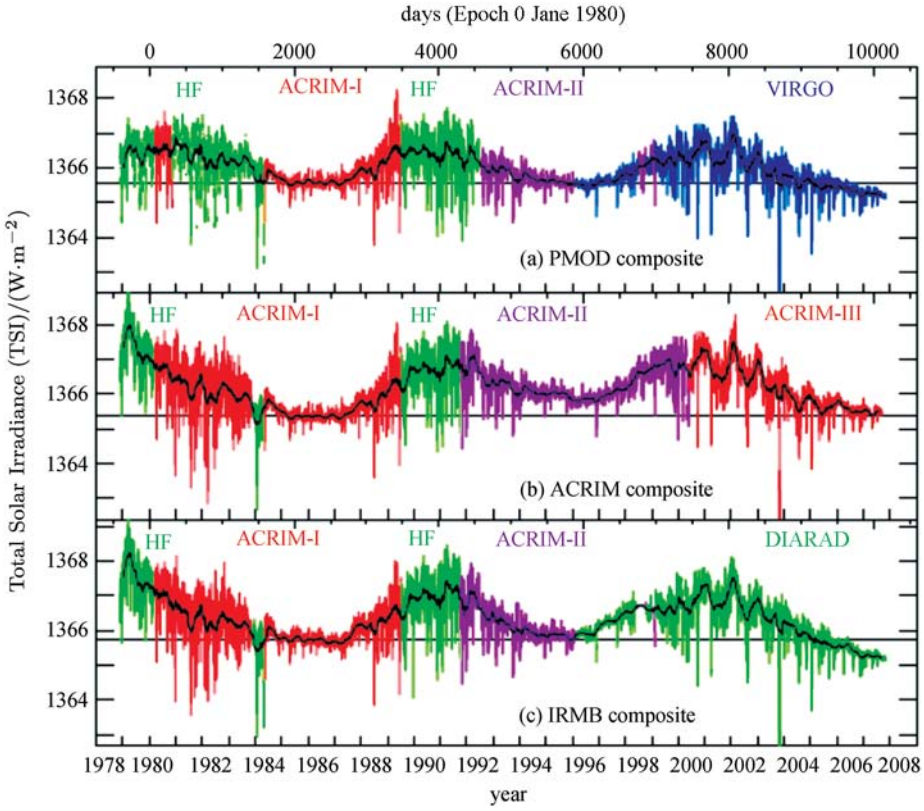


图 4 1978–2007 年的太阳辐射总剂量重建结果 [30]

Fig. 4 Composites of Total Solar Irradiance (TSI) during 1978–2007 [30]

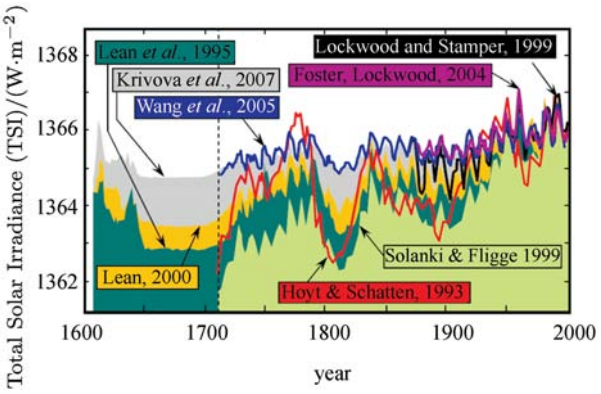


图 5 使用不同方法建立的过去太阳辐射总剂量变化结果 [30]

Fig. 5 Reconstructions of past variations in TSI using different solar proxies[30]

因为蒙德极小期之前没有太阳黑子观测记录, 太阳辐射变化主要利用同位素 ^{14}C 和 ^{10}Be 来重建, 它们是宇宙线与高层大气碰撞时产生的. Bard 等 [48] 首先利用 ^{14}C 和 ^{10}Be 重建了过去 1200 年的太阳磁场, 并且结合类日恒星的行为及太阳在过去几个世纪的变化, 得到了太阳辐射强度的长期变化, 他们的结果显示, 太阳辐射在过去 1200 年中的大部分时间都小于当前值. Steinhilber 等 [49] 在最近观测得到的太阳辐射和开放磁场通量之间关系的基础上, 用宇宙线同位素 ^{10}Be 重建了过去 9300 年以来全新世的太阳辐射总剂量变化, 这是到目前为止重建的最长

时间的太阳辐射, 这一工作为进一步研究长期的太阳和气候关系提供了基础. 他们的结果显示, 在过去 9300 年间太阳辐射总剂量经常处于变化之中, 幅度约为 $2\,\mathrm{W\cdot m^{-2}}$, 当前太阳紫外辐射比历史上的平均值大 $0.4\,\mathrm{W\cdot m^{-2}}$, 但并不是历史最高值.

太阳光谱辐射 (Spectral Solar Irradiance, SSI) 的观测始于 UARS 卫星上的 SOLSTICE (1980 年) 和 SUSIM (1990 年), 其观测结果显示, 在一个太阳活动周期内, 近紫外辐射变化达到百分之几. 紫外辐射虽然比太阳辐射总剂量能量小, 但是变化幅度大, 而且波长越短, 变化幅度越显著. 2003 年新发射的 SORCE 卫星上的 SIM 光谱辐射探测仪的结果显示, 在 2004–2007 年太阳活动下降期期间, 紫外辐射的减小幅度比之前估计的减小幅度大 4~6 倍 [50]. 紫外辐射可以通过臭氧影响平流层, 进而可能影响到对流层, 近些年来在气候变化研究方面受到越来越多的重视.

尽管太阳光谱辐射重建方法不如太阳辐射总剂量重建方法成熟, 特别是对于波长较短波段的重建还有些困难, 然而近些年太阳光谱辐射重建工作也有一些进展. Krivora 等 [51] 计算了 1974 年到 2007 年的太阳紫外辐射, 发现在一个太阳活动周内, 130~175 nm 波段变化幅度为 10%~15%, 这个波段辐射在热层被完全吸收; 170~200 nm 波段变化幅度为 5%~8%, 200~242 nm 波段变化为 3%, 这两个波段对于平流层和中间层光化学臭氧的产生和分解过程十分重要; 200~350 nm 波段太阳辐射是平流层的主要热源, 其变化幅度为 1%, 仍是太阳辐射总剂量变化幅度的 10 倍. 蒙德极小期以来的太阳光谱辐射变化也被重建出来, 结果显示, 1675 年以来紫外辐射波段增加约 0.7%, 红外波段增加约 0.07%[6], 尤其是 $Ly-\alpha$ 波段增加达到 50%, 但是在 1500~2500 nm 波段异常减弱 [52].

最后需要特别指出的是, 地球接受到的太阳辐射量的变化除了太阳辐射自身的变化原因以外, 地球轨道的变化也很重要. 地球公转轨道偏心率周期约为 10 万年和 40 万年, 这会影响地球接受到的总太阳辐射, 地球自转轴倾角周期约为 2 万年, 地球黄道与赤道的交角周期约为 4 万年, 这会影响太阳辐射在地球上不同纬度的分配 [1]. 对冰芯温度记录的数学分析表明, 4.1 万年、2.3 万年和 10 万年这三个周期是很显著的, 此外 40 万年周期也很重要. 米兰科维奇 1941 年首先提出了通过地球轨道参数变化影响气候的机制, 并发展出一套完整的米兰科维奇理论, 该理论认为如果地球轨道变化有利于夏季北半球高纬冰雪的融化, 将促使地球进入间冰期, 因为冰雪能够有效反射太阳辐射, 否则将促使地球进入冰期 [53].

3 太阳活动在气候系统中的观测证据

气候系统是一个非常复杂的系统, 气候变化既可能源于内在的系统演化规律, 又可能源于外在的强迫因素. 因为很难区分太阳因素和其他外界强迫因素以及系统内在因素的作用, 在气候系统中提取和确认太阳信息非常困难. 尽管如此, 还是在很多方面找到了太阳活动影响气候的证据, 如古气候、大气温度、大气环流、云量等.

3.1 太阳活动与古代气候

对于几个世纪以内的气候变化, 可以通过人类的记载进行研究, 一些历史记录表明, 局地的气候变化可能归因于太阳活动 [54−55]. 对于几千年时间尺度的气候变化, 由于缺乏观测资料, 必须通过某些介质的记录间接地获取, 例如海洋沉积物、石笋、生物遗迹等. 这些介质在漫长的历史中记录了气候的变迁. 需要注意的是, 能够影响介质记录信息过程的因素一般有很多种, 对结果进行小心验证是非常必要的.

Bond 等 [56] 分析对比了过去 12 000 年中北大西洋沉积物中冰筏碎屑和 ^{10}Be 的关系, 发现在 1000 年的时间尺度上二者有很好的相关性. 冰筏碎屑由冰山从大陆搬运到海上, 沉积物中冰筏碎屑的含量与当时的温度以及大气环流有关, 而 ^{10}Be 反映了太阳活动的强弱, 所以他们的结果说明在整个全新世时期太阳活动对北大西洋气候的长期变化都具有重要影响. Neff 等 [57] 利用阿曼北部洞穴中的石笋, 分析了 9000 年前到 6000 年前之间的 Δ^{18}O 与 ^{14}C 的变化, 发现二者具有非常好的相关性. Δ^{18}O 是 ^{18}O 与 ^{16}O 的相对丰度, 当水分蒸发时由于 ^{18}O 更重一些, 水蒸气中 ^{18}O 的含量会稍微少一些, 这种信息会随着水蒸气降落而保存在冰雪或石笋中. 石笋中的 Δ^{18}O 可以用来反映降水情况, Neff 等据此认为太阳辐射变化可能控制印度洋季风的强度. Wang 等 [58] 利用中国贵州省董哥洞穴中的石笋进行了类似的工作, 发现过去 9000 年中 Δ^{18}O 和 ^{14}C 变化的相关系数为 0.3, 在 9000 年前到 6000 年前二者相关系数为 0.39. 从图 6

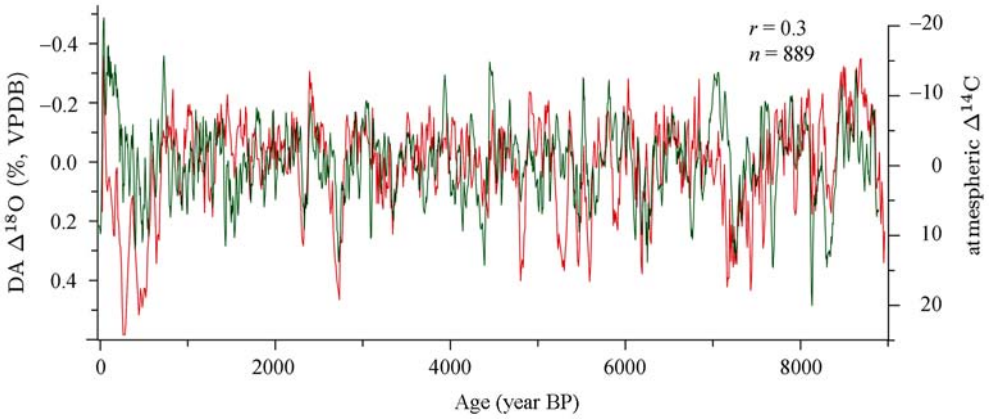


图 6 石笋 $\Delta^{18}O$ 记录 (绿线) 和大气 $\Delta^{14}C$(红线) 记录的时间序列 [58]

Fig. 6 Time series of the $\Delta^{18}O$ record (green line) and the atmospheric $\Delta^{14}C$ record (red line)[58]

可以看出, 较高的太阳辐射 (较低的 $\Delta^{14}C$, 红线) 对应较强的亚洲季风 (较低的 $\Delta^{18}O$, 绿线), 这一结果说明, 尽管在几十年时间尺度上大气和海洋环流可能更加重要, 但亚洲季风的变化可能要部分地归因于太阳活动.

尽管古气候研究工作为太阳与气候关系的提供了一些证据和线索, 但是对这些结果还需要谨慎看待. 首先, ^{14}C 和 ^{10}Be 同位素只能粗略地代表太阳变化, 研究中通常忽略地磁场的长期变化, 但事实上地磁场对宇宙线具有一定的屏蔽作用, 宇宙线同位素中也会包含地磁场变化的因素. 其次, 因为在测定气候介质或太阳介质的年龄序列过程中会有一些不确定性, 尤其是短时间尺度, 所以比较二者的时间序列时很难保证没有偏差, 甚至可能存在一定的人为选择因素 [31]. 再次, 尽管这方面的工作也没有确认古气候和温室气体之间的因果关系, 但研究发现古气候变化和温室气体变化同样具有很好的相关性 [59], 总之, 古气候提供了非常好的观测证据, 但是判定太阳活动是古气候变化的控制因素应该还需要更全面的观察研究.

3.2 太阳活动周期长度与北半球陆地温度

Friis-Christensen 和 Lassen[60] 发现太阳活动周期长度 (Solar Cycle Length, SCL) 与北半球陆地表面温度之间具有很好的相关性 (见图 7). 这一工作受到广泛关注, 有力地推动了太阳与气候方面的研究, 但需要确定的是, 这种相关关系能否代表因果关系, 以及太阳活动周期长度所代表的物理意义. Laut 和 Gundermann[61] 用更长时间的数据重复了这项的工作, 发现 20 世纪上半叶太阳活动周期长度和北半球陆地表面温度相关性依然很明显, 但是在最近几十年的全球变暖过程中, 二者相关性不明显, Thejll 和 Lassen[62], 发现在 1990 年到 2000 年的北半球陆地温度的长期变化中, 太阳活动周期长度已不再起主要作用.

为了研究太阳活动周期长度的物理意义, 已有大量工作关注太阳活动周期长度与太阳活动之间的关系. Solanki 等 [63] 发现太阳活动周期长度能影响太阳总磁场和开放磁场的缓慢变化, 而总磁通量与太阳辐射总剂量密切相关, 开放磁力线通量能调制银河宇宙线 (Galactic Cosmic Ray, GCR) 这意味着太阳活动周期长度可能反映太阳辐射总剂量或银河宇宙线的变化. 早期的工作发现, 太阳活动周期的长度与幅度之间确实存在一定的负相关性 [42,64], Solanki 等 [65]

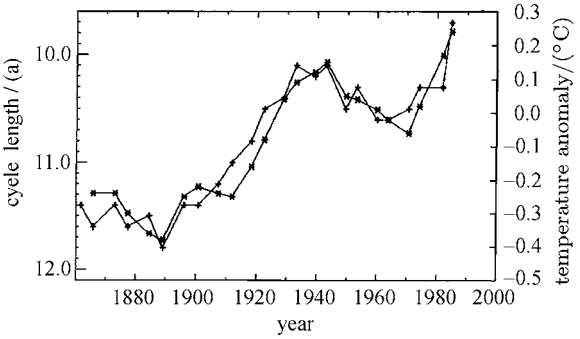


图 7 北半球陆地温度 (星号) 与太阳活动周期长度 (加号) 的关系 [60]

Fig. 7 Northern hemisphere land temperature (asterisks) and Solar Cycle Length (inverted, pluses)[60]

的模型实现了使用太阳活动周期的长度来计算幅度, 但模型中所假设的二者关系很复杂.

太阳活动周期长度平均约为 11 年, 一般介于 9 年到 13 年之间. 当前的太阳活动低谷比较异常, 从 2008 年到 2010 年共有 780 天无太阳黑子, 为 1913 年以来的最长时间. 研究结果显示, 这段时期的异常可能是由于太阳表面等离子体经向运动速度的变化造成的 [66]. 事实上, 太阳活动周期长度变化机制的研究工作最近几年才刚刚开始 [67], 还远没有完全了解太阳活动周期长度的不规则性.

3.3 太阳变化与大气温度

观测发现, 大气温度有一个 11 年周期信号, 太阳活动极大年期间几乎全球的每一个地方温度都会上升 [68−69]. Camp 和 Tung[70] 将长期温度变化从全球平均表面大气温度中减去, 发现近半个世纪以来的温度与太阳活动有一定相关性 (见图 8), 太阳活动高年比太阳活动低年的温度高 0.2 K 左右. 欧洲三个台站约 200 年的数据显示, 当地温度的变化幅度在 1 K 左右, 而年平均温度在太阳黑子极大年和太阳黑子极小年同样相差约 1 K, 太阳活动可能是温度变化的原因 [71].

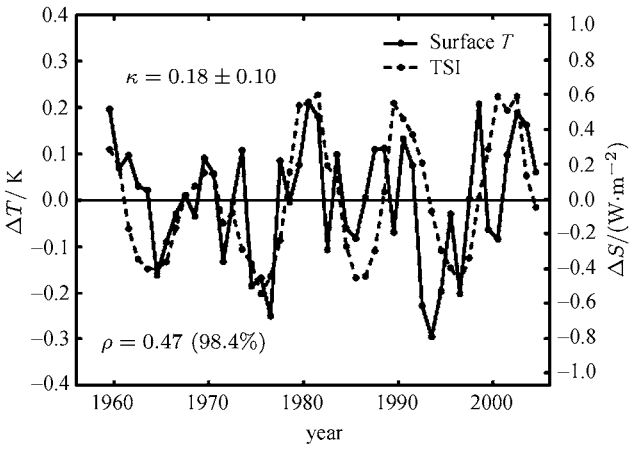


图 8 年平均、全球平均 NCEP 表面大气温度 (实线) 与总太阳辐射 (虚线) 的关系. κ 为全球平均温度对太阳常数变化的响应, ρ 为二者的相关性 [70]

Fig. 8 Annual mean, global mean NCEP surface air temperature (1959–2004), in solid line, with scale on the left axis. The dashed line shows the annual mean TSI time series, κ is the regression of global mean temperature response in K per each W·m^{-2} variation of the solar constant. ρ is the correlation coefficient between the global temperature and the TSI[70]

对于温度的长期变化, Jager 等 [72] 发现 1620—1970 年陆地温度以每世纪 0.087 K 的速度缓慢增长, 文献 [72] 的模型将这种变化的原因归结为三个因素, 即太阳环向磁场变化、太阳极向磁场变化和天气学过程. 对于近些年的全球变暖, 一些工作认为在综合考虑冰雪反照率、水气蒸发和云的反馈等过程的情况下, 地表变暖和太阳辐射强迫是一致的 [73], 但也有人认为, 太阳活动仅对 1956 年以前的地表温度变化具有重要作用, 而对 1956 年之后温度变化的贡献不超过 14%[74].

3.4 太阳 11 年周期变化与大气环流

热带大气环流是控制天气过程的主要因素, 热带大气环流包括 Hadley 环流和 Walker 环流. Hadley 环流在赤道上升并在副热带下沉, 与季风、热带降雨等关系密切; Walker 环流是由海陆热量不均引起的一种热带下对流层大气环流. 使用不同数据的研究发现了 Hadley 环流强度在太阳活动高年更强的事例 [75−76], Kodera 发现在太阳活动极大年期间赤道附近的对流活动被压缩, 而印度洋季风远离赤道的对流得到加强 [77]. 同样, 近几年也发现了在太阳活动极大年 Walker 环流增强的事例 [76], Gleisner 和 Thejll 发现在太阳活动极大年 Walker 环流在赤道西太平洋的上升运动和东太平洋的下沉运动更强 [78].

环状模反映的是中高纬度半球尺度的天气变化, 南北半球分别对应南半球环状模 (SAM) 和北半球环状模 (NAM). 环状模描述了异常大气流动中的变化, 即与季节性循环无关的变化. 早期的研究中, 一些科学家在北半球环状模和南半球环状模中发现了太阳周期的信号 [79−80], 但存在争议 [81]. 后来发现仅考虑太阳周期或准两年震荡 (Quasi-Biennial Oscillation, QBO) 时环状模对太阳的响应并不明显, 但是按准两年震荡的风向分类后, 对太阳周期的响应非常明显. 在太阳活动高年/准两年震荡西向 (Smax/QBO-W) 和太阳活动低年/准两年震荡东向 (Smin/QBO-E) 的年份, 极区漩涡很弱而且很温暖; 而在太阳活动高年/准两年震荡东向 (Smax/QBO-E) 和太阳活动低年/准两年震荡西向 (Smin/QBO-W) 的年份, 极区漩涡则很强而且很冷 [82]. 最近 Kuroda 和 Yamazaki[83] 发现, 太阳周期和准两年震荡对南半球环状模的影响均很大, 当两者同时被考虑时, 它们的作用被近似线性地叠加在一起.

3.5 宇宙线与云量

云量可以直接影响地球能量收支, 即使云量发生微小变化, 也会对气候产生重要影响. 云量可以通过反射太阳辐射产生制冷作用, 也可以通过反射地表长波辐射产生温室效应, 但总体上呈制冷作用. 近年来, 云量与银河宇宙线关系的研究充满争议. Svensmark 等 [84] 发现全球云量和银河宇宙线有非常好的相关性, 如图 9 所示, 全球云量变化与银河宇宙线通量很吻合, 而与 $F_{10.7}$ 符合得不是很好. 文献 [84] 还发现在高纬地区云量与银河宇宙线的相关性更强, 这可能与高纬地区地磁场屏蔽弱银河宇宙线更容易进入大气有关.

按照云底与地面之间的距离, 可以将云分为高云、中云、低云三类. 研究发现低云云量与银河宇宙线相关性更明显, 而中云和高云与银河宇宙线无明显相关性 [85−86], 目前云量研究的焦点集中在低云. Kristjansson 等 [87] 发现海洋低云云量与太阳辐射总剂量也具有很好的相关性. 文献 [87] 认为这是太阳辐射总剂量改变了下对流层稳定性导致的, 并且其没有找到低云云量受银河宇宙线调制的证据. 银河宇宙线与太阳辐射总剂量都有 11 年的变化周期, 并且变化趋势相反, 因此有必要通过其他时间尺度的变化区分银河宇宙线对云量的作用, Forbush 事件提供了这样的手段. Forbush 事件是指当发生日冕物质抛射 (CME) 事件时, 银河宇宙线通量迅速下降, 并在十几天内缓慢恢复的现象. Svensmark 等 [88] 发现 Forbush 事件期间低云水含量减少, 响应最强的事例中水含量减少达 7%, 文献 [88] 的研究支持太阳、宇宙线、气溶胶、液态水滴云之间在全球尺度上存在联系的观点. Laken 等 [89] 发现 Forbush 事件期间南极上对流层的云量也有所减少.

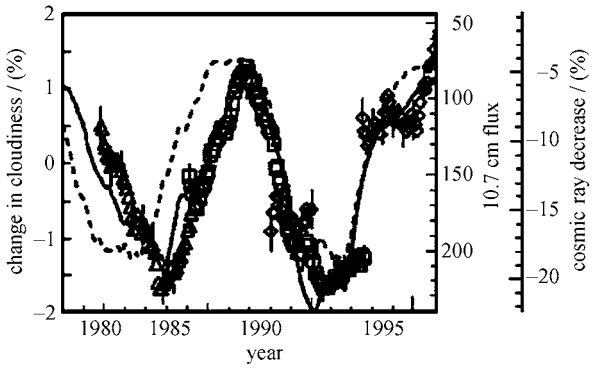


图 9 云量变化与宇宙线变化 (实线) 及太阳 $F_{10.7}$ 通量变化 (虚线) 的关系 [84]

Fig. 9 Changes in total cloud cover, the cosmic rays fluxes (solid curve) and $F_{10.7}$ cm solar flux (broken curve)[84]

Kniveton[90] 在分析 Forbush 事件与低云云量关系时发现二者关系很复杂. 在云层较厚地区云量随银河宇宙线减少而减少, 而云层较薄地区云量随银河宇宙线减少而增多. 同时 Forbush 事件也提供了一些反例, 如 Calogovic 等 [91] 发现全球云量在任何经度和纬度上对 Forbush 事件均没有响应.

总之, 对于云量与银河宇宙线是否相关, 目前虽然找到了大量证据, 但也找到了大量反例, 事实上这方面的研究仍然处于起步阶段, 而且存在很大争议.

4 太阳活动影响气候系统的可能机制

太阳活动影响气候系统的机制主要可以分为三大类, 一类是总太阳辐照度通过辐射过程影响气候, 第二类是紫外辐射通过影响平流层与对流层间的动力学过程影响气候, 第二类是太阳通过调制高能粒子影响形成云的微观物理过程影响气候.

4.1 太阳辐射总剂量

太阳辐射总剂量可以直接驱动地球的能量收支过程, 因而是太阳影响气候的最直接途径. 根据最近 30 多年的卫星观测, 太阳辐射总剂量的 11 年周期变化幅度为 0.1% 左右. Meehl 等 [92]2003 年根据数值模拟结果, 提出了太阳影响气候的自下而上 (bottom-up) 机制, 即太阳辐射总剂量通过影响温度、大气环流和云量等要素完成区域性的海–气耦合反馈机制.

在 bottom-up 机制中, 热带辐合带 (ITCZ) 和南太平洋辐合带 (SPCZ) 是太阳辐射总剂量发挥作用的关键区域, 热带辐合带是南北半球信风汇集区域, 是低纬地区热量、水气输送最密集的区域, 热带大部分云系集中分布在热带辐合带, 而热带辐合带位置根据太阳天顶点不同而穿越赤道来回移动. 南太平洋辐合带是热带辐合带的一部分, 位于赤道以南洋面, 但距赤道更远. 在太阳活动高年, 相对无云的亚热带洋面对阳光的吸收量增加, 导致蒸发量增加, 如图 10(a) 所示. 水气通过季风向热带辐合带和南太平洋辐合带汇聚, 增加当地的降水及垂直向上的对流, Hadley 和 Walker 环流因此得到加强, 同时无云区海水表面温度会因为海水蒸发带走潜热而变冷, 如图 10(b) 所示. 亚热带的下沉气流也会增强, 高压

会导致无云区的天气更加晴朗, 云量更少, 季风加强, 如图 10(c) 所示. 最终的结果是通过海–气耦合, 形成一个正反馈, 放大了太阳辐射总剂量的作用.

4.2 紫外辐射

根据卫星观测, 一个 11 年太阳活动周期内紫外辐射的变化幅度约为 6%~8%, 远大于太阳辐射总剂量的变化幅度. 与可见光到达地面被吸收不同, 紫外辐射直接被对流层中的臭氧强烈吸收并影响平流层, 平流层作为对流层的上边界, 可以通过耦合作用对对流层产生影响. 这种通过紫外辐射影响平流层进而自上而下地影响对流层的机制称为 top-down 机制.

Kodera[93] 在 1995 年认为, 异常的太阳加热可

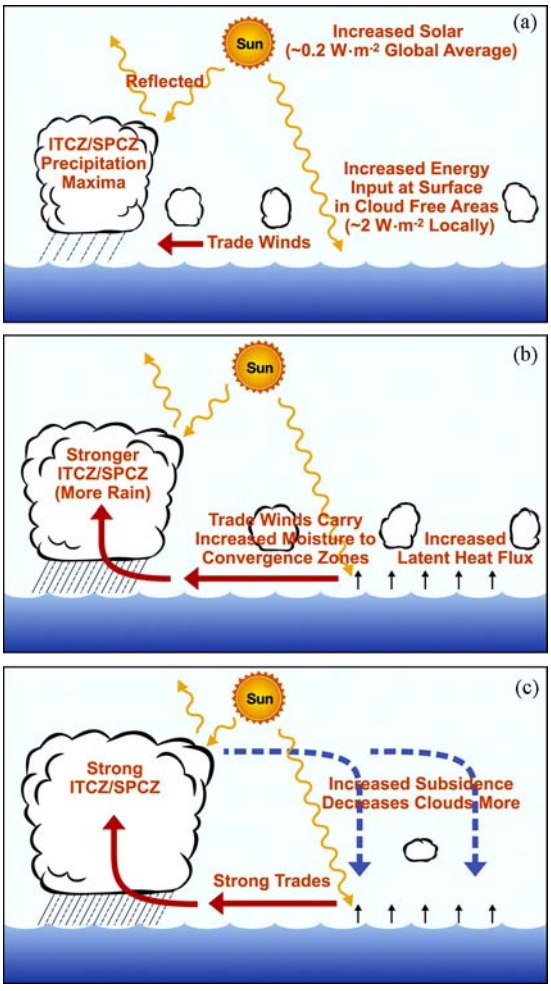


图 10 太阳强迫峰年太平洋海域通过海–气耦合作用对太阳辐射总剂量的响应过程 [14]

Fig. 10 Schematic diagram showing processes involved with the Pacific coupled air-sea response coincident with peak years of solar forcing[14]

以导致冬季平流层极区发生变化, 这可能影响行星波的向上传播, 并改变行星波动量的沉积. Kodera 和 Kuroda[79] 进一步认为, 动量沉积将会影响平流层 Brewer-Dobson(B-D) 环流的强度以及热带下平流层的温度.

Meehl 等 [94] 总结了 top-down 机制的过程: (1) 太阳活动增强, 加强对臭氧的加热作用, 并会增加臭氧含量, 导致平流层温度和纬向风发生变化; (2) 因为行星波对背景风敏感, 行星波的传播以及其能量从赤道向极区的输运会受到影响, 最终影响平流层 B-D 环流的强度; (3) 平流层的变化会通过对流层–平流层耦合影响对流层, 并增加对流层热带地区的降水.

早期紫外线影响平流层的研究中, 主要关注紫外辐射的变化, 后来发现臭氧浓度的分布也很重要 [95]. 模型结果表明, 辐射变化既能影响臭氧吸收辐射加热, 又能影响产生臭氧的光化学反应速率, 而臭氧的变化及输运会反过来影响绝热加热 [96]. 根据多个模型的平均计算结果, 目前模拟得到的臭氧分布大体处于实际观测误差范围内 [97], 但是一些细节特征与观测还不是符合得很好.

紫外辐射变化和臭氧的反馈会导致赤道平流层顶温度出现 1~2 K 的 11 年周期异常, 这将改变温度梯度以及风场. 因为行星波的传播对背景流场敏感, 通过波–流相互作用, 风场异常向极区和向下移动, 并且幅度显著增加, 最终影响大尺度 B-D 环流的强度 [79]. 在赤道纬度平流层, B-D 环流向上流动, 至平流层顶后继续向高纬流动并在极区下降, 然后从极区经下平流层流回赤道地区. 在太阳活动高年 B-D 环流减弱, 导致 B-D 环流在极区下降支的加热作用减弱, 因而极区下平流层会更冷. 同理, 由于缺少 B-D 环流在赤道的上升支的冷却作用, 赤道平流层低层会更温暖. 总之, 紫外辐射的变化最终会导致显著的平流层热力学和动力学响应.

越来越多的观测结果表明, 下平流层对太阳紫外辐射的响应可以向下传到对流层. 观测表明存在一个向下传播的北半球环状模 (NAM) 异常 [98−100], 并确认了一个平流层 B-D 环流和对流层 Hadley 环流在赤道纬度区域的相互作用 [101]. Lee 等 [102] 认为, 对流层对平流层的主要响应是 Walker 环流的增强和 Hadley 环流的增宽, 但其中有大量的季节变化, 并且响应还依赖于背景大气中温室气体的浓度.

平流层与对流层如何相互耦合是近年来研究的

热点问题, 目前已提出多种机制, 如对流层准瞬态地转风对平流层顶位势涡度结构变化的适应调整 [103], 向上传播的行星波的折射 [104] 或反射 [105] 的调整, 以及一些其他的机制 [106−107]. 在对流层平流层耦合中, 至今仍有很多问题尚未解决, 更详细的介绍可以参见相关文献 [108−109].

top-down 机制和 bottom-up 机制是太阳辐射影响气候的两种主要机制, 尽管在观测和模拟中都得到一些证实, 但是到目前为止, 各机制的内部细节并不清楚. 事实上, top-down 和 bottom-up 机制可能不是单独起作用, 而是彼此协同共同增强热带降水和云反馈, 使对流层的对太阳的响应更强烈 [94]. 图 11(a)(b) 所示为观测到的太平洋地区的温度和降水量, 图 11(c)(d) 所示为仅考虑 bottom-up 机制的模型结果, 图 11(e)(f) 所示为仅考虑 top-down 机制的模型结果, 图 11(g)(h) 所示为既考虑 bottom-up 又考虑 top-down 机制的模型结果, 显然同时考虑 bottom-up 和 top-down 机制的模型结果与观测更接近一些.

4.3 高能粒子

银河宇宙线是 55∼60 km 以下 3∼4 km 以上大气的主要电离源, 电离峰值距地面高度平均约 15 km, 且随纬度不同略有变化. 银河宇宙线通过电离作用可以影响许多大气微观物理过程, 并可能通过这些过程影响云量. 目前提出的银河宇宙线影响云量的主要机制有两种, 一种是离子诱导核化 (Ionization Modulated Nucleation, IMN) 作用, 另一种是电清除作用. 在离子诱导核化作用中, 离子为硫酸和水蒸气形成气溶胶粒子提供凝结场所, 气溶胶粒子在一定条件下可以长大成为云凝结核 (Cloud Condensation Nuclei, CCN), 提供形成云的条件. 在电清除作用中, 云边界层所带静电荷会增加气溶胶粒子被下落云滴清除的速率, 这种清除作用会对云产生一系列影响.

云室实验表明, 水蒸气直接在离子上凝结需要非常高的过饱和状态, 这在大气中是不可能的. 大气的过饱和度太小, 形成云滴需要尺度足够大的凝结核. 银河宇宙线电离大气产生的离子可能在凝结核产生过程中起重要作用, 因为凝结在离子周围的带电分子团与中性分子团相比更加稳定, 并且生长更快. 图 12 给出的是银河宇宙线通过离子诱导核化作用影响云滴形成的结果 [110], 首先, 受太阳周期调控的银河宇宙线能引起底层大气中凝结核 (CN) 数量发生变化, 但凝结核直径通常只有几纳米, 在大气的饱和度下不能凝结生成云滴. 其次, 凝结核尺寸增大 10 倍左右, 生长成有效的云凝结核 (CCN), 这个过程通常需要几个小时. 最后, 云凝结核浓度的变化将会对云产生影响. 离子诱导核化作用引起的云量变化会导致日平均短波辐射强迫发生变化, 在太阳黑子极大年和极小年相差小于 $0.24\,\mathrm{W\cdot m^{-2}}$[111], 而太阳辐射总剂量在太阳黑子极大年和极小年之间的变化幅度约为 $0.1\,\mathrm{W\cdot m^{-2}}$.

全球大气电流是银河宇宙线影响云量的另一种途径 [112]. 全球大气电流是通过大气在电离层和地表之间流动的一个电流回路, 在雷暴区的雷电活动中向电离层和地表充电, 使电离层对地表维持 250 kV 左右的电压, 在晴空区域电流从电离层流向大地, 形成回路. 全球大气电流受三个因素影响: 银河宇宙线通量的变化, 太阳高能粒子沉降的变化, 极盖电离层电势分布的变化. 虽然全球大气电流并不是完全依赖于银河宇宙线, 但是对银河宇宙线有明显的响应. 区域性的观测发现, 在银河宇宙线极大年和极小年之间, 大气电场变化 12%, 电流变化 16.5%[113]. 因为云内电导率小于大气, 在云边界处电导率梯度很大, 当电流流经云时, 电荷会在云边界层聚集形成空间电荷. 空间电荷会传给气溶胶粒子和云滴, 带电的气溶胶粒子会在中性的云滴内诱导产生镜像电荷, 并因此受到云滴的静电吸引力. 当云滴下落时, 因为静电力的作用, 气溶胶粒子和云滴的碰撞效率增强, 更多的气溶胶粒子会被下落的云滴吸收, 如图 13 所示, 这个过程叫做电清除 [114]. 在过冷云中电清除作用通过增强碰撞核化可以增加冰晶的形成. 对于薄云, 冰晶的增多可以降低对入射太阳辐射的反照率, 增加对出射红外线的反射, 对于厚的雷暴云, 冰晶的增多可以增加降水和潜热传送, 这些都能影响大气的温度和动力学过程 [23].

离子诱导核化机制中产生云凝结核的详细微观物理机制还不是很清楚, 全球电流机制提出的时间更晚, 仍需要更多的观测和模拟来证实. 关于银河宇宙线影响气候的更多内容, 可以参见文献 [115].

5 总结

太阳辐射是地球最终的能量来源, 太阳辐射的变

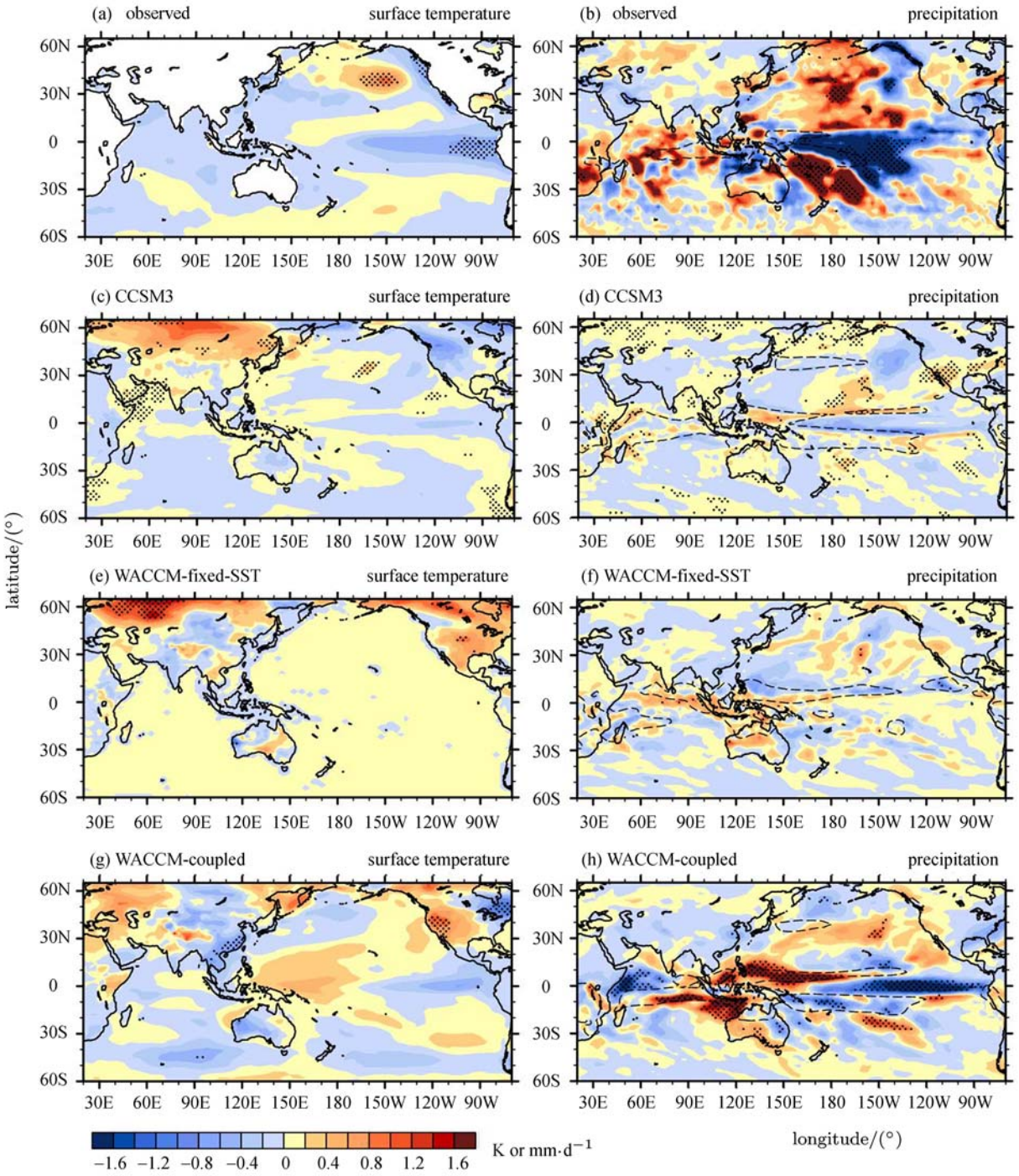


图 11 考虑不同机制的模型所得到的太平洋地区气候对太阳强迫的响应及实际观测 [94]

Fig. 11 Amplifying the Pacific climate system response to a small 11 year solar cycle forcing[94]

化很显然可以影响气候. 但是根据卫星观测, 太阳辐射总剂量的 11 年周期变化非常小, 只有约 0.1%, 如此小的太阳辐射变化能否影响气候以及如何影响气候是当前研究太阳与气候关系的难点. 对历史上太阳辐射强度的众多重建结果表明, 太阳辐射总剂量和太阳光谱辐射都存在长期变化, 尽管对于长期变化的幅度还没有统一结论, 但可以肯定当前的太阳辐射强度在过去几百年中是最高的. 对于几千年时间尺度的

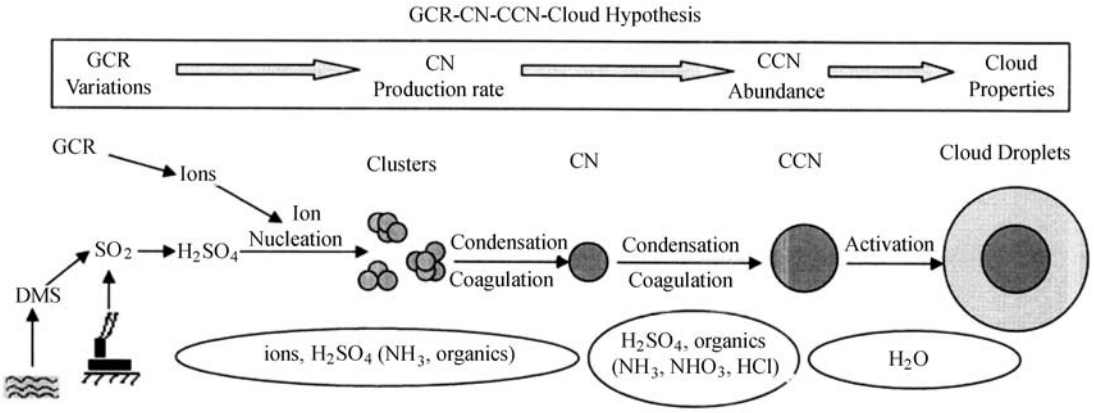


图 12 银河宇宙线、凝结核、云凝结核作用对云滴的影响 [110]

Fig. 12 Schematic illustrating of GCR-CN-CCN-cloud hypothesis[110]

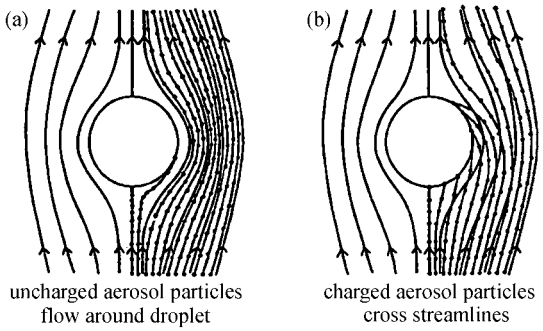


图 13 (a) 没有静电力时下落水滴周围的气溶胶粒子沿流线流动, (b) 静电力作用使气溶胶粒子横越流线运动 [114]

Fig. 13 (a) Schematic of aerosol flow around a falling droplet in the absence of electrical forces. (b) Schematic of effect of electrical forces in moving aerosol particles across streamlines[114]

太阳辐射的重建工作还很少. 已有的研究结果表明, 当前太阳辐射在历史上并不是特别显著, 当然, 目前的全球温度在几千年时间尺度的气候变迁中也不是特别突出.

相比复杂的太阳辐射变化, 气候系统的变化同样复杂, 寻找这样两个复杂系统的联系是一件非常困难的工作, 但多年的观测还是积累了大量的证据. 来自古气候方面的证据表明, 全新世以来的许多区域性气候要素 (如降水、环流等) 的变化与太阳变化具有明显的相关性. 近百年来积累了大量的太阳 11 年周期活动影响温度、大气环流、云量等的事例, 这些结果大大促进了对气候的认识. 随着更新数据的积累, 对太阳与气候系统关系的认识会越来越深刻.

太阳可以通过总辐射、紫外辐射以及宇宙线三种途径影响气候, 并且发展了三种机制, 即 bottom-up 机制, top-down 机制, GCR–云量机制. 在 bottom-up 机制中, 通过太阳辐射总剂量直接影响地表温度, 进而向上影响大气环流, 并最终通过海–气耦合形成一个正反馈. 这种机制需要更多的观测来证实, 尤其需证实太阳辐射总剂量对热带海洋的直接加热能否产生可观测的效应. top-down 机制首先通过紫外辐射影响平流层的温度和风场, 并与平流层–对流层耦合将平流层的变化向下传输到对流层. 关于平流层温度及臭氧浓度对紫外辐射响应的机制目前已经有了一定的了解, 但比较详细的机制还没有很好地建立起来. 平流层–对流层耦合也已经发展了很多机制, 但还是有许多基本问题有待研究. 银河宇宙线–云量机制相对前两种机制还比较初步, 但是因为云量能直接参与地球的能量收支, 如果这种机制确实存在, 可能会对气候有较大影响. 关于银河宇宙线电离大气的研究已经比较成熟, 但银河宇宙线能否通过电离作用影响云量仍然有很大争议, 问题的关键在于对云凝结核形成以及增长的微观物理过程还不是非常了解.

关于太阳活动与气候系统的关系, 还有许多问题需要解决. 首先, 需要弄清楚太阳活动在各种时间尺度上的变化规律, 太阳变化的规律是研究太阳–气候关系的基础. 第一, 需要发展精确一致的卫星数据重构方法; 第二, 需要深入研究太阳磁场与太阳辐射之间的物理关系, 然后利用太阳黑子及宇宙线同位素数据重建历史上的太阳辐射; 第三, 尽管在气候系统中已经找到大量与太阳活动相关的证据, 但证明这些观

测上的相关性代表物理上的因果关系, 必须提出可靠的物理机制, 目前虽然已经提出了很多机制, 但这些机制的很多细节还不完善, 而且一般只能解释问题的某一个方面; 第四, 气候系统是一个高度复杂的非线性系统, 仅靠几个太阳或气候参数来预测气候几乎是不可能的, 预测气候需要建立精确的数值模式.

在考虑太阳因素的气候模型中, 目前往往是仅针对某一方面的机制, 如 top-down 或 bottom-up, 而 GCR-云量机制还没有被引入到气候模型中. 真正成熟的气候预报模型应该综合考虑太阳、温室气体、火山、地表参数等诸多因素, 这显然还需要开展很多研究工作. 在太阳变化、太阳影响气候机制以及气候模型等方面取得的进展, 可以帮助人们更好地了解气候变化的原因及规律, 以及更精确地评估人类活动对全球气候变化的影响.

参考文献

[1] Haigh J D. The Sun and the Earth's Climate [J/OL]. *Living Rev. Solar Phys.*, 2007, **4**:2. http://solarphysics.livingreviews.org/Articles/lrsp-2007-2/

[2] Herschel W. Observations tending to investigate the nature of the Sun, in order to find the causes or symptoms of its variable of light and heat; with remarks on the use that may possibly be drawn from solar observations [J]. *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, 1801, **91**:265-318

[3] Core Writing Team, Pachauri R K, Reisinger A. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [R]. Geneva: IPCC, 2010. 104

[4] Scafetta N. Climate Change and Its Causes A Discussion About Some Key Issues [R/OL]. Virginia: Science and Public Policy Institute, 2010. http://scienceandpublicpolicy.org/images/stories

[5] Hansen J, Sato M, Ruedy R, *et al*. Global temperature change [J]. *Proc. Nat. Acad. Sci.*, 2006, **103**:14288

[6] Lean J. Evolution of the Sun's spectral irradiance since the Maunder Minimum [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2000, **27**:2425-2428

[7] Foster S S. Reconstruction of solar irradiance variations, for use in studies of global climate change: Application of recent SOHO observations with historic data from the Greenwich observations [D]. Southampton: School of Physics and Astronomy, University of Southampton, 2004

[8] Haigh J D. The impact of solar variability on climate [J]. *Science*, 1996, **272**:981

[9] Loon van H, Labitzke K. The global range of the stratospheric decadal wave. Part I: Its association with the sunspot cycle in summer and in the annual mean, and with the troposphere [J]. *J. Clim.*, 1998, **11**:1529-1537

[10] Lean J, Rottman G, Harder J, *et al*. SORCE contributions to new understanding of global change and solar variability [J]. *Solar Phys.*, 2005, **230**:27-53

[11] Lim G, Suh Y, Kim B. On the origin of the tropical Atlantic decadal oscillation based on the analysis of the ICOADS [J]. *Quart. J. Royal Meteor. Soc.*, 2006, **132**:1139-1152

[12] White W B, Lean J, Cayan D R, *et al*. Response of global upper ocean temperature to changing solar irradiance [J]. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**:3255-3266

[13] Weng H. The influence of the 11 yr solar cycle on the interannual-centennial climate variability [J]. *J. Atmos. Solar Terr. Phys.*, 2005, **67**:793-805

[14] Meehl G A, Arblaster J M, Branstator G, *et al*. A coupled air-sea response mechanism to Solar forcing in the Pacific region [J]. *J. Clim.*, 2008, **21**:2883-2897

[15] Frame T H A, Gray L J. The 11-year solar cycle in ERA-40 data: an update to 2008 [J]. *J. Clim.*, 2009, **23**:2213-2222

[16] White W B, Dettinger M D, Cayan D R. Sources of global warming of the upper ocean on decadal period scales [J]. *J. Geophys. Res.*, 2003, **108**:3248

[17] White W B. Response of tropical global ocean temperature to the Sun's quasi-decadal UV radiative forcing of the stratosphere [J]. *J. Geophys. Res.*, 2006, **111**:C09020

[18] Singha M, Singha Y P, *et al*. Solar modulation of galactic cosmic rays during the last five solar cycles [J]. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 2008, **70**:169-183

[19] Cane H V. Coronal mass ejections and Forbush decreases [J]. *Space Sci. Rev.*, 2000, **93**:55-77

[20] Oh S, Yi Y, Bieber J. Modulation cycles of galactic cosmic ray diurnal anisotropy variation [J]. *Solar Phys.*, 2010, **262**:199-212

[21] Ney E P. Cosmic radiation and the weather [J]. *Nature*, 1959, **183**:451-452

[22] Dickinson R E. Solar variability and the lower atmosphere [J]. *Amer. Meteor. Soc. Bull.*, 1975, **56**:1240-1248

[23] Tinsley B A. Influence of solar wind on the global electric circuit, and inferred effects on cloud microphysics, temperature, and dynamics in the troposphere [J]. *Space Sci. Rev.*, 2000, **94**:231-258

[24] Reid G C. Solar variability and the Earth's climate: Introduction and overview [J]. *Space Sci. Rev.*, 2000, **94**:1-11

[25] Rind D, The Sun's Role in Climate Variations [J]. Science, 2002, **296**:673-677

[26] Haigh J D, The effects of solar variability on the Earth's climate [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2003, **361**:95-111

[27] Beer J, Vonmoos M, Muscheler R. Solar variability over the past several millennia [J]. *Space Sci. Rev.*, 2006, **125**:67-79

[28] Foukal P, Frohlich C, Spruit H, *et al*. Variations in solar luminosity and their effect on the Earth's climate [J]. *Nature*, 2006, **443**:161-166

[29] Jager de C, Usoskin I. On possible drivers of Sun-induced climate changes [J]. *J. Atmos. Solar Terr. Phys.*, 2006, **68**:2053-2060

[30] Gray L J, Beer J, Geller M, *et al*. Solar influences on climate [J]. *Rev. Geophys.*, 2010, **48**:RG4001

[31] Lockwood M, solar induced climate effects [C]//Encyclopedia of Sustainability Science and Technology, Springer, 2010

[32] Fröhlich C, Lean J. Solar radiative output and its variability: evidence and mechanisms [J]. *Astron. Astrophys. Rev.*, 2004, **12**:273-320

[33] Mishchenko M, Cairns B, Kopp G, *et al*. Accurate monitoring of terrestrial aerosols and total solar irradiance: Introducing the Glory mission [M]. Boston MA ETATS-UNIS: American Meteorological Society, 2007. 677-691

[34] Ohlich Fr C, Total Solar irradiance variations since 1978 [J]. *Adv. Space Res.*, 2002, **29**:1409-1416

[35] Willson R C, Mordvinov A V. Secular total solar irradiance trend during Solar cycles 21-23 [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2003, **30**:1199

[36] Dewitte S, Crommelynck D, Mekaoui S, *et al*. Measurement and uncertainty of the long-term total solar irradiance trend [J]. *Solar Phys.*, 2004, **224**:209-216

[37] Lockwood M, Frohlich C. Recent oppositely directed trends in solar climate forcings and the global mean surface air temperature. II. Different reconstructions of the total solar irradiance variation and dependence on response time scale [J]. *Proc. Royal Soc. A: Math. Phys. Eng. Sci.*, 2008, **464**:1367

[38] Scafetta N, Willson R C. ACRIM-gap and TSI trend issue resolved using a surface magnetic flux TSI proxy model [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2009, **36**:L05701

[39] Krivova N A, Solanki S K, Wenzler T. ACRIM-gap and total solar irradiance revisited: Is there a secular trend between 1986 and 1996 [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2009, **36**:L20101

[40] Wenzler T, Solanki S K, Krivova N A. Reconstructed and measured total solar irradiance: Is there a secular trend between 1978 and 2003 [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2009, **36**:L11102

[41] Hall J C, Lockwood G. The chromospheric activity and variability of cycling and flat activity solar-analog stars [J]. *Astrophys. J.*, 2004, **614**:942

[42] Hoyt D V, Schatten K H. A discussion of plausible solar irradiance variations, 17001992 [J]. *J. Geophys. Res.*, 1993, **98**:18-18

[43] Lean J, Beer J, Bradley R. Reconstruction of solar irradiance since 1610:Implications for climate change [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1995, **22**:3195-3198

[44] Fligge M, Solanki S. The solar spectral irradiance since 1700 [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2000, **27**:2157-2160

[45] Solanki S K, Fligge M. Reconstruction of past solar irradiance [J]. *Space Sci. Rev.*, 2000, **94**:127-138

[46] Solanki S, *et al*. Secular variation of the Sun's magnetic flux [J]. *Astron. Astrophys.*, 2002, **383**:706-712

[47] Krivova N, Balmaceda L, Solanki S. Reconstruction of Solar total irradiance since 1700 from the surface magnetic flux [J]. *Astron. Astrophys.*, 2007, **467**:335-346

[48] Bard E, Raisbeck G, Yiou F, *et al*. Solar irradiance during the last 1200 years based on cosmogenic nuclides [J]. *Tellus B*, 2000, **52**:985-992

[49] Steinhilber F, Beer J, Fr hlich C. Total solar irradiance during the Holocene [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2009, **36**:L19704

[50] Harder J W, Fontenla J M, Pilewskie P, *et al*. Trends in solar spectral irradiance variability in the visible and infrared [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2009, **36**:L07801

[51] Krivova N A, Solanki S K, Wenzler T, *et al*. Reconstruction of solar UV irradiance since 1974 [J]. *J. Geophys. Res.*, 2009, **114**:D00I04

[52] Krivova N A, Vieira L E A, Solanki S K. Reconstruction of solar spectral irradiance since the Maunder minimum [J]. *J. Geophys. Res.*, 2010, **115**:A12112

[53] Bonnet R M, Woltjer L. Surviving 1000 centuries: can we do it [M]. London: Praxis. 2008. 163-170

[54] Eddy J A. The maunder minimum [J]. *Science*, 1976, **192**:1189-1202

[55] Ruzmaikin A, Feynman J, Yung Y L. Is solar variability reflected in the Nile River [J]. *J. Geophys. Res.*, 2006, **111**:D21114

[56] Bond G, Kromer B, Beer J, *et al*. Persistent solar influence on north Atlantic climate during the Holocene [J]. *Science*, 2001, **294**:2130-2136

[57] 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 [J]. *Nature*, 2001, **411**:290-293

[58] Wang Y, Cheng H, Edwards R L, *et al*. The Holocene Asian monsoon: Links to Solar changes and north atlantic climate [J]. *Science*, 2005, **308**:854-857

[59] Fedorov A V, Dekens P S, McCarthy M, *et al*. The pliocene paradox (mechanisms for a permanent El Niño) [J]. *Science*, 2006, **312**:1485-1489

[60] Friis-Christensen E, Lassen K. Length of the solar cycle: an indicator of solar activity closely associated with climate [J]. *Science*, 1991, **254**:698

[61] Laut P, Gundermann J. Solar cycle lengths and climate: A reference revisited [J]. *J. Geophys. Res.*, 2000, **105**:27 489-27 492

[62] Thejll P, Lassen K. Solar forcing of the Northern hemisphere land air temperature: New data [J]. *J. Atmos. Solar Terr. Phys.*, 2000, **62**:1207-1213

[63] Solanki S, *et al*. Evolution of the Sun's large-scale magnetic field since the Maunder minimum [J]. *Nature*, 2000, **408**:445-447

[64] Charbonneau P, Dikpati M. Stochastic fluctuations in a Babcock-Leighton model of the solar cycle [J]. *Astrophys. J.*, 2000, **543**:1027

[65] Solanki S K, Krivova N A, Schüssler M, *et al.* Search for a relationship between solar cycle amplitude and length [J]. *Astron. Astrophys.*, 2002, **396**:1029-1035

[66] Nandy D, Munoz-Jaramillo A, Martens P C H. The unusual minimum of sunspot cycle 23 caused by meridional plasma flow variations [J]. *Nature*, 2011, **471**:80-82

[67] Choudhuri A R. The origin of the solar magnetic cycle [J]. *J. Phys.*, 2011, **77**:77-96

[68] Labitzke K, Loon Van H. Connection between the troposphere and stratosphere on a decadal scale [J]. *Tellus A*, 1995, **47**:275-286

[69] Coughlin K, Tung K K. Eleven-year solar cycle signal throughout the lower atmosphere [J]. *J. Geophys. Res.*, 2004, **109**:D21105

[70] Camp C D, Tung K K. Surface warming by the Solar cycle as revealed by the composite mean difference projection [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2007, **34**:L14703

[71] Mouel J L L. A solar pattern in the longest temperature series from three stations in Europe [J]. *J. Atmos. Solar Terr. Phys.*, 2010, **72**:62-76

[72] Jager de C, Duhau S, Geel van B. Quantifying and specifying the solar influence on terrestrial surface temperature [J]. *J. Atmos. Solar Terr. Phys.*, 2010, **72**:926-937

[73] Tung K K, Camp C D. Solar cycle warming at the Earth's surface in NCEP and ERA-40 data: A linear discriminant analysis [J]. *J. Geophys. Res.*, 2008, **113**:D05114

[74] Erlykin A, Wolfendale A. Global cloud cover and the Earth's mean surface temperature [J]. *Sur. Geophys.*, 2010, **31**:399-408

[75] Loon van H, Meehl G A, Arblaster J M. A decadal solar effect in the tropics in July–August [J]. *J. Atmos. Solar Terr. Phys.*, 2004, **66**:1767-1778

[76] Loon van H, Meehl G A, Shea D J. Coupled air-sea response to solar forcing in the Pacific region during northern winter [J]. *J. Geophys. Res.*, 2007, **112**:D02108

[77] Kodera K. Solar influence on the Indian Ocean Monsoon through dynamical processes [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2004, **31**:L24209

[78] Gleisner H, Thejll P. Patterns of tropospheric response to solar variability [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2003, **30**:1711

[79] Kodera K, Kuroda Y. Dynamical response to the solar cycle [J]. *J. Geophys. Res.*, 2002, **107**:4749

[80] Lee J N, Hameed S, Shindell D T. The northern annular mode in summer and its relation to solar activity variations in the GISS Model E [J]. *J. Atmos. Solar Terr. Phys.*, 2008, **70**:730-741

[81] Moore J, Grinsted A, Jevrejeva S. Is there evidence for sunspot forcing of climate at multi-year and decadal periods [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2006, **33**:L17705

[82] Haigh J D, Roscoe H K. The final warming date of the Antarctic polar vortex and influences on its interannual variability [J]. *J. Clim.*, 2009, **22**:5809-5819

[83] Kuroda Y, Yamazaki K. Influence of the Solar cycle and QBO modulation on the Southern Annular Mode [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2010, **37**:L12703

[84] Svensmark H, Friis-Christensen E. Variation of cosmic ray flux and global cloud coverage–a missing link in solar-climate relationships [J]. *J. Atmos. Solar Terr. Phys.*, 1997, **59**:1225-1232

[85] Marsh N, Svensmark H. Cosmic rays, clouds, and climate [J]. *Space Sci. Rev.*, 2000, **94**:215-230

[86] Brown B H. Short-term changes in global cloud cover and in cosmic radiation [J]. *J. Atmos. Solar Terr. Phys.*, 2008, **70**:1122-1131

[87] Kristjansson J E, Kristiansen J, Kaas E. Solar activity, cosmic rays, clouds and climate-an update [J]. *Adv. Space Res.*, 2004, **34**:407-415

[88] Svensmark H, Bondo T, Svensmark J. Cosmic ray decreases affect atmospheric aerosols and clouds [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2009, **36**:L15101

[89] Laken B A, Kniveton D R. Forbush decreases and Antarctic cloud anomalies in the upper troposphere [J]. *J. Atmos. Solar Terr. Phys.*, 2010, **73**:371-376

[90] Kniveton D R. Precipitation, cloud cover and Forbush decreases in galactic cosmic rays [J]. *J. Atmos. Solar Terr. Phys.*, 2004, **66**:1135-1142

[91] Calogovic J, Albert C, Arnold F, *et al.* Sudden cosmic ray decreases: No change of global cloud cover [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2010, **37**:L03802

[92] Meehl G A,Washington W M,Wigley T, *et al.* Solar and greenhouse gas forcing and climate response in the twentieth century [J]. *J. Clim.*, 2003, **16**:426-444

[93] Kodera K. On the origin and nature of the interannual variability of the winter stratospheric circulation in the northern hemisphere [J]. *J. Geophys. Res.*, 1995, **100**:14 077-14 087

[94] Meehl G A, Arblaster J M, Matthes K, *et al.* Amplifying the pacific climate system response to a small 11-year solar cycle forcing [J]. *Science*, 2009, **325**:1114-1118

[95] Haigh J D. The role of stratospheric ozone in modulating the solar radiative forcing of climate [J]. *Lett. Nature*, 1994, **370**:544-546

[96] Labitzke K, Austin J, Butchart N, *et al.* The global signal of the 11-year solar cycle in the stratosphere: observations and models [J]. *J. Atmos. Solar Terr. Phys.*, 2002, **64**:203-210

[97] Austin J, Tourpali K, Rozanov E, *et al.* Coupled chemistry climate model simulations of the solar cycle in ozone and temperature [J]. *J. Geophys. Res.*, 2008, **113**:D11306

[98] Baldwin M P, Dunkerton T J. Stratospheric harbingers of anomalous weather regimes [J]. *Science*, 2001, **294**:581

[99] Kuroda Y, Kodera K. Role of the Polar-night Jet Oscillation on the formation of the Arctic Oscillation in the

Northern Hemisphere winter [J]. *J. Geophys. Res.*, 2004, **109**:D11112

[100] Thompson D W J, Baldwin M P, Solomon S. Stratosphere-troposphere coupling in the Southern Hemisphere [J]. *J. Atmos. Sci.*, 2005, **2**:708-715

[101] Salby M L, Callaghan P F. Interaction between the Brewer-Dobson circulation and the Hadley circulation [J]. *J. Clim.*, 2005, **18**:4303-4316

[102] Lee J N, Shindell D T, Hameed S. The influence of solar forcing on tropical circulation [J]. *J. Clim.*, 2009, **22**:5870-5885

[103] Hartley D E, Villarin J T, Black R X, *et al.* A new perspective on the dynamical link between the stratosphere and troposphere [J]. *Nature*, 1998, **391**:471-474

[104] Hartmann D L, Wallace J M, Limpasuvan V, *et al.* Can ozone depletion and global warming interact to produce rapid climate change [J]. *Proc. Nat. Acad. Sci. Unit. States Amer.*, 2000, **97**:1412

[105] Perlwitz J, Harnik N. Downward coupling between the stratosphere and troposphere: The relative roles of wave and zonal mean processes [J]. *J. Clim.*, 2004, **17**:4902-4909

[106] Kushner P J, Polvani L M. Stratosphere-troposphere coupling in a relatively simple AGCM: The role of eddies [J]. *J. Clim.*, 2004, **17**:629-639

[107] Simpson I R, Blackburn M, Haigh J D. The role of eddies in driving the tropospheric response to stratospheric heating perturbations [J]. *J. Atmos. Sci.*, 2009, **6**:1347-1365

[108] Shepherd T G. Issues in stratosphere-troposphere coupling [M]. Tokyo: Meteorological Society of Japan. 2002. 769-792

[109] Baldwin M P, Dunkerton T J. The solar cycle and stratosphere-troposphere dynamical coupling [J]. *J. Atmos. Solar Terr. Phys.*, 2005, **67**:71-82

[110] Yu F. Altitude variations of cosmic ray induced production of aerosols: Implications for global cloudiness and climate [J]. *J. Geophys. Res.*, 2002, **107**:1118

[111] Kazil J, Lovejoy E, Barth M, *et al.* Aerosol nucleation over oceans and the role of galactic cosmic rays [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 2006, **6**:4905-4924

[112] Rycroft M, Israelsson S, Price C. The global atmospheric electric circuit, Solar activity and climate change [J]. *J. Atmos. Solar Terr. Phys.*, 2000, **62**:1563-1576

[113] Harrison G R, Usoskin I. Solar modulation in surface atmospheric electricity [J]. *J. Atmos. Solar Terr. Phys.*, 2010, **72**:176-182

[114] Tinsley B A,Yu F. Atmospheric ionization and clouds as links between solar activity and climate [G]// Solar Variability and its Effects on Climate. Washington: the American Geophysical Union, 2004. 321-339

[115] Kirkby J. Cosmic Rays and Climate [J]. *Sur. Geophys.*, 2007, **28**:333-375