

⑦ 400-405

第 15 卷第 4 期
2000 年 8 月地球科学进展
ADVANCE IN EARTH SCIENCESVol. 15 No. 4
Aug., 2000

综述与译述

太阳变化驱动气候变化研究进展^{*}

洪业汤

(中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002)

摘 要:从 5 个方面综述了近 20 年来太阳变化驱动气候变化研究的进展,重点在机制方面,即对全球变暖原因看法的分歧、太阳总辐射量的卫星测量结果、树轮¹⁴C 记录与太阳变化代用指标、太阳变化影响的模拟研究,以及太阳—宇宙射线—云量的关系。强调这是一个有重大经济和科学意义的前沿课题。

关 键 词:太阳变化;气候变化;全球变暖;泥炭;全新世

中图分类号:P182;P467 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-8166(2000)04-0400-06

近 20 年来,围绕地球气候变暖的性质和原因的探索,极大地活跃了国际科学界的学术气氛,深化了对人类生存环境演变机理的认识。在地球科学历史上,继围绕日心和地心说、灾变论和均变论以及大陆漂移说的论争之后,现在关于全球变暖的争论在意义和影响方面,可能是最重要的一场学术论争了。一方面,器测资料和代用记录都表明,20 世纪 90 年代比过去 200 年的任何 10 年都要暖,似乎显示了温室气体对气候的驱动作用;政府间气候变化委员会也审慎地声称:“来自各方面的证据仔细斟酌以后表明,人为活动对气候变化存在可见的影响”^[1]。但同时存在的另一个事实是,自 17 世纪以来太阳活动水平也一直在增强,20 世纪 90 年代太阳活动水平比过去数百年的任何时候都更强^[2]。这场论争牵动着气候学、环境科学、地球科学、太阳科学、社会学等多学科的发展,已经走过了一段很长的路程。

在研究气候与太阳关系的国际文献中,所谓“太阳变化”(solar variability)主要是指太阳总辐射量的变化、不同波段辐射的变化、太阳风磁场的变化等。所谓“太阳活动”(solar activity)是指用太阳黑子数、太阳黑子周期长度等指标表征的太阳活动总体水平状况。“太阳活动”也常与“太阳变化”通用,指

那些表征太阳是一个变化的星球的地球物理过程及其影响。本文试图简要介绍太阳变化驱动气候变化研究方面的一些进展。

1 马歇尔研究所对全球变暖的看法

1991 年美国《科学》杂志刊登丹麦气象研究所 Friis-Christensen 等^[3]撰写的论文“太阳周期的长度:一个与气候变化紧密相关的太阳活动指标”。他们所指的太阳周期就是太阳黑子周期。众所周知,太阳黑子周期的时间长度统计上约 11 a,但各个周期的实际长度有几年的变化。他们的创新之处在于,第一次以两个太阳黑子周期极大值之间的时间长度作为表征太阳活动水平的指标,并与北半球陆面平均温度进行对比。结果发现^[3],自 19 世纪末起,随着太阳黑子周期的变短,北半球陆面温度也逐渐升高;在 1940 年左右太阳黑子周期停止变短并逐渐变长时,地表温度也达到峰值,并开始逐渐下落;到 20 世纪 60 年代太阳黑子周期再次变短,温度又再次转而上升,并一直延续到现在。两者之间有极好的相关,相关系数达 0.95。

该成果的发表引起国际学术界极大的关注。同年 11 月,《科学》杂志又以《太阳可能正在加热地球

* 基金项目:国家自然科学基金重点项目“近 13 ka 以来陆气系统的物质能量交换过程与全球环境变化”(编号:49733130)资助。

作者简介:洪业汤(1941-),男,广西桂林人,研究员,主要从事全球环境变化的同位素标记研究。

收稿日期:2000-01-03;修回日期:2000-03-13。

吗?》为题,发表了一篇对上文的评论文章^[4]。该文虽然也列出了若干支持者的肯定言论,但更多的是强烈的质疑意见。如文中援引一位英国气象学家尖锐的话说,在研究太阳活动与气候关系时,“你查看的参数愈多,你会发现与全球温度曲线相吻合的东西也愈多”。就像反复掷骰子一样,你总可以掷出一个最符合你愿望的最佳结果。更值得注意的是,令反对者们真正担心的是“政治观点会自然而然地驱使少数人欢迎这个新发现”,使“马歇尔研究所报告复活”。

位于华盛顿的乔治·马歇尔研究所是美国政府的一家思想库。1989年当时的美国布什政府面对全球变暖问题而制定政策时,该思想库的三位著名学者,William A. Nierenberg、Robert Jastrow 和 Frederick Seitz 联名向美国白宫提交了一份35页的报告,题为《关于温室效应问题的科学前景》。该报告概述了温室气体模型及其在预测全球变暖问题上的不确定性,认为没有确切证据表明,20世纪发生的约0.5℃的升温与温室气体的排放有关;他们还预测到21世纪太阳活动将减弱,随之出现的变冷趋势将抵消气候任何可能的温室变暖。该报告建议增拨1亿美元加强这方面的研究,但认为立即采取行动削减温室气体排放还为时尚早^[5]。

报告抛出后立即遭到美国学术界很多人的反对,但是,“所有的批评者都承认,该报告的第一部分很好地论述了围绕温室变暖预测问题所存在的科学上的不确定性。而且都同意该报告关于用1亿美元来开展更多研究的主张”^[5]。那么,与这个存在很多科学不确定性的温室变暖观点相对立的太阳变化驱动气候变化的观点,所面临的挑战主要是什么呢?归结起来可能主要是:太阳是否是一个变化的星球?它是怎样引起地球气候变化的?能否用气候模型模拟这一变化?

2 太阳总辐射量的卫星测量结果

长期以来人类一直在对太阳进行观测。中国有世界上最古老最完整的太阳黑子观测记录。人们认为^[6],在太阳辐射的长期变化与气候变化相关方面,最有说服力的证据是Eddy^[7]提出的。他通过对太阳黑子数和极光资料的重新整理,发现在太阳活动减弱的蒙德极小期,太阳黑子数目很少,极光也很少出现,而这一时期恰好对应于气候变化的小冰期^[7]。根据树轮¹⁴C浓度的变化,他在过去7500a中识别出18次明显的太阳活动强弱变化,通过与全球冰川进退的比较,指出每当较长期太阳活动减弱,地表气温就下

降,全球冰川就扩展;反之,每当较长期的太阳活动增强,气温就上升,全球冰川就退缩。他推测这种明显的相关性可能是由于太阳辐射变化的结果^[8]。

可是,令人迷惑不解的是,大约从17世纪以来从地面上对太阳总辐射量进行的测量,却没有发现可见的变化,人们因此把太阳总辐射量称为“太阳常数”。显然,太阳总辐射量究竟是不是个常数,成为研究太阳与地球环境关系的基本前提。为了解决这个问题,在Eddy的论文发表2年后,美国宇航局于1978年发射了名为Nimbus-7(云雨7号)的空间探测器,重点对太阳辐射等现象进行观测,从此拉开了为对太阳辐射等物理现象进行观测而发射一系列观测卫星的序幕。在随后的几年中,美国和欧洲先后发射了太阳极大值观测卫星(SMM)、上层大气研究卫星(UARS)、辐射变化和重力扰动卫星(VIRGO)、地球辐射收支实验卫星(ERBS)、欧洲可回收携带者号卫星(EURECA),以及太阳和太阳物理观测台(SOHO)等。从这些卫星观测资料获得了若干新的重要发现^[9]。太阳总辐射量在日际尺度上是变化的,它与太阳盘面上磁性活动区的出现有关;不同卫星测量的绝对值因所用仪器不同而有出入,但相对于长期平均值的偏离,不同卫星逐日的测量值是可比的;特别重要的发现是,在一个太阳黑子周期的相位内,太阳总辐射量的变化水平约0.1%,当太阳黑子活动处于极大值时,太阳总辐射量也最大,反之亦然;在这些辐射变化中,在地球对流层顶部被吸收掉的紫外线和较短波长的太阳辐射约占20%,而其余80%是对气候变化有重要意义的不同波长辐射,绝大部分在对流层下部被吸收,加热陆地和海洋,给植物光合作用提供能量,驱动气候变化^[10]。

太阳科学的迅速发展还表现在对太阳总辐射量变化原因的探索方面。研究表明,太阳总辐射量的11a周期变化,不大可能涉及太阳核心的热核反应过程的变化,而可能与辐射从太阳核心经过对流区向太阳表面的传输过程有关,与太阳活动区的表面特性,如太阳黑子、光斑、太阳磁力线发射的变化、太阳半径的变化等相关^[10]。对太阳的观测还在继续进行,但是上述发现已使气候变化与太阳活动的遥相关具有更明确的物理意义。例如,White等仔细研究了太平洋、大西洋、印度洋的海表面温度,发现它们中的每一个的海表面温度或全球海洋平均海表面温度变化,在数十年至百年尺度上,在相位上与太阳黑子11a周期变化几乎完全一致,温度变化的量级与太阳总辐射11a变化的量级也相当^[11]。这表明很可

能是有一种外部的驱动力,而不是气候系统内部随机波动的结果,也不是深层海水系统或全球海洋热盐环流变化的结果^[10]。

在 11 a 太阳黑子周期尺度上,太阳总辐射变动在 0.1% 水平。但现在普遍认为,在更长的时间尺度上,如 80 a 的 Gleisberg 周期尺度上,太阳总辐射的变化可能更大,对气候的影响可能也更重要。对类太阳星体的研究表明^[12],自蒙德极小期以来曾发生大到 0.6% 的辐射变化。这推动了重建过去太阳变化和对太阳变化代用指标研究的深入开展。

3 太阳活动的代用指标及其与气候变化的关系

在树轮¹⁴C 含量变化的长期趋势线上,有一系列数十年至百年尺度的偏离总趋势的扭动变化^[21]。1973 年美国的 Suess^[13]通过研究一棵大约 5 000 年轮的树轮¹⁴C 含量后首次指出,树轮¹⁴C 含量的扭动变化不是随机的,而是具有一个周期谱系,其中约 200 a 的周期是最主要的变化周期。他同时还指出,树轮¹⁴C 含量变化可能反映了太阳磁场调节入射地球的宇宙射线通量所引起的大气 CO₂ 的¹⁴C 含量变化^[13]。这一发现意味着树轮¹⁴C 含量有可能记录着太阳活动的变化,有可能成为太阳活动的代用记录。但是,树轮¹⁴C 含量受多种因素影响,因此,它们之间的关系还需进一步阐明。

20 世纪 80 年代,经过对树轮、大气、海洋等的系统测定和研究,Stuiver 等^[14,15]证明,在数十年至百年尺度上,树轮¹⁴C 的变化主要是由大气¹⁴C 产率的变化所决定;而大气¹⁴C 产率的变化主要又是由入射地球的宇宙射线通量所决定。宇宙射线入射到地球大气层前要穿越太阳风磁场,后者对地球起着一种屏蔽宇宙射线的作用。因此,入射地球的宇宙射线通量又是由太阳磁场强度的变化所调节。这就是说,树轮¹⁴C 含量所指示的大气¹⁴C 产率,可用来表征太阳活动变化。

Stuiver 等指出,大气¹⁴C 产率的增加可能还有其它原因,如在地球海—气界面上 CO₂ 气体交换速率的减小,以及具有不同¹⁴C 的深层海水上涌混合速率的减小等,都可能引起大气¹⁴C 产率的增加。但是对碳循环中碳库模型的模拟研究表明,如果要达到像太阳黑子活动蒙德极小期时大气¹⁴C 产率那样的水平,全球风速必须减小到目前全球风速平均值的 2/3;或者全球海水的混合速率必须迅速缩小到海水混合速率长期平均值的 1/2。这样的变化是很大的,迄今没有任何代用记

录支持这样的极端环境变化行为。因此,Stuiver 等^[16]的结论是,太阳风驱动是世纪尺度大气¹⁴C 产率变化的最好解释。由于引起太阳黑子变化和太阳风磁场变化的原因也引起太阳总辐射变化,因此,大气¹⁴C 产率记录所指示的较长期的太阳周期,如约 102 a、200 a、420 a 等,可能都与太阳总辐射量变化有关^[16]。

¹⁰Be 和¹⁴C 一样也是一种宇宙成因核素,但没有¹⁴C 那样复杂的地球化学历史。对南极冰芯¹⁰Be 的测定表明,在过去的 1 ka 中¹⁰Be 的含量变化历史与树轮纤维素 $\delta^{14}\text{C}$ 的变化很一致,它们都与太阳活动变化相吻合^[17]。这些重要的进展证实了一个基本前提,即全球大气¹⁴C 数十年至百年尺度上的波动反映了太阳活动的变化,为研究太阳变化与气候变化关系奠定了基础。

据此,一些引人注目的气候变化与大气¹⁴C 表征的太阳变化间的遥相关关系不断提出,例如,湖泊水位变化与阿尔卑斯冰川的进退和太阳变化间的关系^[18];过去 8 ka 中斯堪的纳维亚地区的大多数冷事件发生时间与低的太阳活动时间相一致^[19];约公元前 800 年时南北半球许多地区都记录到的冷事件与树轮¹⁴C 记录中当时一个很突出的¹⁴C 峰(指示太阳活动很弱)相吻合^[20]等。在这类遥相关中,中国金川泥炭纤维素 $\delta^{18}\text{O}$ 温度代用记录与大气 $\Delta^{14}\text{C}$ 记录之间的比较,可能是这类遥相关中最有代表性的了。在过去 6 ka 中,金川泥炭纤维素 $\delta^{18}\text{O}$ 温度代用记录与大气 $\Delta^{14}\text{C}$ 记录之间可见几乎一对一的相关性。大约 22 个暖时期(包括著名的中世纪温暖期)和 22 个冷时期(包括著名的小冰期),以及约 80 a、207 a 等一系列周期,都与太阳变化有很好的相关,为太阳变化驱动气候变化提供了有力证据^[21]。

4 太阳变化影响的模拟研究

早在 1975 年, Wetherald 等^[22]曾用美国地球物理流体动力学实验室一个早期版本的大气环流模型(GCM),来研究如果“太阳常数”发生变化所带来的影响。这是一个简化的模型,具有一个沼泽式海洋和冰反射系统,没有考虑季节变化,特别是把全球云量设为一个定值。尽管如此,由该模型模拟结果仍发现了高的非线性响应。如随太阳辐射减小,累积雪量明显增加,雪线向赤道方向移动;当太阳总辐射增加到 2% 时,对流层平均温度的变化类似于大气 CO₂ 含量加倍时增温的效果。以后,许多著名实验室开展了低层大气 GCM 研究,模拟太阳辐射变化对全球气候的影响。如美国国家大气研究中心的气候模型、

Goddard 航天研究所的模型等。随着工作的开展,除了模拟太阳总辐射变化的影响外,对太阳紫外辐射、臭氧含量变化等因素也逐渐予以考虑,出现了模拟中层大气对太阳紫外辐射变化的动力学影响研究、中层大气对太阳紫外辐射变化的光化学响应研究,以及用辐射和臭氧浓度的真实变化来代表太阳变化,模拟研究中低层大气的响应等^[23]。

现在的问题是,要比较这些模型模拟的结果是较困难的,因为各个模型对地球表面状况的表述不完全相同,对太阳总辐射变化的辐度也有不同的设定。特别是,相对于一个太阳周期中太阳总辐射约 0.1% 的变化水平,这些模型设定的太阳总辐射变化都未能反映真实的太阳变化水平。而对 0.1% 的辐射变化,目前的 GCM 模拟结果又不理想。那么,究竟是因为 0.1% 的太阳总辐射变化本身就太小,不足以驱动人们从实测和代用记录中所看到的气候变化,因而也不可能在 GCM 中模拟出来呢?还是现今的 GCM 本身不够完善,因而未能模拟较小的太阳辐射变化对气候的影响呢?近 20 a 的研究表明,这两方面的问题可能都存在,但也都在取得进展。

一个重要的进展是对云的重要性的了解。现已知道云是地球辐射加热的调节器,它对地球气候系统起着两种相互竞争的或相反的作用。一方面,云把人射地球的大部分太阳辐射反射回太空,因而起着一种倾向于使地球变冷的作用;另一方面,云能吸收下层大气和地面的长波热辐射,在某种意义上类似于微量气体的温室效应,因而又起着一种倾向于使地球加热的作用。显然这里有一个复杂的云辐射收支平衡问题。

为弄清这个问题,美国航空航天局组织开展了云辐射平衡实验,它由 1984~1986 年期间先后发射的不同轨道上的 3 颗卫星,即 ERBS、NOAA-9 和 NOAA-10 来对全球云辐射状况进行观测。数据表明,在 1985 年 4 月期间,全球短波云驱动作用(提高地球的反射率)是 -44.5 W/m^2 ,而长波云驱动作用(云的温室效应)是 31.3 W/m^2 ,两者平衡下来,获得了一个重要的基本结论,即云对地球的净全球影响起着一种降温变冷作用^[23]。这个净降温驱动作用的大小还有争论,范围值从 $17\sim 35 \text{ W/m}^2$,相当于全球大气 CO_2 含量翻一番所能引起的升温驱动作用的 4 倍。因此,作为一种气候反馈机制,小的云辐射驱动场变化,就能对气候变化起相当大的作用^[24]。

但是,云的这两种相互竞争的作用是随时间、地理

位置、云的类型和结构,以及云的高度等条件而变化,使得在气候模型中如何处理云辐射成了一个困难的问题,也是当今气候模型的一个最主要的不确定因素之一。人们认为,可能正是由于现有的气候模型在云辐射反馈的参数化方面的内在缺陷,使得现有气候模型的敏感性不足以显示太阳辐射小的变化与气候响应之间复杂的特性^[25]。在这方面,确实还有许多工作要做。

5 太阳、宇宙射线、云量及气候变化

云对气候变化的重要性是不容置疑的了,但它与太阳变化是否有关系,有什么样的关系,成为太阳变化与气候变化之间至关重要的环节。

90 年代以来,Tinsley 等^[26]在一系列论文中,提出了一个所谓“静电冻结机制(electrofreezing mechanism)”,根据昼夜间太阳风磁场与大气动力学变化间的一种相关性,认为太阳风磁场变化驱动的全球电场变化,将对云顶部的超冷水滴和气溶胶的静电荷发生影响,促使超冷水滴冻结,冰核成核速率增加,降水增加,这将导致潜热的释放。这样,通过平流层中云微物理状态的变化,太阳变化的影响将逐渐扩展和放大,导致对流层大尺度环流的改变。

这一机制提出后引起热烈讨论,总的说来,人们期待有更多实证性的观测资料来支持这一假说。太阳风磁场变化的确能引起全球电场变化,但不清楚这种“静电冻结机制”是否真的在起作用,因为它至少还取决于两方面的工作:一是应证明地球电场究竟是否对云微物理状态有影响;二是即使假定静电冻结机制在起作用,也还不清楚它是否会导致大尺度的对流层环流变化^[10]。无论如何,这仍是一个值得注意的动向,因为它已经试图把太阳变化、云微物理状态和气候变化串在一起。

值得指出的是,这一过程联系是通过太阳风磁场本身对地球电场,并进一步对云滴和气溶胶的静电荷发生影响来实现的,它与早在 20 世纪 50 年代末期萌发的另外一种思路不同。1959 年 Ney^[27]认为,太阳的周期变化对气候的影响可能与大气电离作用的影响有关。随后 Dickinson 等^[28]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,从而有利于硫酸盐气溶胶的生成,并可作为形成云粒的凝结核。这暗示了宇宙射线和云量之间可能有某种关系。1995 年 Pudovkin 等^[29]首次报道了云量对宇宙射线通量变化响应的实测结果,他们发现,随着太阳活动增强,宇宙射线通量减小,观测地区的云量也明显减少。

这一局地观测结果发表后,立即引起人们注意。Svensmark 等^[30]评论说,如果这个发现是系统的,而且在全球尺度上能证实其存在,那么在太阳变化驱动气候变化的环节中,一直缺少的一个环节可能就找到了,一个非常有效的太阳变化驱动气候变化的放大机制可能也就找到了。因为如前文所述,入射地球的银河宇宙射线通量是受太阳活动调节的,太阳活动水平愈高,太阳磁场强度愈强,对宇宙射线的屏蔽作用也愈大,抵达地球的宇宙射线也就愈少。这一过程联系在地球大气¹⁴C 产率的变化上已经得到反映。

1997 年 Svensmark 等^[30]从国际卫星云气候研究计划 (ISCCP) 中,搜集到了 1983 年 7 月~1990 年 12 月期间的全球云盖度数据。为了简化问题,他们仅以海洋上空的云盖度与宇宙射线通量的变化资料作比较。ISCCP 的观测资料的确显示,随着宇宙射线通量的减小,全球云量也减小,在一个太阳周期内,有约 3%~4% 的变化,相关系数约 0.95。在地球的高纬度地区,宇宙射线的这种效应也较大,与高纬度地区地球磁场对高能带电离子的屏蔽作用较小相一致。据粗略估算,在平均 11 a 的太阳周期内,3% 的云盖度变化大约相当于 0.8~1.7 W/m² 的辐射变化。他们认为“与自从 1750 年以来 CO₂ 含量增加的总辐射驱动效应,即估计约 1.5 W/m² 相比较,这是一个非常大的量”。

这一最新进展表明,入射地球的宇宙射线通量和云量之间有直接的联系。太阳变化是通过调节宇宙射线通量的变化,影响地球上空云量的变化,最终影响气候变化的,而不仅仅是太阳辐射本身变化的直接影响。这些新进展,连同过去太阳变化与气候变化的多种代用指标间好的相关性,表明太阳变化驱动气候变化研究已出现新的局面,可能正在酝酿着一场重大的变革。

6 结 语

有关太阳变化与气候变化关系的认识,目前大致分为三类:一些研究似乎认为太阳变化能解释自 1860 年以来几乎所有的气候变化;一些研究则完全忽视太阳变化的贡献;一些研究认为,在不同时间尺度上,太阳变化的影响可能有不同。例如,洪业汤等^[2]认为,在数十年至百年尺度上,过去 6 ka 的气候变化主要都是由太阳变化驱动的,尽管在小冰期至 1950 年期间全球的变暖还有人为活动的贡献;Lean 等^[31]认为,在小冰期至 1850 年期间,太阳对气

候变化起着主要影响,但从 1900 年起,随着人类活动影响的增大,太阳活动的影响在减小。在 1900 年至 1990 年期间的 0.6 °C 的升温中,太阳变化的贡献可能是 0.25 °C。

太阳变化及其对地球环境的影响,是一个重大基础科学问题,是一个真正多学科交叉的重大科学问题。从以上概述可见,国际上正动用各种高科技观测方法和非线性理论,进行多学科的集成研究。目的是深入认识我们居住的地球表生环境演变的机理,评估自然和人为活动对全球变暖的相对贡献,制定科学的可持续发展战略。中国科学界应当在这一重大科学前沿领域作出自己的贡献。

参 考 文 献

- [1] Houghton J T, Meira Filho L G, Callander B A, et al. Climate Change 1995; the Science of Climate Change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1996.
- [2] Lean J, Beer J, Bradley R. Reconstruction of solar irradiance since 1610; implications for climate change[J]. Geophys Res Lett, 1995, 22: 3 195~3 198.
- [3] Fris-Christensen E, Lassen K. Length of the solar cycle: an indicator of solar activity closely associated with climate[J]. Science, 1991, 254: 698~700.
- [4] Kerr R A. Could the sun be warming the climate? [J]. Science, 1991, 254: 652~653.
- [5] Roberts L. Global warming; blaming the sun[J]. Science, 1989, 246: 992~993.
- [6] Reid G C. Solar irradiance variations and the global sea surface temperature record[J]. Journal of Geophysical Research, 1991, 96, 2 835~2 844.
- [7] Eddy J A. The maunder minimum[J]. Science, 1976, 192: 1 189~1 202.
- [8] Eddy J A. Climate and the changing sun[J]. Climate Change, 1977, 1: 173~190.
- [9] Pap J M, Frohlich C. Total solar irradiance variations[J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 1999, 61: 15~24.
- [10] Reid G C. Solar variability and its implications for the human environment[J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 1999, 61: 3~14.
- [11] White W B, Lean J, Cayan D R, et al. Response of global upper ocean temperature to changing solar irradiance [J]. Journal of Geophysical Research, 1997, 102: 3 255~3 266.
- [12] Zhang Q, Soon W H, Baliunas S L, et al. A method of determining possible brightness variations of the Sun in past centuries from observations of solar-type stars[J]. Astrophysics Journal, 1994, 427: L111~L114.
- [13] Suess H E. The radiocarbon record in tree rings of the last 8 000 years[J]. Radiocarbon, 1980, 22: 200~209.
- [14] Stuiver M. Solar variability and climatic change during the

- current millennium[J]. *Nature*, 1980, 286: 868~871.
- [15] Stuiver M, Braziunas T F, Becker B, *et al.* Climatic, solar, oceanic, and geomagnetic influences on late-glacial and Holocene atmospheric $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ change[J]. *Quaternary Research*, 1991, 35: 1~24.
- [16] Stuiver M, Braziunas T F. Atmospheric ^{14}C and centry-scale solar oscillations[J]. *Nature*, 1989, 338: 405~408.
- [17] Raisbeck G M, Yiou F, Jouzel J, *et al.* ^{10}Be and ^8H in polar ice cores as a probe of the solar variability's influence on climate[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1990, A330, 463~470.
- [18] Magny M. Solar influence on Holocene climatic changes illustrated by correlations between past lake-level fluctuations and the atmospheric ^{14}C record[J]. *Quaternary Research*, 1993, 40: 1~9.
- [19] Karlen W, Kuylenstierna J. On solar forcing of Holocene climate; evidence from Scandinavia[J]. *The Holocene*, 1996, 6: 359~365.
- [20] Van Geel B, Van Der Plicht J, Killian M R, *et al.* The sharp rise of $\Delta^{14}\text{C}$ Ca 800 cal BC; possible causes, related climatic teleconnections and the impact on human environments[J]. *Radiocarbon*, 1998, 40: 535~550.
- [21] Hong Y T, Jiang H B, Liu T S, *et al.* Response of climate to solar forcing recorded in a 6 000-year $\delta^{18}\text{O}$ time series of Chinese peat cellulose[J]. *The Holocene*, 2000, 10 (1): 1~7.
- [22] Wetherald R T, Manabe S. The effects of changing the solar constant on the climate of a general circulation model[J]. *Journal of Atmospheric Science*, 1975, 32: 2 044~2 059.
- [23] Haigh J D. Modelling the impact of solar variability on climate [J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 1999, 61: 63~72.
- [24] Ramanathan V, Cess R D, Harrison E F, *et al.* Cloud-radiative forcing and climate: results from the Earth radiation budget experiment[J]. *Science*, 1989, 243: 57~63.
- [25] Chambers F M, Ogle M I, Blackford J J. Paleoenvironmental evidence for solar forcing of Holocene climate, linkages to solar science[J]. *Progress in Physical Geography*, 1999, 23(2): 181~204.
- [26] Tinsley B A, Heelis R A. Correlations of atmospheric dynamics with solar activity evidence for a connection via solar wind, atmospheric electricity, and cloud microphysics[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1993, 98(D6): 10 375~10 384.
- [27] Ney E R. Cosmic radiation and the weather[J]. *Nature*, 1959, 183, 451~452.
- [28] Dickinson R. Solar variability and the lower atmosphere[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1975, 56: 1 240~1 248.
- [29] Pudovkin M, Veretenenko S. Cloudiness decrease associated with Forbush decrease of galactic cosmic rays[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 1995, 57: 1 349~1 355.
- [30] Svensmark H, Friis-Christensen E. Variation of cosmic ray flux and global cloud coverage—a missing link in solar-climate relationships[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 1997, 59: 1 225~1 232.
- [31] Lean J, Rind D. Evaluating sun-climate relationships since the Little Ice Age[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 1999, 61: 25~36.

PROGRESS IN STUDY ON RELATIONSHIPS BETWEEN SOLAR VARIABILITY AND CLIMATE CHANGE

HONG Ye-tang

(State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry,
Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China)

Abstract: There is still controversy on both nature and cause for global warming. This review paper will be concerned only with effects of solar variability on climate change. The emphasis is on the progress in the study on potential mechanisms, rather than on reported correlation between solar variability and climate changes. It covers the Sun's total irradiance observed by satellites, atmospheric $\Delta^{14}\text{C}$ as a proxy indicator of solar activity, modeling of the effect of the Sun's total irradiance on climate variation, and the influence of cosmic ray on cloud coverage.

Key words: Solar variability; Climate variation; Global warming; Peat; Holocene.