

太阳总辐照度的监测与重建研究进展

陈诗吉,周立旻,郑祥民

(华东师范大学地理信息科学教育部重点实验室,上海 200241)

摘要:太阳总辐照度(TSI)变化是影响地球气候变化的重要因素,对TSI的监测与重建是研究太阳活动驱动全球气候变化机制的重要基础。本文回顾了地基平台和卫星平台的TSI监测历程及其取得的主要研究成果,分析了利用宇宙成因核素和地外天体信息重建TSI的研究进展及所存在的问题,并对该领域未来的发展方向进行展望。现有的地基平台和卫星平台TSI监测资料表明,太阳活动周期中TSI的变化幅度很小,不足以引起各种记录中所观测到的气候变化。但太阳物理领域迄今尚未完全解译TSI变化的物理过程,加之TSI监测资料所限,难以判定其过去或未来的变幅,需整合现有3种主要的数据合成方法,并继续坚持TSI长期监测。此外,还需利用宇宙成因核素、地外天体信息反演等新方法重建过去太阳活动所造成的TSI变化,以获得长周期TSI变化序列。

关键词:太阳活动;太阳总辐照度;监测;重建;研究进展

doi: 10.11820/dlkxjz.2013.10.014

1 引言

IPCC第四次气候变化评估报告指出,近百年间全球平均气温上升很可能是人类活动导致温室气体浓度上升所致(Solomon et al, 2007)。NIPCC则对此提出质疑,认为驱动气候变化的是太阳活动的变化,而非温室气体(Idso et al, 2009)。科学认识人类活动对全球气候变化的影响,首先需要判别作为影响气候变化背景因素的太阳活动是如何产生影响的。太阳总辐照度(Total Solar Irradiance,以下简称TSI)的长期监测数据及其历史重建资料则是此项工作的必要基础。

大量研究表明,太阳活动与全球气候系统之间存在紧密联系(Foukal et al, 2006; Jager et al, 2006; Gray et al, 2010; Reid, 2000; Rind, 2002; 赵亮等, 2011),特别是十年至百年尺度的气候变化受太阳活动的影响显著(Eddy, 1977; Karlen et al, 1996; Stuiver, 1980; Wang et al, 2005; Yu et al, 2011)。太阳活动过程中TSI的变化,影响到达地面的太阳辐射量,成为地表温度、水循环乃至整个生态环境—人类社会系统变化的主要自然驱动因素之一,对

气候变化的影响最为直接(Egorova et al, 2004; Shindell et al, 2001)。已有研究发现,地球表面年平均气温的年际变化(去趋势化后)与TSI变化量呈正相关关系,且其信度大于98%(图1)(Tung et al, 2008)。

迄今为止,短时间尺度太阳活动驱动气候变化的物理机制尚未完全搞清。最初的TSI机制认为,太阳活动通过改变到达地球大气上界的TSI驱动气候变化(Willson, 1997)。而观测事实表明,太阳常数在太阳活动周中最大变幅约 1.3 W/m^2 (Willson, 1997)。不同研究者的观测结果不尽一致(Pachauri et al, 2007; Frohlich et al, 2004; Rottman, 2005; Willson, 1997; Willson et al, 2003),但1906-2006年全球气温变化的线性趋势为 0.74 K ,1975年以来更是以 0.2 K/10a 的速率迅速增长(Hansen et al, 2006)。无论何种观测变幅,较之全球气候变化所需的变化量均小1~2个数量级(王绍武, 2009)。随后又有研究尝试从不同角度探讨太阳活动对气候变化的驱动,如太阳短波辐射变化机制(UV机制)(Haigh, 1994, 1996)和空间天气(Space-weather)机制(Tinsley, 2000; 周立旻等, 2007)。

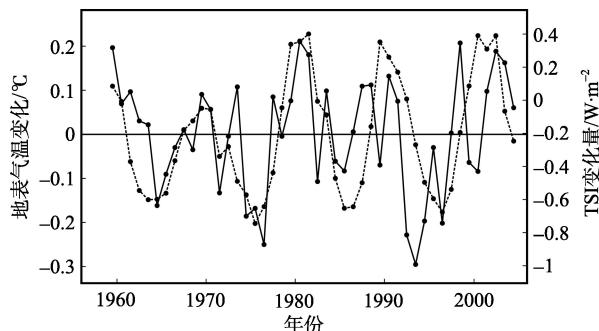
收稿日期:2013-04;修订日期:2013-07.

基金项目:国家973计划项目(2012CB957800);国家自然科学基金项目(41271054)。

作者简介:陈诗吉(1989-),男,硕士研究生,主要研究方向为环境演变与可持续发展。E-mail: vincent_89@126.com

通讯作者:周立旻(1976-),男,博士,副研究员,主要从事主要从事地外因素对全球气候变化影响研究。

E-mail: lmzhou@geo.ecnu.edu.cn



注:图中实线表示基于NCEP/NCAR再分析数据的1959-2004年全球年平均地表气温变化,虚线表示年平均TSI变化(Lean et al, 1995);全球年平均表面气温与TSI的相关系数为0.47(信度水平98.4%);TSI每变化1 W·m⁻²,全球年平均地表气温相应的回归值为0.18±0.01 K/(W·m⁻²)。

图1 全球年平均表面气温与年平均TSI距平序列

Fig. 1 Annual mean global surface air temperature and annual mean TSI time series

客观认识太阳活动对全球气候变化的驱动,深入研究气候变化机制并预测其未来趋势,有赖于更可靠的长时间TSI监测与重建记录,才能明确TSI对气候变化的贡献。目前,对太阳活动影响气候变化的机制认识还不够全面,同样需要依托对TSI变化的监测与重建,探索TSI与气候变化之间的复杂响应机制,为正确认识气候变化奠定科学基础。为此,本文对目前TSI监测与重建领域的研究成果加以系统梳理,并据此展望该领域研究的未来发展。

2 太阳总辐照度监测

太阳总辐照度(TSI)是指在单位时间内到达任何球面(包括地球表面)单位面积上的所有波段的电磁辐射能量的总和。除了日地距离、地球绕日公转轨道参数等因素外,TSI的增减主要受太阳辐射能量变化的影响(徐景晨等,2011)。早期由于监测条件和获取数据所限,通常将TSI视为一个恒定的常量,故有“太阳常数”(solar constant)的提法,其平均值约为1365~1372 W/m²(王绍武,2009)。随着监测资料的不断积累和卫星等现代观测技术的广泛应用,人们开始意识到TSI是不断变化的(Smith et al, 1983)。鉴于TSI的重要意义,现已广泛开展地基、高空气球、飞机、火箭、卫星、宇航飞机等众多不同平台的长期监测工作。

2.1 地基平台的TSI监测

最初的TSI监测工作主要依托地基平台完

成。最早可追溯至1837年,Clasude Pouillet(法国物理学家)与John Herschel(英国天文学家)尝试用水的比热对TSI进行推算,得到约为当前TSI(通常取1367 W/m²)一半的观测结果(徐景晨等,2011),主要是由于他们均未考虑到大气对太阳辐射的吸收作用。真正意义上对TSI进行广泛的地面监测始于1957-1958年国际地球物理年(Wild et al, 2005),中国自20世纪50年代起着手开展此项工作。不同学者在不同纬度地区开展地面TSI监测工作,得到不尽一致的结果。

地面TSI监测势必受到地球大气中不同气体组分和气溶胶散射、吸收作用的影响,通常需要测量一天内不同时刻的TSI以消除大气影响,或通过与其他平台监测数据进行综合等方法得到TSI监测资料。辐射热计(bolometer)是监测TSI能量通量所使用的主要工具(Fleagle et al, 1980),不同学者所使用的辐射热计性能及其本身所能到达的监测高度不同,需对地面监测结果进行大气订正,而大气订正的统一方法尚未建立,大气成分亦复杂多变,其准确度与可靠性受到限制。此外,由于监测项目、台站数量与布局的调整,以及仪器校正不规范、监测仪器更新等因素,太阳辐射资料存在质量不一致性(甚至可能具有虚假的变化趋势),影响到辐射监测资料在时间和空间上的连续性,制约了较长时间尺度的研究工作,这也是该监测方法所存在的主要弊端。

TSI监测起步较晚,至今所积累的监测记录尚不足以反映TSI的长期变化及其与太阳长周期活动、地球环境变化之间的关系。为此,人们尝试借助一些代用指标来重建更长时间周期的TSI变化序列。研究表明,太阳黑子与TSI具有相关性,虽然太阳黑子数的变化并不能完全反映TSI在不同尺度的变化情况,但利用太阳黑子数重建过去TSI的资料是可行的(Hoyt et al, 1993, 1998; Lean et al, 1995; Solanki et al, 1999)。早在1749年,人们就已对太阳黑子进行逐日连续记录,这比TSI监测历史要早。不少学者遂将目光投向历史上长期的太阳黑子观测记录,希望借此重建百年尺度的TSI变化序列。国外许多学者已开展过不少重建工作,获得了一系列过去TSI变化序列(Foster, 2004; Krivova et al, 2003; Lean et al, 1995; Schöll et al, 2007; Solanki et al, 1999; Vaquero et al, 2006)(图2);国内学者也开展过相关工作,如通过交叉小波分析方法研

究太阳黑子数与 TSI 关系, 建立重建统计模型, 重建 1878-1975 年逐年 TSI 变化序列(杨若文等, 2009)。

2.2 卫星平台的 TSI 监测

为了减少地面监测中环境要素的干扰, 获得更准确的 TSI 数据, 20 世纪 70 年代后期人们开始尝试突破大气层的制约, 利用卫星平台搭载 TSI 监测设备进行监测。

1978 年, 配备 HF 空腔辐射计(Hickey-Frieden

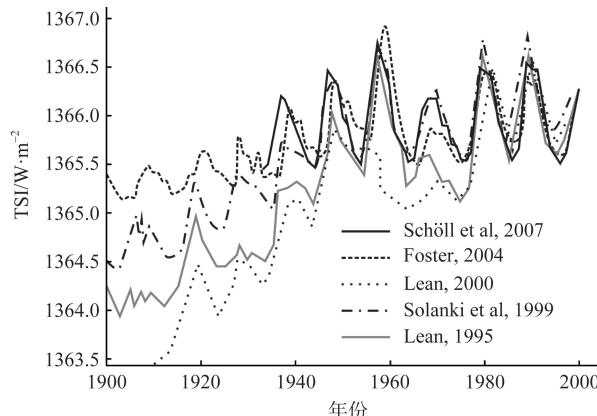
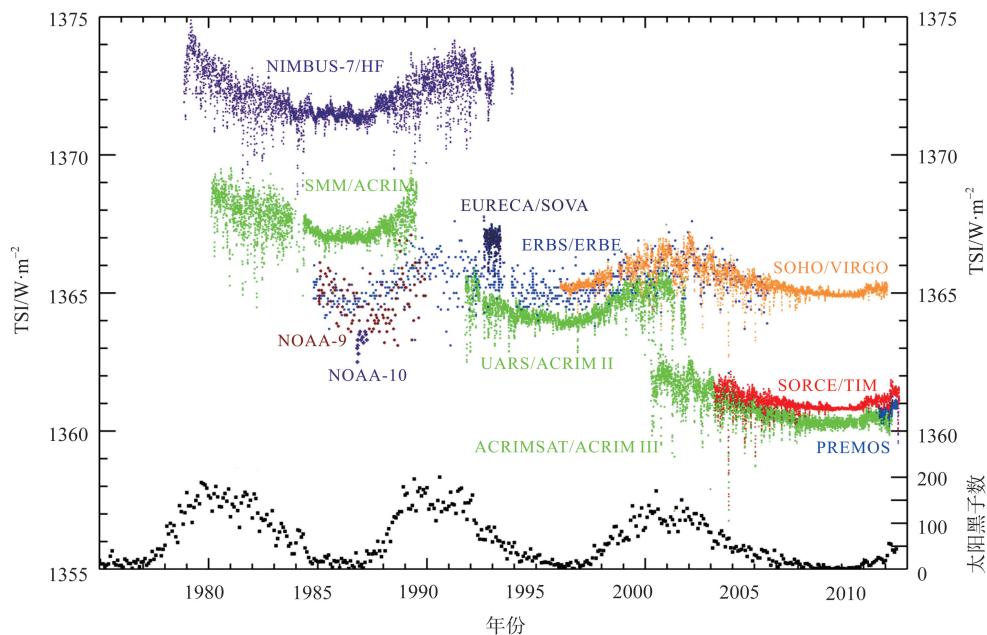


图 2 利用太阳黑子重建的 TSI 变化序列(Schöll et al, 2007)

Fig. 2 Reconstruction of TSI series based on sunspot number
(Schöll et al, 2007)

radiometer)的 NIMBUS 7 卫星发射升空(Hoyt et al, 1992), 拉开了卫星平台 TSI 监测的序幕。此后, 各国相继发射多颗卫星对 TSI 开展连续监测, 至今 TSI 气候资料记录已有 30 余年的时间跨度(图 3)。

目前具有 TSI 监测功能的卫星平台主要有: 云雨气象卫星(NIMBUS-7/HF, 1978-1993 年)、太阳峰年号卫星(Solar Maximum Mission, SMM/ACRIM I, 1980-1989 年)、地球辐射收支卫星(Earth Radiation Budget Satellite, ERBS/ERBE, 1984-2005 年)、美国国家海洋和大气管理局气象卫星(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA-9, 1984 年, NOAA-10, 1986 年)、高层大气研究卫星(Upper Atmosphere Research Satellite, UARS/ACRIM II, 1991-2001 年)、欧空二代空间平台(European Research Coordination Agency, EURECA/SOVA, 1992-1993 年)、太阳和太阳风层探测器(Solar and Heliospheric Observatory, SOHO/VIRGO, 1996 年至今)、美国航空航天局的长期太阳监视系列卫星(Active Cavity Radiometer Irradiance Monitor Satellite, ACRIMSAT/ACRIM III, 1999 年至今)、太阳辐射与气候实验卫星(Solar Radiation and Climate Experiment, SORCE/TIM, 2003 年至今)等(Hoyt et al, 1992; Willson, 1994; 徐景晨等, 2011), 据此先后建



注: 不同颜色的散点分别表示不同卫星平台上所搭载的辐射监测仪器所获得的自 1978 年以来的 TSI 日平均值; 黑色散点表示不同年份的太阳黑子数记录。

图 3 不同卫星平台辐射探测计的 TSI 监测数据与太阳黑子数

Fig. 3 TSI data from radiometer on different satellites and sunspots number

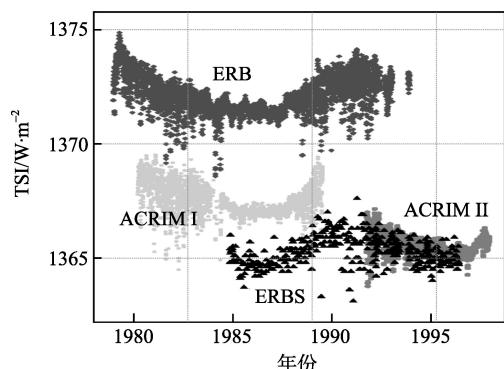
立了一系列卫星平台 TSI 监测序列(Forster et al, 2007),如辐照度变率与重力脉动(Variability of Irradiance and Gravity Oscillations, VIRGO)(Fröhlich et al, 1997)、主动空腔辐射仪辐照度监测(Active Cavity Radiometer for Irradiance Monitoring, ACRIM III)(Willson, 2001)、太阳总辐照度监测(Total Solar Irradiance Monitor, TIM)(Kopp et al, 2005)等。

不同卫星平台所获取的 TSI 数据并不完全相同,其变动范围大致在 $1365\text{--}1373\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。图 4 所示不同卫星平台获得的 TSI 资料(Rasmus, 2006)虽不尽相同,但在太阳活动极小期时均呈下降趋势。

由于卫星服役期的限制,需要不同卫星平台的监测资料才能获得长周期连续的 TSI 变化资料。然而,这些带有 TSI 监测任务的卫星所获取的数据有明显差异,这可能是由于不同卫星平台上所搭载的探测仪器性能各异,加之其运行高度与轨道环境不同等因素所致(徐景晨等, 2011)。因此,需要对不同卫星平台的数据进行交叉校准,并将其调整到相

近的水平上,目前主要有 PMOD(Fröhlich, 2006)、ACRIM(Willson et al, 2003)和 IRMB(Dewitte et al, 2004)3 种合成方法(图 5)。

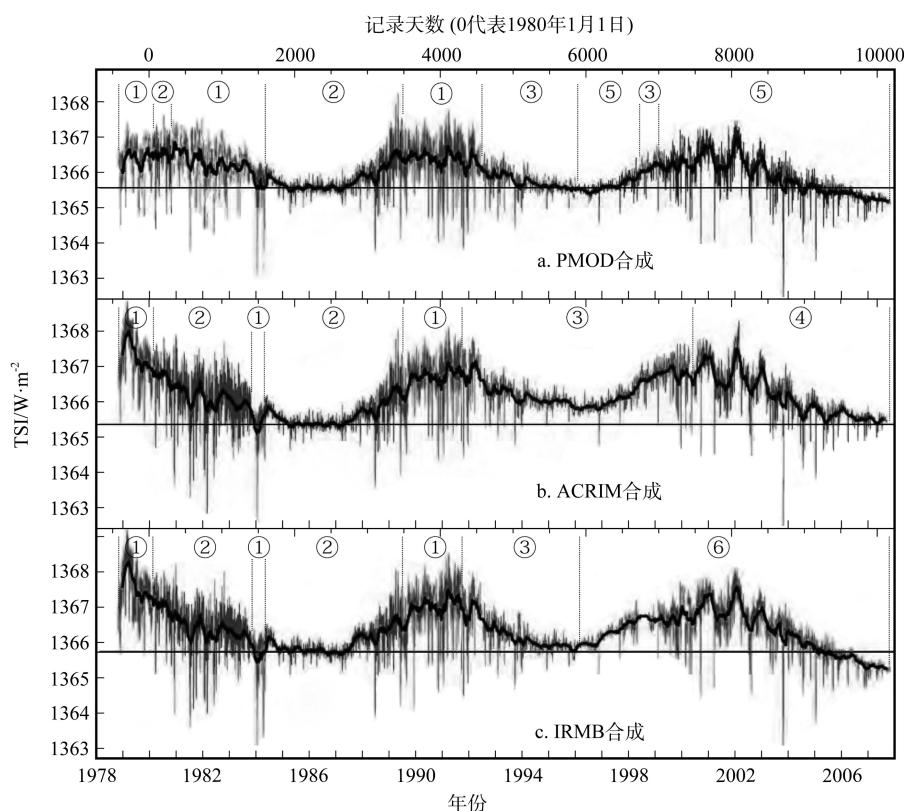
上述 3 种合成方法之间存在一定的差异,即使基于相同的数据来源(即 1996 年以前的 TSI 数据),



注:资料来源为 <ftp://daac.gsfc.nasa.gov/>

图 4 不同卫星平台获取的 TSI 数据比较

Fig. 4 Comparison between different satellites-based TSI data



注:图中谱线代表 1978-2007 年间 TSI 变化序列,各段分别对应卫星平台上所搭载的不同 TSI 监测仪器,即:(1) HF、(2) ACRIM-I、(3) ACRIM-II、(4) ACRIM-III、(5) VIRGO、(6) DIARAD;黑色粗线条表示其 81 天滑动平均值;中间的水平线条表示 1985 年(太阳活动第 21~22 周期之间)所出现的 TSI 最小值。

图 5 不同的 TSI 合成数据(Gray et al, 2010)

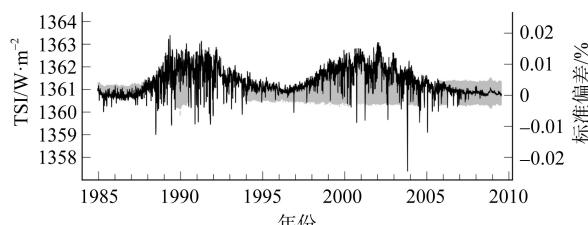
Fig. 5 Different composites of total solar irradiance data(Gray et al, 2010)

也因其校准方法和参考标准的不同而相差较大,特别是在ACRIM间断(ACRIM-gap)的时间段内(Krivova et al, 2009; Nicola et al, 2009)。究竟其中哪种合成方法更可靠,也存在不少争论(Krivova et al, 2009; Lockwood et al, 2008; Wenzler et al, 2009; Willson et al, 2003)。有学者将这3种合成方法进行复合调整,其结果符合SORCE/TIM的绝对规模(图6)(Greg et al, 2011)。

值得一提的是,美国国家航空航天局(NASA)于2003年发射的太阳辐射与气候实验卫星SORCE,其装载的美国科罗拉多大学大气与空间物理实验室制造的太阳辐射监测仪(TIM),被认为是目前最精确的TSI探测仪器。该仪器提供了一个基准值,以确保这一重要气候数据记录被保存,并减少航天器测量潜在误差风险。SORCE卫星持续监测太阳以X射线、紫外、可见光和近红外等波长向外辐射的能量,积累了大量有关太阳辐射与太阳活动的珍贵数据,学者基于SORCE数据分析得到了许多有益的成果(Haigh et al, 2010; Greg et al, 2011; Ineson et al, 2011; Matthes, 2011)。例如,基于SORCE数据,提高了连续32年的TSI记录的准确性,并利用模型预测在11年太阳活动周期内,太阳能量的变化使全球变暖0.1°C;尽管它可能不是过去30年全球变暖的主要原因,但仍有助于科学家更深入认识气候变化的自然原因和人为影响(Kopp et al, 2011)。

3 过去太阳总辐照度重建

时至今日,TSI监测工作只开展了3个太阳活动周期,尚难以判定过去太阳活动及其引起的TSI变化情况,更难以据此推测未来TSI变化趋势及其对全球气候变化的影响。同时,由于1610年以前缺少太阳黑子观测资料,需要借助其他环境载体来解译其中所蕴含的太阳活动与TSI变化信息,以此



注:图中黑色折线反映第22-23个太阳活动周的TSI变化情况,灰色阴影表示标准偏差。

图6 不同合成方法的复合调整结果

Fig. 6 Results of different composites

重建过去TSI的变化过程。近年来,利用宇宙成因核素和地外天体信息反演过去太阳活动造成的TSI变化已成为研究的热点。

3.1 基于宇宙成因核素的TSI重建

作为宇宙射线与地球大气成分发生反应的产物,宇宙成因核素(cosmogenic nuclides)是追溯太阳活动、重建长周期TSI的重要间接载体,其产生受到射向地球的宇宙射线通量变化的影响,而宇宙射线通量又受控于太阳发射出的低密度电离气体(太阳风)的变化。因此,太阳活动能够对到达地球大气层的宇宙射线进行调节。当太阳活动增强(对应TSI高值)时,太阳磁场影响范围扩大,导致宇宙射线粒子(特别是中、低能量粒子)能量削弱,使地球免于遭受宇宙射线的轰击,从而减少大气中宇宙成因核素的产生(Bond, 1997; Masarick et al, 1999);反之,太阳活动相对减弱(对应TSI低值)时,宇宙成因核素产率则增加。研究表明,¹⁰Be浓度与太阳黑子数(太阳活动的重要标志)有显著相关,与aa系数也有相似的结果(Beer et al, 1990)。

常用于重建长周期TSI的宇宙成因核素有¹⁰Be和¹⁴C。有关学者运用该方法开展了重建过去TSI的有益尝试(Edouard et al, 1997; Magny, 1993; Raisbeck et al, 1990; Usoskin et al, 2004),但不同研究结果之间存在一定的差异。究其原因,主要与用于重建过去TSI的环境载体(主要是树轮、极地冰心等)所在区域对TSI变化的响应不同,以及环境载体记录覆盖的范围和分辨率之间的差异有关。目前重建的TSI变化序列中时间范围最长的是利用极地冰心中¹⁰Be测量值所重建的全新世(9300 a BP)以来的TSI变化序列(图7),其变化幅度约为2W·m⁻²,其

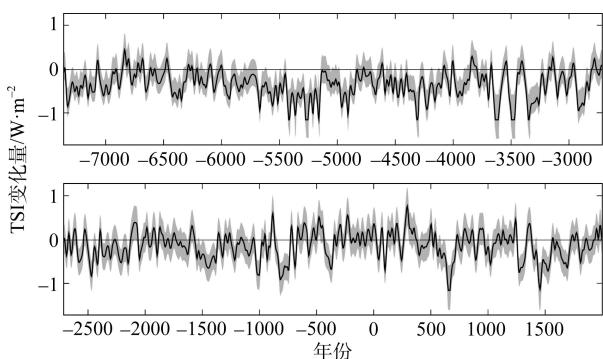


图7 利用¹⁰Be重建的过去9300年TSI变化序列
(Steinhilber et al, 2009)

Fig. 7 Reconstruction of TSI series for the past 9300 years based on ¹⁰Be data(Steinhilber et al, 2009)

均值比当前观测值低约 $0.4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 而比蒙德尔极小期(Maunder Minimum, 1645-1715 年)时高出近 $0.5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 但尚未达到历史极值(Steinhilber et al, 2009)。确定的 TSI 低值期与气候变冷时期吻合较好, 特别是蒙德尔极小期时太阳黑子最少, 与小冰期(Little Ice Age)的一个最冷时期对应。

一般认为, ^{10}Be 记录较之 ^{14}C 可靠些。其原因在于: ^{14}C 生成后易被氧化为 CO_2 , 参与地球表层系统的碳循环过程, 在各圈层和不同介质中进行复杂的迁移、转化, 这样势必将对 TSI 的重建产生影响; 此外, 大气中 ^{14}C 的减少除与太阳活动性的增强有关外, 还可能受到深部海水上涌释放大量低 ^{14}C “老”碳的影响(Broecker et al, 1992)。产生于高纬度地区同温层下部、对流层上部的 ^{10}Be , 在大气中仅可存留 1~2 a, 虽亦有局部短期波动, 但仍可反演太阳黑子序列和太阳活动变化, 是重建长周期 TSI 的首选核素(Horiuchi et al, 2008)。需要指出的是, 太阳活动并非影响 ^{10}Be 产率的唯一因素, 宇宙射线自身通量、地磁场, 以及大气混合、颗粒沉降、大气降水量等相关因素也有影响(杨士杰等, 2007)。例如, 地磁场可在一定程度上屏蔽宇宙射线, 因此地磁场一旦变化将影响宇宙射线通量, 导致宇宙成因核素的产率发生相应变化, 而这种影响在已有研究中并未得到应有的关注。因此, 区分不同影响因素的贡献、消除噪声因素的干扰是利用宇宙成因核素记录重建 TSI 首先需要解决的问题。

3.2 基于地外天体的 TSI 重建

利用宇宙成因核素(如 ^{10}Be)等代用指标已重建了不同时间尺度的过去 TSI 记录(Steinhilber et al, 2009; Usoskin et al, 2004)。然而, 地球表层地质体中 ^{10}Be 剂量的变化受到诸多因素的综合影响, 并非 TSI 的直接证据, 据此所反演的 TSI 序列势必有所误差。为了更准确地重建过去 TSI 记录, 需要获取 TSI 的直接证据。当前及未来各国纷纷开展地外探测计划, 为这一难题的解决提供了新的途径。

由于地外天体(如月球)表层没有大气圈的屏障、水圈的调节和生物圈(包括人类活动)的影响, 太阳辐射对其产生直接的加热作用。月球表层温度的剧烈变化向下传导, 与一定深度的月壤发生热交换。在没有水的干扰而产生耗散的条件下, 温度垂向分布仅与月壤物质的导热特性有关, 并可长期累积, 因此月壤垂向温度谱可作为 TSI 的重要记录。在地球表面的实验表明, 地面钻探计划已成功获取

地表以下 500 m 深的钻孔, 并据此反演过去 500 a 的气温变化信息(Huang et al, 2000; Mann et al, 1999)。与地球不同的是, 月球上至少过去 10 ka 内不存在构造运动和火山活动, 表层月壤没有明显来自其内部的热流贡献, 温度剖面谱主要是由太阳活动所驱动, 这为利用月球温度剖面重建过去 TSI 提供了可能, 有关学者也开展过相关研究(Hiroko et al, 2008; Lean, 2000)。

Miyahara 等(2008)将两种 TSI 情景(Lean, 2000; Wang et al, 2005)作为输入项进行热流数值计算, 研究月壤剖面温度对 TSI 的响应。结果表明, 记录百年尺度 TSI 变化信号的理想深度为 10 m, 其中的温度变化幅度从极地附近的 0.01 K 到赤道附近的 0.017 K, 用于重建 TSI 的月壤剖面的最佳位置是在月球赤道附近(Miyahara et al, 2008)。该研究提供了利用未来月球探索中可获得的月壤温度剖面数据, 重建蒙德极小期和小冰期的物理基础和新的研究思路。循着这样的思路, 今后可进一步将其所使用的一维模型扩展到三维模型, 并深入探究月壤孔隙度、颗粒大小、物质组成以及其他潜在热源对月壤垂直温度谱的影响, 从而更准确地据此重建过去 TSI 的变化情况。

4 结论与展望

太阳活动对地球表层系统环境变化的影响得到越来越多的关注。综合现代气候学和古气候研究成果, 太阳活动是影响气候变化重要的自然驱动力。各种机制研究在理论和观测层面均取得了一定的进展, 但尚未彻底解决太阳活动驱动气候变化的机制问题。TSI 的监测与重建是该项研究的重要基础。现有的地基和卫星平台监测资料表明, 太阳活动周期中 TSI 的变化幅度很小, 按照现有的气候模式不足以引起各种记录中所观测到的气候变化(主要是气温指标)。仅靠现有的、非常有限的 TSI 监测数据, 难以获取太阳活动及其所引起的 TSI 变化对气候变迁的驱动机制, 对过去太阳活动和 TSI 变化的幅度以及未来趋势也难以作出准确的判定。

地基和卫星平台的 TSI 监测工作已获取了许多不同时间尺度和时间分辨率的 TSI 变化序列。然而, 由于仪器性能、使用时间和监测环境等客观因素的影响, 使得所获得的 TSI 资料具有诸多不确

定性, 监测数据及其合成结果的可靠性和精度有待进一步提高。因此, 需要继续探索太阳活动及其所引起TSI变化的机制, 据此研发精度更高的探测仪器, 获取更为可靠的TSI实测数据; 同时, 还需整合现有长周期数据合成方法, 并继续坚持TSI的长期监测工作, 积累充足的监测资料, 以便开展相关研究。

此外, 利用宇宙成因核素和地外天体信息反演的方法, 为重建过去太阳活动造成的TSI变化提供了新思路, 是该领域发展的重要方向之一, 应受到足够的重视, 但对该方法的局限性也应有必要的认识, 在此基础上不断加以改进, 实现更长时间序列、更高精度的过去TSI序列的重建。

随着TSI长期监测资料的积累, 以及长时间序列的过去TSI重建工作不断推进, 人们所获悉的TSI长期变化资料越来越翔实, 这将促进太阳活动及其所引起的TSI变化影响地球表层系统(特别是对全球气候变迁的驱动)的科学认识不断深入, 有助于客观判定人类活动对全球气候变化的贡献, 并据此采取必要的措施, 实现地球表层系统的可持续发展。

参考文献(References)

- Beer J, A Blinov, G Bonani, et al. 1990. Use of ^{10}Be in polar ice to trade the 11-year cycle of solar activity. *Nature*, 347: 164-166.
- Bond G, Showers W, Cheseby M, et al. 1997. A pervasive millennial-scale cycle in north Atlantic Holocene and glacial climate. *Science*, 278: 1257-1266.
- Broecker W S, Maier-Reimer. 1992. The influence of air and sea exchange on the carbon isotope distribution in the sea. *Global Biochemical Cycles*, 6(3): 315-320.
- Dewitte S, Crommelynck D, Mekaoui S, et al. 2004. Measurement and uncertainty of the long-term total solar irradiance trend. *Solar Physics*, 224(1-2): 209-216.
- Eddy J A. 1997. Climate and the changing sun. *Climate Change*, 1(2): 173-190.
- Edouard B, Grant M R, Françoise Y. 1997. Solar modulation of cosmogenic nuclide production over the Last Millennium: comparison between ^{14}C and ^{10}Be records. *Earth and Planetary Science Letters*, 150(3): 453-462.
- Egorova T, Rozanov E, Manzini E, et al. 2004. Chemical and dynamical response to the 11-year variability of the solar irradiance simulated with a chemistry-climate model. *Geophysical Research Letters*, 31(6): 6119-6122.
- Fleagle R G, Businger J A. 1980. An introduction to atmospheric physics. Orlando, FL: Academic Press.
- Forster P, Ramaswamy V, Artaxo P, et al. 2007. Changes in atmospheric constituents and in radioactive forcing//Solomon S, Qin D, Manning M, et al. *Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of IPCC*. Cambridge, UK: Cambridge University Press: 129-234.
- Foster S S. 2004. 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, UK: University of Southampton.
- Foukal P, Fröhlich C, Spruit H, et al. 2006. Variations in solar luminosity and their effect on the earth's climate. *Nature*, 443: 161-166.
- Fröhlich C, Crommelynck D, Wehrli C, et al. 1997. In-flight performances of VIRGO solar irradiance instruments on SOHO. *Solar Physics*, 175(2): 267-286.
- Fröhlich C, Lean J. 2004. Solar radiative output and its variability: Evidence and mechanisms. *Astronomy and Astrophysics Review*, 12(4): 273-320.
- Fröhlich C. 2006. Solar irradiance variability since 1978. *Space Science Reviews*, 125(1-4): 53-65.
- Gray L J, Beer J, Geller M, et al. 2010. Solar influences on climate. *Reviews of Geophysics*, 48(4): RG4001.
- Greg K, Judith L L. 2011. A new, lower value of total solar irradiance: evidence and climate significance. *Geophysical Research Letters*, 38(1): L01706.
- Haigh J D. 1994. The role of stratospheric ozone in modulating the solar radioactive forcing of climate. *Nature*, 370: 544-546.
- Haigh J D. 1996. The impact of solar variability on climate. *Science*, 272: 981-984.
- Haigh J D, Winning A R, Toumi R, et al. 2010. An influence of solar spectral variations on radiative forcing of climate. *Nature*, 467: 696-699.
- Hansen J, Sato M, Ruedy R, et al. 2006. Global temperature change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 103(39): 14288-14293.
- Horiuchia K, Uchidab T, Sakamotoa Y, et al. 2008. Ice core record of ^{10}Be over the past millennium from Dome Fuji, Antarctica: A new proxy record of past solar activity and a powerful tool for stratigraphic dating. *Quaternary Geochronology*, 3(3): 253-261.
- Hooy D V, Kyle H L, Hickey J R, et al. 1992. The Nimbus-7

- solar total irradiance: A new algorithm for its derivation. *Geophysical Research*, 97(A1): 51-63.
- Hoyt D V, Schatten K H. 1993. A discussion of plausible solar irradiance variations: 1700-1992. *Journal of Geophysical Research*, 98(A11): 18895-18906.
- Hoyt D V, Schatten K H. 1998. Group sunspot numbers: A new solar activity reconstruction. *Solar Physics*, 181(2): 491-512.
- Huang S H, Pollack N, Shen P Y. 2000. Temperature trends over the past five centuries reconstructed from borehole temperatures. *Nature*, 403: 756-758.
- Idso C, Singer S F. 2009. Climate change reconsidered: 2009-report of the Nongovernmental International Panel on Climate Change(NIPCC). Chicago: The Heartland Institute.
- Jager C D, Usoskin I. 2006. On possible drivers of sun-induced climate changes. *Journal of Atmospheric Solar-terrestrial Physics*, 68(18): 2053-2060.
- Karlen W, Kuyljenstierna J. 1996. On solar forcing of Holocene climate: Evidence from Scandinavia. *The Holocene*, 6(3): 359-365.
- Keihm S J. 1984. Interpretation of the lunar microwave brightness temperature spectrum: Feasibility of orbital heat flow mapping . *Icarus*, 60(3): 568-589.
- Kopp G, Lawrence G. 2005. The total irradiance monitor (TIM): Instrument design . *Solar Physics*, 230: 91-109.
- Krivova N A, Solanki S K, Wenzler T. 2009. ACRIM-gap and total solar irradiance revisited: Is there a secular trend between 1956 and 1996? *Geophysical Research Letters*, 36 (20): L20101.
- Krivova N A, Solanki S K, Fligge M, et al. 2003. Reconstruction of solar irradiance variations in cycle 23: Is solar surface magnetism the cause? *Astronomy and Astrophysics Review*, 399(1): L1-L4.
- Lean J, Beer J, Bradley R. 1995. Reconstruction of solar irradiance since 1610: Implications for climate change. *Geophysical Research Letters*, 22(23): 3195-3198.
- Lean J. 2000. Evolution of the sun's spectral irradiance since the Maunder Minimum. *Geophysical Research Letters*, 27 (16): 2425-2428.
- Lockwood M, Frohlich C. 2008. 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. *Proceedings the Royal of Society A*, 464: 1367-1385.
- Magny M. 1993. Solar influence on Holocene climate changes illustrated by correlation between past lake-level fluctuations and the atmospheric ^{14}C record. *Quaternary Research*, 40(1): 1-9.
- Mann M E, Bradley R S, Hughes M K. 1999. Northern hemisphere temperatures during the past millennium: Inferences, uncertainties, and limitations. *Geophysical Research Letters*, 26(6): 759-762.
- Masarick J, Beer J. 1999. Simulation of particle fluxes and cosmogenic nuclide product ion in the earth's atmosphere. *Journal of Geophysical Research*, 104(D10): 112099-12111.
- Matthes K. 2011. Atmospheric science: Solar cycle and climate predictions. *Nature Geoscience*, 4(11): 735-736.
- Miyahara H, Wen G Y, Robert F C, et al. 2008. Deriving historical total solar irradiance from lunar borehole temperatures. *Geophysical Research Letters*, 35(2): L02716.
- Nicola Scafetta, Richard C Willson. 2009. ACRIM-gap and TSI trend issue resolved using a surface magnetic flux TSI proxy model . *Geophysical Research Letters*, 36(5): L05701.
- Pachauri R K, Reisinger A, Nottage R, et al. 2007. Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of IPCC. Geneva, Switzerland: IPCC.
- Raisbeck G M, Yiou F, Jouzel J, et al. 1990. ^{10}Be and $\delta^2\text{H}$ in polar ice cores as a probe of the solar variability's influence on climate. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, A330: 463-470.
- Rasmus E Benestad. 2006. Solar Activity and Earth's Climate. London: Springer-Verlag London, Limited.
- Reid G C. 2000. Solar Variability and the earth's climate: Introduction and overview. *Space Science Reviews*, 94(1-2): 1-11.
- Rind D. 2002. The sun's role in climate variations. *Science*, 296: 673-677.
- Rottman G. 2005. The SORCE Mission. *Solar Physics*, 230 (1): 7-25.
- Ineson S, Scaife A A, Knight Jeff R, et al. 2011. Solar forcing of winter climate variability in the Northern Hemisphere. *Nature Geoscience*, 4(11): 753-757.
- Schöll M, Steinhilber F, Beer J, et al. 2007. Long-term reconstruction of the total solar irradiance based on neutron monitor and sunspot data. *Advances in Space Research*, 40(7): 996-999.
- Shindell D T, Schmidt G A, Mann M E, et al. 2001. Solar forcing of regional climate change during the Maunder Minimum. *Science*, 294: 2149-2152.

- Smith E A, Harr T H V, Hickey J R, et al. 1983. The nature of the short period fluctuations in the solar irradiance received by the earth. *Climatic Change*, 5(3): 211-235.
- Solanki S K, Fligge M. 1999. A Reconstruction of total solar irradiance since 1700. *Geophysical Research Letters*, 26(16): 2465-2468.
- Solomon S, Qin D, Manning M, et al. 2007. Climate change 2007: The physical science basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of IPCC. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Steinrueger F, Beer J, Frohlich C. 2009. Total solar irradiance during the Holocene. *Geophysical Research Letters*, 36(19): L19704.
- Stuiver M. 1980. Solar variability and climate change during the current millennium. *Nature*, 286: 868-871.
- Tang W J, Yang K, Qin J, et al. 2011. Solar radiation trend across China in recent decades: A revisit with quality-controlled data. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11(1): 393-406.
- Tinsley B A. 2000. Influence of the solar wind on the global electric circuit, and inferred effects on cloud microphysics, temperature, and dynamics of the troposphere. *Space Science Reviews*, 94(1-2): 231-258.
- Tung K K, Camp C D. 2008. Solar cycle warming at the earth's surface in NCEP and ERA-40 data: A linear discriminant analysis. *Journal of Geophysical Research*, 113: D05114.
- Usoskin I G, K Mursula, S Solanki, et al. 2004. Reconstruction of solar activity for the last millennium using ^{10}Be . *Astronomy and Astrophysics Review*, 413(2): 745-751.
- Vaquero J M, Gallego M C, Trigo R M, et al. 2006. A new reconstruction of total solar irradiance since 1832. *Atmosfera*, 19(4): 267-274.
- Wang S W. 2009. Solar constant. *Advances in Climate Change Research*, 5(1): 61-62. [王绍武. 2009. 太阳常数. 气候变化研究进展, 5(1): 61-62.]
- Wang Y J, Chen H, Edwards R L, et al. 2005. The Holocene Asian monsoon: Links to solar charges and north Atlantic climate. *Science*, 308: 854-857.
- Wang Y M, Judith L L, Sheeley N R. 2005. Modeling the sun's magnetic field and irradiance since 1713. *Astrophysical Journal*, 625(1): 522-538.
- Wenzler T, Solanki S K, Krivova N A. 2009. Reconstructed and measured total solar irradiance: Is there a secular trend between 1975 and 2003? *Geophysical Research Letters*, 36(11): L20102.
- Wild M, Gilgen H, Roesch A, et al. 2005. From dimming to brightening: Decadal changes in solar radiation at earth's surface. *Science*, 308: 847-850.
- Willson R C. 1994. The sun as a variable star, solar and stellar irradiance variations. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Willson R C. 1997. Total solar irradiance trend during solar cycle 21 and 22. *Science*, 277: 1963-1965.
- Willson R C. 2001. The ACRIMSAT/ACRIM III experiment: Extending the precision, long-term total solar irradiance climate database. *The Earth Observer*, 13(3): 14-17.
- Willson R C, Mordvinov A V. 2003. Secular total solar irradiance trend during solar cycles 21-23. *Geophysical Research Letters*, 30(5): 3-6.
- Xu J C, Li K J. 2011. Progress in the measurement and study of solar irradiance. *Progress in Astronomy*, 29(2): 132-147. [徐景晨, 李可军. 2011. 太阳辐照的观测研究进展. 天文学进展, 29(2): 132-147.]
- Yang J D, Xu S J. 2007. Isotope and global environmental change. Beijing, China: Geological Press House. [杨杰东, 徐士进. 2007. 同位素与全球环境变化. 北京: 地质出版社.]
- Yang R W, Cao J, Huang W, et al. 2009. Cross wavelet analysis of the relationship between total solar irradiance and sunspot number. *Chinese Science Bulletin*, 54(7): 871-875. [杨若文, 曹杰, 黄玮, 等. 2009. 太阳常数与太阳黑子数关系的交叉小波分析. 科学通报, 54(7): 871-875.]
- Yu X F, Zhou W J, Liu Z. 2011. Different patterns of changes in the Asian summer and winter monsoons on the eastern Tibetan Plateau during the Holocene. *The Holocene*, 21(7): 1031-1036.
- Zhao L, Xu Y, Wang J S, et al. 2011. Progress in studies on the influence of solar activity on climate change during the last 100 years. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 1(4): 37-48. [赵亮, 徐影, 王劲松, 等. 2011. 太阳活动对近百年气候变化的影响研究进展. 气象科技进展, 1(4): 37-48.]
- Zhou L M, Tinsley B A, Zheng X M, et al. 2007. The advanced in mechanism of the effect of the solar activity on the climate by space-weather. *Advances in Earth Science*, 22(11): 1099-1108. [周立曼, Tinsley B A, 郑祥民, 等. 2007. 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, 22(11): 1099-1108.]

Research progress in monitoring and reconstruction of Total Solar Irradiance

CHEN Shiji, ZHOU Limin, ZHENG Xiangmin

(Key Laboratory of Geo-Information Science of the Ministry of Education, East China Normal University,
Shanghai 200241, China)

Abstract: Total Solar Irradiance (TSI) is defined as total energy of electromagnetic radiation of all bands from the sun to any sphere (including the Earth's surface) in per unit area and per unit time. Change of TSI in solar active cycle has been considered as one of important candidate factors impacting global climate change. Monitoring and reconstruction of TSI is the important foundation for the study of the mechanism of how solar activities drive global climate change. In this article, we first reviewed the history of both ground-based and satellite-based TSI monitoring and the results they produced. Then, we analyzed the research progress on, and the problems in, using cosmogenic nuclides and celestial information to reconstruct TSI series. Finally, we provided an outlook of future directions in this field. Existing ground-based and satellite-based TSI monitoring has access to lots of TSI series of different time-scales and temporal resolution. The TSI monitoring data shows that TSI changes very little in each solar activity cycle, not enough to cause the earth surface temperature rise observed and documented in a variety of records. However, solar physics has not yet fully interpreted the physical process of TSI change, and, with limited TSI monitoring data, it is difficult to find out the mechanism of how solar activities cause TSI changes and drive the climate change. It is also impossible to accurately determine the variations of the past or future solar activities and TSI. In addition, due to instrument capacity, service time, monitoring environment and other objective factors, the TSI data has many uncertainties. Therefore, it is necessary to continue exploring the mechanism of solar activities and the TSI change, develop higher precision equipment, integrate different data composite methods, such as ACRIM, PMOD, and IRMB, and adhere to long-term TSI monitoring. In addition, use of cosmogenic nuclides such as ^{10}Be and ^{14}C in reconstructing TSI change caused by solar activity is also necessary to obtain long-period TSI series. By using cosmogenic nuclides, many historical TSI series have been reconstructed. Since the index of cosmogenic nuclides is an indirect record of TSI, we need to find out the records directly driven by TSI change. Explorations to other planets in the near future may provide a unique opportunity to resolve this issue. Currently, deriving historical TSI from celestial information such as lunar borehole temperatures has proved to be feasible. Furthermore, limitations of these methods should be noticed, and we need to improve the method of TSI reconstruction, so that we can get longer sequences and more accurate reconstruction of historical TSI. With the accumulation of long-term TSI monitoring data and progress in long sequence historical TSI reconstruction, we will obtain more and more detailed and reliable TSI series. It's important to objectively assess the impact of human activities on global climate change, and take effective measures accordingly to achieve the sustainability of earth surface system.

Key words: solar activity; Total Solar Irradiance; monitoring; reconstruction; research progress