

文章编号: 1000-8349(2011)02-132-16



太阳辐照的观测研究进展

徐景晨^{1,2}, 李可军^{1,3}

(1. 中国科学院 国家天文台 / 云南天文台, 昆明 650011; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049;
3. 中国科学院 国家天文台 太阳活动重点实验室, 北京 100012)

摘要: 太阳总辐照是指在地球大气层顶接收到的太阳总辐射照度, 也叫“太阳常数”, 但它实际上并非常数。太阳总辐照随波长的分布即为太阳分光辐照。太阳辐照变化的研究, 对理解太阳表面及内部活动的物理过程、机制, 研究地球大气、日地关系, 解决人类面临的全球气候变暖的挑战等, 都具有重要意义。首先简单介绍了太阳辐照, 回顾了太阳辐照的空间观测; 接着介绍了观测数据的合并, 以及对合成数据的一些研究; 然后讨论了太阳辐照变化的原因, 简述了太阳总辐照的重构及其在气候研究上的一些应用, 并进行必要的评论; 最后对未来的研究方向提出了一些看法。

关键词: 太阳物理学; 太阳辐照; 太阳常数

中图分类号: P182 **文献标识码:** A

1 引 言

太阳总辐照 (Total Solar Irradiance, TSI) 是指距离太阳一个天文单位处, 在以太阳中心为球心的球面上, 单位时间通过单位面积的、全波段的电磁辐射能量之和。TSI 在各个波长范围内的分布即为太阳分光辐照 (Spectral Solar Irradiance, SSI)。太阳辐照是人类所用能源的主要来源, 是地球气候的主要驱动力^[1,2], 其具有合适的值也是人类文明存在的必要条件。地球大气层对来自太阳的能量的吸收、散射、反射强烈依赖于波长, 而产生各波长辐射的太阳大气高度区域也随波长的不同而不同^[3]。

收稿日期: 2010-10-13; **修回日期:** 2010-12-28

资助项目: 国家自然科学基金 (10873032, 10921303, 40636031); 973 计划 (2011CB811406)

引起地球接收到的太阳辐射能量变化的因素有两个: (1) 地球相对太阳距离、倾角等轨道参数的变化; (2) 太阳自身辐射能量的变化。第一个因素可以很精确地预测且变化很缓慢^[4], 本文将讨论第二个因素。在现代观测手段出现以前, 人们一直认为太阳辐照是个常数, 但是近 30 a 来积累的空间卫星观测资料表明, 太阳辐照在所有能够观测的时间尺度上都在变化^[5,6]。太阳辐射的能量来源于核心区的热核反应, 经过一系列辐射转移过程后发射出来, 因而其大小会受到太阳内部及表面各种活动的影响。近十几年来, 随着观测资料的增多, 对引起太阳辐照变化的物理机制的研究取得了很大进步, 发展了一些模型进行重构^[7-9], 可以很好地再现太阳辐照的变化^[3,10]。太阳辐照变化的研究, 对于研究太阳内部的结构与演化, 太阳表面各种活动现象的物理机制, 全球气候的长期变化, 以及日地关系等都有很重要的应用价值^[6,11]。

第 2 章将介绍太阳辐照的观测, TSI 卫星观测数据的合成, 及合成方法和最终合成数据之间的比较与讨论; 第 3 章讨论 TSI 合成数据的一些周期特征, 及 TSI 在第 24 太阳活动周极小期的值是否为极小的问题; 第 4 章讨论辐照变化的原因; 第 5 章简要介绍太阳辐照的重构及其在气候研究上的一些应用, 并结合作者的认识进行必要的评论。最后一章对未来的研究方向提出需要加强的几个方面。

2 太阳辐照观测

2.1 TSI 观测

一个多世纪以来, 太阳辐射的能量如何变化, 以及这种变化怎样影响地球气候等问题一直吸引着科学家的好奇心^[12]。早在 1837 年, 法国物理学家 Claude Pouillet 和英国天文学家 John Herschel 就通过记录阳光照射下水的升温过程, 然后由水的比热值来推定 TSI 的值, 他们测得的结果约为现在的一半。1884 年美国天文学家、测辐射热计的发明者 Samuel Langley 在加利福尼亚州的惠特尼山上, 通过在一天的不同时刻对 TSI 进行测量以消除地球大气吸收的影响, 得到的值为 $2\ 903\ \text{W}/\text{m}^2$ 。1902 到 1957 年间, 美国天体物理学家 Charles Abbot 和其他一些人在不同纬度地区进行测量, 所得值在 $1\ 322$ 到 $1\ 465\ \text{W}/\text{m}^2$ 之间。有两个曾经被广泛引用的 TSI 测量结果: 一个是 1954 年 Johnson 根据 20 世纪 50 年代以前的地面和火箭(紫外区) 测量结果, 综合分析后得到 TSI 值为 $1\ 394\ \text{W}/\text{m}^2$; 另一个是 1971 年 Labs 和 Neckel 综合 20 世纪 60 年代地面和高空观测结果得到的值为 $1\ 352\ \text{W}/\text{m}^2$ ^[13]。

地面测量都不可避免地受到地球大气的影响, 不同作者所用的仪器设备、观测点的大气条件和所采用的大气消光改正方法不尽相同, 同时在绝对标度校准和不同标度系统的换算上也往往存在误差; 火箭测量则受到观测时间短、仪器误差大、不同仪器有性能差异等制约。因而这些观测得不到准确一致的值, 更不可能去研究 TSI 的变化。自从 1978 年 10 月美国 NIMBUS7 卫星携带“Hickey-Frieden 空腔辐射计”(Hickey-Frieden cavity radiometer, HF) 发射升空以后, TSI 就得到了由几颗卫星相继进行的连续观测(一般有 2~4 个卫星同时进行), 见表 1^[6,14]。这些仪器都携带有“电校准辐射计”(Electrically Calibrated Radiometer, ECR), 它由一个用来吸收太阳辐照的空腔和一个电校准的热流量转换器组成^[15]。

图 1(a) 显示了这些卫星观测的原始数据。可以明显看出, 由于不同仪器所携带的电校准

表 1 观测 TSI 的卫星及仪器

仪器	所属卫星	运行时间 / 年份	参考文献
HF	NIMBUS7	1978—1993	[16]
ACRIM I	SMM	1980—1989	[17]
ERBE	ERBS	1984—2005	[18]
ACRIM II	UARS	1991—2001	[17]
SOLCON	Space shuttle	1992—2003	[19]
SOVA	EURECA	1992—1993	[20]
DIARAD/VIRGO	SOHO	1996— …	[14]
PMO 06/VIRGO	SOHO	1996— …	[21]
ACRIM III	ACRIMSAT	1999— …	[22]
TIM	SORCE	2003— …	[23]

注：“…”表示目前仍在运行中，下同。

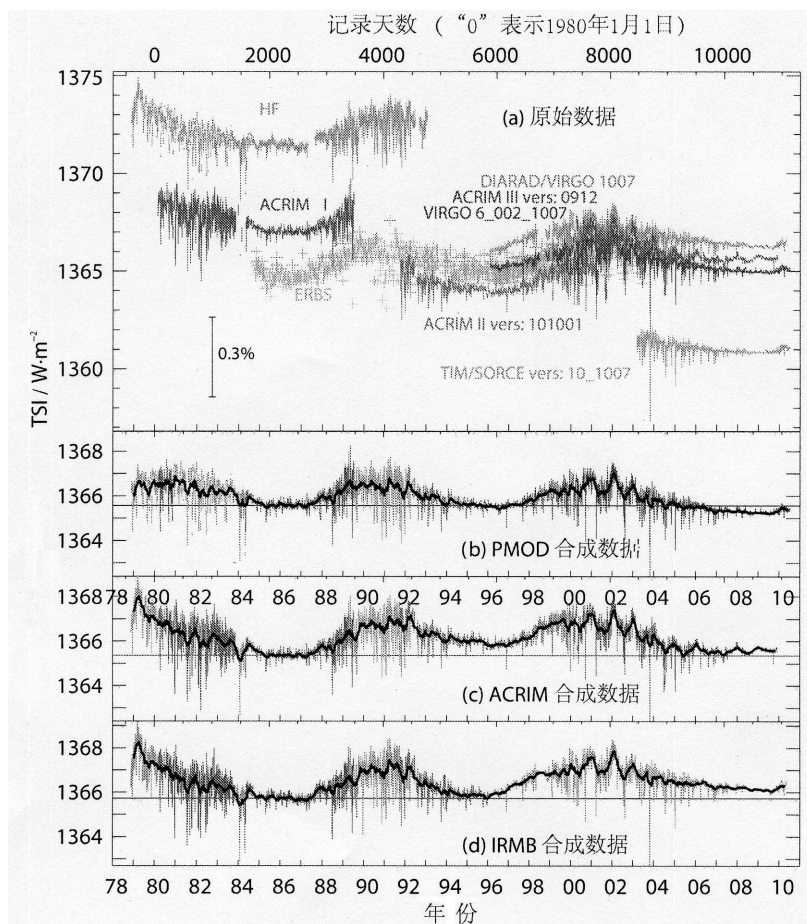


图 1 TSI 原始卫星数据与三种合成数据。

(a) 自 1978 年 11 月以来由各个仪器团组发布的日平均 TSI 卫星数据, (b) PMOD 合成数据, (c) ACRIM 合成数据, (d) IRMB 合成数据^[3]。

辐射计之间的性能差异, 以及卫星所处环境的不同等, 它们测量的平均值基本上都不在一个水平线上, 甚至相差很大; 不同仪器在同一时间段里测量的值也有很大差异。例如, “太阳辐射和气候试验” (Solar Radiation and Climate Experiment, SORCE) 卫星携带的“太阳辐射监测器” (Total Irradiance Monitor, TIM) 测量的平均值, 与 NIMBUS7/HF 测量的平均值之间相差达 10 W/m^2 , 比同时期其他仪器测量值也要显著地低约 5 W/m^2 。

2.2 SSI 观测

TSI 是地球辐射收支平衡的关键部分, 而地球的大气、云层、地面等对 TSI 的吸收、散射、反射强烈依赖于辐射光波的波长。例如, 可见光和近红外辐射可以穿过云层严重影响地球表面和对流层; 而紫外波段辐射在对流层和平流层就被吸收了^[3]。气候研究领域尤为关注的问题是太阳辐射在紫外波段的变化^[25]。

不同波段 (能量) 的辐射来自太阳不同高度、不同温度的大气层。如, 可见光和红外辐射主要产生于光球和色球层, 而 X 射线和紫外光大多来自日冕和过渡区。太阳辐射变化的分布也与波长有关, TSI 在一个活动周内大约变化 0.1%, 200~300 nm 内辐照变化为几个百分点, 150~200 nm 内辐照变化为 10%~20%, 而 Ly- α (121.6 nm 附近) 发射线能量变化超过 50%, 某些极紫外波段能量的变化能达到 100%。因此, 虽然 TSI 的大部分能量集中在可见光和近红外波段, 但是变化的大部分却在紫外波段^[24], 如图 2 所示。而这部分变化可能会对地球气候系统产生重要影响^[25]。例如, Haigh 等人比较了 2004 年 11 月和 2007 年 11 月太阳辐射的卫星观测数据和 Lean 等的模型数据^[27], 并研究了太阳分光辐照变化对臭氧浓度的影响。观测数据显示, 从 2004 年到 2007 年的太阳活动减弱阶段, 太阳在紫外波段 (约波长 400 nm 以下) 的辐照也减弱了, 而可见光和红外波段的辐照都增加了; Lean 等人的模型结果则显示它们都减小了, 与观测不一致。研究发现, SSI 的这种变化似乎导致了海拔高度 45 km 以下平流层臭氧浓度的显著下降。同时, 观测数据也显示, 太阳对地球气候的辐射强迫作用 (Radiative Forcing) 与太阳活动是不同相的^[28]。

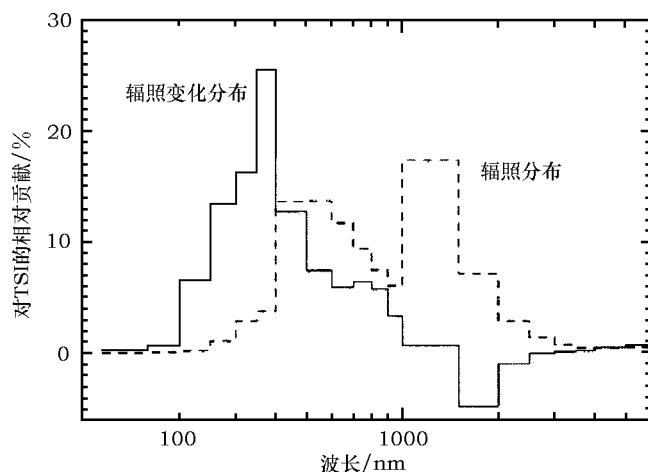


图 2 1 个太阳活动周里, 辐照和辐照的变化在各个波段的分布对 TSI 的相对贡献。其中虚线表示辐照, 实线表示辐照的变化。注意横坐标是不均匀的, 200 nm 以下约每单位长度 40 nm, 200~400 nm 每单位长度约 50 nm, 400~1 000 nm 每单位长度约 100 nm, 1 000 nm 以上的是每单位长度约 500 nm^[25]。

因此, 研究 SSI 有助于我们理解辐照产生的物理过程, 以及它们对地球大气层和气候的影响, 对其他行星大气环境的研究也有重要意义^[29]。关于 SSI 还有一个重要方面是, 变化的极紫外辐射影响热成层和电离层, 改变地球上层大气的中性密度 (Neutral Density)。由于卫星、空间站等的运动受此中性密度影响, 如果能够实时预测它的变化, 就能够对卫星进行更精确的定位, 能显著地提高卫星操作的可靠性与准确性^[29]。

由于在地球大气物理和太阳物理的研究中, 不同的项目需要用不同分辨率的仪器来观测不同波长的辐射能量, 所以 SSI 的观测在时间上和波段上都是间断的。最早的是美国国家海洋和大气管理局 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) 在他们的“环境应用静地卫星” (Geostationary Operational Environmental Satellites, GOES) 上放置的“X 射线探测器” (X-Ray Sensors, XRS's), 这也提供了现存持续时间最长的 SSI 连续观测数据。此后, 美国和欧洲相继在多颗卫星上携带仪器测量太阳在某些波段的上的辐照, 见表 2^[3]。

表 2 观测 SSI 的卫星及仪器

仪器	所属卫星	运行时间 / 年份	大致观测波长范围 /nm
XRS's	GOES(多颗)	1975— …	0.05~0.4, 0.1~0.8
SUM	SME	1981—1991	115~302
SBUV/2	POES(多颗)	1985— …	252.0~339.8, 160~400
SOLSTICE	UARS	1991—2005	115~425
SUSIM	UARS	同上	115~410
GOME	ERS-2	1995—2003	240~400
SEM	SOHO	1996— …	0.1~50
VIRGO	SOHO	同上	402, 500, 862
SXP	SNOE	1998—2003	2~35
XPS	TIMED	2001— …	1~34
EGS	TIMED	同上	25~200
SCIAMACHY	ENVISAT	2002— …	240~2 380
XPS	SORCE	2003— …	1~27
SOLSTICE A/B	SORCE	同上	115~310
SIM	SORCE	同上	310~2 400
GOME-2	MetOp-A	2006— …	240~790
SOLSPEC	SOLAR/ISS	2009— …	180~3 000
SolACES	SOLAR/ISS	同上	16~65, 25~99, 39~151, 115~226
EVE	SDO	2010— …	0.1~7, 5~105

2.3 TSI 数据的合成及其讨论

由于卫星和仪器寿命的限制, 还没有一个仪器单独的测量数据覆盖了整个观测时间段 (甚至都不到一个太阳活动周)。但是要研究 TSI 的长周期变化, 需要长时间段、至少几个太阳活动周的数据。因此, 需要对这些不同仪器测量的数据进行交叉校准, 修正由仪器敏感度改变、

长期运行造成的老化等带来的误差, 把不同辐射计测得的数据参照一定标准调整到同一个水平线上, 合并到一起得到 TSI 连续的变化数据, 这有不同的方法。

目前可用的合成数据有 3 种, 如图 1(b)、(c)、(d) 所示。第 1 种是由 Frohlich 和 Lean 于 1997 年完成, 在东京国际天文学会大会上发表的, 称为“PMOD 合成数据”(名称来源于 Physikalisch-Meteorologisches Observatorium Davos, PMOD)。第 2 种也是在 1997 年, 由 Willson 发表, 并于 2003 年更新, 称为“ACRIM 合成数据”(名称来源于 Active Cavity Radiometer for Irradiance Monitoring, ACRIM)。第 3 种称为“IRMB 合成数据”(名称来源于 Institut Royale Meteorologique de Belgique, IRMB), 由 Dewitte 等人在 2004 年发表^[3,30]。这 3 种合成数据, 是用对应于不同数学原理的方法来构造的。

3 种合成数据虽然基于同样的原始数据, 但由于合成方法和所用参照标准的不同, 它们之间有很多差异。差异最大的地方主要产生于这两个时间段: 1981 年之前, 1989 年 6 月 ACRIM I 末期到 1991 年 10 月 ACRIM II 初期即所谓的“ACRIM 间断”(ACRIM-gap)的那段时间里^[3]。在绝对标度上, PMOD 和 IRMB 合成都是参照空间绝对辐射度参考(Space Absolute Radiometric Reference, SARR)^[14,31], 而 ACRIM 合成则是参照 ACRIM III 的观测数据^[30]。下面简要介绍 3 种合成所用的方法。

ACRIM 合成。在直接比较两个邻近卫星观测数据重叠区域的基础上, 校准 3 个 ACRIM 数据并和 NIMBUS7、ERBS 的数据进行合成, 没有改变原始实验小组发布的观测数据。在这种方法里, 如果原始数据中存在一些由于仪器退化或假信号(Glitch)等造成的误差, 这个合成就是有缺陷的。至少有两个方面的原因: (1) 两个邻近卫星的数据进行并合时, 仅仅用了两个数据组之间重叠区域的平均值, 这很容易得出有偏差的结果; (2) 如果 NIMBUS7/HF 的数据存在假信号, 或者它在“ACRIM 间断”期间确实发生了退化, 那么并合时 ACRIM I 和 ACRIM II 的相对水平位置就是错误的^[32]。

IRMB 合成。把所有数据都参照 SARR, 然后每天的实际数值是通过把那一天所有的卫星观测值进行平均而得到, 即 IRMB 合成对所有能用的每日观测值采用了统计平均法。然而, 由于日平均计算是基于很小的数据集合(每天一两个或者少数情况下 3 个数据), 它不是统计稳健的, 这很容易在丢失或添补某些记录时, 产生人为的误差^[14]。

PMOD 合成。每当 PMOD 小组声称发布的卫星数据是不准确的(由于航天器方向的改变, 或开关传感器, 或是因为一些类似仪器老化造成的突然出现的假信号), 他们就改变发布的 TSI 卫星数据, 并用修改后的数据进行合成。PMOD 小组也大量用一些 TSI 理论模型来证认和改正这些认定错误的 TSI 卫星数据, 但是所用的这些理论模型在最近 10 a 里也一直在不断改进^[33]。

如何连接“ACRIM 间断”, 是每种数据合成方法都要面临的一个很重要的问题, 因为不确定 NIMBUS7/HF 辐射计在“ACRIM 间断”是否由于老化而发生了改变, 这个问题一直很有争议, 由 Lee III, Chapman 等人首先提出^[3]。ACRIM 合成和 PMOD 合成之间最显著的区别是: 怎样用 NIMBUS7/HF 的记录来弥补“ACRIM 间断”。ACRIM 和 IRMB 合成都用的是原始的卫星数据, 没有考虑这个问题。而 PMOD 合成则对发布的原始数据没有考虑的一些影响进行了修正, 结果它们之间有很大不同: 在长期趋势上, ACRIM 合成显示出, TSI 在 22—23 活动周之间的极小值(1996 年 8 月)相比 21—22 周之间的极小值(1986 年 9 月), 有

0.45 W/m² 以上的显著增长; 而 PMOD 合成则显示, 上述两个极小值之间的变化趋势完全可以忽略, 并且它的两个极小值都比 ACRIM 和 IRMB 相应的极小值要低^[32]。

Frohlich 等人对 HF 辐射计的长期行为进行了详尽分析, 并把 HF 数据与 ERBE 观测数据、基特峰的重构数据进行了比较, 表明确实需要对 HF 的数据进行修正^[14]。最近发布的 PMOD 合成数据里, 对用到的 HF 数据又进行了重新修正, 去掉了整个卫星任务期间的假信号和敏感度增加造成的影响, 并修正了卫星入轨初期的增长、后期的退化等误差^[33]。这样得到的 PMOD 合成数据与 ERBS 独立的观测数据、利用基特峰磁图进行重构得到的数据都吻合得很好, 并且在第 21 周有可靠的数据, 因此被研究者们使用得相对较多一些^[3]。

PMOD 合成被应用得比较广泛, 还因为它声称和一些 TSI 理论代理模型的结果一致^[5,34,35]。然而, 由模型得到的数据与 PMOD 合成数据之间的差异也能很容易看出, 例如 Wenzler 等人需要把模型对 PMOD 合成本身进行校准以提高吻合度, 一些变化细节不能够再现^[5]。也不能排除这种情况: 这些 TSI 代理模型参数的另一个校准值, 可能与 ACRIM 或 IRMB 合成符合得更好。而且, 如果发现上面的理论模型或者 PMOD 小组对卫星数据的改正有缺陷, 那么 PMOD 合成也就有缺陷。不管怎样, 依赖于几个改正参数的一些 TSI 理论模型, 和一个 TSI 卫星合成数据之间比较好的吻合, 并不能证实后者的准确性。因为在科学研究里, 理论模型应该用实际观测来检验和评估, 而不是反过来^[32]。

TSI 合成数据之间的差异, 不仅在太阳物理的研究上, 而且在更一般的全球变暖争论上, 都有重要意义。利用过去 400 a 来的 TSI 代理物指数、卫星合成数据、以及全球温度记录进行的现象学分析表明: 在工业前时期和工业时期, 太阳变化(主要是辐照变化)都成为了对气候改变起主导作用的因素。因此, 根据这些分析, 太阳可能会是未来气候变化的主要贡献者^[32]。然而, 太阳在最近 30 a 来对全球变暖的贡献依然是很不确定的, 这主要是由于 TSI 卫星合成数据之间的差异(不能确定哪个合成数据是正确的)。显然, 如果太阳的贡献不确定的话, 造成全球变暖的人为贡献也是不能确定的^[36]。因此, 得到最近 30 a 里可靠的 TSI 合成数据, 具有决定性的意义。

3 TSI 数据的研究

由上述几个合成数据都可以看出, TSI 最明显的特征是它受 11 a 太阳周期活动的调制, 变化周期同黑子、Mg II 指数等类似。平均值约为 1 366 W/m², 一个周期内的变化约为 1.3 W/m²(0.1%), 大气层内的测量值约为 342 W/m²(约 TSI 的 1/4)^[24]。

利用 PMOD 合成数据的分析结果, 可以得到两个有统计意义的周期: 除 10.32 a 的太阳活动周期外, 发现长约 32 d 的自转周期也具有统计意义。它比黑子活动周期(27 d)稍大, 并且间断地出现在黑子极大期附近。TSI 32 d 的自转周期主要由黑子活动引起, 但是也受亮结构的调制。TSI 在一个太阳活动周以上的变化主要来自于黑子阻挡暗化, 和光斑、谱斑及网状结构增亮的综合作用; 在活动周极大期, 亮结构的影响轻微占优势。对 TSI 与每日黑子数(SN)、每日黑子面积(SA)的交叉相关分析表明, 对于黑子和亮结构的影响在一个太阳活动周里对 TSI 的贡献, 前者至少领先后者 29 d, 见图 3^[6]。

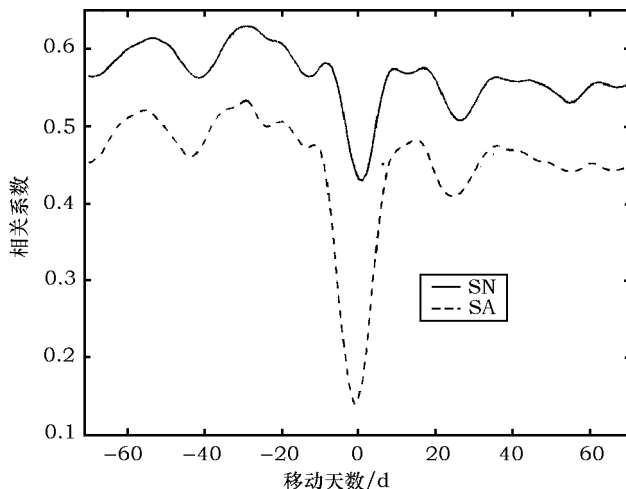


图3 每日 TSI 值与每日黑子数 SN(实线) 每日黑子面积 SA(虚线) 的交叉相关分析
横坐标表示 TSI 相对 SN (SA) 沿时间轴移动的天数, 负值代表向后移动^[6]。

由图可见, 当 TSI 相对 SN (SA) 没有移动时, 相关系数为 0.435 (0.146); 当 TSI 相对它们沿时间轴往后移 29 d (即移动 -29 d) 时, 相关系数达到最大 0.629 (0.533)。因此认为 TSI 落后于太阳黑子活动 29 d。产生这种现象的物理原因还不知道, 但可以推断它与黑子和亮结构的演化有关。黑子群生长并达到最大面积所需要的时间, 比退化至消失所需要的时间短得多。一个大黑子群的生长时间为几个小时到几天, 而黑子群的退化时间长达几天到几个月^[6,26]。

对每日黑子数和黑子面积进行的小波分析发现, 具有统计意义的自转周期间断地出现在黑子极大期附近, 类似于 TSI 的自转周期, 但它的值是约 27 d, 比 TSI 的自转周期稍小。发现 TSI 的准自转信号沿时间轴向前移动几天的时候, 与黑子数和面积显著地正相关, 因此认为它主要由黑子活动引起。在黑子活动周期的极大期, 大的黑子常常出现在日面, 持续几个自转周; 但是在黑子活动极小期, 黑子一般只存活几天以内。这就是为什么 TSI 和黑子活动的自转周期, 间断地出现在太阳活动周的极大期。然而, 由于亮结构的调制, TSI 里的自转周期信号领先于黑子活动, 它的值比黑子活动自转周期稍大一点^[6]。

对黑子数的研究表明, 自第 16 周 (1874 年) 以来, 第 23 太阳活动周有最长的周期长度 (12.6 a) 和最长的下降持续时间 (8.7 a); 而周期长度与地球全球温度的长期变化有重要联系^[38,39]。在第 24 周极小附近, 无黑子事件发生的频率最高, 所以在 23—24 周太阳处在一个相当低的活动水平, 最小平滑的月平均黑子数大约是 1.7 (发生在 2008 年 11 月), 它甚至可能是现代太阳活动周以来太阳活动的最低水平^[38]; 与 1900 年前后的极小期相似^[37]。另外, 在这个极小期, 太阳极区磁场只有以前极小的 2/3 大小, 太阳和日球层开放磁流 (Open Flux) 的大小是自 1967 年有观测以来的最低值, 还有更多的低纬冕洞等^[40]。

然而, 在太阳活动水平很低的 24 周极小期, 太阳辐射总能量即 TSI 的值是否也比前几个极小期的值低呢? 把 2008 年的辐照观测数据与前一个极小 (1996 年) 的相比发现, 3 个 TSI 合成数据得出的结果不一致: PMOD 和 ACRIM 合成数据均显示, 最近极小期 (2009 年) 的 TSI 值比 1996 年的要低约 $2 \times 10^{-4} \text{ W/m}^2$; 而 IRMB 合成数据则显示, 最近极小期的 TSI 值

比 1996 年的要高约 $5 \times 10^{-5} \text{ W/m}^2$ ，如图 4 所示^[37]。而 3 个 TSI 合成数据在 2000 年之后的值都吻合得很好，这应该是源于新的观测仪器精度和可靠性的提高。

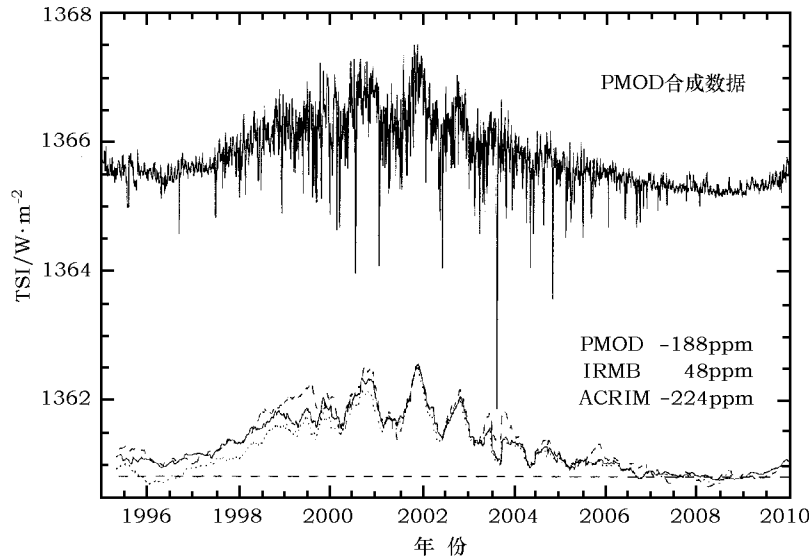


图 4 3 种 TSI 合成数据在最近两个活动周极小期的值的比较

图上部是 PMOD 合成的每日数据，下部是 3 种合成数据在 81 d 平滑后的值。其中实线是 PMOD 合成，虚线是 ACRIM 合成，点线是 IRMB 合成。3 个合成从 1996 年极小到 2008 年极小的变化标于图中：PMOD 和 ACRIM 合成均显示出约 $2 \times 10^{-4} \text{ W/m}^2$ 的下降，而 IRMB 合成则有约 $5 \times 10^{-5} \text{ W/m}^2$ 的增长（图中 ppm 表示 10^{-6} ）^[37]。

4 太阳辐照变化的原因

关于太阳辐照是否变化的问题，曾有过长期争议，主要原因是以往 TSI 测量的精度不高，难以判定不同作者在不同时间测量到的不同结果是源于太阳本身的变化还是它们之间的系统误差。直到“太阳极大年使者”（Solar Maximum Mission, SMM）卫星高精度观测表明 TSI 的变化与日面上的黑子密切相关后，才有了定论。太阳瞬时爆发现象（例如耀斑）引起的辐射增强比 TSI 小 4 个量级以上，几乎可以忽略；因此 TSI 的变化通常是指比太阳耀斑时标（100~1 000 s）长得多的缓慢变化^[13]。

由前面卫星观测数据可知，TSI 在能够测量的时间尺度上都是变化的^[6]。TSI 观测数据两个最显著的特征是：与太阳活动周期同相的幅度约 0.1% 的变化，以及幅度达到 0.1% 甚至比它更大的突然下降；后面这种变化通常持续 7 到 10 d。研究表明，这种“突降”的产生，是黑子群随太阳自转穿过可见日面引起的。例如，在 2003 年 10 月 31 日前后的几天里观测到 TSI 急剧下降了约 4 W/m^2 （见图 1），这是观测到的最大突降，其原因就是有大的黑子群出现（黑子数约从 15 增加到了 170）。趋向太阳活动极大的时候，黑子数目显著地增长，这种突降的深度和出现频率都在增长。然而，平均来说太阳却变亮了，这是因为太阳表面亮结构（光斑和网状结构）的数量也都增加了，而由亮结构覆盖的太阳表面面积比由黑子覆盖的面积增加得更多^[3]。

目前研究表明, TSI 在几分钟到几个小时时间尺度上的变化主要是由对流, 以及与对流相关的米粒组织、中米粒组织、超米粒组织引起的; 在几天到几个星期时间尺度上的变化则由太阳表面磁场结构起主导作用; 在一个太阳活动周上, TSI 约 0.1% 幅度的变化则主要来自黑子暗化, 以及亮光斑、谱斑和网状结构增量的综合作用^[6,41-43]。Solanki 等人^[43]对 VIRGO 的 TSI 观测数据进行了分析, 研究了磁场和对流(米粒组织)对辐照变化的影响。分析表明, 太阳辐照在 1 h 到 1 d 之间的时间尺度上的波动是由表面磁场和对流共同引起的; 在更长时间尺度上则由磁场主导; 在更短时间尺度上是否由对流主导则由于磁场观测精度的限制不能确定。由于太阳辐照的空间观测到目前为止只持续了约 32 a, 在长于 11 a(即一个太阳活动周)时间尺度上的变化还不能确定^[6]。太阳光度和半径在 $10^6 \sim 10^{10}$ a 时间尺度上的显著改变, 则可由恒星结构与演化理论进行预测。

由于无论是暗结构(如黑子), 还是光斑、网状结构等亮结构, 都是太阳表面磁场活动的反映, 与太阳表面磁场的演化有密切联系。因此, 至少目前看来, 辐照变化与太阳表面磁场是紧密联系的^[3,44]。观测表明, 只要有这些磁场结构存在于太阳表面, 它们就会对通过太阳表面的热流形成一个局部的“磁障”(Magnetic Obstruction), 并能增加或减少辐射通量。

黑子处损失的辐射通量, 主要被存储起来加强了它的磁场强度。用目前的磁流体动力学程序模拟太阳黑子表明^[45,46], 它们的暗化作用可以理解为“热塞子”(Thermal Plugs), 黑子里面强的垂直磁场把从深层来的热流转移了。用太阳辐照变化的这种热障碍模型进行的计算表明, 被黑子转移的热流不是被简单地分散到附近然后重新辐射出来(如果情况是这样的话, 它就不会引起辐照的变化), 而是水平地扩散, 又回到了太阳内部, 这个过程比它从附近重新辐射出来要快得多。黑子处损失的热流量也不是直接从光斑处再辐射出来, 光斑是作用与黑子相反的、独立的对光球热流的磁扰动^[47]。结果, 被阻挡的热流实际上仍然储存在太阳内部几十万年, 而不会很快在太阳表面别的地方重现出现, 这也与观测符合: 黑子周围有很弱的“亮环”或根本没有。但是, 这种能量的“存储”只有在黑子的磁场能量增加时才会发生, 而且由黑子引起的 TSI 下降的幅度, 与黑子面积或磁场大小改变也没有表现出明确的依赖关系^[3]。

磁增亮的行为则正好相反, 可以把它们理解为“热漏洞”(Thermal Leaks)。它们看起来亮是因为它们的小尺度磁场在光球表面形成了很多小的沉降, 因而可以让更低、更热大气层的辐射更轻易地跑出来。这种沉降现在已经由光球层高分辨率仪器直接成像观测到^[48], 用三维磁流体力学辐射模拟也可以很详细地再现这种小磁场结构^[49]。

这样, 每个暗的(如黑子)和亮的(如光斑、网状结构等)结构都对太阳辐照的变化有贡献, 其贡献等同于它的投影面积与相对它邻近的未受扰动日面的测光对比度的乘积。近年来发展的半经验模型利用黑子和亮结构面积的记录, 通过把这些结构的贡献相加, 来重构太阳辐照的变化^[9]。这种模型可以解释辐照变化的绝大部分。

Pipin 等人研究了由太阳发电机产生的大尺度磁场对由对流区发射的辐射流量的影响。计算表明, 大尺度磁场的影响能够对太阳辐照产生相对幅度达 0.07% 的调制作用, 会显著影响太阳辐照, 并可能导致它的 11 a 周期变化。这个过程的主要机制是: 在磁场存在情况下对流效率的改变, 以及由于大尺度磁场的产生和耗散所引起的太阳辐射出来的总能量(TSI)的变化^[50]。

然而, 要理解太阳辐照的变化, 最终依赖于太阳大气, 特别是太阳表面各种磁场结构与活动现象(黑子、光斑、网状结构等)的物理模型的建立, 以及对太阳内部活动物理机制的深入理解。

5 太阳辐照的重构简介

尽管太阳辐照变化很弱(TSI 在一个太阳活动周内变化幅度约 0.1%), 但它依然可能会给地球气候系统产生重要影响^[36]。为了定量评估引起气候变化的不同因素的贡献, 需要把来自太阳的影响可靠地隔离开。然而, 全球气候变化通常发生在长于目前可用辐照测量记录的时间尺度上, 因此需要重构辐照变化到卫星前时代^[4], 这只有在合适的模型下才可能实现。这种模型应该尽可能地包含我们对引起辐照变化的物理机制的理解, 还必须首先能够重现已有的观测数据^[51]。而反过来, 通过重构, 也可以检验我们对辐照变化和太阳活动的理解, 有助于研究它们的物理机制。

最直接的方法是利用反映黑子暗化和光斑增量的代理物指数, 如黑子数、黑子面积、光斑面积、Mg II 指数、Ca II K 发射线、F10.7 射电流量等。Mg II 指数是指 Mg II h、k 共振线线心线翼比, 它的线心形成于色球上层, 线翼形成于光球上层; 由于光球(线翼)变化很小, 因此可以用 Mg II 指数量度色球(线心)的变化^[52], 它是光斑和网状结构增量的很好的代理物。这样, 可以由黑子数等得到“黑子暗化指数”, 由 Mg II 指数等得到“光斑增量指数”; 在模型中, 把这两种指数作为输入参数, 即把亮、暗部分的贡献以不同的比例合成, 即得到分光辐照和总辐照。表达式形式对于分光辐照为: $F(\lambda, t) \propto a_\lambda P_s(t) + b_\lambda P_f(t)$, 对所有波长求和即得到总辐照: $S(t) \propto a P_s(t) + b P_f(t)$ 。其中 t 为时间, λ 表示波长, P_s 和 P_f 分别表示黑子暗化指数和光斑增量指数, a 、 b 为不依赖于时间的参数^[30]。由于代理物指数只能有限地反映太阳辐照在某些波段的变化, 这种方法得不到很精确的结果。

目前比较成功的重构方法是基于这样的假设: 所有在长于大约半天时间尺度上的辐照变化, 都完全是由太阳表面磁场的演化决定的^[53]。如 SATIRE 模型^[44], 它把日面分成四种成分: 黑子本影(u)、黑子半影(p)、光斑(f)(包括网状结构等亮的部分)和宁静太阳(q)。每种成分的辐射强度 $I_k(i, j; \lambda)$ 分别利用 Kurucz 的基于平面平行大气模型的 ATLA9 程序进行计算得到^[54]。日面(磁图或连续谱图)的某一像素被各种成分占据的份额用一个填充因子 $\alpha_k(i, j; t)$ 表示 ($0 \leq \alpha_k \leq 1$)。其中, 黑子本影、半影的填充因子 α_u 、 α_p 由连续谱图得到, 光斑的填充因子 α_f 由磁图得到; 去除这 3 种即得到宁静太阳的填充因子, 即 $\alpha_q = 1 - \alpha_u - \alpha_p - \alpha_f$ 。这里 (i, j) 表示日面坐标, λ 表示波长, t 表示时间, $k = u, p, f, q$ 分别代表上述 4 种成分。然后把某时刻、某波长处 4 种成分各自的填充因子与辐射强度的乘积进行求和, 即得到分光辐照 SSI: $F(\lambda, t) = \sum_{i, j} \sum_k \alpha_k(i, j; t) I_k(i, j; \lambda)$; 把它对波长进行积分即为随时间变化的 TSI: $S(t) = \int F(\lambda, t) d\lambda$ 。这种模型比较成功, 差不多能完全用太阳表面磁场的演化来解释 TSI 的变化。

从 17 世纪蒙德极小期以来 400 a 里 TSI 的长期变化, 也由一些研究者们进行了重构, 如 Hoyt 和 Schatten^[55], Lean^[27], Wang 等人^[56] 和 Krivova 等人^[34]。这些 TSI 代理重构是基

于黑子数、地磁活动记录、太阳对 ^{14}C 和 ^{10}B 等的宇宙线同位素调制记录, 以及其他与太阳有关的记录等。然而, 还不是非常确切地知道怎样才能从这些历史记录重构 TSI, 或者利用这些记录是否能足够可靠地重构 TSI 的变化。因此, 得到的几个 TSI 长期代理重构数据之间有很大不同, 它们显示了不同的变化模式 (Pattern) 和极值, 如图 5 所示。但是, 它们也再现了一些相似的特征, 特别是蒙德极小期 (1645—1715 年) 和 Dalton 极小期 (1790—1820 年) 的极小值, 以及在 20 世纪上半叶期间 TSI 的增长。事实上, 由于气候对外部强迫的特征响应时间是 8~12 a, 即使 TSI 在 20 世纪下半叶期间保持不变, 20 世纪上半叶期间 TSI 的增长依然可能会诱发全球变暖^[32]。

图 5 显示的 4 个 TSI 代理重构在 1975 年以后的时间段里也呈现出不同的变化趋势。Hoyt 和 Schatten 的 TSI 重构认为 TSI 在这段时间增长了, 与 ACRIM TSI 合成数据一致; 而其他 3 个 TSI 代理重构 Lean, Wang 等人 和 Krivova 等人认为, 自 1978 年来 TSI 平均来说没有改变, 就像 PMOD 合成数据显示的那样。因此, 我们在合成 TSI 卫星观测数据时遇到的不确定性, 在利用 TSI 代理重构时也不能够解决, 因为不同的太阳代理物也确实显示出 TSI 不同的变化趋势^[32]。

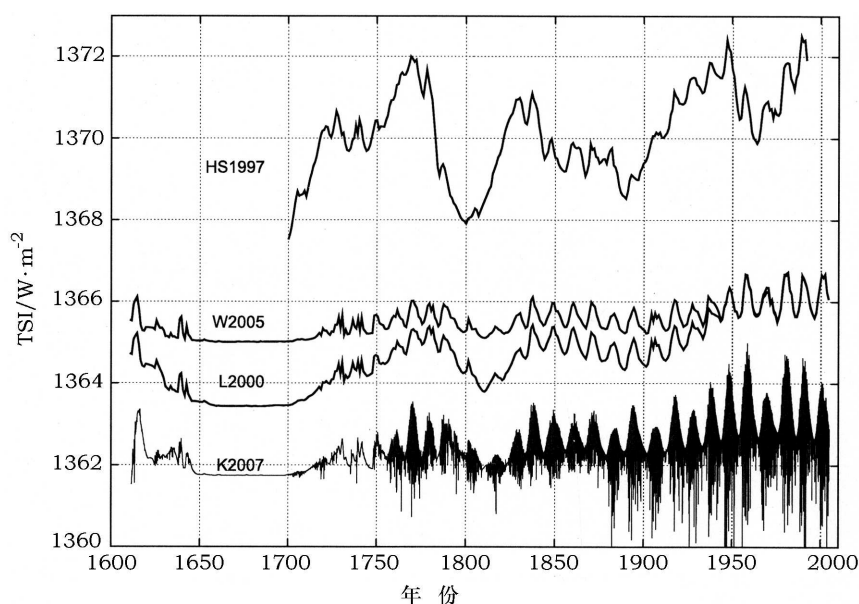


图 5 4 种最近 400 a 来 TSI 的代理物长期重构

由上到下, 分别是由 Hoyt 和 Schatten (HS1997), Wang 等人 (W2005), Lean (L2000) 以及 Krivova 等人 (K2007) 得到的重构数据^[32]。

值得注意的是, 政府间气候变化专门委员会 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 2007 年的报告采用的气候模型与上面的结论不一致。它认为, 在最近一个世纪里, 特别是在最近 30 a 里, 太阳对气候变化的贡献很少。然而, 这种气候模型假定 TSI 强迫 (Forcing) 是太阳对气候唯一的影响因素, 还用了由 Lean 等人^[27,56] 提出的 TSI 代理重构数据, 它和 1978 年以来的 PMOD TSI 合成数据一致。然而, 如果发现 PMOD 合成数据是有错误的, 那

么这些结论将很有问题。而且最近 Haigh 等人的研究也表明, Lean 等人的模型数据与观测数据在 SSI 变化上存在一些重要差异, 在有些问题 (如纬向平均臭氧浓度变化) 的研究上利用模型重构的太阳辐照数据将得不出可靠的结论^[28]。不管怎样, 目前气候模型显示出的气候对太阳辐照变化比较小的敏感度, 可能是缘于对太阳改变很敏感的几种气候反馈机制及对 TSI 的变化理解不足。这些机制包括: 对会影响平流层水蒸气反馈的臭氧浓度的紫外线调制, 和太阳磁场活动变化有关的缘于宇宙线流量变化对云层的调制等, 这些机制预计会放大太阳辐照变化对气候的影响^[32]。

6 未来的观测与研究方向

尽管已经有了 TSI 最近 32 a、约 3 个太阳活动周的观测数据, 但是由于仪器的性能差异和老化等带来的一些不确定性, 仍然不能得到可靠的 TSI 合成数据, 也就不能确定 TSI 有空间观测以来, 在一个太阳活动周和更长时间尺度上的长期变化趋势。因此, 在观测方面, 需要发展新的观测仪器, 提高仪器的抗老化能力和可靠性, 进而提高观测精度, 得到可靠的观测数据, 并积累更多的观测资料。对 SSI 的观测来说, 还需要覆盖更多波段的连续观测, 特别是对地球气候变化有重要影响的紫外波段的观测。

在理论研究方面, 过去几年里太阳辐照模型取得了很大进步, 已经能够以很高的精确度再现 TSI 的变化。但是, 这类比较好的模型是基于太阳表面磁场的演化, 因此它依赖于磁图观测的分辨率和精确度。我们对黑子、光斑等太阳活动物理机制的理解还不够完善, 各种活动现象与太阳辐照变化的关系也就不能很好地定量确定。重构所用的半经验大气模型有待完善, 特别是在紫外、极紫外波段, 因为这时候假定的局部热动平衡已经失效, 需要发展基于非局部热动平衡的大气模型来计算各个成分的出射光谱。还需要建立更精确的模型, 并尽可能重构 TSI 和 SSI 到蒙德极小期, 甚至重构最近几千年来的太阳辐照变化, 以利于对地球气候长期变化的研究。

致 谢

感谢审稿专家耐心仔细的审阅及建设性意见。

参考文献:

- [1] Beer J, Vonmoos M, Muscheler R. *Space Sci. Rev.*, 2006, 125: 67
- [2] Willson R C. *Science*, 1997, 277: 1963
- [3] Domingo V, Ermolli I, Fox P, et al. *Space Sci. Rev.*, 2009, 145: 337
- [4] Haigh J D. *Living Rev. Solar Phys*, 2007, 4: 2
- [5] Wenzler T, Solanki S K, Krivova N A, Frohlich C. *A&A*, 2006, 460: 583
- [6] Li K J, Xu J C, et al. *Sol. Phys.*, 2010, 267: 295
- [7] Fontenla J, Harder G. *Mem. S. A. It.* 2005, 76: 826
- [8] Tobiska W K, Woods T, Eparvier F, et al. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2000, 62: 1233

- [9] Wenzler T, Solanki S K, Fluri D M, et al. In: Wilson A ed. Proceedings of the SOHO 11 Symposium on From Solar Min to Max: Half a Solar Cycle with SOHO, Noordwijk: ESA Publications Division, 2002: 231
- [10] Tobiska W K. Solar Variability and Solar Physics Missions, 2002, 29: 1969
- [11] Kuhn J R. Adv. Space Res., 2004, 34: 302
- [12] Lean J L. WIREs Climate Change, 2010, 1: 111
- [13] 林元章. 太阳物理导论. 北京: 科学出版社, 2000: 261
- [14] Dewitte S, Crommelynck D, Mekaoui S, Joukoff A. Sol. Phys., 2004, 224: 209
- [15] Gueymard C A, Myers D R. Modeling Solar Radiation at the Earth's Surface: Recent Advances. New York: Springer-Verlag, 2008: 3
- [16] Hoyt D V, Kyle H L, Hickey J R, Maschhoff. J. Geophys. Res. 1992, 97: 51
- [17] Willson R C. The Sun as a Variable Star, Solar and Stellar Irradiance Variations. Cambridge: Cambridge University Press, 1994: 54
- [18] Lee III R B, Gibson M A, Wilson R S, Thomas S. J. Geophys. Res. 1995, 100: 1667
- [19] Dewitte S, Joukoff A, Crommelynck D, et al. Journal of Geophysical Research-Space Physics. 2001, 106: 15759
- [20] Crommelynck D, Domingo V, Barkstrom B, et al. Earths Middle Atmosphere. 1994, 14: 253
- [21] Frohlich C. Metrologia. 2003, 40: S60
- [22] Willson R C. Earth Obs. 2001, 13: 14
- [23] Lawrence G M, Kopp G, Rottman G, et al. Metrologia. 2003, 40: S78
- [24] de Toma G, White O R, Chapman G A, Walton S R. Adv. Space Res., 2004, 34: 237
- [25] Krivova N A, Solanki S K, Floyd L. A&A, 2006, 452: 631
- [26] Vazquez R H, Regulo C, Roca C T. Proceeding of SOHO 18/GONG, Noordwijk: ESA Publications Division, 2006: 69
- [27] Lean J. Geophys. Res. Lett., 2000, 27: 2425
- [28] Haigh J D, Winning A R, Toumi R, Harder J W. Nature, 2010, 467: 696
- [29] Haberreiter M. Solar and Stellar Variability Impact on Earth and Planets, 2009, 264: 119
- [30] Frohlich C. Climate and Weather of the Sun-Earth System(CAWSES): Selected Papers from the 2007 Kyoto Symposium, Tokyo: TERRAPUB, 2009: 217
- [31] Crommelynck D, Fichot A, Lee III R B, Romero J. Adv. Space Res., 1995, 16: 17
- [32] Scafetta N. 2009, preprint(astro-ph/arXiv:0908.0792v1)
- [33] Frohlich C. Space Sci. Rev., 2006, 125: 53
- [34] Krivova N A, Balmaceda L, Solanki S K. A&A, 2007, 467: 335
- [35] Wenzler T, Solanki S K, Krivova N A. Geophysical Research Letters, 2009, 36: L11102
- [36] Haigh J D. Science, 2001, 294: 2109
- [37] Woods T N. 2010, preprint(astro-ph/arXiv:1003.4524v1)
- [38] Li K J. Research in Astron. Astrophys. 2009, 9: 959
- [39] Harvey K L, White O R. JGR, 1999, 104(A9): 19759
- [40] Sheeley N R Jr. 2010, preprint(astro-ph/arXiv:1005.3834v1)
- [41] Unruh Y C, Krivova N A, Solanki S K, et al. A&A, 2008, 486: 311
- [42] Withbroe G L. Sol. Phys., 2009, 257: 71
- [43] Solanki S K, Seleznyov A D, Krivova N A. ESA SP, 2003, 538: 285
- [44] Fligge M, Solanki S K, Unruh Y C. A&A, 2000, 353: 380
- [45] Rempel M. 2010, preprint(astro-ph/arXiv:1011.0981v1)
- [46] Zhao J W, Kosovichev A G. ApJ, 2003, 591: 446
- [47] Foukal P, Lean J. ApJ, 1986, 302: 826
- [48] Lites B W, Scharmer G B, Berger T E, Title A M. Sol. Phys., 2004, 221: 65
- [49] Steiner O. A&A, 2005, 430: 691
- [50] Pipin V V, Kichatinov L L. Astronomy Reports, 2000, 44: 771

- [51] Krivova N A, Solanki S K. *J.Astrophys.Astr.*, 2008, 29: 151
- [52] Snow M, McClintock W E, Woods T N, et al. *Sol. Phys.*, 2005, 230: 325
- [53] Krivova N A, Solanki S K, Fligge A, Unruh Y C. *A&A*, 2003, 399: L1
- [54] Solanki S K, Krivova N A, Wenzler T. *Advances in Space Research*, 2005, 35: 376
- [55] Hoyt D V, Schatten K H. *Sol. Phys.*, 1998, 179: 189
- [56] Wang Y M, Lean J L, Sheeley N R. *ApJ*, 2005, 625: 522

Progress in the Measurement and Study of Solar Irradiance

XU Jing-chen^{1,2}, LI Ke-jun^{1,3}

(1. *National Astronomical Observatories/Yunnan Observatory, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650011, China;*
2. *Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;* 3. *Key Laboratory of Solar Activity, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China*)

Abstract: Total solar irradiance (TSI) is the total amount of solar electromagnetic energy irradiated from the Sun over the entire spectrum at the top of the Earth's atmosphere per unit area and per unit time. The spectrally distributed total solar irradiance is the Spectral Solar Irradiance (SSI). Solar irradiance input is the driving term in the Earth's energy budget, and its variations are reckoned to be the prime solar factors exerting influence on the Earth's climate. The absorption, scattering, reflection of the solar energy by the Earth's atmosphere, clouds, or surface depend greatly on wavelength, and light of different wavelength comes from different regions of the sun's atmosphere. There are two main variability components which affect the energy received by the Earth related to the Sun. The first is due to changes in the orbital parameters of the Earth's position relative to the Sun induced by the other planets, and the second component is due to variability within the Sun itself. Since the first can be predicted precisely and it varies rather slow, we only discuss the second component here, i.e., solar irradiance. Due to the low precision of the ground-based instruments, total solar irradiance was believed to be constant before it was measured with space radiometers started in 1978, and it was consequently know as the "solar constant". But now we know that besides modulated by the 11-year solar cycle, it varies at all time scales at which it has been measured, i.e., minutes to decades, and most probably, on longer time scales as well.

The variability of solar irradiance has important implication for our understanding of solar internal structure, solar activities, global changes in the Earth's climate system, and the solar-terrestrial relationship. Thus, accompanied with more and more data from space-borne satellites

during the recent three decades, lots of work has been done. It is believed that Irradiance variability on timescales from minutes to hours is mainly caused by convection. Short-term changes of total solar irradiance on timescales of few days to weeks are dominated by magnetic structures. Over the solar cycle, variations of 0.1% is believed to come mainly from the combination of the sunspots blocking and the intensification due to bright faculae, plages, and network elements. Some indexes seems to have certain relationship with the variations of solar irradiance, for example sunspot number, Mg II index, faculae area, F10.7 flux index, solar modulation of cosmogenic isotopes such as ^{14}C and ^{10}B and other solar related records. Based on this knowledge as well as the measurements of solar surface magnetic field, some models have been developed to reconstruct both total and spectral solar irradiance. Some of them are very successful and can account for most of the variance in the observed irradiance time series. There are still some problems with the three commonly used composite data, because significant uncertainties remain related to the calibration of the instruments and their degradation over time, and this uncertainty is a serious problem underlying current solar-climate research.

In Sect. 2 the total and spectral solar irradiance measurements are reviewed. Sect. 3 describes a statistical analysis of one of the TSI composite, and discuss the trend of TSI during the recent two solar minimum. Sect. 4 summaries explanations why solar irradiance varies. Sect. 5 describes reconstructions of solar irradiance and the implication to climate change. Finally, Sect. 6 points out some directions of future development.

Key words: solar physics; solar irradiance; solar constant