

文章编号:1001-8166(2008)09-0915-09

# 地面太阳辐射的变化、影响因子及其可能的气候效应最新研究进展\*

申彦波<sup>1</sup>, 赵宗慈<sup>1</sup>, 石广玉<sup>2</sup>

(1. 中国气象局国家气候中心, 风能太阳能资源评估中心, 北京 100081;

2. 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

**摘要:**近几十年来,全球和我国大部分区域的地面太阳辐射都经历了一个从减少到增加的过程,也就是所谓的地球“变暗”到“变亮”;引起这种变化的原因复杂多样,总云量的变化无法完全解释,而气溶胶的变化则有可能在某些地区(包括中国)起着重要作用;地面太阳辐射的这种变化会产生重要的气候效应,在“变亮”的过程中有可能使温室气体的增暖效应表现得更加明显。从以上 3 个方面,对近几年国内外利用地面观测资料和卫星遥感资料所得到的最新研究成果进行了总结和分析,这些研究所揭示的与全球气候变化有关的基本事实也可以为我国的气候变化研究提供一定的参考和启示。

**关键词:**地面太阳辐射;云量;气溶胶;全球气候变化

**中图分类号:**P422;P182      **文献标志码:**A

## 1 引言

太阳辐射是地球表层最终的能量来源。在地球气候系统的长期演化过程中,由于地球轨道变化而引起的到达地面太阳辐射量的变化可能起着“原始驱动力”的作用;而在地球气候某一个时期的变化过程中,大气层以下的各种因素则有可能起着重要的作用,如云的反射和散射、气溶胶的散射和吸收、水汽的吸收、大气的分子散射和气体吸收等均会使太阳辐射被削弱,同时这些因子时空分布的变化也会在不同程度上引起到达地面太阳辐射的变化,进而可能对地表温度、蒸发和水循环等以及人类的生活环境和地球生态系统等带来多方面的影响,产生较为深远的气候效应<sup>[1]</sup>。

由于太阳辐射与地球气候系统之间的这种密切关系,随着当前全球气候变化及相关研究工作的倍受重视,有关到达地球表面的太阳辐射在最近几十

年的变化、原因及其可能的气候效应等问题也引起了科学家的广泛关注,并在全球范围内开展了一系列的研究工作,如利用观测资料揭示了大部分地区的地面太阳辐射在最近几十年所发生的从减少到增加的变化特征,从不同角度(云、气溶胶、水汽以及城市化的影响等)分析了引起这种变化的可能原因以及这种变化可能对地表温度、蒸发和植被等所产生的影响等,得到了许多具有重要科学意义的研究成果。

本文是对国内外最近几年在上述研究领域所取得的最新研究成果进行总结,并对存在的问题进行适当的评述,从而为我国的气候变化研究工作提供一定的参考和启示。主要包括 3 方面的内容:①近 50 年到达地面太阳辐射(本文主要指总辐射)的变化特征;②影响地面太阳辐射变化的因子分析;③地面太阳辐射变化可能产生的气候效应。

\* 收稿日期:2008-06-10;修回日期:2008-06-25.

\* 基金项目:国家自然科学基金面上项目“人为热释放气候效应的数值模拟研究”(编号:40775008)资助.

作者简介:申彦波(1978-),男,河南南阳人,副研究员,主要从事太阳能资源评估与气候变化研究. E-mail: shenyb@cma.gov.cn

## 2 近 50 年地面太阳辐射的变化特征

国际上对到达地面的太阳辐射进行广泛的地面观测是从 20 世纪 50 年代后期(1957—1958 年的国际地球物理年之后)开始<sup>[2]</sup>,几乎与此同时,对地球的辐射平衡进行自上而下的卫星遥感观测也逐渐展开<sup>[3]</sup>,迄今已有 50 余年的历史,这使得直接采用观测资料来研究到达地面太阳辐射的长期(年际和年代际,下同)变化成为可能,近些年来,已有许多研究者借助这些资料对本国及所处地区乃至全球的地面辐射变化情况进行了深入的分析和探讨。

目前,国际上公认的质量较高的地面辐射观测资料主要包含在 GEBA/WRDC (Global Energy Balance Archive/World Radiation Data Centre), BSRN/WCRP (Baseline Surface Radiation Network/ World Climate Research Program) 和 CMDL (Climate Monitoring and Diagnostics Laboratory) 等数据集中。Wild 等<sup>[2]</sup>根据这些数据资料的分析发现,在 1950—1990 年期间,全球大部分区域的地面太阳辐射量呈下降趋势,也就是所谓的全球“变暗”(dimming),之前的其他一些研究也发现了这一现象,只是下降的幅度有所不同,如 Gilgen 等<sup>[4]</sup>和 Liepert<sup>[5]</sup>给出的平均减少幅度为每 10 年 1.3% 或 7 W/m<sup>2</sup>,而 Stanhill 等<sup>[6]</sup>则认为是每 10 年 2.7% 或 5 W/m<sup>2</sup>;除此之外,Wild 等<sup>[2]</sup>还特别指出,从 1980 年代中后期开始一直到 2000 年,在北半球以及南半球的澳大利亚和南极等

地,这种“变暗”现象不再持续,相反的,则是到达地面太阳辐射量的逐渐增加(根据 BSRN 资料,平均每年约增加 0.66 W/m<sup>2</sup>),也就是所谓的全球“变亮”(brightening)。

卫星观测资料也可以用于计算地面太阳辐射。Pinker 等<sup>[7]</sup>利用 ISCCP (International Satellite Cloud Climatology Project) 的资料计算了 1983—2001 年期间的地面太阳辐射通量,结果表明,就全球范围而言,地面太阳辐射总体上是增加的(平均每年增加 0.16 W/m<sup>2</sup>),其间大约在 1990 以前略有减少,其后则持续增加,但这种增加主要是在海洋区域;而仅就陆地范围而言,地面太阳辐射总体上则是减少的(平均每年减少 0.05 W/m<sup>2</sup>),但其中在 1990 年前后也略有反转。这种与地面观测资料在数值和符号上的差别,原因之一可能是由于地面资料只代表观测站附近的陆地范围,且分布不均匀,而卫星资料则均匀地包含了全球所有的陆地和海洋。

尽管上述研究给出了全球范围的地面太阳辐射变化特征,但不同国家和地区的变化却并不完全一致,表 1 给出了部分国家和地区的具体情况。从表中可以看出,在 1994 年之前,这些国家和地区的地面太阳辐射都呈减少趋势,这与全球的变化情况一致,只是变化幅度不同;而印度则是在 1994 年以后其地面太阳辐射仍然呈减少趋势,且减少幅度较大,这与全球大部分地区在这一时间段开始的“变亮”过程恰恰相反。

表 1 部分国家和地区地面太阳辐射的长期变化情况  
Table 1 Long-term variations of surface solar radiation over some regions

国家/地区	时间区间	基本变化趋势	平均变化幅度(每 10 年)*	参考文献
南 极	1956—1994	减少	-2.8 W/m <sup>2</sup>	Stanhill 等 <sup>[8]</sup>
美 国	1961—1990	减少	-2.3 W/m <sup>2</sup> 或 -1.3%	Liepert <sup>[5]</sup> ; Stanhill 等 <sup>[9]</sup>
前苏联	1955—1993	减少	约 -2.0 W/m <sup>2</sup> 或约 -1.8%	Abakumova 等 <sup>[10]</sup>
德 国	1964—1990	减少	约 -16 W/m <sup>2</sup> 或约 -6.1%	Liepert 等 <sup>[11]</sup>
印 度	1981—2004	减少	-8.6 W/m <sup>2</sup>	Kumari 等 <sup>[12]</sup>
土耳其	1960—1994	减少	-1.0%	Aksoy <sup>[13]</sup>
埃 及	1969—1993	减少	-3.5 W/m <sup>2</sup> 或 -1.5%	Omran <sup>[14]</sup>
南 非	1960—2000	减少	-2.8 W/m <sup>2</sup> 或 -1.3%	Power 等 <sup>[15]</sup>

\* 表示部分文献给出的是平均每年的变化幅度,这里将其近似转化为每 10 年的变化幅度

我国气象部门对于地面太阳辐射的业务观测从 1950 年代开始,其间经过几次观测项目、观测台站数目和布局的调整,一定程度上影响了辐射观测资料在时间和空间上的连续性。尽管如此,研究者还是可以从近 50 余年的观测资料中分析得到我国地面太阳辐射长期变化的基本特征。这方面的研究大

致从 20 世纪 90 年代开始,到 2005 年之后,随着地面观测资料的进一步积累以及国际上的广泛关注,我国地面太阳辐射的长期变化也再一次受到重视。综合这些研究成果(表 2),可以发现除了很少一部分台站以外,我国大部分区域近 50 余年地面太阳辐射的总体变化特征是在 1960—1990 年左右呈下降

趋势,之后从1990年前后开始逐渐增加。同时,任国玉等<sup>[25]</sup>所给出的我国日照时数的长期变化也表现出类似的特征,从另外一个侧面反映了地面太阳辐射的长期变化。这种变化特征与文献[2]对全球的研究结果基本一致,但由于不同学者研究的时间

区间以及采用的观测台站数目不同,所给出的变化幅度也不尽相同(表2)。此外,还有研究者对我国的西北地区<sup>[26,27]</sup>、东部地区<sup>[28]</sup>和青藏高原<sup>[29,30]</sup>等地区的地面太阳辐射变化情况也进行了分析,其结果进一步印证了上述变化特征。

表2 有关我国地面太阳辐射变化的主要研究结果

Table 2 The primary results about the variations of surface solar radiation in China

研究者	台站数	时间区间	平均变化幅度(每10年)*	说明
徐群 <sup>[16]</sup>	9	1959—1987	-3.9%	仅采用了冬季晴空的观测资料,且未给出变化的绝对值
查良松 <sup>[17]</sup>	58	1971—1990	-5.3 W/m <sup>2</sup>	总辐射是由日照时数间接计算得到
李晓文等 <sup>[18]</sup>	55	1961—1990	减少	总体下降,但未给出全国变化幅度的平均值
Che等 <sup>[19]</sup>	64	1961—2000 (1965—1988)	-4.5 W/m <sup>2</sup> 或 -2.7% (-9.1 W/m <sup>2</sup> 或 -5.4%)	发现1980年代后期开始增加,但未给出增加幅度
Liang等 <sup>[20]</sup>	46	1961—2000	-5.2 W/m <sup>2</sup> 或 -3.3%	
Qian等 <sup>[21]</sup>	85	1955—2000	-3.1 W/m <sup>2</sup> 或 -1.9%	
杨胜鹏等 <sup>[22]</sup>	60	1961—2002	-3.4 W/m <sup>2</sup> 或 -2.0%	
Streets等 <sup>[23]</sup>	52	1960—2000 (1960—1989) (1990—2000)	约-2.7 W/m <sup>2</sup> (约-5.7 W/m <sup>2</sup> ) (约5.5 W/m <sup>2</sup> )	文中未给出具体的变化幅度数值,这里是据图估算的结果
Shi等 <sup>[24]</sup>	72	1961—2000 (1961—1989) (1990—2000)	-4.1 W/m <sup>2</sup> 或 -2.5% (-4.6%) (1.8%)	对所用辐射资料进行了比较严格的质量控制

\*表示部分文献中变化幅度的单位采用的是 MJ/(m<sup>2</sup>·a) 或 W/(m<sup>2</sup>·a),为了与表1对应和比较,这里统一将其换算为 W/(m<sup>2</sup>·10a)

关于利用卫星资料对我国地面太阳辐射的分析,Hayasaka等<sup>[31]</sup>的研究表明,利用GEWEX-SRB(Global Energy and Water Cycle Experiment-Surface Radiation Budget)和ISCCP的资料反演得到的短波辐射度要大于地面观测的数值。但对于地面太阳辐射的长期变化特征,目前我国还没有根据卫星资料得到的研究成果。

### 3 影响地面太阳辐射变化的因子分析

从以上论述可以看出,尽管有符号和幅度上的不确定性,但全球地面太阳辐射在近50年的确发生了较大的变化。那么,是什么原因造成了这种变化?在太阳辐射到达地面的过程中,会受到云和大气(包括基本大气成分、气溶胶和水汽等)以及其自身变化的影响,以下根据近几年国内外已有的研究逐一进行分析。

#### 3.1 云

云不仅对到达地面的太阳辐射有非常重要的影响,而且还对地球的气候变化起着重要的调节作用,因此,关于云的气候学研究很早就受到重视,这里只是结合地面太阳辐射的变化,仅就近几年国内外的

一些相关研究成果进行分析。

云的观测也分为地面和卫星的。地面观测显示从20世纪50年代中期开始全球许多大陆地区的总云量是增加的<sup>[32]</sup>,如美国<sup>[33~35]</sup>、前苏联<sup>[36,37]</sup>、西欧、加拿大(中纬度地区)和澳大利亚<sup>[38]</sup>等,但也有一些地区的总云量是减少的,如中国<sup>[21,39,40]</sup>、意大利<sup>[41]</sup>和中欧<sup>[42]</sup>等。IPCC第四次评估报告(IPCC AR4)<sup>[43]</sup>进一步指出,如果从1971年之后开始划分,则地球陆地上总云量空间变化的连续性更差;就全球范围而言(不包括美国和加拿大,这两个国家从90年代初期开始将云的人为观测改为仪器观测,使资料与之前的记录没有可比性),大约在1976—1984年期间,总云量是减少的,而在1984—2003年,总云量则有增加的趋势,这种现象在北半球更为明显。

当前最全面的云卫星观测资料来源于从1983年7月开始的ISCCP计划,该资料显示在1983—1987年期间,全球的总云量增加了2%,之后1987—2001年,则减少了大约4%<sup>[44~46]</sup>。这看起来与地面观测的结果完全相反,但其它卫星资料所反映的云的年代际变化却与ISCCP不同。例如,HIRS

显示 1985—2001 年全球的云量是略微增加的<sup>[47]</sup>；而经过订正后的 AVHRR 资料则显示 1981—2000 年热带地区的云量基本上没有明显的变化趋势<sup>[48]</sup>。地面观测与不同卫星观测结果之间的差异一方面是由于两者观测角度不同(自下而上和自上而下),另一方面由于不同卫星的视角和覆盖范围的变化而引起的偏差也会影响到全球平均云量的时间分布<sup>[35,49]</sup>。

我国对于云量变化的研究主要依据地面观测资料,不同研究者的结果比较一致,认为从 50 年代初期开始,我国的总云量是一直减少的<sup>[21,39,40]</sup>,但在不同的区域和季节其变化符号和幅度有所不同<sup>[50,51]</sup>。此外,丁守国<sup>[52]</sup>根据 ISCCP 的资料分析表明,1984—2000 年期间我国的年平均总云量也是减少的,这与地面观测资料所显示的变化特征基本一致。

一般来说,云量的增加(减少)会引起地面太阳辐射的减少(增加)。从上述国内外的研究现状可以看出,就全球而言,总云量的年代际变化还存在较大争议,也不能完全解释近 50 年地面太阳辐射所发生的从减少到增加的变化(只是在某些地区的某一段时间内两者有较好的反相关);而就中国大陆地区而言,虽然关于云量的长期减少趋势没有很大的争议,但这种变化却无法解释 1990 年之前我国地面太阳辐射的减少,尽管它对于 1990 年之后地面太阳辐射的增加是有利的。

以上只是全球和我国总云量的年代际变化情况。事实上,云对于太阳辐射的影响是非常复杂的,不同的云高、云状、云厚等几何性质以及不同的云物理、化学和光学性质等都会对太阳辐射产生不同的影响。因此,尽管目前观测到的总云量的变化很难完全解释地面太阳辐射的变化,但不能因此而否认云的变化对太阳辐射的重要影响。

### 3.2 气溶胶

气溶胶是另外一个对太阳辐射有重要且复杂影响的因素,它既可以直接反射、散射或吸收太阳辐射,又可以通过改变云的微物理性质而产生间接效应,同时不同气溶胶之间对太阳辐射的影响也有很大的差异<sup>[1]</sup>。但总体而言,气溶胶的增加(减少)通常还会使到达地面的太阳辐射减少(增加)。这里分为自然气溶胶和人为气溶胶两个方面进行分析。

自然气溶胶主要指由于火山喷发而释放到大气中的气溶胶。在近 50 年期间,具有全球范围影响的火山喷发主要有 2 次:1982 年的艾尔奇琼(El Chichon)火山和 1991 年的皮纳图博(Pinatubo)火山喷

发,它们使全球范围的气溶胶浓度和光学厚度有明显增加<sup>[53]</sup>,从而十分明显地削弱了到达地面的直接辐射而增强了散射辐射<sup>[54]</sup>,但两者之和的总辐射却并没有非常显著的减少。

人为气溶胶主要是近几十年由于全球工业和经济的发展而大量燃烧化石燃料所排放的气溶胶,如硫酸盐和黑碳等,两者约贡献了全球平均气溶胶光学厚度的 1/3<sup>[55]</sup>。根据 IPCC AR4<sup>[43]</sup>,气溶胶对地面短波辐射具有负的强迫作用,且这种强迫在 1950—2000 年之间快速增强(绝对值增加),这可能是引起地面太阳辐射减少的一个原因。根据 ISCCP 和 AVHRR 的卫星资料反演得到的结果<sup>[53,56,57]</sup>,在 1991—2005 年,对流层光学厚度具有变小的趋势;同时,Streets 等<sup>[55]</sup>综合分析已发表的数据指出,全球的人为硫酸盐排放从 80 年代后期不再增加,在 1990—2000 年期间不同区域有明显的减少或相对的稳定不变,这样的变化趋势对于地面太阳辐射的增加可能是有贡献的。

对于我国地面太阳辐射的变化,上述研究者在排除了云量的影响之外,大多猜测或根据定性的分析认为,人为气溶胶在 90 年代之前的增加和之后的有所减少可能是一个重要原因。最新的研究<sup>[23]</sup>进一步量化地研究了中国 1980—2000 年的硫酸盐、黑碳和有机碳等 3 种气溶胶排放量的变化趋势,结果表明:硫酸盐的排放量在 1996 年达到峰值,含碳气溶胶排放量的峰值出现在 1994—1995 年,这些气溶胶的光学厚度在 1995 年以前平均每年增加 1.3%,1995 年以后则平均每年减少 0.8%。这些结果与我国地面太阳辐射的变化有一定的反相关,气溶胶的增加基本对应的是地面太阳辐射的减少,而之后的减少则基本对应了地面太阳辐射的增加,说明了气溶胶的变化对我国地面太阳辐射的变化可能起着相当重要的作用。

总的来说,由于气溶胶对于地面太阳辐射影响的不确定性在某种程度上可能比云更大,因此尽管有很多的研究(包括 IPCC AR4<sup>[43]</sup>)都认为 90 年之后全球大气透明度的增加对于地面太阳辐射的增加有重要贡献,但这种贡献究竟有多大,它是否可以完全解释近 50 年全球和区域地面太阳辐射所发生的变化,目前尚无量化、确切的结论,需要进一步深入的研究。

### 3.3 水汽

水汽对于太阳辐射有吸收作用。研究表明,全球平均的气柱水汽含量为 25 mm<sup>[58]</sup>,要使水汽对太

阳短波辐射的吸收增加1%,数值模拟和回归方法的研究分别认为需要增加3 mm和6 mm的水汽含量<sup>[59,60]</sup>。IPCC AR4<sup>[43]</sup>分别给出了全球近地面和对流层下层、对流层上层以及平流层水汽的长期变化,结果表明这三层的水汽含量在20世纪后半叶均有增加的趋势,但同时也指出由于观测资料的缺乏,其增加量还存在着很大的不确定性,其对太阳辐射的影响也有待进一步定量的研究。对于我国水汽含量的变化,Zhai等<sup>[61]</sup>的研究表明,在1970—1990年的20年间,气柱水汽含量大约增加了0.5 mm,显然不足以使其对太阳辐射的吸收产生大的变化。

### 3.4 大气的分子散射和吸收

大气中的气体分子也会对太阳辐射有散射和吸收作用。尽管最近几十年来,人类活动使某些气体成分(如CO<sub>2</sub>)有了比较大的变化,但由于这些成分本身在大气中的含量很低,它们的变化并不足以影响大气对太阳辐射的作用。另外还值得一提的是,臭氧对太阳辐射吸收作用较强,但根据WMO<sup>[62]</sup>的结果,全球的大气臭氧总量在1993年之前是减少的,之后有所增加,这种变化趋势对太阳辐射的影响恰恰与地面太阳辐射的实际变化相反。

### 3.5 太阳活动

太阳活动的变化主要从卫星观测,目前全球有4个相互独立的空基仪器直接观测总太阳辐照度。IPCC AR4<sup>[43]</sup>给出的结果表明,1980年以来,不同的观测记录均反映了太阳活动的准11年周期(1980—1991年,1991—2002年),在1991年之后,除了周期变化之外,总太阳辐照度还有额外的0.01%~0.04%的增加,但也有研究者认为<sup>[63]</sup>这可能是由于观测仪器所引起的,而不是太阳自身发生的变化,而且该变化量本身相对于地面太阳总辐射的增加也只是一个很小的量。

### 3.6 城市化

近几十年,随着全球经济的发展,城市化的步伐也越来越快,这对于全球的气候变化也有重要影响。对于到达地面太阳辐射的变化,Alpert等<sup>[64]</sup>的分析发现,那些在90年代之前有明显“变暗”的气象台站中有相当一部分是位于城市或受城市影响的区域,在这些区域地面太阳辐射的平均减少幅度为0.41 W/(m<sup>2</sup>·a),而人口稀少的农村地区“变暗”的情形则要弱得多,地面太阳辐射的平均减少幅度仅为0.16 W/(m<sup>2</sup>·a),说明城市化对这一过程有一定的影响;但对于90年代之后的全球“变亮”过程,城市化的因素似乎很难解释,尚需要进一步的分析。

综上所述,影响地面太阳辐射变化的原因非常复杂,总云量的变化不能完全(甚至是完全不能)解释,气溶胶的变化虽然与其有一定的反相关关系,但还缺乏定量的分析,水汽的变化和城市化的发展可能对其有一定的贡献,其它因素的变化对其影响很小。究竟是哪一个或哪一些因素的变化引起了近50年全球和区域地面太阳辐射的变化,尚需要更深入的研究来证明。

## 4 地面太阳辐射变化的可能气候效应

从一般的气候学原理而言,到达地面太阳辐射的减少或增加势必会引起地表温度发生相应的变化,而地表温度又与蒸发和水循环以及人类的生活环境和地球生态系统等密切相关,因此,地面太阳辐射的变化有可能会产生多方面的综合效应。然而,由于该问题自身的复杂性,这方面的研究至今尚不多见,已有的研究主要集中于对地表温度可能影响的分析。

Wild等<sup>[65]</sup>在文献[2]研究的基础上进一步针对地球的“变暗”和“变亮”过程对全球变暖的可能影响进行了研究。结果表明,在全球变暖的大背景下,1958—1985年期间,地球的“变暗”过程对温室气体的增暖效应有较大的遮蔽作用,它使得日最高温度出现略微下降的趋势,而最低温度则是上升趋势,日较差明显下降,总的来说,这一过程使得同期全球平均温度的增加量减少了60%~70%;1985—2002年期间,全球的平均温度上升较快,但这并非完全是由于温室气体的增加所引起的,其中地球的“变亮”过程也起到了相当重要的作用,它使得日最高温度也开始明显增加,增加的幅度与日最低温度相当,从而使日较差几乎不变(只是略有下降)。但是从1960—2000年总的时期来看,地球“变亮”的过程并不能完全抵消地球“变暗”过程所带来的影响,而全球陆地的平均温度在此时则是持续上升,说明温室气体仍然是该阶段全球变暖的主要原因。

研究表明<sup>[66]</sup>,近50年我国的气候变暖在近千年中属于明显的,其原因可能与太阳活动、火山活动和人类活动有关。有研究者曾对1951—1999年期间极端温度出现的天数进行了统计分析<sup>[67]</sup>,结果表明,温度较高的白天和夜晚出现的天数从1980年代后期开始均有明显的增加,而最低温度在0℃以下的天数则有明显的下降,对应于上述Wild等的研究,这有可能与该时期我国的太阳辐射发生了从减少到增加的变化有关。

除了温度之外,地面太阳辐射的变化也会对地面蒸发产生影响。理论上,到达地面太阳辐射量的减少会使蒸发所需要的能量减少,进而引起蒸发皿蒸发量和实际蒸发量的减少,但如果引起地面太阳辐射减少的原因是由于云和降水的增加所引起,那么它们的增加又会使蒸发皿蒸发量和实际蒸发量增加,这是气候学研究中的一个悖论<sup>[43]</sup>,尚需要深入的探讨。

对于我国蒸发皿蒸发量长期变化的研究表明<sup>[21,25,68]</sup>,在 1955—2000 年期间,该物理量也经历了一个从 1990 早期之前的减少过程到之后的增加过程,其变化趋势和地面太阳辐射(或日照时数)的变化非常类似,据此,任国玉等<sup>[25]</sup>认为地面太阳辐射的变化可能是引起我国蒸发皿蒸发量发生变化的原因之一。

此外,地面太阳辐射的变化对植物的生长过程和农业产量也可能会有影响。对此,Stanhill 等<sup>[6]</sup>指出,虽然模拟研究认为农业产量和蒸腾作用会随着地面太阳辐射的减少而成比例地减少,但这并未得到有关实验数据的支持,说明很多农作物(尤其是在干旱但辐射充足的地区)对地面太阳辐射的变化并不是很敏感,因为它们对辐射和水汽的变化有一定的适应能力。

## 5 结论与讨论

以上主要从现象、原因及以后果等 3 个方面对近几年国内外关于地面太阳辐射变化的研究进行了总结,总的来说,当前这些研究中所反映的共同现象以及存在的主要问题包括以下几个方面:

(1) 近 50 年来的地面辐射观测资料表明,全球很多区域(包括中国)都发生了从“变暗”到“变亮”的变化,但不同时间段、不同区域的变化幅度不尽相同;而这一变化现象并未完全得到卫星资料的支持,对我国的变化情况也有待利用卫星资料进行验证。

(2) 在影响地面太阳辐射变化的众多因素中,气溶胶的变化与之有相对较好的反相关关系,但目前的研究尚不能给出明确的结论,同时也不能据此而否认云的变化对地面太阳辐射的重要影响;在 1990 年代之后一些区域的“变亮”过程有可能是由于云量减少和大气透明度增加共同造成的;其他影响因子的变化,如水汽、大气的气体成分、太阳活动和城市化等则不会对地面太阳辐射的变化产生太大的影响或其影响的程度尚不明确,还有待进一步的研究。

(3) 地面太阳辐射从减少到增加的变化过程,可能会使温室气体的增暖效应表现得更加明显,进而加快全球变暖;同时也可能使蒸发量发生相应的减少和增加的变化。但目前这些结论主要来源于统计分析的结果,还需要进一步从物理机制方面进行深入的量化研究,提供更充分的证据。

此外,还需要指出的是,太阳辐射和地球气候系统之间的关系,实际上是所谓的“日地关系”的一部分。本文中仅讨论了近几十年地面太阳辐射的变化,而对于更长时间尺度(如 10 万年以上)或周期的地面太阳辐射和地球气候的变化问题,则还要涉及到天文学,如有关地球轨道参数变化的米兰柯维奇(Milankovitch)经典理论等。

## 参考文献(References):

- [1] Shi Guangyu. Atmospheric Radiation [C]. Beijing: Science Press, 2007. [石广玉. 大气辐射学[C]. 北京: 科学出版社, 2007.]
- [2] Wild M, Gilgen H, Roesch A, et al. From dimming to brightening: Decadal changes in Solar radiation at Earth's surface[J]. *Science*, 2005, 308:847-850.
- [3] Zhong Qiang. Advance on research on surface radiation climatology: Some problems of retrieval of surface radiation budget from satellite[J]. *Advances in Earth Science*, 1996, 11(3):238-244. [钟强. 地面辐射气候学研究进展——从卫星反演地面辐射收支的若干问题[J]. 地球科学进展, 1996, 11(3):238-244.]
- [4] Gilgen H, Wild M, Ohmura A. Means and trends of shortwave irradiance at the surface estimated from global energy balance archive data[J]. *Journal of Climate*, 1998, 11:2 042-2 061.
- [5] Liepert B G. Observed reductions of surface solar radiation at sites in the United States and worldwide from 1961 to 1990[J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29, 1421, doi: 10. 1029/2002GL014910.
- [6] Stanhill G, Cohen S. Global dimming: A review of the evidence for a widespread and significant reduction in global radiation with discussion of its probable causes and possible agricultural consequences[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 107:255-278.
- [7] Pinker R T, Zhang B, Dutton E G. Do satellites detect trends in surface solar radiation? [J]. *Science*, 2005, 308:850-854.
- [8] Stanhill G, Cohen S. Recent changes in solar irradiance in Antarctica [J]. *Journal of Climate*, 1997, 10:2 078-2 086.
- [9] Stanhill G, Cohen S. Solar radiation changes in the United States during the twentieth century: Evidence from sunshine duration measurements[J]. *Journal of Climate*, 2005, 18:1 503-1 512.
- [10] Abakumova G M, Feigelson E M, Russak V, et al. Evaluation of long-term changes in radiation, cloudiness, and surface temperature on the territory of the former Soviet Union[J]. *Journal of Climate*, 1996, 9:1 319-1 327.

- [11] Liepert B G, Kukla G J. Decline in global solar radiation with increased horizontal visibility in Germany between 1964 and 1990 [J]. *Journal of Climate*, 1997, 10:2 391-2 401.
- [12] Kumari B P, Londhe A L, Danie S, et al. Observational evidence of solar dimming: Offsetting surface warming over India [J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34, L21810, doi:10.1029/2007GL031133.
- [13] Aksoy B. Variations and trends in global solar radiation for Turkey [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 1997, 58:71-77.
- [14] Omran M A. Analysis of solar radiation over Egypt [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2000, 67:225-240.
- [15] Power H C, Mills D M. Solar radiation climate change over South Africa and an assessment of the radiative impact of volcanic eruptions [J]. *International Journal of Climatology*, 2005, 25:295-318.
- [16] Xu Qun. The remarkable change of winter solar radiation in China during recent 29 years [J]. *Science in China (Series B)*, 1990, 10:1 112-1 120. [徐群. 近29年冬季我国太阳辐射的显著变化 [J]. 中国科学: B 辑, 1990, 10:1 112-1 120.]
- [17] Zha Liangsong. A study on spatial and temporal variation of solar radiation in China [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 1996, 16 (3):232-237. [查良松. 我国地面太阳辐射量的时空变化研究 [J]. 地理科学, 1996, 16(3):232-237.]
- [18] Li Xiaowen, Li Weiliang, Zhou Xiuji. Analysis of the solar radiation variation of China in recent 30 years [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 1998, 9(1):24-31. [李晓文, 李维亮, 周秀骥. 中国近30年太阳辐射状况研究 [J]. 应用气象学报, 1998, 9(1):24-31.]
- [19] Che Huizheng, Shi Guangyu, Zhang Xiaoye, et al. Analysis of 40 years of solar radiation data from China, 1961-2000 [J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32, L06803, doi:10.1029/2004GL022322.
- [20] Liang F, Xia X A. Long-term trends in solar radiation and the associated climatic factors over China for 1961-2000 [J]. *Annales Geophysicae*, 2005, 23:2 425-2 432.
- [21] Qian Y, Kaiser D P, Leung L R, et al. More frequent cloud-free sky and less surface solar radiation in China from 1955 to 2000 [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33, L01812, doi:10.1029/2005GL024586.
- [22] Yang Shengpeng, Wang Keli, Lü Shihua. Regional characteristics of global solar radiation evolution in China over recent 40 years [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2007, 28(3):227-232. [杨胜鹏, 王可丽, 吕世华. 近40年来中国大陆总辐射的演变特征 [J]. 太阳能学报, 2007, 28(3):227-232.]
- [23] Streets D G, Yu C, Wu Y, et al. Aerosol trends over China, 1980-2000 [J]. *Atmospheric Research*, 2008, 88:174-182.
- [24] Shi Guangyu, Hayasaka T, Ohmura A, et al. Data quality assessment and the long-term trend of ground solar radiation in China [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2008, 47(4):1 006.
- [25] Ren Guoyu, Guo Jun, Xu Mingzhi, et al. Climate changes of China's mainland over the past half century [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2005, 63(6):942-956. [任国玉, 郭军, 徐铭志, 等. 近五十年来中国地面气候变化基本特征 [J]. 气象学报, 2005, 63(6):942-956.]
- [26] Zha Liangsong. Research on the variation of solar radiation in northwest China [J]. *Arid Land Geography*, 1995, 18(1):8-13. [查良松. 西北地区太阳辐射量变化的研究 [J]. 干旱区地理, 1995, 18(1):8-13.]
- [27] Chen Zhihua, Shi Guangyu, Che Huizheng. Analysis of the solar radiation of Xinjiang Uygur Autonomous Region in recent 40 years [J]. *Arid Land Geography*, 2005, 28(6):734-739. [陈志华, 石广玉, 车慧正. 近40年来新疆地区太阳辐射状况研究 [J]. 干旱区地理, 2005, 28(6):734-739.]
- [28] Zhang Y L, Qin B Q, Chen W M. Analysis of 40 year records of solar radiation data in Shanghai, Nanjing and Hangzhou [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2004, 78:217-227.
- [29] Ji Guoliang, Lü Lanzhi. Secular variation characteristics of solar radiation and air temperature at Golmud [J]. *Plateau Meteorology*, 1997, 16:30-35. [季国良, 吕兰芝. 格尔木太阳辐射与气温的多年变化 [J]. 高原气象, 1997, 16:30-35.]
- [30] Chen Fang, Zhou Lusheng. Climatic characteristics of solar global radiation change over Yushu [J]. *Journal of Qinghai Environment*, 2002, 44:47-49. [陈芳, 周陆生. 玉树地区太阳总辐射量变化的气候特征 [J]. 青海环境, 2002, 44:47-49.]
- [31] Hayasaka T, Kawamoto K, Shi Guangyu, et al. Importance of aerosols in satellite-derived estimates of surface shortwave irradiance over China [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33, L06802. doi:10.1029/2005GL025093.
- [32] IPCC. Climate Change 2001: The Scientific Basis [C] // Houghton J T, et al. eds. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom, New York: Cambridge University Press, 2001:148-150.
- [33] Sun B M. Cloudiness over the contiguous United States: Contemporary changes observed using ground-based and ISCCP D2 data [J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(2), 1053, doi:10.1029/2002GL015887.
- [34] Groisman P Ya, Knight R W, Karl T R, et al. Contemporary changes of the hydrological cycle over the contiguous United States: Trends derived from in situ observations [J]. *Journal of Hydrometeorol*, 2004, 5:64-85.
- [35] Dai A, Karl T R, Sun B, et al. Recent trends in cloudiness over the United States: A tale of monitoring inadequacies [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2006, 87:597-606.
- [36] Sun B M, Groisman P Ya. Cloudiness variations over the former Soviet Union [J]. *International Journal of Climatology*, 2000, 20:1 097-1 111.
- [37] Sun B M, Groisman P Ya, Mikhov I I. Recent changes in cloud-type frequency and inferred increases in convection over the United States and the former USSR [J]. *Journal of Climate*, 2001, 14:1 864-1 880.
- [38] Henderson-Sellers A. Continental cloudiness changes this century [J]. *Geo-Journal*, 1992, 27:255-262.

- [39] Kaiser D P. Analysis of total cloud amount over China, 1951-1994 [J]. *Geophysical Research Letters*, 1998, 25:3 599-3 602.
- [40] Kaiser D P. Decreasing cloudiness over China: An updated analysis examining additional variables [J]. *Geophysical Research Letters*, 2000, 27:2 193-2 196.
- [41] Maugeri M, Bagnati Z, Brunetti M, et al. Trends in Italian cloud amount 1951-1996 [J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28: 4 551-4 554.
- [42] Auer I, Böhm R, Jurkovic A, et al. HISTALP-Historical Instrumental climatological surface time series of the greater Alpine region [J]. *International Journal of Climatology*, 2007, 27:17-46.
- [43] IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis [C] // Solomon S, et al. eds. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York: Cambridge University Press, 2007.
- [44] Rossow W B, Duxas E N. The International Satellite Cloud Climatology Project (ISCCP) web site [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2004, 85:167-172.
- [45] Ding Shouguo, Shi Guangyu, Zhao Chunsheng. Analysis of global cloud amount variation and its probable climatic effect over the past 20 years through ISCCP D2 data [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(11):1 105-1 111. [丁守国, 石广玉, 赵春生. 利用 ISCCP D2 资料分析近 20 年全球不同云类云量的变化及其对气候可能的影响 [J]. 科学通报, 2004, 49(11):1 105-1 111.]
- [46] Ding Shouguo, Zhao Chunsheng, Shi Guangyu, et al. Analysis of global total cloud amount variation over the past 20 years [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2005, 16(5): 670-677. [丁守国, 赵春生, 石广玉, 等. 近 20 年全球总云量变化趋势分析 [J]. 应用气象学报, 2005, 16(5):670-677.]
- [47] Wylie D P, Jackson D L, Menzel W P, et al. Trends in global cloud cover in two decades of HIRS observations [J]. *Journal of Climate*, 2005, 18:3 021-3 031.
- [48] Jacobowitz H, Stowe L L, Ohring G, et al. The advanced very high resolution radiometer pathfinder atmosphere (PATMOS) climate dataset: A resource for climate research [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2003, 84:785-793.
- [49] Norris J R. What can cloud observations tell us about climate variability? [J]. *Space Science Reviews*, 2000, 94:375-380.
- [50] Chen Shaoyong, Dong Anxiang, Wang Liping. Climate change features of total cloud cover over Northwest China [J]. *Journal of Chengdu University of Information Technology*, 2006, 21(3): 423-428. [陈少勇, 董安祥, 王丽萍. 中国西北地区总云量的气候变化特征 [J]. 成都信息工程学院学报, 2006, 21(3): 423-428.]
- [51] Zhang Xueqin, Peng Lili, Zheng Du, et al. Variation of total cloud amount and its possible causes over the Qinghai-Xizang plateau during 1971-2004 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2007, 62(9):959-969. [张雪芹, 彭莉莉, 郑度, 等. 1971—2004 年青藏高原总云量时空变化及其影响因子 [J]. 地理学报, 2007, 62(9):959-969.]
- [52] Ding Shouguo. Study on Clouds and Their Radiative Properties over China [R]. Beijing: Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 2004. [丁守国. 中国地区云及其辐射特性的研究 [R]. 北京: 中国科学院大气物理研究所, 2004.]
- [53] Mishchenko M I, Geogdzhayev I V, Rossow W B, et al. Long-term satellite record reveals likely recent aerosol trend [J]. *Science*, 2007, 315:1 543.
- [54] Robock A. Volcanic and eruptions and climate [J]. *Reviews of Geophysics*, 2000, 38(2): 191-219.
- [55] Streets D G, Wu Ye, Chin Mian. Two-decadal aerosol trends as a likely explanation of the global dimming/brightening transition [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33, L15806, doi: 10.1029/2006GL026471.
- [56] Mishchenko M I, Geogdzhayev I V, Cairns B, et al. Past, present, and future of global aerosol climatologies derived from satellite observations: A perspective [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2007, 106: 325-347.
- [57] Mishchenko M I, Geogdzhayev I V. Satellite remote sensing reveals regional tropospheric aerosol trends [J]. *Optics Express*, 2007, 15:7 423-7 438.
- [58] Garrat J R, Prata A J, Rotstayn L D, et al. The surface radiation budget over oceans and continents [J]. *Journal of Climate*, 1998, 11:1 951-1 968.
- [59] Ramanathan V, Vogelmann A M. Greenhouse effect, atmospheric solar absorption and the Earth's radiation budget: From the arhenius langley era to the 1990s [J]. *AMBIO*, 1997, 26:38-46.
- [60] Arking A. Absorption of solar energy in the atmosphere: discrepancy between model and observations [J]. *Science*, 1996, 273: 779-782.
- [61] Zhai Pan-Mao, Eskridge R E. Atmospheric water vapor over China [J]. *Journal of Climate*, 1997, 10:2 643-2 652.
- [62] World Meteorological Organization (WMO). Scientific Assessment of Ozone Depletion; 2002 [C] // Global Ozone Research and Monitoring Project-Report. Geneva, Switzerland, 2003:47.
- [63] Fröhlich C, Lean J. Solar radiative output and its variability: Evidence and mechanisms [J]. *The Astronomy and Astrophysics Review*, 2004, 12:273-320.
- [64] Alpert P, Kishcha P, Kaufman Y J, et al. Global dimming or local dimming?: Effect of urbanization on sunlight availability [J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32, L17802, doi:10.1029/2005GL023320.
- [65] Wild M, Ohmura A, Makowski K. Impact of global dimming and brightening on global warming [J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34, L04702, doi:10.1029/2006GL028031.
- [66] Zhao Zongci, Wang Shaowu, Xu Ying, et al. Attribution of the 20th century climate warming in China [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2005, 10(4): 808-817. [赵宗慈, 王绍武, 徐影, 等. 近百年我国地表气温趋势变化的可能原因 [J]. 气候与环境研究, 2005, 10(4):808-817.]
- [67] Zhai P, Pan X. Trends in temperature extremes during 1951-1999 in China [J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30,



1913, doi:10. 1029/2003GL018004.

*physical Research*, 2004, 109, D15102, doi: 10. 1029/

[68] Liu Binhui, Xu Ming, Henderson M, *et al.* A spatial analysis of pan evaporation trends in China, 1955-2000[J]. *Journal of Geo-*

2004JD004511.

## The Progress in Variation of Surface Solar Radiation, Factors and Probable Climatic Effects

SHEN Yanbo<sup>1</sup>, ZHAO Zongci<sup>1</sup>, SHI Guangyu<sup>2</sup>

(1. *National Climate Center, Center for Wind and Solar Energy Resources Assessment, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China*; 2. *Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*)

**Abstract:** The surface solar radiation over global and regional areas (including China) has obvious changed during the recent several decades. Before the middle or end of the 1980s, the surface solar radiation decreased (namely global dimming) and after that increased (namely global brightening). The reasons for this change are multiplex and complex. The change of total cloudiness can not account for it reasonably while the change of aerosol may be important in some regions (including China). The change of surface solar radiation would have important climate effects. During global brightening, the warming effect of greenhouse gases would be more obvious. In this paper, the newest results in above three aspects are concluded and analyzed, which will be useful for climate change study in China.

**Key words:** Surface solar radiation; Cloudiness; Aerosol; Global climate change.

### IODP 特定任务平台大堡礁航次召集科学家

由欧洲“大洋钻探研究联盟”(ECORD)组织实施的大堡礁(Great Barrier Reef)航次目前开始召集船上科学家。该航次计划在澳大利亚大堡礁海区进行钻探。航次基于 IODP 第 519 号建议书(下载网址:<http://www.eso.ecord.org/docs/519.pdf>),其主要科学目标是:

1. 重建末次冰消期(~20-10 ka)时的海平面变化。

2. 研究千年尺度气候变化的机制和特征。

3. 研究大堡礁对快速海平面和气候变化的生物和地质响应,建立一个可能的模式来预测生态系统对将来气候变化的响应。

航次的执行分为海上钻探和岸上研究两部分,其中海上钻探预计在 2009 年 8~12 月间执行(只有部分科学家可参加),之后该航次全体科学家将于 2010 年春季在德国布莱梅大学开展为期 1 个月的岸上研究,对钻探获得的岩芯进行深入研究。关于航次的更详细信息请访问 ECORD 网站:[www.eso.ecord.org](http://www.eso.ecord.org)。

中国 IODP 鼓励中国科学家积极申请参加航次,有意申请者请在截止日期前提交个人英文简历及航次申请表(可在中国 IODP 网站下载:<http://www.iodp.cn/chs/html/2005/02/20050216154752-1.htm>)。

联系人:拓守廷 电话:021-65982198

E-mail: [iodp\\_china@mail.tongji.edu.cn](mailto:iodp_china@mail.tongji.edu.cn)

截止日期:2008 年 9 月 5 日

中国 IODP 办公室  
2008 年 6 月 22 日