

王雅婕, 黄耀, 张稳. 2009. 1961~2003年中国大陆地表太阳总辐射变化趋势 [J]. 气候与环境研究, 14 (4): 405-413. Wang Yajie, Huang Yao, Zhang Wen. 2009. Changes in surface solar radiation in mainland China over the period from 1961 to 2003 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 14 (4): 405-413.

1961~2003年中国大陆地表太阳总辐射变化趋势

王雅婕 黄耀 张稳

中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029

摘要 利用中国大陆30个气象站1961~2003年地表太阳总辐射观测数据, 研究了辐射年总量和季节总量的变化趋势及其空间分布特征, 并探讨了其原因。结果表明: 1961~1989年中国大陆地表太阳总辐射总体呈减少趋势, 减少约11%; 1990~2003年间略有回升, 但其均值仍比1961~1965年的均值低8.2%。大部分地区春夏两季减少明显, 约占年减少量的55%~85%。对各站点观测数据的趋势分析表明, 地表太阳总辐射随时间的变化大致可分为4种类型, 其特征分别为: 1961~2003年间持续减少(占总站点数20%); 20世纪60年代初到80年代中期呈显著减少趋势, 其后线性趋势不明显(占总站点数40%)或呈逐步增加趋势(占总站点数16.7%); 1961~2003年间无显著变化(占总站点数23.3%)。这4种类型在空间分布上无明显的区域特征。日照时数减少是总辐射减少的主要原因, 可以解释地表太阳辐射年总量变化的72%, 日照时数随风速的增大而增加。

关键词 地表太阳总辐射 变化趋势

文章编号 1006-9585 (2009) 04-0405-09 **中图分类号** P468 **文献标识码** A

Changes in Surface Solar Radiation in Mainland China over the Period from 1961 to 2003

WANG Yajie, HUANG Yao, and ZHANG Wen

*State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry,
Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

Abstract Using the datasets from 30 observational stations over mainland China, the authors studied the changes in annual and seasonal amounts of surface solar radiation from 1961 to 2003 and the spatial characteristics. Cause of the changes was discussed. The results indicated that surface solar radiation in mainland China decreased by approximately 11% from the early 1960s to the late 1980s in general, but increased slightly during 1990-2003. Nevertheless, the mean value of surface solar radiation over 1990-2003 was 8.2% lower than that over 1961-1965. Significant decrease occurred in the period from March to August, accounting for 55%-85% of the annual reduction. Analysis of the datasets for each station suggested that the trend in changes of surface solar radiation with time could be roughly identified as four groups with the characteristics of decreasing continuously (6 out of 30 stations) or leveling off (7 out of 30 stations) over the period from 1961 to 2003, and decreasing significantly from the early 1960s

收稿日期 2008-05-30 收到, 2009-02-10 收到修定稿

资助项目 中国科学院知识创新工程重要方向项目“我国减缓气候变化的碳汇管理与适应气候变化的对策研究”KZCX2-YW-305

作者简介 王雅婕, 女, 1983年出生, 硕士, 研究方向为气候变化的影响与适应。E-mail: wangyj@mail.iap.ac.cn

通讯作者 黄耀, 男, 1956年出生, 研究员。E-mail: huangy@mail.iap.ac.cn

to the mid 1980s and leveling off thereafter (12 out of 30 stations) or increasing gradually thereafter (5 out of 30 stations). The four groups have no significant regional feature in spatial distribution. A main cause of the reduction in solar radiation is the decreasing sunshine duration. Approximately 72% of the variability in the solar radiation can be expressed by the sunshine duration which is positively correlated with wind speed.

Key words surface solar radiation, trend of change

1 引言

太阳辐射是地表各种物理和生物化学过程的主要能量来源,并驱动地表物质循环过程(Ohmura et al., 2002; Roderick et al., 2002; Liu et al., 2004)。有研究表明,1960~1990 年全球多个区域的太阳总辐射呈减少趋势,30 年间减少了 4%~6% (Gilgen et al., 1998; Liepert, 2002)。Wild et al. (2005) 研究发现这种全球范围的减少趋势在 20 世纪 90 年代并未继续下去,甚至呈现普遍的增加趋势。以欧洲为例,1985~2002 年间覆盖 300 个观测点的 32 个网格中有 26 个网格的地表太阳辐射呈增加趋势(Wild et al., 2005)。我国学者的研究表明,1990 年前中国地表辐射呈减少趋势(查良松, 1995, 1996a, 1996b; 李晓文等, 1998; 张雪芬等, 1999; 陈志华等, 2005),减少幅度为每 10 年减少 4.61%~5.43% (Che et al., 2005; Shi et al., 2008)。但其后直到 2000 年的观测数据分析显示,这种趋势在 1990 年以后并未持续下去(Xia et al., 2004; Che et al., 2005; Liang et al., 2005; Shi et al., 2008)。多数研究者认为气溶胶的变化可能是中国地表辐射变化的原因(Xia et al., 2004; Che et al., 2005; Liang et al., 2005)。对于各站点间辐射变化趋势的差异性及各季节的变化特点研究不多。本文试图通过对中国大陆 1961~2003 年观测数据的分析,阐明该研究时段内我国地表太阳总辐射的变化趋势及空间特征,并探讨其原因,为深入研究地表太阳辐射变化对陆地物质循环过程的影响提供依据。

2 数据与方法

本研究采用中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn/>) 公布的观测数据。

由于多数站点直到 1960 年后才有较完整的太阳辐射观测记录,因此选取 1961~2003 年具有较完整辐射数据(连续缺失不超过 1 个月)的站点,共 30 个。参考 Liu et al. (2004) 的数据插补方法,对于连续缺失不超过 3 天的,用该站点时距最近的观测数据进行时间插值;对于连续缺失大于 3 天的,用邻近站点同期观测数据建立回归方程,然后利用该回归方程进行数据插补。将逐日太阳总辐射累加得年总量或季总量。将 3~5 月定义为春季,6~8 月为夏季,9~11 月为秋季,当年 12 月至次年 2 月为冬季。

日照时数、湿度(1990 年前为水汽压,以后为相对湿度)和风速数据用于分析太阳总辐射与气象要素的关系,在 30 个站点中有 26 个站点具有上述要素的逐日数据。因为缺乏和田、吐鲁番、若羌和侯马 4 个观测站的逐日气象要素观测数据,这些站点未纳入太阳总辐射与气象要素相关关系的分析。

采用线性倾向估计法(魏凤英, 2007)研究太阳总辐射的变化趋势,建立太阳总辐射(y)与时间序列(x , 年份)的一元线性回归方程 $y = a + bx$, 方程斜率 b 即为倾向率。 $b > 0$ 和 $b < 0$ 分别表示太阳总辐射随时间增加和减少。相关分析和回归分析采用 SPSS 统计软件。

3 结果与讨论

3.1 太阳总辐射年总量变化趋势及空间特征

表 1 为各站点 1961~2003 年间太阳总辐射的线性倾向率。在 30 个站点中,23 个站点的太阳总辐射总体呈显著减少趋势($P < 0.05$),其中有 16 个站点减少趋势极显著($P < 0.001$)。各站点总辐射减少量存在较大差异:北京站减少最明显,为 $302.1 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$;青海格尔木站减少量低于其他站点,为 $67.1 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$;有 7 个站点未表现显著增加或减少趋势。

表 1 太阳总辐射年总量倾向率

Table 1 Temporal tendency of annual solar radiation at each station $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$

站点	倾向率	站点	倾向率	站点	倾向率
阿勒泰	-102.0***	二连浩特	-30.9	南京	-229.4***
伊宁	-106.9*	大同	-269.1**	杭州	-81.8
乌鲁木齐	-152.9***	哈尔滨	0.6	宜昌	-136.4**
吐鲁番	-197.2***	沈阳	-163.2**	成都	-248.7***
和田	-96.3*	北京	-302.1**	贵阳	-104.8*
若羌	-23.6	天津	-202.6**	福州	-77.5
民勤	91.1	太原	-246.8**	广州	-195.6***
格尔木	-67.1**	侯马	-191.3**	汕头	-79.8*
西宁	-244.1***	西安	-216.9**	南宁	-73.4
兰州	-162.2***	固始	-275.3**	蒙自	-117.8**

注：*** 表示 $P < 0.001$, ** 表示 $P < 0.01$, * 表示 $P < 0.05$

对各站点观测数据的进一步分析表明，太阳总辐射年总量的时间变化趋势大致分为 4 种类型（图 1）：I 型，年总量呈持续减少趋势，如山西大同观测点（图 1a）；II 型，从 20 世纪 60 年代初到 80 年代中期呈显著减少趋势，其后线性趋势不明显，年总量基本保持稳定，如北京观测点（图 1b）；III 型，从 20 世纪 60 年代初到 80 年代中期呈减少趋势，其后呈逐步增加趋势，如湖北宜昌观测点（图 1c）；IV 型，年总量总体没有明显的

时间变化趋势，如黑龙江哈尔滨观测点（图 1d）。

图 2 为太阳总辐射年总量变化趋势 4 种类型的空间分布。其中：I 型站点为 6 个（占总站点数的 20%），主要分布在大约 $32^{\circ}\text{N} \sim 44^{\circ}\text{N}$ 的条带范围内；在 20 世纪 80 年代前太阳总辐射减少，其后基本不变的 12 个 II 型站点（占总站点数的 40%）主要分布在新疆地区、沈阳—北京—西安—成都一线和东南沿海地区；III 型站点为 5 个（占总站点数的 16.7%），主要分布在我国中西部地区；IV 型站点有 7 个（占总站点数的 23.3%），主要分布在我国北方地区和东南沿海区。

以 1961~1965 年、1983~1987 年和 1999~2003 年各 5 年太阳总辐射均值代表研究初期、中期和末期的太阳总辐射强度，分别计算各站点的总辐射强度变化。结果表明：在研究期内，I 型站点末期太阳总辐射强度比初期减少了 4.8%~18.5%，东部比西部的减少更明显；II 型和 III 型站点中期的太阳总辐射强度分别比初期减少了 6.1%~17.1% 和 12.0%~23.7%，但 III 型站点的太阳总辐射强度自 20 世纪 80 年代中期起逐步增加，末期比中期增加了 8.3%~10.6%。

将各站点太阳辐射年总量平均，其均值的变化趋势见图 3。可以看出，就全国整体而言，其变化趋势是 1961~1989 年总体减少，1985~1989 年

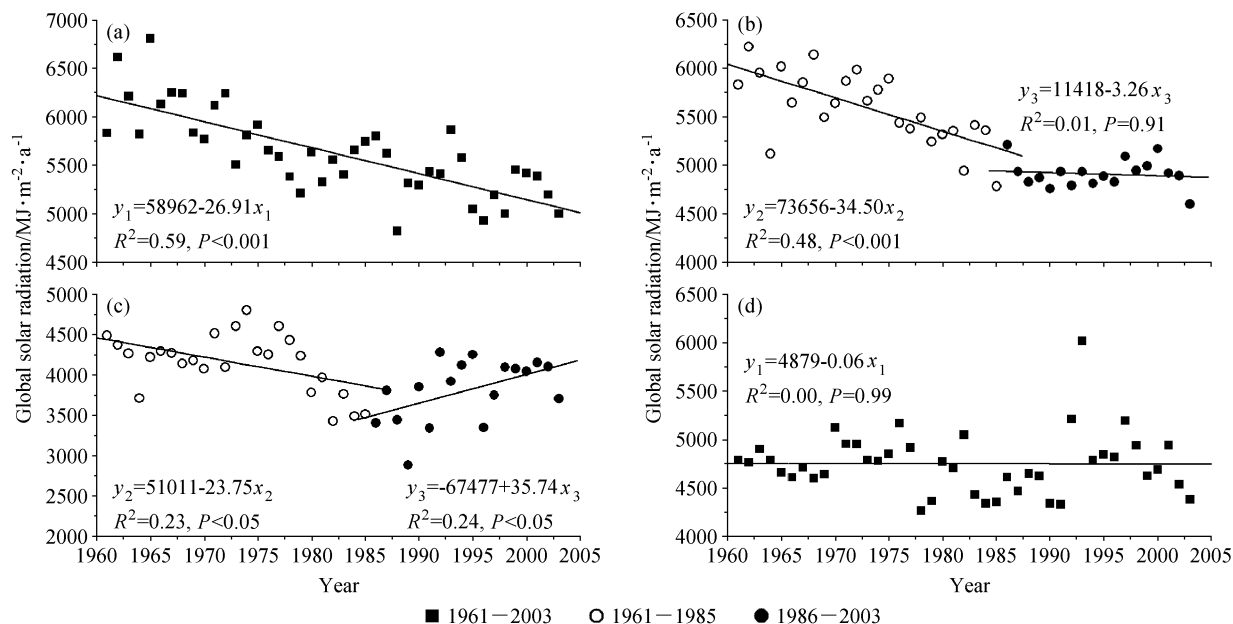


图 1 太阳总辐射年总量变化趋势：(a) 大同；(b) 北京；(c) 宜昌；(d) 哈尔滨

Fig. 1 Trend of changes in annual solar radiation: (a) Datong; (b) Beijing; (c) Yichang; (d) Harbin

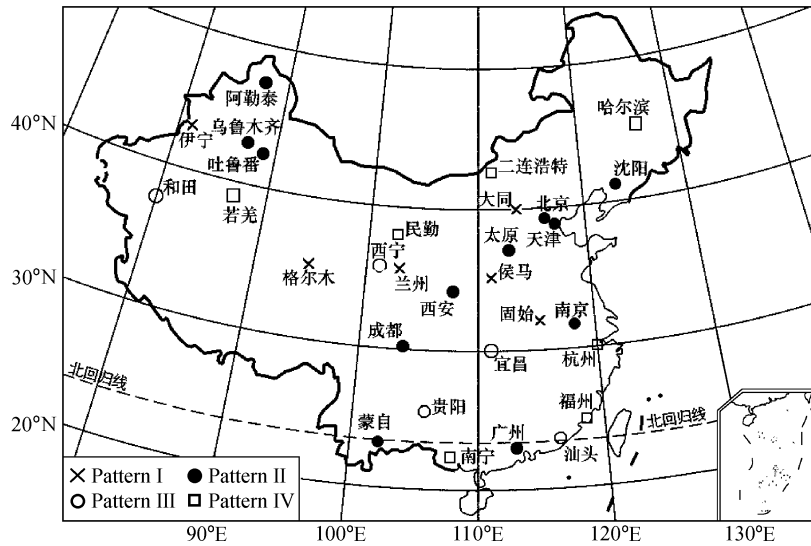


图 2 不同类型站点空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of the stations with different patterns of temporal change in solar radiation

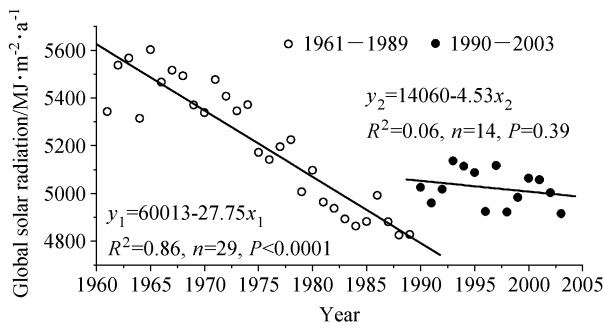


图 3 全国年均地表太阳总辐射变化趋势

Fig. 3 Trend of changes in the mean annual solar radiation in China

均值 ($4882 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) 比 1961~1965 年
均值 ($5473 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) 低 10.8%；1990~
2003 年间无显著变化趋势 ($P > 0.2$)，甚至略有
增加，均值为 $5024 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ，比 1985~
1989 年均值高 2.9%，但仍比 1961~1965 年
均值低 8.2%。

3.2 太阳总辐射季节变化趋势

3.2.1 I 型站点太阳总辐射季节变化

表 2 的统计分析结果显示，I 型站点各季节太
阳总辐射的变化趋势与年总量变化基本一致，但
各季节减少的幅度不同。其中伊宁、侯马和固始
观测点在夏季的减少幅度最大，占年减少量的
32%~34%；兰州和大同观测点在秋季减少幅度
最大，分别占年减少量的 28%和 34%；格尔木则
是冬季减少幅度最大，占年减少量的 32%。

表 2 I 型站点太阳总辐射倾向率

Table 2 Temporal tendency of solar radiation at each station
of pattern I

站点	倾向率 $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$				
	春季	夏季	秋季	冬季	年总量
伊宁	-31.5	-35.2	-21.1	-18.4*	-106.9*
格尔木	-16.2	-15.9	-15.5	-18.7**	-67.1**
兰州	-52.5**	-42.3	-35.9**	-33.1***	-162.2***
大同	-66.3***	-74.9***	-65.2***	-63.5***	-269.1***
侯马	-27.9	-74.9***	-41.7**	-48.0***	-191.3***
固始	-60.5***	-99.0***	-47.6**	-66.2***	-275.3***

注：同表 1

3.2.2 II 型站点太阳总辐射季节变化

表 3 为 II 型站点各季及年太阳辐射总量的线
性倾向率。可以看出，20 世纪 80 年代中期以前，
有一半的 II 型站点四季总量均呈显著减少趋势，
其他站点四季中有 2、3 个季节总量减少趋势显
著。春夏两季的总辐射减少甚为明显，约占年减
少量的 60%~85%；相比之下，秋冬两季减少量
较小，约占年减少量的 15%~40%。20 世纪 80
年代中期以后，所有 II 型站点冬季辐射量的变化
趋势不显著；除个别站点（沈阳夏季、太原秋季
和广州春季）呈较显著的增加或减小外，其他站
点均无明显变化趋势。

3.2.3 III 型站点太阳总辐射季节变化

表 4 为 III 型站点各季及年太阳辐射总量的线

表 3 II 型站点太阳总辐射倾向率

Table 3 Temporal tendency of solar radiation at each station of pattern II

MJ · m⁻² · (10 a)⁻¹

站点	春季		夏季		秋季		冬季		年总量	
	初期到中期	中期到末期	初期到中期	中期到末期	初期到中期	中期到末期	初期到中期	中期到末期	初期到中期	中期到末期
阿勒泰	-48.8*	-32.3	-21.3	-18.3	-22.3	4.5	-30.7*	-2.7	-130.9**	-54.2
乌鲁木齐	-65.3*	55.1	-64.9**	-4.3	-66.4**	19.8	-85.5***	35.0	-281.9***	100.0
吐鲁番	-77.2***	36.9	-70.6**	-0.6	-51.6***	-22.7	-75.5***	8.1	-273.6***	30.9
沈阳	-148.4***	-31.5	-80.1*	93.8*	-54.9	47.4	-55.1**	23.4	-339.7***	139.3
北京	-103.8**	2.6	-119.7**	27.8	-54.5*	-41.5	-53.8**	-5.0	-345.0***	-7.4
天津	-108.7*	-60.2	-165.7***	-75.6	-73.5*	-33.9	-57.3*	19.5	-408.1***	-133.7
太原	-55.4	1.6	-113.3**	-29.4	-37.7	-69.9**	-65.4**	-29.1	-278.2**	-128.0
西安	-73.9	51.9	-179.2***	41.8	-66.9	-18.6	-85.0**	-9.2	-407.3***	77.3
南京	-75.2*	21.7	-190.7**	20.3	-96.6**	56.8	-75.2*	-9.7	-445.8***	87.7
成都	-43.9	3.5	-102.8**	-61.5	-52.5**	-32.8	-75.5**	-33.2	-272.2***	-110.6
蒙自	-114.5***	21.1	-47.8	38.3	-80.5*	76.3	-51.3	-4.8	-286.9**	118.8
广州	-174.8***	138.8**	-76.0*	14.4	-64.6	-4.4	-72.0	-20.0	-395.1***	168.9

注：同表 1

表 4 III 型站点太阳总辐射倾向率

Table 4 Temporal tendency of solar radiation at each station of pattern III

MJ · m⁻² · (10 a)⁻¹

站点	春季		夏季		秋季		冬季		年总量	
	初期到中期	中期到末期	初期到中期	中期到末期	初期到中期	中期到末期	初期到中期	中期到末期	初期到中期	中期到末期
和田	-105.2***	119.7*	-87.9**	80.0	-84.4***	22.6	-77.0***	24.2	-352.8***	246.0*
西宁	-130.1***	158.2***	-129.1***	155.9	-85.7**	100.4	-126.5***	32.9	-470.2***	454.3*
宜昌	-0.4	74.5	-147.6**	139.2*	-31.9	85.3	-55.3*	61.8	-237.5*	350.8*
贵阳	-109.2**	66.2	-118.4*	143.8*	-73.9*	139.2**	-77.7**	43.8	-369.5***	388.3**
汕头	-240.7***	194.9***	-168.9***	19.5	-128.8***	84.6	-134.8***	18.3	-675.4***	360.7**

注：同表 1

性倾向率。可以看出，20 世纪 80 年代中期以前，除宜昌观测站外各季节的太阳总辐射量均减少。与 II 型站点相仿，春夏两季的总辐射减少较多，约占年减少量的 55%~63%，秋冬两季约占年减少量的 37%~45%。20 世纪 80 年代中期以后，和田、西宁和汕头观测点在春季有显著增加趋势，而贵阳在夏季和秋季均呈显著增加趋势。一个比较明显的规律是，20 世纪 80 年代中期前减幅较大的季节，在 80 年代中期后也表现出较大的增幅，其中春季增量约占年增量的 51%~57%，夏季占 37%~51%。

3.2.4 IV 型站点太阳总辐射季节变化

IV 型站点除民勤观测点在夏季有增加趋势 ($P<0.05$)，二连浩特、杭州、福州和南宁在冬季呈减少趋势 ($P<0.05$) 外，其余各季均无明显的增加或减少趋势，与年辐射总量的变化趋势基本一致。

3.3 太阳总辐射变化原因的探讨

云是影响太阳短波辐射达到地表的重要障碍因素。20 世纪 80 年代中期以前，多数站点的太阳辐射总体呈显著减少趋势，但曾昭美等 (1993) 的研究表明，1950~1988 年中国西北、东北华北、长江中下游地区的云量也是呈减少趋势的，只有南部沿海地区的云量呈增加趋势。这无法解释本研究中多数站点在 20 世纪 80 年代中期前太阳总辐射显著的减少趋势。李晓文等 (1998) 在分析 1990 年以前的太阳辐射变化规律时，也证明了排除云量的影响并不能改变辐射的变化趋势。因此，云量变化可能并不是引起中国 43 年来太阳总辐射变化的关键因素。

有研究表明，20 世纪 90 年代前中国许多地区能见度呈下降趋势，其后下降速度减慢或略有回升 (罗云峰等，2000；范引琪等，2005；黄健等，

2008)。这与太阳总辐射在 20 世纪 80 年代中期以前的减少趋势以及 80 年代中期后的增加趋势或保持稳定比较一致。地面能见度的变化主要受低层大气气溶胶状况的影响,包括沙尘暴和城市空气污染。20 世纪 90 年代以后对沙尘暴的治理和对污染的控制有可能提高了大气能见度(林杨等, 2007; 廖国莲等, 2007),从而增加太阳辐射。

任国玉等(2005)的研究表明,1956~2002 年期间我国年平均日照时数具有明显的减少趋势,其变化速率为 $-37.6 \text{ h} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,但 20 世纪 90

年代初开始这种减少趋势已不明显;1956~2002 年全国风速也呈现明显的减小趋势,变化速率为 $-0.12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。1961~2003 年我国太阳辐射的变化趋势与日照时数的变化趋势具有较大的一致性(图 4),但与风速变化趋势的一致性只呈现在部分时间段,如北京的 20 世纪 70~90 年代(图 4b)。

对 26 个具有同期气象要素观测数据的相关分析表明,24 个站点太阳辐射年总量与年日照时数呈显著正相关($P < 0.05$),其余两个站点(伊宁

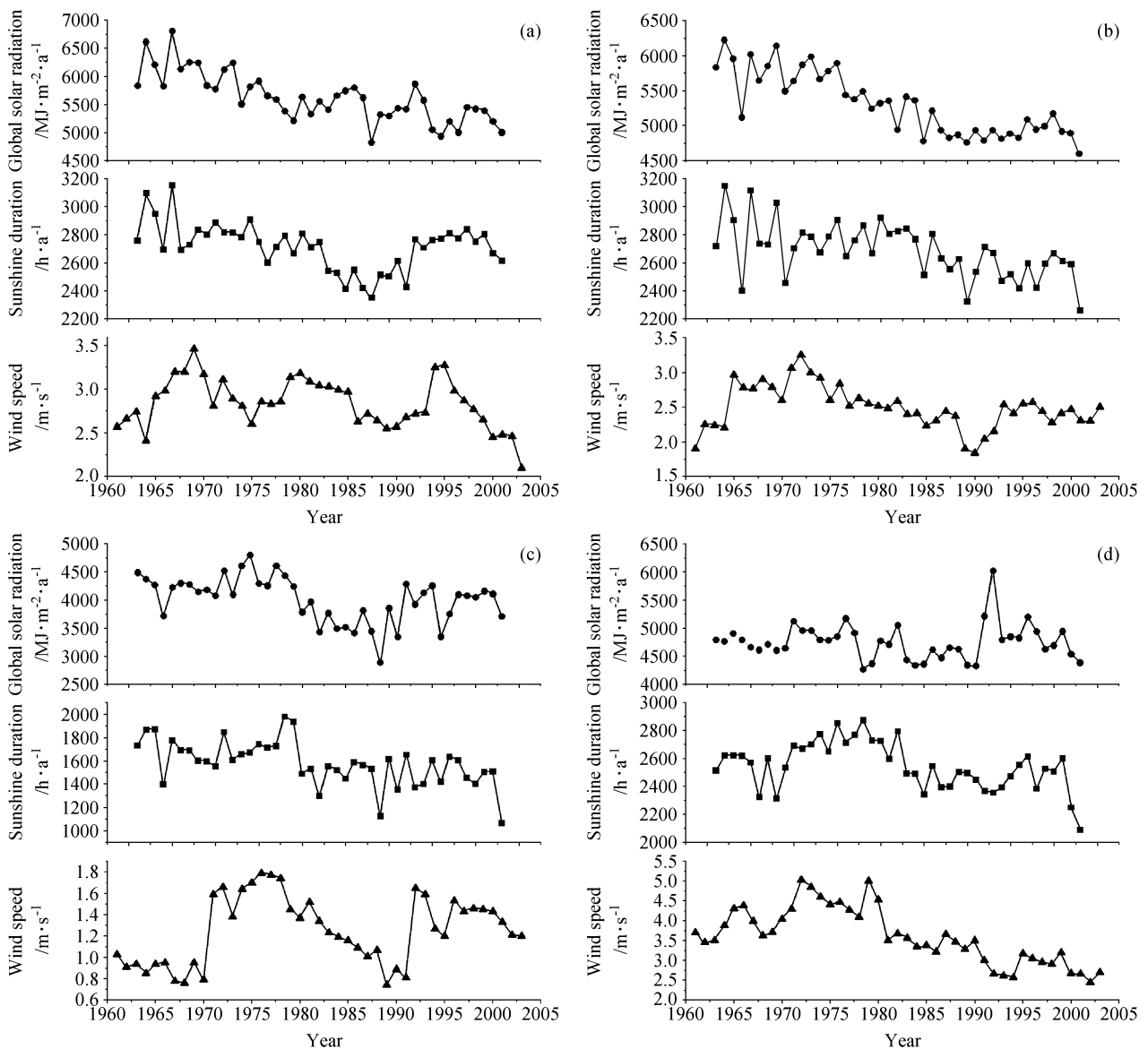


图4 太阳辐射年总量、年日照时数和年均风速的变化趋势:(a)大同;(b)北京;(c)宜昌;(d)哈尔滨

Fig. 4 Trends of changes in annual solar radiation, annual sunshine duration, and mean wind speed: (a) Datong; (b) Beijing; (c) Yichang; (d) Harbin

和哈尔滨) 相关性不甚显著的原因是 1961~2003 年间的年日照时数没有显著变化。图 5 为所有 26 个站点太阳辐射年总量与年日照时数的相关关系, 表明辐射年总量变化的 72% 可以用日照时数的变化来解释。

对 26 个站点太阳辐射年总量与年均风速的相关分析表明: 10 个站点的辐射年总量与年均风速呈显著正相关 ($P < 0.05$); 2 个站点呈弱正相关 ($P < 0.1$); 12 个站点的辐射年总量与年均风速无显著相关 ($P > 0.1$); 成都观测点则呈显著负相关 ($P < 0.01$)。图 6 为所有站点太阳辐射年总量与年均风速的相关关系, 表明辐射年总量变化的 17% 可以用年均风速的变化来解释。研究表明,

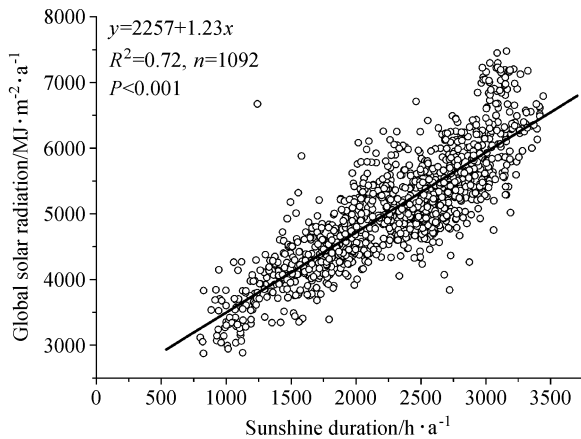


图 5 太阳辐射年总量与年日照时数的相关性

Fig. 5 Relationship between annual solar radiation and sunshine duration

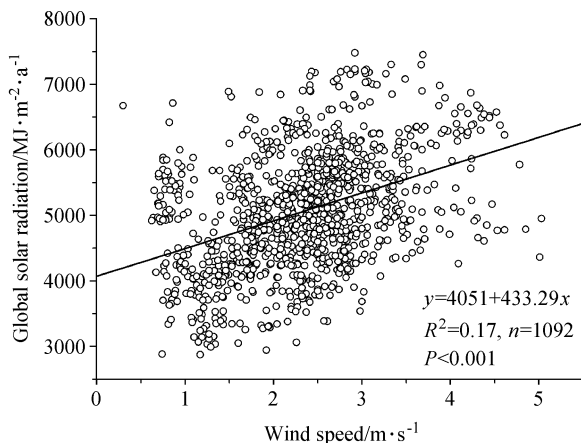


图 6 太阳辐射年总量与年均风速的相关性

Fig. 6 Relationship between annual solar radiation and mean wind speed

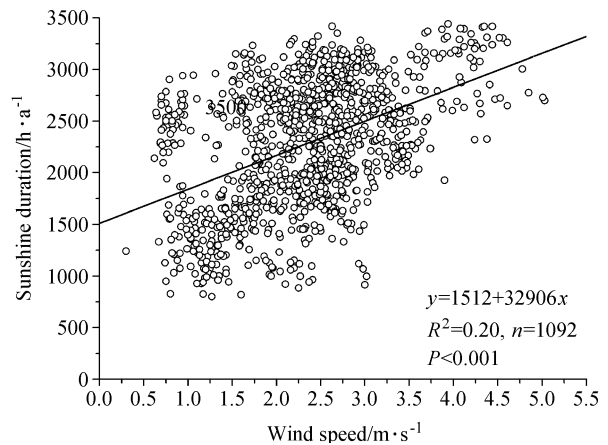


图 7 年日照时数与年均风速的相关性

Fig. 7 Relationship between annual sunshine duration and mean wind speed

气溶胶的变化可以解释辐射的减少 (Ramanathan et al., 2001; Liepert et al., 2004), 而气溶胶光学厚度 (AOD) 与风速总体呈负相关 (李霞, 2006)。AOD 反映了整层大气的污染状况, 其值越大说明空气质量状况越差, 因此风速可以解释部分太阳辐射的变化, 但成都观测点辐射年总量与年均风速呈显著负相关的原因尚难以解释。

以太阳辐射年总量为因变量, 年日照时数和年均风速为自变量进行二元线性回归, 方程的决定系数 ($R^2 = 0.72$) 并不显著高于与日照时数的单相关分析 (图 5); 当进行逐步回归时, 风速因子被剔除。这说明 1990 年前太阳辐射减少 (图 3) 的原因主要归咎于日照时数的减少。对于日照时数减少的原因, 一般认为可能主要与人为排放的气溶胶浓度增加有关 (王自发等, 1998; 王喜红等, 2002; 罗云峰等, 2002)。另一方面, 风速增加可能有利于气溶胶的扩散, 使得日照时数增加, 因为我们注意到日照时数随风速增加而增加 (图 7)。我们还将 26 个站点太阳辐射年总量和同期大气湿度进行了相关分析, 但总体上未见显著相关, 尽管有 5 个站点的结果表明辐射年总量与湿度呈线性相关 ($P < 0.05$)。

4 结论

(1) 1961~1989 年间中国地表太阳辐射总体呈减少趋势, 1990~2003 年略有回升, 但其均值

仍比 1961~1965 年均值低 8.2%。地表太阳辐射在春夏两季减少明显, 约占年减少量的 55%~85%。

(2) 各观测站地表太阳辐射随时间的变化趋势存在差异, 但大致可分为 4 种类型: 1961~2003 年间持续减少或无显著变化; 20 世纪 60 年代初到 80 年代中期显著减少, 其后线性趋势不明显或呈增加趋势。这几种类型在空间分布上无明显的区域特征。

(3) 日照时数减少是总辐射减少的主要原因, 日照时数的变化可能与风速和大气气溶胶浓度有关。

参考文献 (References)

- Che H Z, Shi G Y, Zhang X Y, et al. 2005. Analysis of 40 years of solar radiation data from China, 1961 - 2000 [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 32 (L06803): 1 - 5.
- 陈志华, 石广玉, 车慧正. 2005. 近 40 年来新疆地区太阳辐射状况研究 [J]. *干旱区地理*, 28 (6): 734 - 739. Chen Zhihua, Shi Guangyu, Che Huizheng. 2005. Analysis of the solar radiation of Xinjiang Uygur Autonomous Region in recent 40 years [J]. *Arid Land Geography* (in Chinese), 28 (6): 734 - 739.
- 范引琪, 李二杰, 范增禄. 2005. 河北省 1960~2002 年城市大气能见度的变化趋势 [J]. *大气科学*, 29 (4): 526 - 535. Fan Yin-qi, Li Erjie, Fan Zenglu. 2005. Visibility trends in 11 cities of Hebei Province during 1960 - 2002 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 29 (4): 526 - 535.
- Gilgen H, Wild M, Ohmura A. 1998. Means and trends of short-wave irradiance at the surface estimated from global energy balance archive data [J]. *J. Climate*, 11: 2042 - 2061.
- 黄健, 吴兑, 黄敏辉, 等. 2008. 1954 - 2004 年珠江三角洲大气能见度变化趋势 [J]. *应用气象学报*, 19 (1): 61 - 69. Huang Jian, Wu Dui, Huang Minhui, et al. 2008. Visibility variations in the Pearl River Delta of China during the period of 1954 - 2004 [J]. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 19 (1): 61 - 69.
- 李霞. 2006. 乌鲁木齐气象要素对大气气溶胶光学特性的影响 [J]. *干旱区研究*, 23 (3): 484 - 488. Li Xia. 2006. Effects of meteorological factors on optical properties of aerosol in Ürümqi [J]. *Arid Zone Research* (in Chinese), 23 (3): 484 - 488.
- 李晓文, 李维亮, 周秀骥. 1998. 中国近 30 年太阳辐射状况研究 [J]. *应用气象学报*, 9 (1): 24 - 31. Li Xiaowen, Li Weiliang, Zhou Xiuji. 1998. Analysis of the solar radiation variation of China in recent 30 years [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 9 (1): 24 - 31.
- 廖国莲, 程鹏. 2007. 南宁市大气能见度变化特征及影响因子分析 [J]. *气象研究与应用*, 28 (4): 26 - 28. Liao Guolian, Cheng Peng. 2007. Analysis on variation features of atmospheric visibility and its influencing factors in Nanning [J]. *Journal of Meteorological Research and Application* (in Chinese), 28 (4): 26 - 28.
- Liang F, Xia X A. 2005. Long-term trends in solar radiation and the associated climatic factors over China for 1961 - 2000 [J]. *Annales Geophysicae*, 23: 2425 - 2432.
- Liepert B G. 2002. Observed reductions of surface solar radiation at sites in the United States and worldwide from 1961 to 1990 [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 29 (10): 61.
- Liepert B G, Feichter J, Lohmann U, et al. 2004. Can aerosols spin down the water cycle in a warmer and moister world? [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 31 (L06207): 1 - 4.
- 林杨, 胡琳, 邓小丽, 等. 2007. 西安市大气能见度变化规律及空气污染关系 [J]. *陕西气象*, 6: 29 - 31. Lin Yang, Hu Lin, Deng Xiaoli, et al. 2007. Visibility variations of Xi'an and relationship between visibility and air pollution [J]. *Journal of Shaanxi Meteorology* (in Chinese), 6: 29 - 31.
- Liu B H, Xu M, Henderson M, et al. 2004. A spatial analysis of pan evaporation trends in China, 1955 - 2000 [J]. *J. Geophys. Res.*, 109 (D15102): doi: 10.1029/2004JD004511.
- 罗云峰, 吕达仁, 何晴, 等. 2000. 华南沿海地区太阳直接辐射、能见度及大气气溶胶变换特征分析 [J]. *气候与环境研究*, 5 (1): 36 - 43. Luo Yunfeng, Lü Daren, He Qing, et al. 2000. An analysis of direct solar radiation, visibility and aerosol optical depth in South China coastal area [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 5 (1): 36 - 43.
- 罗云峰, 吕达仁, 周秀骥, 等. 2002. 30 年来我国大气气溶胶光学厚度平均分布特征分析 [J]. *大气科学*, 26 (6): 721 - 730. Luo Yunfeng, Lü Daren, Zhou Xiuji, et al. 2002. Analyses on the spatial distribution of aerosol optical depth over China in recent 30 years [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 26 (6): 721 - 730.
- Ohmura A, Wild M. 2002. Is the hydrological cycle accelerating? [J]. *Science*, 298: 1345 - 1346.
- Ramanathan V, Crutzen P J, Kiehl J T, et al. 2001. Aerosols, climate, and the hydrological cycle [J]. *Science*, 294: 2119 - 2124.
- 任国玉, 郭军, 徐铭志, 等. 2005. 近 50 年中国地面气候变化基本特征 [J]. *气象学报*, 63 (6): 942 - 956. Ren Guoyu, Guo Jun, Xu Mingzhi, et al. Climate changes of China's Mainland over the past half century [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 63 (6): 942 - 956.
- Roderick M L, Farquhar G D. 2002. The cause of decreased pan evaporation over the past 50 years [J]. *Science*, 298: 1410 - 1411.
- Shi G Y, Hayasaka T, Ohmura A, et al. 2008. Data quality assessment and the long-term trend of ground solar radiation in China [J]. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 47: 1006 - 1016.

- 魏凤英. 2007. 现代气候统计诊断与预测技术 (第 2 版) [M]. 北京: 气象出版社, 37-40. Wei Fengying. 2007. Modern Climatic Statistical Diagnosis and Prediction (2nd ed.) [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 37-40.
- 王喜红, 石广玉. 2002. 东亚地区云和地表反照率对硫酸盐直接辐射强迫的影响 [J]. 气象学报, 60 (6): 758-765. Wang Xihong, Shi Guangyu. 2002. Effect of cloud and surface albedo on direct sulfate radiation forcing over East Asia [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 60 (6): 758-765.
- 王自发, 黄美元, 高会旺, 等. 1998. 关于我国和东亚酸性物质的输送研究 II. 硫化物浓度空间分布特征及季节变化 [J]. 大气科学, 22 (5): 693-700. Wang Zifa, Huang Meiyuan, Gao Huiwang, et al. 1998. Studies on transport of acid substance in China and East Asia. Part II: Spatial distribution of sulfur and its seasonal variation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 22 (5): 693-700.
- Wild M, Gilgen H, Roesch A, et al. 2005. From dimming to brightening: Decadal changes in solar radiation at earth's surface [J]. Science, 308: 847-850.
- Xia X A, Wang P C, Chen H B, et al. 2004. Analysis of downwelling surface solar radiation in China from National Centers for Environmental Prediction reanalysis, satellite estimates, and surface observations [J]. J. Geophys. Res., 111 (D09103): 1-9.
- 曾昭美, 严中伟. 1993. 近 40 年中国云量变化的分析 [J]. 大气科学, 17 (6): 688-696. Zeng Zhaomei, Yan Zhongwei. 1993. An analysis of cloudiness in China during 1950-1988 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 17 (6): 688-696.
- 查良松. 1995. 西北地区太阳辐射量变化的研究 [J]. 干旱区地理, 18 (1): 8-13. Zha Liangsong. 1995. Research on the variation of solar radiation in Northwest China [J]. Arid Land Geography (in Chinese), 18 (1): 8-13.
- 查良松. 1996a. 我国地面太阳辐射量的时空变化研究 [J]. 地理科学, 16 (3): 232-237. Zha Liangsong. 1996a. A study on spatial and temporal variation of solar radiation in China [J]. Scientia Geographica Sinica (in Chinese), 16 (3): 232-237.
- 查良松. 1996b. 我国太阳辐射量区域性变化特征研究 [J]. 地理研究, 15 (2): 21-27. Zha Liangsong. 1996b. Regional variations of solar radiation in China [J]. Geographical Research (in Chinese), 15 (2): 21-27.
- 张雪芬, 陈东, 付祥健, 等. 1999. 河南省近 40 年太阳辐射变化规律及其成因探讨 [J]. 气象, 25 (3): 21-25. Zhang Xuefen, Chen Dong, Fu Xiangjian, et al. 1999. Analysis of the regularity and forming reasons of the solar radiation variation of Henan in recent 40 years [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 25 (3): 21-25.