

近 50 年来中国东、西部地面太阳辐射变化及其与大气环境变化的关系

齐月 房世波 周文佐

Correlative analysis between the changes of surface solar radiation and its relationship with air pollution, as well as meteorological factor in East and West China in recent 50 years

Qi Yue Fang Shi-Bo Zhou Wen-Zuo

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 64, 089201 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.089201

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.089201>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I8>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

中国夏季大气水分循环特征及再分析资料对比分析

[The characteristics of the summer atmospheric water cycle over China and comparison of ERA-Interim and MERRA reanalysis](#)

物理学报.2014, 63(24): 249201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.249201>

黄土高原地表能量平衡分量年际变化及其对气候波动的响应

[Plateau surface energy balance components and interannual variability in response to climate fluctuations](#)

物理学报.2014, 63(11): 119201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.119201>

黄土高原区域气候暖干化对地表能量交换特征的影响

[Warming and drying climate over Loess plateau area in China and its effect on land surface energy exchange](#)

物理学报.2013, 62(13): 139202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.139202>

集合经验模态分解在区域降水变化多尺度分析及气候变化响应研究中的应用

[The application of ensemble empirical mode decomposition method in multiscale analysis of region precipitation and its response to the climate change](#)

物理学报.2013, 62(10): 109203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.109203>

基于气候变化综合指数的中国近 50 年来气候变化敏感性研究

[The research on the sensitivity of climate change in China in recent 50 years based on composite index](#)

物理学报.2012, 61(14): 149205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.149205>

近50年来中国东、西部地面太阳辐射变化及其与大气环境变化的关系*

齐月¹⁾²⁾ 房世波^{1)†} 周文佐³⁾

1)(中国气象科学研究院生态环境与农业气象研究所, 北京 100081)

2)(中国气象局兰州干旱气象研究所, 甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室, 中国气象局干旱气候变化与减灾重点实验室, 兰州 730020)

3)(西南大学地理科学学院, 重庆 400715)

(2014年4月30日收到; 2014年11月16日收到修改稿)

利用1961—2011年中国东、西部地区地面太阳辐射和长期气象数据观测资料, 综合分析了东、西部地区地面太阳总辐射的变化特征, 并结合云量、日照百分率、风速、相对湿度等分析了影响东、西部地面太阳总辐射的变化原因. 结果表明: 近50年来东、西部地区地面太阳总辐射整体呈下降趋势, 下降幅度有所不同; 20世纪90年代之前大部分地区地面太阳总辐射呈下降趋势, 之后呈缓慢增加; 东、西部各地区地面太阳总辐射与日照时数间存在显著相关性; 分析影响地面太阳总辐射减少的因素, 东部地区地面太阳总辐射与日照百分率呈显著正相关, 日照百分率是影响地面太阳总辐射减少的主要因素, 总云量与低云量已不是东部地区影响太阳辐射的主要因素; 西部地区地面太阳辐射与云量相关性较低, 主要受大气污染和日照百分率的影响. 风速成为影响地面大气辐射的一个重要因子, 并且风是驱逐大气对流层雾霾等大气污染的主要因子, 这进一步证实了大气污染已经成为影响地面太阳辐射的重要因素, 尤其在中国东部地区.

关键词: 气候变化, 雾霾天气, 气溶胶, 日照百分率

PACS: 92.60.Vb, 92.05.Df, 92.60.Sz, 92.70.Mn

DOI: 10.7498/aps.64.089201

1 引言

太阳辐射是地球表层最重要的能量来源, 它决定了地球大气系统的热力状况, 是影响生态环境变化的主要因子. 地球大气上界某一点的太阳辐射长期变化非常小, 而到达地面的太阳辐射量的变化则较大, 造成这种差别的原因是由于太阳辐射在到达地球表面的过程中, 受到大气对太阳辐射的吸收和散射的不同, 其与大气成分、云量、大气中水汽的含量以及大气悬浮物含量等变化密切相关^[1-4]. 这种变化对地表的大气温度、蒸发和水循环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, 产生较为深远的综合效应^[5].

到达地面的太阳辐射的变化受云、气溶胶、水汽等因素的影响, 而人类活动(如土地利用与城市化过程)改变了大气中气溶胶的含量^[6,7], 从而影响地表接收的太阳总辐射, 导致地面总辐射的减少. 城市化会导致城市空气质量恶化, 其中气溶胶含量增加是主要表现之一^[8-13]. 由于城市的发展, 不同地区城市空气中污染物的浓度增加, 大气透明度降低, 使到达地表的太阳辐射发生变化^[14,15]. 受人类排放的各种污染物质的影响, 太阳总辐射从20世纪50年代到90年代有明显减少的趋势, 这种现象又称为“全球变暗”(global dimming)^[8]. Norris和Wild^[16]研究了欧洲地面太阳总辐射的变化, 发现人类活动向大气排放气溶胶的变化是影响地面

* 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2010CB951300)和国家自然科学基金(批准号: 41375117)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: fangshibo@cma.gov.cn

太阳总辐射变化的主要因素. Elminir^[17]发现大气污染直接导致埃及晴空状况下的地面总辐射减少了9.3%—22%. Che等^[18]研究了1961—2000年中国境域内太阳辐射的变化,发现人类排放的气溶胶可能影响太阳辐射及日照时间; Zhang等^[19]认为与大气污染有关的气溶胶浓度的增加可能是造成中国东部地区地面总辐射减少的主要原因,中国1960—2005年气溶胶光学厚度呈逐年增加趋势,且气溶胶厚度在中国呈东南高、西北部低的分布^[20],而近50年来在中国东部霾出现频次呈增加趋势,而西部变化不大^[21,22]. 近40年来,中国的霾集中区域在珠三角、广西东北部、华北、长三角以及云南南部地区,在福建沿海以及四川盆地也有一定的分布,霾的分布受城市工业化和污染排放的影响^[23]. 张利等^[24]分析能见度的变化趋势发现中国西部地区的能见度比东部地区高,能见度与相对湿度有较好的相关性,大气污染是能见度降低的重要因子. 申彦波和王标^[1]对近50年来中国东南地区地面太阳辐射变化的研究发现,1989年前地面太阳辐射呈减少趋势,之后呈增加趋势,并对气温的升高起到加强作用. 1980—2003年京、津、冀大部分地区能见度水平呈下降趋势,并且能见度与空气污染指数呈反比关系^[25]. 中国这种东、西部大气污染的差异能在多大程度上影响太阳辐射,而这种影响在我国不同区域其差异如何,需要进一步深入分析.

本文利用1961—2011年中国东部(北京、天津、山东、江苏、河南)和西部(青海、西藏自治区、新疆维吾尔自治区)的长期气象数据及地面太阳辐射观测资料,研究了东、西部地区地面太阳总辐射和日照时数的变化规律,并探讨地面太阳总辐射与各气候要素间的相关性,重点分析与太阳总辐射的减少密切相关的空气污染即大气气溶胶的影响,分析东、西部气溶胶影响的差异.

2 资料与方法

2.1 资料来源

选取中国东、西部北京、天津、江苏、山东、河南、新疆维吾尔自治区、青海和西藏自治区的长期气象观测数据和地面太阳辐射观测日平均资料,包括总辐射、直接辐射、散射辐射、日照时数、风速、相对湿度、总云量、低云量,其中,风速为2 m处的观测数据,相对湿度为平均相对湿度资料,采用内插

法计算以转化成月均值和年均值. 所用资料来自中国气象科学数据服务共享网^[26]. 观测资料的平均相对误差为0.5%,能够满足气候学分析需要,参照1996年中国气象局编写的“气象辐射观测方法”^[27]对资料进行了严格处理和质量控制. 由于受辐射资料台站以及资料完整性的限制,选用代表中国东、西部地区时间序列较为连续的大城市(省会)和中小城市的20个站点进行分析.

为了更能突显大气环境的变化,用浑浊度因子反映气溶胶的变化. 以散射辐射 D 和直接辐射 S 的比值来表示大气浑浊度(α 为浑浊度因子)^[28,29],

$$\alpha = D/S.$$

在晴天同一太阳高度角下浑浊因子的大小主要取决于大气中气溶胶含量. 当大气很清洁时 D/S 数值很小,而大气浑浊时 D/S 数值较大.

2.2 方法简介

2.2.1 线性回归法

通过线性回归法分析气候要素在较长时间尺度上的演变趋势. 采用线性倾向估计法研究地面总辐射的变化趋势,建立辐射(y)与时间序列(x , 年份)的一元线性回归方程 $y = a + bx$,系数 b 即为倾向率, a , b 可以通过最小二乘法计算得到. $b > 0$ 和 $b < 0$ 分别表示辐射随时间增加和减少, $b = 0$ 表示无变化^[30].

2.2.2 相关性分析

通过计算两组气象要素间的Pearson相关系数来度量气象要素间的相关性.

对于两组气象要素 $X_1, X_2, \dots, X_n$ 和 $Y_1, Y_2, \dots, Y_n$,相关系数 r 的计算公式为

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}},$$

相关系数 r 取值在 -1.0 — $+1.0$ 之间. 当 $r > 0$ 时表明两变量正相关,越接近1.0,正相关越显著;当 $r < 0$ 时,表明两变量负相关,越接近 -1.0 ,负相关越显著;当 $r = 0$ 时,则表明两变量相互独立. 计算出的相关系数是否显著,需要经过显著性检验^[31,32].

3 结果分析

3.1 东部地区地面太阳辐射变化及影响因素分析

3.1.1 东部地区地面太阳辐射的年际变化

图1为中国东部各地区地面太阳辐射的变化。由图1可见, 1960—2011年各站地面太阳总辐射均呈减少趋势。从1961—2011年辐射变化曲线的最低值出现的时间来看: 各地区低值出现的时间不同, 除郑州站外, 总体都是在20世纪90年代前后地面太阳总辐射达到最低值, 之后呈增加趋势; 北京、济南、固始地面太阳总辐射在1990年前后出现低值, 之后呈波动增加趋势; 南京和天津在80年代地面太阳总辐射出现最低值; 但郑州站波动幅度较大, 在70年代初期地面总辐射出现低值, 之后地面总辐射呈增加趋势, 80年代以后地面总辐射开始下降。

本文选用东部地区6个气象观测站(北京、天

津、济南、南京、固始、郑州), 各站点地面总辐射的年际变化各不相同, 1961—2011年东部地区年平均地面太阳总辐射为 4910.83 MJ/m^2 。由表1可见: 1961—2011的52年中6个地区地面太阳总辐射均呈下降趋势, 北京下降幅度最大, 为 $-22.69 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot 10 \text{ a})$, 其次为固始; 北京、天津、济南、固始通过了0.001显著性水平检验($P < 0.001$), 南京、郑州地面总辐射通过了0.01显著性水平检验($P < 0.01$)。1961—1970年各站点地面太阳总辐射下降趋势有所不同, 郑州下降幅度最大($P < 0.05$); 1971—1980年北京地面太阳总辐射的下降幅度最大($P < 0.001$), 但郑州地面太阳辐射呈上升趋势($P < 0.05$); 1981—1990年各站点地面太阳总辐射变化各不相同, 其中郑州地面太阳总辐射的下降幅度最大, 其次为济南($P < 0.05$); 1991—2000年北京地面太阳总辐射上升幅度最大, 其次为济南; 2001—2011年各站点地面太阳辐射均呈上升趋势, 其中上升幅度最大的地区为济南。

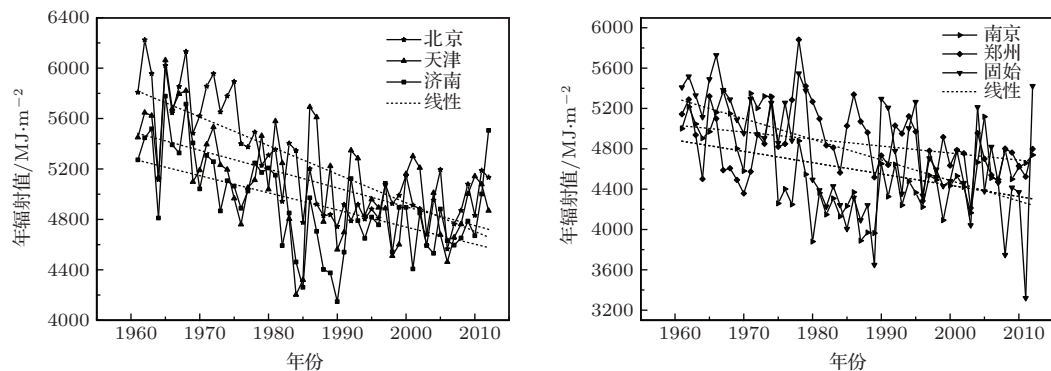


图1 中国东部各地区地面太阳总辐射年际变化趋势

Fig. 1. The interannual variation of surface solar radiation in East China.

表1 中国东部各站地面太阳总辐射变化的气候线性倾向率(单位: $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$)

Table 1. The climate linear tendency (unit: $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$) of surface solar radiation in East China.

	1961—2011	1961—1970	1971—1980	1981—1990	1991—2000	2001—2011
北京	-22.69***	-25.21	-75.81***	-60.34*	26.09*	23.47
天津	-14.92***	-21.80	-29.86	-23.29	-29.2	-8.06
济南	-13.58***	-1.30	-0.13	-68.74*	9.76	50.83*
南京	-6.34**	-27.78	-38.36	-1.56	-2.53	5.15
固始	-20.39***	-37.92	-10.24	18.35	-58.25	-24.98
郑州	-6.94**	-86.5*	89.15*	-17.69	-28.59	0.78

注: ***表示 $P < 0.001$; **表示 $P < 0.01$; *表示 $P < 0.05$.

3.1.2 地面太阳辐射与气候要素的关系

表2为东部各地区地面太阳总辐射与浑浊度、日照百分率、风速、低云量、总云量的相关系数. 各地区浑浊度因子与地面太阳总辐射呈负相关, 其中北京、天津、南京、济南的浑浊度因子与地面太阳总辐射呈显著负相关($P < 0.01$); 东部地区6个站点日照百分率与地面太阳总辐射均呈显著正相关($P < 0.01$); 北京、天津、固始的风速与地面太阳总辐射呈显著相关($P < 0.01$), 其他地区风速与地面太阳总辐射无相关性; 除北京和济南外, 相对湿度与地面太阳总辐射无相关性; 低云量和总云量与地面太阳总辐射的相关性分析可以看出, 各地区

的总云量与地面太阳总辐射不具有相关性; 北京和郑州低云量与地面太阳总辐射呈显著的负相关($P < 0.01$ 和 $P < 0.05$), 其他地区低云量与地面太阳总辐射呈不显著的负相关. 总的来看, 总云量和低云量对太阳辐射的影响不大, 不是主要因素, 这可能与中国东部大气污染导致的气溶胶厚度增加而霾天气出现的频次也增加有关^[20–22]. 而霾出现频次的增加降低了日照百分率, 表2中地面太阳总辐射与日照百分率显著相关, 而与低云量和总云量无相关性, 大气浑浊度成为影响中国东部地区地面太阳总辐射的主要因素, 从侧面反映了大气污染影响东部地区地面总太阳总辐射.

表2 东部各地区地面太阳总辐射与各气象要素的相关系数

Table 2. Correlation coefficients between surface solar radiation and sunshine percentage in East China.

	北京	天津	济南	南京	郑州	固始
浑浊度	−0.530**	−0.565**	−0.861**	−0.799**	−0.261	N
日照百分率	0.793**	0.623**	0.669**	0.670**	0.533**	0.705**
风速	0.545**	0.453**	0.179	0.170	0.127	0.497**
相对湿度	0.343*	−1.56	0.320*	−1.23	0.031	0.104
低云量	−0.577**	−0.142	−0.176	−0.131	−0.318*	−0.102
总云量	−0.133	0.036	0.218	0.230	0.125	0.026

注: **表示 $P < 0.01$; *表示 $P < 0.05$; N表示没有观测数据.

3.2 西部地区地面太阳辐射变化及影响因素分析

3.2.1 西部地区地面太阳辐射的年际变化

本文选用西部地区西宁、格尔木、玉树、昌都、拉萨、那曲、喀什、吐鲁番、和田、哈密、若羌、阿勒泰、乌鲁木齐、伊宁14个气象站点. 图2为中国西部各地区地面太阳总辐射年际变化趋势. 从图2可以看出: 1961—2011年多数站点地面太阳总辐射呈下降趋势; 其中拉萨、西宁、乌鲁木齐、格尔木、吐鲁番、玉树等地面太阳总辐射呈显著下降趋势($P < 0.05$), 喀什、吐鲁番、拉萨、乌鲁木齐、那曲、昌都的地面太阳总辐射在1990年左右出现低值, 之后呈增加趋势; 伊宁、格尔木、西宁的地面太阳总辐射在1980年左右出现低值, 之后呈增加趋势; 阿勒泰、若羌、和田地面太阳总辐射在2000年前后出现低值, 玉树在2010年前后出现低值. 总的来说, 1961—2011年西部地区地面太阳总辐射表现为90

年代前呈下降趋势, 90年代后呈上升趋势.

1961—2011年西部地区地面太阳总辐射为6058.12 MJ/m². 由表3可见, 1961—2011年14个站点的地面太阳总辐射均呈下降趋势, 11个站点通过了显著性水平检验, 其中7个站点通过0.001显著性水平检验, 拉萨地面太阳总辐射下降幅度最大. 1961—1970年喀什、伊宁地面太阳总辐射呈下降趋势显著, 其他地区地面太阳总辐射下降较少或者呈上升趋势, 玉树地面太阳总辐射上升最为显著($P < 0.05$); 1971—1980年14个站点中10个站点地面太阳总辐射呈下降趋势, 其中玉树下降幅度最大, 若羌地面太阳总辐射增幅最大; 1981—1990年昌都的地面太阳总辐射下降幅度最大, 其次为喀什; 1991—2000年大部分地区地面太阳总辐射呈增加趋势, 增加幅度有所不同; 2001—2011年大部分地区的地面太阳总辐射呈下降趋势, 降幅有所不同.

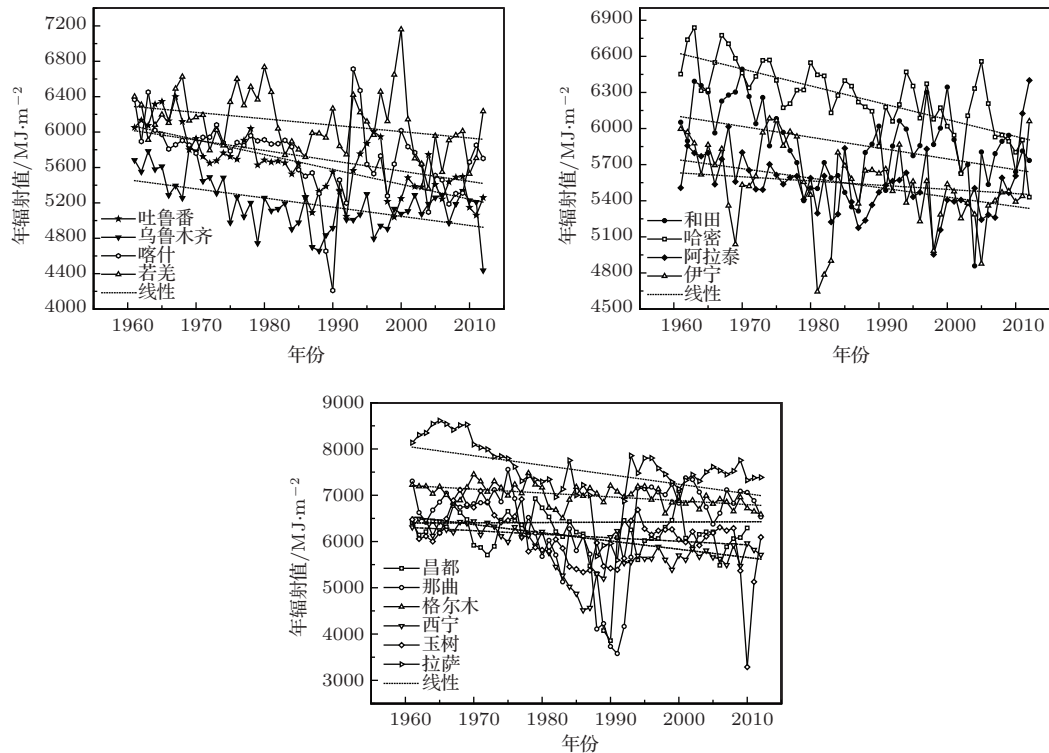


图2 中国西部各地区地面太阳总辐射年际变化趋势

Fig. 2. The interannual variation of surface solar radiation in West China.

表3 中国西部各站点地面太阳总辐射的气候线性倾向率(单位: $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot(10\text{ a})^{-1}$)Table 3. The climate linear tendency (unit: $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot(10\text{ a})^{-1}$) of surface solar radiation in West China.

	1961—2011	1961—1970	1971—1980	1981—1990	1991—2000	2001—2011
西宁	-27.02***	2.01	-21.76	-1.58	-29.7	7.10
格尔木	-22.54***	-2.32	4.01	52.50***	-31.41	-18.44
玉树	-29.53***	93.88*	-125.49**	-43.32	47.47	-106.59
昌都	-19.19	6.36	52.48	-151.21***	202.78*	-45.26
拉萨	-35.22***	9.47	-91.41***	-179.05	91.42	4.26
那曲	-12.91	-7.54	-126.87*	-226.9	347.31**	-34.58
喀什	-23.01**	-55.32**	-6.82	-165.89	-8.43	-1.06
吐鲁番	-27.71***	-19.52	10.30	-38.13	-11.26	-27.32
和田	-20.80**	33.42	-86.48***	35.09	53.28*	18.36
哈密	-12.33***	-0.40	-8.83	-44.65	-10.94	-53.28
若羌	-19.61*	8.18	78.52**	-5.94**	103.68*	13.57
阿勒泰	-7.50	7.94	-6.16	-5.02	-38.18	69.79
乌鲁木齐	-20.64***	-4.34	-51.49*	-41.52***	-17.43	-23.76
伊宁	-3.51*	-77.70**	-10.15	146.11	-40.66	38.23

注: *** 表示 $P < 0.001$; ** 表示 $P < 0.01$; * 表示 $P < 0.05$.

3.2.2 地面太阳辐射与气候要素的关系

表4为西部各地区地面太阳总辐射与各气候要素的关系, 13个站点中9个站点的大气浑浊度与地面太阳总辐射存在负相关关系, 5个站点呈显著负相关($P < 0.01$). 62%的站点日照百分率与地面太阳总辐射存在正相关关系, 38%的站点呈显著相

关($P < 0.01$). 总云量和低云量与地面太阳总辐射呈无规律的相关性, 无法判断两者的影响. 吐鲁番、西宁、哈密、格尔木的风速与地面太阳总辐射呈显著的相关性($P < 0.01$), 其他地区无相关性. 在影响地面太阳总辐射减少的因子中, 60%以上的站点受大气浑浊度和日照百分率的影响较大.

表4 中国西部各地区地面太阳总辐射与各气象要素的相关系数

Table 4. Correlation coefficients between surface solar radiation and climatic factors in West China.

	浑浊度	日照百分率	风速	低云量	总云量
乌鲁木齐	-0.414**	0.553**	0.223	0.173	0.11
吐鲁番	-0.162	0.688**	0.626**	-0.043	-0.297*
哈密	-0.091	0.086	0.499**	-0.18	0.362**
和田	0.011	0.409**	0.182	-0.357*	-0.357*
阿勒泰	-0.167	-0.092	-0.219	0.168	0.084
伊宁	-0.411*	-0.104	0.199	0.021	-0.192
格尔木	0.036	0.379**	0.556**	0.004	-0.442**
西宁	-0.584**	0.525**	0.500**	-0.441**	0.287*
玉树	0.17	0.207	-0.223	-0.171	-0.082
拉萨	-0.406**	0.092	0.243	0.057	0.414**
那曲	0.329	-0.161	0.001	-0.285*	0.362**
昌都	-0.286	-0.121	0.241	0.310*	-0.061
葛尔	-0.949**	-0.125	0.005	-0.137	-0.02

注: **表示 $P < 0.01$; *表示 $P < 0.05$.

3.3 中国东、西部地面太阳总辐射变化趋势及影响因子对比分析

3.3.1 中国东、西部地区地面太阳辐射的年际变化分析

图3为中国东、西部各站点太阳总辐射的年际变化趋势,东、西部地区地面太阳总辐射在1990年前后均出现低值;西部年太阳总辐射值大于东部地区;东部地面太阳总辐射的变化幅度大于西部地区.从东、西部地面太阳总辐射的变化情况分析,50年来东部地区地面太阳总辐射下降幅度大于西部地区;各年际间东、西部太阳辐射的变化情况各不相同,90年代西部地面太阳总辐射的变化幅度较大;西部地区的太阳能资源较丰富,可以进行合理

开发利用.

中国东、西部地区的地面太阳总辐射的变化趋势不同.从表5可以看出,1961—2011年东部地区和西部地区地面太阳总辐射均呈显著下降趋势($P < 0.001$),东部地区下降幅度大于西部地区.60年代东、西部地区地面太阳总辐射均呈下降趋势;70,80年代东部地区的地面太阳总辐射的下降趋势较60,70年代有所减弱,而西部地区地面太阳总辐射呈显著下降趋势,通过了0.01和0.001水平显著性检验;90年代西部地区地面太阳总辐射呈增加趋势;90年代以后东部地区地面太阳总辐射呈增加趋势,西部地区的地面太阳总辐射呈显著下降趋势($P < 0.001$).

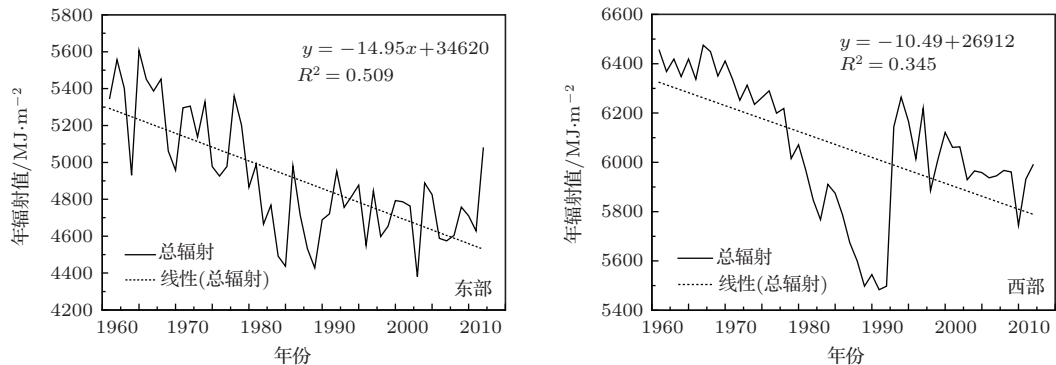


图3 中国东、西部地面太阳总辐射年际变化趋势

Fig. 3. The interannual variation of surface solar radiation in East and West China.

表5 中国东、西部地区地面太阳总辐射的气候线性倾向率(单位: $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot(10\text{ a})^{-1}$)Table 5. The climate linear tendency (unit: $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot(10\text{ a})^{-1}$) of surface solar radiation in East and West China.

	1961—2011	1961—1970	1971—1980	1981—1990	1991—2000	2001—2011
东部	-14.96***	-33.42	-27.80	-26.26	-14.98	10.36
西部	-10.50***	-0.42	-27.87**	-47.82***	47.00	-11.36*

注: ***表示 $P < 0.001$; **表示 $P < 0.01$; *表示 $P < 0.05$.

3.3.2 气候要素与东、西部地区地面总辐射的变化特征

日照反映了一个地区接受太阳光照射的情况, 衡量日照的多少, 常以实际照射时数与可能照射时数之百分比即日照百分率表示^[33]. 如表2和表4所列, 总云量和低云量对太阳辐射的影响不大, 尤其在中国东部地区已经不是影响太阳总辐射的主要因素. 日照百分率与中国东部地区地面太阳总辐射有显著的相关性, 即地面太阳总辐射与总云量或者低云量无相关关系或者相关性不大时, 雾霾、空气污染等因素成为影响日照百分率的主要因素. 所以, 可以从分析地面总辐射与日照百分率的相关性来分析雾霾等大气气溶胶对辐射的影响. 日照百分率在一定程度上反映了空气质量情况, 空气质量差, 日照百分率减小; 反之, 空气质量好, 大气透明度高, 日照百分率大. 在中尺度范围内, 日照百分率可以反映空气污染情况.

日照是太阳辐射最直接的表现, 日照百分率的减少反映了太阳辐射的减少. 东部日照时数与地面

太阳总辐射的变化趋势大致相同, 下降幅度有所不同; 西部地区日照时数的下降幅度小于地面太阳总辐射下降幅度, 1980年之前日照时数的变化幅度较小, 地面太阳总辐射呈显著下降趋势, 1980—1990年西部地区日照时数和地面太阳总辐射均呈显著下降趋势, 1990年之后日照时数和地面太阳总辐射呈缓慢增加趋势(图4). 从表6可以看出: 东部地区各个年代日照百分率和地面太阳总辐射存在显著正相关性($P < 0.01$); 西部地区60年代和80年代日照百分率和地面太阳总辐射存在显著相关性, 通过0.05显著性水平检验, 其他年代无相关性.

综合可以看出, 日照百分率是影响东部地区地面太阳总辐射减少的主要因素, 西部地区日照百分率对地面太阳总辐射也有影响; 而地面总辐射与总云量或者低云量无相关关系或者相关性不大时, 雾霾、空气污染等因素就成为影响日照百分率的主要因素, 这预示着东部雾霾、空气污染等因素是该区域太阳辐射减少的主要因素.

表6 东、西部地区太阳总辐射与日照百分率的相关系数

Table 6. Correlation coefficients between surface solar radiation and sunshine percentage in East and West China.

	1961—2011	1961—1970	1971—1980	1981—1990	1991—2000	2001—2011
东部	0.851**	0.919**	0.772**	0.842**	0.845**	0.885**
西部	0.348*	0.713*	0.198	0.704*	0.195	-0.563

注: **表示 $P < 0.01$; *表示 $P < 0.05$.

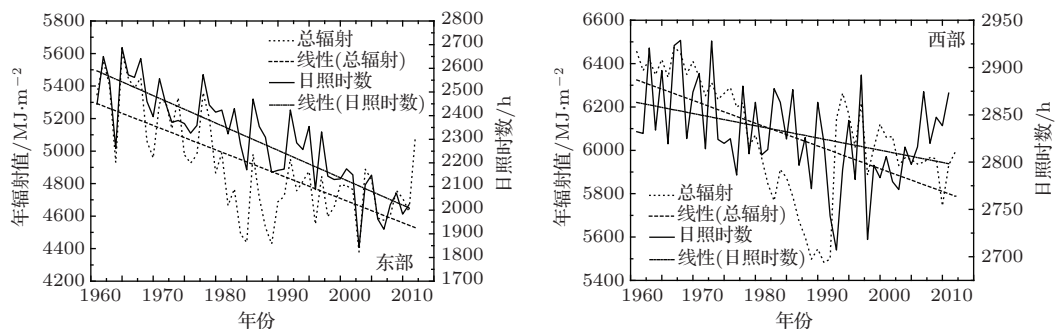


图4 1961—2011年中国东、西部日照时数与地面太阳总辐射的关系

Fig. 4. The variation of surface solar radiation and sunshine duration from 1961 to 2011 in East and West China.

3.3.3 东、西部地区地面太阳辐射与气候要素的关系

影响地面太阳总辐射减少的因素很多,下面分析低云量、总云量、风速、浑浊度、日照百分率等因素对地面太阳总辐射的影响.从表7可以看出:东、西部地区的浑浊度与地面太阳总辐射呈显著负相关($P < 0.01$),东部大气浑浊度与太阳总辐射的相关系数(6.99%/10 a)较西部的(3.66%/10 a)大得多;东、西部地区的风速与太阳总辐射均呈显著正相关($P < 0.01$),且相关系数均较大;东、西部地区的日照百分率与太阳总辐射呈显著正相关,东部日照百分率与太阳总辐射的相关系数(0.851, $P < 0.01$)较西部的(0.348, $P < 0.05$)大得多;东、西部地区总云量、低云量以及相对湿度与太阳总辐射之间不存在显著相关性.

许多学者对云量变化进行研究,结果一致认为从50年代初期开始,我国总云量一直是减少

的^[10,34–37],不同的区域和季节变化幅度有所不同^[38,39],这与地面太阳总辐射的变化趋势大体一致,但并不能完全解释地面太阳辐射从减少到增加的变化.Norris和Wild^[40]指出云量对太阳辐射变化有着不可忽视的作用,不同地区、不同条件下,云的平均吸收率也有所差异.汪凯等^[31]研究发现低云量对太阳辐射的影响比总云量的影响更加明显.对比分析东、西部地区低云量、总云量与太阳总辐射的相关关系可以看出,总云量、低云量并不能解释太阳总辐射的变化.马金玉^[41]研究影响中国地面太阳辐射变化的因素发现,日照百分率、风速与地面太阳辐射呈正相关关系,与本文结果相一致.已有研究表明,气溶胶的变化可以解释辐射的减少^[42,43],而气溶胶光学厚度与风速总体呈负相关^[44],风速可以解释部分地面太阳辐射的变化,即风速减少了雾霾等污染天气而增加了地面太阳辐射.

表7 东、西部各地区地面太阳总辐射与各气象要素的相关系数

Table 7. Correlation coefficients between surface solar radiation and climatic factors in East and West China.

	浑浊度	日照百分率	风速	相对湿度	低云量	总云量
东部	-0.699**	0.851**	0.689**	0.051	0.047	0.083
西部	-0.366**	0.348*	0.720**	-0.070	0.213	-0.019

注: **表示 $P < 0.01$; *表示 $P < 0.05$.

4 结 论

利用中国东、西部地区20个站点的长期气象观测数据和地面辐射观测数据,分析和阐明了地面太阳辐射、日照时数的变化特征,以及地面太阳总辐射与气象要素间的相关关系,研究发现了影响东、西部地面太阳总辐射减少的因素.得到以下结论.

1) 近50多年来,东部地区大部分站点太阳总辐射整体呈下降趋势,东部地区太阳辐射下降幅度大于西部地区.从年际变化上看,大部分站点地面太阳辐射的变化在1990年左右出现转折,1990年之前地面太阳总辐射呈显著下降趋势,1990年之后大部分站点地面太阳总辐射出现了上升趋势,这与全球“先变暗后变亮”的现象相一致.

2) 对比东、西部地区,50年来地面太阳总辐射均呈显著下降趋势,东部地区下降幅度大于西部地区.东部地区日照百分率的变化趋势与地面太阳总

辐射相一致,并且两者表现出显著相关性.

3) 影响地面太阳总辐射减少的因素很多,日照百分率、大气浑浊度因子是影响东部地区地面太阳总辐射减少的主要因素,云量和总云量与地面太阳总辐射无相关性,则日照百分率将主要受云量和空气污染状况的影响.对比东、西部地面太阳辐射的变化发现,空气污染产生的气溶胶粒子是影响东部地区地面太阳总辐射减少的主要因素.太阳总辐射与总云量和低云量不相关,而主要受日照百分率影响,同时风成为影响太阳辐射的主要因子.Zhang等^[45]研究发现,中国从20世纪60年代中期到80年代末,地面太阳辐射显著下降,90年代初开始增加,主要是由于吸收和散射大气中的气溶胶.气溶胶对地面太阳辐射的影响仅次于大气的吸收作用,是不容忽视的^[46].本文研究证实了以气溶胶为主的大气污染已成为影响地面太阳辐射的主要因素,尤其在东部地区.

参考文献

- [1] Shen Y B, Wang B 2011 *Chin. J. Geophys.* **54** 1457 (in Chinese) [申彦波, 王标 2011 地球物理学报 **54** 1457]
- [2] Xia L, Zhang Q 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 119201 (in Chinese) [夏露, 张强 2014 物理学报 **63** 119201]
- [3] Yue P, Zhang Q, Zhao W, Wang J S, Wang R Y, Yao Y B, Wang S, Hao X C, Yang F L, Wang R A 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 209201 (in Chinese) [岳平, 张强, 赵文, 王劲松, 王润元, 姚玉璧, 王胜, 郝小翠, 阳伏林, 王若安 2014 物理学报 **63** 209201]
- [4] Qi Y, Fang S B, Zhou W Z 2014 *Acta Ecol. Sin.* **34** 7444 (in Chinese) [齐月, 房世波, 周文佐 2014 生态学报 **34** 7444]
- [5] Shi G Y 2007 *Atmospheric Radiation* (Beijing: Science Press) (in Chinese) [石广玉 2007 大气辐射学 (北京: 科学出版社)]
- [6] Alpert P, Kishcha P, Kaufman Y J, Schwarzbard R 2005 *Geophys. Res. Lett.* **32** L17802
- [7] Wang X, Wen J, Liu R, Tian H, Zhang T T 2011 *J. Arid Meteorol.* **29** 427 (in Chinese) [王欣, 文军, 刘蓉, 田辉, 张堂堂 2011 干旱气象 **29** 427]
- [8] Shao Z Y, Zhou T, Shi P J, Gong D Y 2009 *Plateau Meteor.* **28** 1105 (in Chinese) [邵振艳, 周涛, 史培军, 龚道溢 2009 高原气象 **28** 1105]
- [9] Gilgen H, Wild M, Ohmura A 1998 *J. Clim.* **11** 2042
- [10] Qian Y, Kaiser D P, Leung L R, Xu M 2006 *Geophys. Res. Lett.* **33** L01812
- [11] Liang F, Xia X A 2005 *Ann. Geophys.* **23** 2425
- [12] Kaiser D P, Qian Y 2002 *Geophys. Res. Lett.* **29** 2042
- [13] Romanou A, Liepert B, Schmidt G A, Rossow W B, Ruedy R A, Zhang Y 2007 *Geophys. Res. Lett.* **34** L05713
- [14] Zhang M F, Lin Z Y 2011 *Acta Energ. Sol. Sin.* **22** 53 (in Chinese) [张明峰, 林正云 2011 太阳能学报 **22** 53]
- [15] Ma J Y, Liang H, Luo Y, Li S K 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 069601 (in Chinese) [马金玉, 梁宏, 罗勇, 李世奎 2011 物理学报 **60** 069601]
- [16] Norris J R, Wild M 2007 *J. Geophys. Res.* **112** D08214
- [17] Elminir H K 2006 *Meteor. Atmos. Phys.* **96** 257
- [18] Che H Z, Shi G Y, Zhang X Y, Zhao X Y, Li Y 2006 *Theor. Appl. Climatol.* **89** 83
- [19] Zhang Y L, Qin B Q, Chen W M 2004 *Theor. Appl. Climatol.* **78** 217
- [20] Qin S G, Shi G Y, Chen L, Wang B, Zhao J Q, Yu C W, Yang S 2010 *Chin. J. Atmos. Sci.* **34** 449 (in Chinese) [秦世广, 石广玉, 陈林, 王标, 赵剑琦, 于长文, 杨溯 2010 大气科学 **34** 449]
- [21] Ding Y H, Liu Y J 2014 *Sci. China: Earth Sci.* **44** 37 (in Chinese) [丁一汇, 柳艳菊 2014 中国科学: 地球科学 **44** 37]
- [22] Ding Y H, Liu Y J 2014 *Sci. China: Earth Sci.* **57** 36
- [23] Sun Y, Ma Z F, Niu T, Fu R Y, Hu J F 2013 *Climatic Environ. Res.* **18** 397 (in Chinese) [孙戡, 马振峰, 牛涛, 付如友, 胡俊峰 2013 气候与环境研究 **18** 397]
- [24] Zhang L, Wu J, Zhang W 2011 *J. Lanzhou Univ. (Nat. Sci.)* **47** 46 (in Chinese) [张利, 吴润, 张武 2011 兰州大学学报 (自然科学版) **47** 46]
- [25] Fan Y Q, Li C Q 2008 *Plateau Meteor.* **27** 1392 (in Chinese) [范引琪, 李春强 2008 高原气象 **27** 1392]
- [26] China Meteorological Data Sharing Service System <http://cdc.cma.gov.cn>
- [27] China Meteorological Administration 1997 *The Method of Radiation Observation* (Beijing: China Meteorological Press) (in Chinese) [中国气象局 1997 气象辐射观测方法 (北京: 气象出版社)]
- [28] Chen Q S 1997 *Meteorol. Mon.* **23** 40 (in Chinese) [陈千盛 1997 气象 **23** 40]
- [29] Zhou S Z, Zhang C 1985 *Urban Climatology Export Citation* (Shanghai: East China Normal University Press) (in Chinese) [周淑贞, 张超 1985 城市气候学导论 (上海: 华东师范大学出版社)]
- [30] Wei F Y 2007 *Modern Diagnosis and Prediction of Climate Statistics* (Beijing: Meteorological Press) (in Chinese) [魏凤英 2007 现代气候统计诊断与预测技术 (北京: 气象出版社)]
- [31] Wang K, Ye H, Chen F, Xiong Y Z, Li X Y, Tang L N 2010 *Ecol. Environ. Sci.* **19** 1119 (in Chinese) [汪凯, 叶红, 陈峰, 熊永柱, 李祥余, 唐立娜 2010 生态环境学报 **19** 1119]
- [32] Cai Z Y, Zheng Y F, Liu J J, Lü Y, Wu R J 2009 *J. Meteorol. Sci.* **29** 447 (in Chinese) [蔡子颖, 郑有飞, 刘建军, 吕妍, 吴荣军 2009 气象科学 **29** 447]
- [33] Du C L, Shen X Y, Chen W M, Shi S H 2008 *J. Nanjing Ins. Meteorol.* **32** 200 (in Chinese) [杜春丽, 沈新勇, 陈渭民, 施帅红 2008 南京气象学院学报 **32** 200]
- [34] Kaiser D P 1998 *Geophys. Res. Lett.* **25** 3599
- [35] Kaiser D P 2000 *Geophys. Res. Lett.* **27** 2193
- [36] Li H J, Liu J X, Liu D S, Wang W J, Lin D 2014 *J. Arid Meteorol.* **32** 194 (in Chinese) [李慧晶, 刘建西, 刘东升, 王维佳, 林丹 2014 干旱气象 **32** 194]
- [37] Yao X Y, Pu J Y, You Z G, Chen W 2010 *J. Arid Meteorol.* **28** 391 (in Chinese) [姚小英, 蒲金勇, 尤志刚, 陈薇 2010 干旱气象 **28** 391]
- [38] Chen S Y, Dong A X, Wang L P 2006 *J. Chengdu Univ. Inform. Technol.* **21** 423 (in Chinese) [陈少勇, 董安祥, 王丽萍 2006 成都信息工程学院学报 **21** 423]
- [39] Zhang X Q, Peng L L, Zheng D, Tao J 2007 *Acta Geogr. Sin.* **62** 959 (in Chinese) [张雪芹, 彭莉莉, 郑度, 陶杰 2007 地理学报 **62** 959]
- [40] Norris J R, Wild M 2009 *J. Geophys. Res.* **114** D00D15
- [41] Ma J Y 2011 *Ph. D. Dissertation* (Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology (in Chinese) [马金玉 2011 博士学位论文 (南京: 南京信息工程大学)])
- [42] Ramanathan V, Crutzen P J, Kiehl J T, Rosenfeld D 2001 *Science* **294** 2119
- [43] Liepert B G 2002 *Geophys. Res. Lett.* **29** 61
- [44] Li X 2006 *Arid Zone Res.* **23** 484 (in Chinese) [李霞 2006 干旱区研究 **23** 484]
- [45] Zhang H, Yin Q, Teruyuki N, Nakata M M, Lu P, He J H 2013 *Acta Meteorol. Sin.* **27** 87
- [46] Shen Z P, Zhang H 2009 *Acta Energ. Sol. Sin.* **30** 1209 (in Chinese) [沈钟平, 张华 2009 太阳能学报 **30** 1209]

Correlative analysis between the changes of surface solar radiation and its relationship with air pollution, as well as meteorological factor in East and West China in recent 50 years*

Qi Yue¹⁾²⁾ Fang Shi-Bo^{1)†} Zhou Wen-Zuo³⁾

1) (Institute of Eco-environment and Agro-meteorology, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China)

2) (Gansu Key Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster,
Key Laboratory of Arid Climatic Change and Disaster Reduction of CMA, Institute of Arid Meteorology,
China Meteorological Administration, Lanzhou 730020, China)

3) (School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China)

(Received 30 April 2014; revised manuscript received 16 November 2014)

Abstract

Based on the solar radiation information and climatic observation data from 1961 to 2011 in both East and West China, the interannual trends of surface solar radiation are investigated. By combining with cloud cover, sunshine percentage, sunshine duration, wind speed, atmospheric turbidity, and relative humidity, the causes affecting the variations of the total surface solar radiation in East and West China are analyzed. The results show that the surface solar radiation decreased from 1961 to 2010 in both East and West China, but there was an abrupt change, which occurred in the early 1990s, followed by sustained increase. The surface solar radiation decreased from 1961 to 2010 in East China, and the decrease of surface solar radiation in the eastern region was greater than in the western region. The surface solar radiation is significantly correlated with sunshine duration in both East and West China. In East China, the surface solar radiation is significantly positively correlated with the percentage of sunshine. It indicates that the percentage of sunshine duration is the main factor affecting the total surface solar radiation in East China. The decrease of the total surface solar radiation is influenced by many factors. In East China, the percentage of sunshine and the atmospheric turbidity factor are the main factors affecting the surface solar radiation reduction. There is no correlation between cloud and ground solar total radiation. However, the percentage of sunshine is affected mainly by cloud cover and air pollution. In West China, no significant correlation is found between surface solar radiation and cloud cover, but significant correlation is detected between surface solar radiation and sunshine percentage. These indicate that the sunshine percentage could be a main factor affecting surface solar radiation. Wind becomes an important factor affecting the total surface solar radiation, since wind is a main factor expelling troposphere air pollution such as smog. A comparison of the variation in ground solar radiation between the East and West China shows that the aerosol particles of air pollution are the main factor affecting the reduction of total surface solar radiation in East China. Many scholars have found that the significant reduction of the surface solar radiation is mainly due to the absorption and scattering atmospheric aerosols. All these findings suggest that the air pollution has become an important factor affecting the surface solar total radiation, especially in East China.

Keywords: climate change, smog/haze, aerosol, percentage of sunshine

PACS: 92.60.Vb, 92.05.Df, 92.60.Sz, 92.70.Mn

DOI: 10.7498/aps.64.089201

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2010CB951300) and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41375117).

† Corresponding author. E-mail: fangshibo@cams.cma.gov.cn