

DOI: 10.5846/stxb201303130409

齐月, 房世波, 周文佐. 近 50 年来中国地面太阳辐射变化及其空间分布. 生态学报, 2014, 34(24): 7444-7453.

Qi Y, Fang S B, Zhou W Z. Variation and spatial distribution of surface solar radiation in China over recent 50 years. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(24): 7444-7453.

近 50 年来中国地面太阳辐射变化及其空间分布

齐 月^{1,2}, 房世波^{2,*}, 周文佐¹

(1. 西南大学地理科学学院, 重庆 400715; 2. 中国气象科学研究院生态环境与农业气象研究所, 北京 100081)

摘要: 基于国内外有关地面太阳辐射研究, 并根据中国大气气溶胶的有关研究, 综合分析了近 50 年中国地面太阳辐射变化特征, 并分析了我国各个地区、不同城市间地面太阳辐射的变化差异。结果表明: 与全球大部分地区类似, 中国的地面太阳辐射经历了一个从减少到增多的过程, 即所谓的地球由“变暗”到“变亮”; 中国各个地区发生相同的变化过程, 大致以 1990 年为界, 之前以减少趋势为主, 之后逐渐增加, 不同地区太阳辐射变化幅度有所差异; 分析了城市类型和气溶胶厚度对太阳辐射变化的影响, 多数大城市和工业城市的太阳辐射下降幅度大于中小型非工业城市, 气溶胶光学厚度的分布与太阳辐射下降趋势呈相似分布特征, 说明城市工业化及其产生的气溶胶污染对太阳辐射的下降起着重要作用。

关键词: 地面太阳辐射; 全球变暗; 气溶胶; 雾霾

Variation and spatial distribution of surface solar radiation in China over recent 50 years

QI Yue^{1,2}, FANG Shibo^{2,*}, ZHOU Wenzuo¹

1 School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China

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

Abstract: Under the background of global warming, the gross radiation intensity on the ground changes obviously, most of Earth's surface energy is from solar, and the change of surface solar radiation could profoundly affect the global climate and eco-environment, thus the effects of the natural and human factors on solar radiation have become a hot issue. Based on the review of previous studies, this paper analyzed the long term variation characteristics of the surface solar radiation, using methods of a linear-trend estimation, regression analysis and correlation analysis, and analyzed the relationship between the surface solar radiation variations and the atmospheric aerosol distribution. The characteristics of variation and spatial distribution of surface solar radiation was analyzed during past nearly 50 years in China. The results showed as followed: (1) Similar with most parts of the world, China's surface solar radiation have experienced an earlier decreased and later raised process, which known as that the earth changed from 'global dimming' to 'global brightening'; The surface solar radiation has been decreasing tendencies in recent 50 years in China, but the trends of surface solar radiation roughly divided into two phases in recent 50 years, the surface solar radiation and direct solar radiation had a decreasing trend over 1960—1990 and an increasing trend since 1991. The scattered radiation had a increasing trend over 1960—1990 and an decreasing trend since 1991. So in China, the reducing trend of surface solar radiation did not persist after the 1990, instead, an increasing trend had been observed since the late 1980s, and the trend and turning points of surface solar radiation in China are consistent with the global trend. (2) The relationships between city's industry type, city size and

基金项目: 全球变化重大专项(973)项目(2010CB951300); 中加国际合作项目(2009DFA91900)

收稿日期: 2013-03-13; **网络出版日期:** 2014-03-19

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: sbfang0110@163.com

aerosol thickness distribution and surface solar radiation trends were analyzed. It showed that surface solar radiation declined more sharply in most big cities with intensive industry than the small or medium-sized city with less industry. In provincial capital, whether north or south of the Qinling Mountain-Huai River, the surface solar radiation of industrial cities had a decreasing tendency. The surface solar radiation in most of small cities showed insignificantly changing trends. It indicated that the change trend of surface solar radiation could be associated with air pollution in the process of quick urbanization and fast industrialization. On the whole, compared with south of Qinling Mountain-Huai River, the region in north of the Qinling Mountain-Huai River had a higher percentage of stations showed a downward trend. Compared with the small cities, the provincial capital cities had a higher percentage of the downward trend in surface solar radiation. As spatial variation, the surface solar radiation value is relatively higher in North China, Central China, Eastern China and South China, Sichuan basin, and relatively lower in other areas. The surface solar radiation in Eastern China, Central China and part of North China decreased even more sharply than west of China. Thicker aerosol optical depth was with larger trend of the surface solar radiation decrease, it indicated that aerosol pollution plays an important role in the decline of surface solar radiation.

Key Words: surface solar radiation; global dimming; aerosol; haze

地面太阳辐射是自然界中各种物理过程的主要能量来源,是驱动天气、气候形成和演变的基本动力^[1-2],是生态系统能量的主要来源,是维持地球气候系统及生态系统能量平衡的重要因子,是人类可开发、利用的重要自然资源。到达地面的太阳辐射包括直接辐射和散射辐射两部分,其中直接辐射是指以平行光线的形式直接投射到地面上的辐射能,经过大气散射到达地面的辐射能是散射辐射^[3]。

太阳辐射经过大气层时,由于受到云、水汽、大气中的 CO_2 和 O_3 等气体以及气溶胶粒子的吸收、反射和散射作用,使到达地面的太阳辐射减弱^[4]。到达地面的直接辐射强弱由太阳高度角和大气透明度(或者浑浊度)条件决定。同一个地区太阳高度角在一段时期内基本不变,大气透明度是决定太阳辐射的关键因子。散射辐射的强弱主要取决于太阳高度和大气透明度状况,有云时则需要考虑云的重要作用。云对散射辐射的影响比较复杂,高而薄的中高云使散射辐射随云量的增多而增大,低而厚的低云则使其随云量变化呈抛物线型^[5]。

近几十年由于中国经济的快速发展和工业化水平提高,大气污染、气溶胶粒子增加等环境问题以及云量、温度等气候因素给太阳辐射带来很大影响,引起了国内外科学家的广泛关注,并开展了一系列研究工作^[6-9],如利用太阳辐射观测资料研究发现 20 世纪 60 年代以来非洲、亚洲、欧洲和北美洲地区等太阳辐射明显下降,出现了“全球变暗”,90 年代开始太阳辐射开始上升出现“全球变亮”的趋势,从不

同方面分析了影响太阳辐射变化的因素,得到了许多科学研究成果^[10-12]。本文对中国近年来的最新研究成果进行综合分析,研究了近 50 年中国地面太阳辐射(总辐射、直接辐射和散射辐射)的变化特征;对中国不同地区、不同城市的地面太阳辐射变化进行了对比研究,重点分析了太阳辐射与大气污染间存在的关系。

1 近 50 年国内外地面太阳辐射的变化特征

从 20 世纪 50 年代后期国际上开始对到达地面的太阳辐射开始进行了观测^[13],同期逐渐利用卫星遥感自上而下的对地球辐射平衡进行观测^[14],得到了地面太阳辐射长期观测数据,为以后的研究提供了资料。近十几年来,国内外许多学者对中国及其区域的地面辐射变化情况进行了深入的分析探讨。中国对于太阳辐射观测从 20 世纪 50 年代开始,期间由于观测项目、观测台站的调整,影响了辐射资料在时间和空间上的连续性,导致了部分资料数据缺失或无观测。许多学者对缺失数据进行了处理补齐,得到了我国近 50 年来的地面太阳辐射长期变化特征。选择全国站点数大于 30 个站点的研究总结如表 1。

从表 1 和图 1 可以看出中国地面太阳辐射的变化特征,大致是在 1960—1990 年左右呈下降趋势,之后从 1990 年前后开始全国及不同区域太阳总辐射逐渐增加,不同学者由于选取的站点数及时间段不同,得出的变化幅度有所不同,但总体上与变化趋

表 1 中国地面太阳辐射的长期变化情况

Table 1 Long-term variations of surface solar radiation in China				
站点数 The number of site	时间区间 Time interval	变化趋势 Trend	平均变化幅度 /(每 10a) Average variation amplitude	参考文献 References
58	1957—1992	减少	-5.2 W/m ²	[15]
	1961—1984	减少	无介绍	
	1985—1992	增加	无介绍	
55	1961—1990	减少	无介绍	[16]
64	1961—2000	减少	-4.5 W/m ² 或-2.7%	[17]
	1961—1990	减少	无介绍	
	1990—2000	增加	无介绍	
46	1961—2000	减少	-5.2 W/m ² 和-3.3%	[18]
85	1955—2000	减少	-3.1 W/m ² 和-1.9%	[19]
	1955—1990	减少	无介绍	
	1990—2000	增加	无介绍	
52	1960—2000	减少	-2.7 W/m ²	[20]
	1960—1989	减少	-5.7 W/m ²	
	1990—2000	增加	+5.5 W/m ²	
60	1961—2002	减少	-3.4 W/m ² 或-2%	[21]
	1961—1990	无介绍	无介绍	
	1990—2002	无介绍	无介绍	
30	1961—1989	减少	-3.3%	[22]
	1990—2003	增加	无介绍	
58	1961—2009	减少	无介绍	[5]

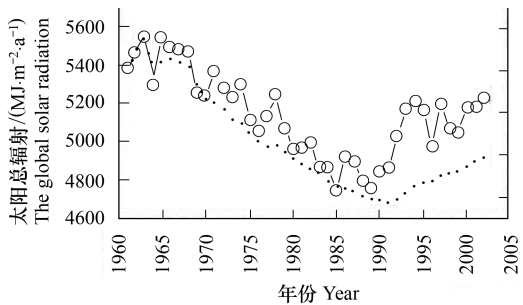


图 1 全国地面太阳辐射的年际变化和趋势检验 (Mann-Kendall 法)^[21]

Fig.1 Regional averaged inter-annual variation of global solar radiation and their trends (Mann-Kendall method)^[21]

势相符。任国玉等^[23]利用日照时数资料发现,1956—2002年间,全国平均年日照时数具有明显的下降趋势,1990年以后变化趋势趋于和缓,与太阳辐射的变化特征一致,从另一个侧面反映了地面太阳

辐射的长期变化特征。中国地面太阳辐射的变化特征与全球变化特征相一致,即先“变暗”后“变亮”。

2 中国不同地区地面太阳辐射变化对比分析

近 50 年来中国的地面太阳辐射出现了先减少后增多趋势,与地球的先“变暗”后“变亮”过程相一致。我国的不同区域和不同城市间太阳辐射会发生怎样的变化,变化幅度又是如何? 本文根据学者们对这个问题的研究,分析我国不同地区和不同城市的太阳辐射变化情况。

2.1 中国各区域地面总辐射年际变化特征

太阳辐射的变化不只发生在大区域内,在小范围内同样会表现出不同的变化趋势。我国许多研究者利用不同的方法对我国的华东地区、西北地区、和新疆地区等地面太阳辐射变化情况进行了分析,如表 2 所示。

从表 2 中可以看出中国从 1961—2010 年地面太阳辐射总辐射变化整体上呈下降趋势,各分区的总辐射以减少为主,减少幅度略有不同,华东地区下降幅度大于其他地区。从 20 世纪 60 年代开始呈减少趋势至 70 年代初期变得非常显著且达到 95% 的显著性检验,这一趋势一直持续到 1991 年,其后一直表现为增长趋势^[21]。近 50 年来中国地面总辐射的变化大体上可以分为两个阶段,各个地区从 1961 到 1990 年前后地面太阳总辐射量和直接辐射均以下降趋势为主,1990 年至今地面太阳辐射量逐渐上升,与全球变化趋势相符。

杨胜鹏等^[21]人对中国大陆总辐射的演变特征做了研究,发现川黔(包括四川、贵州和重庆)、东部(包括安徽、江苏、浙江、福建、广东、广西、江西、湖南、湖北和河南)、云南、高原和西北地区(西藏、青海、甘肃的西北部和内蒙古西部)基本上都是先降后升的过程,转折点在 1990 年前后;北疆(新疆北部)和北方地区(山东、山西、陕西、辽宁、吉林、河北、宁夏、北京和内蒙古中部地区)从 1960 年开始一直呈下降趋势,1990 年后趋势变得平缓;而东北东(包括黑龙江和内蒙古北部地区)近 40 年趋势变化曲线基本没有通过 95% 的显著性检验。中国及各个区的变化趋势和转折点与全球总体趋势相一致,与先“变暗”后“变亮”的过程相吻合。

表 2 中国部分地区地面太阳辐射的长期变化的主要研究结果

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

区域 Region	地区 Area	时间区间 Time interval	总辐射变化 趋势/(每 10a) Trend of global solar radiation	直接辐射变化 The variations of solar direct radiation	散射辐射变化 The variations of scattering solar radiation	所含站点 Site	参考文献 References
华北地区 North China	京津冀地区	1960—2005	下降: -20.195 W/m ²	无介绍	无介绍	北京、天津、 唐山、张家 界、秦皇岛等	[24]
		1958—2000	下降	下降			
	北京地区	1958—1990	下降	下降	无介绍	北京	[25]
		1990—2000	微升	微升			
	环渤海地区	1961—2010	下降			北京、天津、 辽宁河北和 山东	[26]
		1961—1990	下降	下降	无介绍		
西北地区 Northwest China	西北地区	1961—2007	下降	下降	上升	乌鲁木齐、格 尔木、兰州等	[27]
		1961—1992	先下降后 上升	先下降后 回升	先上升 后下降		
青藏高原主体区 Plateau Area	怒江流域	1981—2008	下降			安多、那曲、 索县、比如、 丁青等	[28]
		1981—1997	下降:-49.4 W/m ²	无介绍	无介绍		
		1998—2008	上升:+34.5 W/m ²				
新疆地区 Xinjiang Region	新疆地区	1961—2000	下降	下降	下降	阿勒泰、塔 城、伊宁、乌 鲁木齐、等	[29]
		1961—1991	下降	下降	变化不明显		
		1992—2000	上升	下降	下降		
	北疆地区	1961—2006	下降	无介绍	无介绍	乌鲁木齐、伊 宁、阿勒泰、 塔城	[30]
华南地区 South China	东南地区	1961—2008	下降			广州、合肥、 桂林、南昌等	[31-32]
		1961—1989	下降:-8.45%	无介绍	无介绍		
		1990—2008	上升:1.54%				
	粤西北地区	1970—2009	先下降后上升	无介绍	无介绍	连南、连州、 连山、阳山	[33]
	福州	1961—1992	下降:-73 W/m ²	下降:-86.11 W/m ²	上升:+15.75 W/m ²	福州	[34]
华中地区 Central China	华南地区	1961—2008	下降	下降	变化不显著	广东、广西、 海南、珠江三 角洲等	[35-37]
	黄土高原 地区	1961—2000	下降:-25.33 W/m ²	无介绍	无介绍	大同、东胜、 太原、延安、 侯马、郑州、 西安	[38]
	海河流域	1957—2008	下降	下降	上升	大同、太原、 北京、天津、 济南、郑州	[39]
西南地区 Southwest China	云南	1961—2007	下降:-0.64%下降			云南省 7 个 站点	[40]
		1961—1990	上升	无介绍	无介绍		
华东地区 East China	云贵高原	1990—2007					
		1961—2005	下降	下降	无介绍	腾冲、丽江、 景洪、昆明、 蒙自等	[41]
	华东地区	1961—2008	下降:-2.05 W/m ²			江苏、安徽、 江西、浙江、 福建、上海	[42]
		1961—1989	下降:-11.7 W/m ²	无介绍	无介绍		
		1990—1999	上升:8.0 W/m ²				
		2000—2008	上升:5.6 W/m ²				

续表

区域 Region	地区 Area	时间区间 Time interval	总辐射变化 趋势/(每 10a) Trend of global solar radiation	直接辐射变化 The variations of solar direct radiation	散射辐射变化 The variations of scattering solar radiation	所含站点 Site	参考文献 References
	江苏	1971—2007	下降	无介绍	无介绍	淮安、南京、 吕泗	[43]
		1971—1990	下降				
		1990—2007	下降				
	中国东南部	1961—2008	下降: -3.2 W/m ²	下降 下降: -11.44 W/m ² 无介绍	下降 下降: -0.75 W/m ² 无介绍	南京、合肥、 杭州、福州、 南昌、赣州、 广州、汕头	[32]
		1961—1990	下降: -12.38 W/m ²				
		1991—2008	上升: +4.16 W/m ²				

2.2 不同城市间地面太阳辐射变化特征对比分析

近几十年,随着经济的发展,城市化的步伐越来越快,工业发展迅速,对全球的气候变化也产生了重要影响。Alpert 等^[44]分析了城市化对于到达地面太阳辐射的变化影响,发现在 1990 年以前在“变暗”的气象台站中,城市或受城市影响的区域太阳辐射明显减少,平均每年减少幅度为 0.41 W/m²,而农村地区的减少幅度小得多,平均每年减少幅度为 0.16 W/m²。说明城市化对太阳辐射的变化有一定的影响。

我国的产业结构复杂,种类居多,将利用资源发展钢铁工业、重工业、机械等的城市划分为工业型城市,其他为非工业型城市。表 3 显示了中国部分城市是否通过 $\alpha=0.05$ 显著性检测的倾向率,从表中可以看出,近 50 年来大多数站点的地面太阳辐射以下降趋势为主,个别站点呈上升趋势,其中下降幅度较大的站点有太原、北京、武汉等,上升幅度最大的为

峨眉山,地面太阳辐射呈下降趋势站点都是以工业型城市为主;通过 $\alpha=0.05$ 显著性检测的站点,其地面太阳总辐射的变化以下降为主。在省会及大城市中,通过 $\alpha=0.05$ 显著性检测的城市占 68%,并且大部分是以工业为主的大城市,无论是秦岭淮河以南还是以北,工业型城市地面太阳辐射下降幅度都较大;未通过 $\alpha=0.05$ 显著性检测的城市,大部分是以旅游业或第三产业为主的城市;在中小城市中,通过 $\alpha=0.05$ 显著性检测的城市占 53.3%,其中大部分地区地面太阳辐射升降变化趋势不明显,个别城市呈上升趋势,可能由于人为活动影响较小,属于正常自然波动。秦岭淮河以北的城市通过 $\alpha=0.05$ 显著性检测站点多于秦岭淮河以南,并且秦岭淮河以北的城市太阳辐射下降幅度大于秦岭淮河以南的城市。中小城市的下降幅度小于省会及直辖市,不同类型城市的地面太阳辐射的这种变化趋势,可能与城市化和人类活动等因素影响较大有关。

表 3 中国部分城市太阳总辐射变化的气候倾向率/(W m⁻² 10a⁻¹)^[5,22]

Table 3 The climate tendency of surface solar global radiation over some cities in China

城市等级 Urban hierarchy	界线 Boundary	城市类型 Urban type	城市数 Quantity of urban	平均值 Average	标准差 Standard value	城市 (站点) Urban	倾向率 Tendency rate	城市 (站点) Urban	倾向率 Tendency rate
省会及直辖市 Provincial capitals and Municipalities	秦岭淮河以南	工业型城市	7	-51.6	34.1	武汉	-72.2	成都	-50.9
						合肥	-39.1	南京	-44.4
						南昌	-60.9	拉萨	-60.0
						贵阳	-33.1 **		
						福州	-24.5 **	上海	-27.4
	秦岭淮河以北	工业型城市	6	-25.5	19.9	海口	-12.1 *	广州	-39.8
						杭州	-25.8 **	南宁	-23.2 **
						北京	-81.0	太原	-81.1
						济南	-54.9	天津	-54.5
						长春	-13.2 *	沈阳	-34.2
						郑州	-21.2	西宁	-59.4

续表

城市等级 Urban hierarchy	界线 Boundary	城市类型 Urban type	城市数 Quantity of urban	平均值 Average	标准差 Standard value	城市 (站点) Urban	倾向率 Tendency rate	城市 (站点) Urban	倾向率 Tendency rate
中小城市 Middle-sized and Small cities	秦岭淮河以南	非工业型城市	2	-16.6	14.9	银川	-39.3	兰州	-49.2 **
						西安	-42.0		
		工业型城市	7	-26.4	14.9	哈尔滨	0.19 **	乌鲁木齐	-32.9
						汕头	-25.2 **	宜昌	-25.6
						昌都	-30.8 *	蒙自	-37.2 **
						桂林	-22.9 *	敦煌	-17.9
						赣县	-25.5		
		非工业型城市	4	10.1	35.0	那曲	6.9 *	峨眉山	43.9
						丽江	-8.6 *	腾冲	-1.7 *
	秦岭淮河以北	工业型城市	11	-41.6	49.2	大同	-57.8	吐鲁番	-51.3
						固始	-67.4	侯马	-60.9
						玉树	-32.4	喀什	-44.7
						阿勒泰	-26.1	和田	-30.4
						哈密	-31.9	格尔木	-22.5
						伊宁	-31.3		
		非工业型城市	8	-2.3	33.9	朝阳	-8.8 *	通辽	-3.8 *
						佳木斯	-2.3 *	延安	-9.2 *
						黑河	-5.8 *	若羌	-7.4 **
						民勤	28.7	二连浩特	-9.7 **

* * 表示的时间段为:1961—2003 年末通过 $\alpha=0.05$ 显著性检测的站点; * 1961—2009 年末通过 $\alpha=0.05$ 显著性检测的站点;其他:1961—2009 年通过 $\alpha=0.05$ 显著性检测的站点

中国自然环境复杂,气候类型多样,现将中国分成以下 9 个区域如图 1 所示:(I)新疆、(II)青藏高原主体(西藏、青海)、(III)西北(陕西、甘肃、宁夏)、(IV)华北(北京、天津、河北、山西、内蒙古)、(V)西南(重庆、四川、贵州、云南)、(VI)华东(上海、江苏、浙江、安徽、山东)、(VII)华南(广东、广西、海南、福建)、(VIII)华中(江西、河南、湖北、湖南)、(IX)东北(辽宁、吉林、黑龙江)用来统计分析区域地面太阳辐射倾向率变化特征。从图 2 中地面太阳辐射下降显著的站点数与总站点数的比率来看,华中地区最高为 100%,新疆和华东地区在 80%以上,青藏高原主体区和西北地区均为 66.7%,西南地区为 33.3%,其他区域均在 20%以下。华中、新疆和华东地区是太阳辐射下降趋势最为明显的区域,这与许多学者^[32,43,45-46]的研究结果相吻合。

结合图 2 1961—2009 年中国地面太阳总辐射变化趋势和表 3 可以看出,东中部地区地面太阳辐射比西部地区下降快,以工业为主的地区比以第三产业为主的地区地面太阳辐射下降的快,省际大城市以下降明显为主,而其他城市以变化不显著的站点

居多。东北地区 AOD (Aerosol Optical Depth) 值较低,华北、华南、华中地区、四川盆地以及华东地区北部 AOD 值较高,其他地区 AOD 值较低。大部分地区气溶胶光学厚度的分布与太阳辐射分布相一致,由于图 2 中地面太阳辐射的变化与气溶胶光学厚度分布的数据的时间段不同,个别地区分布上并不是很一致,如山西、青海东部;这可能因为省际大城市的城市化进程较快,人为活动相对频繁、空气污染严重等因素有关。这一方面还没有学者进行量化研究,还需进一步的分析探讨。

以上综述了我国各个区域以及不同城市的地面太阳辐射变化特征,地面太阳辐射总体呈下降趋势,以 1990 年为分界点之前大部分地区和城市以下降趋势为主,之后以逐渐上升。Hayasaka 等^[48]利用卫星资料对我国地面太阳辐射进行研究,结果发现利用 GEWEX-SRB 和 ISCCP 的资料反演得到的短波辐射照度大于地面观测数值。目前对于我国地面太阳辐射的长期变化特征,都是利用地面观测数值得到的,还没有利用卫星资料研究得到的成果,还需要进行这方面的深入研究。

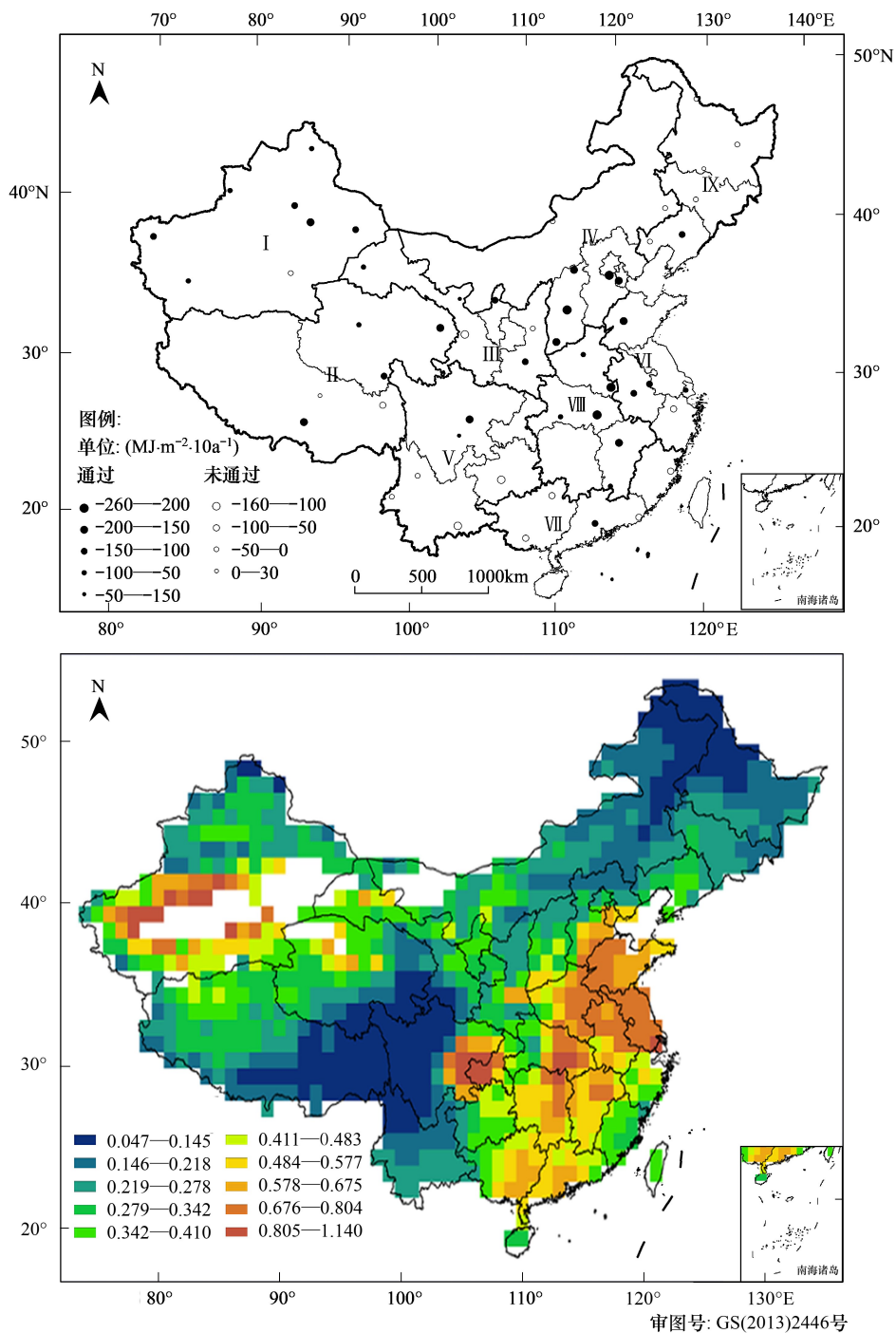


图2 中国近50年地面太阳总辐射变化趋势^[5,22]和中国区域2001—2010年平均遥感气溶胶光学厚度(550nm)分布^[47](黑点:通过 $\alpha=0.05$ 显著性检测,空心点:未通过 $\alpha=0.05$ 显著性检测)

Fig.2 The surface solar radiation long-term trend in recent 50 years in China and Annual mean AOD (550nm) over China for 2001—2010

3 结论与讨论

以上主要利用近几年国内外关于地面太阳辐射的研究情况,对中国以及各地区和不同城市间进行地面太阳辐射的变化特征进行了总结,主要包括以下几个方面:

(1)近50年来包括中国地面太阳辐射出现了先减少后增多的变化趋势,即从“变暗”到“变亮”的过程,大体上是1990年之前以下降趋势为主,1990后逐渐上升。但是不同的时间段、不同的区域变化幅度有所不同,这些研究成果都是根据地面观测资料,没有得到卫星资料的验证。

(2)总结了前人的研究成果发现,中国不同的地区、不同城市间地面太阳辐射变化情况有所不同,但总体趋势是以下降为主,有个别城市变化不显著。东中部地区地面太阳辐射比西部地区下降显著,以工业为主的地区比非工业为主的地区地面太阳辐射下降的明显,省际大城市比其他城市变化显著。这些研究成果只是通过地面观测资料得到,并没有通过卫星资料的证实,可能在变化幅度上还有所差异。

(3)通过对地面太阳辐射变化分布图和气溶胶光学厚度分布图进行对比研究发现,气溶胶光学厚度分布与地面太阳辐射变化趋势相一致,说明地面太阳辐射的减少可能与空气污染有关,对于这一方面还没有定量化的研究,需要进一步深入探讨。

近 50 年来地面太阳总辐射出现了从减少到增加的变化过程,由于受不同影响因素的影响,各地区地面太阳辐射变化不同。已有研究^[31,35,40]表明,影响地面太阳辐射的因子中云量、气溶胶的影响较大;水汽、大气的气体成分、太阳活动、气温和降水等对地面太阳辐射的影响程度尚不明确,还需进一步的研究。目前,国内太阳能的开发利用较少,根据不同地区地面太阳辐射的分布情况充分利用太阳能资源仍需深入研究。

References:

- [1] Zuo T K, Zhou Y H, Xiang Y Q. Earth Surface Radiation Research. Beijing: Science Press, 1999.
- [2] Shi Y L, Chen C Y, He X J. Resource Science. Beijing: Higher Education Press, 2006: 395-396.
- [3] The Editorial Board of Atmospheric Science Dictionary. Atmospheric Science Dictionary. Beijing: China Meteorological Press, 1994: 803-803.
- [4] Ma J Y, Liang H, Luo Y, Li S K. Variation trend of direct and diffuse radiation in China over recent 50 years. Acta Physica Sinica, 2011, 60(6): 853-866.
- [5] Ma J Y. The Long-Term Variation and Short-Term Prediction Method of Surface Solar Radiation in China [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2011.
- [6] Liepert B G. Observed reductions of surface solar radiation at sites in the United States and worldwide from 1961 to 1990. Geophysical Research Letters, 2002, 29(10): 61-1-61-4, doi: 10. 1029/2002GL014910.
- [7] Stanhill G, Cohen S. Solar radiation changes in the United States during the twentieth century: Evidence from sunshine duration measurements. Journal of Climate, 2005, 18(15): 1503-1512.
- [8] Liepert B G, Kukla G J. Decline in global solar radiation with increased horizontal visibility in Germany between 1964 and 1990. Journal of Climate, 1997, 10(9): 2391-2401.
- [9] Kumari B P, Loudhe A L, Danie S, Jadhav D B. Observational evidence of solar dimming: Offsetting surface warming over India. Geophysical Research Letters, 2007, 34(21), L21810, doi: 10. 1029/2007GL031133.
- [10] Aksoy B. Variations and trends in global solar radiation for Turkey. Theoretical and Applied Climatology, 1997, 58(1-2): 71-77.
- [11] Omran M A. Analysis of solar radiation over Egypt. Theoretical and Applied Climatology, 2000, 67(3): 225-240.
- [12] Power H C, Mills D M. Solar radiation climate change over Southern Africa and an assessment of the radiative impact of volcanic eruptions. International Journal of Climatology, 2005, 25(3): 295-318.
- [13] Wild M, Gilgen H, Roesch A, Ohmura A, Long C N, Dutton E G, Forgan B, Kallis A, Russak V, Tsvetkov A. From dimming to brightening: Decadal changes in solar radiation at Earth's surface. Science, 2005, 308(5723): 847-850.
- [14] Zhong Q. Advance in research on surface radiation climatology: Some problems of retrieval of surface radiation budget from satellite. Advances in Earth Science, 1996, 11(3): 238-244.
- [15] Zha L S. A study on spatial and temporal variation of solar radiation in China. Scientia Geographica Sinica, 1996, 16(3): 232-237.
- [16] Li X W, Li W L, Zhou X J. Analysis of the solar radiation variation of China in recent 30 years. Journal of Applied Meteorological Science, 1998, 9(1): 24-31.
- [17] Che H Z, Shi G Y, Zhang X Y, Arimoto R, Zhao J Q, Xu L, Wang B, Chen Z H. Analysis of 40 years of solar radiation data from China, 1961—2000. Geophysical Research Letters, 2005, 32(6), L06803, doi: 10. 1029/2004GL022322.
- [18] Liang F, Xia X A. Long-term trends in solar radiation and the associated climatic factors over China for 1961- 2000. Annales Geophysicae, 2005, 23(7): 2425-2432.
- [19] Qian Y, Kaiser D P, Leung L R, Xu M. More frequent cloud-free sky and less surface solar radiation in China from 1955 to 2000. Geophysical Research Letters, 2006, 33, L01812, doi: 10. 1029/2005GL024586.
- [20] Streets D G, Yu C, Wu Y, Chin M, Zhao Z C, Hayasaka T, Shi G Y. Aerosol trends over China, 1980—2000. Atmospheric Research, 2008, 88(2): 174-182.
- [21] Yang S P, Wang K L, Lü S H. Regional characteristics of global solar radiation evolution in China over recent 40 years. Acta Energiae Solaris Sinica, 2007, 28(3): 227-232.
- [22] Wang Y J, Huang Y, Zhang W. Changes in surface solar radiation in mainland China over the period from 1961 to 2003. Climatic and Environmental Research, 2009, 14(4): 405-413.
- [23] Ren G Y, Guo J, Xu M Z, Xu Z M, Zhang L, Zou X K, Li Q

- X, Liu X N. Climate changes of China's mainland over the past half century. *Acta Meteorologica Sinica*, 2005, 63(6): 942-956.
- [24] Zheng Y F, Yin Y Y, Wu R J, Liu J J. Analyses on variation and cause of Surface solar radiation in Beijing, Tianjin and Hebei Regions from 1960 to 2005. *Plateau Meteorology*, 2012, 31(2): 436-445.
- [25] Zhou J, Yan G, Wu Y Z. Analysis of solar radiation for Beijing China. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2005, 26(5): 712-716.
- [26] Li M C, Xiong M M, Yang Y J, Ren Y. Spatial-temporal variations of solar global radiation in the circum-Bohai Sea region during 1961—2010. *Advances in Climate Change Research*, 2012, 8(2): 119-123.
- [27] Xu J M, He J H, Yan F X. Research on secular variation of solar radiation over Northwest China from 1961 to 2007. *Climatic and Environmental Research*, 2010, 15(1): 89-96.
- [28] Shi L, Du J. Variation trend of the total solar radiation in Nujiang basin in recent 30 Years. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2010, 38(23): 12767-12769, 12775-12775.
- [29] Guo Z H, Shi G Y, Che H Z. Analysis of the solar radiation of Xinjiang Uygur Autonomous Region in recent 40 years. *Arid Land Geography*, 2005, 28(6): 734-739.
- [30] Yang Y, Huang J, Pu Z C, Qiu H, Liao W J, Ma L X. Spatial-temporal change of the solar total radiation in the Northern region of Xinjiang. *Journal of Shihezi University: Natural Science*, 2009, 27(4): 419-422.
- [31] Shen Y B, Wang B. Effect of surface solar radiation variations on temperature in South-East China during recent 50 years. *Chinese Journal of Geophysics*, 2011, 54(6): 1457-1465.
- [32] Wang K, Ye H, Chen F, Xiong Y Z, Li X Y, Tang L N. Long-term change of solar radiation in southeastern China: Variation, factors, and climate forcing. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(5): 1119-1124.
- [33] Gong X Y, Liang L F, Yang Y H, Yang S Y. Spatial and temporal characteristics of solar radiation in Guangdong Northwest. *Guangdong Meteorology*, 2012, 34(3): 39-43.
- [34] Chen Q S, Chi Y Z. The influence of air pollution on solar radiation and other elements over Fuzhou. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1998, 18(5): 557-560.
- [35] Shi H, Xu J M, Li C C. Analysis on variation and transition of surface radiation in South China area. *Journal of Tropical Meteorology*, 2009, 25(2): 209-215.
- [36] Luo Y F, Lv D R, He Q, Wang F. An analysis of direct solar radiation, visibility and aerosol optical depth in South China coastal area. *Climatic and Environmental Research*, 2000, 5(1): 36-44.
- [37] Li Y L, He R, Du Y D. Spatiotemporal variation characteristics of total solar radiation in south china region. *Renewable Energy Resources*, 2012, 30(1): 13-16.
- [38] Han H, Ren G Y, Wang W, Zhu L H, Wu Z H, Zhang H Y. Temporal and spatial variation characteristics of total solar radiation over the loess plateau region. *Climatic and Environmental Research*, 2008, 13(1): 61-66.
- [39] Liu C M, Liu X M, Zheng H X, Zeng Y. The change of solar radiation and its causes in Haihe river basin and surrounding areas. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(11): 1283-1291.
- [40] Wang X F, Zhu Y, Fan L Z, Yang P W, Yang X P. Spatial-temporal variations of solar global radiation in Yunnan province during 1961—2007. *Advances in Climate Research*, 2009, 5(1): 29-34.
- [41] Zheng X B, Wang X F, Luo Y X, Chen J. Variation characteristics of global radiation and the associated climatic factors over Yunnan-Guizhou plateau in the Southwestern part of China for 1961- 2005. *Climatic and Environmental Research*, 2011, 16(5): 654-664.
- [42] Yin Q, Zhang H, He J H. Long-term change of surface total solar radiation and influencing factors over East China in recent 48 years. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2011, 6(1): 37-46.
- [43] Mai M, Huo Y, Zeng Y, Yu Y X. The distribution characteristics of total solar radiation in Jiangsu province. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2012, 32(3): 269-274.
- [44] Alpert P, Kishcha P, Kaufman Y J, Schwarzbard R. Global dimming or local dimming?: Effect of urbanization on sunlight availability. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32, L17802, doi: 10.1029/2005GL023.
- [45] Sun B M. Cloudiness over the contiguous United States: Contemporary changes observed using ground-based and ISCCP D2 data. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(2): 1053, doi: 10.1029/2002G1915887.
- [46] Shen Y B, Zhao Z C, Shi G Y. The progress in variation of surface solar radiation, factors and probable climatic effects. *Advance in Earth Science*, 2008, 23(9): 915-923.
- [47] Luo Y X, Chen J, Zheng X B, Zhao T L. Climatology of aerosol optical depth over China from recent 10 years of MODIS remote sensing data. *Ecology and Environment Sciences*, 2012, 21(5): 876-883.
- [48] Hayasaka T, Kawamtoto K, Shi G Y. Importance of aerosols in satellite-derived estimates of surface shortwave irradiance over China. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33, L06802, doi: 10.1029/2005GL025093.

参考文献:

- [1] 左大康, 周允华, 项月琴. 地球表层辐射研究. 北京: 科学出版社, 1991.
- [2] 石玉林. 资源科学. 北京: 高等教育出版社, 2006: 395-396.
- [3] 《大气科学词典》编委会. 大气科学词典. 北京: 气象出版社, 1994: 803-803.
- [4] 马金玉, 梁宏, 罗勇, 李世奎. 中国近 50 年太阳直接辐射和

- 散射辐射变化趋势特征. 物理学报, 2011, 60(6): 853-866.
- [5] 马金玉. 中国地面太阳辐射长期变化特征及短期预报方法研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2011.
- [14] 钟强. 地面辐射气候学研究进展——从卫星反演地面辐射能收支的若干问题. 地球科学进展, 1996, 11(3): 238-244.
- [15] 查良松. 我国地面太阳辐射量的时空变化研究. 地理科学, 1996, 16(3): 232-237.
- [16] 李晓文, 李维亮, 周秀骥. 中国近 30 年太阳辐射状况研究. 应用气象学报, 1998, 9(1): 24-31.
- [21] 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. 太阳能学报, 2007, 28(3): 227-232.
- [22] 王雅捷, 黄耀, 张稳. 1961—2003 年中国大陆地表太阳总辐射变化趋势. 气候与环境研究, 2009, 14(4): 405-413.
- [23] 任国玉, 郭军, 徐铭志, 初子莹, 张莉, 邹旭凯, 李庆祥, 刘小宁. 近 50 年中国地面气候变化基本特征. 气象学报, 2005, 63(6): 942-956.
- [24] 郑有飞, 尹焰寅, 吴荣军, 刘建军. 1960—2005 年京津冀地区地表太阳辐射变化及成因分析. 高原气象, 2012, 31(2): 436-445.
- [25] 周晋, 晏刚, 吴业正. 北京地区的太阳辐射分析. 太阳能学报, 2005, 26(5): 712-716.
- [26] 李明财, 熊明明, 杨艳娟, 任雨. 环渤海地区 1961—2010 年太阳辐射时空变化特征. 气候变化研究进展, 2012, 8(2): 119-123.
- [27] 许建明, 何金海, 阎凤霞. 1961—2007 年西北地区地面太阳辐射长期变化特征研究. 气候与环境研究, 2010, 15(1): 89-96.
- [28] 石磊, 杜军. 怒江流域近 30 年太阳总辐射变化趋势. 安徽农业科学, 2010, 38(23): 12767-12769, 12775-12775.
- [29] 郭志华, 石广玉, 车慧正. 近 40a 来新疆地区太阳辐射状况研究. 干旱区地理, 2005, 28(6): 734-739.
- [30] 杨勇, 黄杰, 普宗朝, 邱辉, 廖卫江, 马玲霞. 北疆地区太阳总辐射的时空变化. 石河子大学学报: 自然科学版, 2009, 27(4): 419-422.
- [31] 申彦波, 王标. 近 50 年中国东南地区地面太阳辐射变化对气温变化的影响. 地球物理学报, 2011, 54(6): 1457-1465.
- [32] 汪凯, 叶红, 陈峰, 熊永柱, 李祥余, 唐立娜. 中国东南部太阳辐射变化特征、影响因素及其对区域气候的影响. 生态环境学报, 2010, 19(5): 1119-1124.
- [33] 龚仙玉, 梁列夫, 杨粤红, 杨少英. 粤西北地区太阳辐射的时空分布特征. 广东气象, 2012, 34(3): 39-43.
- [34] 陈千盛, 池艳珍. 福州大气污染对太阳辐射等要素的影响. 环境科学学报, 1998, 18(5): 557-560.
- [35] 施红, 许建明, 李成才. 华南地面太阳辐射状况及其转折特征分析. 热带气象学报, 2009, 25(2): 209-215.
- [36] 罗云峰, 吕达仁, 何晴, 王凡. 华南沿海地区太阳直接辐射、能见度及大气气溶胶变化特征分析. 气候与环境研究, 2000, 5(1): 36-44.
- [37] 李艳兰, 何如, 杜尧东. 华南区域太阳总辐射的时空变化特征. 可再生能源, 2012, 30(1): 13-16.
- [38] 韩虹, 任国玉, 王文, 朱临洪, 吴占华, 张红雨. 黄土高原地区太阳辐射时空演变特征. 气候与环境研究, 2008, 13(1): 61-66.
- [39] 刘昌明, 刘小莽, 郑红星, 曾燕. 海河流域太阳辐射变化及其原因分析. 地理学报, 2009, 64(11): 1283-1291.
- [40] 王学锋, 朱勇, 范立张, 杨鹏武, 杨晓鹏. 1961—2007 年云南太阳总辐射时空变化特征. 气候变化研究进展, 2009, 5(1): 29-34.
- [41] 郑小波, 王学锋, 罗宇翔, 陈娟. 1961—2005 年云贵高原太阳辐射变化特征及其影响因子. 气候与环境研究, 2011, 16(5): 654-664.
- [42] 尹青, 张华, 何金海. 近 48 年华东地区地面太阳总辐射变化特征和影响因子分析. 大气与环境光学学报, 2011, 6(1): 37-46.
- [43] 买苗, 火焰, 曾燕, 俞亚勋. 江苏省太阳总辐射的分布特征. 气象科学, 2012, 32(3): 269-274.
- [46] 申彦波, 赵宗慈, 石广玉. 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. 地球科学进展, 2008, 23(9): 915-923.
- [47] 罗宇翔, 陈娟, 郑小波, Zhao T L. 近 10 年中国大陆 MODIS 遥感气溶胶光学厚度特征. 生态环境学报, 2012, 21(5): 876-883.