

郑有飞,关福来,蔡子颖,等. 我国南方中东部地区地面太阳总辐射变化规律. 应用气象学报, 2011, 22(3): 312-320.

我国南方中东部地区地面太阳总辐射变化规律

郑有飞^{1)*} 关福来¹⁾²⁾ 蔡子颖¹⁾³⁾ 吴荣军¹⁾ 刘建军¹⁾

¹⁾(南京信息工程大学, 南京 210044) ²⁾(河北省气象与生态环境重点实验室, 石家庄 050021)

³⁾(天津气象科学研究所, 天津 300074)

摘 要

为进一步探讨我国地面太阳辐射的变化规律及其原因, 选择我国南方中东部地区, 利用该区域 1961—2007 年 33 个站点的地面太阳总辐射资料, 结合云量、大气水汽含量和能见度等观测资料, 综合研究该区域地面太阳总辐射的变化规律及其原因。结果表明: 1961—1989 年, 我国南方中东部地区地面太阳总辐射呈下降趋势, 之后发生逆转, 1995 年后其变化趋于缓和, 1961—2007 年总体呈现变暗—变亮—变缓的趋势。究其原因, 该区域云量平均值由峰入谷、云量下降速率由快变慢可能是产生此变化趋势的原因之一; 其次, 20 世纪 80 年代到 21 世纪初, 气溶胶光学厚度上升趋势减缓, 气溶胶地面辐射强迫变化趋于缓和, 某些区域甚至出现下降, 也导致部分站点地面太阳总辐射由暗变亮。

关键词: 地面太阳总辐射; 大气水汽; 气溶胶; 云量

引 言

太阳辐射是地球最基本、最重要的能量来源^[1-2], 由于对辐射平衡具有扰动指示作用^[3], 在气候变化和全球变暖的研究中往往作为一个重要因子来讨论^[4]。大范围地面太阳总辐射观测开始于 20 世纪 50 年代, 自有观测记录以来, 全球地面太阳总辐射变化大致可以分为两个阶段, 首先一个下降的趋势出现在 20 世纪 60—90 年代^[5] ($-7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$), 从北美^[3]到西欧^[6], 从东欧的前苏联^[7]到亚洲的中国^[8], 从南极到北极^[9], 地面太阳总辐射变暗的趋势普遍存在。但在 20 世纪 90 年代全球大部分地区地面太阳总辐射变化趋势发生逆转, Martin Wild 等^[10]研究发现, 全球大部分站点 1990 年以后地面太阳总辐射呈增加趋势, 并且在部分地区晴空条件也如此; Lohmann 等^[11]利用 ISCCP 数据进行再分析比较得出, 在 1984—2001 年东亚 ($+3.9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) 和南非 ($+2.4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) 直接辐射有强烈的线性上升趋势; Power^[12] 研究显示德国地

面太阳总辐射从 1977—2000 年存在 $1.94 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}/10 \text{ a}$ 的上升趋势; Shi 等^[13] 对我国的研究也显示出地面太阳总辐射存在同样的变化趋势。

关于全球地面太阳总辐射呈现大范围变暗到变亮的原因, 主要有以下几种观点: 20 世纪 50—80 年代地面太阳总辐射下降, 可能来自于人类与自然产生的硫酸盐及其他气溶胶污染; 20 世纪 90 年代后全球地面太阳总辐射呈上升趋势 (约恢复 $6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$), 可能原因是云量减少, 人为气溶胶浓度减少, 增加无云大气的透明度, 以及全球已从 1991 年 Pinatubo 火山爆发的影响中恢复^[14], 但大部分观点都需要区域研究的证实。本文在研究我国南方中东部地区近 50 年地面太阳总辐射长期变化的基础上, 尽可能全面和完善地收集与地气系统太阳辐射过程相关因子的资料, 对可能造成地面太阳总辐射变化的众多因子, 如云、大气组分 (气溶胶、水汽) 等, 进行更为完整和系统的分析, 同时基于辐射传输模式, 探讨晴空条件气溶胶对地面太阳总辐射变化的贡献, 分析我国南方中东部地区地面太阳总辐射变化原因。一方面了解南方中东部地区地面太阳总辐

2010-03-13 收到, 2011-02-28 收到再改稿。

资助项目: 国家重点基础研究发展规划项目 (2006CB403705)

* E-mail: zhengyf@nuist.edu.cn

射变化规律;另一方面,选择一个典型由变暗转为变亮区域,探寻该区域地面太阳总辐射变化原因,在全球气候变化研究中具有一定价值。而选择我国南方中东部地区作为研究目标,一方面根据文小航等^[15]、吴其重等^[16]、杨羨敏等^[17]、李晓文等^[18]的研究显示,我国变暗是普遍的,变亮主要发生在新疆北部、东北北部和南方大部地区,南方中东部地区地面太阳总辐射变化趋势与全球一致,属于典型的先变暗、后变亮的区域;另一方面,我国具有长时间观测地面太阳总辐射的观测站点相对较少,而南方中东部地区日射站相对较多而且分布均匀,便于研究。

1 资料和方法

依据文小航等^[15]对我国地面太阳总辐射的区域划分,本文选择我国南方中东部地区(主要指我国华东、中南地区,包括山东、河南、江苏、上海、福建、安徽、浙江、江西、广东、广西、海南、湖北、湖南12省1市)为研究对象,所用资料均来自中国气象局,包括33个日射站(其中18个站具有1961—2007年完整时间序列资料)地面太阳总辐射日暴量,其参照1996年中国气象局编写的《气象辐射观测方法》^[19]进行严格的质量控制;18个站气溶胶光学厚度资料,其基于邱金桓等^[20]改进的Elterman模式和地面能见度目测数据进行计算,该模式经杨琨等^[21]的评估,其反演结果可信。

晴空条件气溶胶、水汽对地面太阳总辐射影响分析,基于Ricchiazzi^[22]开发的SBDART模型,该模式自开发以来进行了大量验证,其计算结果与ARM太阳观测和基线辐射网(BSRN)观测结果比对,显示良好,适合使用。在处理过程中选择两种情景:城市条件(气溶胶类型假设为城市气溶胶,地面反射率选择城市地面)、乡村条件(气溶胶类型假设为乡村气溶胶,地面反射率选择绿地)。

2 我国南方中东部地区地面太阳总辐射变化规律

图1显示我国南方中东部地区近50年地面太阳总辐射变化可分为3个阶段:第1阶段(1961—1989年),地面太阳总辐射变化呈显著下降,称为变

暗时期;第2阶段(1989—1995年),地面太阳总辐射变化发生逆转,呈快速上升,可称为显著变亮时期;第3阶段(1995—2007年),地面太阳总辐射变化趋于稳定。在变暗时期我国南方中东部地区地面太阳总辐射每年下降 $1.08 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (通过0.01显著性检验),并且这种下降遍布于大多数站点(22个站点中有20个站点地面太阳总辐射呈下降趋势,其中18个站点通过0.05显著性检验)。在显著变亮时期我国南方中东部地区地面太阳总辐射变化趋势发生逆转,线性倾向率为 $3.27 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (通过0.05显著性检验),但这种逆转变并不是发生在所有站点,广州和南宁地面太阳总辐射依旧保持 $2.29 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $7.65 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 的下降,而其余16个站点中有9个站点通过0.05显著性检验。1995年以后,我国南方中东部地区地面太阳总辐射变化趋于缓和,线性倾向率仅为 $0.06 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, R^2 (R 为相关系数)为0.0051,是变暗时期变化速率的5.4%,是变亮时期变化速率的1.8%。而该时期我国南方中东部地区太阳总辐射上升和下降的站点各占50%,仅有1个站点通过0.05显著性检验。分析显示该时期我国南方中东部地区地面太阳总辐射下降的站点大都集中在东部沿海、河南、山东以及湖南的北部;地面太阳总辐射上升的站点集中于 $28^\circ \sim 32^\circ \text{N}$ 之间的内陆和两广地区,其变化幅度远小于上两个阶段,单站线性倾向率均值(取绝对值)为显著变亮时期15.8%,变暗时期55.8%,单站地面太阳总辐射变化趋于缓和。

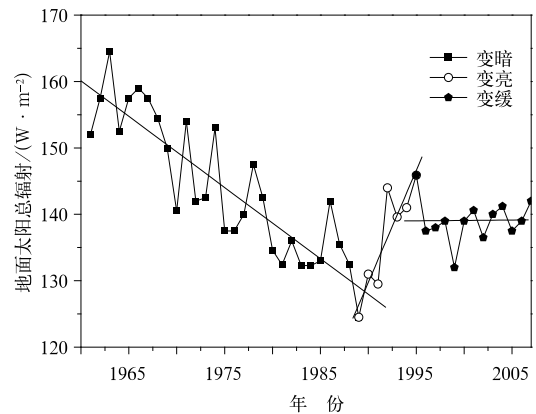


图1 1961—2007年我国南方中东部地区18站地面太阳总辐射变化规律

Fig. 1 Variation of annual-averaged surface solar radiation over the central and east of southern China during 1961—2007

表1 1961—2007年我国南方中东部地区地面太阳总辐射的变化趋势

Table 1 Decrease and ascend in surface solar radiation over the central and east of southern China during 1961—2007

时段	日射站数量	上升站点数量	通过0.05显著性检验上升站点数量	下降站点数量	通过0.05显著性检验下降站点数量
1961—1989年	22	2	0	20	18
1989—1995年	18	16	9	2	1
1995—2007年	29	14	1	15	0

表2 1961—2007年我国南方中东部地区地面太阳总辐射的变化线性倾向率

Table 2 The long trend of annual-averaged surface solar radiation over the central and east of southern China during 1961—2007

时段	线性倾向率/($W \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$)	R^2
1961—1989年	-1.078	0.7648**
1989—1995年	3.270	0.7909*
1995—2007年	0.058	0.0051

注：**为通过0.01显著性检验，*为通过0.05显著性检验。

3 我国南方中东部地区地面太阳总辐射变化原因

3.1 云和能见度

太阳辐射能在穿透大气层时受到大气层中各种成分的反射、散射和吸收作用,其中云量减弱作用最大。图2给出我国南方中东部地区18个站点1960—2005年云量变化趋势。由图2可知,该区域云量整体呈下降趋势,在20世纪70年代—20世纪80年代处于峰值,20世纪末至今处于谷值。20世纪80

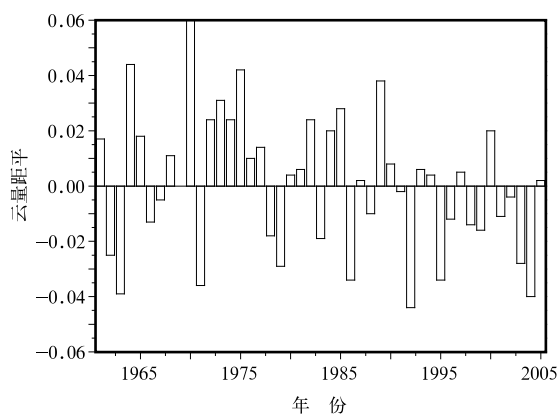


图2 我国南方中东部地区18个台站云量距平的变化

Fig. 2 Variation of annual-averaged cloud cover over the central and east of southern China during 1961—2007

年代末我国南方中东部地区云量变化有一个转折,在1989年达到峰值,此后5年呈下降趋势,且在1992,1995年两次处于谷值,分别为45年距平的-0.0438,-0.0382,1995年后云量始终处于历史负距平。而1989—1995年我国南方中东部地区地面太阳总辐射呈上升趋势,云量下降可能是不可忽略的一个因素。比较两个时期云量变化速率:1989—1995年云量呈迅速下降趋势,1995年后云量变化趋于缓和,1996—2005年云量变化线性倾向率仅为1989—1995年的1/4。云量平均值由峰入谷,云量下降速率由快变慢可能是导致我国南方中东部地区地面太阳总辐射在1961—2007年期间由变暗到变亮,由变亮再到变缓的一个原因。

表3给出我国南方中东部地区1989—2005年部分站点云量、能见度、地面太阳总辐射变化趋势。1989—1995年我国南方中东部地区18个站点中有15个站点云量呈下降趋势,所有云量呈明显下降的站点地面太阳总辐射均呈上升趋势,其中仅有济南、杭州、福州3个站点同期能见度也上升;1995—2005年我国南方中东部地区有5个站点地面太阳总辐射变化与能见度变化正相关;有11个站点总辐射变化与云量变化呈负相关,8个站点地面太阳总辐射变化与云量变化不符(主要集中在云量上升的站点);而其中地面太阳总辐射有明显下降的3个站点,2个站点云量有明显上升。综合上面分析可知,1989—1995年我国南方中东部地区云量呈明显下降趋势,由于云量下降,大部分地区地面太阳总辐射呈上升趋势;1995—2005年我国南方中东部地区云量下降趋势放缓,且部分地区云量呈现上升趋势(主要集中在我国南方中东部地区北部、江苏、安徽一带),各地地面太阳总辐射变化趋势趋于不同。在云量下降的大部分区域,地面太阳总辐射仍然保持上升趋势;在云量上升区域,部分地区可能由于空气质量的改善(能见度上升),地面太阳总辐射有所增加。

表3 1989—2005年我国南方中东部地区部分站点云量、能见度、地面太阳总辐射变化趋势

Table 3 The long trend of cloud cover, visibility, surface solar radiation over the central and east of southern China during 1989—2005

站点	1989—1995年			1995—2005年		
	云量 /(10 ⁻² /10 a)	能见度 /(km/10 a)	地面太阳总辐射 /(W·m ⁻² /10 a)	云量 /(10 ⁻² /10 a)	能见度 /(km/10 a)	地面太阳总辐射 /(W·m ⁻² /10 a)
济南	-1.49	0.32	29.05	0.58	2.02	-6.02
郑州	-1.22	-0.85	27.66	0.11	-0.80	6.13
宜昌	-1.02		61.92	0.26		12.38
武汉	-0.23	-1.55	52.20	-0.14	-0.38	4.51
长沙	-1.15	-2.74	42.01	-0.55	1.87	-21.99
桂林	0.08	-2.76	73.26	-0.60	-0.04	14.81
赣州	-0.32	-0.37	33.56	0.34	1.94	-9.84
固始	-1.24	-2.53	39.70	0.22	1.09	3.13
南京	-1.67	-0.63	8.68	0.29	-1.63	16.09
合肥	-1.60		75.58	0.03		11.69
上海	-0.62		17.48	-0.38		4.28
杭州	-1.39	0.96	57.99	-0.65	-0.95	18.40
南昌	-0.85		39.12	-0.61		2.31
福州	-0.70	1.68	47.80	-0.35	-0.76	-0.58
广州	-0.09	0.05	-22.92	-0.78	0.81	7.41
汕头	-0.30	-0.07	39.00	-0.68	0.17	2.66
南宁	0.00	-1.62	-76.50	-0.46	1.35	17.48
海口	0.33	0.25	16.90	-0.11	-0.28	2.31

3.2 气溶胶

近年来,由于人为活动的加剧,越来越多的人为气溶胶被排入大气,大气中的气溶胶通过直接和间接两方面的作用影响地面太阳总辐射。图3给出我国南方中东部地区部分站点气溶胶光学厚度的变化趋势。由图3可知,1980—2007年该区域大部分站点气溶胶光学厚度呈上升趋势(上升8.8%),1989—1995年并未下降,与该时期地面太阳总辐射上升不

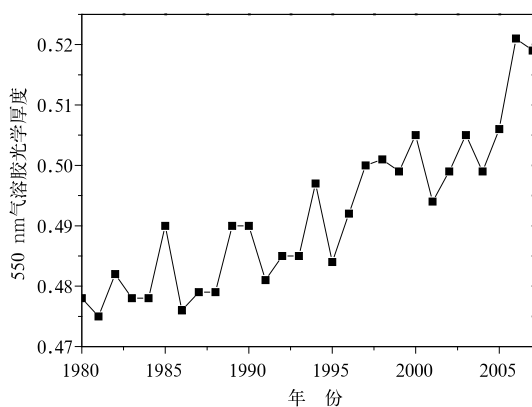


图3 我国南方中东部地区气溶胶光学厚度的变化趋势

Fig. 3 Variation of annual-averaged aerosol optical thickness over the central and east of southern China

相符,但与20世纪60—80年代相比,气溶胶光学厚度的上升有明显减缓(我国46个城市气溶胶光学厚度20世纪80年代比20世纪60年代增加21.5%^[18])。通过模式估算可知,该区域晴空条件下气溶胶减少地面太阳总辐射平均值为23.86 W·m⁻²(乡村条件,图4),35.41 W·m⁻²(城市条件,图5),21世纪初相比20世纪80年代,由于大气气溶胶负载量增加,地面太阳总辐射减少0.22 W·m⁻²(乡村条件,图6),0.29 W·m⁻²(城市条件,图7),无论从趋势上还是量级上都显示出气溶胶光学厚度的变化不是该区域20世纪90年代地面太阳总辐射由变暗转向变亮的决定因素,不过通过模拟显示部分站点气溶胶地面辐射强迫呈下降趋势,增加了地面太阳总辐射,可合理解释某些站点云量微升或者晴空条件下,20世纪90年代后地面太阳总辐射呈上升趋势的原因。

3.3 水汽

水汽对太阳总辐射有4%~15%的吸收,是影响到达地面太阳总辐射的重要因素之一,本文选取1961—2007年地面水汽压月值资料(按照日射站分布选取18个站点),估算我国南方中东部地区大气水汽含量^[23]。结果表明,47年中,我国南方中东部地区

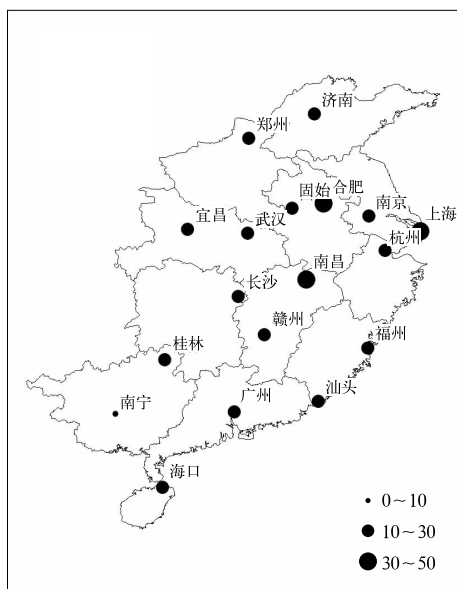


图 4 1980—2007 年我国南方中东部地区(乡村)气溶胶地面辐射强迫模拟结果(单位: $W \cdot m^{-2}$)

Fig. 4 Distribution of aerosol radiative forcing on country surface over the central and east of southern China during 1980—2007 (unit: $W \cdot m^{-2}$)

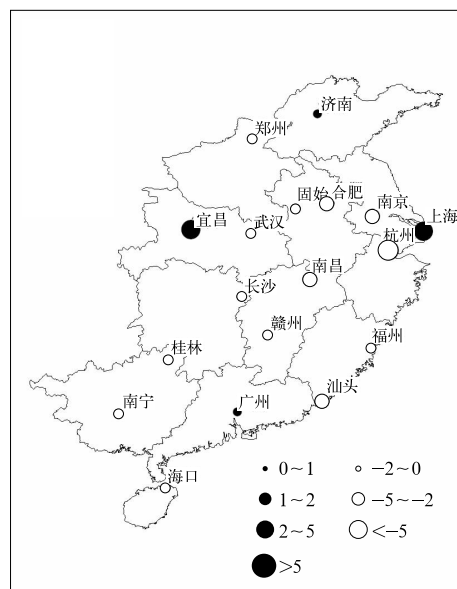


图 6 20 世纪 80 年代到 21 世纪初我国南方中东部地区(乡村)气溶胶地面辐射强迫变化模拟结果(单位: $W \cdot m^{-2}$)

Fig. 6 Variation of aerosol radiative forcing on country surface over the central and east of southern China from 1980s to the beginning of the 21st Century (unit: $W \cdot m^{-2}$)

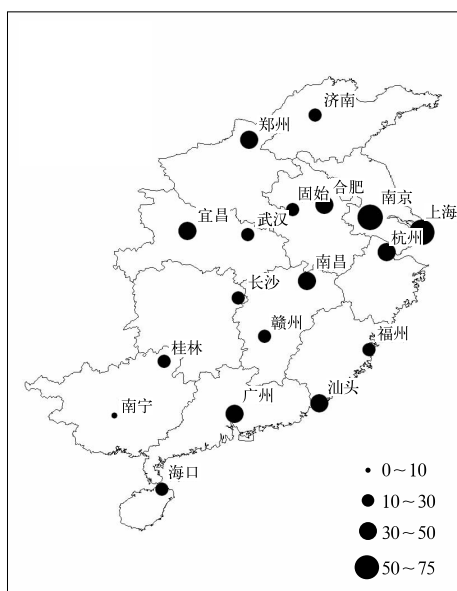


图 5 1980—2007 年我国南方中东部地区(城市)气溶胶地面辐射强迫模拟结果(单位: $W \cdot m^{-2}$)

Fig. 5 Distribution of aerosol radiative forcing on city surface over the central and east of southern China during 1980—2007 (unit: $W \cdot m^{-2}$)

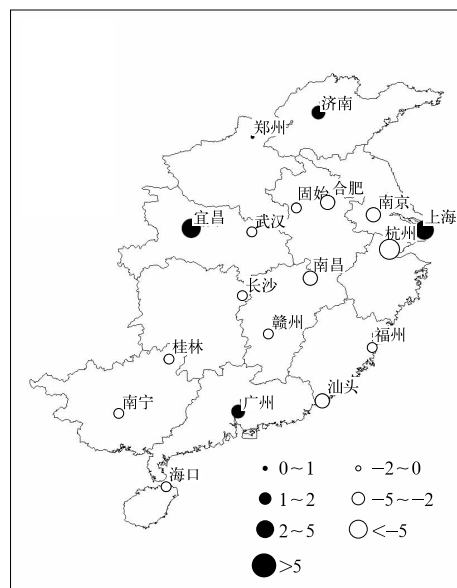


图 7 20 世纪 80 年代到 21 世纪初我国南方中东部地区(城市)气溶胶地面辐射强迫变化模拟结果(单位: $W \cdot m^{-2}$)

Fig. 7 Variation of aerosol radiative forcing on city surface over the central and east of southern China from 1980s to the beginning of the 21st Century (unit: $W \cdot m^{-2}$)

大气水汽含量呈上升趋势,其中1961—1990年变化缓和,但在20世纪90年代后有明显上升,其线性倾向率为 $0.0072 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。利用SBDART模型,假设一个样本初估我国南方中东部地区大气水汽总量变化对地面太阳总辐射的影响,选取 33°N , 115°E ,儒日数为75,地面反射率为0.18,大气廓线为美国标准大气(US62),云量为0,气溶胶光学厚度为0.5,计算结果显示,水汽变化直接作用引起的地面太阳总辐射变化幅度,与观测到的地面太阳总辐射变化幅度相差1~2个量级,水汽变化对地面太阳总辐射变暗变亮产生的影响有限。

同时利用SBDART辐射传输模式,精细估算我国南方中东部地区水汽增加对地面太阳总辐射变化的影响(图8),结果表明,20世纪80年代到21世纪初,我国南方中东部地区晴空由于大气水汽增加,到达地面太阳总辐射减少 $0.55 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

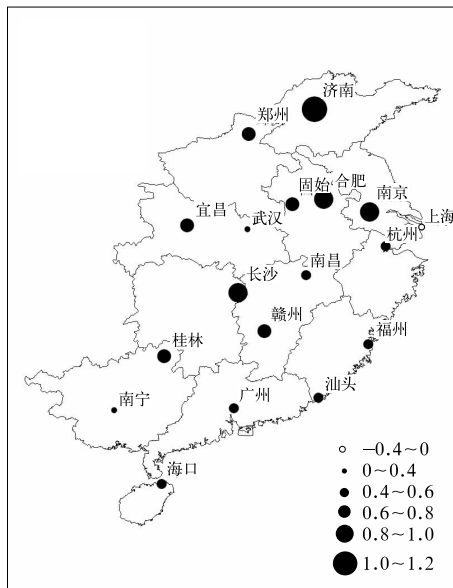


图8 20世纪80年代到21世纪初我国南方中东部地区水汽对地面太阳辐射削弱的模拟结果(单位: $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)

Fig. 8 Variation of drop extinction over the central and east of southern China from 1980s to the beginning of the 21st Century (unit: $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)

3.4 我国南方中东部地区地面太阳总辐射变化原因

到达地面太阳总辐射变化是全球变化的一个重要信号,是大气环境优劣的重要指标,了解其变化规律和原因,对认识大气环境和全球变化有特别意义。

在20世纪90年代随着地面太阳总辐射由变暗到变亮,地面太阳总辐射下降对温室效应遮蔽作用消失,导致20世纪90年代全球温度大幅度升高。而影响地面太阳总辐射的因素主要可以归结为以下几类^[24]:天文因子、地表因子、人类因子和大气因子。其中天文因子(太阳总辐射通量密度)在11年周期内的变化大约是0.1%^[25],由太阳输出变化引起的辐射强迫为 $+0.12 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,数值上与地面观测的太阳辐射变化有很大差异。

现阶段研究显示,近半个世纪地面太阳总辐射的变化原因更多来自地球内部,并且这种原因在全球是多样的。在变暗时期,气溶胶和云的变化对其产生重要贡献^[26]。就全球而言,Stanhill等^[27]早在1992年就指出引起地面太阳总辐射变暗的主要原因可能是来自工业化和城市化排放的气溶胶,变暗时期全球化石燃料排放与总辐射变化峰值存在高的纬度相关性,便是其中最好的证据。而我国变暗时期地面太阳总辐射下降,与大部分地区气溶胶光学厚度上升相关(我国46个城市气溶胶光学厚度20世纪80年代比20世纪60年代增加21.5%^[28]),大气气溶胶增加对地面太阳总辐射变化有很重要的作用;罗云峰等^[28]指出,1961—1990年我国华南地区直接辐射下降是地面能见度明显减少和大气气溶胶增加引起的。Liang等^[29]研究也表明,我国能见度变化趋势和地面太阳总辐射下降有较好的相关性。而云对变暗时期地面太阳总辐射下降的影响,相对气溶胶更多体现在局部,在美国变暗时期云光学厚度增加使地面太阳总辐射下降 $18 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ^[30],而同期气溶胶辐射效应仅为 $8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$;在新西兰变暗和变亮的趋势未必与气溶胶直接辐射效应有关^[31],减少的云量才是新西兰地面太阳总辐射变暗到变亮的主要原因,但同时期中国总云和低云呈现出明显的下降趋势,与地面太阳总辐射下降并不相符。

进入20世纪90年代,地面太阳总辐射由变暗趋势转向变亮趋势。就全球而言,Martin等^[10]提出,20世纪80年代后更为严格的污染物排放标准是气溶胶排放减少,使全球由暗转向变亮的可能原因。Streets等^[32]利用历史排放数据库,Hatzianastassiou^[33]利用TOMS卫星气溶胶光学厚度资料,Ohmura^[34]通过透射率估算,在全球尺度上也证实了此结果。但在中国,20世纪90年代至今没有任何证据显示该区域地面太阳总辐射上升与气溶胶排放变化有关。本文在我国南方中东部的研究也验证

了同样观点,并且通过比较分析认为,相对20世纪60—80年代,在20世纪80年代到21世纪初我国南方中东部地区气溶胶仍呈增加趋势,但增速减缓,气溶胶的排放相对稳定。与变暗时期相比,气溶胶对地面太阳总辐射衰减作用并没有明显增强,为地面太阳总辐射由变暗到变亮创造必要条件。但20世纪90年代地面太阳总辐射上升,发挥更大作用的是云,20世纪80—90年代云量均值由峰入谷,增加了到达地面的太阳总辐射,我国南方中东部地区地面太阳总辐射变亮从本质上有别与欧美地区地面太阳总辐射变亮。

进入21世纪,Martin^[26]指出中国地面太阳总辐射由变亮重新转入变暗,主要原因是中国污染排放的加剧,不过本文通过能见度资料分析显示,南方中东部地区进入21世纪气溶胶的排放增加已经明显减少,部分区域的变亮趋势是云和气溶胶共同作用的结果,而部分恢复变暗的站点,其主要原因也不是气溶胶排放的增加,而是云量从20世纪90年代的谷值有所恢复的结果。

4 小 结

1) 1960—1989年我国南方中东部地区地面太阳总辐射呈下降趋势,在20世纪80年代末发生逆转,地面太阳总辐射呈上升趋势,但在1995年后上升趋势并没有持续,地面太阳总辐射变化趋于缓和。

2) 1989—1995年我国南方中东部地区云量呈明显下降趋势,由于云量的下降,该区域大部分地区地面太阳总辐射呈上升趋势;1995年后,云量下降趋势放缓,并且部分地区云量出现上升,各观测站点地面太阳总辐射变化趋势趋于不同。而其中该时期云量均值由峰入谷,云量下降速率由快变慢可能是地面太阳总辐射由变暗到变亮,再由变亮到变缓的原因之一。

3) 通过能见度估算显示,20世纪80年代后我国南方中东部地区气溶胶光学厚度有一定增加(8.8%),但趋势减缓。得以控制的大气气溶胶负载量和水汽的间接作用,使得大气气溶胶对到达地面太阳总辐射的削弱作用并没有持续之前的迅速上升,气溶胶衰减辐射能力变化趋于缓和(乡村为 $0.22 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,城市为 $0.29 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$)。部分区域空气质量改善,气溶胶衰减辐射能力呈下降趋势,增加到地面太阳总辐射,合理解释某些区域地面太

阳总辐射变亮原因。

4) 我国南方中东部地区大气水汽总量在47年中呈上升趋势,1961—1990年大气水汽总量变化缓和,在20世纪90年代后明显上升,水汽变化的直接作用,并不是该区域1961—2007年地面太阳总辐射变暗—变亮—变缓的主要原因。

参 考 文 献

- [1] 李崇银. 气候动力学引论. 北京: 气象出版社, 2000: 65-105.
- [2] 汪方, 丁一汇. 全球气候模式对东亚地区地表短波辐射的模拟检验. 应用气象学报, 2008, 19(6): 749-759.
- [3] 李清泉, 王兰宁, 徐影. 辐射参数化方案对气候模拟和回报的影响. 应用气象学报, 2005, 16(增刊): 12-21.
- [4] Pinker R T, Zhang B, Dutton E G. Do satellites detect trends in surface solar radiation. *Science*, 2005, 308(6): 850-853.
- [5] Beate G L. Observed reductions of surface solar radiation at sites in the United States and world from 1961 to 1990. *Geophys Res Lett*, 2002, 29(10): 61-64.
- [6] Stanhill G. Long-term trends in, and spatial variation of solar irradiances in Ireland. *Int J Climatol*, 1998, 18: 1015-1030.
- [7] Abakumova G M, Feigelson E M, Bussak V, et al. Evaluation of long term changes in radiation, cloudiness and surface temperature on the territory of the former Soviet Union. *J Climate*, 1996, 9: 1319-1327.
- [8] 陈志华. 1957—2000年中国地面太阳辐射状况的研究. 北京: 中国科学院大气物理研究所, 2005: 1-78.
- [9] Stanhill G. Global irradiance, air pollution and temperature changes in the Arctic. *Phil Trans Roy Soc A*, 1995, 352: 247-258.
- [10] Martin Wild, Hans Gilgen, Andreas Roesch, et al. From dimming to brightening: Decadal changes in solar radiation at earth's surface. *Science*, 2005, 308(5723): 847-850.
- [11] Lohmann S, Schillings C, Mayer B, et al. Long-term variability of solar direct and global radiation derived from ISCCP data and comparison with reanalysis data. *Solar Energy*, 2006, 80(11): 1390-1401.
- [12] Power H C. Trends in solar radiation over Germany and an assessment of the role of aerosols and sunshine duration. *Theor Appl Climatol*, 2003, doi: 10.1007/s00704-003-0005-8.
- [13] Shi G Y, Hayasaka T, Ohmura A, et al. Data quality assessment and the long-term trend of ground solar radiation in China. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2008, 47: 1006-1016.
- [14] 丁一汇, 孙颖. 国际气候变化研究进展. 气候变化研究进展, 2006, 2(4): 161-167.
- [15] 文小航, 尚可政, 王式功, 等. 1961—2000年中国太阳辐射区域特征得初步研究. 中国沙漠, 2008, 28(3): 554-561.
- [16] 吴其重, 王自发, 崔应杰. 我国近20年太阳辐射时空分布状

- 况模式评估. 应用气象学报, 2010, 21(3): 343-351.
- [17] 杨羨敏, 曾燕, 邱新法, 等. 1960-2000年黄河流域太阳总辐射气候变化规律研究. 应用气象学报, 2005, 16(2): 243-248.
- [18] 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.
- [19] 中国气象局. 气象辐射观测方法. 北京: 气象出版社, 1997: 1-9.
- [20] 邱金桓, 林耀荣. 关于中国大气气溶胶光学厚度的一个参数化模式. 气象学报, 2001, 59(3): 368-372.
- [21] 杨琨, 孙照渤, 倪东鸿. 1999—2003年我国气溶胶光学厚度的变化特征. 南京气象学院学报, 2008, 31(1): 92-96.
- [22] Ricchiazzi P. SBDART: A research and teaching software tool for plane parallel radiative transfer in the earth's atmosphere. *Bull Amer Meteor Soc*, 1998, 79: 210122114.
- [23] 王炳忠, 刘庚山. 我国大陆大气水汽含量的计算. 地理学报, 1993, 48(3): 244-253.
- [24] 翁笃鸣. 中国辐射气候. 北京: 气象出版社, 1997: 41-43.
- [25] IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis // Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [26] Martin Wild. Global dimming and brightening: A review. *J Geophys Res*, 2009, 114, D00D16, doi:10.1029/2008JD011470.
- [27] Stanhill G, Moreshet S. Global radiation climate changes: The world network. *Clim Change*, 1992, 21: 57-75, doi:10.1007/BF00143253.
- [28] 罗云峰, 吕达仁, 李维亮, 等. 近30年来中国地区大气气溶胶光学厚度的变化特征. 科学通报, 2000, 45(5): 549-554.
- [29] 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: 2425-2432.
- [30] Liepert B G, Kukla G J. Declines in global solar radiation with increased horizontal visibility in Germany between 1964 and 1990. *J Clim*, 1997, 10, 2391-2401, doi:10.1175/1520-0442.
- [31] Liley B. New Zealand dimming and brightening. *J Geophys Res*, 2009, 114, D00D10, doi: 10.1029/2008JD011401.
- [32] Streets D G, Wu Y, Chin M. Two-decadal aerosol trends as a likely explanation of the global dimming/brightening transition. *Geophys Res Lett*, 2006, 33, L15806, doi:10.1029/2006GL026471.
- [33] Hatzianastassiou N. Global distribution of Earth's surface short-wave radiation budget. *Atmos Chem Phys*, 2005, 5: 2847-2867.
- [34] Ohmura A. Observed decadal variations in surface solar radiation and their causes. *J Geophys Res*, 2009, 114, D00D05, doi:10.1029/2008JD011290.

Variation of Surface Solar Radiation over the Central and East of Southern China

Zheng Youfei¹⁾ Guan Fulai¹⁾²⁾ Cai Ziyang¹⁾³⁾ Wu Rongjun¹⁾ Liu Jianjun¹⁾

¹⁾ (Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044)

²⁾ (Hebei Provincial Meteorological and Eco-environmental Key Laboratory, Shijiazhuang 050021)

³⁾ (Tianjin Institute of Meteorology, Tianjin 300074)

Abstract

Surface solar radiation is one of most essential variables that influence the climate and environment. Various studies analyzing long-term records of surface radiation measurements suggest a widespread decrease in surface solar radiation between the 1950s and 1980s (global dimming), with a partial recovery more recently at many locations (brightening). To provide reasonable evidence for predicting the future trend of climate changes, the spatial and temporal variation of surface solar radiation and the causes are analyzed comprehensively by using observational solar radiation data together with conventional meteorological data of the central and east of southern China from 1961 to 2007.

Solar radiation is obviously declining during 1961—1990 over the central and east of southern China, and a widespread brightening is observed during 1989—1995, but from 1995 to 2007 brightening doesn't persist and the solar radiation tendency tends to moderation. Increase of aerosol may be the main causes of solar radiation from dimming to brightening during 1961—1990, and the difference of cloud cover tendency maybe the main causes of solar radiation dimming.

Model simulation shows that in recent 50 years water vapor is rising, which has decreased solar radiation by $0.55 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ at the beginning of the 21st Century than that of the 1980s, but it is not main cause of solar radiation from dimming to brighting in recent 50 years. A widespread ascending aerosol optical depth (8.8%) is observed from 1980 to 2007, but the tendency tends to moderation. Due to the joint effect of atmosphere moisture and aerosol optical depth, a variation of aerosol direct radiative forcing is weakened, and the overall trend shows that aerosol direct radiative forcing variation trend to moderation ($0.22 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ in the country and $0.29 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ in the city).

Entering the 21st Century, solar radiation tends to moderation. This tendency indicates the cause for solar radiation change of China in the 1990s is different from Europe and America, and aerosol decline is not the major contributor. On the other hand, it also demonstrates if the air quality improves in the future, the solar radiation over the central and east of southern China may rise again.

Key words: surface solar radiation; water vapor; aerosol; cloud cover

欢迎订阅《应用气象学报》

《应用气象学报》是由中国气象科学研究院、国家气象中心、国家卫星气象中心、国家气候中心、国家气象信息中心和中国气象局气象探测中心联合主办的大气科学理论与应用研究的综合性学术期刊。《应用气象学报》将向您提供有关我国大气科学领域内研究和应用成果的最新论文、资料、方法等大量信息,内容包括气象预报、卫星气象、农业气象、海洋气象、航空气象、环境气象、人工影响天气、应用气象、大气探测、遥感技术以及计算机应用技术等学科;还将向您介绍国内外现代科技的新理论与新技术在大气科学中应用的研究论文及信息。主要栏目有论著、短论、综合评述、业务系统、学术论坛、研究简报、书刊评介等。本刊被《中文核心要目总览》确认为大气科学(气象学)类核心期刊,并已首批入选“中国科学引文数据库”(CSCD),中国科学技术期刊文摘(CSTA)国家数据库(英文版)收录的刊源名单,并被美国气象学会“气象与地球天体物理学文摘”(MGA)和美国国际科学应用协会(SAIC)以及中国科学文摘(英文版)等多种文摘摘录。本刊还首批入选“中国学术期刊(光盘版)”、“万方数据——数字化期刊群”和“中文科技期刊数据库”。《应用气象学报》面向广大的气象科研、业务技术人员、在校有关专业的研究生、大专院校师生等专业人员。

《应用气象学报》为双月刊,逢双月出版,可以随时汇款订阅或购买(户名:中国气象科学研究院,账号:11001028600056086013,开户行:建行北京白石桥支行)。2011年6期(每期定价30.00元),总订价180.00元(含邮资)。

订阅地址:北京市中关村南大街46号中国气象科学研究院《应用气象学报》编辑部;邮政编码:100081。

联系电话:(010)68407086,68408638。网址:qk.cams.cma.gov.cn。

E-mail: yyqxxb@cams.cma.gov.cn, yyqxxb@163.com。