

杨溯, 石广玉, 王标, 等. 2013. 1961~2009 年我国地面太阳辐射变化特征及云对其影响的研究 [J]. 大气科学, 37 (5): 963~970, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.11122. Yang Su, Shi Guangyu, Wang Biao, et al. 2013. Trends in Surface Solar Radiation (SSR) and the effect of clouds on SSR during 1961~2009 in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (5): 963~970.

1961~2009 年我国地面太阳辐射变化特征 及云对其影响的研究

杨溯¹ 石广玉² 王标² 杨红龙³ 段云霞⁴

¹ 国家气象信息中心, 北京 100081

² 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

³ 深圳市国家气候观象台, 深圳市气象局, 深圳 518040

⁴ 沈阳市气象台, 沈阳 110168

摘 要 基于我国 100 个地面站点的地面太阳总辐射、日平均云量资料分析 1961~2009 年我国地面太阳辐射 (Surface Solar Radiation, SSR) 变化特征及云在不同时期对 SSR 的影响。结果显示: 1961~2009 年我国 SSR 经历了先下降后上升的变化过程, 其中 1961~1990 年 SSR 显著下降 (“变暗”), 下降速率为 $-4.3\%/10\text{ a}$ ($-7.87\text{ W m}^{-2} (10\text{ a})^{-1}$), 各地 SSR 变化趋势比较一致; 1990 年后 SSR 开始上升 (“变亮”), 上升速率为 $2.8\%/10\text{ a}$ ($2.4\text{ W m}^{-2} (10\text{ a})^{-1}$), 各地 SSR 变化趋势不如前一阶段一致, 但没有显著的地域分布特征。晴空条件的设置对 1961~1990 年各站点 SSR 变化特征影响不大, 仍为大范围下降 (“变暗”), 但对 1990~2009 年的结果影响显著。相比全天空条件的结果, 晴空条件下 1990~2009 年我国 SSR 变化有明显的南北特征, 南方地区以 “变亮” 为主, 而北方地区大多继续 “变暗”, 但 “变暗” 速度减缓。1961~1990 年我国总云量总体呈小幅下降趋势, 下降速率很慢, 这一时期总云量与全天空 SSR 没有很好的对应关系; 1990~2009 年我国总云量总体呈小幅上升趋势, 有显著的南北分布差异, 北方地区以上升趋势为主, 南方地区以下降趋势为主, 期间云量与全天空情况下 SSR 有很好的对应关系。这些结果表明, 在 “变暗” 阶段, 云对 SSR 的作用不显著, 而在 “变亮” 阶段, 云的作用变得较为突出。

关键词 地面太阳辐射 云 全球变暗 全球变亮

文章编号 1006-9895(2013)05-0963-08

中图分类号 P412.14

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.11122

Trends in Surface Solar Radiation (SSR) and the Effect of Clouds on SSR during 1961–2009 in China

YANG Su¹, SHI Guangyu², WANG Biao², YANG Honglong³, and DUAN Yunxia⁴

¹ National Meteorological Information Centre, Beijing 100081

² Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

³ Shenzhen National Climate Observatory, Shenzhen Meteorological Bureau, Shenzhen 518040

⁴ Shenyang Meteorological Service, Shenyang 110016

Abstract This study investigates variations in surface solar radiation (SSR) and the effects of cloud on SSR during 1961–2009 based on global radiation and cloud fraction data from 100 radiation observation sites over China. The results

收稿日期 2012-03-05, 2013-02-19 收修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展计划项目 (973 计划) 2010CB950502, 中国科学院战略性先导科技专项 XDA05100504

作者简介 杨溯, 男, 1983 年出生, 工程师, 主要从事地面太阳辐射和气溶胶研究。E-mail: yangsu@cma.gov.cn

indicate a general decrease of $-4.3\%/10a$ ($7.87 \text{ W m}^{-2} (10 \text{ a})^{-1}$) in SSR over land surfaces since measurements began (in about 1961) until 1990, with a turnover corresponding to a $2.8\%/10a$ ($2.4 \text{ W m}^{-2} (10a)^{-1}$) increase from 1990 onward. Moreover, this turnover was more significant in southern China. It seems that cloud was not one of the primary factors inducing global dimming during 1961–1990, based on the similar variation characteristics witnessed under all-sky and clear-sky conditions and the weak correlation between total cloud fraction and SSR. However, there were distinct differences between all-sky and clear-sky SSR results after 1990 and it shows a significant negative correlation between all-sky and clear-sky SSR values. Thus, it may be concluded that cloud had a significant effect on SSR variation, such that it may have inhibited global brightening in some way during 1990–2009.

Keywords Surface solar radiation, Cloud, Global dimming, Global brightening

1 引言

到达地面的太阳入射辐射 (Surface Solar Radiation, SSR) 既包括直接到达地表的太阳辐射, 也包括被气体、云、气溶胶散射的那部分太阳辐射, 它几乎是地气系统唯一的能量来源 (IPCC, 2007; 石广玉, 2007; Wild, 2009)。SSR 对许多陆面过程都起着非常重要的作用, 它直接影响着水汽蒸发和植物光合作用, 进而影响与之相关的水循环、碳循环等 (Haverkort et al., 1991; Ledley and Chu, 1995; Ramanathan and Vogelmann, 1997; 吴亚平, 2006; IPCC, 2007; Kadur et al., 2007; Li et al., 2009; 孙敬松等, 2010)。因此地表接收到太阳辐射量的多少, 从根本上来说决定了行星的气候条件。

过去 30 年的观测和模式的研究结果都表明, 在 10 年以上时间尺度的 SSR 不是一个常量, 尤其在 20 世纪 90 年代前后, 更是表现出两种截然不同的变化趋势: 上世纪 90 年代前 SSR 持续下降, 90 年代之后开始上升 (Stanhill and Cohen, 2001; Streets et al., 2001; Shi et al., 2008; Tang et al., 2011)。全球“变暗”和全球“变亮”分别被用来描述这两个时期的 SSR 变化特征 (Wild et al., 2005; Wild, 2009)。

云是 SSR 重要的调制者, 它可以吸收和散射入射的太阳辐射, 减少 SSR, 起到冷却地气系统的作用 (汪宏七和赵高祥, 1994; 赵高祥和汪宏七, 1994; IPCC, 2007; 石广玉, 2007)。目前关于云在 SSR 变化趋势转变过程中所起的作用一直没有定论。罗云峰等 (2000) 发现, 上世纪 60~90 年代, 我国华南地区的总云量变化很小, 云量与直射太阳辐射、日照时数之间没有很好的对应关系, 认为云量不是造成太阳直接辐射和日照时数明显减小的主要因素。Li et al. (2011) 分析了 1961~2005 年我国南方地区日照时数百分比与低云、高云云量之间

的关系, 发现低云云量与日照时数有很好的对应关系, 并认为低云与中国南方地区日照时数下降有关。Wang et al. (2011) 利用卫星资料分析了我国 1984~2000 年云对 SSR 的影响, 认为高云对 SSR 变化有较大贡献。

已有的研究有助于我们了解 SSR 的变化特征以及云在 SSR 变化中所扮演的角色, 但由于受限于资料时间长度等方面的原因, 这些研究大多针对某一时期进行分析, 未能得到较长时间内云对 SSR 的影响。另一方面, SSR 的变化受多种因素影响, 全球“变暗”与全球“变亮”时期云在众多影响因素中的贡献大小是否变化也是值得关注的问题。因此, 本文利用我国 100 个地面站点的太阳总辐射、日平均云量资料分析 1961~2009 年我国 SSR 变化特征及云在不同时期对 SSR 的影响。

2 资料和方法

本文所用资料均来自中国气象局气象信息中心中国气象科学数据共享服务网 (<http://cdc.cma.gov.cn/> [2011-05-01]), 主要包括逐日地面太阳总辐射、日平均云量数据。在数据分析前, 我们发现部分台站在观测起止时间内, 有一次或多次连续数年数据缺测。为了尽量减少缺测对结果的影响, 在数据挑选阶段将缺测数据较多的台站剔除出去, 最终留下 100 个时间连续性相对较好的台站。日平均云量包括总云量、低云量和高云量。本文着重分析云量对 SSR 总的影响及在不同时期的贡献大小, 因此选择总云量数据用于分析。资料时间跨度为 1961~2009 年, 总计约 130 万组数据。需要指出, 中国气象局从 1990 年开始调整太阳辐射观测网, 因此 1990 年前后地面太阳辐射观测站点数量和分布有一定变化。本文所选的 100 个观测站, 其中 61 个从 1960 年前后开始有太阳辐射资料, 39 个从 1990 年前后开始有辐射资料, 其中的榆中、上海、纳溪站为上

世纪 90 年代兰州、龙华、泸州站新址, 若将这三个站点视为原站点观测的延续, 则实际观测站点为 97 个。从图 1 可以看到, 这些站点基本能够覆盖我国除台湾地区外所有省份, 西藏地区站点相对较少, 分布较稀疏, 其他地区站点分布较均匀, 基本可以代表我国 SSR 总的变化趋势。

在使用总辐射数据前, 参照 Shi et al. (2008) 提出的物理阈值、时间序列对地面太阳总辐射数据做了质量评估, 评估结果表明我国总辐射数据总体数据质量较好, 通过质量评估的总辐射数据比例为 94.0%。

3 结果与讨论

3.1 我国 SSR 变化特征

本文选取的 100 个站点的资料起始时间大致分为上世纪 90 年代前、后两部分, 站点数量和分布有较大变化。因此在分析我国 1961~2009 年地面太阳辐射 (SSR) 总体变化趋势前, 要考虑站点数量对全国平均变化趋势的影响。图 2 是 1961~2009 年全国平均 SSR 逐年变化趋势图。图中蓝色曲线代表自上世纪 60 年代开始有观测资料的 61 个站点 SSR 年平均结果; 红色曲线代表自上世纪 90 年代开始有观测资料的 39 个站点 SSR 年平均结果; 黑色曲线代表不考虑前后站点变化的结果。从图中可以看到, 红色曲线略高于其他两条曲线, 这与新增站点在高纬度地区分布相对较少有关。三条曲线的变化趋势比较相似 (1990 年后), 因此可以认为上世纪 90 年代前后站点变化对全国 SSR 总的变化趋势影响较小。

总的来看, 在过去近 50 年我国 SSR 经历了先下降后上升的过程。具体变化特征为 (图 2 黑色曲

线): 1961~1990 年呈显著下降趋势, 期间 SSR 共下降约 23 W m^{-2} , 下降速率为 $-4.3\%/10 \text{ a}$ ($7.9 \text{ W m}^{-2} (10 \text{ a})^{-1}$); 1990 后 SSR 变化趋势转变, 总体呈上升趋势, 上升速率为 $2.8\%/10 \text{ a}$ ($2.4 \text{ W m}^{-2} (10 \text{ a})^{-1}$), 尤其在 1990~1995 年间 SSR 增长非常迅速, 期间 SSR 上升了约 14 W m^{-2} , 增长速率为 $17.7\%/10 \text{ a}$ ($28.2 \text{ W m}^{-2} (10 \text{ a})^{-1}$)。

SSR 变化的转折点大致出现在 1990 年, 因此本文将数据分为 1990 年前、后两组, 分别分析各时期我国 SSR 变化的地域特征。图 3 是 1961~1990 年全天空条件下我国 61 个站点 SSR 变化线性趋势图。从图中可以看到, 大部分站点 (95.5%) SSR 均呈下降趋势, 其中通过 95% 显著性检验的站点有 44 个 (73.3%)。上述结果表明, 在 1961~1990 年我国经历了大范围“变暗” (SSR 下降) 过程, 这一结果与之前的一些研究结果吻合, 说明在此期间引起 SSR 下降的主导因素是大范围的, 局地因素的影响较小。

图 4 是 1990~2009 年全天空条件下我国 97 个站 SSR 逐年变化趋势图。相比图 3, 图 4 中各站点 SSR 的变化趋势差别较大。图中 12 个 (12.4%) 站点呈显著下降趋势, SSR 下降但不显著的站点有 47 个 (48.5%), 6 个站点 (6.2%) 呈显著“变亮” (SSR 上升), “变亮”但不显著的站点有 32 个 (33.0%)。SSR 变化趋势有较显著的地域特征, 长江以南的站点多表现为增长趋势, 而长江以北则多表现为下降趋势。

3.2 全天空与晴空条件下 SSR 变化特征对比

通过比较全天空 (所有数据) 与晴空 (总云量为零的数据) 条件下 SSR 的变化可以在一定程度上反映云对 SSR 的影响。本文根据中国气象局提供的云量资料, 挑选出日平均云量为 0 的数据 (约 13 万组) 分析我国晴空条件下的 SSR 变化趋势, 并与全天空的结果比较。

图 5 为 1961~2009 全天空与晴空条件下我国 SSR 变化趋势的对比图。可以看到 1961~1990 年晴空条件下 SSR 持续下降, 期间 SSR 下降了约 23 W m^{-2} , 下降速率为 $-3.9\%/10 \text{ a}$ ($7.1 \text{ W m}^{-2} (10 \text{ a})^{-1}$); 1990~2009 年呈增长趋势, 期间 SSR 增长了约 8 W m^{-2} , 增长速率为 $2.3\%/10 \text{ a}$ ($4.0 \text{ W m}^{-2} (10 \text{ a})^{-1}$)。总的来看, 晴空条件下 SSR 变化趋势与全天空情况相似 (先“变暗”后“变亮”), 表明近 50 年内云的变化不足以引起 SSR 变化趋势的改变。就不同

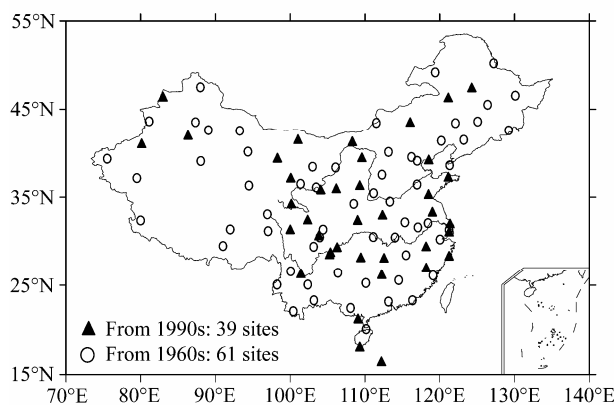


图 1 100 个总辐射观测站点分布

Fig. 1 100 surface solar radiation observation sites over China

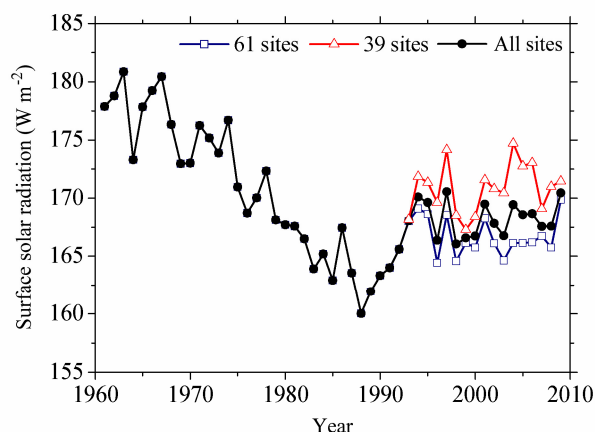


图2 1961~2009年全国平均SSR逐年变化趋势。蓝色曲线代表自上世纪60年代开始有观测资料的61个站点SSR平均结果；红色曲线代表自上世纪90年代开始有观测资料的39个站点SSR平均结果；黑色曲线代表不考虑前后站点变化

Fig. 2 Time series of annual SSR during 1961–2009. Blue line is the result from 61 sites data, red line is the result from 39 sites data, and the black line is the result from all sites data

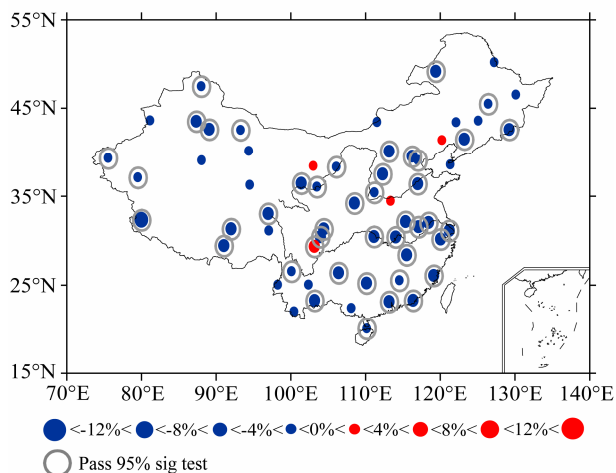


图3 1961~1990年全天空条件我国61个站点SSR变化线性趋势(单位: $(10 \text{ a})^{-1}$)

Fig. 3 SSR linear trends at 61 sites during 1961–1990 under all sky condition (units: $(10 \text{ a})^{-1}$)

阶段来看, 1961~1990年两者变化趋势一致, 全天空的下降速率略大于晴空, 线性下降趋势比晴空显著。上世纪80年代中后期晴空的地面辐射下降趋势变缓是引起1961~1990年晴空SSR下降较慢的主要原因。据此推测, 云可能是引起1980~1990年地面继续“变暗”的主要因子。1990~2009年, 晴空情况的SSR波动较大, 且全天空情况下没有出现1990~1995年SSR快速上升的情况, 但总趋势是上升的。

图6(见文后彩图)是1961~1990年我国各

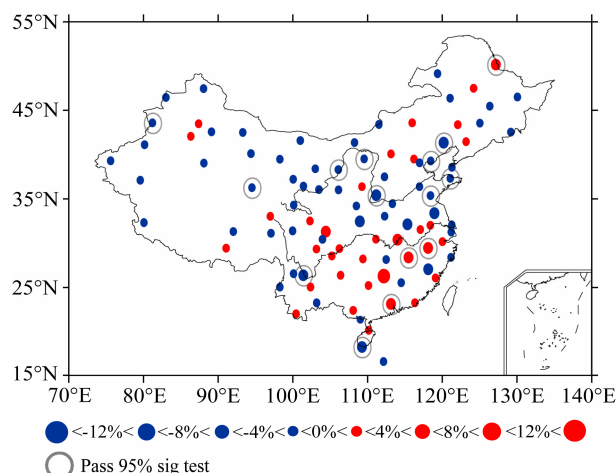


图4 1990~2009年全天空条件我国97个站点SSR线性变化趋势(单位: $(10 \text{ a})^{-1}$)

Fig. 4 SSR linear trends at 97 sites during 1990–2009 under all sky condition (units: $(10 \text{ a})^{-1}$)

站点晴空条件下SSR变化特征。图中显著下降的站点31个(51.7%), 递减但不显著的站点24个(40%), 全国地面辐射以下降为主, 总的变化趋势与全天空的结果(图3)一致。

图7(见文后彩图)为1990~2009我国各站点晴空条件下SSR变化特征。图中显著“变暗”的站点数为0, “变暗”但不显著的站点34个(35.0%), 显著“变亮”的站点有8个(8.2%), 54个站点(55.7%)“变亮”但不显著。可以看到1990~2009年晴空条件下地面“变亮”的趋势非常明显。对比同时期全天空条件下各站点SSR变化趋势(图4)可以看到, 晴空条件下“变亮”的站点数量更多, 覆盖范围更大。

在假设各个站点无云日的数据量差别不大且无云数据在各个季节分布较均匀的条件下, 根据上述结果(图6、7)可以认为, 在1961~1990年, 晴空条件的设置对地面辐射变化趋势的影响不大, 此时云量变化在地面“变暗”过程中并不起主导作用; 而在1990~2009年, 云量在一定程度上削弱了地面的“变亮”趋势。

3.2 云量变化特征及与SSR变化的联系

前面通过对比全天空和晴空条件下SSR的变化趋势分析云在不同时期对SSR的贡献, 本节通过分析云量的变化来验证和补充上述结论。

图8是1961~2009年间我国100个辐射观测站点平均云量变化趋势图。由图可以看出我国云量的变化大致可以分为两个时段, 1961~1990年呈微弱的

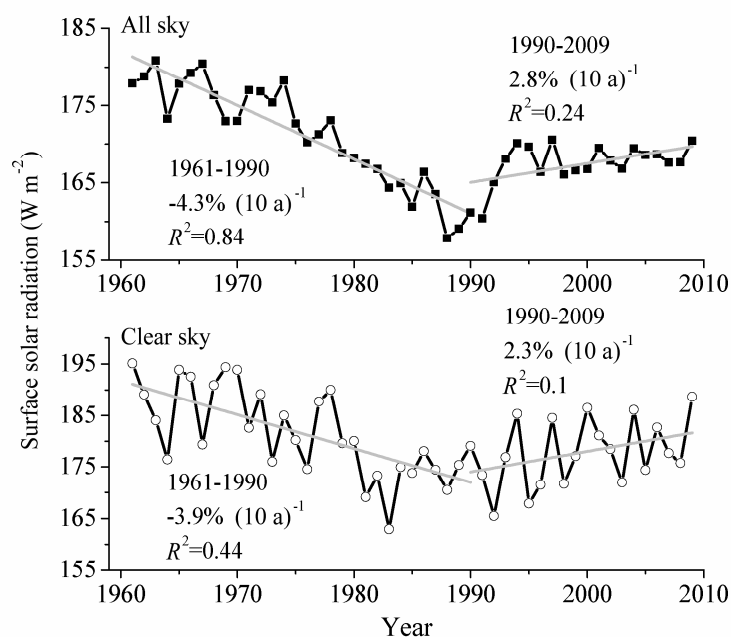


图 5 1961~2009 年全天空与晴空条件我国 SSR 变化趋势对比

Fig. 5 Comparison between time series of annual SSR in past 50 years under all sky and clear sky condition

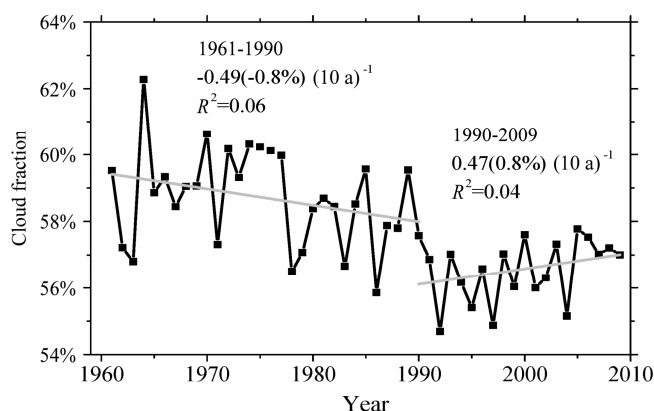


图 8 1961~2009 年我国平均云量变化趋势

Fig. 8 Time series of annual total cloud fraction during 1961–2009

下降趋势, 下降速率为 $-0.49/10 \text{ a}$ ($-0.8\% (10 \text{ a})^{-1}$), 1990~2009 年云量转为微弱的上升趋势, 上升速率为 $0.47/10 \text{ a}$ ($0.8\% (10 \text{ a})^{-1}$)。这种先降后升的特征与地面太阳辐射的变化相似(图 2), 并且发生转折的时间点也非常接近。

图 9(见文后彩图)为 1961~1990 年我国各辐射站点云量变化趋势。图中对 61 个辐射观测站点的云量变化进行分析。结果显示, 有 23 个站点(37.7%)表现为增长趋势, 其中 2 个站点通过显著性检验; 其余 38 个站点(62.3%)表现为下降趋势, 其中 8 个站点通过显著性检验。我国东北部地区的云量多为下降趋势, 而浙江、福建和广东地区的站点多为上升趋势。总体而言, 这一时期云量变

化的并不显著, 且变化幅度较小。

图 10(见文后彩图)为 1990~2009 年我国各辐射站点云量变化图。图中有 53 个站点(54.6%)呈增长趋势, 其中 30 个站点通过显著性检验, 其余 44 个站点(45.4%)表现为下降趋势, 其中 12 个站点通过显著性检验。与 1961~1990 年的结果对比(图 9), 1990~2009 年(图 10)云量为增长趋势的站点增加了 16.7%, 云量变化幅度更大, 中、高纬度地区, 云量增长趋势非常明显。

与全天空 SSR 变化趋势的结果(图 3、4)结合可以发现, 1990 年后云量显著增长的站点与地面辐射下降的站点都集中在我国中高纬度带, 长江以南的站点多表现为地面辐射上升同时云量下降, 云量与 SSR 间呈较明显的负相关, 但这种负相关在 1990 年前并不明显。这表明, 1990 年后云对 SSR 的作用较 1990 年前显著。

图 11 和图 12 分别给出 1961~1990, 1990~2009 云量与地面辐射年平均值的线性拟合函数的斜率。在 1961~1990 年(图 11), 云与 SSR 呈显著的负相关的站点有 14 个(21.5%); 而在 1990~2009 年(图 12), 有 47 个站呈显著负相关(48.0%), 表明 1990 年后云对 SSR 的影响力由不明显转为较显著。这与本文 3.2 节的结果一致。

3.4 晴空与全天空情况下 SSR 变化拐点的讨论

从前文全天与晴空条件下全国 SSR 逐年变化

图可以发现, 在 1980~1990 年, 晴空条件下 SSR 没有表现出明显的下降趋势, 而全天空条件下 SSR 继续下降, 两者区别较显著 (图 5)。这意味着晴空与全天空条件下 SSR 出现转折的时间可能有所不同。本节通过拟合不同时段 SSR 线性变化趋势, 寻找晴空与全天空条件下各自最合适的拐点。SSR 变化拐点的判断依据为两条拟合曲线的均方根误差 (Root Mean Square Error, RMSE) 之和最小, 计算公式如下:

$$\text{RMSE}_{\text{sum}} = \text{RMSE}_1 + \text{RMSE}_2 = \sqrt{\frac{\sum_i (\hat{Y}_1^i - Y_1^i)^2}{n_1 - 1}} + \sqrt{\frac{\sum_j (\hat{Y}_2^j - Y_2^j)^2}{n_2 - 1}}, \quad (1)$$

式中, 下标 1 和 2 分别代表前后两个时段, 上标 i ,

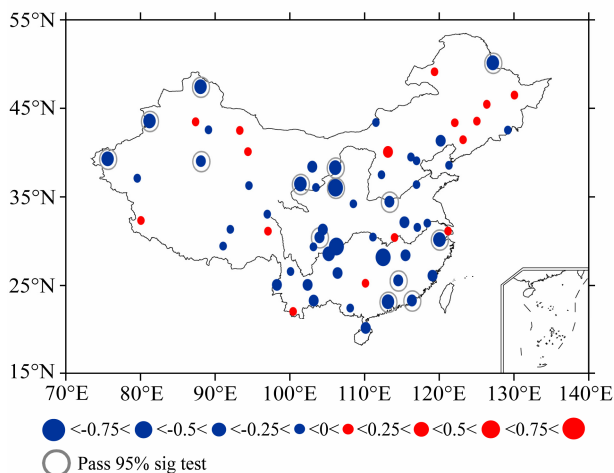


图 11 1961~1990 年云量与 SSR 线性拟合函数斜率

Fig. 11 The slopes of linear regression between total cloud fraction and SSR at 60 sites during 1961–1990

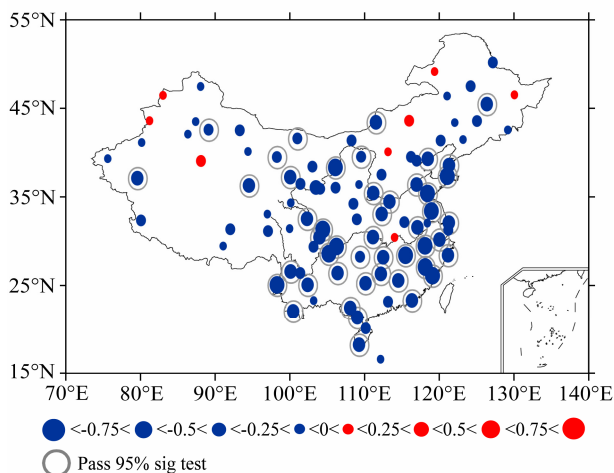


图 12 1990~2009 年云量与 SSR 线性拟合函数斜率

Fig. 12 The slopes of linear regression between total cloud fraction and SSR at 60 sites during 1990–2009

j 分别代表各时段内第 i, j 年, Y 为观测结果, $\hat{Y}$ 为线性拟合结果。结果显示, 晴空与全天空情况下, SSR 变化出现转折的时间分别在 1980 年和 1990 年前后。由此推测, 云在 1980 年后 SSR 继续下降过程中扮演了非常重要的角色。

这里同时分析了 1980~1990 年间各站点晴空与全天空条件下 SSR 的变化特征。考虑到数据量较少 (11 a), 拟合结果的统计意义相对较弱, 因此其结果仅作为参考。图 13 和图 14 分别拟合了这一时期各站点在全天空与晴空条件下 SSR 的线性变化趋势。由图可以看到全天空条件下, 大部分站点 SSR 呈下降趋势 (64.0%), 显著下降的站点占总站

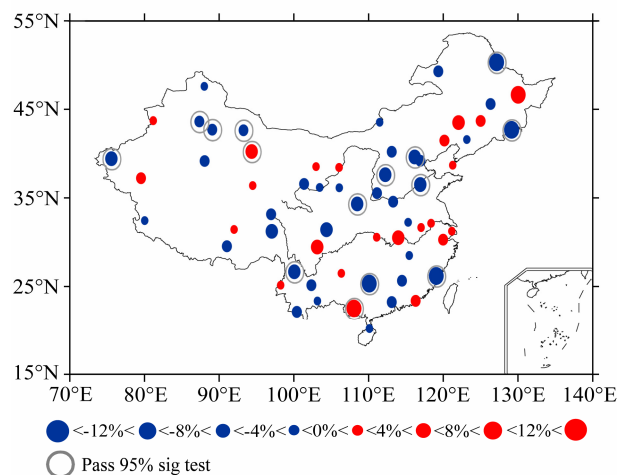


图 13 1980~1990 年全天空条件我国各站点 SSR 线性变化趋势 (单位: $(10a)^{-1}$)

Fig. 13 SSR linear trends at 61 sites during 1980–1990 under all sky condition (units: $(10a)^{-1}$)

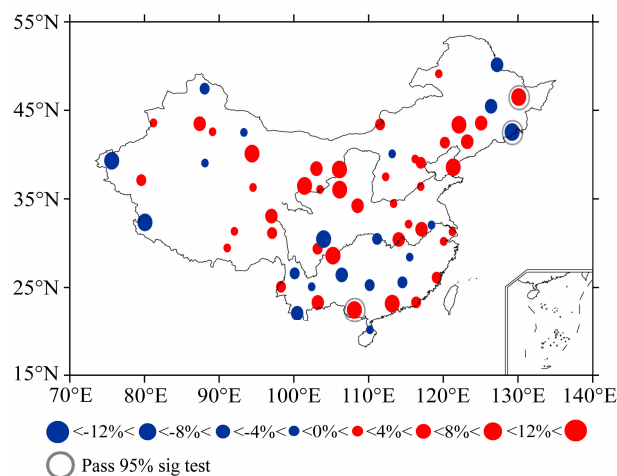


图 14 1980~1990 年晴空条件我国各站点 SSR 线性变化趋势 (单位: $(10a)^{-1}$)

Fig. 14 SSR linear trends at 97 sites during 1980–1990 under clear sky condition (units: $(10a)^{-1}$)

点数的 21.3%，呈上升趋势的站点上升速率较慢 ($<4\%/10\text{ a}$)。而在晴空条件下，大部分站点 SSR 呈上升趋势 (67.7%)，显著上升的站点占总站点数的 3.2%。对比两种结果，推测此时云在一定程度上抑制了“变亮”的趋势。

4 主要结论

本文通过分析地面太阳总辐射和日平均总云量资料分析过去近 50 年我国地面太阳辐射 (SSR) 变化特征及云在不同时期的影响，主要结论如下：

(1) 过去近 50 年，我国 SSR 表现出先下降后上升的变化趋势。1961~1990 年呈显著下降趋势，下降速率为 $-4.3\%/10\text{ a}$ ($7.87\text{ W m}^{-2} (10\text{ a})^{-1}$)；1990 年后 SSR 开始上升，上升速率为 $2.8\%/10\text{ a}$ ($2.4\text{ W m}^{-2} (10\text{ a})^{-1}$)。

(2) 对比晴空与全天空情况下 SSR 变化特征发现：1961~1990 年，晴空条件和全天空条件下的地面辐射变化趋势非常相似，变化速率也比较接近；1990~2009 年，晴空的地面辐射相对全天空的波动更大，但总的为上升趋势。

(3) 晴空条件设置对 1961~1990 年各站点 SSR 变化趋势的影响较小，各站点 SSR 变化较一致（大范围“变暗”）；1990 年后我国 SSR 不再继续“变暗”，部分站点开始逐渐“变亮”。长江以南地区呈“变亮”特征的站点比例较高，而北方地区站点大多以“变暗”趋势为主，但“变暗”的速率明显较前一时段（1961~1990）放缓。

(4) 我国云量总体变化大致可以分为两个时段：1961~1990 年我国云量总体呈下降趋势，下降速率为 $-0.49/10\text{ a}$ ($-0.8\% (10\text{ a})^{-1}$)。20 世纪 90 年代开始云量呈上升趋势，上升速率为 $0.47/10\text{ a}$ ($0.8\% (10\text{ a})^{-1}$)。就各站点的变化而言，1961~1990 年云量变化的显著性不强，且幅度较小；1990~2009 年云量变化呈明显南北差异，我国北方地区云量增长的趋势非常明显，而南方地区主要表现为下降趋势。

(5) 对比全天空条件下 SSR 与云量的变化特征，发现 1961~1990 年间，地面辐射受云的影响不明显，而从 20 世纪 90 年代开始云与地面辐射有很好的对应关系。结合晴空与全天空 SSR 变化特征对比的结果可以认为，在“变暗”时期（1961~1990 年），云对 SSR 年代际变化的贡献不明显，而在“变亮”时期（1990~2009 年）云成为众多影响

因子中较为突出的一项，起到减少 SSR 的作用。

(6) 晴空与全天空条件下 SSR 出现拐点的时间分别在 1980 年和 1990 年前后，这表明云可能成为 1980~1990 年期间 SSR 继续下降的主要因素。下一步工作，将会着重讨论 1980 年后云量的变化特征及与 SSR 之间的联系。

参考文献 (References)

- Haverkort A J, Uenk D, Veroude H, et al. 1991. Relationships between ground cover, intercepted solar radiation, leaf area index and infrared reflectance of potato crops [J]. *Potato Research*, 34: 113–121.
- IPCC. 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis* [M]. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. New York: Cambridge University Press, 106 pp.
- Kadur G, Swapan B, Sunita K, et al. 2007. Growth enhancement of soybean (glycine max) upon exclusion of UV-B- and UV-B/A components of solar radiation: Characterization of photosynthetic parameters in leaves [J]. *Photosynthesis Research*, 94: 299–306.
- Ledley T S, Chu S P. 1995. The initiation of ice sheet growth, milankovitch solar radiation variations, and the 100 ky ice age cycle [J]. *Climate Dyn.*, 11: 439–445.
- Li W G, Hou M T, Xin J W. 2011. Low-cloud and sunshine duration in the low-latitude belt of South China for the period 1961–2005 [J]. *Theor. Appl. Climatol.*, 104: 473–478.
- Li W P, Sun S F, Wang B, et al. 2009. Numerical simulation of sensitivities of snow melting to spectral composition of the incoming solar radiation [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 403–412.
- 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化特征分析 [J]. *气候与环境研究*, 5: 36–44.
- 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: 36–44.
- Ramanathan V, Vogelmann A M. 1997. Greenhouse effect, atmospheric solar absorption and the earth's radiation budget: From the arrhenius-langley era to the 1990s [J]. *Ambio*, 26: 38–46.
- 石广玉. 2007. *大气辐射学* [M]. 北京: 科学出版社, 402pp.
- Shi Guangyu. 2007. *Atmospheric Radiation (in Chinese)* [M]. Beijing: Science Press, 402pp.
- 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. Clim.*, 47: 1006–1016, doi:10.1175/2007jamc1493.1.
- Stanhill G, Cohen S. 2001. 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]. *Agr. Forest. Meteorol.*, 107: 255–278.
- Streets D G, Jiang K J, Hu X L, et al. 2001. Recent reductions in China's greenhouse gas emissions [J]. *Science*, 294: 1835–1837, doi:10.1126/science.1065226.
- 孙敬松, 周广胜, 韩广轩. 2010. 太阳辐射对玉米农田土壤呼吸作用的影响

- 影响 [J]. 生态学报, 30: 5925–5932. Sun Jingsong, Zhou Guangsheng, Han Guangxuan. 2010. Effects of solar radiation on soil respiration of a maize ecosystem [J]. Acta Ecologica Sinica (in Chinese), 30: 5925–5932.
- Tang W J, Yang K, Qin J, et al. 2011. Solar radiation trend across China in recent decades: A revisit with quality-controlled data [J]. Atmos. Chem. Phys., 11: 393–406.
- Wang C H, Zhang Z, Tian W S. 2011. Factors affecting the surface radiation trends over China between 1960 and 2000 [J]. Atmos. Environ., 45: 2379–2385.
- 汪宏七, 赵高祥. 1994. 云和辐射——(I) 云气候学和云的辐射作用 [J]. 大气科学, 18(增刊): 910–932. Wang Hongqi, Zhao Gaoxiang. 1994. Cloud and radiation—I: Cloud climatology and radiative effects of clouds [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 18 (Suppl.): 910–932.
- Wild M. 2009. Global dimming and brightening: A review [J]. J. Geophys.

- Res., 114 (D10), doi:10.1029/2008jd011470.
- 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, doi:10.1126/science.1103215.
- 吴亚平. 2006. 南海近岸海域浮游植物初级生产力与阳光辐射关系的研究 [D]. 汕头大学硕士学位论文. Wu Yaping. 2006. Studies on the relationship between solar radiation and the primary production of phytoplankton assemblages in the coastal water of South China Sea [D]. M. S. thesis (in Chinese), Shantou University.
- 赵高祥, 汪宏七. 1994. 云和辐射——(II) 环流模式中的云和云辐射参数化 [J]. 大气科学, 18 (增刊): 933–958. Zhao Gaoxiang, Wang Hongqi. 1994. Cloud and radiation—II: Cloud and cloud radiation parameterizations in general circulation models [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 18 (Suppl.): 933–958.

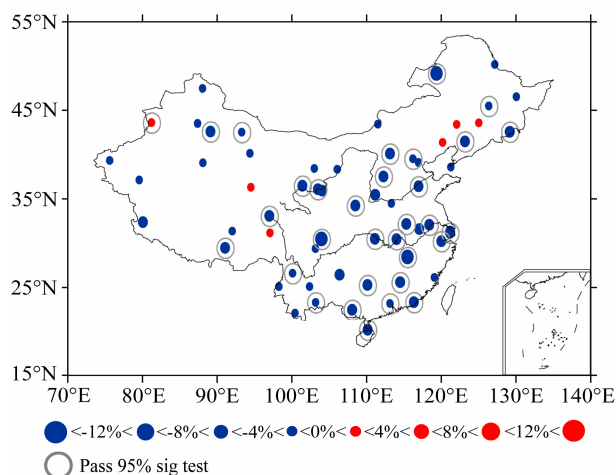


图 6 1961~1990 年晴空条件我国 60 个站点 SSR 线性变化趋势(单位: $(10 \text{ a})^{-1}$)

Fig. 6 SSR linear trends at 60 sites during 1961–1990 under clear sky condition (units: $(10 \text{ a})^{-1}$)

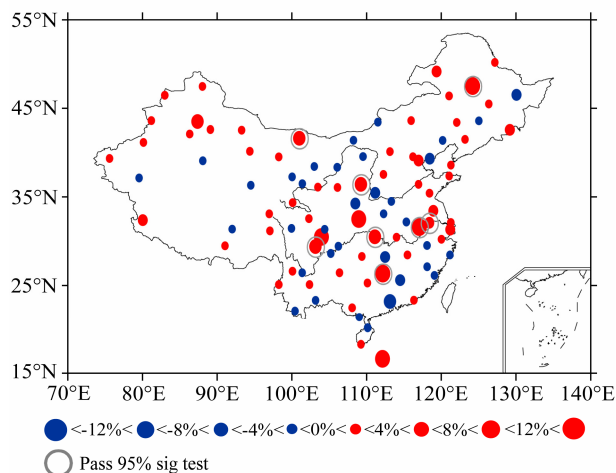


图 7 1990~2009 年晴空条件我国 97 个站点 SSR 线性变化趋势(单位: $(10 \text{ a})^{-1}$)

Fig. 7 SSR linear trends at 97 sites during 1990–2009 under clear sky condition (units: $(10 \text{ a})^{-1}$)

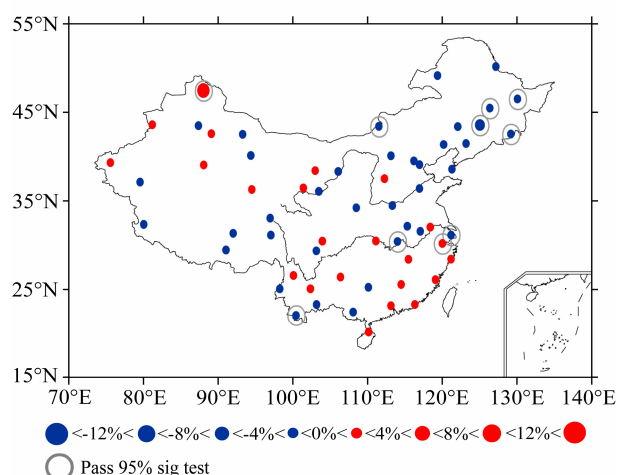


图 9 1961~1990 年我国 60 个站点云量线性变化趋势(单位: $(10 \text{ a})^{-1}$)

Fig. 9 Total cloud fraction linear trend at 60 sites during 1961–1990 (units: $(10 \text{ a})^{-1}$)

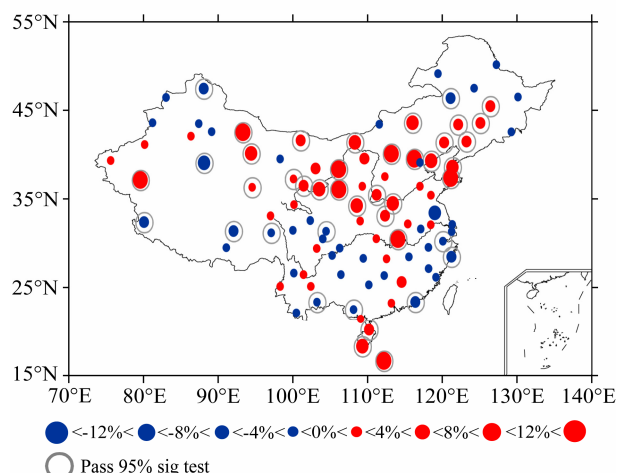


图 10 1990~2009 年我国 97 个站点云量线性变化趋势(单位: $(10 \text{ a})^{-1}$)

Fig. 10 Total cloud fraction linear trend at 97 sites during 1990–2009 (units: $(10 \text{ a})^{-1}$)