

许建明, 何金海, 阎凤霞. 2010. 1961~2007年西北地区地面太阳辐射长期变化特征研究 [J]. 气候与环境研究, 15 (1): 89-96. Xu Jianming, He Jinhai, Yan Fengxia. 2010. Research on secular variation of solar radiation over Northwest China from 1961 to 2007 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 15 (1): 89-96.

1961~2007年西北地区地面太阳辐射长期变化特征研究

许建明¹ 何金海² 阎凤霞³

1 上海市气象局, 上海 200135

2 南京信息工程大学大气科学学院, 南京 210044

3 民航华东空管局气象中心, 上海 200335

摘要 利用西北地区16个甲级辐射站1961~2007年的总辐射资料, 和1961~1992年的直接辐射、散射辐射资料, 研究该地区地面太阳辐射的长期变化特征。发现, 从1961~2007年总辐射的长期变化经历了“维持”、“变暗”、“变亮”和“回落”4个阶段。其中从70年代至80年代中期总辐射持续“变暗”, 之后开始转折“变亮”。“变亮”过程持续到90年代中期基本停止, 之后振荡“回落”。各个季节总辐射的长期变化都表现出“变暗”和“变亮”这两个明显特征, 其中冬季的“变暗”过程持续时间最长, “变亮”过程持续时间最短。从1961~1992年, 直接辐射的变化过程为先下降后回升, 散射辐射则是先上升后下降, 两者的变化趋势和相对幅度决定了总辐射在不同阶段的变化趋势。60年代至80年代中期是西北地区直接辐射下降的主要时期, 直接辐射和日照时数的下降过程具有地域性和季节性差异, 表现为省会城市和冬季的下降百分率最显著。这种特征表明气溶胶排放的增加或许是影响该地区直接辐射和日照时数减小的因子之一。

关键词 太阳辐射 变暗 变亮 气溶胶

文章编号 1006-9585 (2010) 01-0089-08 **中图分类号** P468 **文献标识码** A

Research on Secular Variation of Solar Radiation over Northwest China from 1961 to 2007

XU Jianming¹, HE Jinhai², and YAN Fengxia³

1 Shanghai Meteorological Bureau, Shanghai 200135

2 Department of Atmospheric Science, Nanjing University of Information Science and Technique, Nanjing 210044

3 Meteorological Center of Air Traffic Management Bureau of East China, Shanghai 200135

Abstract The surface radiation data from China Meteorological Administration (CMA) including the global radiation from 1961 to 2007, the direct and diffuse radiation from 1961 to 1992 at 16 first-degree stations were used to analyze the long term variation of the surface solar radiation over Northwest China. The results showed that the long term variation of global radiation was characterized as four phases: “retaining”, “dimming”, “brightening”, and “declining”. The “dimming” phase proceeded from the 1970s to the mid 1980s, then “brightening” took place and

收稿日期 2009-01-04 收到, 2009-10-27 收到修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展计划项目 2006CB403705 和上海市基础研究重点项目 08JC1418301

作者简介 许建明, 男, 1978年出生, 博士, 高级工程师, 主要从事城市大气环境与城市气候研究。E-mail: xjmdt@sina.com

lasted to the mid 1990s. Afterward, the global radiation began fluctuating and “declining”. Furthermore, both “dimming” and “brightening” were obvious during all seasons. While the temporal spans of the above two phases were the longest and shortest respectively in winter than in other seasons. From 1961 to 1992, the direct radiation varied from “dimming” to “brightening” in general, while the diffuse radiation varied from “brightening” to “dimming”. The variations of the global radiation in different phases were closely related to the corresponding trend and magnitude of the direct and diffuse radiation. The decreasing percentages of direct radiation and sunshine duration from 1961 to 1984 were distinct in different cities and different seasons. Direct radiation and sunshine duration decreased most significantly in the provincial capitals during winter months, which indicated that the secular variation of solar radiation over Northwest China is perhaps related to anthropogenic emission of aerosol.

Key words solar radiation, dimming, brightening, aerosol

1 引言

太阳辐射是地球大气系统最重要的能量来源,也是产生大气运动的主要动力,它从根本上决定着地球大气的能量平衡过程。在地球大气上界接受的太阳辐射主要由地理纬度决定,此外还受到太阳常数以及日地平均距离的影响,其长期变化非常小 (Che et al., 2005)。相比之下,到达地球表面太阳辐射的变化很大,这是因为大气对太阳辐射的吸收和散射作用在不同时期和不同地区都存在差异,它与大气成分、云量、水汽含量以及大气悬浮物含量的变化相关。因此研究到达地面的太阳辐射的中长期变化,不但具有直接的气候意义 (Shi et al., 2008b),还有助于了解区域大气成分的变化,进而探讨导致上述变化的自然和人为原因。

过去的研究表明,自国际地球物理年 (1957 年) 建立地面太阳辐射观测网以来到 20 世纪 80 年代末,全球地面太阳辐射普遍呈下降趋势。对 GEBA (Global Energy Balance Archive) 1500 个辐射站资料的分析结果表明 (Gilgen et al., 1998), 亚洲、非洲、欧洲和北美的大部分地区都出现地面太阳总辐射减少的趋势,不同地区的减少幅度有所差异,平均为 $2\% (10 \text{ a})^{-1}$ 。但是近几十年地球表面已经从过去的“变暗 (dimming)”转变为“变亮 (brightening)”。从 1980 年代末到 1990 年代初,全球许多地区的地面太阳辐射停止了自 1950 年代以来的下降趋势开始增加,这种转折与云量和大气透过率的变化不相符,并可能对地面气候、水循环以及生态系统产生重要影响 (Wild et al., 2005)。1960~1990 年中国地面太

阳总辐射和直接辐射呈下降趋势,可能与人为气溶胶的排放有关 (李晓文等, 1998)。但是从 1990 年开始,中国地区的地面太阳总辐射同样发生转折开始回升 (Che et al., 2005)。最近 Shi et al. (2008a) 对中国过去 40 年的辐射资料进行了严格的质量控制,得到一套高质量数据集,研究结果同样证实了太阳辐射的“变暗”和“变亮”过程。

中国不同地区太阳辐射的长期变化存在明显差异,可能与各地的纬度、云量和大气环境质量相关 (陈志华等, 2005; Zhang et al., 2005; 韩虹等, 2008)。相关研究已经揭示了中国地区太阳辐射变化过程的“变暗”和“变亮”特征,但是由于分析的资料序列截止到 2003 年,因此对于“变亮”过程还缺乏更多的了解。本文利用 1961~2007 年的太阳辐射资料研究我国西北地区 (新疆、青海、甘肃、宁夏、陕西) 地面太阳辐射的长期变化,发现总辐射经历了“维持”、“变暗”、“变亮”和“回落”4 个阶段。其中从 70~80 年代中期总辐射持续“变暗”,之后开始转折“变亮”,但是“变亮”过程持续到了 90 年代中期基本停止,之后振荡“回落”。此外本文结合日照时数资料,分析直接辐射的下降特征,从地域差异和季节差异的角度出发,通过计算不同城市 and 不同季节直接辐射和日照时数的下降百分率,发现省会城市和冬季的下降百分率最为明显。这种现象表明气溶胶排放的增加或许是影响该地区直接辐射和日照时数减小的一个可能原因。

2 资料和方法

我国从 20 世纪 50 年代末开始观测地面太阳辐射。1990 年之前,西北地区共有 16 个甲级辐射

观测站,观测项目包括总辐射、水平面直接辐射和散射辐射。1990~1992年,中国气象局实施太阳辐射观测网调整,将原来16个甲级站中的4个(乌鲁木齐、格尔木、兰州、喀什)设为一级站,观测总辐射、直接辐射、散射辐射、反射辐射和净辐射,其余12个(若羌、敦煌、和田、玉树、西宁、吐鲁番、伊宁、银川、阿勒泰、民勤、西安、哈密)设为二级站,并增加了1个二级站(塔城),观测总辐射和净辐射。此外还增设了8个三级站(阿克苏、刚察、果洛、酒泉、焉耆、延安、安康、固原),仅观测总辐射。目前西北地区共25个辐射观测站(图1),本文采用的是16个甲级站的逐日资料,其中总辐射序列从1961~2007年、直接辐射和散射辐射序列从1961~1992年,保证了研究资料在站点数目、时间长度和要素个数上的一致性。此外还利用了16个站逐日的日照时数资料。所有资料均来自中国气象局资料室。

本文采用的方法主要包括距平计算、滑动相关和线性回归模型。通过计算逐年距平和滑动相关分析其长期变化趋势和不同阶段的变化特征；利用线性回归计算不同城市 and 不同季节太阳辐射和日照时数的下降百分率。

3 总辐射的长期变化特征

1961~2007 年,西北地区地面太阳总辐射的年平均值为 $184.65 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 标准差为 $6.1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,

1963年最大,为 $195.73 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,1987年最小,为 $174.97 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。图2为总辐射的逐年距平变化和5年滑动平均。由图可见,20世纪60年代和70年代西北地区总辐射多为正距平。80年代以后,除1993、1994、1995、1997和2005年呈现正距平,其余年份都为负距平,低值主要集中在80年代。从1961~2007年,西北地面太阳总辐射的长期变化经历了“维持”、“变暗”、“变亮”和“回落”4个阶段:20世纪60年代是“维持”阶段,总辐射基本不变;70年代至80年代中期是“变暗”阶段,总辐射持续下降,平均每年下降幅度为 $1.1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (99%信度),之后开始转折回升;从80年代中期至90年代中期是“变亮”阶段,总辐射持续回升,到1993、1994、1995年已高于47年平均水平;但是90年代中期以后“变亮”过程基本停止,进入“回落”阶段。和第二阶段的“变暗”过程相比,“回落”阶段总辐射的下降通道并没有完全建立,主要呈现振荡回落的特征,其中在1997年异常偏高,2000和2005年和平均水平相当,其余年份都偏低。从目前的资料序列还难以判断其未来的变化趋势。

进一步计算西北地区各个季节总辐射的逐年距平变化和 5 年滑动平均 (图略)。发现和前文四个阶段相比, 各个季节总辐射的长期变化都表现出“变暗”和“变亮”这两个明显特征。但是不同季节在从“暗”到“亮”的转折发生时间, 以及“变暗”和“变亮”的持续时间上有所差异。春季总辐射的转折发生在 80 年代中期, 夏季和秋



图 1 西北地区辐射观测站点

Fig. 1 Distribution of the solar radiation stations over Northwest China

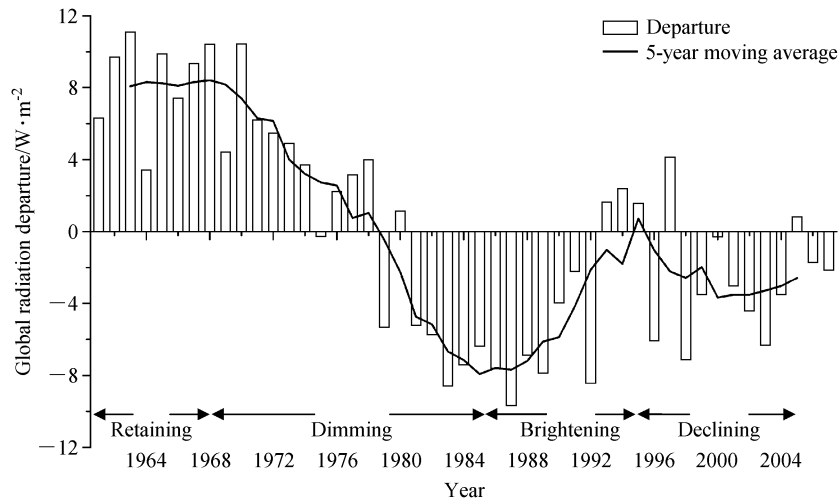


图2 1961~2007年西北地区总辐射的逐年距平变化和5年滑动平均

Fig. 2 Annual departure of global radiation and its 5-year moving average over Northwest China from 1961 to 2007

季都发生在80年代初期,而冬季发生在90年代末期。相比之下,1961~2007年冬季总辐射的“变暗”过程持续时间最长,约25年,“变亮”过程最短,约5年;其他3个季节的“变暗”过程持续约15年,“变亮”过程约10年。

4 直接辐射和散射辐射的长期变化特征

1961~1992年,西北地面太阳直接辐射年平均值为 $104.49 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,标准差为 $6.99 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,1963年最大,为 $123.12 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,1992年最小,为 $91.53 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。散射辐射的平均值为 $81.04 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,标准差为 $3.96 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,1977年最大,为 $88.7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,1990年最小,为 $72.09 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。图3为1961~1992年直接辐射和散射辐射的逐年距平变化和5年滑动平均。由图可见,直接辐射的变化过程为先“变暗”后“变亮”。从60年代至80年代中期,直接辐射持续下降,平均每年下降幅度为 $0.718 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (99%信度),80年代中期以后直接辐射转折回升,一直持续到90年代初,基本恢复到过去30年的平均水平。散射辐射的变化过程则是先“变亮”后“变暗”。60年代散射辐射基本保持上升趋势,70年代至90年代初整体下降,其中在70年代中期和80年代初期经历了两次短暂调整,1977~1981年、1984~1990年是散射辐射两个非常明显的下降通道。

总辐射是直接辐射和散射辐射之和,其长期变化取决于直接辐射和散射辐射的相对变化趋势和变化幅度。20世纪60年代,西北地区直接辐射下降,散射辐射上升,两者变化趋势相反,但由于变化幅度相当,因此总辐射“维持”;70年代至80年代中期,直接辐射和散射辐射都呈下降趋势,因此总辐射“变暗”;80年代中期至90年代初,直接辐射回升,散射辐射下降,两者位相反,但是由于直接辐射的回升幅度明显大于散射辐射的下降幅度,因此总辐射“变亮”。可以看出,在总辐射的“维持”阶段和“变亮”阶段,直接辐射和散射辐射变化趋势相反,前一阶段两者效果相当,而后一阶段直接辐射的作用超过散射辐射。在“变暗”阶段直接辐射和散射辐射的趋势一致,共同导致了总辐射的下降。遗憾的是由于1992年以后二级站和三级站不再观测直接辐射和散射辐射,目前还不了解在总辐射的“回落”阶段直接辐射和散射辐射的变化过程。

5 直接辐射和日照时数的下降特征

Kaiser and Qian (2002)发现1954~1998年中国地区日照时数显著下降,其中东部和南部的站点尤为明显,而同期地面太阳辐射也呈现了类似的下降特征和分布形态(Che et al., 2005; Shi et al., 2008a; 申彦波等, 2008)。上述研究认为人为气溶胶排放的增加是导致日照时数和地面太

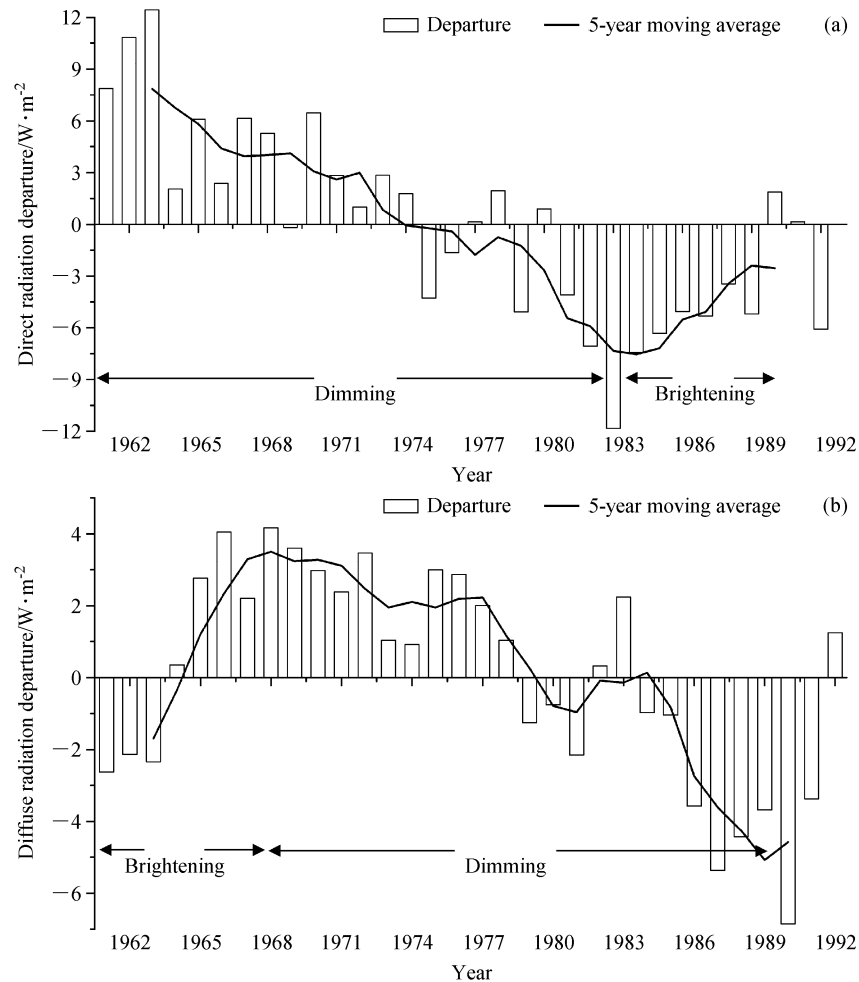


图3 1961~1992 年西北地区 (a) 直接辐射、(b) 散射辐射逐年距平变化和 5 年滑动平均

Fig. 3 Annual departure of (a) direct radiation and (b) diffuse radiation and its 5-year moving average over Northwest China from 1961 to 1992

阳辐射下降的一个重要因素。Shi et al. (2008a) 同时指出, 这种猜测还需要更多的研究证据。

前文的计算表明, 1961~1984 年是西北地区地面太阳直接辐射下降的主要阶段, 平均每年的下降幅度为 $0.72 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。期间该地区的日照时数也呈下降趋势 (99% 的信度检验), 两者的相关系数达到 0.8。本节重点研究 1961~1984 年西北地区直接辐射和日照时数的下降特征, 从空间分布和季节变化的角度出发, 通过计算不同城市 and 不同季节直接辐射、日照时数的下降百分率, 揭示其下降过程的地域性差异和季节性差异, 研究其与人类活动和气溶胶排放存在的可能联系。

5.1 不同城市直接辐射和日照时数的下降特征

由于地理纬度和气候条件不同, 对比不同城

市太阳辐射和日照时数的长期下降过程时需要考虑背景的差异, 用 $P = \alpha / A \times 100\% \times 10$ 表示直接辐射或日照时数 10 年变化百分率, 其中 α 为日照时数或直接辐射平均每年的变化幅度, 用线性回归计算得到, A 为某个城市日照时数或直接辐射 1961~1984 年的年平均值。由图 4 可见, 从 1961~1984 年西北地区 16 个城市的直接辐射全部呈下降趋势, 其中 11 个城市通过了 99% 的信度检验。乌鲁木齐的下降百分率最大, 为 $-11.4\% (10 \text{ a})^{-1}$, 其次为西宁、民勤、西安、兰州和银川, 下降百分率都超过 $-9\% (10 \text{ a})^{-1}$ 。可以看出除民勤外, 西北地区直接辐射下降最明显的都是省会城市。图 5 为不同城市日照时数的变化百分率。由图可见, 西北地区 14 个城市的日照时数呈下降趋势,

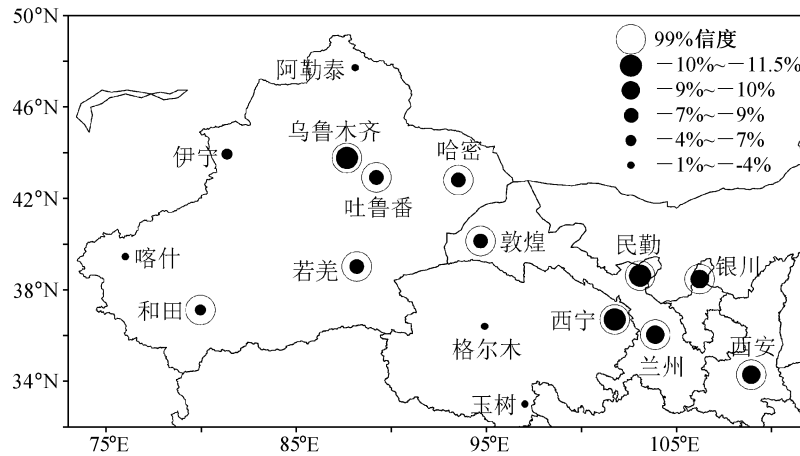


图 4 西北地区不同城市 1961~1984 年直接辐射的变化趋势, 单位: $(10 \text{ a})^{-1}$

Fig. 4 Trends in annual direct radiation for different cities in Northwest China from 1961 to 1984, units: $(10 \text{ a})^{-1}$

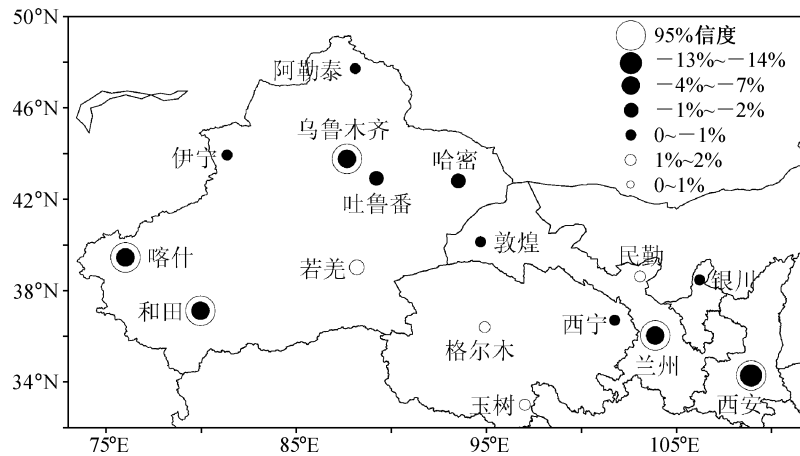


图 5 西北地区不同城市 1961~1984 年日照时数的变化趋势, 单位: $(10 \text{ a})^{-1}$

Fig. 5 Trends in annual sunshine duration for different cities in Northwest China from 1961 to 1984, units: $(10 \text{ a})^{-1}$

其中 5 个城市 (西安、和田、兰州、乌鲁木齐、喀什) 通过了 95% 的信度检验。格尔木、玉树、民勤、若羌 4 个城市的日照呈上升趋势, 但是都没有通过信度检验。西安日照时数的下降百分率最大, 达到 $-13.4\% (10 \text{ a})^{-1}$, 其次为和田、兰州、乌鲁木齐和喀什。省会城市中, 西安、兰州、乌鲁木齐的下降百分率非常显著, 明显高于其他城市, 和直接辐射的变化特征一致, 而西宁和银川基本维持不变, 下降百分率低于 $-1\% (10 \text{ a})^{-1}$, 和直接辐射的特征有所差异。1961~1984 年西北地区直接辐射和日照时数都整体下降, 日照时数的下降趋势和幅度不如直接辐射显著。相比之下, 省会城市直接辐射和日照时数的下降百分率更加明显。

5.2 不同季节直接辐射的下降特征对比

本节计算从 1961~1984 年西北地区不同月份直接辐射和日照时数的下降特征。类似于 3.1, 用 $P' = \alpha' / A' \times 100\% \times 10$ 表示 10 年变化百分率, 其中 α' 为 1961~1984 年某个月直接辐射和日照时数的年平均下降幅度, 用线性回归计算得到, A' 为某个月日照时数或直接辐射 1961~1984 年的平均值。由表 1 可见从 1961~1984 年, 各个月直接辐射都呈下降趋势, 除 4 月以外全部通过了 90% 的信度检验。1 月的下降百分率最大, 为 $-15.3\% (10 \text{ a})^{-1}$, 其次为 2 月和 12 月, 均超过 $-10\% (10 \text{ a})^{-1}$, 明显高于其他月份。就季节而言, 直接辐射在冬季的下降最为明显。日照时数的变化呈现出相似的特征, 除 4 月和 10 月外, 其

表 1 1961~1984 年不同月份直接辐射和日照时数的下降百分率

Table 1 Trends of monthly direct radiation and sunshine duration in Northwest China from 1961 to 1984 $(10\text{ a})^{-1}$

月份	直接辐射下降百分率	日照时数下降百分率
1 月	-15.43%***	-5.32%*
2 月	-12.17%***	-3.50%
3 月	-9.35%**	-1.50%
4 月	-3.56%	0.08%
5 月	-5.13%**	-0.69%
6 月	-8.17%***	-3.54%*
7 月	-3.67%*	-1.72%
8 月	-6.42%***	-1.77%
9 月	-4.89%**	-1.31%
10 月	-4.52%*	0.36%
11 月	-5.51%*	-0.86%
12 月	-11.88%**	-5.40%*

*** 表示通过 99% 信度, ** 表示通过 95% 信度, * 表示通过 90% 信度。

他月份的日照时数同样也呈下降趋势，但是趋势和幅度没有直接辐射显著。其中 1 月、6 月和 12 月通过了 90% 的信度检验。12 月和 1 月的下降百分率最大，超过 -5% $(10\text{ a})^{-1}$ ，其次为 6 月和 2 月，超过 -3% $(10\text{ a})^{-1}$ ，远高于其他月份的下降百分率。和直接辐射的特征相似，日照时数在冬季下降百分率更加明显。

1961~1984 年西北地区直接辐射和日照时数的下降呈现明显的地域性特征和季节性特征，主要表现为省会城市和冬季的下降百分率最显著，高于其他城市和季节。省会城市人口、经济集中，存在大量的人为排放，乌鲁木齐、兰州、西安一直是我国主要的煤烟型污染城市。冬季是采暖季节，通过燃烧燃油、煤炭和木材取暖，是气溶胶排放最严重的季节。气溶胶的增加会增强对入射太阳辐射的后向散射和吸收作用，从而有效减小日照时数和地面直接辐射。因此气溶胶排放的增加可能是影响西北地区 60 年代至 80 年代中期直接辐射和日照时数减小的原因之一，但是由于缺乏长期的气溶胶观测资料，上述结果还需要进一步的研究论证。

6 结论和讨论

(1) 从 1961~2007 年，西北地区地面太阳总

辐射的长期变化经历了“维持”、“变暗”、“变亮”和“回落”4 个阶段。其中从 70 年代至 80 年代中期总辐射持续“变暗”，之后开始转折“变亮”，但是“变亮”过程持续到了 90 年代中期基本停止，之后振荡“回落”。

(2) 不同季节的总辐射都出现了明显的“变暗”和“变亮”过程，冬季的“变暗”过程持续时间最长，约 25 年，“变亮”过程最短，约 5 年；其他 3 个季节“变暗”过程持续约 15 年，“变亮”过程约 10 年。

(3) 1961~1992 年，直接辐射的变化过程为先下降后回升。散射辐射则是先上升后下降。两者的变化趋势和相对幅度决定了总辐射的变化过程。

(4) 60 年代至 80 年代中期是西北地区地面直接辐射下降的主要时期，期间直接辐射和日照时数的下降过程具有地域性和季节性特征，表现为省会城市和冬季的下降百分率最为明显。这种特征表明气溶胶排放的增加可能是影响该地区直接辐射和日照时数减小的原因之一，但是还需要进一步的研究论证。

和其他文献的结果相似，西北地区地面太阳辐射在 80 年代中期发生了从“变暗”到“变亮”的转折，本文的研究发现这种“变亮”过程持续到 90 年代中期基本停止。“变暗”过程可能与人类活动特别是人为气溶胶的排放有关，但是对于 90 年代之后的“变亮”过程目前还缺乏直接的证据。尽管 IPCC AR4 认为 90 年代之后全球大气透明度的增加对于地面太阳辐射的增加有重要贡献，但是这种贡献究竟多大，是否能够完全解释过去 50 年全球和区域地面太阳辐射所发生的变化，目前尚无量化、确切的结论，需要进一步深入研究。

参考文献 (References)

- Che H, Shi G, Zhang X, et al. 2005. Analysis of 40 years of solar radiation data from China, 1961 - 2000 [J]. Geophys. Res. Lett, 32, L06803, doi: 10.1029/2004GL022322.
- 陈志华, 石广玉, 车慧正. 2005. 近 40 a 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 Zhenhui. 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.

- Gilgen H, Wild M, Ohmura A. 1998. Means and trends of short-wave incoming radiation at the surface estimated from global energy balance archive data [J]. *J. Climate*, 11: 2042–2061.
- 韩虹, 任国玉, 王文, 等. 2008. 黄土高原地区太阳辐射时空演变特征 [J]. *气候与环境研究*, 13 (1): 61–66. Han Hong, Ren Guoyu, Wang Wen, et al. 2008. Temporal and spatial variation characteristics of total solar radiation over the Loess Plateau region [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 13 (1): 61–66.
- 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.
- Kaiser D P, Qian Y. 2002. Decreasing trends in sunshine duration over China for 1954–1998; Indication of increased haze pollution [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 29 (21), 2042, doi: 10.1029/2002GL016057.
- 申彦波, 赵宗慈, 石广玉. 2008. 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 [J]. *地球科学进展*, 23 (9): 618–329. Shen Yanbo, Zhao Zongci, Shi Guangyu. 2008. The progress in variation of surface solar radiation, factors and probable climatic effects [J]. *Advances in Earth Science (in Chinese)*, 23 (9): 618–329.
- Shi G, Chen Z, Wang B, et al. 2008a. Data quality assessment and the long-term trend of ground solar radiation in China [J]. *J. Appl. Meteor.*, 47 (4): 1006–1016.
- Shi X, Xu X, Xie L. 2008b. Characteristics of climate change in the “significant impact zone” affected by aerosols over eastern China in warm seasons [J]. *Science in China (Ser. D): Earth Science*, 51 (5): 730–739.
- 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.
- Zhang Y, Qin B, Chen W. 2005. Analysis of 40 year records of solar radiation data in Shanghai, Nanjing and Hangzhou in Eastern China [J]. *Theor. Appl. Climatol.*, 78: 217–227.