

郑小波, 王学锋, 罗宇翔, 等. 2011. 1961~2005年云贵高原太阳辐射变化特征及其影响因子 [J]. 气候与环境研究, 16 (5): 657-664. Zheng Xiaobo, Wang Xuefeng, Luo Yuxiang, et al. 2011. Variation characteristics of global radiation and the associated climatic factors over Yunnan-Guizhou Plateau in the southwestern part of China for 1961-2005 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 16 (5): 657-664.

1961~2005年云贵高原太阳辐射变化特征及其影响因子

郑小波^{1,2,3} 王学锋⁴ 罗宇翔^{1,2} 陈娟^{1,2}

1 贵州省山地气候与资源重点实验室, 贵阳 550002

2 贵州省山地环境气候研究所, 贵阳 550002

3 中国气象局成都高原气象研究所, 成都 610072

4 云南省气候中心, 昆明 650034

摘要 利用云贵高原1961~2005年9个日射站辐射和气候观测资料以及能见度观测资料等, 采用数理统计方法, 研究了该区域到达地表太阳总辐射量(以下简称总辐射)变化特征及其影响因子。结果表明: 该区年总辐射的空间分布特点是西部高于东部, 丽江站最高($6207 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$), 遵义站最低($3340 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)。1961~2005年间, 该区6个站的年总辐射呈年际或年代际变化, 但无线性变化趋势($P > 0.1$), 其余3个站(蒙自、贵阳、遵义)的年总辐射在1960年代至1980年代间呈显著下降趋势($P < 0.001$), 其后略有增加(蒙自)或增加明显(贵阳)。蒙自总辐射下降的主要原因是能见度降低, 遵义下降则与总云量增加和能见度较低有关, 贵阳总辐射下降则与总云量增加有关, 总云量增加导致日照时数减少。总体而言, 1961~2005年云贵高原总辐射的年际变化或年代际变化与总云量及日照时数有关, 城市站(昆明、贵阳)日照时数随能见度降低而显著减少。

关键词 云贵高原 地表辐射变化 日照 云量 能见度

文章编号 1006-9585(2011)05-0657-08 **中图分类号** P422.1 **文献标识码** A

Variation Characteristics of Global Radiation and the Associated Climatic Factors over Yunnan-Guizhou Plateau in the Southwestern Part of China for 1961-2005

ZHENG Xiaobo^{1,2,3}, WANG Xuefeng⁴, LUO Yuxiang^{1,2}, and CHEN Juan^{1,2}

1 Key Laboratory of Mountainous Climate and Resource of Guizhou Province, Guiyang 550002

2 Institute of Mountainous Climate and Environment of Guizhou Province, Guiyang 550002

3 Institute of Plateau Meteorology, China Meteorological Administration, Chengdu 610072

4 Climate Center of Yunnan Province, Kunming 650034

Abstract The variation characteristics of the global radiation and the meteorological factors such as cloud cover, humidity, wind speed, visibility, and sunshine duration which may impact the global radiation over the Yunnan-Guizhou Plateau in the southwestern part of China were studied by mathematical statistics method, with which the

收稿日期 2010-02-04 收到, 2011-08-03 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金项目 40965009, 成都高原气象研究所高原气象开放基金 LPM2009007

作者简介 郑小波, 男, 1954年出生, 正研级高工, 主要从事山地气候资源、应用气象研究。E-mail: zxb-816@126.com

data of nine radiation observation stations and about 200 weather stations from 1961 to 2005 were involved. The results show that the spatial distribution characteristics of annual global radiation are higher in the western part than the eastern part, and the highest is at Lijiang station ($6207 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$), the lowest is at Zunyi station ($3340 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$). The global radiations in six out of nine stations have no significant linear trend ($P > 0.1$) in inter-annual variation, but the other three stations (Mengzi, Guiyang, and Zunyi) have a significant decline ($P < 0.001$) from the 1960s to the 1980s, and then followed by slight (Mengzi) or significant increasing (Guiyang). The main reason of the global radiation declining in Mengzi may owe to the visibility decreasing, and that in Guiyang is concerned with the increasing total cloud cover which result in sunshine duration decreasing. The cloud cover increasing and visibility decreasing are the reasons of the global radiation decline in Zunyi. Overall, interannual or decadal time scale variations of the global radiation are relative to the cloud cover and sunshine duration on the Yunnan-Guizhou Plateau during 1961-2005. The sunshine duration at city stations (Kunming and Guiyang) decreased with visibility reducing.

Key words Yunnan-Guizhou Plateau, global radiation variation, sunshine duration, cloud cover, visibility

1 引言

太阳辐射是地球最重要的能量来源,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。到达地面的太阳辐射与云量、大气中水汽含量、大气气溶胶含量密切相关。辐射量的变化影响到地面温度、蒸发和水循环。因此,在全球气候变化的背景条件下,研究到达地表太阳总辐射量(以下简称总辐射)的变化特征趋势,不仅有助于了解区域气候变化的规律,还可以通过辐射的变化状况间接推断该地区大气中气溶胶的变化特点,为生态环境保护提供依据。

20世纪90年代以来,为应对全球气候变化各国先后开展了对太阳辐射变化的研究。Stanhill and Kalma(1994)、Power(2003)、Stanhill(2001)等对分布在全球各地(包括南极在内)的观测站辐射资料研究发现:1960~1990年,到达地面的太阳辐射减少了约10%。由此出现了一个新的词汇“地球变暗”(global dimming)。国外最新的研究表明,在经历了下降过程之后,80年代末到21世纪初,在一些地区太阳辐射有开始增加的趋势,因此又产生了“地球变亮”(global brightening)的说法(Wild et al., 2005; Stanhill, 2007)。Li et al.(1995)、李晓文等(1998)对中国55个辐射观测站1961~1990年30年太阳辐射变化的统计分析表明:中国总辐射量呈下降趋势;并认为四川盆地出现的降温现象与大气气溶胶增加使太

阳辐射量减少有关。查良松(1996)对1957~1992年总辐射研究表明:在四川盆地以东的长江流域,总辐射和直接辐射的减少最为显著。他认为与火山爆发产生的气溶胶,以及与人口、工业、交通迅速发展带来的大气污染物增加的叠加影响有关。韩虹等(2008)对黄土高原地区40年辐射研究表明,总辐射几十年来呈减少趋势,其主要原因是由于大气中总悬浮微粒的增加引起。陈志华等(2005)对1961~2000年新疆地区太阳辐射研究表明,总辐射在这40年总体减少,但总体下降的趋势中,自1992年后呈现增加趋势。认为可能与当地政府从20世纪90年代开始,逐渐加大环境保护工作力度,减少气溶胶颗粒物的排放有关。王雅婕等(2009)对中国30个站1961~2003年研究表明,1989年以前总辐射总体呈减少趋势,1990年后略有回升,但其均值仍比1961~1965年均值低8.2%,认为日照减少是总辐射减少的主要原因。云贵高原位于青藏高原的东南侧,受青藏高原热力作用和东亚季风的共同影响较大,且具有海拔高、立体气候明显的特征,加之近20年来该区人类活动加剧,这些均可能导致地表总辐射发生变化,但相关研究甚少。本文试图通过对该区1961~2005年总辐射、气候和其他相关资料的分析,阐明总辐射的时间变化特征及其影响因子。

2 材料与方法

所用资料为位于高原上云南、贵州两省9个

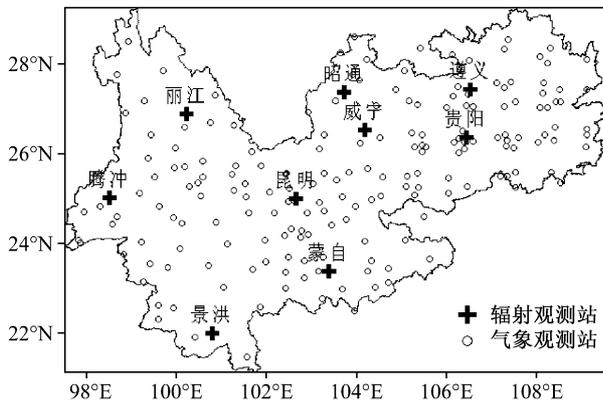


图1 云贵高原辐射站和常规气象站分布

Fig. 1 Radiation stations and weather stations over the Yunnan - Guizhou Plateau

辐射观测站(台站的分布见图1,其中有3个乙种站1990年后停止观测,贵阳站缺部分月份辐射观测值)、200多个地面观测站的云量、日照和大气能见度观测资料。辐射(见表1)、日照、云量和能见度的观测时间为1961~2005年。能源消耗数据来自于云南、贵州两省统计局,时间为1980~2005年。

采用线性倾向估计法研究高原总辐射的变化趋势,建立总辐射(y)与时间序列(x ,年份)的一元线性回归方程 $y = a + bx$,方程斜率 b 即为倾向率。 $b > 0$ 和 $b < 0$ 分别表示总辐射随时间增加和减少。

由于1980年前大气能见度距离的观测值是以

10个等级划分,1980年后的以观测距离(单位:km)表示。因此对80年代以前的数据分析进行了分段处理。此外,为减少因太阳高度角、降水、雾等对能见度观测的影响,本文应用的能见度资料需同时满足:时间为14时,天气现象无降水和雾,相对湿度 $\leq 90\%$ 。为消除西南地区空气湿度较大对能见度的影响,应用公式(1)对相对湿度 $> 40\%$ 时的能见度数据进行订正,得到所谓“干能见度”(Rosenfeld et al., 2007):

$$V_d = V / [0.26 + 0.4285 \cdot \lg(100 - R)] \quad (1)$$

式中, V 为观测能见度, V_d 为干能见度, R 为相对湿度 $\times 100$ 。

3 结果和讨论

3.1 总辐射的空间分布特征

总辐射多年平均值空间分布的特点是西高、东低;最高达 $6207 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (丽江),最低为 $3340 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (遵义),空间分布差异较大。这种辐射的分布形式与高原地形和西南地区天气系统的活动密切相关。日射量的空间分布主要受云贵准静止锋影响。它是南下冷气团受云贵高原地形阻挡形成,锋面呈准南北向,平均位于 $103.5^\circ\text{E} \sim 104.0^\circ\text{E}$ 附近,垂直高度约 2.0 km ,锋后覆盖着大片的中低云系,一般可达几百公里。高原东部的海拔在 $0.8 \sim 1.8 \text{ km}$ 之间,由于准静止锋锋后的中低云系无法抬升到平均为 $2.0 \sim 3.5$

表1 云贵高原辐射观测站基本情况和年平均总辐射及其标准差

Table 1 Basic characteristic of the radiation stations, and annual mean global radiations and their standard deviations over the Yunnan - Guizhou Plateau

站名	经度	纬度	海拔/m	土地利用情况	年平均总辐射	
					值/ $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$	标准差/ $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$
腾冲	98.50°E	25.02°N	1647.8	农业	5519	275
丽江	100.22°E	26.87°N	2393.2	农业	6207	285
景洪	100.78°E	22.00°N	552.7	农业	5615	311
昆明	102.65°E	25.00°N	1891.5	工业	5422	313
蒙自	103.38°E	23.38°N	1300.7	农业、轻工业	5594	429
昭通*	103.72°E	27.35°N	1949.5	农业、轻工业	5198	402
威宁*	104.17°E	26.52°N	2237.5	农业	4696	257
贵阳	106.43°E	26.35°N	1071.2	工业	3627	365
遵义*	106.53°E	27.42°N	843.9	轻工业	3340	378

*表示观测资料的时间为1961~1990年。

km 的高原西部, 东部大部分时间处于锋后, 因此, 年平均总辐射量小于长期处于锋前以晴天为主的西部。

3.2 总辐射变化特征

9 个观测站中, 6 个站 (丽江、腾冲、景洪、昆明、威宁、昭通) 的年总辐射随时间不呈线性变化 ($P > 0.1$), 变化特征也不尽相同。20 世纪 60 年代中后期总辐射普遍较高 (图 2a-f), 80 年代中期腾冲站总辐射出现低值 (图 2b); 昆明站总辐射有 2 个明显的低值时段, 分别出现在 70 年代中期和 80 年代末 90 年代初 (图 2d); 威宁站总辐射普遍较低的时段出现在 70 年代中期 (图 2e)。丽江 (图 2a)、景洪 (图 2c) 和昭通 (图 2f) 则无明显低值时段。60~80 年代间, 蒙自、贵阳和遵义站年总辐射呈显著减少趋势 ($P < 0.001$), 年均减少 $28 \sim 36 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ (图 2g-i)。自 90 年代初开始, 贵阳站年总辐射明显增加 (图 2h)。在 9 个站中蒙自、贵阳和遵义 3 个站均在城区内, 其所处的地形是较为典型的岩溶高原盆地, 盆地内与周围山岭的高差平均为 $300 \sim 500 \text{ m}$, 因此大气输送不是很通畅, 因城市人为活动排放的气溶胶和污染物不易被稀释 (沈家芬等, 2007; 孟晓艳等, 2009)。

3.3 总辐射变化与气候要素及能见度的相关性

将各站总辐射分别与同期日照、总云量、相对湿度、风速和干能见度 (以下简称能见度) 等要素进行相关分析, 结果表明: 在整个研究时段内, 丽江、景洪和蒙自逐年总辐射变化与气候要

素和能见度无明显的线性相关, 其他观测站逐年总辐射变化则与年日照时数呈显著正相关, 或与总云量呈显著负相关; 腾冲、昆明和昭通总辐射随空气相对湿度增加而减少 (见表 2)。除景洪和腾冲站外, 其余 7 个站的日照时数变化与云量呈显著负相关。值得注意的是: 人口超过百万的城市站 (昆明、贵阳) 日照时数与能见度的相关性极显著 ($P < 0.001$), 蒙自站的日照与能见度相关显著 ($P < 0.01$), 景洪和遵义站的日照与能见度相关较显著 ($P < 0.05$), 而其他 4 站的日照时数则与能见度无显著相关。

60~80 年代, 贵阳与遵义站日照时数减少是总辐射显著下降 (图 2h 和 2i) 的主要原因。以贵阳站为例, 这 30 年间日照时数年均减少速率约为 16 h (图 3a), 1986~1990 年平均日照时数约为 1961~1965 年的 75%。日照时数减少则与总云量增加有关 (图 3b)。年总辐射随年均总云量增加而减少 (图 3d), 随日照时数增加而增加 (图 3c)。虽然贵阳站自 20 世纪 90 年代初开始总辐射明显增加 (图 2h), 但这个增加与日照时数及总云量无显著相关 ($P > 0.1$)。令人费解的是该时段内贵阳站的能见度以 $6.8 \text{ km} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 的速率降低 ($R^2 = 0.830$, $P < 0.001$), 但总辐射却呈增加趋势 (图 2h)。这可能与 2000 年贵阳站从市区迁到比原站址高 149.5 m 的小山头后风速增加有一定关系 (王雅婕等, 2009)。迁站前 10 年 (1990~1999 年) 贵阳站平均风速为 $2.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 迁站后 (2000~2009 年) 10 年平均风速增加到 $2.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

表 2 总辐射与各气象要素、能见度的相关系数

Table 2 Correlation coefficients between global radiation and climatic factors and visibility

站名	辐射-日照	辐射-云量	辐射-湿度	辐射-风速	辐射-能见度	日照-云量	日照-能见度
丽江	0.221	-0.249	-0.083	-0.076	0.061	-0.550***	0.225
腾冲	0.541***	-0.347*	-0.385**	0.306*	0.180	-0.423**	0.226
景洪	0.192	-0.001	0.114	-0.099	-0.020	0.000	0.289*
昆明	0.142	-0.393**	-0.435**	-0.240	0.164	-0.395**	0.751***
威宁	0.630***	-0.555**	-0.306	-0.017	0.201	-0.767***	0.136
昭通	0.636***	-0.641***	-0.576***	0.108	0.141	-0.596***	0.196
蒙自	0.290*	0.001	-0.050	0.084	0.230	-0.057	0.370**
贵阳	0.497***	-0.447**	-0.134	0.326*	-0.041	-0.334*	0.589***
遵义	0.845***	-0.641***	-0.206	0.313	0.457**	-0.661***	0.318*
全部站点	0.912***	-0.880***	-0.526***	0.237*	0.204*	-0.880***	0.272**

* 代表 $P < 0.05$, ** 代表 $P < 0.01$, *** 代表 $P < 0.001$ 。

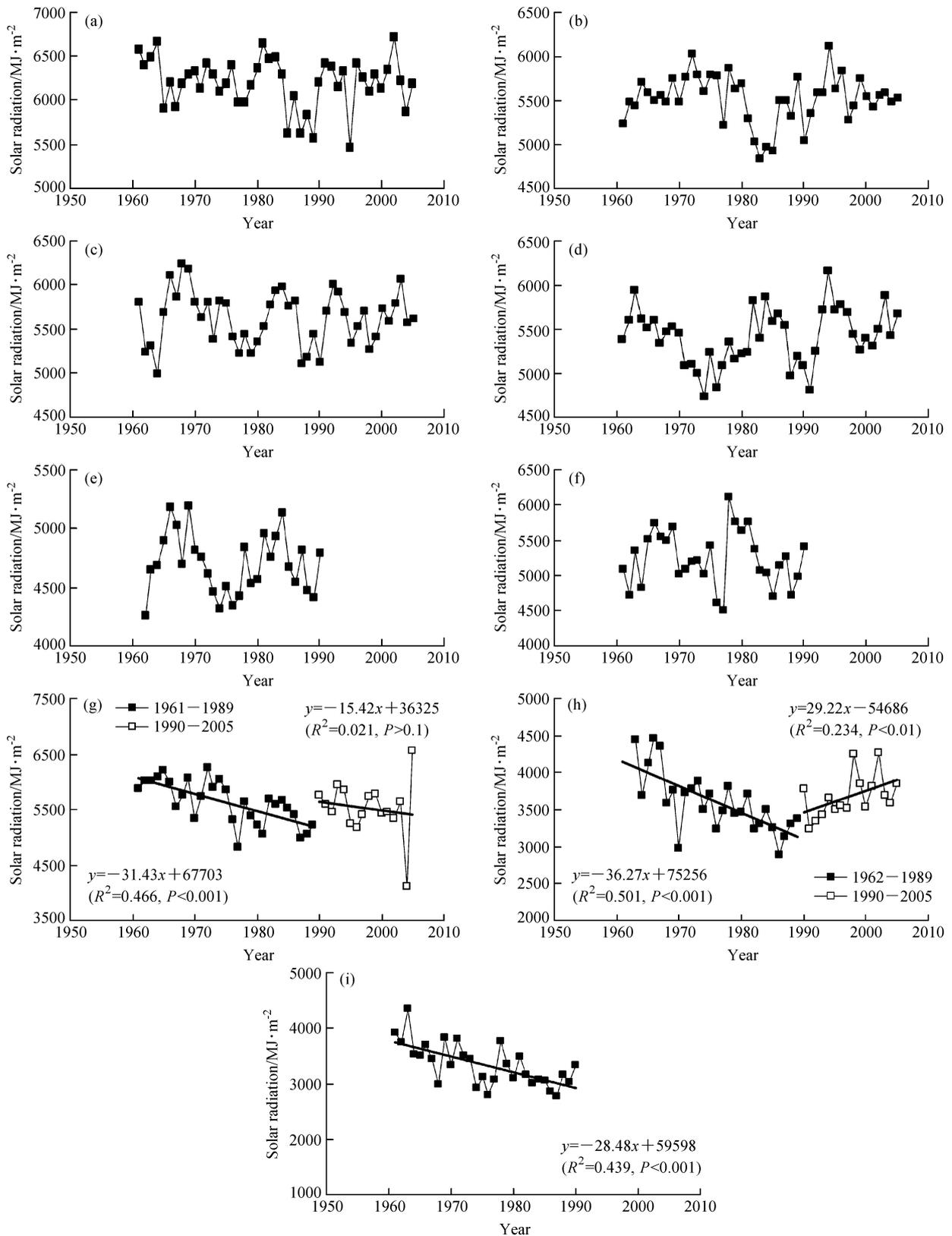


图2 (a) 丽江、(b) 腾冲、(c) 景洪、(d) 昆明、(e) 威宁、(f) 昭通、(g) 蒙自、(h) 贵阳、(i) 遵义总辐射年总量变化

Fig. 2 Annual variations of the global radiations at (a) Lijiang, (b) Tengchong, (c) Jinghong, (d) Kunming, (e) Weining, (f) Zhaozhong, (g) Mengzi, (h) Guiyang, and (i) Zunyi

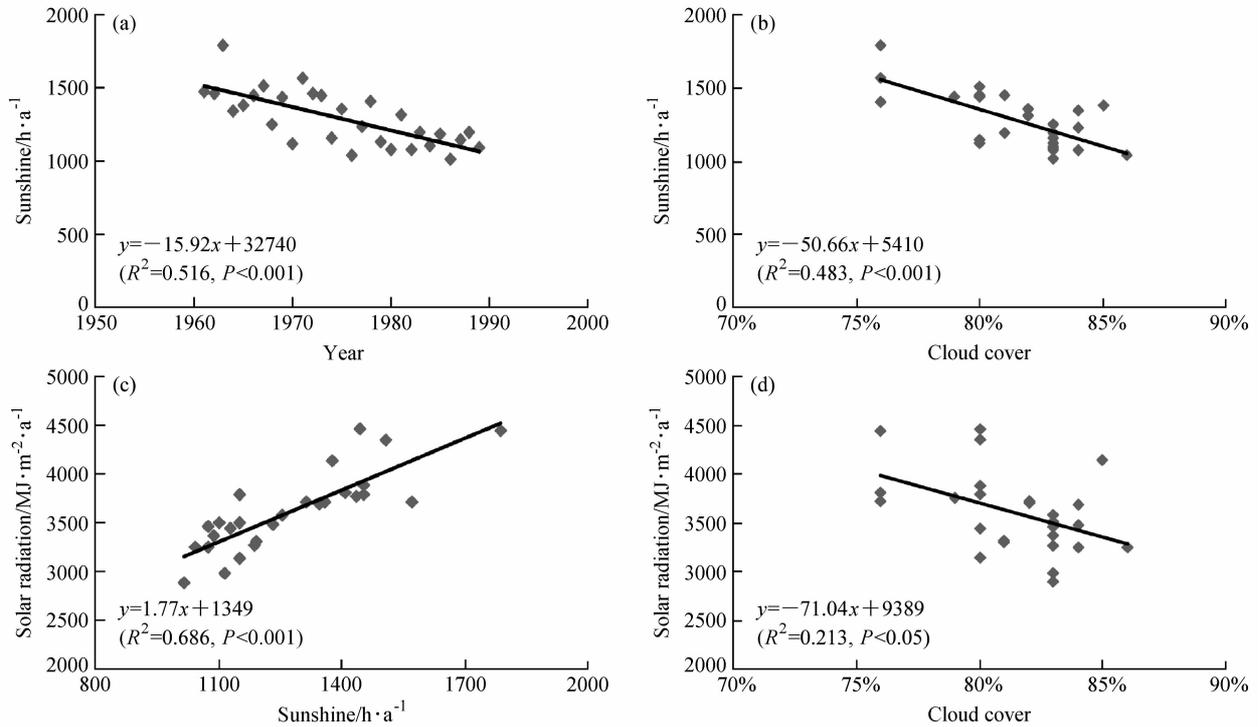


图3 贵阳站 20 世纪 60~80 年代 (a) 日照时数变化趋势、(b) 日照时数与总云量的相关性、(c) 总辐射与日照时数的相关性及 (d) 总辐射与总云量的相关性

Fig. 3 (a) Trend of the sunshine duration, (b) correlation between sunshine duration and total cloud cover, (c) correlation between global radiation and sunshine duration, and (d) correlation between global radiation and total cloud cover at Guiyang station from the 1960s to the 1980s

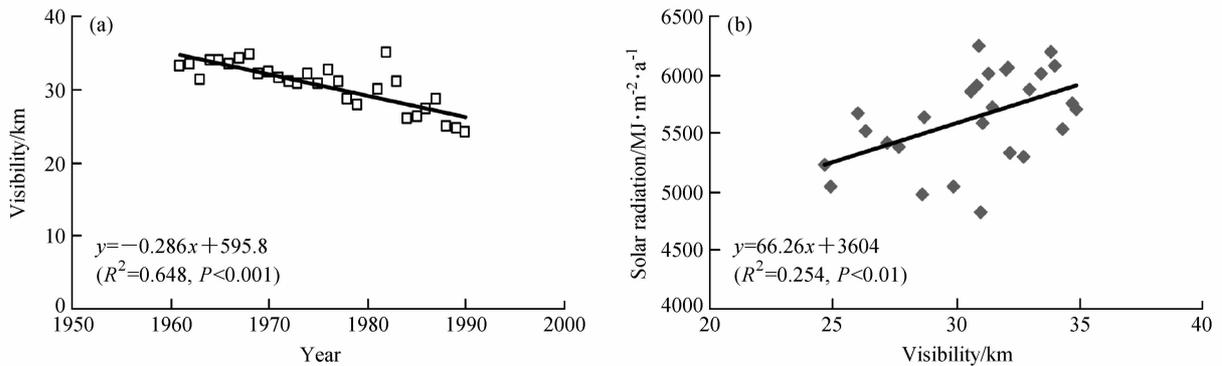


图4 蒙自站 20 世纪 60~80 年代 (a) 能见度变化趋势及 (b) 总辐射与能见度的相关性

Fig. 4 (a) Trend of the visibility and (b) correlation between global radiation and visibility at Mengzi station from the 1960s to the 1980s

与贵阳站不同，60~80 年代蒙自年总辐射显著下降（图 2g）与能见度降低有关（图 4）。这 30 年间，蒙自的能见度年均降低 0.286 km（图 4a），能见度降低导致总辐射减少（图 4b）。

就现有数据的分析而言，除蒙自和遵义站外，其他 7 个站的总辐射变化均无法通过能见度的变化得以解释，虽然昆明和贵阳站的日照时数与能

能见度呈极显著正相关。自 20 世纪 80 年代初以来，云贵高原能见度急剧降低（图 5a），能见度降低与同期能源消耗（标准煤）增加呈显著负相关（图 5b）。云贵高原以燃煤为主的能源结构使排放气体中的硫酸盐气溶胶含量较高，对流层气溶胶浓度增加使得雾和霾日数增加（高丽洁等，2004；宗雪梅等，2005；陈潇潇等，2008），这可能导致日

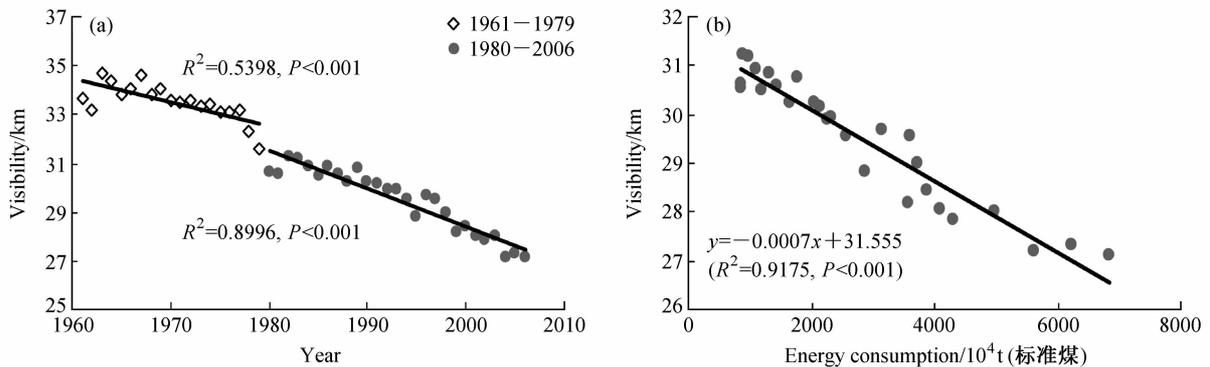


图5 云贵高原1980~2005年 (a) 年平均能见度变化及其 (b) 与能源消耗的关系

Fig. 5 (a) Annual mean visibility and (b) correlation between visibility and total domestic energy consumption from 1980 to 2005

照和辐射减少, 但目前的数据分析尚无法证实。

4 结论

云贵高原年辐射总量的空间分布特点是东低西高。1961~2005年间, 该区9个观测站中有6个站的年辐射总量呈年际或年代际变化, 但无线性变化趋势 ($P>0.1$), 其余3个站(蒙自、贵阳、遵义)的年辐射总量在20世纪60~80年代间呈显著下降趋势 ($P<0.001$), 这与1960~1990年全球总辐射普遍降低不尽一致, 其原因可能与该区独特的地形地貌有关。20世纪60~80年代间蒙自站总辐射下降的主要原因是能见度降低, 贵阳站总辐射下降与总云量增加有关, 遵义站下降则与总云量增加和能见度较低有关。总体而言, 1961~2005年云贵高原太阳辐射的年际变化或年代际变化与总云量及日照时数有关, 大城市站(昆明、贵阳)日照时数随能见度降低而显著减少。

参考文献 (References)

陈潇潇, 郭品文, 罗勇. 2008. 中国不同等级雾日的气候特征 [J]. 气候变化研究进展, 4 (2): 106-110. Chen Xiaoxiao, Guo Pinwen, Luo Yong. 2008. Climate characteristics of fog days of various categories in China [J]. Advances in Climate Chang Research (in Chinese), 4 (2): 106-110.

陈志华, 石广玉, 车慧正. 2005. 近40年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 Huizheng. 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.

高丽洁, 王体健, 徐永福. 2004. 中国硫酸盐气溶胶及其辐射强迫的模拟 [J]. 高原气象, 23 (5): 612-620. Gao Lijie, Wang Tijian, Xu Yongfu, et al. 2004. Modeling sulfate aerosol and its radiative forcing over China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 23 (5): 612-620.

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): 61-26. 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): 61-26.

Li Xiaowen, Zhou Xiuji, Li Weiling, et al. 1995. The cooling of Sichuan Province in recent 40 years and its probable mechanisms [J]. Acta Meteorological Sinica, 9 (1): 57-68.

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 of China in recent 30 years [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 9 (1): 24-31.

孟晓艳, 王普才, 王庚辰, 等. 2009. 北京及其周边地区冬季 SO_2 的变化与输送特征 [J]. 气候与环境研究, 14 (3): 309-317. Meng Xiaoyan, Wang Pucui, Wang Gengchen, et al. 2009. Variation and transportation characteristics of SO_2 in winter over Beijing and its surrounding areas [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 14 (3): 309-317.

Power H C. 2003. Trends in solar radiation over Germany and an assessment of the role of aerosols and sunshine duration [J]. Theor. Appl. Climatol., 76: 47-63.

Rosenfeld D, Dai J, Yu X, et al. 2007. Inverse relations between amounts of air pollution and orographic precipitation [J]. Science, 315: 1396-1398.

沈家芬, 冯建军, 谢利, 等. 2007. 广州市大气能见度的特征及其影响因子分析 [J]. 生态环境, 16 (4): 1199-1204. Shen Jiafen, Feng Jianjun, Xie Li, et al. 2007. Characterization of visibility and its effect factors in Guangzhou [J]. Ecology and Environment (in Chinese), 16 (4): 1199-1204.

- Stanhill G, Kalma J D. 1994. Secular variation of global irradiance in Australia, Australian [J]. Meteor. Mag., 43: 81-86.
- Stanhill G. 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]. Agriculture and Forest Meteorology, 107: 255-278.
- Stanhill G. 2007. A perspective on global warming, dimming, and brightening [J]. EOS, Trans. Amer. Geophys. Union, 88 (5): 58-59.
- 王雅婕, 黄耀, 张稳. 2009. 1961~2003 年中国大陆地表太阳总辐射变化趋势 [J]. 气候与环境研究, 14 (4): 405-413.
- Wang Yajie, Huang Yao, Zhang Wen. 2009. Changes in surface solar radiation in mainland China over the period from 1961 to 2003 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 14 (4): 405-413.
- 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.
- 查良松. 1996. 我国地面太阳辐射量的时空变化研究 [J]. 地理科学, 16 (3): 232-237. Zha Liangsong. 1996. Regional variation of solar radiation in China [J]. Geographical Research (in Chinese), 16 (3): 232-237.
- 宗雪梅, 邱金桓, 王普才. 2005. 近 10 年中国 16 个台站大气气溶胶光学厚度的变化特征分析 [J]. 气候与环境研究, 10 (2): 201-208. Zong Xuemei, Qiu Jinhuan, Wang Pucui. 2005. Characteristics of atmospheric aerosol optical depth over 16 radiation stations in the last 10 years [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 10 (2): 201-208.