

黄土高原地区太阳辐射时空演变特征

韩虹¹ 任国玉² 王文³ 朱临洪⁴ 吴占华¹ 张红雨⁴

1 山西省朔州市气象局, 朔州 036002

2 中国气象局气候研究开放实验室, 国家气候中心, 北京 100081

3 兰州大学大气科学学院, 兰州 730000

4 山西省气象局, 太原 032000

摘要 利用太阳总辐射和日照时数等资料, 获得了计算黄土高原地区日太阳总辐射的统一公式, 并进而计算和分析了该区 39 个站点 1961~2000 年共 40 年的月、季、年太阳总辐射的时间序列和空间趋势特征。结果表明, 在研究时段内, 黄土高原地区年太阳总辐射均值呈明显减少趋势, 全区平均每 10 年减少 $81.7 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 。夏季和冬季太阳辐射减少趋势尤为明显, 春秋季节下降趋势较微弱; 年太阳总辐射仅在陕北、晋北和陇东等个别台站呈微弱增加趋势, 其余大部分地区均呈减少趋势, 其中山西大部、内蒙南部和河南北部减少趋势最明显。

关键词 黄土高原 太阳辐射 时空演变 气候变化

文章编号 1006-9585 (2008) 01-0061-06 **中图分类号** P468 **文献标识码** A

Temporal and Spatial Variation Characteristics of Total Solar Radiation over the Loess Plateau Region

HAN Hong¹, REN Guo-Yu², WANG Wen³, ZHU Lin-Hong⁴, WU Zhan-Hua¹, and ZHANG Hong-Yu⁴

1 *Shuozhou Meteorological Bureau, Shuozhou 036002*

2 *Laboratory for Climate Studies, National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081*

3 *College of Atmospheric Science, Lanzhou University, Lanzhou 730000*

4 *Shanxi Meteorological Bureau, Taiyuan 032000*

Abstract A formula for calculating total solar radiation for the Loess Plateau is obtained using data of solar radiation and sunshine duration at seven stations in the region. The annual and seasonal means of total solar radiation during 1961—2000 for 39 stations are calculated based on the formula. We analyze the temporal and spatial feature of total solar radiation for the period, and find that the annual total solar radiation over the Loess Plateau as a whole underwent a significant downward trend, with a trend of $81.7 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ per 10 years. The decrease is more remarkable in summer and winter, but relatively small in spring and autumn. It is also found that the decrease in total solar radiation during the 40 years is more obvious in Shanxi Province, southern Inner Mongolia and northern Henan Province. The possible causes for the decrease are discussed.

Key words Loess Plateau, solar radiation, temporal and spatial variation, climate change

收稿日期 2006-8-17 收到, 2007-10-30 收到修定稿

资助项目 科技部国家“十五”科技攻关课题 2001BA611B-01、中国气象局气候变化专项经费和山西省气象局 2005 年 Q20 重点科研项目

作者简介 韩虹, 女, 1967 年出生, 硕士, 高级工程师, 主要从事气候、气候变化和农业气象方面的研究和业务工作。

E-mail: dthanh@sina.com

1 引言

太阳辐射是一种重要的气候资源。随着经济建设的快速发展,太阳辐射与农业生产、建筑节能设计、太阳能利用等行业的关系愈加密切,各行业对太阳能资料的要求也越来越迫切。分析太阳辐射的时空分布及其时间演化,对于进一步研究农业气候生产潜力及大气条件变化对生态系统的可能影响,具有一定的科学和实际价值。

我国有各级气象观测台站 2 500 多个,而进行辐射观测的台站只有 90 多个^[1]。在黄土高原地区,共有国家基本和基准站 51 个,而进行太阳辐射观测的台站只有 9 个,太阳辐射资料远远不能满足研究和业务的需要。早在 20 世纪 60 年代初,就有许多学者对太阳辐射的气候学计算方法进行了研究。左大康等^[2]、翁笃鸣^[3]、邓根云等^[4]和王炳忠等^[5]都曾计算了我国太阳能资源。近几年,高国栋等^[6]详细介绍了天文辐射和多种总辐射的计算方法,刘新安等^[7]和林文贤^[8]利用不同的方法计算了东北地区和云南省的太阳辐射资料,杨荆安^①等推导了武汉市晴天和雨天条件下的太阳辐射计算方程。在太阳辐射的变化方面也有若干研究,例如李晓文等^[9]认为近年来中国大部分地区太阳总辐射和直接辐射呈减少趋势,查良松^[10]运用统计方法分析得出从 70 年代以来,我国太阳辐射量普遍减少。

黄土高原地区是我国北方重要的农业地带。针对这个地区的相关研究还很少,特别是目前还不清楚黄土高原地区太阳总辐射的时间演变情况。本文采用黄土高原中东部地区 7 个太阳辐射站的气候资料,推导了日太阳总辐射计算公式,并计算了黄土高原 1961~2000 年 39 个测站逐年的日太阳总辐射,在此基础上分析了太阳辐射能的空间分布和时间变化特征。

2 资料与方法

所用资料为来自中国气象局气象信息中心资

料室的黄土高原地区 39 个站点 1961~2000 年逐日的日照时数资料,以及大同、太原、侯马、东胜、延安、西安和郑州等 7 个站的 1961~2000 年的逐日太阳总辐射和日照时数资料。研究区域共有 9 个太阳辐射站,选择上述 7 个站是考虑到资料序列的完整性和站点分布的均匀性。所有台站日照和太阳辐射资料缺、空记录用相邻站点的资料进行了插补。

首先根据 7 个台站的太阳总辐射和日照时数资料建立研究区域的转换公式,然后再根据转换公式计算更多台站的太阳辐射值。本文选择左大康等^[2]、翁笃鸣^[3]的公式计算日太阳总辐射:

$$Q=Q_0(a+b \cdot S/S_0), \quad (1)$$

其中, Q 为日总辐射, Q_0 为日天文辐射量, S/S_0 为实际日照时数与可照时数的比值, a 和 b 为系数。

根据高国栋等^[6]和杨荆安等^①的工作,日天文辐射量为

$$Q_0 = \frac{T}{\pi} - \frac{I_0}{\rho^2} (\omega_0 \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \sin \omega_0), \quad (2)$$

其中, I_0 为太阳常数, $I_0 = 1367 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 其小时累计值为 $4.921 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$; T 按一日计算, $T=24 \text{ h}$; ρ 为相对日地距离, ω_0 为日出没时角。可照时数为

$$S_0 = 2\omega_0/15. \quad (3)$$

天文辐射量与地理纬度和太阳赤纬有关,分为平年、闰年计算逐日天文辐射量。

用公式 (1) 计算大同、太原、侯马、东胜、延安、西安和郑州 7 站的经验系数 a 和 b 。这 7 个太阳辐射站的 a 和 b 值、相关系数 r 及结果检验情况如表 1。

由于根据 7 个太阳辐射站计算得到的系数 a 和 b 值比较接近,对 7 站的系数求平均获得的经验系数值可以更好地代表整个区域的情况。通过用 7 站的实测值与公式计算值相比较,可以得到计算结果的相对误差为 5%~9%,误差在允许范围以内。因此得到黄土高原计算日太阳总辐射的统一公式:

$$Q=Q_0(0.1776+0.5470S/S_0). \quad (4)$$

运用公式 (4) 计算得到了研究区域内 39 个站

① 杨荆安, 陈正洪. 无辐射观测地区采暖制冷期间太阳辐射量的计算

Yang Jingan, Chen Zhengh. The Calculation of the variation of solar radiation during summer and winter in un-gauged region

表 1 7 个太阳辐射站的系数 a 和 b 及计算和观测记录的相关系数 r

Table 1 Coefficients a and b and the correlation coefficients r between observed and calculated solar radiation for seven stations on the Loess Plateau

站名	纬度	a	b	r	信度/%
大同	40°N	0.1907	0.5749	0.8852	99.9
东胜	40°N	0.1902	0.5527	0.9204	99.9
太原	38°N	0.1691	0.5804	0.9082	99.9
延安	37°N	0.1558	0.5247	0.9143	99.9
侯马	36°N	0.1798	0.5295	0.9351	99.9
郑州	35°N	0.1696	0.5431	0.9221	99.9
西安	34°N	0.1883	0.5239	0.8738	99.9
平均		0.1776	0.5470		

点 1961~2000 年的逐日太阳总辐射, 并据此统计各站月、季、年的太阳总辐射。全部台站的分布情况见图 1 和图 3。

对 39 个站点逐年的春 (3~5 月)、夏 (6~8 月)、秋 (9~11 月)、冬 (12 月至次年 2 月)、年太阳总辐射, 采用经纬度网格平均和面积加权平均方法^[12], 得到黄土高原区春、夏、秋、冬、年的逐年和多年平均太阳总辐射, 并在此基础上分析本区太阳总辐射的空间分布和时间演变特点。

3 太阳辐射的空间分布

图 1 给出根据 39 个站点 1961~2000 年 40 年资料获得的黄土高原地区春、夏、秋、冬、年的多年平均太阳总辐射量分布情况。从中可以看到, 西部等值线密集, 表明太阳总辐射空间梯度大; 东部较稀疏, 表明空间梯度相对较小。年太阳总辐射从西南部 (以宝鸡为中心) 的 4 500 $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$, 向东北逐渐增大到 5 600 $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$, 然后又转为向西北方向增大, 出现以临河为中心的最大值区, 达到 5 800 $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 。但总体看等值线呈东西向排列, 表明黄土高原地区年太阳总辐射从南向北逐渐增多。

春季太阳总辐射从西南部的 1 300 $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$, 向北逐渐增大到 1 742 $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$, 大同、临河为最大值区 (图略); 夏季太阳总辐射从西南部的 1 550 $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ (宝鸡 1 570 $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$) 向东北逐渐增大到 1 875 $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ (大同 1 887 $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$), 然后又转为向西北方向增大, 出现以临河为中心的最大值区 (2 000 $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$); 秋季太阳总辐射

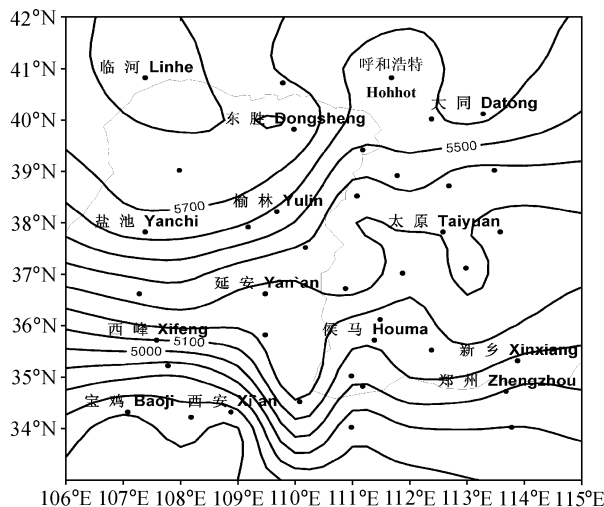


图 1 黄土高原年太阳总辐射等值线分布 (单位: $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$)

Fig. 1 Annual total solar radiation on the Loess Plateau (units: $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$)

从西南部的 86 $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ (西安为 866 $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$), 向东北逐渐增大到 1 180 $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$, 然后又转为向西北方向增大, 最大值出现在临河、东胜、鄂托克旗 (1 230 $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$); 冬季太阳总辐射的空间分布与其他季节不同, 在西南部的西安和华山出现了最小和最大值区, 分别为 866 $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 939 $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$, 太阳辐射在中部地区数值较高, 华山、洛川、盐池和五台山等地一般达 900 $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

4 太阳辐射时间演变

研究区 1961~2000 年平均的年太阳总辐射为 5 322.1 $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$, 1965 年出现最大值为 5 842.6 $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$, 1964 年出现最小值 4 993.2 $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ (表 2)。春季平均太阳总辐射为 1 586.5 $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$, 最高年为 1962 年 1 791.64 $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$, 最低年为 1964 年 1 372.0 $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 。夏季平均为 1 784.3 $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$, 最高年 1965 年达 1 977.2 $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$, 最低年 1996 年为 1 614.4 $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 。秋季平均为 1 112.4 $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$, 最高为 1 260.6 $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$, 最低为 947.8 $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

在 1961~2000 年期间, 黄土高原地区年太阳辐射呈显著减少趋势, 平均每 10 年减少 81.7 $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 。年太阳辐射随时间变化的趋势相关系数为 -0.5084, 通过了 0.001 显著性水平检验 (表 2 和图 2)。最明显的减少出现在 20 世纪 90 年

代之前，而自从 90 年代初以来太阳辐射的下降趋势已不明显。

从各季节来看，太阳辐射变化均呈减少趋势，但春、秋季下降趋势较弱，夏季减少最为显著，冬季也较显著（表 2）。春季平均每 10 年减少 $14.5 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ ；夏季平均每 10 年减少 $42.6 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ ，通过了 0.001 的显著性检验；秋季平均每 10 年减少 $4.3 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ ；冬季平均每 10 年减少 $20.3 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ ，通过了 0.01 的显著性检验。

5 太阳辐射变化趋势的空间特征

对全区 39 个站点春、夏、秋、冬和年太阳辐射线性变化倾向率进行 t 检验，共有 195 个样本，其中 102 个（占总数的 52%）通过了 95% 的信度检验，有明显的减少趋势；有 74 个（占总数的 38%）通过了 99% 的信度检验，表明这些站点附近的减少非常显著。

图 3 给出了年太阳总辐射变化趋势的空间分布情况。除在陕西中北部地区、山西右玉、五台山、宁夏盐池和甘肃西峰镇呈不显著的增

加外，大部分地区年太阳总辐射表现为减少趋势，其中山西大部、陕西北部、内蒙古南部及河南北部减少趋势明显。全区近 1/3 的站点每 10 年减少 $100 \sim 200 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ ，大同、太原、西安、武功等城市台站每 10 年减少更高达 $200 \sim 300 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

在不同的季节，太阳总辐射的变化趋势空间分布特点存在差异。春季太阳辐射呈增加趋势的范围比年太阳辐射略有扩大，延安、绥德等地增加趋势明显，为每 10 年 $20 \sim 40 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ ，其他地区一般为每 10 年 $0 \sim 20 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ （图略）。减少区域面积占全区总面积的 2/3 以上，大同、太原、阳泉和西安等城市地区减少趋势最显著。

夏季太阳总辐射全区均呈减少趋势，陕西、山西北部、内蒙南部、宁夏和甘肃东部每 10 年减少达 $60 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 以上，减少最显著的区域分布在山西中南部的太原、阳泉、侯马、运城，陕西的长武，河南的许昌等台站，每 10 年减少可达 $80 \sim 100 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ ，40 年减少 $300 \sim 400 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ ，约占夏季多年平均值的 15%~25%。大同、介休、西安和武功等地减少也比较显著。

表 2 黄土高原年和四季太阳总辐射量及变化量

Table 2 Annual and seasonal total solar radiation and the change trend of the Loess Plateau

	太阳总辐射量/ $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$			倾向率/ $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$	趋势系数	t 检验
	平均	最大	最小			
春季	1 586.5	1 791.5	1 372.0	-14.5	-0.1984	
夏季	1 784.3	1 977.2	1 614.4	-42.6	-0.5601	0.001
秋季	1 112.4	1 260.6	947.8	-4.3	-0.0759	
冬季	838.9	956.4	724.3	-20.3	-0.4448	0.01
全年	5 322.1	5 842.6	4 993.2	-81.7	-0.5084	0.001

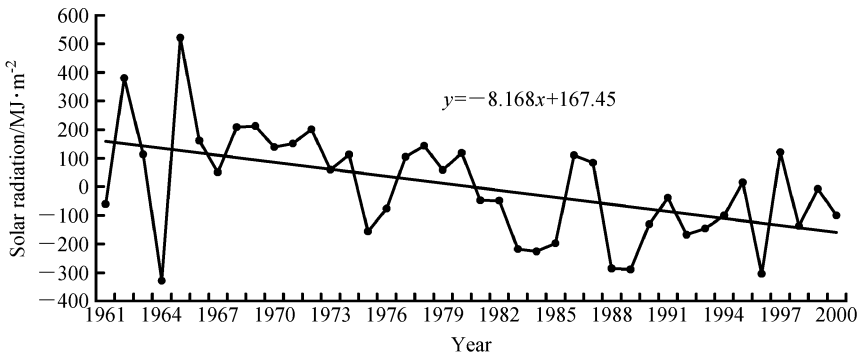


图 2 1961~2000 年黄土高原年太阳总辐射变化趋势（折线为距平值，直线为趋势）

Fig. 2 Change in annual total solar radiation on the Loess Plateau during 1961—2000

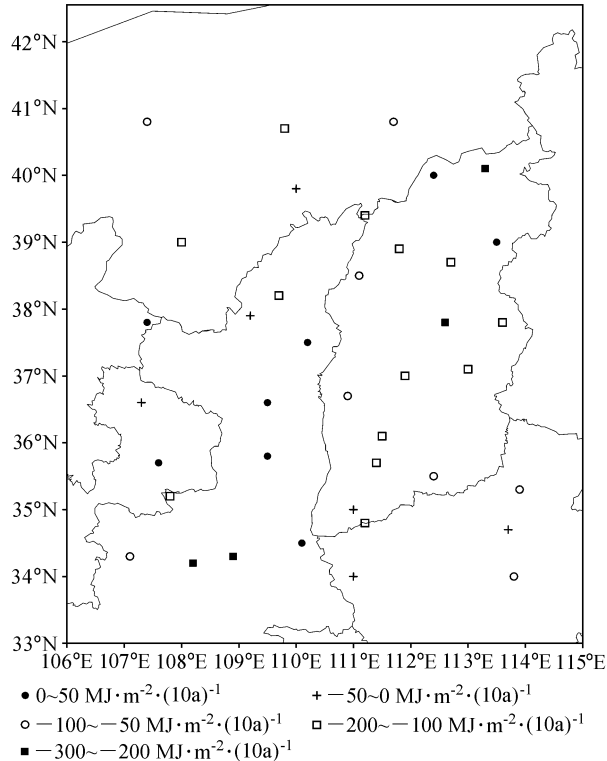


图3 黄土高原年太阳总辐射变化趋势的空间分布

Fig. 3 Linear trends of annual total solar radiation on the Loess Plateau during 1961—2000

秋季太阳总辐射与年和春季的变化趋势一致。从陕西中北部向北到内蒙古东胜,山西右玉、五台山,宁夏盐池和甘肃西峰镇的大片区域为弱的增加趋势,其余地区表现为减少趋势,其中山西中南部及西安和武功一带减少趋势明显,山西北部的大同一带每10年减少达 $60 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

冬季太阳辐射呈增加趋势的站点很少,大部分地区呈减少趋势。大同、原平、太原、临汾、西安、武功和榆林等台站减少趋势显著,可达到每10年下降 $40 \sim 70 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

6 结论与讨论

黄土高原地区1961~2000年平均的年太阳总辐射为 $5322.1 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$,空间分布从南向北逐渐增多。春季太阳总辐射从西南部向北和东北增多;夏季和秋季从西南部向东北和西北增大;而冬季在西南部的西安最小,华山最大,高值区一般分布在中部。

在所分析的时段内,全区年和各季节的太阳总辐射均呈减少趋势,年太阳总辐射每10年减少 $81.7 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$,夏季和冬季太阳辐射减少趋势尤为明显,春秋季节趋势变化较小。就区域分布特征而言,年太阳总辐射仅在陕西中北部地区,山西右玉、五台山,宁夏盐池和甘肃西峰镇呈微弱增加趋势,其余大部分地区呈减少趋势,其中山西大部、陕西北部、内蒙古南部及河南北部减少趋势明显,大同、太原、西安和武功等台站每10年减少达 $200 \sim 300 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 。全区年太阳辐射均值最明显的减少发生在20世纪90年代之前,而在90年代初以后有停止下降甚至微弱回升趋势。

春、秋季太阳辐射增、减区域分布与年变化基本一致。夏季太阳总辐射全区均呈减少趋势,减少趋势最显著的台站包括山西中南部的太原、阳泉、侯马和运城,陕西的长武和河南的许昌等站点,40年内线性减少了 $300 \sim 400 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$,约占夏季多年平均值的 $15\% \sim 25\%$ 。冬季太阳总辐射在大部分地区亦呈减少趋势。

本文计算得到的黄土高原太阳辐射下降趋势与近年其他作者的发现非常一致。Kaiser等^[11]分析中国地面日照记录资料指出,20世纪后半叶中国的日照时间明显减少,大部分减少发生在80年代以后。任国玉等^[12]利用更新的资料分析发现,1956~2002年间,全国平均年日照时数具有明显的下降趋势,20世纪90年代初以后变化趋于和缓,减少趋势最明显的地区是华北和华东地区,但黄土高原中东部下降也比较明显。陈志华等^[13]利用1961~2000年资料,分析了新疆近40年来日照和地面太阳辐射的变化,发现日照时间、太阳总辐射和直接辐射均呈下降趋势,自1992年开始这种减少趋势发生逆转。因此,黄土高原太阳辐射的时间变化,是中国更广泛地区日照减少和太阳辐射减弱的区域性反映,在全国具有代表性。

黄土高原地区太阳辐射的明显减少可能与区域内城市和工矿业发展引起的空气污染物排放有关^[11,14]。笔者也发现,太阳总辐射减少显著的台站多为大中型工矿业城市,如太原、西安和大同;而太阳总辐射减少不明显甚至增加的台站一般位于偏远的乡村或山区,如右玉、五台山和盐池。这说明,研究区城市化、矿业发展及其大气环境污染可能是造成一些台站附近日照时数和太阳辐

射减少的主要原因之一。一般情况下,云量变化也会导致太阳总辐射下降,但研究区 1961~2000 年的年降水量多呈减少趋势。因此,云量变化可能无法解释多数台站记录的太阳总辐射下降趋势。

黄土高原地区太阳总辐射的明显下降必将对主要农业作物和自然植物的生长以及区域水文循环和水资源产生一定影响,值得进一步研究。

参考文献 (References)

[1] 张宇, 赵四强. 关于逐日太阳辐射的估算方法的探讨. 气象, 1991, **17** (10): 11~14
Zhang Yu, Zhao Siqiang. Discussion of estimation method about the day by day solar radiation. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 1991, **17** (10): 11~14

[2] 左大康, 王懿贤, 陈建绥. 中国地区太阳总辐射的空间分布特征. 气象学报, 1963, **33** (1): 78~95
Zuo Dakang, Wang Yixian, Chen Jiansui. Spatial distribution feature of Chinese solar radiation. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1963, **33** (1): 78~95

[3] 翁笃鸣. 试论总辐射的气候学计算方法. 气象学报, 1964, **34** (3): 304~314
Weng Duming. Discussion of solar radiation calculating method. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1964, **34** (3): 304~314

[4] 邓根云, 冯雪华. 我国光温资源与气候生产潜力. 自然资源, 1980, **4**: 11~16
Deng Genyun, Feng Xuehua. Light and temperature resource in China. *Nature Resource* (in Chinese), 1980, **4**: 11~16

[5] 王炳忠, 张富国, 李立贤. 我国的太阳能资源及其计算. 太阳能学报, 1980, **1** (1): 1~9
Wang Bingzhong, Zhang Fuguo, Li Lixian. Calculation and analysis of solar energy resource in China. *Journal of Solar Energy* (in Chinese), 1980, **1** (1): 1~9

[6] 高国栋, 陆渝蓉, 缪启龙. 气候学教程. 北京: 气象出版社, 1996. 25~60
Gao Guodong, Lu Yurong, Miu Qilong. *An Introduction to Climatology* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1996. 25~60

[7] 刘新安, 范辽生, 王艳华, 等. 辽宁省太阳辐射的计算方法及其分布特征. 资源科学, 2002, **24** (1): 82~87
Liu Xin'an, Fan Liaosheng, Wang Yanhua, et al. The

Calculation method and distribution character of solar radiation in Liaoning Province. *Resources Science* (in Chinese), 2002, **24** (1): 82~87

[8] 林文贤. 云南省水平地面月总太阳辐射的统一经验计算公式. 云南师范大学学报, 1994, **14** (1): 56~65
Lin Wenxian. The United empiric formula for monthly global insolation on horizontal surfaces in Yunnan Province. *Journal of Yunnan Normal University* (in Chinese), 1994, **14** (1): 56~65

[9] 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
Li Xiaowen, Li Weiliang, Zhou Xiuji. Analysis of the solar radiation of China in recent 30 years. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 1998, **9** (1): 24~31

[10] 查良松. 我国太阳辐射量区域性变化特征研究. 地理研究, 1996, **15** (2): 21~27
Zha Liangsong. Regional variation of solar radiation in China. *Geographical Research* (in Chinese), 1996, **15** (2): 21~27

[11] Kaiser D P, Qian Y. Decrease trends in sunshine duration over China for 1954—1998: Indication of increased haze pollution? *Geophys. Res. Lett.*, 2002, **29** (21): 2042, doi:10.1029/2002GL016057

[12] 任国玉, 郭军, 徐铭志, 等. 五十年来中国大陆近地面气候变化的基本特征. 气象学报, 2005, **63** (6): 942~956
Ren Guoyu, Guo Jun, Xu Mingzhi, et al. Characteristics of surface climate change over China during recent 50 years. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2005, **63** (6): 942~956

[13] 陈志华, 石广玉, 车慧正. 近 40 a 来新疆地区太阳辐射状况研究. 干旱区地理, 2005, **28** (6): 734~739
Chen Zhihua, Shi Guangyu, Che Zhenghui. Research on the variation of solar radiation in Xinjiang in the past 40 years. *Arid Land Geography* (in Chinese), 2005, **28** (6): 734~739

[14] 任国玉, 徐德应, 石广玉, 等. 人类活动在中国气候演变中的作用. 见: 秦大河, 丁一汇, 苏纪兰, 主编, 中国气候与环境演变. 北京: 科学出版社, 2005. 455~506
Ren Guoyu, Xu Deying, Shi Guangyu, et al. Impact of human activities on climate change in China. In: *Climate and Environmental Change in China* (in Chinese), Qin Dahe, Ding Yihui, Su Jilan, Eds. Beijing: Science Press, 2005. 455~506