

曹敏,朱晓晨.中国地表太阳总辐射空间化模拟及其时空特征分析[J].气象研究与应用,2021,42(2):24–28.

Cao Min, Zhu Xiaochen. Spatial simulation and spatiotemporal changes analysis of total solar radiation on the earth's surface in China [J]. Journal of Meteorological Research and Application, 2021, 42(2): 24–28.

中国地表太阳总辐射空间化模拟及其时空特征分析

曹 敏¹, 朱晓晨^{2*}

(1 中海油气象台, 广东 湛江 524000; 2 南京信息工程大学, 南京 210044)

摘要:以 1960—2019 年全国 99 个气象台站太阳辐射观测数据和 839 个气象台站的气温日较差为基础数据,利用 Bristow–Campbell 太阳总辐射估算模型,对中国地表太阳总辐射进行空间化模拟,分析了太阳总辐射的时空变化特征。结果表明,中国地表太阳总辐射南多北少,西多东少,受地形海拔因素影响很大;青藏高原一带的地表太阳总辐射最大,四川盆地及新疆部分盆地区域的太阳总辐射最小;对研究区整体而言,分析期的地表太阳总辐射呈减小趋势,为 $-0.0074\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{yr}^{-1}$ 。

关键词:太阳辐射; Bristow–Campbell 模型; 时空分布

中图分类号: P422.1

文献标识码: A

doi: 10.19849/j.cnki.CN45–1356/P.2021.2.05

OSID:



引言

地球上的能量来源于太阳辐射,太阳辐射对地球生态系统至关重要,对大气系统的形成与变化起着决定性作用^[1]。太阳辐射是地球生态系统中生物和非生物很多重要过程中的动力,不可或缺的因子^[2]。地表太阳辐射的不同分布会影响云层分布、大气环流特征、湿度、降水,还会对生态系统模型,全球大气环流模型的参数产生影响等^[3–5]。

地表太阳辐射与温度、日照时间、湿度等气象因子有着密切的关系,很多学者早在 20 世纪初就开始利用气象因子构建太阳辐射的函数及模型。Angstrom 简单的利用了日照时数因子,发现日照时数与太阳辐射存在线性关系,同时他指出其它因子,诸如降水量、云量也与太阳辐射有某种联系,给后续学者提供了思考^[6]。Linke 在 1924 年提出太阳辐射与大气浑浊度、大气湿度相关联,并分析了相关因子^[7]。Kimball 着重分析了大气透射率与太阳辐射之间的关系,建立了大气透射率的相关函数模型^[8]。Black 在 Kimball 的基础上继续发展,利用部分台站的太

阳辐射及云量数据集,构建了全球太阳辐射的估算模型并分析了全球太阳辐射分布状况^[9]。此后,太阳辐射能源的开发利用使得众多学者投入到太阳辐射估算的研究中。Bristow 和 Campbell 建立了精度高达 70%~90%的太阳辐射估算模型,他们利用台站观测到的气温日较差数据及太阳辐射数据,建立以地温日较差、大气透射率为输入因子的太阳辐射关系函数,并得到很好的验证^[10]。刘玉洁和潘韬基于 1981—2010 年全国 122 个气象站的太阳辐射和气温日较差观测数据,将其输入校验后的 Bristow–Campbell 模型,实现太阳净辐射空间化模拟,得到的结论为:我国地表太阳净辐射高值区位于青藏高原,低值区位于川黔地区^[11]。

基于 1960—2019 年较长时间周期的太阳辐射观测数据及气温日较差数据,将在 Bristow–Campbell 模型的基础上,充分考虑气温对地表太阳总辐射变化的影响,将数字高程模型(DEM)和地理信息系统运用到中国不同区域的太阳辐射计算中,实现全国太阳总辐射的空间化模拟,分析其时空特征,从而得到太阳总辐射较为稳定的区域分布及长时间周期下

收稿日期: 2021–03–15

作者简介: 曹敏(1997—)男,江西九江人,学士,助理工程师,从事天气预报工作。E-mail: caomin2@cnooc.com.cn

* 通讯作者: 朱晓晨(1984—),男,江苏盐城人,博士,讲师,主要从事 GIS 在气象中应用研究。E-mail: xiaochen.zhu@nuist.edu.cn

的年际变化规律,为太阳能开发利用提供基础理论依据。

1 数据与方法

1.1 研究区与数据来源

研究区地理位置及辐射台站、气象台站分布较不均匀,中国东部地区台站较为密集,暂没有收录台湾气象及辐射数据,西部地区由于地形因素,人口较少,气候恶劣,布置的气象台站及辐射观测站点较少。

相关气象因子数据及太阳辐射数据来源于中国气象数据共享网国家气象科学数据中心(<http://www.cma.gov.cn/2011qxw/2011qsjgx/>),包括 1960—2019 年 839 个气象站点的日平均气温、日最高气温、日最低气温数据,及全国 99 个站点的日太阳总辐射数据。数字高程数据(DEM)的海拔高度空间分辨率为 1km*1km,由中国科学院资源环境科学数据中心提供。

1.2 研究方法

1.2.1 站点分区

根据中国区域的地形地势因素和气候因素,将全国划分为 7 大区域。气温较低的东北三省划为同一区域,纬度较高,地形平坦,为东北区;将河南、河北及山东等中纬度省划为同一区域,气候半湿润,降水较少,为中原区;将东南沿海省市区域及江西、湖南等省划为同一区域,长江流域珠江流域降水丰富,温度较高,为人口密集区,为华南区;将内蒙古横向狭长地域划为同一区域,牧场较多,气候偏干旱,为内蒙区;将新疆、甘肃等省划为同一地区,气候最为干旱,昼夜温差大,为西北区;将青藏高原地区划为同一地区,海拔较高,温度气压低,为青藏区;将四川盆地、云南、贵州 3 省划为同一地区,为西南区。如图 1 所示:

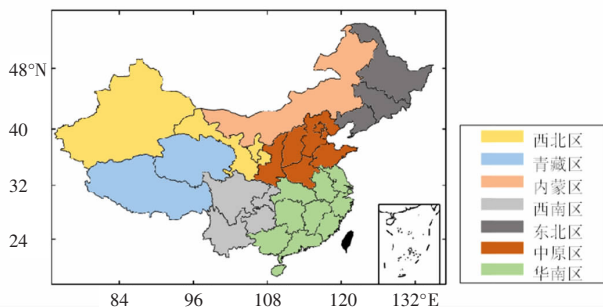


图 1 七大区域划分及各区域分布情况

1.2.2 天文太阳总辐射模型

天文太阳总辐射^[12]

$$Q_0 = T \cdot I_0 \cdot (\omega_0 \sin \varphi \sin \sigma + \cos \sigma \sin \omega_0) / (\pi \rho^2) \quad (1)$$

其中太阳常数 $I_0 = 1367 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 小时累计值为 $4.921 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, $T = 24$; φ 表示纬度。

$$\omega_0 = \arccos(-\tan \sigma \tan \varphi) \quad (2)$$

其中 ω_0 为日出时角;

$$\left(\frac{1}{\rho}\right)^2 = 1.00011 + 0.034221 \cos \theta + 0.00128 \sin \theta +$$

$$0.000719 \cos(2\theta) + 0.000077 \sin(2\theta) \quad (3)$$

$$\theta = 2\pi(N-1)/365 \quad (4)$$

其中 N 为一年中的日序;

$$\sigma = (0.006918 - 0.399912 \cos \theta + 0.070257 \sin \theta - 0.006758 \cos 2\theta + 0.000907 \sin 2\theta - 0.002697 \cos 3\theta + 0.00148 \sin 3\theta) \cdot (180/\pi) \quad (5)$$

其中 σ 为太阳赤纬。

1.2.3 Bristow-Campbell 模型

每日太阳总辐射与日最高气温和日最低气温 ΔT 存在如下关系^[13]:

$$T_i = A [1 - \exp(-B \Delta T^C)] \quad (6)$$

式中: T_i 为大气顶层太阳辐射通过大气层的透射率, A 、 B 、 C 均为经验系数, ΔT 为平均最高气温与平均最低气温之差。各参数均有一定的物理意义, A 表示晴朗无云条件下的大气透明度系数, B 和 C 决定气温日较差对太阳辐射的影响程度。

在计算晴朗无云条件下的大气透明度系数的过程中, Kreith 和 Kreider 提出一个经验方程, 其拟合的误差范围在 3% 以内, 计算公式为^[14]

$$A = 0.56 (e^{-0.56 M_h} + e^{-0.095 M_h}) \quad (7)$$

$$M_h = M_0 \frac{P_h}{P_0} \quad (8)$$

$$M_0 = [1229 + (614 \sin H)^2]^{1/2} - 614 \sin H \quad (9)$$

$$\frac{P_h}{P_0} = \left(1 - \frac{0.0065}{288} h\right)^{5.256} \quad (10)$$

式中: M_h 为一定高度下的大气量, M_0 为海平面的大气量, P_h/P_0 为大气压修正系数, H 为太阳高度角(rad), h 为海拔高度(m)。

地表水平面的太阳总辐射(Q)可以通过下面的公式表达^[15]:

$$Q = T_i \cdot Q_0 \quad (11)$$

1.2.4 模拟精度检验系数

Bristow-Campbell 模型的模拟精度采用 Nash-Sutcliffe 系数(Ens)来检验, 其计算公式为:

$$E_{ns} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - S_{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (S_i - S_{aver})^2} \quad (12)$$

式中: S_i 为实测值; S_{sim} 为模拟值; S_{aver} 为实测平均值; n 为实测数据个数。当 $S_i = S_{sim}$ 时, $E_{ns} = 1$; 若 E_{ns} 为负值, 说明模型模拟平均值比直接使用实测平均值的可信度更低^[16]。

2 结果与分析

2.1 模拟结果检验

中国大陆地表区域广袤, 模型在各大区域订正的系数有很大的差异性。B 系数最大在内蒙区(0.085), 最小在华南区(0.014); C 系数最大在中原区(2.341), 最小在内蒙区(1.399)。B、C 均为经验系数且具有物理含义, 详见公式(6)及参考文献。在各大区域进行精度检验, 拟合度良好。如表 1 所示:

表 1 全国七大区域 Bristow–Campbell 模型系数校正结果

自然区	Bristow–Campbell 模型经验系数		Nash–Sutcliffe 系数
	B	C	
西北区 (NW)	0.034	1.642	0.86
青藏区 (TB)	0.036	1.523	0.78
西南区 (SW)	0.017	2.301	0.91
内蒙区 (N)	0.085	1.399	0.88
中原区 (C)	0.016	2.341	0.79
华南区 (S)	0.014	2.199	0.94
东北区 (NE)	0.023	1.577	0.86

2.2 中国太阳总辐射模拟

根据公式(1)–(5), 计算全国各站点天文太阳总辐射; 基于数字高程数据(DEM)的海拔高度及各站点太阳高度角, 采用公式(8)–(10), 计算出全国的大气量分布, 进而采用公式(7)计算得到大气透明度系数; 采用公式(6)及公式(11), 经估算模式计算得到全国各站点的模拟值, 统计 1960—2019 年各站点太阳辐射的日均值, 使用地理信息数据分析平台, 实现中国大陆地表太阳总辐射的空间化模拟。从图 2 中可以看到: 中国大陆地表的辐射资源分布不均, 各地区差异性大。青藏高原一带的太阳总辐射为全国最高值, 多年日均值在 $18\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ 以上, 局部区域达到 $20\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ 以上。四川盆地及西北塔里木盆地为中国大陆的太阳总辐射最低值, 多年日均值不到青藏高原的一半, 在 $10\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ 以下。长江中下游以南

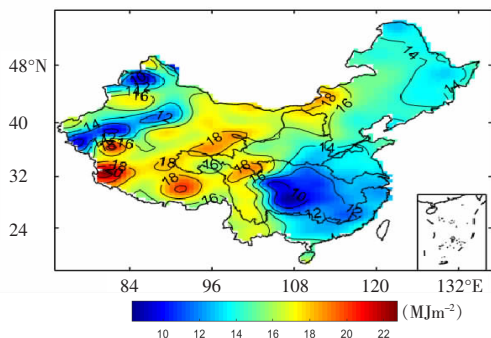


图 2 1960—2019 年全国太阳总辐射日均值

区域、四川盆地以东区域太阳总辐射值较小, 在 $12\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ 左右。华南区域接收大气上层的太阳辐射较多, 多年辐射日均值为 $14\sim 16\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ 。东北地区区域辽阔, 但由于海拔较高, 大气上层接收的太阳辐射较小, 到达地面的太阳总辐射损失率小, 多年辐射日均值为 $12\sim 14\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ 。内蒙地区的地表太阳总辐射较大, 多年辐射日均值在 $16\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ 左右, 最高值可达 $18\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ 。西北地区局地差异大, 山脉与盆地交错分布(三山夹两盆), 地形起伏十分大, 在海拔高的地区多年辐射日均值达到 $16\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ 以上, 而在海拔较低的盆地多年辐射日均值小于 $12\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

中国大陆地区的地表太阳总辐射分布总体上南多北少, 西多东少, 受地形海拔因素影响很大。

2.3 年际变化分析

对中国大陆各区域 1960—2019 年的地表太阳总辐射进行年际变化分析, 得到各区域的太阳总辐射拟合分布函数, 如图 3 所示; 对研究区整体而言, 1960—2019 年的地表太阳总辐射呈减小趋势, 地表总辐射变化趋势为 $-0.0074\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{yr}^{-1}$ 。中国大陆地表太阳总辐射年日均值在 $13.5\sim 15\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ 之间浮动, 1964—1976 年地表太阳总辐射有明显减小的趋势, 1977—1979 年地表太阳总辐射有一个上升的拐点, 而后在 1980—2005 年地表太阳总辐射在 $14\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ 上下浮动, 无明显变化趋势, 2006 年之后, 地表太阳总辐射呈上升趋势, 均值超过 $14\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

东北区、西北区、中原区及青藏区的地表总辐射呈减小趋势, 其中中原地区的太阳总辐射减小趋势最为明显; 内蒙区、华南区和西南区的地表太阳总辐射呈增加趋势, 其中西南地区的太阳总辐射增加最为明显。多数地区在 2014 年之后的太阳总辐射有明显增加趋势。该趋势的改变可能与城市化发展息息相关, 城市化进程与大气污染治理改变了大气透明度, 及城市内的温度分布, 进而改变了到达地表的太

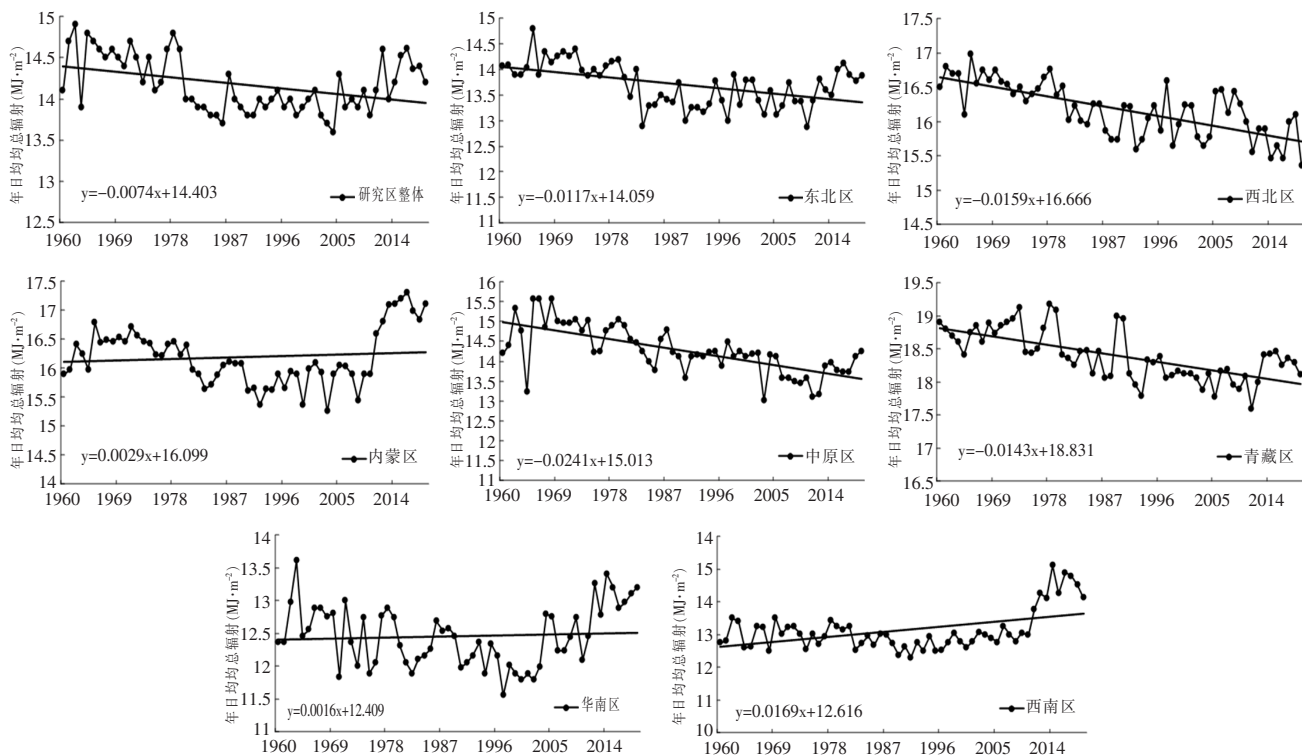


图3 中国各区域 1960—2019 年平均地表太阳总辐射变化趋势

阳总辐射。

3 结论

中国大陆地表的辐射资源分布十分不均,各地区差异性大,地表太阳总辐射分布总体上南多北少,西多东少,受地形海拔因素影响很大,该结论与刘玉洁和潘韬在 2012 年基于 Bristow-Campbell 模型模拟得到太阳辐射资源空间分布的结论一致^[11];邹玲基于中国大陆地区 1961—2013 年地表辐射日值数据集,构建多个地表太阳辐射估算模型,得到的太阳总辐射时空分布结论与本文一致^[17]。由于地理位置海拔高度因素,青藏高原一带的太阳总辐射为全国最高值,多年日均值在 $18\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ 以上,局部区域达到 $20\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ 以上。四川盆地及西北塔里木盆地为中国大陆的太阳总辐射最低值。

从年际变化来看,1960—2019 年中国地表太阳总辐射呈减小趋势。其中中原地区的太阳总辐射减小趋势最为明显,而内蒙区、华南区和西南区的地表太阳总辐射呈增加趋势,其中西南地区的太阳总辐射增加最为明显。

参考文献:

[1] 翁笃鸣.中国辐射气候研究[M].北京:气象出版社,1997.

- [2] Barker H W, Li Z. Improved simulation of clear-sky short-wave radiative transfer in the CCC-GCM[J]. Journal of climate, 1995, 8(9): 2213-2223.
- [3] Liu J, Chen J M, Cihlar J, et al. Net primary productivity distribution in the BOREAS region from a process model using satellite and surface data[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1999, 104(D22): 27735-27754.
- [4] Stöckle C O, Donatelli M, Nelson R. CropSyst, a cropping systems simulation model[J]. European journal of agronomy, 2003, 18(3-4): 289-307.
- [5] IPCC W G I. Climate Change 1995: The Science of Climate Change, Contribution of the WGI to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. (Eds. Houghton, JT, LG Meira Filho, BA Callander, N. Harris, A. Kattenberg and K. Maskell) Cambridge University Press[J]. UK, 1996.
- [6] Angstrom A. Solar and terrestrial radiation. Report to the international commission for solar research on actinometric investigations of solar and atmospheric radiation[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1924, 50(210): 121-126.
- [7] Franz L. Results of Measurements of Solar Radiation and Atmospheric Turbidity Over the Atlantic Ocean and in ARGENTINA—PRELIMINARY Report [J]. Monthly Weather Review, 1924(2): 157.

- [8] Kimball H H. Amount of solar radiation that reaches the surface of the earth on the land and on the sea, and methods by which it is measured [J]. Monthly Weather Review, 1928, 56(10): 393–398.
- [9] Black J N. The distribution of solar radiation over the earth's surface[J]. Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie Serie B, 1956, 7(2): 165–189.
- [10] Bristow, Keith L., and Gaylon S. Campbell. On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature[J]. Agricultural and forest meteorology, 1984, 31(2): 159–166.
- [11] 刘玉洁, 潘韬. 中国地表太阳辐射资源空间化模拟[J]. 自然资源学报, 2012, 27(8): 1392–1403.
- [12] 于海敬. 安徽省近 45 年日照时数时空分布及太阳辐射模拟优化[D]. 安徽: 安徽农业大学, 2018.
- [13] Allen R. Self-calibrating method for estimating solar radiation from air temperature[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 1997(2): 56–67.
- [14] Kreith F, Kreider J F. Principles of Solar Engineering [M]. New York: McGrawHill, 1978.
- [15] Thornton P E, Running S W. An improved algorithm for estimating incident daily solar radiation from measurements of temperature, humidity, and precipitation [J]. Agriculture and Forest Meteorology, 1999, 93: 211–228.
- [16] 田永中, 朱莉芬, 岳天祥. 水平面上太阳辐射空间模拟对比研究[J]. 地球信息科学, 2005, 7(4): 95–100.
- [17] 邹玲. 中国大陆地区地表太阳辐射估算及其时空变化分析[D]. 湖北: 武汉大学, 2017.

Spatial simulation and spatiotemporal changes analysis of total solar radiation on the earth's surface in China

Cao Min¹, Zhu Xiaochen²

(1. Meteorological Observatory of China National Offshore Oil Corporation, Zhanjiang Guangdong 524000;
2. Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044)

Abstract: In this paper, the solar radiation observation data of 99 meteorological stations and the daily temperature difference data of 839 meteorological stations from 1960 to 2019 were used as data sources. The Bristow–Campbell total solar radiation estimation model was used to realize the spatial simulation of total solar radiation in China and analyzed the characteristics of spatiotemporal changes of solar radiation from 1960 to 2019. The results show that the total surface solar radiation in China is much less in the north and east, and more in the south and west. Greatly affected by the terrain altitude, the total surface solar radiation in the Qinghai–Tibet Plateau is the largest, and the total solar radiation in the Sichuan and Xinjiang basins is the smallest. For the study area as a whole, the total surface solar radiation from 1960 to 2019 shows a decreasing trend, which is $-0.0074\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{yr}^{-1}$.

Key words: solar radiation; Bristow–Campbell model; space–time distribution