

华中地区太阳辐射时空变化特征

茅成铮, 时一文, 武乘烨, 杨松涛, 袁淑杰

成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都

收稿日期: 2025年6月16日; 录用日期: 2025年7月10日; 发布日期: 2025年7月18日

摘要

本文采用1961~2016年全国太阳总辐射及日照时数资料, 运用趋势分析等方法研究华中地区太阳辐射时空变化特征。结果表明: (1) 1961~2016年间华中地区年太阳总辐射呈显著下降趋势。多年平均值为4338.26 MJ/m², 1966年为最大值4600.00 MJ/m², 2014年为最小值4250.00 MJ/m²。四季太阳总辐射中除春季表现为不明显的上升趋势外, 其余季节均呈显著下降趋势($p < 0.05$)。 (2) 华中地区年及四季太阳总辐射分布特点均为自东北向西南递减。多年太阳总辐射平均值在3446.12~5326.83 MJ/m², 华中北部济源、焦作等市为最大值区, 西南恩施、湘西土家族苗族自治州最小值区。四季总辐射分布变化较大, 如春季相对低值区(657.00~1063.00 MJ/m²)范围最大, 秋季最大值区南移至华中南端永州市, 冬季相对最高值区范围为四季最广。

关键词

华中地区, 太阳总辐射, 时空变化, 变化趋势

Temporal and Spatial Variation Characteristics of Solar Radiation in Central China

Chengzheng Mao, Yiwen Shi, Chengye Wu, Songtao Yang, Shujie Yuan

School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu Sichuan

Received: Jun. 16th, 2025; accepted: Jul. 10th, 2025; published: Jul. 18th, 2025

Abstract

Based on the total solar radiation and sunshine hours data from 1961 to 2016, this paper studies the temporal and spatial variation characteristics of solar radiation in Central China by using trend analysis methods. The results show that: (1) The annual total solar radiation in Central China showed

a significant downward trend from 1961 to 2016. The multi-year average value is 4338.26 MJ/m², the maximum value is 4600.00 MJ/m² in 1966, and the minimum value is 4250.00 MJ/m² in 2014. In the four seasons, except for the insignificant upward trend in spring, the total solar radiation showed a significant downward trend in other seasons ($p < 0.05$). (2) The distribution characteristics of annual and seasonal total solar radiation in Central China are decreasing from northeast to southwest. The average annual total solar radiation is 3446.12~5326.83 MJ/m², and Jiyuan and Jiaozuo in the north of central China are the areas with the maximum area. Moreover, Enshi and Xiangxi Tujia and Miao Autonomous Prefecture are the smallest areas. The distribution of total solar radiation in the four seasons varies greatly. For example, the relatively low value area (657.00~1063.00 MJ/m²) in spring is the largest. The maximum value area in autumn moves southward to Yongzhou City, the southern end of Central China, and the relatively highest value area in winter is the widest in the four seasons.

Keywords

Central China, Total Solar Radiation, Spatial and Temporal Variation, Variation Trend

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

太阳辐射是地表能量的主要来源，到达地球的太阳辐射能量的多少和分布，对地表生物生活状态、农作物生长情况、能源分布等生物资源因素造成显著影响[1]。近年来，经济迅速发展导致能源需求不断增大，石油、天然气等不可再生资源逐渐短缺。人类迫切要求水能、风能、太阳能等更为清洁的可再生能源。

研究太阳辐射将帮助我们更好地分析气候情况及能源分布状态。此前有学者利用全国 62 个站点的 1986~2015 年逐日太阳总辐射数据检验，以此研究我国近 30 年太阳总辐射时空分布，发现近 30 年来我国太阳总辐射值总体保持在 3309.00~7580.00 MJ/m²，地域特点表现为西高东低[2]。又有周扬、吴文祥等选用西北地区 1961~2008 年 27 个辐射站资料与 1958~2008 年 163 个气象站资料以规则样条插值法评估西北地区太阳能资源与太阳辐射潜力，总结出西北地区中部太阳能资源最丰富，西部地区次之，东部及西南部资源最贫乏的规律[3]。而在我国南方，亦有李艳兰、何如等对华南区域太阳总辐射时空变化特征进行总体概括，发现华南大部分地区太阳总辐射量有每年减少 0.10~17.80 MJ/m² 的趋势[4]。同时，西南地区如云南等地也有学者利用云南省 1961~2000 年日照及有关辐射资料通过太阳总辐射计算公式计算全省太阳总辐射并分析，得出云南地区太阳总辐射整体呈西高东低的分布特点[5]。而湖南、湖北、河南三省所在的华中地区，尽管有张雪芬等[6]、刘可群等[7]以及杜东升等[8]分别利用对河南、湖北及湖南三省太阳辐射进行研究，发现各省太阳总辐射均表现为随时间变化下降的趋势，但其只局限于本省区域并未涵盖整个华中地区。

本文选用 1961~2016 年 56 年间全国 114 个辐射站及 814 个日照站逐日资料，对之前未曾做出整体分析总结的华中地区太阳辐射时空变化进行更为系统性地研究，揭示近几十年华中地区太阳辐射时空变化特征，为我国太阳能资源布局优化及进一步开发与利用提供新的数据分析支持。

2. 资料和方法

本文气象数据来源于中国气象数据网。采用全国 114 个辐射站点的 1961~2016 共计 56 年逐日太阳总

辐射数据,并选用全国 819 个日照站的 1961~2016 年逐日日照时数资料。地理数据来源于地理空间数据云网。在地理空间数据云网获取 90 m 分辨率华中地区高程数据作为底图,使用 ArcGIS 进行后续规则样条插值分析处理。同时按气象季节划分方法将季节划分为春季(3~5 月)、夏季(6~8 月)、秋季(9~11 月)、冬季(12 月~次年 2 月),对各年、季节做变化趋势分析并计算各年、季节气候倾向率,同时利用 Mann-Kendall 检验对年、四季变化做 M-K 趋势显著性检验,判断其变化的显著程度。

2.1. 太阳总辐射

由于我国辐射站点较少,为提高数据精度采用间接的辐射气候学计算方法计算相关辐射是有必要的[9]。早在 20 世纪 60 年代,左大康等就根据太阳总辐射月总量和日照百分率关系提出我国太阳总辐射气候学计算公式[10],之后有王炳忠等拟合西部地区的经验公式,进一步补充了我国太阳辐射计算的空白[11]。本文采用公认的太阳总辐射计算公式[12]:

$$Q = Q_0(a + bS_i)$$

式中: Q 为太阳总辐射, Q_0 为天文辐射, a 、 b 为经验系数, S_i 为日照百分率。

2.2. 天文辐射

天文辐射指未经大气削减的到达大气上界的太阳辐射[8],其计算公式为:

$$Q_0 = \frac{TI_0}{\pi\rho^2}(\omega_s \sin\varphi \sin\delta + \cos\varphi \cos\delta \sin\omega_s)$$

式中: Q_0 为天文辐射, T 为一天的时间(s), $\frac{1}{\rho^2}$ 为日地距离订正系数, I_0 为太阳常数($I_0 = 1367 \text{ W/m}^2$), ω_s 为日没时角, φ 为当地纬度(rad), δ 为太阳赤纬(rad)。

为计算天文辐射先计算日地距离订正系数、太阳赤纬及日没时角,其计算公式如下。

2.2.1. 日地距离订正系数

$$\frac{1}{\rho^2} = 1.00011 + 0.034221\cos\theta + 0.00128\sin\theta + 0.000719\cos 2\theta + 0.000077\sin 2\theta$$

2.2.2. 太阳赤纬

可从每年发布的天文年历中查出,或者通过计算公式计算[13]:

$$\delta = 0.006918 - 0.399912\cos\theta + 0.070257\sin\theta - 0.006758\cos 2\theta + 0.000908\sin 2\theta$$

在日地距离订正系数及太阳赤纬计算公式中, $\theta = \frac{2\pi}{365}(N-1)$ 。其中 N 表示日期在年内的排列序号,自 1 月 1 日为 1,平年至 12 月 31 日为 365,闰年至 12 月 31 日为 366。

2.2.3. 日没时角

杨建莹等[14]介绍了日没时角的计算公式:

$$\omega_s = \arccos(-\tan\varphi \tan\delta)$$

2.3. 日照百分率

$$S_i = \frac{H}{H_0}$$

式中: H 为实际日照时数, H_0 为太阳可照时间。

3. 华中地区太阳总辐射时空变化特征

3.1. 太阳总辐射模型误差分析及总辐射计算

利用华中及其周边地区 24 个辐射站 1961~2016 年逐日水平面太阳总辐射 Q 、逐日水平面天文辐射 Q_0 、以及日照百分率 S_i 资料, 对太阳总辐射模型以最小二乘法逐月进行拟合, 得出 24 个站的经验系数 a 、 b , 相关系数 R 及相对误差 RE 。选取代表华中及其周边地区上中下部的 3 个主要城市(上部: 济南, 中部: 宜昌, 下部: 南昌), 以各部分代表城市为例, 相关结果如表 1。

- (1) a 、 b 均通过 0.05 显著性检验。
- (2) 逐月相关系数整体基本在 0.5 之上。其中 7、8 两月相关系数为各月最好基本处于 0.7 及以上。而 1~2 月及 11~12 月的相关系数整体不甚良好处于 0.5 之下, 尤其以 1 月和 12 月最差相关系数基本在 0.15~0.49 之间。各月中, 济南 5 月份相关系数最大为 0.80197, 宜昌 1 月相关系数仅有 0.1673, 这说明该模型在拟合冬季太阳总辐射时效果会有所降低, 但就整体而言仍在可接受范围内。
- (3) 相对误差绝大多数在 0.1 之下。其中 6~8 月相对误差最小, 基本保持在 0.05~0.08 之间。1~2 月与 11~12 月的相对误差略大, 但也基本处于 0.14 以下。仅有南昌 2 月份相对误差为 0.1438 略微超过 0.14, 宜昌相对误差 0.1559 略微超过 0.15。通常认为绝对误差在 0.15 之下为可接受程度, 在 0.1 之下为良好程度, 这表明尽管 1~2 月与 11~12 月相关系数 0.14 在 12 个月中较差, 但其整体仍处于可接受范围内。
- 综上所述, 运用该模型模拟太阳总辐射是可以接受的。

Table 1. Empirical coefficients a and b in the calculation formula of monthly total solar radiation at 3 stations such as Jinan
表 1. 济南等 3 个站逐月太阳总辐射计算公式中的经验系数 a 、 b

站点	系数	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月
济南	a	0.1866	0.1640	0.1297	0.0898	0.0753	0.1303
	b	0.4314	0.4662	0.5398	0.6012	0.6409	0.5600
	R	0.5258	0.5943	0.7121	0.7594	0.8019	0.7418
	RE	0.0759	0.0872	0.0617	0.0613	0.0619	0.0650
宜昌	a	0.2513	0.1847	0.1164	0.0876	0.0932	0.1165
	b	0.1565	0.2540	0.3915	0.4973	0.5160	0.5103
	R	0.1673	0.2422	0.4313	0.5451	0.5796	0.5924
	RE	0.1116	0.1559	0.1201	0.0995	0.0925	0.0874
南昌	a	0.2077	0.1673	0.1017	0.1162	0.1209	0.1574
	b	0.2770	0.3408	0.4620	0.4716	0.5205	0.4363
	R	0.2633	0.3395	0.4529	0.5462	0.6191	0.5228
	RE	0.0929	0.1438	0.0999	0.0902	0.0611	0.0560
站点	系数	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
济南	a	0.1410	0.1424	0.1492	0.1433	0.1680	0.1874
	b	0.5104	0.5018	0.5053	0.5221	0.4871	0.4366
	R	0.7330	0.7235	0.6853	0.6915	0.5957	0.4811
	RE	0.0729	0.0706	0.0777	0.0630	0.0618	0.0924

续表

宜昌	<i>a</i>	0.1396	0.1389	0.1172	0.1233	0.1882	0.2459
	<i>b</i>	0.5080	0.5049	0.4712	0.4363	0.3178	0.1848
	<i>R</i>	0.6584	0.6660	0.5493	0.4567	0.3893	0.1843
	<i>RE</i>	0.0949	0.0803	0.1088	0.1124	0.1244	0.1278
南昌	<i>a</i>	0.1598	0.1875	0.1870	0.1748	0.2226	0.2014
	<i>b</i>	0.5196	0.4768	0.4521	0.4495	0.3294	0.3526
	<i>R</i>	0.6974	0.6820	0.5995	0.5592	0.4144	0.3362
	<i>RE</i>	0.0583	0.0504	0.0477	0.0691	0.0958	0.1139

3.2. 华中地区太阳总辐射随时间变化分析

运用太阳总辐射公式反算 1961~2016 年全国太阳总辐射逐月数据后, 提取华中地区所需辐射数据并进行年、四季多年平均太阳总辐射随时间变化的相关分析。

3.2.1. 华中地区年太阳总辐射随时间变化分析

图 1 为 1961~2016 年华中地区年太阳总辐射随时间变化图, 由图 1 可知, 1961~2016 年 56 年间华中地区的太阳总辐射随时间变化整体呈现波动下降趋势($p < 0.05$)。且华中地区年太阳总辐射的气候倾向率为 $-26.86 \text{ MJ/m}^2/10\text{a}$, 这表明华中地区年太阳总辐射整体下降十分明显。

尽管华中地区太阳总辐射呈下降趋势, 其太阳总辐射量在 56 年里均大于 4200.00 MJ/m^2 , 1961~2016 年间华中地区太阳总辐射平均值为 4388.26 MJ/m^2 , 绝大多数年太阳总辐射值位于 $4300.00\sim4500.00 \text{ MJ/m}^2$, 并在 1966 年达到最大值 4600.00 MJ/m^2 , 且自 1971 年之后年太阳总辐射出现明显的下降趋势, 直至 2014 年辐射值降至最小 4250.00 MJ/m^2 。这表明华中地区整体太阳辐射资源仍较丰富。

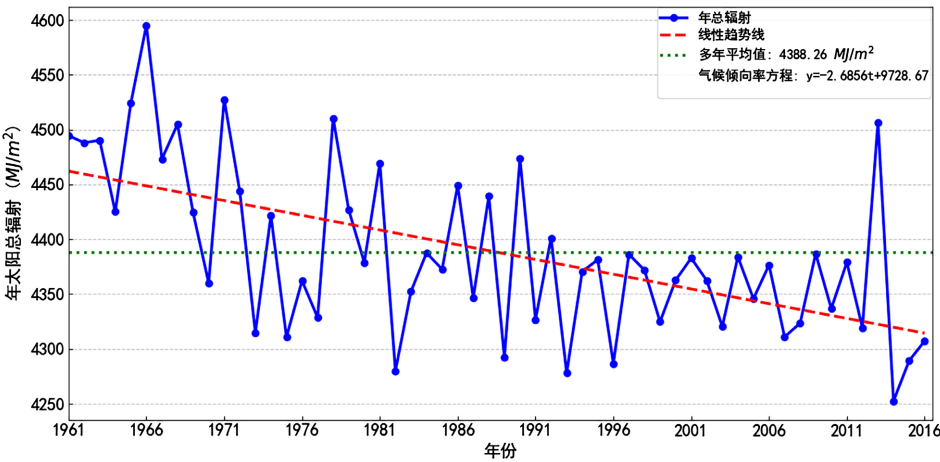


Figure 1. Variation of annual total solar radiation with time in Central China (1961~2016)
图 1. 华中地区年太阳总辐射随时间变化(1961~2016)

3.2.2. 华中地区四季太阳总辐射随时间变化分析

为更细致分析华中地区四季太阳总辐射变化趋势, 绘制四季太阳总辐射随时间变化图(图 2~5)。以春季变化(图 2)为例, 春季太阳总辐射随时间变化表现为不明显的上升趋势。其气候倾向率仅有 $1.38 \text{ MJ/m}^2/10\text{a}$, M-K 趋势显著性检验结果也并未通过 0.05 显著性检验, 这与春季太阳总辐射在 56 年变化间存

在不明显的上升趋势相吻合。而 1961~2016 年间, 华中地区春季太阳辐射资源始终保持在较丰富的水平。56 年间春季整体太阳辐射值在 1100.00 MJ/m^2 以上, 平均值为 1156.38 MJ/m^2 。期间太阳总辐射最大值出现在 2011 年为 1220.00 MJ/m^2 左右, 最低值出现在 1973 年为 1090.00 MJ/m^2 左右, 绝大多数太阳总辐射值处于 $1120.00 \sim 1200.00 \text{ MJ/m}^2$, 这表明, 春季太阳总辐射的不明显上升趋势对整体太阳辐射值影响较小。

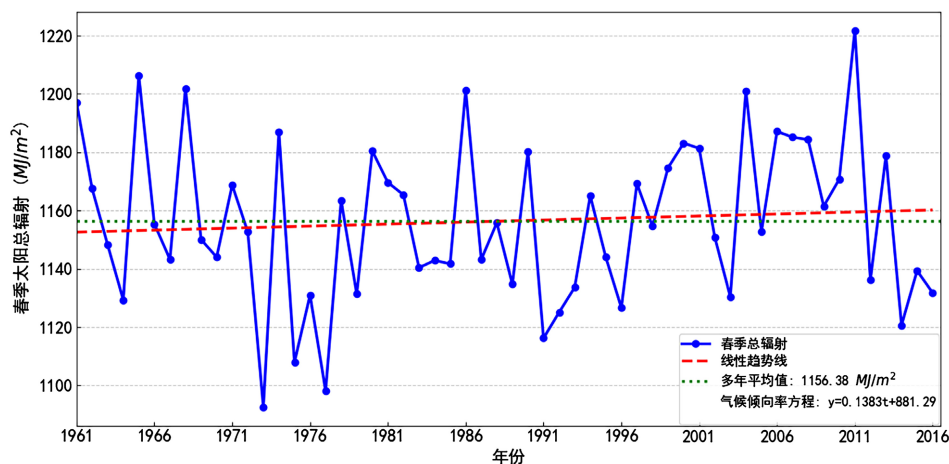


Figure 2. Variation of spring total solar radiation with time in Central China (1961~2016)

图 2. 华中地区春季太阳总辐射随时间变化(1961~2016)

夏季太阳辐射资源同样较为丰富, 由图 3 华中地区夏季太阳总辐射随时间变化可知, 56 年间夏季太阳总辐射值总体大于 1400.00 MJ/m^2 , 为四季最高。其多年平均值为 1526.22 MJ/m^2 , 期间太阳总辐射最大值出现在 1966 年为 1690.00 MJ/m^2 左右, 1993 年为最低值 1400.00 MJ/m^2 , 多数年份太阳总辐射值分布于 $1450.00 \sim 1600.00 \text{ MJ/m}^2$, 在中纬度地区属较高水平。

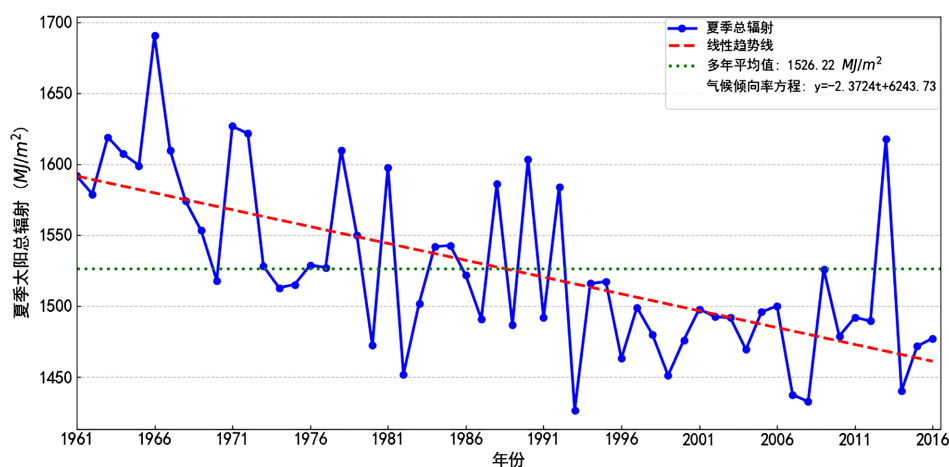


Figure 3. Variation of summer total solar radiation with time in Central China (1961~2016)

图 3. 华中地区夏季太阳总辐射随时间变化(1961~2016)

此外, 夏季太阳总辐射气候倾向率高达 $-23.72 \text{ MJ/m}^2/10\text{a}$, 这一值与年太阳总辐射气候倾向率 $-26.86 \text{ MJ/m}^2/10\text{a}$ 几乎相当, 其 M-K 趋势显著性检验也通过了 0.05 显著性检验, 上述结果表明夏季太阳总辐射随时间变化在 1961~2016 年间呈现出显著下降趋势。

与夏季相同,秋、冬两季太阳总辐射随时间变化同样表现为明显下降趋势($p < 0.05$),图4、图5分别为秋季、冬季华中地区太阳总辐射随时间变化图。

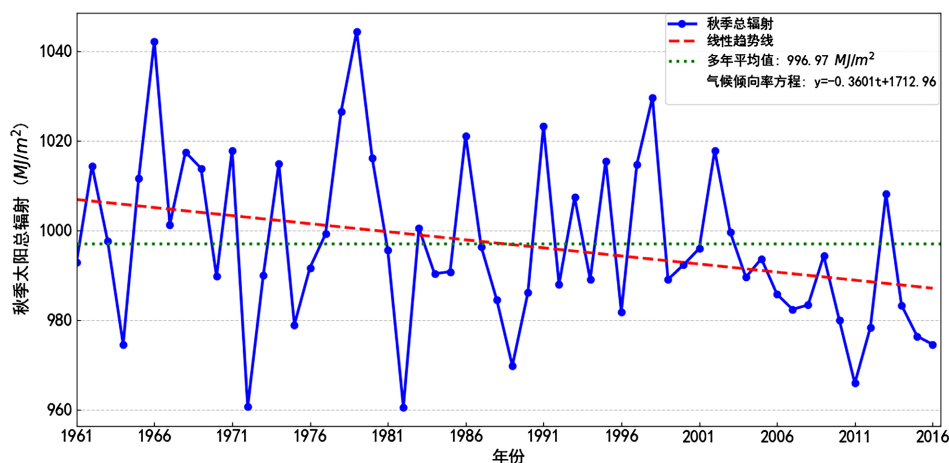


Figure 4. Variation of autumn total solar radiation with time in Central China (1961~2016)

图4. 华中地区秋季太阳总辐射随时间变化(1961~2016)

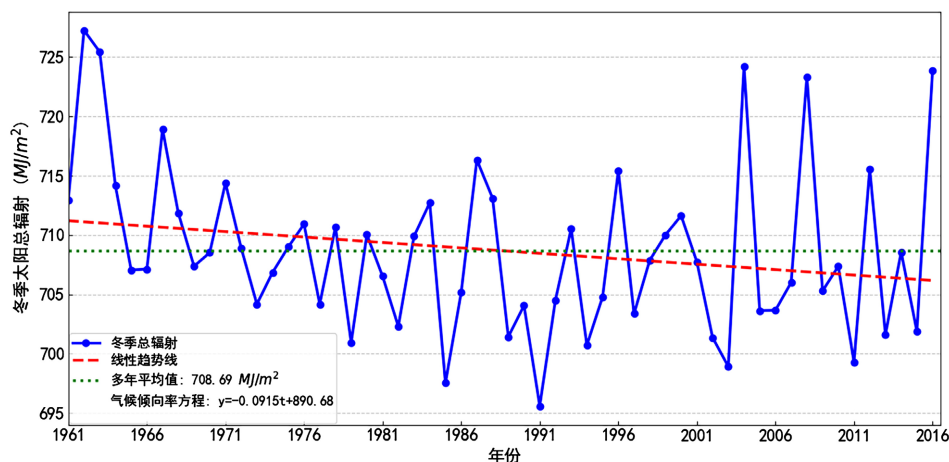


Figure 5. Variation of winter total solar radiation with time in Central China (1961~2016)

图5. 华中地区冬季太阳总辐射随时间变化(1961~2016)

由图4、图5可知,秋、冬两季气候倾向率均远小于夏季,这表明秋、冬两季太阳总辐射虽呈明显下降趋势但其降低速率远低于夏季。同时,秋冬两季56年间季内总辐射变化亦远小于夏季,秋季变化幅度为85.00 MJ/m²,冬季仅为33.00 MJ/m²为四季最小。这表明华中地区秋、冬两季太阳总辐射量在多年变化中整体较为稳定。

3.3. 华中地区华中地区太阳总辐射年变化特征

以华中地区各月平均辐射量绘制华中地区太阳总辐射年变化图(图6)进行年内变化分析。

如图6所示,华中地区月太阳总辐射平均量总体保持夏季最多,春秋次之,冬季最少的单峰型特点。其中,1月太阳总辐射量最少,仅为233.80 MJ/m²,1月之后太阳总辐射量开始逐渐增多至7月达到最大值为544.90 MJ/m²。在全年变化中,冬季(12月~次年2月)太阳总辐射季内变化最大,变化量仅为5.6

MJ/m²。而春季(3~5月)平均量变化最大,为141.00 MJ/m²,这表明冬季各月华中地区接收到的太阳辐射十分稳定,而春季受其余因素影响接收到的太阳辐射变化较大。此外,夏秋交替的8~9月平均量减少最快,达到109.20 MJ/m²,说明自9月开始太阳总辐射出现明显的降低。

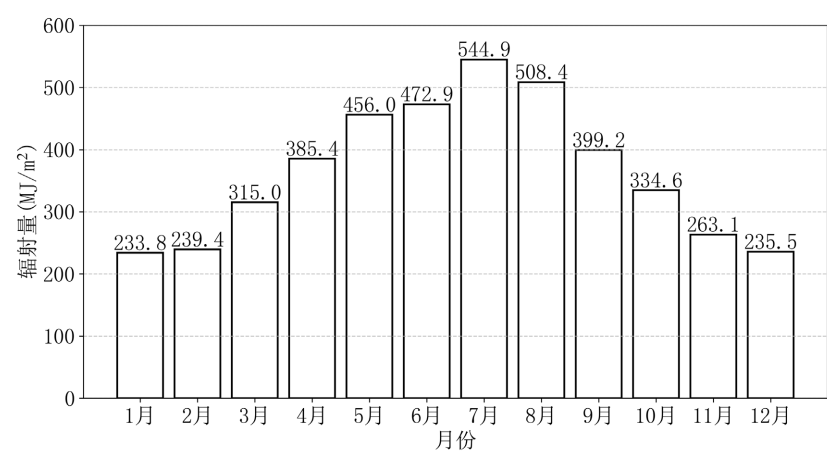


Figure 6. Variation of annual total solar radiation in Central China (1961~2016)
图 6. 华中地区冬季太阳总辐射随时间变化(1961~2016)

4. 华中地区太阳总辐射空间分布特征

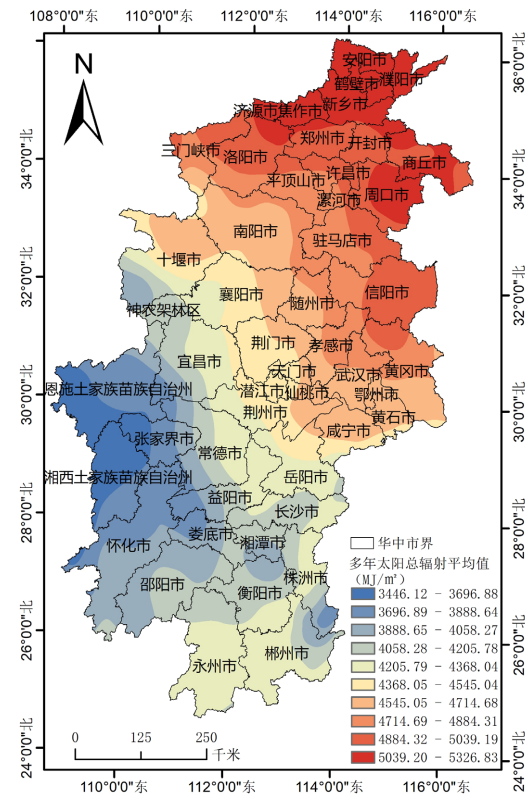
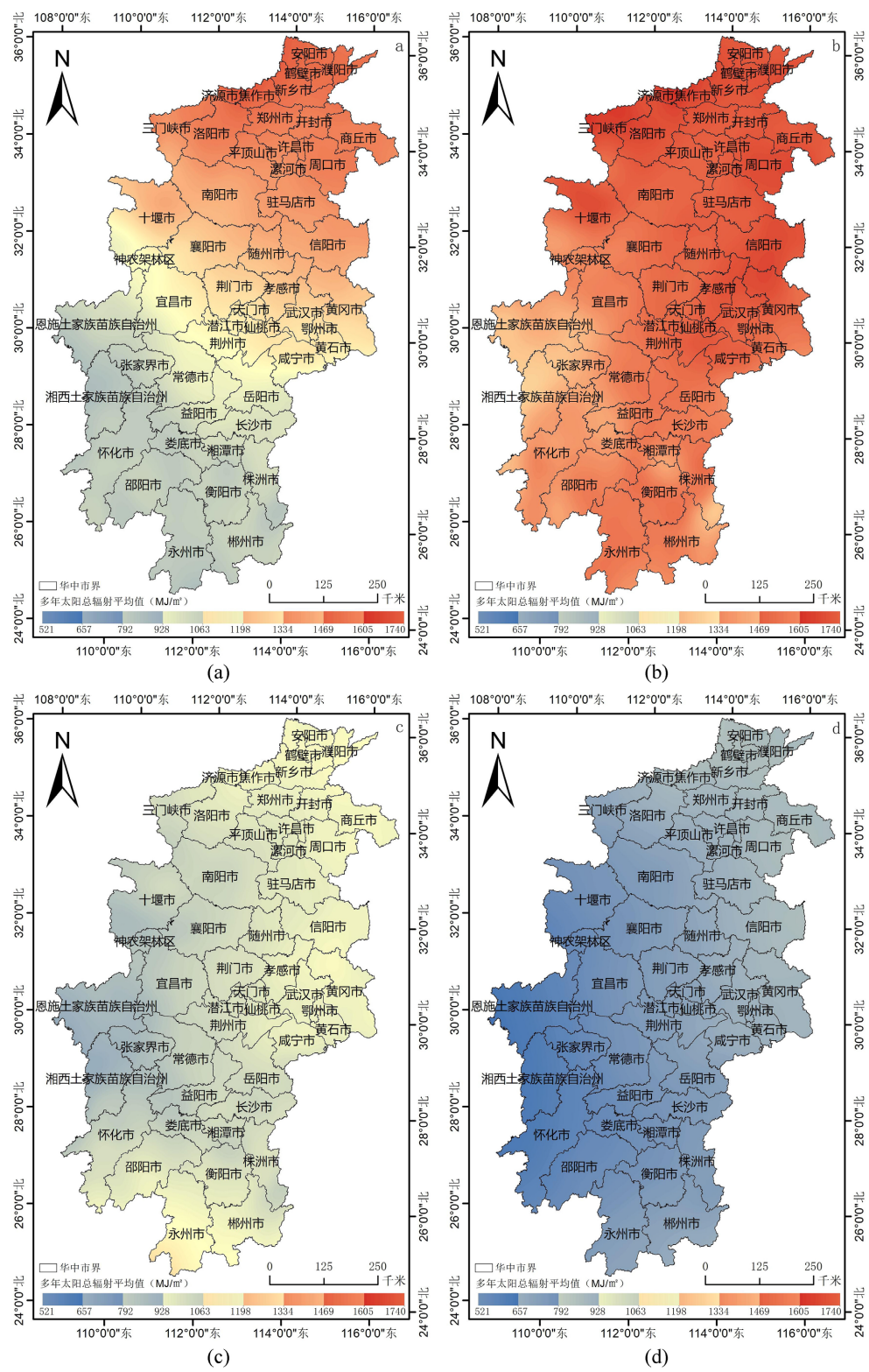


Figure 7. Spatial distribution of annual total solar radiation in Central China
图 7. 华中地区年太阳总辐射空间分布



注：使用软件 arcgis 制图。

Figure 8. Spatial distribution of total solar radiation in four seasons in Central China. (a) Spring; (b) summer; (c) autumn; (d) winter

图 8. 华中地区四季太阳总辐射空间分布。(a) 春季; (b) 夏季; (c) 秋季; (d) 冬季

在 ArcGIS 中以规则样条插值法插值后制作华中地区年及四季太阳总辐射空间分布图(图 7, 图 8)。

由图 7 可知, 华中地区多年太阳总辐射平均值在 3446.12 MJ/m^2 至 5326.83 MJ/m^2 , 且辐射分布的地域特点为自东北向西南递减。多年太阳总辐射平均最大值区为河南省济源、焦作、新乡等地区, 这些地区年太阳总辐射平均值均达到 5039.20 MJ/m^2 以上。

自郑州、开封等次大值区向西南多年太阳总辐射平均值进一步减少, 至华中西南端的恩施土家族苗族自治州西南部、湘西土家族苗族自治州中部及西北部地区, 多年太阳总辐射低于 3696.88 MJ/m^2 , 为辐射最低值区。

由图 8 可得, 四季多年太阳总辐射整体仍保持自东北向西南递减的规律, 但各季变化较大。其中夏季辐射值大于 1605.00 MJ/m^2 的最大值区位于华中北部的济源、焦作两市; 辐射值小于 1334.00 MJ/m^2 的最小值区为恩施土家族苗族自治州西南部及湘西土家族苗族自治州中部和西北部, 最值区与全年分布相吻合。

而春季太阳总辐射相对低值区($656.00 \sim 1063.00 \text{ MJ/m}^2$)在四季中范围最广, 基本涵盖整个华中地区的南部。夏季面积则大幅缩小至恩施土家族苗族自治州、湘西土家族苗族自治州及张家界市, 秋季略微增大后冬季进一步向南扩张至怀化等市。相对最高值区变化同样显著, 四季中仅有秋季相对最高值区($1063.00 \sim 1198.00 \text{ MJ/m}^2$)南移至华中南端的永州市, 其余三季最高值区均位于华中北部。

5. 主要结论

(1) 1961~2016 年间华中地区年太阳总辐射随时间变化呈波动下降趋势。过程中年太阳总辐射最大值出现在 1966 年为 4600.00 MJ/m^2 , 最小值出现于 2014 年为 4250.00 MJ/m^2 , 且 1971 年之后年太阳总辐射出现明显的下降趋势。而四季太阳总辐射中除春季太阳总辐射整体表现为不显著的上升趋势外, 其余三季均表现为显著下降趋势($p < 0.05$), 但年及各季太阳总辐射量在中纬度地区仍属较高水平。

(2) 华中地区年及四季太阳总辐射分布的地域特点都表现为自东北向西南递减的特点, 但季节空间分布变化很大。其中年太阳总辐射平均值在 $3446.12 \sim 5326.83 \text{ MJ/m}^2$ 之间, 最大值区位于华中北部济源、焦作等市。最小值区位于华中西南部恩施、湘西土家族苗族自治州。

四季变化中, 春季太阳总辐射相对低值区($657.00 \sim 1063.00 \text{ MJ/m}^2$)范围最广, 夏季太阳总辐射最值分布与全年基本相当, 秋季相对最高值区($1063.00 \sim 1198.00 \text{ MJ/m}^2$)南移至华中南部永州市, 冬季最高值区范围最大。

6. 存在的问题与展望

由于 2017 年及以后的辐射站点数据形式与此前相比发生了较大改变, 很难统一起来用作数据处理分析, 导致分析时间段只能集中于 1961~2016 年间而对华中地区太阳总辐射近 10 年的变化了解甚少。同时, 由于时间问题原始数据中缺测漏测数据较多, 对于这些数据使用多年平均的方式代替其实际值, 难免与实际情况有所偏差。

未来工作将集中于两方面: 其一为找寻更为准确精细的方法, 如 EM 算法、机器学习等更为稳健准确的方法对缺测漏测数据进行处理, 进一步提高整体数据的精确度, 提升研究结果的准确性; 其二为延长选取长度, 对 2017 年之后的辐射及日照数据进行处理, 并与 1961~2016 年数据相结合, 重新运用太阳总辐射公式对华中地区太阳总辐射进行研究, 以此对华中地区太阳辐射时空变化进行时效性更强的分析。

基金项目

成都信息工程大学科学技术创新能力提升项目(KYQN202205); 2025 年度大学生创新训练项目

(X202510621004); 中国气象科学研究院科技合作项目(2024002K): 复杂地形区太阳能资源精细化评估及价值转化研究与实践 - 以中国西南地区为例。

参考文献

- [1] 周晋, 晏刚, 吴业正. 北京地区的太阳辐射分析[J]. 太阳能学报, 2005, 26(5): 712-716.
- [2] 喻丽, 王姝苏, 褚荣浩, 等. 近 30 年中国太阳总辐射时空特征及趋势分析[J]. 安徽农业科学, 2017, 45(33): 192-196, 239.
- [3] 周扬, 吴文祥, 胡莹, 等. 西北地区太阳能资源空间分布特征及资源潜力评估[J]. 自然资源学报, 2010, 25(10): 1738-1749.
- [4] 李艳兰, 何如, 杜尧东. 华南区域太阳总辐射的时空变化特征[J]. 可再生能源, 2012, 30(1): 13-16.
- [5] 范立张, 解明恩, 杨晓鹏, 等. 云南太阳能资源时空分布特征与区划评估[J]. 太阳能学报, 2025, 46(2): 496-504.
- [6] 张雪芬, 陈东, 付祥健, 等. 河南省近 40 年太阳辐射变化规律及其成因探讨[J]. 气象, 1999(3): 22-26.
- [7] 刘可群, 陈正洪, 夏智宏. 湖北省太阳能资源时空分布特征及区划研究[J]. 华中农业大学学报, 2007, 26(6): 888-893.
- [8] 杜东升, 张剑明, 张建军. 湖南省太阳能资源时空分布特征及评估[J]. 中国农学通报, 2015, 31(36): 170-175.
- [9] 鞠晓慧, 屠其璞, 李庆祥. 我国太阳总辐射气候学计算方法的再讨论[J]. 南京气象学院学报, 2005, 28(4): 516-521.
- [10] 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[J]. 气象学报, 1963(1): 78-96.
- [11] 王炳忠, 邹怀松, 殷志强. 我国太阳能辐射资源[J]. 太阳能, 1998(4): 19.
- [12] 翁笃鸣. 中国辐射气候[M]. 北京: 气象出版社, 1997: 111-113, 21-123.
- [13] 于贺军. 气象用太阳赤纬和时差计算方法研究[J]. 气象水文海洋仪器, 2006(3): 50-53.
- [14] 杨建莹, 刘勤, 严昌荣, 等. 近 48a 华北区太阳辐射量时空格局的变化特征[J]. 生态学报, 2011, 31(10): 2748-2756.