

方琼玉,谭佳勇,丁美花,等. 基于气候学方法的太阳能资源估算研究概述[J]. 气象研究与应用,2023,44(2):87-91.

Fang Qiongyu,Tan Jiayong,Ding Meihua,et al. Summary of solar energy resource estimation based on climatological methods [J]. Journal of Meteorological Research and Application,2023,44(2):87-91.

基于气候学方法的太阳能资源估算研究概述

方琼玉¹, 谭佳勇², 丁美花^{3*}, 何立³, 杨鑫³, 莫雁雯⁴, 吴怡⁵

(1.桂林市气象局, 广西 桂林 541001; 2.河池市气象局, 广西 河池 547099; 3.广西壮族自治区气象科学研究所, 南宁 530022; 4.阳朔县气象局, 广西 阳朔 541900; 5.龙胜县气象局, 广西 龙胜 541700)

摘要: 气候学方法是一种传统、简便而有效的分析评估太阳能资源的方法。本文回顾了气候学方法估算太阳能资源的研究进展,并针对研究方法和结果进行了比较、分析及总结,提出了存在问题以及改进与应用展望。

关键词: 气候学; 太阳能; 估算; 概述

中图分类号: TK511

文献标识码: A

doi: 10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2023.2.15

引言

目前,各地对太阳能资源监测评估并开发利用已成为一个行业热点,我国大部地区的太阳能资源优于欧美地区。目前估算太阳能资源的主要方法有:基于地面观测资料的统计反演法即气候学方法、基于卫星遥感观测资料的统计反演法、基于辐射传输理论的物理反演法和复杂地形下的计算方法等^[1-2]。在上述方法中,气候学方法是一种在太阳能资源评估领域中较早得到广泛应用的方法之一。有许多专家学者应用该方法在不同区域进行太阳能资源的评估计算,获得了基于该区域气象观测数据的太阳能资源评估计算结果,并应用于光伏发电、特色农业开发等领域^[3-29]。本文针对气候学方法将前人的研究进行总结、分析和展望,供同行参考。

1 气候学方法研究概述

太阳能资源是指特定时间段内(如日、月、年)水平面上太阳辐射量的累计值,为太阳直接辐射和散射辐射之和,常用的单位为兆焦耳每平方米(MJ/m²)。目前国内外太阳总辐射的气候学计算方法可归

纳为如下公式^[30]:

$$Q=Q_0f(s,n) \quad (1)$$

其中, Q 为地表接收到的太阳总辐射, Q_0 为太阳总辐射初始值, $f(s,n)$ 是以日照时数百分率 s 和总云量 n 表示的天空遮蔽度函数。

1.1 太阳总辐射初始值 Q_0

气候学方法计算太阳总辐射初始值 Q_0 有三种:晴天大气总辐射、理想大气总辐射、天文总辐射^[1]。我国高海拔区域幅员辽阔,日射站点稀疏,虽然晴天大气总辐射更接近实际,但要考虑大气中的水汽和其它液态、固态颗粒的影响,计算量较大,且有较多误差,海拔高度和纬度不能同时兼顾,存在较大困难,因而使用晴天大气总辐射来计算太阳总辐射量存在较大困难^[3]。选择理想大气总辐射可以得到任意海拔高度和纬度组合点的辐照量,但涉及参数较多,计算量大,较难采用^[3]。另外,祝昌汉等^[31]研究表明,理想大气不同海拔高度上的差异仅限于大气分子对太阳辐射的散射和吸收,即使有差异也并不显著。虽然天文总辐射没有考虑大气对太阳辐射的削弱作用,但回归系数中隐含有大气对太阳辐射到达地面的影响,而且计算天文辐射所需参数容易获得,

收稿日期: 2022-11-10

基金项目: 广西重点研发计划项目(桂科 AB22035069)、广西壮族自治区气象局青年人才培养项目(桂气科 2022QN07)及河池重点研发计划项目(河科 AB220704)

作者简介: 方琼玉(1977—),女,工程师,主要从事气象科技服务工作。

* 通讯作者: 丁美花(1973—),女,硕士,正研级高级工程师,主要从事遥感技术应用研究工作 E-mail:190034143@qq.com

多数研究者选择天文总辐射为初始值^[18-19,27]。

天文总辐射的计算公式

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

其中, Q_n 为日天文总辐射量, 单位 $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$; T 为时间周期, 为 $24 \times 60 \text{min} \cdot \text{d}^{-1}$; I_0 为太阳常数, 取 0.0820, 单位 $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$; ρ 为日地距离系数, 无量纲; φ 为地理纬度, 单位为弧度 (rad); δ 为太阳赤纬, 单位为弧度 (rad); ω_0 为日落时的太阳时角, 单位为弧度 (rad)。根据公式 (2), 则可计算出 Q_0 。

1.2 天空遮蔽度函数 $f(s, n)$

在天空遮蔽度函数 $f(s, n)$ 的计算过程中, 云量时空变化大, 其数值带有很大的主观性和不确定性, 而日照数据可以直接通过气象站自动观测获得, 同时王炳忠^[4]、刘绍民^[5]等研究表明用日照百分率 $f(s)$ 表示天空遮蔽度函数比用云量 $f(n)$ 效果好。此外, 用双因子 $f(s, n)$ 表示天空遮蔽度函数比单因子 $f(s)$ 略好, 但差距不大。因此, 现有研究^[7,13]大多使用日照百分率 $f(s)$ 表示天空遮蔽度函数。

综上, 从简单实用的角度出发, 太阳总辐射量的计算采用以天文总辐射为基础辐射和日照百分率表示天空遮蔽度的公式^[11,27], 表达如下:

$$Q = Q_0(a + bs) \quad (3)$$

其中, Q 为太阳总辐射; Q_0 为天文总辐射; s 为日照时数百分率; a 和 b 为经验系数。

月日照时数百分率 s 计算公式

$$S = \text{INT}(h/T_A) \quad (4)$$

其中 h 为月日照时数, T_A 为月可照时数。

公式 (3) 中系数 a 、 b 的物理意义与初始值和气候要素的选取有关, 云、大气、地形以及观测仪器等都可以影响其值。不同的 a 、 b 系数建立的太阳辐射计算公式对太阳总辐射量的估算值存在一定的差异, 不同地域特征有不同的最佳选择, 因此使用合理方法开展 a 、 b 系数估算是太阳总辐射计算的关键。在有总辐射及日照时间观测的气象站 (日射站), 根据实际总辐射和日照百分率数据, 通过拟合、回归等方法计算获得 a 、 b 系数。但我国的日射站较少只有 100 多个, 且分布不均, 因此需要将日射站的 a 、 b 系数, 通过一定的方法延伸到非日射站, 而且要保证精度。

将日射站计算得到的 a 、 b 系数延伸到一般站是个关键问题, 计算精度在很大程度上取决于 a 、 b 系数空间分布的规律性。对一定区域的 a 、 b 系数的确

定通常采用两种方法^[2], 一种是区域平均取值法即在所研究的广大区域范围内取一组统一的系数值, 或将整个研究地区分成若干个小区域, 将实测的总辐射、日照百分率或云量间关系相近的各站点划在同一个小区内, 每个区域取一组统一的系数值, 区域划得越小, 总辐射计算值的精度就越高, 在该方法中, 按照纬度进行分区的方法是较常用的方法。另一种是连续变化取值法, 即根据日射站点的经验系数, 画出等值线分布图, 内插得到各地的系数值, 如果站点稀少、云和大气状况变化较大的地区, 则需要寻求经验系数与地面常规气象要素的数学关系, 利用确定的数学公式求得各气象台站的系数值, 进而以各日射站的经验系数值为主要依据, 参照各气象站的系数值作等值线分布图, 然后再在该等值线图上用反距离权重等插值方法计算各地的经验系数值。

区域平均取值法和连续变化取值法推算得到的 a 、 b 系数, 在不同的地区适用性存在差异, 从而影响地面总辐射估算精度^[1]。选取河北^[6]、江苏^[7]和广西^[11]有代表性的研究个例进行分析, 以期得出相关结论供参考。

于长文等^[6]用河北省周边 8 个日射站逐月日照百分率资料和太阳总辐射资料, 采用最小二乘法拟和经验系数 a 、 b , 再分别通过纬度分区和反距离权重插值两种方法得到河北省 142 个测站的经验系数 a 、 b , 并据此求出河北省四个辐射观测台站的总辐射值, 对比分析实测值与不同经验系数下总辐射估算值之间的差异。结果表明采用纬度分区法所得的经验系数在计算太阳辐射年总量时, 与实际观测值更为接近。于长文等^[6]同时发现, 受纬度和地形的影响 a 、 b 系数值存在明显的区域差异, 表现为北部地势较高地区系数 a 值最大, 在南部系数 a 值最小, 系数 b 值分布特征与系数 a 值的分布特征恰好相反。

买苗等^[7]利用江苏省 7 个日射站及淮安 3 个日射站资料, 采用反距离权重、克里格及径向基函数 3 种插值方法对江苏省 70 个站点的经验系数进行空间插值, 并用南京站、吕泗站作为结果进行检验, 结果表明采用反距离权重插值方法得到的经验系数 a 、 b 误差最小。

何如等^[11]利用 1961—2010 年广西 3 个辐射站的太阳总辐射和 90 个国家气象站的日照资料, 根据南宁、桂林 (1961—2010 年) 和北海 (1993—2010 年) 的历年各月太阳总辐射、同期天文辐射以及日照百分率, 采用最小二乘法计算, 得到三个辐射站各月的

经验系数 a、b 值(表 1)。然后利用站点分区法,以桂林、南宁、北海 3 个辐射站为中心,其它 87 个站按照相关系数最大法归入相应的三个辐射站片区。24°N 以北 42 个站归入桂林(Ⅰ区),中南部地区 36 个站归入南宁(Ⅱ区),南部沿海地区 12 个站归入北海(Ⅲ

区)。此研究成果促进了广西区内各地市对太阳能资源可利用量的评估工作,对太阳能产业开发和推广起到了指导作用。但由于辐射站太少,a、b 值站点分区归入法产生的误差不能确定,由此建立的各地太阳辐射方程所计算出来的辐射量也存在不确定的误差。

表 1 广西三个辐射站各月经验系数 a、b 值

| 站点 | 项目 | 1 月 | 2 月 | 3 月 | 4 月 | 5 月 | 6 月 | 7 月 | 8 月 | 9 月 | 10 月 | 11 月 | 12 月 |
|----|----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 南宁 | a | 0.1401 | 0.1294 | 0.1390 | 0.1668 | 0.2499 | 0.2138 | 0.2272 | 0.3679 | 0.2710 | 0.2601 | 0.1950 | 0.1671 |
| | b | 0.6448 | 0.6677 | 0.5876 | 0.5382 | 0.3630 | 0.4725 | 0.4202 | 0.1487 | 0.3789 | 0.3969 | 0.5165 | 0.5815 |
| 桂林 | a | 0.1135 | 0.1212 | 0.1077 | 0.1519 | 0.1266 | 0.1901 | 0.2110 | 0.2510 | 0.1765 | 0.1706 | 0.1567 | 0.1555 |
| | b | 0.6944 | 0.6314 | 0.6745 | 0.4676 | 0.6447 | 0.4617 | 0.4282 | 0.3726 | 0.5366 | 0.5503 | 0.5718 | 0.5570 |
| 北海 | a | 0.2063 | 0.1901 | 0.2053 | 0.1502 | 0.1802 | 0.2123 | 0.2562 | 0.2999 | 0.1788 | 0.2754 | 0.3095 | 0.2403 |
| | b | 0.4810 | 0.5149 | 0.4048 | 0.6220 | 0.5379 | 0.4830 | 0.4043 | 0.3215 | 0.5564 | 0.4108 | 0.3364 | 0.4553 |

由上述典型个例分析可以看出,在中高纬度地区按照纬度分区法和反距离权重插值方法结果误差较小,但是在低纬度多云丘陵地区,按照上述方法计算出来的辐射量存在不确定的误差,需要进一步研究。

2 目前存在问题

虽然气候学方法具有物理意义明确、计算简单、结果精度较高等优点而被广泛应用^[1],但该方法存在未考虑地形遮蔽影响、过度依赖地面观测数据等缺点,其计算误差和局限性主要体现在三方面:一是由于日射站选址通常在相对平坦的地方,地形遮蔽问题没有反映出来,但在实际的区域计算中,不可避免的会遇到山地或丘陵等复杂地形,它们对于太阳辐射的遮蔽作用会给计算结果带来一定的误差;二是经验系数的确定依赖于地面台站的辐射观测值,在日射站稀疏而地形又比较复杂或者云和大气状况的时空变化大的地区^[11,19],比如广西区域,采用内插方法或区域平均法得到的经验系数可能会给计算结果带来较大的误差,而且这种误差还难以评估;三是由于统计方法本身的局限性,计算结果难以准确反映出地面辐射极值的分布,无法满足实际开发利用的需求^[1]。

3 改进展望及应用前景分析

随着计算科学的发展,卫星遥感技术的成熟及辐射传输理论的运用,在保留气候学方法优点的基础

上,需要对传统气候学方法进行改进,进一步提高其计算精度,更好的服务于太阳能资源评估开发领域^[32]。

3.1 增加地面观测站点

在气候学方法中,由于 a、b 系数的确定是依赖于日射站点的太阳总辐射值和日照百分率值,非日射站由相邻日射站的 a、b 系数值估算得到。因此,增加地面观测点(日射站)的密度,获得 a、b 系数的空间分布细节,可提高总辐射计算精度。目前各地都建设了很多农田、生态等小气候观测站,观测要素包括了太阳辐射数据,应该充分的利用这些数据,加强技术研究,获得精细化的 a、b 系数。

3.2 使用合理的基础辐射量

晴天大气总辐射、理想大气总辐射、天文总辐射三种辐射数据各有优缺点^[1]。天文辐射最简便,但距离实际相差太远,适用于地形比较平坦开阔区域。考虑到我国地形复杂,地势高低不平造成气柱厚度有差异,若采用天文辐射则不能反映出这样的差异。20 世纪七十年代末,王炳忠等^[4]曾提出利用理想大气总日射辐照量代替天文辐照量作为计算的基础辐射量。理想大气辐射可以计算任意经纬度点的辐照量,还可以分担影响太阳辐射的大气因子的“责任”,如果计算条件达到要求,再把水汽、气溶胶的影响也予以考虑,高精度的理想大气辐射量的计算就可以实现。王炳忠等^[3]还充分考虑晴天辐射量在太阳能资源计算评估中的重要性,利用 SMARTS 模式依据每个气象站的平均气压、绝对湿度、能见度等数据推算

出符合当地环境条件的晴天辐射数据,作为基础辐射数据,进而达到考虑各地真实大气条件来计算晴天辐射的目的。

在各地太阳能资源评估计算时,建议同时计算当地的晴天大气总辐射、理想大气总辐射、天文总辐射,并进行对比分析,选取合理的基础辐射数据,进而得到高精度的实际太阳总辐射量。

3.3 引入卫星遥感数据

20 世纪下半叶以来,随着辐射传输理论的发展和卫星遥感观测技术的逐渐成熟及其观测资料在时空连续性方面的明显优势,遥感技术具有信息量大、观测范围广、精度高、速度快以及实时性和动态性强等特点,越来越多的研究者开始研究利用卫星遥感资料计算地面太阳辐射量。比较简单实用的方法为统计反演法,该方法反演太阳辐射量主要有两种思路,其一是建立卫星测值与所要计算地面辐射量之间的回归关系,然后根据地面辐射量的观测值确定回归系数。其二称之为云量反演法,基本思路是首先利用卫星遥感资料反演得到云对太阳辐射的影响因子(可以是云量,也可以是由云量派生出的其他因子),然后利用气候学方法计算到达地面的太阳辐射。利用卫星遥感反演技术可以弥补气候学方法在无测站地区推算误差大的缺陷。

4 结论

在太阳能资源研究评估方法中,气候学方法是一种成熟而且有用的方法,但由于各地情况不一,甚至千差万别,因此,不能生搬硬套其它地区的做法。

各地所采用的太阳能资源计算公式,需要通过由计算公式的估算值和实际观测值进行对比和验证,符合要求才能采用。

在大数据时代,应建立和完善太阳辐射基础数据库,加强计算的精准度,增加太阳辐射地面观测站的数量,引入多元辐射数据,构建适合各地地形地貌和地域特点的太阳能资源评估计算模型,提高太阳辐射的计算精度;尝试运用多种观测资料和计算方法,如加强卫星遥感和人工智能技术的综合应用,以弥补监测站点空间分布不足,提高结果精度。

参考文献:

[1] 申彦波.我国太阳能资源评估方法研究进展[J].气象科技进展,2017,7(1):77-84.
[2] 申彦波.近 20 年卫星遥感资料在我国太阳能资源评估

中的应用综述[J].气象,2010,36(9):111-115.

- [3] 王炳忠,申彦波.自然环境条件下对太阳能资源计算影响的再思考[J].应用气象学报,2012,23(4):505-512.
[4] 王炳忠,张富国,李立贤.我国的太阳能资源及其计算[J].太阳能学报,1980(1):1-9.
[5] 刘绍民,李银芳.新疆月太阳总辐射气候学计算方法的研究[J].干旱区地理,1997,20(3):75-81.
[6] 于长文,许琴慧,秦莉,等.河北省太阳总辐射经验系数两种气候学计算方法的比较分析[J].气象与环境学报,2014,30(3):78-84.
[7] 买苗,火焰,俞亚勋.太阳辐射经验系数插值方法的比较[J].气象与环境学报,2011,27(5):42-45.
[8] 李芬,马年骏,刘邦银,等.上海地区太阳能资源评估与散射辐射推算方法研究[J].水电能源科学,2015,33(5):207-210.
[9] 董泽亮,王欢,韩翔洋.太阳总辐射的简易计算——以辛集市总辐射计算为例[J].现代农业科技,2021(1):183-184.
[10] 解福燕,丁圣.玉溪太阳能辐射资源分布特征[J].云南地理环境研究,2011,23(3):85-88.
[11] 何如,周绍毅,苏志,等.近 50 年广西太阳能资源估算与特征分析[J].江西农业学报,2016,28(3):109-112.
[12] 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].武汉:武汉大学,2017:5.
[13] 王钰.江西省太阳总辐射经验计算公式的探讨[J].江西能源,2006(3):53-56.
[14] 孙若晨,熊康宁,郭应军,等.喀斯特地区太阳能资源评估研究进展[J].安徽农业科学,2021,49(9):5-10.
[15] 左大康.地球表层辐射研究[M].北京:科学出版社,1991:274-292.
[16] 朱飙,李春华,方锋.甘肃省太阳能资源评估[J].干旱气象,2010,28(2):217-221.
[17] 姚熠,张开华.遵义市太阳能资源分布推算及其利用评估[J].贵州气象,2011,35(6):10-13.
[18] 李月高,汪青春.柴达木盆地太阳能资源分布及评估初探[J].青海科技,2009(2):31-34.
[19] 梁玉莲,申彦波,白龙,等.华南地区太阳能资源评估与开发潜力[J].应用气象学报,2017,28(4):481-492.
[20] 申彦波,张顺谦,郭鹏,等.太四川省太阳能资源气候学计算[J].应用气象学报,2014,25(4):493-498.
[21] 林文鹏,陈金华,王长耀.福建沿海地区太阳辐射时空变化分析[J].华侨大学学报,2004,25(4):430-434.
[22] 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.
[23] 和清华,谢云.我国太阳总辐射气候学计算方法研究[J].自然资源学报,2010,25(2):308-319.
[24] 李一平,杜成勋,陈永琼,等.攀枝花太阳能资源评价[J].高原山地气象研究,2009,29(1):44-50.

- [25] 童成立, 张文菊, 汤阳, 等. 逐日太阳辐射的模拟计算[J]. 中国农业气象, 2005, 26(3): 165-169.
- [26] 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]. 气象与环境学报, 2014, 30(3): 78-84.
- [27] 杜尧东, 毛慧琴, 刘爱君, 等. 广东省太阳总辐射的气候学计算及其分布特征[J]. 资源科学, 2003, 25(6): 65-70.
- [28] 刘媛媛, 胡琦, 和骅芸, 等. 中国不同时间尺度地表太阳总辐射估算研究[J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(2): 175-183.
- [29] 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.
- [30] 中国气象局. 太阳能资源评估方法: QXT 89-2008[S]. 北京: 气象出版社, 2008.
- [31] 祝昌汉. 再论总辐射的气候学计算方法(二)[J]. 南京气象学院学报, 1982, 2(2): 196-209.
- [32] 赵东. 中国太阳能长期变化及计算方法研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2009: 4.

Summary of solar energy resource estimation based on climatological methods

Fang Qiongyu¹, Tan Jiayong², Ding Meihua^{3*}, He Li³, Yang Xin³, Mo Yanwen⁴, Wu Yi⁵

- (1. Guilin Meteorological Bureau, Guangxi Guilin 541001, China;
2. Hechi Meteorological Bureau, Guangxi Hechi 547099, China;
3. Guangxi Institute of Meteorological Sciences, Nanning 530022, China;
4. Yangshuo Meteorological Bureau, Guangxi Yangshuo 541900, China;
5. Longsheng Meteorological Bureau, Guangxi Longsheng 541700, China)

Abstract: The climatological method is a traditional, simple and effective method for analyzing and assessing solar energy resources. This paper reviews the progress of the research on climatological methods for estimating solar energy resources, compares, analyses, and summarizes the research methods and results, and presents problems and prospects for improvement.

Key words: Climatology; solar energy; estimation; overview