

申彦波,张顺谦,郭鹏,等. 四川省太阳能资源气候学计算. 应用气象学报,2014,25(4):493-498.

## 四川省太阳能资源气候学计算

申彦波<sup>1)2)\*</sup> 张顺谦<sup>3)</sup> 郭鹏<sup>1)2)</sup> 王香云<sup>1)2)</sup>

<sup>1)</sup>(中国气象局公共气象服务中心,北京 100081)

<sup>2)</sup>(中国气象局风能太阳能资源中心,北京 100081) <sup>3)</sup>(四川省气候中心,成都 610072)

### 摘 要

利用 SMARTS 模式计算晴天总辐射,充分考虑大气对太阳辐射的削弱作用和海拔高度的影响,以四川省为例,建立了复杂自然环境条件下基于日照百分率的太阳能资源气候学计算方程。该方法不仅物理意义明确,而且计算结果误差明显降低;与实测值相比,7 个辐射站年地面太阳总辐射曝辐量的相对误差均低于 7%;与初始值采用天文辐射曝辐量的方法相比,无论是相对误差值还是离散程度,均降低一半以上。该方法较好地解决了在一个地形复杂、气候多变的区域采用同一计算方程的难题,从而有效避免了过去采用分区方法带来的边界不连续问题,对我国东西高差大、干湿变化明显的特殊情况具有应用价值。

**关键词:** 四川省; 太阳能资源; 晴天总辐射; 日照百分率

### 引 言

基于日照百分率的气候学统计方法是计算地面太阳总辐射(即太阳能资源)的常用方法<sup>[1-4]</sup>,其表达式为

$$H = H_0(a + bs)。 \quad (1)$$

式(1)中, $H$  是所要计算的地面太阳总辐射曝辐量; $H_0$  是计算所用初始值,有天文辐射曝辐量(亦称地外太阳辐射)、理想大气总辐射曝辐量和晴天总辐射曝辐量 3 种选择; $s$  是日照百分率; $a, b$  是经验系数。

在太阳辐射穿过大气层到达地面的过程中,由于云、气溶胶、水汽、各种大气成分的吸收和散射作用以及地势的影响而被削弱。但在利用式(1)计算  $H$  时,由于  $s$  只反映日照的持续时间,而不反映太阳辐射的强弱,因此,大气层对太阳辐射的削弱程度主要由初始值  $H_0$  和系数  $a, b$  来反映。

近年来,随着太阳能发电在我国的大规模应用,基于上述方程开展太阳能资源的计算和评价工作再次受到重视,然而,很多研究<sup>[5-7]</sup> 中的重点不是在初始值选择,而是放在对  $a, b$  系数的空间处理方面,当

遇到地形复杂、气候多变的区域时,往往难以处理或产生较大误差。

王炳忠等<sup>[8]</sup>对初始值的选择进行了讨论,重点分析了我国大地势(海拔高度)及其他自然条件对晴天太阳总辐射的影响,并利用 Gueymard 研制的 SMARTS(Simple Model of Atmospheric Radiative and Transfer of Sunshine)模式<sup>[9]</sup>,在确定臭氧、气体成分、气柱厚度(反映当地海拔高度)、气溶胶(以能见度表示)和水汽含量的基础上,相对简单、准确地计算晴天总辐射,通过对成都和峨眉山两个单站地面太阳总辐射的计算,初步证明了该方法的合理性。

本文在该工作的基础上,从一个较大的区域范围来进一步验证。而对研究区域的选择,四川省是最适宜的<sup>[10]</sup>。四川省内不仅辐射站点较多(7 个站可收集到辐射数据),而且自然环境条件极其复杂,从东部海拔仅有数百米的盆地,到西部海拔达数千米的高原山地,从东部的天无三日晴,到西部的晴朗少云,地形和气候条件均复杂多变。如果能将文献<sup>[8]</sup>所研究的方法运用到四川省,并能得到较好的效果,则可进一步证明该方法的合理性和适用性。

2013-07-22 收到,2014-05-09 收到再改稿。

资助项目:公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306048)

\* email: shenyb@cma.gov.cn

## 1 资料与方法

### 1.1 资料

本文所用气象数据来源于国家气象信息中心,从 1981—2010 年四川省 156 个国家级业务气象台站(基准站、基本站和一般站)中根据数据质量和研究需要挑选出 93 个站点参与计算,其中 7 个站具有辐射观测(分别为成都、泸州、绵阳、攀枝花、甘孜、峨眉山和红原,其中成都站的辐射观测 2004 年迁至其附近的温江站,泸州站的辐射观测 2003 年迁至其附近的纳溪站),在四川省西部高原和东部盆地地区均有分布。

### 1.2 基于 SMARTS 模式的晴天总辐射计算

利用文献[8]中所述方法计算地面太阳总辐射的核心,是基于 SMARTS 模式计算出四川省各个气象站所在地各月的晴天总辐射曝辐量。对此,模式中所需要的常规气象要素诸如气温、气压、相对湿度等输入参数,可直接由气象台站实测数据获得。但模式中需要的整层水汽含量、大气浑浊度和大气臭氧含量等则要通过其他途径获取。

对于整层水汽含量,采用文献[11]中计算气候平均态整层水汽含量的方程,利用各气象台站 30 年平均水汽压和气压实测数据,计算各站点的整层水汽含量。

SMARTS 模式中提供了 5 种计算大气浑浊度参数的选项,本文采用能见度来反映大气浑浊度。根据气象台站能见度数据的观测情况,采用每日 02:00,08:00,14:00 和 20:00(北京时,下同)的数据求平均获得能见度日平均值,对于只有 08:00,14:00 和 20:00 3 次观测的台站则除以 3 作为日平均值,在此基础上进一步统计多年平均值。事实上,能见度数据的质量仍然是本文能够使用的站点数量的限制性因素,经过严格挑选,最终参与计算的气象台站为 93 个。

由于臭氧对太阳辐射的影响仅限于紫外波段,因此大气臭氧含量对地面太阳总辐射曝辐量的影响相对较小。在本次计算中,为了尽可能多地考虑各影响因素的变化,本文采用 NASA 网站(<http://macuv.gsfc.nasa.gov/index.md>)所提供的 OMI (ozone monitoring instrument) 2004—2010 年的臭

氧含量格点数据参与计算。

利用以上计算或选取的关键参数,基于 SMARTS 模式,即可获得各气象台站各月的晴天总辐射曝辐量。

### 1.3 地面太阳总辐射计算

根据各个气象站各月的晴天总辐射曝辐量,再配合各个辐射站月实测地面太阳总辐射曝辐量与日照百分率,不难根据式(1)拟合出相应的计算方程。如图 1 所示,由四川省 7 个辐射站多年平均(1981—2010 年平均)的月晴天总辐射曝辐量  $H_1$ 、月地面太阳总辐射曝辐量  $H$  和月日照百分率  $s$  拟合的回归方程为

$$H = H_1(0.30 + 0.72s), \quad (2)$$

式(2)的决定系数  $R^2$  达到 0.95。

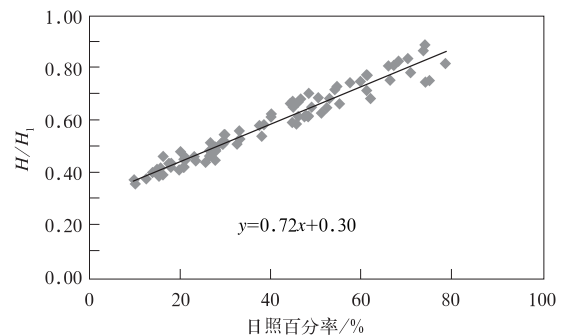


图 1 四川省 7 个辐射站日照百分率与  $H/H_1$  的相关关系

Fig. 1 The correlation between percentage of sunshine and  $H/H_1$  at seven radiation stations in Sichuan Province

式(2)与已有研究<sup>[12-14]</sup>的不同之处在于,过去的计算方程是将四川省的东部盆地与西部高原分开处理。这样做虽可避开不同气候以及高原地势的影响,但同时也带来如何划分站点的问题,尤其是分界线附近的站点。如峨眉山站若将其归入东部盆地地区,则难以反映海拔 3000 m 的高度;若将其划入西部高原区,其近旁的气象站不好处理。对此,有的研究曾不考虑峨眉山站,有的研究虽将其统一进行处理(划入东部或西部),但计算结果误差较大。这些都是式(1)中初始值采用天文辐射曝辐量所带来的弊端。而采用 SMARTS 模式输出的晴天总辐射曝辐量,不仅反映了水汽、气溶胶及其他大气成分等气象因素的消光作用,而且包含了海拔高度这一地理因素的影响,从而避免上述弊端。

## 2 效果检验

### 2.1 与实测值对比

为了验证式(2)的合理性,首先应用实测值对计算值进行检验。表1是7个辐射站1981—2010年

30年平均的年地面太阳总辐射曝辐量计算值与实测值的对比。由表1中可以看出,7个站年地面太阳总辐射曝辐量相对误差均低于7%,最高为攀枝花的6.26%,最低为泸州的一0.67%,这一误差水平明显低于以往关于四川省同类研究<sup>[10,13-15]</sup>。

表1 1981—2010年平均7个辐射站年地面太阳总辐射曝辐量的计算值与实测值对比  
Table 1 The contrast of calculated data and observed data of annual global irradiation at seven radiation stations from 1981 to 2010

辐射曝辐量	成都	泸州	绵阳	攀枝花	甘孜	峨眉山	红原
计算值/(MJ·m <sup>-2</sup> )	3335.27	3305.88	3442.83	6175.19	6344.00	4752.27	6108.18
实测值/(MJ·m <sup>-2</sup> )	3243.97	3328.06	3580.60	5811.18	6673.39	4682.51	6006.57
绝对误差/(MJ·m <sup>-2</sup> )	91.31	-22.18	-137.76	364.01	-329.39	69.77	101.61
相对误差%	2.81	-0.67	-3.85	6.26	-4.94	1.49	1.69

### 2.2 与天文辐射计算结果对比

将式(2)的计算结果与初始值采用天文辐射曝辐量所建方程的计算结果进行比较。初始值采用天文辐射曝辐量所建拟合方程(图略)为

$$H = H_2(0.14 + 0.71s), \quad (3)$$

式(3)中, $H_2$ 是月天文辐射曝辐量,该方程的决定系数 $R^2$ 为0.88。

分别计算式(2)和式(3)在7个辐射站1981—2010年平均的每月地面太阳总辐射曝辐量相对误差 $\delta$ (共84站月),并统计其最大值 $\delta_{\max}$ 、最小值 $\delta_{\min}$ 、绝对值的平均值 $|\bar{\delta}|$ 和均方差 $\delta_{SD}$ 列于表2。由表2可以看出,初始值采用晴天总辐射曝辐量时的相对误差统计值均明显优于采用天文辐射曝辐量,无论是误差的量值还是离散程度,前者均不及后者的一半。

表2 式(2)和式(3)的计算值与实测值的相对误差 $\delta$ (单位:%)

Table 2 The relative deviation  $\delta$  between calculated data from equation 2, equation 3 and observed data(unit:%)

统计项目	式(2)	式(3)
$\delta_{\max}$	10.26	18.91
$\delta_{\min}$	-11.56	-26.64
$ \bar{\delta} $	4.24	9.71
$\delta_{SD}$	5.02	11.21

综上所述,基于SMARTS模式得到晴天总辐射,进而对一个区域建立类似式(2)的统计方程进行太阳能资源的气候计算,不仅减少了根据地形和气候条件处理 $a, b$ 系数的工作量,而且所得结果的误

差明显降低,更重要的是,该方法物理意义更明确,除云之外的大气和地理消光因素均可通过模式进行参数化计算,从而有效减少了计算结果不确定性的来源。

## 3 四川省太阳能资源再计算

基于上述方法,对1981—2010年四川省太阳能资源重新进行计算,其中4个典型月(1月、4月、7月、10月)的计算结果如图2所示。由图2可以看出,1月地面太阳总辐射曝辐量空间分布差异最大,最大值为494 MJ·m<sup>-2</sup>(稻城),最小值为96 MJ·m<sup>-2</sup>(自贡),相差4倍以上,等值线密集,随地势的变化也很明显;7月地面太阳总辐射曝辐量空间分布差异最小,最大值为677 MJ·m<sup>-2</sup>(若尔盖),最小值为402 MJ·m<sup>-2</sup>(自贡),两者相差68%,等值线稀疏,随地势的走向不十分明显;4月和10月介于二者之间。这是因为冬季太阳高度角低,地形差异对地面太阳辐射的影响很大,夏季则正好相反。

此外,从全年各月地面太阳总辐射曝辐量的变化来看,四川省西部高原的太阳能资源相对稳定,以理塘站为例,月地面太阳总辐射曝辐量最小值占最大值62%;东部盆地的太阳能资源波动较大,以自贡站为例,月地面太阳总辐射曝辐量最小值仅占最大值的22%。这主要是由气候原因造成的,对于西部高原台站而言,一年内空气质量变化不大,各月太阳辐射差异较小;而对于东部盆地台站而言,不同季节下气候条件和空气质量的变化都很剧烈,成为引起地面太阳总辐射年变化的主要因素。

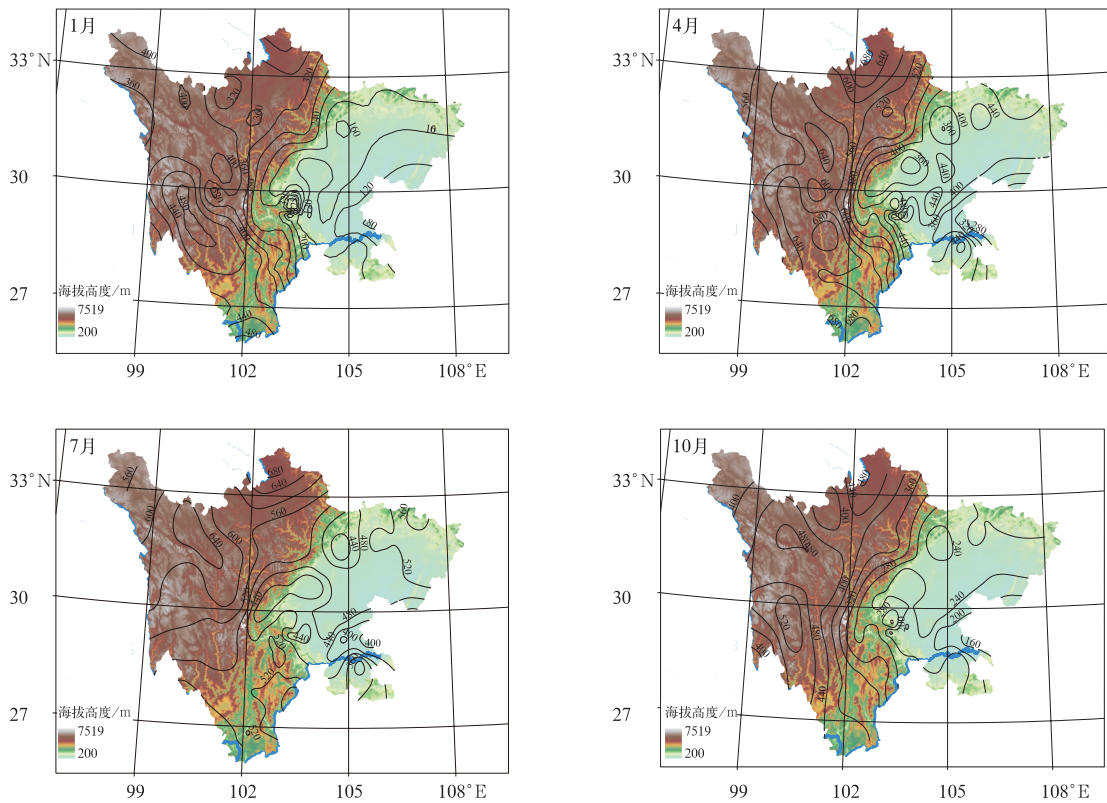


图2 1981—2010年平均四川省4个季节代表月份地面太阳总辐射曝辐量(等值线,单位: MJ·m<sup>-2</sup>)

Fig.2 The monthly global irradiation of Jan, Apr, Jul and Oct in Sichuan Province from 1981 to 2010(contour, unit: MJ·m<sup>-2</sup>)

## 4 问题与讨论

### 4.1 气溶胶类型选择

本文在利用 SMARTS 模式计算晴天总辐射的过程中所遇到的主要问题是气溶胶类型选择。根据模式用户手册<sup>[16]</sup>说明,共有 12 种备选类型,包括乡村、城市、海洋、对流层、大陆,考虑霾、沙尘暴等情况而设立的 11 种固定类型,以及一种用户自定义类型。由于自定义计算时所需的参数很难获得,因此只能在前 11 种固定类型中选用。

表 3 为雅安站在其他气象参数相同、唯有气溶胶类型分别选择为城市和乡村时各月地面太阳总辐射曝辐量计算结果。由表 3 可以看出,两者的差别大,年地面太阳总辐射曝辐量相差超过 6%,甚至超过表 2 中 7 个辐射站计算结果的相对误差。

在本文的计算中,大部分气象台站(除个别高山站)位于城镇中,具体选择时,对一般县城按照乡村气溶胶类型来处理,对地市一级的大中城市则按照城

市气溶胶来处理。而事实上,有很多站点的气溶胶类型可能介于两者之间,这是目前难以解决的问题。

表 3 雅安站两种气溶胶类型下地面太阳总辐射曝辐量的计算结果比较

Table 3 The contrast of global irradiation calculated by difference environment of aerosol in Yaan Station

时间	乡村气溶胶/ (MJ·m <sup>-2</sup> )	城市气溶胶/ (MJ·m <sup>-2</sup> )	相对差值%
1月	438.8	389.6	11.2
2月	510.2	463.7	9.1
3月	717.6	665.4	7.3
4月	814.4	764.6	6.1
5月	911.7	860.1	5.7
6月	902.0	857.8	4.9
7月	910.0	870.2	4.4
8月	848.2	808.1	4.7
9月	719.8	681.9	5.3
10月	604.2	564.8	6.5
11月	457.3	418.9	8.4
12月	404.0	361.8	10.5
年	8238.1	7706.8	6.5

### 4.2 计算方程的适用性

任何一种方法都有其适用范围,本文也不例外。

对一个区域建立类似式(2)的统计方程,适用于计算多年平均的太阳能资源。首先需要计算每个输入参数的多年平均值,由 SMARTS 模式得到多年平均的晴天总辐射;然后再利用多年平均的地面太阳总辐射和日照百分率,建立统计方程。即先平均再计算,进而得到平均值。如果将该方程用于计算某一特定月(年)的总辐射曝辐量,则可能产生较大误差。

## 5 小 结

通过以上计算和分析,研究了基于 SMARTS 模式计算复杂自然环境条件下区域气候平均态太阳能资源的方法,主要结论如下:

1) 利用 SMARTS 模式计算晴天总辐射,建立基于日照百分率的太阳能资源气候学方程,可以充分考虑大气对太阳辐射的削弱作用和海拔高度的影响,通过对四川省太阳能资源的气候计算,证明该方法不仅更合乎物理机制,而且具体可行。

2) 通过与采用天文辐射的方法进行对比,显示该方法不仅能解决在地形复杂、气候多变的区域使用同一公式,可有效避免分区域边界附近站点的归属难题,且计算值与实测值的相对误差小,所得到的资源分布更接近实际情况。

我国东西部不仅存在着较大高差,而且干湿情况明显不同,天文辐射本身只是纬度的函数,无法反映地势和干湿的差别,采用本文的方法对于我国太阳能资源的计算具有实际应用价值。由于目前缺少气溶胶方面的参数,特别是气候平均态参数,在考虑其对太阳辐射的影响方面,尚存不足。

**致 谢:**中国气象科学研究院王炳忠研究员对较使用 SMARTS 模式计算给予了具体指导和帮助;中国气象科学研究院王亚强研究员提供了得自卫星的有关气溶胶的多年月平均

数据,在此谨表衷心感谢。

## 参 考 文 献

- [1] 左大康,王懿贤,陈建绥. 中国地区太阳总辐射的时空分布特征. 气象学报,1963,33(1):78-96.
- [2] 翁笃鸣. 试论总辐射的气候学计算方法. 气象学报,1964,34(3):304-315.
- [3] 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.
- [4] 祝昌汉. 再论总辐射的气候学计算方法(一). 南京气象学院学报,1982,1:15-24.
- [5] 张运林,秦伯强,陈伟民,等. 太湖无锡地区太阳总辐射的气候学计算及特征分析. 应用气象学报,2003,14(3):339-347.
- [6] 郑有飞,关福来,蔡子颖,等. 我国南方中东部地区地面太阳总辐射变化规律. 应用气象学报,2011,22(3):312-320.
- [7] 杨羨敏,曾燕,邱新法,等. 1960—2000年黄河流域太阳总辐射气候变化规律研究. 应用气象学报,2005,16(2):243-248.
- [8] 王炳忠,申彦波. 自然环境条件对太阳能资源计算影响的再思考. 应用气象学报,2012,23(4):505-512.
- [9] Gueymard C. SMARTS2, A Simple Model of the Atmospheric Radiative and Transfer of Sunshine: Algorithms and Performance Assessment. Publication Number: FSEC-PF-270-95. Florida Solar Energy Center, 1995.
- [10] 冯万瑞,熊志强. 四川太阳辐射能资源. 成都:四川科学技术出版社,1992.
- [11] 王炳忠,申彦波. 我国上空的水汽含量及其气候学估算. 应用气象学报,2012,23(6):763-768.
- [12] 张顺谦,冯万瑞. 四川太阳辐射旬辐照量的气候计算. 太阳能学报,1992,13(3):263-270.
- [13] 杨淑群,詹兆渝,范雄. 四川省太阳能资源分布特征及开发利用建议. 四川气象,2007,27(2):15-17.
- [14] 汤大清. 四川省太阳总辐射的气候计算方法和时空分布特征. 西南师范学院学报,1983,4:84-96.
- [15] 冯新灵,杨利泉. 四川盆地西北地区太阳总辐射的分布特征. 四川气象,1989,9(3):34-38.
- [16] Gueymard Christian A. SMARTS Code, Version 2. 9. 5, User's Manual. Solar Consulting Services, USA, 2006.

## Climatology Calculation of Solar Energy Resource in Sichuan Province

Shen Yanbo<sup>1)2)</sup> Zhang Shunqian<sup>3)</sup> Guo Peng<sup>1)2)</sup> Wang Xiangyun<sup>1)2)</sup>

<sup>1)</sup> (CMA Public Meteorological Service Center, Beijing 100081)

<sup>2)</sup> (CMA Wind and Solar Energy Resources Center, Beijing 100081)

<sup>3)</sup> (Sichuan Provincial Climate Center, Chengdu 610072)

### Abstract

Using SMARTS to calculate clear-sky global radiation, fully thinking of the weaken effects of the altitude and the atmosphere, in terms of water vapor in atmosphere, meteorological visibility and O<sub>3</sub> content, a climatology universal calculation equation on solar energy resource is established, which is based on the percentage of sunshine. This method is different from the calculation of solar energy resources using extraterrestrial radiation. Taken Sichuan Province as an example, results show that this method not only has unambiguous physical meaning, but also decreases the error of the calculating result obviously. 7-station annual value relative error is less than 7%, with the highest of 6.26% for Panzhihua and the lowest of -0.67% for Luzhou, the error is significantly lower than that in previous studies of Sichuan. Contrast with results from extraterrestrial radiation, not only the quantity but also discreteness of relative error decreases by more than a half. For the distribution of solar energy resources in Sichuan, it is large in the east part and low in the west part. From the change of each month, solar energy resources in the western plateau is relatively stable, the minimum monthly solar radiation for a maximum of 62% at Litang Station; solar energy resource in the east basin is fluctuant, the minimum monthly radiant exposure is only accounted for 22% of the maximum value at Zigong Station. The climatology universal calculation equation on solar energy resource can better resolve the problem of using the same calculation equation in the region which has complex topography and climate, avoiding the boundary discontinuity, effectively which is brought by using partition method in the past, and it is useful for special regional situations of huge relative altitude between the east part and the west part of China with obvious changes of dry and wet. This statistical equation is suitable for the calculation of solar energy resources, first of all, each input parameter on average is needed. If the equation is used to calculate the total radiation exposure radiation in a special month or a special year, it will result in great error.

**Key words:** Sichuan Province; solar energy resource; clear-sky global radiation; percentage of sunshine