

王传辉,申彦波,2021. 复杂地形下太阳总辐射空间订正方法——以四川省为例[J]. 气象,47(6):746-754. Wang C H, Shen Y B, 2021. Spatial correction of global horizontal irradiation under complex terrain—as a case study in Sichuan Province[J]. Meteor Mon, 47(6):746-754(in Chinese).

复杂地形下太阳总辐射空间订正方法 ——以四川省为例^{*}

王传辉¹ 申彦波²

1 安徽省公共气象服务中心,合肥 230031

2 中国气象局公共气象服务中心,北京 100081

提 要: 利用四川省 158 个气象站 2016—2019 年逐小时 2 m 气温、相对湿度、地面气压、能见度等观测数据,通过 SMARTS 模式计算并积分得到逐月晴天太阳总辐射,建立晴天太阳总辐射随海拔高度的变化关系,将该关系应用到 1990—2019 年太阳总辐射空间插值订正中,并对订正效果进行验证,结果表明:晴天太阳总辐射随海拔高度呈对数增加,海拔越高晴天太阳总辐射随高度增幅越小;辐射订正方面,海拔较低、地势平坦的四川盆地地区订正幅度最小,高海拔的川西高原订正幅度居中,高低海拔过渡地带订正幅度最大;交叉验证结果表明,用来验证的 7 个辐射站年平均绝对误差由 $182.77 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-2}$ 减少到 $145.48 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-2}$,相对误差由 13.41% 减少到 10.24%,冬半年订正效果好于夏半年。通过订正可有效提高复杂地形下太阳总辐射插值效果,减小插值误差。

关键词: 太阳总辐射,订正方法,复杂地形,交叉验证,四川省

中图分类号: P422,P413

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.06.010

Spatial Correction of Global Horizontal Irradiation Under Complex Terrain —As a Case Study in Sichuan Province

WANG Chuanhui¹ SHEN Yanbo²

1 Anhui Public Meteorological Service Center, Hefei 230031

2 CMA Public Meteorological Service Centre, Beijing 100081

Abstract: Based on the hourly 2 m temperature, relative humidity, surface pressure and visibility data of 158 stations in Sichuan Province during the period 1967—2008, the monthly sunny global horizontal irradiation (GHI) was calculated and integrated by using simple model for atmospheric transmission of sunshine (SMARTS). The relationship between sunny GHI and altitude was established, which was applied to the correction of GHI interpolation during the period 1990—2019, and the correction effect was verified. The results show that the sunny GHI increases logarithmically with altitude, and the higher the altitude is, the smaller the increase of sunny GHI with altitude becomes. In terms of radiation correction, the correction range of Sichuan Basin with low altitude and flat terrain is the smallest, the high-altitude plateau in western Sichuan is in the middle, the transition zone between high and low altitudes is the largest. The results of cross validation show that the annual mean absolute error of the seven stations is reduced from $182.77 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-2}$ to $145.48 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-2}$, while the relative error is reduced from 13.41% to 10.24%.

^{*} 第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0804)资助

2020 年 8 月 20 日收稿; 2021 年 3 月 4 日收修定稿

第一作者:王传辉,主要从事专业气象服务及清洁能源评估研究. E-mail:wang_chh@aliyun.com

通讯作者:申彦波,主要从事太阳能资源评估预报及气候变化研究. E-mail:shenyb@cma.gov.cn

The correction effect of winter half year is better than that of summer half year. After the correction, the interpolation effect can be effectively improved by reducing interpolation error.

Key words: global horizontal irradiation, correction method, complex terrain, cross validation, Sichuan Province

引 言

太阳能资源作为一种“取之不尽,用之不竭”的可再生清洁能源,被公认为是未来最具竞争力的能源之一。中国幅员辽阔,各地太阳能资源差异较大,有研究指出,中国西北地区年总辐射量明显高于东北、中东部和南方地区(陶苏林等,2016),合理的布局开发利用太阳能资源需建立在准确评估的基础上。从 20 世纪 60 年代开始,我国学者一直在持续不断地进行中国太阳辐射资源分布的探索,中国太阳能资源空间分布不均,变化趋势上存在差异(左大康和弓冉,1962;王炳忠等,1980;郑小波等,2011;马金玉等,2012;梁玉莲等,2017)。

影响太阳能资源空间分布不均的因素有很多,气象因素方面主要包括云、气溶胶、水汽、大气气体成分等(杨溯等,2013;刘琳等,2018;熊燕琳和周筠珺,2020)。随着工业化进程的推进, O_3 、 $PM_{2.5}$ 等因素对太阳能资源的变化产生影响,尤其是城市附近地区(刘长焕等,2018)。更多研究指出,地形等因素可改变气象因素,对太阳能资源分布的影响尤为明显(王晓梅等,2013;梁玉莲等,2017;钟燕川等,2018)。梁玉莲等(2017)的研究结果指出,利用不同分辨率太阳辐射数据得到的评估结果不尽相同。大量研究指出,不同地形下太阳辐射存在明显差异(王晓梅等,2013;蔡元刚等,2019;闵敏和吴晓,2020;熊燕琳和周筠珺,2020)。虽然静止卫星产品不断丰富,但目前相关辐射产品还存在一定的不确定性,可提升空间较大(梁进秋等,2020)。利用站点数据进行数学插值获得气象要素的空间分布是气象领域常用的方法,然而由于地面观测站点的密度问题,在站点比较稀疏或地形复杂的地区,太阳辐射等值线的走向往往难以通过数学方法被准确刻画。SMARTS(simple model for atmospheric transmission of sunshine)由美国国家可再生能源实验室(NREL)Gueymard(2001)研制并发布,覆盖了太阳光谱的整个短波波段(280~4 000 nm)。SMARTS 在 2003 年国际大气辐射测量计划模式比对、NREL 实测对

比、美国材料与试验协会标准应用等一系列检验验证后,被认为是一个实用、精确度较高的光谱模式(Michalsky et al, 2006)。基于地面实测气象数据,利用 SMARTS 模拟的方式可以较好模拟不同地形下辐射分布情况。

为提高直接插值太阳辐射分布的准确性,合理利用地形因素对太阳辐射进行订正,得到更精细、更接近真实值的太阳总辐射,对太阳能资源评估具有重要意义。四川省作为中国地形最复杂的省份之一,一直以来被作为太阳辐射典型地区进行研究(钟燕川等,2018;蔡元刚等,2019;熊燕琳和周筠珺,2020)。申彦波等(2014)充分考虑大气对太阳辐射的削弱作用和海拔高度的影响,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,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。可见,在以往的研究中已经注意到地形对辐射的影响,但定量分析其影响程度的文献还较为少见。本文以申彦波等(2014)的工作为基础,以四川省为例,利用 SMARTS 建立晴天太阳总辐射随海拔高度的变化关系,进而对直接插值得到格点的太阳总辐射进行订正,减小由地形因素导致的总辐射偏差,更加真实地反映太阳能资源的实际情况。

1 资料与方法

1.1 资 料

研究区域为四川省,在建立辐射随海拔高度变化关系和相关验证中仅针对四川省境内的站点。同时,为解决边界由于站点分布不均导致的插值偏差,在插值过程中采用四川省及周围气象站。本文所用数据均由国家气象信息中心提供,包括四川省及周围气象站点观测数据,其中 22 个辐射站(四川省 7 个)及 648 个无辐射观测项目的国家级气象站(四川省 158 个,以下简称气象站),站点分布见图 1[地图通过中华人民共和国自然资源部批准,审图号为 GS(2019)3082 号]。数据包括:1990—2019 年逐月

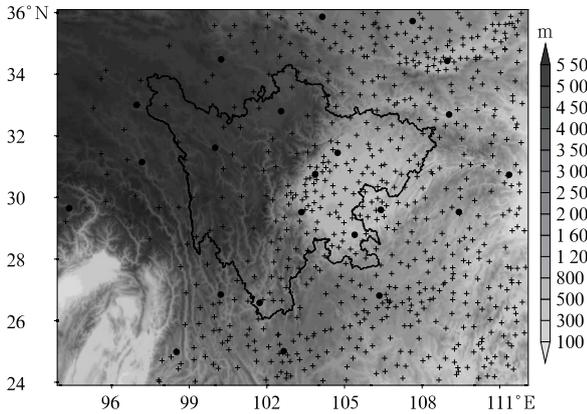


图 1 四川省及周边地区海拔高度分布
(阴影:地形,●为辐射站,
+为无辐射观测项目的气象站)

Fig. 1 Altitude distributions of Sichuan
and its surrounding areas
(shaded: terrain, ●: radiation station,
+: meteorological station without
observational radiation project)

的日照百分率、辐射站的太阳总辐射数据;站点经纬度、海拔高度;2016—2019年逐小时地面气压、2 m 气温、相对湿度以及能见度数据。

1.2 方法

复杂地形下太阳总辐射空间订正具体分为以下三个步骤:(1)利用四川省及周边辐射站,通过经验公式计算出不具备辐射观测站点的逐月太阳总辐射;(2)基于实测气象数据,利用 SMARTS 模拟出晴天太阳总辐射,进而得到晴天情况下太阳总辐射随海拔高度的变化关系模型;(3)分别利用(1)中得到全部气象站点太阳总辐射和站点海拔高度进行格点化插值,根据(2)中的关系模型,对插值海拔高度与实际海拔高度的差异进行高度订正,订正值与直接插值的辐射值之和为最终订正结果。

1.2.1 月太阳总辐射计算方法

中国太阳辐射观测站点相对较少,四川省有 7 个辐射站,加上周边辐射站共有 22 个,本文利用太阳总辐射与日照百分率的关系,采用经验公式(1)计算得到气象站的太阳总辐射(中国气象局,2019)。

$$GHI = GHIS \times (a + bS) \quad (1)$$

式中: a 、 b 为经验系数, GHI 为到达地面的晴天太阳总辐射(单位: $\text{kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-2}$), S 为日照百分率(单位:%), $GHIS$ 可以使用天文辐射或晴天太阳总辐射(单位: $\text{kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-2}$)。申彦波等(2014)研究表明,考虑了海拔高度和大气对太阳辐射削弱作用的晴天太阳总辐射明显优于天文辐射,为此采用申彦

波等(2014)的方法, $GHIS$ 使用晴天太阳总辐射。通过该方法得到 22 个辐射站的 a 、 b 值,利用反距离权重插值方法得到 648 个气象站的 a 、 b 值,再利用式(1)得到 648 个气象站 1980—2019 年的地面太阳总辐射。

1.2.2 太阳总辐射随高度的变化

本文采用 SMARTS 模拟晴天太阳总辐射,该模式对各影响因子具有多种方案选择、光谱范围可设、具备斜面计算功能、输出参数多样等诸多优点(Gueymard, 1995)。目前该模式已在我国晴天太阳辐射计算方面得到广泛应用(王炳忠和申彦波, 2012;申彦波等,2014)。模式输入数据主要包括站点经纬度、海拔高度,逐小时地面气压、2 m 气温、相对湿度以及能见度数据。在模式中大气浑浊度是影响辐射传输的重要因子,本文采用能见度来反映大气浑浊度,一方面,能见度是气象台站的基本观测要素,较易获得;另一方面,能见度和大气气溶胶光学厚度之间存在较好的反相关关系(朱忠敏等,2010)。

由于能见度自 2016 年开始才有完整的逐时器测数据,这里利用 SMARTS 模拟四川省气象站 2016—2019 年逐时晴天太阳总辐射,累加后得到逐月晴天太阳总辐射,通过拟合得到晴天太阳总辐射随海拔高度的变化关系。

图 2 给出了四川省年晴天太阳总辐射与海拔高度散点分布。可以看出,晴天太阳总辐射与海拔高度对数关系拟合决定系数高达 0.80,呈现出较好的对数关系。海拔高度在 1 km 以下时,晴天太阳总辐射随海拔高度变化明显,当海拔高度高于 1 km 时,晴天太阳总辐射随海拔高度的变化幅度明显减小。

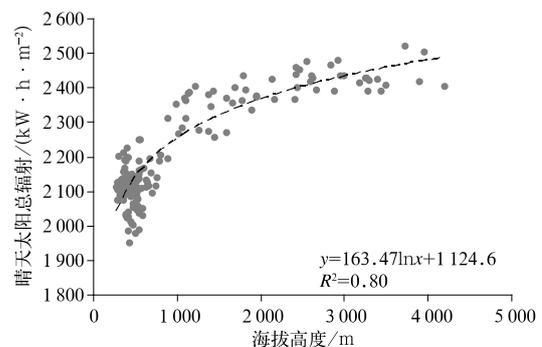


图 2 2016—2019 年四川省晴天太阳
总辐射与海拔高度散点分布

Fig. 2 Scatter distribution of annual sunny
global horizontal irradiation and altitude
in Sichuan Province during 2016—2019

通过对各月晴天太阳总辐射与海拔高度分析可以发现,两者在各月均呈对数变化,表达式如式(2)所示。

$$GHIS = \alpha \ln H + \beta \quad (2)$$

式中: H 为海拔高度(单位:m), α 、 β 为经验系数,各月 α 、 β 见表1。

表 1 各月及年平均晴天太阳总辐射随海拔高度变化的经验系数

系数	月份												全年
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
α	15.93	11.83	16.80	14.23	15.14	13.79	11.44	10.81	13.38	13.16	11.95	15.02	163.47
β	-3.97	42.09	77.93	128.32	150.42	159.54	181.37	168.43	109.46	78.05	36.31	-3.37	1124.60

1.2.3 太阳总辐射订正方法

通过反距离权重(IDW)对站点的海拔高度和太阳总辐射进行插值,得到任意位置的插值海拔高度和插值太阳总辐射,通过式(3)对插值结果进行订正。

$$GHI_{订正} = GHI_{插值} (GHIS_{实际} / GHIS_{插值}) \quad (3)$$

式中: $GHI_{插值}$ 为通过IDW得到的插值太阳总辐射, $GHIS_{实际}$ 为模拟的实际海拔高度上的晴天太阳总辐射, $GHIS_{插值}$ 为模拟的插值海拔高度上的晴天太阳总辐射。

2 结果分析

2.1 订正前太阳总辐射空间分布

利用1.2.1节中月太阳总辐射计算方法,计算得到四川省及周围站点逐月太阳总辐射,通过逐月累加得到年太阳总辐射,利用IDW插值方法得到1 km分辨率的格点化太阳总辐射(图3)。由图3可见,四川省年太阳总辐射整体呈现出西高东低的空间分布

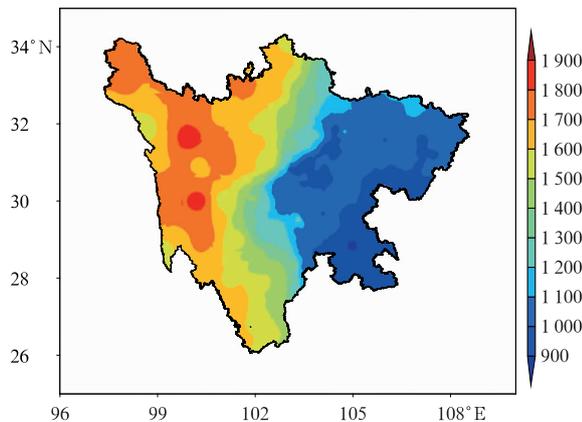


图 3 1990—2019 年四川省年平均太阳总辐射(单位: $\text{kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-2}$)

Fig. 3 Annual average sunny global horizontal irradiation in Sichuan Province during 1990—2019 (unit: $\text{kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-2}$)

特点,与海拔高度分布(图1)相一致,最高值位于川西高原西部的甘孜县,为 $1859.50 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-2}$,最低值位于四川盆地的宜宾市南溪区,仅为 $872.43 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-2}$,不足最高值的47%,可见,四川省年太阳总辐射空间差异十分明显,这与以往的结论相一致(申彦波等,2014;钟燕川等,2018;熊燕琳和周筠珺,2020)。四川省的地形起伏十分明显,空间差异显著,尤其是川西高原地区,海拔高度直接影响辐射量值的大小(钟燕川等,2018),虽然本研究插值的分辨率达到1 km,但图3并不能很好地刻画出局地地形所带来的太阳总辐射的空间差异。

2.2 太阳总辐射空间订正

直接利用站点数据进行插值得到的太阳总辐射与真实值间的差异,主要是由未考虑太阳总辐射随海拔高度的变化以及云的空间变化所导致的。图4a给出了利用站点海拔高度插值得到格点海拔高度与真实值间的差值。可以看出:站点插值与实际海拔高度差异还是比较明显的,其中差异最大的地区位于四川盆地和川西高原的过渡地带;其次为川西高原海拔较高且起伏明显的地区;差异最小的地区位于四川盆地海拔较低且平缓的地区。四川盆地站点插值得到的海拔高度与实际海拔高度相近,高度差基本在0 m附近,其他大部分地区插值海拔高度普遍比实际海拔高度偏低,只有在河谷、山谷地带略比插值海拔偏高。这主要是由于气象台站一般建在城市的郊区附近,而城市往往位于海拔高度相对较低的半山腰地带。

利用图2给出的年晴天太阳总辐射与海拔高度的关系,计算各格点由于高度差导致的太阳总辐射订正量(图4b)。由图4b可以看出,在四川省大部分地区年太阳总辐射的订正量在 $-40 \sim 40 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-2}$,订正量最大的地区主要位于四川盆地与川西高原两者的过渡地带,局部地区的订正量超过

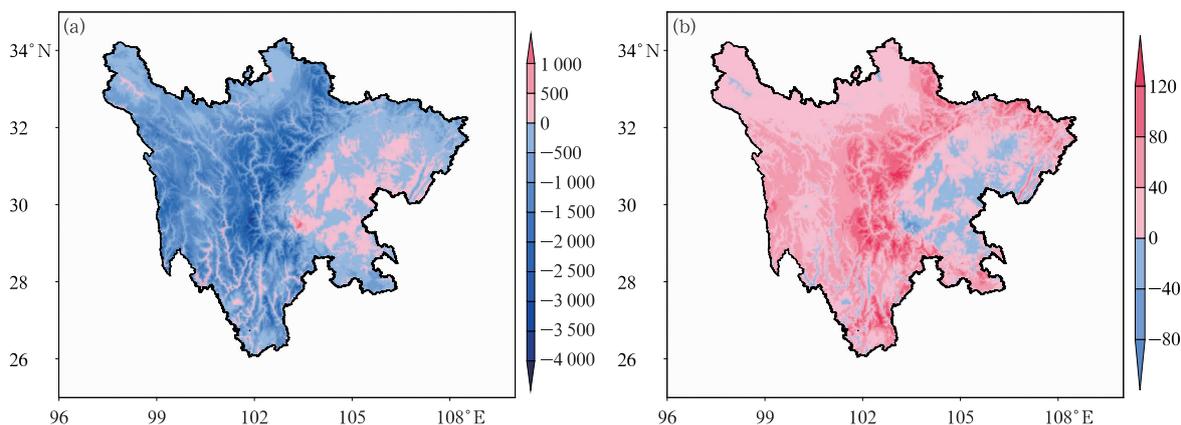


图 4 插值海拔高度与实际海拔高度之差(a,单位:m)及 1990—2019 年四川省年平均太阳总辐射订正值(b,单位: $\text{kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-2}$)

Fig. 4 The difference between interpolated altitude and actual altitude (a, unit: m) as well as the annual average global horizontal irradiation correction in Sichuan Province during 1990—2019 (b, unit: $\text{kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-2}$)

$120 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-2}$ 。可见,利用海拔高度差对插值总辐射的订正是十分必要的。

图 5 给出了订正后年太阳总辐射的空间分布,与订正前(图 3)相比,在四川省的多数地区数值有所增大,尤其是在四川盆地与川西高原两者过渡地带太阳总辐射增加最大。可见,越是海拔高度空间差异大的地区由于地形因素导致的辐射偏差越大,订正的意义也越大。订正后超过 $1800 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-2}$ 的区域范围明显扩大。同时,订正后的年平均太阳总辐射空间差异更为明显,局部总辐射超 $1900 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-2}$ 。订正后各月太阳总辐射空间分布(图 6)整体和年太阳总辐射相似,但存在明显的季节变化,整体上看冬半年太阳总辐射较低,夏半年太阳总辐射较高(钟燕川等,2018)。

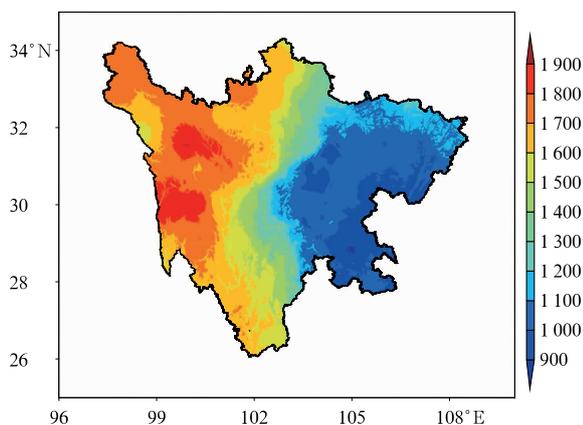


图 5 同图 3,但为订正后

Fig. 5 Same as Fig. 3, but after correction

2.3 订正结果检验

利用辐射站数据对订正前后的插值结果进行交叉验证,即每次插值时空出一个辐射观测站,将该站点订正前后的插值太阳总辐射与观测值相比,分别计算平均绝对误差和平均相对误差,获得 7 个辐射站的误差检验结果。从辐射站订正前后站点年平均绝对误差分布上看(图 7),订正前年平均绝对误差最大是甘孜站,为 $411.20 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-2}$,订正后绝对误差减少到 $342.88 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-2}$ 。订正前年平均绝对误差最小的为温江站,为 $40.17 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-2}$,订正后绝对误差减少到 $28.33 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-2}$,可见,订正幅度还是比较大的。同时,可以看出在 7 个辐射站有 6 个站点为明显的正订正,只有攀枝花站订正后较订正前年平均绝对误差由 $166.38 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-2}$ 增大到 $185.78 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-2}$ 。攀枝花地区受其独特的地理和气候条件影响,太阳能资源异常丰富(陈晓燕和田朋飞,2013),较邻近地区存在明显差异。

从四川省 7 个辐射站平均的各月和年平均绝对误差看(表 2),订正前年平均绝对误差为 $182.77 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-2}$,订正后降至 $145.48 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-2}$ 。各月平均绝对误差表现出明显的季节变化,呈单峰型分布,3 月最高,6 月最低。除了 7 月、8 月,各月订正后误差均较订正前有不同程度的降低,整体看冬半年(10 月至次年 3 月)订正效果好于夏半年(4—9 月),其中 1 月订正后误差减小最为明显,平均每站误差减少 $6.01 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-2}$,7 月和 8 月订

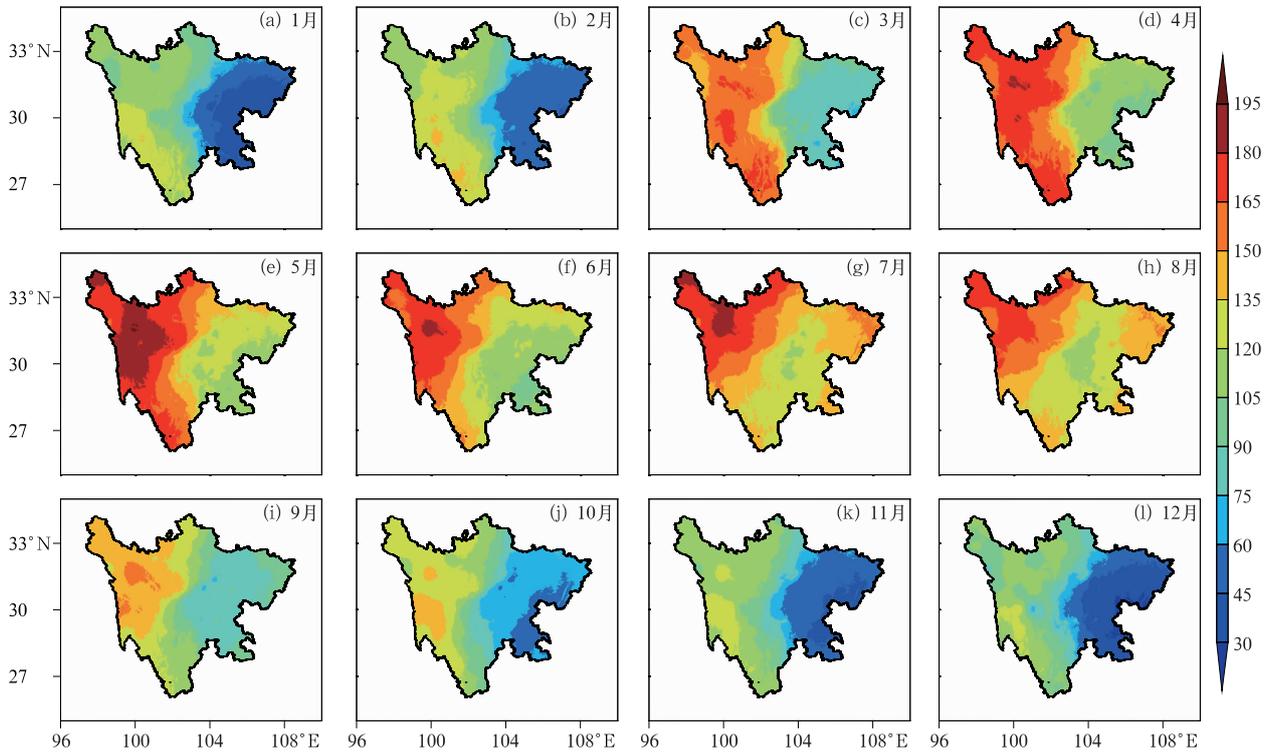


图 6 订正后 1990—2019 年四川省年平均各月太阳总辐射(单位: $\text{kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-2}$)

Fig. 6 Monthly global horizontal irradiation after correction in Sichuan Province during 1990—2019 (unit: $\text{kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-2}$)

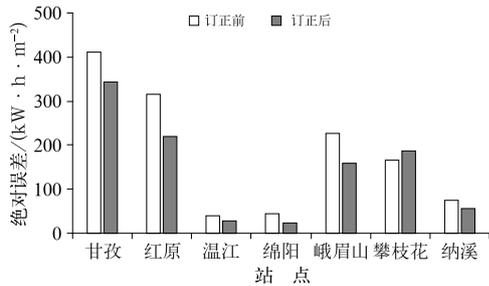


图 7 1990—2019 年四川省 7 个辐射站交叉验证中订正前后的年平均绝对误差

Fig. 7 Annual mean absolute error before and after corrections in cross validation of 7 radiation stations in Sichuan from 1990 to 2019

正后平均绝对误差反而略有增加,可能主要是因为夏、秋季四川正处雨季,天气复杂,局地天气特征较

强(李强等,2017;周秋雪等,2019;齐冬梅等,2020)。

由于各站点太阳总辐射相差较大,为更好地说明误差相对气候态的比例,统计了年平均相对误差(图 8)。由图 8 可以看到,除攀枝花站外,其他 6 个站订正后均较订正前年平均相对误差明显减小。订正前年平均相对误差最大的是甘孜站,为 22.62%,订正后减小到 18.74%。订正前年平均相对误差最小的是温江站,为 4.42%,订正后减小到 3.06%。从区域平均的各月平均相对误差看(表 3),年平均情况下订正前平均相对误差为 13.41%,订正后降为 10.24%。除 7 月和 8 月外,订正后其他各月的相对误差均有所减小,冬半年订正效果好于夏半年。这可能是由于四川省夏、秋季天气比较多变(李强等,2017;毛冬艳等,2018;周秋雪等,2019;齐冬梅等,

表 2 1990—2019 年四川省 7 个辐射站订正前后各月及年平均绝对误差(单位: $\text{kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-2}$)
Table 2 Monthly and annual mean absolute error before and after corrections at 7 radiation stations in Sichuan Province during 1990—2019 (unit: $\text{kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-2}$)

	月份												年平均
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
订正前	18.01	18.00	18.43	14.13	12.43	11.75	13.20	12.36	13.69	15.52	16.91	18.33	182.77
订正后	12.00	13.45	12.93	10.44	12.09	11.01	13.31	12.43	10.44	12.10	12.57	12.70	145.48

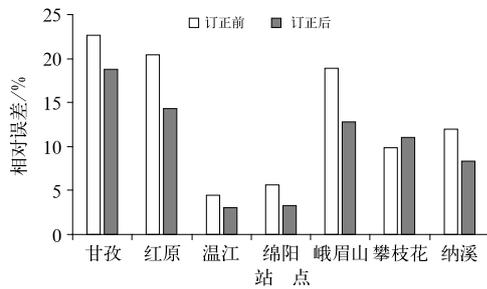


图 8 同图 7, 但为年平均相对误差

Fig. 8 Same as Fig. 7, but for annual mean relative error

表 3 同表 2, 但为相对误差

Table 3 Same as Table 2, but for relative error

	月份												年平均
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
订正前	20.96	17.87	13.53	9.09	7.25	7.51	8.42	8.29	11.05	15.07	18.78	23.06	13.41
订正后	13.63	12.93	8.95	6.36	7.41	7.34	8.90	8.76	8.03	11.12	13.60	15.81	10.24

3 结论与讨论

以四川为例, 利用 SMARTS 输入气象站点实测气象数据, 模拟了晴天太阳总辐射, 建立了晴天太阳总辐射随海拔高度变化规律, 根据该规律对直接利用站点太阳总辐射插值结果进行订正, 并对订正效果进行检验, 结果发现:

(1) 晴天太阳总辐射随海拔高度呈对数增加, 在海拔高度 1 km 以下晴天太阳总辐射随海拔高度变化幅度明显高于 1 km 以上。

(2) 利用晴天太阳总辐射随海拔高度的变化关系对太阳总辐射插值结果进行订正时, 海拔较低、地势平坦的四川盆地订正幅度最小, 高海拔的川西高原地区订正幅度居中, 高低海拔过渡地带订正幅度最大。

(3) 通过海拔高度订正可有效提高插值效果, 缩小插值误差, 区域年平均绝对误差由 $182.77 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-2}$ 减少到 $145.48 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-2}$, 相对误差由 13.41% 减少到 10.24%, 且冬半年订正效果好于夏半年。

影响太阳总辐射的因素很多, 就地形而言, 除了站点位置海拔高度之外, 地形遮挡等方面的影响也不容小觑(叶冬等, 2014)。同时, 地形影响太阳总辐射的机制也是十分复杂的, 除了直接影响辐射量外, 受地形影响产生的局地特殊天气状况(蔡元刚等,

2020), 由天气因素导致的辐射偏差比例升高所致。

以上分析表明, 无论从平均绝对误差还是平均相对误差上看, 根据晴天太阳总辐射随海拔高度的变化关系对太阳总辐射插值结果进行订正, 可有效提高插值效果, 缩小插值误差, 区域年平均绝对误差由 $182.77 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-2}$ 减少到 $145.48 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-2}$; 区域年平均相对误差由 13.41% 减少到 10.24%。整体上冬半年订正效果优于夏半年。

2019), 也会影响太阳总辐射, 攀枝花站就是一个典型的实例。本文仅通过建立晴天太阳总辐射随海拔高度的变化关系给出了一个普适订正方法, 由于能见度等要素是影响晴天太阳总辐射的重要因素之一, 受小时能见度观测数据限制, 所以在利用 SMARTS 计算晴天太阳总辐射时使用数据年限较短, 能否代表气候平均状况还存在一定的不确定性。另外, 从订正效果上看还有很大的提升空间, 尤其是对夏半年天气复杂时段还有待做进一步的研究。

参考文献

- 蔡元刚, 王明田, 蔡怡亨, 等, 2019. 利用地面气象资料建立四川省日总辐射计算模型[J]. 中国农业气象, 40(9): 543-556. Cai Y G, Wang M T, Cai Y H, et al, 2019. Using surface meteorological data to establish daily total solar radiation calculation model for Sichuan Province[J]. Chin J Agrometeorol, 40(9): 543-556 (in Chinese).
- 陈晓燕, 田朋飞, 2013. 攀枝花太阳能光热资源开发利用研究——以小型太阳能主题公园为例[J]. 煤炭技术, 32(10): 205-206. Chen X Y, Tian P F, 2013. Development and utilization of Panzhihua solar energy resources—taking a small solar energy theme park as an example[J]. Coal Technol, 32(10): 205-206 (in Chinese).
- 李强, 邓承之, 张勇, 等, 2017. 1980—2012 年 5—9 月川渝盆地小时强降水特征研究[J]. 气象, 43(9): 1073-1083. Li Q, Deng C Z, Zhang Y, et al, 2017. Study on spatio-temporal distribution characteristics of hourly heavy rainfall in Sichuan and Chongqing from May to September during 1980-2012[J]. Meteor Mon, 43(9): 1073-1083 (in Chinese).
- 梁进秋, 申彦波, 胡丽琴, 等, 2020. FY-4A 地表太阳入射辐射产品在

- 山西高原的适用性研究[J]. 气象, 46(12): 1575-1584. Liang J Q, Shen Y B, Hu L Q, et al, 2020. Applicability of FY-4A surface solar irradiance products in the Loess Plateau of Shanxi[J]. Meteor Mon, 46(12): 1575-1584(in Chinese).
- 梁玉莲, 申彦波, 白龙, 等, 2017. 华南地区太阳能资源评估与开发潜力[J]. 应用气象学报, 28(4): 481-492. Liang Y L, Shen Y B, Bai L, et al, 2017. Assessment of solar energy resource and its exploitation potential in South China[J]. J Appl Meteor Sci, 28(4): 481-492(in Chinese).
- 刘长焕, 邓雪娇, 朱彬, 等, 2018. 近10年中国三大经济区太阳总辐射特征及其与 O_3 、 $PM_{2.5}$ 的关系[J]. 中国环境科学, 38(8): 2820-2829. Liu C H, Deng X J, Zhu B, et al, 2018. Characteristics of GSR of China's three major economic regions in the past 10 years and its relationship with O_3 and $PM_{2.5}$ [J]. China Environ Sci, 38(8): 2820-2829(in Chinese).
- 刘琳, 白永清, 林春泽, 等, 2018. 华中区域空气质量数值预报系统评估及气溶胶辐射效应的模拟研究[J]. 气象, 44(9): 1179-1190. Liu L, Bai Y Q, Lin C Z, et al, 2018. Evaluation of regional air quality numerical forecasting system in Central China and its application for aerosol radiative effect[J]. Meteor Mon, 44(9): 1179-1190(in Chinese).
- 马金玉, 罗勇, 申彦波, 等, 2012. 近50年中国太阳总辐射长期变化趋势[J]. 中国科学: 地球科学, 42(10): 1597-1608. Ma J Y, Luo Y, Shen Y B, et al, 2012. Regional long-term trend of ground solar radiation in China over the past 50 years[J]. Sci Sin Terrae, 42(10): 1597-1608(in Chinese).
- 毛冬艳, 曹艳察, 朱文剑, 等, 2018. 西南地区短时强降水的气候特征分析[J]. 气象, 44(8): 1042-1050. Mao D Y, Cao Y C, Zhu W J, et al, 2018. Climatic characteristics of short-time severe precipitation in Southwest China[J]. Meteor Mon, 44(8): 1042-1050(in Chinese).
- 闵敏, 吴晓, 2020. 从FY-4A卫星遥感数据和GFS资料估算全天空状况下的地表长波辐射通量[J]. 气象, 46(3): 336-345. Min M, Wu X, 2020. Estimating surface longwave radiation flux under all-sky condition from FY-4A and GFS data[J]. Meteor Mon, 46(3): 336-345(in Chinese).
- 齐冬梅, 周长艳, 李跃清, 等, 2020. 2017年秋季四川阴雨寡照特征及成因分析[J]. 气象, 46(1): 37-49. Qi D M, Zhou C Y, Li Y Q, et al, 2020. Analysis of autumn rainy and sunless characteristics and its mechanism in Sichuan in 2017[J]. Meteor Mon, 46(1): 37-49(in Chinese).
- 申彦波, 张顺谦, 郭鹏, 等, 2014. 四川省太阳能资源气候学计算[J]. 应用气象学报, 25(4): 493-498. Shen Y B, Zhang S Q, Guo P, et al, 2014. Climatology calculation of solar energy resource in Sichuan Province[J]. J Appl Meteor Sci, 25(4): 493-498(in Chinese).
- 陶苏林, 戚易明, 申双和, 等, 2016. 中国1981~2014年太阳总辐射的时空变化[J]. 干旱区资源与环境, 30(11): 143-147. Tao S L, Qi Y M, Shen S H, et al, 2016. The spatial and temporal variation of solar radiation over China from 1981 to 2014[J]. J Arid Land Resour Environ, 30(11): 143-147(in Chinese).
- 王炳忠, 申彦波, 2012. 自然环境条件对太阳能资源计算影响的再思考[J]. 应用气象学报, 23(4): 505-512. Wang B Z, Shen Y B, 2012. Reconsideration about effects of natural environmental conditions on the calculation of solar energy resources in China[J]. J Appl Meteor Sci, 23(4): 505-512(in Chinese).
- 王炳忠, 张富国, 李立贤, 1980. 我国的太阳能资源及其计算[J]. 太阳能学报, 1(1): 1-9. Wang B Z, Zhang F G, Li L X, 1980. Solar energy resources in China[J]. Acta Energ Sol Sin, 1(1): 1-9(in Chinese).
- 王晓梅, 张山清, 普宗朝, 等, 2013. 近50年乌鲁木齐市太阳能资源时空变化分析[J]. 气象, 39(4): 443-452. Wang X M, Zhang S Q, Pu Z C, et al, 2013. Analysis on spatial-temporal variation of solar energy resource in Urumqi City in recent 50 years[J]. Meteor Mon, 39(4): 443-452(in Chinese).
- 熊燕琳, 周筠珺, 2020. 四川地区地面太阳总辐射时空分布及气象影响因素研究[J]. 太阳能学报, 41(12): 162-171. Xiong Y L, Zhou J J, 2020. Spatial and temporal distribution of total solar radiation and meteorological factors in Sichuan Province[J]. Acta Energ Sol Sin, 41(12): 162-171(in Chinese).
- 杨溯, 石广玉, 王标, 等, 2013. 1961—2009年我国地面太阳辐射变化特征及云对其影响的研究[J]. 大气科学, 37(5): 963-970. Yang S, Shi G Y, Wang B, et al, 2013. Trends in surface solar radiation (SSR) and the effect of clouds on SSR during 1961—2009 in China[J]. Chin J Atmos Sci, 37(5): 963-970(in Chinese).
- 叶冬, 申彦波, 杜江, 等, 2014. 吐鲁番气象站周边典型建筑对日照时数的影响分析[J]. 高原气象, 33(6): 1712-1721. Ye D, Shen Y B, Du J, et al, 2014. Analysis of influence of typical buildings around Turpan Meteorological Station on sunshine hours[J]. Plateau Meteor, 33(6): 1712-1721(in Chinese).
- 郑小波, 王学锋, 罗宇翔, 等, 2011. 1961—2005年云贵高原太阳辐射变化特征及其影响因子[J]. 气候与环境研究, 16(5): 657-664. Zheng X B, Wang X F, Luo Y X, et al, 2011. Variation characteristics of global radiation and the associated climatic factors over Yunnan-Guizhou Plateau in the southwestern part of China for 1961—2005[J]. Clim Environ Res, 16(5): 657-664(in Chinese).
- 中国气象局, 2019. 太阳能资源评估方法: GB/T 37526—2019[S]. 北京: 中国标准出版社. China Meteorological Administration, 2019. Assessment method for solar energy resource: GB/T 37526—2019[S]. Beijing: China Standard Press(in Chinese).
- 钟燕川, 马振峰, 徐金霞, 等, 2018. 基于地形分布式模拟的四川省太阳能资源评估[J]. 西南大学学报(自然科学版), 40(7): 115-121. Zhong Y C, Ma Z F, Xu J X, et al, 2018. Assessment of solar energy resource in Sichuan based on distributed modeling on rugged terrains[J]. J Southwest Univ (Nat Sci Ed), 40(7): 115-121(in Chinese).
- 周秋雪, 康岚, 蒋兴文, 等, 2019. 四川盆地边缘山地强降水与海拔的关系[J]. 气象, 45(6): 811-819. Zhou Q X, Kang L, Jiang X W, et al, 2019. Relationship between heavy rainfall and altitude in mountainous areas of Sichuan Basin[J]. Meteor Mon, 45(6): 811-819(in Chinese).

- 朱忠敏, 龚威, 余娟, 等, 2010. 水平能见度与气溶胶光学厚度转换模型的适用性分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 35(9): 1086-1090. Zhu Z M, Gong W, Yu J, et al. 2010. Applicability analysis of transformation models for aerosol optical depth and horizontal visibility[J]. Geomat Inf Sci Wuhan Univ, 35(9): 1086-1090 (in Chinese).
- 左大康, 弓冉, 1962. 中国太阳直接辐射、散射辐射和太阳总辐射间的关系[J]. 地理学报, 28(3): 175-186. Zuo D K, Gong R, 1962. The relationship among direct solar radiation, scattered radiation and global radiation in China[J]. Acta Geogr Sin, 28(3): 175-186 (in Chinese).
- Gueymard C A, 1995. SMARTS2, A Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine: Algorithms and Performance Assessment[M]. Florida: Florida Solar Energy Center.
- Gueymard C A, 2001. Parameterized transmittance model for direct beam and circumsolar spectral irradiance[J]. Solar Energy, 71(5): 325-346.
- Michalsky J J, Anderson G P, Barnard J, et al, 2006. Shortwave radiative closure studies for clear skies during the Atmospheric Radiation Measurement 2003 Aerosol Intensive Observation Period [J]. J Geophys Res, 111 (D14): D14S90. DOI: 10. 1029/2005JD006341.