

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2018.07.017

基于地形分布式模拟的四川省太阳能资源评估^①

钟燕川^{1,2}, 马振峰², 徐金霞², 郭海燕²

1. 高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室, 成都 610000; 2. 四川省气候中心, 成都 610000

摘要: 利用四川省气象站常规观测数据和 1:25 万数字高程(DEM)数据, 根据地形因子(坡度和坡向)建立太阳辐射分布式模型, 计算实际地形下的四川省太阳总辐射时空分布情况; 评估分析了能体现太阳能资源的稳定度、资源丰富度、可利用价值等指标. 结果表明: 四川省复杂地形下的太阳总辐射多年平均年总量为 1 800~7 200 MJ/m², 盆地内与高原山地上总辐射值差异较大; 总辐射冬季较小, 夏季较大, 在 1981—2010 年间降低 5%; 四川省太阳能资源自西向东规律分布, 在太阳能资源稳定且丰富, 可利用日数较长, 具有开发利用价值的四川省攀西和三州(阿坝州、甘孜州、凉山州)地区可合理利用太阳能资源, 在交通不便地区安装小型分布式发电设施; 四川省高原和山地以东的盆地地区太阳能资源较差, 但仍存在少量太阳能资源丰富地区, 有适用中小型分布式发电设施的可能.

关键词: 太阳能资源; 时空分布; 总辐射; 资源丰富度; 稳定度

中图分类号: P422.1

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2018)07-0115-07

随着社会经济的发展, 我国对能源需求的日渐增加, 社会对于清洁能源的开发有着巨大需求^[1-2]. 对于太阳能辐射资源的计算, 以往多采取仅考虑气候因子的气候学计算方法^[3-8], 近年来逐渐加入地形因子的计算^[9-11]. 在四川省以往关于太阳能资源的研究中, 大多仅考虑气候学因子, 即通过统计分析气候观测因子来建立经验统计模型^[5]. 而实际上, 太阳辐射不仅受季节和纬度的影响^[12], 在实际地形下由于遮蔽度、坡向和坡度的不同, 局地接受的太阳辐射会出现巨大差异^[13-14], 实际情况下太阳辐射的空间分布十分复杂. 四川省地形多样, 气象站点分布不均, 实测太阳辐射资料非常有限, 给太阳能资源评估带来困难. 研究多山地区起伏地形下的太阳辐射精细空间分布的有效方法是采用数字高程资料(DEM)^[15]. 本研究基于四川省常规气象观测数据、DEM 数据和遥感数据, 对四川省实际起伏地形下的太阳辐射进行计算和模拟, 为四川省新能源开发工作提供更为科学准确的评估方法和依据^[16].

1 资料和方法

1.1 资料来源

本研究使用的气象资料为日照百分率, 检验所用数据为辐射观测值, 分别为建模和检验所用. 其中日照百分率资料时间段为 1981—2010 年, 辐射观测值为 2012 年观测资料, 均来自于四川省气象局; 所用的地形数据为 1:25 万 DEM, 由中国气象局提供; 遥感资料用于反演地表反照率, 来自南京信息工程大学.

1.2 计算方法

1.2.1 分布式模型建立

分布式模型通常认为, 复杂地形上的地表太阳总辐射由来自太阳的直接辐射、来自天空散射辐射和来

① 收稿日期: 2017-05-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(41275097); 四川省科技支撑计划项目(15ZC0098); 四川省气象局项目(川气课题 2013-开发-09).

作者简介: 钟燕川(1984-), 女, 硕士, 工程师, 主要从事气候资源应用、气象和地质灾害研究.

自地形的反射辐射组成^[10], 前提是忽略地表和大气之间的多次反射, 模型也据此建立^[7-8,17].

1) 直接辐射计算模型建立

考虑结合气象观测站的日照百分率观测资料, 建立水平面太阳直接辐射模型^[18-19]:

$$Q_b = Q \cdot f_b = Q(1 - \alpha)(1 - \exp[-bs^c/(1 - s)]) \quad (1)$$

式中: Q 为水平面太阳总辐射量; f_b 为直接分量; a, b, c 为经验系数, 代表水平面直接辐射占总辐射的比重; s 为日照百分率^[19].

$$Q_{ba\beta} = \frac{Q_{0a\beta}}{Q_0} \times Q_b \quad (2)$$

式中: $Q_{ba\beta}$ 为复杂地形下的天文辐射; Q_0 为水平面的天文辐射, 由纬度、太阳常数和太阳赤纬求得; 通过大气参数和日照百分率来计算水平面的太阳直接辐射 Q_b .

2) 散射辐射计算模型建立

局地地形对天穹各向散射辐射有遮蔽作用. 复杂地形中太阳散射辐射的计算模型^[16]为:

$$Q_{da\beta} = Q_d[(Q_b/Q_0)R_b + V(1 - Q_b/Q_0)] = Q_d[f_b k_t R_b + V(1 - f_b k_t)] \quad (3)$$

式中: $Q_{da\beta}$ 为起伏地形下散射辐射; 未考虑地形影响计算所得地面所接受的太阳散射量为水平散射辐射 Q_d ; $k_t = \frac{Q}{Q_0}$ 为晴空指数; V 为根据实际地形特征计算而得的地形开阔度.

3) 反射辐射计算模型建立

① 实际地形下太阳地形反射辐射分布式模型^[19].

太阳反射辐射量可由周围地形投射, 受周围山地地形开阔度和反射能力的影响^[18], 其计算式为:

$$\begin{cases} Q_{\gamma a\beta} = \alpha_s(Q_b + Q_d)(1 - V) = Q\alpha_s(1 - V) & V \leq 1 \\ Q_{\gamma a\beta} = 0 & V > 1 \end{cases} \quad (4)$$

式中: 下垫面性质决定了 $Q_{\gamma a\beta}$ 地形反射辐射和 α_s 地表反照率.

② 地表反射率模型

根据遥感资料中的地表反照率与反射率之间的线性回归关系, 地表反射率计算式如下:

$$\alpha = a\gamma_1 + b\gamma_2 + c \quad (5)$$

式中: a, b, c 为经验系数; γ_1 和 γ_2 分别为 NOAA/AVHRR 的第一和第二通道的窄带反射率(谱反射率).

4) 总辐射计算模型的建立

实际起伏地形中的太阳总辐射由上述三部分构成:

$$Q_{a\beta} = Q_{ba\beta} + Q_{da\beta} + Q_{ra\beta} \quad (6)$$

式中: $Q_{a\beta}$ 为实际地形下的太阳总辐射; $Q_{ba\beta}$ 为实际地形下的太阳直接辐射; $Q_{da\beta}$ 为实际地形下的太阳散射辐射月总量; $Q_{ra\beta}$ 为地形反射辐射.

5) 模拟结果检验

采用四川省境内辐射观测站 2012 年 12 个月实测总辐射值与同期模拟计算值进行检验. 结果显示, 模拟值和实测值的相对误差平均值为 6.86%.

1.2.2 稳定度计算

太阳能资源稳定度通常用日照时数大于 6 h 的日数的最大和最小值之比来表示. 比值越大, 太阳能资源稳定程度越小, 反之则稳定程度越好. 当地太阳能资源年变化幅度越小, 越有利于开发和利用, 其公式可以表示为^[16]:

$$K = \frac{\max(Day_1, Day_2 \cdots Day_{12})}{\min(Day_1, Day_2 \cdots Day_{12})} \quad (7)$$

式中: K 为太阳能资源稳定程度指标, 无量纲数; $\max()$ 为求最大值的标准函数; $\min()$ 为求最小值的标准函数. $Day_1, Day_2 \cdots Day_{12}$ 为各月日照时数大于 6 h 的天数, 单位为天(d); 依照相关评估标准^[17]: $K < 2$, 太阳能资源稳定; $2 < K < 4$, 太阳能资源较稳定; $K > 4$, 太阳能资源不稳定.

2 结果分析

2.1 四川省总辐射时空特点

2.1.1 四川省总辐射时空分布特点分析

图 1 分别为 1981—2010 年期间, 基于起伏地形情况下得到的四川省多年平均的全年、春季和夏季月份太阳总辐射空间分布图(区间取值范围包括前值). 由图中可以看出, 多年平均太阳总辐射范围是 1 800~7 200 MJ/m², 年总辐射经向变化差异较大, 这是由于四川省东部盆地、西部高原和山地海拔、地貌和环流特征方面带来的差异, 对总辐射的地带性规律产生的影响. 盆地地区为四川省总辐射低值区, 由于盆地地区阴雨时间长、多云天气多、盆周地形带有遮蔽性等特点, 导致盆地地区太阳总辐射相较于高原地区较少. 四川省东部盆地年均总辐射在 4 000 MJ/m² 以内, 盆地南部大部分地区以及盆地与高原交界地带地处青衣江和龙门山^[20]暴雨区, 该地区地形多为山谷, 开阔度低, 日照时间和接受日照辐射时间相对偏少, 年总辐射低于 3 000 MJ/m². 其中邻水县、叙永县、筠连县、屏山县、荣经县、宝兴县和绵阳市一带是总辐射的低值区, 而年均辐射最低值中心则在宝兴县附近, 年总辐射值仅为 2 500 MJ/m². 四川省太阳辐射值较高的区域几乎全分布于西部高原和山地的三州地区(凉山州、甘孜州和阿坝州), 由于地形开阔度大, 少云遮蔽日照时间充足, 这些地区总辐射均大于 4 000 MJ/m², 相当部分地区辐射值高于 6 000 MJ/m²; 四川省年均总辐射最高地区位于甘孜州的稻城县、石渠县、巴塘县、理塘县、炉霍县和甘孜州一带, 其中理塘县为最高值地区, 辐射值高达 6 500 MJ/m² 以上.

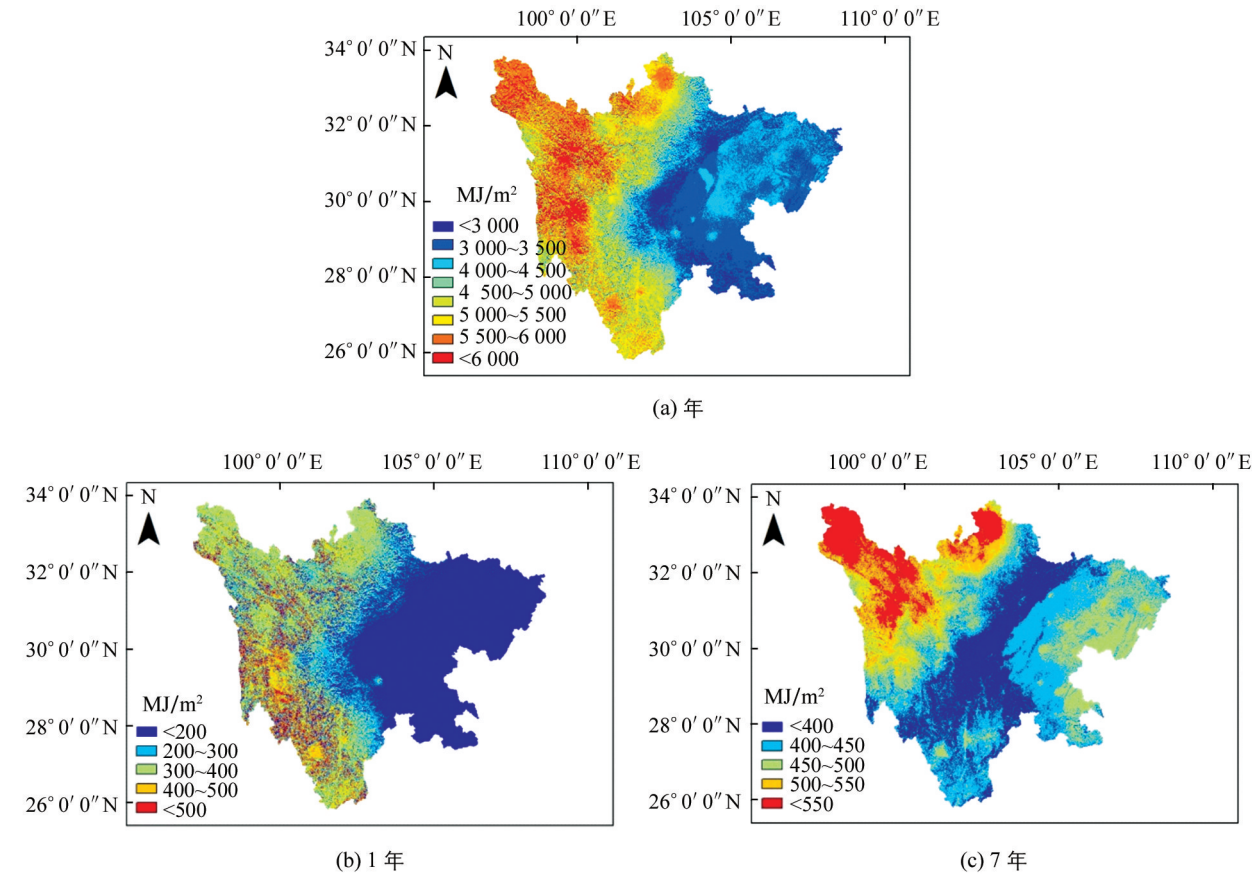


图 1 四川省起伏地形下总辐射空间分布

四川省总辐射呈现出典型的夏丰冬贫的季节特点. 冬季 1 月太阳总辐射范围为 50~700 MJ/m²; 其中盆地内总辐射低于 300 MJ/m²; 总辐射随着盆地向高原逐渐增大, 盆周山区总辐射明显高于盆地; 其中大于 500 MJ/m² 辐射丰富区域主要集中在总辐射资源良好的攀枝花市、凉山州和甘孜州南部分小地区, 且攀枝花市、凉山州和甘孜州南部总辐射高于 400 MJ/m² 地区明显多于阿坝州和甘孜州北部. 从冬季到夏季, 随着太阳高度角不断增大, 7 月总辐射辐射值范围为 220~630 MJ/m², 相较于冬季 1 月显著

增加,且由于夏季太阳直射点北移,北部地区日照时间增多的缘故,在甘孜州和阿坝州北部大部分地区,总辐射都能达到 500 MJ/m^2 以上.而盆地与高原地区相交的山区,依旧为总辐射相对较小地区,大部分地区小于 400 MJ/m^2 .

2.1.2 四川省主要城市总辐射变化

四川省总辐射年变化情况如图 2 所示(区间取值范围包括前值),年均总辐射 $3\,992\text{ MJ/m}^2$,在 1981—2010 年间降低 5%.从图 2 来看,四川省中部和南部以雅安市为中心的盆地和高原山地交界地区、四川盆地东部的巴中市和达州市部分地区以及北部高原小部分地区总辐射 30 年增幅在 5%以内,位于雅安市以南的乐山市峨边县总辐射增幅最大达 10.3%;四川省其余地区均呈减小趋势,四川省东南部的自贡市、宜宾市和泸州市部分地区、位于东北部的广元市和南充市部分地区、中部的德阳市和成都市、甘孜州和凉山州小部分地区减幅大于 10%,其中位于南充市的苍溪县、位于绵阳市的什邡县和位于阿坝州的汶川县减幅高于 25%.

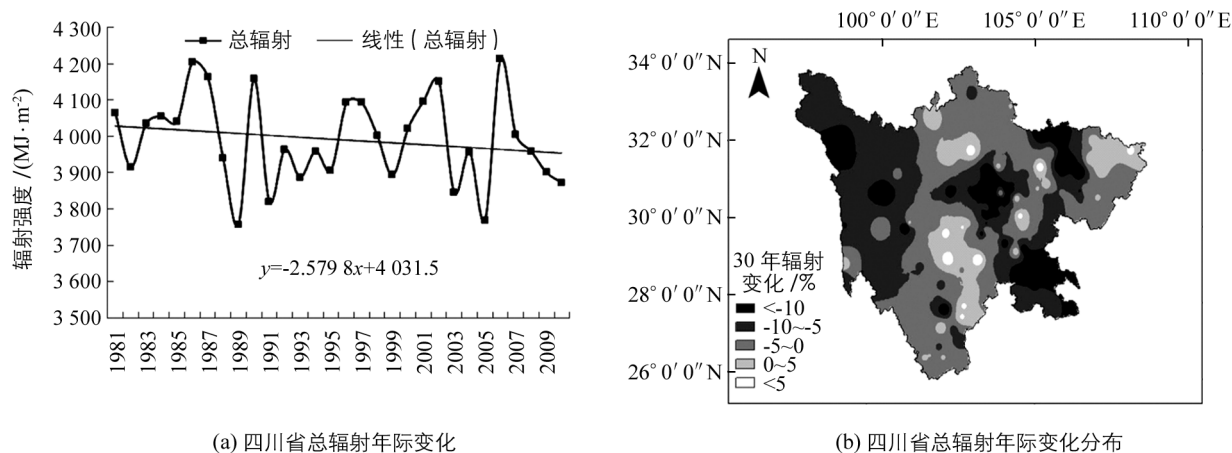


图 2 四川省 1981—2010 年间总辐射变化情况

2.1.3 同纬度邻近省份总辐射比较

同纬度相邻的西藏自治区,由于海拔比川西高原高,其太阳年总辐射在 $3\,935\sim8\,235\text{ MJ/m}^2$ 之间,高于川西高原,且也呈现出西高东低的特点.位于四川省东部的重庆地区,太阳总辐射年总量为 $3\,036\sim3\,947\text{ MJ/m}^2$ 之间^[15],同与之接壤的四川盆地东部山区值近似,但重庆地形高差比四川省小,故其总辐射量区间变化比四川小.

2.1.4 同省份气候经验模型结果比较

同四川省与四川省以往以仅考虑气候因子的气候学经验模型^[5]计算的总辐射结果相比,加入地形的分布式模型计算得到的总辐射结果范围更大,分布式模型计算所得四川省年均总辐射结果范围为 $1\,800\sim7\,200\text{ MJ/M}^2$,气候学经验模型所得总辐射值变化范围在 $3\,200\sim6\,390\text{ MJ/M}^2$;四川省辐射的高值区和低值区分布大致相同.但对于局地地形对太阳辐射造成的影响,气候学经验模型结果无法做到细致的表达.局地地形由于受到周围山地遮蔽和自身遮蔽的影响,对太阳辐射空间影响明显.而通过分布式模型进行计算的四川省总辐射结果,可以根据使用的 DEM 数据精度,为实地太阳能勘探和开发工作提供不同的精细化参考结果.

2.2 太阳能资源评估

2.2.1 四川省太阳能资源丰富度空间分布

四川省太阳能资源丰富度分布情况如图 3 所示.从经向上看,四川省太阳能资源丰富度由东到西呈现出东低西高的特点.四川盆地大部分为属于太阳能资源一般地区,在东北部存在小部分资源丰富区;四川西部和北部高原,以及南部高山地区的大部分为资源很丰富地区,其中太阳能资源最丰富地区分布在高原地区甘孜州的石渠县、甘孜州、炉霍县、理塘县、巴塘县和稻城县.

2.2.2 储量分布

四川省太阳能储量分布情况如图 4 所示(区间取值范围包括前值).四川省太阳能储量高于 $3\,500\,000\text{ kW}\cdot\text{h}$

地区分布于四川西部高原阿坝州北部和甘孜州西北部, 其中甘孜州的炉霍县、理塘县和甘孜县储量高于 3 800 000 kW·h; 阿坝州、甘孜州、凉山州和攀枝花大部分地区太阳能储量高于 2 500 000 kW·h; 四川盆地内大部分地区太阳能储量在 200 000~2 500 000 kW·h 之间; 太阳能储量最低的地区为盆地西部和高原交界一带。

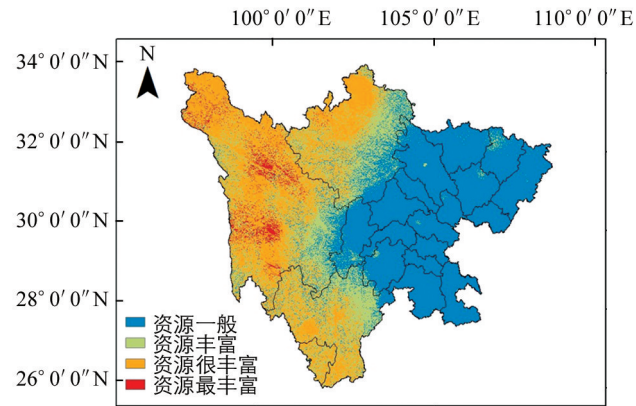


图 3 四川省太阳能资源丰富度分布

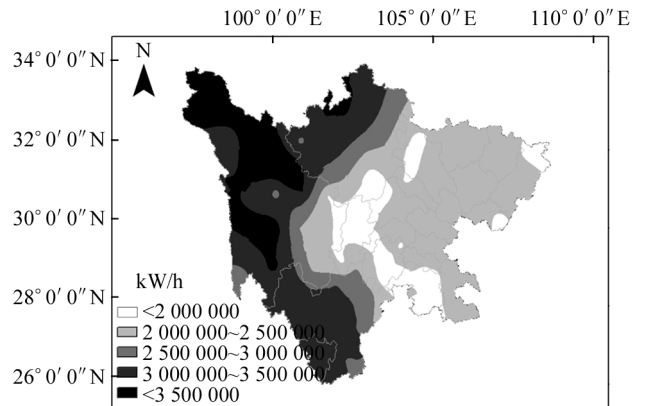


图 4 四川省太阳能储量分布

2.2.3 四川省太阳能资源可利用价值评估

通常评价某地太阳辐射是否具有开发利用价值, 则评价某地某天日照时数是否大于 6 h^[17]. 四川省日照时数大于 6 h 天数分布情况如图 5 所示(区间取值范围包括前值). 盆地地区日照时数大于 6 h 的天数在 150 d 以下, 其中中部和南部大部分地区不足 100 d; 四川省西北部高原地区和南部山区部分地区日照时数大于 6 h 的天数在 150~200 d 之间, 其中阿坝州北部、甘孜州中部和南部、凉山州南部和攀枝花地区, 日照时数在 200 d 以上. 省内太阳能可利用日数最少为宝兴县, 30 年平均可利用日照时数仅为 34 d; 最多为攀枝花仁和区, 为 241 d.

2.2.4 四川省太阳能资源稳定度评估

四川省太阳能资源稳定度分布情况如图 6 所示. 四川省太阳能资源稳定度分布经向特征明显. 四川省高原西北部大部分地区为太阳能资源稳定的区域; 四川省太阳能资源较稳定地区为盆地和高原交界处地区、盆地北部的广元市、甘孜州南部和四川省南部凉山州地区; 其余四川盆地大部地区太阳能资源为不稳定状态^[19]. 其中, 位于高原地区的小金县、理县、丹巴县、雅江县、泸定县、壤塘县和盆地内宝兴县 K 值最低, 东部邻水县 K 值最高.

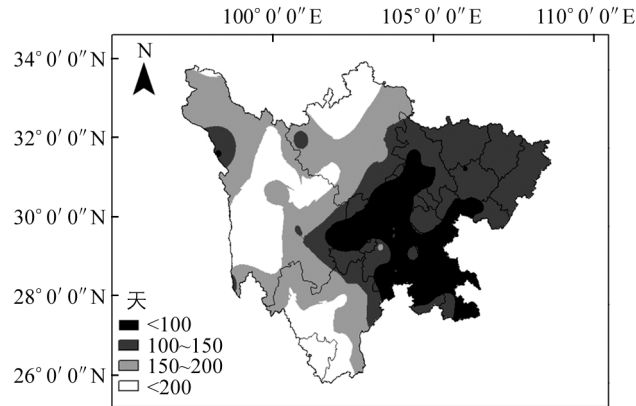


图 5 四川省大于 6h 日照天数分布

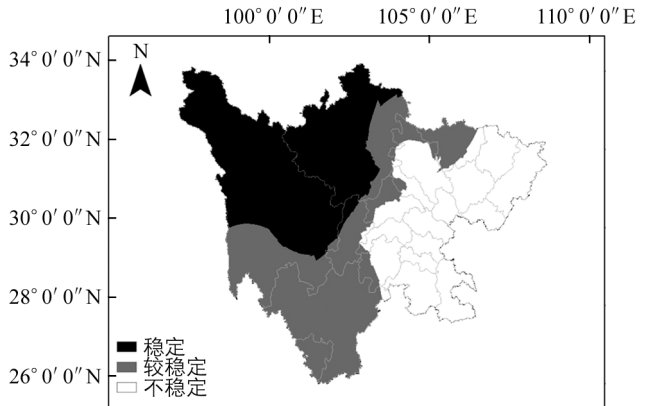


图 6 四川省太阳能资源稳定度分布

3 结果与讨论

1) 四川省复杂地形下的太阳总辐射多年平均年总量为 1 800~7 200 MJ/m² 之间, 盆地内与高原山地

上总辐射差异较大. 1981—2010 年间四川省平均总辐射降低 5%, 位于甘孜州西北部的总辐射高值区 30 年总辐射在减小, 位于四川省雅安市附近的辐射低值区总辐射在增大. 实际地形下太阳辐射的空间分布是地形、天文、大气等因子综合作用的结果. 直接辐射、散射辐射和反射辐射共同决定了总辐射大小, 而辐射分量又受到太阳高度角、大气透明系数、云量的影响. 造成实际地形下太阳辐射分布不均的主要原因是局地地形对太阳辐射的空间分配^[10].

2) 四川省太阳能资源自西向东呈经向性规律分布. 四川省太阳能资源较好地区主要分布于四川省盆地以西的高原和山地, 如阿坝州、甘孜州、凉山州和攀西地区, 该地区其年均太阳总辐射在 $4\,500\text{ MJ/m}^2$ 以上, 冬季大值区主要集中在攀西地区、凉山州和甘孜州南部, 夏季集中于阿坝州和甘孜州北部; 太阳能资源丰富度为丰富和很丰富, 太阳能储量在高于 $2\,500\,000\text{ kW}\cdot\text{h}$, 且一年中可利用日数大于 150 d, 太阳能资源也较为稳定; 位于高原上甘孜州的稻城县、石渠县、巴塘县、理塘县、甘孜州和炉霍县一带为总辐射最高值区大于 $6\,000\text{ MJ/m}^2$, 太阳能资源最为丰富, 一年中可利用日数大于 200 d, 且太阳能资源稳定. 四川省高原和山地以东的盆地地区太阳能资源较差, 盆地大部分地区多年平均年总辐射小于 $3\,000\text{ MJ/m}^2$, 太阳能资源一般, 太阳能储量在 $2\,500\,000\text{ kW}\cdot\text{h}$ 以下, 年均太阳能资源可利用天数小于 150 d, 且大部分地区不稳定. 高原与盆地交界处沿线地区位于龙门山断裂带、地形复杂开阔度低, 且位于青衣江和龙门山暴雨区, 成为四川省太阳能资源最差地区.

3) 四川省的攀西地区和三州地区太阳能资源稳定且丰富, 可利用日数较长, 具有开发价值. 但位于西部和北部高原的阿坝州和甘孜州海拔较高, 南部凉山州和攀西地区地形复杂, 部分地区交通设施不到位, 为光伏发电并网带来一定困难. 在交通便利、地形平坦地区可建立中型和大型光伏电站; 对于地形陡峭的山地且交通不便地区, 可在居民楼房以及户外空地建设安装中小型分布式发电设施, 通过自发自用的方式, 解决当地居民自用电问题, 合理利用太阳能资源. 在太阳能资源较差的盆地内, 依然存有少量太阳能资源丰富地区, 可适用中小型分布式发电设施.

4) 在进行局地太阳能资源开发时, 尤其对于地形复杂的四川省来说, 太阳辐射在山区有很强的地域分布特点, 考虑地形因子的太阳辐射模型比仅考虑气候因子的经验统计模型更能提供更详细的参考. 因辐射观测站所获取资料有限, 本研究中所用因辐射观测站建立时间不长, 仅采用了 2012 年总辐射数据用于模型检验, 关于对地形影响的太阳总辐射分量的效果检验, 今后在观测资料获得补充后, 可在提高该类型模型的精确度和减小误差方面继续开展研究.

参考文献:

- [1] 刘 怡, 杜流洪, 王 成, 等. 新型农村社区农户生态满意度影响因素分析——以整村推进示范区“大柱新村”为例 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2015, 40(7): 151—157.
- [2] 丁丽萍, 李文静, 帅传敏. 公众太阳能光伏发电采纳意愿的差异分析 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2015, 37(5): 162—167.
- [3] WANG C L, YUE T X, FAN Z M. Solar Radiation Climatology Calculation in China [J]. Journal of Resources and Ecology, 2014, 5(2): 132—138.
- [4] 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.
- [5] 杨淑群, 詹兆渝, 范雄. 四川省太阳能资源分布特征及其开发利用建议 [J]. 四川气象, 2007, 27(2): 15—17.
- [6] 申彦波, 张顺谦, 郭 鹏, 等. 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.
- [7] 闫加海, 张冬峰, 安 炜, 等. 山西省太阳能资源时空分布特征及利用潜力评估 [J]. 干旱气象, 2014, 32(5): 712—718.
- [8] 朱学玲, 李红卫. 洛阳地区太阳能资源分析与评估 [J]. 气象与环境科学, 2015, 38(1): 67—72.
- [9] 王 丽, 邱新法, 王培法, 等. 复杂地形下长江流域太阳总辐射的分布式模拟 [J]. 地理学报, 2010, 65(5): 543—552.
- [10] 谷晓平, 袁淑杰, 史 岚, 等. 贵州高原复杂地形下太阳总辐射精细空间分布 [J]. 山地学报, 2010, 28(1): 96—102.
- [11] 张海龙, 刘高焕, 叶 宇, 等. 青藏高原短波辐射分布式模拟及其时空分布 [J]. 自然资源学报, 2010, 25(5): 811—821.
- [12] 曾 燕, 邱新法, 刘昌明, 等. 基于 DEM 的黄河流域天文辐射空间分布 [J]. 地理学报, 2003, 58(6): 810—816.

[13] 邬定荣, 刘建栋, 刘 玲, 等. 基于 DEM 的广东山地高分辨率太阳辐射模拟研究 [J]. 热带气象学报, 2014, 30(4): 795—800.

[14] 罗怀良. 川中丘陵地区近 46 年来气候变化及旱涝动态特征 [J]. 四川师范大学学报(自然科学版), 2011, 34(2): 273—278.

[15] 程炳岩, 孙卫国, 孙仕强, 等. 重庆地区太阳总辐射的气候学计算方法研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2011, 33(9): 94—104.

[16] 文明章, 张容焱, 高建芸, 等. 基于地形的福建省太阳辐射模拟计算及评估 [J]. 亚热带资源与环境学报, 2013, 8(3): 65—71.

[17] 中国气象局. 太阳能资源评估方法: QX/T89-2008 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.

[18] 袁淑杰, 李钰春, 向 乐, 等. 起伏地形下四川省太阳直接辐射时空分布特征 [J]. 干旱气象, 2016, 34(1): 20—25.

[19] 钟燕川, 马振峰, 徐金霞, 等. 基于分布式模型方法和气候经验模型的四川省总辐射结果比较研究 [J]. 高原山地气象研究, 2017, 37(3): 58—63.

[20] 詹兆渝. 中国气象灾害大典—四川卷 [M]. 北京: 气象出版社, 2006: 8—15.

Assessment of Solar Energy Resource in Sichuan Based on Distributed Modeling on Rugged Terrains

ZHONG Yan-chuan^{1,2}, MA Zhen-feng², XU Jin-xia², GUO Hai-yan²

1. Heavy Rain and Drought-Flood Disasters in Plateau and Basin Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610000, China;
2. Sichuan Provincial Climate Centre, Chengdu 610000, China

Abstract: A distributed model based on 1 : 250 000 DEM data and meteorological data has been established to calculate the solar total radiation (STR) over rugged terrains in Sichuan province, and the result is compared with the neighboring provinces at the same latitude. The indexes reflecting the stability of solar energy source, resource richness and use value (UV) are assessed and analyzed in this paper. The results show that the annual average STR of Sichuan Province is 1 800—7 200 MJ/m². There is a big difference in STR between the basin and plateau regions of the province. STR is more in summer than in winter and was reduced by 5% during 1981—2010. The STR in Sichuan province is regularly distributed from west to east. In Aba autonomous prefecture in the northern part of the province, Ganzi autonomous prefecture in the west and Liangshan autonomous prefecture in the south, the solar energy resource is rich and stable, with a sunshine duration of above 6 hours per day. The solar energy resource in these regions has development value. Although the traffic is inconvenient in some places, small-or medium-sized solar generators can be installed. In the basin area which is to the east of the plateau and mountainous areas, solar energy is poor. But there are some areas suitable for small-sized solar generators.

Key words: solar energy source; time and space distribution; total radiation; resource abundance; stability

责任编辑 包 颖

