

文章编号: 1008-2786-(2017)3-420-09

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000238

川西山区太阳辐射估算及其时空分布特征

黄盼^{1,2}, 赵伟¹, 李爱农^{1*}

(1. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所 数字山地与遥感应用中心 四川 成都 610041;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 山地地表接收的太阳入射辐射由于受到坡度、坡向及地形遮蔽等影响, 导致其在时空分布上呈现较高的异质性。为定量分析山地地表太阳辐射的时空分布特征, 本研究选择川西山区为研究对象, 针对山地特殊地理环境, 基于太阳直接辐射、散射辐射和周围地形反射辐射的参数化方案, 采用 Landsat 系列卫星遥感影像数据和 30m ASTER GDEM 数据定量估算了研究区在不同时期的太阳辐射空间分布, 并结合研究区的坡度、坡向、海拔等地形因子, 选择夏、秋、冬不同季节对山地太阳辐射时空分布进行了综合分析。结果表明: (1) 经过贡嘎山站观测数据的验证, 本研究所采用的估算方案能够取得较高的估算精度, 平均绝对误差为 $48.7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 相对误差为 6%; (2) 山地太阳辐射分布具有很强的地形规律, 总体特点是山脊大于山谷, 阳坡大于阴坡; (3) 随着坡度的增加, 太阳辐射呈现递减的趋势; 而随海拔的上升太阳辐射总体来说呈现增加趋势, 只是在低海拔处由于地形遮蔽和山顶由于坡度陡峭造成坡面入射角小而略有回落; (4) 在不同的季节, 太阳辐射受地形因子的影响程度有所差异, 这与太阳高度角的大小有着直接的关系。

关键词: 太阳辐射; 地形影响; 时空分布; 川西山区

中图分类号: P463.2; P422.1

文献标志码: A

作为地球表层生物、物理和化学过程的主要能量来源, 太阳辐射对局地气候的形成和植被的生长发育极其重要, 同时也是开展基于水文模型、陆面过程模型以及生物物理模型的陆地水文、生态、气候及环境等研究中不可或缺的参数^[1,2]。随着地球系统科学研究的不断深入, 获取区域地表太阳辐射、认识其时空分布特征也变得日趋重要^[3]。山地约占地球陆地面积的 24%, 而在我国更是接近陆地面积的 70%, 因此, 准确地估算山区太阳辐射、了解其时空

分布状况是一项重要的研究工作。然而在山区, 太阳辐射受坡度、坡向和地形遮蔽等诸方面因素影响, 空间分布相比平坦地表呈现更高的时空异质性, 单一利用山区有限地面观测站点通过插值来获取区域地表太阳辐射会有很大的不确定性^[4]。

为开展山区地表太阳辐射估算, 早在 1958 年傅抱璞就提出了坡地上太阳辐射的计算方法^[5], 随后对其理论进行了不断的完善和充实^[6]。在此基础上, 李占清和翁笃鸣^[7]针对丘陵山地特点, 提出了

收稿日期(Received date): 2017-01-09; 改回日期(Accepted date): 2017-03-09。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金项目(41401425; 41631180); 国家重点研发计划全球变化及应对专项子课题(2016YFA0600103); 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所青年百人团队计划(SDSQB-2015-02); 中国科学院青年创新促进会项目(2016333)。[National Natural Science Foundation of China (41401425; 41631180); National Key Research and Development Program of China (2016YFA0600103); Youth Talent Team Program of Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS (SDSQB-2015-02); Youth Innovation Promotion Association, CAS (2016333)]

作者简介(Biography): 黄盼(1992-), 男, 四川德阳人, 硕士研究生, 研究方向: 山地地表水热通量遥感估算。[Huang Pan (1992-), male, M. Sc. candidate, research on mountain water and heat fluxes estimation by remote sensing method] E-mail: 374151766@qq.com

* 通讯作者(Corresponding author): 李爱农(1974-), 男, 安徽庐江人, 研究员, 博士生导师, 研究方向: 山地定量遥感及其应用研究。[Li Ainong (1974-), male, professor, Ph. D supervisor, research on mountain quantitative remote sensing and its application] E-mail: ainongli@imde.ac.cn

丘陵山地总辐射的理论计算模式并充分考虑了地形因素(包括局地地形遮蔽角、平均坡向和坡度等)的影响。以上研究由于当时计算机技术的限制,其计算工作只能借助于地形图,导致计算量大而且繁琐。随着数字高程模型(DEM)的出现,为计算各种地形参数(如坡度、坡向和地形遮蔽度等)及其可视化表达提供了便利。首先相关地形参数从数字高程模型分析的角度得到有效的定义^[8],然后基于GIS平台实现了复杂地形下太阳辐射估算模型^[9]。随着研究的深入,地形遮蔽的影响得到全面的考虑,相关学者对任意地形条件下太阳辐射模型进行了改进^[10,11]。近年来,由于遥感技术快速发展,采用遥感技术与数字高程模型相结合方式逐渐成为地表太阳辐射估算的主要手段。在地表太阳辐射估算过程中,通过敏感性分析可以发现,太阳天顶角、地表反照率、半球云比例、海拔和大气透过率等因素对地表接收的太阳辐射有着不可忽视的影响^[12]。因此,精确估算山区地表太阳辐射不仅需要可靠的地形数据和大气参数,还需要考虑地形起伏引起的下垫面参数变化。例如,在晴空条件下山区太阳辐射分布模型中,虽然既考虑了地形的影响,也考虑了大气条件对太阳辐射的作用,但没有对地表反照率进行地形校正,这会对反射辐射的计算造成一定的误差^[13],但在后来的青藏高原地表太阳辐射相关研究中对此进行了补充,采用C校正模型纠正了地形对遥感影像的影响^[14]。

为客观认识山地地表接收太阳辐射空间分布的规律及其时间变化特征,本文基于Landsat遥感数据和30m ASTER GDEM数据,在综合已有山区地表

太阳辐射估算方法的基础上,引入SCS+C校正模型改进地表反照率的反演结果,然后估算出川西山区不同季节的晴空太阳辐射,并且分析了太阳辐射空间分布特征与地形因子(坡度、坡向和高度)的关系以及不同季节地形因子对太阳辐射分布影响的差异。

1 研究区与数据

本研究为了突出在崎岖地形下,太阳辐射时空分布的复杂性,选取的研究区为川西山区,具体位置根据Landsat图幅号确定,其中条带号为131,行编号为39,图1展示了研究区的地理位置及其高程分布特征。该区域地处横断山构造带,境内山峰高耸,河谷幽深,特别是研究区东南角的贡嘎山东坡区域,在水平方向相隔不到30 km的范围内,海拔高差达到6 400 m^[15]。在海螺沟内设有贡嘎山森林生态系统国家野外科学观测研究站(以下简称贡嘎山站),主要包括海拔1 600 m的磨西基地站(29°39'N, 102°07'E)和3 000 m的亚高山观测站(29°35'N, 102°00'E)。

本研究所需数据主要包括(1) Landsat 遥感数据,空间分辨率30 m,主要用于计算地表反照率;(2) ASTER GDEM数据,空间分辨率30 m,主要用于计算地形因子,如坡度、坡向、天空可视因子等;(3) 地面站点观测数据,主要为贡嘎山站地表太阳辐射逐时观测数据,将用于山区太阳辐射估算结果的精度验证。其中,相关遥感数据和DEM数据均可以从地理空间数据云免费下载(<http://www.gscloud>。

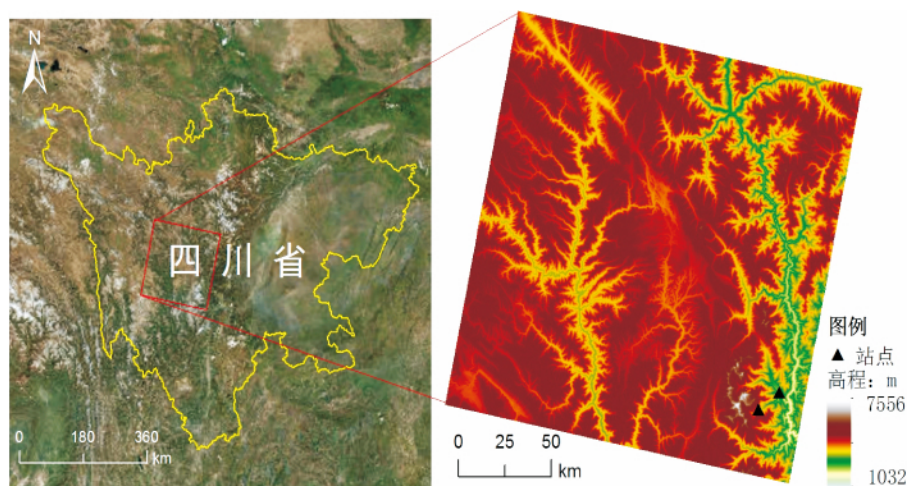


图1 研究区地理位置及其高程空间分布

Fig. 1 Geographical location of study area and spatial distribution of its elevation

cn/) ,而地面数据则来源于贡嘎山森林生态系统国家野外科学观测研究站(<http://ggf.cern.ac.cn/>)。

2 方法

本文采用 Dubayyah^[9] 和 Han^[14] 的地形起伏条件下地表太阳辐射估算思路,即将地表太阳辐射分为太阳直接辐射、天空散射辐射和周围地形反射辐射,通过求和计算出研究区的总入射太阳辐射 I :

$$I = I_b + I_d + I_r \quad (1)$$

式中 I_b 为直接辐射, I_d 为天空散射辐射, I_r 为周围地形反射辐射。

2.1 太阳直接辐射

与水平地面上相似,入射到起伏地表的太阳直接辐射可以表示为^[16]:

$$I_b = \begin{cases} E_0 \times dr \times \tau_b \times \cos\theta & \text{当 } \cos\theta > 0 \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \quad (2)$$

其中 E_0 是太阳常数,由于太阳常数是日地平均距离处的值,当具体到某一天时,需要进行订正,当天日地距离订正系数为^[17]:

$$dr = 1 + 0.0344 \times \cos\left(\frac{2\pi \times DOY}{365}\right) \quad (3)$$

式中 DOY 是积日;公式(2)中 τ_b 是直接辐射大气透过率,由于山区地形起伏较大,透过率随高程变化明显,因此通过对 Beer 的辐射消减定律线性化而成为高程的函数^[18]:

$$\tau_b = 0.75 + 0.00002 \times z \quad (4)$$

其中 z 为高程,该关系式考虑了海拔的影响,逐网格进行计算,优于一般的大气透过率计算模型(不考虑地形起伏)。公式(2)中 θ 为太阳光线与坡面法线的夹角,按下式计算^[8]:

$$\cos\theta = \cos Z_s \cos S + Z_s \sin S \cos(A_s - A) \quad (5)$$

其中 Z_s 为太阳天顶角; A_s 为太阳方位角; S 为坡度; A 为坡向;实际地形坡度和坡向可以利用数字高程模型计算。

2.2 天空散射辐射

复杂地形下天空散射辐射 I_d ,受到半球空间可见天空大小的影响,在平坦地表天空散射辐射 $I_{d,flat}$ 的基础上,利用天空可视因子 SVF 进行订正获得^[16]:

$$I_d = I_{d,flat} \times SVF \quad (6)$$

$$I_{d,flat} = E_0 \times dr \times \tau_d \times \cos(Z_s)$$

其中 τ_d 为散射辐射透过率,天空散射在晴朗无云条

件下是一个均质散射,与直接辐射之透过率间存在线性关系^[19]:

$$\tau_d = 0.271 - 0.294 \times \tau_d \quad (7)$$

其中天空可视因子定义为目标点上方半球可见部分面积与半球面积之比。在半球空间上划分为 n 等份,沿光线在水平面上的投影方向追踪,依次计算该方向上每一坡元与起点坡元构成的高度角,找到最大高度角,记为 h_i ,每点的 SVF 可由下式计算^[20]:

$$SVF = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (1 - \sin h_i) \quad (8)$$

本研究中 n 取 16 个方向,搜索半径 R 取 10 个像元进行计算。

2.3 周围地形反射辐射

对于周围地形反射产生的附加辐射,采用 Dozier^[8] 简化的近似计算方法,只考虑地形结构参数以及周围地形的反射作用:

$$I_r = \rho \times C_t \times (I_b + I_d) \quad (9)$$

其中 C_t 为地形结构参数,它包括了各向异性特性和坡元与周围可见坡元之间的几何效应(因为只有可见坡元对目标点的反射辐射才有贡献),假设下垫面为朗伯体, C_t 按下式计算^[8]:

$$C_t = (1 + \cos S) / 2 - SVF \quad (10)$$

其中 S 是坡度, SVF 是天空可视因子。式(9)中 ρ 是邻近地形的平均反照率,文中取每个像元周围 5×5 窗口的地表反照率 α 的平均值,其中 α 根据 Liang 等^[21] 的研究成果,采用如下的地表反照率参数化方案:

$$\alpha = 0.356\alpha_2 + 0.130\alpha_4 + 0.373\alpha_5 + 0.085\alpha_6 + 0.072\alpha_7 - 0.0018 \quad (11)$$

式中 α 为宽波段地表反照率, $\alpha_2, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6, \alpha_7$ 分别代表相应窄波段的地表反射率,其中窄波段地表反射率可由 ENVI 中的 FLAASH 大气校正工具获取。但是由于遥感数据各波段反射率在复杂山区受地形的影响严重,因此在计算地表反照率之前必须对遥感影像进行地形校正,可以有效减小或消除山区遥感影像的地形效应,基于前人的研究结论^[22],本文选择 SCS + C 模型^[23] 对反射率进行了地形校正。SCS + C 校正模型可表示为:

$$\alpha' = \alpha_i \cdot (\cos Z_s \cdot \cos S + c) / (\cos\theta + c) \quad (12)$$

式中 α' 为校正后地表反射率, Z_s 为太阳天顶角, S 是坡度, θ 为坡面入射角, α_i 为地形校正前的地表反射率, c 为经验系数。由于研究区土地覆被主要为森林,树木的生长是竖直向上的,地形不能控制太阳和树木之间的几何关系,而在 SCS + C 模型中,太阳

和冠层之间的几何关系在校正前后保持不变,同时考虑了散射辐射的影响,因此更加符合实际情况,适用于研究区的地形校正。

3 结果与分析

3.1 太阳辐射估算结果验证

由于研究区云雾干扰严重以及地面站点观测时间跨度有限,本研究选取了5景研究区的Landsat数据进行估算(时间分别为2005年1月6日、9月19日;2013年10月11日;2014年1月31日和2015年5月10日)。由于观测数据为每日逐时观测,需通过邻近时刻插值的方式获取卫星过境时刻的太阳辐射观测值,以便用于估算结果验证。表1展示了不同站点地表太阳辐射观测值与估算值。从表中可以看出,亚高山观测站在2005年9月19日存在最大的绝对误差($128.5\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$),与2005年1月6

日的估算结果均存在10%以上的相对误差,其余时刻估算结果的相对误差基本控制在5%左右。就平均结果而言,估算结果的平均绝对误差为 $48.7\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$,平均相对误差为6%。观测数据与估算结果的散点分布图(图2)进一步反映了估算方法的精度表现,二者的线性拟合结果表明二者具有很好的相关性,决定性系数(R^2)为0.91,均方根误差(RMSE)为 $58.63\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$,拟合斜率接近1,估算结果存在一定的系统性低估现象,引起这一因素的原因主要是估算方法中对大气的影响仅采用经验性的参数化方案,即将大气透过率定义为海拔的线性函数,忽视了大气自身成分差异(尤其是气溶胶含量和水汽含量)对大气透过率的影响,导致估算结果在表现出系统性偏差的同时,部分结果的误差还较大。但是,总体而言,该估算方法能够较好的反映山地地表太阳辐射的空间变化趋势,可满足本研究的时空分布特征分析的需求。

表1 研究区太阳辐射估算结果的验证

Tab.1 Estimation results verification of solar radiation in the study area

站点	时间	观测值/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	估算值/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	绝对误差/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	相对误差
亚高山观测站	2015.05.10	1074.2	1068.8	5.4	0.5%
	2014.01.31	741.9	703.0	38.9	5.2%
	2013.10.11	848.5	882.4	33.9	4.0%
	2005.09.19	1071.7	943.2	128.5	11.9%
	2005.01.06	687.4	618.4	69.0	10.0%
磨西基地	2015.05.10	973.1	1010.2	37.1	3.8%
	2014.01.31	692.8	642.7	50.1	7.2%
	2013.10.11	797.3	825.5	28.2	3.5%
	2005.09.19	908.5	883.7	24.8	2.7%
	2005.01.06	636.4	564.8	71.6	11.3%
平均误差				48.7	6.0%

3.2 时空分布特征分析

3.2.1 研究区太阳辐射的时空分布特征

为了分析研究区太阳辐射的时空分布特征,选取2014年1月31日、2015年5月10日和2013年10月11日的估算结果分别代表冬季、夏季和秋季的空间分布,从表2中可以看出它们的最大最小值差别不大,但是平均值却差异很大,夏季最大,高达 $950.8\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$,冬季最小,只有 $645.5\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$,这是因为季节变化导致太阳高度角的变化,进而引起太阳辐射的季相差异,另外从标准差来看,冬季比夏季大了 $132.8\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$,说明冬季太阳辐射空间分

布受地形影响更严重,局地辐射值分布更加离散。

表2 研究区不同季节太阳辐射统计特征

Tab.2 Statistical characteristics of solar radiation in different seasons in the study area

时间	最小值 / $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	最大值 / $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	平均值 / $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	标准差 / $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
2014.01.31(冬)	10	1233	645.5	310.5
2015.05.10(夏)	26	1279	950.8	177.7
2013.10.11(秋)	9	1263	781.1	280.0

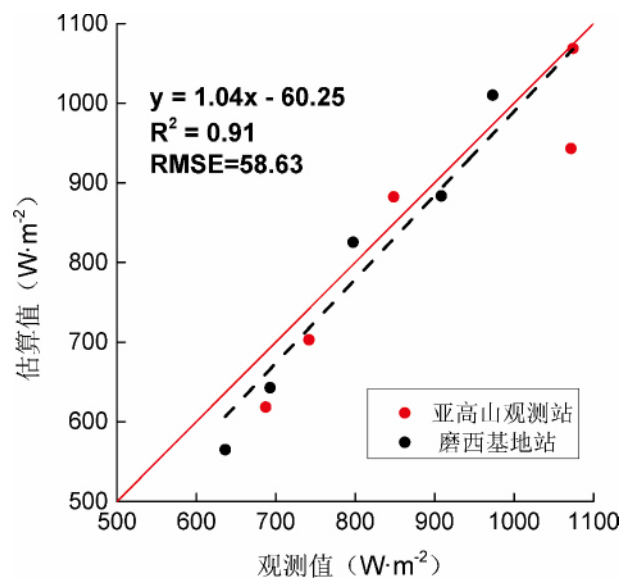


图 2 太阳辐射观测值和估算值的散点图
Fig. 2 Scatter plot of observed and estimated solar radiation

总体而言,研究区的辐射分布具有很强的地形规律,如图 3 所示。从图中可以看出,太阳辐射的总体分布特点是山脊大于山谷,阳坡大于阴坡,中部高原地区相对平坦,太阳辐射值比较稳定,差异很小,而延伸到周围环绕的山区,则表现出极强的地形相关性,以下分别从不同的地形因子(坡向、坡度和高程)对太阳辐射分布特征的影响进行分析。

3.2.2 坡向对太阳辐射分布的影响

为分析坡向对太阳辐射分布的影响,本研究首先对研究区的坡向按一定的间隔进行划分,提取每一等级相应像元,统计均值,通过均值分析太阳辐射随坡向的变化关系(图 4)。从图中可以看出,东南坡的太阳辐射最大,西北坡的值最小。这是由于计算时,太阳位于东南方向,太阳直接辐射的最大值会出现在太阳所在方向,例如 1 月和 10 月最大值出现在 150°,5 月出现在 120°,这都是由太阳方位角决定

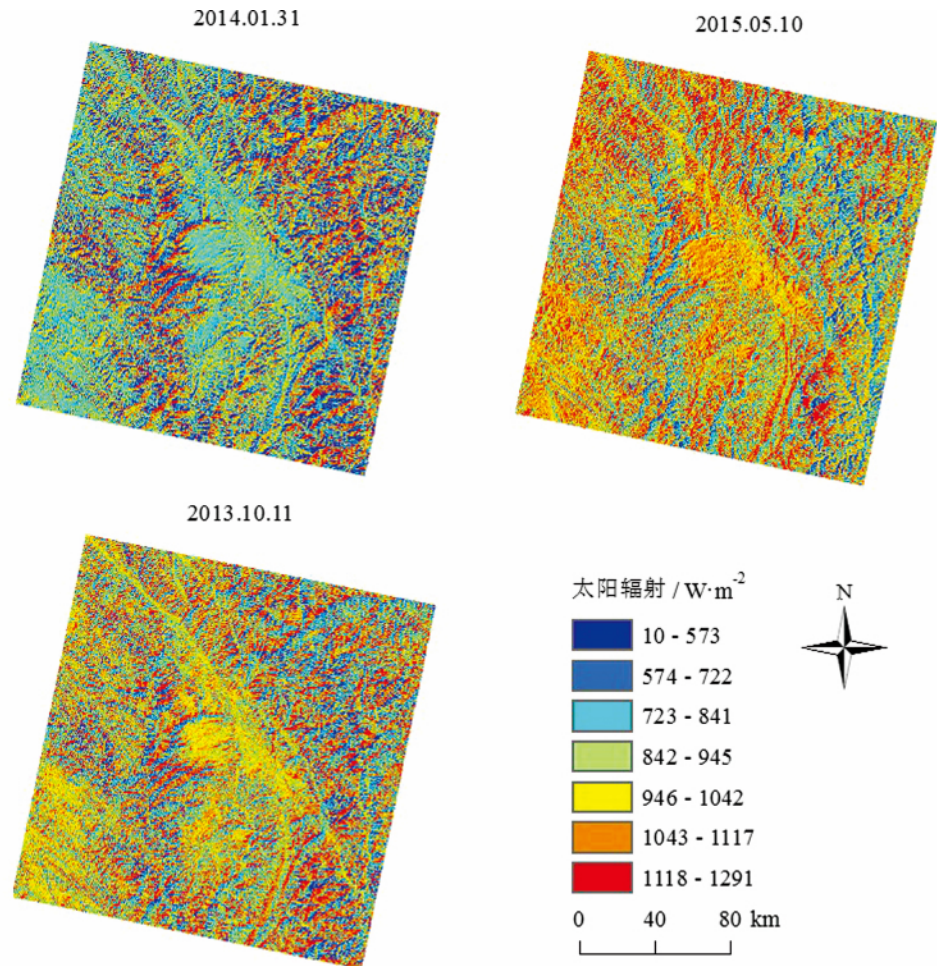


图 3 研究区不同季节的太阳辐射空间分布
Fig. 3 Spatial distribution of solar radiation in different seasons in the study area

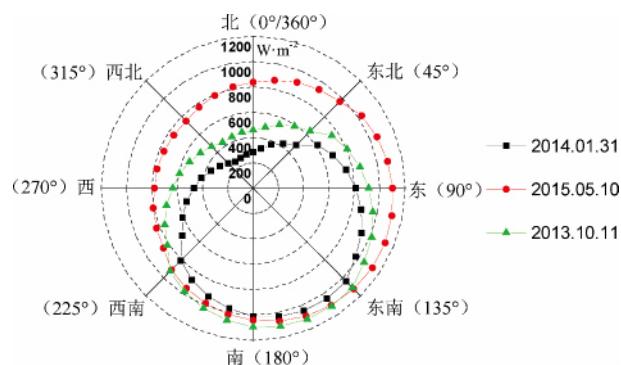


图4 研究区不同季节太阳辐射与坡向关系

Fig. 4 Relationship between solar radiation and aspects in different seasons in the study area

的。太阳总辐射受直接辐射的影响,东南坡太阳总辐射大于其余坡向,而西北坡相对于其他坡向,太阳入射角余弦值小,有的地方甚至被山体阴影遮蔽,接收不到太阳直接辐射,太阳辐射也就最小。另外,坡向对太阳辐射的影响随季节而变。在冬季,太阳高度角小,背阴坡受到的地形遮蔽更为严重,因此东南坡和西北坡的太阳辐射量差异最大,达到 $759.9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。秋季次之,也达到了 $644.1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,夏季最不明显,只有 $373.3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

3.2.3 坡度对太阳辐射分布的影响

与坡向分析类似,本研究对研究区的坡度按 5° 的间隔进行划分,提取每一等级相应像元,统计均值。图5表达了太阳辐射值随坡度的变化趋势。由图可知,太阳辐射总体上随着坡度的增大而减小,但是不同季节减小快慢不同,夏季最快,秋季次之,冬季最慢。其中,冬季太阳辐射在坡度 45° 到 55° 之间反而略有上升,这是因为冬季太阳辐射的空间分布同时受坡向剧烈影响。此外,在太阳直射方向(即东南坡方向),太阳辐射值与坡度的关系则有所不同(图6)。其整体趋势是随着坡度的增大,太阳辐射先增大,后减小。这主要是坡度和太阳高度角的差异会造成太阳入射角大小也不同,只有当太阳光线垂直坡面时,太阳辐射才会达到最大,因此达到最大太阳辐射的坡度正好是太阳高度角的余角。由于1月、5月和10月当时太阳高度角分别为 36° 、 66° 和 48° ,所以辐射值分别在坡度 54° 、 24° 和 42° 附近达到最大值,然后开始下降,从下降速率来看,夏季最快,冬季最慢,这也与前面分析的结论相一致。虽然平均太阳辐射夏季最大,冬季最小,但是图6中太阳正射坡向上的最大值却是冬季最大,夏季最小,这是因为该值的大小主要取决于天顶太阳辐射大小,而

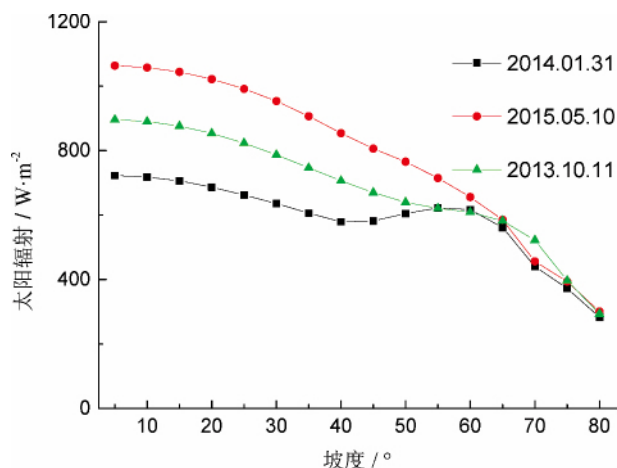


图5 研究区不同季节太阳辐射与坡度的关系

Fig. 5 Relationship between solar radiation and slope in different seasons in the study area

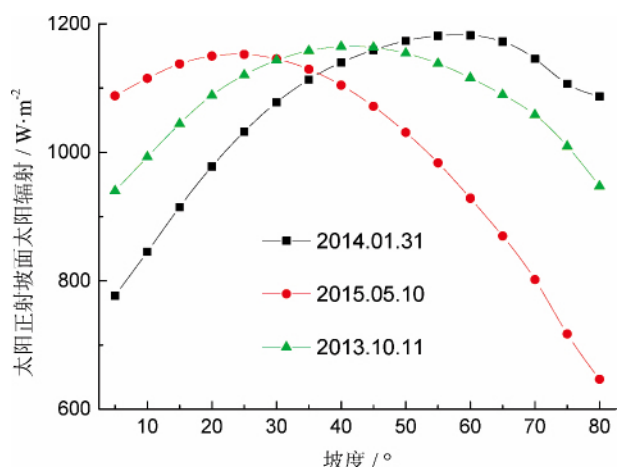


图6 研究区不同季节太阳正射坡面辐射与坡度关系

Fig. 6 Relationship between slope and solar radiation in the normal direction in different seasons in the study area

天顶辐射与时间成余弦关系,可由式(3)计算得到,恰好冬季最大,夏季最小。

3.2.4 海拔对太阳辐射分布的影响

根据文中大气透过率的参数化方案,随着海拔升高,大气变稀薄,大气透过率增加,太阳直接辐射变大,但是由于山区太阳辐射还受多种地形因子综合影响,所以太阳总辐射并不是随着海拔上升而单调递增。根据本文的估算结果,按照前面的方法进行分级统计,得到太阳辐射与海拔高程的关系(如图7)。在 $1\,000 - 2\,000 \text{ m}$ 之间太阳辐射值略有减少,这是因为这个范围内的区域为东部低海拔丘陵进入高山峡谷区的过渡带,开始出现地形阴影遮蔽的现象,故而太阳辐射值有所降低;在 $2\,000 -$

3 000 m 之间太阳辐射值基本保持平稳,这是由于阴影遮蔽现象与大气透过率的递增效应大致抵消的缘故;而在 3 000–4 800 m 之间随海拔的上升,太阳辐射值逐渐增大,这主要是大气透明度条件对其作用的一种直观反映;但是在 4 800 m 以后随海拔上升,太阳辐射值反而降低了,这是由于高海拔地区往往是陡峭的山峰,坡度较大。由以上分析可知,太阳辐射值随坡度的增加而迅速递减,因此该区域的变化特征可以看做是坡度的递减效应和大气透过率的递增效应的综合反映。从不同的季节来看,它们的变化趋势基本一致,说明海拔对太阳辐射的影响在研究区基本不随季节变化。

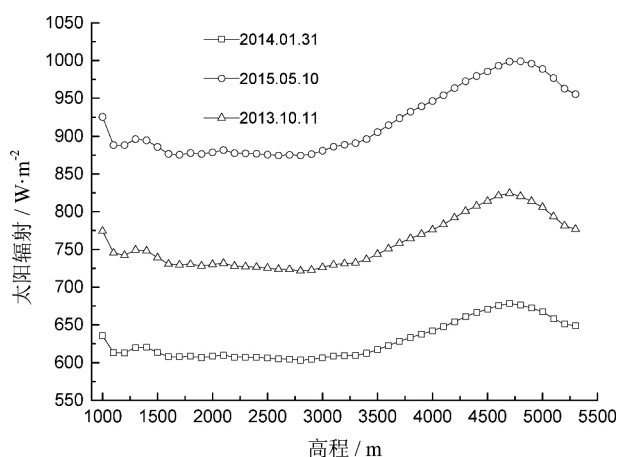


图 7 研究区不同季节太阳辐射与海拔的关系

Fig. 7 Relationship between solar radiation and altitudes in different seasons in the study area

4 结论与讨论

本文综合考虑了山地环境中的太阳直接辐射、散射辐射和周围地形反射辐射,估算了不同时期川西山区晴空下的地表太阳辐射,并对其时空变化特征开展了分析,得到以下结论:

(1) 通过地面观测数据的验证表明,本文估算的山区太阳辐射平均相对误差为 6%,估算值与观测值存在较好的相关关系,一定程度上可以满足山区生态水文等相关领域的应用与研究要求。

(2) 太阳辐射分布具有很强的地形规律,总体特点是山脊大于山谷,阳坡大于阴坡,其中东南坡最大,西北坡最小。

(3) 随着坡度的增加,辐射量呈现递减的趋势,但是在太阳所在的方位上,辐射随着坡度的增加先缓慢上升,直到坡度等于太阳天顶角后,太阳辐射开

始逐渐降低。

(4) 太阳辐射随海拔的上升总体来说呈现增加趋势,只是在低海拔处由于地形遮蔽和山顶由于坡度陡峭造成坡面入射角小而略有回落。

(5) 不同的地形因子对太阳辐射的影响随时间变化而有所差异,坡向对太阳辐射的影响冬季大,夏季小;坡度对太阳辐射的影响夏季大,冬季小;而海拔对太阳辐射的影响基本不随季节变化。

本研究主要基于前人的基础,引入 SCS + C 校正模型以改进地表反照率的估算结果从而提高周围地形反射辐射的估算精度。从地面站点数据的验证结果可以看出,本研究能取得相对较好的估算结果,但是仍然存在一定的不足,主要体现在:①估算过程中对大气的作用采用简化处理,未从机理上考虑山区水汽、气溶胶等含量差异对大气吸收作用的影响,这也是将来工作中需要重点考虑的地方;②由于研究区云雾影响十分突出,导致遥感观测数据相对有限,一定程度上影响了估算结果精度验证的可靠性,这也要求在后期研究中选择云雾影响较小的山区进一步开展山地的地面观测工作,丰富地面观测数据和遥感观测数据,对算法做更为充分的验证;③本研究只考虑了晴空无云条件下的情况,然而太阳辐射作为众多模型的重要输入参数,往往需要连续时间序列数据,因此发展任意天气条件下的太阳辐射估算方法就显得尤为重要。云是太阳辐射传输中重要的参数之一,在太阳辐射模型中考虑云影响的方法有经验方法(如晴空指数、云量函数等),也有纯粹的物理模型(如大气辐射传输模型),但日-云-地之间的几何关系模拟困难,那么如何解决这个问题就是今后工作的一个重点。

参考文献 (References)

- [1] WINSLOW J C, HUNT E R, PIPER S C. A globally applicable model of daily solar irradiance estimated from air temperature and precipitation data[J]. *Ecological Modelling*, 2001, 143(3): 227–243
- [2] MEZA F, VARAS E. Estimation of mean monthly solar global radiation as a function of temperature[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, 100(2): 231–241
- [3] 何洪林, 于贵瑞, 牛栋. 复杂地形条件下的太阳资源辐射计算方法研究[J]. *资源科学*, 2003, 25(1): 78–85 [HE Honglin, YU Guirui, NIU Dong. Method of global solar radiation calculation on complex territories[J]. *Resources Science*, 2003, 25(1): 78–85]
- [4] 姜创业, 孙娴, 王娟敏, 等. 山地天文辐射的地形影响与空间尺度效应研究[J]. *高原气象*, 2010(05): 1230–1237 [JIANG

- Chuangye, SUN Xian, WANG Juanmin, et al. Influences of various local topographic factors on astronomical radiation of mountain and its spatial scale effect in mountainous region [J]. *Plateau Meteorology*, 2010(05): 1230–1237]
- [5] 傅抱璞. 论坡地上的太阳辐射总量 [J]. *南京大学学报(自然科学版)*, 1958(2): 49–84 [FU Baopu. The solar radiation falling on slope [J]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 1958(2): 49–84]
- [6] 傅抱璞. 傅抱璞论文选集 [M]. 北京: 气象出版社, 2011 [FU Baopu. *Selected papers of FU Baopu* [M]. Beijing: Meteorological Press, 2011]
- [7] 李占清, 翁笃鸣. 丘陵山地总辐射的计算模式 [J]. *气象学报*, 1988, 46(4): 461–468 [LI Zhanqing, WENG Duming. A numerical approach toward global radiation over rugged areas [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1988, 46(4): 461–468]
- [8] DOZIER J, FREW J. Rapid calculation of terrain parameters for radiation modeling from digital elevation data [J]. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 1990, 28(5): 963–969
- [9] DUBAYAH R, RICH P M. Topographic solar radiation models for GIS [J]. *International Journal of Geographical Information Systems*, 1995, 9(4): 405–419
- [10] 李新, 陈贤章, 曾群柱. 利用数字地形模型计算复杂地形下的短波辐射平衡 [J]. *冰川冻土*, 1996(S1): 344–353 [LI Xin, CHEN Xianzhang, ZENG Qunzhu. A model to calculate the net solar radiation over complex terrain based on digital terrain model [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1996(S1): 344–353]
- [11] 李新, 程国栋. 任意地形条件下太阳辐射模型的改进 [J]. *科学通报*, 1999, 44(9): 993–998 [LI Xin, CHENG Guodong. Improvement of solar radiation model under arbitrary topography [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44(9): 993–998]
- [12] CHEN L, YAN G, WANG T, et al. Estimation of surface short-wave radiation components under all sky conditions: modeling and sensitivity analysis [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 123(3): 457–469
- [13] 李净, 罗晶. 晴空下山区太阳辐射模拟 [J]. *干旱区地理*, 2015, 38(1): 120–127 [LI Jing, LUO Jing. Estimation of solar radiation over rugged terrains based on clear sky condition [J]. *Arid Land Geography*, 2015, 38(1): 120–127]
- [14] HAN C, MA Y, CHEN X, et al. Estimates of land surface heat fluxes of the Mt. Everest region over the Tibetan Plateau utilizing ASTER data [J]. *Atmospheric Research*, 2016, 168: 180–190
- [15] 雷光斌, 李爱农, 边金虎, 等. 基于阈值法的山区森林常绿、落叶特征遥感自动识别方法——以贡嘎山地区为例 [J]. *生态学报*, 2014, 34(24): 7210–7221 [LEI Guangbin, LI Ainong, BIAN Jinhu, et al. An practical method for automatically identifying the evergreen and deciduous characteristic of forests at mountainous areas: a case study in Mt. Gongga Region [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(24): 7210–7221]
- [16] DUBAYAH R. Estimating net solar radiation using Landsat Thematic Mapper and digital elevation data [J]. *Water resources research*, 1992, 28(9): 2469–2484
- [17] CHEN X, SU Z, MA Y, et al. Estimation of surface energy fluxes under complex terrain of Mt. Qomolangma over the Tibetan Plateau [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2013, 17(4): 1607–1618
- [18] ALLEN R G, PEREIRA L, RAES D, et al. FAO Irrigation and drainage paper No. 56 [J]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998, 56: 97–156
- [19] LIU B Y, JORDAN R C. The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation [J]. *Solar energy*, 1960, 4(3): 1–19
- [20] ZAKSEK K, OŠTIR K, KOKALJ Ž. Sky-view factor as a relief visualization technique [J]. *Remote Sensing*, 2011, 3(2): 398–415
- [21] LIANG S. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I: Algorithms [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2001, 76(2): 213–238
- [22] 穆悦, 安裕伦, 王喆, 等. 不同地形校正模型计算地形复杂山区地表反射率的对比 [J]. *山地学报*, 2014(3): 257–266 [MU Yue, AN Yulun, WANG Zhe, et al. Comparison of different topographic correction models for surface reflectance calculating in rugged terrain area [J]. *Journal of Mountain Science*, 2014(3): 257–266]
- [23] SOENEN S A, PEDDLE D R, COBURN C A. SCS + C: A modified sun-canopy-sensor topographic correction in forested terrain [J]. *Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, 43(9): 2148–2159

Estimation of Solar Radiation and Its Spatio-temporal Distribution Characteristics in the Mountainous Area of Western Sichuan

HUANG Pan^{1 2} ZHAO Wei¹, LI Ainong^{1,*}

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China;

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Land surface incident solar radiation comes from a complex interaction of energy transfer between atmosphere and surface. Due to the influence of slope, aspect, and terrain shielding, the spatial distribution of solar radiation in the mountainous area varies significantly and its estimation is more complicated than those in the flat area. To demonstrate spatio-temporal variation of solar radiation in the mountainous area, values of the solar radiation at different seasons in Western Sichuan were collected with the aid of Landsat image and 30 m ASTER GDEM data. Considering topographical effects, the parameterization approach was improved by using sky-view factor and terrain configuration factor. Meanwhile, land surface albedo was also corrected to reduce the topographical effects in the study area. The estimated results were consistent with the in-situ observations, with a mean bias of $48.7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ and a mean relative error of 6%. Based on our analysis, it was found that the solar radiation on the sunny slope was greater than that on the shade slope. With the increase of inclination, the amount of radiation showed a decreasing trend. The solar radiation generally increased with altitude ascent except the low elevation and peak. In addition, the topographic effects varied with seasons, because it was directly related to the solar altitude angle.

Key words: solar radiation; topographic effect; spatial and temporal distribution characteristics; mountainous areas of western Sichuan