

引用格式:周文臻,陈楠.天文辐射空间分布与尺度效应研究[J].地球信息科学学报,2018,20(2):186-195. [Zhou W Z, Chen N. Spatial distribution of extraterrestrial solar radiation and its spatial scale effect on rugged terrains[J]. Journal of Geo-information Science, 2018,20(2): 186-195. ] DOI: 10.12082/dqxxkx.2018.170363

# 天文辐射空间分布与尺度效应研究

周文臻, 陈楠

1. 福州大学 福建省空间信息工程研究中心,福州 350002; 2. 福州大学 空间数据挖掘与信息共享教育部重点实验室,福州 350002

## Spatial Distribution of Extraterrestrial Solar Radiation and Its Spatial Scale Effect on Rugged Terrains

ZHOU Wenzhen, CHEN Nan

1. Spatial Information Research Center, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China; 2. Key Lab for Spatial Data Mining and Information Sharing of Ministry of Education, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China

**Abstract:** The Extraterrestrial Solar Radiation (ESR) is the basis of surface solar irradiance, and it is also an important astronomical parameter for calculating solar radiation, assessing solar energy resource and for estimation of agricultural potential productivity. Based on Digital Elevation Model (DEM) data of Fujian Province with a resolution of 30 meters, the spatial distribution of ESR over rugged terrains of Fujian Province was calculated by using parallel computing framework of MATLAB software. Then, the influences of slopes and aspects on the distribution of ESR were quantitatively analyzed. Finally, the spatial scale effects of DEM on ESR were discussed. The results clearly depict that the latitude and complex landforms profoundly disrupt the zonal distribution of ESR in Fujian Province. The terrain factors have more significant effects on the magnitude of ESR compared with the latitude. Annual ESR of Fujian Province was mainly at 10 000~13 000 MJ/m<sup>2</sup> and presented a decrease trend from Southeast coastal areas to the Midwestern areas. As affected by the slopes and aspects, the ESR over seasons showed characteristics of differences and dissymmetry. The screening impact of topography was higher on spatial distribution of ESR in winter and considerably low in summer. The total amount of ESR in spring was larger than that in autumn. The influences of different slopes and aspects on the distribution of ESR were consistent with the terrain characteristics of Fujian Province, which is high in the northwest and low in the southeast. The ESR was depleted obviously along with the increase of the slope. The ESR was mainly concentrated in the east, southeast and south. The impact of topographic feature was significant, the ESR in the chine was bigger than the one in the valley and the one in the sunny slope is more than that in the shady slope. Meanwhile, the effect of spatial scale of the DEM was obvious. The ESR of Hills of Midwestern Fujian Province was more sensitive to changes in resolution.

**Key words:** rugged terrains; extraterrestrial solar radiation; spatial distribution; spatial scale effects; digital elevation model

\*Corresponding author: CHEN Nan, E-mail: fjc99@163.com

**摘要:** 天文辐射是地表实际入射太阳辐射的基础背景,也是辐射计算、太阳能资源评估和农业生产潜力估算等方面的重要天

收稿日期 2017-04-30;修回日期:2017-08-25.

基金项目:国家自然科学基金项目(41771423)。[ **Foundation item:** National Natural Science Foundation of China, No.41771423. ]

作者简介:周文臻(1991-),男,硕士生,研究方向为地理信息服务。E-mail:zhouwenzhen@outlook.com

\*通讯作者:陈楠(1975-),男,博士,副研究员,研究方向为数字地形分析。E-mail:fjc99@163.com

文参量。本文基于分辨率为30 m的福建省数字高程模型,使用MATLAB软件提供的并行计算框架模拟了起伏地形下福建省天文辐射空间分布,定量地分析了坡度坡向对天文辐射分布的影响规律,同时探讨数字高程模型对天文辐射产生的空间尺度效应。结果表明:福建省年天文辐射量大部分处于10 000~13 000 MJ/m<sup>2</sup>,呈现东南沿海向中西部递减的分布特征;不同季节的天文辐射分布受纬度和坡度坡向的影响具有明显的差异性,呈现季节分布的不对称性;不同坡度和坡向对天文辐射的影响与福建省总体上西北高东南低地势特征相吻合,天文辐射量随坡度增大而减小,东、东南和南坡向是天文辐射分布较集中的区域,总体上呈现山脊多、山谷少、阳坡多、阴坡少的地域差异性;数字高程模型的空间尺度效应在起伏较大的福建中西部丘陵地貌表现更加明显,该区域的天文辐射对分辨率的变化更加敏感。

**关键词** 起伏地形;天文辐射;空间分布;尺度效应;数字高程模型

## 1 引言

作为新能源之一的太阳辐射,具有充分的清洁性、绝对的安全性、相对的广泛性、确实的长寿命和免维护性、资源的充足性及潜在的经济性等优点,在长期的能源战略中具有重要地位<sup>[1]</sup>。太阳辐射是地球上最主要的热量来源,对气候形成及植被生长发育具有重要影响<sup>[2]</sup>。太阳辐射的传递最先到达地球大气上界,如果不考虑地球大气和不同性质的地球表面对太阳辐射所造成的影响,把地球假想为没有大气的均一体,这种条件下的太阳辐射称为天文辐射<sup>[3]</sup>。天文辐射是地球大气产生冷暖变化的根本原因,也是产生各种天气现象的动因。天文辐射是日地天文关系所决定的重要特征量,可以简单的定义为无大气存在时入射到地球表面的太阳辐射<sup>[4]</sup>,它是太阳辐射计算重要的起始数据之一。影响天文辐射强弱的主要因素有太阳高度角、太阳方位角、纬度和地形,这种纬度、地形的变化是形成气温纬度性和地域性分布的基本原因。

在山地日照和坡面辐射的理论研究和区域试验中许多研究者<sup>[5-11]</sup>考虑了地形的影响因素,为起伏地形下的天文辐射相关研究提供了新的思路。对于起伏地形下的天文辐射量的计算,充分考虑地形遮蔽和下垫面多样性的影响可以有效减小水平面辐射量存在的误差。实际地形中的遮蔽度主要来自于自身的遮蔽和周围地形的相互遮蔽,使起伏地形下天文辐射场的计算变得非常复杂<sup>[12]</sup>。

从单一坡面到起伏地形,从考虑地形因子到天文参数,从局部计算到全球模拟,许多研究者从不同的方向对起伏地形下的天文辐射进行了深入研究。全球任意纬度非水平面天文辐射各时段总量系统图像的出现<sup>[4]</sup>,丰富和完善了非水平面天文辐射的理论规律。但非水平面只运用了相对水平面的倾斜角并没有考虑坡度坡向等地形因子所造成的影响,因此有研究者<sup>[13-14]</sup>提出了在理论上比较严

密的椭圆积分模式来计算坡面的天文辐射,此方法普遍适用于全球任意坡度坡向的坡地。然而,影响起伏地形下天文辐射强弱的因素不仅仅局限于坡度坡向,地形起伏所造成的遮蔽同样是不可忽视的。天文辐射分段式积分模拟方法充分考虑了起伏地形之间的相互遮蔽,从而解决了起伏地形天文辐射量的计算难题<sup>[15-21]</sup>,本文将采用此方法计算起伏地形下的天文辐射量。

本文以先进星载热发射和反射辐射仪全球数字高程模型(ASTER GDEM)第二版本分辨率为30 m的福建省数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)数据为输入参数,设计了基于MATLAB起伏地形下天文辐射的并行计算框架,分析了高分辨率DEM数据下天文辐射空间分布,定量分析坡度坡向对天文辐射的影响规律以及DEM分辨率变化所产生的空间尺度效应。本研究有助于进一步深入透彻了解天文辐射的空间分布特征,对于最大化开发利用太阳能资源具有实际应用价值,为后续全国乃至欧亚大陆范围的天文辐射量并行计算奠定计算基础,也为气候和环境等方面的研究提供基础数据。

## 2 研究区概况与数据源

福建省位于中国东南沿海,境内峰岭耸峙,丘陵连绵,河谷、盆地穿插其间,山地、丘陵占全省总面积的80%以上(图1)。地势总体上西北高东南低,横断面略呈马鞍形。福建省靠近北回归线,受季风环流和地形的影响,形成暖热湿润的亚热带海洋性季风气候,热量丰富,光照充足,年平均气温17~21℃。本文采用的DEM数据来源于 <https://gdex.cr.usgs.gov/gdex/>, ASTER GDEM数据按经纬度1°×1°分割,福建省由25幅分幅组成。分辨率为90 m和1000 m的DEM数据采用 Shuttle Radar Topography Mission (STRM)数据源,来源于 <http://srtm.csi.cgiar.org/>。

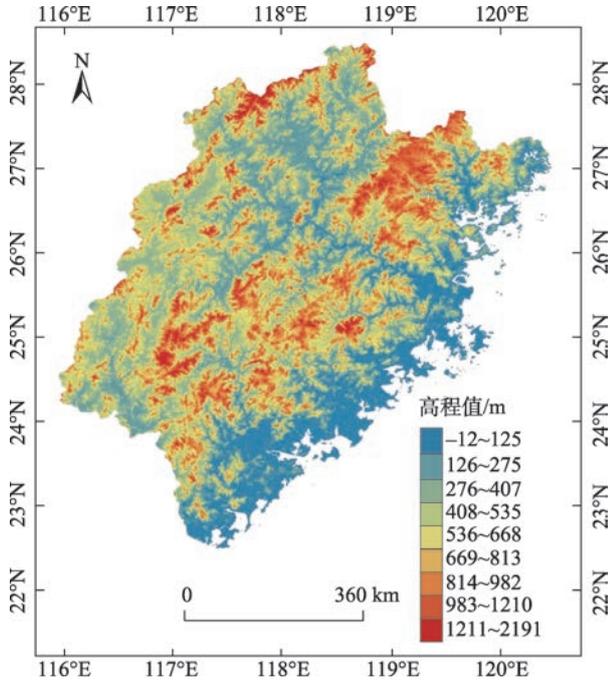


图1 研究区域

Fig. 1 The study area

### 3 研究方法

#### 3.1 技术路线

本研究技术路线如图2所示。分辨率为30 m的福建省DEM数据其数据量较大且起伏地形下天文辐射算法时间及空间复杂度较高,单机的计算速度和效率已经远远不能满足需求。随着多核和集群技术的快速发展,并行程序设计成为提高数值计算效率的主流技术之一。本研究基于MATLAB软件提供的并行计算框架设计了起伏地形下天文辐

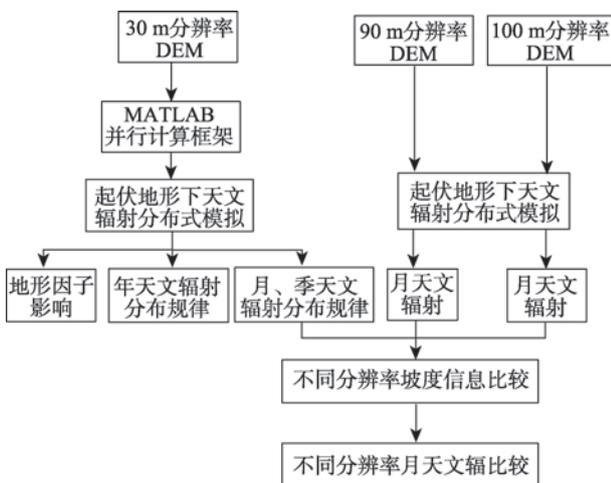


图2 技术路线图

Fig. 2 Technical roadmap of this study

射的并行计算模型,有效提高计算效率,起伏地形下天文辐射的并行计算模型见3.2节。

#### 3.2 起伏地形下天文辐射分布式估算模型

实际地形复杂多变,呈现不规则状态,计算起伏地形下天文辐射量应该考虑地形遮蔽情况,而坡面具体某一点的日照时间无法采用统一的数学公式表达,因此采用分段式积分<sup>[15]</sup>的方法获得,其计算公式为:

$$w_s = \frac{T}{2\pi} \left(\frac{1}{\rho}\right)^2 I_0 \left[ u \sin \delta \sum_{l=1}^m (\omega_{ssl} - \omega_{srl}) + v \cos \delta \sum_{l=1}^m (\sin \omega_{ssl} - \sin \omega_{srl}) - w \cos \delta \sum_{l=1}^m (\cos \omega_{ssl} - \cos \omega_{srl}) \right] \quad (1)$$

式中:  $w_s$  为起伏地形下天文辐射量 ( $\text{MJ}/\text{m}^2$ );  $T$  为日长 (1440 min);  $\left(\frac{1}{\rho}\right)^2$  为日地距离校正系数;  $I_0$  为太阳常数 ( $0.082 \text{ MJ}/\text{m}^2/\text{min}$ );  $\omega$  为时角 (从太阳正午算起,向西为正,向东为负, rad);  $\omega_{srl}$  和  $\omega_{ssl}$  为倾斜面日照时段对应的起始和终止太阳时角;  $\delta$  为太阳赤纬,采用傅里叶分析计算 (rad);  $m$  为根据时间步长将日出到日落划分的段数,本文计算过程中时间步长设定为 20 min。

$$\delta = 0.006894 - 0.399512 \cos \tau + 0.072075 \sin \tau - 0.006799 \cos 2\tau + 0.000896 \sin 2\tau - 0.002689 \cos 3\tau + 0.001516 \sin 3\tau \quad (2)$$

$$\begin{cases} u = \sin \varphi \cos \alpha - \cos \varphi \sin \alpha \cos \beta \\ v = \sin \varphi \sin \alpha \cos \beta + \cos \varphi \cos \alpha \\ w = \sin \alpha \sin \beta \end{cases} \quad (3)$$

$$\left(\frac{1}{\rho}\right)^2 = 1.000109 + 0.033494 \cos \tau + 0.001472 \sin \tau + 0.000768 \cos 2\tau + 0.000079 \sin 2\tau \quad (4)$$

式中:  $\tau$  为日角 (rad),  $\tau = 2\pi t / 365.2422$ ,  $t = N - 1$ ,  $N$  为积日,即日期在年内的顺序号;  $u$ 、 $v$ 、 $w$  是与地理、地形有关的特征因子;  $\alpha$  为坡度,即坡面与水平面之间的夹角,在坡度分析时采用水保通用分级标准分为 13 个级别 (0~3°、3~5°、5~10°、10~15°、15~20°、20~25°、25~30°、30~35°、35~40°、40~45°、45~50°、50~55°、55~90°);  $\beta$  为坡向,即坡面法线与当地子午面之间的夹角,南向为 0°,顺时针方向为正,逆时针方向为负,分为 8 个方位<sup>[22]</sup>,地形遮蔽度采用 Hillshade<sup>[23]</sup>算法。

地形遮蔽度是计算一定时角在一定的方位上格网点对计算点造成的地形遮蔽状况  $S_i$ ,  $S_i$  只有 2 种取值, 即 0 和 1, 0 表示遮蔽, 1 表示可照。通过 Hillshade 计算遮蔽度(基本原理是在一定的太阳方位角范围内, 其最大水平地平线角与当时太阳高度角进行比较, 如大于太阳高度角, 则处于阴影范围内, 太阳辐射为零; 否则, 需要计算太阳辐射值, ArcGIS 中提供了计算周围地形对太阳辐射影响的 Hillshade 函数, 其基本原理是通过为栅格中的每个像元指定太阳高度等信息, 来计算表面的假定亮度值, 其值是介于 0 和 255 之间的整数相关的灰度梯度。通过对 Hillshade 值进行建模, 将等于 0 的判定为遮蔽; 其他介于 1 和 255 之间重分类为 1, 判定为可照), 得到遮蔽状况函数数组  $[S_0, S_1, S_2, \dots, S_n]$ 。判断相邻 2 个数组元素, 确定计算点当天的可照时数  $m$  及每个时段的起始和终止太阳时角, 共有 4 种情况(表 1)。

表 1 遮蔽状况函数数组中相邻 2 个元素取值状态

Tab. 1 Possible values of two neighboring elements in the array of shielding status

情况	$S_i$	$S_{i+1}$	含义
1	0	0	遮蔽时段延续
2	0	1	新可照时段开始
3	1	0	可照时段结束
4	1	1	可照时段延续

出现情况 1 和 4 时, 保持原有的时角  $\omega_i$ 。

出现情况 2 时, 新可照时段开始, 取相应两个时刻时角的平均值作为新可照时段起始时角, 记为  $\omega_{srl}$ 。

出现情况 3 时, 可照时段结束, 取相应两个时刻时角的平均值作为当前可照时段终止时角, 记为  $\omega_{ssl}$ 。

另外, 如果  $S_0 = 1$ ,  $\omega_{srl} = -\omega_0$ ,  $S_n = 1$ ,  $\omega_{ssl} = \omega_n$ , 最终得到  $m$  段可照时段的太阳时角数组:

$$[\omega_{sr1}, \omega_{ss1}, \dots, \omega_{srl}, \omega_{ssl}, \dots, \omega_{srm}, \omega_{ssm}]$$

## 4 结果与讨论

使用分辨率为 30 m 的福建省 DEM 原始高程数据, 并行计算福建省月、季和年天文辐射量, 分析其空间分布规律以及 DEM 分辨率空间尺度效应。太阳高度角、太阳方位角、坡度坡向以及地形遮蔽度是天文辐射重要的影响因子。福建省地势总体上

西北高东南低, 西部和中部形成东北向斜贯全省的闽西大山带和闽中大山带。2 个大山带之间为互不贯通的河谷、盆地, 东部沿海为丘陵、台地和滨海平原, 因此西、中部的地形坡度大于东部沿海, 受地形遮蔽度的影响程度较大。

### 4.1 月、季节天文辐射量空间分布特征分析

统计福建省 1-12 月的月天文辐射量数据, 如图 3 所示。从各月平均天文辐射量角度分析得出 7 月最高, 12 月最低, 分别为 1149.584 MJ/m<sup>2</sup> 和 698.866 MJ/m<sup>2</sup>。月平均天文辐射量曲线偏度为 -0.22 呈负偏态分布, 峰度为 1.232 分布的集中程度低于正态分布, 曲线相对平坦。4-8 月月天文辐射量平均值均超过 1000 MJ/m<sup>2</sup>。1-12 月天文参数和纬度对天文辐射的影响很小, 而坡度和坡向的影响相当显著<sup>[24]</sup>。7 月天文辐射的总体分布差异较小影响天文辐射的主要因素为坡度坡向, 纬度影响较弱; 而 12 月差异开始突显, 这是纬度和坡度坡向共同影响的结果, 福建位于北回归线以北地区 12 月太阳高度角最小, 在相同纬度下地形起伏产生的地形遮蔽度的影响进一步增强。

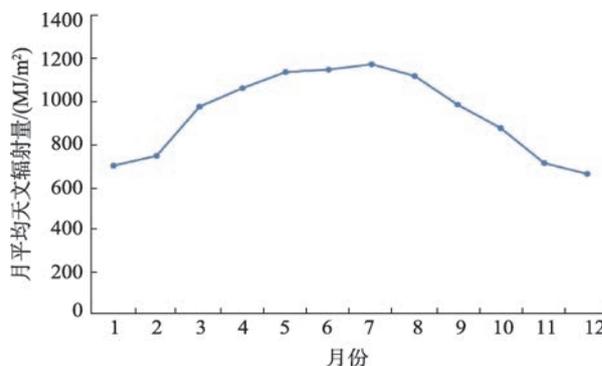


图 3 福建省月天文辐射量平均值的时间变化

Fig. 3 Monthly variation of ESR in Fujian province

分别统计福建省四季天文辐射量(春季:3-5月、夏季:6-8月、秋季:9-11月、冬季:12、1-2月)。由图 4 可以看出, 福建省不同季节天文辐射量的变化规律为自东南沿海向中西部递减。不同的季节具有明显的差异性, 季节天文辐射量的最大值和平均值的变化规律依次为夏季最大, 春、秋位列二三, 冬季最小, 表现出福建省天文辐射四季分布的不对称性。在夏季, 太阳直射点位于赤道和北回归线之间, 太阳高度较大, 纬度和地形起伏的影响减小, 北半球接收到的太阳天文辐射是最高的, 其天文辐射

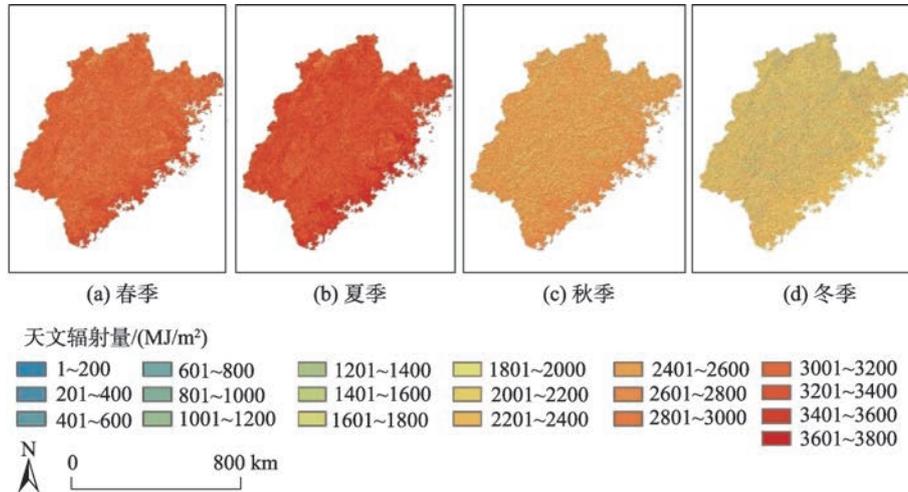


图4 福建省四季天文辐射量空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of seasonal ESR in Fujian province

量的变异系数为 290.9263, 东南沿海与中西部差异性较小; 而冬季太阳高度角较小, 地形起伏产生的地形遮蔽度对天文辐射产生较严重影响, 其天文辐射量的变异系数增大, 约为夏季的 2.15 倍, 东南沿海和中西部地区的差异变大。

不同月份、季节表现出山脊多、山谷少、阳坡多、阴坡少的地域差异性, 选取福建省丘陵地貌样区 1 月天文辐射, 如图 5 所示。受坡向和地形遮蔽度的影响, 天文辐射在山脊与山谷的分布形成明显对比。山谷在起伏地形产生的遮蔽度的影响下, 所接收到的天文辐射小于山脊, 这种差异性的产生与日照时间和长度和范围密切相关; 坡向按阴阳坡分类, 北半球南坡属于阳坡, 东南、西南大致划分为半阳坡, 各月、季节天文辐射的最大值一般分布在山脊、阳坡和半阳坡, 这些区域接收天文辐射的时间在无地形遮蔽影响下较长且范围较广, 一般出现天

文辐射高值。而阴坡、半阴坡由于太阳照射不利或地形遮蔽接收到的太阳辐射远低于阳坡、半阳坡。

#### 4.2 年天文辐射量的空间分布特征分析

##### 4.2.1 年天文辐射空间分布

福建省太阳年天文辐射量如图 6 所示, 统计最大值约为 12 913 MJ/m<sup>2</sup>, 平均的年天文辐射为 11 016.23 MJ/m<sup>2</sup>, 分布范围为 11 000~12 913 MJ/m<sup>2</sup> 之间(图 7)。图 7 中每圆圈数值为年天文辐射量等级占总的年天文辐射量面积百分比(此百分比数值进行以 e 为底的对数处理, 当圆圈的数值为 0 时, 该年天文辐射量等级约占 1%)。东南部的厦(门)漳(州)泉(州)是天文辐射高值的集中区域, 自东南沿海向中西部递减, 总体上东部沿海地区的天文辐射量大于中西部地区。天文辐射的空间分布受太阳高度角、地理纬度和地形的共同影响。福建省地处中纬度地带且主要以丘陵地貌类型为主, 坡度一般较缓, 切割破碎, 无一定方向, 地面崎岖不平。这种地貌类型下地形遮蔽度的影响相较于平原地貌进一步加重, 天文辐射量受地形影响较为突出(尤其体现在中西部的低中山丘陵地貌)。而东南沿海是平原、海岛地貌, 高度变化微小, 地势平坦起伏较小, 地形影响较弱, 可接收天文辐射的时间较长范围较广, 因此整体的天文辐射量较大。

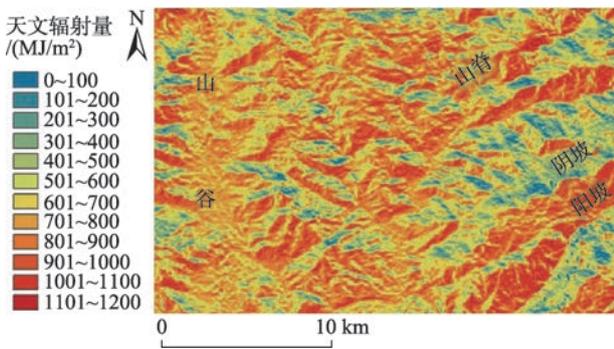


图5 福建省中西部丘陵地貌某样区 1 月天文辐射量

Fig. 5 Spatial distribution of ESR in a sample area of the hill landform of Middle-western Fujian in January

##### 4.2.2 坡度对年天文辐射的影响

利用福建省年天文辐射量数据, 分析坡度与天文辐射的关系以及相同坡向下年天文辐射量随坡度的变化规律。图 8 是不同坡度平均年天文辐射量

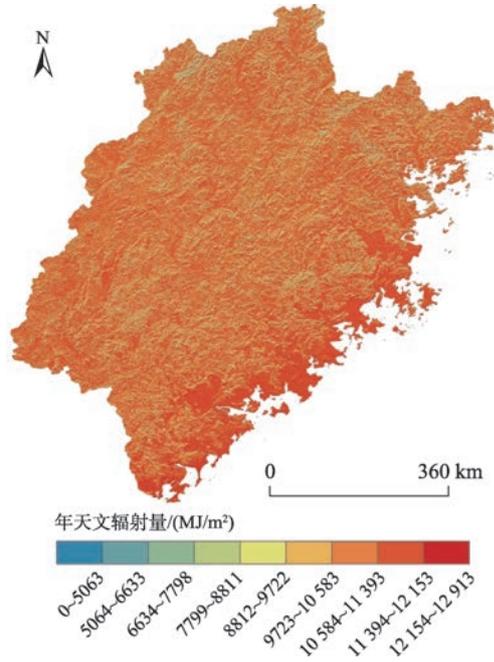


图6 福建省年天文辐射量空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of annual ESR in Fujian Province

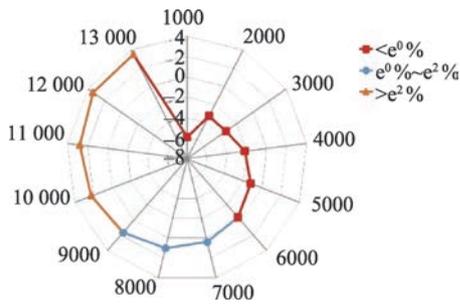


图7 福建省年天文辐射量统计(MJ/m²)

Fig. 7 Statistics of annual ESR in Fujian province

变化规律。随着坡度的递增,每个坡度栅格接收到的年天文辐射量呈现明显的递减趋势。丘陵地貌由连绵不断的低矮山丘组成的地形,起伏不大坡度较缓此处地形遮蔽影响相对山区较弱,使单栅格接收的太阳辐射相对较大。福建省属于东南丘陵的浙闽丘陵地貌,依据数据统计得出大部分坡度位于 $0\sim 20^\circ$ 且此坡段每个栅格年天文辐射量都较大,因此该区间的坡度栅格接收到的天文辐射量是整个福建省天文辐射量的主要组成部分。

图9是相同坡向下福建省年天文辐射量随坡度变化曲线。在相同的坡向下,福建省年天文辐射量受坡度的影响比较显著,不同坡向年天文辐射量随着坡度的增加大致呈现下降趋势。在东南、南坡向上,随着坡度的增加年天文辐射量先增加后减小,其中坡度 $<20^\circ$ 年天文辐射量涨幅较小,可以认为

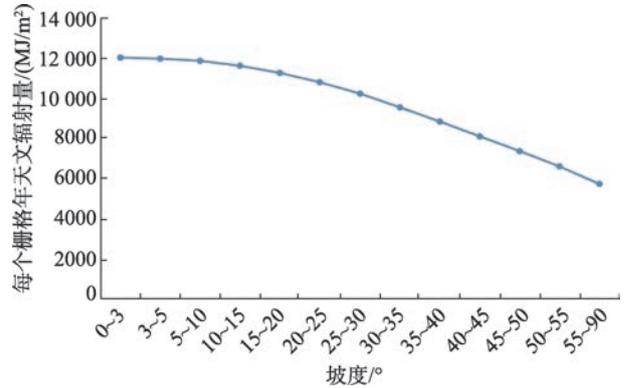


图8 不同坡度平均年天文辐射量变化规律

Fig. 8 Variations of mean annual ESR at different slopes

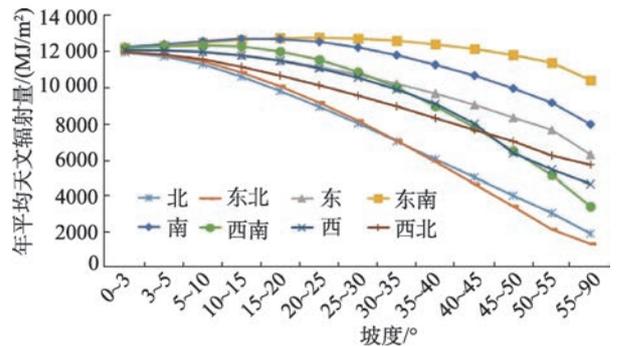


图9 不同坡向年天文辐射量随坡度变化规律

Fig. 9 Variations of mean annual ESR of different aspects with the slopes

$<20^\circ$ 时随着坡度的增加基本无发生变化,说明东南、南坡向在坡度 $<20^\circ$ 范围内对坡度的变化不敏感;坡度 $>20^\circ$ 时东南、南坡向随着坡度的增加开始减小;其余6个坡向,年天文辐射量随坡度的增加而不断减小,其中坡度在 $0\sim 15^\circ$ 年天文辐射量的减少幅度明显小于 $15\sim 90^\circ$ 。整体上任意坡向天文辐射量随着坡度的增加而减少。

### 4.2.3 坡向对年天文辐射的影响

在坡度分级基础上,按照不同的坡度等级分别统计各个坡向年平均天文辐射量,分析在坡度一定下,福建省年平均天文辐射量随坡向的变化规律。由图10可知,在相同的坡度下,福建省年天文辐射量随坡向的变化是显著的,其中东、东南和南坡向是天文辐射高值比较集中的区域,这是由于福建省的山脉主要呈现西南-东北走向,坡向较集中于偏东南方向,这些坡向属于阳坡或半阳坡,太阳可直接照射。在坡度 $<10^\circ$ 时,坡向对年天文辐射量的影响较弱,各个坡向的天文辐射总体上差异较小,其变异系数如表2所示;坡度 $>10^\circ$ 时,随着坡度的增加

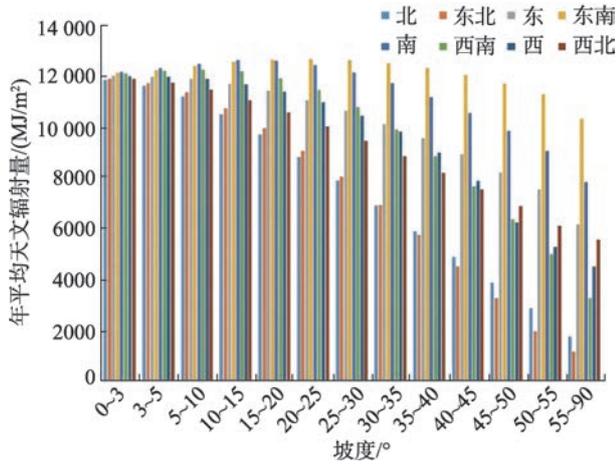


图 10 不同坡度年天文辐射量随坡向变化规律

Fig. 10 Variations of mean annual ESR of different slopes with the aspects

坡向对年天文辐射量的影响开始突显,变化幅度较大,且坡度越陡坡向的影响越强烈,其变异系数如表3所示。

表2 坡度小于10°下不同坡向年平均天文辐射量变异系数  
Tab. 2 Coefficient of variation in mean annual ESR of different aspects (the slope < 10°)

	北	东北	东	东南	南	西南	西	西北
变异系数/%	2.81	2.31	0.48	1.11	1.31	0.63	0.47	1.81

表3 坡度大于10°下不同坡向年平均天文辐射量变异系数  
Tab. 3 Coefficient of variation in mean annual ESR of different aspects (the slope > 10°)

	北	东北	东	东南	南	西南	西	西北
变异系数/%	46.93	54.69	19.09	6.43	14.99	35.28	30.03	22.41

### 4.3 天文辐射的空间尺度效应分析

DEM分辨率是DEM刻画地形精确程度的一个重要指标,DEM数据的尺度效应对天文辐射的精度产生的影响是不可忽视的。栅格分辨率是决定DEM地形描述精度的一个重要的空间尺度参数。随着分辨率的变化,DEM所提取的坡度、坡向以及地形遮蔽信息将产生很大差异<sup>[25-28]</sup>,这种差异直接影响着天文辐射计算的准确性和不确定性。早期采用1000 m分辨率的DEM数据模拟天文辐射,此分辨率下提取微观的坡度坡向等地形因子存在一定的误差。随着DEM数据源的种类增多,目前模拟天文辐射主要采用STRM DEM 90 m分辨率的DEM数据。本文采用30、90和1000 m分辨率的DEM数据作为数据源分析DEM分辨率对年天文辐射量的影响。

#### 4.3.1 DEM尺度对地形描述精度的影响规律分析

DEM分辨率的变化对于地表实际状况的描述程度存在较大差异性,采用分辨率为30、90和1000 m的DEM数据提取福建省坡度等级。随着分辨率的粗略化,福建中西部丘陵、低中山地貌地表实际起伏状况逐渐被拉平,较陡的坡度向较缓转换,呈现出较小的起伏特征。统计数据显示就平均坡度而言,30 m分辨率为17.534°,90 m分辨率为13.663°,1000 m分辨率为4.018°,平均坡度呈递减趋势。这种地表的起伏会影响坡度、坡向和地形遮蔽度的变化,对天文辐射量的计算精度产生较大影响。为了进一步说明坡度随分辨率变化的规律,本文统计了3种不同分辨率的福建省DEM数据提取的各等级坡度所占面积百分比数据,如图11所示。

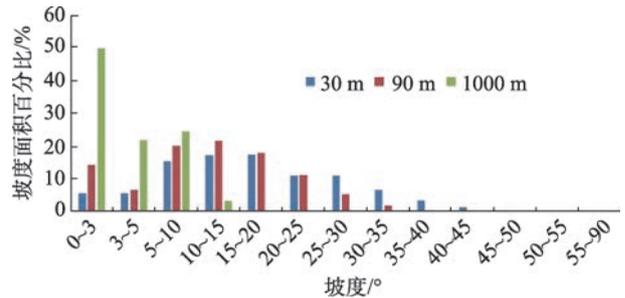


图 11 不同分辨率下各坡度等级所占面积百分比

Fig. 11 Area percentage of the slope rating with different spatial resolutions

图11中不同坡度等级所占面积随着分辨率的变化而变化,在1000 m分辨率下,坡度<5°的区域超过70%,95%的区域坡度<15°,最大坡度为22°,标准差为3°。说明坡度主要集中于小坡度,详细的地形起伏被简化和综合,空间上坡度的差异性很小,地形被高度概括,只能表现出一些大的地形起伏,地形的破碎化程度降低。在90 m分辨下,超过20%的区域坡度<5°,10~15°面积有所增加,坡度<15°的区域超过60%,最大坡度为68°,标准差为8.2°,主要位于福建省西部的低中山地貌。说明地形细部特征逐步开始体现,描述更加接近真实的地貌。当分辨率提高到30 m时,坡度<5°的区域只占11%,坡度<15°的区域减小到44%。坡度在5~25°的区域超过了60%,更加符合福建省以丘陵为主的地貌类型,最大坡度为74°,标准差为10.2°,说明地形描述更加精确,体现了小尺度地形因子的影响。因此随着分辨率粗略化,地貌的细部特征被简化,舍去小的地形起伏,表现出大的地形起伏特征,对地面复杂程

度的描述越来越简单,地形信息将产生缺失,这种缺失所产生的差异性会影响坡度、坡向和地形遮蔽度的准确性。

#### 4.3.2 DEM分辨率对天文辐射的影响规律

采用30、90和1000 m分辨率的DEM数据计算起伏地形下福建省1月和7月天文辐射量,统计其最大值、最小值、平均值、标准差和变异系数,如表4所示。时间作为横向对比,分辨率从高到低为纵向对比。通过对比分析表明,横向对比中相同分辨率DEM下天文辐射的变异程度1月强于7月,这是1月太阳高度角数值较小(平均为 $43.129^\circ$ )加深了地形起伏产生的地形遮蔽度影响,1月天文辐射的分布较为分散,变异系数较大;纵向对比中,随着DEM分辨率从30 m降低到1000 m,天文辐射的最大值基本保持稳定,最小值逐步上升,平均值呈现递增趋势,变异系数为递减趋势,这种变化与DEM分辨率变化所引起的坡度、坡向和地形遮蔽度的变化有着密切联系,随着分辨率粗略化,地貌的细部

表4 不同分辨率下1、7月天文辐射统计

Tab. 4 Statistics of ESR with different spatial resolutions in January and July

DEM 分辨率/m	1月			7月		
	30	90	1000	30	90	1000
最大值/ (MJ/m <sup>2</sup> )	1129	1121	1007	1256	1256	1256
最小值/ (MJ/m <sup>2</sup> )	0	0	331	0	65	1074
平均值/ (MJ/m <sup>2</sup> )	680.02	702.85	738.63	1149.58	1181.60	1233.10
标准差/ (MJ/m <sup>2</sup> )	221.21	181.84	68.09	101.19	69.76	15.04
变异系数/ %	32.53	25.87	9.22	8.80	5.90	1.21

特征被简化,对地面复杂程度的描述越来越简单,坡度坡向产生的地形遮蔽度也随之减弱。天文辐射的变化因坡度坡向的改变而改变,坡度坡向随着DEM分辨率粗略化趋于简单集中化,因此天文辐射的分布只表现出大的总体特征,数值偏高且数据分布更加集中,离散变异性减小。

为了更加直观的描绘这种变化,绘制了不同分辨率下福建省7月天文辐射量图,如图12所示。按照1000 m分辨率下福建省7月天文辐射量的取值范围,对分辨率为30 m和90 m的数据重分类。图12(a)中月天文辐射量 $<1100$  MJ/m<sup>2</sup>的蓝色区域(天文辐射低值区)主要分布在福建省中西部地区,所占面积约为23.1%,大部分属于1201~1250 MJ/m<sup>2</sup>的土黄色区域(天文辐射高值区),约占38.9%。当分辨率降低至90 m时,蓝色区域所占面积开始减小,约占11.6%;而土黄色区域有所增加,约占50.8%,蓝色区域所减小的比重与土黄色所增加的比重基本持平,其他区域保持稳定。随着分辨率向粗略化方向发展,分辨率为1000 m时,蓝色区域基本接近于0,土黄色和红色区域增加,其中土黄色区域的增加幅度最大为41%,而其他区域逐步减小。不同颜色区域面积的变化进一步验证了随着分辨率的粗略化天文辐射的分布向集中化发展,省略了小的地形起伏。

高分辨率的DEM数据可以更好地拟合真实的地表,可以更加精细清晰的展现出坡度、坡向和地形遮蔽度,所计算出的天文辐射量也更加符合实际地表状况;而1000 m分辨率的数据本身对于地表的描述过于粗略和简化,加之坡度和坡向属于微观地形因子,因此1000 m分辨率所提取的坡度、坡向和地形遮蔽度中许多局部微小的地形特征被平滑了,

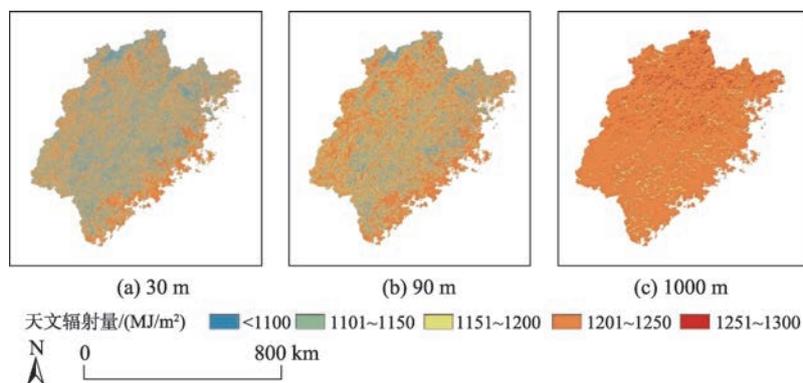


图12 不同分辨率下福建省7月天文辐射量

Fig. 12 ESR with different spatial resolutions in Fujian province in July

所计算的天文辐射量就存在明显的误差。

## 5 结论

本文基于 30 m 分辨率的 DEM 原始高程数据, 计算了福建省实际地形下的各月、季节和年天文辐射量的空间分布, 并详细分析了不同季节、不同坡度、坡向对天文辐射量的影响规律和不同分辨率天文辐射量的空间尺度效应, 主要结论为:

(1) DEM 分辨率变化引起的天文辐射量的变化规律存在明显, 分辨率越粗略化, 天文辐射量越大, 分布离散性和变异性越低; 对于起伏较大地表较破碎的山地丘陵地貌应该选取分辨率较高的 DEM 数据。

(2) 不同坡度坡向对天文辐射量的影响与福建省总体上西北高东南低地势特征相吻合, 福建省大部分区域属于丘陵地貌, 天文辐射量随着坡度增大而减小; 东、东南和南坡向是天文辐射量分布较集中的区域, 总体上呈现山脊多、山谷少、阳坡多、阴坡少的地域差异性。

(3) 福建省年天文辐射量由东部沿海向中西部递减的分布特征; 7 月天文辐射量最高, 12 月最低; 福建省四季天文辐射量大小依次为夏季>春季>秋季>冬季, 呈现出不同季节分布的不对称性。

从多角度对太阳辐射进行分析, 有助于深入透彻了解其空间格局分布特征, 综合太阳辐射的空间分布情况因地制宜选择合适的地点, 考虑地球自转下不同太阳高度角和方位角依据太阳辐射时空分布改变太阳能板朝向, 以及建筑的地理位置、朝向上的选取等方面都有广泛的应用。

考虑基于高分辨率的 DEM 数据精细模拟福建省实际地形下的天文辐射和可照时间的空间格局对于推进太阳辐射领域的研究和发展是有一定的贡献价值。本研究存在的不足主要有: DEM 高程数据的不确定性对计算结果的影响没有涉及; 基于 DEM 计算起伏地形下的天文辐射存在一定的误差, 需要对模型进行进一步修改以符合实际值; 坡度、坡向、天文参数和纬度都是影响天文辐射的因素, 而哪个因素占主导地位限于篇幅本研究没有进行探讨。

### 参考文献(References):

[1] 张雪松, 朱想, 赵波, 等. 基于 WT-PLSP 的太阳辐射短期预

测[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(6): 142-146. [Zhang X S, Zhu X, Zhao B, et al. Shortterm forecasting of solar radiation based on WT-PLSP[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2017, 31(6): 142-146. ]

[2] 魏胜龙, 陈志彪, 陈志强, 等. 微地形上太阳辐射模拟及与地表温度关系研究[J]. 国土资源遥感, 2017, 29(1): 129-135. [Wei S L, Chen Z B, Chen Z Q, et al. Simulation of the total solar radiation over micro-landform and correlation between the solar radiation and the land surface temperature[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2017, 29(1): 129-135. ]

[3] 盛裴轩. 大气物理学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2013. [Sheng P X. Atmosphere physics[M]. Beijing: Peking University Press, 2013. ]

[4] 朱志辉. 非水平面天文辐射的全球分布[J]. 中国科学(B 辑), 1988(10): 1100-1110. [Zhu Z H. The global distribution of astronomical solar radiation on nonhorizontal surfaces[J]. Science in China (Series B), 1988(10): 1100-1110. ]

[5] Dozier J, Frew J. Rapid calculation of terrain parameters for radiation modeling from digital elevation data[J]. IEEE Transactions on geoscience and Remote Sensing, 1990, 28(5): 963-969. ]

[6] Lin W X. Simplified determination of annual and seasonal total extraterrestrial radiation incident on a horizontal surface[J]. Energy, 1990, 15(12): 1171-1174. ]

[7] 傅抱璞. 坡地对于日照和太阳辐射的影响[J]. 南京大学学报(自然科学版), 1958(2): 23-46. [Fu B P. The influence of slope on the sunniness[J]. Journal of Nanjing University (Natural Science), 1958(2): 23-46. ]

[8] 李净, 李新. 基于 DEM 的坡地太阳总辐射估算[J]. 太阳能学报, 2007, 28(8): 905-911. [Li J, Li X. Estimation of solar radiation over the slope using DEM[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2007, 28(8): 905-911. ]

[9] 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 Z Q, Weng D M. A numerical approach of calculating global radiation over rugged areas[J]. Acta Meteorologica Sinica, 1988, 46(4): 461-468. ]

[10] 李占清, 翁笃鸣. 一个计算山地日照时间的计算机模式[J]. 科学通报, 1987(17): 1333-1335. [Li Z Q, Weng D M. A computer model of calculating topographic sunshine hours[J]. Chinese Science Bulletin, 1987(17): 1333-1335. ]

[11] 李新, 程国栋, 陈贤章, 等. 任意地形下太阳辐射模型的改进[J]. 科学通报, 1999, 44(9): 993-998. [Li X, Cheng G D, Chen X Z, et al. Optimization of solar radiation model in any situation[J]. Chinese Science Bulletin, 1999, 44(9): 993-998. ]

[12] 曾燕, 邱新法, 刘绍民. 起伏地形下天文辐射分布式估算

- 模型[J].地球物理学报,2005,5(5):1028-1033. [ Zeng Y, Qiu X F, Liu S M. Distributed modeling of extraterrestrial solar radiation over rugged terrains[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2005,5(5):1028-1033. ]
- [13] 孙汉群.坡面天文辐射日总量临界坡度的研究[J].气象科学,2014,34(4):404-407. [ Sun H Q. Study on critical slope angles of daily insolation on the slope[J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2014,34(4):404-407 ]
- [14] 孙汉群,傅抱璞.坡面天文辐射总量的椭圆积分模式[J].地理学报,1996,51(6):559-566. [ Sun H Q, Fu B P. The elliptical integral model of computing the extraterrestrial solar radiation on the slope[J]. Acta Geographica Sinica, 1996,51(6):559-566. ]
- [15] 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. [ Zeng Y, Qiu X F, Liu C M, et al. Study on spatial distribution of astronomical solar radiation over the Yellow River Basin based on DEM data[J]. Acta Geographica Sinica, 2003,58(6):810-816. ]
- [16] Ambreen R, Ahmad I, Qiu X F, et al. Regional and monthly assessment of extraterrestrial solar radiations in Pakistan [J]. Journal of Geographic Information System, 2015(7): 58-64.
- [17] Ambreen R, Qiu X F, Ahmad I. Distributed modeling of extraterrestrial solar radiation over the rugged terrains of Pakistan[J]. Journal of Mountain Science, 2011,8(3):427-436.
- [18] 张世范,张岸,齐清文,等.起伏地形下朝鲜半岛天文辐射的时空分布[J].资源科学,2010,32(6):1097-1102. [ Zhang S F, Zhang A, Qi Q W, et al. Spatial distribution of extraterrestrial solar radiation under rugged terrains over the Korean Peninsula[J]. Resources Science, 2010,32(6):1097-1102. ]
- [19] 袁淑杰,谷小平,缪启龙,等.基于GIS的起伏地形下天文辐射分布式模型——以贵州高原为例[J].山地学报,2007,25(5):577-583. [ Yuan S J, Gu X P, Miao Q L, et al. Distribution models of astronomical solar radiation over rugged terrains based on GIS: Taking Guizhou Plateau as an illustration[J]. Journal of Mountain Science, 2007,25(5):577-583. ]
- [20] Qiu X F, Zeng Y, Liu S M. Distributed modeling of extraterrestrial solar radiation over rugged terrain[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2005,48(5):1100-1107.
- [21] Qiu X F, Zeng Y, Liu C M, et al. Simulation of astronomical solar radiation over Yellow River Basin based on DEM [J]. Journal of Geographical Sciences, 2004,14(1):63-69.
- [22] 傅抱璞.山地气候[M].北京:科学出版社,1983:1-10. [ Fu B P. Mountain Climate[M]. Beijing: Science Press, 1983: 1-10. ]
- [23] Hong T, Lee M, Koo C, et al. Development of a method for estimating the rooftop solar photovoltaic (PV) potential by analyzing the available rooftop area using Hillshade analysis[J]. Applied Energy, 2017,194:320-332.
- [24] 陈志强,何瑞婷.福建省太阳天文年辐射模拟与空间变异性分析[J].江西农业学报,2013,25(9):108-110. [ Chen Z Q, He R T. Simulation and spatial variability analysis of annual extraterrestrial radiation in Fujian Province[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2013,25(9):108-110. ]
- [25] 刘晓,赵荣,梁勇,等.顾及地貌与DEM分辨率的坡度算法适应性研究[J].测绘科学,2017,42(3):29-34. [ Liu X, Zhao R, Liang Y, et al. Study on adaptability of algorithms for deriving slope based on different geomorphic types and DEM resolution[J]. Science of Surveying and Mapping, 2017,42(3):29-34. ]
- [26] 陈楠.DEM分辨率与平均坡度的关系分析[J].地球信息科学学报,2014,16(4):524-530. [ Chen N. Relationship between DEM resolution and average slope derived from DEM[J]. Journal of Geo-information Science, 2014,16(4): 524-530. ]
- [27] Chen N, Tang G A, Guo D, et al. Influence of DEM orientation on the error of slope calculation[J]. Earth Science Informatics, 2014,7(4):277-285.
- [28] 陈楠.基于信息损失量的坡度精度分析[J].地球信息科学学报,2014,16(6):852-858. [ Chen N. Study on slope precision based on the loss quantity of information[J]. Journal of Geo-information Science, 2014,16(6):852-858. ]