

山区地表太阳辐照度随时空变化的模拟分析

秦慧平^{1,2} 易维宁¹ 黄红莲¹ 潘邦龙¹

(1 中国科学院安徽光学精密机械研究所,合肥市 1125 信箱,230031)
(2 安徽师范大学物理与电子信息学院,芜湖市北京东路 1 号,241000)

摘 要:在光学遥感数据的应用过程中,地表太阳辐照度的量化问题对于遥感数据的获取和地表地物特性的反演等工作都是一个非常重要的环节,而地表太阳辐照度的定量计算又依赖于辐射源、目标物和传感器三者之间的几何关系以及目标地物的地表特征。利用山区地表太阳辐照度的计算模型,对不同时间、不同山区地形下的地表太阳辐照度进行了定量模拟,用三维图的方式分析了地表太阳辐照度随时间、地形坡度、坡向的变化规律,为光学遥感中地表太阳辐照度随时空变化的量化关系分析提供了更直观的依据。

关键词:辐照度;坡度;坡向;光学遥感;6S

中图法分类号:P237.3

在太阳反射光谱区(0.35~2.5 μm),山区地表的入射太阳辐照度可分为以下 3 个部分:① 太阳直射光辐照度;② 天空散射光辐照度;③ 邻近地表反射光辐照度。由于受大气、周围地形、目标地物自身特性等因素的影响,太阳辐照度表现出各向同性或各向异性特征,不同目标物的入射辐照度的分布可能产生很大差异^[1]。如在山地丘陵等地表起伏较大的地区,地形对地表接收的辐射亮度影响就非常明显,阳坡会接收到更多的光照,同种地物在遥感影像上表现得要更亮一些,而阴坡在影像上则表现得暗淡一些,而且不同高程的地表辐射受大气影响的差别很大,这就导致地表覆盖类型相同的目标地物具有分散的辐射亮度。可见,对于不同时刻、不同地表地形,其大气条件、高程、坡度、坡向的不同以及与太阳的相对位置的变化,对地表太阳辐照度的影响非常显著,不同坡度、坡向地表的入射太阳直射辐射差异很大,低太阳高度、高地形起伏区域地形产生阴影突出,此外,天空散射光以及邻近坡地的交叉辐射也受地形条件影响,这使得起伏地形下地表太阳辐照度的计算分析变得非常复杂^[2]。

在光学遥感数据的应用过程中,遥感数据的获取、地表地物特性的反演等工作都涉及到地表太阳辐照度的量化问题。对于山区地表

太阳辐照度的计算和模拟分析,国内外很多学者基于天文理论和地形的 DEM 模型对不同尺度的地形影响进行了研究,考虑了太阳时角、地形坡度、坡向以及地形遮蔽等对太阳辐照度的影响^[2,3],但还没有文献将时空变化对山区地表太阳辐照度进行一个直观模拟。为了更好地分析山区起伏地形对地表太阳辐照度的影响,本文基于已有理论,以厦门地区春分、夏至、秋分和冬至等 4 个典型节气日为例,利用 6S 软件对不同时间、不同山区地形下的地表太阳辐照度进行了定量模拟,用三维图的方式表示出了地表太阳辐照度随时间、地形坡度、坡向的变化规律,为光学遥感中地表太阳辐照度随时空变化的量化关系分析提供了更直观的依据。

1 山区地表太阳辐照度的计算

考虑到山区起伏地形不仅受大气的影响,也受地形条件的影响,山区地表入射太阳辐照度表达式表示为^[4-5]:

$$E_g = \Theta E_d^i \frac{\cos i}{\cos \theta_s} + \Theta E_f^h k \frac{\cos i}{\cos \theta_s} + E_f^h (1 - k) V_d + E_a \tag{1}$$
$$\cos i = \cos \theta_s \cos S + \sin S \sin \theta_s \cos(\varphi - A) \tag{2}$$

式中,θ_s 为太阳天顶角;φ 为太阳方位角;S 为坡

面坡度;A 为坡面坡向。

从式(1)~式(2)可知,对于有地形起伏的地表,太阳总入射辐射不仅与时间有关,还与目标地表的坡度、坡向有关。这可以根据时间和目标地物的地理位置,利用 6S 模拟当时平坦地表下太阳直射辐射和散射辐射,然后代入山区地表太阳辐照度的计算公式,模拟得出时间、地形坡度、坡向对太阳辐照度的影响关系。由于邻近地表的反射辐射对目标地物的总入射辐照度的贡献与当地地形的具体特点有关^[8],所以在后面的模拟中没有考虑。

2 地表太阳辐照度随时空变化的模拟

从前面的公式知道,山区地表太阳辐照度与太阳相对于目标地物的几何位置有关,不同时刻相对于目标地物的太阳天顶角和方位角不同,到达水平地表的太阳直射辐射和散射辐射也不同^[9],本文先对典型节气日的水平地表太阳辐照度进行计算,然后在此基础上模拟得到不同时刻山地地表太阳辐照度随地表坡度、坡向变化的三维模拟图。

2.1 典型节气日太阳辐照度分布情况

地球绕太阳公转过程中,由于地轴与轨道平面始终保持着大概 66°34′ 的夹角,引起太阳直射点在南北纬 23°26′ 之间往返移动,并决定了太阳可能直射的范围。对于某一特定地区,在一年中的不同时期,它与太阳的相对位置存在差别,而一天中的不同时间也存在差别。本文以经纬度为 (24.5°N,118.1°E) 的厦门地区为例,利用 6S 软件^[10]对春分日、夏至日、秋分日和冬至日 4 d 内不同时刻接收的太阳辐照度进行模拟计算。

6S 设置如下:输入相应的格林威治时间;春分日和冬至日选择中纬度冬季气候模式,夏至日和秋分日选择中纬度夏季气候模式;大气成分为

默认,选择乡村型气溶胶模式,能见度选择 23 km;计算波段为 0.38~0.76 μm;观测位置为水平地面^[11]。

对厦门地区春分日、夏至日、秋分日、冬至日 4 d 中北京时间从早上 7 点到下午 17 点每隔一个小时地表接收的太阳总辐射值和漫总比进行了计算统计,如图 1 所示。

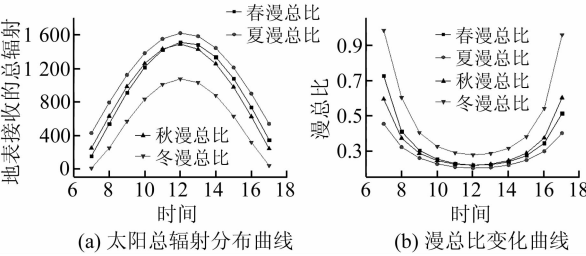


图 1 能见度为 23 km 时厦门地区地表接收的太阳辐射(单位:W/m²/mic)与时间的关系分布图

Fig. 1 Distribution of Ground Irradiance Changing with Time at 23 km Visibility

图 1 是在不考虑地形影响时时间对地表太阳辐照度的影响模拟。从图 1(a)可见,春分日、夏至日、秋分日、冬至日当地地表接收到的太阳辐射是符合一般规律的,即夏天地表接收的太阳辐射最大,而冬天地表接收的太阳辐射最小,而且一天当中中午 12 点地表接收的辐射最大,而早上 7 点和下午 17 点则最小。这是因为在夏至或是一天的中午,太阳天顶角相对较小,太阳辐射大部分以太阳直射的形式照射到地面;而在春分、秋分、冬至日,太阳天顶角变大,太阳辐射被散射和大气吸收损失掉的部分增大,从图 1(b)对一天当中的漫总比的模拟计算结果也可以证明这一点。

2.2 地表太阳辐照度随时空变化的模拟分析

为了定量地对时间、地形对地表接收的入射辐射的影响进行分析,分别计算春分日、夏至日、秋分日、冬至日 4 d 中不同时刻的太阳天顶角和方位角,如表 1 所示,其中时间为北京时间。

表 1 不同时间厦门地区(24.5°N,118.1°E)的太阳天顶角和方位角

Tab. 1 Solar Zenith and Azimuth at Different Time in Xiamen (24.5°N,118.1°E)

北京时间	春分			夏至			秋分			冬至		
	7 点	12 点	17 点	7 点	12 点	17 点	7 点	12 点	17 点	7 点	12 点	17 点
天顶角/(°)	80	25	73	70	2	66	76	25	77	88	48	86
方位角/(°)	95	171	262	107	116	254	97	180	264	117	178	242

对于特定时刻,太阳天顶角和方位角已知,水平地表的太阳辐照度已由 6S 计算得到,则选取地形坡度范围为 0~80°,方位角(为太阳与地形坡向的相对角度)选取 0~360°。代入式(1),就可

以得到不同的坡度、坡向下地表接收到的太阳辐射。图 2 用三维图方式表示出了地表太阳辐照度随时间、地形坡度、坡向的变化规律。由于篇幅有限,只列出了夏至日和春分日两组图。其中 z 轴

表示地表接收的太阳辐射,单位为 $\text{W}/\text{m}^2/\text{mic}$;水平坐标为坡度、坡向组成的极坐标系,坡度对应半径坐标轴,坡向对应弧度坐标轴,单位为 $(^\circ)$ 。图

中正坡度表示朝向太阳方向,负坡度表示背向太阳光,坡度为 0° 的方位上分别为太阳主平面方向和垂直太阳主平面的方向。

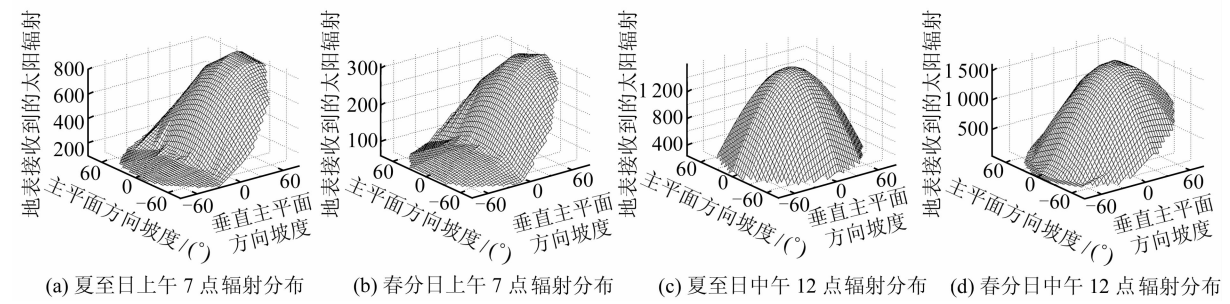


图 2 不同时间地表接收的太阳辐照度随坡度坡向变化的三维分布图

Fig. 2 3D Distribution of Ground Irradiance Changing with Slope and Aspect at Different Time

从图 2 可以看出,中午 12 点的太阳天顶角比较小,所以地表接收到太阳辐射的范围比较大,而且太阳辐射强度较强,4 个节气日中夏至日 12 点的太阳天顶角最小,各个方位角方向都能接收到太阳辐射,而春分、秋分、冬至部分背向太阳的区域由于直射辐射为 0,只有散射辐射,存在阴影区域。上午 7 点地表接收到的太阳辐射与 12 点的

相比,太阳天顶角变大,地表接收的太阳辐射强度较小,在朝向太阳的方向都能接收到太阳辐射,而在背向太阳的方向存在很大的阴影区。

为了更直观地表示出地形坡度、坡向对地表太阳辐照度的影响,对太阳主平面和垂直平面方向上的地表太阳辐照度随时间、坡度、坡向的变化用二维坐标形式表示如图 3 所示。

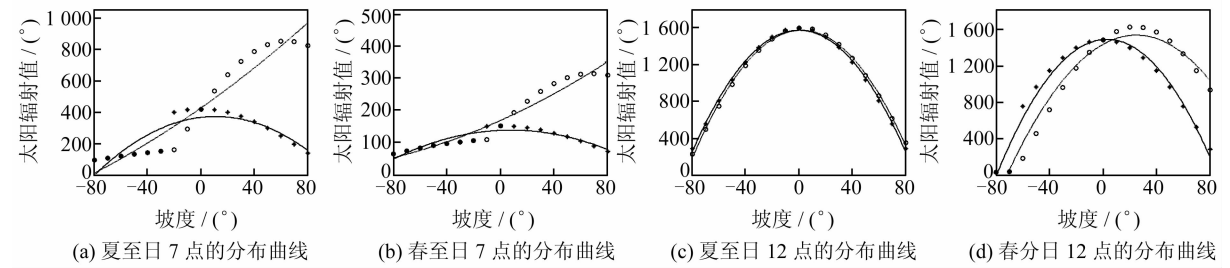


图 3 在太阳主平面和垂直主平面,地表接收的太阳辐射随坡度的变化分布图

Fig. 3 Distribution of Ground Irradiance Changing with Slope and Aspect at Solar Principal Plane and Vertical Plane

从图 3 可以看出,在主平面方向,对于太阳天顶角较小的中午 12 点,朝向太阳的一面无论坡度大小都接收到了太阳辐射,而且地表接收的太阳辐射最大值出现在主平面朝向太阳的坡面上,但由于受太阳天顶角、方位角的影响,最大值对应的坡度在 $0\sim 80^\circ$ 范围变化;背向太阳的一面,太阳辐射强度随坡度的增大而减小,在坡度较大区域由于只有散射辐射而存在阴影区域。而对于太阳天顶角较大的上午 7 点,太阳总辐射强度较 12 点小很多,在朝向太阳的方向接收到的太阳辐射较强,太阳辐射出现最大值点;在背向太阳的方向,则只有坡度较小时有较小的太阳辐射,坡度增加到一定角度后,就只有散射辐射而形成较大的阴影区域。

在垂直主平面方向,当太阳天顶角较小时,地表接收的太阳辐射相对于坡度基本呈对称形式,

随着坡度角的增大,地表接收的辐射减小。

3 结 语

通过对山区起伏地形地表的人射太阳辐照度与时间、坡度、坡向之间的关系进行三维模拟,可以很直观地看出,太阳天顶角越小,地表接收到的太阳辐射越强,太阳天顶角越大,地形对地表接收的太阳辐射的影响越明显;而当地表与太阳相对方位角较小时,地表接收到的太阳辐射越强,相对方位角较大时,则容易产生阴影区域,随着坡度的不同,地表接收的太阳辐射也不同。对于特定的研究地区,只要知道地形坡度、坡向和时间,就可以根据三维图近似得出当时当地的地表太阳总入射辐照度的分布情况。

本文对地形对地表太阳辐照度的影响的模拟

分析是以经纬度为(24. 5°N, 118. 1°E)的厦门地区为例进行研究的,没有考虑当时当地的具体大气状况、云量、地形高程以及周围邻近地形的影响等,单纯地模拟分析地表接收的太阳辐射与时间、地形之间的关系得到的统计结果。但事实上对于具体的一些情况,如当时当地的天气情况、局部地形的复杂性、山体之间的相互影响、海拔等因素对于地表接收的太阳辐射也有很大的影响,而且光学传感器的不同波段对于太阳辐射分布也有影响,所以在后续的工作中可以收集更多的气象数据和地区数据,从而得到更精确的模型。

参 考 文 献

[1] 亓雪勇,田庆久. 山地 TM 遥感影像大气辐射校正模型改进及地表反射率反演[J]. 遥感信息, 2007 (4):3-8

[2] 张秀英,冯学智. 基于数字地形模型的山区太阳辐射的时空分布模拟[J]. 高原气象, 2006, 25(1):123-127

[3] 傅抱璞. 不同地形下辐射收支各分量的差异与变化[J]. 大气科学, 1998, 22(2):178-190

[4] Sandmeier S, Itten K. A Physically-Based Model to Correct Atmospheric and Illumination Effects in Optical Satellite Data of Rugged Terrain[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 1997, 35(3):708-717

[5] 闻建光,柳钦火,肖青,等. 复杂山区光学遥感反射率计算模型[J]. 中国科学(D 辑), 2008, 38(11):1419-1427

[6] 黄薇,张良培,李平湘. 基于地形区域分割的复杂地区遥感影像分类[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2007, 32(9):791-795

[7] Proy C, Tanre D, Deschamps P Y. Evaluation of Topographic Effects in Remotely Sensed Data[J]. Remote Sens Environ, 1989, 30:21-32

[8] Dozier J, Frew J. Rapid Calculation of Terrain Parameters for Radiation Modeling from Digital Elevation Data[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 1990, 28(5):963-969

[9] Chen Y, Hall A, Liou K N. Application of Three-dimensional Solar Radiative Transfer to Mountains[J]. Journal of Geophysical Research, 2006, 111 (D21):111-120

[10] Richter R. Atmospheric/Topographic Correction for Airborne Imagery (2008) [R]. DLR Report DLR-IB 565-02/08, Wessling, Germany, 2008

[11] 麻金继,杨世值,王先兵,等. 利用 MODIS 图像反演海岸与海岛的地物光谱反射率[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2005, 30(9):791-795

第一作者简介:秦慧平, 博士生, 讲师, 主要从事光学遥感成像仿真及应用方面的研究。
E-mail: pinghui4600@sina. com

Simulation of the Irradiance Changing with the Temporal and Spatial Distribution on the Terrain Surface

QIN Huiping^{1,2} YI Weining¹ HUANG Honglian¹ PAN Banglong¹

(1 Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Science, P.O. Box 1125, Hefei 230031, China)
(2 The College of Physics and Electronic Information, Anhui Normal University, 1 East Beijing Road, Wuhu 241000, China)

Abstract: In the application of the remote sensing data, the quantity of surface irradiance is very important in the acquisition of remote sensing data and retrieval of surface character, but the quantity of surface irradiance is based on the geometrical relationship of light source, objects, sensor and the surface character of objects. Based on the model of terrain surface irradiance, the terrain surface irradiance with different temporal and spatial distribution was quantitatively simulated. The law between the surface irradiance and the time, slope, aspect was showed with a 3-D coordinate, which provided a more direct basis for the quantity relationship of the surface irradiance and temporal and spatial distribution in the remote sensing.

Key words: irradiance; slope; aspect; optical remote sensing; 6S