



月表可照时间谱和太阳辐射谱空间分布特征研究

刘奇祺, 陈楠, 林蔚

Research on Spatial Distribution Characteristics of Lunar from Possible Sunshine Duration Spectrum and Solar Radiation Spectrum

LIU Qiqi, CHEN Nan, and LIN Siwei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.15982/j.issn.2096-9287.2021.20210100>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于LOLA数据的冯·卡门撞击坑太阳辐射研究

Research on Solar Radiation of Von Kármán Crater Using LOLA Data

深空探测学报(中英文). 2018, 5(1): 12-19

月球粒子辐射环境探测现状

Current Status of Radiation Environment Detection on the Lunar Surface

深空探测学报(中英文). 2019, 6(2): 127-133

月球阿波罗盆地区域月壳结构及光谱特征

Crustal Structure and Spectral Features of Lunar Apollo Basin Region

深空探测学报(中英文). 2018, 5(5): 488-494

基于场理论的“嫦娥4号”着陆区亮温时空分布特征研究

The Research of Temporal and Spatial Distribution of Microwave Brightness Temperature in Chang'E-4 Landing Area Based on Field Theory

深空探测学报(中英文). 2018, 5(1): 27-33

近月空间带电粒子环境——“嫦娥1号”“嫦娥2号”观测结果

The Lunar Charged Particle Environment by Chang'E-1 and Chang'E-2

深空探测学报(中英文). 2019, 6(2): 119-126

“嫦娥4号”月球背面着陆区月壳及深部结构特征

Crustal and Subsurface Structures of Chang'E-4 Lunar Farside Landing-Site

深空探测学报(中英文). 2018, 5(1): 41-49



月表可照时间谱和太阳辐射谱空间分布特征研究

刘奇祺^{1,2}, 陈楠^{1,2}, 林偲蔚^{1,2}

(1. 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 350108; 2. 福州大学 数字中国研究院(福建), 福州 350108)

摘要: 以20 m分辨率的月球数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)为数据源,在不同的纬度区域选取了16个典型月貌样区,基于数据并行技术定量计算月表实际起伏地形下2020年的可照时间和太阳辐射。源于数字地形分析中的坡谱模型,采用矩形窗口扩张法提取了不同地貌样区的稳定坡度-年平均可照时间谱、坡度-年平均太阳辐射谱、坡向-年平均太阳辐射谱以及稳定面积。结果表明:月表太阳辐射和可照时间的空间分布受地形要素影响显著;月表可照时间和太阳辐射整体呈现出随纬度增大而逐渐减小的分布特征;各样区稳定面积与坡度的变异系数呈正相关关系。研究结果可为未来月球基地建设选址提供支持。

关键词: 数字高程模型;可照时间;太阳辐射;谱模型;月球

中图分类号: P184

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2021)06-0614-11

DOI:10.15982/j.issn.2096-9287.2021.20210100

引用格式: 刘奇祺, 陈楠, 林偲蔚. 月表可照时间谱和太阳辐射谱空间分布特征研究[J]. 深空探测学报(中英文), 2021, 8(6): 614-624.

Reference format: LIU Q Q, CHEN N, LIN S W. Research on spatial distribution characteristics of lunar from possible sunshine duration spectrum and solar radiation spectrum[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2021, 8(6): 614-624.

引言

月球是距离地球最近的天然卫星,由于大气稀薄,太阳辐射长驱直入,是月面物质最主要的辐射源^[1]。月面太阳辐射能代表单位面积内给定时段接收能量的多少,可照时间是指太阳在一地实际照射的时长,通常采用有效太阳辐照度和可照时间定量模拟太阳辐射^[2]。研究起伏地形下月面可照时间和太阳辐射的空间分布结构,可为月球科研基地的建设选址提供太阳能量和光照信息,也为月面温度以及热环境研究提供数据参考,对开展更深入的月面以及宇宙其他星体探测具有重要的科学价值。

对于月面太阳辐射的研究,Jeager等^[3]仅考虑了太阳辐照度随时间的简单余弦变化;李雄耀等^[4]在太阳有效辐照度实时计算中考虑了太阳入射角和日月距离的影响;Meng等^[5]进一步加入地形起伏对月面太阳辐射以及温度分布的影响,但未考虑随时间变化的情况;张吉栋等^[6]在此基础上建立月表太阳辐射模型,分析了2018年冯·卡门地区的太阳辐射分布,提出“嫦娥四号”在此区域的最佳着陆时间和着陆点。月面可照时间的研究大多集中在两极地区^[7-9]。美国月球勘测轨道飞行

器(Lunar Reconnaissance Orbiter, LRO)的月球轨道激光高度计(Lunar Orbiter Laser Altimeter, LOLA)数据得出月球南极的永久阴影区月表层下可能存在水冰^[8, 10];日本“Kaguya/Selene”探测器上的激光高度计获取的数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)^[7, 11],研究了月球极区的光照条件和温度,以期找出极区水冰存在的直接证据;“嫦娥一号”激光高度计数据^[9],采用地形最大高度角法并考虑黄道和白道交点进动的影响,得出了月球极区长久阴影区分布。张吉栋^[12-13]进一步基于DE430月球行星历表和LOLA数据,综合考虑地形条件和日月距离对月表太阳辐射的影响,对全月球光照特性和太阳辐射做了模拟分析,但数据精度和时间分辨率较低,也缺乏起伏地形下宏观尺度可照时间和太阳辐射的分布规律研究。

月表接收的太阳辐射和可照时间受地形、纬度、天文因素的综合影响^[13],目前对可照时间和太阳辐射的时空分布结构研究多是采用数值统计、图形对比分析等传统方法^[4, 6, 12],无法直观有效地反映各动力因素和太阳辐射、可照时间空间分布之间的关系。基于坡谱模型^[14-15]Chen^[16-17]首次提出可照时间谱、天文辐射谱

在特定的统计区内，以定量地形因子（坡度）为自变量，以其所对应的栅格年可照时间和年天文辐射均值为因变量构成的直方图模型，分析黄土高原6个典型地貌区太阳辐射和可照时间的时空分异特征。Lin等^[18]将此方法推广到火星表面的太阳辐射研究中，发现地形遮蔽、纬度效应、星体自转周期和自转轴倾角等对太阳辐射和可照时间的时空分布均有不同程度的影响。可见谱模型能反映多重因素作用下的可照时间、太阳辐射的空间分异，也能深入揭示空间中各类要素的分布现象、机理及其分异格局^[19]，是一种新颖有效的研究方法。

本文采用空间高分辨率的DEM数据，借鉴分段式积分方法^[20]，充分考虑月面起伏地形之间的相互遮蔽，引入时角概念，使用并行计算方法模拟月面可照时间和太阳辐射。首次利用谱模型综合分析宏观尺度下的月面可照时间、太阳辐射的空间特征，揭示其与地形效应、纬度效应、天文因素的内在联系。

1 “嫦娥二号”DEM-20 m数据

在月面可照时间和太阳辐射的数值模拟和空间特性研究中，必须考虑实际起伏地形的遮挡，需要以地形数据为支撑。本文采用分辨率为20 m的月球数字高

程模型（Digital Elevation Model, DEM），数据来源于月球与行星数据发布系统网站（<http://moon.bao.ac.cn/>），基于“嫦娥二号”立体相机CCD在100 km轨道高度获取的立体像制作得到，全月范围共计188幅影像，均采用GCS_Moon_2000地理坐标系。这是迄今为止发布的精度最高的全月DEM数据，不但能精细反映月面的各种起伏地形，而且可以基于此数据获取月表坡度、坡向等参数，易于存储和处理。

按照宏观形态及引力作用方式，月海、月陆、撞击坑这三大地貌单元构成了月球形貌的基本类型，国际天文联合会（International Astronomical Union, IAU）在此分类基础上又划分出月湖、月谷、月湾、山地、皱脊、月湖、陡坡和月溪等二级地貌类型^[21]。依据美国地质调查局（United States Geological Survey, USGS）在其官方网站（<http://planetarynames.wr.usgs.gov>）公布的迄今为止所有月球地名，综合考虑了纬度范围、地貌形态的规模、地貌类型的单一性，本文选取了4种具有特色且分布较广的地貌：撞击坑、月海、山脉、月谷，并在南北半球的中低纬度区域分别根据四种地貌选取了16个实验样区，其名称与位置信息等见表1，限于篇幅，图1给出了其中4个样区的DEM图。

表 1 实验样区基本信息表

Table 1 Basic information of the experimental sample area				
编号	样区名称	纬度范围	经度范围	样区地貌
1	Vallis Alps	47.79°N~50.52°N	0.36°E~6.95°E	月谷
2	Lacus Spei	42.51°N~44.56°N	63.69°E~66.94°E	月湖
3	Chandler Crater	42.19°N~45.11°N	169.77°E~173.8°E	撞击坑
4	Mons Rümker	39.37°N~41.88°N	-59.84°W~-56.68°W	山脉
5	Charlier Crater	34.41°N~38.03°N	-133.94°W~-129.44°W	撞击坑
6	Vallis Schroteri	24.16°N~26.32°N	-53.63°W~-49.28°W	月谷
7	Montes Archimedes	23.11°N~27.89°N	-7.55°W~-3.3°W	山脉
8	Copernicus Crater	8.04°N~11.21°N	-21.68°W~-18.47°W	撞击坑
9	Mare Spumans	-1.06°N~3.72°N	63.61°E~66.73°E	月海
10	Vallis Capella	-6°S~-8.69°S	33.78°E~36.23°E	月谷
11	Montes Rhipaeus	-4.75°S~-10.63°S	-29.02°E~-25.39°W	山脉
12	Lacus Aestatis	-13.42°S~-16.24°S	-69.39°W~-67.86°W	月湖
13	Lacus Oblivionis	-19.92°S~-21.04°S	-169.21°W~-167.96°W	月湖
14	Eotvos Crater	-33.93°S~-37.29°S	132.36°E~136.5°E	撞击坑
15	Tycho Crater	-41.89°S~-44.7°S	-13.15°W~-9.28°W	撞击坑
16	Vallis Baade	-48.66°S~-42.82°S	-79.91°W~-74.76°W	月谷

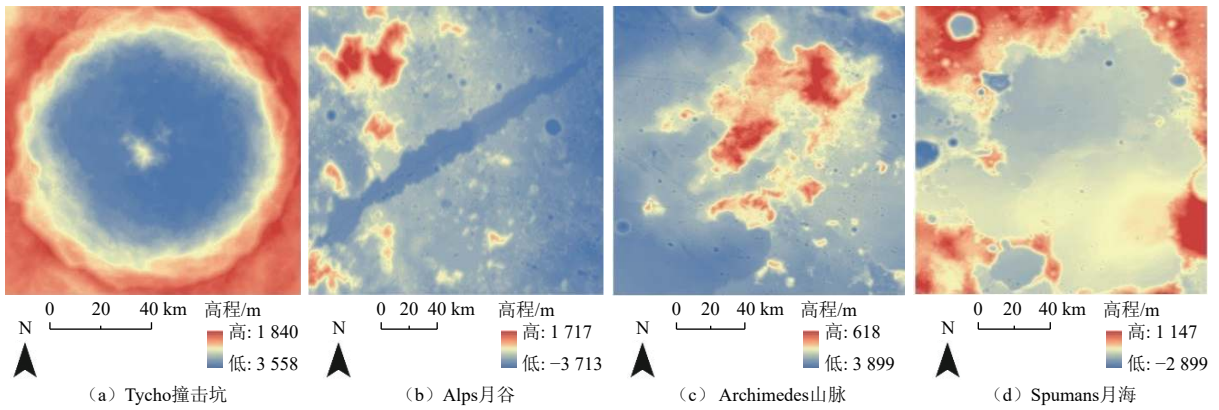


图1 典型月貌图

Fig. 1 A typical geomorphological map of the Moon

2 月面可照时间和太阳辐射估算模型

2.1 计算星下点纬度

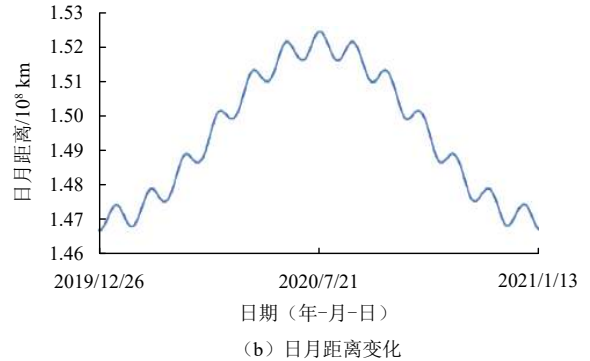
Meeus基于VSOP82行星理论和Chapront ELP-2000/82月球理论以及月球天平动原理^[22],拟合了日月距离以及日下点位置随时间的变化。本文从公元前4712年开始以连续的儒略日数来表示时间作为输入项,将拟合的多项式编写程序,时间间隔为1 h,计算

得到任意时刻月球和太阳的地心黄道坐标、日下点位置、日月距离。

月球上一昼夜的长度是一个朔望月,本研究以每月农历初一(即朔:此时日月黄经差为 0°)到次月农历初一定义为一个月球昼夜。以上述天文算法为依据,本文的计算周期为UTC时刻2019年12月26日—2021年1月13日,共计13个月球日。图2给出了2020年日下点纬度和日月距离随时间的变化。



(a) 日下点纬度



(b) 日月距离变化

图2 实时信息

Fig. 2 Real-time information

2.2 基于数据并行的模型构建

DEM数据源较密集,基于此数据的计算模型采用并行框架进行处理。在实际起伏地形中,任意1 d的可照时间可以抽象为无限个微分时段内可照时间的总和,通过离散化方式分别计算每一微分时段内的地形遮蔽系数,综合微分时段与遮蔽系数,累加求和,计算起伏地形下任意点的可照时间和太阳辐射^[23]。

1) 根据栅格点所在的地理纬度 ϕ 和星下点纬度 δ 计算任意月球日的日出时角 ω_r 、日没时角 ω_s 。

$$\omega_r = \arccos(-\tan\delta \times \tan\phi) \quad (1)$$

$$\omega_s = -\omega_r \quad (2)$$

2) 指定时间步长为 $\Delta t = 30 \text{ min}$,将日出到日没的时角 $[-\omega_r, \omega_s]$ 等分为 n 个时段 $[-\omega_r, -\omega_r + \Delta\omega, \dots, -\omega_r + (n-1) \times \Delta\omega, \omega_s]$,对应的太阳时角步长为 $\Delta\omega = \frac{2\pi}{T} \times \Delta t$, T 为一个月球日时长(约29.53 d)。

3) 获取各时角 ω_i 所对应的太阳高度角 h_i 和太阳方位角 A_i 。

$$h_i = \arcsin(\sin\delta \sin\phi + \cos\delta \cos\phi \cos\omega_i) \quad (3)$$

$$A_i = \arccos\left(\frac{\sin h_i \sin\phi - \sin\delta}{\cos h_i \cos\phi}\right) \quad (4)$$

4) 计算 ω_i 到 ω_{i+1} 时段内的遮蔽系数 g_i 。

图3为实际起伏地形下B点受到A点的遮蔽情况。

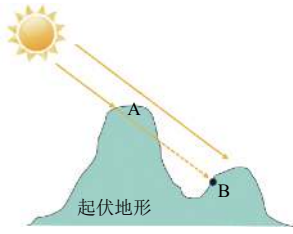


图3 地形遮挡示意图

Fig. 3 Schematic diagram of shading conditions

判断栅格点是否遮蔽主要采用ArcGIS提供的Hillshade模块计算^[24-25]：计算每个时角 ω_i 对应的太阳高度角 h_i 在太阳方位角 A_i 上的最大遮蔽度，比较最大遮蔽度与太阳高度角来确定此时此刻的遮蔽状况函数 S_i 的值， $S_i=1$ 表示计算点此时此刻可照， $S_i=0$ 表示受地形遮蔽不可照。

进而对相邻时刻遮蔽状况数组 $[S_1, S_2, \dots, S_n]$ 的元素进行判断，确定 ω_i 到 ω_{i+1} 时段内的遮蔽系数 g_i 。

$$g_i = \begin{cases} 1, & S_i = S_{i+1} = 1 \\ 0, & S_i = S_{i+1} = 0 \\ \frac{S_i + S_{i+1}}{2}, & S_i = 1, S_{i+1} = 0 \text{ 或 } S_i = 0, S_{i+1} = 1 \end{cases} \quad (5)$$

5) 根据上述，月面起伏地形下的日可照时间采用分段式积分^[26]的方法表示为

$$T_d = \frac{T}{2\pi} \left[\sum_{i=1}^{n-1} g_i \Delta\omega + g_n \text{mod} \left(\frac{\omega_s - \omega_r}{\Delta\omega} \right) \right] \quad (6)$$

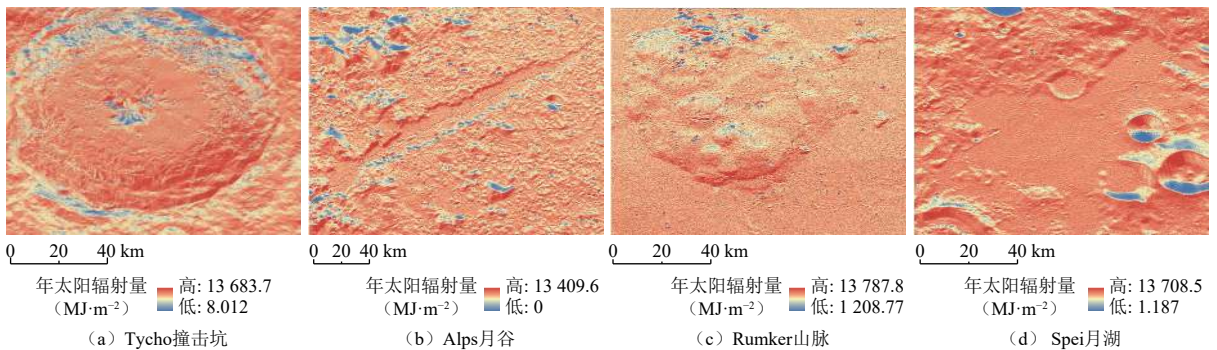


图4 典型地貌样区年太阳辐射分布图

Fig. 4 Solar radiation of typical sample areas

3 获取太阳辐射谱和可照时间谱

本文以坡度-年平均太阳辐射谱为例，给出平均太阳辐射谱技术流程图如图5所示。核心思想在既定区域内，通过对不断扩张的矩形窗口范围内的栅格坡度值和太阳辐射值进行统计分析，判断是否满足误差指

6) 月面点接收的太阳辐射度 I 可表示为

$$I = I_0 \left(\frac{D_{SE}}{D_{SM}} \right)^2 (u \sin \delta + v \cos \delta \cos \omega + w \cos \delta \sin \omega) \quad (7)$$

结合(5)(6)(7)式，累计各时段的太阳辐射，得到计算点日太阳辐射量 W_m 为

$$W_m = \frac{T}{2\pi} I_0 \left(\frac{D_{SE}}{D_{SM}} \right)^2 \sum_{i=1}^n [u \sin \delta (\omega_{s,i} - \omega_{r,i}) + v \cos \delta (\sin \omega_{s,i} - \sin \omega_{r,i}) - w \cos \delta (\cos \omega_{s,i} - \cos \omega_{r,i})] g_i \quad (8)$$

其中： g_i 为每个微分时段内的遮蔽系数； g_n 为第 n 个时段的遮蔽系数。 I_0 为太阳常数，指在日地平均距离处，在地球大气上界垂直于太阳光线的单位面积内每秒钟接收的太阳辐射，本文取均值 $1\ 367\ \text{W/m}^2$ ^[20]； D_{SE} 是日地平均距离； D_{SM} 是日月中心距离； $\omega_{s,i}$ 、 $\omega_{r,i}$ 为每一微分时段的起始和终止时角； u 、 v 、 w 为与地理、地形有关的特征因子，且有^[26]

$$u = \sin \phi \cos \alpha - \cos \phi \sin \alpha \cos \beta \quad (9)$$

$$v = \sin \phi \sin \alpha \cos \beta + \cos \phi \cos \alpha \quad (10)$$

$$w = \sin \alpha \sin \beta \quad (11)$$

其中： α 为坡度； β 为坡向。

任意栅格的坡度、坡向计算采用地理信息系统中最常见的基于DEM地形信息提取方法^[27]。图4给出了4种典型地貌样区的年太阳辐射分布图。

标，以提取稳定形态的坡度-年平均太阳辐射谱。

1) 初步获取年平均太阳辐射谱：在既定研究区内随机选取格网点作为分析窗口的中心点，如图6中A点，初次分析窗口采用 3×3 矩形窗口。将该窗口内的栅格坡度值根据等差分级法^[28]分为8级： $0^\circ \sim 5^\circ$ 、 $5^\circ \sim 10^\circ$ 、 $10^\circ \sim 15^\circ$ 、 $15^\circ \sim 20^\circ$ 、 $20^\circ \sim 25^\circ$ 、 $25^\circ \sim 30^\circ$ 、

30°~35°、35°~90° (各实验样区坡度在35°~90°区间的面积占全样区面积的比例约为1%, 不再进行级别划分)。按照坡度分级, 基于第2.2节中已获取的样区坡度和年太阳辐射数据, 对3×3分析窗口内每个坡度分段的年太阳辐射取均值。以坡度因子分级为自变量, 以年太阳辐射为因变量, 采用直方图的形式构建区域的初步坡度-年平均太阳辐射谱 $PS_1 = [PS_{1,1}, PS_{1,2}, PS_{1,3}, \dots, PS_{1,8}]$, $PS_{1,i}$ 表示第 i 坡度分级区间内的年平均太阳辐射, i 表示坡度因子分级数 (8级)。

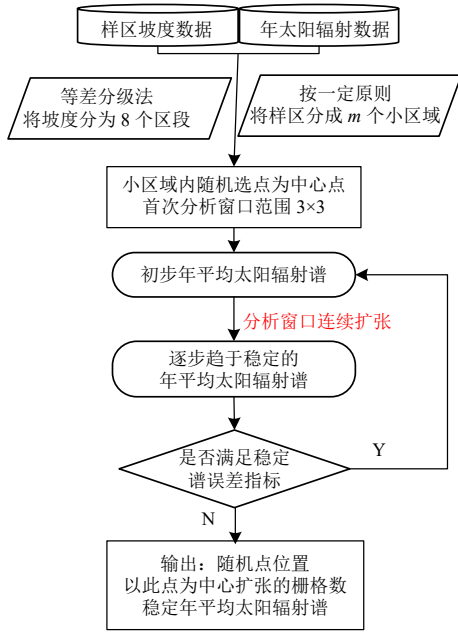


图5 坡度-年平均太阳辐射谱技术流程图

Fig. 5 Technical flowchart of the method used in extracting the slope-mean solar radiation spectrum

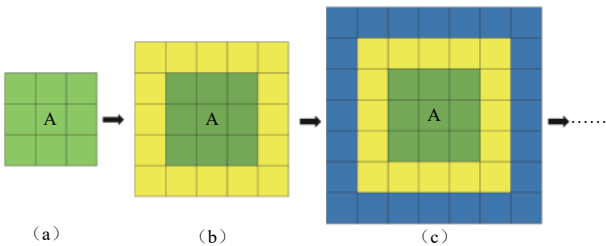


图6 不断扩大的分析窗口

Fig. 6 Expanding analysis window

2) 逐步扩大分析窗口并提取太阳辐射谱: 将中心点仍为 A 的 3×3 绿色窗口逐次扩大一个栅格维度, 即 5×5, 7×7, 9×9, ..., $n \times n$ 的分析窗口, 如图 6 中 (b)、(c) 所示。对该区域不断扩大的矩形分析窗口, 重复操作步骤 1, 逐次构建坡度-年平均太阳辐射谱 $PS_2 = [PS_{2,1}, PS_{2,2}, PS_{2,3}, \dots, PS_{2,8}]$, $PS_3, \dots, PS_n$ 。

3) 定义误差指标 E_1 和 E_2 , 利用该指标判断逐步扩

大的太阳辐射谱是否为稳定太阳辐射谱, 指标^[16]为

$$E_1 = \max \left(\left| \frac{(PS_{2,i} - PS_{1,i})}{PS_{1,i}} \right| \right) \quad (12)$$

$$E_2 = \sum_{i=1}^8 \left(\left| \frac{(PS_{2,i} - PS_{1,i})}{PS_{1,i}} \right| \right) \quad (13)$$

式 (12) 和式 (13) 借鉴了坡谱^[29-30]天文辐射谱^[16,18]的指标精度, 设定 $E_1 < 0.1\%$, $E_2 < 0.5\%$, 有利于获取样区稳定太阳辐射谱和稳定面积。

4) 获取稳定坡度-年平均太阳辐射谱: 基于前述需在此基础上扩大 30 次分析窗口, 分别获取太阳辐射谱 PS_n , 若皆满足误差指标, 视第一个分析窗口提取的太阳辐射谱 PS_1 为稳定太阳辐射谱, 此时的矩形分析窗口面积为区域的稳定面积, 记为 AS。若分析窗口扩大的过程中获取的太阳辐射谱不满足误差指标, 将 PS_2 视为 PS_1 , 继续重新扩大 30 次矩形窗口, 直至矩形窗口连续扩大的过程中均满足误差指标 E_1 、 E_2 。

为包含整个样区的地貌特征, 需将每个实验样区划分为 M 个小区域提取稳定太阳辐射谱 PS_m , 划分样区遵循以下原则: 相邻小区域最终获取稳定谱时的稳定面积重叠部分 (如图 7 中 M 和 N 的重叠区域) 与该区域稳定面积之比应小于 5%, 目的是各小区域能更独立地揭示太阳辐射和可照时间的空间结构且顾及更全面的地貌信息。最后将各小区的 PS_m 累加取均值, 确定样区的稳定坡度-年平均太阳辐射谱 S 为

$$S = \{S_1, S_2, \dots, S_5, \dots, S_8\} = \left\{ \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M PS_{j,1}, \frac{1}{M} \sum_{j=2}^M PS_{j,2}, \dots, \frac{1}{M} \sum_{j=M}^M PS_{M,8} \right\} \quad (14)$$

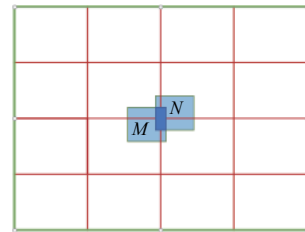


图7 样区划分示意图

Fig. 7 Divide test area

4 谱的空间分异性

4.1 坡度-年平均可照时间谱和太阳辐射谱

表 1 中各样区的坡度-年平均太阳辐射谱和坡度-年平均可照时间谱 (以下简称太阳辐射谱和可照时间谱) 的结果如图 8 和图 9 所示, 主要呈现出以下几个特征。

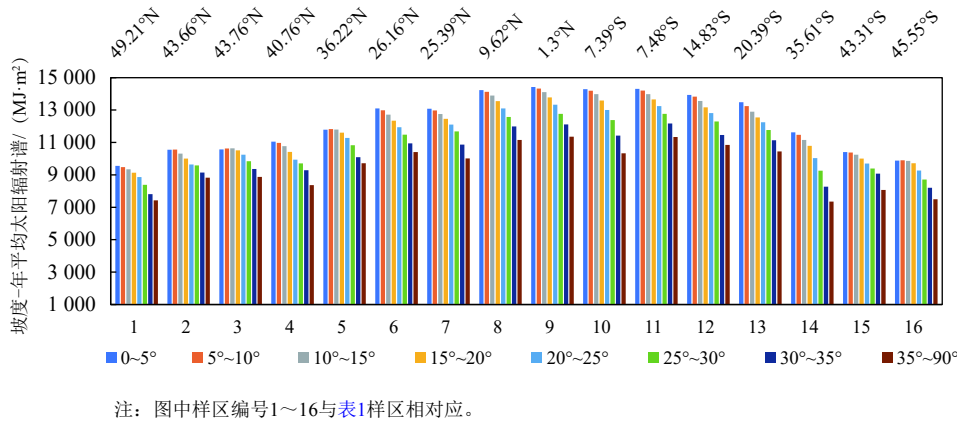


图 8 坡度-年平均太阳辐射谱
Fig. 8 Slope-mean solar radiation spectrum in a year

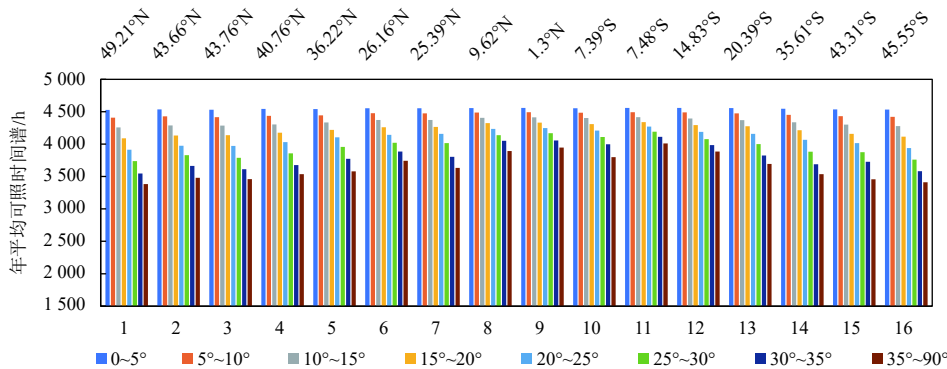


图 9 坡度-年平均可照时间谱
Fig. 9 Slope-mean possible sunshine duration spectrum in a year

1) 随坡度分级的增大, 太阳辐射谱和可照时间谱的值均呈减小趋势, 其中坡度在区间 $20^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 太阳辐射谱值的减小幅度明显大于区间 $0^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 的减小幅度。为量化表示所述两个谱数值的减小速率, 本文以坡度分段区间的中值为自变量 x , 各分段内太阳辐射谱或可照时间谱的数值为因变量 y 进行函数拟合。结果呈现出显著的线性函数关系, 可表示为 $y = Ax + b$, 16个样区(见表1)的相关系数 R^2 均大于0.87, 相关性较强。

图10~11分别给出16个样区太阳辐射谱值随坡度增大的减小速率。可知: 可照时间谱值的减小速率($-9\sim -21$)整体上小于太阳辐射谱值减小速率

($-29\sim -73$)。一方面是由于月球表面相对平坦, 大部分地区坡度在 15° 以下, 约占月球总面积的90%; 另一方面, 坡度因子可以反映微观地表单元的形态、起伏或扭曲特征, 坡度越大, 地形起伏相应越大, 由此引起月面点自身和周围地形的遮蔽越强烈, 可照时间越短, 太阳辐射越少。月表实际起伏地形下的相互遮蔽效应是影响太阳辐射和可照时间空间分布的重要因素, 与前人研究的月表地形起伏对光照和太阳辐射影响很大^[12-13]的结论相符, 黄土高原^[16]和火星^[18]的研究结果也印证了这一结论。

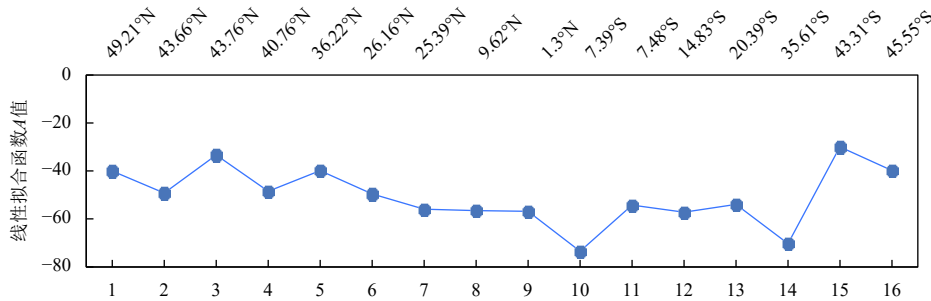


图 10 样区太阳辐射谱值随坡度的减小速率
Fig. 10 The descending rate of slope-mean solar radiation spectrum in a year with the variation of slope

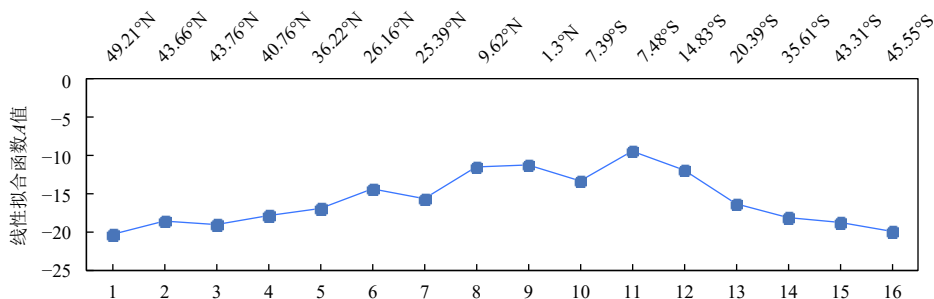


图 11 样区可照时间谱值随坡度的减小速率

Fig. 11 The descending rate of slope-mean possible sunshine duration spectrum in a year with the variation of slope

2) 稳定可照时间谱、太阳辐射谱在空间上表现出明显的纬向性分布。由图8可知:中心纬度位于北纬 $36.22^{\circ}\text{N}\sim 49.21^{\circ}\text{N}$ 、南纬 $35.61^{\circ}\text{S}\sim 45.55^{\circ}\text{S}$ 的8个样区太阳辐射谱数值均低于 $12\,000\text{ MJ/m}^2$;中心纬度位于 26.16°N 、 25.39°N 、 20.39°S 、 14.83°S 的4个样区太阳辐射稳定谱的值在 $10\,000\sim 14\,000\text{ MJ/m}^2$ 之间;中心纬度在南北纬 10° 内的4个样区太阳辐射谱的最大值均高于 $14\,000\text{ MJ/m}^2$;由图9可知:中心纬度位于 $9.62^{\circ}\text{N}\sim 14.83^{\circ}\text{S}$ 的样区相比其他样区,显然各坡度区间内的谱数值差异很小。

太阳直射点仅在月球南北纬 $1^{\circ}32'$ 的范围内移动^[13],样区所在纬度越低,月面点距离太阳直射点越近,纬度差越小,太阳高度角越大,地形起伏引起的遮挡效应减弱,月面点的可照时间越长;随纬度的减小,赤道区域太阳高度角最大,单位面积的辐射通量高,有效太阳辐照度强,则赤道区域附近的太阳辐射能量最高。因此,纬度效应是影响太阳辐射和可照时间空间分布的另一个重要因素。

3) 图8的太阳辐射谱值比图9的可照时间谱值纬向性特征更明显。从空间上而言,中低纬度区域太阳辐

射分布较离散,而可照时间分布变化范围小,与在 $40\%\sim 50\%$ 之间^[12]的结论相符合。可照时间和太阳辐射均受地形、纬度因素的影响^[13],由2.2节式(8)可知太阳辐射是有效太阳辐照度和可照时间分段积分的定量模拟,同时受到这两者的影响,式(7)中有效太阳辐照度的计算模型同样考虑了地形起伏(坡度、坡向)的影响,所以太阳辐射的结果受到地形因素的双倍影响。由太阳辐射的计算模型可知,除坡度、坡向之外,太阳辐照度的影响因子还包括地理纬度、星下点纬度、太阳高度角、日月距离,其计算结果也随纬度由高到低的变化呈现逐渐增大的特征^[4],并且可照时间有同样的变化特征,对太阳辐照度和可照时间采用分段积分得到太阳辐射,稳定谱具有更显著的纬向变化特征。

4.2 坡向-年平均太阳辐射谱

在不同的坡面朝向,各种物质的能量存在明显的差异,坡向是决定月球表面局部区域接受阳光和重新分配太阳辐射能量的另一重要的地形因子,本文将坡向按阴阳坡划分为8类。图12为坡向-年平均太阳辐射谱,主要呈现以下几个特征。

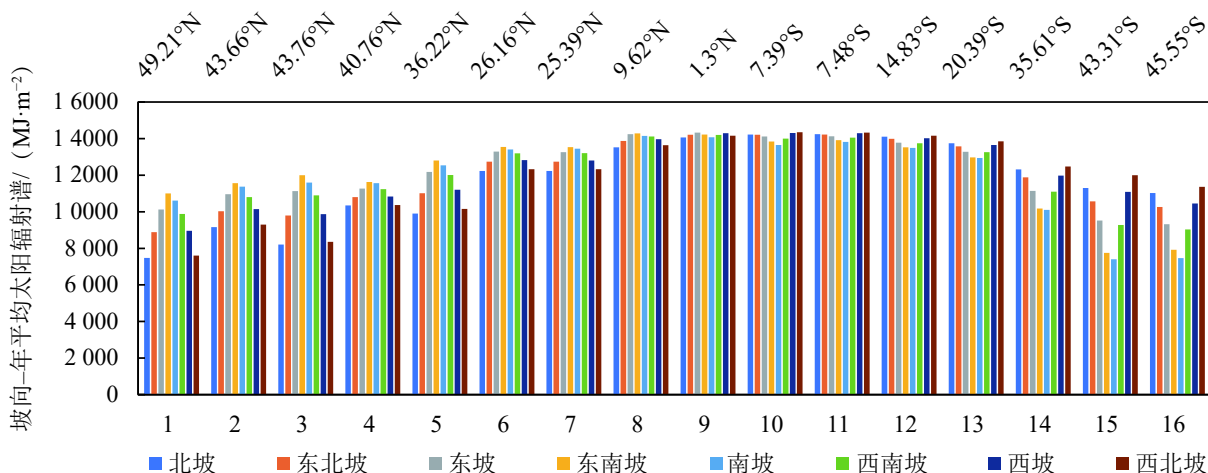


图 12 坡向-年平均太阳辐射谱

Fig. 12 Aspect-mean solar radiation spectrum in a year

1) 16个样区的太阳辐射谱可以反映出南北半球中低纬度区域太阳辐射在各坡向的分布规律。北半球中低纬度区域太阳辐射谱值表现为南坡多、北坡少的特点(如样区1~8),具体为南坡(东南坡)>西南坡(东坡)>西坡(东北坡)>西北坡(北坡),谱形态呈现出“倒V型”;南半球中低纬度区域则表现为北坡多、南坡少的特点(如样区10~16),具体为北坡(西北坡)>东北坡(西坡)>东坡(西南坡)>南坡(东南坡),谱形态呈现出“V型”;最靠近赤道的区域第9样区Mare Spumans,各坡向上的年平均太阳辐射谱值分布均衡,无明显差异。

2) 坡向-太阳辐射谱还具有和坡度-太阳辐射谱相似的纬向分布特征,同样表现为实验样区越靠近赤道,太阳辐射谱越大,中心纬度位于 $26.16^{\circ}\text{N}\sim 20.39^{\circ}\text{S}$ 的样区各坡向太阳辐射谱值均大于 $12\,000\text{ MJ/m}^2$,高于南北纬 30° 的样区各坡向的太阳辐射谱值在 $7\,000\sim 12\,000\text{ MJ/m}^2$ 之间。同时,随着纬度降低,样区太阳辐射谱值各坡向之间的差异也逐渐减小,从图12谱的形态可知高于南北纬 30° 的样区呈现明显的“尖峰”与“下凹”形态,而中心纬度位于 $26.16^{\circ}\text{N}\sim 20.39^{\circ}\text{S}$ 的样区谱形态较缓和。

随着纬度的增大,太阳高度角逐渐减小,周围地

势的遮蔽程度增强,太阳辐射值也逐渐减小;太阳高度角的增大会削弱方向的影响,在太阳高度角非常大的时候,坡向的作用被大大削弱^[31],出现了纬度越低,太阳辐射谱各坡向之间的数值差异越小的现象;太阳直射月面纬度的范围仅在南北纬 $1^{\circ}32'$ 之间变化,那么在太阳直射点以北区域,即对月球北半球各样区,光源从南部照射,无法接受阳光直射,则南坡为阳坡,北坡为阴坡。根据Lambert余弦定理,垂直照向平面的光线比从侧面照向平面的光线更加强烈,倾斜的太阳光表明太阳高度角较小,有效太阳辐射度较小,太阳辐射总量相对太阳直射区域也少,会出现阳坡多、阴坡少的现象。

4.3 稳定面积

谱稳定面积的存在是提取正确谱的必要条件,确定不了能够提取稳定谱的最小面积阈值,就无法应用谱模型完成相关分析^[29]。因此,获得谱的稳定面积是分析区域可照时间和太阳辐射空间分布结构的必要前提。

1) 坡度-太阳辐射谱、可照时间谱稳定面积

各实验样区提取的坡度-年平均可照时间谱稳定面积AD和太阳辐射谱稳定面积AS如图13所示。

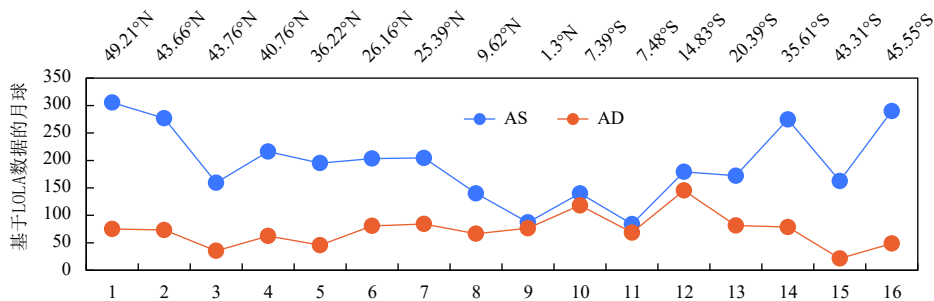


图13 坡度谱-稳定面积

Fig. 13 Values of stable areas of the slope-mean spectrum

(1) 若实验区域地形复杂或坡度差异较大,代表局部地形起伏剧烈,局部地形自相似性较弱,进而导致相应区域可照时间和太阳辐射的空间分布越复杂,需要扩张更大的分析窗口、更大的稳定面积以保证提取稳定的坡度-太阳辐射谱。可以推断稳定面积的大小可能与地形的复杂度相关。本文在所选实验区,用坡度变异系数反映坡度的起伏变异程度,将变异系数定义为样区坡度数据的标准差与平均值之比,以其为自变量,以区域稳定面积AS和AD为因变量,进行函数拟合,结果为中等相关性的对数函数关系为

$$AS = 137.62\ln(x) - 398.28R^2 = 0.583\,3 \quad (15)$$

$$AD = 79.909\ln(x) - 275.4R^2 = 0.536\,7 \quad (16)$$

由拟合关系式可知,样区稳定面积和坡度的变异系数呈正相关关系,可从一定程度上反映稳定面积的大小与地形的复杂度相关。坡度变异系数越大,表明坡度值越离散,地形起伏度越大。复杂的地势变化会引起不同的地形遮蔽效果,造成各样区的可照时间和太阳辐射空间变异越剧烈。为包含更全面的地形特征信息和可照时间、太阳辐射空间分布信息,提取各个坡度分段内的稳定谱,意味着需要逐步扩大分析窗口

以达到稳定面积,即采样区域包含的地形逐渐完整,日照时间谱和太阳辐射谱也趋于稳定。

(2) 坡度-年平均太阳辐射谱的稳定面积均大于坡度-年平均日照时间谱的稳定面积,符合4.1节中年平均太阳辐射谱的数值在纬向分布上较年平均日照时间谱数值更明显的特征。结合样区稳定面积与坡度的变异系数拟合结果,说明在同一地貌区域,太阳辐射相比日照时间受地形起伏的影响更为强烈,对地势的变化更敏感,因而获取的稳定谱所需面积较大,再次反映地形起伏是影响月面太阳辐射和日照时间空间分布的重要因素。

2) 坡向-年平均太阳辐射谱稳定面积

图14为坡向-年平均太阳辐射谱的稳定面积,整体看小于坡度-年平均太阳辐射谱的稳定面积。主要是本文所选的实验样区没有明显的东西或南北地势走向,

各个方向的坡向大致分布均匀,提取稳定谱时比较容易获得各坡向的太阳辐射值,可以正确包含既定区域内应有的微地形特征以及引起的太阳辐射详细分布特征,稳定面积普遍较小,最大值为58.31 km²。样区1、2、3、5、14、15、16的稳定面积相对其他样区较大(图14中红色点),为探究其原因,计算了各样区的栅格在每个坡向内的频率(图15),与其他样区相比,发现这7个样区在各坡向内的占比之间差异大,范围为2%~8%,而其他样区仅在2%以内,说明样区内栅格坡向的分布不均匀,那么在每个样区所划分的M个小区域中获取各坡向稳定太阳辐射谱时,需要扩大更多的栅格以顾及更全面的地形信息,得到较大的稳定面积。可见谱方法能综合反映样区宏观地形特征与太阳辐射空间分布的内在联系。

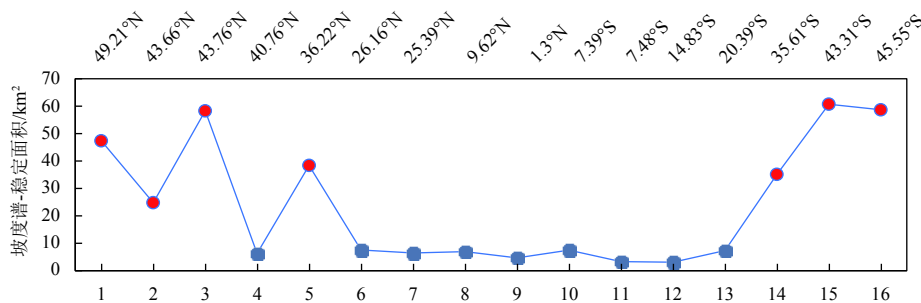


图 14 坡向-年平均太阳辐射谱稳定面积

Fig. 14 Values of stable areas of the aspect-mean solar radiation spectrum in a year

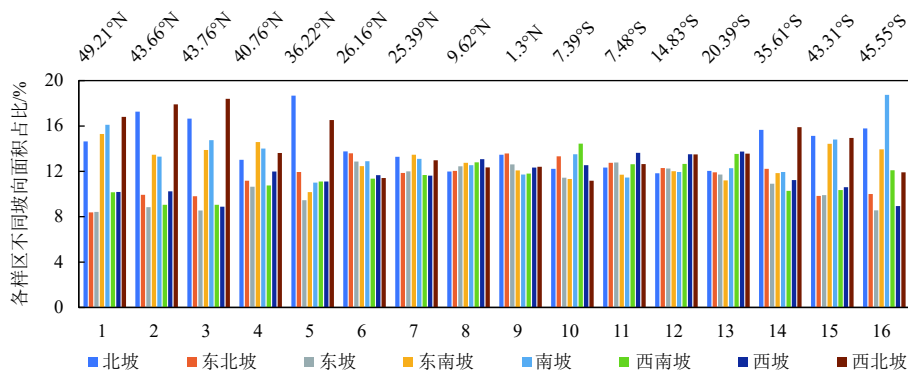


图 15 各样区不同坡向面积占比

Fig. 15 Proportion of area in different slope of the sixteen sample areas

5 结 论

本文以全月20 m DEM为主要数据源,在不同纬度区域选取16个实验样区,充分考虑坡度坡向条件,借鉴分段式积分思想计算了月表起伏地形下各样区2020年的日照时间和太阳辐射,并根据谱模型对日照时间和太阳辐射的空间分布特征进行了分析,得到结

论是地形是影响日照时间和太阳辐射空间分布的重要因素、纬度效应是影响月面日照时间和太阳辐射的另一因素;各样区日照时间谱的稳定面积均小于太阳辐射谱的稳定面积。未来将利用谱方法研究时间尺度上的月面日照时间和太阳辐射空间分布特性,为月球基地建设选址提供太阳辐射条件参考。

参 考 文 献

- [1] 于雯,李雄耀,王世杰.月球探测中月面热环境影响的研究现状[J].地球科学进展,2012,27(12):1337-1343.
YU W, LI X Y, WANG S J. Research status of influence of thermal environment on lunar surface in lunar exploration[J]. *Advances in Earth Science*, 2012, 27(12): 1337-1343.
- [2] 甘红,李雄耀,魏广飞.月表光照区简单陨坑的有效太阳辐照度和温度的数值模拟[J].中国科学:物理学力学天文学,2019,49(6):101-112.
GAN H, LI X Y, WEI G F. Numerical simulation of effective solar irradiance and temperatures at simple crater of lunar dayside[J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica Astronomica*, 2019, 49(6): 101-112.
- [3] JAEGER J C. Conduction of heat in a solid with periodic boundary conditions, with an application to the surface temperature of the moon[J]. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 1953, 49(2): 355-359.
- [4] 李雄耀,王世杰,程安云.月表有效太阳辐照度实时模型[J].地球物理学报,2008,51(1):25-30.
LI X Y, WANG S J, CHENG A Y. A lunar surface effective solar irradiance real-time model[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2008, 51(1): 25-30.
- [5] MENG Z G, XU Y, CAI Z C, et al. Influence of lunar topography on simulated surface temperature[J]. *Advances in Space Research*, 2014, 54(10): 2131-2139.
- [6] 张吉栋,孟治国,平劲松,等.基于LOLA数据的Aristarchus高原光照特性初步研究[J].深空探测学报(中英文),2017,4(2):171-177.
ZHANG J D, MENG Z G, PING J S, et al. Preliminary study of illumination characteristics of Aristarchus plateau using LOLA data[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2017, 4(2): 171-177.
- [7] NODA H, ARAKI H, GOOSSENS S, et al. Illumination conditions at the lunar polar regions by KAGUYA(SELENE) laser altimeter[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(24): 1-5.
- [8] SPEYERER E J, ROBINSON M. S. Persistently illuminated regions at the lunar poles: ideal sites for future exploration[J]. *Icarus*, 2013, 222(1): 122-136.
- [9] 郝卫峰,李斐,鄢建国,等.基于“嫦娥一号”激光测高数据的月球极区光照条件研究[J].地球物理学报,2012,55(1):46-52.
HAO W F, LI F, YAN J G, et al. Lunar polar illumination based on Chang'E-1 laser altimeter[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2012, 55(1): 46-52.
- [10] FISHER E A, LUCEY P G, LEMELIN M, et al. Evidence for surface water ice in the lunar polar regions using reflectance measurements from the lunar orbiter laser altimeter and temperature measurements from the diviner lunar radiometer experiment[J]. *Icarus*, 2017, 292: 74-85.
- [11] BUSSEY D B J, MCGOVERN J A, SPUDIS P D, et al. Illumination conditions of the south pole of the Moon derived using Kaguya topography[J]. *Icarus*, 2010, 208(2): 558-564.
- [12] 张吉栋.基于LOLA数据的月球光照模型及应用研究[D].长春:吉林大学,2017.
ZHANG J D. Research on the illumination model of the Moon using LOLA data and its significance[D]. Changchun: Jilin University, 2017.
- [13] 张吉栋.基于多源数据的实时月表太阳辐射模型及地质应用研究[D].长春:吉林大学,2020.
ZHANG J D. Research on the real-time solar radiation model of the lunar surface and its geological applications based on multisource data[D]. Changchun: Jilin University, 2020.
- [14] LI F Y, TANG G A, WANG C, et al. Slope spectrum variation in a simulated loess watershed[J]. *Frontiers of Earth Science*, 2016, 10(2): 328-339.
- [15] 王春,汤国安,李发源,等.坡谱提取与应用的基本地域条件[J].地理科学,2007,27(4):587-592.
WANG C, TANG G A, LI F Y, et al. Fundamental conditions of slope spectrum abstraction and application[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2007, 27(4): 587-592.
- [16] CHEN N. Deriving the slope-mean shielded astronomical solar radiation spectrum and slope-mean possible sunshine duration spectrum over the loess plateau[J]. *Journal of Mountain Science*, 2020, 17(1): 133-146.
- [17] CHEN N. Spectra method for revealing relations between slope and possible sunshine duration in China[J]. *Earth Science Informatics*, 2020(7): 1-13.
- [18] LIN S W, CHEN N. DEM based study on shielded astronomical solar radiation and possible sunshine duration under terrain influences on mars by using spectral methods[J]. *International Journal of Geo-Information*, 2021, 10(2): 56.
- [19] XIONG L Y, TANG G A, YANG X, et al. Geomorphology-oriented digital terrain analysis: Progress and perspectives[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2021, 31(3): 456-476.
- [20] 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,2005,48(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, 48(5): 1028-1033
- [21] 程维明,刘樯漪,王娇,等.全月球形貌类型分类方法初探[J].地球科学进展,2018,33(9):885-897.
CHENG W M, LIU Q Y, WHANG J, et al. A preliminary study of classification method on lunar topography and landforms[J]. *Advances in Earth Science*, 2018, 33(9): 885-897.
- [22] MEEUS J. Astronomical algorithms[M]. [S. l.]: Willmann-Bell Incorporated, 1991.
- [23] 张刚,汤国安,宋效东,等.黄土高原可照时间空间分布特征研究[J].武汉大学学报(信息科学版),2015,40(6):834-840.
ZHANG G, TANG G A, SONG X D, et al. Spatial distribution of insolation-duration in Loess Plateau[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(6): 834-840.
- [24] TAEHOON H, MINHYUN L, CHOONGWAN K, 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*, 2016, 194: 320-332.
- [25] 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.
- [26] 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 astronomical solar

- radiation distribution over the Yellow river basin based on DEM data[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(6): 810-816.
- [27] 贺丹. 不同分辨率DEM提取地形因子的适宜分析窗口研究[D]. 西安: 西北大学, 2012.
- [28] 朱梅, 李发源. 坡度分级对地面坡谱的影响研究[J]. *测绘科学*, 2009, 34(6): 165-167.
- ZHU M, LI F Y. Influence of slope classification on slope spectrum[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2009, 34(6): 165-167.
- [29] TANG G A, LI F Y, LIU X J, et al. Research on the slope spectrum of the Loess Plateau[J]. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 2008, 51(1): 175-185.
- [30] ZHAO S, CHENG W. Transitional relation exploration for typical loess geomorphologic types based on slope spectrum characteristics[J]. *Earth Surface Dynamics*, 2014, 2(2): 433-441.
- [31] 韩磊. 基于DEM的起伏地形下散射辐射计算方法研究[D]. 南京: 南京气象学院, 2004.

HAN L. Research on the calculation method of diffuse-radiation in rugged topography based on DEM[D]. Nanjing: Nanjing Institute of Meteorology, 2004.

作者简介:

刘奇祺(1995-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 地理信息服务研究。

通讯地址: 福建省福州市闽侯县福州大学国家科技园数字中国研究院(福建) (350100)

电话: 18435390082

E-mail: N195527021@fzu.edu.cn

陈楠(1975-), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向: 数字地形分析。**本文通讯作者。**

通讯地址: 福建省福州市闽侯县福州大学国家科技园数字中国研究院(福建) (350100)

电话: 13489135282

E-mail: chennan@fzu.edu.cn

Research on Spatial Distribution Characteristics of Lunar from Possible Sunshine Duration Spectrum and Solar Radiation Spectrum

LIU Qiqi^{1,2}, CHEN Nan^{1,2}, LIN Siwei^{1,2}

(1. Key Laboratory for Spatial Data Mining and Information Sharing of Education Ministry, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;

2. The Academy of Digital China, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: The paper use the lunar DEM with 20m resolution as the data source, 16 typical lunar areas in different latitudes were selected. Then, we build a parallel computing framework to conduct numerical simulations of PSD and SR on each experimental sample area in 2020. Then, utilizing the slope spectrum model on digital terrain analysis, we use the rectangular window expansion method to define the PSD spectrum and SR spectrum. On this basis, the slope-mean PSD spectrum in a year, slope-mean SR spectrum in a year and aspect-mean SR spectrum in a year were derived. Meanwhile, the stable area values of different spectrums were extracted. The results show that: It can be seen that the spatial distribution of PSD and SR is significantly affected by terrain; On the whole, with the increase of latitude, the solar altitude angle decreases, the terrain shielding effect becomes more obvious, resulting in the decrease of PSD spectrum and SR spectrum; The stable area value of the slope-mean possible sunshine duration spectrum on sample areas is positively correlated with the variation coefficient of slope. The result can be employed as a import support for the construction of the lunar base in the future.

Keywords: digital elevation model; possible sunshine duration; solar radiation; spectrum; Moon

Highlights:

- Based on the finer data resolution and time resolution, via the idea of segmented integration, this paper fully considers the actual rugged terrain of the moon's surface to conduct the numerical simulation of the possible sunshine duration and solar radiation.
- With the spectral method, this paper respectively shows the spatial distribution of possible sunshine duration and solar radiation under the influence of slope, aspect and latitude.
- The spectral method can be used to quantitatively reveal the interaction between the spatial structure of possible sunshine duration or solar radiation and the topographical factors.

[责任编辑: 杨晓燕, 英文审校: 宋利辉]