

谷神星表面地形遮蔽判断研究及其太阳辐射模拟

刘伟^{1,2}, 陈楠^{1,2}

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

摘要: 综合考虑季节差异、地貌类型及研究区规模对太阳辐射模拟造成的影响, 基于136.7 m分辨率的谷神星数字高程模型, 使用光线追踪法对不同搜索半径样区太阳辐射进行模拟和时空分析, 得到在谷神星表面实际地形遮蔽判断所需设置最小阈值搜索半径74 km的结论, 并以此半径模拟谷神星表面一个太阳日内的太阳辐射。研究表明: 不同时节中, 南至日判断谷神星实际地表遮蔽信息所需搜索半径最大; 在空间尺度上, 搜索半径对不同地貌下太阳辐射影响主要与实际地形起伏及地貌形态规模有关, 地表断层下太阳辐射受搜索半径影响持续、火山地貌太阳辐射受搜索半径的影响最为显著; 谷神星全球太阳辐射分布呈现出明显的纬度效应, 表现为由低纬度地区向高纬度地区逐渐减小。研究结果丰富和完善了谷神星表面太阳辐射理论和方法, 可为未来谷神星探测提供数据和理论支撑。

关键词: 太阳辐射; 搜索半径; 时空格局; 数字高程模型; 谷神星

中图分类号: P184

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2023)06-0677-12

DOI: 10.15982/j.issn.2096-9287.2023.20220102

引用格式: 刘伟, 陈楠. 谷神星表面地形遮蔽判断研究及其太阳辐射模拟[J]. 深空探测学报(中英文), 2023, 10(6): 677-688.

Reference format: LIU W, CHEN N. Study of terrain shading judgment on Ceres surface and its solar radiation simulation[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2023, 10(6): 677-688.

引言

谷神星是位于火星和木星轨道之间小行星带内的一颗矮行星。近年,“黎明号”(Dawn)在谷神星(Ceres)“奥卡托”(Occator)陨石坑、“厄努特”(Ernutet)陨石坑检测出碳酸钠沉积物和有机化合物^[1],且证实谷神星水冰含量17~27 wt%^[2],说明谷神星在水、碳酸化合物、土质及阳光照射下,可能出现更复杂的有机化合物,为生命的诞生创造条件。太阳辐射作为谷神星表面最基本、最主要的能量源,在谷神星表面的分布可为小行星生命起源和演化提供太阳辐射信息资源,加之谷神星缺乏实质大气,不具备全球磁场^[3],太阳辐射在其表面的分配变化会从根本上改变谷神星的温度、湿度和大气环流特征的模拟场^[4-6]。因此,对谷神星表面太阳辐射的精确模拟,是未来人类对于谷神星光热资源开发的基础,可为谷神星探测器着陆区选址、谷神星基地建设提供基本的环境数据支撑。

现今众多学者对于谷神星的研究主要集中在“冰冻火山^[7-9]”和“神秘亮点^[10-12]”等物质结构,而对于谷神星表面热环境的时空匹配问题,能否精确模拟谷神星表面的太阳光照则更加重要,但目前缺乏相关研究报

道。当前太阳辐射计算在地球已趋于成熟,翁笃鸣等^[13-16]建立了实际地形下太阳辐射及其分量的计算模型,曾燕等^[17-18]以数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)为数据源,采用分段式积分模型对起伏地形下太阳的辐射进行探究,解决了地形起伏下太阳辐射计算精度的难题;近年来,一些学者将其方法推广至地外行星,如Chen等^[19-20]利用山体阴影法,在充分考虑地形遮蔽的基础上计算了月球表面太阳辐射,并利用“谱”对全月表太阳辐射进行分析;Spagnuolo等^[21]以数字地形模型(Digital Terrain Model, DTM)为数据源,利用太阳位置的视线关系模拟了火星表面太阳辐射。这些均可为谷神星表面太阳辐射的计算模拟提供参考。

谷神星高程范围在-27 947~17 020 m,绝大多数表面特征与陨石撞击和冰火山的活动有关。谷神星缺乏板块构造^[22],但其地表地势起伏剧烈,地貌形态各异,受天文因子(太阳高度角、太阳方位角)及地形因子(坡度、坡向等)的影响使得太阳辐射的空间分布异质性较大。特别是在地形起伏变化较大的区域,由于坡度坡向等地形因子的影响,以及周围地形的遮蔽效应,太阳辐射存在显著的地形分异性,给每个栅

格点实际的遮蔽情况判断带来困难。

光线追踪法^[23]可有效模拟地形遮蔽。该方法通过设置一定的半径(以下简称搜索半径),在该半径下沿着太阳入射光线路径对所有栅格点搜索,从而判断计算点是否受到遮蔽。采用该方法模拟起伏地形下的太阳辐射时,随着地形遮蔽情况的搜索半径发生改变,会导致利用DEM提取地形遮蔽信息时产生较大差异,这种差异将直接影响太阳辐射模拟的准确性^[24]。搜索半径过小将影响地形遮蔽状况判断的准确度,搜索半径过大将降低太阳辐射模拟的计算效率,故合理的最小阈值搜索半径是谷神星表面太阳辐射模拟的关键。

综上所述,本文以136.7 m分辨率的谷神星数字高程模型为数据源,设计基于Flink大数据集群的谷神星太阳光照分布式计算框架,以此获得在谷神星表面太阳辐射模拟的最小阈值搜索半径,并通过此半径计算模拟谷神星全球一个公转周期内的太阳辐射,形成谷神星表面太阳辐射数据产品,进一步对其空间分异进行分析和探讨。该研究可为人类对谷神星气候地理研究提供太阳辐射的信息资源,并为谷神星表面太阳辐射研究提供借鉴。

1 实验样区选取以及数据源

1.1 数据源及研究区

谷神星沿着火星和木星之间的轨道运行,其位置靠近小行星带的中部,形状类似一个扁球体,“黎明号”宇宙飞船测量发现其平均赤道半径为 4.6973×10^2 km,轨道周期为4.6个地球年(1 682个地球日),轨道半长轴2.767 096 2 AU,离心率0.116 497 7,自转周期9 h 4 min^[25]。与其它行星和矮行星相比,谷神星的轨道倾角适中,倾角 $i = 10.6^\circ$,偏心率 $e = 0.08$ ^[26]。谷神星北极轴的位置指向赤经19 h 25 m 40.3 s (291.418°),赤纬 $+66^\circ 45' 50''$,表明谷神星约有 4° 的轴向倾斜^[27]。换言之,谷神星目前没有由纬度引起的光照季节性变化,同时会产生 $0^\circ \sim 4^\circ$ 阶段性的极昼极夜。

本文以“黎明号”探测器在高空测绘轨道(High Altitude Mapping Orbit, HAMO)使用FC2取景相机拍摄基于立体摄影测量方法得到的谷神星全球DEM为基础数据源进行模拟(<https://astrogeology.usgs.gov/search/map/Ceres/Dawn/DLR/FramingCamera>)。该数据覆盖98%的谷神星表面(极点附近的永久阴影区域通过“高程空填充函数”补充),数据分辨率136.7 m,垂直精度约10 m,如图1所示。

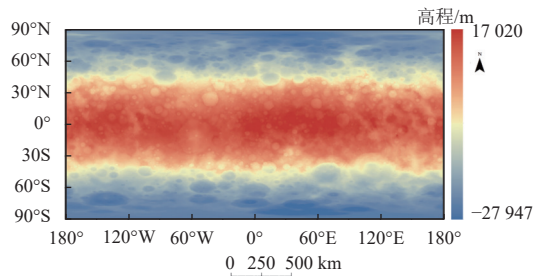


图1 谷神星全球地表高程图
Fig. 1 Global surface elevation map of Ceres

1.2 谷神星地貌及典型样区选取

1.2.1 样区选取

谷神星地表保留着地势形态极为丰富的原始地形地貌,空间分布、规模结构表现出独特的性质规律,如图2所示。陨石坑是谷神星地表最为常见的地貌形态,目前确定直径大于400 m的陨石坑^[28]达到10~15个。在谷神星东半球存在千米级的线性裂缝——“萨温裂缝链”(Samhain Catenae)作为其表面断层^[29],与陨石坑链具有很强的相似性。此外,“黎明号”在谷神星上5 km高的冰冻火山——“阿胡纳·蒙斯”(Ahuna Mons)^[7]与“谷神星谷神区”(Cerealia Facula)^[10]发现了白色的神秘亮斑,该亮斑是谷神星地下卤水渗出地表受太阳照射结晶所致。

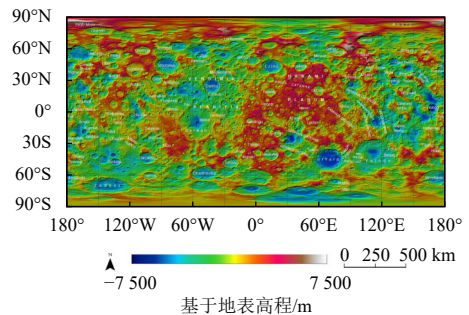


图2 谷神星地貌划分图
Fig. 2 Geomorphological division of Ceres

Buczowski^[30]指出,谷神星表面有3种遍布全球的叶片流,它们形态各异,大多存在于陨石坑,受到不同太阳辐射的影响,致使冰消融,是谷神星表面水存在的可能依据之一,也是研究谷神星表面物质结构以及太阳辐射量大小所需关注的对象,如图3所示。

这些地质构造单元在形态、规模、高程存在差异,探究适宜谷神星表面的最小阈值搜索半径,需综合考虑不同纬度及形态特征地貌带来的地形遮蔽影响。本文综合考虑典型性与实用性,以谷神星代表性地貌(火山、高原、撞击坑、地表断层,如图4所示)和具有特殊形态规模(3种类型的叶片流)及研究价值

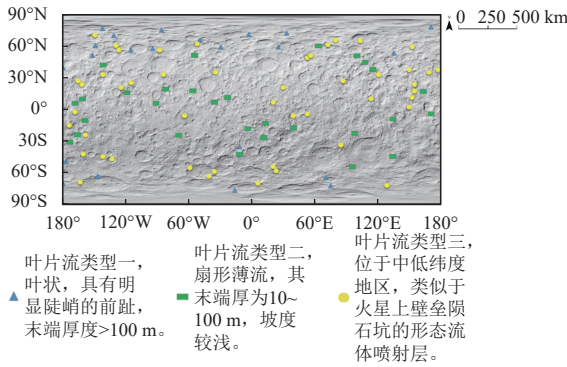


图 3 谷神星叶片流分布图

Fig. 3 Loabte Flows Distribution on Ceres

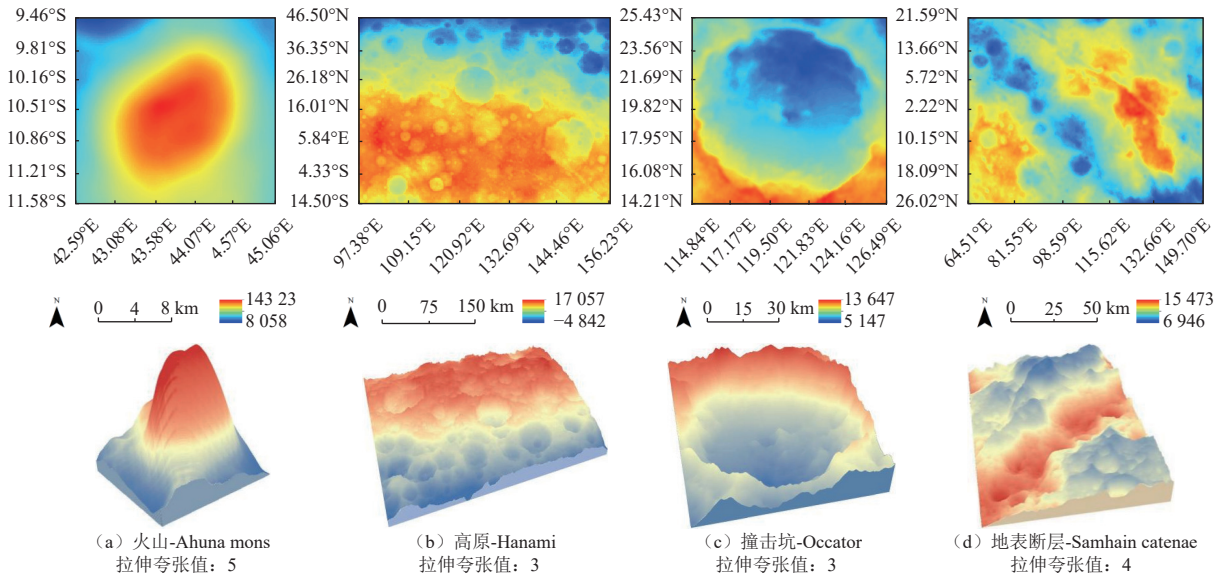


图 4 谷神星典型地貌图

Fig. 4 A typical geomorphic map on the surface of Ceres

表 1 样区基本情况表

Table 1 Table of sample areas' basic information

编号	样区名称	地貌类型	样区面积/km ²	样区纬度区间	样区经度区间
1	Ahuna Mons	火山	9 652.72	9.46°S~11.58°S	42.59°E~45.06°E
2	Hanami	高原	225 217.39	14.50°S~46.50°N	97.38°E~156.23°E
3	Samhain Catenae	地表断层	33 138.06	26.02°S~21.59°N	64.51°E~149.70°E
4	Occator	撞击坑	9 190.77	14.21°N~25.43°N	114.84°E~126.49°E
5	Urvara	撞击坑	43 444.72	35.36°S~55.96°S	96.04°E~125.45°E
6	Loabte Flows 1	叶片流1	8 182.65	34.23°S~37.49°S	9.54°W~13.81°W
7	Loabte Flows 2	叶片流2	11 450.1	10.57°N~15.36°N	110.74°W~121.53°W
8	Loabte Flows 3	叶片流3	5 112.04	35.56°S~32.47°N	91.26°E~95.48°E
9	—	验证样区	500 000	32.36°S~40.51°N	75.47°W~24.47E

半径, 以升分日、北至日、降分日、南至日为不同时节(简称四时), 对该搜索半径下不同实验样区模拟出的太阳辐射进行影响程度和影响持续性分析, 具体技术路线如图5所示。

首先, 本文通过样区 DEM数据结合“日-谷”空间位置信息计算模型所需实验参数(坡度、坡向、日下

的区域(包含“神秘亮点”的陨石坑Occator)为研究样区进行分析, 同时增加面积为50万km²且混合各地貌类型的样区来验证最小阈值搜索半径的准确性。各样区经纬度及面积均不相同, 对于测试最小阈值搜索半径更具有通用性, 样区具体情况如表1所示。

2 研究方法

2.1 技术路线

为探究适合谷神星表面的最小阈值搜索半径, 本文分别以1, 5, …, 100 km(间隔递增值为5 km)为搜索

点纬度、太阳常数、太阳高度角、太阳方位角等), 通过自行设置不同搜索半径, 模拟该搜索半径下对应的太阳辐射。

其次, 综合考虑影响程度和影响持续性, 对不同搜索半径下的样区太阳辐射进行时空分析, 获取影响程度和持续性最高的时节, 以此时节为基准, 以相邻

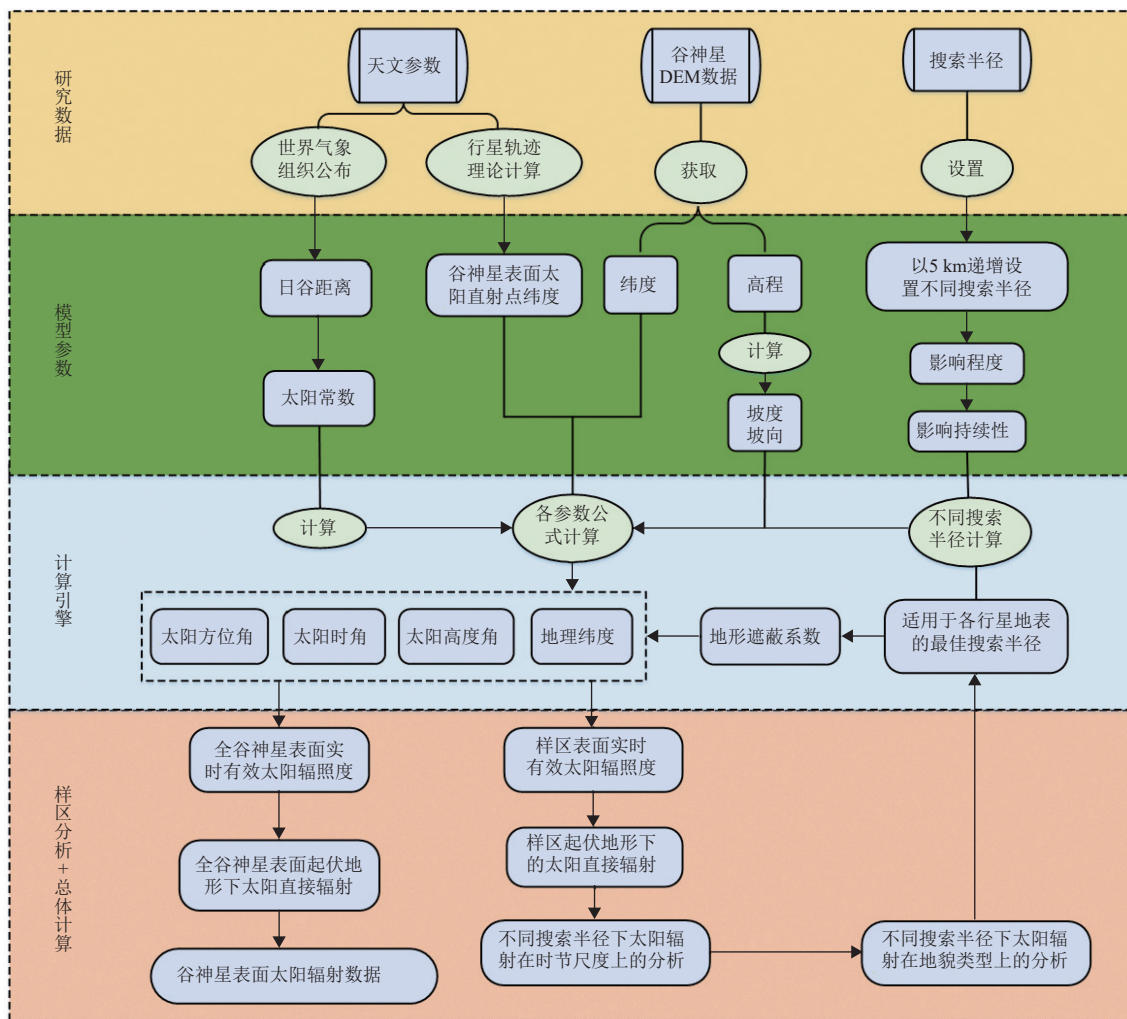


图5 技术路线图

Fig. 5 Technology roadmap

平均值的差值、相邻标准差的差值为指标，对模拟谷神星表面太阳辐射时的最小阈值搜索半径进行探究，以此确定合适的地形遮蔽系数。

本文以谷神星全球DEM作为模拟对象，结合最小阈值搜索半径计算实际起伏地形下一个太阳日内的太阳辐射，制作其表面太阳辐射数据产品。

2.2 谷神星轨道数据

精确的“日-谷”空间位置信息数据和太阳直射点纬度数据是影响谷神星表面太阳光照强弱的关键，本文采用美国国家航空航天局（National Aeronautics and Space Administration, NASA）喷气推进实验室（Jet Propulsion Laboratory, JPL）最新版本Horizons在线系统所提供的谷神星星历数据及太阳直射点纬度数据，数据时间周期为谷神星最近的一个公转周期，从2018年5月1日—2022年12月8日，共计1 682 d（数据网址为<https://ssd.jpl.nasa.gov/horizons/app.html>）。该数据

以DE441历表为基础，在DE431的基础上增加了7 a的新数据，而且新添了更多的观测拟合数据，精度较高并综合考虑谷神星公转周期中的进动和章动影响^[31]。该数据为本文研究谷神星绕日轨道运行时的参数提供了有效数据支撑，增强了数据合理性。

2.3 太阳辐射计算方法

本文以DEM为基础数据，采用分段式积分模型模拟谷神星表面太阳辐射。该方法具备数据密集且组织规律性强的特点，适合使用数据并行算法。对于实际高低起伏的地表，将栅格像元每天的太阳辐射抽象为 n 个微分时段内太阳辐射的总和，通过离散化分别计算每一微分时段内的地形遮蔽系数，进而判断每一个微分时段该像元是否可照，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太阳辐射^[32]。

1) 提取地形特征信息，基于实验区域DEM数据，获取每个栅格单元纬度和高程信息，使用最常见

的 3×3 矩形窗口数值微分方法^[33-34]计算坡度和坡向。

2) 当太阳在地平线之下, 此时的太阳高度角为零。根据坡元位置所在的地理纬度和太阳直射点纬度计算谷神星日的日出时角 ω_r (上午时角为负) 和日末时角 ω_s (下午时角为正), 其变化曲线如图6所示。

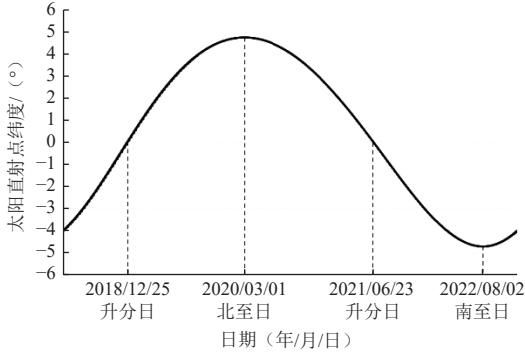


图6 太阳直射点纬度趋势变化曲线图

Fig. 6 Curve of trend change in Sun sub-latitude

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

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

其中: φ 为地理纬度; δ 为太阳直射点纬度。

3) 将日出到日末的时角 $[-\omega_r, \omega_s]$ 按照步长 $\Delta\omega$ 等分为 n 个时段, 即 $[-\omega_r, -\omega_r + \Delta\omega, -\omega_r + 2\Delta\omega, \dots, -\omega_r + i \times \Delta\omega, \dots, -\omega_r + (n-1) \times \Delta\omega, \omega_s]$ 。本文计算地球的标准, 指定计算时间步长为 $\Delta t = 20 \text{ min}$ ^[35], 根据式(3) 可得时角步长 $\Delta\omega$, 此时每个谷神星日的昼长被划分为更精细的计算时段

$$\Delta\omega = \frac{2\pi}{T} \times \Delta t \quad (3)$$

$$n = \text{int}\left(\frac{\omega_s - \omega_r}{\Delta\omega}\right) \quad (4)$$

其中, T 为一个谷神星日的时长 (约544.45 min)。

4) 计算各时角时刻相应的太阳高度角 h_i 和太阳方位角 A_i

$$\omega_i = -\omega_0 + i \times \Delta\omega, \omega_n = \omega_s \quad (5)$$

$$H_i = \arcsin(\sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos \omega_i) \quad (6)$$

$$A_i = \arccos[(\sin h_i \sin \varphi - \sin \delta) / \cos h_i \cos \varphi] \quad (7)$$

其中, $i = 1, 2, \dots, n$ 。

5) 判断每个时角 ω_i 到 ω_{i+1} 时段内, 地形的遮挡利用光线追踪法计算实际地形下太阳对其产生的遮蔽影响, 根据坡元坐标和光源位置确定微分时段上的入射光线方程, 以坡元为起点沿入射光线进行追踪, 判断光线方向上所有多面体 (图7) 是否能对光线形成遮蔽。

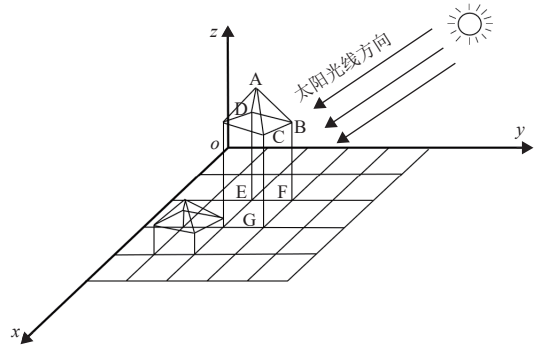


图7 地形遮蔽效果图

Fig. 7 Rendering of terrain shading

确定各时刻对应的太阳方位角 A_i 遮蔽状况为 S_i , 以P点为起点, 沿 A_i 方位做直线 L_i , 根据太阳高度角 h_i 和直线 L_i 方向各点的高程即可确定该时刻周围地形对P点的遮蔽状况 S_i , 当直线 L_i 方向各点的高程均对P点不造成遮蔽时, 记 $S_i = 1$, 表示P点可照; 反之, 只要存在一点高程使得P点不可照, 记 $S_i = 0$, 表示P点受到地形遮蔽。在计算机模型中, 自P点开始沿直线 L_i 按照距离步长 ΔL 依次判断相应格网点对P点的遮蔽状况。

取DEM格网长和宽的最小值作为距离步长 ΔL , 即

$$\Delta L = \min(\text{size}_x, \text{size}_y) \quad (8)$$

其中: size_x 表示DEM在 x 方向的分辨率; size_y 表示DEM在 y 方向的分辨率。

在直线 L_i 方向上随距离按步长 ΔL 的增加, 使P点不受遮蔽应满足的最大高程增量 ΔH 为

$$\Delta H = \tan h_i \quad (9)$$

在实际计算过程中, 直线 L_i 长度即为本文要确定的搜索半径, 若

$$Z(xp + j \times \Delta Lx, yp + j \times \Delta Ly) > Z(xp, yp) + j \times \Delta H \quad (10)$$

其中: $j = 1, 2, \dots, N$, 此时, 则 $S_i = 0$, 即在 A_i 方位周围地形对P点有遮蔽; 否则, $S_i = 1$, P点可照。其中 $Z(x, y)$ 为 (x, y) 处的高程; ΔLx 、 ΔLy 为 x 和 y 方向的坐标增加步长, $\Delta Lx = \Delta L \times \sin A_i$, $\Delta Ly = \Delta L \times \cos A_i$ 如图8所示; N 为计算次数, 由搜索半径 R 和分辨率决定。

使用双线性插值法计算 $Z(xp + j \times \Delta Lx, yp + j \times \Delta Ly)$, 保证 $xp + j \times \Delta Lx$ 和 $yp + j \times \Delta Ly$ 为整数。

通过上述计算得到每一个微分时刻的遮蔽状况数组 $[S_1, S_2, \dots, S_n]$, 将数组相邻两个元素按照式(11) 进行判断, 得到 $\omega_i \sim \omega_{i+1}$ 时段内的遮蔽系数 g_i , g_i 的取值根据以下法则

图9 (a) 搜索半径为1 km时, 撞击坑北部、外围及坑唇等向阳且地形起伏剧烈的区域, 呈现出高亮红色。图9 (b) 搜索半径增加到5 km时, 这些高亮红色区域明显收缩。图9 (c) 搜索半径增加到10 km时, 大部分红色高亮区域被橙色和黄色所替代。撞击坑外围区域地势较为平坦, 随着搜索半径的增加, 高亮红色区域无明显变化。说明随着搜索半径的增加, 对地形遮蔽的情况可做出更准确的判断。为准确描述搜索半径改变对于谷神星表面太阳辐射模拟的影响, 本文从两方面分析: ①影响程度, 当搜索半径小于阈值搜索半径时, 样区内太阳辐射减少的速率定义为搜索半径对于太阳辐射模拟的影响程度, 即平均值或标准差与搜索半径的斜率, 斜率越大, 则搜索半径对该样区太阳辐射的影响程度越大; ②影响持续性, 当搜索半径小于最佳搜索半径时, 样区内太阳辐射的平均值或标准差随着搜索半径的变化而改变; 反之, 当太阳辐射的平均值或标准差不随搜索半径的变化而改变, 即相邻平均值或标准差的差值为零时, 则该搜索半径为该地形保证模拟精度时所需的最小阈值搜索半径。不同地貌的阈值搜索半径越大, 则影响持续性越强。

本文绘制了不同时节下Occator样区太阳辐射的相邻平均值差值随搜索半径的变化趋势图, 如图10所示。搜索半径进行横向对比时, 4个日期均呈现为先递增后趋于水平的趋势。在太阳辐射值的分布情况中,

北至日在搜索半径达到40 km时最早趋于水平, 在搜索半径达到50 km时, 升分日和降分日几乎同时趋于水平; 而在搜索半径达到70 km时, 南至日才完全趋于水平。故在时间尺度上, 搜索半径对该样区内太阳辐射的影响持续性表现为: 南至日 > 降分日 > 升分日 > 北至日。

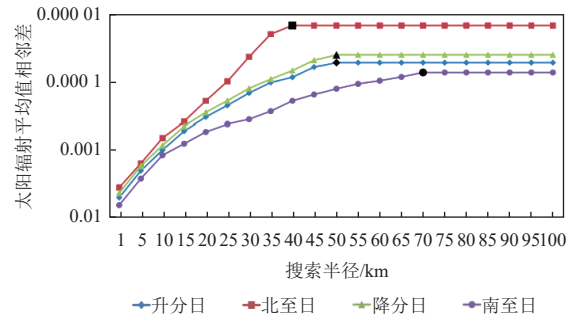


图 10 不同时节下Occator样区的太阳辐射相邻平均值变化趋势图
Fig. 10 Variation trend of the mean difference between adjacent solar radiation at different seasons in occator sample area

由图10可知, 在时间尺度不同时节搜索半径趋于稳定的数值不尽相同, 南至日下搜索半径对于太阳辐射的影响持续性最高, 进而南至日下的阈值搜索半径适用于其它时节, 图11中其它样区均体现出相同规律, 故本文以南至日作为时节标准探究不同样区搜索半径对于太阳辐射的影响。基于此本文可得出南至日下各样区的阈值搜索半径区间, 如表2所示。

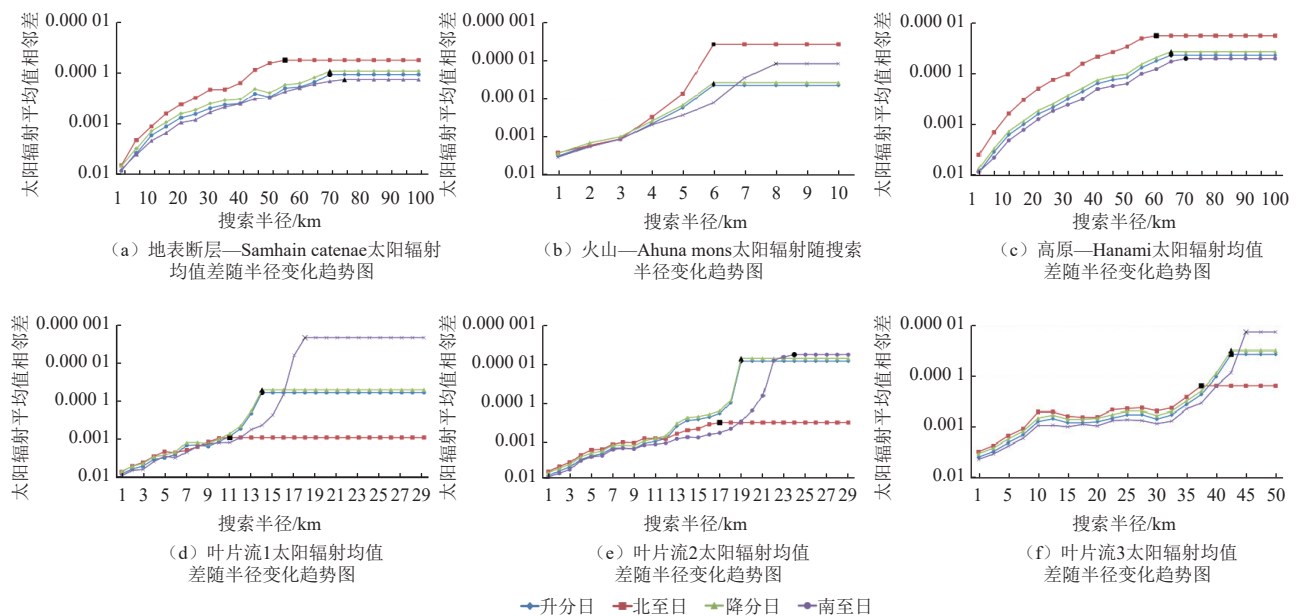


图 11 各样区四时对应的太阳辐射随搜索半径不同相邻平均插值变化趋势图

Fig. 11 The variation trend graph of the solar radiation corresponding to four seasonal points in various regions with different adjacent mean interpolation of search radius

表2 南至日太阳辐射综合结果表

Table 2 Table of the North Temperate Zone Results

序号	样区名称	地貌类型	时节	误差区间/($\text{JM}\cdot\text{m}^{-2}$)	最小搜索半径区间/km
1	Samhain Catenae	地表断层	南至日	0.016~0.095	65~75
2	Ahuna Mons	火山	南至日	0.018~0.037	5~8
3	Hanami	高原	南至日	0.018~0.061	55~75
4	Occator	撞击坑	南至日	0.022~0.062	65~70
5	Loabte Flows 1	叶片流1	南至日	0.013~0.035	17~20
6	Loabte Flows 2	叶片流2	南至日	0.016~0.041	16~24
7	Loabte Flows 3	叶片流3	南至日	0.021~0.049	35~45

3.1.2 不同地貌类型下南至日搜索半径分析

谷神星地形状况复杂粗糙, 各地质构造单元对模拟其表面太阳辐射搜索半径的要求不同。本文以南至日下叶片流3和地表断层Samhain Catenae为例, 探究不

同地貌类型搜索半径对于太阳辐射的影响。

如图12(a)~(d)所示, 叶片流3在搜索半径为1~20 km时变化剧烈, 红色高亮区域占比从48%减少到22%, 黄色高亮区域占比从21%增加到43%。当搜索半径为20~40 km时, 太阳辐射受搜索半径的影响逐渐减轻, 红色高亮区域占比从22%减少到17%, 黄色高亮区域占比从43%增加到52%。当搜索半径为40~45 km时, 颜色占比没有发生改变。说明搜索半径到40 km之后, 所获得的实际地形遮蔽信息是准确的, 即40 km为叶片流3的最小阈值搜索半径。图12(e)~(h)地表断层也表现出相同规律, 随搜索半径的增加, 断层周围的红色高亮区域逐渐趋向“断层线”, 使得地貌间类型辨别更加清晰。当其颜色占比不发生改变时, 对应的搜索半径为74 km, 即达到了地表断层的最小阈值搜索半径。说明不同地貌类型下太阳辐射值受搜索半径的影响存在一定的差异。

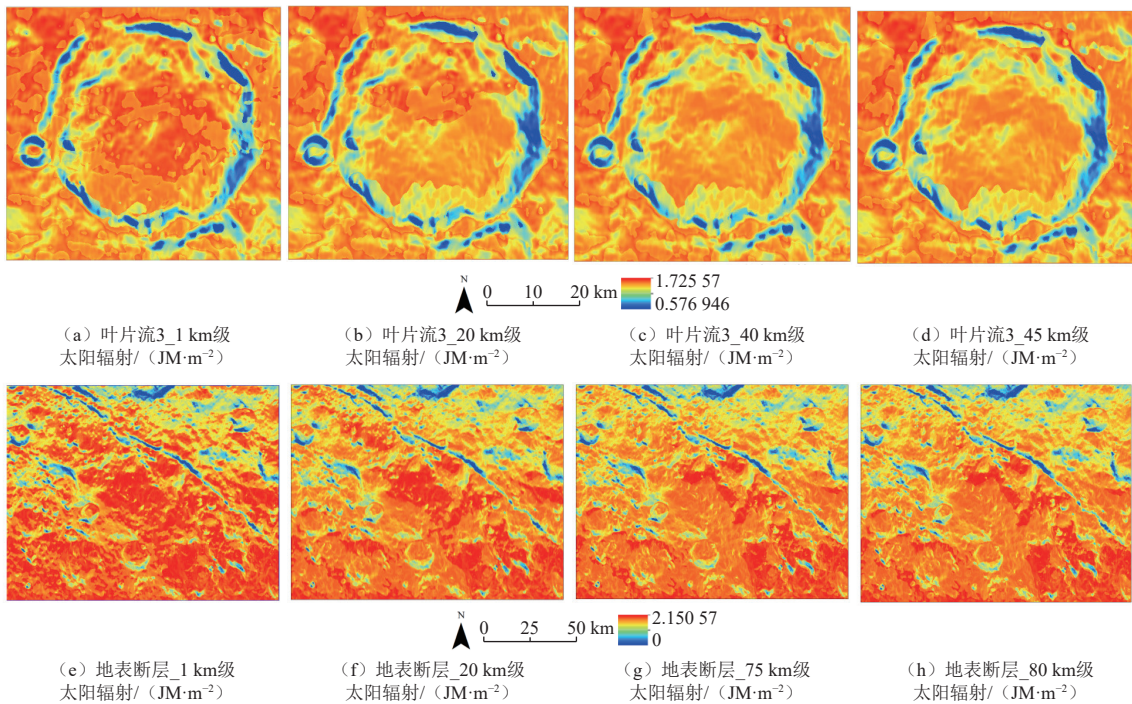


图12 不同搜索半径下叶片流3与地表断层的太阳辐射量图

Fig. 12 Solar radiation map of lobate flow 3 and surface fault under different search radius

为探究不同地貌类型搜索半径对于太阳辐射的影响, 本文绘制了不同地貌太阳辐射的相邻标准差差值和相邻平均值差值随搜索半径的变化曲线分布图, 并引入验证样区来检验纯地貌类型的阈值搜索半径, 结果如图13所示。

根据图13各样区太阳辐射相邻标准差差值和相邻

平均值差值与搜索半径的曲线图, 可知搜索半径对太阳辐射的影响程度大小: 火山 > 叶片流3 > 叶片流2 > 验证样区 > 叶片流3 > 撞击坑 > 高原 > 地表断层。火山地貌层峦叠嶂, 相对于其它地貌, 地势跌宕起伏, 地形遮蔽受太阳高度角的影响也最为剧烈, 故火山地貌下太阳辐射相邻标准差差值和相邻平均值差值曲线

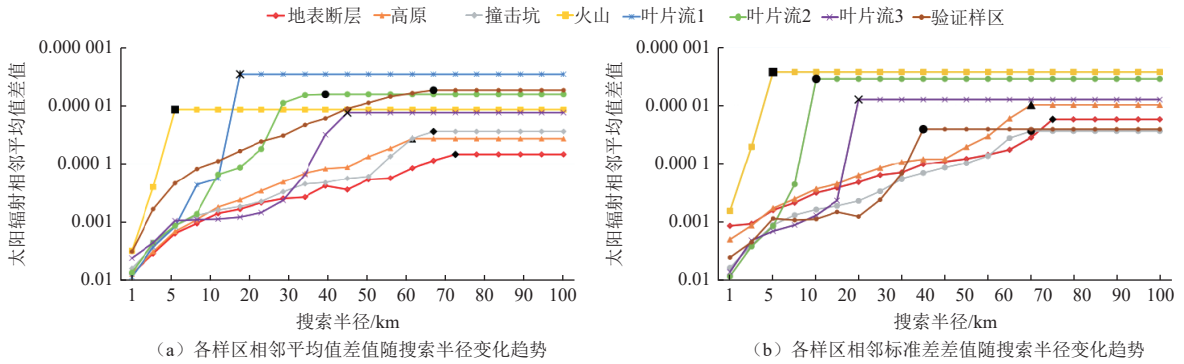


图 13 不同地貌下太阳辐射相邻平均差值和相邻标准差的曲线分布图

Fig. 13 Curve distribution of mean difference and standard deviation of adjacent solar radiation in different landform

的斜率都最大。而地表断层周围平面的地表地势起伏相对平缓, 地形遮蔽受搜索半径的影响最轻, 其影响程度最小。验证样区包含多种地貌形态, 平滑了搜索半径对太阳辐射的影响。其余地貌下太阳辐射受搜索半径的影响程度也与其样区内的地表起伏情况和太阳高度角有关。

根据图13将几种地貌类型随着搜索半径的变化横向对比可知, 搜索半径对太阳辐射持续性的影响大小: 地表断层 > 验证样区 > 高原 > 撞击坑 > 叶片流3 > 叶片流2 > 叶片流1 > 火山。搜索半径对于地表断层太阳辐射的影响程度不大, 但其影响持续, 由于断层内部属于狭窄的“凹”区, 随着搜索半径与太阳高度角的增加, “断层线”持续明显, 峡谷内部的信息也愈加充足, 但“断层”与“断裂带上地层”区域具有较大的落差, 故搜索半径对其影响持续性较大, 准确判断实际地形遮蔽所需要的搜索半径阈值也最大。

为进一步精确搜索半径, 对表2中适宜搜索半径区间以1 km为单位重新划分, 并按照上述步骤对太阳辐射重新分析, 确定在各地貌类型下保证模拟精度所需设置的最小阈值搜索半径如表3所示。

表 3 谷神星表面各地貌类型下阈值搜索半径分析结果表
 Table 3 Table of Analysis Results of threshold search radius for Each Geomorphic Type on Ceres Surface

编号	样区名称	地貌类型	时节	误差区间/ (JM·m ⁻²)	阈值搜索半径/km
1	Hanami	高原	南至日	0.039	68
2	Occator	撞击坑	南至日	0.056	71
3	Ahuna Mons	火山	南至日	0.028	8
4	Samhain Catenae	地表断层	南至日	0.025	74
5	Loabte Flows 1	叶片流1	南至日	0.016	19
6	Loabte Flows 2	叶片流2	南至日	0.034	24
7	Loabte Flows 3	叶片流3	南至日	0.026	44
8	—	验证样区	南至日	0.037	69

由表3可得, 各样区中地表断层的阈值搜索半径最大, 由于为搜索半径为向下兼容, 该阈值搜索半径可以满足其它地貌类型对搜索半径的要求。在谷神星表面使用光线追踪法对其太阳辐射进行模拟时, 最小需要设置74 km作为阈值搜索半径才能满足实际地形遮蔽判断的准确性。因此, 下文综合考虑模拟精度及计算效率, 以74 km作为最小阈值搜索半径, 对谷神星全球太阳辐射模拟。

3.2 谷神星表面太阳辐射数据模拟

3.2.1 不同日期下谷神星表面太阳辐射模拟

不同时节谷神星表面太阳辐射在不同区域的空间分布呈现出一定差异性, 并且谷神星运动的天文轨迹在宏观层面上也控制着谷神星表面接收太阳辐射量的不同。本文按照最小阈值搜索半径74 km分别在升分日、北至日、降分日、南至日(简称四时)计算了谷神星当日的太阳辐射, 如图14所示。

随着谷神星与太阳“相对轨迹”不同, 四时太阳辐射的空间分布格局之间存在差异。根据图14所得数据, 四时太阳辐射的最大值顺序为: 南至日 > 升分日 > 降分日 > 北至日。南至日时, 太阳直射点纬度位于谷神星南回归线(南纬4.073 99°)上, 此时谷神星接近近日点, 距离太阳为2.577 AU, 距离因素使得谷神星地表接收的太阳有效辐照度最大; 北至日时太阳直射点纬度北回归线(北纬4.707 399°)上, 此时谷神星接近远日点距离太阳2.945 AU, 太阳高度角增大, 导致太阳辐射最小。

3.2.2 谷神星表面全年太阳辐射模拟

本文模拟了谷神星一个太阳日(时间范围从2018年5月1日—2022年12月8日共计1 682 d)的全球表面太阳辐射如图15所示, 其分布呈现出由赤道区域向两级区域逐渐递减的趋势, 体现出明显的纬度效应, 太阳辐射的高值集中分布在谷神星表面南北纬30°区域之间。

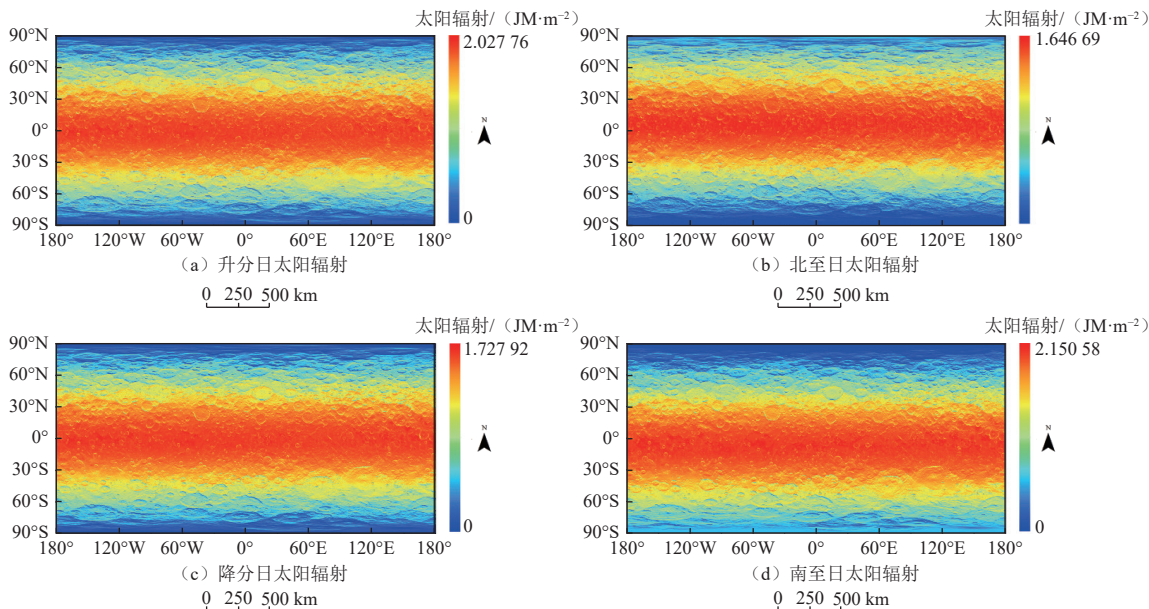


图 14 谷神星表面四时太阳辐射模拟分布图

Fig. 14 Simulated solar radiation distribution at four seasonal points on the surface of Ceres

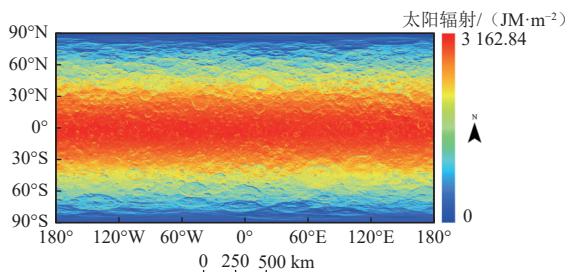


图 15 谷神星表面全年太阳辐射模拟分布图

Fig. 15 Simulated distribution of year-round solar radiation on the surface of Ceres

4 结 论

本文基于136.7 m分辨率的谷神星DEM数据, 设定若干搜索半径, 探究在谷神星表面使用光线追踪法模拟太阳辐射所需设置的最小阈值搜索半径, 并通过此半径模拟一个太阳日内谷神星表面太阳辐射。主要结论如下。

1) 对谷神星使用光线追踪法进行太阳辐射模拟时, 设置74 km为最小阈值搜索半径可确保实际地形遮蔽判断的准确性, 该阈值搜索半径研究方法可为其它小行星相关研究提供参考。

2) 搜索半径的改变所引起的谷神星地表太阳辐射的变化呈现的规律较为明显, 当搜索半径小于最小阈值搜索半径时, 搜索半径与太阳辐射的平均值和离散程度成正相关, 当搜索半径达到最小阈值半径后, 则搜索半径的改变对谷神星表面太阳辐射不再产生影响。

3) 在时间尺度, “日-谷”之间的相对位置是影响

谷神星表面接收太阳辐射的重要因素, 谷神星距离太阳越近, 其表面所接收到的太阳辐射量就越高; 受太阳高度角影响, 搜索半径对太阳辐射的影响程度和影响持续性呈现时节分布的不对称性, 北至日谷神星表面太阳辐射受搜索半径的影响最剧烈, 南至日谷神星表面太阳辐射受搜索半径影响则最持续。

4) 在空间尺度, 搜索半径对谷神星表面太阳辐射的影响效果取决其它地貌类型和形态规模, 受搜索半径的影响效果不能完全按照地貌进行划分, 影响主要与地表起伏情况和地貌形态有关, 但总体表现为地表断层的太阳辐射受搜索半径影响最为持续, 火山地貌的太阳辐射受搜索半径影响最为显著。

5) 谷神星地表太阳辐射分布呈现出明显的纬向特征, 从低纬度地区到高纬度地区太阳辐射逐渐减小。总体上来看, 谷神星距离赤道越近且地势越平坦, 所接受到的太阳辐射值越高。

立足于分布式计算模型, 本文探究了对谷神星太阳辐射的最佳搜索半径并对谷神星太阳辐射时空分布进行了分析, 相应成果拓宽了对谷神星热环境的认识, 未来进一步的研究工作可展望于对谷神星表面温度的模拟研究。

参 考 文 献

[1] COMBE J P, SINGH S, JOHNSON K E, et al. The surface composition of Ceres' ezinu quadrangle analyzed by the dawn mission[J]. *Icarus*, 2019, 318: 124-146.

[2] MCCORD T B, COMBE J P, CASTILLO-ROGEZ J C, et al. Ceres, a

- wet planet: the view after Dawn[J]. *Geochemistry*, 2022, 82(2): 125745.
- [3] NORDHEIM T A, CASTILLO-ROGEZ J C, VILLARREAL M N, et al. The radiation environment of Ceres and implications for surface sampling[J]. *Astrobiology*, 2022, 22(5): 509-519.
- [4] AHEARN M F, FELDMAN P D. Water vaporization on Ceres[J]. *Icarus*, 1992, 98(1): 54-60.
- [5] BARKER H W, LI Z Q. Improved simulation of clear-sky shortwave radiative-transfer in the Ccc-Gcm[J]. *Journal of Climate*, 1995, 8(9): 2213-2223.
- [6] WARD D M. Comparison of the surface solar-radiation budget derived from satellite data with that simulated by the Near Ccm2[J]. *Journal of Climate*, 1995, 8(11): 2824-2842.
- [7] SORI M M, Sizemore H G, Byrne S, et al. Cryovolcanic rates on Ceres revealed by topography[J]. *Nature Astronomy*, 2018, 2(12): 946-950.
- [8] CASTILLO-ROGEZ J C, NEYEU M, SCULLY J E C, et al. Ceres: astrobiological target and possible ocean world[J]. *Astrobiology*, 2020, 20(2): 269-291.
- [9] WILLIAMS D A, KNEISSL T, NEESEMANN A, et al. The geology of the Kerwan quadrangle of dwarf planet Ceres: investigating Ceres' oldest, largest impact basin[J]. *Icarus*, 2018, 316: 99-113.
- [10] SCHENK P, SIZEMORE H, SCHMIDT B, et al. The central pit and dome at Cerealia facula bright deposit and floor deposits in Occator crater, Ceres: morphology, comparisons and formation[J]. *Icarus*, 2019, 320: 159-187.
- [11] VU T H, HODYSS R, JOHNSON P V, et al. Preferential formation of sodium salts from frozen sodium-ammonium-chloride-carbonate brines - implications for Ceres' bright spots[J]. *Planet Space Science*, 2017, 141: 73-77.
- [12] QUICK L C, BUCZKOWSKI D L, RUESCH O, et al. A possible brine reservoir beneath Occator crater: thermal and compositional evolution and formation of the Cerealia dome and Vinalia faculae[J]. *Icarus*, 2019, 320: 119-135.
- [13] 翁笃鸣. 中国太阳直接辐射的气候计算及其分布特征[J]. *太阳能学报*, 1986 (2): 121-130.
- WENG D M. Climate calculation and distribution characteristics of direct solar radiation in China[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 1986 (2): 121-130.
- [14] 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): 47-82.
- FU B P. On Total solar radiation over sloping land[J]. *Journal of Nanjing University (Natural Science)*, 1958, (2): 47-82.
- [15] 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. Effects of sloping land on sunlight and solar radiation[J]. *Journal of Nanjing University (Natural Science)*, 1958 (2): 23-46.
- [16] 左大康, 王懿贤, 陈建瓴. 中国地区太阳总辐射的空间分布特征[J]. *气象学报*, 1963 (1): 78-96.
- ZUO D K, WANG Y X, CHEN J S. Spatial distribution of total solar radiation over China[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1963 (1): 78-96.
- [17] 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): 1028-1033.
- ZENG Y, QIU X F, LIU S M. A distributed estimation model for astronomical radiation in undulating terrain[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2005 (5): 1028-1033.
- [18] 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 (6): 810-816.
- ZENG Y, QIU X F, LIU C M, et al. Spatial distribution of astronomical radiation in the yellow river basin based on DEM[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2003 (6): 810-816.
- [19] 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.
- [20] 刘奇祺, 陈楠, 林德蔚. 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.
- LIU Q Q, CHEN N, LIN S W. Study on spatial distribution characteristics of time spectrum and solar radiation spectrum of lunar surface[J]. *Journal of Deep Space Exploration (Chinese & English)*, 2021, 8(6): 614-624.
- [21] SPAGNUOLO M G, CARBALLO F D, FIGUERA R M, et al. MarsLux: HI-resolution illumination maps generator for Mars[J]. *Earth Space Science*, 2019, 6(1): 146-155.
- [22] STERN R J, GERYA T, TACKLEY P J. Stagnant lid tectonics: perspectives from silicate planets, dwarf planets, large moons, and large asteroids[J]. *Geoscience Frontiers*, 2018, 9(1): 103-119.
- [23] 曾燕, 邱新法, 缪启龙, 等. 起伏地形下我国可照时间的空间分布[J]. *自然科学进展*, 2003(5): 99-102+116.
- ZENG Y, QIU X F, MIAO Q L, et al. Spatial distribution of observable time under undulating terrain[J]. *Progress in Natural Science*, 2003(5): 99-102+116.
- [24] 郭连鹤, 陈楠. 模拟火星地表可照时间的搜索半径研究[J]. *测绘科学*, 2021, 46(9): 157-167.
- GUO L H, CHEN N. Research on search radius of simulated martian surface illuminable time[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2021, 46(9): 157-167.
- [25] RAMBAUX N, CASTILLO-ROGEZ J, DEHANT V, et al. Constraining Ceres' interior from its rotational motion[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2011, 535: A43.
- [26] RUSSELL C T, RAYMOND C A. The Dawn mission to minor planets 4 Vesta and 1 Ceres foreword[J]. *Space Science Reviews*, 2011, 163(1-4): 1-2.
- [27] SCHORGHOFER N, MAZARICO E, PLATZ T, et al. The permanently shadowed regions of dwarf planet Ceres[J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43(13): 6783-6789.
- [28] MARCHI S, ERMAKOV A I, RAYMOND C A, et al. The missing large impact craters on Ceres[J]. *Nature Communications*, 2016, 7(1): 12257.
- [29] KROHN K, VON DER GATHEN I, BUCZKOWSKI D L, et al. Fracture geometry and statistics of Ceres' floor fractures[J]. *Planetary and Space Science*, 2020, 187: 104955.
- [30] BUCZKOWSKI D L, SCHMIDT B E, WILLIAMS D A, et al. The geomorphology of Ceres[J]. *Science*, 2016, 353(6303): aaf4332.
- PARK R S, FOLKNER W M, WILLIAMS J G, et al. The JPL planetary and lunar ephemerides DE440 and DE441[J]. *The Astronomical Journal*, 2021, 161(3): 105.
- [32] 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. Study on temporal and spatial distribution characteristics of the loess plateau[J]. *Geomatics*

- and Information Science of Wuhan University, 2015, 40(6): 834-840.
- [33] 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.
- HE D. Study on the suitable window of extraction of topographic factors from different resolution DEM[D]. Xi'an: Northwestern University, 2012.
- [34] 陈楠, 王钦敏, 汤国安. 黄土高原丘坡信息DEM提取算法的应用[J]. 地球信息科学, 2006(3): 69-75.
- CHEN N, WANG Q M, TANG G A. Application of dem extraction algorithm on slope information of loess plateau[J]. Geo-information Science, 2006(3): 69-75.
- [35] 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 for calculating daylight hours in mountainous areas[J]. Chinese Science Bulletin, 1987(17): 1333-1335.
- 作者简介:
刘伟(1998-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 地理信息服务。
通信地址: 福建省福州市闽侯县上街镇国家大学科技园阳光楼(350108)
E-mail: 1695437566@qq.com
陈楠(1975-), 男, 研究员, 主要研究方向: 月球数字地形分析。**本文通信作者**。
通信地址: 福建省福州市闽侯县上街镇国家大学科技园阳光楼(350108)
E-mail: chennan@fzu.edu.cn

Study of Terrain Shading Judgment on Ceres Surface and Its Solar Radiation Simulation

LIU Wei^{1,2}, CHEN Nan^{1,2}

(1. The Academy of Digital China(Fu Jian), Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;

2. Key Lab for Spatial Data Mining and Information Sharing of Education Ministry, Fuzhou 350108, China)

Abstract: As solar radiation is an important source of energy received by the surface of the planets in the solar system, accurate modeling of solar radiation on the surface of Ceres is crucial for studying the thermal environment. However, the highly undulating terrain on Ceres makes determining terrain shading coefficients challenging. While the ray tracing method can accurately determine terrain shading coefficients, it is limited by the search radius. In the paper, it examines the effects of seasonal differences, landform types, and study area size on solar radiation simulation, and concludes that a minimum threshold search radius of 74 km is required to determine actual terrain shading. Using this radius, the paper simulates solar radiation over a solar day and finds that the search radius required for accurate shading information varies with time of year and landscape type. Surface faults are most consistently influenced by the search radius, while volcanic landscapes are most significantly influenced. The global solar radiation distribution of Ceres shows a gradual decrease from low to high latitudes. Results improve the theory and method of solar radiation modeling and provide data and theoretical support for future exploration of Ceres.

Keywords: solar radiation; search radius; spatial-temporal pattern; digital elevation model; Ceres

Highlights:

- The minimum threshold search radius of Ceres based on ray tracing method is obtained, which is 74 km.
- The different geomorphic types on the surface of Ceres are ranked according to the persistence and degree of influence of the search radius on the solar radiation simulation.
- A solar radiation data product of Ceres' surface within one solar day has been produced.

[责任编辑: 宋宏, 英文审校: 宋利辉]