



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

甘红^{1,2*}, 李雄耀^{3,4}, 魏广飞^{2,3,4}

1. 贵州理工学院分析测试中心, 贵阳 550003;
2. 澳门科技大学月球与行星科学国家重点实验室, 澳门;
3. 中国科学院地球化学研究所月球与行星科学研究中心, 贵阳 550081;
4. 中国科学院比较行星学卓越创新中心, 合肥 230026

*联系人, E-mail: ganhong06@gmail.com

收稿日期: 2018-10-12; 接受日期: 2019-01-08; 网络出版日期: 2019-04-24

国家自然科学基金(编号: 41572037, 41803052)、中国科学院B类先导科技专项(编号: XDPB11)、澳门科学技术发展基金(编号: 119/2017/A3)和贵州理工学院高层次人才科研启动项目(编号: XJGC20181290)资助项目

摘要 太阳辐射是影响月表热环境的主要因素, 前人的研究大多忽略月表地形的影响或仅考虑大尺度的地形起伏. 本文以Banting简单陨坑(16.4°E, 26.6°N)为例, 首先基于月球勘探轨道器(LRO)搭载的月球轨道器激光测高仪获取的地形数据构建了该陨坑的三维数值模型, 计算了不同地方时条件下的有效太阳辐照度分布. 其次, 本文以具有Banting陨坑相同深径比的陨坑为研究对象, 计算了其在月表任意位置和时刻的光照面积占陨坑面积的分布(光照面积占比). 结果表明, 在48.2°N/S和当地时间08:48–15:12的时空范围内, 陨坑的光照面积占比达100%. 最后, 根据月表热辐射平衡模型计算了Banting陨坑在白天不同时刻的温度分布. 通过与LRO月球辐射实验仪的测量温度对比, 二者表现出较好的一致性, 验证了数值模拟的可靠性.

关键词 月球, 简单陨坑, 太阳辐照度, 温度, 数值模拟

PACS: 95.30.Jx, 95.85.Hp, 96.20.-n, 96.35.Gt

1 引言

太阳辐射是驱动月表温度变化的主要热源, 也是研究月表热环境考虑的主要因素. 对月表温度的测量一般有直接测量、利用样品热物理性质推测、遥感探测、地基观测、物理模型等方法^[1]. 由于月表地形起伏尤其是密集分布的陨坑使得月表热环境变得十分复杂, 通常用有效太阳辐照度和太阳光照

率(某一位置的光照时间占总时长的百分比)来表示其光照特征. 其中有效太阳辐照度控制着月表的温度, 而光照率则影响月面活动的时间, 它们是月球着陆点和未来基地选址的重要影响因素.

有效太阳辐照度是影响月表温度分布的重要因素. Li等人^[2]、Feng等人^[3]根据月表有效太阳辐照度与日月距离、太阳辐射入射角的关系, 建立了月表有效太阳辐照度的实时模型. 刘书豪^[4]提出

引用格式: 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. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2019, 49: 069601
Gan H, Li X Y, Wei G F. Numerical simulation of effective solar irradiance and temperatures at simple crater of lunar dayside (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2019, 49: 069601, doi: 10.1360/SSPMA2018-00348

了一种基于应用计算几何的月面任意位置的太阳辐照度仿真模型. 以上模型均是基于光滑球面的假设, 未考虑月表真实地形如陨坑的影响. Meng等人^[5]通过建立经纬向坡度的太阳辐射模型以探讨地形对月面温度分布的影响, 但没有考虑太阳辐照度随时间的变化以及坡面的二次反射和热辐射等情况. 张吉栋等人^[6]基于月球行星历表和月球勘探轨道器(LRO)搭载的月球轨道器激光测高仪(LOLA)数据, 根据日-地-月几何关系建立了月表光照模型, 分析了Aristarchus高原的光照特性, 但缺乏对月表热环境的研究. 此后张吉栋等人^[7]改进了月球光照模型, 充分考虑坡度条件以及日月距离对月表太阳辐射的影响, 计算了冯·卡门陨坑2018年接受的太阳辐射能量, 但该研究仍没有考虑坑壁的二次反射和热辐射作用.

目前, 对月表光照条件和热环境的研究更多地集中在两极地区. 主要是由于月球两极永久阴影区分布有一定量的水冰^[8], 是未来月球水资源探测和开采的重要区域. 永久阴影区的分布与月表温度的分布密切相关, 其主要受到地形特征的影响^[9]. Vasavada^[10]采用太阳辐射和热辐射多次散射模型, 计算了月球和水星极区简单陨坑、平底陨坑的最大和平均温度分布, 但没有详细讨论不同地方时以及纬度效应对陨坑内温度的影响. 随着高精度地形数据的获取, Noda等人^[11]、Bussey等人^[12]根据KAGUYA卫星获取的激光高度计数据和月球行星历表计算了月球极区的光照率. Paige等人^[13]同样根据KAGUYA激光高度计数据采用光线追踪法计算了月球南极地区年均温度分布, 探讨了潜在水冰的埋藏深度. Mazarico等人^[14]基于LOLA数据采用最大高度角法计算了极区的光照条件并分析了散射光对永久阴影坑挥发物的影响. 郝卫峰等人^[15]基于嫦娥一号地形数据同样采用地形最大高度角法分析了月球极区的光照条件, 发现南极比北极地区有更大面积的永久阴影区, 且主要分布在大而深的撞击坑. 他们仅给出了极区光照率的分布或年均温度分布特征, 并没有讨论陨坑在不同空间条件下的有效太阳辐照度和热环境瞬时变化特征.

地形的遮挡使得陨坑内外接受的太阳辐射能量差异非常大. 早期Pettit等人^[16]、Sinton^[17]基于地基

观测发现月球正面的热辐射强度从中心向边缘并不是按照理想的余弦曲线变化, 即光滑朗伯体球面, 而是在边缘地区出现明显的亮温增强现象. Buhl等人^[18]通过建立陨坑模型考虑了坑壁的二次辐射、局部入射角、发射角和遮蔽效应对亮温的影响, 从而解释了月球正面边缘亮温增强的观测现象. 当讨论复杂地形如陨坑的热环境时, 往往需要考虑陨坑的自身遮蔽效应、纬度效应以及二次辐射等因素的影响^[9, 19]. 由于陨坑特殊的形状, 其接受和被遮蔽的太阳辐射是随时间不断变化的, 即太阳辐射到达坑壁, 部分被反射其余被吸收, 吸收的能量则再次以热辐射的形式发射出去. 这些过程又与陨坑所在的纬度位置和地方时密切相关, 针对这一复杂过程本文对地方时、纬度效应对陨坑热辐射环境的影响展开讨论.

本文以位于澄海中央附近的Banting陨坑为研究对象, 首先介绍了构建该陨坑的数学模型、有效太阳辐照度和温度的方法. 其次, 给出了不同地方时条件下Banting陨坑的有效太阳辐照度和表面温度分布的数值模拟结果, 并进一步讨论了纬度效应对该类型陨坑接受的有效太阳辐射面积的影响. 最后, 基于LRO探测任务获取的热红外数据分析了Banting陨坑不同地方时的温度分布, 对比验证了数值模拟结果的可靠性.

2 数据和研究方法

2.1 Diviner数据

月球勘探轨道飞行器(LRO)发射于2009年6月18日, 其搭载的月球辐射计实验仪(Diviner Lunar Radiometer Experiment, Diviner), 是第一个系统测量月表热环境和矿物成分的探测器^[20], 也是目前唯一能提供全月热红外波段测量数据的仪器. Diviner辐射计的科学目标之一是系统地探测月表热环境绘制全月温度图, 共包含9个观测通道且分布于两个波段范围. 其中第1和2通道波段范围为0.35–2.8 μm , 用于测量月表反射的太阳辐射; 第3–9通道范围为7.55–400 μm , 用于测量月表红外辐射能量. 每个观测通道都含有21个水平的线性探测器单元阵

列并采用连续推扫式测量^[20]. LRO进入到科学探测任务阶段后的在轨运行高度为50 km时, Diviner辐射计的顺轨和交轨方向空间分辨率达320 m×160 m, 刈幅宽度为3.4 km. 在轨运行8年多, 已获得月表任意位置的昼夜温度变化数据^[21,22].

Bandfield等人^[23]在利用Diviner数据计算月表温度和石块丰度等信息时发现, 通道3至通道5的月球夜晚低温时没有足够的信噪比, 不适合分析温度起伏剧烈的月表昼夜温度; 在Diviner的定标观测中, 通道9的亮温数据存在严重漂移. 由于通道7 (25–41 μm)在整个黑体温度范围内都有很高的信噪比, Vasavada等人^[24]则仅根据通道7亮温数据探讨了赤道地区月壤的热物性. 本文同样采用覆盖Banting陨坑的Diviner第7通道亮温数据(<http://oderest.rsl.wustl.edu/GDSWeb/GDSDLRERDR.html>), 以探讨不同时刻的热环境特征.

2.2 简单陨坑的三维模拟——以Banting陨坑为例

月表陨坑不仅数量多, 而且存在多种构造类型. 有复杂的大型多环撞击盆地, 如东海; 有包含中央峰的撞击盆地, 如第谷撞击坑^[25,26]; 还有呈碗形的简单陨坑, 通常直径小于15 km^[27]. 尤其对于陨坑密集分布的高地, 陨坑的叠覆使得月表地形变得更加复杂. 相对于大型撞击坑, 简单陨坑的地形特征较为简单, 在进行数值模拟时可以通过较少的参数对其特征进行限定. 而且在中低纬度区域太阳辐照度更大, 更适合陨坑探测中的太阳能利用. 为避免周围起伏地形或陨坑叠覆等地形对陨坑热环境的影响, 故本文选取位于澄海中央附近中心坐标(16.4°E, 26.6°N)的Banting陨坑为研究对象, 其光学影像如图1(a)所示. 可以看出, Banting陨坑具有典型的简单陨坑特征且表面较为光滑, 直径约为6.1 km, 坑底位置相对平坦, 可能由坑壁碎屑滑落堆积导致. 但这对本文的数值模拟没有影响.

根据LOLA数据可以得到Banting陨坑的高程分布, 如图1(b)所示. 可以看到, Banting陨坑深度约1.1 km, 坑缘周围地形平坦且坑壁坡度连续没有明显陡坡. 对于此类陨坑一般可通过截取球面的部分

曲面, 再由曲面向周围延伸平面来进行模拟. 陨坑的大小由坑深(H)和坑径(D)描述, 一般用二者比值表示, 即深径比 $\Delta = H/D$. 研究表明, 月球上 $D < 15$ km的简单陨坑中深径比一般为 $1/6 < \Delta < 1/5$, 且均可用截取的球面作为近似^[28,29]. 相比Banting陨坑直径, 月表的球面曲率对陨坑的影响可以忽略不计. 本文以 x, y 轴方向确定的 $x-y$ 平面表示月面, 陨坑的深度为 z 轴方向建立 $x-y-z$ 三维笛卡尔坐标系. 则陨坑任意位置的高程(z)可表示为^[30]

$$z = R - H \pm \sqrt{R^2 - x^2 - y^2}, \quad (1)$$

其中, $R = (D^2/4 + H^2)/(2H)$ 为与月球表面相交的大球面的半径. 根据式(1)可建立径向(x)和纬向(y)的网格坐标, 并构建Banting陨坑的三维地形, 如图1(c)所示, 其中 $\Delta = H/D = 1.1/6.1 \approx 0.18$. 注意, 在给定 Δ 值并忽略月球表面曲率的条件下, 坑径和坑深的实际取值对本文模拟结果没有任何影响. 对比图1(b)可以看出, 数值模拟陨坑可以很好地代表真实陨坑的地形特征. 因此, 本文将基于模拟陨坑进一步探讨陨坑的太阳辐照度和热环境特征.

2.3 有效太阳辐照度及温度

为计算有效太阳辐照度, 我们将数值模拟的陨坑划分为 $N \times N$ 个等面积的网格, 在 x, y 方向的单元网格分别用 $i, j(i, j = 1, \dots, N)$ 表示. 为计算陨坑各个位置的坡度, 这里需要将由4个网格点连接的网格单元进一步划分为两个三角网格面^[30], 则得到 $2 \times N \times N$ 个三角网格面. 假设月表地形对太阳辐射的散射为朗伯散射, 太阳辐射到达坑壁的能量即有效太阳辐照度取决于日月距离、局部太阳入射角. 由此可以计算陨坑内各个网格面之间的太阳辐射和热红外辐射能量的散射.

对于任一天体如月球, 水平表面某一位置的太阳高度角(β)可用纬度(λ)、太阳赤纬(δ)、时角(h)表示为^[31]

$$\sin \beta = \cos \lambda \cos \delta \cos h + \sin \lambda \sin \delta, \quad (2)$$

当 $\sin \beta < 0$ 时, 假设太阳位于该无限延伸水平面以下. 针对地形起伏的月表, 需要进一步考虑斜坡面

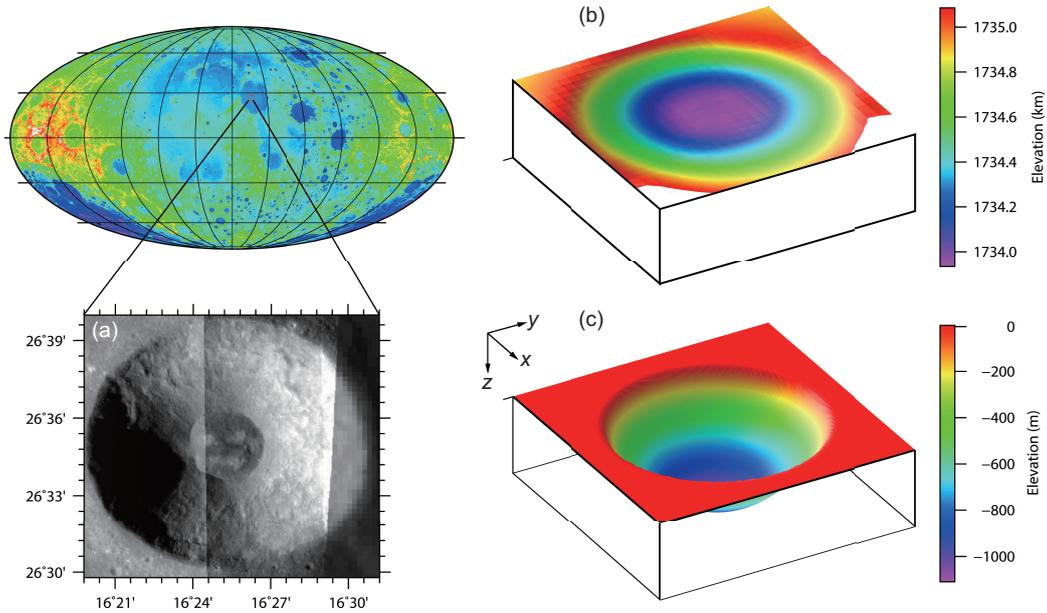


图 1 (网络版彩图)Banting陨坑的光学影像(a)、三维数字高程(b)、三维数值模型(c). 注: 光学影像数据来源于LRO 广角相机(<http://ode.rsl.wustl.edu/moon/indexMapSearch.aspx>), 高程数据来源于LRO LOLA (<http://oderest.rsl.wustl.edu/GDSWeb/GDSLORLARDR.html>)

Figure 1 (Color online) (a) Optical image, (b) three-dimensional topographic map and (c) three-dimensional numerical model of Banting crater. Note: the optical data are obtained by LRO Wide Angle Camera (<http://ode.rsl.wustl.edu/moon/indexMapSearch.aspx>), and the elevation data are obtained by LRO LOLA (<http://oderest.rsl.wustl.edu/GDSWeb/GDSLORLARDR.html>).

上的局部太阳高度角(θ). 对于任意斜坡面上的太阳高度角可表示为^[31]

$$\sin \theta = \cos \alpha \sin \beta - \sin \alpha \cos \beta \cos(\Delta\alpha), \quad (3)$$

其中, $\Delta\alpha$ 是太阳方位角(α)和地形坡度的差值. 当 $\sin \theta < 0$ 时, 假设太阳位于以该局部坡面无限延伸的平面以下, 即坡面的自身遮蔽作用. 假设入射到月表的太阳辐射为平行光, 根据式(2)和(3)可知, 月表局部地形的太阳高度角主要受到 λ 和 h 的影响. 对于陨坑内存在的光的散射和坑壁热辐射作用, 任意位置则满足以下能量守恒

$$(1 - A)(J + Q_{\text{ref}}) + \varepsilon K + k \frac{\partial T}{\partial z} = F, \quad (4)$$

其中, 左边第一项表示太阳直接辐射和坑壁二次反射贡献的能量, 第二项表示陨坑内漫反射场即热红外辐射的贡献, 第三项表示月壤次表层向上传导贡献的能量, 相比太阳辐射, 内部热流对表面温度的影响可以忽略. 此外阿波罗样品分析表明, 月壤表层(约2 cm厚的月尘层)的热导率极低, 因此对于瞬

时平衡可忽略此项的贡献即 $k \approx 0$. 右边第一项表示月表向外空间辐射的能量, 即 $F = \varepsilon\sigma T^4$. 其中 J 为太阳的直接辐射, Q_{ref} 为周围坑壁反射的太阳辐射, A 为表面反照率(这里假设各个位置反照率相同), ε 为表面热发射率, σ 为Stephan-Boltzmann常数.

对于太阳的直接辐射, 网格面 i 接受到的能量可表示为^[30]

$$J_i = S \sin \theta \frac{v_i}{R_m^2}, \quad (5)$$

其中, S 为太阳常数, R_m 为月球到太阳距离(Au), v_i 为可见度参数, $v_i = 1$ 或 0 . 即当网格面受到太阳辐射时取值为1, 当位于阴影区时取值为0. 而陨坑内的漫辐射场主要为坑壁对太阳辐射的二次反射、坑壁的热红外辐射, 其分别表示为^[30]

$$Q_{\text{ref}i} = \sum_{j \neq i}^N \alpha_{ji} A_j J_j, \quad (6)$$

$$K_i = \varepsilon\sigma \sum_{j \neq i}^N \alpha_{ji} T_j^4, \quad (7)$$

其中, α_{ji} 为视场系数, 表示陨坑内从单元面 j 辐射到单元面 i 的能量比例, A_j 为单元面 j 的反照率. 实际上由于无法准确获得各个单元面的反照率 (A_j) 也为了简化计算, 本文中假设 $A = A_j (j = 1, \dots, N)$, 即坑壁所有单元面的反照率相同. α_{ji} 可通过计算视角系数得到^[10,19]

$$\alpha_{ji} = \frac{\cos \theta_j \cos \theta_i}{\pi d_{ji}^2} dS_j, \quad (8)$$

其中, θ_j 和 θ_i 分别为网格面 j, i 的法线与二者中心连线的夹角, d_{ji} 为两个单元面中心的距离, dS_j 为 j 网格面的面积. 根据以上辐射平衡模型, 可以计算陨坑内的漫辐射场进而得到温度的分布. 通过计算发现, 坑壁表面反照率 (A) 和热发射率 (ε) 是影响温度分布的重要因素. 需要注意的是, 影响反照率和热发射率的因素有很多, 如表面粗糙度、岩块含量及分布等. Bandfield 等人^[23], Vasavada 等人^[24] 对这些因素进行了详细的讨论. 本文假设坑壁表面光滑且月壤表层物性均一, 并采用经验值作为参考 $A = 0.127$, $\varepsilon = 0.95$. 日月距离 $R_m \approx 1 \text{ AU}$, 太阳常数 $S = 1366 \text{ W m}^{-2}$.

3 结果及讨论

3.1 有效太阳辐照度

对于地理坐标确定的 Banting 陨坑, 这里仅考虑地方时变化对有效太阳辐照度 (E_{eff}) 的影响. 如图2所示, Banting 陨坑的有效太阳辐照度随地方时变化表现出显著的差异, 且在不同时间陨坑的自身遮蔽效应差异很大. 从背光面坑壁到向阳面坑壁, 太阳辐照度逐渐增加并呈平缓的渐变特征. 具体来看, 在黎明(图2(a))和傍晚(图2(g))时刻坑内的遮蔽效应最明显, 大约24.8%的坑壁被自身遮蔽, 而有效太阳辐照度均在 1024.5 W m^{-2} 以下. 在地方时为10:00(图2(b))和16:00(图2(f))时, 陨坑则接受更多的太阳辐射, 仅~7.9%的坑壁被自身遮蔽, 且光照区太阳辐照度普遍增加, 最高达 1271.7 W m^{-2} . 在靠近正午时刻(图2(c)和(e))坑壁已不存在自身遮蔽效应, 只是有效太阳辐照度分布表现出明显的不均匀性, 在 $202.2\text{--}1366 \text{ W m}^{-2}$ 范围变化. 到了正午时

刻(图2(d))背光面有效太阳辐照度继续增大且分布更均匀, 但背光面还是明显受到坡度的影响, 最低约 505.4 W m^{-2} . 值得一提的是, Banting 陨坑自身遮蔽效应消失和开始的时间并不是在图2(c)和(e)所示的10:00和14:00时刻, 具体时间下文将详细讨论. 此外, 坑缘周围水平区域的太阳辐射率则与时间表现出很好的相关性. 越接近正午时刻有效太阳辐照度越大, 即接受的太阳辐射能量也就越多. 二者对比恰恰可以说明陨坑是影响月表太阳辐照度分布非常重要的因素.

除了地方时影响陨坑太阳辐射率分布外, 纬度效应也是另一个很重要的因素. 纬度效应改变了坑壁局部太阳高度角, 使有效太阳辐照度分布更加复杂. 图3展示了具有 Banting 陨坑特征(即具有相同深径比)的陨坑在月表任意时刻、任意位置的光照区面积占陨坑总面积的百分比分布(以下简称光照面积占比). 可见在 48.2°N/S 范围且当地时间在 08:48–15:12 之间(由实心点围成的圆圈内)的陨坑, 光照面积占比达到100%, 即在此范围内陨坑没有自身遮蔽效应. 相反, 越靠近黎明/傍晚时刻或两极位置陨坑的遮蔽效应越明显, 光照面积占比最低降到70%以下. 由此可知, 在未来月球陨坑的探测任务中选择在此范围内开展可确保太阳辐射能源的持续供应. 当然, 具有不同深径比的简单陨坑的光照面积占比会有变化, 根据本文模型均可计算得到. 鉴于大多数简单陨坑的深径比在 $1/6\text{--}1/5$ 之间, 因此本文的计算结果仍具有一定的代表性.

为进一步对比分析 Banting 陨坑的太阳光照特征, 本文分别在图3(a)中选取了位于不同纬度的4条剖面, 即赤道, 26.6°N , 60°N 和 85°N , 其中 26.6°N 为 Banting 陨坑中心所在的纬度, 如图3(b)所示. 显然, 赤道和 26.6°N 位置陨坑的光照条件十分接近. 光照面积占比达到100%的当地时间范围分别为 (08:48–15:12) 和 (09:18–14:42). 而 60°N 和 85°N 位置的陨坑始终存在遮蔽区域, 且高纬度地区遮蔽效应更显著. 从图3还可以发现, 所有与圆圈相交的纬度剖面均存在100%光照占比, 而被圆弧截取的线段则是其光照时长. 没有与圆圈相交的纬度剖面则在白天任何时刻均存在遮蔽区域, 且距离圆圈越远遮蔽面积越大, 遮蔽时间越长.

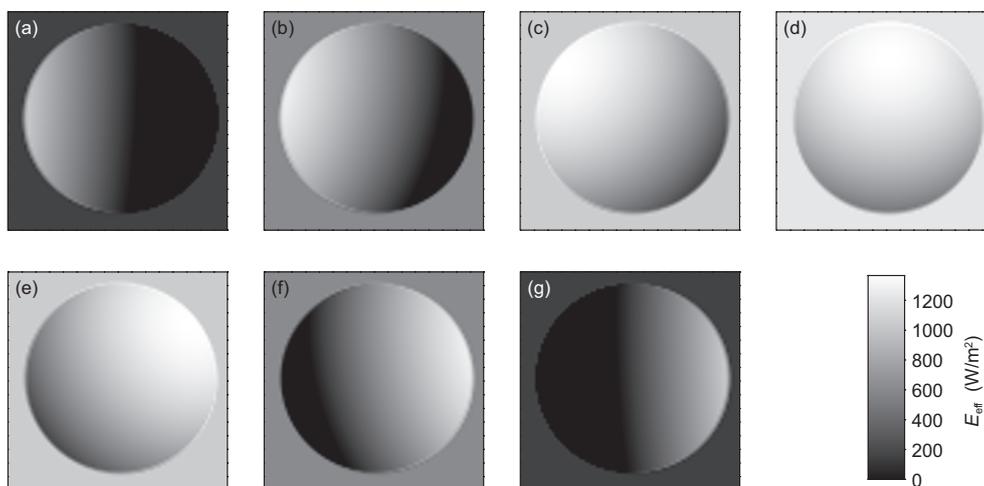


图2 不同地方时条件下Banting陨坑(16.4°E, 26.6°N)的有效太阳辐射度分布. (a)–(g)对应的地方时分别为06:30, 08:00, 10:00, 12:00, 14:00, 16:00, 17:30. 注: 当 $E_{\text{eff}}=0$ 时, 表示该位置完全被遮蔽; 为 $E_{\text{eff}}=1366 \text{ W m}^{-2}$ 时, 表示太阳直射该位置

Figure 2 Distribution of solar radiation rate of Banting crater (16.4°E, 26.6°N) at different local times. (a)–(g) correspond to the local time 06:30, 08:00, 10:00, 12:00, 14:00, 16:00, 17:30, respectively. Note: When $E_{\text{eff}}=0$, it is self-shaded. When it increases to $E_{\text{eff}}=1366 \text{ W m}^{-2}$, it is illuminated vertically.

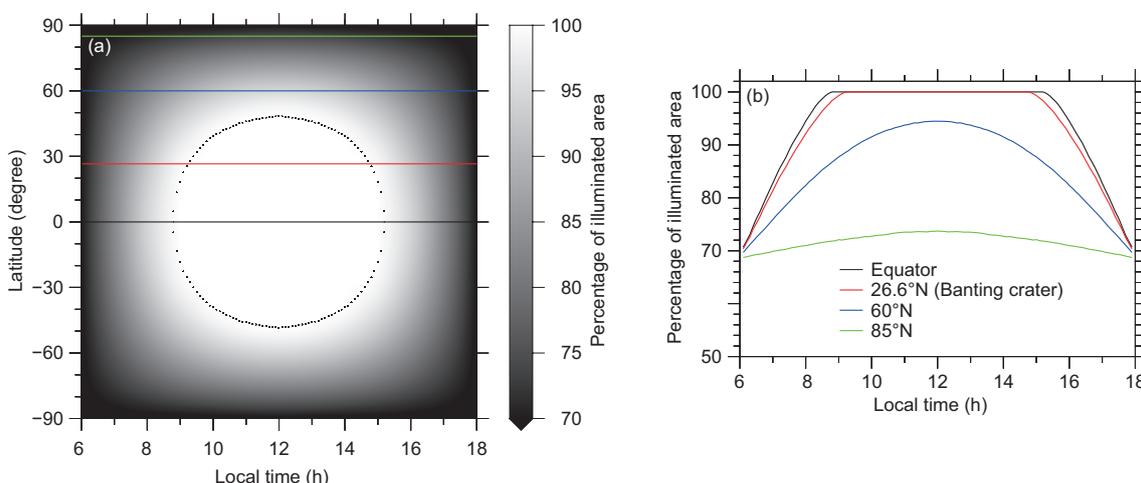


图3 (网络版彩图)具有Banting陨坑特征的月球陨坑在(a)不同时间、不同位置的光照面积占比分布及(b)剖面分布. 注: 由实心点围成的圆圈区域表示陨坑的光照面积占比为100%, 即没有任何自身遮蔽效应. 26.6°N为Banting陨坑中心所在的纬度

Figure 3 (Color online) Distribution of percentage of illuminated area of craters at (a) different local times and locations and (b) their profiles. Note: the area enclosed by black dots indicates the craters are 100% illuminated, i.e., the craters are illuminated without self-shading effect. The center of Banting crater locates at 26.6°N.

对比这4条剖面特征还可以发现: (1) 在黎明和傍晚附近, 位于所有纬度陨坑的光照面积占比十分接近; (2) 纬度越高陨坑的光照面积占比达到最大值(黎明到正午)或降低到最小值(正午到傍晚)需要的时间越长; (3) 纬度越高陨坑的光照面积占比变化幅度就越小. 在将来的陨坑探测任务中, 由于低

纬度陨坑内太阳光照变化速率更快和幅度更大, 对仪器或航天员的热冲击也将更强烈, 但光照面积更大. 而在高纬度陨坑的探测中, 太阳光照变化速率更慢、幅度更小, 由此给航天器或宇航员带来的热冲击更小, 但是光照面积更小不利于太阳能的利用.

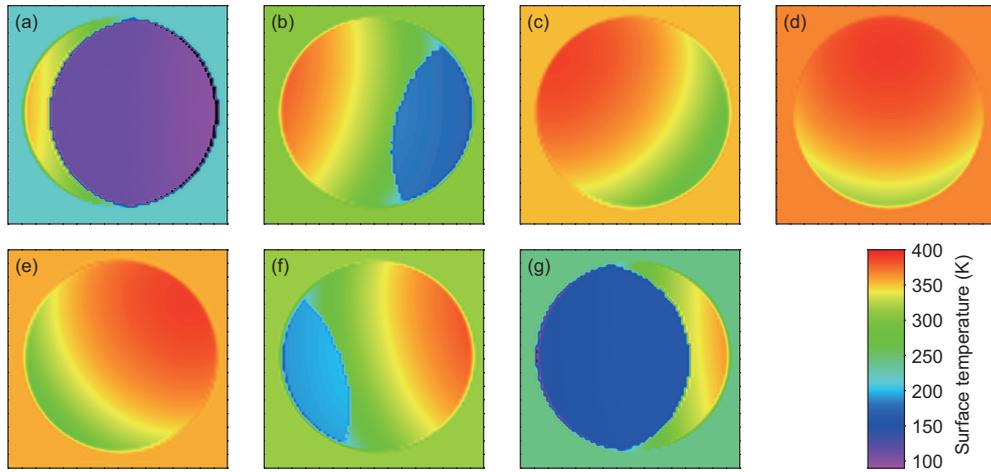


图4 (网络版彩图)Banting陨坑(16.4°E, 26.6°N)在不同地方时的温度分布. (a)–(g)对应的地方时分别为06:30, 08:00, 10:00, 12:00, 14:00, 16:00和17:30. 注: 温度计算采用的参数为 $S=1366 \text{ W m}^{-2}$, $A=0.127$, $\varepsilon=0.95$ [32]

Figure 4 (Color online) Distribution of temperatures of Banting crater (16.4°E, 26.6°N) at different local times. (a)–(g) correspond to the local time 06:30, 08:00, 10:00, 12:00, 14:00, 16:00 and 17:30, respectively. Note: The parameters in our simulation are $S=1366 \text{ W m}^{-2}$, $A=0.127$, $\varepsilon=0.95$ [32].

3.2 陨坑温度分布

基于陨坑的有效太阳辐照度分布和表面能量平衡, 图4给出了Banting陨坑不同地方时的表面温度分布. 为方便与有效太阳辐照度分布(图2)对比, 模拟温度的时刻与其相对应. 可以看出, 太阳辐照度高的坑壁具有较高的温度; 太阳辐照度低和遮蔽区域的温度很低. 且越接近黎明(图4(a))或傍晚(图4(g))时刻, 温度差异越大. 值得一提的是, 图4(a)和(g)所在的时刻距离日出和日落均相差30 min (月球地方时), 但温度分布却并没有表现出很好的对称性. 主要是因为黎明时刻的阴影区经历了一个月球夜晚的热辐射损耗达到最低的98.6 K; 从上文分析可知Banting陨坑从14:42才开始出现阴影区, 因此坑内阴影区经历的最长热辐射损耗时间为2.8 h (月球当地时), 温度最低仅为147.9 K. 而光照区的最高温度为359.2和366.7 K, 二者相差并没有阴影区那么大.

从时间范围来看, 越接近中午时刻(黎明到中午和中午到傍晚)太阳辐射、坑壁反射和热辐射作用越强. 结果如图4(b)和(f)所示, 光照区面积增大, 阴影区面积减小, 且陨坑温度逐渐上升. 此时二者光照区的最高温度分别为384.0和387.9 K, 阴影区的最低温度分别为144.4和165.6 K. 在10:00

(图4(c))和14:00(图4(e))时刻坑内光照面积占比达100%, 陨坑的自身遮蔽效应消失且表面温度主要取决于有效太阳辐照度. 前者对应的最高温度为395.3 K, 最低温度为260.9 K; 后者对应的最高温度为396.3 K, 最低温度为277.3 K. 至此可以说明, 无论是在上午还是下午陨坑光照区最高温度差别不大, 但是阴影区或背光面的最低温度差异却很明显, 不过越临近中午这种差异均逐渐减小. 到了正午时刻(图4(d)), 坑内向阳面最高温度为397.4 K, 背光面最低为321.8 K. 此时陨坑接受太阳辐射能量最多, 温度趋向均匀分布且平均值也达到最大.

3.3 可靠性验证

以上模拟结果给出了Banting陨坑温度随地方时变化的特征, 为验证结果的可靠性本文进一步将模拟结果与Diviner探测数据进行对比分析. 图5为覆盖研究区(16.333°E–16.523°E, 26.496°N–26.666°N)的表面温度随地方时的变化. 可以看出, Diviner的测量数据并未覆盖研究区的所有时段, 但在部分时间段数据分布比较集中. 为方便与模拟结果进行比较, 且保证Banting陨坑数据的最大覆盖范围, 本文分别选取07:21–07:36, 10:11–10:13, 12:24–12:27, 15:38–15:40, 16:49–16:54时间范围内的

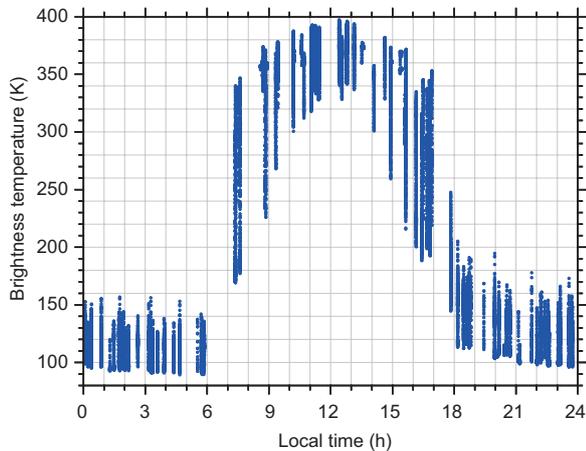


图5 (网络版彩图)Banting陨坑(16.4°E, 26.6°N)月表亮温随地方时的变化

Figure 5 (Color online) Brightness temperature of Banting crater (16.4°E, 26.6°N) versus local time.

Diviner数据分别表示07:30, 10:12, 12:26, 15:39和16:52时刻的亮温. Vasavada等人^[24]通过分析覆盖赤道地区的Diviner第7通道数据,认为该通道的光谱发射率(ϵ_{IR})具有全球普适性,其值为0.98.则表面温度可通过 $T_{\text{surf}} = T_{\text{IR}}/\epsilon_{\text{IR}}^{0.25}$ 计算得到,其中 T_{IR} 为红外辐射亮温.

图6展示了Banting陨坑在不同地方时的温度分布,可以明显看到陨坑地形对温度分布的影响,且模拟结果和Diviner测量温度均表现出相似的温度分布特征.具体来看,在07:30时刻坑内阴影区测量的温度范围为169.1–346.8 K(图6(a)),模拟温度范围为157.4–377.6 K(图6(a')).到了10:12(图6(b))坑内温度迅速上升,主要表现为向阳和背阳坡面的温度差异.坑内温度范围是300.5–387.6 K,此时对应的模拟温度范围是275.1–395.6 K(图6(b')).而在接近正午时刻陨坑的温度范围是341.6–399.2 K(图6(c));对应的模拟结果为320.7–397.4 K(图6(c')).而到了15:40,坑内温度迅速下降且再次出现阴影区,温度范围是216.7–373.5 K(图6(d));对应的模拟温度范围是197.1–390.0 K(图6(d')).在16:52时刻,坑内测量温度范围是193.5–354.9 K(图6(e)),模拟温度范围是166.7–375.6 K(图6(e')).

通过以上几个时刻的温度对比发现,在向阳面的模拟温度的最大值比Diviner测量的最大值普

遍偏大(12:26除外,差值为–1.8 K),范围在8–30.8 K;在背光面或阴影区模拟温度的最小值比Diviner测量的最小值普遍偏小,范围在–26.8––11.7 K.可能有以下三点原因:(1)由于没有实测数据,模型中给定的表面反照率和热红外发射率均是经验值,而Banting陨坑表面的反照率可能比经验值更高.这会直接影响到陨坑光照区的温度并通过二次反射和热辐射作用间接影响阴影区坑壁的温度,下文将具体讨论.此外坑壁表面有大量石块,且分布不均一(图7),使得坑壁表面月壤(0–10 cm深度)的热物理性质更加复杂,从而对表面温度变化产生重要的影响^[23].而且这会使坑内太阳辐射的散射和热辐射变得更复杂.在本文的模型中均未考虑这些因素的影响.(2)选取的Diviner数据跨越一定的时间范围,并不是与模拟温度的时间完全一致.比如,从图5可以看出,即使在地方时很接近的如16:00–17:00时间段内,最高或最低温度的差异可以达10 K以上.不过需要注意的是在光照区和阴影区的交界处,理论模拟值表现出显著的温度突变.而Diviner测量的温度则表现出明显的渐变特征,这主要是由于Diviner的视场均获取了明暗交界处的热辐射信息得到了混合值.(3)坑壁的坡度变化与模型中采用的球面曲率存在一定的差距,导致计算的坑内热辐射散射场与实际观测结果存在一定的偏差.相对而言,第一点原因是主要因素,也是在后续工作中需要考虑的关键因素.

为进一步探讨反照率对陨坑内热辐射环境的影响,且考虑陨坑温度随时间变化的连续性,选取坑底(16.4°E, 26.6°N)作为研究对象,计算得到不同反照率条件下坑底温度随时间连续变化的特征.同时选取以坑底为中心、覆盖区域为 $16.4^\circ \pm 0.01^\circ \text{E}$, $26.6^\circ \pm 0.01^\circ \text{N}$ 的Diviner第7通道数据,从而得到Banting陨坑坑底白天测量温度与模拟温度的对比,如图8所示.可以看到在13:00之前,模拟温度与观测结果具有非常相似的变化趋势.其中在07:27均表现出温度的急剧上升,说明坑底经历了从阴影区到光照区的快速转变.而在13:00之后二者也同样表现出随时间下降的趋势,不过Diviner测量值变化更为迅速.具体特征为观测值温度在15:39急剧下降,模拟温度则在16:38开始

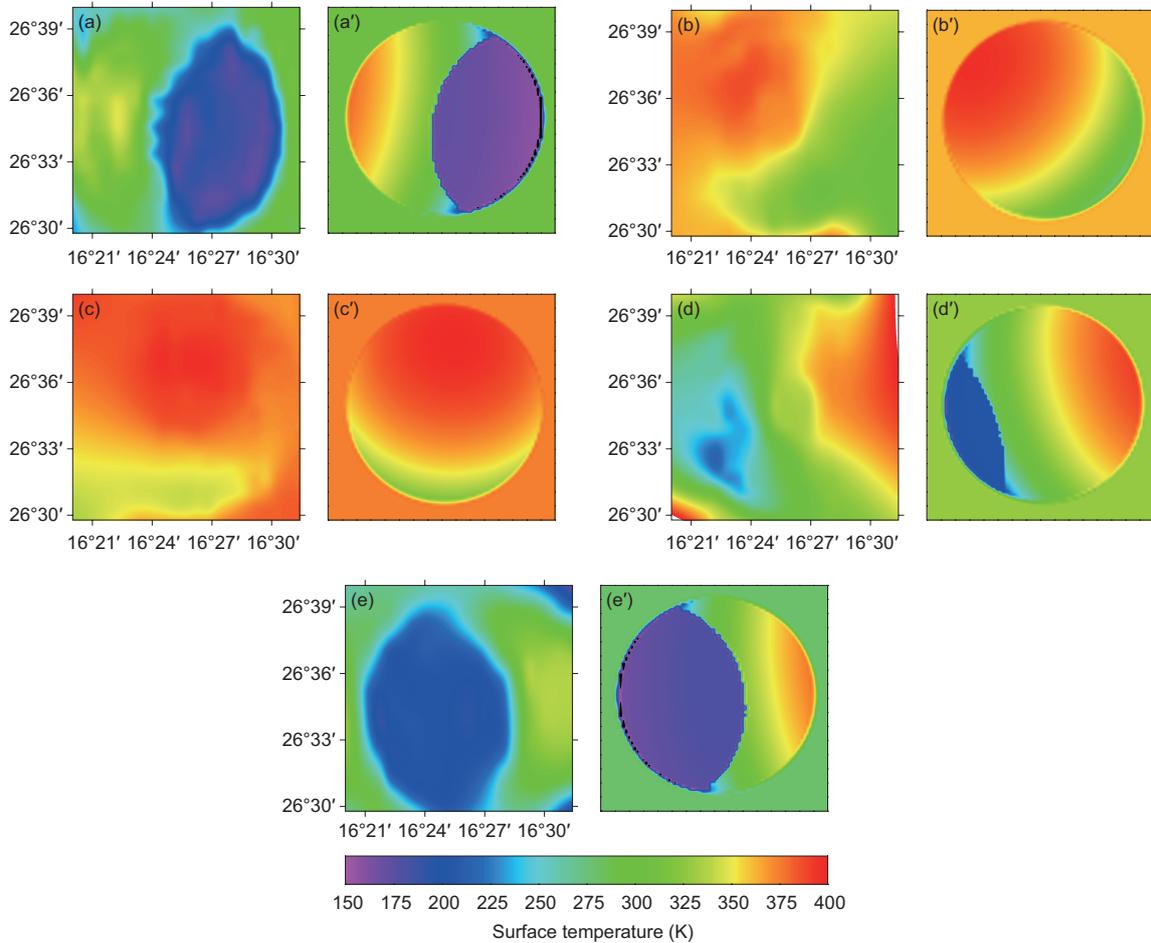


图6 (网络版彩图)Banting陨坑(16.4°E, 26.6°N)在不同地方时的Diviner测量温度(左列)与模拟温度(右列)的对比。(a)–(e)以及(a′)–(e′)对应的地方时分别为07:30, 10:12, 12:26, 15:39和16:52。注: 温度计算采用的参数为 $S=1366 \text{ W m}^{-2}$, $A=0.127$, $\varepsilon=0.95$ [32], 红外发射率 $\varepsilon_{\text{IR}}=0.98$, 且左列图中部分缺失数据的区域采取了插值填充

Figure 6 (Color online) Comparison of Diviner observations (left column) and simulated results (right column) for the temperatures at Banting crater (16.4°E, 26.6°N) at different local times. (a)–(e)/(a′)–(e′) correspond to 07:30, 10:12, 12:26, 15:39 and 16:52, respectively. Note: the parameters in our simulation are $S=1366 \text{ W m}^{-2}$, $A=0.127$, $\varepsilon=0.95$ [32], and $\varepsilon_{\text{IR}}=0.98$, and the missing data in left column are interpolated.

急剧下降. 从整体时间范围来看, Banting陨坑坑底的模拟温度以12:00为界呈对称分布, 而Diviner测量温度分布则更加复杂. 可能是坑内石块堆积物等因素使坑底的热辐射环境变得更加复杂导致的.

反照率对光照区温度的影响非常大, 随着反照率增大月表温度快速降低. 例如, 在正午时刻, 当反照率从0.1升高到0.127变化时, 表面温度降低约2.7 K. 当反照率从0.127增加到0.2时, 温度降低约7.5 K. 反照率继续增加到0.3时, 这时温度迅速降低约11.4 K. 而当坑底处于阴影区时, 反照率变化对其温度的影响不如处于光照区时那么明显, 但仍表现

出随着反照率增加温度降低的趋势. 需要说明的是, 虽然反照率升高增加了阴影区接受太阳散射光的能量, 但其阴影区对入射散射光的反照率也同样增加. 最后的作用结果是随反照率增加温度逐渐降低. 综合对比来看, 本文陨坑温度计算中选取的反照率0.127具有一定合理性.

通过上述分析发现, 即使给定反照率较大的取值范围(0.1–0.3), 模拟温度与Diviner观测结果仍然存在一定的偏差. 由此可见, 除了反照率, 石块含量及分布也是控制陨坑温度的重要因素. 在后续工作中我们将进一步结合反照率和石块含量及分布对温

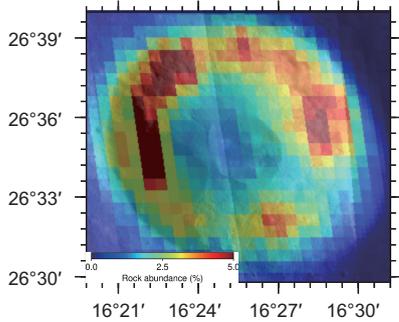


图 7 (网络版彩图) Banting陨坑(16.4°E, 26.6°N)表面石块分布. 数据来源于<http://ode.rsl.wustl.edu/moon/indexProductSearch.aspx>, 底图为LRO WAC光学影像

Figure 7 (Color online) Distribution of rock abundance in Banting crater (16.4°E, 26.6°N). The data are from <http://ode.rsl.wustl.edu/moon/indexProductSearch.aspx>, and the base map is LRO WAC image.

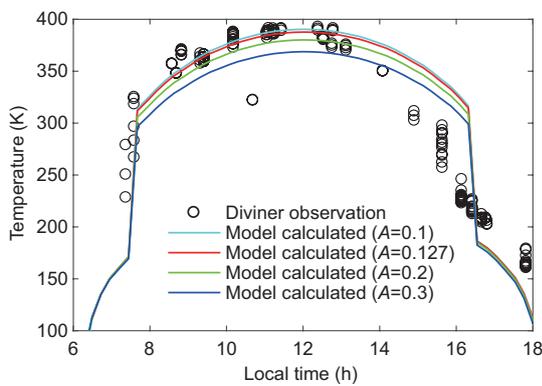


图 8 (网络版彩图) Banting陨坑坑底中心(16.4°E, 26.6°N)不同反照率条件下的模拟温度与Diviner 测量温度对比. $\epsilon_{\text{IR}}=0.98$. 注: Diviner第7通道数据覆盖范围为(16.4°±0.01°)E, (26.6°±0.01°)N

Figure 8 (Color online) Comparison of temperature at the center of Banting crater (16.4°E, 26.6°N) between Diviner measurements and albedo dependent simulation results. $\epsilon_{\text{IR}}=0.98$. Note: The coverage of channel 7 data of Diviner is (16.4°±0.01°)E, (26.6°±0.01°)N.

度的影响, 探讨月表不同时空条件下陨坑的热辐射环境特征. 为将来陨坑探测任务中区域选址、太阳能资源利用等提供一定的参考依据.

4 结论

太阳辐射是驱动月表热环境变化的主要因素, 而广泛分布的陨坑使得月表温度分布变得更加复杂. 本文以Banting简单陨坑为例, 首先基于LOLA数

据并通过数值方法构造了Banting陨坑的三维模型. 接着计算了陨坑在白天不同时刻的有效太阳辐照度分布, 发现越接近黎明或傍晚时刻陨坑的自身遮蔽效应越显著, 太阳辐射对陨坑的影响也就越弱. 并进一步假设月表任意位置均具有Banting陨坑特征的陨坑分布, 计算了白天任意时刻陨坑的光照面积占比分布. 结果表明, 在48.2°N/S范围且当地时间在08:48–15:12之间的陨坑, 光照面积占比达到100%, 即在此范围内陨坑没有自身遮蔽效应. 而在靠近黎明/傍晚时刻或两极位置的陨坑的自身遮蔽效十分明显, 光照面积占比最低降到70%以下.

基于陨坑的有效太阳辐照度分布和表面能量平衡, 本文计算了Banting陨坑在不同时刻的温度分布. 结果表明, 即使在黎明或傍晚向阳坑壁可以接受较多的太阳辐射能量, 与阴影区表现出很大的温度差异. 越接近正午时刻, 光照区面积增加温度升高, 阴影区面积减小温度也升高. 在整个月球白天, 光照区的最高温度随时间变化幅度较小, 而阴影区或背光面的最低温度随时间变化的幅度较大.

为验证模拟结果的可靠性, 本文进一步选取了覆盖Banting陨坑的Diviner第7通道亮温数据, 分别与07:30, 10:12, 12:26, 15:39和16:52时刻的模拟温度进行对比分析. 结果表明模拟温度与Diviner测量温度均表现出相似的温度分布特征. 在向阳面的模拟温度的最大值比测量温度的最大值普遍偏大(12:26除外, 差值为-1.8 K), 范围在8–30.8 K; 在背光面或阴影区模拟温度的最小值比测量温度的最小值普遍偏小, 范围在-26.8–-11.7 K. 这些可能是由于模型中表面反照率、发射率以及陨坑坡面堆积物所致. 再通过对Banting陨坑坑底的模拟温度与Diviner观测温度, 发现模拟结果与观测值表现出相似的变化趋势. 在07:27均表现出温度的急剧上升, 而在13:00之后二者也同样表现出随时间下降的趋势, 不过Diviner测量值变化更为迅速. 从整体时间范围看, 模拟温度与Diviner观测结果的一致性验证了模拟结果的可靠性. 在未来工作中, 我们将进一步考虑不同深径比对陨坑表面温度的影响, 同时结合月球星历数据建立月球陨坑温度变化的实时模型, 为将来月球陨坑探测和月表活动提供一定的参考依据.

参考文献

- 1 Li X Y, Wang S J, Cheng A Y. A review of lunar-surface temperature model (in Chinese). *Adv Earth Sci*, 2007, 22: 480–485 [李雄耀, 王世杰, 程安云. 月球表面温度物理模型研究现状. *地球科学进展*, 2007, 22: 480–485]
- 2 Li X, Wang S, Zheng Y, et al. Estimation of solar illumination on the Moon: A theoretical model. *Planet Space Sci*, 2008, 56: 947–950
- 3 Feng X, Guo Q. The lunar surface temperature real-time model. *J Remote Sensing*, 2017
- 4 Liu S H. Lunar surface solar irradiance simulation model based on computational geometry (in Chinese). *Spacecraft Eng*, 2014, 23: 19–26 [刘书豪. 应用计算几何的月面太阳辐射度仿真模型. *航天器工程*, 2014, 23: 19–26]
- 5 Meng Z G, Xu Y, Cai Z C, et al. Influence of lunar topography on simulated surface temperature. *Adv Space Res*, 2014, 54: 2131–2139
- 6 Zhang J D, Meng Z G, Ping J S, et al. Preliminary study of illumination characteristics of aristarchus plateau using LOLA data (in Chinese). *J Deep Space Explor*, 2017, 4: 171–177 [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. *深空探测学报*, 2017, 4: 171–177]
- 7 Zhang J D, Meng Z G, Zhu Y Z, et al. Research on solar radiation of Von Kármán Crater using LOLA data (in Chinese). *J Deep Space Explor*, 2018, 5: 12–19 [张吉栋, 孟治国, 朱蕴哲, 等. 基于LOLA数据的冯·卡门撞击坑太阳辐射研究. *深空探测学报*, 2018, 5: 12–19]
- 8 Colaprete A, Schultz P, Heldmann J, et al. Detection of water in the LCROSS ejecta Plume. *Science*, 2010, 330: 463–468
- 9 Rubanenko L, Aharonson O. Stability of ice on the Moon with rough topography. *Icarus*, 2017, 296: 99–109
- 10 Vasavada A. Near-surface temperatures on mercury and the Moon and the stability of polar ice deposits. *Icarus*, 1999, 141: 179–193
- 11 Noda H, Araki H, Goossens S, et al. Illumination conditions at the lunar polar regions by KAGUYA (SELENE) laser altimeter. *Geophys Res Lett*, 2008, 35: L24203
- 12 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. *Icarus*, 2010, 208: 558–564
- 13 Paige D A, Siegler M A, Zhang J A, et al. Diviner Lunar Radiometer observations of cold traps in the Moon's south polar region. *Science*, 2010, 330: 479–482
- 14 Mazarico E, Neumann G A, Smith D E, et al. Illumination conditions of the lunar polar regions using LOLA topography. *Icarus*, 2011, 211: 1066–1081
- 15 Hao W F, Li F, Yan J G, et al. Lunar polar illumination based Chang'E-1 laser altimeter (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2012, 55: 46–54 [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. *地球物理学报*, 2012, 55: 46–52]
- 16 Pettit E, Nicholson S B. Lunar radiation and temperatures. *Astrophys J*, 1930, 71: 102–135
- 17 Sinton W M. CHAPTER 11-Temperatures on the Lunar Surface. Heidelberg: Elsevier Inc., 1961
- 18 Buhl D, Welch W J, Rea D G. Reradiation and thermal emission from illuminated craters on the lunar surface. *J Geophys Res Planets*, 1968, 73: 5281–5295
- 19 Davidsson B J R, Rickman H. Surface roughness and three-dimensional heat conduction in thermophysical models. *Icarus*, 2014, 243: 58–77
- 20 Paige D A, Foote M C, Greenhagen B T, et al. The lunar reconnaissance orbiter diviner lunar radiometer experiment. *Space Sci Rev*, 2010, 150: 125–160
- 21 Hayne P O, Bandfield J L, Siegler M A, et al. Global regolith thermophysical properties of the moon from the diviner lunar radiometer experiment. *J Geophys Res Planets*, 2017, 122: 2371–2400
- 22 Williams J P, Paige D A, Greenhagen B T, et al. The global surface temperatures of the Moon as measured by the Diviner Lunar Radiometer Experiment. *Icarus*, 2017, 283: 300–325
- 23 Bandfield J L, Ghent R R, Vasavada A R, et al. Lunar surface rock abundance and regolith fines temperatures derived from LRO Diviner Radiometer data. *J Geophys Res Planets*, 2011, 116: E00H02
- 24 Vasavada A R, Bandfield J L, Greenhagen B T, et al. Lunar equatorial surface temperatures and regolith properties from the Diviner Lunar Radiometer Experiment. *J Geophys Res Planets*, 2012, 117: E00H18
- 25 Chen S, Meng Z G, Zhang J D, et al. Research on microwave radiation characteristics at Tycho crater area (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2016, 46: 029608 [陈思, 孟治国, 张吉栋, 等. Tycho 撞击坑地区微波热辐射特性研究. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2016, 46: 029608]
- 26 Sun L Z, Ling Z C, Zhang J, et al. The spectral characteristics and remote detection of lunar Mg-spinel: A case study of Tycho Crater (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2016, 46: 029607 [孙灵芝, 凌宗成, 张江, 等. 月表镁尖晶石矿物的光谱特征与遥感探测: 以第谷撞击坑为例. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2016, 46: 029607]
- 27 Pike R J. Size-dependence in the shape of fresh impact craters on the moon. In: *Impact and Explosion Cratering: Planetary and Terrestrial Implications*, Flagstaff, 1977. 489–509

- 28 Ingersoll A P, Svitek T, Murray B C. Stability of polar frosts in spherical bowl-shaped craters on the moon, Mercury, and Mars. *Icarus*, 1992, 100: 40–47
- 29 Stopar J D, Hawke B R, Robinson M S, et al. Distribution, occurrence, and degradation of impact melt associated with small lunar craters. In: 43rd Lunar and Planetary Science Conference. The Woodlands, 2012. 115–118
- 30 Davidsson B J R, Rickman H, Bandfield J L, et al. Interpretation of thermal emission. I. The effect of roughness for spatially resolved atmosphereless bodies. *Icarus*, 2015, 252: 1–21
- 31 Aharonson O, Schorghofer N. Subsurface ice on Mars with rough topography. *J Geophys Res Planets*, 2006, 111: E11007
- 32 Racca G D. Moon surface thermal characteristics for moon orbiting spacecraft thermal analysis. *Planet Space Sci*, 1995, 43: 835–842

Numerical simulation of effective solar irradiance and temperatures at simple crater of lunar dayside

GAN Hong^{1,2*}, LI XiongYao^{3,4} & WEI GuangFei^{2,3,4}

¹Analyzing and Testing Center, Guizhou Institute of Technology, Guiyang 550003, China;

²State Key Laboratory of Lunar and Planetary Sciences, Macau University of Science and Technology, Macau, China;

³Center for Lunar and Planetary Sciences, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China;

⁴Center for Excellence in Comparative Planetology, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230026, China

Solar radiation plays an important part in lunar surface thermal environment. The topographic effect was usually ignored in previous work, which might cause great uncertainties in surface temperature simulation. To better understand the surface temperatures of the craters at any time and on any location of the Moon, we simulated the effective solar irradiance and temperatures of the Banting crater as an example. In this work, we firstly constructed a three-dimensional Banting crater (16.4°E, 26.6°N) model based on the elevation data obtained from the Lunar Orbiter Laser Altimeter onboard Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO), and then calculated the distribution of the effective solar irradiance at different local times. In addition, we calculated the distribution of percentage of illuminated area of the Banting-like craters at any day time and on all locations of the Moon. These results show that the craters located within 48.2°N/S and at the time of 08:48–15:12 are illuminated without any self-shading, while that located at high latitudes or near to dawn/dusk endure different degrees of the self-shading effect. Finally, we simulated the temperatures of the Banting crater at different local times based on the surface radiation balance. Compared to the temperatures measured by Diviner aboard LRO, the results show that the simulated temperatures are well consistent with the Diviner observations, which verified our models and simulation results.

Moon, simple crater, solar irradiance, temperature, numerical simulation

PACS: 95.30.Jx, 95.85.Hp, 96.20.-n, 96.35.Gt

doi: 10.1360/SSPMA2018-00348