

基于 LRO Diviner 数据的月球虹湾地区 表面亮温时空分布

马明^{1,2}, 陈圣波^{1*}, 李健¹, 于岩¹, 肖扬^{1,2}

(1. 吉林大学地球探测科学与技术学院, 吉林 长春 130026;

2. 吉林建筑大学测绘与勘查工程学院, 吉林 长春 130118)

摘要: Diviner 在 7 年多的运行时间内, 共获得了超过 3.3×10^{11} 个辐射亮度测量值. 这些数据除了具有的推扫性、条带性和少量的“坏点线”与“故障”等特征外, 在一个月球日内呈现白天正午前后和整个夜晚亮温值变化幅度相对均匀, 上下午尤其是日出和日落前后亮温值变化剧烈的规律. 利用昼夜分段亮温拟合模型, 结合数值模拟、奇异值剔除、分段拟合和纬向校正等方法获得了虹湾地区 6 个时刻的高分辨率和高覆盖度的亮温分布. 结果表明, 白天的亮温与太阳辐射通量值计算的亮度值相接近, 敏感于地形起伏、物质混合和通道光度计特性等因素, 最高和最低亮温分别出现在朝向赤道方向的山坡和落差最大的撞击坑中心位置; 夜晚的亮温敏感于视场内物质的热物理属性差异, 变化幅度由上半夜的相对剧烈逐渐过渡到下半夜的趋于均匀. 文章揭示了月表热能量交换规律, 解释了复杂和异常月表热红外环境的本质, 提供了一个关于无大气星体的风化层如何存储热红外辐射能量以及与空间环境进行能量交换的新视角.

关键词: 热红外; 亮温; 时空分布; 虹湾; Diviner

中图分类号: P184.5+3 **文献标识码:** A

The Sinus Iridum surface brightness temperature temporal-spatial distributions by LRO diviner data

MA Ming^{1,2}, CHEN Sheng-Bo^{1*}, LI Jian¹, YU Yan¹, XIAO Yang^{1,2}

(1. College of Geo-exploration Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, China;

2. College of Surveying and Exploration Engineering, Jilin Jianzhu University, Changchun 130118, China)

Abstract: Approximately more than 330 billion calibrated radiance measurements of the Moon had been acquired by Diviner over 7 years. Diviner data were routinely interrupted by pushbroom nadir mapping mode and had a small number of outliers during spacecraft or instrument anomalies. In one lunar day, the change of brightness temperature is relatively uniform at noon or throughout the night and abnormally severe in the morning or afternoon especially during sunrise and sunset. The Sinus Iridum brightness temperature distributions of high spatial resolution and high coverage in six moments have been obtained by processing methods which include numerical simulation of bright temperature, elimination of singularities, piecewise fit and latitudinal direction correction. Remarkably, diurnal brightness temperatures are nearly equal to that calculated from the solar flux and vary depending on the distribution of topography range, material composition and channel photometric properties. The highest value appears in the direction of the slope towards the equator and the lowest value appears at the center of the crater where the elevation difference is the biggest. Nevertheless, nocturnal brightness temperatures mainly are sensitive to materials with differing thermophysical properties. Brightness temperature drop rate

收稿日期: 2017-02-17, 修回日期: 2017-03-27

Received date: 2017-02-17, revised date: 2017-03-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(41372337, 3A415AK44423, 41772346), 科技基础专项项目(2015FY210500)和 863 计划(2015AA123704)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China (41372337, 3A415AK44423, 41772346), Special project of science and Technology Foundation (2015FY210500), the National High Technology Research and Development Program ("863" Program) of China (2015AA123704)

作者简介 (**Biography**): 马明 (1979-), 男, 辽宁丹东人, 讲师, 博士, 主要从事月球热红外遥感研究. E-mail: 121303083@qq.com

* 通讯作者 (**Corresponding author**): E-mail: chensb@jlu.edu.cn

changes severly in the first half of the night and becomes gradually uniform in the latter half of the night. Results of the paper reveal the surface energy balance of the Moon, explain the complex and extreme nature of the lunar surface thermal environment. The results also provide a new comprehensive view of how regoliths on airless heavenly bodies store and exchange thermal energy with the space environment.

Key words: thermal infrared, brightness temperature, temporal-spatial distributions, sinus Iridum, diviner

PACS: 95.55. -n, 95.55. Pe

引言

Diviner 是月球勘测轨道飞行器 LRO(The Lunar Reconnaissance Orbiter)七个有效载荷之一^[1]已经对月球表面进行了系统的测量,正在获取全月范围内的太阳反射和红外辐射测量值.从 2009 年 7 月 5 至 2016 年 12 月 15 日,共获取了超过 3.3×10^{11} 组辐射定标测量数据,覆盖了全月球和季节,并包含了太阳反射和热辐射两个波段.利用这些数据,我们可以构建月表能量平衡模型,揭示月表复杂多变的热环境的本质.此外,时间和空间分辨率将会随着数据的更新不断改进.

与太阳系中其他可探测的无大气星体相比,月球是为数不多的能够提供全面描述表面热环境观测数据的星体.月球的研究意义不仅因为其相对于其他星体易于探测,而且其古老的表面记录着地球和太阳系中星体最早阶段的形成信息(小行星比月球更能代表古老的、太阳系早期的信息),表现为月球表面相当长时段的重要星体演变过程,包括撞击、火山、易挥发物冷却痕迹和空间风化等作用,这些与太阳系中可观测到其他星体的演变过程具有直接的联系.虹湾($24^\circ \sim 38^\circ \text{W}$, $38^\circ \sim 50^\circ \text{N}$)位于月球正面中轴线西北侧,月海和月陆高地交界地区,是月表具有代表性的研究区域之一.该区域的热平衡时空规律研究,有助于揭示和理解月表热环境变化规律,可以对其他地区的热环境研究提供借鉴.

早期的月球热环境研究从地基望远镜探测^[2]开始.随着研究的不断深入,地基热气球^[3]、月表着陆航天任务^[4]、实验室测量^[5]和绕月卫星观测^[6]等方式逐渐开展.其中,Diviner 是目前探测手段最先进、空间分辨率最高、数据完整性最好和探测面积最全的月球红外研究手段^[7].以 Diviner 红外探测数据为基础,Paige *et al.* (2009)^[6]、Williams *et al.* (2015)^[8]和 Williams *et al.* (2016)^[9]等研究了月球局部或者整体的温度分布.但是,他们对于月表热分布规律研究存在明显的缺陷,一部分学者没有考虑

到 Diviner 数据的时间和空间分布规律,只是将特定时间段的亮温数据简单叠加获得了低覆盖度的月表热分布;另一部分学者的月表热分布空间分辨率相对较低,只有 2×2 像素/度,无法对月表局部亮温异常进行分析.本文充分研究了 Diviner 连续推扫式观测方式获取的红外数据的时间和空间分布规律,以 Diviner 红外观测数据的基本特征为基础建立分段亮温拟合模型,利用数值拟合、奇异值剔除、分段拟合和纬向校正等方法对不同观测时间和相同观测条件下的红外数据进行处理,获得虹湾地区特定时间点(0、3、9、12、15 和 21 点)和高空间分辨率(64×64 像素/度)的亮温分布,并在此基础上分析和研究了虹湾地区亮温的时空分布规律,希望能够为月表物质热物理特性、永久阴影区和水冰等研究提供依据.

1 Diviner 探测器

LRO 于 2009 年 6 月 19 日(北京时间)发射,2009 年 6 月 28 日开始工作.Diviner 于 LRO 开始工作 8 天后进行数据测量,是一个 9 通道推扫式辐射计,可以获得全月范围内的太阳反射和热红外发射数据,光谱通道范围从紫外到远红外,约 0.3 至 $400 \mu\text{m}$.其中,通道 6 至通道 9 为宽波热红外通道,主要用于获得月球表面的热发射能量,并在此基础上反演月表亮温值,进而描述月表的热发射特征^[6].由于没有新的探测器接替 LRO,其目前依旧从事椭圆轨道的探测任务.

Diviner 每个通道由 21 个探测器组成,通过推扫式天底观测采集数据,测量周期为 0.128 秒,在半个地球年中将月球扫描一遍.目前,Diviner 已经利用最低点推扫式测量方式获取了全月统一和最大时间覆盖度的测量数据,伴随着探测时间的增加,全月范围内红外数据的时间和空间分辨率将不断改进.同时,Diviner 在其传统的间隔性的测量工作间隙期间内还需要完成空间黑体定标和太阳校正,以及特殊的大倾角遥感观测等工作.尽管 Diviner 数据的时间和空间分辨率一直在提高,但是这种推扫式测量

方式不免造成了全月范围内数据时间和空间覆盖度的缺失问题. 关于 Diviner 更详细的描述参见文献 [6].

2 Diviner 数据特征

Diviner 辐射计数据包括 4 个级别数据^[10], 其中, GDR 2 (Gridded Data Record) 级数据被 NASA PGN (NASA Planetary Geosciences Node) 定于为 Diviner 数据存储标准之一, 包含着大量 Diviner 测量过程的原始信息, 为 ASCII 格式. 以月表赤道地区 ($180^{\circ}\text{W} \sim 180^{\circ}\text{E}, 0.015\ 625^{\circ}\text{S} \sim 0.015\ 625^{\circ}\text{N}$) 2012 年 1 到 6 月之间的 GDR 2 级红外通道亮温数据为研究对象, 其误差棒图如图 1^[7].

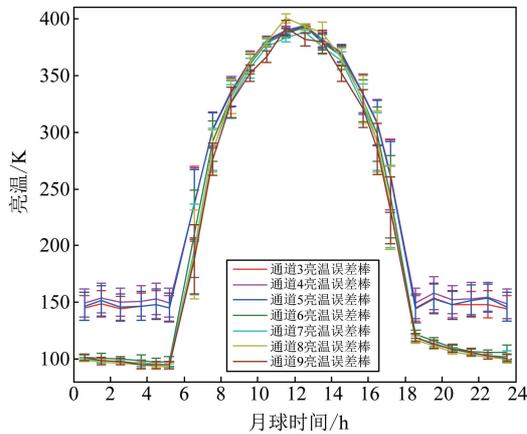


图 1 赤道地区 Diviner 亮温误差棒图
Fig. 1 The Brightness Temperature Error Bar Charts of the Lunar Equator Area

由图 1 可见, 赤道地区 Diviner 红外测量数据展示了月表温度分布规律, 呈现白天正午前后和整个

夜晚亮温变化幅度较小, 上下午 (尤其是日出和日落前后) 亮温变化剧烈的特征. 表 1 给出了 Diviner 赤道地区部分时段亮温的均值和变化量 (均方差 R^2). 其中, 通道 6 的亮温最接近文献 [11] 模型计算的温度分布, 且 Vasavada 也认为通道 6 的亮温可以代替月表实际温度^[12]. 因此, 以通道 6 的亮温为主开展分析. 研究赤道地区通道 6 的亮温平均值发现, 白天的亮温变化量大约为 290 K 左右, 而夜晚的亮温变化量约为 24 K 左右. 此外, 白天的月表温度由于受到地形影响, 清晨 (6 ~ 7 点) 和黄昏 (17 ~ 18 点) 时段的亮温变化量较大, 均方差分别为 38.38 K 和 36.32 K, 而正午时段赤道区域受到地形效应的影响最小, 且太阳辐射吸收充足和稳定, 亮温变化量相对较小 (3.74 K 和 1.63 K), 甚至小于部分夜晚时间段的亮温变化量.

但是, 有三个问题需要引起注意: 首先, 通道 3、4、5 的夜晚亮温平均值出现明显的异常, 且亮温变化量也异常高 (与通道 6 到 9 相比), 这与文献 [13] 得出的 Diviner 通道 3 到 5 夜间红外数据没有足够信噪比一致. 因此, 不能利用这些数据进行月表温度分布研究. 其次, 白天的月表温度变化是不对称的, 仍然以通道 6 亮温为例, 日出后 (6 ~ 7 点) 和日落前 (17 ~ 18 点) 的平均亮温相差 32.36 K, 但它们的亮温变化量几乎相同, 仅仅相差 2.06, 而正午前后 (11 ~ 12 点和 12 ~ 13 点) 的平均亮温差和亮温变化量分别为 5.71 K 和 2.11 K, 变化幅度趋于对称, 这与文献 [14] 发现的月球日出和日落时间段内普遍存在非平衡辐射现象一致. 最后, 夜间的月表亮温下降速度是不均匀的, 在 13.65 个地球日的漫长月夜中, 月表亮温不是持续均匀降低, 例如日落后、午夜和日

表 1 Diviner 赤道地区部分时段 (h, 月球时间) 亮温均值 (K) 和均方差 (R^2)

Table 1 The Average Brightness Temperature and Mean Square Deviation of Equator Area in Several Lunar Hours

通道		23-24	0-1	5-6	6-7	11-12	12-13	17-18	18-19
通道 3	均值	144.65	145.19	144.84	237.56	388.87	392.28	263.00	144.70
	R^2	11.36	10.86	11.06	32.26	3.39	1.49	31.24	11.21
通道 4	均值	148.74	149.46	149.51	236.47	390.18	394.22	261.57	149.30
	R^2	13.08	12.62	12.81	32.24	3.51	1.59	32.00	13.37
通道 5	均值	146.10	149.46	145.39	237.02	388.78	393.66	260.79	144.68
	R^2	12.81	12.63	12.46	30.17	3.65	1.65	31.36	12.40
通道 6	均值	105.52	101.42	97.59	210.56	387.42	393.13	242.92	121.82
	R^2	6.48	2.47	4.49	38.38	3.74	1.63	36.32	3.51
通道 7	均值	102.15	100.13	94.92	196.74	383.76	388.67	234.36	118.85
	R^2	4.80	1.21	2.53	39.92	3.76	1.62	36.40	3.19
通道 8	均值	99.95	98.95	93.32	191.97	400.68	393.38	233.65	116.97
	R^2	3.92	1.47	2.41	39.23	3.90	2.60	36.65	3.21
通道 9	均值	101.02	101.42	94.59	188.20	392.39	382.16	231.09	118.91
	R^2	3.58	3.11	3.23	30.51	6.67	5.71	29.48	3.67

出前通道 6 的平均亮温分别为 121.82 K、102.82 K 和 97.59 K,上半个月夜和下半个月夜的平均亮温变化量分别为 19K 和 5.23 K,这种不均规律明显大于文献[11]模型的不均匀结果.因此,在对于月表夜间亮温进行数值模拟的过程中不能将夜晚作为一个整体进行模拟.

此外,在研究 Diviner GDR 2 级 ASCII 数据过程中发现,Diviner 测量数据中除了存在少量的“坏点”或者“坏线”数据之外,每隔 40 min(地球时间)Diviner 会出现一次仪器“故障”,并且纬度越高,出现的频率越高,尤其在两极地区,“故障”排除后 Diviner 的测量数据依然缺乏足够的信噪比.因此,在利用 Diviner 测量数据进行研究时,需要剔除“坏点”、“坏线”、“故障”以及“故障”排除后(约 783 × 21 × 9 组)的测量数据.

3 Diviner 亮温制图

整理了 2009 年 7 月 15 日到 2016 年 9 月 15 日间虹湾地区 3451 景 Diviner 通道 6 亮温数据,依据红外数据特征建立中心纬度(40°、44°和 48°)昼夜分段亮温拟合模型.其中,建立了傅里叶式(1)、高斯式(2)和二阶线性式(3)日亮温拟合模型,以及一阶线性式(4)分段夜亮温拟合模型.表 2 中给出了三种日亮温拟合模型参数及精度.研究表 2 发现:傅里叶与线性拟合模型相关性相同,高于高斯拟合模型相关性,最低相关系数为 0.752 9,满足虹湾地区日亮温拟合要求;每种日拟合模型相关系数随纬度的增加而减少,原因是高纬度的虹湾地区地形复杂,导致白天亮温测量数据离散程度增大,降低拟合模型的相关性.表 3 中给出了分段夜亮温拟合模型参数及精度.研究表 3 发现:夜拟合模型相关系数在 0.062 67 ~ 0.658 2 之间,低于日拟合模型相关系

数;每种夜拟合模型相关系数随纬度和时间的增加而减少.导致夜拟合模型相关系数较低的主要原因是高纬度虹湾地区地形复杂和月表物质的热物理属性差异,这两方面原因加大了夜晚亮温数据的离散程度.因此,在昼夜亮温数据处理过程中必须增加约束条件,控制拟合模型相关性低带来的影响.

$$T_{\text{model}} = a_0 + a_1 \cdot \cos(h \cdot w) + b_1 \cdot \sin(h \cdot w) \quad (1)$$

$$T_{\text{model}} = a_1 \cdot e^{-((h-b_1)/c_1)^2} \quad (2)$$

$$T_{\text{model}} = p_1 \cdot h^2 + p_2 \cdot h + p_3 \quad (3)$$

$$T_{\text{model}} = p_1 \cdot h + p_2 \quad (4)$$

表 3 中心纬度夜分段拟合模型参数及精度
Table. 3 The Night Fitting Model Parameters and Mean Square Deviation of 40°, 44° and 48°

时段	纬度	p_1	p_1	R^2
18 ~ 24	40°	-3.502	180.3	0.658 2
	44°	-3.301	175	0.549 7
	48°	-3.471	177.5	0.527 3
21 ~ 3	40°	-1.791	98.75	0.317 2
	44°	-1.978	97.67	0.269 7
	48°	-1.92	96.33	0.258 1
0 ~ 6	40°	-0.972 5	97.31	0.099 77
	44°	-0.912 3	96.14	0.071 92
	48°	-0.884 4	94.76	0.062 67

分别以二阶线性日亮温拟合模型和一阶线性夜亮温拟合模型为基础,利用数值拟合方法将研究区不同时间点的亮温计算成特定时间点的亮温;利用奇异值剔除方法(中心纬度 40°、44°和 48°的极大值 1.01 倍和极小值的 0.99 倍)剔除测量值中“坏点”、“坏线”、“故障”和“故障”排除后(7047 组)数据;利用分段拟合方法拟合特定时间点的亮温数据(一般为特定时间点上下 3 小时范围数据,不包括 5 ~ 7 点和 17 ~ 19 点数据);利用纬向校正方法(式(5))消除亮温图中的纬向效应.具体制图方法参见文

表 2 中心纬度日拟合模型参数及精度

Table. 2 The Day Fitting Model Parameters and Mean Square Deviation of 40°, 44° and 48°

模型	纬度	a_0	a_1	b_1	w	R^2
傅里叶拟合	40°	-7.794e+007	7.794e+007	-3.425e+005	-0.000 366 5	0.890 4
	44°	-4.875e+007	4.875e+007	2.677e+005	0.000 460 3	0.897 6
	48°	-2.057e+008	2.057e+008	-5.553e+005	-0.000 224 8	0.778 4
模型	纬度	a_1	b_1	c_1		R^2
高斯拟合	40°	369.3	11.99	7.578		0.862 9
	44°	361.8	11.93	7.548		0.865 5
	48°	355.9	12.01	7.438		0.752 9
模型	纬度	p_1	p_2	p_3		R^2
线性拟合	40°	-5.235	125.5	-385.6		0.890 4
	44°	-5.165	123.2	-375.9		0.897 6
	48°	-5.196	124.8	-396.4		0.778 4

献[15].

$$T_1 = T_h \cdot \left(\frac{T_{h(\text{mod elup})}}{T_{h(\text{mod elup})}} \cdot \frac{lat_h - lat_{up}}{4} + \frac{T_{h(\text{mod eldown})}}{T_{h(\text{mod eldown})}} \cdot \frac{lat_{down} - lat_h}{4} \right) \quad (5)$$

制图过程中忽略了地形效应、发射角度和太阳入射角度等问题. 原因有两方面, 一方面 Diviner 的垂直观测推扫测量方式获取了发射角度为近似 0° 的红外数据, 保证了红外数据在发射角度这一条件的相同性; 另一方面, 亮温拟和模型是在多种观测条件和效应基础上建立的, 同时数值拟合过程中的奇异值剔除、分段拟合和纬向校正等方法有效的消除了特定时间点的亮温异常值, 每个像素最终的亮温值也是建立在多个拟合值的均值基础上的.

亮温图的像素分辨率为 $0.015\ 625^\circ \times 0.015\ 625^\circ$, 即 64×64 像素/度, 也是 Diviner 测量数据能达到的最高空间分辨率. 研究的亮温图空间分辨率高于温度图的空间分辨率^[9] (2×2 像素/度), 且由于 Diviner 较长的工作时间, 该分辨率下可以满足较高的空间覆盖度 (6 个时间点的空间覆盖度均高于 99%), 极大的满足了月表亮温空间分布规律研究的需求. 时间点设为 0 点、3 点、9 点、12 点、15 点和 21 点的亮温图, 可以充分分析月表昼夜温度变化规律. 也可以根据研究需要, 制作其他时间点的亮温图. 持续不断的观测可以提高 Diviner 数据的空间和时间分辨率, 加强未来 Diviner 数据产品的科学性.

值得注意的是, 日出和日落前后的月表温度是月球热环境最直观和有效的研究对象, 包含着大量的月表物质热物理特性和月球环境热交换的信息. 但是, 在亮温拟合时没有利用日出和日落前后时间内的亮温数据, 也没有制作 6 点和 18 点的亮温图, 原因是日出和日落前后月表的温度变化剧烈, 很难利用现有的数学模型对这个时间段内的观测数据进行模拟. 在以后的研究中, 需要对月表瞬时辐射量变化进行充分的研究后, 才能合理分析和研究此时间段内的亮温数据.

基于等距圆柱投影和 GCS_MOON_2000 坐标系, 64×64 像素/度空间分辨率的月表虹湾地区 21 点、0 点、3 点、9 点、12 点、和 15 点的亮温分布图, 如图 2、图 3、图 4、图 5、图 6 和图 7.

4 亮温时空分布规律

4.1 白天亮温

Diviner 每个通道获取的白天亮温值主要与探

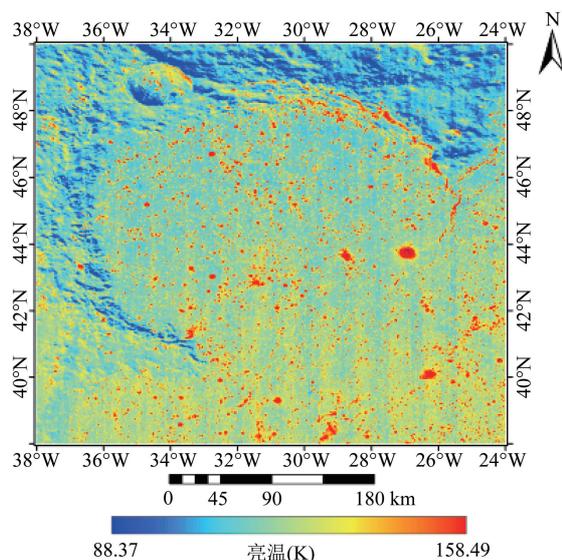


图 2 虹湾地区 21 点亮温分布图

Fig. 2 The brightness temperature distribution image of the sinus iridium at 21:00

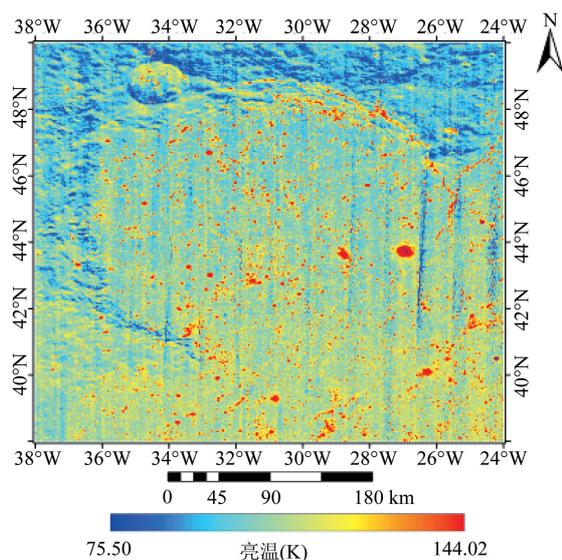


图 3 虹湾地区 0 点亮温分布图

Fig. 3 The brightness temperature distribution image of the sinus iridium at 0:00

测范围内像元温度、像元内物质的发射率和通道光度计的特性有关. 由于月表粗糙度^[14]和月表物质热物理特性多样性影响, Diviner 通道亮温中存在大量的热异常. 因此, Diviner 通道 6 的白天亮温分布轻微夸大了实际温度分布, 与温度较为稳定的正午时刻 (图 6) 相比, 9 点 (图 5) 和 15 点 (图 7) 亮温图中这种热异常表现的更为明显. 虹湾的平坦地区热分布均匀, 亮温数值主要取决于纬度, 接近太阳辐射通量值计算的温度值. 与平坦地区相比, 山脉和撞击坑

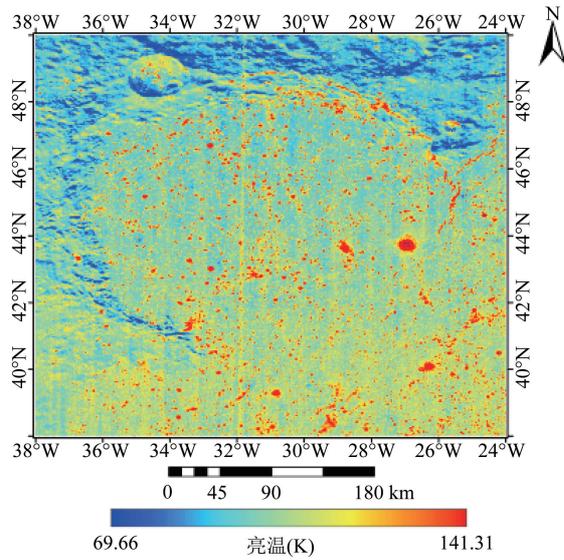


图 4 虹湾地区 3 点亮温分布图
Fig. 4 The brightness temperature distribution of the sinus iridium at 3:00

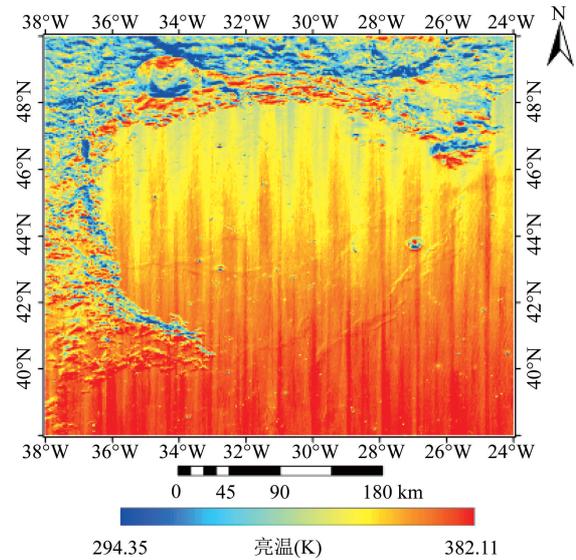


图 6 虹湾地区 12 点亮温分布图
Fig. 6 The brightness temperature distribution of the sinus iridium at 12:00

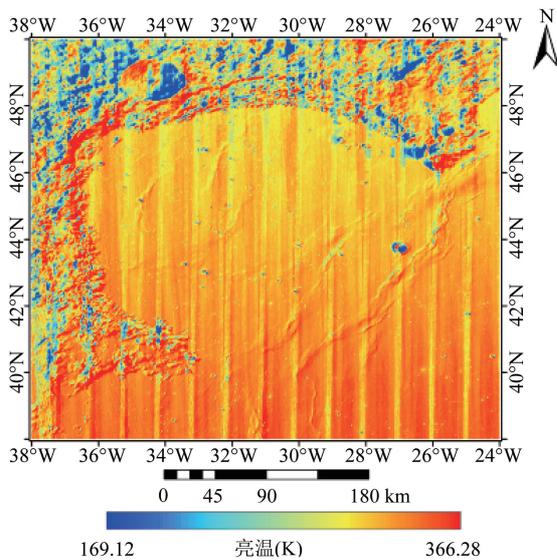


图 5 虹湾地区 9 点亮温分布图
Fig. 5 The brightness temperature distribution of the sinus iridium at 9:00

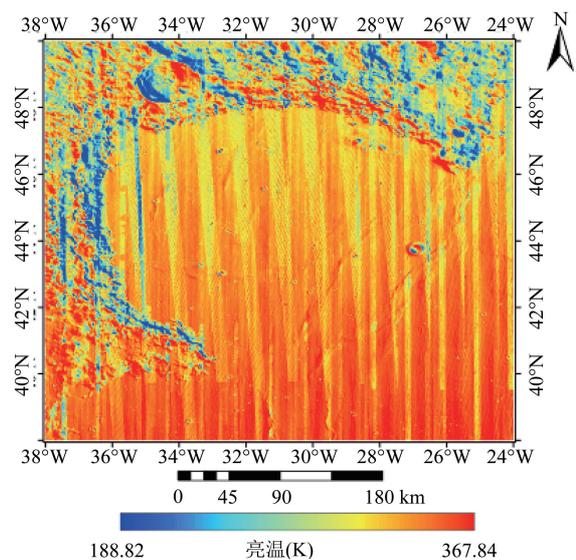


图 7 虹湾地区 15 点亮温分布图
Fig. 7 The brightness temperature distribution of the sinus iridium at 15:00

地区的太阳光照射条件受到地形起伏影响较大,其中,较大的光照入射角、地面倾斜角度和阴影加大了亮温的差异性.同时,风化层最上层几厘米的高绝缘物质隔离了更深层中几毫米厚的能保持较高温度月壤与月球外部空间环境间的联系,产生了较大的温度梯度^[14].这种现象在日出后和日落前的一段时间内表现的更为明显.

光照和斜坡阴影的共同作用导致了明显的亮温异常,这种异常导致了正午时刻(图 6)与 9 点(图

5)和 15 点(图 7)的亮温图存在明显的差异.正午时刻的亮温图中,东和西两个方向的阴影地形效应影响最小,而 9 点和 15 点的亮温明显受到阴影地形效应影响,尤其是在比安基尼撞击坑(Bianchini)地区和虹湾西侧山脉地带.正午时刻,山脉顶部的亮温最高,东西两侧的逐渐降低,数值相近,朝向赤道方向山坡的亮温明显高于朝向北极方向山坡的亮温.撞击坑的亮温分布规律与山脉的规律相似,只是高程较低的撞击坑中心的亮温低于东、西侧坑壁的亮温,

且亮温差随撞击坑的深度增加而增大. 9点和15点亮温呈现明显的对比关系, 早上朝向东侧的山坡和坑壁的亮温明显高于朝向西侧的山坡和坑壁的亮温, 下午则恰恰相反. 9点、12点和15点的亮温最大值分别为366.28 K、382.11 K和367.84 K, 最高亮温值出现在赫拉克利德角(Promontorium Heraclides)和拉普拉斯角(Promontorium Laplace)处, 此位置朝向赤道, 没有任何遮挡, 每天都有12个小时的日照. 白天的最低亮温出现在拉普拉斯角上方的一个较小撞击坑的底部阴影区中, 该撞击坑是虹湾地区高程差变化最大的地区之一, 撞击坑底部几乎接收不到太阳的照射.

此外, 在Diviner的推扫式探测过程中, 每组数据探测结束后需要进行空间黑体定标和空间太阳校正等工作, 由于测量时间的增长, 导致每组探测数据的最后几个数据会出现轻微的异常. 如图5、图6和图7中的条带现象, 由于正午的温度变化量较小, 正午的条带现象明显弱于上、下午的条带现象. 当然, 可以利用小波变换修正和校正这些异常数据, 消除亮温分布中的条带现象, 后续将另文研究.

4.2 夜晚亮温

由于没有太阳辐射和保持温度的大气, 月表夜间温度的不同主要取决于物质热物理属性的差异, 敏感于密度和粒度分布等特性. 21点(图2)、午夜(图3)和3点(图4)亮温图揭示了虹湾地区最上层30 cm厚度的月壤热物理特性的变化趋势, 此厚度接近白天热辐射波谱的穿透深度^[12]. 岩石含量比例较低和具有相对较高热惯量月壤风化层的月海地区亮温明显高于岩石含量较高和具有相对较低热惯量月陆地区的亮温. 例如, 比安基尼撞击坑地区的亮温差异最明显, 其主要原因是宇宙射线的侵蚀和撞击熔化等作用风化和改变了撞击过程中挖掘出大量的岩石, 导致了撞击坑月壤风化层中岩石和月壤的不规律分布. 值得注意的是, 之前的研究认为表的主要地质作用, 包括月表岩石的机械分解作用和微小陨石的撞击作用, 导致了月海风化层中大部分岩石都被作用成均匀的风化层颗粒^[12]. 然而, 图2、图3和图4中的亮温分布显示, 月海中除了由于地形原因导致的微小撞击坑的亮温异常外, 月表和近月表的风化层中依然保存大量的岩性特征. 此外, 向北倾斜的山脉具有相对较低的亮温, 表明中高纬度地区, 地形倾斜方向依然对月表温度具有影响.

与白天的月表亮温变化剧烈相比, 夜晚的月表

亮温分布较为均匀, 变化幅度较小. 但是, 在整个夜晚中亮温的下降量却不是均匀, 例如, 21点、0点和3点的亮温最大值分别为158.49 K、144.02 K和141.31 K, 最小值分别为88.37 K、75.50 K和69.66 K. 21点与0点的最大和最小亮温极值的变化量分别为14.47 K和12.87 K, 而0点与3点的变化量分别为2.71 K和5.84 K, 换言之, 上半夜的亮温下降量是下半夜亮温下降量的2倍至5倍. 整个研究区域的亮温下降都呈现这种不均匀的变化规律. 此外, 亮温极值点的位置并不固定在特定地区, 而是随着时间推移而变化. 导致这种变化的原因是在漫长的月夜中由于缺少大气, 在日落前后较短的时间内, 月表大部分地区的平均温度由日落前的200 K以上下降至日落后的120 K左右. 之后, 月表风化层的能量损失主要取决于表层或者近表层物质的热物理属性, 在相对较长的“冷却”时间内, 风化层中的逐层能量传递不断减少, 导致热惯量物质的热对比不断减少, 温度变化由上半夜的相对剧烈逐渐过渡到后半夜的趋于均匀.

值得注意的是, 之前的研究^[9]没有得到如此高分辨率的月表亮温分布, 无法对月表局部亮温异常进行分析. 研究夜晚的亮温分布(图2、图3和图4)发现, 月海中存在大量的亮温热点. 原因主要有三方面. 第一, 夜晚月海中较小或者极小撞击坑的内部受到坑壁岩石辐射能量的多重散射, 导致探测器视场内的视辐射量异常增加^[16], 使得本身就具有较高亮温的撞击坑内部额外出现一个亮温增加量, 夸大了撞击坑内部的亮温值; 第二, 月壤中的高绝缘物质和近似真空的大气环境导致了月海地区仿佛是一个“保温箱”, 1.4 m以下的能量^[11]几乎传递不到月壤表层. 但是, 如果存在大块裸露的岩石, 贯穿到月壤表层1.4 m以下, 与细颗粒的风化层相比, 岩石将传递更多的月球内部热量, 进而导致遥感观测的亮温异常; 第三, 月海的个别区域中存在着0.5~1 m的岩石碎片^[9], 这些碎片间的相互散射导致了传感器感应的亮度值存在一个增加量, 进而导致了亮温值的异常, 产生热点现象.

4.3 昼夜亮温变化

对于慢旋转体和低热惯量的月球, 月表白天的温度接近于热辐射平衡, 最高温度出现在正午时刻, 且敏感于观测角度和地形几何. 最低温度出现在日出前, 取决于风化层的热物理特性. 夜晚的温度不仅与风化层的热物理特性有关, 而且受到地形倾斜角度的影响. 总的来说, 反射率较低的月海地区和朝向

赤道方向的岩石地区具有较高的温度,而低热惯量或者岩石含量较高的表面以及朝向两极方向的岩石地区具有较低的温度。

虹湾地区存在着月陆和月海两种地质单元,高地更为古老,月壤更厚。月陆的反射率较高,主要以岩石为主,热惯量相对较低,吸收能量能力低;而月海的反射率较低,主要以月壤为主,热惯量较高,吸收能量能力高。因此,白天同一纬度的月海亮温要比月陆亮温大约高 10 K,夜晚月海的亮温依然高于月陆,但是亮温差却降低了大约 1 倍,约为 5 K。主要原因是白天的太阳辐射能量较大,而夜晚的月球内部传递能量较小。这种温度变化导致了在月球基地的设计过程中,结构体的热膨胀、收缩和易受损等方面将变得更加复杂。

5 结论

以虹湾地区 3451 景 (200907151820-201609151700) Diviner 通道 6 辐射定标亮温值为研究对象,依据同纬度红外数据的基本特征,利用数值模型模拟、奇异值剔除、分段拟合和纬向校正等方法绘制了研究区 6 个时间点的 0.015625°分辨率的亮温分布,并以此为基础分析了月表虹湾地区亮温时空分布规律,提供了虹湾地区近月表层综合热环境分布数据。主要有以下三点结论:

(1) 同一纬度的 Diviner 红外辐射亮温数据整体上展示出了月表温度分布规律,呈现白天正午前后和整个夜晚亮温变化幅度较小,日出和日落前后亮温变化剧烈的规律。但是,也存在着日出和日落亮温变化不对称,整晚亮温变化速率不均匀,少量的“坏点”、“坏线”、“故障”数据和“故障”排除后一定时间内的数据失真等现象,在进行数据模拟过程中应该充分考虑各种规律和现象。

(2) 利用昼夜分段拟合模型,结合数值拟合、奇异值剔除、分段拟合和纬向校正等处理方法可以获得虹湾地区 64×64 像素/度高覆盖度的不同时刻的月表亮温分布影像,能够满足了月表区域或者局部亮温空间分布规律研究的需求。

(3) 虹湾地区的热环境非常极端,在月球表面具有极强的代表性。白天,虹湾的平坦地区热分布均匀,主要受纬度影响,亮温值接近太阳辐射通量值计算的亮度值;山脉和撞击坑地区的热分布取决于光照入射角、地面倾斜角度和阴影等因素,朝向太阳和赤道方向的山坡、山顶和坑壁亮温值明显高于朝向北极方向和阴影区域的亮温值。白天热分布符合纬

度模型计算的亮度规律^[11]。夜晚,虹湾地区的热分布主要取决于视场内物质传递月球内部热能力的差异和地形影响,尽管亮温变化幅度没有白天剧烈,但是在整个夜晚中亮温呈现上、下半夜不均匀下降规律,且月海中存在大量的亮温热点。月海的亮温始终高于同纬度月陆的亮温,且白天月海与月陆的昼夜亮温变化量大约是夜晚变化量的 2 倍。

References

- [1] Chin G, Brylow S, Foote M, *et al.* Lunar Reconnaissance Orbiter Overview: The Instrument Suite and Mission [J]. *Space Science Reviews*, 2007, **129**(4):391-419.
- [2] Jaeger J C, Harper A F A. Nature of the Surface of the Moon [J]. *Nature*, 1950, **166**(4233):1026-1026.
- [3] Murcray F H, Murcray D G, Williams W J. Infrared emissivity of lunar surface features: 1. Balloon-borne observations [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1970, **75**(14):2662-2669.
- [4] Salisbury J W, Hunt G R, Logan L M. Infrared spectra of Apollo 16 fines [C]//Lunar and Planetary Science Conference Proceedings. 1973, **4**:3191.
- [5] Logan L M, Hunt G R. Emission spectra of particulate silicates under simulated lunar conditions [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1970, **75**(32):6539-6548.
- [6] Paige D A, Foote M C, Greenhagen B T, *et al.* The Lunar Reconnaissance Orbiter Diviner Lunar Radiometer Experiment [J]. *Space Science Reviews*, 2009, **150**(1-4):125-160.
- [7] Ma M, Chen SB, Zhou C, *et al.* Major Element Abundances at the Apollo 15 Landing Site: Results from Diviner Data [J]. *Acta Petrologica Sinica*, (马明, 陈圣波, 周超, 等. 基于 Diviner 热红外数据的 Apollo 15 登陆区元素含量反演. *岩石学报*)2016, **32**(1):144-150.
- [8] Williams J P, Seftonnash E, Paige D A. The temperatures of Giordano Bruno crater observed by the Diviner Lunar Radiometer Experiment: Application of an effective field of view model for a point-based data set [J]. *Icarus*, 2015, **273**:205-213.
- [9] 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 [J]. *Icarus*, 2016.
- [10] Vondrak R R, Keller J W, Russell C. Lunar Reconnaissance Orbiter Mission [M]. Springer, Berlin, 2015.
- [11] Vasavada A R, Paige D A, Wood S E. Near-surface temperatures on Mercury and the Moon and the stability of polar ice deposits [J]. *Icarus*, 1999, **141**(2):179-193.
- [12] 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]. *Journal of Geophysical Research*, 2012, **117**(E12):301-311.
- [13] 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]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2011, **116**(12):96-111.

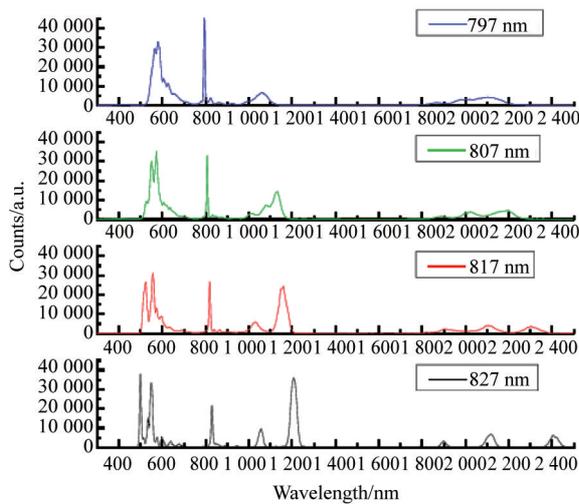


图7 当泵浦功率为0.42 W,泵浦波长为797、807、817、827 nm时输出光谱

Fig. 7 The observed output spectra with the pump wavelength at 797, 807, 817, 827 nm and pump power at 0.42 W 外光源应用提供了一个很好的解决途径.

References

- [1] Yuan J H, Sang X Z, Yu C X, *et al.* Widely wavelength-tunable two-colored solitons and small spectral component for broadband mid-Infrared wavelength generation in a highly birefringent photonic crystal fiber[J]. *Photonics Technology Letters, IEEE*, 2012, **24**(4): 670–672.
- [2] Zhang L, Yang S G, Han Y, *et al.* Simultaneous generation of tunable giant dispersive waves in the visible and mid-infrared regions based on photonic crystal fibers [J]. *Journal of optics*, 2013, **15**(7): 075201.
- [3] Wang W, Hou L T, Liu Z L, *et al.* Design of a high-nonlinearity single-mode holey fiber with flattened dispersion around 800 nm[J]. *Chinese Physics Letters*, 2009, **26**(11): 114202.
- [4] Liao J F, Sun J Q, Qin Y, *et al.* Ultra-flattened chromatic dispersion and highly nonlinear photonic crystal fibers with ultralow confinement loss employing hybrid cladding [J]. *Optical Fiber Technology*, 2013, **19**:468–475.
- [5] YANG Tian-Yu, JIANG Hai-Ming, WANG Er-Lei, *et al.* Photonic crystal fibers with large birefringence and high nonlinearity in near-infrared band [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (杨天宇, 姜海明, 王二垒, 等. 一种近红外波段的高双折射高非线性光子晶体光纤. *红外与毫米波学报*), 2016, **35**(3): 350–354.
- [6] Knight J C, Birks T A, Russell P St J, *et al.* All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding [J]. *Optics Letters*, 1996, **21**(19): 1547–1549.
- [7] Washburn B R, Ralph S E, Lacourt P A, *et al.* Tunable near-infrared femtosecond soliton generation in photonic crystal fibers [J]. *Electronics Letters*, 2001, **37**(25): 1510–1512.
- [8] Liu X, Xu C, Knox W H, *et al.* Soliton self-frequency shift in a short tapered air-silica microstructure fiber [J]. *Optics Letters*, 2001, **26**(6): 358–360.
- [9] Takayanagi J, Sugiura T, Yoshida M, *et al.* 1.0–1.7 μm wavelength-tunable ultrashort-pulse generation using femtosecond Yb-doped fiber laser and photonic crystal fiber [J]. *Photonics Technology Letters*, 2006, **18**(21): 2284–2286.
- [10] Chan M C, Chia S H, Liu T M, *et al.* 1.2 to 2.2 μm tunable Raman soliton source based on a Cr:Forsterite laser and a photonic crystal fiber [J]. *Photonics Technology Letters*, 2008, **20**(11): 900–902.
- [11] Dekker S A, Judge A C, Pant R, *et al.* Highly-efficient, octave spanning soliton self-frequency shift using a specialized photonic crystal fiber with low OH loss [J] *Optics Express*, 2011, **19**(18): 17767–17773.
- [12] Yuan J H, Sang X Z, Wu Q, *et al.* Efficient red-shifted dispersive wave in a photonic crystal fiber for widely tunable mid-infrared wavelength generation [J]. *Laser Physics Letters*, 2013, **10**:045405.
- [13] CHEN Qi-Jie, ZHOU Gui-Yao, SHI Fu-Kun, *et al.* Study of near-infrared dispersion wave generation for microstructured fiber [J]. *Acta Physica Sinica* (陈其杰, 周桂耀, 石富坤, 等. 微结构光纤近红外色散波产生的研究. *物理学报*), 2015, **64**(3): 034215.
- [14] Wang W, Bi X Y, Wang J Q, *et al.* Broadband tunable Raman soliton self-frequency shift to mid-infrared band in a highly birefringent microstructure fiber [J]. *Chinese Physics B*, 2016, **25**(7): 074206.
- [15] Kubat I, Petersen C R, Møller U V, *et al.* Thulium pumped mid-infrared 0.9–9 μm supercontinuum generation in concatenated fluoride and chalcogenide glass fibers [J]. *Optics Express*, 2014, **22**(4): 3959–3967.
- [16] Wang W, Hou L T, Lu M, *et al.* Design of double cladding nearly zero dispersion flattened nonlinear photonic crystal fiber [J]. *Chinese Physics Letters*, 2009, **26**(11): 114205.
- [17] WU Xia, HOU Lan-Tian, WANG Wei. A double cladding dispersion flattened photonic crystal fiber with low confinement loss [J]. *Optical Communication Technology* (吴侠, 侯蓝田, 王伟. 一种双包层低损耗色散平坦光子晶体光纤. *通信技术*), 2011, (12): 21.

(上接第 635 页)

- [14] Bandfield J L, Hayne P O, Williams J P, *et al.* Lunar surface roughness derived from LRO Diviner Radiometer observations [J]. *Icarus*, 2015, **248**: 357–372.
- [15] Ma M. Study on the Lunar Surface Emissivity Inversion and Scale Effect Based on the Diviner Thermal Infrared Data of LRO Satellite [D]. Jilin University, 2016. (马明. 基于 LRO 卫星 Diviner 热红外数据的月表发射率反演及其尺度效应研究 [D]. 吉林大学, 2016.)
- [16] Li J, Li J, Weisz E, *et al.* Physical retrieval of surface emissivity spectrum from hyperspectral infrared radiances [J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, **34**(16).