



嫦娥专题·论文

地球反照对月表亮温的影响: 基于 CE-1 MRM 数据分析

魏广飞^{①②}, 李雄耀^{①*}, 王世杰^①^① 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 550002;^② 中国科学院大学, 北京 100049

*联系人, E-mail: lixiongyao@vip.skleg.cn

收稿日期: 2013-05-07; 接受日期: 2013-09-03

国家自然科学基金(批准号: 41373067, 40803019)、中国科学院空间科学战略性先导科技专项项目(编号: XDA04072100)和中国科学院地球化学研究所前沿领域月球专项资助项目

摘要 嫦娥一号(CE-1)搭载的微波辐射计(MRM)获得了全月微波亮度温度(TB)数据, 但其中包含的大量信息(例如地球反照等)尚未被挖掘. 地球反照是影响月表夜晚 TB 的重要热源, 也是研究全球气候变化的重要途径. 根据月球同步自转的特点, 本研究基于 CE-1 MRM 数据初步提取了地球反照影响下的月球正面的澄海和低纬度带的高地地区的亮温信息. 结果表明: 澄海地区的亮温主要在 1.0–1.6 K 之间, 低纬度带的高地地区则在 0.2–0.6 K 之间.

关键词 CE-1, 亮温, 地球反照**PACS:** 07.57.-c, 07.57.Kp, 07.57.Hm**doi:** 10.1360/132013-214

1 引言

地球反照是影响月表夜晚热辐射特性的重要热源, 包括地球反射的太阳短波辐射和自身的热辐射. 因此, 通过地球反照获取的地球辐射能量变化可为研究全球气候变化提供重要的信息^[1–3]. 从 1998 年开始, BBSO (Big Bear Solar Observatory)对地球反照进行了连续观测, 然而受到观测角度和大气散射等因素的影响, 其观测数据与 CERES (Clouds and the Earth's Radiant Energy System)卫星平台探测结果存在一定的差异^[4–6]. 同样, 基于卫星平台的地球反照

观测容易受到信息延迟、观测空间尺度、仪器故障等因素的影响^[3,7]. 而基于月球卫星的观测数据直接反映了全球尺度的地球反照能量变化特征, 可以提供更加全面、直接的全球气候变化信息.

2007 年 10 月 24 日我国成功发射了嫦娥一号卫星并成功在轨运行 494 天, 其搭载的多通道(3 GHz, 7.8 GHz, 19.35 GHz, 37 GHz)微波辐射计获取了多次覆盖全球、空间分辨率为 30–50 km、灵敏度为 0.5 K 的 TB 数据. 研究人员根据微波传输特性, 反演出了月表物理温度、月壤厚度、介电常数等信息^[8–11]. 然而, 亮温中包含的地球反照信息却鲜有研究. 相比白

引用格式: 魏广飞, 李雄耀, 王世杰. 地球反照对月表亮温的影响: 基于 CE-1 MRM 数据分析. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2013, 43: 1457–1464
Wei G F, Li X Y, Wang S J. Earthshine effect on lunar brightness temperature: based on the analysis of CE-1 MRM data (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2013, 43: 1457–1464, doi: 10.1360/132013-214

天, 地球反照对月表夜晚热辐射特性的影响更为突出. Huang^[12]通过计算认为地球反照到达月表的最大能量可达 0.095 W m^{-2} , 这明显大于 Apollo 15, 17 登陆点测量到的热流值 0.021 W m^{-2} , 0.014 W m^{-2} 以及全球平均值 0.018 W m^{-2} ^[13,14]. 可见在利用微波遥感数据解译月表热流时, 除了考虑地形、月壤密度、温度梯度的影响外, 地球反照也是重要的影响因素^[15]. 由于月壤的高度绝热性, Apollo 15, 17 实测数据和数值模拟结果均表明仅在距离月表 50 cm 深度以内温度变化与深度相关^[13,16,17]. 相比太阳辐射地球反照能量十分微弱, 热波穿透深度更浅, 因此从 CE-1 MRM 数据中提取地球反照信息时仅考虑穿透深度较浅的 37 GHz 通道的亮温数据. 根据月球自转与公转同步的特点, 即月球正面始终受到地球反照的影响而背面没有, 通过选取合适的研究区并剔除相关影响因素可以得到地球反照对月表亮温的影响.

2 研究方法

月表地形最显著的特征是高地和月海, 前者占月表 80% 以上^[18]. 月海、高地形成的地质过程不同, 造就了其特殊的地形地貌. 而且在矿物组成、含量、分布方面也表现出显著的差异. 月海主要被玄武岩浆流和火山灰覆盖, 富含 FeO, TiO₂ 以及较高的 CaO/Al₂O₃. 其最主要的化学特征是 TiO₂ 的含量变化很大^[18]. 高地主要矿物是钙长石, 辉石的含量变化比较大, 次矿物有橄榄石、氧化物. 除了月海和高地, 月表最显著的地形地貌特征是全球分布的撞击坑, 大小从微米级的微陨石撞击坑到巨大的多环盆地^[19]. 撞击坑在物质组成、含量等方面还表现出显著的差异. 地形的起伏变化、物质成分的差异, 造成不同区域微波发射率的变化. 要提取地球反照信息需剔除这些因素的影响. 在行星遥感中, 常用粗糙度来描述地形的起伏程度, 它也是影响 TB 的重要因素. 常用的参数有表面均方根高度(σ), 表面相关长度(l), 分别表示垂直尺度和水平尺度的粗糙程度^[20,21]. 此外还有有效均方根斜率($s_{\text{eff}} = \sqrt{2} \sigma/l$)、均方根偏差、有效坡度等, 通常采用一个或多个参数来表示星体表面的粗糙程度^[21-23]. 数值模拟结果表明, 在观测角度为 0° 时粗糙度越大 TB 越大^[24,25]. 由于 CE-1 MRM 37 GHz

通道的空间分辨率为 30 km, 为简化粗糙度分析仅考虑 σ 作为本研究中月表粗糙度的主要参数. 地基雷达观测和月壤样品测试分析表明钛铁矿含量、月壤密度与微波的吸收或介电损耗密切相关, 是影响 TB 的重要因素^[14,26]. 其中钛铁矿的影响尤为显著, 其含量越高介电损耗越高 TB 就越大^[27,28]. 由于 37 GHz 微波穿透深度很浅, 为简化计算假设在其穿透深度内月壤层结构、密度相同, 仅考虑钛铁矿含量的影响.

温度也是影响月表 TB 的重要因素, 且微波频率越高变化越明显^[11]. 引起月表温度变化的因素很多. 首先, 月球昼夜变化引起月表温度的波动^[29]. 其次, 纬度效应引起温度从赤道向两极递减^[30]. 第三, 月壤热物性差异、地形起伏、撞击坑壁的反射以及砾石的含量也会引起月表温度的改变^[31]. 第四, 太阳-月球距离的变化也会引起月表温度的改变, 且纬度越高变化越明显^[11,28]. 尽管 CE-1 MRM 数据覆盖全球多达 8 次, 但是获取数据的时间并不是在相同的当地时. 也就是说月表夜晚 TB 的获取并不是都在午夜时刻, 这就导致了月表温度的差异从而引起 TB 的变化^[32]. 本研究中采用时空归一化方法剔除时空差异引起的 TB 偏差^[32,33].

此外月表热辐射特性还受内部热流的影响, 基于热流等于放射性元素产热量的假设, Langseth 等人^[14]计算出全球平均热流值为 0.018 W m^{-2} , 这与 Apollo 15, 17 实测值以及地基雷达观测结果十分接近, 说明热流在全球范围内的变化非常小^[19,34]. 根据 CE-1 卫星在轨运行周期, 选取 CERES 卫星从 2007 年 10 月至 2008 年 5 月期间对地观测获得的全球月平均短波辐射和长波辐射全景(All-Sky)数据(http://ceres.larc.nasa.gov/order_data.php)以及 Archinal 等人^[35]根据 Clementine UV/VIS 相机 750 nm 波段探测数据修正得到的月表反射率(<http://www.mapaplanet.org/explorer/moon.html>), 得到地球反照能量在月表的分布(图 1), 可以看出该结果明显大于月球平均热流值和 Apollo 15, 17 实测值, 月海地区尤为明显. 因此, 在 CE-1 数据处理中可以忽略热流变化的影响.

根据上述分析, 从 CE-1 MRM 数据中提取地球反照信息需剔除月表粗糙度(垂直尺度)、钛铁矿含量差异、MRM 数据时空差异的影响.

3 数据分析

从图 1 可以看出, 月海地区受地球反照的影响最为显著, 尤其是在风暴洋、雨海、澄海、静海地区. 而且月海地区地形起伏程度较小, 可近似为平坦表面. Lucey 等人^[36]根据 Clementine UV/VIS 三个波段数据反演出了月表 FeO, TiO₂ 含量的分布, 由此可以获得钛铁矿 (FeO+TiO₂) 的含量及分布 (<http://www.mapaplanet.org/explorer/moon.html>). 为剔除纬度效应的影响, 分别选取相同纬度带的月球正面、背面研究区, 其对应的钛铁矿分布如图 2 所示. 将研究区按 1°×1° 网格进行划分并分别计算网格内钛铁矿的平均含量.

为剔除研究区 MRM 数据时空差异对结果的影响, 本文采用 Zheng 等人^[32]给出的时空归一化方法, 表达式如下:

$$TB_{h(\text{model})} = \sum_{n=0}^7 B_n \times h^n, \quad (1)$$

$$TB_{\text{midnight}(\text{normalized})} = TB_{h(\text{measured})} \times TB_{\text{midnight}(\text{model})} / TB_{h(\text{model})}. \quad (2)$$

其中, $B_n (n=0, 1, \dots, 7)$ 为拟合多项式系数, h 为当地时, $TB_{h(\text{model})}$ 表示由拟合多项式得到的 h 时刻的亮温值, $TB_{h(\text{measured})}$ 表示由 MRM 探测得到的 h 时刻的亮温值, $TB_{\text{midnight}(\text{model})}$ 表示由公式(1)拟合得到的午夜时刻的亮温值, $TB_{\text{midnight}(\text{normalized})}$ 表示经过归一化计算后得到的 h 时刻的亮温值.

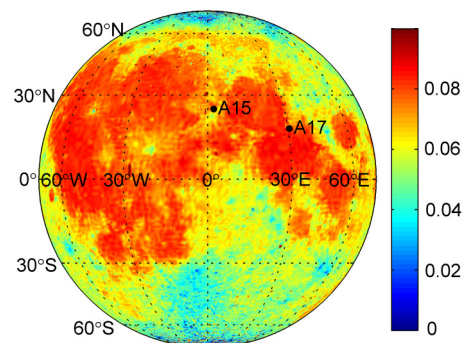


图 1 地球反照能量在月表的分布(W m⁻²)

A15, A17 分别表示 Apollo15, Apollo17 登陆点

Figure 1 Distribution of Earthshine on the lunar nearside (W m⁻²). A15 and A17 indicate the Apollo15 and Apollo17 landing sites respectively.

根据公式(1)和(2)将覆盖图 2 研究区的 MRM 数据进行时空归一化处理得到午夜时刻不同钛铁矿含量下地球反照影响的 TB 分布(图 3).

可以看出, 在误差范围内地球反照对澄海 TB 的影响主要在 1.0–1.6 K 之间. 值得一提的是: 在钛铁矿含量相近的位置(如 12%, 14%, 18%)对应的 TB 波动较明显且最大相差 0.4 K. 这可能是由于其他因素如地形、热流对结果产生的干扰, 将在下一节做具体分析.

高地地区地形起伏较大且撞击坑密集, 根据高度计数据可计算得到 σ 值分布. 相比月海高地钛铁矿含量十分低, 仅相当于全球平均值(5% 左右)^[37]. 因

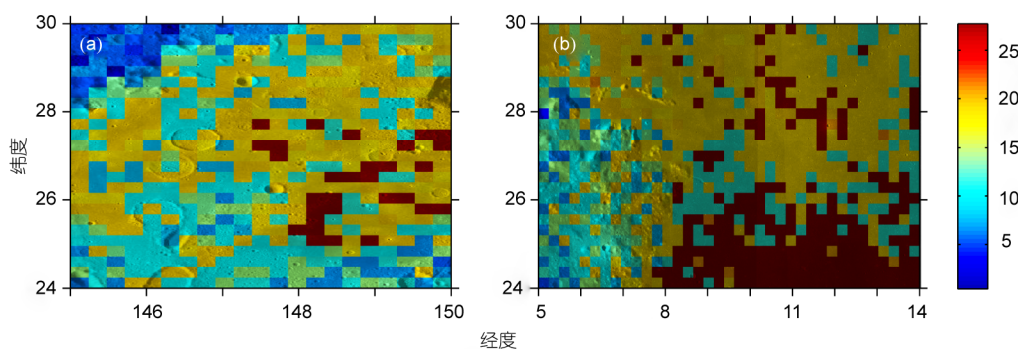


图 2 研究区范围及对应钛铁矿分布(百分含量)

(a)和(b)分别表示莫斯科海(背面)和澄海(正面)的钛铁矿分布, 分辨率为 4 px/deg. 底图为对应的月表光学图像

Figure 2 Study areas and their ilmenite distributions (percentages). (a) and (b) show respectively the distributions of ilmenite at Mare Moscoviense (located on farside) and Mare Serenitatis (located on nearside) with a resolution of 4 px/deg. The attached base maps are optical images of lunar surface.

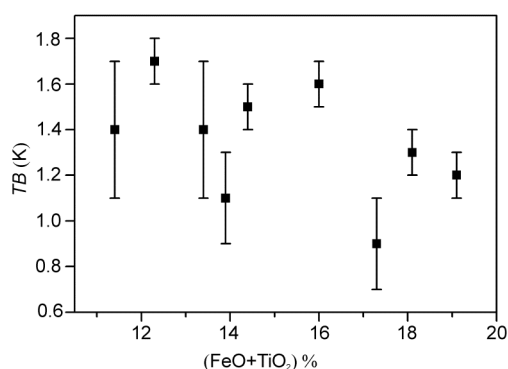


图3 地球反照对 TB 的影响随钛铁矿含量的变化

图中黑色方块对应的钛铁矿含量在图 2(a)和(b)间的最大偏差为 15%

Figure 3 Distributions of TB affected by earthshine versus the contents of ilmenite. The maximum deviation of ilmenite content between Figures 2(a) and (b) that are indicated by black squares in this figure is 15%.

此分别选择月球正、背面主量元素(Si, Ca, Mg, Fe, Ti, Al) 含量偏差在 2% 以内的区域, 根据 LRO/LOLA(Lunar Reconnaissance Orbiter/Lunar Orbiter Laser Altimeter)数据(<http://pds-geosciences.wustl.edu/missions/lro/lola.htm>)计算得到研究区的 σ 分布(图 4)。从图 4 可

以看出, 位于月球正、背面的(a)和(b)研究区地形起伏较大, σ 的变化范围在 0.3–1.6 km 之间。为剔除地形起伏对亮温产生的影响, 分别选取研究区中相同 σ 值对应的 MRM 数据进行比较。

筛选覆盖图 4 研究区的夜晚 MRM 数据并进行时空归一化处理, 得到午夜时刻不同 σ 对应的月球正、背面 TB 分布以及地球反照影响的 TB 分布(图 5)。

从图 5 下图可以看出, 随着 σ 增大图 4 中的月球正、背面研究区亮温呈现出相似的变化趋势, 因此可以得到相同粗糙度条件下地球反照影响的亮温分布(图 5 上图)。相比澄海, 研究区所在的高地地区亮温要小得多, 在 0.2–0.6 K 之间变化。一方面是由于二者的物质成分、热物性差异所引起; 另一方面是由于月表粗糙度差异所导致。

4 影响因素分析

本研究基于 CE-1 MRM 数据提取地球反照信息, 考虑了不同地区钛铁矿含量和地形的差异而忽略了月壤物性、地层结构、热流等因素的影响。由于 37 GHz 穿透深度较浅且缺少全球范围的月壤物性实测

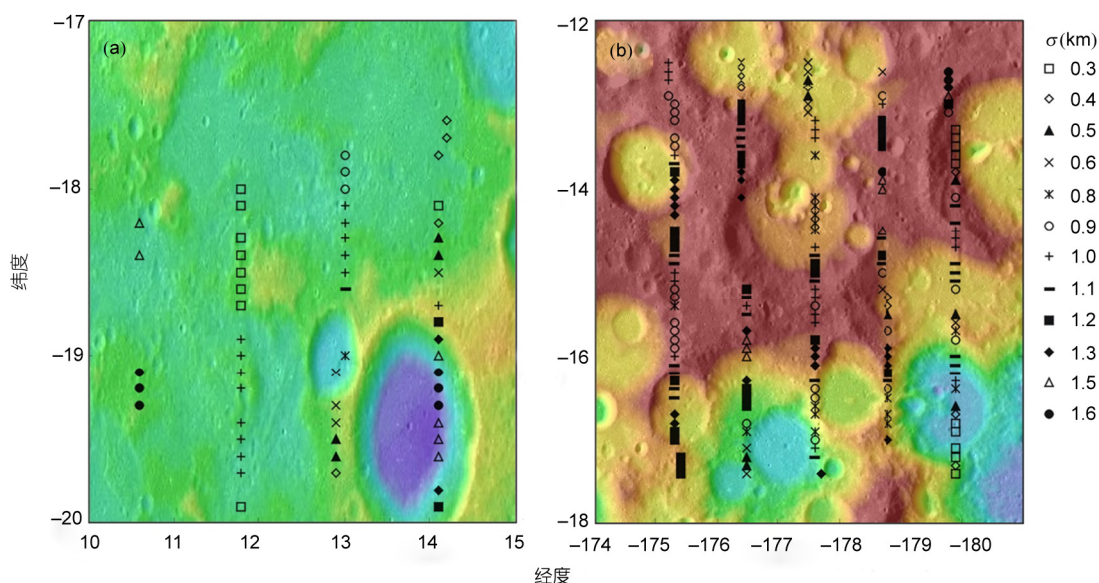


图4 月球正面(a)和背面(b)的 σ 分布

底图为根据 LRO/LOLA 数据绘制的假彩色地形图(<http://ode.rsl.wustl.edu/moon/indexMapSearch.aspx>), 两者均属于低纬度带的月球高地

Figure 4 Distributions of σ on the lunar nearside (a) and farside (b). Both of the attached base maps are false color topographic maps drawn from LRO/LOLA data (<http://ode.rsl.wustl.edu/moon/indexMapSearch.aspx>). And the areas are located in the highland which belongs to low latitude band of the Moon.

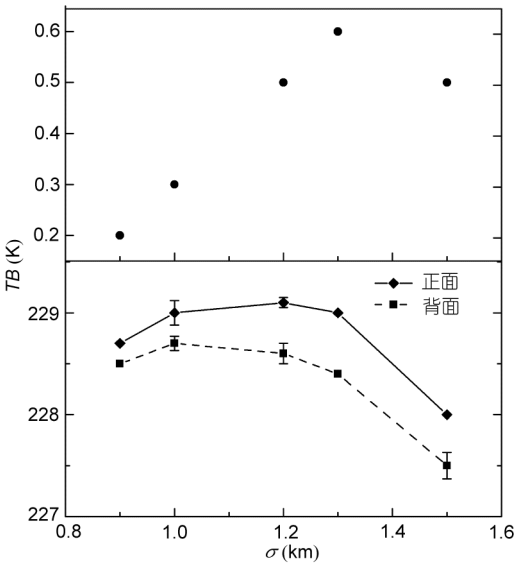


图 5 TB 随 σ 的变化

下图表示图 4(a)和(b)研究区不同粗糙度对应的归一化亮温分布, 误差线表示研究区内相同粗糙度对应的亮温偏差分布. 上图表示不同粗糙度对应的地球反照影响的平均亮温分布

Figure 5 TB versus σ . The image below shows the distributions of the normalized TB corresponding to each σ value in Figures 4(a) and (b). And the error bars indicate the standard deviation of TB which has the same σ value. The image above shows the distributions of TB affected by earthshine at different σ values.

数据, 这里不讨论月壤物性、地层差异产生的影响. 从数据分析结果(图 3 和图 5)可以看出地球反照对月表 TB 的影响很小, 由于钛铁矿含量、粗糙度的差异月海和高地表现出不同的热辐射特性. 图 3 中相似的钛铁矿含量却表现出不同的 TB 值(最大相差 0.4 K), 说明除了钛铁矿含量外其他因素如热流、粗糙度也对结果产生一定的影响. 伽玛光谱数据分析表明, 放射性生热元素 U, Th, K 主要分布在月球正面月海地区^[38–40], 这就增加了月球正背面热流值的差异并对结果产生一定的影响. Lawrence 等人^[38]、Prettyman 等人^[39]根据月球勘探者号(Lunar Prospector)伽玛光谱数据得到了月表放射性元素含量分布(<http://www.mapaplanet.org/explorer/moon.html>), 表 1 给出了图 2 研究区放射性元素的平均含量. 尽管含量很低但差别仍然较大, 对结果会产生一定的干扰, 在以后的分析工作中需进一步剔除由生热元素差异导致的影响.

此外, 月海也并非完全光滑平坦表面, 密布的撞击坑无疑增加了地形的复杂程度. 从图 3 反映的结果

也可以推测: 除了热流对结果有影响外地形也是十分重要的因素. 假设在较大的空间范围内, 月海水平尺度粗糙度趋于稳定, 这里仅考虑垂直尺度粗糙度参数即 σ . 根据图 2 划分的网格和 Clementine 高度计数据(分辨率为 4 px/deg)可分别得到莫斯科海、澄海的 σ 分布即 σ_M , σ_S . 根据图 3 不同钛铁矿含量对应的网格位置, 计算相应的 σ 差值即 $\sigma_S - \sigma_M$ (图 6). $\sigma_S - \sigma_M$ 绝对值越小, 网格对应的澄海与莫斯科海地形起伏程度越接近. 从图中可以看出, 随着钛铁矿含量变化澄海与莫斯科海表现出较大的地形差异尤其在 14%, 16%, 18% 附近, 这也很好地解释了图 3 所表现出的 TB 变化特征. 在后续研究中, 需进一步考虑地形的影响以提取出更加有效地地球反照信息.

相比月海高地钛铁矿、生热元素含量都很低, 但地形起伏十分强烈. 从数据分析结果(图 5)可以看出, 地形是影响高地地区地球反照信息提取的重要因素. 本文在数据分析中仅计算了 σ 分布, 即仅考虑了垂直尺度粗糙度而忽略了水平尺度粗糙度的影响. 这样划分虽简化了计算但未能充分体现出地形的变化特征. 分别选取图 4 中覆盖 14°E, 175°W 的高度计数据计算得到归一化自相关函数 $C(x)$ (图 7)以及相关月表粗糙度参数(表 2).

可以看出二者在水平尺度粗糙度上也表现出较大的差异且背面更加复杂. 若用 σ 难以准确反映出地形特征, 或者说仅采用 σ 表示月表粗糙度来提取地球反照信息时会产生一定的误差, 这时需考虑更多的粗糙度参数.

表 1 研究区放射性元素平均含量(ppm)

Table 1 Average content of radioactive elements in the study areas (ppm)

	莫斯科海	澄海
U	0.5	1.5
Th	1.8	4.2
K	413	1739

表 2 月球高地研究区表面粗糙度参数^{a)}

Table 2 Surface roughness parameters of study areas in the lunar highland

	h (km)	σ (km)	l (km)	θ_{eff}
正面	0.091	0.107	22	0.0069
背面	2.231	0.638	13	0.0693

a) h 为平均高度; $\theta_{\text{eff}} = \arctan(\sqrt{2} s_{\text{eff}})$ 为月表有效均方根斜率^[23]

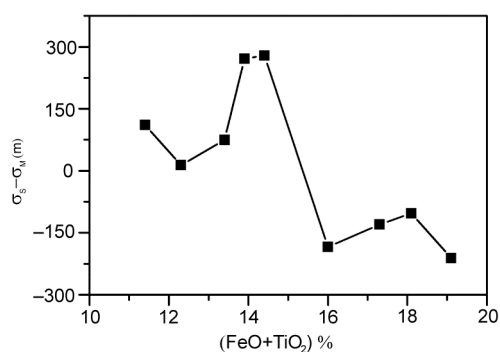
图6 澄海与莫斯科海 σ 差值随钛铁矿分布

Figure 6 The difference of sigma value between Mare Serenitatis and Mare Moscoviense versus the content of ilmenite.

5 结论

根据月球同步自转的轨道特征, 本研究基于 CE-1 MRM 数据分析了地球反照对月表 TB 的影响取得以下认识: 地球反照对澄海地区 TB 的影响主要在 1.0–1.6 K 之间; 对高地(低纬度带) TB 的影响在 0.2–0.6 K 之间. 由于没有全球范围的实测数据, 忽略了月壤密度、结构、热流等因素的影响, 主要讨论

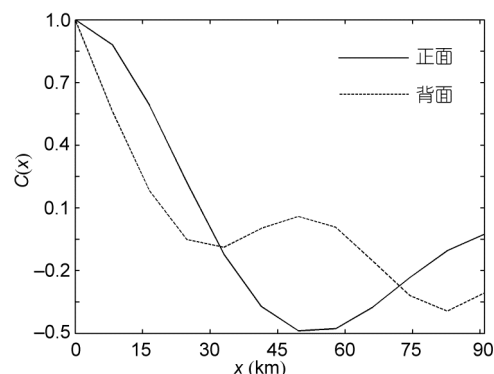


图7 月球高地研究区归一化自相关函数

Figure 7 Normalized autocorrelation functions of study areas in the lunar highland.

了月球正、背面研究区间的生热元素含量、月表粗糙度的差异性. 通过分析认为月球正面富集的生热元素增大了与背面热流的差异, 表面均方根高度的差异也表明月海并不能完全视为平坦表面. 相比月海, 高地地区钛铁矿、生热元素含量很低但地形更加复杂, 单纯采用表面均方根高度不能充分体现出月表粗糙度特征. 在后续研究中需考虑更加详细的粗糙度参数以提取有效地球反照信息.

致谢 感谢中科院国家天文台郑永春副研究员、北京大学地球与空间科学学院法文哲研究员对本文工作提出的指导和建议. 感谢匿名审稿人的辛勤付出.

参考文献

- Goode P R, Dziembowski W A. Sunshine, earthshine and climate change I. Origin of, and limits on solar variability. J Korean Astron Soc, 2003, 36(D22): 75–81
- Goode P R, Pallé E, Yurchyshyn V, et al. Sunshine, earthshine and climate Change: II. solar origins of variations in the Earth's Albedo. J Korean Astron Soc, 2003, 36(S1): 83–91
- Taubes G. Physicists watch global Change Mirrored on the Moon. Science, 1994, 264(5165): 1529–1530
- Pallé E, Goode P R, Yurchyshyn V, et al. Earthshine and the Earth's Albedo: 2. Observations and simulations over 3 years. J Geophys Res, 2003, 108(D22): 4710
- Wielicki B A, Wong T, Loeb N, et al. Changes in Earth's Albedo measured by satellite. Science, 2005, 308(5723): 825
- Goode P R, Qiu J, Yurchyshyn V, et al. Earthshine observations of the Earth's reflectance. Geophys Res Lett, 2001, 28(9): 1671–1674
- Pallé E, Montañés Rodríguez P, Goode P R, et al. The Earthshine project: Update on photometric and spectroscopic measurements. Adv Space Res, 2004, 34(2): 288–292
- Fa W, Jin Y. Analysis of microwave brightness temperature of lunar surface and inversion of regolith layer thickness: Primary results of Chang-E 1 multi-channel radiometer observation. Sci China-Inform Sci, 2010, 53(1): 168–181
- Gong X, Jin Y. Microwave brightness temperature of cratered lunar surface and inversions of the physical temperature profile and thickness of regolith layer. Radio Sci, 2012, 47(1): RS1012
- Zhou M, Zhou J, Zhang X, et al. Inversion of microwave brightness temperature data for estimating lunar regolith thickness. Int J Appl Electromagn Mech, 2010, 33(3): 1041–1048

- 11 Li Y, Wang Z, Jiang J. Simulations on the influence of lunar surface temperature profiles on CE-1 lunar microwave sounder brightness temperature. *Sci China-Earth Sci*, 2010, 53(9): 1379–1391
- 12 Huang S. Surface temperatures at the nearside of the Moon as a record of the radiation budget of Earth's climate system. *Adv Space Res*, 2008, 41(11): 1853–1860
- 13 Langseth M G, Clark S P, Chute J L, et al. The Apollo 15 lunar heat-flow measurement. *Earth Moon Planets*, 1972, 4(3-4): 390–410
- 14 Langseth M G, Keihm S J, Peters K. Revised lunar heat-flow values. *Proc Lunar Planet Sci Conf 7th*, 1976, 7: 3143–3171
- 15 Keihm S J. Interpretation of the lunar microwave brightness temperature spectrum: Feasibility of orbital heat flow mapping. *Icarus*, 1984, 60(3): 568–589
- 16 Vasavada A R, Paige D A, Wood S E. Near-surface temperatures on Mercury and the Moon and the stability of polar ice deposits. *Icarus*, 1999, 193(2): 179–193
- 17 Saari J M, Shorthill R W, Winter D F. The sunlit lunar surface. II. A study of far infrared brightness temperatures. *Earth Moon Planets*, 1972, 5(1-2): 179–199
- 18 Milone E, Wilson W F. *The Moon's Surface, Structure, and Evolution*. New York: Springer, 2008
- 19 McFadden L A, Weissman P, Johnson T. *Encyclopedia of the Solar System*. 2nd ed. Waltham: Academic Press, 2006. 236
- 20 Mo T, Schmugge T. A parameterization of the effect of surface roughness on microwave emission. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 1987, GE-25(4): 481–486
- 21 Gupta V K, Jangid R A. Microwave response of rough surfaces with auto-correlation functions, RMS heights and correlation lengths using active remote sensing. *Indian J Radio Space Phys*, 2011, 40(3): 137–146
- 22 Shepard M K, Campbell B A, Bulmer M H, et al. The roughness of natural terrain: A planetary and remote sensing perspective. *J Geophys Res*, 2001, 106(E12): 32777–32795
- 23 Lumme K, Karttunen H, Irvine W. Roughness of the lunar soil. *Earth Moon Planets*, 1985, 33(1): 19–29
- 24 He L, Lang L, Li Q, et al. Effect of surface roughness on microwave brightness temperature from lunar surface: Numerical analysis with a hybrid method. *Adv Space Res*, 2013, 51(1): 179–187
- 25 Alekseev V A, Aleshina T N, Krotikov V D, et al. The roughness of the Moon's surface layer as it affects the lunar emissivity and radio-brightness distribution. *Soviet Astron*, 1968, 11(5): 1070–1074
- 26 Heiken G H, Vaniman D T, French B M. *Lunar sourcebook: A User's Guide to the Moon*. London: Cambridge University Press, 1991. 531
- 27 Feng J, Zou Y, Bian W, et al. Review on physical models of lunar brightness temperature. *Chin J Geochem*, 2010, 29(2): 204–211
- 28 Fa W, Jin Y Q. Simulation of brightness temperature from lunar surface and inversion of regolith-layer thickness. *J Geophys Res*, 2007, 112(E05003): 1–13
- 29 Cremers C J, Birkebak R C, White J E. Lunar surface temperatures from Apollo 12. *Earth Moon Planets*, 1971, 3(3): 364–351
- 30 Keihm S J, Gary B L. Comparison of theoretical and observed 3.55 cm wavelength brightness temperature maps of the Full Moon. *Proc Lunar Planet Sci Conf 10th*, 1979, 10: 2311–2319
- 31 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*, 2011, 116(E12): E00H02
- 32 Zheng Y C, Tsang K T, Chan K L, et al. First microwave map of the Moon with Chang'E-1 data: The role of local time in global imaging. *Icarus*, 2012, 219(1): 194–210
- 33 Chan K L, Tsang K T, Kong B, et al. Lunar regolith thermal behavior revealed by Chang'E-1 microwave brightness temperature data. *Earth Planet Sc Lett* 2010, 295(1-2): 287–291
- 34 Keihm S J, Langseth M G. Lunar microwave brightness temperature observations reevaluated in the light of Apollo program findings. *Icarus*, 1975, 24(2): 211–230
- 35 Archinal B A, Rosiek M R, Kirk R L, et al. *The Unified Lunar Control Network 2005*. Reston: US Geological Survey, 2006
- 36 Lucey P G, Blewett D T, Hawke B R. Lunar iron and titanium abundance algorithms based on final processing of Clementine ultraviolet-visible images. *J Geophys Res*, 2000, 105(E8): 20297–20305
- 37 Lucey P G, Blewett D T, Hawke B R. Mapping the FeO and TiO₂ content of the lunar surface with multispectral imagery. *J Geophys Res*, 1998, 103(E2): 3679–3699
- 38 Lawrence D J, Feldman W C, Barraclough B L, et al. Global elemental maps of the Moon: The Lunar Prospector gamma-ray spectrometer. *Science*, 1998, 281(5382): 1484–1489
- 39 Prettyman T, Feldman W, Lawrence D, et al. Library least squares analysis of Lunar prospector gamma-ray spectra. *Lunar Planet Sci Conf 33rd*, 2002, 33: 2012

- 40 Hareyama M, Karouji Y, Yamashita Y, et al. Lunar iron and uranium distribution obtained by SELENE(Kaguya) gamma-ray spectrometer. Lunar Planet Sci Conf 44th, 2013, 44: 1871

Earthshine effect on lunar brightness temperature: based on the analysis of CE-1 MRM data

WEI GuangFei^{1,2}, LI XiongYao^{1*} & WANG ShiJie¹

¹ Lunar and Planetary Science Research Center, Insititute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China;

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

The Microwave Radiometer (MRM) on board the Chinese Chang'E-1 (CE-1) Orbiter has acquired the microwave brightness temperature (*T_B*) data of the Moon on a global scale. However, information such as the earthshine effects contained in *T_B* data had not been fully explored. As a heat source of the Moon, the earthshine may have an important effect on the *T_B* of the Moon during the Lunar night-time and might also help to study the global climate Change of the Earth. Based on the fact that the Moon is in synchronous rotation with the Earth, the effects of earthshine on *T_B* at Mare Serenitatis and the highland areas are studied using the CE-1 MRM data. It has been found that the *T_B* ranges from 1.0 to 1.6 K at Mare Serenitatis and 0.2–0.6 K in the highland area.

CE-1, brightness temperature, earth shine

PACS: 07.57.-c, 07.57.Kp, 07.57.Hm

doi: 10.1360/132013-214