

基于 Clementine 热红外数据的 Apollo17 登月点区域氧化钙含量反演

刘道飞, 陈圣波*, 路 鹏

吉林大学地球探测科学与技术学院, 吉林长春 130026

摘 要: 为了研究利用 Clementine 热红外数据反演月球表面岩石的氧化钙(CaO)含量, 论文选取了两景覆盖 Apollo17 登月点的 Clementine 热红外影像, 将其覆盖的区域选为研究区。利用月球表面温度物理模型模拟月表温度, 结合普朗克函数, 完成发射率反演。在此基础上, 对 LPI 中 35 个除 Apollo17 登月计划外所采集的样品 CaO 含量与其热红外发射率特征做回归统计分析, 发现存在很好的线性关系($R^2=0.661$)。由此, 基于 Clementine 热红外发射率实现了研究区 CaO 含量反演。通过利用 LPI Apollo17 月岩(壤)样品实际 CaO 含量分析数据对反演结果进行精度评价, 发现 8 组反演值与实际值的相对误差最小为 1.77%, 最大为 9.29%, 均方根误差为 0.767。研究结果表明, 使用发射率进行 CaO 含量反演方法可行, 为利用 Clementine 热红外数据对月表矿物成分含量定量反演提供一种新的思路。

关键词: 月球; Clementine; 热红外; Apollo17; 发射率; 氧化钙

中图分类号: TN219; O242.1 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2015.02.14

The Inversion of CaO Content from Clementine Thermal Infrared Data around the Apollo 17 Landing Site

LIU Dao-fei, CHEN Sheng-bo*, LU Peng

College of Geoexploration Science and Technology, Jilin University, Changchun, Jilin 130026

Abstract: In order to study the inversion of CaO content in the lunar rock by using Clementine thermal infrared data, the authors selected two Clementine infrared images, which covered the Apollo17 landing site as the study area. The lunar physical temperature model was employed to simulate the temperature as the input parameter which was used to conduct inversion of the emissivity. 35 LPI Apollo samples except Apollo17 were used to calculate the relationship between the content of CaO and the emissivity. It was shown that the relationship between them was in linear correlation($R^2=0.661$). Thus the inversion of the content of CaO was carried out based on the Clementine infrared emissivity. To evaluate the results, the authors calculated the relative error between the derived value and the actual value of CaO. Among the 8 relative error results, the minimum is 1.77%, the maximum is 9.29% and the root mean square error is 0.767. Studies show that the methods used for the inversion of emissivity and content of CaO in this paper are feasible. The result achieved by the authors provides a new idea for quantitative inversion of the ingredients of lunar minerals.

Key words: moon; Clementine; thermal infrared spectrum; Apollo17; emissivity; CaO

本文由国家自然科学基金项目(编号: 41372337; 41373068)资助。

收稿日期: 2014-10-11; 改回日期: 2014-11-10。责任编辑: 张改侠。

第一作者简介: 刘道飞, 男, 1989 年生。硕士研究生。主要研究热红外遥感数据的发射率反演, 对地矿物蚀变信息提取及对月矿物含量反演。E-mail: liudaofei1989@126.com。

*通讯作者: 陈圣波, 男, 1967 年生。吉林大学博士生导师。通讯地址: 130026, 吉林省长春市西民主大街 938 号。

E-mail: chensb0408@126.com。

氧化钙(CaO)是组成月表主要矿物斜长石及辉石的重要氧化物,在月球的平均化学成分中含量为15.8%(欧阳自远, 2005)。当月球岩浆冷却和固结时,首先形成的斜长石与原始岩浆相比具有较高的Ca/(Na+K)比值,随着结晶作用的进行,不断结晶出来的斜长石的Ca/(Na+K)比值逐渐减小。换言之,早期形成的斜长石居于序列的钙长石一端,晚期形成的斜长石居于更靠钠长石的一端(Jolliff et al., 2006)。

在月表岩石 CaO 含量反演方面, Yamashita 等(2012)利用 Kaguyaw 卫星搭载的伽马射线光谱仪得到全月球 CaO 含量分布情况, Grande 等(2007)与 Narendranath 等(2011)还利用 X 射线对 Ca 元素的含量做了月球区域性分析。而对于在热红外区间具有诊断性的光谱特征的斜长石及辉石等月表矿物,利用热红外遥感技术对其 CaO 含量进行反演的研究还尚未见报道。

利用热红外遥感技术进行反演的基础与核心为发射率的获取。目前,在月球热红外数据发射率的反演方面, Vasavada 等(2012)利用 LRO 卫星上的 Diviner 热红外数据粗略地估算发射率曲线形态用来研究月表硅酸盐矿物的 CF 特征,并没有反演其真实发射率。而对于诸如 Clementine 热红外数据,国内外学者仅仅是研究其亮温数据的标定及月表热物理特性,并没有对发射率反演开展深入的探讨(连懿, 2014; Lawson et al., 2000, 2001)。

论文基于上述背景,选取 Clementine 热红外数据,根据其数据特点探索合适的发射率反演方法。在此基础上,尝试寻找月岩(壤)中 CaO 的含量与其发射率的关系并对月表矿物 CaO 的含量进行反演,为利用热红外遥感技术定量反演月表岩石成分带来帮助。

1 Clementine 热红外数据

Clementine 是美国于 1994 年 1 月 25 日发射的绕月球极轨道航天器,装载有紫外/可见光/近红外相机、高分辨率相机、激光雷达测距系统以及长波红外相机等仪器。

基于长波红外相机, Clementine 获得了单波段热红外数据。数据波段范围为 8.0~9.5 μm , 中心波长为 8.75 μm 。空间分辨率在极地为 200 m, 赤道为 55 m。在红外相机系统成像期间, Clementine 获得接近 220000 景观测月球热红外影像, 论文选取其中两景, 编号为 bt3277-1-289 和 bt3286-1-289, 数据成像时间为 2002 年 10 月 20 日 20 点 12 分。

2 研究区概况

Apollo17 登月点经纬度为 30°45'58.3"E, 20°9'50.5"N, 论文选取了两景含有 Apollo17 登月点的 Clementine 热红外影像, 将他们镶嵌在一起选为论文研究区, 研究区原始影像亮度温度及 Apollo17 登月点位置见图 1 所示。研究区地理坐标范围为 30°45'00"—31°01'12"E, 19°59'24"—20°22'48"N, 位于金牛和利特罗峡谷陨石坑西侧, 靠近澄海西南边缘。金牛-利特罗峡谷是高地和月海过渡区域, 位于澄海和宁静海相交区域附近。从 Apollo17 登月点采集的大量样品分析结果来看, 该地区主要岩石类型为玄武岩以及黄色-灰色角砾岩。

3 发射率反演

3.1 发射率反演原理

任何物体只要其温度超过绝对零度, 就会不断地向外发射红外能量, 称之为热辐射。应用热红外遥感来反演发射率是基于热辐射四大定律(基尔霍夫定律、普朗克定律、斯蒂芬-玻尔兹曼和维恩位移定律)之一的普朗克定律, 而普朗克定律是针对黑体(发射率 $\epsilon=1$)的辐射特征而言, 然而大多数自然界物体($0<\epsilon(\lambda)<1$)并不是黑体, 对于这些不是黑体的物体, 普朗克函数要乘以 $\epsilon(\lambda)$, 详见公式(1)。

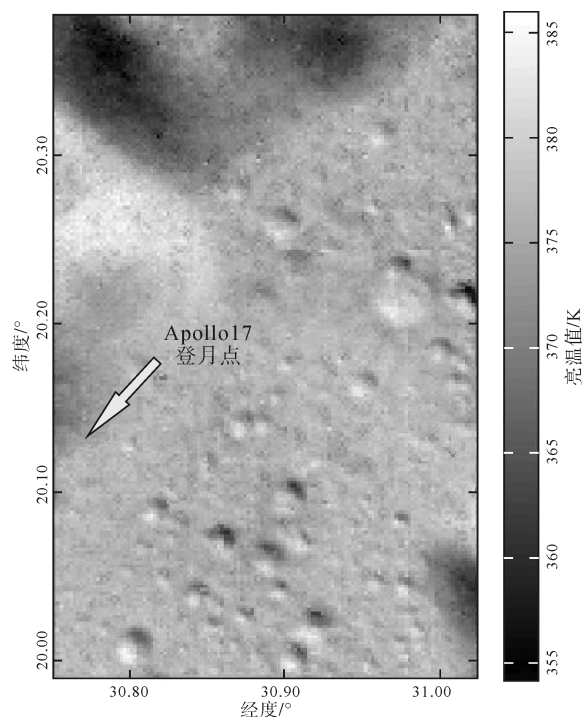


图 1 Apollo17 登月点区域原始影像亮温图

Fig. 1 The brightness temperature image of the Apollo 17 landing site

$$R(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda) B(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda) \frac{c_1 \lambda^{-5}}{\pi(\exp(c_2 / \lambda T) - 1)} \quad (1)$$

式中, $R(\lambda, T)$ 是物体的实际辐射率 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$); $B(\lambda, T)$ 是黑体辐射率 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$); λ 是波长 (μm); $\varepsilon(\lambda)$ 是物体在波长 λ 的发射率; T 是物体的物理温度 (K); c_1, c_2 分别是普朗克函数常量, $c_1 = 3.7148 \times 10^{-16} \text{ Wm}^2$, $c_2 = 14388 \mu\text{mK}$ 。

由于月球上没有大气的存在, 所以 Clementine 热红外传感器接收到的月表热辐射不受大气的干扰。因此, 假设在温度已知的条件下, 就可以利用普朗克函数反演出月表目标物在某一波长下的发射率值。

3.2 月球表面温度模拟

成珂等(2007)在前人研究的基础上, 通过月球天文计算, 建立了以太阳辐射、月球辐射和太阳反照参与的月球表面辐射系统模型(张鹤飞, 2004)。该模型能够模拟任意时刻不同经纬度坐标的月球表面温度, 极大地满足了论文发射率反演对月球表面物理温度值的要求。月面单位面积热模型见公式(2)。

$$\varepsilon \sigma T^4 = (1 - \bar{A}) G_{l,b} + q(T) \quad (2)$$

模型中, $\varepsilon \sigma T^4$ 为月面辐射, 取 $\varepsilon = 0.92$, 波尔兹曼常量为 $\sigma = 5.678 \times 10^{-8} \text{ W}(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。 T 为模型最后要求得的温度值, $(1 - \bar{A}) G_{l,b}$ 为去除太阳反照后, 月面得到的太阳辐射。 $\bar{A} = 0.127$, $G_{l,b}$ 为经纬度坐标 (l, b) 点的太阳辐射强度, 其计算方法见公式(3)。 $q(T)$ 代表该表面从周围通过导热传入的热量, 为 T 的线性函数 ($q(T) = 0.154T + 9.9$)。

$$\begin{cases} G_{(l,b)} = G_{on} \cos \theta & \cos \theta > 0 \\ G_{(l,b)} = 0 & \cos \theta \leq 0 \end{cases} \quad (3)$$

公式(3)中, G_{on} 为太阳直射点辐射强度月球表面单位面积、单位时间内的辐射强度, 其计算见公式(4)。 $\cos \theta$ 为月球表面经纬度坐标 (l, b) 转换为单位向量坐标 (a_x, a_y, a_z) 与太阳直射点月面坐标 (l_0, b_0) 转换为单位向量坐标 (b_x, b_y, b_z) 后, 两个单位向量坐标之间的夹角的余弦值, 其中太阳直射点月面坐标 (l_0, b_0) 在 Clementine 热红外数据头文件中可获得, 为 $(55.35^\circ, 0.68^\circ)$, 其计算见公式(5)。

$$G_{on} = G_{sc} (1 + 0.033 \cos \frac{2\pi n}{365}) \quad (4)$$

$$\cos \theta = \frac{a_x b_x + a_y b_y + a_z b_z}{\sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} \sqrt{b_x^2 + b_y^2 + b_z^2}} \quad (5)$$

公式(4)中, G_{sc} 为太阳常数, 取值 1353 Wm^2 , n 为数据成像的地球时间在该年中的天数, 论文使用的 Clementine 热红外数据成像日期为 2002 年 10 月

20 日, 故 $n=293$ 。月表坐标 (l, b) 及太阳直射点月面坐标 (l_0, b_0) 转换为单位向量坐标见公式(6)。

$$\begin{cases} a_x = \cos b \sin l \\ a_y = \cos b \cos l \\ a_z = \sin b \end{cases} \quad (6)$$

论文依据上述模型, 在研究区 Clementine 热红外影像上均匀选取 30 个月面点, 对公式(2)得到的关于 T 的一元四次方程求解, 得到 30 个月表温度值 T , 利用插值方法得到研究区的模拟温度图像, 结果见图 2 所示。

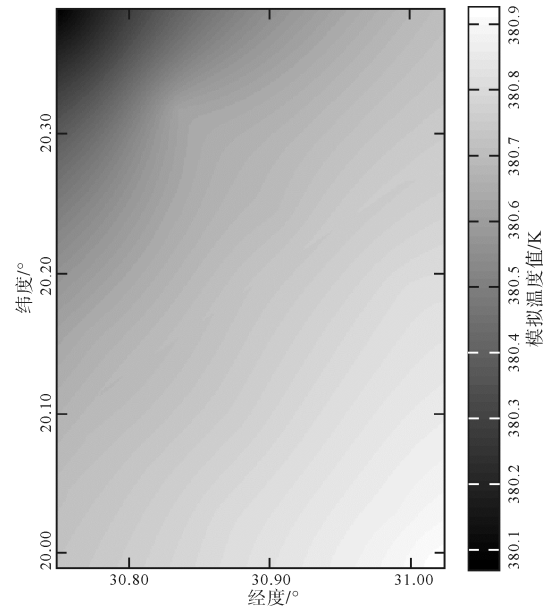


图 2 Apollo17 登月点区域模拟温度值

Fig. 2 Simulated temperatures at the Apollo 17 landing site

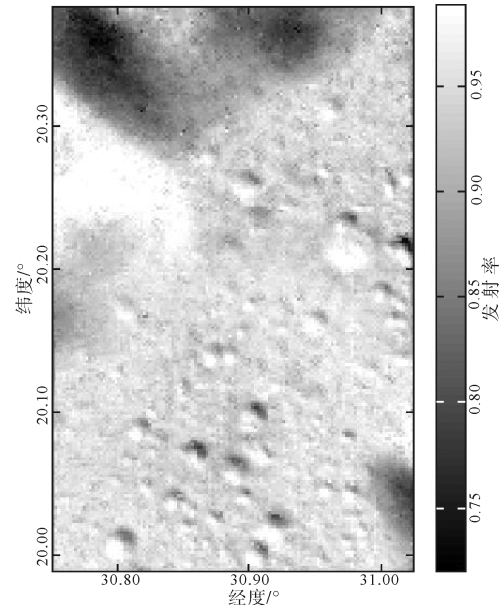


图 3 Apollo17 登月点区域发射率

Fig. 3 The emissivity at the Apollo 17 landing site

3.3 发射率反演

论文基于普朗克函数推导出发射率的计算公式,如公式(7)所示。根据月面温度物理模型模拟得到研究区内的各坐标点的温度值 T , Clementine 热红外波段的中心波长 $\lambda=8.75\text{ }\mu\text{m}$, 得出研究区发射率图像,结果见图 3 所示。

$$\varepsilon(\lambda)=\frac{R(\lambda,T)\pi(\exp(c_2/\lambda T)-1)}{c_1\lambda^{-5}}\tag{7}$$

4 氧化钙(CaO)含量反演及评价分析

4.1 氧化钙(CaO)含量反演

为建立 LPI(Lunar and Planetary Institute) Apollo 样品 CaO 含量与其发射率特征之间的关系, 论文将 RELAB 波谱库中除 Apollo17 登月点以外的 35 个不同粒径下月岩(壤)样品热红外波谱重采样至 Clementine 热红外波段(8.0~9.5 μm), 对样品在该波段中心波长(8.75 μm)处的发射率值与对应样品 CaO 含量分析数据进行回归统计分析, 如图 4 所示。

根据统计分析结果, 发现 Apollo 样品 CaO 含量与发射率存在很好的线性关系, 拟合关系式为 $P=-54.391\times E+61.795$, 负相关系数 $R^2=0.661$, 式中 P 代表 CaO 含量, E 代表发射率值。由此, 基于研究区发射率影像进行波段运算得到研究区的 CaO 含量反演结果, 如图 5 所示。图中 CaO 含量高值区域对应于 USGS(美国地质调查局)地质图上的亚斜长岩, 含量低值区域对应于玄武岩。

4.2 评价分析

Lucey 等(2000)在文献中给出 Apollo17 登月计划中各采样站及月球车经纬度坐标, 根据采样点经纬度信息, 在 CaO 含量反演结果图中记录下对应的 CaO 反演含量值, 将其与 LPI Apollo 样品实际化学分析得到的 CaO 含量分析数据进行对比分析, 发现大部分反演结果较实际结果偏大。对 8 组数值的相对误差进行计算发现, 误差最小为 1.77%, 最大为 9.29%, 均方根误差为 0.767, 结果见表 1 所示。

5 结论

针对热红外遥感技术在月球表面矿物 CaO 含量反演方面研究的不足, 论文提出利用 Clementine 热红外数据以 Apollo17 登月点区域为例对其表面矿物

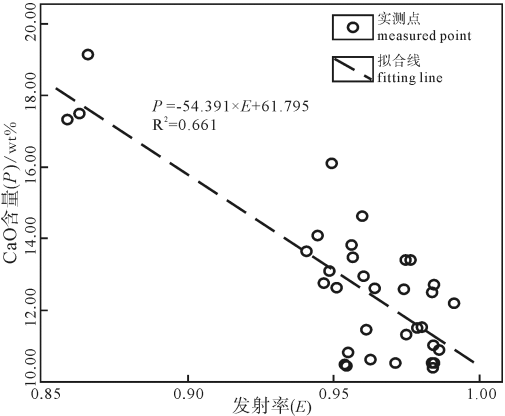


图 4 CaO 含量与发射率的关系
Fig. 4 Relationship between emissivity and content of CaO

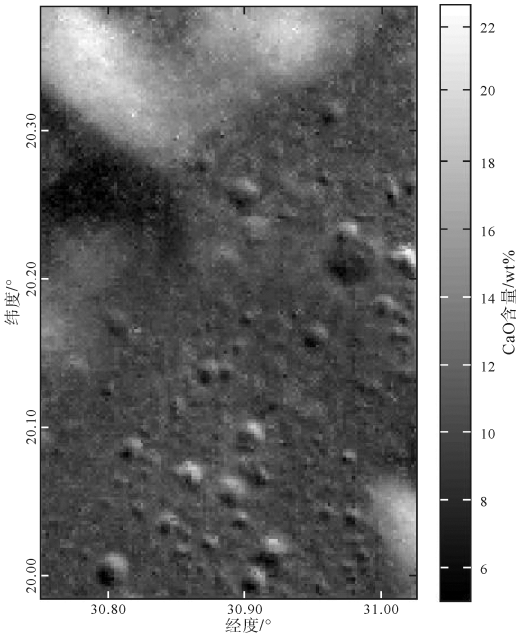


图 5 CaO 含量结果图
Fig. 5 The values of CaO

表 1 实际 CaO 含量与其反演值对比表
Table 1 Comparison between actual values and inversion values of CaO

登月点	样品编号	经度/°	纬度/°	实际 CaO 含量/wt%	反演 CaO 含量/wt%	相对误差
Apollo17-LRV11	78121	30.8410	20.2764	9.76	10.58	8.40%
Apollo17-LRV12	76015	30.7812	20.1977	11.13	11.37	2.15%
Apollo17-LM	70181	30.7518	20.1922	12.55	13.69	9.08%
Apollo17-S1	78155	30.7530	20.1560	15.20	14.93	1.77%
Apollo17-S6	74275	30.7712	20.2890	10.38	10.57	1.83%
Apollo17-S7	78501	30.7843	20.2914	11.51	10.92	5.12%
Apollo17-S8	79221	30.8491	20.2804	11.19	12.23	9.29%
Apollo17-S9	76240	30.8024	20.2256	11.97	10.90	8.93%

CaO 含量进行反演。通过分析研究结果, 得出以下结论:

(1)在月球上没有大气干扰的情况下, 利用月球表面温度物理模型模拟得到月表温度, 结合普朗克函数, 能够实现 Clementine 单波段热红外数据发射率反演。

(2)对月表矿物 CaO 含量与其相对应的 Clementine 热红外发射率光谱做回归统计分析, 发现它们存在较好的线性关系, 由此得出 CaO 含量反演结果, 说明利用 Clementine 热红外数据对月表矿物 CaO 含量进行定量反演是可行的。通过对反演结果评价分析, 发现 Apollo17 登月点 CaO 含量反演结果与实际值的相对误差均小于 10%, 均方根误差为 0.735, 反演结果较好。

参考文献:

- 成珂, 张鹤飞. 2007. 月球表面温度的数值模拟[J]. 宇航学报, 28(5): 1376-1380.
- 连懿, 陈圣波, 孟治国, 张莹, 路鹏. 2014. 基于嫦娥二号微波辐射计数据月球中低纬度亮温异常区地质分析研究[J]. 地球学报, 35(5): 643-647.
- 欧阳自远. 2005. 月球科学概论[M]. 北京: 中国宇航出版社.
- 张鹤飞. 2004. 太阳能热利用原理与计算机模拟[M]. 西安: 西北工业大学出版社.

References:

- CHENG Ke, ZHANG He-fei. 2007. The numerical simulation of the temperature on the surface of the moon[J]. Acta Astronautica, 28(5): 1376-1380 (in Chinese).
- GRANDE M, KELLETT B J, HOWE C. 2007. The D-CIXS X-ray spectrometer on the SMART-1 mission to the Moon first results[J]. Planetary and Space Science, 55(4): 494-502.
- JOLIFF B L, WIECZOREK M A, SHEARER C K. 2006. New views of the Moon[M]. Mineralogical Society of America, Geochemical Society.

- LAWSON S L, JAKOSKY B M, PARK H S. 2000. Brightness temperatures of the lunar surface: Calibration and global analysis of the Clementine long-wave infrared camera data[J]. Journal of Geophysical Research: Planets (1991-2012), 105(E2): 4273-4290.
- LAWSON S L, JAKOSKY B M. 2001. Lunar surface thermophysical properties derived from Clementine LWIR and UVVIS images[J]. Journal of Geophysical Research: Planets (1991-2012), 106(E11): 27911-27932.
- LIAN Yi, CHEN Sheng-bo, MENG Zhi-guo, ZHANG Ying, LU Peng. 2014. Geological analysis in low-latitude brightness temperature anomaly area from the Chang'e-2 microwave radiometer data[J]. Acta Geoscientica Sinica, 35(5): 643-647(in Chinese with English abstract).
- LUCEY P G, BLEWETT D T, JOLLIFF B L. 2000. Lunar iron and titanium abundance algorithms based on final processing of Clementine ultraviolet-visible images[J]. Journal of Geophysical Research: Planets (1991-2012), 105(E8): 20297-20305.
- NARENDHRANATH S, ATHIRAY P S, SREEKUMAR P. 2011. Lunar X-ray fluorescence observations by the Chandrayaan-1 X-ray Spectrometer (C1XS): Results from the nearside southern highlands[J]. Icarus, 214(1): 53-66.
- OUYANG Zi-yuan. 2005. Introduction to lunar science[M]. Beijing: China Astronautics Press(in Chinese).
- VASAVADA A R, BANDFIELD J L, GREENHAGEN B T. 2012. Lunar equatorial surface temperatures and regolith properties from the Diviner Lunar Radiometer Experiment[J]. Journal of Geophysical Research: Planets (1991-2012), 117(E12).
- YAMASHITA N, GASNAULT O, FORNI O. 2012. The global distribution of calcium on the Moon: Implications for high-Ca pyroxene in the eastern mare region[J]. Earth and Planetary Science Letters, 353: 93-98.
- ZHANG He-fei. 2004. Solar energy heat utilization principle and the computer simulation[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press(in Chinese).