

“嫦娥一号”干涉成像光谱仪数据 FeO 反演初步结果

凌宗成^{①②}, 张江^{①②}, 刘建忠^①, 张文喜^③, 边伟^①, 任鑫^①, 牟伶俐^①, 刘建军^①, 李春来^①

① 中国科学院国家天文台, 北京 100012;

② 山东大学威海分校空间科学与物理学院, 威海 264209;

③ 中国科学院光电研究院, 北京 100080

E-mail: zcling@nao.cas.cn

2010-04-14 收稿, 2010-06-09 接受

国家高技术研究发展计划(2008AA12A212/211/213)、中国博士后科学基金(20090450580)和中国科学院国家天文台青年人才基金资助

摘要 月表 FeO 含量的分布对于未来月球资源利用和科学研究具有重要意义. 在 Apollo 和 Luna 取样点的干涉成像光谱数据与月表 FeO 含量真值的基础上, 得到了利用干涉成像光谱仪数据进行月表 FeO 填图的初步数学模型. 将该公式应用于“嫦娥一号”干涉成像光谱仪数据, 成功得到了月表 FeO 的局域地区分布. 经过与 Clementine UVVIS 数据进行比较, 嫦娥干涉成像光谱仪数据的 FeO 含量初步模型对于月海地区的预测偏低(2%), 对于高地地区的预测偏高(3%).

关键词

嫦娥一号

干涉成像光谱仪

FeO 反演

Clementine UVVIS

2009 年 3 月 1 日, 随着中国第一个月球探测器——“嫦娥一号”成功撞击月球丰富海地区(52.36°E, 1.50°S), “嫦娥一号”圆满完成了 494 天的绕月飞行. 作为“嫦娥一号”上 8 种有效载荷之一, 干涉成像光谱仪(IIM)承担获取月球表面有用元素与物质类型的含量与分布的科学目标^[1]. 月表可见近红外光谱对于探测月表矿物、化学和月壤物理状态比较灵敏^[2], 因而可用于月表物质成分探测. 月表铁元素(Fe, 天体化学中常采用 FeO)的分布对于理解月球表面的成岩过程和月球的热学历史及演化过程具有重要意义^[3]. 对于如何预测月表 FeO 分布, 国际上已经存在了很多模型, 其中 Lucey 等人^[3-9]的模型应用比较广泛, 并经历了一系列的修正和优化. 随着全球范围内月球探测热潮的到来, 来自日本月亮女神(Kaguya)、中国“嫦娥一号”(Chang'E-1)、印度月船一号(Chandrayaan-1)和美国月球复兴号(LRO)等探测数据将会对全世界的行星科学家公布^[10]. 利用这些数据进行 FeO 反演, 对于对比各种数据的交叉校准和验证, 以及利用该数据进行月球地质科学应用和资源勘察有着重要意义.

“嫦娥一号”干涉成像光谱仪已经获得了大量科

学数据, 这是我国未来进行月球探测和科学研究的宝贵基础资料. 国际上对月球探测采用的光谱仪大多为色散型光谱仪(如 Clementine UVVIS 为滤光片型, Chandrayaan-1 M3 为光栅型), 采用干涉型成像光谱仪进行月球探测是第一次. 如何对数据进行定标和科学反演应用是摆在科学家面前的课题之一. 绕月探测工程地面应用系统已经对成像光谱仪数据进行了光度校正和反射率换算, 所得的反射率数据可以用于科学研究工作. 本文将在 IIM2C 级数据的基础上, 介绍一种进行月表 FeO 元素反演的初步计算模型, 并将其应用于月球局域地区进行反演, 并与美国 Clementine UVVIS 数据的反演结果进行对比验证.

1 干涉成像光谱仪和数据描述

“嫦娥一号”上搭载的干涉成像光谱仪是一台 Sagnac 型干涉成像光谱仪, 采用推扫模式, 工作波长范围为 0.48~0.96 μm , 共有 32 个谱段, 光谱分辨率为 325.5 cm^{-1} . 在卫星高度为 200 km 时, 地面分辨率为 200 m/pixel, 成像幅宽为 25.6 km. IIM 数据在南北纬 70°范围内的覆盖范围约为 84%. 干涉成像光谱仪获

取的数据为干涉图数据, 该数据经过暗电流去除和相对定标修正之后, 利用傅里叶变换进行光谱复原将干涉图数据转换为光谱数据; 然后对影像数据进行辐射定标, 得到影像像元值为辐亮度数值的 IIM2A 级数据. 我们采样修正 Lommel-Seeliger 光度模型^[11], 对 IIM2A 级数据进行光度校正, 把所有数据校正到标准几何条件下(入射角为 30° , 出射角为 0° , 相位角为 30°). 采用 Apollo 16 附近的标准区域的 IIM 第 2225 轨覆盖了 Cayley Plains 内西北边缘的 5×18 个像素区域作为定标区域, 采用 Apollo 62231 月壤光谱作为其标准光谱, 对嫦娥 IIM 数据进行了反射率换算^[12]. 本文所采用的数据就是在以上定标基础之上进行的.

2 FeO 反演方法

2.1 Clementine 数据的 FeO 反演方法

在 Clementine 之前, 利用多光谱数据进行月表 FeO 填图方面的研究不多, 但也表明可以采用类似月表 TiO_2 填图的方法进行月表 FeO 填图^[13,14]. Lucey 等人^[3-6]发展的一套 FeO 反演方法, 成为目前通用的利用 Clementine UVVIS 数据进行 FeO 反演的方法. Lucey 等人^[3]于 1995 年研究出第一个利用 Clementine UVVIS 光谱数据进行 FeO 含量反演的数学模型. 在月球样品光谱以及低分辨率 Clementine UVVIS 数据中都观察到成熟度与 FeO 的光谱效应, 即反射率(750 nm)随月壤成熟度增加而降低, NIR/NIR 比值(950 nm/750 nm)随月壤成熟度的增加而增大; 但随 FeO 含量增加, 反射率和 NIR/NIR 比值都降低. 他们还在 VIS 反射率-NIR/NIR 比值图上发现组成类似而成熟度变化不一的月壤形成线性趋势, 而且那些组成有差异的月壤因成熟度变化形成的上述线性趋势在反射光谱图上看上去相交于暗且“红”的一点, 这与将月壤与一个光谱“红”且暗的端元组分混合时所观察到的趋势一致.

根据上述事实, Lucey 等人给出一种根据 VIS 反射率与 NIR/NIR 比值得到 FeO 含量的方法. 但该方法利用的是实验室单向半球反射率光谱, 它与月球卫星获得的双向反射率数据之间非线性相关. 意识到这一缺陷后, Blewett 等人^[4]利用 Apollo 与 Luna 登陆点高分辨 Clementine UVVIS 影像以及已知采样点的 FeO 含量来改进 Lucey 的算式. Clementine UVVIS 可以定位 Apollo 和 Luna 的月球样品取样点, 而这些

取样点的 FeO 丰度已知. 将 39 个取样点或取样站的 Clementine 光谱数据与已知的来自各取样点或取样站的月壤平均组成作了比较, 他们发现铁的光谱参数与这些取样点或取样站的 FeO 含量之间有很好的相关性, 因此利用 Clementine 在 Apollo 与 Luna 登陆点的高分辨率图像和已知取样点的 FeO 丰度对 Lucey 等人的定量公式作了修补, 同时还改进了 Lucey 等人对光谱角参数的定义, 更好地消除了成熟度的影响.

Blewett 方法与 Lucey 等人 FeO 定量模型的导出过程类似. Blewett 等人的光谱角参数以及铁反演公式分别表示如下:

$$\theta_{\text{Fe}} = -\arctan\left(\frac{R_{950}/R_{750}-A}{R_{750}-B}\right),$$

式中 A, B 为常数, 分别对应暗色光谱“红”端元的 950 nm/750 nm 光谱比值和 750 nm 反射率.

$$\text{FeO} = \theta_{\text{Fe}} \times C - D,$$

式中 C, D 为常数, 与采用的标准图谱有关, Lucey 等人采用 62231 月壤的 John Adams 光谱.

在对 Clementine UVVIS 做最终定标处理的基础上, Lucey 等人提出了利用 Clementine UVVIS 数据进行月表 FeO 含量反演的公式, 并对模型做了进一步修正和优化^[6]. 采用的公式为

$$\theta_{\text{Fe}} = -\arctan\left(\frac{R_{891}/R_{757}-E}{R_{757}-F}\right),$$

$$\text{FeO} (\%) = \theta_{\text{Fe}} \times 17.427 - 7.565.$$

2.2 Chang'E-1 IIM 数据的 FeO 反演方法

干涉成像光谱仪数据谱段范围为 480~960 nm, 共有 32 个谱段, 其中中心波长与 Clementine UVVIS 相近的谱段存在 B23(739 nm), B24(757 nm), B30(891 nm), B31(918 nm)和 B32(947 nm)等. 以 IIM 2264 轨为例, 我们选择 5×5 大小均匀地区的平均光谱与 Clementine UVVIS 数据同样地区进行比较, 其平均光谱如图 1 所示. 750 nm 附近一般为月壤的反射峰位置, 对于 IIM 数据, 我们选择与 Clementine 反演 FeO 更为接近的 757 nm 谱段. 950 nm 处为 Fe^{2+} 吸收峰位置, 最好选取与其 Clementine 数据较为接近的 947 nm 作为反演, 但从光谱图中可以看出, B31, B32 等谱段的质量与 Clementine 数据偏差较大. 进一步的光谱质量分析也可以得知其光谱的信噪比较差(<30), 因此我们没有采用这两个谱段. 最终我们选择 B30(891 nm)和 B24(757 nm)谱段进行 FeO 反演, 采用

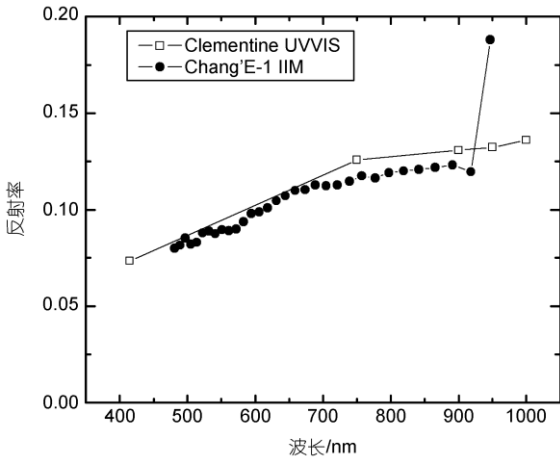


图1 IIM 第2624轨高地地区光谱与 Clementine UVVIS 相应地区的光谱曲线对比

的公式为

$$\theta_{\text{Fe}} = -\arctan\left(\frac{R_{891}/R_{757} - E}{R_{757} - F}\right),$$

$$\text{FeO}(\%) = \theta_{\text{Fe}} \times G - H.$$

计算的主要方法就是拟合公式中的 E , F , G , H 等参数.

反演方法与 Lucey 等人的方法类似. 首先提取 Apollo 和 Luna 取样点的 IIM 光谱数据. 我们利用 Lucey 等人^[6]给出的经纬度坐标, 找到 Clementine UVVIS 数据中的精确位置, 然后将 IIM 数据与 Clementine UVVIS 数据进行同名点匹配, 得到 IIM 数据中 Apollo 和 Luna 取样点的位置, 将其光谱提取出来. 由于干涉成像光谱仪没有覆盖 Apollo15 登陆点数据, 因此我们采用除 Apollo15 之外的另外 38 个取样点的光谱数据. 取样点附近典型月壤样品中 FeO 丰度是进行反演的月面真值(Ground Truth), 其数据在 Lucey 等人^[6]的文章中可以得到.

根据取样点光谱数据, 我们做出 757 nm 反射率与 891 nm/757 nm 比值关联图, 如图2所示. 假定 IIM 数据也满足 Lucey 等人^[6]提出的关系, 我们提出新的 FeO 光谱角参数 θ_{Fe} , 在沿光谱角转动的方向, FeO 含量增加. 而在同样光谱角方向, 月壤成熟度增加. 通过定义 FeO 的光谱角参数来抑制成熟度效应. 我们计算的目标就是尽量增大光谱角参数与 FeO 含量之间的关联. 通过计算, 我们找到了这个光谱“红”端元的位置在(0.088, 1.548)附近, 即得到了公式中 E 和 F 的值. 此时 FeO 与光谱角参数之间的关联系数最大,

可以达到 0.94.

$$\theta_{\text{Fe}} = -\arctan\left(\frac{R_{891}/R_{757} - 1.548}{R_{757} - 0.088}\right).$$

在 Apollo 和 Luna 取样地区的 FeO 含量与 FeO 光谱角参数之间关系如图3所示. 在最大关联系数条件下, 经过多项式拟合, 可以得到公式中的 G 和 H , 最终关联方程为

$$\text{FeO}(\%) = \theta_{\text{Fe}} \times 43.394 - 50.952.$$

图3中散点经多项式拟合后的标准偏差为 1.58% (质量分数, 全文同). 相应计算公式为

$$\sqrt{\frac{\sum (\text{FeO}_{\text{预测值}} - \text{FeO}_{\text{实际值}})^2}{N-1}},$$

其中 N 为运算的数据点个数, 在此取 $N=38$.

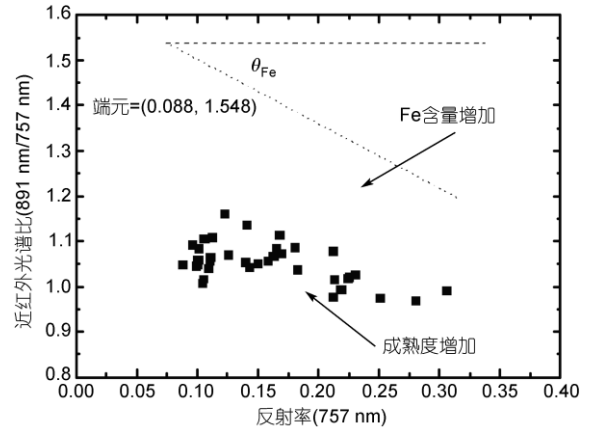


图2 “嫦娥一号”干涉成像光谱仪所获得的 Apollo 和 Luna 取样点地区的近红外光谱比(891 nm/757 nm)与反射率(757 nm)关联图

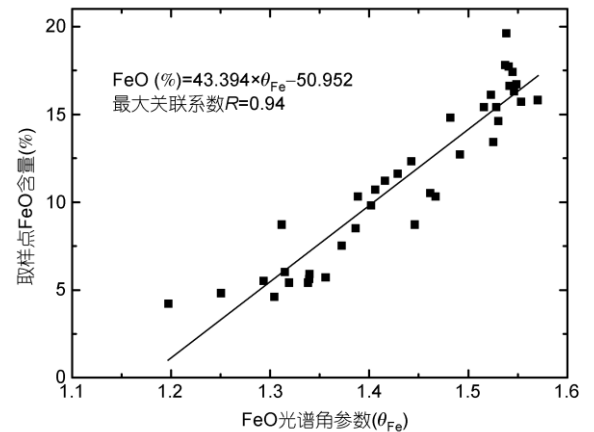


图3 Apollo 和 Luna 取样点的 FeO 含量与 FeO 光谱角参数关联图

3 月表样例地区研究

在以上讨论基础上,我们将 FeO 含量计算公式应用于 IIM 数据,进行月表样例地区研究.同时,我们也对 Clementine UVVIS 数据采用 Lucey 等人^[6]的公式进行了 FeO 的计算,以此进行对比研究.我们选择月球危海(Mare Crisium)南部高地和月海交界地区作为研究对象(IIM 第 2185 轨数据).选择该地区的原因在于该地区地形含有高地和月海两种,物质成分变化较为明显.图 4(a)给出了所研究区域 750 nm 波段影像.需要指出的是,由于 IIM 的地面分辨率为 200 m/pixel,比 Clementine 分辨率低(100 m/pixel).因此,我们将 IIM 数据进行 2 倍重采样,以便于数据与 Clementine 数据相互比较.

图 4(b)给出了“嫦娥一号”IIM 和 Clementine UV-

VIS 数据在月球危海南部相应地区的 FeO 分布图.从图中可以看出,二者分别在高地和月海的 FeO 分布符合较好,即月海中由于存在大量富含铁镁质矿物的玄武岩,其中 FeO 含量较高,而高地由于主要富含硅铝质的斜长岩,其中 FeO 含量较低.我们把图中 FeO 含量统计图与 Clementine 数据进行了对比,如图 5 所示. IIM 数据 FeO 含量平均值为 14.07%,而 Clementine 数据平均值为 14.58%,二者相差不多.数据统计分布中的双峰分布即为影像中月海和高地不同地区的 FeO 含量.可以看出, IIM 数据双峰间距比 Clementine 数据要小.从峰位上来讲,我们的预测模型在月海地区为 15%左右,而 Clementine 数据为 16%~17%,预测结果偏低 2%左右.从高地分布来看,嫦娥 IIM 预测的峰位位置在 11%左右,而 Clementine 数据在 8%~9%,预测结果偏高 3%左右.

我们从以下几个方面来讨论产生预测偏差的原因.首先,我们预测模型输入中没有 Apollo15 样品数据, Apollo15 样品点光谱和化学特性与其他取样点不同(例如, Apollo15 样品含有低钛玄武岩,而 Apollo17 样品则有高钛月球样品^[8]),这必然会带来预测模型的偏差.其次,由于光谱数据质量限制,我们没有使用 Lucey 等人采用的 950 nm 附近的光谱数据.月球低钙辉石的吸收位置在 900 nm 附近,高钙辉石等矿物的吸收位置在 950 nm 左右,这样我们采用 891 nm 应该可以捕捉其光谱变化,但效果可能不如采用 950 nm 波段好.第三,从初步光谱数据质量分析来看,即使我们采用的是 891 nm 和 757 nm 波段数据,其信噪比也比 Clementine 数据要低.最后,地形因素和光照方向(阴影区域不同)影响也是两幅影像所得 FeO 含量有差异的原因之一,特别是对于高地地区而言.

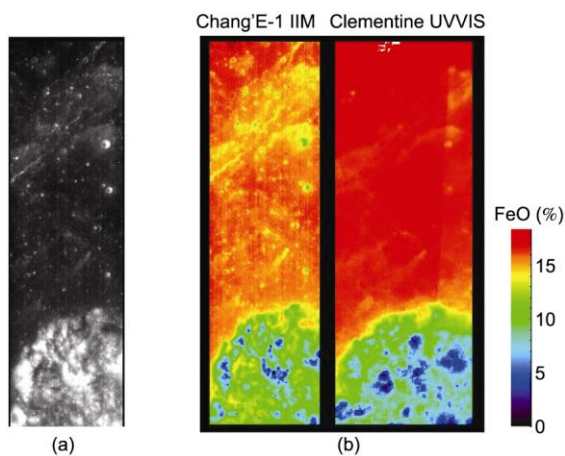


图 4 月球危海附近局域研究

(a) “嫦娥一号”IIM 第 2185 轨 757 nm 影像; (b) IIM 第 2185 轨反演 FeO 含量分布图及与 Clementine UVVIS 相应地区 FeO 含量比较

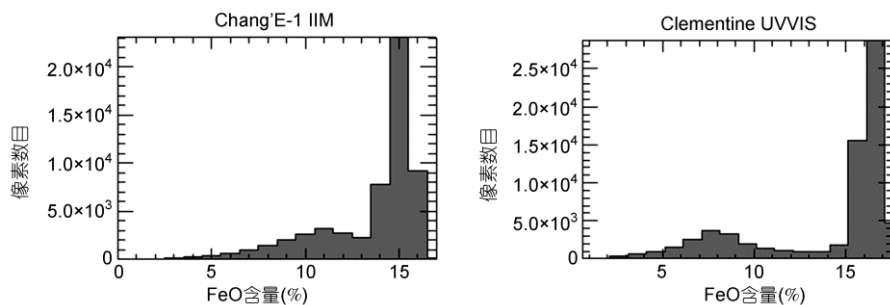


图 5 IIM 第 2185 轨与 Clementine UVVIS 相应地区反演 FeO 含量统计分布图

4 结论

本文在回顾 Clementine UVVIS 数据进行月表 FeO 填图方法的基础上, 借鉴其经验, 利用 Apollo 和 Luna 取样点的干涉成像光谱数据和月表 FeO 含量, 得到了利用干涉成像光谱仪数据进行月表 FeO 填图的初步数学模型. 在现有光谱数据情况下, 我们选择了光谱质量较好的 891 和 757 nm 进行 FeO 含量反演, 定义 FeO 光谱角参数, 用以抑制成熟度的影响. 将该

数学模型应用于“嫦娥一号”干涉成像光谱仪数据, 成功得到月表 FeO 在局域地区的分布. 经过与 Clementine UVVIS 数据进行比较, “嫦娥一号”干涉成像光谱仪数据的 FeO 含量初步模型对于月海地区预测偏低(2%), 对于高地地区预测偏高(3%). 我们从模型限制和数据质量等方面分析了这种偏差产生的原因. 我们将进一步优化 FeO 的反演模型, 以获得利用 IIM 数据进行 FeO 预测的更佳结果.

参考文献

- 1 Zheng Y C, Ouyang Z Y, Li C L, et al. China's lunar exploration program: Present and future. *Planet Space Sci*, 2008, 56: 881—886
- 2 Lucey P, Korotev R L, Gillis J J, et al. Understanding the lunar surface and space-moon interactions. *Rev Miner Geochem*, 2006, 60: 83—219
- 3 Lucey P G, Taylor G J, Malaret E. Abundance and distribution of iron on the Moon. *Science*, 1995, 268: 1150—1153
- 4 Blewett D T, Lucey P G, Hawke B R, et al. Clementine images of the lunar sample-return stations: Refinement of FeO and TiO₂ mapping techniques. *J Geophys Res*, 1997, 102: 16319—16325
- 5 Lucey P G, Blewett D T, Hawke B R. Mapping the FeO and TiO₂ content of the lunar surface multispectral imagery. *J Geophys Res*, 1998, 103: 3679—3699
- 6 Lucey P G, Blewett D T, Jolliff B L. Lunar iron and titanium abundance algorithms based on final processing of Clementine ultraviolet-visible images. *J Geophys Res*, 2000, 105: 20297—20305
- 7 Lawrence D J, Feldman W C, Elphic R C, et al. Iron abundances on the lunar surface as measured by the lunar prospector gamma-ray and neutron spectrometers. *J Geophys Res*, 2002, 107: 5130
- 8 Gillis J J, Jolliff B L, Korotev R L. Lunar surface geochemistry: Global concentrations of Th, K, and FeO as derived from lunar prospector and Clementine data. *Geochim Cosmochim Acta*, 2004, 68: 3791—3805
- 9 Wilcox B B, Lucey P G, Gillis J J. Mapping iron in the lunar mare: An improved approach. *J Geophys Res*, 2005, 110: E11001
- 10 Pieters C M, Head J W, Isaacson P, et al. Lunar international science coordination/calibration targets (L-ISCT). *Adv Space Res*, 2008, 42: 248—258
- 11 Hillier J K, Buratti B J, Hill K. Multispectral photometry of the moon and absolute calibration of the clementine UV/Vis camera. *Icarus*, 1999, 141: 205—225
- 12 Pieters C M. The Moon as a spectral calibration standard enabled by lunar samples: The Clementine example. *Workshop on New Views of the Moon II*, 1999, abstract #8025
- 13 Charette M P, Mccord T B, Pieters C, et al. Application of remote spectral reflectance measurements to lunar geology classification and determination of titanium content of lunar soils. *J Geophys Res*, 1974, 79: 1605—1613
- 14 Fischer E M, Pieters C M. Remote determination of exposure degree and iron concentration of lunar soils using Vis-Nir spectroscopic methods. *Icarus*, 1994, 111: 475—488