

基于太空风化的尖晶石二向性反射特性研究

张渊智¹, 安璐², 黄朝君³

(1. 中国科学院国家天文台 月球与深空探测重点实验室, 北京 100012; 2. 北京科技大学 数理学院, 北京 100083;
3. 香港中文大学 深圳研究院, 深圳 518057)

摘 要: 简要介绍了不同太空风化条件下尖晶石的光谱特性, 特别是利用 Hapke 模型计算了不同太空风化条件下尖晶石的二向性反射率分布特征。模拟的结果显示, 对 M^3 数据, 可比较 $0.6\ \mu\text{m}$ 和 $1.9\ \mu\text{m}$ 附近的吸收特征; 对 IIM 数据, 则需要先分析太空风化程度, 然后比较 $0.6\ \mu\text{m}$ 和 $0.9\ \mu\text{m}$ 附近的吸收特征来判断是否为尖晶石。该结论为选择探月传感器的波段组合识别尖晶石提供了依据, 也为应用 M^3 数据和“嫦娥 1 号” IIM 数据的尖晶石判别奠定了基础。

关键词: 尖晶石; 光谱特征; Hapke 模型; 太空风化

中图分类号: TP79; S15 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-7777(2014)03-0210-04

DOI: 10.15982/j.issn.2095-7777.2014.03.008

The Study of Bidirectional Reflectance Feature of the Spinel Based on the Space Weathering

ZHANG Yuanzhi¹, AN Lu², HUANG Zhaojun³

(1. Key Lab of Lunar and Deep-space Exploration, National Astronomical Observatories, CAS, Beijing 100012, China;
2. School of Mathematics and Physics, Beijing University of Science and Technology, Beijing 100083, China
3. Shenzhen Research Institute, the Chinese University of Hong Kong, Shenzhen 518057, China)

Abstract: This paper briefly introduces the bidirectional reflectance feature of spinel based on space weathering. The distribution of the bidirectional reflectance feature of spinel under the different conditions of space weathering was simulated using the Hapke model. The results show that the absorption features at $0.6\ \mu\text{m}$ and $1.9\ \mu\text{m}$ could be used to determine spinel when the Moon Mineralogy Mapper (M^3) data is applied. However, when the Chang'e-1 Interference Imaging Spectrometer (IIM) data is used, the space weathering level should be first analyzed, and then the absorption features at $0.6\ \mu\text{m}$ and $0.9\ \mu\text{m}$ could be applied to identify the mineral. These results provide the basis of identifying spinel using absorptive positions and depths of the spinel, which can also be applied to M^3 data and Chang'e-1 IIM data processing.

Key words: spinel; spectral feature; Hapke model; space weathering

0 引 言

尽管人类已经能够从月球采集样品进行实验室分析, 但遥感技术仍然是研究月球的主要手段。月球遥感的主要内容之一就是定性或定量地研究月球

矿物的组成。研究月球表面的矿物类型, 不仅可以揭示月球的演化历史, 而且也可以为研究太阳系及其行星、卫星早期演化的历史提供重要科学信息和依据。

月表矿物分布探测主要利用轨道探测器上搭载

的光学传感器来实现。针对月球矿物分布的研究,目前主要集中在反演月球的主要矿物:斜长石、钛铁矿、橄榄石和辉石的分布研究。由于尖晶石属于月球次生矿物,月表含量低,加之太空风化的影响,故尖晶石矿物分布的探测难度很高。

Pieters 等在 2010 年第 41 届月球与行星科学大会上首次报告了他们的科学发现,即利用探月高光谱数据在月球背面发现了以含镁尖晶石为主、辉石或橄榄石含量小于 5% 的含镁尖晶石矿物^[1]。该发现引发了科学界对于月球尖晶石成因的讨论。

目前关于尖晶石的成因,有两种假说,一种是由接触变质作用形成;另一种是由岩浆结晶作用形成。因此探测月球尖晶石的分布位置及其特征成为研究月球尖晶石成因的关键。

2012 年 Bhattacharya 等在月球正面发现了含镁尖晶石及 OOS(辉石-橄榄石-尖晶石)矿物组合^[2]。Prissel 等在 2012 年^[3]发表了对月球撞击坑内尖晶石分布特征的分析,其研究结果支持关于尖晶石成因的上述第一种假说。此外,Prissel 等通过模拟月幔环境讨论了含镉尖晶石的形成环境,并认为可以利用遥感手段,通过寻找月表含镉尖晶石来判断月球含镁岩浆岩的位置^[4]。

对于大多数物质,反射光谱的吸收特征能够敏感地指示其矿物和化学成分。因此物质吸收特征的中心、强度和波形是识别矿物的重要依据。本文以 Relab 实验室提供的尖晶石矿物光谱曲线为基础,利用 Hapke 模型模拟不同太空风化条件下的尖晶石光谱特征,为后期研究月表尖晶石分布提供数据基础。

1 问题的提出

近年来,随着成像技术的发展,高光谱遥感数据已广泛应用于月表地质信息的探测研究中,并取得了许多研究成果。这些数据包括日本“月女神”卫星携带的 Spectral Profiler 探测器、中国“嫦娥 1 号”卫星上携带的干涉成像光谱仪(interference imaging spectrometer, IIM)以及“月球飞船 1 号”(Chandrayaan-1)卫星上携带的美国探月仪器“矿物绘图仪”(moon mineralogy mapper, M³)探测器。

关于月球尖晶石的探测,现阶段主要是利用去除连续统的方法来突出光谱曲线的吸收、反射特征,通过比较特定波段范围下的吸收深度来判断是否含有尖晶石。

M³ 数据,波段范围为 0.405 ~ 3.000 μm ,共 260 个波段,光谱分辨率约为 0.01 μm ,它覆盖了月表矿物的主要光谱特征。我国“嫦娥 1 号”携带的光谱仪 IIM 在可见光范围下与 M³ 探测器的光谱分辨率相近,其波段范围为 0.48 ~ 0.96 μm ,共 32 个波段,(0.48 μm 波段光谱分辨率为 7.62 nm,0.96 μm 波段光谱分辨率为 29 nm)。

为了对月球尖晶石进行探测研究,需要针对不同探测器的波段,提取相应的有效的吸收位置和吸收深度进行判断。

2 尖晶石光谱特征

尖晶石(Spinel, MgAl_2O_4)是橄长岩的主要矿物,但在月海玄武岩中为次要矿物,在月球表面分布较少。由于 Fe^{2+} 的存在,地球尖晶石光谱在 0.46、0.93 和 2.8 μm 附近具有较强的吸收。由于 Al 和 Fe^{3+} 的存在,在 0.93 μm 处也有吸收特征。由于 Cr 的存在,在 0.55 μm 处可见吸收特征。

由于尖晶石矿物稀少,目前还没有月球尖晶石矿物的光谱曲线,因此图 1 中尖晶石光谱使用的是 Relab 光谱库中的地球尖晶石矿物的光谱曲线(SP-ECA-016),该尖晶石矿物粒径范围为 0 ~ 45 μm 。

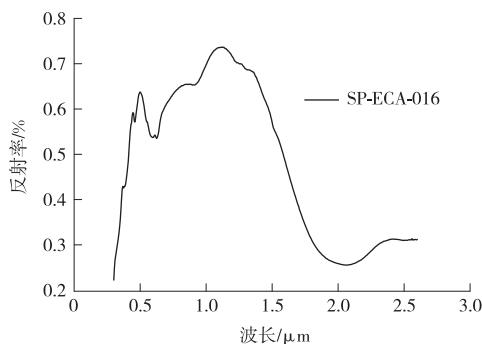


图 1 尖晶石反射光谱(SP-ECA-016)
Fig. 1 Reflectance feature of spinel (SP-ECA-016)

3 太空风化模拟方法

Heiken 等在文献[5]中认为,由于月球没有大气圈,月球物质直接暴露在太阳风、宇宙射线及陨石的撞击下,在长期的地质演化过程中月壤遭受强烈的太空风化。月表太空风化过程会改变月表光谱特征,从而影响月表矿物反演精度。

在假设月表为各向同性的标准朗伯面的前提下,Hapke 等在文献[6]中给出模型可以简化为二向反射率 r 和单次反照率 w 的关系:

$$r(\mu_0, \mu, g) =$$

$$\frac{w}{4\pi} \frac{\mu_0}{\mu_0 + \mu} \{ [1 + B(g)] P(g) + H(\mu_0) H(\mu) - 1 \} \quad (1)$$

式中: μ_0 和 μ 分别为入射角和出射角的余弦值; g 为相位角; $B(g)$ 为后向散射函数; $P(g)$ 表示单个颗粒散射相函数; $H(x)$ 为描述多项散射的函数。

月表物质光谱的主要影响因素之一为太空风化, Hapke 等在文献[7]中提出太空风化程度可以利用 SMFe 进行表述, 具体可表述为单次反照率和矿物折射系数的实部 n 、吸收系数 α 、散射系数 s 及粒径 D 的关系

$$w = S_e + (1 - S_e) \frac{1 - S_i}{1 - S_i \Theta} \Theta \quad (2)$$

其中

$$\begin{aligned} S_e &= (n - 1)^2 / (n + 1)^2 + 0.05 \\ S_i &= 1 - 4 / n(n + 1)^2 \\ \Theta &= \frac{r_i + \exp(-\sqrt{\alpha(\alpha + s)} D)}{1 + r_i \exp(-\sqrt{\alpha + s} D)} \\ r_i &= \frac{\sqrt{1 + \alpha/s} - 1}{\sqrt{1 + \alpha/s} + 1} \end{aligned} \quad (3)$$

特别的, 当颗粒无内部散射时, 该散射过程为单次透射, 有 $s = 0$, $\Theta = \exp[-\alpha D]$ 。

其中, 粒径 D 可用等效粒径 D_p 替代

$$D_p \approx D_L \ln \left(\frac{D_U}{D_L} \right) \quad (4)$$

式(4)中: D_U 为最大粒径; D_L 为最小粒径。

吸收系数 α 是主要矿物的吸收系数 α_h 和单质铁的吸收系数 α_{Fe} 之和。

$$\alpha = \alpha_h + \alpha_{Fe} \quad (5)$$

其中, α_{Fe} 和 风化程度 f 的关系为

$$\alpha_{Fe} = 36\pi z f \rho_h / \lambda \rho_{Fe} \quad (6)$$

其中, ρ_h 和 ρ_{Fe} 分别是主要矿物和单质铁的密度, z 可表述为

$$z = \frac{n_h^3 n_{Fe} k_{Fe}}{(n_{Fe}^2 - k_{Fe}^2 + 2n_h^2)^2 + (2n_{Fe} k_{Fe})^2} \quad (7)$$

式中: n_{Fe} 和 k_{Fe} 分别为单质铁折射率的实部和虚部; n_h 是主要矿物的折射率实部。

计算矿物太空风化条件下的二向性反射率的计算方法如下:

- 1) 设置不同的太空风化程度 f ;
- 2) 利用式(7), 根据太空风化程度 f , 计算 z ;
- 3) 计算等效粒径 D_p , 则有: $\alpha D = \alpha_h D + \alpha_{Fe} D$;
- 4) 由 $\Theta = \exp[-\alpha D]$ 和式(2)、(3) 计算单次反

照率 w ;

5) 由式(1) 计算不同太空风化条件下的二次反射率 r 。

4 基于太空风化的尖晶石光谱特征

文献[8]给出尖晶石折射率实部 n 与波长 λ 的关系可表述为

$$n^2 - 1 = \frac{1.8938\lambda^2}{\lambda^2 - 0.09942^2} + \frac{3.0755\lambda^2}{\lambda^2 - 15.826^2} \quad (8)$$

文献[9]给出单质铁的折射率虚部和实部, 本文设置太空风化程度分别为 $f = 0, 0.1\%, 0.2\%, 0.5\%, 1.0\%, 1.5\%$ 和 2.0% 。

计算出不同太空风化条件下的尖晶石的二向性反射率, 如图 2 所示。

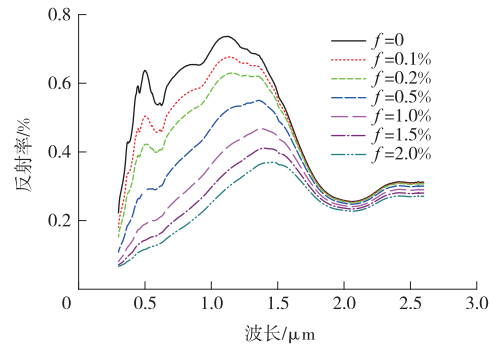


图 2 不同太空风化条件下的尖晶石二向性反射率
Fig.2 Bidirectional reflectance feature of the spinel based on different levels of the space weathering

不同太空风化条件下, 尖晶石反射率在 $1.9 \mu\text{m}$ 左右的位置均有明显的吸收。

反射率随太空风化作用的加强而减弱。特别是在波长 $0.3 \sim 1.6 \mu\text{m}$ 范围内, 反射率曲线随 f 的增加而趋向平滑, $0.56 \mu\text{m}$ 处的吸收谷逐渐不明显。

月球矿物的探测, 现阶段主要是利用去除连续统的方法来突出光谱曲线的吸收、反射特征, 通过比较特定波段范围下的吸收深度来判断是否含有相应的矿物。为清楚地显示出尖晶石的吸收特性, 对各反射率去除连续统, 如图 3 所示。

连续统去除后, 不同太空风化条件下的尖晶石反射率在 $0.6 \mu\text{m}$ 左右仍能找到吸收, 且在 $0.4 \mu\text{m}$ 处附近有微小的吸收。此外, 当 $f \leq 0.5\%$ 时, 在 $0.9 \mu\text{m}$ 处有吸收谷; 当 $f \geq 1\%$ 时, $0.9 \mu\text{m}$ 附近吸收不明显。

对于 M^3 数据, 可通过比较 $0.6 \mu\text{m}$ 和 $1.9 \mu\text{m}$ 附近的吸收特征来寻找月表尖晶石分布。

然而, 对于 IIM 数据, 则需要首先探讨太空风

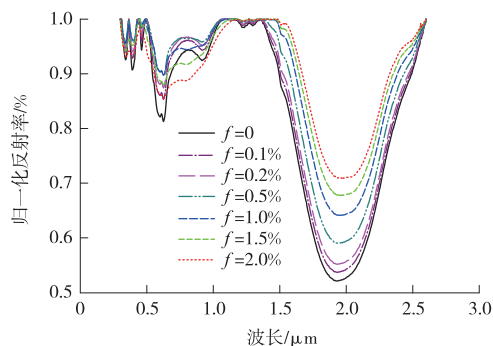


图3 连续统去除后的尖晶石光谱二向性反射率

Fig. 3 Bidirectional reflectance feature of the spinel based on continuum-removed

化的程度,然后再比较 $0.6\ \mu\text{m}$ 和 $0.9\ \mu\text{m}$ 附近的吸收特征来寻找月表尖晶石分布。

5 结 论

由于尖晶石属于月球次生矿物,月表含量低,其光谱信息易被淹没在其他矿物信息中,加之太空风化的影响,利用探月传感器探测尖晶石矿物分布难度很高。

本文利用 Hapke 模型模拟了不同太空风化条件下尖晶石的二向性反射率。模拟结果显示,尖晶石在 $1.9\ \mu\text{m}$ 附近有较宽的吸收带谷。当太空风化较强时($f=2\%$),通过去除连续统, $0.6\ \mu\text{m}$ 附近也有吸收谷。

此外,单质铁的含量(即 f 值),会影响 $0.9\ \mu\text{m}$ 附近尖晶石的吸收特征。因此寻找月表尖晶石分布,可通过比较 $0.6\ \mu\text{m}$ 和 $1.9\ \mu\text{m}$ 附近的吸收特征来完成。

对于不同的探月传感器,需要通过比较不同波段下的吸收特征来确定尖晶石的分布。如对 M^3 数据,可比较 $0.6\ \mu\text{m}$ 和 $1.9\ \mu\text{m}$ 附近的吸收特征;对 IIM 数据,则需要先分析太空风化程度,然后比较 $0.6\ \mu\text{m}$ 和 $0.9\ \mu\text{m}$ 附近的吸收特征来判断是否为尖晶石。

参 考 文 献

- [1] Pieters, C M, Boardman J, Buratti B, et al. Identification of a new spinel-rich lunar rock type by the Moon mineralogy mapper (M^3) [C]// Lunar and Planetary Science Conference. Houston, USA, 2010.
- [2] Bhattacharya, Satadru, Prakash Chauhan, et al. Mg-spinel-rich lithology at crater Endymion in the lunar nearside[C]// 39th COSPAR Scientific Assembly. Moscow, Russia, 2-10 August 2014.
- [3] Prissel T C, Parman S W, Jackson C R M, et al. Melt-wallrock reactions on the Moon: experimental constraints on the formation of newly discovered Mg-Spinel anorthosites[C]// Lunar and Planetary Institute Science Conference. Houston, USA, 2012.
- [4] Prissel T C, Parman S W, Jackson C R M, et al. Pink Moon: The petrogenesis of pink spinel anorthosites and implications concerning Mg-suite magmatism[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2014 (403): 144 - 156. doi: 10.1016/j.epsl.2014.06.027.
- [5] Heiken D, Vaniman, French B M. Lunar sourcebook: a user's guide to the moon [M]. New York: Cambridge University Press, 1991.
- [6] Hapke B W, Cohen A J, Cassidy W A, et al. Solar radiation effects on the optical properties of Apollo 11 samples [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta Supplement, 1970:2199.
- [7] Hapke B. Space weathering from mercury to the asteroid belt [J]. Journal of Geophysical Research, 2001, 106 (E5): 10039 - 10073.
- [8] Bass M, DeCusatis D C, Enoch J M, et al. Enoch handbook of optics[M]. [S.l.]: McGraw-Hill, 2009.
- [9] Johnson P, Christy R. Optical constants of transition metals: Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni and Pd [J]. Phts. Rev., 1974, B9:5056 - 5070.

作者简介:

张渊智(1964—),男,教授,博士生导师,主要研究方向:环境遥感,月球与行星遥感。

通信地址:北京市朝阳区大屯路甲20号(100012)

电话:010-64807833

E-mail: zhangyz@nao.cas.cn

[责任编辑:高莎]