

模拟月壤的 Hapke 模型参数反演方法

许学森^{1,2,3}, 刘建军^{1,2*}, 刘斌^{1,2}, 刘大卫^{1,2}

(1. 中国科学院月球与深空探测重点实验室, 北京 100012;

2. 中国科学院国家天文台, 北京 100012;

3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: Hapke 模型是描述行星表面光度行为的辐射传输模型, 利用行星表面多角度反射率数据可以反演得到 Hapke 模型参数, 研究行星表面的物理和光度特性. Hapke 模型参数的反演需要覆盖相角范围足够大的反射率数据, 而行星遥感和就位探测时很难覆盖足够大的相角范围. 因此, 如何利用有限的多角度数据获取准确的模型参数是一个重要的研究课题. 实验室提供了获取大范围角度下反射率数据的实验条件, 可以在实验室条件下研究 Hapke 模型参数反演方法. 通过实验室 ASD 光谱仪和 Chang' E-3 红外成像光谱仪鉴定件获取的橄榄石和模拟月壤多角度反射率数据进行实验, 结果表明有限观测角度可以获取比较准确的模型参数; 通过分析 Hapke 模型参数得到橄榄石和两种模拟月壤的光度和物理特征.

关键词: 二向反射; Chang' E-3; 红外成像光谱仪; 反射率; 光度校正; Hapke 模型; 辐射传输; 最小二乘

中图分类号: P691 **文献标识码:** A

Hapke's parameters inverse method of Lunar analog sample

XU Xue-Sen^{1,2,3}, LIU Jian-Jun^{1,2*}, LIU Bin^{1,2}, LIU Da-Wei^{1,2}

(1. Key Laboratory of Lunar and Deep Space Exploration, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China;

2. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Hapke model has been widely used in the photometric study of regolith as the parameters has specific photometric and physical meaning. To reverse these parameters, photometric observations are needed for a wide range of incidence, emission, and phase angles of the regolith. However, it is difficult to have such wide range angles in the remote sensing and in situ observation. So, it is very important to know how we can get precise result with the limited observations and we can do the research at laboratory. In this work, we got the reflectance of olivine with large range of phase angle by ASD spectrometer and got reflectance of two kinds of Lunar analog samples by Chang' E-3 VIS-NIR Imaging Spectrometer. Also we learned how to reverse Hapke model parameters. As a result, we find that we can get accurate result with limited measurements. Also, we have got some result of two Lunar analog samples (one with glass and the other without glass) with analysis of relative parameters of Hapke model.

Key words: bi-directional reflectance, Chang' E-3 VIS-NIR Imaging Spectrometers, reflectance, photometric correction, Hapke model, radiation transfer, the least squares algorithm

PACS: 95.75.De, 95.75.Fg

收稿日期: 2017-07-18, 修回日期: 2018-01-16

Received date: 2017-07-18, revised date: 2018-01-16

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)(2015AA123704), 国家自然科学基金(11403049, 413714141)

Foundation items: Supported by National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (2015AA123704), National Natural Science Foundation of China (11403049, 413714141)

作者简介(Biography): 许学森(1990-), 男, 山东聊城人, 博士研究生, 主要从事实验室和遥感光谱研究. E-mail: xuxs@nao.cas.cn

* 通讯作者(Corresponding author): E-mail: liujj@nao.cas.cn

引言

国际上已经普遍将光谱探测技术用于行星探测领域,我国也已经成功利用嫦娥一号搭载的干涉成像光谱仪(IIM)和嫦娥三号搭载的红外成像光谱仪(VNIS)分别对月球进行了遥感和就位探测,获取了宝贵的月表光谱数据^[1].对月表进行探测时,不同时间、不同地点探测器观测角度和太阳光照角度会有所变化,导致获取的光谱数据有所差异,从而影响矿物定性识别、定量反演的准确度以及镶嵌图像的质量.通过对获取的光谱数据进行光度校正,将不同光照几何(相位角、入射角、出射角)条件下获取的光谱数据归一到同一标准角度下,通过消除不同光照观测角度对光谱数据的影响,提高矿物定量反演的准确度^[2-9],提高图像镶嵌的质量^[10-15],并且能使不同的区域数据以及不同探测器获取的数据具备可对比性.

目前常用的月球光度校正模型有经验模型、几何光学模型和 Hapke 模型.三类模型有不同的适用性,其中经验模型在图像镶嵌应用比较广泛,能有效消除相邻轨图像之间的亮度差异,获取高质量镶嵌拼接图像,但是经验模型参数不具有物理意义;几何光学模型比较适合描述土壤反射的物理模型,优点在于概念简单、针对性强,适合于各种类型的土壤;缺点在于公式复杂,多次散射采用近似计算^[3];Hapke 模型是根据辐射传输方程推导得到,综合考虑了月表颗粒孔隙度、粗糙度、热点效应、多重散射等因素,具有可靠的数学基础与明确的物理意义,可以通过解算模型参数来研究月表物理特性;但是辐射传输模型对数据要求较高,需要对月表多次重复观测、尽可能覆盖各种光照观测几何^[1].

Hapke 模型参数具有明确的物理意义,利用月表光谱反射率数据反演 Hapke 模型参数是研究月表物理特性重要方法^[16].但是遥感和就位探测时往往很难得到足够的多角度观测数据.因此,如何利用有限的多角度数据获取准确的模型参数是一个重要的研究课题^[17].实验室具备获取大范围光照观测角度数据的条件,为研究此问题提供了实验条件.利用在实验室获取有限的多角度观测数据进行 Hapke 模型参数反演方法研究,可以为遥感数据的应用提供方法和依据^[17,22,29].

本文在实验室条件下,利用 ASD 光谱仪获取了月表主要矿物橄榄石样品的大相角范围的反射率数据,研究了 Hapke 模型参数反演方法.实验结果表

明,选择适当的角度设置条件下可以利用有限的观测角度数据获得准确的参数结果.利用 Chang' E-3 红外成像光谱仪鉴定件模拟月表就位探测条件,获取了两种模拟月壤的多角度反射率数据,反演得到模拟月壤样品模型参数,分析其物理特性,并比较了 Hapke 模型和经验模型分别对多角度反射率数据进行光度校正的效果.实验结果为利用遥感和就位探测数据,研究月表物理特性提供了方法和理论依据.

1 Hapke 模型介绍

1.1 反射率几种描述方法:

介质二向反射观测几何如图 1 所示,其中 i 、 e 分别为光线入射角和出射角, φ 为方位角, g 为出射光线与入射光线的夹角,几个角度有以下函数关系^[16].

$$\cos(g) = \cos(i)\cos(e) + \sin(i)\sin(e)\cos(\varphi) \quad (1)$$

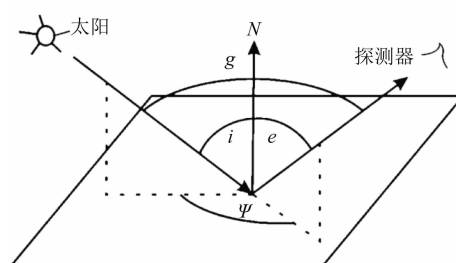


图 1 介质二向反射观测几何示意图^[2]
Fig. 1 Schematic diagram of lighting observation on the moon

介质反射率是利用已知反射率的标准白板计算得到,公式如下,其中 $DN_{\text{样品}}$ 为光谱仪实验室测量样品 DN 值, $DN_{\text{白板}}$ 是相同光谱仪、光源条件下测量的标准白板 DN 值, $r_{\text{白板}}$ 为标准白板的反射率^[16]:

$$\frac{r_{\text{样品}}}{r_{\text{白板}}} = \frac{DN_{\text{样品}}}{DN_{\text{白板}}} \quad (2)$$

反射率通常有几种不同的描述方法,根据 Hapke 2012^[16]对于光线平行入射和出射情况,可以根据光源辐照度 J 和光源辐亮度 I 定义常用的反射率的几种描述方法,首先是二向反射率(bidirectional reflectance) $r(i, e, g)$ 是辐亮度与入射光辐照度之比.

$$r(i, e, g) = \frac{I * (i, e, g)}{J} \quad (3)$$

介质表面单位面积在入射光线方向 i 的投影面积为 $\cos i$,单位时间内照射到介质上能量 $P = J \cos$

i , 辐亮度 I 与 P 比值即为双向反射率分布函数 (BRDF, Bidirectional Reflectance Distribution Function).

$$\text{BRDF}(i, e, g) = \frac{I}{I \cos i} = \frac{r}{\cos i} \quad (4)$$

相同光源辐照度 J , 同等光照-观测几何 (i, e, g) 下介质表面和理想朗伯面辐亮度 I 之比称为反射率因子 (REFF, Reflectance Factor).

$$\text{REFF}(i, e, g) = \frac{\pi r(i, e, g)}{\cos i} \quad (5)$$

相同光源辐照度 J , 介质表面辐亮度 I 与 0° 入射角下测量的朗伯体辐亮度之比称为辐亮度因子 (RADF, Radiance Factor).

$$\text{RADF} = \frac{1}{F}(i, e, g) = \pi r(i, e, g) \quad (6)$$

1.2 Hapke 模型

Hapke 模型是通过辐射传输理论对土壤中的辐射场分布进行描述, 进而推导出土壤二向反射特性的物理模型. 其参数反映了介质的物理性质, 如矿物成分、颗粒粒径和形状、孔隙度、表面粗糙度等. Hapke 模型中, K 为孔隙度因子, ω 代表单次散射反照率, $\mu_0 = \cos(i)$, $\mu = \cos(e)$, $\frac{\mu_0}{\mu_0 + \mu}$ 为 LS (Lommel-Seelinger) 因子^[16], $p(g)$ 代表单粒子相函数, 阴影遮蔽 (SHOE, Shadow Hiding Opposition Effect) 和相关后向散射 (CBOE, Coherent Backscatter Opposition Effect) 是代表热点效应项, B_{s0} 和 B_{c0} 分别是 SHOE 和 CBOE 的振幅, 为多次散射函数, $M(\mu_0, \mu)$ 为粗糙度函数, $S(i, e, \Psi)$ 不同的反射率描述方式对应不同的 Hapke 模型表达方式.

$$r = K \frac{\omega}{4\pi \mu_0 + \mu} [p(g)(1 + B_{s0}B_{SH}) + M(\mu_0, \mu)] [1 + B_{c0}B_c(g)] S(i, e, \Psi) \quad (7)$$

1.2.1 单次散射反照率

平均粒子单次散射反照率 ω 定义为某波段的光被介质表面散射部分与散射和吸收部分光能量和的比值. S 为散射系数, 表示光被介质散射部分, K 为吸收系数, 是光被介质吸收的部分, 因此 ω 的取值范围为 $0 \leq \omega \leq 1$. 在应用中, ω 代表介质表面组成粒子的平均特征, 与粒子的光学参数、粒径、粒子形状以及内部结构有关^[20, 21]. 对于大多数不透明粒子, 粒径较大吸收入射光能量较多^[22], 所以其与粒径成反比关系.

$$\omega = \frac{S}{S + K} \quad (8)$$

1.2.2 表面粗糙度

粗糙度校正因子 $\bar{\theta}$, 是粗糙度函数 $S(i, e, \Psi)$ 中的参数, 是与宏观表面粗糙度和传感器尺寸有关的量^[23, 24]. 因为在小相角时, 热点效应和粒子相函数可能影响宏观粗糙度的反演, 所以要考虑粗糙度因子影响就必须获取大相角的反射率数据^[22, 24].

1.2.3 热点效应

热点效应指在相角接近 0° 时反射率随相角的减小呈现非线性增加的现象, 热点效应 Seeliger 最早认为由于阴影遮蔽效应 (SHOE) 的影响^[25], 粒子之间的阴影在 0° 相角时会相互遮蔽, 因此反射率会成非线性增加; 后来 Hapke 认为相关后向散射 (CBOE) 也会造成热点效应^[16, 27], 在大相角时土壤颗粒的多重散射光在相反方向上是随机影响的, 而在小相角时会产生干涉导致散射光强度增强. 其中 CBOE 在相角小于 3° 时影响较强. 其中, B_{s0} 和 B_{c0} 分别是 SHOE 和 CBOE 的振幅, $B_{s0} = R(0)/\omega p(0)$, $R(0)$ 代表入射光散射到 0° 相角的概率, 取值范围为 $[0, 1]$; $B_s(g)$ 和 $B_c(g)$ 分别是 SHOE 和 CBOE 的相函数^[16, 28].

$$B_s(g) = \frac{1}{1 + (\tan \frac{g}{2})/h_s} \quad (9)$$

$$B_c(g) = \frac{1 + \frac{1 - \exp[\tan(g/2)/h_c]}{\tan(g/2)/h_c}}{2[1 + \tan(g/2)/h_c]^2} \quad (10)$$

1.2.4 单粒子相函数 $P(g)$

相函数为 Double Henyey-Greenstein 经验函数, 是所有表面颗粒的平均散射相函数, 同时考虑了前向和后向散射^[20]. 第一项为后向散射项, 第二项为前向散射项, $c > 0$ 表示后向散射, $c < 0$ 表示前向散射; b 描述了散射项幅值和幅宽, b 较小代表幅值较小, 幅宽较宽, b 较大代表幅值较大, 幅宽较窄. b 的取值范围为 $0 \leq b \leq 1$, c 的取值范围由相函数不能为负值来约束^[29], 并且 bc 之间存在经验关系^[30]:

$$c = 3.29 \exp(-17.4b^2) - 0.908 \quad (11)$$

$$p(g) = \frac{1+c}{2} \frac{1-b^2}{(1-2b \cos g + b^2)^{3/2}} + \frac{1-c}{2} \frac{1-b^2}{(1+2b \cos g + b^2)^{3/2}} \quad (12)$$

M 函数代表的是多次散射项,

$$M(i, e) = H\left(\frac{\cos i}{K}, \omega\right) \cdot H\left(\frac{\cos e}{K}, \omega\right) - 1 \quad (13)$$

$$H(x, \omega) = \left\{ 1 - \omega x \left[r_0 + \frac{1 - 2r_0 x}{2} \ln \left(\frac{1+x}{x} \right) \right] \right\}^{-1}, \quad (14)$$

$$r_0 = (1 - \sqrt{1 - \omega}) / (1 + \sqrt{1 - \omega}) \quad (15)$$

1.3 光度校正模型

光度校正就是将不同光照观测几何条件下的反射率数据校正到同一标准角度下,从而消除光照观测几何对数据的影响.光度校正模型如下,其中 $r_{标准}$ 代表光度校正后反射率数据, $r_{实测}$ 代表实际测量数据, $r_{模型拟合标准值}$ 代表标准角度下模型拟合数据, $r_{模型拟合值}$ 代表与实测角度相同的模型拟合数据:

$$\frac{r_{标准}}{r_{实测}} = \frac{r_{模型拟合标准值}}{r_{模型拟合值}} \rightarrow \frac{r_{模型拟合标准值}}{r_{模型拟合值}} \cdot r_{实测} \quad (16)$$

2 多角度反射率数据获取

实验选择了橄榄石粉末样品、不含玻璃成分模拟月壤样品(辉石 40%, 橄榄石 20%, 斜长石 30%, 钛铁矿 10%)(以下简称 HHY)以及含玻璃成分模拟月壤样品(国家天文台月球与深空探测科学应用中心研制,斜长石 56%, 辉石 17%, 橄榄石 5%, 钛铁矿 2%)(以下简称 LLB). 实验仪器选用 ASD 光谱仪和 Chang' E-3 红外成像光谱仪鉴定件. 设置光照观测几何时,考虑到月球遥感探测(如 Chang' E-1 干涉成像光谱仪)仪器的出射角为 0° ,而就位探测红外成像光谱仪出射角为 45° . 因此实验中模拟两种不同探测模式下的探测角度,利用 ASD 光谱仪获取了橄榄石样品的大相角范围多角度(出射角分别为 $0^\circ, 45^\circ$)反射率数据,用 Chang' E-3 红外成像光谱仪鉴定件获取了两种模拟月壤有限相角(出射角为 45°)范围的多角度反射率数据.

大范围相角探测:利用 ASD 光谱仪得到橄榄石粉末样品 $0^\circ \sim 120^\circ$ 相角范围,480 ~ 2 000 nm 波段辐亮度因子(RADF)数据;由于实验中使用光源平行性不好,导致小相位角处数据质量较差,本文只选择了 $10^\circ \sim 120^\circ$ 相角范围数据.

有限相角探测:Chang' E-3 红外成像光谱仪就位探测时,出射角度固定为 45° ,太阳高度角限制在 $15^\circ \sim 33^\circ$ 范围,且在方位角小于 60° 时探测区域会出现阴影. 因此,利用红外成像光谱仪鉴定件(以下简称 VNIS)模拟就位探测角度,得到 $40^\circ \sim 120^\circ$ 相角范围,900 ~ 2 500 nm 波段反射率因子(REFF)数据.

表 1 三种矿物样品观测几何信息

Table 1 Observation geometry of the three samples

矿物样品	出射角/ ($^\circ$)	入射角/($^\circ$)	方位角/($^\circ$)	相角范围
橄榄石矿物样品	0, 45	5, 15, 25, 35, 45, 55, 65, 75	0, 5, 10, 15, 20, 30, 60, 90, 120, 150, 180	0 ~ 120 $^\circ$
模拟月壤样品(LLB)	45	50, 55, 60, 65, 70, 75	60, 90, 120, 150, 180	40 ~ 120 $^\circ$
模拟月壤样品(HHY)	45	50, 55, 60, 65, 70, 75	60, 90, 180	40 ~ 120 $^\circ$

表 2 Chang' E-3 VNIS 和 ASD 光谱仪参数信息

Table 2 Main parameters of Chang' E-3 VNIS and ASD FieldSpec spectrometer

仪器名称	波长范围	光谱分辨率
Chang' E-3 号红外成像光谱仪鉴定件	可见近红外通道: 450 ~ 950 nm 近红外短波红外通道: 950 ~ 2 400 nm	450 ~ 950 nm: < 8 nm 950 ~ 2 400 nm: < 12 nm
ASD FieldSpec 光谱仪	可见近红外通道: 350 ~ 1 000 nm 近红外短波红外通道: 1 001 ~ 2 500 nm	350 ~ 1 000 nm: 1.4 nm 1 001 ~ 2 500 nm: 1.1 nm

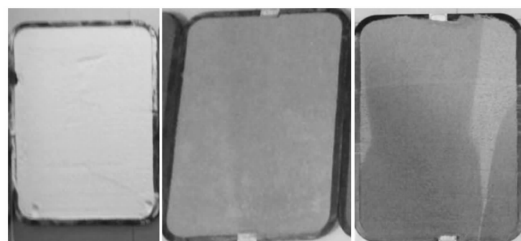


图 2 试验样品(从左往右分别是橄榄石、HHY、LLB 样品)
Fig. 2 Picture of samples in the experiment (Olivine (left), HHY (middle), LLB (right))



图 3 Chang' E-3 号 VNIS 和 ASD 光谱仪测量数据装置图
Fig. 3 Experimental setup of Chang' E-3 VNIS and ASD spectrometer

3 Hapke 模型参数拟合方法

3.1 参数拟合方法

Hapke 模型包括 9 个物理参数,如果考虑所有参数,数学运算非常复杂.在进行模型参数反演时,可以根据数据和应用目的实际情况进行简化^[5,17,22,31].考虑到实验样品经过人工抹平,因此忽略了粗糙度的影响,孔隙度因子设置为 1.采用最小二乘法拟合方法,拟合初始值的设置对于最终结果很重要,不合适的初始值可能不会得到全局最小值,甚至可能导致运算错误.本实验采用以下方法找到合适的初始值^[31],由于在相角小于 20°时才存在热点效应,所以首先不考虑热点效应的影响,选取相角大于 20°的数据,拟合出 ω, b, c 值,求出忽略热点效应的 Hapke 模型中 $r_c(0,0,0)$

$$r_c(i, e, g) = \omega p(g)/4 + \omega M(i, e)/4, \quad (17)$$

然后利用相角小于 20°的数据,固定 ω, b, c 解算热点效应参数.为简化计算可以忽略 CBOE,只考虑 SHOE 的影响,得到 $r_R(0,0,0)$

$$r_R(0,0,0) = \left[\frac{\omega}{4} p(0)(1 + B_{s0}) + \frac{\omega}{4} M(0,0) \right] (1 + B_{c0}), \quad (18)$$

$\Delta r = r_R(0,0,0) - r_c(0,0,0)$ 根据 B_{s0} 的定义可以得到

$$\Delta r = R(0)(1 + B_{c0})/4 + B_{c0}r_c(0,0,0), \quad (19)$$

Δr 和 $r_c(0,0,0)$ 是具有线性关系,二者的截距和斜率可以求出 $R(0)$ 和 B_{c0} ,进而可以求出 B_{s0} ,最终由已经求出的参数值作为初值拟合得到剩余的 h_s 和 h_c 值.

3.2 评价标准

模型拟合结果和实测结果的评价标准采用均方根误差 (RMSE) 和相关系数 R 综合评价.其中 RMSE 用于评价模拟值与实测值之间的偏差, R 用于实测值与拟合值之间相关关系的密切程度. \hat{y}_i 为实测光谱反射率值, y_i 为拟合光谱反射率值, \bar{y} 为拟合光谱反射率 y_i 的平均值, \bar{y} 是实测光谱反射率数据 \hat{y}_i 的平均值

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}}$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})^2}}. \quad (20)$$

4 结果与分析

通过参数 ω, b, c 的前人研究结果和实验室对比,可以看出实验中橄榄石样品 Hapke 模型参数结果与样品物理特性一致,说明 Hapke 模型参数可以准确说明样品的物理和光度特性.同时,选取相同相角覆盖范围的部分橄榄石样品反射率数据进行试验,发现在合适的角度设置下,有限的观测角度数据可以得到准确的模型参数结果,通过分析模型参数得到了模拟月壤的物理特性.最后分别利用 Hapke 模型和经验模型对橄榄石反射率数据进行光度校正,对比分析 Hapke 模型光度校正效果.

4.1 Hapke 模型参数结果准确性

首先利用 3.1 中 Hapke 参数拟合方法拟合得到橄榄石样品的模型参数,从结果中热点效应参数值判断热点效应可以忽略,这与实际数据情况也相符合,因为实验角度不包括小于 10°的小相角数据,而 10°~20°相角范围的热点效应较弱可忽略^[16].因此只考虑 ω, b, c 三个参数, ω 代表平均单次散射反照率,反映了粒子平均反射强度,首先拟合出最稳定的参数 ω ,结果见图 4.

根据 $i = 30^\circ, e = 0^\circ, g = 30^\circ$ 角度条件下,反射率 r 与 ω 存在经验关系(公式(21))^[32] 计算出橄榄石样品经验 ω 值,与拟合得到的 ω 值基本一致(RMSE = 0.007 1, $R = 0.996$) (如图 4a 所示),说明了结果的准确性,并且 ω 与反射率随波段的变化是一致的,与前人得出的结果相同^[33,34];此外,利用未参与拟合计算的光照观测几何 ($i = 55^\circ, e = 0^\circ, g = 55^\circ$) 条件下实验室测量 RADF 与对应拟合计算的 RADF 进行对比,结果高度一致(如图 4b, RMSE = 0.009 28, $R = 0.996$),综合以上两个结果,说明反演方法和参数结果的准确性.

$$\omega = 1 - \left(\frac{-27.856r + \sqrt{4.029r^2 + 602.932r + 268.696}}{51.71r + 16.392} \right)^2. \quad (21)$$

4.2 有限角度数据的反演结果比较

从橄榄石样品的 11 个方位角观测数据中,挑选了两组数据分别拟合 ω, b, c 参数值.第一组挑选了方位角为 0°、60°、120°和 180°的数据,此时相角范围与原始数据相同为 10°~120°,且相角分布比较规律,仅减少了数据密度;第二组挑选了方位角为 30°、60°、90°和 120°的数据,此时相角覆盖范围 18°~100°,相角覆盖范围发生变化,并且 10°~30°相角分布不规律.

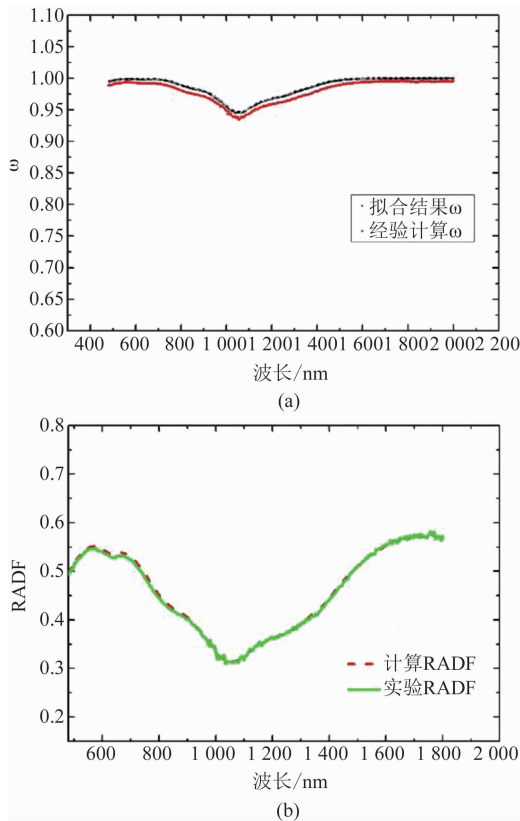


图4 (a) 橄榄石样品经验计算与拟合值曲线图, (b) 橄榄石样品在 $g = 55^\circ$ 时测量与计算反射率曲线图
Fig.4 (a) is curve of the calculated and modeled w of olivine, (b) is the measured and calculated RADF of olivine at $g = 55^\circ$

结果发现第二组数据得到的结果与原始数据 ω 参数相差不大,但是 b 、 c 参数相差较大,不具备可比性. 第一组数据结果与原始数据结果比较接近(如图 5. b 所示). 图 5(a)、(b) 分别为第一组数据和原始所有角度数据反演的 ω 和 b c 散点图, 两组数据结果 ω 非常一致 ($RMSE = 0.00132, R = 0.99$). 两组数据的 b c 散点图有部分差异, 第一组数据结果 b c 散点图离散性较大, 可能是由于数据较少使计算结果产生误差, 但是两组数据反映样品的物理特性是一致的^[17,22,29,30], 都表明样品具有中高强度的内部散射. 综合以上结果表明, 在合适的角度设置下, 有限角度数据也可以获得准确的参数结果.

4.3 参数 b 、 c 结果分析

实验得到了三种样品全波段的 bc 值, 如图 6a 为三种样品的 bc 值散点图, 都落在 HS 曲线附近, 说明二者符合 HS 经验公式^[30]. 首先从图中判断三种样品都具有较强的内部散射^[29]; 样品颗粒的形状也与 bc 有关, 颗粒形状不规则 b 值较小 c 值较大^[29],

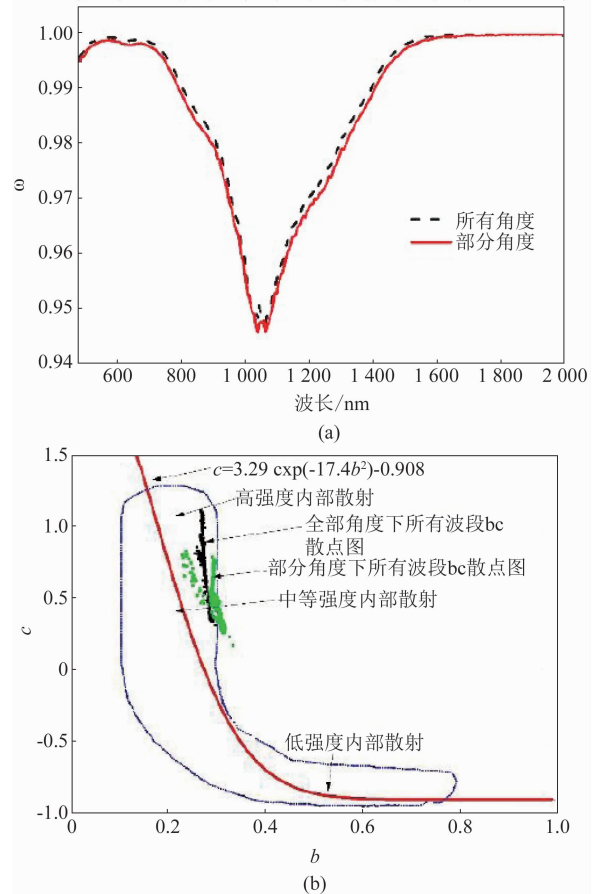


图5 第一组数据和原始数据参数结果图((a) (b) 分别是 ω 和 bc 结果对比)
Fig.5 (a) and (b) show the results of ω b c with limited angles VS all angles data

所以可以判断颗粒形状不规则程度 HHY 样品最大, 橄榄石样品次之, LLB 样品最小; 物质成分不同也会导致参数值变化, 含有透明物质会导致 b 值偏大, c 值偏小^[31], 所以含有 20% 含量的玻璃成分的 LLB 样品 b 值最大, c 值最小.

对于存在内部散射的粒子, ω 和 c 都随着吸收强度的减弱而增大^[29], 橄榄石样品比 HHY 和 LLB 两种样品的吸收峰深度强(如图 6b), 所以橄榄石样品 c 值比 HHY 和 LLB 两种样品变化范围较大, LLB 的 c 值最小.

McGuir 得到了不同强度内部散射的样品的 $I(g)$ 随相角的变化曲线^[29]. 利用 $p(g)$ 求出了三种样品的 $I(g)$ (如图 7 所示), 与不同强度内部散射样品的 $I(g)$ 对比可以说明 LLB 和 HHY 样品具有中等强度内部散射, 橄榄石样品具有高强度内部散射, 并且橄榄石样品的内部散射强度比 McGuir 文章^[29] 中样品内部散射更强. 这是因为研磨会导致橄榄石颗粒出现裂隙, 使其内部散射强度增加. 此结果与上述由

b、c 得到的结果相一致,再次证明了结果的准确性.

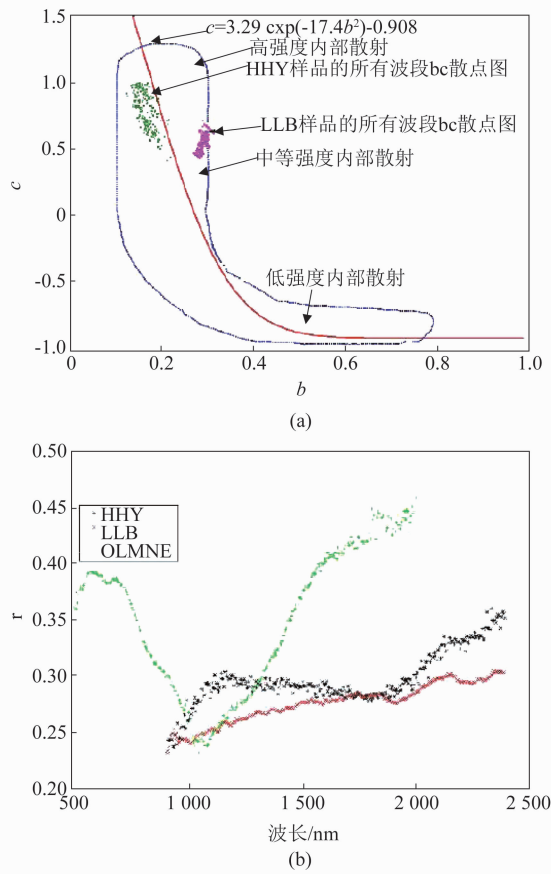


图6 (a)三种样品 b、c 散点图,(b)三种样品在 $g = 110^\circ$ 反射率
Fig.6 (a) Plots of c vs b of three samples, (b) plots the reflectance at $g = 110^\circ$ of the three samples

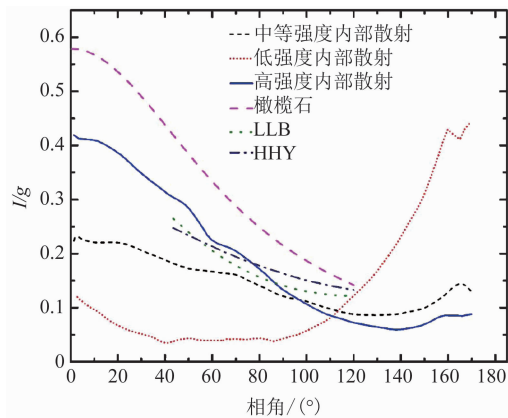


图7 三种样品的 $I(g)$ 随相角变化曲线与不同强度内部散射 $I(g)$ 曲线图
Fig.7 The relative intensity ($I(g)$) of three samples and different internal scattering density particles

4.4 光度校正结果分析

根据 1.3 节光度校正模型,首先利用实验数据拟合 Lommel_Seelinger 经验模型^[25]和 Hapke 模型

参数,得到所有测量角度的模型拟合数据 $r_{\text{模型拟合值}}$ 和标准角的模型拟合数据 $r_{\text{模型拟合标准值}}$,根据式 (16) 计算得到光度校正后数据 $r_{\text{标准}}$. 目前常用的校正标准角是 $i = 30^\circ, e = 0^\circ, g = 30^\circ$,将数据校正到此角度便于与国际上数据进行对比分析,但是考虑到嫦娥三号红外成像光谱仪在月面工作实际情况,探测角度(即光线出射角度 e)固定为 45° ,另外太阳高度角条件被限制在 $15^\circ \sim 33^\circ$ 范围(即光线入射角为 $57^\circ \sim 75^\circ$),且巡视探测器一般采取面向太阳的方式进行工作,所以 VNIS 一般工作在 $43.5^\circ \sim 120^\circ$ 太阳相角范围内. 实际在月面工作时,相角 105° 工作时间最长,因此为了避免数据外推,获取更好的光度校正效果,校正标准角选择 $i = 60^\circ, e = 45^\circ, g = 105^\circ$ (以下简称 CE-3 标准角). 为了更好的分析 Hapke 模型校正效果,分别利用 Hapke 模型和经验模型对数据进行光度校正,选取橄榄石的特征峰 850 nm 、 1050 nm 、 1250 nm 以及非特征峰波段 1500 nm 的校正结果进行分析,用标准差来表征其离散程度,离散程度越小说明光照观测角度对数据影响越小,校正效果越好. 结合图 8 和表 3 的信息表明,经过光度校正可以很好的消除角度对数据的影响,且 Hapke 模型校正结果优于经验模型.

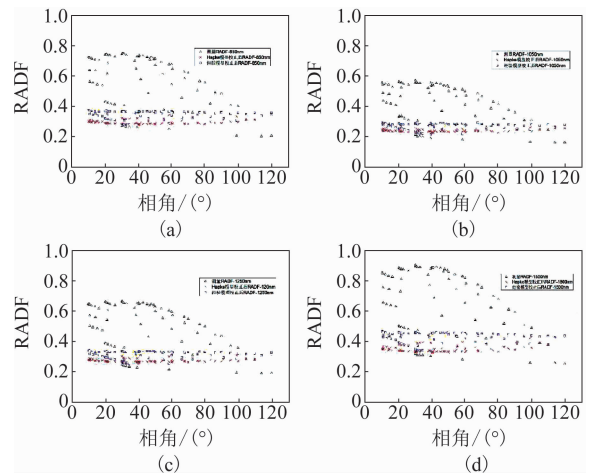


图8 橄榄石样品不同模型光度校正前后数据对比图(a)、(b)、(c)、(d)分别表示 850 nm 、 1050 nm 、 1250 nm 和 1500 nm 波段)
Fig.8 RADF before VS after photometric correction with two photometric model of Olivine ((a)、(b)、(c)、and (d) respectively represent results of $850 \text{ nm}/1050 \text{ nm}/1250 \text{ nm}/1500 \text{ nm}$)

5 实验结论与展望

本文利用实验室获取的橄榄石样品多角度反射率数据研究了Hapke模型参数的反演方法,结果证

表 3 橄榄石样品不同模型光度校正前后标准差
Table 3 The standard deviation of RADF before VS after photometric correction with Hapke and empirical model of Olivine

波段	850 nm	1 050 nm	1 250 nm	1 500 nm
原始数据标准差	0.172	0.127	0.152	0.208
Hapke 模型校正后标准差	0.015	0.008	0.012	0.025
经验模型校正后标准差	0.026	0.019	0.023	0.036

表 4 橄榄石样品 Hapke 模型参数值
Table 4 Parameters of Hapke model of Olivine sample

波段/nm	ω	b	c	RMSE	R
850	0.983	0.241	0.882	0.024	0.995 3
1 050	0.946	0.270	0.270	0.014	0.995
1 250	0.971	0.252	0.599	0.019	0.995 7
1 500	0.996	0.236	0.955	0.035	0.995 4

明在合适的角度设置下,有限的多角度反射率数据也可以获得准确的 Hapke 模型参数结果. 利用 Chang' E-3 红外成像光谱仪鉴定件获取了两种模拟月壤样品的多角度反射率数据,反演得到两种样品的 Hapke 模型参数. 通过分析三种样品的 Hapke 模型参数,发现橄榄石和两种模拟月壤样品都呈现很强的后向散射特性,且都具有较强的内部散射,含有玻璃质成分会使样品的后向散射特性减弱.

Hapke 模型参数中单次散射反照率最稳定,并且是影响矿物样品反射强度最重要的参数;相函数参数 b 、 c 符合 HS 经验公式,且主要由矿物样品颗粒的物理特性和物质组成成分决定.

光度校正可以很好地消除光照观测角度对数据的影响,Hapke 模型光度校正结果要优于经验模型.

本实验的实验结果为利用 Chang' E-1 干涉成像光谱仪、Chang' E-3 红外成像光谱仪及未来的月球光谱探测数据研究月表物理和光度特性提供方法借鉴和理论依据.

References

[1] XU Xue-Sen, LIU JianJun, LIU Bin, *et al.* Progress on research of lunar photometric model [J]. *Remote Sensing Technology and Application* (许学森, 刘建军, 刘斌, 等. 月表光度模型研究进展. *遥感技术与应用*), 2016, **31** (4): 634-644.

[2] Besse S, Sunshine J, Staid M, *et al.* A visible and near-infrared photometric correction for Moon Mineralogy Mapper (M3) [J]. *Icarus*, 2013, **222**(1): 229-242.

[3] Shkuratov Y G, Kaydash V G, Opanasenko N V. Iron and titanium abundance and maturity degree distribution on the lunar nearside [J]. *Icarus*, 1999, **137**(2): 222-234.

[4] McEwen A, Eliason E, Lucey P, *et al.* Summary of radiometric calibration and photometric normalization steps for the Clementine UVVIS images [C]. *Lunar and Planetary*

Science Conference, 1998: 1466.

[5] Sato H, Robinson M S, Hapke B, *et al.* Resolved Hapke parameter maps of the Moon [J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2014, **119**(8): 1775-1805.

[6] Zhang J, Ling Z, Zhang W, *et al.* Photometric modeling of the Moon using Lommel-Seeliger function and Chang' E-1 IIM data [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, **58** (36): 4588-4592.

[7] Buratti B, Hicks M, Nettles J, *et al.* A wavelength-dependent visible and infrared spectrophotometric function for the Moon based on ROLO data [J]. *Journal of Geophysical Research: Planets* (1991~2012), 2011, **116**(E6).

[8] Hillier J K, Buratti B J, Hill K. Multispectral photometry of the Moon and absolute calibration of the Clementine UV/Vis camera [J]. *Icarus*, 1999, **141**(2): 205-225.

[9] Wu Y, Besse S, Li J-Y, *et al.* Photometric correction and in-flight calibration of Chang' E-1 Interference Imaging Spectrometer (IIM) data [J]. *Icarus*, 2013, **222**(1): 283-295.

[10] Wu Y, Xue B, Zhao B, *et al.* Global estimates of lunar iron and titanium contents from the Chang' E-1 IIM data [J]. *Journal of Geophysical Research: Planets* (1991-2012), 2012, **117**(E2).

[11] LING Z C, ZHANG J, LIU J Z, *et al.* Preliminary results of FeO mapping using Imaging Interferometer data from Chang' E-1 [J]. *Chinese Science Bulletin* (凌宗成, 张江, 刘建忠, 等. “嫦娥一号”干涉成像光谱仪数据 FeO 反演初步结果. *科学通报*), 2011, **56**(4-5): 376-379.

[12] LING Z C, ZHANG J, LIU J Z, *et al.* Preliminary results of TiO₂ mapping using imaging interferometer data from Chang' E-1 [J]. *Chinese science bulletin* (凌宗成, 张江, 刘建忠, 等. 嫦娥一号干涉成像光谱仪数据 TiO₂ 反演初步结果 [J]. *科学通报*), 2011, **56**(20): 2082-2087.

[13] WANG Zhen-Chao. Analysis of spectral characteristics of lunar soil and quantitative inversion of mineral information [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing) [王振超. 月壤光谱特性分析与月表矿物信息定量反演]. 北京: 中国地质大学 (北京), 2011.

[14] Shkuratov Y G, Stankevich D G, Kaydash V G, *et al.* Composition of the lunar surface as will be seen from SMART-1: A simulation using Clementine data [J]. *Journal of Geophysical Research: Planets* (1991~2012), 2003, **108**(E4).

[15] Qiao L, Xiao L, Zhao J, *et al.* Geological features and evolution history of Sinus Iridum, the Moon [J]. *Planetary and Space Science*, 2014, **101**: 37-52.

[16] Hapke B. *Theory of reflectance and emittance spectroscopy* [M]. Cambridge university press, 2012.

[17] Souchon A L, Pinet P C, Chevrel S D, *et al.* An experimental study of Hapke's modeling of natural granular surface samples [J]. *Icarus*, 2011, **215**(1): 313-331.

[18] Besse S, Yokota Y, Boardman J, *et al.* One Moon, many measurements 2: Photometric corrections [J]. *Icarus*, 2013, **226**(1): 127-139.

[19] Minnaert M. The reciprocity principle in lunar photometry [J]. *The Astrophysical Journal*, 1941, **93**: 403-410.

[20] Hapke B. Bidirectional reflectance spectroscopy: 1. Theory [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1981, **86**(B4): 3039-3054.