

GU Yaya, YANG Yazhou, LIU Jianzhong, ZHANG Li. Photometric Analysis of Lunar Regolith Based on the Bidirectional Reflectance Data of Apollo Samples (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2025, 45(2): 328–339. CSTR:32142.14.cjss.2024-0153. DOI:10.11728/cjss.2025.02.2024-0153

基于 Apollo 月壤样品二向反射测量数据的光度学分析*

谷亚亚^{1,2,3} 杨亚洲³ 刘建忠^{1,4} 张莉^{1,2}

1(中国科学院地球化学研究所月球与行星科学中心 贵阳 550081)

2(中国科学院大学 北京 100049)

3(中国科学院国家空间科学中心 太阳活动与空间天气学国家重点实验室 北京 100190)

4(中国科学院比较行星学卓越创新中心 合肥 230026)

摘要 了解不同观测角度下的月壤光散射特征, 不仅可以为月表光谱数据的光度校正或解混提供参考依据, 还可以帮助解译月壤物质的化学特性或物理性质. Hapke 模型被广泛地应用于月表光度学分析中, 但不同研究中所选取的模型参数组合不同, 导致得到的月壤光度参数存在差异, 无法进行直接的对比分析. 为了更好地理解月壤光度特性, 基于 6 个不同 Apollo 月壤样品的二向反射测量数据, 选用不同参数组合的 Hapke 模型进行光度学分析, 获取了月海和高地月壤的光度参数. 同时, 对比了二项勒让德形式相函数与 Henyey-Greenstein 相函数, 以及 3 参数与 5 参数 Hapke 模型在月壤光度学分析中的适用性. 分析结果可为月壤光谱数据处理过程中的模型选择与后续解译提供参考.

关键词 月壤光度, 相函数, 光度参数, 观测几何, Hapke 模型

中图分类号 P141.2

Photometric Analysis of Lunar Regolith Based on the Bidirectional Reflectance Data of Apollo Samples

GU Yaya^{1,2,3} YANG Yazhou³ LIU Jianzhong^{1,4} ZHANG Li^{1,2}

1(Center for Lunar and Planetary Science, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081)

2(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

3(State Key Laboratory of Solar Activity and Space Weather, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

4(Center for Excellence in Comparative Planetology, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230026)

* 中国科学院重点部署科研专项 (KGFZD-145-23-15-3), 中国地质调查局地质调查项目 (DD20230007, DD20221645), 黔科合重大专项 (字 [2024]016), 中国科协青年人才托举工程项目 (2021QNR001) 和国家自然科学基金项目 (42441804) 共同资助

2024-11-01 收到原稿, 2024-12-16 收到修定稿

©The Author(s) 2025. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Abstract To provide a parametric basis for photometric correction or spectral unmixing of lunar surface spectral data, as well as to understand the physical properties of the lunar soil, it is essential to comprehensively investigate the light scattering characteristics of lunar soil under various observational angles. The Hapke model is widely used for photometric analysis of the lunar surface. However, the derived photometric parameters of the lunar soil often exhibit discrepancies. These discrepancies arise from the varying combinations of model parameters selected in different studies, which hinders direct comparative analysis. To better understand the photometric properties of the lunar soil, this paper conducted photometric analysis using the Hapke model with various parameter combinations, based on the bidirectional reflectance data from six distinct Apollo lunar soil samples. This approach enabled the acquisition of photometric parameters for both mare and highland lunar soils. Additionally, a comparison was made between the applicability of the two-term Legendre phase function and the Henyey-Greenstein phase function in lunar soil photometric analysis, as well as between the three-parameter and five-parameter Hapke models. The results indicate that the highland lunar soils exhibit more backscattering than the mare lunar soils for both the 5-parameter and 3-parameter Hapke model. The 5-parameter Hapke model outperforms the 3-parameter Hapke model in describing the scattering properties of lunar soil across varying observing angles, particularly for spectral data measured at identical phase angles but different emission angles. The 5-parameter Hapke model includes the additional parameters of porosity factor and photometric roughness, compared to the 3-parameter Hapke model, which incorporates the single-scattering albedo and two phase function parameters. The derived photometric roughness, ranging from 17.4° to 24.6° , may serve as a reference lower limit for photometric analysis of the lunar surface. The analytical results presented in this paper can serve as a reference for model selection and subsequent interpretation in the processing of lunar soil spectral data.

Key words Regolith photometry, Phase function, Photometric parameters, Observing geometry, Hapke model

0 引言

天体表面物质的光谱特征不仅与其矿物类型、化学成分有关,还会受到观测几何角度的影响^[1,2]. 光照射到天体表面后会被散射向整个半球空间,而在不同角度观测到的散射光强度通常存在差异. 二向性反射分布函数 (Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF) 是对某个观测表面不同角度光散射特性的直接表征,可以通过在不同角度下的二向性反射测量来获取^[3]. 光度学研究主要就是分析物质在不同角度下的光散射特性^[3,4]. 使用合适的光度模型对所测的 BRDF 数据进行拟合,就可以得到相应的各种光度参数,从而对观测表面的相关物理特性 (例如颗粒尺寸与分布、孔隙度等) 进行约束^[5-8].

光度学分析对于光谱的准确解译也至关重要. 在实验室中进行反射光谱测量时,通常在某一个标准角度下进行测量 (例如入射角为 30° , 出射角为 0° , 相角为 30°)^[9]. 但对于轨道遥感和就位探测,获取的行星

表面光谱数据因观测时间或观测区域不同,观测几何角度往往存在较大差异. 因此,在对轨道遥感和就位光谱数据进行分析前,一般要将所测数据校正到某一标准角度,该处理过程被称为光度校正^[2,10,11]. 严格的光度校正需要有对同一表面在不同角度下的重复观测数据,同时还需要合适的光度模型.

Hapke 等^[12-18] 基于辐射传输理论,针对由颗粒堆积而成的表面提出了一种近似解析表达式 (Hapke 模型),该模型将由颗粒堆积而成的表面反射率表示为单颗粒单次散射反照率 (SSA)、观测几何角度、单颗粒单次散射相函数、冲效应、孔隙度、多重散射和粗糙度的函数,其被广泛应用于可见-近红外谱段反射光谱的定量反演分析^[19,20]. Hapke 模型中的单颗粒单次散射相函数主要用来表征观测表面各类型颗粒的平均单颗粒角度散射特征^[3],其主要由颗粒固有的光学常数、颗粒尺寸及形态等决定,是光度模型中的关键部分,常被用来对不同观测表面进行光度学分类^[6,20].

为了方便计算,在用 Hapke 模型进行光度分析时,常采用近似的相函数表达式.其中有两种近似表达式最为常用.一种是二项勒让德 (LG) 多项式形式的相函数,另一种是 Henyey-Greenstein (HG) 相函数^[20].在实验室中对不同类型月表矿物、模拟月壤以及真实月壤等样品进行 BRDF 测量,并计算其相函数参数,可以积累有关月表物质光度特性的先验知识. Mustard 与 Pieters^[21]对月表典型硅酸盐矿物(橄榄石、辉石和斜长石)以及磁铁矿进行了详细的光度光谱测量,并计算了这些矿物的 LG 相函数参数值. Lucey^[22]提出将 Mustard 与 Pieters^[21]得到的 4 种矿物(橄榄石、辉石、斜长石和磁铁矿)在不同波段的 LG 相函数参数的平均值作为月表物质的典型相函数参数值,该参数值在后续的月表光谱定量解混分析中得到广泛应用^[19,20]. Yang 等^[20]分析了作为月表主要暗色矿物的钛铁矿^[23]的光度特性,发现月表主要暗色矿物钛铁矿更偏向向散射,并更新了月表典型矿物的相函数参数值. Yang 等^[24]通过对嫦娥四号 (CE-4) 第十月昼获取的就位探测数据进行分析,反演得到了未经扰动月壤的 LG 相函数参数值,并发现与基于实验室测量得到的矿物或模拟月壤样品的相函数参数值存在明显差异.

在进行月表光度参数反演研究时,为了简化模型,通常忽略孔隙度与光度粗糙度 (Hapke 光度模型中用于描述平均坡度的参数,常用来代表观测表面粗糙度) 的影响.例如将孔隙度因子 K 值设置为 1^[5,6,24],而 1 是 K 的有效值域下限,对应的孔隙度为 0^[3].然而,在月表测得的上层 15 cm 厚月壤的平均孔隙度超过 50%^[25],基于遥感观测得到的月表孔隙度超过 70%^[26,27].此外,光度粗糙度会直接影响孔隙度^[27],同时还对反照率以及前后向散射程度都具有影响^[7,28].因此,在基于月表探测数据进行光度分析时,模型参数组合的选取会直接影响最终的解译结果.

使用不同参数组合的 Hapke 模型进行光度对比分析有助于更好地理解月表光度特性.本文基于 Apollo 月壤样品的 BRDF 数据,对不同 Apollo 样品的光度参数进行了计算,重点分析了当采用不同参数组合时, Hapke 模型的表现差异.2024 年 6 月 25 日,嫦娥六号着陆器成功着陆于内蒙古四子王旗,带回世

界首份月球背面样品.本文分析结果可为后续嫦娥六号样品分析,以及其他月表就位或遥感探测数据的光度学研究提供参考.

1 月壤 BRDF 数据与光度模型

1.1 Apollo 月壤 BRDF 数据集

Apollo 任务采样返回的月壤 BRDF 数据获取自美国国家航空航天局 (NASA) 行星数据系统 (PDS) 的地球科学节点*.该数据是由 Michael K. Shepard 利用布卢姆斯堡大学二向性反射测量仪 (Bloomsburg University Goniometer, BUG)^[29] 测量月壤而获取的辐亮度因子 (IoF).本文中使用的 Apollo 月壤样品编号分别是 10084, 12001, 15071, 61141, 68810 和 70181.该数据集为在约半个半球空间测量的月壤 BRDF 数据,分为 450, 550, 750, 950 nm 四个波段.当入射光、反射光和法线位于同一平面时,该平面被称为主平面.从该数据集中筛选了在主平面测得的光谱数据,涵盖了 6 个不同的入射角 i ,分别为 0° , 15° , 30° , 45° , 60° 和 75° ,出射角 e 变化范围为 $-75^\circ \sim 75^\circ$.完整的 Hapke 光度模型包含 9 个参数,有些参数之间存在耦合现象^[6-8],9 个参数中有 4 个参数用于描述冲效应,而冲效应在相角较小时较为显著,例如相角小于 15° 时^[20].冲效应对本文研究的影响不大,所以本文通过剔除相角小于 15° 的数据,来忽略冲效应以实现对模型的简化.最终所采用的 BRDF 数据相角范围为 $15^\circ \sim 155^\circ$,该相角范围足以支持模型相函数参数的计算^[6].

1.2 光度模型

如果只考虑单颗粒相函数 $P(\alpha)$ 和单次散射反照率 (SSA) ϖ_0 , Hapke 光度模型可简化为

$$R(i, e, \alpha) = \frac{\varpi_0}{4} \frac{\mu_0}{\mu_0 + \mu} \left\{ P(\alpha) + H(\mu_0, \varpi_0) H(\mu, \varpi_0) - 1 \right\}. \quad (1)$$

其中, R 为 IoF, $\mu_0 = \cos(i)$, $\mu = \cos(e)$, $H(x, \varpi_0)$ 为 Ambartsumian-Chandrasekhar H 函数. H 函数可近似表达为^[16]

$$H(x, \varpi_0) \approx \left\{ 1 - \varpi_0 x \left[r_0 + \frac{1 - 2r_0 x}{2} \ln \left(\frac{1 + x}{x} \right) \right] \right\}^{-1}. \quad (2)$$

* <https://pds-geosciences.wustl.edu/>

其中, r_0 为漫反射率, 有

$$r_0 = \frac{1 - \sqrt{1 - \varpi_0}}{1 + \sqrt{1 - \varpi_0}}. \quad (3)$$

常见的相函数 $P(\alpha)$ 有两种近似表达式, 第一种是采用 LG 多项式近似表示的相函数^[12], 即

$$P(\alpha) = 1 + b_{LG} \cos(\alpha) + c_{LG} \left[\frac{3}{2} \cos^2(\alpha) - \frac{1}{2} \right]. \quad (4)$$

参数 b_{LG} 描述了单颗粒的前向或后向散射程度, 取值为 $-1 \sim 1$, 为负值时表示前向散射更强, 正值则表示后向散射更强. 参数 c_{LG} 表示侧向散射的程度, 其值可能为 $-1 \sim 2$. 参数 b_{LG} 和 c_{LG} 的取值组合需要满足 $P(\alpha)$ 的值非负^[21].

相函数 $P(\alpha)$ 的第二种近似表达式为 HG 相函数^[30], 即

$$P(\alpha) = \frac{1 + c_{HG}}{2} \frac{1 - b_{HG}^2}{[1 - 2b_{HG} \cos(\alpha) + b_{HG}^2]^{3/2}} + \frac{1 - c_{HG}}{2} \frac{1 - b_{HG}^2}{[1 + 2b_{HG} \cos(\alpha) + b_{HG}^2]^{3/2}}, \quad (5)$$

其中, 参数 b_{HG} 是表示散射瓣形状, 取值为 $0 \sim 1$; 参数 c_{HG} 反映的是后向散射或前向散射瓣的相对强度, 类似于 LG 相函数中的参数 b_{HG} , 取值为 $-1 \sim 2$. 参数 b_{HG} 和 c_{HG} 的取值需要同时满足两个条件, 即 $P(\alpha) \geq 0$ 和

$$|c| \leq \frac{1 + 3b^2}{b(3 + b^2)}. \quad (6)$$

当使用上述 LG 或 HG 相函数时, 加上 SSA, Hapke 模型中共有 3 个未知参数. 如果将孔隙度和粗糙度也纳入模型, 则构成 5 参数 Hapke 光度模型^[3], 即

$$R(i, e, \alpha) = K \frac{\varpi_0}{4} \frac{\mu_{0e}}{\mu_{0e} + \mu_e} [P(\alpha) + H(\mu_{0e}/K, \varpi_0) H(\mu_e/K, \varpi_0) - 1] S(i, e, \bar{\theta}). \quad (7)$$

其中, K 为孔隙度因子, μ_{0e} 和 μ_e 分别为有效入射角 i 和有效出射角 e 的余弦值, $s(i, e, \bar{\theta})$ 为阴影函数, $\bar{\theta}$ 为亚像元光度粗糙度.

对于 3 参数模型, 常采用拟合的方式求解模型参数值. 在进行光度模型拟合时, 模型参数求解易受到初始值的影响^[6,31]. 为防止反演结果为局部最优解, 本文首先在各参数的合理取值范围内, 随机生成了 100 组参数值组合, 拟合得到 100 组最优解, 最后根据最小均方根误差 (RMSE) 值确定最优参数值. 对

于 5 参数模型, 其参数数量较多, 求解器对如 5 参数 Hapke 模型这样的高阶非线性模型进行拟合存在困难, 因此本研究采用网格搜索法来获得参数值. 类似地生成 10 万组初始参数值组合, 并代入模型从而得到 10 万组预测 BRDF 值, 计算其与实测 BRDF 值的 RMSE, 最后根据最小 RMSE 值确定最优参数值.

2 结果

2.1 IoF 曲线

图 1 所示为在 750 nm 波段处, 各 Apollo 月壤样品的 IoF 曲线, 出射角值 e 为正表示反射光与入射光在法线同侧, 为负则为相反侧. 当入射角为 15° , 30° , 45° , 60° 时, 以 $e = i$ 为中心, 左右两侧存在相角相同但出射角不同的测量数据, 可以观察到这些数据点呈现随 e 增大或减小 (相角增大), 反射率都逐渐变小的趋势. 本文将以 $e < i$ 时的 IoF 曲线定义为主 IoF 曲线, 在主 IoF 曲线上, 随着出射角逐渐变小 (即相角逐渐变大), 反射率会先减小再增大. 当入射角为 0° 和 75° 时, 只有主 IoF 曲线的测量数据. 6 个 Apollo 样品在不同入射角的主 IoF 曲线均呈碗形, 但 IoF 随 e 变化的曲线极小值点位置以及整体 IoF 值有明显差异.

2.2 LG-3 参数模型的 IoF 曲线拟合结果

使用基于 LG 相函数的 3 参数 Hapke 光度模型 (LG-3) 对 BRDF 数据进行拟合, 图 2 和图 3 分别给出了典型月海样品 Apollo 10084 和典型高地样品 Apollo 68810 的拟合结果. 结果显示, 所有 Apollo 样品在 4 个波长下的 IoF 曲线拟合效果相似, 整体拟合效果较好. 但对于不同入射角下所测 IoF 曲线的拟合效果存在一定的差异, 入射角为 0° , 15° , 60° 和 75° 时的拟合效果均很好, 而入射角为 30° 和 45° 时, 0° 相角 ($e = i$) 两侧附近的测量数据点的拟合效果都比较差, 尤其是 0° 相角右侧的 IoF 曲线 (红色虚线框中的 IoF 曲线). 可以看到, LG-3 得到的最佳拟合 IoF 曲线均呈简单的碗形, 在观测角 $e = i$ 附近, 模型预测的 IoF 值随出射角的增大呈现单调递增的趋势, 但是实测 IoF 值在 $e = i$ 附近随出射角的增大先递增然后逐渐减小.

这是因为 3 参数 Hapke 模型存在一定的缺陷,

当相角相同时, 相函数 $P(\alpha)$ 的数值是相同的, 而 SSA 是与角度无关的参数, 此时影响 Hapke 模型中 IoF 值的主要因素是描述反射率与入射角、出射角关系的 Lommel-Seeliger 函数^[3]. 当入射角固定时,

Lommel-Seeliger 函数值随出射角的增大呈单调递增趋势, 然而, 实测 IoF 曲线呈现先递增后递减的趋势, 这导致 3 参数 Hapke 模型无法充分描述 IoF 曲线的变化特征.

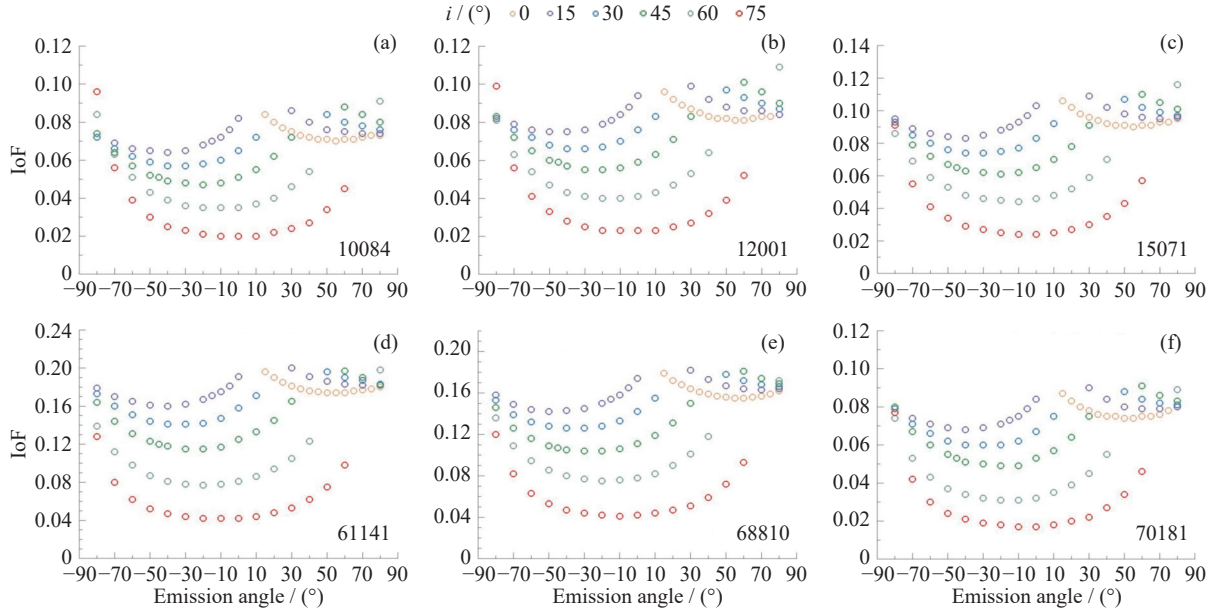


图 1 不同 Apollo 月壤样品在 750 nm 波段处的 IoF 曲线

Fig. 1 IoF curves of different Apollo lunar soil samples measured at the wavelength of 750 nm

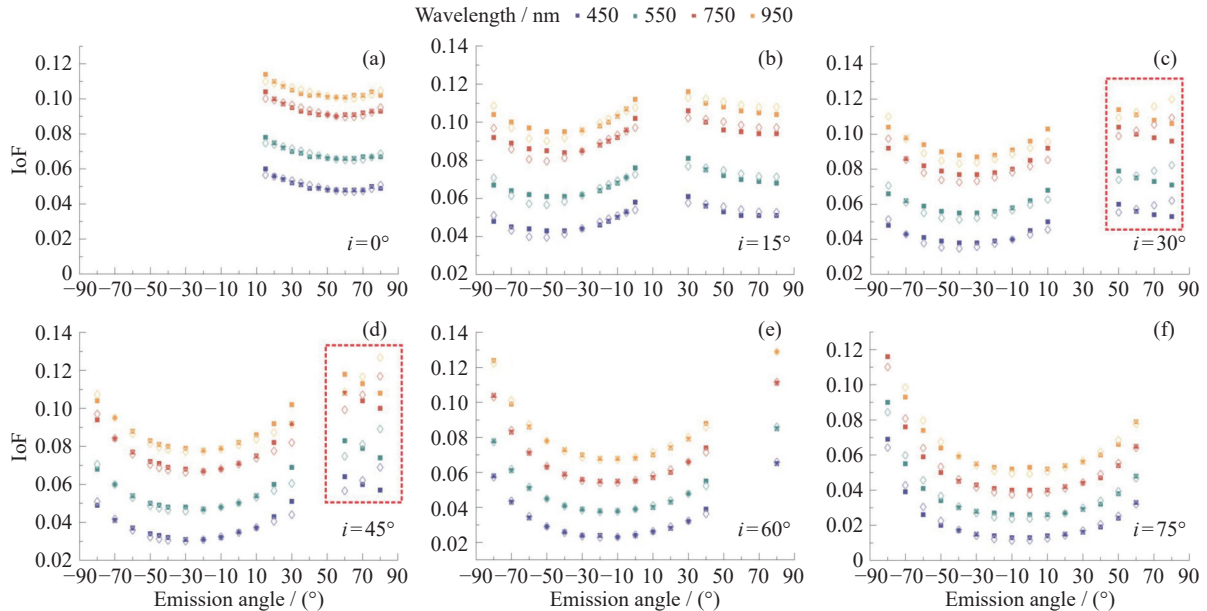


图 2 Apollo 10084 IoF 曲线的 LG-3 拟合结果. 拟合 IoF 曲线用菱形符号表示. 为区分波段 550, 750 和 950 nm 的 IoF 曲线, 分别垂直平移了 0.01, 0.02 和 0.03

Fig. 2 Fitted IoF curves of Apollo 10084 using LG-3. The fitted IoF curves are represented by the diamond symbols. IoF curves are vertically offset for clarity, with 0.01, 0.02, and 0.03 for the wavelength of 550, 750, and 950 nm, respectively

2.3 LG-3 参数模型的主 IoF 曲线拟合结果

从前述结果中可以看到, 在入射角为 30° 和 45° 时, 所测 IoF 曲线中的相角相同但出射角不同的数据点, 其拟合效果都较差, 本文将这部分数据定义为重复相角数据. 因此, 对入射角为 30° 和 45° IoF 曲线中的重复相角数据点进行剔除, 仅对其主 IoF 曲线的数据进行拟合. 如图 4 所示, 以 Apollo 10084 为例, 入射角为 30° 和 45° 的主 IoF 曲线拟合效果均很好, 这与 Apollo 12001, 15071, 61141 和 70181 样品的结

果一致.

2.4 LG-3 参数模型拟合的参数值

图 5 所示为以 Apollo 10084 为例, 使用 LG-3 拟合得到的相函数参数值, 可以看出, 4 个波段的相函数参数值无明显差异. 是否含有重复相角数据, 对基于入射角为 45° 和 60° 的 IoF 曲线拟合得到的光度参数 b_{LG} 和 c_{LG} 值几乎无影响, 但对入射角为 15° 和 30° 的 b_{LG} 和 c_{LG} 值有明显影响, 含有重复相角数据的相函数参数值比不含的更偏向向前向散射 ($b_{LG} < 0$).

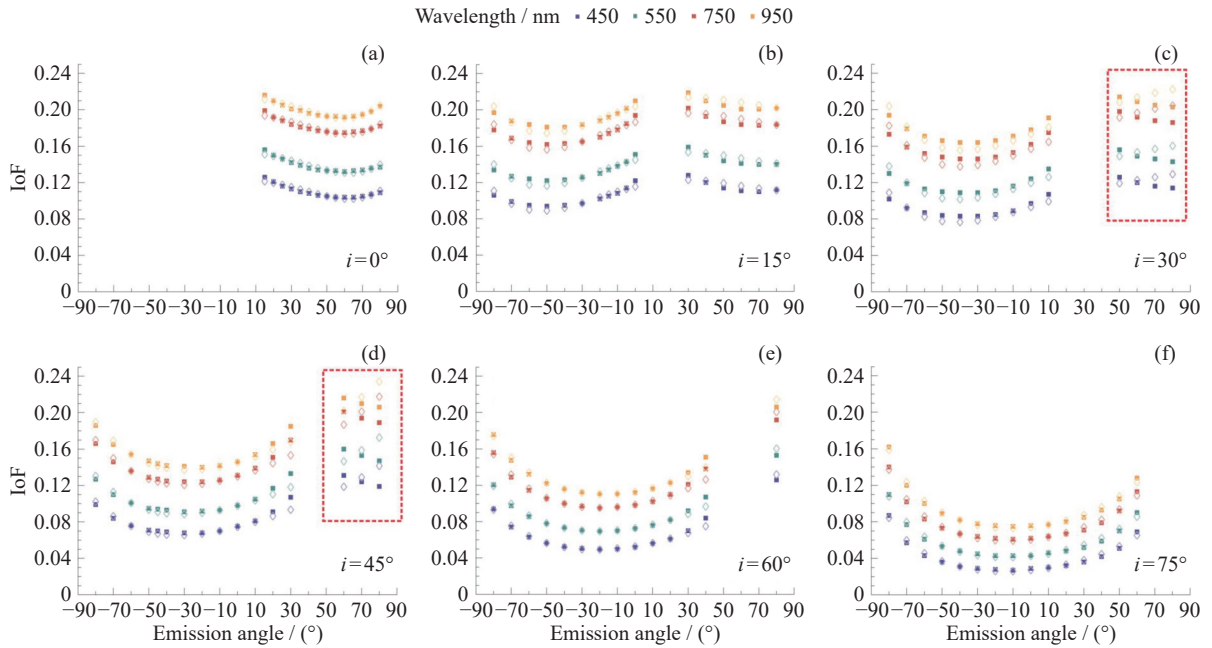


图 3 Apollo 68810 IoF 曲线的 LG-3 拟合结果. 拟合 IoF 曲线用菱形符号表示. 为区分波段 550, 750 和 950 nm 的 IoF 曲线, 分别垂直平移了 0.01, 0.02 和 0.03

Fig. 3 Fitted IoF curves of Apollo 68810 using LG-3. The fitted IoF curves are represented by the diamond symbols. IoF curves are vertically offset for clarity, with 0.01, 0.02, and 0.03 for the wavelength of 550, 750, and 950 nm, respectively

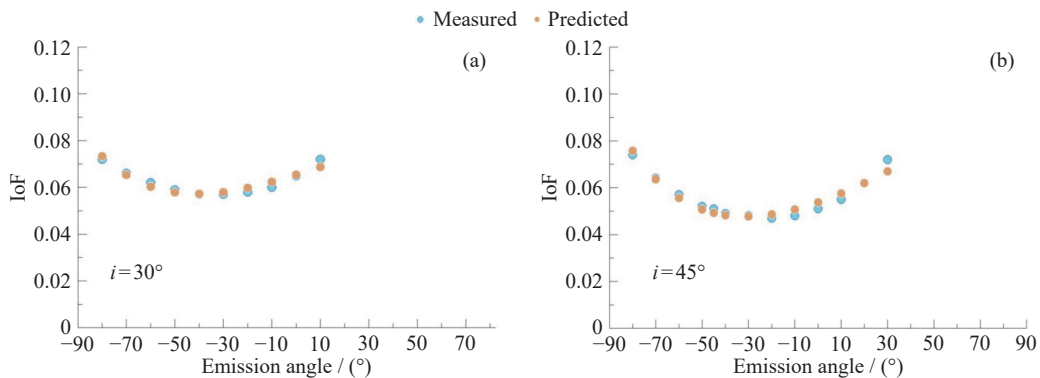


图 4 Apollo 10084 在 750 nm 处的主 IoF 曲线 LG-3 拟合结果

Fig. 4 Fitted main IoF curves of Apollo 10084 using LG-3 at the wavelength of 750 nm

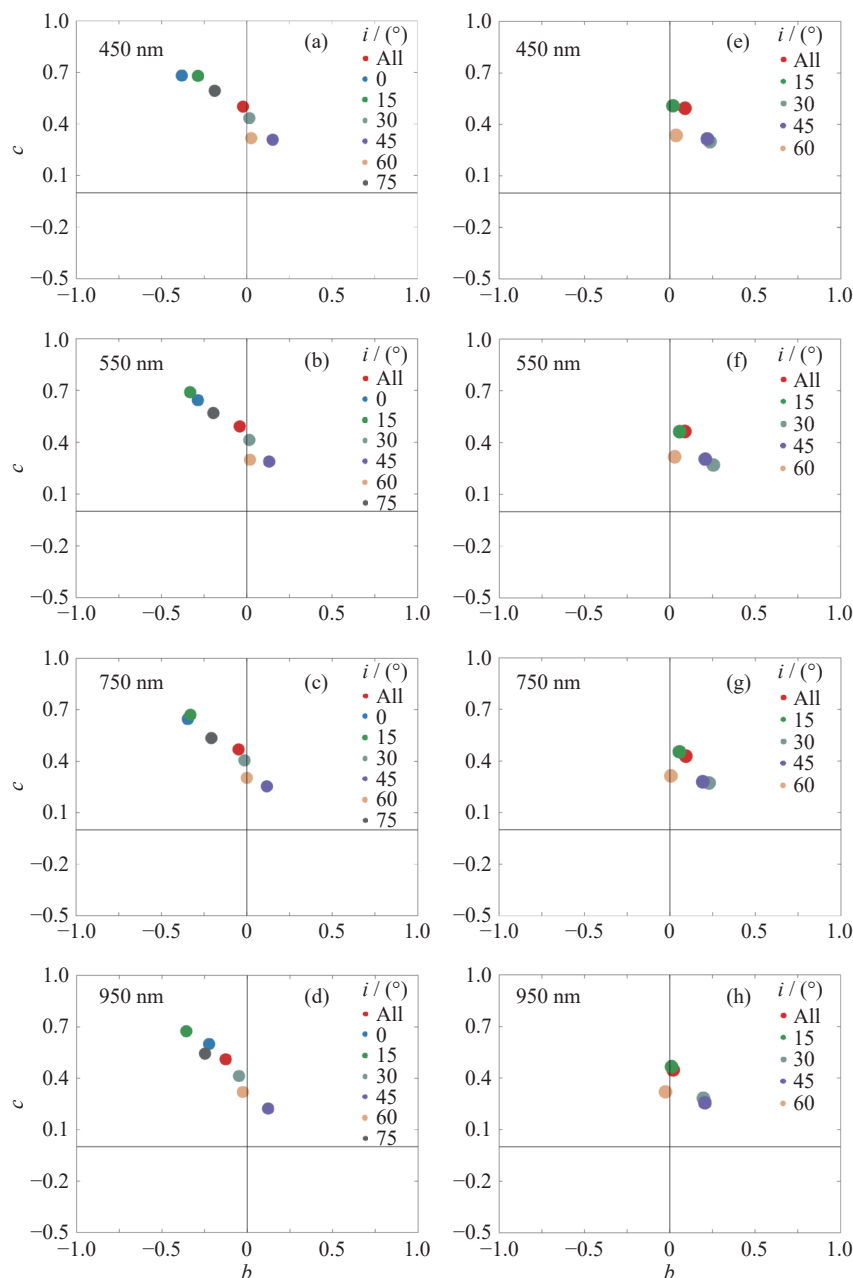


图 5 Apollo 10084 的 LG-3 拟合相函数参数. (a)~(d) 为含重复相角数据的拟合值, 其中 All 是所有入射角度数据的相函数参数值. (e)~(h) 为删除重复相角数据后的相函数参数值, All 为含入射角 0° 和 75° 的所有入射角度数据的相函数参数值

Fig. 5 Phase function parameters fitted by using LG-3 for Apollo 10084. (a)~(d) show the values of phase function parameters before eliminating duplicate phase angle data, where “All” represent the values fitted by using spectral data of all incident angles. (e)~(h) show the values of phase function parameters after elimination, where “All” represent the values fitted by using spectral data of all incident angles data, including 0° and 75°

对于合并所有入射角数据的拟合结果显示, 含重复相角数据的表现出比不含的略偏前向散射.

删除重复相角数据后, 基于不同入射角 IoF 曲线拟合得到的相函数参数均值与合并所有入射角数据

的拟合值相近, 但部分入射角的相函数参数值与合并的差异明显, 例如入射角 0° , 30° , 45° , 75° . 不同入射角的相函数参数值之间存在明显差异, 入射角为 0° 和 75° 时, 呈现明显的前向散射, 入射角为 15° 和

60°时, 拟合结果表现出前向与后向散射近乎相当, 入射角为 30°和 45°时, 呈明显的后向散射.

是否含有重复相角数据, 对入射角为 15°的 SSA 值具有明显影响, 但对入射角为 30°, 45°和 60°的 SSA 值无明显影响. 含重复相角的结果如图 6(a) 所示, 基于入射角为 0°和 15°所测得的 IoF 曲线拟合得到的 SSA 值明显高于其他入射角的拟合结果. 其他入射角 (30°, 45°, 60°和 75°) 的 SSA 拟合值, 除在 950 nm 波长处略分散, 在波长 450, 550 和 750 nm 处都很相近. 删除重复相角数据后, 入射角为 15°的 SSA 拟合值变小且与其他入射角的结果很相近, 如图 6(b) 所示. 另外, 各入射条件下的 SSA 拟合值在 950 nm 的差异也明显减小.

删除重复相角数据并合并所有入射角数据后, 使用 LG-3 拟合得到的模型参数值见表 1. 对于单次散射反照率, 高地样品 Apollo 61141 和 Apollo 68810 (0.52~0.56) 的值明显高于其他 4 个月海样品

(0.31~0.36). 对于相函数参数 b_{LG} , Apollo 61141 和 Apollo 68810 这两个高地样品的值明显高于其他 4 个月海样品, 呈现出更为显著的后向散射 ($b_{LG} > 0$), 其他 4 个样品呈现出无明显前向或后向散射偏向性 (b_{LG} 接近 0). 对于相函数参数 c_{LG} , Apollo 61141 和 Apollo 68810 这两个高地样品的值偏小, 表明其侧向散射占比小于其他 4 个月海样品. 以上结果与基于地球矿物的实验分析结果存在明显差异. Yang 等^[20] 基于实验室所测月表常见硅酸盐矿物 (橄榄石、辉石、斜长石等) 的 BRDF 数据反演得到的相函数参数 b_{LG} 值均小于 0, 表明这些矿物具有明显的前向散射特征. 这意味着, 真实月壤的光度特性可能更为复杂, 不能将基于纯矿物测试数据得到的光度参数^[22] 直接应用到月表光谱的分析中.

2.5 HG-3 参数模型的 IoF 曲线拟合结果

HG 相函数在光度分析中的应用更为广泛^[5-8]. Yang 等^[20] 曾基于月表典型矿物样品的 BRDF 数据,

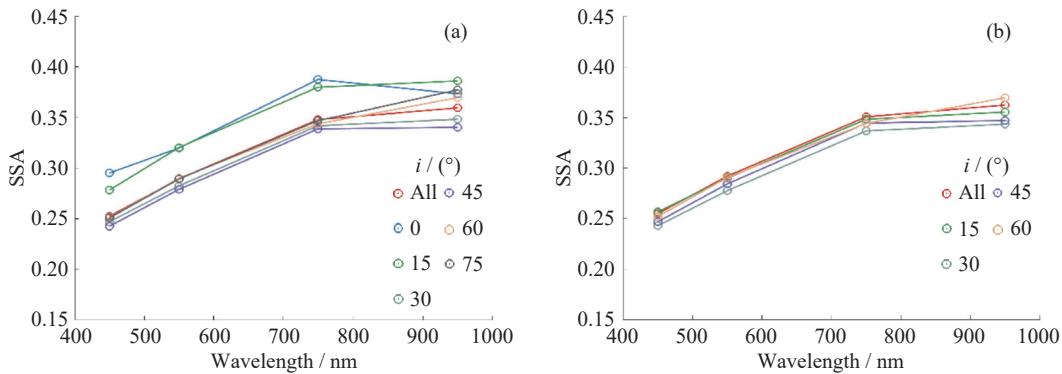


图 6 Apollo 10084 的 LG-3 拟合单次散射反照率. (a) 含重复相角数据的拟合值, 其中 All 为所有入射角度数据的拟合结果. (b) 删除重复相角数据后的, All 为包含入射角 0°和 75°的所有入射角度数据的拟合结果

Fig. 6 Single scattering albedos fitted by using LG-3 for Apollo 10084. (a) Fitted SSA values before eliminating duplicate phase angle data, where “All” represents the values fitted by using spectral data of all incident angles data. (b) SSA values after elimination, where “All” means the values fitted by using spectral data of all incident angles data, including 0° and 75°

表 1 各 Apollo 月壤的 LG-3 拟合相函数参数值和单次散射反照率
Table 1 Values of phase function parameters and single scattering albedo fitted by using LG-3 for different Apollo lunar regolith

Apollo	10084	12001	15071	61141	68810	70181
b_{LG}	-0.02	0.07	0.13	0.26	0.23	0.14
c_{LG}	0.50	0.46	0.39	0.35	0.38	0.37
ϖ_0	0.31	0.34	0.36	0.56	0.52	0.32

注 各参数值为4个波段的平均值.

分别使用 LG 与 HG 相函数进行了光度参数的反演, 未发现两者在拟合表现上有明显的差异, 但其分析的数据仅涉及一个入射角 (45°). 本文也使用 HG 相函数的 3 参数 Hapke 光度模型 (HG-3) 对 Apollo 月壤的 BRDF 数据进行了拟合, 发现不同入射角下所测 IoF 曲线的整体拟合效果都很好 (见图 7), 但入射角为 30° 和 45° 的重复相角部分拟合效果依然较差, 这与 LG-3 的拟合效果一致.

2.6 HG-5 参数模型的 IoF 曲线模拟结果

无论采用 LG 还是 HG 相函数, 在使用 3 参数模型进行拟合时, 对于入射角为 30° 和 45° 的重复相角部分拟合效果都较差. 这更加确定影响 3 参数模型拟合表现的因素不是相函数, 而是 Hapke 光度模型中的 Lommel-Seeliger 函数. 因此, 本文使用包含参数孔隙度因子和光度粗糙度的 5 参数 Hapke 光度模型 (HG-5) 对数据进行模拟. 结果显示, 不同入射角的 IoF 曲线整体模拟效果都很好 (见图 8).

将所有入射角的数据合并后, 使用 HG-5 进行模拟, 得到了各样品的模型参数值 (见表 2). 基于 HG-5 的模拟结果与基于 LG-3 的反演结果基本一致, 相比于月海样品, 两个高地样品 (Apollo 61141 和 Apollo 68810) 呈现出更强的后向散射特征. 6 个样品的孔隙度因子反演结果为 $1.1 \sim 1.5$, 月海样品和高地样品之间没有明显差异. 6 个样品的光度粗糙度也没

有明显差异, 范围为 $17.4^\circ \sim 24.7^\circ$.

本研究与 Johnson 等^[32] 对于典型月海和高地样品的结果对比 (见表 3), 可以看出两者的参数值存在明显差异. 本研究得到的 SSA、 b_{HG} 和 c_{HG} 参数值较小, 但两者得到的月海与高地样品的参数值变化趋势一致.

3 讨论

在使用 Hapke 模型进行月表光度分析时, 以往研究常会对模型进行不同程度的简化^[6-8,33-36], 导致计算的光度参数不能进行直接的对比. 当使用完整的 9 参数 Hapke 模型时, 由于参数之间的耦合, 结果往往存在多解性^[6-8]. 本文基于 Apollo 月壤的 BRDF 数据, 分别使用 3 参数和 5 参数 Hapke 光度模型进行对比分析. 发现使用 LG-3 进行 IoF 曲线数据拟合, 对于入射角为 30° 和 45° 所测得的相角相同但出射角不同的数据点, 拟合效果均都较差. 使用 HG-3 进行 IoF 曲线拟合, 发现也存在类似的情况. 在引入孔隙度因子和光度粗糙度这两个参数后, 即使用 HG-5 进行 IoF 曲线模拟, 发现所有数据的模拟效果都比较好. 这表明, 本文采用的 5 参数模型能够充分表征月壤的光度性质. 同时, 5 参数模型较为简单, 各参数值易于计算.

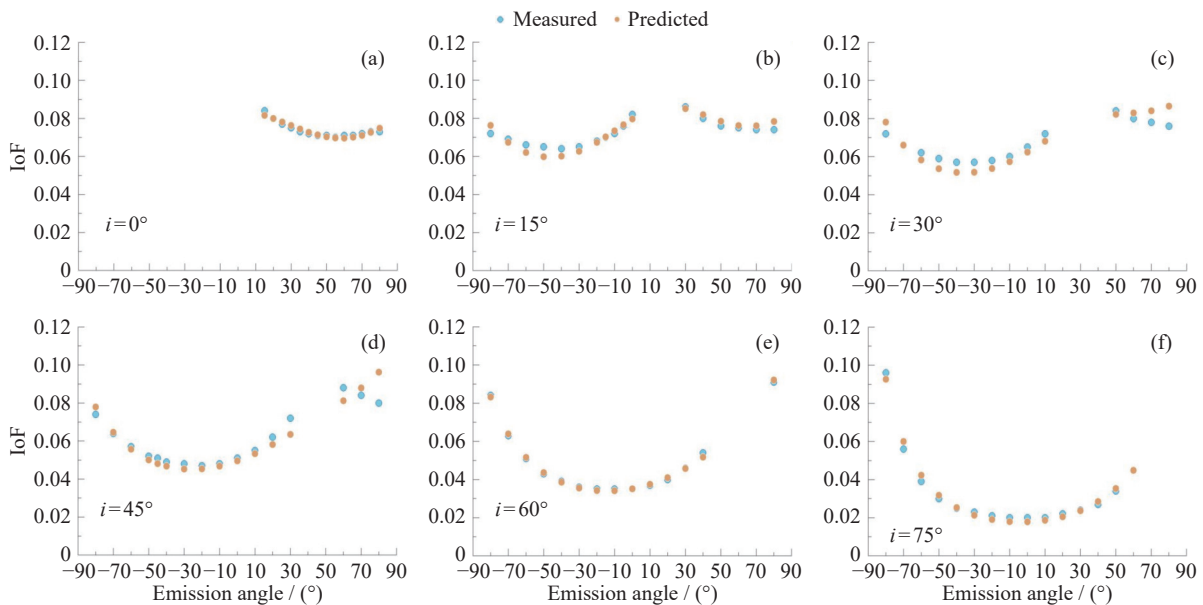


图 7 Apollo 10084 在 750 nm 处的 HG-3 拟合 IoF 曲线

Fig. 7 Fitted IoF curves of Apollo 10084 using HG-3 at the wavelength of 750 nm

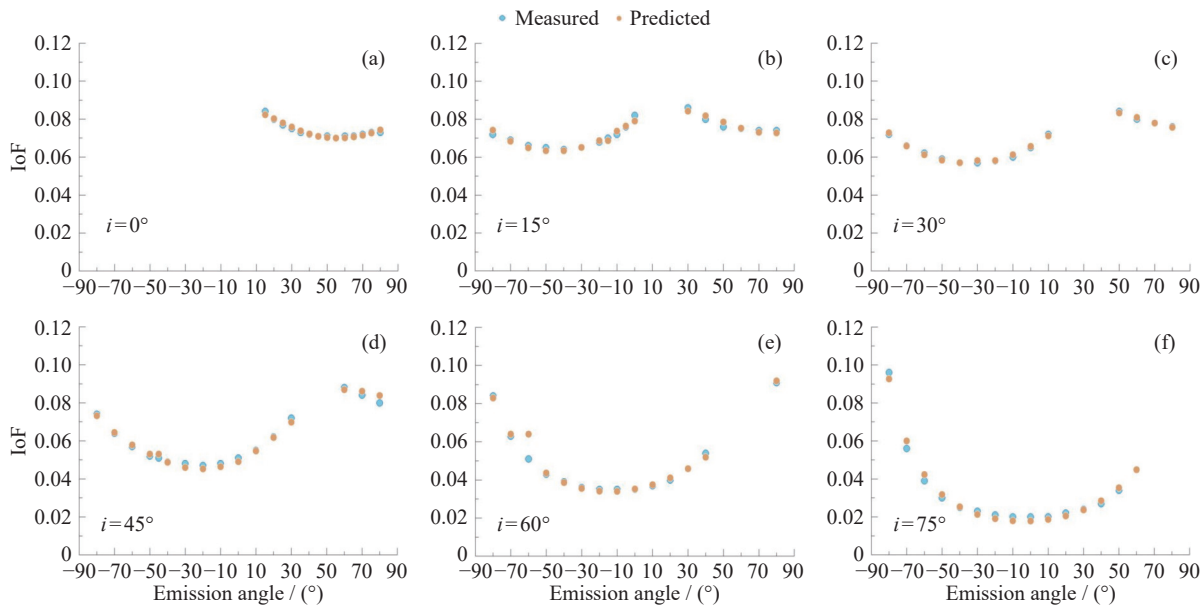


图 8 Apollo 10084 在 750 nm 处的 HG-5 模拟 IoF 曲线

Fig. 8 Modeled IoF curves by using HG-5 for Apollo 10084 at the wavelength of 750 nm

表 2 各 Apollo 月壤的 HG-5 模拟参数值

Table 2 Parameter values modeled by HG-5 for different Apollo lunar soil samples

Apollo	K	b_{HG}	c_{HG}	SSA	$\bar{\theta}/(^{\circ})$
10084	1.52	0.29	-0.08	0.24	18.19
12001	1.31	0.27	0.02	0.30	20.56
15071	1.27	0.23	0.14	0.33	24.60
61141	1.10	0.25	0.24	0.55	17.42
68810	1.49	0.22	0.29	0.44	24.20
70181	1.52	0.23	0.18	0.24	20.84

注 各参数值为4个波段的平均值.

表 3 文献 [32] 中 Apollo 月壤样品的 Hapke 模型参数值

Table 3 Parameter values of Hapke model for Apollo lunar samples in Ref.[32]

Apollo	K	b_{HG}	c_{HG}	SSA	$\bar{\theta}/(^{\circ})$
10084	—	0.34	0.30	0.34	14
68810	—	0.34	0.34	0.56	15

一般越亮的样品越偏向前向散射^[20]. 相比月海样品, 高地样品的斜长石含量更高^[37], 反照率更高, 因此高地样品应该比月海样品具有更强的前向散射特征. 本文基于 3 参数模型和 5 参数模型进行分析, 结果显示, 高地样品的 SSA 值明显高于月海样品, 但是高地

样品的相函数参数值 (b_{LG} 与 c_{HG}) 都显著高于月海样品 (见表 1 和表 2), 呈现出更强的后向散射特征. 该结果与 Sato 等^[6] 基于 Lunar Reconnaissance Orbiter Camera Wide Angle Camera (LROC WAC) 数据得到的结果一致, 均为高地月壤比月海月壤更偏后向散射. 这表明, 月壤的光度特性比一般认为的更为复杂, 高地与月海样品的光度特性差异可能与月表的空间风化作用有关, 在风化过程中产生的纳米相铁颗粒 (npFe^0) 对斜长石光学性质的影响可能远高于其他镁铁质矿物^[38]. 将来可对嫦娥五号和嫦娥六号月壤样品开展类似的光度学对比分析, 以进一步探究空间风化作用对月壤组分光度特性的影响.

已有研究在求解光度参数时, 通常会将光度粗糙

度值固定为 23.4° ^[6,27], 以此来减少模型待求解参数的数量. 这可能会影响光度参数值的求解准确性, 因为光度粗糙度不仅会影响 SSA 值的计算结果, 其本身也具有很重要的科学意义. 本文基于 6 个 Apollo 月壤样品反演的光度粗糙度为 $17.4^{\circ} \sim 24.6^{\circ}$, 略高于 Johnson 等^[32] 的反演结果 ($14^{\circ} \sim 15^{\circ}$), 这可能是因为本文只分析了这组数据集中在主平面测得的数据. 通常在实验室进行测量时, 样品表面会被处理得比较平整, 因此本文反演的光度粗糙度或可以作为月表光度分析时的参考下限. 另外, 需要注意的是, 颗粒尺寸也会对月壤的光度特性产生影响, 细粒月壤样品可能会具有更小的光度粗糙度. 针对嫦娥六号样品的初期分析结果显示, 嫦娥六号月壤样品要比以往返回的 Apollo 月壤样品更细^[39], 后续对嫦娥六号月壤样品的研究将进一步加深对月壤光度特性的理解.

4 结论

基于 6 个 Apollo 月壤样品的 BRDF 光谱数据, 采用 Hapke 光度模型开展了光度特性研究. 分别使用 3 参数和 5 参数 Hapke 光度模型进行分析, 结果显示 5 参数模型的模拟结果更好, 后续光度分析可优先考虑 5 参数光度模型. 3 参数模型和 5 参数模型的结果均表明, 高地样品比月海样品表现出更明显的后向散射特征, 计算的光度粗糙度为 $17.4^{\circ} \sim 24.6^{\circ}$, 或可以作为月表光度分析时的参考下限. 有待对嫦娥五号和嫦娥六号月壤样品开展系列光度学研究以进一步拓展对月壤光度特性的理解.

致谢 论文材料整理得到了中国科学院地球化学研究所月球与行星研究中心张珂博士的帮助.

参考文献

- [1] SHKURATOV Y, KAYDASH V, KOROKHIN V, *et al.* Optical measurements of the moon as a tool to study its surface[J]. *Planetary and Space Science*, 2011, **59**(13): 1326-1371
- [2] SANCHEZ J A, REDDY V, NATHUES A, *et al.* Phase reddening on near-Earth asteroids: implications for mineralogical analysis, space weathering and taxonomic classification[J]. *Icarus*, 2012, **220**(1): 36-50
- [3] HAPKE B. Theory of Reflectance and Emittance Spectroscopy[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2012
- [4] SHEPARD M K. Introduction to Planetary Photometry [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2017
- [5] HAPKE B, DENEVI B, SATO H, *et al.* The wavelength dependence of the lunar phase curve as seen by the Lunar Reconnaissance Orbiter wide-angle camera[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2012, **117**(E12): E00H15
- [6] 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
- [7] JIN W D, ZHANG H, YUAN Y, *et al.* In situ optical measurements of Chang'E-3 landing site in Mare Imbrium: 2. Photometric properties of the regolith[J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, **42**(20): 8312-8319
- [8] JIANG T, HU X Y, ZHANG H, *et al.* In situ lunar phase curves measured by Chang'E-4 in the Von Karman Crater, South Pole-Aitken basin[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2021, **646**: A2
- [9] LI S, MILLIKEN R E. Estimating the modal mineralogy of eucrite and diogenite meteorites using visible-near infrared reflectance spectroscopy[J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2015, **50**(11): 1821-1850
- [10] YOKOTA Y, MATSUNAGA T, OHTAKE M, *et al.* Lunar photometric properties at wavelengths $0.5\text{--}1.6\text{ }\mu\text{m}$ acquired by SELENE Spectral Profiler and their dependency on local albedo and latitudinal zones[J]. *Icarus*, 2011, **215**(2): 639-660
- [11] WU Y Z, 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
- [12] HAPKE B. Bidirectional reflectance spectroscopy: 1. theory[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1981, **86**(B4): 3039-3054
- [13] HAPKE B, WELLS E. Bidirectional reflectance spectroscopy: 2. experiments and observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1981, **86**(B4): 3055-3060
- [14] HAPKE B. Bidirectional reflectance spectroscopy: 3. correction for macroscopic roughness[J]. *Icarus*, 1984, **59**(1): 41-59
- [15] HAPKE B. Bidirectional reflectance spectroscopy: 4. the extinction coefficient and the opposition effect[J]. *Icarus*, 1986, **67**(2): 264-280
- [16] HAPKE B. Bidirectional reflectance spectroscopy: 5. the coherent backscatter opposition effect and anisotropic scattering[J]. *Icarus*, 2002, **157**(2): 523-534
- [17] HAPKE B. Bidirectional reflectance spectroscopy: 6. effects of porosity[J]. *Icarus*, 2008, **195**(2): 918-926
- [18] HAPKE B. Bidirectional reflectance spectroscopy 7: the single particle phase function hockey stick relation[J]. *Icarus*, 2012, **221**(2): 1079-1083
- [19] LI S, LI L. Radiative transfer modeling for quantifying lunar surface minerals, particle size, and submicroscopic metallic Fe[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, **116**(E9): E9001

- [20] YANG Y Z, LI S, MILLIKEN R E, *et al.* Phase functions of typical lunar surface minerals derived for the Hapke model and implications for visible to near-infrared spectral unmixing[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2019, **124**(1): 31-60
- [21] MUSTARD J F, PIETERS C M. Photometric phase functions of common geologic minerals and applications to quantitative analysis of mineral mixture reflectance spectra[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1989, **94**(B10): 13619-13634
- [22] LUCEY P G. Model near-infrared optical constants of olivine and pyroxene as a function of iron content[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 1998, **103**(E1): 1703-1713
- [23] OUYANG Ziyuan. Introduction to Lunar Science[M]. Beijing: China Aerospace Press, 2005 (欧阳自远. 月球科学概论 [M]. 北京: 中国宇航出版社, 2005)
- [24] YANG Yazhou, LIN Honglei, LIU Yang, *et al.* The effects of viewing geometry on the spectral analysis of lunar regolith as inferred by *in situ* spectrophotometric measurements of Chang'E-4[J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, **47**(8): e2020GL087080
- [25] SLYUTA E N. Physical and mechanical properties of the lunar soil (a review)[J]. *Solar System Research*, 2014, **48**(5): 330-353
- [26] OHTAKE M, MATSUNAGA T, YOKOTA Y, *et al.* Deriving the absolute reflectance of lunar surface using SELENE (Kaguya) multiband imager data[J]. *Space Science Reviews*, 2010, **154**(1/2/3/4): 57-77
- [27] HAPKE B, SATO H. The porosity of the upper lunar regolith[J]. *Icarus*, 2016, **273**: 75-83
- [28] SHEPARD M K, HELFENSTEIN P. A test of the Hapke photometric model[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2007, **112**(E3): E03001
- [29] SHEPARD M K. The bloomsburg University Goniometer (B. U. G.) Laboratory: an Integrated Laboratory for Measuring Bidirectional Reflectance Functions[C]//Lunar and Planetary Science XXXII. Houston: LPI, 2001: abstract 1015
- [30] MCGUIRE A F, HAPKE B W. An experimental study of light scattering by large, irregular particles[J]. *Icarus*, 1995, **113**(1): 134-155
- [31] GUO L, REN X, LIU D W, *et al.* Chang'E-5 In Situ spectra reveal photometric properties of the lunar surface[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2024, **129**(2): e2023JE007847
- [32] JOHNSON J R, SHEPARD M K, GRUNDY W M, *et al.* Spectrogoniometry and modeling of Martian and Lunar analog samples and Apollo soils[J]. *Icarus*, 2013, **223**(1): 383-406
- [33] JIANG T, ZHANG H, YANG Y Z, *et al.* Bi-directional reflectance and polarization measurements of pulse-laser irradiated airless body analog materials[J]. *Icarus*, 2019, **331**: 127-147
- [34] LIN H L, YANG Y Z, LIN Y T, *et al.* Photometric properties of lunar regolith revealed by the Yutu-2 rover[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2020, **638**: A35
- [35] XU J F, WANG M Z, LIN H L, *et al.* In-Situ photometric properties of lunar regolith revealed by lunar mineralogical spectrometer on board Chang'E-5 Lander[J]. *Geophysical Research Letters*, 2022, **49**(4): e2021GL096876
- [36] CHANG R, LIN H L, YANG W, *et al.* Comparison of laboratory and in situ reflectance spectra of Chang'e-5 lunar soil[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2023, **674**: A68
- [37] The Lunar and Planetary Institute. Lunar samples [EB/OL]. (2009-08-01)[2024-10-29]. <https://www.lpi.usra.edu/lunar/samples>
- [38] PIETERS C M, NOBLE S K. Space weathering on airless bodies[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2016, **121**(10): 1865-1884
- [39] LI C L, HU H, YANG M F, *et al.* Nature of the lunar far-side samples returned by the Chang'E-6 mission[J]. *National Science Reviews*, 2024, **11**(11): nwae328

作者简介



谷亚亚 女, 1992 年 2 月出生于四川阆中市, 现为中国科学院地球化学研究所月球与行星科学研究中心博士研究生, 主要研究方向为行星光谱学。

E-mail: guyaya20@mails.ucas.ac.cn



刘建忠 (通信作者) 男, 1968 年 10 月出生于内蒙古四子王旗, 现为中国科学院地球化学研究所月球与行星科学研究中心研究员, 博士生导师, 主要研究方向为月球与行星地质等。

E-mail: liujianzhong@mail.gyig.ac.cn