

月表橄榄石含量分布制图

陈圣波¹ 王景然² 郭鹏举¹ 崔腾飞¹ 连懿¹ 杨倩¹

(¹ 吉林大学地球探测科学与技术学院, 吉林 长春 130026
² 中国船舶重工集团公司第七一五研究所, 浙江 杭州 311400)

摘要 全月表橄榄石作为月球形成演化的指示矿物,其含量分布是月球探测研究的热点。月球卫星多光谱或高光谱数据,为利用反射光谱反演全月表橄榄石含量提供了可能。利用 51 组由月壤特征协会(LSCC)得出的月壤反射波谱及相应的实验室实测橄榄石含量,建立了 4 个反射波谱与橄榄石含量回归模型,其余 6 组 LSCC 数据作为模型验证数据。在分别解算不同模型系数的基础上,结合 LSCC 验证数据,比较评价不同模型标准偏差和相关系数,以及橄榄石含量分布散点图,优选出利用光谱反射率数据反演月表橄榄石含量的模型。从而利用 Clementine 卫星 UV/VIS/NIR 5 个波段的反射光谱数据反演了全月表橄榄石含量分布,通过与 Apollo 登月采样点实际测量橄榄石含量进行比较,验证了其结果可靠性。

关键词 遥感;月表橄榄石;回归模型;月壤综合特性光谱;Clementine 卫星

中图分类号 TP722.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0228001

Olivine Abundance Distribution Mapping on the Lunar Surface

Chen Shengbo¹ Wang Jingran² Guo Pengju¹ Cui Tengfei¹ Lian Yi¹ Yang Qian¹

(¹ College of Geoporation Science and Technology, Jilin University, Changchun, Jilin 130026, China
² 715th Research Institute of China Shipbuilding Industry Corporation, Hangzhou, Zhejiang 311400, China)

Abstract The olivine on the lunar surface is a diagnostic product of the moon's formation and geologic evolution. Its abundance distribution is a hot spot in lunar exploration. It is possible to inverse the global lunar olivine abundance using the obtained reflected spectra. In this paper, 51 groups spectral data of lunar soils produced by the lunar soil characterization consortium (LSCC) and its corresponding olivine abundance are used to establish four regression models. The remaining 6 groups data are used to validate the models. Based on the calculation of coefficients, combined with validating LSCC data, the standard deviation, correlation coefficient and scatter plots of different models are compared, and the best optimized formulation statistically with the relationship between spectrum and olivine abundance is chosen. By using the Clementine UV/VIS/NIR data and the model, the global lunar olivine abundances are inversed and mapped. By comparing with the measured olivine abundance of the Apollo sampled soils, it is proved that the result is reliable.

Key words remote sensing; olivine on lunar surface; regression model; lunar soil charaterization consortium spectrum; Clementine satellite

OCIS codes 100.2960; 100.3190; 280.4788; 300.6170

1 引 言

月球矿物成分研究是月球探测的主要任务与目标,其中橄榄石是月表四种主要矿物之一^[1]。橄榄石分布及其含量信息是认识月球深部物质成分、以及研究月球形成演化的重要依据。

20 世纪 90 年代开始的第二次探月热潮中,各国相继发射了搭载了高分辨率的多光谱和高光谱探测器的探测卫星,使月球矿物分布制图成为可能。

我国于 2007 年发射了嫦娥一号卫星,搭载了干涉高光谱成像仪(IIM),波段范围是 0.48~0.96 μm ,共 32 个波段。2010 年发射的嫦娥二号卫星没有搭载多光谱或高光谱探测器。目前,尽管通过日本 Spectral Profiler (SP) 和印度 Moon Mineralogy Mapper (M3) 高光谱数据都能根据高光谱特征成功识别出月球表面橄榄石,但是还没有发布经过光度校正的全球覆盖数据产品^[2-3]。美国 Clementine

收稿日期: 2013-09-05; 收到修改稿日期: 2013-09-29

基金项目: 国家自然科学基金(41372337,40971187)

作者简介: 陈圣波(1967—),男,博士,教授,主要从事空间遥感理论与方法方面的研究。E-mail: chensb@jlu.edu.cn

卫星多光谱数据是目前唯一用于反演全月球矿物分布的多光谱数据^[4-5]。Lawrence 等^[5-6]利用 Clementine UV/VIS 数据的 4 个波段,通过 Hapke 辐射传输方程^[7],反演了月表包括橄榄石在内的 4 种矿物的含量分布。Li 等^[8]综合多端元混合光谱分解和辐射传输模型的多次迭代,计算了包括橄榄石在内的 13 种端元的含量分布。但是,这些方法涉及到颗粒物的辐射传输模拟,适用于成熟度大于 0.3 的月壤,不具有普适性。Pieters 等^[4,9]基于月壤特征协会(LSCC)光谱数据,通过主成分分析方法研究月壤光谱与其元素成分、矿物含量的相关关系,认为利用光谱数据反演含铁辉石的精度较高,而反演钛铁矿的精度最低,并且通过 LSCC 和 Clementine 多光谱数据的回归分析,建立了反演月表辉石含量的光谱模型,实现了全月球辉石含量分布制图,被认为是精度比较高的月表辉石含量分布图。

综合上述数据特点和各种矿物反演方法,可见 Clementine 数据覆盖区域最全,回归方法也没有应用条件的限制。因此,本文以全月表橄榄石矿物分布为例,利用 Clementine 所有 5 个通道的多光谱数据,通过与 LSCC 数据的回归分析,在比较评价 4 种不同模型的基础上,实现全月表橄榄石含量反演和分布制图。

表 1 LSCC 部分月壤波谱及相应的橄榄石含量数据

Table 1 Part of spectral and olivine abundance data for lunar soils from LSCC

Sample number	Grainsize / μm	$R_{415}/\%$	$R_{753}/\%$	$R_{899}/\%$	$R_{952}/\%$	$R_{1000}/\%$	Olivine abundance /%
12030	<10	13.53	20.85	21.69	21.82	22.66	2.5
	10~20	9.91	15.44	13.51	13	13.64	3.7
	20~45	9.89	14.76	12.15	11.57	11.98	4.3
14141	<10	21.82	32.99	33.57	33.73	34.89	1.5
	10~20	17.02	25.92	23.93	23.85	25.59	1.6
	20~45	13.7	20.15	15.98	15.65	17.26	4
61221	<10	31.71	42.38	43.48	43.81	44.51	0.9
	10~20	29.76	38.95	38.44	38.6	39.39	2
	20~45	24.55	31.77	28.46	28.14	28.96	3.9

3 反演模型

3.1 反演模型

为充分利用 Clementine 卫星多光谱数据,结合橄榄石矿物的光谱特征,分别组合 5 个不同波长下的反射率,与不同样品对应橄榄石含量进行逐步回归分析,建立四个回归方程,即

$$\log P = a_1 \cdot R_{753} + a_2 \cdot R_{952} + a_3 \cdot R_{1000} + a_4, (1)$$

$$\log P = a_1 \cdot R_{415} + a_2 \cdot R_{753} + a_3 \cdot R_{899} + a_4 \cdot R_{1000} + a_5, (2)$$

2 Clementine 与 LSCC 数据

Clementine 是美国 NASA 和战略防御倡议组织于 1994 年 1 月 25 日联合发射的探月卫星,其上搭载紫外/可见光相机,可获得中心波长分别为 415、753、899、952、1000 nm,相应带宽分别为 40、10、30、30、30 nm 共 5 个通道的数据,空间分辨率为 100 m。Clementine 获取的光谱数据,主要是用于月表矿物研究。

LSCC 实验测量了 Apollo 计划 6 次登月时采集带回样品的反射光谱^[10]。采样点包括成熟度较低的月海月壤(Apollo 11、12、15、17 月海采样)及成熟度较高的月陆月壤(Apollo 14、16 月陆高地采样),具有一定的代表性。月壤的光学特性与其粒径相关,LSCC 测量了 4 种不同粒径样品的反射光谱:小于 10 μm ,10~20 μm ,20~45 μm 及块状。样品共计 57 组,随机选择其中 51 组进行回归分析建模,另外 6 组作为验证组。表 1 是其中部分的 Apollo 12、14 和 16 登月点样品光谱及其橄榄石含量,其中 R_λ 表示波长 λ (单位: nm)下的反射率,样品编号前 1 位或 2 位分别代表不同期次的 Apollo 计划。

$$\log P = a_1 \cdot R_{415} + a_2 \cdot R_{753} + a_3 \cdot R_{899} + a_4 \cdot R_{952} + a_5 \cdot R_{1000} + a_6, (3)$$

$$\log P = a_1 \cdot A_R + a_2 \cdot C_{BR} + a_3 \cdot C_{IR1} + a_4 \cdot C_{IR2} + a_5 \cdot C_{IR3} + a_6 \cdot D + a_7, (4)$$

式中 a_1, \dots, a_7 是回归系数; P 是橄榄石含量; $A_R = R_{753}$; $C_{BR} = R_{415}/R_{753}$; $C_{IR1} = R_{899}/R_{753}$; $C_{IR2} = R_{952}/R_{753}$; $C_{IR3} = R_{1000}/R_{753}$; $D = R_{753} \cdot R_{1000}/R_{899}^2$ 。

(1)~(3)式是线性回归方程,(4)式则为非线性回归方程,其中 C 项都依据比值法来构建的,分母均为 753 nm 时的反射率,而 D 表达式则是依据导

数法来构建的,分母为 899 nm 反射率的平方。利用 51 组 LSCC 数据,通过最小二乘方法,保证均方根误差最小,求解方程系数如表 2 所示。

表 2 最小二乘法解算方程系数

Table 2 Calculated models coefficients based on least squares method

	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7
Equation(1)	0.0868	0.0877	-0.1788	0.5600	—	—	—
Equation(2)	0.1301	-0.0573	-0.1433	0.0926	0.6903	—	—
Equation(3)	0.1400	-0.1243	0.1627	-0.3801	0.2250	0.6696	—
Equation(4)	-0.0199	3.0785	5.8570	-7.3167	3.2065	1.2471	-4.3965

3.2 模型比较评价

3.2.1 模型比较评价原则

综合验证组数据、相关系数、标准差以及散点图,来优选模型。原则如下:

1) 综合 6 组 LSCC 验证数据,分别针对 4 个模型进行橄榄石计算值与测量值偏差比例计算。首选橄榄石含量偏差小的模型。

2) 相关系数大于 0.5,认为模型是稳定的;标准差越小,说明离散程度越小。首选相关系数大、标准差小的模型。

3) 当模型的相关系数和标准差相近时,选择线性模型,不选非线性模型。

4) 当模型的相关系数和标准差相近,同时都为线性模型时,选择散点图中整体离散程度和夹角都较小的模型,排除个别点离散程度很大的模型。离散程度和夹角,二者中有一个相近时,判断另一个即可。

3.2.2 验证组数据验证

利用另外 6 组 LSCC 验证数据,根据表 2 中的系数分别计算(1)~(4)式得到橄榄石含量,然后与 LSCC 数据中实际测量的含量比较,得到不同组样品中橄榄石含量偏差。图 1 为 6 组样品利用 4 个模型的方程分别计算得到的橄榄石含量偏差,不同颜色代表不同模型。其中最大偏差小于 20%,样品 15041、14163、61141 计算的橄榄石含量偏差小于 8%。

3.2.3 相关系数和标准差

利用参与模型解算的 51 组 LSCC 数据,通过 4 个模型分别计算其橄榄石含量,并与每组样品中橄榄石实际含量比较,计算其相关系数和标准差如表 3 所示。由于样本数据个数大于模型未知系数,相关系数是线性组合系数数量的函数,反映了模型的可靠性;而标准差则体现了计算值偏离测量值的离散程度。由表 3 可见,模型 2 的标准差最小,模型 3 的相关系数最大,它们都是线性模型,但都没有兼顾

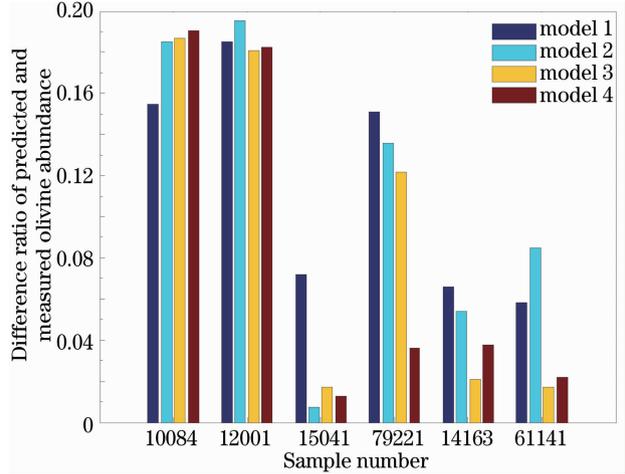


图 1 橄榄石计算值与测量值偏差比例

Fig. 1 Difference ratio of predicted and measured olivine abundance

相关系数最大标准差最小的条件,因此需要在模型 2 和模型 3 中进行优选。

表 3 模型定量分析评价表

Table 3 Quantitative analysis evaluation for models

	Correlation coefficient	Standard deviation
model 1	0.6799	0.9717
model 2	0.7548	0.8558
model 3	0.7614	0.8774
model 4	0.7566	0.8849

3.2.4 月海与月陆橄榄石含量散点图

图 2(a)~(d)分别为 4 种模型计算的橄榄石含量测量值与计算值的散点图,横轴为测量值,纵轴为计算值。图 2 中,×、◇分别代表月海月壤与月陆月壤的橄榄石含量散点,直线则代表拟合直线。

理论上,拟合直线与直线 $y=x$ (图中黑色虚线)的夹角越小,说明模型计算值与测量值整体上越接近,模型越精确。从图 2 中看出,图 2(a)~(c)夹角很接近,但图 2(d)的夹角是最小的,这可能是因为模型 1、2、3 都为光谱反射率与橄榄石含量对数的线性回归,而模型 4 则为非线性。图 2(a)中各点整体上

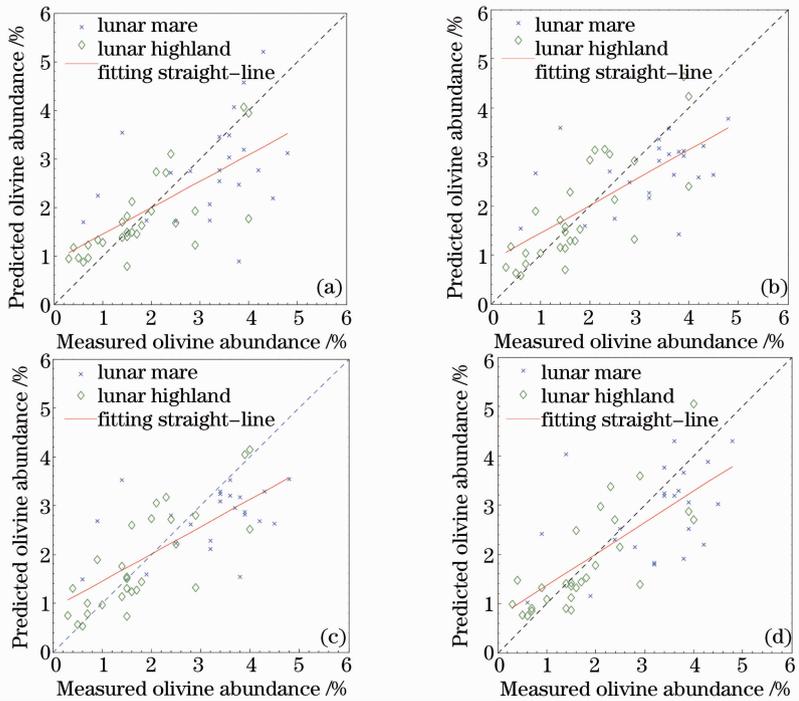


图 2 橄榄石实验测量值与模型计算值的散点图。(a)模型 1；(b)模型 2；(c)模型 3；(d)模型 4

Fig. 2 Scatterplots of measured and predicted olivine abundance. (a) Model 1; (b) model 2; (c) model 3; (d) model 4

最分散,说明模型 1 计算值与测量值偏差最大,此模型准确度不高,而模型 2,3 和 4 差别不大。

综合不同模型比较分析结果,选择夹角、散点离散程度、标准差均最小,而相关系数大的模型。考虑全月表反射率数据量大,以线性回归模型为主,提高计算效率。综合定性及定量分析结果,模型 1 的

相关系数与其他模型相比,明显偏小,且散点较离散;模型 2 和 3 都为线性模型,且夹角接近,但模型 3 的相关系数及标准差都优于模型 2(如图 2 与表 3 所示),模型 3 在 6 组 LSCC 验证数据计算的偏差中 5 组小于模型 2 计算的偏差(如图 1 所示);模型 4 的相关系数及标准差与模型 3 接近,但在 6 组

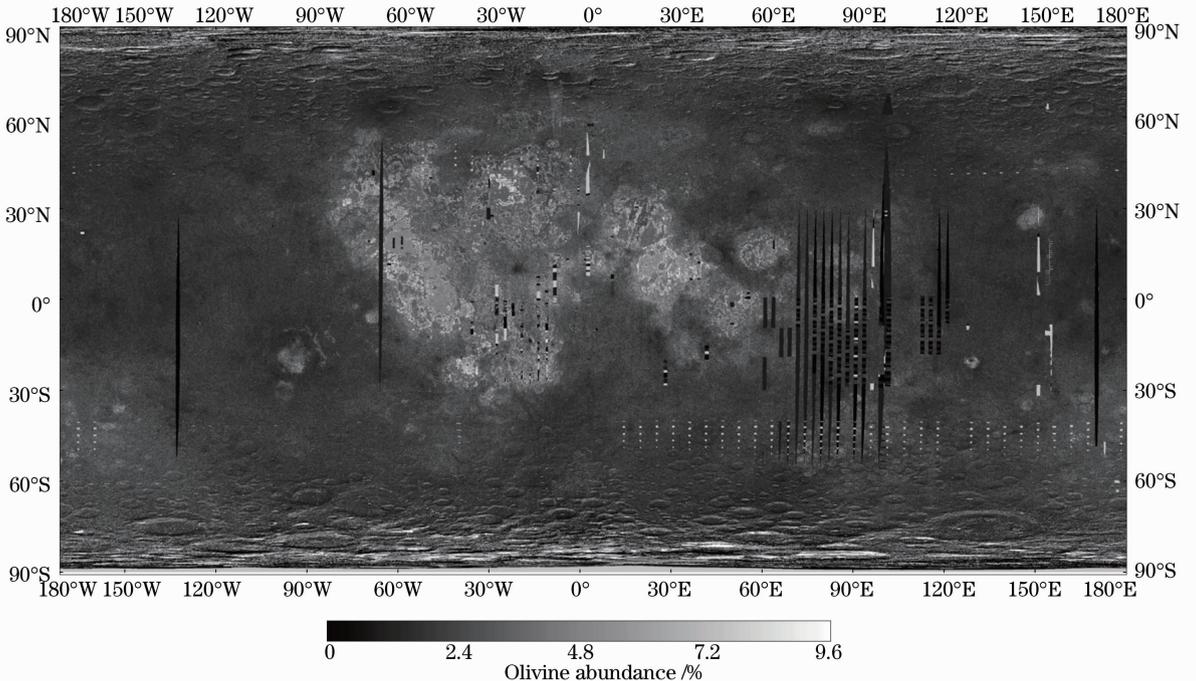


图 3 基于 Clementine 数据反演的全月表橄榄石含量图

Fig. 3 Estimates of olivine abundance using Clementine data

LSCC 验证数据计算的偏差中模型 3 有 4 组小于模型 4, 而且考虑到模型 4 是非线性回归模型, 计算效率低。因此, 选择模型 3, 能够相对较好地反映光谱反射率与橄榄石含量之间的关系。

4 月表橄榄石含量分布反演

利用 51 组 LSCC 不同粒度月壤光谱及其橄榄石含量回归分析, 建立了 4 组不同模型。通过分析选择模型 3, 同时基于 100 m 空间分辨率的 Clementine UV/VIS/NIR 共 5 个波段反射光谱数据, 反演了全月表橄榄石含量分布如图 3 所示。从图 3 可看出, 月表无大面积的橄榄石分布。月陆高地橄榄石含量很少, 只分布在局部地区; 月海玄武岩中橄榄石含量明显高于月陆高地, 特别集中在风暴洋中, 且边缘较高, 最高含量约为 9.6%。

在反演的月表橄榄石含量分布上(图 3), 分别选择已测月壤橄榄石含量分布的 Apollo 登月采样点。将不同登月采样点的橄榄石反演结果与不同粒径下的地面实测含量进行对比, 发现 Apollo 12、14、15、16 及 17 登月采样点, 橄榄石含量反演结果介于不同粒度月壤中实测最大值与最小值之间, 说明粒径对模型的影响不大, 结果可靠; 而 Apollo 11 登月采样点反演结果大于实测最大值, 可能是由于该点卫星测量反射率与地面测量月壤反射率有偏差造成的(如表 4 所示)。

表 4 采样点橄榄石反演结果与实测值对比

Table 4 Comparison of predicted and measured olivine abundance for the Apollo sampled soils

	<10	10~20	20~45	Predicted
Apollo 11	0.90	1.10	1.40	1.62
Apollo 12	3.35	3.95	3.85	3.60
Apollo 15	1.25	2.60	3.60	3.09
Apollo 17	3.10	3.78	3.98	3.46
Apollo 14	1.00	1.65	2.70	1.47
Apollo 16	0.75	1.78	2.87	1.81

5 结 论

通过 LSCC 数据中 Apollo 登月采样点不同粒

度月壤样品光学反射率及其中橄榄石含量的统计分析, 建立了 4 组月壤光谱反射率与橄榄石含量的回归方程, 即反演模型。分别从 LSCC 数据验证、模型标准偏差和相关系数, 以及模型计算的橄榄石含量分布的散点图对比分析, 优选出反演全月表橄榄石含量的模型。结合 Clementine 卫星测量的全月表光谱反射率, 反演得到全月表橄榄石含量分布图。经过与 Apollo 登月采样点实际测量的橄榄石含量比较, 6 个登月采样点中 5 个点的橄榄石含量反演结果介于不同粒度月壤中实测最大值与最小值之间, 结果可靠。该模型和其他可能的全月球多光谱和高光谱数据, 也能够反演全月球橄榄石含量分布, 可以为分析月球内部成分以及月球的形成演化提供科学依据。

参 考 文 献

- Ouyang Ziyuan. Introduction to Lunar Science [M]. Beijing: China Astronautics, 2005. 95-106.
- 欧阳自远. 月球科学概论[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2005. 95-106.
- C M Pieters, J Boardman, B Buratti, *et al.*. The moon mineralogy mapper (M3) on chandrayaan-1 [J]. Current Science, 2009, 96(4): 500-505.
- S Yamamoto, R Nakamura, T Matsunaga, *et al.*. Possible mantle origin of olivine around lunar impact basins detected by SELENE [J]. Nature Geoscience, 2010, 3(8): 533-536.
- C Pieters, Y Shkuratov, V Kaydash, *et al.*. Lunar soil characterization consortium analyses: pyroxene and maturity estimates derived from clementine image data [J]. Icarus, 2006, 184(1): 83-101.
- D J Lawrence, W C Feldman, B L Barraclough, *et al.*. Global elemental maps of the moon: the lunar prospector Gamma-ray spectrometer [J]. Science, 1998, 281(5382): 1484-1489.
- P G Lucey. Mineral maps of the moon [J]. Geophysical Research Letters, 2004, 31: L08701. doi:10.1029/2003GL019406.
- B Hapke. Theory of Reflectance and Emittance Spectroscopy [M]. Cambridge University Press, 2012. 206-210.
- L Li, P G Lucey. Use of multiple end member spectral mixture analysis and radiative transfer model to derive lunar mineral abundance maps [C]. 40th Lunar and Planetary Science Conference, Woodlands, 2009.
- C M Pieters, D G Stankevich, Y G Shkuratov, *et al.*. Statistical analysis of the links among lunar mare soil mineralogy, chemistry, and reflectance spectra [J]. Icarus, 2002, 155(2): 285-298.
- <http://www.planetary.brown.edu/pds/database.html>.