



嫦娥二号 γ 谱数据反演月表 Fe 元素分布

陈剑^①, 凌宗成^{①②*}, 李勃^①, 孙灵芝^①, 张江^①, 刘建忠^③

① 山东大学空间科学研究院, 山东省光学天文与日地空间环境重点实验室, 威海 264209;

② 中国科学院月球与深空探测重点实验室, 北京 100012;

③ 中国科学院地球化学研究所, 贵阳 550002

*联系人, E-mail: zcling@sdu.edu.cn

收稿日期: 2015-09-15; 接受日期: 2015-11-17

国家自然科学基金(批准号: U1231103, 41473065, 41373068, 41490634)、山东省自然科学基金(编号: JQ201511, ZR2015DQ001)、中国科学院重点部署项目(编号: KGZD-EW-603)、中国科学院月球与深空探测重点实验室开放基金和山东大学(威海)青年学者未来计划资助

摘要 Fe 作为重要的成岩元素之一, 其月表含量和分布特征对于认识月球岩石成因和岩浆演化具有重要指示意义. 本文由嫦娥二号 γ 谱仪 2C 级数据出发, 经过谱线筛选、宇宙线校正、能谱累积与本底处理后提取 Fe 峰计数率. 我们借助月球勘探者号的热中子数据进行中子校正, 之后结合月球样品、陨石与嫦娥三号的就位探测数据标定 Fe 元素丰度. 嫦娥二号 γ 谱仪全月 Fe 分布图中月海玄武岩区域与 Fe 元素富集区域吻合, 其中风暴洋和雨海中部为 Fe 含量高值区域($\text{FeO} > 23 \text{ wt.}\%$), 南极艾肯盆地内也出现 Fe 的相对富集, 而月陆区域 Fe 含量较低($\text{FeO} < 8 \text{ wt.}\%$). 与月球勘探者号 γ 谱仪的探测结果相比, 嫦娥二号 γ 谱仪解算的 Fe 元素丰度(FeO)平均偏低 0.7 wt.%.

关键词 嫦娥二号, γ 射线, Fe 元素分布图, 月海玄武岩

PACS: 96.20.Br, 95.85.Pw, 95.55.Pe

Fe 是月球主要的成岩元素之一, 月表 Fe 元素的全球分布对于研究月球起源与月亮演化, 尤其是月海玄武岩的成因、分布与变化等月球基础科学问题具有重要价值^[1-4]. 通过返回样品的研究, 目前对于 Apollo 与 Luna 采样点周围的 Fe 元素丰度已有较为准确的认知^[5], 而对于全月球的 Fe 元素丰度分布的认知则需借助遥感测量手段. 常用的月表 Fe 元素遥感技术主要有可见近红外光谱^[4,6,7]、X 射线^[8-10]、中子^[11,12]与 γ 射线能谱^[13-17]等.

由于月球大气稀薄(主要为 Na, K 原子组成的外

逸层)且磁场极弱, 高能银河宇宙射线(GCR)持续轰击月表, 产生的中子与月表元素(O, Mg, Al, Si, Ca, Ti 与 Fe 等)发生非弹性散射、中子俘获等相互作用, 被激发的元素核能够发射具有特征能量的 γ 射线, 使得利用月表 γ 射线的轨道遥感可以确定包括 Fe 在内的月表元素含量与空间分布.

从 Apollo 时代开始, γ 射线谱遥感技术已被多次运用于全球月表的 Fe 元素分布测量. 阿波罗 15, 16 号探测器所携带的 γ 谱仪首次通过遥感方法获得月表 Fe 元素的分布信息, 但由于轨道倾角较小, 探测范

引用格式: 陈剑, 凌宗成, 李勃, 等. 嫦娥二号 γ 谱数据反演月表 Fe 元素分布. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2016, 46: 029605
Chen J, Ling Z C, Li B, et al. The distribution of lunar iron revealed by Chang'E-2 gamma ray spectrometer (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2016, 46: 029605, doi: 10.1360/SSPMA2015-00458

围仅局限于赤道附近区域,对月表的覆盖率只有18%^[13,14]. 第一张由 γ 谱所解译的全月 Fe 元素分布图来自月球勘探者号数据, Lawrence 等人^[15,16]根据 7.6 MeV 谱线的计数率变化得到 Fe 元素分布; Prettyman 等人^[17]对月表 γ 射线产生、传输与探测过程进行建模,导出了包含 Fe 在内 10 种元素的绝对丰度.

近年来,日本的月女神号与我国的嫦娥二号均携带了 γ 谱仪对月表元素分布进行探测^[18,19]. 其中,月女神号 γ 谱仪数据已有初步的 Fe 元素解译结果^[20],而马涛等人^[21]也通过分析嫦娥二号 γ 谱中 Fe 元素对应能量区间得到初步的计数率分布图,但目前尚未见有基于嫦娥二号数据的月表 Fe 元素丰度分布的结果. 本文将通过嫦娥二号 γ 谱仪绕月探测过程中获取的谱线数据反演 Fe 元素丰度在月表的分布,深入挖掘嫦娥二号探测数据解译月表物质成分的应用潜力.

1 仪器简介及 2C 数据处理

嫦娥二号于 2010 年 10 月 1 日发射,绕月工作轨道高度约为 100 km^[22,23]. γ 射线谱仪作为科学载荷之一,经过为期一个月的在轨定标测试之后,进入月面探测阶段,直至 2011 年 5 月 20 日关闭,在轨观测时间约为 7 个月,获取了 4610 h 的探测数据^[19,24]. 嫦娥二号 γ 射线谱仪以 LaBr₃(Ce)闪烁体为主探测器,探测能量范围为 0.3–10 MeV,谱分辨率为 3.6%@662 keV^[19],空间分辨率约为 150 km(月表 γ 射线遥感空间分辨率约为 1.5 倍轨道高度^[25]). 嫦娥二号 γ 谱仪获取的月表 γ 射线谱如图 1 所示,其中观测到 K, Th, Si, Al, Ca, O, Ti, Fe 等元素特征峰.

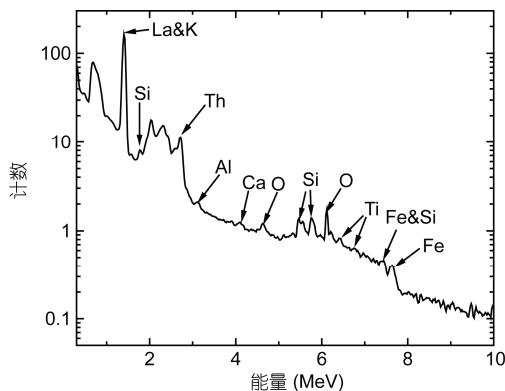


图 1 嫦娥二号 γ 谱仪获取的月球 γ 射线谱

Figure 1 Lunar gamma ray spectra measured by Chang'E-2 Gamma Ray Spectrometer.

1.1 数据筛选

本文基于嫦娥二号 γ 射线谱仪 2C 级科学数据开展研究,2C 级数据由探月工程地面应用系统发布,已经过能量定标、增益校正、死时间校正、几何校正与轨道高度归一化处理,但仍存在空间环境变化或仪器异常状态下获取的错误谱线(如异常高值谱线、安全模式数据等),需加以筛选以防影响元素反演准确性,数据筛选以高压等级、质量状态参数、全谱计数为判据.

1.2 GCR 校正

月表 γ 谱中除放射性元素的衰变信号外,主要包含 GCR 与月表物质相互作用所产生的 γ 射线,这些 γ 射线的强度受到 GCR 通量随时间变化的调制,因此,月表 γ 谱需进行 GCR 校正,消除 GCR 通量变化对时间序列数据的影响.

O 元素在月表的分布变化较小,O 峰计数率主要由 GCR 强度控制,可用于评估 GCR 通量的变化^[23]. 本文中选用 O@4438 keV 峰统计 O 峰计数率,尽管 O@6129 keV 峰具有更高的通量,但其附近存在较多其他元素峰形干扰,相比前者净峰计数率误差更大(图 1). 我们将每一轨的谱线平滑后抽取 O 峰计数率,并向嫦娥二号 γ 谱仪轨道探测任务开始时的 O 峰计数率测量值归一,校正全通道谱线计数.

1.3 谱线累积

释放 γ 射线辐射的核反应具有随机性,因而月表 γ 谱所测量的元素特征 γ 射线辐射强度围绕一个平均值上下波动,这一现象被称为统计涨落. 统计结果表明,统计涨落现象满足泊松分布,大量的统计平均将使测量值逼近其数学期望. 因此,为了降低 γ 谱测量中的统计涨落对月表元素反演的影响,我们采用谱线累积的方式抑制统计噪声.

全月面按照 60 km×60 km 近似等面积像元被划分为 11306 个谱线累积区域. 嫦娥二号 γ 射线谱仪获取的有效月面谱线数据根据经纬度范围累积入对应像元内,同时我们统计了累积谱线的计数变化以评估数据误差. 每个累积区域的谱线计数误差可由公式(1)计算^[26],

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{N_{\text{spectra}}} (S_i - S)^2}{N_{\text{spectra}} - 1}}, \quad (1)$$

其中 σ 为标准偏差, N_{spectra} 为像元累积光谱数, S_i 为单条光谱计数, S 为像元平均光谱计数. 每个像元的数据相对误差可由 σ/S 表示.

2 Fe 元素反演

月表 Fe 元素丰度的测量主要利用两条 γ 射线: 中子俘获反应产生的 7.64 MeV 谱线与非弹性散射产生的 0.846 MeV 谱线. 如图 1 所示, 嫦娥二号 γ 射线谱仪获取的月面 γ 射线谱中包含 Fe@7.64 MeV 峰; 而 0.846 MeV 谱线虽然通量与前者相近, 但由于其所处能量区间受到 LaBr₃ 探测器自身放射谱线的影响而难以分析. 本文采用 7.64 MeV 特征峰进行分析, 反演月表 Fe 元素空间分布特征.

2.1 本底估算与计数率

Fe 元素的定量分析基于 7.64 MeV 特征峰计数率的计算, 而嫦娥二号 γ 谱仪数据中存在康普顿坪与反散射峰等信号构成的连续谱本底, 特征峰计数率的测量受到本底计数率的影响, 因此首先需要分离谱线本底与元素特征峰. 我们根据能量高于 8 MeV 的连续谱估算本底, 使其延伸至 Fe@7.64 MeV 峰所在能量区间, 扣除 Fe 峰的本底; 之后采用 7.65–7.85 MeV 能量区间数据统计 Fe 峰的计数率, 以避免低能侧其他元素谱峰(如 Si@7.42 MeV)的影响, 如图 2 所示. 由公式(1)可得该能量区间计数误差为 $(5.51 \pm 3.13)\%$.

2.2 中子数密度校正

Fe@7.64 MeV 峰由月表赋存的热中子与 Fe 元素

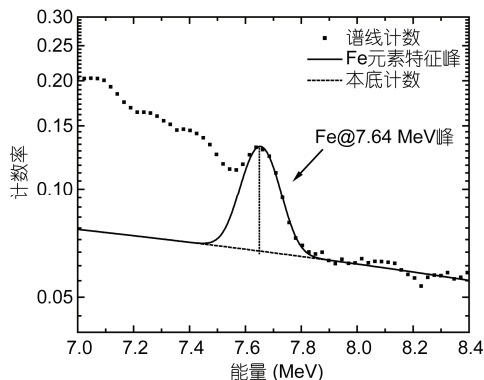


图 2 Fe 元素特征峰本底估算与计数率统计

Figure 2 Background estimation and count rate of Fe peak@7.64 MeV.

核的俘获反应所激发, 月壤中热中子数密度与 Fe 元素含量越高, 发生热中子俘获反应的几率也越高, 进而所释放的 γ 光子数越多, 因此, 热中子俘获反应产生的 γ 射线强度(对应 γ 谱仪测量的计数率)与热中子数密度以及 Fe 元素丰度呈正比^[16],

$$R=nNC, \quad (2)$$

其中, R 为计数率, n 为元素丰度, N 为热中子数密度, C 为线性常数. 根据 Fe@7.64 MeV 峰计数率反演 Fe 元素丰度的空间分布时需要归一其他影响计数率空间分布的因素, 如热中子数密度. 我们利用月球勘探者号中子谱仪数据所解译的月表热中子数密度分布图对 Fe 峰计数率进行热中子数密度校正(根据公式(2), 将 Fe 峰计数率除以对应像元的月表热中子数密度值). 由月球勘探者号所探测到的热中子分布图可知, 热中子数密度在全月表面具有高达 3 倍的变化范围, 因此这一校正不可忽略.

2.3 绝对丰度定标

本文利用月壤角砾样品的 Fe 元素丰度(下文所涉及 Fe 元素丰度均以 FeO 含量形式表示)数据^[5]进行绝对丰度定标. 月壤角砾是由月表物质经历长期的陨石撞击之后形成的均匀混合物, 因此尽管 Apollo 与 Luna 样品的采样范围(着陆点附近)远小于嫦娥二号 γ 谱仪的空间分辨率(~150 km), 但月壤角砾样品仍可代表与 γ 谱仪遥感分辨率相当的大尺度范围内的月表真值^[27]. 我们对 7 个真值点的 Fe 峰计数与 FeO 含量(表 1)进行线性拟合, 如图 3(虚线)所示. 月球样品大多来自月海玄武岩区域, 除 Apollo 16 之外缺少来自典型月陆地区(月球正面南部与背面北部区域)的代表样品, 且缺乏高铁(FeO>20 wt.%)月海玄武岩区域的样品. Korotev 等人^[28]对长石质月球陨石的成分分析结果可以代表典型长石质月陆地区的平均成分, 因为这些长石质陨石来自月陆地区的随机取样; 而最近, 我国嫦娥三号巡视器的粒子激发 X 射线谱仪探测获取了月球雨海北部年轻地质单元的 FeO 含量^[29], 发现极为富 FeO 的月海玄武岩. 因此, 我们在定标数据中加入长石质月球陨石与嫦娥三号着陆区的 FeO 含量数据以约束反演结果的变化范围, 如图 3(实线)所示, 并最终获得基于嫦娥二号 γ 谱仪数据的月表 FeO 含量定量反演公式,

$$A=3.43 \times 10^{-3} R - 8.77, \quad (3)$$

其中, A 为 FeO 含量, R 为 Fe 峰计数率.

表 1 用于绝对丰度定标的月壤角砾样品^[5]、长石质月球陨石^[28]以及嫦娥三号着陆区 FeO 含量^[29]与嫦娥二号γ谱仪 Fe 峰计数

Table 1 FeO contents of lunar soil and regolith samples [5], feldspathic meteorites [28] and Chang'E-3 landing site [29] and Fe peak counts of Chang'E-2 Gamma Ray Spectrometer utilized in calibration

| 定标点 | 月壤 FeO 含量 (wt.%) | 嫦娥二号γ谱仪 Fe 峰计数 |
|-----------|------------------|----------------|
| Apollo 11 | 16.4 | 7708.2 |
| Apollo 12 | 17.19 | 7809.0 |
| Apollo 15 | 14.98 | 6949.9 |
| Apollo 16 | 4.98 | 4100.7 |
| Apollo 17 | 10.29 | 5548.2 |
| Luna 16 | 16.75 | 7053.7 |
| Luna 20 | 7.46 | 4558.0 |
| 长石质月球陨石 | 4.4 | 3892.5 |
| 嫦娥三号 | 21.7 | 8621.7 |

3 结果与讨论

基于绝对丰度定标关系式(公式(3)), 我们得到全月 FeO 含量分布图(图 4). 月海玄武岩沉积区具有较高的 FeO 含量; 而月陆区域普遍呈现低 FeO 特征, 南极艾肯盆地内则出现相对外围月陆的 FeO 富集. 我们将本文的反演结果与以往的遥感探测(以月球勘探者号与 Clementine 为代表)进行对比以评估精度, FeO 含量的频率分布如图 5 所示, 其中月球勘探者号的结果来自其γ谱仪数据(http://pds-geosciences.wustl.edu/lunar/lp-1-grs-5-elem-abundance-v1/lp_9001/data/),

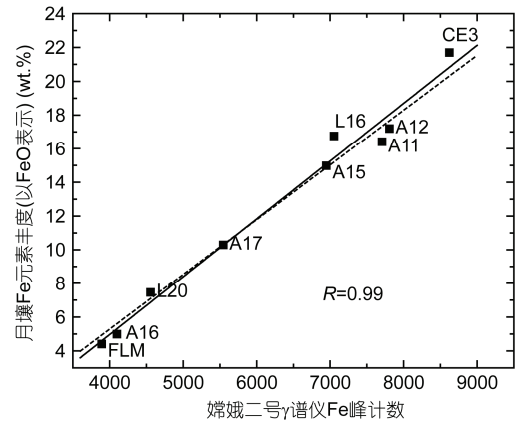


图 3 嫦娥二号γ谱 Fe 峰计数与月表 FeO 含量散点图及拟合线, 其中虚线代表 7 个 Apollo(A)与 Luna(L)月壤角砾样品点拟合结果, 实线代表引入长石质月球陨石(FLM)与嫦娥三号(CE3)探测数据后的拟合结果

Figure 3 Scatter plots of FeO content versus Chang'E-2 Gamma Ray Spectrometer count rates. Results of linear fitting are shown as two regression lines: dash line for Apollo (A) & Luna (L) soil and regolith samples while solid line for those samples combined with feldspathic lunar meteorites (FLM) and Chang'E-3 (CE3) detections.

空间分辨率(~150 km)与本文所采用的嫦娥二号γ谱仪数据相近, 而 Clementine 多光谱数据所获得的 FeO 分布图(<http://www.mapaplanet.org/explorer/moon.html>)空间分辨率较高(~1 km), 但其可用的数据范围仅限于 70°S–70°N 之间, 因此 3 个数据集的 FeO 分布统计均采用 70°S–70°N 范围内的数据.

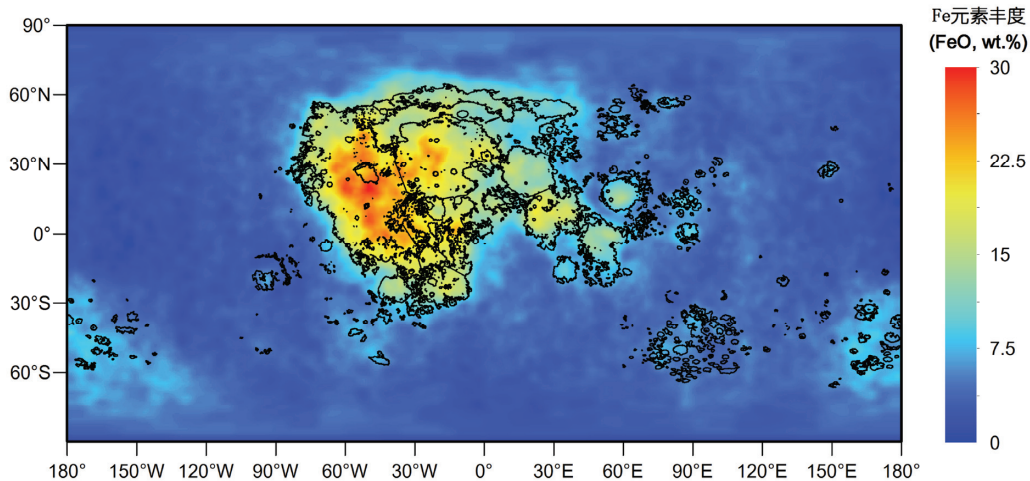


图 4 (网络版彩图)嫦娥二号γ谱仪数据解译的月表 FeO 分布图, 图像经过 150 km 直径圆形邻域平滑处理, 黑色实线表示月海轮廓

Figure 4 (Color online) Lunar FeO map derived from Chang'E-2 Gamma Ray Spectrometer. Map is smoothed in a circle neighborhood with a diameter of 150 km. Mare regions are outlined in black lines.

由图 5 可知, γ 谱仪(嫦娥二号与月球勘探者号)所获得的 FeO 含量的分布趋势相近, 峰值(众数)都位于月陆低值区. 嫦娥二号的 FeO 含量众数(~ 3.6 wt.%)相比月球勘探者号(~ 4.34 wt.%)偏低 0.74 wt.%, 全月 FeO 含量均值也偏低 0.71 wt.%(表 2), 这可能与两者定标模型的差异有关. Prettyman 等人^[17]仅依靠月球勘探者号 γ 谱仪与中子谱仪的数据独立导出月表 FeO

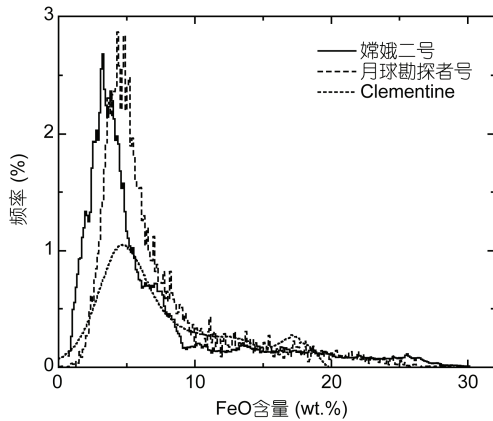


图 5 不同的遥感探测任务(嫦娥二号、月球勘探者号与 Clementine)获得的月表 FeO 频率分布比较

Figure 5 Comparison of FeO distribution on the lunar surface from Chang'E-2, Lunar Prospector and Clementine.

含量, 而本文的定标过程中将月球样品、陨石与嫦娥三号的数据作为地面真值, 这些数据所代表月表 FeO 信息的来源深度可能与月球勘探者号 γ 谱仪与中子谱仪对月表成分的探测深度不同.

两个 γ 谱仪获得的 FeO 含量频率分布均向高值区逐渐降低, 而 Clementine 光谱仪的反演结果除月陆低值区域的峰值(~ 4.66 wt.%)外, 在月海高值区域也存在频率极大值(~ 17.2 wt.%). 两种遥感技术获得的 FeO 含量差别可能是由于光谱遥感的空间分辨率(≤ 1 km)以及对月壤的探测深度($\sim 1 \mu\text{m}$)与 γ 谱遥感(空间分辨率几十至几百 km, 深度 ~ 30 cm)不同所导致. 另外, 光谱遥感对月表 FeO 的定量反演还受到空间风化、地形阴影与矿物分布等因素的影响; 目前月表 FeO 遥感定量的真值也更倾向于 γ 谱的探测结果, 例如 Lawrence 等人^[16]利用月球勘探者号 γ 谱仪数据对 Clementine FeO 分布图进行修正. 下文将只对 γ 谱仪的探测结果进行区域分布方面的比较.

我们统计了 16 个月海区域与月陆区域以及南极艾肯盆地的 FeO 分布, FeO 含量最高值(30.2 wt.%)位于风暴洋中 Aristarchus 撞击坑南侧年轻的玄武岩地区, 风暴洋-雨海中部为月表主要的 FeO 富集区(>23 wt.%), 岛海、静海、澄海等临近的大面积月海也具

表 2 嫦娥二号 γ 谱仪与月球勘探者号 γ 谱仪 FeO 含量解译结果对比

Table 2 Comparisons between FeO map from Chang'E-2 gamma ray spectrometer and that from lunar prospector gamma ray spectrometer

| 区域 | 嫦娥二号 | | | 月球勘探者号 | | |
|--------|-----------|------|------|-----------|------|------|
| | 范围 | 平均值 | 标准差 | 范围 | 平均值 | 标准差 |
| 风暴洋 | 6.74-30.2 | 22.1 | 5.56 | 6.49-30.7 | 19.4 | 4.29 |
| 雨海 | 8.08-28.7 | 20.7 | 4.28 | 9.12-29.9 | 19.3 | 3.82 |
| 岛海 | 5.98-25.7 | 20.9 | 4.40 | 7.97-23.3 | 16.2 | 3.21 |
| 静海 | 7.59-22.7 | 16.2 | 4.23 | 7.61-23.4 | 16.0 | 3.37 |
| 澄海 | 10.0-23.6 | 14.8 | 2.55 | 10.1-24.2 | 17.0 | 2.79 |
| 丰富海 | 6.70-20.3 | 12.1 | 2.97 | 7.18-20.6 | 13.3 | 2.71 |
| 冷海 | 7.66-18.3 | 13.9 | 2.87 | 7.46-16.9 | 12.2 | 1.73 |
| 云海 | 5.47-21.6 | 16.4 | 3.21 | 5.10-21.4 | 13.9 | 2.95 |
| 危海 | 4.66-17.7 | 11.5 | 3.38 | 5.31-18.3 | 13.1 | 2.73 |
| 湿海 | 8.02-18.4 | 13.9 | 3.22 | 4.82-18.7 | 13.9 | 3.00 |
| 南海 | 2.59-10.7 | 5.89 | 1.73 | 2.94-11.1 | 7.19 | 1.49 |
| 知海 | 9.09-22.2 | 18.9 | 3.21 | 8.99-22.0 | 16.1 | 2.98 |
| 酒海 | 6.26-11.8 | 9.26 | 1.93 | 6.42-13.8 | 10.0 | 1.98 |
| 汽海 | 9.06-21.2 | 15.2 | 2.46 | 9.59-19.5 | 14.8 | 2.62 |
| 东海 | 3.80-7.98 | 6.72 | 2.10 | 4.80-8.39 | 6.95 | 0.88 |
| 界海 | 5.85-13.3 | 8.94 | 1.97 | 7.16-13.4 | 10.9 | 1.69 |
| 月陆 | 0.71-8.00 | 4.66 | 3.32 | 0-8.00 | 5.60 | 2.49 |
| 南极艾肯盆地 | 1.58-12.7 | 4.96 | 2.49 | 1.10-13.1 | 6.37 | 1.96 |
| 全球 | 0.71-30.2 | 6.07 | 5.29 | 0-30.7 | 6.78 | 4.37 |

有较高的 FeO 含量(> 17 wt.%), 而南海、酒海、东海与界海区域 FeO 含量相对较低(~8–13 wt.%), 可能与玄武岩面积较小且远离大面积月海区, γ 谱探测数据受到周围月陆信号影响有关. 与月球勘探者号结果相比(见表 2), 16 个月海玄武岩区域的 FeO 含量分布范围均与月球勘探者号相近; 均值方面, 风暴洋、雨海、岛海、静海、冷海、云海、知海与汽海区域的 FeO 含量相比月球勘探者号结果偏高; 而澄海、丰富海、危海、南海、酒海、东海与界海偏低.

嫦娥二号的 FeO 含量分布数据中月海与月陆的分界值与月球勘探者号相近, 均为 8 wt.%左右. 月陆地区的 FeO 含量普遍较低(<8 wt.%), 嫦娥二号的 FeO 含量均值(4.66 wt.%)低于月球勘探者号的结果(5.6 wt.%). 月陆一般被认为起源于月球形成初期岩浆洋中上浮堆积的原始月亮斜长岩^[1–3], 纯斜长岩中具有极低的 FeO 含量, 但长期的撞击作用使得表层月壳与来自深部的铁镁质成分混合而造成 FeO 含量的上升.

嫦娥二号对南极艾肯盆地的 FeO 含量解译结果(极大值 12.7 wt.%, 均值 4.96 wt.%)比月球勘探者号(极大值 13.1 wt.%, 均值 6.37 wt.%)偏低, 但同样表现

出相对于盆地外围月陆地区 FeO 的富集. 尽管盆地内月海玄武岩覆盖面积较小, 但盆地撞击的挖掘作用暴露出下月壳更富铁镁质的岩石成分使得大部分非月海充填区域也出现富 FeO 特征^[6].

4 结论

我们对嫦娥二号 γ 谱 2C 级科学数据进行筛选、宇宙线校正、谱线累积与本底处理, 并从中提取 Fe 元素特征峰计数率. 之后借助月球勘探者号中子谱仪的数据对 Fe 峰计数进行热中子数密度校正, 通过线性关联 γ 谱计数与月壤角砾样品、长石质陨石成分以及嫦娥三号就位测试结果得到 FeO 含量定标关系.

嫦娥二号 γ 谱解译的全月 FeO 分布图显示 FeO 富集特征主要与月海玄武岩分布区域相对应; 南极艾肯盆地内部出现 FeO 的相对富集; 月陆地区 FeO 含量普遍偏低. 总体而言, 嫦娥二号 γ 谱仪对月表 FeO 含量的探测结果相比月球勘探者号偏低. FeO 分布图的获取, 表明我国嫦娥二号数据在月表物质成分反演方面仍然具有较大的应用潜力, 有待于未来进一步发掘.

参考文献

- 1 Wood J A. Moon over mauna loa——A review of hypotheses of formation of earth's moon. *Origin Moon*, 1986, 1: 17–55
- 2 Warren P H. The magma ocean concept and lunar evolution. *Ann Rev Earth Planet Sci*, 1985, 13: 201–240
- 3 Taylor S R. The origin of the moon Geochemical considerations. *Origin Moon*, 1986, 1: 125–143
- 4 Lucey P G, Taylor G J, Malaret E. Abundance and distribution of iron on the moon. *Science*, 1995, 268: 1150–1153
- 5 Haskin L, Warren P. Lunar chemistry. In: *Lunar Sourcebook*. New York: Cambridge University Press, 1991. 4: 357–474
- 6 Lucey P G, Blewett D T, Hawke B R. Mapping the FeO and TiO₂ content of the lunar surface with multispectral imagery. *J Geophys Res Planets*, 1998, 103: 3679–3699
- 7 Ling Z C, Zhang J, Liu J Z, et al. Preliminary results of FeO mapping using Imaging Interferometer data from Chang'E-1. *Chin Sci Bull*, 2011, 56: 376–379
- 8 Andre C G, Adler I, Clark P E, et al. Chemical character of the partially flooded Smythii Basin based on Al/Si orbital X-ray data. *Lunar Planet Sci Conf Proc*, 1977, 8: 925–931
- 9 Spudis P, Pieters C. Global and regional data about the Moon. In: *Lunar Sourcebook: A User's Guide to the Moon*. New York: Cambridge University Press, 1991. 595–632
- 10 Yin L I, Trombka J I, Adler I, et al. X-ray remote sensing techniques for geochemical analysis of planetary surfaces. In: *Remote Geochemical Analysis: Elemental and Mineralogical Composition*. New York: Cambridge University Press, 1993. 199–212
- 11 Feldman W C, Lawrence D J, Elphic R C, et al. Chemical information content of lunar thermal and epithermal neutrons. *J Geophys Res Atmosph*, 2000, 105: 20347–20363
- 12 Maurice S, Feldman W C, Lawrence D J, et al. High-energy neutrons from the Moon. *J Geophys Res Planets*, 2000, 105: 20365–20375
- 13 Bielefeld M J, Reedy R C, Metzger A E, et al. Surface chemistry of selected lunar regions. *Lunar Scie Conf*, 1976, 7: 2661–2676
- 14 Davis P A, Bielefeld M J. Inelastic neutron scatter iron concentrations of the Moon from orbital gamma ray data. *J Geophys Res Solid*

- Earth, 1981, 86: 11919–11926
- 15 Lawrence D J, Feldman W C, Barraclough B L, et al. Global elemental maps of the Moon: The Lunar Prospector gamma-ray spectrometer. *Science*, 1998, 281: 1484–1489
 - 16 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 Planets*, 2002, 107: 131–1326
 - 17 Prettyman T H, Hagerty J J, Elphic R C, et al. Elemental composition of the lunar surface: Analysis of gamma ray spectroscopy data from Lunar Prospector. *J Geophys Res: Planets*, 2006, 111: 41–51
 - 18 Hasebe N, Yamashita N, Okudaira O, et al. The high precision gamma-ray spectrometer for lunar polar orbiter SELENE. *Adv Space Res*, 2008, 42: 323–330
 - 19 Ma T, Chang J, Zhang N, et al. Gamma-ray spectrometer onboard Chang'E-2. *Nucl Instrum Methods Phys Res*, 2013, 726: 113–115
 - 20 Hareyama M, Karouji Y, Yamashita Y, et al. Lunar iron and uranium distribution obtained by SELENE (Kaguya) gamma-ray spectrometer. *Lunar Planetary Sci Conf*, 2013, 44: 1871
 - 21 Ma T, Chang J, Zhang N, et al. Gamma-ray spectrometer onboard Chang'E-2 (in Chinese). *Acta Astron Sin*, 2013, 54: 291–299 [马涛, 常进, 张南, 等. 嫦娥二号伽玛射线谱仪. *天文学报*, 2013, 54: 291–299]
 - 22 Ye P J, Huang J C, Zhang T X, et al. Technical achievements of Chang'E-2 satellite and prospect of Chinese deep space explorations (in Chinese). *Sci China-Tech Sci*, 2013, 43: 467–477 [叶培建, 黄江川, 张廷新, 等. 嫦娥二号卫星技术成就与中国深空探测展望. *中国科学: 技术科学*, 2013, 43: 467–477]
 - 23 Ou-Yang Z Y. Chang'E-2 preliminary results (in Chinese). *Chin J Nat*, 2013, 35: 391–395 [欧阳自远. 嫦娥二号的初步成果. *自然杂志*, 2013, 35: 391–395]
 - 24 Liu J J, Ren X, Mou L L, et al. Payloads and scientific experiments of Chang'E-2 lunar orbiter (in Chinese). *Life Sci Instrum*, 2013, 11: 31–38 [刘建军, 任鑫, 牟伶俐, 等. 嫦娥二号卫星有效载荷与科学探测. *生命科学仪器*, 2013, 11: 31–38]
 - 25 Lawrence D J, Elphic R C, Feldman W C, et al. Small-area thorium features on the lunar surface. *J Geophys Res-Planets*. 2003, 108: 369–378
 - 26 Lawrence D J, Maurice S, Feldman W C. Gamma-ray measurements from Lunar Prospector: Time series data reduction for the Gamma-Ray Spectrometer. *J Geophys Res-Planets*, 2004, 109: 611–616
 - 27 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 et Cosmochim Acta*, 2004, 68: 3791–3805
 - 28 Korotev R L, Jolliff B L, Zeigler R A, et al. Feldspathic lunar meteorites and their implications for compositional remote sensing of the lunar surface and the composition of the lunar crust. *Geochim Et Cosmochim Acta*, 2003, 67: 4895–4923
 - 29 Zhang J, Yang W, Hu S, et al. Volcanic history of the Imbrium basin: A close-up view from the lunar rover Yutu. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2015, 112: 5342–5347

The distribution of lunar iron revealed by Chang'E-2 gamma ray spectrometer

CHEN Jian¹, LING ZongCheng^{1,2*}, LI Bo¹, SUN Lingzhi¹, ZHANG Jiang¹
& LIU JianZhong³

¹ Shandong Provincial Key Laboratory of Optical Astronomy and Solar-Terrestrial Environment, Institute of Space Sciences, Shandong University, Weihai 264209, China;

² Key Laboratory of Lunar and Deep Space Exploration, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China;

³ Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China

As one of the important rock-forming elements, lunar global iron abundance and distribution are essential for the understanding of petrogenesis and crustal evolution of the Moon. In this paper, we derive lunar iron map from Chang'E-2 Gamma Ray Spectrometer (CE2GRS) data. Beginning from level 2C scientific data, a series of processing procedures (data selection, galactic cosmic ray correction, spectral accumulation and background estimation, etc.) are conducted to extract iron peak count rates. Neutron correction is achieved with the help of thermal neutron density data acquired by Lunar Prospector Neutron Spectrometer. We map the absolute abundance of iron (FeO) in terms of ground truths mostly from Apollo and Luna soils and regolith breccias, FeO-poor feldspathic lunar meteorites and young FeO-rich mare basalt detected in-situ by Chang'E-3 Particle Induced X-ray Spectrometer (PIXS). The global iron map indicates that majority of iron-rich regions match well with mare basalt deposits. Especially, Oceanus Procellarum and central Mare Imbrium dominate the high values (FeO > 23 wt.%) of iron abundance and the richest FeO (30.2 wt.%) region locates in the young mare basaltic unit south of Aristarchus crater. South Pole Aitken basin is relatively enriched in iron (maximum of 12.7 wt.%) compared to the highlands poor of iron (FeO < 8 wt.%). When coordinated with the iron map derived by Lunar Prospector Gamma Ray Spectrometer (LPGRS), iron map determined by CE2GRS reveals slightly lower abundances (average difference of 0.7 wt.%) than the result of LPGRS at global level.

Chang'E-2, gamma ray, iron map, mare basalt

PACS: 96.20.Br, 95.85.Pw, 95.55.Pe

doi: 10.1360/SSPMA2015-00458