第21卷 第4期 空 间 科 学 学 报 Vol.21, No.4
2001 年 10月 CHINESE JOURNAL OF SPACE SCIENCE Oct., 2001

月球表面元素含量的定量分析方法*

胥 涛 李春来
(中国科学院地球化学研究所 贵阳 550002)

摘 要

综述了月球元素定量研究在探测手段和定量方法等方面取得的最新进展. 在探测手段方面, 介绍了美国最近发射的克莱门汀和月球勘探者探测器使用的多谱段成像仪、中子探测仪以及 γ 谱仪的主要性能. 在定量方法方面, 讨论 Fe 、 Ti 以及稀土元素等在定量方法上的进展.

关键词 月球元素定量研究—月球探测

研究月球表面各种元素, 特别是一些关键元素如 Ti 、 Fe 、稀土元素的含量及分布特征, 有助于更好地了解月球的总体组成以及月球的形成与演化过程, 也有助于弄清楚月球上可够人类利用的资源的分布情况. 最近美国相继发射了克莱门汀 (Clementine, 1994-01-25) 和月球勘探者 (Lunar Prospector, 1998-01-07) 探测器, 这两个探测器的主要任务之一是获取一些元素在整个月球表面的含量及其分布特征. 随着数据分析工作的展开及深入, 对一些主要元素的遥感定量分析取得了不少进展, 本文将综合这些最新进展, 特别是有关元素 Fe 、 Ti 、 Th 及稀土元素的定量分析技术和方法.

1 元素探测手段的进展

20 世纪 70 年代阿波罗 15 、 16 曾采用 γ 谱仪和 X 射线荧光进行元素探测, 但探测精度、覆盖区域以及可有效探测元素的种类都很有限, 无法与克莱门汀和月球勘探者的探测器相提并论, 后者分辨率高且近乎能覆盖整个月球表面.

美国克莱门汀和月球勘探者探测器本着 “好、快、省” 的设计原则, 采用了许多新技术, 也代表了未来月球及行星探测的新趋势.

1.1 克莱门汀携带的主要探测器及性能

1.1.1 紫外—可见光 CCD 相机

该相机使用紫外、可见光区的 5 个波段研究月表, 可以获得月表岩石学信息, 同时可得到用于形态学和撞击坑统计的图像.

从月表反射过来的光线通过一个兼反射光和折射光的望远镜 (光圈孔径 416 mm), 以及一个硅酸盐棱镜聚焦在 Thompson CCD 相机上. 相机通带为 250—1000 mm, 有 6 个滤光片按不同角度安装在一个滤光片轮上. 滤光片的中心波长以及通带宽度 (FWHM, 半高宽) 分别是 415 nm(40 nm) 、750 nm(10 nm) 、900 nm(30 nm) 、950 nm(30 nm) 和 1 000 nm(30 nm), 还有一个 400—950 nm 的宽波段滤片.

* 中国科学院知识创新工程资助项目 (KZCX2-115)
2001-03-01 收到原稿, 2001-07-25 收到修定稿

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

所使用的 Thompson CCD 相机是一种帧转移设备，望远镜的视场是 $4.2° \times 5.6°$，在大约 400 km 的普通月球轨道高度，月面轨迹较短的一侧 (cross-track width) 大约 40 km 宽，像素维数是 288×384 像素，像素分辨率 (与轨道高度有关) 在 100—325 m 之间.

克莱门汀在两个月之内就能完成对整个月球的拍摄. 信噪比随月表的反照率和相角变化，分布在 25—87 之间.

1.1.2　近红外 CCD 相机

近红外相机利用近红外的 6 个波段观测月表，可以获取月表岩石学方面的信息. 相机也使用一个兼反射光及折射光的棱镜，它使光线聚焦在被机械冷却 (最低 70 K) 的 Amber InSb CCD 焦平面阵列上. 相机通带为 1 100—2 800 nm，装有 6 个滤光片，按不同角度安装在一个滤光片轮上，滤光片的中心波长以及通带宽度 (FWHM) 分别是 1100 nm(60 nm)、1250 nm(60 nm)、1500 nm(60 nm)、2000 nm(60 nm)、2600 nm(60 nm) 和 2780 nm(120 nm).

相机光圈孔径为 29 mm，焦距为 96 mm，视场 (FOV) 为 $5.6° \times 5.6°$. 在 400 km 的普通轨道高度，地面轨迹较短的一侧大约是 40 km. CCD 的像素维数为 256×256 像素，在一个单独的照相轨道，像素分辨率 (与轨道高度有关) 在 150—500 m 之间. 2 个月之内，近红外 CCD 相机可以覆盖整个月表，信号变化范围是 15 000. 信噪比取决于月表的反照率和相角，在 11—97 间变化.

1.1.3　高分辨率相机

该相机的主要部件是一个带影像增强设备的望远镜以及一个帧转移 CCD 成像仪. 这套成像系统主要用于研究月球表面某些预先选择的区域，能够详细研究月球的表面过程，如果结合其他光谱数据，可进行高分辨率的月表组成与地质学研究.

成像仪是一个增强 Thompson CCD 相机. 有一个滤光片轮，可按 6 个不同方位安装滤光片. 这组滤片由 1 个通带为 400×800 nm 的宽带滤片以及 4 个窄带滤片组成，滤片的中心波长以及通带宽度 (FWHM) 分别是 415 nm(40 nm)、560 nm(10 nm)、650 nm(10 nm)，以及 750 nm(20 nm).

相机视场是 $0.3° \times 0.4°$，在大约 400 km 的普通月球轨道高度，轨道宽度大约为 2 km 宽. 像素维数是 288×384 像素 (像素尺寸为 $23 \times 23\mu$m)，所以像素分辨率为 7—20 m(与轨道高度有关). 信噪比的变化范围为 13—41.

1.2　月球勘探者探测器携带的主要探测仪器及性能

1.2.1　γ 谱仪 (GRS)

阿波罗 15、16 都曾携带 γ 射线探测器，它们使用闪烁体为 NaI(Tl) 的闪烁检测器，工作区间为 0.2—10.0 MeV，能量分辨率不高. 月球勘探者 (以下简称 LP) 检测器使用铋的锗酸盐晶体 (BGO) 作为闪烁体，它的密度比 NaI(Tl) 高，能更有效地阻止 γ 射线，所以检测灵敏度显著提高. LP γ 谱仪实现对 0.3—9 MeV 的 γ 射线测量，能量分辨率 (以 $\Delta E/E$ 表示) 在 0.662 MeV 为 10.5%，且随能量的增加按 $E^{-1/2}$ 变化.

阿波罗与 LP 的 γ 射线检测器都是各向同性检测器，所以探测器的地面分辨率基本上只由轨道高度决定. LP 地面分辨率在高轨道 (100 km) 为 150 km 左右，在低轨道 (10—30 km) 达到 45 km 左右.

LP γ 谱仪使用锗酸铋 (BGO) 晶体闪烁体为主探头，反符合屏蔽环 (ACS)—— 井形硼酸盐塑料闪烁体 (BC454) 为另一个探头，两个闪烁体各接一个光电倍增管 (PMT)，对收集到的光信号进行光电转换及放大.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

由于 BGO 晶体的能量分辨率随温度降低而增强，该 γ 谱仪要求保持在低温 ($-40°C$) 下工作. 因为对弱 γ 射线的测量要求仪器的环境本底极弱，所以采用碳-环氧树脂材料对仪器进行封装，以减少宇宙线及其次级射线的干扰，而且该封装材料中 Fe 、Ti 、Ca 、Al 和 Mg 等杂质元素含量极低，此外还利用伸杆将仪器探头部分置于卫星外一定距离 (2.5 m) 处，以减少宇宙线粒子与卫星材料相互作用产生的次级射线的影响. 最终，该 γ 谱仪还要求谱仪探头处能量高于 100 keV 的光子计数率低于 $0.03\,\mathrm{cm^{-2}\cdot s^{-1}}$.

1.2.2 中子探测器 (NS)

LP 中子探测器由两个气体氦-3 正比计数器组成，其中一个由镉包裹，另一个由锡包裹. 中子与氦-3 碰撞时，会发生核反应，产生一个氚核、一个质子并释放能量，能量的脉冲式爆发表明检测到了一个中子. 两个检测器中镉计数器只能检测到超热中子，而锡计数器能让所有的中子通过，因此它们之间的差值即为热中子通量. 快中子通量是由另外的装置，即通过 GRS 的反符合屏蔽环 (ACS) 得到的.

LP 的 NS 检测器也是各向同性检测器，所以空间分辨率与 GRS 差不多，在 30 km 高的成像轨道，热中子分辨率约为 110 km，超热中子约为 55 km.

2 元素定量方面的进展

2.1 Ti 与 Fe 的遥感定量方法的研究进展

2.1.1 Ti 的的遥感定量

Charette[1] 于 1974 年发现随 Ti 含量增加月壤光谱变 “蓝”(UV/VIS 比值变大)，并建立了月海月壤 UV/VIS 比值与 TiO_2 含量的经验关系式. 这一经验关系式曾在 20 世纪 70 年代用于从望远镜或阿波罗探测器获得的光谱数据中估算 TiO_2 在月表有限区域的含量分布，但它的应用局限于月海区. 20 世纪 90 年代初，Pieters[2] 和 Johnson 等 [3,4] 对 Charette 经验关系式做了进一步的发展. 最近，Lucey 等 [5,7] 与 Blewett 等 [6] 分别提出了计算月球 Ti 含量更新的方法，这是由于美国发射的伽利略和克莱门汀探测器获得了大量 UV 、VIS 和 NIR 数据，使研究人员可以更好地研究月表的化学组成与反射光谱特征之间的关系，

研究表明月球表面的化学组成对 UV 、VIS 和 NIR 波段反射光谱特征起主要支配作用，Hapke 等 [9] 提出了一个简单的理论模型来阐明这种支配作用，他们认为月表 UV 、VIS 和 NIR 波段光谱特征主要受下面 4 种组份的影响：第 1 类组份为亚铁，它在 UV 波段有一强烈的自旋允许吸收，在 NIR 波段约 1μm 波段附近有一弱的自旋禁止吸收，由于 UV 和 VIS 吸收重叠，使得整个矿物变暗. 第 2 类组份是亚微观的单质 Fe 颗粒，它在月壤成熟过程中因 “太空风化” 而产生. 这些颗粒非常小 (约 10^2Å)，会使月壤变暗，削弱光谱对比度，产生一个强且反射率随波长增加而增加 (也称为光谱 “红”) 的、贯穿近紫外、可见和近红外区域的斜坡，但这些光谱效应的产生并不意味着月壤中铁元素的总含量发生了变化，而是 Fe 的价态发生了变化. 第 3 类组份是硅酸盐矿物 (特别是硅酸盐玻璃) 中的 Ti. 在含亚铁的玻璃中，Ti 的存在会产生强烈的 $Fe^{2+}\rightarrow Ti^{4+}$ 电荷转移跃迁，出现在 0.3—0.6 μm，这个吸收波段会使反射光谱的 UV-VIS 波段变暗、变 “红”. 第 4 类组份是不透明矿物 (在月球上主要是钛铁矿). 不透明矿物的光谱特征接近中性 (即从 UV 到 VIS 反

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

射光谱比较平坦). 对以含铁硅酸盐为主的月壤, 不透明矿物的存在使月壤变暗, 削弱它们的对比度, 并会使月壤的反射光谱变 "蓝"(UV/VIS 变大). 在上述 4 种物质中, 单质 Fe 与含 Ti 玻璃的浓度与月壤的成熟度密切相关, 所以月壤的成熟度能显著影响月壤的反射光谱.

Hapke 提出的上述模型过于简单, 事实上探测到的月球反射光谱特征是上面 4 种主要组份与其他一些因素相互作用的结果. 所以 Pieters 与 Wells 分别对 Hapke 的模型做了进一步的完善. Pieters 等 [8,2] 提出了光谱对比度模型, 他们也引用 Hapke 及其合作者提出的上述因素来研究月球的反射光谱, 但他们更强调反射特征的本质与散射作用的细节对理解月球反射光谱的重要性. 他们认为很多月海月壤组份的反射率极低, 只有很少的光线能透过月壤, 所以月海月壤的光谱特征不能用单个组份的光谱特征来理解, 但光谱特征可以用暗色组份对光谱对比度的影响来表示. 富 Fe 和 Ti 的暗色组份会减弱月壤的对比度, 所以与 Fe 含量相近但 Ti 含量偏低的月壤相比, 富 Ti 月壤光谱的 UV-VIS 部分会相对变 "蓝"(UV/VIS 比值变大). 至于高地月壤或 Ti 含量很低的月海月壤, 它们的透射能力要高一些, 更多的光能透射出月壤, 就使得这些区域月壤的光谱特征更直接地受一些单个组份光谱特征的支配. 所以低反射率地区光谱特征的支配机制与高反射率地区是不相同的.

Wells 与 Hake[9] 重新研究了 Charette 等 [1] 的工作, 提出与 TiO_2 含量相关的光谱变化是由于不透明矿物的影响. Lucey 等 [5] 认为如果 Wells 与 Hake 的假说正确, 不透明矿物的影响就不该只局限于月海区域, 在任何类型的月壤中都应存在 TiO_2 含量与反射光谱特征之间的相关性. 这就与前面的 "光谱对比度模型" 有矛盾, 前者认为月球高地相对高的透明度会使月壤中无数相互竞争的组份竟相支配月壤的颜色和光谱特征, 从而会破坏高地光谱特征与不透明矿物间的简单关系.

Lucey 等 [7] 支持 Wells 与 Hake 的观点, 他们利用 Clementine 反射光谱数据导出了同时适用于月海和高地 Ti 的含量公式, 并对 Wells 与 Hake 的观点作了验证.

他们选取分别靠近 6 个月球着陆点 (阿波罗-11 、 12 、 14 、 16, Luna-16 、 20) 很新且较小的撞击坑及围绕这些撞击坑的物质作为研究对象. Lucey 利用上述撞击坑内成熟度不同点的 UV/VIS 比值 (415 nm/750 nm) 以及反射率 (750 nm) 数据 (来自分辨率为 125 m/像素的克莱门汀高分辨率图像), 证实这个波长区域的光谱特征确实受到不透明矿物丰度的强烈影响, 他们导出了一个只与 Ti 含量相关的角度参数 θ, 并发现上述阿波罗取样点的 Ti 含量与对应的 θ 之间确实有很好的相关性, 这种相关性是非线性的, 而且这种非线性趋势与不透明矿物的光谱特征完全一致. 于是, Lucey 进一步导出了表示为 θ 函数的 Ti 的定量关系式, 并分析其误差为 1—2 wt%.

$$\theta_{\mathrm{Ti}} = \arctan\left(\frac{R_{415}/R_{750} - E}{R_{750} - F}\right), \tag{1}$$

式中, E 、 F 为常数, 分别为假想的暗色、光谱红的端员组份对应的光谱比值及反射率, TiO_2 的重量百分比为

$$W_{\mathrm{TiO_2}} = \theta_{\mathrm{Ti}}^2 \times A - \theta_{\mathrm{Ti}} \times B + C, \tag{2}$$

式中, A 、 B 、 C 为常数, 与标准图谱有关, Lucey 等采用 62331 的 John Adams 光谱.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

2.1.2 Fe 的遥感定量

Lucey 等 [10] 通过对月球样品反射光谱的研究发现：反射率 (750 nm) 随月壤成熟度增加而降低， NIR/VIS 比值 (950 nm/750 nm) 随月壤成熟度的增加而增加；但随 FeO 含量的增加，反射率和 NIR/VIS 比值都降低. 利用 Adams 等 [16] 得到的月壤的单向半球光谱，他们导出了一个可根据 VIS 反射率与 NIR/VIS 比值得到 FeO 丰度的算式，该算式被用来还原低分辨率克莱门汀数据，结果成功地重复了月球着陆点 Fe 的平均含量，误差在 1—2 wt% 之内. Lucey 等在该方法中定义了一个角度参数来消除月壤成熟度的影响，并取得了很好的效果.

上述方法基于以单向半球反射率为单位的实验室光谱，它和通过遥感获得的双向半球反射光谱之间有非线性相关性. 对于该缺陷， Blewett 等 [6] 利用克莱门汀在阿波罗与 Luna 着陆点获得的高分辨率图像 (125 m/像素) 和已知取样点的 FeO 丰度作了修补，同时他还改进了 Lucey 等对角度参数的定义. Blewett 等得到的角度参数以及 Fe 的定量公式分别表示如下：

$$\theta_{\mathrm{Fe}} = \arctan\left(\frac{R_{950}/R_{750} - A}{R_{750-B}}\right), \tag{3}$$

式中， A 、 B 为常数，分别为假想的暗色、光谱红的端员组份对应的光谱比值及反射率，FeO 的重量百分比含量为

$$W_{\mathrm{FeO}} = \theta_{\mathrm{Fe}} \times C - D, \tag{4}$$

式中， C 、 D 为常数，与标准图谱有关， Lucey 等采用 62331 的 John Adams 光谱.

2.1.3 对 Lucey 的 Ti 、 Fe 定量方法的评价与检验

对于 Ti 的定量， Lucey 指出光谱比值与 Ti 含量之间存在明显的相关性是因为含 Ti 的不透明矿物 (主要是钛铁矿) 为不透明矿物的主体. 然而并不是所有的不透明矿物都含 Ti，而且含 Ti 的不透明矿物也不是 Ti 的惟一载体. 当 Ti 含量高时， Ti 会进入到其他矿物相，如辉石. 所以 Lucey 认为他所导出的公式用于测量 Ti 含量时仅在低 Ti 和中等 Ti 含量区间有较高的准确性.

Lucey 关于 Fe 的定量方法只能检测辉石与橄榄石中的亚铁，但不能表征斜长岩中的 Fe 杂质或陨石碎片中粗粒的金属 Fe，虽然这些组份的含量很低，还会有影响. 此外，上述方法不能检测钛铁矿中的 Fe. 月壤中加入钛铁矿会使月壤暗化，使得 NIR/VIS 比值趋向钛铁矿的值 (~ 1.0)，不透明矿物的增加会对定量产生明显的影响，使 Fe 的表观浓度增加，然而由于钛铁矿本身富 Fe，不透明矿物的增加也会增加 Fe 的实际浓度，所以 Fe 参数与 FeO 之间的关系几乎没有受到影响. 但是如果不透明矿物含 Fe 很少，则根据上述光谱特征得到的 Fe 含量会偏高.

此外在火成碎屑物富集的区域，由于它们特殊的光谱特征，不适合应用上述 Ti 、 Fe 定量方法.

对于 Lucey 提出的 Ti 、 Fe 定量方法，更大的缺陷在于它们都是选取了数目有限的阿波罗与 Luna 着陆点作为研究区域，这些点都在月球正面. 由于月球表面物质的矿物和化学组成变化与阿波罗和 Luna 着陆点处不完全一致，所以基于这些点的光谱特征与矿物组成得出的 Fe 与 Ti 的定量公式不可避免地具有局限性. 在某些区域应用上述公式可能会出现较大的误差. 来自其他探测仪器的数据证实了这一点.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Lawrence 等 [11] 利用中子探测数据研究了 Sm 与 Gd 的定量, 发现根据中子探测得到的热中子吸收横截面积与根据 Lucey 的 Ti、Fe 定量方法得到的 Fe 与 Ti 的含量有矛盾, Fe 和 Ti 的含量偏高, 特别是在月海区. Lawrence 分析后认为可能性最大的是 TiO_2 丰度偏高.

Gasnault 等 [12] 和 Maurice 等 [13] 研究 LP 快中子 (0.5—8 MeV) 数据之后也认为 Lucey 得到的 TiO_2 含量可能太高了, 无法解释测得的快中子通量. 由于快中子数据是通过一个完全不同的探测器 (GRS) 获得, 所以它与中子探测数据一样反映 Lucey[6] 等的 Ti、Fe 定量方法, 特别是 Ti 的定量方法还有缺陷.

此外, Ti、Fe 定量还需要考虑其他一些因素, 如地形、月壤粒度等, 尤其是地形, Lucey 导出钛铁含量的表达式时还假设月球表面是平滑的, 所以地形所引起的亮度的变化会引起误差. Lucey 对此作了详细讨论.

2.2　Sm、Gd 和 KREEP 岩的遥感定量研究

Sm 和 Gd 都是稀土元素, 而月球上稀土元素主要富集在 KREEP 岩石 (为钾 (K)、稀土元素 (REE) 和磷 (P) 的元素符号的缩写) 中, 所以探测 Sm 和 Gd 除了可以获得这些元素在月表的含量及分布特征, 还可以间接指示 KREEP 岩在月球表面的分布.

稀土元素 Gd 和 Sm 对热中子有异常高的吸收, 同位素 ^{155}Gd 与 ^{157}Gd(分别占 Gd 的 14.7% 和 15.7%),^{149}Sm(占 Sm 的 13.8%) 能够发生核的共振, 有效增加热中子吸收横截面积, 它们在 0.0253 eV 分别为 58 000、240 000 和 408 000 barn(1 barn= 10^{-28}m^2). 元素对热中子吸收能力的大小一般用宏观吸收横截面积 a 表示, 如果将 $\sum_{\text{eff}}$ 定义为月球表面所有组份对热中子吸收横截面积贡献的总和, 则 $\sum_{\text{eff}}$ 是月壤中所有组份吸收中子的能力按重量百分比的加权统计之和, 表示为

$$\sum_{\text{eff}} = \sum_{a_i} f_i N_{\text{A}}/A_i, \tag{5}$$

式中, f_i 是元素 i 的重量百分比, A_i 是元素 i 的质量数, N_{A} 是阿佛加德罗常数.

在富 KREEP 岩的月壤中, 虽然 Gd 与 Sm 是微量元素, 但它们对热中子吸收横截面积的贡献很大. 在 Gd 与 Sm 相对富集的地区, 它们能显著地影响 $\sum_{\text{eff}}$ 的大小.

月壤中中子迁移和吸收的模拟试验表明 $\sum_{\text{eff}}$ 与超热中子/热中子比值之间有下列线性关系,

$$\sum_{\text{eff}} = A \times (f_{\text{epi}}/f_{\text{thermal}}) + C, \tag{6}$$

式中, $f_{\text{epi}}/f_{\text{thermal}}$ 是超热中子与热中子计数率的比值.

除了 Gd 和 Sm, Ti、Fe 和 Ca 也能显著地影响热中子吸收. 如果知道它们的丰度, 可得到它们对热中子吸收横截面积的贡献, Ti、Fe 丰度可以从反射光谱或 γ 探测数据获得. 如果 Fe 含量已知, 利用下面在月球样品中发现的经验关系可以得到 Ca 的含量.

$$W_{\text{CaO}} = 20\text{wt\%} - 0.91 \times W_{\text{FeO}}, \quad W_{\text{FeO}} < 10\text{wt\%}; \tag{7}$$

$$W_{\text{CaO}} = 10.9\text{wt\%}, \quad W_{\text{FeO}} \geqslant 10\text{wt\%}. \tag{8}$$

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

月壤中 Gd 、 Sm 、 Ti 、 Fe 和 Ca 是主要的热中子吸收物质，另外还有一些次要的热中子吸收物质. 将所有非稀土元素物质对吸收横截面积的贡献记为 $\sum_{\text{eff}}(\text{no REEs})$, 对月球样品的分析发现， $\sum_{\text{eff}}(\text{no REEs})$ 与 $\sum_{\text{eff}}^{*}$ 之间也有简单的线性相关关系. Elphic 等利用最小平方拟合，得到了下面关系:

$$\sum_{\text{eff}}(\text{no REEs}) = 0.951 \times \sum_{\text{eff}}^{*} + 17.5 \times 10^{-4}(\text{cm}^2/\text{g}). \tag{9}$$

利用上式，可以从 $\sum_{\text{eff}}^{*}$ 得到 $\sum_{\text{eff}}(\text{no REEs})$, 而 $\sum_{\text{eff}}(\text{no REEs})$ 与 $\sum_{\text{eff}}^{*}$ 之间的差值在理论上对应着 Gd 与 Sm 对吸收横截面积的贡献 $\sum_{\text{eff}}(\text{Gd+Sm})$.

在月壤样品中，高浓度的不相容元素之间具有高度相关性，如 Th 与 Sm 之间的相关系数为 0.99, Gd 与 Sm 之间为 0.998. Elphic 等采用一组样品的镁铁质撞击熔融角砾岩中 Gd 与 Sm 比值的平均值作为 Gd 与 Sm 的比值 ($\sim$ 1.17). 由此可以从 $\sum_{\text{eff}}(\text{Gd+Sm})$ 得出 Gd 与 Sm 各自的含量.

Elphic 等 [14] 基于上述方法，利用克莱门汀反射光谱数据 (CSR) 得到的 Fe 和 Ti 的含量 (根据 Lucey[7] 的 Ti 、 Fe 定量方法), 得到了 Sm 的全球含量分布图. 由于目前无法直接研究月球表面 Gd 和 Sm 的含量，所以上述方法是目前惟一可确定月球 Gd 与 Sm 含量的方法，但该方法需要知道 Ti 、Fe 、Ca 等的含量，而这些元素的定量本身还有缺陷，且各种经验公式也都是从数目有限的月球样品中获得的，在整个月表区域未必准确，所以准确确定 Gd 与 Sm 的含量离不开其他元素探测工作的改进，特别是 Ti 与 Fe 的定量.

2.3 其他元素的遥感定量分析

O 、Mg 、Al 、Ca 、Na 、Th 、U 等元素主要通过 γ 谱仪进行测量. Th 、U 、K 通过放射性衰变产生 γ 射线，其他元素与中子或宇宙射线相互作用，产生 γ 射线. 由于同一核素常常有多条谱线，测量时须选用强度大且易分辨的谱线. Ti 和 Fe 除通过克莱门汀反射光谱数据获得其含量外，也可以利用 γ 谱仪，但分辨率无法达到前者的水平.

Lunar Prospector 号 γ 谱仪由于仪器性能的改进，可探测元素的种类增加了，阿波罗 15 、16 不能有效地探测的 Th 、Al 、Mg 与 Ca 都可以直接探测了. 此外，对于 γ 射线探测数据的还原也取得了进展. γ 射线能谱由各元素产生的线谱以及连续背景组成，因此可先设法扣除连续背景 (随能量的增加按指数关系单调递减的背景计数值), 这样就可以得到基本上由各元素谱线组成的 "净能谱", 然后再与各元素已知的特征谱线及理论通量进行对照，从而计算出各元素的含量. Reedy[15] 通过理论计算得出月球上各种 γ 射线源发出的主要 γ 射线的理论强度，建立一个月球表面 γ 射线强度的标准数据库. 从阿波罗 15 、16 到最近的 LP GRS, γ 探测数据的分析都是基于 Reedy 的方法. Reedy 方法需要扣除连续背景，对于连续背景的扣除阿波罗 γ 射线探测是根据获得的数据在地面通过理论估计得出，然后再加以扣除. 而 Lunar Prospector 的 GRS 能在观测时通过仪器获得的数据直接得到连续背景并加以扣除，所以可以有效减小扣除时的误差. 最近， Lawrence[11] 讨论了利用 2.6 MeV γ 射线对 Th 进行高分辨率测量的问题.

至于氢的探测， Feldman 等 [17] 讨论了利用中子探测器测量氢含量的原理及方法，

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

该方法在 Lunar Prospector 探测中得到了应用，即通过探测氢来间接验证月球表面特别是两极区域水的存在.

3　总结与展望

元素定量研究的质量和可靠性与使用的探测手段以及定量方法的可靠性有关. 每种探测手段所依据的原理与仪器性能决定了它的探测本领与特点. γ 射线探测可同时对很多元素进行探测，但空间分辨率不高. 紫外、可见与红外反射光谱可用于 Fe 与 Ti 的高分辨率探测，但在光度校正方面有待提高. 中子探测是一种新的探测手段，但目前只能用于研究 H 的定量以及研究某些元素 (Fe 、 Ti 、 K 、 Gd 和 Sm) 的相对含量. 至于阿波罗 15 、 16 使用过的 X 射线荧光探测，在太阳活动平静时只适用于 Mg 、 Al 和 Si 的定量研究，而在耀斑期间还能对 Fe 、 Ti 、 Ca 以及 Cr 定量. 上述方法各有所长，所以探测时应该使用多种探测仪器，并将它们的分析结果相互对照与校正，这样可以更好地研究元素的定量并提高可靠性. 例如中子探测、 γ 探测数据与 Lucey 等的 Ti 、 Fe 定量结果之间的差异就很有意义，可以根据这些差异反过来去推测引起这些差异的化学与矿物学特征.

至于定量方法，也可理解为定量模型. 各种探测仪器获得的原始数据要还原成元素的含量，就离不开定量模型，所以定量模型的可靠性直接决定了元素定量分析数据的质量，定量模型的建立需要对被探测元素与探测源作用并在探测仪器中产生可有效检测信号的机制有透彻理解，并需在被测元素的含量与探测获得的信号之间建立起准确的数学关系. 而这些工作就目前而言还需做很多努力，如对月球反射光谱特征形成机制的探讨.

今后月球元素的定量研究重点仍将注重于定量方法的可靠性以及仪器性能的改进或采用新的探测方法. 目前对克莱门汀和月球勘探者探测数据的分析工作还在进行之中，有可能会取得一些更新的成果. 此外，欧洲计划于 2002 年发射月球探测卫星 SMART-1，它将搭载新一代高性能的 X 射线荧光成像仪 D-CIXS 、红外成像仪 SIR 以及一个微型多波段成像仪 AMIE，重量分别仅为 3 kg 、 2 kg 和 450 g. D-CIXS 使用扫描 SCDD 检测器 (Swept Charge Device Detectors) 以及先进的微型准直器，能量分辨率高于 200 eV. SIR 将测量 900—2400 nm 之间的红外反射光谱，光谱分辨率达 0.06μm，优于克莱门汀，空间分辨率为约 300 m. AMIE 装有 3 个滤光片 (450 nm 、 750 nm 、 950 nm)，分辨率可达 50 m/像素. D-CIXS 与 AMIE 相结合将首次提供高分辨率的月球表面化学组成数据. SIR 与 AMIE 相结合则能很好地区分月表的各种组份与岩石类型. 如果 SMART-1 能成功发射，将有力地推动月球探测以及元素含量的研究工作.

参　考　文　献

[1] Charette M P, MoCord T B, Pieters C, Adams J B. Application of remote spectral reflectance measurements to lunar geology classification and determination of titanium contents of lunar soils. *J. Geophys. Res.*, 1974, **79**:1605—1613

[2] Pieters C M *et al.* Crustal Diversity of the Moon: Compositional Analyses of Galileo SSI Data, *J. Geophys. Res.*, 1993, **98**(E9):17 127—17 148

[3] Johnson J R, Larson S M, Singer R B. Reevaluation of spectral ratios for lunar mare TiO_2 mapping. *Geophys. Res. Lett.*, 1991, **18**(11):2153—2156

[4] Johnson J R, Larson S M, Singer R B. Remote-sensing of potential lunar resources, I: Near-side compositional properties. *J. Geophys. Res.*, 1991, **96**:18 861—18 882

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

[5] Lucey P G, Blewettet D T, Johnson J R, Taylor G J, Hawke B R. Lunar titanium content from UV-VIS measurements (abstract). *Lunar Planet. Sci.*, 1996, **27**:781—782
[6] Blewett D T, Lucey P G, Hawke B R, Jolliff B L. Clementine images of the Lunar sample-return stations: Refinement of FeO and TiO_2 mapping techniques. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**:16 319—16 325
[7] Lucey P G, Blewett D T, Hawke B R. Mapping the FeO and TiO_2 content of the lunar surface with multispectral imagery. *J. Geophys. Res.*, 1998, **103**(E2):3679—3699
[8] Pieters C M. Mare basalt types on the front side of the moon: A summary of spectral reflectance data. In: Proc. 9th Lunar. Sci. Conf., 1978. 2825—2849
[9] Wells E, Hapke B. Lunar soil: Iron and Titanium bands in the glass fraction. *Science*, 1977, **195**:977—979
[10] Lucey P G, Taylor G J, Malaret E. Abundances and distribution of iron on the moon. *Science*, 1995, **268**:1150—1153
[11] Lawrence D J, Feldman W C. High resolution measurements of absolute thorium abundances on the lunar surface. *Geophys. Res. Lett.*, 1999, **26**:2681—2684
[12] Gasnault O, Uston C d, Feldman W C, Maurice S. Lunar fast neutron leakage flux calculation and its elemental abundance dependence. *J. Geophys. Res., Planets*, 2000, **105(E2)**:4263—4276
[13] Maurice S *et al.* High-energy neutrons from the Moon. *J. Geophys. Res., Planets*, 2000, **105(E8)**:20 365—20 371
[14] Elphic R C *et al.* Lunar rare earth elements distribution and ramifications for FeO and TiO_2: Lunar Prospector neutron spectrometer observations. *J. Geophys. Res., Planets*, 2000, **105(E8)**:20 333—20 365
[15] Reedy R C, Arnold J R. Expected γ ray emission spectra from the Lunar surface as a function of chemical composition. *J. Geophys. Res.*, 1973, **78**:5847—5866
[16] Adams J B, McCord T B. Vitrification darkening of in the lunar highlands and identification of the Descartes material at the Apollo 16 site. Proc. 4th Lunar. Sci. Conf., 1973. 163—177
[17] Feldman W C, Reedy R C. Lunar neutron leakage fluxes as a function of composition and hydrogen content. *Geophys. Res. Lett.*, 1991, **18**:2157—2160

ABUNDANCES AND DISTRIBUTION OF ELEMENTS ON THE LUNAR SURFACE

XU Tao LI Chunlai

(*Institute of Geochemistry, The Chinese Academy of Sciences, Guiyang* 550002)

Abstract

Recently USA launched two Moon probes which are "Clementine" and "Lunar Prospector". They carried some newly developed or innovated instruments to map the elements abundances on the moon, such as gamma-ray spectrometer, neutron spectrometer and UV-VIS imager. Based on the data of high quality those instruments gained, new progress have been made about the quantification of lunar elements.

This paper summarizes those up to date progress in two ways. First the instruments used by Lunar Prospector and Clementine to map the elements abundances will be introduced, then the progress achieved in the theory of elements quantification will be discussed in detail, especially about the quantification of iron, titanium and Ree.

Key words Lunar element quantification, Lunar exploration progress

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com