

南极月球陨石 MIL05035 矿物学、岩石学及演化历史*

陈宏毅^{1,2} 缪秉魁^{1,2**} 谢兰芳^{1,2} 夏志鹏^{1,2}

CHEN HongYi^{1,2}, MIAO BingKui^{1,2**}, XIE LanFang^{1,2} and XIA ZhiPeng^{1,2}

1. 桂林理工大学 广西隐伏金属矿产勘查重点实验室 桂林 541004

2. 桂林理工大学地球科学学院 桂林 541004

1. Guangxi Key Laboratory of Hidden Metallic Ore Deposits Exploration, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China

2. College of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China

2013-12-02 收稿, 2015-03-04 改回.

Chen HY, Miao BK, Xie LF and Xia ZP. 2015. Mineralogy, petrology and evolution history of Lunar meteorite MIL05035 from Antarctica. *Acta Petrologica Sinica*, 31(4): 1171–1182

Abstract Petrologically, the Lunar meteorite Miller Range (MIL) 05035 is low-Ti augite basalt, characterized by coarse gabbro texture and massive structure, non-breccia. It consists mainly of pyroxene (60.2%), plagioclase (27.3%), olivine (6.05%), quartz (4.36%), ilmenite (1.25%), troilite (0.84%), with minor spinel enriched Fe and Ti contents and apatite. Symplectites are composed of hedenbergite, fayalite and quartz. The pyroxene grains are distinctly heterogeneous with exsolution lamellae. The cores are enriched in MgO and depleted in CaO and FeO ($Fs_{30.2-60.8}Wo_{14.2-35.0}$) contents. By contrast, the rims are rich in CaO and FeO, and depleted in MgO contents. The maskelynites are weakly heterogeneous: the rims are relatively enriched in Na₂O and K₂O ($Ab_{9.3-12.3}, Or_{0.31-1.03}$) and the cores are inverse ($Ab_{7.6-10.6}, Or_{0.12-0.36}$). The olivine occurs as coarse grains ($Fa_{95.5-96.6}$) and fine grains ($Fa_{88.9-93.5}$) in symplectites. The quartz can also be divided into three types: veined, cloddy and helminthoid. The quartz vein is changed into glass of silica. The residual quartz has wide Raman spectra (448 ~ 502 cm⁻¹) implying that these quartz experienced strong shock metamorphism and retrogressive metamorphism; cloddy quartz locates in the boundary between olivine and plagioclase or olivine, which formed filling structure with plagioclase; helminthoid quartz distributes in the symplectite assemblages. The identical composition, continued structure, impact darkening Phenomena, correlation with fusion vein and denticular cleavage trend indicate that symplectites are derived from pyroxene grains induced by shock retrogressive metamorphism. The integration of petrographic observation, mineral chemistry and MELTS modelling indicate that the magma evolution processes experienced following scenarios: when the temperature decreased, spinel crystallized from parent magma, augite and anorthite were followed; as the temperature fell down, pigeonite, ferriferous augite and hedenbergite were generated, the evolution of anorthite stopped or generated a bit of bytownites and labradorites. When the temperature continued decreasing, olivine crystallized from residual magma, followed by the ilmenite and troilite, quartz was enriched in Al and K intruded along the fractures between the augite, olivine and plagioclase grains. When the rock exposed on the surface of the moon, because of the shock metamorphism, the plagioclases were transformed into maskelynites, quartz partly changed into glass and presence of fusion veins, which indicate that MIL05035 experienced strong shock metamorphism, with the degree is at least S₅. This study provides convincing evidence for the early lunar magma evolution and later shock metamorphism.

Key words Lunar meteorite; MIL05035; Symplectite; Magma evolution; Shock metamorphism

摘要 月球陨石 MIL05035 岩石类型上属于普通辉石低钛玄武岩粗粒辉长结构, 无角砾化。主要矿物为辉石 (60.2%)、斜长石 (27.3%) 和橄榄石 (6.05%)。次要矿物为石英 (4.36%)、钛铁矿 (1.25%) 和陨硫铁 (0.84%)。含极少量富 Ti、Fe 尖晶石和磷灰石。广泛发育由钙铁辉石 + 铁橄榄石 + 石英组成的后成合晶三相集合体。辉石颗粒具有明显的化学成分不均匀性和出溶片晶。核部相对贫铁钙富镁 ($Fs_{30.2-60.8}Wo_{14.2-35.0}$)。边部富铁钙贫镁 ($Fs_{47.5-64.9}Wo_{22.8-44.3}$)。熔长石化斜长石具有微弱的成

* 本文受国家自然科学基金项目 (41173077) 和广西隐伏金属矿产勘查重点实验室主任基金项目 (13-A-01-02) 联合资助。

第一作者简介: 陈宏毅, 男, 1980 生, 博士生, 实验师, 陨石学和天体化学研究方向, E-mail: chy@glute.edu.cn

** 通讯作者: 缪秉魁, 男, 1966 生, 博士, 教授, 天体化学和地球化学研究方向, E-mail: miaobk@glut.edu.cn

分环带, 边部相对富碱金属元素 ($Ab_{9.3+2.3}$, $Or_{0.31-1.03}$) 核部则相反 ($Ab_{7.6+10.6}$, $Or_{0.12-0.36}$) 含有未熔长石化的残留斜长石。橄榄石具有粗晶橄榄石 ($Fa_{95.5-96.6}$) 和后成合晶中细粒橄榄石 ($Fa_{88.9-93.5}$) 两种产状。石英具有脉状、团块状和蠕虫状等产状: 脉状石英大部分转变为二氧化硅玻璃, 核部石英具有较宽的拉曼谱特征峰 ($448 \sim 502 \text{cm}^{-1}$), 证明其经历了冲击变质与退变质作用; 团块状石英分布于粗粒橄榄石颗粒间或橄榄石与斜长石和辉石接触边界上, 与斜长石构成充填结构; 蠕虫状石英分布于细粒后成合晶中。粗粒辉石边部铁辉石和后成合晶中辉石成分的继承性、结构上的延续性、光学特征上的冲击暗化现象、与冲击熔脉结构上的相关性和后成合晶中发育与粗粒辉石方向几乎一致的解理等方面的证据, 认为后成合晶可能由于铁辉石在冲击压力释放与温度降低后的退变质作用下分解形成。根据岩石矿物结构观察、成分分析和 MELTS 模拟表明该陨石母岩的岩浆演化过程可能为: 母岩浆在温度降低后首先产生极少量钛铁尖晶石、其次是普通辉石和钙长石先后结晶; 随着温度下降, 贫钙铁普通辉石、铁钙铁辉石和铁普通辉石等在普通辉石边部大量结晶, 钙长石边部分异结晶少量培长石或拉长石; 随着温度继续下降, 早期结晶的普通辉石析出易变辉石等出溶片晶, 橄榄石在辉石和斜长石边部结晶; 其后, 钛铁矿和陨硫铁析出, 石英沿橄榄石和钙长石等先结晶矿物裂隙充填。出露月表后强烈的冲击变质作用使斜长石几乎全部转变为熔长石、石英大部分转变为二氧化硅玻璃, 并具有系列面状变形, 冲击熔脉发育, 冲击变质程度至少为 S_5 。本研究为月球的岩浆演化和冲击变质过程提供了重要证据。

关键词 月球陨石; MIL05035; 后成合晶; 岩浆演化; 冲击变质

中图法分类号 P575; P588.145

1 引言

由于缺乏大气层的保护, 月球曾经历了强烈的撞击作用, 月表留下的大量撞击坑就是最直接的证据。因此, 绝大部分月球陨石都是碎屑岩, 只有少部分月球陨石保留了未碎裂的结晶结构。Miller Range (MIL) 05035 是美国南极陨石搜寻项目组 (ANSMET) 于 2005 年底在南极米勒山区收集到的, 属于非常珍贵的具有粗粒结晶结构的月海玄武岩 (Arai *et al.*, 2007; Joy *et al.*, 2007; Liu *et al.*, 2007)。根据国际陨石协会数据库 (Meteoritical Bulletin Database) 的统计, 截至 2013 年 7 月 31 日, 地球上共发现月球陨石 165 个, 其中仅有 25 块属于未碎裂的月球陨石, 代表了 10 次月球溅射作用, 这些月球陨石均为玄武岩或辉长岩 (缪秉魁等, 2013)。根据岩石学特征研究, 这些未碎裂玄武岩质月球陨石具有如下特征: (1) 矿物组合存在明显的相似性, 主要矿物为辉石、斜长石和橄榄石等, 此外还含有石英、钛铁矿、尖晶石、磷灰石和锆石等矿物, 岩性都为玄武岩质; (2) 结构上存在明显相似性, 主要为次辉绿结构和辉长结构, 在矿物结晶粒度上有一定变化, 从细粒至中粗粒不等, 少数陨石中矿物颗粒粗大, 如 Asuka-881757 和本次研究的 MIL05035; (3) 与地球上的玄武岩和辉长岩相比有明显成分差异, 辉石以单斜辉石为主, 具有明显的成分环带, 富铁钙贫镁, 斜长石富钙, 有些如 NWA4734、Dhofar287 和 Asuka881757 等陨石中斜长石具有明显的成分环带, 橄榄石富铁贫镁; (4) 所有这些陨石都具有强烈的冲击变质特征, 如斜长石的熔长石化, 冲击熔脉发育等。MIL05035 的岩石学矿物学特征具有该类型月球陨石的一般特征, 因此该陨石具有开展月海玄武岩研究的普遍科学意义。另外, 月海玄武岩岩浆活动时间主要在 43.5 亿年 (Terada *et al.*, 2007) 至 28 亿年前之间 (Fernandes *et al.*, 2005; Borg *et al.*, 2007)。Apollo 和 Luna 计划采集样品较为年轻, 结晶年龄在 3.5 ~ 3.1 Ga 之间 (Neal and Taylor, 1992;

Korotev, 2002; Joy *et al.*, 2008) MIL05035 结晶年龄为 $3.80 \pm 0.05 \text{Ga}$ (Sm-Nd 法)、 $3.90 \pm 0.04 \text{Ga}$ (Rb-Sr 法) (Nyquist *et al.*, 2007)、 $3.845 \pm 0.014 \text{Ga}$ (Ar-Ar 法) (Fernandes *et al.*, 2009) 是目前发现最老的月海玄武岩之一, 代表了古老的结晶玄武岩, 对 MIL05035 月球陨石的深入研究还可能加深对月球早期的岩浆演化作用的了解 (Korotev, 2005; Day and Taylor, 2007; Liu *et al.*, 2009; Basilevsky *et al.*, 2010)。

MIL05035 陨石是一块珍贵而有特色的月球玄武岩, 体现在: (1) 保留完整的岩浆结晶结构, 矿物组合复杂; (2) 冲击变质效应强烈, 特征显著; (3) 铁橄榄石 + 钙铁辉石 + 石英三相组成的后成合晶强烈发育; (4) 最古老的月球岩石之一。该陨石已开展岩石学、矿物化学、地球化学和同位素年代学等方面研究 (Zeigler *et al.*, 2007; Joy *et al.*, 2008; Liu *et al.*, 2009; Arai *et al.*, 2010; Zhang *et al.*, 2010)。研究表明 MIL05035 陨石是月球早期岩浆广泛分异时期的产物, 可能与 Asuka-881757 和 Yamato-793169 月球陨石为溅射成对陨石 (Nyquist *et al.*, 2007; Arai *et al.*, 2010)。但这块陨石矿物组合复杂, 既有共生结构的辉石和斜长石, 也有后成合晶的钙铁辉石 + 铁橄榄石 + 石英、岩浆晚期分异的橄榄石 + 石英 + 钛铁矿以及冲击变质阶段石英和斜长石的一系列相变矿物组合, 这些矿物相之间的关系并不清晰。本文试图在岩石学和矿物化学研究的基础上, 以不同期次的粗粒结晶矿物、后成合晶和石英、斜长石的相变研究为切入点, 讨论后成合晶成因, 还原岩浆演化过程和冲击变质历史, 为早期月球的岩浆演化和后期冲击变质历史提供有利证据。因此, 本文的主要研究目的有: (1) 理清岩浆演化阶段矿物生成的先后顺序; (2) 后成合晶的冲击变质成因证据; (3) 陨石冲击变质特征和历史分析。

2 样品和实验方法

研究使用的样品是标准厚度光薄片, 编号 MIL05035-50,

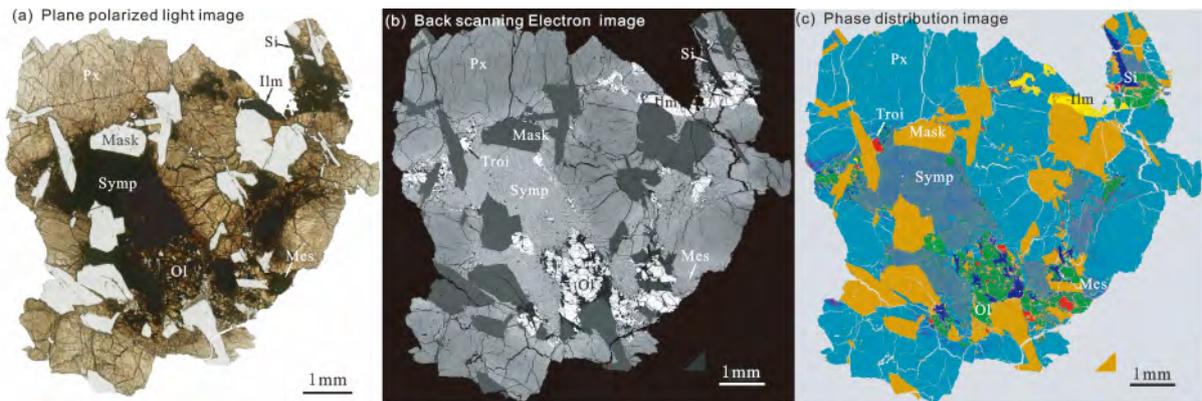


图1 MIL05035 光薄片透射光 (a)、背散射电子 (b) 和 X 射线假彩色合成 (c) 图像

Px-辉石; Mask-熔长石; Ol-橄榄石; Symp-后成合晶; Troi-陨硫铁; Ilm-钛铁矿; Q-石英; Fv-熔脉; Mes-后期充填物

Fig. 1 Transmitted-light photomicrograph (a), backscattered electronic image (b) and false-color (FC) X-ray map (c) of the polished thin section MIL05035

Px-pyroxene; Mask-plagioclase maskelynite; Ol-olivine; Symp-symplectite assemblages; Troi-troilite; Ilm-ilmenite; Q-quartz; Fv-fusion vein; Mes-mesostasis

样品大小 $7\text{mm} \times 8\text{mm}$, 申请于美国国家航空航天局 (NASA) 约翰逊航天中心。分析测试工作在桂林理工大学广西隐伏金属矿产勘查重点实验室完成。岩石学特征观察是利用 NIKON ECLIPSE 50iPOL 透反射偏光显微镜和 Zeiss SIGMA 场发射扫描电镜完成。矿物成分测定使用 JEOL JXA8230 型电子探针进行, 分析条件为加速电压 15kV , 束流 20nA , 束斑 $1\mu\text{m}$ (斜长石采用 $5\mu\text{m}$ 散焦)。电子探针分析的检出限为 0.01% , 使用 ZAF 法校正 (缪秉魁等, 2010)。标准样品主要采用自然矿物和少量玻璃标样。激光拉曼型号 Renishaw inVia, 激光光源为 Ar +, 波长 514nm , 功率为 20mW , 实际作用在样品表面的束斑为 $1\mu\text{m}$, 采用单晶硅标样进行拉曼谱峰位置标定。

矿物的面积百分含量估算: 将矿物分布相图 (图 1c) 进行灰度化处理, 该灰度图消除了背散射图像由于矿物成分不均匀分布的灰度差别造成的统计误差, 目的是每一种矿物对应 $0 \sim 256$ 灰度等级中一个确定的灰度值, 在此基础上采用图像二值化相关技术 (江明等, 2009) 统计不同灰度占有的空间像素百分比 (使用 Zeiss 偏光显微镜自带相分析软件 Micro-image Analysis & process 统计), 该百分比则对应不同矿物的面积百分比。全岩分析采用对单个矿物组份进行统计分析, 最后用矿物面积百分含量与单矿物组份平均含量加权平均的方法求得。后成合晶全岩分析采用电子探针大束斑 ($100\mu\text{m}$) 散焦分析。

3 岩石学和矿物学特征

3.1 岩石结构和矿物产状

在光学单偏光显微镜下, MIL05035 可为二个区域: 正常光学区域和暗化不透明区域 (图 1a)。正常光学区域表现为

粗粒辉长结构, 无角砾岩化, 主要由单斜辉石、斜长石和橄榄石组成, 单斜辉石为半自形, 大小 $3 \sim 6\text{mm}$; 斜长石为自形板状, 大小 $0.5 \sim 1\text{mm}$ 。暗化不透明区域主要由冲击变质作用造成, 为细小矿物集合体。根据扫描电镜背散射图像 (BSE) (图 1b) 和矿物分布相图 (图 1c) 统计, 主要矿物是辉石 (60.2%)、斜长石 (27.3%)、橄榄石 (6.05%), 次要矿物是石英 (4.36%)、钛铁矿 (1.25%) 和陨硫铁 (0.84%), 另外还有极少量的磷灰石和富钛铁尖晶石。不透明物质分布区由两部分组成: 90% 以上分布于薄片的中部, 面积近 $1/4$, 成分上由钙铁辉石 + 铁橄榄石 + 石英三种矿物相互交织构成后成合晶 (symplectite); 另一部分为岩浆后期充填物, 主要由陨硫铁、钛铁矿、磷灰石及二氧化硅玻璃等组成。发育大量后成合晶是该陨石的显著特色, 后成合晶中单矿物多数为长条形 $5 \sim 10\mu\text{m}$ 居多, 具有定向分布趋势, 其总体上具有中间颗粒细小, 边缘相对较大的特征 (图 1b)。

辉石颗粒具有明显的化学成分不均匀性和广泛发育于边部的出溶条带 (宽 $1 \sim 5\mu\text{m}$) (图 2a), 强烈破碎, 早期破碎的颗粒和裂隙经过后期的改造产生的明显的位移。颗粒表面可见两组近直交的解理, 并和粗大的裂隙相互交切, 同时被晚期的裂隙改造 (图 2b)。在后成合晶发育初始阶段的残留辉石内部发现模糊的与未分解辉石颗粒方向近于一致的解理 (图 2c)。

斜长石含量和大小仅次于辉石, 经过冲击变质作用斜长石几乎全部转变成熔长石, 仅在部分熔长石的核部发现了残留的斜长石晶体 (图 2d)。背散射图像上看熔长石灰度均匀, 无明显的成分变化。详细的成分分析表明, 熔长石具有两种不同的成分, 且具有微弱的成分环带 (详见后文)。

橄榄石存在两种不同的产状: 一种分布于辉石和斜长石颗粒之间, 呈填隙分布, 颗粒相对粗大, 呈半自形粒状, 大小 $0.1 \sim 0.3\text{mm}$, 局部含有钛铁矿包裹体 (图 2e); 另一种分布于

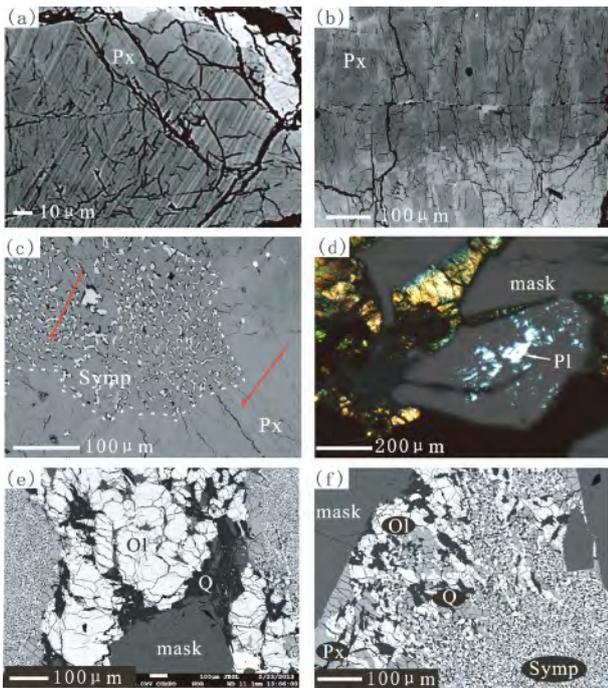


图2 MIL05035 月球陨石的结构

(a) 辉石中微米级的出溶片晶; (b) 辉石颗粒中发育两组近直角的解理且被后期裂隙切穿; (c) 后成合晶中发育和粗粒辉石中方向近一致的解理, 箭头代表解理的方向; 辉石主晶中的橄榄石和石英包裹体; (d) 熔石中尚未玻璃化的斜长石晶体(透光图); (e) 团块状石英分布于橄榄石和斜长石的边缘和斜长石组成充填交代结构; (f) 两种不同产状的辉石和橄榄石颗粒, 后成合晶中包含钙铁辉石、铁橄榄石和石英三种矿物集合体

Fig.2 Structures of lunar meteorites MIL05035

(a) exsolution lamellae of pyroxene; (b) two groups of cleavage are nearly vertical which had been cut by later shocked fractures; (c) the cleavage between pyroxenes and symplectite assemblages are nearly consistent; inclusion of quartz and olivines in pyroxene; (d) residual plagioclase crystals in maskelynites; (e) the plagioclases and olivines were filled and replaced respectively by quartz; (f) symplectite assemblages

后成合晶中, 为细小晶粒状, 粒径小于 50 μm , 其主体约 1 ~ 5 μm (图 2f)。

石英具有三种不同的产状: 第一种为脉状石英, 最长近 1mm, 充填于辉石、斜长石和橄榄石等颗粒的边部和裂隙中(图 1、图 3b、图 4a, b)。由于冲击变质作用影响, 在高分辨背散射图像中显示树枝状条纹的鲍伦结构(ballen-structure)(French, 1998)(图 3b); 第二种为团块状石英, 分布于后成合晶边部粗粒橄榄石矿物颗粒间, 或斜长石与辉石的接触边界上, 石英交代斜长石构成充填交代结构(图 2e-f); 第三种以小于 10 μm 的晶粒状分布于后成合晶中, 与铁橄榄石、钙铁辉石交织呈蠕虫状结构。

钛铁矿主要分布于辉石和斜长石颗粒之间及辉石裂隙中呈填隙结构, 或者在橄榄石中以包裹体形式存在, 他形粒状, 大小 0.5 ~ 1mm, 含有少量富 Ti 尖晶石(图 1、图 2e)。

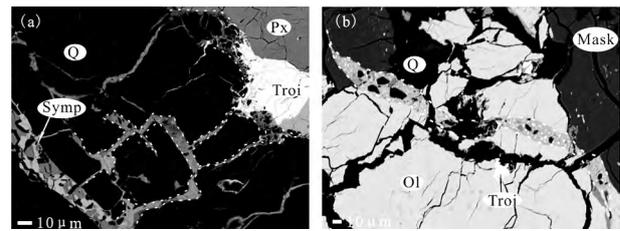


图3 MIL05035 陨石的冲击熔脉(白色虚线所示)

(a) 发育于脉状石英中的冲击熔脉和后成合晶相连; (b) 发育于橄榄石和斜长石中的冲击熔脉

Fig.3 Shock veins of Lunar meteorite MIL05035 (the white dashed lines)

(a) shock vein in quartz which connected with symplectite; (b) shock vein in olivine and plagioclase

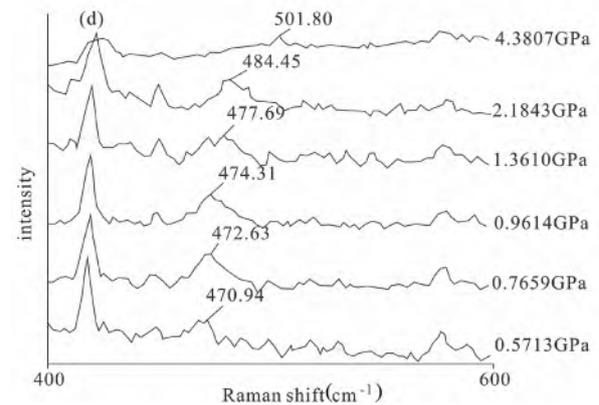
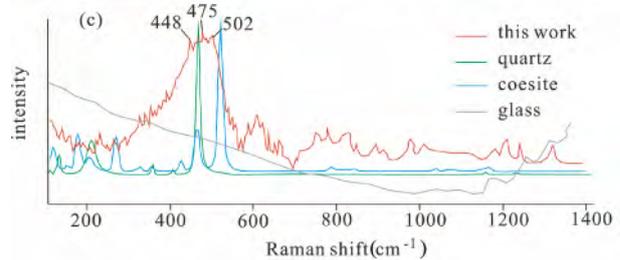
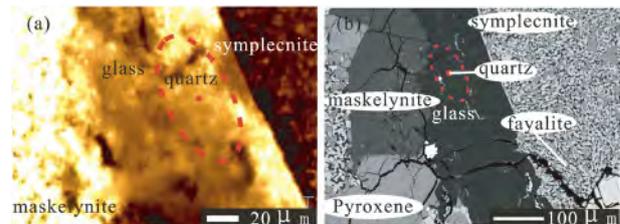


图4 MIL05035-50 陨石石英激光拉曼峰对比图

(a) 透光照片和分析位置; (b) 背散射照片和分析位置; (c) 退变质石英、熔融玻璃和标准石英、柯石英的对比图(标准峰来源于加利福尼亚理工学院标准矿物拉曼谱峰库 RRUFF); (d) 实验室测定不同压力条件下石英的拉曼峰(李月等, 2006, 图 1)

Fig.4 The compared graph for quartz, glass and coesite of Lunar meteorite MIL05035-50

(a) transmitted-light photomicrograph and analysis position; (b) Backscattered electronic image; (c) the compared graph for quartz in this job, melted glass, standard quartz and coesite (the standard spectra date came from the RRUFF Project website containing an integrated database of Raman spectra, X-ray diffraction and chemistry data for minerals in California Institute of Technology); (d) the raman spectra shift in the different press condition in the lab (Li et al., 2006, Fig. 1)

陨硫铁为不规则团块状,主要充填于辉长结构的辉石和斜长石之间,大小0.1~0.3mm。

磷灰石和锆石等少量矿物呈星散状分布。

3.2 冲击变质特征

该陨石具有强烈的冲击变质特征,环绕斜长石边缘的辉石发育放射状裂隙(图1a,b),大的辉石颗粒多数被裂隙切穿,且具有明显的位移(图2b),斜长石较少被裂隙切穿。辉石颗粒具有典型的波状消光,局部具有冲击导致的平面变形裂隙;斜长石绝大部分熔长石化,部分熔长石核部具有残留的斜长石,其具有与熔长石不同的成分特征(后文详述);石英显示了一系列的冲击变质结构:包括波状消光、击变玻璃和树枝状分叉的鲍伦结构(图3a)。冲击熔脉发育,一熔脉宽度约10~50 μm ,熔脉中含陨硫铁(1~5 μm)、熔长石和二氧化硅玻璃角砾(10~20 μm)(图3b)。另一熔脉发育于石英中,宽度小于10 μm ,呈树枝状分布,且与后成合晶相交(图3a)。石英大部分在冲击作用中转变为二氧化硅玻璃,仅残留部分石英晶体,其拉曼特征峰较宽(448~502 cm^{-1}),包括了常温下不同压力条件下的石英谱峰范围,边界接近于柯石英特征峰边界(图4)。

3.3 矿物和岩石化学

辉石 辉石主晶从核部到边部显示了复杂的化学分带,且整体具有明显的出溶现象。辉石核部富镁贫铁钙($\text{Fs}_{30.2-60.8} \text{Wo}_{14.2-25.0}$)相对贫钛,富铬铝(Ti_2O_3 1.28%, Cr_2O_3 0.44%, Al_2O_3 1.97%);边部富铁钙贫镁($\text{Fs}_{47.5-64.9} \text{Wo}_{22.8-44.3}$)相对富钛,贫铬铝(Ti_2O_3 1.45%, Cr_2O_3 0.08%, Al_2O_3 1.46%)(图5、图6)。锰含量变化不大,分布较均匀。出溶片晶的成分与二者均不同,铁含量中等,富镁,更贫钙($\text{Fs}_{43.4-56.6} \text{Wo}_{14.3-25.3}$)。后成合晶中辉石为钙铁辉石,具有富铁钙贫镁($\text{Fs}_{49.4-60.2} \text{Wo}_{29.3-43.8}$)的特征。仔细对比发现,后成合晶中辉石的成分含量与粗粒辉石的边部有很大的相似性,

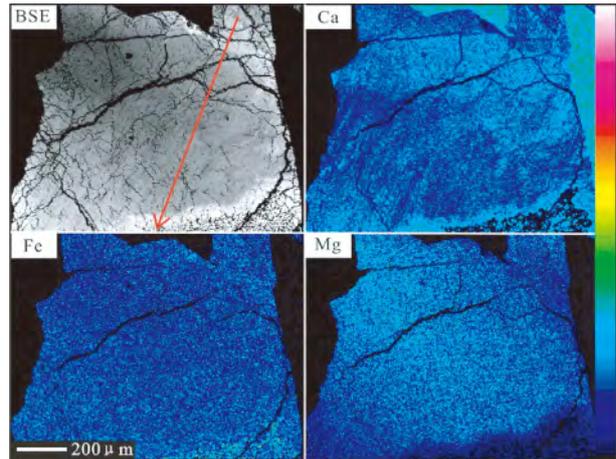


图5 MIL05035 陨石中辉石颗粒背散射电子图像和元素面分布图

箭头方向代表成分剖面的方向,右侧颜色条从上(粉红)到下(墨绿)表示含量从高到低

Fig. 5 Back scattered electronic image and qualitative WDS maps of a typical pyroxene of Lunar meteorite MIL05035

The quantitative traverse is indicated by a red arrow in the BSE image. Warm colors (upper) correspond to higher concentrations whereas cooler colors (down) are lower concentrations

微量元素 Al、Ti、Mn、Cr 含量基本一致,主量元素 Fe、Ca、Mg 含量稍有差别,相对于粗粒辉石颗粒的边部,后成合晶中辉石的铁镁含量降低,钙含量升高(图5、图6、表1)。按照辉石的成分分类,辉石的核部主要为普通辉石和贫钙铁普通辉石,边部主要为铁钙铁辉石和铁普通辉石,后成合晶主要为钙铁辉石,出溶片晶主要为贫钙铁普通辉石和易变辉石(图7)。

斜长石 绝大部分熔长石化,具有微弱的成分环带,表现为边部富碱金属 K、Na,贫 Ca ($\text{Ab}_{9.3-12.3}$, 平均 10.7, $\text{Or}_{0.31-4.03}$, 平均 0.54),核部则相反 ($\text{Ab}_{7.6-10.6}$, 平均 9.3, $\text{Or}_{0.12-0.36}$, 平均 0.20),熔长石和未完全熔长石化的残留斜长

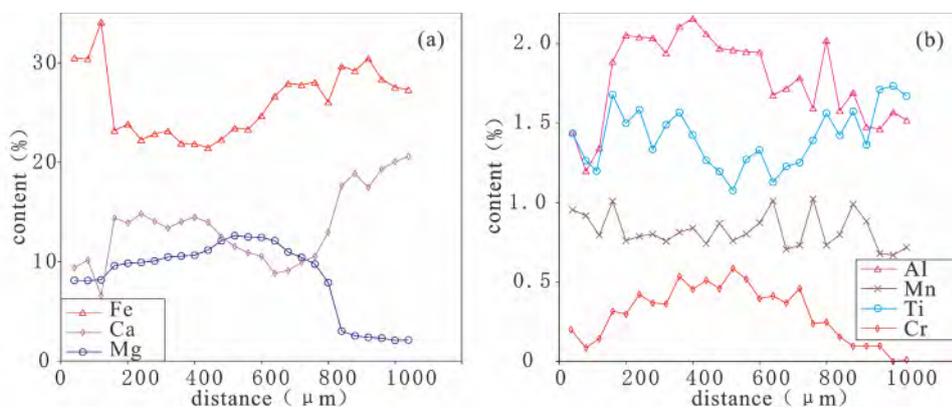


图6 MIL05035 陨石中辉石颗粒边部→核部→边部成分变化剖面

Fig. 6 Contents rim to core to rim traverse of a pyroxene of Lunar meteorite MIL05035

The traverse path is illustrated in BSE image of Fig. 5

表1 MIL05035 陨石代表性电子探针分析结果及全岩数据(wt%)

Table 1 Representative electron microprobe analyses and bulk composition in MIL05035 (wt%)

成分	普通辉石		辉石出溶片晶 (n=18)	粗粒橄榄石 (n=25)	个别高碱金属熔长石		普通熔长石 (n=35)	残留斜长 (n=10)	脉状石英 (n=10)	团块状石英 (n=12)	全岩	后成合晶			
	核部 (n=48)	边部 (n=28)			核部 (n=8)	边部 (n=10)						钙铁辉石 (n=20)	铁橄榄石 (n=18)	石英 (n=15)	后成合晶全岩
SiO ₂	45.3	43.7	44.7	26.2	48.1	50.1	45.0	45.0	99.0	96.3	47.5	44.0	27.1	95.7	51.3
FeO	25.4	33.7	29.9	68.1	0.68	0.84	0.46	0.44	0.28	1.82	22.0	31.6	67.2	2.71	37.3
CaO	12.5	15.3	8.98	0.61	18.3	16.4	19.0	19.3	0.03	0.23	13.2	18.2	0.47	0.20	5.76
MgO	10.9	3.02	11.5	1.58	0.02	0.02	0.08	0.11	0.01	0.08	5.28	2.70	2.73	0.09	1.81
Al ₂ O ₃	1.97	1.46	1.56	0.02	32.8	30.6	32.7	32.9	0.42	0.98	9.52	1.40	0.04	0.41	0.54
TiO ₂	1.28	1.45	1.38	0.15	0.03	0.06	0.04	0.06	0.25	0.33	1.30	1.43	0.13	0.23	0.52
MnO	0.79	0.81	0.81	1.65	0.02	0.04	0.03	0.02	0.02	0.21	0.31	0.78	1.89	0.11	0.96
Cr ₂ O ₃	0.44	0.08	0.36	0.01	0.02	0.01	0.02	nd	0.04	0.01	0.21	0.08	0.03	0.01	0.08
Na ₂ O	nd	nd	nd	nd	1.28	2.20	1.14	1.03	nd	nd	0.32	nd	nd	nd	nd
K ₂ O	0.02	0.02	0.01	0.01	0.13	0.30	0.04	0.02	0.24	0.23	0.01	0.01	0.02	0.19	0.07
Total	98.7	99.7	99.2	98.6	101.4	100.5	98.5	98.9	100.5	100.2	99.7	100.0	99.9	99.8	98.6
Fa/Fs/An															
最大值	60.8	64.9	56.6	96.7	90.2	81.4	91.6	92.3				60.2	93.5		
最小值	30.2	47.5	43.4	95.5	86.2	76.4	86.8	90.2				49.4	88.9		
平均值	41.9	57.5	49.0	96.0	88.2	79.1	90.0	91.1				52.9	90.6		
Wo/Ab															
最大值	35.0	44.3	25.3		13.0	21.6	12.3	9.65				43.8			
最小值	14.2	22.8	14.3		9.3	16.8	8.16	7.56				29.3			
平均值	26.3	33.4	18.5		11.1	19.2	9.75	8.79				39.1			

注: n 代表分析的点数, nd 表示低于检测限, 以上成分数据均取所分析样品的平均值

石之间具有微弱的成分差异, 残留斜长石 (Ab_{7.56-9.65}, 平均 8.79 An_{90.2-92.3}, 平均 91.1) (表 1、图 8) 相比较而言, 具有钙高碱金属低的特征。但不同的熔长石颗粒之间元素含量有微小差别, 如个别颗粒 K、Na 碱金属含量相对较高 (Ab_{9.3-21.6} Or_{0.58-2.15}) 和存在明显的成分环带, 例如位于薄片右上角与长条状石英接触部位的熔长石: K、Na 含量边部高 (Ab_{19.2} Or_{1.72}) 核部低 (Ab_{11.1} Or_{0.73}), Ca 含量边部低 (An_{79.1}), 核部高 (An_{88.2}) (表 1、图 9)。

橄榄石 两种产状橄榄石的成分均以富铁为特征, 但其成分稍有差别。填隙的粗粒橄榄石为铁橄榄石 (Fa_{95.5-96.6}, 平均 97.7), 对于单个颗粒而言, 核部相对富 MgO (Fa_{88.5-92.6}, 平均 90.5), 边部相对富 FeO (Fa_{94.7-96.9}, 平均 95.6)。后成合晶中的细粒橄榄石也为铁橄榄石 (Fa_{88.9-93.5}, 平均 90.6), 显然其含铁量略低于粗粒橄榄石, 基本相当于粗粒橄榄石核部的成分 (图 7、表 1)。

石英 三种不同产状的石英具有不同的微量元素成分。脉状石英具有较纯的 SiO₂ 成分 (99.0%) ; 团块状石英 Al、K 含量较高; 蠕虫状石英具有较高的 Fe 含量 (表 1)。

钛铁矿 成分分布较均匀, 含有微量的 Mn、Cr 和 Mg 元素。

尖晶石族矿物 成分上可以分为两类, 一类为高铬铝低铁钛尖晶石, 化学式为: (Fe_{0.55}Ti_{0.40}Mg_{0.01}Ca_{0.01}Mn_{0.02})(Al_{0.22}Cr_{0.47}Fe_{0.31})₂O₄; 另一类为低铬铝高钛铁尖晶石, 化学式为:

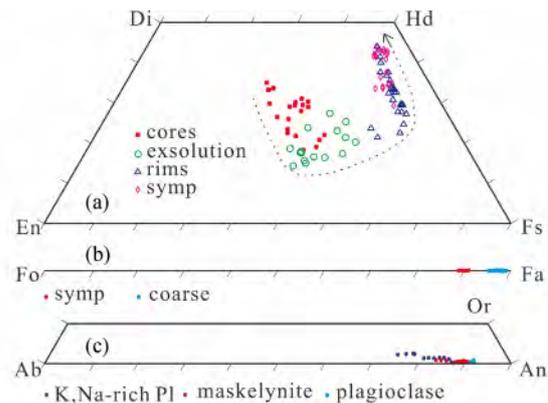


图7 MIL05035 陨石中辉石、橄榄石和斜长石的成分图
Cores-辉石颗粒的核部; rims-辉石颗粒的边部; exsolution-出溶片晶; K, Na-rich Pl-富碱金属熔长石; maskelynite-熔长石; plagioclase-残留斜长石

Fig. 7 Pyroxene (a), olivine (b), and plagioclase (c) mineral compositions of Lunar meteorite MIL05035

Cores of pyroxenes (cores); rims of pyroxenes (rims); pyroxene exsolution lamellae (exsolution); coarse olivine (coarse); K, Na-rich plagioclase (K, Na-rich Pl); K, Na-poor maskelynite (maskelynite); K, Na-poor residual plagioclase (plagioclase)

(Fe_{0.40}Ti_{0.56}Mg_{0.01}Mn_{0.02}) (Al_{0.15}Cr_{0.11}Fe_{0.74})₂O₄, 含量小于 0.1% 均不参加计算。

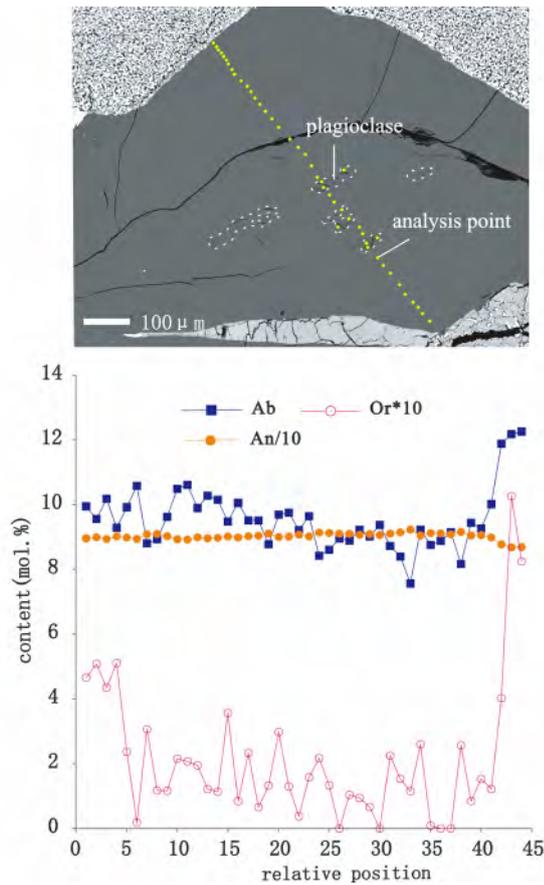


图8 MIL05035 陨石中熔长石颗粒边部→核部→边部成分变化剖面

Fig. 8 Contents rim to core to rim traverse of a maskelynite in MIL05035

陨硫铁 成分分布均匀,分子式为标准的 FeS。

全岩成分 后成合晶的平均 $Mg^{\#}$ (4.63) 与全岩 $Mg^{\#}$ (19.4) 差别较大,但与辉石边部 $Mg^{\#}$ (8.22) 接近。通过后成合晶全岩成分的原子比计算分子式为 $Ca_{0.22} (Fe_{1.1} Mg_{0.10} Mn_{0.03} Ti_{0.01}) Si_{2.1} Al_{0.02} O_6$, 与粗粒辉石边部铁钙铁辉石化学式 $Ca_{0.69} (Fe_{1.2} Mg_{0.19} Mn_{0.03} Ti_{0.05}) Si_{1.84} Al_{0.07} O_6$ 相比较,后成合晶中 Ca、Mg 含量降低, Si 含量升高, 总体近一致。后成合晶中 Fe、Ca、Mg、Al、Ti 等主量元素含量与全岩含量有明显区别 (表 1)。

4 讨论与结论

4.1 MIL 05035 陨石的月球起源证据和类型划分

将陨石全岩成分中的氧化铁 + 氧化镁和氧化铝在 $(FeO + MgO) - Al_2O_3$ 图上投点发现,其正好落在月海区域,与 Apollo 系列月海玄武岩和其它月海玄武岩陨石样品的落点一致 (图 10)。全岩 Fe/Mn 为 71 (MIL05035)、63 (MIL05035-19)、Apollo12 样品中的 Fe/Mn 为 72~74, Apollo15 样品中的

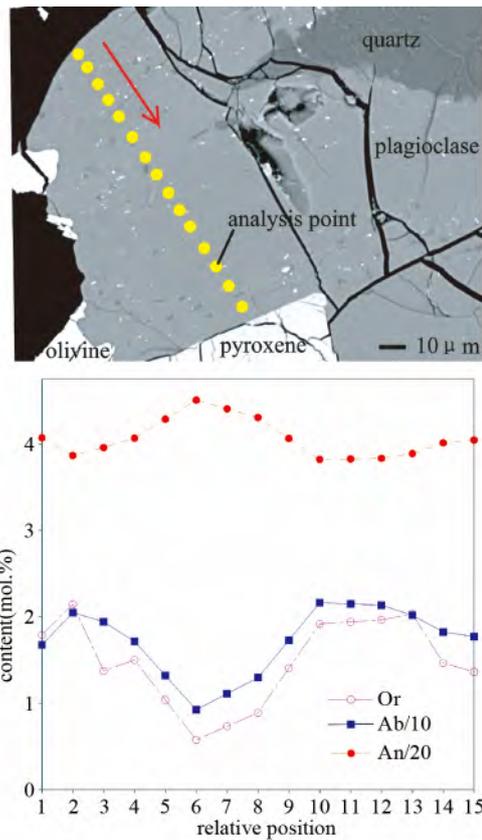


图9 MIL05035 陨石中富碱金属熔长石颗粒边部→核部→边部成分变化剖面

Fig. 9 Contents rim to core to rim traverse of a maskelynite with K, Na-rich content in MIL05035

Fe/Mn 为 61 在 Fe/Mn 比值图上投点发现, MIL05035 月球陨石落在月海区域,但其 FeO 和 MnO 含量比 Apollo12、Apollo15 和其它月海区域样品的含量要高 (图 10)。通过和 Apollo 系列样品的对比分析,发现 MIL05035 陨石样品和 Apollo12 (12064 号)、Apollo15 (15597 号) 和 Apollo12 (12051 号) 的矿物模式含量 (表 2)、全岩化学成分和 $(FeO + MgO) / Al_2O_3$ 值、Fe/Mn 值等特征相似 (表 2、图 10)。另外,该陨石的同位素组成特征 (Ar-Ar, Fernandes *et al.*, 2005; Joy *et al.*, 2008)、微量元素、不相容元素和稀土元素地球化学特征 (Joy *et al.*, 2008)、全岩 Co/Cr 值 (Joy *et al.*, 2007)、斜长石成分 An 范围和无水的矿物组合特征等充分证明, MIL05035 陨石来自月球。

由于该陨石矿物颗粒粗大,对于分析用样品存在相当的不均一性,因此,不同研究工作的分析数据存在明显的差异 (表 2、表 3),尤其是矿物模式组合和一些矿物间的相关关系。但无论如何, MIL05035 定名为月海玄武岩是没有问题的,也得到了相关研究者的认可 (Liu *et al.*, 2007; Joy *et al.*, 2008; Arai *et al.*, 2010)。但截至目前,针对该陨石还没有进一步的详细类型划分。按照 Papike 的玄武岩分类, TiO_2 含量

表2 Apollo 低钛玄武岩月球样品与 MIL05035 月球陨石成分对比分析表

Table 2 Compared components between the Low-Ti basalts in Apollo samples and Lunar meteorite MIL05035

化学成分	已知低钛玄武岩			MIL05035		
	Apollo12 (12064号)	Apollo12 (12051号)	Apollo15 (15597号)	-19	-6	-50
SiO ₂	46.5	45.3	48.0	48.4	47.2	47.5
TiO ₂	3.99	4.68	1.80	0.90	1.00	1.30
Al ₂ O ₃	10.7	9.95	9.44	8.85	10.5	9.52
FeO	19.9	20.2	20.2	20.7	20.7	22.0
MnO	0.27	0.28	0.30	0.33	—	0.31
MgO	6.49	7.01	8.74	7.79	5.90	5.28
CaO	11.8	11.4	10.4	12.1	13.7	13.2
Na ₂ O	0.28	0.29	0.32	0.21	—	0.32
K ₂ O	0.07	0.06	0.06	0.01	—	0.01
Cr ₂ O ₃	0.37	0.31	0.48	0.30	0.40	0.21
合计	100.2	99.5	99.8	99.6	99.4	99.7

注: Apollo12, Apollo 15 数据来自欧阳自远, 2005; MIL05035-19 数据来自 Joy *et al.*, 2007; MIL05035-6 来自 Liu *et al.*, 2007; MIL05035-50 数据来自本次工作

表3 Apollo 低钛玄武岩月球样品与 MIL05035 月球陨石矿物含量对比表

Table 3 Compared contents of minerals between the low-Ti basalts in Apollo samples and Lunar meteorite MIL05035

样品号	岩石类型	辉石	斜长石	橄榄石	暗色矿物
Apollo15-1	橄榄石低钛玄武岩	63	24	7	6.0
Apollo12	普通辉石低钛玄武岩	69	21	1	9.0
Apollo15-2	普通辉石低钛玄武岩	62	34	—	4.0
MIL05035-29		58	35	—	6.3
MIL05035-33	普通辉石低钛-极	69.2	17.2	—	13.6
MIL05035-36	低钛玄武岩	63.4	29.5	—	7.0
MIL05035-50		60.2	27.3	6.05	6.40

注: Apollo15 和 Apollo12 数据来自欧阳自远, 2005; MIL05035-29, -33, -36 数据来自于 Arai *et al.*, 2007; MIL05035-50 数据来自本次工作

6% ~ 14% 的为高钛玄武岩, 1% ~ 6% 的为低钛玄武岩, <1% 的为极低钛玄武岩 (VLT 玄武岩) (Papike *et al.*, 1998)。MIL05035 全岩 TiO₂ 含量 (0.90% ~ 1.30%) , 介于极低钛玄武岩和低钛玄武岩之间。另外, 该陨石相对于大多月海玄武岩具有高铁 (FeO = 22.0%)、低铝 (Al₂O₃ = 9.52%)、低钍 (Th = 0.3 × 10⁻⁶) 和低轻稀土的特征 (Arai *et al.*, 2007; Zeigler *et al.*, 2007), 一般的极低钛玄武岩具有高铝的特征 (欧阳自远, 2005), 该陨石为低铝, 综合对比研究认为, MIL05035 陨石划分为普通辉石低钛玄武岩。

4.2 后成合晶的特征及成因分析

后成合晶在地球岩石中是非常普遍的现象, 对地幔物质

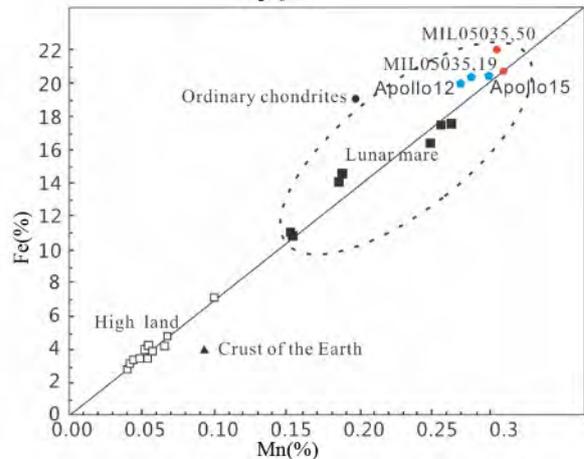
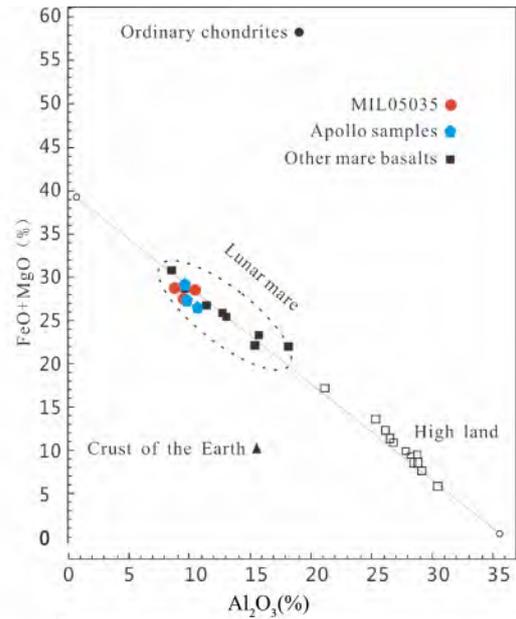


图10 月球陨石的 (FeO + MgO) -Al₂O₃ 图和 Fe/Mn 图 (欧阳自远, 2005)

Fig. 10 Plots of (FeO + MgO) -Al₂O₃ and Fe/Mn for Lunar meteorites

形成和演化的热力学和动力学条件具有重要的指示意义 (Newton and Perkins, 1986; Joanny *et al.*, 1991; Elvevold and Gilotti, 2000)。在月球陨石中后成合晶的发育也很普遍 (Fagan *et al.*, 2002; Arai *et al.*, 2007), 其成因机制存在多种解释: (1) 因为后成合晶中常有铬铁矿、钛铁矿和陨硫铁等岩浆晚期矿物, 而被认为是晚期岩浆的结晶产物 (Fagan *et al.*, 2008; Liu *et al.*, 2009); (2) 铁辉石在高压下更稳定, 低压下处于亚稳态, 经过缓慢的冷却过程可转变为更稳定的后成合晶相 (Lindsley *et al.*, 1972; Lindsley, 1983); (3) 不太稳定的富铁辉石亚固相在低温和低压 (< 1.15 GPa) 的近月表环境中分解形成 (Oba and Kobayashi, 2001)。

MIL05035 陨石的一个典型特征是后成合晶现象非常发育, 在 MIL05035-50, -29, -33, -35, -31 等薄片后成合晶所

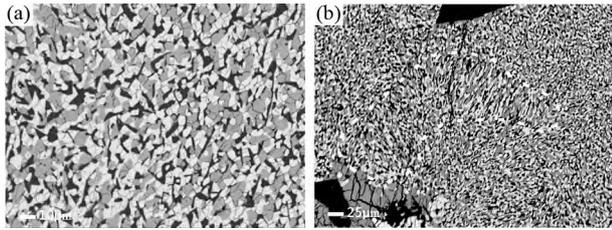


图 11 MIL05035 中不同形态的后成合晶集合体

(a) 半自形扭曲状晶形集合体; (b) 蠕虫状集合体

Fig. 11 Symplectite assemblages with different occurrences in MIL05035

(a) subhedral stretch and twist shape; (b) helminthoid shape

占面积为 6% ~ 25% (Arai *et al.*, 2007; Joy *et al.*, 2007)。这些后成合晶是三相矿物集合体, 主要由铁橄榄石 + 钙铁辉石(或铁钙铁辉石) + 石英组成。它们以多种形态产出: (1) 半自形扭曲状晶形集合体, 颗粒大小为 3 ~ 10 μm (图 11a); (2) 蠕虫状晶形集合体 (图 11b); (3) 辉石主晶中的橄榄石和石英包裹体 (图 2c)。关于 MIL05035 月球陨石中后成合晶的成因, 通过本文研究认为其来源于富钙铁辉石在冲击退变质作用下分解。主要证据为: (1) MIL05035 的冲击变质程度高, 矿物普遍发生冲击变质, 斜长石发生熔长石化, 石英发生玻璃化, 达到了 S₅ 级 (Stöffler *et al.*, 1991); (2) 后成合晶三相集合体橄榄石 + 钙铁辉石 + 石英均是透明矿物, 但在单偏光下发黑不透明, 具有典型的冲击暗化特征; (3) 后成合晶包围的斜长石保持原始结晶的平直边界 (图 1、图 2f), 这排除了晚期结晶和后期熔体交代的可能, 背散射图像上可以清楚看到后成合晶中的钙铁辉石与铁普通辉石的边部具有很好的连续性, 后成合晶发育初始阶段的残留辉石内部发现模糊的解理, 该解理的方向与粗粒辉石中解理的方向近于一致 (图 2c); (4) 冲击熔脉发育, 并且与后成合晶连续共生 (图 3b); (5) 后成合晶全岩原子比组成的分子式接近于辉石颗粒边部铁钙铁辉石的分子式, 全岩成分接近于未分解的铁钙铁辉石, 与全岩整体成分有明显差异 (图 12)。

4.3 岩浆演化历史

MIL05035 月球陨石的粗晶结构暗示了岩浆缓慢的冷却速度与相对较深的形成环境。实验结晶学的研究指出了长石颗粒大小和母体岩浆流冷却速率的大概关系 (Grove, 1978; Grove and Vaniman, 1978), 由于 MIL05035 中斜长石大部分为粗大的自形板状晶体, 大小为 0.5 ~ 1mm, 满足依据晶体颗粒大小估算结晶速率的条件。据此推算冷却速率约 0.07 ~ 0.1 $^{\circ}\text{C}/\text{h}$ (据 Grove, 1978 的图 5 的斜长石结晶与冷却速率关系曲线外推)。这个速率要比 Luna24 样品的铁辉长岩稍慢 (0.1 ~ 0.5 $^{\circ}\text{C}/\text{h}$) (Joy *et al.*, 2008) 暗示着 MIL05035 在一个更深的区域结晶。实际上, MIL03035 是迄今发现的月球陨石中形成深度最深的陨石之一, 与 Asuka881757 类似 (Aral *et al.*, 2010)。由全岩的化学组成和矿物组成可推测,

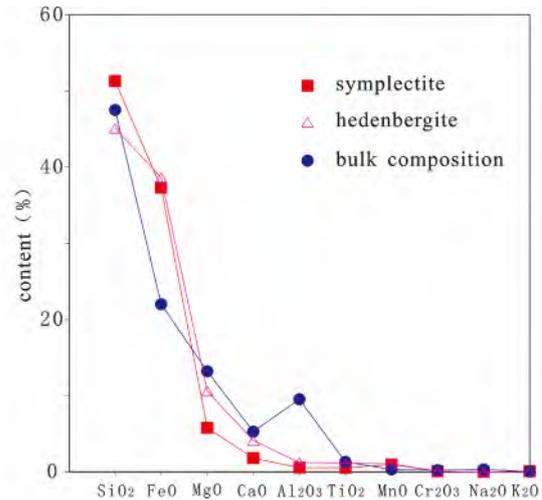


图 12 MIL05035 陨石全岩、后成合晶全岩与铁辉石成分分布图

Fig. 12 The comparison of bulk, symplectite and ferrosilites in MIL05035

母岩浆应该为基性无水条件下的贫钙玄武岩浆 (SiO₂ 含量 47.5%, TiO₂ 含量 0.9% ~ 1.3%, 无角闪石、云母等含水矿物, 主要矿物为辉石和斜长石) (图 12、表 3)。在岩浆结晶阶段, 由于 MIL05035 为典型的辉长结构, 辉石和斜长石构成了岩石的基本格架, 其它类型的矿物均为填隙结构、交代充填或源自辉石的分解等, 母岩浆中除了少量尖晶石外辉石和斜长石首先从熔体中析出。辉石核部 Ti/Al 接近于 1/2 时, 辉石和斜长石同时结晶, 当 Ti/Al 接近于 1/4 时, 辉石先结晶, 斜长石未形成 (Arai *et al.*, 2007)。本次工作在 MIL05035 中所测试的 48 个辉石核部数据中 Ti[#] = 0.24 ~ 0.50, 平均 0.36, 其中, 小于 0.25 的有 1 个, 0.25 ~ 0.38 之间 30 个, 0.38 ~ 0.5 之间 17 个, 绝大部分数据位于 0.25 ~ 0.5 之间 (即 Ti/Al 位于 1/4 ~ 1/2, 接近 1/4 的数据约占 2/3), 说明母岩中 2/3 的辉石为先结晶, 1/3 的辉石和斜长石同时结晶。在富铁母岩浆无水条件下, 粗粒辉石核部的普通辉石和钙长石先后或同时从母岩浆中晶出。MIL05035 中辉石和斜长石的体积百分含量换算成质量百分比并归一化到 100% 的比值为 67.1 : 32.9, 与标准辉长岩从岩石母体中首先结晶的标准组成 58 : 42 有一定差别, 可能与冲击后退变质阶段辉石的分解有关, 也可能与该陨石粗晶结构导致的矿物体积百分含量不均匀性有关。随着温度逐渐降低, 从辉石强烈的成分环带和斜长石微弱的成分环带可知, 贫钙铁普通辉石、铁钙铁辉石和铁普通辉石等在普通辉石边部大量结晶, 在钙长石边部分异结晶产生极少量培长石或拉长石; 随着温度继续下降, 早期结晶的普通辉石出溶易变辉石等片晶。

橄榄石的生成阶段是理清该陨石中矿物形成顺序的关键。首先, 陨石具有粗晶辉长结构或辉绿结构, 粗粒橄榄石大部分位于辉石和后成合晶的边部以及辉石与斜长石接触边界, 与辉石和斜长石互成嵌晶结构, 橄榄石中存在填隙分

布的石英、钛铁矿等金属矿物包裹体。按照鲍文反应序列橄榄石熔点较高,应该在辉石和斜长石之前结晶,但岩石结构上不支持这一观点。如章节 4.2 分析,细粒后成合晶中的橄榄石形成于冲击变质退变质作用下辉石的分解。通过化学成分对比发现,后成合晶中铁橄榄石的 Fa 值 90.6,而粗粒橄榄石的 Fa 值 97.7,另外粗粒橄榄石团块状的分布特征也与后期冲击变质成因的铁橄榄石有明显不同。以上分析限定了橄榄石生成于母岩浆主结晶阶段之后和冲击变质之前的时间范围内。此阶段橄榄石的形成有三种可能:第一种可能是后期热事件,引起了辉石的重熔,温度降低后分解为橄榄石和石英等;第二种可能是随着温度压力降低辉石分解为橄榄石和石英,但橄榄石的粗大晶粒与辉石的分解不太吻合;第三种是晚期残余岩浆的结晶作用形成的。第三种解释与陨石结构吻合,但与鲍文反应序列有矛盾,可能由于母岩浆结晶初始阶段不具备橄榄石结晶的物质成分条件,所以在母岩浆结晶第一阶段没有形成橄榄石,而是晚期由残余岩浆结晶形成。

随着母岩浆温度的进一步降低(晚期岩浆阶段),辉石出现出溶片晶,同期或稍晚橄榄石结晶;随后,钛铁矿和陨硫铁从残余熔体中结晶并充填于辉石和斜长石晶粒之间;含二氧化硅的熔体充填交代斜长石或充填于辉石和橄榄石之间。

母岩浆的成分会随着早期结晶矿物的出现而不断发生改变,为了进一步证明 MIL05035 月球陨石岩浆演化过程,采用 MELTS 应用程序进行矿物结晶顺序的模拟计算,该程序是经过实验反复验证用于模拟岩浆演化的软件(Ghiorso and Sack, 1995; 孙赫等, 2009)。采用表 2 中 3 个全岩成分的平均值作为母岩浆的初始成分条件,假定岩浆演化系统为封闭体系,结晶的压力按照 Joy 等计算的岩浆冷凝结晶深度 2.5 ~ 3.5m(岩浆密度 2980kg/m^3 ; Joy *et al.*, 2008) 估算为 1kbar,氧逸度采用 FMQ 模式,计算流体温度为 1197°C ,固体温度为 805°C (图 13),以上结果与 Joy 估算的 1191.5°C 与 800°C 基本一致(Joy *et al.*, 2008),说明设定条件基本可靠。母岩浆温度下降到 1197°C 时,开始有极少量铬铁尖晶石结晶,熔体中的 FeO 含量随着温度下降先降低,之后缓慢升高再急剧降低,熔体中 FeO 含量的变化对残留岩浆的性质具有较好的指示意义,因此采用残余熔体中 FeO 的含量作为横坐标,温度为纵坐标模拟结晶演化过程(图 13)。温度下降到 1168°C 时,开始有单斜辉石(主要为普通辉石和透辉石)结晶,并随着温度继续下降,辉石成分逐渐变化,表现为 FeO 含量升高(11.4% ~ 33.9%)、MgO 含量降低(15.5% ~ 9.60%)、CaO 含量降低(18.1% ~ 5.54%),与矿物化学分析中辉石的成分环带规律一致。温度下降到 1132°C 时,斜长石开始结晶(主要成分为钙长石),此时辉石占固溶体的 40%,与完全结晶的 69% 相比,已经有近 2/3 的辉石结晶,与 Ti/Al 的方法讨论的 2/3 辉石先结晶结论一致。当温度下降为 1077°C ,橄榄石开始形成,此时残余熔体剩下 27%,残余熔体中 Fe 的含量达到最高 22.9%,为铁橄榄石的析出创造了条件,辉石占固溶体的 58%(已结晶 84%),斜长石占固溶体的

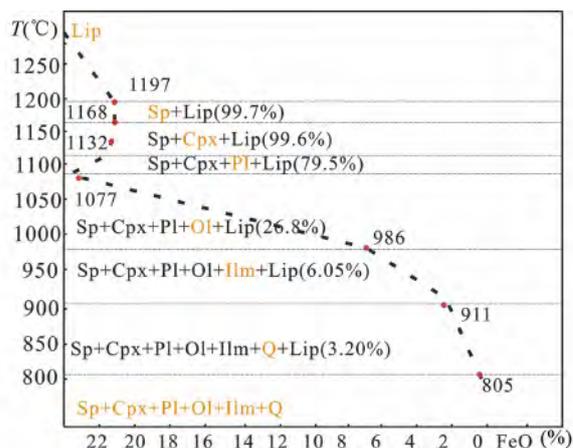


图 13 MIL05035 月球陨石矿物结晶演化图

Lip (xx%) - 残余熔体及其重量百分比; Sp-尖晶石; Cpx-单斜辉石。点线代表结晶矿物的液相线,红点代表固液临界点

Fig. 13 Model curve plot of crystallization sequence of Lunar meteorite MIL 05035

Lip (xx%) - Residual melt and its weight percentage; Sp-spinel; Cpx-clinopyroxene. The dotted lines represent results of fractional crystallization modeling using MELTS (Ghiorso and Sack, 1995). The red points represent solid-liquid interface

14%(已结晶 64%)。但温度下降至 986°C 时,残余熔体仅剩下 6%(主要成分为 SiO_2),钛铁矿和陨硫铁等开始形成,辉石、斜长石和橄榄石基本全部结晶。温度下降至 911°C 时,石英和极少量磷灰石等副矿物开始形成,残余岩浆中剩余的 Al、Ca、K 等元素可能与石英共同析出,温度下降至 805°C 时,石英充填交代完成。此时,矿物结晶完成,模拟计算的矿物组成为辉石(72%)、斜长石(21%)、橄榄石(2.5%)、尖晶石(0.1%)、钛铁矿和陨硫铁(1.4%)和石英(3.2%),与薄片观察矿物组成相比,辉石含量偏高,其它矿物含量偏低,可能与在后期冲击退变质作用过程中辉石的分解有关。以上模拟分析结果与矿物结构观察和分析得到的结论基本一致。

根据岩石的结构特征,矿物之间的相互关系、单矿物的成分特征和依据 MELTS 程序的模拟反演,岩浆的结晶演化可分为母岩浆主体结晶和晚期岩浆结晶两个阶段。矿物生成顺序可能为:尖晶石→普通辉石+钙长石→钙铁辉石、易变辉石、铁钙铁辉石、铁普通辉石+钙长石、培长石+拉长石(少量)→粗粒橄榄石→钛铁矿+陨硫铁→石英(磷灰石)(表 4)。

4.4 冲击变质历史

MIL05035 具有多种强烈的冲击变质特征。斜长石几乎全部熔长石化,仅在核部保留部分斜长石晶体,熔长石化过程中未发现显著的成分迁移($\text{Ab}_{7.56-9.65}\text{An}_{90.2-92.3} \rightarrow \text{Ab}_{7.60-12.3}\text{An}_{86.8-92.3}$)。熔长石具有微弱的成分环带,其压力指示为 30 ~ 45GPa(Ostertag, 1983)。石英具有一系列面状变形结构,如波状消光、击变玻璃和鲍伦结构的形成。石英在常温常压下

表 4 MIL05035 月球陨石矿物生成顺序表

Table 4 Crystallization sequence of Lunar meteorite MIL 05035

矿物	母岩浆主体结晶阶段	晚期岩浆结晶阶段
尖晶石	——	
普通辉石	————	
钙长石	——	
钙铁辉石	————	
铁普通辉石	————	
易变辉石	————	
铁钙铁辉石	————	
富钾—斜长石	————	
培—拉长石	————	
粗粒橄榄石	————	
钛铁矿		————
硫铁矿		————
石英		————
磷灰石		————

“—” 所处的位置代表矿物的生成阶段, 越靠近右边代表结晶越晚

的拉曼光谱波数在 $463.59 \sim 464.65 \text{cm}^{-1}$ 范围内变化(郭宁和郑海飞, 2010)。加利福尼亚理工学院矿物拉曼数据库中石英的特征峰位于 $460.17 \sim 467.93 \text{cm}^{-1}$ 而柯石英的特征峰位于 522.75cm^{-1} 实际测的残留石英波数变化范围为 $448 \sim 502 \text{cm}^{-1}$ (图 4c)。根据石英压标实验研究, 石英的承受压力范围从 $0 \sim 4.38 \text{GPa}$, 其对应的拉曼峰波数为 $470.94 \sim 501.80 \text{cm}^{-1}$ (李月等, 2006) (图 4d)。由熔长石的压力指标 $30 \sim 45 \text{GPa}$ 说明石英应该同时经历了较强压力的冲击作用, 冲击形成的高温高压引起石英结构的相变, 可能一度转变为柯石英乃至超石英, 但可能由于冷却速度相对较慢, 柯石英(超石英)发生退变质为石英。同时缓慢的冷却速度也有利于辉石的分解, 产生后成合晶。另外的冲击变质特征还有冲击熔脉的形成, 辉石的 PDF 面理发育(Joy *et al.*, 2008), 解理面的明显位移, 局部有马赛克消光和波状消光。根据以上分析, 按照 Stöffler 的划分标准, 至少达到了 S_5 级(Stöffler *et al.*, 1991)。

致谢 美国国家航空航天局(NASA)约翰逊航天中心提供了研究用样品; 审稿人提出了很好的修改意见; 编辑付出了辛勤劳动; 在此一并表示感谢。

References

- Arai T, Misawa K and Kojima H. 2007. Lunar meteorite MIL05035: Mare basalt paired with Asuka-881757. *Lunar and Planetary Science*, XXXVIII
- Arai T, Hawke BR, Giguere TA, Misawa K, Miyamoto M and Kojima H. 2010. Antarctic Lunar meteorites Yamato-793169, Asuka-881757, MIL 05035, and MET 01210 (YAMM): Launch pairing and

- possible cryptomare origin. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74(7): 2231–2248
- Basilevsky AT, Neukum G and Nyquist L. 2010. Lunar meteorites: What they tell us about the spatial and temporal distribution of mare basalts. 41st Lunar and Planetary Science Conference
- Borg L, Gaffney A and DePaolo D. 2007. Rb-Sr & Sm-Nd isotopic systematics of NWA032. In: 70th Annual Meeting of the Meteoritical Society (Abstract #5232). Houston: Lunar and Planetary Institute
- Day JMD and Taylor LA. 2007. On the structure of mare basalt lava flows from textural analysis of the LaPaz Icefield and Northwest Africa 032 Lunar meteorites. *Meteoritics & Planetary Science*, 42(1): 3–17
- Elvevold S and Gilotti JA. 2000. Pressure-temperature evolution of retrogressed kyanite eclogites, Weinschenk Island, North-East Greenland Caledonides. *Lithos*, 53(2): 127–147
- Fagan TJ, Taylor GJ, Keil K, Bunch TE, Wittke JH, Korotev RL, Jolliff BL, Gillis JJ, Haskin LA, Jarosewich E, Clayton RN, Mayeda TK, Fernandes VA, Burgess R, Turner G, Eugster O and Lorenzetti S. 2002. Northwest Africa 032: Product of lunar volcanism. *Meteoritics and Planetary Science*, 37(3): 371–394
- Fagan TJ, Hayakawa S, Kodama S, Kataoka Y and Sasamoto A. 2008. Late-stage crystallization products in NWA 773 group Lunar meteorites. In: Tokyo, Lunar and Planetary Institute Science Conference Abstracts
- Fernandes VA, Morris AA and Burgess R. 2005. New Ar-Ar age determinations for the lunar mare basalts Asuka 881757 and Yamato 793169. In: Lunar and Planetary Science, XXXVI. Houston: 36th Lunar and Planetary Science Conference
- Fernandes VA, Burgess R and Morris A. 2009. ⁴⁰Ar-³⁹Ar age determinations of Lunar basalt meteorites Asuka 881757, Yamato 793169, Miller Range 05035, La Paz Icefield 02205, Northwest Africa 479, and basaltic breccia Elephant Moraine 96008. *Meteoritics and Planetary Science*, 44(6): 805–821
- French BM. 1998. In Traces of Catastrophe: A Handbook of Shock-Metamorphic Effects in Terrestrial Meteorite Impact Structures. Houston: Technical Report, LPI-Contrib-954
- Ghiorso MS and Sack RO. 1995. Chemical mass transfer in magmatic processes IV: A revised and internally consistent thermodynamic model for the interpolation and extrapolation of liquidus-solidus equilibria in magmatic systems at elevated temperatures and pressure. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 119(2–3): 197–212
- Grove TL. 1978. Cooling histories of Luna 24 very low Ti (VLT) ferrobasalts: An experimental study. In: Proc. 9th Lunar. Sci. Conf., 565–584
- Grove TL and Vaniman DT. 1978. Experimental petrology of very low Ti (VLT) basalts. In: Mare Crisium: The View from Luna 24. New York: Pergamon Press: 445–471
- Guo NH and Zheng HF. 2010. Study on the accuracy of pressure determined by Raman spectra of quartz. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 30(8): 2161–2163 (in Chinese with English abstract)
- Jiang M, Liu H and Huang H. 2009. Research of image binarization technology. *Software Guide*, 8(4): 176–178 (in Chinese)
- Joanny V, van Roermund H and Lardeaux JM. 1991. The clinopyroxene/plagioclase symplectite in retrograde eclogites: A potential geothermobarometer. *Geologische Rundschau*, 80(2): 303–320
- Joy KH, Anand M, Crawford IA and Russell SS. 2007. Petrography and bulk composition of miler range 05035: A new lunar VLT gabbro. *Lunar and Planetary Science*, XXXVIII
- Joy KH, Crawford IA, Anand M, Greenwood RC, Franchi IA and Russell SS. 2008. The petrology and geochemistry of Miller Range 05035: A new Lunar gabbroic meteorite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72(15): 3822–3844
- Korotev RL. 2002. The Luna 20 Regolith. *Lunar and Planetary Science*, XXXIII. Houston: Lunar and Planetary Institute
- Korotev RL. 2005. Lunar geochemistry as told by Lunar meteorites. *Chemie der Erde*, 65(4): 297–346
- Li Y, Zhou YQ, Yan SY, Cui QL, Zhao YN, Zhang DG and Chen Y. 2006. The laser Raman spectroscopic study of olivine at high pressure. *Chinese Journal of Light Scattering*, 18(1): 11–16 (in

- Chinese with English abstract)
- Lindsley DH, Papike JJ and Bence AE. 1972. Pyroxferroite: Breakdown at low pressure and high temperature. In: Abstracts of the Lunar and Planetary Science Conference, Lunar and Planetary Institute, Provided by the NASA Astrophysics Data System, 483 – 485
- Lindsley DH. 1983. Pyroxene thermometry. *American Mineralogist*, 68 (5–6): 477–493
- Liu Y, Hill E, Patchen A and Taylor LA. 2007. New Lunar Meteorite MIL 05035: Petrography and Mineralogy. *Lunar and Planetary Science*, XXXVIII
- Liu Y, Floss C, James MDD, Hill E and Taylor LA. 2009. Petrogenesis of Lunar mare basalt meteorite Miller Range 05035. *Meteoritics & Planetary Science*, 44(2): 261–284
- Miao BK, Lin YT, Hu S, Shen WJ, Wang BH, Feng L and Liu T. 2010. Grove Mountains (GRV) 052382, from East Antarctica: Likely a most heavily shocked ureilite. *Acta Petrologica Sinica*, 26(12): 3579–3588 (in Chinese with English abstract)
- Miao BK, Chen HY, Xia ZP, Yao J, Xie LF, Ni WJ and Zhang CT. 2013. Lunar meteorites: Witnesses to the moon's composition and evolution. *Chinese Journal of Polar Research*, 25(4): 315–328 (in Chinese with English abstract)
- Neal CR and Taylor LA. 1992. Petrogenesis of mare basalts: A record of Lunar volcanism. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 56(6): 2177–2211
- Newton RC and Perkins D. 1986. Thermodynamic calibration of geobarometers based on the assemblages garnet-plagioclase-orthopyroxene (clinopyroxene)-quartz. *American Mineralogist*, 67: 203–222
- Nyquist LE, Shih CY and Reese YD. 2007. Sm-Nd and Rb-Sr ages for MIL 05035: Implications for surface and mantle sources. *Lunar and Planetary Science*, XXXVIII
- Oba T and Kobayashi Y. 2001. The mineral assemblage of symplectites in Lunar meteorite Asuka-881757. *Antarctic Meteorite Research*, 14: 21–27
- Ostertag R. 1983. Shock experiments on feldspar crystals. *Journal of Geophysical Research*, 88(15S1): B364–B376
- Ouyang ZY. 2005. Introduction to Lunar Science. Beijing: China Aerospace Press, 119–125 (in Chinese)
- Papike JJ, Ryder G and Shearer CK. 1998. Lunar samples. In: Papike JJ (ed.). *Reviews in Mineralogy: Planetary Materials*. Washington: Mineralogical Society of America, 36: 5–234 (Chapter 5)
- Stöffler D, Keil K and Scott Edward RD. 1991. Shock metamorphism of ordinary chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55(12): 3845–3867
- Sun H, Qin KZ, Su BX, Fan X, Tang DM and Li J. 2009. Discovery of komatiitic ultramafic intrusion in terrain: Xiadong intrusion, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 25(4): 738–748 (in Chinese with English abstract)
- Terada K, Anand M, Sokol AK, Bischoff A and Sano Y. 2007. Cryptomare magmatism 4.35 Gyr ago recorded in lunar meteorite Kalarhari 009. *Nature*, 450(7171): 849–852
- Zeigler RA, Korotev RL and Jolliff BL. 2007. Miller Range 05035 and Meteorite Hills 01210: Two basaltic Lunar meteorites, both likely source-crater paired with Asuka 881757 and Yamato 793169. *Lunar and Planetary Science*, XXXVIII
- Zhang AC, Xu WB, Li QL, Li Y, Liu Y, Jiang Y and Tang GQ. 2010. SIMS Pb/Pb dating of Zr-rich minerals in lunar meteorites Miller Range 05035 and LaPaz Icefield 02224: Implications for the petrogenesis of mare basalt. *Science China (Earth Sciences)*, 53(3): 327–334

附中文参考文献

- 郭宁和, 郑海飞. 2010. 石英拉曼峰进行压力标定的误差研究. *光谱学与光谱分析*, 30(8): 2161–2163
- 江明, 刘辉, 黄欢. 2009. 图像二值化技术的研究. *软件导刊*, 8(4): 176–178
- 李月, 周瑶琪, 颜世永, 崔启良, 赵永年, 章大港, 陈勇. 2006. 高压下橄榄石的激光拉曼光谱研究. *光散射学报*, 18(1): 11–16
- 缪秉魁, 林杨挺, 胡森, 沈文杰, 王葆华, 冯璐, 刘焘. 2010. 东南极格罗夫山陨石(GRV 052382): 一块强烈冲击变质的橄辉无球粒陨石. *岩石学报*, 26(12): 3579–3588
- 缪秉魁, 陈宏毅, 夏志鹏, 姚杰, 谢兰芳, 倪文俊, 张川统. 2013. 月球陨石: 月球的物质组成及其演化历史的见证. *极地研究*, 25(4): 315–328
- 欧阳自远. 2005. *月球科学概论*. 北京: 中国宇航出版社, 119–125
- 孙赫, 秦克章, 苏本勋, 范新, 唐冬梅, 李军. 2009. 中天山地块科马提质超镁铁岩体的发现: 新疆峡东岩体. *岩石学报*, 25(4): 738–748