

一块新发现的月球陨石 NWA 12279 的岩石矿物学、源区和冲击变质作用

周剑凯, 陈宏毅, 谢兰芳, 缪秉魁, 仲 艳

(桂林理工大学 广西隐伏金属矿产勘查重点实验室, 广西 桂林 541006; 行星地质演化广西高校重点实验室, 广西 桂林 541006; 桂林理工大学 陨石与行星物质研究中心, 广西 桂林 541006)

摘要: NWA 12279 为 2016 年发现的一块斜长岩质月球陨石, 由 86% 的斜长岩和 14% 的冲击熔融角砾岩组成。斜长岩具嵌晶结构, 矿物组成主要为斜长石(70.6%)、橄榄石(11.3%)、辉石(10.0%)、镁铝尖晶石(7.0%), 含少量石英、铬铁矿和钛铁矿; 冲击熔融角砾岩具角砾状结构, 主要由岩屑(斜长岩、辉长-橄长-斜长岩、微斑熔融角砾岩、辉长岩)、晶屑(橄榄石、辉石、斜长石、尖晶石)、玻屑和基质组成。斜长岩和角砾岩的矿物组成基本一致, 主要为斜长石($\text{An}_{92.9-98.4}$)、紫苏辉石($\text{Fs}_{15.5-32.2}\text{Wo}_{2.98-4.22}$)、易变辉石($\text{Fs}_{27.9-53.1}\text{Wo}_{7.19-14.7}$)、普通辉石($\text{Fs}_{8.42-38.9}\text{Wo}_{17.0-44.1}$)、橄榄石($\text{Fo}_{53.7-89.4}$)、尖晶石[($\text{Mg}_{4.97}\text{Fe}_{0.86}$) $_{5.83}$ ($\text{Al}_{11.4}\text{Cr}_{0.61}$) $_{12.0}\text{O}_{24}$]。通过对陨石的矿物组成、碎屑组成、矿物成分、全岩成分和冲击变质特征进行研究, 并和已发现的月球斜长岩进行了对比, 认为该陨石可能起源于一个新的富含尖晶石的辉长橄长斜长岩高地。该陨石的斜长岩和角砾岩具有不同的冲击特征, 斜长岩区域发育橄榄石面状破裂、斜长石熔长石化及含未熔融的辉石和橄榄石晶屑的冲击熔脉; 角砾岩区域发育玻璃质熔脉、冲击熔体及岩石角砾化, 这些特征限制了斜长岩区和角砾岩区经历的冲击压力峰值分别约为 45 GPa 和 78 GPa, 温度峰值分别约为 1 100℃ 和 1 890℃, 冲击变质阶段为 $S_5 \sim S_6$ 。

关键词: 月球陨石; NWA 12279; 岩石矿物学; 源区; 冲击变质

中图分类号: P185.83; P588.12⁺4

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2019)04-0521-14

Petromineralogy, origin and impact metamorphism of a new lunar meteorite NWA 12279

ZHOU Jian-kai, CHEN Hong-yi, XIE Lan-fang, MIAO Bing-kui and ZHONG Yan

(Guangxi Key Laboratory of Hidden Metallic Ore Deposits Exploration, Guilin University of Technology, Guilin 541006, China;

Guangxi Key University Laboratory of Planetary Geological Evolution, Guilin University of Technology, Guilin 541006, China;

Institute of Meteorites and Planetary Materials Research, Guilin University of Technology, Guilin 541006, China)

Abstract: NWA 12279 is a piece of anorthosite lunar meteorite newly discovered in 2016, consisting of 86% anorthite and 14% impact melt breccia. The anorthosite, has a poikilitic texture and is composed of plagioclase (70.6%), olivine (11.3%), pyroxene (10.0%) and magnesium-aluminum spinel (7.0%), with a small amount of quartz, chromite and ilmenite. The impact melt breccia is mainly composed of lithic clasts such as anorthosite, gabbro-troctolite-anorthosite, microporphyritic crystalline impact melt breccias and gabbro, and such mineral fragments as olivine, pyroxene, plagioclase and spinel, and glass as well as matrix. The anorthosite has the

收稿日期: 2019-03-07; 接受日期: 2019-04-04; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 国家自然科学基金项目(41866008); 广西科技计划项目(桂科 AD16450001); 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)

作者简介: 周剑凯(1995-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 陨石学和天体化学, E-mail: 453726104@qq.com; 通讯作者: 陈宏毅(1980-), 男, 博士, 高级实验师, 研究方向: 陨石学和天体化学, E-mail: Chy@glut.edu.cn。

same mineral composition as the breccia: plagioclase ($\text{An}_{92.9 \sim 98.4}$), hypersthene ($\text{Fs}_{15.5 \sim 32.2} \text{Wo}_{2.98 \sim 4.22}$), pigeonite ($\text{Fs}_{27.9 \sim 53.1} \text{Wo}_{7.19 \sim 14.7}$), augite ($\text{Fs}_{8.42 \sim 38.9} \text{Wo}_{17.0 \sim 44.1}$), olivine ($\text{Fo}_{53.7 \sim 89.4}$), and magnesium aluminum spinel ($\text{Mg}_{4.97} \text{Fe}_{0.86} \text{Al}_{11.4} \text{Cr}_{0.61} \text{O}_{24}$). Based on mineral composition, clastic composition, mineral components, total rock composition and shock-metamorphism features of the meteorite, as well as a comparison with the discovered lunar anorthosite, the authors hold that the meteorite may originate from a new spinel-rich gabbro-troctolite-anorthosite highland. Anorthite and breccia of this meteorite have different shock metamorphic features. Planar fractures in olivine, maskelynite of plagioclase and impact melt veins containing unmelted pyroxene and olivine fragments were produced in the anorthite, and vitreous veins, impact melt-pockets and rock brecciation were developed in the breccia. The peak shock pressures in anorthosite and breccias are estimated to be ~ 45 GPa and ~ 78 GPa respectively, and the shock temperature peaks to be $\sim 1\ 100^\circ\text{C}$ and $\sim 1\ 890^\circ\text{C}$ respectively. The shock stage is $S_5 \sim S_6$.

Key words: lunar meteorite; NWA 12279; petromineralogy; origin; impact metamorphism

Fund support: National Natural Science Foundation of China (41866008); Project of Guangxi Science and Technology Plan (AD16450001); Project of Guangxi Key Laboratory of Hidden Metallic Ore Deposits Exploration (13-A-01-02)

月球的起源和演化是我们认识太阳系和地球起源和早期演化的一个重要参考(中国科学院贵阳地球化学研究所, 1977)。20 世纪 60 年代末开始, 美国 Apollo 计划和前苏联 Lunar 计划共计带回 382 kg 月表样品(Filiberto *et al.*, 2011), 为早期研究月球的物质组成提供了重要的科学依据。自从第一块月球陨石 Allan Hills A81005 在南极洲发现并被证实以来(Gross *et al.*, 2011), 截至发稿前国际陨石协会通过命名的月球陨石已经有 360 块(包括成对陨石), 合计 268 kg(来自国际陨石数据库统计)。

月球曾经历了强烈的撞击作用, 绝大部分月球陨石都是角砾岩, 只有少部分玄武岩质和斜长岩质月球陨石保留了未碎裂的结晶结构, 极少部分为原始结晶的玄武岩(陈宏毅等, 2015)。按照产地、主要矿物组成及其含量, 月球陨石可划分为月海玄武岩、高地斜长岩和冲击角砾岩 3 种类型, 但由于强烈的撞击作用, 地球上发现的月球陨石大部分为角砾岩。根据斜长岩质与玄武岩质的比例, 角砾岩可划分为斜长岩质角砾岩、玄武岩质角砾岩、斜长岩-玄武岩混合角砾岩(缪秉魁等, 2013)。月球陨石 NWA 12279 样品属于原始结晶的斜长岩(86%)和冲击熔融角砾岩(14%)的混合岩, 本文对其开展了详细的岩石学和矿物化学研究工作, 重点对冲击熔融区域的岩石、矿物学特征等进行了详细描述, 并探讨了陨石所经历的冲击历史事件和陨石的源区。

1 样品及实验方法

Northwest Africa 12279 (以下简称 NWA 12279, 该名称为国际命名)月球陨石于 2016 年 10 月被发现于西撒哈拉沙漠, 总质量为 1 830 g。陨石样品正面可见明显的棕褐色熔壳、椭圆形-圆形的冲击气印, 并发育有龟背裂纹状收缩裂隙。陨石背面可见明显的熔流线。熔流线呈褐色放射状, 并发育于土黄色-黄褐色熔壳上, 长度大于 5.0 cm, 宽约 0.1 ~ 0.2 cm, 放射状熔流线的中心为一个熔蚀坑。陨石中 14% 的物质为冲击熔融体。熔融体呈明显的角砾状, 冲击熔融部分无熔壳。陨石新鲜面呈灰白色, 具角砾状结构。

本文研究用陨石样品是从 NWA 12279 主体上切割下来的一部分, 质量为 37 g, 其中包含约 8% 的冲击熔融体(图 1)。由于样品较疏松、易脱落, 故首先将样品进行环氧树脂注胶, 然后对注胶样品进行切片, 最后制成标准厚度(0.03 mm)的光薄片进行观察。岩石学观察和矿物成分分析在广西隐伏金属矿产勘查重点实验室的光学显微镜和电子探针实验室完成, 激光拉曼光谱分析在有色金属及材料加工新技术教育部重点实验室完成。矿物化学成分定量分析利用 JEOL JXA-8230 型电子探针, 加速电压为 15 kV, 束流为 20 nA, 单矿物分析采用散焦方法测定, 束斑为 1 μm (斜长石采用 5 μm 散焦), 分析标样

为中国地质科学院制作的天然硅酸盐矿物和氧化物,使用标样及元素最低检测限(单位: 10^{-6})为: Na(钠长石, 97)、Mg(橄榄石, 69)、Al(钠长石, 88)、Si(橄榄石, 69)、K(金云母, 77)、Ca(硅灰石, 155)、Ti(金红石, 153)、Cr(金属铬, 83)、Mn(氧化锰, 171)、Fe(橄榄石, 91)、Ni(金属镍, 201)。所有分析结果采用 ZAF 方法校正(陈捷等, 1984; 陈宏毅等, 2015)。利用 CorelDraw 软件的网格功能和 Photoshop 的像素功能计算碎屑中不同矿物的模式丰度。用于矿物拉曼波谱分析的激光拉曼仪型号 Renishawinvia, 激光光源为 Ar^+ , 波长 514 nm, 功率为 20 mW, 实际作用

在样品表面的束斑直径为 $1\text{ }\mu\text{m}$, 采用单晶硅标样进行拉曼谱峰位置标定(谢超等, 2016)。

2 岩石学特征

NWA 12279 陨石由斜长岩和冲击熔融角砾岩两种岩性组成(图 1), 玻璃质熔脉左侧为斜长岩区域, 右侧为角砾岩区域。斜长岩具全晶质结构(图 2), 部分斜长石熔长石化, 含自形到半自形的尖晶石(图 3)。角砾岩冲击变质程度高, 含有玻璃质冲击熔脉、脱玻化的斜长石锥晶和大量的岩屑、晶屑和玻屑。

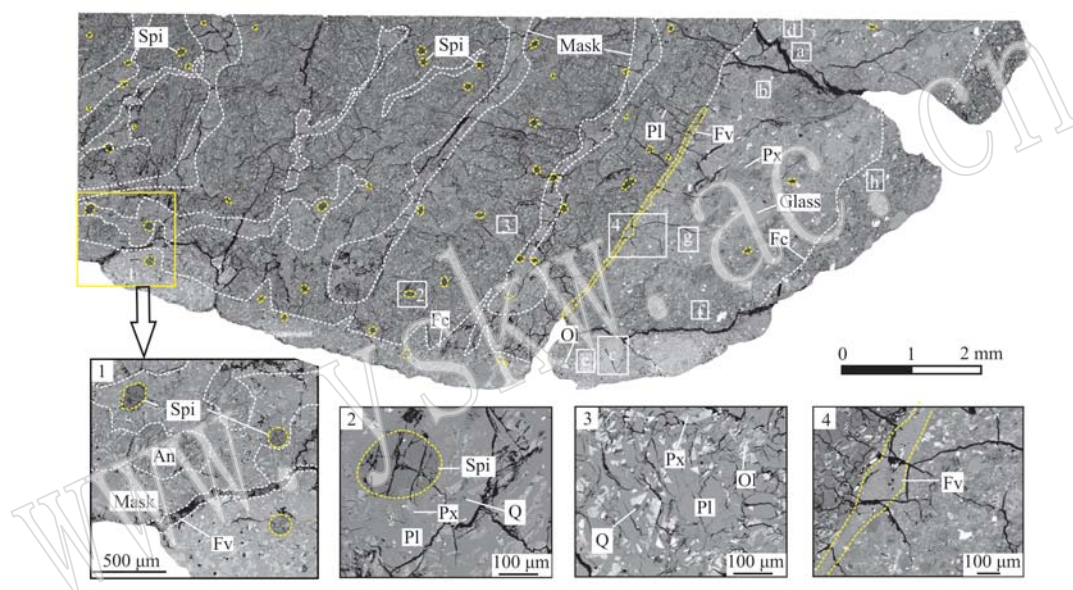


图 1 NWA 12279 陨石薄片背散射电子图像全拼图

Fig. 1 BSE images of the thin section of NWA 12279

a ~ h 为本文讨论的角砾区域, 放大见图 4; 1 ~ 4 为区域放大图: 1—玻基斑状结构; 2—嵌晶结构; 3—次辉绿结构; 4—熔脉; Pl—斜长石; Ol—橄榄石; Px—辉石; Gl—玻璃; Mask—熔长石; Spi—尖晶石; Q—石英; An—斜长岩; Fv—熔脉; Fe—熔壳
a ~ h are breccia for this discussion, partly enlarged images in Fig. 4; 1 ~ 4 are partly enlarged images: 1—vitriphic texture; 2—poikilitic texture; 3—sub-ophitic texture; 4—fusion veins; Pl—plagioclase; Ol—olivine; Px—pyroxene; Gl—glass; Mask—masklynite; Spi—spinel; Q—quartz; An—anorthosite; Fv—fusion veins; Fe—fusion crust

2.1 斜长岩

在电子背散射图中, 斜长岩具玻基斑状结构(图 1-1)和嵌晶结构(图 1-2)。嵌晶结构区域, 不规则状它形辉石颗粒($50 \sim 100\text{ }\mu\text{m}$, 10.0%)、浑圆状它形橄榄石颗粒($10 \sim 50\text{ }\mu\text{m}$, 11.3%)、圆形到次圆形半自形尖晶石($80 \sim 200\text{ }\mu\text{m}$, 7.0%)颗粒以及少量细小的石英(0.32%)、铬铁矿(0.21%)和钛铁矿(0.17%)等矿物被斜长石(71.0%)主晶包裹(图 2)。尖晶石颗粒较大(图 1), 具有 404 cm^{-1} 的标准拉曼吸收峰(图 3)。嵌晶结构局部发育次辉绿结构(图 1-3), 板条状的斜长石形成三角形空间, 中间被辉石

或橄榄石颗粒充填(图 1-3)。约 58% 的斜长石已熔长石化, 构成玻基斑状结构。熔长石条带宽 $0.2 \sim 1.0\text{ mm}$, 呈不规则条带状、树枝状分布, 斑晶的主要类型为辉石、橄榄石和尖晶石, 形态和含量与嵌晶结构区域一致。

2.2 冲击熔融角砾岩

冲击熔融角砾岩呈角砾状结构, 基质为熔融玻璃, 熔融条带宽 $2 \sim 5\text{ mm}$, 与斜长岩区域具有明显且笔直的界线, 交界处发育冲击程度较高的玻璃质熔脉(图 1-4), 在熔融角砾岩外侧发育 $0.5 \sim 1.0\text{ mm}$ 宽的冲击破碎角砾, 指示遭受强烈的冲击作用。整

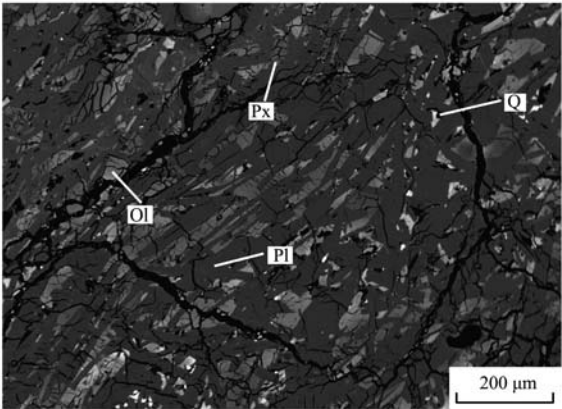


图 2 斜长岩区域全晶质结构背散射图像
Fig. 2 BSE image of pleocrystalline texture of anorthosite
Pl—斜长石; Ol—橄榄石; Px—辉石; Q—石英
Pl—plagioclase; Ol—olivine; Px—pyroxene; Q—quartz

体结构以角砾(86.4%)和基质(13.6%)组成。角砾呈不规则棱角状和少量浑圆状,大小一般为 0.10~3.60 mm。角砾类型多样,主要为晶屑(70.8%)、岩屑(12.5%)和少量玻屑(3.10%)。晶屑主要为橄榄石、紫苏辉石、易变辉石、普通辉石、斜长石及镁铝尖晶石,粒径大小为 0.1~0.5 mm 左右;玻屑主要为斜长石质,粒径一般为 0.10~0.52 mm,呈长条状和不规则状;岩屑主要以斜长岩岩屑、辉长-橄长-斜长岩岩屑、辉长岩岩屑和微斑冲击熔融角砾岩岩屑为主,粒径一般为 0.17~3.16 mm(表 1)。基质主要是细小的玻屑和矿物碎屑形成的混合物(图 1)。

2.2.1 岩屑的类型及特征

岩屑是角砾岩区中的主要碎屑,依据 Stöffler 等(1980)划分岩屑类型的标准,本文岩屑包括斜长岩

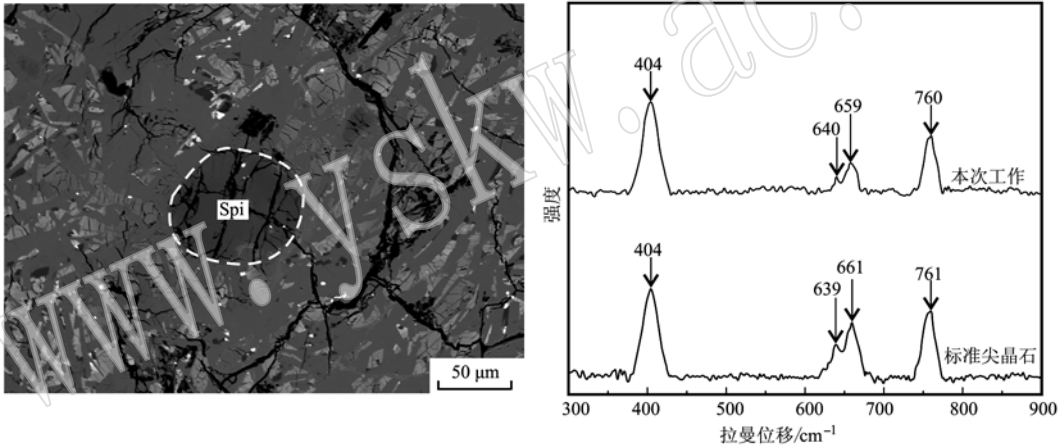


图 3 尖晶石背散射电子图像及激光拉曼谱图
Fig. 3 BSE images and laser Raman spectra of the spinel
Spi—尖晶石;尖晶石标准峰来源于加利福尼亚理工学院标准矿物拉曼谱峰库 RRUFF, 网址: <http://rruff.info/>
Spi—spinel; the spinel standard spectrum data from the RRUFF Project website containing an integrated database of Raman spectra, X-ray diffraction and chemistry data for minerals in California Institute of Technology, URL: <http://rruff.info/>

表 1 NWA 12279 角砾岩区碎屑统计表

$\varphi_B/\%$

Table 1 The characteristics of clastics in breccia of the NWA 12279

角砾类型	数量	形态	碎屑粒径范围/mm	橄榄石	辉石	斜长石	其他
斜长岩岩屑	12	棱角状	0.13~0.25	0~6	0~3	90~97	钛铁矿 0~2, 铬铁矿 0~1
辉长-橄长-斜长岩岩屑	8	棱角状、浑圆状	0.45~3.61	13~32	12~22	40~53	铬铁矿 0~8
微斑熔融角砾岩岩屑	5	浑圆状	0.53~1.37	2~9	3~11	70~89	钛铁矿 0~4
辉长岩岩屑	4	棱角状	0.12~0.20	—	51~60	40~47	铬铁矿 0~2
斜长石晶屑	127	板条状、次棱角状	0.10~0.30	—	—	100	—
尖晶石晶屑	3	浑圆状、次圆状	0.50~0.98	—	—	—	—
橄榄石晶屑	34	棱角状、次棱角状	0.10~0.40	100	—	—	—
辉石晶屑	29	次棱角状、浑圆状	0.10~0.15	—	100	—	—
长石质玻屑	9	长条状、似圆状	0.12~0.19	0~4	0~13	13~20	玻璃质 57~80

岩屑、辉长-橄长-斜长岩岩屑、微斑熔融角砾岩岩屑 和辉长岩岩屑 4 种(表 1、图 4)。

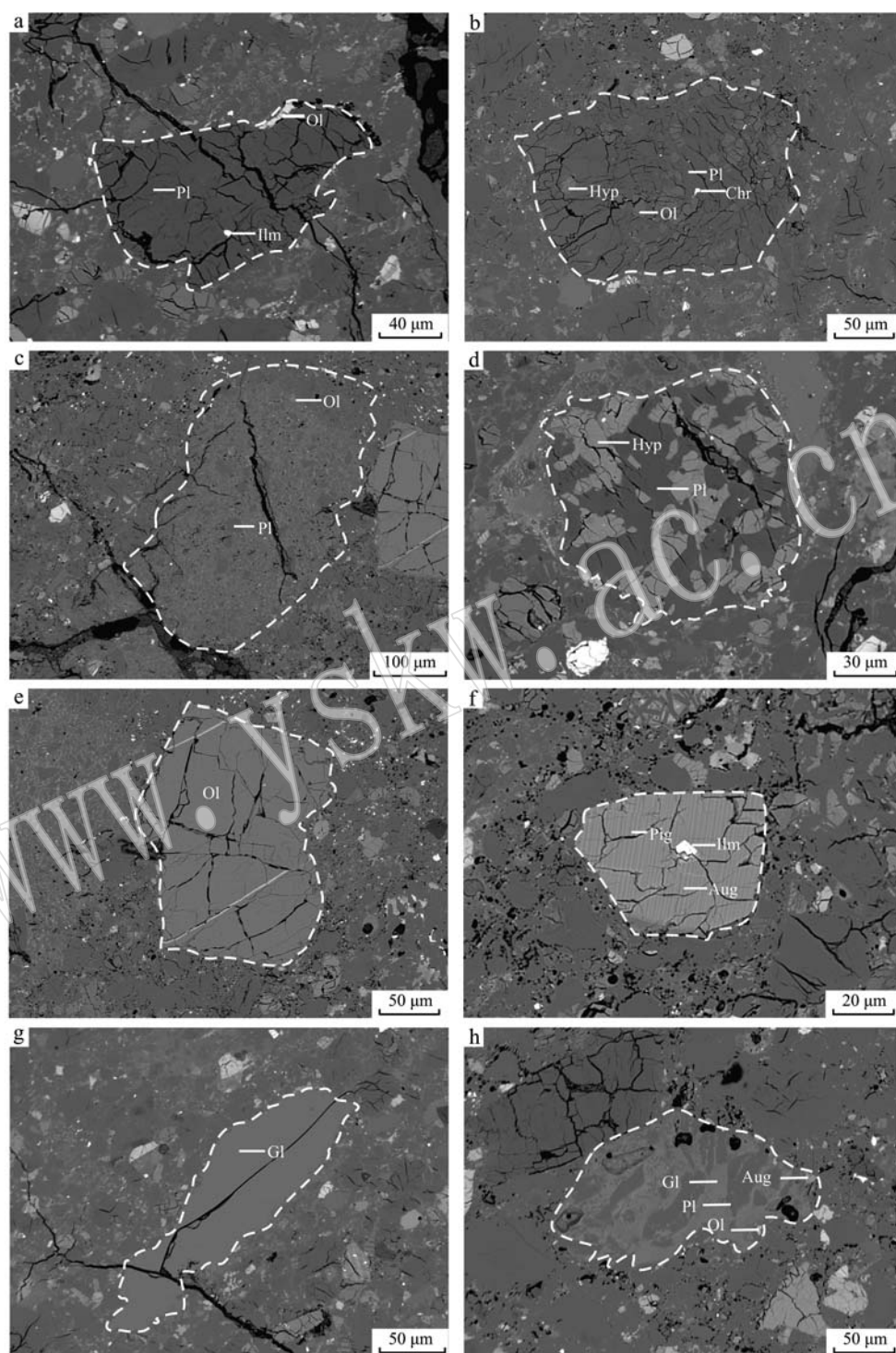


图 4 代表性碎屑的背散射电子图像(具体位置见图 1)

Fig. 4 The BSE images of the typical clastics in breccia area (the specific location shown in Fig. 1)

a—斜长岩岩屑；b—辉长-橄长-斜长岩岩屑；c—微斑熔融角砾岩岩屑；d—辉长岩岩屑；e—橄榄石晶屑；f—具有出溶条带的辉石晶屑；g、h—玻屑；Pl—斜长石；Ol—橄榄石；Aug—普通辉石；Pig—易变辉石；Hyp—紫苏辉石；Gl—玻璃质玻屑；Ilm—钛铁矿；Chr—铬铁矿
a—anorthositeclasts；b—gabbro-troctolite-anorthositeclasts；c—microporphyrritic crystalline impact melt breccia；d—gabbro clast；e—olivine clast；f—exsolution of the pyroxene clast；g, h—glass clast；Pl—plagioclase；Ol—olivine；Aug—augite；Pig—pigeonite；Hyp—hypersthene；Gl—glass；Ilm—ilmenite；Chr—chromite

斜长岩岩屑,主要矿物为斜长石,含极少量橄榄石和钛铁矿,是主要碎屑类型。一典型斜长岩岩屑斜长石含量为97%,大小为0.25 mm×0.16 mm,具棱角状边缘,表面具不规则裂纹,橄榄石和钛铁矿呈它形粒状分布在岩屑中(图4a)。

辉长-橄长-斜长岩岩屑,主要矿物为斜长石、橄榄石、普通辉石和紫苏辉石。其中一辉长-橄长-斜长岩岩屑,具不等粒结构,发育不规则裂纹,大小为0.45 mm×0.30 mm,矿物组成为斜长石(51%)、橄榄石(29%)、紫苏辉石(12%)、普通辉石(6%)以及少量的铬铁矿(2%)(图4b)。

微斑熔融角砾岩岩屑,斑状结构,由少量以斜长石和钛铁矿为主的斑晶和细粒-极细粒基质矿物(橄榄石、辉石、斜长石)组成。一典型的微斑熔融角砾岩岩屑,大小为0.53 mm×0.74 mm,呈次棱角边缘,斑状结构,斑晶为斜长石(84%)、橄榄石(13%)和钛铁矿(3%)(图4c)。

辉长岩岩屑,具辉长结构,主要矿物为紫苏辉石和斜长石。一典型辉长岩岩屑,大小为0.17 mm×0.16 mm,棱角状边缘,表面有裂纹,矿物组成为斜长石(47%)、紫苏辉石(51%)和铬铁矿(2%),斜长石和辉石均呈半自形-它形存在,极少数铬铁矿以粒状散分布在岩屑中(图4d)。

2.2.2 晶屑的类型及特征

晶屑主要为斜长石、橄榄石、紫苏辉石、易变辉石、普通辉石及尖晶石,其次为钛铁矿和铬铁矿(表1)。斜长石为半自形晶,部分已熔长石化。橄榄石具波状消光,晶面发育破裂面,粒度为200 μm左右(图4e)。辉石呈次棱角状或浑圆状,部分辉石具有出溶条带(图4f),说明部分区域遭受较强烈的热变质作用。尖晶石呈次圆-浑圆状,整个薄片上均有分布,以在斜长岩中居多。钛铁矿、铬铁矿主要为不规则状,粒度一般为0.1 mm左右,在斜长岩和冲击熔融角砾岩中均有分布。

2.2.3 玻屑的类型及特征

玻屑为长石质,按照玻屑的结构特征分为玻璃质玻屑和玻基斑状玻屑。在角砾岩区域中,有3块较大的玻璃质玻屑存在,呈似圆状和长条状。其中一典型玻屑呈长条状,边界清晰,粒径大小为0.12 mm×0.49 mm(图4g)。玻基斑状玻屑基质为玻璃,斑晶为斜长石(极少数为普通辉石和橄榄石),呈弯曲条状和不规则粒状,粒径大小0.19 mm×0.31 mm,玻璃边部存在气孔(图4h)。

2.2.4 基质及特征

基质主要存在于冲击熔融角砾岩区域中,为细粒-极细粒隐晶质结构,由小于0.1 mm的细小晶屑和玻屑胶结而成。基质除了粒径大小和碎屑物质存在差异之外,其他特征和晶屑均没有明显的差异。

2.3 冲击熔脉

在斜长岩和角砾岩中均有冲击熔脉发育。斜长岩中的熔脉主要发育在熔长石化区域,熔脉宽10~50 μm,长度小于2 mm,发育时间晚于熔长石形成时间,含有橄榄石和辉石角砾。样品角砾岩和斜长岩交界处发育一长达5 mm、宽50~100 μm的玻璃质熔脉,成分均一,不含角砾(图1)。

3 矿物化学成分特征

3.1 斜长石

NWA 12279 陨石中的长石均为钙长石($An_{92.9 \sim 98.4}$),角砾与基质成分基本一致。由于受到冲击作用,使得大部分斜长石(58%)发生固态相变变为熔长石。不同区域碎屑中斜长石成分稍有差别,斜长岩区域中的斜长石($An_{97.2 \sim 98.4}$)相对角砾岩区域中的斜长石($An_{92.9 \sim 98.4}$)具有高镁、贫硅铝的特征。其中斜长岩岩屑钙含量最高($An_{97.2 \sim 98.4}$),辉长岩岩屑中钙含量最低($An_{92.9 \sim 93.8}$),微斑熔融角砾岩岩屑和辉长-橄长-斜长岩岩屑基本一致($An_{96.3 \sim 97.3}$)(表2、图5a)。

3.2 橄榄石

NWA 12279 陨石中的橄榄石多以富镁橄榄石($Fo_{53.7 \sim 89.4}$)为主,不同的碎屑中橄榄石成分稍有差别,辉长-橄长-斜长岩岩屑中橄榄石相对富镁($Fo_{81.7 \sim 82.9}$),斜长岩岩屑中橄榄石相对富铁($Fo_{58.7 \sim 64.7}$)(图5b)。部分橄榄石具有明显的成分环带,核部富镁贫铁,边部富铁贫镁,核部到边部成分变化趋势明显(图6)。

3.3 辉石

NWA 12279 陨石辉石类型多样,矿物成分范围变化较大。不同碎屑中辉石具有不同的分布特征:其中辉长-橄长-斜长岩岩屑中有两种辉石,分别为紫苏辉石($Fs_{15.5 \sim 32.2} Wo_{2.98 \sim 4.22}$)和普通辉石($Fs_{8.42 \sim 23.0} Wo_{23.7 \sim 44.1}$),普通辉石以出溶条带形式产出;辉长岩岩屑以紫苏辉石($Fs_{19.7 \sim 32.2} Wo_{3.0 \sim 3.17}$)为主,相对其他类型的辉石富铁;不同区域的辉石晶屑出溶不同类型的条带,冲击熔融区的辉石出溶普通

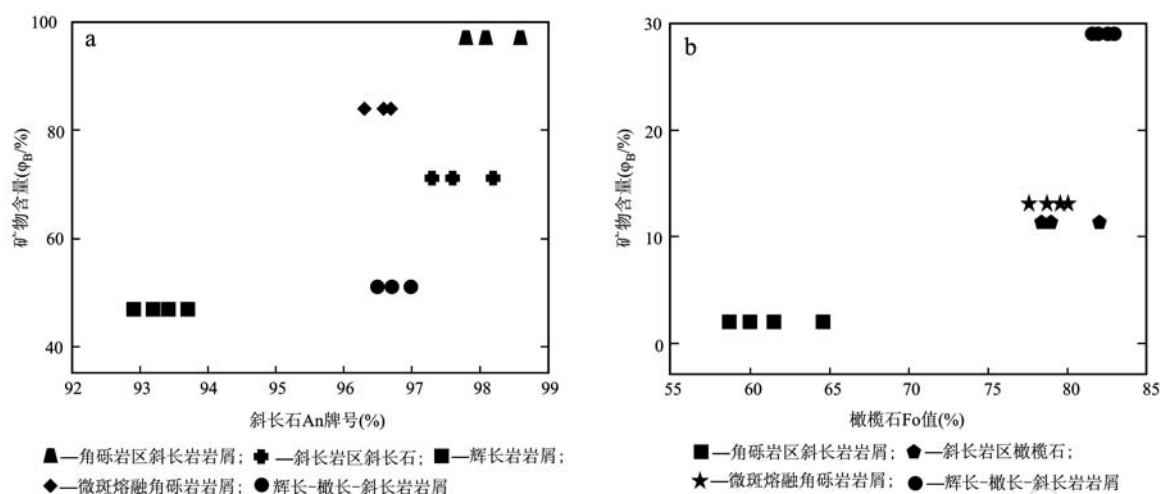


图5 陨石中斜长石(a)及橄榄石(b)的成分投图

Fig. 5 Mineral compositions of plagioclase (a) and olivine (b) in NWA 12279

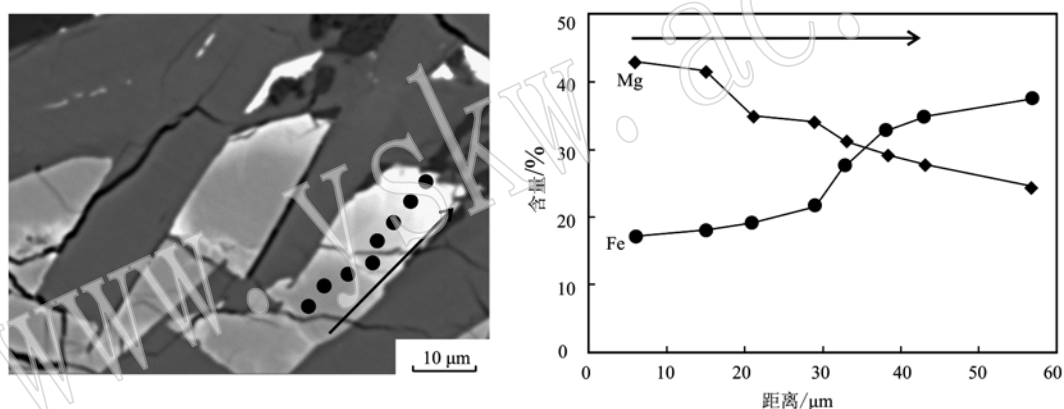


图6 橄榄石颗粒由核部到边部的成分变化图

Fig. 6 The growth zoning of olivine from core to rim

辉石($\text{Fs}_{14.4 \sim 24.9} \text{Wo}_{19.6 \sim 41.3}$), 原始斜长岩区的辉石出溶易变辉石($\text{Fs}_{27.9 \sim 53.1} \text{Wo}_{7.19 \sim 14.7}$)(图7)。

3.4 尖晶石

斜长岩与角砾岩区域均存在镁铝尖晶石

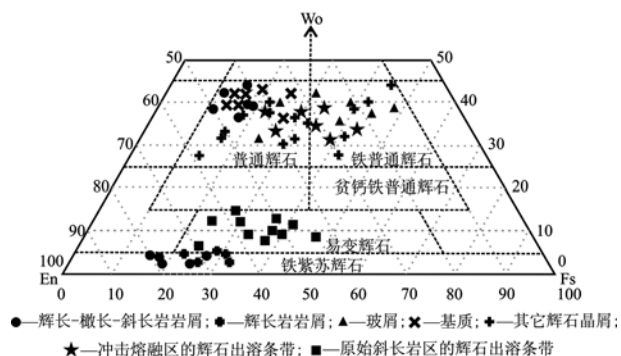


图7 辉石的化学成分

Fig. 7 Mineral compositions of pyroxene of NWA 12279

[$w(\text{MgO}) = 20.1\% \sim 23.6\%$, $w(\text{Al}_2\text{O}_3) = 59.5\% \sim 69.2\%$)(表2), 以斜长岩为主。尖晶石成分较均一, 化学式为 $(\text{Mg}_{4.97} \text{Fe}_{0.86})_{5.83} (\text{Al}_{11.4} \text{Cr}_{0.61})_{12.0} \text{O}_{24}$, 可简化为 MgAl_2O_4 。由于受强烈的撞击作用, 尖晶石表面均发育有破裂纹理(图1、图3)。

4 冲击变质特征

月表在陨星的撞击作用下, 月岩中的矿物可出现波状消光、面状破裂、马赛克消光、冲击熔脉、斜长石熔长石化等冲击变质特征(丁明伟等, 2008)。NWA 12279 陨石中存在大量破碎程度较高的岩石碎屑、矿物碎屑和发生熔长石化的斜长石。该陨石的冲击变质特征为: ① 由不同的斜长岩角砾碎块冲击胶结而成, 角砾岩和斜长岩具有明显的界线, 界线为

玻璃质的冲击熔脉; ② 斜长岩中的熔长石为不规则树枝状, 但具有方向上的一致性; ③ 角砾岩从左到右依次为玻璃质冲击熔脉、固结较好的角砾岩和固结程度不高的角砾岩, 显示了不同的冲击变质程度;

④ 熔长石占有斜长石的 58.0% 以上, 是冲击熔体和熔脉基质的主要成分(图 8a); ⑤ 冲击裂隙(图 8b)、面状裂隙(图 8c)、角砾化、波状消光(图 8d)等冲击特征明显; ⑥ 冲击熔融体中有淬火结构的

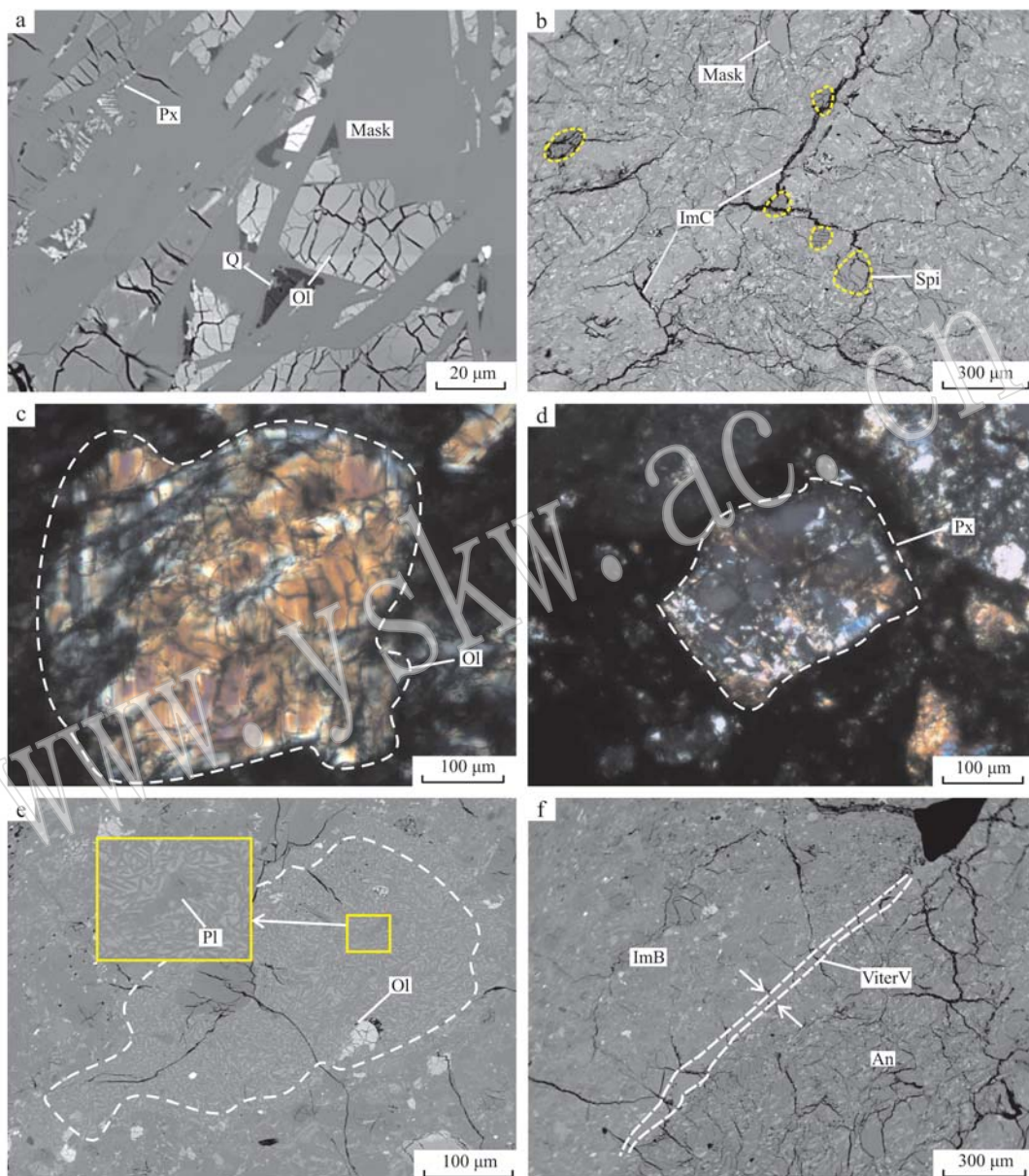


图 8 NWA 12279 陨石的冲击变质特征

Fig. 8 The characteristics of shock metamorphism of NWA 12279 meteorite

c 和 d 为正交偏光图像, 其它为背散射电子图像; 黄色方框为区域放大图; a—熔长石; b—冲击造成的裂隙; c—橄榄石面状破裂; d—辉石波状消光; e—冲击熔体中的淬火结构, 雏晶为斜长石; f—玻璃质熔脉; Mask—熔长石; Pl—斜长石; Ol—橄榄石; Px—辉石; Spi—尖晶石; Q—石英; ImC—冲击裂隙; Viter V—玻璃质熔脉; An—斜长岩; ImB—冲击熔融角砾岩

c and d are crossed nicols images, others are BSE images; the yellow box is partially enlarged images; a—maskelynite; b—impact crack; c—planar fracture of olivine; d—undulate extinction of pyroxene; e—quenched structure of the melt-pockets, the crystallites being maskelynite; f—vitreous veins; Mask—maskelynite; Pl—plagioclase; Ol—olivine; Px—pyroxene; Spi—spinel; Q—quartz; ImC—impact crack; Viter V—vitreous veins;

An—anorthosite; ImB—impact melting breccia

出现(图8e), 雏晶为斜长石; ⑦ 大量发育的冲击熔脉有两种: 一种含有未熔融的辉石和橄榄石晶屑, 一种转变为完全均一化的玻璃化斜长石(图8f)。依据斜长石发生熔长石化、冲击熔脉、呈淬火结构的冲击熔融体、角砾化等冲击变质特征, 按照 Stöffler 等(1991)的划分标准, 推断 NWA 12279 经历的冲击程度为 $S_5 \sim S_6$ 。

5 讨论

5.1 NWA 12279 陨石来自月球的证据

该陨石来源于月球的证据主要有: ① 岩性主要以斜长岩为主, 符合典型的月球岩石与月球陨石的

岩性特征(Isacson *et al.*, 2011); ② 月球高地斜长岩中的斜长石主要以钙长石为主(Carter *et al.*, 1968; 郭迪江, 1995; Korotev, 1983; Korotev *et al.*, 2003; 陈鸣, 2009), 而该陨石中的斜长石 An 值范围为 92.9 ~ 98.4, 符合高地斜长岩中钙长石的组分范围; ③ Fe/Mn 值是区分小行星、火星、月球和地球来源的重要参数, 它是判别陨石是否为月球起源的重要依据(Korotev *et al.*, 2003)。该陨石中的橄榄石和 3 种不同类型的辉石的 $n(\text{Fe})/n(\text{Mn})$ 值分别为 62 ~ 102 和 37 ~ 69, 均落在月球岩石趋势线范围内(图9), 明显区别于其他行星和小行星起源的陨石和地球上的岩石(Papike, 1998)。因此, 可以认为 NWA 12279 起源于月球。

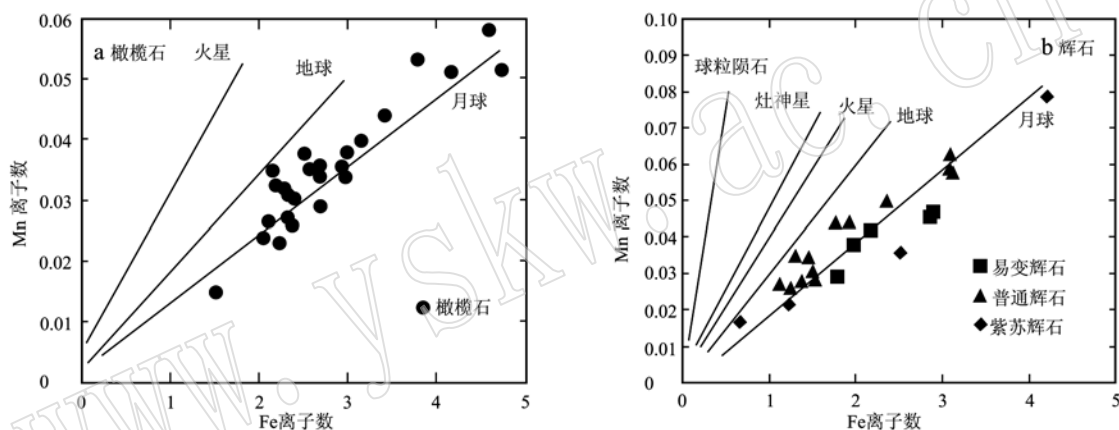


图9 NWA 12279 陨石中橄榄石与辉石的 Fe/Mn 值

Fig. 9 Concentrations of Fe and Mn in pyroxene and olivine from NWA 12279

火星、地球和月球的趋势线来源于 Papike 等(1998)

The trend lines of the Mars, the Earth and the Moon from Papike *et al.*, 1998

5.2 NWA 12279 陨石的岩石学类型

NWA 12279 陨石整体由 86.0% 的未破碎斜长岩和 14.0% 的冲击熔融角砾岩两部分组成。斜长岩区域以斜长岩为主, 矿物组成主要为斜长石, 其次为橄榄石、辉石和尖晶石; 角砾岩区域角砾以斜长岩质居多, 晶屑类型与斜长岩区域一致, 角砾岩的矿物组成与斜长岩基本一致, 但是角砾岩中的碎屑类型、粒径、结构、岩屑类型、晶屑矿物化学成分之间存在明显差异(表3)。

NWA 12279 中有 3 种玻璃质: 斜长岩熔壳、角砾岩中的熔脉和玻屑。角砾岩中的熔脉和玻屑化学成分基本一致, 而与斜长岩熔壳有明显区别(表4)。熔壳在一般意义上可以代表陨石全岩成分, 说明斜长岩区的全岩成分和角砾岩熔脉成分不同。

斜长岩和角砾岩具有相同的矿物组成, 共同起源于月球高地, 但斜长岩和角砾岩中不同的岩屑、结构、粒径大小、碎屑类型及矿物化学成分说明二者来自于不同的高地区域, 并经历不同的温度, 是通过撞击作用结合在一起的。通过分析 NWA 12279 的岩石学、矿物成分、结构构造等特征, 对照 Stöffler 等(1980)对高地斜长岩的分类标准, 确定 NWA 12279 为局部角砾岩化的富尖晶石辉长-橄长岩质的斜长岩。

5.3 源区分析

目前在地球上发现的月球高地斜长岩(包括斜长岩质角砾岩)陨石共有 53 块, 而含有大量尖晶石的高地斜长岩在月球陨石中是极其罕见的(Greshake *et al.*, 2001; Gross *et al.*, 2011)。NWA 12279 陨石

表3 NWA 12279 陨石斜长岩区域与角砾岩区域特征一览表
Table 3 The characteristics of anorthosite and breccias area in NWA 12279

	斜长岩	角砾岩
矿物粒径/ mm	橄榄石: 0.10~0.23 辉石: 0.10~0.12 斜长石: 0.10~0.16	橄榄石: 0.23~0.40 辉石: 0.12~0.15 斜长石: 0.16~0.30
矿物化学成分 (w _B %)	橄榄石 (Fo): 77.0~82.0 辉石 (Wo): 7.19~36.4 斜长石 (An): 97.2~98.4	橄榄石 (Fo): 53.7~89.4 辉石 (Wo): 2.98~44.1 斜长石 (An): 92.9~98.4
岩屑类型及 结构	斜长岩 (嵌晶结构、玻基斑状结构)	斜长岩、辉长- 橄长-斜长岩岩屑 (不等粒结构) 微斑熔融角砾岩岩屑 (斑状结构) 辉长岩岩屑(辉长结构)
玻屑		玻璃质玻屑 玻基斑状玻屑

表4 角砾岩区玻璃质熔脉、玻屑和斜长岩区熔壳间
成分对比

Table 4 Compositional comparison of the vitreous veins,
glass and fusion crust

元素	角砾岩区玻璃质熔脉	角砾岩区玻屑	斜长岩区熔壳
Na ₂ O	0.37	0.11	0.54
MgO	6.11	7.40	0.37
Al ₂ O ₃	28.2	24.8	34.6
SiO ₂	44.5	45.0	44.2
P ₂ O ₅	0.03	—	—
K ₂ O	0.02	0.07	0.02
CaO	17.2	16.3	21.0
TiO ₂	0.25	0.34	0.04
V ₂ O ₃	—	—	0.03
Cr ₂ O ₃	0.11	0.18	0.02
MnO	0.11	0.10	—
FeO	4.18	6.59	0.47
NiO	—	—	—
Total	101	101	101

“—”代表低于检测限。

与 ALHA 81005 (Gross *et al.*, 2011)、Dhofar 081 (Greshake *et al.*, 2001) 等陨石在岩石结构和矿物组成上等具有类似性, 岩性均以斜长岩为主, 均含有斜长石、橄榄石、低钙辉石、高钙辉石等矿物, 但 NWA 12279 含有约 7% 的镁铝尖晶石 (100~200 μm, Fe[#] 值为 0.15), 斜长石、橄榄石和辉石等矿物颗粒细小, 而 ALHA 81005 中一颗含尖晶石岩屑为辉长橄长斜长岩 (碎屑大小 300 μm × 500 μm), 尖晶石成分为镁铁铝尖晶石 (Fe[#] 值为 0.35), 含量 30%, 直径 30~

50 μm。ALHA 81005 被认为起源于 M3 探测器探测到的月球远边 Moscoviense 盆地边缘的区域, 这些区域富含镁铁铝尖晶石, 并含有少于 5% 的镁铁硅酸盐矿物 (橄榄石和辉石) (Gross *et al.*, 2011)。显然, NWA 12279 从矿物含量、尖晶石大小和成分等方面与 ALHA 81005 陨石并不完全一致, 也与 Moscoviense 盆地边缘矿物含量不一致。Dhofar 081 陨石中的尖晶石为富钛铬尖晶石, 二者矿物颗粒、岩屑大小均具有粗大的特征, 可能起源于远离月球前缘的 KREEP 岩性的高地 (Greshake *et al.*, 2001)。因此, NWA 12279 与 ALHA 81005、Dhofar 081 的来源并不完全相同。同时, 到目前为止, NWA 12279 陨石与 Apollo 系列采样带回的月球岩石 (Warren and Kallemeyn, 1991; Warren and Taylor, 2014) 成分之间也存在明显差异, 说明 NWA 12279 源区不同于 Apollo 系列采集的月球岩石区域。Luna 20 登月采样任务带回的一个月球粉尘样品 Troctolite 2003 在 2003 年被挑选出来, 质量为 1.75 mg、小于 60 μm 的橄榄石 (Fo_{95~96}) 和尖晶石 (Al₂O₃ = 66.6%~68.9%, MgO = 24.9%~26.1%, FeO = 3.99%~4.57%, Cr₂O₃ = 1.81%~2.25%) 客晶嵌镶在斜长石主晶中 (Snyder *et al.*, 1999), NWA 12279 中的尖晶石与 Troctolite 2003 尖晶石成分类型相似, 但粒径要大许多, 橄榄石成分上相对富铁, 说明 NWA 12279 起源于比 Troctolite 2003 碎屑更深的月壳下方。Troctolite 2003 采样点位于与月球东边高地的 Crisium 盆地 (Snyder *et al.*, 1999), 属于自动化采集的月球土壤样品, 其原来的来源不得而知。因此, 除了 ALHA 81005 一颗小于 1 mm 的岩石碎屑和 Troctolite 2003 中一颗 200 μm × 300 μm 的碎屑物质外, 在地球和登月采样的样品中均没有发现与 NWA 12279 类型一致、化学成分一致的岩石, NWA 12279 是非常独特的原始岩浆结晶的富尖晶石辉长-橄长岩质斜长岩, 可能起源于月球高地一个新的富含尖晶石 (~7%) 的辉长-橄长岩质斜长岩岩体。

5.4 冲击压力和温度约束

陨石中不同的冲击效应及高压相矿物是判断其温压历史的重要指标 (朱佳玲等, 2018)。不同温压条件下产生的冲击效应均不相同 (表 5)。NWA 12279 陨石由未破碎的斜长岩和冲击熔融角砾岩两部分组成, 二者区域内橄榄石、辉石与斜长石均表现出波状消光的特征, 说明其遭受到的压力应高于约 20 GPa, 温度高于约 336℃ (Müller *et al.*, 1969;

Homemann et al., 1971; *Schaal et al.*, 1979; *Dai et al.*, 1991; *Hiesinger*, 2006)。

表 5 陨石中不同矿物的冲击变质效应及对应的温度和压力

Table 5 Shock-metamorphic effects in different minerals of meteorites and their pressure and temperature

矿物	冲击效应	NWA 12279 冲击特征	冲击压力 / GPa	冲击温度 / °C	参考文献
橄榄石	波状消光	✓	约 10~15 约 12	约 336	Müller <i>et al.</i> , 1969; Dai <i>et al.</i> , 1991; Hiesinger, 2006
	镶嵌现象	—	约 10~15 约 27~33	约 472	Snee <i>et al.</i> , 1975; Kieffer <i>et al.</i> , 1976; Stöffler <i>et al.</i> , 1978
	面状破裂	✓	约 15~20	约 472	Müller <i>et al.</i> , 1969; Stöffler <i>et al.</i> , 1978, 1980, 1991
	林伍德石	—	约 18~23	约 1 800~1 950	谢先德等(2005), 陈鸣(2009)
	瓦兹利石	—	约 13~14	约 1 750~1 900	谢先德等(2005), 陈鸣(2009)
辉石	波状消光	✓	约 20~30 约 12	约 336	Homemann <i>et al.</i> , 1971; Schaal <i>et al.</i> , 1979
	镶嵌现象	—	约 20~30 约 27	约 472	Kieffer <i>et al.</i> , 1976; Schaal <i>et al.</i> , 1977; Schaal <i>et al.</i> , 1979; Hiesinger, 2006;
	面状破裂	—	约 30~35	约 472	Homemann <i>et al.</i> , 1971; Schaal <i>et al.</i> , 1977, 1979
	镁铁榴石	—	约 16~23	约 1 600~2 500	谢先德等(2005), 陈鸣(2009)
	钙铁矿结构	—	约 23~25	约 2 000	谢先德等(2005), 陈鸣(2009)
斜长石	波状消光	✓	约 10~12	约 336	Schaal <i>et al.</i> , 1979; Hiesinger, 2006
	熔长石化	✓	约 25~45	约 1 000~1 100	Schaal <i>et al.</i> , 1977, 1979; Stöffler <i>et al.</i> , 1972, 1980, 1991; Ostertag, 1983; Xie Xiande <i>et al.</i> , 2016
	冲击熔融体	✓	约 20	约 1 100~1 500	Bischoff <i>et al.</i> , 1992; Hiesinger, 2006
—	岩石角砾化	✓	约 78	约 1 120	Kieffer <i>et al.</i> , 1976; Dai <i>et al.</i> , 1991; Hiesinger, 2006

“—”代表未出现的现象,“✓”表示研究样品中具有的现象。

NWA 12279 陨石的冲击熔融角砾岩区域的形成可能是由于陨星撞击月表时,部分斜长岩受撞击后破碎并在高温、高压下矿物发生熔融、胶结所导致。受冲击熔融的胶结作用,使矿物碎屑不断缓慢胶结周围物质,内部形成固结程度较好的角砾,边部由于温度、压力的逐渐减小,快速冷凝固结成岩,形成固结程度不高的角砾。冲击减压保温过程中,辉石发育出溶条带(图 4)。角砾岩区域发育明显的玻璃质熔脉与玻璃,二者间铁、镁、钙含量较高(表 4),说明高温使橄榄石和辉石发生了熔融,经历的温度约为 1 420 ~ 1 890 °C (姚新娟等, 2010; 李明建等, 2011),淬火结构的冲击熔融体及岩石角砾化的出现,表示经历的压力最高约为 78 GPa,温度约为 1 120 ~ 1 500 °C (Kieffer *et al.*, 1976; Dai *et al.*, 1991; Bischoff

et al., 1992; Hiesinger, 2006)。综上所述,角砾岩区域内经历的冲击变质压力最高约为 78 GPa,温度最高约为 1 890 °C,冲击变质程度为 S_6 。

当压力最高达约 45 GPa 时斜长石可熔长石化 (Stöffler *et al.*, 1972, 1980, 1991; Schaal *et al.*, 1977, 1979; Ostertag, 1983; Xie Xiande *et al.*, 2016),发育含未熔融的辉石、橄榄石的冲击熔脉及橄榄石的面状破裂,指示受到的压力至少可达 20 GPa,温度约为 472 °C (Müller *et al.*, 1969; Homemann *et al.*, 1971; Schaal *et al.*, 1977, 1979; Stöffler *et al.*, 1978, 1980, 1991),橄榄石结晶环带(图 6)的存在,指示该区域受到的热变质程度要小于角砾岩区域,因此斜长岩区域受到的冲击变质压力最高约为 45 GPa,温度最高约为 1 100 °C,冲击变质程度为 S_5 。

6 结论

(1) NWA 12279 为一块月球陨石, 根据其岩石学特征、矿物成分、含量和结构等特征综合分析, 确定该陨石为局部角砾岩化的含尖晶石的辉长-橄长岩质的斜长岩。

(2) NWA 12279 由斜长岩和角砾岩两部分组成, 二者矿物成分、含量、形态、大小和冲击变质程度有明显差别, 说明二者可能起源于高地斜长岩的不同撞击点, 通过撞击作用胶结在一起。

(3) NWA 12279 陨石的斜长岩区含有约 7.0% 的镁铝尖晶石, 与 Troctolite 2003 陨石中尖晶石成分及类型相似, 但碎屑粒径要大许多, 橄榄石成分上相对富铁, 是一颗非常独特的原始岩浆结晶的含尖晶石辉长-橄长岩质斜长岩, 可能起源于月球高地一个新的含尖晶石的辉长-橄长岩质斜长岩岩体。

(4) 冲击熔融角砾岩具有玻璃质熔脉、冲击熔体、岩石角砾化特征, 指示冲击变质压力、温度最高分别约为 78 GPa、1 890℃, 冲击变质程度 S_6 ; 部分熔长石化的斜长岩具有熔长石化、橄榄石面状破裂、含有未熔融的辉石、橄榄石的冲击熔脉特征, 指示冲击变质压力、温度最高分别约为 45 GPa 和 1 100℃, 冲击变质程度 S_5 。

致谢 钟国冰先生捐赠了研究用样品, 匿名评委和编辑提出了很好的修改意见, 在此一并表示感谢。

References

- Bischoff A and Stöfler D. 1992. Shock metamorphism as a fundamental process in the evolution of planetary bodies: Information from meteorites[J]. *European Journal of Mineralogy*, 4(4): 707 ~ 755.
- Carter N L, Raleigh C B and De Carli P S. 1968. Deformation of olivine in stony meteorites[J]. *Journal of Geophysical Research*, 73(16): 5 439 ~ 5 461.
- Chen Hongyi, Miao Bingkui, Xie Langfang, *et al.* 2015. Mineralogy, petrology and evolution history of Lunar meteorite MIL05035 from Antarctica[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(4): 1 171 ~ 1 182(in Chinese with English abstract).
- Chen Jie, Chai Jinghe, Pan Zi'ang, *et al.* 1984. Electron probe micro-area quantitative analysis and ZAF correction procedure[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, (3): 60 ~ 69(in Chinese with English abstract).
- Chen Ming. 2009. Features and conditions for the intracrystalline transformation from olivine to high-pressure polymorphs in shock-metamorphosed meteorites[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 29(1): 1 ~ 6(in Chinese with English abstract).
- Dai C, Wang D and Jin X. 1991. Shock-loading experimental study of Jilin meteorite[J]. *Chinese Science Bulletin*, 36(23): 1 984 ~ 1 987.
- Ding Mingwei, Zhang Aicheng and Xu Weibiao. 2008. Thermal and Shock Metamorphism of the Sixiangkou Ordinary Chondrite[J]. *Acta Astronomica Sinica*, 49(1): 55 ~ 66(in Chinese with English abstract).
- Filiberto J, Abernethy F, Butler I B, *et al.* 2011. Maximizing the science return from 3.3 g of Martian meteorite: A consortium study of olivine-phyric shergottite NorthWest Africa 6234[A]. *Agu. Fall Meeting Abstracts*[C].
- Greshake A, Schmitt R T, Stöfler D, *et al.* 2001. Dhofar 081: A new lunar highland meteorite[J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 36(3): 459 ~ 470.
- Gross J and Treiman A H. 2011. Unique spinel-rich lithology in lunar meteorite ALHA 81005: Origin and possible connection to M3 observations of the far side highlands[J]. *Journal of Geophysical Research Planets*, 116(E10): 1 ~ 9.
- Guo Dijiang. 1995. Geological textures and Petrological Characteristics of the Moon[J]. *Geological Science and Technology Information*, 14(4): 29 ~ 32(in Chinese with English abstract).
- Homemann U and Müller W F. 1971. Shock-induced deformation twins in clinopyroxene[J]. *Neues. Jb. Min. Mh.*, 6: 247 ~ 256.
- Hiesinger H. 2006. New Views of Lunar Geoscience: An Introduction and Overview[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 60(1): 1 ~ 81.
- Isaacson P J, Sarbadhikari A B, Pieters C M, *et al.* 2011. The lunar rock and mineral characterization consortium: Deconstruction and integrated mineralogical, petrologic, and spectroscopic analyses of mare basalts[J]. *Meteoritics and Planetary Science*, 46(2): 228 ~ 251.
- Kieffer S W, Schaal R B, Gibbons R V, *et al.* 1976. Shocked basalt from Lunar impact crater, India, and experimental analogues[J]. *Proceedings Lunar Science Conference*, 7: 1 391 ~ 1 412.
- Korotev R L. 1983. Geochemical study of individual 1-2 mm particles from Apollo 16 soil 65502[A]. *Lunar and Planetary Institute Science Conference Abstracts*[C]. 14: 397 ~ 398.
- Korotev R L, Zeigler R A and Jolliff B L. 2003. Feldspathic lunar meteorites and their implications for compositional remote sensing of the lunar surface and the composition of the lunar crust[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67(24): 4 895 ~ 4 923.
- Li Mingjian and Shang Yuejun. 2011. Development and application of forsterite[A]. *Academic Exchange Meeting on Refractory Materials*

- [C]. 150.
- Miao Bingkui, Chen Hongyi, Xia Zhipeng, *et al.* 2013. Lunar meteorites: Witnesses to the moon's composition and evolution[J]. Chinese Journal of Polar Research, 25(4): 316 ~ 328(in Chinese with English abstract).
- Müller W F and Hornemann U. 1969. Shock-induced planar deformation structures in experimentally shock loaded olivines and in olivines from chondritic meteorites[J]. Earth Planet Science Letters, 7(3): 251 ~ 264.
- Ostertag R. 1983. Shock experiments on feldspar crystals[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 88: 364 ~ 376.
- Papke J J. 1998. Comparative planetary mineralogy: chemistry of melt-derived pyroxene, feldspar, and olivine[J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 36(2): 1 ~ 11.
- Schaal R B and Hörz F. 1977. Shock metamorphism of lunar and terrestrial basalts[J]. Proceedings Lunar Science Conference, 8: 1 697 ~ 1 729.
- Schaal R B, Hörz F, Thompson T D, *et al.* 1979. Shock metamorphism of granulated lunar basalt[J]. Proceedings Lunar Planet Science Conference, 10: 2 547 ~ 2 571.
- Snee L W and Ahrens T J. 1975. Shock-induced deformation features in terrestrial peridot and lunar dunite[J]. Proceedings Lunar Science Conference, 6: 833 ~ 842.
- Snyder G A, Taylor L A, Patchen A, *et al.* 1999. Mineralogy and petrology of a primitive spinel troctolite and gabbros from Luna 20, Eastern Highlands of the Moon[A]. Lunar and Planetary Science Conference[C].
- Stöffler D and Hornemann U. 1972. Quartz and feldspar glasses produced by natural and experimental shock[J]. Meteoritics, 7: 371 ~ 394.
- Stöffler D, Keil K and Scott E R D. 1991. Shock metamorphism of ordinary chondrites[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 55(12): 3 845 ~ 3 867.
- Stöffler D, Knoell H D, Marvin U B, *et al.* 1980. Recommended classification and nomenclature of lunar highland rocks: A committee report[J]. Lunar High-lands Crust, 1: 51 ~ 70.
- Stöffler D and Reimold W U. 1978. Experimental shock metamorphism of dunite[J]. Proceedings Lunar Planet Science Conference, 9: 2 805 ~ 2 824.
- Warren P H and Taylor G J. 2014. The Moon[J]. Reviews of Geophysics, 29(4): 213 ~ 250.
- Warren P H and Kallemeyn G W. 1991. Geochemical investigation of five lunar meteorites: Implications for the composition, origin and evolution of the lunar crust[A]. Nipr Symposium on Antarctic Meteorites [C]. 4: 91 ~ 117.
- Xie Chao, Du Jianguo, Liu Lei, *et al.* 2016. In Situ Raman spectrum peak test of monocrystalline silicon wafer under quantitative uniaxial pressure[J]. Spectroscopy and spectral Analysis, 36(4): 1 261 ~ 1 265(in Chinese with English abstract).
- Xie Xiande and Chen Ming. 2005. Investigation of mineral assemblage in the Earth's mantle on the basis of study of the Suizhou meteorite[J]. Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry, 24(4): 277 ~ 285(in Chinese with English abstract).
- Xie Xiande and Chen Ming. 2016. Suizhou Meteorite Mineralogy and Shock Metamorphism[M]. Guangdong: Science and Technology Press, 1 ~ 257.
- Yao Xinjuan, Zeng Yiwei and Jiang Bihui. 2010. Application prospect of spodumene in metallurgical casting and foundry coatings[J]. Advanced Materials Industry, 11: 45 ~ 48(in Chinese with English abstract).
- Guiyang Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences. 1977. Advances in the Study of Lunar Geological[M]. Beijing: Science Press, 90(in Chinese with English abstract).
- Zhu Jialing, Miao Bingkui, Gao Yang, *et al.* 2018. Petrology, mineralogy and shock metamorphism of GRV 090228 meteorite from Antarctica [J]. Journal of Guilin University of Technology, 38(2): 230 ~ 238 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 陈宏毅, 缪秉魁, 谢兰芳, 等. 2015. 南极月球陨石 MIL05035 矿物学、岩石学及演化历史[J]. 岩石学报, 31(4): 1 172 ~ 1 182.
- 陈捷, 柴京鹤, 潘子昂, 等. 1984. 电子探针微区定量分析及 ZAF 校正程序[J]. 硅酸盐通报, (3): 60 ~ 69.
- 陈鸣. 2009. 冲击变质陨石橄榄石晶内高压多形转变特征与条件[J]. 矿物学报, 29(1): 1 ~ 6.
- 丁明伟, 张爱铨, 徐伟彪. 2008. 寺巷口普通球粒陨石的热变质和冲击变质历史研究[J]. 天文学报, 49(1): 55 ~ 66.
- 郭迪江. 1995. 月球地质结构及其岩石学特征[J]. 地质科技情报, 14(4): 29 ~ 32.
- 李明建, 尚跃军. 2011. 镁橄榄石的开发应用[C]. 耐火原料学术交流会, 150.
- 缪秉魁, 陈宏毅, 夏志鹏, 等. 2013. 月球陨石: 月球的物质组成及其演化历史的见证[J]. 极地研究, 25(4): 316 ~ 328.
- 谢超, 杜建国, 刘雷, 等. 2016. 定量单轴压力下单晶硅片原位拉曼谱峰测试[J]. 光谱学与光谱分析, 36(4): 1 261 ~ 1 265.
- 谢先德, 陈鸣. 2005. 从随州陨石研究探讨地幔的高压矿物组成[J]. 矿物岩石地球化学通报, 24(4): 277 ~ 285.
- 姚新娟, 曾益伟, 蒋碧辉. 2010. 锂辉石在冶金铸造和铸造涂料中的应用前景[J]. 新材料产业, 11: 45 ~ 48.
- 中国科学院贵阳地球化学研究所. 1977. 月质学研究进展[J]. 北京: 科学出版社, 90.
- 朱佳玲, 缪秉魁, 高杨, 等. 2018. 南极陨石 GRV090228 的岩石矿物学及冲击变质特征[J]. 桂林理工大学学报, 38(2): 230 ~ 238.