

月球角砾岩 Bechar 003、NWA 13788 和 NWA 11110 中岩屑溯源研究

李明宝^{1 2} 李玉琼^{3 4,*} 沈德汗^{1 2} 范焱^{1 5} 于雯^{1 2} 李世杰^{1 2}

1. 中国科学院 地球化学研究所 月球与行星科学研究中心, 贵阳 550081; 2. 中国科学院大学 地球与行星科学学院, 北京 101408; 3. 中国科学院 力学研究所 中国科学院 流固耦合系统力学重点实验室 超常环境非线性力学国家重点实验室(筹), 北京 100190; 4. 广东空天科技研究院(南沙) 广州 511458; 5. 西北大学 地质系 大陆动力学国家重点实验室 西安 710069

摘要: 月球角砾岩是月球陨石的代表性样品,含有多来源的岩屑,是揭示月球内-外动力演化历史的重要窗口。本文对 Bechar 003、NWA 13788 和 NWA 11110 月球陨石中的岩屑开展了岩相学、矿物学及地球化学分析,通过岩相、矿物成分、全岩主微量元素等岩石地化综合分析,旨在厘清这 3 块样品中岩屑的类型、来源与成因机制。结果表明,3 块陨石内部的斜长辉长质冲击熔融岩屑、微斑熔融角砾岩屑、以及辉长质斜长岩屑的初始物质均由月海玄武岩与月球高地岩石的混合物,不同初始物质成分的岩屑表明月表经历了冲击事件,并且冲击事件发生在月表的不同位置,冲击事件造成月球高地岩石与月海玄武岩或非月海溅射物的混合。

关键词: 陨石; 月球陨石; 月球角砾岩; 冲击

中图分类号: P691 文章编号: 1007-2802(2023)06-1300-18 doi: 10.19658/j.issn.1007-2802.2023.42.062

A study on the origin of protoliths of clasts in lunar breccia meteorites of Bechar 003 , NWA 13788 and NWA 11110

LI Ming-bao^{1 2} , LI Yu-qiong^{3 4,*} , SHEN De-han^{1 2} , FAN Yan^{1 5} , YU Wen^{1 2} , LI Shi-jie^{1 2}

1. Center for Lunar and Planetary Sciences, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China;
2. College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China;
3. Key Laboratory for Mechanics in Fluid Solid Coupling Systems, State key Laboratory of Nonlinear Mechanics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
4. Guangdong Aerospace Research Academy (Vansha), Guangzhou 511458, China;
5. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China

Abstract: Lunar breccias are representative samples of lunar meteorites, containing rock clasts of multiple sources, and are served as important windows for understanding the internal and external evolution of the moon. The Bechar 003, NWA 13788, and NWA 11110 are recently discovered lunar meteorites, and they are classified as impact-melt breccias. In this study, we have conducted petrographic, mineralogical, and geochemical analyses of lithic clasts in these three lunar meteorites in order to clarify their types, sources, and formation mechanisms. Our comprehensive analyses of their characteristics of petrology, mineral compositions, and whole-rock major and trace elements indicate that the initial materials of anorthosite and gabbro impact-melt debris, microporphyrific melt breccia debris, and gabbro-anorthosite debris in all three samples are all mixtures of mare basalt and lunar highland rocks. Clasts with different compositions of initial materials in all three meteorites suggest that multiple impact events, occurred at different locations on the lunar surface, had resulted in the mixing of lunar highland rocks and mare basalts or non-mare sputtering materials.

Key words: meteorites; lunar meteorites; lunar breccia; impact

收稿编号: 2023-031 2023-2-14 收到 2023-3-20 改回

基金项目: 中国科学院青年创新促进会优秀会员项目(Y2022009); 广东省高水平创新研究院项目(2020B0909010003); 国家自然科学基金资助(42173046)

第一作者简介: 李明宝(1997—)男, 硕士研究生, 研究方向: 天体化学. E-mail: limingbao@mail.gyig.ac.cn.

* 通信作者简介: 李玉琼(1982—)男, 博士, 研究员, 研究方向: 车辆与机器地面力学、特种车辆全域越野机动、星壤力学测试与模型构建. E-mail: liyuqiong@imech.ac.cn.

0 引言

月亮为地月系统的形成与演化提供了丰富的信息,包括行星的形成以及早期演化进程(Gross et al., 2020)。目前,人们对月球早期历史以及其岩相学的了解主要来自于 Apollo 和 Luna 任务从月球表面中部和东部所带回的 382 kg 月岩及月壤(Vaniman et al., 1991; Gross et al., 2020)。Apollo 任务和 Luna 任务带回的样品为之后对月球的研究建立了基本的框架,为众多的地质调查和实验、数据校准等工作提供了丰富的样品。近年来,嫦娥五号任务从风暴洋(Oceanus Procellarum)东北部带回的样品为月球晚期年轻的岩浆活动提供了较多的信息(Qian et al., 2021; Li et al., 2022)。月球陨石的源区具有随机性,相当于整个月球表面的随机取样,其中包括 Apollo 和 Luna 和嫦娥五号任务没有访问的地区,因此,相对而言,月球陨石更能代表月球表面性质的平均状况并且具有更为广泛的区域代表性(Korotev, 2005)。

本文通过对降落在阿尔及利亚的 Bechar 003、NWA 13788 和降落在摩洛哥的 NWA 11110 三块月球角砾岩陨石中岩屑的岩相学观察、矿物化学特征、全岩主微量化学特征进行研究,推测月球表面发生的冲击事件及其波及范围。

1 样品及分析方法

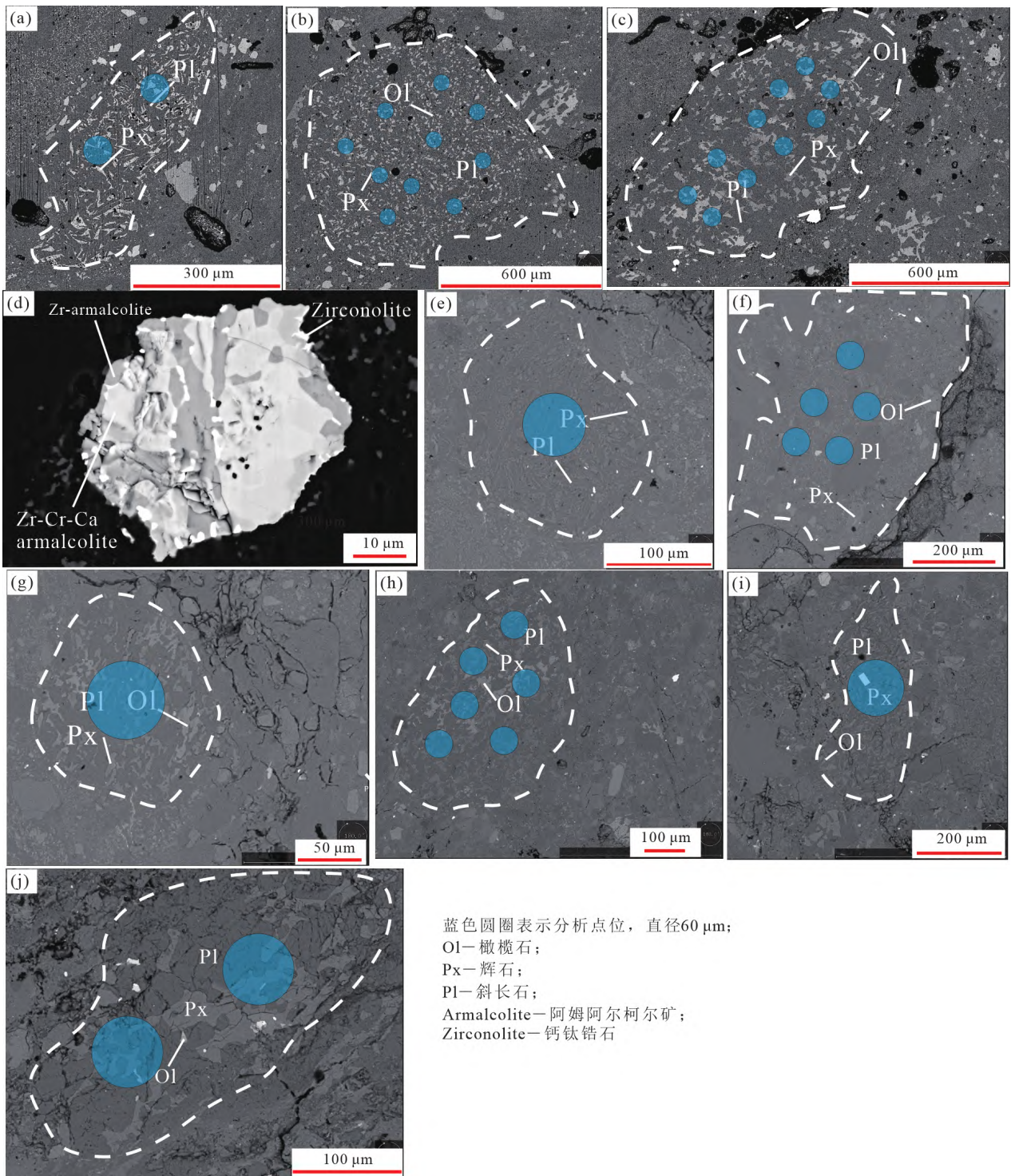
Bechar 003 与 NWA 13788 由陨石猎人徐邓钦提供,二者的样品预处理在中国科学院地球化学研究所月球与行星科学研究中心完成,首先对样品进行切割(STX-603A 金刚石线切割机),之后利用自动精密研磨抛光机(UNIPOL-1502)对切割好的薄片进行粗磨-细磨-抛光并制成光片。NWA 11110 月球陨石光片由湖南科技大学尹峰博士提供。岩相学观察在中国科学院地球化学研究所月球与行星科学研究中心完成,使用仪器为配有能谱分析仪的 FEI Scios 双束扫描电子显微镜。实验条件为束流 1.6 nA,加速电压 20 kV,工作距离 7.2 mm。本文中 Bechar 003、NWA 13788、NWA 11110 样品的背散射图像(BSE)均通过此设备获得。矿物成分分析在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室中完成。矿物成分分析仪器为 JXA8530F-plus 型场发射电子探针。实验条件为束流 10 nA,加速电压 15 kV,束斑 1~10 μm 。分析矿物有橄榄石、高钙辉石、低钙辉石、斜长石及阿穆阿尔柯尔石。橄榄石与辉石测试的元素有 Fe、Mn、Ni、Ti、Cr、Na、Si、Al、Mg、K 和 Ca,斜长石测试的元素有 Fe、

Mn、Ti、Cr、Na、Si、Al、Mg、K 和 Ca,采用的标准矿物为硅酸盐矿物及氧化物,分析结果用 ZAF 方法进行校正,Fe、Mn、Ti、Cr、Na、Si、Al、Mg、K 和 Ca 的检测限分别为 0.06%、0.06%、0.09%、0.08%、0.04%、0.06%、0.04%、0.03%、0.02%和 0.02%。阿穆阿尔柯尔矿测试的元素有 Fe、P、Ti、Cr、Y、Al、Mg、Zr 和 Ca,以氧化物为分析标准,分析结果用 ZAF 方法进行校正,这些元素的检测限分别为 0.08%、0.05%、0.09%、0.09%、0.12%、0.04%、0.03%、0.07%和 0.03%。岩屑全岩主、微量元素成分分析在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室完成,分析仪器为 Newave 213 nm 激光剥蚀系统与 Agilent 7700x 质谱仪连用,其工作波长为 213 nm,束斑直径 60 μm ,脉冲宽度低于 4 ns。以 BIR-1G、BHVO-2G 和 BCR-2G 为矫正外标,QC-NIST612 为质量监控标样。因部分岩屑形态狭长,仅能进行一次测试,区域选择时尽可能包含岩屑内所有矿物,以此来代表单颗岩屑的全岩成分。单颗岩屑进行多点测试的情况取平均值代表全岩成分。矿物占比由 ImageJ 软件进行统计。

2 分析结果

2.1 岩石学及矿物学特征

2.1.1 Bechar 003 Bechar 003 是一块由大量岩屑和晶屑组成的复矿角砾岩,其主要岩屑类型有具有次辉绿结构的斜长辉长质冲击熔融岩屑 A1(图 1a)、微斑熔融角砾岩屑 A2(图 1b)和具嵌晶结构的斜长辉长质冲击熔融岩屑 A3(图 1c)等。不同岩屑中的橄榄石、辉石、斜长石、Fe-Ni 金属具有不同的模式丰度(表 1)。Bechar 003 陨石中晶屑的主要组成矿物有斜长石、橄榄石、辉石及副矿物,如阿穆阿尔柯尔矿等(图 1d)。该陨石内部呈斑状结构,斑晶主要为橄榄石和辉石碎屑,基质为斜长石。橄榄石或辉石晶屑的粒径不均一,较大的是橄榄石晶屑,粒径可达 550 μm ,较小的晶屑粒径为 10~20 μm 。大部分橄榄石、辉石都具半自形结构,少数橄榄石、辉石为他形结构。Bechar 003 晶屑中的矿物成分不均一,橄榄石的 Fo 平均值为 72.24(69.70~75.57),其 Fe/Mn 值为 114.79(83.97~132.25)。低钙辉石的 En 平均值为 75.02(70.20~80.92),其 Fe/Mn 值为 72.70(59.10~102.54),Mg[#]为 75.6(70.20~83.08);高钙辉石的 En 为 69.60(46.85~76.22),其 Fe/Mn 值为 62.35(56.13~93.50),Mg[#]为 72.53(69.56~79.13);斜长石的 An 值为 96.53%(93.98%~98.22%)(表 2)。橄榄石、辉石的 Fe/Mn 值与月球岩石趋势相同(图 2、图 3)。



(a) 虚线圈定范围是 Bechar 003 陨石中的斜长辉长质冲击岩屑，具有典型次辉绿结构；(b) Bechar 003 陨石中的微斑岩屑；(c) Bechar 003 陨石中的斜长辉长质冲击岩屑，具有嵌晶结构；(d) Bechar 003 陨石中的阿莫阿尔柯尔矿及其共生的钙钛锆石；(e) NWA 13788 陨石中的斜长辉长质冲击岩屑，具有典型辉绿结构；(f) NWA 13788 陨石中的微斑岩屑；(g) NWA 13788 陨石中的斜长辉长质冲击岩屑，具有典型的嵌晶结构；(h) NWA 11110 陨石中的斜长辉长质冲击岩屑，具有典型嵌晶结构；(i) NWA 11110 陨石中的斜长辉长质冲击岩屑，具有典型次辉绿结构；(j) NWA 11110 陨石中的辉长质斜长岩岩屑

图 1 Bechar 003、NWA 13788 和 NWA 11110 陨石中代表性岩屑的背散射图片

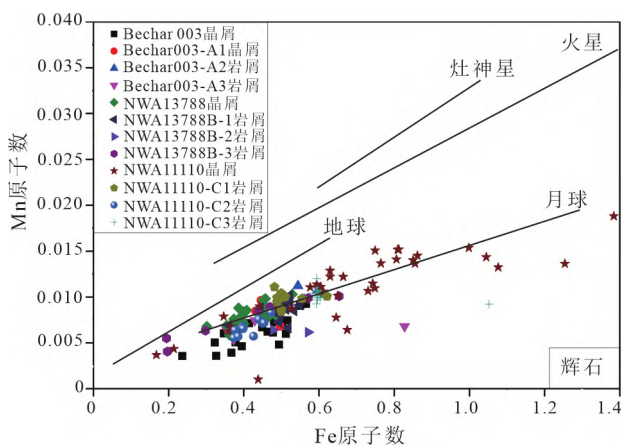
Fig. 1 Back-scattered images of representative lithic clasts in meteorites of Bechar 003, NWA 13788 and NWA 11110

表1 Bechar 003、NWA 13788 和 NWA 11110 陨石岩屑中主要矿物模式丰度

Table 1 Modal abundances of major minerals in lithic clasts of the Bechar 003, NWA 13788 and NWA 11110

成分	Bechar 003	NWA 13788	NWA 11110
辉石	18.4%	20.7%	17.2%
橄榄石	3.2%	2.0%	7.6%
长石	78.4%	73.2%	74.5%
Fe-Ni 金属	—	4.1%	0.8%
岩屑类型	斜长辉长质冲击熔融岩屑	斜长辉长质冲击熔融岩屑	斜长辉长质冲击熔融岩屑
	A1	B1	C1
辉石	8.1%	17.0%	33.5%
橄榄石	14.2%	11.2%	1.2%
长石	77.7%	68.5%	65.3%
Fe-Ni 金属	—	3.4%	—
岩屑类型	微斑熔融角砾岩岩屑	微斑熔融角砾岩岩屑	斜长辉长质冲击熔融岩屑
	A2	B2	C2
辉石	16.3%	16.1%	18.8%
橄榄石	11.6%	6.3%	0.8%
长石	72.2%	77.2%	80.4%
Fe-Ni 金属	—	0.4	—
岩屑类型	斜长辉长质冲击熔融岩屑	斜长辉长质冲击熔融岩屑	辉长质斜长岩岩屑
	A3	B3	C3

注：“—”表示无。

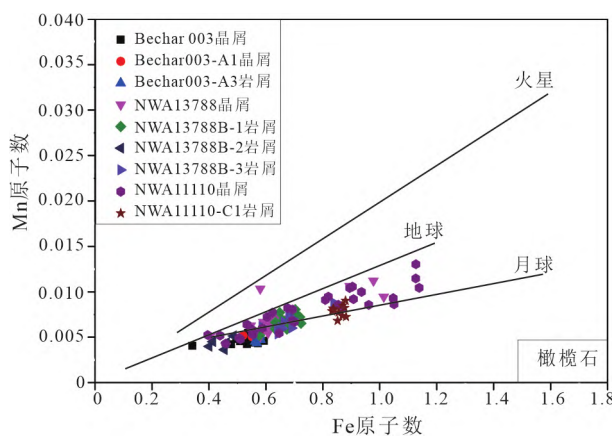


修改自 Papike 等(2009)。辉石化学式单位的原子数
以6个氧原子为基础计算

图2 Bechar 003、NWA 13788 和 NWA 11110
中辉石的 Fe 和 Mn 原子数

Fig. 2 Numbers of atoms of Fe and Mn of pyroxenes in
the Bechar 003, NWA 13788 and NWA 11110

Bechar 003 中 A1 岩屑长约 700 μm、宽约 200 μm, 形状不规则, 与周围晶屑界限明显, 具有典型的次辉绿结构(图 1a)。该岩屑主要由斜长石、辉石和橄榄石组成, 其模式丰度分别为 78.4%、18.4% 和 3.2%(表 1, 图 4)。辉石呈半自形-自形, 部分呈三角形, 钝角角度约 120°(图 1a)。辉石主要为富镁低钙辉石, En 值为 58.74~61.41(均值为 60.10), Wo 值为 9.65~10.76



修改自 Papike 等(2009)。橄榄石化学式单位的原子数
以6个氧原子为基础计算

图3 Bechar 003、NWA 13788 和 NWA 11110
中橄榄石的 Fe 和 Mn 原子数

Fig. 3 Numbers of atoms of Fe and Mn in olivine from
the Bechar 003, NWA 13788 and NWA 11110

(均值为 10.30), Fe/Mn 值为 48.48~57.71(均值为 53.89)(图 2); 辉石 Mg# 值为 65.61~67.97(均值为 67.00)(表 2)。橄榄石粒径较小(<1 μm) 并且裂隙发育, 因此没有测试。斜长石呈半自形-自形, 其平均粒径大于辉石的平均粒径(图 1a)。斜长石主要为钙长石, An 值为 94.49~96.29(均值为 95.21), Or 值为 0.10~0.25(均值为 0.20)(表 3)。

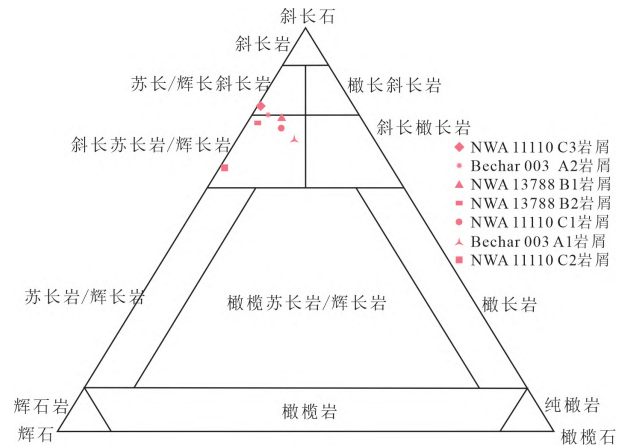
表 2 Bechar 003 陨石中橄榄石和辉石的代表性电子探针成分
Table 2 Representative EPMA chemical compositions of olivines and pyroxenes in the Bechar 003 (%)

组分	Bechar 003 晶屑				A1 岩屑		A2 岩屑		A3 岩屑	
	高钙辉石 (n=11)	低钙辉石 (n=18)	橄榄石 (n=14)	辉石 (n=3)	辉石 (n=5)	橄榄石 (n=10)	辉石 (n=4)	橄榄石 (n=3)		
SiO ₂	50.56~53.08(51.67)	53.00~54.92(53.78)	37.37~53.91(39.09)	50.63~52.51(51.82)	38.05~52.62(49.21)	36.98~38.18(37.26)	52.79~53.49(53.23)	37.57~38.45(37.91)		
TiO ₂	0.24~1.66(0.98)	0.19~0.81(0.57)	0.00~0.76(0.09)	0.94~2.11(1.39)	0.07~1.15(0.73)	0.00~0.16(0.05)	0.78~1.21(0.92)	0.03~0.08(0.05)		
Al ₂ O ₃	0.97~2.08(1.49)	0.65~1.35(0.91)	0.03~0.93(0.12)	1.00~1.82(1.32)	0.08~9.66(3.68)	0.04~0.18(0.09)	0.83~1.19(1.01)	0.04~0.08(0.06)		
Cr ₂ O ₃	0.41~0.71(0.57)	0.20~0.56(0.33)	0.02~0.29(0.09)	0.12~0.17(0.15)	0.09~0.55(0.35)	0.03~0.09(0.06)	0.33~0.39(0.36)	0.07~0.18(0.13)		
MgO	15.09~24.15(17.62)	24.20~29.71(26.27)	23.90~38.00(34.75)	20.14~20.83(20.53)	18.90~35.72(23.95)	34.98~35.57(35.26)	23.29~24.20(23.78)	34.41~36.94(35.60)		
FeO	7.56~16.32(11.88)	10.79~18.31(15.08)	16.67~26.21(23.79)	17.33~18.82(18.03)	11.45~24.91(15.49)	25.25~25.89(25.62)	14.01~16.06(15.13)	23.71~25.83(24.74)		
CaO	4.89~19.47(14.11)	1.33~3.33(2.00)	0.17~2.31(0.39)	4.51~5.18(4.90)	0.30~10.11(5.45)	0.28~0.35(0.31)	3.40~4.48(3.95)	0.24~0.30(0.27)		
NiO	n. a.	n. a.	0.00~0.04(0.02)	0.00~0.04(0.02)	0.00~0.04(0.01)	0.00~0.04(0.01)	—	—		
MnO	0.11~0.29(0.19)	0.12~0.30(0.21)	0.19~0.24(0.21)	0.31~0.35(0.33)	0.18~0.25(0.22)	0.19~0.24(0.22)	0.22~0.31(0.27)	0.22~0.23(0.23)		
Na ₂ O	0.02~0.11(0.07)	0.00~0.03(0.01)	—	0.00~0.03(0.02)	0.00~0.10(0.04)	0.00~0.04(0.01)	0.00~0.01(0.01)	0.00~0.02(0.01)		
K ₂ O	—	—	—	0.00~0.01(0.01)	0.00~0.01(0.01)	—	—	0.00~0.02(0.01)		
总量	98.16~99.26(98.58)	98.22~99.88(99.15)	98.03~99.28(98.56)	98.09~99.12(98.53)	98.02~100.83(99.13)	98.01~99.55(98.91)	98.28~99.03(98.66)	98.62~99.76(99.02)		
Fe/(En)	46.85~76.22(69.60)	70.20~80.92(75.02)	69.70~75.57(72.24)	58.74~61.41(60.1)	58.5~71.57(64.82)	70.79~71.32(71.04)	66.59~69.16(67.74)	70.37~73.53(71.94)		
Wo	2.60~6.65(3.98)	10.11~40.79(29.56)	—	9.65~10.76(10.3)	0.44~22.03(11.85)	—	6.94~9.14(8.08)	—		
Fe/Mn	56.13~93.50(62.35)	59.10~102.54(72.70)	83.97~132.25(114.79)	48.48~57.71(53.89)	52.57~121.75(71.84)	104.62~130.40(116.25)	46.45~73.09(55.91)	100.45~110.88(106.89)		
Mg [#]	69.56~79.13(72.53)	70.20~83.08(75.61)	69.70~75.57(72.24)	65.61~67.97(67.00)	71.88~75.03(73.60)	70.79~71.32(71.04)	72.29~75.48(73.7)	70.37~73.53(71.93)		

注: 括号内数值为平均值; “n”表示样品数量; Fe/Mn = Fe/(atom)/Mn(atom); Mg[#] = 100×Mg/(Fe+Mg); Fo = 100×Mg/(Fe+Mg); En = 100×Mg/(Mg+Fe+Ca); “—”表示低于检测限; “n. a.”表示未获取数据。

A2 岩屑呈似圆状,半径约为 400 μm(图 1b)。该岩屑由斜长石、橄榄石、辉石组成,其模式丰度分别为 77.7%、14.2%、8.1%(表 1,图 4)。辉石呈半自形,主要为富镁低钙辉石且成分不均一,En 值为 58.5~71.57(均值为 64.82),Wo 值为 0.44~22.03(均值为 11.85),Fe/Mn 值为 52.57~121.75(均值为 71.84)(图 2),Mg[#] 值为 71.88~75.03(均值为 73.60)(表 2)。橄榄石呈他形-半自形,主要成分为镁橄榄石, Fo 值为 70.79~71.32(均值为 71.04), Fe/Mn 值为 104.62~130.40(均值为 116.25)(图 3,表 2)。基质斜长石的主要成分为钙长石,钙长石成分均一, An 值为 95.47~96.77(均值为 96.06%), Or 值为 0.08~0.18(均值为 0.13)(表 3)。

A3 岩屑长约 1.2 mm、宽约 600 μm,外形不规则,近似椭圆状,具有典型的嵌晶结构(图 1c)。该岩屑主要由斜长石、辉石和橄榄石组成,模式丰度分别为 72.2%、16.3%和 11.6%(表 1,图 4)。辉石呈半自形-自形,主要成分为低钙辉石, En 值为 66.59~69.16(均值为 67.74), Wo 值为 6.94~9.14



修改自 Gross 等(2020)

图 4 Bechar 003, NWA 13788 和 NWA 11110 陨石中的部分岩屑在橄榄石-辉石-斜长石三元相图上的投图

Fig. 4 The olivine-pyroxene-plagioclase ternary diagram for parts of lithic clasts of the Bechar 003, NWA 13788 and NWA 11110

(均值为 8.08), 辉石的 Fe/Mn 值为 46.45~73.09(均值为 55.91)(图 2), Mg[#] 值为 72.29~75.48(均值为 73.7)(表 2)。橄榄石呈半自形-自形, Fo 值为

表 3 Bechar 003 陨石中斜长石、阿莫阿尔柯尔矿的代表性电子探针成分

Table 3 Representative EPMA chemical compositions of plagioclases and armalcolites in the Bechar 003 (%)

Bechar 003 晶屑				A1 岩屑	A2 岩屑	A3 岩屑
组分	斜长石 (n=29)	Zr-阿莫阿 尔柯尔矿 (n=1)	Zr-Cr-Ca 阿莫阿 尔柯尔矿 (n=1)	斜长石 (n=9)	斜长石 (n=10)	斜长石 (n=10)
P ₂ O ₅	n.a.	0.01	—	n.a.	n.a.	n.a.
SiO ₂	43.83~45.12(44.44)	n.a.	n.a.	43.81~44.51(44.15)	43.48~44.25(43.97)	43.01~44.72(43.87)
TiO ₂	0.00~0.08(0.01)	67.39	64.87	0.04~0.14(0.10)	0.00~0.09(0.04)	0.00~0.05(0.02)
ZrO ₂	n.a.	2.38	5.91	n.a.	n.a.	n.a.
Al ₂ O ₃	34.95~36.05(35.55)	2.08	1.6	34.07~34.58(34.24)	34.17~34.97(34.71)	34.59~35.54(34.98)
Cr ₂ O ₃	0.00~0.06(0.01)	1.53	7.17	0.00~0.06(0.01)	0.00~0.05(0.01)	0.00~0.06(0.01)
Y ₂ O ₃	n.a.	0	0.41	n.a.	n.a.	n.a.
MgO	0.04~0.16(0.09)	7.2	2.24	0.10~0.13(0.12)	0.09~0.34(0.14)	0.06~0.15(0.10)
FeO	0.07~0.32(0.16)	14.67	9.85	0.28~0.40(0.34)	0.26~0.51(0.33)	0.16~0.52(0.28)
CaO	18.93~19.64(19.36)	0.89	2.6	18.96~19.33(19.11)	19.06~19.44(19.25)	19.45~20.07(19.67)
NiO	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
MnO	0.00~0.04(0.01)	n.a.	n.a.	0.00~0.03(0.01)	0.00~0.04(0.01)	—
Na ₂ O	0.20~0.63(0.37)	n.a.	n.a.	0.40~0.60(0.51)	0.35~0.48(0.42)	0.28~0.41(0.35)
K ₂ O	0.00~0.08(0.02)	n.a.	n.a.	0.02~0.04(0.03)	0.01~0.03(0.02)	0.01~0.04(0.02)
总量	99.10~100.74(100.20)	96.15	94.65	92.12~98.97(98.62)	98.62~99.62(98.90)	98.20~101.20(99.32)
An	93.98~98.22(96.53)			94.49~96.29(95.21)	95.47~96.77(96.06)	96.26~97.34(96.74)
Or	0.02~0.48(0.14)			0.10~0.25(0.20)	0.08~0.18(0.13)	0.07~0.22(0.12)

注: 括号内数值为平均值 “n” 表示样品数; “—” 表示低于检测限 “n.a.” 表示未获取数据; An = 100×Ca/(Ca+Na+K); Or = 100×K/(Ca+Na+K)。

70.37~73.53(均值为71.94), Fe/Mn 值为100.45~110.88(均值为106.89)(表2,图3)。基质斜长石成分上呈钙长石质特征, An 值为96.26~97.34(均值为96.74), Or 值为0.07~0.22(均值为0.12)(表3)。

2.1.2 NWA 13788 该陨石与 Bechar 003 相似,是一块由多种岩屑与晶屑组成的复矿角砾岩。岩屑可分为具有辉绿结构的斜长辉长质冲击熔融岩屑 B1(图1e)、微斑角砾熔融岩屑 B2(图1f)和具嵌晶结构的斜长辉长质冲击熔融岩屑 B3(图1g)等。局部冲击特征显著,金属冲击脉长度可达2 mm。陨石风化特征显著,晶屑中含有大量的氧化钙与少量的硫酸钡。晶屑的组成矿物有斜长石、辉石、橄榄石及少量副矿物(钛铁矿、金属氧化物)。辉石呈他形-半自形,粒径越小,自形程度越低,粒径越大,自形程度越高。辉石成分不均一,主要为富镁低钙辉石,其 En 值为53.66~78.30(均值为71.57), Wo 值为3.18~30.70(均值为6.42),辉石的 Fe/Mn 值为43.91~61.62(均值为53.20)(图2); $Mg^{\#}$ 值为64.16~80.96(均值为76.43)(表4)。橄榄石呈他形-半自形,粒径越小,自形程度越低,粒径越大,自形程度越高。橄榄石成分不均一,主要为镁橄榄石, Fo 值为47.02~79.55(均值为66.78), Fe/Mn 值为56.11~113.46(均值为94.89)(图3)。该陨石中的基质斜长石成分均一,主要为钙长石, An 值为94.00~97.60(均值为96.46), Or 值为0.04~0.76(均值为0.28)(表5)。

B1 岩屑形状不规则,长约250 μm ,宽约150 μm ,具有典型的辉绿结构,部分辉石呈三角形,钝角约为120°(图1e)。该岩屑由斜长石、辉石和少量橄榄石和 Fe-Ni 金属组成,其模式丰度分别为73.2%、20.7%、2%和4.1%(表1,图4)。辉石呈半自形-自形,成分均一,主要为富镁低钙辉石, En 值为74.43~75.72(均值为75.08), Wo 值为3.88~4.09(均值为3.98), Fe/Mn 为74.73~92.80(均值为83.76)(图2), $Mg^{\#}$ 值为77.60~78.78(均值为78.19)(表4)。橄榄石的主要成分为镁橄榄石, Fo 值为74.88~78.74(均值为76.97), Fe/Mn 值为91.58~125.15(均值为103.25)(图3)。斜长石呈半自形-自形,主要为钙长石, An 值为93.94~95.54(均值为94.77), Or 值为0.68~1.32(均值为0.97)(表5)。

B2 岩屑由斜长石、橄榄石、辉石及少量 Fe-Ni 金属组成,其模式丰度分别为68.5%、11.2%、17%及3.4%(表1,图4)。斜长石晶体大小不均一,最

大超过200 μm ,橄榄石与辉石大小也不均匀,最大可达100 μm ,最小的不到1 μm ,呈似斑状结构(图1f)。辉石呈他形-半自形,成分不均一,以高钙辉石为主, En 值为47.3~81.01(均值为65.11), Wo 值为3.36~42.62(均值为13.02),辉石的 Fe/Mn 值为35.37~64.77(均值为52.45)(图2), $Mg^{\#}$ 值为63.46~84.23(均值为75.35)(表4)。橄榄石呈他形-半自形,成分不均一,主要成分为镁橄榄石, Fo 值为57.67~70.29(均值为65.34), Fe/Mn 值为91.45~119.83(均值为103.93)(表4,图3)。斜长石晶体呈半自形-自形,成分均一,主要成分为钙长石, An 值为94.83~97.17(均值为96.11), Or 值为0.10~0.56(均值为0.30)(表5)。

B3 岩屑呈近似圆形,半径约60 μm ,具有典型的嵌晶结构(图1g)。该岩屑由斜长石、辉石、橄榄石及少量的 Fe-Ni 金属组成,其模式丰度分别为77.2%、16.1%、6.3%及0.4%(表1,图4)。辉石呈半自形,主要成分为高钙辉石, En 值为47.83~62.7(均值为59.41), Wo 值为9.77~32.62(均值为14.56),辉石的 Fe/Mn 值为50.34~78.18(均值为59.41)(图2), $Mg^{\#}$ 值为67.86~70.98(均值为69.57)(表4)。橄榄石呈半自形-自形,主要成分为镁橄榄石, Fo 值为62.94~67.15(均值为64.77), Fe/Mn 值为84.06~114.46(均值为100.75)(图3,表4)。基质斜长石的成分十分均一,主要为钙长石, An 值为94.38~96.7(均值为95.84), Or 值为0.22~0.39(均值为0.32)(表5)。

2.1.3 NWA 11110 该陨石与 Bechar 003 和 NWA 13788 陨石的结构相似,是一块由多种岩屑与晶屑胶结而成的复矿角砾岩。组成该陨石的岩屑主要包括具有嵌晶结构的斜长辉长质冲击熔融岩屑 C1(图1h)、具有辉绿结构的斜长辉长质冲击熔融岩屑 C2(图1i)和辉长质斜长岩岩屑 C3(图1j)等。与 Bechar 003 和 NWA 13788 不同的是,NWA 11110 具有程度更高的冲击变质特征,冲击裂隙长达3 mm。晶屑的组成矿物有斜长石、橄榄石、辉石及少量副矿物(钛铁矿、金属氧化物),晶屑中矿物的粒径相比 Bechar 003 和 NWA 13788 更不均一,绝大多数表面裂隙发育。晶屑中辉石呈他形-半自形,成分极不均一,以高钙辉石为主, En 值为0.13~78.2(均值为42.5), Wo 值为0.19~47.72(均值为18.31),辉石的 Fe/Mn 值为43.99~435.59(均值为71.64)(图2), $Mg^{\#}$ 为0.16~84.15(均值为51.45)(表6)。橄榄石呈他形-半自形,成分极不均一,以镁橄榄石为主, Fo 值为42.22~80.07(均值为62.68), Fe/Mn 值为75.51~

表 4 NWA 13788 陨石中的橄榄石、辉石的代表性电子探针成分
Table 4 Representative EPMA chemical compositions of olivines and pyroxenes in the NWA 13788 (%)

组分	NWA 13788 晶屑		B1 岩屑		B2 岩屑		B3 岩屑	
	辉石 (n = 30)	橄榄石 (n = 32)	辉石 (n = 2)	橄榄石 (n = 5)	辉石 (n = 10)	橄榄石 (n = 5)	辉石 (n = 12)	橄榄石 (n = 15)
SiO ₂	51.40~54.74(53.74)	34.71~49.88(37.58)	39.81~46.77(43.29)	38.10~40.05(38.88)	51.00~55.45(52.87)	35.27~38.01(36.89)	51.42~53.74(52.49)	36.71~39.07(37.5)
TiO ₂	0.21~1.16(0.69)	0.00~0.36(0.05)	0.21~0.35(0.28)	0.11~0.34(0.19)	0.18~1.75(0.83)	0.00~0.19(0.07)	0.50~1.28(0.76)	0.04~0.15(0.08)
Al ₂ O ₃	0.66~2.38(1.17)	0.01~0.96(0.07)	1.95~4.49(3.22)	0.21~1.21(0.52)	0.84~2.44(1.35)	0.04~1.10(0.32)	1.61~4.11(2.32)	0.09~5.37(0.87)
Cr ₂ O ₃	0.16~0.81(0.48)	0.00~0.44(0.05)	0.13~0.25(0.19)	0.09~0.22(0.13)	0.00~0.92(0.41)	0.05~0.15(0.09)	0.23~0.77(0.53)	0.03~0.14(0.07)
MgO	19.01~28.10(25.69)	13.16~40.91(32.40)	31.99~35.08(33.53)	36.88~38.69(38.19)	16.51~30.12(23.3)	27.10~34.62(31.29)	16.08~22.06(20.57)	26.66~32.81(30.68)
FeO	9.87~19.05(14.05)	18.74~41.85(28.22)	15.36~18.05(16.70)	18.56~22.05(20.38)	6.27~20.73(13.9)	26.08~35.46(29.54)	11.72~18.00(16.07)	26.28~31.66(29.72)
CaO	1.59~15.13(3.18)	0.12~7.20(0.45)	2.28~2.68(2.48)	0.38~0.74(0.52)	1.67~20.83(6.39)	0.36~1.00(0.51)	4.80~15.26(6.98)	0.42~3.90(0.91)
NaO	0.00~0.06(0.01)	0.00~0.07(0.02)	—	0.00~0.05(0.02)	0.00~0.04(0.01)	0.00~0.04(0.01)	0.00~0.04(0.01)	0.00~0.05(0.01)
MnO	0.19~0.33(0.26)	0.18~0.47(0.30)	0.19~0.20(0.20)	0.16~0.23(0.20)	0.13~0.32(0.26)	0.24~0.37(0.28)	0.21~0.33(0.27)	0.23~0.35(0.29)
Na ₂ O	0.00~0.10(0.02)	0.00~0.33(0.03)	0.02~0.05(0.03)	0.00~0.01(0.01)	0.00~0.07(0.02)	0.00~0.02(0.01)	0.01~0.18(0.08)	0.00~0.62(0.08)
K ₂ O	—	—	0.03~0.04(0.04)	0.00~0.02(0.01)	0.00~0.03(0.01)	0.00~0.06(0.01)	0.00~0.02(0.10)	0.00~0.02(0.01)
总量	98.24~100.58(99.3)	98.10~100.18(99.18)	99.20~100.72(99.96)	98.64~99.67(99.03)	98.04~101.74(99.33)	98.09~100.88(99.02)	98.77~100.21(100.08)	98.51~101.09(100.23)
Fe/(En)	53.66~78.3(71.57)	47.02~79.55(66.78)	74.43~75.72(75.08)	74.88~78.74(76.97)	47.3~81.01(65.11)	57.67~70.29(65.34)	47.83~62.7(59.41)	62.94~67.15(64.77)
Wo	3.18~30.70(6.42)	—	3.88~4.09(3.98)	—	3.36~42.62(13.02)	91.45~119.83(103.93)	9.77~32.62(14.56)	—
Fe/Mn	43.91~61.62(53.20)	56.11~113.46(94.89)	74.73~92.80(83.76)	91.58~125.15(103.25)	35.37~64.77(52.45)	—	50.34~78.18(59.41)	84.06~114.46(100.75)
Mg [#]	64.16~80.96(76.43)	47.02~79.55(66.78)	77.60~78.78(78.19)	74.88~78.74(76.97)	63.46~84.23(75.35)	57.67~70.29(65.34)	67.86~70.98(69.57)	62.94~67.15(64.77)

注:括号内数值为平均值;“—”表示低于检测限;“n”表示样品数;Fe/Mn=Fe/(atom)/Mn(atom);Mg[#]=100×Mg/(Fe+Mg);Fo=100×Mg/(Fe+Mg);En=100×Mg/(Mg+Fe+Ca)。

表 5 NWA 13788 陨石中的斜长石的代表性电子探针成分

Table 5 Representative EPMA chemical compositions of plagioclases in the NWA 13788

(%)

组分	NWA 13788 晶屑	B1 岩屑	B2 岩屑	B3 岩屑
	斜长石 (n=30)	斜长石 (n=9)	斜长石 (n=10)	斜长石 (n=12)
SiO ₂	43.88~45.58(44.62)	44.06~45.84(45.02)	43.75~44.90(44.22)	44.54~45.79(45.17)
TiO ₂	0.00~0.10(0.03)	0.00~0.11(0.05)	0.00~0.09(0.04)	0.00~0.09(0.03)
Al ₂ O ₃	34.74~35.86(35.40)	25.10~33.85(32.37)	34.41~35.42(35.05)	35.09~35.96(35.47)
Cr ₂ O ₃	0.00~0.04(0.01)	0.00~0.05(0.02)	—	0.00~0.05(0.01)
MgO	0.05~0.25(0.12)	0.35~11.76(1.98)	0.08~0.30(0.14)	0.10~0.19(0.15)
FeO	0.07~0.44(0.24)	0.47~5.59(1.19)	0.17~0.61(0.39)	0.35~0.83(0.47)
CaO	19.13~20.13(19.75)	12.97~19.32(18.31)	19.30~19.89(19.64)	19.42~19.85(19.65)
MnO	0.00~0.04(0.01)	0.00~0.04(0.02)	0.00~0.04(0.01)	0.00~0.06(0.02)
Na ₂ O	0.27~0.62(0.37)	0.35~0.52(0.45)	0.31~0.54(0.41)	0.35~0.60(0.44)
K ₂ O	0.01~0.13(0.05)	0.12~0.22(0.16)	0.02~0.10(0.05)	0.04~0.07(0.05)
总量	99.41~101.40(100.60)	99.02~100.16(99.57)	99.34~100.35(99.95)	100.72~101.86(101.40)
An	94.00~97.60(96.46)	93.94~95.54(94.77)	94.83~97.17(96.11)	94.38~96.7(95.84)
Or	0.04~0.76(0.28)	0.68~1.32(0.97)	0.10~0.56(0.30)	0.22~0.39(0.32)

注: 括号内数值为平均值; “—”表示低于检测限 “n”表示样品数; An=100×Ca/(Ca+Na+K); Or=100×K/(Ca+Na+K)。

121.64 (均值为 97.63) (表 6)。基质斜长石成分以钙长石为主,成分相对均一,An 值为 92.13~97.06 (均值为 95.94),Or 值为 0.04~0.84(均值为 0.26) (表 7)。

C1 岩屑形状近似椭圆状,长轴约为 500 μm,短轴约为 300 μm,具有典型的嵌晶结构(图 1h)。该岩屑有斜长石、辉石、橄榄石和少量 Fe-Ni 金属组成,其模式丰度分别为 74.5%、17.2%、7.6% 和 0.8%(表 1,图 4)。辉石呈半自形-自形,成分以富镁低钙辉石为主,En 值为 55.4~65.62(均值为 61.79),Wo 值为 8.33~19.57(均值为 11.54),辉石 Fe/Mn 值为 43.42~61.68(均值为 52.63) (图 2),Mg[#] 为 63.92~71.62(均值为 69.84) (表 6)。橄榄石呈半自形-自形,成分均一,En 值为 54.87~57.61 (均值为 56.31),Fe/Mn 值为 97.52~124.95(均值为 109.43) (表 6,图 3)。基质斜长石成分均一,以钙长石为主,An 值为 95.71~97.49 (均值为 96.62),Or 值为 0.04~0.36(均值为 0.20) (表 7)。

C2 岩屑呈长条状,长约 270 μm,宽约 100 μm,具有典型的次辉绿结构(图 1i)。该岩屑由斜长石、辉石及少量橄榄石组成,其模式丰度分别为 65.3%、33.5% 及 1.2%(表 1,图 4)。辉石呈半自形-自形,部分辉石呈三角形,辉石整体平均粒径大于长石粒径,岩屑内部具有冲击裂隙(图 1i)。辉石成分均一,主要以高钙辉石为主,En 值为 53.64~66.91(均值为 59.24),Wo 值为 12.03~20.48(均值为 17.34),Fe/Mn 值为 56.90~74.47(均值为 62.67) (图 2),Mg[#] 值为 67.18~76.05(均值为

71.58) (表 6)。斜长石的主要成分为钙长石,An 值为 94.67~97.35(均值为 96.28),Or 值为 0.18~0.84(均值为 0.40) (表 7)。

C3 岩屑呈不规则状,粒径约 300 μm,由斜长石、辉石及极少量橄榄石组成,其模式丰度分别为 80.4%、18.8% 及 0.8%(表 1,图 4)。辉石呈他形-半自形,成分均一,以富镁低钙辉石为主,En 值为 60.51~64.31(均值为 61.61),Wo 值为 0.23~8.8 (均值为 7.42),Fe/Mn 值的均值为 62.29(图 2),Mg[#] 值为 64.46~67.71(均值为 66.55) (表 6)。斜长石的主要成分为钙长石,An 值为 95.83~96.83 (均值为 96.33),Or 值为 0.19~0.25(均值为 0.23) (表 7)。

2.2 岩屑全岩化学成分

2.2.1 Bechar 003(A1、A2、A3) 分析结果(表 8) 显示,Bechar 003 陨石中的 A1 岩屑的全岩主量元素组成的平均值是: FeO 7.10% (6.77%~7.43%), MgO 5.28% (4.94%~5.61%), Al₂O₃ 25.34% (24.49%~26.20%), TiO₂ 3.56% (3.35%~3.77%); 微量元素组成的平均值是: Sc 23.53×10⁻⁶ (21.85×10⁻⁶~25.22×10⁻⁶), Cr 963.52×10⁻⁶ (871.05×10⁻⁶~1056.0×10⁻⁶), Sm 2.17×10⁻⁶ (1.73×10⁻⁶~2.61×10⁻⁶), Eu 0.96×10⁻⁶ (0.92×10⁻⁶~1.0×10⁻⁶), Th 0.44×10⁻⁶ (0.39×10⁻⁶~0.49×10⁻⁶)。

表 8 显示, A2 岩屑全岩主量元素组成的平均值为: FeO 5.72% (4.18%~7.41%), MgO 7.31% (5.02%~8.90%), Al₂O₃ 27.23% (25.35%~30.36%), TiO₂ 0.27% (0.17%~0.53%); 微量元素

表 6 NWA 11110 陨石中的橄榄石、辉石的代表性电子探针成分
Table 6 Representative EPMA chemical compositions of olivines and pyroxenes in the NWA 11110 (%)

组分	NWA 11110 晶屑		C1 岩屑		C2 岩屑		C3 岩屑	
	辉石 (n = 41)	橄榄石 (n = 30)	辉石 (n = 11)	橄榄石 (n = 10)	辉石 (n = 11)	橄榄石 (n = 10)	辉石 (n = 12)	橄榄石 (n = 11)
SiO ₂	33.21~54.92(49.37)	33.81~39.35(36.84)	52.27~53.20(52.76)	35.43~36.09(35.76)	46.33~47.35(47.00)	37.21~54.33(52.26)		
TiO ₂	0.01~2.25(0.68)	0.00~0.20(0.05)	0.34~0.85(0.44)	0.00~0.16(0.07)	0.79~1.02(0.91)	0.06~1.06(0.71)		
Al ₂ O ₃	0.03~30.05(2.08)	0.02~0.20(0.06)	1.45~2.08(1.79)	0.02~0.08(0.06)	10.01~12.28(10.87)	0.01~1.01(0.67)		
Cr ₂ O ₃	0.00~0.81(0.23)	0.00~0.21(0.07)	0.07~1.01(0.71)	0.02~0.15(0.11)	0.03~0.82(0.40)	0.06~0.47(0.31)		
MgO	0.04~40.51(15.16)	18.67~42.07(30.57)	19.23~23.06(21.59)	25.55~27.27(26.5)	17.42~21.90(19.23)	21.43~31.59(22.63)		
FeO	5.44~44.55(23.14)	18.66~46.04(31.75)	15.48~19.99(16.61)	35.76~37.46(36.63)	12.29~15.39(13.55)	18.93~31.05(20.34)		
CaO	0.13~21.31(8.33)	0.12~0.55(0.29)	4.07~9.45(5.61)	0.30~0.41(0.35)	5.48~9.24(7.82)	0.16~4.36(3.67)		
NiO	0.00~0.06(0.01)	0.00~0.08(0.02)	0.00~0.03(0.01)	0.00~0.09(0.03)	0.00~0.05(0.02)	—		
MnO	0.03~0.68(0.36)	0.20~0.52(0.32)	0.27~0.35(0.31)	0.29~0.38(0.33)	0.18~0.27(0.22)	0.27~0.39(0.33)		
Na ₂ O	0.00~0.12(0.03)	0.00~0.03(0.01)	0.00~0.03(0.01)	—	0.00~0.08(0.03)	0.00~0.04(0.02)		
K ₂ O	—	—	—	—	0.00~0.03(0.01)	—		
总量	98.14~100.91(99.39)	98.64~101.95(99.98)	99.24~100.74(99.84)	99.17~100.17(99.85)	99.16~101.24(100.06)	100.32~101.97(100.95)		
Fo(En)	0.13~78.2(42.50)	42.22~80.07(62.68)	55.4~65.62(61.79)	54.87~57.61(56.31)	53.64~66.91(59.24)	60.51~64.31(61.61)		
Wo	0.19~47.72(18.31)	8.33~19.57(11.54)	12.03~20.48(17.34)	0.23~8.8(7.42)				
Fe/Mn	43.99~435.59(71.64)	75.51~121.64(97.63)	43.42~61.68(52.63)	97.52~124.95(109.43)	56.90~74.47(62.67)	49.38~113.98(62.29)		
Mg [#]	0.16~84.15(51.45)	42.22~80.07(62.68)	63.92~71.62(69.84)	54.87~57.61(56.31)	67.18~76.05(71.58)	64.46~67.71(66.55)		

注: 括号内数值为平均值; “n”表示样品数; “—”表示低于检测限; $Fe/Mn = Fe(atom)/Mn(atom)$; $Mg^{\#} = 100 \times Mg / (Fe + Mg)$; $Fo = 100 \times Mg / (Fe + Mg)$; $En = 100 \times Mg / (Mg + Fe + Ca)$ 。

表 7 NWA 11110 陨石中的斜长石的代表性电子探针成分

Table 7 Representative EPMA chemical compositions of plagioclases in the NWA 11110

(%)

组分	NWA 11110 晶屑	C1 岩屑	C2 岩屑	C3 岩屑
	斜长石 (n=29)	斜长石 (n=11)	斜长石 (n=9)	斜长石 (n=9)
SiO ₂	43.52~46.23 (44.78)	44.10~45.12 (44.64)	44.74~46.94 (45.67)	44.80~45.55 (45.09)
TiO ₂	0.00~0.10 (0.03)	0.00~0.05 (0.01)	0.00~0.41 (0.09)	0.00~0.05 (0.01)
Al ₂ O ₃	34.45~35.91 (35.44)	35.05~36.09 (35.4)	27.64~35.19 (32.42)	35.56~35.97 (35.76)
Cr ₂ O ₃	—	0.00~0.05 (0.01)	0.00~0.17 (0.05)	—
MgO	0.05~0.42 (0.14)	0.10~0.23 (0.15)	0.41~5.51 (1.87)	0.07~0.11 (0.09)
FeO	0.23~0.82 (0.38)	0.44~0.72 (0.54)	0.46~4.78 (1.65)	0.18~0.42 (0.28)
CaO	18.68~20.48 (19.66)	19.58~20.24 (19.85)	15.42~18.71 (17.67)	19.71~19.92 (19.81)
MnO	0.00~0.03 (0.01)	0.00~0.05 (0.02)	0.00~0.09 (0.02)	0.00~0.02 (0.01)
Na ₂ O	0.32~0.84 (0.43)	0.27~0.47 (0.36)	0.24~0.51 (0.34)	0.33~0.45 (0.39)
K ₂ O	0.01~0.14 (0.05)	0.01~0.06 (0.04)	0.03~0.12 (0.06)	0.03~0.04 (0.04)
总量	99.71~101.85 (100.93)	100.48~101.48 (100.86)	98.45~100.88 (99.84)	101.09~101.95 (101.48)
An	92.13~97.06 (95.94)	95.71~97.49 (96.62)	94.67~97.35 (96.28)	95.83~96.83 (96.33)
Or	0.04~0.84 (0.26)	0.04~0.36 (0.20)	0.18~0.84 (0.39)	0.19~0.25 (0.23)

注: 括号内数值为平均值; “—”表示低于检测限 “n”为样品数; An=100×Ca/(Ca+Na+K); Or=100×K/(Ca+Na+K)。

表 8 Bechar 003 陨石中 A1、A2 和 A3 岩屑的全岩主、微量元素含量

Table 8 Contents of major and trace elements of A1, A2, A3 clasts in the Bechar 003

组分	A1 (n=2)	A2 (n=10)	A3 (n=10)
Li	4.21~6.21 (5.22)	3.41~9.88 (5.32)	2.27~6.62 (4.88)
Be	0.00~0.11 (0.06)	0.00~0.94 (0.29)	0.00~0.95 (0.19)
B	0.00~7.20 (3.60)	0.00~9.75 (4.06)	0.00~6.57 (3.24)
Na ₂ O	0.42~0.44 (0.43)	0.33~0.39 (0.36)	0.20~0.51 (0.31)
MgO	4.94~5.61 (5.28)	5.02~8.90 (7.31)	1.76~21.05 (11.30)
Al ₂ O ₃	24.49~26.20 (25.34)	25.35~30.36 (27.23)	16.54~34.00 (24.47)
SiO ₂	42.00~42.21 (42.10)	42.44~43.58 (42.97)	39.10~44.39 (41.44)
K ₂ O	0.03~0.05 (0.04)	0.02~0.04 (0.03)	0.02~0.05 (0.04)
CaO	15.48~15.79 (15.64)	14.84~16.90 (15.73)	9.58~19.16 (13.81)
Sc	21.85~25.22 (23.53)	6.52~11.60 (9.31)	2.73~13.68 (6.79)
TiO ₂	3.35~3.77 (3.56)	0.17~0.53 (0.27)	0.06~0.88 (0.24)
V	27.66~31.96 (29.81)	13.66~25.06 (21.47)	8.20~49.49 (24.26)
Cr	871.05~1055.98 (963.52)	410.03~796.13 (683.73)	253.84~3861.16 (1012.95)
MnO	0.10~0.11 (0.11)	0.05~0.09 (0.07)	0.02~0.13 (0.08)
FeO	6.77~7.43 (7.10)	4.18~7.41 (5.72)	1.60~12.69 (7.88)
Co	13.15~14.62 (13.89)	6.50~10.77 (8.51)	4.09~76.54 (14.93)
Ni	41.34~67.21 (54.27)	27.93~115.85 (73.46)	16.90~1528.76 (185.44)
Cu	2.03~2.99 (2.51)	0.89~4.14 (2.39)	1.20~70.73 (9.27)
Zn	2.90~3.70 (3.30)	1.20~4.08 (2.33)	0.36~7.47 (3.54)
Rb	0.53~0.63 (0.58)	0.51~0.69 (0.56)	0.23~1.23 (0.55)
Sr	152.30~156.76 (154.53)	145.71~171.39 (157.46)	96.01~210.32 (139.49)
Y	18.87~23.46 (21.16)	4.21~8.99 (6.67)	1.11~11.01 (4.70)
Zr	65.43~73.98 (69.70)	19.14~29.95 (23.95)	3.43~47.91 (17.81)
Nb	8.85~9.15 (9.00)	0.74~5.47 (1.80)	0.33~8.07 (2.07)
Cs	0.04~0.04 (0.04)	0.00~0.02 (0.01)	0.00~0.09 (0.02)
Ba	42.04~73.42 (57.73)	33.76~40.99 (37.24)	17.00~102.59 (42.40)
La	1.43~1.59 (1.51)	1.75~2.25 (1.96)	0.57~2.60 (1.51)
Ce	4.76~5.35 (5.06)	4.30~5.76 (4.94)	1.50~6.69 (4.13)
Pr	0.83~0.87 (0.85)	0.47~0.75 (0.64)	0.21~0.90 (0.51)
Nd	5.02~5.56 (5.29)	2.31~3.97 (2.98)	1.13~4.10 (2.55)

续表

组分	A1(n=2)	A2(n=10)	A3(n=10)
Sm	1.73~2.61(2.17)	0.66~1.22(0.93)	0.00~1.36(0.67)
Eu	0.92~1.00(0.96)	0.69~0.99(0.82)	0.42~1.13(0.70)
Gd	2.50~2.99(2.75)	0.59~2.20(1.10)	0.22~1.84(0.72)
Tb	0.47~0.64(0.56)	0.10~0.33(0.21)	0.04~0.23(0.13)
Dy	3.43~4.27(3.85)	0.82~1.78(1.21)	0.17~2.15(0.86)
Ho	0.86~0.93(0.90)	0.11~0.37(0.25)	0.05~0.42(0.18)
Er	2.31~2.94(2.62)	0.34~1.14(0.77)	0.14~1.23(0.52)
Tm	0.28~0.37(0.32)	0.06~1.16(0.11)	0.01~0.19(0.08)
Yb	2.38~2.61(2.49)	0.57~1.29(0.78)	0.11~1.34(0.52)
Lu	0.37~0.42(0.40)	0.05~1.19(0.11)	0.01~0.18(0.08)
Hf	1.86~2.01(1.93)	0.36~0.88(0.59)	0.00~1.28(0.40)
Ta	0.61~0.63(0.62)	0.02~0.24(0.08)	0.01~0.41(0.09)
Pb	0.05~0.19(0.12)	0.04~0.36(0.15)	0.04~2.53(0.46)
Th	0.39~0.49(0.44)	0.21~0.40(0.31)	0.03~0.55(0.31)
U	0.15~0.22(0.18)	0.03~0.15(0.10)	0.03~0.16(0.09)

注: 括号内数值为平均值, 主量元素含量为%, 微量元素含量为 $\times 10^{-6}$; “n”为样品数。

组成的平均值为: Sc 9.31×10^{-6} ($6.52 \times 10^{-6} \sim 11.6 \times 10^{-6}$), Cr 683.73×10^{-6} ($410.03 \times 10^{-6} \sim 796.13 \times 10^{-6}$), Sm 0.93×10^{-6} ($0.66 \times 10^{-6} \sim 1.22 \times 10^{-6}$), Eu 0.82×10^{-6} ($0.69 \times 10^{-6} \sim 0.99 \times 10^{-6}$), Th 0.31×10^{-6} ($0.21 \times 10^{-6} \sim 0.40 \times 10^{-6}$)。

表 8 显示, A3 岩屑全岩主量元素组成的平均值是: FeO 7.88% (1.60% ~ 12.69%), MgO 11.30% (1.76% ~ 21.05%), Al₂O₃ 24.47% (16.54% ~ 34.00%), TiO₂ 0.24% (0.06% ~ 0.88%); 微量元素组成平均值是: Sc 6.79×10^{-6} ($2.73 \times 10^{-6} \sim 13.7 \times 10^{-6}$), Cr 1013.0×10^{-6} ($253.84 \times 10^{-6} \sim 3861.2 \times 10^{-6}$), Sm 0.67×10^{-6} ($0.00 \times 10^{-6} \sim 1.36 \times 10^{-6}$), Eu 0.70×10^{-6} ($0.42 \times 10^{-6} \sim 1.13 \times 10^{-6}$), Th 0.31×10^{-6} ($0.03 \times 10^{-6} \sim 0.55 \times 10^{-6}$)。

2.2.2 NWA 13788(B1、B2、B3) 分析结果(表 9) 显示, NWA 13788 陨石中的 B1 岩屑全岩主量元素组成平均值为: FeO 7.03%, MgO 13.90%, Al₂O₃ 21.80%, TiO₂ 0.23%; 微量元素的平均值为: Sc 8.52×10^{-6} , Cr 1218.00×10^{-6} , Sm 3.56×10^{-6} , Eu 1.04×10^{-6} , Th 2.62×10^{-6} 。

分析结果(表 9) 显示, B2 岩屑全岩主量元素组成平均值为: FeO 7.80% (2.15% ~ 12.38%), MgO 7.87% (1.83% ~ 13.71%), Al₂O₃ 24.36% (15.40% ~ 34.09%), TiO₂ 0.27% (0.10% ~ 0.36%); 微量元素的平均组成为: Sc 17.21×10^{-6} ($5.44 \times 10^{-6} \sim 25.61 \times 10^{-6}$), Cr 1383.6×10^{-6} ($311.11 \times 10^{-6} \sim 2895.4 \times 10^{-6}$), Sm 1.03×10^{-6} ($0.33 \times 10^{-6} \sim 1.79 \times 10^{-6}$), Eu 0.77×10^{-6} ($0.59 \times 10^{-6} \sim 1.0 \times 10^{-6}$), Th 0.47×10^{-6} ($0.20 \times 10^{-6} \sim 0.87 \times 10^{-6}$) (表 9)。

分析结果(表 9) 显示, B3 岩屑全岩主量元素组成平均值为: FeO 2.02%, MgO 1.72%, Al₂O₃ 33.65%, TiO₂ 0.12%; 微量元素的平均组成为: Sc 5.80×10^{-6} , Cr 305.76×10^{-6} , Sm 0.92×10^{-6} , Eu 0.88×10^{-6} , Th 0.52×10^{-6} (表 9)。

2.2.3 NWA 11110(C1、C2、C3) 分析结果(表 10) 显示, NWA 11110 陨石中 C1 岩屑全岩主量元素组成平均值为: FeO 为 11.60% (6.70% ~ 16.94%), MgO 8.29% (5.04% ~ 10.97%), Al₂O₃ 21.87% (18.46% ~ 25.42%), TiO₂ 0.43% (0.08% ~ 0.71%); 微量元素的平均组成为: Sc 17.52×10^{-6} ($6.51 \times 10^{-6} \sim 28.79 \times 10^{-6}$), Cr 1096×10^{-6} ($360.4 \times 10^{-6} \sim 1894 \times 10^{-6}$), Sm 4.08×10^{-6} ($0.77 \times 10^{-6} \sim 12.50 \times 10^{-6}$), Eu 0.72×10^{-6} ($0.51 \times 10^{-6} \sim 0.92 \times 10^{-6}$), Th 为 1.7×10^{-6} ($0.26 \times 10^{-6} \sim 5.0 \times 10^{-6}$) (表 10)。

分析结果(表 10) 显示, C2 岩屑全岩主量元素组成平均值为: FeO 7.09%, MgO 6.10%, Al₂O₃ 25.91%, TiO₂ 0.29%; 微量元素的主要组成为: Sc 14.82×10^{-6} , Cr 993.01×10^{-6} , Sm 1.71×10^{-6} , Eu 0.90×10^{-6} , Th 1.12×10^{-6} 。

分析结果(表 10) 显示, C3 岩屑全岩主量元素组成平均值为: FeO 6.41% (6.36% ~ 6.45%), MgO 5.54% (5.52% ~ 5.56%), Al₂O₃ 26.71% (18.46% ~ 25.42%), TiO₂ 0.21% (0.19% ~ 0.22%); 微量元素的主要组成为: Sc 10.55×10^{-6} ($9.26 \times 10^{-6} \sim 11.84 \times 10^{-6}$), Cr 643.80×10^{-6} ($568.02 \times 10^{-6} \sim 719.58 \times 10^{-6}$), Sm 0.50×10^{-6} ($0.48 \times 10^{-6} \sim 0.51 \times 10^{-6}$), Eu 0.74×10^{-6} ($0.72 \times 10^{-6} \sim 0.77 \times 10^{-6}$), Th 0.08×10^{-6} ($0.08 \times 10^{-6} \sim 0.09 \times 10^{-6}$)。

表9 NWA 13788 陨石中 B1、B2 和 B3 岩屑的全岩主微量元素含量

Table 9 Contents of major and trace elements of B1, B2, B3 clasts in the NWA 13788

组分	NWA		NWA
	13788-B1 (n=1)	NWA 13788-B2(n=5)	13788-B3 (n=1)
Li	12.7	3.94~10.56(7.52)	5.5
Be	1.94	0.13~0.63(0.29)	0.3
B	5.76	0.12~7.37(3.16)	1.8
Na ₂ O	0.36	0.23~0.40(0.33)	0.4
MgO	13.9	1.83~13.71(7.87)	1.7
Al ₂ O ₃	21.8	15.40~34.09(24.36)	33.7
SiO ₂	43.7	42.63~45.87(44.01)	43.3
K ₂ O	0.21	0.04~0.18(0.08)	0.0
CaO	12.1	10.10~18.54(14.50)	18.6
Sc	8.52	5.44~25.61(17.21)	5.8
TiO ₂	0.23	0.10~0.36(0.27)	0.1
V	33.7	11.79~89.45(47.08)	11.2
Cr	1218	311.11~2895.42(1383.59)	305.8
MnO	0.092	0.03~0.21(0.11)	0.0
FeO	7.03	2.15~12.38(7.80)	2.0
Co	29.1	9.42~32.49(21.04)	3.5
Ni	151	156.94~385.06(261.30)	48.3
Cu	5.00	2.85~6.57(4.73)	0.4
Zn	15.7	1.17~13.50(5.89)	1.8
Rb	4.02	1.25~4.96(2.10)	1.0
Sr	191	119.64~334.30(183.16)	177.8
Y	26.2	3.02~14.75(8.92)	5.7
Zr	110	7.91~36.21(23.28)	24.5
Nb	8.88	0.63~3.05(1.81)	1.4
Cs	0.075	0.01~0.18(0.07)	0.1
Ba	641	48.44~6329.60(1337.03)	47.8
La	8.20	2.24~4.52(2.98)	2.8
Ce	20.2	5.35~11.35(6.82)	6.5
Pr	2.46	0.65~1.74(0.91)	0.7
Nd	11.9	2.75~7.16(4.14)	3.3
Sm	3.56	0.33~1.79(1.03)	0.9
Eu	1.04	0.59~1.02(0.77)	0.9
Gd	3.91	0.73~4.79(1.94)	0.9
Tb	0.66	0.07~0.41(0.25)	0.1
Dy	4.25	0.46~2.56(1.57)	1.0
Ho	1.15	0.09~0.59(0.33)	0.2
Er	2.96	0.39~1.45(0.96)	0.7
Tm	0.47	0.05~0.26(0.15)	0.1
Yb	3.11	0.49~1.88(1.14)	0.3
Lu	0.44	0.05~0.24(0.14)	0.1
Hf	2.93	0.18~1.06(0.64)	0.6
Ta	0.43	0.04~0.14(0.09)	0.1
Pb	1.33	0.12~1.52(0.53)	0.4
Th	2.62	0.20~0.87(0.47)	0.5
U	0.66	0.00~0.21(0.13)	0.2

注: 括号内数值为平均值, 主元素含量为%, 微量元素含量为 $\times 10^{-6}$ 。

3 讨论

3.1 Bechar 003、NWA 13788 和 NWA 11110 陨石类型划分

Bechar 003、NWA 13788、NWA 11110 陨石的岩石结构与矿物组成与典型的月球角砾岩基本一致 (Jolliff et al., 2018), 同时, 3 块陨石中斜长石的成分范围(表 3、5、7) 均与月球陨石斜长石的成分范围 (An_{90-100}) 一致 (Zhang and Hsu, 2006)。此外, 3 块陨石的晶屑及岩屑(斜长辉长质冲击熔融岩屑、微斑熔融角砾岩岩屑、辉长质斜长岩岩屑) 的橄榄石和辉石的 Fe/Mn 值的变化趋势与月球陨石中橄榄石和辉石 Fe/Mn 值的变化趋势一致(图 2、图 3) (Papike et al., 2009)。3 块陨石的岩石学矿物学特征充分表明它们均为月球陨石。

3.1.1 A1、A2 和 A3 岩屑 Bechar 003 陨石中发现的斜长辉长质冲击熔融岩屑以及微斑熔融角砾岩屑说明该陨石属于混合岩质的月球角砾岩, 其冲击特征以及陨石内部的岩屑、晶屑表明该陨石在经历过冲击破碎、熔融与其他源区物质混合后胶结形成。该陨石中 A1 岩屑具有典型的次辉绿结构(图 1a) (NWA 11460) 属于冲击熔融岩屑, 并且次辉绿结构的出现表明其相比 A3 岩屑具有更快的冷却速率 (Norman, 2005), 通过对岩屑中橄榄石、辉石以及斜长石矿物模式丰度的统计, 其投点落在斜长质辉长岩的范围内(图 4), 因此 A1 岩屑为斜长辉长质冲击熔融岩屑。

A1 岩屑的全岩 FeO 与 Al_2O_3 的含量分别为 5.72% (4.18% ~ 7.41%), 27.23% (25.35% ~ 30.36%) (表 8), 均与月球高地陨石十分相似, 其投点落在月球高地陨石附近(图 5)。A1 岩屑中斜长石 $An_{94.49-96.29}$ 与其铁镁质矿物(橄榄石、辉石) $Mg^{\#}$ 值的关系表明, 该岩屑的原岩物质可能来自于月球高地的镁质岩套 (Mg-suite) (图 6), 但仅通过全岩主量元素成分与矿物化学成分来判断原岩物质并不完全可靠, 需要类似于 Ti、Sm、Sc 等难熔微量元素数据进行支撑。A1 的 Sc/Sm、Th/Sm、Eu/Sm 值及 $Mg^{\#}$ 等表明(图 7), A1 岩屑的原岩物质并不仅仅来自月球高地岩石(镁质岩套), 还掺入了部分月海玄武岩物质, 其中月海玄武岩占比较高。

通过对比 A2 岩屑全岩主量元素含量 [FeO 平均值为 5.72% (4.18% ~ 7.41%), Al_2O_3 平均值为 27.23% (25.35% ~ 30.36%)] 与岩屑中斜长石 $An_{95.47-96.77}$ 与其铁镁质矿物(橄榄石、辉石) $Mg^{\#}$ 值的关系, 该岩屑的原岩物质可能来自于高地亚铁斜

表 10 NWA 11110 陨石中 C1、C2 和 C3 岩屑的全岩主微量元素含量
Table 10 Contents of major and trace elements of C1 , C2 , C3 clasts in the NWA 11110

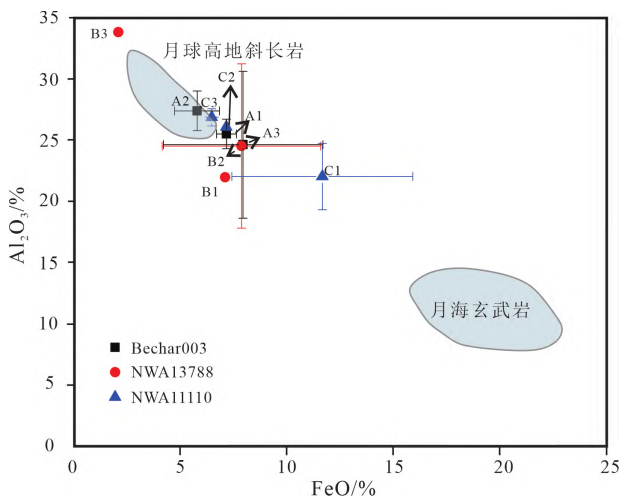
组分	NWA 11110-C1(n=6)	NWA 11110-C2(n=1)	NWA 11110-C3(n=2)
Li	4. 39~11. 54(7. 72)	9. 92	11. 08~13. 08(12. 08)
Be	0. 17~0. 69(0. 50)	0. 63	—
B	6. 59~15. 27(11. 02)	14. 1	4. 74~8. 62(6. 68)
Na ₂ O	0. 23~0. 31(0. 26)	0. 29	0. 32~0. 33(0. 33)
MgO	5. 04~10. 97(8. 29)	6. 10	5. 52~5. 56(5. 54)
Al ₂ O ₃	18. 46~25. 42(21. 87)	25. 9	18. 46~25. 42(26. 71)
SiO ₂	37. 47~43. 16(40. 92)	44. 4	37. 47~43. 16(45. 43)
K ₂ O	0. 05~0. 10(0. 07)	0. 098	0. 05~0. 08(0. 07)
CaO	12. 75~17. 93(15. 73)	15. 2	12. 75~17. 92(14. 82)
Sc	6. 51~28. 79(17. 52)	14. 8	9. 26~11. 84(10. 55)
TiO ₂	0. 08~0. 71(0. 43)	0. 29	0. 19~0. 22(0. 21)
V	13. 31~63. 43(39. 28)	38. 3	19. 43~21. 57(20. 50)
Cr	360. 4~1894(1096)	993	568. 0~719. 6(643. 8)
MnO	0. 10~0. 17(0. 14)	0. 098	0. 11~0. 12(0. 12)
FeO	6. 70~16. 94(11. 60)	7. 09	6. 36~6. 45(6. 41)
Co	8. 80~28. 84(17. 14)	9. 73	4. 92~7. 18(6. 05)
Ni	13. 90~142. 13(61. 29)	38. 0	14. 11~23. 70(18. 91)
Cu	2. 34~5. 84(4. 01)	3. 88	2. 98~3. 62(3. 30)
Zn	5. 92~17. 40(9. 85)	9. 26	10. 32~14. 65(12. 48)
Rb	0. 47~2. 43(1. 34)	1. 41	0. 96~1. 41(1. 19)
Sr	152. 44~351. 59(237. 64)	192	168. 85~195. 01(181. 93)
Y	5. 71~58. 41(24. 42)	15. 2	4. 60~5. 37(4. 98)
Zr	22. 79~391. 29(137. 71)	51. 0	8. 67~11. 55(10. 11)
Nb	1. 11~17. 69(7. 15)	4. 63	0. 22~0. 29(0. 26)
Cs	0. 01~0. 06(0. 09)	0. 036	0. 02~0. 03(0. 02)
Ba	219. 3~2328(1074)	912	491. 62~771. 94(631. 78)
La	1. 09~26. 28(9. 23)	4. 72	0. 98~1. 09(1. 04)
Ce	4. 12~66. 92(23. 85)	11. 7	2. 68~3. 30(2. 99)
Pr	0. 52~9. 45(3. 25)	1. 47	0. 27~0. 36(0. 31)
Nd	2. 75~38. 67(14. 09)	7. 12	1. 15~1. 33(1. 24)
Sm	0. 77~12. 50(4. 08)	1. 71	0. 48~0. 51(0. 50)
Eu	0. 51~0. 92(0. 72)	0. 90	0. 72~0. 77(0. 74)
Gd	1. 27~12. 99(4. 89)	2. 61	0. 91~0. 98(0. 95)
Tb	0. 14~1. 97(0. 74)	0. 41	0. 12~0. 13(0. 12)
Dy	1. 04~11. 13(4. 58)	2. 87	0. 68~1. 01(0. 85)
Ho	0. 19~2. 34(0. 96)	0. 64	0. 16~0. 20(0. 18)
Er	0. 55~6. 33(2. 57)	1. 85	0. 49~0. 57(0. 53)
Tm	0. 11~0. 93(0. 40)	0. 28	0. 08~0. 11(0. 09)
Yb	0. 55~5. 55(2. 48)	1. 85	0. 60~0. 61(0. 61)
Lu	0. 10~0. 76(0. 38)	0. 28	0. 08~0. 09(0. 09)
Hf	0. 69~8. 64(3. 23)	1. 48	0. 29~0. 32(0. 30)
Ta	0. 03~0. 81(0. 31)	0. 19	0. 02~0. 03(0. 03)
Pb	0. 37~0. 65(0. 51)	0. 57	0. 42~0. 60(0. 51)
Th	0. 26~4. 96(1. 71)	1. 12	0. 08~0. 09(0. 08)
U	0. 29~1. 78(0. 80)	0. 59	0. 34~0. 35(0. 35)

注: 括号内数值为平均值, 主量元素含量为%, 微量元素含量为 $\times 10^{-6}$; “—”表示低于检测限。

长岩层(Ferroan anorthosites ,FANs) (图 6) 。但其微量元素特征表明 ,A2 岩屑的原岩物质由月球高地陨石与月海玄武岩混合组成 ,其中月球高地陨石的占比较高(图 7) 。

A3 岩屑中含有橄榄石、辉石、斜长石 根据其模式丰度 A3 岩屑属于斜长辉长质岩屑(图 4) ,但其与

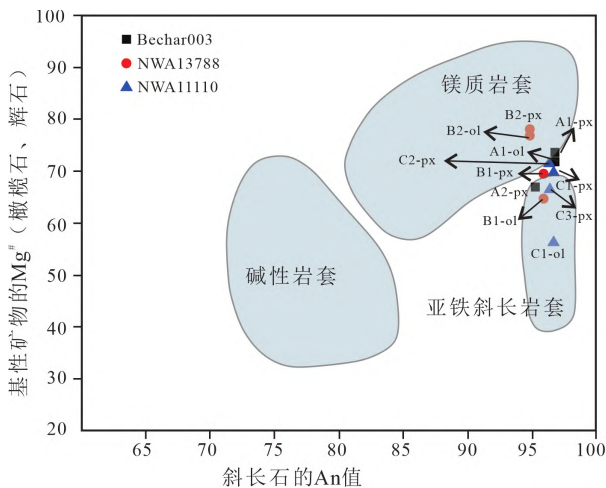
月球内生作用形成的斜长质辉长岩不同 ,A3 岩屑具有嵌晶结构(图 1c) ,属于冲击熔融角砾岩中的常见结构(Norman ,2005) ,该岩屑的原岩物质在冲击作用下发生熔融后快速冷却形成 ,因此 ,A3 岩屑为斜长辉长质冲击熔融岩屑。A3 岩屑的全岩主量元素特征 [FeO 平均值为 7. 88% (1. 60% ~ 12. 69%) ,



修改自 Zeng 等 (2018)

图5 Bechar 003、NWA 13788 和 NWA 11110 陨石中岩屑全岩 Al_2O_3 和 FeO 含量成分投图

Fig. 5 Diagram of Al_2O_3 and FeO of lithic clasts in the Bechar 003, NWA 13788 and NWA 11110



修改自 Shearer 等 (2015)

图6 镁质岩套、碱性岩套、亚铁斜长岩中铁镁质矿物(辉石、橄榄石) $\text{Mg}^\#$ 与斜长石 An 关系图

Fig. 6 A plot of $\text{Mg}^\#$ of mafic silicates vs. An of plagioclases for Mg-suite rocks, alkali-suite rocks, and ferroan anorthosite

Al_2O_3 平均值为 24.47% (16.54% ~ 34.00%)]与微量元素特征表明, A3 岩屑的原岩物质为月球高地陨石与月海玄武岩的混合物, 其中月球高地陨石物质占比较高(图7)。

上述特征表明, 在冲击作用的影响下, 导致月球高地物质与月海玄武岩物质在月表相遇, 最终胶结成岩, 在后期的冲击作用下导致内部发生熔融, 形成冲击熔融岩屑, 但对于月球高地陨石中是否含有镁质岩套物质或亚铁斜长岩层物质并不能确定。

3.1.2 B1、B2 和 B3 岩屑 NWA 13788 陨石中发

现的斜长辉长质冲击熔融岩屑以及微斑熔融角砾岩屑同样说明该陨石应该属于混合岩质的月球角砾岩, 其冲击特征较 Bechar 003 更为明显, 表明其由撞击产生的碎屑混合而成。该陨石中 B1 岩屑具有典型的辉绿结构(图 1e), 其全岩主量元素(FeO 含量为 7.03%, Al_2O_3 含量为 21.80%) 投图落点在月球高地陨石附近(图 5), 岩屑中斜长石 $\text{An}_{93.94\sim 95.54}$ 与其铁镁质矿物(橄榄石、辉石) $\text{Mg}^\#$ 值的关系表明, 该岩屑的原岩物质可能来自于亚铁斜长岩层(Ferroan anorthosites, FANs)(图 6)。而其微量元素特征现实, B1 岩屑的原岩物质并非只来自月球高地岩石, 与 Bechar 003 陨石中的岩屑相似, 其原岩物质由月球高地陨石与月海玄武岩混合组成, 并且其中月球高地陨石占比较高(图 7)。

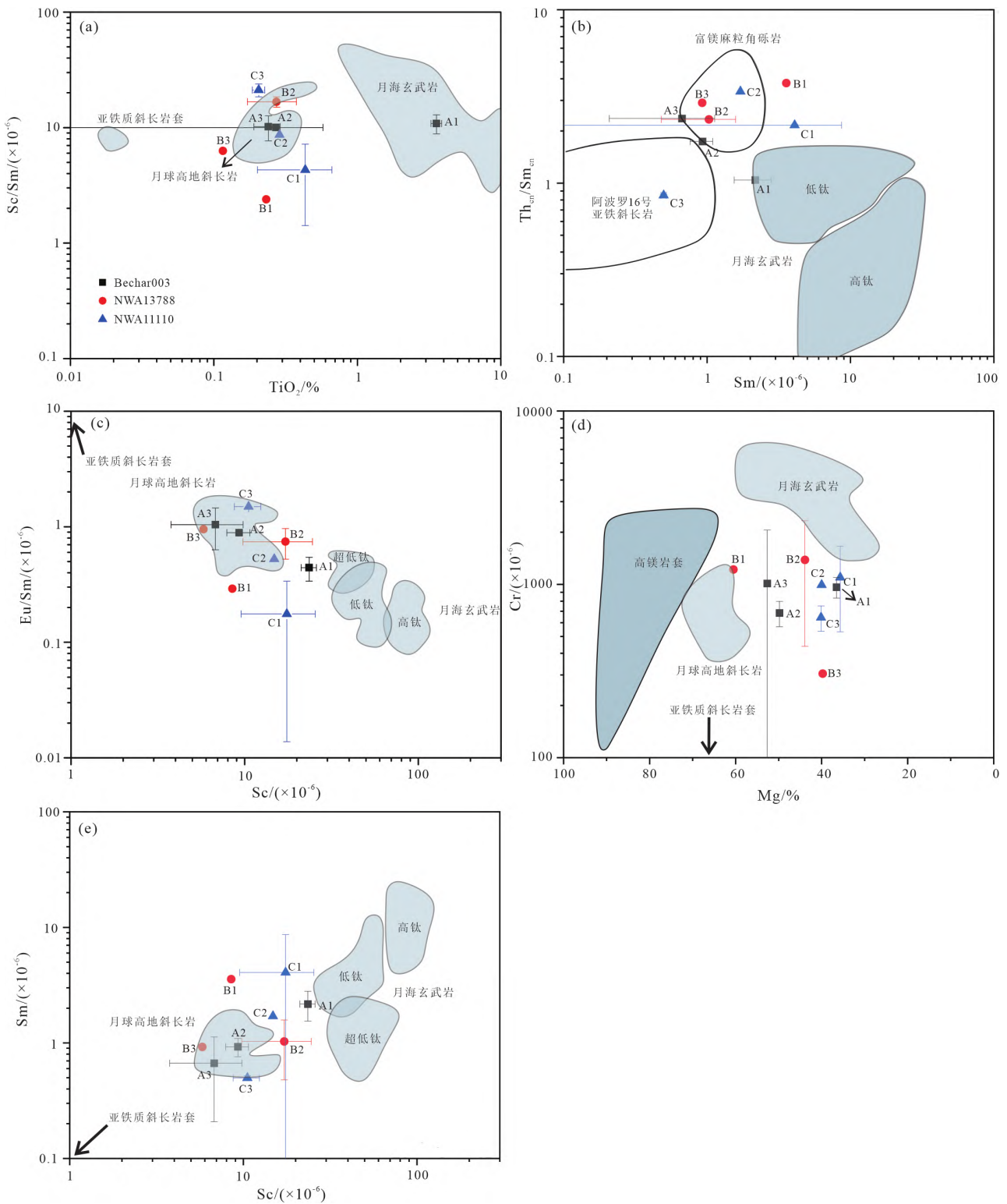
B2 岩屑的全岩主量元素特征 [FeO 平均值为 7.80% (2.15% ~ 12.38%), Al_2O_3 平均值为 24.36% (15.40% ~ 34.09%)] 与岩屑中斜长石 $\text{An}_{94.83\sim 97.17}$ 与其铁镁质矿物(橄榄石、辉石) $\text{Mg}^\#$ 值的关系表明, 该岩屑的原岩物质可能来自于月球高地的镁质岩套(Mg-suite)(图 5、图 6)。其微量元素特征表明, B2 岩屑的原岩物质由月球高地陨石与月海玄武岩混合组成, 其中月球高地陨石占比较高(图 7)。

B3 岩屑的全岩主量元素(FeO 含量为 2.02%, Al_2O_3 含量为 33.65%) 与微量元素特征表明, 其原岩物质也不是单一来自月球高地或月海, 而是由高地陨石与月海玄武岩混合物组成(图 7a~7e), 并且其原始物质中高地陨石占比较高(图 6)。

上述特征表明, 月表发生冲击后, 造成月球高地陨石与月海玄武岩碎屑物质的混合、胶结, 之后的冲击事件造成岩石内部发生部分熔融, 形成冲击熔融岩屑。

3.1.3 C1、C2 和 C3 岩屑 NWA 11110 陨石相比 NWA 13788 和 Bechar 003 陨石其冲击特征更加明显, 矿物碎屑的粒度更加不均匀, 斜长辉长质冲击熔融岩屑以及辉长质斜长岩岩屑的存在表明该陨石属于混合质月球角砾岩。

C1 岩屑的全岩主量元素(FeO 平均值为 11.60% (6.70% ~ 16.94%), Al_2O_3 平均值为 21.87% (18.46% ~ 25.42%)) 投图落点在月球高地陨石端元与月海玄武岩端元中部(图 5), 岩屑中斜长石 $\text{An}_{95.71\sim 97.49}$ 与铁镁质矿物(橄榄石、辉石) $\text{Mg}^\#$ 值的关系表明, 该岩屑来自于亚铁斜长岩层(Ferroan anorthosites, FANs)(图 6)。其主量元素特征与微量元素特征表明, C1 岩屑原岩物质不来自某一端



修改自 Joy 等 (2010)

图 7 Bechar 003、NWA 13788 和 NWA 11110 陨石岩屑全岩主微量元素投图

Fig. 7 Diagrams for contents of major and trace elements of lithic clasts in the Bechar 003, NWA 13788, NWA 11110

元 而是由月球高地陨石与月海玄武岩两部分物质混合而成,其混合比例相当(图 7)。

C2 岩屑的全岩主量元素 (FeO 含量为 7.09%, Al₂O₃ 含量为 25.91%) 投点落在月球高地陨石附近

(图 5) 岩屑中斜长石 (An_{94.67~97.35}) 与辉石 Mg[#] 值的关系表明,该岩屑的原岩物质可能来自于高地镁质岩套 (Mg-suite) (图 6)。但其微量元素特征表明, C2 岩屑的原岩物质物质由月球高地陨石与月海玄

武岩混合而成,并且月球高地陨石在其中占比较高(图7)。

C3 岩屑全岩主量元素(FeO 均值为 6.41% (6.36%~6.45%), Al_2O_3 均值为 26.71% (18.46%~25.42%)) 投图落点在月球高地陨石的范围内(图5) 岩屑中斜长石 $An_{95.83-96.83}$ 与铁镁质矿物(橄榄石、辉石) $Mg^{\#}$ 值的关系表明,该岩屑来自于亚铁斜长岩层(Ferroan anorthosites, FANs)(图6)。其 $Thcn/Smcn-Sm$ 关系表明,C3 岩屑与 Apollo 16 号采回的亚铁质斜长岩同源(图7b) 其他微量元素特征表明其原岩物质可能由高地亚铁斜长岩层的物质与月海玄武岩物质混合而成,其中高地物质占比较高(图7a,7c~7e)。

上述特征表明,月表受冲击作用影响导致月球高地陨石的碎屑物质与月海玄武岩碎屑物质混合、胶结,并在后期的冲击作用中发生部分熔融,并形成冲击熔融岩屑,其中 C3 岩屑的原始物质中可能混有亚铁质斜长岩层物质。

3.2 Bechar 003 中阿姆阿尔柯尔矿的指示意义

阿姆阿尔柯尔矿 [(Mg,Fe) Ti_2O_5] 是 Apollo 11 号在静海中的高钛月海玄武岩中发现的一种新矿物(Anderson et al., 1970) 矿物的名称以 Apollo 11 号任务三位宇航员的名字命名——Neil A. Armstrong, Edwin E. Aldrin, and Michael Collins (Zhang et al., 2020)。

该矿目前分为 3 种类型: I 型阿姆阿尔柯尔矿(Armalcolite)、II 型含铬锆钙的阿姆阿尔柯尔矿(Cr-Zr-Ca-armalcolite) 和 III 含锆阿姆阿尔柯尔矿(Zr-armalcolite) (Haggerty, 1972, 1973)。3 种类型的矿物成分不同,形成环境不同,其伴生矿物也有所不同。I 型阿姆阿尔柯尔矿以低 ZrO_2 含量为特征,小于 0.8% 并且 I 型阿姆阿尔柯尔矿的伴生矿物比较简单,主要是钛铁矿(Ilmenite), I 型阿姆阿尔柯尔矿存在于典型的月海高钛玄武岩(Haggerty, 1973)。II 型与 III 型阿姆阿尔柯尔矿一般出现在同一种岩浆环境中,产出于典型的非月海的高铝玄武岩,并且这两种类型会伴生有非常复杂的矿物,比如斜锆石(Baddelevite)、钙钛锆石(Zirconolite)、金红石(Rutile)、钛铁矿(Ilmenite) 和铬铁矿(Chromite)。II 型阿姆阿尔柯尔矿具有较高的 ZrO_2 含量(3.8%~6.2%), Cr_2O_3 含量(4.3%~11.5%) 以及 CaO 含量(3.0%~3.5%) (Haggerty, 1972; Brett et al., 1973; Reid et al., 1973)。III 型阿姆阿尔柯尔矿相比 I 型具有更高的 ZrO_2 含量(2.0%~

4.5%) 相比 II 型具有更低的 Cr_2O_3 含量(~1.5%) 和 CaO 含量(<1%)。

Bechar 003 中发现 II 型与 III 型阿姆阿尔柯尔矿的集合体,并且在集合体上发现交生的钙钛锆石(图1d)。电子探针数据表明,在 Bechar 003 中发现的两种阿姆阿尔柯尔矿分别属于 II 型与 III 型阿姆阿尔柯尔矿(表3)。该矿物形成于非月海的高铝玄武岩,而其出现在 Bechar 003 中,表明在冲击作用的影响下该矿物脱离源区与月球高地的碎屑物质以及月海玄武岩碎屑物质混合、胶结,在后期的冲击作用下,最终形成 Bechar 003 角砾岩。

4 结论

(1) 通过对比主要造岩矿物类型、岩相结构、橄榄石辉石矿物中 Fe 原子与 Mn 原子之间的关系,斜长石 An 值,充分证明 Bechar 003、NWA 13788、NWA 11110 属于月球陨石,并且是混合质月球斜长角砾岩。同时三块月球陨石中的部分岩屑(Bechar 003 中的具有嵌晶结构的斜长辉长质冲击熔融岩屑, NWA 13788 中的具有辉绿结构的斜长辉长质冲击熔融岩屑, NWA 11110 中的具有辉绿结构的斜长辉长质冲击熔融岩屑等)的原岩物质均由月球高地陨石与月海玄武岩混合而成,这一特征表明,在岩屑形成时期,月表曾经发生过多次撞击事件导致月球高地物质与月海玄武岩物质发生混合。

(2) 三块混合质月球角砾岩均经历过冲击作用,其中 NWA 13788 于 NWA 11110 的冲击特征更加显著,三块陨石均是由于月球表面的不同的冲击事件产生,Bechar 003 中阿姆阿尔柯尔矿的发现表明该陨石不仅由月球高地陨石物质以及月海玄武岩物质组成,还有来自非月海高铝玄武岩源区的原岩物质的加入。

参考文献 (References):

- Anderson A T, Boyd F R, Bunch T E, Cameron E N, El Goresy A, Finger L W, Haggerty S E, James O B, Keil K, Prinz M, Ramdohr P. 1970. Armalcolite: A new mineral from the Apollo 11 samples. *Geochimica et Cosmochimica Acta Supplement*, 1: 55-63
- Brett R, Gooley R C, Dowty E, Prinz M, Keil K. 1973. Oxide minerals in lithic fragments from Luna 20 fines. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 37(4): 761-773
- Gross J, Hilton A, Prissel T C, Setera J B, Korotev R L, Calzada-Diaz A. 2020. Geochemistry and petrogenesis of Northwest Africa 10401: A new type of the Mg-suite rocks. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 125(5): e2019JE006225
- Haggerty S E. 1972. The mineral chemistry of some decomposition and reaction assemblages associated with Cr-Zr, Ca-Zr and Fe-Mg-Zr titan-

- ates. The Apollo 15 Lunar Samples, 88-91
- Haggerty S E. 1973. Armalcolite and genetically associated opaque minerals in the lunar samples. In Lunar and Planetary Science Conference Proceedings, 4: 777
- Jolliff B L, Wieczorek M A, Shearer C K, Neal C R. 2018. New views from the Moon. *Chantilly: Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 60
- Joy K H, Crawford I A, Russell S S, Kearsley A T. 2010. Lunar meteorite regolith breccias: An in situ study of impact melt composition using LA-ICP-MS with implications for the composition of the lunar crust. *Meteoritics & Planetary Science*, 45(6): 917-946
- Korotev R L. 2005. Lunar geochemistry as told by lunar meteorites. *Geochemistry*, 65(4): 297-346
- Li C L, Hu H, Yang M F, Pei Z Y, Zhou Q, Ren X, Liu B, Liu D W, Zeng X G, Zhang G L, Zhang H B, Liu J J, Wang Q, Deng X J, Xiao C J, Yao Y G, Xue D S, Zuo W, Su Y, Wen W B, Ouyang Z Y. 2022. Characteristics of the lunar samples returned by the Chang'E-5 mission. *National Science Review*, 9(2): nwab188
- Norman M D. 2005. Lunar impact breccias: Petrology, crater setting, and bombardment history of the Moon. *Australian Journal of Earth Sciences*, 52(4-5): 711-723
- Papike J J, Karner J M, Shearer C K, Burger P V. 2009. Silicate mineralogy of martian meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73(24): 7443-7485
- Qian Y Q, Xiao L, Head J W, Van Der Bogert C H, Hiesinger H, Wilson L. 2021. Young lunar mare basalts in the Chang'e-5 sample return region, northern Oceanus procellarum. *Earth and Planetary Science Letters*, 555: 116702
- Reid A M, Warner J L, Ridley W I, Brown R W. 1973. Luna 20 soil: Abundance and composition of phases in the 45 - 125 micron fraction. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 37(4): 1011-1030
- Shearer C K, Elardo S M, Petro N E, Borg L E, McCubbin F M. 2015. Origin of the lunar highlands Mg-suite: An integrated petrology, geochemistry, chronology, and remote sensing perspective. *American Mineralogist*, 100(1): 294-325
- Vaniman D, Dietrich J, Taylor G J, Heiken G. 1991. Exploration, samples, and recent concepts of the Moon. Heiken G, Vaniman D, French M. *Lunar Source book*. Cambridge University Press
- Zeng X J, Joy K H, Li S J, Pernet-Fisher J F, Li X Y, Martin D J, Li Y, Wang S J. 2018. Multiple lithic clasts in lunar breccia Northwest Africa 7948 and implication for the lithologic components of lunar crust. *Meteoritics & Planetary Science*, 53(5): 1030-1050
- Zhang A C, Hsu W. 2006. Petrographic and mineralogical studies of the lunar meteorite Dhofar 1180. *Meteoritics & Planetary Science*, 41(5): 5170
- Zhang A C, Pang R L, Sakamoto N, Yurimoto H. 2020. The Cr-Zr-Ca armalcolite in lunar rocks is loveringite: Constraints from electron backscatter diffraction measurements. *American Mineralogist*, 105(7): 1021-1029

(本文责任编辑: 刘莹; 英文审校: 张兴春)