

HED 族陨石中辉石颗粒的 Ca-Mg-Fe 元素 迁移规律及其指示意义

郭壮^{1,2} 陈宏毅^{3*} 刘燊¹ 李阳² 王鹏⁴

1. 西北大学 地质学系 西安 710069; 2. 中国科学院 地球化学研究所 贵阳 550081;
3. 桂林理工大学 地球科学学院 桂林 541004; 4. 贵州理工学院 化学工程学院 贵阳 550003

摘要: Howardites-Eucrite-Diogenite (HED) 族陨石普遍被认为来自于灶神星, 辉石颗粒中出溶片晶的形成是母体经历热变质事件的直接产物, 因此出溶辉石的元素迁移规律可以反映灶神星经历的热变质条件。本文采用扫描电镜、激光拉曼光谱仪和电子探针针对不同类型 HED 族陨石样品进行了分析。结果表明, HED 族陨石中非平衡型辉石颗粒的 Ca-Mg-Fe 元素不均一, 各样品中平衡型辉石颗粒的 Ca-Mg-Fe 元素平均扩散速率比值约为 $\nu_{Ca}:\nu_{Mg}:\nu_{Fe}=5:1:4$ 。根据二辉石温度计得出母体热变质温度范围为 700~1000 °C, 且玄武质 Eucrite 平衡辉石指示的温度普遍低于 Howardites 指示的温度, 反映可能存在垂向压力差异性。这些特征都说明灶神星热变质期间的热源主要来源于演化早期玄武岩浆的快速喷发掩埋。

关键词: 出溶辉石; HED 族陨石; 元素迁移; 热变质作用; 灶神星

中图分类号: P691 文章编号: 1007-2802(2019)04-0790-12 doi: 10.19658/j.issn.1007-2802.2019.38.064

The Migration Rules of Ca-Mg-Fe in Pyroxene in Meteorites of Howardites-Eucrite-Diogenite (HED) Clan and Its Significance

GUO Zhuang^{1,2}, CHEN Hong-yi^{3*}, LIU Shen¹, LI Yang², WANG Peng⁴

1. Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China; 2. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China; 3. College of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China; 4. School of Chemical Engineering, Guizhou Institute of Technology, Guiyang 550003, China

Abstract: The HED (Howardites-Eucrite-Diogenite) meteorites are generally considered to be derived from the Vesta. Exsolved lamella in HED meteorite is direct product of thermal metamorphism in parent body. Therefore, the variation of elements in exsolved pyroxene can reflect the thermal metamorphism conditions. In this paper, we studied the petrology of the various type samples and revealed the migration rules of elements in HED meteorites by scanning electron microscope (SEM), laser Raman spectrometer and electron probe microanalysis (EPMA). The results show that the homogenization of Ca-Mg-Fe could not be achieved in unequilibrated pyroxene grains, while the variations of the Ca, Mg and Fe in equilibrated pyroxene grains yield an average element diffusion rate ratio of about $\nu_{Ca}:\nu_{Mg}:\nu_{Fe}=5:1:4$. According to the Two-pyroxene geothermometer, the temperature of basaltic Eucrite is lower than that of Howardites, reflecting possible difference of vertical pressure. These characteristics suggest that rapid eruptive burial of basaltic magma in early evolution is the main heat source of thermal metamorphism.

Key words: exsolved pyroxene; HED clan of meteorites; element migration; thermal metamorphism; Vesta asteroid

0 引言

陨石是人们认识太阳系早期演化的重要手段,

Howardites-Eucrite-Diogenite (HED) 族陨石作为太阳系最古老的分异型无球粒陨石, 对揭示太阳系早期小行星的岩浆作用有着重要的意义 (Takeda *et*

收稿编号: 2018-232 2018-11-08 收到 2018-12-13 改回

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41673071)

第一作者简介: 郭壮(1993-) 男, 硕士研究生, 研究方向: 地球化学. E-mail: guozhuang@stumail.nwu.edu.cn.

* 通信作者简介: 陈宏毅(1980-) 男, 高级实验师, 博士, 研究方向: 陨石学与天体化学. E-mail: 380886658@qq.com.

al., 1994; 陈宏毅等 2016)。目前, HED 族陨石普遍被认为是来源于 V 型小行星, 大多数的学者都将灶神星作为 HED 的母体(McCord *et al.*, 1970; Mccween *et al.*, 2013; Greenwood *et al.*, 2014; Mccoy *et al.*, 2015)。灶神星的演化历史主要包含 4 个阶段: ①早期的岩浆活动, 形成了灶神星早期岩浆岩, 发生在太阳系历史的很早期(Lugmair and Shukolyukov, 1998; Mittlefehldt 2015; Liao and Hsu 2017); ②显著的全球性热变质作用, 特别是在 Eucrite 中表现最为明显(具有出溶片晶的辉石颗粒等), 在岩浆岩结晶后发生(Mittlefehldt 2015; Liao and Hsu 2017); ③强烈的冲击事件, 主要发生在 41~33 亿年之间, 造成 HED 陨石中普遍观察到的角砾岩化特征(Yamaguchi *et al.*, 1996; Bogard 2011); ④多阶段流体驱动的次生蚀变, 该事件在 HED 族陨石中记录了大量的特殊现象(具有流动构造的石英脉以及交代反应结构), 目前对这个过程仍然存在很多的争议(Zhang *et al.*, 2013; Warren *et al.*, 2014)。

热变质作用是 HED 族陨石的标志性特征, 对其进行深入研究有助于我们认识太阳系早期岩浆作用后的演化历史。大多数 HED 族陨石都通过不同程度的辉石出溶现象表现出热变质作用的证据, 其中以玄武质 Eucrite 最为明显。Takeda 和 Graham (1991) 通过辉石的亚固相平衡、辉石的云雾化等一系列特征将 HED 族陨石的热变质程度分为 6 个等级, Yamaguchi 等(1996) 随后又增加了第 7 级, 其中 1 级~3 级属非平衡型辉石, 4 级以上的类型为平衡型辉石。Schwartz 和 Mccallum(2005) 通过 HED 陨石中出溶辉石的平衡特征以及辉石的固溶线得出陨石所经历的热演化历史温度范围为 700~1000 °C (Schwartz and Mccallum, 2005)。目前针对灶神星所经历热变质作用的热源仍存在争议, 主流的观点包括冲击加热、侵入加热(接触热变质作用)和快速熔岩流叠覆(Mittlefehldt, 2015), 其中快速熔岩流叠覆机制是指在灶神星演化早期, 岩浆喷发率高, 从而导致较早形成的玄武岩被快速掩埋, 这种叠覆作用形成的全球范围的热变质作用(Yamaguchi *et al.*, 1996; Mittlefehldt 2015)。HED 族陨石中辉石的出溶片晶是灶神星经历热变质作用的直接产物(Love-ring, 1975), 即 HED 族陨石中辉石颗粒在经历亚固相的热变质作用时, Ca-Mg-Fe 元素发生扩散, 从而使初始的易变辉石由于出溶出高 Ca 的普通辉石而转变为斜方辉石(Takeda and Graham, 1991; 陈宏毅, 2018)。同时, 这一过程中的元素迁移受后期事件的影响很小, 一方面由于灶神星的冲击变质程度普

遍很低, 另一方面, 灶神星基本无水, 冲击蒸汽的影响也非常有限, 只能在局部产生交代反应, 所以辉石颗粒中 Ca-Mg-Fe 元素的迁移可以直接反映灶神星的热变质特征(Boyd and Brown, 1969; Takeda *et al.*, 1976)。我们可以通过 HED 族陨石中出溶辉石颗粒精确的成分含量测定来讨论灶神星的热变质演化, 灶神星在热变质过程中元素之间的变化规律也可以有效的反映其热演化条件, 并对热变质过程的热源起到一定的限定作用。本文选择的样品缺乏 Diogenite 以及堆晶的 Eucrite 样品, 是由于它们是深成的岩浆岩, 经历了长时间的退火过程, 受热变质的影响较小, 没有明显的元素迁移特征, 因此主要选择玄武质 Eucrite 和 Howardites 中的玄武质 Eucrite 角砾进行研究。

本文通过对不同类型 HED 陨石进行岩石学及成分数据进行研究, 旨在发现灶神星在经历热变质过程中元素迁移的规律, 揭示其热演化的过程, 深刻认识太阳系早期岩浆演化后的热效应。

1 HED 族陨石的岩石类型

Howardites-Eucrite-Diogenite(HED) 表示 3 种不同的岩石类型, 是分异型小行星—灶神星的典型陨石样品, 主要来源于母体的壳层(Ruzicka *et al.*, 1997), 与地球超镁铁质岩和镁铁质岩有着很大的相似性(陈宏毅等 2016)。大多数 Diogenite 属于超镁铁质岩石, 来自于灶神星的上地幔—下地壳, 矿物组成主要是辉石以及少量橄榄石和长石, 根据其矿物特征定名为古铜辉石无球粒陨石(陈宏毅等, 2016)。Eucrite 则进一步分为堆晶岩和玄武岩两种类型, 主要来源于母体的上地壳, 矿物组成均以辉石和长石为主, 堆晶岩一般具有粗粒的辉长结构, 而玄武岩则表现出辉绿结构, Eucrite 中文定名为钙长辉长无球粒陨石(Mittlefehldt, 2015; 陈宏毅, 2018)。Howardites 被认为是来源于灶神星最表层的角砾岩或者风化层, 以古铜钙长无球粒陨石为主, 主要是由 Eucrite 和 Diogenite 的混合角砾组成, 混合比例为 55:45~76:24(Mittlefehldt *et al.*, 2013)。这 3 类灶神星陨石中, 从 Diogenite 到玄武质 Eucrite 热变质程度越来越高, 根据 3 类陨石在灶神星的深度依次为 Diogenite>堆晶 Eucrite>玄武质 Eucrite, 因此判断热变质作用的热源可能来自灶神星上部(陈宏毅 2018), Howardites 来源于灶神星的最表层, 热变质程度主要和角砾类型有关。同时, HED 陨石中很少发现高压相矿物组合, 冲击作用主要表现在陨石的不规则破裂以及样品的角砾岩化, 判断灶神星经

历的冲击等级很弱,冲击压力约为 10~15 GPa (Stöffler *et al.*, 1991)。

2 样品及分析方法

本次研究涉及的陨石样品均收集于西北非地区,国际定名分别为: NWA (Northwest Africa) 8343、NWA 11604、NWA 11606、NWA 11595、NWA 11592, 共计 5 块,其中 NWA 8343 与 NWA 11606 属于 Howardites, 其余均为玄武质 Eucrite 类型, 样品均为陨石薄片。

样品薄片的岩相学观察在中国科学院地球化学研究所完成。通过配有能谱分析仪的 FEI Scios 双束扫描电子显微镜对 5 块陨石薄片进行矿物和岩石结构分析, 并获取矿物的半定量成分数据及背散射图像。分析条件: 加速电压为 15 kV, 束流 1.6 nA, 工作距离 7 mm (Li *et al.*, 2018; Zeng *et al.*, 2018)。陨石中典型矿物的结构特征通过 Renishaw inVia 激光拉曼光谱仪进行分析, 波长为 532 nm, 激光功率为 0.5 nW, 积分时间根据不同的矿物分别选择 10 s 和 20 s。

样品的矿物成分定量数据分析在桂林理工大学地球科学学院的 JEOL JXA-8230 电子探针分析仪上完成, 工作电压为 15 kV, 电流为 20 nA, 使用 ZAF (原子序数效应、吸收效应、荧光效应) 方法校正 (Chen *et al.*, 2017; Tang *et al.*, 2017)。

3 分析结果

3.1 岩相学特征

5 块陨石样品中, 除 NWA 11592 没有明显的角砾岩化特征外, 其余均受到了不同程度的角砾岩化作用。NWA 11592 中辉石和长石总体积占比约 90%, 颗粒大小为 300~500 μm , 具有典型的辉长结构, 陨石中含有少量中等粒度的橄榄石颗粒 (约 50~250 μm) 以及铬铁矿、陨硫铁等副矿物, 并含有一条宽约 500 μm 的熔脉。其中辉石颗粒具有明显的出溶特征, 片晶宽度 ~5 μm (图 1a, 1b); NWA 11595 主要矿物组成为单斜辉石和长石, 还含有钛铁矿、铬铁矿、二氧化硅等副矿物。基质占比约为 65%, 为细小的辉石和长石碎屑。背散射图像下可见角砾由不同类型的 Eucrite 岩屑构成, 岩屑中很难观察到辉石的出溶特征, 基质中细粒的辉石中存在高 Ca 辉石的出溶, 且宽度很细 (图 1c, 1d)。NWA 11604 角砾岩化严重, 基质占比约为 60%, 角砾主要由玄武质岩屑构成, 以次辉绿结构和辉长结构为主, 矿

物以单斜辉石和长石为主, 且粒径差异较大, 表明结晶深度的不同, 反映出样品是由多种 Eucrite 破碎胶结而成, 还含有少量二氧化硅、铬铁矿、陨硫铁等副矿物, 大多数的辉石颗粒都具有较宽的出溶片晶 (图 1e, 1f, 1g)。NWA 11606 为 Howardites 类型, 基质占比约为 20%, 角砾主要是玄武质岩屑, 具有典型的辉绿结构, 同时还含有大于 10% 的以斜方辉石为主的 Diogenite 碎屑。样品中包含一个熔融程度很高的碳质球粒陨石碎屑, 辉石颗粒表现出不同的热变质程度, 包含有典型的出溶特征辉石 (图 1h, 1i)。NWA 8343 也为 Howardites 类型, 基质占比约为 30%, 含有多种玄武质岩屑, 主要矿物为长石, 斜方辉石以及单斜辉石, 还含有铬铁矿、二氧化硅、钛铁矿等副矿物, 样品中包含有两个后成合晶 (富铁辉石的不稳定分解), 且辉石颗粒表现出热变质程度的不均一特征, 同时包含有低程度和高程度的热变质辉石颗粒。

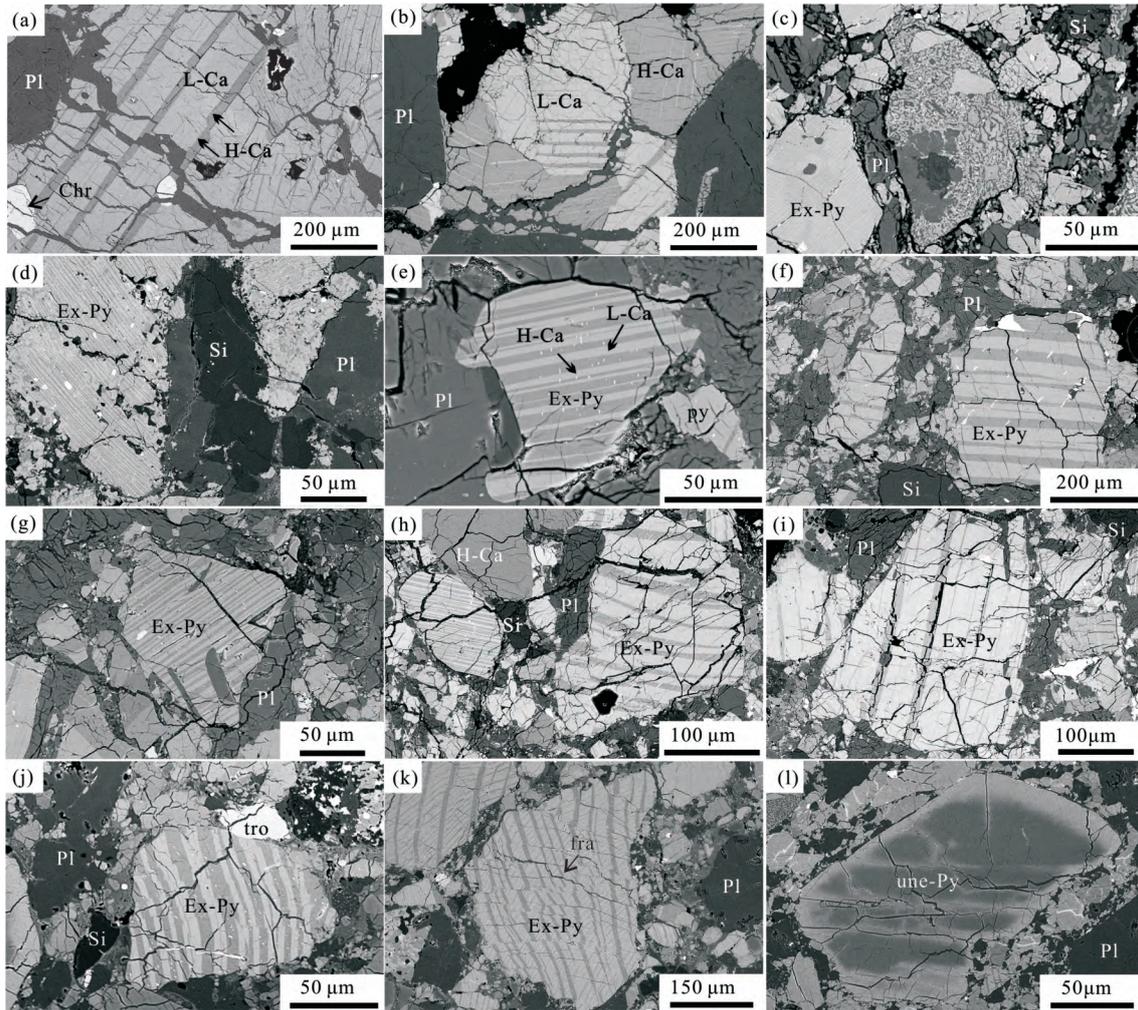
激光拉曼光谱分析结果表明不同样品中辉石的拉曼光谱都具有单斜辉石的主要谱带, Si-O-伸缩谱带 (1110 cm^{-1} 、997 cm^{-1})、Si-O-Si 弯曲谱带 (665 cm^{-1} 、559 cm^{-1}) 以及 M-O 谱带 (397 cm^{-1} 、320 cm^{-1}), 为配位的八面体结构 (图 2; 王蓉和张保民, 2010)。样品中长石的光谱特征表现出弥散的宽峰, 1110 cm^{-1} 和 506 cm^{-1} 谱峰的面积最大, 802 cm^{-1} 处较弱 (图 3), 不属于典型结晶质长石的光谱特征 (主要表现为 506~518 cm^{-1} 和 1050~1150 cm^{-1} 的谱峰; 谢先德等, 2006)。长石在偏光显微镜下不具备熔长石的全消光特征, 表明灶神星样品经历的冲击等级普遍较低。各样品中辉石和长石的拉曼光谱特征表明这 5 个样品的主要矿物组成结构具有相似性。

扫描电镜观察发现, 一些辉石颗粒中的出溶片晶被冲击产生的裂缝截断 (图 1k), 表明灶神星的热变质作用是发生于普遍的角砾岩化作用之前。

3.2 矿物化学特征

通过对不同样品中的辉石和长石颗粒进行电子探针成分分析, 得出各样品的主要矿物成分相似。各样品中的长石都以钙长石为主 (表 1), 个别样品中会出现少量的培长石 (A_n 为 72.73~95.48, 均值为 89.89)。

各样品中辉石颗粒的 Fe/Mn 值变化不大, 主要为 25.77~38.36, 根据各个陨石样品的 Fe-Mn 成分投图可以看出所有样品均满足灶神星的 Fe-Mn 趋势线 (表 2, 图 4), 判断样品是来自于灶神星的 HED



(a) (b) NWA 11592 中出溶辉石颗粒; (c) (d) NWA 11595 中的出溶辉石颗粒; (e) (f) (g) NWA 11604 中出溶辉石颗粒; (h) (i) NWA 11606 中出溶辉石颗粒; (j) (k) (l) : NWA 8343 中具有不同程度的热变质辉石颗粒。Pl-斜长石; Chr-铬铁矿; L-Ca-低钙辉石; H-Ca-高钙辉石; Si-二氧化硅; Ex-Py-出溶辉石; Py-辉石; tro-陨硫铁; fra-裂缝; unc-Py-非平衡型辉石

图1 各样品中辉石热变质特征的背散射图像

Fig.1 BSE images of thermal metamorphosed of pyroxene in each sample

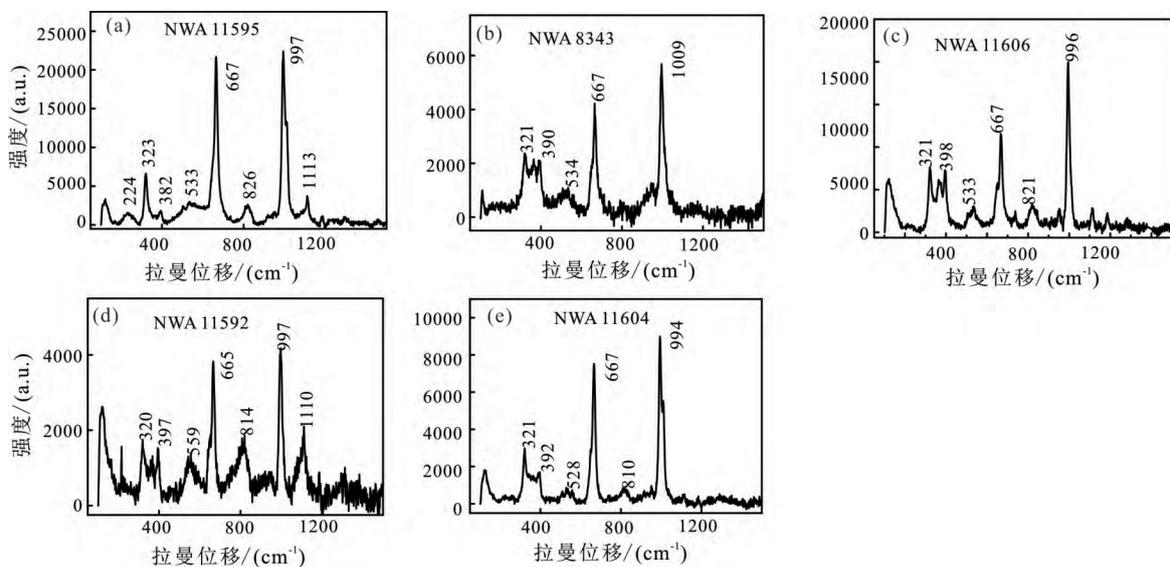


图2 各样品中辉石颗粒的激光拉曼光谱图

Fig.2 The laser Raman spectrograms of the pyroxene grains in each sample

表 2 样品中辉石颗粒的电子探针成分
Table 2 The electronic probe analysis of pyroxene in samples

| 样品名称 | 辉石类型 | 阳离子数(以24个氧原子数计算) | | | | | | | | | | | | | | | | | 总计 | Wo/% | En/% | Fs/% | Mg# | Fe/Mn |
|-----------|-------|------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | Na | Si | Al | Mg | K | Ca | S | P | Mn | Ni | Fe | Cr | V | Ti | | | | | | | | | |
| NWA 11592 | 辉石颗粒1 | 低钙 | 0.02 | 7.98 | 0.02 | 2.75 | 0.00 | 0.52 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.14 | 0.00 | 4.49 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 15.97 | 6.75 | 35.45 | 57.80 | 38.02 | 31.66 |
| | | 高钙 | 0.05 | 7.82 | 0.09 | 2.29 | 0.01 | 3.52 | 0.00 | 0.04 | 0.07 | 0.00 | 0.00 | 2.12 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 0.03 | 16.06 | 44.38 | 28.89 | 26.73 | 51.94 | 31.34 |
| | 辉石颗粒2 | 低钙 | 0.02 | 7.99 | 0.02 | 2.73 | 0.00 | 0.39 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.16 | 0.00 | 4.65 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 15.98 | 4.98 | 35.19 | 59.84 | 37.03 | 29.08 |
| | | 高钙 | 0.05 | 7.72 | 0.17 | 2.22 | 0.03 | 3.58 | 0.01 | 0.06 | 0.07 | 0.00 | 0.00 | 2.10 | 0.03 | 0.01 | 0.00 | 0.04 | 16.07 | 45.29 | 28.07 | 26.64 | 51.31 | 29.66 |
| NWA 8343 | 辉石颗粒3 | 低钙 | 0.00 | 7.93 | 0.05 | 2.62 | 0.01 | 1.06 | 0.00 | 0.01 | 0.14 | 0.00 | 4.16 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 16.01 | 13.50 | 33.43 | 53.07 | 38.65 | 29.14 | |
| | | 高钙 | 0.01 | 7.89 | 0.02 | 2.78 | 0.00 | 0.16 | 0.00 | 0.00 | 0.17 | 0.00 | 5.02 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 16.08 | 2.05 | 34.89 | 63.06 | 35.62 | 29.64 | |
| | 辉石颗粒4 | 低钙 | 0.03 | 7.79 | 0.10 | 2.25 | 0.00 | 3.61 | 0.00 | 0.00 | 0.08 | 0.00 | 2.21 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.03 | 16.13 | 44.71 | 27.89 | 27.40 | 50.45 | 28.73 | |
| | | 高钙 | 0.02 | 7.78 | 0.05 | 2.50 | 0.01 | 1.83 | 0.01 | 0.07 | 0.12 | 0.01 | 3.66 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 16.07 | 22.93 | 31.30 | 45.77 | 40.61 | 30.78 | |
| NWA 11595 | 辉石颗粒1 | 低钙 | 0.02 | 7.79 | 0.07 | 2.93 | 0.00 | 1.09 | 0.01 | 0.01 | 0.12 | 0.00 | 3.81 | 0.14 | 0.00 | 0.05 | 16.04 | 13.89 | 37.42 | 48.69 | 43.46 | 32.19 | | |
| | | 高钙 | 0.02 | 7.95 | 0.07 | 2.41 | 0.00 | 0.44 | 0.00 | 0.00 | 0.15 | 0.00 | 4.90 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 15.99 | 5.72 | 31.11 | 63.18 | 32.99 | 33.65 | |
| | 辉石颗粒2 | 低钙 | 0.03 | 7.75 | 0.17 | 2.05 | 0.00 | 3.16 | 0.00 | 0.00 | 0.09 | 0.00 | 2.79 | 0.03 | 0.00 | 0.04 | 16.12 | 39.49 | 25.59 | 34.91 | 42.29 | 32.24 | | |
| | | 高钙 | 0.03 | 7.76 | 0.03 | 2.04 | 0.01 | 0.88 | 0.00 | 0.00 | 0.16 | 0.00 | 5.27 | 0.01 | 0.00 | 0.02 | 16.22 | 10.74 | 24.89 | 64.38 | 27.88 | 32.29 | | |
| | 辉石颗粒3 | 低钙 | 0.03 | 7.84 | 0.06 | 1.85 | 0.01 | 2.75 | 0.00 | 0.00 | 0.10 | 0.00 | 3.39 | 0.02 | 0.00 | 0.03 | 16.09 | 34.41 | 23.14 | 42.45 | 35.28 | 33.36 | | |
| | | 高钙 | 0.03 | 7.79 | 0.05 | 1.88 | 0.02 | 2.32 | 0.00 | 0.00 | 0.11 | 0.00 | 3.91 | 0.02 | 0.00 | 0.04 | 16.16 | 28.60 | 23.14 | 48.26 | 32.41 | 36.67 | | |
| | 辉石颗粒4 | 低钙 | 0.02 | 7.73 | 0.11 | 2.62 | 0.00 | 0.68 | 0.01 | 0.00 | 0.14 | 0.00 | 4.82 | 0.01 | 0.00 | 0.03 | 16.17 | 8.40 | 32.22 | 59.38 | 35.17 | 34.34 | | |
| | | 高钙 | 0.02 | 7.84 | 0.06 | 2.28 | 0.00 | 3.18 | 0.00 | 0.01 | 0.07 | 0.00 | 2.48 | 0.03 | 0.00 | 0.08 | 16.04 | 40.06 | 28.75 | 31.20 | 47.96 | 35.57 | | |
| | 辉石颗粒5 | 低钙 | 0.01 | 7.62 | 0.11 | 2.12 | 0.00 | 0.38 | 0.00 | 0.00 | 0.15 | 0.00 | 5.39 | 0.26 | 0.01 | 0.08 | 16.11 | 4.78 | 26.85 | 68.37 | 28.20 | 35.77 | | |
| 高钙 | | 0.03 | 7.82 | 0.09 | 1.82 | 0.01 | 3.33 | 0.00 | 0.01 | 0.08 | 0.00 | 2.82 | 0.02 | 0.00 | 0.04 | 16.09 | 41.71 | 22.87 | 35.42 | 39.24 | 33.54 | | | |
| 辉石颗粒6 | 低钙 | 0.03 | 7.86 | 0.07 | 1.99 | 0.01 | 2.15 | 0.00 | 0.00 | 0.12 | 0.00 | 3.78 | 0.02 | 0.00 | 0.04 | 16.07 | 27.15 | 25.15 | 47.70 | 34.52 | 32.69 | | | |
| | 高钙 | 0.03 | 7.78 | 0.10 | 3.28 | 0.01 | 0.81 | 0.00 | 0.00 | 0.13 | 0.00 | 3.96 | 0.03 | 0.00 | 0.01 | 16.15 | 10.06 | 40.74 | 49.20 | 45.29 | 29.67 | | | |
| NWA 8343 | 辉石颗粒7 | 低钙 | 0.03 | 7.77 | 0.13 | 3.79 | 0.01 | 0.85 | 0.01 | 0.00 | 0.13 | 0.00 | 3.35 | 0.04 | 0.00 | 0.01 | 16.13 | 10.68 | 47.43 | 41.89 | 53.10 | 25.77 | | |
| | | 高钙 | 0.01 | 7.88 | 0.07 | 3.20 | 0.00 | 0.46 | 0.00 | 0.00 | 0.14 | 0.00 | 4.18 | 0.06 | 0.00 | 0.03 | 16.03 | 5.86 | 40.84 | 53.30 | 43.38 | 29.71 | | |
| | 辉石颗粒8 | 低钙 | 0.02 | 7.81 | 0.19 | 3.06 | 0.00 | 0.98 | 0.00 | 0.00 | 0.13 | 0.01 | 3.74 | 0.07 | 0.01 | 0.02 | 16.04 | 12.64 | 39.35 | 48.01 | 45.05 | 29.81 | | |
| | | 高钙 | 0.04 | 7.81 | 0.17 | 2.91 | 0.01 | 2.14 | 0.00 | 0.00 | 0.10 | 0.00 | 2.80 | 0.03 | 0.00 | 0.05 | 16.05 | 27.27 | 37.08 | 35.65 | 50.99 | 28.64 | | |
| NWA 11595 | 辉石颗粒1 | 低钙 | 0.02 | 7.95 | 0.03 | 2.93 | 0.00 | 0.12 | 0.00 | 0.00 | 0.14 | 0.00 | 4.73 | 0.01 | 0.00 | 0.05 | 15.99 | 1.52 | 37.64 | 60.84 | 38.22 | 33.11 | | |
| | | 高钙 | 0.04 | 7.49 | 0.20 | 2.31 | 0.00 | 2.91 | 0.16 | 0.00 | 0.07 | 0.00 | 2.69 | 0.03 | 0.01 | 0.10 | 16.00 | 36.79 | 29.18 | 34.03 | 46.16 | 36.19 | | |
| | 辉石颗粒2 | 低钙 | 0.01 | 7.89 | 0.04 | 3.26 | 0.00 | 0.26 | 0.00 | 0.00 | 0.12 | 0.00 | 4.46 | 0.01 | 0.00 | 0.01 | 16.07 | 3.30 | 40.88 | 55.82 | 42.27 | 38.36 | | |
| | | 高钙 | 0.03 | 7.83 | 0.15 | 2.79 | 0.00 | 1.25 | 0.01 | 0.00 | 0.12 | 0.00 | 3.77 | 0.04 | 0.00 | 0.04 | 16.03 | 16.02 | 35.70 | 48.29 | 42.50 | 31.31 | | |
| | 辉石颗粒3 | 低钙 | 0.05 | 7.79 | 0.47 | 2.61 | 0.01 | 1.33 | 0.01 | 0.00 | 0.11 | 0.00 | 3.41 | 0.11 | 0.01 | 0.02 | 15.91 | 18.06 | 35.51 | 46.43 | 43.34 | 30.88 | | |
| | | 高钙 | 0.03 | 7.93 | 0.02 | 3.10 | 0.00 | 0.41 | 0.00 | 0.00 | 0.13 | 0.01 | 4.38 | 0.01 | 0.00 | 0.02 | 16.04 | 5.16 | 39.28 | 55.56 | 41.42 | 34.46 | | |
| | 辉石颗粒4 | 低钙 | 0.01 | 7.84 | 0.04 | 2.98 | 0.00 | 0.42 | 0.00 | 0.00 | 0.14 | 0.00 | 4.46 | 0.13 | 0.00 | 0.04 | 16.04 | 5.37 | 37.89 | 56.74 | 40.04 | 32.98 | | |
| | | 高钙 | 0.02 | 7.85 | 0.14 | 2.99 | 0.00 | 1.04 | 0.00 | 0.00 | 0.11 | 0.00 | 3.74 | 0.03 | 0.00 | 0.07 | 16.00 | 13.42 | 38.47 | 48.11 | 44.43 | 33.32 | | |
| | 辉石颗粒5 | 低钙 | 0.03 | 7.77 | 0.13 | 2.83 | 0.01 | 1.09 | 0.01 | 0.00 | 0.12 | 0.00 | 3.95 | 0.04 | 0.00 | 0.08 | 16.07 | 13.90 | 35.88 | 50.23 | 41.67 | 32.71 | | |
| 高钙 | | 0.03 | 7.74 | 0.13 | 2.81 | 0.00 | 1.08 | 0.04 | 0.00 | 0.13 | 0.00 | 3.96 | 0.06 | 0.01 | 0.05 | 16.05 | 13.75 | 35.81 | 50.45 | 41.51 | 31.68 | | | |

续表 2

| 样品名称 | 辉石类型 | 阳离子数 (以 24 个氧原子数计算) | | | | | | | | | | | | | | 总计 | Wo/% | En/% | Fs/% | Mg# | Fe/Mn | | |
|-----------|--------|---------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | Na | Si | Al | Mg | K | Ca | S | P | Mn | Ni | Fe | Cr | V | Ti | | | | | | | | |
| WA 11606 | 低钙 | 0.00 | 7.94 | 0.06 | 2.94 | 0.00 | 0.12 | 0.00 | 0.00 | 0.14 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.03 | 15.98 | 1.49 | 37.81 | 60.71 | 38.38 | 33.89 |
| | 高钙 | 0.02 | 7.67 | 0.28 | 2.38 | 0.00 | 3.15 | 0.00 | 0.00 | 0.08 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.09 | 16.07 | 40.03 | 30.24 | 29.73 | 50.43 | 30.12 |
| | 辉石颗粒 1 | 0.00 | 7.97 | 0.03 | 2.88 | 0.01 | 0.16 | 0.00 | 0.00 | 0.14 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 15.99 | 2.01 | 36.84 | 61.15 | 37.60 | 34.89 |
| | 辉石颗粒 2 | 0.01 | 7.98 | 0.02 | 2.88 | 0.00 | 0.44 | 0.00 | 0.00 | 0.14 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 15.98 | 5.66 | 36.89 | 57.45 | 39.11 | 32.53 |
| NWA 11604 | 辉石颗粒 3 | 0.00 | 7.87 | 0.14 | 5.22 | 0.00 | 0.24 | 0.00 | 0.00 | 0.08 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.05 | 0.00 | 0.02 | 16.00 | 3.03 | 66.62 | 30.35 | 68.70 | 29.74 |
| | 低钙 | 0.00 | 7.93 | 0.03 | 2.79 | 0.00 | 0.17 | 0.00 | 0.00 | 0.17 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 16.03 | 2.12 | 35.51 | 62.37 | 36.28 | 28.76 |
| | 高钙 | 0.03 | 7.75 | 0.14 | 2.23 | 0.00 | 3.69 | 0.00 | 0.00 | 0.07 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.03 | 0.00 | 0.06 | 16.13 | 45.85 | 27.71 | 26.44 | 51.17 | 29.51 |
| | 总体 | 0.01 | 7.87 | 0.11 | 2.40 | 0.00 | 2.41 | 0.00 | 0.00 | 0.11 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.00 | 0.05 | 16.01 | 30.75 | 30.63 | 38.62 | 44.24 | 28.30 |
| NWA 11604 | 低钙 | 0.00 | 7.93 | 0.03 | 2.86 | 0.00 | 0.17 | 0.00 | 0.00 | 0.16 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.02 | 16.03 | 2.13 | 36.27 | 61.60 | 37.06 | 29.75 |
| | 高钙 | 0.02 | 7.72 | 0.15 | 2.30 | 0.00 | 3.58 | 0.00 | 0.00 | 0.08 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.03 | 0.00 | 0.06 | 16.14 | 44.43 | 28.56 | 27.01 | 51.39 | 27.27 |
| | 总体 | 0.02 | 7.79 | 0.09 | 2.49 | 0.00 | 2.38 | 0.00 | 0.00 | 0.10 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.01 | 0.04 | 16.12 | 29.54 | 30.92 | 39.54 | 43.88 | 30.58 |
| | 低钙 | 0.00 | 7.89 | 0.02 | 2.99 | 0.00 | 0.22 | 0.00 | 0.00 | 0.16 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.02 | 16.07 | 2.80 | 37.62 | 59.58 | 38.71 | 29.03 |
| NWA 11604 | 高钙 | 0.02 | 7.75 | 0.08 | 2.37 | 0.00 | 3.81 | 0.00 | 0.00 | 0.07 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.00 | 0.03 | 16.17 | 46.44 | 28.91 | 24.65 | 53.98 | 29.79 |
| | 低钙 | 0.01 | 7.90 | 0.02 | 2.56 | 0.00 | 0.16 | 0.00 | 0.00 | 0.17 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.03 | 0.00 | 0.04 | 16.04 | 2.05 | 32.49 | 65.46 | 33.17 | 30.86 |
| | 高钙 | 0.02 | 7.82 | 0.08 | 2.18 | 0.00 | 3.69 | 0.00 | 0.00 | 0.07 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.00 | 0.03 | 16.10 | 45.90 | 27.10 | 27.00 | 50.09 | 30.72 |
| | 总体 | 0.03 | 7.78 | 0.07 | 2.29 | 0.01 | 2.24 | 0.00 | 0.00 | 0.11 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.07 | 0.01 | 0.05 | 16.11 | 28.01 | 28.61 | 43.38 | 39.74 | 30.42 |
| NWA 11604 | 低钙 | 0.03 | 7.93 | 0.03 | 3.03 | 0.00 | 0.20 | 0.00 | 0.00 | 0.18 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.00 | 0.03 | 16.03 | 2.53 | 38.79 | 58.68 | 39.80 | 26.02 |
| | 高钙 | 0.02 | 7.81 | 0.13 | 2.40 | 0.00 | 3.44 | 0.00 | 0.00 | 0.07 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.03 | 0.00 | 0.06 | 16.06 | 43.26 | 30.22 | 26.51 | 53.27 | 29.32 |
| | 总体 | 0.01 | 7.87 | 0.05 | 2.69 | 0.00 | 1.93 | 0.00 | 0.00 | 0.12 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.00 | 0.03 | 16.07 | 24.20 | 33.76 | 42.04 | 44.54 | 26.83 |
| | 低钙 | 0.00 | 7.97 | 0.03 | 3.03 | 0.00 | 0.18 | 0.00 | 0.00 | 0.15 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.02 | 15.99 | 2.26 | 38.83 | 58.90 | 39.73 | 31.61 |
| NWA 11604 | 高钙 | 0.02 | 7.81 | 0.11 | 2.44 | 0.00 | 3.63 | 0.00 | 0.00 | 0.07 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.03 | 0.00 | 0.05 | 16.08 | 45.44 | 30.46 | 24.11 | 55.82 | 28.69 |
| | 低钙 | 0.02 | 8.02 | 0.01 | 2.88 | 0.00 | 0.43 | 0.00 | 0.00 | 0.15 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.03 | 0.00 | 0.03 | 15.95 | 5.53 | 37.44 | 57.04 | 39.63 | 29.60 |
| | 高钙 | 0.02 | 7.76 | 0.14 | 2.28 | 0.00 | 3.69 | 0.00 | 0.00 | 0.07 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.03 | 0.00 | 0.06 | 16.10 | 46.12 | 28.55 | 25.33 | 52.99 | 27.86 |
| | 总体 | 0.01 | 7.79 | 0.08 | 2.71 | 0.00 | 1.90 | 0.00 | 0.00 | 0.12 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.04 | 0.00 | 0.04 | 16.12 | 23.55 | 33.70 | 42.76 | 44.07 | 29.04 |
| NWA 11604 | 低钙 | 0.00 | 7.89 | 0.02 | 2.94 | 0.00 | 0.21 | 0.00 | 0.01 | 0.17 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.02 | 16.05 | 2.65 | 37.15 | 60.20 | 38.16 | 28.46 |
| | 高钙 | 0.00 | 7.92 | 0.06 | 5.19 | 0.00 | 0.16 | 0.00 | 0.00 | 0.09 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.00 | 0.02 | 16.02 | 1.99 | 65.70 | 32.30 | 67.04 | 29.72 |
| | 总体 | 0.00 | 7.95 | 0.06 | 4.26 | 0.01 | 0.17 | 0.00 | 0.00 | 0.12 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.01 | 16.00 | 2.16 | 54.44 | 43.41 | 55.64 | 29.01 |
| | 低钙 | 0.02 | 7.89 | 0.06 | 2.72 | 0.00 | 2.13 | 0.00 | 0.00 | 0.09 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.03 | 16.04 | 26.91 | 34.32 | 38.78 | 46.95 | 33.07 |
| NWA 11604 | 高钙 | 0.00 | 7.96 | 0.04 | 3.18 | 0.00 | 0.12 | 0.00 | 0.00 | 0.14 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.01 | 16.00 | 1.58 | 40.66 | 57.77 | 41.31 | 33.01 |
| | 总体 | 0.01 | 7.99 | 0.03 | 3.11 | 0.00 | 0.13 | 0.00 | 0.00 | 0.13 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 15.97 | 1.72 | 39.98 | 58.30 | 40.68 | 35.29 |

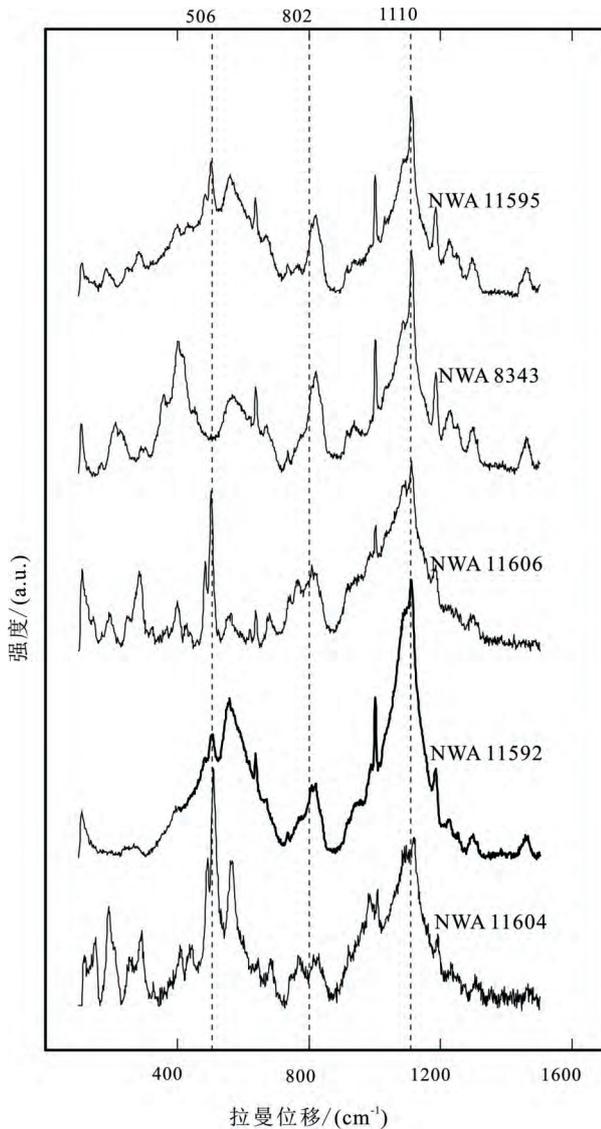
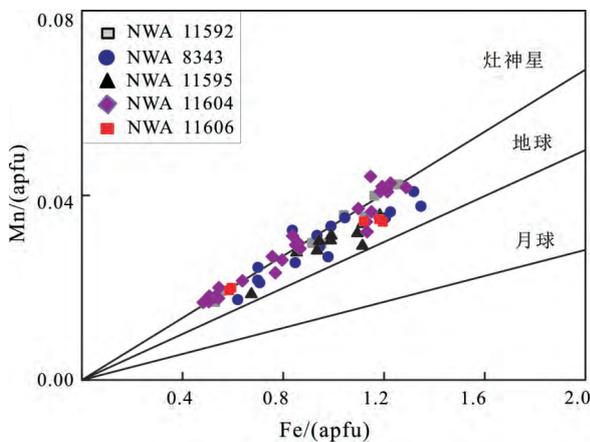


图3 各样品中长石的激光拉曼光谱图
Fig.3 The laser Raman spectrograms of the feldspars in each sample



底图据文献 Papike 等 (2003); apfu = atoms per formula unit

图4 样品中辉石 Fe-Mn 关系图

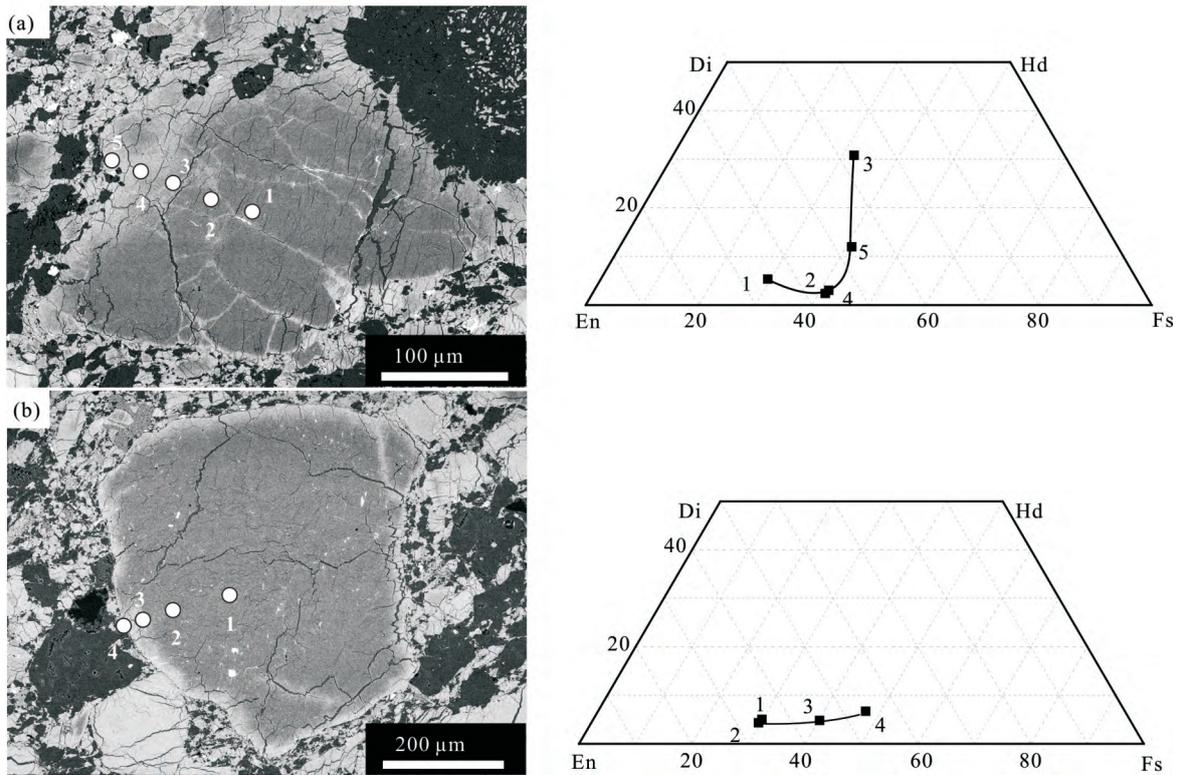
Fig.4 Diagram of Fe vs. Mn of pyroxene in samples

族分异型无球粒陨石。根据前人样品中的 $Mg^\#$ 数据统计,对于 HED 族陨石来说,堆晶岩的 $Mg^\#$ 普遍大于 60,玄武质的 $Mg^\#$ 一般小于 60 (Mittlefehldt 2015; 陈宏毅, 2018)。数据表明,玄武质 Eucrite 相比于 Howardites, $Mg^\#$ 范围明显更小,指示其辉石颗粒中包含更少的堆晶 Eucrite 或者 Diogenite 组分(表 2)。结合岩相学的特征,样品中大多数辉石颗粒都指示为玄武质的 Eucrite 类型,其中, NWA 11592 的 $Mg^\#$ 落在玄武岩范围之内,且变化范围很窄,为典型的未角砾岩化玄武质 Eucrite; NWA 11595 与 NWA 11606 成分特征类似,但经历了强烈的角砾岩化作用,为角砾岩化的玄武质 Eucrite; NWA 8343 的 $Mg^\#$ 变化范围较大,同时背散射图像下可观察到多于 10% 的 Diogenite 角砾,判断为 Howardites 类型; NWA 11604 的 $Mg^\#$ 变化范围很大,表明由不同的 Eucrite 角砾组成,且样品中只有少量的 Diogenite 碎屑,因此该样品为角砾岩化的复矿碎屑玄武质 Eucrite, NWA 11606 中除了玄武质 Eucrite 角砾,含有较多 Diogenite 角砾,属于 Howardites 类型。

3.3 热变质辉石的元素迁移规律

NWA 8343 中存在具有低热变质等级的辉石颗粒,其边缘和内部都存在成分的不均一性,个别辉石颗粒从边缘到核部的 Ca 含量基本恒定,这都与初始熔体分离结晶产生的辉石正环带不同 (刘鑫和汤艳杰, 2018)。这些特征很可能是受后期事件影响而形成的。根据辉石颗粒从核部到边部电子探针成分的四角投图可以看出,其中一个颗粒沿着裂缝以及边部具有明显富铁的趋势,这个趋势建立在 Ca 浓度不均一的基础上(图 5a),为 type-2 型热变质程度的辉石颗粒,裂缝以及边部富铁物质的出现被解释为富 Fe 流体或蒸汽沿着颗粒边缘以及裂缝迁移的结果 (Barrat *et al.*, 2011)。该非平衡型辉石颗粒的 Ca-Mg-Fe 元素表现出强烈不均一性。另一颗粒同样具有富铁的环带(图 5b),但其具有相对恒定的低 $Ca/(Ca+Mg+Fe)$ 值,从边部到核部,主要是 Fe-Mg 元素发生变化,边部富 Fe 贫 Mg,核部富 Mg 贫 Fe, Ca 元素浓度基本保持恒定值,为 type-3 型热变质程度的辉石颗粒 (Schwartz and McCallum, 2005)。

同时,我们对 5 块样品中 16 个具有良好出溶特征的平衡型辉石进行了片晶(高 Ca 组分)及主体(低 Ca 组分)成分的测定,得出高钙组分和低钙组分除了 Ca 元素不同外,Fe 和 Mg 元素也存在差异。而 Mg 和 Fe 元素的变化量总和恰好与 Ca 元素的变化量互补,因此,可以判断出辉石的出溶现象主要



(a) 2型热变质程度辉石颗粒; (b) 3型热变质程度辉石颗粒。En-顽火辉石; Fs-铁辉石; Hd-钙铁辉石; Di-透辉石

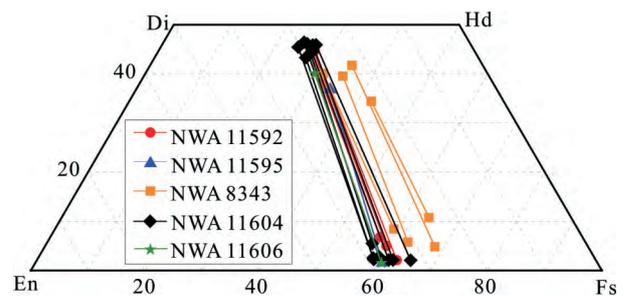
图5 NWA 8343 中非平衡型辉石核部到边部元素变化趋势

Fig.5 Elemental variation trend of the unequilibrated pyroxene from core to rim in NWA 8343

是 Ca-Mg-Fe 元素扩散的结果。相比于非平衡型辉石颗粒,平衡型的辉石颗粒具有更加均一的 Ca-Mg-Fe 元素分布特征。我们对辉石颗粒的高 Ca 辉石和低 Ca 辉石的成分进行辉石四角成分投图,并将同一颗粒的高 Ca 和低 Ca 数据用直线相连(图 6),图中各个辉石颗粒都表现出一一致的斜率趋向,反映出经历高程度热变质作用的出溶辉石中 Ca-Mg-Fe 元素具有一定的迁移规律。出溶辉石的元素特征主要表现在,片晶主要以高 Ca 辉石为主,并含有相对较低的 Fe 和 Mg 含量,出溶后残留的主体辉石以低 Ca 辉石为主,含有相对较高 Fe 和 Mg 元素。从高 Ca 辉石到低 Ca 辉石,除了 Ca 元素存在巨大差异外,Fe 元素的变化量明显高于 Mg 元素的变化量。

4 讨论

根据样品的岩相学特征、辉石成分特征,判断 5 块陨品样品均是来自于灶神星的无球粒陨石,以玄武质 Eucrite 为主,各样品长石中 Ca 的强烈富集可能指示灶神星在经历了早期超镁铁质分离结晶后,岩浆源区的 Ca 元素含量增高,使得钙长石成为后期 Eucrite 的主要结晶矿物(陈宏毅等 2016)。个别样品的 $Mg^{\#}$ 变化范围很广,据此判断样品中存在个



En-顽火辉石; Fs-铁辉石; Hd-钙铁辉石; Di-透辉石

图6 样品中出溶辉石高 Ca 组分与低 Ca 组分四角投图

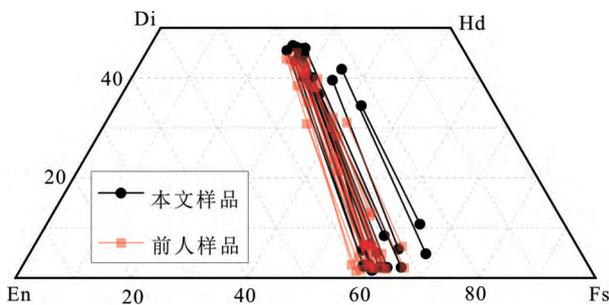
Fig.6 Compositions of high-Ca and low-Ca components in exsolved pyroxene

别深成岩浆岩的组分。尽管除 NWA 11592 外,样品都经历了不同程度的角砾岩化作用,使得岩石发生破碎并在矿物内部产生一系列裂隙,但从岩石学观察,角砾岩化作用并没有改变热变质作用对样品的影响,主要以机械破碎为主,主要由于灶神星经历的冲击作用等级普遍较低(Stöfler *et al.*, 1991; Mittelehldt 2015)。样品中包含有复矿碎屑的玄武质 Eucrite 以及 Howardites,指示辉石颗粒来源的广泛性(不同深度以及不同位置),可以代表灶神星的大范围区域,因此对其规律性的研究可以代表灶神星一定规模的演化特征。

对样品中经受热变质作用辉石的研究表明,在低程度的热演化事件中(即非平衡的辉石颗粒)辉石的成分特征体现在 Ca-Mg-Fe 元素的差异性,背散射图像中表现出来的辉石成分不均一特征主要是由 Fe-Mg 元素的差异造成,Fe 的来源被认为与样品角砾岩化过程中的最后填隙物质相关,即富 Fe 的流体或者蒸汽通过矿物边界或者裂缝时产生 (Miyamoto *et al.*, 1985; Barrat *et al.*, 2011)。

出溶片晶的产生是平衡型热变质作用的特征,是辉石在亚固相状态下元素迁移并均一化的结果。样品中出溶辉石的成分数据表现出明显的规律性,即每个辉石颗粒从高 Ca 到低 Ca 之间的变化都具有一定的斜率趋向,可能指示大多数的 Euclite 经历的热变质条件具有一定的相似性。

为验证规律的普遍性,搜集前人对 HED 陨石中出溶辉石的成分数据,对其进行相同的辉石四角投图(图 7),反映出玄武质 Euclite 的出溶辉石都具有类似斜率的变化趋势。

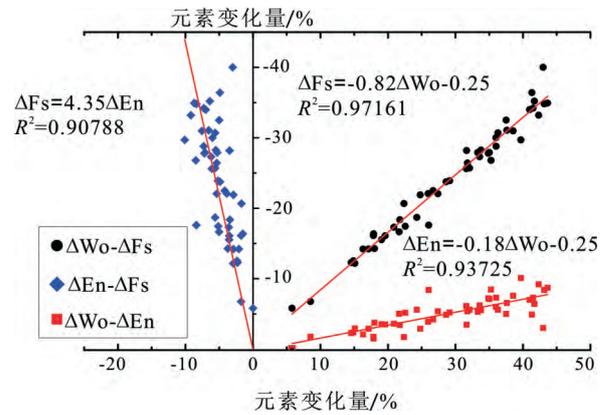


前人数据来自 Mittlefehldt 和 Lindstrom(1993); Mayne 等(2009); Beck 等(2011)。En-顽辉石; Fs-铁辉石; Hd-钙铁辉石; Di-透辉石

图 7 出溶辉石成分数据四角投图

Fig.7 Compositions of exsolved pyroxene from this study and published data

为揭示此斜率的内在含义,对同一颗粒中高 Ca 辉石与低 Ca 辉石的 Ca-Mg-Fe 元素变化量两两进行直角坐标系投图(图 8),Ca-Mg, Ca-Fe, Mg-Fe 的变化都表现出了良好的线性关系,这一线性关系是图 7 中相当斜率趋势的直观反映,通过 Excel 对其进行线性拟合,拟合出直线的斜率即为两元素的变化率比值,得到热变质过程中每个辉石颗粒的 Ca-Mg-Fe 元素都具有大致相同的扩散速率比值,约为 $v_{Ca} : v_{Mg} : v_{Fe} = 5 : 1 : 4$ (对于同一辉石颗粒而言, Ca、Mg、Fe 元素在出溶过程中扩散的时间是相同的,变化量的比值即为扩散速率的比值),揭示出在热演化事件中玄武质 Euclite 中的辉石颗粒以一定的 Ca-Mg-Fe 元素扩散速率发生高 Ca 辉石的出溶。尽管控制扩散



红线代表三组组合元素变化量关系的线性拟合直线。ΔWo 为出溶辉石对中 Wo_{高钙辉石}-Wo_{低钙辉石} 的值; ΔFs 为出溶辉石对中 Fs_{高钙}-Fs_{低钙} 的值; ΔEn 为出溶辉石对中 En_{高钙}-En_{低钙} 的值

图 8 出溶辉石的 Ca-Mg-Fe 元素变化量投图

Fig.8 Variation relation of Ca, Mg and Fe (Wo-En-Fs) in exsolved pyroxene

速率的因素较多,但温度的影响巨大 (Zhang, 2008) 而且灶神星在该阶段主要是热作用的驱动,因此,这个规律反映出灶神星上地壳在热演化阶段的温度是控制在某一确定的范围之内。

为了消除辉石颗粒成分中其他元素(如 Na、Ti、Cr、Al) 的干扰,我们通过 Taylor(1998) 给出的二辉石温度计计算公式来计算其平衡温度(表 3; Taylor, 1998) 结果都符合 Schwartz 等人给出的热变质温度范围(700~1 000 °C, 该温度既高于 Ca-Mg-Fe

表 3 各辉石颗粒在不同压力下的平衡温度

Table 3 Equilibrium temperature of pyroxene grains under different pressure

| 样品编号 | 岩石类型 | 辉石 | t/°C, p=0 GPa | t/°C, p=1.0 GPa |
|-----------|-------------|--------|---------------|-----------------|
| NWA 11592 | 玄武质 Euclite | 辉石颗粒 1 | 864 | 896 |
| | | 辉石颗粒 2 | 821 | 851 |
| | | 辉石颗粒 3 | 816 | 846 |
| NWA 11604 | 玄武质 Euclite | 辉石颗粒 1 | 762 | 791 |
| | | 辉石颗粒 2 | 831 | 861 |
| | | 辉石颗粒 3 | 704 | 730 |
| | | 辉石颗粒 4 | 765 | 794 |
| | | 辉石颗粒 5 | 889 | 921 |
| | | 辉石颗粒 6 | 804 | 833 |
| | | 辉石颗粒 7 | 760 | 789 |
| NWA 11595 | 玄武质 Euclite | 辉石颗粒 1 | 971 | - |
| NWA 8343 | Howardites | 辉石颗粒 1 | 958 | - |
| | | 辉石颗粒 2 | 999 | - |
| | | 辉石颗粒 3 | 963 | - |
| | | 辉石颗粒 4 | 920 | - |
| NWA 11606 | Howardites | 辉石颗粒 1 | 950 | - |

注:成分数据见表 2,计算公式来自于 Taylor(1998)。

元素扩散的封闭温度,也低于辉石的熔融温度; Schwartz and Mccallum, 2005)。同时, Howardites 的辉石颗粒得到的温度普遍高于玄武质 Eucrite 的指示温度(NWA 11595 除外,其岩性为复矿碎屑角砾岩,且出溶特征不明显,选择的辉石颗粒可能来自于表层) 根据 Sack 和 Ghiorso(1994) 给出的二辉石温度计同样也得到 Howardites 指示的温度普遍高于玄武质 Eucrite 指示的温度(图 9)。由于 Howardites 主要来源于母体的最表层位置,而玄武质 Eucrite 则主要分布于母体上地壳 20 km 的厚度以内(Mittlefehldt, 2015), 且最底层玄武质 Eucrite 的上覆压力一定是小于 1GPa。通过压力计算得到玄武质 Eucrite 在 1 GPa

压力下的平衡温度(表 3) 相比于 0 GPa 压力下增长了约 30 °C, 但还是与 Howardites 指示的平衡温度相差近 100 °C。因此,我们认为 Howardites 与玄武质 Eucrite 指示的温度差异可能只有一部分是来源于垂向压力的不均一性。

上述的温度条件限定出热变质的热源不是主要来源于撞击作用或岩浆侵入作用,一方面由于冲击作用或者侵入作用在空间范围的局限性,另一方面由于其所产生的热效应区域上会存在较大差异,离热源的远近程度不同导致同一平面上不同位置的温度差异较大,很难形成辉石颗粒中 Ca-Mg-Fe 元素的大致相同的迁移速率比值。恒定范围的温度以及可能的垂向压力不均一进一步可以支持快速的熔岩流喷发掩埋的热源供给,不仅可以满足热源面状分布从而产生平衡辉石内部相似 Ca-Mg-Fe 元素扩散速率的特征,并且随着熔岩流的叠覆,平衡辉石热变质的压力也会存在垂向上的差异,下部的压力更大,上部的压力较小,与 Howardites 和玄武质 Eucrite 指示的温度差异相对应。

5 结论

(1) 样品中辉石颗粒的 Fe-Mn 数据指示样品来源于灶神星,并普遍经历了热变质作用以及角砾岩化作用。样品中长石 An 的平均值为 89.89, Ca 元素的富集指示灶神星在经历早期镁铁质分离结晶后,岩浆源区 Ca 元素富集,使得钙长石称为后期主要结晶矿物。

(2) 非平衡型辉石颗粒的成分变化,表明低程度的热变质作用无法使得 Ca-Mg-Fe 元素实现均一

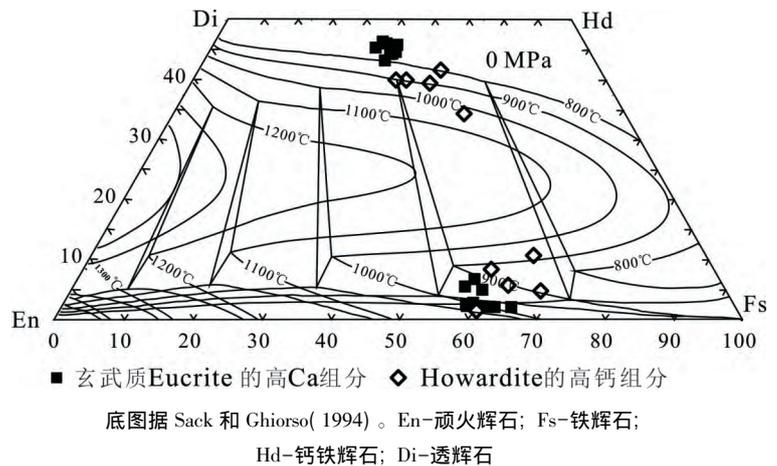


图 9 出溶辉石中高 Ca 组分的二辉石温度计投图

Fig.9 Calculated peak metamorphic and closure temperature by high-Ca component in exsolved pyroxene

化。辉石颗粒中裂隙以及边缘处 Fe 元素的富集可能主要来源于角砾岩化过程中的最后填隙物质。

(3) 平衡型辉石颗粒之间近似相等的 Ca-Mg-Fe 元素扩散速率比例($v_{Ca} : v_{Mg} : v_{Fe} = 5 : 1 : 4$) 以及可能的垂向压力不均一性表明多期次玄武岩浆叠覆是热变质作用的主要热源供给,而冲击作用以及岩浆侵入并不对广泛的热变质作用起主导作用。

参考文献(References):

- Barrat J A, Yamaguchi A, Bunch T E, Bohn M, Bollinger C, Ceuleneer G. 2011. Possible fluid-rock interactions on differentiated asteroids recorded in Eucritic meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75(13): 3839-3852
- Beck A W, Mittlefehldt D W, Mcswen Jr H Y, Rumble III D, Lee C T A, Bodnar R J. 2011a. MIL 03443, a dunite from asteroid 4 Vesta: Evidence for its classification and cumulate origin. *Meteoritics & Planetary Science*, 46(8): 1133-1151
- Bogard D D. 2011. K-Ar ages of meteorites: Clues to parent-body thermal histories. *Chemie der Erde Geochemistry*, 71(3): 207-304
- Boyd F R, Brown G M. 1969. Electron-Probe study of pyroxene exsolution. *Mineral Soc. Amer. Spec. Pap*, 2: 211-216
- Chen H Y, Miao B K, Xie L F, Shao H M. 2017. Siderophile element compositions of pyroxenes in HED meteorites: Implications for the differentiation of magma ocean on Vesta. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 91(S1): 267-268
- Greenwood R C, Barrat J A, Yamaguchi A, Franchi I A, Scott E R D, Bottke W F, Gibson J M. 2014. The oxygen isotope composition of diogenites: Evidence for early global melting on a single, compositionally diverse, HED parent body. *Earth and Planetary Science Letters*, 390: 165-174
- Li S J, Yin Q Z, Bao H M, Sanborn M E, Irving A, Ziegler K, Agee C, Marti K, Miao B K, Li X Y, Wang S J. 2018. Evidence for a multi-layered internal structure of the chondritic acapulcoite-lodranite par-

- ent asteroid. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 242: 82–101
- Liao S Y, Hsu W. 2017. The petrology and chronology of NWA 8009 impact melt breccia: Implication for early thermal and impact histories of Vesta. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 204: 159–178
- Lovering J F. 1975. The Moama eucrite—a pyroxene-plagioclase adcumulate. *Meteoritics*, 10(2): 101–114
- Lugmair G W, Shukolyukov A. 1998. Early solar system timescales according to ^{53}Mn – ^{53}Cr systematics. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62(16): 2863–2886
- Mayne R G, Mesween Jr H Y, McCoy T J, Gale A. 2009. Petrology of the unbrecciated eucrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73(3): 794–819
- Mccord T B, Adams J B, Johnson T V. 1970. Asteroid vesta: Spectral reflectivity and compositional implications. *Science*, 168(3938): 1445–1447
- Mccoy T J, Beck A W, Prettyman T H, Mittlefehldt D W. 2015. Asteroid (4) Vesta II: Exploring a geologically and geochemically complex world with the Dawn Mission. *Chemie der Erde–Geochemistry*, 75(3): 273–285
- Mesween H Y Jr, Binzel R P, De Sanctis M C, Ammannito E, Prettyman T H, Beck A W, Reddy V, Le Corre L, Gaffey M J, McCord T B, Raymond C A, Russell C T, the Dawn Science Team. 2013. Dawn; the Vesta – HED connection; and the geologic context for eucrites, diogenites, and howardites. *Meteoritics & Planetary Science*, 48(11): 2090–2104
- Mittlefehldt D W, Lindstrom M M. 1993. Geochemistry and petrology of a suite of ten Yamato HED meteorites. In: Yanai K, Misawa K, Takaoka N, Yoshida Y, eds. *Proceedings of the NIPR Symposium*. Tokyo: The National Institute of Polar Research, 268–292
- Mittlefehldt D W, Herrin J S, Quinn J E, Mertzman S A, Cartwright J A, Mertzman K R, Peng Z X. 2013. Composition and petrology of HED polymict breccias: The regolith of (4) Vesta. *Meteoritics & Planetary Science*, 48(11): 2105–2134
- Mittlefehldt D W. 2015. Asteroid (4) Vesta: I. The howardite–eucrite–diogenite (HED) clan of meteorites. *Chemie der Erde – Geochemistry*, 75(2): 155–183
- Miyamoto M, Duke M B, McKay D S. 1985. Chemical zoning and homogenization of Pasamonte–type pyroxene and their bearing on thermal metamorphism of a howardite parent body. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 90(S02): C629–C635
- Papike J J, Kamber J M, Shearer C K. 2003. Determination of planetary basalt parentage: A simple technique using the electron microprobe. *American Mineralogist*, 88(2–3): 469–472
- Ruzicka A, Snyder G A, Taylor L A. 1997. Vesta as the howardite, eucrite and diogenite parent body: Implications for the size of a core and for large-scale differentiation. *Meteoritics & Planetary Science*, 32(6): 825–840
- Sack R O, Ghiorso M S. 1994. Thermodynamics of multicomponent pyroxenes. II. Phase relations in the quadrilateral. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 116(3): 287–300
- Schwartz J M, Mccallum J S. 2005. Comparative study of equilibrated and unequilibrated eucrites: Subsolidus thermal histories of Haraiya and Pasamonte. *American Mineralogist*, 90(11–12): 1871–1886
- Stöffler D, Keil K, Scott E R D. 1991. Shock metamorphism of ordinary chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55(12): 3845–3867
- Takeda H, Miyamoto M, Ishii T, Reid A M. 1976. Characterization of crust formation on a parent body of achondrites and the moon by pyroxene crystallography and chemistry. In: *Lunar Science Conference*, 3535–3548
- Takeda H, Graham A L. 1991. Degree of equilibration of eucritic pyroxenes and thermal metamorphism of the earliest planetary crust. *Meteoritics & Planetary Science*, 26(2): 129–134
- Takeda H, Mori H, Bogard D D. 1994. Mineralogy and Ar^{39} – Ar^{40} of an old pristine basalt: Thermal history of the HED parent body. *Earth and Planetary Science Letters*, 122(1–2): 183–194
- Tang G J, Wang Q, Zhang C F, Wyman D A, Dan W, Xia X P, Chen H Y, Zhao Z H. 2017. Sr–Nd–Hf–O isotope geochemistry of the Ertaibei pluton, East Junggar, NW China: Implications for development of a crustal-scale granitoid pluton and crustal growth. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 18(9): 3340–3358
- Taylor W R. 1998. An experimental test of some geothermometer and geobarometer formulations for upper mantle peridotites with application to the thermobarometry of fertile lherzolite and garnet websterite. *Neues Jahrbuch für Mineralogie Abhandlungen*, 172(2): 381–408
- Warren P H, Rubin A E, Isa J, Gessler N, Ahn I, Choi B G. 2014. Northwest Africa 5738: Multistage fluid-driven secondary alteration in an extraordinarily evolved eucrite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 141: 199–227
- Yamaguchi A, Taylor G J, Keil K. 1996. Global crustal metamorphism of the eucrite parent body. *Icarus*, 124(1): 97–112
- Zeng X J, Li S J, Leya I, Wang S J, Smith T, Li Y, Wang P. 2018. The Kumtag 016 L5 strewn field, Xinjiang Province, China. *Meteoritics & Planetary Science*, 53(6): 1113–1130
- Zhang A C, Wang R C, Hsu W B, Bartoschewitz R. 2013. Record of S-rich vapor on asteroid 4 Vesta: Sulfurization in the Northwest Africa 2339 eucrite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 109: 1–13
- Zhang Y C. 2008. *Geochemical kinetics*. New Jersey: Princeton University Press, 656
- 陈宏毅, 缪秉魁, 谢兰芳, 黄丽霖. 2016. HED 族陨石: 分异型小行星物质组成和演化. *矿物岩石地球化学通报*, 35(5): 1037–1052
- 陈宏毅. 2018. HED 族陨石的岩石学成因及其对母体岩浆演化的指示. 博士学位论文. 桂林: 桂林理工大学
- 刘鑫, 汤艳杰. 2018. 冀西北姚家庄超镁铁岩–正长岩杂岩体中辉石的环带特征及意义. *岩石学报*, 34(11): 3315–3326
- 王蓉, 张保民. 2010. 辉石的拉曼光谱. *光谱学与光谱分析*, 30(2): 376–381
- 谢先德, 陈鸣, 王德强, 王英. 2006. 动态高压下斜长石的熔融和玻璃化研究. *岩石学报*, 22(2): 503–509

(本文责任编辑: 龚超颖; 英文审校: 高剑峰)