

HED 族陨石：分异型小行星物质组成和演化

陈宏毅, 缪秉魁*, 谢兰芳, 黄丽霖

桂林理工大学 地质流体与地质过程广西高校重点实验室, 广西矿冶与环境科学实验中心,
广西隐伏金属矿产勘查重点实验室, 广西 桂林 541004

摘 要: Howardite-Eucrite-Diogenite (HED) 族陨石是地球上发现数量最多的无球粒陨石类型,也是太阳系中除地球岩石之外数量最多的岩浆岩样品。本文对大量 HED 族陨石的岩石学和矿物化学特征进行了归纳总结,讨论了陨石的后期热变质作用和母体起源,对 HED 族陨石的中文定名提出了具体意见。

关 键 词: HED 族陨石; 岩石学; 矿物化学; 热变质; 灶神星; 分异型小行星

中图分类号: P691 文章编号: 1007-2802(2016)05-1037-16 doi: 10.3969/j.issn.1007-2802.2016.05.025

A Review to the Composition and Evolution of the HED Meteorites: The Differentiated Asteroids

CHEN Hong-yi, MIAO Bing-kui*, XIE Lan-fang, HUANG Li-lin

Key Laboratory of Geological Fluid and Geological Process at Universities of Guangxi Province, Guangxi Scientific
Experiment Center of Mining, Metallurgy and Environment, Guangxi Key Laboratory of Hidden Metallic Ore
Deposits Exploration, Guilin University of Technology, Guilin Guangxi 541004, China

Abstract: The Howardite-Eucrite-Diogenite (HED) meteorites are a group of achondrites discovered in largest quantity on the Earth. They are also the largest quantity magmatic rock samples in the Solar system with the exception of the magmatic rocks on the Earth. This paper has reviewed previous researches on the petrological and mineral chemical characteristics of the HED group of meteorites, discussed the late stage thermal metamorphism and the parent origin of the HED meteorites, and finally proposed some detailed suggestions on the Chinese naming of the HED meteorites.

Key words: HED meteorites; petrology; mineral chemistry; thermal metamorphism; Vesta; differentiated asteroids

Howardites-Eucrites-Diogenites (HED) 族陨石是地球上发现数量最多的无球粒陨石类型,也是太阳系中除地球岩石之外数量最多的岩浆岩样品。它们的总质量超过了月球陨石和月球样品总和(据国际陨石数据库统计),HED 族陨石累计发现达 1555.8 kg,而月球陨石累计发现 65.2 kg,月球样品 382 kg(缪秉魁等,2013)。HED 族陨石与地球岩浆岩有着非常类似的物质组成和分类系统,但和地球岩浆岩不同,因为多数地球岩浆岩非常年轻,至今地球还有岩浆活动。而 HED 族陨石年龄非常老,是目前所知太阳系内最古老的岩浆岩,其岩浆结晶年龄约为 4.43 ~ 4.55 Ga (Takeda *et al.*, 1994; Yamaguchi *et al.*, 2001),其广泛的岩浆作用形成于太阳系产生之初的 10 Ma 之内 (McSween *et al.*, 2011)。而且大部

分 HED 族陨石,特别是玄武岩质 Eucrites 发生了广泛的热变质作用,是热变质最强和最广泛的岩浆分异型无球粒陨石,但热变质仅仅局限于岩浆作用过程或者岩浆作用期后一个很窄的时间段内 (Takeda and Graham, 1991; Yamaguchi *et al.*, 1996; Warren *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2013; Isa *et al.*, 2014; Warren *et al.*, 2014; Mittlefehldt, 2015; Chen *et al.*, 2015)。因此, HED 族陨石是探索和研究太阳系早期小行星岩浆演化和分异作用的重要窗口。

根据 HED 族陨石的已有研究成果和对 4 号小行星灶神星的观测对比数据分析,普遍认为 HED 族陨石起源于灶神星 (Binzel, 1993; Kunz *et al.*, 1995; McSween *et al.*, 2013; Reddy *et al.*, 2013; Usui and Iwamori, 2013; Neumann *et al.*, 2014; McCord and

收稿日期: 2015-11-04 收到, 2015-11-24 改回

基金项目: 广西高校科研项目(教育厅 KY2015LX117); 国家自然科学基金项目(41173077); 国家自然科学基金资源平台建设项目(2005DKA21406-1)

第一作者简介: 陈宏毅(1980-), 男, 实验师, 博士研究生, 研究方向: 陨石学与天体化学. E-mail: chy@glut.edu.cn.

* 通讯作者简介: 缪秉魁(1966-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向: 陨石学与天体化学. E-mail: miaobk@glut.edu.cn.

Scully, 2015; McCoy *et al.*, 2015), 因此, HED 族陨石也被称为灶神星陨石。然而, 至今尚未从灶神星上采样返回, 无法进行对比和确认。关于 HED 族陨石的母体或起源问题存在 3 种观点: ①直接起源于灶神星; ②起源于灶神星被撞击后形成的 V 型小行星群; ③起源于和灶神星有类似物质组成的分异型小行星 (Mittlefehldt, 2015; McCoy *et al.*, 2015)。

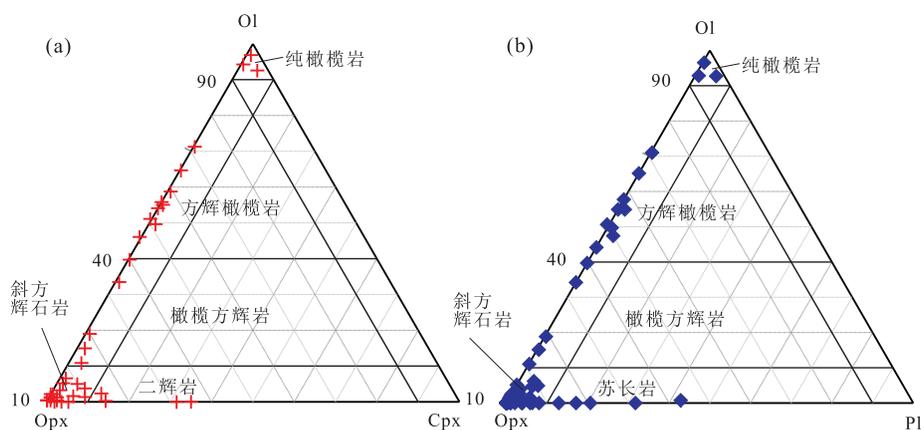
关于 HED 族陨石热变质的成因也是目前陨石研究热点, 总体上存在撞击加热说、岩浆侵入接触变质说和多期次岩浆反复作用覆盖加热区域变质说等多种观点 (Nyquist *et al.*, 1986; Takeda and Graham, 1991; Yamaguchi *et al.*, 1996, 1997)。另外, 关于中铁陨石是否该划归 HED 族陨石范畴 (Duke and Silver, 1967), 一些氧同位素异常的 HED 族陨石的起源等问题也是目前悬而未决的问题。HED 族陨石是研究太阳系早期小行星岩浆演化的重要对象, 但随着 HED 族陨石样品数量的增加, 疑问和争论也越来越多。例如, Ibitira, Asuka 881394, Bunburra Rockhole, Pasamonte 和 PCA91007 等 Eucrites 陨石具有异常的氧同位素和铬同位素组成, 被认为起源于灶神星之外的分异型小行星 (Sanborn and Yin, 2014); 部分新发现的纯橄榄岩 (如 MIL03443) 与已知的 HED 族陨石有近乎一致的氧同位素组成, 也被划分为 HED 族陨石范畴 (Beck *et al.*, 2011a); NWA2968 纯橄榄岩具有类似的氧同位素组成, 同样被认为属于 HED 族陨石, 但由于其较高的 $Mg^{\#}$ (92.5) 和次要矿物化学组成与 HED 族陨石不一致, 其归类问题具有较大争议 (聂喜柯和孔屏, 2013)。岩石学和矿物化学特征分析和研究是揭示陨石母体岩浆演化和后期热变质的基础, 通过归纳

和总结前人的研究成果, 可以增加一些规律性的发现, 避免了单个陨石研究中管中窥豹的弊端。目前国内关于 HED 族陨石研究的中文文献不多, 仅少量以会议论文形式发表 (孙浅等, 2013; 张爱铨等, 2013; 陈宏毅等, 2014)。另外, HED 族陨石的中文定名也很混乱 (王道德等, 2005; 刘焘等, 2008; 聂喜柯和孔屏, 2013; 孙浅等, 2013)。本文在前人研究资料的基础上, 对 HED 族陨石的岩石学和矿物化学特征进行归纳和总结, 从而探讨陨石的后期热变质作用和陨石母体起源等科学问题, 另外对 HED 族陨石的中文定名进行讨论, 希望能起到抛砖引玉的作用, 引起对国内天体化学和地球化学界的重视。

1 HED 族陨石的类型和发现数量

1.1 HED 族陨石的类型划分

HED 是 Howardite-Eucrite-Diogenite 的英文缩写, 代表了 3 种不同的岩石类型。Diogenites 原岩为超镁铁质的岩浆岩, 为堆晶岩或侵入岩, 在岩石组成上包括纯橄榄岩、方辉橄榄岩、橄榄方辉岩、二辉石岩、苏长岩和数量最多的斜方辉石岩组合 (图 1)。Eucrites 为辉长岩和玄武岩, 辉长岩多数为堆晶岩, 具有中-粗粒结构; 玄武岩为浅成侵入或者喷出岩, 具有次辉绿结构和玄武岩质结构。Howardite 为复矿碎屑角砾岩, 碎屑来源于 Eucrite 和 Diogenite, 其中 Diogenite 体积含量大于等于 10% (Buchanan and Reid, 1996), 其结构上还可分为冲击破碎角砾岩、风化表土层和冲击熔融玻璃等。鉴于 HED 族陨石在目前中文文献中的中文定名并不统一的情况 (刘焘等, 2008; 孙浅等, 2013; 王道德等, 2005), 本文在论述时仍统一采用其英文名称, 将在讨论部分专门



(a) 橄榄石-斜方辉石-单斜辉石三角图; (b) 橄榄石-斜方辉石-斜长石三角图。Ol: 橄榄石; Opx: 斜方辉石; Cpx: 单斜辉石; Pl: 斜长石。相关数据引自: Barrat 等 (2010); Beck 和 McSween (2010); Bunch 等 (2010); Beck 等 (2011a); Wittke 等 (2011); Yamaguchi 等 (2011); Mittlefehldt (2015)

图 1 Diogenites 矿物组成分类图解

Fig.1 Triangle diagrams of mineral compositions of Diogenites

论述其中文定名问题。

根据母体的地质过程, Mittlefehldt (2015) 把 HED 族陨石分为 3 类岩性: ① 岩浆岩, 包括堆晶岩和玄武岩, 由岩浆冷凝结晶形成, 具有原始岩浆结晶结构; ② 变质岩, 由岩浆岩经历强烈的热变质作用形成, 主要由 Eucrite 经热变质形成; ③ 冲击破碎角砾岩, 分为单矿碎屑和复矿碎屑, 由陨星或陨石的冲击作用和母体表面表土化作用形成。与之前的 HED 族分类相比, 该分类显然更加注重其地质过程。

按照岩石结构和化学成分, Eucrites 可分为辉长岩和玄武岩 2 种 (Consolmagno and Drake, 1977; Stolper, 1977)。依据地球化学性质的差异 (如亲铁元素 Ti, 不相容元素 Hf、Sc、Rb、Sr 等含量和全岩 $Mg^{\#}$), 玄武岩质 Eucrite 可分为主群、Stannern 群和 Nuevo-Laredo 群 3 种类型 (图 2)。Stannern 群和 Nuevo-Laredo 群陨石分别于 19 世纪初期和 20 世纪 50 年代被发现, 均为单矿碎屑角砾岩型玄武岩质 Eucrite, 因为它们特殊的地球化学性质, 被划分为特殊类型的 Eucrites 陨石, 以和大多数地球化学性质相似的 Eucrites 陨石主群相区分。此后, 有和 Stannern 群和 Nuevo-Laredo 群陨石具有类似地球化学特征的 HED 族陨石分别被划分为 Stannern 群和 Nuevo-Laredo 群, 其他具有类似特征的陨石被划分为主群。按照是否为冲击破碎, Eucrite 又可分为原始结晶岩和角砾岩 2 种, 前者包括辉长岩和玄武岩, 后者按照冲击破碎和混合的程度则分为单矿碎屑角砾岩、复矿碎屑角砾岩和冲击熔融角砾岩。

Howardite 包含 2 个次一级分类: ① 风化表土型: 在母体表面由微陨石撞击和太阳风辐射形成, 含有 Diogenite 和 Eucrite 的微小岩屑和冲击玻璃, 类似于月球上的月壤; ② 角砾岩型: 由 Diogenite 和

Eucrite 的碎片组成的复矿碎屑角砾岩, 岩石结构上具有明显的岩石角砾、矿物角砾和细粒的基质 (Warren *et al.*, 2009; Mittlefehldt *et al.*, 2013)。

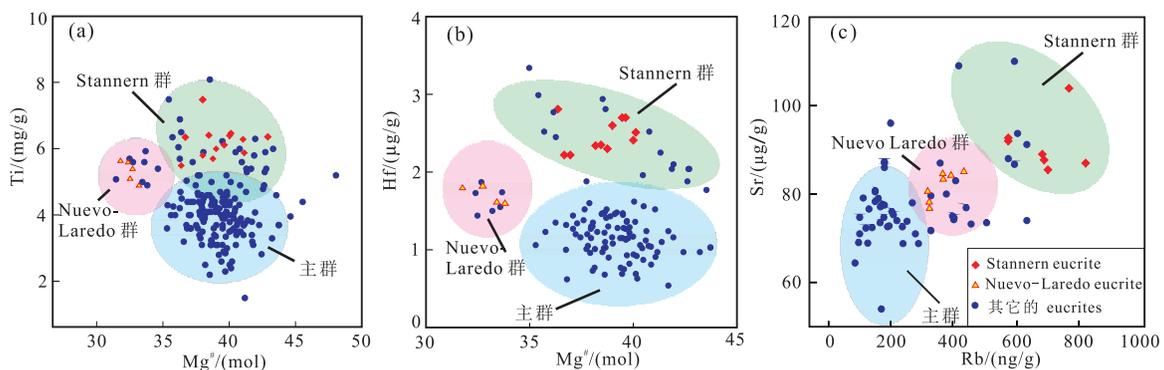
1.2 HED 族陨石的发现数量

根据国际陨石数据库的统计, 截至 2015 年 8 月 20 日, 向国际陨石协会申报并获得官方命名的陨石共计 61603 块, 其中绝大多数是普通球粒陨石 (73%), 其次为无球粒陨石 (2185 块, 4%)。在无球粒陨石陨石中, 多数为 HED 族陨石 (1612 块, 占无球粒陨石总数的 74%, 占发现陨石总数的 2.6%)。在 HED 族陨石中, 收集于南极和非洲西北部沙漠的陨石各占 44%, 收集于其他地区的占 12%。中国目前已分类的南极陨石中, 仅发现 3 块 HED 族陨石, 且全部为 Eucrites, 其中中国第 30 次南极科考收集的一块 Eucrite 陨石重 1299 g, 为中国最大的一块 HED 族陨石 (Chen *et al.*, 2015)。在 HED 族陨石中, eucrites 为 907 块, 占 56%, Diogenites 和 Howardites 分别占 25% 和 19%。无论在数量上, 还是在质量上, Eucrites 均占了 HED 族陨石的一半以上, 这可能与 HED 族陨石母体的上部壳层物质组成和冲击溅射的强度有关。而在已分类的 Eucrites 陨石中, 绝大多数为角砾岩。据美国黎明号环绕灶神星探测器发回的光谱数据显示, 灶神星表面大部分被冲击破碎角砾岩覆盖, 与 Eucrites 的光谱数据相当, 而富含橄榄石的 Diogenites 几乎没有发现, 只是在 Rheasilvia 撞击盆地的底部有零星分布 (Combe *et al.*, 2015; McCord and Scully, 2015)。

2 HED 族陨石岩石学和矿物化学特征

2.1 Diogenites 岩石学特征

Diogenites 为超镁铁质岩石, 大部分为角砾岩,



其他的 Eucrites, 是除了 Stannern 和 Nuevo-Laredo 之外的玄武岩质 Eucrites 陨石, 其中大部分落在主群范围之内, 一小部分落在 Stannern 群和 Nuevo-Laredo 群范围

图 2 玄武岩质 Eucrite 化学组成分类图 (相关数据引自 Mittlefehldt, 2015)

Fig.2 Chemical classification of basaltic Eucrites (data cited from Mittlefehldt, 2015)

极少部分为堆晶岩。角砾岩具有单矿碎屑和复矿碎屑之分,角砾具有中-粗粒堆晶结构。堆晶岩主要为斜方辉石堆晶,近年来也发现有橄榄石堆晶,如 MIL03443 陨石中的橄榄岩角砾 (Beck *et al.*, 2011a)。主要矿物成分为斜方辉石和橄榄石,含少量斜长石,斜长石体积含量(下同)为 10%~40%者称为苏长岩 (Wittke *et al.*, 2011),目前也划分为 Diogenites,但应该为 Diogenites 向 Eucrites 过渡的类型(图 1b)。副矿物有二氧化硅相、钛铁矿、铬铁矿、磷灰石、陨磷钙钠石和陨硫铁,含极少量金属。按照矿物的模式含量,Diogenites 可细分为斜方辉石岩、橄榄方辉岩、二辉石岩、方辉橄榄岩、纯橄榄岩和苏长岩等,在目前搜集到的 HED 族陨石中均有发现,其中以斜方辉石岩最多。

斜方辉石岩可分为角砾岩和堆晶岩。角砾岩主要由不同程度破碎的斜方辉石角砾机械堆积形成。如 QUE99050 陨石为一块斜方辉石单矿碎屑角砾岩,其矿物角砾几乎全部为斜方辉石 (McSween *et al.*, 2011),粒度大小不等,可以明显分为粗、中、细 3 个不同的区域,最大角砾约 2 mm,机械堆积,角砾之间未发生化学反应。堆晶岩为中-粗粒粒状结构,由 90% 以上的半自形-他形粒状斜方辉石组成,如 GRO95555 具有多边形颗粒结构,他形斜方辉石颗粒可达 2.4 mm (Papike *et al.*, 2000),次要矿物和副矿物还有普通辉石、易变辉石、橄榄石、斜长石、二氧化硅相、铬铁矿、钛铁矿和金属 (Beck *et al.*, 2013; Beck and McSween, 2010; Bowman *et al.*; 1997),其中 QUE99050 陨石含有 0.9% (vol) 的磷灰石 (Beck and McSween, 2010)。少部分斜方辉石岩具有原生结构,这样的陨石仅见有 5 篇报道: GRO95555、Tatahouine、NWA4215、Dho700、Y-74013 及其配对的 Y-74097、Y-74136。Tatahouine 是一块特殊的 Diogenite, 1931 年降落时收到了陨石碎块,时隔 63 年后又收集到同一次降落的样品。它由很多独立的厘米级的斜方辉石颗粒碎片组成(大部分晶体颗粒大于 5 mm),斜方辉石具有马赛克消光,化学成分均一,显示出较强的冲击变质和热变质作用 (Barrat *et al.*, 1999)。NWA 4215 具有中粒结构,环带状他形斜方辉石颗粒达 0.5 mm,并含大颗粒铬铁矿 (Barrat *et al.*, 2006)。Dho700 为中粒结构,99% 的矿物由一些轻微环带状的斜方辉石颗粒和少量填隙的斜长石和二氧化硅相组成 (Yamaguchi *et al.*, 2011)。Y-74013 系列陨石具有类似于花岗变晶的重结晶结构,由几十微米到毫米级别的等粒状、近圆形的斜方辉石颗粒组成,其中有铬铁矿和陨硫铁

的包裹体 (Mittlefehldt and Lindstrom, 1993)。

橄榄方辉岩中主要矿物为斜方辉石和橄榄石,其体积含量分别为 58.0%~90.0% 和 10.0%~38.2%,副矿物为普通辉石、斜长石、铬铁矿、钛铁矿和金属 (Sack *et al.*, 1991; Bowman *et al.*, 1997; Beck and McSween, 2010; Beck *et al.*, 2013)。LEW88697 陨石为复矿碎屑角砾岩 (McSween *et al.*, 2011),在背散射图像中明显可见富铁辉石角砾和由橄榄石、富镁辉石组成的橄榄方辉岩角砾 2 个明显不同的区域,铬铁矿、陨硫铁和金属等副矿物填隙于橄榄方辉岩角砾中,而在富铁辉石角砾中分布极少,说明角砾的物源不同。GRA98108 是由中-粗粒的堆晶斜方辉石和橄榄石组成橄榄方辉岩,粗粒堆晶结构,斜方辉石发育交叉状裂隙,橄榄石裂隙不发育,斜方辉石和橄榄石含量分别为 79.4% 和 18.5%,次要矿物为普通辉石,副矿物为斜长石、二氧化硅相、铬铁矿、陨硫铁和金属 (Beck and McSween, 2010)。

二辉石岩主要由斜方辉石 (43.6%~83.5%) 和单斜辉石 (12.1%~45.9%) 组成,斜长石 (含量 < 10%) 和二氧化硅相 (含量最高达 6.3%) 次之,副矿物为钛铁矿、铬铁矿、磷灰石、陨硫铁和金属 (Delaney *et al.*, 1984a, 1984b; Beck and McSween, 2010)。

方辉橄榄岩主要由橄榄石 (46.0%~80.0%) 和斜方辉石 (20.0%~54.0%) 组成,其中 EETA79002 含有普通辉石、斜长石等次要矿物和铬铁矿、钛铁矿和金属等副矿物 (Bowman *et al.*, 1997); NWA5480 手标本上可见其大面积分布的粗粒橄榄石和粗脉状分布的暗色辉石 (Tkalcic and Brenker, 2015)。

纯橄榄岩无球粒陨石是近年来发现的 HED 族陨石类型,对于陨石母体深部物质成分研究有重要意义。MIL03443 纯橄榄岩型 Diogenites 为单矿碎屑角砾岩,粗粒结构,具有明显的熔壳,橄榄石含量 91%,斜方辉石 5%,含少量钛铁矿和铬铁矿 (Beck *et al.*, 2011a)。另外还有一些其他的超镁铁质陨石也被划分为来自灶神星的纯橄榄岩 (如 NWA2968, NWA5784, NWA5968, NWA6157) (Bunch *et al.*, 2006, 2010; Barrat *et al.*, 2010), NWA2968 也有人由于其极高的 $Mg^{\#}$ ($Fo_{0.2.6}$) 而否定了其 HED 族陨石的划分 (聂喜柯和孔屏, 2013)。

苏长岩主要由辉石和斜长石组成,二氧化硅含量较高 (可达 6.3%),副矿物为钛铁矿、铬铁矿、陨硫铁、磷灰石和金属。这些陨石有 Y-791201, 以及和其配对的 Y-791073、Y-791200 和 Y791072 等,由

于其粗粒结构,不同样品矿物含量差别较大,总体上斜长石含量在 10%~40%,或者作为堆晶辉长岩的 Eucrite 划分(Delaney *et al.*,1984a,1984b)。

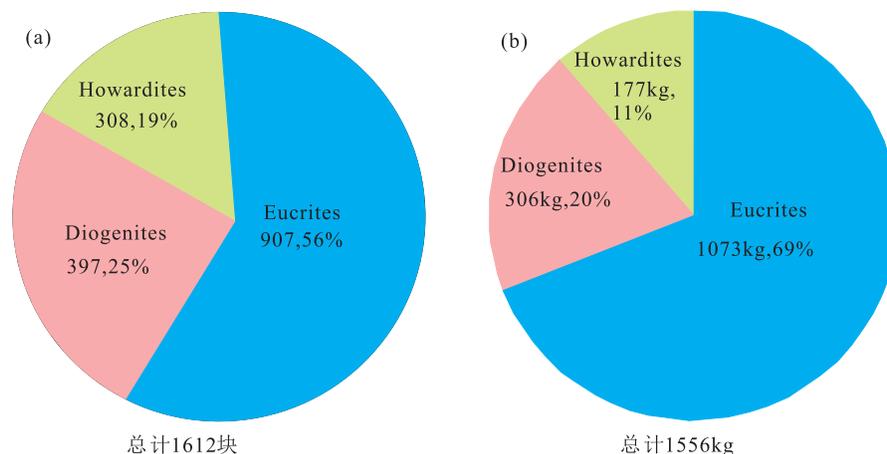
2.2 Eucrites 和 Howardites 岩石学特征

根据国际陨石数据库公布的信息,如不考虑详细划分类型的 Eucrites 陨石外,Eucrite 陨石中角砾岩数量最多,共 511 块,占 Eucrite 陨石的 56%(图 3)。Eucrite 角砾岩可分为单矿碎屑角砾岩、复矿碎屑角砾岩和其他角砾岩。此外,Eucrite 陨石还有堆晶岩和玄武岩类型,目前已发现的数量分别是 36 块和 39 块。在复矿碎屑角砾岩中,出现的岩石角砾类型主要有堆晶的辉长岩、次辉绿岩以及玄武岩;矿物碎屑主要由辉石、斜长石和副矿物等。

堆晶的 Eucrites 陨石具有中-粗粒的辉长结构或等粒状结构(图 4a),主要由辉石和斜长石颗粒组成,其粒径为 0.5~5 mm(Duke and Silver,1967; Lovering,1975; Mittlefehldt and Lindstrom,1993; Mayne *et al.*,2009);次要矿物为铬铁矿或钛铁尖晶石(Delaney *et al.*,1984a,1984b),其产状和结构类型多样,包括离散的颗粒填隙于辉石和斜长石之间,斜长石颗粒和磷石英交互生长,或者在辉石中作为包裹体存在(Lovering,1975; Hostetler and Drake,1978; Mittlefehldt and Lindstrom,1993; Ghosh *et al.*,2000; Kaneda *et al.*,2000)。副矿物为二氧化硅、陨磷钙钠石、钛铁矿、金属、陨硫铁和锆石(Delaney *et al.*,1984a,1984b)。多数堆晶岩中的原始岩浆结晶的辉石是易变辉石,但经历了后期热变质,易变辉石固溶体分解形成普通辉石和斜方辉石(Lovering,1975; Takeda,1976; Harlow *et al.*,1979; Mori and Takeda,1981b)。

玄武岩质 Eucrites 陨石多数为角砾岩,角砾主要是岩屑和粗粒矿物屑,这些角砾分布在细粒碎片化基质中。玄武岩质角砾一般具有次辉绿结构,几乎由等量的辉石和斜长石组成,辉石为半自形到他形粒状,斜长石为自形到半自形板条状,部分辉石充填于斜长石的三角空隙中。次要矿物成分包括二氧化硅相、铬铁矿、钛铁矿、陨硫铁、锆石等,铁镍合金少见。GRV13001 是在中国在南极发现的一块 Eucrite 陨石,被划分为玄武岩质单矿碎屑角砾岩(Chen *et al.*,2015),具有典型的角砾状构造,角砾为不规则棱角状(图 4d),最大一颗角砾为 1.5 cm,角砾含量约 35%;基质主要为辉长岩岩屑。角砾中保留有原始岩浆结晶的次辉绿结构(图 4e),角砾和基质具有类似的矿物与化学组成,表明其属于同源碎屑角砾岩。一些未角砾化的玄武岩质 Eucrites 经历了较强的热变质作用,导致部分颗粒重结晶(图 4b)(Mayne *et al.*,2009)。A-881388 and A-881467 为粒状角砾岩化的 Eucrites,经历了高度变质产生了重结晶结构(Yamaguchi *et al.*,1997)。未角砾岩化具有岩浆结晶结构的玄武岩质 Eucrites 陨石结构变化较大,从细粒玻基斑状(在斜长石、石英成分的玻璃形成的基质中分布有辉石微斑晶)(ALHA81001)到粗粒的次辉绿结构和细粒重结晶的最后填充物均有分布(PCA91078 和 PCA91245)(Howard *et al.*,2002; Mayne *et al.*,2009)。

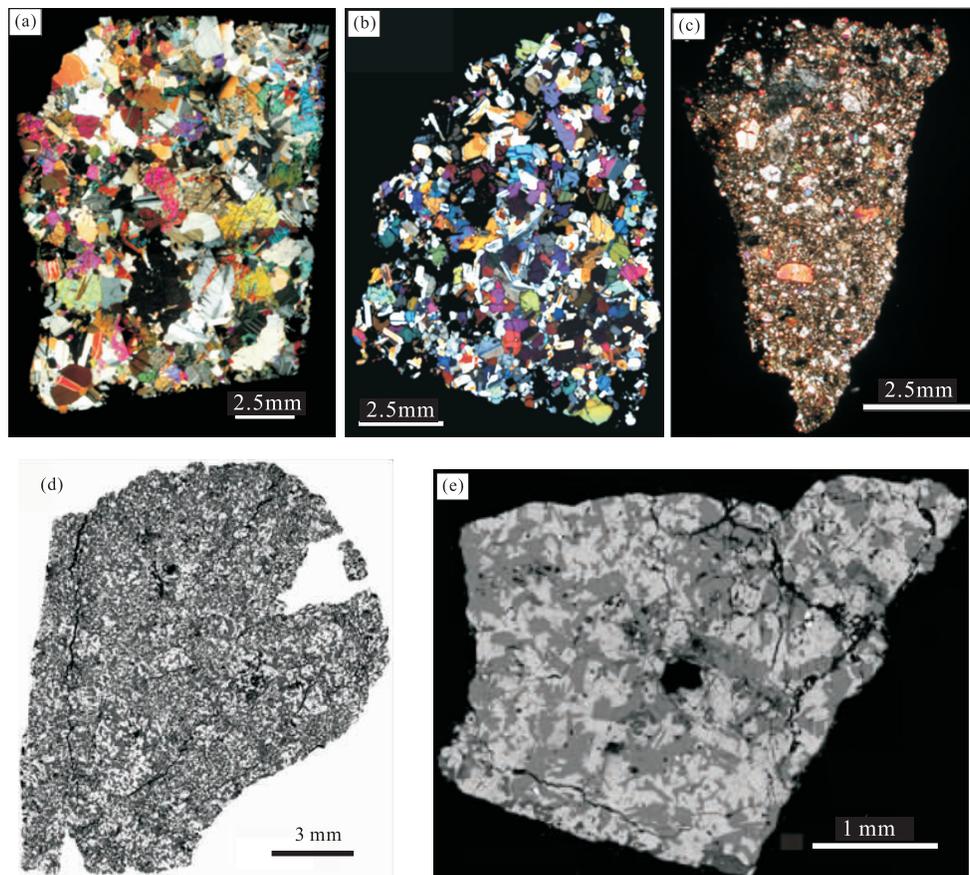
Howardites 主要由 Eucrites 和 Diogenites 混合角砾组成(图 4c)。Mittlefehldt 等(2013)对系列表土化的 Howardites 和复矿碎屑角砾岩的 Eucrites 研究发现,Eucrites 和 Diogenites 混合的比例从 55:45 到 76:24。



(a) HED 族陨石数量分布饼图; (b) HED 族陨石质量分布饼图

图 3 HED 族陨石的类型和比例(数据来源于 Meteoritical Bulletin Database 的统计)

Fig.3 The types and proportions of HED meteorites (datas cited from international Meteoritical Bulletin Database)



(a) Moore County 堆晶辉长岩, 具有中-粗粒状结构, 正交偏光; (b) EET90020 玄武岩质 Eucrite, 部分矿物具有重结晶结构, 正交偏光; (c) PCA 02019, 由 Eucrite 和 Diogenite 组成的多矿碎屑角砾岩型 Howardite, 正交偏光; (d) GRV13001 单矿碎屑角砾岩, 具有明显的角砾状结构, 背散射像; (e) GRV13001 中一个玄武岩角砾, 具有次辉绿结构, 背散射像。(a)、(b)和(c)引自 McSween 等(2011), (d)和(e)来自本次工作

图 4 Eucrites 和 Howardites 陨石的岩石结构特征

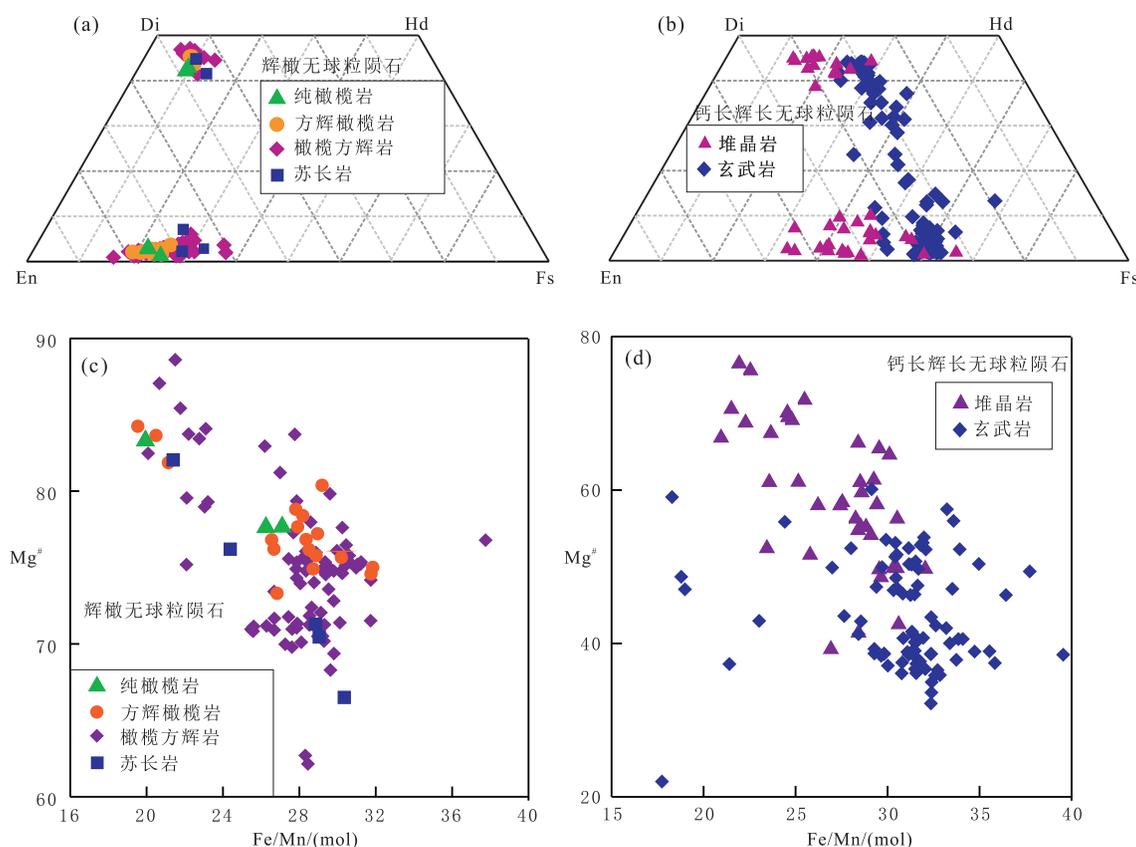
Fig.4 Images showing textures of Eucrite and Howardite

2.3 矿物化学特征

2.3.1 辉石 辉石是 HED 族陨石的主要造岩矿物。通过统计 110 个 Diogenites 陨石的辉石颗粒 (数据来源列于图 5, 特殊的个别注明), 基本可分为高钙辉石 ($Wo_{41.4-47.1} En_{41.7-48.5}$) 和低钙辉石 ($Wo_{0.76-7.52} En_{60.4-82.9}$) 2 个基本群, 并且具有高钙辉石相对贫镁, 低钙辉石相对富镁的特征, 且不同的次级岩石类型中辉石的成分分布没有明显的差别 (图 5a)。在 Eucrites 陨石中, 无论是堆晶岩还是玄武岩, 其辉石成分分布范围均较广, 唯一不同的是, 堆晶岩中的辉石与 Diogenites 中的辉石成分类似, 可以分为高钙辉石 ($Wo_{38.6-45.4} En_{37.9-41.0}$) 和低钙辉石 ($Wo_{1.12-10.0} En_{32.3-64.4}$) 2 个基本群, 但无论高钙辉石还是低钙辉石, 其平均 $Mg^{\#}$ 均要比 Diogenites 中同类的辉石低; 而玄武岩质岩石中的辉石分布范围更广, 从透辉石—普通辉石—易变辉石均有分布 (图 5b)。与 Eucrites 相比, Diogenites 辉石中的镁含

量高 ($Mg^{\#} = 62.2 \sim 88.6$, 均值为 75.4), 低钙辉石为古铜辉石、铁紫苏辉石 ($En_{70.0-82.9} Fs_{16.1-28.4}$) 和铁紫苏辉石 ($En_{60.4-69.9} Fs_{26.6-37.1}$)。而在 Eucrites 陨石中, 堆晶岩的辉石显然有相对较高的 $Mg^{\#}$ (32.9~76.5, 均值为 58.2), 玄武岩质 $Mg^{\#}$ 分布范围较大, 但平均含量低 (22.0~60.1, 均值为 43.6)。从以上统计数据可见, 平均 $Mg^{\#}$ 是区分 Diogenites、堆晶的 Eucrites 和玄武岩质 Eucrites 的一个重要参数, 从 Diogenites—堆晶辉长岩—玄武岩质 Eucrites, 平均 $Mg^{\#}$ 从 75.4—58.2—40.6 (图 5c、5d), 反映了从深成岩浆岩—浅成岩浆岩—喷出岩, 其平均 $Mg^{\#}$ 逐渐降低的趋势。

辉石和全岩的 Fe/Mn (mol, 下同) 值是区分不同类型的分异型无球粒陨石以及地球玄武岩的一个重要参数。月球陨石、火星陨石、地球玄武岩具有明显不同的全岩和辉石的 Fe/Mn 值, HED 族陨石也是如此。HED 族陨石的辉石中 Fe/Mn 值一般是



(a) Diogenites 中辉石成分四角图; (b) Eucrites 中辉石成分四角图; (c) Diogenites 中辉石的 $Mg^{\#}$ 和 $Fe/Mn(mol)$ 比值关系图; (d) Eucrites 中 $Mg^{\#}$ 和 Fe/Mn 值关系图。 $Mg^{\#} = Mg / (Mg + Fe) (mol)$, $Fe/Mn(mol)$, Fe 和 Mn 的摩尔数比值。数据来自: Lovering (1975), Gooley and Moore (1976), Harlow and Klimentidis (1980), Christophe Michel-Levy *et al.* (1987), Mittlefehldt (1990), Mittlefehldt and Lindstrom (1993), Mittlefehldt (1994), Pun and Papike (1995), Ghosh *et al.* (2000), Mittlefehldt (2000), Treiman *et al.* (2004), 刘焯等 (2008), Mayne *et al.* (2009), Beck and McSween (2010), Bunch *et al.* (2010), Shearer *et al.* (2010), Beck *et al.* (2011b), Yamaguchi *et al.* (2011), Zhang *et al.* (2013), Warren *et al.* (2014), Mittlefehldt (2015), 笔者本次工作

图5 Diogenites 和 Eucrites 中辉石成分四角图和 $Mg^{\#}$ - $Fe/Mn(mol)$ 值关系图

Fig.5 The quadrilateral diagrams of mineral compositions of pyroxene from Diogenites(a) and Eucrites(b), and Diagrams of $Mg^{\#}$ values vs. Fe/Mn ratios for pyroxene in Diogenites(c) and Eucrites(d)

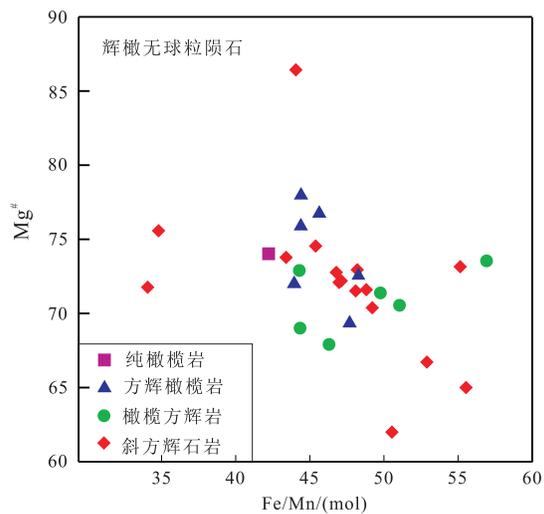
27.1~30.9, 全岩 FeO/MnO 一般为 30~35, 明显不同于地球辉石的 Fe/Mn 值 40~100 (张斌辉等, 2007)、火星陨石辉石 FeO/MnO 为 20~25, 如 Tissint 火星陨石全岩 FeO/MnO 为 21.7, Y984028 火星陨石中辉石 FeO/MnO 为 25.2 (胡森等, 2011)、月球全岩 (为 61~72, 缪秉魁等, 2013; 陈宏毅等, 2015)。HED 族陨石 Fe/Mn 值变化范围较小, Diogenites 辉石中的 Fe/Mn 值 (18.9~37.8, 均值为 27.6) 和堆晶岩型 Eucrites 中辉石的 Fe/Mn 值 (21.0~31.1, 均值为 27.1) 基本一致, 而玄武岩型 Eucrites 辉石的 Fe/Mn 值 (17.8~39.6, 均值为 30.9) 明显偏大 (图 5c、5d), 说明母体岩浆在不同阶段结晶过程中, Fe 、 Mn 元素发生了分馏。

一些斜方辉石岩质的 Diogenites 具有异常的辉石 $Mg^{\#}$, 最高 $Mg^{\#}$ 的 Diogenites 是 Bilanga 陨石, 其斜

方辉石 $Mg^{\#}$ 可达 88.6 (Mittlefehldt *et al.*, 2015), 其他较高 $Mg^{\#}$ 的有 NWA 1461 (86.0) 和 MET00425 (84.0) (Barrat *et al.*, 2010; Mittlefehldt *et al.*, 2013)。苏长岩型 Diogenites 辉石具有相对低的 $Mg^{\#}$ (一般为 66.5~82.0, 均值为 73.3), 如 QUE 93009 中斜方辉石的 $Mg^{\#} = 70.0$ (Mittlefehldt *et al.*, 2013)。

2.3.2 橄欖石 橄欖石主要出现在纯橄欖岩、方辉橄欖岩和橄欖方辉岩型 Diogenites 中, 在斜方辉石岩中以次要矿物形式存在, 含量少于 10%。堆晶 Eucrites 中也有少量产出, 但在玄武岩质 Eucrites 陨石中含量极少。大部分橄欖石富镁, 其 $Mg^{\#}$ 值 (61.7~86.6, 均值为 72.2) 和 Diogenites 斜方辉石中的 $Mg^{\#}$ (62.2~88.6, 均值为 75.4) 相当或略低, 但比 Eucrites 斜方辉石中的 $Mg^{\#}$ 值要高很多。而橄欖石中的 Fe/Mn 值 (34.0~57.2, 均值为 47.1) 则要比

Diogenites 和 Eucrites 中斜方辉石的 Fe/Mn 值高很多(图 5c、图 6)。在 Diogenites 中,橄榄石和辉石的富镁特征,均指示原始 HED 母岩浆具有富镁的地球化学特性(Beck and McSween, 2010; Mittlefehldt, 2000; Mittlefehldt, 2015)。但有些 Diogenites 陨石不是富镁的,甚至有些方辉橄榄岩是富铁的(Beck and McSween, 2010),这可能说明 Diogenites 陨石存在多个源区或者不同的岩浆演化过程。在不同岩石类型的 Diogenites 陨石中,橄榄石的 $Mg^{\#}$ 和 Fe/Mn 稍有不同:方辉橄榄岩分布范围最小($Mg^{\#} = 69.2 \sim 77.6$, 均值为 74.0; $Fe/Mn = 44.0 \sim 48.4$, 均值为 45.9),和纯橄榄岩($Mg^{\#} = 74.0$, $Fe/Mn = 42.3$ 接近);橄榄方辉岩的 $Mg^{\#} = 67.7 \sim 73.5$, 均值为 70.8, Fe/Mn 均值为 48.9;而斜方辉石岩和橄榄方辉岩的 $Mg^{\#}$ 和 Fe/Mn 则较为分散,平均 $Mg^{\#} = 71.9$, 平均 $Fe/Mn = 47.1$ (图 6)。从以上分析可以看出,纯橄榄岩和方辉橄榄岩的平均 $Mg^{\#}$ 值要大于斜方辉石岩和橄榄方辉岩的平均 $Mg^{\#}$ 值,而 Fe/Mn 值则正好相反,说明从橄榄岩到辉石岩在岩浆演化过程中从相对富镁贫铁到相对贫镁富铁的过程,或者说明岩浆源区的差异性。



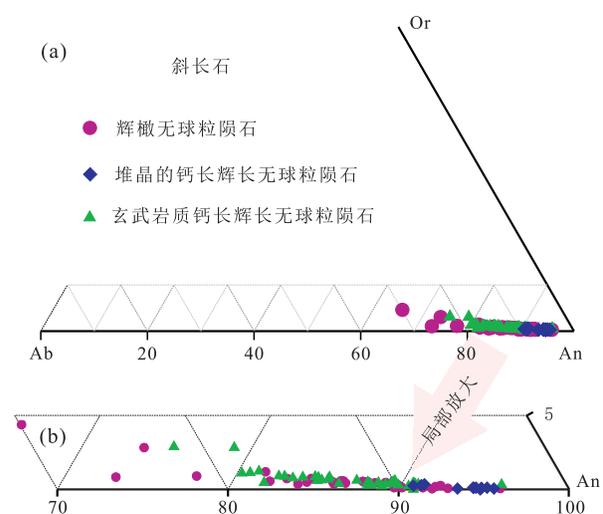
相关数据引自: Floran 等(1981), Mittlefehldt(1994, 2015), Beck 和 McSween(2010), Shearer 等(2010), Yamaguchi 等(2011)

图 6 Diogenites 中橄榄石 $Mg^{\#}$ -Fe/Mn(md)关系图

Fig.6 The diagram of $Mg^{\#}$ values vs. Fe/Mn (md) ratios for olivine in Diogenites

2.3.3 斜长石 斜长石在 Eucrite 陨石中是主要造岩矿物,其体积含量一般在 30% ~ 65%, 28 个 Eucrites 陨石样品的平均斜长石含量为 44%。在玄武岩质 Eucrites 陨石中,斜长石含量集中于 39% ~ 47%, 均值为 43%;而在堆晶辉长岩中,斜长石含量

变化较大(30% ~ 65%), 平均含量 51%。在大部分 Diogenites 陨石中斜长石仅作为副矿物出现,含量在 0 ~ 5.7%, 47 个样品的平均值为 1.1%。如果苏长岩型 HED 陨石也算在 Diogenites 的话,那么斜长石在苏长岩中的含量为 10.4% ~ 36.4%, 3 个样品的平均值为 22%。在 Diogenites 中,斜长石成分变化最大,具有从拉长石—钙长石的变化($An_{65.7-95.9}$, 均值为 86.2, $Or_{0.05-4.38}$, 均值为 0.62)。在 Eucrites 陨石中,堆晶岩斜长石成分变化范围小,基本全部为钙长石($An_{91.0-96.0}$, 均值为 93.0; $Or_{0.00-0.35}$, 均值为 0.14);而玄武质岩石中斜长石成分变化范围相对较大($An_{75.4-95.9}$, 均值为 86.5; $Or_{0.00-2.89}$, 均值为 0.69)(图 7)。从图 7 和数据分析可以发现,无论是 Ca 含量,还是 K_2O 含量,Diogenites 陨石中微量的斜长石和玄武岩质 Eucrites 陨石中斜长石的成分分布均十分接近。堆晶 Eucrite 陨石的 An 大于 Diogenite 的 An 而约等于玄武岩质 Eucrite 陨石的 An 值,可能暗示 HED 族陨石母体深部岩浆源区或者岩浆演化早期相对贫钙,这与灶神星下地壳和上地幔的物质组成一致,而上地壳主要由堆晶 Eucrites 陨石组成,斜长石是该层的主要矿物,经过早期超镁铁质岩分异结晶之后,岩浆源区变得相对富钙,为钙长石的大量结晶创造了条件。而在岩浆演化到后期的玄武岩阶段,由于斜长石(主要为钙长石)的大量结晶,并且按照鲍文反应序列,斜长石在堆晶辉长岩阶段



相关数据引自: Lovering (1975), Gomes 和 Keil (1980), Floran 等(1981), Fredriksson (1982), Christophe Michel-Levy 等(1987), Warren 等(1990), Mittlefehldt 和 Lindstrom(1993), Metzler 等(1995), Ghosh 等(2000), Treiman 等(2004), Mayne 等(2009), Yamaguchi 等(2011), Mittlefehldt 等(2012, 2013), Mittlefehldt(2015), 笔者本次工作

图 7 Diogenites 和 Eucrites 中斜长石成分图(b 为 a 的局部放大)

Fig.7 Compositional diagrams of plagioclases in Diogenites and Eucrites (b is magnified of the part of a)

仅仅结晶出了钙长石就结束了,说明了灶神星的岩浆演化并不是一个成熟的岩浆演化序列。在玄武岩阶段,由于前阶段钙长石的结晶,消耗了大量 Ca 的成分,为倍长石结晶创造了条件。

2.3.4 次要矿物和副矿物的岩石学和矿物化学特征 HED 族陨石中的次要矿物和副矿物主要包括二氧化硅相、铬铁矿、钛铁矿、陨硫铁、磷灰石、陨磷钙钠石和锆石等。

二氧化硅相在 Eucrites 陨石中是一种重要的副矿物,特别是在热变质程度较高的玄武岩质 Eucrites 中其含量可达 1.1%~7.7%(均值为 3.9%)。因为二氧化硅相和水岩相互作用或者岩石的热变质有着密切的关系,因此引起了研究者的浓厚兴趣。二氧化硅的相态主要有方石英、磷石英、 α -石英和二氧化硅玻璃等(Chen *et al.*, 2015),没有发现高压相石英。但二氧化硅相在 Diogenites 中含量极少。

铬铁矿和钛铁矿是 HED 族陨石中最常见的次要矿物。在 EET87530 和 Garland Diogenites 陨石中铬铁矿最高含量分别可达到 5.1%和 4.8%(Bowman *et al.*, 1997),粒径最大可达毫米级别,在角砾岩中可形成独立的角砾。粒径较小者为数微米到数百微米,产出于辉石和斜长石边界。铬铁矿在典型的 Diogenites 陨石中具有变化的 Cr/Al 值和 $Mg^{\#}$ 值(7.69~31.7,平均 17.8),但 Ti 的变化范围有限(Mittlefehldt, 2015)。但在 Eucrites 陨石中,特别是玄武岩质 Eucrites 中,铬铁矿的 Ti、Al 和 Cr 则显示了很宽的变化范围: TiO_2 质量分数(下同)为 1.40%~22.9%, Al_2O_3 为 3.50%~17.7%, Cr_2O_3 为 17.9%~58.9%。而 $Mg^{\#}$ 相对变化不大(Bunch and Keil, 1971; Christophe Michel-Levy *et al.*, 1987; Warren *et al.*, 1990; Yamaguchi *et al.*, 1994; Mayne *et al.*, 2009; Yamaguchi *et al.*, 2009)。钛铁矿颗粒大部分为镁钛铁矿-钛铁矿的固溶体。微量成分包括 MgO 、 Al_2O_3 、 Cr_2O_3 和 MnO ,但含量均小于 1.4 wt%, $Mg^{\#}$ 从 1.6 到 5.3。

其他副矿物还有陨硫铁、铁镍金属、陨磷钙钠石、磷灰石、锆石和斜锆石等(Delaney *et al.*, 1984a, 1984b; Saiki *et al.*, 1991; Mayne *et al.*, 2009; Haba *et al.*, 2014)。陨硫铁等粒状或多晶集合体,呈几十到几百微米微粒分布在基质中,或者以小于几微米的小颗粒包裹在斜方辉石中。小颗粒常在斜方辉石中和金属、铬铁矿和二氧化硅相形成包裹体(Gooley and Moore, 1976; Mori and Takeda, 1981a; Domanik *et al.*, 2004)。金属主要为铁纹石和镍纹石,以铁纹

石为主,分布在基质中或被包裹在斜方辉石中(Gooley and Moore, 1976; Mittlefehldt, 2000; Domanik *et al.*, 2004)。锆石经常与钛铁矿交互生长(Misawa *et al.*, 2005)。少量的矿物还包括陨磷钙钠石、钾长石、镍黄铁矿和自然铜等(Mittlefehldt, 1994; Domanik *et al.*, 2004, 2005; Mittlefehldt and Peng, 2013)。

Howardites 主要由不同比例的 Eucrites 陨石和 Diogenites 陨石混合而成,混合作用除冲击变质作用外,几乎为机械的混合,其矿物化学特征不再单独讨论。

3 讨论

3.1 HED 族陨石的中文定名问题

在 HED 族陨石中,除了 Eucrite 陨石具有统一的中文名称——钙长辉长无球粒陨石外,Diogenite 和 Howardite 均具有 2 个以上不同的中文名称,相对较混乱。为了引起国内陨石研究者的重视,规范定名十分必要。

Diogenite 在中文文献中译为古铜无球粒陨石(王道德等, 2005; 孙浅等, 2013)或奥长古铜无球粒陨石(刘焯等, 2008)。但随着近年来在南极洲和非洲西北部沙漠地区发现陨石数量的爆炸式增长,一些新的陨石类型成员加入 Diogenite 群,如纯橄榄岩(如前所述)和多个方辉橄榄岩等。另外,斜方辉石岩中的辉石不但有古铜辉石,还有一部分为紫苏辉石(Mittlefehldt, 2015)。这样,Diogenite 的中文名称古铜无球粒陨石和奥长古铜无球粒陨石显然忽略了橄榄石作为 Diogenites 主要矿物组成的属性,也没有顾及到紫苏辉石,而奥长古铜无球粒陨石的定名将斜长石中的奥长石参与定名也是不合适的,因为斜长石在 Diogenite 中含量极少,少部分苏长岩属于 Diogenite 向 Eucrite 过渡的类型,其归属问题目前还有争议。目前中国对 HED 族陨石类型名称尚未有专门的论述,按照岩石定名的惯例,一般以主要矿物来定名,Diogenite 应该可以定名为橄辉无球粒陨石,但和原始无球粒陨石中的橄辉无球粒陨石(Ureilite)有冲突,橄辉无球粒陨石以橄辉石和易变辉石为主,并富含碳质(缪秉魁等, 2010)。因此,在本文论述中,暂时采用英文“Diogenite”的名称,中文建议定名为“辉橄无球粒陨石”,一方面符合现有以辉石作为主要矿物的属性,另一方面和原始无球粒陨石的橄辉无球粒陨石相区别。

Eucrite 为辉长岩和玄武岩,辉长岩为堆晶岩,具有中-粗粒结构;玄武岩为浅成侵入或者喷出岩,

具有次辉绿结构和玄武岩质结构。中文译为钙长辉长无球粒陨石,从目前发现的 Euclites 陨石来看,除了含量小于 10% 的 Diogenite 成分的复矿碎屑角砾岩之外,主要矿物成分均为辉石(包括斜方辉石、易变辉石和普通辉石等)和斜长石(包括钙长石和倍长石,以钙长石为主),这 2 种矿物成分占总体积含量的 90% 以上,因此, Euclite 陨石定名为钙长辉长无球粒陨石问题不大,中文文献也比较统一(王道德等,2005;刘焘等,2008;聂喜柯和孔屏,2013;孙浅等,2013)。

Howardite 为复矿碎屑角砾岩,碎屑来源于 Euclite 和 Diogenite,其结构上还可分为冲击破碎角砾岩、风化表土层和部分冲击熔融玻璃等。Howardite 具有多种中文名称,即紫苏钙长无球粒陨石(王道德等,2005)、钙长紫苏无球粒陨石(孙浅等,2013)或者古铜钙长无球粒陨石(刘焘等,2008)。紫苏和古铜是表明在 Diogenite 和 Euclite 中辉石的成分,然而在 Diogenite 和 Euclite 中辉石成分变化相当大,还有易变辉石、普通辉石、铁普通辉石等多种成分,且比例上几乎是古铜-紫苏辉石和易变辉石-普通辉石各占一半,斜长石中以钙长石为主。但是在中文文献中使用的 Howardite 名称较多,非常混乱,对初学者易误导。因此本文论述中暂时采用 Howardite 的英文名称,建议中文定名为“辉长角砾无球粒陨石”,一方面具有 Howardite 矿物组成和结构的特点,另一方面与辉橄无球粒陨石和钙长辉长无球粒陨石相对应。

3.2 后期热变质和可能的流体蚀变

经历了复杂的热变质是很多 HED 族陨石的共有特征,特别是在玄武岩质 Euclites 陨石或者玄武岩角砾中表现最为明显(Barrat *et al.*, 2011b)。岩石结构和矿物化学对热变质作用的主要表现特征为:①原始铁易变辉石出溶普通辉石片晶,其余部分转变为斜方辉石;②辉石颗粒的成分发生均一化,原始的 Fe/Mg/Ca 成分环带消失;③通过出溶和氧化还原反应使微量元素离开主矿物相,辉石和斜长石出现云雾状(Harlow and Klimentidis, 1980; Schwartz and McCallum, 2005);④部分矿物颗粒重结晶(图 4b)。但需要注意的是,有些玄武岩质 Euclites 中原始辉石不是易变辉石,如在 Sioux County 中原始结晶的辉石是斜方辉石(Takeda *et al.*, 1978)。在高级变质阶段易变辉石通过出溶普通辉石转变为斜方辉石。

Takeda 和 Graham (1991) 描述了玄武岩质 Euclites 陨石中辉石的岩石学和矿物学特征,并依此划

分为 1~6 的变质序列:1 型(T1),热变质的最低阶段,易变辉石出溶普通辉石片晶厚度小于 0.1 μm ,在透射电镜下才可观察到,辉石未云雾化,原始岩浆结晶的 Fe/Mg/Ca 成分环带保留,具有镁易变辉石的核,富铁辉石环带边;6 型(T6),热变质的最高阶段,易变辉石出溶的普通辉石片晶具有数个微米的宽度,在电子探针下可轻易发现,部分易变辉石发生分解,转变为斜方辉石和普通辉石,辉石 Fe/Mg/Ca 成分环带消失,成分均一化,矿物颗粒云雾化,部分矿物颗粒重结晶(Takeda and Graham, 1991)。从 T1 到 T6,为逐渐过渡,之间并无明显的界限。Yamaguchi 等(1996)提出了 7 型变质程度,辉石的热变质现象具有从 4 型到 6 型的混合结构,重结晶的颗粒具有新的 Ca-Mg 环带,基质出现细粒化矿物颗粒(Yamaguchi *et al.*, 1996),可能代表了更高温度热变质阶段的叠加(表 1)。

辉石的出溶结构及其 $\text{Mg}^{\#}$ 值相关,堆晶 Euclites 陨石中的辉石(相对富镁)比玄武岩质 Euclites 陨石中的辉石(相对富铁)的出溶条带宽,即辉石越富镁其热变质的出溶条带越宽,可能与不同化学组成的易变辉石的分解温度有关。辉石的出溶结构可以用来计算模拟岩石的冷却速率,进而估计母岩的形成深度,利用这些现象科学家们建立了 HED 族陨石母体灶神星的壳层模型(Miyamoto and Takeda, 1977; Takeda *et al.*, 1979)。还有一些 Euclites 陨石和总的规律不吻合,可能代表了后期热变质过程中的一些特殊事件(Takeda and Graham, 1991)。

对于后期热变质的机制(热量来源),存在 3 种观点:①陨石或小星体撞击热-冲击变质作用(Nyquist *et al.*, 1986; Takeda and Graham, 1991);②熔岩流和地下侵入体的残余热量-接触变质作用;③后期玄武岩浆喷发覆盖热,即后期玄武岩浆喷发覆盖在早期喷发的玄武岩之上,造成早期玄武岩的热变质,热变质程度越高其形成时间越早,热变质程度低的玄武岩说明喷发的越晚,埋藏深度越浅,越近表层(Yamaguchi *et al.*, 1996, 1997)。但冲击热不易长时间保存,也不能造成全球性的壳层变质。根据对 GRV13001 等陨石稀有气体的研究,陨石的热变质和角砾岩化过程至少持续了数个百万年之久。如此长时间的变质作用,如果是由冲击作用引起的,那么:①这样的结果必然是多次冲击作用叠加的结果,但在陨石中并没有发现大量不同冲击作用叠加的证据;②Euclites 陨石中没有发现大量冲击变质作用的证据,例如高压矿物相和冲击熔脉等,相反,大量 Euclites 陨石的冲击变质程度很

表 1 玄武岩质 Eucrites 陨石热变质的 7 个阶段

Table 1 The seven periods of thermal metamorphism of basaltic Eucrites

类型	1 型	2 型	3 型	4 型	5 型	6 型	7 型
成分环带	辉石具有强烈的成分环带, 边缘富铁, 核部富钙镁	亚稳定态的富铁辉石保留	从核部到边缘具有 Fe-Ca 的含量富集变化	辉石、斜长石成分基本均一化, 局部有微弱成分变化	主矿物均一化, 易变辉石开始出溶	主矿物均一化, 易变辉石出溶条带较宽	辉石具有 Ca-Mg 成分环带
易变辉石出溶普通辉石条带宽度	小于几十纳米	几-几十纳米	几百纳米	微米尺度	微米尺度	微米尺度	
易变辉石是否转变为斜方辉石	否	否	否	否	在晶体尺度开始变化	部分转变	部分转变
辉石的云雾状	无	无	少量, 开始出现	大量出现	普遍存在	普遍存在	普遍存在
后期充填的玻璃质	保留	不清晰	不清晰	部分重结晶或不存在	重结晶或不存在	重结晶或不存在	玻璃质重结晶, 矿物细粒化, 基质角砾化
代表性样品	Y75011, 84, Y75015, Y74450 中的角砾	Pasamonte	Y790266 中的角砾	Stannern Neuvo Laredo	Juvinas, Haraiya, Emmaville, Sioux Co	Y791186 Y792510	Haraiya, Jonzac, Palo Blanco Creek

注: 据 Takeda 和 Graham(1991a), Yamaguchi 等(1996) 修订。

低。因此, Eucrites 陨石中的变质现象不大可能是由冲击作用形成的, 但并不排除个别陨石的局部热变质可由冲击变质作用形成。而侵入体接触变质作用可引起岩体局部的烘烤边等现象, 但在陨石中并没有发现这一现象, 况且接触变质也不能引起陨石母体整体均匀的变质反应, 所以接触变质作用造成热变质也不会太广泛。玄武岩质 Eucrites 陨石中辉石的出溶结构、重结晶和云雾化等结构说明陨石母体在重新被加热的过程中, 经历了高温峰值之后缓慢冷却的, 这个过程需要在母体小行星(如灶神星)内部具备一个保温的条件, 而全球性的熔岩覆盖达到一定厚度则可能提供这样的条件, 这样的条件可能是在灶神星等分异型小行星全球性物质分异和壳层形成之后不久就发生的。这样也可以解释大多数玄武岩质 Eucrites 陨石具有不同程度的热变质, 但也有少部分 Eucrites 陨石并未遭受热变质作用的现象。因此, 笔者认为, 灶神星等 HED 族陨石母体表层发生的广泛热变质作用是由岩浆覆盖热提供了热量来源。

在 Eucrites 陨石中发生的流体蚀变是近年来科学界讨论的一个热门话题。小行星上是否和地球和早期火星一样, 存在有水溶液参与的流体作用, 对于探讨行星演化和生命起源有重要的理论和现实意义。但一般认为 HED 族陨石形成于小行星, 缺乏挥发分, 流体相并不能参与熔融、岩浆结晶或者亚固相的过程。但近年来, 也有学者找到了流体蚀变的证据, 甚至有的认为有的矿物是在水溶液中直接沉淀结晶的。前人通过研究不同的样品得出了

不同的认识, 主要焦点集中于是否有流体参与了变质反应, 如果有流体参与, 流体是干的蒸汽? 还是有水溶液的参与? 如在 Elephant Moraine, EET92014 等 Howardites 的角砾中发现了镁质斜方辉石斑晶包含了富铁的辉石脉, 并有异常高的 Fe/Mn 值, 并排除了岩浆分异结晶形成富 Fe 辉石脉的可能 (Mittlefehldt and Lindstrom, 1997; Mittlefehldt *et al.*, 2013); 在 Pasamonte 陨石中发现辉石的富铁环带 (Schwartz and McCallum, 2005); Zhang 等 (2013) 通过研究 NWA2339 Eucrites 陨石后发现, 铁辉石部分被细粒陨硫铁、富镁普通辉石、钙铁辉石和二氧化硅相置换, 原岩颗粒遭受了硫化作用; 在 GRV13001 陨石中发现了含硫的二氧化硅相交斜长石和辉石的特征 (Chen *et al.*, 2015)。这些例子被认为是富硫、富铁的干蒸汽与原岩发生反应的结果。还有部分学者认为水溶液是变质作用可信的载体, 和地球上的热液类似。例如, 在 Serra de Magé 陨石发现的石英脉被认为是在水溶液中沉淀的结果 (Treiman *et al.*, 2004); 更有学者认为很多 Eucrites 中辉石的成分和矿物变化是由后期含水流体引起的, 包括富铁辉石脉, 富铁细粒橄榄石和钙长石等 (Barrat *et al.*, 2011a)。但目前的研究都是基于单个或者几个陨石的个别现象研究, 以及和地球热液作用相对比所得出的认识, 关于热蒸气的成因机制也缺乏相应的理论支持, 例如热液或热气的物质来源和动能机制等问题没有得到很好的解决。认为流体蚀变中水为外生成因, 推测可能由碳质球粒陨石撞击带来, 却缺乏直接的证据。但 Eucrites

陨石经历了复杂的变质作用是无容置疑的,大量的变质现象就是最好证据。

相对于 Eucrites 陨石, Diogenites 陨石的热变质现象并不突出,这可能与 2 种岩石形成深度有关。Diogenites 陨石形成于母体壳层下部,而 Eucrites 陨石形成于上部,从而说明变质的热量来源于上部而不是内部。这与后期玄武岩浆喷发覆盖加热造成陨石热变质的观点吻合。但变质过程中是否有流体的参与,流体的性质和成因等科学问题则还需要大量的工作。

3.3 源区分析

由于 Howardite, Eucrite 和 Diogenite 3 类陨石具有类似的氧同位素组成特征,科学家们将其划为一族,并且认为它们起源于同一个分异型小行星母体。在 20 世纪 70 年代,就有科学家根据地面望远镜观测到的灶神星可见光和红外光反射光谱和实验室测定 Eucrites 陨石(例如 Nuevo Laredo 陨石)对比后提出,灶神星可能是 HED 族陨石的母体 (McCord *et al.*, 1970; Consolmagno and Drake, 1977)。在美国的黎明号探测器绕灶神星飞行后,返回的大量数据经分析表明,灶神星表面的物质组成与 Diogenites 陨石和 Eucrites 陨石类似 (McSween *et al.*, 2013; McCoy *et al.*, 2015),更加证明了这一结论。另外部分氧同位素(例如 $\Delta^{17}\text{O}$)和铬同位素(例如 $\epsilon^{54}\text{Cr}$)异常的低冲击变质程度的 Eucrites 可能起源于类似于灶神星的 V 型小行星 (Scott *et al.*, 2009; Barrat *et al.*, 2011a; Sanborn and Yin, 2014)。无论如何,大多数具有类似氧同位素组成的 HED 族陨石起源于灶神星已经取得了共识,所以, HED 族陨石也称之为灶神星陨石。但地球上发现的 HED 族陨石数量如此之多(1612 块,发现数量最多的无球粒陨石,总体上仅次于普通球粒陨石,总重量超过 1.5t),这样就存在 2 个疑问: ①数量如此之多的 HED 族陨石全部直接起源于灶神星吗? ②HED 族陨石是一次从灶神星上溅射还是经历了二次运移过程?

如果 HED 族陨石直接从灶神星上溅射并降落到地球,难以解释的是其动力学问题。灶神星轨道和地球轨道相距甚远,只有具备高能量的撞击事件才可以使灶神星的碎片被抛射进入地球轨道,这样的高能量撞击事件是否具备 (Wasson and Wetherill, 1979)? 有科学家观测到 3 个直径 1~3 km 的近地小行星的光谱特征和灶神星以及 HED 族陨石类似,他们提出这些小行星是 HED 族陨石的直接来源 (Cruikshank *et al.*, 1991)。20 世纪 90 年代科学家

发现 20 个直径在 4~10 km 的小行星有着和灶神星类似的轨道和光谱特征。这些小行星被称之为 V 型小行星(或者灶神星族小行星),它们在灶神星后面形成一个尾巴,分布范围从接近灶神星轨道到和近地轨道呈 3:1 轨道共振区域,这些“尾巴”可能会被卷入近地轨道,从而降落到地球形成 HED 族陨石 (Binzel and Xu, 1993)。

如果大多数 HED 族陨石全部起源于灶神星,那么按照概率分析,降落到地球上的 HED 族陨石可能仅占灶神星全部溅射物的极少部分,绝大部分散落于小行星带中。按照溅射量分析,该次撞击必然会在灶神星表面形成一个巨大的撞击坑,或者造成灶神星的破碎。而灶神星上最为明显的特征其南极存在一个巨大的陨石撞击坑-Rheasilvia 撞击坑 (Neumann *et al.*, 2014),该撞击坑地面标高从 -25.4 km 到 13.7 km,垂直高差 39.1 km,是太阳系中最大的撞击坑之一 (Ivanov and Melosh, 2013; McCoy *et al.*, 2015)。Asphaug (1997)模拟了一个中型小行星撞击在灶神星上,该撞击不会造成灶神星的毁灭,但可以形成灶神星南极的撞击盆地和小行星带上的 V 型小行星 (Asphaug, 1997)。基于以上分析,灶神星及其被撞击后形成的众多 V 型小行星则可能是 HED 族陨石的母体,而绝大多数 HED 族陨石可能来源于灶神星被撞击溅射后形成的 V 型小行星,这些 V 型小行星经历了二次破碎,碎片中的少部分被地球引力捕获。

4 主要结论和认识

(1) HED 族陨石是在地球上发现数量最多、总重量最大的岩浆分异型无球粒陨石,是研究太阳系早期行星和小行星岩浆分异演化的重要样品来源。陨石的岩石学和矿物化学特征为研究小行星岩浆演化、热变质和冲击破碎历史提供了重要证据。

(2) HED 族陨石包含了超镁铁质的 Diogenite 陨石,辉长岩或玄武岩质的 Eucrite 陨石和二者混合角砾岩 Howardite。Diogenite 矿物成分上相当于地球上的超镁铁质岩浆岩中橄榄岩-辉石岩系列,以斜方辉石岩数量最多,代表了灶神星或和其类似的分异型小行星下地壳和部分上地幔的物质组成; Eucrite 陨石包括堆晶的辉长岩和玄武岩 2 种,在矿物成分和岩石结构上相当于地球上的基性侵入岩和喷出岩系列,代表了陨石母体中上地壳和部分表层的物质组成; Howardite 为冲击破碎角砾岩,角砾主要为 Eucrite 陨石和大于等于 10% 的 Diogenite 陨石混合物,部分为冲击熔融玻璃和表土化基质等,

是母体表层的主要物质组成。在地球上发现的 HED 族陨石中,绝大多数为角砾岩,很多角砾岩包含原始结晶的岩浆岩,少部分为原始堆晶岩。

(3) Diogenites 陨石主要矿物组成为斜方辉石和橄榄石,按照斜方辉石和橄榄石的相对含量可划分为斜方辉石岩、橄榄方辉岩、方辉橄榄岩和纯橄榄岩等类型,在地球上发现的二辉岩和苏长岩型无球粒陨石,根据氧同位素和地球化学特征也划分为 Diogenite,苏长岩中斜长石体积占比为 10%~40%,属于 Diogenite 向 Eucrite 过渡的中间产物,斜长石成分大部分为钙长石,但含有少量倍长石,个别拉长石也有发现;次要矿物和副矿物成分包括斜长石、二氧化硅相、铬铁矿、钛铁矿、磷灰石(陨磷钙钠石)和陨硫铁,含极少量金属。

(4) Eucrites 陨石主要矿物成分为几乎等量的辉石和斜长石,在岩石结构上可分为堆晶岩和玄武岩 2 种,原始结晶的辉石为易变辉石,斜长石在堆晶岩中几乎全部是钙长石,玄武岩中大部分为钙长石,但含有少量倍长石;次要矿物成分包括二氧化硅相、铬铁矿、钛铁矿、钛铁尖晶石、陨硫铁、磷灰石、陨磷钙钠石、锆石、斜锆石和少量金属,二氧化硅相一般为 α -石英,磷石英和方石英。Howardite 的矿物成分因包含 Diogenite 和 Eucrite 比例的不同而不同,但含有冲击熔融玻璃和外生矿物相。

(5) 辉石的平均 $Mg^{\#}$ 值在不同类型的 HED 族陨石中变化较大,从 Diogenites \rightarrow 堆晶 Eucrites \rightarrow 玄武岩质 Eucrites,其平均 $Mg^{\#}$ 值从 75.4 \rightarrow 58.2 \rightarrow 40.6;而辉石的平均 Fe/Mn (mol) 值变化范围不大,从 Diogenites \rightarrow 堆晶 Eucrites \rightarrow 玄武岩质 Eucrites,其 Fe/Mn (mol) 值从 27.6 \rightarrow 27.1 \rightarrow 30.9;橄榄石中的 Fe/Mn (mol) 值平均 47.1,比辉石和全岩的 Fe/Mn (mol) 值均高出很多;反映了在分异型小行星岩浆演化的不同阶段 Mg 和 Fe 元素产生了明显分异,而 Fe 和 Mn 元素则无明显分异,但在不同的矿物中 Fe 和 Mn 元素却有明显的分异。

(6) 大部分 Diogenites 辉石和橄榄石表现为富镁的特征,但仍发现少量橄榄石具有富铁的特征,暗示着 Diogenites 母岩并不是形成一个持续演化的岩浆序列。橄榄石在不同岩性中具有不同的 $Mg^{\#}$ 和 Fe/Mn (mol),从纯橄榄岩 \rightarrow 斜方辉石岩, $Mg^{\#}$ 总体上降低, Fe/Mn (mol) 值相对升高,在岩浆演化后期形成的 Eucrite 陨石中,橄榄石表现为富铁的特征,说明了陨石母体的岩浆演化从早到晚表现为从富镁到富铁的一个演化过程。但斜长石在堆晶 Eucrite 的 An 大于 Diogenite 的 An ,而 Diogenite 的

An 值玄武岩质 Eucrite 的 An 值,可能说明灶神星的岩浆演化并不是一个成熟的岩浆演化序列。

(7) 根据矿物成分及其相对含量,HED 族陨石中的 Howardite、Eucrite 和 Diogenite 的中文名称建议分别统一定名为辉长角砾无球粒陨石、钙长辉长无球粒陨石和辉橄无球粒陨石。

(8) Eucrites 的热变质是其显著特征,按照出溶条带宽度和成分环带的均一化程度等特征可以划分为 1~6 型,根据 4~6 型的综合特征,有的学者提出了热变质的 7 型。辉石出溶条带的宽度与其 $Mg^{\#}$ 和母岩热变质程度呈正相关,与冷却速率呈负相关。热变质的动力来源可能为陨石母体岩浆结晶晚期大规模玄武岩浆喷发覆盖在早期的玄武岩之上,造成了早期岩石的热变质。热变质过程中可能有流体的参与,但流体的性质、来源和成因机制等还需进一步工作证明。

(9) 大量分析表明,HED 族陨石母体为灶神星,但大部分陨石可能起源于灶神星被撞击之后形成的 V 型小行星,在经历了二次撞击后才可能被地球捕获。

致谢: 研究样品由中国极地研究中心陨石标本库提供,在此谨致谢忱。

参考文献 (References):

- Asphaug E. 1997. Impact origin of the Vesta family. *Meteoritic & Planetary Science*, 32(6): 965-980
- Barrat J A, Gillet P, Lesourd M, Blichert-Toft J, Poupeau G R. 1999. The Tatahouine diogenite: Mineralogical and chemical effects of sixty-three years of terrestrial residence. *Meteoritics & Planetary Science*, 34(1): 91-97
- Barrat J A, Beck P, Bohn M, Cotten J, Gillet P, Greenwood R C, Franchi I A. 2006. Petrology and geochemistry of the fine-grained, unbrecciated diogenite Northwest Africa 4215. *Meteoritics & Planetary Science*, 41(7): 1045-1057
- Barrat J A, Greenwood R C, Yamaguchi A, Bohn M, Bollinger C, Franchi I A. 2010. Northwest Africa 2968/3329: Dunitic and Diogenitic Pebbles from the Same Mesosiderite Fall?. In: *Proceedings of the 73rd annual meeting of the Meteoritical Society*. New York: Meteoritics and Planetary Science Supplement, 5304
- Barrat J A, Yamaguchi A, Bunch T E, Bohn M, Bollinger C, Ceuleneer G. 2011a. Fluid-rock interactions recorded in Unequilibrated Eucrites. In: *Proceedings of the 42nd lunar and planetary science conference*, LPI Contribution No. 1608. The Woodlands, Texas: LPI, 1306
- Barrat J A, Yamaguchi A, Bunch T E, Bohn M, Bollinger C, Ceuleneer G. 2011b. Possible fluid-rock interactions on differentiated asteroids recorded in eucritic meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75(13): 3839-3852
- Beck A W, McSween Jr H Y. 2010. Diogenites as polymict breccias com-

- posed of orthopyroxenite and harzburgite. *Meteoritics & Planetary Science*, 45(5): 850–872
- Beck A W, Mittlefehldt D W, Mesween 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
- Beck A W, McCoy T J, Sunshine J M, Viviano C E, Corrigan C M, Hiroi T, Mayne R G. 2013. Challenges in detecting olivine on the surface of 4 Vesta. *Meteoritics & Planetary Science*, 48(11): 2155–2165
- Beck P, Barrat J A, Grisolle F, Quirico E, Schmitt B, Moynier F, Gillet P, Beck C. 2011b. NIR spectral trends of HED meteorites: Can we discriminate between the magmatic evolution, mechanical mixing and observation geometry effects?. *Icarus*, 216(2): 560–571
- Binzel R P. 1993. The asteroid-meteorite connection: Forging a new link to Vesta as the parent body of basaltic achondrite (HED) meteorites. In: 24th lunar and planetary science conference. Cambridge, MA: NASA
- Binzel R P, Xu S. 1993. Chips off of asteroid 4 Vesta-evidence for the parent body of basaltic achondrite meteorites. *Science*, 260(5105): 186–191
- Bowman L E, Spilde M N, Papike J J. 1997. Automated energy dispersive spectrometer modal analysis applied to the diogenites. *Meteoritics & Planetary Science*, 32(6): 869–875
- Buchanan P C, Reid A M. 1996. Petrology of the polymict eucrite Petersburg. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60(1): 135–146
- Bunch T E, Keil K. 1971. Chromite and ilmenite in nonchondritic meteorites. *American Mineralogist*, 56: 146–157
- Bunch T E, Wittke J H, Rumble III D, Irving A J, Reed B. 2006. Northwest Africa 2968; A Dunite from 4 Vesta. In: Proceedings of the 69th annual meeting of the Meteoritical Society. Zurich, Switzerland: LPT, 41: 5252
- Bunch T E, Irving A J, Wittke J H, Kuehner S M, Rumble D, Sipiera P. 2010. Northwest Africa 5784, Northwest Africa 5968 and Northwest Africa 6157: More Vestan dunites and olivine diogenites. In: 73rd annual meeting of the Meteoritical Society. New York: *Meteoritics and Planetary Science Supplement*, 5315
- Chen H Y, Miao B K, Huang L L. 2015. Ancient silicification on asteroid 4 Vesta: Evidence from a eucrite Grove Mountains (GRV) 13001 from Antarctic. In: Proceedings of the 78th Annual Meeting of the Meteoritical Society, LPI Contribution No. 1856. Berkeley, California: LPI, 5003
- Christophe Michel-Levy M, Bourot-Denise M, Palme H, Spettel B, Wänke H. 1987. L'eucrie de Bouvante: Chimie, pétrologie et minéralogie. *Bull Minerol*, 110: 449–458
- Combe J P, McCord T B, McFadden L A, Ieva S, Tosi F, Longobardo A, Frigeri A, De Sanctis M C, Ammannito E, Ruesch O, Palomba E, Fulchignoni M, Raymond C A, Russell C T. 2015. Composition of the northern regions of Vesta analyzed by the Dawn mission. *Icarus*, 259: 53–71
- Consolmagno G J, Drake M J. 1977. Composition and evolution of the eucrite parent body: Evidence from rare earth elements. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 41(9): 1271–1282
- Cruikshank D P, Tholen D J, Hartmann W K, Bell J F, Brown R H. 1991. Three basaltic earth-approaching asteroids and the source of the basaltic meteorites. *Icarus*, 89(1): 1–13
- Delaney J S, Prinz M, Nehru C E, Stokes C P. 1984a. Allan Hills A81001, cumulate eucrites and black clasts from polymict eucrites. In: 15th Lunar and Planetary Science Conference. Houston: Lunar and Planetary Institute, 1108
- Delaney J S, Prinz M, Takeda H. 1984b. The polymict eucrites. *Journal of Geophysical Research*, 89(S1): C251–C288
- Domanik K, Kolar S, Musselwhite D, Drake M J. 2004. Accessory silicate mineral assemblages in the Bilanga diogenite: A petrographic study. *Meteoritics & Planetary Science*, 39(4): 567–579
- Domanik K J, Sideras L C, Drake M J. 2005. Olivine and Ca-phosphate in the diogenites Manegaon and Roda. In: 36th Annual Lunar and Planetary Science Conference, Abstract No. 2128. League City, Texas: LPI
- Duke M B, Silver L T. 1967. Petrology of eucrites, howardites and mesosiderites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 31(10): 1637–1665
- Floran R J, Prinz M, Hlava P F, Keil K, Spettel B, Wänke H. 1981. Mineralogy, petrology, and trace element geochemistry of the Johnston meteorite: A brecciated orthopyroxenite with siderophile and REE-rich components. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 45(12): 2385–2391
- Fredriksson K. 1982. The Manegaon diogenite. *Meteoritics*, 17(3): 141–144
- Ghosh S, Pant N C, Rao T K, Mohana C R, Ghosh J B, Shome S, Bhandari N, Shukla A D, Suthar K M. 2000. The Vissannapeta eucrite. *Meteoritics & Planetary Science*, 35(5): 913–917
- Gomes C B, Keil K. 1980. Brazilian stone meteorites. Albuquerque, New Mexico: University of New Mexico Press
- Gooley R, Moore C B. 1976. Native metal in diogenite meteorites. *American Mineralogist*, 61: 373–378
- Haba M K, Yamaguchi A, Horie K, Hidaka H. 2014. Major and trace elements of zircons from basaltic eucrites: Implications for the formation of zircons on the eucrite parent body. *Earth and Planetary Science Letters*, 387: 10–21
- Harlow G E, Nehru C E, Prinz M, Taylor G J, Keil K. 1979. Pyroxenes in Serra de Magé: Cooling history in comparison with Moama and Moore County. *Earth and Planetary Science Letters*, 43(2): 173–181
- Harlow G E, Klimentidis R. 1980. Clouding of pyroxene and plagioclase in eucrites-implications for post-crystallization processing. In: Proceedings of the 11th lunar and planetary science conference. New York: Pergamon Press, 1131–1143
- Hostetler C J, Drake M J. 1978. Quench temperatures of Moore County and other eucrites: Residence time on eucrite parent body. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 42(5): 517–522
- Howard L M, Domanik K J, Drake M J, Mittlefehldt D W. 2002. Petrology of antarctic eucrites PCA 91078 and PCA 91245. In: Proceedings of the 33rd annual lunar and planetary science conference, Abstract No. 1331. Houston, Texas: LPI
- Isa J, Warren P H, Rubin A E, McKeegan K D, Gessler N. 2014. Fluid deposition products in Eucrites and Moon Rocks: A study in contrasts. In: Proceedings of the 45th lunar and planetary science conference, LPI Contribution No. 1777. The Woodlands, Texas: LPI, 2777
- Ivanov B A, Melosh H J. 2013. Two-dimensional numerical modeling of the Rheasilvia impact formation. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 118(7): 1545–1557
- Kaneda K, Warren P H, Miyamoto M. 2000. Petrology and thermal history of Mg-rich pyroxene bearing cumulate eucrite, Talampaya. In: Proceedings of the 31st annual Lunar and Planetary Science Confer-

- ence, Abstract No. 2069. Houston, Texas; LPI
- Kunz J, Triefflof M, Bobe K D, Metzler K, Stöfler D, Jessberger E K. 1995. The collisional history of the HED parent body inferred from ^{40}Ar - ^{39}Ar ages of eucrites. *Planetary and Space Science*, 43(3-4): 527-543
- Lovering J F. 1975. The Moama eucrite-a pyroxene-plagioclase adcumulate. *Meteoritics*, 10(2): 101-114
- Mayne R G, McSween 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
- McCord T B, Scully J E C. 2015. The composition of Vesta from the Dawn mission. *Icarus*, 259: 1-9
- 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
- McSween H Y, 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. 2013. Dawn; the Vesta-HED connection; and the geologic context for eucrites, diogenites, and howardites. *Meteoritics & Planetary Science*, 48(11): 2090-2104
- McSween Jr H Y, Mittlefehldt D W, Beck A W, Mayne R G, McCoy T J. 2011. HED meteorites and their relationship to the geology of Vesta and the Dawn Mission. *Space Science Reviews*, 163(1-4): 141-174
- Metzler K, Bobe K D, Palme H, Spettel B, Stöfler D. 1995. Thermal and impact metamorphism on the HED parent asteroid. *Planetary and Space Science*, 43(3-4): 499-525
- Misawa K, Yamaguchi A, Kaiden H. 2005. U-Pb and ^{207}Pb - ^{206}Pb ages of zircons from basaltic eucrites: Implications for early basaltic volcanism on the eucrite parent body. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(24): 5847-5861
- Mittlefehldt D W. 1990. Petrogenesis of mesosiderites: I. Origin of mafic lithologies and comparison with basaltic achondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54(4): 1165-1173
- Mittlefehldt D W, Lindstrom M M. 1993. Geochemistry and petrology of a suite of ten Yamato HED meteorites. In: *Proceedings of the NIPR symposium*. Tokyo: The National Institute of Polar Research, 268-292
- Mittlefehldt D W. 1994. The genesis of diogenites and HED parent body petrogenesis. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58(5): 1537-1552
- Mittlefehldt D W, Lindstrom M M. 1997. Magnesian basalt clasts from the EET 92014 and Kapoeta howardites and a discussion of alleged primary magnesian HED basalts. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61(2): 453-462
- Mittlefehldt D W. 2000. Petrology and geochemistry of the Elephant Moraine A79002 diogenite: A genomic breccia containing a magnesian harzburgite component. *Meteoritic & Planetary Science*, 35(5): 901-912
- Mittlefehldt D W, Beck A W, Lee C T A, McSween Jr H Y, Buchanan P C. 2012. Compositional constraints on the genesis of diogenites. *Meteoritics & Planetary Science*, 47(1): 72-98
- Mittlefehldt D W, Herrin J S, Quinn J E, Mertzman S A, Cartwright J A, Mertaman 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, Peng Z X. 2013. Petrologic and in-situ geochemical constraints on diogenite genesis. In: *Proceedings of the 44th lunar and planetary science conference*, LPI Contribution No. 1719. The Woodlands, Texas: LPI, 1285
- 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, Takeda H. 1977. Evaluation of a crust model of eucrites from the width of exsolved pyroxene. *Geochemical Journal*, 11(3): 161-169
- Mori H, Takeda H. 1981a. Thermal and deformational histories of diogenites as inferred from their microtextures of orthopyroxene. *Earth and Planetary Science Letters*, 53(2): 266-274
- Mori H, Takeda H. 1981b. Evolution of the Moore County pyroxenes as viewed by an analytical transmission electron microprobe (ATEM). *Meteoritics*, 16: 362-363
- Neumann W, Breuer D, Spohn T. 2014. Differentiation of Vesta: Implications for a shallow magma ocean. *Earth and Planetary Science Letters*, 395: 267-280
- Nyquist L E, Takeda H, Bansal B M, Shih C Y, Wiesmann H, Wooden J L. 1986. Rb-Sr and Sm-Nd internal isochron ages of a subophitic basalt clast and a matrix sample from the Y75011 eucrite. *Journal of Geophysics Research*, 91(88): 8137-8150
- Papike J J, Shearer C K, Spilde M N, Karner J M. 2000. Metamorphic diogenite Grosvenor Mountains 95555: Mineral chemistry of orthopyroxene and spinel and comparisons to the diogenite suite. *Meteoritics & Planetary Science*, 35(4): 875-879
- Pun A, Papike J J. 1995. Ion microprobe investigation of exsolved pyroxenes in cumulate eucrites: Determination of selected trace-element partition coefficients. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(11): 2279-2289
- Reddy V, Li J Y, Le Corre L, Scully J E C, Gaskell R, Russell C T, Park P S, Nathues A, Raymond C, Gaffey M J, Sierks H, Becker K J, McFadden L A. 2013. Comparing Dawn, Hubble Space Telescope, and ground-based interpretations of (4) Vesta. *Icarus*, 226(1): 1103-1114
- Sack R O, Azeredo W J, Lipschutz M E. 1991. Olivine diogenites: The mantle of the eucrite parent body. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55(4): 1111-1120
- Saiki K, Takeda H, Tagai T. 1991. Zircon in magnesian, basaltic eucrite Yamato 791438 and its possible origin. In: *Proceedings of the Lunar and Planetary Science Conference*. Houston, TX: Lunar and Planetary Institute, 341-349
- Sanborn M E, Yin Q Z. 2014. Chromium isotopic composition of the Anomalous Eucrites: An additional geochemical parameter for evaluating their origin. In: *Proceedings of the 45th Lunar and Planetary Science Conference*, LPI Contribution No. 1777. The Woodlands, Texas: LPI, 2018
- Schwartz J M, McCallum I S. 2005. Comparative study of equilibrated and unequilibrated eucrites: Subsolvus thermal histories of Haraiya and Pasamonte. *American Mineralogist*, 90(11-12): 1871-1886
- Scott E R D, Greenwood R C, Franchi I A, Sanders I S. 2009. Oxygen isotopic constraints on the origin and parent bodies of eucrites, diogenites, and howardites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73(19): 5835-5853
- Shearer C K, Burger P, Papike J J. 2010. Petrogenetic relationships between diogenites and olivine diogenites: Implications for magmatism

- on the HED parent body. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74 (16): 4865–4880
- Stolper E. 1977. Experimental petrology of eucritic meteorites. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 41(5): 587–611
- 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: *Proceedings of the lunar and planetary science conference*. Houston, TX: Lunar and Planetary Exploration, 7: 3335–3348
- Takeda H, Miyamoto M, Yanai K, Haramura H. 1978. A preliminary mineralogical examination of the Yamato-74 achondrites. In: *Proceedings of the 2nd symposium on Yamato meteorites*. Memoirs of the National Institute of Polar Research. Tokyo, Japan: National Institute of Polar Research, 8(S): 170–184
- Takeda H, Miyamoto M, Ishii T, Yanai K, Matsumoto Y. 1979. Mineralogical examination of the Yamato-75 Achondrites and their layered crust model. In: *Proceedings of the 3rd symposium on Antarctic meteorites*. Memoirs of National Institute of Polar Research. Tokyo, Japan: National Institute of Polar Research, 12(S): 82–108
- Takeda H, Graham A L. 1991. Degree of equilibration of eucritic pyroxenes and thermal metamorphism of the earliest planetary crust. *Meteoritics*, 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
- Tkalcec B J, Brenker F E. 2015. Asteroidal processes recorded by poly-phase deformation in a harzburgitic diogenite NWA 5480. *Journal of Structural Geology*, 77: 138–150
- Treiman A H, Lanzirrotti A, Xirouchakis D. 2004. Ancient water on asteroid 4 Vesta: Evidence from a quartz veinlet in the Serra de Magé eucrite meteorite. *Earth and Planetary Science Letters*, 219(3–4): 189–199
- Usui T, Iwamori H. 2013. Mixing relations of the howardite-eucrite-diogenite suite: A new statistical approach of independent component analysis for the Dawn mission. *Meteoritics & Planetary Science*, 48(11): 2289–2299
- Warren P H, Jerde E A, Migdisova L F, Yaroshevsky A A. 1990. Pozzdino—an anomalous, high-MgO/FeO, yet REE-rich eucrite. In: *Proceedings of the 20th Lunar and Planetary Science Conference*. Houston, TX: Lunar and Planetary Institute, 281–297
- Warren P H, Kallemeyn G W, Huber H, Ulf-Møller F, Choe W. 2009. Siderophile and other geochemical constraints on mixing relationships among HED-meteoritic breccias. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73(19): 5918–5943
- Warren P H, Gessler N, Isa J. 2013. Complex, fluid-driven alteration of the Northwest Africa 5738 Eucrite: Focus on spinels and elongate, pure-iron metals. In: *Proceedings of the 76th annual meeting of the Meteoritical Society*. Edmonton, Canada: Meteoritics and Planetary Science Supplement, 5361
- 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
- Wasson J T, Wetherill G W. 1979. Dynamical chemical and isotopic evidence regarding the formation locations of asteroids and meteorites. In: *Asteroids*. Tucson, Ariz: University of Arizona Press, 926–974
- Witke J H, Irving A J, Bunch T E, Kuehner S M. 2011. A nomenclature system for diogenites consistent with the IUGS system for naming terrestrial ultramafic rocks. In: *Proceedings of the 74th annual meeting of the Meteoritical Society*. London, UK: Meteoritics and Planetary Science Supplement, 5223
- Yamaguchi A, Takeda H, Bogard D D, Garrison D. 1994. Textural variations and impact history of the Millbillillie eucrite. *Meteoritics*, 29(2): 237–245
- Yamaguchi A, Taylor G J, Keil K. 1996. Global crustal metamorphism of the eucrite parent body. *Icarus*, 124(1): 97–112
- Yamaguchi A, Taylor G J, Keil K. 1997. Metamorphic history of the eucritic crust of 4 Vesta. *Journal of Geophysical Research*, 102(E6): 13381–13386
- Yamaguchi A, Taylor G J, Keil K, Floss C, Crozaz G, Nyquist L E, Bogard D D, Garrison D H, Reese Y D, Wiesmann H, Shih C Y. 2001. Post-crystallization reheating and partial melting of eucrite EET90020 by impact into the hot crust of asteroid 4Vesta~4.50 Ga ago. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65(20): 3577–3599
- Yamaguchi A, Barrat J A, Greenwood R C, Shirai N, Okamoto C, Setoyanagi T, Ebihara M, Franchi I A, Bohn M. 2009. Crustal partial melting on Vesta: Evidence from highly metamorphosed eucrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73(23): 7162–7182
- Yamaguchi A, Barrat J A, Ito M, Bohn M. 2011. Posteucritic magmatism on Vesta: Evidence from the petrology and thermal history of diogenites. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 116(E8), doi: 10.1029/2010JE003753
- Zhang A C, Wang R C, Hsu W B, Bartoschewitz R. 2013. Record of S-rich vapors on asteroid 4 Vesta: Sulfurization in the Northwest Africa 2339 eucrite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 109: 1–13
- 陈宏毅, 缪秉魁, 黄丽霖, 朱佳玲. 2014. GRV13001 钙长辉长无球粒陨石的岩石矿物学及其热变质. 见: 第十一届“月球·行星·科学与探测”学术研讨会论文集. 贵阳: 中国空间科学学会, 117–118
- 陈宏毅, 缪秉魁, 谢兰芳, 夏志鹏. 2015. 南极月球陨石 MIL05035 矿物学、岩石学及演化历史. *岩石学报*, 31(4): 1171–1182
- 胡森, 冯璐, 林杨挺. 2011. Y984028 火星陨石的岩石矿物学特征和冲击变质. *科学通报*, 56(13): 1050–1059
- 刘焘, 林杨挺, 胡森, 冯璐. 2008. GRV 051523: 一块新的灶神星陨石. *极地研究*, 20(2): 219–228
- 缪秉魁, 林杨挺, 胡森, 沈文杰, 王葆华, 冯璐, 刘焘. 2010. 东南极格罗夫山陨石 (GRV 052382): 一块强烈冲击变质的橄辉无球粒陨石. *岩石学报*, 26(12): 3579–3588
- 缪秉魁, 陈宏毅, 夏志鹏, 姚杰, 谢兰芳, 倪文俊, 张川统. 2013. 月球陨石: 月球的物质组成及其演化历史的见证. *极地研究*, 25(4): 315–328
- 聂喜柯, 孔屏. 2013. 东乌旗中铁陨石硅酸盐地球化学特征及对成因的启示. *极地研究*, 25(4): 403–413
- 孙浅, 张爱铨, 徐伟彪, 王汝成. 2013. NWA2339 陨石的岩相学和矿物学研究. 见: 中国矿物岩石地球化学学会第 13 届学术年会论文集. 贵州: 中国矿物岩石地球化学学会, 308
- 王道德, 缪秉魁, 林杨挺. 2005. 陨石的矿物-岩石学特征及其分类. *极地研究*, 17(1): 45–74
- 张爱铨, 王汝成, 徐伟彪. 2013. 灶神星表面流体-岩石相互作用的陨石学记录. *高校地质学报*, 19(增刊): 628
- 张斌辉, 刘勇胜, 高山. 2007. 中国东部新生代玄武岩高 Fe/Mn 比值的成因意义. *中国科学(D 辑)*, 37(1): 1456–1466