

伊吾 Eucrite 陨石的岩石学、矿物学特征及其成因

高天静^{1,4)}, 冯彩霞¹⁾, 宋光明²⁾, 刘燊¹⁾, 李世杰^{3,4)}

1) 西北大学地质系, 大陆动力学国家重点实验室, 陕西西安, 710069;

2) 北京卫星环境工程研究所, 北京, 100094;

3) 桂林理工大学, 广西隐伏金属矿产勘查重点实验室, 广西桂林, 541004;

4) 中国科学院地球化学研究所, 贵州贵阳, 550081

内容提要: Howardite-Eucrite-Diogenite (HED) 族陨石是地球上目前发现数量最多的无球粒陨石类型, 已发现的 HED 族陨石主要来自于南极和非洲西北部的沙漠, 本研究的 HED 族陨石国际命名为 Yiwu 001, 发现于中国新疆维吾尔自治区伊吾县境内。系统的矿物学和岩石学研究显示, 该陨石属于单矿物碎屑角砾岩 Eucrite, 主要矿物为易变辉石(38%)、普通辉石(8%)和斜长石(46%), 副矿物主要为二氧化硅、陨硫铁、铬铁矿、钛铁矿。根据主要矿物的粒径, 对该陨石开展了区域划分: 粗粒、细粒和极细粒, 辉石对应的粒径均值分别为 550 μm 、100 μm 和 60 μm 。粗粒和部分细粒区域具次辉绿结构, 细粒和极细粒区域发育麻粒结构。陨石中细粒玄武岩包裹着以椭球体为主的粗粒和拉长的极细粒玄武岩, 极细粒玄武岩呈定向构造。Yiwu 001 陨石原岩可能为内含粗粒玄武岩捕虏体的玄武岩, 定向构造指示可能发生近静态的部分熔融。该陨石在晚期经历了复杂的热变质作用, 为 5 型变质类型, 主要表现在出溶辉石条带、麻粒结构和三联点结构。

关键词: 钙长辉长无球粒陨石; 伊吾 001 陨石; 沙漠陨石; 定向构造; 热变质

HED 族陨石为完全分异的小行星被撞击后所产生的岩石碎片, 是古铜钙长无球粒陨石 (Howardite)、钙长辉长无球粒陨石 (Eucrite) 和古铜辉石无球粒陨石 (Diogenite) 的统称 (Mittlefehldt, 2015)。Diogenite 的矿物组成相当于地球上超镁铁质堆晶或侵入岩, 代表了母体下壳层和上幔层的物质组成; Eucrite 包括堆晶辉长和玄武岩, 代表了母体上壳层和部分表层的物质组成; Howardite 为 Eucrite 和 Diogenite 的机械混合物。根据 HED 族陨石的可见光和红外光谱、氧同位素研究及“黎明号”探测器观测的灶神星遥感数据, HED 族陨石被认为可能来自灶神星 (McCord et al., 1970; Mccween et al., 2013; Greenwood et al., 2014), 但该观点目前仍存明显争议 (Wiechert et al., 2004; Scott et al., 2009; Schiller et al.,

2011; Wasson, 2013)。目前, 除月球和火星陨石仅 HED 族陨石存在可能对应的母体-灶神星, 灶神星具有与类地行星相似的早期演化过程, 岩浆结晶年龄时段约为 4.55~4.43 Ga 之间 (Yamaguchi et al., 2001), 较好地保留了太阳系早期演化的重要信息。因此, HED 族陨石已成为研究太阳系天体演化历史的理想对象。

20 世纪 60 年代以来, 学者们已对 HED 族陨石进行了岩石学、矿物学、地球化学、岩浆熔融实验、计算模拟、光谱学等方面的系统研究, 并在 HED 族陨石的岩石学特征、类型划分、母体起源、岩浆演化及后期变质作用等方面取得了较多重要成果和认识 (Duke et al., 1967; McCord et al., 1970; Takeda, 1976; Newsom et al., 1983; Pun et al., 1996; Williams et al., 2014; Mittlefehldt, 2015)。

注: 本文为西部之光项目 A (中国沙漠陨石居地年龄的测定) 和民用航天预研项目 (编号 D020304) 联合资助的成果。

收稿日期: 2021-05-06; 改回日期: 2021-07-19; 网络发表日期: 2021-08-18; 责任编辑: 李曼。

作者简介: 高天静, 女, 1997 年生。硕士研究生, 地球化学专业。E-mail: 201921085@stumail.nwu.edu.cn; 通讯作者: 李世杰, 男, 1978 年生。研究员, 主要从事陨石学与行星科学研究。E-mail: lishijielpsc@gyig.ac.cn。

引用本文: 高天静, 冯彩霞, 宋光明, 刘燊, 李世杰. 2021. 伊吾 Eucrite 陨石的岩石学、矿物学特征及其成因. 地质学报, 95(9): 2901~2908. doi:10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2021235.

Gao Tianjing, Feng Caixia, Song Guangming, Liu Shen, Li Shijie. 2021. The petrological and mineralogical characteristics and genesis of Eucrite meteorite in the Yiwu County. Acta Geologica Sinica, 95(9): 2901~2908.

2011~2012年,美国 NASA 发射的“黎明号”探测器环灶神星进行了一年飞行,并获取大量数据,从而为 HED 族陨石和灶神星研究提供了重要科学证据支撑。20 世纪 80 年代以来,前人对 HED 族陨石的成因提出了较多模式,如:岩浆洋模式(Warren, 1997; Greenwood et al., 2005; Chen et al., 2017)和部分熔融模式(Stolper, 1977; Warren, 1987)等,其中代表性的为灶神星早期熔融结晶四阶段模型(Mandler et al., 2013):①核衰变放射热使星子熔融成岩浆洋,铁镍金属下沉成核;②表层快速冷却,深部岩浆平衡结晶;③壳层增厚,岩浆对流停滞,残余岩浆上涌并分离结晶;④残余岩浆周期性侵入壳层或喷发。虽然如此,上述模式对残余岩浆侵入或喷发过程及影响方面的认识目前仍相对薄弱。鉴于 Eucrite 型陨石研究的不足,进一步的相关研究就显得尤为重要。

中国境内发现的 HED 族陨石非常稀有的,共三块获得国际命名,其中两块为 Diogenite(Lop Nur 011 和 Mazichuan),另一块为 Eucrite(Yiwu 001)。本研究的 Yiwu 001 Eucrite 型陨石被发现于新疆维吾尔自治区伊吾县境内。从而弥补了中国境内 Eucrite 型陨石的空白。

1 研究方法

Yiwu 001 陨石(图 1)大小为 22 cm × 15 cm × 16 cm,重 8600 g,陨石表面呈浅褐色,上覆约 1 mm 的黑色熔壳,70%已脱落。该陨石样品的处理、岩石学观察和矿物成分分析均在中国科学院地球化学研究所月球与行星科学研究中心和矿床地球化学国家重点实验室完成。

首先,使用 STX-603A 金刚石线切割机对所研究陨石进行切割,得到大小约 5 cm × 4 cm × 1.5 cm 的手标本(图 2a)。然后将手标本沿垂直横截面方向切割成厚约 1 mm 的薄片(Yiwu 001-1),再分别沿平行横切面方向切下厚约 1 mm 的两块薄片(Yiwu 001-2(图 2b)和 Yiwu 001-3)。另外,用 UNIPOL-1502 自动精密研磨抛光机分别对 3 张薄片进行粗磨-细磨-抛光制成光薄片。

在陨石样品的岩石学观察过程,使用配有能谱分析仪的 FEI Scios 双束扫描电子显微镜(加速电压为 15 kV,束流 1.6 nA,工作距离 7 mm)对 3 枚光薄片进行了矿物组成和岩石结构的观察,并获得样品的背散射图像和面积背散射图像拼图。

在陨石样品的矿物成分分析过程。使用

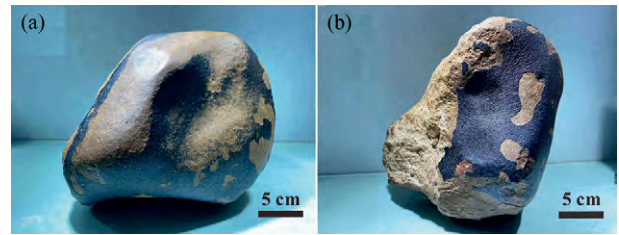


图 1 HED 陨石 Yiwu 001 的样品照片
(图片由 Guo Jianbin 提供)

Fig. 1 The pictures of the HED meteorite Yiwu 001
(Photo courtesy of Guo Jianbin)

JXA8530F-plus 型场发射电子探针(加速电压为 15 kV、束流 10 nA、束斑 1~10 μm)对 2 枚光薄片(Yiwu 001-2 和 Yiwu 001-3)进行了辉石和斜长石矿物的成分分析。3 枚光薄片主要矿物占比使用 ImageJ 软件统计。

2 研究结果

2.1 岩石学

Yiwu 001-1 光薄片厚度约 1.0 mm,具有明显的透光性,在透射光下肉眼直接观测,样品具有明显的不均一性(图 2b),主体呈黄褐色,内部包裹定向排列的深褐色椭球体或棒状团块,棒状团块对应手标本上深褐色凸起块体(图 2a)。

扫描电镜观察显示,Yiwu 001-2 光薄片有三种粒度不同的分区(粗粒、细粒和极细粒)。样品由主要的细粒玄武岩包裹椭球体或不规则形状的粗粒玄武岩(图 2 白色虚线标记,直径大小为 4~25 mm)和单向拉长的极细粒的棒状玄武岩(图 2 黄色虚线标记,长度为 4~30 mm)组成,少量极细粒玄武岩团块呈弯曲变形(长约 8 mm,宽约 1 mm)。

粗粒区域约占比 25%,呈玄武质和次辉绿结构,主要矿物为易变辉石(30%)、普通辉石(11%)和斜长石(47%),副矿物主要包括二氧化硅、陨硫铁、铬铁矿和钛铁矿。其中辉石和斜长石的粒径范围分别为 50~1200 μm 和 50~2600 μm,均值 550 μm 和 800 μm。易变辉石中普遍出溶普通辉石条带(图 3e),条带宽度 1~30 μm,均值 2 μm;少数普通辉石出溶易变辉石条带,宽度 1~10 μm,均值 1 μm。部分长石内部含大量柱状(1~40 μm)或颗粒状(1~20 μm)辉石(普通辉石和易变辉石)包体,常沿长石晶面分布(图 3a)。部分长石中出现粒状石英包体(1~40 μm)。

细粒区域约占 55%,具有典型的麻粒结构,另

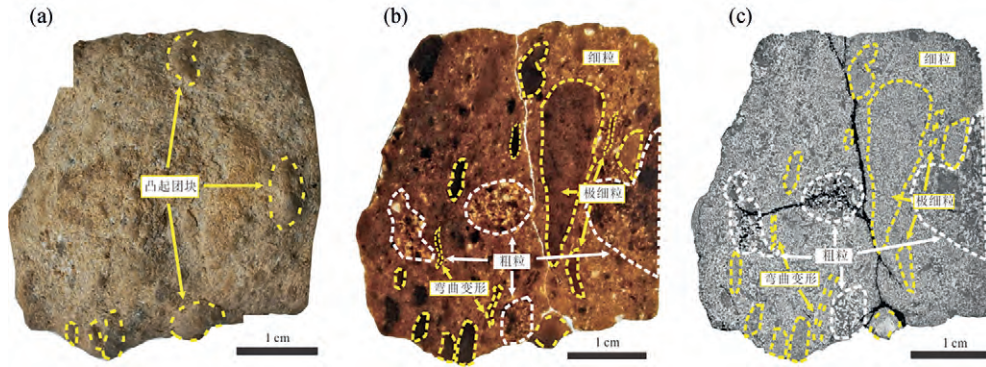


图 2 HED 陨石 Yiwu 001 的(a)手标本、(b)光薄片和(c)背散射拼图

Fig. 2 (a) Hand specimen picture, (b) thin section picture and (c) BSE image of HED meteorite Yiwu 001

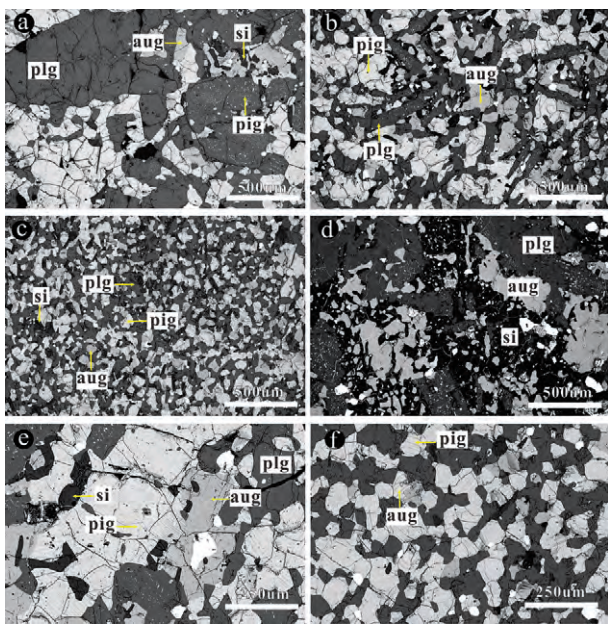


图 3 HED 陨石 Yiwu 001-2 的背散射图像

Fig. 3 BSE images of HED meteorite Yiwu 001-2

(a) 粗粒区域(长石中含辉石包体);(b) 细粒区域(具次辉绿结构);(c) 极细粒区域(麻粒结构);(d) 粗粒区域广泛发育二氧化硅;(e) 粗粒区域中的辉石出溶条带;(f) 细粒区域中的辉石出溶条带; plg—斜长石; pig—易变辉石; aug—普通辉石; si—二氧化硅

(a)—Coarse-grained area with pyroxene inclusions in the plagioclase; (b)—fine-grained area with subophitic texture; (c)—ultrafine-grained area with granulitic texture; (d)—abundant silica in the coarse-grained area; (e)—exsolution lamella in the coarse-grained area; (f)—exsolution lamella in the fine-grained area; plg—plagioclase; pig—pigeonite; aug—augite; si—silica

有小部分区域呈次辉绿结构,主要矿物包括易变辉石(40%)、普通辉石(6%)和斜长石(45%),副矿物主要包括二氧化硅、陨硫铁和铬铁矿。辉石和斜长石的粒径范围为 20~300 μm,均值 100 μm,易变辉石多出溶普通辉石条带(图 3f),宽度 1~10 μm,均

值 1 μm;少数普通辉石中出溶易变辉石条带,条带宽 1~10 μm,均值 1 μm。部分长石中包含普通辉石和易变辉石包体,主要为柱状(1~40 μm)或颗粒状(1~20 μm),常沿长石晶面分布,少数长石中有长约 1~20 μm 的柱状或粒状石英包体。

极细粒区域占 20%,呈麻粒结构,主要矿物成分包括易变辉石(41%)、普通辉石(8%)和斜长石(45%),副矿物成分包括二氧化硅、陨硫铁和铬铁矿等,矿物粒径范围为 20~100 μm,均值 60 μm。易变辉石普遍出溶普通辉石条带,条带宽度范围为 1~3 μm,均值 1 μm;少数易变辉石中出溶普通辉石条带,条带宽度范围为 1~3 μm,均值 1 μm。长石中包含辉石现象偶有出现,多呈颗粒状(1~10 μm)。

Yiwu 001 陨石中广泛发育辉石出溶条带,根据条带宽度可分为四类:①易变辉石几乎全部转变为普通辉石,形成类似“反出溶条带”结构;②密集的细条带状出溶(1~2 μm);③稀疏出溶条带(20~30 μm);④粗细相间、不均匀分布的出溶条带。

2.2 矿物学

对样品中不同区域的易变辉石、普通辉石和斜长石分别开展了电子探针成分分析,分析结果显示(表 1),样品中斜长石主要为钙长石,粗粒 An 值为 86.4~91.4,均值 87.9±1.0;细粒 An 值为 86.5~88.9,均值 87.8±1.3;极细粒 An 值为 86.0~89.7,均值 87.6±0.6。

辉石的化学组成分析结果显示,粗粒区域中的普通辉石成分均值为 $Fs_{32.8}En_{28.3}Wo_{39.0}$,易变辉石成分均值为 $Fs_{58.3}En_{34.0}Wo_{7.7}$;细粒区域的普通辉石为 $Fs_{32.8}En_{27.7}Wo_{39.4}$,易变辉石为 $Fs_{58.8}En_{33.2}Wo_{8.0}$;极细粒区域的普通辉石为 $Fs_{32.8}En_{27.8}Wo_{39.5}$,易变辉石为 $Fs_{59.3}En_{33.4}Wo_{7.3}$ 。另外,陨石样品中粗粒区

域的辉石 Fe/Mn 的摩尔数比值为 30.5~37.3, 均值为 33.3±1.8; 细粒区域为 31.5~40.6, 均值为 33.9±1.8; 极细粒区域为 32.6~37.9, 均值为 34.6±1.8。对应的 Mg[#] 范围分别为 36.0~47.5(均值 42.5±4.8)、35.4~47.4(均值 42.0±4.7)和 34.7

~46.6(均值 41.1±5.1)。

因为 Yiwu 001 陨石中不同粒径的玄武岩碎屑具有近乎一致的主要矿物化学成分, 陨石中没有观察到不同岩性的岩屑(如球粒陨石或 Diogenite 等), 表明 Yiwu 001 陨石是玄武岩质单矿物碎屑角砾岩。

表 1 HED 陨石 Yiwu 001 中矿物的电子探针成分

Table 1 EPMA analysis mean compositions (%) of mineral in HED meteorite Yiwu 001

元素	粗粒区域			细粒区域			极细粒区域		
	普通辉石(16)	易变辉石(11)	斜长石(32)	普通辉石(20)	易变辉石(13)	斜长石(20)	普通辉石(16)	易变辉石(15)	斜长石(38)
Na ₂ O	0.10 ± 0.04	0.05 ± 0.04	1.30 ± 0.20	0.07 ± 0.04	<0.04	1.33 ± 0.15	0.07 ± 0.03	<0.04	1.35 ± 0.07
SiO ₂	50.74 ± 0.89	48.93 ± 0.67	45.72 ± 1.18	50.21 ± 0.49	48.95 ± 0.62	45.81 ± 0.60	51.09 ± 0.43	48.93 ± 0.75	44.97 ± 0.72
TiO ₂	0.58 ± 0.08	0.26 ± 0.04	<0.04	0.58 ± 0.07	0.31 ± 0.06	<0.04	0.54 ± 0.05	0.31 ± 0.04	<0.04
Al ₂ O ₃	0.67 ± 0.07	0.30 ± 0.03	35.23 ± 0.64	0.71 ± 0.09	0.30 ± 0.07	34.70 ± 0.34	0.75 ± 0.08	0.29 ± 0.05	35.16 ± 0.61
Cr ₂ O ₃	0.45 ± 0.06	0.22 ± 0.04	<0.04	0.46 ± 0.07	0.24 ± 0.03	<0.04	0.46 ± 0.07	0.25 ± 0.03	<0.04
FeO	19.47 ± 0.52	33.69 ± 0.45	0.22 ± 0.08	19.53 ± 0.59	34.12 ± 0.76	0.47 ± 0.17	19.44 ± 0.51	34.22 ± 0.92	0.57 ± 0.29
MnO	0.56 ± 0.03	1.04 ± 0.05	<0.04	0.55 ± 0.04	1.00 ± 0.03	<0.04	0.54 ± 0.03	1.01 ± 0.03	<0.04
MgO	9.43 ± 0.14	11.05 ± 0.24	<0.04	9.26 ± 0.21	10.82 ± 0.22	<0.04	9.25 ± 0.19	10.80 ± 0.27	<0.04
CaO	18.07 ± 0.52	3.48 ± 0.35	18.08 ± 0.52	18.31 ± 0.49	3.63 ± 0.70	18.01 ± 0.27	18.28 ± 0.54	3.28 ± 0.80	18.06 ± 0.14
K ₂ O	n a .	n a .	0.09 ± 0.02	n a .	n a .	0.08 ± 0.02	n a .	n a .	0.09 ± 0.01
总计	100.08 ± 1.04	99.02 ± 0.77	100.69 ± 0.80	99.68 ± 0.71	99.38 ± 0.80	100.48 ± 1.00	100.48 ± 0.76	100.11 ± 0.99	100.26 ± 1.16
Fs	32.8 ± 1.0	58.3 ± 0.8	n a .	32.8 ± 1.0	58.8 ± 1.3	n a .	32.8 ± 0.8	59.3 ± 1.5	n a .
En	28.3 ± 0.4	34.0 ± 0.6	n a .	27.7 ± 0.4	33.2 ± 0.5	n a .	27.8 ± 0.5	33.4 ± 0.6	n a .
Wo	39.0 ± 1.0	7.7 ± 0.8	n a .	39.4 ± 1.0	8.0 ± 1.5	n a .	39.5 ± 2.0	7.3 ± 1.8	n a .
Ab	n a .	n a .	13.5 ± 1.3	n a .	n a .	11.6 ± 1.0	n a .	n a .	13.5 ± 0.8
An	n a .	n a .	87.9 ± 1.0	n a .	n a .	87.8 ± 1.3	n a .	n a .	87.6 ± 0.6
Or	n a .	n a .	n a .	n a .	n a .	n a .	n a .	n a .	n a .

注: n a. 表示未分析; 以上成分数据均取所分析样品的平均值

3 讨论

3.1 类型划分

Yiwu 001 陨石具有明显的熔壳, 不含球粒, 同时岩石学特征与玄武岩一致, 具有典型的玄武岩矿物组合(含量相近的辉石和斜长石)和次辉绿结构, 表明 Yiwu 001 陨石是无球粒陨石, 并且应该是属于月球陨石、火星陨石或者 HED 族陨石中的一种(Weisberg et al., 2006)。Yiwu 001 陨石中辉石(普通辉石和易变辉石)的 Fe/Mn 的摩尔比值为 31~41, 均值 34, 与 HED 族陨石的组成特征一致, 月球陨石、火星陨石和 HED 族陨石中辉石的 Fe/Mn 的摩尔比值区间分别为 61~72、20~25 和 19~40(Chen Hongyi et al., 2016), 显然最符合 HED 族陨石。另外, Yiwu 001 陨石中辉石的 Fe 的摩尔值为 0.6~1, Mn 的摩尔值为 0.02~0.04, 均落在 HED 族陨石范围内(图 4), 同样支持 Yiwu 001 陨石应属于 HED 族。结合 Yiwu 001 陨石的岩石学特征, 断定其为 HED 族陨石中的 Euclite 型陨石。

3.2 形成机制

前人研究表明灶神星玄武岩壳层至少经历了以

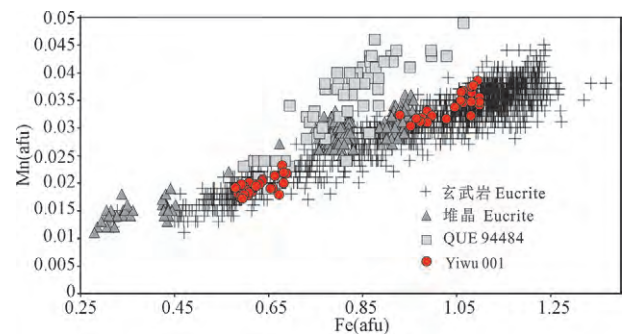


图 4 HED 陨石 Yiwu 001 的辉石 Fe-Mn(mol)

图(据 Mayne et al., 2009)

Fig. 4 Fe-Mn (mol) of pyroxenes in HED meteorite Yiwu 001 (after Mayne et al., 2009)

下五种热事件(Yamaguchi et al., 1997, 2001, 2013; Tsuyoshi et al., 2019): ①原始岩浆岩的结晶作用, 常伴随辉绿-次辉绿结构(Schwartz et al., 2005; Mandler et al., 2013); ②全球性的热变质作用, 导致辉石的均一化、出溶等(Takeda et al., 1991; Tsuyoshi et al., 2019); ③短期加热事件, 达到固相线温度(ca. 1050°C; Stolper, 1977; Yamaguchi et al., 2013), 使 Euclite 部分熔融; ④

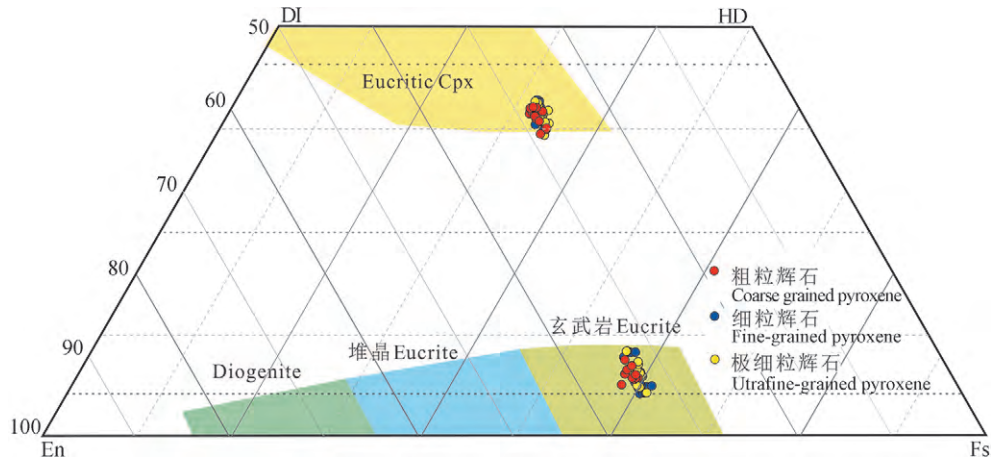


图 5 HED 陨石 Yiwu 001 的辉石组分图

Fig. 5 Compositions of pyroxenes in HED meteorite Yiwu 001

En—顽火辉石;Fs—铁辉石;Hd—钙铁辉石;Di—透辉石;Cpx—单斜辉石;Eucrite—钙长辉长无球粒陨石;Diogenite—古铜辉石无球粒陨石
En—Enstatite; Fs—Ferrosilite; Hd—Hedenbergite; Di—Diopside; Cpx—Clinopyroxene

冲击事件,伴随角砾岩化作用(Nyquist et al., 1986; Takeda et al., 1991; Yamaguchi et al., 2001; Pang et al., 2018a, 2018b);⑤局部发生有限的交代作用(Zhang et al., 2020)。

Yiwu 001 陨石包含不同粒径的玄武岩,但无机械破碎的截然边界(图 6)。上述特殊结构的形成存在两种可能机制:①Yiwu 001 陨石为冲击成因的玄武岩质单矿物碎屑角砾岩(Yamaguchi et al., 2001);②Yiwu 001 陨石是含包裹体的玄武岩。

广泛发育的麻粒结构表明,Yiwu 001 陨石经历了较高级别的热变质事件,上述观点一认为机械破碎边界的缺失是被后期热变质事件改造而抹除的,矿物边界发育三联点结构可以为此佐证。但该样品中各区域均发育裂隙,大量的裂隙切穿矿物颗粒但并不会使辉石出溶条带发生错动(图 3f),说明形成大量裂隙的冲击事件应发生在热变质事件之前。已知角砾岩化玄武岩的形成时期主要为 4.2~3.5 Ga (Tsuyoshi et al., 2019),发生在灶神星全球性热变质(~4.5 Ga)作用之前的冲击事件相对有限。另外,Yiwu 001 陨石的各区域(尤其是粗粒玄武岩中)都未保留下明显的冲击变质特征,因此冲击成因的证据不充分,但现有研究仍未能排除该类成因。

Yiwu 001 陨石中多数粗粒玄武岩呈浑圆状,更可能是其形成后被熔体包裹而成(图 7),因而不存在明显的机械破碎边界。在 HED 族陨石中,这种粗粒玄武岩(粒径与前人描述粗粒为“数百微米”类似)通常被认为是以岩脉形式侵入上覆熔岩流形成或在岩浆房中形成(Yamaguchi et al. 1997),分散

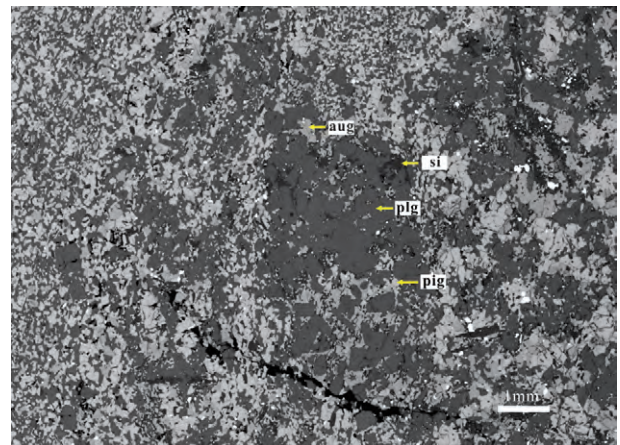


图 6 HED 陨石 Yiwu 001 的粗粒长石碎屑

Fig. 6 Coarse-grained plagioclase clast in HED meteorite Yiwu 001

plg—斜长石; pig—易变辉石; aug—普通辉石; si—二氧化硅
plg—Plagioclase; pig—pigeonite; aug—augite; si—silica

的粗粒玄武岩具有相似的产状、矿物成分和热变质程度,并且二氧化硅含量均较高,表明它们可能来自上壳层中相对深部的同一源区。

Yiwu 001 陨石中广泛发育辉石出溶条带,极细粒和细粒区域呈明显的麻粒结构,矿物颗粒间发育三联点结构,但辉石和斜长石成分基本均一,且无明显成分环带,易变辉石尚未转变为斜方辉石。综上所述,Yiwu 001 陨石经历了多期的热变质事件,且属 5 型变质类型。大量 Eucrite 的变质特征表明,灶神星玄武岩壳层内存在广泛变质作用。热变质的成因机制主要包括三种(Harlow et al., 1980; Metzler et al., 1995; Schwartz et al., 2005;

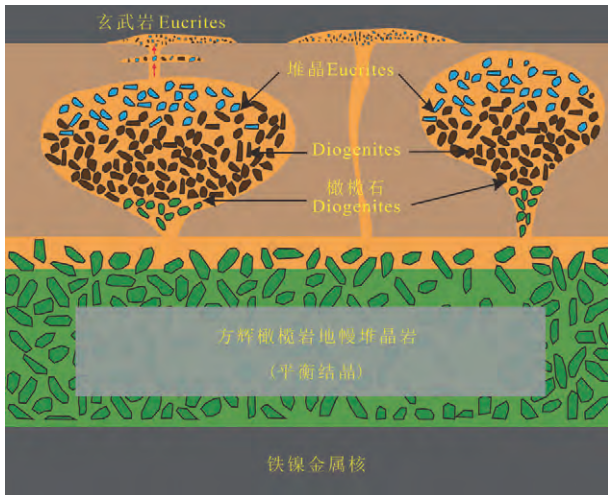


图7 HED 陨石 Yiwu 001 的岩浆演化模型
(据 Hahn et al., 2018)

Fig. 7 Magma evolution model of HED meteorite Yiwu 001 (after Hahn et al., 2018)

Eucrite—钙长辉长无球粒陨石; Diogenite—古铜辉石无球粒陨石

Mayne et al., 2009; Mittlefehldt, 2015; Pang et al., 2018a, 2018b): ① 陨石或小星体撞击热-冲击变质作用 (Nyquist et al., 1986; Takeda et al., 1991); ② 壳层埋藏热伴随着灶神星内部岩浆活动的加热 (Yamaguchi et al., 1997); ③ 后期熔岩流和侵入体的残余热-接触变质作用 (Warren, 1997)。上述过程都在玄武岩质 Eucrite 的热变质历史中发挥了作用, 但因 Yiwu 001 陨石冲击变质等级较低, 未观察到高温高压矿物、熔融脉和熔融囊等典型冲击变质特征, 暗示 Yiwu 001 陨石受冲击变质影响较小。Tsuyoshi et al. (2019) 报道的 Agoult 陨石先经历了岩浆在表层附近的快速冷却结晶, 随后的 10 Ma 内又经历长期的深度埋藏 (埋深 10~20 km), 并伴随着灶神星内部岩浆活动加热。因为 Yiwu 001 陨石的细粒玄武岩 (~100 μm) 与 Agoult 陨石 (~80 μm) 具有类似的矿物粒径、岩石结构 (麻粒结构和次辉绿结构) 及热变质等级 (5 型) 特征, 推测 Yiwu 001 陨石可能也经历过类似的埋藏变质过程, 伴随灶神星内部岩浆活动加热, 后期熔岩流和侵入体的残余热量可能也在 Yiwu 001 陨石复杂的热变质过程发挥了作用。

Yiwu 001 陨石彼此平行定向排布的极细粒棒状玄武岩类似地球上的流动构造 (常见于火山熔岩和侵入岩边缘), 例如华北克拉通中部晚前寒武的镁铁质岩墙群 (Hou Guiting et al., 2003)。不同之处在于, 流动构造表现在岩石中的柱状、片状矿物或捕

虏体彼此平行定向排列 (Shu Liangshu, 2010), Yiwu 001 陨石的定向特征仅表现在极细粒玄武岩团块间, 定向构造指示 Yiwu 001 陨石可能经历了达到 Eucrite 熔点的热事件 (ca. 1050°C; Stolper, 1977; Yamaguchi et al., 2013; Tsuyoshi et al., 2019), 发生过近静态熔融, 少量玄武岩团块在熔体驱动下迁移较短距离, 最终形成定向构造, 但并未改变 Yiwu 001 陨石的主要矿物学和岩石学特征。定向构造的较好保存表明该熔融过程与热变质事件同时或在其后形成。

4 发现意义

根据国际陨石数据库统计结果 (截至 2021 年 5 月 4 日), 获得国际陨石协会正式命名的无球粒陨石共 3233 块, HED 族陨石共 2404 块 (占 74.4%)。HED 族陨石是地球上所发现数量最多的无球粒陨石类型, 也是太阳系除地球岩石数量最多的岩浆岩样品。来自非洲西北部沙漠和南极的 HED 族陨石分别包含 1367 和 778 块, 占比分别为 56.9% 和 32.4%。虽然如此, 中国境内发现的 HED 族陨石仅有 3 块 (Lop Nur 011, Mazichuan 和 Yiwu 001), Yiwu 001 陨石被发现于新疆维吾尔自治区伊吾县境内, 从而弥补了中国境内 Eucrite 型陨石的空白。在南极以外地区, 全世界广泛分布的沙漠为陨石的主要发现区域, 上述首次发现暗示在新疆维吾尔自治区伊吾县及其邻近地区可能存在着沙漠富集区。综上所述, Yiwu 001 陨石的发现不仅丰富了我国的陨石数量, 而且为我国沙漠开展陨石收集工作提供了借鉴和参照。

5 结论

本研究分别从岩石学和矿物学特征方面对 Yiwu 001 陨石进行了系统研究, 并结合前人研究成果, 在 HED 族陨石成因机制及发现意义方面取得了下述重要认识:

(1) Yiwu 001 陨石可能是内含粗粒玄武岩包裹体的玄武岩, 极细粒玄武岩团块呈定向构造, 可能发生过近静态的部分熔融。但无法完全排除其为冲击成因的单矿物碎屑角砾岩。

(2) Yiwu 001 陨石的热变质特征在结构上表现为广泛发育的多种辉石出溶条带、麻粒结构和三联点结构, 但辉石和斜长石成分基本均一, 易变辉石尚未转变为斜方辉石, 以上指示 Yiwu 001 陨石经历了复杂的热变质作用, 属 5 型变质类型。

(3) Yiwu 001 陨石被发现于新疆维吾尔自治区伊吾县境内, 从而弥补了我国境内 Eucrite 型陨石的空白, 也极大地推动了我国陨石的收集和研究工作。

致谢: 感谢新疆地质六大队工程师王鹏提供了有关陨石的宝贵信息, 感谢陨石持有人郭建宾先生提供了 Yiwu 001 陨石的研究用样品, 感谢周文戈研究员和陈宏毅博士的宝贵建议, 感谢电子探针实验室和扫描电镜实验室的郑文勤和文愿运工程师在实验过程中的帮助, 感谢范焱博士提供的实验帮助和文章修改指导, 同时感谢杜科和沈德汗在制样和实验过程中给予的帮助!

References

- Chen H, Miao B, Xie L, Shao H. 2017. Siderophile element compositions of pyroxenes in hedrites; implications for the differentiation of magma ocean on vesta. *Acta Geologica Sinica*, 91(s1): 267~268.
- Chen Hongyi, Miao Bingkui, Xie Lanfang, Huang Lilin. 2016. A review to the composition and evolution of the HED meteorites; the deifferentiated asteroids. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 35(5): 1037~1052 (in Chinese with English abstract).
- Duke M B, Silver L T. 1967. Petrology of eucrites, howardites and mesosiderites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 31: 1637~1665.
- 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.
- Greenwood R C, Franchi I A, Jambon A, Buchanan P C. 2005. Widespread magma oceans on asteroidal bodies in the early solar system. *Nature*, 435: 916~918.
- Hahn T M, Lunning G, Mcsween H Y, Bodnar R J, Taylor L A. 2018. Mg-rich harzburgites from vesta: mantle residua or cumulates from planetary differentiation? *Meteoritics & Planetary Science*, 53(3).
- Harlow G E, Klimentidis R. 1980. Clouding of pyroxene and plagioclase in eucrites; implications for post-crystallization processing. *Lunar and Planetary Science Conference*, 11(2): 1131~1143.
- Hou Guiting, Li Jianghai, Halls H C, Qian Xianglin. 2003. The Flow Structures and Mechanics of Late Precambrian Mafic Dyke Swarms in North China Craton. *Acta Geologica Sinica*, 77(2): 210~216 (in Chinese with English abstract).
- Iizuka T, Yamaguchi A, Haba M K, Amelin Y, Ireland T R. 2014. Timing of global crustal metamorphism on vesta as revealed by high-precision U-Pb dating and trace element chemistry of eucrite zircon. *Earth and Planetary Science Letters*, 409.
- Iizuka T, Jourdan F, Yamaguchi A, Yamaguchi P, Yuki H, Kengo T M, Yuri A. 2019. The geologic history of vesta inferred from combined $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ chronology of basaltic eucrites-scienceDirect. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 267: 275~299.
- Mandler B E, Elkins-Tanton L T. 2013. The origin of eucrites, diogenites, and olivine diogenites: Magma ocean crystallization and shallow magma chamber processes on Vesta. *Meteoritics & Planetary Science*, 48(11): 2333~2349.
- 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: 1445~1447.
- McCord T B, Scully J E C. 2015. The composition of Vesta from the Dawn mission. *Icarus*, 1~9.
- McSween H Y, Binzel Sanctis M C, Ammannito E, Prettyman T H, Beck A W, Reddy V, Corre L, Gaffey M, 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 J H Y, Mittlefehldt D, Andrew Beck W, Mayne R G, McCoy T J. 2011. HED Meteorites and Their Relationship to the Geology of Vesta and the Dawn Mission. *Space Sci Rev*, 163: 141~174.
- Mittlefehldt D W. 2015. Asteroid (4) Vesta; I. The howardite-eucrite-diogenite (HED) clan of meteorites. *Chemie der Erde Geochemistry*, 75.
- Newsom H E, Drake M J. 1983. Experimental investigation of the partitioning of phosphorus between metal and silicate phases: implications for the Earth, Moon and Eucrite Parent Body. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 47(1): 93~100.
- 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: 8137~8150.
- Pang R L, Harries D, Pollok K, Zhang A C, Langenhorst F. 2018a. Vestaite ($\text{Ti}^{4+}\text{Fe}^{2+}$) $\text{Ti}_3^{+}\text{O}_9$, a new mineral in the shocked eucrite Northwest Africa 8003. *American Mineralogist*, 103:1502~1511.
- Pang R L, Harries D, Pollok K, Zhang A C, Langenhorst F. 2018b. Formation and implication of the titanium-rich shock melt pockets in eucrite Northwest Africa 8003. 81st Annual Meeting of the Meteoritical Society.
- Pun A, Papike J J. 1996. Unequilibrated eucrites and the equilibrated Juvinas eucrite; Pyroxene REE systematics and major, minor, and trace element zoning. *American Mineralogist*, 18: 1438~1451.
- Schiller M, Baker J, Creech J, Paton C, Millet M A, Irving A, Bizzarro M. 2011. Rapid timescales for magma ocean crystallization on the howardite-eucrite-diogenite parent body. *The Astrophysical Journal Letters*, 740(1): L22.
- Schwartz J M, McCallum I S. 2005. Comparative study of equilibrated and unequilibrated eucrites; subsolidus 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.
- Shu Liangshu. 2010. *Physical Geology*. Beijing: Geological Press.
- Stolper E. 1977. Experimental petrology of eucritic meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 41(5): 587~611.
- Takeda, Hiroshi. 1991. Comparisons of Antarctic and non-Antarctic achondrites and possible origin of the differences. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55(1): 35~47.
- 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, Miyamoto M, Ishii T, Reid A. 1976. Characterization of crust formation on a parent body of achondrites and the moon by pyroxene crystallography and chemistry. 7th Lunar Science Conference Proceedings, 3: 3335~3348.
- Warren P H, Jerde E A. 1987. Composition and origin of Nuevo Laredo Trend eucrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 51(3): 713~725.
- Warren P H. 1997. MgO-FeO mass balance constraints and a more detailed model for the relationship between eucrites and

- diogenites. *Meteoritics & Planetary Science*, 32(6):945~963.
- Wasson J T. 2013. Vesta and extensively melted asteroids; why HED meteorites are probably not from Vesta. *Earth and Planetary Science Letters*, 381: 138~146.
- Weisberg M K, McCoy T J, Krot A N. 2006. Systematics and evaluation of meteorite classification. *Meteorites & the Early Solar System*, II:19~52.
- Wiechert U, Halliday A N, Palme H, Rumble D, Herd C. 2004. Oxygen Isotope Composition of Eucrites and Implications for the Formation of Crust on the HED Parent Body, in: Jones, J. (Ed.), *Workshop on Oxygen in the Terrestrial Planets*, p: 3034.
- Williams D A, Jaumann R, McSween H Y J, Marchi S, Schmedemann N, Raymond C A, Russell C T. 2014b. The chronostratigraphy of protoplanet Vesta. *Icarus*, 244: 158~165.
- Yamaguchi A, Taylor G J, Keil K, Floss C, 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, Taylor G J, Keil K. 1997. Metamorphic history of the eucritic crust of 4 Vesta. *Journal of Geophysical Research*, 102: 13381~13386.
- Yamaguchi A, Mikouchi T, Ito M, Shirai N, Barrat J A, Messenger S and Ebihara M. 2013. Experimental evidence of fast transport of trace elements in planetary basaltic crusts by high temperature metamorphism. *Earth and Planetary Science Letters*, 368: 101~109.
- Zhang A C, Kawasaki N, Bao H. 2020. Evidence of metasomatism in the interior of Vesta. *Nature Communications*, doi:10.1038/s41467-020-15049-7.

参 考 文 献

- 舒良树. 2010. 普通地质学. 第3版. 北京:地质出版社.
- 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.
- 侯贵廷, 李江海, H C HALLS, 钱祥麟. 2003. 华北晚前寒武纪镁铁质岩墙群的流动结构及侵位机制. *地质学报*, 77(2): 210~216.

The petrological and mineralogical characteristics and genesis of Eucrite meteorite in the Yiwu County

GAO Tianjing^{1,4)}, FENG Caixia¹⁾, SONG Guangming²⁾, LIU Shen¹⁾, LI Shijie^{*3,4)}

1) *State Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xian, Shanxi 710069, China;*

2) *Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing 100094, China;*

3) *Guangxi Hidden Mineral Exploration Center, College of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China;*

4) *Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang Guizhou 550081, China*

* *Corresponding author: lishijie@psc.gyig.ac.cn*

Abstract

Howardite-Eucrite-Diogenite (HED) meteorites, mainly collected in Antarctica and the hot desert of Northwest Africa, are the most abundant achondrite at present. Yiwu 001 reported in this research is an HED meteorite collected in the Yiwu County, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China. The systematic petrological and mineralogical characteristics of Yiwu 001 suggest that this meteorite belongs to monomict eucrite. Mineralogically, Yiwu 001 is mainly composed of pigeonite (38%), augite (8%) and plagioclase (46%), and the accessory minerals include silica, troilite, chromite and ilmenite. Based on the grain size of the main minerals, Yiwu 001 is divided into three areas as coarse-grained, fine-grained and ultrafine-grained areas, and the average grain size of pyroxene in which is 550 μm , 100 μm and 60 μm , respectively. Texturally, the coarse-grained and partial fine-grained areas develop subophitic texture, in addition, the ultrafine-grained and the fine-grained areas are characterized by granulitic texture. The coarse-grained basalt (mainly ellipsoid) and elongated ultrafine-grained basalt with oriented structure are surrounded by fine-grained basalt matrix. Yiwu 001 with complex post-thermal metamorphism should be a basalt containing a small amount of coarse-grained basaltic xenoliths, and the oriented structure may indicate that Yiwu 001 has undergone near-static partial melting. Yiwu 001 is classified as Type-5 thermal metamorphism based on the exsolution lamella, granulitic texture and triple junctions.

Key words: Eucrite; Yiwu 001; desert meteorite; oriented structure; thermal metamorphism