

文章编号: 1674-9057(2021)04-0760-08

doi: 10.3969/j.issn.1674-9057.2021.04.005

钙长辉长无球粒陨石 NWA 11586 稀有气体及其年代学

张川统^{1,2}, 缪秉魁^{1b,1c}, 贺怀宇³, 苏菲³, 解庆林^{1a}

(1. 桂林理工大学 a. 环境科学与工程学院; b. 广西隐伏金属矿产勘查重点实验室; c. 陨石与行星物质研究中心, 广西 桂林 541006; 2. 中国科学院 月球与深空探测重点实验室, 北京 100101; 3. 中国科学院地质与地球物理研究所 地球与行星物理重点实验室, 北京 100029)

摘要: HED 族陨石来自灶神星, 是研究太阳系和类地行星形成及演化的重要窗口, 而研究稀有气体是了解 HED 族陨石和灶神星撞击历史与热事件的主要途径。本文对非角砾岩化钙长辉长无球粒陨石 NWA 11586 开展了稀有气体、宇宙暴露(CRE)年龄和气体保存年龄研究。稀有气体同位素表明, NWA 11586 陨石 He、Ne 和 Ar 气体主要是宇宙射线成因和放射性衰变成因的; 该陨石 CRE 年龄(38.5 ± 4.1 Ma) 与 HED 族陨石 35~41 Ma 的主要撞击溅射事件年龄相一致, 故其可能在~40 Ma 前从灶神星或 V 型小行星溅离; 陨石 U、Th-⁴He(T_4) 及 ⁴⁰K-⁴⁰Ar(T_{40}) 气体保存年龄分别为 1.019 ± 0.41 Ma 和 3.041 ± 0.77 Ma, 已受到后期热事件影响而发生了重置。

关键词: HED 族陨石; 钙长辉长无球粒陨石; NWA 11586; 稀有气体; 宇宙暴露年龄; 气体保存年龄
中图分类号: P185.83; P691 **文献标志码:** A

0 引言

HED 族陨石包括古铜钙长无球粒陨石(Howardite)、钙长辉长无球粒陨石(Eucrite)和奥长古铜无球粒陨石(Diogenite)三类^[1]。Eucrite 陨石为喷出岩或侵入岩, 主要由辉石和斜长石组成, 根据结构特征可分为玄武质 Eucrite 陨石和堆晶型/辉长岩 Eucrite 陨石; Diogenite 陨石是一系列的深部粗粒超铁镁质岩, 其比 Eucrite 陨石更富镁, 按岩浆结晶先后顺序包括苦橄岩、方辉橄岩、斜方辉石岩和苏长岩; 与两者不同, Howardite 陨石并非岩浆直接结晶形成的, 而是 Eucrite 陨石和 Diogenite 陨石的撞击混合产物, 可进一步划分为表土角砾型和破碎型^[2-4]。McCord 等发现 HED 族陨石

与灶神星具有相似的表面反射光谱, 因而首次提出 HED 族陨石可能来自灶神星^[5]。随后, 轨道动力学研究很好地给出了 HED 族陨石从灶神星到地球的传递机制^[6-7]。美国 NASA 的“黎明号”探测器也的确发现灶神星表面主要由 HED 族陨石物质组成, 探测数据表明 HED 族陨石和灶神星具有强烈的成因关系^[8-11]。因此, 目前普遍认为灶神星是 HED 族陨石的母体小行星^[12-14]。

稀有气体包括氦(He)、氖(Ne)、氩(Ar)、氪(Kr)、氙(Xe)和氡(Rn)等6种, 它们不仅在地球科学领域具有重要的示踪作用^[15], 也是研究 HED 族陨石及其母体小行星撞击作用与热事件必不可少的媒介和技术^[2-3, 16]。HED 族陨石在离开母体暴露于高能宇宙射线期间, 将源源不断地产生宇宙

收稿日期: 2021-03-11

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(B类)(XDB 41000000); 中国博士后科学基金项目(2020M673557XB); 民用航天技术预先研究项目(D020302; D020206); 中国科学院月球与深空探测重点实验室开放基金项目(LDSE201907); 广西自然科学基金项目(2021GXNSFBA075061); 广西科技基地及人才专项(桂科 AD1850007)

作者简介: 张川统(1990—), 男, 博士, 研究方向: 天体化学与陨石学, zct@glut.edu.cn。

通讯作者: 缪秉魁, 博士, 教授, miaobk@glut.edu.cn。

引文格式: 张川统, 缪秉魁, 贺怀宇, 等. 钙长辉长无球粒陨石 NWA 11586 稀有气体及其年代学[J]. 桂林理工大学学报, 2021, 41(4): 760-767.

射线成因稀有气体^[17], 据此可计算出陨石暴露于宇宙射线的时间, 即为宇宙暴露年龄(CRE 年龄), 其指示了陨石脱离母体的时间或母体小行星发生的溅射事件^[18-20]。Welten 等修正了稀有气体产率模型并重新对 Diogenite 陨石 CRE 年龄进行计算后, 首次发现 HED 陨石存在 22.5 Ma 和 40 Ma 的 CRE 年龄分布峰值^[21-22]。之后经过发展, 进一步确定了 HED 族陨石具有 ~ 22 Ma 和 38 Ma 的 CRE 年龄分布峰值^[23-24], 而最新的 HED 族陨石稀有气体研究也获得了相近似的年龄分布^[2-3]。因此, 目前普遍认为 HED 族陨石母体小行星在 ~ 20 Ma 和 40 Ma 发生了两次主要的撞击溅射事件, 约 1/3 以上的 HED 族陨石在此期间离开母体小行星, 并最终被地球重力场捕获^[18-19]。

陨石形成并冷却至⁴He 和⁴⁰Ar 封闭温度后, 由 U-Th 衰变产生的放射性成因⁴He, 以及由⁴⁰K 衰变产生的放射性成因⁴⁰Ar 开始累积保存, 由此得到的放射性核素衰变年龄称之为气体保存年龄^[25-26]。这些年龄记录了陨石样品经历的撞击事件或热过程^[27]。HED 族陨石系统性 K-Ar/Ar-Ar 定年研究发现, 非角砾岩化 Eucrite 陨石 Ar-Ar 年龄聚集在 4.48 Ga, 其可能代表了 HED 族陨石在灶神星上经历的早期巨型撞击后的冷却年龄^[27-28]; 角砾岩化 Eucrite 陨石 Ar-Ar 年龄集中在 3.4~4.1 Ga, 其佐证了地球、月球和火星样品共同记录的“内太阳系重轰击事件”^[29-30]。

NWA 11586 是一块新发现的非角砾岩化 Eucrite 陨石, 其明显经历了高度热变质作用, 显示出变晶结构, 被划分为非角砾岩化-花岗变晶结构-玄武质-Eucrite 陨石, 且属于极罕见的 7 型 Eucrite 陨石^[31]。因此, 通过稀有气体来研究 NWA 11586 陨石撞击及热事件历史是十分有必要的。本次工作对 NWA 11586 陨石全岩样品进行稀有气体浓度及同位素比值测量, 依据宇宙暴露年龄和气体保存年龄, 简要讨论陨石的后期演化历史。

1 样品处理及稀有气体分析流程

NWA 11586 陨石于 2016 年购自摩洛哥, 原岩质量为 91.5 g, 结构致密, 表面矿物颗粒清晰可见并残余有黑色熔壳, 切面处见细小金属光泽颗粒存在。光学显微镜下可见 ~ 0.5 mm 的斜长石及辉石颗粒呈半自形-他形交杂分布, 颗粒边界多圆化, 局部可见

相邻矿物颗粒呈现 120° 三联点发育, 没有观察到熔脉等冲击结构及高压矿物存在, 也未发现有明显的风化侵染现象, 这表明陨石遭受的撞击效应和风化程度微弱。NWA 11586 陨石为非角砾岩, 主要矿物为低钙辉石(36.9%, 体积分数, 下同)、高钙辉石(10.8%) 和斜长石(45.2%), 次要矿物为 SiO₂ 相(6.2%), 也见不透明矿物(~ 0.9%) 如钛铁矿、铬铁矿、陨硫铁和单质 Fe(0.3%), 局部区域发现有少量的磷酸盐和锆石等副矿物存在。此外, 该陨石原始的火成辉绿结构已被明显破坏, 显示出花岗变晶结构, 低钙辉石内部普遍发育有高钙辉石出溶片晶, 且高钙辉石内也发现有低钙辉石片晶出溶。电子探针成分测试表明该陨石中同种矿物化学成分高度一致。因此 NWA 11586 被划定为非角砾岩化-花岗变晶结构-玄武质-Eucrite 陨石(7 型)^[31]。

本次工作切下长约 2 cm 的陨石样品用于稀有气体分析, 简略流程(图 1) 如下: 先在陨石样品内部远离表面处切下长条状样品(红色虚线区域); 然后取长条状样品中部(黄色区域) 用酒精于超声波清洗器中清洗 3 遍(每次 15 min), 以去除可能的地球风化产物; 最后, 用玛瑙研钵将烘干后的陨石样品磨碎, 装入医用密封管后用于稀有气体测定。

NWA 11586 陨石稀有气体测量在中国科学院地质与地球物理研究所稀有气体实验室完成, 测试仪器为英国 Nu 仪器公司生产的 Noblesse 质谱仪, 详细测量过程参见文献[16, 32-35]。简略来说, 先将陨石样品装入激光样品盘中, 120 °C 下烘烤纯化系统及样品盘 3 d, 以去除样品所吸附大气组分。测量时采用 CO₂ 激光器熔融样品, 采用连续波(CW) 模式, 频率 1 Hz, 波长 500 nm, 束斑直径 3 mm, 功率 55%, 加热 20 min。样品释放气体先经冷阱及两组



图 1 Eucrite 陨石 NWA 11586 稀有气体分析样品制备示意图

Fig. 1 Schematic of the sample preparation of noble gas analysis for eucrite NWA 11586

锆铝泵纯化, 去除所含杂质气体(如 H_2O 、 CO_2 、烃类等); 然后根据 He、Ne 及 Ar 熔沸点的差异, 利用装有活性炭的冷阱(加液氮冷却)及冷泵(35 K)分别吸附气体中 Ar 及 Ne 组分, 使 Ne、Ar 与 He 分离; 最后将 He、Ne 及 Ar 组分依次进气, 利用 Noblesse 多接收质谱仪测定。对陨石样品熔融测量 2 次, 以确保样品所含稀有气体已完全释放。

多接收质谱测定时, 具有相同荷质比的离子会对所测元素产生干扰, 因此需要进行校正。Noblesse 稀有气体质谱仪同轴电子倍增器质量分辨率 $M/\Delta M > 750$, 能够完全分离 $^3\text{He}^+$ 和 HD^+ 峰位, 但无法将 $^{40}\text{Ar}^{++}$ 和 $^{20}\text{Ne}^+$ 、 $^{44}\text{CO}_2^{++}$ 和 $^{22}\text{Ne}^+$ 完全分开, 因此需对 ^{20}Ne 、 ^{22}Ne 进行元素干扰校正。与此同时, 离子源处加装冷阱, 极大降低了 $^{40}\text{Ar}^{++}$ 对 $^{20}\text{Ne}^+$ 的元素干扰; 接收端装有锆铝泵, 能够降低 $^{44}\text{CO}_2^{++}$ 对 $^{22}\text{Ne}^+$ 的元素干扰; 测量 Ne 时保持冷泵(80 K)与质谱连通, 以降低 H_2O^+ 、 $^{40}\text{Ar}^{++}$ 和 $^{44}\text{CO}_2^{++}$ 对 Ne 同位素的元素干扰。

陨石样品测量前、测量期间以及测量后, 多次测定标准空气^[15, 36]和 HESJ 标样^[37]的稀有气体成分, 计算出 Noblesse 质谱接收器 He、Ne 和 Ar 的灵敏度以及仪器质量歧视系数, 根据样品信号值得

陨石中 He、Ne 及 Ar 的测量浓度与同位素比值。

2 稀有气体测试结果

陨石中测量的稀有气体(measured, 以 m 表示), 是宇宙射线成因稀有气体(cosmogenic, 以 c 表示)、放射性成因稀有气体(radiogenic, 以 r 表示)以及捕获稀有气体(trapped, 以 t 表示)3 种组分的混合^[38]。在实际应用中, 利用宇宙射线成因稀有气体计算陨石宇宙暴露年龄^[19], 根据放射性成因稀有气体求得陨石气体保存年龄^[39], 再通过捕获稀有气体反演陨石环境信息^[40]。因此, 经过测量与校正, 在获得 NWA 11586 陨石的 He、Ne 和 Ar 浓度及同位素比值后(表 1), 需对各组分稀有气体进行区分。

对比 NWA 11586 陨石与不同组分稀有气体同位素比值, 陨石样品 Ne 同位素落在宇宙射线成因值域内(图 2a), 表明其 ^{21}Ne 和 ^{22}Ne 几乎完全是宇宙射线成因的; 样品 $^{36}\text{Ar}/^{38}\text{Ar}$ 值也与宇宙射线成因 $^{36}\text{Ar}/^{38}\text{Ar}$ 值极为接近(图 2b), 表明 ^{38}Ar 同样基本为宇宙射线成因, 且 ^{40}Ar 主要为放射性衰变产生。此外, NWA 11586 陨石样品 $^4\text{He}/^3\text{He}$ 值约为 63, 远低于太阳风($\sim 2\,200$ ^[41])、地球大气($\sim 710\,000$ ^[15])、原始球粒陨石捕获组分(Q 组分, $\sim 8\,100$ ^[40]), 反而

表 1 NWA 11586 陨石稀有气体测试结果

Table 1 Results of noble gases measurements for NWA 11586 meteorite

质量/ mg	$^4\text{He}_m$ 浓度	err	$(^4\text{He}/^3\text{He})_m$ 比值	err	$^{22}\text{Ne}_m$ 浓度	err	$(^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne})_m$ 比值	err	$(^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne})_m$ 比值	err	$^{38}\text{Ar}_m$ 浓度	err	$(^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar})_m$ 比值	err	$(^{36}\text{Ar}/^{38}\text{Ar})_m$ 比值	err
5.27	2 187	93	63	10	7.96	0.05	0.909	0.007	0.843	0.009	2.99	0.16	314	2	0.759	0.002

注: err—误差值; 浓度单位 $10^{-8} \text{ cm}^3 \text{ STP/g}$ 。

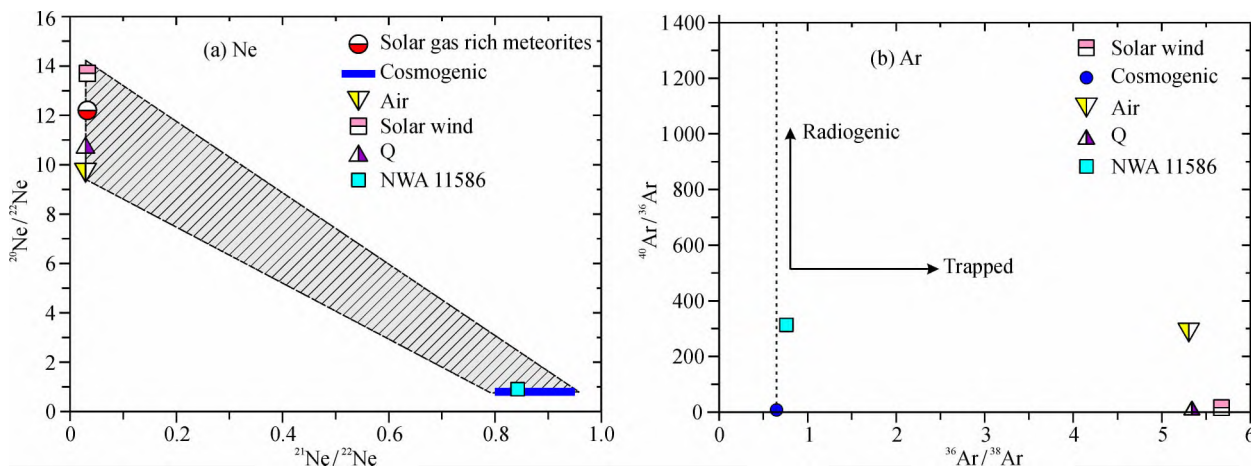


图 2 NWA 11586 陨石与不同组分稀有气体 Ne(a) 和 Ar(b) 同位素对比

Fig. 2 Comparison of Ne(a) and Ar(b) isotopes of NWA 11586 with different noble gases components
宇宙射线成因(Cosmogenic)、放射性衰变成因(Radiogenic)、富太阳风气体陨石(Solar gas rich meteorites)、太阳风(SW)组分、原始球粒陨石捕获组分(Q)和地球大气(Air)数据来自文献[15, 17, 23, 38, 40-41, 43-46]

与宇宙射线成因 $^4\text{He}/^3\text{He}$ 值(~ 6)更为接近,因此可认为陨石所含 ^3He 为宇宙射线成因。这里采用 $(^4\text{He}/^3\text{He})_{\text{c}} = 6.2 \pm 0.2$, $(^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne})_{\text{c}} = 0.80 \pm 0.03$, $(^{36}\text{Ar}/^{38}\text{Ar})_{\text{c}} = 0.65$, $(^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar})_{\text{c}} = 0.3$, $(^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne})_{\text{r}} = 10.39 \pm 0.03$, $(^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne})_{\text{r}} = 0.0294 \pm 0.0010$ ^[38,40]来计算 NWA 11586 陨石样品中宇宙射线成因和放射性成因 He、Ne 和 Ar 的同位素浓度及比值,计算过程参见文献[42],结果列于表2。

3 讨论

3.1 宇宙射线成因稀有气体产率

陨石暴露于宇宙高能射线粒子期间,将产生宇宙射线成因核素,根据宇宙射线成因稳定同位素(如稀有气体 ^3He 、 ^{21}Ne 和 ^{38}Ar)浓度(C)和产率(P),可以求得陨石暴露于宇宙射线的时间,即为宇宙暴露年龄(CRE 年龄= C/P),其表征了陨石在宇宙空间中漂浮的时间或母体小行星的溅射事件^[17-19]。NWA 11586 陨石宇宙射线成因稀有气体 $^3\text{He}_{\text{c}}$ 、 $^{21}\text{Ne}_{\text{c}}$ 和 $^{38}\text{Ar}_{\text{c}}$ 的浓度见表2,下面将讨论陨石 $^3\text{He}_{\text{c}}$ 、 $^{21}\text{Ne}_{\text{c}}$ 和 $^{38}\text{Ar}_{\text{c}}$ 的产率 P_3 、 P_{21} 和 P_{38} (表3),以便精确求得陨石的 CRE 年龄 T_3 、 T_{21} 和 T_{38} 。

Eugster 与 Leya 等分别依据 HED 族陨石和普通球粒陨石推导了宇宙射线成因核素产率模型,它是目前最广泛使用的稀有气体产率计算模型^[23,48]。简略说来,Eugster 模型先分析样品化学成分求得样品表征产率(P'),然后根据屏蔽参数($^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}_{\text{c}}$)与

样品埋藏深度的经验关系求得样品实际产率 P ^[23]。与之不同,Leya 模型利用最新的物理学理论及数据库,推导了陨石全岩成分、半径与样品埋藏深度间的函数关系,并根据函数关系计算陨石稀有气体产率^[48],因而其理论上比 Eugster 模型更接近陨石真实暴露环境。

本次工作并未直接测定样品化学组成,虽然在陨石稀有气体产率计算中,一般用陨石矿物或全岩化学成分来代替分析样品的实际化学组成^[49-50],但为了准确求得陨石 CRE 年龄,将根据 Eugster 模型来探讨此过程可能导致的偏差。NWA 11586 陨石主要由低钙辉石、高钙辉石和斜长石组成,且同种矿物化学成分极为均匀,因此测量样品可近似为主要矿物不同混合比例的产物。这里依次采用 NWA 11586 陨石中低钙辉石、高钙辉石和斜长石成分^[31],以及花岗变晶结构 Eucrite 陨石平均全岩成分(表4),来分别计算陨石样品的 $^3\text{He}_{\text{c}}$ 、 $^{21}\text{Ne}_{\text{c}}$ 和 $^{38}\text{Ar}_{\text{c}}$ 产率。

对于 NWA 11586 陨石而言,无论采用何种成分来计算产率,所得 P_3 和 P_{21} 分别近乎相同,但 P_{38} 相差悬殊(图3)。这表明,NWA 11586 陨石 $^3\text{He}_{\text{c}}$ 和 $^{21}\text{Ne}_{\text{c}}$ 产率不受分析样品矿物组成变化的影响。此外, $^{38}\text{Ar}_{\text{c}}$ 主要由钙元素与宇宙射线互相作用产生^[48],因此分析样品中低钙辉石、高钙辉石与斜长石混合比例的不同会严重影响样品的钙含量,进而影响陨石 $^{38}\text{Ar}_{\text{c}}$ 产率计算。另外, T_{21} 年龄比 T_3 和 T_{38} 年

表2 NWA 11586 陨石宇宙射线成因(c)和放射性成因(r)稀有气体以及 CRE 年龄和气体保存年龄

$^3\text{He}_{\text{c}}$		$^4\text{He}_{\text{r}}$		$(^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne})_{\text{c}}$		$^{21}\text{Ne}_{\text{c}}$		$^{38}\text{Ar}_{\text{c}}$		$^{40}\text{Ar}_{\text{r}}$		CRE/Ma		T_4/Ma		T_{40}/Ma	
浓度	err	浓度	err	比值	err	浓度	err	浓度	err	浓度	err	年龄	err	年龄	err	年龄	err
38.6	6.0	2 187	93	1.174	0.017	6.70	0.09	2.92	0.15	712	37	38.5	4.1	1 019	41	3 041	77

注: CRE 年龄讨论见正文; T_4 和 T_{40} 年龄误差包括 U、Th 和 K 的含量误差; 浓度单位 $10^{-8} \text{ cm}^3 \text{ STP/g}$ 。

表3 两种模型所计算的 NWA 11586 陨石稀有气体产率及 CRE 年龄

计算模型	P_3		P_{21}		P_{38}		T_3/Ma		T_{21}/Ma		T_{38}/Ma	
	产率	err	产率	err	产率	err	年龄	err	年龄	err	年龄	err
Eugster(1995)	1.618	0.162	0.182	0.018	0.153	0.031	23.9	4.4	36.8	3.7	19.1	4.0
Ingo(2009)	1.517	0.044	0.167	0.007	0.112	0.007	25.4	4.0	40.1	1.8	26.1	2.1

注: 稀有气体产率单位 $10^{-8} \text{ cm}^3 \text{ STP/(g} \cdot \text{Ma)}$ 。

表4 非角砾岩化-花岗变晶结构-玄武质-Eucrite 陨石(UGTBE)平均全岩成分

Na	Mg	Al	Si	Ca	Fe	Ti	Cr	Mn	S	Ni	K	U	Th
0.26	4.22	6.76	22.77	7.69	14.39	0.42	0.22	0.39	0.23	6.0	245	96	294

注: UGTBE 全岩成分来自文献[1,47]; $w(\text{Ni}, \text{K})/10^{-6}$; $w(\text{U}, \text{Th})/10^{-9}$; 其余 $w_{\text{B}}/\%$ 。

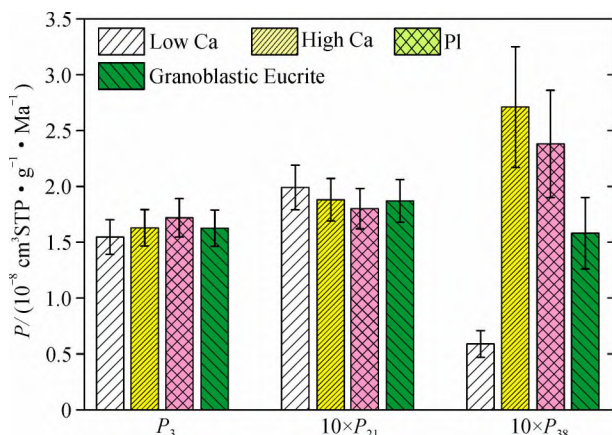


图3 NWA 11586 陨石分析样品稀有气体产率与化学成分关系

Fig. 3 Correlation of chemical compositions and noble gas production rates of analyzed NWA 11586 samples

NWA 11586 陨石矿物化学成分数据来自文献[31]: Low Ca—低钙辉石, High Ca—高钙辉石, Pl—斜长石; Granoblastic Eucrite—花岗变晶结构 Eucrite 陨石平均全岩成分。产率计算采用 Eugster 模型^[23]

龄更可靠^[19, 51]。在综合考虑实验成本与 CRE 年龄精确性后,本文采用花岗变晶结构 Eucrite 陨石平均全岩成分(表4)来计算 NWA 11586 陨石宇宙射线成因稀有气体的产率和 CRE 年龄。

3.2 宇宙暴露年龄与气体保存年龄

本文依据 Eugster 模型稀有气体产率计算公式^[23],采用花岗变晶结构 Eucrite 陨石(UGTBE)平均全岩成分计算了 NWA 11586 陨石³He_c、²¹Ne_c和³⁸Ar_c产率以及相应的 T_3 、 T_{21} 和 T_{38} 年龄(表3)。同时,校正 L 群球粒陨石和未角砾岩化 Eucrite 陨石间化学成分、屏蔽参数(²²Ne/²¹Ne)_c敏感性和密度的不同后^[52-53],利用 Leya 模型宇宙粒子与陨石半径和屏蔽深度的函数关系^[48],同样计算出了陨石样品相应的稀有气体产率和 CRE 年龄(表3)。

比较 NWA 11586 陨石 T_3 、 T_{21} 和 T_{38} 年龄,两种模型计算得到的 T_3 年龄相一致, T_{21} 年龄也基本相同,但 T_{38} 年龄略显差异(图4)。在两种模型中,陨石 T_{21} 年龄均明显大于 T_3 与 T_{38} 年龄(表3、图4)。 T_3 年龄小于 T_{21} 年龄是由于³He 封闭温度较低(<100 °C),易受太阳辐射加热或撞击去气而丢失^[43, 51]。另一方面,地球风化作用使得陨石中³⁸Ar_c比²¹Ne_c更易逃逸,从而引起 T_{38} 年龄偏低^[54-55]。NWA 11586 陨石属于沙漠陨石,其 T_{38} 年龄明显小于 T_{21} 年龄可能是由于地球风化引起的。综合考虑,本文采用 Eugster 模型与 Leya 模型得到的 T_{21} 年龄的平均值作

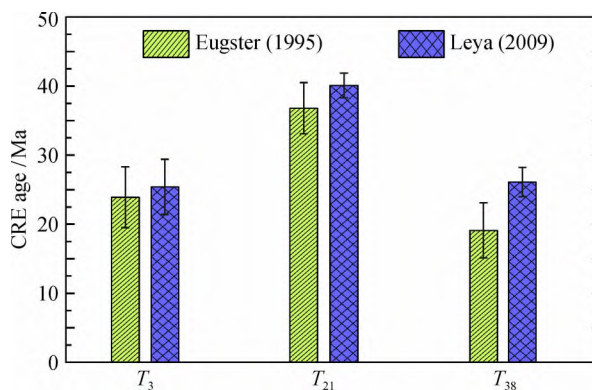


图4 两种模型所得 NWA 11586 陨石 CRE 年龄对比

Fig. 4 Comparison of CRE ages of NWA 11586 meteorite based on Eugster and Leya models

为样品最终 CRE 年龄,也即 NWA 11586 陨石的 CRE 年龄为 38.5 ± 4.1 Ma(表2)。

陨石形成并冷却至⁴He 和⁴⁰Ar 封闭温度后,由 U、Th 衰变产生的⁴He_r,以及由⁴⁰K 衰变产生的⁴⁰Ar_r开始累积保存,由此得到的放射性衰变年龄为 U、Th-⁴He(T_4)和⁴⁰K-⁴⁰Ar(T_{40})气体保存年龄^[25-27]。对于 NWA 11586 陨石,采用非角砾岩化-花岗变晶结构-玄武质-Eucrite 陨石平均 U、Th 和 K 浓度(表4)来计算陨石的 T_4 和 T_{40} 气体保存年龄,其分别为 1019 ± 41 Ma 和 3041 ± 77 Ma(表2)。

3.3 陨石后期演化历史

目前,普遍认为 HED 族陨石 CRE 年龄存在 17~23 Ma 与 35~41 Ma 两个群聚^[2-3],其指示了母体小行星 17~23 Ma 和 35~41 Ma 发生的 2 次主要撞击事件^[19],它们共溅射出了约 1/3 以上的 HED 族陨石^[3, 18-19]。NWA 11586 陨石 CRE 年龄约为 39 Ma,恰好与 HED 族陨石母体小行星 35~41 Ma 的主要撞击溅射事件年龄相一致(图5),表明其极有可能是~40 Ma 前从灶神星或与灶神星具动力学成因联系的 V 型小行星溅离,随后在太空中漂浮并最终被地球重力场捕获。

对于陨石气体保存年龄,当陨石经受后期热事件(如强撞击事件或热变质作用)时,若温度超过⁴He 和⁴⁰Ar 的封闭温度,则陨石 U、Th-⁴He 及⁴⁰K-⁴⁰Ar 放射性衰变体系重置或部分重置,因此气体保存年龄反映了陨石后期热事件历史^[25-27]。另外,⁴He 具有极低的封闭温度,非常容易受到热事件影响而扩散丢失,因此⁴⁰K-⁴⁰Ar 年龄更适合用于探究陨石及其母体后期热历史^[27]。NWA 11586 陨石 T_4 年龄(~1.0 Ga)显著小于陨石的 T_{40} 年龄

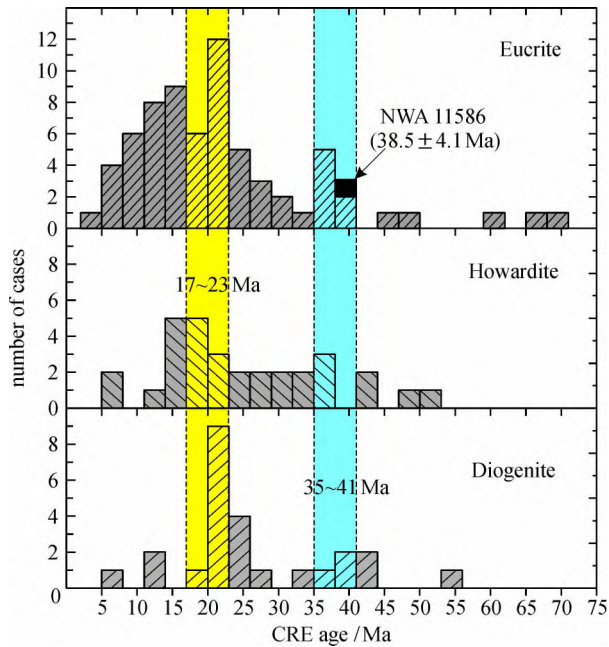


图5 NWA 11586 陨石与 HED 族陨石 CRE 年龄对比
Fig. 5 Comparison of CRE ages of NWA 11586 and HED meteorites
HED 族陨石 CRE 年龄数据来自文献 [18-19, 23-24]

(~ 3.0 Ga), 这是由于具有较低封闭温度的 ^4He 在受到热事件扰动时比 ^{40}Ar 更容易扩散丢失引起的。此外, NWA 11586 陨石 T_{40} 气体保存年龄明显小于 Eucrite 陨石约 4.55 Ga 的结晶年龄^[56-57], 这表明该陨石 $^{40}\text{K}-^{40}\text{Ar}$ 体系已受到热事件影响而发生了重置。

HED 族陨石来自灶神星, 前人研究认为灶神星形成后主要发生了 4 次大的撞击事件, 分别为 ~ 4.48 Ga 的单次大型撞击事件^[27]、 $3.9 \sim 4.1$ Ga 的内太阳系重轰击事件^[28, 58-59]、 3.7 ± 0.1 Ga 的 Veneneia 撞击坑(灶神星第二大撞击坑)成坑事件和 3.5 ± 0.1 Ga 的 Rheasilvia 撞击坑(灶神星最大的撞击坑)成坑事件^[60]。与此同时, Ar-Ar 年代学研究发现 HED 族陨石在约 $3.3 \sim 4.1$ Ga 期间经历了强烈的撞击事件影响, 一些强烈撞击甚至可以使得未角砾岩化的 HED 族陨石 Ar-Ar 体系发生重置^[28]。NWA 11586 陨石 K-Ar 年龄约为 3.0 Ga, 显著小于上述撞击事件或时期。因此, 未角砾岩化且高度热变质的 NWA 11586 陨石, 很有可能是在灶神星较晚期的撞击坑形成期间, 由于热传导或撞击溅射物埋藏而受到了强烈的热影响^[61], 从而导致其 K-Ar 体系重置。

4 结 论

(1) 非角砾岩化-花岗变晶结构-玄武质-Eu-

crite 陨石 NWA 11586 的 He、Ne 和 Ar 气体主要由宇宙射线成因和放射性衰变成因组成, 同位素比值表明其不含太阳风和地球大气等捕获组分气体。

(2) NWA 11586 陨石 CRE 年龄为 38.5 ± 4.1 Ma, 恰好与 HED 族陨石母体小行星 35~41 Ma 的主要撞击事件年龄相一致, 表明其极有可能是 ~ 40 Ma 前从灶神星或与灶神星具动力学成因联系的 V 型小行星溅离, 随后在太空中漂浮并最终被地球重力场捕获。

(3) NWA 11586 陨石 T_4 和 T_{40} 气体保存年龄分别为 1019 ± 41 Ma 和 3041 ± 77 Ma。陨石 T_4 年龄显著小于 T_{40} 年龄是由于具有较低封闭温度的 ^4He 在受到热事件扰动时比 ^{40}Ar 更容易扩散丢失引起的。此外, NWA 11586 陨石 K-Ar 年龄不仅小于 Eucrite 陨石约 4.55 Ga 的结晶年龄, 也比灶神星已确定的大型撞击事件或时期年轻。因此, NWA 11586 陨石很有可能是在灶神星较晚期的撞击坑形成期间, 由于热传导或撞击溅射物埋藏而受到了强烈的热变质作用影响, 从而导致其 K-Ar 体系重置。

致谢: 广东省惠州市彩源陨石科技有限公司缪秉安先生提供了陨石样品, 在此表示衷心的感谢!

参考文献:

- [1] Mittlefehldt D W. Asteroid (4) Vesta: I. The howardite-eucrite-diogenite (HED) clan of meteorites [J]. *Chemie der Erde*, 2015, 75: 155-183.
- [2] Cartwright J A, Ott U, Mittlefehldt D W, et al. The quest for regolithic howardites. Part 1: Two trends uncovered using noble gases [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2013, 105: 395-421.
- [3] Cartwright J A, Ott U, Mittlefehldt D W. The quest for regolithic howardites. Part 2: Surface origins highlighted by noble gases [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2014, 140: 488-508.
- [4] Warren P H, Kallemeyn G W, Huber H, et al. Siderophile and other geochemical constraints on mixing relationships among HED-meteoritic breccias [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2009, 73: 5918-5943.
- [5] McCord T B, Adams J B, Johnson T V. Asteroid Vesta: spectral reflectivity and compositional implications [J]. *Science*, 1970, 168: 1445-1447.
- [6] Binzel R P, Xu S. Chips off of Asteroid 4 Vesta: evidence for the parent body of basaltic achondrite meteorites [J]. *Science*, 1993, 260: 186-191.
- [7] Migliorini F, Morbidelli A, Zappalà V, et al. Vesta fragments from v_6 and 3:1 resonances: implications for V-type near-Earth asteroids and howardite, eucrite and diogenite meteorites [J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 1997, 32: 903-916.
- [8] Buratti B J, Dalba P A, Hicks M D, et al. Vesta, vestoids, and the HED meteorites: interconnections and differences

- based on *Dawn* Framing Camera observations [J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2013, 118: 1991–2003.
- [9] Giebner T, Jaumann R, Schröder S. Reevaluating surface composition of asteroid (4) Vesta by comparing HED spectral data with dawn framing camera(FC) observations[C]//79th Annual Meeting of the Meteoritical Society(2016), 2016: 6372.
- [10] McSween H Y, Binzel R P, De Sanctis M C, et al. Dawn; the Vesta-HED connection; and the geologic context for eucrites, diogenites, and howardites [J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2013, 48 (11): 2090–2104.
- [11] Reddy V, Sanchez J A, Nathues A, et al. Photometric, spectral phase and temperature effects on 4 Vesta and HED meteorites: implications for the Dawn mission [J]. *Icarus*, 2012, 217: 153–168.
- [12] McCoy T J, Beck A W, Prettyman T H, et al. Asteroid (4) Vesta II: exploring a geologically and geochemically complex world with the Dawn Mission [J]. *Chemie der Erde*, 2015, 75: 273–285.
- [13] Thangjam G, Nathues A, Mengel K, et al. Three-dimensional spectral analysis of compositional heterogeneity at Arruntia crater on (4) Vesta using Dawn FC [J]. *Icarus*, 2016, 267: 344–363.
- [14] Zhang C T, Miao B K, He H Y. Oxygen isotopes in HED meteorites and their constraints on parent asteroids [J]. *Planetary and Space Science*, 2019, 168: 83–94.
- [15] Ozima M, Podosek F A. Noble gas geochemistry [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2002.
- [16] Zhang C T, Miao B K, He H Y, et al. A petrologic and noble gas isotopic study of new basaltic eucrite Grove Mountains 13001 from Antarctica [J]. *Minerals*, 2021, 11: 279.
- [17] Wieler R. Cosmic-ray-produced noble gases in meteorites [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2002, 47: 125–170.
- [18] Eugster O, Herzog G F, Marti K, et al. Irradiation records, cosmic-ray exposure ages, and transfer times of meteorites [M] //Lauretta D S, McSween H Y. *Meteorites and the Early Solar System II*. Tucson: University of Arizona Press, 2006: 829–851.
- [19] Herzog G F, Caffee M W. 1.13 Cosmic-ray exposure ages of meteorites [J]. *Treatise on Geochemistry*, 2014, 1: 419–453.
- [20] Eugster O. Cosmic-ray exposure ages of meteorites and lunar rocks and their significance [J]. *Chemie der Erde*, 2003, 63: 3–30.
- [21] Welten K C, Lindner L, Alderliesten C, et al. Cosmic-ray exposure ages of diogenites and prospects for ^{10}Be as shielding parameter in HED-achondrites [J]. *Meteoritics*, 1991, 26: 408.
- [22] Welten K C, Lindner L, van der Borg K, et al. Cosmogenic ^{10}Be and noble gases in diogenites [J]. *Meteoritics*, 1993, 28: 459.
- [23] Eugster O, Michel T. Common asteroid break-up events of eucrites, diogenites, and howardites and cosmic-ray production rates for noble gases in achondrites [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59 (1): 177–199.
- [24] Welten K C, Lindner L, van der Borg K, et al. Cosmic-ray exposure ages of diogenites and the recent collisional history of the howardite, eucrite and diogenite parent body/bodies [J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 1997, 32: 891–902.
- [25] Farley K A. (U–Th)/He dating: techniques, calibrations, and applications [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2002, 47: 819–844.
- [26] Kelley S. K–Ar and Ar–Ar dating [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2002, 47: 785–818.
- [27] Bogard D D. K–Ar ages of meteorites: clues to parent-body thermal histories [J]. *Chemie der Erde*, 2011, 71: 207–226.
- [28] Marchi S, Bottke W F, Cohen B A, et al. A new interpretation of ^{40}Ar – ^{39}Ar ages of eucrites and implications for Vesta's collisional history [C]//43rd Lunar and Planetary Science Conference(2012), 2012: 2167.
- [29] Mercer C M, Young K E, Weirich J R, et al. Refining lunar impact chronology through high spatial resolution $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of impact melts [J]. *Science Advances*, 2015, 1: e1400050.
- [30] Swindle T D. Noble gases in the moon and meteorites: radiogenic components and early volatile chronologies [M]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2002, 47: 101–124.
- [31] 张川统. HED族陨石母体探讨: 来自岩相学、地球化学与年代学的制约 [D]. 桂林: 桂林理工大学, 2019.
- [32] He H Y, Zhu R X, Saxton J. Noble gas isotopes in corundum and peridotite xenoliths from the eastern North China Craton: implication for comprehensive refertilization of lithospheric mantle [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2011, 189: 185–191.
- [33] Ranjith P M, He H Y, Miao B K, et al. Petrographic shock indicators and noble gas signatures in a H and an L chondrite from Antarctica [J]. *Planetary and Space Science*, 2017, 146: 20–29.
- [34] Su F, Xiao Y, He H Y, et al. He and Ar isotope geochemistry of pyroxene megacrysts and mantle xenoliths in Cenozoic basalt from the Changle-Linqu area in western Shandong [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2014, 59 (4): 396–411.
- [35] 王英, 贺怀宇, 张川统, 等. 微量陨石激光熔样稀有气体测定方法 [J]. *岩石学报*, 2018, 34 (11): 3455–3466.
- [36] Lee J Y, Marti K, Severinghaus J P, et al. A redetermination of the isotopic abundances of atmospheric Ar [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2006, 70: 4507–4512.
- [37] Matsuda J, Matsumoto T, Sumino H, et al. The $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratio of the new internal He Standard of Japan (HESJ) [J]. *Geochemical Journal*, 2002, 36: 191–195.
- [38] Eugster O, Lorenzetti S, Krähenbühl U, et al. Comparison of cosmic-ray exposure ages and trapped noble gases in chondrule and matrix samples of ordinary, enstatite, and carbonaceous chondrites [J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2007, 42 (7/8): 1351–1371.
- [39] Swindle T D, Kring D A, Weirich J R. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages of impacts involving ordinary chondrite meteorites [M] //Jourdan F, Mark D F, Verati C. *Advances in $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Dating: from Archaeology to Planetary Sciences*. Geological Society, London, Special Publications, 2014: 378.
- [40] Ott U. Noble gases in meteorites-trapped components [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2002, 47: 71–100.
- [41] Heber V S, Wieler R, Baur H, et al. Noble gas composition of the solar wind as collected by the Genesis mission [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2009, 73: 7414–7432.
- [42] 张川统. 微质量地外样品稀有气体测定流程及新发现 HED族陨石 GRV13001 稀有气体特征 [D]. 桂林: 桂林理工大学, 2016.
- [43] Eugster O, Michel T, Niedermann S, et al. The record of

- cosmogenic, radiogenic, fissionogenic, and trapped noble gases in recently recovered Chinese and other chondrites [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1993, 57: 1115–1142.
- [44] Göbel R, Ott U, Begemann F. On trapped noble gases in ureilites [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1978, 83 (B2): 855–867.
- [45] Geiss J, Bühler F, Cerutti H, et al. The Apollo SWC experiment: results, conclusions, consequences [J]. *Space Science Reviews*, 2004, 110: 307–335.
- [46] Wieler R. Noble gases in the solar system [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2002, 47: 21–70.
- [47] Mayne R G, McSween Jr H Y, McCoy T J, et al. Petrology of the unbrecciated eucrites [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2009, 73: 794–819.
- [48] Leya I, Masarik J. Cosmogenic nuclides in stony meteorites revisited [J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2009, 44 (7): 1061–1086.
- [49] Bhandari N, Murty S V S, Suthar K M, et al. The orbit and exposure history of the Piplia Kalan eucrite [J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 1998, 33: 455–461.
- [50] Shukolyukov Y A, Nazarov M A, Korochantseva E V. Cosmic ray exposure age and time of formation of a new meteorite, Dhofar 007 achondrite from Oman: a rock fragment from the asteroid Vesta [J]. *Petrology*, 2007, 15 (1): 1–18.
- [51] Patzer A, Schultz L, Franke L. New noble gas data of primitive and differentiated achondrites including Northwest Africa 011 and Tafassasset [J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2003, 38 (10): 1485–1497.
- [52] Masarik J, Reedy R C. Effects of bulk composition on nuclide production processes in meteorites [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1994, 58 (23): 5307–5317.
- [53] Welten K C, Meier M M M, Caffee M W, et al. Cosmic-ray exposure age and preatmospheric size of the Bunburra Rock-hole achondrite [J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2012, 47 (2): 186–196.
- [54] Scherer P, Herrmann S, Schultz L. Noble gases in twenty-one Saharan LL-chondrites: exposure ages and possible pairings [J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 1998, 33: 259–265.
- [55] Welten K C, Nishiizumi K, Caffee M W. Cosmogenic radionuclides in enstatite chondrites with low $^{38}\text{Ar}/^{21}\text{Ne}$ exposure age ratios [J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2002, 37: A149.
- [56] McSween H Y, De Sanctis M C, Prettyman T H. Unique, antique Vesta [J]. *Elements*, 2014, 10: 39–44.
- [57] Roszjar J, Whitehouse M J, Srinivasan G, et al. Prolonged magmatism on 4 Vesta inferred from Hf–W analyses of eucrite zircon [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2016, 452: 216–226.
- [58] Bottke W F, Levison H F, Nesvorný D, et al. Can planetesimals left over from terrestrial planet formation produce the lunar Late Heavy Bombardment? [J]. *Icarus*, 2007, 190: 203–223.
- [59] Miyahara M, Ohtani E, Yamaguchi A, et al. Discovery of coesite and stishovite in eucrite [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111 (30): 10939–10942.
- [60] Schmedemann N, Kneissl T, Ivanov B A, et al. The cratering record, chronology and surface ages of (4) Vesta in comparison to smaller asteroids and the ages of HED meteorites [J]. *Planetary and Space Science*, 2014, 103: 104–130.
- [61] 陈宏毅, 周剑凯, 谢兰芳, 等. 3 块钙长辉长无球粒陨石中辉石的热变质特征及其成因分析 [J]. *桂林理工大学学报*, 2018, 38 (4): 674–679.

Noble gas and its chronology of the eucrite NWA 11586

ZHANG Chuan-tong^{1,2}, MIAO Bing-kui^{1b,1c}, HE Huai-yu³, SU Fei³, XE Qing-lin^{1a}

(1. a. College of Environmental Science and Engineering; b. Guangxi Key Laboratory of Hidden Metallic Ore Deposits Exploration; c. Institution of Meteorites and Planetary Materials Research, Guilin University of Technology, Guilin 541006, China; 2. Key Laboratory of Lunar and Deep Space Exploration, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. Key Laboratory of Earth and Planetary Physics, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: Howardite-Eucrite-Diogenite (HED) clan meteorites come from Vesta, and are the important window for studying the formation and evolution of the solar system and terrestrial planets. The noble gases are the key means to understand the impact and thermal history of HED meteorites and Vesta. This research work presents a detail study of the noble gas isotopes, cosmic-ray exposure (CRE) age and nominal gas retention age for the unbrecciated eucrite NWA 11586. The noble gas isotopes indicate that the He, Ne and Ar of NWA 11586 are mainly cosmogenic and radiogenic. The CRE age of this meteorite (38.5 ± 4.1 Ma) is consistent with the ages of major impact events ($35\text{--}41$ Ma) of HEDs, indicating that it may be launched from Vesta or V-type asteroids at ~ 40 Ma. The U, Th– ^4He (T_4) and ^{40}K – ^{40}Ar (T_{40}) gas retention ages of NWA 11586 are $1\,019 \pm 41$ Ma and $3\,041 \pm 77$ Ma respectively, the reset may be caused by late thermal events.

Key words: HED meteorites; eucrite; noble gas; CRE age; nominal gas retention age

(编辑 王蓉嵘)