



中国科学院大学  
University of Chinese Academy of Sciences

## 研究生学位论文中期报告

报告题目 火星陨石 NWA13106 岩石成因研究

学生姓名 陈淳怡 学号 202328007313010

指导教师 徐于晨 职称 副研究员

学位类别 理学硕士

学科专业 行星科学

研究方向 行星化学

研究所（院系） 国家空间科学中心

填表日期 2025 年 10 月

中国科学院大学

## 填 表 说 明

1. 本表内容须真实、完整、准确。
2. “学位类别”名称：学术型学位填写哲学博士、教育学博士、理学博士、工学博士、农学博士、医学博士、管理学博士，哲学硕士、经济学硕士、法学硕士、教育学硕士、文学硕士、理学硕士、工学硕士、农学硕士、医学硕士、管理学硕士等；专业学位填写工程博士、工程硕士、工商管理硕士(MBA)、应用统计硕士、翻译硕士、应用心理硕士、农业推广硕士、工程管理硕士、药学硕士等。
3. “学科专业”名称：学术型学位填写“二级学科”全称；专业学位填写“培养领域”全称。

## 目 录

第 1 章 学位论文进展情况, 存在的问题, 已取得阶段性成果 .....	1
1.1 研究背景及意义 .....	1
1.2 国内外本学科领域的发展现状与趋势 .....	3
1.2.1 火星陨石研究现状及趋势 .....	3
1.2.2 辉玻无球粒陨石研究现状及趋势 .....	4
1.3 研究目标与内容 .....	6
1.3.1 研究内容 .....	6
1.3.2 研究目标 .....	7
1.4 完成情况 .....	8
1.4.1 岩相学分析 .....	8
1.4.2 主成分化学分析 .....	11
1.4.3 铁钛氧化物计温度-氧逸度结果 .....	13
1.4.4 斜锆石 U-Pb 定年结果 .....	13
1.4.5 幔源确定 .....	14
1.4.6 NWA 13106 结晶演化过程 .....	15
1.5 创新点 .....	15
1.6 存在的问题 .....	16
1.7 已取得的阶段性成果 .....	17
第 2 章 下一步工作计划和内容, 预计答辩时间 .....	18
2.1 下一步工作计划 .....	18
2.1.1 具体工作内容 .....	18
2.2 进度安排 .....	19
第 3 章 已取得研究成果列表 .....	21
3.1 已发表、待发表学术论文、专利等 .....	21
参考文献 .....	22

图目录

图 1-1 不同类别火星陨石及时间线 (Udry et al, 2020) .....	2
图 1-2 不同类别辉玻无球粒陨石结晶演化历史 (Udry et al, 2020) ....	3
图 1-3 基于陨石研究和火星车原位分析的火星火成岩全碱-二氧化硅 (TAS) (Udry et al, 2025) .....	4
图 1-4 火星不同地幔源区 (Wu et al, 2021) .....	5
图 1-5 NWA13106 主要矿物及次要矿物 .....	9
图 1-6 NWA13106 主要结构特征 .....	10
图 1-7 冲击变质特征 .....	10
图 1-8 辉石化学成分分析 .....	11
图 1-9 长石化学成分分析 .....	11
图 1-10 长石 An 值 .....	12
图 1-11 铁钛氧化物化学成分分析 .....	13
图 1-12 斜锆石 U-Pb 定年 Tera-Wassenberg 谐和曲线图 .....	14
图 1-13 NWA 13106 全岩稀土模式图 .....	15

表目录

表 1-1 研究工作量 .....	8
表 2-1 进度安排 .....	19

## 第1章 学位论文进展情况, 存在的问题, 已取得阶段性成果

### 1.1 研究背景及意义

火星是除地球之外唯一能够获取实物样本（以陨石形式存在）的类地行星，火星陨石是研究火星物质组成与演化历史的唯一直接样品来源，对揭示火星的内部结构、岩浆作用及表面过程具有重要科学意义。目前，已有超过 370 块陨石被正式鉴定为火星陨石，总重量约 329 kg，归属于 246 个配对组，为开展火星地质与地球化学研究提供了重要的样品基础。

尽管火星陨石在揭示火星内部岩浆作用、幔源演化及表面过程方面具有不可替代的重要价值，但它们在离开母体后均经历了不同程度的次生改造。一部分次生作用与火星本身相关，包括低温蚀变、火星表面环境中硫的非质量依赖性分馏，以及广泛的冲击变质；另一部分则源于陨落地球后的风化过程。这些改造会在一定程度上干扰原生信息的解析，但同时也提供了理解火星表层环境和撞击历史的重要证据。

通过对火星陨石开展岩相学、矿物学及地球化学研究，可以重建其母岩的物质组成、岩浆作用、挥发分行为、表面水活动以及冲击事件等关键过程。这些认识不仅为理解火星地壳与幔源的结构和演化提供了重要约束，也为未来火星样品返回任务的科学目标设定奠定了基础。

根据矿物组成、结构与成因的差异，火星陨石通常可划分为三类典型的无球粒岩：辉玻无球粒陨石 (Shergottites)、辉橄无球粒陨石 (Nakhlites) 与纯橄无球粒陨石 (Chassignites)。此外，还包括两类在成因上独立于 SNC 系列的火星岩石：正交辉石岩 ALH 84001 与多组分角砾岩 NWA 7034 及其配对陨石。

现有火星陨石样品在时代分布上明显偏向亚马逊纪，其中辉玻无球粒陨石 (shergottites) 占绝大多数，其结晶年龄以中—晚亚马逊纪为主，整体集中在 <716 Ma 的范围内，记录了火星晚期持续的幔源部分熔融与岩浆活动。辉橄无球粒陨石 (nakhlites) 与纯橄无球粒陨石 (chassignites) 的结晶年龄则高度一致，均约为 1.3 Ga，对应早亚马逊纪的一次重要岩浆事件，并常被认为与火星浅部/表层水-岩作用过程有关(Udry *et al*, 2020; Udry *et al*, 2025; Barrat *et al*, 2002)。相比之下，样品库中仅有少数诺亚纪岩性：正交辉石岩 ALH 84001 的年龄约为 4.1 Ga，而 NWA 7034 系列角砾岩中所含火成岩碎屑最老可达 4.5 Ga，代表了火星早期原始地壳物质的保存与演化(Udry *et al*, 2020) (图 1-1)。

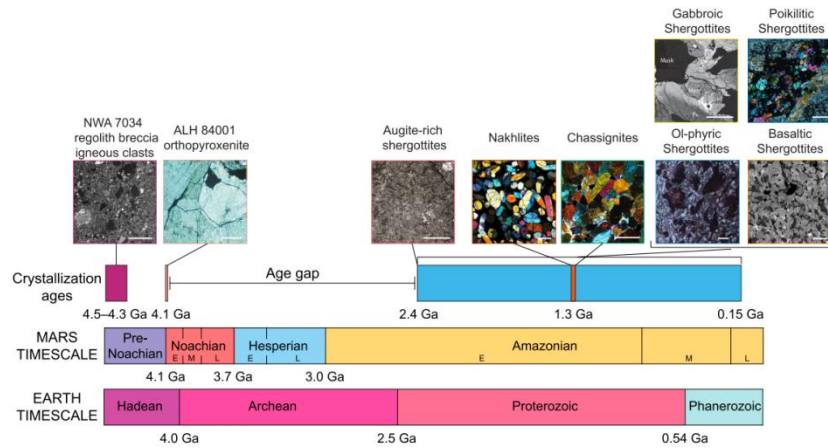


图 1-1 不同类别火星陨石及时间线 (Udry et al, 2020)

Figure 1-1 Martian Meteorite Types and Temporal (Time) Evolution(Udry et al, 2020)

辉玻无球粒陨石是火星陨石中最常见的一种类型, 约占火星陨石总数的 89%, 是火星陨石中研究最为广泛且数量最多的类型(Udry *et al*, 2020)。辉玻无球粒陨石源自于火星地幔深处, 由深部物质发生部分熔融后上升且侵入至火星地壳, 通过多种岩浆作用形成, 记录了火星地幔的地球化学特征(Wu *et al*, 2021)。

根据岩石结构和矿物组成特征, 辉玻无球粒陨石可以进一步划分为: 橄榄石斑晶质辉玻无球粒陨石 (Olivine-phyric Shergottites)、嵌晶质辉玻无球粒陨石 (Poikilitic Shergottites)、玄武质辉玻无球粒陨石 (Basaltic shergottites) 和辉长质无球粒陨石 (Gabbroic Shergottite) 以及橄榄石辉长岩质 (Olivine-gabbroic shergottites) (McSween *et al*, 1998; Goodrich, 2002; Papike *et al*, 2009; Benaroya *et al*, 2024)。

橄榄石斑晶质辉玻无球粒陨石主要由橄榄石、辉石和长石组成, 其中部分样品被认为最能代表源自火星地幔的原生岩浆(Goodrich, 2002)。嵌晶结构辉玻无球粒陨石是一种矿物包裹型的辉玻无球粒陨石, 较大矿物晶体 (如辉石) 内包裹有较小的矿物晶体 (如斜长石、橄榄石等), 通常经历了较复杂的结晶过程。玄武质辉玻无球粒陨石主要由辉石与斜长石组成, 橄榄石含量较少(McSween *et al*, 1998)。通常, 该类陨石中辉石的 Mg#值较高, 指示其可能来源于火星地幔中较为富镁的区域或者更深处区域。辉长质无球粒陨石主要由半自形且粒径较大的辉石和长石组成。玄武质和辉长质无球粒陨石均来自于相对演化的岩浆结晶而形成的(Papike *et al*, 2009)。橄榄石辉长岩质辉玻无球粒陨石由粗粒辉石与一定量橄榄石组成, 部分样品具嵌晶结构, 矿物组合和结构特征介于嵌晶型与辉长质 shergottite 之间(Benaroya *et al*, 2024) (图 1-2)。

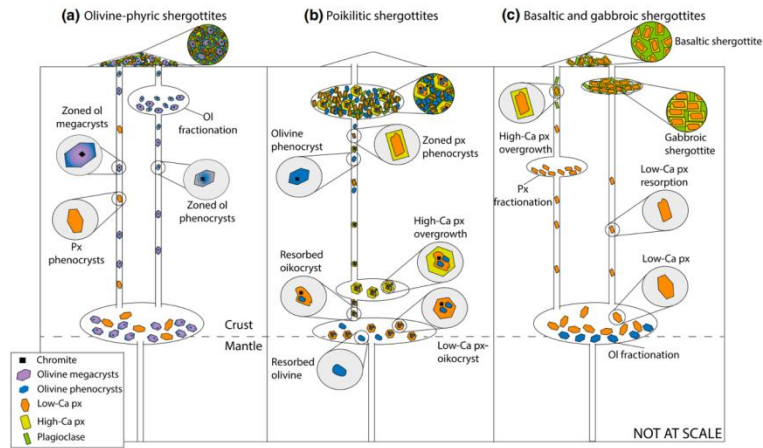


图 1-2 不同类别辉玻无球粒陨石结晶演化历史 (Udry et al, 2020)

Figure 1-2 Crystallization Histories Across Different Shergottite Groups (Udry et al, 2020)

玄武质和橄榄石斑晶质辉玻无球粒陨石被认为是喷出岩(Liu *et al*, 2013; Liu *et al*, 2016; Rahib *et al*, 2019), 而斑状结构和辉长质辉玻无球粒陨石则被认为具有侵入岩起源(Rahib *et al*, 2019; Udry *et al*, 2020)。这些火成岩结晶所来源的不同岩浆源在其地球化学特征中得以体现。

## 1.2 国内外本学科领域的发展现状与趋势

### 1.2.1 火星陨石研究现状及趋势

近年来, 火星陨石研究在揭示火星内部结构、幔源组成、岩浆作用与表面演化方面取得了系统性进展, 并逐步形成了火星地幔异质性、岩浆活动时间序列及氧化还原演化框架(Udry *et al*, 2025)。然而, 现有样品库的固有局限仍显著制约对火星全球地球化学与地质演化的深入认识, 主要体现在以下几个方面。

#### (1) 缺乏可靠的原位地质背景约束

火星陨石虽能约束抛射时间, 但其火星原产地难以确定; 即便提出潜在源坑, 母岩原位地质背景仍无法重建, 进而限制了对其侵位方式、形成环境和区域地质演化的解析;

#### (2) 年代学上存在显著空窗

现有火星陨石的年代分布高度不均一: 4.1–2.4 Ga 与 2.4–1.3 Ga 两个关键阶段几乎无样品记录, 限制了对火星早—中期岩浆活动、幔源演化与地壳形成的认识。除 ALH 84001 (~4.09 Ga) 和 NWA 7034/7533 (碎屑最老 4.4–4.5 Ga) 外, 2.4 Ga 之前基本缺乏陨石; 中期仅少数样品 (如 NWA 7635、8159) 落在 ~2.4 Ga, 其余多为 <1.3 Ga 的年轻辉玻无球粒陨石。

#### (3) 陨石整体成分与火星表面岩石不匹配

现有火星陨石的整体化学组成以低  $\text{SiO}_2$ 、低碱、高  $\text{MgO}$  和高  $\text{CaO}$  的基

性—超基性镁铁质岩浆产物为主, 难以对应火星表面探测到的更复杂岩性。火星车与轨道数据在 Gusev、Gale、Jezero 等地识别出富硅富碱、强分异的安山岩—英安岩、高硅熔岩及多种沉积岩, 表明地表记录的岩浆演化与水—岩/沉积过程远超陨石样品所代表的范围, 因此陨石集合不能反映火星地壳的整体组成 (图 1-3)。

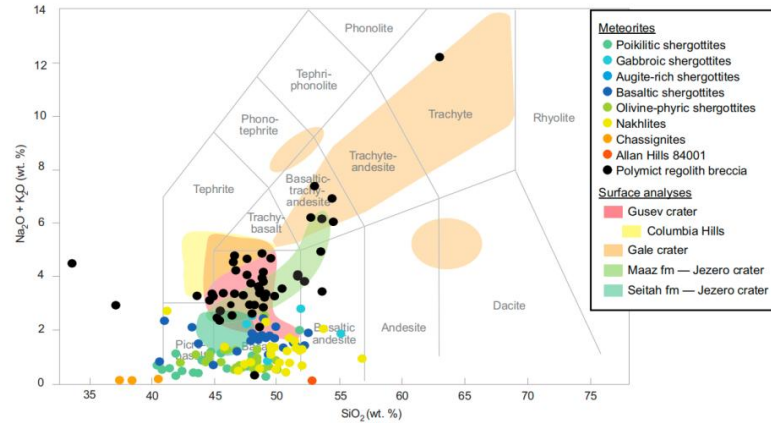


图 1-3 基于陨石研究和火星车原位分析的火星火成岩全碱—二氧化硅 (TAS) (Udry *et al*, 2025)

Figure 1-3 Total Alkali-Silica (TAS) diagram for Martian igneous rocks based on meteorite studies and in-situ rover analyses (Udry *et al*, 2025)

#### (4) 岩性多样性不足

除 NWA 7034 系列中少量角砾岩碎屑外, 现有火星陨石的岩性几乎全部局限于基性—超基性镁铁质火成岩, 整体岩性谱系相对单一; 而火星车与轨道探测在有限着陆区已识别出碱性岩、演化程度较高的火成岩及多类沉积岩, 表明火星地表岩性组合及其所反映的地质过程显著超出现有陨石样品的代表范围。

#### 1.2.2 辉玻无球粒陨石研究现状及趋势

辉玻无球粒陨石 (Shergottites) 是目前已知数量最多的火星陨石类型, 也是研究火星内部结构与演化过程的关键样品。大量岩石学、矿物学及同位素研究表明, 这类陨石来源于火星地幔中成分各异的源储库, 并经历了不同的岩浆作用过程 (Papike *et al*, 2009)。相关研究不仅揭示了火星地幔的复杂组成特征, 也为理解火星岩浆活动的时间序列及化学演化提供了重要约束。

研究主要集中在四个方面: (1) 地幔源区异质性——通过微量元素与同位素特征识别富集型、过渡型和亏损型等不同幔源储库, 揭示火星深部的长期化学分异; (2) 岩浆作用与演化过程——通过岩相学与矿物化学重建岩浆的部分熔融、分异与侵位历史; (3) 氧逸度变化——利用矿物氧化还原敏感元素约束火星幔源与岩浆体系的  $fO_2$  范围及其控制机制; (4) 年代学约束——多同位素体系



(Sm-Nd、Lu-Hf、Rb-Sr、U-Pb、Re-Os) 定年建立了以 shergottites 为主的结晶—喷发年龄框架, 显示火星晚期岩浆活动主要集中于亚马逊纪, 年龄跨度约 2.4–0.15 Ga (主体 <716 Ma), 并为幔源端元的形成与演化提供时间约束。综合这些研究, 辉玻无球粒陨石为理解火星晚期的幔源组成、岩浆成因与内部氧化还原状态提供了最直接且最重要的证据。

火星陨石的微量元素与同位素研究揭示, 火星地幔至少可分为五个不同的源区(Agee et al, 2004), 其中辉玻无球粒陨石主要来源于三类: 富集型、过渡型与亏损型地幔储库(图 1-4)。富集型样品通常表现为较高的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 、 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$  和  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  比值, 而亏损型样品则具有相对较高的  $\epsilon_{\text{Nd}}$  与  $\epsilon_{\text{Hf}}$  值(Mcsween Jr et al, 1996; Barrat et al, 2002; Chowdhury et al, 2023)。部分研究进一步提出, 火星地幔可能存在更多的过渡型或次级源区, 这反映了火星地幔在化学组成和熔融历史上的复杂性与多阶段性。然而, 也有一些观点认为, 火星地幔存在更多的过渡型及次级源区, 指出辉玻无球粒陨石可能来源于更多的源区。对辉玻无球粒陨石源区数量的不同解释, 反映了火星地幔的复杂性和多样性。而源区数量的解释差异并不意味着研究的矛盾, 而是基于火星地幔演化的多样性和研究方法的差异, 指示火星地幔并非均匀的, 而且也不是逐步演化的结果(Wu et al, 2021)。

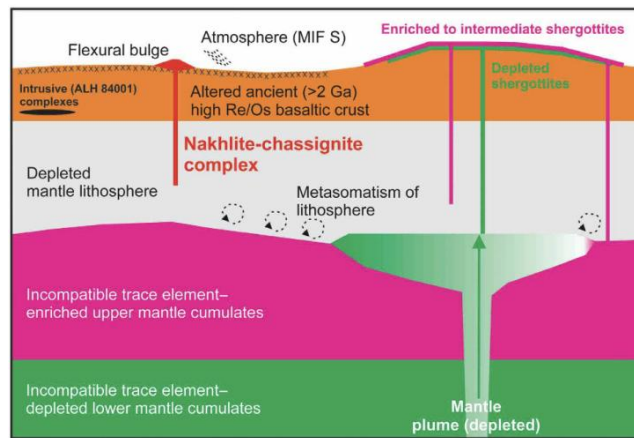


图 1-4 火星不同地幔源区 (Wu et al, 2021)

Figure 1-4 Different mantle sources on Mars(Wu et al, 2021)

辉玻无球粒陨石在定年方面的研究进展极为关键, 尤其在认识火星地幔的演化、火星火山活动及其形成环境方面发挥了重要作用。通过 Rb-Sr、Sm-Nd、Lu-Hf、U-Pb 等同位素体系定年, 发现大多数火星陨石具有较年轻的结晶年龄。此外, 研究发现不同来源辉玻无球粒陨石的结晶年龄与源区性质可能存在相关性, 亏损型辉玻无球粒陨石的结晶年龄相对较老, 且范围较广, 约为 327 Ma 到 2.4 Ga。而富集型和过渡型的较年轻, 富集型辉玻无球粒陨石的结晶年龄大部分位于 165 到 225 Ma 左右, 过渡型辉玻无球粒陨石的结晶年龄约为 150 到 346 Ma。富集型

和亏损型辉玻无球粒陨石结晶年龄的差异, 反映了火星地幔的多阶段演化以及岩浆活动的多期性(Ferdous et al, 2017; Yang et al, 2024)。其中, 富集型源区代表了不相容元素较为富集且较浅层的地幔, 而亏损型源区则代表了火星地幔中经历了长时间部分熔融的较深层区域(Udry et al, 2025; Nicklas et al, 2021; Udry et al, 2020)。

辉玻无球粒陨石氧逸度 ( $fO_2$ ) 的演化会受到火星幔源初始氧化还原状态(Birner et al, 2018)、岩浆分异过程以及脱气过程(Kelley et al, 2012)等多因素的影响。不同辉玻无球粒陨石的氧逸度变化较大,  $\Delta QFM = -4$  至  $+1$ (Nicklas et al, 2021; Sheen et al, 2021; Herd et al, 2001; Herd et al, 2002; Herd, 2003)。即使在同一样品中, 采用不同氧逸度计计算所得的氧逸度也存在差异; 以 NWA 1068 为例, 基于钛铁氧化物温度-氧逸度计与橄榄石-辉石-尖晶石氧逸度计所获得的  $fO_2$  值可相差约 3 个  $\Delta QFM$  单位)(Herd, 2006)。目前正在使用的氧逸度计有: 橄榄石-辉石-尖晶石氧逸度计(Xirouchakis et al, 1998)、铬铁矿中 V 氧逸度计、橄榄石中的 V 氧逸度计(Herd, 2008)、橄榄石中 V / Sc 氧逸度计、辉石中的 Eu 氧逸度计、以及铁钛氧化物氧逸度计(Ghiorso et al, 1991; Schilling et al, 2011; Sauerzapf et al, 2008; Ghiorso et al, 2008)等。铁钛氧化物氧逸度计因铁钛氧化物分布广、灵敏度高、精度好而最常用; 但橄榄石在不少样品中受后期冲击/蚀变改造, 难以用于 V、V/Sc 等氧逸度计量, 而辉石 Eu 氧逸度计对 Eu 分配与共存相条件要求严格, 导致其应用受限。因此, 不同实验方法的使用也是氧逸度范围变化较大的一个重要影响因素(Chen et al, 2024; Herd et al, 2017)。

2019 年以前, 研究认为富集微量元素的储库与氧化条件之间存在明显的相关性, 即随着亏损型-过渡型-富集型的递变, 氧逸度逐渐增高(Herd et al, 2002; Herd et al, 2017)。然而, 随着大量火星陨石数据的发表, 表明两者之间可能不存在相关性(Chen et al, 2024), 亏损型与富集型氧逸度范围一致(平均值为  $-2.1 \pm 1.8 \Delta QFM$ )(Nicklas et al, 2021)。

### 1.3 研究目标与内容

#### 1.3.1 研究内容

本课题围绕玄武质辉玻无球粒陨石所记录的火星晚期岩浆活动, 旨在通过对典型样品 NWA 13106 的精细岩石学与多尺度地球化学研究, 建立从“源区性质 → 岩浆演化过程 → 氧化还原环境”的连续约束框架。

研究以 NWA 13106 为核心对象, 综合岩相学、矿物学及主-微量元素特征追溯其幔源化学性质与岩石成因; 并开展斜锆石 U-Pb 定年, 以圈定样品的结晶/喷发年龄, 为岩浆演化阶段划分与时间尺度建立提供关键约束。在此基础上, 重点依托晚期结晶矿物相中的铁钛氧化物, 进行温度-氧逸度计量与微结构耦合

分析, 重建母体岩浆晚期—亚固相阶段的  $fO_2$  演化轨迹及其控制机制, 从而为火星幔源氧化还原状态及玄武质辉玻无球粒陨石的成因模式提供可靠的定量证据。

### 1.3.2 研究目标

本阶段研究已围绕玄武质辉玻无球粒陨石 NWA 13106 形成了一套相互衔接的科学目标与关键成果框架: 通过岩相学—矿物学与全岩主微量元素约束其幔源端元与岩石成因, 以斜锆石 U-Pb 定年建立结晶年龄并重建多阶段岩浆演化历史, 并进一步依托晚期铁钛氧化物的微结构与温度-氧逸度计量定量恢复岩浆晚期—亚固相阶段的温度-氧逸度演化轨迹与方法可靠性。上述工作为下一部分围绕火星幔源异质性、岩浆演化机制及氧化还原状态等核心科学问题的综合讨论提供了直接的数据基础与约束框架。本阶段已完成的三项基本研究目的为:

(1) 厘清 NWA 13106 的岩石成因与幔源化学特征。

通过薄片岩相学与矿物学观察, 结合全岩主量—微量元素地球化学数据, 约束母岩浆的部分熔融与分异过程, 判定其幔源端元性质及富集/过渡/亏损属性在该样品中的体现, 从而追溯其源区化学特性与岩石成因。

(2) 建立 NWA 13106 的结晶年龄框架并重建多阶段岩浆演化历史。

利用斜锆石 U-Pb 定年精确限定样品的结晶/喷发年龄, 在时间尺度上划分关键岩浆演化阶段; 结合矿物分带特征、全岩微量元素配分与结晶序列, 重建其“深部结晶—上升侵位—浅部快速冷却/喷发”的多阶段岩浆历史, 并将其置于火星晚期岩浆活动的时序背景中进行对比约束。

(3) 基于晚期铁钛氧化物定量温度-氧逸度演化并评估方法可靠性。

依托晚期结晶矿物相中的铁钛氧化物产状与微结构特征, 采用铁钛氧化物温度-氧逸度计量反演不同阶段的氧逸度与温度条件, 评估冲击变质与次固相再平衡对红氧信号的影响, 恢复母体岩浆晚期—亚固相阶段的冷却—氧化还原演化轨迹, 并建立铁钛氧化物温压计在玄武质辉玻无球粒陨石中的可靠使用准则与标准化流程。

下一步拟重点展开以下两项讨论性核心科学问题:

(1) 富集型辉玻无球粒陨石的 ITE/LREE 富集来源: 封闭分离结晶还是壳混染?

富集信号可能来自封闭体系分离结晶, 也可能需要火星壳混染参与。本研究将依据 NWA 13106 的 REE-HFSE 配分、结晶序列与年代学约束, 检验封闭分离结晶能否单独解释其富集特征, 从而评估壳混染的必要性。

(2) 富集端元的幔源性质及是否含钛铁矿。

若富集特征为幔源继承, 则需进一步约束富集型与亏损型是否源自不同幔源, 并判定富集端元的矿物学本质。本研究综合 NWA 13106 的幔源指纹、HFSE

异常与氧逸度结果, 检验富 Ti 相 (如 钛铁矿) 在富集端元中的潜在作用。

#### 1.4 完成情况

目前, 已开展了相关文献的查阅工作; 利用扫描电镜进行矿物种类和产状分析; 利用电子探针进行主量元素成分分析, 已完成 NWA13106 的岩相学工作、主矿物及副矿物化学成分分析工作和斜锆石 U-Pb 定年以及全岩主微量元素分析, 整体工作量见表 1-1。

表 1-1 研究工作量  
Table 1-1 scope of research work

项目名称	项目内容	单位	数量	项目目标	完成情况
文献阅读	文献阅读	篇	112	了解陨石分类、火星陨石岩石学及矿物学特征、岩浆演化和铁钛氧化物及硫逃逸过程成因等相关知识	已完成
岩相学分析	样品薄片制备	片	2	切割、研磨、抛光	已完成
	扫描电镜背散射图像拍摄	副	200	陨石岩相学观察、矿物组分、全岩成分、矿物粒径大小	已完成
矿物主成分分析	EDS 能谱	点	167	矿物成分分析	已完成
	电子探针分析	点	700	矿物成分分析	已完成
	电子探针面扫	副	10	矿物成分分析	已完成
幔源确定	ICP-MS	份	2	全岩的主量元素、微量元素测定	已完成
	LA-ICP-MS	点	X	辉石、长石及磷酸盐的微量元素测定	待完成
定年	SIMS 离子探针	点	10	斜锆石定年 U-Pb 定年	已完成

##### 1.4.1 岩相学分析

NWA 13106 具有玄武岩质辉玻无球粒陨石的典型结构——辉长结构, 主要矿物包括辉石、熔长石, 副矿物包括钛铁矿、磁钛铁矿、铁硫化物、磁铁矿、锆

石、磷酸盐、陨硫铁等 (见图 1-5), 进行 EDS 矿物识别, 统计结果表明, NWA 13106 的矿物模式含量 (面积比) 为辉石 (57.03 %) 和斜长石 (34.18 %), 副矿物为铁钛氧化物 (2.022 %)、磷酸盐 (1.82 %)、富硅相 (1.62 %)、铁橄榄石 (0.6 %)、铁硫化物 (0.424 %)。

辉石呈柱状或长板条状, 粒径约 1 ~ 2mm, 宽约 350  $\mu\text{m}$ , 几乎所有辉石颗粒都具有明显的化学成分不均匀性, 存在明显的环带结构 (图 1-5 a), 少部分辉石晶体出现出溶结构 (图 1-6 a), 表面可见由冲击导致的裂隙与明显位移 (图 1-5 f)。

斜长石颗粒自形程度高, 板条状, 长轴 0.5 ~ 3 mm, 短轴 0.1 ~ 0.5 mm。表面平滑, 成分无明显变化, 斜长石已全部熔长石化 (图 1-6 c)。有些熔长石内部含辉石颗粒 (图 1-6 c), 有些可见二氧化硅相 (图 1-6 d)。

铁钛氧化物包括钛铁矿和磁钛铁矿, 两者常以出溶结构出现, 钛铁矿呈条带状出溶, 宽度约 1  $\mu\text{m}$ , 部分可达 3 ~ 4  $\mu\text{m}$ , 定量分析化学成分可用于氧逸度计算。钛铁矿除了以条带状形式析出于磁钛铁矿, 还以块状形式出现 (图 1-6 e、f)。

铁硫化物有两种产状, 一种以液滴状出现 (图 1-6 h), 另一种与铁氧化物共生 (图 1-5 g)。磷酸盐矿物有磷灰石和陨磷钙钠石两种, 以陨磷钙钠石为主, 微量磷灰石, 磷灰石较破碎 (图 1-5 b)。橄榄石仅存在于后成合晶当中, 为富铁橄榄石 (图 1-5 f)。斜锆石呈自形到半自形, 粒度约 2 ~ 3  $\mu\text{m}$ , 常出现于裂缝当中, 部分斜锆石中可见明显裂缝, 可用于年代学研究。

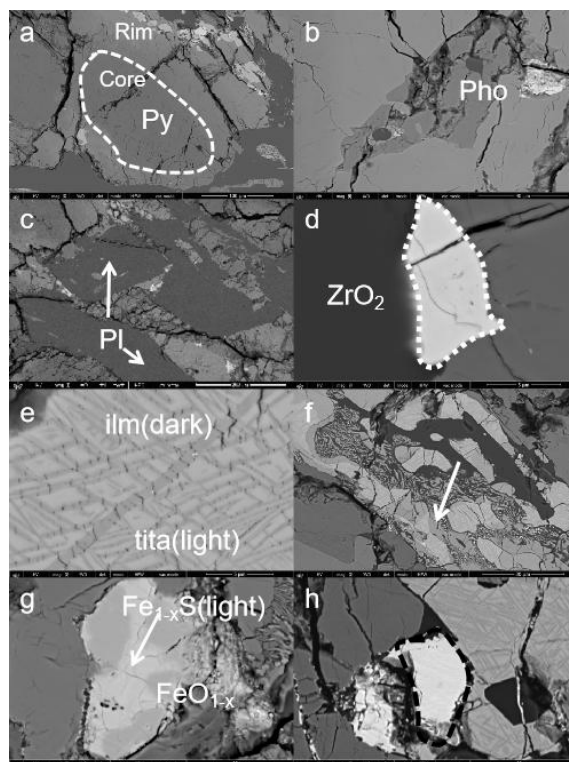
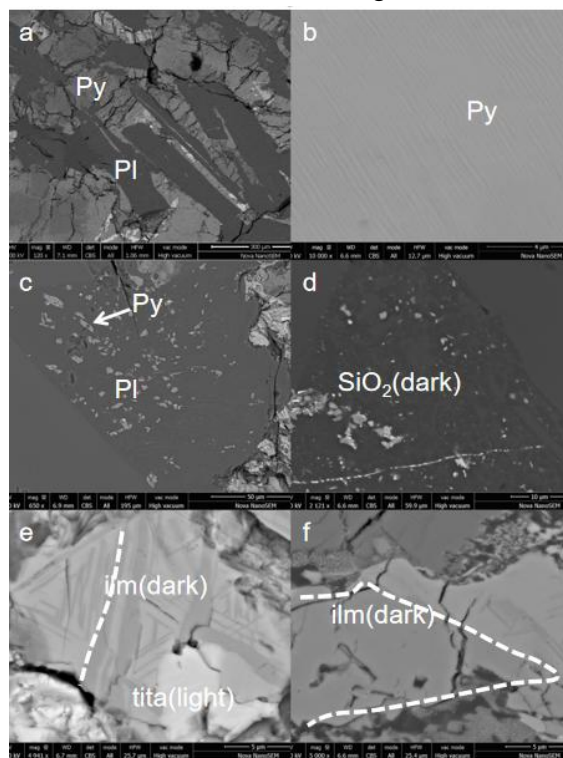


图 1-5 NWA13106 主要矿物及次要矿物

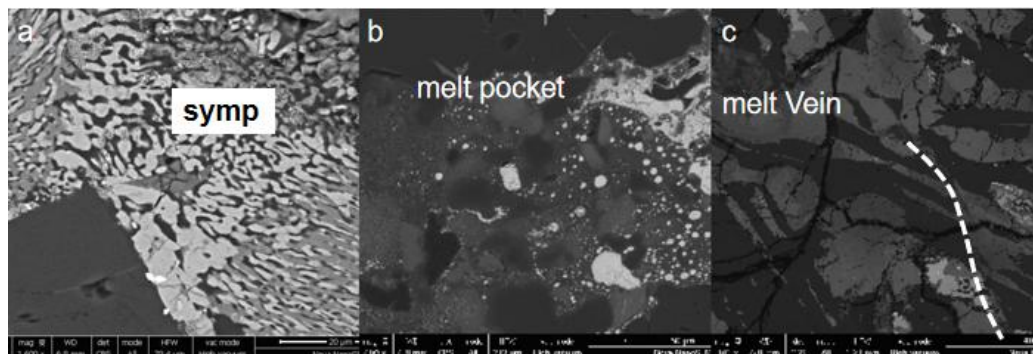
**Figure 1-5 Main and Accessory minerals of NWA 13106**

(a.辉石, 具有成分环带, 核部暗, 边部亮; b.磷酸盐; c.长石, 均发生熔长石化; d.斜锆石;  
e.磁钛铁矿 (亮色) 钛铁矿 (暗色); f.富铁橄榄石; g.铁硫化物及铁氧化物; h.陨硫铁液滴)

**图 1-6 NWA13106 主要结构特征****Figure 1-6 Major textural features of NWA 13106**

(a.辉长结构; b.辉石出溶条带; c.维晶结构; d.二氧化硅相; e.铁钛氧化物的析出结构; f.铁钛氧化物)

该陨石的冲击变质特征主要表现为主要矿物发生碎裂、错位, 长石均已熔长石化。局部区域还可见熔融囊、熔脉等结构 (见图 1-7), 表明 NWA 13106 冲击变质程度为 S3 ~ S4。

**图 1-7 冲击变质特征**

(a.后成合晶; b.熔融囊; c.熔融脉)



### 1.4.2 主成分化学分析

辉石具有明显的环带结构, 从核部到边部表现出复杂的成分分带, 表明辉石结晶早期阶段和晚期阶段的成分变化 (图 1-8 b)。辉石的核部相对富镁  $\text{Fs}_{23.6\sim54.3}\text{En}_{18.4\sim53.3}\text{Wo}_{13.5\sim36.8}$ , 贫  $\text{TiO}_2$  (0.173 ~ 0.677), 贫  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (0.357 ~ 1.768), 边部相对富铁  $\text{Fs}_{61.2\sim79.0}\text{En}_{3.4\sim24.4}\text{Wo}_{12.6\sim23.5}$ , 富  $\text{TiO}_2$  (0.361 ~ 0.849), 富  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (0.352 ~ 1.389) (图 1-8 a)。大多数辉石。基于辉石核部 Ti / Al 比值, 估算其结晶压力约 9.3 kbar。这与辉石核部的 Mg# 值 (~60) 一致, 指示其岩浆形成于火星地幔较深区域。

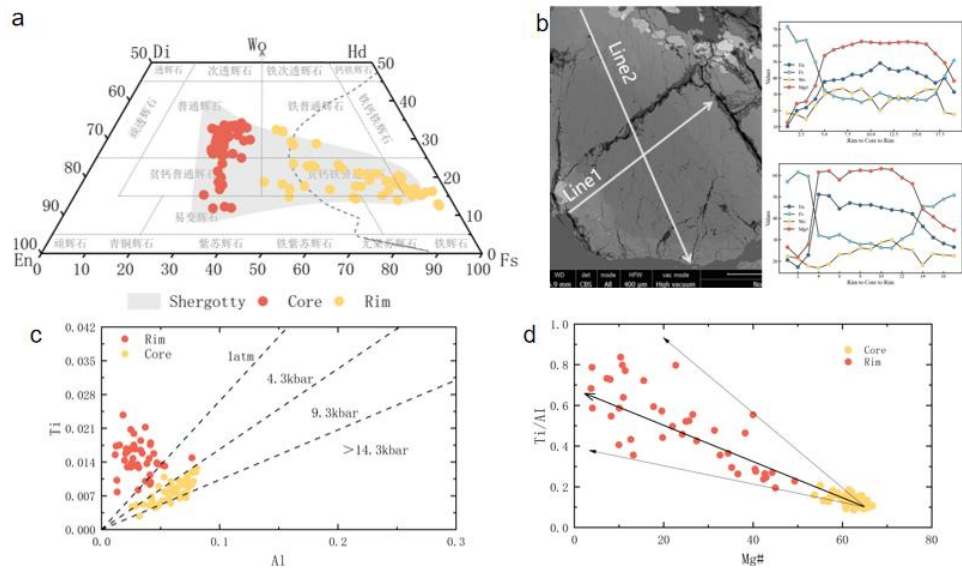


图 1-8 辉石化学成分分析

Figure 1-8 Pyroxene chemical composition analysis

(a.辉石成分投图; b.辉石从边部-核部-边部的成分变化; c.辉石核部和边部的 Ti 和 Al 含量分布; d.辉石 Ti/Al 比与 Mg# 值的相关性)

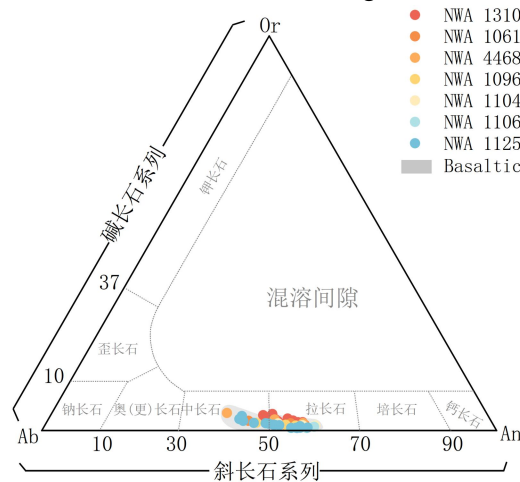


图 1-9 长石化学成分分析

Figure 1-9 Plagioclase chemical composition analysis

熔长石平均成分为  $An_{53.1 \pm 0.5}Or_{2.2 \pm 0.4}Ab_{44.5 \pm 0.4}$  (图 1-9), 该成分主要为中长石和拉长石, An 值投图在火星陨石中, 属于中等型, 与其他玄武质辉玻无球粒陨石中长石的成分相当 (图 1-10)。

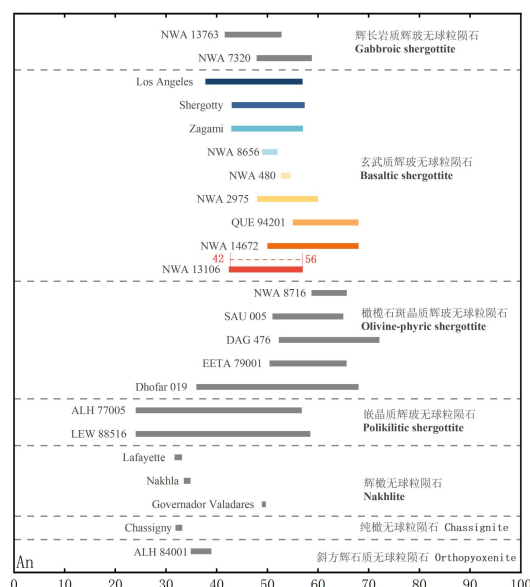


图 1-10 长石 An 值

Figure 1-10 Anorthite content of plagioclase

磷酸盐有磷灰石和陨磷钙钠石, 磷灰石 Cl 含量 ~3wt%。橄榄石仅在后成合晶中出现, 极富铁, Fa 可达 92~98。

非出溶成因钛铁矿呈他形粒状产出, 成分相对均匀:  $w(TiO_2)$  值为 47.7%~49.8%、 $w(TFeO)$  值为 48.4%~51.2%, 含微量  $w(Al_2O_3)$  (0.01%~0.27%)、 $w(MgO)$  (0.03%~0.10%)、 $w(MnO)$  (0.49%~0.86%) 和  $w(Cr_2O_3)$  (0.01%~0.27%)。其端员组成为  $Ilm_{81 \sim 89}Mt_{10 \sim 17}$ ,  $Fe^{3+}/\Sigma Fe$  约为 0.14。

对于出溶片晶宽度  $<1 \mu m$  的钛磁铁矿固溶体, 采用大束斑 ( $4 \sim 6 \mu m$ ) 模式对其整体化学成分进行分析。分析均选在条带均匀的区域进行, 通过多次测量取平均值以代表其成分。分析结果显示, 其化学组成范围:  $w(TiO_2)$  值为 23.6%~28.6%,  $w(FeO)$  值为 52.2%~57.1%、 $w(Fe_2O_3)$  值为 13.6%~20.3%,  $Fe^{3+}/\Sigma Fe$  约为 0.22。需特别说明, 上述分析均属于经 Mg/Mn 平衡判据确认的平衡结构区域, 已排除非平衡区域结果。

钛磁铁矿固溶体中宽度  $>2 \mu m$  的钛铁矿片晶的化学组成与非出溶成因的钛铁矿相当。具体化学组成如下:  $w(TiO_2)$  值为 46.5%~50.1%、 $w(TFeO)$  值为 48.5%~50.9%, 并含有微量  $w(Al_2O_3)$  (0.02%~0.10%)、 $w(MgO)$  (0.02%~0.21%)、 $w(MnO)$  (0.50%~0.86%) 和  $w(Cr_2O_3)$  ( $\leq 0.03\%$ )。其端员组成为  $Ilm_{80 \sim 91}Mt_{8 \sim 18}$ ,  $Fe^{3+}/\Sigma Fe$  值约为 0.05。

钛磁铁矿固溶体出溶结构中磁铁矿的成分变化较大, 其主量元素含量范围



为:  $w(\text{FeO})$  34.3% ~ 45.6%、 $w(\text{Fe}_2\text{O}_3)$  45.8% ~ 64.2%、 $w(\text{TiO}_2)$  2.75% ~ 16.0%。另含微量  $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$  (0.50% ~ 3.93%)、 $w(\text{MnO})$  (0.14% ~ 0.40%)、 $w(\text{MgO})$  (0.14% ~ 0.37%) 和  $w(\text{Cr}_2\text{O}_3)$  ( $\leq 0.20\%$ )，且  $\text{Fe}^{3+}/\Sigma\text{Fe}$  值约为 0.54。

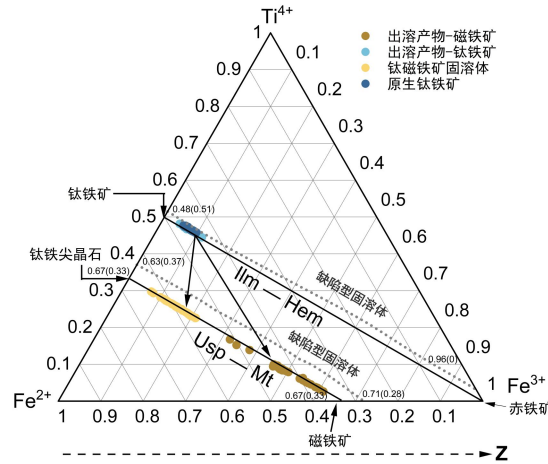


图 1-11 铁钛氧化物化学成分分析

Figure 1-11 Fe-Ti oxides chemical composition analysis

#### 1.4.3 铁钛氧化物计温度-氧逸度结果

针对第一种产状钛磁铁矿固溶体与非出溶型钛铁矿的共生组合, 分别对钛磁铁矿固溶体和非出溶型钛铁矿进行矿物化学成分测定。对钛磁铁矿固溶体进行多次测量, 筛选出单分析点波动值低于 3% (钛磁铁矿固溶体, 多次测量的  $\text{TiO}_2$  wt.% 值, 标准差/平均值低于 3%), 通过了 Mg/Mn 平衡检验, 且单点温度变异系数 (即计算的温度差值/温度平均值) 小于 0.07%。基于这些数据, 夹层型与复合型结构钛磁铁矿固溶体估算的温度和氧逸度结果范围一致, 结晶温度为 1016 至 1167 °C, 氧逸度为  $\Delta\text{QFM} = -0.44$  至  $-0.18$ 。

通过对第二种产状, 即出溶结构中宽度大于  $2\ \mu\text{m}$  的钛铁矿宽片晶及其共生的磁铁矿的化学成分, 计算获得该出溶结构的形成温度为 868 - 909 °C, 氧逸度为  $\Delta\text{QFM} = +0.43$  至  $+0.66$ 。

#### 1.4.4 斜锆石 U-Pb 定年结果

对 10 颗斜锆石进行的二次离子质谱 (SIMS) 分析, 其 U 含量为 18-226ppm, 平均值 85ppm, 分析显示, 斜锆石颗粒的  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  比值为 11-290 (均值 78), 与火星 shergottite 斜锆石普遍低比值特征 ( $< 100$ ; (Niihara, 2011)) 一致。经过 207 校正的加权平均值年龄:  $224 \pm 11\text{Ma}$ , 单点校正年龄分布为 203Ma-252Ma, 数据分布集中。而 U 含量与单点误差呈正相关, 因此即使火星陨石 U 含量普遍较低的情况下, U 含量也是单点 207 校正年龄的重要参考数据。

由未经过普通 Pb 校正的 Tera-Wassenberg 谐和曲线图, 拟合获得其下交点年

龄为  $230 \pm 15$  Ma (95%置信度), 上交点年龄为  $5109 \pm 310$  Ma (95%置信度), 对应上交点  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  值为  $0.94 \pm 0.20$  (95%置信度,  $\text{MSWD} = 0.67$ )。测点的  $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$  比值介于 15.80 到 27.814,  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  比值介于 0.074 到 0.411, 3 个测点的普通 Pb 比例  $f_{206}$  (28%-40%) 明显高于其他测点 (1.99%-12.07%), 这 3 颗点均出现在非斜锆石矿物的重叠之上, 且晶体内部存在裂隙和空洞。

经过普通 Pb 校正 (SK 模型) 的 Tera-Wassenberg 谐和曲线图得到年龄:  $225 \pm 11$  Ma。地球普通铅  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  和火星普通铅  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  的比值分别是 0.836 和 0.948-0.961 (Stacey et al, 1975; Bellucci et al, 2016), 选择不同的初始普通 Pb 固定上交点得到的年龄,  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  波动值 0.12 的差值对应的年龄波动小于 3% (即使采用不同初始铅模型, 年龄差异仅在  $\pm 2$  Ma 内), 这说明初始铅组成的误差对于年龄的敏感度微小, 矿物未经历显著的多期次 Pb 丢失、混染事件或斜锆石在冲击熔体中快速冷却, 其铀铅体系在冲击后保持封闭, 同样  $f_{206}$  普遍上小于 15% 也只支撑了这一说法。

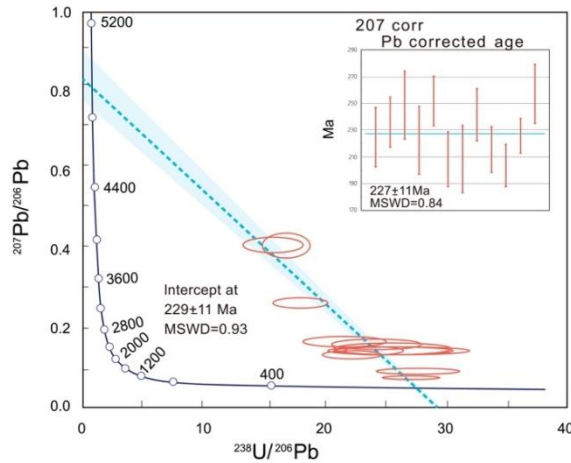


图 1-12 斜锆石 U-Pb 定年 Tera-Wassenberg 谐和曲线图

Figure 1-12 Tera-Wasserburg concordia diagram for baddeleyite U-Pb dating

#### 1.4.5 幔源确定

全岩 CI 标准化 (La/Yb) 值显示出显著的轻稀土相对重稀土富集, 表明 NWA 13106 的母岩浆具有富集型地球化学特征 (图 1-13); 但其富集信号究竟源于富集地幔继承还是火星地壳混染, 仍需进一步约束与判别。

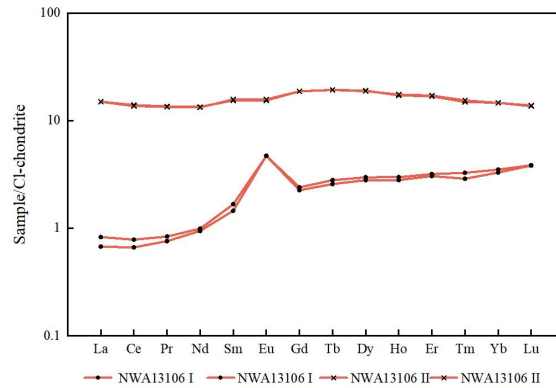


图 1-13 NWA 13106 全岩稀土模式图

(NWA 13106 I 为原始样品, NWA 13106 II 为酸处理后对照样品)

**Figure 1-13 Chondrite-normalized whole-rock REE pattern of NWA 13106.**

(NWA 13106 I: original sample; NWA 13106 II: acid-treated reference sample.)

#### 1.4.6 NWA 13106 结晶演化过程

NWA 13106 的母岩浆在深部 (~50 km、~9.3 kbar) 先缓慢结晶出富镁辉石核部, 记录了早期相对原始、低氧逸度的岩浆条件; 随后岩浆携带这些辉石晶体上升, 在减压过程中开始大量结晶斜长石; 最后岩浆喷发至近地表快速冷却, 形成富铁辉石边 (低 Ca、亚稳态), 同时残余熔体高度分异结晶出磷酸盐、斜锆石、铁钛氧化物。铁钛氧化物的记录显示一个随冷却逐步氧化的三阶段过程: 首先在 1016–1167 °C、低氧逸度 ( $\Delta QFM -0.44 \sim -0.18$ ) 下原生钛磁铁矿与非出溶钛铁矿共生结晶; 继而降温至 868–909 °C 时氧逸度显著升高 ( $\Delta QFM +0.43 \sim +0.66$ ), 钛磁铁矿发生氧化分解并出溶形成较粗的夹层型钛铁矿片晶 ( $>1 \mu m$ ); 最后在 ~868–650 °C 的亚固相低温阶段, 持续氧化与阳离子扩散促使钛铁矿/磁铁矿向端元演化, 形成细小 (多  $<1 \mu m$ ) 的夹层—网格—复合型出溶组合。结合富铁橄榄石—二氧化硅交生体, 这一系列特征共同建立了从富集岩浆储库开始, 在深部 50km 处辉石核结晶, 后续上升结晶斜长石, 最后在近地表快速冷却并伴随氧化增强、铁钛氧化物多阶段出溶的结晶—氧化序列。

#### 1.5 创新点

本研究的创新点主要体现在“新样品数据支撑”与“铁钛氧化物方法学深化”两个层面: 一方面, 针对新补充的玄武质辉玻无球粒火星陨石 NWA 13106, 建立了系统的岩相—矿物学定量及全岩/单矿物地球化学与年代学数据, 为其成因解析提供了新的样品基础; 另一方面, 以铁钛氧化物为核心载体, 结合微结构特征与温度—氧逸度计计算, 重建其多阶段氧化还原—冷却演化, 并进一步完善温氧计的可靠性判据与标准化应用流程, 从而在样品与方法两端同步推进对火星幔源与岩浆过程的约束。

### (1) 基于新样品 NWA 13106 的数据补充与综合表征

本研究以新补充的玄武质辉玻无球粒火星陨石 NWA 13106 为对象, 开展了系统的岩相学与矿物学定量表征, 获得了其矿物组成、含量比例及结构特征等基础数据, 并进一步获取了单矿物主量元素、斜锆石 U-Pb 年代学、全岩主—微量元素组成以及铁钛氧化物温度-氧逸度等关键约束。在此基础上, 本文将“幔源组成与部分熔融—结晶演化历史—氧逸度随时间变化”整合于同一分析框架中进行联合讨论, 为厘定 NWA 13106 的富集特征来源、认识火星地幔的化学异质性及其氧化还原演化提供了新的样品与数据支撑。

### (2) 铁钛氧化物多阶段演化重建与微结构约束与方法改进

本研究以铁钛氧化物为核心载体, 结合钛磁铁矿出溶的夹层型/网格型/复合型等微结构及其共生组合关系, 定量重建了从高温共生结晶到高温氧化出溶、再到低温扩散再平衡的三阶段温度-氧逸度演化序列, 揭示 NWA 13106 在冷却过程中经历了“降温伴随氧化—出溶”的连续氧化还原演化; 同时, 通过元素成像和平衡检验证明氧化物内部成分不均一与局部非平衡会显著扰动温度-氧逸度计结果, 是氧逸度离散的重要来源, 并据此提出平衡区筛选、束斑匹配与模型交叉验证等标准化应用流程, 为玄武质辉玻无球粒陨石的铁钛氧化物氧逸度研究提供了更可靠的操作规范。

## 1.6 存在的问题

目前阶段性工作已较为完整地实现了前三项基础研究目标: 完成了 NWA 13106 的岩相—矿物学与全岩主微量元素表征、建立了斜锆石 U-Pb 结晶年龄框架并重建多阶段岩浆演化过程, 同时基于铁钛氧化物氧化物微结构与温度-氧逸度计量恢复了晚期温度-氧逸度演化并评估了方法可靠性。然而, 这些成果尚停留在“数据与过程约束”的层面, 对应的核心科学问题仍未得到最终回答, 尤其是富集型 辉玻无球粒陨石的不相容微量元素/轻稀土元素富集信号究竟源于封闭分离结晶还是火星地壳混染, 目前仍缺乏定量模型检验与端元贡献评估。因此, 核心科学问题的成因判别与机制整合尚需在后续研究中进一步推进, 这是本次中期阶段存在的首要问题。

其次, 本研究在温度-氧逸度计算中主要采用铁钛氧化物温度-氧逸度计, 但铁钛氧化物属于岩浆晚期矿物组合, 其记录的氧化还原信息更多反映晚期—亚固相阶段, 难以直接对应早期幔源条件。因此, 在讨论幔源性质与氧逸度之间的成因联系时仍存在一定局限; 同时, 关于幔源端元是否含钛铁矿等富 Ti 相的矿物学本质, 也有待在后续工作中进一步检验与约束。

在 NWA 13106 的全岩主—微量元素数据中, 目前缺乏主量元素中  $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$  的约束, 导致在应用 MELTS 软件进行分步结晶模拟以及利用 Mg# 判

定母岩浆原始性时存在关键参数缺失。后续工作将通过进一步获取铁的价态比例数据来补全这一限制, 以提高模型计算与成因判别的可靠性。

### 1.7 已取得的阶段性成果

本研究的整体工作分为两个部分, 均围绕火星陨石 NWA 13106 的岩石学与地球化学特征开展。

(1) 工作内容 1 已完成并发表。

陈淳怡, 徐于晨\*, 刘洋. 火星陨石 NWA 13106 中铁钛氧化物微结构特征及其氧逸度指示 (J/OL). 矿物学报, 2025-10-20. 2025-11-22. <https://www.sciengine.com/doi/10.3724/j.1000-4734.2025.45.118>

该部分系统解析了铁钛氧化物的产状、出溶结构及其温度-氧逸度演化, 并构建了 NWA 13106 的铁钛氧化物多阶段演化模式。

(2) 工作内容 2 已完成英文初稿, 准备投稿至国际期刊 *Icarus*。

论文题目为: “Petrogenesis of basaltic shergottite NWA 13106”。

主要围绕母岩浆成因、富集-亏损端元属性、分离结晶与壳混染的地球化学约束等内容展开, 目前已完成全岩-矿物主微量元素、REE-HFSE、氧逸度与年代学等综合讨论。

## 第2章 下一步工作计划和内容, 预计答辩时间

### 2.1 下一步工作计划

在既有研究基础上, 下一步将对 NWA 13106 的现有数据进行系统整理与综合解译, 重点建立其结晶年代学框架并重建岩浆结晶—演化过程, 在此基础上进一步阐明其岩石成因及幔源地球化学特征, 完成英文论文撰写与投稿。

在已完成岩相—矿物学、全岩/单矿物地球化学、斜锆石 U-Pb 年代学及铁钛氧化物温度-氧逸度重建等基础工作的基础上, 下一阶段研究将由“数据获取与过程约束”转向“核心科学问题的定量判别与机制整合”。重点围绕两大科学问题: (1) NWA 13106 的不相容微量元素/轻稀土元素富集来源 (封闭分离结晶 vs 火星壳混染); (2) 富集端元的幔源性质及是否含钛铁矿 (富 Ti 相), 开展模型检验、端元贡献评估与综合讨论, 最终形成可答辩的成因框架与论文成果。

#### 2.1.1 具体工作内容

##### (1) 数据补充

为解决全岩  $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$  比值缺失对 MELTS 分步结晶模拟以及 Mg# 判定岩浆来源 (原始岩浆或演化岩浆) 带来的不确定性与限制, 拟开展补充测试与参数校正。

##### (2) 富集来源的封闭体系 / 壳混染定量判别

判定 NWA 13106 的不相容微量元素/轻稀土元素富集特征是否能够由封闭体系的渐进分离结晶单独解释, 或是否必须引入地壳混染等开放体系过程, 并进一步估算可能的端元贡献比例。

以 NWA 13106 全岩微量元素作为母岩浆初始组成, 建立分阶段分离结晶模型并与实测矿物配分对比:

1. 按结晶序列分阶段设置模型 (辉石核  $\rightarrow$  斜长石  $\rightarrow$  辉石边 / 晚期相), 分别为各阶段设定分离结晶程度  $F$ 、固相比例及矿物组合, 并选取与矿物 Ca 含量及结晶条件相匹配的分配系数。

2. 逐阶段计算理论结晶矿物的 REE 配分曲线, 并与实测的辉石核/边及斜长石 REE 数据进行对比检验。

3. 若封闭体系模型能够整体拟合观测数据, 则支持“封闭分离结晶主控富集”的解释; 若拟合不足, 则引入潜在壳端元, 开展开放体系混染 / AFC 模型对比, 约束壳端元的贡献范围与比例。

##### (3) 富集幔源端元本质与钛铁矿 (富 Ti 相) 检验

在核心问题 (1) 的结论基础上, 进一步判定富集信号的幔源属性, 并检验

富集端元是否包含钛铁矿等富 Ti 残留相。

1. 综合 NWA 13106 的高场强元素指纹 (Zr-Hf、Nb-Ta、Ti 等) 与氧逸度结果, 提取对钛铁矿/富 Ti 相敏感的异常特征与判别指标。
2. 建立含钛铁矿 / 不含钛铁矿的幔源部分熔融模型 (通过改变残留相组合与分配行为), 对比不同模型对高场强元素异常和稀土元素配分特征的再现能力。
3. 将熔融模型结果与核心问题 (1) (1.3.2 研究目标) 的富集来源判别联动分析, 定量区分“幔源富 Ti 相效应”与“壳端元贡献”在富集信号中的相对作用与主控因素。

2.2 进度安排

目前已完成对 NWA 13106 岩石成因研究所需的全部实验工作, 包括岩相学观察、矿物成分分析、斜锆石 U-Pb 定年以及全岩主量—微量元素地球化学测试。基于上述数据, 已约束该陨石的结晶压力/深度、氧逸度、封闭温度、结晶年龄及其幔源储库性质。下一步将综合现有实验结果, 借助 MELTS、Petrology4.0 等岩石学—地球化学模拟软件重建母岩浆的结晶分异与演化路径, 进一步反演其地幔源区储库的组成与基本物理化学性质 (表 2-1)。

表 2-1 进度安排  
Table 2-1 Project timeline

项目名称	项目内容	项目目标	时间
岩相学分析	样品薄片制备	切割、研磨、抛光	已完成
	扫描电镜背散射图像拍摄	陨石岩相学观察、矿物组分、全岩成分、矿物粒径大小	已完成
矿物成分分析	EDS 能谱	矿物成分分析	已完成
	电子探针分析	矿物成分分析	已完成
	电子探针面扫	矿物成分分析	已完成
幔源确定	ICP-MS	全岩的主量元素、微量元素测定	已完成
	LA-ICP-MS	辉石、长石及磷酸盐的微量元素测定	待定
定年	SIMS 离子探针	斜锆石定年 U - Pb 定年	已完成
补充数据分析	利用 MELTS\ Petrology4.0 进行结晶演化反演	讨论幔源储库基本性质, 探讨火星内部演化非均一性	12 月
英文文章投稿		已完成初稿, 准备投稿至英文 “Icaurs” 论文名: Petrogenesis of	2026.2 月





## 第3章 已取得研究成果列表

### 3.1 已发表、待发表学术论文、专利等

陈淳怡, 徐于晨\*, 刘洋. 火星陨石 NWA 13106 中铁钛氧化物微结构特征及其氧逸度指示 (J/OL). 矿物学报, 2025-10-20. 2025-11-22.  
<https://www.sciengine.com/doi/10.3724/j.1000-4734.2025.45.118>

## 参考文献

- [1] AGEE C B, DRAPER D S 2004. Experimental constraints on the origin of Martian meteorites and the composition of the Martian mantle. *Earth and Planetary Science Letters* [J], 224: 415-429.
- [2] BARRAT J A, GILLET P, SAUTTER V, et al. 2002. Petrology and chemistry of the basaltic shergottite North West Africa 480. *Meteoritics & Planetary Science* [J], 37: 487-499.
- [3] BELLUCCI J, NEMCHIN A, WHITEHOUSE M J, et al. 2016. A Pb isotopic resolution to the Martian meteorite age paradox. *Earth and Planetary Science Letters* [J], 433: 241-248.
- [4] BENAROYA S, GROSS J, BURGER P, et al. 2024. Petrogenesis of a new type of intrusive shergottite: olivine-gabbro Northwest Africa 13227. *Geochimica et Cosmochimica Acta* [J], 370: 41-65.
- [5] BIRNER S K, COTTRELL E, WARREN J M, et al. 2018. Peridotites and basalts reveal broad congruence between two independent records of mantle fO<sub>2</sub> despite local redox heterogeneity. *Earth and Planetary Science Letters* [J], 494: 172-189.
- [6] CHOWDHURY P, BROUNCE M, BOYCE J W, et al. 2023. The Oxidation State of Sulfur in Apatite of Martian Meteorite—Shergotty. *Journal of Geophysical Research: Planets* [J], 128: e2022JE007634.
- [7] FERDOUS J, BRANDON A, PESLIER A, et al. 2017. Evaluating crustal contributions to enriched shergottites from the petrology, trace elements, and Rb-Sr and Sm-Nd isotope systematics of Northwest Africa 856. *Geochimica et Cosmochimica Acta* [J], 211: 280-306.
- [8] GOODRICH C A 2002. Olivine-phyric Martian basalts: A new type of shergottite. *Meteoritics & Planetary Science*, vol. 37, Supplement, p. 31-34 [J], 37: 31-34.
- [9] HERD C D 2003. The oxygen fugacity of olivine - phyric Martian basalts and the components within the mantle and crust of Mars. *Meteoritics & Planetary Science* [J], 38: 1793-1805.
- [10] HERD C D 2006. Insights into the redox history of the NWA 1068/1110 Martian basalt from mineral equilibria and vanadium oxybarometry. *American Mineralogist* [J], 91: 1616-1627.
- [11] HERD C D, PAPIKE J J, BREARLEY A J 2001. Oxygen fugacity of martian basalts from electron microprobe oxygen and TEM-EELS analyses of Fe-Ti oxides. *American Mineralogist* [J], 86: 1015-1024.
- [12] HERD C D K, BORG L E, JONES J H, et al. 2002. Oxygen fugacity and geochemical variations in the martian basalts: implications for martian basalt petrogenesis and the oxidation state of the upper mantle of Mars. *Geochimica et*

- Cosmochimica Acta [J], 66: 2025-2036.
- [13] KELLEY K A, COTTRELL E 2012. The influence of magmatic differentiation on the oxidation state of Fe in a basaltic arc magma. *Earth and Planetary Science Letters* [J], 329-330: 109-121.
- [14] LIU Y, BALTA J B, GOODRICH C A, et al. 2013. New constraints on the formation of shergottite Elephant Moraine 79001 lithology A. *Geochimica et Cosmochimica Acta* [J], 108: 1-20.
- [15] LIU Y, BAZIOTIS I P, ASIMOW P D, et al. 2016. Mineral chemistry of the Tissint meteorite: Indications of two - stage crystallization in a closed system. *Meteoritics & Planetary Science* [J], 51: 2293-2315.
- [16] MCSWEEN H Y, TREIMAN A H, PAPIKE J 1998. Martian meteorites. *Planetary materials* [J], 36: 6-01.
- [17] MCSWEEN JR H Y, EISENHOUR D D, TAYLOR L A, et al. 1996. QUE94201 shergottite: Crystallization of a Martian basaltic magma. *Geochimica et Cosmochimica Acta* [J], 60: 4563-4569.
- [18] NICKLAS R W, DAY J M D, VACI Z, et al. 2021. Uniform oxygen fugacity of shergottite mantle sources and an oxidized martian lithosphere. *Earth and Planetary Science Letters* [J], 564: 116876.
- [19] NIIHARA T 2011. Uranium - lead age of baddeleyite in shergottite Roberts Massif 04261: Implications for magmatic activity on Mars. *Journal of Geophysical Research: Planets* [J], 116.
- [20] PAPIKE J, KARNER J, SHEARER C, et al. 2009. Silicate mineralogy of martian meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta* [J], 73: 7443-7485.
- [21] RAHIB R R, UDRY A, HOWARTH G H, et al. 2019. Mantle source to near-surface emplacement of enriched and intermediate poikilitic shergottites in Mars. *Geochimica et Cosmochimica Acta* [J], 266: 463-496.
- [22] SHEEN A I, HERD C D K, HAMILTON J, et al. 2021. Petrographic controls on baddeleyite occurrence in a suite of eight basaltic shergottites. *Meteoritics & Planetary Science* [J], 56: 1502-1530.
- [23] STACEY J S, KRAMERS J D 1975. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model. *Earth and Planetary Science Letters* [J], 26: 207-221.
- [24] UDRY A, HOWARTH G H, HERD C D K, et al. 2020. What Martian Meteorites Reveal About the Interior and Surface of Mars. *Journal of Geophysical Research: Planets* [J], 125: e2020JE006523.
- [25] UDRY A, OSTWALD A M, DAY J M D, et al. 2025. Fundamental constraints and questions from the study of Martian meteorites and the need for returned samples. *Proceedings of the National Academy of Sciences* [J], 122: e2404254121.
- [26] WU Y, 徐伟彪, LI Q-L, et al. 2021. Heterogeneous martian mantle: Evidence

- from petrology, mineral chemistry, and in situ U-Pb chronology of the basaltic shergottite Northwest Africa 8653. *Geochimica et Cosmochimica Acta* [J], 309: 352-365.
- [27] YANG S, HUMAYUN M, RIGHTER K 2024. Mineralogy of the Martian mantle inferred from bulk chemical compositions. *Meteoritics & Planetary Science* [J], 59: 2545-2564.