

中国陨石学与天体化学研究进展 (2011—2020)

缪秉魁^{1,2}, 胡森³, 陈宏毅¹, 张川统¹, 夏志鹏¹, 黄丽霖¹, 薛永丽¹, 谢兰芳¹

1. 桂林理工大学 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: 过去十年, 中国陨石学与天体化学研究迎来了一个迅速发展时期。嫦娥工程与月球采样返回, 以及天问一号火星探测等一系列深空探测工程的成功实施, 极大地推动了我国陨石学和天体化学的发展; 南极格罗夫山陨石库的建设, 为学科发展提供了充足样品; 高精度同位素分析平台的建设, 保障了陨石及地外返回样品的分析研究需要; 此外, 国内还涌现了一批优秀行星科学与天体化学青年人才。与此同时, 通过对各类陨石的研究, 在太阳星云起源与演化、火星与月球等类地行星形成与宜居性研究、小行星岩浆作用和含水蚀变及后期撞击历史等方面也取得了重要成果。

关键词: 陨石学; 天体化学; 太阳星云; 类地行星; 小行星; 南极陨石

中图分类号: P185.83 **文章编号:** 1007-2802(2021)06-1272-15 **doi:** 10.19658/j.issn.1007-2802.2021.40.095

Progresses of Researches on Meteoritics and Cosmochemistry from 2011 to 2020 in China

MIAO Bing-kui^{1,2}, HU Sen³, CHEN Hong-yi¹, ZHANG Chuan-tong¹, XIA Zhi-peng¹,
HUANG Li-lin¹, XUE Yong-li¹, XIE Lan-fang¹

1. *Institution of Meteorites and Planetary Materials Research, Guilin University of Technology, Guilin Guangxi 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: In the past decade, the researches on meteoritics and cosmochemistry in China have been developed rapidly. The successful implementation of a series of deep-space exploration projects, such as the Chang'e lunar exploration project (especially the lunar surface sampling and the return of collected lunar samples), as well as the Tianwen-1 Mars exploration project, has greatly promoted the development of meteoritics and cosmochemistry in China. The construction of database of the Grove Mountains' meteorites in Antarctica has provided sufficient samples for researchers to develop the discipline of meteoritics and cosmochemistry. The construction of high-precision isotopic analysis platform has ensured the smooth measurements and researches of the meteorites and returned extraterrestrial samples. Especially, a number of young outstanding astrochemical talents are emerged in China. At the same time, through the researches of various kinds of meteorites, many important achievements have been made in many fields, such as the origin and evolution of solar nebulae, the formation and habitability of terrestrial planets (Mars, Moon, etc.), and the magmatism, water-bearing alteration, and late impact history of asteroids.

Key words: meteoritics; cosmochemistry; solar nebula; terrestrial planets; asteroids; Antarctic meteorites

0 引言

天体化学是研究宇宙空间(主要是太阳系)物质的化学组成和化学演化规律的学科,是地球科学、天文学和行星科学相互渗透交互的边缘学科,

同时,对了解地球起源和演化规律也具有重要意义。20世纪人类开始迈步入太空以及现代科学的发展,天体化学已经成为世界前沿学科和热点领域。我国自2007年发射嫦娥一号探测器后,探月工程顺利开展,先后发射嫦娥二号、三号、四号、五号探测

收稿编号: 2021-040, 2021-03-29 收到, 2021-08-19 改回

基金项目: 中国科学院战略性先导专项(B类)(XDB 41000000); 中国博士后科学基金资助项目(2020M673557XB); 民用航天技术预先研究项目(D020302, D020206); 广西自然科学基金资助项目(2021GXNSFBA075061)

第一作者简介: 缪秉魁(1966-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 陨石学与天体化学。E-mail: miaobk@glut.edu.cn.

器,成功完成了月球背部探测和月球采样返回任务。此外,2020年7月23日成功发射了天问一号,启动了火星探测计划,标志着我国行星科学进入了新的发展阶段。天体化学为深空探测和行星科学研究的重要科学目标,陨石则是解决行星科学问题的重要窗口。反之,这些深空探测计划的顺利执行又极大地推动了我国陨石和天体化学的发展。另外,这十年间我国南极陨石库的建设也取得了重要进展。

本文总结了我国陨石学和天体化学在2011—2020年间的发展情况,侧重于以陨石为重要对象的天体化学研究内容。

1 球粒陨石研究:早期太阳星云的起源与演化

球粒陨石是早期太阳星云凝聚吸积产物,不同化学群的球粒陨石代表了不同星云区域的成分特征,因此,球粒陨石是认识和探索太阳星云形成和演化的重要窗口,也是陨石学与天体化学研究的重要对象(王道德和王桂琴,2012;林杨挺等,2014)。十年来,我国在球粒陨石方面开展了较多工作,取得一些重要进展。

1.1 前太阳系颗粒研究

前太阳系颗粒,亦称太阳系外颗粒,主要包括金刚石(C)、碳化硅(SiC)、石墨(C)、氮化碳(C₃N₄)和刚玉(Al₂O₃)等,形成于早期恒星演化阶段,是认识恒星起源的重要样品对象。然而,传统的寻找前太阳系颗粒的方法为酸溶解和物理分选,这种方法既繁琐,又消耗大量珍贵的陨石样品。近年来,国内成功开发了在陨石薄片样品上原位开展同位素扫描方法,来寻找前太阳颗粒(林杨挺等,2013)。

Zhao等(2014)借助NanoSIMS高分辨同位素成像技术,在Sutter's Mill碳质球粒陨石中搜寻前太阳颗粒。Sutter's Mill陨石是2012年在美国加利福尼亚降落的一块CM2型碳质球粒陨石,是研究前太阳颗粒的理想样品。研究表明,该陨石的SiC总体丰度为 55×10^{-6} ,与其他碳质球粒陨石相似,同时研究了不同类型前太阳颗粒的原位产状,共发现37个碳同位素异常颗粒和1个氧同位素异常颗粒。37个碳异常颗粒中包括31个碳化硅颗粒和5个碳颗粒,氧异常颗粒为刚玉。但尚未发现前太阳系硅酸盐颗粒,可能是由于它们在行星母体中容易被水蚀变破坏。基质中SiC颗粒分布是不均匀的($12\times10^{-6}\sim54\times10^{-6}$),可能反映了细粒的基质碎屑来自不同太阳星云源区,或经历了不同的热历史(Zhao et

al.,2014)。这项工作证明,NanoSIMS原位扫描方法,不仅可以获得更丰富的信息,而且极大地提高了工作效率,为前太阳颗粒研究提供了更广阔的前景。

1.2 富铝球粒和富钙长石-橄榄石包体(POI)研究

球粒陨石的富钙铝包体(CAI)和球粒都是早期太阳星云的高温产物,它们记录了早期太阳星云演化的重要信息,对认识太阳系起源和星云演化过程具有重要意义。CAI包体是由富钙铝的硅酸盐和氧化物组成的一种特殊高温凝聚集合体,是太阳早期星云最早凝聚的物质,而球粒是太阳星云高温熔融由橄榄石和低钙辉石等镁铁质硅酸盐组成的球状物。成分特征表明,CAI包体和球粒没有直接联系,但是富铝球粒成分介于CAI包体和普通球粒之间。富铝球粒由钙长石和富钙辉石等富钙铝矿物组成,其Al₂O₃含量一般大于或等于10%,低于CAI包体,但高于普通球粒。研究表明,富铝球粒可能是CAI包体和球粒之间的过渡产物,其对于了解CAI包体和球粒的成因联系具有重要意义(Zhang et al.,2014)。

CAI包体形成于早期太阳星云,与蠕虫状橄榄石集合体(AOA)等难熔包体都是太阳星云降温过程的连续凝聚产物,为太阳星云凝聚理论提供了有力证据(Lin and Kimura,2003)。Dai等(2015)和Zhang等(2019b)研究了碳质球粒陨石中粗粒CAI包体,证明粗粒CAI包体是从星云凝聚后再经历熔融结晶而形成的。球粒的形成时间可能稍晚于CAI包体。CAI包体的²⁶Al/²⁷Al的初始比值为 5×10^{-5} ,而硅酸盐球粒的则约为 1×10^{-5} ,这一差异表明凝聚成因CAI包体的形成时间要早于球粒1~4 Ma,成分介于CAI包体和富Al球粒的POI包体也是CAI包体和球粒之间成因联系的有力证据。

氧同位素对于约束球粒陨石CAI包体和球粒在早期太阳星云形成源区具有重要意义。为了证明CAI包体和球粒之间的成因关系,国内学者对富铝球粒和POI包体开展了氧同位素研究。Zhang等(2014,2020b)和戴德求等(2020)对碳质球粒陨石的富Al球粒开展了岩石矿物学特征和氧同位素成分分析,结果发现富Al球粒的初始物质来源于CAI包体和镁铁质硅酸盐球粒的混合,而且富Al球粒中一些富¹⁶O的尖晶石或橄榄石颗粒可能是前期形成CAI包体在熔融结晶过程中的残留,这为CAI包体和球粒存在成因联系提供了证据。虽然大部分原始富钙铝包体具有富¹⁶O的同位素特征,但也有一

些证据表明部分原始的超难熔富钙铝包体是从相对贫¹⁶O的星云环境中形成的(Zhang et al., 2015)。蒋云等(2015)对普通球粒陨石[Grove Mountains (GRV) 022410 (H4), GRV 052722 (H3.7) 和 Julesburg (L3.6)]中富铝球粒开展了氧同位素分析,获得的富铝球粒的氧同位素组成($\delta^{18}\text{O}$ 为 $-6.1\text{‰} \sim -7.1\text{‰}$, $\delta^{17}\text{O}$ 为 $-4.5\text{‰} \sim -5.1\text{‰}$)与镁铁质球粒相近,远比CAI包体($\delta^{18}\text{O} = -40\text{‰}$, $\delta^{17}\text{O} = -40\text{‰}$)亏损¹⁶O。这表明普通球粒陨石中的富铝球粒不是CAI包体与普通球粒简单混合形成的,相反,它们很有可能在多次熔融过程中与贫¹⁶O的星云气体储库经历了更高程度的氧同位素交换(蒋云等, 2015)。

1.3 顽辉石球粒陨石研究

顽辉石球粒陨石是最还原的球粒陨石类型,对研究太阳星云的氧化还原条件具有重要意义,然而,顽辉石球粒陨石样品非常少见。GRV 13100 顽辉石球粒陨石是我国第30次南极科考队在南极格罗夫山发现的。该陨石的不透明矿物包括陨硫铁、陨硫铬铁矿、陨硫镁矿、陨硫钙矿、含硅铁纹石、陨磷铁矿、硅磷镍矿等金属硫化物和磷化物,总丰度达21%,并经历了一定程度的热变质(谢兰芳等, 2019)。谢兰芳等(2020)对该陨石中的硫化物开展了详细的矿物学研究,取得如下认识:①陨硫镁矿为太阳星云的直接凝聚成因,而且是在橄榄石和顽火辉石冷结晶之后形成的,变质温度主要为200~300℃,个别颗粒可达400~800℃,可能为外来吸入成因;②陨硫铁具有原生和次生两种成因,原生的陨硫铁由太阳星云直接凝聚而成,次生的陨硫铁则是在后期热变质过程中由铁镍金属经硫化作用或由陨硫镁矿分解形成;③硅磷镍矿可能是由富硅铁纹石的出溶形成。此外,由于顽辉石球粒陨石的多种同位素组成与地球的同位素组成相似,被认为是地球形成的前身物质或者类似物质。

2 原始无球粒陨石研究:行星的起源

2.1 原始无球粒陨石成因研究

原始无球粒陨石是指结构上无球粒、但化学成分上与球粒陨石相似的陨石(Weisberg et al., 2006)。这一概念最早由Prinz等(1983)在研究winnonaite陨石(W群)、橄榄古铜陨铁(lodranite陨石, Lord群)、富橄榄石陨石(brachinite, B群)和IAB和IIICD铁陨石(也称为IAB群)中的硅酸盐包体时提出的。目前原始无球粒陨石还包含acapulcoite(A群)和橄辉无球粒陨石(ureilite)(Weisberg et al., 2006; Collinet and Grove, 2020)。此外,一些未分群

的无球粒陨石,如Tafassasset陨石(Gardner-Vandy et al., 2012),也被认为是原始无球粒陨石。不过,对于橄辉无球粒陨石是否是原始无球粒陨石还存在争议(Krot et al., 2014)。

原始无球粒陨石的成因始终是天体化学领域所关注的问题之一。绝大部分原始无球粒陨石群的氧同位素组成不均匀,通常被认为是球粒陨石母体发生不完全熔融的产物(Rumble et al., 2008; Day et al., 2012);然而,W群陨石的氧同位素成分比较均一,这可能是母体较小的原因。

橄辉无球粒陨石与B群陨石被认为是堆晶形成的(Mittlefehldt, 2008)或是熔融残余相(Weisberg et al., 2006)。当然,原始无球粒陨石存在演化程度的差异,如A-Lord陨石系列中,A群陨石的演化程度不及Lord群陨石演化程度高,W群陨石的个体也存在类似情况(Zeng et al., 2019)。原始无球粒陨石在很大程度上保留了与球粒陨石相似的初始地球化学特征,而分异的无球粒陨石的初始地球化学特征则被后期的演化所湮没。原始无球粒陨石作为球粒陨石与无球粒陨石之间的纽带,其保留了小行星母体初始分异状态(Touboul et al., 2009)。因此,原始无球粒陨石不但可以为太阳系早期小行星演化过程提供约束(如其初始球粒陨石母体物质的性质、超变质或部分熔融的程度、变质或部分熔融的热源等),而且能为我们理解地球和月球等类地行星天体早期演化提供必要信息。

原始无球粒陨石是非常稀少的,国内非常缺乏此类陨石样品。近年来,由于南极陨石和沙漠陨石搜寻工作得到快速发展,原始无球粒陨石及其相关陨石类型实现了从无到有的突破,为我国陨石学研究提供了良机。在南极格罗夫山发现2块W群陨石(GRV 021663 和 GRV 022890)、1块来自A-Lod群母体的球粒陨石(GRV 020043)(Li et al., 2011, 2018; Zeng et al., 2019);在新疆戈壁地区,我国分别发现了1块橄辉无球粒陨石(Loulan Yizhi 034)和1块B群陨石(Kumtag 061)(源自国际 Meteoritical Bulletin Database)。

GRV 020043 陨石是一块4型球粒陨石,氧同位素和铬同位素分析表明,它属于未分群陨石,是来源于A-Lord系列原始无球粒陨石源区,也就是说,GRV 020043 陨石是A-Lord系列陨石的球粒陨石质初始物质,可能是A-Lord系列原始无球粒陨石的早期母体,而A-Lord陨石是由它热变质或部分熔融而成(Li et al., 2018)。根据对比研究,A-Lord原始无球粒陨石母体小行星的可能结构,从核部到最外层

依次为富金属 Lord 群陨石物质[如 Northwest Africa (NWA) 468 和 Graves Nunataks (GRA) 95209]、典型的 Lord 群陨石物质、A/Lord 过渡型、典型的 A 群陨石物质和类似 GRV020043 的球粒陨石物质 (Zeng et al., 2019)。然而,有些未分群无球粒陨石(如 NWA 7325)与 A-Lord 原始无球粒陨石具有相似的氧和铬同位素组成。另外,有些原始无球粒陨石(如 Tafassasset)的成分特征与碳质球粒陨石非常相似 (Gardner-Vandy et al., 2012; Kruijer et al., 2020)。这些现象说明,W 群原始无球粒陨石的成因及其与球粒陨石的关系可能是复杂的。总之,原始无球粒陨石成因还有待更多的样品和更深入的研究 (Li et al., 2018)。

GRV 021663 和 GRV 022890 是两块南极 W 群原始无球粒陨石,它们的主要组成矿物为镁橄榄石、顽火辉石、铁纹石和陨硫铁等,但二者的矿物丰度差异很大,前者非常富含镁橄榄石。根据一系列的 W 群陨石(包括南极陨石 GRV 021663 和 GRV 022890)对比研究发现,W 群陨石母体仅发生了较为有限的部分熔融,冲击作用可能在母体的演化过程中扮演了重要角色,其母体小行星具有一个多层结构 (Li et al., 2011; Zeng et al., 2019)。

2.2 陨石的古剩磁研究

由于磁场能够传输角动量并驱使星际增生,所以它对原始星云盘的结构和演化具有重要意义。有证据表明原始太阳行星盘存在大规模磁场,而且球粒的古地磁测量发现中盘太阳星云,即类地行星区,在太阳系形成后的 1~3 Ma 之内,其磁场强度是 5~50 μT 。因此,陨石古剩磁研究对太阳系行星形成和演化具有重要意义。国内学者开展了钛辉无球粒陨石的古磁场分析,为早期类地行星区太阳星云飘散和其他大行星的形成提供时限约束 (Wang et al., 2017)。他们研究的三块钛辉无球粒陨石是 D'Orbigny、Sahara 99555 和 Asuka 881371,其辉石 Pb/Pb 年龄分别是 (4563.37 $\pm$ 0.12) Ma、(4563.54 $\pm$ 0.14) Ma 和 (4562.4 $\pm$ 1.6) Ma。三块陨石的古剩磁几乎为零 (<0.3 μT),表明它们形成时(即太阳系形成之后约 3.8 Ma)类地行星区太阳星云环境没有磁场。这项研究表明,钛辉无球粒陨石磁性对于约束太阳内地行星区的消散和类木气体行星的形成具有重要意义,同时也为球粒的非星云凝聚的撞击成因提供有力证据 (Wang et al., 2017)。

3 HED 族陨石:灶神星的变质历史

根据红外光谱观测、同位素研究及“黎明号”探

测器数据分析,普遍认为 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 Eu-crite 和奥长古铜无球粒陨石 Diogenite)起源于 4 号小行星即灶神星 (McSween et al., 2013; Mittlefehldt, 2015),因此,HED 族陨石也被称为灶神星陨石。

HED 族陨石是经过广泛熔融分异的岩浆岩,与地球岩浆岩的物质组成非常相似 (Mittlefehldt, 2015)。但与地球、月球和火星的岩石组成不同的是,HED 族陨石有非常古老的岩浆结晶年龄,同位素得到其结晶年龄 4.43~4.55 Ga (Misawa et al., 2005; Mittlefehldt, 2015),是目前太阳系最古老的岩浆岩之一。灶神星的岩浆演化过程非常短暂(约 10 Ma),后期没有更年轻的岩浆活动叠加,但是在岩浆作用过程或期后一个较小的时间段内发生了热变质作用 (McSween et al., 2011)。由于灶神星上缺乏地质构造运动和生物活动,而且整体挥发分含量低,其岩石应较好地保留了早期的热变质、冲击变质、流体蚀变等现象。因此,HED 族陨石是探索和研究太阳系分异型行星或小行星早期岩浆演化和变质作用的理想对象和重要窗口 (陈宏毅等, 2016)。

近十年来,国内开展了较多的 HED 族陨石的岩相学、地球化学以及同位素年代学等研究,并在 HED 族陨石的成因和灶神星的地质作用方面获得了一些重要认识:

(1)根据 166 块 HED 族陨石氧同位素统计分析,发现其中 146 块具有非常一致的 $\Delta^{17}\text{O}$ 值,另外 20 块的 $\Delta^{17}\text{O}$ 值出现异常。对这 20 块氧同位素异常陨石的氧同位素分析,发现其中 15 块的氧同位素异常源自内部因素(即母体成分),因此提出 HED 族陨石母体不仅仅限于灶神星,可能还有其他小行星母体 (Zhang et al., 2019a);

(2)在一块苏长质 Diogenite 陨石 NWA8321 的研究中,发现了富硫化物交代橄榄石现象,证实部分 Diogenite 陨石具有部分熔融现象,对灶神星存在岩浆演化后期交代作用提供了重要依据 (Zhang et al., 2020a)。

(3)Eu-crite 陨石 NWA 8009 是一块撞击熔融角砾岩,根据其成分环带、岩相特征及 Zr/Hf 比值特征的研究发现,其中的锆石为热变质成因锆石,其 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 (4560 $\pm$ 8) Ma,由此限定了灶神星的全球热变质作用为约 4.55 Ga。这一研究成果为 HED 族陨石的热变质成因机制及其热液等提供了重要的年代学依据 (Liao and Hsu, 2017)。

(4) 在 HED 族陨石冲击变质效应和灶神星撞击作用研究方面也取得了一些重要认识 (Liao and Hsu, 2017; Pang et al., 2018; Chen et al., 2019)。Pang 等 (2018) 在 Eucrite NWA 8003 的冲击熔融区域中找到了柯石英、斯石英和超硅石榴子石等高温高压矿物相,并在一个富钛冲击熔融囊中发现了蓝晶石、刚玉及新矿物——灶神星矿 (Vestaite), 这为 HED 陨石经历的冲击变质强度 (10 GPa 左右) 找到了确切证据。Chen 等 (2019) 报道了 Eucrite NWA 2650 中长石转变为钙铝榴石+蓝晶石+二氧化硅玻璃组合、锆石转变为斜锆石等多种冲击变质现象。Liao 和 Hsu (2017) 对 Eucrite NWA 8009 中磷灰石进行了 U-Pb 同位素研究,为灶神星高强度冲击变质事件提供了新的年代学数据 (约 4.1~4.2 Ga)。

(5) 灶神星挥发分流体研究已成为国内陨石学和天体化学研究的热点。在较早期的研究中,灶神星被认为是挥发分贫瘠的小行星 (Papike, 1998; McSween et al., 2011)。但近些年,国内学者通过对 HED 族陨石中次生蚀变矿物的研究,指出灶神星表面和岩浆中很可能存在挥发分-岩石相互作用过程 (Zhang et al., 2013, 2020a; Pang et al., 2017; Wang et al., 2019; Huang et al., 2020), 主要证据包括:①发现穿插矿物和岩石的硅酸盐矿物脉。Pang 等 (2017) 在 Eucrite NWA 1109 陨石中观察到为三种硅酸盐脉:富铁橄榄石脉、富镁橄榄石脉和辉石脉,这些硅酸盐脉不但与撞击作用有关,还可能与流体参与。国际上认为这种脉状矿物可能是次生蚀变形成的,而且与含 H_2O 流体有关 (Barrat et al., 2011; Warren et al., 2014)。②辉石、橄榄石和石英等矿物存在富硫化物的交代还原结构。Zhang 等 (2013) 和 Wang 等 (2019) 分别在 Eucrite 陨石 NWA 2339 和 NWA 1109 中发现了富铁辉石的富硫化物交代还原结构,并认为这是干的富硫蒸汽对辉石的交代作用形成的,硫蒸汽来源于撞击作用。另外,Zhang 等 (2018, 2020a) 在 Howardite 陨石中发现了橄榄石被陨硫铁-斜方辉石交代结构,提出这种硫化物交代结构应是富硫蒸汽与橄榄石反应产物,而且硫化作用应是灶神星的内部过程。除橄榄石和辉石被交代现象外,Huang 等 (2020) 还在单矿碎屑 Eucrite NWA 11591 中发现磷石英的富硫化物交代结构,首次提出 HED 族陨石中磷石英的硫化作用机制,为硫化作用增添了新的矿物类型。这些工作证实灶神星岩浆演化和变质过程中应存在挥发分流体的参与,除可能的含 H_2O 流体作用外还可能存在富硫蒸汽的硫化作用,这为重新审视贫挥

发分灶神星的岩浆演化和变质历史提供了新的线索。

4 火星陨石与月球陨石:岩浆作用与行星环境

随着我国嫦娥工程的成功实施和新一轮火星探测高潮 (耿言等, 2018; Li et al., 2019) 的到来,以及国际上月球和火星陨石的申报数量大幅度增加 (据国际陨石数据库统计,2011 年 1 月至 2020 年 12 月,月球陨石从 157 块增加到 435 块,火星陨石从 105 块增加到 291 块),我国月球陨石和火星陨石的研究也产生了积极响应,并取得了重要进展。

4.1 月球陨石研究

月球是人类迈出地球走向太空的第一个跳板,因此,半个多世纪以来,月球都是国际深空探测的热点。美国 Apollo 计划和苏联月球计划采集了 382 kg 月球样品,这些样品对月球科学研究发挥了重要作用。但由于月球采样仅仅局限于几个着陆点,而月球陨石来源是随机的,对月球成分更具有代表性,因此,月球陨石依然是认识和研究月球物质成分的重要窗口。月球陨石传统上分为高地斜长岩、月海玄武岩和混合角砾岩。由于长期的撞击和太空风化,大部分月球陨石为碎屑岩,这些碎屑岩主要具有三种端元:斜长岩、玄武岩和克里普岩 (Miao et al., 2014)。近年来,国内对月球陨石进行了不少岩石学和矿物化学研究 (夏志鹏等, 2013; 谢兰芳等, 2013; 姚杰等, 2013; Xie et al., 2014), 为了解月球表面物质成分和演化过程提供了一些基础数据。在此基础上,月球陨石研究还取得了一些有关月球成分和岩浆演化的重要认识:

(1) 月球岩浆演化的认识。Xu 等 (2020) 研究了 10 块月球陨石的稀土元素和不相容元素成分,发现斜长石的稀土元素丰度和模式与斜长石共生的镁铁质矿物的 $Mg^\#$ 值没有相关性,而且斜长石的稀土元素丰度是镁铁质矿物的 40 倍,据此提出月球斜长岩不是简单的月球岩浆洋 (LMO) 岩浆分异产物,而是 LMO 岩浆分异和后期 KREEP 熔体或月幔部分熔融物质交代作用的结果。

(2) 富尖晶石斜长岩型陨石的发现。周剑凯等 (2019) 发现了一块富含尖晶石的月球斜长岩的陨石 NWA 12279,这块陨石具有完整的结晶结构,主要由斜长石 (70.6%)、橄榄石 (11.3%)、辉石 (10.0%) 和镁铝尖晶石 (7.0%) 等组成,其中尖晶石存在两种产状:粗粒的八面体斑晶和撞击熔融再结晶的小尖晶石颗粒。NWA 12279 陨石为上月幔

代表性岩石“富镁橄榄石+富铝低钙辉石+镁铝尖晶石”的矿物组合找到了直接证据(Wittmann et al., 2019),同时也印证了印度探月卫星“月船一号”M3光谱仪在月球大型撞击坑中央山峰和环形山上发现的含镁铝尖晶石斜长岩(PSA)(Prissel et al., 2014),这对探索月球岩浆演化过程具有重要意义。

(3)极高钾(VHK)的KREEP岩性的发现。Lin等(2012a)在月球陨石 Sayh al Uhaymir(SaU) 169 撞击熔融角砾岩中发现了K含量异常高的KREEP岩屑,即极高K(VHK)KREEP岩性,证明LMO演化结晶晚期存在最后残余液相,为LMO晚期岩浆侵入作用的不均一性提供了证据。

(4)月球陨石冲击变质效应及锆石年龄研究。月表撞击坑形貌和月球陨石丰富的角砾结构充分证明,撞击作用在月球演化历史中具有重要地位。但有关记录月球撞击事件过程条件的研究还比较薄弱。近年来,国内在月球陨石撞击现象和撞击定年研究上取得较大进展。Zhang等(2011)在Dhofar 458月球陨石中发现了锆石的多晶和多孔结构,为月球撞击事件的温度压力条件找到了有力证据。陈宏毅等(2015)在低钛玄武岩月球陨石MIL 05035中发现了三斜铁辉石在撞击作用下分解形成的“钙铁辉石+铁橄榄石+石英”组成的后成合晶。

为精确确定月球撞击事件的演化时间,我国学者对月球陨石和Apollo样品进行了同位素定年研究。Wang等(2012)研究了月球陨石NWA 4734的稀土元素和斜锆石年龄,发现其中的辉石和斜长石具有与LaPaz Icefields(LAPs) 02205/02224低钛玄武岩陨石相似的稀土元素富集规律,二者斜锆石年龄[(3073±15)Ma]与LAPs[(3039±12)Ma]相近,提出它们来自月球上相同的或类似的陨石坑。Liu等(2012)利用SHRIMP-II离子显微探针测试了月球陨石SaU 169高钛冲击熔融角砾岩和Apollo 12号月壤样品中的锆石颗粒的年龄,发现二者具有近似的结晶年龄,分别为(3920±13)(2σ)Ma(SaU 169)和(3914±7)(2σ)Ma,这是国内第一次利用阿波罗样品获得的雨海撞击事件的锆石年龄。

4.2 火星陨石研究

火星陨石是因撞击事件而随机来自火星表面的岩石,对其研究可为火星岩浆演化过程提供直接证据并限制其源区特征。国内以火星陨石为对象,开展了火星深部岩浆作用、年龄限制、流体作用和有机物探测等研究,取得了一系列成果:

(1)火星岩浆作用。通过对含粗粒橄榄石斑晶辉玻无球粒陨石NWA 8716的岩石学、矿物学和稀土

元素地球化学研究,发现该陨石来源于轻稀土亏损的开放型火星岩浆环境,其中橄榄石斑晶是从与早期母岩浆成分相似的熔体中堆晶而成(吴蕴华等,2014)。根据NWA 7034火星陨石中角砾的锆石和磷灰石的原位同位素年龄分析,确定该陨石中岩屑的结晶年龄比较老,最老可达~4465 Ma,表明火星岩浆活动非常早,在太阳系早期很强烈(Hu et al., 2019)。而目前发现最年轻的火星岩石是Zagami陨石,它的结晶年龄仅为180 Ma,可能代表了火星上被溅射出来的最年轻的岩浆岩(Zhou et al., 2013)。

(2)火星壳的热液交代作用和水岩反应。NWA 7034是首块火星表土角砾岩,主要由各种火成岩屑、矿物碎屑和冲击熔融基质组成,其全岩水含量高达 6000×10^{-6} ,也是目前最富水的火星样品。Liu等(2016)首次在NWA 7034和NWA 7533(成对陨石)中发现了富含稀土的磷酸盐和硅酸盐,3个磷灰石中独居石的U-Pb年龄分别为(1.0±0.4)Ga(2σ)、(1.1±0.5)Ga(2σ)和(2.8±0.7)Ga(2σ),记录了火星壳中热液流体和岩石相互作用的变质年龄,这指示火星在1 Ga或更早的时候就广泛存在热液流体。另外,Hu等(2019)对NWA 7034陨石的基质中变质锆石和磷灰石进行了同位素测年,获得其锆石年龄(1634±93 Ma)和磷灰石年龄(1530±65 Ma)较年轻,而且具有富D(δD为313‰~2459‰)和³⁷Cl(δ³⁷Cl为-2.2‰~+3.8‰),表明火星在1.6 Ga年前存在含挥发分流体参与的变质作用。

Hu等(2019)对NWA 7034开展了岩矿、锆石微量元素、锆石和磷酸盐的U-Pb定年和磷酸盐的水含量、H同位素和Cl同位素分析,发现:①火星在15亿年前就存在富D和富P流体的水岩作用。NWA 7034中锆石发生蜕变质,其非晶区域明显富集P、Y和U,表明有流体参与。锆石未变质区域同位素年龄为44亿年,而变质非晶质区域只有15亿年,另外NWA 7034中所有磷酸盐年龄也为15亿年。结合磷酸盐具有富D和蜕变质锆石富P的特征,说明15亿年前的强烈变质事件有富D和富P流体参与,指示该流体可能来自火星浅表;②火星贫D和贫³⁷Cl流体的水岩作用。NWA 7034中磷灰石的水含量和H同位素具有明显的负相关,说明经历过两端元混合,其中一个端元富D,另一端元贫D,富D端元可能发生在15亿年前,与磷酸盐U-Pb体系被重置相关。磷灰石的剖面分析结果表明,从边部向核部水含量是降低的,而H和Cl同位素则呈升高的趋势,指示磷灰石的水从外往里扩散,且其源区来自火星内部,而非地球水的污染。

(3)火星水与挥发分研究。火星被认为是最有可能孕育过生命的地外行星(Lin et al., 2014b),这是当前国际深空探测的热点之一。现有的火星探测和火星陨石研究表明,火星早期很可能存在海洋和大量的水体(Ehlmann et al., 2011),为生命演化提供了基本条件。大约30亿年前,火星表面就已经变成现在这样极度的寒冷和干旱(Ehlmann et al., 2011)。火星剧烈环境变迁,主要受控于内部的岩浆活动。火星内部的挥发分(水、碳、氟、硫、氯等)含量是串联火星生命、古环境和岩浆活动的重要纽带,是探索火星演化历史的钥匙。因此,近十年来,国内以陨石为对象,开展了火星挥发分和水的研究,进而讨论火星的水环境、水岩作用、火星幔挥发分等科学问题。

火星幔的水、硫和氯含量一直是火星科学的研究热点。目前普遍认为火星幔的水含量为 $\sim 20 \times 10^{-6}$,比地球富Cl($\sim 3000 \times 10^{-6}$),而火星幔一直有贫硫和富硫的争议(Filiberto et al., 2016)。Hu等(2014, 2020)对我国南极回收的GRV 020090火星陨石和NWA 6162陨石中的岩浆包裹体和磷灰石的水含量和氢同位素进行了研究,获得有关火星水的重要认识:①该样品岩浆包裹体的水含量和氢同位素具有非常好的对数相关性,指出这是与火星大气水交换的结果,从而推断火星大气的氢同位素组成为 $6034\text{‰} \pm 72\text{‰}$,与“好奇号”的探测结果一致(Leshin et al., 2013; Webster et al., 2013);②这些岩浆包裹体的水含量和D/H比值非常不均匀,二者都是从中央向外逐渐升高,说明这些水是由外部扩散进入冷却后的岩浆包裹体的。因此,这是火星大气水而不是岩浆水,这是首次发现火星存在大气降水的同位素证据;③NWA 6162陨石熔融包裹体的水含量和氢同位素具有非常好的对数正相关关系,指出这是火星大气水交换的结果,说明熔融包裹体中的水大部分来自火星的浅表,证明当时火星表面有水的存在(Hu et al., 2020)。

此外,Hu等(2020)还对NWA 6162陨石的熔融包裹体开展了硫、氯及其与水的相关性研究,结果发现:①熔融包裹体中的S以纳米到微米颗粒均匀分布在熔融包裹体内,可能是金属硫化物,而且硫含量与水含量无明显相关性;②氯含量与水具有正相关关系,落在火星幔源和壳源物质的混合线上,说明熔融包裹体的氯含量也受到了水岩作用的影响;③据估算,火星幔的水、氯和硫含量分别为 $0.1 \times 10^{-6} \sim 3 \times 10^{-6}$ 、 $0.5 \times 10^{-6} \sim 4 \times 10^{-6}$ 和 $0.5 \times 10^{-6} \sim 15 \times$

10^{-6} ,明显比地球地幔“干”。

(4)火星陨石中有机碳的发现。Tissint是一块2012年目击降落在摩洛哥的火星陨石,也是人类能够识别火星陨石以来的第一次目击降落,极大程度避免了地球的污染。Lin等(2012b)通过对赋存在Tissint火星陨石裂隙和冲击熔脉中的碳同位素分析,获得有机质的 $\delta^{13}\text{C}$ 为 $-12.8\text{‰} \sim -33.1\text{‰}$,这比火星大气中的 CO_2 和碳酸盐要轻得多,碳质组分类似于油母岩质干酪根,推断这些碳可能来自Tissint母岩冲击诱发裂缝中的流体沉积,渗入火星表面岩石中的富含有机质液体的存在对火星古环境的研究具有重要意义,也有助于寻找火星上可能存在的古代生物活动痕迹。

5 陨石稀有气体研究:小行星的母体演化历史

稀有气体包括氦(He)、氖(Ne)、氩(Ar)、氪(Kr)、氙(Xe)和氡(Rn)六种元素,其不仅在地球科学中具有重要的示踪作用,也是行星物质重要的溯源途径(贺怀宇等, 2010; 张川统等, 2018)。近十年来,国内学者积极开发陨石稀有气体测试方法,实现了微量样品激光熔融稀有气体测量,为我国快速发展的比较行星学和深空探测提供了先进的研究平台(王英等, 2018),基于此陨石稀有气体研究也取得了长足进展。

5.1 月球陨石稀有气体的研究

月球表面覆盖了一层厚约5~12 m的表土层或月壤。它的形成经历了漫长的地质过程,包括太阳风植入、宇宙射线辐射、撞击及埋藏等。为解析这些地质过程和反演月球演化历史,离不开稀有气体及其宇宙射线暴露年龄研究(Herzog, 2007)。

根据探月工程需求,张川统等(2018)开展了月球陨石稀有气体研究,对月球陨石稀有气体浓度、同位素比值和宇宙暴露年龄数据进行对比分析,进而讨论月球陨石演化历史。取得的主要认识有:①随着暴露程度的增大,即从非角砾岩、角砾岩到表土角砾岩,月表物质的稀有气体浓度逐渐增高;②月球陨石稀有气体成分中不存在太阳高能粒子Ne的组分,富重Ne组分是太阳风分馏作用的产物;③月球陨石存在两种宇宙暴露年龄,分别是地月转移时间的 $T_{4\pi}$ 年龄,以及指示陨石在月表受到宇宙射线辐射累积时间的 $T_{2\pi}$ 年龄,且绝大多数表土角砾岩在月球表面经历了约400~1000 Ma的驻留历史,而非表土角砾岩则要短的多;④月球陨石在离开月球后约 (0.4 ± 0.9) Ma内进入地球大气层。另

外,Ranjith 等(2019)分析了月球陨石 NWA 10203 不同角砾和基质的稀有气体组成,发现这些样品同时含有宇宙射线成因、放射性成因及太阳风组分的稀有气体,这与其斜长岩质表土角砾岩的岩石学研究结果相一致,另外他们计算得到的陨石角砾的 CRE 年龄约为 66~70 Ma。

5.2 南极陨石稀有气体研究

由于南极格罗夫山陨石富集区的发现,我国获得了大量陨石样品(Miao et al., 2018),这为开展不同类型陨石的稀有气体研究提供良机。目前已开展的南极陨石稀有气体工作主要有如下方面:

(1)普通球粒陨石。Ranjith 等(2017)和 Wang 等(2020)对南极格罗夫山 H 群和 L 群普通球粒陨石进行了稀有气体成分分析。结果表明,H 群和 L 群陨石的 K-Ar 气体保存年龄分别是 (3.67 ± 0.26) Ga 和 (459 ± 13) Ma,佐证了 H 群母体在 3.5~4.0 Ga 期间发生的大型撞击事件,支持了 L 群陨石母体在 470 Ma 发生的撞击破裂。3 个 H 群陨石具有不同的宇宙暴露年龄(CRE): (3.8 ± 0.3) Ma、 (5.9 ± 0.4) Ma 和 (16.6 ± 1.5) Ma,这与 H 群陨石母体发生在 4、7.2 和 15~20 Ma 的撞击溅射事件相一致;而 2 个 L 群陨石具有近似的宇宙暴露年龄,分别为 (17.4 ± 1.1) Ma 和 (17.6 ± 1.5) Ma,可能代表 L6 群陨石母体发生在 ~15 Ma 的撞击溅射事件。

(2)HED 族陨石。GRV 13001 是一块发现于南极格罗夫山的玄武质单矿碎屑角砾岩 Eucrite 陨石,Zhang 等(2021)对其进行了稀有气体研究,结果发现该陨石 CRE 年龄为 (29.9 ± 3.0) Ma,表明其很可能在 ~30 Ma 从母体灶神星溅离。它的 K-Ar 气体保存年龄 ~3.6~4.1 Ga,小于 Eucrite 陨石(~4.55 Ga)结晶年龄,表明其⁴⁰K-⁴⁰Ar 体系已发生了重置,这很可能是大型撞击事件引起的。

5.3 沙漠陨石稀有气体研究

除南极外,沙漠地区也是陨石重要的富集区。近年来,我国在西北沙漠地区开展了陨石搜寻工作,找到了不少陨石,发现了我国新疆等地沙漠戈壁地区为陨石富集区。沙漠陨石的分布特征和富集规律对于了解地外物质降落通量和陨石降落历史是非常有意义的。新疆陨石猎人 2012 年在库木塔格沙漠一个陨石密集分布区发现了 24 块陨石样品。为了了解该分布区的陨石降落次数,Zeng 等(2018)对 24 块陨石开展了岩石学、矿物学、微量元素成分、密度和孔隙度等研究。通过综合对比,他们发现其中的 22 块 L5 型陨石为成对陨石,其他 2 块(Kumtag 021, L4 型和 Kumtag 032, L6 型)是不

同时间降落的不同类型陨石。此外,该区域还发现了 Kumtag 003 陨石(H5 型),由此证明该区域至少存在 4 次陨石降落。为了了解陨石降落前的大小和来源历史,Zeng 等(2018)还对 9 块 L5 成对陨石和 2 块独立陨石进行了稀有气体成分分析,结果表明它们的宇宙暴露历史不同,L5 型成对陨石宇宙暴露年龄为 $(3.6 \pm 1.4) \sim (5.2 \pm 0.4)$ Ma, L6 型陨石宇宙暴露年龄为 (4.7 ± 0.8) Ma, L4 型陨石宇宙暴露年龄略微偏高为 (5.9 ± 0.4) Ma。根据稀有气体同位素组成,推测 3 个陨石进入地球大气层前的最小半径分别约为 76、18 和 17 cm。

6 陨石非传统同位素研究:太阳系早期演化及类地行星起源的指示

随着同位素质谱测试技术的快速发展,大量用传统的质谱仪无法精确测量的非传统同位素体系得以准确测定。过去十年,我国在陨石金属稳定同位素研究方面取得了显著进展。

6.1 非传统稳定同位素陨石储库研究

同位素储库是研究各种地质体形成与演化的前提和基础,陨石储库则是研究太阳系、行星与小行星成因和演化的同位素参照标准。近年来,国内对陨石中的 Cr(刘佳, 2019)、V(Xue et al., 2018)、Ca(Wu et al., 2020)、Cu(Xia et al., 2019)、Zn(Xia et al., 2019)等同位素开展了分析研究,建立了分析流程,获得了部分陨石类型的同位素储库。

同位素测试方法和条件、样品代表性及样品量效应等,均对陨石储库同位素数据的质量有影响。使用 MC-ICP-MS 测试 Cr 同位素,容易受样品回收率和 ArN⁺ 的干扰。与 MC-ICP-MS 相比,TIMS 测定 Cr 同位素不受上述困扰,是测试 Cr 同位素最精确的方法,秦礼萍和夏九星(2014)开发了 TIMS 测定 Cr 同位素方法,分析了球粒陨石的 Cr 同位素成分,结果表明球粒陨石的 Cr 同位素组成与地球一致,行星核幔分异不会造成 Cr 同位素的分馏或者使得地核中的 Cr 含量降低。

高精度钒(V)同位素分析技术难度大,国际上陨石 V 同位素工作也较少。Xue 等(2018)率先在国内开展 V 同位素分析和研究,他们对 11 块 L 化学群普通球粒陨石进行了系统的 V 同位素测试,测试在中分辨下进行($\Delta M/M > 5500$),得到的 $\delta^{51}\text{V}$ 值为 $-1.76\text{‰} \sim -1.08\text{‰}$,显示普通球粒陨石的 V 同位素组成具有一定的不均一性。

6.2 陨石同位素异常研究

同位素异常是天体化学研究的重要领域。它

是同位素组成无法用质量分馏、放射性衰变和宇宙射线辐射去解释陨石和地球样品同位素组成上的差异的原因。这些异常程度非常低,但对了解和研究太阳系的演化具有重要意义,全岩同位素异常的发现对太阳系早期演化模型提出了新的挑战。与同位素质量分馏相比,同位素异常不易受后期各种地质过程的影响,这使得金属元素的同位素异常成为示踪天体物质来源、反演太阳系形成时的星际环境的最直接证据(秦礼萍,2015)。由于不受各种地质作用的影响,同位素异常可以直接用来反演太阳系形成时的星际环境、示踪来自不同核合成源区的混合过程,以及指示天体样品物质来源和成因的联系(Qin and Carlson, 2016)。随着高精度质谱仪的发展,行星尺度上的多个体系的同位素异常被发现并证实,这些同位素异常颠覆了人们对于早期太阳系同位素组成在行星尺度上均一的认识,对太阳系早期演化模型提供了新的制约(Qin and Carlson, 2016)。产生核合成异常的载体是陨石中的前太阳系颗粒,它们通常携带了极端的同位素核合成异常组分(Zinner, 1998)。

秦礼萍(2015)对陨石金属同位素异常进行了系统总结。目前,国际上陨石中已经发现金属同位素异常主要有(秦礼萍,2015,及其引用的相关文献):①很多金属元素在不同类型陨石中存在同位素异常,主要发现于球粒陨石 CAI 包裹体中和一些陨石全岩成分;② ^{48}Ca 和 ^{50}Ti 异常主要发现于富黑铝钙石型 CAI 包裹体中($\epsilon^{50}\text{Ti}$: -600 ~ 2500; $\epsilon^{48}\text{Ca}$: -700 ~ 1000);③许多陨石类型都发现 ^{54}Cr 同位素异常($\epsilon^{54}\text{Cr}$),另外,它们的 $^{54}\text{Cr}/^{52}\text{Cr}$ 值有非常系统的变化;④Mo 同位素体系也是目前为止观测到的行星尺度上异常程度最大的金属同位素体系之一,几乎所有陨石全岩样品均显示 $\epsilon^{92}\text{Mo}$ 正异常,以 CM 中的异常程度最高;⑤陨石中还存在 ^{62}Ni 、 ^{100}Ru 、 ^{84}Sr 等其他同位素异常。

不同类型陨石的 $^{54}\text{Cr}/^{52}\text{Cr}$ 比值存在系统变化,说明在大规模时空上原始太阳星云盘存在同位素不均一性(Qin et al., 2010),所以 Cr 同位素异常的发现是探索上述同位素不均一性的关键。为此,Qin 等(2011a,2011b)对碳质球粒陨石和普通球粒陨石开展了同位素异常研究,他们在 C1 型碳质球粒陨石 Orgueil 中发现了 ^{54}Cr ($\delta^{54}\text{Cr}/^{52}\text{Cr} > 1000\%$) 同位素载体——纳米级的含铬氧化物。据分析,估计观察到的异常只是下限,真正的异常可能达 50000%,这些颗粒极有可能来自两类超新星(SN II)的内层(O/Ne 层)(Qin et al., 2011b)。因此,提出这些极

端富 ^{54}Cr 的氧化物可能是随超新星的爆发加入到初始太阳星云的,因此保留了同位素分布上的不均一性(Qin et al., 2011a)。

6.3 宇宙射线对金属同位素体系的影响及校正

陨石在进入地球大气前长期暴露在宇宙射线的辐射下,样品中的核素会与宇宙射线中的高能粒子发生相互作用,产生宇宙成因核素。大量的宇宙成因核素会显著改变天体样品的同位素组成,进而影响样品宇宙射线辐射前的同位素信息。因此,有效评估和校正宇宙射线对同位素的影响是天体化学中一个十分重要的领域(刘佳,2019)。

宇宙成因 Cr 同位素的生成是由散裂反应所主导(Leya et al., 2004)。Liu 等(2019)系统分析了 25 块来自 9 个化学群的铁陨石样品的 Cr 同位素组成,他发现这些铁陨石的 Cr 同位素组成变化极大, $\epsilon^{53}\text{Cr}$ 的变化范围为 $(-0.04 \pm 0.44) \sim (268.29 \pm 0.14)$, $\epsilon^{54}\text{Cr}$ 的变化范围为 $(0.28 \pm 0.72) \sim (1053.78 \pm 0.72)$ 。 $\epsilon^{53}\text{Cr}$ 和 $\epsilon^{54}\text{Cr}$ 之间存在很好的正相关关系,其最佳拟合线为 $\epsilon^{54}\text{Cr} = (3.90 \pm 0.03) \times \epsilon^{53}\text{Cr}$,指示铁陨石中的 Cr 是铁陨石自生 Cr 与宇宙成因 Cr 两端元混合的结果。通过监测铁陨石中宇宙成因 $\epsilon^{54}\text{Cr}$ 的变化和模拟参数,计算了宇宙辐射效应对样品中 $\epsilon^{53}\text{Cr}$ 的影响,给出了铁陨石中 Cr 同位素组成与控制因素之间的函数关系。

月球表面长期暴露在宇宙射线辐射影响之下,月球样品普遍具有较高的辐射年龄,其原始同位素组成也很容易被改变。秦礼萍等(2017)和刘佳(2019)系统研究了 3 块阿波罗样品和 13 块月球陨石样品的 Cr 同位素组成。实验结果表明月球样品的 Cr 同位素组成存在显著的变化($\epsilon^{53}\text{Cr}$ 约有 0.4ϵ 的变化, $\epsilon^{54}\text{Cr}$ 约有 1.0ϵ 的变化),大部分月球样品的 $\epsilon^{53}\text{Cr}$ 和 $\epsilon^{54}\text{Cr}$ 具有正相关关系(斜率约为 2.7),该相关关系也是由于宇宙射线辐射引起的。然而,月球样品中 $\epsilon^{53}\text{Cr}-\epsilon^{54}\text{Cr}$ 的斜率低于铁陨石,可能反映了陨石组成的差异(石陨石与铁陨石)或辐射模型的差异。4 块月球冲击熔融角砾岩陨石的 Cr 同位素组成偏离正相关关系线,可能是由普通球粒陨石(OC)或顽火辉石球粒陨石(EC)碰撞体的混染引起的。为了校正月球样品中 Cr 同位素受宇宙射线辐射的影响,我们用化学方法分离了阿波罗样品中具有较低 Fe/Cr 比值的尖晶石相(尖晶石、铬铁矿等)和较高 Fe/Cr 比值的非尖晶石相(辉石、橄榄石等),并分析了各相的 Cr 同位素组成。据对比分析,获得了月球受辐射前的 Cr 同位素组成, $\epsilon^{53}\text{Cr}$ 为 (0.01 ± 0.03) 、 $\epsilon^{54}\text{Cr}$ 为 (0.00 ± 0.05) 。校正后的结果对月碰撞体的组成及成月大

碰撞过程的制约是有意义的。

6.4 金属稳定同位素对月球演化过程的制约

作为重要的示踪手段,金属稳定同位素在制约月球岩浆演化、核幔分异和月球大碰撞过程研究中发挥着重要作用。因此,国内利用 Ca、Cu、Zn 等金属稳定同位素对月球重要科学问题开展了研究。

我国学者研究了月球 Ca 同位素,为月球岩浆演化模式提供了重要约束。Huang 等(2019)根据同位素分馏系数计算模拟月球岩浆洋冷却结晶过程中的钙同位素演化。结果表明,月球斜长岩壳的 $\delta^{44/40}\text{Ca}$ 比平均月球低 0.09‰~0.11‰,斜长岩月壳和月幔间的 Ca 同位素组成差异可达 0.26‰~0.33‰,证明固体月球可能存在显著的 Ca 同位素不均一。Wu 等(2020)基于 2 块月球玄武岩、3 块长石角砾岩及长石单矿物的 Ca 同位素研究首次精确地限定了月壳、月幔和全硅酸盐月球的 Ca 同位素组成。这一研究结果表明,月球整体具有和地球、火星类似的 Ca 同位素组成,这进一步为地-月同源学说及内太阳系 Ca 同位素的均一提供了重要信息。

铜(Cu)和锌(Zn)同位素组成有潜力来示踪月球大碰撞的挥发事件和月球核幔分异过程。Xia 等(2019)采用高温高压实验岩石学的方法,精确测定了液体金属、硫化物和硅酸盐熔体之间的 Cu 和 Zn 同位素平衡分馏系数。实验测定的铜和锌同位素分馏表明,含碳、铁熔体的同位素比硅酸盐熔体重,硫化物熔体最轻。这说明,在逐渐冷却的月球岩浆海洋的硫化物分离过程中,铜强烈分离,进入到硫化物中($100 < D_{\text{Cu}}$ 硫化物/熔体 < 200),而使月球硅酸盐亏损 Cu,使 Cu 同位素变得更重。而月球硅酸盐 Zn 同位素表现出重的现象,则可以解释为 Zn 挥发性强,是在月球表面蒸发所致。这为月核的成分和核幔分异过程提供约束。

7 南极陨石研究进展

1969 年日本南极考察队在南极 Yamato 地区发现了 9 块不同类型的陨石之后,人们开始意识到南极存在陨石富集机制(Yoshida et al., 1971)。在此后半多个世纪,在南极发现 50 多个陨石富集区,收集到 5 万多块陨石(缪秉魁, 2015)。自 1998 年至今,我国共组织了 7 次格罗夫山考察,成功发现了我国首个南极陨石富集区,收集了 12665 块陨石,使我国成为了仅次于美日的南极陨石大国(表 1)(缪秉魁等, 2012; Xia et al., 2016)。缪秉魁等(2012)对十年前南极陨石的研究做了较为系统的综述。本节将总结 2010—2020 年间我国在南极陨石考察与

陨石库建设方面的工作进展。

近十年中,我国在南极开展了两次陨石考察(2013—2014 年, 2015—2016 年),分别收集到 583 块和 630 块陨石(表 1)(缪秉魁, 2015; 夏志鹏等, 2018; 陈宏毅等, 2020)。在 2018—2019 年,我国第 35 次南极科考队尝试性地在南极中山站所属的拉斯曼丘陵布洛克内斯半岛开展陨石考察,结果没有发现陨石,该区不具备陨石富集特征(夏志鹏和缪秉魁, 2019)。在南极微陨石收集方面,我国共开展了两次采集:①2015—2016 年,在格罗夫山地区进行南极陨石考察时,通过融化少量的表层雪和冰,收集了其中的残余物;②2018—2019 年,在拉斯曼丘陵采集了约 60 kg 的湖底沉积物和少量冰雪残余物(夏志鹏等, 2018; 夏志鹏和缪秉魁, 2019)。然而,至今未见与这些沉积物和残余物相关的研究报告,尚不清楚残余物中微陨石的数量及特征。

南极陨石的大量发现表明南极冰盖存在陨石富集机制。Cassidy 等(1992)提出了陨石富集的冰流模式,即:含有陨石的冰盖在向海洋流动的过程中被山脉阻挡,冰流慢慢抬升,冰在气温和下降风的作用下产生消融,冰盖中的陨石逐步暴露并富集起来(Cassidy et al., 1992)。格罗夫山地区有 64 座冰原岛峰和大量出露的蓝冰区,地势上东南高西北低,加上强烈的下降风作用等条件,为南极陨石富集提供了优越的条件。然而,格罗夫山地区发现的大部分陨石位于阵风悬崖冰流的下方,被认为是冰流的“之”字形回流或强风搬运的结果(缪秉魁等, 2012; 陈宏毅等, 2020)。此外,2015—2016 年,格罗夫山考察队对蓝冰消融率和冰流速度开始进行监测,计划采集 5 年的数据,并建立格罗夫山陨石富集规律的详细模型(陈宏毅等, 2020)。

由于大量陨石的收集,陨石分类也成为了陨石研究中最基础性的工作,为深入开展综合研究打下基础。2008 年前,国内 9 家单位共同对 2433 块南极陨石开展了分类研究,发现了火星陨石、HED 族陨石等一批特殊陨石,建立了我国陨石分类研究的工作程序、分类标准,制定了《中国南极陨石的管理、申请及使用规定》《中国南极陨石样品收集与保存实施细则》等一系列标准。2012 年起,在科技部国家自然资源平台建设项目的支持下,继续开展了 3060 块陨石分类工作(表 2)。截至 2020 年 12 月,已经分类的南极陨石共 5493 块,其中提交国际陨石命名的有 4017 块,暂未提交命名的陨石可在中国极地标本资源共享平台中检索(<http://birds.chinare.org.cn/index/>)。综合 2008 年前的分类结

表 1 我国南极格罗夫山陨石收集信息数据表

Table 1 The information for collections of the Grove Mountains' meteorites in Antarctica							
考察 次序	南极科 考队次	时间	参与 人数	收集 数量/块	总重量 /kg	平均 重量/g	分布区域
第 1 次	第 15 次队	1998-1999 年	4	4	0. 53	132. 5	阵风悬崖北段、中段
第 2 次	第 16 次队	1999-2000 年	10	28	0. 59	21. 1	阵风悬崖南段
第 3 次	第 19 次队	2002-2003 年	9	4448	43. 47	9. 77	阵风悬崖全段,1 号和 4 号冰碛带,天问碎石带
第 4 次	第 22 次队	2005-2006 年	12	5354	62. 10	11. 6	阵风悬崖全段,戴维角峰和撒哈洛夫岭东侧
第 5 次	第 26 次队	2009-2010 年	10	1618	17. 14	10. 6	1、2、3、4 号碎石带,梅森峰南侧,撒哈洛夫岭,天问碎石带
第 6 次	第 30 次队	2013-2014 年	10	583	2. 18	3. 74	阵风悬崖中段,1、2、4 号碎石带,天问碎石带
第 7 次	第 32 次队	2015-2016 年	10	630	1. 71	2. 71	阵风悬崖北段、中段,1、2、4 号碎石带,撒哈洛夫岭东侧,天问碎石带
合计	7		65	12665	127. 72	10. 1	

表 2 历次南极格罗夫山陨石分类情况

Table 2 The classification of the Grove Mountains' meteorites in Antarctica		
时间	数量/块	参加单位
2000 年	4	北京大学、中科院地质与地球物理研究所
2001-2002 年	28	中科院广州地化所、中科院地质与地球物
2003-2004 年	51	理研究所、中科院国家天文台、南京大学
2006 年	600	中科院地质与地球物理研究所、中科院广
2007 年	800	州地球化学研究所、桂林理工大学、中科院
2008 年	950	国家天文台、中科院地球化学研究所、中科
		院紫金山天文台、南京大学和北京天文馆
2012 年	60	
2013 年	90	
2014 年	150	
2015 年	200	
2016 年	250	桂林理工大学
2017 年	250	
2018 年	600	
2019 年	860	
2020 年	600	
合计	5493	

表 3 已分类南极格罗夫山陨石类型

Table 3 Types of classified meteorites found in the Grove Mountains, Antarctica			
陨石类型		数量/块	百分比/%
普通球粒陨石	3 型	80	2. 33
	合计	5413	98. 5
碳质球粒陨石	CK	1	0. 03
	CM	8	0. 23
	CO	1	0. 03
	CR	4	0. 12
	CV	7	0. 2
	合计	21	0. 61
顽辉石球粒陨石	EH	1	0. 03
	合计	2	0. 06
火星陨石		2	0. 06
橄辉无球粒陨石		11	0. 32
HED 族陨石	Eucrites	3	0. 09
原始无球粒陨石	Acapulcoite	1	0. 03
	Winonaite	1	0. 03
铁陨石		4	0. 12
橄榄陨铁		1	0. 03
中铁陨石		12	0. 35
总计		5493	100

果,我国共发现非普通球粒陨石 80 块,类型有:火星陨石、HED 族陨石、原始无球粒陨石、铁陨石、中铁陨石、橄榄陨铁、碳质球粒陨石等(表 3)。

8 展望

由于国家空间科学战略的实施,最近十年是我国快速迈步太空和行星科学大发展的时代,我国嫦娥五号采样返回为标志性成果。在此形势下,陨石学与天体化学作为行星科学的重要专业基础,也得到快速发展并取得了许多重要成果,其中包括不同类型的陨石成因、球粒陨石以及早期太阳星云、月球陨石以及月球演化特征、火星陨石的水、稳定金属同位素的分析技术等领域。然而,陨石学与天体化学发展方面也存在一些不足或问

题。针对这些问题和国家需求,下文提出一些建议和展望:

- (1)在科学技术发展日新月异的今天,迈向太空已成趋势,空间科学已经成为世界前沿科学领域,陨石学与天体化学已成为重要的基础学科。为了应对国家空间科学战略需求,国内各大高校和中国科学院也大力发展空间科学和行星科学,陨石学与天体化学的专业需求非常强劲,但是,我国目前天体化学专业力量还是比较薄弱,人才队伍相对日美发达国家还是非常小,因此,建议我国应该尽快加大天体化学人才培养,在部分具备基本条件的高校开设天体化学本科专业,为我国未来空间科学发展做好人才储备。
- (2)我国在世纪之交发现了南极格罗夫山陨石

富集区,收集了上万块陨石,目前已经开展完成了5493块陨石的分类研究工作,为南极陨石库提供了基础数据。然而,当前仍有超过7000余块南极格罗夫山陨石尚未开展任何基础分类工作,这些样品中极有可能蕴藏有丰富的稀有特殊陨石如火星陨石和月球陨石等,故而严重制约了我国陨石学与天体化学的发展。此外,与美国和日本南极陨石搜寻相比,我国南极陨石质量偏小,特殊类型陨石占比也偏低,且仅有的格罗夫山陨石富集区的陨石资源已接近枯竭。因此,建议我国未来继续开展南极陨石搜寻考察,发掘出新的南极陨石富集区,同时加快南极陨石分类研究及数据库建设,为我国快速发展的陨石学与天体化学提供充足的研究样品。

(3)深空探测是国家重大战略工程,我国已成功实施了嫦娥探月计划以及天问一号火星探测计划,并采集了月球样品。与之相比,火星陨石与月球陨石易获取、成本低,且代表了更广泛区域的样品,对它们开展研究不仅可以更好的了解火星与月球演化历史,积累必要的基础数据、实验技能和人才队伍,同时也为我国未来开展各类深空探测工程提供了不可或缺的知识背景。因此,建议未来加强火星陨石和月球陨石研究工作,迎合国家战略需求。

(4)类地行星及小行星形成演化是我国行星科学与天体化学下一步的研究重点。通过研究反映类地行星初始构成物质的球粒陨石和记载了类地行星后期演化历史的分异型无球粒陨石,目前已在类地行星形成和演化领域取得了大量成果。然而,对于记录了类地行星初始构成物质向原始行星转变历史的原始无球粒陨石而言,在成因、母体结构等方面仍存在严重争议与不足。因此,建议我国未来加强对原始无球粒陨石的研究力度,特别是对于南极格罗夫山收集到的原始无球粒陨石。

致谢:感谢中国科学院月球与深空探测重点实验室开放基金资助项目(LDSE201907)和广西科技基地及人才专项(桂科AD1850007)的支持。

参考文献 (References):

Barrat J A, Yamaguchi A, Bunch T E, Bohn M, Bollinger C, Ceuleneer G. 2011. Possible fluid-rock interactions on differentiated asteroids recorded in eucritic meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75(13): 3839–3852

Cassidy W, Harvey R, Schutt J, Delisle G, Yanai K. 1992. The meteorite collection sites of Antarctica. *Meteoritics & Planetary Science*, 27(5): 490–525

Chen D L, Zhang A C, Pang R L, Chen J N, Li Y. 2019. Shock-in-

duced phase transformation of anorthitic plagioclase in the eucrite meteorite Northwest Africa 2650. *Meteoritics & Planetary Science*, 54(7): 1548–1562

Collinet M, Grove T L. 2020. Formation of primitive achondrites by partial melting of alkali-undepleted planetesimals in the inner solar system. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 277: 358–376

Dai D, Zhou C, Chen X. 2015. Ca-, Al-rich inclusions in two new carbonaceous chondrites from Grove Mountains, Antarctica. *Earth, Moon, and Planets*, 115(1): 101–114

Day J M D, Walker R J, Ash R D, Liu Y, Rumble III D, Irving A J, Goodrich C A, Tait K, McDonough W F, Taylor L A. 2012. Origin of felsic achondrites Graves Nunataks 06128 and 06129, and ultramafic brachinites and brachinite-like achondrites by partial melting of volatile-rich primitive parent bodies. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 81: 94–128

Ehlmann B L, Mustard J F, Murchie S L, Bibring J P, Meunier A, Fraeman A A, Langevin Y. 2011. Subsurface water and clay mineral formation during the early history of Mars. *Nature*, 479(7371): 53–60

Filiberto J, Baratoux D, Beaty D, Breuer D, Farcy B J, Grott M, Jones J H, Kiefer W S, Mane P, McCubbin F M, Schwenzer S P. 2016. A review of volatiles in the Martian interior. *Meteoritics & Planetary Science*, 51(11): 1935–1958

Gardner-Vandy K G, Lauretta D S, Greenwood R C, McCoy T J, Killgore M, Franchi I A. 2012. The Tafassasset primitive achondrite: Insights into initial stages of planetary differentiation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 85: 142–159

Herzog G F. 2007. 1. 13 – cosmic-ray exposure ages of meteorites. *Treatise on Geochemistry*, 1: 1–36

Hu S, Lin Y, Zhang J, Hao J, Feng L, Xu L, Yang W, Yang J. 2014. NanoSIMS analyses of apatite and melt inclusions in the GRV 020090 martian meteorite: Hydrogen isotope evidence for recent past underground hydrothermal activity on mars. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 140: 321–333

Hu S, Lin Y T, Zhang J C, Hao J L, Xing W F, Zhang T, Yang W, Changela H. 2019. Ancient geologic events on Mars revealed by zircons and apatites from the Martian regolith breccia NWA 7034. *Meteoritics & Planetary Science*, 54(4): 850–879

Hu S, Lin Y T, Zhang J C, Hao J L, Yamaguchi A, Zhang T, Yang W, Changela H. 2020. Volatiles in the martian crust and mantle: Clues from the NWA 6162 shergottite. *Earth and Planetary Science Letters*, 530: 115902

Huang F, Zhou C, Wang W Z, Kang J T, Wu Z Q. 2019. First-principles calculations of equilibrium Ca isotope fractionation: Implications for oldhamite formation and evolution of lunar magma ocean. *Earth and Planetary Science Letters*, 510: 153–160

Huang L L, Miao B K, Chen G Z, Shao H M, Ouyang Z Y. 2020. The sulfurization recorded in tridymite in the monomict eucrite Northwest Africa 11591. *Meteoritics & Planetary Science*, 55(7): 1441–1457

Krot A N, Keil K, Scott E R D, Goodrich C A, Weisberg M K. 2014. 1. 1 – classification of meteorites and their genetic relationships. *Treatise on Geochemistry*, 1: 1–63

Kruijer T S, Kleine T, Borg L E. 2020. The great isotopic dichotomy of

- the early Solar System. *Nature Astronomy*, 4(1): 32–40
- Leshin L A, Mahaffy P R, Webster C R, Cabane M, Coll P, Conrad P G, Archer Jr P D, Atreya S K, Brunner A E, Buch A, Eigenbrode J L, Flesch G J, Franz H B, Freissinet C, Glavin D P, McAdam A C, Miller K E, Ming D W, Morris R V, Navarro-González R, Niles P B, Owen T, Pepin R O, Squyres S, Steele A, Stern J C, Summons R E, Sumner D Y, Sutter B, Szopa C, Teinturier S, Trainer M G, Wray J J, Grotzinger J P, MSL Science Team. 2013. Volatile, isotope, and organic analysis of martian fines with the Mars Curiosity rover. *Science*, 341(6153): 1238937
- Leya I, Begemann F, Weber H W, Wieler R, Michel R. 2004. Simulation of the interaction of galactic cosmic ray protons with meteoroids: On the production of ^3H and light noble gas isotopes in isotropically irradiated thick gabbro and iron targets. *Meteoritics & Planetary Science*, 39(3): 367–386
- Li C L, Liu D W, Liu B, Ren X, Liu J J, He Z P, Zuo W, Zeng X G, Xu R, Tan X, Zhang X X, Chen W L, Shu R, Wen W B, Su Y, Zhang H B, Ouyang Z Y. 2019. Chang'E-4 initial spectroscopic identification of lunar far-side mantle-derived materials. *Nature*, 569(7756): 378–393
- Li S J, Wang S J, Bao H M, Miao B K, Liu S, Coulson I M, Li X Y, Li Y. 2011. The Antarctic achondrite, Grove Mountains 021663: An olivine-rich winonaite. *Meteoritics & Planetary Science*, 46(9): 1329–1344
- Li S J, Yin Q Z, Bao H M, Sanborn M E, Irving A, Ziegler K, Agee C, Marti K, Miao B K, Li X Y, Li Y, Wang S J. 2018. Evidence for a multilayered internal structure of the chondritic acapulcoite-lodranite parent asteroid. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 242: 82–101
- Liao S Y, Hsu W. 2017. The petrology and chronology of NWA 8009 impact melt breccia: Implication for early thermal and impact histories of Vesta. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 204: 159–178
- Lin Y, Kimura M. 2003. Ca-Al-rich inclusions from the Ningqiang meteorite: Continuous assemblages of nebular condensates and genetic link to Type B inclusions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67(12): 2251–2267
- Lin Y, Shen W, Liu Y, Xu L, Hofmann B A, Mao Q, Tang G Q, Wu F, Li X H. 2012a. Very high-K KREEP-rich clasts in the impact melt breccia of the lunar meteorite SaU 169: New constraints on the last residue of the Lunar Magma Ocean. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 85: 19–40
- Lin Y T, Hu S, Feng L, Zhang J C, Hao J L, Xu L. 2012b. Petrography and shock metamorphism of the tissint olivine-phyric shergottite. In: 75th Annual Meteoritical Society Meeting. Cairns, Australia: *Meteoritics & Planetary Science Supplement*, 5131
- Lin Y T, El Goresy A, Hu S, Zhang J C, Gillet P, Xu Y C, Hao J L, Miyahara M, Ouyang Z Y, Ohtani E, Xu L, Yang W, Feng L, Zhao X C, Yang J, Ozawa S. 2014a. NanoSIMS analysis of organic carbon from the Tissint Martian meteorite: Evidence for the past existence of subsurface organic-bearing fluids on Mars. *Meteoritics & Planetary Science*, 49(12): 2201–2218
- Lin Y T, El Goresy A, Hu S, Zhang J C, Gillet P, Xu Y C, Hao J L, Miyahara M, Ouyang Z Y, Ohtani E, Xu L, Yang W, Feng L, Zhao X C, Yang J, Ozawa S. 2014b. NanoSIMS analysis of organic carbon from the Tissint Martian meteorite: Evidence for the past existence of subsurface organic-bearing fluids on Mars. *Meteoritics & Planetary Science*, 49(12): 2201–2218
- Liu D Y, Jolliff B L, Zeigler R A, Korotev R L, Wan Y S, Xie H Q, Zhang Y H, Dong C Y, Wang W. 2012. Comparative zircon U-Pb geochronology of impact melt breccias from Apollo 12 and lunar meteorite SaU 169, and implications for the age of the Imbrium impact. *Earth and Planetary Science Letters*, 319–320: 277–286
- Liu J, Qin L P, Xia J X, Carlson R W, Leya I, Dauphas N, He Y S. 2019. Cosmogenic effects on chromium isotopes in meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 251: 73–86
- Liu Y, Ma C, Beckett J R, Chen Y, Guan Y B. 2016. Rare-earth-element minerals in martian breccia meteorites NWA 7034 and 7533: Implications for fluid-rock interaction in the martian crust. *Earth and Planetary Science Letters*, 451: 251–262
- 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): 141–174
- McSween Jr 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, the Dawn Science Team. 2013. Dawn; the Vesta-HED connection; and the geologic context for eucrites, diogenites, and howardites. *Meteoritics & Planetary Science*, 48(11): 2090–2104
- Miao B K, Chen H Y, Xia Z P, Yao J, Xie L F, Ni W J, Zhang C T. 2014. Lunar meteorites: Witnesses of the composition and evolution of the Moon. *Advances in Polar Science*, 25(2): 61–74
- Miao B K, Xia Z P, Zhang C T, Ou R L, Sun Y L. 2018. Progress of Antarctic meteorite survey and research in China. *Advances in Polar Science*, 29(2): 61–77
- 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. 2008. Appendix: Meteorites-A brief tutorial. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 68(1): 571–590
- Mittlefehldt D W. 2015. Asteroid (4) Vesta: I. The howardite-eucrite-diogenite (HED) clan of meteorites. *Geochemistry*, 75(2): 155–183
- Pang R L, Zhang A C, Wang R C. 2017. Complex origins of silicate veinlets in HED meteorites: A case study of Northwest Africa 1109. *Meteoritics & Planetary Science*, 52(10): 2113–2131
- Pang R L, Harries D, Pollok K, Zhang A C, Langenhorst F. 2018. Vestaite, $(\text{Ti}^{4+}\text{Fe}^{2+})\text{Ti}_3^{4+}\text{O}_9$, a new mineral in the shocked eucrite Northwest Africa 8003. *American Mineralogist*, 103(9): 1502–1511
- Papike J J. 1998. Comparative planetary mineralogy: Chemistry of melt-derived pyroxene, feldspar, and olivine. In: 29th Annual Lunar and Planetary Science Conference. Houston
- Prinz M, Nehru C E, Delaney J S, Weisberg M. 1983. Silicates in IAB and IIICD irons, winonaite, lodranites and brachina: A primitive and modified-primitive group. In: Fourteenth Lunar and Planetary Science Conference. Houston, 616–617

- Prissel T C, Parman S W, Jackson C R M, Rutherford M J, Hess P C, Head J W, Cheek L, Dhingra D, Pieters C M. 2014. Pink Moon: The petrogenesis of pink spinel anorthosites and implications concerning Mg-suite magmatism. *Earth and Planetary Science Letters*, 403: 144–156
- Qin L, Nittler L R, Alexander C M O, Wang J, Stadermann F J, Carlson R W. 2011a. Extreme ^{54}Cr -rich nano-oxides in the CI chondrite Orgueil—Implication for a late supernova injection into the solar system. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75(2): 629–644
- Qin L P, Alexander C M O, Carlson R W, Horan M F, Yokoyama T. 2010. Contributors to chromium isotope variation of meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74(3): 1122–1145
- Qin L P, Carlson R W, Alexander C M O. 2011b. Correlated nucleosynthetic isotopic variability in Cr, Sr, Ba, Sm, Nd and Hf in Murchison and QUE 97008. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75(24): 7806–7828
- Qin L P, Carlson R W. 2016. Nucleosynthetic isotope anomalies and their cosmochemical significance. *Geochemical Journal*, 50(1): 43–65
- Ranjith P M, He H Y, Miao B K, Su F, Zhang C T, Xia Z P, Xie L F, Zhu R X. 2017. Petrographic shock indicators and noble gas signatures in a H and an L chondrite from Antarctica. *Planetary and Space Science*, 146: 20–29
- Ranjith P M, He H, Smith T M, Su F, Lin Y, Zhu R. 2019. Noble gas components in the lunar meteorite Northwest Africa 10203. In: 82nd Annual Meeting of The Meteoritical Society 2019. Sapporo, 6175
- Rumble III D, Irving A J, Bunch T E, Wittke J H, Kuehner S M. 2008. Oxygen isotopic and petrological diversity among Brachinites NWA 4872, NWA 4874, NWA 4882 and NWA 4969: How many ancient parent bodies? In: Lunar and Planetary Science Conference XXXIX (2008). Houston, 1974
- Touboul M, Kleine T, Bourdon B, Van Orman J A, Maden C, Zipfel J. 2009. Hf-W thermochronometry: II. Accretion and thermal history of the acapulcoite-lodranite parent body. *Earth and Planetary Science Letters*, 284(1–2): 168–178
- Wang H P, Weiss B P, Bai X N, Downey B G, Wang J, Wang J J, Suavet C, Fu R R, Zucolotto M E. 2017. Lifetime of the solar nebula constrained by meteorite paleomagnetism. *Science*, 335(6325): 623–627
- Wang S Z, Zhang A C, Pang R L, Li Y, Chen J N. 2019. Possible records of space weathering on Vesta: Case study in a brecciated eucrite Northwest Africa 1109. *Meteoritics & Planetary Science*, 54(4): 836–849
- Wang Y, Hsu W, Guan Y B, Li X H, Li Q L, Liu Y, Tang G Q. 2012. Petrogenesis of the Northwest Africa 4734 basaltic lunar meteorite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 92: 329–344
- Wang Y, He H Y, Leya I, Ranjith P M, Su F, Stephenson P C, Zhang C T, Zheng D W. 2020. The noble gases in five ordinary chondrites from Grove Mountains in Antarctica. *Planetary and Space Science*, 192: 105045
- 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
- Webster C R, Mahaffy P R, Flesch G J, Niles P B, Jones J H, Leshin L A, Atreya S K, Stern J C, Christensen L E, Owen T, Franz H, Pepin R O, Steele A, the MSL Science Team. 2013. Isotope ratios of H, C, and O in CO_2 and H_2O of the martian atmosphere. *Science*, 341(6143): 260–263
- Weisberg M K, McCoy T J, Krot A N. 2006. Systematics and evaluation of meteorite classification. In: McSween H Y, McSween Jr H Y, Binzel R P, eds. *Meteorites and the Early Solar System II*. Tucson: University of Arizona Press, 19–52
- Wittmann A, Korotev R L, Jolliff B L, Carpenter P K. 2019. Spinel assemblages in lunar meteorites Graves Nunataks 06157 and Dhofar 1528: Implications for impact melting and equilibration in the Moon’s upper mantle. *Meteoritics & Planetary Science*, 54(2): 379–394
- Wu W, Xu Y G, Zhang Z F, Li X. 2020. Calcium isotopic composition of the lunar crust, mantle, and bulk silicate Moon: A preliminary study. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 270: 313–324
- Xia Y, Kiseeva E S, Wade J, Huang F. 2019. The effect of core segregation on the Cu and Zn isotope composition of the silicate Moon. *Geochemical Perspectives Letters*, 12: 12–17
- Xia Z P, Zhang J, Miao B K, Ou R L, Xie L F, Yang R, Jing Y. 2016. Meteorite classification for building the Chinese Antarctic Meteorite Depository—Introduction of the classification of 500 Grove Mountains meteorites. *Advances in Polar Science*, 27(1): 56–63
- Xie L F, Chen H Y, Miao B K, Xia Z Q, Yao J. 2014. Petrography and mineralogy of new lunar meteorite MIL090036. *Advances in Polar Science*, 25(1): 17–25
- Xu X Q, Hui H J, Chen W, Huang S C, Neal C R, Xu X S. 2020. Formation of lunar highlands anorthosites. *Earth and Planetary Science Letters*, 536: 116138
- Xue Y L, Li C H, Qi Y H, Zhang C T, Miao B K, Huang F. 2018. The vanadium isotopic composition of L ordinary chondrites. *Acta Geochimica*, 37(4): 501–508
- Yoshida M, Ando H, Omoto K, Naruse R, Ageta Y. 1971. Discovery of Meteorites near Yamato Mountains, East Antarctica. *Antarctic Record*, 39(39): 62–65
- Zeng X J, Li S J, Leya I, Wang S J, Smith T, Li Y, Wang P. 2018. The Kumtag 016 L5 strewn field, Xinjiang Province, China. *Meteoritics & Planetary Science*, 53(6): 1113–1130
- Zeng X J, Shang Y L, Li S J, Li X Y, Wang S J, Li Y. 2019. The layered structure model for winonaite parent asteroid implicated by textural and mineralogical diversity. *Earth, Planets and Space*, 71(1): 38
- Zhang A C, Hsu W B, Li X H, Ming H L, Li Q L, Liu Y, Tang G Q. 2011. Impact melting of lunar meteorite Dhofar 458: Evidence from polycrystalline texture and decomposition of zircon. *Meteoritics & Planetary Science*, 46(1): 103–115
- 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
- Zhang A C, Itoh S, Sakamoto N, Wang R C, Yurimoto H. 2014. Origins of Al-rich chondrules: Clues from a compound Al-rich chondrule in the Dar al Gani 978 carbonaceous chondrite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 130: 78–92

Zhang A C, Ma C, Sakamoto N, Wang R C, Hsu W B, Yurimoto H. 2015. Mineralogical anatomy and implications of a Ti-Sc-rich ultrarefractory inclusion from Sayh al Uhaymir 290 CH3 chondrite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 163: 27–39

Zhang A C, Bu Y F, Pang R L, Sakamoto N, Yurimoto H, Chen L H, Gao J F, Du D H, Wang X L, Wang R C. 2018. Origin and implications of troilite-orthopyroxene intergrowths in the brecciated diogenite Northwest Africa 7183. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 220: 125–145

Zhang A C, Kawasaki N, Bao H M, Liu J, Qin L P, Kuroda M, Gao J F, Chen L H, He Y, Sakamoto N, Yurimoto H. 2020a. Evidence of metasomatism in the interior of Vesta. *Nature Communications*, 11(1): 1289

Zhang C T, Miao B K, He H Y. 2019a. Oxygen isotopes in HED meteorites and their constraints on parent asteroids. *Planetary and Space Science*, 168: 83–94

Zhang C T, Miao B K, He H Y, Chen H Y, Ranjith P M, Xie Q L. 2021. A petrologic and noble gas isotopic study of new basaltic eucrite grove mountains 13001 from Antarctica. *Minerals*, 11(3): 279

Zhang M M, Lin Y T, Leya I, Tang G Q, Liu Y. 2019b. Textural and compositional evidence for in situ crystallization of palisade bodies in coarse-grained Ca-Al-rich inclusions. *Meteoritics & Planetary Science*, 54(5): 1009–1023

Zhang M M, Lin Y T, Tang G Q, Liu Y, Leya I. 2020b. Origin of Al-rich chondrules in CV chondrites: Incorporation of diverse refractory components into the ferromagnesian chondrule-forming region. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 272: 198–217

Zhao X C, Lin Y T, Yin Q Z, Zhang J C, Hao J L, Zolensky M, Jenniskens P. 2014. Presolar grains in the CM2 chondrite Sutter’s Mill. *Meteoritics & Planetary Science*, 49(11): 2038–2046

Zhou Q, Herd C D K, Yin Q Z, Li X H, Wu F Y, Li Q L, Liu Y, Tang G Q, McCoy T J. 2013. Geochronology of the Martian meteorite Zagami revealed by U-Pb ion probe dating of accessory minerals. *Earth and Planetary Science Letters*, 374: 156–163

Zinner E. 1998. Stellar nucleosynthesis and the isotopic composition of presolar grains from primitive meteorites. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 26: 147–188

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

陈宏毅, 缪秉魁, 谢兰芳, 黄丽霖. 2016. HED 族陨石: 分异型小行星物质组成和演化. *矿物岩石地球化学通报*, 35(5): 1037–1052

陈宏毅, 缪秉魁, 夏志鹏, 谢兰芳, 赵斯哲. 2020. 南极格罗夫山陨石收集、研究进展和富集机制. *极地研究*, 32(4): 417–434

戴德求, 包海梅, 刘爽, 尹锋. 2020. Kainsaz (CO3) 陨石中两个富 Al 球粒的氧同位素组成特征与形成演化. *岩石学报*, 36(6): 1850–1856

耿言, 周继时, 李莎, 付中梁, 孟林智, 刘建军, 王海鹏. 2018. 我国首次火星探测任务. *深空探测学报*, 5(5): 399–405

贺怀宇, 王英, 邓成龙, 朱日祥. 2010. 月壤中的稀有气体. *地球化学*, 39(2): 123–130

蒋云, 徐伟彪, Guan Y B, 王英. 2015. 普通球粒陨石中富铝球粒的成因: 离子探针氧同位素证据. *中国科学: 地球科学*, 45(9): 1324–1334

林杨挺, 缪秉魁, 徐琳, 胡森, 冯璐, 赵旭晔, 杨晶. 2013. 陨石学与天体化学(2001—2010)研究进展. *矿物岩石地球化学通报*, 32(1): 40–55

林杨挺, 赵旭晔, 徐于晨, 胡森, 杨晶. 2014. 球粒陨石与太阳星云演化. 见: 第十一届“月球·行星·科学”学术研讨会论文集. 贵阳: 中国空间科学学会, 101

刘佳. 2019. 陨石中铬同位素的宇宙射线辐射效应. 博士学位论文. 合肥: 中国科学技术大学

缪秉魁, 林杨挺, 王道德, 欧阳自远. 2012. 我国南极陨石收集进展(2000–2010). *矿物岩石地球化学通报*, 31(6): 565–574

缪秉魁. 2015. 格罗夫山陨石考察现状及其发展设想. *矿物岩石地球化学通报*, 34(6): 1081–1089

秦礼萍, 夏九星. 2014. 陨石中 Cr 稳定同位素组成. 2014 年中国地球科学联合学术年会——专题 38: 非传统稳定同位素的理论、分析和应用论文集. 北京: 中国地球物理学会, 3

秦礼萍. 2015. 金属元素同位素异常. *矿物岩石地球化学通报*, 34(4): 731–743

秦礼萍, 刘佳, 何永胜. 2017. 月球陨石的铬同位素组成. 见: 中国矿物岩石地球化学学会第九次全国会员代表大会暨第 16 届学术年会文集. 西安: 中国矿物岩石地球化学学会, 1159

王道德, 王桂琴. 2012. 陨石学及天体化学研究某些新进展. *矿物学报*, 32(3): 321–340

王英, 贺怀宇, 张川统, 苏菲, Ranjith P M, 马严, 郑德文. 2018. 微量陨石激光熔样稀有气体测定方法. *岩石学报*, 34(11): 3455–3466

吴蕴华, 邢巍凡, 徐伟彪. 2014. 球粒陨石难熔包体中贵金属的矿物岩石学分析: 对太阳星云演化的启示. *天文学报*, 55(2): 105–115

夏志鹏, 缪秉魁, 陈宏毅, 姚杰, 谢兰芳. 2013. 南极月球陨石 EET 96008 矿物学和岩石学特征. *极地研究*, 25(4): 352–361

夏志鹏, 缪秉魁, 张川统, 黄丽霖. 2018. 极地微陨石的收集、研究与设想. *极地研究*, 30(3): 314–328

夏志鹏, 缪秉魁. 2019. 南极拉斯曼丘陵布洛克内斯半岛陨石与微陨石收集. 见: 中国矿物岩石地球化学学会第 17 届学术年会论文摘要集. 杭州: 中国矿物岩石地球化学学会, 1241–1242

谢兰芳, 缪秉魁, 陈宏毅, 夏志鹏, 姚杰. 2013. 一块新发现月球陨石 MIL090036 的岩相学和矿物学. *极地研究*, 25(4): 342–351

谢兰芳, 陈宏毅, 缪秉魁, 夏志鹏, 邵慧敏. 2019. GRV 13100: 一块在南极新发现的顽火辉石球粒陨石. *极地研究*, 31(2): 168–178

谢兰芳, 陈宏毅, 缪秉魁. 2020. GRV 13100 顽火辉石球粒陨石中金属硫化物特征与成因. *矿物学报*, 40(1): 83–91

姚杰, 缪秉魁, 陈宏毅, 谢兰芳, 夏志鹏. 2013. 南极 MIL090070 月球陨石的岩石矿物学特征. *极地研究*, 25(4): 329–341

张川统, 贺怀宇, 缪秉魁. 2018. 月球陨石稀有气体和宇宙暴露年龄研究进展与展望. *矿物岩石地球化学通报*, 37(4): 588–600, 638

周剑凯, 陈宏毅, 谢兰芳, 缪秉魁, 仲艳. 2019. 一块新发现的月球陨石 NWA 12279 的岩石矿物学、源区和冲击变质作用. *岩石矿物学杂志*, 38(4): 521–534