

星子碰撞增生过程中的同位素分馏研究进展

许英奎^{1,2}, 李智^{1,3}, 冯娟⁴, 王得亮^{1,3}, 朱丹^{1,5},
李世杰^{1,2}, 李雄耀^{1,2}, 刘建忠^{1,2}

(1. 中国科学院地球化学研究所 月球与行星科学研究中心, 贵州 贵阳 550081; 2. 中国科学院 比较行星卓越创新中心, 安徽 合肥 230026; 3. 中国科学院大学 地球与行星科学学院, 北京 100049; 4. 贵州省地质矿产勘查开发局 一〇五地质大队, 贵州 贵阳 550018; 5. 中国科学院地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550081)

摘要:理解行星的初始物质组成以及其形成过程对于研究太阳系的形成和演化、地球的生物宜居性有着重要的意义。星子碰撞吸积是类地行星形成过程中的一个重要阶段, 该阶段影响行星整体的元素和同位素组成。中等挥发性元素及其同位素是研究这一过程的有效工具, 因为它们对示踪撞击过程中的高温蒸发和降温凝聚等过程较为灵敏。笔者系统统计了球粒陨石和来自不同天体(地球、月球、火星和灶神星)的陨石样品部分元素及同位素测试数据, 讨论了不同天体的中等挥发性元素及其同位素的特征和导致同位素分馏的主要因素, 并探讨其对行星初始物质组成和形成过程的指示意义。星子、行星胚胎等天体的碰撞过程可能极大地限制了类地行星的挥发性元素含量。

关键词:星子; 碰撞吸积; 中等挥发性元素; 气化过程; 同位素分馏

中图分类号: P597; P185 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-3504(2023)06-0585-12

许英奎, 李智, 冯娟, 等, 2023. 星子碰撞增生过程中的同位素分馏研究进展[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 46(6): 585-596.

Xu Yingkui, Li Zhi, Feng Juan, et al., 2023. Advances in isotopic fractionation in planetesimal collisional accretion processes[J]. Journal of East China University of Technology (Natural Science), 46(6): 585-596.

星子碰撞增生是星子之间碰撞吸积形成更大质量天体的理论, 属于行星形成演化过程的早期阶段(Johansen et al., 2017)。目前, 人类对于太阳系早期星子碰撞吸积过程的理解仍然存在不足。半凝聚温度是指在星云压力下(10^{-4} bar), 太阳系平均组成物质在降温凝聚过程中, 某元素含量的一半凝聚到固相中的温度(Lodders, 2003; Neuman et al., 2022b)。中等挥发性元素(MVE)是半凝聚温度为650~1 250 K的元素, 包括Zn(704 K), Cu(1 034 K), K(993 K), Li(1 148 K)等(Wood et al., 2019)。近年来, 由于分析测试手段的进步(Zhu et al., 2000; Nishio et al., 2002; Chen et al., 2013; Teng et al., 2014; Moynier et al., 2015; Li et al., 2016), 多种中等挥发性元素及其同位素被精

确测试, 并广泛用于研究小行星、类地行星等天体的撞击过程以及行星在物质吸积过程中的元素蒸发丢失(Paniello et al., 2012a; Pringle et al., 2014; Kato et al., 2015; Wang et al., 2016; Hin et al., 2017; Norris et al., 2017; Ivanov et al., 2022)。鉴于中等挥发性元素及其同位素对撞击气化过程具有重要指示意义, 笔者总结了在高温撞击过程中几种常见的中等挥发性元素及其同位素体系的研究进展。

1 撞击成因岩石中MVE及同位素组成

1.1 撞击高温过程形成的地球岩石

玻陨石是地壳岩石遭受地外物质剧烈撞击后形成的天然淬火玻璃(Artemieva, 2008)。前人研究了玻陨石中多种中等挥发性元素及其同位素组成。如Moynier等(2009, 2010b)测试了玻陨石全岩的Zn和Cu同位素组成, 发现随着Zn和Cu含量减少, 其同位素组成愈加偏重。中等挥发性元素含量及其同位素组成之间的负相关性指示: Zn和Cu同

收稿日期: 2023-11-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(42073020, 42173046, 42373020)

作者简介: 许英奎(1987—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事月球与行星科学研究。E-mail: xuyingkui@vip.gyig.ac.cn 通信作者: 李智(1998—), 男, 博士研究生, 主要从事陨石Zn、Ni同位素研究。E-mail: lizhi@mail.gyig.ac.cn

元素分馏主要受到冲击蒸发过程的控制,因为在蒸发过程中轻的同位素优先进入蒸汽相。此外,Cu同位素的分馏程度比Zn同位素更大,这是由于熔体中 Cu^+ 扩散速度大于 Zn^{2+} 。因此元素在熔体中的扩散速度以及在熔体界面处的蒸发速度共同控制了元素蒸发丢失的过程。Creech等(2019)的研究也证实了玻陨石中Zn和Cu的同位素分馏不仅受到元素挥发性的控制,也受离子在熔体中扩散速度的限制。玻陨石的K同位素组成与整体硅酸盐地球(BSE)以及地壳平均组成相比没有显著区别(Jiang et al., 2019)。Jiang等(2019)将K与Zn、Cu之间同位素变化的差异归因于K的亲石性以及不相容性,即K在熔体中的活度系数低,在撞击高温过程中倾向于留在硅酸盐熔体中。玻陨石中Li同位素的研究者也发现了Li具有类似K同位素的弱挥发性的现象。Magna等(2011)通过测试玻陨石以及陨石坑沉积物的Li同位素组成,发现冲击加热和快速熔融未造成明显的Li同位素分馏,这指示了具有中等挥发性的Li对该情景下的高温蒸发过程并不敏感。

另一种受高温蒸发过程影响的岩石是核爆玻璃。该岩石是三位一体核弹试验后留在沙漠上的玻璃状残留物,其形成的温度条件可以类比陨石冲击的瞬时高温过程。因此,核爆玻璃也是研究挥发性元素及其同位素在撞击高温高压条件下地球化学行为的理想样品。前人在核爆实验区的长石砂岩熔融形成的核爆玻璃中发现了显著的Zn同位素分馏,并且距离爆炸中心越近,样品显示出越重的Zn同位素组成(Day et al., 2017)。这表明在核爆过程中轻的Zn同位素优先蒸发丢失,剩余样品中Zn同位素组成变重。核爆玻璃中的Cu也亏损,同位素组成变重(Day et al., 2020),但是K同位素却没有显示明显的分馏(Chen et al., 2019)。这揭示了中等挥发性元素的同位素分馏并不简单受控于元素在星云条件下的半凝聚温度,其他如氧逸度、压力等也会影响中等挥发性元素的挥发能力。

1.2 冲击熔融陨石样品

普通球粒陨石中成对的熔融区域和未熔融区域的K和Zn同位素研究显示,这两种同位素在撞击高温熔融过程中的分馏行为截然相反。Zn在熔融区域含量减少,同位素组成变重;K在熔融区域含量升高,同位素组成变轻,熔融区和未熔融区的

K同位素分馏约为2‰。Zn和K的半凝聚温度相近,但K是强不相容元素,不相容属性使得K在熔融过程中倾向于富集在熔体相中。熔体中轻的K同位素组成受控于扩散导致的动力学效应,因为轻的K同位素扩散速度更快。Zn含量与Zn同位素组成的负相关性表明,Zn同位素的分馏主要受到元素挥发性控制。该研究进一步表明:中等挥发性元素在高温撞击过程中行为较为复杂,并不单一受到半凝聚温度的控制(Xu et al., 2023)。

此外,Moynier等(2010a)在不同冲击变质程度的橄辉无球粒陨石中也发现了Zn同位素分馏,且Zn同位素变化范围可达1‰。冲击橄辉无球粒陨石中具有最低Zn含量的样品显示最重Zn同位素组成,这与地壳受到高速撞击熔融形成的玻陨石以及核爆玻璃中的特征一致。这种变化可能受控于撞击导致的高温蒸发过程。Brugier等(2019)系统地研究了更大样本量的橄辉无球粒陨石样品的Zn同位素组成($\delta^{66}\text{Zn}$ 为+0.40‰~+2.71‰),还测量了同一母体的原始幔熔融形成的粗安岩的Zn同位素组成($\delta^{66}\text{Zn}$ 为+0.67‰)。原始幔源物质的Zn同位素值稍微高于普通球粒陨石,表明至少有一部分幔源物质在撞击解体前就已显示出较高的Zn同位素值。因此他们提出,由于早期行星幔的温度较高,蒸发作用可能主要发生在小行星母体的解体过程中,之后的冲击加热会增强蒸发效应,从而加强Zn同位素分馏。因此,橄辉无球粒陨石中Zn同位素的显著分馏可能是蒸发作用的结果(Brugier et al., 2019)。

2 各行星储库的特征

2.1 Zn同位素

前人测试了多种地球火成岩(如玄武岩、橄榄岩和苦橄岩等)的高精度Zn同位素数据(Chen et al., 2013; Wang et al., 2017; Sossi et al., 2018),发现地幔的Zn同位素组成较为均一,推断出整体硅酸盐地球的Zn同位素值为(+0.18±0.05)‰(Yang et al., 2021)。Luck等(2005)使用多接收器电感耦合等离子体质谱仪测量了碳质球粒陨石(CC)、普通球粒陨石(OC)的高精度Zn同位素组成,发现不同的碳质球粒陨石群(CI、CV、CO、CM等)具有明显的Zn同位素组成差异(+0.16‰ < $\delta^{66}\text{Zn}$ < +0.52‰)。Zn同位素组成随陨石类型的

改变而发生规律性的变化: Zn 同位素值按 CI、CM、CV、CO 的顺序逐渐减小, 且与挥发性元素含量呈正相关。由此说明, CI 型陨石主要富集重的 Zn 同位素, 而其他贫挥发分的碳质球粒陨石主要富集轻的 Zn 同位素。Barrat 等(2012)测试了更多的球粒陨石样品, 得到了更可靠的 CI 型球粒陨石 Zn 同位素推荐值[$\delta^{66}\text{Zn}$ 为 $(+0.46 \pm 0.08)\%$], 这一结果也佐证了上述观点。普通球粒陨石 ($\delta^{66}\text{Zn}$ 为 $-1.30\% \sim +0.76\%$) 按照金属铁含量依次减少的顺序分为 H 型、L 型、LL 型, 三种类型陨石对应的 Zn 同位素组成依次变轻 ($+0.19\%$, $+0.06\%$, -0.07% ; Luck et al., 2005), 这可能受控于元素挥发性 (Creech et al., 2019)。

顽火辉石球粒陨石 (EC) 包括高铁型 (EH) 和高铁型 (EL) 两个群。其中 EL 型陨石按所经历的热变质从弱至强分为 EL1 型至 EL7 型 7 个岩石学类型。Moynier 等(2010a)测试了此类陨石以及顽火辉石无球粒陨石的 Zn 同位素。他们从一块 EL6 型陨石中得到了太阳系内极重的 Zn 同位素组成 ($\delta^{66}\text{Zn}$ 为 $+7.35\%$); 从一块顽火辉石无球粒陨石中得到了极轻的 Zn 同位素组成 ($\delta^{66}\text{Zn}$ 为 -7.04%)。同时, 他们发现 EH 型顽火辉石球粒陨石 ($\delta^{66}\text{Zn}$ 为 $+0.15\% \sim +0.31\%$) 与低热变质程度的 EL3 型陨石 ($\delta^{66}\text{Zn}$ 为 $+0.01\% \sim +0.63\%$) 有着相似的 Zn 同位素组成。然而相比 EL3 型陨石, EL6 型陨石的 Zn 同位素组成更重, 这可能是由于 EL6 型陨石经历了更强烈的热变质作用。而顽火辉石无球粒陨石中极轻的 Zn 同位素组成可能源自蒸汽中轻 Zn 同位素的凝聚 (Moynier et al., 2010a)。

铁陨石的 Zn 同位素组成为 $-0.59\% \sim +5.61\%$ (Chen et al., 2013)。Luck 等(2005)报道的 III AB 型铁陨石 Zn 同位素组成范围很窄 ($-0.59\% \sim +0.50\%$), 而含硅酸盐的铁陨石 (从 I A 型到 III CD 型) Zn 同位素组成变化范围较宽 ($+0.56\% \sim +3.68\%$)。另外, I AB - III CD 型的铁陨石 Zn 同位素值和 Cu 同位素值呈现负相关, 这可能指示了高 $\delta^{66}\text{Zn}$ 值的冲击熔体与深处核分离形成的高 $\delta^{65}\text{Cu}$ 值的金属熔体发生混合。Chen 等(2013)测试了大量铁陨石的 Zn 同位素组成, 发现贫 Zn 的 IV A 和 IV B 型铁陨石相比于其他的铁陨石群并未富集更重的 Zn 同位素。因此他们排除了这两类陨石中挥发性元素的含量受到母体蒸发的影

响的可能性。Bridgestock 等(2014)对不同类型铁陨石 (I AB 型、II AB 型、III AB 型) 中的 Zn 同位素进行了系统性的分析, 发现几乎所有铁陨石都具有比整体硅酸盐地球和球粒陨石更重的 Zn 同位素组成, 且每一类型的铁陨石 $\delta^{66}\text{Zn}$ 值都与 Zn 元素含量呈负相关。

橄榄陨铁曾一度被认为形成于小行星核心结晶达到 75% ~ 80% 之后的核幔边界层 (Wasson et al., 2003)。近期的一些研究倾向于橄榄陨铁是撞击成因, 其金属相和硅酸盐相并不同源 (Kruijer et al., 2022; Bennett et al., 2022), 还有证据显示它可能是由金属多次注入冷却的小行星幔形成的 (Quinlan et al., 2023)。前人发现 Brenham 石铁陨石 ($\delta^{66}\text{Zn}$ 为 -0.05%) 和 III A 型铁陨石的 Zn 同位素组成相差约 1‰, 并且它们的 Cu 同位素和 Zn 同位素的值表现出近乎 1:1 的关系, 这可能是由于陨石母体经历了不同相的分离 (金属液相、金属固相和硅酸盐相等) 导致 (Luck et al., 2005)。

HED 陨石包括 Howardite、Eucrite、Diogenite 三类, 这些陨石可能来自灶神星 (Burbine et al., 2001)。Paniello 等(2012b)研究了 HED 陨石的 Zn 同位素组成, 发现 $\delta^{66}\text{Zn}$ 有着较大的变化范围 ($-2\% \sim +1.7\%$)。另外, 相比于角砾岩化的 HED 陨石, 未角砾化的钙长辉长无球粒陨石和奥长古铜无球粒陨石均亏损 Zn 元素并富集重 Zn 同位素, 这暗示灶神星壳形成时发生了蒸发作用并导致了挥发性元素亏损 (Paniello et al., 2012b)。

火星陨石主要的岩石类型为: 辉玻无球粒陨石、辉橄无球粒陨石、纯橄无球粒陨石 (Krot et al., 2014)。它们的 Zn 同位素组成范围很窄 ($+0.18\% \sim +0.53\%$)。基于样品分析得出的整体硅酸盐火星 (BSMa) 的 Zn 同位素组成为 ($+0.50 \pm 0.18\%$), 相较于 BSE 更重, 这被归因于蒸发过程的控制 (Paquet et al., 2023b)。

原始的低钛月海玄武岩 [$\delta^{66}\text{Zn}$ 平均值为 $(+1.31 \pm 0.13)\%$] 具有与高钛月海玄武岩 [$\delta^{66}\text{Zn}$ 平均值为 $(+1.39 \pm 0.31)\%$] 几乎相同的 Zn 同位素组成, 且重于整体硅酸盐地球的值。两类月海玄武岩的形成模式不同, 但其 Zn 同位素组成显示出相同程度的变重, 这意味形成模式不影响 Zn 同位素的分馏, 可能是行星尺度上的挥发过程导致 (Paniello et al., 2012a)。另外, 月球风化壳、月壤和斜长岩风化层角砾岩陨石都具有偏重的 Zn 同位

素值(+2.6~+5.6‰),这可能反映了撞击溅射和撞击挖掘作用的共同改造过程,并不代表原始岩浆组成(Moynier et al., 2006; Herzog et al., 2009; Day et al., 2014)。部分月海玄武岩显示极轻的 Zn 同

位素特征,可能是岩浆结晶后期轻 Zn 同位素残留在熔体相的结果(Paniello et al., 2012a; Day et al., 2014)。各天体储库的 Zn 同位素数据如图 1 所示。

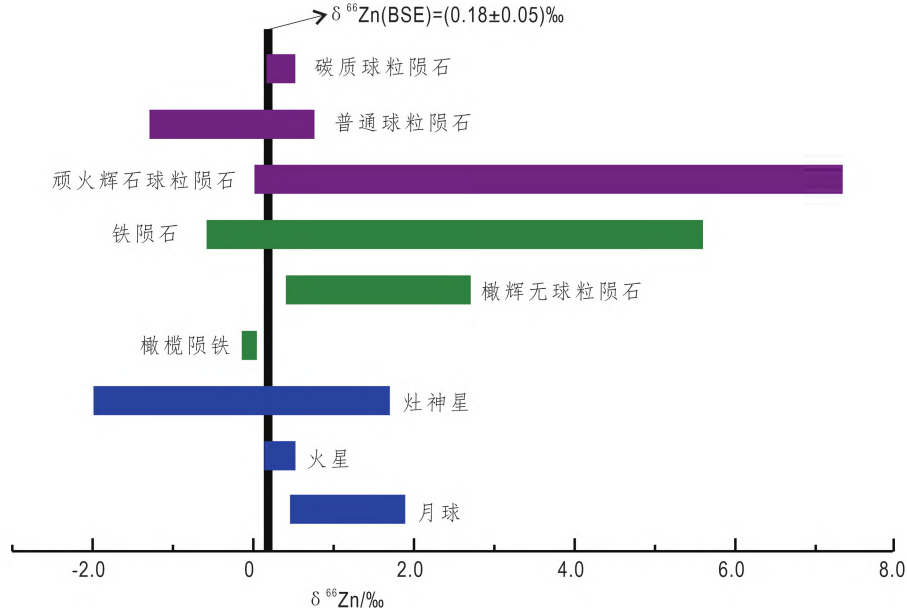


图 1 各天体储库的 Zn 同位素组成 (Luck et al., 2005; Moynier et al., 2010a; Paniello et al., 2012a, 2012b; Chen et al., 2013; Sossi et al., 2018; Brugier et al., 2019; Yang et al., 2021)

Fig. 1 The Zn isotopic compositions of various planetary body reservoirs

2.2 Cu 同位素

碳质球粒陨石的 $\delta^{65}\text{Cu}$ 值范围为 $-1.51\text{‰} \sim 0.19\text{‰}$ (Luck et al., 2003; Barrat et al., 2012; Paquet et al., 2023a),按 CI、CM、CO、CV 群的顺序依次降低。普通球粒陨石的 $\delta^{65}\text{Cu}$ 值分布范围为 $-0.51\text{‰} \sim +0.10\text{‰}$ (Luck et al., 2003; Moynier et al., 2007),按 LL、L、H 群的顺序依次降低。不同群碳质和普通球粒陨石 Cu 同位素分异可能是早期太阳系星云中多个 Cu 储库混合的结果 (Luck et al., 2003)。高铁型和低铁型群顽火辉石球粒陨石的 $\delta^{65}\text{Cu}$ 值没有明显分异 ($-0.38\text{‰} \sim -0.11\text{‰}$),平均值几乎相同,约为 -0.25‰ (Savage et al., 2015)。

铁陨石的 $\delta^{65}\text{Cu}$ 值范围非常大,为 $-0.93\text{‰} \sim +0.99\text{‰}$ (Luck et al., 2005; Williams et al., 2011; Moynier et al., 2007; Bishop et al., 2012)。非岩浆型铁陨石 (I AB - III CD 和 II E) 可能是由未分异 (或经历一定分异) 的小行星受到碰撞经熔融和重组生成 (Benedix et al., 2000; Choi et al., 1995; Wasson et al., 2002),其 $\delta^{65}\text{Cu}$ 值范围较小,被包含在球粒陨石的范围内,可用 Cu 同位素组成指示这些铁

陨石和球粒陨石的成因联系 (Bishop et al., 2012)。而岩浆型铁陨石的 Cu 同位素组成分异较为明显,对铁陨石中的硅酸盐和硫化物包裹体的 Cu 同位素测试 (Williams et al., 2011) 表明, $\delta^{65}\text{Cu}_{\text{硫化物}} < \delta^{65}\text{Cu}_{\text{硅酸盐}} < \delta^{65}\text{Cu}_{\text{金属}}$,这与金属-硅酸盐-硫化物高温高压实验 (Savage et al., 2015; Xia et al., 2019) 的结果一致。Chen 等 (2016) 认为 IV B 型铁陨石的 $\delta^{65}\text{Cu}$ 值范围大是受宇宙射线影响, ^{62}Ni 俘获中子生成 ^{63}Ni 再衰变为 ^{63}Cu , 导致 Cu 同位素组成变化较大。

整体硅酸盐地球的 Cu 同位素组成一般通过幔源火成岩估算。Savage 等 (2015) 和 Liu 等 (2015) 的研究表明,橄辉岩、科马提岩、洋岛玄武岩 (OIB) 和洋中脊玄武岩 (MORB) 等火成岩的 Cu 同位素组成均一,表明地幔岩浆分异过程中的 Cu 同位素分馏有限,并分别测得 BSE 的 Cu 同位素值 $\delta^{65}\text{Cu}$ 为 $(+0.07 \pm 0.10)\text{‰}$ (Savage et al., 2015) 和 $(+0.06 \pm 0.20)\text{‰}$ (Liu et al., 2015),这 2 个值在误差范围内一致。BSE 的 Cu 同位素组成比大多数球粒陨石重,可能是在行星分异过程中受硫化物分离,轻的 Cu 同位素随硫化物向核心迁移所致 (Savage et al.,

2015)。

月球样品的 $\delta^{65}\text{Cu}$ 值范围较大, 为 $-0.97\text{‰} \sim +4.51\text{‰}$ (Moynier et al., 2006; Herzog et al., 2009; Day et al., 2019)。其中, 火山碎屑玻璃的为 $-0.97\text{‰} \sim +0.15\text{‰}$; 月壤的为 $+0.27\text{‰} \sim +4.51\text{‰}$; 高钛玄武岩的为 $+0.12\text{‰} \sim +1.4\text{‰}$; 冲击熔融角砾岩的为 $(+0.72 \pm 0.28)\text{‰}$ 。受限于样品种类和数量, 难以精确定义硅酸盐月球的 Cu 同位素组成。月球火成岩的 $\delta^{65}\text{Cu}$ 值比大多数球粒陨石高, 可能也与硫化物分离有关 (Xia et al.,

2019), 而月壤的较高 $\delta^{65}\text{Cu}$ 值可能与微陨石的撞击和太阳风溅射有关 (Herzog et al., 2009)。

目前, 火星和灶神星的 Cu 同位素的研究偏少, 仅见 Neuman 等 (2022a) 报道了 1 块火星辉玻无球粒陨石中熔融玻璃的 $\delta^{65}\text{Cu}$ 值 (-0.15‰); Dhaliwal 等 (2021) 报道了 19 块灶神星 Eucrites 的 $\delta^{65}\text{Cu}$ 值范围 ($-1.6 \sim +0.9\text{‰}$), 并将极低的 $\delta^{65}\text{Cu}$ 值归因于冲击气化后的再冷凝过程。各天体储库的 Cu 同位素数据如图 2 所示。

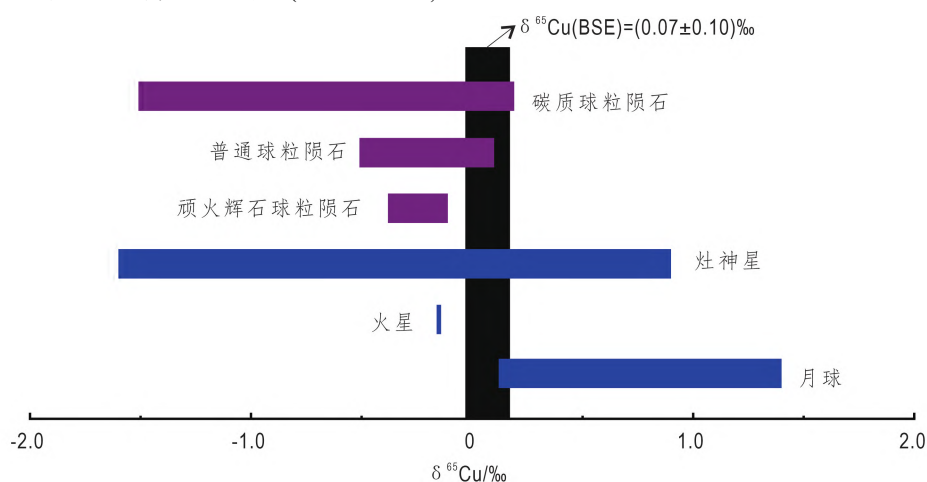


图 2 各天体储库的 Cu 同位素组成 (Luck et al., 2003; Moynier et al., 2006; Herzog et al., 2009; Barrat et al., 2012; Savage et al., 2015; Day et al., 2019; Dhaliwal et al., 2021; Neuman et al., 2022b)

Fig. 2 The Cu isotopic compositions of various planetary body reservoirs

2.3 K 同位素

Tuller - Ross 等 (2019a) 通过测试大量洋中脊玄武岩和洋岛玄武岩样品来确定整体硅酸盐地球的 K 同位素组成, 结果表明不同地区的 MORB 和 OIB 岩石具有相似的 K 同位素组成, 平均值为 $(-0.43 \pm 0.17)\text{‰}$, 这表明地幔 K 同位素较为均一。它与之前基于较小样本集提出的 BSE 值 $(-0.48 \pm 0.03)\text{‰}$ (Wang et al., 2016) 保持一致, 并与多项研究中玄武岩样品的测试结果相符 (Xu et al., 2019; Tuller - Ross et al., 2019b; Hu et al., 2021)。

火星陨石的 K 同位素组成也被多次报道 (Tian et al., 2019, 2021; Ku et al., 2020)。火星陨石的 $\delta^{41}\text{K}$ 平均值为 $(-0.28 \pm 0.18)\text{‰}$, 可以作为硅酸盐火星的 K 同位素代表值。BSMa 相比于 BSE 略微富集重的 K 同位素 (Tian et al., 2021)。通过地球、火星、灶神星和月球 K 同位素和其表面重力的一致性得出: 行星的 K 同位素组成是由行星增生过程中

的气化丢失控制, 较大的行星更容易保留 K 和其他挥发组分, 而较小的行星损失了更多的 K, 因此具备更重的 K 同位素组成。但该结论并未得到钛辉无球粒陨石 K 同位素的证实, 因为钛辉无球粒陨石极度亏损挥发组分, 且其母体小行星与灶神星大小类似, 而其并未显示富集重的 K 同位素 (Hu et al., 2022)。

月球玄武岩的 K 同位素组成显示出较窄的变化范围 ($-0.15\text{‰} \sim -0.01\text{‰}$; Wang et al., 2016; Tian et al., 2020)。整体硅酸盐月球 (BSM) 相比于 BSE [$(-0.43 \pm 0.17)\text{‰}$] 富集更重的 K 同位素 [$(-0.07 \pm 0.09)\text{‰}$], 这可能是由于地月大撞击引起的 (Wang et al., 2016)。然而, 月球非月海玄武岩显示较大的同位素不均一性, 例如富集克里普岩 (KREEP) 组分的角砾岩显著富集重 K 同位素, 而具有蒸发-冷凝玻璃外壳的角砾岩具有较轻的 K 同位素。这可能指示了岩浆洋结晶晚期, 原 KREEP 层发生了气化, 且在这个过程中轻的 K 同

元素优先气化,导致剩余 KREEP 岩层 K 同位素组成偏重。而气化再沉降的富集轻 K 同位素的物质附着到月表岩石形成富轻 K 同位素的角砾岩。

HED 陨石 K 同位素的研究显示出重 K 同位素的极端富集 ($+0.16‰ \sim +0.77‰$; Tian et al., 2019; Ku et al., 2020)。前人根据 20 块 HED 陨石 K 同位素值得出整体硅酸盐灶神星的 K 同位素组成为 ($+0.36 \pm 0.16$)‰。该值比地球、火星、月球等 K 同位素平均值偏重,可能与这 3 个过程有关:①组成灶神星的物质亏损挥发组分,且具有较重的 K 同位素组成;②灶神星增生过程中挥发物质丢失;③灶神星岩浆洋形成过程挥发丢失了 K 元素。然而,具体主导灶神星 K 同位素分馏的过程尚不明确。

与分异的天体(如地球、月球、火星和灶神星)

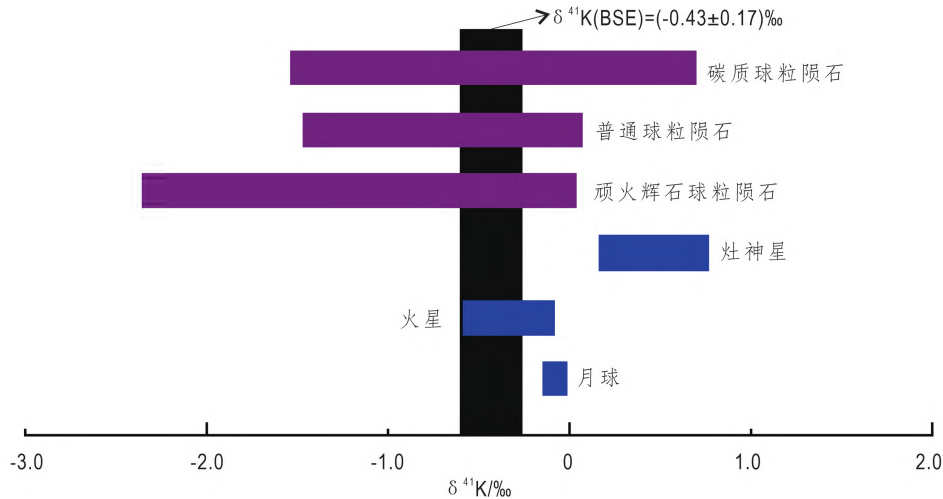


图3 各天体储库的 K 同位素组成 (Wang et al., 2016; Tuller - Ross et al., 2019a, 2019b; Tian et al., 2019, 2020; Ku et al., 2020; Bloom et al., 2020; Zhao et al., 2020; Nie et al., 2023)

Fig. 3 The K isotopic compositions of various planetary body reservoirs

2.4 Li 同位素

Seitz 等(2004)测试了平衡的地幔橄榄岩包体中的矿物,提出了硅酸盐地幔的 $\delta^7\text{Li}$ 值为 $+4‰$ 。Magna 等(2006)根据尖晶石橄榄岩中的橄榄石矿物样品,推断出地幔的 $\delta^7\text{Li}$ 值为 $+3.7‰$,而 Jeffcoate 等(2007)根据橄榄岩包体的全岩组成,推断地幔 $\delta^7\text{Li}$ 值为 $+3.5‰$ 。von Strandmann 等(2011)发现平衡橄榄岩的平均 $\delta^7\text{Li}$ 值为 ($+3.5 \pm 0.5$)‰,并认为这些样品代表了地球的原始地幔。另一项研究显示 Horoman Massif 橄榄岩中,未受交代作用影响的橄榄岩的 $\delta^7\text{Li}$ 值为 ($+3.8 \pm 1.4$)‰ (Lai et al., 2015)。综合上述研究,整体硅酸盐地

相比,未分异的物质表现出更大的 K 同位素分馏(图3),最高可达 $2‰$ (Bloom et al., 2020; Ku et al., 2020; Zhao et al., 2020),其中普通球粒陨石的为 $-1.47‰ \sim +0.07‰$;碳质普通球粒陨石的为 $-1.54‰ \sim +0.7‰$;顽火辉石球粒陨石的为 $-2.36‰ \sim +0.04‰$ 。前人认为这些 K 同位素的显著变化可能与太阳星云过程和母体变化(热变质、含水蚀变和撞击挥发)相关(Bloom et al., 2020; Zhao et al., 2020; Nie et al., 2023)。最近, Hu 等(2022)提出更详细的解释:不同类型球粒陨石可能继承了不同储库的同位素特征,这很可能与非碳质球粒陨石-碳质球粒陨石的二分性有关;碳质球粒陨石的 K 同位素可能受制于挥发性相关的分馏过程,很可能是不同成分的混合造成的。

球的 $\delta^7\text{Li}$ 值为 $+3.5‰ \sim +4.0‰$ 。

球粒陨石的 $\delta^7\text{Li}$ 值为 $+1.9‰ \sim +3.2‰$ (Tomascak et al., 2016)。其中,碳质球粒陨石的为 ($+3.2 \pm 1.7$)‰;普通球粒陨石的为 ($+2.4 \pm 1.6$)‰;顽火辉石球粒陨石的为 ($+1.9 \pm 1.5$)‰。不同类型的球粒陨石的 Li 同位素变化不大,且在误差范围内一致。顽火辉石球粒陨石中的 $\delta^7\text{Li}$ 值低于碳质球粒陨石和普通球粒陨石,这可能是由于顽火辉石球粒陨石在更靠近太阳的地方形成,受到散裂反应的影响更强烈(von Strandmann et al., 2011)。球粒陨石内部也显示出较大的不均一性,可能与不同陨石中球粒、富 Ca 和 Al 包体、基质等组分的比例不同相关(Seitz et al., 2007)。此外,陨

石母体小行星内部的水化蚀变也是导致陨石 Li 同位素不均一性的潜在因素 (Sephton et al., 2013)。而其他因素,如撞击熔融、气化等对 Li 同位素的影响还尚不清楚。

月球样品的全岩分析显示了相对较窄的 Li 同位素组成范围 (+3.5‰ ~ +6.6‰; Magna et al., 2006; Seitz et al., 2006; Day et al., 2016)。这些值与球粒陨石以及硅酸盐地球的 Li 同位素组成相似,表明地球及月球具有球粒陨石起源,也表明太阳系存在一个均匀的 Li 同位素储库。此外有两块样品不在上述范围:一块富铁斜长岩,其 $\delta^7\text{Li}$ 值为 +8.9‰;另一块富 KREEP 高地的角砾岩,其 $\delta^7\text{Li}$ 值为 +18.6‰。前人使用二次离子质谱仪对月球陨石中的橄榄石、辉石和岩浆包裹体进行分析 (Barrat et al., 2005),发现 $\delta^7\text{Li}$ 值具有极大的变化范围 (+2.4‰ ~ +15.1‰),可能是由于扩散导致的分馏。橄榄石的核部具有更高的 $\delta^7\text{Li}$ 值 (+15‰),这代表了岩浆的 Li 同位素组成。Magna

等 (2006) 认为 $\delta^7\text{Li}$ 值的变化可能受控于月球岩浆洋晚期分离结晶过程中的分馏作用。Day 等 (2016) 发现高钛月海玄武岩的 $\delta^7\text{Li}$ 值 [(+5.2 ± 1.2)‰] 显著高于低钛玄武岩 [(+3.8 ± 1.2)‰]。这些结果表明,大规模岩浆洋结晶之后仍然可以发生 Li 同位素分馏 (Day et al., 2016)。

火星陨石显示出相对较窄的 Li 同位素组成范围,大多数火星陨石的 $\delta^7\text{Li}$ 值为 +2.1‰ ~ +6.2‰ (Magna et al., 2006, 2015; Seitz et al., 2006; Filiberto et al., 2012)。代表原始火星幔组分的高 MgO 值辉熔长石无球粒陨石 $\delta^7\text{Li}$ 平均值为 (+4.2 ± 0.9)‰,指示整体硅酸盐火星的 Li 同位素组成 (Magna et al., 2015)。灶神星样品的 Li 同位素组成与其他类地行星相近,约为 (+3.7 ± 0.6)‰ (Tomascak et al., 2016)。综上所述,类地行星相比行星基本组成物质——球粒陨石具有更重的 Li 同位素组成 (图 4),但原因目前还尚不清楚。

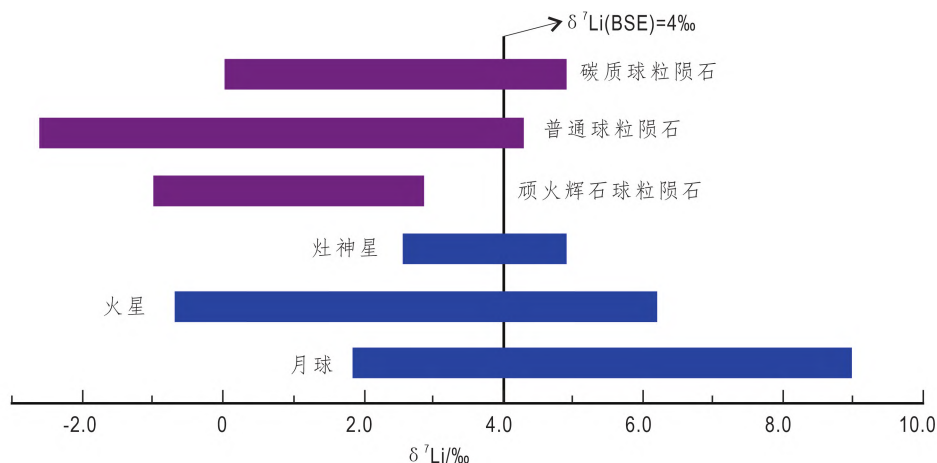


图4 各天体储库的 Li 同位素组成 (Seitz et al., 2004, 2006, 2007; Magna et al., 2006, 2015; von Strandmann et al., 2011; Day et al., 2016)

Fig. 4 The Li isotopic compositions of various planetary body reservoirs

3 撞击过程影响行星化学和同位素组成

3.1 撞击蒸发过程

传统的行星形成理论认为,行星形成于由气体和尘埃组成的原行星盘 (Hayashi et al., 1985)。该过程可以分为三个阶段:①尘埃形成星子;②星子形成原行星;③原行星形成行星。第一阶段中,星子通过尘埃颗粒的凝聚和尘埃层的不稳定性形成。之后,星子通过相互碰撞增长为原行星或行星胚胎,被称为迅猛增长和寡头增长过程。第三个阶段

为原行星之间发生撞击事件形成行星。

撞击事件是太阳系行星形成和演化过程中极其重要的事件。大量研究表明,星子的吸积碰撞过程、陨石的冲击过程以及行星天体的撞击事件均会产生高温高压,致使挥发性元素发生丢失且同位素发生分馏 (Day et al., 2014; Hin et al., 2017; Bloom et al., 2020; Xu et al., 2023)。这些过程可能会影响行星的原始组成,以及行星整体的化学和同位素特征。前人普遍认为月球起源于一次地球与火星大小般天体的大型撞击事件 (Hartmann et al.,

1975; Cameron, 1997; Bottke et al., 2015), 此次大撞击导致地球发生大规模熔融气化, 并且部分物质抛射丢失, 随后这些物质由于引力作用重新吸聚形成月球。因此月球样品可以作为研究中等挥发性元素及其同位素在高温撞击过程中行为的良好载体。月球样品的 Zn、Cu、K 和 Li 同位素研究成果均有人报道(图 1 至 4; Seitz et al., 2006; Magna et al., 2006; Moynier et al., 2006; Herzog et al., 2009; Paniello et al., 2012a; Wang et al., 2016; Day et al., 2016, 2019)。Wang 等(2016)研究了月球样品 K 同位素组成, 发现月球样品相比地球和球粒陨石物质富集更重的 K 同位素, 这指示月球是由一次高能量、高角动量的巨大撞击事件形成的。地球的大部分硅酸盐蒸发形成气体, 在高围压条件下不完全凝结, 导致 K 的丢失及其同位素分馏(Wang et al., 2016)。Xia 等(2019)在模拟月核形成条件下开展了 Zn 和 Cu 同位素在金属、硫化物以及硅酸盐熔体相之间的平衡分馏实验。结果表明: 月球 Zn 同位素变重最有可能是由于月球形成过程中的挥发性物质丢失(Paniello et al., 2012a)或岩浆洋脱气(Kato et al., 2015)导致; 而较重的 Cu 同位素特征可以解释为硫化物封存到月核的结果。月球样品的高精度 Li 同位素研究结果显示, 月球与地球硅酸盐幔的 Li 同位素组成几乎相同(Magna et al., 2006; Seitz et al., 2006), 这可能是大碰撞事件后, 中等挥发性的 Li 在地月蒸汽盘中均匀混合(Canup, 2004; Pahlevan et al., 2007), 或者是 Li 在地月撞击环境条件下并未发生显著的蒸发丢失, 因此其同位素没有表现出明显的分馏。

Zn、Cu、K 和 Li 均为中等挥发性元素, 且半凝聚温度相近, 但它们各自对撞击蒸发过程的指示不同, 因此研究多种同位素体系有助于深入理解撞击蒸发过程。在一些相同类型的与撞击相关的岩石中, 比如玻陨石、核爆玻璃、月球玄武岩, Zn 和 Cu 同位素均显示出比初始物质变重的趋势。前人也对比了玻陨石中 Zn、K 和 Cu 同位素组成, 并通过理论计算得出 Zn 和 Cu 很容易发生挥发丢失, 而 K 则相反, 即使在较高的温度下也倾向保留在硅酸盐熔体中(Jiang et al., 2019)。另外, 玻陨石中 Cu 同位素的分馏程度大于 Zn, 这很可能是由于玻陨石形成的环境会将熔体中的 Cu 还原为 Cu^+ , 而 Cu^+ 在熔体中的扩散速度比 Zn^{2+} 快至少两个数量级的缘故。这种扩散受限的蒸发模型可以解释撞击过

程中玻陨石挥发丢失造成的 Zn 和 Cu 同位素分馏。

部分熔融普通球粒陨石的冲击熔体和未熔融区域之间的 Zn、K 及其同位素变化也显示了冲击蒸发过程对中等挥发性元素的影响(Xu et al., 2023), 即熔体样品相较于未熔融样品显示出更重的 Zn 同位素; 而熔体样品的 K 同位素相较于未熔融样品显示出更轻的特征。这意味着冲击挥发的过程中, K 和 Zn 同位素的行为不单受挥发性质的控制。更多的证据支持 Zn 同位素分馏最主要受到挥发性质的控制, 而 K 同位素分馏主要受到扩散性质的控制。

Li 和 K 同作为第一主族碱金属元素, 在玻陨石中的同位素分馏均不明显。但是前人研究显示, 月球相较于地球具有稍重的 Li 和 K 同位素组成, 这可能被归结于大撞击事件。该事件导致地球形成硅酸盐蒸汽层, 挥发性元素在高围压条件下不完全冷凝得到现今的同位素特征。

半凝聚温度定义的挥发性序列为: $\text{Zn} > \text{K} > \text{Cu} > \text{Li}$ 。但是在上述各种情景中, 各元素及其同位素的行为并不遵守该序列。因此笔者认为元素在星云条件下的半凝聚温度, 不能代表其各自的挥发性强弱, 实际情况中还需要考虑诸多因素, 如熔体化学组成、温度、围压条件和氧逸度等。

3.2 撞击剥蚀对行星同位素组成的影响

星子的碰撞吸积过程也可能造成小的星体壳层的物质发生剥离和丢失, 从而影响行星整体的化学组成。类地行星被认为是由星子积累成行星胚胎形成的, 随后这些胚胎经历巨大撞击形成目前的行星系统(Morbidelli et al., 2012)。星子吸积增长成更大天体是行星形成的关键过程, 但星子并不是一直保持单调增长。行星在生长过程中经历的碰撞也可能导致物质丢失, 并且行星的最终化学组成可能会受到不同化学圈层剥蚀差异的影响(Carter et al., 2015; Boujibar et al., 2015; Allibert et al., 2023)。撞击体的速度和强度不同决定了星体之间发生合并、剥蚀或者破坏的程度(Marcus et al., 2009)。目前碰撞剥蚀过程对挥发性亲石元素的影响缺乏清晰认识。此外, 不同天体的壳层, 由于形成于不同程度的熔融过程, 其具有挥发性的不相容元素(如 K、Li、Rb)的富集程度也存在差异。另外, 被剥蚀的物质仍然可能被母体重新吸积。因此未来需要更多的研究来讨论碰撞剥蚀对行星挥发性

元素及同位素组成的影响。

4 结论

相比 CI 球粒陨石,球粒陨石的 MVE 一般低一个数量级,而像月球和灶神星这样的分异天体的 MVE 可以低两个数量级。MVE 的亏损是太阳系整体化学结构的固有特性。行星整体中等挥发性元素的耗竭机制包括:①太阳星云中的初始不完全凝结;②星际尘埃的部分蒸发;③在早期太阳系中形成的富含挥发性和缺乏挥发性的不同储库的球粒陨石组分的混合;④星子吸积增生导致挥发性元素丢失;⑤巨型撞击;⑥岩浆洋脱气等。

原始陨石的 MVE 及其同位素可以记录早期星云凝聚时太阳系物质的分布。小行星陨石包括未来采集样品的 MVE 及其同位素可以帮助理解不同化学储库混合和星子碰撞吸积导致的挥发性元素丢失过程。不同类地行星物质的 MVE 及其同位素可以指示类地行星的差异性形成和演化过程,如火山去气、大碰撞、后增薄层等事件。中等挥发性元素以及相关同位素的研究已经开始并将一直帮助人类理解太阳星云中挥发性元素的迁移和分布、星子的吸积增生、分异行星的岩浆洋演化、行星天体的吸积历史以及水和关键生命元素的来源等重要问题。

致谢:东华理工大学田世洪教授、中国科学院地球环境研究所贺茂勇研究员、南京大学晏浩特研究员和中国科学院地质与地球物理研究所田恒次副研究员对论文写作提供了帮助,在此表示感谢!

参 考 文 献

- Allibert L, Siebert J, Charnoz S, et al., 2023. The effect of collisional erosion on the composition of Earth-analog planets in Grand Tack models: Implications for the formation of the Earth[J]. *Icarus*, 391: 115325.
- Artemieva N, 2008. High-velocity impact ejecta: Tektites and Martian meteorites[M]//Catastrophic events caused by cosmic objects. Dordrecht: Springer Netherlands: 267-289.
- Barrat J A, Chaussidon M, Bohn M, et al., 2005. Lithium behavior during cooling of a dry basalt: An ion-microprobe study of the lunar meteorite Northwest Africa 479 (NWA 479)[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(23): 5597-5609.
- Barrat J A, Zanda B, Moynier F, et al., 2012. Geochemistry of CI chondrites: Major and trace elements, and Cu and Zn isotopes[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 83: 79-92.
- Benedix G K, McCoy T J, Keil K, et al., 2000. A petrologic study of the IAB iron meteorites: Constraints on the formation of the IAB-Winnonaite parent body[J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 35(6): 1127-1141.
- Bennett N R, Sio C K, Schauble E, et al., 2022. Iron isotope evidence of an impact origin for main-group pallasites[J]. *Geochemical Perspectives Letters*, 23: 6-10.
- Bishop M C, Moynier F, Weinstein C, et al., 2012. The Cu isotopic composition of iron meteorites[J]. *Meteoritics and Planetary Science*, 47(2): 268-276.
- Bloom H, Lodders K, Chen H, et al., 2020. Potassium isotope compositions of carbonaceous and ordinary chondrites: Implications on the origin of volatile depletion in the early solar system[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 277: 111-131.
- Botke W F, Vokrouhlický D, Marchi S, et al., 2015. Dating the Moon-forming impact event with asteroidal meteorites[J]. *Science*, 348(6232): 321-323.
- Boujibar A, Andraut D, Bolfan-Casanova N, et al., 2015. Cosmochemical fractionation by collisional erosion during the Earth's accretion[J]. *Nature Communications*, 6(1): 8295.
- Bridgestock L J, Williams H H, Rehkamper M, et al., 2014. Unlocking the zinc isotope systematics of iron meteorites[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 400: 153-164.
- Brugier Y A, Barrat J A, Gueguen B, et al., 2019. Zinc isotopic variations in ureilites[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 246: 450-460.
- Burbine T H, Buchanan P C, Binzel R P, et al., 2001. Vesta, Vestoids, and the howardite, eucrite, diogenite group: Relationships and the origin of spectral differences[J]. *Meteoritics and Planetary Science*, 36(6): 761-781.
- Cameron A G W, 1997. The origin of the Moon and the single impact hypothesis V[J]. *Icarus*, 126(1): 126-137.
- Canup R M, 2004. Dynamics of lunar formation[J]. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 42: 441-475.
- Carter P J, Leinhardt Z M, Elliott T, et al., 2015. Compositional evolution during rocky protoplanet accretion[J]. *The Astrophysical Journal*, 813(1): 72.
- Chen H, Moynier F, Humayun M, et al., 2016. Cosmogenic effects on Cu isotopes in IVB iron meteorites[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 182: 145-154.
- Chen H, Meshik A P, Pravdivtseva O V, et al., 2019. Potassium isotope fractionation during high-temperature evaporation determined from the Trinity nuclear test[J]. *Chemical Geology*, 522: 84-92.
- Chen H, Savage P S, Teng F Z, et al., 2013. Zinc isotope fractionation during magmatic differentiation and the isotopic composition of the bulk Earth[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 369-370: 34-42.
- Choi B G, Ouyang X W, Wasson J T, 1995. Classification and origin of I AB and III CD iron meteorites[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(3): 593-612.

- Crech J B, Moynier F, Koeberl C, 2019. Volatile loss under a diffusion-limited regime in tektites: Evidence from tin stable isotopes[J]. *Chemical Geology*, 528: 119279.
- Day J M D, Moynier F, 2014. Evaporative fractionation of volatile stable isotopes and their bearing on the origin of the Moon[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 372(2024): 20130259.
- Day J M D, Moynier F, Meshik A P, et al., 2017. Evaporative fractionation of zinc during the first nuclear detonation[J]. *Science Advances*, 3(2): 1-5.
- Day J M D, Moynier F, Sossi P A, et al., 2020. Moderately volatile element behaviour at high temperature determined from nuclear detonation[J]. *Geochemical Perspectives Letters*, 13: 54-60.
- Day J M D, Qiu L, Ash R D, et al., 2016. Evidence for high-temperature fractionation of lithium isotopes during differentiation of the Moon[J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 51(6): 1046-1062.
- Day J M D, Sossi P A, Shearer C K, et al., 2019. Volatile distributions in and on the Moon revealed by Cu and Fe isotopes in the 'Rusty Rock' 66095[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 266: 131-143.
- Dhaliwal J K, Day J M D, Crech J B, et al., 2021. Volatile depletion and evolution of Vesta from coupled Cu-Zn isotope systematics[C]//European Geosciences Union, EGU General Assembly Conference Abstracts, Vienna; EGU21-12820.
- Filiberto J, Chin E, Day J M D, et al., 2012. Geochemistry of intermediate olivine-phyric shergottite Northwest Africa 6234, with similarities to basaltic shergottite Northwest Africa 480 and olivine-phyric shergottite Northwest Africa 2990[J]. *Meteoritics and Planetary Science*, 47(8): 1256-1273.
- Hartmann W K, Davis D R, 1975. Satellite-sized planetesimals and lunar origin[J]. *Icarus*, 24(4): 504-515.
- Hayashi C, Nakazawa K, Nakagawa Y, 1985. Formation of the solar system[C]//Protostars and Planets II; 1100-1153.
- Herzog G F, Moynier F, Albarède F, et al., 2009. Isotopic and elemental abundances of copper and zinc in lunar samples, Zagami, Pele's hairs, and a terrestrial basalt[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73(19): 5884-5904.
- Hin R C, Coath C D, Carter P J, et al., 2017. Magnesium isotope evidence that accretional vapour loss shapes planetary compositions[J]. *Nature*, 549(7673): 511-515.
- Hu Y, Moynier F, Bizzarro M, 2022. Potassium isotope heterogeneity in the early solar system controlled by extensive evaporation and partial recondensation[J]. *Nature Communications*, 13(1): 7669.
- Hu Y, Teng F Z, Helz R T, et al., 2021. Potassium isotope fractionation during magmatic differentiation and the composition of the mantle[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126(3): 1-13.
- Ivanov D, Fitoussi C, Bourdon B, 2022. Trace element volatility and the conditions of liquid-vapor separation in the proto-lunar disk[J]. *Icarus*, 386: 115143.
- Jeffcoate A B, Elliott T, Kasemann S A, et al., 2007. Li isotope fractionation in peridotites and mafic melts[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71(1): 202-218.
- Jiang Y, Heng C, Bruce F, et al., 2019. Implications of K, Cu and Zn isotopes for the formation of tektites[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 259: 170-187.
- Johansen A, Lambrechts M, 2017. Forming planets via pebble accretion[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 45(1): 359-387.
- Kato C, Moynier F, Valdes M C, et al., 2015. Extensive volatile loss during formation and differentiation of the Moon[J]. *Nature Communications*, 6: 7617.
- Krot A N, Keil K, Scott E R D, et al., 2014. Classification of meteorites and their genetic relationships[J]. *Treatise on Geochemistry*: 1-63.
- Kruijer T S, Burkhardt C, Borg L E, et al., 2022. Tungsten and molybdenum isotopic evidence for an impact origin of pallasites[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 584: 117440.
- Ku Y, Jacobsen S B, 2020. Potassium isotope anomalies in meteorites inherited from the protosolar molecular cloud[J]. *Science Advances*, 6(41): 1-10.
- Lai Y J, von Strandmann P A E P, Dohmen R, et al., 2015. The influence of melt infiltration on the Li and Mg isotopic composition of the Horoman Peridotite Massif[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 164: 318-332.
- Li W Q, Beard B L, Li S L, 2016. Precise measurement of stable potassium isotope ratios using a single focusing collision cell multi-collector ICP-MS[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 31(4): 1023-1029.
- Liu S A, Huang J, Liu J, et al., 2015. Copper isotopic composition of the silicate Earth[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 427: 95-103.
- Lodders K, 2003. Solar system abundances and condensation temperatures of the elements[J]. *Astrophysical Journal*, 591(2): 1220-1247.
- Luck J M, Othman D B, Albarède F, 2005. Zn and Cu isotopic variations in chondrites and iron meteorites: early solar nebula reservoirs and parent-body processes[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(22): 5351-5363.
- Luck J M, Othman D B, Barrat J A, et al., 2003. Coupled ^{63}Cu and ^{16}O excesses in chondrites[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67(1): 143-151.
- Magna T, Day J M D, Mezger K, et al., 2015. Lithium isotope constraints on crust-mantle interactions and surface processes on Mars[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 162: 46-65.
- Magna T, Deutsch A, Mezger K, et al., 2011. Lithium in tektites and impact glasses: Implications for sources, histories and large impacts[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75(8): 2137-2158.
- Magna T, Wiechert U, Halliday A N, 2006. New constraints on the lithium isotope compositions of the Moon and terrestrial planets[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 243(3/4): 336-353.
- Marcus R A, Stewart S T, Sasselov D, et al., 2009. Collisional stripping and disruption of super-earths[J]. *The Astrophysical Journal*, 700(2): L118-L122.

- Morbideilli A, Lunine J I, O'Brien D P, et al., 2012. Building terrestrial planets [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 40: 251-275.
- Moynier F, Albarède F, Herzog G F, 2006. Isotopic composition of zinc, copper, and iron in lunar samples [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(24): 6103-6117.
- Moynier F, Beck P, Jourdan F, et al., 2009. Isotopic fractionation of zinc in tektites [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 277(3/4): 482-489.
- Moynier F, Blichert-Toft J, Telouk P, et al., 2007. Comparative stable isotope geochemistry of Ni, Cu, Zn, and Fe in chondrites and iron meteorites [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71(17): 4365-4379.
- Moynier F, Beck P, Yin Q Z, et al., 2010a. Volatilization induced by impacts recorded in Zn isotope composition of ureilites [J]. *Chemical Geology*, 276(3/4): 374-379.
- Moynier F, Koeberl C, Beck P, et al., 2010b. Isotopic fractionation of Cu in tektites [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74(2): 799-807.
- Moynier F, Le Borgne M, 2015. High precision zinc isotopic measurements applied to mouse organs [J]. *Journal of Visualized Experiments*: 1-6.
- Neuman M, Gargano A, Shearer C K, et al., 2022a. Volatile element evolution in the Martian crust: communications with the Martian surface and atmosphere? [C]//Lunar and Planetary Institute, NASA Johnson Space Center, 53rd Lunar and Planetary Science Conference, Texas; Woodlands: 1385.
- Neuman M, Holzheid A, Lodders K, et al., 2022b. High temperature evaporation and isotopic fractionation of K and Cu [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 316: 1-20.
- Nie N X, Chen X Y, Zhang Z J, et al., 2023. Rubidium and potassium isotopic variations in chondrites and Mars: Accretion signatures and planetary overprints [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 344: 207-229.
- Nishio Y, Nakai S, 2002. Accurate and precise lithium isotopic determinations of igneous rock samples using multi-collector inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. *Analytica Chimica Acta*, 456(2): 271-281.
- Norris C A, Wood B J, 2017. Earth's volatile contents established by melting and vaporization [J]. *Nature*, 549(7673): 507-510.
- Pahlevan K, Stevenson D J, 2007. Equilibration in the aftermath of the lunar-forming giant impact [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 262(3/4): 438-449.
- Paniello R C, Day J M D, Moynier F, 2012a. Zinc isotopic evidence for the origin of the Moon [J]. *Nature*, 490(7420): 376-379.
- Paniello R C, Moynier F, Beck P, et al., 2012b. Zinc isotopes in HEDs: Clues to the formation of 4-Vesta, and the unique composition of Pecora Escarpment 82502 [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 86: 76-87.
- Paquet M, Moynier F, Yokoyama T, et al., 2023a. Contribution of Ryugu-like material to Earth's volatile inventory by Cu and Zn isotopic analysis [J]. *Nature Astronomy*, 7: 182-189.
- Paquet M, Sossi P A, Moynier F, 2023b. Origin and abundances of volatiles on Mars from the zinc isotopic composition of Martian meteorites [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 611: 118126.
- Pringle E A, Moynier F, Savage P S, et al., 2014. Silicon isotopes in angrites and volatile loss in planetesimals [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(48): 17029-17032.
- Quinlan M M, Walker A M, Davies C J, 2023. Reconciling fast and slow cooling during planetary formation as recorded in the main group pallasites [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 618: 118284.
- Savage P S, Moynier F, Chen H, et al., 2015. Copper isotope evidence for large-scale sulphide fractionation during Earth's differentiation [J]. *Geochemical Perspectives Letters*, 1(1): 53-64.
- Seitz H M, Brey G P, Lahaye Y, et al., 2004. Lithium isotopic signatures of peridotite xenoliths and isotopic fractionation at high temperature between olivine and pyroxenes [J]. *Chemical Geology*, 212(1/2): 163-177.
- Seitz H M, Brey G P, Weyer S, et al., 2006. Lithium isotope compositions of Martian and lunar reservoirs [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 245(1/2): 6-18.
- Seitz H M, Brey G P, Zipfel J, et al., 2007. Lithium isotope composition of ordinary and carbonaceous chondrites, and differentiated planetary bodies: Bulk solar system and solar reservoirs [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 260(3/4): 582-596.
- Sephton M, James R H, Fehr M A, et al., 2013. Lithium isotopes as indicators of meteorite parent body alteration [J]. *Meteoritics and Planetary Science*, 48(5): 872-878.
- Sossi P A, Nebel O, O'Neill H S C, et al., 2018. Zinc isotope composition of the Earth and its behaviour during planetary accretion [J]. *Chemical Geology*, 477: 73-84.
- Teng F Z, Yang W, 2014. Comparison of factors affecting the accuracy of high-precision magnesium isotope analysis by multi-collector inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 28(1): 19-24.
- Tian Z, Chen H, Fegley B, et al., 2019. Potassium isotopic compositions of howardite-eucrite-diogenite meteorites [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 266: 611-632.
- Tian Z, Jolliff B L, Korotev R L, et al., 2020. Potassium isotopic composition of the Moon [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 280: 263-280.
- Tian Z, Magna T, Day J M D, et al., 2021. Potassium isotope composition of Mars reveals a mechanism of planetary volatile retention [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 118(39): 1-7.
- Tomascak P B, Magna T, Dohmen R, 2016. *Advances in lithium isotope geochemistry* [M]. Berlin: Springer International Publishing.
- Tuller-Ross B, Marty B, Chen H, et al., 2019a. Potassium isotope systematics of oceanic basalts [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 259: 144-154.
- Tuller-Ross B, Savage P S, Chen H, et al., 2019b. Potassium isotope fractionation during magmatic differentiation of basalt to rhyolite [J].

- Chemical Geology, 525: 37-45.
- von Strandmann P A E P, Elliott T, Marschall H R, et al., 2011. Variations of Li and Mg isotope ratios in bulk chondrites and mantle xenoliths[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75(18): 5247-5268.
- Wang K, Jacobsen S B, 2016. Potassium isotopic evidence for a high-energy giant impact origin of the Moon[J]. *Nature*, 538(7626): 487-490.
- Wang Z Z, Liu S A, Liu J G, et al., 2017. Zinc isotope fractionation during mantle melting and constraints on the Zn isotope composition of Earth's upper mantle[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 198: 151-167.
- Wasson J T, Choi B G, 2003. Main-group pallasites: chemical composition, relationship to IIIAB irons, and origin[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67(16): 3079-3096.
- Wasson J T, Kallemeyn G W, 2002. The IAB iron-meteorite complex: A group, five subgroups, numerous grouplets, closely related, mainly formed by crystal segregation in rapidly cooling melts[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 66(13): 2445-2473.
- Williams H M, Archer C, 2011. Copper stable isotopes as tracers of metal-sulphide segregation and fractional crystallisation processes on iron meteorite parent bodies[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75(11): 3166-3178.
- Wood B J, Smythe D J, Harrison T, 2019. The condensation temperatures of the elements: A reappraisal[J]. *American Mineralogist*, 104(6): 844-856.
- Xia Y, Kiseeva E, Wade J, et al., 2019. The effect of core segregation on the Cu and Zn isotope composition of the silicate Moon[J]. *Geochemical Perspectives Letters*, 12:12-17.
- Xu Y K, Hu Y, Chen X Y, et al., 2019. Potassium isotopic compositions of international geological reference materials[J]. *Chemical Geology*, 513: 101-107.
- Xu Y K, Li Z, Li S J, et al., 2023. Shock-induced potassium and zinc isotope fractionation in ordinary chondrites and its implications[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 349: 1-10.
- Yang C, Liu S A, Zhang L, et al., 2021. Zinc isotope fractionation between Cr-spinel and olivine and its implications for chromite crystallization during magma differentiation[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 313: 277-294.
- Zhao C, Lodders K, Bloom H, et al., 2020. Potassium isotopic compositions of enstatite meteorites[J]. *Meteoritics and Planetary Science*, 55(6): 1404-1417.
- Zhu X K, O'Nions R K, Guo Y, et al., 2000. Determination of natural Cu-isotope variation by plasma-source mass spectrometry: implications for use as geochemical tracers[J]. *Chemical Geology*, 163(1/2/3/4): 139-149.

Advances in Isotopic Fractionation in Planetesimal Collisional Accretion Processes

XU Yingkui^{1,2}, LI Zhi^{1,3}, FENG Juan⁴, WANG Deliang^{1,3}, ZHU Dan^{1,5},
LI Shijie^{1,2}, LI Xiongyao^{1,2}, LIU Jianzhong^{1,2}

(1. Center for Lunar and Planetary Sciences, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China; 2. CAS Center for Excellence in Comparative Planetology, Hefei 230026, China; 3. College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. No. 105 Geological Team, Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development Guizhou Province, Guiyang 550018, China; 5. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China)

Abstract: Understanding the initial material composition and formation process of planets is of great significance for studying the formation and evolution of the solar system and the biological habitability of the Earth. Planetesimal collision and accretion is an important stage in the formation of terrestrial planets, which affects the elemental and isotopic composition of the planets. Moderately volatile elements and their isotopes are effective tools for studying this process, because they are sensitive to tracing the processes of high-temperature evaporation and cooling condensation during the impact. This paper systematically summarizes the test data of some elements and isotopes of chondrites and meteorite samples from different celestial bodies (including Earth, Moon, Mars and Vesta), discusses the characteristics and main factors causing isotopic fractionation of moderately volatile elements and their isotopes of different celestial bodies, and explores their implications for the initial material composition and formation process of planets. The impact process of planetesimals, planetary embryos and other celestial bodies may greatly limit the volatile element content of terrestrial planets.

Keywords: planetesimal; collisional accretion; moderately volatile elements; vaporization process; isotopic fractionation