

文章编号: 1000-4734(2023)03-0273-11

锌同位素在行星科学中的研究进展

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

(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. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院比较行星卓越创新中心, 安徽 合肥 230026; 4. 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; 5. 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550081)

摘要: 近年来有关太阳系天体中等挥发性元素的研究掀起了一波浪潮。锌作为中等挥发性元素, 其稳定同位素对于高温挥发过程具有很好的指示作用。因此, 在行星科学领域锌同位素逐渐成为研究星云和行星演化的一个理想工具。本文系统地归纳了各类陨石和行星天体储库的锌同位素组成, 并对不同种类的陨石以及地外样品(碳质球粒陨石、普通球粒陨石、顽火辉石球粒陨石、橄辉无球粒陨石、铁陨石、石铁陨石、月球陨石和 Apollo 样品、火星陨石、灶神星陨石等)中的锌稳定同位素研究内容进行了较全面的总结。主要包括不同陨石和行星锌同位素组成的控制因素以及锌同位素对太阳系内星云过程和行星过程的指示; 同时, 简要论述了锌同位素在太阳系形成和演化过程中的分馏机制, 并立足目前的研究基础, 探讨锌同位素在行星科学领域的研究前景和发展趋势。

关键词: 锌同位素; 陨石; 挥发性元素; 太阳系演化

中图分类号: P597; P68

文献标识码: A

doi: 10.16461/j.cnki.1000-4734.2023.43.021

第一作者: 李智, 男, 1998年9月生, 硕士研究生, 行星科学专业. E-mail: lizhi@mail.gyig.ac.cn

Advances of zinc isotope researches in the planetary science

LI Zhi^{1,2}, XU Ying-kui^{1,3*}, ZHU Dan^{1,4}, LI Shi-jie^{1,5}, LI Xiong-yao^{1,3}, LIU Jian-zhong^{1,3}

(1. Center for Lunar and Planetary Sciences, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049 China; 3. CAS Center for Excellence in Comparative Planetology, Hefei 230022, China; 4. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China; 5. State Key Laboratory of Environment Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China)

Abstract: In recent years, the research on moderately volatile elements in solar system bodies has sparked a wave of interest. As a member of moderately volatile elements, zinc (Zn) and its isotopes are good indicators for tracing the high-temperature evaporation process. Hence, the Zn isotope is considered as an ideal tool to study the evolution of solar nebula and planets in the planetary science. Here, we have systematically summarized the Zn isotopic compositions of various meteorites and planetary reservoirs, and have provided a comprehensive overview on the zinc stable isotope researches of different types of meteorites and extraterrestrial samples (carbonaceous chondrites, ordinary chondrites, enstatite chondrites, angrites, iron meteorites, stony-iron meteorites, lunar meteorites and Apollo samples, Martian meteorites, Vesta meteorites, etc.). Those researches were mainly concentrated on the controlling factors of zinc isotope composition in different meteorites and planets and the indication of zinc isotopes for the nebular processes and planetary processes in the solar system. At the same time, we have briefly discussed the fractionation mechanism of zinc isotopes in the formation and evolution process of the solar system, and have explored the prospects and development trends of zinc isotope researches in the planetary science on the basis of previous researches.

Keywords: Zn isotopes; meteorites; volatile element; the solar system evolution

收稿日期: 2021-06-06

基金项目: 民用航空航天技术预研项目(编号: D020202); 国家自然科学基金项目(编号: 42073020; 42173046); 贵州省科学技术基金(编号: GZ2020SIG)

* 通讯作者, E-mail: xuyingkuai@vip.gyig.ac.cn

中等挥发性元素在行星的演化中扮演着至关重要的角色。就目前所知, 球粒陨石以及内太阳系分异的行星相较于太阳系整体组成均亏损中等挥发性元素^[1,2]。然而, 各行星中挥发分的含量以及在太阳系演化过程中不同行星天体挥发分亏损的机理和过程尚不明确。

锌作为中等挥发性元素, 在星云压力 10^{-4} bar 下其半冷凝温度 (50% Tc) 为 706K^[3]。锌具有 5 个稳定同位素, 分别为 ^{64}Zn (49.2%)、 ^{66}Zn (27.8%)、 ^{67}Zn (4.0%)、 ^{68}Zn (18.4%) 和 ^{70}Zn (0.6%)。陨石中的锌主要赋存于硅酸盐相, 其次也赋存于硫化物相和金属相中。这些物理化学特性为研究星子、行星胚胎和原始行星等太阳系物质行星分异过程、星子吸积过程以及岩浆洋去气过程中的锌同位素行为提供了基础。已有研究表明锌在行星岩石的高温蒸发过程中表现出强烈的同位素分馏^[4,5], 但在地球岩浆演化过程中几乎没有发生分馏^[6,7], 因此锌同位素能有效地指示行星天体以及一些陨石的高温冲击过程。近年来, 锌同位素逐渐展现出其研究星云和行星演化过程中挥发性元素亏损起源的巨大潜力^[8-11]。

研究太阳系内物质的锌同位素组成和分馏机制有助于加深对行星吸积、陨石冲击、陨石母体热变质以及行星分异等过程的理解, 有助于理解太阳系内不同天体包括原始陨石或分异型陨石、小行星、类地行星的形成和演化过程。本文主要回顾了近年来行星科学领域中锌同位素的研究进展, 梳理了目前仍存在的问题, 并展望了锌同位素未来的发展趋势。

1 锌同位素测试方法及国际标准

Blix 等 (1957) 最早使用质谱仪测试了自然样品中的锌同位素组成, 但限于当时的分析精度 (误差 1‰~2‰), 并没有发现地球样品锌同位素组成存在差异^[12]。之后 Filby (1964) 使用中子活化法测试了一些岩石和矿物的锌同位素值^[13]。20 世纪末, 热电离质谱仪 (Thermal Ionization Mass Spectrometer, TIMS) 开始应用于锌同位素测试。在校正了仪器误差并使用了双稀释剂法后, 其精度比起之前的方法有一定提升 (约 1‰/amu)^[14-15]。目前最新的 TIMS 设备能达到 0.1~0.2‰/amu 的精度^[16]。1999 年, Maréchal 最早利用多接收电感耦合等离子体质谱仪 (Multicollector-Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry, MC-ICPMS) 得到了岩石样品中高精度的锌同位素组成。此后, MC-ICPMS 被广泛用于 Zn 同位素的测试 (校正方法: 主要有样品-标样间差法或双稀释剂法)。另外, 结合使用铜滴法和样品-标样间差法可以大幅度校正锌同位素测试中的质量歧视效应^[17]。锌同位素的国际通用标准物质通常选用 JMC-Lyon 溶液。锌同位素组成的测试结果常采用相对标样的千分偏差表示:

$$\delta^{X64}\text{Zn}/\text{‰} = [(X\text{Zn}/^{64}\text{Zn})_{\text{样品}} / (X\text{Zn}/^{64}\text{Zn})_{\text{标准}} - 1] \times 1000$$

式中, X 为质量数, 可以表示 66, 67, 68 和 70。样品的 $\delta^{66}\text{Zn}$ 值越高代表越重的同位素组成。但由于上述物质停产, 国际上不同研究团队又重新标定了锌同位素的参考标准, 如 IRMM-3702 和 NIST SRM 683^[18-19]。作为新的参考标准: $\Delta^{66}\text{Zn}_{\text{IRMM-3702-JMC Lyon}} = +0.27\text{‰} \pm 0.03\text{‰}$ ^[20]; $\Delta^{66}\text{Zn}_{\text{NIST SRM 683-JMC Lyon}} = +0.12\text{‰} \pm 0.04\text{‰}$ ^[19]。

2 不同陨石和天体中锌同位素的组成

锌同位素作为天体化学领域中一个新兴的研究方向, 其对于理解太阳系的形成和演化有着重要的意义。前人已经对各类陨石和月球 Apollo 返回样品开展了系列研究, 包括碳质球粒陨石 (CC)、普通球粒陨石 (OC)、顽火辉石球粒陨石 (EC)、橄辉无球粒陨石 (Ureilite)、铁陨石、石铁陨石、月球陨石和 Apollo 样品、火星陨石 (SNC 陨石)、灶神星陨石 (HED 陨石) 等 (图 1)。

2.1 球粒陨石中锌的宇宙化学性质

球粒陨石是一种富含球粒的陨石, 主要包括碳质球粒陨石 (CC)、普通球粒陨石 (OC)、顽火辉石球粒陨石 (EC), 也包括 Rumuruti (R) 型球粒陨石和 Kakangari (K) 型球粒陨石。球粒陨石被认为

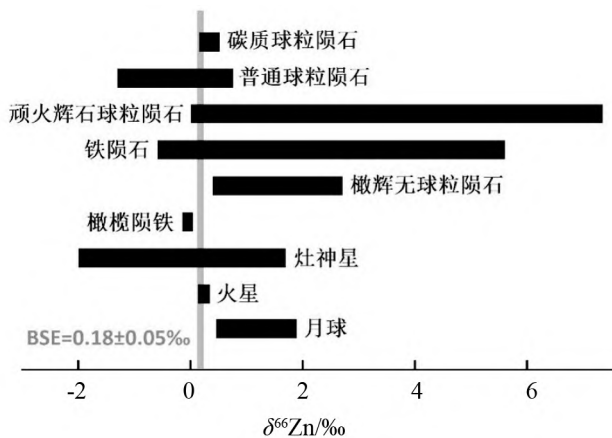


图1 不同陨石和天体中的锌同位素组成(数据源于文献[8-9,21-25])

Fig. 1. Zinc isotope compositions of various meteorites and planetary bodies.

陨石类型的改变而发生规律性的变化, 锌同位素的值按 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锌同位素, 而其它贫挥发分的碳质球粒陨石主要富集轻的锌同位素^[21]。Barrat 等 2012 年测试了更多的球粒陨石样品, 得到了更可靠的 CI 型球粒陨石的锌同位素值: $\delta^{66}\text{Zn} = +0.46\text{‰} \pm 0.08\text{‰}$, 这一结果也显示出 CI 型球粒陨石相较于其它碳质球粒陨石群 (CM、CV、CO 等) 富集重的锌同位素^[28]。Luck 等 (2005) 认为这一规律发生的原因是星云中不同锌同位素储库的混合而非冲击熔融所造成的挥发分丢失^[21,29]。

碳质球粒陨石中含有大量的富钙富铝难熔包体 (calcium-aluminium-rich inclusion, CAI)。CAIs 是原始行星盘中最先冷却凝结出来的固体。Kato 等 (2017) 测试了 CAIs 的锌同位素 ($\delta^{66}\text{Zn} = -1.23\text{‰} \sim -0.19\text{‰}$) 和锌元素含量 ($91 \times 10^{-6} \sim 702 \times 10^{-6}$)。它们相对于碳质球粒陨石全岩更富集轻的锌同位素, 这与 Allende CAI ($\delta^{66}\text{Zn} = -2.65\text{‰}$) 和 Murchison CAI ($\delta^{66}\text{Zn} = -0.64\text{‰}$) 的测试结果一致^[21,30]。此外, 前人还发现 CAIs 富集的锌聚集在边缘位置^[31,32]。因此, CAIs 富集轻的锌同位素的特征被认为是星云内中等挥发性元素冷凝过程中轻的同位素优先冷凝的结果^[33]。

2.1.2 普通球粒陨石

普通球粒陨石 ($\delta^{66}\text{Zn} = -1.30\text{‰} \sim +0.76\text{‰}$) 按照铁含量依次减少的顺序分为: H 型、L 型、LL 型。不同类型所对应的锌同位素组成逐渐变轻 ($+0.19\text{‰}$, $+0.06\text{‰}$, -0.07‰)^[21], 然而前人并未解释这个现象。直到 2019 年, Creech 和 Moynier 比较了普通球粒陨石的锡同位素和锌同位素, 发现按照 H 型、L 型、LL 型的顺序, 这 2 种同位素均表现出一致的变轻趋势。介于 2 种元素的地球化学性质差异, 锌具有中等挥发性, 亲石性和亲铜性; 锡具有中等挥发性, 亲铜性和亲铁性, 最终认为这两种元素的同位素变化受控于挥发性^[34]。对于普通球粒陨石中高温条件如何影响到锌同位素组成的问题一直存在许多争议。Wolf 和 Lipschutz (1998) 报道了受冲击的 H 型球粒陨石 Charsonville (H6, S4) 和未受冲击的 H 型球粒陨石 Kernouvé (H6, S1) 具有相似的锌同位素组成^[35], Luck 等 (2005) 也发现普通球粒陨石中的 $\delta^{66}\text{Zn}$ 值与撞击强度无明显相关性^[21]。然而, Schaefer 和 Fegley Jr (2010) 却发现普通球粒陨石中的锌同位素组成与其热变质温度条件有关^[36]。

前人还对普通球粒陨石的锌同位素和镍同位素进行了对比研究, 发现普通球粒陨石中二者呈正相关, 他们认为这种关系是由于球粒陨石形成过程中固相和气相的物质互相交换所导致的。其中固相主要是金属相和硅酸盐相, 气相则是在吸积过程中矿物分选之后的残余蒸汽^[30]。

是构建行星的基石^[26], 是研究陨石早期演化和行星过程的重要样品。

2.1.1 碳质球粒陨石

碳质球粒陨石是一种富含水与有机化合物的球粒陨石^[27]。Luck 等 (2005) 使用 MC-ICPMS 首次测得了一些碳质球粒陨石 (CC)、普通球粒陨石 (OC) 的高精度锌同位素组成。他们发现不同的碳质球粒陨石群 (CI、CV、CO、CM 等) 有着明显的锌同位素组成差异 ($+0.16\text{‰} < \delta^{66}\text{Zn} < +0.52\text{‰}$)。锌同位素组成随

星云冷凝过程的研究表明优先冷凝的硅酸盐球粒和更晚的阶段凝聚出的硫化物有着不同的锌同位素组成^[37-40]。Pringle 等 (2017) 通过连续酸溶实验分离出未平衡普通球粒陨石中锌的几种赋存相 (硅酸盐相、硫化物相和金属相) 并对其进行了锌同位素分析, 发现硫化物相中的锌同位素组成总是比硅酸盐相中的锌同位素组成更重^[10], 这与 Luck 等 (2005) 测试的结果一致。其原因可能是未平衡普通球粒陨石中的硫化物相和硅酸盐相没有发生锌同位素的交换而是反映了不同相形成时的初始锌同位素组成特征^[10]。

2.1.3 顽火辉石球粒陨石

顽火辉石球粒陨石包括高铁 EH 型和低铁 EL 型两个群。2011 年 Moynier 等测试了这一系列陨石以及顽火无球粒陨石的锌同位素。他们从一块 EL6 型陨石中得到了太阳系内极重的锌同位素组成 ($\delta^{66}\text{Zn} = +7.35\text{‰}$), 从一块顽火无球粒陨石中得到了极轻的锌同位素组成 ($\delta^{66}\text{Zn} = -7.04\text{‰}$)。同时, 他们发现 EH 型顽火辉石球粒陨石 ($\delta^{66}\text{Zn} = +0.15\text{‰} \sim +0.31\text{‰}$) 与低热变质程度的 EL3 型陨石 ($\delta^{66}\text{Zn} = +0.01\text{‰} \sim +0.63\text{‰}$) 有着相似的锌同位素组成。然而相比 EL3 型陨石, EL6 型陨石的锌同位素组成更重, 这可能是因为 EL6 型陨石经历了更强烈的热变质作用。而顽火无球粒陨石中极轻的锌同位素组成可能源自蒸汽中轻的锌同位素的凝聚^[22]。

2.2 分异型陨石中锌的宇宙化学性质

1) 橄辉无球粒陨石 橄辉无球粒陨石 (Ureilite) 是一种超铁镁质的无球粒陨石, 通常认为来自于已分异小行星的残余地幔^[41,42]。Moynier 等 (2011) 研究了不同冲击程度的橄辉无球粒陨石, 发现锌同位素的值与冲击变质程度呈正相关关系, 且锌同位素值的变化达到 1‰ ^[43]。这些陨石中具有最重的锌同位素组成的样品有着最低的锌元素含量, 这与地壳受到高速撞击熔融形成的玻陨石 (tektite) 和核爆炸区域的核融玻璃 (trinity) 显示出相同的特征^[5,44,45]。因此, 他们认为橄辉无球粒陨石锌同位素组成的变化可能受控于撞击导致的高温蒸发过程。但是在 Moynier 等 (2011) 的研究中, 冲击变质程度最高的陨石却并没有表现出最重的锌同位素组成, 这与上述的解释略微相悖。直到 2019 年, Brugier 系统地研究了更多橄辉无球粒陨石中的锌同位素组成变化 ($+0.40\text{‰} \sim +2.71\text{‰}$), 还测量了与它们来自相同母体 (UPB) 的由幔源原始熔体形成的粗安岩的锌同位素组成 ($\delta^{66}\text{Zn} = +0.67\text{‰}$)。他们发现这种原始的幔源物质锌同位素值稍微高于常规普通球粒陨石的值, 这意味着至少有一部分地幔在撞击解体前就已经显示出较高的锌同位素值。因此他们提出一个更合理的解释: 由于早期行星幔的温度足够高, 所以蒸发作用可能主要发生在小行星母体的解体过程中, 除此之外, 之后的冲击加热也会增强蒸发效应, 从而加强锌同位素的分馏。橄辉无球粒陨石中变化较大的锌同位素组成可能是蒸发作用的结果^[24]。

2) 铁陨石 铁陨石又名陨铁, 其主要成分为铁、镍合金, 被认为是古老行星内核的碎片。Luck 等 (2005) 的研究中所报道的 IIIAB 型铁陨石的锌同位素组成范围很窄 ($-0.59\text{‰} \sim +0.50\text{‰}$), 而含硅酸盐的铁陨石 (从 IA 型到 IIICD 型) 其锌同位素组成变化范围更宽 ($+0.56\text{‰} \sim +3.68\text{‰}$)。他们还发现 IAB-IIIICD 型的铁陨石锌同位素和铜同位素具有极好的负相关性, 并认为这是由于具有高 $\delta^{66}\text{Zn}$ 值的冲击熔体与更深处核分离形成的具有高 $\delta^{65}\text{Cu}$ 值的液相金属发生了混合^[21]。之后 Chen 等 (2013) 也测试了大量铁陨石的锌同位素, 发现贫锌的铁陨石群 IVA 和 IVB 相比于其它的铁陨石群并不富集更重的锌同位素。因此他们认为这两类陨石中的低挥发性元素含量与它们母体的蒸发历史无关^[9]。2014 年 Bridgestock 等对不同类型铁陨石 (IAB 型、IIAB 型、IIIAB 型) 中的锌同位素进行了更加系统性的分析, 发现几乎所有铁陨石都有着比整体硅酸盐地球和球粒陨石更重的锌同位素组成, 且每一类型的铁陨石其 $\delta^{66}\text{Zn}$ 值都与锌元素含量呈负相关。又由于铬铁矿十分富集锌元素和轻的锌同位素。因此他们认为 $\delta^{66}\text{Zn}$ 值与 $[\text{Zn}]$ 值的关系指示了铁陨石中的铬铁矿从金属相中分离结晶的过程^[46]。

3) 石铁陨石 石铁陨石 (Pallasite) 被认为形成于 IIIA 型小行星核结晶达到 75~80% 之后的核幔边界层^[47]。前人发现 Brenham 石铁陨石 ($\delta^{66}\text{Zn} = -0.05\text{‰}$) 和 IIIA 型铁陨石的锌同位素组成相差约 1‰, 并且它们的铜同位素和锌同位素的值表现出近乎 1:1 的关系, 他们推测这是陨石母体经历了不同相的分离 (金属液相和金属固相、硫化物/铬铁矿和金属液相或者硅酸盐相和金属液相) 导致的^[21]。

2.3 地球样品中锌的宇宙化学性质

前人的综述中已经十分详细地介绍了地球上的锌同位素特征^[29,48,49]。因此我们在此只是简要地概述前人研究成果, 并补充一些最新的研究进展。

2.3.1 地幔中的锌

Marèchal 等于 2000 年测试了一块来自法国留尼汪岛的玄武岩样品, 其锌同位素为 $+0.25\text{‰}$ ^[50]。2006 年 Ben 等对 3 个大洋的洋中脊玄武岩样品进行了测试, 得到的锌同位素平均值也为 $+0.25\text{‰}$ ^[6]。2009 年, Herzog 等测试了十块留尼汪岛的玄武岩的锌同位素 (平均值 $\delta^{66}\text{Zn} = +0.34\text{‰} \pm 0.09\text{‰}$) 和两块尼拉贡戈火山的玄武岩的锌同位素 ($\delta^{66}\text{Zn}$ 在 $+0.22\text{‰} \sim +0.37\text{‰}$ 之间)^[51]。之后 Chen 等 (2013) 通过研究两套不同地区的火成岩发现岩浆分异过程不会造成明显的锌同位素分馏 (不超过 0.10‰), 由此他们推断地幔的锌同位素组成相对均一, 整体硅酸盐地球的锌同位素值约为 $+0.28\text{‰} \pm 0.05\text{‰}$ ^[7]。Wang 等 (2017 年) 对全球海相玄武岩锌同位素 (平均值 $\delta^{66}\text{Zn} = +0.28\text{‰} \pm 0.05\text{‰}$) 的报道也支持这一观点^[20]。

值得注意的是, 近年来对更加原始的幔源火成岩的锌同位素研究揭示了一个略微不同的值。2018 年 Sossi 等对来自 Balmuccia 地块的更加原始的上地幔橄榄岩和太古宙埃达克岩进行测试得出了更加可靠的结果, 即整体硅酸盐地球的锌同位素值为 $+0.16\text{‰} \pm 0.06\text{‰}$ ^[11]。同年 McCoy-West 等报道了来自加拿大巴芬岛的年轻苦橄岩的 $\delta^{66}\text{Zn}$ 在 $+0.18\text{‰} \sim +0.28\text{‰}$ 之间, 基于此他们得出巴芬岛地幔的锌同位素平均为 $+0.20\text{‰} \pm 0.03\text{‰}$ ^[52]。之后 Liu 等于 2019 年的研究表明, 深海橄榄岩的锌同位素在 $+0.12 \sim +0.62\text{‰}$ 之间, 超出了整体硅酸盐地球的锌同位素; 而蛇绿岩橄榄岩的锌同位素在 $+0.17 \sim +0.33\text{‰}$ 之间, 与之前认为的整体硅酸盐地球的锌同位素组成相符^[53]。2019 年 Yang 等报道了峨眉山大火成岩省的苦橄质火山岩和玄武岩的锌同位素 ($+0.24\text{‰} \sim +0.34\text{‰}$), 其平均值为 $+0.30\text{‰}$ 。但是苦橄质火山中的橄榄石和单斜辉石斑晶比全岩的锌同位素值低 0.15‰, 因此认为橄榄石的堆积会造成岩浆中的锌同位素值减小, 原始地幔的锌同位素值应该要更高^[54]。综上所述, 前人对地球上原始幔源火成岩的锌同位素研究已经较为深入, 目前大家普遍接受 $\delta^{66}\text{Zn} = +0.18\text{‰} \pm 0.05\text{‰}$ 作为整体硅酸盐地球的锌同位素值^[25]。

2.3.2 地壳中的锌

地壳中的锌同位素可以用黄土以及页岩的锌同位素值来加以限制。Marèchal 等 (1999) 报道了黑色页岩和沙尘的锌同位素组成 ($+0.17\text{‰} \sim +0.32\text{‰}$), 平均值为 $+0.24\text{‰} \pm 0.14\text{‰}$ ^[17]。另外不同类型的地质样品也能限制地壳中的锌同位素组成。前人的锌同位素分析结果包括花岗岩 ($+0.47\text{‰}$)、安山岩 ($+0.55\text{‰} \pm 0.05\text{‰}$ 和 $+0.24\text{‰} \pm 0.02\text{‰}$)、海相碳酸盐 ($+0.13\text{‰} \sim +1.34\text{‰}$)、铁锰结核 ($+0.53\text{‰} \sim +1.16\text{‰}$)、硫化物矿物 ($-0.43\text{‰} \sim +1.33\text{‰}$)、闪锌矿 ($-0.75\text{‰} \sim +1.33\text{‰}$) 等^[17,55-61]。Wang 等 (2010) 认为地壳的锌同位素值可以由地壳中的不同地质样品平均值估算得到, 于是推断地壳中的锌同位素组成约为 0.31‰^[48]。而最近 Zhang 等 (2022) 测试了冰期黄土 (低程度化学风化影响) 的锌同位素得出地球上地壳锌同位素的平均值为 0.24‰^[62]。

2.4 月球陨石和 Apollo 样品中锌的宇宙化学性质

月球物质显示出太阳系所有分异天体中最大的 $\delta^{66}\text{Zn}$ 值变化范围 ($-13.7\text{‰} \sim +6.4\text{‰}$)^[4,8,29,51,63,64]。Moynier 等 (2006) 对月球样品进行研究发现月壤的锌同位素组成在 $+2.2\text{‰}$ 到 $+6.4\text{‰}$ 之间, 高钛月海玄武岩的锌同位素组成为 $+0.17\text{‰}$ 和 $+0.75\text{‰}$, 橙色玻璃为 -3.6‰ 。相比于月海玄武岩, 月壤富集重的锌同

位素, 火山碎屑玻璃富集轻的锌同位素。橙色玻璃中轻同位素富集的主要原因可能是火山喷射, 极小可能是蒸汽部分冷凝的结果。月壤富集重的锌同位素可能是由微陨石蒸发和溅射过程共同作用形成^[4]。

Paniello 等 (2012) 的研究表明, 月球的火山碎屑玻璃有着极轻的 $\delta^{66}\text{Zn}$ ($-2.9\text{‰}\sim-4.2\text{‰}$) 和极高的锌元素含量约 $129\times 10^{-6}\sim 231\times 10^{-6}$ 。它被认为是蒸汽中偏轻的锌同位素冷凝在火山碎屑玻璃珠的表面造成的。其次, 原始的低钛月海玄武岩 (平均值 $\delta^{66}\text{Zn} = +1.31\text{‰}\pm 0.13\text{‰}$) 有着与高钛月海玄武岩 (平均值 $\delta^{66}\text{Zn} = +1.39\text{‰}\pm 0.31\text{‰}$) 几乎相同的锌同位素组成, 且锌元素含量仅有 $0.6\times 10^{-6}\sim 12\times 10^{-6}$ 。月球的岩浆岩相比于地球的岩浆岩亏损挥发性元素, 显示出更重的锌同位素组成。而且低钛月海玄武岩和高钛月海玄武岩有着不同的形成模式和地幔来源, 因此它们锌同位素组成的一致性亏损反应了行星尺度的挥发事件, 强烈支持月球形成大碰撞理论^[8]。另外, 月球风化壳、月壤和斜长岩风化层角砾岩陨石 (MAC 88105) 都有着偏重的锌同位素 ($+2.6\text{‰}\sim+5.6\text{‰}$)。这些值反映了溅射效应和月球风化壳受到的撞击改造, 而不代表任何原始的岩浆组成^[4,51,65]。还有一些月海玄武岩有着极轻的锌同位素特征, 被解释为月海玄武岩结晶后期轻的锌同位素聚集的结果^[8,65,66]。

近年 Day 等 (2020) 将研究重点聚焦于月球上的镁质岩套和克里普岩 (KREEP)。在月球岩浆分异过程中: 月球的斜长岩和镁质岩套代表了早期的月壳物质; 而富集不相容元素的克里普岩可能保存了熔体后期阶段高度分异的信息。他们认为镁质岩套 $\delta^{66}\text{Zn}$ ($+2.5\text{‰}\sim+9.3\text{‰}$) 显示出比月海玄武岩 ($\delta^{66}\text{Zn} = +1.3\text{‰}$) 更重的锌同位素组成和更低的锌含量, 反映了岩浆洋晚期阶段月海玄武岩源区形成之后的挥发分丢失。而富 KREEP 的冲击熔融角砾 ($\delta^{66}\text{Zn} = +1.3\text{‰}$) 显示出和月海玄武岩 ($\delta^{66}\text{Zn} = +1.3\text{‰}$) 几乎相同的锌同位素组成以及极低的锌含量 (0.5×10^{-6}), 他们认为这可能反映了克里普岩与月球表面储库发生混合^[64]。

2.5 火星陨石中锌的宇宙化学性质

火星陨石 (SNC 陨石) 主要包含的岩石类型为: 辉玻无粒陨石 (Shergottites)、透辉橄无球粒陨石 (Nakhlites)、纯橄无球粒陨石 (Chassignites)^[27]。它们的锌同位素组成范围很窄 ($+0.13\text{‰}\sim+0.35\text{‰}$, 平均值 $\delta^{66}\text{Zn} = +0.25\text{‰}\pm 0.03\text{‰}$), 与整体硅酸盐地球的锌同位素组成相似^[8,11]。相较于演化程度更高的辉熔长石无球粒陨石、纯橄无球粒陨石和 ALH 84001, 富镁的辉熔长石无球粒陨石有着稍重的锌同位素组成。其中 ALH 84001 ($\delta^{66}\text{Zn} = +0.12\text{‰}$) 表现为火星陨石中的最轻的锌同位素组成^[8]。

2.6 灶神星陨石中锌的宇宙化学性质

灶神星陨石 (HED 陨石) 包括古铜钙长无球粒陨石 (Howardites)、钙长辉长无球粒陨石 (Eucrites)、古铜无球粒陨石 (Diogenites), 据推测这些陨石均来自于灶神星^[67-69]。Paniello 等 (2012) 年研究了 HED 陨石的锌同位素。他们的锌同位素有着极大的变化范围 ($-2\text{‰}\sim+1.7\text{‰}$)。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锌元素并富集重的锌同位素, 这暗示着灶神星壳形成时发生了蒸发作用从而导致挥发性元素亏损^[23]。

之后, Sarafian 等 (2017) 和 Barrett 等 (2019) 报道了 6 块钙长辉长无球粒陨石中全岩锌同位素和磷灰石中氯同位素的正相关性^[70-72]。Sarafian 等认为锌同位素和氯同位素之间的正相关暗示了灶神星挥发性元素不同程度的分馏受到大规模岩浆分异作用的影响^[70]。而 Barrett 等认为这种关系指示了氯在贫氢环境下从钙长辉长质岩浆中以金属氯化物的形式去气丢失^[71]。之后, Kumler 等 (2021) 考虑到矿物结晶顺序不同: 赋存锌的氧化物在结晶早期形成; 赋存氯的磷灰石在结晶晚期形成。因此他们认为这种趋势是由于后期结晶出的矿物其挥发性元素更容易受到热变质作用和冲击作用改造所造成的^[72]。

3 天体演化过程中锌同位素的分馏机制

天体演化过程中, 造成锌同位素分馏主要的因素可能有: 原始行星盘中星云的冷凝过程、星云尘埃的冷凝过程和后期再加热引起的蒸发过程、陨石母体热变质作用导致的挥发过程和次生过程

(如水的蚀变过程)、星子或行星冲击熔融以及行星吸积产生的去气过程、小行星和行星内部放射性元素衰变造成的行星分异过程等^[8,10,22,39,73-78]。目前对这些过程的认识仍然不够清晰明确。以下部分将按照天体演化的基本过程简要介绍已知的锌同位素分馏机制和宇宙化学行为。

星云中挥发性元素的亏损可能是因为星云气体与尘埃之间的化学相互作用、球粒形成或热处理固体的吸积^[77]。原始行星盘本身的温度梯度和不同元素冷凝温度的差异造成了星盘物质径向的分馏。靠近太阳的区域温度较高富集硅酸盐的物质, 远离太阳的区域富集挥发性气体^[79]。不同日心距离处形成的物质将为邻近的行星吸积提供不同特征的挥发性元素, 可能会导致后期形成的天体继承初始物质不均一的锌同位素组成^[80,81]。同时, 星云内的固相与周围星云气体的化学相互作用也可能促进或者抑制锌同位素的分馏^[82,83]。此外, 星云再加热引起的蒸发过程可能会导致轻的锌同位素去气丢失, 使得残余固体富集重的锌同位素。

另外, Luck 等(2005)提出太阳高能辐射会将轻的星云气体或者尘粒清扫至远离太阳的区域, 形成富挥发性元素以及轻的锌同位素的一个储库; 而靠近太阳的位置形成的物质则可能成为锌同位素的另一储库, 表现为亏损锌元素而富集重的锌同位素的特征^[21]。这种推测与碳质球粒陨石的锌同位素及其它同位素(Cr、K、Rb、Te等)所指示的情景一致^[84,85]。此外, 球粒陨石中的硅酸盐球粒似乎与其基质存在互补性^[86-90]。前人认为球粒核心的形成过程中, 硫化物的丢失会导致陨石球粒的锌同位素组成变轻, 随后形成的基质重新吸收了蒸汽中重的锌同位素显示出与球粒陨石互补的同位素特征^[75]。相反, 对富钙富铝难熔包体 CAIs 的研究却暗示了太阳星云冷凝过程会导致其富集轻的锌同位素^[33]。这两种截然不同的结果可能是由于球粒陨石和富钙富铝难熔包体在原始行星盘中的吸积位置不同^[91]。因而两者分别接触到不同挥发性元素特征和化学组分特征的星云环境, 最终导致了上述的结果。

从星云演化至行星形成的过程中, 撞击作用以及放射性核素的衰变均会产生大量的热, 可能导致星子或行星熔融从而发生去气作用^[74,76,92,93]。这可能是造成现今的天体(如月球)亏损锌元素且富集重的锌同位素的主要原因。在此过程中, 行星可能拥有的原始大气或者受撞击形成的短期蒸汽会一定程度地抑制蒸发效应造成的锌同位素分馏^[8,63,73,94,95]。除了上述作用之外, 水的次生蚀变也被认为可以改变陨石的锌同位素组成^[10,28]。此过程可能是由于陨石母体表面的水岩相互作用致使高溶解度的锌伴随流体一同丢失, 这通常会造成长重的锌同位素优先损失^[10]。正如地球表面的风化过程会造成重的锌同位素优先被释放进入流体, 残余的硅酸盐相保存轻的锌同位素^[96-99]。陨石所经历的水蚀变作用造成的锌同位素分馏也与前人所研究的碳质球粒陨石经历水蚀变导致重的钾同位素进入流体的过程一致^[100]。

前人提出行星吸积过程中的蒸汽丢失模型解释了大量地球样品、原始陨石和分异型陨石中的镁同位素分馏, 并提及此机制不可避免地会造成挥发性强于镁的元素发生显著的丢失^[74], 因此我们也应考虑到吸积过程中蒸汽丢失对锌同位素分馏的影响。另外, 行星的岩浆分异过程通常也能造成一定程度的金属稳定同位素分馏(如 Fe、K、Cu、Cr)^[101-104], 但是地球上的岩浆分异并没有产生显著的锌同位素分馏^[7]。因此认为岩浆分异并不是控制锌同位素分馏的主要影响因素。之后, 在行星吸积后期富挥发性元素的陨石或彗星的供给, 也可能改变行星最终的挥发性元素含量及其同位素组成, 造成的锌同位素组成变化取决于这些外来物质的化学组成特征^[105-108]。

4 总结

1) 不同的碳质球粒陨石群显示出明显的锌同位素组成差异($+0.16\% < \delta^{66}\text{Zn} < +0.52\%$), 这可能是星云中不同储库混合造成的。CAIs 中轻的锌同位素特征可能是 CAIs 形成之后星云中轻的锌蒸汽冷凝造成的。普通球粒陨石中的锌同位素可能记录了早期原始星云凝聚物的特征、陨石母体的氧化还原

状态以及后期冲击过程 and 水的蚀变过程的改造。顽火球粒陨石中的锌同位素组成变化范围极大被认为是母体热变质程度不同导致锌发生挥发丢失造成的。

2) 橄辉无球粒陨石的锌同位素变化对应着由母体解体时小行星幔的热状态以及后期冲击作用加热所造成的挥发性元素丢失。而铁陨石中的锌同位素组成主要受铬铁矿的分离结晶过程控制。石铁陨石的锌同位素改变可能是陨石母体中不同相发生分离的结果。

3) 火星陨石的锌同位素组成和整体硅酸盐地球的锌同位素组成相似, 而大部分月球岩石的锌同位素组成比整体硅酸盐地球更重且更亏损挥发性元素, 这支持了形成月球的大碰撞理论。灶神星陨石的锌同位素变化暗示了小行星在其形成过程中经历了挥发去气作用。

不同种类陨石和地外样品的锌同位素组成特征可能反映的是自太阳系形成以来所有导致锌同位素分馏的因素共同作用的结果。锌具有复杂的物理化学性质, 包括中等挥发性, 亲石性和亲硫性等。这导致锌同位素在太阳系演化过程中必将受到复杂的影响。我们对这些影响因素的理解尚有诸多疑惑, 因此还需开展多方面的研究来理解高温条件下锌同位素的分馏行为, 如研究陨石中不同矿物微观尺度上锌同位素组成的改变, 对比单个陨石中不同冲击程度区域的锌同位素组成, 以及计算高温和高压条件下锌同位素在天体内部各相之间的分馏等。

致谢: 特别感谢中国科学院地球化学研究所月球与行星科学研究中心的李阳老师、唐红老师给予的帮助; 感谢中国科学院地球化学研究所许多老师对这篇文章提出的建设性意见!

参 考 文 献:

- [1] Palme H, Larimer J W, Lipschutz M E. Moderately volatile elements.[J]. *Meteorites and the early solar system*, 1988: 436-461.
- [2] Davis A M. University of Arizona Press Tucson, AZ, 2006. Volatile evolution and loss[J]. *Meteorites and the early solar system II*, 2006, 1: 295-307.
- [3] Wood B J, Smythe D J, Harrison T. The condensation temperatures of the elements: A reappraisal[J]. *American Mineralogist*, 2019, 104(6): 844-856.
- [4] Moynier F, Albarède F, Herzog G F. Isotopic composition of zinc, copper, and iron in lunar samples[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2006, 70(24): 6103-6117.
- [5] Moynier F, Beck P, Jourdan F, et al. Isotopic fractionation of zinc in tektites[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 277(3-4): 482-489.
- [6] Ben Othman D, Luck J M, Bodinier J L, et al. Cu-Zn isotopic variations in the Earth's mantle[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2006, 70(18): A46.
- [7] Chen H, Savage P S, Teng F-Z, et al. Zinc isotope fractionation during magmatic differentiation and the isotopic composition of the bulk Earth[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2013, 369-370: 34-42.
- [8] Paniello R C, Day J M D, Moynier F. Zinc isotopic evidence for the origin of the Moon[J]. *Nature*, 2012, 490(7420): 376-379.
- [9] Chen H, Nguyen B M, Moynier F. Zinc isotopic composition of iron meteorites: Absence of isotopic anomalies and origin of the volatile element depletion[J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2013, 48(12): 2441-2450.
- [10] Pringle E A, Moynier F, Beck P, et al. The origin of volatile element depletion in early solar system material: Clues from Zn isotopes in chondrules[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2017, 468: 62-71.
- [11] Sossi P A. Zinc isotope composition of the Earth and its behaviour during planetary accretion[J]. *Chemical Geology*, 2017, 477: 73-84.
- [12] Blix R, Ubisch H V, Wickman F E. A search for variations in the relative abundance of the zinc isotopes in nature[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1957, 11(3): 162-164.
- [13] Filby R H. The determination of zinc in rocks by neutron activation analysis[J]. *Analytica Chimica Acta*, 1964, 31: 557-562.
- [14] Loss R D, Rosman K J R, De Laeter J R. The isotopic composition of zinc, palladium, silver, cadmium, tin, and tellurium in acid-etched residues of the Allende meteorite[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1990, 54(12): 3525-3536.
- [15] Rosman K J R. A survey of the isotopic and elemental abundance of zinc[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1972, 36(7): 801-819.
- [16] Ghidan O Y, Loss R D. Isotope fractionation and concentration measurements of Zn in meteorites determined by the double spike, IDMS-TIMS techniques: Isotopic composition of Zn in meteorites[J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2011, 46(6): 830-842.
- [17] Maréchal C N, Télouk P, Albarède F. Precise analysis of copper and zinc isotopic compositions by plasma-source mass spectrometry[J]. *Chemical geology*, 1999, 156(1-4): 251-273.
- [18] Ponzevera E, Quérel C R, Berglund M, et al. ACS Publications, 2006. Mass discrimination during MC-ICPMS isotopic ratio measurements: investigation by means of synthetic isotopic mixtures (IRMM-007 series) and application to the calibration of natural-like zinc materials (including IRMM-3702 and IRMM-651)[J]. *Journal of the American Society for Mass Spectrometry*, 2006, 17(10): 1413-1427.

- [19] Chen S, Liu Y, Hu J, et al. Zinc Isotopic Compositions of NIST SRM 683 and Whole-Rock Reference Materials[J]. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 2016, 40(3): 417-432.
- [20] Wang Z-Z, Liu S-A, Liu J, et al. Zinc isotope fractionation during mantle melting and constraints on the Zn isotope composition of Earth's upper mantle[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2017, 198: 151-167.
- [21] Luck J-M, Othman D B, Albarède F. Zn and Cu isotopic variations in chondrites and iron meteorites: Early solar nebula reservoirs and parent-body processes[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2005, 69(22): 5351-5363.
- [22] Moynier F, Paniello R C, Gounelle M, et al. Nature of volatile depletion and genetic relationships in enstatite chondrites and aubrites inferred from Zn isotopes[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2011, 75(1): 297-307.
- [23] Paniello R C, Moynier F, Beck P, et al. Zinc isotopes in HEDs: Clues to the formation of 4-Vesta, and the unique composition of Pecora Escarpment 82502[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2012, 86: 76-87.
- [24] Brugier Y-A, Barrat J-A, Gueguen B, et al. Zinc isotopic variations in ureilites[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2019, 246: 450-460.
- [25] Yang C, Liu S-A, Zhang L, et al. Zinc isotope fractionation between Cr-spinel and olivine and its implications for chromite crystallization during magma differentiation[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2021, 313: 277-294.
- [26] Yoshizaki T, Ash R D, Lipella M D, et al. Variable refractory lithophile element compositions of planetary building blocks: Insights from components of enstatite chondrites[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2021, 308: 173-187.
- [27] Krot A N, Keil K, Scott E R D, et al. Classification of meteorites and their genetic relationships[J]. *Meteorites and cosmochemical processes*, 2014, 1: 1-63.
- [28] Barrat J A, Zanda B, Moynier F, et al. Geochemistry of CI chondrites: Major and trace elements, and Cu and Zn Isotopes[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2012, 83: 79-92.
- [29] Moynier F, Vance D, Fujii T, Savage P. The Isotope Geochemistry of Zinc and Copper[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2017, 82(1): 543-600.
- [30] Moynier F, Blichert-Toft J, Telouk P, et al. Comparative stable isotope geochemistry of Ni, Cu, Zn, and Fe in chondrites and iron meteorites[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2007, 71(17): 4365-4379.
- [31] Bischoff A, Palme H, Spettel B. A37--A Coarse-Grained, Volatile Element-Poor Ca, Al-Rich Inclusion With Huge Fremdlinge[C]//Lunar and Planetary Science Conference. , 1987, 18.
- [32] Sylvester P J, Simon S B, Grossman L. Refractory inclusions from the Leoville, Efremovka, and Vigarano C3V chondrites: Major element differences between Types A and B, and extraordinary refractory siderophile element compositions[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1993, 57(15): 3763-3784.
- [33] Kato C, Moynier F. Gallium isotopic evidence for the fate of moderately volatile elements in planetary bodies and refractory inclusions[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2017, 479: 330-339.
- [34] Creech J B, Moynier F. Tin and zinc stable isotope characterisation of chondrites and implications for early Solar System evolution[J]. *Chemical Geology*, 2019, 511: 81-90.
- [35] Wolf S F, Lipschutz M E. Wiley Online Library, 1998. Chemical studies of H chondrites 9: Volatile trace element composition and petrographic classification of equilibrated H chondrites[J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 1998, 33(2): 303-312.
- [36] Schaefer L, Fegley Jr B. Volatile element chemistry during metamorphism of ordinary chondritic material and some of its implications for the composition of asteroids[J]. *Icarus*, 2010, 205(2): 483-496.
- [37] Hewins R H. Chondrules[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1997, 25(1): 61-83.
- [38] Rubin A E, Sailer A L, Wasson J T. Troilite in the chondrules of type-3 ordinary chondrites: Implications for chondrule formation[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, 63(15): 2281-2298.
- [39] Ebel D S, Grossman L. Condensation in dust-enriched systems[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000, 64(2): 339-366.
- [40] Scott E R D, Krot A N. Chondrites and Their Components[A]. Holland H D, Turekian K K. *Treatise on Geochemistry*, vol. 1, second edition[C]. Oxford-Elsevier, 2014: 65-137.
- [41] Singletary S J, Grove T L. Wiley Online Library, 2003. Early petrologic processes on the ureilite parent body[J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2003, 38(1): 95-108.
- [42] Warren P H, Ulf-Møller F, Huber H, et al. Siderophile geochemistry of ureilites: A record of early stages of planetesimal core formation[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2006, 70(8): 2104-2126.
- [43] Moynier F, Beck P, Yin Q-Z, et al. Volatilization induced by impacts recorded in Zn isotope composition of ureilites[J]. *Chemical Geology*, 2010, 276(3-4): 374-379.
- [44] Day J M D, Moynier F, Meshik A P, et al. Evaporative fractionation of zinc during the first nuclear detonation[J]. *Science Advances*, 2017, 3(2): e1602668.
- [45] Day J M D, Moynier F, Sossi P A, et al. European Association of Geochemistry, 2020. Moderately volatile element behaviour at high temperature determined from nuclear detonation[J]. *Geochemical Perspectives Letters*, 2020, 13: 54-60.
- [46] Bridgestock L J, Williams H, Rehkämper M, et al. Unlocking the zinc isotope systematics of iron meteorites[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2014, 400: 153-164.
- [47] Wasson J T, Choi B-G. Main-group pallasites: Chemical composition, relationship to IIIAB irons, and origin[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2003, 67(16): 3079-3096.

- [48] 王跃, 朱祥坤. 锌同位素在矿床学中的应用: 认识与进展[J]. 矿床地质, 2010, 29(5): 843-852.
- [49] 王中伟, 袁玮, 陈玖斌. 锌稳定同位素地球化学综述[J]. 地学前缘, 2015, 22(5): 84-93.
- [50] Maréchal C N, Nicolas E, Douchet C, et al. Abundance of zinc isotopes as a marine biogeochemical tracer: abundance of zinc isotopes[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2000, 1(5): 1(5):1999GC-000029.
- [51] Herzog G F, Moynier F, Albarède F, et al. Isotopic and elemental abundances of copper and zinc in lunar samples, Zagami, Pele's hairs, and a terrestrial basalt[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2009, 73(19): 5884-5904.
- [52] McCoy-West A J, Fitton J G, Pons M-L, et al. The Fe and Zn isotope composition of deep mantle source regions: Insights from Baffin Island picrites[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2018, 238: 542-562.
- [53] Liu S-A, Liu P-P, Lv Y, et al. Cu and Zn isotope fractionation during oceanic alteration: implications for oceanic Cu and Zn cycles[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2019, 257: 191-205.
- [54] Yang C, Liu S-A. Zinc isotope constraints on recycled oceanic crust in the mantle sources of the Emeishan large igneous province[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2019, 124(12): 12537-12555.
- [55] Pichat S, Douchet C, Albarède F. Zinc isotope variations in deep-sea carbonates from the eastern equatorial Pacific over the last 175 ka[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, 210(1-2): 167-178.
- [56] Albarède F. Mineralogical society of America, 2004. The stable isotope geochemistry of copper and zinc[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2004, 55(1): 409-427.
- [57] Mason T F, Weiss D J, Horstwood M, et al. Royal Society of Chemistry, 2004. High-precision Cu and Zn isotope analysis by plasma source mass spectrometry Part 2. Correcting for mass discrimination effects[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2004, 19(2): 218-226.
- [58] Viers J, Oliva P, Nonell A, et al. Evidence of Zn isotopic fractionation in a soil-plant system of a pristine tropical watershed (Nsimi, Cameroon)[J]. *Chemical geology*, 2007, 239(1-2): 124-137.
- [59] Bentahila Y, Ben Othman D, Luck J-M. Strontium, lead and zinc isotopes in marine cores as tracers of sedimentary provenance: A case study around Taiwan orogen[J]. *Chemical Geology*, 2008, 248(1-2): 62-82.
- [60] Toutain J-P, Sonke J, Munoz M, et al. Evidence for Zn isotopic fractionation at Merapi volcano[J]. *Chemical Geology*, 2008, 253(1-2): 74-82.
- [61] Pašava J, Tornos F, Chrástný V. Zinc and sulfur isotope variation in sphalerite from carbonate-hosted zinc deposits, Cantabria, Spain[J]. *Mineralium Deposita*, 2014, 49(7): 797-807.
- [62] Zhang X, Huang J, Gong Y, et al. Climate influence on zinc isotope variations in a loess-paleosol sequence of the Chinese Loess Plateau[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2022, 321: 115-132.
- [63] Kato C, Moynier F, Valdes M C, et al. Extensive volatile loss during formation and differentiation of the Moon[J]. *Nature Communications*, 2015, 6(1): 7617.
- [64] Day J M D, van Kooten E M M E, Hofmann B A, et al. Mare basalt meteorites, magnesian-suite rocks and KREEP reveal loss of zinc during and after lunar formation[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2020, 531: 115998.
- [65] Day J M D, Moynier F. Evaporative fractionation of volatile stable isotopes and their bearing on the origin of the Moon[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2014, 372(2024): 20130259.
- [66] Kato C, Valdes M C, Dhaliwal J, et al. Origin of isotopically light Zn in lunar samples through vaporization and the Zn isotope composition of the Moon[C]//AGU Fall Meeting Abstracts. , 2013, 2013: V33D-2788.
- [67] McCord T B, Adams J B, Johnson T V. American Association for the Advancement of Science, 1970. Asteroid Vesta: Spectral reflectivity and compositional implications[J]. *Science*, 1970, 168(3938): 1445-1447.
- [68] Burbine T H, Buchanan P C, Binzel R P, et al. Vesta, Vestoids, and the howardite, eucrite, diogenite group: Relationships and the origin of spectral differences[J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2001, 36(6): 761-781.
- [69] Mittlefehldt D W. Achondrites[C]//Holland H D, Turekian K K. *Treatise on Geochemistry (Vol.1)*. second edition. Oxford-Elsevier, 2014: 234-266.
- [70] Sarafian A R, John T, Roszjar J, et al. Chlorine and hydrogen degassing in Vesta's magma ocean[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2017, 459: 311-319.
- [71] Barrett T J, Barnes J J, Anand M, et al. Investigating magmatic processes in the early Solar System using the Cl isotopic systematics of eucrites[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2019, 266: 582-597.
- [72] Kumler B, Day J M D. Trace element variations generated by magmatic and post-crystallization processes in eucrite meteorites[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2021, 301: 211-229.
- [73] Wang K, Jacobsen S B. Potassium isotopic evidence for a high-energy giant impact origin of the Moon[J]. *Nature*, 2016, 538(7626): 487-490.
- [74] Hin R C, Coath C D, Carter P J, et al. Magnesium isotope evidence that accretional vapour loss shapes planetary compositions[J]. *Nature*, 2017, 549(7673): 511-515.
- [75] van Kooten E, Moynier F. Zinc isotope analyses of singularly small samples (<5 ng Zn): investigating chondrule-matrix complementarity in Leoville[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2019, 261: 248-268.
- [76] Fegley Jr B, Lodders K, Jacobson N S. Volatile element chemistry during accretion of the Earth[J]. *Geochemistry*, 2020, 80(1): 125594.
- [77] Hirschmann M M, Bergin E A, Blake G A, et al. National Acad Sciences, 2021. Early volatile depletion on planetesimals inferred from C-S systematics of iron meteorite parent bodies[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2021, 118(13).
- [78] Dhaliwal J K, Day J M D, Moynier F. Volatile element loss during planetary magma ocean phases[J]. *Icarus*, 2018, 300: 249-260.
- [79] 陈丰, 李雄耀, 王世杰. 太阳系行星系统的形成和演化[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2010, 29(1): 67-73.

- [80] Grossman L. Condensation in the primitive solar nebula[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1972, 36(5): 597-619.
- [81] Wai C M, Wasson J T. Nebular condensation of moderately volatile elements and their abundances in ordinary chondrites[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1977, 36(1): 1-13.
- [82] Alexander C M O, Grossman J N, Wang J, et al. The lack of potassium-isotopic fractionation in Bishunpur chondrules[J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2000, 35(4): 859-868.
- [83] Alexander C M O, Grossman J N, Ebel D S, et al. The Formation Conditions of Chondrules and Chondrites[J]. *Science*, 2008, 320(5883): 1617-1619.
- [84] Hellmann J L, Hopp T, Burkhardt C, et al. Origin of volatile element depletion among carbonaceous chondrites[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2020, 549: 116508.
- [85] Nie N X, Chen X-Y, Hopp T, et al. Imprint of chondrule formation on the K and Rb isotopic compositions of carbonaceous meteorites[J]. *Science Advances*, 2021, 7(49): eabl3929.
- [86] Alexander C M O. Trace element contents of chondrule rims and interchondrule matrix in ordinary chondrites[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59(15): 3247-3266.
- [87] Bland P A, Alard O, Benedix G K, et al. Volatile fractionation in the early solar system and chondrule/matrix complementarity[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2005, 102(39): 13755-13760.
- [88] Palme H, Hezel D C, Ebel D S. The origin of chondrules: Constraints from matrix composition and matrix-chondrule complementarity[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2015, 411: 11-19.
- [89] Friend P, Hezel D C, Barrat J-A, et al. Composition, petrology, and chondrule-matrix complementarity of the recently discovered Jbilet Winselwan CM2 chondrite[J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2018, 53(12): 2470-2491.
- [90] van Kooten E M M E, Moynier F, Agranier A. A unifying model for the accretion of chondrules and matrix[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2019, 116(38): 18860-18866.
- [91] Bermingham K R, Füre E, Lodders K, et al. The NC-CC Isotope Dichotomy: Implications for the Chemical and Isotopic Evolution of the Early Solar System[J]. *Space Science Reviews*, 2020, 216(8): 133.
- [92] Lammer H, Scherf M, Kurokawa H, et al. Loss and Fractionation of Noble Gas Isotopes and Moderately Volatile Elements from Planetary Embryos and Early Venus, Earth and Mars[J]. *Space Science Reviews*, 2020, 216(4): 74.
- [93] Zhu K, Moynier F, Alexander C M O, et al. Chromium Stable Isotope Panorama of Chondrites and Implications for Earth Early Accretion[J]. *The Astrophysical Journal*, 2021, 923(1): 94.
- [94] Young E D, Shahar A, Nimmo F, et al. Near-equilibrium isotope fractionation during planetesimal evaporation[J]. *Icarus*, 2019, 323: 1-15.
- [95] van Kooten E M M E, Moynier F, Day J M D. Evidence for Transient Atmospheres during Eruptive Outgassing on the Moon[J]. *The Planetary Science Journal*, 2020, 1(3): 67.
- [96] Lv Y, Liu S-A, Zhu J-M, et al. Copper and zinc isotope fractionation during deposition and weathering of highly metalliferous black shales in central China[J]. *Chemical Geology*, 2016, 445: 24-35.
- [97] Vance D, Matthews A, Keech A, et al. The behaviour of Cu and Zn isotopes during soil development: Controls on the dissolved load of rivers[J]. *Chemical Geology*, 2016, 445: 36-53.
- [98] Guinoiseau D, Gélabert A, Allard T, et al. Zinc and copper behaviour at the soil-river interface: New insights by Zn and Cu isotopes in the organic-rich Rio Negro basin[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2017, 213: 178-197.
- [99] Suhr N, Schoenberg R, Chew D, et al. Elemental and isotopic behaviour of Zn in Deccan basalt weathering profiles: chemical weathering from bedrock to laterite and links to Zn deficiency in tropical soils[J]. *Science of The Total Environment*, 2018, 619: 1451-1463.
- [100] Jiang Y, Koefoed P, Pravdivtseva O, et al. Early solar system aqueous activity: K isotope evidence from Allende[J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2021, 56(1): 61-76.
- [101] Weyer S, Anbar A, Brey G, et al. Iron isotope fractionation during planetary differentiation[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 240(2): 251-264.
- [102] Tuller-Ross B, Savage P S, Chen H, et al. Potassium isotope fractionation during magmatic differentiation of basalt to rhyolite[J]. *Chemical Geology*, 2019, 525: 37-45.
- [103] Xia Y, Kiseeva E S, Wade J, et al. The effect of core segregation on the Cu and Zn isotope composition of the silicate Moon[J]. *Geochemical Perspectives Letters*, 2019: 12-17.
- [104] Shen J, Xia J, Qin L, et al. Stable chromium isotope fractionation during magmatic differentiation: Insights from Hawaiian basalts and implications for planetary redox conditions[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2020, 278: 289-304.
- [105] Varas-Reus M I, König S, Yierpan A, et al. Selenium isotopes as tracers of a late volatile contribution to Earth from the outer Solar System[J]. *Nature geoscience*, 2019, 12(9): 779-782.
- [106] Kubik E, Siebert J, Blanchard I, et al. Earth's volatile accretion as told by Cd, Bi, Sb and Tl core-mantle distribution[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2021, 306: 263-280.
- [107] Mezger K, Maltese A, Vollstaedt H. Accretion and differentiation of early planetary bodies as recorded in the composition of the silicate Earth[J]. *Icarus*, 2021, 365: 114497.
- [108] Wang W. Sulfur isotopic signature of Earth established by planetesimal volatile evaporation[J]. *Nature Geoscience*, 2021, 14: 16.