

• 专题 27: 早期地球的形成与演化 •

晚期薄层增生理论的研究现状

李春辉

成都理工大学 地球科学学院 行星科学国际研究中心 成都 610059

晚期薄层增生 (Late Veneer) 是前人为了解释原始地幔中强亲铁元素的过高含量和强亲铁元素之间相对含量与球粒陨石值较为接近提出的理论假说。随着利用同位素稀释剂法精确测定元素含量、重元素同位素核合成异常的识别以及更高温度压力更复杂体系的高温高压实验模拟的进展, 研究者逐渐意识到地

幔中的某些挥发性元素也可通过晚期薄层增生来解释, 并对晚期增生物质的种类、增生物质在地幔中混合均匀的时间等进行了详细的约束。然而, 每一个明显的进步背后都或多或少有一些假定的前提, 梳理这些假定的前提有助于我们从更深刻的角度理解晚期薄层增生理论目前仍需要特别关注的薄弱环节。

• 专题 27: 早期地球的形成与演化 •

顽火辉石球粒陨石熔融实验对地核形成过程的限制

李琼^{1,2}, 杜蔚^{1,4*}, 倪怀玮^{3,4}, 郭璇^{3,4}

1. 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, 贵阳 550081;

2. 中国科学院大学 地球与行星科学学院, 北京 100049;

3. 中国科学院 壳幔物质与环境重点实验室, 中国科学技术大学 地球和空间科学学院, 合肥 230026;

4. 中国科学院 比较行星学卓越创新中心, 合肥 230026

近年来, 对地球形成初期的氧化还原环境 (Rubie et al., 2004; Corgne et al., 2008; Corgne et al., 2009; Georg and Shabar, 2015), 地球地幔演化过程中氧逸度的变化 (Frost et al., 2004, 2008) 等问题的讨论, 都显示出构建一个还原环境下的类地行星的形成和演化模型的必要性。另一方面, 形成于小行星带内侧的, 具有强还原特征的顽火辉石球粒陨石 (Enstatite Chondrite) 具有独特的、十分接近地球的同位素化学组成, 被认为其母体与地球是同源的 (Clayton and Mayeda, 1984; Javoy, 1995; Javoy et al., 2010)。新的同位素研究结果比较倾向支持顽火辉石球粒陨石与早期地球建构物质类似 (Walker et al., 2015; Bouvier and Boyet, 2016; Fischer and Kleine, 2017; Douphas, 2017)。

根据理论模型推算的地球化学组成, 或者以类似地球成分的天然陨石作为初始材料进行高温高压岩石矿物学的实验研究, 是对地球早期形成模型的非常有效的验证手段。因此, 本研究以顽火辉石球粒陨石

Sahara 97072/Sahara 97096 为初始材料, 利用活塞圆筒在 0.5~1.5 GPa, 1150~1550°C 的条件进行了高温高压熔融实验。实验结果显示: (1) 体系内金属熔体的含量随着温度的升高而增加, 并且在较高温度时 (1.5GPa, 1550°C) 金属熔体内部出现了两相不混溶现象; (2) 体系氧逸度与温度成负相关的关系, 同压力下, 温度越高, 氧逸度越低; (3) 当压力不变, V、Cr、Ni 在 metal melt/silicate melt、sulfide/silicate melt、metal melt/enstatite、sulfide/enstatite (metal melt: 金属熔体, silicate melt: 硅酸盐熔体, sulfide: 硫化物, enstatite: 顽火辉石) 间的分配系数 (D) 主要受温度的影响, D_V 、 D_{Cr} 、 D_{Ni} 随温度升高而增大, 并且 D_{Ni} 对温度变化比 D_V 、 D_{Cr} 更敏感; 此外, 体系的氧逸度也是影响 D_V 、 D_{Cr} 、 D_{Ni} 的重要因素, D_V 、 D_{Cr} 、 D_{Ni} 会随着氧逸度的降低而增大, 即随着环境的还原, V、Cr、Ni 变得更加亲铁; (4) 相对较小的行星体, 在早期熔融过程中, 随着硫含量升高可能会经历相当大的核分层。

基金项目: 顽火辉石球粒陨石高温高压熔融实验对地球初始成分的约束 (41773052)

第一作者简介: 李琼 (1998-), 博士研究生, 研究方向: 实验岩石学与实验地球化学研究. E-mail: liqiong@mail.gyig.ac.cn

*通信作者简介: 杜蔚 (1980-), 研究员, 研究方向: 实验地球化学与比较行星学研究. E-mail: duwei@vip.gyig.ac.cn

• 专题 27: 早期地球的形成与演化 •

^{182}W 同位素异常新解

张一宁¹, 刘耘^{1,2*}

1. 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, 贵阳 550081;

2. 成都理工大学 行星科学国际研究中心, 成都 610059

^{182}Hf - ^{182}W 短半衰期放射性同位素体系在近三十年被广泛应用于早期地球, 乃至星子和星胚的核幔分异研究。以现今整体硅酸地球 (BSE) 的 W 同位素为标准, 目前已在各类天然样品中观测到了 ^{182}W 同位素的相对富集和亏损, 大致在 $\pm 20\text{ppm}$ 的范围内。然而, 为了获得可信的 ^{182}W 同位素异常, 必须采用高精度的 W 同位素分析方法 (一般采用 MC-ICP-MS 和 N-TIMS, 2SD 须到 $\pm 5\text{ppm}$ 水平)。基于此类高精

度分析方法, 除 ^{182}W 异常外, 近年来在一些陨石和标样中, 还观测到了 ^{183}W 和 ^{184}W 同位素在统计学上显著的异常信号。

基于以上观察事实, 本研究在前人观测数据的基础上, 重新提出了一种新的理论模型来解释目前在 W 同位素高精度分析工作中所观察到的 ^{182}W , ^{183}W 以及 ^{184}W 异常信号。本研究有望进一步提高 W 同位素分析测试精度, 以及重新解释部分观察事实。

第一作者简介: 张一宁 (1995-), 男, 博士研究生, 研究方向: 特殊同位素效应的理论计算及其地学应用. E-mail: zhangyining17@mails.ucas.edu.cn

*通信作者简介: 刘耘 (1968-), 男, 研究员, 研究方向: 稳定同位素核心平衡分馏理论和计算方法. E-mail: Liuyun@vip.gyig.ac.cn

• 专题 27: 早期地球的形成与演化 •

地幔同位素组成的起源

朱丹^{1,2,3,*} 刘耘^{1,2,3}

1. 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, 贵阳 550081;

2. 中国科学院比较行星学卓越创新中心, 合肥 230026;

3. 成都理工大学 行星科学国际研究中心, 成都 610059

地球经过无数星子和星胚的撞击增生形成长大的 (Halliday, 2004; Rubie et al., 2011)。地球增生到质量为现今 90% 时, 与火星大小的星胚的撞击, 地球的增生和核幔分离过程基本完成 (Nimmo and Kleine, 2015), 并且撞击的碎片在地球附件凝聚形成了月球 (Canup and Asphaug, 2001)。由于太阳系早期核素衰变生热和撞击生热, 导致太阳系星子和星胚都经历过全球尺度的熔融事件 (岩浆洋), 发生核

幔分异 (Kruijer and Kleine, 2019)。因此组成地球的这些星子和星胚也具有独立的核幔结构。因为普遍认为地球的组成物质是未分异的球粒陨石, 所以地球的同位素组成也应该与球粒陨石相同 (Carlson et al., 2015; Palme and O'Neill, 2014)。不过地球地幔 (包括火星幔和月球幔) 与球粒陨石的同位素有差别 (图 1), 这种同位素差别的起源一直存在争议 (Siebert and Shahar, 2015)。

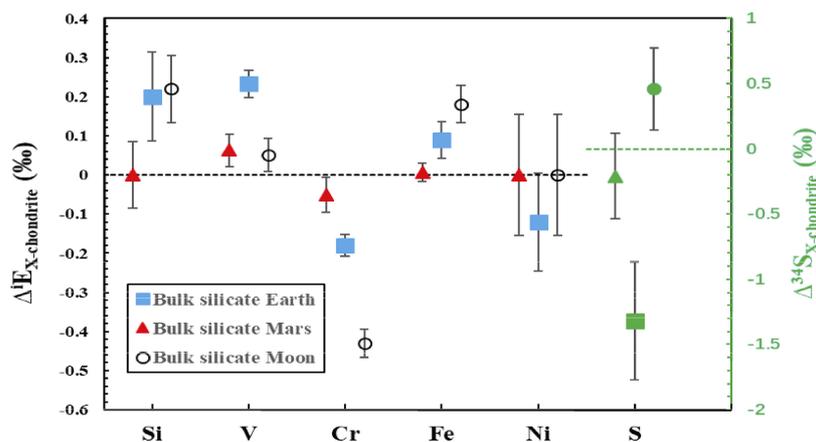


图 1 球粒陨石、地球、火星和月球的同位素组成

纵坐标 $\Delta E_{X-chondrite}$ 代表行星 X 的地幔中的 E 元素的同位素与球粒陨石的差值, i 代表同位素。比如 $\Delta^{30}Si_{BSE-chondrite}$ 为地球硅酸盐地幔的 $\delta^{30}Si$ 与球粒陨石的差值。

目前对此问题的研究可以分为五类: 1) 核幔分异过程造成的。也就是通过高温高压实验和理论计算研究金属相和硅酸盐相的同位素平衡分馏 (Shahar et al., 2017); 2) 组成地球的星子由于高温蒸发过程形成的同位素分馏 (Hin et al., 2017; Moynier et al., 2020; Norris and Wood, 2017); 3) 形成月球的撞击体幔的同位素与球粒陨石有差别 (Nielsen et al., 2021; Wang et al., 2021a); 4) 地球下地幔和上地幔

的同位素有差别 (Huang et al., 2014; Wang et al., 2021b); 5) 地球的金属外核由于温度梯度造成同位素分馏, 然后不断的进入地幔 (Leshner et al., 2020)。这些研究方向或多或少都存在一些问题, 比如, 实验和理论计算表明在地核的分异条件下, Si 和 Fe 同位素在硅酸盐和金属相的平衡分馏极小 (Liu et al., 2017; Moynier et al., 2020); 形成月球撞击体幔的同位素差别模型 (Nielsen et al., 2021; Wang et al., 2021a), 不能解释地幔非亲铁元素的同位素, 比如 Si; 如果是高温蒸发过程形成的, 为何火星的 Si 和 Fe 同位素与球粒陨石相同 (Young, 2017); 如果地球下地幔与上地幔同位素组成存在差异, 地幔对流应

该消除这种差异 (Moynier et al., 2020); 如果用地球外核同位素偏重来解释地幔的 Fe 同位素 (Leshner et al., 2020), 那么地幔的 Ni、Cr 和同位素也应该比球粒陨石偏重, 这与观察事实相反 (图 1)。另外, 地球的核幔分离完成后, 核幔边界的物质交换应该非常有限 (Rizo et al., 2019), 否则地幔的 $\epsilon^{182}\text{W}=0$ (Kleine et al., 2009) 与球粒陨石的 $\epsilon^{182}\text{W}=-1.9$ (Yin et al.,

2002) 应该非常接近, 这不符合观察事实。

本研究提出一个动力学模型: 地球增生过程中, 组成地球的星子和星胚的同位素组成与球粒陨石相同, 这些星子和星胚的金属核与正在增生的地球幔发生部分平衡。通过定量模拟地球整个增生过程 (包括后期加积过程), 不仅模拟出地球地幔的元素成分, 还完全模拟出了图 1 所示地球的同位素组成。

• 专题 27: 早期地球的形成与演化 •

硫化水体中汞光化学反应过程同位素分馏

赵亚秋, 郑旺*

天津大学地球系统科学学院, 天津 300110

地球生命的起源和演化是人类面临的终极问题之一。不少研究认为早期生命产生于厌氧且富含硫化物的海洋环境。例如有研究发现富含 H_2S/HS^- 的水体在紫外光照条件下可能会促进前生命化学物质(如细胞膜所需的磷酸根)的合成(Ritson et al., 2020)。此外, 由于 H_2S 对好氧真核生物具有毒性, 海洋硫化也常常被认为是抑制元古宙真核生物进化和导致显生宙数次生物大灭绝的主要原因之一。因此, 早期海洋的化学组成和氧化还原状态对于研究生命的起源和演化至关重要。

汞同位素是海洋氧化还原状态的新指标。我们前期的研究发现沉积岩中的汞同位素能够指示古海洋的透光带硫化现象(即透光带富含硫化氢)(Zheng et al., 2018)。其机理很可能与二价汞($Hg(II)$) 在硫化水体中的光化学还原有关。因此古代沉积岩中的汞同位素信号有可能记录早期地球硫化水体中的光化学过程, 这对于研究早期生命起源环境和真核生物演化的环境条件具有重要的潜在应用价值。

基于此假设, 我们开展了硫化水体中 $Hg(II)$ 的光化学还原模拟实验并测定了该过程的汞同位素分馏。汞稳定同位素具有独特的三维同位素分馏体系, 即质

量分馏(MDF)、奇数同位素非质量分馏(odd-MIF)和偶数同位素非质量分馏(even-MIF), 因此被广泛应用于示踪环境中汞的生物地球化学循环过程。目前研究表明, 汞同位素 MIF 主要产生于光化学反应过程(Blum et al., 2014), 但是目前对光化学过程中汞同位素分馏机理的认识还有许多不足之处, 尤其缺少对硫化水体中汞光化学反应过程同位素分馏机理的系统研究。

实验结果表明: 硫化水体中汞光还原反应表现为动力学分馏, 剩余反应物 $Hg(II)$ 具有明显的正 MDF 和负 odd-MIF, 即随着反应进行剩余反应物富集重同位素且亏损奇数同位素。硫化水体中汞光还原过程的 MIF 方向与富氧水体环境汞光还原的方向相反, 与富还原态有机硫巯基厌氧水体环境汞光还原的方向一致。令人惊讶的是, 硫化水体 $Hg(II)$ 光还原的 MIF 分馏程度巨大(高达-15‰), 远远高于已知的其它光化学过程的分馏。目前该反应的分馏机理仍在进一步研究中, 但如此巨大的负 MIF 表明该同位素信号有可能用于指示与前生命化学合成和真核生物演化有关的硫化海洋环境。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目: 汞同位素对古海洋透光带硫化的指示作用及其机理研究(41973009)

第一作者简介: 赵亚秋(1997-), 硕士研究生, 研究方向: 汞光化学反应同位素分馏机理. E-mail: yaqiu_77@tju.edu.cn

*通信作者简介: 郑旺(1981-), 教授, 研究方向: 金属同位素地球化学. E-mail: zhengw3@tju.edu.cn

• 专题 27: 早期地球的形成与演化 •

金刚石压砧热导率测量新方法 with 地球早期热演化

刘锦^{*}, 岳冬辉

北京高压科学研究中心, 北京 100000

地球内部热演化历史, 在认识地球内部结构、地球动力学、地磁场以及板块构造中起关键作用。铁作为地核主要成分, 针对其热导率的研究是解析地球热历史演化和地磁场的核心所在。然而, 目前地核条件下铁的热导率测量结果差异甚大, 引发大家关于实验方法的争议, 迫切需要新的测量手段。本报告利用单侧激光加热,

在金刚石压砧腔体内构建稳恒温度梯度场, 通过有限元计算温场分布确定样品热导率。我们发现铁的热导率在高温高压下呈现不连续变化, 变化位置与 hcp-fcc 的晶体结构相边界以及快速结晶边界具有较好吻合。我们新获得的核幔边界处热导率测量结果与古磁场一致, 支持目前由热对流和成分对流驱动地球动力学。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (42072052)

第一及通信作者简介: 刘锦 (1984-), 研究员, 博士生导师, 研究方向: 高压矿物物理. E-mail: jin.liu@hpstar.ac.cn

• 专题 27: 早期地球的形成与演化 •

地核的电阻率和早期地球磁场

尹远¹, 张友君^{2,3}, 刘耘^{1,3}, 翟双猛⁴

1. 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, 贵阳 550081;
2. 四川大学 原子与分子物理研究所, 成都 610065;
3. 成都理工大学 行星科学国际研究中心, 成都 610059;
4. 中国科学院 地球化学研究所 地球内部物质高温高压院重点实验室, 贵阳 550081

地核主要由铁镍合金组成, 并含有少量 (~10wt%) 的轻元素 (例如 Si、S、O、C、N 和 P)。金属核的热导率和电导率都是关键的参数, 可以限定通过地核的热流密度、核幔边界的温度梯度、固态内核的年龄等重大地质信息。同时, 金属核的热导率和电导率也有助于我们了解核部的热对流和地核发电机的状态。

根据 Wiedemann-Franz 定律, 金属或合金的电阻率(电导率的倒数)可以转换为电子传热的热导率。在高温高压设备中测量金属铁及铁-轻元素合金的电阻率, 可以获得对应的热导率信息。结合高温高压发生实验装置(大腔体压机、金刚石压腔)和微小电阻测量方法, 铁及铁合金在高温高压条件下的电阻率测量工作有了长足的发展。纯铁及铁合金的电阻率的测量原理主要有常规四导线法和范德堡四线法两种。前者多与大腔体压机结合, 后者常用于金刚石压腔。理论计算方法可以跳出实验设备的限制, 实现高温高压实验装置无法轻易达到的温度压力环境。基于第一性原理计算的方法, 我们可以计算纯铁及铁合金在高温

高压条件下对应的电阻率、热导率。

现有的实验和理论计算表明, 地核的电阻率可能在 $>90 \mu\Omega\cdot\text{cm}$, 其可能对应的热导率 $>100 \text{ W/m/K}$ 。尽管实验和理论计算在地核的电阻率上达成了一致的认识, 但是热导率测量实验表明地核的热导率可能不会高于 50 W/m/K , 不到电阻率推算的热导率值的一半。这一巨大的差异, 导致内核的形成年龄有了巨大分歧。地核高热导率表明内核应该在距今 ~0.7 Ga 的时间下开始结晶, 而地核低热导的情况可以让内核的结晶时间提前到距今 3.3 Ga。在内核结晶之前, 早期地球磁场的能量来源仍未确定。因为缺失内核结晶产生的物质对流, 早期地球磁场只能依靠原始的热对流, 或者其他方式 (比如, 地核轻元素的出溶, 早期放射性元素衰变生热, 地球的进动, 高电导的基岩浆洋等)。我们通过总结前人的数据和地核演化模型, 发现地核在合适的轻元素赋存的情况下, 可以维持一个适中的电导率, 并在早期的地球依靠热对流方式驱动发电机, 维持早期地磁场。

• 专题 27: 早期地球的形成与演化 •

气相扩散过程的同位素分馏

曹晓斌

国际同位素效应研究中心, 地球科学与工程学院, 南京大学, 南京 210023

一个普遍接受的观点认为地月系统形成于原始地球与火星大小的忒伊亚星体(即 Theia)的大碰撞。这导致了地月系统很多元素和同位素体系的一致性, 也导致月球很多挥发性组分的丢失。对月球挥发性组分的研究, 可对大碰撞以及碰撞后月球的早期演化提供很强的制约, 而稳定同位素已成为研究月球挥发性组分丢失的关键工具。碰撞后岩浆洋阶段的蒸发过程被认为是月球挥发性丢失的主要途径, 而气相扩散往往是蒸发过程的限速步。因此, 气相扩散的同位素分馏是量化月球挥发性组分丢失的关键参数。

经典的动力学理论经常被用于预测扩散过程的同位素分馏。但越来越多的实验观测结果显示, 这一理论存在很大的缺陷。我们认为, 理论预测与试验观测结果的差异源自于经典动力学理论内在的假设, 其中一个重要的假设便是不考虑分子平动-转动耦合的影响。这可能会对预测扩散过程的同位素分馏以及对限制月球挥发性组分的丢失产生重大影响。基于此, 我们拟采用分子动力学模拟来系统研究气体分子在不同温压条件下的扩散行为, 并预测相关的同位素分馏系数。

• 专题 27: 早期地球的形成与演化 •

中-新太古代大陆地壳的抬升

王伟¹, Manoj Pandit²

1. 中国地质大学(武汉)地球科学学院、地质过程与矿床资源国家重点实验室, 武汉 430074;

2. Department of Geology, University of Rajasthan, Jaipur 302004

在地球早期演化阶段中,大陆地壳的抬升过程和时间一直以来存在很大的争议和不确定性。本次研究报道了印度东部发育的中太古代-新太古代低氧($\delta^{18}\text{O}_{\text{锆石}} < 4.7\text{‰}$, VSMOW)岩浆事件。统计发现,同时期的低氧岩浆作用在澳大利亚、南美、南极洲和华北等古老克拉通都有出现。富集及多变的放射性同位素组成 [$\epsilon\text{Hf}(t)_{\text{锆石}} = -22.2 \sim +5.99$] 以及极低 $\delta^{18}\text{O}_{\text{锆石}}$ (-7.7‰) 值的出现,排除了洋壳作为低氧岩浆源区的可能。因此,这些全球性的低氧岩浆事件限定了该时期出现的大陆地壳和大气降水之间的

高温水岩相互作用,指示当时大陆地壳已经大规模抬升并浮出海平面。与其同步出现或者演化的地质过程还包括海平面之上大火成岩省的形成和保存、泥质岩中 $\delta^{18}\text{O}_{\text{全岩}}$ 和 $\Delta^{17}\text{O}_{\text{全岩}}$ 值的降低、海水中 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值的升高,以及大气中氧气含量的断续上升。综合以上论据,我们认为大陆地壳在中太古代($\sim 3.2\text{ Ga}$)即已开始抬升出海平面之上,其出露面积和范围在新太古代($2.8\text{—}2.6\text{ Ga}$)达到一个峰值,从而促使了该时期全球性低氧岩浆的形成,以及一系列岩石圈-大气圈-水圈的相互作用。

• 专题 27: 早期地球的形成与演化 •

地幔硫同位素组成:对核幔分异及后增薄层的启示

欧阳东剑, 鲍惠铭, 彭永波, 曹晓斌

南京大学国际同位素效应研究中心, 南京 210023

核幔分异和地幔不均一性是了解地球形成与早期演化的关键。亲铁元素(包括硫)在核幔分异过程中会优先进入地核,然而地幔的亲铁元素含量比理论计算值要高得多。基于此,后增薄层假说认为在核幔分异结束后,约有 0.5%~1% 地球质量的似球粒陨石成分的陨石加入至地幔,成为亲铁元素的主要来源,因此可以预测地幔硫同位素组成应与球粒陨石一致,这也与前人对洋中脊玄武岩(MORB)和洋岛玄武岩(OIB) $\delta^{34}\text{S}$ 值的分析结果一致($\sim 0\text{‰}$; $\delta^{34}\text{S}_{\text{ave.MORB}} = 0.5 \pm 0.6\text{‰}$, $\delta^{34}\text{S}_{\text{ave.OIB}} = 0.5 \pm 0.5\text{‰}$)。然而似球粒陨石物质的贡献无法解释其他元素-同位素体系的特征。因此,对后增薄层的物质组成仍存在争议。Labidi 等(2012, 2013, 2014)改进了硫的提取方法,重新测定了 MORB 的 $\delta^{34}\text{S}$ 值,发现上地幔源区具有亏损的 $\delta^{34}\text{S}$ 值($-1.40 \pm 0.50\text{‰}$ 至 $-1.28 \pm 0.3\text{‰}$),这被解释为早期核幔分异效应的保留。根据硫在金属相和硅酸盐熔体之间的配分行为,核幔分异确实会导致地幔 $\delta^{34}\text{S}$ 的亏损($< 0\text{‰}$)。但值得注意的是,其研究的 MORB 样品来自快速扩张的洋脊,且源区普遍存在富集的再循环物质,他们的结

论是否具有代表性还需要不同类型的 MORB 样品进一步检验。如果地幔的硫同位素组成主要受核幔分异过程控制,其同位素效应应在全地幔尺度均有保留,对来自深部地幔样品的检验十分必要,尤其是对早期深部地幔硫同位素特征的厘定。此外,最新研究表明后增薄层加积前的地幔成分可保留至今(Godde et al., 2020)。因此,可根据地幔不同储库的硫同位素组成对上述两种模式进行检验。

科马提岩可提供独一无二的早期深部地幔的成分特征。对南非巴伯顿科马提岩的铂族元素及氧同位素研究表明其地幔源区保留了核幔分异过程中矿物相分离结晶的特征(Byerly et al., 2017; Puchtel et al., 2013, 2014)。考虑到古老样品相对容易受到混染,硫的非质量分馏(MIF-S)是识别古老再循环物质的有效特征,岩石的 $\delta^{34}\text{S}-\Delta^{33}\text{S}-\Delta^{36}\text{S}$ 组成是判别硫来源的重要指标,可用于估算源于古老大气硫混染的比例,进而反算出地幔的硫同位素组成。因此,对巴伯顿科马提岩开展多硫同位素分析能够帮助我们完善对早期地球演化过程如何影响硫同位素组成的理解,为地球挥发分的来源和组成提供进一步约束。

• 专题 27: 早期地球的形成与演化 •

类地行星原始大气流体动力学逃逸的影响机制

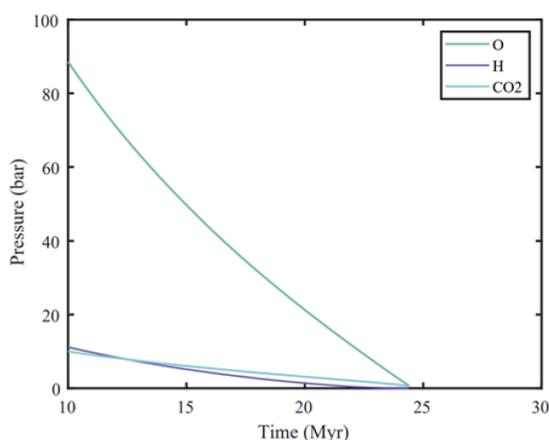
周游¹, 王子琦², 刘耘^{2*}

1. 成都理工大学 地球科学学院行星科学国际研究中心, 成都 610059;
2. 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, 贵阳 550081

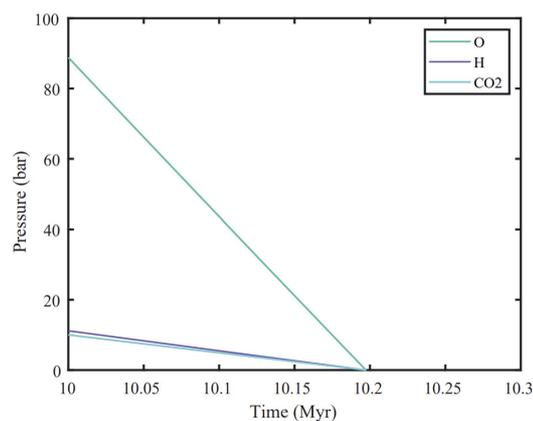
流体动力学逃逸, 又称行星风, 是一种全球性的快速大气逃逸过程。星云盘消散后, 原始行星会暴露在年轻太阳的极端 XUV 辐射环境中。热层大气粒子在吸收 XUV 辐射后动能增加, 热层进而转换为非静力平衡状态。进而出现全球性的、类彗星的大气膨胀, 伴随大气粒子的快速逃逸。在富氢大气中, 氢作为流体动力学逃逸的主体, 其逃逸过程中会拖拽走其它本

不容易发生逃逸的较重粒子, 从而较重粒子的逃逸率在流体动力学逃逸期间也会显著增加。

本次研究在三组分原始大气流体动力学逃逸模型的基础上, 系统研究了原始大气逃逸的主要控制因素, 包括岩浆洋固化时间, 早期太阳辐射状态对原始大气层保留状况的影响。我们发现岩浆洋固化时间对原始大气逃逸具有重要的影响。



我们的结果表明, 如果岩浆洋固化时间较早, 那么类地行星基本都无法保存早期的大气。但如果岩浆洋固化时间较晚, 水星和火星的原始大气层在



演化的最早期就已经丢失殆尽, 而金星, 地球的原始大气层在早期剧烈的流体动力学逃逸中可以被保留。

基金项目: 大碰撞事件与地月系统形成 (41973063, 41973063)

第一作者简介: 周游 (1980-), 副教授, 研究方向: 行星形成大碰撞模拟研究. E-mail: zhouyou06@cdut.cn

*通信作者简介: 刘耘 (1968-), 男, 研究员, 研究方向: 早期地球与行星形成, 稳定同位素基础理论、非传统稳定同位素基本分馏参数计算等

• 专题 27: 早期地球的形成与演化 •

地球早期磷循环演化：冥古宙到太古宙

郝记华^{1,2*}

1. 中科院壳幔物质与环境重点实验室, 地球和空间科学学院, 中国科学技术大学, 合肥 230026;
2. 中科院比较行星学卓越创新中心, 中国科学技术大学, 合肥 230026

磷是生命重要组成元素之一, 参与构成了遗传物质、生物膜、三磷酸腺苷等重要细胞组分。由于在自然水体中浓度较低, 因此磷被广泛认为是地质历史上限制地球生命起源和海洋生物初级生产力规模的关键营养元素。地表磷循环受到陆地面积、岩石成分演化、大气及海水成分、生物活动、矿物吸附等等环境因素的影响。在地球历史时期, 这些环境因素的重大演变也深刻影响了地表磷循环。现代模式的磷循环, 即大陆风化、河流输送、海洋生物摄取、海洋沉淀等过程, 始于太古宙大

陆大规模出露以及生命起源之后。对于地球早期磷循环的研究不仅有助于我们理解生命起源等重大自然科学问题, 而且可以为解决地球-早期生命的协同演化过程提供线索, 尤其是大气氧化等重大地质事件。

本研究立足于前人及作者本人在该方向的研究进展, 试图对冥古宙和太古宙时期地表磷循环演化进行系统梳理。重点探讨撞击事件、地壳演化、早期大气及海洋化学等对早期磷循环的影响, 并讨论对生命起源和早期演化的重要启示意义。

基金项目: “早期透光层中有机磷的光化学降解及其对生命起源的影响机制”面上项目(42173083)

*第一及通信作者简介: 郝记华(1991-), 特任研究员。研究方向: 地球早期表生化学循环, 生命起源和演化, 高温高压水-岩反应, 地球和行星条件下光化学, 太阳系冰卫星海水化学等. E-mail: hao@ustc.edu.cn

• 专题 27: 早期地球的形成与演化 •

月幔深部存在富铝矿物相石榴子石

李瑞^{1,2,3,4}, 鞠东阳^{2,3}, 杜蔚^{2,4*}

1. 中国科学院地球化学研究所月球与行星科学研究中心, 贵阳 550081;

2. 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, 贵阳 550081;

3. 中国科学院大学, 北京 100049;

4. 中国科学院比较行星学卓越创新中心, 合肥 230026

由于缺少来自月球深部的样品, 目前对月球内部物质组成的认知主要依赖于实验和计算模拟的月球岩浆洋 (LMO) 固化过程, 但是模拟最重要的参数之一的 LMO 熔融深度一直存在很大争议。一些月球样品的微量元素特征指示月幔深处存在石榴子石, 暗示 LMO 较深, 但已有的关于 LMO 固化过程的实验研究很少涉及石榴子石稳定的温压区间。此外, 越来越多的动力学计算模拟工作支持月球形成于一次高能量的大碰撞过程, 月球早期处于部分熔融或全熔的状态, 其核幔边界的温压条件极有可能满足石榴子石的存在。

本研究通过高温高压实验, 以 LPUM 为初始成分, 对月球深部含有石榴子石的 LMO 演化过程进行了探索性研究。实验结果表明, 在 3.5 GPa、1650°C 条件下, 月幔深层堆积岩除了有橄榄石和斜方辉石之外, 还有约 8 vol% 的石榴子石 ($\text{Py}_{76.9-80.1}\text{Al}_{9.8-11.9}\text{Gr}_{10.0-13.2}$)。对这一过程中稀土元素的行为的量化计算结果显示: (1) 尽管斜方辉石对稀土元素的分异有一定的影响, 但仍无法解释月球样品展现的重稀土元素 (HREE) 的特征; (2) 镁铝榴石在月幔深部稳定存在不仅可以解释月球样品的稀土元素特征, 也可为较深的 LMO 结晶分异形成较薄的月亮提供数据支撑。然而, 对比 LPUM 的固-液相线图中石榴子石和辉石的液相线走势, 实验和理论计算的数据存在较为明显

的差异, 早期月球内部的绝热线的选择将对岩浆洋结晶的矿物相种类有决定性的影响。基于此, 我们对 LMO 演化模型进行了重新评估, 提出了两种新演化模型: (1) 早期月球处于全熔状态, 其固化过程会形成深部含有石榴子石的堆积层; (2) 早期月球处于部分熔融状态, 岩浆洋的深度假设为 1000 km, 则其下部是含石榴子石的未分异的月幔。

另一方面, 石榴子石的存在不仅对 HREE 的分配有影响, 并且对 Cr 的含量也有显著的制约。假设月球的初始成分中含有 3000 ppm 的 Cr, 实验结果表明对含有石榴子石的堆积层进行部分熔融 (~18%) 后得到的残余熔体中 Cr 的含量仅有约 1000 ppm。利用该熔体成分作为镁质岩套 (Mg-suite) 的母岩浆, 通过 Mg-suite 的计算模型可得, 纯橄岩中橄榄石的 Cr 含量约为 550 ppm; 相反, 橄长岩中由于斜方辉石对 Cr 的分配行为占主导影响, 导致橄长岩中橄榄石的 Cr 含量仅有约 100 ppm。随着部分熔融程度的增加 (< 23%), 石榴子石相发生熔融, 导致镁质岩套中橄榄石的 Cr 含量有所增加。因此, 本研究提出的两种 LMO 演化模型不仅可以满足月亮及微量元素的约束, 还能很好的解释月球样品中镁质岩套与月海玄武岩中 Cr 含量的差异性, 量化镁质岩套母岩浆的来源深度, 为月球演化模型提供了新的数据支撑。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (41773052, 41973058)

第一作者简介: 李瑞 (1987-), 博士, 主要从事月球岩浆洋演化的实验岩石学研究. E-mail: lirui@vip.gyig.ac.cn

*通信作者简介: 杜蔚 (1980-), 研究员, 博士生导师, 从事实验地球化学及行星科学研究. E-mail: duwei@mail.gyig.ac.cn

· 专题 27: 早期地球的形成与演化 ·

Jack Hills 锆石氢同位素: 地球 3.9Ga 年前晚期重轰炸证据

夏小平^{1*}, 崔泽贤¹, 杨晴¹, 张万峰¹, 张彦强¹, Christopher J. Spencer²

1. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640;

2. Queen's University 加拿大

锆石是一种在各类岩石中广泛存在的副矿物, 具有极为稳定的物理化学性质, 可以在经历多次高温地质事件后仍保存其原始的地球化学信息。当岩石风化分解后, 锆石可以作为稳定碎屑存在于沉积岩中, 成为含有早期地质历史记录的宝贵“时间胶囊”。目前在全球范围内的多处沉积岩中都发现有冥古宙锆石, 其中最著名的是澳大利亚 Jack Hills 变质砾岩。该砾岩中不但含有目前地球上已知年龄最古老的锆石(最高可达 44 亿年)(Wilde et al., 2001), 还有大量年龄范围从 44 亿年一直延续到 33 亿年的古老锆石, 为研究地球早期演化历史提供了不可多得的连续记录。近 20 年来, 研究者利用各类地球化学、地球物理以及矿物学等研究手段(例如 Ti 温度计、REE 氧逸度计、O 同位素、Hf 同位素、Li 同位素、以及古地磁和包体矿物组成等)(Harrison et al., 2005; Peck et al., 2001; Tarduno et al., 2020; Turner et al., 2020; Wilde et al., 2001) 解读保存在 Jack Hills 锆石中的早期地球地壳组成和演化信息, 取得了众多的研究成果。

我们利用中国科学院广州地球化学研究所二次离子质谱实验室自主开发的高真空锆石水含量和氢氧同位素分析方法首次对这些古老的碎屑锆石进行了水含量和氢氧同位素同时分析。分析结果表明, 这些锆石氧同位素大多在 5~7permil 之间, 与前人研究

结果一致。首次获得水含量数据表明这些锆石均含有数百到几千 ppm 的水, 氢同位素从-180 到+150 permil, 变化范围较大。值得注意的是这样大的氢同位素变化范围只出现在约 39 亿年的锆石中, 其余锆石氢同位素变化范围明显较小, 最大变化范围从-130 到+9。锆石的拉曼光谱分析表明这些锆石存在一定程度的蛻晶化, 可能有后期水进入锆石中从而造成锆石水含量升高, 并对氢同位素组成造成一定程度的影响。但我们认为后期水的加入不足以完全改变锆石的氢同位素, 结合此前研究表明 39 亿年锆石具有明显区别于其他锆石的卤素组成(Tang et al., 2019), 我们认为 39 亿年锆石明显区别于其他锆石较大的氢同位素变化范围记录了地球历史上一次重大的事件即“晚期重轰炸”(Late Heavy Bombardment, LHB)。

“晚期重轰炸”是指 40 亿至 38 亿年前影响太阳系内部的高频率碰撞事件。LHB 最直接的证据是月球和火星等其他行星表面广泛分布的这一时期的撞击坑以及来自小行星带陨石撞击熔融年龄。地球也被认为经历了 LHB 撞击事件, 但因受板块构造活动改造, 未能保留下来这些撞击陨石坑。撞击的强度足以将地球表面的大部分地壳熔化, 留下丰富的岩浆活动记录, 我们认为陨石撞击带来大量区别地球本身 H 同位素组成的物质, 这些物质信息在 Jack Hills 碎屑锆石中被保留了下来。

• 专题 27: 早期地球的形成与演化 •

第一性原理计算铁硅酸盐熔体高温高压下的热力学和黏度性质

孙义程, 周会群, 刘显东, 尹坤, 陆现彩

南京大学 地球科学与工程学院, 内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室, 南京 210023

地球化学证据显示早期地球经历过几次全球性的熔融事件, 导致早期陆壳的形成, 并促进了铁质地核与硅酸盐地幔间的化学分异。硅酸盐熔体作为地球内部物质和能量迁移的重要载体, 在地球演化过程中扮演了重要角色, 其输运性质和热力学性质决定了岩浆洋的化学演化和热演化。例如, 硅酸盐熔体的黏度影响着大碰撞后的下沉金属与周围硅酸盐熔体间的平衡, 并强烈地影响了地球早期岩浆洋的冷却时间。此外, 硅酸盐熔体的绝热温度剖面 and 地幔液相线同时决定了岩浆洋的结晶路径。铁在岩浆洋早期时的浓度可能比现在地幔中的铁浓度要高, 并且目前的一些研究认为下地幔分布的波速异常体可能与铁的存在有关系。因此, 获得铁硅酸盐的热力学和黏度信息或许对认识岩浆洋早期的状态有重要帮助。

通过第一性原理分子动力学方法, 我们获得了整个地幔压力条件下 FeSiO_3 和 Fe_2SiO_4 熔体的结构、黏度和状态方程。我们推导了两种硅酸盐熔体的热力学性质, 并计算了它们在岩浆洋中的绝热温度剖面。计算发现 Fe 对 $(\text{Mg,Fe})\text{SiO}_3$ 熔体和 $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$ 熔体的绝热温度剖面影响较小, 特别是当位温超过 3000 K 时, Fe 的影响可以忽略。然而, 铁却能降低这两种熔体的黏度。研究得到岩浆洋结晶时的位温上限为 3250 K, 岩浆洋顶部和核幔边界处的黏度下限分别介于 0.0020~0.0040 Pa·s 和 0.0070~0.010 Pa·s。早期岩浆洋的黏度范围基本处于 mPa·s 级, 与常温常压下水的黏度相当。此外, 我们还计算了布里奇曼石铁端员组分的熔点, 以此探讨岩浆洋在地幔底部的结晶。

• 专题 27: 早期地球的形成与演化 •

山西袁家村 BIF 铁矿成矿作用研究及对古环境演化的指示

李家掀¹, 刘磊^{1,2*}

1. 中南大学有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室, 长沙 410083;

2. 中南大学地球科学与信息物理学院, 长沙 410083

前寒武纪铁建造广泛赋存于克拉通区域内, 袁家村 BIFs 位于华北克拉通 (NCC) 山西吕梁地区, 是国内典型的 Superior 型铁矿。袁家村 BIFs 形成于~2.3 Ga, 处于大氧化事件 (2.4~2.2Ga) 末期, 是该时期少有且保存完整的铁建造, 其微量元素特征保留了大氧化事件的信息。主要的富铁岩系赋存于吕梁群下部的袁家村组, 为绿片岩相-低角闪岩相, 与国外典型的 Superior 型铁矿相似, 变质程度较低。袁家村 BIFs 的稀土元素经后太古宙平均页岩(SN)标准化后, 明显地支持铁建造的海水热液混合成因。La 的正异常、较小的(LREE/HREE)_{SN}、接近现代海水的 Y/Ho 值通常被认为是继承了海水的稀土特征, 而显著的正 Eu

异常则来自于热液。样品中 Al、Mg、Ca 等主量元素含量较低, 表明袁家村 BIFs 为较纯净的海洋沉积物, 缺乏陆源碎屑输入。海水、热液及上陆壳三端元对样品较好约束, 暗示了河流输入铁源的可能性, 同时海水与热液的混合接近 1000:1 与前人研究相似。在 Ce 的真实异常判别图中, 袁家村铁建造同时存在正负 Ce 异常, 这说明了当时海洋环境可能是氧化还原分层的, (Pr/Yb)_{SN} 与 Y/Ho 的变化情况进一步肯定了这个结果。结合太古宙和古元古代早期的铁建造往往缺乏 Ce 的负异常的情况, 说明了大氧化事件后海洋环境发生了巨大改变, 由单一的还原状态转变成了氧化还原分层的环境。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目: 华北克拉通南缘 BIFs 成矿作用及对古环境演化的指示资助 (41972198)

第一作者简介: 李家掀 (1997-), 硕士研究生, 研究方向: 岩石地球化学和矿床地球化学. E-mail: 3226235141@qq.com

*通信作者简介: 刘磊 (1984-), 教授, 主要从事前寒武纪地质与矿床地球化学研究. E-mail: liu01@ustc.edu.cn

• 专题 27: 早期地球的形成与演化 •

地球早期撞击环境下有机小分子的合成与稳定

江皓帆¹, 郝记华^{1,2*}, 程文瀚^{1,2}, 周根陶^{1,2}

1. 中国科学院壳幔物质与环境重点实验室, 地球和空间科学学院, 中国科学技术大学, 合肥 230026;

2. 中国科学院比较行星学卓越创新中心, 中国科学技术大学, 合肥 230026

早期地球经历了极高通量的撞击事件, 这对早期地球有机物的来源与稳定有着重要的意义。这些频繁的撞击事件除了能够通过星际物质直接输送有机分子(如羧酸、氨基酸、嘌呤碱等)进入地球外, 其中含有大量还原性物质的撞击体还会引发强烈的水岩相互作用, 生成富含氢气、一氧化碳、甲烷等还原性气体的大气。撞击提供了大量能量和矿物催化剂, 可能有利于这些还原性气体形成生命组成部分, 为生命起源提供原料。同时, 撞击导致的高温高压条件有利于克服合成反应的动力学阻碍促进反应的发生。但是目前的研究普遍认为高温环境不利于有机物的稳定, 限制了生命的发生。因此, 撞击引发的还原但高温的地表环境对有机物的合成及稳定的影响仍未有定论。

为解决这一争议, 我们构建热力学模型, 根据重建的撞击后地表环境特征(包括温度、热液 pH、气

体成分及分压等), 模拟以 $\text{CO}-\text{CO}_2-\text{CH}_4-\text{H}_2-\text{NH}_3-\text{H}_2\text{O}$ 为底物合成小分子有机物的反应亲和势。初步结果表明, 随着地表环境的逐渐冷却, 甲酸在我们的温度计算区间内(30~340℃)都可以被自发合成。在更低温度(约 120~200℃)下, 乙酸、丙酸、甲醇、氨基酸和丙酮酸的合成反应开始趋于发生, 而脱氧核糖、嘧啶和脱氧嘧啶在接近室温的条件下才开始热力学稳定。在我们计算的温度范围内, 甲醛、葡萄糖、核糖、嘌呤、核糖核苷和脱氧嘌呤在热力学上均不能稳定存在。我们的结果还表明, 较低的温度有利于以碳氧化物为碳源的合成反应, 而高温条件则有利于以甲烷为碳源的反应。当前结果可能为地球早期生命起源假说提供一种广泛存在且规模可观的有机物来源途径, 并为判断撞击引发的还原但高温的地表环境下有机物的稳定性提供一定的辅助。

基金项目: 中国科学院“百人计划”青年项目(KY2080000082)

第一作者简介: 江皓帆(1990-), 研究生, 研究方向: 地球早期环境、生命起源、生物成矿过程等. E-mail: jiang999@mail.ustc.edu.cn

*通信作者简介: 郝记华(1991-), 特任研究员, 研究方向: 地球早期表生化学循环, 生命起源和演化, 高温高压水-岩反应, 地球和行星条件下光化学, 太阳系冰卫星海水化学等. E-mail: hao@ustc.edu.cn

• 专题 27: 早期地球的形成与演化 •

水诱导的地幔反转与大陆起源

吴忠庆¹, 宋建¹, 赵国春², 潘忠栩¹

1. 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 合肥 230026

2. 香港大学地球科学系 香港

与其他类地行星不同, 只有地球存在大陆, 大陆的形成影响地球演化的方方面面, 包括宜居性形成和生命的演化。目前尚存的最早大陆是太古宙大陆, 其陆壳主要由英云闪长岩 (Tonalite) - 奥长花岗岩 (Trondhjemite) - 花岗闪长岩 (Grandodiorite) 为主的 TTG 深成侵入体组成, 这些岩石源于含水的玄武岩的部分熔融。太古宙陆壳的起源还存在很大的争议, 比较主流的假说有两个: 一个是认为大陆主要起源于俯冲, 由于板块可以将大量水带入地幔楔, 这个假说可以很好地回答太古宙陆壳源区富水这个特征。但该假说在解释太古宙大陆其他多个特征时遇到了困难。另一个大陆起源主流假说是地幔柱的海底高原模型, 该模型得到越来越多观测证据的支持, 如: 太古宙绿岩中有高温环境下才形成的科马提岩, 太古宙 TTG 在很短的时间内出现于整个克拉通区域, 太古宙克拉通主要是穹隆结构, 太古宙岩石经历的等压降温变质过程以及缺乏高压超高压蓝片岩等等。但该假说在解释太古宙陆壳源区富水这一关键特征方面存在巨大的困难, 因为根据现今的观察, 海底高原底部是贫水的。

在该工作中, 我们提出地球早期存在一个水诱导

的地幔反转 (超级地幔柱), 地幔反转促成太古宙大陆的形成。在形成月球的大撞击后, 整个地幔极可能熔化形成了岩浆洋, 岩浆洋在中地幔深度结晶, 形成外面和基底两个岩浆洋。这两个岩浆洋应该是含水的, 除非地幔及地表水完全来自于后期增生, 但大量的研究并不支持地球的水完全来自后期增生, 由于下地幔矿物含水能力低, 随着岩浆的结晶, 基底岩浆洋将越来越富水, 最终基底岩浆变得比周围地幔密度轻, 出现重力失稳而形成地幔反转 (超级地幔柱)。地幔反转将大量水带到浅部, 诱发太古宙陆壳和很厚的岩石圈地幔的大量形成。我们的工作表明地球早期存在一个完全不同的深部水循环, 地球的水通过基底岩浆洋结晶从浅部运移到深部, 再通过超级地幔柱返回地表。俯冲开始后, 地表水通过俯冲进入地球深部, 最终形成现在的深部水循环 (Wu and Zhao, 2022)。

参考文献

- [1] Z Wu, G Zhao (2022) Hydrous plumes in the Archean and the origin of continents.
- [2] Science Bulletin 67: 2023–2025. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2022.09.016>

• 专题 27: 早期地球的形成与演化 •

金刚石硫化物包裹体对地球早期板块构造过程的指示

丁永康¹, 丘志力^{1*}, 邓小芹², 马瑛³

1. 中山大学地球科学与工程学院/广东省地球动力作用与地质灾害重点实验室/广东省地质过程与矿产资源探查重点实验室, 珠海 519080;

2. 广东省科学院微生物研究所, 广州 510070;

3. 国检中心深圳珠宝检验实验室有限公司, 深圳 518001

金刚石是探索岩石圈地幔、超深地幔地质过程、早期板块构造作用的地球化学探针。金刚石中原生及同生的硫化物包裹体具有独特的莲座状裂隙, 硫化物在地幔深部被金刚石捕获, 可指示金刚石多期生长的特性, 幔源型金刚石 140~200km 的形成环境(Shirey et al., 2013), 以及超深金刚石地幔深部(300 km 以下)的形成环境(郑昕雨等, 2020)等。在研究深部地质作用时, 作为包裹体存在的硫化物矿物堪称金刚石探针中的探针。

金刚石中硫化物包裹体的相随着金刚石运移至地表的过程不断发生变化, 从而可以熔离结晶出磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铜矿等硫化物矿物共晶。因此, 最终在金刚石中看到的硫化物矿物, 并不一定是原来就存在的矿物。本文依据国际上已发表的一百多篇金刚石硫化物包裹体的相关研究文献, 对金刚石中硫化物包裹体的研究成果及其指示意义进行了综合分析, 并提出了对我国金刚石硫化物包裹体研究的思考及目前需要解决的问题。

1) 金刚石中硫化物矿物包裹体的研究表明金刚石有关的地幔硫化物的赋存状态为单硫化物固溶体(MSS), 成分上为富 Fe-Ni-Cu 的贱金属硫化物(BMS)(Harvey et al., 2013); 通过对硫化物包裹体形成机制的研究, 发现深部地幔具有较强的还原性, 并间接揭示了硫化物可能在金刚石形成、生长过程中充当还原剂的角色(Palyanov et al., 2007)。

2) 金刚石硫化物包裹体是金刚石 Re-Os 定年的主要对象, 目前已获得了从最年轻的 69Ma 到最古老的 3.5Ga 的等时线年龄。35 亿年间的 Re-Os 年龄记录了与金刚石形成有关的多期俯冲事件, 如~650Ma 新元古代冈瓦纳大陆的聚合, ~2.0-1.8Ga 的古元古代超大陆形成过程中西伯利亚克拉通不同地体之间的碰撞, ~1.1Ga Rodinia 超大陆的产生等, 同时还显示全球性板块构造启动时间可以达到 30-32 亿年(Shirey and Ricahrdson, 2011), 为地球早期演化及古老地壳物质循环提供了关键性证据, 是超大陆形成和与古老俯

冲相关过程的关键记录。

3) 硫化物包裹体中出现的非质量分馏硫同位素(MIF-S: Mass Independent Sulfur Isotope fraction)记录了太古代大陆岩石圈的地表沉积物成分, 这种 MIF-S 只在冥古代到太古代的贫氧大气环境下通过光化学分馏才会产生(Smit et al., 2019), 且在太古代全球俯冲事件的背景下才有进入地幔的途径, 是金刚石形成时代及地球沉积循环的重要示踪剂, 揭示了地球不同时期大陆岩石圈地幔构造方式的差异。

4) 根据金刚石硫化物包裹体研究建立的早期硫循环模型, 指示了金刚石硫物源的差异, 即随着板块俯冲过程进入地幔的地表沉积硫化物, 以及以 Fe-Ni-Cu 硫化物熔体形式存在于大陆岩石圈深部的地幔原生硫化物, 为地球前板块构造、大陆起源和板块构造过程的恢复提供了重要的约束。

国内外关于金刚石硫化物包裹体的研究虽然已取得重要进展, 但是仍然存在一些重要的有待深入探索的问题, 例如, 1) 如何避免硫化物包裹体在被提取时, 处于裂隙中难以回收的微小硫化物颗粒, 如辉钼矿、黄铜矿等的丢失, 产生严重 Re 损失, 影响 Re-Os 定年的准确性(Kemppinen et al., 2018); 2) 关于硫化物矿物包裹体是与金刚石同时形成(共生作用), 还是先前存在的矿物在金刚石生长过程中被包裹(原生作用), 最近存在激烈的讨论, 对 Re-Os 定年结果的解释具有一定影响; 3) 在利用硫化物包裹体进行深部地质过程指示时, 还涉及不同俯冲模型、俯冲时间尺度、硫化物在俯冲带的赋存形式以及活动性、Re-Os 元素以及 MIF-S 的分馏机制以及在地幔中的保存等方面的知识, 有待进一步研究和补充。此外, 为何金刚石只记录了正异常的非质量分馏硫同位素 $\delta^{33}\text{S}$ 和 $\delta^{36}\text{S}$ 以及地球早期大氧化事件造成的对非质量分馏硫同位素的影响尚不清晰等等。

本文受到国家自然科学基金项目(42073008, 41473030)的支持, 特此致谢

基金项目: 国家自然科学基金项目(42073008, 41473030)

第一作者简介: 丁永康(1999-), 硕士研究生, 研究方向: 金刚石包裹体定年与同位素. E-mail: dykctw@gmail.com

*通信作者简介: 丘志力(1963-), 教授, 博导, 研究方向: 宝玉石成矿对重大地质作用过程响应及古玉文化演化. E-mail: qiuzhili@mail.sysu.edu.cn

• 专题 27: 早期地球的形成与演化 •

动力学数值模拟算法及其程序实现

何婷¹, 章清文¹, 刘耘^{1,2,3*}

1. 成都理工大学行星科学国际研究中心, 成都 610059;

2. 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, 贵阳 550081;

3. 中国科学院比较行星学卓越创新中心, 合肥 230026

在地球和行星动力学领域, 由于难以对研究对象进行直接取样或就位观测, 且复杂地质活动具有非线性、多尺度、多场耦合的特性, 数值模拟发挥着不可替代的作用。尽管国内外可用超算资源日益丰富, 相应模拟算法研究及应用程序开发却十分滞后, 在地球动力学领域尤为明显。对此, 自主开发了一套基于有限体积法

动力学模拟程序。该程序求解质量守恒、动量守恒、能量守恒方程等控制方程。其中, Stokes 方程的求解基于 SIMPLE 类算法, 而采用通量限制器的 TVD 格式处理各控制方程中的对流项, 使程序具有二阶收敛精度。该程序有望在早期地球和类地天体的构造演化和物质分异等关键过程的研究中发挥重要作用。

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(B类)项目(XDB41000000)

第一作者简介: 何婷(1997-), 女, 研究生, 研究方向: 类地天体动力学数值模拟. E-mail: heting@stu.cdut.edu.cn

*通信作者简介: 刘耘(1968-), 男, 研究员, 研究方向: 同位素地球化学、天体化学. E-mail: liuyun@vip.gyig.ac.cn