

https://doi.org/10.3799/dqkx.2024.101



$^{146}\text{Sm}-^{142}\text{Nd}$ 同位素制约早期地球的地壳起源

王 达

成都理工大学地球与行星科学学院, 行星科学国际研究中心, 四川成都 610059

摘要: 地球形成最早 10 亿年的岩石记录稀缺, 严重阻碍了地质学家对地球早期地壳起源的认识. 短寿命放射性衰变的 $^{146}\text{Sm}-^{142}\text{Nd}$ 同位素体系, 由于其较短的半衰期 (103 Ma), 可以示踪地球早期的不相容元素分异过程, 是制约早期地壳起源机制的重要手段. 当前已有地球化学证据显示早期地球可能有多次地幔不相容元素亏损事件, 而导致早期地球地幔亏损的原因很可能是冥古宙大规模原始地壳的形成. 大规模的冥古宙原始地壳不仅是地球上多数现存最古老的始太古代岩浆岩的前身, 也为新太古代大陆的形成提供了重要的物质来源. 首先简述 $^{146}\text{Sm}-^{142}\text{Nd}$ 体系定年和示踪的基本原理, 并介绍 ^{142}Nd 同位素异常的分析方法. 在此基础上, 系统总结了全球有始太古代岩石出露的地块的 ^{142}Nd 同位素异常特征, 探讨早期地球地壳的起源模式.

关键词: 早期地球; 岩石; ^{142}Nd ; 冥古宙; 同位素异常; 灭绝核素; 地球化学.

中图分类号: P597

文章编号: 1000-2383(2024)11-3879-11

收稿日期: 2024-10-24

$^{146}\text{Sm}-^{142}\text{Nd}$ Isotopic Constraints on the Origin of Earth's First Crust

Wang Da

Research Center for Planetary Science, School of Earth and Planetary Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

Abstract: The understanding of the origin of Earth's earliest crust is incomplete due to the limited rock record in the first billion-year of Earth's history. The short-lived isotope system, $^{146}\text{Sm}-^{142}\text{Nd}$, taking advantage of its short half-life of 103 Ma, is especially effective in tracing the chemical differentiation of incompatible elements during the Hadean and thus constraining the origin of the first crust on Earth. Studies show that multiple mantle depletion events may have occurred on the early Earth that were likely caused by the formation of massive proto-crust. The massive proto-crust is not only the likely progenitor of the oldest preserved igneous rocks on Earth, but also has served as the nuclei for the formation of Neoproterozoic continent. Here in this review article, the isotopic systematics and the analytical methods of $^{146}\text{Sm}-^{142}\text{Nd}$ were reviewed, and the current models for the formation of Earth's earliest crust were discussed based on a compilation of ^{142}Nd isotopic anomaly data of ancient samples from global Eoarchean terranes.

Key words: early Earth; rocks; ^{142}Nd ; Hadean; isotopic anomaly; extinct nuclide; geochemistry.

早期地球的硅酸盐分异过程是决定行星地球自形成至演化到现今壳-幔结构的重要桥梁, 而地壳的形成奠定了地球作为宜居行星的基础. 尽管先进的定年手段提供了非常精确的地球形成时间

(4.567 Ga, Connelly *et al.*, 2017), 但地球初始地壳的形成时代与形成机制这两个基本问题仍未解决. 这是由于地球早期受到剧烈的陨石撞击, 以及后期持续的板块构造运动和变质活动等地质作用

作者简介: 王达 (1991-), 研究员, 成都理工大学行星科学国际研究中心研究员, 主要从事早期地球与早期太阳系过程、短半衰期放射性同位素与稳定同位素的核合成异常方面的研究工作. ORCID: 0000-0001-5202-9831. E-mail: da.wang@cduet.edu.cn

引用格式: 王达, 2024. $^{146}\text{Sm}-^{142}\text{Nd}$ 同位素制约早期地球的地壳起源. 地球科学, 49(11): 3879-3889.

Citation: Wang Da, 2024. $^{146}\text{Sm}-^{142}\text{Nd}$ Isotopic Constraints on the Origin of Earth's First Crust. *Earth Science*, 49(11): 3879-3889.

的影响,地球上最早期的地质记录残缺不全.现存最古老的地质记录是残留在澳大利亚 Jack Hills 砾岩里的 4.4 Ga 碎屑锆石 (Wilde *et al.*, 2001),表明在地球形成后的 1~2 亿年内就可能有了地壳形成.然而目前发现的最古老的岩浆岩地质记录的年龄仅为 ~40 亿年 (加拿大阿卡斯塔片麻岩, Bowring *et al.*, 1989a, 1989b; Stern and Bleeker, 1998; Bowring and Williams, 1999),这与地球的形成年龄仍然相差了 5 亿年左右.填补这段相对未知时期地质历史的空白对我们了解地球的起源以及地球初始的物理化学状态有重要的意义.

事实上,基于地球上已知最古老的岩浆岩年龄,最新的国际地层年代表 (IUGS) 将冥古宙的时代划分为 4 031 Ma 之前.在缺少合适的岩石样品用来直接研究冥古宙地壳的情况下,短寿命的 $^{146}\text{Sm}-^{142}\text{Nd}$ 灭绝核素同位素体系是一个极佳的地球化学工具,可以帮助我们越过岩石结晶年代的限制,揭示地球形成最初 500 Ma 的地壳形成与地幔演化历史.除此之外, $^{146}\text{Sm}-^{142}\text{Nd}$ 同位素体系还被广泛应用在宇宙化学领域示踪早期太阳系的演化,比如原始陨石核合成异常、行星原始地球的构建物质来源、地月系统与小行星等分异天体硅酸盐分异事件的定年等.但是由于 $^{146}\text{Sm}-^{142}\text{Nd}$ 体系的半衰期较短,且 Sm 与 Nd 元素性质相似导致 Sm/Nd 分异不显著,其衰变产生的同位素比值变化通常在百万分之一的尺度,在分析技术上具有一定的挑战性,因此 ^{142}Nd 同位素在近十余年质谱分析技术发展后才得以广泛应用.本文将围绕早期地球的地壳起源这一问题,从 ^{142}Nd 同位素地球化学的角度,总结国际上近 20 年关于早期地球的研究和进展.

1 ^{142}Nd 同位素体系

1.1 $^{146}\text{Sm}-^{142}\text{Nd}$ 同位素的半衰期

Sm-Nd 系统有两个放射性同位素体系,分别是长寿命的 $^{147}\text{Sm}-^{143}\text{Nd}$ (半衰期 = 106 Ga) 与短寿命的 $^{146}\text{Sm}-^{142}\text{Nd}$ (半衰期 = 103 Ma, Friedman *et al.*, 1966). 本文重点关注的 $^{146}\text{Sm}-^{142}\text{Nd}$ 体系的半衰期在过去十年曾有过争议,直到最近才得以解决.争议源于 Kinoshita *et al.* (2012, 已撤稿) 利用加速器质谱测定活化的 ^{146}Sm 与天然 ^{147}Sm 的比值,将 ^{146}Sm 的半衰期更新为 68 Ma, 这比之前公认的半衰期 103 Ma (Friedman *et al.*, 1966) 缩短了 30%. 按照这个新的半衰期,月球岩浆洋形成的时代和地球地幔

分异的时代等重要年代学数据会大幅度提早.然而 Bouvier and Boyet (2016) 指出,根据 Boyet *et al.* (2010) 报道的分异陨石 (Binda 钙长辉长陨石) 的 $^{146}\text{Sm}-^{142}\text{Nd}$ 矿物-全岩等时线年龄,如果选择 103 Ma 的半衰期进行计算, $^{146}\text{Sm}/^{144}\text{Sm}$ 的太阳系初始值极为接近 0.008 3, 与 CAIs (富钙铝难熔包体) 的测试结果基本一致 (Marks *et al.*, 2014); 而 68 Ma 的半衰期对应 $^{146}\text{Sm}/^{144}\text{Sm} = 0.009 4$, 远高于已知的任何测试数值.近期 Fang *et al.* (2022) 对已知最古老的安山质分异陨石 EC002 开展了灭绝核素同位素定年工作, 得出了 EC002 的高精度 Al-Mg 相对年龄为太阳系形成后 1.8 Ma 和初始 $^{146}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 比值为 0.008 3. 这个新的结果对应 ^{146}Sm 半衰期为 103 Ma, 且太阳系初始 $^{146}\text{Sm}/^{144}\text{Sm}$ 为 0.008 4. 综上所述,当前学界公认的 ^{146}Sm 半衰期为 103 Ma.

1.2 ^{142}Nd 同位素示踪

由于 ^{146}Sm 的半衰期只有 103 Ma, 且 Sm 与 Nd 元素性质相似导致 Sm/Nd 分异不显著,放射性成因的 $^{142}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值变化范围极小,一般不超过 $\pm 1.5 \times 10^{-5}$. 所以 $^{142}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值的偏差用 $\mu^{142}\text{Nd}$ 的数值 (也简称为 ^{142}Nd 异常) 表示,代表与参考值的 10^{-6} 单位差异:

$$\mu^{142}\text{Nd} = \left(\frac{\frac{^{142}\text{Nd}}{^{144}\text{Nd}}_{\text{样品}}}{\frac{^{142}\text{Nd}}{^{144}\text{Nd}}_{\text{参考标样}}} - 1 \right) \times 1\,000\,000, \quad (1)$$

其中,参考标样是现代的 Nd 同位素标准物质 JNdi-1, $\mu^{142}\text{Nd} = 0$.

在冥古宙与太古宙的界限 4.0 Ga 的时候 ^{146}Sm 已经基本灭绝 ($^{146}\text{Sm}/^{144}\text{Sm} < 0.000 2$), 所以任何在现今地球上可分辨出的 $\mu^{142}\text{Nd}$ 的变化都被认为是 4.0 Ga 之前的 Sm/Nd 分异作用所导致的. $^{146}\text{Sm}-^{142}\text{Nd}$ 同位素示踪壳幔分异作用与传统的 $^{147}\text{Sm}-^{143}\text{Nd}$ 体系原理上相似,通过母体与子体同位素的比值 ($^{146}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$) 判别源区的元素分异过程.硅酸盐分异产生的熔体富集不相容元素,显示出比源区更低的 $^{146}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 比值特征,其产生的放射性成因子体同位素变少,对应比源区更低的 $\mu^{142}\text{Nd}$ 值.因为 ^{146}Sm 已经灭绝,而 $^{146}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 的值可以写成 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 和衰变系数的函数,所以 ^{142}Nd 的母体与子体的同位素比值通常用 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 表达.

1.3 整体地球的初始 Nd 同位素组成

关于整体硅酸盐地球 (BSE) 的 ^{142}Nd 初始值

及其含义的问题,学界在过去的 20 年内存在反复争议,且至今仍有一些问题尚未解决. Boyet and Carlson (2005, 2006) 测定了球粒陨石的 ^{142}Nd 值为 $\mu^{142}\text{Nd} = -20$ ppm, 低于现代地球可采样地幔 (modern accessible mantle, 详见 Carlson *et al.*, 2019) 的值 ($\mu^{142}\text{Nd} = 0$). 此结果意味着 BSE 的微量元素比例与球粒陨石不同, 地球初始的 Sm/Nd 比值应高于 Bouvier *et al.* (2008) 报道的 CHUR 储库数值; 反之, 如果此球粒陨石的测试值可以代表 BSE, 则说明地球早期需要存在一个隐藏的、比球粒陨石的 $\mu^{142}\text{Nd}$ 值更低的、不相容元素富集储库与已知现代地幔互补.

球粒陨石的 $\mu^{142}\text{Nd}$ 是否可以代表 BSE 这个问题可以从核合成异常的角度解释 (Carlson *et al.*, 2007; Qin *et al.*, 2011; Bouvier and Boyet, 2016; Burkhardt *et al.*, 2016; Fukai and Yokoyama, 2017). 这些工作综合显示, 球粒陨石的 $\mu^{142}\text{Nd}$ 负异常很可能是核合成过程引起的, 在校正了慢中子捕获过程 (s 过程) 和富钙铝难熔包体 (CAIs) 对 Nd 同位素异常数值的影响后, 球粒陨石的 $\mu^{142}\text{Nd}$ 与现代地幔基本一致. 这说明地球与球粒陨石很可能具有相同的初始 Sm/Nd 比值, 且 BSE 的初始 $\mu^{142}\text{Nd}$ 值为 0. 这样一来, 球粒陨石 $\mu^{142}\text{Nd}$ 负异常的测试值无法支持地球早期在深部形成了隐藏的富集储库这个假说, 这意味着地球本身的 $\mu^{142}\text{Nd}$ 变化都是放射性衰变的结果. 从硅酸盐分异演化的角度上解释, ^{146}Sm 灭绝前地幔的元素分异使不同地球储库具有了与球粒陨石不一致的 Sm/Nd 比值, 从而导致这些储库之间放射性成因 $^{142}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值的差异性. 但是如果把行星地球当做一个整体与太阳系的其他天体以及构成行星体的星子对比, 地球原始构建物质的 ^{142}Nd 核合成异常来源仍不清楚. 换句话说, 地球的 $\mu^{142}\text{Nd}$ 核合成异常与任何已知球粒陨石的值都不同, 地球有可能是太阳系内一个 s-过程核素的富集端元 (详见 Mezger *et al.*, 2020).

最近, 两个新的研究通过测定顽火辉石球粒陨石的 $^{142}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值, 重提了用初始地球具有高于球粒陨石的 Sm/Nd 比值以解释地球和球粒陨石之间的 $\mu^{142}\text{Nd}$ 差值的观点 (Frossard *et al.*, 2022; Johnston *et al.*, 2022). 他们对于地球高于球粒陨石 Sm/Nd 比值的解释分别是地球形成过程中吸积了碰撞剥蚀的分异天体 (Frossard *et al.*, 2022), 或内太阳系原始行星盘内地球的形成区域分布有高

Sm/Nd 比值的富稀土矿物 (Johnston *et al.*, 2022). 这两个模型的基本假设是顽火辉石球粒陨石是地球的主要构建物质, 然而最新的同位素核合成异常的证据显示地球与顽火辉石球粒陨石的值并不完全相符 (比如 ^{92}Mo , Burkhardt *et al.*, 2011; Renger *et al.*, 2017). 此外, 碰撞剥蚀的分异天体模型移除了 30% 的地壳, 这对 K、Th、U 等元素的放射性生热的热收支和地球的冷却历史有显著的影响; 而富稀土矿物的不均一分布模型则需要选择性额外吸积 0.3% 质量的陨硫钙石 (CaS), 但缺乏直接的矿物学证据和目击陨石样品的系统性原位 Sm-Nd 同位素证据, 而且此模型还忽略了吸积其他低 Sm/Nd 富稀土矿物的可能性. 所以, BSE 具有高于球粒陨石 Sm/Nd 比值的这个假说显然还存在争议, 需要进一步的工作才能证实或证伪.

2 ^{142}Nd 同位素的测定

^{142}Nd 灭绝核素的同位素分析使用湿化学方法, 主要涉及化学分离纯化和质谱仪测试两个部分.

2.1 化学分离

^{142}Ce 和 ^{144}Sm 是 $^{142}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值的同质异位素干扰, 化学分离纯化的目的就是将 Ce、Sm 这两个干扰元素通过色谱法与 Nd 元素充分分离, 以提供纯净 Nd 样品进行同位素测试. 由于天然样品中 $^{142}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值的差异通常小于 10 ppm, 所以高精度的 ^{142}Nd 测试对于干扰元素的容忍度极低. 提纯后的 Nd 样品中残留的 Ce 和 Sm 应不高于 Nd 含量的 1×10^{-5} 才能获得较高质量的数据. 早期 Nd-Ce 的化学分离主要是利用正庚烷提取 Ce 并连用阳离子交换树脂结合 2-MLA 试剂 (2-甲基丙酸) 或 α -HIBA (a 羟基异丁酸) 这种相对传统的方法 (Rehkämper *et al.*, 1996; Boyet and Carlson, 2005; Caro *et al.*, 2005, 2006; Bennett *et al.*, 2007; Upadhyay *et al.*, 2009). 由于 α -HIBA 对酸度异常敏感, 且保存、纯化和标定都较为繁琐, 导致 Nd 回收率不稳定 (在 60%~90%), 且对于 Sm 的分离效果有时不理想 (Garçon *et al.*, 2018), 现在基本已被大多同位素地球化学实验室所淘汰. 由于近十余年 LN 树脂广泛的应用和其对 Sm 和 Nd 极佳的分离效率, 很多实验室利用 LN 树脂进行 Nd-Ce 的分离 (例如 Saji *et al.*, 2016; Horan *et al.*, 2018; Peters *et al.*, 2018; Pin and Gannoun, 2019), 并使用固态 NaBrO_3 氧化法结合 LN 树脂分离 Ce 和其他稀土元素 (Tazoe

et al., 2007; Li *et al.*, 2015; Kagami and Yokoyama, 2016; Saji *et al.*, 2016; Horan *et al.*, 2018). 但缺点是 LN 树脂的方法耗时久、需定期校对、Pr-Nd 的分离效果不好; 而且充分的 Ce-Nd 分离一般需要较细长的树脂柱, 而过大的高/直径比可能产生非质量分馏 (Saji *et al.*, 2016; Garçon *et al.*, 2018; Wang and Carlson, 2022). 为了尽量避免 Nd 在纯化过程中产生非质量分馏, 提高化学流程中 Nd 的回收率, 近年来一些实验室使用了 DGA-N (或 TOGDA) 树脂分离 (Pr)-Ce-Nd-Sm 并取得了较好的分离效果 (Chu *et al.*, 2019; Bai *et al.*, 2021; Wang and Carlson, 2022; Liu *et al.*, 2023), 且大程度缩短了 Nd 分离提纯的时间.

本文推荐使用 (1) AG50W-X8 阳离子交换树脂、(2) NaBrO₃ 氧化法结合 LN 树脂、(3) DGA 树脂 3 个步骤的方法 (Wang and Carlson, 2022). 由于 ¹⁴²Nd 的高精度分析需要至少 600 ng 的 Nd 样品, 所以每份样品通常需要溶解 100 mg 样品粉末, 含有较多基质 (主量) 元素. 所以第一步首先需要使用 AG50W-X8 阳离子交换树脂移除主量元素, 收集整体 LREE 组分; 第二步将收集的 LREE 利用 10 mol/L HNO₃-20 mmol/L NaBrO₃ 混合酸将 Ce³⁺ 氧化成 Ce⁴⁺, 通过 LN 树脂作为介质把 Ce⁴⁺ 离子吸附在树脂上, 以此移除样品中的绝大多数 Ce; 最后将第二步的收集物通过 DGA 树脂提纯 Nd (图 1). 具体分离步骤见 Wang and Carlson (2022). 此方法的优点是耗时较短、Ce-Nd 的纯化效果好, 但树脂多次使用可能会影响 Sm-Nd 的分离效果.

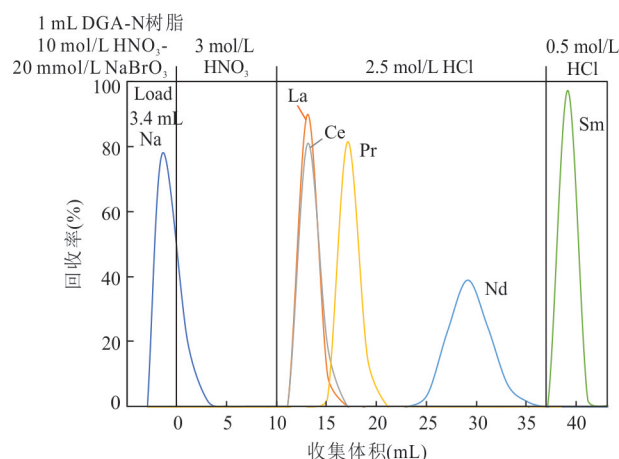


图 1 1 mL DGA 树脂的淋滤曲线 (修改自 Wang and Carlson, 2022)

Fig.1 Elution curve of 1 mL DGA resin (modified from Wang and Carlson, 2022)

2.2 质谱测定

在质谱测试方面, Harper and Jacobsen (1992) 在 20 世纪 90 年代开始利用上一代热电离质谱仪 MAT262 初步开展了一些地质样品 ¹⁴²Nd 同位素组成的测试工作, 可能受当时商业质谱仪分析精度的限制, 此工作后来没有继续开展. 直到新一代热电离质谱仪 Triton 面世之后, 测试精度得到大程度的提高, 使灭绝核素广泛的应用成为了可能 (Caro *et al.*, 2003; Boyet and Carlson, 2005; Bennett *et al.*, 2007). 经过测试分析技术的不断发展, 科学家们在灯丝“点样”技术避免灯丝上的样品混合挥发、“跳峰”动态测试消除法拉第杯之间的效率差异、“跳峰”动态测试导致的时间差以及信号随时间的波动、改进数据处理方法这几个方面做了大幅度的提升, 显著提高了热电离质谱 ¹⁴²Nd 测试的精度 (Bouvier and Boyet, 2016; Fukai and Yokoyama, 2017; Morino *et al.*, 2017; Garçon *et al.*, 2018; Horan *et al.*, 2018; Reimink *et al.*, 2018; Hyung and Jacobsen, 2020). 最近有学者还利用新一代 MC-ICPMS (Neptune Plus) 测试了 ¹⁴²Nd 同位素异常, 也取得了较好的效果 (Saji *et al.*, 2016, 2018; Hasenstab-Dübeler *et al.*, 2022). 经过近 30 年的设备迭代更新与分析技术的不断改进发展, 最新报道的数据显示, 当前国际上 ¹⁴²Nd 同位素的分析测试精度最高可以达到 2 ppm 左右, 接近当前商业化质谱仪的理论极限 (Caro *et al.*, 2017; Hyung and Jacobsen, 2020; Saji *et al.*, 2018; Wang and Carlson, 2022). 本文推荐使用三步或四步动态法测试 (Li *et al.*, 2015; Garçon *et al.*, 2018, 表 1), 优点是同时可以获得 ¹⁴²Nd/¹⁴⁴Nd、¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd、¹⁴⁵Nd/¹⁴⁴Nd、¹⁴⁸Nd/¹⁴⁴Nd 的动态比值, 可用于监控潜在的非质量分馏效应 (比如核体积效应等), 但此方法耗时较长 (每个测试耗时 8~12 小时), 对于灯丝点样操作和质量分馏的判断需要一些经验.

表 1 TIMS Nd 同位素四步动态测试的法拉第杯结构设置
Table 1 The Faraday cup configuration of the 4-step dynamic measurement of Nd isotopes using TIMS

步骤	L4	L3	L2	L1	C	H1	H2	H3	H4
1	¹³⁹ La	¹⁴⁰ Ce	¹⁴¹ Pr	¹⁴² Nd	¹⁴³ Nd	¹⁴⁴ Nd	¹⁴⁵ Nd	¹⁴⁶ Nd	¹⁴⁷ Sm
2	¹⁴⁰ Ce	¹⁴¹ Pr	¹⁴² Nd	¹⁴³ Nd	¹⁴⁴ Nd	¹⁴⁵ Nd	¹⁴⁶ Nd	¹⁴⁷ Sm	¹⁴⁸ Nd
3	¹⁴¹ Pr	¹⁴² Nd	¹⁴³ Nd	¹⁴⁴ Nd	¹⁴⁵ Nd	¹⁴⁶ Nd	¹⁴⁷ Sm	¹⁴⁸ Nd	¹⁴⁹ Sm
4	¹⁴² Nd	¹⁴³ Nd	¹⁴⁴ Nd	¹⁴⁵ Nd	¹⁴⁶ Nd	¹⁴⁷ Sm	¹⁴⁸ Nd	¹⁴⁹ Sm	¹⁵⁰ Nd

3 全球代表性始太古代地块的 ^{142}Nd 同位素异常

较早期的地质样品研究工作 (Harper and Jacobsen, 1992) 显示了格陵兰 Isua 绿岩带可能含 ^{142}Nd 的同位素异常. 此初步发现在十年后被更高精度的 ^{142}Nd 同位素测试工作所证实 (Caro *et al.*, 2003), 验证了 Isua 绿岩带的 ^{142}Nd 同位素与现代地幔的值不同, 数据表明地球在形成之后的 200 Ma 之内就经历了硅酸盐分异作用, 这个早期形成的亏损地幔储库曾经存在于格陵兰岛之下. 随后科学家们对古老的样品开展了大量的 ^{142}Nd 同位素工作, 试图制约冥古宙的壳-幔演化历史. 本文总结了全球几个最具代表性的有始太古代 (>3.6 Ga) 岩石出露的地块的 ^{142}Nd 数据, 并探讨其在地球早期演化中的重要意义.

3.1 北大西洋克拉通

北大西洋克拉通 (North Atlantic Craton) 包含格陵兰 (Greenland) 和加拿大萨格莱克 (Saglek) 这两个区域, 均出露有最老年龄为 3.9 Ga 的 TTG (英云闪长岩-奥长花岗岩-花岗闪长岩) (Nutman *et al.*, 2021; Laurent *et al.*, 2024), 所以一般认为这两个区域在太古宙曾是一体的, 现今被大西洋所隔开. 北大西洋克拉通同时存在 ^{142}Nd 的正异常和负异常. 其中含有正异常的岩性有 TTG、角闪岩、辉长岩等, 这些岩石的年龄从 3 862 Ma 到 2 744 Ma (Boyet and Carlson, 2006; Caro *et al.*, 2006; Bennett *et al.*, 2007; Rizo *et al.*, 2011, 2013; O'Neil *et al.*, 2016; Morino *et al.*, 2017; Saji *et al.*, 2018; Hasenstab-Dübeler *et al.*, 2022; Wasilewski *et al.*, 2022). 其中最受关注的是被认为大于 3 800 Ma 的 Isua 绿岩带的角闪岩, 也具有最高的 $\mu^{142}\text{Nd}$ 值 (最高 (20.4 ± 0.9) ppm, Bennett *et al.*, 2007). 整体而言, 北大西洋克拉通的基性岩的正 $\mu^{142}\text{Nd}$ 异常特征指示了一个分异年龄最早可达 4.45 Ga 的早期不相容元素亏损的地幔源区. 总体上看, 北大西洋克拉通的 $\mu^{142}\text{Nd}$ 异常值随地幔来源基性岩石的年龄降低而减小, 这可能是地幔对流混合作用的结果 (Rizo *et al.*, 2013). 需要特别说明的是, 北大西洋克拉通的格陵兰地区还存在侵入年龄约为 3 400 Ma 且携带 $\mu^{142}\text{Nd}$ 负异常的基性岩墙 (变粗玄岩, $\mu^{142}\text{Nd}$ 平均值为 -7), 代表了一个与早期不相容元素亏损源区所对应的不相容元素富集储库. 这个基性岩墙可以被解释为早期

地球富集源区发生部分熔融的产物, 或是 4.47 Ga 从地幔中抽取出的基性原始地壳 (Rizo *et al.*, 2012).

3.2 华北克拉通

目前华北克拉通内发现了两处地区存在 ^{142}Nd 的正异常, 分别为辽宁鞍山和冀东曹庄地区. 其中鞍山存在 ^{142}Nd 正异常的岩石主要为 3.8~3.2 Ga 的 TTG ($+7 \sim +10$ ppm), 而 ~ 3 300 Ma 的角闪岩没有可分辨出的 ^{142}Nd 异常 (Li *et al.*, 2017). 这意味着鞍山 TTG 的 ^{142}Nd 异常继承自冥古宙的不相容元素亏损地幔, 而 3.3 Ga 的太古宙地幔已无明显 ^{142}Nd 异常, 意味着太古宙的地幔对流和混合作用稀释了冥古宙地幔的 ^{142}Nd 信号, 这些古老的同位素记录在 3.3 Ga 的时候已经基本消除. 与鞍山记录的 ^{142}Nd 同位素特征相比, 冀东曹庄地区 3.5 Ga 的变质沉积岩具有 ^{142}Nd 正异常 ($+6 \sim +12$ ppm, Liou *et al.*, 2024), 与鞍山 TTG 类似. 这说明冀东地区的始太古代地壳可能与鞍山 TTG 相似, 都是起源于冥古宙的亏损地幔. 但值得注意的是, 曹庄地区 3.1~3.0 Ga 的角闪岩保留有明显的 ^{142}Nd 正异常 ($+7 \sim +11$ ppm, Liou *et al.*, 2024), 意味着曹庄 3.1~3.0 Ga 的地幔源区继承了冥古宙不相容元素亏损的信号, 这与鞍山地区 3.3 Ga 基性岩所显示的信息不一致. 可能的解释是冀东曹庄代表了一个被隔绝了的冥古宙地幔区域, 在太古宙早期没有与周围的“新鲜”地幔混合. 但是这个特殊地幔区域被隔绝的机制与原因, 以及冀东与鞍山地区虽同处华北克拉通但两个区域的太古宙早期地壳是否来源于相似的地幔源区等问题还无法解答.

3.3 苏必利尔 (Superior) 克拉通

苏必利尔克拉通的古老岩石样品主要携带 ^{142}Nd 负异常的特征, 分布在哈德逊湾 (Hudson Bay) 的东部, 可划分成 3 个主要的岩石单元, Nuvvuagittuq 绿岩带 (NGB) 的基性岩单元 (>3.8 Ga), 外围的典型始太古代 TTG (3.76 Ga) 和更外围 2.7 Ga 新太古代 TTG (O'Neil *et al.*, 2012; Carlson *et al.*, 2019). NGB 的岩性和地球化学特征与格陵兰 Isua 绿岩带的变玄武岩类似, 但值得关注的是 NGB 样品的 ^{142}Nd 同位素组成与 Sm/Nd 比值呈线性相关, 其斜率对应 4.28 Ga 的年龄 (O'Neil *et al.*, 2008). 此年龄的意义存在一些争议, 一些学者将其解释为混合线而非等时线, 认为 Sm/Nd 与 ^{142}Nd 同位素组成的变化代表的是 ~ 3.8 Ga 地幔火山岩与 ~ 4.5 Ga 不相容元素富集物质的混合所致 (Roth *et*

al., 2013, 2014). 但此混合模型不能很好地定义 4.5 Ga 富集物质的性质, 且未考虑后期变质作用对长衰变 ^{147}Sm - ^{143}Nd 同位素体系的干扰 (O'Neil *et al.*, 2012; Carlson *et al.*, 2019; Fisher *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2022). NGB 的辉长岩给出了 4.12 Ga 的全岩 Sm-Nd 等时线年龄 (O'Neil *et al.*, 2012); 层状辉长岩给出了 4.15 Ga 的内部等时线年龄 (Sole, 2021). 原始基性地壳的母体地幔发生分异的年龄应比以上岩石的 Sm-Nd 等时线年龄更老, 所以对于 NGB 原始地壳的分异年龄本文倾向于 4.28 Ga. 外围 ~ 3.7 Ga 始太古代 TTG 的 ^{142}Nd 异常可能是继承了其玄武质原岩 NGB 基性岩的特征. 而更外围的 ~ 2.7 Ga 新太古代 TTG 的 $\mu^{142}\text{Nd}$ 也有与 NGB 类似的负异常特征 (O'Neil and Carlson, 2017), 这被解释为 NGB 玄武质基性岩部分熔融的产物, 意味着 NGB 于 ~ 4.3 Ga 形成的冥古宙玄武质原始地壳可能保存了 15 亿年都未被改造, 直到 2.7 Ga 作为古老的陆核参与建造了太古宙大陆地壳.

3.4 Slave 克拉通

阿卡斯塔片麻杂岩体 (Acasta Gneiss Complex, AGC) 是全球已知最古老的岩浆岩 (4.03 Ga, Bowring and Williams, 1999; Reimink *et al.*, 2016; Bauer *et al.*, 2017), 位于加拿大的 Slave 克拉通. AGC 可以按照年龄分为两类: (1) 大于 3.6 Ga 的 TTG 具有 ^{142}Nd 的负异常, 指示了 AGC TTG 的源区是一个冥古宙的不相容元素富集储库, 这些 TTG 很有可能是 4.3 Ga 玄武岩地壳部分熔融的产物; 而 AGC 未见任何 ^{142}Nd 正异常的特征, 意味着 AGC 内可能不存在冥古宙的亏损地幔物质 (Reimink *et al.*, 2018). (2) 小于 3.6 Ga 的岩石不具有可分辨出的 ^{142}Nd 异常, 意味着这些更为年轻的岩石的最初源区是不带有 ^{142}Nd 异常的太古宙地幔. 这个 3.6 Ga 的转折不仅显示在 ^{142}Nd 同位素的记录中, 还存在于锆石的 Hf 同位素记录 (Reimink *et al.*, 2019). 这一观测被解释为 Slave 克拉通的地壳增长模式在 3.6 Ga 发生了改变: 3.6 Ga 以前的地壳形成模式主要是封闭系统改造 4.3 Ga 的玄武质原始地壳, 3.6 Ga 之后的地壳增生有太古宙无 ^{142}Nd 异常的亏损地幔物质的加入, 这可能对应构造体制从停滞盖层向活动盖层的切换 (Bauer *et al.*, 2017).

3.5 扬子克拉通

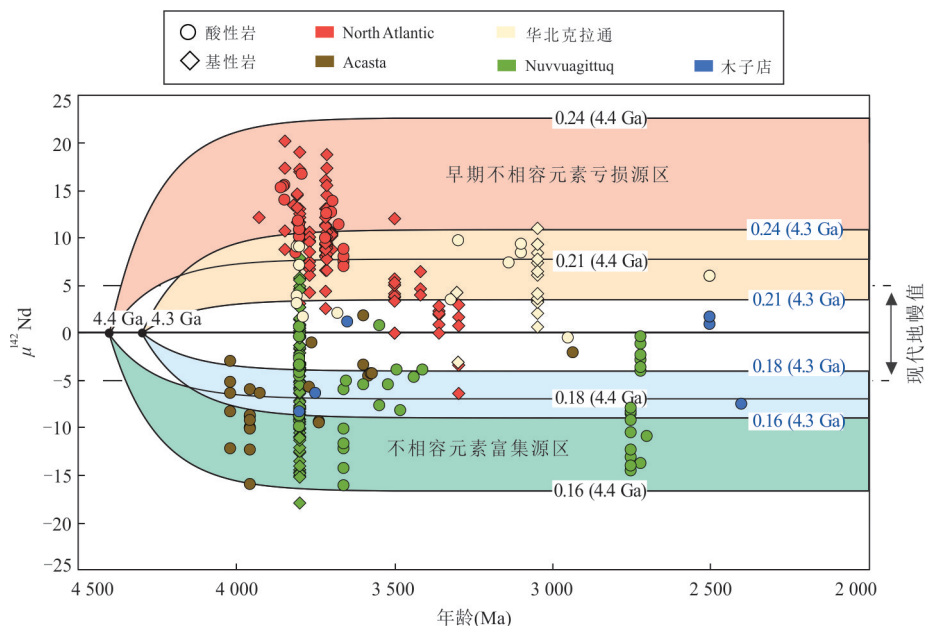
木子店片麻杂岩体位于扬子克拉通北缘, 出露

大于 3.8 Ga 的片麻岩. 邱啸飞等 (2024) 在该地区内识别出了始太古代到新太古代的 TTG (3.8 \sim 2.5 Ga) 与 ~ 3.6 Ga 的角闪岩 (Qiu *et al.*, 2021a), 基于锆石的 Hf 同位素证据认为木子店片麻岩的成因很可能是改造冥古宙的基性原始地壳, 与 AGC 3.6 Ga 以前的 TTG 成因类似; 并且还发现了 4.0 Ga 的继承锆石 (Qiu *et al.*, 2021b). Wang *et al.* (2023) 报道了木子店始太古代和新太古代的 TTG 具有 ^{142}Nd 负异常, 结合锆石的 Hf 同位素证据, 认为木子店 TTG 的源区是 4.3 Ga 的基性原始地壳, 且根据耦合的锆石 Hf-全岩 ^{142}Nd 同位素特征提出了地幔中提取的基性原始地壳是导致早期地球地幔不相容元素亏损的机制. 木子店片麻岩体 2.5 Ga 的新太古代片麻岩也存在 ^{142}Nd 的负异常, 这很可能是继承了其母体的 ^{142}Nd 异常特征, 意味着木子店始太古代 TTG 和 4.3 Ga 的基性原始地壳可能同时作为古老的陆核, 为新太古代大陆地壳的形成提供了重要的物质来源.

4 早期地球地壳的起源模式

根据全球现存的始太古代地块样品的 $\mu^{142}\text{Nd}$ 异常数值, 可以分为 2 类 (图 2): (1) 加拿大 Slave 克拉通的阿卡斯塔片麻岩杂岩体与 Superior 克拉通的 Nuvvuagittuq 绿岩带, 扬子克拉通木子店片麻岩体, 以及南极洲东部 Napier 山脉等地区具有 $\mu^{142}\text{Nd}$ 负异常, 代表了约 4.3 Ga 硅酸盐分异作用形成的冥古宙不相容元素富集储库, 而这个富集储库本身很可能是地球基性原始地壳 (O'Neil *et al.*, 2008, 2012; Reimink *et al.*, 2018; Guitreau *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2023); (2) 与第一类 $\mu^{142}\text{Nd}$ 为负值的地体相对应的是北大西洋克拉通格陵兰 Isua 绿岩带与加拿大东北 Saglek 地块, 华北克拉通鞍山和曹庄地区. 这些地体均具有正的 $\mu^{142}\text{Nd}$ 值, 代表了冥古宙的不相容元素亏损地幔 (Caro *et al.*, 2005, 2006; Rizo *et al.*, 2012, 2013; Debaille *et al.*, 2013; Li *et al.*, 2017; Morino *et al.*, 2017).

地壳主要形成于地幔的部分熔融作用, 如果大量的地壳从地幔中抽取出来, 则会导致相对应的地幔区域亏损不相容元素 (Hofmann, 1988). 太古宙克拉通的岩石圈地幔与地壳近乎同时期的形成则支持了这一机制在太古宙也是成立的 (Pearson *et al.*, 2021). 因此, 北大西洋克拉通和华北克拉通所代表的早期亏损地幔的形成很可能是冥古宙大量原始地壳从原始地幔中抽取的结果. 换句话说, 在

图 2 全球代表性有太古宙岩石出露的地块的 ^{142}Nd 数据总结Fig.2 A compilation of ^{142}Nd data in global early Archean terranes

修改自 Wang *et al.*, 2023, 并增加了 Liou *et al.*, 2024 报道的华北克拉通曹庄数据. 现代地幔参考值为 $\mu^{142}\text{Nd} = \pm 5$ (Carlson *et al.*, 2019). 图上标注了原始地幔分异时间分别为 4.4 Ga 和 4.3 Ga 的参考演化曲线, 以 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 比值代表不相容元素分异的特征 (亏损储库: $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} = 0.21 \sim 0.24$; 富集储库: $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} = 0.16 \sim 0.18$). 此 ^{142}Nd 同位素演化模型详见 Wang *et al.* (2023); 各地块的 ^{142}Nd 同位素演化历史详见 Carlson *et al.* (2019)

冥古宙地球很可能有大量类似阿卡斯塔、Nuvvuagittuq、木子店地体的玄武质母体的原始地壳存在. 但是, 在以格陵兰为代表的地体中 ~ 3.8 Ga 岩石的 Hf 和 Nd 同位素组成记录了不同程度或相反的 Lu/Hf 和 Sm/Nd 分异, 即早期地球的 Hf-Nd 解耦或 Hf-Nd 悖论 (Vervoort *et al.*, 2011). Caro *et al.* (2005) 通过 23 GPa 条件的高温高压实验模拟岩浆洋结晶过程, 发现稀土元素和高场强元素在熔体与下地幔矿物布里奇曼石之间的分配系数非常不同, 并以此解释早期地球的 Hf-Nd 悖论. 这意味着岩浆洋结晶的残余熔体可能具有未强烈分异的 Lu/Hf 比值和高度分异的高 Sm/Nd 比值. 根据此模型的观点, 冥古宙地球岩浆洋的分离结晶作用产生的硅酸盐熔体富集不相容元素, 代表早期地球的富集地幔储库, 可以作为阿卡斯塔、Nuvvuagittuq、木子店这些 $\mu^{142}\text{Nd}$ 为负值的地体的源区, 而岩浆洋的结晶物 (如布里奇曼石、毛钙硅石等) 亏损不相容元素, 代表早期地球的亏损地幔储库 (Caro *et al.*, 2005). 但此观点又无法很好地解释阿卡斯塔、木子店地体强烈耦合的 Hf-Nd 关系; 此外, 近期一些对于太古宙早期岩石的研究发现了古老的岩石在结晶后经历了多次变质和热事件, 全岩 Sm-Nd 同位素

系统受到了强烈改造作用, 不能用于示踪其初始的岩浆源区 (Hammerli *et al.*, 2019; Fisher *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2022). 所以早期地球的 Hf-Nd 悖论以及冥古宙壳幔相互作用或硅酸盐分异对 ^{142}Nd 同位素的影响还缺乏一个全面的解释, 需要未来进行更多的工作. 此外, 未来针对早期地球地壳起源的问题还可结合基础同位素理论、高温高压实验等其他技术手段共同解答.

致谢: 感谢两名匿名审稿专家对本文进行了多次详细审阅并提出了宝贵修改意见, 同时感谢编辑姚戈对本稿件的处理工作!

References

- Bai, J. H., Liu, F., Zhang, Z. F., et al., 2021. Simultaneous Measurement Stable and Radiogenic Nd Isotopic Compositions by MC-ICP-MS with a Single-Step Chromatographic Extraction Technique. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 36(12): 2695–2703. <https://doi.org/10.1039/D1JA00302J>
- Bauer, A. M., Fisher, C. M., Vervoort, J. D., et al., 2017. Coupled Zircon Lu-Hf and U-Pb Isotopic Analyses of the Oldest Terrestrial Crust, the >4.03 Ga Acasta Gneiss Complex. *Earth and Planetary Sci-*

- ence Letters, 458: 37–48. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.10.036>
- Bennett, V. C., Brandon, A. D., Nutman, A. P., 2007. Coupled ^{142}Nd - ^{143}Nd Isotopic Evidence for Hadean Mantle Dynamics. *Science*, 318(5858): 1907–1910. <https://doi.org/10.1126/science.1145928>
- Bouvier, A., Boyet, M., 2016. Primitive Solar System Materials and Earth Share a Common Initial ^{142}Nd Abundance. *Nature*, 537: 399–402. <https://doi.org/10.1038/nature19351>
- Bouvier, A., Vervoort, J. D., Patchett, P. J., 2008. The Lu-Hf and Sm-Nd Isotopic Composition of CHUR: Constraints from Unequilibrated Chondrites and Implications for the Bulk Composition of Terrestrial Planets. *Earth and Planetary Science Letters*, 273(1/2): 48–57. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.06.010>
- Bowring, S. A., King, J. E., Housh, T. B., et al., 1989a. Neodymium and Lead Isotope Evidence for Enriched Early Archaean Crust in North America. *Nature*, 340: 222–225. <https://doi.org/10.1038/340222a0>
- Bowring, S. A., Williams, I. S., Compston, W., 1989b. 3.96 Ga Gneisses from the Slave Province, Northwest Territories, Canada. *Geology*, 17(11): 971. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1989\)017<971:GGFTSP>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1989)017<971:GGFTSP>2.3.CO;2)
- Bowring, S. A., Williams, I. S., 1999. Priscoan (4.00–4.03 Ga) Orthogneisses from Northwestern Canada. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 134(1): 3–16. <https://doi.org/10.1007/s004100050465>
- Boyet, M., Carlson, R. W., 2005. ^{142}Nd Evidence for Early (>4.53 Ga) Global Differentiation of the Silicate Earth. *Science*, 309(5734): 576–581. <https://doi.org/10.1126/science.1113634>
- Boyet, M., Carlson, R. W., 2006. A New Geochemical Model for the Earth's Mantle Inferred from ^{146}Sm - ^{142}Nd Systematics. *Earth and Planetary Science Letters*, 250(1–2): 254–268. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.07.046>
- Boyet, M., Carlson, R. W., Horan, M., 2010. Old Sm-Nd Ages for Cumulate Euclites and Redetermination of the Solar System Initial $^{146}\text{Sm}/^{144}\text{Sm}$ Ratio. *Earth and Planetary Science Letters*, 291(1/2/3/4): 172–181. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2010.01.010>
- Burkhardt, C., Borg, L. E., Brennecka, G. A., et al., 2016. A Nucleosynthetic Origin for the Earth's Anomalous ^{142}Nd Composition. *Nature*, 537(7620): 394–398. <https://doi.org/10.1038/nature18956>
- Burkhardt, C., Kleine, T., Oberli, F., et al., 2011. Molybdenum Isotope Anomalies in Meteorites: Constraints on Solar Nebula Evolution and Origin of the Earth. *Earth and Planetary Science Letters*, 312(3/4): 390–400. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.10.010>
- Carlson, R. W., Boyet, M., Horan, M., 2007. Chondrite Barium, Neodymium, and Samarium Isotopic Heterogeneity and Early Earth Differentiation. *Science*, 316(5828): 1175–1178. <https://doi.org/10.1126/science.1140189>
- Carlson, R. W., Garçon, M., O'Neil, J., et al., 2019. The Nature of Earth's First Crust. *Chemical Geology*, 530: 119321. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2019.119321>
- Caro, G., Bourdon, B., Birck, J. L., et al., 2003. ^{146}Sm - ^{142}Nd Evidence from Isua Metamorphosed Sediments for Early Differentiation of the Earth's Mantle. *Nature*, 423(6938): 428–432. <https://doi.org/10.1038/nature01668>
- Caro, G., Bourdon, B., Birck, J. L., et al., 2006. High-Precision $^{142}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ Measurements in Terrestrial Rocks: Constraints on the Early Differentiation of the Earth's Mantle. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(1): 164–191. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2005.08.015>
- Caro, G., Bourdon, B., Wood, B. J., et al., 2005. Trace Element Fractionation in Hadean Mantle Generated by Melt Segregation from a Magma Ocean. *Nature*, 436(7048): 246–249. <https://doi.org/10.1038/nature03827>
- Caro, G., Morino, P., Mojzsis, S. J., et al., 2017. Sluggish Hadean Geodynamics: Evidence from Coupled ^{146}Sm - ^{142}Nd Systematics in Eoarchean Supracrustal Rocks of the Inukjuak Domain (Québec). *Earth and Planetary Science Letters*, 457: 23–37. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.09.051>
- Chu, Z. Y., Wang, M. J., Li, C. F., et al., 2019. Separation of Nd from Geological Samples by a Single TOD-GA Resin Column for High Precision Nd Isotope Analysis as NdO^+ by TIMS. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 34(10): 2053–2060. <https://doi.org/10.1039/C9JA00200F>
- Connelly, J. N., Bollard, J., Bizzarro, M., 2017. Pb-Pb Chronometry and the Early Solar System. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 201: 345–363. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2016.10.044>
- Debaille, V., O'Neill, C., Brandon, A. D., et al., 2013. Stagnant-Lid Tectonics in Early Earth Revealed by ^{142}Nd Variations in Late Archaean Rocks. *Earth and Planetary Science Letters*, 373: 83–92. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2013.03.010>

- epsl.2013.04.016
- Fang, L. R., Frossard, P., Boyet, M., et al., 2022. Half-Life and Initial Solar System Abundance of ^{146}Sm Determined from the Oldest Andesitic Meteorite. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 119(12): 6465. <https://doi.org/10.1073/pnas.2120933119>
- Fisher, C. M., Bauer, A. M., Vervoort, J. D., 2020. Disturbances in the Sm - Nd Isotope System of the Acasta Gneiss Complex—Implications for the Nd Isotope Record of the Early Earth. *Earth and Planetary Science Letters*, 530: 115900. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2019.115900>
- Friedman, A. M., Milsted, J., Metta, D., et al., 1966. Alpha Decay Half Lives of ^{148}Gd , ^{150}Gd and ^{146}Sm . *Radiochimica Acta*, 5(4): 192—194. <https://doi.org/10.1524/ract.1966.5.4.192>
- Frossard, P., Israel, C., Bouvier, A., et al., 2022. Earth's Composition was Modified by Collisional Erosion. *Science*, 377(6614): 1529—1532. <https://doi.org/10.1126/science.abq7351>
- Fukai, R., Yokoyama, T., 2017. Neodymium Isotope Heterogeneity of Ordinary and Carbonaceous Chondrites and the Origin of Non-Chondritic ^{142}Nd Compositions in the Earth. *Earth and Planetary Science Letters*, 474: 206—214. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2017.06.036>
- Garçon, M., Boyet, M., Carlson, R. W., et al., 2018. Factors Influencing the Precision and Accuracy of Nd Isotope Measurements by Thermal Ionization Mass Spectrometry. *Chemical Geology*, 476: 493—514. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2017.12.003>
- Guitreau, M., Boyet, M., Paquette, J. L., et al., 2019. Hadean Protocrust Reworking at the Origin of the Archean Napier Complex (Antarctica). *Geochemical Perspectives Letters*, 12: 7—11. <https://doi.org/10.7185/geochemlet.1927>
- Hammerli, J., Kemp, A. I. S., Whitehouse, M. J., 2019. In Situ Trace Element and Sm-Nd Isotope Analysis of Accessory Minerals in an Eoarchean Tonalitic Gneiss from Greenland: Implications for Hf and Nd Isotope Decoupling in Earth's Ancient Rocks. *Chemical Geology*, 524: 394—405. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2019.06.025>
- Harper, C. L., Jacobsen, S. B., 1992. Evidence from Coupled ^{147}Sm - ^{143}Nd and ^{146}Sm - ^{142}Nd Systematics for Very Early (4.5-Gyr) Differentiation of the Earth's Mantle. *Nature*, 360: 728—732. <https://doi.org/10.1038/360728a0>
- Hasenstab-Dübeler, E., Tusch, J., Hoffmann, J. E., et al., 2022. Temporal Evolution of ^{142}Nd Signatures in SW Greenland from High Precision MC-ICP-MS Measurements. *Chemical Geology*, 614: 121141. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2022.121141>
- Hofmann, A. W., 1988. Chemical Differentiation of the Earth: The Relationship between Mantle, Continental Crust, and Oceanic Crust. *Earth and Planetary Science Letters*, 90(3): 297—314. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(88\)90132-X](https://doi.org/10.1016/0012-821X(88)90132-X)
- Horan, M. F., Carlson, R. W., Walker, R. J., et al., 2018. Tracking Hadean Processes in Modern Basalts with ^{142}Nd -Neodymium. *Earth and Planetary Science Letters*, 484: 184—191. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2017.12.017>
- Hyung, E., Jacobsen, S. B., 2020. The $^{142}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ Variations in Mantle-Derived Rocks Provide Constraints on the Stirring Rate of the Mantle from the Hadean to the Present. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 117(26): 14738—14744. <https://doi.org/10.1073/pnas.2006950117>
- Johnston, S., Brandon, A., McLeod, C., et al., 2022. Nd Isotope Variation between the Earth-Moon System and Enstatite Chondrites. *Nature*, 611(7936): 501—506. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05265-0>
- Kagami, S., Yokoyama, T., 2016. Chemical Separation of Nd from Geological Samples for Chronological Studies Using ^{146}Sm - ^{142}Nd and ^{147}Sm - ^{143}Nd Systematics. *Analytica Chimica Acta*, 937: 151—159. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2016.07.004>
- Kinoshita, N., Paul, M., Kashiv, Y., et al., 2012. RETRACTED: A Shorter ^{146}Sm Half-Life Measured and Implications for ^{146}Sm - ^{142}Nd Chronology in the Solar System. *Science*, 335(6076): 1614—1617. <https://doi.org/10.1126/science.1215510>
- Laurent, O., Guitreau, M., Bruand, E., et al., 2024. at the Dawn of Continents: Archean Tonalite - Trondhjemite - Granodiorite Suites. *Elements*, 20(3): 174—179. <https://doi.org/10.2138/gselements.20.3.174>
- Li, C. F., Wang, X. C., Li, Y. L., et al., 2015. Ce-Nd Separation by Solid-Phase Micro-Extraction and Its Application to High-Precision $^{142}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ Measurements Using TIMS in Geological Materials. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 30(4): 895—902. <https://doi.org/10.1039/C4JA00328D>
- Li, C. F., Wang, X. C., Wilde, S. A., et al., 2017. Differentiation of the Early Silicate Earth as Recorded by ^{142}Nd - ^{143}Nd in 3.8–3.0 Ga Rocks from the Anshan Complex, North China Craton. *Precambrian Research*, 301: 86—101. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2017.09.001>
- Liou, P., Caro, G., Cui, X., et al., 2024. Long-Term Isola-

- tion of Hadean Mantle Domains Revealed from Coupled $^{147-146}\text{Sm}$ - $^{143-142}\text{Nd}$ Systematics in the Eastern North China Craton. *Earth and Planetary Science Letters*, 638: 118761. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2024.118761>
- Liu, F., Li, X., Yang, H., et al., 2023. Simultaneously Obtaining Stable and Radiogenic Nd Isotope Ratios through a Single DGA Column Using Double Spike TIMS. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 38(12): 2581–2589. <https://doi.org/10.1039/D3JA00284E>
- Marks, N. E., Borg, L. E., Hutcheon, I. D., et al., 2014. Samarium - Neodymium Chronology and Rubidium - Strontium Systematics of an Allende Calcium - Aluminum - Rich Inclusion with Implications for ^{146}Sm Half-Life. *Earth and Planetary Science Letters*, 405: 15–24. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2014.08.017>
- Mezger, K., Schönbächler, M., Bouvier, A., 2020. Accretion of the Earth—Missing Components? *Space Science Reviews*, 216(2): 27. <https://doi.org/10.1007/s11214-020-00649-y>
- Morino, P., Caro, G., Reisberg, L., et al., 2017. Chemical Stratification in the Post - Magma Ocean Earth Inferred from Coupled $^{146,147}\text{Sm}$ - $^{142,143}\text{Nd}$ Systematics in Ultramafic Rocks of the Saglek Block (3.25–3.9 Ga; Northern Labrador, Canada). *Earth and Planetary Science Letters*, 463: 136–150. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2017.01.044>
- Nutman, A. P., Bennett, V. C., Friend, C. R. L., et al., 2021. Fifty Years of the Eoarchean and the Case for Evolving Uniformitarianism. *Precambrian Research*, 367: 106442. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2021.106442>
- O'Neil, J., Carlson, R. W., 2017. Building Archean Cratons from Hadean Mafic Crust. *Science*, 355(6330): 1199–1202. <https://doi.org/10.1126/science.aah3823>
- O'Neil, J., Carlson, R. W., Francis, D., et al., 2008. Neodymium-142 Evidence for Hadean Mafic Crust. *Science*, 321(5897): 1828–1831. <https://doi.org/10.1126/science.1161925>
- O'Neil, J., Carlson, R. W., Paquette, J. L., et al., 2012. Formation Age and Metamorphic History of the Nuvvuagittuq Greenstone Belt. *Precambrian Research*, 220: 23–44. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2012.07.009>
- O'Neil, J., Rizo, H., Boyet, M., et al., 2016. Geochemistry and Nd Isotopic Characteristics of Earth's Hadean Mantle and Primitive Crust. *Earth and Planetary Science Letters*, 442: 194–205. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.02.055>
- Pearson, D. G., Scott, J. M., Liu, J. G., et al., 2021. Deep Continental Roots and Cratons. *Nature*, 596(7871): 199–210. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03600-5>
- Peters, B. J., Carlson, R. W., Day, J. M. D., et al., 2018. Hadean Silicate Differentiation Preserved by Anomalous $^{142}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ Ratios in the Réunion Hotspot Source. *Nature*, 555(7694): 89–93. <https://doi.org/10.1038/nature25754>
- Pin, C., Gannoun, A., 2019. A Triple Tandem Columns Extraction Chromatography Method for Isolation of Highly Purified Neodymium Prior to $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ and $^{142}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ Isotope Ratios Determinations. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 34(2): 310–318. <https://doi.org/10.1039/C8JA00360B>
- Qin, L. P., Carlson, R. W., Alexander, C. M. O., 2011. Correlated Nucleosynthetic Isotopic Variability in Cr, Sr, Ba, Sm, Nd and Hf in Murchison and QUE 97008. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75(24): 7806–7828. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2011.10.009>
- Qiu, X. F., Deng, X., Jiang, T., et al., 2021a. First Discovery of Hadean Xenocrystal Zircons from Granitic Gneisses in the Northern Dabie Orogen. *Acta Geologica Sinica*, 95(5): 1775–1776. <https://doi.org/10.1111/1755-6724.14755>
- Qiu, X. F., Tong, X. R., Jiang, T., et al., 2021b. Reworking of Hadean Continental Crust in the Dabie Orogen: Evidence from the Muzidian Granitic Gneisses. *Gondwana Research*, 89: 119–130. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2020.08.014>
- Qiu, X. F., Peng, L. H., Kong, L. Y., et al., 2024. Discovery of Eoarchean Gneiss in the Beibei Tectonic Belt. *Earth Science*, 49(11): 3960–3970 (in Chinese with English abstract).
- Rehkämper, M., Gärtner, M., Galer, S. J. G., et al., 1996. Separation of Ce from Other Rare-Earth Elements with Application to Sm-Nd and La-Ce Chronometry. *Chemical Geology*, 129(3–4): 201–208. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(95\)00143-3](https://doi.org/10.1016/0009-2541(95)00143-3)
- Reimink, J. R., Chacko, T., Carlson, R. W., et al., 2018. Petrogenesis and Tectonics of the Acasta Gneiss Complex Derived from Integrated Petrology and ^{142}Nd and ^{182}W Extinct Nuclide - Geochemistry. *Earth and Planetary Science Letters*, 494: 12–22. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.04.047>
- Reimink, J. R., Davies, J. H. F. L., Chacko, T., et al., 2016. No Evidence for Hadean Continental Crust within Earth's Oldest Evolved Rock Unit. *Nature Geoscience*, 9: 777–780. <https://doi.org/10.1038/ngeo2786>
- Reimink, J. R., Pearson, D. G., Shirey, S. B., et al., 2019. Onset of New, Progressive Crustal Growth in the Central Slave Craton at 3.55 Ga. *Geochemical Perspectives*

- Letters*, 10: 8–13. <https://doi.org/10.7185/geochemlet.1907>
- Render, J., Fischer - GÖdde, M., Burkhardt, C., et al., 2017. The Cosmic Molybdenum - Neodymium Isotope Correlation and the Building Material of the Earth. *Geochemical Perspectives Letters*, 3(2): 170–178. <https://doi.org/10.7185/geochemlet.1720>
- Rizo, H., Boyet, M., Blichert-Toft, J., et al., 2011. Combined Nd and Hf Isotope Evidence for Deep - Seated Source of Isua Lavas. *Earth and Planetary Science Letters*, 312(3–4): 267–279. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.10.014>
- Rizo, H., Boyet, M., Blichert-Toft, J., et al., 2012. The Elusive Hadean Enriched Reservoir Revealed by ^{142}Nd Deficits in Isua Archean Rocks. *Nature*, 491(7422): 96–100. <https://doi.org/10.1038/nature11565>
- Rizo, H., Boyet, M., Blichert-Toft, J., et al., 2013. Early Mantle Dynamics Inferred from ^{142}Nd Variations in Archean Rocks from Southwest Greenland. *Earth and Planetary Science Letters*, 377: 324–335. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2013.07.012>
- Roth, A. S. G., Bourdon, B., Mojzsis, S. J., et al., 2013. Inherited ^{142}Nd Anomalies in Eoarchean Protoliths. *Earth and Planetary Science Letters*, 361: 50–57. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2012.11.023>
- Roth, A. S. G., Bourdon, B., Mojzsis, S. J., et al., 2014. Combined ^{147}Sm - ^{143}Nd Constraints on the Longevity and Residence Time of Early Terrestrial Crust. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 15(6): 2329–2345. <https://doi.org/10.1002/2014gc005313>
- Saji, N. S., Larsen, K., Wielandt, D., et al., 2018. Hadean Geodynamics Inferred from Time - Varying $^{142}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ in the Early Earth Rock Record. *Geochemical Perspectives Letters*, 7: 43–48. <https://doi.org/10.7185/geochemlet.1818>
- Saji, N. S., Wielandt, D., Paton, C., et al., 2016. Ultra-High-Precision Nd-Isotope Measurements of Geological Materials by MC-ICPMS. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 31(7): 1490–1504. <https://doi.org/10.1039/C6JA00064A>
- Sole, C., 2021. Geochronology and Petrogenesis of Hadean to Paleoproterozoic Mafic and Felsic Crust from the Northeastern Superior Province, Canada. Université d'Ottawa/University of Ottawa, Ottawa. <https://doi.org/10.20381/ruor-25863>
- Stern, R.A., Bleeker, W., 1998. Age of the World's Oldest Rocks Refined Using Canada's SHRIMP: The Acasta Gneiss Complex, Northwest Territories, Canada. *Geoscience Canada*, 25(1):27–31.
- Tazoe, H., Obata, H., Amakawa, H., et al., 2007. Precise Determination of the Cerium Isotopic Compositions of Surface Seawater in the Northwest Pacific Ocean and Tokyo Bay. *Marine Chemistry*, 103(1/2): 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.marchem.2006.05.008>
- Upadhyay, D., Scherer, E. E., Mezger, K., 2009. ^{142}Nd Evidence for an Enriched Hadean Reservoir in Cratonic Roots. *Nature*, 459(7250): 1118–1121. <https://doi.org/10.1038/nature08089>
- Vervoort, J. D., Plank, T., Prytulak, J., 2011. The Hf-Nd Isotopic Composition of Marine Sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75(20): 5903–5926. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2011.07.046>
- Wang, D., Carlson, R. W., 2022. Tandem-Column Extraction Chromatography for Nd Separation: Minimizing Mass-Independent Isotope Fractionation for Ultrahigh-Precision Nd Isotope-Ratio Analysis. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 37(1): 185–193. <https://doi.org/10.1039/D1JA00365H>
- Wang, D., Qiu, X. F., Carlson, R. W., 2023. The Eoarchean Muzidian Gneiss Complex: Long - Lived Hadean Crustal Components in the Building of Archean Continents. *Earth and Planetary Science Letters*, 605: 118037. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2023.118037>
- Wang, D., Shirey, S. B., Carlson, R. W., et al., 2022. Comparative Sm - Nd Isotope Behavior of Accessory Minerals: Reconstructing the Sm-Nd Isotope Evolution of Early Archean Rocks. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 318: 190–212. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2021.11.031>
- Wasilewski, B., O'Neil, J., Rizo, H., 2022. Archean Crustal Evolution of the Saglek-Hebron Complex, Northern Labrador, Revealed from Coupled ^{147}Sm - ^{143}Nd Systematics. *Earth and Planetary Science Letters*, 594: 117735. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2022.117735>
- Wilde, S. A., Valley, J. W., Peck, W. H., et al., 2001. Evidence from Detrital Zircons for the Existence of Continental Crust and Oceans on the Earth 4.4 Gyr ago. *Nature*, 409(6817): 175–178. <https://doi.org/10.1038/35051550>

中文参考文献

- 邱啸飞, 彭练红, 孔令耀, 等, 2024. 北大别构造带始太古代片麻岩的发现. *地球科学*, 49(11): 3960–3970.