

地幔地球化学的建立和发展

陈立辉^{1*}, 张笑宇², 赵键¹

1. 西北大学地质学系, 大陆演化与早期生命全国重点实验室, 西安 710069

2. 南京大学地球科学与工程学院, 关键地球物质循环与成矿全国重点实验室, 南京 210023

* 通讯作者, E-mail: chenlh@nwu.edu.cn

2025-10-03收稿, 2025-12-29修回, 2026-01-05接受, 2026-01-20网络版发表

国家自然科学基金项目(42130310)资助

摘要 地幔地球化学是一门诞生于20世纪70年代中期的学科, 主要运用地球化学方法研究地幔的化学组成、化学结构、演化历史及其动力学机制。自诞生以来, 这门学科一直处于固体地球和行星科学的最前沿, 表现出蓬勃的生命力。其理论体系的构建起始于大洋玄武岩放射成因同位素组成所揭示的地幔化学不均一性, 并由此逐步发展出“地壳物质再循环”的经典模型。在此基础上, 通过定义一系列具有全球代表性的地幔端元组分(包括DMM、EMI、EMII、HIMU和PREMA), 最终建立起一个完整刻画地幔化学结构与地球动力学的基本框架。在半个世纪的发展历程中, 地幔地球化学研究不断吸收新的分析技术与理论成果, 其研究广度和深度得到极大拓展, 成为在地球系统科学框架下构建深部物质循环和地表环境响应的主要途径。为了系统梳理该学科的发展脉络, 本文通过解读地幔地球化学领域中8篇以放射成因同位素为主的经典论文, 回顾学科的建立和发展过程, 学习和领略先驱们的科学视野, 重温这门学科的核心研究内容。

关键词 地幔不均一性, 地壳再循环, 地幔端元, 化学地球动力学

1 引言

地幔是地球内部介于地壳和地核之间的巨厚圈层, 其范围从莫霍面(~30 km)延伸至古登堡面(~2900 km), 占据地球体积的84%和质量的67%, 是地球最大的固态组成部分。基于410 km和660 km深度的地震波速跃变, 地幔被划分为上地幔、地幔过渡带和下地幔。其中上地幔与地表之间主要通过板块俯冲和火山作用发生物质和能量交换, 下地幔主要通过地核之间的对流、冷却放热过程释放出巨量能量。正是这两个自上而下和自下而上的过程维持着地球内部的运转。除了上地幔顶部的岩石圈地幔具有非对流状态外, 其余地幔都具有对流性质。板块俯冲将岩石圈物质携带进入对流地幔, 地幔柱则将核幔边界的物质和能量跨过上下地幔向地球表层输送(郑永飞, 2023; 冷伟和朱沛荣, 2025)。这种地幔与地核、地幔与地表之间的多圈层相互作用, 对维系地球系统的

宜居性起着至关重要的作用(徐义刚等, 2024; 郑永飞等, 2024)。

地幔地球化学是一门旨在了解地球内部的化学结构、物质组成, 解析固体地球圈层之间的相互作用与动力学过程的交叉学科(如Gast等, 1964; Sun和Hanson, 1975; Zindler和Hart, 1986; Hofmann, 1997)。地幔地球化学家以各种幔源岩石(如玄武岩、金伯利岩等)、地幔岩及地幔矿物等为研究对象, 通过各种地球化学(尤其是同位素)示踪手段, 探讨壳-幔分异、核-幔分异过程, 了解壳-幔相互作用和核-幔相互作用, 刻画地球内部各圈层之间的物质循环过程及其运行机制。伴随着板块构造理论在20世纪60年代的诞生(郑永飞和李振新, 2025), 地质学家对板块运动的动力学机制产生了浓厚的兴趣, 从而激发了对于地球深部的探索热情。在此背景下, 随着分析技术(尤其是同位素分析技术)的突破和地幔柱模型的提出, 地幔地球化学这一学科应运而生。在五十多年的学

中文引用格式: 陈立辉, 张笑宇, 赵键. 2026. 地幔地球化学的建立和发展. 中国科学: 地球科学, 56(2): 855–862, doi: [10.1360/SSTe-2025-0334](https://doi.org/10.1360/SSTe-2025-0334)

英文引用格式: Chen L, Zhang X, Zhao J. 2026. Establishment and development of mantle geochemistry. Science China Earth Sciences, 69(2): 831–838, <https://doi.org/10.1007/s11430-025-1820-6>

科发展历程中,它不断与地球物理学、构造地质学、岩石学(特别是高温高压实验岩石学)、行星科学以及地球化学的其他分支领域深度交叉融合,共同构成我们理解地球系统演化的关键理论支柱,是固体地球科学研究中的热点和前沿方向之一。

2 历史背景

由于板块构造理论在20世纪60年代建立并快速发展,科学界逐渐认识到固体地球的不同圈层之间可能存在着大尺度的物质循环和能量交换过程(郑永飞和李振新, 2025)。地幔作为地球的主要圈层,其物理和化学属性对板块构造的响应逐渐成为地球科学界关心的关键问题。在这样的背景下,地幔地球化学作为一门了解地幔的物质组成、演化及与其他圈层相互作用的学科,在20世纪60年代萌芽,70年代初步成形,80年代得到迅猛发展并建立了完整的学科体系,并逐步发展为固体地球科学中的重要前沿方向。

“工欲善其事,必先利其器”,地幔地球化学学科的建立依赖技术的突破。美国曼哈顿计划极大地促进了质谱技术的快速发展,使质谱仪在同位素测量中的精度和稳定性显著提升。随着真空技术、离子检测器等关键硬件技术的进步,热电离质谱仪(TIMS)作为一种高精度的同位素分析仪器,开始被广泛应用于地球化学研究中。随后,越来越多的地球化学家开始使用热电离质谱仪对来自大西洋洋中脊和冰岛等地区的大洋玄武岩开展了放射性同位素体系(Rb-Sr、Sm-Nd、U-Th-Pb)组成的初步测定(Hedge和Walthall, 1963; Gast等, 1964; Tatsumoto等, 1965; Hart等, 1973; Schilling, 1975; Brooks等, 1976)。随着数据的不断积累,地球化学家们发现这些幔源岩石的放射成因同位素组成存在较大的变化,揭示了地幔可能具有不均一的化学结构。这些重要发现为地幔化学组成与演化的研究开辟了新方向,为地幔地球化学理论体系的建立奠定了基础。

3 经典解读

20世纪70年代中期至80年代中叶,是地幔地球化学理论快速演进与体系构建的重要阶段。该时期,一系列奠定学科基础的经典论文相继发表,推动了人们对地幔不均一性、地壳再循环机制以及地幔端元概念的深刻理解。这里精选了其中具有里程碑意义的8篇代表性论文,依照研究主题分三部分进行回顾和分析。

3.1 地幔不均一性的发现

DePaolo和Wasserburg(1976)和Richard等(1976)几乎

同时发表的两项研究首次系统地测定了地球不同时代岩石样品的钕同位素组成。特别是DePaolo和Wasserburg(1976)首次提出了 ϵ_{Nd} 参数,用于衡量样品Nd同位素相对于球粒陨石参考值的偏离程度,成为识别不同时空幔源岩浆源区特征的重要标准化工具(图1)。这两项研究还发现洋岛玄武岩(Ocean island basalt, OIB)和大洋中脊玄武岩(Mid-ocean ridge basalt, MORB)的Nd同位素组成存在显著差异,反映其源区具有不同的Sm/Nd比值,经历了不同的化学演化过程,从而明确揭示了地幔的化学不均一性特征。总的来说,这两项开创性研究共同奠定了Sm-Nd同位素体系在地幔地球化学中的应用基础,为揭示地幔化学储库的时空演化和壳幔物质交换提供了关键工具与理论支撑,具有里程碑式的意义。

在放射成因Sr、Nd和Pb同位素被广泛应用于地幔化学不均一性研究的基础上,Kurz等(1982)开创性地将惰性气体氦的同位素引入地幔不均一性研究,首次揭示了洋岛玄武岩 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值存在显著的变化(图2)。该研究不仅发现夏威夷Loihi海山具有比典型大洋中脊玄武岩明显偏高的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值,而且还发现南大西洋Gough和Tristan da Cunha的洋岛玄武岩的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值明显低于典型MORB。这项工作使惰性气体同位素成为研究地幔化学不均一性的主要工具之一。

随后,Hart(1984)在系统总结前人研究的基础上,提出全球南半球地区(包括印度洋、南大西洋和南太平洋)存在显著的Sr-Nd-Pb同位素异常,并将其定义为DUPAL异常,以纪念其最早的发现者Bernard Dupré和Claude J. Allègre。该异常具体表现为南半球区域的大洋玄武岩具有偏离北半球参考线的 ΔSr 、 $\Delta 8/4$ 和 $\Delta 7/4$ 值($\Delta\text{Sr}=[(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_{\text{sample}}-0.7]\times 10^4$; $\Delta 8/4=[(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_{\text{sample}}-(1.209\times(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_{\text{sample}}+15.627)]\times 100$; $\Delta 7/4=[(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_{\text{sample}}-(0.1084\times(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_{\text{sample}}+13.491)]\times 100$),这种异常的放射成因同位素组成需要其地幔源区存在古老的壳源物质才能解释(图3)。这一现象从全球尺度揭示了南北半球之下的地幔存在显著的放射成因同位素差异。这种大尺度地幔不均一性的长期存在为地幔对流的效率提供了重要约束,表明地幔存在化学分层或者其中不同组分之间的混合机制相当低效,因此对全地幔对流的效率提出了挑战。

3.2 地壳再循环模型

在发现地幔具有化学不均一性特征后,“地壳再循环”逐渐成为解释大洋玄武岩放射成因同位素特征差异的经典模型。Armstrong(1968)最早明确提出了“地壳物质再循环”这一概念,认为富硅的地壳物质可以通过俯冲进

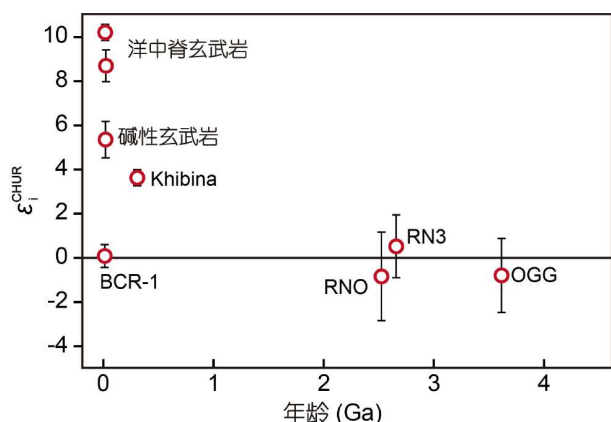


图1 不同地质时代样品 ϵ_{Nd} 值相对于球粒陨石偏离程度(修改自DePaolo和Wasserburg, 1976)

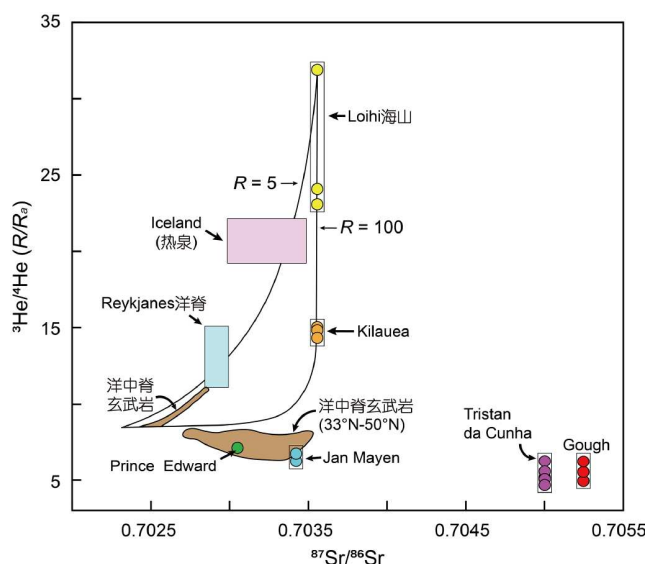


图2 洋岛玄武岩 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 相关图(假定组分1的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值为 $8.5\times\text{Ra}$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为0.70230, 组分2的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值为 $32.0\times\text{Ra}$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为0.70358, 图中两条混合线由上述两种组分通过比率5和100计算得到; 修改自Kurz等, 1982)

入上地幔, 随后再通过火山作用返回地表, 完成壳-幔之间的物质与能量交换(图4)。该文从同位素角度构建了再循环模型的理论框架, 提出Sr和Pb同位素之间显著的演化差异是由于其母体比值在壳-幔之间的不同所引起, 为后续研究提供了基础。Armstrong(1968)提出的“地壳再循环”模型虽然还不够完善, 但已经具有了板块构造理论的“烙印”, 把大陆边缘和岛弧这样的板块汇聚部位作为地壳物质再循环的场所(图4)。

White和Hofmann(1982)在分析了大量大洋玄武岩(包括洋中脊玄武岩和洋岛玄武岩)的Sr-Nd同位素组成后, 发现部分样品显著偏离地幔参考线, 不能通过简单的亏

损-未亏损二元混合来解释, 从而进一步支持了Armstrong(1968)提出的大洋玄武岩地幔源区存在再循环地壳物质的观点(图5)。Hofmann和White(1982)据此提出俯冲进入深部地幔的洋壳会在核幔边界处堆积, 随后由于放射性生热元素富集导致的内部加热失稳, 诱发地幔柱上涌。地幔柱携带俯冲洋壳进入浅部地幔并发生熔融, 从而贡献于洋岛玄武岩的组成(图6)。该文首次将板块俯冲引起的洋壳再循环与地幔柱活动统一起来, 认为再循环洋壳是地幔柱物质和能量的关键来源, 从而实现了地幔地球化学与地球动力学的深度融合。这两篇论文让“地壳再循环”模型从上地幔扩展到全地幔尺度, 标志着地幔地球化学学科的理论框架基本成型。

3.3 化学地球动力学

Zindler和Hart(1986)在全面总结全球大洋玄武岩放射成因同位素(包含Sr、Nd、Pb和He)数据基础上, 从高维度的角度梳理不同同位素之间的协同变化规律, 提出用五个地幔端元来描述地幔的化学不均一性, 并将它们正式命名为DMM、HIMU、EMI、EMII和PREMA(近似于后来提出的“FOZO”或“C”)。同时, 他们还将这些端元组分归因于地幔早期熔融以及不同类型地壳物质的再循环, 并用PREMA和其他地幔端元在地幔对流背景下不同比例的混合来解释全球洋岛玄武岩的同位素组成(图7)。该文通过建立“地幔动物园”(mantle zoo)的方式, 为后续研究精确刻画地幔的化学不均一性提供了参照物(坐标), 并构建了将地幔不均一性与地幔对流模型紧密结合的认识。

4 经典验证

虽然地幔地球化学的内容不限于放射成因同位素体系, 还包括元素和稳定同位素组成, 但放射成因同位素与前者相比存在以下两个明显的优势: (1)在部分熔融和结晶分异过程中放射成因同位素不会发生分馏, 玄武岩的放射成因同位素直接代表地幔源区的同位素组成; (2)放射成因同位素不仅涉及到元素对(如Rb-Sr和Sm-Nd)之间的分馏效应, 还叠加了随着时间放射成因同位素的累积效应, 因此对于示踪地球不同圈层的演化和物质循环方面更直观更高效。正是这两个独特优势, 本文选择的八篇经典文献都以放射成因同位素体系为主开展观察和讨论。

自20世纪70年代起, 以Schilling J G和Wasserburg G J为代表的一批地球化学家们先后对大西洋、冰岛、亚速尔群岛、夏威夷群岛等多个代表性地区的大洋玄武岩开展了微量元素和放射成因同位素分析(Hart等, 1973; Schilling, 1975; Sun和Hanson, 1975; DePaolo和Wasser-

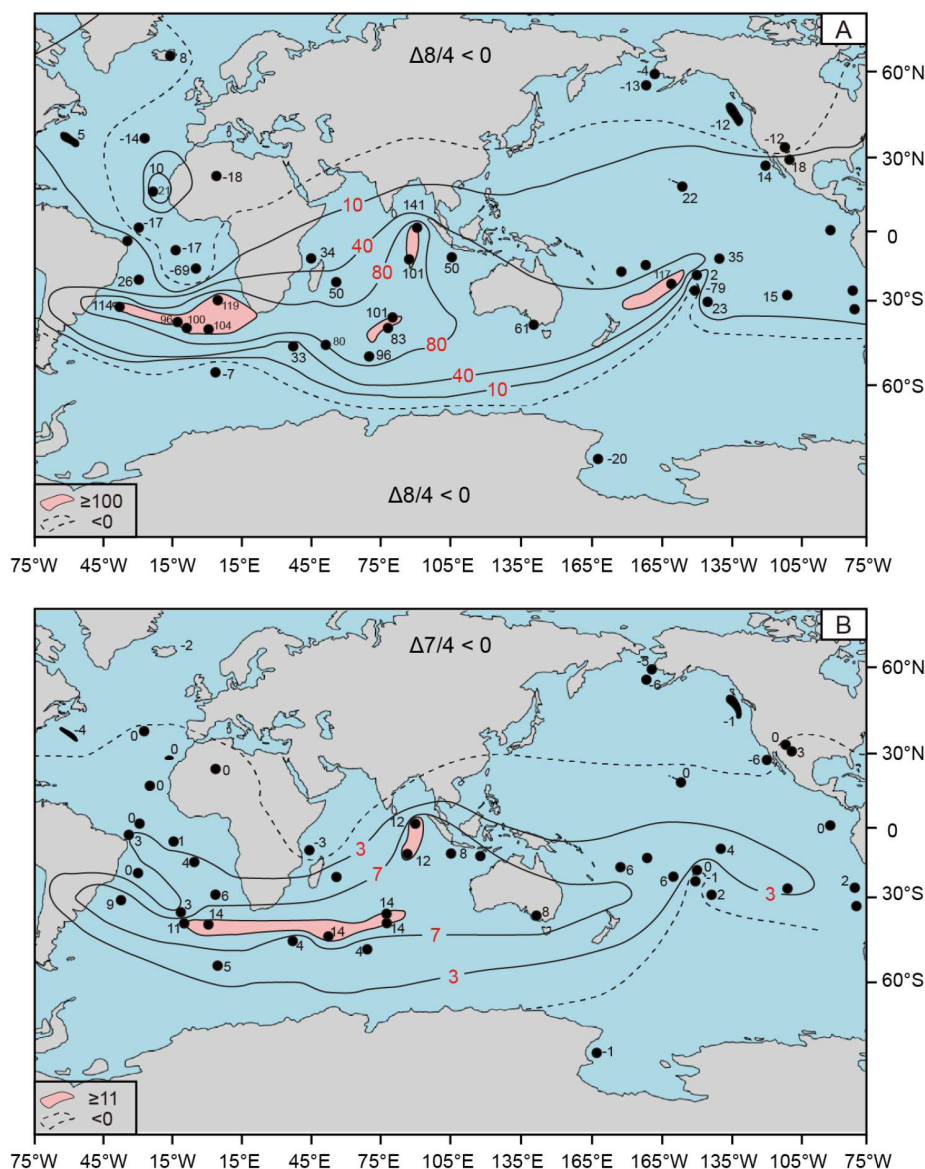


图3 全球范围内Pb同位素异常(或称DUPAL异常,主要集中在南半球,指示在全球尺度上南北半球的地幔存在显著的放射成因同位素差异,图A和图B分别为 $\Delta 8/4$ 和 $\Delta 7/4$ 异常;修改自Hart, 1984)

burg, 1976; Richard等, 1976; O’Nions等, 1977; Tatsumoto, 1978; White和Schilling, 1978; Hawkesworth等, 1979; Wood, 1979; Basu和Tatsumoto, 1980; Kurz等, 1982; Dupré and Allègre, 1983), 揭示出这些玄武岩在微量元素和同位素组成上具有显著的不均一性。这些发现突破了“均一的地幔组成”的传统假设, 明确指示了这些大洋玄武岩的地幔源区并不是完全由单一组分构成, 存在两种甚至更多种不同的源区组分。DePaolo和Wasserburg(1976)和Richard等(1976)这两篇论文是这批先驱工作的杰出代表, 他们建立了地幔分异—Sm/Nd元素对分馏—Nd同位素组成变化这一完整的逻辑链, 从而使运用放射成因同位素理解壳-幔分异过程成为可能。Kurz

等(1982)这项工作不仅揭示出地幔的He同位素存在高度的不均一性, 而且OIB异常高的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值被解释为下地幔存在未去气或者未充分去气的地幔原始物质, 构成地幔柱下地幔起源的关键地球化学证据, 从而极大地推动了对地球内部物质循环过程和热点成因机制的深入理解(黄士春和郑永飞, 2017)。Hart(1984)发现的南半球DUPAL同位素异常, 使地幔不均一性的观察第一次拓展到半球尺度。上述四篇论文不仅从深度和广度上揭示了地幔化学不均一性的三维存在, 而且初步揭示了其形成机理, 成为地幔化学不均一性发现方面的经典论文。

得益于20世纪60年代中后期板块构造理论的建立和发展, 以及随后地幔柱模型的提出(Morgan, 1971), 地

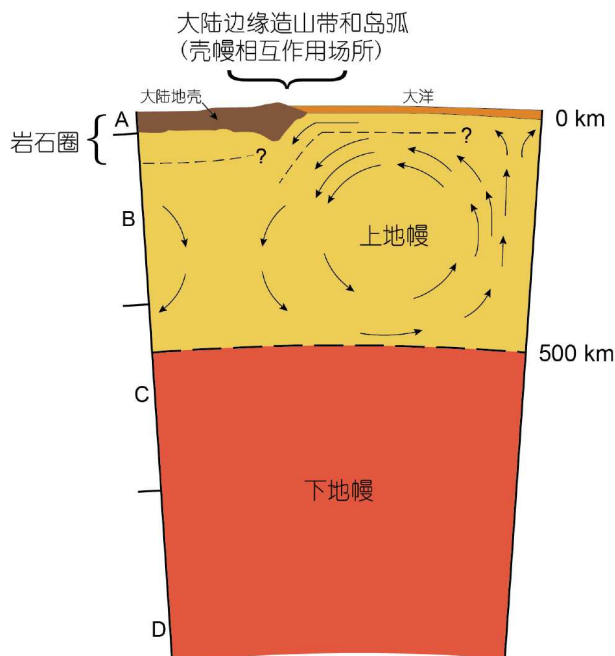


图4 壳幔混合示意图。在该模型中，壳幔相互作用及后续同位素演化仅在大陆边缘的造山带及岛弧等区域发生，图中岩石圈指软流圈之上的刚性块体，原文为structural crust，相当于现代意义的岩石圈。修改自Armstrong(1968)

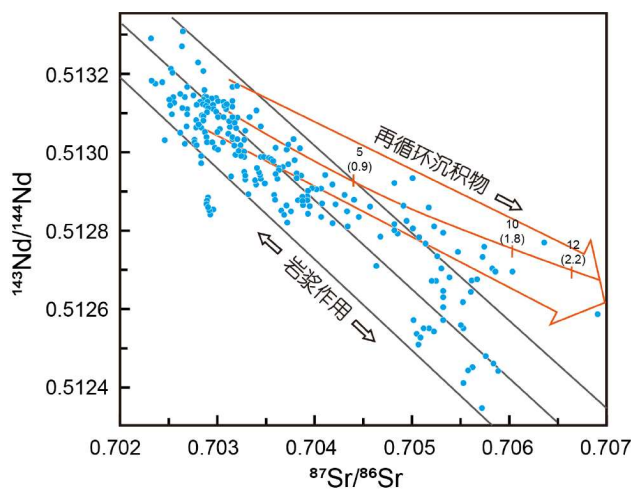


图5 大洋玄武岩Sr-Nd同位素组成变化。早期岩浆作用过程导致地幔的Rb/Sr和Sm/Nd比值发生变化，随时间演化形成Sr-Nd同位素的线性相关，而沉积物的加入则明显偏离该趋势。修改自White和Hofmann(1982)

球动力学研究上升到一个全新的高度，为审视地球内部物质循环过程提供了全新框架。在这一背景下，地球化学家们开始尝试将地幔地球化学与板块运动和地幔柱理论联系起来，探究“地幔化学不均一”的成因机制。Armstrong(1968)最早提出用“地壳再循环”来解释地幔的化学不均一性，这时的“地壳再循环”模型虽然还不够完

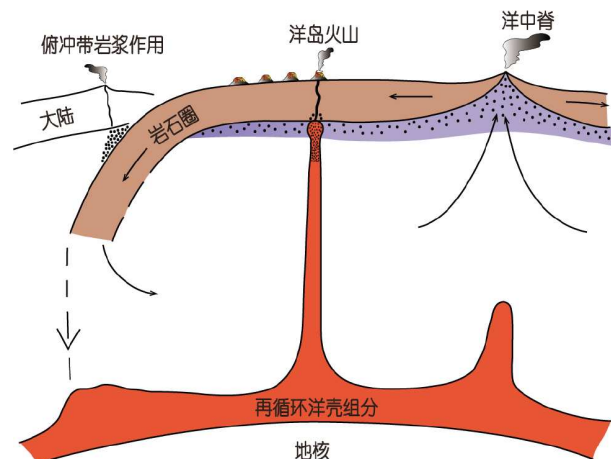


图6 洋壳俯冲及再循环模型图(俯冲的洋壳在深部相变为高密度的榴辉岩，沉入地幔后最终堆积于核幔边界。随着温度缓慢升高，这些物质会重新上涌形成地幔柱，并最终熔融，喷发出地表形成洋岛玄武岩)。修改自Hofmann和White(1982)

善，但已经具有了板块构造理论的“烙印”。Albrecht W. Hofmann和William M. White在融合板块构造理论和地幔柱模型的基础上，提出了全新的“地壳再循环”模型(Hofmann和White, 1982; White和Hofmann, 1982)。新模型不仅将地幔化学不均一性拓展到全地幔尺度，丰富了再循环地壳物质的多样性，提供了地幔化学不均一性的地质形成机制，而且为地幔柱上升提供了动力学解释。该模型后来得到越来越多的研究支持，比如在大洋玄武岩及其中的熔体包裹体中观察到的微量元素(Hofmann等, 1986; Dupuy等, 1987; Sobolev等, 2000)和同位素(如Dupré and Allègre, 1983; Graham等, 1992; Hauri和Hart, 1993; Saal等, 1998)的不均一特征，都可以由远洋沉积物、蚀变洋壳、大陆上地壳(陆源沉积物)等不同类型的再循环地表物质的贡献而产生。因此，上述三篇论文是构建“地壳再循环”理论模型的三篇经典论文，为理解地球各圈层之间的相互作用及物质循环过程提供了坚实的科学依据。

随着质谱技术的快速发展以及越来越多大洋玄武岩样品的地球化学数据的积累，地幔地球化学研究从“观测与建模”进入“系统归纳”的阶段。以Alan Zindler和Stanley Hart为代表的地球化学家系统地收集和梳理了全球大洋玄武岩的元素和放射成因同位素数据，并在此基础上定义了DMM、HIMU、EMI、EMII和PREMA五种地幔端元组分(Zindler等, 1982; Zindler和Hart, 1986)。这一分类体系提出了众多新的科学问题，推动了后续大量研究围绕地幔端元的成因机制、端元组分的时空分布等展开深入讨论，且这些研究将同位素地球化学与板块构造、地

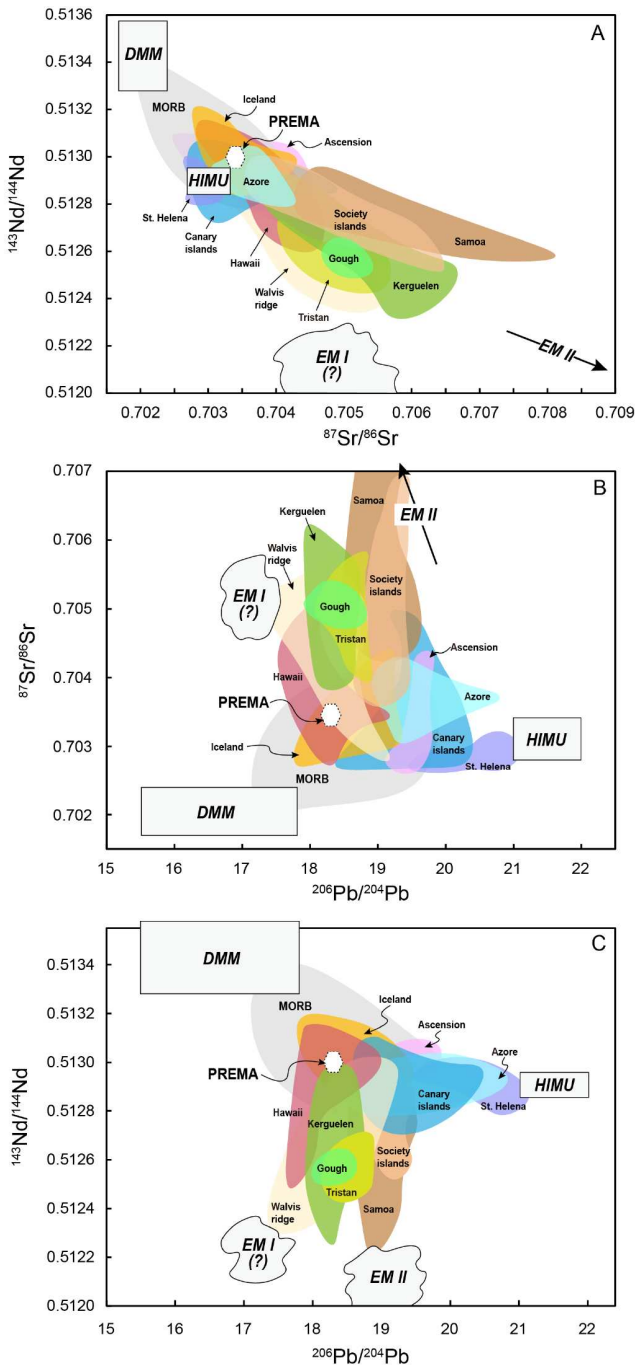


图7 全球大洋玄武岩Sr-Nd-Pb相关图。图中DMM、HIMU、EMI、EMII和PREMA为地幔端元，MORB为大洋中脊玄武岩，其余为洋岛/海山(链)名称。修改自Zindler和Hart(1986)

幔对流等地球动力学过程进行了有机整合(Chauvel等, 1992; Farley等, 1992; Graham等, 1992; Vidal, 1992; Hauri和Hart, 1993; Saal等, 1998)。这篇综述论文建立了一个可长期检验的全球尺度地幔地球化学与地球动力学紧密联系的框架, 是地幔地球化学学科在走向成熟的标志性论文。

5 经典延伸

这八篇经典论文奠定了地幔地球化学学科的基本框架, 但仍遗留若干关键问题有待进一步探究。首先, 地幔地球化学研究长期面临的关键难题在于直接来源于深部地幔的样品极度匮乏, 以玄武岩为代表的幔源岩石的代表性有局限性, 比如地幔部分熔融时难熔组分往往不熔, 不同组分来源的岩浆还会经历岩浆混合作用。而大洋橄榄岩样品虽然是地幔的直接样品, 但是新鲜大洋橄榄岩样品不仅不易获得, 而且在Sr、Nd、Pb等同位素的分析测试上难度大, 因此它们在地幔地球化学学科建立之初几乎没有贡献。此外, 由于担心大陆地壳混染的可能, 大陆板内玄武岩在地幔地球化学的经典理论中没有位置。所以, 地幔地球化学学科是在大洋玄武岩的同位素观察基础上创立的, 其全球代表性上有先天不足, 这不仅导致我们对地幔中的难熔组分和地幔过渡带的物质组成了解不够, 也让人们逐渐认识到经典模型在解释复杂的深部地幔过程时仍具有一定的局限性。但需要强调的是, 这8篇经典文献确立的研究框架起到了“定海神针”的作用, 是后续理论和模型发展的重要支点。正是在这一经典框架所奠定的坚实基础上, 以放射成因同位素为“格架”, 多种主量、微量元素与各类同位素相结合的分析观察为扎实的“填充”, 技术方法和理论模型的发展与突破, 以及研究思路的综合与多样化, 将地幔地球化学推向更精细、更系统的发展阶段。

在技术层面, 基于分析方法的飞速革新带来的“分辨率跃升, 维度拓展”, 为精细刻画深部地幔提供了核心驱动力。进入21世纪以来, 随着微区原位分析技术的突飞猛进, 对橄榄石斑晶中熔体包裹体和超深金刚石中矿物包裹体的原位地球化学分析成为可能, 开展了包括元素、挥发分和同位素在内的高精度地球化学分析(如Walter等, 2008; Sobolev等, 2019)。洋岛玄武岩中的S同位素非质量分馏的发现为古老的地壳物质进入深部地幔提供了明确证据(Delavault等, 2016), Mg、Fe和Zn等金属稳定同位素也被逐步应用于约束地幔端元的属性(如Wang等, 2018; Zhang等, 2022)。另一方面, 在大洋玄武岩中识别出以往未被发现的超亏损组分(Stracke等, 2019; Sanfilippo等, 2024), MORB中观测到的放射成因同位素的显著不均一性(Lambart等, 2019), 以及软流圈地幔中识别到的残余的古老难熔地幔(Liu等, 2022)都为重新理解壳幔相互作用机制和深部地幔演化提供了全新视角。

在理论模型层面, 新的数据和观察也使得一些早期认知发生了转变。例如, 除经典的俯冲作用外, 拆沉作用(delamination)(Kay和Kay, 1993; Gao等, 2004)和俯冲侵蚀作用(subduction erosion)(Straub等, 2020)同样能

将地壳物质携带至深部地幔，并贡献于地幔的不均一性。此外，对经典洋岛玄武岩(如Hawaii、Samoan等)的高精度放射成因同位素研究已经将地幔柱从理想的均质热异常柱体(Morgan, 1971)量化为了具有复杂化学结构的多组分地幔柱(如Abouchami等, 2005; Huang等, 2011; Jackson等, 2014)。玄武岩中显著的W同位素异常表明，下地幔底部还可能保留了地球早期分异的原始地幔物质或存在核幔相互作用(如Mundl等, 2017)。对地幔端元的成因认识也发生了转变。以HIMU为例，从早期认为其直接代表古老的再循环洋壳(如Chauvel等, 1992)，逐渐发展为强调再循环洋壳产生的熔体交代地幔橄榄岩并演化为HIMU组分这一模型(如Weiss等, 2016; Zhang等, 2022)。一些早期研究中被忽视的话题如碳酸盐在深部地幔中的化学效应也有了启发性的思考和回答(Chen等, 2022)。

当前，地幔地球化学与不同学科之间的交叉融合，也日益成为推动相关前沿科学问题不断发展的有效途径。例如，地球物理观测揭示，绝大多数地幔柱似乎都直接或间接起源于南太平洋和非洲大陆下方的两个大型低剪切波速省(Large Low Shear Velocity Provinces, LLSVP; 如French和Romanowicz, 2015)。此外，在上地幔(~200 km)具有低的地震波速异常的热点区域通常具有更高的热浮力，能够携带下地幔具有高 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值的原始地幔物质(Jackson等, 2017)。尽管LLSVP的确切成因仍有争议，这些发现仍为理解地幔柱的物质和动力学起源提供了新视角。同时，高温高压实验构建了“实验室中的深部地球”，成为解读天然样品信息的关键钥匙。基于实验熔体的化学特征与和矿物分配系数研究揭示，洋岛玄武岩的地幔源区常含有辉石岩或榴辉岩，而非单一的橄榄岩。这一发现不仅从全岩主量元素和矿物微量元素组成的双重视角为地壳再循环模型提供了坚实支撑，而且实现了对地幔物质组成的刻画从化学不均一上升到岩性不均一的高度，深化了固体地球科学界对地幔柱物质组成和动态演化的理解(Sobolev等, 2005; Herzberg, 2006)。因此，多学科间的交叉验证已成为推动地幔地球化学发展的核心方法。这种深度融合不仅拓展了其研究疆域，更使其影响力超越了深部地球的范畴，在地球系统多圈层相互作用以及行星形成演化等新兴研究领域发挥着越来越重要的作用。

6 结语

地幔地球化学的发展从初期的数据积累、观察和解释，到提出假设并最终建立完整的理论框架只用了短短的十余年时间，但其相关的研究内容时至今日仍旧对深

部地球探索具有指导意义。从现代地球系统科学的视角审视，地幔地球化学的核心内容之所以被地球科学家们普遍接受，关键在于其与板块构造理论和地幔柱模型达成了有机整合。这些理论之间并非简单的从属或独立关系，而是通过物质循环与动力学过程的相互耦合，共同构筑了现代地球系统科学的重要组成部分。板块俯冲将地壳物质带入深部地幔，地幔对流驱动板块运动，而俯冲的再循环物质不仅改变核幔边界的物质组成，还可以通过地幔柱上涌形成热点火山，这些过程不断重塑地幔的物质和化学组成。正是对这些问题的长期探索，使得地幔地球化学长期以来都处于固体地球和行星科学领域的最前沿，并不断取得日新月异的进展。

地幔地球化学正迈入一个全新的发展阶段。随着高精度分析技术的不断突破，研究范式正逐渐从定性描述转向定量约束，使得我们能够更精确地揭示地幔组成与演化过程。与此同时，挥发分(如水、碳、硫和卤素等)在深部物质循环中的作用日益凸显，成为理解地球内部动力学和元素迁移的关键。多学科交叉与理论融合的不断深入，将进一步推动对地球乃至整个行星系统形成与演化的全面认识。随着探测手段的革新与数据资源的整合，地幔地球化学将与地球物理、行星科学等学科更紧密协同，共同揭示从地球深部到类地行星演化的普遍规律，最终在理解生命宜居环境的形成与演化中发挥关键作用。

参考文献

- 黄士春, 郑永飞. 2017. 地幔地球化学: 洋岛玄武岩制约. 中国科学: 地球科学, 47: 1125–1152
- 冷伟, 朱沛荣. 2025. 地幔柱模型的诞生与发展. 中国科学: 地球科学, 55: 3552–3558
- 徐义刚, 黄小龙, 王强, 等. 2024. 地球宜居性的深部驱动机制. 科学通报, 69: 169–183
- 郑永飞. 2023. 21世纪板块构造. 中国科学: 地球科学, 53: 1–40
- 郑永飞, 郭正堂, 焦念志, 等. 2024. 地球系统科学研究态势. 中国科学: 地球科学, 54: 3065–3090
- 郑永飞, 李振新. 2025. 板块构造理论的诞生. 中国科学: 地球科学, 55: 2104–2110
- Abouchami W, Hofmann A W, Galer S J G, et al. 2005. Lead isotopes reveal bilateral asymmetry and vertical continuity in the Hawaiian mantle plume. *Nature*, 434: 851–856
- Armstrong R L. 1968. A model for the evolution of strontium and lead isotopes in a dynamic Earth. *Rev Geophys*, 6: 175–199
- Basu A R, Tatsumoto M. 1980. Nd-isotopes in selected mantle-derived rocks and minerals and their implications for mantle evolution. *Contr Mineral Petrol*, 75: 43–54
- Brooks C, Hart S R, Hofmann A, et al. 1976. Rb-Sr mantle isochrons from oceanic regions. *Earth Planet Sci Lett*, 32: 51–61
- Chauvel C, Hofmann A W, Vidal P. 1992. himu-em: The French Polynesian connection. *Earth Planet Sci Lett*, 110: 99–119
- Chen L H, Wang X J, Liu S A. 2022. Probing recycled carbonate in the

- lower mantle. *Natl Sci Rev*, 9: NWAC061
- Delavault H, Chauvel C, Thomassot E, et al. 2016. Sulfur and lead isotopic evidence of relic Archean sediments in the Pitcairn mantle plume. *Proc Natl Acad Sci USA*, 113: 12952–12956
- DePaolo D J, Wasserburg G J. 1976. Nd isotopic variations and petrogenetic models. *Geophys Res Lett*, 3: 249–252
- Dupré B, Allègre C J. 1983. Pb-Sr isotope variation in Indian Ocean basalts and mixing phenomena. *Nature*, 303: 142–146
- Dupuy C, Vidal P, Barszcz H G, et al. 1987. Origin of basalts from the Marquesas Archipelago (south central Pacific Ocean): Isotope and trace element constraints. *Earth Planet Sci Lett*, 82: 145–152
- Farley K A, Natland J H, Craig H. 1992. Binary mixing of enriched and undegassed (primitive?) mantle components (He, Sr, Nd, Pb) in Samoan lavas. *Earth Planet Sci Lett*, 111: 183–199
- French S W, Romanowicz B. 2015. Broad plumes rooted at the base of the Earth's mantle beneath major hotspots. *Nature*, 525: 95–99
- Gao S, Rudnick R L, Yuan H L, et al. 2004. Recycling lower continental crust in the North China craton. *Nature*, 432: 892–897
- Gast P W, Tilton G R, Hedge C. 1964. Isotopic composition of lead and strontium from Ascension and Gough Islands. *Science*, 145: 1181–1185
- Graham D W, Humphris S E, Jenkins W J, et al. 1992. Helium isotope geochemistry of some volcanic rocks from Saint Helena. *Earth Planet Sci Lett*, 110: 121–131
- Hart S R. 1984. A large-scale isotope anomaly in the Southern Hemisphere mantle. *Nature*, 309: 753–757
- Hart S R, Schilling J G, Powell J L. 1973. Basalts from Iceland and along the Reykjanes Ridge: Sr isotope geochemistry. *Nat Phys Sci*, 246: 104–107
- Hauri E H, Hart S R. 1993. ReOs isotope systematics of HIMU and EMII oceanic island basalts from the south Pacific Ocean. *Earth Planet Sci Lett*, 114: 353–371
- Hawkesworth C J, Norry M J, Roddick J C, et al. 1979. $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios from the Azores and their significance in LIL-element enriched mantle. *Nature*, 280: 28–31
- Hedge C E, Walthall F G. 1963. Radiogenic strontium-87 as an index of geologic processes. *Science*, 140: 1214–1217
- Herzberg C. 2006. Petrology and thermal structure of the Hawaiian plume from Mauna Kea volcano. *Nature*, 444: 605–609
- Hofmann A W. 1997. Mantle geochemistry: The message from oceanic volcanism. *Nature*, 385: 219–229
- Hofmann A W, Jochum K P, Seufert M, et al. 1986. Nb and Pb in oceanic basalts: New constraints on mantle evolution. *Earth Planet Sci Lett*, 79: 33–45
- Hofmann A W, White W M. 1982. Mantle plumes from ancient oceanic crust. *Earth Planet Sci Lett*, 57: 421–436
- Huang S, Hall P S, Jackson M G. 2011. Geochemical zoning of volcanic chains associated with Pacific hotspots. *Nat Geosci*, 4: 874–878
- Jackson M G, Hart S R, Konter J G, et al. 2014. Helium and lead isotopes reveal the geochemical geometry of the Samoan plume. *Nature*, 514: 355–358
- Jackson M G, Konter J G, Becker T W. 2017. Primordial helium entrained by the hottest mantle plumes. *Nature*, 542: 340–343
- Kay R W, Kay S M. 1993. Delamination and delamination magmatism. *Tectonophysics*, 219: 177–189
- Kurz M D, Jenkins W J, Hart S R. 1982. Helium isotopic systematics of oceanic islands and mantle heterogeneity. *Nature*, 297: 43–47
- Lambart S, Koornneef J M, Millet M A, et al. 2019. Highly heterogeneous depleted mantle recorded in the lower oceanic crust. *Nat Geosci*, 12: 482–486
- Liu C Z, Dick H J B, Mitchell R N, et al. 2022. Archean cratonic mantle recycled at a mid-ocean ridge. *Sci Adv*, 8: eabn6749
- Morgan W J. 1971. Convection plumes in the lower mantle. *Nature*, 230: 42–43
- Mundl A, Touboul M, Jackson M G, et al. 2017. Tungsten-182 heterogeneity in modern ocean island basalts. *Science*, 356: 66–69
- O'Nions R K, Hamilton P J, Evensen NM. 1977. Variations in $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios in oceanic basalts. *Earth Planet Sci Lett*, 34: 13–22
- Richard P, Shimizu N, Allègre C J. 1976. $^{143}\text{Nd}/^{146}\text{Nd}$, a natural tracer: An application to oceanic basalts. *Earth Planet Sci Lett*, 31: 269–278
- Saal A E, Hart S R, Shimizu N, et al. 1998. Pb isotopic variability in melt inclusions from oceanic island basalts, polynesia. *Science*, 282: 1481–1484
- Sanfilippo A, Stracke A, Genske F, et al. 2024. Upwelling of melt-depleted mantle under Iceland. *Nat Geosci*, 17: 1046–1052
- Schilling J G. 1975. Azores mantle blob: Rare-earth evidence. *Earth Planet Sci Lett*, 25: 103–115
- Sobolev A V, Hofmann A W, Nikogosian I K. 2000. Recycled oceanic crust observed in 'ghost plagioclase' within the source of Mauna Loa lavas. *Nature*, 404: 986–990
- Sobolev A V, Hofmann A W, Sobolev S V, et al. 2005. An olivine-free mantle source of Hawaiian shield basalts. *Nature*, 434: 590–597
- Sobolev A V, Asafov E V, Gurenko A A, et al. 2019. Deep hydrous mantle reservoir provides evidence for crustal recycling before 3.3 billion years ago. *Nature*, 571: 555–559
- Stracke A, Genske F, Berndt J, et al. 2019. Ubiquitous ultra-depleted domains in Earth's mantle. *Nat Geosci*, 12: 851–855
- Straub S M, Gómez-Tuena A, Vannucchi P. 2020. Subduction erosion and arc volcanism. *Nat Rev Earth Environ*, 1: 574–589
- Sun S S, Hanson G N. 1975. Evolution of the mantle: Geochemical evidence from alkali basalt. *Geology*, 3: 297–302
- Tatsumoto M, Hedge C E, Engel A E J. 1965. Potassium, rubidium, strontium, thorium, uranium, and the ratio of strontium-87 to strontium-86 in oceanic tholeiitic basalt. *Science*, 150: 886–888
- Tatsumoto M. 1978. Isotopic composition of lead in oceanic basalt and its implication to mantle evolution. *Earth Planet Sci Lett*, 38: 63–87
- Vidal P. 1992. Mantle: More HIMU in the future? *Geochim Cosmochim Acta*, 56: 4295–4299
- Walter M J, Bulanova G P, Armstrong L S, et al. 2008. Primary carbonatite melt from deeply subducted oceanic crust. *Nature*, 454: 622–625
- Wang X J, Chen L H, Hofmann A W, et al. 2018. Recycled ancient ghost carbonate in the Pitcairn mantle plume. *Proc Natl Acad Sci USA*, 115: 8682–8687
- Weiss Y, Class C, Goldstein S L, et al. 2016. Key new pieces of the HIMU puzzle from olivines and diamond inclusions. *Nature*, 537: 666–670
- White W M, Hofmann A W. 1982. Sr and Nd isotope geochemistry of oceanic basalts and mantle evolution. *Nature*, 296: 821–825
- White W M, Schilling J G. 1978. The nature and origin of geochemical variation in Mid-Atlantic Ridge basalts from the Central North Atlantic. *Geochim Cosmochim Acta*, 42: 1501–1516
- Wood D A. 1979. A variably veined suboceanic upper mantle—Genetic significance for mid-ocean ridge basalts from geochemical evidence. *Geology*, 7: 499–503
- Zhang X Y, Chen L H, Wang X J, et al. 2022. Zinc isotopic evidence for recycled carbonate in the deep mantle. *Nat Commun*, 13: 6085
- Zindler A, Hart S. 1986. Chemical geodynamics. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 14: 493–571
- Zindler A, Jagoutz E, Goldstein S. 1982. Nd, Sr and Pb isotopic systematics in a three-component mantle: A new perspective. *Nature*, 298: 519–523

(责任编辑: 郑永飞)