

非传统稳定同位素在碳酸岩研究中的应用

孙 源

桂林理工大学地球科学学院, 广西 桂林

收稿日期: 2024年3月7日; 录用日期: 2024年4月17日; 发布日期: 2024年4月25日

摘 要

非传统稳定同位素高精度测试技术的快速发展, 为非传统稳定同位素在碳酸岩来源方面的研究提供了全新的技术手段。越来越多的学者通过结合非传统稳定同位素, 如Mg、Ce、B同位素来探讨碳酸岩研究中的相关问题。研究通过使用Neptune MC-ICP-MS, TIMS, Nu Plasma II MC-ICP-MS等仪器对不同研究区碳酸岩的非传统稳定同位素组成特征进行讨论分析, 得到了Mg同位素特征在研究碳酸岩的来源和形成过程中的重要指示意义, Ce同位素在证明大洋碳酸岩母岩浆主要来源于再循环碳酸盐中的重要作用。B同位素与Sr-Nd-Pb同位素体系结合在有效识别碳酸岩的地幔组织组成中的重要作用。同位素实验证据都表明, 碳酸岩的来源是地幔, 且与地幔柱活动有时间及空间上的联系。

关键词

碳酸岩, 来源, 地幔, 非传统稳定同位素

Application of Non-Traditional Stable Isotopes in Carbonate Rock Research

Yuan Sun

School of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin Guangxi

Received: Mar. 7th, 2024; accepted: Apr. 17th, 2024; published: Apr. 25th, 2024

Abstract

The rapid development of high-precision testing techniques for non-traditional stable isotopes has provided a new technological means for the study of non-traditional stable isotopes in carbonate rock sources. More and more scholars are exploring related issues in carbonate rock research by combining non-traditional stable isotopes such as Mg, Ce, and B isotopes. This study discussed and analyzed the non-traditional stable isotope composition characteristics of carbonate rocks in different study areas using instruments such as Neptune MC-ICP-MS, TIMS, and NuP-

文章引用: 孙源. 非传统稳定同位素在碳酸岩研究中的应用[J]. 地球科学前沿, 2024, 14(4): 419-428.

DOI: 10.12677/ag.2024.144039

lasma IIMC-ICP-MS. The important indicative significance of Mg isotope characteristics in studying the source and formation process of carbonate rocks was obtained, and Ce isotopes played an important role in proving that the parent magma of oceanic carbonate rocks mainly originates from recycled carbonates. The combination of B isotopes and Sr-Nd-Pb isotope systems plays an important role in effectively identifying the mantle tissue composition of carbonate rocks. Isotope experimental evidence indicates that carbonate rocks originate from the mantle and are spatially and temporally related to mantle plume activity.

Keywords

Carbonate Rock, Source, Mantle, Unconventional Stable Isotope

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

碳酸岩，是指碳酸盐矿物体积大于 50%， SiO_2 含量小于 20% 的火成岩，其地球化学特征不同于常见的沉积成因的碳酸盐岩。通常将沉积成因的主要由碳酸盐矿物组成的岩石称为碳酸盐岩，而将由岩浆形成的主要由碳酸盐矿物组成的岩石称为碳酸岩。碳酸岩是地球表面出露很少的幔源岩石之一，其形成和分布常受深大断裂控制。全球范围内，碳酸岩主要分布在大陆板内环境(如加拿大、东非等地区)、大洋板内环境(非洲西部佛得角以及南印度洋等地区)、造山环境中的强烈伸展地带(如中国攀西地区等)。绝大多数碳酸岩最明显的特征是在其岩浆通过的围岩中发生霓长岩化作用。

经历半个多世纪研究，人们意识到对碳酸岩的认识具有非常重要的意义：碳酸岩形成于地下至少 70 km 处的低程度部分熔融，在所有火成岩中具有最高的不相容元素(如 Rb、Sr、U、Th、Ba、Nb、REE)含量，可以缓冲地壳混染，是研究地幔的“探针”岩石；碳酸岩在大陆地壳中普遍存在，从太古宙到现今均有产出，可以研究地幔源区的长期演化；碳酸岩在空间上常与碱性硅酸岩共生，产于许多大陆溢流玄武岩省中，也与地幔柱的形成密切相关；碳酸岩是引起地幔交代作用和地幔地球化学不均一性的重要介质之一；碳酸岩主要由碳酸盐矿物组成，这意味着其岩石学成因与地球内部碳循环密切相关，是研究地球内部碳循环的重要岩石[1]。因此对碳酸岩的研究具有重要的理论意义和实际意义，对于这类岩石的研究也已经成为最新的国际热点之一。

近些年来，碳酸岩的成因研究迅速发展，特别是在同位素研究方面取得了许多重要进展和新认识。本文探讨了非传统稳定同位素，如 Mg、Ce、B 同位素，对探讨碳酸岩熔体的来源的重要指示意义。目前同位素证据显示，碳酸岩熔体是岩石圈与软流圈的交换作用产生的，但这种交换作用下地幔还是岩石圈与下地幔混合源区还尚不清楚。同位素及实验岩石学证据表明，碳酸岩的来源是地幔，且与地幔柱活动有时间及空间上的联系。但是对于碳酸岩熔体来源于何种组分及深度的地幔，沉积碳酸盐岩随板块俯冲进入地幔对火成碳酸岩熔体的贡献有多大，以及沉积碳酸盐岩循环进入地幔参与碳酸岩熔体形成的循环时间等问题尚不明确，未来还需不断探索新技术方法，以进行深入研究。

2. Mg 同位素

碳酸岩源区的研究一直都是一个棘手的问题。源区的性质主要根据同位素特征来判定，由于 Mg 同

位素在俯冲过程的交代脱水以及岩浆活动分馏微弱，因此被广泛应用于指示再循环沉积物的特征。总结前人对塔里木大火山岩省中碳酸岩的研究发现，Mg 同位素组成对碳酸岩的来源具有十分重要的意义[2]。

2.1. 分析测试方法

Mg 元素包括三种同位素，分别为 ^{24}Mg 、 ^{25}Mg 和 ^{26}Mg 。其中， ^{24}Mg 和 ^{26}Mg 的相对质量差异较大，达到 8.33%。这种质量差异导致在地壳活动或其他地质过程中，Mg 同位素会受化学和物理条件改变的影响而发生明显的同位素分馏。目前，自然界观测到的 $\delta^{26}\text{Mg}$ 范围约为 -5.60‰ 至 0.92‰，相差约 6.5‰。Mg 同位素在低温地球化学过程中表现出明显的分馏效应，而在高温环境下的分馏则并不显著。因此，Mg 同位素常被用作地质过程的地球化学指标和示踪剂，在低温风化、高温熔融、岩浆结晶、变质作用、板块俯冲、热液作用和矿床成因等方面有重要应用。

Mg 同位素分析是利用 Neptune MC-ICP-MS，Mg 同位素分析结果用相对于标准物质 DSM3 的千分偏差来表示：

$$\delta^X\text{Mg} = \left[\left(\frac{X\text{Mg}}{^{24}\text{Mg}} \right)_{\text{sample}} / \left(\frac{X\text{Mg}}{^{24}\text{Mg}} \right)_{\text{DSM3}} - 1 \right] \times 1000$$

其中， $\delta^X\text{Mg}$ 表示 Mg 同位素相对于标准物质 DSM3 的千分偏差， $(X\text{Mg}/^{24}\text{Mg})_{\text{sample}}$ 表示样品中 Mg 同位素相对 ^{24}Mg 的相对丰度， $(X\text{Mg}/^{24}\text{Mg})_{\text{DSM3}}$ 表示标准物质 DSM3 中 Mg 同位素相对 ^{24}Mg 的相对丰度。该公式可用于计算 Mg 同位素在样品中相对于标准物质的偏差，以评估样品中 Mg 同位素比例的变化情况。

对塔里木大火山岩省中碳酸岩 Mg 同位素组成分析结果如下(图 1)。

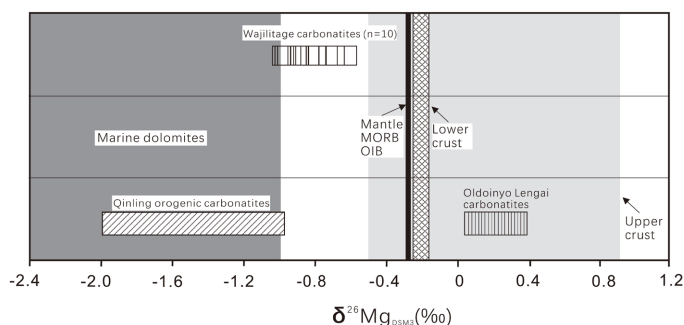


Figure 1. Mg isotope composition of Tarim Carbonate rocks

图 1. 塔里木碳酸岩 Mg 同位素组成

2.2. 结果分析与讨论

分析结果显示，塔里木碳酸岩中方解石和白云石单矿物的 Mg 同位素组成与典型原生幔源岩石相比，具有低 $\delta^{26}\text{Mg}_{\text{DSM3}}$ 的数值(图 1)。由于橄榄石与辉石之间，橄榄石与碳酸盐岩之间，以及地幔部分熔融和铁镁质硅酸盐的分离结晶都没有明显的 Mg 同位素分馏，因此这些轻的镁同位素组分不是来源于未经改造的原始地幔源。虽然硅酸盐与碳酸盐流体不混溶过程、分离结晶过程、地壳混作用、次生流体(例海水，变质水)等都有可能影响碳酸岩中镁同位素组成，但是结合塔里木碳酸岩 $\delta^{26}\text{Mg}$ 的变化范围、 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 的数值以及微量元素特征，认为俯冲再循环的地壳碳酸盐岩组分是塔里木幔源碳酸岩中轻的镁同位素特征的来源。塔里木碳酸岩的镁同位素组成与海相碳酸盐的镁同位素组成接近，由于镁同位素在俯冲过程中分馏微弱，因此在俯冲过程保留了原始镁同位素组成特征。

塔里木碳酸岩中独居石 Th-Pb 定年显示 $266 \pm 5.3 \text{ Ma}$ ，地幔柱活动主阶段晚 10~20 Ma。Campbell and Griffiths 认为地幔柱岩浆活动持续的时间为 2~3 Ma，在此之后的 5~10 Ma 会伴随小体积的地幔熔融作

用[3]。塔里木碳酸岩显示出与早期形成的玄武岩和苦橄岩不同的($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i以及 ϵNd 值(图 2), 表明它们的母岩浆并不来源于同一地幔储层。碳酸岩来源于具有低($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 和高 ϵNd 特征的亏损地幔。

碳酸岩的 Mg 同位素组成特征表明, 海相沉积物是碳酸岩浆的重要来源。碳酸岩的 Sr-Nd 同位素特征具有亏损地幔的特征, 结合碳酸岩与泛流玄武岩的形成时代, 可以推断塔里木碳酸岩来源于上升地幔柱与沉积物减压熔融并与亏损地幔混合产生的熔体。

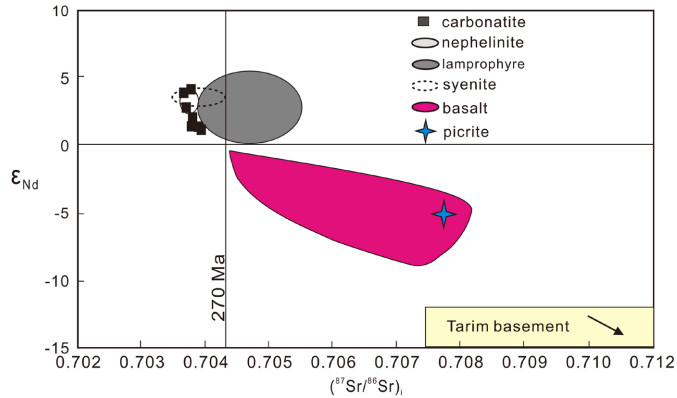


Figure 2. Sr-Nd isotope diagram of Tarim carbonate rocks and Tarim LIP igneous rocks
图 2. 塔里木碳酸岩与塔里木 LIP 火成岩 Sr-Nd 同位素图解

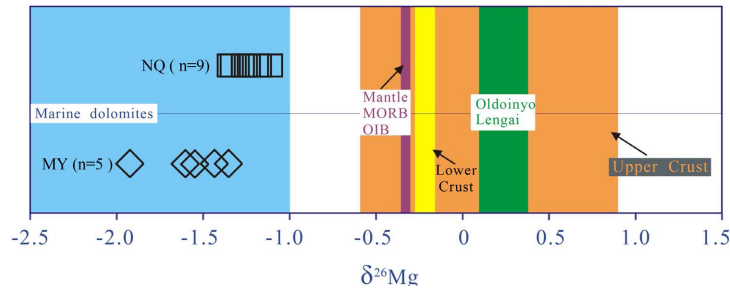


Figure 3. Mg isotope composition of carbonate rocks in the northernmost and southernmost parts of the Qinling orogenic belt
图 3. 秦岭造山带最北部和最南部碳酸岩的 Mg 同位素组成

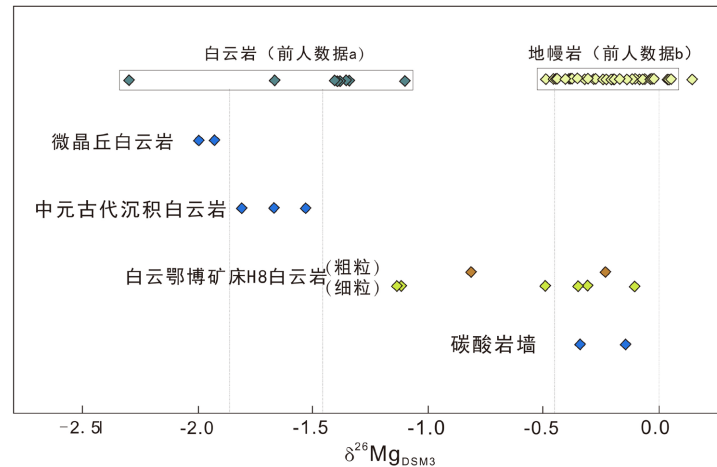


Figure 4. Mg isotope composition of samples from Bayan Obo deposit
图 4. 白云鄂博矿床样品 Mg 同位素组成

结合前人研究结果发现,塔里木地区出现蓝片岩相变质岩,暗示曾发生俯冲事件。在俯冲过程中,碳酸盐沉积物可再循环至地幔深处并发生熔融,有可能生成碳酸岩熔体。然而,该地区碳酸岩的 Sr-Nd 同位素特征没有体现俯冲沉积物的特征,而更类似于菱镁矿的特征。此外,碳酸岩的镁同位素组成表明海相沉积物是其重要来源[4]。另一项在秦岭造山带对碳酸岩的 Mg 同位素的研究结果则表明了低 $\delta^{26}\text{Mg}$ 的特征(图 3),暗示碳酸岩来源包含沉积岩组分[5]。前人对白云鄂博地区的赋矿白云岩的研究则表现为, Mg 同位素组成落在地幔岩端元附近(图 4),这表明由地幔来源,受海水影响等因素造成其与典型碳酸岩不一致。这些研究同样揭示了碳酸岩的 Mg 同位素特征对其来源和形成过程具有重要指示意义[6] [7]。

综上所述,不同地区碳酸岩的 Mg 同位素组成受各地构造背景影响不同,塔里木地区受岩石圈俯冲和亏损地幔影响,而白云鄂博地区受成矿作用和海水影响。这些研究为了解碳酸岩形成与演化过程提供了重要线索。Sr-Nd 同位素虽然在研究碳酸岩来源方面应用广泛,但是对于指示碳酸岩熔体的具体来源方面(地幔柱活动结果还是其他地幔扰动,如岩石圈拆沉)还存在不足。可以通过对碳酸岩 Mg 同位素研究并结合矿物学、年代学、大地构造等方面的分析,对碳酸岩的来源问题的研究具有一定的指示意义。

3. Ce 同位素

Ce 同位素在地球化学研究当应用不多,在碳酸岩来源研究方面应用更少。结合前人的研究,通过模拟地幔储层和再循环碳酸盐中的 Ce-Nd 同位素组成,与 Cape Verde 和 Canary 群岛以及 Tamazert 的大洋碳酸岩的 Ce-Nd 同位素组成特征进行对比,进而指示大洋碳酸岩的来源[8]。

3.1. 分析测试方法

Ce 元素包括四种同位素,分别为 ^{136}Ce (0.185%)、 ^{138}Ce (0.251%)、 ^{140}Ce (88.45%)、 ^{142}Ce (11.11%),它们的丰度相差悬殊。

铈稳定同位素组成一般用 $\delta^{142}\text{Ce}$ 来表示,单位为‰。 $\delta^{142}\text{Ce}$ 的计算公式为:

$$\delta^{142}\text{Ce} = \left(\left[\frac{(^{142}\text{Ce}/^{140}\text{Ce})_{\text{sample}}}{(^{142}\text{Ce}/^{140}\text{Ce})_{\text{standard}}} \right] - 1 \right) \times 1000 \quad [9]$$

铈放射成因同位素组成一般用 $\epsilon^{138}\text{Ce}$ 来表示。 $\epsilon^{138}\text{Ce}$ 的计算公式为:

$$\epsilon^{138}\text{Ce} = \left(\left[\frac{(^{138}\text{Ce}/^{142}\text{Ce})_{\text{sample}}}{(^{138}\text{Ce}/^{142}\text{Ce})_{\text{standard}}} \right] - 1 \right) \times 10000 \quad [10] [11]$$

当前 Ce 同位素主要利用热电离质谱 TIMS (Thermal Ionization Mass Spectrometry, 热离子化质谱法)进行测量,测试过程需要利用高纯度标准溶液去进行标样 - 样品交叉测试,并进行后期的铈同位素校正。

TIMS 将 Ce 同位素的数据记录分析得到:

$$^{138}\text{Ce}/^{142}\text{Ce} = 0.0225747 \pm 0.0000010 (2\text{sd}, n = 53)$$

3.2. 结果分析与讨论

3.2.1. 模拟 D''层 Ce 和 Nd 的同位素

地幔层的稀土分布不能通过对地表岩石的直接观测得来,尤其是 D''层。因此也无法得到 D''层的 Ce 和 Nd 的同位素组成。为了确定地幔层 Ce 和 Nd 的同位素组成,建立了地幔层模型(图 5)。他认为,地幔经历了两个阶段的演化:1) 地幔在 45.68 亿年前开始演化,主要为球粒陨石成分;2) 45.18 亿年前地幔经历了全球性的分异事件,产生不相容元素富集地幔层(EER)和亏损地幔层(EDR),从 45.18 亿年前到现今,大陆地壳的持续增生导致早期亏损不相容元素的地幔层(EDR)又持续亏损形成 DMM 层,而早期富集不相容元素的地幔层(EER)一致保持在地幔底部,对应于现今的 D''层。

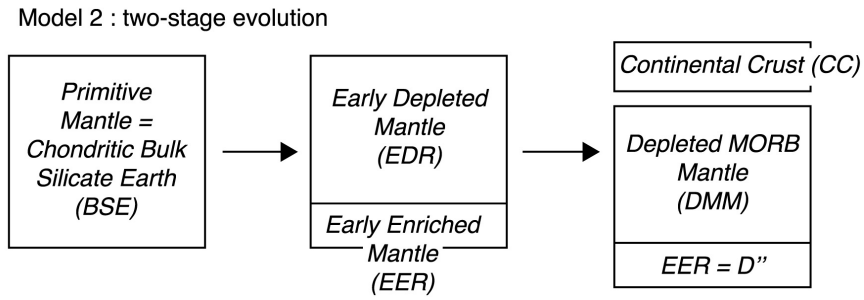


Figure 5. Schematic diagram of various reservoir models in the mantle
 图 5. 地幔各储层模型示意图

利用 MORB 的 Nd 同位素组成和大陆地壳的 REE 含量，计算 W^{Nd} 富硅铝指数以及从早期亏损地幔 (EDR) 分异的大陆地壳的质量分数和 EDR。计算得到 EDR 占地幔质量的 97%，EER 也即 D'' 层位 3%。进而得到 EER (D'' 层) 的 ϵ_{Ce} 和 ϵ_{Nd} 的值。

3.2.2. 模拟循环洋壳和海相碳酸盐的 Ce 和 Nd 的同位素组成

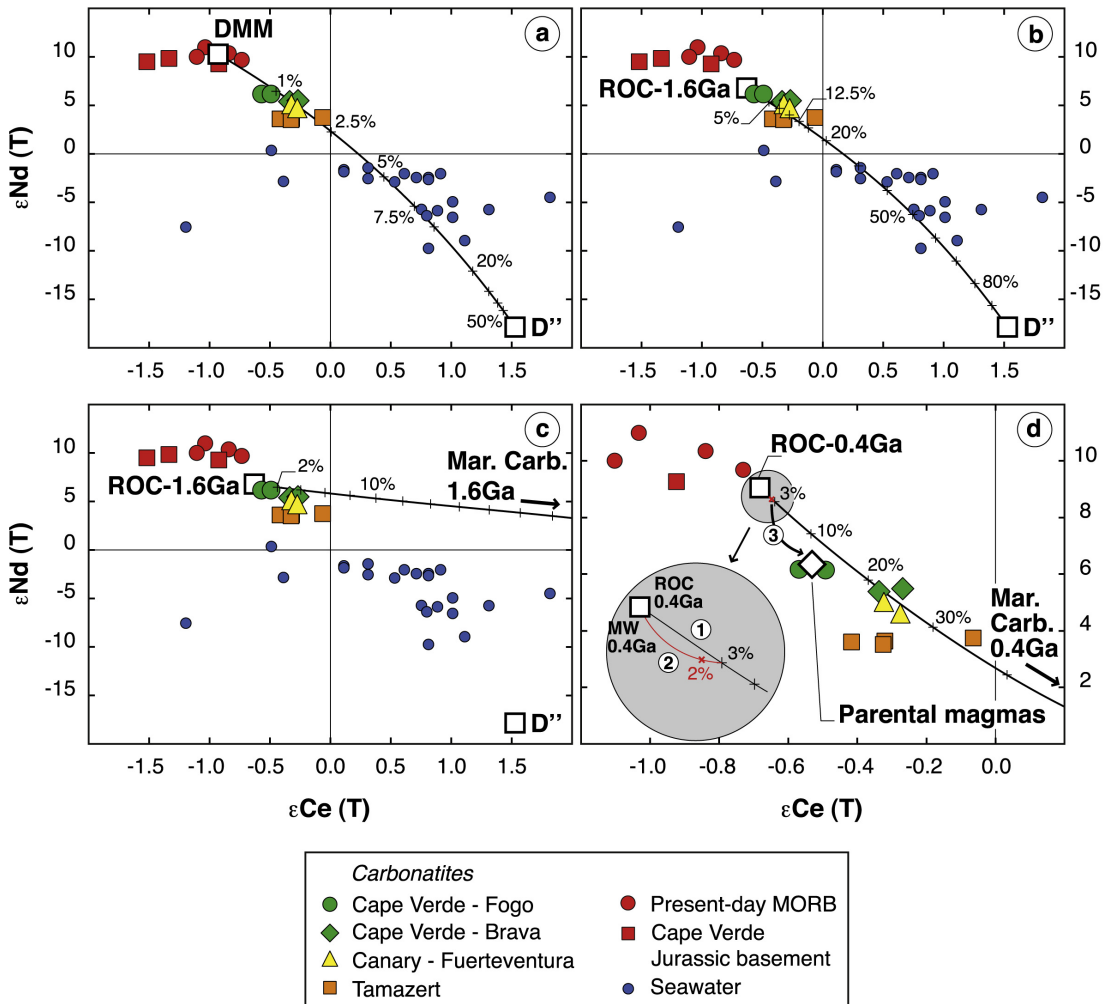


Figure 6. Carbonate rock, marine carbonate, recycled oceanic crust, DMM layer and D'' layer ϵ_{Ce} - ϵ_{Nd} diagram
 图 6. 碳酸岩、海相碳酸盐、再循环洋壳、DMM 层与 D'' 层 ϵ_{Ce} - ϵ_{Nd} 图解

研究结果表明循环海相碳酸盐的同位素组成与海水随时间变化的同位素组成近似, 由此得到了对应 400 Ma 海相碳酸盐的 $\epsilon\text{Nd} = -3.4$, 1.6 Ga 海相碳酸盐的 $\epsilon\text{Nd} = -15.3$ 。海水 Ce 和 Nd 的同位素组成来源于大陆地壳的输入和海底火山的风化。通过计算分析 400 Ma 和 1.6 Ga 组成海水 ϵNd 数值的质量分数, 进而得出 ϵCe 。得到了 400 Ma 海相碳酸盐的 $\epsilon\text{Ce} = +13.7$, 1.6 Ga 海相碳酸盐的 $\epsilon\text{Ce} = +45.5$ 。结果发现模拟出的 ϵCe 高于浅层海水和深层海水。因为在海洋环境下, Ce 被氧化为不溶的 Ce^{4+} , 从海水中析出。因此导致了海相沉积物大的 La/Ce 分馏特征, Ce 同位素比值随时间推移而发生变化[12]。

对于浅循环模式, 400 Ma 的蚀变洋壳的 REE 含量是由部分熔融所致, $\epsilon\text{Ce} = -0.7$, $\epsilon\text{Nd} = +10$ 。对于深循环模式, 1.6 Ga 洋壳的 REE 含量与大洋中脊玄武岩的 REE 含量近似, $\epsilon\text{Ce} = -0.6$, $\epsilon\text{Nd} = +6.7$ 。

结合前人得到的 Cape Verde 的碳酸岩中氢的 R/Ra 的值, 表明存在低 R/Ra 的物质加入导致母岩浆 R/Ra 的值降低[13]。软流圈地幔和大洋岩石圈有类似 DMM 的同位素组成和低的 R/Ra 值。通过不同端元组分的混合, 模拟碳酸岩母岩浆的来源。综合分析 Ce-Nd 同位素的混合比例、R/Ra 的数值、C 的数据等, 得到碳酸岩母岩浆更多来源于再循环碳酸盐(图 6(c、d)), 包括蚀变洋壳, 海相碳酸钙和次生碳酸钙。因为再循环碳酸盐中有适当的 C 含量, 能产生足以到达地表的碳酸岩熔体; R/Ra 的值与钙质碳酸岩一致。这也说明碳酸岩浆中的碳来源于再循环的碳, 而并非都为地幔原始碳。

通过对不同地幔层以及再循环碳酸盐的 Ce 和 Nd 同位素对比, 得到大洋碳酸岩母岩浆主要来源于再循环碳酸盐(包括洋壳和海相碳酸盐)。再循环碳酸盐将碳带入地幔, 成为构成碳酸岩浆的重要碳来源, 是地球碳循环的重要过程。

4. B 同位素

硼是一个具有中等挥发分, 质量较轻的亲石元素, 在熔体或流体中易发生迁移。硼有两个稳定同位素: ^{10}B 和 ^{11}B , 二者之间较大的质量差导致地球上不同端元硼同位素差异明显。因此, 硼及其同位素对探究熔体及流体参与的地质过程和物质循环具有重要意义。目前大量学者对地球表生环境和相关过程中硼的地球化学行为进行了深入研究。然而, 对于地球深部过程中硼的迁移和同位素收支平衡尚缺乏足够的认识。前人研究表明, 岛弧火山岩与洋中脊玄武岩相比更富集硼, 这主要归因于岛弧火山岩的形成过程。弧火山岩是俯冲带的俯冲板片脱水形成的大离子亲石元素流体, 交代地幔楔, 并使其发生熔融, 产生岛弧岩浆作用形成的。因此可以通过对碳酸岩中 B 同位素进行研究, 来指示碳酸岩的来源[14]。

4.1. 分析测试方法

碳酸岩是岩浆结晶形成的, 因此如果对全岩硼同位素进行分析, 将会产生一个混合信号, 因为在不同结晶阶段会产生硼同位素分馏。实验样品来自世界不同地区且年龄为 40 Ma~2600 Ma 的纯碳酸钙, 且样品未受热液及地表风化影响。实验使用 Nu Plasma II MC-ICP-MS 对硼同位素进行分析。

类似于上述同位素, B 同位素组成的表示方法一般为:

$$\delta^{11}\text{B}(\%) = \left[\left(\frac{^{11}\text{B}/^{10}\text{B}}{\text{样品}} \right) / \left(\frac{^{11}\text{B}/^{10}\text{B}}{\text{标准}} \right) - 1 \right] \times 1000$$

其中, 标准硼酸样品 ($^{11}\text{B}/^{10}\text{B}_{\text{NIST SRM 951}} = 4.05003$)。

4.2. 结果分析与讨论

样品测试结果显示有四个样品显示出 $\delta^{11}\text{B} < -4\%$ (图 7)。这可能是由于围岩的霓长岩化导致了残余碳酸岩熔体 B 同位素分馏。围岩发生霓长岩化是从碳酸岩熔体中出溶碱性流体的过程。然而很难证明这个观点, 因为这些 $\delta^{11}\text{B} < -4\%$ 地区的碳酸岩杂岩体并没有出现明显的霓长岩接触变质带。因此对于霓长岩化导致的 B 同位素分馏这一原因未进行研究。

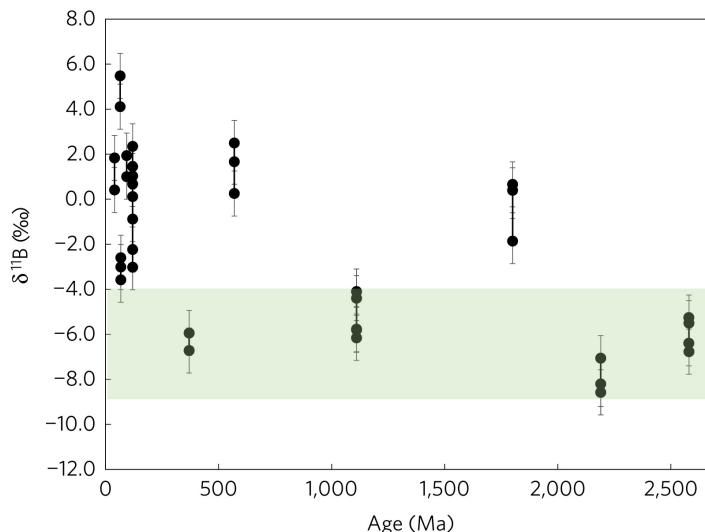


Figure 7. B isotope composition and formation age map of carbonate rocks
图 7. 碳酸岩 B 同位素组成与形成时代图

导致碳酸岩 $\delta^{11}\text{B}$ 负偏(图 7)最可能的原因是碳酸岩中 B 同位素组成可能受大陆岩石圈地幔, 或者软流圈地幔的影响。来自于加拿大和格陵兰岛等不同时代碳酸岩的 Sr 同位素组成变化大(图 8), 这可能是由于不同地幔储层相互作用混合的结果。基于 Sr-Nd-Pb 同位素体系的研究, 可以认为是地幔柱与岩石圈的共同作用导致了碳酸岩熔体的产生。因此, 1800 Ma 前的 Borden 和 570 Ma 的 Iron Hill 中 $\delta^{11}\text{B}$ 的正偏是受富集 B 同位素的地幔源(如含俯冲物质的地幔柱)的影响。而更加正偏的 $\delta^{11}\text{B}$, 可能与主要的造山构造事件有关, 造山事件同时也导致了俯冲的地壳物质的增加。

热力学和地球化学模型及数据表明, 俯冲洋壳脱水排出的流体中的 $\delta^{11}\text{B}$ 随深度的增加而减小。世界范围的年轻碳酸岩的 Sr、Nd 和 Pb 同位素特征证明了俯冲地地壳物质参与了地幔碳酸岩熔体的形成, 这也指示了 HIMU 和 EM1 地幔组分的混合(图 9)。Sr 同位素比值与 B 同位素比值大体显示出正相关关系(图 10), 这也证明了高的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 并不是全部都来源于 ^{87}Rb 的衰变, 而是有亏损地幔组分加入到碳酸岩熔体的形成中。

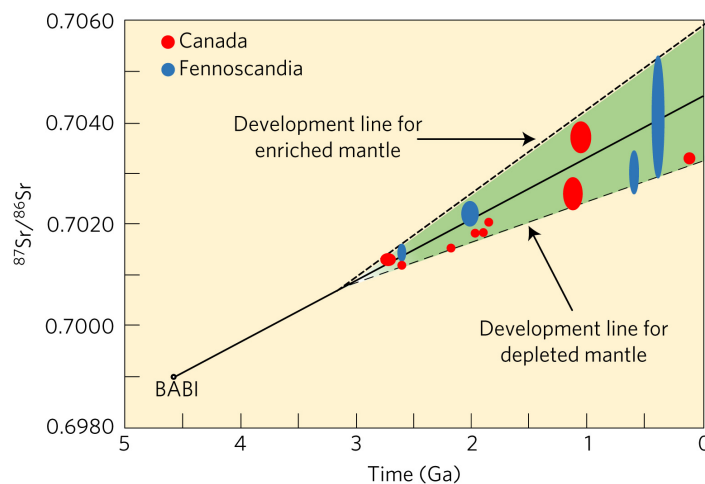


Figure 8. Sr isotope and formation age map of carbonate rocks
图 8. 碳酸岩 Sr 同位素与形成时代图

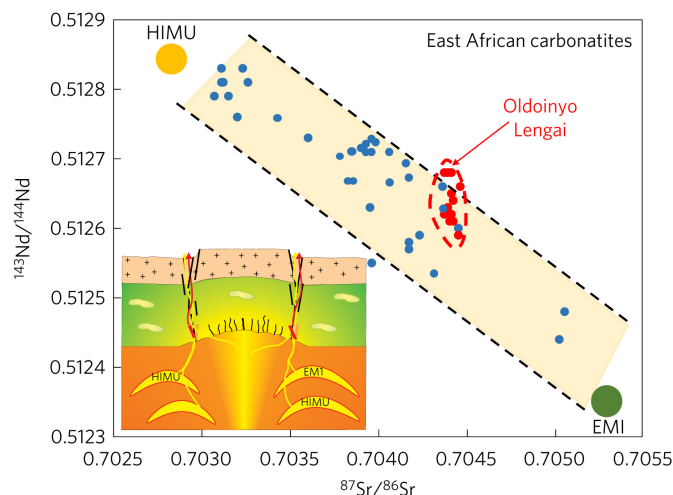


Figure 9. Sr-Nd isotope characteristics of carbonate rock magma
图 9. 碳酸岩岩浆的 Sr-Nd 同位素特征图

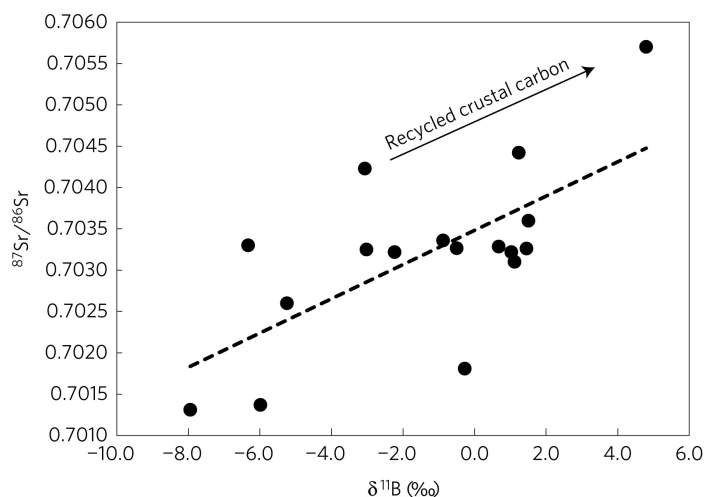


Figure 10. B-Sr isotope characteristics of carbonate rock magma
图 10. 碳酸岩岩浆 B-Sr 同位素特征

与俯冲有关的碳酸盐在地幔中滞留的时间很短，并且再循环形成岛弧火山，而不进入到更深的地幔中。1.5 Ga 之前受高地温梯度和高地幔对流速率的影响，导致与俯冲有关的碳酸盐具有不同的俯冲速率，从而降低了碳进入更深地幔中的可能性。从 1.5 Ga~0.5 Ga，随着地幔的冷却，全球 C 循环会发生改变。俯冲带地幔环境的改变会使地壳碳酸盐进入更深的地幔。因此随着地质年龄的减少，会有越来越多的地壳中的 C 进入到地幔深部。从核幔边界产生的地幔柱能将古老的俯冲地壳中的碳带回地表。因此，与地幔柱活动有关的碳酸岩中的碳可能来源于古老的俯冲地壳中的碳。

距今 300 Ma 的碳酸岩的 B 同位素组成(-3.58‰~+5.48‰)和 B 含量(0.06~2.1 ppm)变化很大。这两个特征都表明，地幔地球动力学条件的改变，产生了碳酸岩。在 300 Ma 以来存在可能改变上地幔条件的大地构造事件，泛大陆在 300 Ma 前的聚合以及在 175 Ma 前的解体就是最主要的大地构造事件。

5. 结语

在碳酸岩岩浆分异演化过程中，不同研究地区碳酸岩的 Mg 同位素组成受各地构造背景影响而不同。

这些研究为了解碳酸岩形成与演化过程提供了重要线索。Sr-Nd 同位素虽然在研究碳酸岩来源方面应用广泛，但是对于指示碳酸岩熔体的具体来源方面还存在不足。可以通过对碳酸岩 Mg 同位素的研究与矿物学、年代学、大地构造等方面研究相结合来指示碳酸岩的来源问题。

通过模拟不同地幔储层以及再循环碳酸盐的 Ce 和 Nd 同位素，通过模拟得到不同地幔储层以及再循环碳酸盐的 Ce 和 Nd 同位素，建立同位素组成之间的对比联系，得到再循环碳酸盐是大洋碳酸岩的重要来源。

B 同位素研究能有效识别碳酸岩的物质组成。将碳酸岩 Sr-Nd-Pb 同位素体系与 B 同位素结合，能有效识别碳酸岩的地幔组织组成，地幔中的碳既有俯冲地壳物质的碳，又有地幔深部的原始碳，地幔柱活动能将俯冲地壳中的碳以及地幔原始碳带回地表，影响全球碳循环。可以将碳酸岩的形成研究，与大地构造研究如过去超大陆形成有关的典型俯冲的事件相联系。

在研究碳酸岩来源问题时，如果只对碳酸岩同位素进行研究，得到的结果是片面的，必须结合矿物学、岩石学、年代学、大地构造学等，才能对碳酸岩有多方位，更全面的认识。

参考文献

- [1] 宋文磊, 许成, 刘琼, 等. 火成碳酸岩的实验岩石学研究及对地球深部碳循环的意义[J]. 地质论评, 2012, 58(4): 726-744.
- [2] Song, W.L., Xu, C., Chakhmouradian, A.R., *et al.* (2017) Carbonatites of Tarim (NW China): First Evidence of Crustal Contribution in Carbonatites from a Large Igneous Province. *Lithos*, 282-283, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2017.02.018>
- [3] Campbell, I.H. and Griffiths, R.W. (1990) Implications of Mantle Plume Structure for the Evolution of Flood Basalts. *Earth and Planetary Science Letters*, **99**, 79-93. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(90\)90072-6](https://doi.org/10.1016/0012-821X(90)90072-6)
- [4] Zhang, D.-Y., Zhang, Z.-C., Santosh, M., Cheng, Z.-G., He, H. and Kang, J.-L. (2013) Perovskite and Baddeleyite from Kimberlitic Intrusions in the Tarim Large Igneous Province Signal Theonset of an End-Carboniferous Mantle Plume. *Earth and Planetary Science Letters*, **361**, 238-248. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2012.10.034>
- [5] Song, W.L., Xu, C., Smith, M.P., *et al.* (2016) Origin of Unusual HREE-Mo-Rich Carbonatites in the Qinling Orogen, China. *Scientific Reports*, **6**, Article No. 37377. <https://doi.org/10.1038/srep37377>
- [6] 孙剑, 朱祥坤, 房楠, 等. 白云鄂博矿床成因的 Mg 同位素制约[J]. 矿床地质, 2012, 28(S1): 2890-2902.
- [7] Yang, K., Fan, H., Pirajno, F. and Li, X. (2019) The Bayan Obo (China) Giant REE Accumulation Conundrum Elucidated by Intense Magmatic Differentiation of Carbonatite. *Geology*, **47**, 1198-1202. <https://doi.org/10.1130/G46674.1>
- [8] Doucelance, R., Bellot, N., Boyet, M., Hammouda, T. and Bosq, C. (2014) What Coupled Cerium and Neodymium Isotopes Tell us about the Deep Source of Oceanic Carbon Atites. *Earth and Planetary Science Letters*, **407**, 175-186. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2014.09.042>
- [9] Ohno, T. and Hirata, T. (2013) Determination of Mass-Dependent Isotopic Fractionation of Cerium and Neodymium in Geochemical Samples by MC-ICPMS. *Analytical Sciences*, **29**, 47-53. <https://doi.org/10.2116/analsci.29.47>
- [10] Makishima, A. and Nakamura, E. (1991) Precise Measurement of Cerium Isotope Composition in Rock Samples. *Chemical Geology: Isotope Geoscience*, **94**, 1-11. [https://doi.org/10.1016/0168-9622\(91\)90035-U](https://doi.org/10.1016/0168-9622(91)90035-U)
- [11] Bonnand, P., Israel, C., Boyet, M., *et al.* (2019) Radiogenic and Stable Ce Isotope Measurements by Thermal Ionisation Mass Spectrometry. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, **34**, 504-516. <https://doi.org/10.1039/C8JA00362A>
- [12] Plank, T. and Langmuir, C.H. (1998) The Chemical Composition of Subducting Sediment and Its Consequences for the Crust and Mantle. *Chemical Geology*, **145**, 325-394. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(97\)00150-2](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(97)00150-2)
- [13] Mata, J., Moreira, M., Doucelance, R., Ader, M. and Silva, L.C. (2010) Noble Gas and Carbonisotopic Signatures of Cape Verde Oceanic Carbonatites: Implications for Carbon Provenance. *Earth and Planetary Science Letters*, **291**, 70-83. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2009.12.052>
- [14] Hulett, S.R.W., Simonetti, A., *et al.* (2016) Recycling of Subducted Crustal Components into Carbonatite Melts Revealed by Boron Isotopes. *Nature Geoscience*, **9**, 904-909.