

• 专题 11: 幔源岩浆活动和地幔动力学 •

## Identifying Multistage Mantle Metasomatism through Mg–Sr–Nd–Pb Isotopes in the Leucite Hills Lamproites

Yang SUN<sup>1,\*</sup>, Fang-Zhen TENG<sup>2</sup>, Kwan-Nang PANG<sup>3</sup>, Ji-Feng YING<sup>4</sup>,  
SCOTT Kuehner<sup>2</sup>

1. Department of Earth and Space Sciences, Southern University of Science and Technology, Shenzhen;

2. Isotope Laboratory, Department of Earth and Space Sciences, University of Washington, Seattle;

3. Institute of Earth Sciences, Academia Sinica, Taipei;

4. State Key Laboratory of Lithospheric Evolution, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing

Cratonic lamproites bear extreme Sr–Nd–Pb isotopic compositions widely known as the enriched mantle I (EMI), yet the origin of the EMI reservoir remains controversial. Here, we explore this issue by examining Mg–Sr–Nd–Pb isotopic compositions of lamproites from Leucite Hills, Wyoming, USA, a type locality of EMI-like, cratonic lamproites that possess a wide variety of lamproite types. The Leucite Hills lamproites documented so far exhibit a bimodal distribution with respect to silica and were divided into silica-rich phlogopite lamproites and silica-poor madupitic lamproites. Both types of lamproites are selected for trace element and Mg–Sr–Nd–Pb isotopic analyses. They are similar in mineralogy, consisting mainly of low-Al diopside, Ti-rich phlogopite, K-Ti-rich richterite, leucite, sanidine, wadeite, priderite, and/or olivine, with minor apatite, perovskite, and chrome spinel. In general, both types of lamproites have EMI-like Sr–Nd–Pb isotopic compositions, with the madupitic lamproites having lower  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  (0.70543–0.70579), higher  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  (0.51197–0.51205), and higher Pb isotopic ratios (e.g.,  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 17.52\text{--}17.79$ ) than those of the phlogopite lamproites ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.70573\text{--}0.70607$ ;  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.51180\text{--}$

0.51187;  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 17.24\text{--}17.64$ ). The phlogopite lamproites have Mg isotopic compositions ( $\delta^{26}\text{Mg} = -0.26\text{‰}$  to  $-0.18\text{‰}$ ) comparable to the mantle range ( $\delta^{26}\text{Mg} = -0.25\text{‰} \pm 0.04\text{‰}$ ), whereas the madupitic lamproites display lower values ( $\delta^{26}\text{Mg} = -0.43\text{‰}$  to  $-0.37\text{‰}$ ) than that. The  $\delta^{26}\text{Mg}$  values of the two lamproite types correlate with indices of the degree of carbonate metasomatism (e.g.,  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Hf}/\text{Hf}^*$  and  $\text{Ti}/\text{Ti}^*$ ), an observation that can be best explained through mantle metasomatism by subducted carbonate-bearing sediments. With increasing extent of carbonate metasomatism, these samples display less extreme EMI Sr–Nd–Pb isotopic signatures, arguing for at least two metasomatic events in their mantle sources. The early metasomatic event associated with subducted continent-derived siliciclastic sediments led to the formation of the EMI Sr–Nd–Pb isotopic signatures while the recent carbonate metasomatism produced the light Mg isotopic signature but diluted the EMI Sr–Nd–Pb isotopic signatures. Our study indicates that a combination of Mg and Sr–Nd–Pb isotopes could be an effective tool in deciphering multiple-stage metasomatic events in mantle sources and places new constraints on the generation of enriched mantle reservoirs.

\*Corresponding author: Yang Sun (e-mail: suny6@sustech.edu.cn)

· 专题 11: 幔源岩浆活动和地幔动力学 ·

## 浅部克拉通地幔存在太古代高非放射性成因铅

张军波<sup>\*</sup>, 刘勇胜

中国地质大学(武汉)地球科学学院, 武汉 430074

自然界中铅(Pb)以四种稳定同位素存在, 其中仅一种为非放射性成因的铅。地球内部铅同位素组成对于理解地球的形成和分异历史具有十分重要的意义。现有大量地球化学数据研究表明, 大洋中脊玄武岩和洋岛玄武岩比全硅酸盐地球具有明显更高的放射性成因铅, 主要位于零地球等时线的右侧。这一问题被称为铅悖论, 长期困扰着地球化学家们。根据质量守恒原理, 这暗示在地球内部隐藏着一个高非放射成因铅同位素的储库。为了破解这一谜题, 有学者提出了一种假说: 在地球早期核幔分异的过程中, 铅可作为亲硫元素进入地核。然而, 最近的高温高压实验测定了铅在金属铁熔体和硅酸岩熔体之间的分配系数, 其结果并不支持这一假说。目前看来, 地球丢失的铅可能隐藏于硅酸盐地球(大陆下地壳或岩石圈地幔)。

早期地球大气圈是极端缺氧的, 可供呼吸的自由氧气分子的含量不及现今大气含氧量的 0.001%。在一次全球规模的早古元古代大氧化事件(GOE)之后, 大气中的游离氧含量急剧增加。这次大氧化事件为地

表环境的宜居性和生命的快速演化奠定了基础, 也改变了陆地-海洋的矿物成分、元素和同位素组成。科学家已经发现太古代沉积岩硫同位素非质量分馏信号非常明显, 但是这些信号在 GOE 之后年轻的沉积岩里面却消失不见。同时, 海水中铀对氧浓度非常敏感: 当海水氧气较低时, 海水贫铀和相应的大洋沉积物富集非放射性成因铅同位素; 当 GOE 之后海水氧气浓度较高时, 海水明显更富铀和相应的大洋沉积物富集放射成因铅同位素。然而, 俯冲再循环的太古代沉积物的命运如何? 早古元古代大氧化事件如何影响深部地幔氧化还原状态和化学组成? 长期以来, 这些都是地质学家值得探讨的科学问题。

针对上述科学问题, 我们选取华北克拉通东部济南早白垩世富镁辉长岩为研究对象, 通过主-微量元素、锶-钕-铅同位素同位素和原位硫同位素研究表明, 浅部克拉通地幔(EMI 型地幔)的非放射性铅来自俯冲交代的太古代含水流体。因此, 该研究为探究 EMI 型地幔端元的起源提供了新的视角。

• 专题 11: 幔源岩浆活动和地幔动力学 •

## **Diffusion in Stishovite and CaCl<sub>2</sub>-type Silica from First-principles Calculations: Implications for MORB Viscosity in the Lower Mantle**

Bowen Chen, WenZhong Wang, Zhongqing Wu<sup>\*</sup>, Xiaoping Wu<sup>\*</sup>

Laboratory of Seismology and Physics of Earth's Interior, School of Earth and Space Sciences,  
University of Science and Technology of China, Hefei, China 230026

The segregation of the subducted oceanic crust was proposed to contribute to the numerous heterogeneities in the lower mantle. However, the rheological properties of the subducted oceanic crust at lower mantle conditions remain unknown. Mineral viscosity is controlled by its ionic diffusion. Here, We report first-principles results for Si and O diffusion of stishovite and CaCl<sub>2</sub>-type silica and determine the relative viscosity of oceanic crust along different mantle geotherms. We find the Si diffusion in stishovite

is slightly slower than that of bridgmanite. After the phase transition, Si diffusion in CaCl<sub>2</sub>-type silica becomes significantly enhanced due to the negative activation volumes. The rheological weaker CaCl<sub>2</sub>-type silica significantly reduces the crustal viscosity and facilitates the segregation of subducted oceanic crust with increasing depth. The crustal fragments could be stretched and mixed rapidly in the convecting mantle which provide good explanations for the widespread seismic heterogeneities in the lower mantle.

• 专题 11: 幔源岩浆活动和地幔动力学 •

## 西太平洋板块俯冲碳循环与华北克拉通破坏型金矿的成因联系

陶仁彪<sup>1,\*</sup>, 张立飞<sup>2</sup>

1. 北京高压科学研究中心;

2. 北京大学地球与空间科学学院

俯冲作用是连接地表碳循环和地球深部碳循环的关键地质过程。中国东部大规模板内玄武岩岩石学和同位素示踪研究表明大量碳酸盐随着西太平洋板块俯冲进入华北克拉通下大地幔楔并产生了广泛的氧化还原交代作用 (Erdmann et al., 2019; Hong et al., 2020; Cai et al., 2021)。我们近期通过高温高压实验模拟发现,深俯冲钙质碳酸盐是氧化深部地幔非常的有效介质 (Tao et al., 2021)。我们进一步通过高温高压实验模

拟发现俯冲碳酸盐的深部地幔氧化还原过程同时引发了地幔硫化物失稳,促使赋存其中的深部金等铜族元素发生活化迁移。结合中国东部大规模板内玄武岩岩石学和同位素示踪研究成果,高温高压实验模拟以及胶东克拉通破坏型金矿同位素地球化学研究成果,我们提出西太平洋板块俯冲碳循环深部地幔氧化作用可能中国东部华北克拉通破坏型金矿 (Zhu et al., 2015) 提供了主要的成矿元素,二者具有密切的成因联系。

• 专题 11: 幔源岩浆活动和地幔动力学 •

## 中国东北新生代玄武岩成分的时间变异: 对东北亚陆缘沟-弧-盆体系以及大地幔楔形成的意义

熊帅<sup>1</sup>, 王枫<sup>1,2\*</sup>, 许文良<sup>1,2</sup>

1. 吉林大学地球科学学院, 长春 130061;

2. 吉林大学东北亚矿产资源评价重点实验室, 长春 130061

东北亚陆缘-沟-弧盆体系的形成标志着东北亚大地幔楔的形成。然而, 东北亚陆缘-沟-弧盆体系的形成时间一直存在争论, 这也制约了对东北亚大地幔楔形成时间的认识。东北亚陆缘新生代玄武岩成分随时间变异很好地揭示了地幔属性的变异, 并为东北亚大地幔楔形成的时间与机制提供了很好地限定。

中国东北新生代玄武岩主要形成于 52 Ma、33 Ma、21 Ma、11 Ma 和 2 Ma。其中 52 Ma 玄武岩属于亚碱性系列, 具有弧型火山岩地球化学属性, 指示原始岩浆可能来源于受俯冲板块流体交代的岩石圈地幔。33 Ma 属于碱性系列, 具有 OIB 型地球化学属性, 指示岩浆可能来源于软流圈地幔的部分熔融, 并且包含更多的古老沉积物组份; 21 Ma 玄武岩则属于碱性系列, 具有典型 OIB 型地球化学属性, 指示其原始岩浆起源于受起源于俯冲板片熔体交代的软流圈地幔的部分熔融。11 Ma 玄武岩属于亚碱性系列, 显示了 OIB 型与弧型火山岩过渡的地球化学属性, 指示原始岩浆可能起源于受早期俯冲流体交代、并且已经发生过熔融的岩石圈地幔的再次熔融。2 Ma 玄武岩属于碱性系列, 具有典型 OIB 型地球化学属性, 指示原始岩浆起源于亏损的软流圈地幔的部分熔融。

位于中国东北西部的双辽新生代玄武岩喷发年龄为~50 Ma, 原始岩浆起源于软流圈地幔的部分熔

融; 而在中国东北的东部, 从(52 Ma 玄武岩的)富集型岩石圈地幔到亏损型软流圈地幔的转变发生在约 33~21 Ma; 而位于最东部的日本海, 这种转变则发生在 20~15 Ma。东北亚新生代玄武岩成分的时空变异, 记录了软流圈地幔流自西向东的流动。这是软流圈地幔在海沟后撤时, 对板片后撤(rollback)的响应, 并且为日本海的打开和东北亚大地幔楔的形成提供了驱动力。

综上所述, 新生代东北亚地幔经历了三次重要的深部过程: 第一次从 52 Ma 到 21 Ma, 经历了等温面下降, 岩浆源区从岩石圈地幔转变成软流圈地幔的过程, 标志着俯冲太平洋板片后撤(rollback)过程的发生, 大地幔楔开始形成; 第二次从 21 Ma 到 11 Ma, 地幔经历了等温面上升, 岩浆源区从软流圈地幔转变成岩石圈地幔的过程, 标志着海沟后撤(retreating)过程的发生, 指示地幔流大规模上涌和东北亚大地幔楔的形成; 第三次从 11 Ma 到 2 Ma, 地幔再次经历了等温面下降, 岩浆源区从岩石圈地幔转变成软流圈地幔的过程, 标志着地幔流向东到达日本海底部, 促使日本海彻底打开。综上所述, 可以得出东北亚陆缘沟-弧-盆体系和东北亚大地幔楔的形成时间约为 20 Ma, 而板片后撤与海沟后撤一起是导致东北亚陆缘沟-弧-盆体系和东北亚大地幔楔形成的主导机制。

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(91858211)

第一作者简介: 熊帅(1997-), 博士研究生, 研究方向: 火成岩岩石学. E-mail: 137499258@qq.com

\*通信作者简介: 王枫(1984-), 教授, 研究方向: 岩石地球化学. E-mail: jlu\_wangfeng@jlu.edu.cn

· 专题 11: 幔源岩浆活动和地幔动力学 ·

## 不同类型弧前地幔的演化历史：以新喀里多尼亚地幔橄榄岩为例

许阳<sup>1,\*</sup>, 刘传周<sup>1,2</sup>, 石学法<sup>1,3</sup>

1. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室, 青岛 266000;

2. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029;

3. 自然资源部第一海洋研究所, 青岛 266061

俯冲带是壳幔相互作用的重要场所。在大洋岛弧弧前地区, 俯冲的洋壳和沉积物将持续释放流体到上覆地幔, 这将降低弧前地幔的固相线温度, 导致其经历极高程度的部分熔融过程而形成具有超难熔特征的地幔橄榄岩 (主要为方辉橄榄岩)。由于超难熔地幔橄榄岩缺乏原生的单斜辉石矿物, 而单斜辉石又是上地幔尖晶石相地幔橄榄岩中微量元素的主要载体, 因而单斜辉石的缺失对研究超难熔地幔橄榄岩的演化历史形成了阻碍, 弧前难熔地幔经历的部分熔融和熔岩反应过程仍然需要进一步研究。此外, 尽管具有超难熔特征的方辉橄榄岩构成了弧前地幔的主体, 但在弧前地区仍然存在少量的成分相对饱满的二辉橄榄岩, 这些二辉橄榄岩的岩石成因和地幔源区特征还存在争议。

新喀里多尼亚蛇绿岩被认为是全球范围内最典型的弧前蛇绿岩之一, 其代表通过构造活动就位于冈瓦纳大陆东缘的弧前大洋岩石圈的残片。研究人员对缺乏原生单斜辉石的方辉橄榄岩样品中的斜方辉石矿物进行了原位的主、微量元素成分分析以及成分模拟计算, 并测试了与方辉橄榄岩伴生的纯橄岩和辉石岩脉的主量元素、微量元素和 Sr-Nd-Hf-Os 同位素成分。新喀里多尼亚方辉橄榄岩中的斜方辉石具有极低的重稀土元素 (HREE) 含量, 其能够通过亏损地幔源区 (DMM) 经历约 25% 的分离熔融过程模拟。此

外, 这些斜方辉石表现出了轻中稀土 (L-MREE) 和大离子亲石元素 (LILE) 的富集, 暗示其经历了晚期的地幔交代过程。辉石岩具有高 CaO (9.02 wt%~9.75 wt%) 低 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (1.59 wt%~1.60 wt%) 的成分特征, 其 Sr-Nd-Hf 同位素和平衡熔体成分类似于新喀里多尼亚玻安岩, 而区别于纯橄岩脉的平衡熔体成分。研究结果表明新喀里多尼亚方辉橄榄岩经历至少两个阶段的部分熔融过程, 并且和具有不同成分特征的渗透熔体的发生了熔岩反应。

和方辉橄榄岩相比, 二辉橄榄岩则具有与饱满的深海橄榄岩类似的成分特征, 其经历了低程度的部分熔融与交代过程。二辉橄榄岩的初始 <sup>176</sup>Hf/<sup>177</sup>Hf 比值与代表其熔融程度的指标 (如橄榄石 Fo 值、全岩 Mg# 值、单斜辉石 Yb 含量等) 以及初始全岩 <sup>187</sup>Os/<sup>188</sup>Os 比值均表现出了较好的相关性。部分二辉橄榄岩样品具有相对古老的 Hf-Os 同位素成分特征, 这表明古老的地幔域不均匀的分布在软流圈地幔中, 俯冲起始过程中软流圈地幔的上涌可能导致这些含有古老熔融信息的地幔增生到弧前地区。这为弧前地区带有古老亏损信号的地幔橄榄岩的成因提供了一个新的解释。弧前地区的古老地幔既可能是由于俯冲带构造活动而卷入的老的岩石圈地幔, 也有可能来源于含有古老地幔域的不均一的软流圈地幔。

• 专题 11: 幔源岩浆活动和地幔动力学 •

## 用铁同位素示踪 Pitcairn 地幔柱中的榴辉岩组分

施金华<sup>1</sup>, 曾罡<sup>1</sup>, 陈立辉<sup>2</sup>, 王小均<sup>2</sup>, Takeshi Hanyu<sup>3</sup>,  
钟源<sup>1</sup>, 谢烈文<sup>4</sup>

1. 南京大学;

2. 西北大学;

3. 日本国立海洋研究开发机构 (JAMSTEC);

4. 中国科学院地质与地球物理研究所

俯冲洋壳可以在上地幔转化为榴辉岩, 最终影响地幔柱源区的化学非均一性。除了橄榄岩, 榴辉岩熔体与橄榄岩反应产生的二阶段辉石岩越来越被认为是 OIB 的源区岩性。然而, 对于榴辉岩是否可以成为 OIB 的直接来源仍不清楚。为了检验这种可能性, 我们测试了 Pitcairn 岛玄武岩的全岩 Fe 同位素组成及橄榄石斑晶的化学成分。Pitcairn 岛玄武岩具有中等的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 、低  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  和  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  同位素比值, 以及 OIB 中最低的  $\delta^{26}\text{Mg}$  值, 表明来自再循环的古地壳成分 (洋壳+沉积物) 的贡献。为了比较, 我们还报告了来自 Louisville 海山链的 FOZO 型玄武岩的 Fe 同位素组成, Louisville 玄武岩被认为是典型的橄榄岩来源的 OIB。Louisville 玄武岩具有类似 MORB 的  $\delta^{57}\text{Fe}$  值, 而 Pitcairn 岛玄武岩具有比 MORB 重得多的 Fe 同位素组成。岩浆分异、部分熔融和高  $\text{Fe}^{3+}/\Sigma\text{Fe}$  不足以产生 Pitcairn 玄武岩的重铁同位

素组成。

Pitcairn 玄武岩中  $\delta^{57}\text{Fe}$  和  $\epsilon_{\text{Nd}(i)}$  (或  $\epsilon_{\text{Hf}(i)}$ 、 $\delta^{26}\text{Mg}$ ) 值之间的良好相关性可以用二端元混合来解释, EM1 放射成因同位素特征的端元的熔体具有重的 Fe 和轻的 Mg 同位素组成。为了解释 Fe、Mg 同位素组成的来源, 本文计算了榴辉岩、次生辉石岩和橄榄岩部分熔体的 Fe、Mg、Nd 和 Hf 同位素组成, 结果表明榴辉岩是唯一具有重铁和轻镁同位素熔体的岩性。Pitcairn 玄武岩中的橄榄石斑晶的主量元素和微量元素组成也验证了这一推论, 其显示出低 Fo 和 Ni 含量, 以及低 Mn/Fe 和 Ni/(Mg/Fe)。这些特征与 MORB (橄榄岩源区) 中的橄榄石和 Koolau 玄武岩 (二阶段辉石岩源区) 中的橄榄石斑晶特征明显不同。因此, 我们认为榴辉岩是 Pitcairn 玄武岩 EM1 端元的源区岩性。除了橄榄岩和二阶段辉石岩外, 榴辉岩可能存在于地幔柱中, 并对 OIB 的来源做出贡献。

· 专题 11: 幔源岩浆活动和地幔动力学 ·

## 蛇绿岩记录的大洋地幔内熔体迁移过程

熊庆<sup>1\*</sup>, 王力<sup>1</sup>, 田廉荣<sup>2</sup>, 薛龙飞<sup>2</sup>, 周翔<sup>2</sup>, 李智勇<sup>3</sup>, 郑建平<sup>1,2</sup>

1. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 武汉 430078;

2. 中国地质大学地球科学学院, 武汉 430074;

3. 中国地质大学地球物理与空间信息学院, 武汉 430074

大洋岩石圈形成演化的关键过程是熔体如何从软流圈地幔中抽取、迁移汇集、并最终形成洋壳。蛇绿岩作为“登陆”的大洋岩石圈残片, 能够为深入揭示该过程提供天然、宏观且经济的研究对象。前人对蛇绿岩的详细研究发现, 熔体在浅部地幔中主要通过网脉状纯橄岩通道发生迁移汇聚, 这种纯橄岩通道与壳幔过渡带和洋壳内的岩浆体系, 共同构成大洋扩张中心从地幔源区至大洋地壳的巨型熔体抽取系统。地幔深部来源的熔体在通过纯橄岩通道时, 会发生复杂的熔体-熔体、熔体-矿物、熔体-岩石相互作用, 使得向上迁移的熔体和岩石圈地幔的组成都发生变化, 进而导致大洋岩石圈壳-幔之间的组成解耦现象。然而, 在不同构造体制、扩张速率和地幔对流形式下的大洋扩张中心, 地幔

内的熔体迁移方式和过程是多样的, 导致大洋岩石圈壳幔结构和组成的复杂多变。

我国西藏雅江带蛇绿岩是不同构造背景下(洋中脊、俯冲带等)大洋扩张中心的产物, 在其地幔单元不同深度内发育较为新鲜的纯橄岩通道样品, 例如纯橄岩、铬铁矿岩、辉石岩等。本研究选择雅江带中段的日喀则蛇绿岩以及东段的泽当和罗布莎蛇绿岩为典型代表, 聚焦于解析其地幔内部的纯橄岩脉体系统, 深入研究这些地幔纯橄岩通道的形成演变、熔体在通道内的反应迁移过程、以及不同构造体制下大洋岩石圈壳-幔组成解耦与否的原因。对蛇绿岩记录的熔体迁移过程开展进一步研究, 有助于更好地认知大洋扩张中心巨型岩浆-动力系统、壳幔圈层分异和地球物质循环过程。

· 专题 11: 幔源岩浆活动和地幔动力学 ·

## 橄榄岩-熔体反应导致的 Fe 同位素分馏: 以兴蒙造山带东南缘后团村地幔捕虏体为例

李志汉<sup>1,2</sup>, 赵新苗<sup>1,2\*</sup>, 林阿兵<sup>3</sup>, 贾喜良<sup>1,2</sup>, 张宏福<sup>4</sup>

1. 中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室, 北京 100029;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 西北大学地质学系大陆动力学国家重点实验室, 西安 710069;

4. 浙江大学地球科学学院, 杭州 310027;

兴蒙造山带是中亚造山带东段在中国境内的统称, 是中国东部多个构造体系叠加与演化的经典地区。兴蒙造山带东南缘后团村地区新生代玄武岩携带了大量地幔捕虏体, 为探究该地区的陆下岩石圈地幔组成与演化提供了直接样品。根据岩相学和矿物学组成, 后团村地幔捕虏体可划分为二辉橄榄岩 (Mg#=88.6~91.9, 平均值 91.1)、方辉橄榄岩 (Mg#=91.9)、纯橄岩 (Mg#=91.8)、异剥橄榄岩 (Mg#=88.4) 和辉石岩 (Mg#=87.5~91.2, 平均值 90.0)。其中, 二辉橄榄岩和方辉橄榄岩的 MgO 含量与其 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 CaO 含量具有负相关性, 单斜辉石稀土配分形式具有轻稀土亏损型、勺型和富集型三种, 表明这些橄榄岩是原始地幔经部分熔融抽取的岩石圈地幔残留, 后期经历了地幔熔体交代作用的影响。大部分二辉橄榄岩与方辉橄榄岩的 Fe 同位素组成变化范围小 ( $\delta^{57/54}\text{Fe} = -0.05\text{‰} \sim 0.10\text{‰}$ , 平均值  $0.02\text{‰} \pm 0.11\text{‰}$ , 2SD, N=9), 与上地幔的 Fe 同位素组成平均值 ( $\delta^{57/54}\text{Fe} = 0.04 \pm 0.04\text{‰}$ ; Weyer and Ionov, 2007) 接近, 并且共生矿物之间 Fe 同位素分馏 ( $\Delta^{57/54}\text{Fe}_{\text{Cpx-OI}} = 0.03\text{‰} \sim 0.14\text{‰}$ ,  $\Delta^{57/54}\text{Fe}_{\text{Opx-OI}} = -0.06\text{‰} \sim 0.10\text{‰}$ ,  $\Delta^{57/54}\text{Fe}_{\text{Cpx-Opx}} = 0.09\text{‰} \sim 0.14\text{‰}$ ,  $\Delta^{57/54}\text{Fe}_{\text{Sp-OI}} = 0.09\text{‰} \sim 0.17\text{‰}$ ,  $\Delta^{57/54}\text{Fe}_{\text{Sp-Opx}} = 0.04\text{‰} \sim 0.17\text{‰}$ ,  $\Delta^{57/54}\text{Fe}_{\text{Sp-Cpx}} = -0.08\text{‰} \sim 0.10\text{‰}$ ) 具有尖晶石>单斜辉石>斜方辉石>橄榄石的特点, 表明这些矿物之间 Fe 同位素分馏达到平衡。其它三个二辉橄榄岩 (ZHTC20-1、ZHTC20-7 和 ZHTC20-14) 和

纯橄岩的共生矿物之间存在较大的 Fe 同位素分馏 ( $\Delta^{57/54}\text{Fe}_{\text{Cpx-OI}} = 0.02\text{‰} \sim 0.23\text{‰}$ ,  $\Delta^{57/54}\text{Fe}_{\text{Opx-OI}} = -0.02\text{‰} \sim 0.03\text{‰}$ ,  $\Delta^{57/54}\text{Fe}_{\text{Cpx-Opx}} = 0.11\text{‰} \sim 0.21\text{‰}$ ,  $\Delta^{57/54}\text{Fe}_{\text{Sp-OI}} = 0.13\text{‰} \sim 0.22\text{‰}$ ,  $\Delta^{57/54}\text{Fe}_{\text{Sp-Opx}} = 0.13\text{‰} \sim 0.24\text{‰}$ ,  $\Delta^{57/54}\text{Fe}_{\text{Sp-Cpx}} = -0.07\text{‰} \sim 0.13\text{‰}$ ), 矿物间的 Fe 同位素没有完全达到平衡。温度、氧逸度以及全岩 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量与其  $\delta^{57/54}\text{Fe}$  之间没有明显的相关性, 表明温度、氧逸度和部分熔融过程对后团村地幔捕虏体 Fe 同位素的分馏影响较小。这些样品受到熔体交代作用的影响, 具有高 Ti/Eu (1369~8590, 平均值 4591) 和低 (La/Yb)<sub>N</sub> (0.11~11.7, 平均值 2.89), 表明后期的硅酸盐熔体交代可能是造成其矿物间 Fe 同位素分馏的主要原因。后团村异剥橄榄岩具有最低的 Mg#, 单斜辉石具有最低的 Ti/Eu (430) 和相对高的 (La/Yb)<sub>N</sub> (3.11) 及轻的 Fe 同位素组成 ( $\delta^{57/54}\text{Fe} = -0.04\text{‰}$ ), 可能是橄榄岩与碳酸盐化的硅酸盐熔体反应的结果。后团村辉石岩具有与二辉橄榄岩相接近的 Mg#, 单斜辉石富集 LREE, 并具有高的 Ti/Eu (4265~8375, 平均值 6197)、低的 (La/Yb)<sub>N</sub> (0.52~1.00, 平均值 0.71) 和最重的全岩 Fe 同位素组成 ( $\delta^{57/54}\text{Fe} = 0.29\text{‰} \sim 0.31\text{‰}$ , 平均值  $0.30\text{‰} \pm 0.11\text{‰}$ , 2SD, N=2), 可能是橄榄岩与硅酸盐熔体反应引起的。以上研究表明, 兴蒙造山带东南缘后团村地区的岩石圈地幔具有不均一的 Fe 同位素组成, 橄榄岩与熔体的反应是造成其 Fe 同位素组成不均一的主要原因。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (E0115117)

第一作者简介: 李志汉 (1996-), 硕士研究生, 主要从事非传统稳定同位素地球化学地球化学和地幔化学研究。E-mail: lizhihan19@mails.ucas.ac.cn

\*通信作者简介: 赵新苗 (1981-), 博士, 副研究员, 主要从事非传统稳定同位素地球化学地球化学和地幔化学研究。E-mail: xinmiao312@mail.iggcas.ac.cn

· 专题 11: 幔源岩浆活动和地幔动力学 ·

## 弧岩浆高氧逸度成因：来自全球弧火山岩 Cu/Zr 比值的制约

赵思宇<sup>1,2,3,4</sup>, 杨阳<sup>1,3,4\*</sup>, Charles H. Langmuir<sup>5</sup>, 赵太平<sup>2,4</sup>

1. 中国科学院广州地球化学研究所, 同位素地球化学国家重点实验室, 广州 510640;

2. 中国科学院广州地球化学研究所, 矿物学与成矿学重点实验室, 广州 510640;

3. 深地科学卓越创新中心, 广州 510640;

4. 中国科学院大学, 地球与行星科学学院, 北京 100049;

5. 哈佛大学, 地球与行星科学学院, 美国 02138

俯冲带岩浆体系的氧逸度是研究地表浅部与深部物质、能量交换循环的重要参数, 对于探索地表大气圈、水圈、生物圈等各圈层的起源与演化也起着重要的示踪作用, 在地球宜居性的研究中扮演着重要的角色, 一直是地球科学研究的前沿课题。前人研究发现, 岛弧岩浆比洋中脊岩浆氧化程度高, 但弧岩浆高氧逸度的成因一直存在争议。部分学者认为是由于俯冲大洋板块被海水蚀变而变氧化, 俯冲时经历变质作用, 产生富含氧化物物质(如  $S^{6+}$ 、 $Fe^{3+}$ 等)的流/熔体交代上覆地幔楔, 导致地幔楔熔融产生的岩浆氧化程度高; 另一部分学者则认为这是由于弧岩浆在地壳中经历的岩浆分异过程导致其氧化。对于弧岩浆高氧逸度是“幔源”还是“壳源”成因的, 目前还没有统一的认识。

俯冲带体系中, 变价元素硫在岩浆中的价态、分配行为以及赋存状态是不断变化的, 这一变化过程取

决于岩浆的氧化还原状态, 因此变价元素硫及亲硫元素 Cu 的系统变化可以灵敏示踪岩浆中氧逸度的变化: 氧逸度越高, 岩浆中 S 的饱和度越高, 地幔熔融形成的原始岩浆中 Cu 的含量就越高。前人统计全球岛弧和洋中脊玄武岩中 Cu 的数据发现:  $MgO > 8 \text{ wt.}\%$  的弧火山岩和洋中脊玄武岩中 Cu 含量相同, 因而认为二者地幔源氧逸度相同。然而高 MgO 的弧火山岩样品 ( $MgO > 8 \text{ wt.}\%$ ) 仅占的全球弧火山岩样品的 3%, 不能代表全球原始弧岩浆的成分, 并且硫化物耗尽后的地幔熔融过程以及硫化物不饱和的分离结晶过程分别会导致弧岩浆中 Cu 的降低和升高, 因此难以准确限定原始弧岩浆中 Cu 的含量。本研究采取与 Cu 在硅酸盐矿物中分配系数相近的 Zr 来消除上述影响, 采用 Cu/Zr 比值限定了原始弧岩浆和洋中脊岩浆中 Cu 的系统差别, 结合弧下地幔楔硫含量高的特征, 证明了弧岩浆高氧逸度是“幔源”成因的。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41773025)

第一作者简介: 赵思宇 (1996-), 博士研究生, 研究方向: 壳幔相互作用. E-mail: zhaosiyu181@mails.ucas.ac.cn

\*通信作者简介: 杨阳 (1986-), 副研究员, 研究方向: 地幔地球化学, 壳幔相互作用. E-mail: yangyang@gig.ac.cn

· 专题 11: 幔源岩浆活动和地幔动力学 ·

## 深部地幔的富水储库

刘佳<sup>\*</sup>, 夏群科

浙江大学 地球科学学院 杭州 310027

地幔矿物中微量的水影响着地幔的众多物理和化学性质, 从而深刻影响着板块构造和地表宜居性。长久以来, 对岩石圈以下地幔的水含量估计主要来自于大洋中脊玄武岩和洋岛玄武岩的水含量分析, 结果显示其源区水含量分别为 50~200 ppm 和 300~900 ppm。近十年以来, 通过对超深金刚石中的林伍德石、冰 VII 等矿物包裹体研究揭示了深部地幔的很有可能存在更富水的区域。而对超慢速扩张洋中脊玄武岩、科马提岩、苦橄岩等幔源岩浆含水性的分析则从更宏观的尺度上证实了地球深部存在着与俯冲带释放流体无关的富水区域, 同时揭示了古老地幔楔残余在浅部软流圈的滞留也是大洋板块内部富水的重要途径。尽管如此, 对地幔深部该富水储库的形成机制、水的来源、以及储库的所在圈层位置等还没有清晰的

认识, 在将来的研究中这些问题应当得到关注。基于以上考虑, 拟对 1) 冰岛地幔柱早期活动的产物 (Baffin Island 和 West Greenland 苦橄岩、Deccan 大火成岩苦橄岩); 2) Siberian、Ethiopia、Karoo 以及峨眉山大火成岩省的苦橄岩, 进行橄榄石熔体包裹体和单斜辉石斑晶两种载体的水含量和 H 同位素组成研究。选择这些样品的原因是: 前人从 Pb、He 等同位素信号上认为 Baffin Island、West Greenland 以及 Deccan 苦橄岩源区存在类似地球早期未分异的原始物质, 因此它们最有可能回答地球早期阶段的原始储库是否是地球内部富水的来源; 而 Siberian、Ethiopia、Karoo 以及峨眉山苦橄岩源区则被认为含有再循环大洋板块物质, 因此它们是检验地球深部水是否源自再循环大洋板块的理想对象。

· 专题 11: 幔源岩浆活动和地幔动力学 ·

## 俯冲板片来源的流体引起的地幔氧化作用： 来自科洛地幔包体的证据

张拉，刘勇胜\*

中国地质大学（武汉），武汉 430074

俯冲板片来源的熔/流体交代岩石圈地幔会影响地幔的物理化学性质，但是其对地幔氧逸度的影响还存在争议。中国东北科洛地区的部分地幔包体中的橄榄石出现了不同程度的赤铁矿出溶，且含赤铁矿出溶的橄榄石相对不含赤铁矿出溶的橄榄石具有更高的 Mg#，反映出被氧化形成的  $\text{Fe}^{3+}$  由于在橄榄石中不相容，而从橄榄石中析出，最终形成富含  $\text{Fe}^{3+}$  的氧化物，而残余的橄榄石中由于 Fe 的丢失具有更高的 Mg#。这些特征表明科洛地幔包体记录了地幔中的高氧逸度条件。结合岩相学以及地球化学特征，我们发现科洛的地幔包体经历了不同程

度的交代作用。这些包体中的单斜辉石整体具有相似的 Th、U 等大离子亲石元素富集，而 Nb、Ta、Zr、Hf 等高场强元素亏损的特征；含水矿物金云母的出现以及橄榄石中包裹体含有的  $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$  以及方解石和铁白云石等矿物表明科洛的岩石圈地幔记录了显著的流体交代。此外，单斜辉石具有富集的 Sr 同位素组成，变化范围在 0.7038 到 0.7063 之间，与 Sr 含量和  $(\text{La}/\text{Yb})_N$  之间具有很好的正相关关系，表明交代这些岩石圈地幔的流体来自俯冲板片。我们由此推测俯冲板片来源的流体可能造成地幔氧逸度的升高。

第一作者简介：张拉（1993-），博士研究生，研究方向：壳-幔相互作用。E-mail: lazhang@163.com

\*通信作者简介：刘勇胜（1971-），教授，研究方向：微量元素地球化学、LA-ICP-MS 元素和同位素分析技术、壳-幔物质交换以及地球深部碳循环作用。

· 专题 11: 幔源岩浆活动和地幔动力学 ·

## 古太平洋板块俯冲与东亚大地幔楔的形成时代

马强<sup>1\*</sup>, 徐义刚<sup>2</sup>

1. 中国地质大学(武汉)地球科学学院, 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 武汉 430074;
2. 中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室, 广州 510640

西太平洋板块俯冲与大地幔楔结构深刻影响了东亚地质演化, 改变了人们对俯冲板片命运和深部地幔动力过程的传统认识。然而, 东亚大地幔楔的形成时代和古太平洋板块俯冲历史等重要科学问题一直没有很好解决。我们通过大尺度岩浆作用的时空演变规律研究, 重建了古太平洋板块中生代的俯冲与后撤历史, 揭示了华北、朝鲜半岛及我国东北地区侏罗纪和白垩纪岩浆作用的时空演变特征, 发现了除大兴安岭北部额尔古纳地区中晚侏罗世早期岩浆活动受控于蒙古鄂霍茨克洋的俯冲闭合和古太平洋板块俯冲

的共同影响, 东北亚地区其他中生代岩浆活动具有侏罗纪自海沟向内陆(由东向西)迁移、早白垩世自内陆向海沟(由西向东)回迁的规律。从岩浆作用角度, 揭示出华北克拉通破坏主要受控于古太平洋板块的平板俯冲与回转后撤, 为华北克拉通破坏与古太平洋板块俯冲的关联提供了关键证据, 确定了古太平洋板块俯冲带大规模后撤的起始时间(~145 Ma), 提出东亚大地幔楔系统初始形成于早白垩世的认识, 明确了古太平洋板块俯冲和蒙古-鄂霍茨克洋闭合的对东北亚地区地质演化的影响范围。

· 专题 11: 幔源岩浆活动和地幔动力学 ·

## 低 MgO 的初始板内碱性玄武岩起源于 碳酸盐榴辉岩源区的部分熔融

邹宗琪<sup>1\*</sup>, 汪在聪<sup>1</sup>, Stephen Foley<sup>2</sup>, 徐荣<sup>1</sup>, 耿显雷<sup>3</sup>,  
刘一诺<sup>1</sup>, 刘勇胜<sup>1</sup>, 胡兆初<sup>1</sup>

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

2. Department of Earth and Environmental Sciences, Macquarie University, North Ryde, New South Wales 2109, Australia;

3. 东华理工大学核资源与环境国家重点实验室, 南昌 330013

碱性玄武岩广泛出露于板内构造环境, 并且越来越多的研究表明其源区与碳酸盐有关, 如碳酸盐化榴辉岩和碳酸盐化橄榄岩。俯冲的蚀变洋壳是在深部地幔形成碳酸盐化榴辉岩最有效的方式之一, 因而建立碳酸盐化榴辉岩与板内碱性玄武岩的联系对理解俯冲板片驱动的深部碳循环具有重大意义。然而, 高温高压实验预测的低 MgO 原始天然玄武岩样品的缺乏, 使得碳酸盐化榴辉岩源区这一广泛提出的模型仍然存在争议。

本研究通过对互层的汉诺坝新生代碱性和拉斑玄武岩的主微量元素和放射性同位素特征, 阐述了汉诺坝碱性玄武岩具有显著的碳酸盐化榴辉岩源区的地球化学特征, 其低 MgO (< 5.25 wt.%) 的端元是碳酸盐化榴辉岩部分熔融的初始熔体。汉诺坝碱性玄武岩的 MgO 和 CaO、Ba/Th、Ti/Eu 之间具有良好的线性正相关, 与 Dy/Yb、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 εNd 呈现良好的线性负相关。特别地, 低 MgO 端元具有低重稀土 (HREE) 和 Sc 含量, 低 CaO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (< 0.41) 和低 Ti/Eu 比值 (< 3380), 以及远高于一般洋岛玄武岩的 Dy/Yb 比值 (> 7.1) 的特征。碱性玄武岩中极少量的橄榄石斑晶以及单斜辉石和石榴石的缺失, 表明这些

线性关系不是由高 MgO 的岩浆分异演化形成的。同时, 熔体自身的分异演化也解释不了放射性 Sr-Nd 同位素与 MgO、Dy/Yb 和 Ba/Th 之间的线性关系。这些线性关系主要是低 MgO 的初始熔体与岩石圈相互作用的结果。低 MgO 初始碱性玄武岩的高 Dy/Yb 和低 CaO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 比值等特征反应了在其地幔源区残留大量石榴石和单斜辉石 (榴辉岩)。蛛网图上的 Ti 负异常、Zr 和 Hf 正异常则反映了源区存在碳酸盐 (碳酸盐化榴辉岩)。位于岩石圈-软流圈边界附近的无挥发分榴辉岩受碳酸盐熔体交代熔融或者含还原碳的榴辉岩由对流地幔携带至软流圈顶部后发生部分熔融形成了初始的碱性玄武岩并快速喷发, 因而能够保留初始的碳酸盐化榴辉岩特征。碳酸盐化榴辉岩熔体部分熔融形成的碱性玄武岩低 MgO 的特征使其常被误认为是高度演化的岩浆, 从而被忽视。蚀变洋壳既可以为地幔提供交代介质, 自身也可以作为源区, 间接或者直接地将蚀变洋壳的成分信息传递给碱性玄武岩。我们的研究结果为蚀变洋壳作为碱性玄武岩的地幔源区提供了直接的天然样品证据, 也进一步阐述了蚀变洋壳俯冲进入深部地幔后以多种方式参与碱性玄武岩的形成。

• 专题 11: 幔源岩浆活动和地幔动力学 •

## 软流圈地幔中水分布的不均一性及其成因

杨阳<sup>1,2,3\*</sup>, C. H. Langmuir<sup>4,1</sup>, Y. Cai<sup>5</sup>, P. Michael<sup>6</sup>, S. L. Goldstein<sup>5</sup>, Z. Chen<sup>4</sup>

1. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640;
2. 中国科学院深地科学卓越创新中心, 广州 510640;
3. 南方海洋科学与工程广东省实验室, 广州 511458;
4. 哈佛大学地球与行星科学系, 剑桥 MA02138;
5. 哥伦比亚大学拉蒙特-多尔蒂地球研究所, 纽约 NY10964;
6. 塔尔萨大学, 塔尔萨 OK74104

太平洋板块的持续俯冲源源不断的向弧下地幔中输送水及其他易活动元素, 从而显著改造了弧下软流圈地幔的组成, 而经典观念中俯冲板片贡献的富水组分对于软流圈地幔的影响范围多局限于俯冲带附近。然而, 全球软流圈地幔中水的分布并不均一, 太平洋最为贫水, 而北冰洋最为富水。为了研究软流圈地幔中水分布不均一性的成因及其与俯冲作用的关系, 本研究以最为富水的北冰洋软流圈为突破口, 在超慢速扩张的北冰洋 Gakkel 洋中脊发现了一系列具有明显岛弧特征且富水的洋中脊玄武岩 (mid-ocean ridge basalts, MORB), 对于经典理论提出了巨大的挑战。通过对采自北冰洋 Gakkel 洋脊的 130 个站位的 576 件玄武岩玻璃样品重新进行高精度的水含量及激光微区主微量元素分析, 发现了北极地区软流圈中广泛富水以及俯冲改造的地幔物质, 指示古俯冲事件对于北冰洋软流圈地幔的改造。通过统计全球近六千

件 MORB 样品数据发现, 俯冲改造地幔组分在大西洋和印度洋 MORB 中也能识别出来, 然而在贫水的太平洋 MORB 中则极为罕见。因此, 杨阳等 (2021) 提出, 软流圈地幔中半球尺度的水及微量元素组成的不均一性反映了俯冲过程对于软流圈地幔组成的影响, 近 200 Ma 以来持续的太平洋板块俯冲像一个巨大的罩子把太平洋其下软流圈地幔罩住, 从而隔绝了俯冲释放流体/熔体对于太平洋地幔的影响, 而在“俯冲罩”之外的印度洋、大西洋、北冰洋地幔则接收了来自俯冲板片的富水组分贡献。定量模拟指示全球软流圈地幔中俯冲板片释放的富水组分贡献约等同于其在全球弧下地幔释放量的 13%。此外, 由于近 200 Ma 太平洋洋盆面积的不断缩小, 俯冲罩下的太平洋地幔域也相应缩小, 本研究发现太平洋地幔的净流出有两个主要通道: 分别通过加勒比海及西南太平洋流向大西洋和印度洋。

\*第一/通信作者: yangyang@gig.ac.cn

· 专题 11: 幔源岩浆活动和地幔动力学 ·

## 镁同位素揭示东亚大地幔楔在早白垩世早期 (123Ma) 已经形成

姜鼎盛<sup>1,2</sup>, 徐夕生<sup>1\*</sup>, 黄建<sup>2</sup>, 王小均<sup>3</sup>, 黄方<sup>2\*</sup>

1. 南京大学地球科学与工程学院 内生金属矿床研究国家重点实验室, 南京 210023;

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

3. 西北大学地质学系, 大陆动力学国家重点实验室, 西安 710069

东亚大地幔楔构造背景下西太平洋俯冲板片来源的富碳酸盐熔/流体与地幔橄榄岩之间的相互作用造成了中国东部中生代岩石圈的强烈减薄 (Li and Wang, 2018; Wang et al., 2016b; Zong and Liu, 2018)。前人的研究表明, 具有西太平洋俯冲板片来源碳酸印记的中国东部碱性玄武岩年龄的年龄普遍小于 106 Ma (Cai et al., 2021; Huang et al., 2015; Jin et al., 2020; Li et al., 2017; Li and Wang, 2018; Yang et al., 2012; Zeng et al., 2021)。然而, 这些年龄明显年轻于中国东部岩石圈减薄的峰值时间 (~125 Ma; Zhu et al., 2015; Zhu and Xu, 2019)。本文报道了一个形成于~123 Ma 的 OIB 型辉绿岩的 Mg 同位素数据, 前期的研究显示该辉绿岩的地幔源区中含有明显的古太平洋板块来源的俯冲组分 (玄武质洋壳+辉长质洋壳+陆源碎屑沉积物) (Jiang et al., 2021)。Mg 同位素结果显示, 该辉绿岩与中国

东部 <106 Ma 的玄武岩类似也富集轻的 Mg 同位素 ( $\delta^{26}\text{Mg} = -0.67\text{‰} \sim -0.35\text{‰}$ ), 揭示了其地幔源区也具有俯冲的碳酸盐组分 (e.g., Huang et al., 2015; Li et al., 2017; Liu et al., 2016; Yang et al., 2012)。这说明中国东部与西太平洋俯冲相关的碳酸盐再循环至少在 123 Ma 时就已经开始, 稍早于前人的认为的~106 Ma。考虑到该辉绿岩也具有相对较低的 ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>i</sub> 比值 (0.704254~0.706300; Jiang et al., 2021), 我们认为该再循环碳酸盐是富镁 (菱镁矿) 的且最初起源于地幔过渡带深度 (>360 km; Huang and Xiao, 2016; Li et al., 2017; Li and Wang, 2018)。以上的研究结果表明, 与西太平洋俯冲有关的东亚大地幔楔可能早在中国东部岩石圈减薄峰期时 (123 Ma) 就已经存在, 再次强调了西太平洋俯冲在中国东部岩石圈减薄过程中发挥了重要作用。

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (42103040, 41930214), 博士面上项目 (BH2080000137), 中央高校基本科研业务经费 (WK2080000151)

第一作者简介: 姜鼎盛 (1991-), 博士后, 研究方向: 金属稳定同位素在火成岩岩石学中国的应用. E-mail: dshjiang@ustc.edu.cn

\*通信作者简介: 徐夕生 (1962-), 教授, 博士生导师, 研究方向: 火成岩岩石学. E-mail: xsxu@nju.edu.cn

黄方 (1978-), 教授, 博士生导师, 研究方向: 同位素地球化学. E-mail: fhuang@ustc.edu.cn

· 专题 11: 幔源岩浆活动和地幔动力学 ·

## 玄武岩中地幔辉石岩捕虏体记录岩石圈的俯冲信息

鲁江姑<sup>1\*</sup>, Romain Tilhac<sup>2</sup>, William L. Griffin<sup>3</sup>, 郑建平<sup>4</sup>,  
熊庆<sup>4</sup>, Beñat Oliveira<sup>3</sup>, Suzanne Y.O'Reilly<sup>3</sup>

1. 自然资源部第二海洋研究所;
2. 西班牙格拉纳达大学;
3. 澳大利亚麦考瑞大学;
4. 中国地质大学(武汉)

大洋/大陆壳通过俯冲作用进入地幔, 对地幔的不均一性和演化起着重要的作用。尽管火山岩对这一过程提供了重要的认识, 但其捕获的地幔捕虏体能更直接地记录地幔和板片的多期相互作用, 从而示踪地幔的演化过程。本文选取澳大利亚东南部 Bullenmerri 和 Gnotuk 湖区的碧玄岩中石榴石二辉石岩和石榴石单斜辉石岩捕虏体, 结合详细的岩相学观察, 开展矿物和全岩的主量、微量以及 Sr、Nd 和 Hf 同位素的分析, 从而揭示这些石榴石辉石岩的成因及其记录的深部地幔动力学演化过程。

研究显示石榴石二辉石岩具有高的 MgO (17 wt% ~ 21 wt%) 和 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的含量, 相对平坦的 LREE 配分形式 ([La/Nd]<sub>CN</sub>=0.77-2.22) 以及洋岛玄武岩型的 Sr、Nd 和 Hf 同位素组成, 说明石榴石二辉石岩是对流地幔楔起源的基性熔体早期堆晶的产物。

石榴石单斜辉石岩总体具有更低的 MgO (12 wt%~16.3 wt%) 和 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的含量, 具体可分为三个亚类: 类型 1 石榴石单斜辉石岩具有最低的 Mg#, 相对亏损的 LREE 配分形式以及高放射性 Nd-Hf 同位素组成, 与热液蚀变的大洋壳熔融产生的熔体堆晶的产物类似, 可能起源于再循环大洋岩石圈相关的低 Mg 辉石岩部分熔融产生的熔体; 类型 2 尖晶石-石榴石单

斜辉石岩含有大量角闪石, 具有相对高的 Mg#, 富集 LREE 和 LILE, 亏损 HFSE, 以及大洋泥质沉积物型的 Sr-Nd-Hf 同位素组成, 可能是大洋混杂岩(含碳酸岩泥质沉积物)参与的熔融产生的熔体堆晶形成, 并作为重要的交代介质改造周围的地幔岩石; 类型 3 石榴石单斜辉石岩含有少量角闪石, 具有中等 Mg#, 多变的 LREE 以及 Sr-Nd-Hf 同位素组成, 可能是类型 1 的原岩受玄武质/碳酸岩质熔体不同程度交代作用产生的。这些结果说明石榴石单斜辉石岩可能更多记录了俯冲的大洋组分对地幔楔的改造作用。

另外, Hf 模式年龄以及 Sm-Nd 矿物等时线年龄表明这些辉石岩至少记录了两期事件。第一阶段代表辉石岩的形成, 可能是古生代大洋俯冲导致澳大利亚东南部陆下地幔楔不同程度部分熔融产生的玄武质岩浆在约 56~75 km 深度下堆晶形成。第二阶段代表辉石岩的重结晶阶段, 伴随着大量石榴石、斜方辉石、尖晶石等的出溶, 是由于始新世(约 40 Ma) 弧后岩石圈伸展导致先前的地幔楔抬升到 40~60 km 深度的过程。这个过程将含不同俯冲组分的辉石岩卷入到玄武岩的源区, 从而引起新生代玄武岩的成分不均一。这些地幔事件发生的时间跟上覆地壳构造运动相吻合。

• 专题 11: 幔源岩浆活动和地幔动力学 •

## The Lithological Heterogeneity of the Samoan Mantle Plume (萨摩亚地幔柱的岩性不均一)

王小均<sup>1</sup>, 陈立辉<sup>1</sup>, Takeshi Hanyu<sup>2</sup>, 钟源<sup>3</sup>, 施金华<sup>3</sup>

1. 西北大学地质学系, 大陆动力学国家重点实验室, 西安 710069;

2. Research Institute for Marine Geodynamics, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Yokosuka 237-0061, Japan;

3. 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

The Samoan mantle plume is thought to host three isotopically distinct low- $3\text{He}/4\text{He}$  components including EM2 (enriched mantle 2), dilute HIMU (high  $\mu = {}^{238}\text{U}/{}^{204}\text{Pb}$ ) and a depleted mantle (DM) component, which were sampled by shield-stage lavas from the Malu, Vai, and Upo trend volcanoes, respectively. However, it is unclear whether the isotopically distinct components are present as different lithologies. Using new Fe-Sr-Nd-Pb isotope data of Tutuila basalts (Samoa), combined with literature data for other Samoan basalts, we attempt to infer the lithological structure of the Samoan mantle plume. Results show that “Malu trend” basalts have heavier Fe isotopic compositions ( $\delta^{57}\text{Fe} = 0.15\text{‰} - 0.24\text{‰}$ ) than “Vai trend” and “Upo trend” basalts. The latter two groups have average  $\delta^{57}\text{Fe}$  of  $0.14\text{‰} \pm 0.07\text{‰}$  (2SD) and  $0.11\text{‰} \pm 0.03\text{‰}$  (2SD), respectively, similar to normal mid-ocean ridge basalts (N-MORBs,  $\delta^{57}\text{Fe} = 0.15\text{‰} \pm$

$0.05\text{‰}$ , 2SD). The fractional-crystallization-corrected  $\delta^{57}\text{Fe}$  values of all shield lavas are positively correlated with  $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$ ,  $\text{Pb}/\text{Nd}$  and  ${}^{87}\text{Sr}/{}^{86}\text{Sr}$  ratios while negatively correlated with  $\text{Nb}/\text{Th}$  and  $\epsilon\text{Nd}$  values, which cannot be explained by partial melting of a single garnet peridotite but points to heterogeneous source lithologies. The EM2 lavas are characterized with high  $\delta^{57}\text{Fe}$  and  $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$ , low  $\text{Nb}/\text{Th}$ , and enriched Sr-Nd isotopic ratios, requiring a pyroxenitic source component with imprints of both recycled terrigenous sediments and oceanic crust. The Vai- and Upo-trend lavas with MORB-like  $\delta^{57}\text{Fe}$  can be explained by partial melting of peridotitic sources, although different extent of refertilization are essential for generating their distinct radiogenic isotope signatures. These observations highlight the lithological heterogeneity of the Samoan mantle plume and relates the EM2 component with a pyroxenitic lithology.

· 专题 11: 幔源岩浆活动和地幔动力学 ·

## 中国东北鸡西新生代玄武岩源区岩性制约

郑志翀<sup>1</sup>, 曾罡<sup>1\*</sup>, 张慧丽<sup>1</sup>, 刘建强<sup>2</sup>, 陈立辉<sup>3</sup>, 周中彪<sup>1</sup>

1. 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;

2. 河海大学海洋学院, 海洋地质研究所, 南京 210098;

3. 西北大学地质学系, 大陆动力学国家重点实验室, 西安 710069

新生代火山岩在中国东北地区广泛出露, 主要集中于松辽盆地周缘。其中盆地东部多沿抚顺-密山、依兰-伊通断裂带分布, 尤其集中于长白山地区, 以钠质玄武岩为主。对这些钠质玄武岩的研究表明, 其化学成分存在较大变化, 其地幔源区存在显著的不均一性, 暗示这些玄武岩复杂的成因。另一方面, 此前对这些钠质玄武岩的研究多集中于长白山、镜泊湖火山区, 而对北部的鸡西、宝清及兴凯地区的玄武岩则关注较少。

为进一步了解这些钠质玄武岩之间的成因联系, 本文选择抚顺-密山断裂带北部鸡西地区的玄武岩开展研究工作, 对其主微量元素进行分析, 以查明其地幔源区岩性, 揭示其岩石成因。结果表明, 鸡西玄武岩岩性变化较大, 在 TAS 分类图上可进一步细分为碧玄岩、粗面玄武岩及玄武岩三个类别。微量元素上, 研究样品呈现不相容元素相对富集的特征, 具 Nb、Ta 的正异常和 Pb、Ti 的负异常, 与洋岛玄武岩的微

量元素组成相类似。通过计算研究样品的原生岩浆组成, 我们发现其具有富 MgO、贫 SiO<sub>2</sub> 和 CaO 的特征, 在透辉石向 CATS-橄榄石-石英的投影图上落在贫硅辉石岩的区域内; 同时结合玄武岩较高的 FC3MS ( $\text{FeO}^T/\text{CaO} - 3 \times \text{MgO}/\text{SiO}_2$ ) 值, 我们认为其源区确实存在辉石岩组分的贡献。

为进一步证实上述岩性特征, 我们还从玄武岩中挑选了橄榄石斑晶进行分析。结果表明, 橄榄石斑晶的 Fo 值存在较大的变化, 高 Fo 的橄榄石具有比低 Fo 橄榄石更低的 Ca 和 Mn 含量、高的 Ni 含量及 Fe/Mn 比值, 且高 Fo 值橄榄石与辉石岩来源熔体结晶的橄榄石组成相似, 同样反映其源区存在辉石岩组分的贡献。综上所述, 我们认为东北鸡西地区新生代玄武岩的源区确实存在辉石岩组分, 是再循环的地壳组分对研究区地幔改造的产物, 并在该区幔源岩浆的形成过程中产生了重要的影响。

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助 (No. 0206-14380114)

第一作者简介: 郑志翀 (1997-), 硕士研究生, 研究方向: 火成岩岩石学. E-mail: mg1929028@smali.nju.edu.cn

\*通信作者简介: 曾罡 (1985-), 硕士生导师, 研究方向: 火成岩岩石学与地幔地球化学. E-mail: zengg@nju.edu.cn

· 专题 11: 幔源岩浆活动和地幔动力学 ·

## Probing the Lithospheric Mantle Roots beneath the Far Eastern Russia: Implications for Orogenic Continental Accretion and Metasomatic Alteration

李东旭<sup>1</sup>, 刘金高<sup>1\*</sup>, Dmitri A. Ionov<sup>2</sup>

1. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083;
2. 蒙彼利埃大学, 法国蒙彼利埃 34095

In order to explore the age, composition and structure of the continental lithospheric mantle beneath the young circum-cratonic orogenic belts and the influence of Pacific plate subduction on the overlying lithospheric mantle. We present a study of the petrology, mineral and rock geochemistry, including Re-Os isotopes as well as highly siderophile elements of peridotite and pyroxenite xenoliths from the two tectonic units of far eastern Russia. Including Khanka block which from the eastern Central Asian Orogenic Belt (CAOB) and Sikhote-Alin accretionary orogenic belt (SAOB) in the Pacific coast of Asia. Our results show that Khanka peridotites are low to moderate degrees of melt extraction residues from the Paleoproterozoic fertile mantle. They show a positive correlation in the  $\text{Al}_2\text{O}_3$  vs.  $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$  diagram and have an alumina-chron age of  $\sim 1.9$  Ga. Their relative depleted LREE pattern in clinopyroxenes, less disturbed HSE and unradiogenic Os isotopic compositions indicate they were no or limited affected by metasomatism and persisted through the Phanerozoic orogenies. However, peridotites in SAOB

are more fertile than Khanka and some of them show significant Fe enrichment in whole-rock (e.g., FeO contents range from 8.5 wt.% to 12.6 wt.%) and minerals. Hydrous minerals and intense melt-rock reactions are observed in Fe-rich peridotites. These xenoliths show a correlation between FeO contents with Os isotopic compositions and other chemical index (e.g.,  $\text{SiO}_2$ , CaO,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  and NiO). Combined with trace element data, we suggest that the lithospheric mantle of SAOB was metasomated by evolved Fe-rich basaltic melts with oceanic plate signature. Plus the results of Os modal age, we conclude that the lithospheric mantle beneath the SAOB is highly heterogeneous. It is composed of ancient Mesoproterozoic lithospheric mantle fragments and most is newly accretive lithospheric mantle formed from the Neoproterozoic to Phanerozoic. It was later modified to form Fe-rich peridotites and pyroxenites by subduction-related melts. Finally, we posit that the Cenozoic mantle metasomatism in northeast China and far eastern Russia is controlled by asthenospheric upwelling and downwelling associated with the Pacific plate subduction.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41822301, 41790451, 41730214)

第一作者简介: 李东旭, 硕士研究生, E-mail: 2575158219@qq.com

\*通信作者简介: 刘金高, 中国地质大学 (北京) 教授, 博士生导师, E-mail: jingao@cugb.edu.cn

· 专题 11: 幔源岩浆活动和地幔动力学 ·

## 北大别饶拔寨超镁铁岩的 PGE 和 Re-Os 同位素研究

闫方超, 侯泉林, 刘庆\*

中国科学院地球动力学重点实验室, 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049

大别造山带位于华北板块和扬子板块的碰撞带上, 西接秦岭造山带, 东部为郟庐断裂带, 由北到南分布的晓天-磨子潭断裂、弥陀-花凉亭断裂、水吼-五河剪切带和太湖-马庙断裂将大别造山带分为 5 个岩石构造单元: 北淮阳带、北大别高温混合岩杂岩带、中大别超高压变质带、南大别低温榴辉岩带和宿松杂岩带 (Zhang et al., 2009; Tong et al., 2011)。大别山出露多个大小不一的镁铁-超镁铁杂岩体, 饶拔寨镁铁-超镁铁杂岩体是北大别岩石构造单元中最大的镁铁-超镁铁杂岩体, 它以方辉橄榄岩为主, 纯橄岩和二辉橄榄岩次之, 另有不规则状产出的基性变质岩团块。目前对饶拔寨橄榄岩的构造属性仍存在较大争议 (Zhai et al., 1994; 王希斌, 2005; Zheng et al., 2009)。PGE 和 Re-Os 同位素具有不同于亲石元素的地球化学性质, 且岩浆期后的次生过程不会导致 PGE 的活化和分异, 因此在研究橄榄岩的成因和演化上具有极大的优势。

本文选取饶拔寨方辉橄榄岩为研究对象, 通过详细的岩相学、矿物化学、全岩地球化学, 结合 PGE 和 Re-Os 同位素研究, 获得如下启示:

(1) 岩相学观察显示饶拔寨方辉橄榄岩可以分为含尖晶石方辉橄榄岩和含铬铁矿方辉橄榄岩两类, 多

种矿物 (橄榄石, 单斜辉石和斜方辉石) 发生韧性变形, 单斜辉石、斜方辉石和尖晶石的特殊共生现象, 均表明岩体来源较深。

(2) 矿物化学和全岩地球化学研究表明, 含尖晶石方辉橄榄岩的部分熔融程度相对较低 (~5%~16%), 而含铬铁矿方辉橄榄岩的部分熔融程度相对较高 (>18%), 整体表现出低-中等程度部分熔融的残余特征, 与深海橄榄岩范围类似, 具有大洋的亲石性。同时, 饶拔寨方辉橄榄岩表现出富集大离子亲石元素 (LREE、Sr、Ba、U), 亏损高场强元素 (Nb、Zr、Hf) 的特征, 暗示其受到过岛弧岩浆作用的影响。

(3) 部分熔融程度低的含尖晶石方辉橄榄岩呈现平坦的 PGE 配分模式, 部分熔融程度较高的含尖晶石方辉橄榄岩和含铬铁矿方辉橄榄岩呈现 PPGE 亏损的配分模式。饶拔寨方辉橄榄岩 Os 含量较高 (2.37~5.04 ppb),  $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$  (0.1149~0.1266) 低于原始地幔推荐值, 表明 Os 同位素较少受到后期熔/流体交代的影响,  $T_{\text{RD}}$  分散可能为地幔不均一的体现。

(4) 综合饶拔寨橄榄岩的岩石学、地球化学特征和产出背景, 提出形成饶拔寨橄榄岩的三种可能构造环境 (俯冲通道内, 增生楔, 洋-陆接触带)。

基金项目: 国家重点研发计划 ‘深地资源勘查开采’ 重点专项 (2016YFC0600401)、国家自然科学基金项目 (41273046) 和中央高校基本科研业务费专项资金

第一作者简介: 闫方超 (1993-), 博士研究生, 构造地质学专业. Email: yanfangchao17@mails.ucas.ac.cn

\*通信作者: 刘庆 (1976-), 副教授, 主要从事岩石学和地球化学研究. Email: qingliu@ucas.ac.cn

· 专题 11: 幔源岩浆活动和地幔动力学 ·

## 海南岛大陆岩石圈地幔的置换作用：地幔橄榄岩 Os-Hf-Sr-Nd 同位素的证据

肖雪<sup>1</sup>, 郝艳涛<sup>2</sup>, 刘金高<sup>1\*</sup>

1. 中国地质大学(北京)科学研究院, 北京 100083;

2. 浙江大学地球科学学院, 杭州 310007

海南岛东北部广泛出露的新生代玄武岩携带了大量新鲜且不同类型的地幔橄榄岩捕虏体, 为我们限定海南岛大陆岩石圈地幔的性质, 结构和年龄提供了理想样品。在地幔熔融过程中, Re-Os 强亲铁同位素体系和 Lu-Hf 亲石同位素体系的母子体相容性存在显著差异, 且不易被后期交代作用扰动, 因此被视为互补和有效的岩石圈地幔定年工具。相比之下, Sr-Nd 同位素体系易被后期事件改造, 很难得到具有意义的年龄, 但仍能为限定岩石圈地幔熔体抽取和交代过程提供约束信息。因此, 本研究拟结合主、微量元素和 Os-Hf-Sr-Nd 同位素对海南岛大陆岩石圈地幔的性质、结构和年龄进行限定。

海南岛地幔橄榄岩的全岩玄武质组分(如 CaO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), 橄榄石 Mg# (Fo), 尖晶石 Cr#和单斜辉石不相容元素具有不同的特征, 说明海南岛地幔橄榄岩经历了不同程度的部分熔融过程。通过对地幔橄榄岩熔融残留单斜辉石的稀土元素(REE)和 Hf 组成的模拟计算, 我们发现大部分样品的轻稀土元素(LREE)均高于模拟值, 说明除部分熔融外样品普遍遭受了后期交代富集作用。纯橄岩, 方辉橄榄岩和贫单斜辉石二辉橄榄岩具有高(La/Yb)<sub>N</sub>, Zr/Hf, Ca/Al, 低 Ti/Eu 比值和高场强元素(HFSE)亏损等特征, 主要经历了碳酸盐熔体的交代作用。富单斜辉石二辉橄榄岩具有与上述样品比值相反的特征, 主要经历了硅酸盐熔体的交代作用。在 Sr-Nd 协变图中, 富单斜辉石二辉橄榄岩靠近富集的洋中脊玄武岩区

域(E-MORB), 类似于华北克拉通东部新生代地幔橄榄岩, 说明交代熔体源于软流圈地幔。而纯橄岩, 方辉橄榄岩和贫单斜辉石二辉橄榄岩分布在亏损地幔和俯冲碳酸盐沉积物混合模拟曲线上, 说明交代熔体可能源于俯冲碳酸盐沉积物。结合主、微量元素, 全岩和橄榄石单矿物的 T<sub>RD</sub> 年龄, 我们认为方辉橄榄岩和贫单斜辉石二辉橄榄岩(0.5~1.9 Ga, 大部分 > 1.0 Ga) 代表古老耐熔的岩石圈地幔, 而富单斜辉石二辉橄榄岩(1.3~0.2 Ga, 大部分 < 1.0 Ga) 则代表新增生的岩石圈地幔。在 Fo 和地幔平衡温度(T<sub>REE</sub>=808~1366°C) 协变图中, 海南岛地幔橄榄岩样品之间并不存在线性关系, 说明海南岛岩石圈地幔并不存在分层现象, 古老的和新增生的岩石圈地幔处于同一深度。此外, 富单斜辉石二辉橄榄岩的橄榄石 T<sub>RD</sub> 年龄比对应全岩的年龄更老(>1.0 Ga), 说明新增生地幔是通过与古老耐熔的岩石圈地幔反应形成。

海南岛地幔橄榄岩的 Re-Os 等时线和“Al 等时线”限定出来的年龄分别为 1.1±0.78 Ga 和 1.3 Ga, 均落在 T<sub>RD</sub>=0.9~1.3 Ga 的年龄峰期范围内。为了进一步精确海南岛岩石圈地幔熔体抽取的年龄, 我们测定了单斜辉石和斜方辉石的 Lu-Hf 含量与同位素组成, 重建了全岩 Lu-Hf 等时线, 得到的等时线年龄为 1.2±0.08 Ga, 初始 ε<sub>Hf</sub> = -6.8±9.9 (1σ), 加权平均方差(MSWD)为 219。因此, 我们认为海南岛岩石圈地幔记录了古老熔体抽取事件的时间为 1.2±0.08 Ga (中元古代), 与上覆地壳年龄相对应。

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41822301, 41790451, 41730214)

第一作者简介: 肖雪(1994-), 博士研究生, 研究方向: 放射性同位素地球化学. E-mail: xiaoxue@cugb.edu.cn

\*通信作者简介: 刘金高(1984-), 博士生导师, 研究方向: 放射性同位素地球化学、天体化学. E-mail: jingao@cugb.edu.cn

· 专题 11: 幔源岩浆活动和地幔动力学 ·

## 用橄榄石和熔体包裹体的组成来制约东亚之下共同地幔组分 (common component) 的性质和起源

刘建强<sup>1\*</sup>, 陈立辉<sup>1</sup>, 王小均<sup>1</sup>, 张慧丽<sup>2</sup>, 曾罡<sup>2</sup>,  
Saskia Erdmann<sup>3</sup>, 张乐<sup>4</sup>, 任钟元<sup>4</sup>

1. 西北大学地质学系, 大陆动力学国家重点实验室 西安 710069;
2. 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;
3. Université d'Orléans - CNRS/INSU - ISTO - BRGM, UMR 7327, Orléans, France;
4. 中国科学院广州地球化学研究所, 同位素地球化学国家重点实验室 广州 510640

东亚地区新生代板内火山岩的地球化学组成揭示其下方的地幔具有高度的不均一性。前人研究表明来自东北亚的玄武岩具有以 EM1 (I 型富集地幔) 为主同位素特征而来自东南亚的玄武岩具有以 EM2 (II 型富集地幔) 为主同位素特征, 并且它们相交于一个共同的地幔组分 (common component, 简称 'C') (图 1)。迄今为止, 绝大多数的研究都集中在东亚之下富集地幔域的性质和组成上, 而对其共同地幔组分 (C) 的约束却很少。

为了阐明东亚之下共同地幔组分 (C) 的性质和起源, 我们对来自东北地区大兴安岭新生代哈拉哈-柴河玄武岩进行橄榄石斑晶及其熔体包裹体的联合研究。研究表明哈拉哈-柴河玄武岩中的橄榄石斑晶具有高的 Ni (1320-3033 ppm)、低的 Mn (1038-2486 ppm) 和 Ca (364-2244 ppm) 含量, 以及高的 Fe/Mn (64-90) 和低 Mn/Zn (<13) 比值, 这些橄榄石的成分特征表明其源区岩性为辉石岩。此外, 通过对 MgO > 6.5 wt% 的熔体包裹体进行加 (减) 橄榄石的方法计算得到哈拉哈-柴河玄武岩的原始岩浆组成。其原始岩浆的成分具有较高的 MgO (12.92-14.33 wt%)

和 TiO<sub>2</sub> (1.89-2.46 wt%), 以及较低的 SiO<sub>2</sub> (46.2-47.88 wt%), CaO (7.59-9.66 wt%) 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (10.65-12.52 wt%) 含量。将得到的哈拉哈-柴河玄武岩的原始岩浆组成与高温高压实验部分熔融体对比进一步揭示该地幔源区为贫硅的辉石岩。

为了进一步约束哈拉哈-柴河玄武岩的源区特征, 我们对其岩浆的水含量, 近液相线的结晶温度和氧逸度进行了估算。计算结果表明哈拉哈-柴河玄武岩的岩浆具有相对湿 (水含量: 1.02-2.83 wt%)、热 (结晶温度: 1050-1250 °C) 和较氧化 (氧逸度: FMQ+1.2) 的特征, 进而推断其地幔源也具有相对湿、热和氧化的特点。此外, 地震层析成像显示, 俯冲的太平洋板块停滞在地幔过渡带中, 其西缘延伸到大兴安岭的东缘, 大概位于哈拉哈-柴河火山之下。结合地球化学和地球物理的观测结果, 我们认为哈拉哈-柴河玄武岩源区的贫硅辉石岩极有可能是来自地幔过渡带的俯冲太平洋洋壳与周围地幔的熔体-岩石反应或机械混合形成的结果。这种特征的地幔源区可能解释了目前在俯冲太平洋板块最西端观测到的一个主要低速体和地幔 C 组分的起源。

· 专题 11: 幔源岩浆活动和地幔动力学 ·

## 超慢速扩张西南印度洋中脊下深层岩浆管道系统的跨岩石圈上升过程

马犇<sup>1</sup>, 刘平平<sup>1\*</sup>, 迪克·亨利<sup>2</sup>, 周美夫<sup>3</sup>, 陈琼<sup>4</sup>, 刘传周<sup>5</sup>

1. 北京大学地球与空间科学学院造山带与地壳演化重点实验室, 北京 100871;

2. 美国伍兹霍尔海洋研究所地质与地球物理系, 美国马萨诸塞伍兹霍尔 02540;

3. 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;

4. 同济大学海洋与地球科学学院, 上海 200092;

5. 中国科学院地质与地球物理研究所 岩石圈演化国家重点实验室, 北京 100029

全球洋中脊 (MOR) 系统中岩浆的生成和运输过程对于理解不同板块边界的岩石圈结构非常重要。MOR 岩浆系统的垂直范围和轴岩浆室 (AMCs) 的深度有很大争议, 特别是在超慢速扩张 MORs 中。在这里, 我们提供了西南印度洋中脊 (SWIR) 45°E 处玄武岩中具有成分环带的橄榄石和斜长石斑晶。斜长石-熔体气压计表明斜长石核部在~33km 的深度结晶, 接近 SWIR 岩石圈的厚度 (~35km 深)。这意味着 MOR 火山可能在软流圈和大洋岩石圈之间的边界处具有岩浆深根。相比之下, 斜长石边缘在海底以下~13km 的深度处生长, 这支持 SWIR 下方

存在一个深的 AMC。结合橄榄石 Fe-Mg、Ni 和 Mn 扩散计时法, MOR 玄武质岩浆可能在半个到两个月内以 0.002-0.01 m/s 的平均速率从 AMC 上升到海底, 这是迄今为止全球 MOR 系统中报告的最慢速度。相应地, SWIR 岩浆系统从~33km 到~13km 的温度梯度很高 (~5.75°C/km), 表明了冷的岩石圈结构。我们的结果表明, 在超慢速扩张 MORs 下的岩浆可能在大洋岩石圈底部深处结晶, 在缓慢上升到洋底之前, 短暂停留在 AMC 中。我们的研究有助于建立洋中脊岩浆系统更精细的岩浆作用过程和上升速率模型。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42272051)

第一作者简介: 马犇 (1997-), 博士研究生, 研究方向: 岩浆岩地球化学. E-mail: maben@stu.pku.edu.cn

\*通信作者简介: 刘平平 (1986-), 研究员, 研究方向: 岩浆岩. E-mail: ppliu@pku.edu.cn

• 专题 11: 幔源岩浆活动和地幔动力学 •

## 长白山天池火山中更新世粗面岩成岩地球动力学机制

叶希青<sup>1,2</sup>, 徐智涛<sup>1,2\*</sup>, 盘晓东<sup>1,2</sup>, 孙立影<sup>1,2</sup>, 朱大庆<sup>1,2</sup>

1. 中国地震局火山研究所, 长春 130117;

2. 吉林省地震局, 长春 130117

长白山天池火山坐落于延边朝鲜族自治州安图县境内, 大地构造位置位于华北克拉通北部东缘, 紧邻敦化-密山走滑深大断裂带东侧, 属于欧亚板块与太平洋板块相互作用的活动大陆边缘构造环境, 其火山喷发演化过程经历了造高原阶段、造盾阶段、造锥阶段和千年大喷发阶段。前人对长白山地区中酸性岩研究大多集中于千年大喷发产物的年代学和岩石地球化学研究, 而对造锥期中更新世粗面岩的研究较少, 且缺乏系统性, 如岩相学、矿物学、成岩时代、岩石成因类型和成岩地球动力学等方面, 一定程度上制约了人们对长白山天池火山造锥期中酸性岩浆作用的认识。基于上述存在的科学问题, 我们以天池火山区聚龙温泉西南部出露的中更新世粗面岩为研究对象, 对成岩时代与岩石成因类型进行了系统性的科学研究。

研究区内出露的粗面岩以岩席状或似层状产出。手标本呈浅灰色, 粗面结构。矿物多以自形或半自形为主, 斑晶主要为透长石(5–10 vol%)、正长石(5–10 vol%)和斜长石(5 vol%)以及少量钠长石、石英和角闪石(5–10 vol%), 基质矿物主要为碱性长石(55–60 vol%), 副矿物可见磁铁矿、磷灰石和锆石(<5 vol%)。本文样品点在火山岩 TAS 图解中均落入粗面岩范围, 地球化学分类命名与野外、室内岩相观察一致。

年代学及岩石地球化学方面, 获得本文粗面岩的锆石 LA-MC-ICP-MS U-Pb 同位素谱和年龄为 0.346Ma, 成岩时代应归属为中更新世。全岩主量元素具有较高的 SiO<sub>2</sub> (63.02–64.39wt.%)、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

(15.45–15.80 wt.%)、Na<sub>2</sub>O (5.85–6.05 wt.%) 和 K<sub>2</sub>O (5.74–5.90 wt.%) 含量, 而 MgO (0.12–0.13 wt.%)、MnO (0.10–0.12 wt.%) 和 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (0.06 wt.%) 含量较低, 全碱 (Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O) 含量 (11.59–11.95 wt.%) 和碱度率 (AR=6.00–6.50) 值较高。在 A/NK–A/CNK 图解和 AR–SiO<sub>2</sub> 图解中, 样品点均落入过碱质、过碱性岩石系列, 在 K<sub>2</sub>O–SiO<sub>2</sub> 图解中, 样品点均属钾玄岩范围, 具有钾质、过碱质、过碱性系列的火山岩石特征; 微量元素方面, 粗面岩中相对富集大离子亲石元素 (LILE; 如 Rb、K 和 Pb 等) 和高场强元素 (HFSE; 如 Th、U、Nb 和 Ta 等), 10000×Ga/Al 值 (3.97–4.06) 相对较低; 轻稀土元素相对富集, 亏损重稀土元素 (LREE/HREE=10.24–10.62, (La/Yb)<sub>N</sub>=13.88–15.41), 具有明显负 Eu 异常值 (δEu=0.13), 指示岩浆源区或演化过程中发生了明显的斜长石分离结晶作用; 全岩 Sr–Nd–Pb 同位素方面, 天池火山区粗面岩的全岩 (<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr)<sub>i</sub> 和 (<sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd)<sub>i</sub> 值范围分别为 0.70849–0.70914 和 0.512687–0.512788, εNd(t) 值为 0.96–2.93。 <sup>208</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb、<sup>207</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb、<sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb 值范围分别为 37.891–38.15、15.518–15.544 和 17.569–17.806。

以上结果综合表明天池火山区粗面岩是由玄武质岩浆持续底侵作用下, 引发的浅层壳源岩浆分异结晶而形成。我们进一步认为, 这些粗面质岩浆作用的地球动力学机制应与中更新世大陆板内伸展环境以及俯冲太平洋板块的回撤有关。

基金项目: 中国地震局地质研究所国家野外科学观测研究站项目 (NORSCBS22-06) 与吉林省地震局青年科技发展课题 (JZQ-202310) 联合资助

第一作者简介: 叶希青 (1995–), 研究实习员, 研究方向: 岩石地球化学和火山成因. E-mail: yxq0326@126.com

\*通信作者简介: 徐智涛 (1987–), 助理研究员, 研究方向: 火山成因和成岩成矿作用. E-mail: xuzhijtao@163.com

· 专题 11: 幔源岩浆活动和地幔动力学 ·

## 西太平洋早白垩纪以来火山岩地球化学及地幔源区不均一性分布

张国良<sup>1\*</sup>, 张吉<sup>1</sup>, Hayden Dalton<sup>2</sup>, 徐丰<sup>1</sup>, David Phillips<sup>2</sup>

1. 中国科学院海洋研究所, 青岛 266071;

2. 墨尔本大学

空间上大尺度化学组成不均一性, 是地幔组成的一个基本属性。通常而言, 地球软流圈地幔被划分为“太平洋型”和“印度洋型”(Dupal 异常)。西太平洋存在众多边缘海盆, 这些海盆整体上位于印澳板块和太平洋板块之间。一般认为, 西太平洋海盆地幔组成与印度洋地幔类似, 而与太平洋地幔明显不同, 二者在空间上大致以西太平洋岛弧体系为界。然而, 现代西太平洋海盆和岛弧系统几乎都形成于新生代以来。尤其是, 新生代以来西太平洋海盆火山岩组成反映出这里主要存在印度洋型地幔。例如: 伊豆小笠原-马里亚纳岛弧以西的海盆通常都是印度洋型地幔。关于西太平洋海盆不均一性分布特征和形成机制、印度洋型地幔长期存在于西太平洋或早期太平洋型地幔在后期被印度洋型地幔所替换, 都还缺少明确证据。实际上, 西太平洋极少出现中生代洋盆或岛弧火山岩, 这导致新生代以前的西太平洋岛弧演化历史和下伏地幔组成性质很不清楚。

首先, 我们对位于菲律宾海盆西缘的加瓜海脊火山岩进行地球化学和年代学研究, 发现加瓜海脊火山岩具有典型的岛弧火山岩特征, 主要有安山岩组成。Ar-Ar 年代学显示, 这些岛弧火山岩形成于 124-115 Ma, 被认为是代表早白垩纪形成的洋内弧。大多数加瓜海脊火山岩在 Hf-Nd 同位素组成上位于太平洋型地幔域, 主要反映了下部属于太平洋型地幔楔性质。这些火山岩在 Pb 同位素组成图解上, 主要表现为印度洋型特征, 主要是反映了地幔楔受到俯冲带流体组分的影响, 而不是地幔楔本身特征。以上结果显示, 西太平洋在早白垩纪时期存在太平洋型地幔。其次, 我们进一步对比了西太平洋新生代早期和晚期海盆火山岩, 发现了同一空间区域内存在不同的地幔化学属性随时间替代现象。结合早白垩纪至新生代以来火山岩(弧-盆)地球化学组成变化, 推测软流圈地幔大规模水平流动引起了西太平洋大尺度地幔组成不均一性多样性和分布变化。

• 专题 11: 幔源岩浆活动和地幔动力学 •

## 碱性洋岛玄武岩钼同位素组成揭示再循环洋壳 在深部地幔的演化

廖仁强<sup>1\*</sup>, 祝红丽<sup>1\*</sup>, Jörg Geldmacher<sup>2</sup>, 孙卫东<sup>1,3</sup>

1. 中国科学院海洋研究所, 青岛 266071;

2. GEOMAR Helmholtz Centre for Ocean Research Kiel, Kiel 24148

3. 中国科学院大学, 北京 100049

板块俯冲作用将地壳物质(如洋壳)输送进地幔深部, 造成地幔成分的不均一性。然而, 这些地壳物质是如何在深部地幔中进行转变和演化的, 目前尚不清楚。为了更好地解决这个问题, 我们对来自北大西洋东部 Madeira 群岛的碱性玄武岩开展了钼同位素分析。这些玄武岩根据地层关系和喷发年龄可分为早裂谷期和晚后侵蚀期两类。Mo 同位素结果显示系统低于洋中脊玄武岩, 且与 Sr-Nd-Pb 同位素比值具有良好的相关性。特别需要注意的是,  $\delta^{98/95}\text{Mo}$  值与样品的喷发年龄具有对应关系, 即早期喷发的熔岩  $\delta^{98/95}\text{Mo}$  值较低, 晚期喷发的熔岩  $\delta^{98/95}\text{Mo}$  值较高。

这些同位素体系表明, Madeira 群岛碱性玄武岩继承了其源区不均一的化学组成, 即再循环大洋岩石圈不同部分比例的变化。具体地, 早裂谷期岩浆主要受到再循环洋壳上部热液蚀变的玄武质部分的影响( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  和 U/Pb 值较高,  $\delta^{98/95}\text{Mo}$  值较低), 而后侵蚀期岩浆则反映了再循环大洋岩石圈未蚀变的下地壳和超镁铁质组分(辉长岩和橄榄岩)(类似地幔的 Sr-Mo 同位素组成和 U/Pb 值)。因此, Madeira 群岛碱性玄武岩的 Mo 同位素特征揭示了再循环洋壳再深部地幔的逐步熔融, 并证实了再循环洋壳在碱性洋岛玄武岩成因中的作用。

基金项目: 海洋地质学 (42206057)

第一作者简介: 廖仁强 (1990-), 特别研究助理, 研究方向: 海洋岩石学与地球化学. E-mail: liaorenqiang@qdio.ac.cn

\*通信作者简介: 祝红丽 (1986-), 副研究员, 研究方向: 海洋岩石学与地球化学. E-mail: zhuhongli@qdio.ac.cn

· 专题 11: 幔源岩浆活动和地幔动力学 ·

## 超临界流体交代地幔橄榄岩的实验研究

于朝辉, 李万财\*, 倪怀玮

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

超临界流体是俯冲带的优良交代介质,但目前对超临界流体交代地幔楔橄榄岩的研究还处于空白。我们采用高温高压活塞圆筒装置,实验模拟弧下深度条件下(3 GPa, 1200 °C)由大洋沉积物(GLOSS)-水体形成的超临界流体,来交代典型的地幔楔橄榄岩(尖晶石二辉橄榄岩, KLB-1),研究超临界流体和地幔楔橄榄岩发生交代反应的机制和产物特征。初步实验结果表明,随着超临界流体对橄榄岩的质量比从 1:15 增加到 2:1,交代残余的流体相从富水的玄武质熔体过渡到高镁安山质超临界流体,交代的固相产物从角闪石二辉橄榄岩变化到方辉橄榄岩,再到纯橄榄岩。在超临界流体和橄榄岩的质量比小于 1:5 时,交

代形成角闪石、石榴石和单斜辉石。超临界流体交代形成的单斜辉石和斜方辉石等矿物的主量元素组成明显有别于前人实验获得的富水流体或含水熔体交代的产物。超临界流体交代形成的斜方辉石更富 Si 和 Mg,而贫 Ca、Fe 和 Al;单斜辉石富 Ca 和 Si,而贫 Fe 和 Al。在微量元素掺杂的实验中,相较于初始的橄榄岩,超临界流体交代形成的橄榄岩在中重稀土和高场强元素含量上都有显著的提高,而大离子亲石元素含量降低;斜方辉石中大离子亲石元素、高场强元素(除 Zr 外)和稀土元素含量都显著提高。总之,超临界流体交代地幔楔橄榄岩能够产生明显有别于含水硅酸盐熔体和富水流体交代的主微量元素地球化学特征。

基金项目: 国家重点研发计划项目: 超临界地质流体的性质和效应 (2018YFA0702700)

第一作者简介: 于朝辉 (1997-), 博士研究生, 研究方向: 超临界流体交代作用

\*通信作者简介: 李万财 (1986-), 副研究员, 研究方向: 实验岩石学. E-mail: jifm@ustc.edu.cn

· 专题 11: 幔源岩浆活动和地幔动力学 ·

## 兴蒙造山带橄榄岩捕虏体中石榴石次变边对地幔组成转变的启示

邹东雅, 张宏福

浙江大学 地球科学学院, 杭州 310058

地幔橄榄岩捕虏体中石榴石次变边的形成过程对理解地幔的构造演化和转变具有非常重要的意义。兴蒙造山带锡林浩特地区新生代玄武岩携带的石榴石橄榄岩捕虏体中的石榴石普遍发育冠冕状次变边结构。本研究通过对石榴石及其次变边进行详细的岩相学和电子探针分析, 探讨石榴石次变边的成因及其揭示的岩石圈地幔经历的深部过程。根据次变边矿物组成的不同, 将其分为原始的次变边 (R1 和 R2) 和交代的次变边 (MR1 和 MR2)。原始的次变边中, 新鲜的石榴石由内向外依次被放射状且矿物颗粒较细的 R1 和粒状且矿物颗粒较粗的 R2 包围, 且 R1 通常比 R2 宽。R1 主要组成矿物为  $\text{Opx}+\text{Sp}+\text{Melt1}/\text{Pl}\pm\text{Cpx}$ , R2 主要组成矿物为  $\text{Opx}+\text{Sp}+\text{Cpx}$ 。与 R2 及橄榄岩捕虏体相比, R1 的斜方辉石和单斜辉石具有较高的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量和较低  $\text{Mg}\#$  值和  $\text{SiO}_2$  含量。与橄榄岩捕虏体相比, R1 和 R2 中的尖晶石均具有较低的  $\text{Cr}\#$  和较高的  $\text{Mg}\#$  值。R1 的斜长石为钙长石, 熔体成分与斜长石相比具有偏高的  $\text{MgO}$  和  $\text{FeO}$  含量。计算的 R1 的全岩成分与新鲜的石榴石一致, 是石榴石等化学分解的产物。R2 的全岩成分比新鲜的石榴石具有偏高的  $\text{MgO}$  和偏低的  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量, 是石榴石和橄榄石反应的产物。交代的次变边是由原始的次变边受到部分或完全的交代作用形成的。完全交代的次变边仍然保留原始次变边的双圈层结构, 而未完全交代的次变边则仅在原始次变边的局部出现。交代的次变边中, 矿物颗粒较细的核部 (MR1) 和矿物颗粒

较粗的边部 (MR2) 主要矿物组成一致为  $\text{Ol}+\text{Cpx}+\text{Sp}+\text{Melt2}$ 。与原始的次变边相比, MR1 和 MR2 中的橄榄石和单斜辉石均具有较高的  $\text{Mg}\#$  值, 单斜辉石同时具有较高  $\text{Ca}/\text{Al}$  比值 ( $>8$ ), 尖晶石具有较高的  $\text{Cr}\#$  和较低的  $\text{Mg}\#$  值, 熔体较富  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$  和  $\text{K}_2\text{O}$  含量。这些现象说明交代的次变边可能是碳酸盐熔/流体交代原始的次变边消耗斜方辉石生成橄榄石和单斜辉石形成的, 这与岩相学观察到的单斜辉石中包裹斜方辉石残余体一致。此外, 同一样品中 R1 的平衡温度略高于 R2 的平衡温度, 且二者均高于橄榄岩的平衡温度。因此, 锡林浩特地区石榴石橄榄岩至少经历了两阶段的退变质作用: 第一阶段为橄榄岩自石榴石相抬升至尖晶石相, 且受到地幔上涌的加热作用, 导致石榴石和橄榄石进行缓慢的反应形成 R2; 第二阶段是在连续减压且加热的背景下, 第一阶段残余的石榴石发生快速地等化学分解反应, 形成 R1。退变质作用之后, 石榴石原始的次变边又经历了碳酸盐熔/流体的交代作用形成 MR1 和 MR2, 最终被寄主玄武岩携带至地表。所以, 石榴石次变边的形成记录了新生代时期兴蒙造山带经历的广泛的地幔上涌和多次的地幔隆升, 以及地幔交代作用, 为研究深部地幔过程提供了重要证据。华北克拉通晚中生代时期经历了强烈的岩石圈伸展运动并伴随着软流圈的上涌, 这些过程同样会造成岩石圈地幔的减压和加热, 从而导致石榴石相橄榄岩向尖晶石相转变, 这可能也是华北克拉通岩石圈地幔转变的机制之一。

· 专题 11: 幔源岩浆活动和地幔动力学 ·

## 南海地幔不均一性与深部物质循环

钱生平<sup>1\*</sup>, 周怀阳<sup>1</sup>, 程昊<sup>1</sup>, 张乐<sup>2</sup>, 夏小平<sup>2</sup>

1. 同济大学 海洋与地球科学学院 210360;

2. 中国科学院广州地球化学研究所 同位素地球化学国家重点实验室, 广州 510640

地幔作为地球的主要组成部分 (体积约占 82.3%), 是全球地球化学循环的关键储库。典型边缘海盆地下覆地幔常受到俯冲板块的影响和改造, 为我们理解俯冲板块在地球内部的循环过程和时间尺度提供了关键线索。

南海作为西太典型边缘海之一, 在扩张期和扩张期后, 南海海盆形成大量海山。我们对南海多个海山火山岩开展 Ar-Ar 和 U-Pb 年代学, 全岩地球化学, 以及熔体包裹体和矿物的原位元素和 Sr-Pb 同位素分析, 并结合地球物理分析研究工作, 取得了如下初步认识: (1) 南海少部分海山形成于扩张期 (16 - 32 Ma), 大部分海山形成于扩张期后 (< 16 Ma)。扩张期海山火山岩大多是拉斑质玄武岩, 而扩张期后海山火山岩大多是碱性玄武岩, 具有更大的成分范围。东南亚新生代幔源岩浆成分随时间的变化主要由源区组成和岩石圈厚度变化共同控制。

(2) 南海及其周围地区新生代玄武岩地幔源区存在 DMM-EM2-FOZO 三端元组分, 地幔不均一性很大程度上是因年轻俯冲洋壳 (< 200 Ma) 经地幔过渡带再循环所导致, 强调俯冲组分的化学成分多样性对于改造地幔的组成具有非常大的影响。

(3) 根据东南亚新生代火山岩的时空演化和岩石地球化学结果, 并结合深部地震层析成像结果和区域构造背景, 提出东南亚新生代火山活动与多个板块先后俯冲引发地幔物质上涌减压熔融有关; 并揭示了东南亚环形俯冲系统的深部动力过程、岩浆时空演化特征、和深部物质循环过程。

通过对南海火山岩的研究揭示了边缘海盆俯冲板块的循环过程和时间尺度, 地幔的不均一性, 构建了东南亚多板块俯冲过程和浅部岩浆响应之间的内在联系, 可以同时解释东南亚地区地质、地球化学和地球物理观测。

· 专题 11: 幔源岩浆活动和地幔动力学 ·

## 一个亏损的赤道西太平洋地幔域: 来自卡洛琳板块玄武岩 Sr-Nd-Pb-Hf 同位素的证据

徐丰<sup>1,2,3</sup>, 张国良<sup>1,3\*</sup>

1. 中国科学院海洋研究所深海极端环境与生命过程研究中心, 青岛 266071;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 中国科学院海洋大科学中心, 青岛 266071

太平洋和印度洋洋中脊玄武岩具有显著的同位素组成差异, 反映了大尺度的地幔不均一性。西太平洋边缘海盆和岛弧玄武岩大多具有印度洋型地幔特征, 因此俯冲带被认为是印度洋型和太平洋型地幔域的边界, 对我们认识地幔对流和组分演化具有重要意义。然而, 由于缺少新生代洋中脊玄武岩样品, 俯冲的中生代太平洋板块下伏地幔属性尚不清楚。卡洛琳海盆形成于 36-25 Ma, 作为唯一的与太平洋板块运动速度和方向相同且缺乏成熟俯冲带相隔的边缘海盆, 是研究西太平洋地幔组成的天然实验室。我们分析了卡洛琳板块洋中脊玄武岩地球化学组成, 根据  $(La/Sm)_N$  将其分为两组: D-MORB 组样品具有异常低的  $(La/Sm)_N$  (0.37~0.6), 不相容元素含量低于大部分太平洋和印度洋洋中脊玄武岩; 而 N-MORB 组样品  $(La/Sm)_N$  (0.69~1.55) 与不相容元素含量和洋中脊玄武岩类似。动力熔融模拟结果表明 D-MORB 组样

品微量元素组成需要一个经历 5% 熔体抽取的超亏损地幔源区。卡洛琳板块洋中脊玄武岩 Sr-Nd-Pb-Hf 同位素组成与印度洋洋中脊玄武岩相似, 但相比于后者, 卡洛琳玄武岩在相同的  $\epsilon Nd$  和  $^{206}Pb/^{204}Pb$  时具有更高的  $\epsilon Hf$ , 并且 D-MORB 组样品具有显著高的  $\epsilon Nd$  和  $\epsilon Hf$ 。D-MORB 组样品异常高的 Nd-Hf 同位素组成与低的母子体比值 ( $Sm/Nd, Lu/Hf$ ) 相对应, 反映了古代经历熔体抽取的超亏损地幔组分的贡献。微量元素-同位素模拟结果表明卡洛琳玄武岩地幔源区可以由超亏损地幔端元和卡洛琳地幔柱富集端元混合而解释。卡洛琳海盆和周边的菲律宾海盆以及马努斯海盆基底玄武岩具有相似的超亏损地幔组分的贡献, 板块重建结果表明它们形成时都位于卡洛琳地幔柱和马努斯地幔柱附近, 我们认为它们来源于共同的赤道西太平洋地幔源区。赤道西太平洋地幔域的发现有助于重建西太平洋边缘海盆构造历史和理解亏损地幔的长期演化。

第一作者简介: 徐丰 (1995-), 研究生, 研究方向: 海洋岩石地球化学. E-mail: xufeng18@mails.ucas.ac.cn

\*通信作者简介: 张国良 (1981-), 研究员, 研究方向: 海洋岩石地球化学. E-mail: zhangguoliang@qdio.ac.cn

• 专题 11: 幔源岩浆活动和地幔动力学 •

## 地幔不均匀体在熔融过程中的变形和混合

刘博达<sup>1\*</sup>, Yan Liang<sup>2</sup>

1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

2. 布朗大学 Brown University, Providence, RI, USA 02906

研究洋中脊下方软流圈地幔的化学组成依赖于洋中脊玄武岩和深海橄榄岩的岩石地球化学观测。由于洋中脊下方地幔经历了部分熔融、熔体抽离、熔体运输等一系列过程, 岩石地球化学观测往往不能直接反映软流圈地幔的组成和结构。尽管如此, 可以肯定的是地幔是化学不均一的。表现出化学不均一性(微量元素、同位素、岩性差异等)且具有一定大小和形状的实体就是地幔不均匀体。为了更好地利用岩石地球化学观测还原软流圈地幔本来的成分和结构信息, 我们应用两相流模型模拟了地幔不均匀体在洋中脊下方地幔熔融、熔体抽离和熔体运输混合过程中的变化。

模拟结果表明: (1) 洋中脊玄武岩的同位素成分超出了传统混合模型定义的混合线; (2) 洋中脊玄武

岩的同位素成分范围随着地幔不均匀体体积的减小而减小; (3) 地幔不均匀体的化学信号在熔融和熔体运输过程中衰减, 几何形状发生拉伸变形, 最终被记录在大洋岩石圈地幔之中。

利用这些数值模拟结果, 我们改进了经典岩浆混合模型 (Langmuir et al., 1978), 确定了不完全混合岩浆的成分范围, 进一步提出利用洋中脊玄武岩同位素估测所在地下方地幔不均匀体大小的方法。我们展望可以通过熔融残留体中的记录反演源区地幔不均匀体的几何形状, 前提是更系统地采样深海橄榄岩或者蛇绿岩。期待岩石地球化学方法可以更精细地约束地幔结构及其化学不均一性的成因, 并联合地球动力学模拟和地球物理观测, 揭示出更丰富的地球演化历史。

基金项目: 中科院青年人才计划

第一作者简介: 刘博达, 副研究员, 研究方向: 岩石地球化学的两相流数值模拟. E-mail: bodaliu@mail.iggcas.ac.cn

• 专题 11: 幔源岩浆活动和地幔动力学 •

## 磷元素在地球各圈层的分布

马超<sup>1,2</sup>, 汤艳杰<sup>1,2\*</sup>

1. 中国科学院地质与地球物理研究所 岩石圈演化国家重点实验室, 北京 100029;

2. 中国科学院大学 地球与行星科学学院, 北京 100049

磷(P)是维持生命活动所必需的关键营养元素, 主要赋存在矿物和岩石中, 并能够通过岩浆活动、风化剥蚀、水体运移、沉积作用和俯冲作用等深部和表生过程在硅酸盐地球的各个圈层之间循环。计算 P 在硅酸盐地球不同圈层中的丰度是理解地球系统及其 P 循环的必要条件。

虽然现有的研究系统地限定了地壳中的 P 元素丰度, 然而由于地球内部尤其是深部地幔的样品获取难度较大, 对于硅酸盐地球的 P 丰度仍缺乏较为准确的限定。硅酸盐地球中包括钕(Nd)在内的亲石元素的丰度可以通过球粒陨石模型计算得出。而由于 P 在行星吸积和核幔分异等早期地质过程中表现为中等挥发性和中等亲铁性, 这造成了无法直接通过球粒陨石模型估算 P 在硅酸盐地球中的丰度。鉴于 P 和 Nd 在地幔熔融和岩浆分异过程中表现出类似的不相容性, P 的丰度可以根据硅酸盐地球的 Nd 丰度和 P/Nd 比值进行推断。由于受分析技术和数据量等因素所限, 前人估算的硅酸盐地球的 P/Nd 比值不确定度较大, 在 50 到 100 之间。随着高精度 P-Nd 数据的增加, 使得更准确地限定岩浆过程中 P 和 Nd 的分配行为以及各个地球化学储库的 P/Nd 比值、进而估算硅酸盐地球的 P 丰度成为可能。

本文通过系统地收集在线岩石地球化学数据库和已发表的文献中的样品数据, 构建了大洋玄武岩数据集。统计结果显示, 全球洋中脊玄武岩具有  $63.8 \pm 0.5 (2\sigma_m)$  的平均 P/Nd 比值, 而洋岛玄武岩的平均 P/Nd 比值为  $57.6 \pm 0.4 (2\sigma_m)$ 。大洋玄武岩中 P 和 Nd 含量呈对数正态分布, 两者的协变关系表明, 在地幔熔融和岩浆分异过程中, P 的不相容性约为 Nd 的 1.1–1.4 倍。结合分离熔融模型和岩浆过程中 P 和 Nd 的分配行为, 本文基于洋中脊玄武岩和洋岛玄武

岩的 P/Nd 比值反演其地幔源区的 P/Nd 比值。结果表明亏损和富集地幔源区的 P/Nd 比值分别为  $62.5 \pm 0.8 (2\sigma_m)$  和  $57.0 \pm 0.5 (2\sigma_m)$ 。

本文通过构建亏损和富集地幔源区的相对大小与其 Nd 含量的函数关系, 结合亏损和富集地幔源区中 Nd 含量的前人研究结果(分别为 0.97 ppm 和 2.20 ppm), 估算出富集地幔源区约占现代地幔的 22%。综合大陆地壳、亏损和富集地幔源区的质量和 P/Nd 比值(前人研究得出大陆地壳的 P/Nd 比值约为 28.4), 本文估算出现代硅酸盐地球的 P/Nd 比值为  $57.7 \pm 3.0 (2\sigma_m)$ , 相当于含有约  $3.1 \times 10^{20}$  kg 的 P。其中亏损和富集地幔源区分别约占现代硅酸盐地球 P 含量的 61%和 35%, 而大陆地壳仅约占其 4%。P 的差异性分布与俯冲过程、岩浆分异和矿物组成等因素相关。俯冲过程可以显著影响地球 P 循环, 而岩浆分异过程通过改变石榴石、磷灰石等矿物的含量来重新分配 P。本文对地球不同圈层 P 丰度的估算有助于更好地理解现代硅酸盐地球 P 的分布、P 循环, 以及地球系统的特征。

### 主要参考文献:

- [1] Palme, H. and O'Neill, H.S.C., 2014. Cosmochemical estimates of mantle composition. In: H.D. Holland and K.K. Turekian (Editors), *Treatise on Geochemistry* (Second Edition). Elsevier, Oxford, 3, 1-39.
- [2] Rudnick, R.L. and Gao, S., 2014. Composition of the continental crust. In: H.D. Holland and K.K. Turekian (Editors), *Treatise on Geochemistry* (Second Edition). Elsevier, Oxford, 4, 1-51.
- [3] Ruttenger, K.C., 2014. The global phosphorus cycle. In: H.D. Holland and K.K. Turekian (Editors), *Treatise on Geochemistry* (Second Edition). Elsevier, Oxford, 10,

基金项目: 国家杰出青年科学基金(41725014)

第一作者简介: 马超(1997-), 博士生, 研究方向: 地幔地球化学. E-mail: mach25@mail2.sysu.edu.cn

\*通信作者简介: 汤艳杰(1973-), 研究员, 研究方向: 地幔地球化学. E-mail: tangyanjie@mail.iccas.ac.cn

- 499-558.
- [4] Ryan, J.G. and Chauvel, C., 2014. The subduction-zone filter and the impact of recycled materials on the evolution of the mantle. In: H.D. Holland and K.K. Turekian (Editors), *Treatise on Geochemistry* (Second Edition). Elsevier, Oxford, 3, 479-508.
- [5] Ma, C., Tang, Y., Ying, J. and Zhang, H., 2023. The phosphorus budget of the silicate Earth based on an updated estimate of the P/Nd ratio. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 128(2): e2022JB025384.

· 专题 11: 幔源岩浆活动和地幔动力学 ·

## 黄长岩-碱玄岩成分的转变揭示碳酸盐化地幔两阶段 熔融熔体与岩石圈地幔的反应

张国坤<sup>1</sup>, 李小伟<sup>1\*</sup>, 孙剑<sup>2</sup>, 刘建强<sup>3</sup>, 许继峰<sup>1</sup>

1. 中国地质大学地球过程与矿产资源国家重点实验室, 地球科学与资源学院, 北京 100083;

2. 中国地质科学院地质研究所, 自然资源部同位素地质重点实验室, 自然资源部深地动力学重点实验室, 北京 100037;

3. 西北大学地质学系, 大陆动力学国家重点实验室, 西安 710069

陆内碱性岩浆作用通常会形成一系列、成分跨度较大的熔岩, 包括强碱性的黄长岩、霞石岩和碧玄岩以及弱碱性的碱性玄武岩和拉斑玄武岩等。对于这一系列碱性系列岩石的成分转变控制因素以及强碱性岩石和弱碱性岩石的相互关系, 目前还存在一些争议。本研究选取西秦岭造山带新生代黄长岩和碱性玄武岩组合作为研究对象, 通过展开全岩主微量及 Sr-Nd-Mg-Ca 同位素分析, 以约束陆内、尤其是加厚岩石圈地区碱性岩的源区组成和成分转变机制。总体而言, 黄长岩和碱性岩具有与 EM-II 端员相似的 Sr-Nd 同位素组成和轻于地幔的 Mg-Ca 同位素组成 ( $\delta^{26}\text{Mg}=-0.26\text{‰}\sim 0.43\text{‰}$ ;  $\delta^{44/42}\text{Ca}=0.22\text{‰}\sim 0.41\text{‰}$ ), 二者均具有近似于 OIB 的微量元素配分模式。但相较于高硅的碱性玄武岩, 贫硅的黄长岩更加富集不相

容元素, 且具有相对高的 Dy/Yb、Nb/Ta 值和相对低的 Ti/Eu 值, 且后者的 Sr-Mg-Ca 同位素组成呈现线性耦合关系。结合前人实验岩石学的认识, 笔者认为西秦岭陆内碱性岩成分上的转变为两阶段碳酸盐化地幔部分熔融的熔体与岩石圈地幔的反应: 阶段 I: 碳酸盐化榴辉岩低程度部分熔融产生的贫硅碳酸盐熔体与上部富集的岩石圈地幔反应, 形成富碳硅酸盐熔体, 上升过程中发生液态不混溶形成黄长岩; 阶段 II: 脱碳榴辉岩高程度部分熔融产生的富硅熔体继承了原岩轻的 Mg-Ca 同位素特征, 之后在上升过程中与岩石圈地幔发生反应生成碱性玄武质熔体, 最终喷发形成碱性玄武岩。深部地幔再循环物质熔融程度的改变, 熔融产物与岩石圈地幔的反应共同控制了陆内碱性岩成分上的转变。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (批准号: 41872066)

第一作者简介: 张国坤 (1996-), 男, 博士研究生, 研究方向: 岩浆作用与深部过程. E-mail: guokun\_zhang@163.com

\*通信作者简介: 李小伟, 男, 博士, 副教授, 岩石学专业. E-mail: xwli@cugb.edu.cn

• 专题 11: 幔源岩浆活动和地幔动力学 •

## 多元同位素示踪地幔中的再循环大洋物质

汤艳杰<sup>1,2</sup>, 英基丰<sup>1,2</sup>, 张宏福<sup>1,2,3</sup>

1. 中国科学院地质与地球物理研究所 岩石圈演化国家重点实验室, 北京 100029;

2. 中国科学院大学 地球与行星科学学院, 北京 100049;

3. 浙江大学 地球科学学院, 杭州 310058

作为非传统稳定同位素的代表, Li 同位素被广泛用于示踪与熔/流体相关的地质过程, 包括地幔中的再循环物质。华北克拉通地幔橄榄岩捕虏体高度不均一的 Li 同位素特征记录了熔/流体对橄榄岩的改造作用。大量地幔捕虏体的锂同位素研究表明, 华北岩石圈地幔经历了三阶段的改造过程, 包括蚀变洋壳俯冲阶段、俯冲板片在深部地幔滞留、以及软流圈上涌所释放的熔/流体改造作用。

在熔/流体-橄榄岩反应的过程中, Li 同位素在交代介质与橄榄岩、以及不同矿物之间的分馏作用造成了复杂的 Li 同位素不均一现象。在大洋板块俯冲的早期阶段, 俯冲板块释放的流体具有高 Li 含量和高  $\delta^7\text{Li}$  的特征, 与橄榄岩反应, 升高橄榄岩 Li 含量和  $\delta^7\text{Li}$  值。随着板片俯冲深度增加和重锂组分的释放, 残余俯冲板片在深部地幔熔融释放出的熔体具有低于正常地幔的  $\delta^7\text{Li}$  值, 轻 Li 熔体与橄榄岩反应, 导致地幔矿物  $\delta^7\text{Li}$  降低。扩散分馏作用可在矿物颗粒尺度形成 Li 含量和同位素组成环带, 矿物颗粒边缘的 Li 浓度通常高于核部, 而  $\delta^7\text{Li}$  值低于核部。近期软流圈熔体改造作用的叠加, 使橄榄岩因之前被轻 Li 熔体改造而降低了的  $\delta^7\text{Li}$  值回升、趋近正常地幔。由于地幔改造作用的多阶段性、熔体和改造程度的不同, 华北克拉通东部与中部地幔橄榄岩的 Li 同位素特征具有系统性的差异。

与亏损地幔相比, 华北中部新生代玄武岩具有偏

低的 Ba 同位素组成 ( $\delta^{138/134}\text{Ba}$  值从 -0.06‰ 变化到 +0.15‰), 轻 Ba 同位素组成指示玄武岩的地幔源区含有轻 Ba 同位素特征的再循环物质。玄武岩的  $\delta^{138/134}\text{Ba}$ 、 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ , 以及 Rb/Ba 和 Ba/Th 比值之间的相关性表明, 地幔源区含有再循环的大洋沉积物。根据 Sr-Nd-Ba 同位素混合模拟计算结果, 亏损地幔中加入 0.5%-5% 的大洋沉积物就可以形成华北新生代玄武岩的 Ba 同位素组成特征。

地幔橄榄岩中单斜辉石原位微量元素和 Sr 同位素分析表明, 矿物核部与边部具有明显差别, 反映了多期改造过程。早期交代作用的含水熔/流体来源于年轻俯冲板片的脱水熔融。中期改造作用的熔/流体来源于俯冲的蚀变洋壳, 使华北克拉通岩石圈地幔组成和性质发生了巨大改变, 导致克拉通的破坏。近期改造作用的介质主要是软流圈的熔/流体。

华北克拉通玄武岩和地幔捕虏体的 Mg 同位素研究也佐证了再循环的碳酸盐熔体对地幔源区的改造作用, 中国东部新生代地幔可能都受到了西太平洋板块俯冲的影响, 远在千公里之外的华北中部地区也受到了影响, 该区新生代玄武岩 Sr-Nd-Pb 同位素特征表明古老岩石圈与软流圈之间的相互作用, 其 Ba 同位素组成特征反映地幔源区含有再循环的大洋沉积物。综上所述, 多元同位素体系联合能够示踪地幔中的再循环大洋物质, 是未来地幔地球化学研究的发展趋势。

· 专题 11: 幔源岩浆活动和地幔动力学 ·

## 华北克拉通岩石圈地幔氧逸度演化

叶辰阳<sup>1,2</sup>, 英基丰<sup>1,2\*</sup>, 汤艳杰<sup>1,2</sup>, 赵新苗<sup>1</sup>, 张宏福<sup>1,2</sup>

1. 中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室, 北京 100029;

2. 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049

氧逸度控制地幔中变价金属元素和 C-O-H 流体组分的行为, 进一步影响物质在各圈层间的循环。前人已充分研究稳定克拉通岩石圈地幔氧逸度的时空演化, 但克拉通破坏过程中氧逸度如何演化尚不明确。作为克拉通破坏的经典案例, 华北克拉通广布由玄武岩携带的橄榄岩捕虏体。因此, 本次研究共收集 605 件橄榄岩捕虏体及其所含矿物主量元素数据, 据此计算橄榄岩温压和氧逸度, 分析氧逸度与橄榄岩组分的关系与相应的地质过程。

橄榄岩氧逸度与橄榄石 Fo 值的变化关系揭示了华北克拉通岩石圈地幔氧逸度经历三个演化阶段: (1) 岩石圈地幔经历大规模熔体抽提后形成的难熔橄榄岩

记录了最高的氧逸度, 且与其它稳定克拉通的氧逸度梯度相匹配, 表明华北克拉通岩石圈地幔破坏前同样经受氧化交代影响。(2) 克拉通破坏期间, 橄榄岩捕虏体记录的氧逸度随 Fo 值降低而降低的现象并非温压变化、熔融程度或还原性流体交代的结果, 而是由软流圈派生还原性熔体交代岩石圈地幔所致。(3) 局部地区可见富 Cpx 橄榄岩, 其橄榄石 Fo 值进一步降低但氧逸度有所回升, 应为受洋壳交代氧化软流圈地幔派生的 Si 不饱和熔体与橄榄岩捕虏体相互作用的结果。本次研究基于氧逸度视角进一步证明俯冲(古)太平洋板片后撤诱发软流圈对流在克拉通破坏期间发挥重要作用, 也有助于认识克拉通演化后期氧逸度演化。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (Nos.41688103,41725014,41873036)

第一作者简介: 叶辰阳 (1997-), 硕士研究生, 研究方向: 地幔氧逸度演化. E-mail: yechenyang19@mails.ucas.ac.cn

\*通信作者简介: 英基丰, 研究员, 研究方向: 地幔地球化学. E-mail: jfyng@mail.iggcas.ac.cn

• 专题 11: 幔源岩浆活动和地幔动力学 •

## 大洋地幔的高温剪切起始: 雅江仲巴蛇绿岩地幔橄榄岩显微构造的启示

张振<sup>1,2</sup>, 刘传周<sup>1,2,\*</sup>, Haemyeong Jung<sup>3,\*</sup>, 刘通<sup>1</sup>, Sejin Jung<sup>3</sup>

1. 中国科学院地质与地球物理研究所 岩石圈演化国家重点实验室, 北京 100029;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. Tectonophysics Laboratory, School of Earth and Environmental Science, Seoul National University, Seoul 08826, Republic of Korea

大洋扩张是深部地幔流动的浅表体现, 在贫岩浆洋脊往往通过流变学低粘滞域(剪切带)的补偿所实现, 比如慢速、超慢速洋脊处的拆离断层。应变集中是形成这些低粘滞域的先决条件。在低温环境下( $<700^{\circ}\text{C}$ ), 应变集中可借助富水矿物(如蛇纹石和角闪石)的形成来实现, 但在高温尤其是亚固相线条件下( $>1000^{\circ}\text{C}$ )应变集中如何在深部地幔启动尚缺乏约束。本研究选取西藏雅鲁藏布江缝合带仲巴蛇绿岩中的地幔橄榄岩, 通过系统的显微构造研究, 揭示大洋上地幔的高温剪切起始机制和过程。仲巴蛇绿岩发育两种类型的地幔橄榄岩: 一类具残斑结构和高温原生面理, 另一类具糜棱结构。地球化学特征指示两类方辉橄榄岩均具有高的平衡温度( $972\text{-}1185^{\circ}\text{C}$ )、低的氧逸度(约 QFM  $-0.93$ )、低的斜方辉石水含量( $48\text{-}107\text{ wt. ppm}$ ), 与超慢速扩张脊深海橄榄岩特征

类似。显微构造研究显示随着变形的持续进行, 矿物晶格优选定向(CPO)自地幔流动向剪切集中转变, 并导致粘度异常的不断降低。颗粒粒径减小(GSR)导致组构强度不断降低, 并使应变速率提升 2 个数量级以上( $\sim 10^{-14}\text{ s}^{-1}$  -  $>10^{-12}\text{ s}^{-1}$ )。与之同时, 变形机制从低应力区( $5.8\text{-}8.8\text{ MPa}$ )的位错蠕变向高应力区( $\sim 37.5\text{ MPa}$ )的颗粒边界滑移(GBS)转变并最终到达扩散蠕变。结合流变学模拟, 本研究详细探讨了随着应变集中的持续进行, 地幔橄榄岩内部结构和显微特征的演化行为及其相互反馈作用。本研究强调 CPO 的转变和 GSR 作用是导致大洋地幔高温剪切起始的两个关键因素, 尤其是大洋中脊贫岩浆段。通过与现今大洋岩石圈的对比, 本研究对深部地幔剪切的起始过程和大洋核杂岩的成核过程具有一定的启示意义。

基金项目: 国家杰出青年科学基金(批准号: 42025201)

Nation Natural Science Foundation of Korea (NRF: 2020R1A2C2003765 and Z022R1A5A1085103)

第一作者简介: 张振(1995-), 博士研究生, 研究方向: 地幔橄榄岩显微构造研究 E-mail: zhenzhang@mail.iggcas.ac.cn

\*通信作者简介: 刘传周(1981-), 研究员, 研究方向: 蛇绿岩成因与大洋岩石圈演化 E-mail: chzliu@mail.iggcas.ac.cn

Haemyeong Jung(1966-), 教授, 研究方向: 壳幔显微构造实验岩石学 E-mail: hjung@snu.ac.kr

· 专题 11: 幔源岩浆活动和地幔动力学 ·

## 蛇绿岩成因的新一轮范式革命：软流圈不均一性和俯冲再起始模型

刘通<sup>1\*</sup>, 刘传周<sup>1</sup>, 张畅<sup>1</sup>, 冀文斌<sup>2</sup>, 吴福元<sup>1</sup>

1. 中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室, 北京 100029;

2. 西北大学地质学系, 西安, 710069

蛇绿岩是地球科学研究中少数得到广泛关注的岩石学概念, 代表了保存在造山带中的古大洋岩石圈, 因此是在现行板块构造理论框架下确立古板块边界、恢复古大洋演化的关键岩石学载体。在海底扩张学说提出和板块构造理论建立初期, 研究者成功揭示出蛇绿岩中的席状岩墙群形成于扩张环境下岩浆的持续供应, 从而建立了蛇绿岩与大洋中脊的直接成因联系。1973 年, 都城秋穗发表文章, 提出蛇绿岩中的火山熔岩表现出岛弧玄武岩的地球化学特征, 应形成于俯冲带的构造环境。这一跨时代的研究文献引发了蛇绿岩成因的范式革命, 即蛇绿岩的构造环境从洋中脊转变为俯冲带上盘 (suprasubduction zone)。随后几十年的地球化学研究进一步诞生了诸多相关模型和概念, 如洋内俯冲起始 (subduction initiation)、弧前蛇绿岩、弧前玄武岩等。SSZ 蛇绿岩的概念模型虽然吸引人, 但终究缺乏现今地质实例。本研究聚焦

蛇绿岩与现今大洋岩石圈的对比, 回顾过去十年我国西藏雅鲁藏布江蛇绿岩的主要研究进展, 即超慢速扩张脊成因的提出和俯冲再起始模型的建立。以雅江蛇绿岩作为标准, 本研究进一步指出新特提斯带侏罗纪-早白垩世蛇绿岩均属于慢速、超慢速扩张型蛇绿岩, 继而将俯冲再起始模型应用于新特提斯带大部分蛇绿岩中。此外, 包括雅江在内的新特提斯蛇绿岩中广泛发育古老的地幔组分, 代表了再循环进入新特提斯软流圈的古老大洋、大陆和岛弧地幔, 这些古老地幔一旦参与熔融即可形成玄武岩中的特殊成分, 甚至岛弧玄武岩和玻安岩。因此, 软流圈不均一性和慢速-超慢速扩张脊的俯冲再起始均可作为蛇绿岩中岛弧地球化学印记的潜在诱因, 蛇绿岩的 SSZ 成因并非“铁板一块”。以软流圈不均一性、俯冲再起始模型作为新的视角, 蛇绿岩的成因和构造环境有望迎来新一轮的范式革命, 即从俯冲带上盘再次转变为大洋中脊。

· 专题 11: 幔源岩浆活动和地幔动力学 ·

## 慢速扩张的西藏中特提斯洋：来自西藏洞错蛇绿岩中堆晶岩的启示

李晓妮<sup>1,2</sup>, 刘传周<sup>1,2,3\*</sup>, 张维骥<sup>1</sup>, 刘通<sup>1</sup>, 张畅<sup>1</sup>, 张振<sup>1,2</sup>, 林音铮<sup>1,2</sup>

1. 中国科学院 地质与地球物理研究所 岩石圈演化国家重点实验室, 北京 100029, 中国;

2. 地球与行星科学学院 中国科学院大学, 北京 100049, 中国

3. 海洋地质实验室 青岛海洋科学与技术国家实验室, 青岛 266061, 中国

下洋壳岩石在限定蛇绿岩形成时代和构造环境中起着重要作用。洞错蛇绿岩位于青藏高原班公湖-怒江缝合带西段, 广泛出露堆晶辉长岩。本文通过开展洞错堆晶辉长岩的矿物学、地球化学以及年代学研究来约束洞错蛇绿岩的形成时代、母岩浆性质和构造环境。辉长岩和辉绿岩样品中锆石和榍石的定年结果为 159-166Ma, 表明洞错蛇绿岩形成于中-晚侏罗世。洞错堆晶岩的岩相学和矿物主量元素数据表明其是由贫水岩浆(水含量~0.5-1.0 wt.%)经过低压结晶作用形成的。相比于洋中脊堆晶岩, 洞错堆晶岩的单斜辉石具有低 Ti、Zr 和 REE, 高 Ba 的特点。与单斜辉石平衡的熔体的组成与辉绿岩的

组成是一致的, 都具有与岛弧玄武岩类似的特征, 例如富集 Ba、Sr、Pb, 亏损 REE 和 Nb, 表明其来源于受到俯冲改造的地幔源区, 且这个地幔源区比 DMM 更加难熔。深部洋壳堆晶岩的冷却速率较快, 加之被近同期的辉绿岩广泛侵入, 共同表明在洞错下洋壳形成过程中, 深部的堆晶岩在形成之后受到快速的构造抬升作用至浅部。综上, 本研究提出洞错蛇绿岩形成于中-晚侏罗世慢速扩张的弧后盆地环境。基于洞错蛇绿岩和拉果错蛇绿岩在形成年龄、扩张速率和构造环境上具有的相似性, 再结合前人研究, 认为狮泉河-永珠-纳木错蛇绿岩带的西段是班公湖-怒江缝合带向南的推覆体。

基金项目: 国家杰出青年科学基金(批准号: 42025201)

National Key Research and Development Project of China (2020YFA0714801)

Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (XDB42020301)

第一作者简介: 李晓妮(1997-), 女, 博士研究生, 研究方向: 蛇绿岩成因及下洋壳增生机制 E-mail: lixiaoni@mail.iggcas.ac.cn

\*通信作者简介: 刘传周(1981-), 男, 研究员, 研究方向: 蛇绿岩成因与大洋岩石圈演化 E-mail: chzliu@mail.iggcas.ac.cn

· 专题 11: 幔源岩浆活动和地幔动力学 ·

## 内蒙古中东部阿巴嘎玄武岩地球化学特征： 对火山岩成因的启示

孙金恒<sup>1,2</sup>, 李霓<sup>1,2\*</sup>, 赵勇伟<sup>1,2</sup>

1. 吉林长白山火山国家野外科学观测研究站, 中国地震局地质研究所机构, 北京 100029

2. 中国地震局地震与火山灾害重点实验室, 北京 100029

兴蒙造山带及其毗邻的蒙古国东南缘发育大面积的晚新生代板内玄武岩, 其中从蒙古国达里干加到我国内蒙的阿巴嘎-达里诺尔火山区断续相连, 组成亚洲东部面积较大的晚新生代火山岩区。前人在对阿巴嘎火山区研究的基础上, 认为本区火山岩的成因与板片俯冲密切相关, 且其源区存在俯冲板片熔体成分。除板片熔体外, 俯冲碳酸盐成分对新生代板内玄武岩成因的影响越来越受到重视。在前人工作的基础上, 本文对阿巴嘎火山区的碱性玄武岩和拉斑玄武岩开展了全岩主微量以及 Sr-Nd-Pb-Hf-Mg 同位素的分析测试工作, 并以此为基础探讨碳酸盐成分对本区火山岩成因的影响。本文发现, 阿巴嘎火山区的碱性玄武岩和拉斑玄武岩在地球化学特征方面存在差异, 指示二者可能具有不同的成因。本区碱性玄武岩的 SiO<sub>2</sub> 含量(41.23~48.68%)、Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O 含量(4.05~6.36%)、TiO<sub>2</sub> 含量(2.57~3.58%)、Hf/Hf\* 值(0.46~0.83)、CaO/

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 值(0.58~0.95)和 Zr/Hf 值(41.24~47.23)与地幔来源的受碳酸盐熔体交代的玄武岩相似, 指示碳酸盐熔体加入其地幔源区。此外, 研究区碱性玄武岩具有轻 Mg 同位素(-0.43~-0.31‰)和重 Zn 同位素特征(0.47~0.50‰), 这也指示其源区可能存在碳酸盐熔体。古亚洲洋板片和太平洋板片的俯冲作用可能是碳酸盐成分加入阿巴嘎地幔源区的重要方式。与碱性玄武岩相比, 研究区拉斑玄武岩具有较高的 SiO<sub>2</sub> 含量(48.13~51.22%)和 Hf/Hf\* 值(0.78~0.89), 而其 Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O 含量(3.41~4.25%)、TiO<sub>2</sub> 含量(2.50~2.91%)、CaO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 值(0.68~0.85)和 Zr/Hf 值(38.57~42.08)较低, 这指示本区两种玄武岩在成因方面可能存在差异。此外, 拉斑玄武岩的 Nd-Hf-Mg 同位素位于碱性玄武岩和地幔捕虏体之间, 暗示拉斑玄武岩可能由碱性玄武岩熔体与岩石圈地幔反应所致。

• 专题 11: 幔源岩浆活动和地幔动力学 •

## 西南印度洋中脊玄武岩和深海橄榄岩对地幔物质再循环的启示

王纪昕

中国科学院海洋研究所, wangjixin@qdio.ac.cn

软流圈物质在洋中脊发生减压熔融产生岩浆形成洋中脊玄武岩, 留下残余的深海橄榄岩。随着板块扩张, 老的岩石圈板片在俯冲带发生消亡, 重新进入软流圈。被俯冲熔流体交代的地幔楔, 经历含水熔融后, 留下亏损的残余地幔楔, 随着地幔对流发生运移。相关的物质旋回至少已经在地球上持续发生了 21 亿年<sup>1</sup>。那么这些古老的残余地幔能再次运移到洋中脊吗? 我们从西南印度洋中脊的深海橄榄岩和洋中脊玄武岩中找到了答案。

我们分析了西南印度洋中脊龙骨脊段 (53°E) 的深海橄榄岩, 其尖晶石 Cr# 值和单斜辉石微量元素橄榄岩经历了 7%-17% 不等的熔融程度, 其中一部分熔融过程发生在石榴子石相稳定域<sup>2</sup>, 而龙骨脊段的玄武岩对应的熔融程度仅 ~7.5%<sup>3</sup>。结合海底勘测和采样所显示的龙骨脊段玄武质洋壳很薄甚至缺失<sup>4</sup>, 我们推断, 龙骨橄榄岩的高程度熔融, 包含两个阶段, 第一阶段的古老熔融事件发生于较深的石榴子石相稳定域; 而第二阶段熔融在现今洋中脊, 古老熔融事件的残余在较浅的尖晶石相稳定域再次发生了熔融。

龙骨脊段西侧龙旂脊段 (48-52°E) 的洋中脊玄武岩也揭示了古老地幔的再循环<sup>5</sup>。龙旂玄武岩极端的 Th/U, La/Sm, Sm/Yb 比值低于亏损地幔, 这表示龙旂玄武岩的源区比正常亏损地幔更为亏损; 此外, 龙旂玄武岩的流体活动元素与流体非活动元素比值明显偏离正常洋中脊玄武岩平均值, 而与弧后盆地玄武岩类似, 指示龙旂玄武岩的源区为再循环的残余弧下地幔楔。

近十几年以来, 全球其它地方的洋中脊玄武岩和深海橄榄岩也揭示出软流圈中残存着大量古老的亏损地幔<sup>6, 7, 8</sup>, 这些古老残余地幔的存在对我们认识上地幔的真实亏损程度发起了新的挑战。

### 参考文献

- [1] Liu H, Sun W-d, Zartman R, Tang M. Continuous plate subduction marked by the rise of alkali magmatism 2.1 billion years ago. *Nature Communications* **10**, 3408 (2019).
- [2] Wang J, Zhou H, Salters V, Liu Y, Sachi-Kocher A, Dick H. Mantle melting variation and refertilization beneath the Dragon Bone amagmatic segment (53°E SWIR): Major and trace element compositions of peridotites at ridge flanks. *Lithos* **324-325**, 325-339 (2019).
- [3] Gao C, Dick HJB, Liu Y, Zhou H. Melt extraction and mantle source at a Southwest Indian Ridge Dragon Bone amagmatic segment on the Marion Rise. *Lithos* **246-247**, 48-60 (2016).
- [4] Zhou H, Dick HJB. Thin crust as evidence for depleted mantle supporting the Marion Rise. *Nature* **494**, 195-200 (2013).
- [5] Wang J, Zhou H, Salters VJM, Dick HJB, Standish JJ, Wang C. Trace Element and Isotopic Evidence for Recycled Lithosphere from Basalts from 48 to 53°E, Southwest Indian Ridge. *Journal of Petrology* **61**, (2020).
- [6] Yang AY, Langmuir CH, Cai Y, Michael P, Goldstein SL, Chen Z. A subduction influence on ocean ridge basalts outside the Pacific subduction shield. *Nat Commun* **12**, 4757 (2021).
- [7] Liu C-Z, et al. Archean cratonic mantle recycled at a mid-ocean ridge. *Science Advances* **8**, eabn6749 (2022).

· 专题 11: 幔源岩浆活动和地幔动力学 ·

## 江南造山带东段陆下岩石圈地幔的性质和演化： 来自橄榄岩捕虏体的证据

王思诺<sup>1,2</sup>, 闫峻<sup>2\*</sup>, 王德恩<sup>3</sup>, 徐生发<sup>3</sup>

1. 安徽理工大学地球与环境学院, 淮南 232001;
2. 合肥工业大学资源与环境工程学院, 合肥 230009;
3. 安徽省地质矿产勘查局 332 地质队, 黄山 245000

华南板块晚中生代岩石圈地幔的性质和演化对理解该时期广泛发育的岩浆作用和深部动力学机制具有重要意义。橄榄岩捕虏体作为岩石圈地幔最直接的样品, 其矿物地球化学特征可以直观反映地幔性质和深部过程, 是地幔动力学研究最理想的对象。本课题组在江南造山带东段的皖南地区(蒋村)发现一处玄武岩筒, 其中含有大量的橄榄岩捕虏体。我们对寄主橄榄玄武岩进行了全岩 K-Ar 定年, 对橄榄岩捕虏体开展了岩相学和矿物地球化学的研究, 目的是约束区域陆下岩石圈地幔的性质, 进而揭示(古)太平洋板块的俯冲作用对华南板块晚中生代岩石圈地幔演化特征的影响。

蒋村橄榄玄武岩的 K-Ar 定年结果为 73 Ma, 属于晚白垩世岩浆活动的产物。而橄榄岩捕虏体为尖晶石相二辉橄榄岩。其中, 橄榄石的 Mg# 值为 87.6~89.0, 斜方辉石和单斜辉石具有高的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量, 分别为 3.93 wt%~4.97 wt% 和 5.30 wt%~7.00 wt%, 尖晶石的 Cr# 值为 10.3~13.7, 均为富沃饱满的岩石圈地幔特征。单斜辉石具有明显的轻重稀土分异 ((La/Yb)<sub>N</sub> = 1.69~3.91), 不同于中-晚侏罗世橄榄岩捕虏体所表现得轻稀土亏损的配分曲线。此外, 单斜辉石的 Sr-Nd 同位素组成为 <sup>87</sup>Sr/<sup>88</sup>Sr(73 Ma) = 0.7044~0.7052 和 ε<sub>Nd</sub>(73 Ma) = 0.6~2.8, 相较于新生代橄榄岩捕虏体, 表现出显著低的亏损程度。橄榄岩的矿物成分以及单斜辉石微量元素和 Sr-Nd 同位素组成特征表明江南造

山带东段的陆下岩石圈地幔经历了低程度的部分熔融(1%~3%的批式熔融 2%~3%的分离熔融), 以及随后来自俯冲大洋板片的硅酸盐熔体交代。

结合前人的研究成果, 我们提出华南板块的显生宙演化历史如下: 华南板块在古生代时具有富集难熔的岩石圈地幔(Zhang et al., 2001); 在中-晚侏罗世时, 软流圈地幔沿穿岩石圈的深大断裂上涌和冷凝, 并增生为新生饱满的岩石圈地幔(Liu et al., 2012; Zhang et al., 2020); 此时, (古)太平洋板块也开始向欧亚大陆西向俯冲, 并在约 145 Ma 时由于板块的回卷和海沟后撤, 形成大地幔楔, 触发大规模的板片-岩石圈地幔的相互作用(Ma and Xu, 2021), 并可能一直持续到晚白垩世(约 73 Ma), 导致先存的新生岩石圈地幔富集轻稀土元素和大离子亲石元素, 并具有弱亏损的同位素组成(以蒋村橄榄岩捕虏体为例); 在新生代时, 热的软流圈地幔物质上涌侵蚀上覆岩石圈地幔, 并在水平流动产生的剪切应力下使岩石圈地幔大幅减薄, 最终形成软流圈质的新生岩石圈地幔, 但是局部仍然保留着受到软流圈来源熔体改造的古老难熔岩石圈地幔(Lu et al., 2013)。本次研究首次报道了来自华南板块晚白垩世的橄榄岩捕虏体, 通过与中-晚侏罗世和新生代橄榄岩捕虏体的对比研究, 揭示了该时期陆下岩石圈地幔的性质, 约束了(古)太平洋板块的俯冲作用对整个中国东部晚中生代岩石圈地幔改造的物质和能量贡献。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41672052, 42030801)

第一作者简介: 王思诺(1991-), 讲师, 研究方向: 中国东部中、新生代岩石圈地幔的性质与演化. E-mail: wsn0928@126.com

\*通信作者简介: 闫峻(1966-), 教授, 研究方向: 岩浆岩岩石成因和深部过程. E-mail: junyan@hfut.edu.cn