

大洋与大陆板内典型 EM1 型玄武岩的成因联系和区别

王小均¹ 陈立辉^{1*} 刘建强²

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 南京 210098

摘要: 前人基于大洋玄武岩的放射成因同位素组成定义了 DMM、HIMU、EM1 和 EM2 等地幔端元组分。然而,自“EM1”这一概念被提出以来,有关其成因的激烈争论持续不断,EM1 因此被认为是最“神秘莫测”的地幔组分。对比研究大洋和大陆板内的 EM1 型玄武岩可为探讨 EM1 组分的属性和成因提供新的制约。本文总结了笔者最近针对典型 EM1 型玄武岩的研究进展,比较了南太平洋 EM1 型洋岛玄武岩(Pitcairn)和中国东北 EM1 型钾质玄武岩的元素和 Mg-Sr-Nd-Pb-Hf 同位素地球化学特征,阐述了这两类 EM1 型玄武岩在成因上的联系和区别。

关键词: EM1; 洋岛玄武岩; Pitcairn; 钾质玄武岩; 镁同位素; 含碳酸盐沉积物

中图分类号: P588.14⁺5 文章编号: 1007-2802(2019)02-0237-11 doi: 10.19658/j.issn.1007-2802.2019.38.033

The Genetic Relationship and Difference between Typical EM1-Type Oceanic and Continental Intraplate Basalts

WANG Xiao-jun¹, CHEN Li-hui^{1*}, LIU Jian-qiang²

1. State Key Laboratory for Mineral Deposits Research, School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 2. College of Oceanography, Hohai University, Nanjing 210098, China

Abstract: Geochemists defined several mantle end-members including DMM, HIMU, EM1 and EM2, based on radiogenic isotopic compositions of oceanic basalts. However, since the concept of EM1 was proposed, the origin of EM1 has been intensively debated, and the EM1 is therefore considered to be the most enigmatic mantle component. The comparative study of typical EM1-type oceanic- and continental-intraplate basalts can provide new constraints on the nature and origin of EM1. In this paper, we summarize our recent research progress on typical EM1-type intraplate basalts, compared elemental and Mg-Sr-Nd-Pb-Hf isotopic geochemical characteristics between the EM1-type oceanic basalt from Pitcairn Island in South Pacific and the EM1-type potassic basalt from Northeast China, and then discuss the genetic relationship and difference between these two types of EM1 basalts.

Key words: EM1; ocean island basalt; Pitcairn; potassic basalt; magnesium isotopes; carbonate-bearing sediments

0 引言

大洋玄武岩在不相容微量元素和 Sr、Nd、Pb 等放射成因同位素组成上变化极大,反映了地幔的大尺度地球化学不均一性(Zindler and Hart, 1986; Hofmann, 1997; Willbold and Stracke, 2006; Stracke, 2012; Hofmann, 2014; White, 2015)。

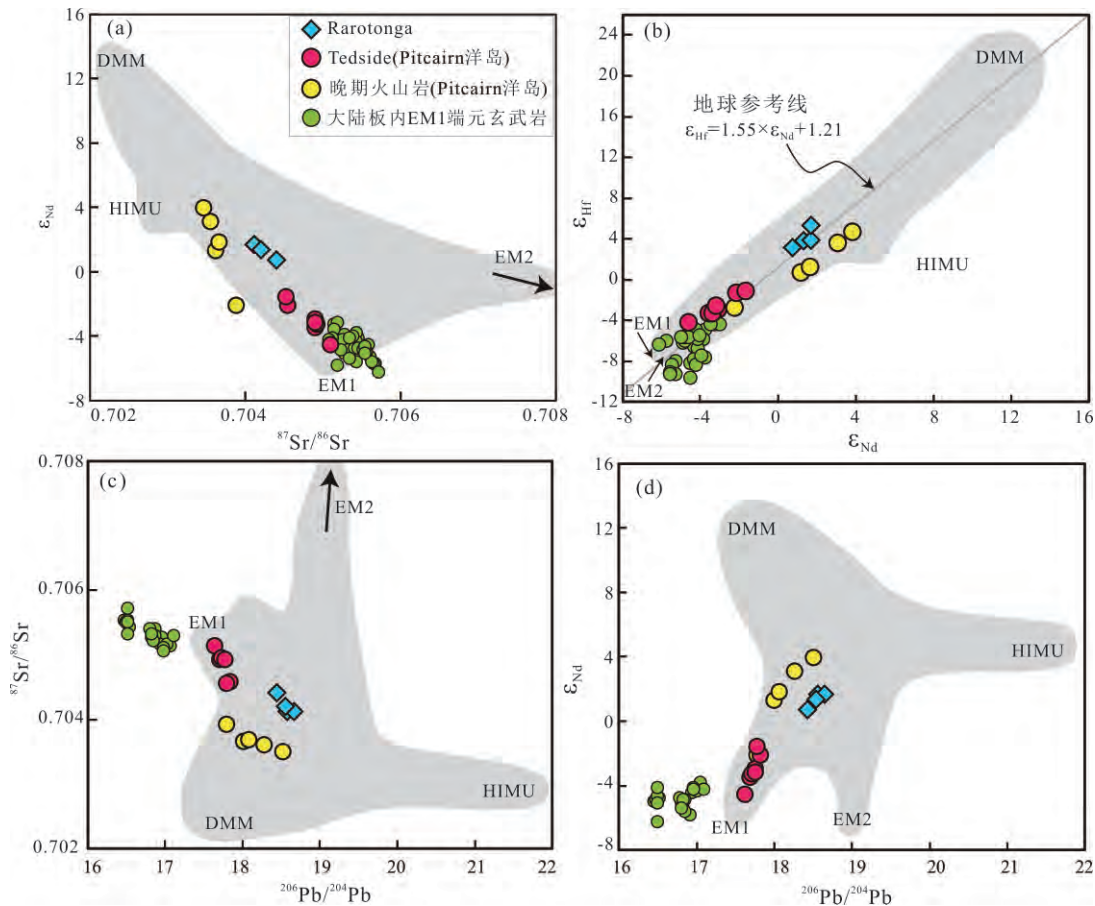
Zindler 和 Hart(1986)对大洋玄武岩的 Sr、Nd、Pb 和 He 同位素数据进行了系统总结和分类,提出地幔中可能至少存在 4 种同位素组成差异明显的端元组分:①亏损地幔(DMM),代表典型洋中脊玄武岩的源区;②HIMU(high μ , $\mu = ^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$),代表具有高 U/Pb 值的地幔组分;③EM1(Enriched Mantle I),I 型富集地幔;④EM2(Enriched

收稿编号: 2018-201 2018-09-26 收到 2018-10-31 改回

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41672049, 41688103)

第一作者简介: 王小均(1990-),男,博士,研究方向: 火成岩岩石学与地幔地球化学. E-mail: xjwang@nju.edu.cn.

* 通信作者简介: 陈立辉(1972-),男,教授,博士生导师,研究方向: 火成岩岩石学与地幔地球化学. E-mail: chenlh@nju.edu.cn.



EM1-I型富集地幔; EM2-II型富集地幔; DMM-亏损地幔; HIMU-具有高 $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$ 值的地幔组分。图中灰色阴影区域代表大洋玄武岩的同位素组成范围。图(b)中地球参考线据 Vervoort 等(2011)。数据来源:大陆板内 EM1 端元玄武岩据 Chu 等(2013), Sun 等(2014), Wang 等(2017); Pitcairn 洋岛玄武岩据 Wang 等(2018); Rarotonga 洋岛玄武岩据 Hanyu 等(2011)

图1 各地幔端元组分及典型 EM1 型玄武岩的 Sr-Nd-Pb-Hf 同位素特征

Fig.1 Sr, Nd, Pb, and Hf isotopic compositions of various mantle end-members and typical EM1-type basalts

Mantle II), II型富集地幔(图1)。HIMU和EM2组分分别以最高的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值(>20.5 ; Chauvel *et al.*, 1992)和最高的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值(>0.720 ; Jackson *et al.*, 2007)为显著特征,EM1组分则以极低的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (<18.0)和 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ (<0.5124)值为特点(图1)。当前,EM2组分代表再循环陆源沉积物的观点已基本成为共识(Jackson *et al.*, 2007; Workman *et al.*, 2008)。最近的研究表明, HIMU组分更可能代表拆沉的、被碳酸盐熔/流体交代的古老大陆岩石圈地幔(Weiss *et al.*, 2016),不同于传统观点认为的再循环洋壳(Hofmann and White, 1982; Chauvel *et al.*, 1992)。然而,EM1组分自上世纪80年代被定义以来,其成因问题一直处于激烈的争论之中。

当前有关EM1的成因主要有3种观点:①EM1代表再循环的古老远洋沉积物(Weaver *et al.*, 1986; Woodhead and McCulloch, 1989; Weaver,

1991; Chauvel *et al.*, 1992; Woodhead and Devey, 1993; Rehkämper and Hofmann, 1997; Eisele *et al.*, 2002; Garapić *et al.*, 2015; Delavault *et al.*, 2016); ②EM1代表拆沉的古老大陆岩石圈地幔(McKenzie and O'Nions, 1983; Milner and Le Roex, 1996; Gibson *et al.*, 2005; Geldmacher *et al.*, 2008; Turner *et al.*, 2017); ③EM1代表再循环的古老大陆下地壳(Lustrino *et al.*, 2000; Hanan *et al.*, 2004; Willbold and Stracke, 2006, 2010)。第①种观点的核心证据是远洋沉积物具有高的Th/U值和低的 $(\text{U,Th})/\text{Pb}$ 值(Ben Othman *et al.*, 1989; Plank and Langmuir, 1998)经长期(1~2 Ga)演化可形成EM1组分极低的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值和较高的 $^{208}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$ 值 $\{^{208}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^* = [(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i - (^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_j] / [(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i - (^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_j]$; Galer and O'Nions, 1985; Weaver, 1991; Chauvel *et al.*, 1992; Rehkämper and Hofmann, 1997}。第②种观点是基

于一些代表古老大陆岩石圈地幔组成的地幔捕掳体具有与 EM1 组分类似的 Sr、Nd 同位素组成 (McKenzie and O'Nions, 1983)。这种地幔捕掳体在北美 Wyoming 克拉通、南非 Kaapvaal 克拉通和中国华北克拉通中部(阳原、繁峙、鹤壁等地)等地均有报道(马金龙和徐义刚, 2006; Menzies and Murthy, 1980; Carlson and Irving, 1994; Xu *et al.*, 2008; Tang *et al.*, 2008, 2010, 2013 等)。第③种观点是基于对下地壳麻粒岩地球化学组成的认识, 它们具有贫 U、Th/U 值较高的特征, 经长期演化可形成极低的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值和高的 $^{208}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$ 值 (Hanan *et al.*, 2004)。

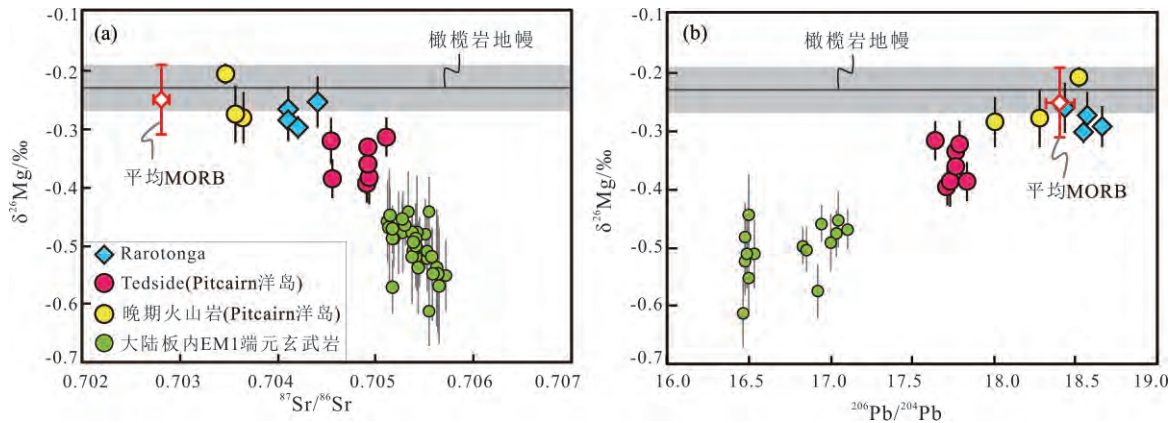
从上述总结可知, 有关 EM1 的成因存在激烈争论的主要原因是, 再循环的古老远洋沉积物、古老大陆岩石圈地幔以及古老大陆下地壳, 都在一定程度上呈现出与 EM1 组分相似的放射成因同位素组成。由此可见, 仅运用放射成因同位素组成来约束 EM1 组分的来源具有多解性。在这种情况下, 结合稳定同位素和放射成因同位素研究往往能提供更加明确的信息。例如, 前人通过联合运用 Li、Sr 和 Nd 同位素来研究华北克拉通中部具 EM1 型 Sr-Nd 同位素特征的地幔橄榄岩捕掳体, 很好地约束了再循环的古老洋壳物质对形成这种 EM1 型富集组分的重要贡献 (Tang *et al.*, 2010; 汤艳杰等, 2011)。Mg 稳定同位素是近年来兴起的地球化学工具, 在地表低温环境下 Mg 同位素的分馏十分显著, 而在部分熔融、分离结晶和板块俯冲等高温过程中 Mg 同位素的分馏有限 (柯珊等, 2011; 朱祥坤等, 2013; Teng 2017), 因此玄武岩的 Mg 同位素显著分馏可指示地表物质的再循环过程 (Yang *et al.*, 2012; Huang *et al.*, 2015; Li *et al.*, 2017 等)。更重要的是, 大陆下地壳、大陆岩石圈地幔、蚀变洋壳、俯冲沉积物和海洋碳酸盐沉积物等可能作为再循环组分的各储库之间存在 Mg 同位素组成差异, 且其中部分储库具有与“正常地幔”(以平均地幔橄榄岩为代表) 明显不同的 Mg 同位素组成 (Teng 2017; Wang *et al.*, 2018)。因此, 运用典型 EM1 型玄武岩的 Mg 同位素组成并结合常规地球化学示踪手段, 可进一步制约 EM1 的成因。笔者团队最近以典型 EM1 型洋岛玄武岩和大陆板内 EM1 型玄武岩为研究对象, 联合运用 Mg 同位素、常规 Sr-Nd-Pb-Hf 同位素以及元素地球化学组成, 探讨了两类玄武岩地幔源区中 EM1 组分的来源 (Wang *et al.*, 2017, 2018)。本文对这些研究结果进行归纳, 并在此基础上阐述两类 EM1 型玄武岩在成因上的联系和区别。

1 大洋板内 EM1 型玄武岩—Pitcairn 洋岛玄武岩

由南太平洋中部的 Pitcairn 热点在约 0.95 ~ 0.45 Ma (Duncan *et al.*, 1974) 形成的 Pitcairn 洋岛可被视为定义“EM1 端元”的代表性岛屿 (Woodhead and McCulloch, 1989), 该火山岛上造盾期玄武岩 (Tedsid 火山岩) 最极端的 Sr-Nd-Pb-Hf 同位素组成与 Zindler 和 Hart (1986) 定义的“EM1 组分”一致 (Woodhead and McCulloch, 1989; Eiler *et al.*, 1995; Eisele *et al.*, 2002)。晚期火山岩 (包括 Pulawana、Christan Cave Formation 和 Adamstown) 的 Sr-Nd-Pb-Hf 同位素组成则呈现出亏损组分与 EM1 组分混合的趋势 (图 1)。因此, 大量前人研究工作通过约束 Pitcairn 洋岛造盾期玄武岩的源区地球化学特征来探讨 EM1 组分的来源 (如 Woodhead and McCulloch, 1989; Woodhead *et al.*, 1993; Eiler *et al.*, 1995; Salters and White, 1998; Eisele *et al.*, 2002; Pfänder *et al.*, 2007; Garapić *et al.*, 2015; Delavault *et al.*, 2016)。

笔者团队通过分析 Pitcairn 洋岛玄武岩样品的 Mg 同位素组成发现: ①造盾期 Tedsid 玄武岩的 $\delta^{26}\text{Mg}$ 为 $-0.40\text{‰} \sim -0.31\text{‰}$, 比晚期火山岩的 $\delta^{26}\text{Mg}$ 值 ($-0.30\text{‰} \sim -0.16\text{‰}$) 和橄榄岩地幔的 $\delta^{26}\text{Mg}$ 值 ($-0.23\text{‰} \pm 0.04\text{‰}$; Lai *et al.*, 2015) 明显偏轻 (Wang *et al.*, 2018; 图 2); ② $\delta^{26}\text{Mg}$ 值为 -0.40‰ 的造盾期玄武岩样品 (PC-15) 是迄今为止发现的 Mg 同位素组成最轻的新鲜大洋玄武岩样品 (Wang *et al.*, 2018)。Rarotonga 与 Pitcairn 洋岛均位于南太平洋同位素和热异常区 (SOPITA, Staudigel *et al.*, 1991), 前人研究表明该火山岛上玄武岩的 Sr-Nd-Pb 同位素组成均具有指向 EM1 端元的趋势 (Hanyu *et al.*, 2011; 图 1)。作为对比, 笔者也分析了 Rarotonga 洋岛玄武岩样品的 Mg 同位素组成 ($\delta^{26}\text{Mg}$ 为 $-0.30\text{‰} \sim -0.26\text{‰}$)。

Tedsid 玄武岩样品的烧失量低 (多数小于 1.0%), 且 $\delta^{26}\text{Mg}$ 与烧失量之间无相关性。对这些样品进行详细的显微薄片观察也未发现明显的蚀变特征和次生碳酸盐矿物的存在。这些观察表明, Tedsid 玄武岩低的 $\delta^{26}\text{Mg}$ 值是玄武岩浆固有的特征, 而非后期蚀变或海水污染所致 (Wang *et al.*, 2018)。前人研究表明橄榄石、辉石和长石的分离结晶引起的 Mg 同位素分馏十分有限 (小于 0.07‰ , Teng *et al.*, 2007), 更重要的是 Tedsid 玄武岩比正



橄榄岩地幔和平均 MORB 的 Mg 同位素组成分别为 $\delta^{26}\text{Mg} = -0.23 \pm 0.04\text{‰}$ 和 $\delta^{26}\text{Mg} = -0.25 \pm 0.06\text{‰}$ ，数据分别来自 Lai 等 (2015) 和 Teng 等 (2010)。平均 MORB 的 Sr、Pb 同位素组成据 Gale 等 (2013)。其余数据来源: 大陆板内 EM1 端元玄武岩据 Chu 等 (2013), Sun 等 (2014), Tian 等 (2016), Wang 等 (2017); Pitcairn 洋岛玄武岩据 Wang 等 (2018); Rarotonga 洋岛玄武岩据 Hanyu 等 (2011), Wang 等 (2018)

图 2 典型 EM1 型玄武岩的 Mg 同位素与 Sr、Pb 同位素组成协变图

Fig. 2 Plots of $\delta^{26}\text{Mg}$ vs. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (a) and $\delta^{26}\text{Mg}$ vs. $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (b) values of typical EM1-type basalts

常地幔明显偏低的 $\delta^{26}\text{Mg}$ 值出现在 MgO 含量高(大于 8%) 的样品而非低 MgO 样品中,表明低的 $\delta^{26}\text{Mg}$ 值是原始岩浆的固有特征而不是分离结晶作用的结果。此外,部分熔融过程导致的有限的 Mg 同位素分馏也无法解释 Tedside 玄武岩原始岩浆极低的 $\delta^{26}\text{Mg}$ 值(-0.40‰),因为无论在辉石岩还是橄榄岩部分熔融过程中,熔体与初始固相之间的 $\delta^{26}\text{Mg}$ 差值都小于 0.1‰(Zhong *et al.*, 2017; Stracke *et al.*, 2018)。综上可认为, Tedside 玄武岩原始岩浆低的 $\delta^{26}\text{Mg}$ 值只能来源于具有轻的 Mg 同位素组成的地幔源区组分。考虑到 Pitcairn 和 Rarotonga 洋岛玄武岩的 $\delta^{26}\text{Mg}$ 值与 Sr-Nd-Pb-Hf 同位素之间的协变关系,且更接近 EM1 端元的 Tedside 玄武岩具有更低的 $\delta^{26}\text{Mg}$ 值(图 2),因此比正常地幔明显偏轻的 Mg 同位素组成应是 Pitcairn 洋岛玄武岩源区 EM1 组分的特征。

Pitcairn 玄武岩源区 EM1 组分这种比正常地幔明显偏轻的 Mg 同位素组成,不支持前人提出的“EM1 组分代表拆沉的古老大陆岩石圈地幔或者再循环古老大陆下地壳”两种观点,因为详细的调研发现这两种储库都不具有轻的 Mg 同位素组成(Wang *et al.*, 2017, 2018)。另外,如果前人提出的“EM1 组分代表再循环古老远洋沉积物”这种观点合理,那么沉积物中必须有一定量的碳酸盐存在,才可解释 EM1 组分低的 $\delta^{26}\text{Mg}$ 值。在可能作为俯冲物质进入地幔的各储库中,海洋碳酸盐(方解石、白云石等)因普遍具有比正常地幔及其它俯冲物质低得多的 $\delta^{26}\text{Mg}$ 值而成为独特的低 $\delta^{26}\text{Mg}$ 端元(Teng, 2017; Wang *et al.*, 2018)。因此,海洋碳酸

盐,尤其是 MgO 含量高的白云石,是主导俯冲沉积物的 Mg 同位素组成的重要组分,含有一定量白云石的俯冲沉积物将具有比地幔明显偏轻的 Mg 同位素组成。考虑到沉积物组分在变质和俯冲过程中发生的 Mg 同位素分馏十分有限(Li *et al.*, 2014; Wang *et al.*, 2015),再循环的含碳酸盐沉积物组分仍可保持偏轻的 Mg 同位素组成,因此满足成为 EM1 组分所需的低 $\delta^{26}\text{Mg}$ 值。最近,Delavault 等(2016)在 Pitcairn 玄武岩斑晶包裹的硫化物中发现了 S 同位素非质量分馏的现象($\Delta^{33}\text{S}$ 低至 -0.8‰),并以 Pitcairn 玄武岩极端的 Pb 同位素组成进行了 Pb 同位素演化的蒙特卡洛模拟来推测 EM1 组分的年龄,二者结合起来表明 EM1 组分的年龄约为 2.5~2.6 Ga。这种年龄约束结合上述 EM1 组分的 Mg 同位素制约,表明再循环的古老(2.5~2.6 Ga)含碳酸盐沉积物能很好地解释 Pitcairn 源区 EM1 组分低的 $\delta^{26}\text{Mg}$ 值和极端的 Pb 同位素组成等特征(Wang *et al.*, 2018)。

然而, Pitcairn 玄武岩的主量元素组成并不支持其地幔源区熔融时有碳酸盐组分的参与。Pitcairn 玄武岩的 CaO 含量及 CaO/Al₂O₃ 值在全球洋岛玄武岩中处于最低值的部分,而 SiO₂ 含量处于较高值的范围(Jackson and Dasgupta, 2008; Garapić *et al.*, 2015)并且这种低的 CaO 含量及 CaO/Al₂O₃ 值不是单斜辉石大量分离结晶的结果而是原始岩浆的特征(Jackson and Dasgupta, 2008)。高温高压实验岩石学工作表明,无论碳酸盐化橄榄岩还是碳酸盐化辉石岩/榴辉岩部分熔融,都会产生具有极高的 CaO 含量和 CaO/Al₂O₃ 值的熔体(Dasgupta *et al.*,

2006, 2007), 明显不同于 Pitcairn 玄武岩 (Wang *et al.*, 2018)。不过前人研究表明, 再循环物质原始的化学和同位素组成特征可以“幽灵”(等同于以化学元素为载体转移)的形式出现在喷发的玄武岩浆中, 而其岩性实体已经完全分解从而不再保留于玄武岩的源区 (Sobolev *et al.*, 2000; Herzberg *et al.*, 2014)。与此类似, “比正常地幔偏轻的 Mg 同位素特征”可能正是以这种“幽灵”的形式存在于 Pitcairn 玄武岩及其源区 EM1 组分中, 而这种特征的原始载体—碳酸盐组分, 已在俯冲进入地幔的过程中通过碳酸盐-硅酸盐反应的方式被完全消耗。原始碳酸盐组分轻的 Mg 同位素组成以 Mg 元素为载体被一起俯冲的硅酸盐组分继承, 并最终在硅酸盐的形式作为 Pitcairn 玄武岩的 EM1 型源区组分 (Wang *et al.*, 2018)。

基于上述讨论, 具有低 $\delta^{26}\text{Mg}$ 值的 Pitcairn 洋岛玄武岩的形成过程可归纳如下 (图 3): ①在距今约 25~26 亿年前, 含碳酸盐的沉积物随洋壳一起俯冲; ②在当时较热的俯冲带环境下, 沉积物中的硅酸盐与碳酸盐发生反应消耗掉碳酸盐组分, 而反应产生的硅酸盐组分作为残余沉积物继续俯冲至核-幔边界; ③残余沉积物组分在核-幔边界经历长期与周围物质相对隔离的同位素演化, 形成具有极端的放射成因同位素组成的 EM1 组分; ④EM1 组分被 Pitcairn 地幔柱携带至浅部软流圈地幔作为 Pitcairn 玄武岩的源区物组分; ⑤从约 0.95 Ma 开始, EM1 型的地幔源区发生部分熔融产生玄武岩浆并于洋底喷发, 最终形成具有低 $\delta^{26}\text{Mg}$ 值的 Pitcairn 洋岛玄武岩。

玄武岩。

2 大陆板内 EM1 型玄武岩—中国东北钾质玄武岩

中国东北地区出露的新生代钾质玄武岩属大陆板内玄武岩, 具极低的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值 (Chu *et al.*, 2013; Sun *et al.*, 2014; Liu *et al.*, 2016, 2017; Zhang *et al.*, 2016 等最新文献中的汇总), 且其 Sr-Nd-Pb 同位素组成接近 Zindler 和 Hart (1986) 定义的“EM1 端元”或更为极端 (图 1), 可被视为 EM1 型玄武岩在大陆板内环境的表现形式, 类似 Pitcairn 洋岛玄武岩在大洋板内玄武岩中的地位。因此, 将这些大陆板内 EM1 型玄武岩与 EM1 型洋岛玄武岩进行对比研究, 可为进一步探讨 EM1 的成因提供重要制约。

由于经历复杂演化的、厚的大陆岩石圈的存在, 探讨大陆背景下 EM1 组分的来源比大洋背景下更加复杂。过去近三十年以来, 不同学者提出了多种有关中国东北钾质玄武岩源区 EM1 组分来源的模型。有学者认为被交代改造的岩石圈地幔是钾质玄武岩的直接源区, 因此 EM1 组分位于岩石圈地幔 (Basu *et al.*, 1991; Zhang *et al.*, 1991, 1995, 1998; 樊祺诚等, 1999; Zou *et al.*, 2003; Chen *et al.*, 2007; Chu *et al.*, 2013; Sun *et al.*, 2014, 2015; Zhang *et al.*, 2016)。不过上述学者对交代岩石圈地幔的介质有不同认识, 被提出的交代熔体来源包括: 地幔过渡带的古老沉积物 (Sun *et al.*, 2014, 2015)、拆沉的古老下地壳 (Chu *et al.*, 2013)、深部

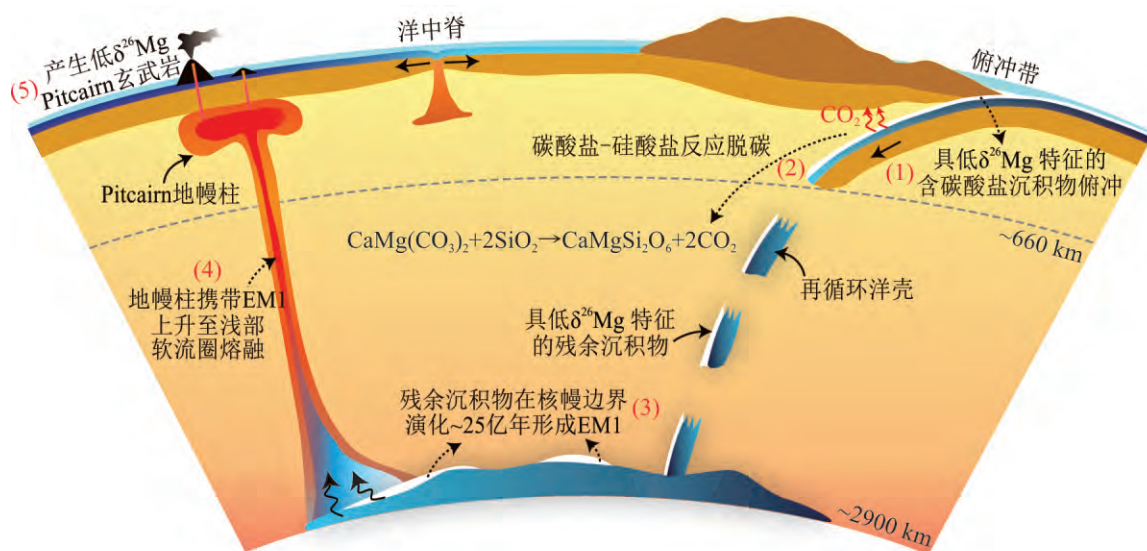


图 3 Pitcairn 洋岛具低 $\delta^{26}\text{Mg}$ 特征的 EM1 型玄武岩的形成过程

Fig.3 Cartoon showing the formation of low- $\delta^{26}\text{Mg}$ EM1-type ocean island basalts from the Pitcairn Island

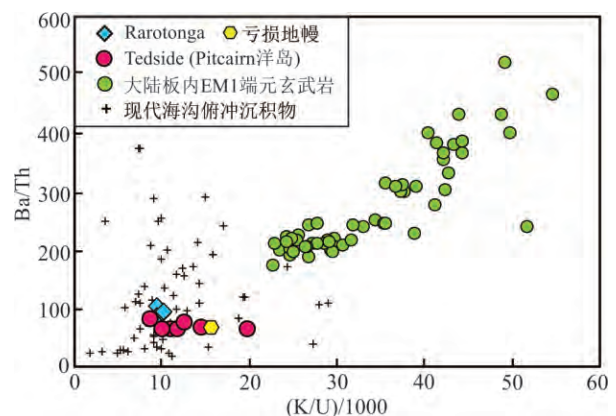
软流圈产生的某种熔体 (Zhang *et al.*, 1991, 1995; Zou *et al.*, 2003)。另有部分学者认为钾质玄武岩来源于软流圈地幔 (Choi *et al.*, 2006; Kuritani *et al.*, 2013; Zhao *et al.*, 2014), 但在他们的模型中 EM1 组分的属性并不相同。Choi 等 (2006) 认为亚洲东部软流圈中存在两个分散的地幔域, 即 EM1 和 EM2 型地幔域。Zhao 等 (2014) 认为 EM1 型的钾质熔体来源于软流圈中富钾的、古老的拆沉岩石圈, 而 Kuritani 等 (2013) 提出钾质玄武岩的 EM1 型同位素特征来源于被富钾沉积物析出的流体交代改造过的地幔过渡带组分。

从上述总结可知, 前人对钾质玄武岩源区 EM1 组分的来源和在地幔中所处的位置争议极大, 那么 EM1 组分究竟代表何种物质? 它位于岩石圈地幔、软流圈地幔还是地幔过渡带? 针对这些争议和问题, 笔者团队以该钾质玄武岩为研究对象, 结合 Mg 同位素和常规地球化学手段, 运用新获得的数据以及前人发表的相关地球化学数据, 对中国东北新生代钾质玄武岩的成因进行了深入探讨, 以制约东北地幔中 EM1 组分的来源和空间位置 (Liu *et al.*, 2016, 2017; Wang *et al.*, 2017)。

结果发现, 东北钾质玄武岩的地球化学特征与其时-空分布存在明显的耦合关系。岩石圈越厚的地区产出的钾质玄武岩的 MgO 含量越高, K₂O/Na₂O 和 Rb/Nb 值越低, Sr 和 Nd 同位素组成更亏损 (Liu *et al.*, 2016); 同一地区 (如大兴安岭诺敏河地区) 喷发越晚的岩浆 SiO₂ 含量和 Rb/Nb、K/La 值越高, MgO 含量越低 (Liu *et al.*, 2017)。这些钾质玄武岩的 Sr-Nd-Pb-Hf 同位素组成具有明显的两端元混合排列特征, 代表该区岩石圈地幔的橄榄岩捕掳体位于亏损端元 (Liu *et al.*, 2016, 2017; Wang *et al.*, 2017)。此外, 钾质玄武岩中橄榄石捕掳晶普遍发育熔蚀结构和成分环带 (Liu *et al.*, 2017)。这些证据明确排除了钾质玄武岩直接来自交代岩石圈地幔的可能, 而支持其源区为富集软流圈地幔的观点。软流圈地幔中的富集物质 (EM1 组分) 部分熔融可产生富钾富硅的初始熔体, 在熔体上升过程中与亏损的岩石圈地幔发生了不同程度的反应, 从而演化为钾质玄武岩。

要进一步制约产生初始富钾熔体的富集物质 (EM1 组分) 的来源, 首先应厘定其地球化学特征。由于钾质玄武岩在 Sr-Nd-Pb-Hf 同位素组成上呈现出 EM1 端元与亏损端元混合的特征, 因而可根据在同位素组成上更接近 EM1 端元的玄武岩样品 (EM1 端元玄武岩) 的地球化学组成来限定 EM1 组分的地

球化学特征。基于端元玄武岩样品限定的 EM1 组分具有以下特征: 极低的 $\delta^{26}\text{Mg}$ 值 ($\leq -0.6\text{‰}$); 异常高的 K/U 值 (~ 50000) 和 Ba/Th 值 (≥ 400); Zr 和 Hf 的显著正异常 ($\text{Hf}/\text{Hf}^* > 1.25$); $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} \leq 16.5$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} \leq 0.5123$, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} \leq 0.2825$ (Wang *et al.*, 2017)。总体而言, 古老大陆岩石圈地幔和再循环古老大陆下地壳两种储库都不具有比正常地幔明显偏轻的 Mg 同位素组成 (Wang *et al.*, 2017, 2018), 因此难以解释钾质玄武岩源区 EM1 组分极低的 $\delta^{26}\text{Mg}$ 值。相比之下, 用于解释 EM1 型洋岛玄武岩源区 EM1 组分成因的“再循环古老含碳酸盐沉积物”, 则同样适用于解释东北钾质玄武岩源区 EM1 型富集组分轻的 Mg 同位素组成和极低的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值。基于 Pb 同位素三阶段演化的计算结果表明俯冲沉积物经历约 22 亿年的演化后, 可形成钾质玄武岩源区 EM1 组分那种极端的 Pb 同位素组成 (Wang *et al.*, 2017)。此外, 钾质玄武岩源区 EM1 组分异常高的 K/U 和 Ba/Th 值说明 K-U 和 Ba-Th 两个地球化学行为极为相近的元素对发生了显著分馏, 然而在沉积物储库中并未见到如此显著的分馏 (图 4)。基于含碳酸盐沉积物的高温高压熔融实验 (Grassi and Schmidt, 2011; Grassi *et al.*, 2012) 以及微量元素定量模拟计算, 我们发现当含碳酸盐沉积物俯冲到地幔过渡带发生脱碳熔融之后, 残余沉积物组分由于钾锰钡矿和镁铁榴石的存在而具有比原始沉积物明显偏高的 (K,



数据来源: 现代海沟附近俯冲沉积物据 Plank (2014), 亏损地幔据 Workman 和 Hart (2005), 其余数据来源同图 1。据 Wang 等 (2017) 修改

图 4 Pitcairn 洋岛玄武岩与中国东北 EM1 端元玄武岩的 K/U 和 Ba/Th 值差异

Fig. 4 The plot of K/U versus Ba/Th ratios for the Pitcairn ocean island basalts and intra-continental EM1-type basalts from Northeast China

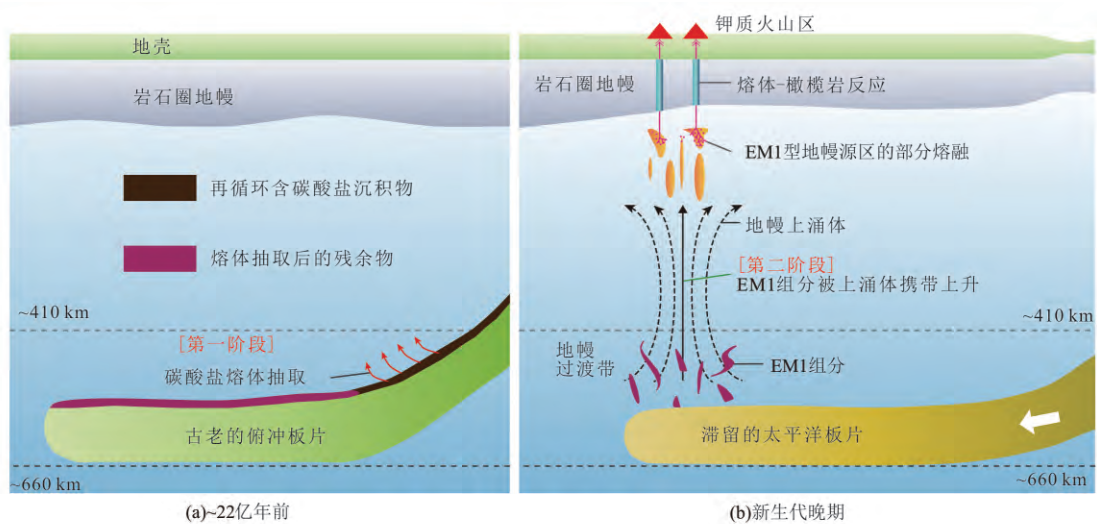
Rb, Ba, Pb) / (Th, U) 和 (Zr, Hf) / (Sm, Nd) 值 (Wang *et al.*, 2017)。残余沉积物组分的这些特征恰好符合钾质玄武岩源区 EM1 组分对应的化学组成异常。

综上所述,可将中国东北 EM1 型钾质玄武岩的形成概括为两个阶段(图 5): ①在大约 22 亿年前,含碳酸盐的沉积物随俯冲板块一起下沉直至到达地幔过渡带深度,俯冲板块发生弯折并逐渐滞留于地幔过渡带(图 5a)。这个过程引起的热释放及板片温度的增加将导致含碳酸盐的沉积物发生部分熔融,产生碳酸盐熔体并残留主要由钾锰钡矿、重硅石、镁铁榴石和刚玉组成的残余沉积物组分(Grassi and Schmidt, 2011)。这种残留沉积物组分的密度低于下地幔顶部温压条件下周围地幔物质的密度,难以下沉至更深的地幔(Nishiyama *et al.*, 2005; Rapp *et al.*, 2008),因而能长期在地幔过渡带保存。残留的沉积物组分在地幔过渡带经过长期的孤立演化后将形成化学和同位素组成特殊的 EM1 组分; ②新生代晚期,由残余沉积物组分在地幔过渡带演化形成的 EM1 组分被地幔上涌体携带上升至浅部软流圈地幔并发生部分熔融,产生的 EM1 型富钾富硅熔体在上升过程中与亏损的岩石圈地幔发生不同程度的反应,最终形成钾质玄武岩(图 5b)。

3 两类 EM1 型玄武岩在成因上的联系和区别

从第 2 和第 3 部分可知,来自 Pitcairn 的典型

EM1 型洋岛玄武岩与中国东北典型大陆板内 EM1 型玄武岩在成因上的共性是:其地幔源区均存在具有比正常地幔明显偏轻的 Mg 同位素特征的 EM1 组分,俯冲的古老(太古代晚期-元古代早期)含碳酸盐沉积物经历脱碳作用之后,残余沉积物组分经历长期、孤立的演化最终形成了这种特殊的 EM1 组分。然而大陆板内的中国东北 EM1 型玄武岩与大洋板内的 Pitcairn 洋岛玄武岩在指示地幔源区特征的地球化学指标上存在一定差别,最显著的表现: ①前者具有更极端的、低的放射成因铅同位素组成(图 1); ②前者具有异常高的 K/U 和 Ba/Th 值,明显不同于后者(图 4)。这些地球化学组成差异的形成表明两类 EM1 型玄武岩在成因上也存在一些差别。结合实验岩石学对含碳酸盐沉积物熔融行为的限定,我们通过定量模拟发现古老的含碳酸盐沉积物在俯冲过程中发生的不同形式的脱碳作用可以很好地解释上述地球化学组成差异的形成。对于 Pitcairn 洋岛玄武岩而言,含碳酸盐沉积物的脱碳作用最可能是在沉积物俯冲过程中以碳酸盐-硅酸盐反应的形式发生,因此脱碳过程并没有造成 K-U、Ba-Th 和 U-Pb 元素对的分馏,在最终形成的 Pitcairn 玄武岩中难以见到异常高的 K/U 和 Ba/Th 值(Wang *et al.*, 2018)。对于大陆板内钾质 EM1 型玄武岩而言,脱碳作用最可能在含碳酸盐沉积物俯冲至地幔过渡带深度时以碳酸盐熔融的形式发生(Wang *et al.*, 2017)。该深度下含碳酸盐沉积物的脱碳熔融会产生碳酸盐熔体而残留钾锰钡



据 Wang 等(2017) 修改

图 5 中国东北钾质玄武岩 EM1 型地幔源区的两阶段成因模型

Fig.5 The two-stage model for the formation of potassic basalts in Northeast China derived from the EM1 mantle source

矿和镁铁榴石(Grassi and Schmidt, 2011)。由于 K、Ba、Pb 和 Zr、Hf 分别强烈相容于残余组分钾锰钒矿和镁铁榴石中,而 U、Th 和轻、中稀土元素则优先进入碳酸盐熔体,使得残余沉积物组分具有异常高的 K/U 和 Ba/Th 值,极低的 U/Pb 值及 Zr、Hf 的正异常特征。这种具有极低 U/Pb 值的残余沉积物组分在地幔过渡带经历长时间(~2.2 Ga)的铅同位素缓慢增长,最终形成钾质玄武岩源区中放射成因铅同位素组成极低的 EM1 组分(这种 EM1 组分的比由未经历上述 U-Pb 元素对强烈分馏的沉积物演化而成的 EM1 组分,如 Pitcairn 洋岛玄武岩源区中的 EM1 组分,具有更低的放射成因铅同位素组成),同时将异常高的 K/U 和 Ba/Th 值等罕见的地球化学特征“传递”给钾质 EM1 型玄武岩。

4 总结与展望

(1) 对大洋和大陆板内经典 EM1 型玄武岩进行的地球化学研究表明,EM1 组分来源于再循环的古老含碳酸盐沉积物,而不支持前人提出的观点。

(2) 含碳酸盐沉积物在俯冲过程中或俯冲至地幔过渡带时,可能经历了不同形式的脱碳过程,之后残余组分在地幔过渡带(中国东北钾质玄武岩)或核幔边界(南太平洋 Pitcairn 玄武岩)经历长期、孤立的同位素演化,最终形成 EM1 组分。

(3) 玄武岩的镁同位素组成可以用于探讨地幔端元组分的成因,但目前我们只代表性地研究了两处经典的 EM1 型玄武岩,今后还应对更多的 EM1 型玄武岩以及其他端元(HIMU, EM2)玄武岩进行镁同位素研究,才能进一步挖掘和评估镁同位素在探究地幔的化学组成和示踪地球浅部物质再循环过程方面的价值。

(4) 大洋和大陆板内 EM1 型玄武岩的形成都与古老的含碳酸盐沉积物俯冲再循环有关,指示玄武岩的镁同位素在探讨不同地质历史时期的深部碳循环方面具有较大的应用潜力。

致谢:中国科学院地质与地球物理研究所的汤艳杰研究员对本文提出了建设性的意见和建议,在此表示衷心的感谢。

参考文献 (References):

Basu A R, Wang J W, Huang W K, Xie G H, Tatsumoto M. 1991. Major element, REE, and Pb, Nd and Sr isotopic geochemistry of Cenozoic volcanic rocks of eastern China: Implications for their origin from suboceanic-type mantle reservoirs. *Earth and Planetary Science Letters*, 105(1-3): 149-169

Ben Othman D, White W M, Patchett J. 1989. The geochemistry of marine sediments, island arc magma genesis, and crust-mantle recycling. *Earth and Planetary Science Letters*, 94(1-2): 1-21

Carlson R W, Irving A J. 1994. Depletion and enrichment history of subcontinental lithospheric mantle: An Os, Sr, Nd and Pb isotopic study of ultramafic xenoliths from the northwestern Wyoming Craton. *Earth and Planetary Science Letters*, 126(4): 457-472

Chauvel C, Hofmann A W, Vidal P. 1992. HIMU-EM: The French Polynesian connection. *Earth and Planetary Science Letters*, 110(1-4): 99-119

Chen Y, Zhang Y X, Graham D, Su S G, Deng J F. 2007. Geochemistry of Cenozoic basalts and mantle xenoliths in Northeast China. *Lithos*, 96(1-2): 108-126

Choi S H, Mukasa S B, Kwon S T, Andronikov A V. 2006. Sr, Nd, Pb and Hf isotopic compositions of late Cenozoic alkali basalts in South Korea: Evidence for mixing between the two dominant asthenospheric mantle domains beneath East Asia. *Chemical Geology*, 232(3-4): 134-151

Chu Z Y, Harvey J, Liu C Z, Guo J H, Wu F Y, Tian W, Zhang Y L, Yang Y H. 2013. Source of highly potassic basalts in northeast China: Evidence from Re-Os, Sr-Nd-Hf isotopes and PGE geochemistry. *Chemical Geology*, 357: 52-66

Dasgupta R, Hirschmann M M, Stalker K. 2006. Immiscible transition from carbonate-rich to silicate-rich melts in the 3 GPa melting interval of Eclogite + CO₂ and genesis of silica-undersaturated ocean island lavas. *Journal of Petrology*, 47(4): 647-671

Dasgupta R, Hirschmann M M, Smith N D. 2007. Partial melting experiments of peridotite + CO₂ at 3 GPa and genesis of Alkalic Ocean Island basalts. *Journal of Petrology*, 48(11): 2093-2124

Delavault H, Chauvel C, Thomassot E, Devey C W, Dazas B. 2016. Sulfur and lead isotopic evidence of relic Archean sediments in the Pitcairn mantle plume. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 113(46): 12952-12956

Duncan R A, McDougall I, Carter R M, Coombs D S. 1974. Pitcairn Island-another Pacific hot spot?. *Nature*, 251(5477): 679-682

Eiler J M, Farley K A, Valley J W, Stolper E M, Hauri E H, Craig H. 1995. Oxygen isotope evidence against bulk recycled sediment in the mantle sources of Pitcairn Island lavas. *Nature*, 377(6545): 138-141

Eisele J, Sharma M, Galer S J G, Blichert-Toft J, Devey C W, Hofmann A W. 2002. The role of sediment recycling in EM-1 inferred from Os, Pb, Hf, Nd, Sr isotope and trace element systematics of the Pitcairn hotspot. *Earth and Planetary Science Letters*, 196(3-4): 197-212

Gale A, Dalton C A, Langmuir C H, Su Y J, Schilling J G. 2013. The mean composition of ocean ridge basalts. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 14(3): 489-518

Galer S J G, O'Nions R K. 1985. Residence time of thorium, uranium and lead in the mantle with implications for mantle convection. *Nature*, 316(6031): 778-782

Garapic G, Jackson M G, Hauri E H, Hart S R, Farley K A, Blusztajn J S, Woodhead J D. 2015. A radiogenic isotopic (He-Sr-Nd-Pb-Os) study of lavas from the Pitcairn hotspot: Implications for the origin of

- EM-1 (enriched mantle 1). *Lithos*, 228-229: 1-11
- Geldmacher J, Hoernle K, Klügel A, van den Bogaard P, Bindeman I. 2008. Geochemistry of a new enriched mantle type locality in the northern hemisphere: Implications for the origin of the EM-1 source. *Earth and Planetary Science Letters*, 265(1-2): 167-182
- Gibson S A, Thompson R N, Day J A, Humphris S E, Dickin A P. 2005. Melt-generation processes associated with the Tristan mantle plume: Constraints on the origin of EM-1. *Earth and Planetary Science Letters*, 237(3-4): 744-767
- Grassi D, Schmidt M W. 2011. The melting of carbonated Pelites from 70 to 700 km depth. *Journal of Petrology*, 52(4): 765-789
- Grassi D, Schmidt M W, Günther D. 2012. Element partitioning during carbonated pelite melting at 8, 13 and 22 GPa and the sediment signature in the EM mantle components. *Earth and Planetary Science Letters*, 327-328: 84-96
- Hanan B B, Blichert-Toft J, Pyle D G, Christie D M. 2004. Contrasting origins of the upper mantle revealed by hafnium and lead isotopes from the Southeast Indian Ridge. *Nature*, 432(7013): 91-94
- Hanyu T, Tatsumi Y, Senda R, Miyazaki T, Chang Q, Hirahara Y, Takahashi T, Kawabata H, Suzuki K, Kimura J, Nakai S. 2011. Geochemical characteristics and origin of the HIMU reservoir: A possible mantle plume source in the lower mantle. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 12(2): Q0AC09, doi: 10.1029/2010GC003252
- Herzberg C, Cabral R A, Jackson M G, Vidito C, Day J M D, Hauri E H. 2014. Phantom Archean crust in Mangaia hotspot lavas and the meaning of heterogeneous mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 396: 97-106
- Hofmann A W, White W M. 1982. Mantle plumes from ancient oceanic crust. *Earth and Planetary Science Letters*, 57(2): 421-436
- Hofmann A W. 1997. Mantle geochemistry: The message from oceanic volcanism. *Nature*, 385(6613): 219-229
- Hofmann A W. 2014. Sampling mantle heterogeneity through oceanic basalts: Isotopes and trace elements. In: Holland H D, Turekian H K, eds. *Treatise on Geochemistry*. 2nd ed. Oxford: Elsevier, 67-101
- Huang J, Ke S, Gao Y J, Xiao Y L, Li S G. 2015. Magnesium isotopic compositions of altered oceanic basalts and gabbros from IODP site 1256 at the East Pacific Rise. *Lithos*, 231: 53-61
- Jackson M G, Hart S R, Koppers A A P, Staudigel H, Konter J, Blusztajn J, Kurz M, Russell J A. 2007. The return of subducted continental crust in Samoan lavas. *Nature*, 448(7154): 684-687
- Jackson M G, Dasgupta R. 2008. Compositions of HIMU, EM1, and EM2 from global trends between radiogenic isotopes and major elements in ocean island basalts. *Earth and Planetary Science Letters*, 276(1-2): 175-186
- Kuritani T, Kimura J, Ohtani E, Miyamoto H, Furuyama K. 2013. Transition zone origin of potassic basalts from Wudalianchi volcano, northeast China. *Lithos*, 156-159: 1-12
- Lai Y J, Pogge Von Strandmann P A E, Dohmen R, Takazawa E, Elliott T. 2015. The influence of melt infiltration on the Li and Mg isotopic composition of the Horoman Peridotite Massif. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 164: 318-332
- Li S G, Yang W, Ke S, Meng X N, Tian H C, Xu L J, He Y S, Huang J, Wang X C, Xia Q K, Sun W D, Yang X Y, Ren Z Y, Wei H Q, Liu Y S, Meng F C, Yan J. 2017. Deep carbon cycles constrained by a large-scale mantle Mg isotope anomaly in eastern China. *National Science Review*, 4(1): 111-120
- Li W Y, Teng F Z, Wing B A, Xiao Y L. 2014. Limited magnesium isotope fractionation during metamorphic dehydration in metapelites from the Onawa contact aureole, Maine. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 15(2): 408-415
- Liu J Q, Chen L H, Zeng G, Wang X J, Zhong Y, Yu X. 2016. Lithospheric thickness controlled compositional variations in potassic basalts of Northeast China by melt-rock interactions. *Geophysical Research Letters*, 43(6): 2582-2589
- Liu J Q, Chen L H, Wang X J, Zhong Y, Yu X, Zeng G, Erdmann S. 2017. The role of melt-rock interaction in the formation of Quaternary high-MgO potassic basalt from the Greater Khingan Range, northeast China. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122(1): 262-280
- Lustrino M, Melluso L, Morra V. 2000. The role of lower continental crust and lithospheric mantle in the genesis of Plio-Pleistocene volcanic rocks from Sardinia (Italy). *Earth and Planetary Science Letters*, 180(3-4): 259-270
- McKenzie D, O'Nions R K. 1983. Mantle reservoirs and ocean island basalts. *Nature*, 301(5897): 229-231
- Menzies M, Murthy V R. 1980. Enriched mantle: Nd and Sr isotopes in diopsides from kimberlite nodules. *Nature*, 283(5748): 634-636
- Milner S C, Le Roex A P. 1996. Isotope characteristics of the Okenyenya igneous complex, northwestern Namibia: Constraints on the composition of the early Tristan plume and the origin of the EM 1 mantle component. *Earth and Planetary Science Letters*, 141(1-4): 277-291
- Nishiyama N, Rapp R P, Irifune T, Sanehira T, Yamazaki D, Funakoshi K. 2005. Stability and p - V - T equation of state of $KAlSi_3O_8$ -hollandite determined by in situ X-ray observations and implications for dynamics of subducted continental crust material. *Physics and Chemistry of Minerals*, 32(8-9): 627-637
- Pfänder J A, Münker C, Stracke A, Mezger K. 2007. Nb/Ta and Zr/Hf in ocean island basalts — Implications for crust-mantle differentiation and the fate of Niobium. *Earth and Planetary Science Letters*, 254(1-2): 158-172
- Plank T, Langmuir C H. 1998. The chemical composition of subducting sediment and its consequences for the crust and mantle. *Chemical Geology*, 145(3-4): 325-394
- Plank T. 2014. The Chemical Composition of Subducting Sediments. In: Holland H D, Turekian K K, eds. *Treatise on Geochemistry*. 2nd ed. Oxford: Elsevier, 607-629
- Rapp R P, Irifune T, Shimizu N, Nishiyama N, Norman M D, Inoue T. 2008. Subduction recycling of continental sediments and the origin of geochemically enriched reservoirs in the deep mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 271(1-4): 14-23
- Rehkämper M, Hofmann A W. 1997. Recycled ocean crust and sediment in Indian Ocean MORB. *Earth and Planetary Science Letters*, 147(1-4): 93-106
- Salters V J M, White W M. 1998. Hf isotope constraints on mantle evolu-

- tion. *Chemical Geology*, 145(3-4): 447-460
- 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(6781): 986-990
- Staudigel H, Park K H, Pringle M, Rubenstone J L, Smith W H F, Zindler A. 1991. The longevity of the South Pacific isotopic and thermal anomaly. *Earth and Planetary Science Letters*, 102(1): 24-44
- Stracke A. 2012. Earth's heterogeneous mantle: A product of convection-driven interaction between crust and mantle. *Chemical Geology*, 330-331: 274-299
- Stracke A, Tipper E T, Klemme S, Bizimis M. 2018. Mg isotope systematics during magmatic processes: Inter-mineral fractionation in mafic to ultramafic Hawaiian xenoliths. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 226: 192-205
- Sun Y, Ying J F, Zhou X H, Shao J A, Chu Z Y, Su B X. 2014. Geochemistry of ultrapotassic volcanic rocks in Xiaogulihe NE China: Implications for the role of ancient subducted sediments. *Lithos*, 208-209: 53-66
- Sun Y, Ying J F, Su B X, Zhou X H, Shao J A. 2015. Contribution of crustal materials to the mantle sources of Xiaogulihe ultrapotassic volcanic rocks, Northeast China: New constraints from mineral chemistry and oxygen isotopes of olivine. *Chemical Geology*, 405: 10-18
- Sun Y, Teng F Z, Ying J F, Su B X, Hu Y, Fan Q C, Zhou X H. 2017. Magnesium isotopic evidence for ancient subducted oceanic crust in LOMU-like potassium-rich volcanic rocks. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122(10): 7562-7572
- Tang Y J, Zhang H F, Ying J F, Zhang J, Liu X M. 2008. Refertilization of ancient lithospheric mantle beneath the central North China Craton: Evidence from petrology and geochemistry of peridotite xenoliths. *Lithos*, 101(3-4): 435-452
- Tang Y J, Zhang H F, Ying J F. 2010. A brief review of isotopically light Li—a feature of the enriched mantle? *International Geology Review*, 52(9): 964-976
- Tang Y J, Zhang H F, Ying J F, Su B X, Chu Z Y, Xiao Y, Zhao X M. 2013. Highly heterogeneous lithospheric mantle beneath the Central Zone of the North China Craton evolved from Archean mantle through diverse melt refertilization. *Gondwana Research*, 23(1): 130-140
- Teng F Z, Wadhwa M, Helz R T. 2007. Investigation of magnesium isotope fractionation during basalt differentiation: Implications for a chondritic composition of the terrestrial mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 261(1-2): 84-92
- Teng F Z, Li W Y, Ke S, Marty B, Dauphas N, Huang S C, Wu F Y, Pourmand A. 2010. Magnesium isotopic composition of the Earth and chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74(14): 4150-4166
- Teng F Z. 2017. Magnesium isotope geochemistry. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 82(1): 219-287
- Tian H C, Yang W, Li S G, Ke S, Chu Z Y. 2016. Origin of low $\delta^{26}\text{Mg}$ basalts with EM-I component: Evidence for interaction between enriched lithosphere and carbonated asthenosphere. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 188: 93-105
- Turner S J, Langmuir C H, Dungan M A, Escrig S. 2017. The importance of mantle wedge heterogeneity to subduction zone magmatism and the origin of EM1. *Earth and Planetary Science Letters*, 472: 216-228
- Vervoort J D, Plank T, Prytulak J. 2011. The Hf-Nd isotopic composition of marine sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75(20): 5903-5926
- Wang S J, Teng F Z, Rudnick R L, Li S G. 2015. The behavior of magnesium isotopes in low-grade metamorphosed mudrocks. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 165: 435-448
- Wang X J, Chen L H, Hofmann A W, Mao F G, Liu J Q, Zhong Y, Xie L W, Yang Y H. 2017. Mantle transition zone-derived EM1 component beneath NE China: Geochemical evidence from Cenozoic potassium basalts. *Earth and Planetary Science Letters*, 465: 16-28
- Wang X J, Chen L H, Hofmann A W, Hanyu T, Kawabata H, Zhong Y, Xie L W, Shi J H, Miyazaki T, Hirahara Y, Takahashi T, Sendai R, Chang Q, Vaglarov B S, Kimura J I. 2018. Recycled ancient ghost carbonate in the Pitcairn mantle plume. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 115(35): 8682-8687
- Weaver B L, Wood D A, Tarney J, Joron J L. 1986. Role of subducted sediment in the genesis of ocean-island basalts: Geochemical evidence from South Atlantic Ocean islands. *Geology*, 14(4): 275-278
- Weaver B L. 1991. The origin of ocean island basalt end-member compositions: Trace element and isotopic constraints. *Earth and Planetary Science Letters*, 104(2-4): 381-397
- Weiss Y, Class C, Goldstein S L, Hanyu T. 2016. Key new pieces of the HIMU puzzle from olivines and diamond inclusions. *Nature*, 537(7622): 666-670
- White W M. 2015. Probing the earth's deep interior through geochemistry. *Geochemical Perspectives*, 4(2): 95-96
- Willbold M, Stracke A. 2006. Trace element composition of mantle end-members: Implications for recycling of oceanic and upper and lower continental crust. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 7(4): Q04004, doi: 10.1029/2005GC001005
- Willbold M, Stracke A. 2010. Formation of enriched mantle components by recycling of upper and lower continental crust. *Chemical Geology*, 276(3-4): 188-197
- Woodhead J D, McCulloch M T. 1989. Ancient seafloor signals in Pitcairn Island lavas and evidence for large amplitude, small length-scale mantle heterogeneities. *Earth and Planetary Science Letters*, 94(3-4): 257-273
- Woodhead J D, Devey C W. 1993. Geochemistry of the Pitcairn seamounts, I: source character and temporal trends. *Earth and Planetary Science Letters*, 116(1-4): 81-99
- Woodhead J D, Greenwood P, Harmon R S, Stoffers P. 1993. Oxygen isotope evidence for recycled crust in the source of EM-type ocean island basalts. *Nature*, 362(6423): 809-813
- Workman R K, Hart S R. 2005. Major and trace element composition of the depleted MORB mantle (DMM). *Earth and Planetary Science Letters*, 231(1-2): 53-72
- Workman R K, Eiler J M, Hart S R, Jackson M G. 2008. Oxygen isotopes in Samoan lavas: Confirmation of continent recycling.

- Geology, 36(7): 551-554
- Xu Y G, Blusztajn J, Ma J L, Suzuki K, Liu J F, Hart S R. 2008. Late Archean to Early Proterozoic lithospheric mantle beneath the western North China craton: Sr-Nd-Os isotopes of peridotite xenoliths from Yangyuan and Fansi. Lithos, 102(1-2): 25-42
- Yang W, Teng F Z, Zhang H F, Li S G. 2012. Magnesium isotopic systematics of continental basalts from the North China craton: Implications for tracing subducted carbonate in the mantle. Chemical Geology, 328: 185-194
- Zhang L Y, Prelević D, Li N, Mertz-Kraus R, Buhre S. 2016. Variation of olivine composition in the volcanic rocks in the Songliao basin, NE China: lithosphere control on the origin of the K-rich intraplate mafic lavas. Lithos, 262: 153-168
- Zhang M, Menzies M A, Suddaby P, Thirlwall M F. 1991. EMI signature from within the post-Archaean subcontinental lithospheric mantle: Isotopic evidence from the potassic volcanic rocks in NE China. Geochemical Journal, 25(5): 387-398
- Zhang M, Suddaby P, Thompson R N, Thirlwall M F, Menzies M A. 1995. Potassic volcanic rocks in NE China: Geochemical constraints on mantle source and magma genesis. Journal of Petrology, 36(5): 1275-1303
- Zhang M, Zhou X H, Zhang J B. 1998. Nature of the lithospheric mantle beneath NE China: Evidence from potassic volcanic rocks and mantle xenoliths. In: Flower M, Chung S L, Lo C H, Lee T Y, eds. Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia, vol. 27. American Geophysical Union, 197-219
- Zhao Y W, Fan Q C, Zou H B, Li N. 2014. Geochemistry of Quaternary basaltic lavas from the Nuomin volcanic field, Inner Mongolia: Implications for the origin of potassic volcanic rocks in Northeastern China. Lithos, 196-197: 169-180
- Zhong Y, Chen L H, Wang X J, Zhang G L, Xie L W, Zeng G. 2017. Magnesium isotopic variation of oceanic island basalts generated by partial melting and crustal recycling. Earth and Planetary Science Letters, 463: 127-135
- Zindler A, Hart S. 1986. Chemical geodynamics. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 14(1): 493-571
- Zou H B, Reid M R, Liu Y S, Yao Y P, Xu X S, Fan Q C. 2003. Constraints on the origin of historic potassic basalts from northeast China by U-Th disequilibrium data. Chemical Geology, 200(1-2): 189-201
- 樊祺诚, 刘若新, 隋建立. 1999. 五大连池裂谷型富钾火山岩带的岩石学与地球化学. 地质论评, 45(S1): 358-368
- 柯珊, 刘盛邀, 李王晔, 杨蔚, 滕方振. 2011. 镁同位素地球化学研究新进展及其应用. 岩石学报, 27(2): 383-397
- 马金龙, 徐义刚. 2006. 河北阳原幔源包体的 Sr-Nd 同位素特征指示华北克拉通中部存在 EMI 型古老富集地幔. 科学通报, 51(10): 1190-1196
- 汤艳杰, 张宏福, 英基丰. 2011. 地幔中 EMI 端员成因的锂同位素制约. 矿物岩石地球化学通报, 30(1): 11-17
- 朱祥坤, 王跃, 闫斌, 李津, 董爱国, 李志红, 孙剑. 2013. 非传统稳定同位素地球化学的创建与发展. 矿物岩石地球化学通报, 32(6): 651-68

(本文责任编辑: 龚超颖; 英文审校: 张兴春)

• 亮点速读 •

过铝质花岗岩中 Nb-Ta 的分异反映了岩浆-热液的转化过程

过铝质花岗岩在成因上一般与 S 型花岗岩和高分异花岗岩有关, 在演化后期往往出熔大量的流体, 可以形成伟晶岩脉、石英脉或云英岩等。这些流体通常导致元素的活化转移, 而且往往与稀有金属矿床(如铌钽、钨锡和铀钍等)密切相关。

Na-Ta 是一对具有相似地球化学性质的亲石元素, 在大多数地质过程中通常不发生分馏。但在花岗岩中, Nd/Ta 比值的范围却变化很大(从 <2 至 25)。花岗岩浆的分异一般导致

Nd/Ta 比值降低, 而高演化的过铝质岩浆在岩浆热液阶段也或产生 Nb-Ta 的分离。为了阐明岩浆过程和热液作用对 Nb-Ta 比值的影响, 法国雷恩大学的 Christophe Ballouar 及其合作者对除伟晶岩和细晶岩外的不同时代、构造背景和矿物组成的过铝质花岗岩 (A/CNK > 1) 的全岩数据进行了系统的分析, 试图阐明 Nb/Ta 比值在岩浆和热液过程中的变化。他们的研究表明, 单纯的分离结晶不足以解释大多数过铝质花岗岩中 Nb-Ta 的分布特征, 并

且代表热液作用的次生白云母化和云英岩化作用可以使得 Nb/Ta 比值显著降低, 与流体发生过相互作用的花岗岩样品其 Nb/Ta 比值一般在 5 以下。在地球化学方面, 指征岩浆和流体转化过程的高度活动性元素 (Sn, K/Rb, TE1-3) 低的 Nb/Ta 比值 (<5) 反映了过铝质花岗岩由岩浆阶段向热液阶段的过渡。同时, 过铝质花岗岩低的 Nb/Ta 比值 (<5) 往往与 Sn-W-Mo-Be-Ta-Nb 等矿化作用密切相关, 可用于判别含矿花岗岩与不含矿花岗岩。

[上述成果发表在国际著名期刊《Geology》上: Ballouard, C., Poujol, M., Boulvais, P., Branquet, Y., Tartèse, R., Vigneresse, J.L., 2016. Nb-Ta fractionation in peraluminous granites: A marker of the magmatic-hydrothermal transition. Geology, 44(3), 231-234.]

(袁超 编译)

III



汪在聪,1985年生,中国地质大学(武汉)地球化学系教授,博士生导师。获得国家"千人计划"青年人才项目和国家自然科学基金优秀青年基金资助。主要研究方向是建立准确分析亲铁亲铜元素含量和稳定同位素的方法,研究地球及其它行星地幔岩浆过程、核幔分异、行星增生演化及增生物质成分和金属矿床成因。近期主要研究俯冲带金属和挥发性元素迁移演化以及胶东巨量金成矿的起源;负责 Nu plasma 1700 MC-ICP-MS,正建立和开发 Ca、Fe、Cu、Zn 等稳定同位素的应用。以第一作者和通讯作者在 Nature、EPSL、GCA、GGR 和 AM 等期刊发表论文十余篇。



刘金高,1984年生。中国地质大学(北京)教授,博士生导师,先后获得"千人计划"青年项目与国家自然科学基金优秀青年基金资助。主要从事亲铁性元素及其放射性同位素体系相关的地球化学、天体化学研究,在国际一流期刊上发表论文 28 篇。



汤艳杰,1973年生,中国科学院地质与地球物理研究所研究员,博士生导师。从事地幔地球化学研究。以火山岩及其捕虏体为主要研究对象,将新兴的锂同位素示踪体系与传统的岩石地球化学方法相结合,揭示不同来源和性质的熔/流体对大陆岩石圈地幔的改造作用。发表第一作者论文 28 篇,其中 SCI 论文 17 篇。获侯德封奖(2010)、中国科学院杰出科技成就奖(主要完成者,2014年),国家杰出

青年科学基金资助(2017年)和国家自然科学基金二等奖(排名第四,2017年)。



王小均,1990年生,南京大学地球科学与工程学院特任助理研究员。2018年于南京大学毕业,获理学博士学位。研究方向为火成岩岩石学与地幔地球化学,近期主要研究内容包括:中国东北新生代钾质玄武岩的成因与东北地幔中 EM1 组分的来源;EM1 型洋岛玄武岩的镁同位素组成与地球深部-地表物质循环过程。迄今以第一作者发表 Nature Index 期刊论文 2 篇,中文核心期刊论文 1 篇,另以共同作者发表论文 5 篇。



陈欢,1989年生,浙江大学地球科学学院在站博士后,研究方向为地幔岩石学和地球化学。2017年获中国科学院院长优秀奖,并于同年获得国家博士后创新人才支持计划资助。目前主要的工作是研究地幔水含量对板内岩浆作用(小规模岩浆活动和大火成岩省)的影响。现负责国家自然科学基金委面上项目一项,以第一作者身份在《Earth and Planetary Science Letters》等知名 SCI 杂志上发表论文 4 篇。



赵智华,1993年生,中国科学院海洋研究所硕士研究生,海洋岩石与地球化学方向,主要从事海洋岩石地球化学研究,现专注于海南岛新生代玄武岩与南海海盆玄武岩成因及其关联研究,通过两者地球化学特征的对比分析,约束其深部地幔动力学背景及南海打开的原因。