

幔源岩类中的稀有气体同位素与 Sr、Nd、Pb 同位素研究进展

马锦龙^{1,2}, 陶明信¹

1. 中国科学院 兰州地质所 气体地球化学国家重点实验室, 兰州 730000; 2. 兰州大学资源环境学院, 兰州 730000

摘 要:对稀有气体同位素与 Sr、Nd、Pb 同位素的结合研究做了综述。两类示踪体系在研究幔源岩时的结合, 可以得到互相印证的结果, 互相补充不足, 并有利于探索岩石成因, 进一步认识地幔结构、地幔物质组成、运移和壳幔之间的相互作用; 地幔第五端员 (FOZO/ C/ PHEM) 的提出是二者结合研究的重要成果之一。这种研究方法还有待于进一步补充、完善和发展。

关 键 词:同位素; 稀有气体; Sr、Nd、Pb; 幔源岩

中图分类号: P581 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2802(2003) 01-0069-06

Sr、Nd、Pb 同位素是相对成熟且极为有效的岩体示踪体系, 在幔源岩研究中应用广泛, 利用放射性衰变所导致的同位素组成差异以追溯岩浆起源及其演化; 稀有气体则是近三四十年来发展起来的一种有效示踪体系。地球演变过程中稀有气体的化学惰性和同位素分馏效应是它能很好地保存岩体源区信息的基础。原理不同而同样有效的两种示踪体系的结合, 可更好地揭示地幔的组成特征。近年来已有不少这方面的研究, 本文拟对这些成果做一综述。

1 地球中的稀有气体与 Sr、Nd、Pb

稀有气体中以 He、Ar 研究最深入。He 有³He 和⁴He 两种稳定同位素, 目前被广为接受的³He/⁴He 值, 在大气中为 1.4×10^{-6} (记为 Ra); 地壳均值为 2×10^{-8} ; 大洋中脊玄武岩 (MORB) 端员值为 1.1×10^{-5} (8~9 Ra); 下地幔或地幔羽中 (OIB) 大于 8~9 Ra。Ar 的三种稳定同位素⁴⁰Ar、³⁸Ar、³⁶Ar 中, ⁴⁰Ar/³⁶Ar 值应用较多。大气的⁴⁰Ar/³⁶Ar = 295.5; 由于放射成因 Ar 的影响, 地壳中⁴⁰Ar/³⁶Ar 值随岩类及其时代不同而差异极大; 地幔中该值的争论较大, 从大洋中脊和地幔羽样品分析结果来看, 从近大气值到 64 000 都有报道, 在上地幔则为 4000~12 000^[1]。

对大洋中脊玄武岩 (MORB) 和洋岛玄武岩

(OIB) Sr、Nd、Pb 同位素相关性特征的研究, 已经鉴定出 4 个代表性的地幔化学组分端员: 亏损的洋中脊玄武岩地幔 (DMM); 高 U/Pb 值地幔 (HIMU); I 型富集地幔 (EM1); II 型富集地幔 (EM2)。其中 DMM 相当于 MORB 组分; EM1、EM2、HIMU 是构成 OIB 的三种主要端员^[2]。

2 岩浆源区的研究

幔源岩中上述两种体系的结合研究始于 20 世纪 80 年代^[3,4], 其后, 越来越多相关研究工作见诸于文献, 其中包括部分较系统的研究。目前 Sr、Nd、Pb 体系与稀有气体结合主要应用于岩浆源区的综合辨识上, 其优点表现在对结果的互相印证和两种体系的互相补充。

2.1 岩浆源区的识别

这类研究成果最多, 根据产出区域可归结为大陆、大洋两类。根据区域分别予以叙述。

2.1.1 MORB 和 OIB 西太平洋 Woodlark 盆地, 三联点、岛弧和中脊毗邻分布, 是研究俯冲作用的空间展布和影响的理想区域。T. W. Trull 等^[5]通过 He、Sr 同位素结合研究发现, 虽然距俯冲带很近, 但扩张中心部位的 He 和 Sr 同位素值均与大洋中脊相近 (³He/⁴He = 8.2~9.3Ra; ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr = 0.7025~0.7029), 无任何壳源物质

收稿日期: 2002-06-24 收到, 09-02 改回

基金项目: 国家自然科学基金项目 (49972081) 和中国科学院知识创新项目资助

第一作者简介: 马锦龙 (1971—), 男 (回族), 甘肃武都人, 讲师, 在读博士生, 主要从事地球化学方面的教学、科研工作; E-mail: mjinlong@lzu.edu.cn.

混染的迹象;而 Solomon 前弧地区明显有较多放射成因组分 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.7035 \sim 0.7039$), 变化不大的 He 同位素值 ($^3\text{He}/^4\text{He} = 6.9 \pm 0.2\text{Ra}$, 与其它俯冲带类似) 表明, 该区并无运移过程中的混染, 为单一岩浆源, 因而前弧很可能有古太平洋俯冲流体在岩浆源区的贡献; 虽然三联点区低而变化极大的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值 ($0.1 \sim 5\text{Ra}$) 似乎暗示, 含放射性组分的洋壳流体在三联点占支配地位, 但完全释气的熔融法中 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值低于粉碎释出气的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值表明, 放射成因 He 仅存在于矿物晶格中, 排除了洋壳物质的混染, 故三连点被解释为岩浆喷发后大气或放射成因 He 的加入。总之, He、Sr 同位素结合分析表明, 尽管有大范围的俯冲作用, Woodlark 盆地岩石中的挥发分主要源自地幔。

对于共生岩类源区的区分, 两种体系结合运用十分有效。拉斑玄武岩和碱性玄武岩被认为是不同源区的产物; 但在某些地区, 这两类岩石有时在同一火山中伴生, 它们究竟是否同源, 源区有何差异? D. W. Graham 等^[6]研究了太平洋年青海山的伴生岩体, 发现两类岩系中 Sr、Nd、Pb 同位素的变化均具良好相关性, 表明源于单一的非混染源区。但拉斑玄武岩中, He、Sr、Nd、Pb 同位素与 MORB 无异, 属正常的亏损上地幔源; 而共生的碱性玄武岩总是含较多放射成因 Sr、Pb 和少量放射成因 Nd, 其 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.7029 \sim 0.7031$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.51289 \sim 0.51301$, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.8 \sim 19.2$, 同时具低的 He 浓度和低而窄的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 范围 ($1.2 \sim 2.6\text{Ra}$)。这些数据充分表明它与拉斑玄武岩并非同源, 而是源于低 He 浓度和高 (U + Th) 区域。研究还表明, 即便密切共生, He、Sr、Nd、Pb 同位素的明显差异也能有效地区分两类玄武岩, 从而辨别来自不同的源区。

B. P. Christensen 等^[7]利用 He、Ar、Pb 同位素的结合对 Cape Verde 岛作了系统研究, 发现 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值变化较大 ($3.2 \sim 13.8\text{Ra}$), $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar} = 356 \sim 1250$, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.90 \sim 19.63$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.526 \sim 15.621$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 38.694 \sim 39.272$, 且 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 与 $^4\text{He}/^3\text{He}$ 具微弱正相关。高的 $^4\text{He}/^3\text{He}$ 值、多放射成因的 Pb 和低的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值, 显示出 HIMU 源的重大贡献; 而低的 $^4\text{He}/^3\text{He}$ 值则显示下地幔源的贡献。但总体较低的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值、低的 $^4\text{He}/^3\text{He}$ 值及负的 $\Delta(7/4)$ 值排除了 DMM 源的存在, 这与单独用 Sr、Nd、

Pb 同位素分析的结果不同^[8]。

在对吉布提 Afar 火山岩的研究中, B. Marty 等^[9]发现 Tadjoura 峡谷大洋玄武岩具高而相对均一的 He 同位素组成 ($14 \sim 15\text{Ra}$), 并含最少放射成因 Sr ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.7031$); 地表样品中, $^3\text{He}/^4\text{He} = 7.0 \sim 14.5\text{Ra}$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.7034 \sim 0.7037$, 含较多放射成因 Sr。虽然 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值近于大气值, 但远高于大气的 He/Ne 值表明地表样品 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值的变化不可能有大气混染, 而是放射成因组分加入的结果。虽然与 B. P. Christensen^[7]所见现象极为相象, B. Marty 等^[9]认可高 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值显示该区热点的存在, 却质疑高 HIMU 是地幔羽本身的特征, 因为高的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值出自 HIMU 源本身有些矛盾, 同时 He-Sr-Nd-Pb 同位素体系的结合分析也表明, 大陆地壳或大陆岩石圈地幔成分在当前样品中是有限的; 另外, He-Ar 同位素数据又排除了 DMM 的重大贡献, 因而该区更可能是地幔羽物质、放射成因组分和大气的混合。

W. Rison 等^[3]根据 Solomon 地区 He 同位素的研究, 认为该区岩石是地幔交代作用所致; W. M. White^[10]则根据 Sr、Nd、Pb 同位素认为是下地幔流体运移进入富集上地幔的结果。K. A. Farley^[11]利用 He、Sr、Nd、Pb 同位素的综合研究, 指出该区存在两种同位素端员: ①低 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值、高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值和高的 Δ 值 ($^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)、 $(7/4)\Delta$ ($^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$) 为特征的端员, 可能含较多近期再循环地壳物质, 为高度富集组分; ②高 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值、中等的 Sr、Nd、Pb 同位素比值端员, 源于未亏损地幔的物质, 属略微富集组分。

2.1.2 大陆火山岩及其超镁铁质包体 D. R. Porcelli 等^[12]研究了大陆超镁铁岩包体的 He、Sr 同位素组成, 其中产自南也门、澳大利亚、法国、坦桑尼亚的各种岩类都具类 MORB 的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值 ($6 \sim 10\text{Ra}$), 表明无热点或放射成因组分的重大贡献。但斜方辉石中变化极大的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值 ($0.7036 \sim 0.8360$), 与 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值具明显的脱耦性。作者认为这是因为 Rb-Sr 和 U-He 分馏作用, 导致最终保留了上地幔 He 同位素, 同时形成了变化较大的 Sr 同位素值。

D. W. Graham 等^[13]研究了东非裂谷年青火山岩斑晶中橄榄石和辉石的 He、Sr、Nd、Pb 同位素变化, 系统的粉碎及熔融实验排除了放射成因组分的影响, 因而同位素数据能较好地反映源区本身的特征。

他发现, Rungwe 区、S. Kiva 区、Virunga 区 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值明显不同且无叠覆(7.5~9.0 Ra、5.0~6.5 Ra、6.7~7.5 Ra), 但均属亏损的大陆上地幔源, 而无热点高 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值物质的痕迹。S. Kiva 区碱性玄武岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为 0.7031~0.7052, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值范围较宽(0.5126~0.5130), 且二者呈强烈负相关; $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值为 19.75~20.70。相反, Rungwe 区镁质岩(包括碱性玄武岩、碧玄岩、霞石岩)则明显不同: $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为 0.7045~0.7057, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值为 0.5124~0.5126, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值为 17.65~18.90。这种 He-Sr-Nd-Pb 体系显示了普通地幔源(如软流圈最上部的热边界层)的贡献, 但鲜明的亲石元素特征又反映了大陆岩石圈的特征。小范围内不同元素同位素组成的较大变化, 多方面论证了大陆岩石圈地幔源的不均一性, 这主要是由于古代的地幔交代事件所致。

徐胜等^[14] 研究辽宁宽甸地区后指出, 虽然玄武岩微量元素和同位素组成与 OIB 相似, 但地幔包体却具有与 MORB 相似的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值(6~10 Ra)和 Sr、Nd 同位素组成, 因而该区包体主要反映 MORB 型源区。这个结果再次证明了包体与玄武岩的非同源性。

2.2 成因机制探讨

目前尚无公认的成因机制模式。D. Vance 等^[15] 研究了一些洋岛玄武岩的 He、Sr、Nd 同位素, 发现夏威夷不同岩类的 He 同位素变化较窄, 为 8.2~9.5 Ra, 与 MORB 无异; Sr、Nd 同位素组成的变化幅度较大, 分别为 0.7032~0.7042 和 0.512 92~0.513 10。Canary Island、Kerguelen、Gough、Maderia 等地区作为一个整体, 其 $^3\text{He}/^4\text{He}$ = 5.2~7.0Ra, 但 Sr、Nd 同位素几乎波及所有大洋玄武岩范围, 分别为 0.512 85~0.513 33 和 0.702 97~0.703 28。而洋岛包体中 He 与 Sr、Nd 关系与 D. R. Porcelli 等^[12] 在大陆超镁铁岩中见到的一样。作者认为, 这些数据证明了大洋岩石圈 He 与亲石元素是脱耦的, 这个过程与从大洋岩石圈内或其下分离出的自由流体 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 有关, 挥发分可能是选择性运移, 极可能是随贫亲石元素的 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 流体迁移而来; 幔源包体中 $\text{C}/^3\text{He}$ 值的稳定性也表明, 这个比值是由进入富 CO_2 挥发分的 He 比例所决定的, 而不是由 He 在玄武岩中的相对溶解性决定的。包体中保留洋岛 Sr、Nd 特征而缺乏地幔羽 He 同位素特征表明, 相对于不相容亲石元素, 挥发分以更短的时间从热点岩石

圈分离出来。这种分选效果使得下地幔源源挥发分没有在地幔停留就进入了大气圈。

K. A. Farley^[11] 从物质运移角度, 利用 He、Sr、Nd、Pb 同位素结果提出了 Somoan 地区物质形成的模式: 高 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 地幔羽物质间歇性上升, 在上地幔或岩石圈与地壳再循环物质相遇, 最终以二元混合形式喷出地表; 或者俯冲作用将富集壳源物质带入下地幔的 PHEM 库。

此外, He、Sr、Nd、Pb 体系研究中, 地幔交代作用、分馏作用、放射物质的产生、不同源物质的混染等也是常见的成因机制^[3, 13]。

3 新模式的提出与两种体系相关性

既然这两种体系都能用于追踪溯源, 应用中联系密切, 探讨它们之间存在的联系就是必要的。20 世纪 90 年代有许多这方面的研究, 一个重大的进展是地幔第五端员(FOZO/ PHEM/ C)的提出, 以及与 DMM、EM1、EM2、HIMU 端员的结合应用。

3.1 模式 i

地幔四端员模式是利用 Sr、Nd、Pb 同位素建立起来的。模式的创立者之一 S. R. Hart^[16] 也意识到这种“先天性”不足, 并且提出 FOZO 端员作为补充。这是一种高 ^3He 的组分, 起源于 670 km 边界、核—幔边界或下地幔; 以低 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值和高 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 、 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 、 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值为特征。这个模式与 Iceland 地区最近的研究结果极为一致^[17]。

通常认为, 洋岛更能代表下地幔或原始地幔特征。K. A. Farley^[11] 综合了多个洋岛数据资料, 提出 PHEM(高 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 地幔)端员, 具如下特征: 近于全球的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值(0.7042~0.7052)和 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值(0.512 65~0.512 80, $\epsilon_{\text{Nd}} = +0.2\sim3.2$), 略富放射成因 Pb($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 18.5~19.0)(图 1), 源自下地幔, 与原始地幔组成接近。基于此, 他提出了 Somoan 地区物质形成模式: 高 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值地幔羽物质间歇性上升, 在上地幔或岩石圈拦截地壳再循环物质, 最终以二元混合(PHEM + EM)形式喷出地表; 或者俯冲作用将富集板源物质带入下地幔 PHEM 库。同一时期, R. Poreda 等^[18] 也运用该模式研究了 Lau Basin 弧后玄武岩(图 2)。

上述两种模式均为利用洋岛样品所得结论。B. B. Hanan 等^[19] 则通过 MORB 样品同位素变化趋

势定义了 C 端员 (COMMON 组分), 这个端员具适中的 Sr (0.7030~0.7040)、Nd (4~6)、Pb (19.2~19.8) 同位素值, 高或者低于 MORB 的 $^3\text{He}/^4\text{He}$, 它可能源于地幔热边界层。由于 HIMU 源区将产生大量 ^4He ,

B. Marty^[9] 认为 OIB 岩浆源区高的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 与原始地幔有关, 它与 HIMU 源共存是不成立的, 暗示有另一端员存在, 而 Hanan 等^[19] 的 C 端员所在位置可以很好地解释这个矛盾。

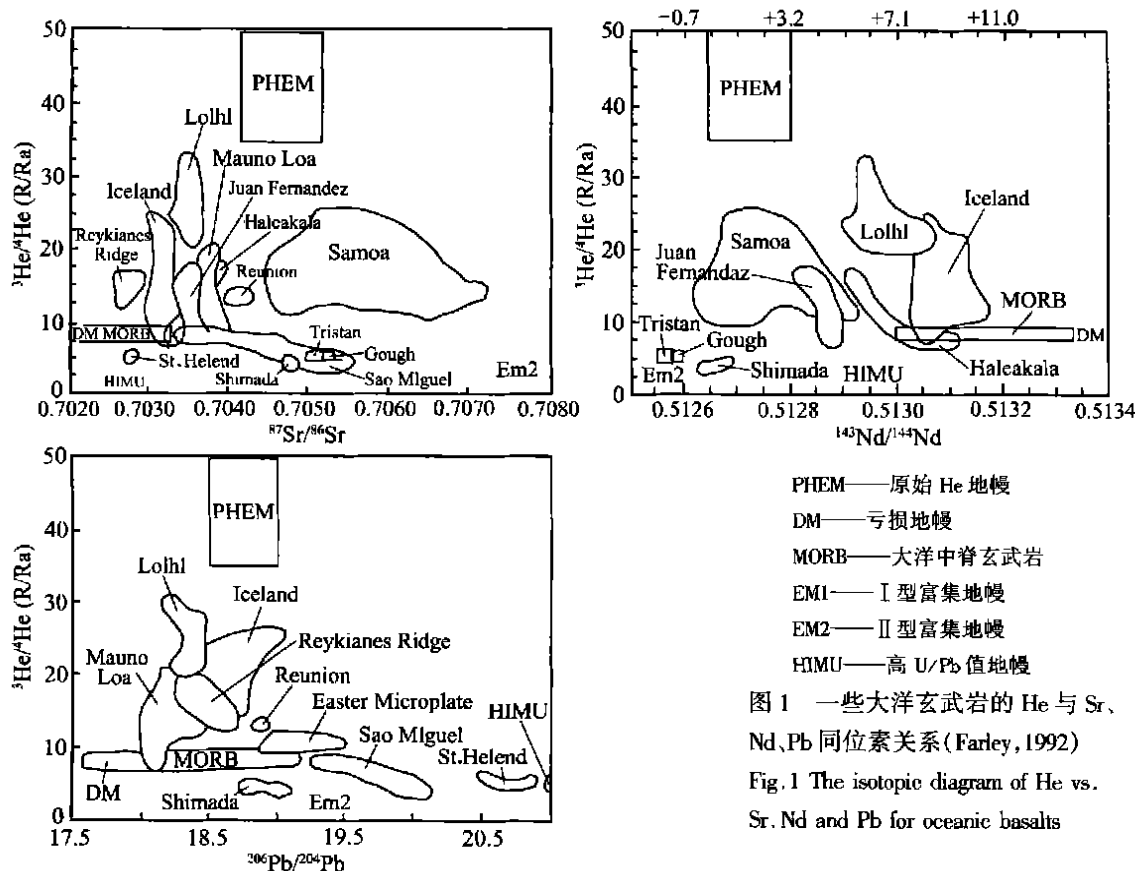


图 1 一些大洋玄武岩的 He 与 Sr、Nd、Pb 同位素关系 (Farley, 1992)

Fig.1 The isotopic diagram of He vs. Sr, Nd and Pb for oceanic basalts

由此可见, 第五端员的存在已被越来越多的研究者接受, 基于不同资料 (MORB 或 OIB) 提出的第五端员具大致类似的特征: 高 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值 (有时例外)、适中的 Sr、Nd、Pb 同位素值, 具较 MORB 更深的起源。

3.2 相关性研究

稀有气体的 He、Ar 等元素和 Sr、Nd、Pb 都有放射成因来源, 在理想的单一源区 (如 MORB、OIB 等) 长期稳定演化的情况下, 它们的同位素变化应有某种特定的关系。这类研究既涉及到岩浆源区物质组成的探讨, 又关系到物质运移过程中相关变化的研究, 故对稀有气体与 Sr、Nd、Pb 联合模式的建立有重大意义。

J. M. Eiler 等^[20] 系统收集了夏威夷地区的 He、Pb 同位素数据, 发现夏威夷玄武岩 (这种选择排除了属 MORB 成分的物质) 中 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值与 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值具良好相关性, 利用单独的 Pb 同

位素估算出该区 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值为 7~32 Ra (偏差为 2~9 Ra), 与实测结果相符。这个结果表明该地区幔源挥发分与非挥发分之间的耦合关系。He 与这些非挥发分同位素间的相关性表明, 在夏威夷地幔羽的熔融带与夏威夷岛火山建造内, He (可能还有其它挥发分) 并未与非挥发分强烈脱耦。高 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值的夏威夷熔岩源区较太平洋 MORB 源区有更高的时间积累 Th/U 值, 表明它可能包含原始地幔组分或是从原始地幔分异出的。这种良好的相关性在其它热点区也存在, 如在 Samoa 地区, $^3\text{He}/^4\text{He}$ 与 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 呈负相关, 而与 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 呈正相关^[11]。

通常认为, 上地幔或亏损地幔中, 稀有气体同位素值依赖于地幔去气和岩浆演化, 而 Sr、Nd、Pb 同位素值则取决于富集组分放射性母体元素含量和年龄, 因而它们常常是解耦的。但 Sarda 等^[21] 有不同的结论。他选择大西洋中脊样品, 在分步加热实验

中发现,低温时($500\sim 700\text{ }^{\circ}\text{C}$) $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar} = 300\sim 5000$;高温时($> 700\text{ }^{\circ}\text{C}$) $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar} = 10\ 000\sim 30\ 000$ 。大西洋中脊 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 最大值与 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 总具相关性。从收集的其它高 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值资料来看,这种关系依然成立;相反,低 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值样品因多放射性 Pb,其 Ar—Pb 相关性很差。由于这种关系普遍在大西洋出现,因而不可能是浅源大气的混染;高 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值及 $^4\text{He}/^3\text{He} > 75\ 000$ 的选择也排除了地幔羽的成分;放射成因 Pb 最多的岩浆,不可能总是最亏损的,这又排除了两种岩浆混合的可能。因而 Sarda 等将这种关系解释为:上地幔物质与高 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ($19\sim 21$)、低 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ ($300\sim 1000$)的再循环物质混合的结果。另外, B. B. Hanan 等^[19]发现,来自不同大洋的玄武岩样品 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 与 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 有不同的关系:太平洋中两者呈正相关,而大西洋则具负相关性,他们认为正相关是下地

幔物质大量迁移的结果;而负相关则与过渡带小型地幔羽或底辟作用有关。

R. Poreda 等^[18]在对 Lau Basin 弧后玄武岩的研究中发现,该区 $^3\text{He}/^4\text{He} = 7\sim 22\text{ Ra}$,明显有深部地幔物质的存在。有趣的是, Rochambeau Bank 地区的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 与 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 呈正相关,与 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 呈负相关;而相邻的 Somoan 地区, He、Sr、Nd 同位素关系与 K. A. Farley^[11]的研究结果相同: $^3\text{He}/^4\text{He}$ 与 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 呈负相关,而与 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 呈正相关。即两区 Sr、Nd 同位素与 He 同位素序列呈镜像分布(图 2)。鉴于相距 600 km 的 Rochambeau Bank 与 Somoan 分别位于 Tonga 海沟的两侧,地理上很接近,因而它们可能同源,也就是说, Rochambeau Bank 区源区物质很可能是上升的地幔羽被下沉的太平洋板块在 700 km 深处阻塞而形成的分支,混入了洋壳物质成分。

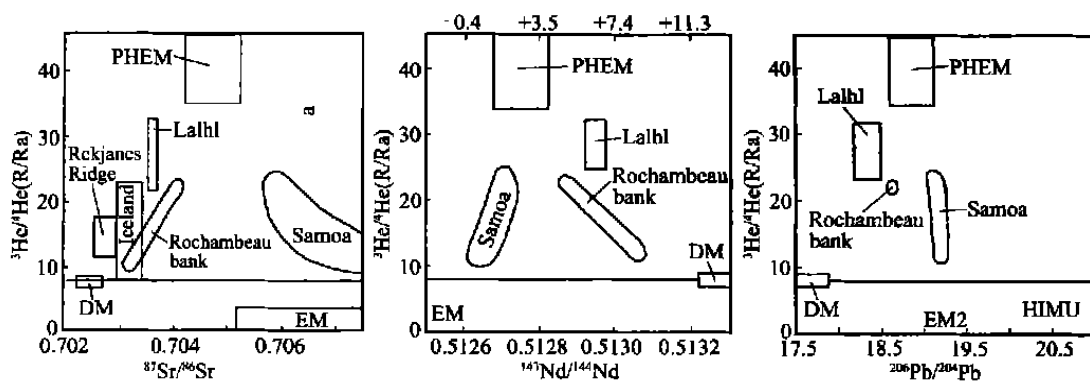


图 2 Lau Basin 盆地 He 与 Sr、Nd、Pb 关系图 符号含义同图 1 (Poreda, 1992)

Fig. 2 The Isotopic Diagrams of He vs. Sr, Nd and Pb for Lau Basin

事实上,由于混染等后期作用的影响,许多地区并不存在这种良好的相关性。如 Iceland 地区玄武岩及中酸性玻璃中, $^3\text{He}/^4\text{He}$ 与 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 、 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 无明显线性关系。M. Condomines 等^[4]认为这是因为新岩浆与老的、已发生过物质交换的玄武岩的相互作用改变了 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 、 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 和 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值,混染过程扰乱了玄武岩源区同位素的分异,从而造成它们之间无任何相关性;而中酸性玻璃中的非线性关系则是浅部升温过程中大气 He 混染的结果。

4 展 望

综上所述,稀有气体同位素与 Sr、Nd、Pb 同位素的结合研究尚处于探索阶段,但越来越多的研究者已充分意识到两种体系配合研究的重要性,特别在幔源岩类的研究中,反映出它在揭示地球内部“秘密”中的潜力。今后一方面要做两种体系各自的完

善工作,如发掘稀有气体 Ne、Kr、Xe 的地球化学指示意义,这是两种体系结合研究发挥优势的基础;另一方面要拓宽两种体系结合研究的领域,除进一步追溯幔源岩类的成因、起源外,还应将其拓广到地球层圈结构等方面;多元体系的结合,还应包括稳定同位素等示踪体系,而缺乏配套的数据极大地妨碍了在这方面的进展^[11];两种(或多种)体系间相互关系的研究,将促进联合模式的建立,系统地示踪地幔物质演化、壳幔物质混合及相互作用,揭示地球的层圈结构。稀有气体与 Sr、Nd、Pb 等多种示踪体系的综合研究将成为正确认识地球深部信息的有效途径。

参考文献 (Reference):

- [1] Burnard P G, Graham D, Turner G. Vesicle - specific noble gas analyses of “popping rock”: Implications for primordial noble gases in earth [J]. Science, 1997, 276: 568 - 571.

- [2] Hart S R. Heterogeneous mantle domains: signatures, genesis and Mixing chronologies[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1988, 90: 273 - 296.
- [3] Rison W, Craig H. Helium 3: Coming of age in Samoa[J]. *EOS* (Trans. Am. Geophys. Union), 1982, 63: 144. (abstract)
- [4] Condomines M, Gronvold K, Hooker P J, Muehlenbachs K, O'Nion R K, Oskarsson N, Oxburgh E R. Helium, oxygen, strontium and neodymium isotopic relationships in Icelandic volcanics [J]. *Earth planet. Sci. Lett.*, 1983, 66: 125 - 136.
- [5] Trull T W, Perfit M R, Kurz M D. He and Sr isotopic constraints on subduction contributions to Woodlark Basin volcanism[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1989, 54: 441 - 453.
- [6] Graham D W, Zindler A, Kurz M D, Jenkins W J, Batiza R, Staudigel H. He, Pb, Sr and Ne isotope constraints on magma genesis and mantle heterogeneity beneath young Pacific seamounts[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1988, 99: 446 - 463.
- [7] Christensen B P, Holm P M, Jambon A, Wilson J R. Helium, argon and lead isotopic composition of volcanics from Santo Antao and Fogo, Cape Verde Islands[J]. *Chemical Geology*, 2001, 178: 127 - 142.
- [8] Gerlach D C, Cliff R A, Davies G R, Norry M, Hodgson N. Magma sources of the Cape Verde archipelago: isotopic and trace element constraints[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1988, 52: 2979 - 2992.
- [9] Marty B, Appora I, Barrat J A, Deniel C, Vellutini P, Vidal Ph. He, Ar, Sr, Nd and Pb isotopes in volcanic rocks from Afar: Evidence for a primitive mantle component constraint on magmatic sources [J]. *Geochem. J.*, 1993, 27: 219 - 221.
- [10] White W M. Sources of oceanic basalts: Radiogenic isotope evidence [J]. *Geology*, 1985, 13: 115 - 118.
- [11] Farley K A, Natland J H, Craig H. Binary mixing of enriched and undergassed (primitive ?) mantle components (He, Sr, Nd, Pb) in Samoan lavas[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1992, 111: 183 - 199.
- [12] Porcelli D R, O'Nions R K, O'Reilly S V. Helium and strontium isotopes in ultramafic xenoliths[J]. *Chim. Geol.*, 1986, 54: 237 - 249.
- [13] Graham D W, Furman T H, Ebinger C J, Rogers N W, Lupton J E. Helium, strontium and neodymium isotope variations in mafic volcanic rocks from the western branch of the East African Rift System[J]. *EOS* (Trans. Am. Geophys. Union), 1995, 76: F686.
- [14] 徐胜, 刘丛强. 中国东部地幔包体的氦同位素组成及其地幔地球化学演化意义[J]. *科学通报*, 1997, 42(11): 1190 - 1194. Xu Sheng, Liu Congqiang. Helium isotopic compositions and its geochemical meanings of mantle xenoliths in the eastern China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1997, 42(11): 1190 - 1194. (in Chinese)
- [15] Vance D, Stone J O H, O'Nions R K. He, Sr and Nd isotopes in xenoliths from Hawaii and other oceanic islands[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1989, 96: 147 - 160.
- [16] Hart S R, Hauri E H, Oschmann L A, et al. Mantle Plumes and Entrainment: Isotopic evidence[J]. *Science*, 1992, 256: 517 - 520.
- [17] Hilton D R, Gronvold K, Macpherson C G, Castillo P R. Extreme $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratios in northwest Iceland constraining the common component in mantle plumes[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1999, 173: 53 - 60.
- [18] Poreda R, Craig H. He and Sr isotopes in the Lau Basin mantle: depleted and primitive mantle components[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1992, 113: 487 - 493.
- [19] Hanan B B, Graham D W. Lead and helium isotope evidence from oceanic basalts for a common deep source of mantle plumes[J]. *Science*, 1996, 272: 991 - 995.
- [20] Eiler J M, Farley K A, Stolper E M. Correlated helium and lead isotope variations in Hawaiian lavas[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1998, 62: 1977 - 1984.
- [21] Sarda P, Moreira M, Staudacher T. Argon - lead isotopic correlation in mid - atlantic ridge basalts[J]. *Nature*, 1999, 283: 666 - 668.

A Review on Isotopes of Noble Gas and Sr, Nd, Pb for Mantle-derived Rocks

MA Jin-long, TAO Ming-xin

State Key Laboratory of Gas Geochemistry, Lanzhou Institute of Geology, Chinese Academy of Science, Lanzhou 730000, China

Abstract: This paper reviewed the combined researches on isotopes of noble gas and Sr, Nd, Pb for mantle-derived rocks. Noble gas isotopes is a useful means for pursuing magma provenance and is different from Sr, Nd, Pb system, which has applied in many fields of the geochemistry. The association of the two systems is very successful in tracing the provenance of magma. More and more studies about the mantle structure, composition, material transfer *et al.*, have been done by the association of noble gas isotope with Sr, Nd, Pb system and some achievements were obtained. The fifth end member of mantle: FOZO/ C/ PHEM is an important fruit of this field. But more works in this field have yet to be improved in the future.

Key words: isotope; noble gas; Sr, Nd, Pb; mantle source rock