第 91 卷　第 11 期
2017年11月 2584～2592
地 质 学 报　ACTA GEOLOGICA SINICA
Vol. 91 No. 11 2017
Nov. 2584～2592

离子交换树脂在地质样品 Sr-Nd 同位素测定中的应用

刘文刚，刘卉，李国占，周红英，肖志斌，涂家润，李惠民
中国地质调查局天津地质矿产研究所，天津，300170

内容提要：Rb-Sr 和 Sm-Nd 同位素测年及同位素示踪方法在同位素地质年代学和同位素地球化学中有非常广泛的应用。目前，Rb-Sr 和 Sm-Nd 同位素质谱测试方法通常需要对 Rb、Sr 和 Sm、Nd 进行分离纯化，因此，如何对地质样品中的 Rb、Sr、Sm 和 Nd 进行分离富集对测试结果准确与否起到至关重要的作用。离子交换分离法是 Sr-Nd 同位素化学前处理阶段应用最广泛的分离方法，本文结合笔者近几年的研究工作，系统介绍离子交换树脂在 Sr-Nd 同位素测试中应用的发展过程和现状，重点介绍几类使用率较高的离子交换树脂（Dowex50W 树脂、AG50W 树脂、锶特效树脂、LN 树脂、P507 树脂等）的优缺点，以及各自的萃取反应机理，探索和讨论未来离子交换树脂在 Sr-Nd 同位素测试中应用的发展趋势。

关键词：地质样品；Rb-Sr，Sm-Nd；分离；离子交换树脂

Rb-Sr 和 Sm-Nd 同位素体系中放射性同位素衰变的规律被广泛应用于地球化学领域，是重要的同位素定年和同位素示踪方法。由于地质样品的 Rb-Sr 和 Sm-Nd 同位素测定的前期化学分离流程相似，因而常被人们放在一起进行研究。Rb-Sr 和 Sm-Nd 同位素体系在 20 世纪 60 年代以后相继得到了广泛应用，近些年随着质谱分析技术的不断完善，测试结果的精度和准确度也得到了大大提升，成为应用最为广泛的同位素体系［U-Pb、K-Ar、Rb-Sr、Sm-Nd、Re-Os、（U-Th）/He 等］之一（Wu Fuyuan et al.，1999；Zhang Zongqing et al.，1999；Shen Baofeng et al.，2005；Li Zhaoli et al.，2008；Chen Wen et al.，2011；Li Yanguang et al.，2015；Sun Yan et al.，2015；Yin Xiaoyan et al.，2015；Zhang Peng et al.，2015；Wang Ran et al.，2016；Yu Reng'an et al.，2016）。国内外学者对地质样品的 Rb-Sr 和 Sm-Nd 同位素测定开展了很多有意义的工作，就分析方法而言主要有两种形式，第一种方式是传统分析方式，即将样品粉碎溶解进行前期化学分离，然后进行质谱测定，该方法适用范围较为宽泛，无论是全岩样品还是单矿物样品均能取得较好的测试结果，是目前最为主流和常用的测试方法。另一种方法是近些年兴起的微区测定技术，其代表是与应用较广泛的锆石微区原位 U-Pb 同位素定年（Fryer et al.，1993；Li Huimin et al.，2007；Cocherie et al.，2008；Hou Kejun et al.，2009；Zhou Hongying et al.，2012；Cui Yurong et al.，2013）、Hf 同位素测定（Xie Liewen et al.，2008；Geng Jianzhen et al.，2011）相类似的 Rb-Sr 和 Sm-Nd 微区测定（Duan Ruichan et al.，2009；Zhu Xiyan et al.，2010；Hou Kejun et al.，2013）。有别于传统分析方法，微区测定技术能更直观地揭示样品内部的不均一性，为地质解释提供更全面的支持。目前常用的微区测定技术又分为两种，其中一种采用微钻技术取样，然后采用传统分析方法进行测定，另一种为原位激光剥蚀等离子体技术（LA-ICP-MS）。但是微区测定技术在 Rb-Sr 和 Sm-Nd 体系的应用对样品选择方面要求较为苛刻，作为一种新兴方法仍有待进一步研究，故本文中不做过多说明。

传统的 Rb-Sr 和 Sm-Nd 同位素测定的测试仪器主要以热电离质谱仪（以下简称 TIMS）和多接收等离子体质谱仪（以下简称 MC-ICP-MS）为主。两种仪器在测试方面各有所长，但共同点为均需要对地质样品进行前期的化学分离。前期化学分离是精确测定同位素比值的关键。由于受到地质样品成分复杂且往往取样量较少（例如单矿物或者某些珍贵

注：：本文为国家自然科学基金项目（编号 41373053）、中国地质调查局地质调查项目（编号 12120115013501）、大陆构造与动力学国家重点实验室开放研究课题（编号 K201510）联合资助成果。
收稿日期：2016-03-14；改回日期：2016-06-11；责任编辑：周健。
作者简介：刘文刚，男，1988 年生。助理工程师，主要从事 Rb-Sr 和 Sm-Nd 同位素测试。Email：liuwg1988 @163. com。

的陨石等）的限制，离子交换树脂成为前期化学分离唯一的选择。近些年来，国内外研究学者先后报道了应用于 Rb-Sr 和 Sm-Nd 同位素化学分离（Wade et al.，1961；Zhang Qichun et al.，1986；Ye Xiaojiang et al.，1990；Griselin et al.，2001；Li Qiuli et al.，2006；Li Chaofeng et al.，2007；Chu Zhuyin et al.，2009）的多种离子交换树脂，并取得了很好的分离效果。笔者基于多年学习和工作所累积的经验，总结几种对于 Rb-Sr 和 Sm-Nd 同位素测定前期化学分离应用较广的离子交换树脂的发展过程和所取得的成果，并探讨未来如何能够进一步提高离子交换树脂分离效率的问题。

1　离子交换树脂在 Rb-Sr 同位素测定中的应用

1.1　Rb-Sr 同位素体系简介

Rb-Sr 同位素定年体系的研究最早始于上世纪 40 年代，随着质谱仪器精度和灵敏度的提高，同位素稀释法的应用以及等时线概念的提出使得 Rb-Sr 同位素体系得到学者的认可与广泛应用（Chen Wen et al.，2011）。Rb 在自然界中由 2 个同位素组成，分别为 ^{85}Rb 和 ^{87}Rb，Sr 在自然界中存在 4 个同位素，分别为 ^{84}Sr、^{86}Sr、^{87}Sr 和 ^{88}Sr。其中 ^{87}Rb 会通过放射性衰变放出 β^- 粒子，变为稳定的 ^{87}Sr。因而，测定 ^{87}Sr/^{86}Sr 比值需排除 ^{87}Rb 的干扰。目前，通用的方法为样品测试之前通过离子交换树脂将 Rb 和 Sr 进行分离，国内外已经有很多此方面的文献报道（Wade et al.，1961；Orihashi et al.，1998；Charlier et al.，2006；Dai Mengning et al.，2012），所采用的离子交换树脂有 Dowex50W 树脂、AG50W 树脂以及锶特效树脂等，受篇幅所限本文主要介绍目前比较常用的几种离子交换树脂。其中 Dowex50W 树脂和 AG50W 树脂是 Rb-Sr 同位素体系前期化学分离领域应用最为广泛的两类树脂。锶特效树脂是近些年发展起来一种针对 Sr 的高效萃淋树脂，对于一些低 Sr 含量和高 Rb/Sr 比值（质量比，下同）的样品有较好的分离效果，其主要成分为 4，4′（5′）-2-3-环己基并 18-冠-6（冠醚）。

1.2　Dowex50W 阳离子交换树脂的应用

Dowex50W 树脂为强酸性阳离子交换树脂，广泛应用于金属离子的分离与富集，是对岩石样品中的 Rb 和 Sr 进行分离常用的一种树脂。其原理为利用金属离子因电子价态以及半径等不同导致与树脂的亲和力亦不相同的特点，通过不同浓度的洗脱剂进行梯度洗脱达到分离 Rb 和 Sr 的目的。早在上世纪 60 年代，Wade et al.（1961）报道了利用 Dowex50W 树脂分离 Ca 和 Sr 的实验流程，结果显示测试过程中如果残存有较高含量的 Ca、Ba、Mg 等离子，会在 TIMS 测试过程中抑制 Sr 的电离信号，而利用 EDTA 和 HCl 为洗脱剂可以使 Ca 和 Sr 进行有效分离。Wang Xueying et al.（1993）亦报道了利用 Dowex50W×8 树脂可以对岩石样品中的 Rb 和 Sr 进行分离后残存于 Sr 溶液中的 Ca 进行有效的分离，解决了 Ca 干扰测试的问题。Zhang Qichun et al.（1986）报道了利用 Dowex50W×8 分离 Rb 和 Sr 的实验流程，以 HCl 为洗脱剂，通过不同酸度 HCl 分别获得 Rb、Sr 和总稀土，并详细研究了后续 Sm 和 Nd 的分离流程。Dowex50W 树脂作为传统阳离子交换树脂广泛应用于常规岩石样品 Rb 和 Sr 分离，然而该树脂对于 Rb/Sr 比值高的岩石样品分离不彻底，往往需要二次分离，对于一些 Sr 含量较低的单矿物需要样品用量较大。综上所述，Dowex50W 树脂作为常用阳离子交换树脂适用于常规全岩地质样品的 Rb 和 Sr 分离，对于 Rb/Sr 比值高的岩石样品一般需要二次纯化分离，而一些样品量较少（<100mg）且 Sr 含量较低的单矿物不适合用此树脂分离 Rb-Sr。

1.3　AG50W 阳离子交换树脂的应用

AG50W 树脂亦为强酸性阳离子交换树脂，由美国伯乐公司（Bio-Rad）生产，是以聚苯乙烯-二乙烯苯为聚合物骨架结合磺酸基为活性基团的螯合树脂，其分离原理和 Dowex50W 树脂相同。目前，在 Rb-Sr 测定中较常用的两种 AG50W 树脂为 AG50W×8 和 AG50W×12，两者主要区别在于两者交联度有所差异，其分离效果及原理相似。Zong Chunlei et al.（2013）报道了利用 AG1×8、AG50W×8 和 HDEHP 组合离子交换柱对地质样品中的 Pb、Sr、Nd 进行一次溶样连续分离的方法。首先利用 AG1×8 阴离子交换树脂进行 Pb 的分离，将分离过程中部分淋洗液进行收集提取转化成分离 Sr、Nd 的母液，再利用 AG50W×8 和 HDEHP 分别进行 Sr 和 Nd 的分离回收。该方法采用一次溶样的方式节约了样品用量和样品准备时间，对于一些珍贵样品（如月岩、陨石等）以及样品量较少的矿物样品有重要的应用价值。Pu Wei et al.（2005）则报道了利用 AG50W×8 以 DCTA 和嘧啶的有机混合溶液为洗脱剂分离 Rb 和 Sr 的另一种方法。该方法大致过程为首先利用 AG50W×8 树脂，以盐酸为洗

脱剂将 Rb 和 Sr 混合溶液洗脱回收，再利用 DCTA 和嘧啶的有机混合溶液对上述 Rb 和 Sr 进行分离，分离过程中减少了盐酸等试剂的使用量，但是过程较为繁琐且有机试剂具有一定毒性，最终能否广泛应用仍有待观察。Li Chaofeng et al.（2012）报道了利用 AG50W×12 树脂对岩石样品进行一次纯化分离，得到 Sr 和主要含有 Nd 的混合稀土（REES），之后利用热电离质谱（TIMS）进行测试。该研究内容亮点在于将 Sr 和 REES 装载于同一个 Re 灯丝上，利用 Sr 和 Nd 电离温度的差异分别进行测试，采用此方法大大节约了样品分离及测试的时间。He Lianhua et al.（2014）报道了利用 AG50W×12 树脂分离岩石样品中 Rb 和 Sr 的实验流程，研究发现一般低 Rb、高 Sr 的样品纯化一次，即可达到 MC-ICP-MS 的测试要求，而对于 Rb 含量较高的样品，需经过二次纯化分离可使 Rb/Sr＜0.0001。AG50W 树脂和 Dowex50W 树脂相似，作为一种传统阳离子交换树脂常用于岩石样品中 Rb-Sr 的分离。该树脂特点和 Dowex50W 树脂类似，适用于常规全岩地质样品的 Rb 和 Sr 分离，对于 Rb/Sr 比值高的岩石样品一般亦需要二次纯化分离，且对于 AG50W 树脂实验流程，洗脱剂用量较大，每次实验流程往往需要较大量的盐酸，产生大量废酸。

1.4 锶特效树脂的应用

锶特效树脂又名锶树脂或者 Sr_Spec，是由 4，4′(5′)-2-3-环己基并 18-冠-6（冠醚）于辛醇中通过涂层到惰性载体上制得对 Sr 具有分离特效的树脂（Tang Suohan et al.，2010）。该树脂相比较传统 Dowe50W 和 AG50W 树脂，表现出了分离流程短、对低含量样品分离效果优异、降低了淋洗酸用量以及低流程本底等优点。近些年，基于上述锶特效树脂所具有的优点，锶特效果树脂获得了广泛关注。Wei Gangjian et al.（2004）系统报道了利用选择性特效树脂富集分离岩石样品中的锶，钐和钕的研究，其中对于锶的分离就是利用锶特效树脂进行的相关研究。文中详细介绍了分离锶的实验流程，结果表明对于锶的回收率可以达到 98.4%，并能很好地富集 Ba，为下一步分离 Nd 去除了 Ba 的干扰。不过文中提出对于一般较高 Rb/Sr 比值的样品（Rb/Sr＞0.5），例如碱性花岗岩等按照此流程会有一些残余的 Rb 影响 MC-ICP-MS 的测量精度，需要进行二次纯化分离。Li Qiuli et al.（2006）报道了利用锶特效树脂结合 IsoProbe-T 热电离质谱精确测定微量样品中 Sr 同位素的方法，并且研究了针对微量样品的超低本底化学流程。文中以金伯利岩中金云母单颗粒 Rb-Sr 等时线定年为例，利用锶特效树脂成功对金云母单颗粒样品进行了有效的 Rb 和 Sr 分离。经测试发现其全流程 Rb 和 Sr 本底分别仅为 4±1 pg 和 6±1 pg，较常规流程本底降低了两个数量级。该方法可以广泛应用于微量样品年代学以及高分辨同位素示踪研究，对研究变质岩，构造岩以及岩脉矿脉等具有初始同位素不平衡样品的等时线年代学有重要的意义。Tang Suohan et al.（2010）报道了利用锶特效树脂分离地质标样的实验流程，以一系列成分组成差别较大的国家标准物质与国际地质标样为例，利用 MAT-262 型热电离质谱仪测试验证了该树脂可以很少的树脂量将 Sr 与 Rb 进行分离。相比较常规流程该实验方案减少了淋洗酸的用量而且流程空白下降了两个数量级。Deniel et al.（2001）提出了利用锶特效树脂一步分离 Sr 和 Pb 的实验方法，该流程利用 150 μL 锶特效树脂对大约 30 mg 岩石样品进行了分离，结果显示该树脂可以同时分离 Sr 和 Pb，其分离纯度和流程本底均满足热电离质谱（TIMS）的测试要求，而且在实验过程中发现利用 6 mol/L 盐酸洗脱可以解决锶特效树脂对样品中锶具有记忆效应的问题，使得该树脂能够多次循环利用。Li Chaofeng et al.（2011）亦报道了利用锶特效树脂成功对微量样品（≤5 mg）中 Rb、Sr、Pb 进行一次分离，结合高精度热电离质谱仪（Triton）分析技术，实现了微量岩石样品高精度 Rb、Sr 和 Pb 同位素分析技术。该研究方法样品用量仅为常规方法样品用量（约 100 mg）的 1/20，大大减少了样品用量，而且实验流程本底亦明显下降，Rb、Sr 流程本底优于 5 pg，Pb 流程本底优于 50 pg，为前人（Deniel et al.，2001）所做一次分离 Rb、Sr 和 Pb 实验流程本底的 1/3～1/4，对于一些极为珍贵且量较少的样品，例如月岩、陨石和化石样品具有很高的应用价值。文中指出一次纯化分离 Rb、Sr 和 Pb 的实验流程中洗脱试剂用量仅 0.75 mL，分离时间约 3 h，结果显示无论是洗脱酸的用量还是花费的时间较常规方法均有明显的改善。综上所述，锶特效树脂对于 Rb、Sr 具有优异的分离效果，然而该树脂成本较高，且相比较传统 Dowe50W 和 AG50W 树脂使用寿命较短，适用于低含量 Sr 和高 Rb/Sr 比值样品。

1.5 Rb-Sr 分离体系小结

通过介绍以上三类离子交换树脂在 Rb-Sr 同位素测定中的应用可以看出，每类离子交换树脂均具

有各自特点。Dowex50W 树脂和 AG50W 树脂是目前应用最广的两类树脂。两类树脂性能相似，具有使用寿命长、成本低、应用范围广等优点。两者分离流程和分离时间大致相同，均以 HCl 为洗脱液，适用于常规岩石样品的 Rb 和 Sr 分离，但是对于高 Rb/Sr 比值样品分离效果较差，需进行二次分离且岩石样品溶样量较大。锶特效树脂则以 HNO_3 为洗脱液，相比于 Dowex50W 树脂和 AG50W 树脂而言酸淋洗液用量、分离时间以及岩石样品用量均减少，对于低含量 Sr 样品和高 Rb/Sr 比值样品分离效果优异，但是该树脂成本较高且使用寿命较短。因此，实际分离过程中应根据不同岩石样品的特性选择分离所需离子交换树脂。

2　离子交换树脂在 Sm-Nd 同位素测定中的应用

2.1　Sm-Nd 同位素体系简介

Sm-Nd 同位素体系相比较 Rb-Sr 同位素体系而言，同位素组成较为复杂，半衰期亦较长。目前，自然界中 Sm 有 7 个同位素：^{144}Sm(3.16%)、^{147}Sm(15.07%)、^{148}Sm(11.27%)、^{149}Sm(13.84%)、^{150}Sm(7.47%)、^{152}Sm(26.63%)、^{154}Sm(22.53%)。Nd 在自然界也有 7 个同位素：^{142}Nd(27.09%)、^{143}Nd(12.14%)、^{144}Nd(23.83%)、^{145}Nd(8.29%)、^{146}Nd(17.26%)、^{148}Nd(5.74%)、^{150}Nd(5.63%)。Sm-Nd 同位素体系主要有两种放射性衰变体系，即：^{147}Sm 和 ^{148}Sm 通过 α 衰变转换为 ^{143}Nd 和 ^{144}Nd，由于 ^{148}Sm 衰变体系的半衰期过长(7×10^6 Ga)尚未发现其在地质方面的应用价值。因而，对于 Sm-Nd 体系通常默认 ^{147}Sm-^{143}Nd 衰变体系。对于 ^{147}Sm-^{143}Nd同位素体系在地质方面的成功应用最早可追溯至 20 世纪 70 年代初，Lugmair (1974) 成功利用 Sm-Nd 同位素体系测定了无球粒陨石 Juvinas 的年龄，随后几年关于 ^{147}Sm-^{143}Nd 体系的研究成果相继被报道，该体系逐步得到人们的认可并被广泛应用于同位素地球化学领域，成为一种经典的同位素体系。近些年随着质谱技术的飞跃发展，国内外科研工作者将目光转向了母体早已衰变完全的 ^{146}Sm-^{142}Nd体系(Nyquist et al., 1995; Li Chaofeng et al., 2015)。^{146}Sm 作为一种灭绝核素，由于其半衰期(103Ma)过短，现已完全通过 α 衰变转换子体 ^{142}Nd，正是由于 ^{146}Sm 的超短半衰期，其衰变体系对于研究地球、月球等行星早期壳幔演化分异有重要的意义。由于 ^{142}Nd/^{144}Nd 比值在不同陨石、地球岩石样品、月岩等不同类型岩石样品之间的差异很小($<4\times10^{-5}$)，且稀土元素 Ce 亦含有 ^{142}Ce 同位素，干扰 ^{142}Nd/^{144}Nd 比值的测定，因此，^{142}Nd/^{144}Nd 比值的测定对样品的分离技术和质谱的测试精度均有较高的要求。受限于此，对于该体系在地质中的广泛应用仍有很多工作需要探索和改进。

目前，对于地质样品中 Sm-Nd 同位素测定的前期化学分离过程，传统方法主要采用两步化学分离。第一步，通常采用强酸性阳离子交换树脂(AG50W 树脂或者 Dowex50 树脂)去除样品中的大量基体元素，得到混合的总稀土成分。第二步，将得到的总稀土成分利用离子交换树脂或者高效液相色谱(HPLC)分离 Sm 和 Nd。近些年，国内外学者(Luais et al., 1997; Yang Yueheng et al., 2010)先后报道了仅需一步分离得到总稀土混合溶液，不分离 Sm 和 Nd 直接测定的相关技术，并提出了准确扣除 ^{144}Sm 干扰的技术方案。该方案相比传统的两步分离方案极大简化了实验流程。然而，该方案中扣除方法计算过程较为繁琐，尚未得到广泛推广与认可。限于文章篇幅，本文主要介绍传统离子交换树脂对于 Sm-Nd 的分离技术。Sm 和 Nd 分离中应用较广的离子交换树脂主要有 3 类：①负载有机膦酸类萃取剂的萃淋树脂(HDEHP 或者 HEHEHP 等)；②利用阳离子交换树脂(如 AG50W 树脂)，以 α-羟基异丁酸(HIBA)为洗脱液进行分离；③其他离子交换树脂在 Sm 和 Nd 分离中的应用。

2.2　有机膦酸类萃淋树脂的应用

有机膦酸类萃取剂广泛应用于稀土元素的萃取分离，其中以二(2-乙基己基)膦酸 (HDEHP，亦简称 P204) 和 2-乙基己基膦酸单-2-乙基己基酯(HEH[EHP]，亦简称 P507)两种萃取剂最有代表性和使用范围最广。对于二(2-乙基己基)膦酸(P204)在稀土分离中的应用最早可以追溯至 1957 年，Peppard et al. (1957) 报道了用 P204 萃取分离稀土元素的工艺，并提出在盐酸介质中，相邻稀土离子的平均分离系数可达到 2.5，可以实现稀土元素的有效分离。以 P204 为萃取剂的稀土分离工艺以其良好的物理化学性能，耐酸碱的化学稳定性，较高的萃取容量被称为稀土溶剂萃取第一代工艺。然而，P204 由于酸性较高与稀土结合能力过强，导致反萃酸度高，对重稀土难以反萃，在此基础上研究发现 2-乙基己基膦酸单-2-乙基己基酯(P507)对稀土元素萃取分离表现出良好的效果，以 P507 为萃取剂的稀土分离工艺被称为稀土溶剂萃取第二代工

艺。中国科学院长春应用化学研究所李德谦课题组(Li Deqian et al.,1990;Xue Lizhen et al.,1992;Zhao Junmei et al.,2006;Wang Xianglan et al.,2009)对于酸性膦类萃取剂应用于稀土分离领域做了大量研究工作,对我国稀土湿法冶金工业的发展发挥重要的推动作用。由于地质样品中稀土含量较低的特点,利用负载有机膦酸类萃取剂的萃淋树脂分离 Sm 和 Nd 效果较好。该方法的原理是:稀土元素首先被无差别地吸附在交换柱上,然后用淋洗剂淋洗,由于稀土离子与淋洗剂发生螯合反应,其稳定常数各不相同,因此稳定常数小的稀土离子首先被淋洗下来,从而达到分离稀土离子的目的。目前,对地质样品中 Sm-Nd 同位素分离常用的两种有机膦类萃淋树脂为 LN 树脂和 P507 树脂,其中 LN 树脂由 Eichrom 公司生产,以二(2-乙基已基)膦酸(HDEHP)为萃取剂负载于惰性高分子材料研制而成。Wei Gangjian et al.(2004)研究了几种国际常用特效树脂对岩石样品分离的相关实验,并详细介绍了其实验流程,结果表明 LN 树脂不仅可以有效地将 Sm 和 Nd 进行分离,而且其 Nd 回收率可以达到 85%左右,完全可以达到 MC-ICP-MS 的测量要求。Li Chaofeng et al.(2007)报道了利用氧化物(NdO^+)方式测定微量样品中钕同位素比值的相关实验,利用 LN 树脂将经过前期分离得到的总稀土样品进行分离获得纯净 Nd。之后,利用高精度热电离质谱计(IsoProbe-T)在高纯氧气环境内对 NdO^+ 进行电离测量。该方法大大降低了 Nd 同位素测定所需样品量(0.25ng Nd 亦可以取得精准的测量结果),相比传统的 Nd^+ 测试方式分析灵敏度提升 100 倍左右。Chu Zhuyin et al.(2009)首次报道了利用 TaF_5 作为激发剂提高 NdO^+ 测试精度的实验方法,文中以大量国际岩石标样为例,通过 P507 树脂分离使 Nd 和 Ce、Pr 得到很好分离,满足了 TIMS 测试要求。文中还提到虽然 LN 树脂(HDEHE 树脂)对 Sm-Nd 具有较好的分离效果,但是对于 Ce-Nd 和 Pr-Ce 的分离效果不如 P507 树脂。He Lianhua et al.(2014)详细报道了利用 P507 萃淋树脂分离 Sm-Nd 的实验流程,结果显示 P507 萃淋树脂可以将 Sm 和 Nd 进行有效分离,同时去除大部分的 Ce,满足 MC-ICP-MS 高精度测定 Nd 比值的要求。综上所述,LN 树脂和 P507 树脂是地质岩石样品领域分离 Sm 和 Nd 最常用的两类有机膦酸类萃淋树脂,由于两类树脂所包含萃取剂均为有机膦酸类萃取剂,对重稀土萃取能力较强导致其再生需要较高浓度盐酸进行洗脱。LN 树脂和 P507 树脂均采用物理涂覆法将有机膦酸类萃取剂固定于惰性高分子材料,随使用次数增加,有机膦酸类萃取剂会有所流失,从而影响树脂柱的交换容量和实验流程的稳定性,一般使用一段时间需更换树脂或者重新设计实验流程。

2.3 阳离子交换树脂的应用

强酸性阳离子交换树脂 AG50W 不仅可以用于 Rb-Sr 的分离,亦可用于分离 Sm-Nd 体系。由于钐和钕均属于镧系元素,物理化学性质十分相近,分离系数较低,单纯靠 HCl 等无机酸为洗脱剂难以达到分离 Sm 和 Nd 的目的,因此需要借助络合剂提高 Sm 和 Nd 之间分离系数,常用络合剂为 α-羟基异丁酸(α-HIBA)。Zhang Qichun et al.(1986)报道了利用阳离子交换树脂 AG50W×8 分离 Sm-Nd 的详细流程,文中利用 α-HIBA 和 HCl 为洗脱剂进行梯度洗脱成功将 Sm 和 Nd 进行了有效分离。Guo Qifeng(1990)介绍了 Sm 和 Nd 分离的化学方法及其在同位素地质年龄测定中的应用,文中提到利用 AG50W×8 阳离子交换树脂于毛细管柱中加压情况下,利用 α-HIBA 洗脱纯化分离 Sm 和 Nd 的方法,称为加压离子交换法。阳离子交换树脂在 Sm 和 Nd 分离中的应用较为广泛,分离效果良好,然而分离过程中需要使用 α-HIBA 为洗脱剂,对 pH 范围要求较为严格,分离过程略为繁琐。

2.4 其他离子交换树脂在 Sm-Nd 分离中的应用

除去上述两种常用离子交换树脂之外,高效液相色谱法(HPLC)亦可以用于地质样品中 Sm-Nd 的分离,该方法核心部分仍为离子交换树脂。Griselin et al.(2001)研究了利用 HPLC 分离 Sm-Nd 的相关工作,利用 Aminex A25 阴离子交换树脂以甲醇和醋酸为洗脱剂进行梯度洗脱。该实验方法需要利用甲醇和醋酸为洗脱剂,相比较 HCl 等无机酸,甲醇和醋酸纯化过程较为繁琐,且甲醇极易挥发,毒性较大,因而,该方法推广使用较为受限。

2.5 Sm-Nd 分离体系小结

目前,对于 Sm-Nd 分离体系应用最广泛的离子交换树脂为有机膦酸类萃淋树脂(LN 树脂和 P507 树脂)。该类树脂具有流程简洁、Sm 和 Nd 分离系数高等优点。LN 树脂和 P507 树脂虽然同为有机膦酸类萃淋树脂,但是对于 Sm-Nd 分离性能而言仍有微小差异。由于二(2-乙基已基)膦酸的酸性较 2-乙基已基膦酸单-2-乙基已基酯酸性强,导致 LN 树脂对于稀土离子萃取能力较 P507 树脂要强,因此,

LN 树脂淋洗酸浓度和用量均高于 P507 树脂。LN 树脂和 P507 树脂由于采用物理涂覆法将有机膦酸类萃取剂固定于惰性高分子材料，相对稳定性较差，使用一段时间需更换树脂或者重新设计实验流程。相比而言，阳离子交换树脂稳定性要明显强于有机膦酸类萃淋树脂，但是该类树脂对于 Sm-Nd 分离系数较低，需借助 α-羟基异丁酸（α-HIBA）为络合剂提高 Sm-Nd 分离性能。阳离子交换树脂由于分离流程较为繁琐，限制了该类分离方法的推广使用。对于高效液相色谱法（HPLC）核心部分仍为离子交换树脂，对于地质样品中 Sm 和 Nd 分离的报道较少，该方法仍需进一步摸索和研究。

3　离子交换树脂在 Sr-Nd 分离应用的未来发展方向

已有研究表明，目前 Rb-Sr 和 Sm-Nd 同位素测试的主要方法仍需要对待测元素进行前期化学分离，如何能够快速高效地分离待测元素是 Rb-Sr 和 Sm-Nd 同位素体系测试的关键，也是耗时较长的环节，而离子交换树脂分离法是目前 Rb-Sr 和 Sm-Nd 同位素测定前期化学分离应用最多、最有效的方法。基于以上总结的目前常用的几种离子交换树脂在 Rb-Sr 和 Sm-Nd 同位素测定前期分离中的应用，笔者认为针对地质样品的特殊性要求，未来如何进一步提高离子交换树脂的分离效率将是关注的重点，研究方向主要集中于以下几个方面：①目前，所使用树脂种类较少且多为进口树脂，价格较高，应探讨研究制备与筛选新型高选择性离子交换树脂以满足地质样品的多样性要求；②对于地质样品分离如何能够做到微量化。前期分离样品一般用量往往需要 50 mg 以上，对于有多期特点的矿物，测量值多为混合平均值，不能准确得到有明确地质含义的测量值，而且结合质谱仪器高精度发展趋势，对样品实际测试需求量逐步降低，因而，适合微量样品的离子交换树脂分离方法具有重要意义；③如何能缩短离子交换树脂的分离时间和减少洗脱剂用量。常用离子交换树脂分离时间均较长且需要使用大量的无机酸类洗脱剂，如何能够减少无机酸的用量以及缩短实验流程，将成为人们重点关注的研究对象。

4　结语

笔者结合近几年工作经验以及前人大量研究工作，介绍了几类在地质样品 Sr-Nd 同位素测定前期化学分离常用的离子交换树脂，并侧重其化学性质简单介绍各个离子交换树脂的优缺点及所适用范围。目前，Dowex50W 树脂、AG50W 树脂、锶特效树脂、LN 树脂、P507 树脂等几类常用树脂各有不同的优缺点及所适用范围，虽然对于常规地质样品 Sr-Nd 同位素测定前期化学分离基本可以达到质谱仪器测量的要求，但是仍然难以满足地质样品的多样性及复杂性对分离所需树脂的要求。因此，针对地质样品具有多样性以及样品成分复杂的特点，结合未来质谱仪器对于超微量样品高精度测试的发展趋势，探寻具有高选择性以及低样品需求量的离子交换树脂应用于地质样品是未来发展方向。

References

Charlier B, Ginibre C, Morgan D, Nowell G, Pearson D, Davidson J P, Ottley C J. 2006. Methods for the microsampling and high-precision analysis of strontium and rubidium isotopes at single crystal scale for petrological and geochronological applications. Chemical Geology, 232(3): 114～133.

Chen Wen, WanYusheng, Li Huaqin, Zhang Zongqing, Dai Tongmo, Shi Zeen, Sun Jingbo. 2011. Isotope geochronology: technique and application. Acta Geologica Sinica, 85(11): 1917～1947 (in Chinese with English abstract).

Chu Zhuyin, Chen Fukun, Yang Yueheng, Guo Jinhui. 2009. Precise determination of Sm, Nd concentrations and Nd isotopic compositions at the nanogram level in geological samples by thermal ionization mass spectrometry. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 24(11): 1534～1544.

Cocherie A, Robert M. 2008. Laser ablation coupled with ICP-MS applied to U-Pb ircon geochronology: A review of recent advances. Gondwana Research, 14(4): 597～608.

Cui Yurong, Zhou Hongying, Geng Jianzhen, Li Huaikun, Li Huimin. 2013. In situ LA-MC-ICP-MS U-Pb isotopic dating of monazite. Acta Geoscientica Sinica, 33(6): 865～876 (in Chinese with English abstract).

Dai Mengning, Zong Chunlei, Yuan Honglin. 2012. A calibration strategy of $^{87}Sr/^{86}Sr$ ratio for rocks with high Rb/Sr measured by multiple collector-inductively coupled plasma-mass spectrometry. Rock and Mineral Anaiysis, 31(1): 95～102 (in Chinese with English abstract).

Deniel C, Pin C. 2001. Single-stage method for the simultaneous isolation of lead and strontium from silicate samples for isotopic measurements. Analytica Chimica Acta, 426(1): 95～103.

Duan Ruichun, Bai Xiao, Ling Wenli, Liu Yongsheng. 2009. In situ analysis technique of Sm-Nd isotopic system and its geological application. Geological Science and Technology Information, 28(4): 7～14 (in Chinese with English abstract).

Fryer B J, Jackson S E, Longerich H P. 1993. The application of laser ablation microprobe-inductively coupled plasma-mass spectrometry (LAM-ICP-MS) to in situ U-Pb geochronology. Chemical Geology, 109(1): 1～8.

Geng Jianzhen, Li Huaikun, Zhang Jian, Zhou Hongying, Li Huimin. 2011. Zircon Hf isotope analysis by means of LA-MC-ICP-MS. Geological Bulletin of China, 30(10): 1508～1513 (in Chinese with English abstract).

Griselin M, Belle J C, Pomiès C, Vroon P Z, Soest M C, Davies G R. 2001. An improved chromatographic separation technique of Nd with application to NdO^+ isotope analysis. Chemical Geology, 172(3): 347～359.

Guo Qifeng. 1990. Chemical methods for Sm-Nd separation and its application in iotopic geological dating. Uranium Geology, 1(1): 54～58 (in Chinese with English abstract).

He Lianhua, Zhang Jun, Gao Jingjin, Zhang Hui, Liu Jihua, Li Huaqin. 2014. Improvement of the method for Chemical separations of Sr and Nd in geological samples. Advances in Marine Science, 32(1): 78～83 (in Chinese with English abstract).

Hou Kejun, Li Yanhe, Tian Yourong. 2009. In situ U-Pb zircon dating using laser ablation-multi ion counting-ICP-MS. Mineral Deposits, 28(4): 481～492 (in Chinese with English abstract).

Hou Kejun, Qin Yan, Li Yanhe, Fan Changfu. 2013. In situ Sr-Nd isotopic measurement of apatite using laser ablation multi-collector inductively coupled plasma-mass spectrometry. Rock and Mineral Analysis, 32(4): 547～554 (in Chinese with English abstract).

Li Chaofeng, Chen Fukun, Li Xianghui. 2007. Precise isotopic measurements of sub-nanogram Nd of standard reference material by thermal ionization mass spectrometry using the NdO^+ technique. International Journal of Mass Spectrometry, 266(1): 34～41.

Li Chaofeng, Li Xianhua, Guo Jinghui, Li Xianghui, Li Huaikun, Zhou Hongying, Li Guozhan. 2011. Single-step separation of Rb-Sr and Pb from minor rock samples and high precision determination using thermal ionization mass spectrometry. Geochimica, 40(5): 399～406 (in Chinese with English abstract).

Li Chaofeng, Li Xianhua, Li Qiuli, Guo Jinghui, Li Xianghui, Yang Yueheng. 2012. Rapid and precise determination of Sr and Nd isotopic ratios in geological samples from the same filament loading by thermal ionization mass spectrometry employing a single-step separation scheme. Analytica Chimica Acta, 727(10): 54～60.

Li Chaofeng, Wang Xuece, Li Youlian, Chu Zhuyin, Guo Jinghui, Li Xianghui. 2015. Ce - Nd separation by solid-phase micro-extraction and its application to high-precision $^{142}Nd/^{144}Nd$ measurements using TIMS in geological materials. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 30(4): 895～902.

Li Deqian, Niu Wei. 1990. Investigation of synergistic extraction mechanism of rare earth elements (Ⅲ) with HEHEHP and PMBP. Journal of Nuclear and Radiochemistry, 12(2): 92～98 (in Chinese with English abstract).

Li Huimin, Li Huaikun, Chen Zhihong, Xiang Zhenqun, Lu Songnian, Zhou Hongying, Song Biao. 2007. Comparison of three methods for baddeleyite U-Pb isotope dating of basic rocks. Geological Bulletin of China. Geological Bulletin of China, 26(2): 128～135 (in Chinese with English abstract).

Li Qiuli, Chen Fukun, Wang Xiuli, Li Xianghui, Li Chaofeng. 2006. Ultra-low procedural blank and the single-grain mica Rb-Sr isochron dating. Chinese Science Bulletin, 51(3): 321～325 (in Chinese with English abstract).

Li Yanguang, Wang Shuangshuang, Liu Minwu, Meng En, Wei Xiaoyan, Zhao Huibo, Jin Mengqi. 2015. U-Pb dating study of baddeleyite by LA-ICP-MS: technique and application. Acta Geologica Sinica, 89(12): 2400～2418 (in Chinese with English abstract).

Li Zhaoli, Yang Jingcui, Luo Liqiang, Li Tianfu, Xu Xiangzhen, Ren Yufeng. 2008. Geochemical characteristics, Sm-Nd and Rb-Sr isotopic compositions of newly-discorvered eclogite in the Lasha terrane, Tibet and their geological significance. Acta Geologica Sinica, 82(7): 941～948 (in Chinese with English abstract).

Luais B, Telouk P, Albaréde F. 1997. Precise and accurate neodymium isotopic measurements by plasma-source mass spectrometry. Geochimica et Cosmochimica Acta 61(22): 4847～4854.

Lugmair G W. 1974. Sm-Nd ages: a new dating method. Meteoritics, 9(9): 369.

Nyquist L, Wiesmann H, Bansal B, Shih C Y, Keith J E, Harper C L. 1995. ^{146}Sm-^{142}Nd formation interval for the lunar mantle. Geochimica et Cosmochimica Acta, 59(13): 2817～2837.

Orihashi Y, Maeda J, Tanaka R, Zeniya R, Niida K. 1998. Sr and Nd isotopic data for the seven GSJ rock reference samples; JA-l, JB-la, JB-2, JB-3, JG-la, JGb-l and JR-l. Geochemical journal, 32(3): 205～211.

Peppard D F, Mason G W, Maier J L, Driscoll W J. 1957. Fractional extraction of the Lanthanides as their Di-alkyl orthophosphates. Journal of Inorganic and Nuclear Chemistry, 4(5-6): 334～343.

Pu Wei, Gao Jianfeng, Zhao Kuidong, Ling Hongfei, Jiang Shaoyong. 2005. Separation method of Rb-Sr, Sm-Nd using DCTA and HIBA. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 41(4): 445～450 (in Chinese with English abstract).

Shen Baofeng, Li Junjian, Lin Yuanxian, Zhai Anmin, Cao Xiulan. 2005. Sm-Nd isotope age of the lower Fuping group complex and its geological significance. Acta Geologica Sinica, 79(6): 784～789 (in Chinese with English abstract).

Sun Yan, Wang Ruijiang, Li Jiankang, Zhao Zhi. 2015. ^{40}Ar-^{39}Ar dating of the muscowite and regional exploration prospect of shihuiyao rubidium-multi-metal deposit, Selenhot, Inner Mongolia. Geological Review, 61(2): 463～468 (in Chinese with English abstract).

Tang Suohan, Zhu Xiangkun, Li Jin, Wang Jinhui, Yan Bin. 2010. Separation and isotopic measurement of Sr in Rock samples using selective Specific Resins. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 38(7): 999～1002 (in Chinese with English abstract).

Wade M A, Seim H. 1961. Ion exchange separation of calcium and strontium. application to determination of total strontium in bone. Analytical Chemistry, 33(6): 793～795.

Wang Ran, Li Yongjun, Wang Junnian, Zhang Shenglong, Guo Xin, Duan Fenghao. 2016. Re-Os geochronology of the Tuketuke Cu deposit in Western Junggar NW China and its metallogenic significance. Acta Geologica Sinica, 90(3): 489～499 (in Chinese with English abstract).

Wang Xianglan, Li Wei, Wang Weiwei, Meng Shulan, Li Deqian. 2009. Influence of isooctanol on the interfacial activity and mass transfer of ytterbium (III) using 2-ethylhexylphosphonic acid mono-2-ethylhexyl ester as an acidic extractant. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 84(2): 269～274.

Wang Xueying, Liu Fengxiang. 1993. Separation of calcium for the

isotope determination of strontium. Rock and Mineral Analysis, 11(3): 240～242 (in Chinese with English abstract).

Wei Gangjian, Liu Ying, Tu Xianglin, Liang Xirong, Li Xianhua. 2004. Separation of Sr , Sm and Nd in mineral and rock samples using selective specific resins. Rock and Mineral Analysis, 23 (1): 11～14 (in Chinese with English abstract).

Wu Fuyuan, Sun Deyou. 1999. Theory and applications of Re-Os isotopic system. Geological Science and Technology Information, 18 (3): 43 ～ 46 (in Chinese with English abstract).

Xie Liewen, Zhang Yanwu, Zhang Huihuang, Sun Jinfeng, Wu Fuyuan. 2008. In situ simultaneous determination of trace elements, U-Pb and Lu-Hf isotopes in zircon and baddeleyite. Chinese Science Bulletin, 53(2): 220～228 (in Chinese with English abstract).

Xue Lizhen, Li Deqian. 1992. Extraction of scandium(Ⅲ), yttrium (Ⅲ), lanthanide (Ⅲ) and iron (Ⅲ) from hydrochloric acid solutions with di-(2-ethylhexyl) phosphinic acid. Chinese Journal of Applied Chemistry, 9(4): 21～25 (in Chinese with English abstract).

Yang Yueheng, Wu Fuyuan, Xie Liewen. 2010. High-precision measurements of the $^{143}Nd/^{144}Nd$ isotope ratio in certified reference materials without Nd and Sm separation by multiple collector inductively coupled plasma mass spectrometry. Analytical Letters, 43(1): 142～150.

Ye Xiaojiang, Zhang Zongqing. 1990. Separation of Sm and Nd in the Determination of Nd Ratio-HDEHP separation method. Journal of Instrumental Analysis, 9(3): 6～10 (in Chinese with English abstract).

Yin Xiaoyan, Zhou Hongying, Liu Dunyi, Gao Linzhi, Dong Chunyan, Wan Yusheng. 2015. Ancient material records in the North China craton: SHRIMP U-Pb dating and LA-MC-ICPMS Hf analysis of zircons from archean metamorphic rocks in the Jiaozou area, Henan. Acta Geologica Sinica, 61(1): 183～194 (in Chinese with English abstract).

Yu Reng'an, Zhang Feng, Tang Yongxiang, Liu Xiaoxue, Xie Yu, Qu Gai, Li Zhidan, Qu Wenjun. 2016. Re-Os isotopic dating of newly discovered porphyric Mo deposit in the central section of Erenhot-dong Ujimqin Qi and its geological significance. Acta Geologica Sinica, 90(1): 139～150 (in Chinese with English abstract).

Zhang Peng, Chen Dong, Kou Linlin, Zhao Yan, Yang Hongzhi, Sha Deming, Wang Xijin. 2015. Geochronology, geochemistry and Sr-Nd-Pb isotopes of the Wolongquan instrusion in Liaodong and its tectonic significance. Acta Geologica Sinica, 89 (10): 1762～1772 (in Chinese with English abstract).

Zhang Qichun, Dong Yibao. 1986. A study on procedures of Sm-Nd age determination and the measurement of BCR-1. Journal of Chengdu College of Geology, 13(3): 183～193 (in Chinese with English abstract).

Zhang Zhongqing, Lu Jiren, Tang Suohan. 1999. Sm-Nd ages of the Panxi Layered basic-ultrabasic intrusions in sichuan. Acta Geologica Sinica, 73(3): 263～271 (in Chinese with English abstract).

Zhao Junmei, Sun Xiaoqi, Li Wei, Meng Shulan, Li Deqian. 2006. Interfacial behavior of DEHEHP and the kinetics of cerium (Ⅳ) extraction in nitrate media. Journal of Colloid and Interface Science, 294(2): 429～435.

Zhou Hongying, Geng Jianzhen, Cui Yurong, Li Huaikun, Li Huimin. 2012. In situ U-Pb dating of apatite using LA-MC-ICP-MS. Acta Geoscientica Sinica, 33(6): 857～864 (in Chinese with English abstract).

Zhu Xiyan, Chen Fukun, Yang Yizeng, Hu Rong. 2010. Micro-sample Rb-Sr analysis using the microsampling technique and its applications on geochronology and petrogenesis. Acta Petrologica Sinica, 26(1): 325～332 (in Chinese with English abstract).

Zong Chunlei, Yuan Honglin, Dai Mengning. 2013. A feasibility study on chemical separation of Pb, Sr and Nd from the same single dissolution of geological sample. Rock and Mineral Analysis, 31(6):945～949 (in Chinese with English abstract).

参　考　文　献

陈文，万渝生，李华芹，张宗清，戴橦谟，施泽恩，孙敬博. 2011. 同位素地质年龄测定技术及应用. 地质学报，85(11)：1917～1947.

崔玉荣，周红英，耿建珍，李怀坤，李惠民. 2013. LA-MC-ICP-MS 独居石微区原位 U-Pb 同位素年龄测定. 地球学报，33(6)：865～876.

戴梦宁，宗春蕾，袁洪林. 2012. 高 Rb/Sr 岩石样品中 Sr 同位素多接收等离子体质谱分析校正方法研究. 岩矿测试，31(1)：95～102.

段瑞春，白晓，凌文黎，刘勇胜. 2009. 微区原位 Sm-Nd 同位素体系分析技术及其地质应用. 地质科技情报，28(4)：7～14.

耿建珍，李怀坤，张健，周红英，李惠民. 2011. 锆石 Hf 同位素组成的 LA-MC-ICP-MS 测定. 地质通报，30(10)：1508～1513.

郭起凤. 1990. 钐钕分离的化学方法及其在同位素地质年龄中的应用. 铀矿地质，1(1)：54～58.

何连花，张俊，高晶晶，张辉，刘季花，李华芹. 2014. 地质样品 Sr 和 Nd 同位素的化学分离方法改进. 海洋科学进展，32(1)：78～83.

侯可军，李延河，田有荣. 2009. LA-MC-ICP-MS 锆石微区原位 U-Pb 定年技术. 矿床地质，28(4)：481～492.

侯可军，秦燕，李延河，范昌福. 2013. 磷灰石 Sr-Nd 同位素的激光剥蚀-多接收器电感耦合等离子体质谱微区分析. 岩矿测试，32(4)：547～554.

李潮峰，李献华，郭敬晖，李向辉，李怀坤，周红英，李国占. 2011. 微量岩石样品中 Rb-Sr 和 Pb 一步分离及高精度热电离质谱测试. 地球化学，40(5)：399～406.

李德谦，牛伟. 1990. HEHEHP 与 PMBP 协同萃取希土元素(Ⅲ)的机理研究. 核化学与放射化学，12(2)：92～98.

李惠民，李怀坤，陈志宏，相振群，陆松年，周红英，宋彪. 2007. 基性岩斜锆石 U-Pb 同位素定年 3 种方法之比较. 地质通报，26(2)：128～135.

李秋立，陈福坤，王秀丽，李向辉，李潮峰. 2006. 超低本底化学流程和单颗粒云母 Rb-Sr 等时线定年. 科学通报，51(03)：321～325.

李艳广，汪双双，刘民武，孟恩，魏小燕，赵慧博，靳梦琪. 2015. 斜锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年方法及应用. 地质学报，89(12)：2400～2418.

李兆丽，杨经绥，罗立强，李天福，徐向珍，任玉峰. 2008. 西藏拉萨地体榴辉岩的地球化学特征和 Sm-Nd、Rb-Sr 同位素组成及其地质意义. 地质学报，82(7)：941～948.

濮巍，高剑峰，赵葵东，凌洪飞，蒋少涌. 2005. 利用 DCTA 和 HIBA 快速有效分离 Rb-Sr、Sm-Nd 的方法. 南京大学学报(自然科学版)，41(4)：445～450.

孙艳，王瑞江，李建康，赵芝. 2015. 锡林浩特石灰窑铷多金属矿床白云母^{40}Ar-^{39}Ar年代及找矿前景分析. 地质论评，61(2)：463～468.

沈保丰，李俊建，林源贤，翟安民，曹秀兰. 2005. 阜平岩群下部Sm-Nd同位素年龄及其地质意义. 地质学报，79(6)：784～789.

唐索寒，朱祥坤，李津，王进辉，闫斌. 2010. 利用锶特效树脂分离富集岩石样品中的锶及测定$^{87}Sr/^{86}Sr$. 分析化学，38(7)：999～1002.

王冉，李永军，王军年，张胜龙，郭鑫，段丰浩. 2016. 新疆吐克吐克铜矿黄铜矿Re-Os定年及成矿意义. 地质学报，90(3)：489～499.

王雪英，刘凤香. 1993. 同位素测定样品中钙和锶的分离. 岩矿测试，11(3)：240～242.

韦刚健，刘颖，涂湘林，梁细荣，李献华. 2004. 利用选择性特效树脂富集分离岩石样品中的锶钐和钕. 岩矿测试，23(1)：11～14.

吴福元，孙德有. 1999. Re-Os同位素体系理论及其应用. 地质科技情报，18(3)：43～46.

谢烈文，张艳斌，张辉煌，孙金凤，吴福元. 2008. 锆石/斜锆石U-Pb和Lu-Hf同位素以及微量元素成分的同时原位测定. 科学通报，53(2)：220～228.

薛理珍，李德谦. 1992. 二(2－乙基己基)膦酸从盐酸介质中萃取钪(Ⅲ)、钇(Ⅲ)、镧系离子(Ⅲ)和铁(Ⅲ). 应用化学，9(4)：21～25.

叶笑江，张宗清. 1990. Nd比值测定中的Sm、Nd分离－HDEHP分离法. 分析测试通报. 9(3)：6～10.

殷小艳，周红英，刘敦一，高林志，董春艳，万渝生. 2015. 华北克拉通古老物质记录——焦作地区太古庙变质岩的锆石SHRIMP U-Pb定年和LA-MC-ICPMS Hf同位素分析. 地质学报，61(1)：183～194.

俞礽安，张锋，唐永香，刘晓雪，谢瑜，曲凯，李志丹，屈文俊. 2016. 二连-东乌旗中段新发现的乌和尔楚鲁图斑岩型钼矿床Re-Os同位素年龄及其地质意义. 地质学报，90(1)：139～150.

张朋，陈冬，寇琳琳，赵岩，杨宏智，沙德铭，王希今. 2015. 辽东卧龙泉岩体锆石U-Pb年龄、地球化学、Sr-Nd-Pb同位素特征及其构造意义. 地质学报，89(10)：1762～1772.

张其春，董宜宝. 1986. Sm-Nd同位素年代学实验条件的研究及标准岩样BCR-1的测定. 成都地质学院学报，13(3)：183～193.

张宗清，卢记仁，唐索寒. 1999. 攀西层状基性—超基性岩体的Sm-Nd年龄. 地质学报，73(3)：263～271.

周红英，耿建珍，崔玉荣，李怀坤，李惠民. 2012. 磷灰石微区原位LA-MC-ICP-MS U-Pb同位素定年. 地球学报，33(6)：857～864.

祝禧艳，陈福坤，杨一增，胡蓉. 2010. 微区-微量样品Rb-Sr同位素分析技术及其应用前景. 岩石学报，26(1)：325～332.

宗春蕾，袁洪林，戴梦宁. 2013. 一次溶样分离地质样品中Pb-Sr-Nd方法的可行性研究. 岩矿测试，31(6)：945～949.

The Application of Ion Exchange Resins in Sr-Nd Isotopic Assay of Geological Samples

LIU Wengang, LIU Hui, LI Guozhan, ZHOU Hongying, XIAO Zhibin, TU Jiarun, LI Huimin

Tianjin Institute of Geology and Mineral Resource, China Geological Survey, Tianjin, 300170

Abstract

Rb-Sr and Sm-Nd isotopic dating and isotopic tracer method are widely applied in both isotopic geochronology and isotope geochemistry. At present, it is necessary to isolate and purificate Rb-Sr and Sm-Nd for the analysis of Rb-Sr and Sm-Nd by isotope mass spectrometry. Therefore how to isolate and enrich Rb, Sr, Sm and Nd in geological samples plays an important role in improving the accuracy of the analysis results. Ion exchange separation method is most widely used in the pre-processing stage of isotope chemistry. Combining with the author′s research in recent years, the development and status of ion exchange separation method applied in isotope analysis was summarized systematically in this paper. In particular, we focus on describing the advantages and disadvantages of some kinds of ion exchange resins (Dowex50W resin; AG50W resin; Strontium spec resin; Ln Spec resin; P507 resin), and their extraction mechanism. At last, this study discusses the development trend of ion exchange resin applied in Sr-Nd isotope analysis.

Key words: geological samples; Rb-Sr; Sm-Nd; separation; ion exchange resin