第 35 卷 第 2 期
2019 年 6 月

华 南 地 质 与 矿 产
Geology and Mineral Resources of South China

Vol.35, No.2, 254-260
June, 2019

doi:10.3969/j.issn.1007-3701.2019.02.011

火成碳酸岩 Sm-Nd 等时线定年技术

张利国,谭娟娟,刘重芃,杨红梅,邱啸飞,江　拓※

ZHANG Li-Guo, TAN Juan-Juan, LIU Chong-Peng, YANG Hong-Mei, QIU Xiao-Fei, JIANG Tuo※

(中国地质调查局武汉地质调查中心(中南地质科技创新中心),湖北 武汉 430205)

(Wuhan Center of China Geological Survey (Central South China Innovation Center for Geosciences), Wuhan 430205, China)

摘要:选取庙垭铌-稀土矿床中 5 件新鲜的碳酸岩样品,依据内部等时线法原理,依次采用醋酸、王水、氢氟酸对其进行分步溶解,并分别对其醋酸溶解相、王水溶解相、氢氟酸溶解相和全岩进行了 Sm-Nd 同位素组成分析。结果显示不同溶解相之间 $^{147}Sm/^{144}Nd$ 同位素比值变化全岩之间由 0.02 扩大为 0.09,5 件样品共计 17 个点拟合获得的等时线年龄为 233±12 Ma (MSWD=2.7),其中单件样品的分相 Sm-Nd 等时线定年结果为 235±17 Ma (MSWD=1.4)。这些结果与在该套碳酸岩中的独居石 SHRIMP U-Th-Pb 年龄 (233.6±1.7 Ma) (*Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2014,143: 189-206.) 、独居石 LA-ICP-MS Th-Pb 年龄(~240 Ma)以及铌铁矿 LA-ICP-MS U-Pb 年龄(232.8±4.5 Ma) (*Lithos*, 2017, 290-291:159-171.)在误差范围内基本一致,表明火成碳酸岩分相 Sm-Nd 定年结果可靠。

关键词:火成碳酸岩;分步溶解;Sm-Nd 同位素年代学;矿物内部等时线

中图分类号:P597　　**文献标识码:**A　　**文章编号:**1007-3701(2019)02-0254-07

Zhang L G, Tan J J, Liu C P, Yang H M, Qiu X F and Jiang T. Sm-Nd Isochron Dating Technique for Carbonatites. *Geology and Mineral Resources of South China*, 2019, 35(2): 254-260.

Abstract: Five fresh carbonatite samples from Miaoya Nb-REE deposit were selected and dissolved step by step with acetic acid, aqua regia and hydrofluoric acid according to the principle of internal isochron method. Sm-Nd isotopic compositions of phases dissolved by acetic acid, Aqua regia, hydrofluoric acid and whole rock were analyzed respectively. The results show that $^{147}Sm/^{144}Nd$ isotope ratios between different dissolving phases change. The age of isochron obtained by fitting 17 points of 5 samples was 233±12 Ma (MSWD=2.7). Among them, the result of phase separation Sm-Nd isochron dating of single sample was 235±17 Ma (MSWD=1.4). These results are basically consistent with the SHRIMP U-Th-Pb age of monazite (233.6 +1.7 Ma) (*Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2014,143: 189-206.), LA-ICP-MS Th-Pb age of monazite (~240 Ma) and LA-ICP-MS U-Pb age of niobite (232.8 +4.5 Ma) (*Lithos*, 2017, 290-291:159-171.) within analytical errors, indicating that the Sm-Nd internal isochron dating of carbonatite by phase separation is reliable.

Key words: Carbonatifes; stepwise dissolution; Sm-Nd isotope chronology; internal isochron of minerals

收稿日期:2019-5-5;**修回日期:**2019-5-28;**责任编辑:**庞迎春

基金项目:国家自然科学基金 No.41303026;中国调查局项目"湘西-鄂西成矿带神农架-花垣地区地质矿产调查(编号:DD20160029)","广州市多要素城市地质调查(编号:DD20190291)"

第一作者:张利国(1979—),高级工程师,从事 Sm-Nd 同位素研究,E-mail:whzliguo@163.com

※**通讯作者:**江拓(1987—),助理研究员,岩石地球化学及同位素年代学,E-mail:jiangtuogeology@163.com

万方数据

火成碳酸岩是指含碳酸盐矿物 (如方解石、白云石、菱铁矿等)体积大于 50%,化学成分上二氧化硅含量小于 20%的火成岩石[1],是地球表面出露很少的幔源岩石之一。碳酸岩通常形成于地下至少>75 km 处的低程度部分熔融[2],与典型硅酸盐熔体相比,碳酸岩熔体相对富含挥发分,且极为富集不相容元素,故通常与许多金属(REE、Nb-Ta、U-Th、Cu、Au 等)、非金属(磷灰石、萤石、蛭石、金刚石等)矿产的成矿作用密切相关[3]。如美国的 Mountain Pass[4],马拉维的 Tundulu 和 Kangankunde[5],巴西的 Araxá(REE-Nb)和 Catalao I[6]、俄罗斯的 Tomtor[7],澳大利亚的 Mteld[8],我国攀西牦牛坪和大陆乡[9-11]、山东微山[12-13]和湖北庙垭[14]等,都是与碳酸岩有关的超大型或大型稀土矿床。

位于南秦岭构造带的湖北庙垭碱性岩-碳酸岩杂岩体是目前国内最典型的原生火成碳酸岩体,是我国第二大 Nb-REE 矿床,矿床的成因自该矿发现以来一直有不同的认识,主要包括正长岩和碳酸岩无成因联系[15],碳酸岩由正长岩直接结晶分异形成[16]等。原因之一是对碳酸岩难以开展精确测年。碳酸岩 SiO_2 和 Zr 含量极低,其岩浆含有大量挥发分,导致喷发温度较低(多低于 600℃),难以结晶出锆石颗粒,其内所见锆石多为捕获锆石;而 K、Rb、Sr 为高活动性元素,在后期变质变形过程中其同位素体系易受干扰,不适宜对碳酸岩直接定年。

相对于 U-Pb、Rb-Sr 及 K-Ar 体系,Sm、Nd 同属轻稀土元素,其化学性质很相近,母体(^{147}Sm)衰变形成的子体(^{143}Nd)易在矿物晶格中保存下来,矿物或岩石中的 Sm-Nd 同位素体系易保持封闭, 具有较强的抗蚀变和变质作用的能力。因此,相对于其他同位素体系,Sm-Nd 同位素等时线法定年更具优势[17-18]。

对于 Sm-Nd 同位素体系, 用于制约等时线的 $^{147}Sm/^{144}Nd$ 范围越宽,该同位素体系能辨别的年龄越年轻[19]。如果岩石中的最大△$^{147}Sm/^{144}Nd$ 为 0.05,在此情况下 Sm-Nd 同位素体系确定年龄绝对误差约为 40 Ma;如果岩石中最大△$^{147}Sm/^{144}Nd$ 达到 0.1,则其确定的年龄绝对误差可降至 20 Ma 左右 [20]。碳酸岩中 REE 含量极高, 便于对其进行精确的 Sm-Nd 同位素组成测定。但碳酸岩通常具有接近的 $^{147}Sm/^{144}Nd$ 比值,其多呈小的岩脉、岩株、岩墙、岩锥等出露[21],无法确保同源和同时性, 传统的 Sm-Nd 同位素体系也难以获得有价值的地质年龄。

因此,本文根据酸对矿物的溶解特性,采用不同酸溶液对碳酸岩样品进行分步溶解,从碳酸岩中分离出部分矿物与全岩构筑内部等时线。该方法先后用醋酸、王水溶解样品,剩余不溶部分再经氢氟酸-硝酸溶解;然后,对不同酸溶部分及全岩,分别进行 Sm、Nd 同位素分析,组成 Sm-Nd 矿物内部等时线,以准确测定碳酸岩年龄。

1 样品选择

本文选取庙垭杂岩体铌-稀土矿床中 5 件新鲜的碳酸岩样品,作为分析对象。

主要矿物:方解石(75% ~85%);次要矿物(15% ~20%):石英、钾长石、黑云母、绢云母;副矿物包括:氟磷灰石($Ca_5F(PO_4)_3$)、独居石($CePO_4$)、氟碳铈矿($CeFCO_3$)、铌铁矿($FeNb_2O_6$)、白云石($CaMg(CO_3)_2$)钛铁矿 ($FeTiO_3$)、烧绿石 ($CaNb_2O_6F$)、易解石($CeNb_2O_6$)、富铌金红石(TiO_2)(图 2a,图 3a)。样品的矿物组成大致可归为碳酸盐矿物、磷酸盐矿物、铁-(铌)-钛氧化物、硅酸盐矿物四大类。

2 实验过程

2.1 仪器及主要试剂

仪器:固体热表面电离质谱仪(TRITON TI,美国 Thermo 公司)。

实验器皿:聚四氟乙烯坩埚、密封溶样罐及高压溶样弹,石英玻璃交换柱。器皿在使用前,均先用去污粉或洗涤剂将其洗至内、外表面不挂水珠或仅有少量细小水珠,再用一次去离子水(经 Milli-Q 水纯化系统纯化)冲洗,装入干净的大烧杯中,依次用王水、硝酸、二次去离子水(一次去离子水再次经过水纯化系统纯化)在电炉上煮至沸腾后保持其微沸 4 ~ 6 h,于超净化实验室风干待用。

试剂:醋酸、盐酸、硝酸、高氯酸、氢氟酸,均为市售高级纯(经亚沸蒸馏)。

2.2 分析流程

样品分析在中国地质调查局武汉地质调查中心同位素地球化学实验室完成,化学分析均在 100 级超净化工作台内完成, 分析过程用GBW04419、BCR-2 和 GSW04-3258-2015 标准物质分别对全

万方数据

流程和仪器进行监控。分步溶样流程如图 1,详细步骤如下。

2.2.1 样品溶解

称取约 1 g 粉末样品(200 目),加入适量 2.5 mol/L 醋酸,用聚四氟乙烯管型瓶(30 mL)于 110℃加热 48 h,待溶液冷却至室温,离心分离。取出上层清液蒸干,用 2.5 mol/L 盐酸提取,为醋酸溶解相①;残余固体加入适量 2.5 mol/L 王水,用低压密封溶样罐于 110℃加热 48 h,待溶液冷却至室温,离心分离。取出上层清液蒸干,用 2.5 mol/L 盐酸提取,称为王水溶解相②。剩余固体置于高压溶样弹,加适量氢氟酸和硝酸(体积比 10:1 原酸),密封于 200℃溶样 48 h,蒸干,再加入少许高氯酸加热直至白烟冒尽,用 2.5 mol/L 盐酸提取,称为王水不溶相③。

2.2.2 稀土及 Nd 的分离纯化

稀土分离:采用 AG50-8 阳离子交换树脂。树脂用 6 mol/L 盐酸和亚沸蒸馏水交替再生 3 次。将醋酸溶解相①、王水溶解相②、王水不溶相③三相溶液各分取约 1/4(体积比),分别加入一定量 ^{145}Nd-^{149}Sm 混合稀释剂,混匀上柱,待溶液流干,加入 6 mL 2.5 mol/L 盐酸冲洗交换柱盛液管内壁,待盐酸滴干,再加入 40 mL 2.5 mol/L 盐酸淋洗 Ca、Mg、Fe 等基体元素,用 15 mL 6 mol/L 盐酸解吸稀土,蒸干解吸液,待质谱测定,计算 ^{147}Sm/^{144}Nd 值[22]。

Nd 的纯化:醋酸溶解相、王水溶解相、王水不溶相未加稀释剂的溶液,经稀土分离后,用 P507 树脂(2-乙基己基膦酸单-2-乙基己基酯)分离纯化 Nd。树脂用 6 mol/L 盐酸再生,亚沸蒸馏水淋洗至中性。待一次分离解吸液蒸干后,用 0.1 mol/L 盐酸提取、上柱。加入 0.1 mol/L 盐酸 15 mL 淋洗 La 和 Ce,用 0.2 mol/L 盐酸 6 mL 解吸 Nd。蒸干,待质谱测定 ^{143}Nd/^{144}Nd 值[22]。

2.2.3 质谱测定

质谱测定采用双灯丝热表面电离。测定过程中,每个试样采集 14 组数据,每组数据取 10 次扫描,单次扫描积分时间 4.194 s,由联机计算机取 14 组数据平均值(数据采用)。样品 ^{147}Sm/^{144}Nd 值的计

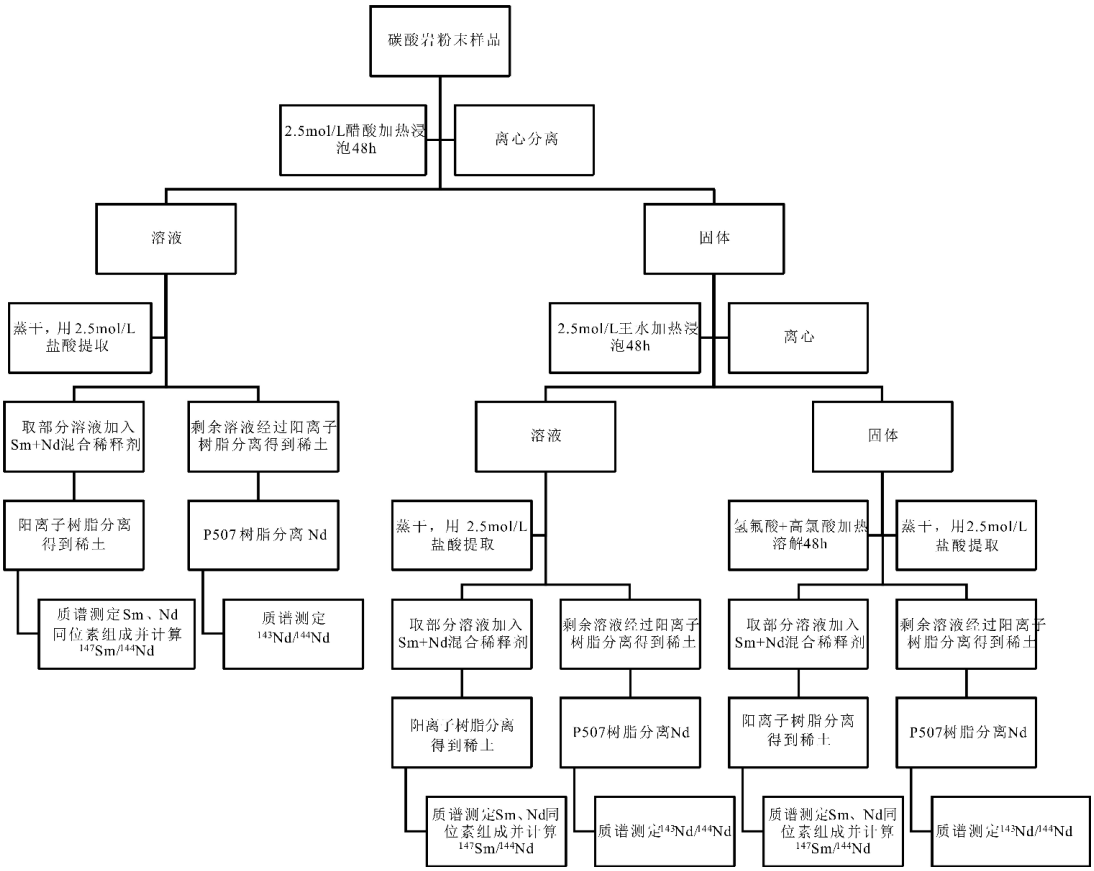

图1 碳酸岩分步溶样Sm-Nd同位素测定分析流程图

Fig. 1 Flow chart of Sm-Nd isotope determination and analysis for carbonatite stepwise dissolution samples

万方数据

算：分别采集 $^{149}Sm/^{147}Sm$ 和 $^{145}Nd/^{146}Nd$ 由稀释法原理离线计算得出[22]。$^{143}Nd/^{144}Nd$ 值测定:采用 $^{146}Nd/^{144}Nd$=0.7219 归一化。

本实验采用静态多接收器采集数据,动态虚拟放大器以消除不同法拉第杯之间的增益。其杯结构如表 1 所示。

表1　静态多接收质谱仪(TRITON)杯结构

Table 1 Cup structure of the static multi-collectors mass spectrometer (TRITON)

杯位置	质量数	同位素	杯位置	质量数	同位素
L3	142	$^{142}Ce+^{142}Nd$	H1	146	^{146}Nd
L2	143	^{143}Nd	H2	147	^{147}Sm
L1	144	$^{144}Nd+^{144}Sm$	H3	149	^{149}Sm
C	145	^{145}Nd			

3 结果与讨论

3.1 分步溶样矿物组成

为了鉴别不同酸溶部分矿物组成,本文对编号为 17MY02 的样品,磨制多块探针片,分别在醋酸、王水中溶解。结果表明:经过醋酸的溶解,探针片中的方解石部分全部溶解在溶液中,而磷灰石、石英等矿物未发生溶解(如图 2);经过王水的溶解,探针片上只剩下石英等硅酸盐矿物,磷灰石全部溶解(图 3)。

结合所选碳酸岩样品的探针片岩相学观察结果,本文认为:在碳酸岩的分步溶解过程中,醋酸溶解相为碳酸盐类矿物,王水溶解相为磷酸盐及金属氧化物,氢氟酸溶解相为硅酸盐矿物。分步溶解实现了碳酸岩中各矿物的化学分选。

3.2 分步溶样 Sm-Nd 同位素组成

本文所选样品为：庙垭碳酸岩 16MY02,16MY04,16MY05,16MY06,16MY07。实验中分别对五件样品进行全岩和分步溶解的 Sm-Nd 同位素分析。所得样品 Sm、Nd 同位素组成结果见表 2。

实验过程中采用 GBW04419、BCR-2、GSW04-3258-2015 分别监控实验流程及仪器工作状态,获得的 GBW04419 标准测定平均值分别为: Sm/(10^{-6})=3.028,Nd/(10^{-6}) =10.08,$^{143}Nd/^{144}Nd$ =0.512720 ±5(1σ), 与其证书值 (3.03 ±0.04、10.10 ±0.12、0.512725±7(2σ))在误差范围内一致;BCR-2 的测定平均值分别为:Sm/(10^{-6}) =6.54,Nd/(10^{-6}) = 28.85,$^{143}Nd/^{144}Nd$=0.512636±8 (1σ), 与其推荐值(6.41 ~ 6.73、27.62 ~ 28.97、0.512618 ~ 0.512650)在误差范围内一致; GSW04-3258-2015 的 $^{143}Nd/^{144}Nd$ =0.512433±5(1σ),与其推荐值(0.512438±6(2σ))在误差范围内完全一致。全流程Nd、Sm 空白分别为 2×10^{-10}g 和 3×10^{-11}g。

3.3 全岩及分步溶矿 Sm-Nd 内部等时线年龄

根据“真假 Sm-Nd 等时线判别经验”:参与等时线年龄计算的各样品间,有相同 εNd(t)值或 Nd 同位素模式年龄, 即可视为满足 Sm-Nd 等时线同源、同时和封闭环境的条件[25]。由表 2 可以看出:碳酸岩经分步溶解后,醋酸、王水、氢氟酸溶解的各部分及全岩具有一致的 t_{2DM} 和 εNd(t)。5 件碳酸岩样品共计 17 个点(剔除 εNd(t)值、t_{2DM} 异常的三个数据)构成的等时线年龄为 233±12 Ma (图 4a),其中单件样品的分相 Sm-Nd 等时线定年结果为 235±17 Ma (图 4b)。这些结果与近年来在该套碳酸岩中获得的独居石 SHRIMP U-Th-Pb 年龄 (233.6±1.7 Ma)[15]、独居石 LA-ICP-MS Th-Pb 年龄(~240 Ma)[26]以及铌铁矿 LA-ICP-MS U-Pb 年龄(232.8±4.5 Ma)[26] 在误差范围内基本一致。

本文通过化学方法,分步提取了碳酸岩样品中碳酸盐类、磷酸盐类、硅酸盐类矿物,由表 2 中数据可以看出：不同矿物的 $^{147}Sm/^{144}Nd$ 值变化在 0.0639~0.1593,而 5 件全岩样品之间的 $^{147}Sm/^{144}Nd$ 值为 0.0817~0.1017, 有效扩大了 $^{147}Sm/^{144}Nd$ 值的差异,实现了碳酸岩 Sm-Nd 同位素年龄的精确测定。

4 结论

对碳酸岩样品采用醋酸、王水和氢氟酸-硝酸分步溶解,有效分离出碳酸岩中碳酸盐矿物、磷酸

万方数据

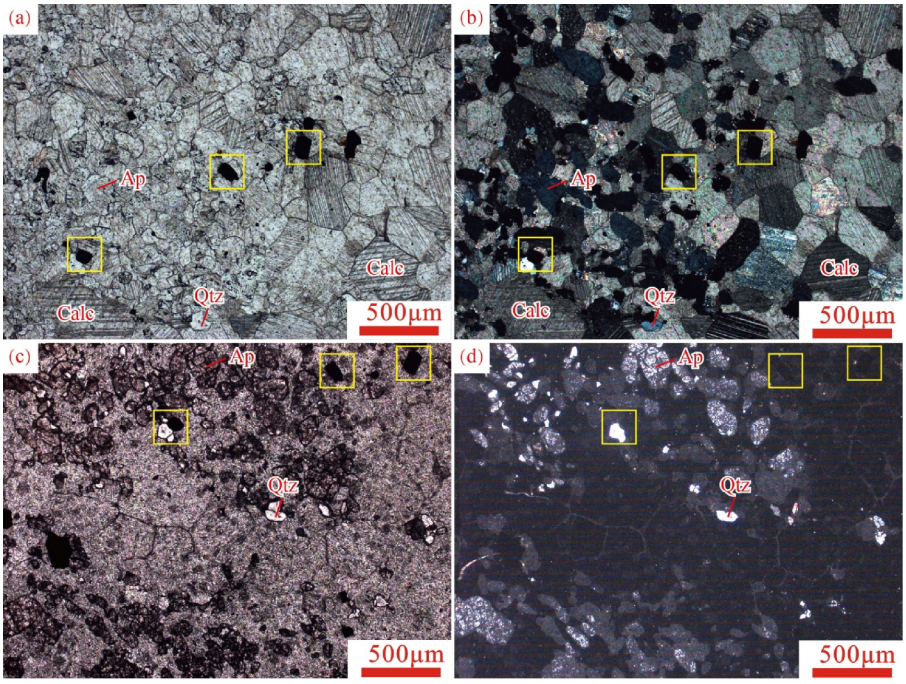

图2 样品17MY02泡醋酸前后对比

Fig. 2 Comparison of sample17MY02 before and after soaking bubble acetic acid

a醋酸浸泡前(单偏光);b-醋酸浸泡前(正交偏光);c-醋酸浸泡后(单偏光);d-醋酸浸泡后(正交偏光);(Ap-磷灰石;Calc-方解石;Qtz-石英)黄色方框为参照点,供醋酸浸泡前后对比用.

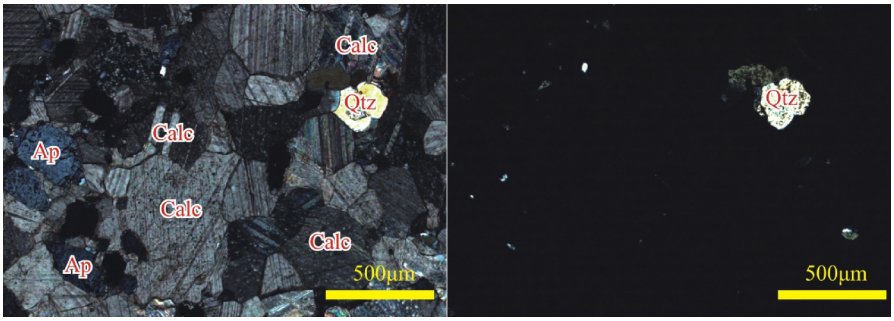

图3 样品17MY02泡王水前后对比

Fig. 3 Comparison of sample17MY02 before and after soaking aqua regia

王水溶解前后对比:左图-王水浸泡前(正交偏光);右图-王水浸泡后(正交偏光)(Ap-磷灰石;Calc-方解石;Qtz-石英).

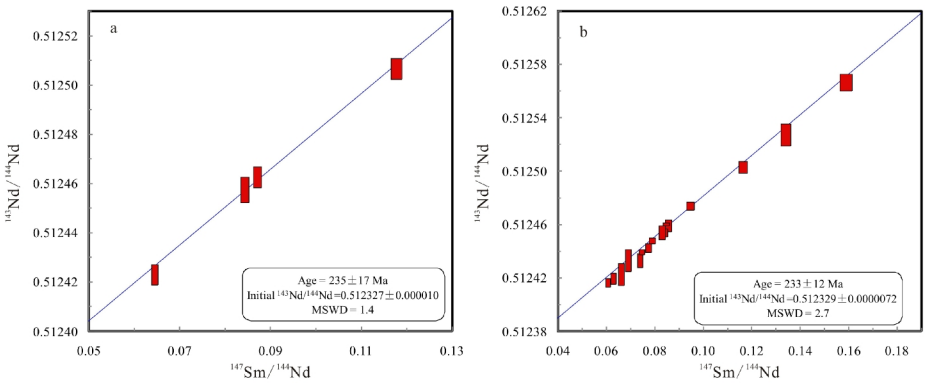

图4 全岩及分步溶解Sm-Nd等时线图

Fig. 4 Sm-Nd isochron of whole rock and stepwise dissolution

a.分步溶样Sm-Nd矿物内部等时线图;b.单件样品(16MY-06)获得的分相等时线图;等时线结果采用Ludwig(2001)[24]的Isoplot程序处理.

万方数据

表2　碳酸岩全岩及其分步溶解Sm-Nd同位素组成

Table 2　Sm-Nd isotopic composition of carbonatite and its stepwise dissolution

样品编号	组成	$^{147}Sm/^{144}Nd$	误差(±2σ)	$^{143}Nd/^{144}Nd$	误差(±2σ)	t_2DM(Ga)	εNd(t)
16my02	全岩	0.0817	0.0012	0.512454	0.000002	0.90	−0.07
16my04	全岩	0.0881	0.0013	0.512467	0.000001	0.90	−0.01
16my05	全岩	0.1017	0.0015	0.512531	0.000005	0.84	0.82
16my06	全岩	0.0881	0.0013	0.512465	0.000004	0.90	−0.05
16my07	全岩	0.0930	0.0014	0.512521	0.000002	0.84	0.90
16my02	醋酸	0.0865	0.0013	0.512460	0.000003	0.90	−0.10
16my04	醋酸	0.1351	0.0020	0.512530	0.000008	0.91	−0.22
16my05	醋酸	0.1593	0.0024	0.512568	0.000006	0.91	−0.22
16my06	醋酸	0.1179	0.0018	0.512507	0.000004	0.91	−0.14
16my07	醋酸	0.1448	0.0022	0.512558	0.000004	0.90	0.03
16my02	王水	0.0802	0.0012	0.512449	0.000003	0.91	−0.12
16my04	王水	0.0692	0.0010	0.512430	0.000008	0.91	−0.15
16my05	王水	0.0970	0.0015	0.512479	0.000003	0.90	−0.05
16my06	王水	0.0854	0.0013	0.512460	0.000005	0.90	−0.06
16my07	王水	0.0775	0.0012	0.512446	0.000002	0.90	−0.09
16my02	氢氟酸	0.0768	0.0012	0.512440	0.000005	0.91	−0.19
16my04	氢氟酸	0.0639	0.0010	0.512424	0.000003	0.90	−0.11
16my05	氢氟酸	0.0872	0.0013	0.512466	0.000001	0.90	0.00
16my06	氢氟酸	0.0661	0.0010	0.512427	0.000004	0.91	−0.11
16my07	氢氟酸	0.0719	0.0011	0.512440	0.000008	0.90	−0.04

注:t_{2DM} 年龄采用李献华等[23]两阶段模式计算.

盐矿物、铁-(铌)-钛氧化物、硅酸盐矿物,实验结果令人满意。

(1)该方法的实现,在一定程度上扩大参加等时线拟合样品点之间 Sm/Nd 值的差别, 提高 Sm-Nd 等时线年龄的测定精度及成功率。尤其对不易分选出单矿物的岩石样品更具现实意义。

(2)详细的岩相学观察结果表明:碳酸岩分步溶解的化学过程,可以有效分选出不同类矿物。

(3)该方法的实现,使单个岩石标本 Sm-Nd 等时线年龄测定成为可能,可避免不符合条件的样品参加等时线拟合, 提高 Sm-Nd 等时线年龄测定成功率。

参考文献:

[1] Le Maitre R W. Igneous Rocks: A Classification and Glossary of Terms [M]. U. K.: Cambridge University Press, 2002.

[2] Irving A J, Wyllie P J. Subsolidus and melting relationships for calcite, magnesite and the join $CaCO_3$-$MgCO_3$ to 36 kbar [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1975, 39: 35-53.

[3] Mariano A N. Nature of economic mineralization in carbonatites and related rocks [M]. // In: Bell K. (ed.) Carbonatites: Genesis and Evolution. London: Unwin Hyman, 1989: 149-176.

[4] Castor S B. The Mountain Pass rare-earth carbonatite and associated ultrapotassic rocks, California [J]. Canadian Mineralogists, 2008, 46: 779-806.

[5] Wall F, Mariano A N. Rare earth minerals in carbonatites: a discussion centred in the Kangankunde carbonatite, Malawi [M]. // In: Jones A P, Wall F, Williams C T, (eds.) Rare Earth Minerals: Chemistry, Origin and Ore Deposits. Mineralogical Society Series, vol.7, London: Chapman and Hall,1996:193-225.

[6] Oliveira S M B, Imbernon R A L. Weathering alteration and related REE concentration in the Catalao I carbonatite complex, central Brazil [J]. Journal of South American Earth Sciences,1998, 11 (4): 379-388.

万方数据

[7] Kavchenko S M. The Tomtor alkaline ultrabasic massif and related REE-Nb deposits, Northern Siberia [J]. Economic Geology, 1995, 90: 676-689.

[8] Lottermoser B G. Rare earth element mineralisation within the Mt. Weld carbonatite laterite, Western Australia [J]. Lithos, 1990, 24: 151-167.

[9] Xu C, Campbell I H, Kynicky J, Charlotte M A, Chen Y J, Huang Z L, Qi L. Comparison of the Daluxiang and Maoniuping carbonatitic REE deposits with Bayan Obo REE deposits, China [J]. Lithos, 2008, 106: 12-24.

[10] Hou Z Q, Tian S H, Yuan Z X, Xie Y L, Yin S P, Yi L S, Fei H C, Yang Z M. The Himalayan collision zone carbonatites in western Sichuan, SW China: Petrogenesis, mantle source and tectonic implication [J]. Earth and Planet Science Letters, 2006, 244: 234-250.

[11] Hou Z Q, Tian S H, Xie Y L, Yang Z S, Yuan Z X, Yin S P, Yi L S, Fei H C, Zhou T R, Bai G, Li X Y. The Himalayan Mianning Dechang REE belt associated with carbonatite -alkaline complexes, eastern Indo -Asian collision zone, SW China [J]. Ore Geology Reviews, 2009, 36:65-89.

[12] 李建康,白 鸽,袁忠信,应立娟,张 建.富氟钡型碳酸岩岩浆的演化机制及其成矿效应 [J]. 地质论评,2008,54(6): 793-800.

[13] 李健康,袁忠信,白 鸽,陈毓川,王登红,应立娟,张 建.山东微山稀土矿床成矿流体的演化及对成矿的制约[J].矿物岩石,2009,29:60-68.

[14] Xu C, Kynicky J, Chakhmouradian A N, Campbell I H, Charlotte M C. Trace element modeling of the magmatic evolution of rare-earth-rich carbonatite from the Miaoya deposit, central China [J]. Lithos, 2010, 118: 145-155.

[15] Xu C, Chakhmouradian A R, Taylor R N, Kynicky J, Li W B, Song W L, Fletcher I R. Origin of carbonatites in the south Qinling orogen: implications for crustal recycling and timing of collision between the South and North China blocks [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2014,143: 189-206.

[16] 李 石.湖北省海西-印支期岩浆岩的发现及其地质意义[J].湖北地质,1989,3(1):57-63.

[17] 陈 文,万渝生,李华芹,张宗清,戴橦谟,施泽恩,孙敬博.同位素地质年龄测定技术及应用 [J]. 地质学报,2011,85(11):1918-1947.

[18] 彭建堂,符亚洲,袁顺达,沈能平,张东亮.热液矿床中含钙矿物的Sm-Nd同位素定年[J].地质论评,2006, 52(5):662-667.

[19] Farmer G L, DePaolo D J. Source of hydrothermal components: Heavy Isotopes [M]. //Barnes H L. Geochemistry of Hydrothermal Deposits (Third Edition). New Jersey: John Wiley & Sons, 1997:31-41.

[20] DePaolo D J. Neodymium Isotope Geochemistry: An introduction [M]. Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 1988.

[21] 宋文磊,徐 成,刘 琼,王林均,吴 敏,曾 亮.火成碳酸岩的实验岩石学研究及对地球深部碳循环的意义[J].地质论评,2012,58(4):726-744.

[22] 张利国,段桂玲,杨红梅,杨 梅,谭娟娟,段瑞春,邱啸飞,刘重芃. 玄武岩分相Sm-Nd内部等时线定年方法流程[J].岩矿测试, 2014, 33(5):640-648.

[23] 李献华,赵振华,桂训唐.华南前寒武纪地壳形成时代的Sm-Nd和锆石U-Pb同位素制约[J].地球化学,1991, (3): 253-263.

[24] Ludwig K R. Isoplot/Ex, rev.2.49. A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel [M]. Berkeley Geochronology Center, 2001:1-56.

[25] 李志昌,路远发,黄圭成.放射性同位素地质学方法与进展[M].武汉:中国地质大学出版社,2004.

[26] Ying Y C , Chen W, Lu J, Jiang S Y, Yang Y H. In situ U-Th -Pb ages of the Miaoya carbonatite complex in the South Qinling orogenic belt, central China[J]. Lithos, 2017, 290-291:159-171.

万方数据