

高精度质谱计在同位素地球化学的应用前景

陈福坤, 李秋立, 李潮峰, 李向辉, 王秀丽, 王 芳

中国科学院地质与地球物理研究所固体同位素地球化学实验室, 北京 100029

摘要: 微量地质样品的高精度同位素比值测试已经成为地质和环境科学等领域极其重要的研究手段。新型固体热电离质谱计以其高精度和高灵敏度, 将在同位素年代学和地球化学领域有广阔的应用前景。报道采用 IsoProbe-T 质谱计测量标准物质溶液的结果。测量锶标准物质 NBS987 和钕标准物质 Ames 分别获得平均 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值 $0.710\,241\,8 \pm 0.000\,005\,1$ 和平均 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值 $0.512\,148\,4 \pm 0.000\,002\,9$, 内部精度可达 $0.000\,3\%$ 。微量锶标准物质 ($0.3 \sim 1\text{ ng}$) 的同位素比值测量内部精度可以优于 0.003% 。结合低本底化学流程, 实现了微量地质样品的高精度同位素比值测试。这一结合将有效地促进单颗粒矿物年代学和同位素示踪在岩浆岩、变质岩、矿床、构造岩研究的应用。

关键词: 质谱计; 高精度; 低本底; 年代学; 同位素地球化学。

中图分类号: P597

文章编号: 1000-2383(2005)06-0639-07

收稿日期: 2005-07-18

Prospect of High Precision Mass Spectrometer in Isotope Geochemistry

CHEN Fu-kun, LI Qiu-li, LI Chao-feng, LI Xiang-hui, WANG Xiu-li, WANG Fang

Laboratory for Radiogenic Isotope Geochemistry, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

Abstract: The high precision measurement of isotopic ratios for micro-geological samples has become very important in the geological and environmental sciences. Recently developed solid-source thermal ionization mass spectrometers are highly precise and sensitive, and are playing a crucial role in isotopic geochronology and geochemistry. This paper reports analytical data obtained from standard material solutions using an IsoProbe-T mass spectrometer. Measurements on the Sr standard material NBS987 and Nd standard material Ames yielded mean $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ and $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ ratio values of $0.710\,241\,8 \pm 0.000\,005\,1$ and $0.512\,148\,4 \pm 0.000\,002\,9$, respectively, with an internal precision better than $0.000\,3\%$. Measurements using a small amount of the Sr standard material solution NBS987 ($0.3 \sim 1\text{ ng}$) yielded an internal precision significantly better than 0.003% . Combining chemical separation procedures having low blank, measurements of micro-geological samples have successively been achieved. This combination of low-blank chemical procedures and the use of a high precision mass spectrometer will potently promote applications of single-grain geochronology and isotopic tracer on magmatic rocks, metamorphic rocks, ore deposits and tectonites.

Key words: mass spectrometer; high precision; low blank; geochronology; isotope geochemistry.

0 引言

自 20 世纪中期以来, 固体热电离质谱计的应用促使同位素地球化学研究获得重大进展, 涉及了地质研究大多数领域。尽管 20 世纪 80 年代以来, 高精度电感耦合等离子体质谱计 (ICP-MS) 和高分辨多接收等离子质谱计 (MC-ICP-MS) 相继问世使得快

速测定地质体等自然样品的微量元素和同位素成为可能, 固体热电离质谱计以其高精度和可靠性的特点, 在同位素年代学和同位素地球化学研究领域的应用依然前景广阔 (Wieser and Schwieters, 2005)。微量和极微量样品测试手段已经成为地质科学和环境科学等领域极其重要的研究方法。然而, 无论是英国 VG 公司生产的 VG354 或是德国 Finnigan 公司

生产的 MAT262,在微量和极微量样品的高精度同位素比值的测量逐显乏力.随着技术飞速发展,国际上固体热电离质谱计的技术不断更新和改进,体现在德国 Finnigan 公司新开发的 TRITON 型和英国 GV 公司(原 MicroMass 公司)最新产品 IsoProbe-T 型固体热电离质谱计.它们具有较宽质量谱带、高精度和高灵敏度特点,装备多通道离子计数接收器,易于操作,依然是今后的同位素年代学和地球化学研究的主导设备之一.本文报道采用 IsoProbe-T 质谱计获得的标准物质分析数据,讨论高精度质谱计在微量样品年代学和高分辨同位素地球化学研究以及相关地学领域的应用前景.

1 高精度质谱计

中国科学院地质与地球物理研究所固体同位素地球化学实验室于 2004 年引进英国 GV 公司的 IsoProbe-T 固体热电离质谱计,同年底投入运行.该质谱计配置了 9 个法拉第接收器、1 个戴利接收器和 7 个离子计数器,共 17 个通道(图 1),可以测量常规和微量样品固体同位素组成,包括铷—锶、钐—钕、铀—钍、过渡族元素(如铁、铜等)和轻质量元素(如锂和硼)同位素组成.法拉第接收器因技术进步已具备稳定和高效特征,能够保证接收器之

间稳定的增益,使得在静态测量方式下可以获得高精度的同位素比值,达到一致的内部和外部精度.该质谱计配备有给氧设备,可进行负离子状态的氧化物分析,如微量 Sm-Nd 氧化物同位素和 Re-Os 氧化物同位素分析等.它的运用将有望大幅度地促进壳幔相互作用与深部物质成分、古大陆形成与演化、造山带与盆地演化、新生代地质与环境、流体与成矿等重要领域的研究工作.

2 标准物质溶液测试

表 1 和表 2 列出了采用高精度质谱计 IsoProbe-T 测定标准物质 NBS987 锶和 Ames 钕溶液的结果.每个测量取含有少于 200 ng 锶或钕的标准物质溶液.12 次测量获得平均 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为 $0.710\,241\,8 \pm 0.000\,005\,1$, 平均 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值为 $0.512\,148\,4 \pm 0.000\,002\,9$ (图 2), 内精度可达 0.000 3%, 外精度可优于 0.000 7%. 数据计算采用 Isoplot 软件(Ludwig, 2001). Sr 同位素比值测定采用 Ta 金属带和纯化 Ta-HF 发射剂, Nd 同位素比值测定采用双 Re 金属带形式.测得的 Nd 和 Sr 同位素比值分别采用 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.721\,9$ 和 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr} = 0.119\,4$ 校正.该高精度质谱计具有很高的灵敏度,以锶同位素比值测量为例,采用 0.5 ng

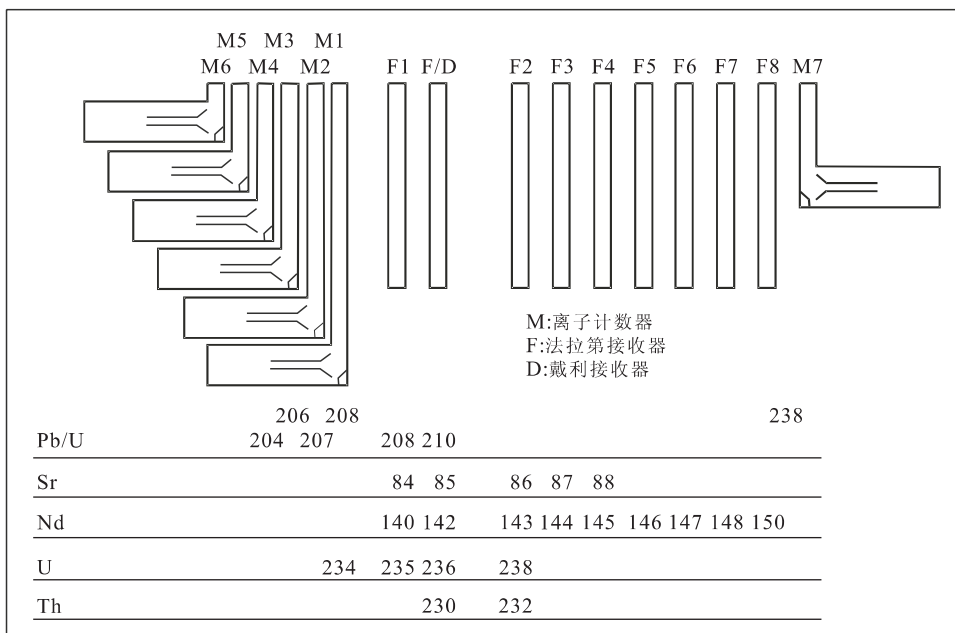


图 1 IsoProbe-T 质谱计 17 个接收器分布

Fig. 1 Array of seventeen receivers of the IsoProbe-T mass spectrometer

表 1 标准物质溶液 NBS987 Sr 测量结果

Table 1 Analytical data of the Sr standard material solution NBS987

	⁸⁸ Sr/ ⁸⁶ Sr 测量值	⁸⁴ Sr/ ⁸⁶ Sr 标准化	绝对误差 (2σ)	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr 标准化	绝对误差 (2σ)
1	8.327 930	0.056 519	0.000 003	0.710 235 5	0.000 005 5
2	8.415 918	0.056 509	0.000 002	0.710 240 5	0.000 004 3
3	8.425 433	0.056 520	0.000 002	0.710 249 5	0.000 005 0
4	8.307 626	0.056 511	0.000 002	0.710 230 8	0.000 004 3
5	8.343 408	0.056 520	0.000 002	0.710 239 9	0.000 003 7
6	8.303 591	0.056 510	0.000 002	0.710 232 0	0.000 004 1
7	8.328 799	0.056 507	0.000 002	0.710 242 0	0.000 004 5
8	8.356 992	0.056 514	0.000 002	0.710 244 3	0.000 004 2
9	8.393 424	0.056 515	0.000 002	0.710 250 7	0.000 004 1
10	8.305 286	0.056 525	0.000 002	0.710 230 9	0.000 004 1
11	8.333 238	0.056 507	0.000 002	0.710 251 4	0.000 003 6
12	8.407 170	0.056 511	0.000 002	0.710 249 7	0.000 003 9
平均值				0.710 241 8	0.000 005 1

表 2 标准物质溶液 Ames Nd 测量结果

Table 2 Analytical data of the Nd standard material solution Ames

	¹⁴⁶ Nd/ ¹⁴⁴ Nd 测量值	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd 测量值	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd 标准化	绝对误差 (2σ)
1	0.720 151	0.512 779 3	0.512 151 2	0.000 003 8
2	0.720 360	0.512 704 2	0.512 146 8	0.000 005 2
3	0.720 353	0.512 707 9	0.512 150 0	0.000 005 7
4	0.719 819	0.512 893 9	0.512 145 8	0.000 004 3
5	0.719 770	0.512 908 5	0.512 143 3	0.000 004 3
6	0.720 194	0.512 763 0	0.512 152 5	0.000 006 2
7	0.720 367	0.512 691 7	0.512 141 1	0.000 005 2
8	0.720 255	0.512 741 3	0.512 152 0	0.000 004 9
9	0.719 878	0.512 876 5	0.512 153 6	0.000 005 0
10	0.719 880	0.512 869 9	0.512 145 1	0.000 004 5
11	0.720 261	0.512 745 7	0.512 157 4	0.000 006 3
12	0.720 190	0.512 760 4	0.512 148 2	0.000 006 0
平均值			0.512 148 4	0.000 002 9

锶标准物质 NBS987 试测, ⁸⁸Sr 信号强度可达到 2 V 左右, 测量内部精度可以优于 0.003%。

3 单颗粒锆石同位素年代学

锆石由于普遍地存在于大多数岩浆岩、变质岩和沉积岩内, 富含放射性铀和钍, 而且同位素体系封闭温度高(Lee *et al.*, 1997; Cherniak and Watson, 2000), 因而, 该矿物近几十年来被广泛地应用于地质同位素年代学的研究领域中。在铀—铅锆石年代学研究中, 谐和年龄或接近谐和年龄一般被认为具有明确的地质意义(Mezger and Krogstad, 1997)。采用传统的同位素稀释法分析演化历史复杂的锆石, 获得错误的模式年龄常常是不可避免的。在过去的几十年来, 同位素年代学家致力于分析方法的开发, 以

达到获得锆石谐和的表面年龄的目的。这些方法主要有: 机械磨损法(Krogh, 1982)、逐步酸淋滤法或称局部溶解法(Mattinson, 1994)、单颗粒蒸发法(Kober, 1986, 1987; Cocherie *et al.*, 1992; Klötzli, 1997)、阴极发光指导选样法(Poller *et al.*, 1997)、机械晶区分离法(Sergeev *et al.*, 1997)。

20 世纪 80 年代发展起来的锆石 Pb-Pb 蒸发法定年方法有效地对具有简单的结晶历史的锆石进行定年, 获得较高精度的结晶年龄(Kober, 1986, 1987; Cocherie *et al.*, 1992; Klötzli, 1997; Chen *et al.*, 2000)。这一方法致命弱点是, 不能根据测得的²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 比值直观地判断对应的²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄是否为谐和年龄。传统的锆石蒸发法定年原理是将锆石单颗粒包裹于铱灯丝中加热, 将锆石中铅蒸发至另一铱灯丝上, 之后加热电离沉淀于该灯丝上

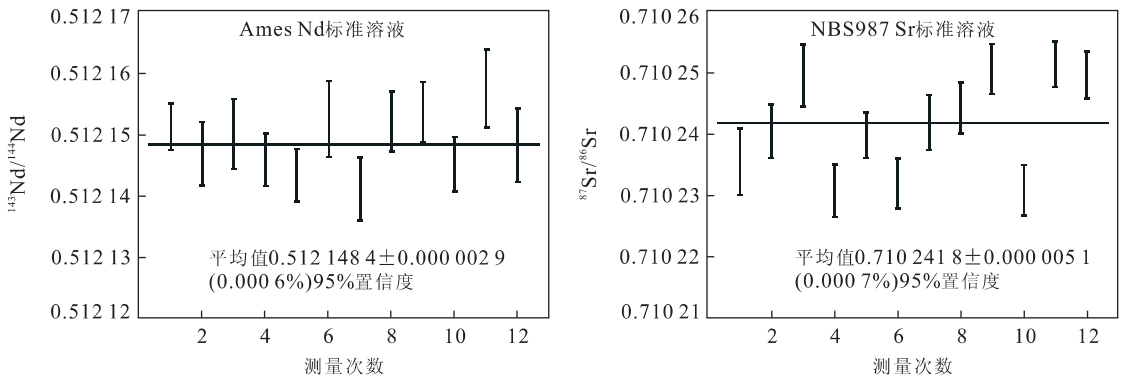


图 2 Sr 和 Nd 标准物质溶液的测量结果(NBS987 和 Ames)

Fig. 2 Analytical data of Sr and Nd standard material solutions

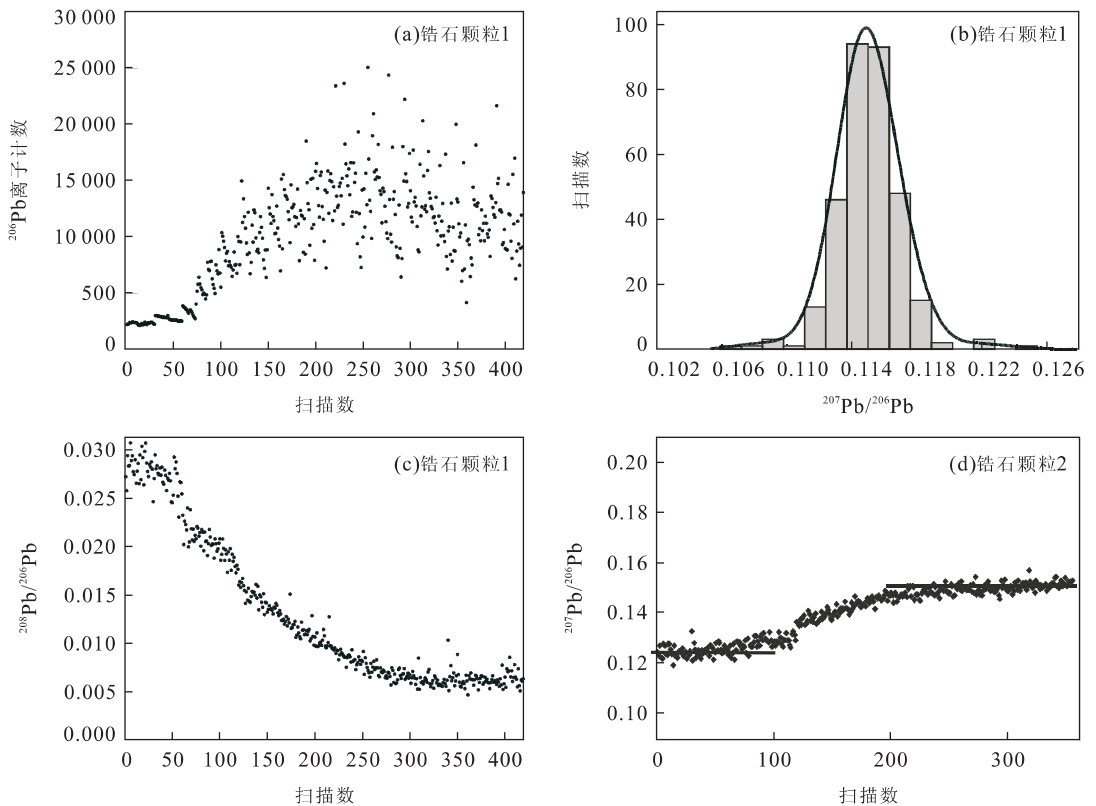


图 3 锆石 Pb-Pb 蒸发法分析结果

Fig. 3 Analytical data using the zircon Pb-Pb evaporation method

a. 锆石颗粒 1 测量过程中 ^{206}Pb 信号强度变化; b. 锆石颗粒 1 测得的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 比值; c. 锆石颗粒 1 测得的 $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 比值变化; d. 锆石颗粒 2 测得的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 比值变化, 指示核边结构或复杂的锆石结晶历史

的铅样品, 采用单个离子计数器动态方式测量铅同位素组成, 从而获得 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 比值和对应的年龄. 这一方法技术上简单但极为耗时. 采用 IsoProbe-T 质谱计的多个离子计数器测量, 可以克服耗时缺点. 方法是将包裹于铯灯丝的锆石颗粒加热, 采用静态方式直接测量蒸发出来的铅同位素组成, 获得 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄. 简便省时, 同时可以直观地观测到锆石内部铅同位素组成的变化, 如 $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 比值, 指示锆石内部 Th/U 比值变化或 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 比值变化, 直接反映出继承锆石的存在与否. 图 3 所示实例为来自华北克拉通两颗锆石的测量结果. 尽管测量过程中, ^{206}Pb 信号强度变化范围很大, 锆石颗粒 1 测得的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 比值集中于 0.115 左右(图 3b), $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 比值随测量时间变化, 反映锆石颗粒内部 Th/U 环带结构(图 3c). 锆石颗粒 2 测得的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 比值随测量时间发生有规律的变化, 指示该锆石颗粒有较复杂的结晶历史(图 3d). 多通道离子计数器之间的效率差别可以采用测定铅标准溶液同位素比值来校正, 简便快捷. 尽管该方法不能

与 SHRIMP 微区 U-Pb 定年媲美, 但对成因单一或简单历史的锆石, 可以获得高精度的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄, 而且经济环保.

多个离子计数器测量技术也可以应用于单颗粒锆石 U-Pb 年代学方法, 该方法所获得的数据可靠性主要取决于实验流程 U 和 Pb 本底情况. 为了降低流程本底, 我们采用低本底蒸汽法高温高压条件下溶解锆石(图 4). 将锆石和 $^{205}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 混合稀释剂加于小溶样杯内, HF 酸置于 Teflon 焖罐底部, 在高温高压条件下加热, 完全溶解锆石. 采用该溶样方法和高纯度水及试剂, 可获得全流程 U 和 Pb 本底分别小于 5 pg 和 10 pg.

4 微量样品 Rb-Sr 同位素年代学

自 20 世纪中期以来, Rb-Sr 同位素定年及随后的 Sr 同位素地球化学示踪在地学领域发挥着重要作用. 然而, 由于 ^{87}Rb 对 ^{87}Sr 的同质异素干扰, Sr 同位素微区原位分析方法依然存在困难, 尤其较高 Rb

含量矿物,如云母、Rb 和 Sr 化学分离和热电离质谱计测试仍然是高精度、高准确度 Sr 同位素比值测量的最佳选择. 多数情况下 Rb-Sr 同位素定年方法采用等时线法,即为不同矿物或全岩构成的等时线. 然而,对于经历复杂变质过程的岩石,矿物有多期的特点,即可在进变质、峰期、退变质阶段结晶生长,而前期矿物组分也在后期会受到变质作用的叠加改造 (Li *et al.*, 2000). 由于实验全流程本底条件及仪器性能的限制,以往的分析用量一般多于 50 mg 矿物颗粒,这样不可避免地有不同期次矿物组分的混合. 构成不同矿物间等时线的年龄具有地质意义的前提条件是初始同位素平衡,并且未受到后期改造. 然而不同矿物的 Rb-Sr 同位素体系封闭温度各异,初始同位素平衡可能难以达到. 解决以上问题可以通过在明确矿物组分、结构、演化历史关系后,利用矿物颗粒间元素含量的差异,构成单一矿物内部等时线定年 (Müller *et al.*, 2000, 2003).

实现单颗粒矿物样品分析对化学流程本底和同位素比值的精确测定提出了更高的要求. 微量样品的化学处理过程成功与否,很大程度上取决于全流程本底高低和样品分离纯化过程的回收率. 目前,国际国内实验室处理 Rb-Sr 化学分离的常规流程本底大都变化在 0.1~1 ng (即 100~1 000 pg). 这样的实验条件,对于 Sr 总量低于 ng 级样品将不能获得有实际意义的 Sr 同位素分析测定. 因此,单颗粒矿物样品的同位素分析要求在化学流程中改进试剂纯化、样品溶解和化学分离纯化等方面的技术问题. 中国科学院地质与地球物理研究所固体同位素地球化学实验室在低本底的 Rb-Sr 化学流程技术上已取得突破. 通过采用低本底高温高压溶样技术 (图 4),提高试剂纯化度和改进化学分离技术,获得 5~6 pg 超低 Rb-Sr 全流程本底 (Li *et al.*, 2005). 结合高精度质谱计 IsoProbe-T 具有较高灵敏度特征,可以对 Sr 总量低于 1 ng 的地质样品,如单颗粒矿物或微量全岩样品,进行较高精度的同位素比值测定和精细定年. 图 5 显示应用 IsoProbe-T 质谱计测量微量的标准物质溶液 NBS987 的结果. 采用 Sr 总量 1 ng 的标准物质可以满足高精度测量要求,样品 Sr 总量低至 0.3 ng 依然能够在精度和准确度上获得较好的测量结果. 6 次测量极微量锶标准物质 NBS987 溶液 (1 ng, 0.5 ng 和 0.3 ng 各 2 次) 获得 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值为 $0.710\,236\,1 \pm 0.000\,007\,1$ (95%置信度),内部精度变化在 0.002%~0.003% 之间. 测得的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值微

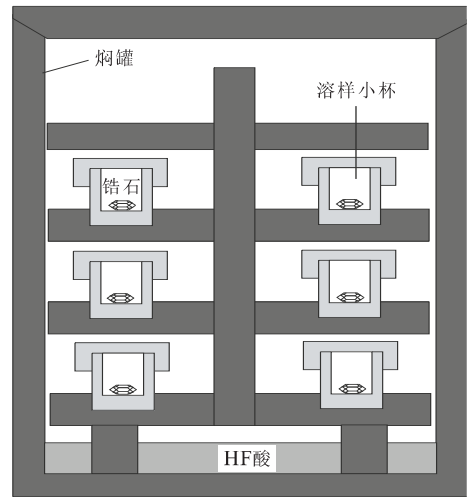


图 4 低本底高温高压蒸汽法溶样

Fig. 4 Low-blank vapor digestion method under high-temperature and high-pressure conditions

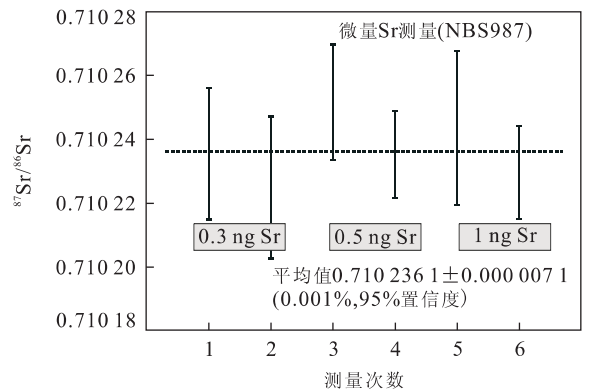


图 5 微量 Sr 标准物质溶液 NBS987 同位素比值测量结果
Fig. 5 Analytical data using a small amount of the Sr standard material solution NBS987

弱偏低,可能由本底叠加相对增大引起.

5 高精度、高分辨同位素地球化学示踪

近年来质谱计技术的发展和完善实现了高精度的同位素比值测量. 无论是德国 Finnigan 公司的产品 TRITON 质谱计,还是英国 GV 公司生产的 IsoProbe-T 质谱计,对 Sr 和 Nd 同位素比值测量的精度可以比以往质谱计提高近一个数量级水平,同时也提高了灵敏度. 结合实验室条件和化学分离方法的改进,这一测量技术的提高可以在微量样品同位素年代学方面,尤其在高分辨同位素地球化学示踪方面发挥作用. 近年来,高分辨同位素示踪已广泛地应用在岩石成因、古地质环境等领域的研究,如利用

矿物和岩石的化学组成和同位素比值环带进行研究 (Leshner, 1994; Waight *et al.*, 2000; Gagnevin *et al.*, 2005a). 尽管 ICP-MS 和 MC-ICP-MS 质谱计可以应用于原位 Pb 同位素比值测定, 如长石 Pb 同位素组成环带研究 (Gagnevin *et al.*, 2005b), Sm-Nd 和 Rb-Sr 等同位素体系由于存在同质异素的叠加干扰, 原位分析难以获得准确的、高精度的 Nd 和 Sr 同位素比值. 相反地, 新型高精度质谱计有较高灵敏度, 结合低本底化学分离流程, 可以大大地降低分析样品量, 提高分析空间分辨率, 是高精度、高分辨 Nd 和 Sr 同位素地球化学研究的主导手段.

20 世纪 90 年代, Harper 和 Jacobsen (1992) 利用 Finnigan MAT262 质谱计测量了格陵兰 Isua 古老的长英质片麻岩 (3.8 Ga) Nd 同位素组成, 发现 $^{142}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值的正异常. ^{142}Nd 正异常是由于短寿命的 ^{146}Sm 同位素衰变积累造成的. 其半衰期大致为 103 Ma, 在地球形成后的 300 Ma 左右因衰变而耗尽, 因此, $^{146}\text{Sm}-^{142}\text{Nd}$ 同位素体系可以成为研究地球早期历史的分馏演化过程的有效手段之一 (Harper and Jacobsen, 1992). 然而, 初始 ^{146}Sm 丰度低, 在 4.566 Ga 前, $^{146}\text{Sm}/^{144}\text{Sm}$ 比值仅为 0.0078 (Jacobsen and Wasserburg, 1984), $^{142}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值的正异常很小, 仅为 $(30\sim 40)\times 10^{-6}$ 左右. 因此, 鉴别 $^{142}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值正异常对测量精度要求很高. 无论 Finnigan MAT262 还是 VG354 质谱计对 $^{142}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值测量精度仅达到 20×10^{-6} 左右, 难于有效地鉴别地球古老岩石的 $^{142}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值正异常 (Sharma *et al.*, 1996). 新型高精度质谱计 (GV 公司 IsoProbe-T 或 Finnigan 公司 TRITON) 的测量精度可以达到 5×10^{-6} 左右, 因此, 它们有望在研究地球早期分馏过程获得突破性的进展.

致谢: 实验工作得到肖平女士协助.

References

- Chen, F., Hegner, E., Todt, W., 2000. Zircon ages, Nd isotopic and chemical compositions of orthogneisses from the Black Forest, Germany—Evidence for a Cambrian magmatic arc. *Int. J. Earth Sci.*, 88:791—802.
- Cherniak, D. J., Watson, E. B., 2000. Pb diffusion in zircon. *Chem. Geol.*, 172:5—24.
- Cocherie, A., Guerrot, C., Rossi, P., 1992. Single-zircon dating by step-wise Pb evaporation: Comparison with other geochronological techniques applied to the Hercynian granites of Corsica, France. *Chem. Geol.*, 101: 131—141.
- Gagnevin, D., Daly, J. S., Poli, G., et al., 2005a. Microchemical and Sr isotopic investigation of zoned K-feldspar megacrysts: Insights into the petrogenesis of a granitic system and disequilibrium crystal growth. *J. Petrol.*, 46:1689—1724.
- Gagnevin, D., Daly, J. S., Waight, T. E., et al., 2005b. Pb isotopic zoning of K-feldspar megacrysts determined by laser ablation multi-collector ICP-MS: Insights into granite petrogenesis. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 69: 1899—1915.
- Harper, Jr. C. L., Jacobsen, S. B., 1992. Evidence from coupled $^{147}\text{Sm}-^{143}\text{Nd}$ and $^{146}\text{Sm}-^{142}\text{Nd}$ systematics for very early (4.5-Gyr) differentiation of the earth's mantle. *Nature*, 360:728—732.
- Jacobsen, S. B., Wasserburg, G. J., 1984. Sm-Nd isotopic evolution of chondrites and achondrites, II. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 67:137—150.
- Klötzel, U. S., 1997. Single zircon evaporation thermal ionisation mass spectrometry: Method and procedures. *Analyt.*, 122:1239—1248.
- Kober, B., 1986. Whole-grain evaporation for $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ age—Investigations on single zircons using a double-filament thermal ion source. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 93:482—490.
- Kober, B., 1987. Single-zircon evaporation combined with Pb^+ emitter bedding for $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ -age investigations using thermal ion mass spectrometry, and implications to zirconology. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 96:63—71.
- Krogh, T. E., 1982. Improved accuracy of U-Pb zircon ages by the creation of more concordant systems using air abrasion technique. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 46, 637—649.
- Lee, J. K. W., Williams, I. S., Ellis, D. J., 1997. Pb, U and Th diffusion in natural zircon. *Nature*, 390:159—161.
- Leshner, C. E., 1994. Kinetics of Sr and Nd exchange in silicate liquids: Theory, experiments, and applications to uphill diffusion, isotopic equilibration, and irreversible mixing of magmas. *J. Geophys. Res.*, 99:9585—9604.
- Li, Q. L., Chen, F. K., Wang, X. L., et al., 2005. Low-blank chemical separation procedure and the single grain mica Rb-Sr isochron dating method. *Chinese Sci. Bull.* (in press).
- Li, S. G., Jagoutz, E., Chen, Y. Z., et al., 2000. Sm-Nd and Rb-Sr isotopic chronology and cooling history of ultrahigh pressure metamorphic rocks and their country rocks at Shuanghe in the Dabie Mountains, central Chi-

na. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 64:1077-1093.

Ludwig, K. R., 2001. Isoplot/Ex, rev. 2. 49: A geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronological Center, Special Publication, (1):58.

Mattinson, J. M., 1994. A study of complex discordance in zircons using step-wise dissolution techniques. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 116:117-129.

Mezger, K., Krogstad, E. J., 1997. Interpretation of discordant U-Pb zircon ages: An evaluation. *J. Metamorph. Geol.*, 15:127-140.

Müller, W., Mancktelow, N. S., Meier, M., 2000. Rb-Sr microchrons of synkinematic mica in mylonites: An example from the DAV fault of the Eastern Alps. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 180:385-397.

Müller, W., 2003. Strengthening the link between geochronology, textures and petrology. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 206:237-251.

Poller, U., Liebetrau, V., Todt, W., 1997. U-Pb single-zircon dating under cathodoluminescence control (CLC-method): Application to polymetamorphic orthogneisses. *Chem. Geol.*, 139:287-297.

Sergeev, S. A., Komarov, A. N., Bickel, R. A., et al., 1997. A new microtome for cutting hard submillimeter-sized crystalline objects for promoting high-resolution instrumental microanalysis. *Eur. J. Mineral.*, 9:449-456.

Sharma, M., Papanastassiou, D. A., Wasserburg, G. J., et al., 1996. The issue of the terrestrial record of ¹⁴⁶Sm. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 60:2037-2047.

Waight, T. E., Maas, R., Nicholls, I. A., 2000. Fingerprinting feldspar phenocrysts using crystal isotopic composition stratigraphy: Implications for crystal transfer and magma mingling in S-type granites. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 139:227-239.

Wieser, M. E., Schwieters, J. B., 2005. The development of multiple collector mass spectrometry for isotope ratio measurement. *Int. J. Mass Spectrometry*, 242:97-115.

《地球科学——中国地质大学学报》 2005 年 第 31 卷 第 1 期 要目预告

地壳与弱化岩石圈地幔的相互作用——以燕山造山带为例	路凤香等
华北东部橄榄岩岩石化学特征及其岩石圈地幔演化意义	郑建平
复杂橄榄岩捕虏体:反演岩石圈演化过程的罕见而重要的样品	张宏福
上地幔 Os 同位素组成的演化	支霞臣等
太行山重力梯度带的形成与华北岩石圈减薄的时空差异性有关	徐义刚
粤东北基底变质岩的组成和形成时代	于津海等
基底岩系和花岗岩类 Pb-Nd 同位素组成限制祁连山带的构造属性	张宏飞等
鲁西中生代高 Mg 闪长岩的成因——年代学与岩石地球化学证据	杨承海等
汉诺坝橄榄岩捕虏体的单斜辉石 LAM-ICPMS 分析及其岩石圈地幔演化意义	余淳梅等