

Neptune 多接收器等离子体质谱精确测定锶同位素组成

杨岳衡^{1,2}, 张宏福¹, 吴福元¹, 谢烈文¹, 张艳斌¹

(1. 中国科学院地质与地球物理研究所 岩石圈演化国家重点实验室, 北京 100029;
2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要:报道了近两年来在 Neptune 多接收器等离子体质谱(MC-ICP-MS)上对 NIST SRM987 的测试结果。针对实际地质样品, Neptune MC-ICP-MS 和热电离质谱(TIMS)进行了平行测定。Neptune MC-ICP-MS 可以精确测定锶同位素组成, 与传统的 TIMS 相比, MC-ICP-MS 可以获得与 TIMS 相媲美的数据精度, 而且分析时间短, 效率高。对于等离子体载气——氩气中少量氙的干扰, 可以直接扣除; 对于样品中少量铷(Rb/Sr < 0.01)的干扰, 同样可以直接扣除, 从而获得准确的锶同位素组成。

关键词: Neptune 多接收器等离子体质谱; 锶同位素组成; 氙、铷的干扰校正

中图分类号: O657.63; O614.23⁺² **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-2997(2005)04-215-06

Accurate Measurement of Strontium Isotopic Composition by Neptune Multiple Collector Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry

YANG Yue-heng^{1,2}, ZHANG Hong-fu¹, WU Fu-yuan¹, XIE Lie-wen¹, ZHANG Yan-bin¹

(1. State Key Laboratory of Lithospheric Evolution, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;
2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: This paper reported the analytical results of the NIST SRM987 measured by Neptune multiple collector inductively coupled plasma mass spectrometry (MC-ICP-MS) over last two years. Geological samples after traditional chemical separation were measured by Neptune MC-ICP-MS and thermal ionization mass spectrometry (TIMS), respectively. Neptune MC-ICP-MS can precisely measure strontium isotopic composition as the TIMS does, even more effective and less time-consuming than the TIMS method. For the krypton from ICP source carrier—the argon gas, isobaric interference can be directly corrected without the requirement for mass discrimination correction due to low level of the krypton ion beam. As for the sample containing small amount of rubidium (Rb/Sr < 0.01), direct calibration for isobaric interference and mass discrimination by the exponential law can be obtained by assuming that rubidium mass discrimination is the same as that of strontium.

Key words: Neptune MC-ICP-MS; Sr isotopic composition; Kr, Rb correction

收稿日期: 2005-04-14 修回日期: 2005-08-02

基金项目: 国家自然科学基金委杰出青年科学基金(40225009)

作者简介: 杨岳衡(1970—), 男(汉族), 湖南衡山人, 博士生, 同位素地球化学专业。E-mail: yangyueheng@mail.iggcas.ac.cn

自从第一台商业多接收器等离子体质谱仪(multiple collector inductively coupled plasma mass spectrometry: MC-ICP-MS) Plasma 54 (P54)于1995年安装在法国里昂(Lyon)以来,MC-ICP-MS在地球、行星、海洋和环境等方面的应用取得了迅猛的发展^[1-2]。MC-ICP-MS与传统的热电离质谱(thermal ionization mass spectrometry: TIMS)相比,有以下几方面的优点:等离子体源近8 000 K高温可以将元素周期表中的绝大多数元素有效离子化,以前TIMS无法测定或很难准确测定的高电离能元素(如Hf、W),利用MC-ICP-MS可以精确测定其同位素组成;通过配备激光进样系统,原位(in situ)同位素分析技术得以实现^[2];MC-ICP-MS分馏行为稳定,可以更好地进行分馏校正(如T1校正Pb)和同质量异位素干扰校正(如⁸⁷Rb和⁸⁷Sr, ¹⁵⁴Sm和¹⁴⁴Nd, ¹⁷⁸Lu, ¹⁷⁶Yb和¹⁷⁶Hf),从而使得液态样品(如天然水)无需化学分离,直接进行同位素测定成为可能^[3]。

铈同位素在同位素地质年代学和同位素地球化学方面得到了广泛的应用。成熟的TIMS技术一直是固体同位素(如Sr、Nd、Pb)的经典测试方法,MC-ICP-MS是近10年才出现的新型质谱仪器。因此,人们不但用它来开展一些创新性的研究工作(如测定Hf、W),同时也用它来进行传统的同位素分析(如分析Sr、Nd、Pb)。目前市场上的MC-ICP-MS仪器主要有两种类型:单聚焦和双聚焦,前者是Micromass IsoProbe,后者包括Nu Instrument、VG P54、Axiom和Finnigan Neptune。对于IsoProbe、Nu、P54和Axiom型仪器测定铈同位素组成已有较多的报道^[4-9],而对于Neptune型仪器,则少见报道^[10]。本文报道了近两年来在中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室新引进的Neptune MC-ICP-MS上测试铈同位素的情况。

1 实验部分

1.1 仪器与装置

Neptune MC-ICP-MS:德国Finnigan Mat公司产品,由Triton(TIMs)和Element2(ICP-MS)两部分组成,在离子光学通路上采用双聚焦(能量聚焦和质量聚焦)设计,并采用动态变焦(zoom)技术可以将质量色散扩大至17%。配

有9个法拉第杯接收器和一个离子计数器,除了中心杯和离子计数器外,其余8个法拉第杯配置在中心杯的两侧,并以马达驱动进行精确的位置调节。另外,Neptune MC-ICP-MS采用虚拟放大器专利技术,在每个探测器同时采集完一个Block后,运用软件自动轮流更换其后的放大器电路,在采集9个Block后,各放大器电路与原探测器恢复一致。该技术可有效地消除因各法拉第杯接收器后的放大器的增益不同所造成的同位素比值的误差,提高同位素比值测定的精度^[11]。

1.2 试剂与标准

所用试剂均是经一次纯化后得到:高纯水(电阻>18 M Ω)、氢氟酸(亚沸蒸馏)、盐酸(亚沸蒸馏)、硝酸(亚沸蒸馏)和高氯酸(减压蒸馏)。用标准溶液NIST SRM987(200 μ g/L)来优化仪器参数和监控实际样品测量,100 mg/L铈标准溶液(国家标准物质中心)逐级稀释得到1 mg/L和10 μ g/L的工作溶液,在实际样品分析过程中,则使用了国际岩石标样BCR-1进行跟踪测量。

1.3 实验方法

1.3.1 样品溶解和化学分离 称取100 mg样品放入15 mL Teflon溶样罐(Savillex)中,加2 mL氢氟酸和少量的高氯酸在电热板保温一周,使样品溶解完全。铈的化学分离则采用传统的阳离子交换树脂(AG50W \times 12,200~400目)来完成,首先用2.5 mol/L盐酸把基体元素淋洗掉,然后用不同体积5 mol/L盐酸依次把铈和铈分别淋洗下来,最后把得到的铈溶液平均作两份,分别由TIMS和MC-ICP-MS进行测定,该过程空白 \leq 50 pg。

1.3.2 质谱测量 对于铈同位素组成的测定,全部采用静态方式,具体的法拉第杯结构参数见表1。测量⁸³Kr是为了监控⁸⁴Kr、⁸⁶Kr对⁸⁴Sr、⁸⁶Sr的干扰,测量⁸⁵Rb是为了监控⁸⁷Rb对⁸⁷Sr的干扰。在测试样品之前,使用NIST SRM987 200 μ g/L标准溶液对Neptune进行参数优化,包括等离子体部分(炬管位置和载气流速等参数)和离子透镜参数,以达到最大灵敏度。在以后的实际样品测试过程中,只是对炬管位置和载气流速稍作调节即可进行实际样品的测量。仪器的操作条件参数见表2。

表1 Neptune MC-ICP-MS 测锶同位素的法拉第杯结构参数

Table 1 Faraday collector configuration of Neptune MC-ICP-MS for Sr isotopic measurement

法拉第杯	L3	L2	L1	Center	H1	H2
质量数	83	84	85	86	87	88
测量元素	-	Sr	-	Sr	Sr	Sr
天然丰度/%	-	0.56	-	9.86	7.00	82.58
干扰元素	Kr	Kr	Rb	Kr	Rb	-
天然丰度/%	11.5	57.0	72.165	17.3	27.835	-

表2 Neptune 测锶同位素的仪器参数

Table 2 Operating parameters of the Neptune MC-ICP-MS for Sr isotopic measurement

仪器参数	数值及范围
RF 功率	1 299 W
RF 反射功率	3 W
冷却气流速	16.2 L/min
辅助气流速	0.6 L/min
载气流速	1.1 L/min *
X-Position	0.1 mm *
Y-Position	1.5 mm *
Z-Position	1.1 mm *
透镜 Extraction	-1 504.6 V
透镜 Focus	-570.6 V
雾化器	Micromist PFA Nebuliser
进样量	50 μ L/min
仪器质量分辨率	400(Low)
锶的信号灵敏度	30 V/ μ g
信号采集时间	ca. 10 min(9 Blocks \times 10 cycles)
积分时间	4.194 s/cycle

* 每天测试之前稍做调整

液中锶浓度约为 200 μ g/L),使用自由雾化进样方式。样品测量完成后,使用 $w=3\%$ HNO_3 溶液清洗进样系统,然后开始下一个样品的测量。通常,完成一个样品的测量时间为 10 min,两个样品之间洗涤时间为 5 min。由于铷和锶具有较强的记忆效应^[6,7,10],尤其是铷,对于浓度太高的样品,建议适当稀释后再进行测量,否则需要更长的清洗时间。

2 结果与讨论

在每次测量之前,都要扣除质谱在半质量数处的计数(On Peak Zero; OPZ),主要是消除少量的来自矩管和锥的锶积累,然后开始收集数据。数据处理过程如下:首先根据⁸³Kr 的信号强度来计算氩在质量数 84 和 86 的贡献大小,从中扣除,得到真正的⁸⁴Sr 和⁸⁶Sr 的信号强度,然后根据⁸⁵Rb 的信号强度来计算铷在质量数 87 的贡献大小,从中扣除,得到真正的⁸⁷Sr 的信号强度,最后按照指数定律^[12],用⁸⁶Sr/⁸⁸Sr(指原子个数比,下同)为 0.119 4 来进行分馏校正⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 和⁸⁴Sr/⁸⁶Sr。

2.1 国际标样 NIST SRM987 的测试

自 2003 年元月仪器安装调试完毕以来,进行了近两年的 NIST SRM987 标准样品的测试工作(表 3,图 1),其中包含 15 天以上在不同的仪器状态下测试得到的结果,最长的时间跨度达半年之久。结果表明:利用 Neptune MC-ICP-MS 对 NIST SRM987 的测定结果与 TIMS 的测定结果在误差范围内完全一致^[9],而且内部精度和长期稳定性可与 TIMS 分析方法相媲美,这表明利用 Neptune MC-ICP-MS 测定锶同位素组成是完全可行的。

化学分离后的样品用 $w=2\%$ HNO_3 溶液引入质谱,使得⁸⁸Sr 的信号强度为 6 V 左右(溶

表 3 两年来 Neptune MC-ICP-MS 测试 NIST SRM987 结果
Table 3 Repeatedly measured NIST SRM 987 by Neptune MC-ICP-MS in last two-years

No.	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$2\sigma_m$	$^{84}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$2\sigma_m$	No.	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$2\sigma_m$	$^{84}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$2\sigma_m$
1	0.710 235	0.000 004	0.056 500	0.000 007	28	0.710 272	0.000 013	0.056 526	0.000 025
2	0.710 240	0.000 004	0.056 477	0.000 006	29	0.710 250	0.000 011	0.056 509	0.000 024
3	0.710 232	0.000 004	0.056 494	0.000 008	30	0.710 234	0.000 013	0.056 474	0.000 036
4	0.710 242	0.000 004	0.056 481	0.000 005	31	0.710 249	0.000 015	0.056 365	0.000 035
5	0.710 237	0.000 005	0.056 491	0.000 006	32	0.710 265	0.000 015	0.056 589	0.000 047
6	0.710 235	0.000 005	0.056 479	0.000 006	33	0.710 257	0.000 018	0.056 475	0.000 045
7	0.710 239	0.000 004	0.056 487	0.000 007	34	0.710 249	0.000 017	0.056 565	0.000 040
8	0.710 234	0.000 004	0.056 506	0.000 008	35	0.710 238	0.000 016	0.056 573	0.000 040
9	0.710 236	0.000 004	0.056 479	0.000 006	36	0.710 249	0.000 013	0.056 373	0.000 041
10	0.710 271	0.000 005	0.056 448	0.000 008	37	0.710 242	0.000 016	0.056 500	0.000 040
11	0.710 258	0.000 005	0.056 436	0.000 009	38	0.710 256	0.000 015	0.056 516	0.000 042
12	0.710 252	0.000 004	0.056 471	0.000 008	39	0.710 267	0.000 018	0.056 461	0.000 043
13	0.710 254	0.000 005	0.056 490	0.000 008	40	0.710 272	0.000 016	0.056 545	0.000 041
14	0.710 277	0.000 019	0.056 479	0.000 030	41	0.710 283	0.000 018	0.056 500	0.000 036
15	0.710 272	0.000 014	0.056 482	0.000 028	42	0.710 291	0.000 019	0.056 540	0.000 043
16	0.710 275	0.000 016	0.056 407	0.000 041	43	0.710 285	0.000 018	0.056 472	0.000 045
17	0.710 278	0.000 016	0.056 420	0.000 045	44	0.710 288	0.000 021	0.056 564	0.000 044
18	0.710 218	0.000 019	0.056 469	0.000 033	45	0.710 259	0.000 015	0.056 491	0.000 047
19	0.710 243	0.000 013	0.056 377	0.000 025	46	0.710 275	0.000 012	0.056 487	0.000 033
20	0.710 251	0.000 018	0.056 482	0.000 042	47	0.710 258	0.000 017	0.056 446	0.000 047
21	0.710 231	0.000 017	0.056 572	0.000 051	48	0.710 218	0.000 016	0.056 500	0.000 047
22	0.710 259	0.000 011	0.056 544	0.000 029	49	0.710 227	0.000 018	0.056 470	0.000 036
23	0.710 275	0.000 013	0.056 424	0.000 025	50	0.710 234	0.000 013	0.056 591	0.000 032
24	0.710 282	0.000 011	0.056 471	0.000 031	51	0.710 296	0.000 013	0.056 461	0.000 039
25	0.710 288	0.000 014	0.056 461	0.000 024	52	0.710 228	0.000 015	0.056 465	0.000 035
26	0.710 263	0.000 011	0.056 429	0.000 026	53	0.710 244	0.000 014	0.056 422	0.000 032
27	0.710 229	0.000 014	0.056 518	0.000 026	54	0.710 279	0.000 013	0.056 418	0.000 039

2.2 氦的干扰

由于等离子体载气——氦气中不可避免地含有氙,通常把仪器调试到最佳状态后,在不进样品的状态下,来监控不同批次氦气中氙的情况, ^{84}Kr 的信号强度通常为3~10 mV(^{83}Kr 为1~2 mV),极个别情况下会达到15 mV;然后引入 $w=2\%$ HNO_3 溶液,则 ^{84}Kr 的信号强度迅速下降,通常小于0.1 mV(^{83}Kr 小于0.02 mV),这是由于氙、氙和氧形成多原子的缘故。由于氙影响质量数84和86锶的测定,不扣除氙的干扰,

则 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 会出现0.003%~0.01%偏差。因此,统一使用了氙的天然同位素比值: $^{83}\text{Kr}/^{84}\text{Kr}$ 为0.201 75, $^{83}\text{Kr}/^{86}\text{Kr}$ 为0.664 74来进行氙的干扰扣除。近两年来测试 NIST SRM987 的结果($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 、 $^{84}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)也证明了该扣除方法是可行的、正确的(图1)。同时,如果在实际样品测量中 ^{83}Kr 的信号超过5 mV(进样状态),那么 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值明显偏低, $^{84}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值明显偏高,建议终止测量,更换氦气。

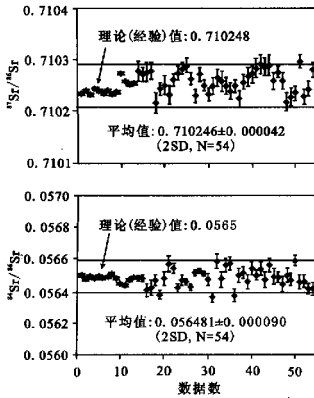


图1 两年来 Neptune MC-ICP-MS 测试 NIST SRM987 的结果变化图

Fig. 1 Variation in analytical results for NIST SRM987 by Neptune MC-ICP-MS in last two-years

(前 13 个数据采用 16 s 积分时间, 其他则采用 4.194 s 积分时间.)

2.3 铷的干扰

由于 NIST SRM987 标准溶液是不含铷的纯铯溶液, 而实际地质样品经过离子交换柱后, 铯的溶液中不可避免会含有少量的铷, 通常

Rb/Sr ≤ 0.0001 , 尤其对高铷低铯的样品, 可能还会有更多铷的残留。对于 TIMS 测量铯而言, 由于铷铯完全不同的电离温度, 因此可以很容易在测量铯之前, 把少量的铷先烧掉, 然后再进行铯的测量, 而在 MC-ICP-MS 测量铯时, 由于等离子体高温高效的特点, 铷铯同时离子化, 不得不考虑其他方法扣除铷的干扰。为此进行了模拟条件试验, 通过往 NIST SRM987 标准溶液中加入一定比例的铷来检验仪器扣除干扰能力, 不同 Rb/Sr 比例的干扰溶液见表 4。数据处理方法: 认为铷和铯的分馏行为一致, 采用 $^{85}\text{Rb}/^{87}\text{Rb} = 2.5926$ 天然的比值, 通过测量 ^{85}Rb 来扣除 ^{87}Rb 对 ^{87}Sr 的干扰^[3]。从表 4 和图 2 的结果可以看出, 随着溶液中铷的质量浓度 (ρ) 增加, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 精度逐渐变差, 但是只要 Rb/Sr 小于 0.01, 则完全可以扣除铷的干扰。

2.4 实际地质样品测量

化学分离好的实际地质样品分别由 Neptune MC-IC-MS 和 TIMS 进行平行测量, 数据处理方法和前述标准溶液完全相同。结果表明: Neptune MC-ICP-MS 测试结果和 TIMS 测试结果的相对偏差均小于 0.01%, 这样的精度对于铯同位素年代学和一般的铯同位素示踪是完全可以适用的。这说明 Neptune MC-ICP-MS 对于实际地质样品的测量是可靠的(表 5, 图 3)。

表 4 加入不同 Rb 的 NIST SRM987 的测试结果

Table 4 Results of NIST SRM987 with addition of variable rubidium content

序号	$\rho(\text{Rb})/(\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{Sr})/(\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	Rb/Sr	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(\text{MC-ICP-MS})$	$2\sigma_m$
0	0	200	0	0.710 242	0.000 016
1	~0.04	200	~0.000 2	0.710 256	0.000 015
2	~0.1	200	~0.000 5	0.710 267	0.000 018
3	~0.2	200	~0.001	0.710 272	0.000 016
4	~0.4	200	~0.002	0.710 283	0.000 018
5	~0.8	200	~0.004	0.710 291	0.000 019
6	~1.2	200	~0.006	0.710 285	0.000 018
7	~1.6	200	~0.008	0.710 288	0.000 021
8	~2	200	~0.01	0.710 259	0.000 015
9	~4	200	~0.02	0.710 313	0.000 019
10	~8	200	~0.04	0.710 402	0.000 017
11	~12	200	~0.06	0.710 483	0.000 020
12	~16	200	~0.08	0.710 572	0.000 018

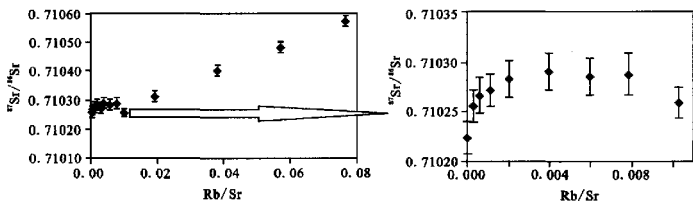


图 2 加入不同 Rb 的 NIST SRM987 的测试结果图

Fig. 2 Results of NIST SRM987 with addition of variable Rubidium content

表 5 实际地质样品锶同位素的 Neptune MC-ICP-MS 和 TIMS 平行测定结果

Table 5 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ isotope ratios in geological samples measured by Neptune MC-ICP-MS and TIMS respectively

序号	样品	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (MC-ICP-MS)	$2\sigma_m$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}^*$ (TIMS)	$2\sigma_m$	RSD/%
1	BCR-1	0.705 021	0.000 010	0.705 011	0.000 009	0.001 4
2	FW0034	0.706 885	0.000 013	0.706 869	0.000 011	0.002 3
3	FW0043	0.707 139	0.000 012	0.707 149	0.000 011	-0.001 4
4	FW0043R	0.707 126	0.000 009	—	—	-0.003 3
5	FW0044	0.707 692	0.000 014	0.707 686	0.000 011	0.000 8
7	FW0044R	0.707 687	0.000 012	—	—	0.000 1
8	FW0047	0.713 032	0.000 010	0.712 965	0.000 012	0.009 4
9	FW0047R	0.713 018	0.000 012	0.712 978	0.000 009	0.005 6
10	FW0052	0.708 534	0.000 010	0.708 504	0.000 010	0.004 2
11	FW0066	0.754 422	0.000 012	0.754 457	0.000 010	-0.004 6
12	FW0084	0.706 385	0.000 012	0.706 443	0.000 014	-0.008 2
13	FW0084R	0.706 374	0.000 013	—	—	-0.009 0
14	FW0088	0.708 729	0.000 010	0.708 695	0.000 014	0.004 8
15	FW0091	0.706 809	0.000 008	0.706 759	0.000 014	0.007 1
16	FW0096	0.704 614	0.000 010	0.704 601	0.000 011	0.001 8
17	FW0096R	0.704 608	0.000 012	—	—	0.001 0
18	FW00104	0.709 905	0.000 011	0.709 872	0.000 014	0.004 6
19	yz02-2	0.707 772	0.000 012	0.707 772	0.000 013	0.000 0
20	yz02-10	0.706 470	0.000 012	0.706 417	0.000 014	0.007 5

* TIMS 的测量由 MAT 262 完成,应用指数定律 $^{84}\text{Sr}/^{88}\text{Sr}=0.119 4$ 进行质量分馏校正, R 表示重复称样。

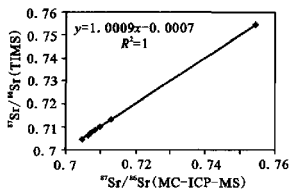


图 3 Neptune MC-ICP-MS 和 TIMS 测定实际地质样品结果对比图

Fig. 3 Comparison of the $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ isotope ratios in geological samples measured by Neptune MC-ICP-MS and TIMS respectively.

3 结论

近两年来 NIST SRM987 的测试结果和 TIMS 的测试结果是一致的, Neptune MC-ICP-MS 可以精确测定锶同位素组成。对于实际地质样品, Neptune MC-ICP-MS 和热电离质谱 (TIMS) 的平行测定结果表明, 与传统的 TIMS 相比, MC-ICP-MS 可以获得与 TIMS 相媲美的数据精度, 而且分析时间缩短, 效率明显提高。对于等离子体载气——氙气中少量氙的干扰, 可以直接扣除, 而对于样品中铷的干扰, 当 Rb/Sr 比值较小时 ($\text{Rb}/\text{Sr} < 0.01$), 同样可以直接扣除, 从而获得准确的锶同位素组成。

致谢: 本工作实际地质样品的化学分离和 TIMS 测量是在中国科学院地质与地球物理研究所固体放射性同位素地球化学实验室完成的, 非常感谢实验室主任陈福坤研究员、超净化学实验室储著银博士、TIMS 技术负责李潮峰硕士和李向辉硕士的有益讨论和热心帮助。

参考文献:

- [1] Halliday AN, Lee DC, Christensen JN, et al. Recent Developments in Inductively Coupled Plasma Magnetic Sector Multiple Collector Mass Spectrometry [J]. *Int J Mass Spectrom Ion Proc*, 1995, 146/147: 21-33.
- [2] Halliday AN, Lee DC, Christensen JN, et al. Applications of Multiple Collector-ICPMS to Cosmochemistry, Geochemistry, and Paleoclimatology [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1998, 62: 919-940.
- [3] Ehrlich S, Gavrieli I, Dor LB, et al. Direct High-Precision Measurement of the $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ Isotope Ratio in Natural Water, Carbonates and Related Materials by Multiple Collector Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (MC-ICP-MS) [J]. *J Anal At Spectrom*, 2001, 16: 1 389-1 392.
- [4] Christensen JN, Halliday AN, Lee DC, et al. In Situ Sr Isotopic Analysis by Laser Ablation [J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1995, 136: 79-85.
- [5] Davidson JP, Tepley III FJ, Palacz Z, et al. Magma Recharge, Contamination and Residence Times Revealed by in Situ Laser Ablation Isotopic Analysis of Feldspar in Volcanic Rocks [J]. *Earth Planet Sci Lett*, 2001, 184: 427-442.
- [6] 韦刚健, 梁细荣, 李献华, 等. (LP) MC-ICPMS 方法精确测定液体和固体样品的 Sr 同位素组成 [J]. *地球化学*, 2002, 31: 295~299.
- [7] Waight T, Baker J, Peate D. Sr Isotope Ratio Measurements by Double-Focusing MC-ICPMS: Techniques, Observations and Pitfalls [J]. *Int J Mass Spectrom*, 2002, 221: 229-244.
- [8] Schmidberger SS, Simonetti A, Francis D. Small-scale Sr Isotope Investigation of Clinopyroxenes from Peridotite Xenoliths by Laser Ablation MC-ICP-MS—Implications for Mantle Metasomatism [J]. *Chem Geol*, 2003, 199: 317-329.
- [9] Bizzarro M, Simonetti A, Stevenson RK, et al. In Situ $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ Sr Investigation of Igneous Apatites and Carbonates Using Laser-Ablation MC-ICP-MS [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 2003, 67: 289-302.
- [10] Ramos FC, Wolff JA, Tollstrup DL. Measuring $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ Sr Variation in Minerals and Groundmass from Basalts Using LA-MC-ICPMS [J]. *Chem Geol*, 2004, 211: 135-158.
- [11] 徐平, 吴福元, 谢烈文, 等. U-Pb 同位素定年标准锆石的 Hf 同位素 [J]. *科学通报*, 2004, 49: 1 403~1 410.
- [12] Russell WA, Papanastassiou DA, Tombrello T A. Ca Isotope Fractionation on the Earth and Other Solar System Materials [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1978, 42: 1 075-1 090.

新书推荐

《电感耦合等离子体质谱技术与应用》

作者: 刘虎生、邵宏翔 价格: 39.00 元 出版社: 化学工业出版社 出版日期: 2005 年 8 月

本书共分 15 章, 介绍了 ICP-MS 的离子源、样品引入系统、质量分析器、干扰及其克服、特殊技术装置及分析方法的建立等基本理论知识; 着重介绍 ICP-MS 在地质、环境、生物与医学、核工业、考古学、超净高纯试剂分析、冶金及贵金属分析领域中的应用。全书引用了国内外参考文献 500 多篇, 在介绍国外研究成果的同时介绍了我国科技工作者的成果。

本书可供从事质谱分析科技人员参考, 也可作为对 ICP-MS 技术感兴趣的潜在工作者的重要的参考书。