

U-Pb 定年锆石标准¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 比值的多接收器电感耦合等离子体质谱测定

祁昌实^{1,2}, 李献华^{1,*}, 梁细荣¹, 刘颖¹, 涂湘林¹

(1. 中国科学院广州地球化学研究所同位素年代学和地球化学重点实验室, 广东 广州 510640;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要:利用 Micromass Isoprobe 型多接收器电感耦合等离子体质谱 (MC-ICP-MS) 测定 U-Pb 定年国际锆石标准 91500、Temora 和本实验室锆石工作标准样 We-1 的¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 比值。对添加 Zr 的室内 Hf 标准溶液 Hf-GIG 的模拟实验表明:Zr/Hf = 120 时,Zr 对 Isoprobe 型 MC-ICP-MS 的 Hf 同位素比值测定值没有明显的影响,所以锆石 Hf 分离纯化流程采用改进的高温高压氢氟酸溶解和其后的一个离子交换分离流程实现,整个流程 Hf 的回收率高于 90%。¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 比值测定采用 JMC-475 Hf 标准溶液 (¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf = 0.282 160) 进行外部校正并监控仪器漂移。标准样 91500、Temora 和 We-1 平均的¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 比值测定结果分别为 (0.282 310 ± 0.000 034)、(0.282 706 ± 0.000 020) 和 (0.281 534 ± 0.000 009)。上述每个结果包括至少 7 组独立的锆石样品的溶解、分离和测定,表明标准样 91500、Temora 和 We-1 是 Hf 同位素组成均一的。本实验结果对于激光熔蚀多接收器电感耦合等离子体质谱 (LA-MC-ICP-MS) 锆石原位¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 比值测定校正方法的检验具有重要意义。

关键词:多接收器电感耦合等离子体质谱 (MC-ICP-MS); 锆石标准; Hf 同位素; 激光熔蚀多接收器电感耦合等离子体质谱 (LA-MC-ICP-MS)

中图分类号:O657.63; P313.3 文献标识码:A 文章编号:1004-2997(2005)03-149-06

High-precision Measurement of Hf Isotopic Reference Values for the U-Pb Geochronology Standard Zircons by Multi-collector Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry

QI Chang-shi^{1,2}, LI Xian-hua^{1,*}, LIANG Xi-rong¹, LIU Ying¹, TU Xiang-lin¹

(1. Key Laboratory of Isotope Geochronology and Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;

2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: The Hf isotope ratios were determined by a Micromass Isoprobe multiple collector-inductively coupled plasma mass spectrometry (MC-ICP-MS) for two international zircon standards 91500 and Temora and one in-house zircon standard We-1. Zircons were

收稿日期:2004-12-28;修回日期:2005-02-26

基金项目:中国科学院广州地球化学研究所知识创新领域前沿项目(GIGCX-03-06)

作者简介:祁昌实(1979~),男(汉族),甘肃榆中人,博士研究生,同位素地球化学专业。E-mail:qics@gig.ac.cn.

*通讯作者:李献华(1961~),男(汉族),浙江人,博士生导师。E-mail:lixh@gig.ac.cn

digested by HF in high-pressure bombs. For the reason that Zr did not change Hf isotopic ratios in the simulative experiment, Hf was separated using a modified one-step ion-exchange chromatography reported by Arnard et al.. The overall recovery of Hf was better than 90%. Calibrated by an external standard solution JMC-475 Hf, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ ratios of these standard zircons were precisely determined. The average $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ values of 91500 and Temora and We-1 were $(0.282\ 310 \pm 0.000\ 034)$, $(0.282\ 706 \pm 0.000\ 020)$ and $(0.281\ 534 \pm 0.000\ 009)$, respectively. Considering that the Hf isotope results above consist of at least seven separated performances of aliquots for each zircon sample, the $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ ratios of 91500, Temora and We-1 were homogeneous. These results have significant implications for testing the calibration method in zircon Hf isotopic determination by laser-ablation multiple collector-inductively coupled plasma-mass spectrometry (LA-MC-ICP-MS).

Key words: multi-collector inductively coupled plasmar mass spectrometry (MC-ICP-MS); zircon standard; Hf isotope; laser-ablation multi-collector ICP-MS

天然核素 ^{176}Lu 通过 α 衰变生成 ^{176}Hf ,相对于 Rb-Sr 和 Sm-Nd 体系, Lu-Hf 体系研究可提供关于岩石成因和壳幔演化新的约束^[1,2]。锆石具有抗风化、富集 Hf (类质同像替代 Zr, 含量 0.5% ~ 2%) 和极低的 Lu/Hf 比值的特点, 具有近似于地质体形成时刻初始 Hf 同位素组成, 结合 U-Pb 地质年代学, 它是一种获取准确 Hf 同位素初始比值, 进而更好地了解大陆地壳增长和演化的理想矿物^[3-5]。激光熔蚀多接收器电感耦合等离子体质谱 (LA-MC-ICP-MS) 能够对锆石进行高空间分辨率的 Hf 同位素比值原位微区测定。该方法采用激光熔蚀取样技术, 具有制样简单、可分辨不同生长区、分析快捷、分析精度高等特点, 目前开始在地质研究中受到重视^[6,7]。

对于锆石中 Hf 同位素的 LA-MC-ICP-MS 微区原位测定, 实现干扰 ^{176}Hf 准确的 ^{176}Yb 和 ^{176}Lu 同质异位素扣除, 得到准确的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = (^{176}\text{Hf} + ^{176}\text{Lu} + ^{176}\text{Yb}) / ^{177}\text{Hf} - ^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} - ^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$ 是至关重要的。这要求同时准确刻画 Hf、Yb 和 Lu 的各同位素在激光熔蚀过程和等离子体中产生的分馏效应影响, 并采用固体标准样品的分析来检验, 而获得固体锆石标准准确的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值是进行该检验的必要前提。

目前, 国际上广泛采用的锆石标准中仅有锆石标准 91500 有详细的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 测定值报道^[4, 6, 8-10]。该锆石标准的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值为 1 062 Ma。然而, 对各种不同年龄、成因及 Hf、

Lu、Yb 等组分特征的锆石进行 Hf 同位素比值的高精度原位分析, 仅采用 91500 进行检验是不够的。本文采用一种改进的 Hf 分离流程对近年广泛应用的显生宙 U-Pb 定年锆石标准 Temora 和本实验室锆石工作标准样 We-1 进行 Hf 分离, 并用多接收器电感耦合等离子体质谱 (MC-ICP-MS) 测定 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值, 同时介绍 91500 的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值测定结果。

1 实验部分

1.1 主要仪器、装置与工作条件

PE Elan 6000 型电感耦合等离子体质谱 (ICP-MS): 美国珀金·埃尔默 (PerkinElmer) 公司产品, RE 功率为 1 000 W, 雾化器氩气流速为 0.83 L/min, 等离子体氩气流速为 15 L/min, 辅助氩气流速为 1.2 L/min, 透镜电压采用自动聚焦, 质谱扫描为跳峰方式; 多接收电感耦合等离子体质谱 (MC-ICP-MS): 英国 Micromass 公司产品, 为单聚焦系统, RE 功率为 1 350 W, 反射功率 < 2 W, 冷却氩气流速为 13.50 L/min, 雾化氩气流速为 0.756 L/min, 碰撞氩气流速为 2.500 mL/min, 透镜聚焦采用自动调节; 一次性 Poly-Prep 塑料管 ($h = 10\text{ cm}$): 美国 Bio-rad 公司产品。

1.2 主要试剂与材料

HF、HNO₃ 和 HCl 均采用市售优级纯试剂经二次亚沸蒸馏纯化制备, 其中 HF 浓度约为 23 mol/L; 离子交换树脂 AG50W-X8 为 H⁺ 形式, 200 ~ 400 目, 美国 Bio-rad 公司产品。

1.3 样品

锆石标准 Temora 采自澳大利亚东南部拉克兰造山带宽谷中部的一个辉长闪长岩中。该锆石已成为 SHRIMP (Secondary Ionization High Resolution Ion Microprobe) U-Pb 定年的标样之一,其²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄为(416.75 ± 0.24) Ma (95 %置信度),具体化学成分特征可参见文献[11]。锆石标准 91500 U-Th-Pb 年龄、Lu-Hf 同位素比值和微量元素结果可参见文献[8]。锆石标准 We-1 为产于内蒙古大厂沟的伟晶岩锆石,该锆石为棕褐色的大颗粒集合体,U、Th、Pb 含量较高,但无明显的非晶化,无残留锆石,其 U-Pb 年龄约 1.9 Ga,正式的 U-Pb 年龄和化学成分数据待发表。

1.4 样品溶解

取上述锆石碎片(厚度 < 1 mm),用稀 HNO₃ 清洗,蒸干。分别称取 8 份标准 91500 (质量为 0.000 4 ~ 0.000 7 g)、7 份标准 Temora (质量为 0.000 1 ~ 0.000 4 g) 和 8 份标准 We-1 (质量为 0.000 2 ~ 0.000 6 g) 于密闭高压溶样器中,加入 0.5 mL HF,在 195 °C 下溶解 48 h 后,蒸干 HF,用 0.5 mL 1 mol/L HCl-0.1 mol/L HF(可实现 Zr/Hf 的充分溶解,又可防止稀土元素 REE 的沉淀)提取剩余物。超声震荡 1 h。约 70 °C 下恒温隔夜。

1.5 REE 与 Hf(Zr) 的分离

采用阳离子交换柱(内径 $D = 0.8$ cm,柱高 $h = 3.7$ cm)分离 REE 和 Hf(Zr)。离子交换树脂为 AG50W-X8,柱管为一次性 Poly-Prep 塑料管。锆石 Hf 分离纯化步骤采用 0.5 mL 1 mol/L HCl-0.1 mol/L HF 上柱,然后用 2 mL 1 mol/L HCl 淋洗 Hf(Zr) 实现。

该流程是在文献[9]的流程基础上改进而来。比较后者,由于 Hf(Zr) 氟络阴离子不以任何形式保留在阳离子柱上,而 REE 在 1 mol/L HCl 淋洗下对阳离子柱有高的分配系数,所以本文实验流程 Hf(Zr) 的淋洗液没有使用 HF 且采用短柱。整个流程的 Hf 回收率 > 90 %,而 Yb 和 Lu 在 ICP-MS 分析中几乎检测不到。

1.6 Zr 对 Hf 同位素比值测定的影响

Goolaerts 等^[9]发现:Zr 的存在(Zr/Hf 800)在双聚焦 Nu 型 MC-ICP-MS 测定中不会改变溶液原始 Hf 同位素组成,只是对精度存在一定的影响(相对于热电离质谱(TIMS)测定)。

为在本实验室的单聚焦 Micromass Isoprobe 型 MC-ICP-MS 上检验溶液中 Zr 对 Hf 同位素比值测定的干扰,将 Hf-GIG 标准溶液与 Zr-GIG 标准溶液进行了不同比例的配制,然后进行 MC-ICP-MS 的¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 比值测定。测定结果示于图 1。

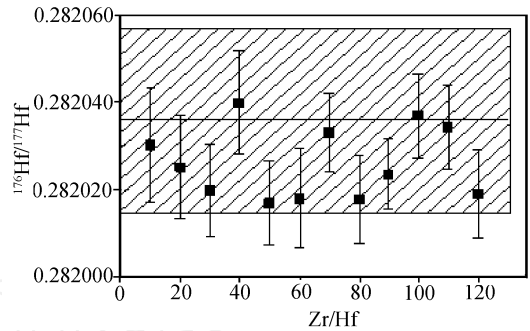


图 1 加 Zr 的 Hf-GIG 溶液直接测定的¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 与 Zr/Hf 比值的关系

Fig. 1 Relationship between ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf and Zr/Hf ratios for Hf-GIG with Zr

注:Zr、Hf 分别取自本实验室同位素分析工作标准溶液 Zr-GIG 和 Hf-GIG, Hf 浓度均为 250×10^{-6} g/L。Hf-GIG 同位素工作标准溶液连续 7 次的¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 比值测定的平均结果为(0.282 036 ± 0.000 021) (2 S.D.); 38 h 内作为监控样间隔测定 18 次平均结果为(0.282 039 ± 0.000 025) (2 S.D.)。

测量结果表明:Zr/Hf = 120 (锆石 Zr/Hf 同位素比值的上限为 100) 时,Zr 的存在对原始溶液的¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 比值和精度基本没有影响。由于锆石 Ti 含量非常低,不存在 MC-ICP-MS 测定过程中 Ti 的基体效应和电障效应(即 Ti 堆积于采样锥孔形成干扰电子盾,影响 Hf 的传输且引起同位素测量系统性的漂移),因此锆石 Hf 同位素 MC-ICP-MS 测定的分离纯化仅需实现 REE 与 Hf(Zr) 的分离即可。

2 结果与讨论

2.1 锆石¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 比值的测定结果

将锆石样品的 Hf(Zr) 溶液蒸干后,采用 2 % HNO₃-0.2 % HF 提取,然后在 MC-ICP-MS 上进行 Hf 同位素比值测定。该仪器采用六极杆碰撞室(Hexapole)消除 Ar 化合物对某些同位素的干扰并进行能量聚焦,配置了 9 个法拉第杯接收器。Hf 分析流程采用静态方式同时测量¹⁷²Yb、¹⁷⁵Lu、¹⁷⁶Hf、¹⁷⁶Lu、¹⁷⁶Yb、¹⁷⁷Hf、

^{178}Hf 、 ^{179}Hf , 具体分析方法见文献[15]。由于在 MC-ICP-MS 测定过程中, 样品溶液中 ^{175}Lu 和 ^{172}Yb 的信号强度与 JMC-475 $\text{Hf } 2.0 \times 10^{-7} \text{ g/mL}$ 标准溶液相似, 甚至更低 ($< 0.0001 \text{ mV}$), 所以测定过程不需要进行 ^{176}Lu 和 ^{176}Yb 对 ^{176}Hf 的同质异位素干扰校正。 $^{160}\text{Gd}^{16}\text{O}$ 在 ^{176}Hf 上的潜在干扰同样也是不存在的, 采用 Russell 等^[12] 指数定律对 Hf 同位素比值测定过程中的质量分馏效应进行校正。

$$(R_i / R_m) = (M_2 / M_1) \quad (1)$$

式(1)中, R_m ——质量数为 M_1 与 M_2 的同位素比值的测量值; R_i ——该同位素比值的真值。取 $(^{179}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i = 0.7325$ 。

MC-ICP-MS 的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值测定过程采用 JMC-475 $\text{Hf } 2.0 \times 10^{-7} \text{ g/mL}$ 标准溶液作为仪器质量分馏监控和外部校正标准溶液, 该标准溶液 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值采用 Nowell 等^[13] 推荐的归一化值 0.282160。标准 91500、Temora 和 We-1 的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 同位素比值分析结果列于表 1。

2.2 讨论

相对于 91500 的大量已有 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值数据而言, 锆石标准样 Temora 的 Hf 同位素值目前仅有 Woodhead 等^[14] 和徐平等^[10] 获得, 而本实验室工作标准样 We-1 的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值是首次采用化学分离后的 MC-ICP-MS 获得的。表 2 列出上述标准样与目前国际上已有数据的对比。

本研究获得的锆石标准 91500 的 Hf 同位素比值与文献报道的数据^[4,6,8~10] 在误差范围内完全吻合。标准 Temora 的测量结果在误差范围内与文献报道的数据亦基本一致。这表明本文锆石 Hf 分离流程是有效的, 完全适用于 Iso-probe 型 MC-ICP-MS 的锆石 Hf 同位素比值分析。标准 We-1 的测量结果表明其 Hf 同位素组成非常均一、测量数据准确可信。

与化学分离的测量结果相比, 早先采用 LA-MC-ICP-MS 直接测定的标准样 91500 和 We-1 的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值不同程度偏低^[15]。其可能的原因有: (1) 早先激光进样时, ^{176}Yb 和 ^{176}Lu 对 ^{176}Hf 的同质异位素干扰是由 ^{172}Yb 及 ^{175}Lu 直接换算成 ^{176}Yb 和 ^{176}Lu 进行校正, 未对 $^{176}\text{Yb}/^{172}\text{Yb}$ 和 $^{176}\text{Lu}/^{175}\text{Lu}$ 比值进行分馏校正^[15]; (2) 采用 LA-MC-ICP-MS 测量锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值时, ^{176}Yb 和 ^{176}Lu 对 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值的影响是通过溶液进样建立其校正方程的, 并未考虑激光干熔蚀物与溶液湿雾化物对 ICP 的电离行为差异; (3) 在校正 ^{176}Yb 和 ^{176}Lu 对 ^{176}Hf 的同质异位素干扰时, $^{176}\text{Yb}/^{172}\text{Yb}$ 比值和 $^{176}\text{Lu}/^{175}\text{Lu}$ 比值的取值会影响 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值^[10], 且其不同的取值对 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值的影响程度会随 Yb/Hf 及 Lu/Hf 比值(或 Yb、Lu 和含量)的不同而导致不同的趋势。其它具体的原因有待进一步研究。

表 1 MC-ICP-MS 测定的锆石标准样 91500/Temora/We-1 的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值

Table 1 Composition of $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ isotopic value of zircon standard 91500, Temora and We-1 by MC-ICP-MS

并行样 Aliquot	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$		
	91500	Temora	We-1
1	0.282 323 $\pm 0.000 007$	0.282 708 $\pm 0.000 006$	0.281540 $\pm 0.000 007$
2	0.282 319 $\pm 0.000 007$	0.282 709 $\pm 0.000 009$	0.281536 $\pm 0.000 006$
3	0.282 331 $\pm 0.000 007$	0.282 696 $\pm 0.000 007$	0.281531 $\pm 0.000 007$
4	0.282 308 $\pm 0.000 007$	0.282 689 $\pm 0.000 007$	0.281531 $\pm 0.000 005$
5	0.282 291 $\pm 0.000 007$	0.282 706 $\pm 0.000 009$	0.281528 $\pm 0.000 008$
6	0.282 323 $\pm 0.000 007$	0.282 718 $\pm 0.000 008$	0.281539 $\pm 0.000 006$
7	0.282 280 $\pm 0.000 006$	0.282 713 $\pm 0.000 008$	0.281533 $\pm 0.000 007$
8	0.282 307 $\pm 0.000 009$		0.281536 $\pm 0.000 008$
平均值	0.282 310 $\pm 0.000 034(2. S. D.)$	0.282 706 $\pm 0.000 020(2. S. D.)$	0.281 534 $\pm 0.000 009(2. S. D.)$

表 2 锆石标准样 91500/ Temora/ We-1 已报道的¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 值对比
Table 2 Comparison of reported ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf isotopic value of zircon standard 91500, Temora and We-1 measured by ICP-MS

锆石标样 Zircon standard	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf 值 ¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf value	并行分析次数 Number of aliquots	方法 Method	JMC-475 ¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf	参考文献 Reference
91500	0.282 310 ±0.000 034	8	MC-ICP-MS	0.282 160	本文
	0.282 284 ±0.000 006 ^a	4	TIMS	0.282 142	[8]
	0.282 320 ±0.000 028	5	MC-ICP-MS	0.282 162	[4]
	0.282 297 ±0.000 044	60	LA-MC-ICP-MS	0.282 161	[6]
	0.282 302 ±0.000 008	4	MC-ICP-MS	0.282 160	[9]
	0.282 285 ±0.000 010 ^a	13	LA-MC-ICP-MS	0.282 167	[15]
Temora	0.282 321 ±0.000 024	65	LA-MC-ICP-MS	0.282 160	[10]
	0.282 706 ±0.000 020	7	MC-ICP-MS	0.282 160	本文
	0.282 686 ±0.000 007	3	MC-ICP-MS	0.282 160	[14]
	0.282 680 ±0.000 024	83	LA-MC-ICP-MS	0.282 160	[14]
We-1	0.282 684 ±0.000 014	24	LA-MC-ICP-MS	0.282 160	[10]
	0.281 534 ±0.000 009	8	MC-ICP-MS	0.282 160	本文
	0.281 453 ±0.000 020 ^a	12	LA-MC-ICP-MS	0.282 167	[15]

注:除 a 代表 2 S. E. 外,所有报道偏差均为 2 S. D.。

3 小 结

模拟实验表明:Zr/ Hf 120 时,Zr 对 Iso-probe 型 MC-ICP-MS Hf 同位素比值测定值没有明显的影响;采用改进的分离纯化流程获得的标准样 91500 和 Temora 的¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 值与文献报道的结果吻合,We-1 的¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 比值准确可信,可以作为 LA-MC-ICP-MS 微区原位 Hf 同位素分析方法的一个新的外部校正及监控标准样;从 Hf 同位素组成来看,锆石标准 Temora 较 91500 标样具有更高的¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 比值,而标准 We-1 的¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 比值最低,因此它们更适合作为与该值相近且相似 Yb 和 Lu 含量锆石的精确的微区原位分析检测标样。这两个新的锆石标样的¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 值的获得对于锆石微区原位 LA-MC-ICP-MS 分析具有重要意义。

参考文献:

- [1] Stevenson RK, Patchett PJ. Implications for the Continental Crust from Hf Isotope Systematics of Archean Detrital Zircons[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1990,54: 1 683 ~ 1 697.
- [2] Vervoort JD, Blichert-Toft J. Evolution of the Depleted Mantle: Hf Isotope Evidence from Juvenile Rocks Through Time [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1999,63: 533 ~ 556.
- [3] Bodet F, Schoer U. Evolution of the SE-Asian Continent from U-Pb and Hf Isotopes in Single Grains of Zircon and Baddeleyite from Large Rivers [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 2000,64: 2 067 ~ 2 091.
- [4] Amelin Y, Lee D-C, Halliday AN. Early-middle Archaean Crustal Evolution Deduced from Lu-Hf and U-Pb Isotopic Studies of Single Zircons Grains [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 2000,64: 4 205 ~ 4 225.
- [5] Knudsen T-L, Griffin WL, Hartz EH, et al. In-situ Hafnium and Lead Isotope Analyses of Detrital Zircons from the Devonian Sedimentary Basin of NE Greenland: a Record of Repeated Crustal Reworking[J]. *Contrib Mineral Petrol*, 2001,141: 83 ~ 94.
- [6] Griffin WL, Wang X, Jackson SE, et al. Zircon Chemistry and Magma Mixing, SE China: In-situ Analysis of Hf Isotopes, Tonglu and Pingtan Igneous Complexes[J]. *Lithos*, 2002,61:237 ~ 269.
- [7] Griffin WL, Pearson NJ, Belousova E, et al. The Hf Isotope Composition of Cratonic Mantle: LAM-MC-ICP-MS Analysis of Zircon Megacrysts in Kimberlites [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 2000,64:133 ~ 147.

- [8] Wiedenbeck M, Allé P, Corfu F, et al. Three Natural Zircon Standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, Trace Element and REE Analyses[J]. Geostandard Newslett, 1995, 19:1~23.
- [9] Goolaerts A, Mattielli N, Jong J, et al. Hf and Lu Isotopic Reference Values for the Zircon Standard 91500 by MC-ICP-MS[J]. Chem Geol, 2004, 206:1~9.
- [10] 徐平, 吴福元, 谢烈文, 等. U-Pb 同位素定年锆石标准的 Hf 同位素[J]. 科学通报, 2004, 49: 1403~1410.
- [11] Black LP, Kamo SL, Allen CM, et al. Temora 1: a New Zircon Standard for Phanerozoic U-Pb Geochronology[J]. Chem Geol, 2003, 200:155~170.
- [12] Russell WA, Papanastassiou DA, Tombrello T-A. Ca Isotope Fractionation on the Earth and Other Solar System Materials[J]. Geochim Cosmochim Acta, 1978, 42:1075~1090.
- [13] Nowell GM, Kempton PD, Noble SR, et al. High Precision Hf Isotope Measurements of MORB and OIB by Thermal Ionization Mass Spectrometry: Insights into the Depleted Mantle[J]. Chem Geol, 1998, 149: 211~233.
- [14] Woodhead J, Hergt J, Shelley M, et al. Zircon Hf-Isotope Analysis with an Excimer Laser, Depth Profiling, Ablation of Complex Geometries, and Concomitant Age Estimation [J]. Chem Geol, 2004, 209:121~135.
- [15] 李献华, 梁细荣, 韦刚健, 等. 锆石 Hf 同位素组成的 LAM-MC-ICP-MS 精确测定[J]. 地球化学, 2003, 32:86~90.

中国科技核心期刊

CODEN: YACEDJ

《岩矿测试》

欢迎订阅 欢迎投稿 承接广告

ISSN 0254-5357

CN 11-2131/ TD

《岩矿测试》杂志是中国地质学会岩矿测试专业委员会和国家地质实验测试中心共同主办的分析测试技术科技期刊。国际标准刊号:ISSN 0254-5357;国际刊名代码 CODEN: YACEDJ;国内统一刊号 CN11-2131/ TD。

《岩矿测试》的宗旨是突出服务于地球科学和地质找矿事业以及促进岩矿测试技术的发展;根据国家地质工作的重点由单一资源向资源环境并重的转变,《岩矿测试》的内容有所拓宽,主要报道国内与分析科学、资源环境、地球科学相关的新技术、新方法、新理论和新设备等研究成果、动态、评述及相关实践经验。

《岩矿测试》1982年创刊。近年来刊物地位不断提高,是中国科技核心期刊,中国期刊方阵双效期刊。目前被国内外多家检索数据库、文摘收录。曾先后被评为国家、原地矿部、北京市、中国科协的优秀科技刊物。适合于地质、冶金、环保、石油、化工、煤炭等部门从事分析测试的科技工作者及大专院校分析化学、环境资源、地球科学等相关专业的师生阅读。

《岩矿测试》为国内外公开发行人物。国内邮发代号 2-313,国际书店发行代号 Q4089,广告经营许可证:京西工商广字第 0227 号。本刊 2006 年仍为季刊,定价 10.00 元/本,全年 40.00 元。漏订的读者可与编辑部直接联系。

《岩矿测试》编辑部地址:北京阜外百万庄大街 26 号 国家地质实验测试中心

邮政编码:100037 电话:010-68999562 传真:010-68999563

E-mail: ykcs_zazhi@163.com