

# 锆石 Hf 同位素组成的 LA-MC-ICP-MS 测定

耿建珍, 李怀坤, 张 健, 周红英, 李惠民

GENG Jian-zhen, LI Huai-kun, ZHANG Jian, ZHOU Hong-ying, LI Hui-min

中国地质调查局天津地质矿产研究所, 天津 300170

Tianjin Institute of Geology and Mineral Resources, Tianjin 300170, China

**摘要:**利用多接收器等离子体质谱仪(MC-ICPMS)和 193nm 准分子激光器联用技术,对 GJ-1、Temora、91500 和 Mud Tank 四个标准锆石的 Hf 同位素组成进行测试,并通过指数方法进行同质异位素干扰校正,测得它们的  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  比值分别为  $0.282006 \pm 24$  ( $n=159$ , 2SD)、 $0.282684 \pm 46$  ( $n=20$ , 2SD)、 $0.282305 \pm 32$  ( $n=20$ , 2SD) 和  $0.282509 \pm 25$  ( $n=48$ , 2SD)。测定结果与文献报道的值在误差范围内一致。

**关键词:**LA-MC-ICP-MS; 标准锆石; Hf 同位素

中图分类号: P597+.3 文献标志码: A 文章编号: 1671-2552(2011)10-1508-06

**Geng J Z, Li H K, Zhang J, Zhou H Y, Li H M. Zircon Hf isotope analysis by means of LA-MC-ICP-MS. *Geological Bulletin of China*, 2011, 30(10):1508-1513**

**Abstract:** Hf isotopic compositions of four standard zircons, i.e., GJ-1, Temora, 91500 and Mud Tank, were analyzed using MC-ICPMS (Neptune) coupled with excimer laser ablation system (New Wave 193nm FX). The  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  ratios obtained are  $0.282006 \pm 24$  ( $n=159$ , 2SD) for GJ-1,  $0.282684 \pm 46$  ( $n=20$ , 2SD) for Temora,  $0.282305 \pm 32$  ( $n=20$ , 2SD) for 91500, and  $0.282509 \pm 25$  ( $n=48$ , 2SD) for Mud Tank respectively. The results are in excellent agreement with the previously reported data.

**Key words:** LA-MC-ICP-MS; standard zircon; Hf isotope

随着激光剥蚀取样技术的发展,其与电感耦合等离子体质谱仪(ICPMS)联用进行原位微区元素和同位素分析已被广泛应用于地球科学研究中。锆石由于稳定性强,抵抗后期地质作用(变质作用、风化作用、蚀变作用等)改造的能力强,具有适中的 U、Th、Pb 含量和低的普通 Pb 含量,而被作为 U-Th-Pb 同位素体系定年的主要测定矿物。大多数锆石具有高的 Hf 含量(0.5%~2%)和低的 Lu/Hf 比值( $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  比值通常小于 0.002),因此锆石也成为 Lu-Hf 同位素体系测定的理想矿物<sup>[1-3]</sup>,为探讨壳-幔分异和岩浆演化过程提供重要的 Lu-Hf 同位素地球化学信息。

本文报道利用天津地质矿产研究所同位素实验

室的多接收器电感耦合等离子体质谱仪(NEP-TUNE)与氟化氙准分子激光器(NEW WAVE 193nm FX)联用,对目前国际上经常使用的 4 种标准锆石 GJ-1、91500、Mud Tank 和 Temora 进行 Lu-Hf 同位素分析测试的结果。

## 1 仪器介绍

本实验中所使用的多接收器电感耦合等离子体质谱仪为美国 Thermo Fisher 公司生产的 NEP-TUNE,其离子光学通路采用能量聚焦和质量聚焦的双聚焦设计,并采用动态变焦(Zoom)将质量色散扩大至 17%。仪器配有 9 个法拉第杯接收器和 4 个离子计数器接收器,除了中心杯和离子计数器外,

收稿日期:2011-01-11;修订日期:2011-06-16

资助项目:中国地质调查局项目《铪同位素测定标准物质的研制》(编号:1212010916068)

作者简介:耿建珍(1982-),男,工程师,同位素地球化学专业。E-mail:mumu1270@163.com

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,4 个离子计数器捆绑在 L4 法拉第杯上。激光器为美国 ESI 公司生产的 NEW WAVE 193nm FX ArF 准分子激光器,波长 193nm,脉冲宽度小于 4ns,束斑直径为 2、10、20、35、50、75、100 和 150( $\mu\text{m}$ )可调,脉冲频率为 1~200Hz 连续可调,激光输出功率为 15 J/cm<sup>2</sup>。

## 2 实验方法

溶液进样方式,采用 200 $\times 10^{-9}$  标准溶液,蠕动泵将溶液以 50 $\mu\text{L}/\text{min}$  流速送入雾化器,9 个法拉第杯同时接收 <sup>172</sup>Yb、<sup>173</sup>Yb、<sup>175</sup>Lu、<sup>176</sup>(Yb+Hf+Lu)、<sup>177</sup>Hf、<sup>178</sup>Hf、<sup>179</sup>Hf、<sup>180</sup>Hf 和 <sup>182</sup>W。数据采集过程运用 NEPTUNE(MC-ICPMS)的虚拟放大器技术,分析器采集完一组数据后,软件自动依次更换其后的放大器电路,采集 9 组数据后,各放大器电路与原分析器恢复一致。该技术可有效地消除各法拉第杯接收器的增益不同所造成的同位素比值误差,提高同位素比值测定的精度。

激光剥蚀测试首先对待测锆石制靶、抛光和照相。将锆石样品排列在载玻片的双面胶上,放上 PVC 环,然后将环氧树脂和固化剂进行充分混合后注入 PVC 环,待树脂充分固化后将样品座从载玻片上剥离,并对其进行抛光,然后对靶上样品照阴极发光、反射光和透射光照片。根据这 3 种照片选择锆石的合适区域,利用 193nm FX 激光器对锆石进

行剥蚀,激光剥蚀的斑束直径一般为 35、50 或者 75 ( $\mu\text{m}$ ),能量密度为 10~11 J/cm<sup>2</sup>,频率为 8~10Hz,激光剥蚀物质以高纯 He 为载气送入 Neptune(MC-ICPMS),接收器配置与溶液进样方式相同。测试采用的接收器配置及相关仪器参数见表 1。

<sup>176</sup>Hf/<sup>177</sup>Hf 比值采用 <sup>179</sup>Hf/<sup>177</sup>Hf=0.7325<sup>[4]</sup> 进行指数归一化校正(即认为 2 对同位素之间的质量歧视分馏效应符合指数法则)。<sup>176</sup>Hf 同质异位素的干扰校正:<sup>176</sup>Hf 有 2 个同质异位素 <sup>176</sup>Lu 和 <sup>176</sup>Yb,通过对 <sup>175</sup>Lu 和 <sup>172</sup>Yb 的测定对 <sup>176</sup>Lu 和 <sup>176</sup>Yb 进行同质异位素的干扰校正。校正公式如下<sup>[5]</sup>:

$$^{176}\text{Hf} = ^{176}\text{Hf}_m -$$

$$\left[ ^{175}\text{Lu}_m \times \left( \frac{^{176}\text{Lu}}{^{175}\text{Lu}} \right)_m \left( \frac{M_{176}}{M_{175}} \right)^{\beta(\text{Lu})} + ^{172}\text{Yb}_m \times \left( \frac{^{176}\text{Yb}}{^{172}\text{Yb}} \right)_m \left( \frac{M_{176}}{M_{172}} \right)^{\beta(\text{Yb})} \right]$$

$$\beta = \ln \left( \frac{R_m}{R_t} \right) / \ln \left( \frac{M_A}{M_B} \right)$$

式中,<sup>176</sup>Hf<sub>m</sub> 为包含 <sup>176</sup>Hf、<sup>176</sup>Lu 和 <sup>176</sup>Yb 3 个同质异位素的测量值, $\beta$  为质量歧视校正系数, $R_m$  为测量比值, $R_t$  为理论比值, $M$  为质量数(在计算  $\beta_{\text{Yb}}$  时, $R_m$  为 <sup>172</sup>Yb 与 <sup>173</sup>Yb 的实际测定比值, $R_t$  为 <sup>172</sup>Yb 与 <sup>173</sup>Yb 的理论比值, $M_A$ 、 $M_B$  分别为 <sup>172</sup>Yb 与 <sup>173</sup>Yb 的质量数),<sup>176</sup>Yb/<sup>172</sup>Yb=0.5887<sup>[6]</sup>,<sup>175</sup>Lu/<sup>176</sup>Lu=0.02655<sup>[5]</sup>。采用 <sup>179</sup>Hf/<sup>177</sup>Hf=0.7325 对 Hf 同位素比值进行指数归一化质量歧视校正,采用 <sup>173</sup>Yb/<sup>172</sup>Yb=1.35274<sup>[5]</sup> 对 Yb 同位素比值进行指数归一化质量歧视校正。由于锆石中的 <sup>176</sup>Lu/<sup>177</sup>Hf 比值通常小于 0.002,因此锆石中 <sup>176</sup>Hf 的同质异位素的干扰主要来自 <sup>176</sup>Yb。在锆石激光剥蚀

表 1 锆石 Hf 同位素比值测定的接收器配置及相关仪器参数

Table 1 LA-MC-ICP-MS collector configuration and operating parameters for zircon Hf isotopic analysis

L4	L3	L2	L1	C	H1	H2	H3	H4
172	173	175	176	177	178	179	180	182
Yb	Yb	Lu	(Yb+Hf+Lu)	Hf	Hf	Hf	Hf	W
参 数			溶液进样方式	激光剥蚀进样方式				
冷却气(Ar)			16L/min	16L/min				
辅助气(Ar)			0.75 L/min	0.75 L/min				
载气(Ar)			1.032 L/min	0.892 L/min				
载气(He)				0.86L/min				
RF 功率			1200W	1250W				
积分时间			4.194s	0.131s				
激光能量密度						10~11J/cm <sup>2</sup>		
剥蚀斑直径						35、50、75( $\mu\text{m}$ )		
频率						8~10Hz		

注:L4-H4 为 9 个法拉第杯的编号,172~182 为测量时各法拉第杯接收的质量数

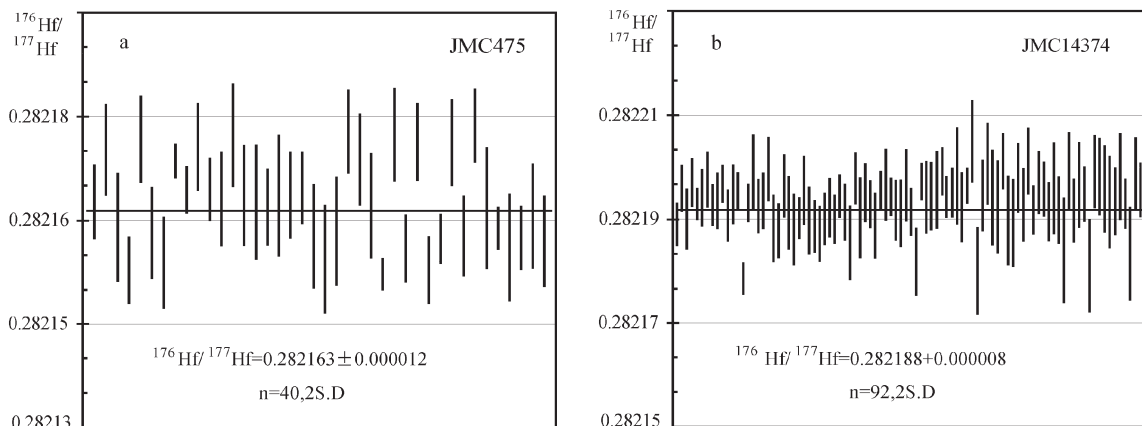


图1 JMC475(a)和JMC14374(b)标准溶液的  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  比值测定结果

Fig. 1  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  ratios of standard solution JMC475(a) and JMC 14374(b)

过程中直接测定 Yb 信号,用剥蚀过程中  $\beta_{\text{Yb}}$  的平均值作为 Yb 的质量歧视校正系数来进行同质异位素  $^{176}\text{Yb}$  的干扰校正<sup>[3,6-7]</sup>。

为检验 MC-ICPMS (NEPTUNE) 仪器的稳定性和分析数据的重现性,笔者采用  $200 \times 10^{-9}$  的 JMC475 和 JMC14374 Hf 同位素标准溶液进行了长期实验测试。JMC475 在 13 个月(2007 年 5 月~2008 年 6 月)内测定结果平均值为  $0.282163 \pm 12$  ( $n=40, 2\text{SD}$ ) (图 1-a), 该测定值与文献报道的值在误差范围内完全一致 [Nowell 等<sup>[8]</sup> ( $0.282155 \pm 6$ )], Wu 等<sup>[9]</sup> ( $0.282158 \pm 16$ )]. JMC14374 在近 11 个月(2009 年 10 月~2010 年 9 月)内测定结果平均值为  $0.282188 \pm 8$  ( $n=92, 2\text{SD}$ ) (图 1-b), 该测定值与文献报道的值在误差范围内一致 [(徐平等<sup>[1]</sup> ( $0.282183 \pm 18$ ), Wu 等<sup>[9]</sup> ( $0.282189 \pm 19$ )]. 溶液进样测试方式的信号采集时间设置得较长,而大多数锆石分析信号稳定持续时间不超过 1min, 因此不适合锆石的激光剥蚀进样。徐平等<sup>[1]</sup>在未使用 Neptune 虚拟放大器的情况下,采用 0.131s 的积分时间对 JMC14374 溶液进行约 0.5min (200 组数据) 的测量, 单次测量的精度明显下降,但是 2 种不同实验方法获得的 Hf 同位素组成极为一致,即所获得数据的准确度基本与积分模式无关。因此,笔者在激光剥蚀测试时采用 0.131s 的积分时间,不使用虚拟放大器。

### 3 标准锆石测试

#### 3.1 GJ-1

该锆石源自澳大利亚 Macquarie 大学大陆地球

化学演化和矿床成因研究中心 (GEMOC), 为一个宝石级等轴状巨晶, 由 TIMS 测得的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄为 600Ma<sup>[9]</sup>, 通过 CL、BSE、EMP 和 MC-ICPMS 对其结构和主量、微量元素进行分析证实, 锆石的组成是均一的<sup>[10]</sup>。笔者分别采用  $35\mu\text{m}$ 、 $50\mu\text{m}$  和  $75\mu\text{m}$  激光剥蚀直径对其进行了测试, 获得的  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  比值分别为  $0.282004 \pm 46$  ( $n=28, 2\text{SD}$ )、 $0.282003 \pm 31$  ( $n=31, 2\text{SD}$ ) 和  $0.282003 \pm 28$  ( $n=23, 2\text{SD}$ )。3 种剥蚀直径获得的比值在误差范围内完全一致, 只是  $35\mu\text{m}$  剥蚀直径获得的单点误差较大 (图 2)。近 12 个月以来, 在  $50\mu\text{m}$  剥蚀直径下 159 次分析结果的平均值为  $0.282006 \pm 24$  ( $2\text{SD}$ ) (图 3), 与文献报道值在误差范围内一致 (Gerdes 等<sup>[11]</sup> 用 LA-MC-ICPMS 法

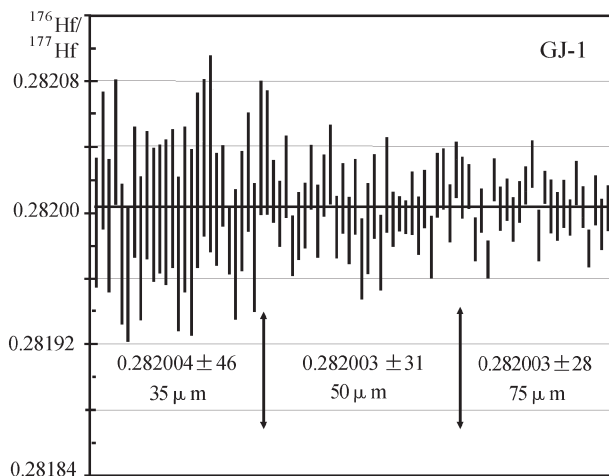


图2 标准锆石 GJ-1 不同剥蚀斑束的  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  测定结果

Fig. 2  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  ratios of standard zircon GJ-1 with different ablation spot sizes

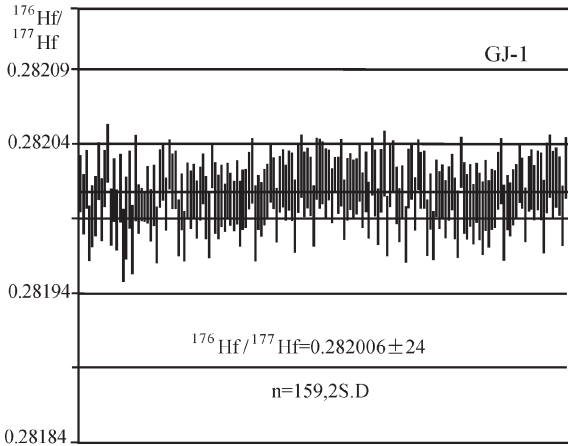


图3 GJ-1 标准锆石的  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  比值测定结果  
Fig. 3  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  ratios of standard zircon GJ-1

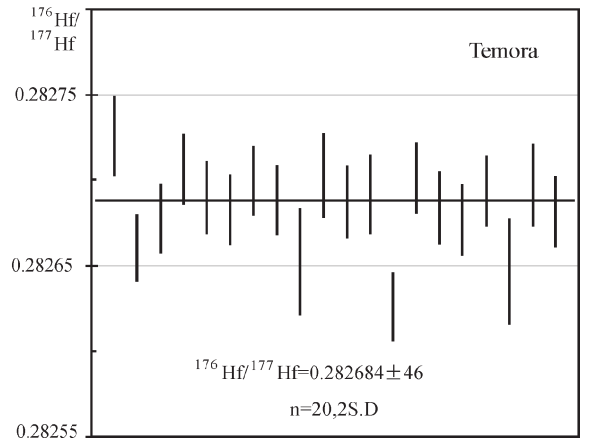


图4 Temora 标准锆石的  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  比值测定结果  
Fig. 4  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  ratios of standard zircon Temora

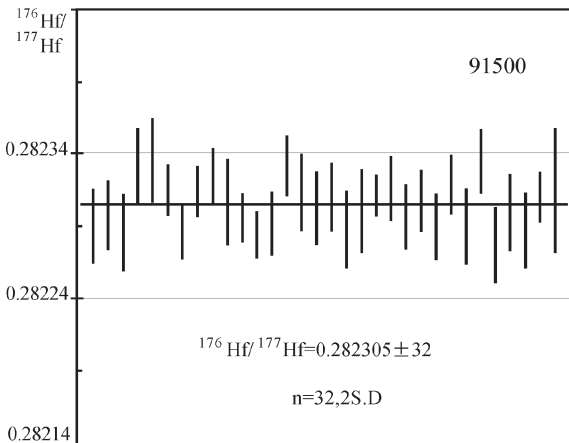


图5 91500 标准锆石的  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  比值测定结果  
Fig. 5  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  ratios of standard zircon 91500

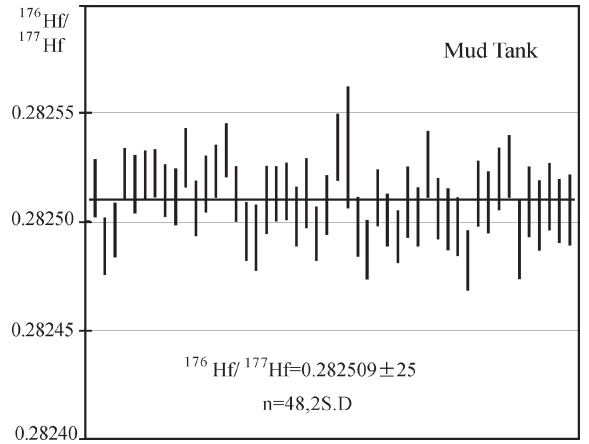


图6 Mud Tank 标准锆石的  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  比值测定结果  
Fig. 6  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  ratios of standard zircon Mud Tank

获得的比值为  $0.282003 \pm 18$ , 用树脂分离 Hf 溶液 MC-ICPMS 法测得值  $0.281998 \pm 7$ ; Elhlou 等<sup>[10]</sup>获得的值为  $0.282015 \pm 19$ <sup>[10]</sup>; 侯可军等<sup>[3]</sup>为  $0.282008 \pm 25$ ; Morel 等<sup>[12]</sup>为  $0.282000 \pm 5$ ; Yuan 等<sup>[13]</sup>为  $0.282013 \pm 4$ 。

### 3.2 Temora

该锆石产于澳大利亚东南拉克兰褶皱带上的 Temora 镇, 是澳大利亚国立大学实验室的标准锆石, 颗粒大小几十到数百微米不等,  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄为  $417\text{Ma}$ <sup>[14]</sup>。采用  $50\mu\text{m}$  剥蚀直径对其进行测量, 获得的  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  比值为  $0.282684 \pm 46$  ( $n=20, 2\text{SD}$ ) (图 4), 与文献报道值在误差范围内一致(徐平等,  $0.282684 \pm 14$ <sup>[11]</sup>; Woodhead 等,  $0.282686 \pm 7$ <sup>[15]</sup>; 祁昌实等,  $0.282706 \pm 20$ <sup>[16]</sup>; Harrison 等,  $0.282684 \pm 36$ <sup>[17]</sup>; Hawkesworth 等,  $0.282687 \pm 24$ <sup>[18]</sup>; Wu 等,  $0.282680 \pm$

$31$ <sup>[9]</sup>; 侯可军等,  $0.282700 \pm 64$ <sup>[3]</sup>; Yuan 等,  $0.282677 \pm 3$ <sup>[13]</sup>)。

### 3.3 91500

该标准锆石是一块保存在哈佛矿物博物馆原重达  $238\text{g}$  的锆石单晶, 样品产自加拿大安大略省的 Renfrew 地区, 其  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄值为  $1062\text{Ma}$ <sup>[19]</sup>。采用  $50\mu\text{m}$  剥蚀直径对其进行了测量, 获得的  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  比值为  $0.282305 \pm 32$  ( $n=32, 2\text{SD}$ ) (图 5), 与文献报道值一致(Machado 等,  $0.282270 \pm 123$ <sup>[20]</sup>; Griffin 等,  $0.282297 \pm 44$ <sup>[21]</sup>; 李献华等,  $0.282285 \pm 10$ <sup>[22]</sup>; 徐平等,  $0.282316 \pm 4$ <sup>[11]</sup>; Goolaerts 等,  $0.282302 \pm 8$ <sup>[23]</sup>; Woodhead 等,  $0.282293 \pm 28$ <sup>[15]</sup>; Iizuka 等,  $0.282321 \pm 46$ <sup>[7]</sup>; Harrison 等,  $0.282315 \pm 28$ <sup>[17]</sup>; Wu 等,  $0.282307 \pm 31$ <sup>[16]</sup>; Hawkesworth 等,  $0.282302 \pm 18$ <sup>[18]</sup>; Yuan 等,  $0.282309 \pm 4$ <sup>[13]</sup>)。

表2 4种标准锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 测定值与文献报道值对比Table 2 Comparison between  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  ratios obtained by the authors and data reported in literatures

锆石名称	本文比值	文献报道值	资料来源	本文推荐值*
GJ-1	0.282006±24 n = 159, 2SD	0.282000±5	[12]	0.282008±12 n = 6, 2SD
		0.282013±4	[13]	
		0.282008±25	[3]	
		0.282003±18	[11]	
		0.282015±19	[10]	
Temora	0.282684±46 n = 20, 2SD	0.282677±3	[13]	0.282688±19 n = 9, 2SD
		0.282686±7	[15]	
		0.282680±31	[6]	
		0.282687±24	[18]	
		0.282684±36	[17]	
		0.282706±20	[16]	
		0.282700±64	[3]	
91500	0.282305±32 n = 32, 2SD	0.282684±14	[1]	0.282302±28 n = 12, 2SD
		0.282309±4	[13]	
		0.282302±18	[18]	
		0.282307±31	[6]	
		0.282315±28	[17]	
		0.282321±46	[7]	
		0.282293±28	[15]	
		0.282302±8	[23]	
		0.282316±4	[1]	
0.282285±10	[22]			
Mud Tank	0.282297±44 n = 48, 2SD	0.282270±123	[20]	0.282509±25 n = 5, 2SD
		0.282506±4	[13]	
		0.282523±43	[26]	
		0.282497±18	[18]	
		0.282504±44	[25]	

注: \*本文推荐值为本文比值与文献报道值的平均值, 不确定度为 2SD 误差

### 3.4 Mud Tank

该标准锆石产自澳大利亚艾丽斯普林斯市东北 85km 的碳酸岩, 由 ID-TIMS 测得的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄值为 732Ma Black<sup>[24]</sup>。采用 50 $\mu\text{m}$  剥蚀直径对其

进行了测量, 获得的  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  比值为 0.282509±25 (n=48, 2 SD)(图 6), 与文献报道值一致(Woodhead 等, 0.282504±44<sup>[25]</sup>; Griffin 等, 0.282523±43<sup>[26]</sup>; Yuan 等, 0.282506±4<sup>[13]</sup>)。



## 4 结 论

利用天津地质矿产研究所同位素实验室的多接收器电感耦合等离子体质谱仪(NEPTUNE)MC-ICPMS 和氟化氙准分子激光器(NEW WAVE 193nm FX),对 GJ-1、Temora、91500 和 Mud Tank 4 个标准锆石的 Hf 同位素进行了系统的测定实验,采用剥蚀过程中  $\beta_{\text{vb}}$  的平均值来进行同位素的干扰校正。测得 4 个标准锆石的  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  比值分别为  $0.282006 \pm 24$  ( $n=159, 2\text{SD}$ )、 $0.282684 \pm 46$  ( $n=20, 2\text{SD}$ )、 $0.282305 \pm 32$  ( $n=20, 2\text{SD}$ ) 和  $0.282509 \pm 25$  ( $n=48, 2\text{SD}$ ),测定结果与文献报道值(表 2)在误差范围内完全一致。结合前人的测试结果,本文提出了 4 种标准锆石的 Hf 同位素组成推荐值(表 2)。

## 参考文献

- [1]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, 49:1403-1410.
- [2]吴福元,李献华,郑永飞,等. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用[J]. 岩石学报,2007, 23(2):185-220.
- [3]侯可军,李延河,邹天人,等. LA-MC-ICPMS 锆石 Hf 同位素的分析方法及地质应用[J]. 岩石学报,2007, 23(10):2595-2604.
- [4]Patchett P J, Tatsumoto M. A Routine High-Precision Method for Lu-Hf Isotope Geochemistry and Chronology[J]. Contrib. Mineral. Petrol., 1980, 75: 263-267.
- [5]Chu N C, Taylor R N, Chavagnac V, et al. Hf isotope ratio analysis using multi-collector inductively coupled plasma mass spectrometry: an evaluation of isobaric interference corrections[J]. J. Anal. At. Spectrom., 2002, 17: 1567-1574.
- [6]Wu F Y, Yang Y H, Xie L W, et al. Hf isotopic compositions of the standard zircons and baddeleyites used in U-Pb geochronology[J]. Chem. Geol., 2006, 234: 105-126.
- [7]Iizuka T, Hirata T. Improvements of precision and accuracy in in-situ Hf isotope microanalysis of zircon using the laser ablation-MC-ICPMS technique[J]. Chem. Geol., 2005, 220: 121-137.
- [8]Nowell G M, Kempton P D, Noble S R, et al. High precision Hf isotope measurements of MORB and OIB by thermal ionisation mass spectrometry: insights into the depleted mantle[J]. Chem. Geol., 1998, 149: 211-233.
- [9]Jackson S E, Pearson N J, Griffin W L, et al. The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry(LA-ICP-MS) to in-situ U-Pb zircon geochronology[J]. Chem. Geol., 2004, 211: 47-69.
- [10]Elhlou S, Belousova E, Griffin W L, et al. Trace element and isotopic composition of GJ-red zircon standard by laser ablation[C]// Goldschmidt Conference Abstracts. England: Elsevier Science, 2006: A158.
- [11]Gerdes A, Zeh A. Combined U-Pb and Hf isotope LA-(MC-) ICP-MS analyses of detrital zircons: Comparison with SHRIMP and new constraints for the provenance and age of an Armorican metasediment in Central Germany[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2006, 249: 47-61.
- [12]Morel M L A, Nebel Y J, Nebel J S, et al. Hafnium isotope characterization of the GJ-1 zircon reference material by solution and laser-ablation MC-ICPMS[J]. Chem. Geol., 2008, 255: 231-235.
- [13]Yuan H L, Gao S, Dai M N, et al. Simultaneous determinations of U-Pb age, Hf isotopes and trace element compositions of zircon by excimer laser-ablation quadrupole and multiple-collector ICP-MS[J]. Chem. Geol., 2008, 247:100-118.
- [14]Black L P, Kamo S L, Allen C M, et al. TEMORA 1: a new zircon standard for Phanerozoic U-Pb geochronology[J]. Chem. Geol., 2003, 200:155-170.
- [15]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.
- [16]祁昌实,李献华,梁细荣,等. U-Pb 定年标准锆石  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  比值的多接收器等离子体质谱测定[J]. 质谱学报,2005, 26:149-154.
- [17]Harrison T M, Blichert T J, Muller W, et al. Heterogeneous Hadean hafnium: evidence of continental crust at 4.4 to 4.5 Ga[J]. Science, 2005, 310: 1947-1950.
- [18]Hawkesworth C, Kemp T. Using hafnium and oxygen isotopes in zircons to unravel the record of crustal evolution[J]. Chem. Geol., 2006, 226: 144-162.
- [19]Wiedenbeck M, Alle P, Corfu F, et al. Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace-element and REE analyses[J]. Geostand NewsL., 1995, 19: 1-23.
- [20]Machado N, Simonetti A. U-Pb dating and Hf isotopic composition of zircon by laser-ablation MC-ICP-MS[C]//Sylvester P. Laser Ablation-ICPMS in the Earth sciences: Principles and applications. Mineralogical Association of Canada, St. John's, Newfoundland, 2001: 121-146.
- [21]Griffin W L, Wang X, Jackson S E, et al. Zircon chemistry and magma genesis, SE China: in-situ analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtan Igneous complexes[J]. Lithos, 2002, 61: 237-269.
- [22]李献华,梁细荣,韦刚健,等. 锆石 Hf 同位素组成的 LA-MC-ICPMS 精确测定[J]. 地球化学,2003, 32:86-90.
- [23]Goolaeerts A, Mattielli N, Jong Jd, et al. Hf and Lu isotopic reference values for zircon standard 91500 by MC-ICP-MS[J]. Chem. Geol., 2004, 206: 1-9.
- [24]Black L P, Gulson B L. The age of the Mud Tank carbonatite, Strangways Range, Northern Territory, BMR[J]. Aust. Geol. Geophys., 1978, 3: 227-232.
- [25]Woodhead J D, Hergt J M. A preliminary appraisal of seven natural zircon reference materials for in-situ Hf-isotope analysis[J]. Geostand. Geoanal. Res., 2005, 29: 183-195.
- [26]Griffin W L, Pearson N J, Belousova E A, et al. Comment: Hf-isotope heterogeneity in zircon 91500[J]. Chem. Geol., 2006, 233: 358-363.