

# 湖南益将稀土-钨矿的石英闪长岩锆石 U-Pb 定年和 Hf 同位素特征: 湘南加里东期岩浆活动的年代学证据

王彦斌<sup>1</sup> 王登红<sup>2</sup> 韩娟<sup>1</sup> 陈郑辉<sup>2</sup> 王清利<sup>1,3</sup>

(1. 中国地质科学院地质研究所北京离子探针中心, 北京 100037; 2. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037; 3. 河南大学环境与规划学院, 河南 开封 475001)

**摘要:** 湖南汝城益将 REE-Sc 矿是中国华南重要的稀有稀土金属矿床类型, 其赋矿岩石石英闪长岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为(424±3) Ma, 代表中志留世的侵位年龄, 为该区存在加里东期岩浆活动提供了同位素年代学的新证据。锆石  $\varepsilon_{\text{Hf}(t)}$  值为-1.9~-7.6, 锆石 Hf 同位素地壳模式年龄 (1.5~1.9 Ga)。  $\varepsilon_{\text{Hf}(t)}$  值主要为负值, 揭示其源区可能主要为陆壳物质或者富集地幔。部分锆石的  $\varepsilon_{\text{Hf}(t)}$  值约为-1.9, 说明在其形成过程中可能有一定比例亏损地幔物质的加入; 源区同位素的不均一, 可能是壳幔相互作用的结果, 即幔源岩浆与古老地壳物质混合的结果。锆石 Hf 同位素数据 displays 古元古代—中元古代(1.5~1.9 Ga)的两阶段模式年龄揭示湘南地区存在至少为古元古代的地壳增生。这些新资料为理解华南地壳演化和区域成矿提供了重要的同位素年代学和地球化学制约。

**关键词:** 石英闪长岩; 稀土-钨矿床; U-Pb 定年; Hf 同位素; 湖南汝城

**中图分类号:** P588.12+2; P597 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2010)04-1062-09

华南大陆是华南地块(华夏地块)与扬子地块在新元古代(约 970 Ma)拼合形成的复合造山带(图 1-a)<sup>[1-9]</sup>, 至少经历了新元古代(晋宁期)、加里东、印支和燕山等多期构造-岩浆热事件和造山作用<sup>[10-13]</sup>。该造山带是世界上为数不多、发育完整的多期次构造-岩浆造山事件的造山带, 分解这一长期演化的复杂历史, 探究每个造山带作用对于完整了解该复式造山带形成和演化是十分必要的。著名的华南加里东造山带以其强烈的褶皱与韧性剪切变形、泥盆纪不整合、花岗岩广泛发育等为标志<sup>[13-17]</sup>, 尤其是加里东期花岗岩涉及华南地壳的增生、演变、矿产和该地质时期的地球动力学模型<sup>[13, 17-19]</sup>近年来受到了国内外众多地质学家的关注。

加里东期花岗岩在华南岩浆岩中占突出地位, 主要分布在诸广山—大瑶山、武夷山—武功山、云开

大山等地。近年来 Faure et al<sup>[13]</sup>研究中国东南早古生代造山带时, 认为该时期蛇绿岩、岩浆弧、俯冲杂岩、高压变质作用的缺乏, 说明它不是一个碰撞带。相反, 韧性拆离、中温中压变质作用和地壳熔融的显著特征, 以及构造变形、变质作用和沉积作用记录显示它是华夏地块向北俯冲控制的陆内造山带。张芳荣等<sup>[19]</sup>也认为华南加里东期花岗岩类主体形成于板内构造环境, 其岩浆峰期年龄为 430~400 Ma, 变形峰期为 420~400 Ma<sup>[9]</sup>。在湘南主要表现为雷公仙、四都、益将等闪长岩的岩浆活动, 特别是 1987 年发现的湖南益将石英闪长岩风化壳型稀土钨矿, 属钨矿床的新类型, 是中国找到的第一个大型钨矿床<sup>[20]</sup>, 该类型的稀土钨矿床作为中国在世界上少有的优势资源, 其战略地位十分重要。而该矿与石英闪长岩岩体的关系密切, 原 1:20 万区调报告益将石英闪长岩体

收稿日期: 2010-05-18; 改回日期: 2010-07-10

基金项目: 中国地质调查局“我国重要矿产和区域成矿规律研究”项目(1212010633903)资助。

作者简介: 王彦斌, 男, 1966 年生, 博士, 研究员, 同位素年代学和地球化学专业; E-mail: yanbinw@cags.ac.cn。

定为印支期;1984 年湖南区调队在诸广山复式岩体课题研究中,通过全岩 Rb-Sr 法、黑云母 K-Ar 法和锆石 U-Pb 法测定获得同位素年龄值分别为 359 Ma、423 Ma 和 418 Ma。这一岩体究竟是形成于印支期、华力西期、还是加里东期一直存在争议。迄今为止,尚缺乏精确的同位素年龄方面的制约,而对其侵位时代的确定将有助于我们对该区地壳演化和成矿作用的认识。

因此,本文对湖南汝城益将稀土钨矿的石英闪长岩中锆石进行 SHRIMP U-Pb 定年及 Hf 同位素分析,获得石英闪长岩岩体的侵位年龄和 Hf 同位素特征资料,这些为理解益将石英闪长岩成岩作用、成矿作用演化过程及动力学背景,以及华南加里东

期地质演化和区域成矿提供重要的同位素年代学和地球化学制约。

### 1 岩体特征

湖南汝城益将石英闪长岩岩体位于南岭诸广山,呈岩株状产出,出露面积约 11 km<sup>2</sup>(图 1-b)。除西北部与泥盆纪跳马涧组呈沉积接触外(矿区外围),与南华纪—奥陶纪地层皆为侵入接触。

益将岩体主要以石英闪长岩为主,岩石主要由斜长石、黑云母、角闪石和辉石等组成,其中斜长石含量 50%~65%(An=48~50),黑云母含量 10%~15%,角闪石含量 8%~15%,辉石含量 1%~15%,石英含量 5%~15%,钾长石 1%~2%,暗色矿物多蚀变为绢云

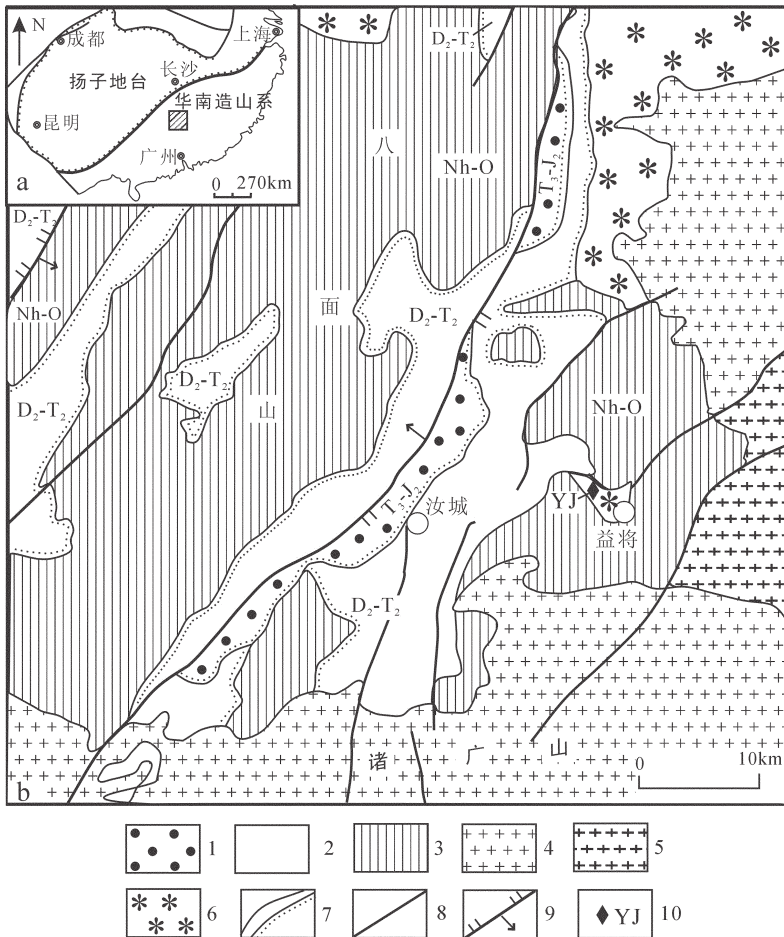


图 1 益将岩体产出的地质简图

- 1—T<sub>3</sub>-J<sub>2</sub> 晚三叠世-中侏罗世地层; 2—D<sub>2</sub>-T<sub>2</sub> 中泥盆世-中三叠世地层; 3—Nh-O 南华纪-奥陶纪地层; 4—侏罗纪花岗岩;
- 5—印支期花岗岩; 6—加里东期花岗岩; 7—地质界线/角度不整合地质界线; 8—断裂; 9—逆断裂; 10—采样位置

Fig.1 Geological map of the Yijiang quartz-dioritic pluton

- 1—T<sub>3</sub>-J<sub>2</sub> Late Trassic-Middle Jurassic; 2—D<sub>2</sub>-T<sub>2</sub> Middle Devonian-Middle Trassic; 3—Nh-O Nanhuaian-Ordovician;
- 4—Jurassic granite; 5—Indosinian granite; 6—Caledonian granite; 7—Geological boundary/unconformity;
- 8—Fault; 9—Thrust fault; 10—Sampling location

母、绿泥石,副矿物为锆石、钛铁矿、磷灰石、独居石和磷铀矿。其化学成分为:SiO<sub>2</sub> 55.22%~59.23%, TiO<sub>2</sub> 1.08%~1.19%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 13.51%~13.76%, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0.66%~0.69%, FeO 4.83%~4.88%, MnO 0.10%~0.11%, MgO 4.65%~4.70%, CaO 4.31%~5.96%, Na<sub>2</sub>O 4.6%~4.89%, K<sub>2</sub>O 0.45%~0.47%, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 0.20~0.22%, H<sub>2</sub>O 3.42%~3.92%, LOI 5.66~6.88%。石英闪长岩高 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、富钠(Na<sub>2</sub>O/ K<sub>2</sub>O>1.0)。岩体的 RE<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量 101×10<sup>-6</sup>~10×10<sup>-6</sup>, Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量 16.8×10<sup>-6</sup>~16.9×10<sup>-6</sup>。益将岩体稀土和 Sc 含量较高,益将稀土矿床主要为风化壳离子吸附型矿床,系李俊武同志(原湖南省地质局四七三队负责人之一)于 1987 年发现,属钽矿床的新类型,是中国找到的第一个大型钽矿床<sup>[20]</sup>。钽的富集与母岩岩性石英闪长岩有密切关系,为了确定益将石英闪长岩体的侵位时代,笔者采集了同位素年龄样品,样品 YJ(位置为:25°34.282 N, 113°54.914 E)为浅灰黑色石英闪长岩,由斜长石、石英、黑云母、角闪石和辉石等组成。

## 2 样品采集和实验手段及方法

### 2.1 锆石 SHRIMP U-Pb 定年方法

益将石英闪长岩岩体的锆石应用 SHRIMP U-Pb 法测定。把锆石从 2.5 kg 的样品中分选出来,在双目镜下挑纯。将待测锆石与数粒锆石标样 TEM 置于环氧树脂中做成样品靶(Mount)。将靶上的锆石磨至约一半,以使锆石内部暴露,用于锆石透射光、反射光和阴极发光(CL)研究以及 SHRIMP U-Pb 分析。CL 图像在北京离子探针中心电镜室完成,其目的是在进行 SHRIMP U-Pb 分析时,参考锆石颗粒剖面的阴极发光图像,对锆石颗粒的不同区域 U、Th、Pb 同位素成分进行分析。

SHRIMP U-Pb 分析在中国地质科学院地质研究所北京离子探针中心的 SHRIMP II 上完成。一次离子源气体为氧气,将其电离后,由 O<sub>2</sub> 打击锆石颗粒,激发出锆、铅、铀、钍的氧化物离子或金属离子。测定 Zr<sub>2</sub>O、<sup>204</sup>Pb 背景值、<sup>206</sup>Pb、<sup>207</sup>Pb、<sup>208</sup>Pb、<sup>238</sup>U、<sup>232</sup>ThO、<sup>238</sup>UO 质量峰的强度,每个峰的积分时间分别为 2.0 s、10.0 s、10.0 s、10.0 s、15.0 s、5.0 s、5.0 s、2.0、2.0 s,每个点的数据是 5 次扫描后的平均值。一次离子流强度约为 4.5 nA,10 kV 的 O<sub>2</sub>,打到锆石上束斑的直径为~25 μm,质量分辨率约 5400(1%峰高)<sup>[21]</sup>。待分析点与标样 TEM 的测点交叉进行分析。应用 RSES 的

锆石 SL13(572 Ma,238 ppm)标定样品的 U、Th、Pb 含量,TEM(417 Ma)进行年龄校正。数据处理采用 Ludwig 的 SQUID1.02 及 ISOPLOT 程序。普通铅根据实测的 <sup>204</sup>Pb 进行校正,加权平均年龄具 95%的置信度。

### 2.2 锆石 Hf 同位素 LA-MC-ICPMS 分析

益将石英闪长岩锆石 Hf 同位素测试分析在中国地质科学院矿产资源研究所 MC-ICPMS 实验室完成,所用仪器为 Neptune 型 MC-ICPMS 和与之配套的 Newwave UP 213 激光剥蚀系统和 TEM。实验过程中采用 He 作为剥蚀物质载气。根据锆石大小,剥蚀直径采用 40 μm。测定时采用锆石 GJ-1 和 TEM 做外标,<sup>176</sup>Hf/<sup>177</sup>Hf 比值分别为 0.282013±19(2σ)<sup>[22]</sup>、0.282680±31(2σ)<sup>[23]</sup>。本次实验测试 GJ-1 的 <sup>176</sup>Hf/<sup>177</sup>Hf 的平均值为 0.282004±0.000032(2σ, n=30)和 0.282672±0.000044(2σ, n=54),分析流程及校正参见侯可军等(2007)<sup>[24]</sup>。

## 3 锆石 U-Pb 定年实验结果

益将石英闪长岩岩体样品 YJ 的锆石主要为浅黄色透明,柱状自形晶,长粒径约 120~250 μm,长宽比大多为 1:2 至 1:4,阴极发光(CL)图像显示出很好的结晶环带,具岩浆结晶锆石的特点,锆石还具薄的边,可能反映锆石的增生(图 2)。对 14 个锆石颗粒进行了 U-Pb 同位素分析(表 1)。这些锆石的 U=

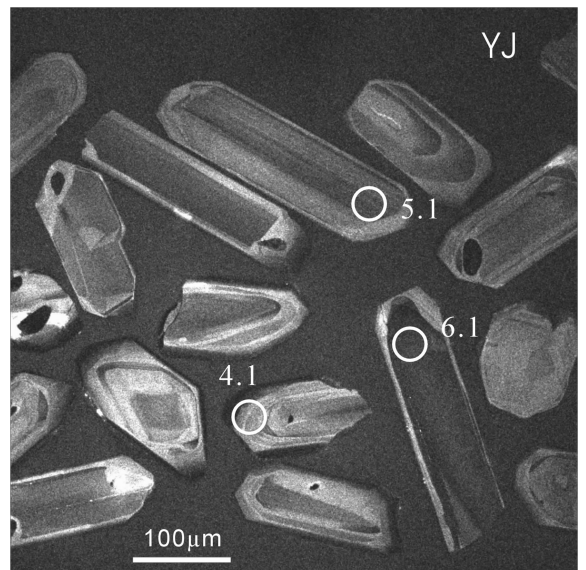


图 2 益将石英闪长岩锆石阴极发光图像  
Fig.2 CL images of zircons from quartz-diorite in Yijiang

表 1 益将石英闪长岩锆石 SHRIMP U-Pb 分析结果  
Table 1 SHRIMP data of zircons from the Yijiang quartz-diorite

点号	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\text{Th}/^{232}\text{Th}$	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}^*/10^{-6}$	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	年龄/Ma	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$	±%	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$	±%	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$	±%	Rho
YJ-1.1	1.92	1.44	0.60	14.6	420	7	935	190	0.0702	9.3	0.651	9.4	0.0673	1.7	0.178	
YJ-2.1	0.56	700	1.03	40.1	413	4	870	140	0.0681	6.5	0.621	6.6	0.0662	1.0	0.154	
YJ-3.1	2.45	301	0.85	21.2	414	7	52	470	0.0471	19.0	0.430	20.0	0.0663	1.7	0.084	
YJ-4.1	0.63	849	1.06	48.3	411	3	528	70	0.0580	3.2	0.526	3.3	0.0658	0.8	0.244	
YJ-5.1	0.85	1117	1.13	65.6	422	3	650	68	0.0613	3.1	0.573	3.2	0.0677	0.7	0.225	
YJ-6.1	0.63	1293	1.04	76.7	428	4	379	83	0.0542	3.7	0.513	3.8	0.0686	1.0	0.259	
YJ-7.1	1.81	469	0.92	28.2	428	5	571	160	0.0591	7.3	0.560	7.3	0.0687	1.1	0.155	
YJ-8.1	2.81	361	0.88	21.6	423	6	281	320	0.0519	14.0	0.486	14.0	0.0678	1.4	0.098	
YJ-9.1	0.63	747	0.97	43.2	417	4	629	98	0.0607	4.6	0.559	4.7	0.0668	1.0	0.205	
YJ-10.1	1.29	597	0.94	35.6	427	4	496	160	0.0571	7.4	0.539	7.5	0.0685	1.0	0.138	
YJ-11.1	1.21	456	0.81	28.0	440	4	430	120	0.0554	5.3	0.540	5.4	0.0706	1.0	0.189	
YJ-12.1	1.10	243	0.62	14.7	436	6	1206	100	0.0804	5.2	0.775	5.4	0.0700	1.5	0.279	
YJ-13.1	0.43	575	0.93	35.0	439	4	645	93	0.0612	4.3	0.594	4.4	0.0705	0.9	0.213	
YJ-14.1	2.23	320	0.70	19.8	439	5	677	180	0.0621	8.4	0.603	8.5	0.0705	1.3	0.148	

注:误差为  $1\sigma$ ;  $\text{Pb}_c$  和  $\text{Pb}^*$  分别表示普通铅和放射成因铅; 标准校正值的误差为 1.03%; 普通铅校正应用  $^{206}\text{Pb}$  实测值, Rho 为误差相关系数。



$243 \times 10^{-6} \sim 1293 \times 10^{-6}$ ,  $Th = 144 \times 10^{-6} \sim 1297 \times 10^{-6}$ ,  $Th/U = 0.60 \sim 1.13$ , 具岩浆锆石的地球化学特征<sup>[28]</sup>。14个锆石颗粒  $^{206}Pb/^{238}U$  年龄范围在 411~440 Ma, 分析点在一致曲线中集中分布,  $^{206}Pb/^{238}U$  年龄加权平均值为  $(424.4 \pm 5.8)$  Ma (MSWD = 5.4, 95%置信度)。除去最小年龄的锆石颗粒 2.1、4.1 分析点, 最大年龄的锆石颗粒分析点 11.1、13.1、14.1,  $^{206}Pb/^{238}U$  加权平均值年龄为  $(424 \pm 3)$  Ma (MSWD = 1.5, 95%置信度)(图 3), 可见二者的年龄一致, 只是 MSWD 值前者较大, 笔者把获得的锆石结晶年龄  $(424 \pm 3)$  Ma 解释为益将石英闪长岩岩体的形成年龄。

### 4 益将石英闪长岩锆石的 Hf 同位素特征

益将石英闪长岩岩体样品 YJ 的 14 粒锆石的  $^{176}Yb/^{177}Hf$  和  $^{176}Lu/^{177}Hf$  比值范围分别为 0.016087~0.056354 和 0.000414~0.001827 (表 2),  $^{176}Lu/^{177}Hf$  比值非常接近或小于 0.002, 表明这些锆石在形成以

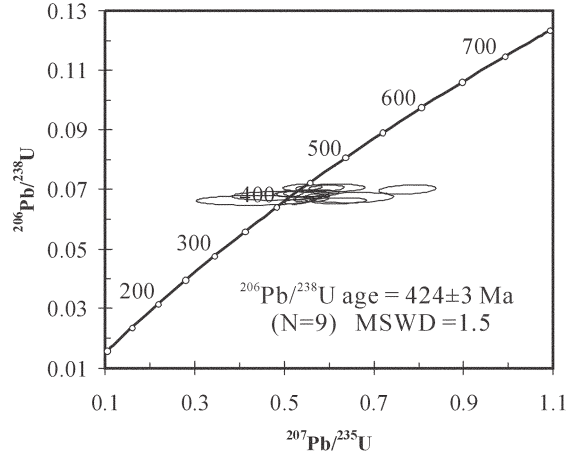


图 3 益将石英闪长岩锆石 U-Pb 一致线曲线  
Fig.3 U-Pb concordia diagrams showing SHRIMP data of quartz-diorite from Yijiang

后, 仅具有较少的放射成因 Hf 的积累, 因而可以用初始  $^{176}Hf/^{177}Hf$  比值代表锆石形成时的  $^{176}Hf/^{177}Hf$  比值<sup>[29]</sup>。这 14 粒锆石的  $\epsilon_{Hf}(t)$  值为  $-1.9 \sim -7.6$ , 变化范

表 2 益将石英闪长岩锆石 Hf 同位素分析结果

Table 2 Zircon Hf isotopic compositions of the Yijiang quartz-diorite

点号	年龄 /Ma	$^{176}Yb/^{177}Hf$	$^{176}Lu/^{177}Hf$	$^{176}Hf/^{177}Hf$	$2s_m$	$(^{176}Hf/^{177}Hf)_t$	$\epsilon_{Hf}(0)$	$\epsilon_{Hf}(t)$	2s	$T_{DM}/Ma$	$T_{DM}^C/Ma$	$f_{Lu/Hf}$
YJ-1.1	424	0.026443	0.000699	0.282338	0.000013	0.282333	-15.3	-6.2	0.5	1280	1803	-0.98
YJ-2.1	424	0.077827	0.001827	0.282341	0.000023	0.282327	-15.2	-6.4	0.8	1315	1816	-0.94
YJ-3.1	424	0.037218	0.000814	0.282408	0.000016	0.282401	-12.9	-3.8	0.6	1187	1650	-0.98
YJ-4.1	424	0.033772	0.000778	0.282368	0.000017	0.282361	-14.3	-5.2	0.6	1242	1739	-0.98
YJ-5.1	424	0.041765	0.000932	0.282387	0.000018	0.282380	-13.6	-4.6	0.6	1220	1698	-0.97
YJ-6.1	424	0.054079	0.001241	0.282380	0.000020	0.282370	-13.9	-4.9	0.7	1240	1720	-0.96
YJ-7.1	424	0.026574	0.000682	0.282415	0.000019	0.282410	-12.6	-3.5	0.7	1172	1630	-0.98
YJ-8.1	424	0.047100	0.001133	0.282463	0.000021	0.282454	-10.9	-1.9	0.7	1119	1531	-0.97
YJ-9.1	424	0.016087	0.000414	0.282389	0.000020	0.282386	-13.5	-4.3	0.7	1200	1683	-0.99
YJ-10.1	424	0.039029	0.000860	0.282343	0.000026	0.282337	-15.2	-6.1	0.9	1278	1794	-0.97
YJ-11.1	424	0.056354	0.001304	0.282404	0.000024	0.282394	-13.0	-4.0	0.8	1207	1666	-0.96
YJ-12.1	424	0.044189	0.001021	0.282457	0.000020	0.282449	-11.1	-2.1	0.7	1125	1543	-0.97
YJ-13.1	424	0.051958	0.001181	0.282403	0.000020	0.282394	-13.0	-4.0	0.7	1205	1666	-0.96
YJ-14.1	424	0.040649	0.001127	0.282302	0.000023	0.282293	-16.6	-7.6	0.8	1345	1891	-0.97

注:  $\epsilon_{Hf}(t) = 10000 \times \{ [(^{176}Hf/^{177}Hf)_S - (^{176}Lu/^{177}Hf)_S \times (e^{\lambda t} - 1)] / [(^{176}Hf/^{177}Hf)_{CHUR,0} - (^{176}Lu/^{177}Hf)_{CHUR,0} \times (e^{\lambda t} - 1)] - 1 \}$ .  $T_{DM} = 1/\lambda \times \ln \{ 1 + [(^{176}Hf/^{177}Hf)_S - (^{176}Hf/^{177}Hf)_{DM}] / [(^{176}Lu/^{177}Hf)_S - (^{176}Lu/^{177}Hf)_{DM}] \}$ .  $T_{DM}^C = T_{DM} - (T_{DM} - t) \times [(f_{CC} - f_S) / (f_{CC} - f_{DM})]$ .  $f_{Lu/Hf} = (^{176}Lu/^{177}Hf)_S / (^{176}Lu/^{177}Hf)_{CHUR} - 1$ . 其中:  $\lambda = 1.867 \times 10^{-11} a^{-1}$ <sup>[25]</sup>;  $(^{176}Lu/^{177}Hf)_S$  和  $(^{176}Hf/^{177}Hf)_S$  为样品测量值;  $(^{176}Lu/^{177}Hf)_{CHUR} = 0.0332$ ,  $(^{176}Hf/^{177}Hf)_{CHUR,0} = 0.282772$ <sup>[26]</sup>;  $(^{176}Lu/^{177}Hf)_{DM} = 0.0384$ ,  $(^{176}Hf/^{177}Hf)_{DM} = 0.28325$ <sup>[27]</sup>;  $(^{176}Lu/^{177}Hf)$  平均地壳 = 0.015;  $f_{CC} = [(^{176}Lu/^{177}Hf)_{平均地壳} / (^{176}Lu/^{177}Hf)_{CHUR}] - 1$ ;  $f_S = f_{Lu/Hf}$ ;  $f_{DM} = [(^{176}Lu/^{177}Hf)_{DM} / (^{176}Lu/^{177}Hf)_{CHUR}] - 1$ ;  $t$  为锆石结晶年龄。

围达 5.7 个  $\varepsilon$  单位,明显高于数据测试过程中所引起 的变化范围,因此,该石英闪长岩样品很可能具有不均一的锆石 Hf 同位素组成。对应地,该样品也显示较宽的 Hf 同位素地壳模式年龄 ( $T_{DM}^C=1.5\sim 1.9$  Ga)(图 4)。

## 5 讨论和结论

### 5.1 益将中志留世石英闪长岩岩体形成年龄:加里东期岩浆活动的年代学证据

湖南汝城益将 REE-Sc 矿石英闪长岩岩体样品的锆石 U-Pb 定年给出了  $(424\pm 3)$  Ma 的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄,该年龄代表锆石的结晶年龄,对应益将石英闪长岩岩体的形成年龄为中志留世,该年龄说明湘南地区存在加里东期岩浆活动。

### 5.2 益将稀土-钨矿床的成矿物质来源—石英闪长岩

益将岩体地貌上出露于一个四面环山、中间低洼的小盆地中,除部分第四纪覆盖外,其余基本为风化壳出露,矿体赋存于岩体石英闪长岩风化壳中,残坡积层、全风化层、半风化层均可含矿,而以全风化层为主,形成稀土和钨矿体。按照稀土元素的赋存状态和配分,该矿床属离子吸附型高钨富钨轻稀土矿床,其中主要矿物为石英、长石、高岭土和云母等,稀土主要以离子形式赋存在高岭土等粘土矿物上。粘土矿物不是吸附简单的阳离子,而是呈水合阳离子或羟基水合阳离子及带正电的胶体粒子吸附于矿物表面上。

钨的富集与母岩石英闪长岩有密切关系,岩性为石英闪长岩的几乎整个风化壳都是钨矿体。该矿床的成矿物质来源即基岩,益将石英闪长岩原岩  $\text{RE}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Sc}_2\text{O}_3$  丰度较高,并含少量磷钇矿、独居石、褐帘石等稀土矿物,钨呈类质同象赋存于各造岩矿物和副矿物中。主要载体矿物是角闪石、辉石、斜长石、黑云母,类质同象也是稀土元素的一种重要赋存形式。风化壳矿石中钨和稀土主要呈离子吸附型和类质同象,原岩经风化淋滤后钨和稀土进一步次生富集,为矿床的形成提供了丰富的物质来源。

### 5.3 成因指示

在益将岩体中,本文获得的锆石  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值 ( $-1.9\sim -7.6$ ),该样品的锆石 Hf 同位素是明显不均一的(变化范围达 5.7),由于锆石 Hf 同位素比值不会随部分熔融或分离结晶而变化,因此锆石 Hf 同

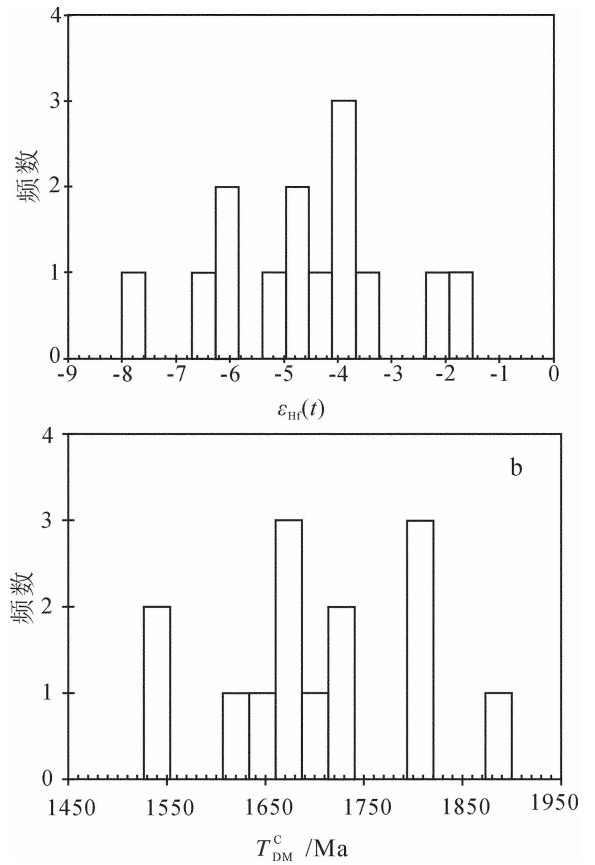


图 4 益将石英闪长岩锆石  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  和地壳模式年龄 ( $T_{DM}^C$ ) 柱状图

Fig.4 Zircon Hf isotopic compositions and  $T_{DM}^C$  of quartz-diorite from Yijiang

位素的不均一性很可能指示了更具放射成因 Hf 的幔源和较少放射成因 Hf 的壳源这两种端元之间的相互作用<sup>[30]</sup>,与其他地区观测到的锆石 Hf 同位素不均一现象的解释一样<sup>[30-36]</sup>,笔者将益将岩体中不均一的锆石 Hf 同位素组成解释成幔源和壳源两种不同性质岩浆的混合作用的结果,即可能是幔源岩浆诱发古老地壳物质重熔并与壳源熔体混合形成。周新民等<sup>[17]</sup>对华南花岗岩的研究时认为花岗岩  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  值趋于零,反映当时有年轻地幔物质扩散、卷入了花岗岩的形成和地壳的增生,而区域上华南加里东期花岗岩 Nd 同位素获得的  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  值多数集中在  $-6\sim -12$ <sup>[17,37]</sup>,推断加里东期花岗岩可能在中地壳—中上地壳深度由元古宙基底物质参与改造形成<sup>[17]</sup>。

与锆石的  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  值 ( $-1.9\sim -7.6$ ) 相对应的地壳模式年龄为  $1.5\sim 1.9$  Ga,峰值在  $\sim 1.7$  Ga 左右。由于锆石 Hf 同位素地壳模式年龄是从锆石  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  值计

算出来的,而壳-幔作用是不可避免的<sup>[38-40]</sup>,因此笔者获得的锆石  $\varepsilon_{\text{Hf}(t)}$  值,实际上代表了幔源物质与古老地壳物质混合后的产物,反映益将石英闪长岩的源区可能含有地幔组分。锆石 Hf 同位素所推断的模式年龄(1.5~1.9 Ga)与区域上华南加里东期花岗岩获得的 Nd 同位素  $T_{\text{DM}}$  模式年龄(2.0~1.6 Ga)一致<sup>[17,37]</sup>,反映该岩体与华南其他加里东期花岗岩一样也可能是幔源物质和华夏地块早中元古代基底物质或者更古老的基底物质改造而成。以上认识可能对理解华南地区加里东期地壳演化和区域成矿具重要的科学意义。

**致谢:**野外工作期间,得到湖南省地质矿产勘查开发局湘南地质调查大队许以明、雷泽恒、资柏忠、龚述清等高工的指导和帮助;Hf 同位素分析得到侯可军博士的指导;耿树方研究员和匿名审稿人对本文提出了建设性修改意见,在此表示诚挚感谢。

谨以此文献给李廷栋院士 80 寿辰,祝愿李先生健康、长寿!

## 参考文献(References):

- [1] Guo L, Shi Y, Lu H, et al. The pre-Devonian tectonic patterns and evolution of South China [J]. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 1989, 3:87-93.
- [2] 周新民, 邹海波, 杨杰东, 等. 安徽歙县伏川蛇绿岩套的 Sm-Nd 等时线年龄及其地质意义 [J]. *科学通报*, 1989, 34 (16): 1243-1245.  
Zhou Xinmin, Zou Haibo, Yang Jiedong. The Sm-Nd isochron age of the Fuchuan ophiolites suite in Shexian of Anhui Province and its geological significance [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1989, 34 (16):1243-1245(in Chinese).
- [3] Chen J, Foland K, Xing F, et al. Magmatism along the southeast margin of the Yangtze Block Precambrian collision of the Yangtze and Cathaysia Blocks of China [J]. *Geology*, 1991, 19:815-818.
- [4] Charvet J, Shu L S, Shi Y S, et al. The building of South China: collision of Yangtzi and cathaysia blocks, problems and tentative answers [J]. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 1996, 13(3-5), 223-235.
- [5] Shu L S, Charvet J. Kinematics and geochronology of the Proterozoic Dongxiang-Shexiang ductile shear zone with HP metamorphism and ophiolitic melange (Jiangnan Region, China) [J]. *Tectonophysics*, 1996, 267:291-302.
- [6] Li X H, Zhao J X, McCulloch M T, et al. Geochemical and Sm-Nd isotopic study of Neoproterozoic ophiolites from southeastern China: Petrogenesis and tectonic implications [J]. *Precambrian Research*, 1997, 81(1-2):129-144.
- [7] Zhao G, Cawood P. Tectonothermal evolution of the Mayuan assemblage in the Cathaysia Block: implications for Neoproterozoic collision-related assembly of the South China Craton [J]. *Am. J. Sci.*, 1999, 299:309-339.
- [8] Li Z X, Li X H, Zhou H, et al. Grenvillian continental collision in South China: new SHRIMP U-Pb zircon results and implications for the configuration of Rodinia [J]. 2002, *Geology*, 30:163-166.
- [9] 舒良树. 华南前泥盆纪构造演化: 从华夏地块到加里东期造山带 [J]. *高校地质学报*, 2006, 12(4):418-431.  
Shu L S. Predevonian tectonic evolution of South China: From Cathaysian block to Caledonian period folded orogenic belt [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2006. 12 (4):418-431(in Chinese with English abstract).
- [10] Wang Y J, Fan W, Zhao G, et al. Zircon U-Pb geochronology of gneisses in Yunkai Mountains and its implications on the Caledonian event in South China [J]. *Gondwana Research*, 2007, 12(4), 404-416.
- [11] Wang Y J, Fan W M, Cawood P A, et al. Indosinian high-strain deformation for the Yunkaidashan tectonic belt, South China: Kinematics and  $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$  geochronological constraints [J]. *Tectonics*, 2007, 26, TC6008, doi:10.1029/2007TC002099.
- [12] Lin Wei, Wang Qingchen, Chen Ke. Phanerozoic tectonics of south China block: New insights from the polyphase deformation in the Yunkai massif [J]. *Tectonics*, 2008, 27, TC6004 doi: 10.1029/2007TC002207.
- [13] Faure Michel, Shu Liangshu, Wang Bo, et al. Intracontinental subduction: a possible mechanism for the Early Palaeozoic Orogen of SE China [J]. *Terra Nova*, 2009, 21(5):360-368.
- [14] Grabau A. Stratigraphy of China, part I, Paleozoic and older, *Geol. Surv. of Agric. and Commerce*. 1924, Peking.
- [15] Huang T K. On Major Tectonic Forms of China [J]. *Geol. Mem. Nat. Geol. Survey*, 1945, China, 20.
- [16] Ren J, Chen T. Tectonic evolution of the continental lithosphere in eastern China and adjacent areas [J]. *J. SE Asian Earth Sci.*, 1989, 3:17-27.
- [17] 周新民. 对华南花岗岩研究的若干思考 [J]. *高校地质学报*, 2003, 9(4):556-565.  
Zhou Xinmin. My thinking about granite genesis of South China [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2003, 9 (4):556-565 (in Chinese).
- [18] 舒良树, 于津海, 贾东, 等. 华南东段早古生代造山带研究 [J]. *地质通报*, 2008, 27(10):1581-1593.  
Shu Liangshu, Yu Jinhai, Jia Dong, et al. Early Palaeozoic orogenic belt in the eastern segment of South China [J]. *Geological Bulletin of China*, 2008, 27(10):1581-1593 (in Chinese with English abstract).
- [19] 张芳荣, 舒良树, 王德滋, 等. 华南东段加里东期花岗岩类形成构造背景探讨 [J]. *地学前缘*, 2009, 16(1):248-260.  
Zhang Fangrong, Shu Liangshu, Wang Dezi, et al. Discussions on the tectonic setting of Caledonian granitoids in the eastern segment of South China [J]. *Earth Science Frontiers*, 2009, 16(1):248-260 (in Chinese with English abstract).

- [20] 中国矿床发现史·湖南卷编委会编. 中国矿床发现史·湖南卷 [M]. 北京:地质出版社, 1996.  
Committee of editors on the discovery history of mineral deposits of China ·Volume. Hunan. The Discovery History of Mineral Deposits of China ·(Volume. Hunan) [M]. Beijing:Geological Publishing House, 1996(in Chinese).
- [21] Williams I S. U-Th-Pb Geochronology by Ion Microprobe, in McKibben MA, Shanks IIIWC and Ridley WI(eds.):Applications of microanalytical techniques to understanding mineralizing processes [J]. Reviews in Economic Geology, 1988, 7:1-35.
- [22] Elhlou S, Belousova E, Griffin W L, et al. Trace element and isotopic composition of GJ-red zircon standard by laser ablation [J]. Geochim Cosmochim Acta, 2006, suppl: A158.
- [23] Wu FY, Yang YH, Xie LW, et al. Hf isotopic compositions of the standard zircons and baddeleyites used in U-Pb geochronology [J]. Chem. Geol. 2006, 234: 105-126.
- [24] 侯可军, 李延河, 邹天人. LA-MC-ICP-MS 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.  
Hou Kejun, Li Yanhe, Zou Tianren, et al. Laser ablation-MC-ICP-MS technique for Hf isotope microanalysis of zircon and its geological applications [J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(10): 2595-2604 (in Chinese with English abstract).
- [25] Soderlund U, Patchett P J, Vervoort J D, et al. The  $^{176}\text{Lu}$  decay constant determined by Lu-Hf and U-Pb isotope systematics of Precambrian mafic intrusions [J]. Earth Planet. Sci. Lett., 2004, 219: 311-324.
- [26] Blichert-Toft J, Albarède F. The Lu-Hf geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system [J]. Earth Planet. Sci. Lett., 1997, 148:243-258.
- [27] Griffin W L, Pearson N J, Belousova E, et al. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites [J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 2000, 64: 133-47.
- [28] Williams I S, Claesson S. Isotopic evidence for the Precambrian provenance and Caledonian metamorphism of high grade paragneisses from the Seve Nappes, Scandinavian Caledonides: II. Ion microprobe zircon U-Th-Pb [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1987, 97:205-217.
- [29] 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.  
Wu Fuyuan, Li Xianhua, Zheng Yongfei, et al. Lu-Hf isotopic Systematics and their applications in petrology [J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(2):185-220 (in Chinese with English abstract).
- [30] Bolhar R, Weaver S D, Whitehouse M J, et al. Sources and evolution of arc magmas inferred from coupled O and Hf isotope systematics of plutonic zircons from the Cretaceous Separation Point Suite (New Zealand) [J]. Earth Planet. Sci. Lett., 2008, 268: 312-324.
- [31] Griffin W L, Wang X, Jackson S E, 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.
- [32] Belousova B A, Griffin W L, O'Reilly S Y. Zircon crystal morphology, trace element signatures and Hf isotope composition as a tool for petrogenetic modeling: examples from Eastern Australian granitoids [J]. J. Petrol, 2006, 47:329-353.
- [33] Kemp A I S, Hawkesworth C J, Foster G L, et al. Magmatic and crustal differentiation history of granitic rocks from Hf-O isotopes in zircon [J]. Science, 2007, 315:980-983.
- [34] Yang J H, Wu F Y, Wilde S A, et al. Tracing magma mixing in granite genesis: in situ U-Pb dating and Hf-isotope analysis of zircons [J]. Contrib. Mineral Petrol, 2007, 153:177-190.
- [35] Li X H, Li Z X, Li W X, et al. U-Pb zircon, geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic constraints on age and origin of Jurassic I- and A-type granites from central Guangdong, SE China: a major igneous event in response to foundering of a subducted flat-slab? [J] Lithos, 2007, 96: 186-204.
- [36] Zhu Dicheng, Mo Xuanxue, Wang Liquan, et al. Petrogenesis of highly fractionated I-type granites in the Zayu area of eastern Gangdese, Tibet: Constraints from zircon U-Pb geochronology, geochemistry and Sr-Nd-Hf isotopes [J]. Science in China(Earth Science), 2009, 52(9):1223-1239.
- [37] Chen J F, Jahn B M. Crustal evolution of southeastern China: Nd and Sr evidence [J]. Tectonophysics, 1998, 284:101-133.
- [38] Bergantz G W. Underplating and partial melting: implications for melt generation and extraction [J]. Science, 1989, 245:1093-1095.
- [39] Huppert H F, Sparks R S J. The generation of granitic magmas by intrusion of basalt into continental crust [J]. Journal of Petrology, 1998, 29:599-624.
- [40] Petford N, Cruden A R, McCaffrey K J W, et al. Granite magma formation, transport and emplacement in the Earth's crust [J]. Nature, 2000, 408:669-673.



## U–Pb dating and Hf isotopic characteristics of zircons from quartz–diorite in the Yijiang REE–Sc deposit, Rucheng County, Hunan: constraints on the timing of Caledonian magmatic activity in South China

WANG Yan–bin<sup>1</sup>, WANG Deng–hong<sup>2</sup>, HAN Juan<sup>1</sup> CHEN Zheng–hui<sup>2</sup>, WANG Qing–li<sup>3</sup>

(1. Beijing SHRIMP Lab, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;

2. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3. College of Environment and Planning, Henan University, Kaifeng 475001, Henan, China)

**Abstract:** Quartz–diorite intrusion is spatially and temporally associated with the REE–Sc mineralization in the Yijiang REE–Sc deposit, Rucheng County, Hunan Province. To constrain the age of the quartz–dioritic pluton related to REE–Sc mineralization, the authors conducted U–Pb analysis of zircon. Hafnium isotope data were also acquired through laser–ablation multi–collector ICPMS analysis of the zircon, with the aim of gaining an insight into the age and nature of the source region of the pluton. The yielded age ( $424\pm 3$  Ma) confirms that this quartz–diorite intrusion belongs to the Caledonian period. Hafnium analysis shows that the Caledonian quartz–diorite has negative and variable  $\epsilon$  Hf values ( $-1.9$  to  $-7.6$ ) and Palaeo–Mesoproterozoic ( $1.5$  to  $1.9$  Ga) depleted–mantle model ages, which is interpreted to reflect derivation from an isotopically heterogeneous mantle–crust mixed source. The source region of these magmas might have been correlated at least with Palaeo–Mesoproterozoic materials of the South China Block, which has been held to underlie Hunan Province; however, further work is necessary to demonstrate this suggestion.

**Key words:** quartz–diorite; REE–Sc mineral deposit; U–Pb dating; Hf isotope; Rucheng in Hunan

---

**About the first author:** WANG Yan–bin, male, born in 1966, senior researcher, mainly engages in the study of geochronology and geochemistry; E–mail: yanbinw@cags.ac.cn.