

桂东北越城岭—苗儿山地区印支期成矿作用： 油麻岭和界牌矿区成矿花岗岩锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素制约

程顺波^{1,2} 付建明^{1,2} 马丽艳¹ 蒋桂新³ 陈希清¹ 卢友月¹ 童喜润^{1,4}

(1.武汉地质调查中心,湖北 武汉 430205;2.花岗岩成岩成矿地质研究中心,湖北 武汉 430205;3.广西壮族自治区二七一地质队,广西 桂林 541100;4.中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室,湖北 武汉 430074)

摘要:油麻岭和界牌矿床是越城岭—苗儿山地区两个钨多金属矿床,规模均达到中型,主要矿体均产在中细粒(斑状)二长花岗岩接触带附近矽卡岩和破碎带中。本研究利用 LA-MC-ICP-MS 微区原位测试技术,对油麻岭矿化花岗岩和界牌内接触带花岗岩中的锆石进行了 U-Th-Pb 和 Hf 同位素分析。结果显示,油麻岭矿化花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 (220 ± 1) Ma (MSWD=0.035),界牌内接触带花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 (215 ± 1) Ma (MSWD=0.055),间接指示越城岭—苗儿山地区存在印支期成矿作用。油麻岭花岗岩样品 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值在 $-2.47 \sim -6.67$,界牌花岗岩样品 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值在 $-3.52 \sim -6.79$,表明这两个矿区花岗岩都是源于地壳物质的重熔。与南岭地区其他成钨花岗岩比较,两者源区均具有高 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值特征,可能是较多 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) > 0$ 的新元古代新生岛弧地壳组分加入引起的。本文获得及前人发表的印支期同位素年龄表明,桂北地区经历了较强的印支期成岩成矿事件,有较好的找矿前景,今后应注意区内印支期花岗岩出露区的勘查评价工作。

关键词:印支期;成矿花岗岩;LA-MC-ICP-MS;锆石 U-Pb 年龄;Hf 同位素;桂东北

中图分类号: 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2013)04-1189-13

越城岭—苗儿山岩体位于南岭成矿带西部,出露面积超过 3000 km²。在能源矿产领域,该地区作为中南地区五大铀矿田之一而备受瞩目,在岩体范围内分布有中国最大规模碳硅泥岩型铲子坪铀矿床以及沙子江、双滑江、孟公界等诸多规模较大的花岗岩型铀矿床^[1]。但是在钨锡有色金属方面,“加里东期岩体不成钨锡矿”的传统认识^[2]严重阻碍着当地的地质勘查脚步。在 20 世纪 80—90 年代,仅湖南地矿局 418 队对苗儿山岩体湖南部分进行 1:5 万花岗岩地质填图。勘查评价工作也只是在牛塘界、长岗岭等少数几个矿床(区)开展,大部分矿点只限于地表矿点检查^[3]。在科研方面,只有华东地质学院徐伟昌和张宏运^[4]做了一些测年工作,并据此将越城岭—苗儿

山岩体定为加里东—印支—燕山多旋回复式岩基。

国土资源大调查以来,锡田、大义山等印支—燕山期复式岩基内取得的丰硕找矿成果^[5],证实多旋回复式岩基也存在较大的找矿潜力。受此影响,湖南省地质调查院、桂林二七一地质队、中国地质大学地调院、武警黄金部队等多家地勘单位开始进入越城岭—苗儿山地区进行矿产调查评价或者商业勘查工作,初步工作即取得较好的找矿效果,新发现的油麻岭钨矿达到中型规模,界牌钨铜矿经补充勘探也达到中型钨矿规模^[6-7]。依托南岭成矿带计划项目,笔者及时对该地区进行跟踪矿产检查和科研跟进,发现这两个矿区科研工作比较薄弱,矿床成矿时代还没有准确限定,在一定程度上妨碍了该区的后续勘

收稿日期:2012-10-17;改回日期:2013-03-08

基金项目:中国地质调查局地质大调查项目(1212010981028 和 1212011120804)资助。

作者简介:程顺波,男,1983 年生,助理研究员,从事矿床学和地球化学研究;E-mail:chs2007@qq.com。

①湖南省地质调查院. 湖南阳明山—大义山锡铋铅锌矿评价报告. 2003:1-69.

查工作。为此,本文利用当代高精度分析测试手段,研究了油麻岭钨矿和界牌钨铜矿成矿花岗岩的成岩时代和 Hf 同位素特征,为了解越城岭—苗儿山岩基的成岩成矿期次和源区特征提供依据。

1 地质背景

越城岭—苗儿山岩体位于湘桂边境地区,横跨

湖南新宁、城步、广西全州、兴安四县。它是南岭成矿带西段出露面积最大的岩体。岩体侵入新元古界和下古生界,被中生代地层不整合覆盖,岩体长轴方向呈北北东向展布,与区域构造线方向一致(图 1-a)。越城岭—苗儿山岩体是一个多期次多阶段岩浆侵入活动形成的复式岩基,主要岩性为中粗粒斑状二长花岗岩,岩石中常见灰黑色细粒富云花岗闪长岩包

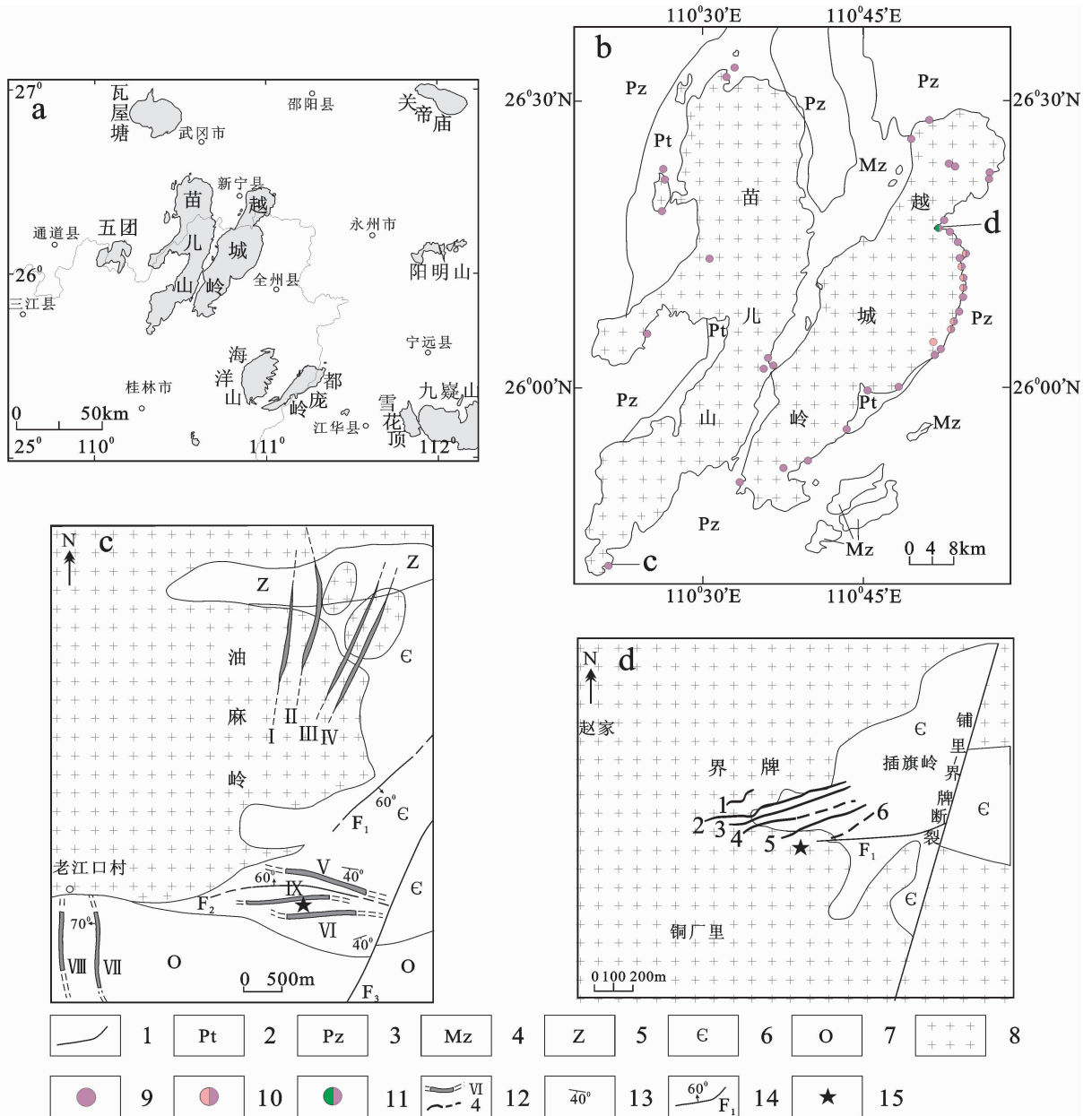


图 1 越城岭—苗儿山地理位置图(a)、地质图(b)及油麻岭 W 矿床(c)、界牌 W-Cu 矿床(d)地质简图(图 c 据文献[6],图 d 据文献[7])
 1—地质界线; 2—元古界; 3—古生界; 4—中生界; 5—震旦系; 6—寒武系; 7—奥陶系; 8—花岗岩; 9—钨矿床(点); 10—钨锡矿床(点);
 11—钨铜矿床(点); 12—控制及推测矿体; 13—地质体产状; 14—断层及其产状; 15—采样地点

Fig.1 Regional location (a) and geological (b) maps of Yuechenglǐng—miǎoeshān area and simplified geological maps of Youmalǐng (c) and Jiépái (d) deposits in northeastern Guangxi (map c and d after Jiang Guixin et al. (2010) [6] and Zhang Jianguo and Chen Qi (2011) [7] respectively)

1—Geological boundary; 2—Proterozoic; 3—Paleozoic; 4—Mesozoic; 5—Sinian; 6—Cambrian; 7—Ordovician; 8—Granite; 9—W deposit (ore spot); 10—W-Sn deposit; 11—W-Cu deposit; 12—Controlled and inferred ore bodies; 13—Ore spot; 14—Fault and its attitude; 15—Sampling location

体,形态椭圆状到透镜状,大小1~10 cm不等,与围岩呈突变关系^[8],次要岩性为中细粒(斑状)二长花岗岩,岩石中基本不含包体。在越城岭岩体西部,由于邵阳—资源断裂的影响,岩石发育强烈的叶理构造和线理,形成一条宽2~10 km,长80 km的片麻状花岗岩带^[9]。在岩体边部分布着油麻岭、牛塘界、界牌、长岗岭、蜜蜂寨、云头界等百余个钨锡(多金属)矿床(点)(图1-b)。

油麻岭钨矿床位于苗儿山岩体的东南端(图1-b),钨矿化产在中细粒花岗岩内外接触带中,目前已控制工业矿体9个(图1-c)^[6]。矿体在空间上具有明显分带性,在矿区北部以石英脉型为主,西南部为破碎带蚀变岩型,东南部为似层状矽卡岩型。其中后者是矿区最重要的矿化类型,矿体走向长300~700 m,厚0.5~6.9 m。通过钻孔揭露,矽卡岩型矿体下面内接触带还存在厚约20 m的变花岗岩型矿化。油麻岭钨矿床矿石矿物主要有白钨矿、黑钨矿、黄铁矿及少量锡石、黄铜矿、毒砂等,脉石矿物主要有透辉石、透闪石、石榴石、石英、白云母、绿泥石等,蚀变主要有矽卡岩化、硅化、云英岩化和绿泥石化。

界牌钨铜矿床位于越城岭东北部岩体内凹部位(图1-b),目前已发现矿脉6条(图1-d),圈定工业矿体7个,呈层状、似层状赋存在中细粒斑状—含斑二长花岗岩与地层接触带,地层层间破碎带和岩体破碎带中^[7]。矿体走向长90~600 m,厚0.3~28.9 m。矿化在垂向上具有明显分带,在浅部以白钨矿化、黄铜矿化为特征,往深部黄铜矿化逐渐消失。界牌钨铜矿床矿石矿物主要有白钨矿、黄铜矿、黄铁矿,次为锡石和磁黄铁矿,脉石矿物有透辉石、符山石、透闪石、阳起石、黝帘石、黑云母、石英、电气石、长石、绢云母、绿泥石等,蚀变主要有矽卡岩化、硅化、云英岩化和电气石化。

2 样品采集与描述

油麻岭成矿花岗岩样品(11D73-2)采自zk1901孔271 m处(孔口坐标:37435235E, 2842228N),上距岩体顶界面20 m。岩石中普遍具有星点状白钨矿化,局部具有工业开采价值。在本孔86.4~89.9 m和118.9~125.2 m分布有两层矽卡岩型钨矿体。界牌成矿花岗岩样品(11D71)采自矿山简易公路旁的人工弱风化露头(坐标:110°54'55"E, 26°16'45"N),北距5号矽卡岩型矿体100 m左右。

11D73-2样品岩性为中细粒二长花岗岩,具中细粒花岗结构,粒径一般在1~3 mm,块状构造。岩石主要由斜长石、钾长石、石英、黑云母以及少量次生白云母组成。斜长石为半自形板状,牌号(An值)为26~27,常见聚片双晶、卡钠复合双晶,不同程度地被白云母交代(图2)。钾长石属微斜条纹长石,半自形—他形粒状,常见格子双晶和钠质条纹,表面具弱粘土化。石英为他形粒状,多充填长石颗粒空隙,可见波状消光。黑云母为他形鳞片状,基本被绿泥石交代。岩石主要矿物含量为:斜长石(35%~40%)、微斜条纹长石(30%~35%)、石英(25%~30%)、黑云母(1%~2%)。副矿物主要为锆石、磷灰石。

11D71样品岩性为中细粒含斑二长花岗岩,具斑状结构,块状构造。斑晶主要为条纹长石,长板状,大小4 mm×10 mm~10 mm×25 mm,含量5%~8%,次为球状石英,大小4 mm×6 mm~6 mm×8 mm,含量1%~3%。基质具中细粒花岗结构,粒径从<0.5 mm到4 mm均有,集中分布在2~3 mm。岩石主要暗色矿物为黑云母,褐色,他形薄片状,局部被绿泥石交代。浅色矿物中,斜长石为半自形板状,牌号(An值)为27~28,常见聚片双晶、卡钠复合双晶,局部被白云母交代,颗粒中心具弱粘土化(图3)。部分颗粒可见环带结构,但不多于3环。钾长石属微斜条纹长石,半自形—他型,一般充填斜长石颗粒空隙,常见卡式双晶、格子双晶和钠质条纹,表面也具有弱粘土化。石英为他形粒状,多充填长石颗粒空隙,具有强烈波状消光,常见带状消光(图3)。基质主要矿物含量为:斜长石(25%~35%)、微斜条纹长石(25%~30%)、石英(25%~30%)、黑云母(2%~5%)。副矿物为锆石、磷灰石、电气石等。

3 样品整理与测试方法

样品破碎和锆石挑选由廊坊峰之源矿物分选技术服务公司完成。将环氧树脂和乙二醇胺按照1:7混合均匀,然后灌注到已经排好的锆石靶上,放至恒温箱(60°)约12 h固结成型。磨蚀和抛光树脂靶,直至锆石核心部位暴露。阴极发光图像在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室拍摄,并结合透射光和反射光图像观察锆石内部结构。样品锆石大多数为无色到浅黄色,少部分为棕黑色。颗粒晶形为自形到半自形,呈短柱状,长宽比为1~3。锆石中常见磷灰石包裹体。棕黑色者受继承核

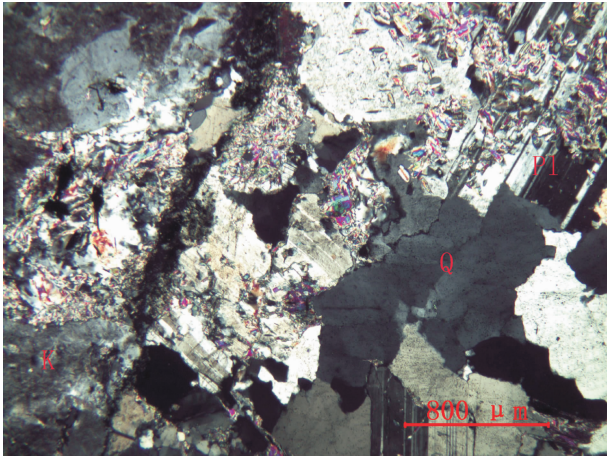


图2 油麻岭 11D73-2 蚀变中细粒二长花岗岩(正交偏光)
Pl—斜长石;K—钾长石;Q—石英

Fig.2 Altered fine-medium grained monzogranite sample 11D73-2 from the Youmaling deposit (crossed nicols)
Pl—Plagioclase;K—K-feldspar;Q—Quartz

U、Th 放射性衰变的影响,放射状裂纹比较发育,褪晶化现象也比较明显,在测试过程中予以排除。CL 图像显示大部分被测锆石为“老核新壳”的复合型锆石,核部已基本圆化,无环带或显示残留岩浆环带(图4),边部具有比较明显的岩浆韵律环带^[10-11]。CL 图像中颜色较暗者 U、Th 含量高,颜色较亮者 U、Th 含量低。

锆石 U-Th-Pb 同位素和 Hf 同位素分析均在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成。U-Th-Pb 同位素分析在 Agilent 7500a 型 ICP-MS 配套的 GeoLas 2005 激光剥蚀系统上进行。激光剥蚀所用斑束直径为 32 μm,剥蚀过程中采用氦气作载气、氩气为补偿气以调节灵敏度,二者在进入 ICP 之前通过一个 T 型接头混合。在等离子体中心气流(Ar+He)中加入了少量氮气,以提高仪器灵敏度、降低检出限和改善分析精密度^[12]。每个时间分辨分析数据包括 20~30 s 的空白信号和 50 s 的样品信号。对分析数据的离线处理(包括对样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正、元素含量及 U-Th-Pb 同位素比值和年龄计算)采用软件 ICPMSDataCal^[13-14]完成。详细的仪器操作条件和数据处理方法同 Liu et al. (2008, 2010)^[13-14]。U-Pb 同位素定年中采用锆石标准 91500 作外标进行同位素分馏校正,每分析 5 个样品点,分析 2 次 91500。对于与分析时间有关的 U-Th-Pb 同位素比值漂移,利用

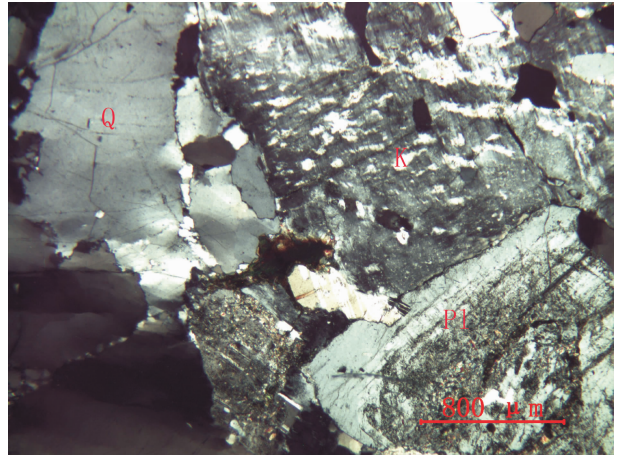


图3 界牌岭 11D71 中细粒含斑二长花岗岩(正交偏光)

Fig.3 Fine-medium grained porphyritic monzogranite sample 11D71 from the Jiepai deposit (crossed nicols)

91500 的变化采用线性内插的方式进行了校正^[14]。锆石标准 91500 的 U-Th-Pb 同位素比值推荐值据 Wiedenbeck et al. (1995)^[15]。锆石样品的 U-Pb 年龄谱和图绘制和年龄权重平均计算均采用 Isoplot/Ex_ver3^[16]完成。锆石 Hf 同位素分析在 Neptune 多接收 MC-ICP-MS 配套的 GeoLas 2005 剥蚀系统上进行。激光剥蚀所用斑束直径为 44 μm。详细仪器条件和数据获取详见 Hu et al. (2012)^[17]。为了校正 ¹⁷⁶Lu 和 ¹⁷⁶Yb 对 ¹⁷⁶Hf 的干扰,取 ¹⁷⁶Lu/¹⁷⁵Hf=0.02656 和 ¹⁷⁶Yb/¹⁷³Yb=0.79381^[18-19] 为定值。采用 ¹⁷³Yb/¹⁷¹Yb=1.13017 和 ¹⁷⁹Hf/¹⁷⁷Hf=0.7325 分别对 Yb 同位素和 Hf 同位素进行指数归一化质量歧视校正^[19]。锆石标样 GJ-1 的 ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 标准值为 0.282013±19^[17]。对分析数据的离线处理(包括对样品和空白信号的选择、Lu-Yb-Hf 同位素比值校正)采用软件 ICPMSDataCal^[13-14]完成。

4 分析结果

4.1 锆石 U-Pb 年龄

油麻岭(11D73-2)和界牌(11D71)成矿花岗岩样品的锆石 U-Th-Pb 同位素分析结果见表 1。样品锆石中 Th 和 U 含量非常高,前者 Th 含量为 $696 \times 10^{-6} \sim 7825 \times 10^{-6}$,U 含量为 $2417 \times 10^{-6} \sim 38936 \times 10^{-6}$,后者 Th 含量为 $480 \times 10^{-6} \sim 3509 \times 10^{-6}$,U 含量为 $510 \times 10^{-6} \sim 26269 \times 10^{-6}$ 。前者 Th/U 比值为 0.10~1.21,均值 0.51,后者 Th/U 比值为 0.09~0.94,均值 0.32,显示典型岩浆成因锆石的特点^[20-21]。

表 1 油麻岭(11D73-2)和界牌(11D71)花岗岩样品锆石 U-Th-Pb 同位素分析结果
Table 1 U-Th-Pb isotopic analyses of zircons from Youmaling and Jiepai granites

分析点	Pb*	Th	U	Th/U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	谐和度
	/10 ⁻⁶	/10 ⁻⁶	/10 ⁻⁶	比值	比值	/10 ⁻⁴	比值	/10 ⁻⁴	比值	10 ⁻⁴	年龄	/Ma	年龄	/Ma	/%
11D73-2															
1	2458	3820	38936	0.10	0.0684	16	0.3272	77	0.0347	7	287	6	220	4	73%
2	189	1326	2736	0.48	0.0518	19	0.2479	97	0.0347	7	225	8	220	4	97%
3	803	5062	14279	0.35	0.0506	13	0.2448	66	0.0348	5	222	5	221	3	99%
4	268	1845	3007	0.61	0.0514	18	0.2466	84	0.0346	4	224	7	219	3	98%
5	1224	3796	38713	0.10	0.0498	11	0.2401	64	0.0348	6	218	5	220	4	99%
6	572	4490	4419	1.02	0.0505	17	0.2427	81	0.0347	4	221	7	220	3	99%
7	650	4629	7045	0.66	0.0498	13	0.2393	61	0.0348	3	218	5	220	2	98%
8	463	3392	5447	0.62	0.0506	14	0.2432	65	0.0347	3	221	5	220	2	99%
9	441	3577	2945	1.21	0.0546	20	0.2612	98	0.0346	5	236	8	219	3	92%
10	1028	7825	13520	0.58	0.0513	11	0.2477	61	0.0348	4	225	5	220	3	98%
11	239	1763	3034	0.58	0.0515	20	0.2388	88	0.0337	4	217	7	214	2	98%
12	359	2370	5504	0.43	0.0499	14	0.2404	72	0.0348	4	219	6	221	2	99%
13	234	1298	3948	0.33	0.0512	15	0.2453	73	0.0347	3	223	6	220	2	98%
14	339	2184	4736	0.46	0.0538	17	0.2572	78	0.0348	4	232	6	220	3	94%
15	384	2200	7323	0.30	0.0527	13	0.2524	66	0.0346	4	228	5	219	2	95%
16	332	2125	4726	0.45	0.0524	17	0.2517	82	0.0348	3	228	7	220	2	96%
17	645	4270	11261	0.38	0.0506	14	0.2421	73	0.0347	6	220	6	220	4	99%
18	453	3537	4533	0.78	0.0513	16	0.2453	75	0.0346	4	223	6	219	2	98%
19	134	696	2417	0.29	0.0505	17	0.2421	83	0.0347	4	220	7	220	3	99%
20	553	3386	7546	0.45	0.0521	13	0.2518	67	0.0348	3	228	5	220	2	96%
11D71															
1	1022	3509	20326	0.17	0.0630	18	0.2860	101	0.0339	4	255	8	215	2	82%
2	601	1412	18182	0.08	0.0513	21	0.2255	132	0.0340	4	206	11	215	2	95%
3	310	1308	3439	0.38	0.0746	48	0.3149	297	0.0342	6	278	23	217	4	75%
4	499	1751	4401	0.40	0.0904	71	0.3632	462	0.0339	5	315	34	215	3	62%
5	507	2079	9919	0.21	0.0504	50	0.1924	331	0.0340	6	179	28	215	4	81%
6	400	1660	9485	0.18	0.0476	47	0.1828	314	0.0341	6	170	27	216	4	76%
7	69.8	480	510	0.94	0.0562	55	0.2223	312	0.0340	8	204	26	215	5	94%
8	370	2066	2656	0.78	0.0818	50	0.3426	311	0.0339	5	299	24	215	3	67%
9	1812	2270	26269	0.09	0.0829	40	0.3562	215	0.0339	5	309	16	215	3	64%
10	752	2659	18328	0.15	0.0540	15	0.2446	85	0.0338	3	222	7	214	2	96%
11	620	3408	5962	0.57	0.0695	22	0.3431	107	0.0358	4	300	8	227	2	72%
12	206	1352	2991	0.45	0.0541	15	0.2529	75	0.0338	3	229	6	214	2	93%
13	412	2212	7474	0.30	0.0549	13	0.2580	68	0.0339	4	233	5	215	3	91%
14	3106	2082	18728	0.11	0.1481	39	0.7985	229	0.0388	4	596	13	245	3	16%
15	560	1609	13894	0.12	0.0545	13	0.2567	62	0.0339	3	232	5	215	2	92%
16	563	1153	17260	0.07	0.0511	13	0.2429	72	0.0341	5	221	6	216	3	97%
17	262	1959	2101	0.93	0.0532	28	0.2512	163	0.0338	6	228	13	214	4	93%
18	395	1573	7685	0.20	0.0590	16	0.2770	77	0.0339	5	248	6	215	3	85%
19	959	2026	17176	0.12	0.0717	26	0.3427	155	0.0340	6	299	12	215	4	67%
20	475	2392	11017	0.22	0.0510	13	0.2416	74	0.0340	6	220	6	215	4	98%

注: * 放射性成因 Pb。

样品 11D73-2 所选的 20 个分析点均位于锆石边部, ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄集中分布在 214~221 Ma(表 1)。1 号点存在一定的普通铅加入, 致使 ²⁰⁷Pb/²³⁵U 年龄显著变大, 在成图过程中该点没有采用。其余 19 个

测点均落在谐和线上或临近区域, 其中 11 号点略微偏移群集区(图 5-a), 可能是放射成因铅协和丢失引起。利用最谐和的 16 个测点 (1, 9, 11, 14 除外) 计算, 获得 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄加权平均值为 (220±1)Ma

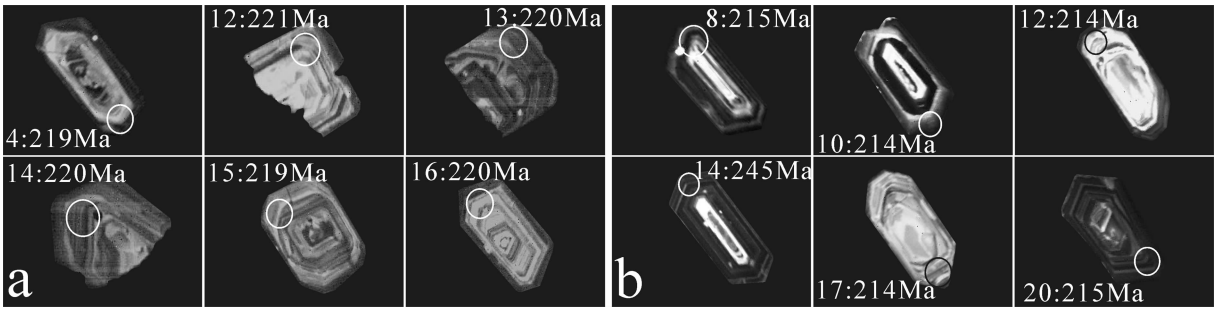


图4 油麻岭 11D73-2(a)和界牌 11D71(b)花岗岩代表性锆石样品 CL 图像(圆圈直径为 32 μm)

Fig.4 Typical cathodoluminescence images of zircons from Youmaling (11D73-2) and Jiepai (11D71) granites

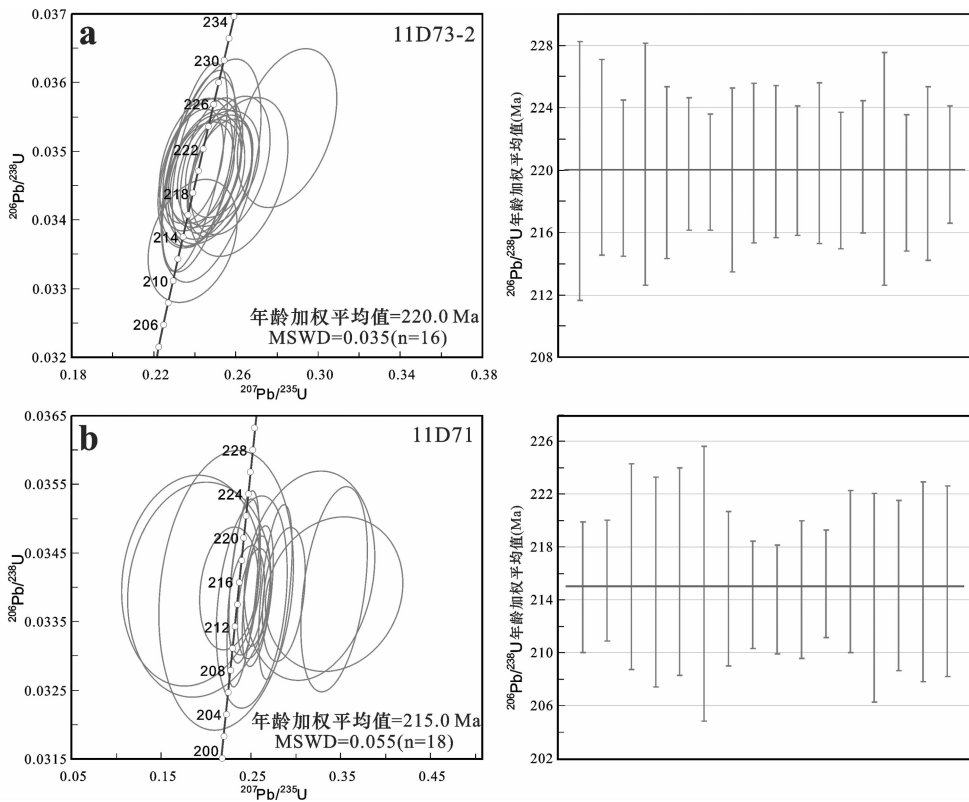


图5 油麻岭 (a)和界牌 (b) 花岗岩样品锆石 U-Pb 年龄谐和图和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均图
Fig.5 LA-ICP-MS U-Pb concordia diagrams and weighted average ages of $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ of zircons from Youmaling(a) and Jiepai(b) granites

(95%置信度, MSWD=0.035), 准确代表了油麻岭花岗岩质岩浆的结晶时间。

样品 11D71 所选的 20 个分析点也都位于锆石边部(表 1)。在数据处理中, 笔者发现大部分分析点的 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 误差比样品 11D73-2 大一个数量级, 在谐和图上表现为沿谐和线左右轻微振荡分布(图 5-b)。究其原因有两种: 其一是 Th、U 含量太高使

锆石晶格损伤和裂纹的产生; 其二是富 F 成矿流体作用, 共同引起锆石中铅的带入带出^[22-23]。但是这些事件并没有对样品 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄产生显著的影响。18 个测点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄集中分布在 214~217 Ma, 误差也在 5 Ma 以内(<5%), 说明本次测试结果是可信的。它们的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为(215±1) Ma(95%置信度, MSWD=0.055), 基本代表了界牌花

岗质岩浆的结晶时间。11 点和 14 点明显离群,在本次计算中予以舍弃。

4.2 锆石 Hf 同位素

在锆石 U-Pb 定年的基础上,笔者对油麻岭

(11D73-2)和界牌 (11D71)成矿花岗岩各 16 颗锆石进行了原位 Hf 同位素分析, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值以及二阶段模式年龄均按测定年龄来计算。结果显示,它们的 Hf 同位素组成相对均匀(表 2),除少数分析点,大部分

表 2 油麻岭(11D73-2)和界牌(11D71)花岗岩样品锆石 Hf 同位素分析结果
Table 2 MC-ICP-MS Hf isotopic analyses of zircons from Youmaling and Jiepai granites

	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	1σ	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	1σ	$\epsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	$T_{\text{DM1}}(\text{Ga})$	$T_{\text{DM2}}(\text{Ga})$	$f_{\text{Lu/Hf}}$
	比值	/10 ⁻⁶	比值	比值	/10 ⁻⁶					
11D73-2										
1	0.282537	09	0.005100	0.157559	3039	-8.30	-4.21	1.13	1.36	-0.85
2	0.282571	9	0.001273	0.040408	1557	-7.12	-2.47	0.97	1.26	-0.96
3	0.282460	10	0.003447	0.103348	3417	-11.02	-6.67	1.20	1.49	-0.90
5	0.282532	9	0.006028	0.182748	2185	-8.50	-4.55	1.18	1.37	-0.82
7	0.282498	9	0.002027	0.060901	972	-9.71	-5.17	1.10	1.41	-0.94
9	0.282509	11	0.002266	0.066882	1489	-9.30	-4.82	1.09	1.39	-0.93
10	0.282540	7	0.003693	0.105649	2972	-8.20	-3.91	1.08	1.34	-0.89
12	0.282505	8	0.001987	0.062759	342	-9.45	-4.88	1.08	1.39	-0.94
13	0.282488	7	0.001079	0.032723	474	-10.05	-5.38	1.08	1.42	-0.97
14	0.282504	8	0.000990	0.029611	1490	-9.49	-4.81	1.06	1.39	-0.97
15	0.282499	7	0.001559	0.049465	1233	-9.67	-5.09	1.08	1.40	-0.95
16	0.282525	7	0.001526	0.047982	2234	-8.73	-4.12	1.04	1.35	-0.95
17	0.282559	7	0.001651	0.047097	886	-7.52	-2.93	1.00	1.29	-0.95
18	0.282530	6	0.001390	0.044344	1088	-8.57	-3.97	1.03	1.34	-0.96
20	0.282537	18	0.003837	0.118444	5667	-8.32	-4.04	1.09	1.35	-0.88
21	0.282503	9	0.001084	0.031153	274	-9.50	-4.83	1.06	1.39	-0.97
11D71										
1	0.282497	7	0.001592	0.053899	154	-9.71	-5.22	1.08	1.41	-0.95
2	0.282547	10	0.001928	0.064331	1840	-7.96	-3.52	1.02	1.31	-0.94
3	0.282499	8	0.000815	0.027365	127	-9.64	-5.00	1.06	1.40	-0.98
5	0.282473	7	0.001327	0.044262	458	-10.56	-6.03	1.11	1.45	-0.96
6	0.282483	8	0.002130	0.072781	589	-10.23	-5.80	1.12	1.44	-0.94
7	0.282498	6	0.000690	0.023390	287	-9.69	-5.07	1.06	1.40	-0.98
8	0.282493	8	0.001261	0.042979	1283	-9.86	-5.32	1.08	1.41	-0.96
10	0.282471	7	0.001751	0.058586	2625	-10.64	-6.19	1.13	1.46	-0.95
12	0.282451	7	0.001012	0.034214	882	-11.34	-6.79	1.13	1.49	-0.97
13	0.282467	7	0.001723	0.059041	1605	-10.80	-6.33	1.13	1.47	-0.95
15	0.282476	7	0.002273	0.074869	1132	-10.48	-6.09	1.14	1.46	-0.93
16	0.282501	8	0.001114	0.038030	392	-9.60	-5.02	1.07	1.40	-0.97
17	0.282509	9	0.000690	0.024408	219	-9.31	-4.71	1.04	1.38	-0.98
18	0.282474	7	0.001615	0.054408	621	-10.53	-6.04	1.12	1.45	-0.95
19	0.282465	9	0.002359	0.074996	568	-10.86	-6.47	1.15	1.48	-0.93
20	0.282497	13	0.001870	0.064543	1006	-9.73	-5.27	1.09	1.41	-0.94

分析点 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} \leq 0.002$, 指示锆石形成后放射成因 Hf 积累十分有限^[24-25]。其中, 样品 11D73-2 的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 0.282460~0.282571, 平均值为 0.282522±0.000013, 计算的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值集中分布在 -2.47~-6.67, 平均值为 -4.49(图 6), Hf 二阶段模式年龄在 1.26~1.49 Ga, 平均值为 1.37 Ga。样品 11D71 的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值在 0.282451~0.282547, 平均值为 0.282482±0.000009, 计算的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值集中分布在 -3.52~-6.79, 平均值为 -5.55(图 6), Hf 二阶段模式年龄在 1.31~1.49 Ga, 平均值为 1.43 Ga。

5 讨论

5.1 越城岭—苗儿山岩基成岩期次的划分

越城岭—苗儿山岩基在 20 世纪 60 年代被认为属加里东期^[26]。随着工作的逐步开展, 地质同行者们开始从该岩基中解体出其他旋回的岩体。1993—1995 年, 湖南地矿局 418 队在苗儿山北部进行 1:5 万麻林幅、安心观幅区调时, 从岩基中识别出雪峰期、加里东期、印支期和燕山期侵入体^[8]。几乎同时, 通过测年工作, 华东地质学院徐伟昌和张宏运^[4]认为该岩基范围内存在加里东期、海西期、印支期和燕山期等四期岩浆活动。上述年龄数据主要是 20 世纪采用锆石 U-Pb 法、全岩 Rb-Sr 法和黑云母 K-Ar

法获得的。由于锆石中普遍含有继承核, 锆石 U-Pb 法所得年龄可能代表了混合年龄。加之该岩基存在多旋回多期次岩浆活动, Rb-Sr、K-Ar 同位素体系可能经历了多次开放和封闭, 得出的等时线年龄往往低于真实年龄。这给精确厘定区内岩浆活动时代和成岩期次带来一定困难。而 SHRIMP 锆石 U-Pb 法的诞生和 LA-ICP-MS U-Pb 法测试精度的改进, 使精确厘定岩浆活动时代成为可能。近五年来, 笔者利用上述方法对越城岭和苗儿山岩基多个岩体进行锆石 U-Pb 法定年, 获得了加里东期(435~402 Ma)(表 3)到印支期(215~220 Ma)的成岩年龄。这与其他学者获得的年龄数据(表 3)非常一致, 证实该地区存在加里东期和印支期的岩浆侵入活动。另外, 柏道远等^[27]在苗儿山北部获得叶溪江花岗闪长岩的 SHRIMP 锆石年龄为(809±9)Ma(表 3), 说明该地区确实存在晋宁期岩浆侵入活动。对于越城岭北部曾认为是燕山期的细粒二云母花岗岩, 项目组利用 SHRIMP 法获得了(402±6)Ma 的锆石 U-Pb 年龄, 指示其形成时代应为加里东期。受样品数量限制, 我们还不能肯定该地区不存在燕山期岩浆活动。

5.2 南岭地区印支期成矿作用

在 20 世纪, 对于南岭地区是否存在印支期钨锡成矿作用, 大多数人会持否定态度。陈毓川等^[32]曾推测

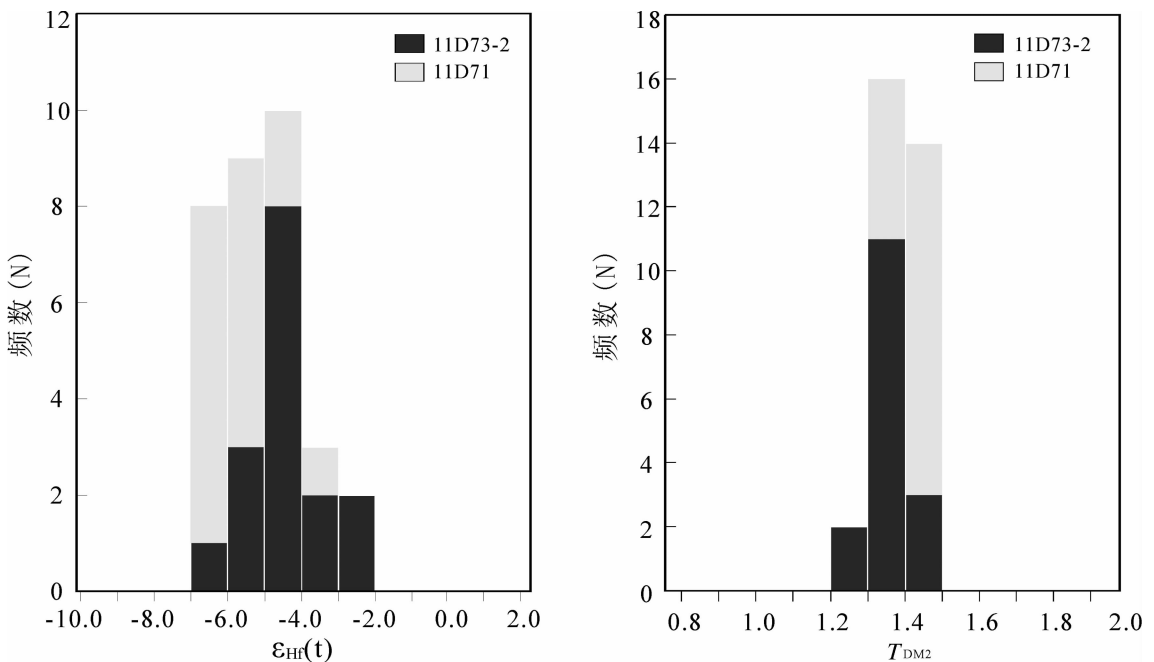


图 6 油麻岭(11D73-2)和界牌(11D71)花岗岩样品锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 和 T_{DM2} 直方图

Fig.6 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ and T_{DM2} histograms of analyzed zircons from Youmaling and Jiepai granites

表 3 越城岭—苗儿山岩基范围内代表性成岩年龄
Table 3 Compiled data of diagenetic ages of Yuechengling–Miaoershan batholith

区域	岩体	岩性	年龄/Ma	分析方法	数据来源
苗儿山	叶溪江	细中粒片麻状花岗闪长岩	806±9	SHRIMP	文献[27]
苗儿山	兰蓉	粗中粒斑状二长花岗岩	434±8	SHRIMP	文献[28]
越城岭	南部小岩体	细粒花岗岩闪长岩	435±1	LA-ICP-MS	未刊数据
越城岭	中部	细中粒电气石二长花岗岩	423±1	LA-ICP-MS	未刊数据
越城岭	长岗岭	细中粒斑状含榴二长花岗岩	423±4	SHRIMP	未刊数据
越城岭	北部小岩体	细粒二云母花岗岩	402±6	SHRIMP	未刊数据
越城岭	界牌	中细粒含斑二长花岗岩	220±1	LA-ICP-MS	本次研究
苗儿山	油麻岭	中细粒二长花岗岩	215±1	LA-ICP-MS	本次研究
苗儿山	豆柞山	黑云母二长花岗岩	228±11	SHRIMP	文献[29]
苗儿山	云头界	中粒斑状二长花岗岩	229±4	LA-ICP-MS	文献[30]
苗儿山	云头界	细粒白云母花岗岩	217±5	LA-ICP-MS	文献[30]
苗儿山	小木楠	花岗岩	228±4	SHRIMP	文献[31]
越城岭	戈洞坪	花岗岩	224±4	SHRIMP	文献[31]

广西栗木稀土—钨锡矿床形成于印支期,但缺乏测年资料予以证实。2006年,蔡明海等^[33]通过对荷花坪矿床早期矽卡岩进行辉钼矿 Re—Os 测年,首次确认南岭地区存在印支期成矿作用,5个辉钼矿样品生成了(224.0±1.9)Ma的等时线年龄。之后,刘善宝等^[34]在赣南仙鹅塘矿区取得了(231.4±2.4)Ma的白云母⁴⁰Ar—³⁹Ar 坪年龄,进一步证实南岭地区印支期成矿作用的存在。在锡田垄上矿段和桐木山矿段,早先的测年工作曾让我们认为该区主要成矿时期为燕山期,印支期只存在矽卡岩化和钨锡预富集作用^[35]。但是,去年我们在该区进行了详细的成岩成矿期次调查工作,并采集与矽卡岩矿体相接的内接触带花岗岩进行了系统锆石 U—Pb 定年工作,无一例外地获得了印支期成岩年龄(未刊资料),说明印支期成矿作用在上述矿段中有着重要的贡献。

在桂北地区,杨锋等(2009)^[36]在栗木老虎头岩体云英岩顶盖样品中首次获得了(214.1±1.9)Ma的白云母⁴⁰Ar—³⁹Ar 坪年龄,证实了陈毓川等^[32]对于栗木矿床形成于印支期的推测。同年,邹先武等^[37]报道了都庞岭东体中也存在印支期成矿事件,7件来自李贵福钨锡矿的辉钼矿样品产生了(211.9±6.4)Ma的等时线年龄。在本次研究中,油麻岭和界牌矿区用于

测年的样品均是与钨矿化密切相关的成矿花岗岩,所获得的印支期成岩年龄(215~220 Ma)能间接说明这两个矿床形成于印支期,即越城岭—苗儿山地区也存在印支期成矿作用。最近,伍静等^[30]在苗儿山云头界钼矿也报道了印支期成矿作用。这些工作一致表明,在桂北地区不仅存在印支期成矿事件,而且规模相当可观。在该区进行了钨锡矿产资源调查评价时,应优先选取印支期中细粒花岗岩岩体开展工作。

5.3 岩浆源区性质

锆石一般具有较高的 Hf 含量和很低的 Lu/Hf 比值,由 Lu 衰变而成的 ¹⁷⁶Hf 比例很低,被测锆石样品的 ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 基本可以代表其形成时体系的 Hf 同位素组成,加上锆石化学性质稳定,即使经历了麻粒岩相等高级变质作用也能很好地保留初始 Hf 同位素组成^[38-39]。因此,锆石 Hf 同位素组成近年来已成为岩石成因研究的重要示踪剂,被认为是探讨岩浆起源与演化,以及揭示壳幔相互作用过程的最有力工具之一^[40]。在南岭地区,Hf 同位素已成功运用于含钨、含锡花岗岩的源区鉴别,含锡花岗岩锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 集中在-2~-8,而含钨花岗岩中的锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 集中在-8~-14,表明含锡花岗岩的物源中有明显地幔物质参与,而含钨花岗岩的物源则以地壳物质

为主^①。

油麻岭和界牌花岗岩样品的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值都是低负值,说明这两个地区花岗岩都是源于地壳物质的重熔,并且源区性质相近。前者的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值在 $-2.47 \sim -6.67$, 后者的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值在 $-3.52 \sim -6.79$, 明显低于成钨花岗岩的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值,而与成锡花岗岩 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值相似。在南岭地区,具有上述 Hf 同位素组成的花岗岩,其成因解释通常有两种可能:(1)地壳熔融形成的花岗岩岩浆中存在幔源岩浆的加入^[41-42], (2)花岗岩的源岩具有相对高的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值^[42-43]。对于第一种情况,花岗岩所具有的强过铝性质以及不含暗色微粒包体等证据明显不支持壳幔混合成因,可以将其排除。近几年来,多个学者在十一杭带上发现了新元古代新生岛弧岩浆活动,如双溪坞地区存在 $890 \sim 970$ Ma 岛弧火山岩,其 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化范围为 $11.0 \sim 15.3$, T_{DM2} 变化范围为 $0.72 \sim 1.4$ Ga^[44]; 浙江平水地区也有 $904 \sim 906$ Ma 的角闪质岩石的报道,其 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $8.6 \sim 15.4$, T_{DM2} 值为 $0.84 \sim 1.11$ Ga^[45]。最近,张怀峰等^[46]报道栗木地区大岐岭花岗岩中存在 (945 ± 11) Ma 的继承锆石,其 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 9.37 , T_{DM2} 值为 1.11 Ga。这使我们更倾向于从高 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值的地壳源区部分熔融来解释这两个花岗岩的成因,即在 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -10 左右的古老循环地壳源区中混入了较多 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) > 0$ 的新生岛弧地壳组分,形成了高 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值的异常源区。

6 结 论

(1) 油麻岭成矿花岗岩形成时代为 (220 ± 1) Ma, 界牌成矿花岗岩为 (215 ± 1) Ma, 说明越城岭—苗儿山地区存在印支期成矿作用,而且规模可观。结合已有年代学数据,可以确认该区存在晋宁、加里东和印支三期成岩作用,是否存在燕山期岩浆活动还不能肯定。

(2) 油麻岭和界牌花岗岩都是源于地壳物质的重熔,并且源区性质相似。他们的源区具有高 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值特征,可能是由于古老循环地壳源区中混入了较多 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) > 0$ 的新元古代新生岛弧地壳组分所引起的。

致谢: 南京大学章荣清博士和匿名审稿人给本文提出许多宝贵修改意见,在此一并表示感谢!

参考文献(References):

- [1] 石少华, 胡瑞忠, 温汉捷, 等. 桂北沙子江铀矿床成矿年代学研究: 沥青铀矿 U-Pb 同位素年龄及其地质意义 [J]. 地质学报, 2010, 84(8): 1175-1182.
Shi Shaohua, Hu Ruizhong, Wen Hanjie, et al. Geochronology of the Shazijiang uranium ore deposit, northern Guangxi, China: U-Pb ages of pitchblende and their geological significance [J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 84(8): 1175-1182 (in Chinese with English abstract).
- [2] 南京大学地质学系. 华南不同时代花岗岩类及其与成矿关系 [M]. 北京: 科学出版社, 1981: 271.
Geology Department of Nanjing University. Granitoids in South China and their Metallogenic Relation [M]. Beijing: Science Press, 1981: 271 (in Chinese).
- [3] 冯国玉, 黄杰, 何芳. 越城岭—猫儿山地区花岗岩特征及成矿 [J]. 矿产与地质, 2009, 23(5): 412-417.
Feng Guoyu, Huang Jie, He Fang. The features and metallogenesis of the granites in the Yuechengling-Miaoershan area [J]. Mineral Resource and Geology, 2009, 23 (5): 412-417 (in Chinese with English abstract).
- [4] 徐伟昌, 张宏运. 苗儿山花岗岩复式岩基年代学研究的进展及时代划分方案 [J]. 岩石学报, 1994, 10(3): 330-337.
Xu Weichang, Zhang Hongyun. Progression in geochronological study and scheme of chronocalssification on Miaoershan granitic batholith [J]. Acta Petrological Sinica, 1994, 10 (3): 330-337 (in Chinese with English abstract).
- [5] 蔡新华, 贾宝华. 湖南锡田锡矿的发现及找矿潜力分析 [J]. 中国地质, 2006, 33(5): 1100-1109.
Cai Xinhua, Jia Baohua. Discovery of the Xitian tin deposit, Hunan, and its ore potential [J]. Geology in China, 2006, 33(5): 1100-1109 (in Chinese with English abstract).
- [6] 蒋桂新, 陆小平, 张慧. 兴安油麻岭钨矿类型的多样性及成矿富集规律 [J]. 矿产与地质, 2011, 24(4): 300-304.
Jiang Guixin, Lu Xiaoping, Zhang Hui. Discussion of metallogenic enrichment regularity and type variety of Youmaling tungsten deposit [J]. Mineral Resource and Geology, 2011, 24(4): 300-304 (in Chinese with English abstract).
- [7] 张建国, 陈蹊. 湖南省新宁县界牌钨铜矿床地质特征及控矿因素分析 [J]. 四川地质学报, 2011, 31(2): 153-156.
Zhang Jianguo, Chen Xi. Geological features and ore control Factors for the Jiepai W-Cu deposit in Xinning, Hunan [J]. Sichuan Geology, 2011, 31(2): 153-156 (in Chinese with English abstract).
- [8] 李福顺, 周厚祥. 苗儿山花岗岩体单元—超单元特征及其定位机制 [J]. 湖南地质, 2002, 21(1): 20-25.
Li Fushun, Zhou Houxiang. The characteristics and its fixed position mechanism of granite unit and super-unit of Miaoershan

① 陆建军. 南岭地区稀有金属矿化花岗岩的成因特征 [C]. 武汉: 南岭成矿带计划项目会议, 2011: 1-84.

- batolith[J]. *Hunan Geology*, 2002, 21(1):20–25(in Chinese with English abstract).
- [9] 张桂林, 梁金城, 冯作海, 等. 越城岭花岗岩体西侧滑脱型韧性剪切带的发现及其形成的构造体制 [J]. *大地构造与成矿学*, 2002, 26(2):131–137.
- Zhang Guilin, Liang Jincheng, Feng Zuohai, et al. Discovery of detached ductile shear zone and its structure mechanism in the west of Yuechengling granitic pluton[J]. *Geotonic et Metallogenia*, 2002, 26(2): 131–137(in Chinese with English abstract).
- [10] Corfu F, John M. Hanchar, et al. Atlas of Zircon Textures [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2003, 53 (1):469–500 (in Chinese with English abstract).
- [11] 吴元保, 郑永飞. 锆石成因矿物学和微量元素地球化学[J]. *科学通报*, 2004, 49(16):1589–1604.
- Wu Yuanbao, Zheng Yongfei. Genetic mineralogy and trace element geochemistry of zircon[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(16): 1589–1604(in Chinese).
- [12] Hu Zhaochu, Gao Shan, Liu Yongsheng, et al. Signal enhancement in laser ablation ICP–MS by addition of nitrogen in the central channel gas [J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2008, 23:1093–1101.
- [13] Liu Yongsheng, Hu Zhaochu, Gao Shan, et al. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA–ICP–MS without applying an internal standard [J]. *Chemical Geology*, 2008, 257(1–2): 34–43.
- [14] Liu Yongsheng, Gao Shan, Hu Zhaochu, et al. Continental and oceanic crust recycling–induced melt–peridotite interactions in the Trans–North China Orogen: U–Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons of mantle xenoliths [J]. *Journal of Petrology*, 2010, 51(1&2): 537–571.
- [15] Wiedenbeck M, Alle P, Corfu F. Three natural zircon standards for U–Th–Pb, Lu–Hf, trace element and REE analyses [J]. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 1995, 19(1):1–23.
- [16] Ludwig K R, ISOPLOT 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel [J]. Berkeley Geochronology Center, California, Berkeley, 2003:39.
- [17] Hu Zhaochu, Liu Yongsheng, Gao Shan, et al. Improved in situ Hf isotope ratio analysis of zircon using newly designed X skimmer cone and jet sample cone in combination with the addition of nitrogen by laser ablation multiple collector ICP–MS[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2012, 27:1391–1399.
- [18] Blichert–Toft J, Chauvel C, Albarede F. Saperation of Hf and Lu for high–precision isotope analysis of rock samples by magmatic sector – multiple collector ICP MS[J]. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 1997, 127:248–260.
- [19] Segal I, Halicz L and Platzner I T, Accurate isotope ratio measurements of ytterbium by multiple collection inductively coupled plasma mass spectrometry applying erbium and hafnium in an improved double external normalization procedure[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2003, 18:1217–1223.
- [20] Rubatto D, Williams I S. Imaging, trace element geochemistry and mineral inclusions: Link between U–Pb ages with metamorphic conditions[J]. *EOS*, 2000, 21: 25.
- [21] Rubatto D. Zircon trace element geochemistry: Partitioning with garnet and the link between U–Pb ages and metamorphism [J]. *Chemical Geology*, 2002, 184:123–138.
- [22] Krogh T E. Improved adduracy of U–Pb zircon ages by the creation of more concordant systems using an air abrasion technique [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1982, 46(4): 637–649.
- [23] Kober B. Single–zircon evaporation combined with Pb emitter bedding for $^{207}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ –age investigations using thermal ion mass spectrometry, and implications to zirconology [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1987, 96(1):63–71.
- [24] Kinny P D, Maas R. Lu–Hf and Sm–Nd isotope systems in zircon [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2003, 53 (1):327–341.
- [25] 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 Petrological Sinica*, 2007, 23(2): 185–220(in Chinese with English abstract).
- [26] 徐克勤, 孙鼎, 王德滋, 等. 华南多旋回的花岗岩类的侵入时代、岩石特征、分布规律及其成矿专属性质探讨 [J]. *地质学报*, 1963, 43(1): 1–10; (2):141–152.
- Xu Keqin, Sun Nai, Wang Dezi, et al. Investigation on the polycycle granite intrusions of southern China, with special notice on their ages of intrusions, distribution, characteristics, and their genetic relations to mineral deposits [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1963, 43(1):1–10; (2): 141–152(in Chinese with English abstract).
- [27] 柏道远, 贾宝华, 刘伟, 等. 湖南城步火成岩锆石 SHRIMP U–Pb 年龄及其对江南造山带构造演化的制约 [J]. *地质学报*, 2010, 84(12):1715–1726.
- Bai Daoyuan, Jia Baohua, Liu Wei, et al. Zircon SHRIMP U–Pb dating of the igneous rocks from Chengbu, Hunan: Constraint on the Neoproterozoic tectonic evolution of the Jiangnan Orogenic belt[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2010, 84(12):1715–1726(in Chinese with English abstract).
- [28] 刘伟, 刘耀荣, 张晓阳, 等. 湖南城步地区 1:5 万区调主要成果和进展[J]. *华南地质与矿产*, 2011, 27(4): 307–313.
- Liu Wei, Liu Yaorong, Zhang Xiaoyang, et al. Progresses in 1 :50,000 regional geological survey in Chengbu area, Hunan Province [J]. *Geological and Mineral Resources of South China*, 2011, 27(4):307–313(in Chinese with English abstract).
- [29] 谢晓华, 陈卫锋, 赵葵东, 等. 岩石学报 桂东北豆仟山花岗岩年代学与地球化学特征[J]. *岩石学报*, 2008, 24(6):1302–1312.
- Xie Xiaohua, Chen Weifeng, Zhao Kuidong, et al. Geochemical characteristics and geochronology of the Douzhashan granite, northeastern Guangxi, China [J]. *Acta Petrological Sinica*, 2008, 24 (6):1302–1312(in Chinese with English abstract).

- [30] 伍静, 梁华英, 黄文婷, 等. 桂东苗儿山—越城岭西部岩体和矿床同位素年龄及华南印支期成矿分析 [J]. 科学通报, 2012, 57(13): 1126–1136.
Wu Jing, Liang Huaying, Huang Wenting, et al. Indosinian isotope ages of plutons and deposits in southwestern Miaoershan—Yuechengling, northeastern Guangxi and implications on Indosinian mineralization in South China [J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(13): 1126–1136(in Chinese).
- [31] 赵葵东, 蒋少涌, 孙涛, 等. 南岭西段印支期花岗岩 Hf–Nd 同位素解耦现象及岩石成因意义 [C]//全国岩石学与地球动力学会议论文集. 2006: 435.
Zhao Kuidong, Jiang Shaoyong, Sun Tao, et al. Hf–Nd isotopic incoordination in indosinian granites and their genetic significance in western Nanling Range [C]. Paper compilation on the National Petrological and Geodynamical Symposium. 2006: 435 (in Chinese).
- [32] 陈毓川, 毛景文, 邹天人. 桂北地区矿床成矿系列和成矿历史演化轨迹[M]. 南宁: 广西科学技术出版社, 1995: 1–433.
Chen Yuchuan, Mao Jingwen, Zou Tianren. Metallogenic series of ore deposits and metallogenic evolution through geological history in North Guangxi [M]. Nanning: Guangxi Scientific and Technological Press, 1995: 1–433(in Chinese with English abstract).
- [33] 蔡明海, 陈开旭, 屈文俊, 等. 湘南荷花坪锡多金属矿床地质特征及辉钨矿 Re–Os 测年[J]. 矿床地质, 2006, 25(3): 263–268.
Cai Minghai, Chen Kaixu, Qu Wenjun, et al. Geological characteristics and Re–Os dating of molybdenites in Hehuaping tin–polymetallic deposit, southern Hunan Province [J]. Mineral Deposits, 2006, 25(3): 263–268(in Chinese with English abstract).
- [34] 刘善宝, 陈毓川, 王登红, 等. 赣南崇义—大余—上犹矿集区不同类型含矿石英中白云母 ^{40}Ar – ^{39}Ar 年龄及其地质意义[J]. 矿床地质, 2008, 27(7): 932–939.
Liu Shanbao, Chen Yuchuan, Wang Denghong, et al. ^{40}Ar – ^{39}Ar ages of muscovite from different types tungsten–bearing quartz veins in the Chong–Yu–You concentrated mineral area in Gannan region and its geological significance[J]. Mineral Deposits, 2008, 27(7): 932–939(in Chinese with English abstract).
- [35] 付建明, 程顺波, 卢友月, 等. 湖南锡田云英岩–石英脉型钨锡矿的形成时代及其赋矿花岗岩锆石 SHRIMP U–Pb 定年[J]. 地质与勘探, 2012, 48(2): 313–320.
Fu Jianming, Cheng Shunbo, Lu Youyue, et al. Geochronological reconstraint of Xitian tungsten–tin greisen–quartz lode and its host granite, eastern Hunan Province [J]. Geology and Exploration, 2012, 48(2): 313–320(in Chinese with English abstract).
- [36] 杨锋, 李晓峰, 冯佑海, 等. 栗木锡矿云英岩化花岗岩白云母 ^{40}Ar – ^{39}Ar 年龄及其地质意义[J]. 桂林工学院学报, 2009, 29(1): 21–24.
Yang Feng, Li Xiaofeng, Feng Zuohai, et al. ^{40}Ar – ^{39}Ar dating of muscovite from greisenized granite and geological significance in Limu tin deposit [J]. Journal of Guilin University of Technology, 2009, 29(1): 21–24(in Chinese with English abstract).
- [37] 邹先武, 崔森, 屈文俊, 等. 广西都庞岭李贵福钨锡多金属矿 Re–Os 同位素定年研究[J]. 中国地质, 2009, 36(4): 837–844.
Zou Xianwu, Cui Sen, Qu Wenjun, et al. Re–Os isotope dating of the Liguifu tungsten–tin polymetallic deposit in Dupangling area, Guangxi [J]. Geology in China, 2009, 36 (4): 837–844(in Chinese with English abstract).
- [38] Amelin Y, Lee D C, Halliday A N, et al. Nature of the earth's earliest crust from Hafnium isotopes in single detrital zircons [J]. Nature, 1999, 399: 252–255.
- [39] 郑永飞, 陈仁旭, 张少斌, 等. 大别山超高压榴辉岩和花岗片麻岩中锆石 Lu–Hf 同位素研究[J]. 岩石学报, 2007, 23(2): 17–30.
Zheng Yongfei, Chen Renxu, Zhang Shaobin, et al. Zircon Lu–Hf isotope study of ultrahigh–pressure eclogite and granitic gneiss in the Dabie orogen [J]. Acta Petrological Sinica, 2007, 23(2): 17–30(in Chinese with English abstract).
- [40] 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, 61: 237–269.
- [41] 李献华, 李武显, 王选策, 等. 幔源岩浆在南岭燕山早期花岗岩形成中的作用: 锆石原位 Hf–O 同位素制约[J]. 中国科学(D 辑), 2009, 39(7): 872–887.
Li Xianhua, Li Wuxian, Wang Xuance, et al. Role of mantle–derived magma in genesis of early Yanshanian granites in the Nanling Range, South China: in situ zircon Hf–O isotopic constraints [J]. Science in China (series D), 2009, 39(7): 872–887(in Chinese).
- [42] 赵葵东, 蒋少涌, 朱金初, 等. 桂东北花山–姑婆山侵入杂岩和暗色包体的锆石微区 Hf 同位素组成及其成岩指示意义[J]. 科学通报, 2009, 54(23): 3716–3725.
Zhao Kuidong, Jiang Shaoyong, Zhu Jinchu, et al. Hf isotopic composition of zircons from the Huashan–Guposhan intrusive complex and their mafic enclaves in northeastern Guangxi: Implication for petrogenesis [J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54(23): 3716–3725(in Chinese).
- [43] 郑佳浩, 郭春丽. 湘南王仙岭花岗岩体的锆石 U–Pb 年代学、地球化学、锆石 Hf 同位素特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 2012, 28(1): 75–90.
Zheng Jiahao, Guo Chunli. Geochronology, geochemistry and zircon Hf isotopes of the Wangxianling granitic intrusion in South Hunan Province and its geological significance [J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(1): 75–90(in Chinese with English abstract).
- [44] Li Xianhua, Li Wuxian, Li Zhengxiang, et al. Amalgamation between the Yangtze and Cathaysia Blocks in South China: constraints from SHRIMP U–Pb zircon ages, geochemistry and Nd–Hf isotopes of the Shuangxiwu volcanicrocks [J]. Precambrian Research, 2009, 174: 117–128.
- [45] 陈志洪, 邢光福, 郭坤一, 等. 浙江平水群角斑岩的成因: 锆石 U–Pb 年龄和 Hf 同位素制约[J]. 科学通报, 2009, 54(5): 610–617.
Chen Zhihong, Xing Guangfu, Guo Kunyi, et al. Petrogenesis of keratophyes in the Pingshui Group, Zhejiang: Constraints from zircon U–Pb ages and Hf isotopes [J]. Chinese Science Bulletin,

2009, 54(5): 610–617(in Chinese).

[46] 张怀峰, 陆建军, 王汝成, 等. 广西栗木大岐岭隐伏花岗岩的成因及其构造意义: 岩石地球化学、锆石 U–Pb 年代学和 Nd–Hf 同位素制约[J]. 中国科学(D 辑):(待刊).

Zhang Huaifeng, Lu Jianjun, Wang Rucheng, et al. Genesis and its tectonic significance of Daqiling granite in Limu area, Guangxi: Petrological, geochemical, geochronological and Nd–Hf isotopic constraints[J]. Science China(series D) (in press).

Indosinian metallogenic activity in Yuechengling–Miaoershan area, northeastern Guangxi: implications from zircon U–Pb ages and Hf isotopic constraint on ore–forming granites in Youmaling and Jiepai deposits

CHENG Shun–Bo^{1,2}, FU Jian–Ming^{1,2}, MA Li–Yan¹, JIANG Gui–Xin³, CHEN Xi–Qing¹,
LU You–Yue¹, TONG Xi–Run^{1,4}

(1. Wuhan Center of China Geological Survey, Wuhan 430205, Hubei, China; 2. Institute of Granitic Diagenesis and Metallogeny, Wuhan 430205, Hubei, China; 3. No. 721 Geological Party of Guangxi Zhuang Autonomous Region, Guilin 541100, Guangxi, China; 4. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, Wuhan 430074, Hubei, China)

Abstract: Youmaling and Jiepai are two newly–discovered tungsten–tin polymetallic deposits with middle–scale metal resources. Their main ore bodies occur in skarn and fractured rocks adjacent to the fine to medium grained monzogranite contacts. In this paper, in situ LA–MC–ICP–MS technology was employed to measure the U–Th–Pb and Hf isotopes of these granites from inner contacts of the Youmaling and Jiepai deposits. Zircon U–Pb isotopic results show that the granites were formed at Ca. 220 ± 1 Ma (MSWD=0.035) and 215 ± 1 Ma (MSWD=0.055) respectively, indicating that Indosinian metallogenic activity took place in Yuechengling–Miaoershan area. $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ values of granite from Youmaling vary between -2.47 and -6.67 , and those from Jiepai vary between -3.52 and -6.79 , suggesting that they were both remelted from crust rocks. In contrast to other tungsten mineralized granites in the Nanling Mountains, the sources of two granites have higher $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ values. A appropriate reason is that some Neoproterozoic island arc materials with positive $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ values were involved during the remelting of the source materials. Isotopic ages from this paper and previous work indicate that intense Indosinian petrogenetic and metallogenic activities took place in this area. As we all know, fruitful exploration achievements have been obtained in the vicinity of contacts of Indosinian granites in the Nanling Mountains, so more attention must be paid to the exploration and evaluation in this area in the next few years.

Key words: Indosinian; ore–forming granite; LA–MC–ICP–MS; zircon U–Pb ages; Hf isotope; northeastern Guangxi

About the first author: CHENG Shun–bo, male, born in 1983, assistant researcher, specializes in mineral deposit and geochemistry; E–mail: chsb2007@qq.com.