# 南岭地区万洋山岩体锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄和地球化学特征及其构造意义

季文兵1),路远发1),付建明2),程顺波2),卢友月2)

2) 中国地质调查局武汉地质调查中心,武汉,430205

**内容提要:** 万洋山岩体位于湘赣两省交界地带,为加里东期多阶段岩浆活动的复式岩体,花岗岩主要岩石类型 有黑云母二长花岗岩、黑云母花岗闪长岩和二云母二长花岗岩,以黑云母二长花岗岩分布面积最广。对岩体中黑云 母二长花岗岩中的锆石样品进行激光剥蚀—多接收器电感耦合等离子体质谱(LA-ICP-MS) U-Pb 定年,锆石的 16 个 测点 <sup>206</sup> Pb/<sup>238</sup> U 的加权平均年龄为(446.0±3.4) Ma (n = 16,MSWD = 0.15)(95% 置信度),反映该岩体形成于晚奥 陶世至早志留世。岩石地球化学表明岩体中 SiO<sub>2</sub> 的含量为 65.91% ~73.35%, K<sub>2</sub>O 的平均含量为 4.20%, Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O 为 5.90% ~7.88%, K<sub>2</sub>O/ Na<sub>2</sub>O 平均值为 1.64, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>平均值为 13.81%, ASI 平均值为 1.09%,总体属于高钾钙 碱性过铝质花岗岩。微量元素组成中 Ba、K、Sr、P、Ti 表现出明显的亏损, Rb、Th、U、Nb、Zr、Hf 等则相对富集,稀土元 素总量中等(159.71×10<sup>-6</sup>~262.78×10<sup>-6</sup>),轻稀土富集 LREE/HREE = 6.16~10.01, (La /Yb) N = 6.37~12.17, 具明显的负 Eu 异常( $\delta$ Eu = 0.30~0.59)。岩体的[ $n(^{87}$ Sr)/ $n(^{86}$ Sr)],值为 0.71223~0.72509,  $\epsilon_{st}(t)$ 值为 117.5~ 299.9Ma, $\epsilon_{Nd}(t)$ 值为 -9.39~ -7.30,两阶段 Nd 模式年龄( $T_{DM2}$ )为 1.77~1.94 Ga。根据上述岩石地球化学特征 表明万洋山岩体为来源于地壳的 S 型花岗岩,花岗岩氧化物和微量元素构造环境判别图解指示岩体形成于后碰撞 构造环境。结合前人对华南加里东期岩体的研究成果,推断华南加里东期花岗岩岩体的具体形成机制为:在全球板 块构造的影响,华夏板块与扬子板块拼接后,板块间的强烈挤压应力相对松弛、压力降低的后碰撞构造环境下,因地 壳增厚而升温的中上地壳岩石减压熔融并向上侵位。

关键词:锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄;地球化学特征;构造意义;万洋山岩体;南岭

我国华南地区广泛的分布着不同时期、不同规 模的花岗岩岩体。花岗岩是大陆地壳的主要组成, 记录着地壳形成,壳幔相互作用和岩石圈演化的丰 富信息(徐夕生等,2012)。此外花岗岩与多金属成 矿和构造动力学背景有十分紧密的联系,一直以来 是国内外学者研究的焦点(徐夕生等,2008)。花岗 岩的成因机制及其地球动力学背景成为华南大陆地 质演化问题争论的焦点之一(肖庆辉等,2002)。对 于华南晋宁期,印支期以及和大规模成矿有紧密联 系的燕山期花岗岩研究的较为深入,并且取得了一 系列的研究成果(毛景文,2008;付建明等 2008;肖 庆辉等,2009;张旗等 2009;华仁民等,2013;陈希清 等,2015)。而对于华南加里东期花岗岩的研究相 对较少,这在一定程度上制约了华南加里东期构造 背景及其动力学机制的理解(周新民,2003;柏道远 等,2006;张文兰等,2011)。近年来,随着测试技术, 特别是同位素测年技术的快速发展(陈文等, 2011),使花岗岩的年龄精确测定成为可能,关于加 里东岩体的研究逐渐增多(吴富江等,2003;柏道远 等,2006;张爱梅等,2010;赵芝等,2012)。但是关于 华南加里东期的动力学背景存在比较大的争议(杨 森楠等,1989;王德滋等,2003;许德如等,2006;徐先 兵等,2009;张爱梅等,2010;王永磊等,2012;柏道远 等,2014)。

万洋山岩体是华南花岗岩的重要组成部分,20 世纪90年代曾有学者从年代学、岩石学、地球化学 等方面做了一些探讨(李献华,1990,1993;李献华 等,1991),但是由于测试水平和精度的制约,很难 清晰的描述万洋山岩体的地球化学特征,特别是高 精度的年龄数据和岩石地球化学数据。近年来,部

<sup>1)</sup> 长江大学资源与环境学院,武汉,430100

注:本文为中国地质调查局地质大调查项目(编号:1212011120804、12120114084501和12120114020701)的成果。

收稿日期:2016-01-12;改回日期:2016-08-24;责任编辑:章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2016.05.016

作者简介:季文兵,1991年生。硕士研究生,岩石地球化学专业。Email:997967081@qq.com。通讯作者:路远发,男,1959年生。研究员, 主要从事地球化学,同位素地质年代学研究。Email:Lyuanfa@163.com。

分学者对该岩体做过研究,取得一些成果(沈渭洲等,2008;伍光英等,2008),但是大部分学者只是局限于万洋山岩体的构造动力学背景研究,缺少对华南加里东期花岗岩的动力学背景进行探讨。

本文在野外地质调查的基础上,对万洋山岩体 的岩石学、地球化学、高精度锆石 U-Pb 年代学进行 研究,并且通过综合前人的研究成果,对华南加里东 期的构造环境进行探讨,为华南早古生代晚期花岗 岩与地壳演化提供新的资料。

## 1 地质背景

万洋山花岗岩岩体位于湘赣二省交界地带(图 la),出露面积约1400 km<sup>2</sup>,呈岩基产出。该岩体总 体近南北向分布,其接触界线明显受北东向永新大 断裂和黄坳大断裂控制(图1b)。该区在奥陶纪以 前沉积环境相对稳定,主要沉积了一套以砂岩和板 岩为主的巨厚岩系。志留系扬子板块与华夏板块拼 贴,导致该区以浅海环境为主的海槽或者浅海盆地 闭合,泥盆系不整合覆盖于前泥盆系的地层之上,伴 随加里东运动形成大规模的花岗岩岩体(王德滋 等,2003)。万洋山岩体侵位于寒武系—奥陶系地 层,侵入接触关系清楚,并被泥盆系跳马涧组沉积覆 盖。张永忠等(2005)对接触面做过详细的研究,在 接触面上普遍可见1-2m厚的花岗质古风化壳。 岩体的围岩均发生较强的角岩化,斑点板岩化等热 接触变质现象。从岩体和地层的侵位接触关系可以 厘定万洋山岩体为加里东期岩浆作用的产物。

万洋山岩体以中粗粒黑云母二长花岗岩为主, 局部见有黑云母花岗闪长岩和二云母二长花岗岩。 花岗结构,局部见有斑晶,块状构造。主要矿物组成 为钾长石(20%~30%),斜长石(30%~40%),石 英(20%~30%),黑云母(5%~8%),斑晶主要由 钾长石,斜长石组成,含量3%~5%,大小一般在 0.8cm×1.6cm左右,最大可见2cm×4cm。副矿物 以锆石、榍石、磁铁矿、磷灰石为主,基质主要由斜长 石、钾长石、石英以及少量的黑云母组成。

### 2 样品采集、加工与测试

#### 2.1 样品采集

用于本次 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年的样品为 浅肉红色中细粒二长花岗岩样一袋,样品号为 12D116,本样品采自炎陵县洋溪水电站桥头,坐标 为113°58′44″E,26°32′19″N。样品 12D112、12D113-1、12D114-1、12D115 为新鲜中粗粒少斑状黑云母二



Fig. 1 Caledonian batholiths distribution map in Southern China (a) (after Sun Tao, 2006&)

and geological sketch map of Wanyangshan batholith (b)

长花岗岩,样品 12 D113-4 为闪长质包体,样品 12D117 为新鲜中粒斑状黑云母二长花岗岩。以上 7 个样品均进行主量元素、微量元素和稀土元素分 析,具体的采样位置见图 1b。

#### 2.2 样品加工与测试

花岗岩样 12D116 锆石挑选和制靶由廊坊峰之 源矿物分选技术服务公司完成。首先将测年的岩石 样品机械破碎后,经人工淘洗后分选出重矿物,再将 重矿物进行电磁分选和重磁分选,得到一定纯度的 锆石样品,然后在双目镜下手工选纯,将挑选出的晶 形完好、透明度高锆石排放到双面胶上,置于圆环模 具中,注入环氧树脂,待固结后,对环氧树脂表面进 行抛光至锆石表面暴露。锆石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。锆石样品定年前先拍摄其反射光、透射 光照片,再进行 CL 显微结构观察、照相,以作为分 析时选点的依据。

锆石样品 U-Pb 年龄测定在西北大学大陆动力 学国家重点实验室完成,选择合适的锆石颗粒采用 西北大学大陆动力学国家重点实验室激光剥蚀与多 接收等离子体质谱仪联机(LA-(MC)-ICP-MS)进行 U-Pb年龄分析。年龄分析采用的激光剥蚀系统为 德国 MicroLas 公司生产的 GeoLas 2005,其激光发生 器为 Lambda Physik 公司的 ComPex102 准分子激光 器(193nm ArF Excimer),分析采用的激光剥蚀孔径 为30(m,并以He作为剥蚀物质的载气。等离子体 质谱为 Agilent 公司 7500a 型 ICP-MS。同位素组成 采用国际标准锆石 91500 作外标进行同位素质量分 馏校正,每隔5个样品分析点测1次91500,以保证 标准和样品的仪器条件完全一致。在10次锆石的 分析前后测1次标准锆石 NIST610 和 GJ-1,以 Si 作 为内标来测定锆石中 U、Th 和 Pb 的含量。样品的 同位素比值及元素含量计算采用 GLITTER(ver4.0; Macquarie University)程序,并应用 Anderson(2002) 所提供的方法进行同位素比值的校正,以扣除普通 铅的影响。年龄及谐和图绘制采用 Isoplot (Ludwig, 2001)程序。详细的测试方法及仪器参数可参考袁 洪林等(2003)。



图 2 万洋山岩体样品 12D116 中典型锆石阴极发光图片 Fig. 2 Typical cathode luminescence images of zircons from the sample 12D116 of Wanyangshan batholith

2016年

化学样品首先用机械方法除去样品表层,用压 缩空气和去离子水清除样品表面污物,经严格加工 粉碎到毫米级,研磨至通过200目筛,然后在中国地 质调查局武汉地质矿产研究所中南检测中心进行主 量元素、微量元素、稀土元素和 Sr、Nd 同位素分析和 测试。Si 和烧失量采用重量法;Al 和 Fe<sup>2+</sup>采用容量 法;Fe<sup>3+</sup>、Ti 和 P 采用分光光度法;K、Na、Ca、Mg 和 Mn 采用原子吸收光谱法。微量元素和稀土元素测 试在 Thermo X series 2 型电感耦合等离子质谱仪上 完成,标样采用 10mg/L 多元素混合内标(美国 PerkinElmer 公司配制),相对偏差(RSD)均小于 10%。Sr、Nd 同位素分析在 MAT261 多接收质谱仪 上完成,用 n(<sup>88</sup>Sr)/n(<sup>86</sup>Sr) = 8.3752 和 n(<sup>146</sup>Nd)/ n(<sup>144</sup>Nd) = 0.7219 对 Sr 和 Nd 作质量分馏校正,计 算机自动进行数据采集,采用美国标准样 NBS987 (Sr)和该实验室标准样 ZkbzNd(Nd) 监测仪器工作 状态,国家一级标准物质 GBW 04411 (Rb-Sr) 和 GBW 04419 (Sm-Nd) 监测分析流程。相对误差  $n(^{87}\text{Rb})/n(^{86}\text{Sr})$  优于 1%,  $n(^{147}\text{Sm})/n(^{144}\text{Nd})$ 优 于 0.5%, 衰变常数采用 $\lambda$ (<sup>87</sup>Rb) = 1.42 × 10<sup>-11</sup> a<sup>-1</sup>,  $\lambda(^{147}Sm) = 6.54 \times 10^{-12} a^{-1}$ 。地球化学参数计算与 图解生成使用 GeoKit 软件(路远发,2004)完成。

### 3 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄

对样品 12D116 中的 20 颗锆石分析了 20 个点, LA-ICP-MS 分析得出的锆石 U—Th—Pb 同位素组 成数据经普通铅校正(Andersen,2002)结果见表 1, 表中所列单个数据点的标准误差均为 1σ,阴极发光 (CL)图像及分析点位见图 2;锆石 U-Pb 谐和图见 图 3;20 颗锆石均呈自形晶,多数为长柱状晶体,长 柱状的长轴一般为 120~180µm,宽 50~80µm,长 宽比值为 1:2 到 1:3.2 之间;少数为短柱状晶体, 短柱状的长轴一般为 80~120µm,宽 50~80µm,长 宽比值为 1:1 到 1:1.6 之间。阴极发光图像均显 示清晰致密的环带结构,环带较窄,环数较多,少量 锆石内部具有继承核(图 2)。显示出岩浆锆石的特 征(Vavra, 1990; Crofu et al., 2003; Wu Yuanbao et al., 2004)。

图 3a 显示,所测 20 个点均沿着谐和线或附近 分布。综合表 1 与图 3a,锆石年龄可以明显地分为 3 组:

第一组年龄有 2 个测点(图 2,12D116-12、 12D116-20),分析点打在锆石晶核上,锆石<sup>206</sup>Pb /<sup>238</sup>U年龄为(991±21)Ma、(991±13)Ma。属新元 古代,为捕获锆石年龄。与华南新元古代晋宁期造 山运动的年龄一致(李献华,1998),这些捕获的锆 石记录的是华南晋宁期华南各板块拼贴成为一个整 体的事件,为岩体侵位过程中捕获围岩地质体的锆 石。

第二组年龄有 2 个测点(图 2,12D116-05、 12D116-14),锆石<sup>206</sup> Pb/<sup>238</sup> U 年龄为(582 ±7) Ma、 (584 ±7) Ma。这 2 个分析点都打在了具双层结构 锆石的边部外缘和核部结合部位,代表混合年龄,没 有地质意义。

第三组年龄有16个测点,这些测点均打在了锆石的韵律环带部位,这些环带结构是岩浆锆石的典型特征,因而其年龄代表该花岗岩体岩浆结晶年龄, 16个分析点基本上都落在谐和曲线上,其谐和度为



图 3 万洋山岩体样品 12D116 锆石 U-Pb 谐和图 Fig. 3 U-Pb concordia diagram of zircons from the sample 12D116 of Wanyangshan batholith

#### 表 1 万洋山岩体 12D116 样品锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素分析结果

#### Table 1 LA-ICP-MS U-Pb analyzed data of the zircons from the sample 12D116 of Wanyangshan batholith

	元素含量(×10 <sup>-6</sup> )		同位素比值						同位素年龄(Ma)								
测试点号	DI .	TT	<b>T</b> 1	Th∕ U	n( <sup>207</sup> Pb).	∕n( <sup>206</sup> Pb)	$n(^{207}{ m Pb})$	/n( <sup>235</sup> U)	n( <sup>206</sup> Pb)	/n( <sup>238</sup> U)	$n(^{207} \text{Pb})$	$/n(^{206} Pb)$	$n(^{207} \text{Pb})$	$/n(^{235}U)$	n ( <sup>206</sup> Pb)	$/n(^{238}U)$	谐和度
	PD *	U	Th		测值	误差(1σ)	测值	误差(1σ)	测值	误差(1σ)	测值	误差(1σ)	测值	误差(1σ)	测值	误差(1σ)	(%)
12D116-01	49	573	171	0.30	0.05879	0.00238	0.57818	0.02236	0.07132	0.00085	560	90	463	14	444	5	104
12D116-02	25	299	117	0.39	0.05724	0.00320	0.56401	0.02933	0.07147	0.00104	501	89	454	19	445	6	102
12D116-03	50	621	92	0.15	0.05782	0.00302	0.56816	0.02734	0.07126	0.00102	523	80	457	18	444	6	103
12D116-04	11	138	60	0.44	0.05784	0.00545	0.56118	0.05137	0.07035	0.00139	524	168	452	33	438	8	103
12D116-05	36	345	108	0.31	0.05736	0.00253	0.74805	0.02967	0.09454	0.00125	505	64	567	17	582	7	97
12D116-06	29	378	43	0.11	0.05990	0.00274	0.59189	0.02448	0.07160	0.00095	600	66	472	16	446	6	106
12D116-07	21	249	124	0.50	0.05492	0.00301	0.54172	0.02771	0.07147	0.00100	409	89	440	18	445	6	99
12D116-08	34	450	90	0.20	0.05590	0.00258	0.54445	0.02288	0.07056	0.00094	448	70	441	15	440	6	100
12D116-09	52	669	92	0.14	0.05649	0.00188	0.55914	0.01554	0.07170	0.00081	472	41	451	10	446	5	101
12D116-10	23	255	75	0.29	0.06297	0.00361	0.62193	0.03333	0.07154	0.00114	707	87	491	21	445	7	110
12D116-11	14	161	95	0.59	0.05171	0.00382	0.51296	0.03649	0.07184	0.00120	273	132	420	24	447	7	94
12D116-12	13	54	61	1.12	0.07252	0.00601	1.66398	0.13401	0.16618	0.00373	1001	128	995	51	991	21	100
12D116-13	78	924	98	0.11	0.05654	0.00185	0.55893	0.01541	0.07159	0.00085	474	40	451	10	446	5	101
12D116-14	40	386	102	0.26	0.05558	0.00207	0.72761	0.02389	0.09481	0.00117	436	51	555	14	584	7	95
12D116-15	55	682	97	0.14	0.05630	0.00215	0.55747	0.01884	0.07172	0.00090	464	53	450	12	447	5	101
12D116-16	272	3212	244	0.08	0.05570	0.00143	0.55168	0.01072	0.07176	0.00078	440	24	446	7	447	5	100
12D116-17	45	472	64	0.14	0.05584	0.00207	0.55381	0.01811	0.07186	0.00091	446	50	447	12	447	5	100
12D116-18	48	545	115	0.21	0.05521	0.00660	0.54744	0.06390	0.07186	0.00207	421	210	443	42	447	12	99
12D116-19	72	866	176	0.20	0.05562	0.00333	0.55010	0.03123	0.07169	0.00123	437	96	445	20	446	7	100
12D116-20	60	262	159	0.61	0.07326	0.00263	1.67888	0.05347	0.16612	0.00233	1021	42	1001	20	991	13	104

注:Pb\*为放射性成因的铅。

	元素合	×)曹	(9-0I				同位湯	まは値					同位素	年龄(Ma)			
测试点号	i d	Ļ	Ē	Th/U	n( <sup>207</sup> Pb),	/n ( <sup>206</sup> Pb)	n( <sup>207</sup> Pb))	∕n( <sup>235</sup> U)	n ( <sup>206</sup> Pb).	$n(2^{38}U)$	$n(^{207} Pb)$	$/n(^{206}{ m Pb})$	$n(^{207} \text{Pb}$	$)/n(^{235}U)$	$n(^{206}\mathrm{Pb})$	$)/n(^{238}{ m U})$	谐和度
	д ж	)	4		测值	误差(1σ)	剡值	<b>淏差(1σ)</b>	漢値	误差(1σ)	测值	誤差(1σ)	漢値	误差(1σ)	测值	<b>误差(1σ)</b>	(%)
12 D1 16-01	49	573	171	0.30	0.05879	0.00238	0.57818	0.02236	0.07132	0.00085	560	96	463	14	444	Š	104
12 D1 16-02	25	299	117	0.39	0.05724	0.00320	0.56401	0.02933	0.07147	0.00104	501	89	454	19	445	6	102
12 D1 16-03	50	621	92	0.15	0.05782	0.00302	0.56816	0.02734	0.07126	0.00102	523	80	457	18	444	ó	103
12 D1 16-04	11	138	60	0.44	0.05784	0.00545	0.56118	0.05137	0.07035	0.00139	524	168	452	33	438	~	103
12 D116-05	36	345	108	0.31	0.05736	0.00253	0.74805	0.02967	0.09454	0.00125	505	64	567	17	582	7	97
12 D1 16-06	29	378	43	0.11	0.05990	0.00274	0.59189	0.02448	0.07160	0.00095	600	96	472	16	446	6	106
12 D116-07	21	249	124	0.50	0.05492	0.00301	0.54172	0.02771	0.07147	0.00100	409	89	440	18	445	6	96
12 D116-08	34	450	96	0.20	0.05590	0.00258	0.54445	0.02288	0.07056	0.00094	448	70	441	15	440	9	100
12 D1 16-09	52	669	92	0.14	0.05649	0.00188	0.55914	0.01554	0.07170	0.00081	472	41	451	10	446	S	101
12 D1 16-10	23	255	75	0.29	0.06297	0.00361	0.62193	0.03333	0.07154	0.00114	707	87	491	21	445	٢	110
12 D116-11	14	161	95	0.59	0.05171	0.00382	0.51296	0.03649	0.07184	0.00120	273	132	420	24	447	7	94
12 D1 16-12	13	54	61	1.12	0.07252	0.00601	1.66398	0.13401	0.16628	0.00373	1001	128	995	51	991	21	100
12 D1 16-13	78	924	98	0.11	0.05654	0.00185	0.55893	0.01541	0.07159	0.00085	474	40	451	10	446	S.	101
12 D1 16-14	40	386	102	0.26	0.05558	0.00207	0.72761	0.02389	0.09481	0.00117	436	51	555	14	584	7	95
12 D1 16-15	55	682	7.6	0.14	0.05630	0.00215	0.55747	0.01884	0.07172	0.0000	464	53	450	12	447	S.	101
12 D1 16-16	272	3212	244	0.08	0.05570	0.00143	0.55168	0.01072	0.07176	0.00078	440	24	446	7	447	Ś	100
12 D1 16-17	45	472	64	0, 14	0.05584	0,00207	0.55381	0.01811	0.07186	0,00091	446	50	447	12	447	N.	100
12 D1 16-18	48	545	115	0.21	0.05521	0.00660	0.54744	0.06390	0.07186	0.00207	421	210	443	42	447	12	66
12 D1 16-19	72	866	176	0.20	0.05562	0.00333	0.55010	0.03123	0.07169	0.00123	437	96	445	20	$^{446}$	7	100
12  D1 16-20	69	262	159	0.61	0.07326	0.00263	1.67888	0.05347	0.16622	0.00233	1021	42	1001	20	166	13	104

94%~110%,并集中在 99%~103%之间。由这 16个点获得的谐和年龄为  $(445 \pm 3.0)$  Ma, (MSWD = 2.9,95% 置信度),<sup>206</sup>Pb  $/^{238}$ U 年龄的加权平均为  $(446 \pm 3.4)$  Ma (MSWD = 0.15,95% 置信度)(图 3b)。两种计算方法给出 的年龄在误差范围内完全 一致,代表了该花岗岩体的 主期岩浆结晶年龄,其时代 属于晚奥陶世。本文得出 的年龄与近期的关于万洋 山岩体的年龄结果基本一 致(沈渭洲等,2008;伍光 英等,2008)。

综上所述,万洋山二长 花岗岩形成于晚奥陶世,属 于加里东期。

# 4 岩石地球化学特 征

#### 4.1 主量元素

万洋山花岗岩样品的 主量元素的分析结果如表 2 所示。总体来看,样品  $SiO_2$ 含量变化较大,为 65.91% ~ 73.35%, 平均 69.50%;在以SiO2为横坐 标的 Harker 图 解 上(图 4),随着 SiO<sub>2</sub>含量的增加 CaO, MgO, TFeO,  $TiO_2$ , P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、MnO 均呈现规律性 减少, 而 Na<sub>2</sub>O、Al<sub>2</sub>O, 没有 明显的变化,K2O 略呈增加 的趋势, Na<sub>2</sub>O 和 K<sub>2</sub>O 没有 呈现同步变化特征,可能与 岩浆演化的后期钾质碱性 溶液交代产生钾长石有关; Al, 0, 含量中等, 为 12.53% ~ 15.20%, 平均 13.81%,K,O的含量偏高

注:Pb\*为放射性成因的铅

为3.19%~5.36%,平均4.20%;全碱(ALK)含量 中等、变化范围较大,含量为5.90%~7.88%,平均 6.76%; K, O/Na, O的值在1.10~2.46之间, 平均 1.69; A/CNK 值介于 0.99~1.14, 平均 1.07, 总体 属过铝质花岗岩(Le Maitre et al., 1989);在 K, O+ Na,0—SiO,图(图5a)上,所有样品都投影在亚碱 性系列区,将亚碱性系列进一步分类,仅个别点投到 钾玄岩系列区,其他样品都分布在高钾钙碱性系列 区(图 5b),表明万洋山花岗岩岩体具有高钾钙碱性 特征(邓晋福等,2015a)。TFeO 含量变化范围较 大,为2.74%~5.83%,平均4.55%,总体的TFeO 含量偏高,镁铁比值(F/F+M)变化范围较小,为 0.67~0.73,集中在0.70左右,碱钙指数(MALI)为 2.72%~6.90%,变化范围较大。对于 CaO、MgO、 TiO<sub>2</sub>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、MnO 的平均含量分别为 2.27%、 1.00% 0.57% 0.16% 0.07%

#### 4.2 微量元素和稀土元素

万洋山花岗岩样品微量元素和稀土元素的分析 结果见表 3, 微量元素原始地幔标准化图和稀土元

表 2 加里东期万洋山岩体的主量元素组成(%)

Table 2	2 Major e	elements o	of Caledon	nian Wang	yangshan	batholith	(%)
送样号	12D112	12D113-1	12D113-4	12D114-1	12D115	12D116	12D117
SiO <sub>2</sub>	71.34	68.71	65.91	67.97	68.85	73.35	70.37
$Al_2O_3$	0.41	0.80	0.92	0.72	0.51	0.24	0.40
$\mathrm{Fe}_2\mathrm{O}_3$	13.18	13.42	15.20	14.45	14.48	13.41	12.53
FeO	0.44	0.25	0.19	0.66	0.16	0.50	0.86
CaO	3.34	5.55	5.31	4.70	4.49	2.19	2.86
MgO	0.06	0.08	0.08	0.08	0.05	0.04	0.06
K <sub>2</sub> O	0.73	1.38	1.38	1.26	1.04	0.45	0.79
Na <sub>2</sub> O	1.55	2.75	3.42	2.76	1.96	0.98	2.44
$TiO_2$	2.75	2.44	2.88	2.91	2.56	2.52	1.90
$P_2O_5$	4.33	3.46	3.26	3.19	5.09	5.36	4.68
MnO	0.12	0.18	0.25	0.16	0.14	0.14	0.15
灼失	1.31	0.22	0.46	0.48	0.04	0.52	2.56
总和	99.55	99.24	99.26	99.35	99.38	99.70	99.59
A/CNK	1.10	1.05	1.05	1.05	1.09	1.09	1.14
A/NK	1.43	1.73	1.73	1.84	1.75	1.49	1.35
ALK	7.08	5.90	5.90	6.14	6.10	7.65	7.88
K <sub>2</sub> 0/Na <sub>2</sub> 0	1.57	1.42	1.42	1.13	1.10	1.99	2.13
A/MF	2.00	1.18	1.18	1.38	1.47	1.61	3.16
MALI	5.53	3.15	3.15	2.72	3.34	5.69	6.9
F/F + M	0.72	0.69	0.69	0.68	0.68	0.71	0.73
TFeO	3.83	5.83	5.83	5.52	5.43	4.67	2.74
注:A/CNK	$=\frac{1}{r(C_{2}O)}$	$n(Al_2O_3)$	)	; A/NK =	$n(Al_2)$	$\frac{0_3}{r(K,0)};$	
	n(CaO)	$+n(Na_2O)$	$+ n(\mathbf{K}_2 0)$	)	$n(\operatorname{Na}_2 0)$ +	$-n(\mathbf{K}_20)$	
$ALK = Na_2$	$0 + K_2 O; A$	$/MF = \frac{1}{n(N)}$	$\frac{n(\operatorname{AI}_2\operatorname{O}_3)}{\operatorname{IgO}) + n(\operatorname{F}$	eO);MALI	$= (Na_2O +$	K <sub>2</sub> O – Ca	.0);
$F/F + M = \frac{1}{2}$	$\frac{n(\text{Fe})}{n(\text{Fe}O) + r}$	$\frac{O}{n(MgO)}^{\circ}$					

素球粒陨石标准化分布模式图 6a 和图 6b。

图 6a 中可以看出万洋山花岗岩样品岩体以富 集大离子元素 Rb、Th、U、K 和稀土元素 La、Ce、Nd 而明显的亏损 Ba、Nb、Sr、P、Ti 元素为特征。从表 3 中可以看出万洋山岩体中以低 Sr(<170×10<sup>-6</sup>)和 低 Yb( <6×10<sup>-6</sup>) 为特点,反映花岗岩形成于中等 深度(30~50km),显示出一般S型花岗岩特征(张 旗等,2006)。此外,从Nb/Ta(6.93~11.21,平均值 为8.67)说明在岩浆演化形成花岗岩的过程中,Nb 和 Ta 元素发生了明显的分馏作用,也显示 S 型花岗 岩特征(赵振华等,2008),为地壳重融的产物。对 于微量元素原始地幔标准化蛛网图(图 6a),图中部 分元素的明显亏损与造岩矿物的形成有关; Rb 含量 高,Ba、Sr含量相对低,一般由钾长石和斜长石的分 离结晶作用造成的;Ti的负异常反映可能有钛铁矿 的分离结晶作用; P 的亏损暗示有磷灰石的分离结 晶。

所有样品的稀土元素总量中等(表3),∑REE 值为159.71×10<sup>-6</sup>~262.78×10<sup>-6</sup>,平均225.85×

> 10<sup>-6</sup>,轻重稀土的比值较高,为 6.16 ~10.01,平均值为 7.47。(La /Yb)<sub>N</sub> 的值也较高为 6.37 ~12.17,在球粒 陨石标准化分布模式图(图 6b)中,所 有样品均表现为明显的右倾曲线,Eu 的亏损较强, $\delta$ Eu = 0.30 ~0.59,平 均值为 0.45,反映了在岩浆作用过程 中经历了斜长石的分离结晶作用。

#### 4.3 Nd—Sr 同位素

如表4所示,万洋山花岗岩样品 的 ε<sub>Nd</sub>(t)的值为 -9.39 ~ -7.30,平 均-8.21。[n(<sup>87</sup>Sr)/n(<sup>86</sup>Sr)]<sub>i</sub>值为 0.71223~0.72509,平均0.71590,沈 渭洲等(1993)对华南基底变质岩的 Sm-Nd 同位素进行研究,得出华南元 古代地壳 Sm-Nd 同位素演化域,万洋 山花岗岩样品都位于华南元古代地壳 Sm-Nd 同位素演化域内。两阶段 Nd 模式年龄(T<sub>DM2</sub>)为1.77~1.94Ga,与 湘桂内陆带花岗岩的背景值(1.8~ 2.4 Ga)(孙健等,2009)基本一致。  $\epsilon_{\mathbf{s}_{M}}(t) - \epsilon_{\mathbf{s}_{r}}(t)$ 图中(图7),样品投 影点比较集中,总体呈较明显的水平 方向展布,并落入澳大利亚东南部 Lachlan 加里东造山带 S 型花岗岩



图 4 万洋山岩体主要氧化物 Harker 图解 Fig. 4 Harker diagrams of selected major oxides of Wanyangshan batholith



图 5 万洋山花岗岩 K<sub>2</sub>O + Na<sub>2</sub>O—SiO<sub>2</sub>图解(a)(据 Irvine et al., 1971)和 SiO<sub>2</sub>—K<sub>2</sub>O 图解(b)(据 Le Maitre et al., 1989) Fig. 5 K<sub>2</sub>O + Na<sub>2</sub>O—SiO<sub>2</sub> diagram (a) (after Irvine et al., 1971) and SiO<sub>2</sub>—K<sub>2</sub>O diagram (b)

(after Le Maitre et al., 1989) of the Wanyangshan granite

 $[\varepsilon_{Sr}(t) = 77 \sim 204, \varepsilon_{Nd}(t) = -9.8 \sim -6.1]$ (Chappell et al., 1992)投影区,显示地壳成因特征 (沈渭洲等,1999)。

# 5 讨论与结论

#### 5.1 物质来源

万洋山花岗岩样品碱质含量较高且 K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O ≥1.1,弱过铝质(A/CNK 均值为 1.07);样品的大

离子亲石元素(LILE)富集,高场强元素(HFSE)略 为亏损,据前人有关过铝花岗岩成因研究 (Sylvester,1998),显示万洋山岩体为地壳成因。 Rb/Sr值可以灵敏地记录源区物质的性质,当Rb/Sr >0.9时,为S型花岗岩;当Rb/Sr < 0.9时,为I型 花岗岩(王德滋等,1993),万洋山花岗岩的Rb/Sr 值介于2.779~11.440,表明其源区为演化比较充 分的成熟陆壳。在K<sub>2</sub>O—Na<sub>2</sub>O图解(图8a)中,样



图 6 万洋山岩体的微量元素原始地幔蛛网图解(a)(原始地幔值据 Sun and McDonough, 1989)和 稀土元素球粒陨石标准化曲线(b)(球粒陨石值据 Taylor and Mclennan, 1985)

Fig. 6 Primitive mantle-normalized trace element spider diagram(a) (primitive mantle data after Sun and McDonough, 1989) and Chondrite-normalized REE patterns(b) (chondrite data after Taylor and Mclennan, 1985) of Wanyangshan batholith

Table 3 Tra	ce element	and rare	earth elem	ent analys	es of Wang	yangshan l	oatholith
样号	12D112	12D113-1	12D113-4	12D114-1	12D115	12D116	12D117
La	46.70	48.80	51.70	57.20	48.80	31.20	39.90
Ce	92.20	91.90	99.80	109.00	95.80	61.80	76.20
Pr	11.80	11.70	13.20	13.80	12.50	8.15	9.72
Nd	42.70	42.30	49.20	48.20	45.00	28.40	35.30
Sm	9.10	8.73	9.88	9.22	9.78	7.15	7.65
Eu	1.07	1.63	1.72	1.50	1.20	0.69	1.05
$\operatorname{Gd}$	8.48	7.86	8.96	7.90	8.75	6.56	6.95
Tb	1.51	1.28	1.46	1.22	1.51	1.19	1.25
Dy	8.53	6.60	7.76	6.20	8.30	6.40	7.16
Ho	1.70	1.28	1.50	1.17	1.64	1.13	1.35
Er	4.72	3.31	3.96	3.03	4.28	2.96	3.71
Tm	0.86	0.54	0.67	0.51	0.71	0.52	0.70
Yb	5.26	3.40	4.03	3.37	4.29	3.13	4.19
Lu	0.75	0.48	0.55	0.46	0.57	0.43	0.61
Y	43.10	30.50	35.80	27.70	40.00	30.10	34.90
$\Sigma$ REE	235.38	229.81	254.39	262.78	243.13	159.71	195.74
LREE	203.57	205.06	225.50	238.92	213.08	137.39	169.82
HREE	31.81	24.75	28.89	23.86	30.05	22.32	25.92
LREE/HREE	6.40	8.29	7.81	10.01	7.09	6.16	6.55
LaN/YbN	6.37	10.30	9.20	12.17	8.16	7.15	6.83
δEu	0.37	0.59	0.55	0.52	0.39	0.30	0.43
δCe	0.94	0.91	0.91	0.92	0.93	0.93	0.92
Rb	190.0	119.0	142.0	147.0	218.0	250.0	264.0
Ba	357.0	583.0	546.0	544.0	592.0	253.0	448.0
Th	21.70	18.50	16.90	18.40	24.50	17.30	19.10
U	6.63	3.88	3.29	7.88	4.19	10.40	6.33
Nb	11.30	14.10	14.80	12.70	13.90	17.40	10.60
Sr	115.0	126.0	178.0	134.0	108.0	63.40	89.80
Zr	140.0	278.0	290.0	257.0	180.0	97.30	136.0
Hf	4.92	8.53	7.77	8.14	6.01	3.62	4.67

表 3 万洋山岩体微量元素和稀土元素(×10⁻⁰)分析结果

$11 \sim 204,  \varepsilon_{\rm Nd}(t) = -9.8 \sim$
-6.1) (Chappell et al.,
1992)和邻区大宁花岗岩岩体
$(\varepsilon_{\rm Sr} (t) = 102.2 \sim 221.9,$
$\varepsilon_{\rm Nd}(t) = -7.53 \sim -6.77$ )
(程顺波等,2009)类似。研究
表明湘桂内陆带花岗岩的 Nd
模式年龄(T <sub>DM1</sub> )为1.8~2.4
Ga(孙健等,2009),基底的时
代主要在1.7~2.7Ga间,而
湘东南地区有地幔物质加入的
早燕山期花岗岩的 T <sub>DM2</sub> 在
1.22~1.76 Ga之间(柏道远
等,2005),加里东期万洋山岩
体的两阶段 Nd 模式年龄值
(1.77~1.94 Ga) 与基底地壳
相当,并高于具地幔物质加入
的湘东南早燕山期壳源花岗
岩,据此也可推断苗儿山加里
东期花岗岩源于基底地壳的重
熔。在 Sylvester(1998)所提出
的Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /TiO <sub>2</sub> —CaO/Na <sub>2</sub> O判
别图解(图8b)上,主要落在澳
大利亚 Lachlan 造山带内及其
附近,指示万洋山岩体起源于
以碎屑岩为主的源区的部分熔

S型花岗岩(图7)( $\varepsilon_{sr}(t)$  =

品点比较集中投到 S 型花岗岩类。进一步佐证万洋 山花岗岩的地壳成因。

万洋山花岗岩同位素组成显示出高 Sr、低 Nd 特征,样品的[ $n(^{87} Sr)/n(^{86} Sr)$ ]<sub>i</sub>值 0.71223 ~ 0.72509, $\varepsilon_{Sr}(t)$ 值为 117.5 ~ 299.9, $\varepsilon_{Nd}(t)$ 值为 -9.39 ~ -7.30,总体与澳大利亚 Lanchlan 造山带 融。

综上所述,花岗岩地球化学及 Sr、Nd 同位素地 球化学特征表明万洋山花岗岩为陆壳重熔型花岗岩 (S型花岗岩),且源岩为中上地壳变质碎屑岩。

表 4 万洋山岩体 Nd—Sr 同位素组成 Table 4 Sr and Nd isotopic compositions of granite of Wanyangshan batholith

样只是	Rb	Sr	<u>n(<sup>87</sup>Rb)</u>	<sup>87</sup> Sr	$\left[\frac{n(^{87}\mathrm{Sr})}{2}\right]$	$\mathbf{s}_{\alpha}(t)$	Sm	Nd	$n(^{147}Sm)$	<i>n</i> ( <sup>143</sup> Nd)	$\mathbf{s}_{m}(t)$	$T_{\rm DM1}$	$T_{\rm DM2}$
1414	( ×10 <sup>-6</sup> )		$n(^{86}\mathrm{Sr})$	<sup>86</sup> Sr	$\lfloor n({}^{so}\mathrm{Sr}) \rfloor_{i}$	$c_{\rm Sr}(r)$	( ×1	0 -6)	<i>n</i> ( <sup>144</sup> Nd)	<i>n</i> ( <sup>144</sup> Nd)	CNd(V)	(Ga)	(Ga)
12D113-1	163.5	127.0	3.722	0.73759	0.71400	142.4	8.608	44.12	0.1181	0.511997	-8.04	1.84	184
12D113-4	162.2	168.7	2.779	0.73238	0.71476	153.2	9.995	49.52	0.1221	0.512047	-7.30	1.84	1.77
12D116	269.1	68.4	11.44	0.79761	0.72509	299.9	6.879	28.22	0.1475	0.512014	-9.39	2.61	1.94
H22	179.0	138.8	3.727	0.73655	0.71223	117.5	6.230	33.44	0.1127	0.511975	-8.03	1.77	1.85
H24	233.9	107.0	6.330	0.75471	0.71341	134.2	7.760	39.24	0.1196	0.511982	-8.30	1.89	1.87

注:Nd 同位素模式年龄采用陈江峰等(1999)提出的 Nd 模式年龄计算方式。H22、H24 样品测试结果引自文献伍光英等(2008),其他 为本文数据。



图 7 万洋山岩体  $\varepsilon_{Nd}(t) - \varepsilon_{sr}(t)$  相关关系图(据李献华 等,1991)

Fig. 7  $\varepsilon_{\rm Nd}(t) - \varepsilon_{\rm Sr}(t)$  diagram of Wanyangshan batholith ( after Li Xianhua et al. ,1991&)

#### 5.2 华南加里东花岗岩形成构造背景

Pearce 等(1984)提出的微量元素 Y + Nb—Rb 构造环境判别图中(图9),所有的样品点均落入后 碰撞花岗岩区域;在 SiO<sub>2</sub>—K<sub>2</sub>O 图上(图 5b),样品 点几乎都位于主要投到高钾钙碱性系列花岗岩,而 高钾钙碱性系列花岗岩是后碰撞花岗岩的主要特征 之一(Liégeois et al., 1998)。因此可以推断加里东 期万洋山岩体是后碰撞构造环境下形成的,而不是 前人所述洋—陆俯冲造山的产物(杨森楠,1989;王 德滋等,2003)。 在仔细对比研究和大量的统计工作中,发现华 南加里东期花岗岩的分布主要沿着两个带分布:一 个是武夷山—云开大山一带,另外一个是诸广山— 大瑶山—带,两个分布带与扬子板块和华夏板块的 缝合带江山—绍兴断裂带近似平行,集中于政和— 大埔及绍兴—江山—萍乡两条区域性深大断裂构成 的喇叭形区域之间(图 1a),有线状分布的特点(王 永磊等,2011)。

关于华南加里东期的花岗岩形成的构造环境长 期以来不同的学着存在着各自不同的观点(杨森楠 等,1989;王德滋等,2003;许德如等,2006;徐先兵 等,2009;张爱梅等,2010;王永磊等,2012;柏道远 等,2014)。但是焦点集中在华南地区早古生代是 否存在蛇绿岩或者大面积火山岩,是否存在广阔的 深海或者大海。因而形成了三种具有代表性的华南 加里东期花岗岩形成的构造动力学背景:①属沟弧 盆构造体系的岛弧花岗岩;②由地体拼贴作用形成 的花岗岩;③陆内造山作用形成的板内花岗岩(张 芳荣,2011;王永磊等,2012)。

前人曾经对政和一大埔断裂带附近分布的变质 火山岩和超镁铁质基性岩进行研究,认为该岩体为 早古生代的蛇绿岩,推断该断裂带是洋壳俯冲带,然 而近年来,高精度的测年数据显示(Li Wuxian et al.,2005;Shu Liangshu et al.,2006,2008),变质火 山岩和超镁铁质基性岩为新元古代,即该断裂带不 是加里东期的洋壳俯冲带。另外徐夕生(2008)认



图 8 万洋山岩体 K<sub>2</sub>O—Na<sub>2</sub>O 图解(a)(据 Collins 等,1982)和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub>—CaO/Na<sub>2</sub>O 图解(b)(据 Sylvester 等,1998) Fig. 8 K<sub>2</sub>O—Na<sub>2</sub>O diagram (a) (after Collins et al. ,1982) and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub>—CaO/Na<sub>2</sub>O diagram (b) of Wanyangshan batholith (after Sylvester et al. ,1982)

10





为,华南不具备洋陆俯冲活动的大陆边缘特征。此 外,新的区域地质调查的资料显示,原先被认为震旦 纪一奥陶纪华南属于大洋深海环境,实际上属于浅 海为主,部分区段为半深海的环境(舒良树,2006)。

本文研究的万洋山岩体采集的样品点均位于高 钾钙碱性花岗岩系列(图 5b),暗示着当时岩体形成 过程中地壳明显加厚(Treloar et al., 1992),此外, 华南地区高钾钙碱性系列花岗岩类的分布非常普 遍,据邓晋福等(2015b)指出形成高钾钙碱性系列 的火成岩的地壳厚为40~67km,进一步说明华南加 里东期地壳可能有明显的增厚。而当地壳增厚 50km时,足以产生花岗质岩浆所需要的热源,这种 加厚的地壳很快发生自然的减薄,促使岩石圈迅速 进入伸展减薄的构造环境(Turner et al., 1992)。 中上地壳的岩石发生部分熔融,最后侵入上覆地层, 形成华南的各种花岗岩岩体。

上述资料表明华南加里东期大规模的岩浆活动 很难用板块构造弧一陆或陆弧一陆碰撞造山模式来 解释,根据本文对万洋山岩体的研究以及结合其他 学者对华南加里东期的岩体的构造背景的分析(吴 富江等,2003;张芳荣等,2009;王永磊等,2011;华仁 民等,2013;王磊等,2013;崔圆圆等,2013),本文将 华南加里东期的岩浆活动归结为板块内部的构造事 件,也就是后碰撞构造事件。受到全球板块运动的 影响,华夏板块与扬子板块沿钦一杭断裂带拼合,引 发华南浅海盆地或海槽关闭,导致华夏板块与扬子 板块再次拼合,进而导致大面积的地壳增厚。这种 地壳增厚可以导致高热产生元素在空间上重新分 布,最后集中的加厚带内(Sandiford,2003),在足够 的温压条件下,导致中上地壳的局部熔融,然后在后 碰撞期发生陆内伸展,促使岩浆上侵,最后形成华南 大面积分布的S型花岗岩。板块碰撞作用虽没有直 接导致加里东期岩浆的活动,但是板块碰撞的远程 效应间接导致了此次板块内部的构造事件。

### 6 结论

(1)加里东期万洋山岩体总体为高钾钙碱性系 列过铝质花岗岩类,属于S型花岗岩,源岩主要为中 上地壳变质碎屑岩。

(2)加里东期万洋山岩体年龄 446.0±3.4Ma, 反映的是晚奥陶世至早志留世华南加里东期岩浆活动事件。

(3) 万洋山花岗岩岩体以及其他华南加里东期 花岗岩都归结于板块内部的构造事件,是在后碰撞 构造环境下,陆内强烈挤压相对松弛,地壳增厚引起 部分熔融并向上侵位而形成。

参考文献 / References

(The literature whose publishing year followed by a "&" is in Chinese with English abstract; the literature whose publishing year followed by a "#" is in Chinese without English abstract)

- 柏道远,黄建中,刘耀荣,伍光英,马铁球,王先辉. 2005. 湘东南及湘 粤赣边区中生代地质构造发展框架的厘定. 中国地质,32(4): 557~570.
- 柏道远,黄建中,马铁球,王先辉. 2006. 湘东南志留纪彭公庙花岗 岩体的地质地球化学特征及其构造环境.现代地质,20(1):130 ~140.
- 柏道远,钟响,贾朋远,熊雄,黄文义. 2014. 南岭西段加里东期苗儿 山岩体锆石 SHRIMP U-Pb 年龄、地球化学特征及其构造意义. 岩石矿物学杂志,33(3):407~423.
- 陈江峰,郭新生,汤加富,周泰禧. 1999. 中国东南地壳增长与 Nd 同 位素模式年龄. 南京大学学报(自然科学版),35(6):649 ~ 658.
- 陈文,万渝生,李华芹,张宗清,戴橦谟,施泽恩,孙敬博. 2011. 同位 素地质年龄测定技术及应用. 地质学报,85 (11): 1917~1947.
- 陈希清,付建明,程顺波,马丽艳,卢友月. 2015. 湖南宝峰仙花岗岩 地球化学特征与锆石 SHRIMP U-Pb 定年. 矿床地质,34(3): 602~616.
- 程顺波,付建明,徐德明,陈希清,王晓地. 2009. 桂东北大宁岩体锆 石 SHRIMP 年代学和地球化学研究. 中国地质,36(6):1278 ~ 1288.
- 崔圆圆,赵志丹,蒋婷,杨金豹,丁聪,盛丹,侯青叶,胡兆初. 2013. 赣南早古生代晚期花岗岩类年代学、地球化学及岩石成因. 岩 石学报,29(11):4011~4024.
- 邓晋福,刘翠,冯艳芳,肖庆辉,狄永军,苏尚国,赵国春,段培新,戴 蒙.2015a.关于火成岩常用图解的正确使用:讨论与建议.地质 论评,61(4):717~734.
- 邓晋福,冯艳芳,狄永军,刘翠,肖庆辉,苏尚国,赵国春,孟斐,马帅,

姚图.2015b. 岩浆弧火成岩构造组合与洋陆转换. 地质论评,61 (3):473~484

- 付建明,李华芹,屈文俊,马丽艳,杨晓君,魏君奇,刘国庆. 2008. 粤 北始兴地区石英脉型钨矿成矿时代的确定及其地质意义. 大地 构造与成矿学,31(1):57~62.
- 华仁民,张文兰,陈培荣,翟伟,李光来. 2013. 初论华南加里东花岗 岩与大规模成矿作用的关系. 高校地质学报,19(1):1~11.
- 李献华. 1990. 万洋山一诸广山花岗岩复式岩基的岩浆活动时代与 地壳运动. 中国科学(B辑),20(7):747~755.
- 李献华,桂训唐. 1991. 万洋山—诸广山加里东期花岗岩的物质来 源—— I.Sr—Nd—Pb—O 多元同位素体系示踪. 中国科学(B 辑),21(5):533~540.
- 李献华. 1993. 万洋山一诸广山加里东期花岗岩的形成机制——微 量元素和稀土元素地球化学证据.地球化学,(1):35~43.
- 李献华. 1998. 华南晋宁期造山运动一地质年代学和地球化学制 约. 地球物理学报,41(1):184~194.
- 路远发. 2004. GeoKit: 一个用 VBA 构建的地球化学工具软件包. 地 球化学,35(5): 459~464.
- 毛景文,谢桂青,郭春丽,袁顺达,程彦博,陈毓川. 2008. 华南地区 中生代主要金属矿床时空分布规律和成矿环境. 高校地质学 报,14(4):510~526.
- 沈渭洲,朱金初,刘昌实,徐士进 凌洪飞. 1993. 华南基底变质岩的 Sm-Nd 同位素及其对花岗岩类物质来源的制约. 岩石学报,9 (2):115~124.
- 沈渭洲,凌洪飞,李武显,黄小龙,王德滋. 1999. 中国东南部花岗岩 类 Nd—Sr 同位素研究. 高校地质学报,5(1):22~32.
- 沈渭洲,张芳荣,舒良树,王丽娟,向磊.2008.江西宁冈岩体的形成 时代、地球化学特征及其构造意义.岩石学报,24(10):2244 ~ 2254.
- 舒良树. 2006. 华南前泥盆纪构造演化:从华夏地块到加里东期造 山带.高校地质学报,12 (4):418~431.
- 孙健,倪艳军,柏道远,马铁球. 2009. 湘东南瑶岗仙岩体岩石化学 特征、成因与构造环境. 华南地质与矿产,(3):12~18.
- 孙涛. 2006. 新编华南花岗岩分布图及其说明. 地质通报,25(3): 332~335.
- 王德滋,刘昌实,沈渭洲. 1993. 桐庐 I 和相山 S 型两类碎斑熔岩对 比. 岩石学报,9 (1):44~53.
- 王德滋,沈渭洲. 2003. 中国东南部花岗岩成因与地壳演化. 地学前 缘,10(3):209~220.
- 王磊,龙文国,周岱. 2013. 云开地区加里东期花岗岩锆石 U-Pb 年龄 及其地质意义.中国地质,40(4):1016~1029.
- 王永磊,王登红,张长青,侯可军,王成辉. 2011. 广西钦甲花岗岩体 单颗粒锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年及其地质意义. 地质学报,85 (4):475~481.
- 王永磊,陈振宇,陈郑辉,侯可军,赵正,许建祥,张家菁,曾载淋. 2012. 赣南一湘东湖南洞岩体的锆石 U-Pb 年代学研究及其对 加里东构造背景的意义. 岩矿测试,31(3):525~529.
- 吴富江,张芳荣.2003. 华南板块北缘东段武功山加里东期花岗岩特 征及成因探讨. 中国地质,30(2):166~172.
- 伍光英,马铁球,冯艳芳,闰全人,刘富国,柏道远. 2008. 南岭万洋 山加里东期花岗岩地质地球化学特征及其成因. 中国地质,35 (4):608~617.
- 许德如,陈广浩,夏斌,李鹏春,贺转利.2006. 湘东地区板杉铺加里 东期埃达克质花岗闪长岩的成因及地质意义.高校地质学报,12 (4):507~521.
- 肖庆辉,邓晋福,马大铨. 2002. 花岗岩研究思维与方法. 北京:地质 出版社,21~36.
- 肖庆辉,邓晋福,邱瑞照,刘勇,冯艳芳.2009. 花岗岩类与大陆地壳

生长初探——以中国典型造山带花岗岩类岩石的形成为例.中国地质,36(3):594~622.

- 徐先兵,张岳桥,舒良树,贾东,王瑞瑞,许怀智. 2009. 闽西南玮埔 岩体和赣南菖蒲混合岩锆石 La-ICP-MS U-Pb 年代学:对武夷山 加里东运动时代的制约. 地质论评,55(2):277~285.
- 徐夕生. 2008. 华南花岗岩一火山岩成因研究的几个问题. 高校地 质学报,14(3): 283~294.
- 徐夕生,贺振宇. 2012. 花岗岩研究进展. 矿物岩石地球化学通报, 31(3):205~209.
- 袁洪林,吴福元,高山,柳小明,徐平,孙德有. 2003. 东北地区新生 代侵入体的锆石激光探针 U-Pb 年龄测定与稀土元素成分分析. 科学通报,48(14):1511~1520.
- 杨森楠. 1989. 华南裂陷系的建造特征和构造演化. 地球科学,14 (1):29~36.
- 张爱梅,王岳军,范蔚茗,张菲菲,张玉芝. 2010. 闽西南清流地区加 里东期花岗岩锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素组成研究. 大地构 造与成矿学,31(3):408~418.
- 张芳荣,舒良树,王德滋,于津海,沈渭洲. 2009.华南东段加里东期 花岗岩类形成构造背景探讨. 地学前缘,16(1):248~260.
- 张芳荣. 2011. 江西中一南部加里东期花岗岩地质地球化学特征及 其成因. 南京大学博士学位论文,86~97.
- 张旗, 王焰, 李承东, 王元龙, 金惟俊, 贾秀勤. 2006. 花岗岩的 Sr-Yb 分类及其地质意义. 岩石学报, 22(9):2249~2269.
- 张旗,金惟俊,李承东,王元龙. 2009. 中国东部燕山期大规模岩浆 活动与岩石圈减薄与大火成岩省的关系. 地学前缘,16(2):21 ~51.
- 张文兰,王汝成,雷泽恒,华仁民,朱金初,陆建军,谢磊,车旭东,章荣 清,姚远,陈骏. 2011. 湘南彭公庙加里东期含白钨矿细晶岩脉 的发现. 科学通报,56(18): 1448~1454.
- 周新民. 2003. 对华南花岗岩研究的若干思考. 高校地质学报,9 (4):556~565.
- 张永忠,吕少伟,邓必荣. 2005. 湘赣边境志留纪花岗岩岩石谱系单 位特征及侵位机制探讨.资源调查与环境,26(1):12~18.
- 赵芝,陈振宇,陈郑辉,侯可军,赵正,许建祥,张家菁,曾载淋. 2012. 赣南加里东期阳埠(垇子下)岩体的锆石年龄、构造背景及含矿 性评价. 岩矿测试,30(3):530~535.
- 赵振华,熊小林,王强,乔玉楼. 2008. 铌与钽的某些地球化学问题. 地球化学,37(4): 304~320.
- Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report  $^{204}$  Pb. Chem Geol, 192:59 ~ 79.
- Bai Daoyuan, Huang Jianzhong, Liu Yaorong, Wu Guangying, Ma Tieqiu, Wang Xianhui. 2005 &. Framework of Mesozoic tectonic evolution in southeastern Hunan and the Hunan – Guangdong – Jiangxi border area. Geology in China, 32(4) :557 ~570.
- Bai Daoyuan, Huang Jianzhong, Ma Tieqiu, Wang Xianhui. 2006&. Geology and geochemistry of the Silurian Penggongmiao granitic pluton in the southeastern Hunan province and its implication for tectonic setting. Geoscience, 20(1):130~140.
- Bai Daoyuan, Zhong Xiang, Jia Pengyuan, Xiong Xiong, Huang Wenyi. 2014 &. Zircon SHRIMP U-Pb dating and geochemistry of Caledonian Miaoershan pluton in the western part of the Nanling Mountains and their tectonic significance. Acta Petrologica et Mineralogica, 33(3):407 ~423.
- Chappell B W, White A J R. 1992. I- and S-type granites in the Lachlan Fold Belt. Transactions of the Royal Society of Edinburgh Earth Sciences, 83:1 ~ 26.
- Cheng Jiangfeng, Guo Xinsheng, Tang Jiafu, Zhou Taixi. 1999 &. Nd isotopic model ages: implications of the growth of the continental

第5期

crust of southeastern China. Journal of Nanjing University (Natural Sciences),  $35(6):649 \sim 658$ .

- Cheng Shunbo, Fu Jianming, XU Deming, Chen Xiqing, Wang Xiaodi. 2009. Zircon SHRIMP U-Pb dating and geochemical characteristics of Daning batholith in Northeast Guangxi. Geology in China, 36 (6): 1278 ~1288.
- Cheng Wen, Wan Yusheng, Li Huaqin, Zhang Zongqing, Dai Tongmo, Shi Zeen, Sun Jingbo. 2011&. Isotope geochronology: technique and application. Acta Geologica Sincia, 85 (11): 1917 ~ 1947.
- Chen Xiqing, Fu Jianming, Cheng Shunbo, Ma Liyan, Lu Youyue. 2015&. Geochemical characteristics and Zircon SHRIMP U-Pb dating of Baofengxian stocks in southern Hunan. Mineral Deposits, 34(3):602~616.
- Collins W J, Beams S D, White A J R, Chappell B W. 1982. Nature and origin of A-type granites with particular reference to southeastern Australia. Contributions to Mineralogy & Petrology, 80(2):189 ~ 200.
- Corfu F. 2003. Atlas of Zircon Textures. Reviews in Mineralogy & Geochemistry, 53(1):469 ~ 500.
- Cui Yuanyuan, Zhao Zhidan, Jiang Ting, Yang Jinbao, Ding Cong, Sheng Dan, Hu Zhaochu. 2013&. Geochronology, geochemistry and petrogenesis of the Early Paleozoic granitoids in southern Jiangxi province. Petrologica Sincia, 29(11):4011~4024.
- Deng Jinfu, Liucui, Feng Yanfang, Xiao Qinghui, Di Yongjun, Su Shangguo, Zhao Guochun, Duan Peixin, Dai Meng. 2015a&. On the correct application in the common igneous petrological diagrams: discussion and suggestion. Geological Review, 61(4):717 ~734.
- Deng Jinfu, Feng Yanfang, Di Yongjun, Xiao Qinghui, Su Shangguo, Zhao Guochun, Meng Fei, Ma Shuai, Yao Tu. 2015b&. Magmatic arc and ocean—continent transition. Geological Review, 61 (3): 473~484.
- Fu Jianming, Li Huaqin, Qu Wenjun, Ma Liyan, Yang Xiaojun, Wei Junqi, Liu Guoqing. 2008 &. Determination of mineralization epoch of quartz-vein-type tungsten depositsin Shixig Region, northerm Guangdong and its geological significance. Geotectonica et Metallogeni, 31(1): 57 ~ 62.
- Hua Renming, Zhang Wenlan, Chen Peirong, Zhai Wei, Li Guanglai. 2013 &. Relationship between Caledonian granitoids and large-scale mineralization in South China. Geological Journal of China Universities, 19(1):1~11.
- Irvine T. N and Baragar W. R. A. 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. Canad J Earth Sci,523 ~548
- Le Maitre R W, Bateman P, Dudek A. 1989. A Classification of igneous rocks and glossary of terms . Oxford: Blackwel.
- Liégeois J P, Navez J, Hertogen J. 1998. Contrasting origin of postcollisional high-K calc-alkaline and shoshonitic versus alkaline and peralkaline granitoids. The use of sliding normalization. Lithos , 45 (1):1 ~ 28.
- Li Xianhua. 1990#. The age of magmatic activity and crustal movement for the Wanyangshan—Zhuguangshan complex granite batholith. Science in China( Series B ), 20(7):747 ~755.
- Li Xianhua, Gui Xuntang. 1991 #. Provenance for the Caledonian granitoids from Wanyangshan and Zhuguangshan, southeastern China—I: Evidences from Sr—Nd—Pb—O isotopic systematics. Science in China( Series B ), 21(5):533 ~ 540.
- Li Xianhua. 1993 #. On the genesis of Caledonian granitoid rocks at Wanyangshan and Zhuguangshan, southeast China: Evidence from

trace elements and rare-elements geochemistry. Geochimica, (1):  $35 \sim \! 43.$ 

- Li Xianhua. 1998 &. The Jinning orogeny in southeast China geochronological and geochemical constraints. Chinese Journal of Geophysics, 41(1):184 ~ 194.
- Li Wuxian, Li Xianhua, Li Zhengxiang. 2005. Neoproterozoic bimodal magmatism in the Cathaysia Block of south China and its tectonic significance. Precambrian Research, 136(1):51 ~ 66.
- Ludwig K R. 2001. Squid 1. 02: A User Manual. Berkeley Geochronological Center Special Publication, 2 ~19.
- Lu Yuanfa. 2004&. GeoKit: A geochemical toolkit for Microsoft Excel. Geochimica, 35(5): 459 ~ 464.
- Mao Jingwen, Xie Guiqing, Guo Chunli, Yuan Shunda, Cheng Yanbo, Chen Yuchuan. 2008&. Spatial—temporal distribution of Mesozoic in South China and their metalloenic ore deposits settings. Geological Journal of China Universities, 14(4):510 ~526.
- Sandiford M. 2003. Melting the crust——where is the heat. Geoscience Australia: the Ishihara Symposium——granites and associated metallogenesis, 111 ~ 114.
- Shen Weizhou, Zhu Jinchang, Liu Changshi Xu Shijin, Ling Hongfei. 1993&. Sm-Nd isotopic study of basement metamorphic rocks in south china and its constraint on material sources of granitoids. Acta Petrologica Sincia. 9(2):115~124.
- Shen Weizhou, Ling Hongfei, Li Xianwu, Huang Xiaolong, Wang Dezi. 1999&. Study on the Nd—Sr isotopic compositions of granitoids in SE China. Geological Journal of China Universities, 5(1):22~32.
- Shen Weizhou, Zhang Fangrong, Shu Liangshu, Wang Lijuan, Xiang Lei. 2008&. Formation age, geochemical characteristics of the Ninggang granite body in Jiangxi province and its tectonic significance. Acta Petrologica Sincia. 24(10):2244 ~2254.
- Shu Liangshu. 2006 & Predevonian tectonic evolution of South China from Cathaysian Block to Caledonian period folded orogenic belt. Geological Journal of China Universities, 12 (4): 418 ~431.
- Shu Liangshu, Faure M, Jiang Shaoyong, Yang Qun, Wang Yujing. 2006. SHRIMP zircon U-Pb age, litho- and biostratigraphic analyses of the Huaiyu Domain in South China—Evidence for a Neoproterozoic orogen, not Late Paleozoic—Early Mesozoic collision. Episodes, 29(4):244 ~ 252.
- Shu Liangshu, Faure M, Wang Bo, Zhou Xinmin, Song Biao. 2008. Late Palaeozoic—Early Mesozoic geological features of South China: Response to the Indosinian collision events in Southeast Asia. Comptes Rendus Geosciences, 340(2):151 ~ 165.
- Sun Jian, Ni Yanjun, Bai Daoyuan, Ma Tieqiu. 2008&. Geochemistry, petrogenesis and tectonic setting of early Yaogangxian granite pluton, southeastern Hunan province. Geology and mineral resources of South China, (3):12~18.
- Sun S S, Nough W F. 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. Geological Society London Special Publications, 1989, 42:313 ~ 345.
- Sun Tao. 2006&. A map showing the distribution of granites in South China and its explanatory notes. Geological bulletin of China, 25 (3):332 ~335.
- Sylvester P J. 1998. Post-collisional strongly peraluminous granites. Lithos, 45:29 ~44.
- Taylor S R, Mclennan S M. 1985. The continental crust: Its composition and evolution. Journal of Geology, 94(4).
- Treloar P J, Coward M P, Harris N B W. 1992. Himalayan-Tibetan

analogies for the evolution of the Zimbabwe craton and Limpopo belt. Precambrian Research. 55;571 ~ 587.

- Turner S, Sandiford M and Foden J. 1992. Some geodynamic and compositional constraints on "postorogenic" magmatism. Geology, 20: 931 ~ 934.
- Pearce J A. Harris N B W, Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks, Petroh, 25: 956 ~ 983.
- Vavra G. 1990. On the kinematics of zircon growth and its petrogenetic significance: A cathodoluminescence study. Contributions to Mineralogy and Petrology, 106: 90 ~ 99.
- Wang Dezi, Liu Changshi, Shen Weizhou. 1993&. The contrast between Tonglu I-type and Xiangshan S-type clastoporphyritic lava. Acta Petrologica Sinica, 9 (1):44 ~ 53.
- Wang Dezi, Shen Weizhou. 2003&. Genesis of granitoids and crustal evolution in southeast China. Earth Science Frontiers (China University of Geosciences, Beijing), 10(3):209 ~ 220.
- Wang Lei, Long Wenguo, Zhou Dai. 2013 &. Zircon LA-ICP-MS U-Pb age of Caledonian granites from Precambrian basement in Yunkai area and its geological implications. Geology in China, 40(4):1016 ~1029.
- Wang Yonglei, Wang Denghong, Zhang Changqing, Hou Kejun, Wang Chenghui. 2011 &. LA-ICP-MS Zircon U-Pb dating of the Qinjia granite in Guangxi province and its geologic significance. Acta Geologica Sincia, 85(4):475~481.
- Wang Yonglei, Chen Zhenyu, Chen Zhenghui, Hou Kejun, Zhao Zheng, Xu Jianxiang, Zhang Jiajing, Zeng Zailin. 2012&. Zircon U-Pb dating of the Hunandong granite and its Caledonian tectonic significance, South Jiangxi—East Hunan province. Rock and Mineral Analysis, 31(3):525 ~ 529.
- Wu Fujiang, Zhang Fangrong. 2003 &. Features and genesis of Caledonian granites in the Wugongshan in the eastern segment of the northern margin of South China plate. Geology in China, 30(2): 166 ~ 172.
- Wu Guangying, Ma Tieqiu, Feng Yanfang, Yan Quanrn, Liu Fuguo, Bo Daoyuan. 2008 &. Geological and geochemical characteristics and genesis of the Caledonian Wanyangshan granite in the Naming Mountains, South China. Geology in China, 35(4): 608 ~ 617.
- Wu Yuanbao, Zheng Yongfei. 2004. Genetic mineralogy of zircon and its constraint on the interpretation of U-Pb zircon ages. Chinese Science Bulletin, 49(16):1589 ~ 1604.
- Xu Deru, Chen Guanghao, Xia Bin, Li Pengchun, He Zhuanli. 2006&. The Caledonian adakite-like granodiorites in Banshanpu area eastern Hunan province, South China: petrogenesis and geological significance. Geological Journal of China Universities, 12(4): 507 ~521.
- Xiao Qinhui, Deng Jinfu, Ma Daquan. 2002#. Thinking and methods of granite research. Beijing: Geological Publishing House, 21 ~ 36.
- Xiao Qinhui, Deng Jinfu, Qiu Ruizhao, Liu Yong, Feng Yanfang. 2009 &. A preliminary study of the relationship between granitoids and the growth of continential crust: a case study of formation of key orogen granitoids in China. Geology in China, 36(3):594 ~622.
- Xu Xianbing, Zhang Yueqiao, Shu Liangshu, Jia Dong, Wang Ruirui, Xu Huaizhi. 2009 &. Zircon La-ICPMS U-Pb dating of the Weipu granitic pluton in southwest Fujiian and the Changpu migmatite in

South Jiangxi: constrains to the timing of Caledonian Movement in Wuyi Mountains. Geological Review, 55(2):277 ~285.

- Xu Xisheng. 2008 &. Several problems worthy to be noticed in the research of granites and volcanic rocks in SE China. Geological Journal of China Universities, 14(3): 283 ~ 294.
- Xu Xisheng, He Zhenyu. 2012&. Progress in granite studies. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 31(3):205 ~ 209.
- Yuan Honglin, Wu Fuyuan, Gao Shan, Liu Xiaoming, Xu Ping, Sun Deyou. 2003#. Determination of U-Pb age and rare earth element concentration of zircons from Cenozoic intrusions in northeastern China by laser ablation ICP-MS. Chinese Science Bulletin, 48 (14):1511~1520.
- Yang Sennan. 1989&. The formation features and tectonic evolution of the South China taphrogenic system. Earth Science(Journal of China University of Geosciences), 14(1): 29 ~ 36.
- Zhang Aimei, Wang Yuejun, Fan Weiming, Zhang Feifei, Zhang Yuzhi. 2010&. LA -ICP MS Zircon U-Pb geochronology and Hf isotop compositions of Caledonian granites from the Qinggiu area, southwest Fujian. Geotectonica et Metallogeni, 31(3):408~418.
- Zhang Fangrong, Shu Liangshu, Wang Dezi, Yu Jinhai, Shen Weizhou. 2009&. Discussions on the tectonic setting of Caledonian granitoids in the eastern segment of South China. Earth Science Frontiers (China University of Geosciences, Beijing), 16(1):248 ~ 260.
- Zhang Fangrong, 2011&. The geological and geochemical characteristics and its petrogenesis for Caledonian granites in the central—southern Jiangxi province. Ph. D Dissertation Nanjing University, 86 ~97.
- Zhang Qi, Wang Yan, Li Chengdong, Wang Yuanlong, Jin Weijun, Jia Xiuqin. 2006&. Granite classification on the basis of Sr and Yb contents and its implications. Petrologica Sincia, 22(9):2249 ~ 2269.
- Zhang Qi, Jin Weijun, Li Chengdong, Wang Yuanlong. 2009&. Yanshanian large-scale magmatism and lithosphere thinning in eastern China: Relation to large igneous province. Earth Science Frontiers (China University of Geosciences, Beijing), 16(2):21 ~51.
- Zhang Wenlan, Wang Rucheng, Lei Zeheng, Hua Renming, Zhu Jinchu, Lu Jianjun, XieLei, Che Xudong, Zhang Rongqing, Yao Yuan, Chen Jun. 2011#. Zircon U-Pb dating confirms existence of a Caledonian scheelite-bearing aplitic vein in the Penggongmiao granite batholith, South Hunan. Chinese Science Bulletin, 56 (18):1448 ~ 1454.
- Zhou Xinming. 2003&. My thinking about granite geneses of South China. Geological Journal of China Universities, 9(4):556~565.
- Zhang Yongzhong, Lü Shaowei, Deng Birong. 2005&. On the rock hierarchical units characteristics and the emplacement mechanism of Silurian granite in the boundary between Hunan and Jiangxi. Resources Survey & Environment, 26(1):12~18.
- Zhao Zhi, Chen Zhenyu, Chen Zhenghui, Hou Kejun, Zhao Zheng, Xu Jianxiang, Zhang Jiajing, Zeng Zailin. 2012 &. Zircon U-Pb Dating, tectonic setting and evaluation of the Caledonian Yangbu pluton in ore-bearing properties South Jiangxi. Rock and Mineral Analysis, 30(3):530 ~535.
- Zhao Zhenhua, Xiong Xiaolin, Qiao Yulou. 2008 &. Some aspects on geochemistry of Nb and Ta. Geochimica, 37(4):304 ~320.

# LA-MC-ICP-MS Zircon U-Pb Age and Geochemical Characteristics of Wanyangshan Batholith in Nanling Area, South China, and Tectonic Implications

JI Wenbing<sup>1)</sup>, LU Yuanfa<sup>1)</sup>, FU Jianming<sup>2)</sup>, CHENG Shunbo<sup>2)</sup>, LU Youyue<sup>2)</sup>

College of Resources and Environment, Yangtze University, Wuhan, 430100;
 Wuhan Center of China Geological Survey, Wuhan, 430205

**Objectives**: Wanyangshan batholith is an important part of Caledonian magmatism in south China. Though some work have been performed to reveal petrology, geochemistry, U-Pb dating and tectonic setting of the batholith, but lack of work on tectonic setting of Caledonian granitoids. We discuss tectonic setting of Caledonian granitoids and provide new data for early Late Paleozoic granite and crustal evolution in south China.

**Methods**: We apply methods including zircon LA-ICP-MS U-Pb dating, main elements, trace elements, rare earth elements and Sr, Nd isotopic analysis and testing. We analyze the interior structures of zircons by the CL technology and in-situ zircon U-Pb dating of a biotite two-mica monzogranite sample. For main elements analysis and testing, we apply burning method for Si summation, volumetric method for Al and Fe<sup>2+</sup>, spectrophotometric method for Fe<sup>3+</sup>, Ti and P, atomic absorption spectrometry for K, Na, Ca, Mg and Mn. Trace elements and rare earth elements have been tested on the X series Thermo 2 type inductively coupled plasma mass spectrometry. Sr and Nd isotope analysis has been performed on the MAT261 multi receiver mass spectrometer.

**Results**: We obtained the 16 points of zircon <sup>206</sup> Pb/<sup>238</sup> U weighted average ages of  $(446.0 \pm 3.4)$  Ma(MSWD = 0.15, 95% confidence degree), suggesting crystallization age of the batholith. The result indicates it formed during late Ordovician to Early Silurian the Southern China Caledonian magmatism. Geochemical analyses showed that: the Wanyangshan batholith has a SiO<sub>2</sub> content of 65.91 to 73.35%, an average K<sub>2</sub>O content of 4.20%,  $(Na_2O + K_2O)$  content of 5.90 to 7.88%. the average of K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and ASI are 1.64, 13.81% and 1.09%. Which indicates granitic pluton is high-K calc-alkaline peraluminous. The contents of Rb, (Th + U), (Nb + La + Ce), Nd, (Zr + Hf + Sm) and (Y + Yb + Lu) are relatively higher and the granite intrusion has moderate  $\sum REE (159.71 \times 10^{-6} \sim 262.78 \times 10^{-6})$ . It is enriched in LREE and depleted in HREE (LREE/HREE = 6.16 ~ 10.01),  $(La/Yb)_N = 6.37 \sim 12.17$ , with obvious negative Eu anomaly ( $\delta Eu = 0.30 \sim 0.59$ ). The Wanyangshan granite has a range of initial strontium from 0.71223 to 0.72509, and a range of  $\varepsilon_{Sr}(t)$  from 117.5 to 299.9,  $\varepsilon_{Nd}(t)$  ranges from -9.39 to -7.30, with the depleted mantle model age of 1.77 ~ 1.95 Ga.

**Conclusions**: Those methods above have been successfully applied to formation mechanism of Caledonian Wanyangshan batholith, providing some new evidences for understanding the tectonic setting of Southern China Caledonian granites.

Acknowledgements: This study was financially supported by the Chinese Geological Surveey (No. 1212011120804, No. 12120114084501 and No. 12120114020701). We would like to express our thanks to Xia Jinlong from Wuhan Center of China Geological Survey for explanation of isotopic dating. We would also like to express our thanks to reviewers and editors for valuable advice on this paper.

Keywords: Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating ; Geochemical characteristics; Tectonic implications; Wanyangshan batholith ; Nanling

First author: JI Wenbing, born in 1991, graduate student, engaged in lithogeochemistry, Email: 997967081 @ qq. com

Corresponding author: LU Yuanfa, born in 1959, researcher, engaged in geochemistry and isotopic geochronology, Email: Lyuanfa@163.com

Manuscript received on: 2016-01-12; Accepted on: 2016-08-24; Edited by: ZHANG Yuxu.

Doi: 10.16509/j.georeview.2016.05.016