

赣东北地区瑶里花岗岩年代学、地球化学 及其岩石成因

白玉岭¹, 王宗起², 王涛³, 吴发富⁴

(1. 内蒙古自治区地质调查院, 内蒙古 呼和浩特 010020; 2. 中国地质科学院 矿产资源研究所, 北京 100037;
3. 中国地质科学院 地质研究所, 北京 100037; 4. 中国地质调查局 武汉地质调查中心, 湖北 武汉 430223)

摘要: 瑶里花岗岩位于钦杭结合带赣东北地区, 侵入于双桥山岩群和溪口岩群中, 主要由石英、钾长石、斜长石、黑云母和少量白云母组成。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年结果显示, 该岩体形成年龄为 132.0 ± 1.9 Ma, 获得的捕获锆石年龄表明该区在 141.7 ± 2.6 Ma 发生过岩浆活动事件。岩体地球化学特征表现出较高的 SiO_2 含量和 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值, 低的 Al_2O_3 、 MgO 、 CaO 和 TiO_2 含量, 铝饱和指数(A/CNK)为 $0.92 \sim 1.17$, 大部分大于 1.1, 属于高钾钙碱性过铝质花岗岩。岩石富集大离子亲石元素, 亏损 Nb 和 Ti 元素, 具有明显的轻稀土元素富集特征, δEu 值为 $0.30 \sim 0.86$ 。通过与相邻岩体的对比, 发现瑶里岩体与同时期的鹅湖和卧龙岗岩体的地球化学特征相似, 均可能由地壳深处变质泥质岩发生部分熔融形成。但是, 瑶里岩体与中侏罗世德兴铜厂花岗岩长斑岩岩石学特征和地球化学性质不同, 表明中侏罗世至早白垩世, 花岗岩的形成温度和压力降低, 深度变浅, 指示钦杭结合带赣东北地区中侏罗世至早白垩世为碰撞后的伸展环境。

关键词: 赣东北; 瑶里岩体; 锆石 U-Pb 年龄; 岩石成因

中图分类号: P588.12⁺1; P597

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2015)01-0035-16

LA-ICP-MS zircon U-Pb age, geochemistry and petrogenesis of the Yaoli pluton in northeastern Jiangxi Province

BAI Yu-ling¹, WANG Zong-qi², WANG Tao³ and WU Fa-fu⁴

(1. Geological Survey Institute of Inner Mongolia, Hohhot 010020, China; 2. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 4. Wuhan Center of China Geological Survey, Wuhan 430223, China)

Abstract: Located in the northeast of Jiangxi Province along the Qinzhou-Hangzhou junction belt, the Yaoli granite intruded into the Shuangqiaoshan rock group and Xikou rock group. The granite is mainly composed of quartz, potash feldspar, plagioclase, biotite and minor muscovite. The LA-ICP-MS zircon U-Pb dating shows that the one-forming age of the Yaoli pluton is 132.0 ± 1.9 Ma, with another age of 141.7 ± 2.6 Ma, suggesting that another magmatic activity occurred at 141.7 ± 2.6 Ma. The Yaoli pluton is characterized by high $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ ratios and SiO_2 content as well as low content of Al_2O_3 , MgO , CaO and TiO_2 . The A/CNK ratios vary from 0.92 to 1.17, mostly higher than 1.1, implying that the Yaoli granite belongs to high-K calc-alkaline and

收稿日期: 2013-11-20; 修订日期: 2014-12-19

基金项目: 中国地质调查局项目(1212011085408); 国土资源部公益项目(201211024-04); 中央高校基本科研业务费专项资金(53200959380); 中国地质调查局项目(12120114017201)

作者简介: 白玉岭(1989-), 男, 硕士研究生, 构造地质学专业, E-mail: baiyuling4511@126.com; 通讯作者: 王宗起, 研究员, E-mail: kcwzq@vip.sina.com。

peraluminous series. The Yaoli granite is also enriched in LILEs but depleted in HFSEs of Nb and Ti. The δEu values vary from 0.30 to 0.86. The granite is remarkably characterized by enrichment of LREE, which is similar to things of Ehu pluton and Wolonggu pluton which were formed at the same time as the Yaoli granite. They were all generated by partial melting of metamorphosed argillaceous rock in the deep crust; nevertheless, the Yaoli granite is different from Tongchang granite, which formed in Middle Jurassic. These data show the decrease of formation temperature and pressure of the granite from Middle Jurassic to Early Cretaceous, suggesting that the tectonic setting of the northeast of Jiangxi Province along the Qinzhou-Hangzhou junction belt was an extensional tectonic environment.

Key words: northeastern Jiangxi Province; Yaoli granite; zircon U-Pb dating; petrogenesis of rocks

花岗岩是大陆地壳的重要组成部分,在造山带内分布尤为广泛。花岗岩的成因与壳幔相互作用有着密切的联系,不同程度的壳幔混合可以形成不同类型的花岗岩,并且花岗岩与金属矿床成矿关系密切,强烈而频繁的岩浆活动为矿体的形成提供了热源和物质来源,因此通过花岗岩的岩石成因及其形成的物理化学条件分析,不但可以研究其形成的大地构造背景,还对成矿作用和成矿地质背景研究有重要的地质指示意义。

赣东北地区处于江南造山带东段,区内断裂构造发育,中生代岩浆活动强烈,分布着与花岗岩相关的铜金多金属矿床,如著名的德兴斑岩型铜矿床形成于中侏罗世 171~176 Ma 的花岗闪长斑岩体中(王强等, 2004; 水新芳等, 2012; 郭博然等, 2013)。在德兴斑岩型铜矿的相邻地区出露有瑶里、鹅湖、卧龙谷等岩体,呈北东向展布,岩性主要为黑云母二长花岗岩。早期研究表明,鹅湖岩体形成时代为早白垩世(121 Ma),与裂谷带诱发的软流圈地幔上涌有关(赵鹏等, 2010);卧龙谷岩体年龄为 133 Ma,被认为是壳源变质沉积岩部分熔融的产物(郭博然等, 2013);而瑶里花岗岩早期被划归为鹅湖岩体的一部分,岩体的 Rb-Sr 等时线年龄数据有 165 Ma(沈渭洲等, 1991)和 120~133 Ma(吴文革等, 2004)。早期研究认为,瑶里、鹅湖和卧龙谷岩体可能为连续多期次的岩浆活动的产物,但目前缺乏系统的地球化学对比研究,特别是瑶里岩体,作为赣东北燕山期花岗岩带的重要组成部分,不但缺乏高精度年代学数据和地球化学分析,也缺乏与区域成矿相关岩体关系的对比工作。因此,本文对瑶里岩体进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学、岩石学和地球化学研究,以进一步确定瑶里花岗岩体的成岩时

代,探讨其岩石成因和岩体形成环境,同时通过与区域内相邻岩体的岩石学、地球化学特征的对比,分析研究区内燕山期不同岩体在岩石成因和形成环境上的差异与联系及其对成矿地质背景的制约,并且探讨它们的构造演化背景。

1 区域地质

赣东北地区大地构造位置属于扬子板块与华夏板块结合的钦杭成矿带东段。目前普遍认为钦-杭结合带东北起于杭州湾,经赣中和湘东北,西南延伸至广西钦州湾,整体呈北东向反 S 弧形展布,全长近 2 000 km,宽约 80~100 km,面积约 $1.5 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。该带南界大致沿江山—绍兴—广丰—萍乡—茶陵—郴州—怀集展布,北部边界不连续,大约以歙县—景德镇—宜丰为界(杨明桂等, 1997; 余达淦等, 2006)。区内构造线以 NE 向为主,发育一系列 NE-NEE 向断裂和剪切带,花岗岩产出受断裂带控制。鹅湖岩体沿景德镇—祁门深断裂带侵位,德兴花岗闪长斑岩位于赣东北构造混杂带内。

区内出露地层主要是新元古代双桥山群和溪口群(图 1),岩性为一套具有复理石建造的浅变质火山碎屑沉积岩夹变质火山岩,总体呈北东向展布,局部尚残留鲍马序列等浊流沉积特征。在钦-杭结合带中,中新元古带岩浆活动强烈,但是古生代构造岩浆活动总体较弱,在中生代尤其是燕山期岩浆活动强烈,区内广泛出露中生代花岗岩体,中晚侏罗世花岗岩分布在研究区东南部,与成矿密切相关主要有铜厂斑岩体;早白垩世花岗岩分布在研究区东北部,靠近宜丰—景德镇—祁门断裂带附近 出露面积相对较大,包括鹅湖岩体、金村岩体、瑶里岩体和卧龙谷岩体等。

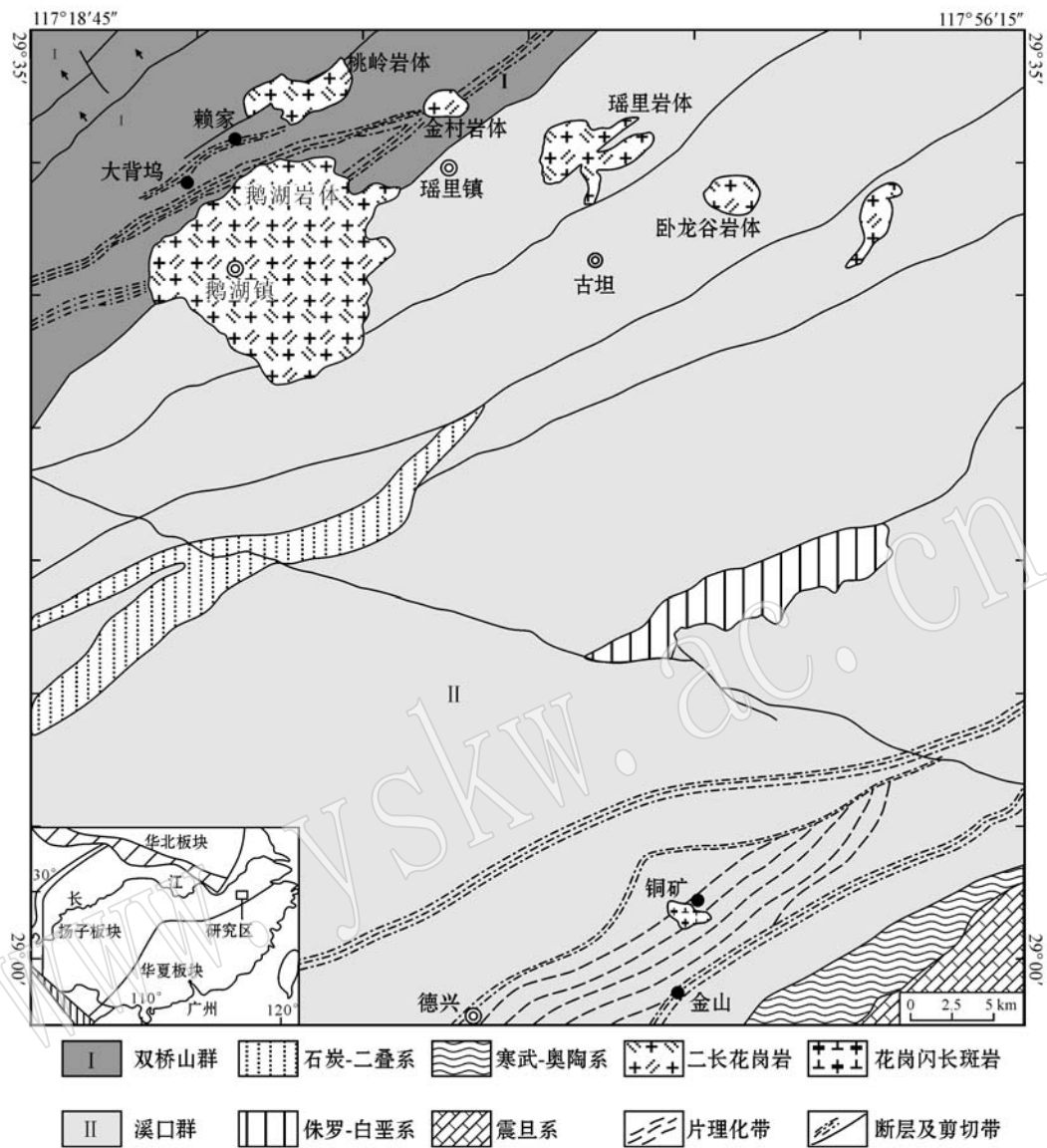


图 1 瑶里岩体地质简图(据江西省地质调查院,2011^①修编)

Fig. 1 Sketch geological map of the Yaoli pluton (modified from Geological Survey Institute of Jiangxi Province, 2011^①)

2 岩石学特征

瑶里岩体出露面积约 13 km²,岩性与鹅湖岩体、卧龙谷岩体岩性相同,为黑云母二长花岗岩,与围岩溪口群浅变质火山碎屑沉积岩呈岩浆侵入关系。岩石表面呈灰白色,中粗粒斑状结构,块状构造(图 2a、2b)。

岩石主要矿物成分为斜长石、钾长石、石英、黑云母和少量白云母(图 2c、2d)。斜长石呈自行板状,

具聚片双晶,大小 1 mm ~2 mm×2 mm ~3 mm,含量约 40%;钾长石表面较脏,呈长条状,具卡氏双晶,含量约 25%~30%;石英呈它形粒状,粒径 1 mm 左右,含量 25%;黑云母斑晶大小不一,具多色性呈绿色或黄褐色条状,含量不足 10%;白云母无色透明,具较高干涉色,含量不足 5%。部分斜长石发生蚀变,表面发生轻微绢云母化;黑云母局部绿泥石化。岩石中亦含有呈高级白干涉色的后期碳酸盐矿物以及钛铁氧化物。

岩石镜下可见两种白云母:第1种呈自形或半

① 江西省地质调查院. 2011. 1:25 万景德镇幅地质调查报告.

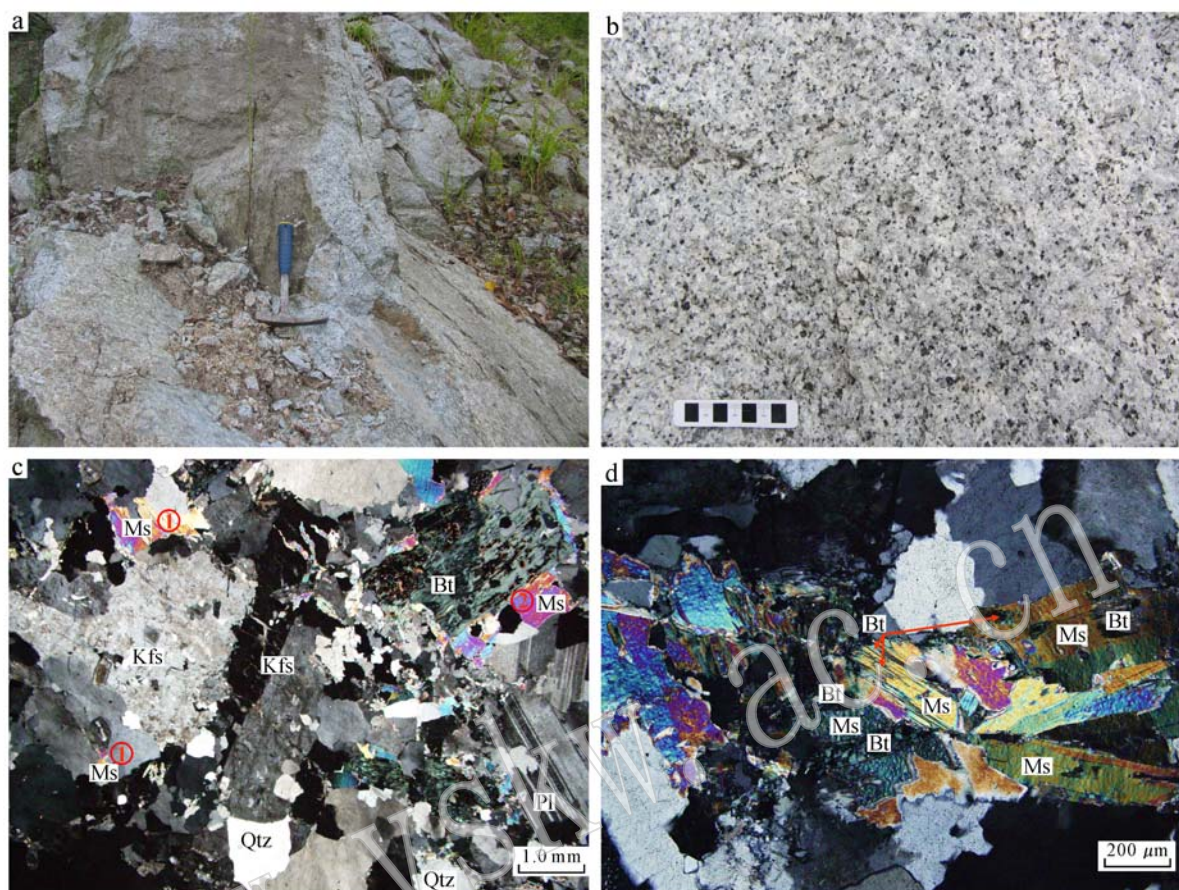


图2 瑶里花岗岩野外地质特征(a,b)和代表性显微照片(c,d)

Fig. 2 Outcrop photographs(a, b)and representative microphotographs(c, d)of the Yaoli granite

Qtz—石英; Kfs—钾长石; Pl—斜长石; Bt—黑云母; Ms—白云母

Qtz—quartz; Kfs—K-feldspar; Pl—plagioclase; Bt—biotite; Ms—muscovite

自形,粒径 0.2~1 mm 范围,存在于长石或石英等黑云母外的其他矿物的交接部位(图 2c①);第 2 种与黑云母解理平行,消光位相同,白云母和黑云母伴生(图 2c②)或者白云母呈现出沿解理缝产出或白云母内部保留有残留的黑云母(图 2d),应为交代黑云母形成。据 Miller 等(1981)提出的有关白云母鉴别特征,第 1 种应属花岗岩中的原生白云母。第 2 种白云母争议较大。章邦桐等(2010)以赣南富城 SP 花岗岩为例,通过花岗岩主要造岩矿物的结晶顺序,结合白云母、黑云母稳定曲线及合成花岗岩初融曲线对比分析,认为第 2 种白云母应属于原生白云母。本文据章邦桐等(2010),认为岩石内两类白云母均为原生白云母。

3 分析测试方法

对瑶里黑云母二长花岗岩(12YL-1~4)进行了

LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年。野外采集瑶里岩体没有次生蚀变和风化的岩石样品,碎样和锆石挑选工作在河北省廊坊市区域地质矿产调查研究所实验室完成,在北京锆石领航科技有限公司完成锆石的制靶和阴极发光照相。锆石 U-Pb 定年测试分析在中国地质科学院矿产资源所 LA-MC-ICP-MS 实验室完成,所用仪器为 Finnigan Neptune 型多接收电感耦合等离子体质谱仪(MC-ICP-MS)及与之配套的 Newwave UP 213 激光剥蚀系统。测试过程中,在每测定 10 个样品前后重复测定两个 GJ1 锆石以对样品进行校正,并测量 1 个 Plesovice 锆石观察仪器的状态以保证测试的精确度。数据处理采用 ICP-MSS-DataCal 程序,对²⁰⁴Pb 含量异常高的分析点在计算时剔除,锆石年龄谱和图用 Isoplot3.0 程序获得。

岩石主微量及稀土元素分析在中国地质科学院国家地质实验测试中心完成。主量元素在 X 射线荧

光光谱仪(PW4400)上完成,Fe₂O₃ 和 FeO 用湿化学法单独分析,检测方法依据为:Al₂O₃、CaO、Fe₂O₃、K₂O、MgO、MnO、Na₂O、P₂O₅、SiO₂、TiO₂ 按 GB/T14506.28-2010 标准,FeO 按 GB/T14506.14-2010 标准;微量和稀土元素分析采用等离子质谱仪(PE300D),检测方法依据 DZ/T0223-2001。H₂O、LOI 的检测方法依据依次为 GB/T14506.2-2010、TY/T1253-1999。其中 SiO₂、Al₂O₃、FeO、CaO、MgO、K₂O、Na₂O 分析精度为 1%,Fe₂O₃、P₂O₅、TiO₂、MnO 的分析精度为 10%;微量和稀土元素含量大于 10×10⁻⁶ 的元素测试精度为 5%,小于 10×10⁻⁶ 的元素测试精度为 10%。

4 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素年龄

本次测试所选样品的锆石自形程度较高,多呈

长柱状,长轴约 80~300 μm,短轴约为 40~100 μm,长宽比近于 2:1~3:1,具有岩浆韵律环带(图 3a)。所测 18 粒锆石 Th/U 值变化于 0.25~0.81 之间,只有一粒的 Th/U 值为 2.29(表 1)。该粒锆石阴极发光照片明显偏白(图 3a),推测其可能是 U 元素丢失造成 Th/U 值偏高,年龄偏低。去除误差范围以外的锆石,各锆石测点²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄分布于 127.57~143.34 Ma 区间。9 粒锆石发育明显的震荡环带(图 3a),所有测点均位于锆石外侧环带,测点年龄分布于 127.57~134.64 Ma 之间,在谐和图上显示出良好的一致性,获得的²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄加权平均值为 132.0±1.9 Ma,MSWD=0.64(图 3b)。该年龄可以代表瑶里岩体的岩浆结晶年龄。其余 4 粒锆石环带清晰(图 3a),获得的²⁰⁶Pb/²³⁸U 分布于 137.89~143.84 Ma,其中 8、9、12 号锆石(图 3a)由于测点靠近核部,显示出较老的年龄,13 号测点位于边部,单

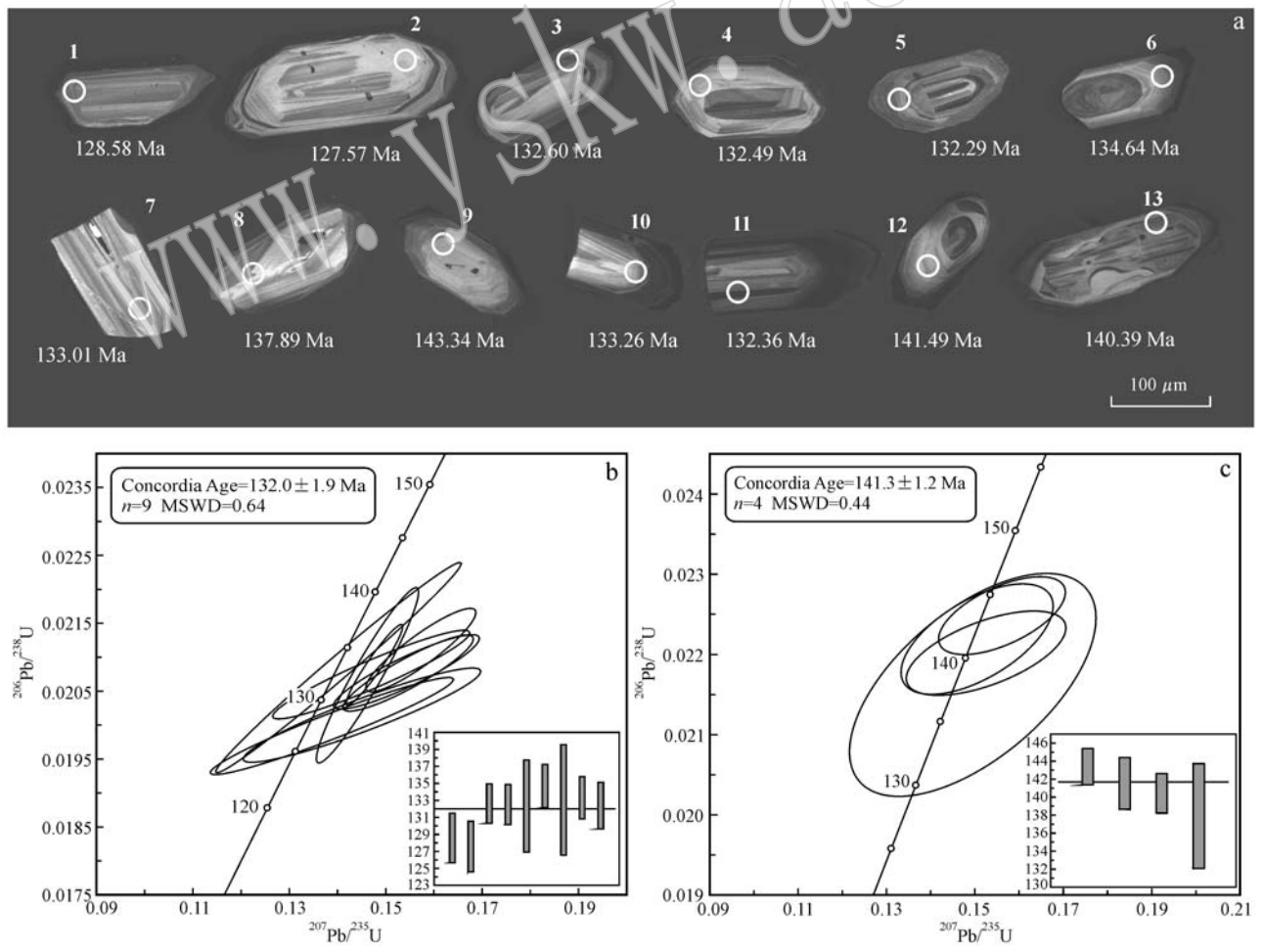


图 3 瑶里花岗岩代表性锆石阴极发光图(a)和锆石 U-Pb 年龄谐和图(b、c)

Fig. 3 Zircon cathodoluminescence images (a) and concordia diagram of LA-ICP-MS zircon U-Pb dating (b and c) for the Yaoli granite

表 1 瑶里花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年分析结果

Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb dating analytical data for the Yaoli granite

序号	测点	$\omega_B/10^{-6}$			Th/U	同位素比值						年龄/Ma	
		Pb	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ
1	12YL5-1	1.2	27.7	65.8	0.42	0.052 6	0.006 6	0.145 1	0.016 3	0.020 1	0.000 5	128.58	2.9
2	12YL5-2	20.8	39.2	17.1	2.29	0.050 5	0.005 8	0.138 9	0.016 6	0.020 0	0.000 5	127.57	3.0
3	12YL5-3	19.0	37.2	46.4	0.80	0.053 9	0.003 5	0.154 3	0.010 0	0.020 8	0.000 4	132.60	2.3
4	12YL5-4	29.7	46.3	58.7	0.79	0.053 7	0.002 9	0.154 7	0.008 9	0.020 8	0.000 4	132.49	2.3
5	12YL5-5	9.7	24.3	69.2	0.35	0.051 8	0.002 9	0.146 2	0.007 0	0.020 7	0.000 9	132.29	5.4
6	12YL5-6	8.5	25.2	97.8	0.26	0.054 5	0.003 3	0.157 3	0.007 5	0.021 1	0.000 4	134.64	2.6
7	12YL5-7	27.9	58.6	81.9	0.72	0.049 2	0.005 6	0.140 2	0.016 8	0.020 8	0.001 0	133.01	6.5
8	12YL5-8	17.4	34.8	59.2	0.59	0.051 1	0.007 4	0.149 5	0.018 4	0.021 6	0.000 9	137.89	5.8
9	12YL5-9	25.7	26.8	79.3	0.34	0.050 3	0.002 9	0.156 1	0.009 5	0.022 5	0.000 3	143.34	2.0
10	12YL5-10	11.6	40.8	154.7	0.26	0.051 3	0.001 2	0.147 7	0.003 9	0.020 9	0.000 4	133.26	2.5
11	12YL5-11	67.4	89.2	160.2	0.56	0.051 5	0.004 9	0.147 0	0.013 5	0.020 7	0.000 4	132.36	2.7
12	12YL5-12	23.0	27.6	52.9	0.52	0.049 1	0.003 4	0.150 5	0.011 4	0.022 2	0.000 5	141.49	2.9
13	12YL5-13	77.1	165.5	246.2	0.67	0.050 1	0.003 3	0.152 5	0.011 9	0.022 0	0.000 3	140.39	2.2

颗粒锆石年龄为 140.39 Ma, 4 粒锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值 141.3 ± 1.2 Ma, MSWD = 0.44(图 3c), 说明该锆石为岩浆捕获锆石, 指示区内曾有 141.3 ± 1.2 Ma 的岩浆活动。

5 地球化学特征

5.1 主量元素

本文分析了 4 个瑶里岩体二长花岗岩的主量元素特征(表 2), 同时收集区内前人测试的二长花岗岩体、卧龙谷岩体)的测试数据进行比较。瑶里岩体 SiO_2 含量为 72.09%~76.49%, 全碱($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) 含量较高, 为 6.52%~8.40%, 平均为 7.81%。岩石的里特曼指数(σ)小于 3.3, 在 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图解中分布于高钾钙碱性花岗岩系列区域(图 4a), 属于高钾钙碱性系列。 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值较高, 均大于 1(表 2), 岩石的铝碱指数(A/CNK) 在 0.92~1.68 区间, 且大部分都大于 1.1, 为过铝质花岗岩(图 4b)。

对比分析显示, 区内早白垩世岩体花岗岩总体表现为具有高的 SiO_2 含量(大部分 > 72%), 低的 Al_2O_3 (12.52%~13.45%)、 MgO (0.1%~0.72%)、 CaO (大部分在 0.27%~0.71% 范围内)、 TiO_2 (0.1%~0.38%) 含量。哈克图解中, 各岩体 Al_2O_3 、 MgO 、 CaO 含量与 SiO_2 含量呈现负相关性(图 5a、5b, 表 2), 且由鹅湖-瑶里-卧龙谷岩体, SiO_2 含量逐渐增加, Al_2O_3 、 MgO 、 CaO 含量逐渐降低(图 5a、5b, 表 2)。这说明该区早白垩世岩体以过铝质的高钾钙

碱性系列花岗岩为主(图 4)。

5.2 微量元素和稀土元素

赣皖邻区 3 个岩体稀土元素分布特征总体一致, 呈右倾式配分模式(图 6a), 稀土元素总量(ΣREE) 整体偏低, 大部分在 $54.51 \times 10^{-6} \sim 98.52 \times 10^{-6}$ 之间, 且三者整体没有明显差异; 轻重稀土元素比值为 5.78~12.13, 属于轻稀土元素富集型, 其中瑶里岩体轻重稀土元素比值最小(5.78~8.00), 卧龙谷岩体次之(6.14~10.28), 鹅湖岩体最大(8.18~12.13); 岩体的 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值也有相同的渐变规律, 说明轻重稀土元素分异程度鹅湖岩体最大, 卧龙谷岩体次之, 瑶里岩体最小。岩体球粒陨石标准化模式显示不同程度的铕负异常: 卧龙谷岩体 δEu 值最小(0.25~0.62), 异常最明显, 瑶里岩体次之(0.30~0.56), 鹅湖岩体 δEu 值最大(0.55~0.86), 显示不明显的负 Eu 异常。负 Eu 异常的存在说明源岩部分熔融残留物有斜长石存在, 由此可以推测卧龙谷岩体源岩残留物斜长石含量最高。

在原始地幔标准化微量元素蛛网图(图 6b)上, 瑶里、鹅湖和卧龙谷岩体曲线呈现良好的一致性, 大离子亲石元素富集, 高场强元素 Nb、Ti 表现亏损, Sr 异常明显, 且卧龙谷相较于瑶里岩体和鹅湖岩体 Sr 负异常更为显著, Sr 负异常表示源区同时还有斜长石残留, 说明三者源区都有斜长石残留。鹅湖、瑶里、卧龙谷岩体 SiO_2 含量依次逐渐增加, 三者 Sr 含量、 δEu 值呈现随 SiO_2 含量增加而逐渐减小的变化趋势(图 5c、5d)。

表 2 区内相关花岗岩主量元素($w_B/\%$)和微量元素($w_B/10^{-6}$)含量
Table 2 Major element($w_B/\%$)and trace element($w_B/10^{-6}$)content of the granites in the area

化学元素	瑶里岩体(本文测试)				鹅湖岩体(赵鹏等,2010)				卧龙岗岩体(郭博然等,2013)				
	12YL-1	12YL-2	12YL-3	12YL-4	EH-1	EH-2	EH-3	EH-5	WY01	WY02	WY03	WY04	WY05
SiO ₂	74.58	72.09	73.86	76.49	73.3	71.68	71.74	69.47	76.04	74.5	74.88	75.79	73.39
TiO ₂	0.18	0.20	0.24	0.15	0.21	0.33	0.32	0.38	0.10	0.10	0.11	0.11	0.23
Al ₂ O ₃	13.45	13.23	13.43	12.52	14.60	14.90	14.80	15.90	12.60	13.37	12.94	12.45	13.55
Fe ₂ O ₃	0.35	0.74	0.66	0.53	1.48	2.41	2.43	2.81					
FeO	1.20	0.99	1.13	0.88					1.48	1.48	1.68	1.63	1.89
MnO	0.04	0.05	0.04	0.03	0.04	0.06	0.06	0.06	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
MgO	0.25	0.28	0.32	0.23	0.27	0.63	0.60	0.72	0.10	0.11	0.20	0.10	0.26
CaO	0.71	1.74	0.62	0.48	1.28	1.70	1.61	0.68	0.37	0.45	0.39	0.27	0.94
Na ₂ O	3.14	3.97	2.85	2.96	3.14	3.29	3.15	2.04	2.99	3.28	3.11	3.05	2.77
K ₂ O	4.64	4.33	5.21	4.54	4.76	4.15	4.29	4.48	4.80	5.12	5.06	4.88	5.48
P ₂ O ₅	0.19	0.18	0.19	0.18	0.11	0.14	0.16	0.23	0.16	0.19	0.17	0.18	0.19
Total	98.73	97.80	98.55	98.99	99.19	99.29	99.16	96.77	98.67	98.63	98.57	98.49	98.73
LOI	1.08	1.26	1.28	0.99	0.90	0.85	0.90	3.09	0.97	1.02	1.03	1.12	0.89
K ₂ O/Na ₂ O	1.48	1.09	1.83	1.53	1.52	1.26	1.36	2.20	1.61	1.56	1.63	1.60	1.98
K ₂ O+Na ₂ O	7.78	8.30	8.06	7.50	7.90	7.44	7.44	6.52	7.79	8.40	8.17	7.93	8.25
CaO/Na ₂ O		0.23	0.44	0.22	0.16	0.41	0.52	0.51	0.33	0.12	0.14	0.13	0.09
Al ₂ O ₃ /TiO ₂	74.72	66.15	55.96	83.74	69.52	45.15	46.25	41.84	126.00	133.70	117.64	113.18	58.91
里特曼指数	1.92	2.37	2.11	1.68	2.06	1.93	1.93	1.61	1.84	2.24	2.09	1.92	2.24
A/CNK	1.17	0.92	1.17	1.17	1.15	1.15	1.16	1.68	1.17	1.14	1.14	1.15	1.11
Rb	348.0	298.0	347.0	322.0	182.0	150.0	159.0	170.0	392.0	407.0	412.0	364.0	308.0
Ba	82.4	97.2	365.0	62.3	254.0	205.0	237.0	274.0	75.8	60.0	84.9	68.2	430.0
Th	10.2	13.1	14.2	9.95	6.19	9.64	9.43	10.9	9.89	8.89	12.1	11.7	14.7
U	3.69	3.71	11.7	10.4	3.55	4.24	14.4	5.24	13.03	20.6	9.69	8.3	8.11
Ta	2.25	2.39	2.44	2.45	1.2	1.49	1.8	1.71	2.75	3.8	3.06	3.2	1.61
Nb	13.6	14.4	15.3	12.5	6.14	8.97	9.41	10.9	15.1	15.6	16.8	16.3	13.0
Zr	105.0	123.0	130.0	89.6	74.0	89.0	102.0	136.0	73.0	69.0	71.5	72.9	51.7
Sr	43.1	56.6	67.8	41.2	124.0	124.0	127.0	80.0	27.3	22.2	30.8	37.0	86.9
Hf	3.33	3.92	3.98	3.19	2.29	2.75	3.21	3.89	3.23	3.24	3.07	3.43	1.94
La	13.9	17.4	22.1	10.7	10.6	17.9	16.7	18.9	11.6	9.45	14.7	10.8	31.0
Ce	31.0	39.8	46.9	26.1	22.6	37.3	35.9	41.5	27.2	21.4	33.0	25.4	65.1
Pr	3.63	4.61	5.64	2.83	2.58	4.67	4.21	4.97	3.47	2.67	4.13	3.17	7.99
Nd	13.6	18.1	21.8	11.0	10.0	18.1	16.8	19.2	13.4	10.3	16.4	12.1	32.1
Sm	3.25	4.45	5.14	2.77	2.21	4.17	3.72	3.98	3.9	3.12	4.64	3.74	6.9
Eu	0.38	0.49	0.91	0.27	0.58	0.72	0.71	0.64	0.35	0.27	0.36	0.32	1.29
Gd	3.18	4.49	4.52	2.74	1.79	3.29	3.22	2.91	3.69	2.92	4.16	3.29	5.87
Tb	0.55	0.73	0.72	0.50	0.25	0.42	0.43	0.31	0.66	0.59	0.73	0.66	0.99
Dy	2.89	3.93	3.73	2.75	1.57	2.48	2.38	1.83	2.61	2.53	2.95	2.64	4.24
Ho	0.46	0.65	0.59	0.45	0.31	0.46	0.43	0.32	0.30	0.31	0.30	0.29	0.58
Er	1.27	1.87	1.60	1.30	0.90	1.27	1.21	0.88	0.50	0.66	0.57	0.56	1.29
Tm	0.16	0.24	0.2	0.18	0.13	0.17	0.17	0.13	0.06	0.09	0.06	0.06	0.15
Yb	1.09	1.55	1.26	1.19	0.86	1.11	1.15	0.84	0.34	0.53	0.37	0.37	0.83
Lu	0.15	0.21	0.19	0.17	0.13	0.17	0.17	0.13	0.04	0.06	0.04	0.05	0.10
Y	14.6	20.1	16.9	13.80	7.88	11.80	11.9	7.19	9.52	9.63	9.72	9.38	15.60
ΣREE	75.51	98.52	115.3	62.95	54.51	92.23	87.2	96.54	68.11	54.89	82.4	63.44	158.42
LREE	65.76	84.85	102.49	53.67	48.57	82.86	78.04	89.19	59.92	47.21	73.23	55.53	144.38
HREE	9.75	13.67	12.81	9.28	5.94	9.37	9.16	7.35	8.2	7.69	9.18	7.92	14.05
LREE/HREE	6.74	6.21	8.00	5.78	8.18	8.84	8.52	12.13	7.31	6.14	7.98	7.01	10.28
(La/Yb) _N	9.15	8.05	12.58	6.45	8.84	11.57	10.42	16.14	24.54	12.91	28.65	20.88	26.86
δEu	0.36	0.33	0.56	0.3	0.86	0.57	0.61	0.55	0.28	0.28	0.25	0.28	0.62
δCe	1.05	1.07	1.0	1.14	1.03	0.98	1.02	1.03	1.04	1.03	1.02	1.05	0.99

注：里特曼指数 = $(K_2O + Na_2O)^2 / (SiO_2 - 43)$ ； $A/CNK = Al_2O_3 / (K_2O + Na_2O + CaO)$ ； $\delta Eu = Eu/Eu^*$ ； $\delta Ce = Ce/Ce^*$ 。

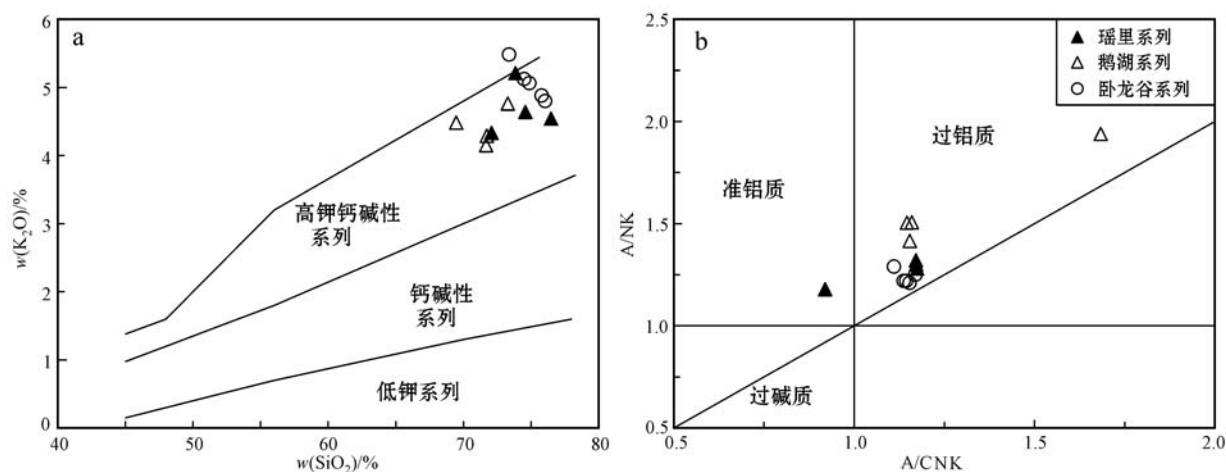
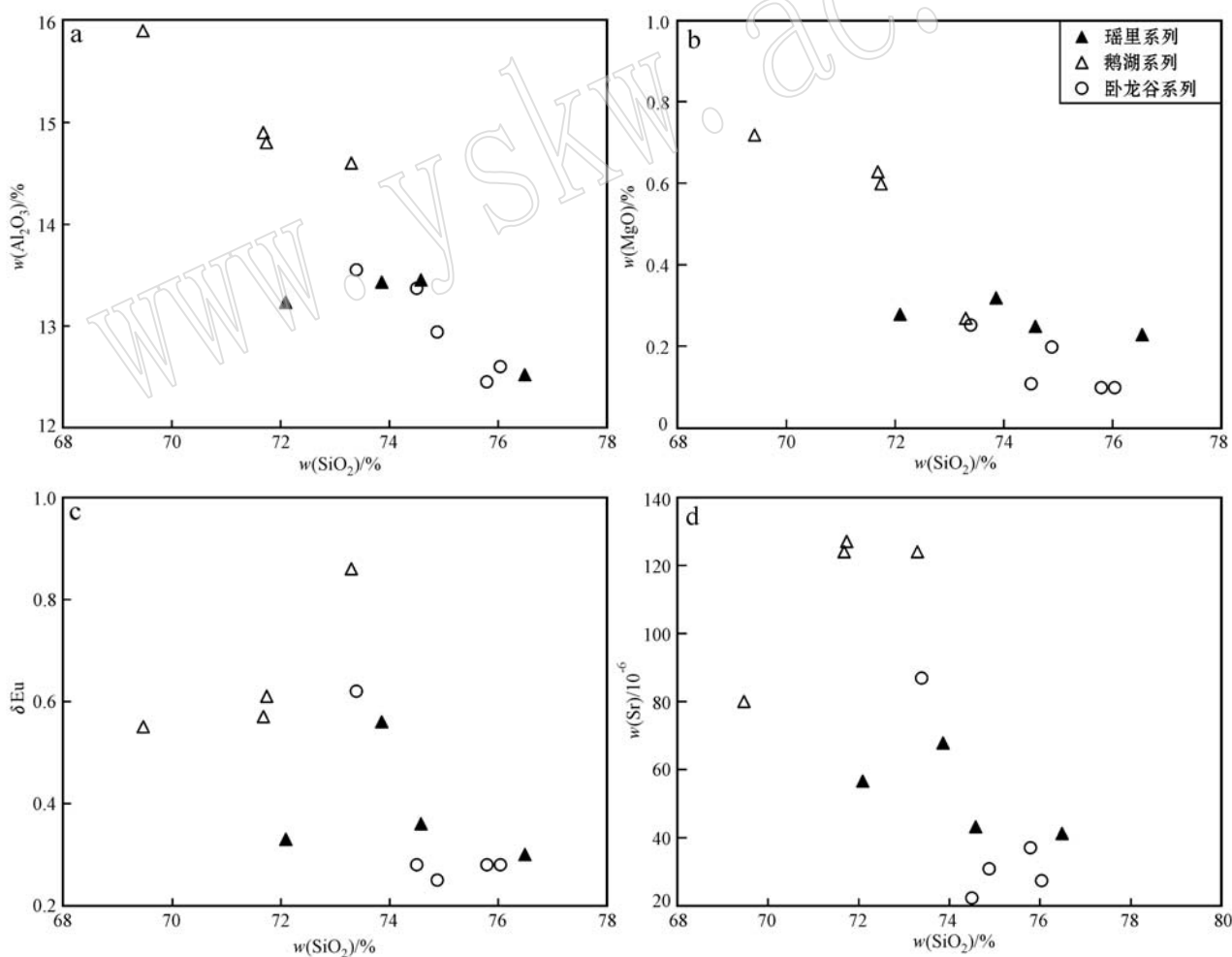
图4 瑶里花岗岩 K_2O-SiO_2 图解和 $A/NK-A/CNK$ 图解Fig. 4 K_2O-SiO_2 (a) and $A/NK-A/CNK$ (b) plots for the granites

图5 花岗岩哈克图解

Fig. 5 Harker diagrams for the granites

3 个岩体的地球化学性质对比分析结果显示,它们具有近似的地球化学性质,说明 3 个岩体具有同源性。

6 讨论

6.1 区内花岗岩的年代学特征讨论

研究区内德兴铜厂花岗闪长斑岩形成年龄为 171 Ma 左右 (水新芳等, 2012; 郭博然等, 2013)。赵鹏等(2010)报道鹅湖岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 年

龄为 121.7 ± 2.9 Ma, 个别 131~137 Ma 的锆石年龄被解释为测点位于锆石核幔交界的混合年龄。郭博然等(2013)报道卧龙谷花岗岩 LA-ICP-MS 年龄为 133 ± 1 Ma。

据吴文革等(2004)报道,鹅湖花岗岩 Rb-Sr 等值线年龄为 132~120 Ma, 并建立了鹅湖岩体岩石谱系单位及其就位机制,将鹅湖岩体划分为金村单元、桐源单元、莲花山单元、洪家山单元和杨连坞单元共5个单元。江西省地质调查院(2011)^①将瑶里

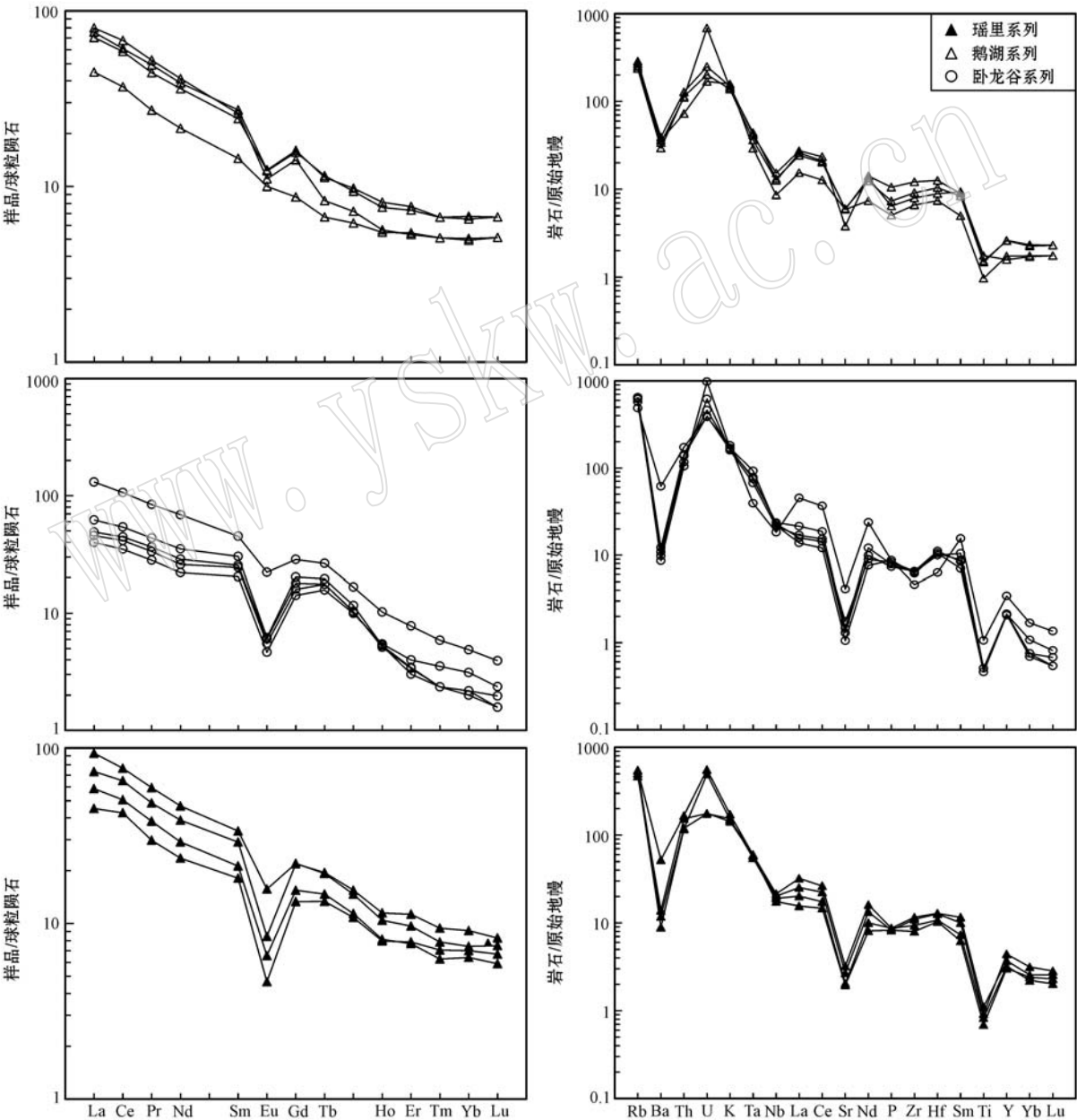


图 6 鹅湖、卧龙谷和瑶里花岗岩稀土元素球粒陨石标准化配分曲线图和微量元素原始地幔标准化蛛网图
Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns and primitive mantle-normalized patterns for the Ehu, Wolonggu and Yaoli granites

① 江西省地质调查院, 2011. 1:25 万景德镇镇幅地质调查报告.

岩体划归为樟公山小区鹅湖超单元的桐源单元,是鹅湖超单元的主体期单元。最早侵入的金村单元分布在区内北侧;第2次岩浆强烈上涌推挤并刺破金村单元,形成桐源单元,Rb-Sr 同位素年龄为 132 Ma,与本次测得瑶里岩体 U-Pb 锆石年龄 132.0 ± 1.9 Ma 误差范围内一致;最后莲花山单元随之上侵,定位在岩体近中心部位;洪家山单元和杨连坞单元为残余岩浆,从构造薄弱带侵位,呈离散状分布,Rb-Sr 同位素年龄为 120 Ma,与赵鹏等(2010)报道的鹅湖岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄(121.7 ± 2.9) Ma 误差范围内一致。由此可见,区内花岗岩自 120~133 Ma 期间至少存在 3 期岩浆活动,从早到晚分别形成 133 ± 1 Ma 的卧龙谷岩体、 132.0 ± 1.9 Ma 的瑶里岩体和 121.7 ± 2.9 Ma 的鹅湖岩体,在年代学上与前人(吴文革等,2004)提出的区内鹅湖花岗岩是多期次岩浆侵入形成的观点一致。至于赵鹏等(2010)获得的个别 131~137 Ma 的锆石年龄,可能属于前期岩浆活动的捕获锆石。

6.2 岩体的成因及其源岩性质

花岗岩中 Rb、Sr、Ba 等元素主要赋存于长石和黑云母中,Rb/Ba 和 Rb/Sr 值可以直接反映强过铝质花岗岩的源区特征。过铝质花岗岩的 Rb-Sr-Ba 元素特征与源岩中起作用的泥质岩及砂屑岩的源区相对应,因此,利用 Rb-Sr-Ba 系统比值可以确定源区的成分(Sylvester, 1998)。在 Rb/Ba - Rb/Sr 图解中,瑶里、鹅湖、卧龙山岩体全部投于富粘土区,且呈现一致的变化规律(图 7a),鹅湖-瑶里-卧龙谷岩体源岩粘土比重逐渐增加,这与 3 个岩体的 SiO_2 含量变化趋势一致。

$\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 值是判别花岗岩源区成分的一个重要指标(Chappelle and White, 1992)。Patino 和 Johnson(1991)通过实验证明,花岗岩 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 值与源区中斜长石/粘土值具有一定相关性,一般贫斜长石、富粘土源区产生的强过铝质花岗岩比富斜长石、贫粘土源区产生的强过铝花岗岩具有较小 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 值,泥质岩生成的花岗岩 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 值一般小于 0.3,碎屑岩生成的花岗岩 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 值大于 0.3。图 7b 显示 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}_{\text{鹅湖}} > \text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}_{\text{瑶里}} > \text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}_{\text{卧龙谷}}$,说明瑶里岩体与卧龙谷岩体主要为泥质岩生成,而鹅湖岩体为碎屑岩生成,源岩粘土物质含量与 Rb/Ba - Rb/Sr 特征有着相同的变化趋势(图 7b)。由此可以推断,区内早白垩世瑶里岩体以及鹅湖、卧龙谷岩体主要是由地壳变质泥质岩部分熔融形成。而图 7 的两个图中鹅湖岩体投于不同位置是因为两种判别方法的标准不同所致。

6.3 花岗岩形成条件与构造环境判别

强过铝质花岗岩 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 值可以指示岩浆的形成温度,一般该值越低,形成温度越高, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2 < 100$,其形成温度不低于 875°C ; $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2 > 100$,形成温度低于 875°C (Sylvester, 1998)。据郭博然等(2013)等发表数据计算,德兴花岗闪长斑岩 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 值为 30~44,远小于 100,说明其形成温度远高于 875°C 。鹅湖、瑶里、卧龙谷 3 个岩体 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 值相差不大,投点相对集中靠近 100(图 7b),说明 3 个岩体形成温度相近,且都低于德兴花岗闪长斑岩形成温度。鹅湖、瑶里岩体该比值略小于 100,指示其形成温度高于 875°C ,且瑶里岩体比鹅湖岩体更靠近 100,说明瑶里岩体形成温度略低

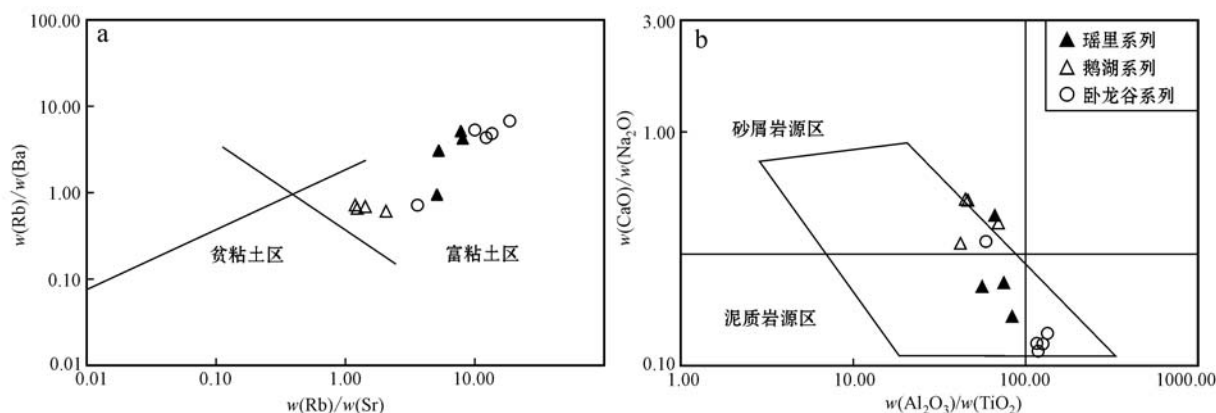


图7 瑶里花岗岩 Rb/Ba - Rb/Sr(a, 据 Sylvester, 1998)和 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ - $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ (b, 据 Patino 和 Johnson, 1991)图解

Fig. 7 Rb/Ba - Rb/Sr(a, after Sylvester, 1998) and $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ - $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ (b, after Patino and Johnson, 1991)

diagrams of the Yao Li granite

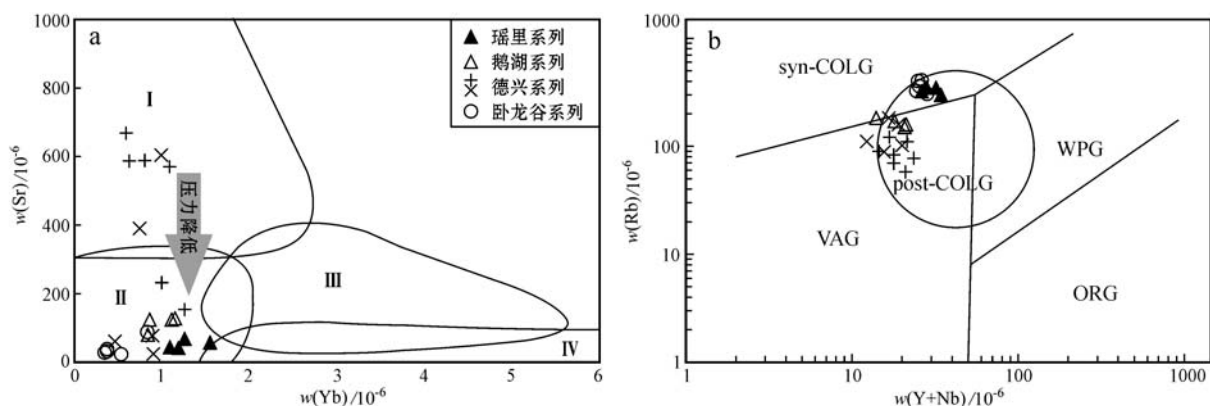


图 8 花岗岩 Sr-Yb 判别图(a, 据张旗等, 2010a, 2010b)与 Rb-Y+Nd 判别图(b, 据 Pearce, 1996)

Fig. 8 Sr-Yb discrimination diagram(a, after Zhang Qi *et al.*, 2010a, 2010b) and Rb-Y+Nd discrimination diagram (b, after Pearce, 1996) of tectonic setting for the granites

I—埃达克岩型; II—喜马拉雅型; III—浙闽型; IV—南岭型; syn-COLG—同碰撞花岗岩; post-COLG—后碰撞花岗岩; VAG—火山弧花岗岩; ORG—洋脊花岗岩; WPG—板内花岗岩; +—德兴系列(据钱鹏等, 2005); ×—德兴系列(据郭博然等, 2013)
I—adakite granites; II—Himalayan type granites; III—Zhe-Min type granites; IV—Nanling type granites; syn-COLG—syn-collision granites; post-COLG—post-collision granites; VAG—volcanic arc granites; ORG—ocean ridge granites; WPG—intraplate granites; +—Dexing series (after Qian Peng *et al.*, 2005); ×—Dexing series (after Guo Boran *et al.*, 2013)

于鹅湖岩体。卧龙谷岩体该比值大于 100, 指示其形成温度低于 875℃。由上述分析可知, 鹅湖岩体形成温度最高, 瑶里岩体次之, 卧龙谷岩体形成温度最低。

张旗等(2006, 2010a, 2010b)通过总结国内外资料 and 大量花岗岩数据, 根据花岗岩的 Sr-Yb 含量及其他地球化学特征将花岗岩划分为埃达克岩型、喜马拉雅型、浙闽型和南岭型(图 8a)。该分类主要反映不同类型花岗岩源区压力的不同: 与浙闽型花岗岩平衡的残留相是斜长石, 与喜马拉雅型花岗岩平衡的是斜长石+石榴石, 与埃达克岩型花岗岩平衡的是石榴石, 与南岭型花岗岩平衡的是富钙的斜长石。对于产于大陆的不同类型花岗岩, 这种分类主要反映了地壳厚度的不同, 埃达克岩型形成厚度最大(约>50 km), 喜马拉雅型次之(约 40~50), 浙闽型较浅(约 30~40 km), 南岭型最浅(约小于 30 km)。对于产于海洋的不同类型花岗岩, 则主要反映形成深度的来源的不同: 埃达克岩型最深(形成于消减板片部分熔融, 深度>40 km), 喜马拉雅型次之(形成于消减板片, 深度约 30~40 km), 浙闽型较浅(形成于岛弧底部, 一般<30 km), 南岭型最浅(形成于洋壳中下部, 约 2~7 km)。

据前人(王强等, 2004; 钱鹏等, 2005; 水新芳等, 2012; 郭博然等, 2013)研究, 与成矿有关的德兴铜厂花岗岩主要岩性为花岗闪长斑岩, 岩体形成于较高温压条件下, 源区残留相以石榴子石和辉石为主, 可

能含有少量斜长石, 在 Sr-Yb 图解中, 主要位于埃达克岩型区域(图 8a), 个别点分布于喜马拉雅型区, 可能因为其与成矿有关的岩体受到热液蚀变作用而造成 Sr 含量降低所致(张旗等, 2010, 2010b)。这进一步说明德兴花岗闪长斑岩其形成于高温高压环境, 源区残留相为石榴子石+辉石相。鹅湖、瑶里、卧龙谷 3 个岩体在 Sr-Yb 图中落于 II 区(喜马拉雅型区), 属低 Sr 低 Yb 型(图 8a), 指示其源区残留物为石榴石+斜长石。同时鹅湖、瑶里、卧龙谷 3 个岩体 Sr 含量和 δEu 值呈现随 SiO_2 含量增加而逐渐减小的变化趋势, 同时均具负 Eu 异常, 故这 3 个岩体源区残留相为石榴石+斜长石相, 形成压力相对于德兴花岗闪长斑岩明显降低。

综上所述, 形成于早白垩世的鹅湖、瑶里和卧龙谷岩体形成温度和压力不高, 其中鹅湖岩体形成温压相对较高, 卧龙谷岩体相对最低, 可以推测它们是地壳的变质泥质岩重熔产物。与成矿有关的德兴铜厂花岗闪长斑岩形成于温压相对较高且有幔源物质加入的环境。

强过铝花岗岩的形成与碰撞造山作用有关, 且后碰撞花岗岩的侵位发生在地壳收缩高峰之后的伸展环境中(Barbarin, 1999)。利用 R_1-R_2 图解(图 9b)对鹅湖、瑶里和卧龙谷岩体进行判别, 样品主要落在非造山的或者造山晚期的区域; 在 $\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ (图 9a)构造判别图解中, 3 个岩体样品点位于后造山类花岗岩区内; 在 $(Y+Nb)-Rb$ 图解中(图 8b),

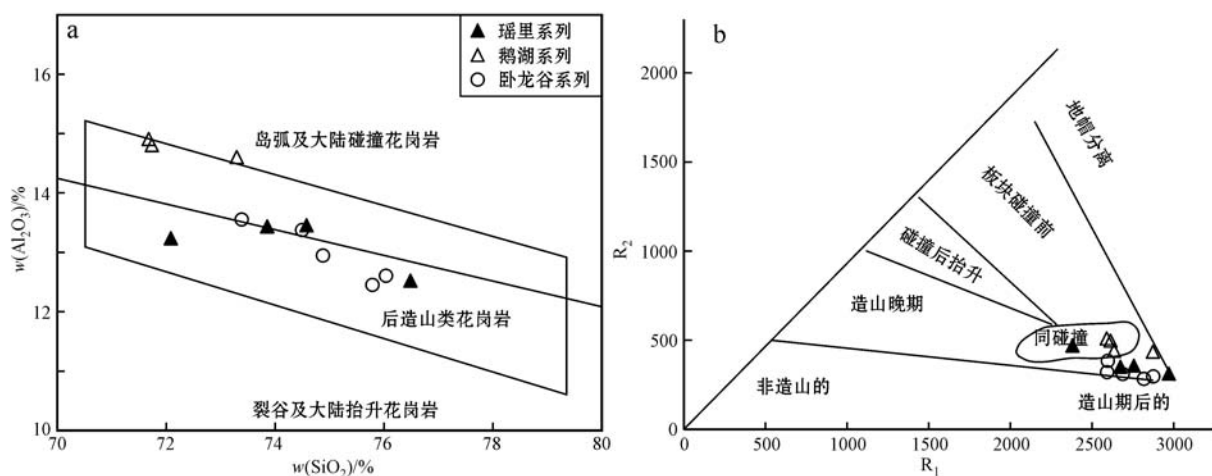


图9 花岗岩 Al_2O_3 - SiO_2 构造判别图(a)(据 Batcheler and Bowden, 1985)与 R_1 - R_2 构造判别图(b)(据 Maniar and Piccoli, 1989)

Fig. 9 Tectonic differentiation diagram of Al_2O_3 - SiO_2 (a)(after Batcheler and Bowden, 1995) and diagram of R_1 - R_2 of the granite(b)(after Maniar and Piccoli, 1989)

铜厂花岗斑岩、鹅湖岩体、瑶里岩体和卧龙谷岩体集中投于后碰撞区。鹅湖岩体投于后碰撞区靠近岛弧区域,可能指示其源岩具有岛弧性质。同时从 Sr - Yb 图解(图 8a)中可以看出,从中侏罗世形成的德兴铜厂花岗闪长斑岩到早白垩世形成的鹅湖、瑶里、卧龙谷黑云母二长花岗岩,岩体形成温压变低,深度变浅,说明早白垩世花岗岩形成于后碰撞板内的地壳伸展阶段,自中侏罗世到早白垩世该区处于温压逐渐降低的碰撞后伸展环境中。

6.4 构造背景和岩浆活动的关系

华南不同构造单元在三叠纪已拼合为一个统一的整体,此后该区有了一致或相似的地质演化史(张勤文等, 1982; 马杏垣, 1983; Li, 2000)。赵越等(1994)在研究了东亚中生代古大地构造特征后提出,中侏罗世是东亚古特提斯构造系与古亚洲洋构造系向环太平洋主动大陆边缘转变的重要转折点,燕山运动是这一重要转折的产物。毛景文等(2004, 2007, 2008)认为华南在早中侏罗世经历了一次从东西向古亚洲构造域向东北、向西太平洋构造域的体制转换。舒良树(2012)提出在震旦纪到早中侏罗世的 5 亿年间,华南基本处于大陆板内环境,经过早中侏罗世的构造体制转换,逐渐演化成为晚中生带西太平洋活动大陆边缘的一部分,成为弧后伸展区。王德滋等(2003)提出中国东南沿海晚中生代出现陆缘伸展型的双峰式火山岩、双峰式侵入岩和 A 型花岗岩组合,表明中国东南大陆边缘在晚中生代处于

一种弧后位置,地壳处于不断拉张之中。胡瑞忠等(2007)总结华南地区岩浆活动、断陷盆地以及变质核杂岩证据,提出至少自白垩纪以来,华南地区已处于陆内岩石圈伸展的构造环境。徐先兵等(2009)从构造地质学角度说明早燕山构造事件发生于中侏罗世(175~165 Ma),在华南形成了宽达 1 300 km 的褶皱逆冲构造系统,构造线走向为 NE-NNE,动力来自于大洋板块向华南大陆下低角度俯冲作用,早中侏罗世岩浆活动代表了地壳伸展构造背景下的地幔上涌。由此可见,中侏罗世之后华南地区花岗岩的形成主要受太平洋构造域的控制,太平洋板块向欧亚板块(华南地区)俯冲引起的弧后陆内岩石圈伸展作用控制了华南地区花岗岩的形成。

瑶里、鹅湖、卧龙谷岩体成因具有一致性,源区温压变化规律和构造环境判别表明研究区内岩体形成于后碰撞造山的地壳伸展阶段,处于大陆岩石圈稳定之后的拉张阶段。区内岩体形成时代属燕山期,主要为中侏罗世(171 Ma)和早白垩世(131~133 和 120 Ma),这符合谢桂青(2003)提出华南地区的岩石圈伸展主要集中在 180~160、140±、125±、100~110 和 80~90 Ma 这 6 个阶段,并与毛景文等(2004)归并的 180~155、145~125 和 110~75 Ma 3 个伸展阶段时限相吻合,指示区内花岗岩形成的构造背景为太平洋板块向华南大陆俯冲引起的弧后多阶段岩石圈伸展作用。

6.5 花岗岩与成矿的关系

毛景文等(2004)通过对华南中生代矿床的精确

测年和成矿规律分析,认为大规模成矿作用主要发生在 170~150、140~126、和 110~80 Ma 3 个时间段,认为该阶段的大规模成矿与华南-华北地块后碰撞、太平洋板块俯冲引起弧后多阶段岩石圈伸展有关。同时花岗岩与成矿的关系在 Sr 和 Yb 的变化上也有所反映(张旗等, 2010a, 2010b),突出表现在埃达克岩型花岗岩与斑岩铜矿成矿的关系上(张旗等, 2001, 2002, 2004; 王强等, 2003),另外喜马拉雅型花岗岩也与金矿关系密切(李承东等, 2004)。

铜厂花岗闪长斑岩在 Sr-Yb 分类中属埃达克岩型,形成温压较高,且有幔源物质加入,与德兴斑岩铜矿密切相关,后者成矿与斑岩成岩时代一致,为 171 Ma,属于毛景文等(2004)3 阶段成矿作用第 1 阶段的产物,铜矿的成矿物质主要来源于花岗闪长斑岩,幔源物质对于成岩成矿具有重要作用(王强等, 2004; 水新芳等, 2012)。

瑶里岩体形成于早白垩世 132.0 ± 1.9 Ma,与邻近的鹅湖、卧龙谷岩体同形成于早白垩世,且具有相同的成因,为壳源变质泥质岩部分熔融的产物, Sr-Yb 分类中属喜马拉雅型花岗岩,从年代学上与毛景文等(2004)3 阶段成矿作用第 2 阶段相吻合。区内在鹅湖岩体 NW 地带分布有大背坞、赖家金矿床。大背坞金矿床发育于韧性剪切带内,双桥山群浅变质岩系第 2 岩性组是大背坞金矿的主要物质来源之一。大背坞金矿成矿与鹅湖花岗岩密切相关,主要表现在:鹅湖花岗岩侵入作用引起的垂向运动为金矿体的沉淀及运移和提供空间(陈柏林等, 1997, 2002; 谢春华等, 2006);成因上,鹅湖花岗岩构造-岩浆活动为成矿提供了热液流体、热动力及部分成矿物质(王平安等, 1998; 谢春华等, 2006);年代学上,矿体内蚀变矿物(作者未说明矿物类型)的 Rb-Sr 等时线年龄为 118.08 ± 1.26 Ma,稍晚于花岗岩侵位,二者之间显示很好的时间对应关系(王平安等, 1998)。

综上所述,德兴斑岩铜矿与铜厂花岗闪长斑岩具有直接的成因关系,同时幔源物质的加入对于成矿与成岩具有重要作用。除大背坞金矿床外,赣东北地区还发育多个剪切带型金矿床,其中最著名的金山金矿与大背坞金矿都发育在新元古界双桥山群浅变质岩中,该岩系为金矿的主要矿源层,并且矿体主要发育在剪切带内。研究区早期受剪切带控制,形成类似金山金矿的蚀变糜棱岩型矿体,后期发生的鹅湖花岗岩构造-岩浆作用是对金矿体的再一次

活化与富集,因此有必要对大背坞金矿深部或鹅湖花岗岩远端是否存在早期的蚀变糜棱岩型金矿体进行进一步的探索研究工作。

7 结论

LA-ICP-MS 锆石测年获得瑶里花岗岩的成岩年龄为 132.0 ± 1.9 Ma,表明瑶里岩体形成于燕山期早白垩世,与鹅湖、卧龙谷岩体同期,岩石类型均为黑云母二长花岗岩,为壳源变质泥质岩部分熔融的产物,岩石地球化学特征及年代学特征显示它们具有同源岩浆演化特征。

在 Sr-Yb 地球化学特征分类中,研究区内早白垩世花岗岩属于喜马拉雅型花岗岩,区内发育与其相关的金矿,但对于矿源层-剪切带-岩体三者与金矿成矿的关系需要进一步深入研究。德兴铜厂花岗闪长斑岩即中侏罗世岩体按 Sr-Yb 分类属于埃达克岩型花岗岩,成因上有幔源物质的加入,这是瑶里、鹅湖、卧龙谷花岗岩与德兴铜厂花岗闪长斑岩的主要区别,也是制约成岩成矿的重要因素。

瑶里、鹅湖、卧龙谷岩体岩石地球化学特征表明,钦杭结合带赣东北地区在中侏罗世到早白垩世为碰撞后的伸展环境,构造背景为太平洋板块俯冲引起的弧后岩石圈伸展作用。

致谢 在野外取样和论文撰写过程中,得到中国地质科学院矿产资源研究所张英利副研究员、赵亮亮博士后和王东升博士的帮助和建议,在此对他们的帮助表示真诚感谢。同时感谢编辑部老师和评审专家对于本文进行了细致认真的审阅,并提出了中肯、有益的建议。

References

- Barbarin B. 1999. A review of the relationship between granitoid types, their origins and their geodynamic environments[J]. *Lithos*, 46: 605~626.
- Batchelor R and Bowden P. 1985. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters[J]. *Chemical Geology*, 48(1~4): 43~45.
- Chappell B W and White A J R. 1992. I and S type granites in the Lachlan Fold Belt[J]. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh*:

- Earth Sciences, 83: 1~26.
- Chen Bailin, Dong Faxian, Wang Pingan *et al.* 1997. A discussion on the origin of Dabewu gold deposit of Jiangxi[J]. Jiangxi Geology, 11(3): 8~15(in Chinese with English abstract).
- Chen Bailin, Dong Faxian, Zhang Da, *et al.* 2002. Analysis of the depositional environment and deformation history of Shuangqiaoshan Group-An example from Dabewu area, Jiangxi province[J]. Resources Survey and Environment, 23(3): 158~164(in Chinese with English abstract).
- Guo Boran, Liu Shuwen, Yang Pentao, *et al.* 2013. Petrology, Geochemistry and Petrogenesis of Wolonggu granites and Tongchang granodioritic porphyries: Constraints on copper metallogenic geological settings in northeastern Jiangxi Province[J]. Geological Bulletin of China, 32(7): 1 035~1 046(in Chinese with English abstract).
- Hu Ruizhong, Bi Xianwu and Peng Jiantang. 2007. Some problems concerning relation ship between Mesozoic-Cenozoic lithospheric extension and uranium metallogenesis in South China[J]. Mineral Deposits, 26(2): 139~152(in Chinese with English abstract).
- Li Chengdong, Zhang Qi, Miao Laicheng, *et al.* 2004. Mesozoic high-, low-Y and low-Sr, low-Y types granitoids in the northern Hebei Province: Geochemistry and petrogenesis and its relation to mineralization of gold deposits[J]. Acta Petrologica Sinica, 20: 269~284(in Chinese with English abstract).
- Li Xianhua. 2000. Cretaceous magmatism and lithospheric extension in South east China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 18: 293~305.
- Ma Xingyuan. 1983. Mesozoic depression and extension structures in eastern China[J]. Acta Geologica Sinica, 57(1): 22~31(in Chinese with English abstract).
- Maniar P D and Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids [J]. Geological Society of America Bulletin, 101: 635~643.
- Mao Jingwen, Xie Guiqing, Guo Chunli, *et al.* 2007. Large-scale tungsten-tin mineralization in Nanling region, South China: Metallogenic age and corresponding geodynamic processes[J]. Acta Petrologica Sinica, 23(10): 2 329~2 338(in Chinese with English abstract).
- Mao Jingwen, Xie Guiqing, Guo Chunli, *et al.* 2008. Spatial-temporal distribution of Mesozoic ore deposits in South China and their metallogenic settings[J]. Geological Journal of China Universities, 14(4): 510~526(in Chinese with English abstract).
- Mao Jingwen, Xie Guiqing, Li Xiaofeng, *et al.* 2004. Mesozoic large scale mineralization and multiple lithospheric extension in South China[J]. Earth Science Frontiers, 11(1): 45~55(in Chinese with English abstract).
- Miller C F, Stoddard E F, Bradfish L J, *et al.* 1981. Composition of plutonic muscovite: Genetic implications[J]. Can. Mineral., 19: 25~34.
- Patino Douce A E and Johnston A D. 1991. Phase equilibria and melting productivity in the plitic system: Implication for the origin of peraluminous granitoids and aluminous granulites[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 107: 202~218.
- Pearce J A. 1996. Sources and settings of granitic rocks[J]. Episodes, 19: 120~125.
- Qian Peng and Lu Jianjun. 2005. The material resources of granodiorite porphyry in the Dexing copper ore district: a study on trace elements [J]. Contributions of Geology and Mineral Resources Research, 20(2): 75~79, 150(in Chinese with English abstract).
- Shen Weizhou, Lu Minrong, Liu Changshi, *et al.* 1991. Stable isotope study of the yinshan polymetallic deposit in Jiangxi province[J]. Journal of Nanjing University(Earth Science), 2: 1 186~1 193(in Chinese).
- Shu Liangshu. 2012. An analysis of principal features of tectonic evolution in South China Block[J]. Geological Bulletin of China, 31(7): 1 035~1 053(in Chinese with English abstract).
- Shui Xinfang, Zhao Yuanyi, Guo Shuo, *et al.* 2012. U-Pb dating and Hf isotopic characteristics of zircons from granodiorite[J]. Geology in China, 39(6): 1543~1531(in Chinese with English abstract).
- Sylvester P J. 1998. Post-collisional strongly peraluminous granites[J]. Lithos, 45: 29~44.
- Wang Dezi, Shen Weizhou. 2003. Genesis of Granitoids and crustal evolution in Southeast China[J]. Earth Science Frontiers, 10(3): 209~220(in Chinese with English abstract).
- Wang Pingan, Dong Faxian, Liu Jianmin, *et al.* 1998. Geology and Geochemistry of the Dabewu gold deposit, Jiangxi province[J]. Mineral Deposits, 17(1): 57~69(in Chinese with English abstract).
- Wang Qiang, Zhao Zhenhua, Jian Ping, *et al.* 2004. ZHRIMP zircon geochronology and Nd-Sr isotopic geochemistry of the Dexing granodiorite porphyry[J]. Acta Petrologica Sinica, 20(2): 315~324(in Chinese with English abstract).
- Wu Wenge and Xie Weihong. 2004. The establishment of rock hierarchical unit for the Ehu intrusion and an analysis of its tectonic environment[J]. Beijing Geology, 16(3): 12~17, 23(in Chinese with English abstract).
- Xie Chunhua, Liang Xianghui, Wei Xinglin, *et al.* 2006. Metallogene-

- sis of gold deposit in Ehu concentration region of gold mineralization in Jiangxi Province[J]. *Geology and Resources*, 15(4): 278~320 (in Chinese with English abstract).
- Xie Guiqing. 2003. Late Mesozoic Mafic Dikes (Body) from Southeastern China: Geological and Geochemical Characteristics and Its Geodynamics-A Case of Jiangxi Province[D]. Guiyang: Chinese Academy of Sciences, 1~128 (in Chinese).
- Xu Xianbing, Zhang Yueqiao, Jia Dong, *et al.* 2009. Early Mesozoic geotectonic processes in South China[J]. *Geology in China*, 36(3): 573~592 (in Chinese with English abstract).
- Yang Minggui and Mei Yongwen. 1997. Characteristics of geology and metallogenesis in the QinZhou-HangZhou paleoplate juncture[J]. *Bureau of Geology and Mineral Resources of Jiangxi*, (3): 52~59 (in Chinese with English abstract).
- Yu Dagan and Guan Taiyang, Wu Jianhua, *et al.* 2006. The review of new development of basic geology research in Jiangxi province[J]. *East China Institute of Technology*, (supp): 1~11 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Bangtong, Wu Junqi and Ling Hongfei. 2010. Petrological discrimination between primary and secondary muscovites and its geological implications: A case study of Fucheng peraluminous granite pluton in southern Jiangxi[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 29(3): 225~234 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Jin Weijun, Li Chengdong, *et al.* 2010a. Revisiting the new classification of granitic rocks based on whole-rock Sr and Yb contents: Index[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(4): 985~1015 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Jin Weijun, Li Chengdong, *et al.* 2010b. On the classification of granitic rocks based on whole-rock Sr and Yb concentrations III[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(12): 3431~3455 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Qin Kezhang, Wang Yuanlong, *et al.* 2004. Study on adakite broadened to challenge the Cu and Au exploration in China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20: 195~204 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Wang Yan, Li Chengdong, *et al.* 2006. Granite classification on the basis of Sr and Yb contents and its implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(9): 2249~2269 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Wang Yan, Qian Qing, *et al.* 2001. The characteristics and tectonic-metallogenetic significances of the adakites in Yanshanian period from eastern China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 17: 236~244 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Wang Yuanlong, Zhang Fuqin, *et al.* 2002. Adakite and porphyry copper deposit[J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, (3): 85~90 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qinwen and Huang Huaizeng. 1982. Mesozoic Cenozoic tectonic-magmatic evolution history in eastern China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 56(2): 111~122 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Peng, Jiang Yaohui, Liao Shiyong, *et al.* 2010. SHRIMP Zircon U-Pb Age, Sr-Nd-Hf Isotopic Geochemistry and Petrogenesis of the Ehu Pluton in Northeastern Jiangxi Province[J]. *Geological Journal of China Universities*, 16(2): 218~225 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Yue, Yang Zhenyu and Ma Xinghua. 1994. Geotectonic transition from Paleasian system and Paleotethyan system to Paleopacific active continental margin in eastern Asia[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 29(2): 106~118 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈柏林, 董法先, 王平安, 等. 1997. 江西大背坞金矿床成因探讨[J]. *江西地质*, 11(3): 8~15.
- 陈柏林, 董法先, 张达, 等. 2002. 双桥山群的沉积环境和变形历史再探讨——以大背坞地区为例[J]. *资源调查与环境*, 23(3): 158~164.
- 郭博然, 刘树文, 杨朋涛. 2013. 江西卧龙岗谷花岗岩和铜厂花岗闪长斑岩的地球化学特征及成因——对赣东北地区铜矿成矿地质背景的制约[J]. *地质通报*, 32(7): 1036~1046.
- 胡瑞忠, 毕献武, 彭建堂, 等. 2007. 华南地区中生代以来岩石圈伸展及其与铀成矿关系研究的若干问题[J]. *矿床地质*, 26(2): 139~152.
- 李承东, 张旗, 苗来成, 等. 2004. 冀北中生代高Sr低Yb和低Sr低Yb型花岗岩: 地球化学、成因及其与成矿作用的关系[J]. *岩石学报*, 20: 269~284.
- 马杏垣. 1983. 中国东部中生代裂陷作用和演化[J]. *地质学报*, 57(1): 22~31.
- 毛景文, 谢桂青, 郭春丽, 等. 2007. 南岭地区大规模钨锡多金属成矿作用: 成矿时限及地球动力学背景[J]. *岩石学报*, 23(10): 2329~2338.
- 毛景文, 谢桂青, 郭春丽, 等. 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[J]. *高校地质学报*, 14(4): 510~526.
- 毛景文, 谢桂青, 李晓峰, 等. 2004. 华南地区中生代大规模成矿作用与岩石圈多阶段伸展[J]. *地学前缘*, 11(1): 45~55.

- 钱 鹏, 陆建军. 2005. 德兴铜矿花岗闪长斑岩物质来源的微量元素研究[J]. 地质找矿论丛, 20(2): 75~79, 150.
- 沈渭洲, 陆敏荣, 刘昌实, 等. 1991. 江西银山多金属矿床的稳定同位素研究[J]. 南京大学学报(地球科学), 2: 1 186~1 193.
- 舒良树. 2012. 华南构造演化的基本特征[J]. 地质通报, 31(7): 1 035~1 053.
- 水新芳, 赵元艺, 郭 硕, 等. 2012. 德兴矿集区花岗闪长斑岩锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素特征及其意义[J]. 中国地质, 39(6): 1 543~1 561.
- 王德滋, 沈渭洲. 2003. 中国东南部花岗岩成因与地壳演化[J]. 地学前缘, 10(3): 209~220.
- 王平安, 董法先, 刘建民, 等. 1998. 江西大背坞金矿床地质、地球化学特征[J]. 矿床地质, 17(1): 58~68.
- 王 强, 许继峰, 赵振华, 等. 2003. 安徽铜陵地区燕山期侵入岩的成因及其对深部动力学过程的制约[J]. 中国科学(D), 33: 323~334.
- 王 强, 赵振华, 简 平, 等. 2004. 德兴花岗闪长斑岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学和 Nd-Sr 同位素地球化学[J]. 岩石学报, 20(2): 315~324.
- 吴文革, 谢卫红. 2004. 鹅湖岩体岩石谱系单位的建立及其就位机制分析[J]. 北京地质, 16(3): 12~17, 23.
- 谢春华, 梁湘辉, 韦星林, 等. 2006. 江西省鹅湖金矿化集中区金矿成矿特征研究[J]. 地质与资源, 15(4): 278~320.
- 谢桂青. 2003. 中国东南部晚中生代以来的基性岩脉(体)的地质地球化学特征及其地球动力学意义初探——以江西省为例[D]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 1~128.
- 徐先兵, 张岳桥, 贾 东, 等. 2009. 华南早中生代大地构造过程[J]. 中国地质, 36(3): 573~592.
- 杨明桂, 梅勇文. 1997. 钦-杭古板块结合带与成矿带的主要特征[J]. 华南地质与矿产, 9(3): 52~59.
- 余达淦, 管太阳, 巫建华, 等. 2006. 江西基础地质研究新进展述评[J]. 东华理工学院学报, 增刊: 1~11.
- 张 旗, 金惟俊, 李承东, 等. 2010a. 再论花岗岩按照 Sr-Yb 的分类: 标志[J]. 岩石学报, 26(4): 986~1 015.
- 张 旗, 金惟俊, 李承东, 等. 2010b. 三论花岗岩按照 Sr-Yb 的分类: 应用[J]. 岩石学报, 26(12): 3 432~3 455.
- 张 旗, 秦克章, 王元龙, 等. 2004. 加强埃达克岩研究, 开创中国 Cu、Au 等找矿工作的新局面[J]. 岩石学报, 20: 195~204.
- 张 旗, 王 焰, 李承东, 等. 2006. 花岗岩的 Sr-Yb 分类及其地质意义[J]. 岩石学报, 22(9): 2 250~2 269.
- 张 旗, 王 焰, 钱 青, 等. 2001. 中国东部燕山期埃达克岩的特征及构造-成矿意义[J]. 岩石学报, 17: 236~241.
- 张 旗, 王元龙, 张福勤, 等. 2002. 埃达克岩与斑岩铜矿[J]. 华南地质与矿产, (3): 85~90.
- 张勤文, 黄怀曾. 1982. 中国东部中、新生代构造——岩浆活化史[J]. 地质学报, 56(2): 111~122.
- 章邦桐, 吴俊奇, 凌洪飞, 等. 2010. 花岗岩中原生与次生白云母的鉴别特征及其地质意义——以赣南富城强过铝花岗岩体为例[J]. 岩石矿物学杂志, 29(3): 225~234.
- 赵 鹏, 姜耀辉, 廖世勇, 等. 2010. 赣东北鹅湖岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄 Sr-Nd-Hf 同位素地球化学与岩石成因[J]. 高校地质学报, 16(2): 219~225.
- 赵 越, 杨振宇, 马醒华. 1994. 东亚大地构造发展的重要转折[J]. 地质科学, 29(2): 106~118.