

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2022.04.005

赣东北地区福泉山岩体高分异S型花岗岩成因： 来自锆石U-Pb年龄、Hf同位素及地球化学的证据

徐文坦^{1,2,3}, 张雪辉^{2,3*}, 张斌斌^{2,3,4}, 吕劲松^{2,3}, 孙建东^{2,3}, 张勇^{2,3}, 武彬^{2,3}
XU Wentan^{1,2,3}, ZHANG Xuehui^{2,3*}, ZHANG Binbin^{2,3,4}, LYU Jinsong^{2,3}, SUN Jiandong^{2,3},
ZHANG Yong^{2,3}, WU Bin^{2,3}

1. 防灾科技学院地球科学学院, 河北 三河 065201;
 2. 中国地质调查局南京地质调查中心, 江苏 南京 210016;
 3. 中国地质调查局华东地质科技创新中心, 江苏 南京 210016;
 4. 湖北神龙地质工程勘察院有限公司, 湖北 武汉 430100
1. College of Earth Sciences, Institute of Disaster Prevention, Sanhe 065201, Hebei, China;
2. Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, Jiangsu, China;
3. East China Geoscience and Technology Innovation Center, CGS, Nanjing 210016, Jiangsu, China;
4. Hubei Shenlong Geological Engineering Investigation Institute Co., Ltd., Wuhan 430100, Hubei, China

摘要: 福泉山岩体位于钦杭成矿带的万年-德兴成矿亚带, 是区域大规模岩浆活动的重要组成部分。对福泉山岩体进行了年代学、Hf同位素和全岩地球化学研究。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果表明, 该岩体形成于 130 Ma 左右, 为早白垩世岩浆活动的产物。岩石地球化学显示高硅、富铝、富碱、低稀土元素总量等特征, 岩石属高钾钙碱性系列且具有过铝质 ($A/CNK > 1.1$) 特征。结合明显的 Eu 异常、富 Rb、亏损 Sr 和 Ba、低 Nb/Ta (5.14~5.52) 和 Zr/Hf (31.22~39.09) 值及明显亏损 Nb、Ga、Y 等高场强元素的特征, 认为福泉岩体为高分异的 S 型花岗岩。锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 集中于 -5.47~-1.51, t_{DM2} 为 1255~1668 Ma, 暗示岩浆源区为中元古代下地壳变沉积岩。综合分析表明, 福泉岩体与区域上同时代 A 型花岗岩构造背景相同, 即在早白垩世古太平洋板块向华南板块俯冲后的拉张环境下, 岩石圈地幔上涌导致下地壳岩石部分熔融形成福泉山 S 型花岗岩。

关键词: 早白垩世; S 型花岗岩; 锆石 U-Pb 年龄; Hf 同位素; 地球化学; 赣东北地区; 地质调查工程

中图分类号: P588.12⁺1; P595; P597 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2022)04-0577-13

Xu W T, Zhang X H, Zhang B B, Lyu J S, Sun J D, Zhang Y, Wu B. Genesis of highly fractionated S-type granites: Evidence from zircon U-Pb age, Hf isotopes and geochemistry of Fuquanshan pluton, Northeastern Jiangxi Province. *Geological Bulletin of China*, 2022, 41(4): 577-589

Abstract: Fuquanshan pluton is located in the Wannian-Dexing metallogenic belt within Qinzhou-Hangzhou belt, and it is also an important part of regional large volume of granitic magma. In this paper, we studied the geochronology, Hf isotopes and geochemistry of Fuquanshan pluton. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating yield the age of around 130 Ma, suggesting this pluton emplaced at Early Cretaceous. The geochemistry features of these rocks are rich in Si, Al, alkali and have low content of REE, implying they belong to high potassium calc alkaline series and peraluminous rocks ($A/CNK > 1.1$). Combined with the characteristics of obvious negative Eu anomaly, high content of Rb, low content of Sr and Ba, low ratios of Nb/Ta (5.14~5.52) and Zr/Hf (31.22~39.09), depletion of

收稿日期: 2021-03-08; 修订日期: 2021-08-15

资助项目: 中国地质调查局项目《华东地区钨锡钴等矿产地质调查》(编号: DD20221688)、《钦杭成矿带武宁—平江地区钨铜多金属矿地质调查》(编号: DD20190153)、《钦杭成矿带德兴-歙县地区地质矿产调查项目》(编号: 1212013065500)

作者简介: 徐文坦, (1993-), 男, 硕士, 实验师, 从事岩石地球化学研究。E-mail: xuwentan1993@163.com

* 通信作者: 张雪辉 (1983-), 男, 硕士, 高级工程师, 从事区域矿产地质调查和矿床地质研究工作。E-mail: zhangxuehui35@qq.com

high field strength elements (Nb, Ga, Y), we propose this pluton is highly fractionation S-type granite. Furthermore, the $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ values of zircons range from -5.47 to -1.51 with t_{DM2} values from 1255 Ma to 1668 Ma, implying the magma source is Mesoproterozoic lower-crust metasedimentary rocks. Comprehensive analysis shows that the Fuquanshan granite has the same tectonic setting as contemporary A-type granite in the region, and they generated by partial melting of Mesoproterozoic lower-crust metasedimentary induced by upwelling of asthenosphere in an extensional environment resulted from subduction of the paleo-Pacific plate to South China.

Key words: Early Cretaceous; S-type granite; zircon U-Pb dating; Hf isotopes; geochemistry; Northeast Jiangxi Province; geological survey engineering

由华夏板块和扬子板块沿江南造山带拼合而成的华南海域一直是地质学研究的热点,其主要的争论焦点包括板块拼贴时限、早古生代构造背景、中生代大规模花岗岩的动力学机制等^[1-13]。其中,华南中生代大规模岩浆活动及其记录的巨量钨-锡-钼-铜等多金属成矿作用历来受到国内外学者的关注^[2-3, 5-7, 11, 13]。在这一成矿大爆发的时期,众多大型—超大型的钨、锡、钼、铌、钽、铅等多金属矿床被报道,其中包括大湖塘、朱溪、浒坑、冷水坑、雅山等在内的大型矿床的形成均与 S 型花岗岩密切相关^[13-15]。赣东北地区位于江南造山带东段,是钦杭成矿带东段的重要组成部分,近年朱溪等超大型钨多金属矿的发现改变了传统意义上“南钨北铜”的多金属矿分布格局^[16]。本文通过区域对比分析发现,赣东北地区存在一期 130 Ma 左右的构造岩浆活动,与之相关的花岗质侵入体广泛出露,如珍珠山花岗斑岩 ($129.3 \pm 0.5 \text{ Ma}$)、灵山岩体 ($131.7 \pm 0.55 \text{ Ma}$)、三清山岩体 ($134.8 \pm 0.7 \text{ Ma}$)、卧龙谷岩体 ($133 \pm 1 \text{ Ma}$)、福泉山岩体(本文)等^[17-21]。前人对以三清山、灵山、珍珠山等岩体为代表的 A 型花岗岩进行了系统研究,但对赣东北地区同时代 S 型花岗岩鲜有报道,限制了对该地区成矿的研究。

福泉山岩体位于赣东地区,前人对该岩体的基础地质研究工作相对薄弱,其成岩年龄存在争议,地球化学研究尚不完善。本文以福泉山岩体为研究对象,通过系统的岩石学、U-Pb 年代学、Hf 同位素和全岩地球化学特征分析,结合前人研究成果,探讨岩石成因及形成的大地构造背景,厘定福泉山岩体的形成时代,判断岩石成因类型和构造背景,以期为华南中生代岩浆活动研究提供基础地质资料,并为区域找矿工作提供地质依据。

1 区域地质背景

赣东北地区位于江南造山带东段,是钦杭成矿

带的重要组成部分(图 1-a)。钦杭成矿带为扬子板块和华夏板块在中—新元古代多块体拼贴而成的结合带,并于中晚侏罗世再次活化,卷入印支期挤压背景向燕山期拉张伸展背景的构造转化事件^[2, 13, 22]。长期多旋回的构造运动使研究区内岩浆活动较发育,形成了广泛分布的花岗质侵入体,其中又以燕山期岩浆活动最甚^[9, 12-13]。华南燕山期经历了大规模岩浆活动与成矿事件,使该区成为了研究热点,国内外众多学者从岩浆活动阶段性、成岩成矿物质来源、形成构造背景等方面进行了研究^[6-7, 10]。区内断裂和褶皱构造发育,其中中生代形成的赣东北大断裂、景德镇断裂等对区域成矿起着重要的控制作用^[20-21, 23]。区内地层主要包括新元古代浅变质基底地层及晚古生代沉积盖层两部分。浅变质基底地层主要包括双桥山群、张村岩群、溪口岩群、万年群等,主体为一套海相火山—沉积建造^[24-25]。沉积盖层由石炭系—白垩系组成,其中以灰岩、含炭灰岩为主的石炭系以角度不整合覆盖在变质基底之上。区内碳酸盐岩地层广泛分布,中生代以来强烈的构造—岩浆活动,导致多期次中酸性岩浆岩侵入,使得在研究区内寻找矽卡岩型钨多金属矿床成为可能^[23]。

福泉山岩体所在地区位于赣东北深大断裂的北缘(图 1-b),属于钦杭成矿带的万年—德兴成矿亚带^[26]。区内地层主要包括新元古代浅变质基底、晚古生代和中生代沉积地层(图 1-c)。其中新元古代浅变质地层为万年群(Pt_3w),为一套浅变质的细碎屑岩建造;晚古生代地层包括梓山组(C_1z)、黄龙组(C_2h)、马平组(P_1m)、栖霞组(P_2q)、小江边组(P_2x)、鸣山组(P_2ms)、乐平组(P_3l)等,其中梓山组、小江边组、乐平组为一套碎屑岩建造,黄龙组和马平组为一套碳酸盐岩建造,鸣山组为一套火山硅质岩建造;中生代地层有多江组($\text{T}_3\text{J}_1\text{d}$),为细粒石英砂岩、长石石英杂砂岩等;水北组(J_3s),石英砂岩、长石石英砂岩和粉砂岩等;漳平组(J_2z),下部为

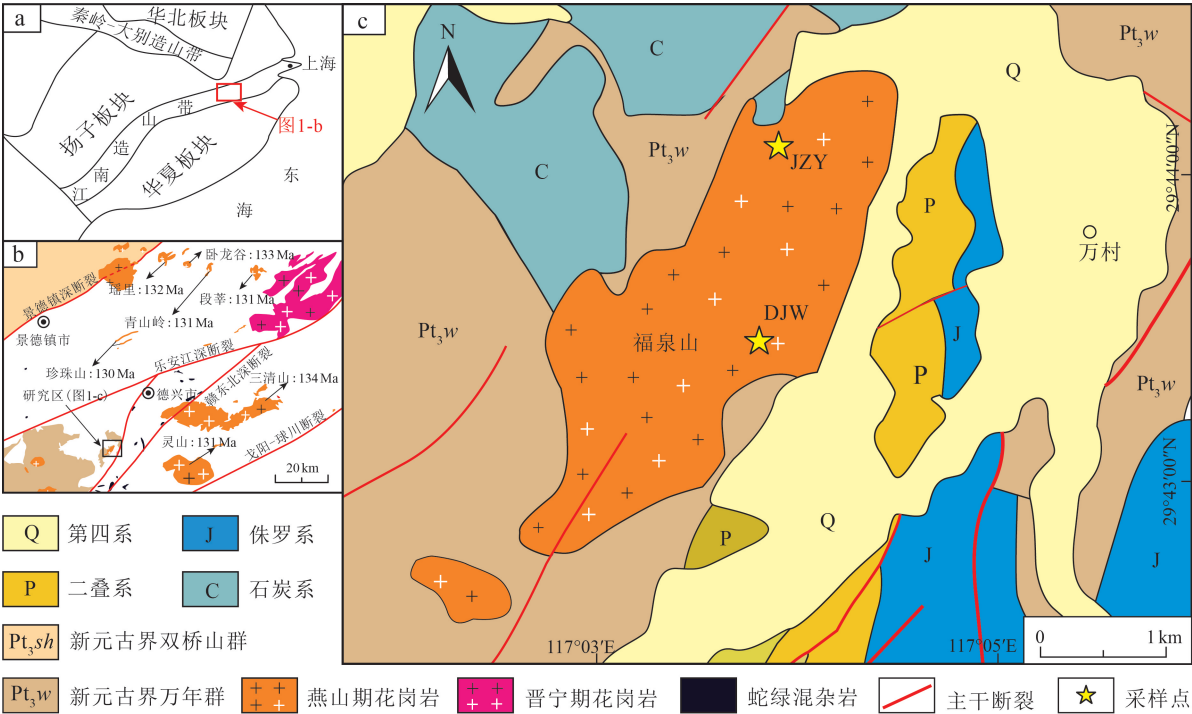


图 1 研究区大地构造位置及地质简图^[26]

Fig. 1 Geological sketch map and tectonic location map of study area

a—研究区大地构造位置简图;b—赣东北地区早白垩世岩体分布图;c—福泉山岩体地质简图

砂砾岩,上部为长石岩屑砂岩与粉砂、泥岩互层。区内断裂构造发育,以北东向断裂为主。

2 样品信息及测试方法

福泉山岩体出露于江西省德兴市万村乡一带,呈岩株状产出,出露面积约 6.5 km²,侵位于赣东北深大断裂上盘万年群,岩体北缘局部与石炭系黄龙组接触,在接触带部位发育矽卡岩化和白钨矿化。

岩体岩性为斑状黑云母花岗岩(图 2-a),似斑状结构,基质为中细粒花岗结构,块状构造。斑晶含量约为 20%,主要由钾长石、斜长石和少量石英组成;基质主要有石英(25%)、钾长石(20%)、斜长石(30%)、白云母(4%)等,副矿物包括锆石、磷灰石、磁铁矿等。其中,石英颗粒主要为他形粒状,发育少量裂纹,颗粒大小为 1~5 mm,具波状消光。钾长石呈自形板状,可见卡斯巴双晶。斜长石为自形—

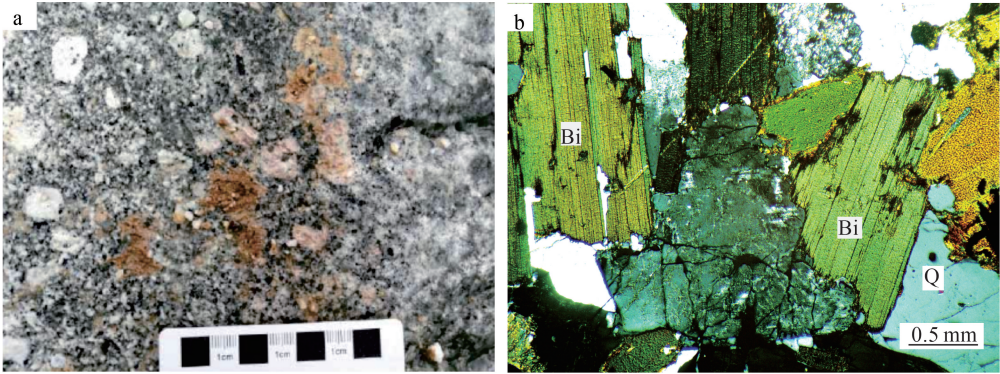


图 2 福泉山岩体野外标本特征(a)和镜下特征(b)

Fig. 2 Field characteristics(a) and mineral assemblages(b) of Fuquanshan Pluton

Bi—黑云母;Q—石英

半自形板状,局部绢云母化,并可见残留聚片双晶。黑云母呈自形板状,发育一组极完全解理,多色性明显,矿物边缘可见铁质析出。

锆石单矿物挑选、制靶和阴极发光(CL)图像由河北省廊坊市宇恒矿岩技术服务公司完成。锆石测年由 中国冶金地质总局山东局测试中心 ICP-MS 和激光剥蚀系统联机完成,采用的仪器型号为 X Series2,激光剥蚀系统为 Coherent 公司生产的 Compex Pro102F。在分析过程中,激光剥蚀系统的斑束直径为 32 μm ,频率为 6 Hz。数据处理运用 ICPMSDataCal 程序完成^[27],并用 Isoplot (3.23) 软件^[28]完成年龄加权平均值计算和谐和图绘制。锆石 Lu-Hf 同位素原位分析在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。实验所用仪器为 Agilent 7500a 与由 Coherent 公司生产的 Geolas Pro 激光剥蚀系统联机完成。激光束斑直径为 44 μm ,脉冲频率为 8 Hz,测点背景采集时长为 30 s,样品剥蚀时长为 50 s,吹扫时间为 40 s,剥蚀厚度为 20~30 μm 。分析过程中将 91500 和 GJ-1 标准锆石作为监测标样,每 5 个样品插入 1 组标准样品,以确保仪器的良好运行,具体仪器参数及分析流程详见 Yuan^[29]等。全岩主量、微量和稀土元素均在自然资源部华东矿产资源监督检测中心完成。其中主量元素采用 Axios4.0 波长色散型 X 射线荧光光谱仪测定,分析

精度优于 1%。微量和稀土元素采用 Finnigan Element II 型电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)测定,精度优于 5%。

3 分析结果

3.1 锆石 U-Pb 年龄

本次分别对福泉山岩体 2 件斑状黑云母花岗岩样品(DJW JZY)进行了锆石测年研究,分析结果见表 1,锆石阴极发光图像见图 3。2 个样品的锆石均呈自形短柱或长柱状,长轴在 100~200 μm 之间,长短轴比多为 1~3。锆石 CL 图像显示,这些锆石均具有清晰的振荡环带,Th/U 值在 0.15~1.4 之间,且绝大多数大于 0.4,显示岩浆锆石特征^[30],其²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄可以代表岩体的形成时代。锆石定年结果显示,这些锆石的年龄分布集中,绝大多数数据落在谐和线上及其附近(图 4),²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄加权平均值分别为 133 ± 1.5 Ma (MSWD = 0.847) 和 129 ± 1.4 Ma (MSWD = 1.3),成岩时代为早白垩世,属燕山晚期岩浆活动的产物。

3.2 Lu-Hf 同位素特征

对 2 件已测年龄样品的部分点位进行了原位 Hf 同位素分析,分析结果见表 2。福泉山岩体锆石¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 值在 0.282481~0.282664 之间变化,除 1 个点的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值低至 -8.06 外,其他点位的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$

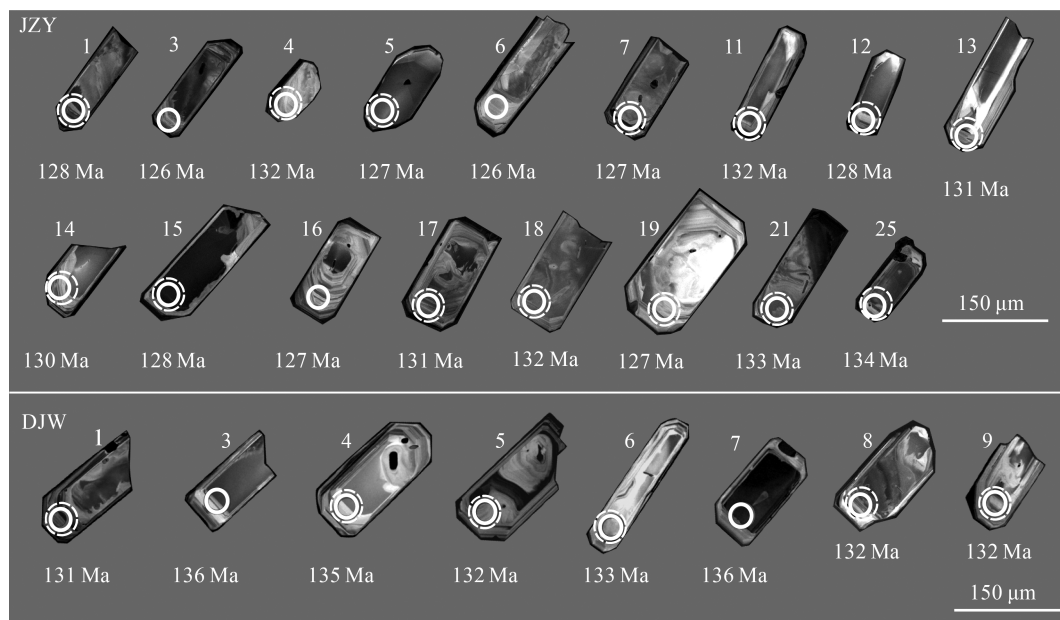


图 3 福泉山岩体部分锆石阴极发光(CL)图像(实线圆圈为锆石定年位置,虚线圆圈为 Lu-Hf 分析位置)

Fig. 3 CL images of zircons from Fuquanshan pluton (the small circles are the U-Pb dating positions and the dashed circles are the Lu-Hf analyzes positions)

表 1 福泉山岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 同位素分析数据
Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Th-Pb dating results of the Fuquanshan pluton

样品号	元素含量/ 10^{-6}		Th/U	同位素比值				年龄/Ma			
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ
1	713	648	1.10	0.0515	0.0020	0.1425	0.0053	0.0201	0.0003	265	89
3	274	582	0.47	0.0560	0.0021	0.1523	0.0056	0.0198	0.0003	454	116
4	123	220	0.56	0.0523	0.0045	0.1462	0.0096	0.0207	0.0005	298	200
5	1053	755	1.40	0.0535	0.0053	0.1495	0.0126	0.0199	0.0004	350	229
6	166	280	0.59	0.0586	0.0038	0.1573	0.0093	0.0198	0.0004	550	110
7	175	281	0.62	0.0548	0.0038	0.1483	0.0098	0.0199	0.0006	406	156
11	627	1457	0.43	0.0546	0.0027	0.1554	0.0085	0.0207	0.0005	398	109
12	96	131	0.74	0.0500	0.0049	0.1391	0.0114	0.0200	0.0006	195	215
13	177	206	0.86	0.0465	0.0035	0.1304	0.0094	0.0206	0.0004	33	161
14	232	299	0.77	0.0548	0.0056	0.1580	0.0159	0.0204	0.0006	406	227
15	1163	1855	0.63	0.0561	0.0039	0.1565	0.0055	0.0200	0.0003	454	158
16	285	502	0.57	0.0457	0.0019	0.1252	0.0052	0.0199	0.0003	error	
17	360	802	0.45	0.0471	0.0030	0.1345	0.0059	0.0205	0.0003	54	157
18	239	1539	0.15	0.0506	0.0015	0.1462	0.0049	0.0207	0.0004	233	73
19	104	173	0.60	0.0502	0.0029	0.1358	0.0072	0.0199	0.0004	206	140
21	132	178	0.74	0.0531	0.0036	0.1493	0.0094	0.0208	0.0004	332	154
25	753	1118	0.67	0.0516	0.0031	0.1509	0.0047	0.0210	0.0003	333	173
1	252	446	0.57	0.0506	0.0018	0.1439	0.0050	0.0206	0.0002	233	53
3	676	1181	0.57	0.0481	0.0013	0.1419	0.0041	0.0214	0.0003	106	67
4	317	505	0.63	0.0516	0.0018	0.1498	0.0049	0.0212	0.0003	333	81
5	79	123	0.64	0.0473	0.0041	0.1326	0.0117	0.0207	0.0005	65	196
6	181	307	0.59	0.0463	0.0047	0.1301	0.0102	0.0208	0.0005	17	226
7	519	449	1.15	0.0544	0.0045	0.1575	0.0096	0.0213	0.0005	387	187
8	609	1148	0.53	0.0482	0.0012	0.1380	0.0036	0.0207	0.0002	109	56
9	270	384	0.70	0.0564	0.0046	0.1659	0.0139	0.0206	0.0006	478	180

注: 锆石年龄测试分析由中国冶金地质总局山东局测试中心完成

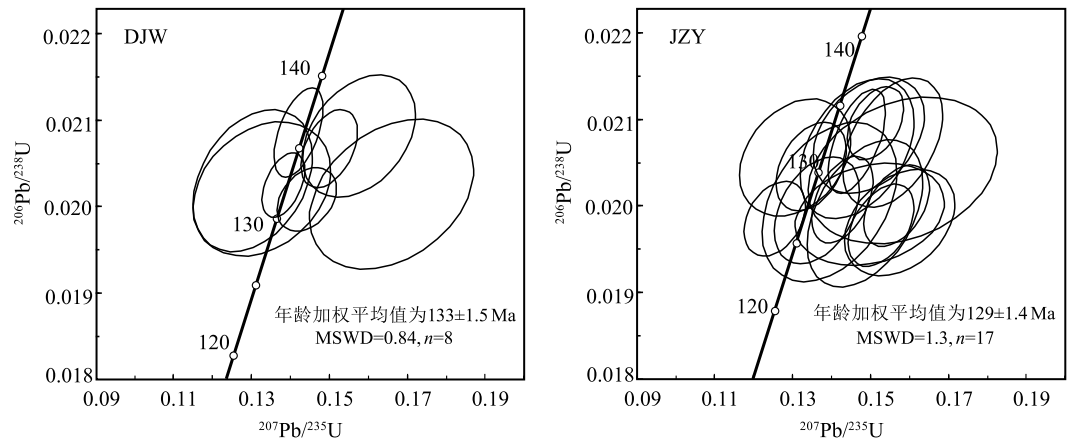


图 4 福泉山岩体锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 4 U-Pb concordia plots of the zircons from Fuquanshan pluton

表 2 福泉山岩体锆石原位 Hf 同位素数据

Table 2 Hf isotopic results of the zircons from the Fuquanshan pluton

样品	点号	年龄/Ma	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	2σ	t_{DM1}/Ma	t_{DM2}/Ma	$f_{\text{Lu/Hf}}$
JZY	1	128	0.033089	0.001044	0.282644	0.000022	-2.23	0.79	862	1297	-0.97
	4	132	0.054815	0.001833	0.282664	0.000018	-1.51	0.64	852	1255	-0.94
	5	127	0.020653	0.000683	0.282659	0.000023	-1.70	0.80	833	1263	-0.98
	7	127	0.034855	0.001149	0.282632	0.000020	-2.70	0.71	882	1326	-0.97
	11	132	0.023928	0.000778	0.282619	0.000019	-3.00	0.65	890	1349	-0.98
	12	128	0.033658	0.001074	0.282597	0.000023	-3.90	0.80	929	1403	-0.97
	13	131	0.060977	0.002047	0.282585	0.000020	-4.34	0.69	971	1433	-0.94
	14	130	0.036608	0.001237	0.282598	0.000020	-3.84	0.72	932	1401	-0.96
	15	128	0.047405	0.001564	0.282554	0.000022	-5.47	0.79	1003	1502	-0.95
	17	131	0.020577	0.000703	0.282585	0.000021	-4.24	0.74	937	1427	-0.98
	18	132	0.082085	0.002884	0.282481	0.000019	-8.06	0.68	1147	1668	-0.91
	19	127	0.043471	0.001323	0.282642	0.000020	-2.36	0.72	872	1305	-0.96
	21	133	0.033054	0.001068	0.282654	0.000023	-1.77	0.81	848	1272	-0.97
	25	134	0.022307	0.000681	0.282655	0.000018	-1.67	0.62	838	1267	-0.98
DJW	1	131	0.028448	0.000875	0.282653	0.000017	-1.85	0.60	846	1276	-0.97
	4	135	0.051199	0.001551	0.282608	0.000016	-3.41	0.57	925	1378	-0.95
	5	132	0.100671	0.003234	0.282581	0.000021	-4.58	0.74	1010	1449	-0.90
	6	133	0.031384	0.000952	0.282641	0.000016	-2.21	0.57	863	1300	-0.97
	8	132	0.032733	0.000998	0.282638	0.000016	-2.36	0.57	870	1309	-0.97
	9	132	0.033364	0.001021	0.282630	0.000015	-2.64	0.53	881	1327	-0.97

注: 锆石原位 Lu-Hf 同位素测试分析由西北大学大陆动力学国家重点实验室完成

值变化范围为-5.47~-1.51,全部为负值且变化较小,平均为-3.19。其一阶段 Hf 模式年龄(t_{DM1})为 833~1147 Ma,除去 1 颗锆石具有较老的二阶模式年龄外,其他锆石的二阶段 Hf 模式年龄(t_{DM2})均为 1255~1502 Ma。在 $t-\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 图(图 5)中,所有点均

落在下地壳演化区域之上和球粒陨石均一储库之下,说明成岩过程中样品主要为壳源物质。相较于福泉山岩体,三清山、灵山岩体 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化范围更大,并有相当部分的正值,说明在成岩过程中有明显的幔源物质加入^[17]。

3.3 地球化学特征

5 件样品的主量、微量与稀土元素组成见表 3。福泉山岩体具有较高的 SiO_2 (73.65% ~ 74.56%) 含量, 富 K_2O (3.82% ~ 4.77%)、 Na_2O (3.13% ~ 3.79%)、 CaO (0.49% ~ 1.08%) 和 Al_2O_3 (13.22% ~ 13.50%), 较低的 MnO (0.05% ~ 0.06%)、 TiO_2 (0.18% ~ 0.23%)、 P_2O_5 (0.14% ~ 0.15%) 含量, TFEO 含量在 1.57% ~ 1.79% 之间变化。在 TAS 图解(图 6-a)中, 岩体样品点均落入花岗岩范围; 在 SiO_2 - K_2O 图解(图 6-b)中, 所有样品点均落入高钾钙碱性系列单元; 福泉山岩体 A/CNK 值在 1.09 ~ 1.22 之间变化, 在 A/CNK - A/NK 图解(图 6-c)中, 所有样品点均落入过铝质岩石单元。CIPW 标准矿物计算中福泉山岩体刚玉分子含量为 1.27 ~ 2.72, 平均为 2.07。分异指数 DI 是源区岩浆演化程度的重要岩石地球化学指标, 福泉山岩体具有较

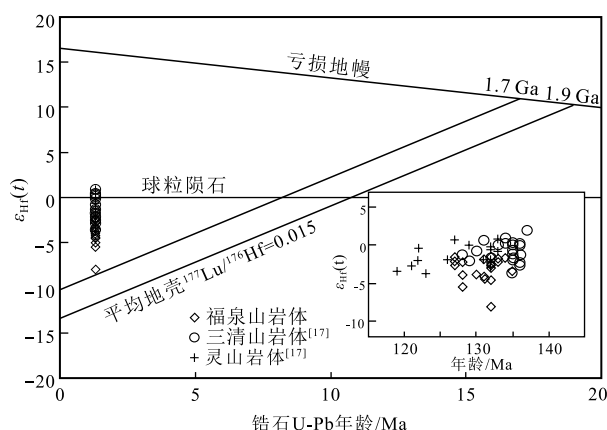


图 5 福泉山岩体 Hf 同位素演化图解

Fig. 5 Hf isotopic evolution plot of the Fuquanshan pluton

高的 DI 值(90~92, 平均 91), 表明岩体分异程度较高。全岩 Rb-Ba-Sr 图解(图 6-d)显示, 岩体均落入高分异花岗岩范围, 与 DI 指数所示结果一致。

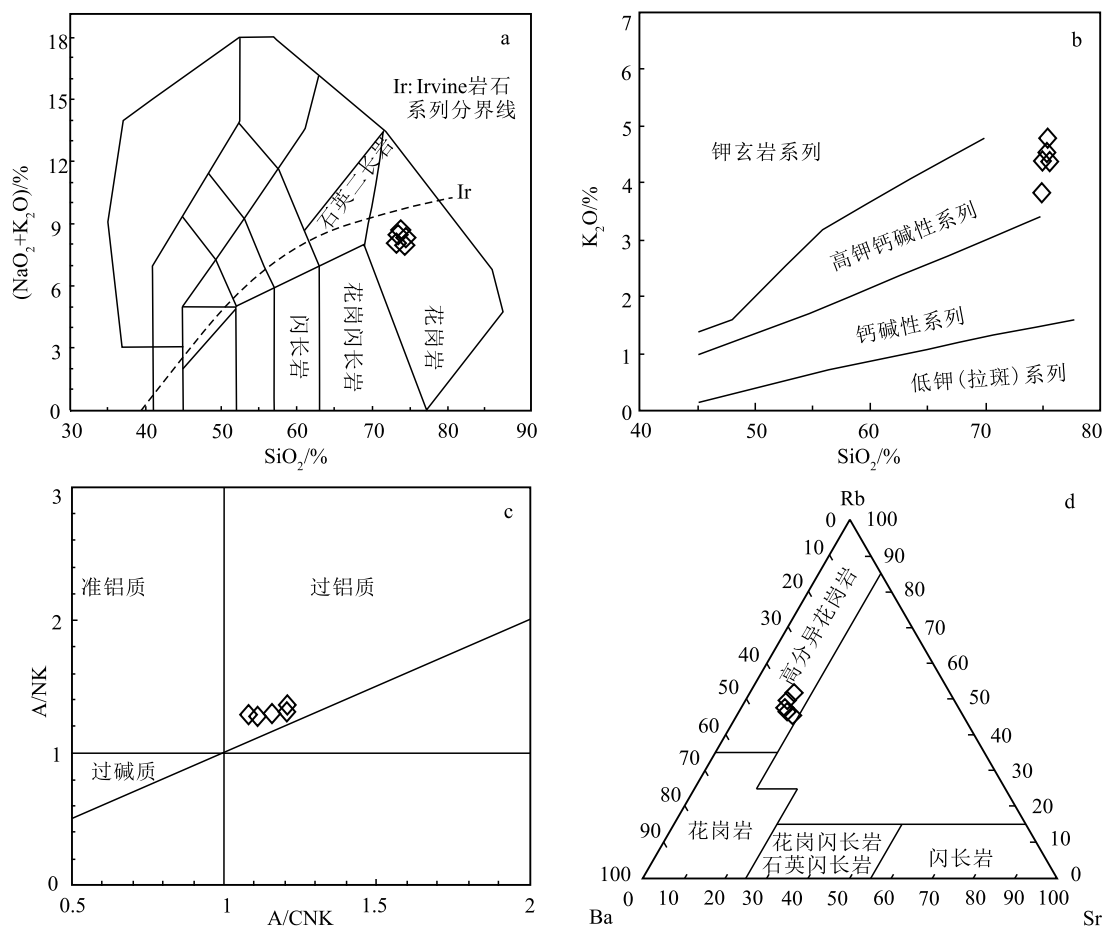


图 6 福泉山岩体 SiO_2 -($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$)^[31] (a)、 SiO_2 - K_2O ^[32] (b)、 A/CNK - A/NK ^[33] (c) 和 Rb-Ba-Sr^[34] (d) 图解

Fig. 6 SiO_2 -($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$) (a), SiO_2 - K_2O (b), A/CNK - A/NK (c) and Rb-Ba-Sr (d) diagrams of Fuquanshan pluton

表 3 福泉山岩体主量、微量和稀土元素分析结果

Table 3 Major, trace and rare earth elements compositions of the Fuquanshan pluton

样品	JZY-1	JZY-2	JZY-3	JZY-4	JZY-5	样品	JZY-1	JZY-2	JZY-3	JZY-4	JZY-5
SiO ₂	73.85	74.39	74.33	74.56	73.65	Sc	4.79	4.71	5.20	5.35	6.30
Al ₂ O ₃	13.33	13.31	13.48	13.50	13.22	Nb	9.84	9.91	10.20	10.80	11.60
FeO	1.30	1.33	1.34	1.28	1.39	Ta	1.86	1.90	1.90	2.10	2.10
Fe ₂ O ₃	0.40	0.34	0.33	0.33	0.45	Zr	98.2	99.9	93.4	89.9	106.0
CaO	0.88	0.68	0.63	0.49	1.08	Hf	2.80	3.20	2.50	2.30	2.90
MgO	0.49	0.44	0.45	0.42	0.50	Be	4.29	3.97	4.10	3.43	4.20
K ₂ O	4.37	4.36	4.52	4.77	3.82	Ga	14.30	13.90	14.40	15.10	15.30
Na ₂ O	3.50	3.43	3.18	3.13	3.79	U	2.56	2.57	2.20	3.66	2.60
TiO ₂	0.20	0.19	0.19	0.18	0.23	Th	14.70	14.40	14.40	12.60	14.70
P ₂ O ₅	0.14	0.14	0.14	0.15	0.14	Y	9.08	7.98	7.80	8.26	13.60
MnO	0.06	0.06	0.05	0.05	0.06	La	20.90	20.50	20.50	17.80	22.40
烧失量	1.38	1.23	1.25	1.02	1.58	Ce	41.10	40.20	40.10	34.70	43.20
SO ₃	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04	Pr	5.33	5.03	5.10	4.47	5.50
总计	99.96	99.96	99.97	99.97	99.95	Nd	19.90	19.10	18.70	16.50	20.60
TFe ₂ O ₃	1.84	1.82	1.82	1.75	1.99	Sm	3.98	3.86	3.80	3.35	4.20
TFeO	1.66	1.64	1.64	1.57	1.79	Eu	0.46	0.42	0.41	0.37	0.49
A/CNK	1.12	1.16	1.21	1.22	1.09	Gd	3.06	2.94	2.90	2.58	3.40
DI	90	91	91	92	90	Tb	0.48	0.45	0.43	0.42	0.58
Cr	17.00	16.70	13.70	15.10	13.40	Dy	2.27	2.06	2.00	2.01	3.00
Ni	5.43	5.37	5.20	4.99	6.30	Ho	0.39	0.35	0.34	0.34	0.56
Co	2.72	2.61	2.60	2.51	3.30	Er	1.04	0.92	0.86	0.92	1.50
Li	29.90	30.90	35.30	33.30	31.80	Tm	0.18	0.16	0.15	0.16	0.27
Rb	209	197	215	223	200	Yb	1.32	1.16	1.10	1.17	1.90
Cs	11.50	11.30	11.90	15.10	11.60	Lu	0.20	0.18	0.17	0.18	0.28
W	3.52	3.06	2.60	6.26	3.30	ΣREE	100.6	97.3	96.6	85.0	107.9
Mo	0.43	0.34	0.25	0.33	0.26	L/H	10.30	10.80	11.10	9.90	8.40
Sr	64.70	55.00	51.40	53.30	73.00	δEu	0.13	0.12	0.12	0.13	0.13
Ba	207	191	190	176	196	(La/Yb) _N	11.40	12.70	13.40	10.90	8.46
V	21.50	14.90	15.30	13.80	20.20						

注:主量元素含量单位为%,微量和稀土元素含量单位为 10^{-6} 。主量、微量和稀土元素测试均由自然资源部华东矿产监督检测中心完成

由微量元素蛛网图(图 7-a)可知,福泉山岩体富集 Rb、Th 等元素,亏损 Ba、Nb、Sr。较低的 Sr 含量($51.4 \times 10^{-6} \sim 73.0 \times 10^{-6}$, 平均 59.5×10^{-6})表明斜长石和钾长石经历了明显的分离结晶作用,Ti 的负异常说明源区岩浆经历了钛铁矿物的分离结晶作用,较低的 Zr、Hf、Th、U 表明锆石发生了大量分离结晶作用。福泉山岩体的稀土元素总量介于 $85 \times$

$10^{-6} \sim 107.9 \times 10^{-6}$ 之间,LREE/HREE 值在 $8.4 \sim 11.1$ 之间,平均为 10.1,(La/Yb)_N 值为 $8.46 \sim 13.4$ 。样品的稀土元素呈现富集轻稀土元素而亏损重稀土元素的右倾配分曲线特点(图 7-b),Eu 出现明显的亏损,δEu 值介于 0.12~0.13 之间,说明该岩体经历了强烈的斜长石分离结晶作用。相较于福泉山岩体,以灵山和三清山为代表的 A 型花岗岩显示出更加

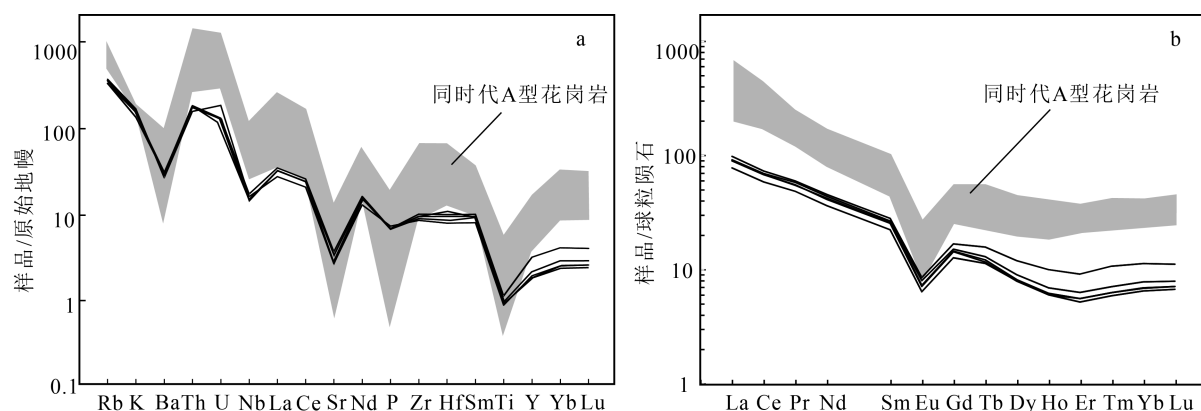


图 7 福泉山岩体微量元素原始地幔标准化图解(a)和稀土元素球粒陨石标准化图解(b)
(微量和稀土元素标准化值据参考文献[35],同时代A型花岗岩据参考文献[17])

Fig. 7 Primitive mantle-normalized trace element(a) and chondrite-normalized REE patterns(b) of Fuquanshan pluton

富集稀土元素的特征。

4 讨 论

4.1 岩体年代学特征

据 1:25 万上饶幅区域地质调查资料^①,前人运用 K-Ar 法测得福泉山岩体的成岩年龄为 114.6Ma。已有研究表明,矿物的 K-Ar 体系封闭温度较低,后期的构造变形、变质或岩浆等热事件均可能使得 K-Ar 同位素体系重置,所测年龄较不准确^[36]。华南地区经历了多期次复杂的岩浆活动,尤以燕山期岩浆活动最强烈,可能使福泉山岩体 K-Ar 同位素体系发生变化,因此前人所测 K-Ar 年龄不能代表福泉山岩体的真实年龄。而 U-Pb 同位素体系的封闭温度高达 900℃,锆石形成后抗蚀变能力较强,年龄可信度较高^[37]。本次定年结果显示,福泉山岩体的锆石 U-Pb 年龄在 129~133 Ma 之间,2 个样品年龄结果稍有差异,但均属于早白垩世。因此笔者认为,福泉山岩体的成岩年龄在 130 Ma 左右,属燕山晚期岩浆活动的产物。

华南构造-岩浆活动强烈,产生了加里东、印支、燕山等多期次岩浆旋回。赣东北地区作为华南东段重要的组成部分,岩浆活动广泛,前人对该区燕山期花岗岩的成岩年龄分别进行过报道,例如区内较典型的三清山(134.8 ± 0.7 Ma)、灵山(131.7 ± 0.55)、卧龙岗(132.0 ± 1.9 Ma)、青山岭(131 Ma)、瑶里(132.0 ± 1.9 Ma)、珍珠山(130 Ma)等^[17-21]。本文所得福泉山岩体的形成年龄在 130 Ma 左右,

与上述岩体的形成时代基本一致,表明赣东北地区燕山晚期岩浆活动强烈,至少存在早白垩世(130 Ma)一期构造-岩浆活动。

4.2 岩石类型

目前,花岗岩的 MISA 分类方法已被大多数学者接受,不同类型的花岗岩往往具有独特的岩石、矿物与地球化学特征^[38-39]。Chappell 等^[38]将花岗岩分为 I 型和 S 型,其中 I 型花岗岩强调以火成岩为主的源区,具有较低的 SiO₂ 含量,富含角闪石,相对亏损 Nd、Hf、Sr 等同位素。而 S 型花岗岩源区成分主要为变沉积岩, A/CNK 值往往大于 1.1,且富含原生石榴子石、堇青石、白云母等富铝矿物。Loiselle 等^[40]提出了 A 型花岗岩的概念,国内外不同学者对 A 型花岗岩同样也进行了大量的研究^[41-43],认为 A 型花岗岩具有较低的氧逸度,相对贫水(小于 2%)和较高的熔融温度。通常情况下,利用岩体特殊指示矿物和经典的地球化学投图可以有效区分不同类型的花岗岩。但对于分异程度较高的花岗岩类型,其矿物组成和化学成分都具有低共结花岗岩的特征,因此需要综合判定。

福泉山岩体具有较高的 SiO₂(73.65%~74.56%)和 Rb(197 × 10⁻⁶ ~ 223 × 10⁻⁶) 含量, Nb/Ta (5.14 ~ 5.52)、Zr/Hf (31.22 ~ 39.09) 值较低,在 Rb-Ba-Sr 图解(图 6-d)中均落入高分异花岗岩范围,因此福泉山岩体应为高分异花岗岩。福泉山岩体具有较低的稀土元素含量,且明显低于赣东北地区同时代的典型 A 型花岗岩(图 8-b),明显亏损 Nb、Ga、Y

等高场强元素, $10000 \times \text{Ga}/\text{Al}$ 和 $\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y}$ 值均低于 A 型花岗岩的值, 同时在花岗岩类型判别图解(图 8)中均落入非 A 型花岗岩区域。因此, 福泉山岩体不属于 A 型花岗岩, 应属于分异的 I 型或 S 型花岗岩。

高分异的 I 型和 S 型花岗岩通常具有相似的地球化学特征, 其成因类型往往难以区分^[39]。但有研究表明, 高分异 I 型花岗岩的 TFeO 含量往往小于 1%^[44-45]。福泉山岩体的 TFeO 含量在 1.6~1.8 之间, 岩体显示过铝质特征, CIPW 标准矿物中刚玉分子含量为 1.27~2.72, 平均为 2.07, Th 、 Y 随 Rb 增高而呈现增加或不变的趋势, 明显不同于典型的 I 型花岗岩, 且不含典型的角闪类矿物。在 $\text{Zr}-\text{TiO}_2$ 和 SiO_2-Zr 图解(图 9)中, 所有样品点均落入 S 型花岗岩演化区域。因此福泉山岩体应为高分异的 S 型花岗岩。

4.3 岩浆源区

福泉山岩体稀土元素配分模式明显右倾, Eu 的强烈负异常表明岩石经历了强烈的斜长石分离结晶作用, Rb 的强烈富集和 Ba 的相对亏损暗示了岩浆充分的分异作用, Ti 的强烈亏损指示岩浆经历了钛铁矿的分离结晶, 同时指示岩浆源区组分以地壳为主。实验岩石学研究表明, $\text{Rb}/\text{Sr}-\text{Ba}$ 体系和 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 值可以确定源区成分^[47]。在 $\text{Rb}/\text{Sr}-\text{Ba}$ 图解(图 10-a)中, 所有样品点均落入富粘土区域。一般认为, 泥质岩成分源区的成熟度较高, 而砂岩源区成熟度较低, 贫长石、富粘土的泥质岩部分熔融形成的过铝质花岗岩 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 值一般小于 0.3^[47], 福泉山岩体的 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 值均小于 0.3 (图 10-b), 说明其源区成分成熟度较高。福泉山岩体相对陡峭的稀土元素配分曲线及较低的 HREE ($\text{Yb} < 1.9 \times 10^{-6}$ 和 $\text{Y} < 189 \times 10^{-6}$) 含量表明, 岩浆源区

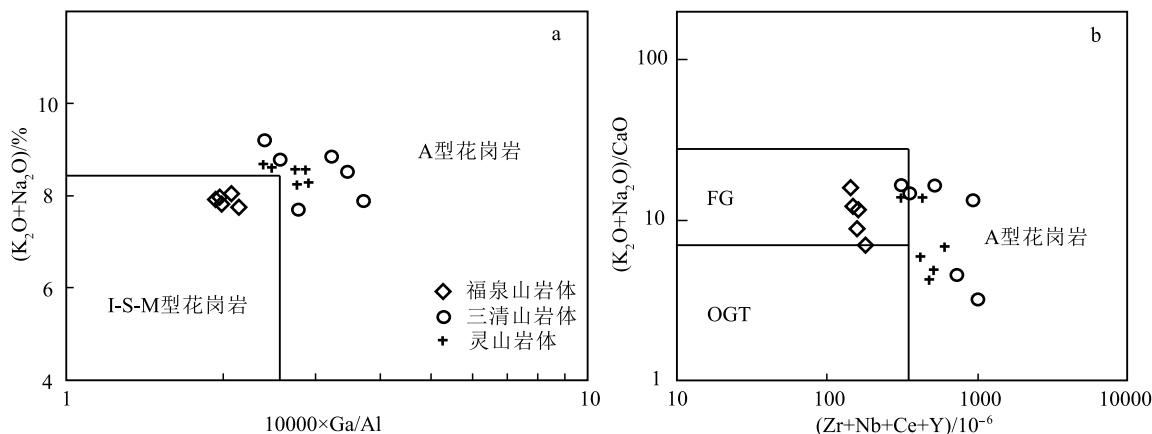


图 8 花岗岩类型判别图解(底图据参考文献[40])

Fig. 8 Granite type discrimination diagrams

a— $10000 \times \text{Ga}/\text{Al}-(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})$ 图解; b— $(\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y})-(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})/\text{CaO}$ 图解

FG—分异花岗岩; OGT—未分异的花岗岩

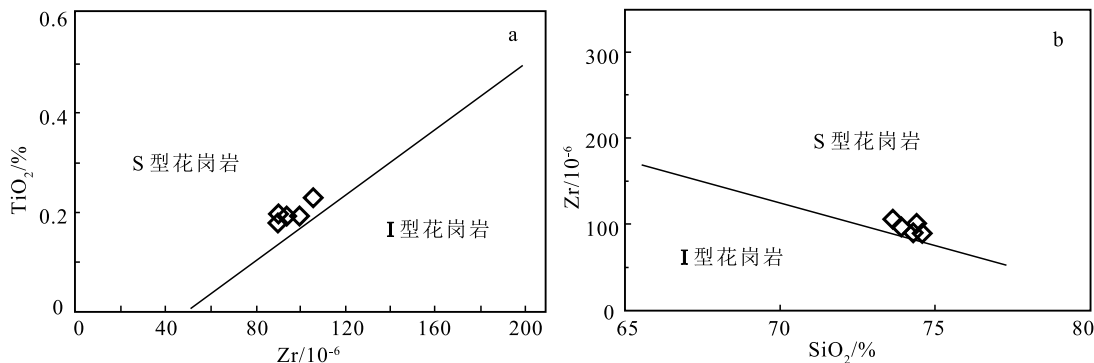


图 9 福泉山岩体 $\text{Zr}-\text{TiO}_2$ (a) 和 SiO_2-Zr (b) 图解(底图据参考文献[46])

Fig. 9 $\text{Zr}-\text{TiO}_2$ (a) and SiO_2-Zr (b) diagrams of Fuquanshan pluton

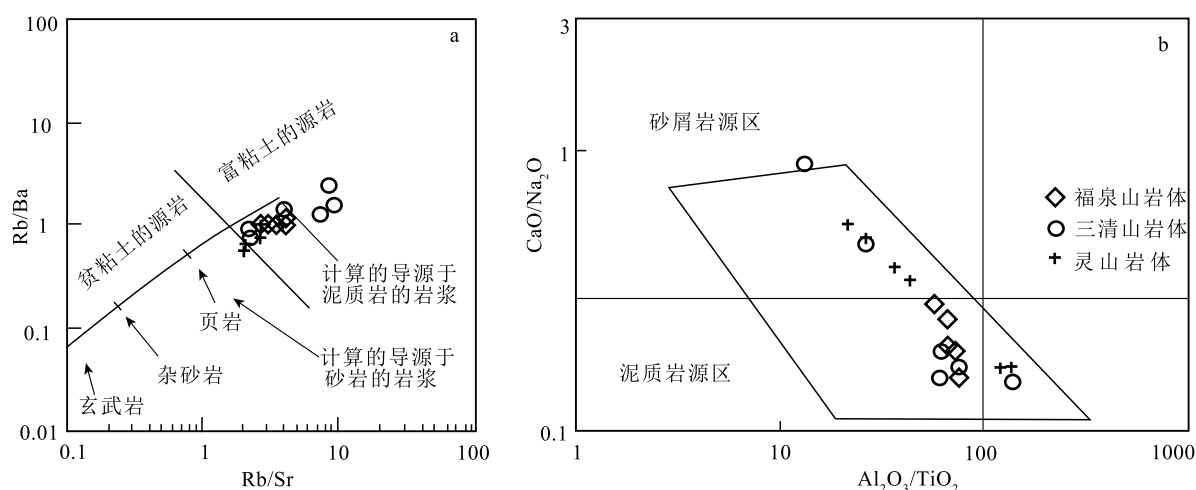


图 10 福泉山岩体 Rb/Sr-Rb/Ba(a, 底图据参考文献[47]) 和 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ -CaO/Na₂O(b, 底图据参考文献[48]) 图解

Fig. 10 Rb/Sr-Rb/Ba(a) and $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ -CaO/Na₂O(b) diagrams of Fuquanshan pluton

为石榴子石相而非角闪岩相的残留; 较低的 Sr ($51.4 \times 10^{-6} \sim 73.0 \times 10^{-6}$, 小于 400×10^{-6}) 和 Eu 的负异常说明, 源区岩石熔融时斜长石为稳定相; 实验岩石学研究表明, 变沉积岩脱水熔融过程中稳定石榴子石相所要求的压力超过 12.5 kbar, 而斜长石稳定相至少超过 15 kbar, 说明福泉山岩体岩浆源区成分较深 (40~50 km)。较低的 $\text{Mg}^\#$ 值表明, 福泉山岩体在成岩过程中没有幔源物质的加入。福泉山岩体岩浆锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值均为负值, 说明岩浆源区主要为古老的下地壳, 与上述成岩过程中没有幔源物质明显加入一致。Barbarin^[49] 将 S 型花岗岩分为含白云母过铝质花岗岩 (MPG) 和富黑云母含堇青石花岗岩 (CPG), 并进一步研究认为, CPG 形成于受底侵或幔源岩浆热影响的地壳岩石深熔作用。岩相学研究表明, 福泉山岩体属富黑云母过铝质花岗岩, 因此其应是受幔源岩浆活动热影响的下地壳变泥质岩石深熔 (部分熔融) 作用的产物。

前人研究表明, 赣东北地区以灵山和三清山为代表的 A 型花岗岩形成于岩石圈地幔上涌导致的中元古代变质基底的部分熔融, 幔源物质明显加入^[17]。三清山和灵山岩体锆石 t_{DM2} 年龄分别为 1070~1417 Ma 和 1133~1410 Ma^[17], 与福泉山岩体 t_{DM2} 年龄 (1255~1502 Ma) 大致在相同区间, 说明赣东北地区早白垩世这期岩浆具有相似的岩浆源区, 均为中元古代变质基底部分熔融的产物。江南造山带东段新元古代的大量岩浆活动及其 Hf 同位素证据表明, 该造山带在中—新元古代经历了明显的

地壳增生事件^[50], 该时期的地壳增生为赣东北地区早白垩世不同类型花岗岩的形成提供了岩浆源区。因此, 本文认为, 福泉山岩体为中元古代下地壳变沉积岩部分熔融的产物。

4.4 成岩构造背景

不同构造背景形成的花岗岩地球化学成分和微量元素组成存在一定差异, 因此国内外学者利用这些差异性对花岗岩形成的构造背景进行了大量研究^[33, 51-52]。但之后有学者指出, 花岗岩微量元素地球化学特征的差异性往往是岩浆源区成分、源岩部分熔融、结晶分异等的综合表现, 微量元素构造背景判别不能真正反映花岗岩形成的构造背景^[53-55]。因此, 本文未对福泉山岩体进行微量元素地球化学构造背景判别分析。

对于华南中生代大规模岩浆作用及其动力学机制, 国内外学者已进行过大量的研究^[2, 6, 11]。中生代是华南地区由古特提斯南北向挤压向古太平洋东西向挤压的重要构造体制转折时期^[1, 21], 前人研究认为, 自早—中侏罗世以来, 华南板块已完成古亚洲构造域向太平洋构造域的体制转换^[2, 17], 也有学者根据华南地区构造岩浆运动指出, 至少自白垩纪以来华南已处于陆内岩石圈伸展构造环境^[1, 3]。但对于早白垩世花岗岩, 绝大多数学者认为, 其形成于拉张的构造背景, 且与古太平洋板块的俯冲有关^[42, 45]。关于 S 型花岗岩形成的构造背景, 前人研究表明, 在陆—陆碰撞造山构造背景下仅能形成少量 S 型花岗岩, 巨量 S 型花岗岩的形成与伸展构造

背景有关^[56]。华南燕山晚期构造-岩浆活动强烈,形成众多花岗岩侵入体,其中包括大量的 S 型花岗岩^[2, 11-13, 57-59]。因此,福泉山岩体形成于伸展拉张构造背景。

赣东北地区以三清山和灵山为代表的同时期 A 型花岗岩的形成与古太平洋板块向欧亚板块俯冲引发的岩石圈地幔上涌有关^[17, 60]。笔者认为,赣东北地区早白垩世这期岩浆活动均形成于上述构造背景。早白垩世以来,包括赣东北地区在内的华南板块已完成由古特提斯构造域向太平洋构造域的转换,受古太平洋板块向欧亚板块俯冲的影响,区内主要应力体制转换为伸展环境,并一直持续到中生代末期^[1, 19]。随着古太平洋板块的持续俯冲,岩石圈地幔上涌导致赣东北地区中元古代加厚,下地壳变沉积岩部分熔融形成了以福泉山岩体为代表的 S 型花岗岩。

5 结 论

(1) LA-ICP-MS 定年结果显示,福泉山岩体形成于 130 Ma 左右,形成时代为早白垩世,为燕山晚期岩浆活动的产物。

(2) 全岩地球化学、岩相学及 Hf 同位素特征表明,福泉山岩体属高分异的 S 型花岗岩,为中元古代变沉积岩部分熔融的产物。

(3) 福泉山岩体形成于古太平洋板块向华南板块俯冲,引发岩石圈地幔上涌产生的拉张构造背景。

致谢:感谢审稿专家对本文提出建设性的意见和宝贵的建议,江西省地质调查勘查院黄传冠正高级工程师在野外调查中提供了协助,中国地质大学(北京)谢元惠博士在成文过程中给与了很多帮助,感谢黄学聪老师在行文过程中给与的帮助,在此表示衷心的感谢。

参考文献

- [1] 余心起,吴淦国,张达,等.中国东南部中生代构造体制转换作用研究进展[J].自然科学进展,2005,15(10): 1167-1174.
- [2] 毛景文,谢桂青,李晓峰,等.华南地区中生代大规模成矿作用与岩石圈多阶段伸展[J].地质前缘,2006,11(1): 45-55.
- [3] 胡瑞忠,毕献武,彭建堂,等.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,2007,26(2): 139-152.
- [4] Li Z X, Li X H. Formation of the 1300-km-wide intracontinental orogen and postorogenic magmatic province in Mesozoic South China: A flat-slab subduction model[J]. Geology, 2007, 35(2): 179-182.
- [5] 毛景文,谢桂青,郭春丽,等.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,2008,14(4): 510-526.
- [6] 华仁民,李光来,张文兰,等.华南钨和锡大规模成矿作用的差异及其原因初探[J].矿床地质,2010,29(1): 9-23.
- [7] 毛景文,陈懋弘,袁顺达,等.华南地区钦杭成矿带地质特征和矿床时空分布规律[J].地质学报,2011,85(5): 636-658.
- [8] 陈毓川,王登红.华南地区中生代岩浆作用的四大问题[J].大地构造与成矿学,2012,36(3): 315-321.
- [9] 舒良树.华南构造演化的基本特征[J].地质通报,2012,31(7): 1035-1053.
- [10] 赵希林,刘凯,毛建仁,等.华南燕山期早期晚阶段两类花岗岩岩体与成矿作用:以赣南—闽西南地区为例[J].中国地质,2012,39(4): 871-886.
- [11] 陈毓川,王登红,徐志刚,等.华南区域成矿和中生代岩浆成矿规律概要[J].大地构造与成矿学,2014,38(2): 219-229.
- [12] 张国伟,郭安林,王岳军,等.中国华南大陆构造与问题[J].中国科学:地球科学,2013,43(10): 1553-1582.
- [13] 吕劲松,张雪辉,孙建东,等.钦杭成矿带东段燕山中酸性岩浆活动时空演化与成矿规律[J].岩石学报,2017,33(11): 3635-3658.
- [14] 王广先,刘战庆,刘善宝,等.江西朱溪铜钨矿细粒花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年和岩石地球化学研究[J].岩矿测试,2015,34(5): 592-599.
- [15] 褚平利,段政,廖圣兵,等.江西大湖塘中生代花岗岩的成因与构造指示意义:年代学、矿物化学、地球化学与 Lu-Hf 同位素制约[J].地质学报,2019,93(7): 1687-1707.
- [16] 陈国华,万浩章,舒良树,等.江西景德镇朱溪铜钨多金属矿床地质特征与控矿条件分析[J].岩石学报,2012,28(12): 3901-3914.
- [17] Zhou J, Jiang Y H, Xing G F, et al. Geochronology and petrogenesis of Cretaceous A-type granites from the NE Jiangnan Orogen, SE China[J]. International Geology Review, 2013, 53(11): 1359-1383.
- [18] 郭博然,刘树文,杨朋涛,等.江西卧龙谷花岗岩与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,2013,32(7): 1035-1046.
- [19] 白玉岭,王宗起,王涛,等.赣东北地区瑶里花岗岩年代学、地球化学特征及其岩石成因[J].矿物岩石学杂志,2015,34(1): 35-50.
- [20] 刘经纬,陈军胜,陈斌.赣东北高分异花岗岩的成因及其对钨矿化的意义[J].矿物岩石地球化学通报,2016,35(6): 1156-1180.
- [21] 刘战庆,刘善宝,裴荣富,等.赣东北地区珍珠山花岗岩脉地球化学、锆石 U-Pb 定年及 Hf 同位素组成研究[J].大地构造与成矿学,2016,40(4): 808-825.
- [22] Li X H, Li W X, Wang X C, 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: Earth Sciences, 2009, 52(9): 1262-1278.
- [23] 刘善宝,王成辉,刘战庆,等.赣东北塔前-赋春成矿带岩浆岩时代限定与序列划分及其意义[J].岩矿测试,2014,33(4): 598-611.
- [24] 吴新华,楼法生,刘春根,等.赣东北万年地区万年群的建立及其意义[J].地质通报,2005,24(9): 819-825.
- [25] 杨明桂,刘亚光,黄志忠,等.江西新元古代地层的划分及其与邻区对比[J].中国地质,2012,39(1): 43-53.
- [26] 张斌斌.江西德兴福泉山岩体成矿潜力分析[D].成都理工大学硕士学位论文,2019.

- [27] Liu Y S, Hu Z C, Gao S, et al. In situ analysis of the major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. *Chemical Geology*, 2008, 257: 34-43.
- [28] Ludwig K R. ISOPLOT 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley Geochronology Center, 2003: 1-39.
- [29] Yuan H L, Gao S, Dai M N, et al. Simultaneous determinations of U-Pb age, Hf isotopes and trace element compositions of zircon by excimer Las-ablation quadrupole and multiple-collector ICP-MS[J]. *Chemical Geology*, 2008, 247(1/2): 100-118.
- [30] Hoskin P W, Schaltegger U. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2003, 53(1): 27-62.
- [31] Middlemost E A K. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. *Annual Reviews of Earth and Planetary Sciences*, 1994, (3/4): 215-244.
- [32] Peccerillo A, Taylor S R. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1976, 58(1): 63-81.
- [33] Maniar P D, Piccoli P M. Tectonic discrimination of granitoids [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1989, 101(5): 635-643.
- [34] Bouseily A M E, Sokkary A A E. The relation between Rb, Ba and Sr in granitic rocks [J]. *Chemical Geology*, 1975, 16(3): 207-219.
- [35] Sun S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [C]// *Magmatism in the ocean basins*. Geological Society of London Special Publication, 1989, 42(1): 313-345.
- [36] Chiaradia M, Schaltegger U, Spikings R A. Time scales of mineral systems Advances in understanding over the past decade [J]. *Society of Economic Geologists*, 2014: 37-58.
- [37] Lee J K W, Williams I S, Ellis D J. U and Th diffusion in natural zircon [J]. *Nature*, 1997, 390: 159-161.
- [38] Chappell B W, White A. Two contrasting granite types [J]. *Pacific Geology*, 1974, 8(2): 173-174.
- [39] 吴福元, 李献华, 杨进辉, 等. 花岗岩成因研究的若干问题 [J]. *岩石学报*, 2007, 23(6): 1217-1238.
- [40] Loiselle M C, Wones D R. Characteristics and origin of anorogenic granites [J]. *Geological Society of America Abstracts with Programs*, 1979, 11(7): 468.
- [41] Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. A type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1987, 95(4): 407-419.
- [42] 王强, 赵振华, 简平, 等. 华南腹地白垩纪 A 型花岗岩类或碱性侵入岩年代学及其对华南晚中生代构造演化的制约 [J]. *岩石学报*, 2005, 21(3): 795-808.
- [43] 张旗. A 型花岗岩的标志和判别——兼答汪洋等对“A 型花岗岩的实质是什么”的质疑 [J]. *岩石矿物学杂志*, 2013, 32(2): 267-274.
- [44] 王强, 赵振华, 熊小林, 桐柏-大别造山带燕山晚期 A 型花岗岩的厘定 [J]. *岩石矿物学杂志*, 2000, 19(4): 297-306.
- [45] 舒徐洁, 陈志洪, 朱延辉, 等. 赣南兴国东固高分异花岗岩成因及地质意义 [J]. *地质论评*, 2018, 64(1): 108-126.
- [46] Watson E B, Harrison T M. Zircon saturation revisited—temperature and composition effects in a variety of crustal magma types [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1983, 64(2): 295-304.
- [47] Sylvester P J. Post-collisional strongly peraluminous granites [J]. *Lithos*, 1998, 45: 29-44.
- [48] Patino Douce A E, Johnston A D. Phase equilibria and melting productivity in the polytic system: Implication for the origin of peraluminous granitoids and aluminous granulites [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1991, 107: 202-218.
- [49] Barbarin B. Genesis of the two main type of peraluminous granitoids [J]. *Geology*, 1996, 24: 295-298.
- [50] Wang X L, Zhou J C, Wan Y S, et al. Magmatic evolution and crustal recycling for Neoproterozoic strongly peraluminous granitoids from southern China: Hf and O isotopes in zircon [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2013, 366: 71-82.
- [51] Pearce J A, Harris N B, Tindle A G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks [J]. *Journal of Petrology*, 1984, 25(4): 956-983.
- [52] Harris N B, Pearce J A, Tindle A G. Geochemical characteristics of collision zone magmatism [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1986, 19(1): 67-81.
- [53] Frost B R, Barnes C G, Collins W J, et al. A geochemical classification for granitic rocks [J]. *Journal of Petrology*, 2001, 42(11): 2033-2048.
- [54] 张旗, 冉峰, 李承东. A 型花岗岩的实质是什么 [J]. *岩石矿物学杂志*, 2012, 31(4): 621-626.
- [55] 邓晋福, 刘翠, 冯艳芳, 等. 关于火成岩常用图解的正确使用: 讨论与建议 [J]. *地质论评*, 2015, 61(4): 717-734.
- [56] Collins W J, Richards S W. Geodynamics significance of S-type granites in circum-Pacific orogens [J]. *Geology*, 2008, 36(7): 559-562.
- [57] 阳华杰, 刘亮, 刘佳. 华南中生代大花岗岩省成岩成矿作用研究进展与展望 [J]. *矿物学报*, 2017, 37(6): 791-800.
- [58] 余振东, 项新葵, 谭荣, 等. 赣北大湖塘平苗矿段白云母花岗岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学及地质意义 [J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2020, 50(5): 1505-1517.
- [59] 项新葵, 尹青青, 孙克克, 等. 江南造山带中段大湖塘同构造花岗岩斑岩的成因: 锆石 U-Pb 年代学、地球化学和 Nd-Hf 同位素的制约 [J]. *岩石矿物学杂志*, 2015, 34(5): 581-600.
- [60] Jiang Y H, Zhao P, Zhou Q, et al. Petrogenesis and tectonic implications of Early Cretaceous S- and A-type granites in the northwest of the Gan-Hang rift, SE China [J]. *Lithos*, 2011, 121: 55-73.
- ①江西省地质调查院. 1:25 万上饶市幅(H50C004003)区域地质调查报告. 江西省, 2002.