

皖南祁门地区东源钨钼矿区花岗闪长斑岩SHRIMP 锆石U-Pb年龄和Hf同位素特征

王德恩¹, 周翔², 余心起², 杜玉雕², 杨赫鸣², 傅建真¹, 董会明¹

WANG De-en¹, ZHOU Xiang², YU Xin-qi², DU Yu-diao²,

YANG He-ming², FU Jian-zhen¹, DONG Hui-ming¹

1. 安徽省地质矿产勘查开发局 332 地质队, 安徽 黄山 245000; 2. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083

1. No.332 Geological Team, Anhui Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Huangshan 245000, Anhui, China;

2. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

摘要:江家等系列花岗闪长斑岩是皖南祁门县东源钨钼矿区含矿岩体的组成部分,位于东源花岗闪长岩的西侧。对江家和方村花岗闪长斑岩进行的 SHRIMP 锆石 U-Pb 测年结果表明,江家、方村花岗闪长斑岩的结晶年龄为 149~152Ma,与富钨的东源花岗闪长岩相近。岩石地球化学和锆石 Hf 同位素分析显示,江家等系列花岗闪长斑岩源区具有复杂的多成分端元,其中老锆石核的正 ε_{Hf} 值反映了成岩岩浆对晋宁期岩浆岩的继承,震荡岩浆环带的负 ε_{Hf} 值(-39.5~-2.86)指示源区的主要成分为古老的地壳物质,有少量地幔物质的混染。全岩锆石饱和温度(737~913°C)显示岩浆组成中有幔源物质的贡献。

关键词:花岗闪长斑岩;SHRIMP 锆石 U-Pb 测年;锆石 Hf 同位素;皖南东源矿区

中图分类号: P588.12⁺1; P597⁺.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2011)10-1514-16

Wang D E, Zhou X, Yu X Q?, Du Y D, Yang H M, Fu J Z, Dong H M. SHRIMP zircon U-Pb dating and characteristics of Hf isotopes of the granodiorite porphyries in the Dongyuan W-Mo ore district, Qimen area, southern Anhui. *Geological Bulletin of China*, 2011, 30(10):1514-1529

Abstract: Granodiorites in Jiangjia and neighboring areas are ore-bearing rock components of the Dongyuan W-Mo deposit in southern Anhui. The zircon SHRIMP U-Pb data show that these rock bodies were formed at 149~152 Ma, almost at the same time with the formation of the Dongyuan W-rich granodiorite. The whole-rock chemical and zircon Hf isotopic data indicate that these magma sources have complex multi-component end-members. CL images reveal that the young zircons occur as new grains or rims of homogeneous structure with magmatic zoning, whereas most of the old ages occur in cores or as single xenocrysts in Neoproterozoic granodiorites, showing that the magmatic source contained considerable amounts of components of early igneous rocks. Young magmatic zircon zones in the granodiorites samples are heterogeneous in $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ values (-39.5~-2.86), probably indicating the mixture between crust and mantle materials during the formation of the magma, with old crustal rocks being the main source. Zircon Hf isotopic data and bulk-rock zircon saturation temperature (737~913°C) indicate that mantle-derived materials probably played a role in the generation of the granodiorites.

Key words: granodiorite; zircon SHRIMP U-Pb dating; zircon Hf isotope compositions; Dongyuan W-Mo ore district; southern Anhui

皖南地区介于长江中下游成矿带和钦杭成矿带之间,属于全国 19 个成矿区带之外的非重点成矿区带,也是地质工作程度较低的地区。祁门东源大型钨

矿的勘查突破,旌德岩体周边发现大量的钨矿脉,加上休宁县南部清坑、长岭尖等找矿线索,尤其是青阳县高家榜钼矿已达大型,说明皖南地区有可能形成

收稿日期:2011-04-25;修订日期:2011-07-08

资助项目:安徽省国土资源厅公益性地质(科研)工作项目《祁门县东源—绩溪县迳溪地区钨钼多金属成矿规律研究》(编号:2009-20)

作者简介:王德恩(1969-),男,高级工程师,从事矿床学、区域地质学研究。E-mail: anhui332@sohu.com

通讯作者:余心起(1962-),男,教授,从事应用构造地质学研究。E-mail: yuxinqi@cugb.edu.cn

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

与赣南相媲美的钨矿基地。此外,祁门地区位于江南隆起带的北缘,属于扬子板块内部的稳定区,与赣东北复合混杂岩带的成矿条件有较大的差别。因此,这一新发现不仅具有找矿实际意义,而且具有重大的理论意义,既增加了人们对钨矿成矿地质背景进行深入研究的兴致,也提供了新的科研基地。

江家等系列花岗闪长斑岩包括江家、方村、弯刀岭等岩体,位于祁门县东源钨钼矿区的西部,勘查中发现具有斑岩型钼矿的特征,脉体发育且剥露面已达钾化蚀变带,是对皖南斑岩型钨钼矿进行研究的典型岩体样本。在秦燕^[1]、周翔^[2]等报道的东源钨钼矿区主要含矿岩体——东源花岗闪长岩成岩成矿年代学特征的基础上,本文对江家、方村花岗闪长岩进行了 SHRIMP 锆石 U-Pb 测年,并对江家等系列岩体进行了岩石地球化学分析,以进一步探讨研究区中生代成矿岩浆岩的源区特征。

1 区域地质背景和江家等系列花岗闪长斑岩的地质特征

研究区位于扬子地块东南部江南隆起的北缘,往北与常印佛^①所划分的下扬子拗陷相邻,往南为浙西拗陷,隶属江南造山带北缘的一部分。祁门县东源钨钼矿区出露新元古界牛屋组(Pt₃n),大面积分布于矿区及东南部(图 1)。牛屋组由紫、灰紫、灰绿色中厚层岩屑砂岩、细砂岩和硅质板岩构成浊积岩,上部为黑色板岩夹中厚层砂岩或砂、板岩互层,发育浅水沉积标志和风暴流沉积。岩层褶皱不明显,新元古界基底地层呈单斜状产出。总体地层走向为近东西向,倾向南,倾角陡立。

区内燕山期岩浆岩发育。早期有黟县花岗闪长岩体,位于该区的东侧。与黟县岩体同时或稍晚的岩浆岩为三宝、大屋里、东源花岗闪长岩体。燕山晚期岩体为城安—大历山花岗闪长岩、花岗岩。

主要断裂构造有近东西向的祁门断裂,晚期有加里东—燕山期形成的东北、北西向断裂。祁门断裂为一条区域上较大规模的断裂,走向东西向,经历了晋宁期的冲断、加里东期的伸展和印支—燕山期的伸展、冲断等转变,控制了研究区的岩浆岩、矿产和中生代红色盆地的展布,是一条重要的控岩控矿断裂。矿区外围的古溪断裂走向 60°,长度大于 10km,断裂带由挤压片理化岩、碎裂岩等组成,宽度十余米至数十米不等,断裂带局部有花岗斑岩充填。

东源矿区主要的含钨、钼矿岩体有东源、西源、茶条坞、江家、方村、弯刀岭、等多个小岩株,岩性为花岗闪长斑岩、石英二长岩到花岗岩,矿化、蚀变特征也有所不同。本文涉及的江家、方村、弯刀岭岩体位于矿区西部,地表出露面积均小于 1km²。江家等系列岩体与基底地层新元古界牛屋组碎屑沉积岩接触,花岗闪长斑岩四周发育角岩及角岩化岩石。盖层地层在矿区内没有出露。矿区另有少量基性岩脉不规则分布(图 2),钻孔资料显示少量基性岩脉侵入到江家花岗闪长岩内。

通过矿区的 5 条北东向断裂和矿区东部的 4 条断裂近于平行,走向 50~70°。通过矿区的北西向断裂有 2 条,总体走向 315°左右,分别位于东源岩体外接触带中。

1.1 江家等系列花岗闪长斑岩地质特征

江家岩体:岩石呈浅红色、灰紫色,多斑似斑状—基质细微粒花岗结构,块状构造。斑晶为斜长石(25%~55%)、钾长石(5%~15%)、石英(5%)、少量黑云母,均半自形粒状,大小一般 2~5mm,少部分钾长石 5~8mm。斜长石板状,环带发育,局部绢云母化、黝帘石化。钻孔深部有钾长石斑晶被后期石英脉胶结的现象(图 3-b)。钾长石板状,部分格子双晶,可见环带,内有少量半自形斜长石包裹体,钾长石常呈填隙状分布,粘土化强烈,表面浑浊,边部常有细小石英似珠边状分布。石英边部不太规则,局部港湾状熔蚀。黑云母呈散状分布。基质为斜长石、钾长石、石英、黑云母,大小一般 0.1~0.2mm。岩体内发育大量方解石—长石—石英细脉,宽度 0.2~0.6cm,脉体平直交切呈共轭状网络;另有脉宽 1~2cm 的一套石英脉,脉体分支汇合显现常见,脉体形态多有弯曲。岩石经历过强烈钾化。后期叠加较强的硅化,硅化裂隙中出现黄铁矿、辉钼矿。次生矿物钾长石 60%~65%、石英 20%~25%、方解石 1%~5%。

方村岩体:与围岩为侵入接触,接触带围岩角岩化。岩石灰紫色、浅红色,多斑似斑状—基质微晶结构及中细粒花岗结构,斑晶较其它几个岩体少,块状构造(图 3-a)。岩石成分主要有:斜长石(50%~55%)、钾长石(15%~20%)、石英(25%~30%)、黑云母(3%~5%)、角闪石(2%~5%),角闪石被微晶黑云母交代呈假像。岩体黄铁矿化强烈,黄铁矿呈自形粒状立方体晶形浸染状散布在岩石中,粒度 0.3~0.6cm,个别达 1cm。岩体西南部边界见有少量暗色微粒包体,包体

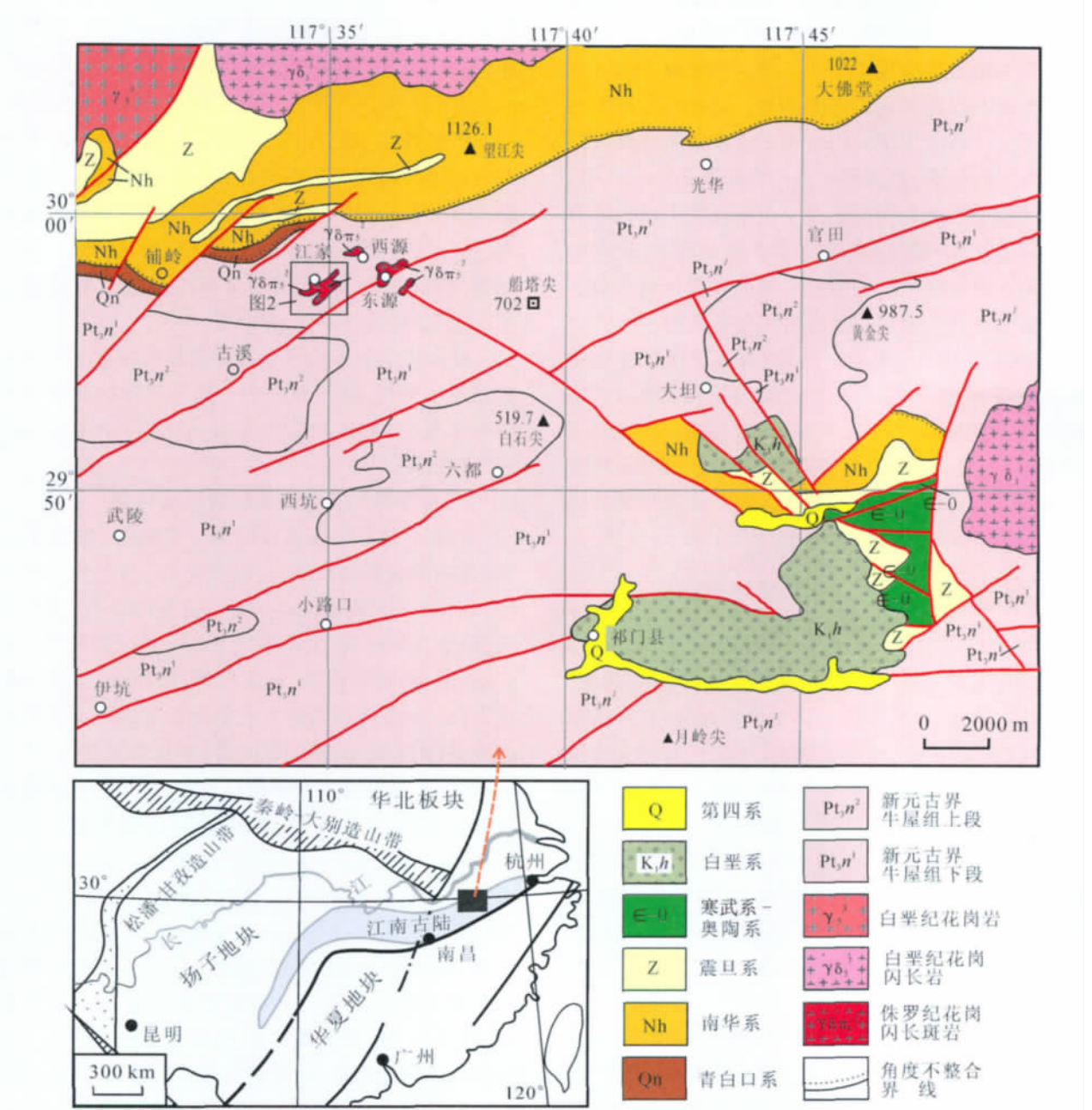


图1 皖南祁门县东源区域地质简图(据参考文献②修改简化)
Fig. 1 Geological sketch map of Dongyuan area, Qimen County, southern Anhui Province

仅硬币大小,内部被岩体物质交代,成分不明(图4)。岩体内节理较为规律,石英脉相对稀疏,主要出现一套宽约1cm的长石石英脉。

弯刀岭岩体:岩石灰白色,多斑似斑状-基质细微粒花岗结构,块状构造。斑晶颗粒多数为2~5mm,主要为斜长石(50%~55%)、石英(10%~15%),少量钾长石和黑云母(均小于3%),均为半自形粒状;

基质主要为斜长石(35%~40%)、钾长石(最高约25%)、石英(25%~30%)。岩体内主要发育石英细脉,脉幅小于1cm者居多,少数达到2~3cm,岩石钾长石化、绢云母化、绿帘石化、绿泥石化、高岭土化,整体表现为钾化明显,局部发育石英钾长石脉体网络。

3个岩体的岩石中副矿物有磷灰石、锆石、白钨矿,未见金红石。方村岩体见角闪石,黄铁矿在方村

岩体中最发育。

1.2 岩体矿化特征

东源钨钼矿区钼异常分布在东源岩体北侧和江家岩体北部。AP2 地球化学综合异常分布在江家岩体及其周边的角岩化带中,面积大于 1.0km^2 , Mo、Cu、Bi 异常套合较好。Mo 原生晕异常主要在岩体接触带附近,宽度大于 200m。

由于白钨矿主要发育的硅化-绿泥石化-绢云母化带在江家、弯刀岭岩体中已经被剥蚀,这些岩体内钨的品位相对较低。钼矿化主要发育在石英细脉中,并与黄铁矿伴生,品位随着石英脉的发育呈现韵律式变化。地表样品中 Mo 含量最高达到 278×10^{-6} , W 含量最高达到 32.8×10^{-6} , 钻孔岩心中 Mo 最高达到 990×10^{-6} , W 最高达到 27.08×10^{-6} 。

1.3 围岩蚀变

岩体周围的牛屋组碎屑沉积岩普遍角岩化,岩石由灰白变为紫灰色,风化后紫红色更为明显,局部见明显的椭圆形斑点,斑点长约 1mm。角岩化总体围绕岩体呈面型展布,程度随远离岩体而减弱,角岩化带宽度 50~700m 不等,分布范围大于含钨石英细脉带的分布范围。

江家岩体北部硅化较强、南部钾长石化较强,岩石呈肉红色,石英脉和长石-石英脉也较为发育(图 4-a);方村岩体硅化、钾长石化均较弱,黄铁矿化最为发育,以自形粒状呈星点状散布在岩石中;弯刀岭岩体规模最小,蚀变以硅化、绢云母化、绿泥石化为主,分带不明显。

钾长石化有 2 种类型,其一为钾长石呈脉状分布于石英细脉中,属线型蚀变;其二为岩体中的斜长石蚀变成钾长石,岩石呈肉红色(图 4-b)。线型钾化相对常见,面型钾化以江家岩体东南部最为发育。

硅化主要表现为石英细脉的发育。此外,部分石英细脉与围岩的界线模糊不清,围岩坚硬,说明岩体晚期的剩余含矿热液在形成石英细脉的过程中相伴有硅化、硫化物和钨钼矿化。

绢云母化伴随绿泥石化、绿帘石化和碳酸盐化发育,主要交代中长石,绢云母含量一般为全岩的 25%~30%,最高达 6%~40%,绢云母呈鳞片状均匀地分布于中长石内,仅见中长石净边残留。在钻孔中绢云母化往往与钾长石交替出现,而常与硅化共存。绿泥石化、绢云母化发育与白钨矿富集有密切的关系。

2 样品采集和分析方法

2.1 采样位置

笔者对东源矿区,包括东源、西源、江家一带,进行了详细的剖面测制和钻孔编录工作,厘定了矿区岩性的空间变化,并对江家等系列岩体进行了系统的采样分析。由于江家等系列花岗闪长斑岩在地下深处一定部位有可能连为一体,即同属于一个岩体,故 SHRIMP 锆石 U-Pb 测年和锆石 Hf 同位素测试样品在江家和方村岩体中采集,样品位置坐标分别为:样品 09JJ06,江家花岗闪长斑岩(图 2),北纬 $29^{\circ}58'24''$ 、东经 $117^{\circ}36'16''$;样品 09FE01,方村花岗闪长斑岩(图 2),北纬 $29^{\circ}58'16''$ 、东经 $117^{\circ}36'13''$ 。另外采集了江家、方村和弯刀岭花岗闪长斑岩中蚀变较弱的新鲜岩石样品,进行了岩石地球化学测试,以探讨岩浆源区的特征。

2.2 岩石地球化学分析方法

岩石地球化学分析在中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所完成。采用粉末样品压片制样,用 X 射线荧光光谱仪直接测量样品中 SiO_2 等 10 个主量元素和 Ti、Cr、Rb、Sr、Ba、Zr 等 34 个微量元素。主量元素分析精度优于 1%,其中 FeO 采用容量法分析,烧失为 1000°C 时的烧失量。各分析元素采用经验系数法与散射射线内标法校正元素间的基体效应。所用仪器型号:帕纳克公司 PW4400。15 种稀土元素和 Ni、Cu、Zn、Ga、Nb、Mo、Cd、Cs、Hf、Ta、Pb、Bi、Th、U 元素采用 ICP-MS 分析法,所用仪器型号:美国热电公司 X Series II。测试数据见表 1。

2.3 锆石 SHRIMP U-Pb 测年方法

将新鲜的岩石样品破碎至 80 目,用常规的人工淘洗和电磁选方法富集锆石,再在双目镜下用手工方法逐个精选锆石颗粒,未用任何化学试剂。选出的锆石为浅棕黄色至无色的自形柱状晶体,主要发育 {100}+{101} 晶面,{110} 次之,晶体较细小,宽度大多 0.05~0.1mm。将锆石与标准锆石(Temora,年龄值 417Ma)一起粘贴在环氧树脂表面,抛光后将待测锆石进行透射光、反射光、阴极发光照相。锆石 U-Th-Pb 同位素分析在北京离子探针中心 SHRIMP-II 上进行。分析流程和原理可参考 Compston 等^[3]、刘敦一等^[4]、简平等^[5]的文献。通过对透射光、反射光、阴极发光图像分析,选择环带比较明显、表面光洁、没有包裹体的区域进行分析;束斑直径为 20~

表 1 江家、方村、弯刀岭花岗闪长斑岩主量元素、微量元素和稀土元素分析结果

Table 1 Maior elements, trace elements and REE composition of Jiangjia, Fangcun and Wandaoling granodiorite porphyries

	WDL-B2	WDL-B4	WDL-B5	JC-B1	JC-B2	JC-B4	JC-B9	JC-B11-1	JC-B13	JC-B14-0	JC-B14-1	JC-B14-2
样品号和 岩石名称	弯刀岭 云英岩化含斑细 粒二长花岗岩	弯刀岭 细微粒斑状 花岗岩闪长岩	弯刀岭 细微粒斑状花 岗闪长岩	江家 蚀变碎裂 状石英岩	江家 花岗岩 斑岩	江家 花岗岩 斑岩	江家 细微粒斑状 花岗岩闪长岩	江家 细微粒斑状 花岗岩闪长岩	方村 花岗岩 长斑岩	方村 细粒斑状 花岗岩闪长岩	方村 细粒斑状花 岗闪长岩	方村 细粒斑状花 岗闪长岩
SiO ₂	68.82	71.62	72.66	78.98	72.71	75.19	72.36	69.63	68.18	68.80	69.11	69.82
TiO ₂	0.35	0.38	0.32	0.35	0.31	0.07	0.32	0.36	0.62	0.44	0.48	0.44
Al ₂ O ₃	18.00	15.08	15.19	9.99	14.26	14.07	14.60	11.82	14.72	14.64	15.30	15.05
FeO	0.16	1.06	0.52	1.32	1.37	0.16	0.53	1.22	2.89	1.12	1.71	1.59
Fe ₂ O ₃	1.12	1.22	1.39	3.06	0.95	0.29	0.71	0.43	0.88	1.47	1.24	1.08
MnO	0.03	0.03	0.03	0.08	0.06	0.02	0.02	0.02	0.06	0.05	0.04	0.04
MgO	0.71	0.67	0.52	0.89	0.62	0.17	0.56	0.51	1.25	1.02	1.03	0.98
CaO	0.12	1.27	0.54	0.11	0.63	0.55	2.22	2.51	3.58	2.33	2.83	2.36
Na ₂ O	0.94	3.51	2.90	0.63	3.64	3.83	3.26	3.61	3.87	3.27	3.64	3.54
K ₂ O	7.81	3.72	4.15	2.01	4.31	4.85	4.32	5.34	1.56	3.46	3.24	3.49
P ₂ O ₅	0.07	0.13	0.08	0.06	0.06	0.03	0.12	0.12	0.19	0.16	0.18	0.16
LOI	1.87	1.07	1.59	2.27	0.85	0.57	0.76	1.05	0.64	1.57	0.93	1.22
TOTAL	100.00	99.76	99.90	99.76	99.78	99.80	99.78	96.62	98.44	98.33	99.74	99.78
Cr	3.40	5.40	3.80	30.90	25.50	2.50	4.80	3.90	8.50	7.70	5.90	7.00
Ni	2.12	2.68	2.23	11.11	9.35	0.96	0.98	2.53	4.99	3.05	3.03	2.93
Rb	417.7	138.5	197.3	121.8	270.5	194.2	126.3	139.4	138.9	169.8	106.7	142.2
Ba	311.7	552.6	402.3	252.7	210.8	115.0	355.8	358.8	377.1	537.5	551.8	475.9
Th	10.00	10.80	9.18	4.65	6.82	3.78	6.62	7.59	8.07	8.18	7.82	8.01
U	3.79	3.35	4.99	1.98	8.95	11.39	3.90	3.78	2.31	2.74	2.21	2.19
Nb	9.25	9.25	7.30	5.86	23.18	14.57	5.14	6.92	10.04	10.24	8.67	8.36
Ta	0.91	0.94	0.70	0.37	3.27	1.61	0.52	0.61	0.85	0.75	0.87	0.80
La	40.92	26.57	44.86	20.58	13.62	5.41	26.69	16.17	27.74	28.07	27.09	25.66
Ce	60.46	51.74	42.23	39.89	28.31	9.12	55.38	32.76	59.02	54.74	55.02	47.80
Pr	8.84	6.10	10.59	4.59	3.20	1.41	6.04	3.68	6.51	6.21	6.42	5.75
Sr	21.3	338.7	167.2	26.5	69.5	133.3	254.6	242.7	361.7	318.9	373	344.3
Nd	33.58	25.26	41.80	18.59	13.43	6.04	23.15	15.52	27.28	25.86	26.33	24.05
Zr	151	139.7	132.7	118.9	121	56.2	123.8	109.5	177.9	144.3	147.0	145.9
Hf	6.18	5.81	5.37	3.46	6.60	3.73	5.70	4.42	5.12	6.32	6.00	6.14
Sm	5.69	4.41	6.35	3.25	2.76	1.66	3.75	2.80	4.83	4.45	4.55	4.08
Eu	1.23	1.16	1.40	0.65	0.55	0.32	0.86	0.77	1.32	1.17	1.14	1.08
Gd	4.33	3.99	4.65	3.09	3.25	2.29	2.76	2.28	4.47	3.77	3.88	3.66
Tb	0.51	0.48	0.47	0.46	0.51	0.37	0.31	0.28	0.54	0.45	0.46	0.44
Dy	2.14	2.11	2.01	2.60	2.92	1.98	1.37	1.29	2.43	2.05	2.05	1.94
Y	7.49	10.28	8.53	14.52	17.26	14.08	6.13	5.95	10.34	9.86	9.12	9.08
Ho	0.30	0.32	0.30	0.50	0.52	0.34	0.19	0.19	0.35	0.32	0.31	0.29
Er	0.74	0.85	0.82	1.52	1.57	0.97	0.54	0.50	0.86	0.77	0.76	0.76
Tm	0.11	0.12	0.11	0.25	0.26	0.18	0.08	0.07	0.12	0.11	0.11	0.11
Yb	0.66	0.77	0.73	1.64	1.74	1.19	0.51	0.49	0.73	0.66	0.70	0.66
Lu	0.11	0.11	0.10	0.30	0.30	0.20	0.09	0.08	0.11	0.10	0.10	0.10
A/CNK	1.76	1.25	1.48	2.92	1.21	1.12	1.04	0.73	1.01	1.10	1.05	1.08
K ₂ O+Na ₂ O	8.76	7.23	7.06	2.64	7.95	8.68	7.57	8.95	5.43	6.73	6.88	7.03
K ₂ O/Na ₂ O	8.27	1.06	1.43	3.19	1.18	1.27	1.33	1.48	0.40	1.06	0.89	0.99
SREE	159.62	123.99	156.42	97.92	72.94	31.47	121.72	76.87	136.31	128.74	128.90	116.38
LREE/HREE	16.93	13.17	16.02	8.45	5.59	3.18	19.79	13.85	13.20	14.63	14.42	13.62
La _N /Yb _N	41.69	23.21	41.65	8.47	5.29	3.07	35.52	22.45	25.76	28.78	26.32	26.14
dEu	0.73	0.83	0.75	0.62	0.56	0.50	0.78	0.91	0.86	0.85	0.81	0.84
dCe	0.72	0.92	0.44	0.93	0.98	0.76	0.99	0.97	1.00	0.94	0.95	0.89
T ₂₀ /°C	822.2	790.5	801.8	834.0	776.5	710.9	763.7	712.5	789.8	780.5	775.8	780.1

续表 1-1

	JC-B14-3	JC-B14-	JC-B15	JC-B16	JK001-B1	JK001-B	JK001-B3	JK001-B4	JK001-B5	JK001-B6	JK001-B7	JK-1401-B
样品号和	方村	4 方村	方村	方村	江家	2 江家	江家	江家	江家	江家	江家	1 江家
岩石名称	细粒斑状花	中细粒	细粒斑状花	细粒斑状花	细微粒斑状	细微粒斑状	细微粒斑状	细微粒斑状	细微粒斑状	细微粒斑状	细微粒斑状	蚀变花岗
	岗闪长岩	花岗岩	岗闪长岩	岗闪长岩	花岗闪长岩	花岗闪长岩	花岗闪长岩	花岗闪长岩	花岗闪长岩	花岗闪长岩	花岗闪长岩	闪长岩
SiO ₂	68.53	68.46	68.04	70.15	72.39	67.73	71.14	71.52	71.68	70.84	69.01	67.43
TiO ₂	0.44	0.46	0.41	0.44	0.24	0.24	0.27	0.26	0.29	0.30	0.24	0.10
Al ₂ O ₃	14.95	14.64	14.56	14.82	14.01	13.91	14.46	14.15	14.05	14.36	15.56	18.41
FeO	1.63	1.75	1.20	1.67	1.60	0.32	1.04	1.68	1.05	1.13	0.64	0.12
Fe ₂ O ₃	1.01	0.92	1.27	1.14	0.01	1.04	0.39	0.17	0.74	1.00	0.50	0.05
MnO	0.05	0.05	0.04	0.05	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.01	0.00
MgO	0.96	1.01	0.96	0.90	0.49	0.46	0.54	0.58	0.66	0.65	0.48	0.14
CaO	2.69	2.77	2.31	2.46	1.92	3.69	2.08	2.34	2.15	2.78	1.15	0.39
Na ₂ O	3.49	3.42	3.39	3.61	2.19	2.34	2.92	3.08	3.18	3.34	2.64	1.48
K ₂ O	3.29	3.49	3.44	3.29	5.46	5.30	4.67	3.77	3.99	3.43	7.03	11.26
P ₂ O ₅	0.16	0.17	0.16	0.14	0.09	0.09	0.09	0.09	0.11	0.10	0.12	0.11
LOI	1.15	1.05	1.26	1.08	0.62	2.96	0.73	0.78	0.95	0.65	1.26	0.45
TOTAL	98.37	98.19	97.04	99.75	99.04	98.10	98.35	98.45	98.89	98.60	98.65	99.93
Cr	8.90	7.80	6.90	5.20	2.06	3.53	4.51	8.53	6.27	4.12	6.27	2.94
Ni	3.04	3.04	3.22	3.42	1.44	1.44	1.56	1.72	1.84	1.94	1.60	0.38
Rb	160.8	153.6	154.5	137.3	182.6	213.2	149.7	121.8	124.9	122.9	271.8	499.5
Ba	519.5	532	496.6	471.9	319.7	375.6	551.4	339.5	351.6	352.5	588.4	455.5
Th	7.55	8.63	8.96	10.50	5.83	6.11	8.25	7.21	7.42	7.02	7.98	7.48
U	2.25	2.55	2.66	3.31	4.10	4.23	5.58	4.52	3.83	3.47	7.23	4.40
Nb	9.23	9.80	9.32	8.87	5.07	4.65	6.14	4.22	6.75	6.73	5.01	3.64
Ta	0.73	0.78	0.86	0.86	0.48	0.42	0.65	0.44	0.65	0.63	0.52	0.49
La	30.63	28.83	24.58	22.11	16.20	16.65	19.32	20.17	20.33	18.02	13.25	8.56
Ce	55.03	56.14	51.51	44.49	31.76	33.44	38.52	39.84	40.72	35.73	30.53	17.70
Pr	6.66	6.45	5.55	5.15	3.65	3.83	4.46	4.52	4.70	4.10	3.64	2.31
Sr	318.5	298.2	328.1	257.7	233.2	229.1	312.9	259.1	267.4	243.1	224.2	123.6
Nd	27.33	26.32	22.84	21.25	15.54	15.89	18.70	19.10	19.45	16.92	16.14	10.14
Zr	151.1	137.9	139.6	128.7	116.9	119.8	124.6	130.6	130.1	131.9	133.8	60.5
Hf	6.38	5.66	5.91	5.98	5.70	5.74	6.48	6.56	6.42	6.06	6.76	3.40
Sm	4.58	4.36	3.96	3.78	2.94	2.94	3.72	3.62	3.85	3.03	3.46	2.37
Eu	1.13	1.10	0.99	0.94	0.80	0.77	0.88	0.91	0.87	0.83	0.67	0.79
Gd	3.99	3.79	3.43	3.30	2.54	2.46	3.04	2.84	2.90	2.61	3.15	2.20
Tb	0.47	0.44	0.40	0.41	0.32	0.32	0.40	0.37	0.37	0.34	0.46	0.34
Dy	2.12	2.00	1.79	1.91	1.41	1.34	1.73	1.53	1.53	1.39	1.95	1.61
Y	9.59	8.95	7.79	8.92	6.62	6.12	7.62	6.79	6.79	6.55	9.26	7.90
Ho	0.31	0.30	0.27	0.29	0.22	0.20	0.25	0.23	0.23	0.21	0.32	0.27
Er	0.77	0.77	0.68	0.76	0.57	0.51	0.64	0.58	0.58	0.56	0.84	0.72
Tm	0.11	0.10	0.09	0.11	0.09	0.08	0.09	0.09	0.09	0.09	0.12	0.11
Yb	0.65	0.62	0.57	0.69	0.56	0.49	0.63	0.56	0.59	0.56	0.80	0.77
Lu	0.10	0.09	0.09	0.11	0.09	0.09	0.10	0.10	0.10	0.09	0.13	0.12
A/CNK	1.05	1.01	1.08	1.06	1.08	0.85	1.06	1.06	1.04	1.01	1.11	1.20
K ₂ O+Na ₂ O	6.78	6.91	6.83	6.90	7.65	7.64	7.59	6.85	7.17	6.77	9.67	12.74
K ₂ O/Na ₂ O	0.94	1.02	1.02	0.91	2.49	2.26	1.60	1.22	1.25	1.02	2.66	7.60
SREE	133.89	131.31	116.75	105.30	76.68	79.00	92.47	94.46	96.29	84.48	75.44	48.01
LREE/HREE	14.70	15.20	14.96	12.88	12.22	13.43	12.44	13.98	14.10	13.45	8.72	6.81
La _N /Yb _N	31.90	31.65	28.91	21.65	19.45	22.93	20.75	24.31	23.26	21.67	11.21	7.47
dEu	0.79	0.81	0.80	0.79	0.87	0.85	0.78	0.84	0.76	0.89	0.61	1.05
dCe	0.87	0.93	1.00	0.95	0.94	0.95	0.94	0.95	0.95	0.95	1.02	0.92
T _{Zr} /°C	779.8	768.1	775.9	767.8	763.8	737.4	766.2	770.3	768.7	765.0	773.2	712.6

续表 1-2

	JJK-1401-B2	JJK-1401-B5	JJK-1401-	JJK-1401-	JJK-1401-	JJK-1401-	JJK-1401-	JJK-1401-	09jj02	09jj04	09jj06	09fc01
样品号和 岩石名称	江家	江家	B6 江家	B7 江家	B8 江家	B9 江家	B10 江家	B11 江家	江家	江家	江家	方村
	细粒斑状	细粒斑状	细粒斑状	硅化钾化	细粒斑状	细粒斑状	细粒二长	细微粒斑状	细粒花岗	细粒花岗	细粒花岗	细粒花岗
	花岗闪长岩	花岗闪长岩	花岗闪长岩	细粒闪长岩	花岗闪长岩	花岗闪长岩	花岗岩	花岗闪长岩	闪长岩	闪长岩	闪长岩	闪长岩
SiO ₂	73.03	71.39	71.96	67.73	70.19	66.83	70.58	69.77	71.80	71.43	71.91	68.77
TiO ₂	0.32	0.39	0.38	0.21	0.41	0.46	0.27	0.35	0.26	0.28	0.28	0.49
Al ₂ O ₃	13.88	14.23	14.22	15.77	13.81	15.40	13.96	14.59	14.72	14.43	14.73	15.42
FeO	0.85	1.06	1.23	0.40	1.07	1.60	0.64	0.58	1.38	1.14	1.80	1.59
Fe ₂ O ₃	0.98	1.19	0.96	1.17	1.25	1.09	1.32	1.43	0.07	0.61	(0.24)	1.21
MnO	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.05
MgO	0.59	0.94	0.77	0.44	0.72	0.82	0.45	0.59	0.55	0.61	0.62	1.00
CaO	2.01	1.62	2.11	1.25	2.28	2.38	1.56	2.49	1.54	1.27	2.24	2.46
Na ₂ O	2.83	2.60	2.81	2.42	2.88	1.98	2.89	3.11	3.22	3.88	3.61	3.94
K ₂ O	4.17	4.31	4.42	7.66	4.14	4.59	5.02	4.38	5.26	4.77	3.96	3.06
P ₂ O ₅	0.11	0.14	0.13	0.07	0.15	0.15	0.09	0.12	0.10	0.11	0.11	0.16
LOI	1.06	1.99	0.69	1.28	2.20	3.16	1.59	2.27	0.91	1.28	0.74	1.55
TOTAL	99.85	99.89	99.70	98.41	99.13	98.49	98.39	99.71	99.82	99.82	99.77	99.70
Cr	6.86	6.96	7.74	4.80	7.06	6.27	3.43	5.59	6.90	4.40	6.70	9.30
Ni	2.17	3.07	2.01	1.16	2.94	2.16	1.61	2.06	1.61	1.47	1.71	3.08
Rb	115.6	138.2	111.4	337.2	149.8	179.7	182.5	170.4	163	174.7	125.8	137.7
Ba	548.3	471.9	722.5	584.8	489	415.3	392.7	507	479.7	516.3	423	549.9
Th	11.85	9.41	9.41	7.38	8.66	10.22	7.94	11.18	7.21	7.50	7.98	8.59
U	2.89	2.70	1.90	3.11	2.54	2.17	7.70	2.72	3.81	3.54	4.39	1.63
Nb	9.62	8.97	8.45	4.47	8.17	10.94	8.33	7.61	4.71	6.57	5.84	11.51
Ta	0.61	0.72	0.72	0.33	0.64	1.00	0.68	0.74	0.36	0.56	0.56	0.96
La	23.57	27.90	28.98	17.53	30.88	33.76	23.66	31.41	14.35	18.30	19.88	31.61
Ce	48.85	57.09	59.26	33.96	60.68	69.05	46.18	63.43	29.15	36.60	38.75	60.16
Pr	5.46	6.43	6.84	3.86	6.94	7.76	5.12	7.07	3.61	4.54	4.82	7.46
Sr	317	225.9	374.1	119.8	261.6	154	246.1	208.4	330.6	237.2	247.7	319.2
Nd	22.22	26.97	28.39	16.14	28.76	32.85	21.04	28.8	13.88	17.21	18.2	28.7
Zr	147.2	154.5	150.2	123.4	157.9	179.9	117.3	148.1	107	111.8	114.4	147.9
Hf	6.32	6.12	6.69	4.87	6.92	8.88	4.40	7.32	4.37	4.68	4.70	5.86
Sm	3.95	4.83	4.99	2.91	5.10	5.75	3.78	5.01	2.83	3.45	3.64	5.35
Eu	0.92	1.12	1.20	0.88	1.22	1.32	0.88	1.17	0.74	0.90	0.89	1.31
Gd	2.65	3.80	3.68	2.19	3.82	4.52	2.76	3.58	2.14	2.58	2.75	4.28
Tb	0.31	0.46	0.46	0.27	0.47	0.53	0.33	0.43	0.30	0.34	0.36	0.57
Dy	1.15	1.93	1.82	1.09	1.85	2.02	1.39	1.72	1.34	1.45	1.60	2.62
Y	4.78	7.47	7.38	4.59	7.16	8.10	6.09	6.65	6.18	6.85	7.23	11.73
Ho	0.17	0.26	0.24	0.16	0.24	0.27	0.20	0.22	0.19	0.22	0.24	0.38
Er	0.40	0.67	0.59	0.39	0.61	0.66	0.53	0.57	0.52	0.58	0.63	0.93
Tm	0.06	0.09	0.08	0.06	0.08	0.09	0.07	0.08	0.08	0.09	0.09	0.13
Yb	0.36	0.52	0.52	0.36	0.49	0.58	0.50	0.45	0.49	0.59	0.58	0.74
Lu	0.05	0.07	0.08	0.06	0.08	0.08	0.08	0.08	0.07	0.08	0.09	0.10
A/CNK	1.08	1.20	1.07	1.08	1.03	1.23	1.07	1.01	1.07	1.04	1.03	1.08
K ₂ O+Na ₂ O	7.01	6.91	7.24	10.08	7.01	6.57	7.91	7.49	8.47	8.65	7.57	7.00
K ₂ O/Na ₂ O	1.47	1.66	1.57	3.17	1.44	2.32	1.74	1.41	1.63	1.23	1.10	0.78
SREE	110.11	132.14	137.15	79.86	141.21	159.25	106.53	144.01	69.68	86.93	92.51	144.35
LREE/HREE	20.41	15.93	17.31	16.44	17.49	17.17	17.14	19.23	12.61	13.64	13.58	13.80
La _N /Yb _N	43.82	36.20	37.76	32.69	42.23	39.29	31.99	47.19	19.78	21.08	23.02	28.74
dEu	0.82	0.77	0.82	1.03	0.81	0.76	0.79	0.81	0.88	0.89	0.82	0.81
dCe	0.98	0.97	0.96	0.93	0.94	0.97	0.95	0.97	0.93	0.92	0.91	0.89
T _{Zr} /°C	784.2	897.0	894.0	873.6	899.3	913.4	868.5	892.5	753.5	754.1	755.5	778.4

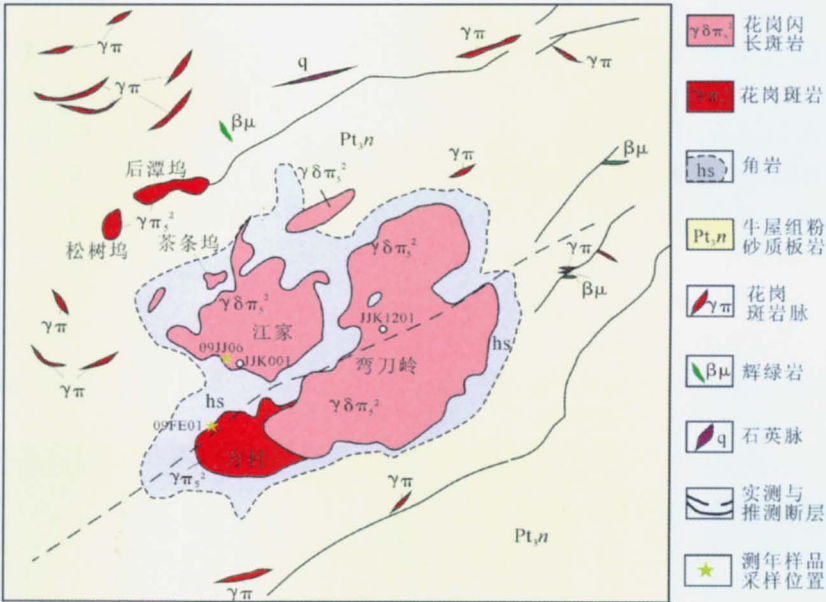


图 2 江家、方村、弯刀岭花岗闪长斑岩地质简图
Fig. 2 Geological sketch map of Jiangjia, Fangcun and Wandaoling granodiorite porphyries

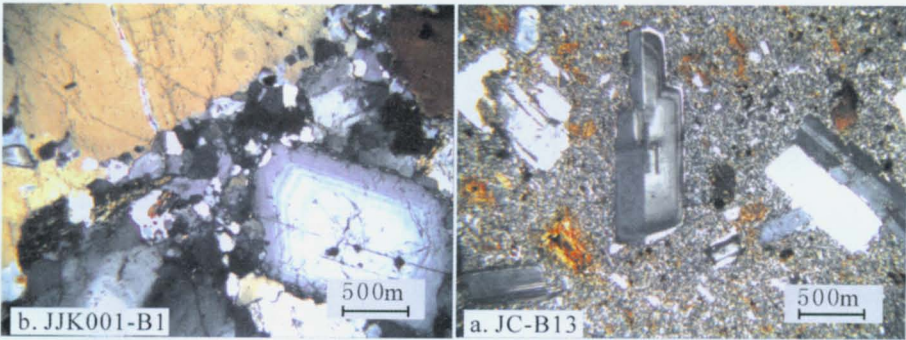


图 3 花岗闪长斑岩显微图像
Fig. 3 Photomicrographs showing the features of granodiorite porphyries
a—JC-B13 方村蚀变中细粒花岗闪长岩, 似斑状结构;
b—JJK001-B1 江家花岗闪长斑岩, 斜长石环带和石英珠边

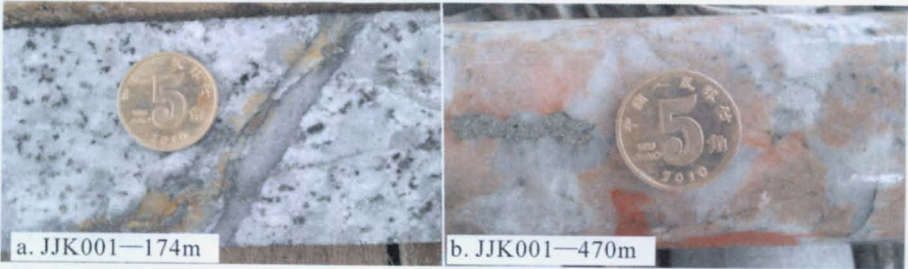


图 4 钻孔 JJK001 岩心(江家花岗闪长斑岩)蚀变特征
Fig. 4 Alteration features of Jiangjia granodiorite porphyry from core of drill hole JJK001
a—浅部弱蚀变花岗闪长斑岩;b—深部钾长石化花岗闪长斑岩

30 μm ;数据采集在 5 个扫描仪上进行;所有年龄结果均用 ^{204}Pb 含量作了普通 Pb 校正;所给定的同位素比值和年龄的误差在 1σ 水平。年龄测定结果列于表 2。

用于 U-Pb 测年的锆石阴极发光图片见图 5。锆石内部结构比较清晰,大多数锆石具有震荡环带的生长边,Th/U 比值大部分大于 0.1,显现了岩浆成因的特征^[6-7]。多数具有震荡生长环带的岩浆锆石的分析结果主要集中在谐和线上(图 6),即数据在谐和图中的投影点位于谐和线上及其附近,表明这些锆石颗粒形成后的 U-Pb 同位素体系是基本封闭的,没有 U 或 Pb 同位素的明显丢失或加入。这些特征指示被测锆石未遭受明显的后期热事件的影响,可以代表所测定岩石的形成年龄。

进行锆石 SHRIMP 原位微区年龄测定时,使用 Squid 程序进行有关计算。表 2 中普通 Pb 校正采用 ^{204}Pb 校正方式。校正时普通 Pb 组成由 Stacey-Kramers 两阶段模式^[8]给出。标准样品 TEM 校正时普通 Pb 的组成为此模式年龄为 417Ma 时的组成,即 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} = 0.86 \pm 0.01$, $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} = 2.10 \pm 0.2$, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.05 \pm 0.8$;未知样品校正时的普通 Pb 组成为其年龄(即消除普通 Pb 影响后的年龄)对应的该模式给出的普通 Pb 组成^[9]。

2.4 Hf 同位素测试方法

锆石 Hf 同位素测试在中国地质科学院矿产资源研究所国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室 Neptune 多接收等离子质谱仪和 Newwave UP213 紫外激光剥蚀系统(LA-MC-ICP-MS)上进行。实验过程中采用 He 作为剥蚀物质载气,根据锆石大小,剥蚀直径采用 55 μm 或 40 μm ,测定时使用锆石国际标样 GJ1 和 Plesovice 作为参考物质。相关仪器运行条件和详细分析流程见侯可军等^[10]的描述。分析过程中锆石标准 GJ1 和 Plesovice 的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 测试加权平均值分别为 0.282007 ± 0.000007

(2σ , $n=36$)和 0.282476 ± 0.000004 (2σ , $n=27$),与文献报道值(侯可军等^[10]、Morel 等^[11]、Sláma 等^[12])在误差范围内完全一致。 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 是根据每个测点的锆石 U-Pb 年龄计算而来的,采用的 ^{176}Lu 衰变常数为 $1.867 \times 10^{-11} \text{a}^{-1}$ ^[13],利用平均大陆壳的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值 0.015 ^[14]计算锆石 Hf 同位素地壳模式年龄(T_{DM}^{C})。锆石 Hf 同位素数据列于表 3。

3 测试结果

3.1 年代学测试结果

江家、方村花岗闪长斑岩 SHRIMP 锆石 U-Pb

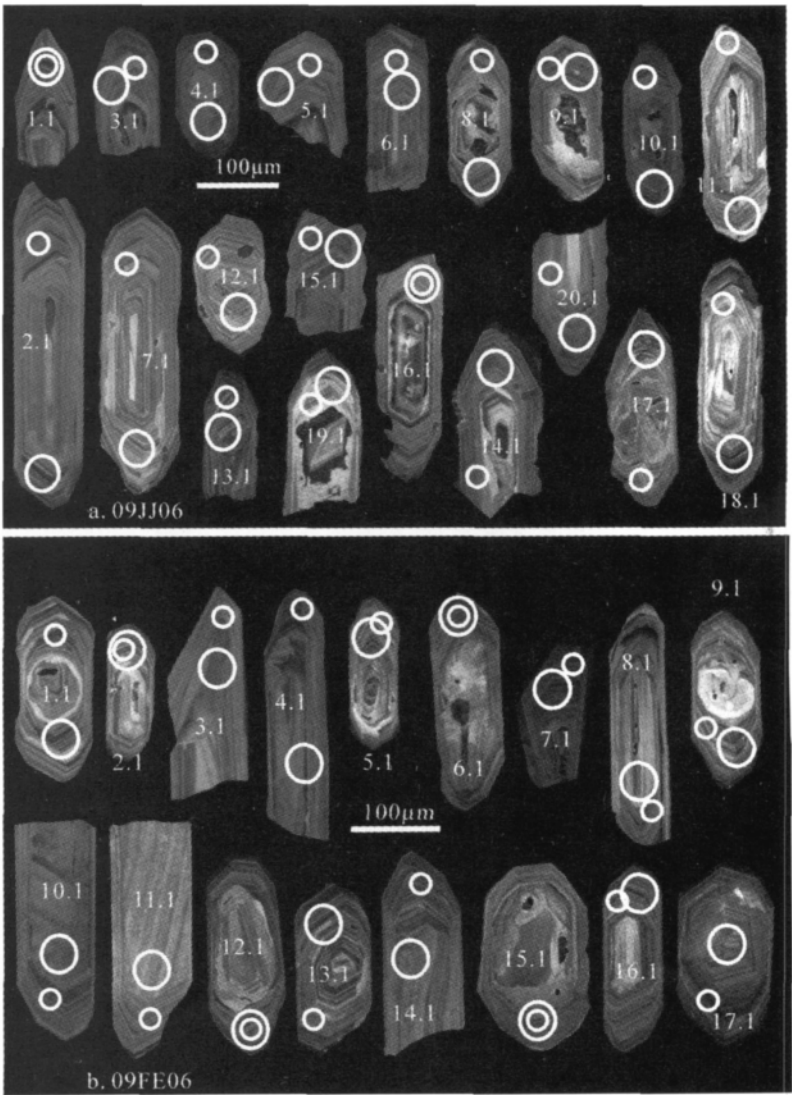


图 5 花岗闪长斑岩代表性锆石阴极发光(CL)图像

Fig. 5 Cathodoluminescence (CL) images of zircons from Jiangjia (a) and Fangcun (b) granodiorite porphyries

a—江家花岗闪长斑岩;b—方村花岗闪长斑岩

测年分析结果见表 2 和图 6。江家花岗闪长斑岩的锆石基本上都具有震荡环带的生长边,²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄集中在 140~156Ma 之间,年龄加权平均值为 149Ma±1Ma(n=16,MSWD=1.9)。方村花岗闪长斑岩锆石 U-Pb 年龄集中在谐和线上 148~156Ma 之间,年龄加权平均值为 152.2Ma±1Ma(n=14,MSWD=1.7),均属于晚侏罗世。

3.2 锆石 Hf 同位素测试结果

对江家花岗闪长斑岩的 20 颗锆石进行了 Hf 同位素分析。其中,老锆石 09JJ06-18(800.5Ma)的 ¹⁷⁶Yb/¹⁷⁷Hf 比值和 ¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf 明显偏大,可能是变质锆石;锆石 09JJ06-7(262.7Ma)的 ¹⁷⁶Yb/¹⁷⁷Hf 比值偏高;锆石 09JJ06-14(640.2Ma)的 ε_{Hf} 为 5.25,二阶段模式年龄为 1243Ma;锆石 09JJ06-20(651.4Ma)的 ε_{Hf} 为 6.78,二阶段模式年龄为 1154Ma。应为继承锆石,指示了对早期幔源火成岩组分的继承。另外的 16 个测点为有效测点,得到 ¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf 平均值为 0.000578。其中 ε_{Hf}(149Ma)为-5.63~-2.42,平均值为-4.20。Hf 单阶段模式年龄平均值为 965Ma,二阶段模式年龄平均值为 1468Ma。

对方村花岗闪长斑岩的 17 颗锆石进行了 Hf 同位素分析。结合锆石的阴极发光图像结构分析,

09FE01-10 的 ¹⁷⁶Yb/¹⁷⁷Hf 比值和 ¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf 比值接近平均值,其 ε_{Hf} 的负值代表了区域基底地层古老地壳成分端元,二阶段模式年龄达到 1806Ma;锆石 09FE01-2(152.8Ma)和 09FE01-8(815.8Ma)的 ¹⁷⁶Yb/¹⁷⁷Hf 和 ¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf 比值明显偏大,后者可能是经历强烈变质的继承锆石;锆石 09FE01-15(193.4Ma)的 ¹⁷⁶Yb/¹⁷⁷Hf 和 ¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf 比值明显偏低,可能是变质的继承锆石。09FE01-17 的 Hf 同位素测点为其古老的锆石核,¹⁷⁶Yb/¹⁷⁷Hf 比值和 ¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf 比值相对偏大,其二阶段模式年龄仅为 989Ma,其 ε_{Hf} 的正值可能代表了岩浆源区中的继承幔源组分。另外的 12 个测点为有效测点,得到 ¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf 平均值为 0.000683。其中 ε_{Hf}(152.1Ma)为-7.98~-2.69,平均值为-5.45。Hf 单阶段模式年龄为 1019Ma,二阶段模式年龄为 1549Ma。

4 讨 论

4.1 岩石成因

经过对江家、弯刀岭、方村岩体的地表地质勘探和薄片镜下分析,三者的岩石学特征非常接近,主要的差别体现为蚀变特征。排除蚀变强烈的样品 JJK1401-B1、JJK1401-B7、WDL-B2、JC-B1、JC-

表 2 江家、方村花岗闪长斑岩 SHRIMP 锆石 U-Th-Pb 同位素测试数据

Table 2 SHRIMP zircon U-Th-Pb analyses of Jiangjia and Fangcun granodiorite porphyries, southern Anhui Province

点号	²⁰⁶ Pb /%	U /10 ⁶	Th /10 ⁶	²³² Th / ²³⁸ U	²⁰⁶ Pb* /10 ⁻⁶	²⁰⁶ Pb ^{*/238} U 年龄 /Ma±1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb 年龄 /Ma±1σ	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th 年龄 /Ma±1σ	不谐和 度/%	²⁰⁷ Pb ^{*/206} Pb* ±1σ %	²⁰⁷ Pb ^{*/235} U ±1σ %	²⁰⁶ Pb ^{*/238} U ±1σ %	误差相 关系数
09JJ06 江家花岗闪长斑岩													
1.1	0.21	1128	157	0.14	22.6	148.58±0.78	225±87	156±15	34	0.0523±1.9	0.1629±3.8	0.02332±0.53	0.139
2.1	0.26	620	31	0.05	12.3	146.9±1.1	363±140	232±70	60	0.0559±2.8	0.171±6.1	0.02305±0.72	0.119
3.1	2.07	290	49	0.18	5.74	143.6±2.0	-261±570	107±61	155	0.0580±4.3	0.129±22	0.02252±1.4	0.063
4.1	0.33	665	35	0.06	13.4	149.03±0.98	188±120	175±48	21	0.0525±2.8	0.1607±5.1	0.02339±0.66	0.129
5.1	0.52	472	103	0.23	9.51	148.5±1.1	236±120	186±14	37	0.0550±2.8	0.1635±5.2	0.02330±0.75	0.145
6.1	0.90	364	35	0.10	7.23	146.0±1.4	293±220	207±56	50	0.0593±3.7	0.165±9.6	0.02290±0.98	0.102
*7.1	0.42	537	156	0.30	19.3	262.7±1.8	518±77	627±18	49	0.0611±1.9	0.331±3.6	0.04159±0.70	0.195
8.1	0.78	732	82	0.12	14.8	148.6±2.5	50±100	105±19	-199	0.0532±2.0	0.1511±4.6	0.02332±1.7	0.618
9.1	0.89	719	42	0.06	14.5	147.9±1.2	-14±180		1163	0.0529±2.8	0.146±7.3	0.02321±0.78	0.229
10.1	0.61	1390	103	0.08	28.7	152.2±1.6	110±82	121±25	-39	0.05305±1.5	0.1588±3.6	0.02389±1.1	0.563
11.1	0.47	506	27	0.06	10.3	149.6±1.4	217±82	201±19	31	0.0542±3.1	0.1634±3.7	0.02348±0.92	0.251
12.1	1.51	379	57	0.15	7.93	152.7±2.5	-43±290	125±42	459	0.0573±2.9	0.150±12	0.02397±1.7	0.409
13.1	0.39	947	65	0.07	19.0	148.33±0.99	227±83	128±25	35	0.0538±2.2	0.1627±3.7	0.02328±0.68	0.277
*14.1	0.54	180	34	0.20	16.2	640.2±7.7	762±110	710±88	16	0.0690±1.9	0.930±5.2	0.1044±1.3	0.487
15.1	0.54	576	60	0.11	11.7	149.9±1.3	189±85	138±15	21	0.0542±2.5	0.1617±3.7	0.02352±0.85	0.294
16.1	2.09	380	41	0.11	7.85	150.1±2.0	-448±500		134	0.0554±3.0	0.125±19	0.02355±1.3	0.285
17.1	0.98	383	50	0.13	7.90	151.5±1.6	18±180	130±28	-753	0.0542±3.6	0.152±7.5	0.02378±1.1	0.244
*18.1	0.34	296	186	0.65	33.7	800.5±6.3	783±46	765±17	-2	0.06807±1.3	1.190±2.4	0.1322±0.84	0.535
19.1	1.88	506	109	0.22	10.6	153.0±2.8	-315±300	100±26	149	0.0557±2.6	0.134±12	0.02402±1.9	0.535
*20.1	0.20	557	179	0.33	51.0	651.4±4.0	775±29	776±15	16	0.06668±1.1	0.953±1.5	0.10633±0.65	0.433

续表 2-1

点号	²⁰⁶ Pb _c /%	U /10 ⁻⁶	Th /10 ⁻⁶	²³² Th / ²³⁸ U	²⁰⁶ Pb* /10 ⁻⁶	²⁰⁶ Pb* / ²³⁸ U 年龄 /Ma±1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb 年龄 /Ma±1σ	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th 年龄 /Ma±1σ	不谐和 度/%	²⁰⁷ Pb*/ ²⁰⁶ Pb* ±1σ %	²⁰⁷ Pb*/ ²³⁵ U ±1σ %	²⁰⁶ Pb*/ ²³⁸ U ±1σ %	误差相 关系数
09FE01 方村花岗岩闪长斑岩													
1.1	0.68	910	112	0.13	18.6	150.4±1.1	69±110	130±19	-117	0.0474±4.5	0.1543±4.6	0.02361±0.73	0.300
2.1	0.54	1157	564	0.50	24.0	152.8±1.0	18±80	134.9±4.4	-754	0.0464±3.3	0.1534±3.4	0.02398±0.69	0.329
4.1	0.55	710	62	0.09	14.3	149.0±1.1	193±86	112±21	23	0.0499±3.7	0.1611±3.8	0.02339±0.77	0.311
4.1	0.92	783	90	0.12	15.9	149.5±1.1	-117±160	97±28	228	0.0439±6.5	0.1420±6.6	0.02346±0.77	0.303
5.1	1.06	770	66	0.09	16.0	152.5±1.4	-85±270	92±68	280	0.0445±11	0.147±11	0.02394±0.94	0.293
6.1	0.62	1081	271	0.26	22.5	153.23±0.95	93±61	145.4±5.5	-65	0.0479±2.6	0.1588±2.6	0.02405±0.63	0.304
7.1	0.60	919	68	0.08	19.0	152.8±1.5	111±100	132±27	-38	0.0482±4.3	0.1595±4.4	0.02399±0.99	0.327
*8.1	0.11	722	141	0.20	83.8	815.8±4.3	769±22	793±18	-6	0.06482±1.1	1.206±1.2	0.13491±0.56	0.541
9.1	0.46	810	89	0.11	16.9	153.9±1.2	155±95	156±20	1	0.0492±4.1	0.1638±4.2	0.02416±0.82	0.326
10.1	0.80	1229	57	0.05	25.8	154.6±1.4	-81±160		291	0.0445±6.4	0.1490±6.5	0.02427±0.94	0.442
11.1	1.21	705	105	0.15	14.4	149.5±1.4	-121±200	103±27	223	0.0438±8.0	0.142±8.1	0.02347±0.94	0.327
12.1	0.55	610	65	0.11	12.5	151.2±1.2	124±87	152±21	-22	0.0485±3.7	0.1587±3.8	0.02373±0.82	0.286
13.1	0.41	760	131	0.18	15.6	151.7±1.1	151±77	153.6±9.5	0	0.0491±3.3	0.1611±3.4	0.02381±0.74	0.291
14.1	0.42	959	145	0.16	20.0	153.9±1.0	20±100	139±15	-651	0.0464±4.3	0.1547±4.3	0.02416±0.69	0.295
*15.1	0.53	647	136	0.22	17.0	193.4±1.2	214±69	232±11	10	0.0504±3.0	0.2117±3.1	0.03046±0.64	0.272
16.1	0.64	918	164	0.18	19.0	152.9±1.0	24±98	135±12	-540	0.0465±4.1	0.1539±4.1	0.02400±0.8	0.333
17.1	0.67	874	198	0.23	18.0	152.1±1.0	-94±92	135.1±8.4	261	0.0443±3.8	0.1458±3.8	0.02387±0.68	0.324

注:由北京离子探针中心分析测试。²⁰⁶Pb_c指普通 Pb 中的 ²⁰⁶Pb 占全铅 Pb²⁰⁶Pb 的百分数;应用实测 ²⁰⁶Pb 校正普通 Pb,误差为 1σ;
为离群值,未参与年龄加权平均值计算

B11-1,大部分样品的数据投点在 TAS 分类图解中落入花岗岩区域,个别样品的投点落入花岗闪长岩、石英闪长岩区域内(图 7-a)。样品 Al₂O₃ 含量中等(11.81%~15.56%),铝饱和指数(A/CNK)主要变化在 1.01~1.25 之间(29 个样品),6 个样品大于 1.1。SiO₂ 含量在 66.8%~72.4%之间,全碱(ALK)含量较高,Na₂O+K₂O 变化于 6.6%~9.7%之间,相对低 Ca(全部样品 CaO 小于 3.0%),高 K(23 个样品 K₂O 大于 3.0%),K₂O/Na₂O=0.4~2.49,绝大多数大于 1。P₂O₅ 为 0.06%~0.19%,TiO₂ 为 0.07%~0.62%。

方村岩体因含有角闪石和更多的黄铁矿,Fe、Mg 含量较高。样品中较低的 Na₂O 和较高的 K₂O、CaO 含量可能是斜长石发生绢云母化和方解石化导致的。在岩石主量元素哈克图解上,随着 Si 含量增高,K₂O 显示降低的趋势,说明早期的钾化被后期的硅化破坏,硅化过程的同时(或后期)发育了黑云母的交代蚀变。

除个别样品外,江家等系列岩体样品的稀土元

素总量分布在 72.94×10⁻⁶~159.25×10⁻⁶ 之间,它们具有较高的轻重稀土元素比(29 个样品的 LREE/HREE 比值=12.61~20.41)和高的 La_N/Yb_N 比值(29 个样品为 22.45~43.82)。在球粒陨石标准化的稀土元素分布模式图上,分布曲线明显呈右倾型(图 8-a),多数样品与典型的华南壳源改造型花岗岩的“海鸥型”^[18]曲线不同,而与杨小男等^[19]、毛建仁等^[20]、邱检生等^[21]报道的长江中下游、闽西、粤东等地具壳幔混合成因的花岗质岩石相类似。在 δEu-La_N/Yb_N 图解(图 9)上多数样品的投点落入壳幔源区域,也指示有幔源物质参与了东源等系列岩体的形成。

岩石 Eu 亏损较弱,多数样品 δEu 值为 0.76~0.89,在原始地幔标准化微量元素蜘蛛图解(图 8-b)上,样品明显亏损 Ba、Nb、Ta、Sr、Eu 等,显示 K、P、Ti、Pb、Th、U、Hf 等富集。在强烈蚀变的样品(WDL-2、JJK1401-B1、JJK1401-B7)中,Sr 含量进一步降低,Rb 含量显著升高,并且显示 Ce 的负异常。多数样品的 Zr/Hf 平均值为 22.75,低于地壳岩石平

表 3 江家、方村花岗闪长斑岩锆石 Hf 同位素数据

Table 3 Zircon Hf isotopic data of Jiangjia and Fangcun granodiorite porphyries

点号	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U 年龄/Ma	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Yb/ ¹⁷⁷ Hf	2s	<i>e</i> _{Hf} (0)	<i>e</i> _{Hf} (<i>T</i>)	2s	<i>T</i> _{DM}	<i>T</i> _{DM} ^C	<i>f</i> _s
09JJ06 江家花岗闪长斑岩											
1	148.6	0.282572	0.000524	0.014645	0.000023	-7.06	-3.85	0.81	950	1445	-0.98
2	146.9	0.282531	0.000467	0.014369	0.000028	-8.52	-5.34	0.98	1006	1539	-0.99
3	143.6	0.282534	0.000508	0.015323	0.000028	-8.40	-5.30	0.99	1002	1534	-0.98
4	149.0	0.282565	0.000687	0.018101	0.000025	-7.32	-4.12	0.90	964	1463	-0.98
5	148.5	0.282538	0.000575	0.017534	0.000026	-8.29	-5.08	0.93	999	1524	-0.98
6	146.0	0.282605	0.001106	0.032879	0.000029	-5.92	-2.82	1.02	919	1378	-0.97
#7	262.7	0.282497	0.000634	0.020709	0.000028	-9.71	-4.05	1.00	1057	1545	-0.98
8	148.6	0.282568	0.000427	0.013948	0.000029	-7.20	-3.98	1.03	953	1454	-0.99
9	147.9	0.282584	0.000578	0.017459	0.000028	-6.63	-3.44	1.01	934	1419	-0.98
10	152.2	0.282521	0.001038	0.033753	0.000028	-8.87	-5.63	0.98	1035	1561	-0.97
11	149.6	0.282595	0.000201	0.005854	0.000029	-6.26	-3.00	1.02	911	1392	-0.99
12	152.7	0.282510	0.000373	0.012635	0.000029	-9.25	-5.94	1.02	1032	1581	-0.99
13	148.3	0.282534	0.000621	0.017328	0.000029	-8.40	-5.21	1.02	1005	1531	-0.98
#14	640.2	0.282528	0.000591	0.017547	0.000023	-8.62	5.25	0.81	1013	1243	-0.98
15	149.9	0.282576	0.000534	0.015632	0.000024	-6.92	-3.69	0.87	945	1436	-0.98
16	150.1	0.282599	0.000445	0.014031	0.000028	-6.11	-2.86	1.01	910	1383	-0.99
17	151.5	0.282551	0.000532	0.016862	0.000029	-7.82	-4.55	1.03	980	1492	-0.98
#18	800.5	0.282482	0.001088	0.038459	0.000024	-10.27	6.85	0.83	1092	1265	-0.97
19	153.0	0.282610	0.000630	0.017964	0.000027	-5.71	-2.42	0.96	899	1358	-0.98
#20	651.4	0.282564	0.000516	0.014363	0.000024	-7.37	6.78	0.85	962	1154	-0.98
09FE01 方村花岗闪长斑岩											
1	150.4	0.282585	0.000421	0.012363	0.000024	-6.62	-3.36	0.86	930	1416	-0.99
#2	152.8	0.281565	0.001372	0.039725	0.000414	-42.68	-39.48	14.65	2384	3683	-0.96
3	149.0	0.282522	0.000404	0.010424	0.000023	-8.82	-5.60	0.80	1016	1557	-0.99
4	149.5	0.282415	0.001982	0.066373	0.000029	-12.61	-9.53	1.01	1214	1806	-0.94
5	152.5	0.282543	0.000620	0.016731	0.000024	-8.09	-4.80	0.86	993	1509	-0.98
6	153.2	0.282576	0.000733	0.018590	0.000041	-6.93	-3.64	1.45	950	1436	-0.98
7	152.8	0.282564	0.000876	0.022828	0.000029	-7.35	-4.08	1.04	970	1463	-0.97
#8	815.8	0.282385	0.003217	0.097533	0.000028	-13.69	2.59	0.99	1301	1545	-0.90
9	153.9	0.282493	0.000742	0.022210	0.000026	-9.85	-6.55	0.93	1065	1621	-0.98
#10	154.6	0.282451	0.000218	0.006979	0.000031	-11.35	-7.98	1.11	1109	1712	-0.99
11	149.5	0.282518	0.000822	0.024901	0.000028	-8.97	-5.77	0.99	1033	1568	-0.98
12	151.2	0.282559	0.000303	0.008637	0.000025	-7.54	-4.26	0.90	963	1473	-0.99
13	151.7	0.282515	0.000492	0.014119	0.000026	-9.08	-5.80	0.92	1028	1571	-0.99
14	153.9	0.282522	0.000585	0.018248	0.000028	-8.84	-5.52	0.99	1021	1556	-0.98
#15	193.4	0.282577	0.000248	0.006505	0.000027	-6.91	-2.69	0.96	937	1406	-0.99
16	152.9	0.282569	0.000676	0.018883	0.000027	-7.18	-3.90	0.96	958	1452	-0.98
#17	152.1	0.282776	0.001243	0.032474	0.000027	0.13	3.35	0.97	679	989	-0.96

注: # 为离群值, 未参与年龄加权平均值计算, 也不参与 ¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf 平均值计算

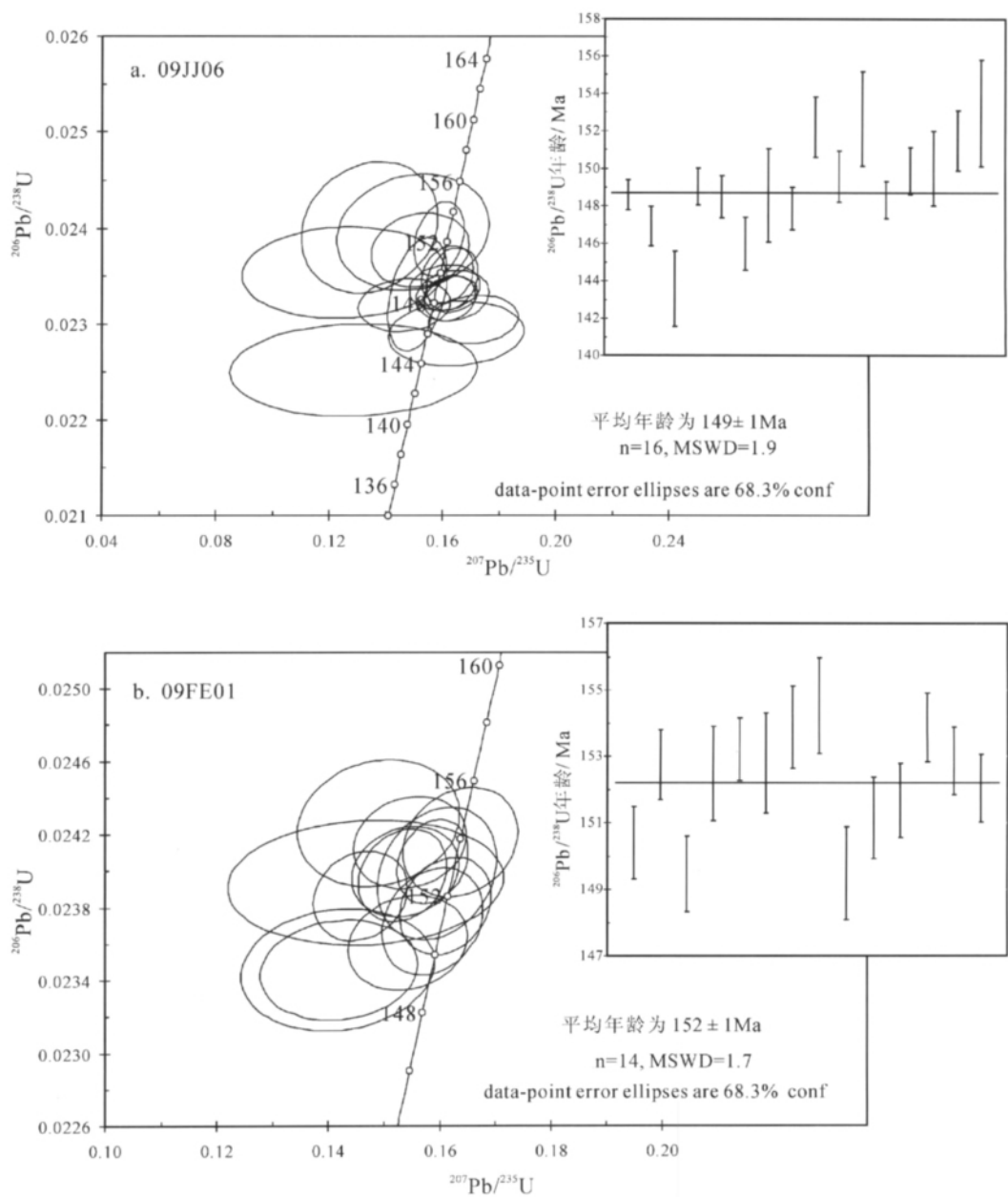


图 6 江家(a)、方村(b)花岗闪长斑岩锆石 U-Pb 谐和图
Fig. 6 Concordia diagram of zircons from Jiangjia (a) and Fangcun (b) granodiorite porphyries

均值 38,反映出样品普遍经历了水岩反应过程。

在 La-La/Sm 和 Zr-Zr/Sm 图解(图 10)上,3 个岩体的全岩数据展示了部分熔融的演化趋势。由于全岩地球化学数据没有显示高度演化的特征(高的 Rb/Sr 值,高的 Zr/Hf 值=50),笔者认为东源矿区江家等系列岩体岩石的形成主要是受部分熔融控制的。成岩后岩体经历了强烈的热液蚀变并且发生钨钼矿化。

4.2 岩浆源区

虽然东源矿区江家等系列岩体普遍经历了热液强烈的蚀变,但由于锆石具有较强的抗蚀变能力,且 Hf 同位素体系封闭温度较高,锆石微区 Hf 同位素数据依然可以有效地提供岩浆结晶时的源区信息。经过对锆石阴极发光图像的研究,Hf 同位素测试的选点有效地区分了继承老锆石核和新生岩浆锆石环带。虽然多数锆石的 Hf 同位素 SHRIMP 测试点位

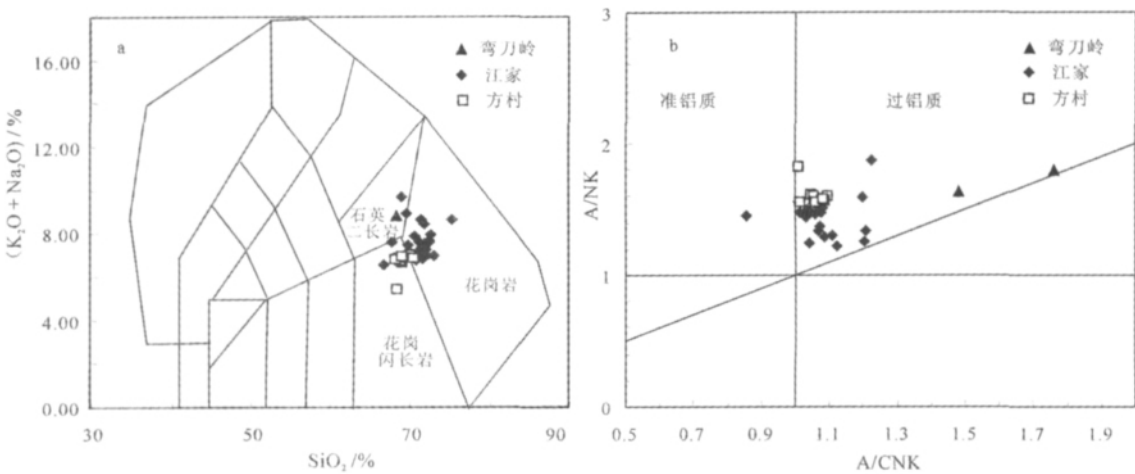


图 7 花岗闪长斑岩 TAS^[15] (a) 和 A/CNK-A/NK^[16] (b) 判别图解
Fig. 7 TAS (a) and A/CNK-A/NK(b) discrimination diagrams of Granodiorite porphyries

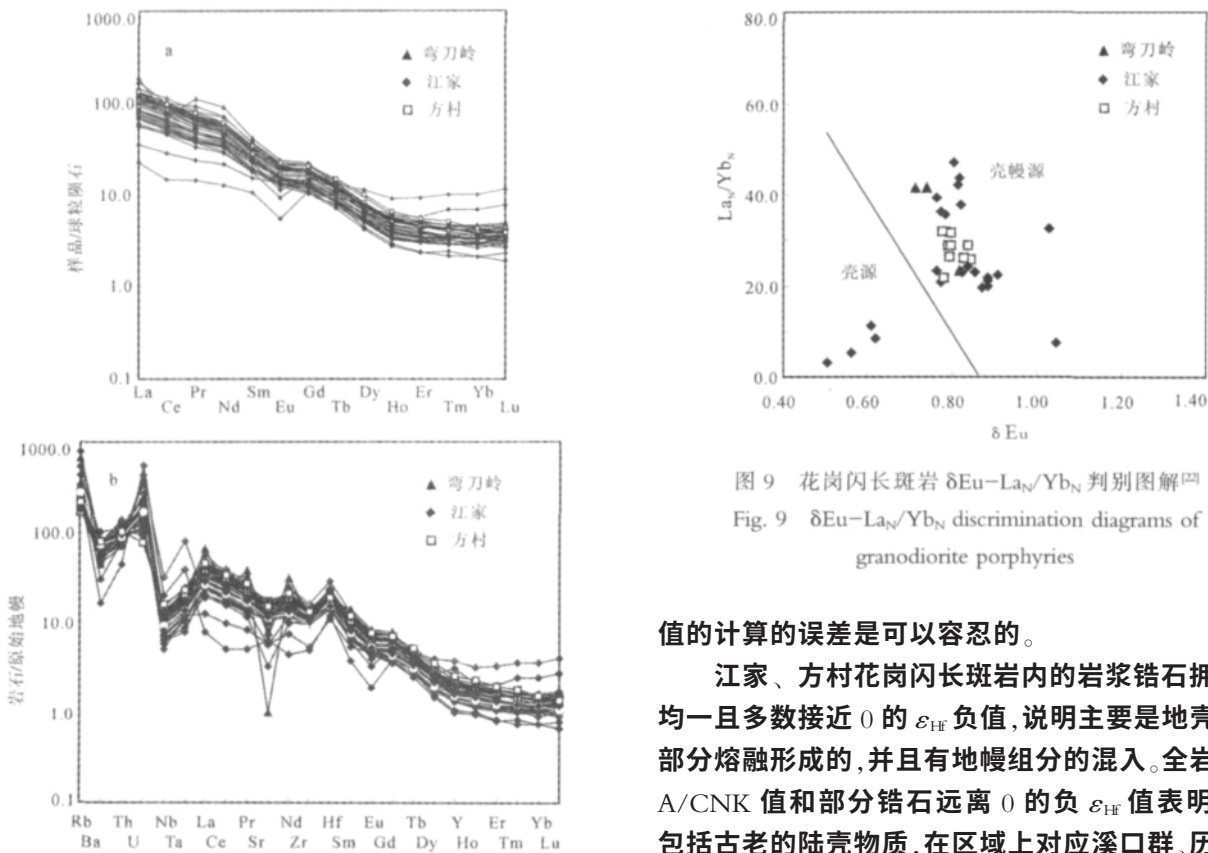


图 8 花岗闪长斑岩稀土元素配分模式(a)和微量元素蛛网图(b)(球粒陨石和原始地幔标准化值引自参考文献[17])
Fig. 8 REE patterns (a) and spider diagram of trace elements (b) for the granodiorite porphyries

图 9 花岗闪长斑岩 $\delta\text{Eu}-\text{La}_N/\text{Yb}_N$ 判别图解^[22]
Fig. 9 $\delta\text{Eu}-\text{La}_N/\text{Yb}_N$ discrimination diagrams of granodiorite porphyries

值的计算的误差是可以容忍的。

江家、方村花岗闪长斑岩内的岩浆锆石拥有不均一且多数接近 0 的 ε_{Hf} 负值,说明主要是地壳物质部分熔融形成的,并且有地幔组分的混入。全岩的高 A/CNK 值和部分锆石远离 0 的负 ε_{Hf} 值表明源区包括古老的陆壳物质,在区域上对应溪口群、历口群的浅变质复理石建造、碎屑岩建造夹部分中基性火山岩和其它基底地层。明显存在的继承锆石的 Hf 同位素特征指示江家、方村、弯刀岭花岗闪长斑岩继承了早期的岩浆岩物质。区域上对应的地质体为许村、歙县、休宁岩体等晋宁期中酸性侵入岩,这些岩浆具有过铝质、正的 ε_{Hf} 值、高的 $\delta^{18}\text{O}$ 值,是弧陆碰

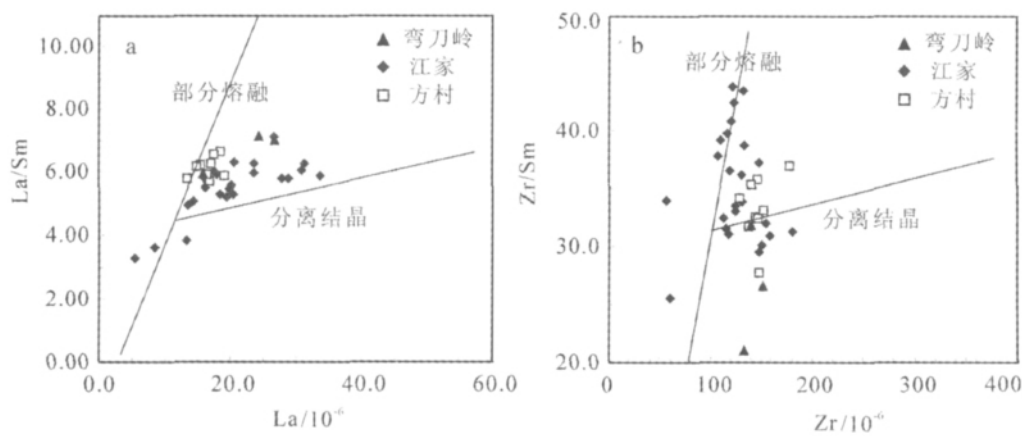


图 10 花岗闪长斑岩 La-La/Sm(a)和 Zr-Zr/Sm(b)图解^[23]
Fig. 10 La-La/Sm (a) and Zr-Zr/Sm (b) discrimination diagrams of granodiorite porphyries

撞过程中新生的地壳组分，兼具 I 型和 S 型的特征^[24]。早期的沉积岩和岩浆岩共同组成了东源矿区岩浆的主体部分。

通过锆石饱和温度计^[25]计算的花岗闪长斑岩温度范围为 768~781℃(表 1)，江家花岗闪长斑岩温度范围为 737~913℃，表明幔源物质参与了东源等系列岩体的形成。东源矿区花岗闪长岩中相容元素含量普遍较低，Cr=2.06×10⁻⁶~8.9×10⁻⁶，CaO(0.55%~3.69%)和 MgO(0.14%~1.25%)含量也较低，显示幔源组分含量很少，壳幔作用的动力学过程还有待进一步探讨。

袁峰等^[26]、周涛发等^[27]认为，相比赣东北的中生代花岗岩类，皖南中生代斑岩体源区的幔源组分比例较低，因而(铜铁)成矿潜力较差。本文的研究结果支持皖南中生代花岗质岩类含幔源成分较少的判断，但需要指出的是，钨钼等壳源金属在皖南地区仍有较好的成矿潜力，这可能是受到皖南基底地层经历多次构造事件的控制，地壳中成矿元素多次富集所致。

5 结 论

(1)SHRIMP 锆石 U-Pb 测年结果表明，江家、方村、弯刀岭花岗闪长岩体的岩浆活动于 149~152Ma(晚侏罗世)。江家等系列岩体成分相近、产状相似，为岩浆脉动式侵入所造成的。

(2)全岩地球化学数据表明，江家、方村、弯刀岭花岗闪长岩体的化学属性主要受部分熔融的

控制，没有经历强烈的结晶分异过程。岩体蚀变过程符合一般斑岩矿化钾化-硅化-黄铁绢英岩化的序列。

(3)全岩地球化学数据和不均一的锆石 Hf 同位素数据显示，江家等 3 个岩体的岩浆岩源区成分复杂，以地壳物质为主，有幔源物质的加入。壳源端元包括早期的火成岩和古老的变质沉积岩基底。

致谢：SHRIMP 锆石 U-Pb 测年在北京离子探针中心 SHRIMP II 上完成，Lu-Hf 同位素测试在中国地质科学院矿产资源研究所国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室完成，岩石地球化学分析由中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所完成。野外工作中得到安徽地质矿产勘查开发局 332 地质队的支持，成文过程得到中国地质大学朱弟成教授的指导。在此一并致以诚挚的谢意。

参考文献

[1]秦燕,王登红,吴礼彬,等. 安徽东源钨矿含矿斑岩中的锆石SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 地质学报,2010,84(4): 479-484.
[2]周翔,余心起,王德恩,等. 皖南东源含 W、Mo 花岗闪长斑岩及成矿年代学研究[J]. 现代地质,2011,25(2): 201-210.
[3]Compston W, Williams I S, Kirsdivink J L, et al. Zircon U-Pb ages for the Early Cambrian time-scale[J]. Journal of the Geological Society, London, 1992, 149: 171-184.
[4]刘敦一,简平,张旗,等. 内蒙古图林凯蛇绿岩中埃达克岩SHRIMP 测年:早古生代洋壳消减的证据[J]. 地质学报,2003,77(3): 317-327.
[5]简平,刘敦一,张旗,等. 蛇绿岩及蛇绿岩中浅色岩的 SHRIMP U-Pb 测年[J]. 地学前缘,2003,10(4): 439-456.

- [6]Belousova E A, Griffin W L, O'Reilly S Y, et al. Igneous zircon: trace element composition as an indicator of source rock type [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2002, 143(5): 602-622.
- [7]Hoskin P W O, Schaltegger U. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis [J]. Reviews of Mineralogy and Geochemistry, 2003, 53(1): 27-62.
- [8]Stacey J S, Kramers J D. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two stage model [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1975, 26: 207-221.
- [9]宋彪, 乔秀夫. 辽北辉绿岩墙(床)群及二道沟组玄武岩锆石年龄及其构造意义 [J]. 地学前缘, 2008, 15(3): 250-262.
- [10]侯可军, 李延河, 邹天人, 等. LA-MC-ICP-MS 锆石 Hf 同位素的分析方法及地质应用 [J]. 岩石学报, 2007, 23(10): 2595-2604.
- [11]Morel M L A, Nebel O, Nebel-Jacobsen Y J, et al. Hafnium isotope characterization of the GJ-1 zircon reference material by solution and laser-ablation MC-ICPMS [J]. Chemical Geology, 2008, 255: 231-235.
- [12]Sláma J, Kosler J, Condon D J, et al. Plesovice zircon—A new natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis [J]. Chemical Geology, 2008, 249: 1-35.
- [13]Soderlund U, Patchett P J, Vervoort J D, et al. The ^{176}Lu decay constant determined by Lu-Hf and U-Pb isotope systematics of Precambrian mafic intrusions [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2004, 219: 311-324.
- [14]Griffin W L, Pearson N J, Belousova E, et al. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LA-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2000, 64: 133-147.
- [15]Middlemost E A K. Naming materials in the magma/igneous rock system [J]. Earth-Science Reviews, 1994, 37: 215-224.
- [16]Maniar P D, Piccoli P M. Tectonic discrimination of granitoids [J]. Geological Society of America Bulletin, 1989, 101: 635-643.
- [17]Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes [J]. Geological Society, London, Special Publications, 1989, 42: 313-345.
- [18]徐克勤, 朱金初, 刘昌实, 等. 华南花岗岩类的成因和物质来源 [J]. 南京大学学报(地球科学), 1989, 1(3): 1-19.
- [19]杨小男, 徐兆文, 张军, 等. 安徽狮子山矿田南洪钟岩体形成时代及成因机制研究 [J]. 岩石学报, 2007, 23(6): 1543-1551.
- [20]毛建仁, 陶奎元, 李寄崑, 等. 闽西南晚中生代四方岩体同位素年代学、地球化学及其构造意义 [J]. 岩石学报, 2002, 18(4): 449-458.
- [21]邱检生, 胡建, McInnes B I A, 等. 广东龙窝花岗闪长质岩体的年代学、地球化学及岩石成因 [J]. 岩石学报, 2004, 20(6): 1363-1374.
- [22]王中刚, 于学元, 赵振华, 等. 稀土元素地球化学 [M]. 北京: 科学出版社, 1989: 133-246.
- [23]Treuil M, Varet J. Criteres volcanologiques et geochimique de la genese et de la differenciation des magmas basaltique: exemple de l'Afar [J]. Bulletin of Geological Society of France, 1973, 15(7): 401-644.
- [24]Wu R X, Zheng Y F, Wu Y B, et al. Reworking of juvenile crust: Element and isotope evidence from Neoproterozoic granodiorite in South China [J]. Precambrian Research, 2006, 146: 179-212.
- [25]Waston 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: 295-304.
- [26]袁峰, 周涛发, 范裕, 等. 皖赣相邻区燕山期花岗岩类构造背景及其意义 [J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2005, 28(9): 1130-1134.
- [27]周涛发, 袁峰, 侯明金, 等. 江南隆起带东段皖赣相邻区燕山期花岗岩类的成因及形成的地球动力学背景 [J]. 矿物岩石, 2004, 24(3): 65-71.
- ① 常印佛, 邓晋福, 杜建国, 等. 中国东南地区(大别山-台湾走廊带) Cu、Au、Ag、Pb、Zn、Fe 成矿作用与资源潜力——成矿区带形成的四维结构. 2002: 1-259.
- ② 安徽省地质调查院. 1:25 万安庆市幅区域地质调查报告. 2005.