DOI:10.16788/j.hddz.32-1865/P.2018.03.003

引用格式:蔡杨,吴维平,马涛,等.安徽九华山柯村花岗斑岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学特征及地质意义[J]. 华东地质, 2018,39(3):177-186.

安徽九华山柯村花岗斑岩锆石 U-Pb 年代学、 地球化学特征及地质意义

蔡 杨^{1,2},吴维平^{1,2},马 涛^{1,2},董婷婷^{1,2},林启刚³,章寅虎³

 (1. 安徽省地质调查院,合肥 230001; 2. 安徽省地质科学研究所, 合肥 230001; 3. 九华山国家地质公园,池州 242811)

摘要:柯村花岗斑岩位于九华山国家地质公园西部,九华山岩体西侧。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学研究表明:该花岗斑岩的侵入时间为125.8±0.9 Ma,与九华山岩体的侵入时间相近,属于早白垩世岩浆活动的产物;九华山柯村花岗斑岩富硅、富碱、富集不相容元素,亏损 Sr、Ba、Ti 等元素,具有较高的10 000×Ga/Al 值和锆石饱和温度,地球化学特征与A型花岗岩相似,形成于伸展构造环境,表明在125 Ma 左右,皖南地区已经由早期相对挤压的构造环境转变为伸展构造环境。

关键词: 锆石 U-Pb 定年;地球化学;构造环境;柯村花岗斑岩;安徽省 中图分类号: P588.12 文献标识码: A 文章编号: 2096-1871(2018)03-177-10

安徽南部大面积出露中生代中酸性侵入岩,分 布于江南深断裂两侧(图 1)。区内中生代侵入岩的 形成时代可以分为 2 个阶段^[1-3]:第一阶段主要集中 在 135~140 Ma,以花岗闪长岩和二长花岗岩为主; 第二阶段主要集中在 125~130 Ma,主要为正长花 岗岩和碱性花岗岩。两阶段的侵入岩通常呈多期 多阶段复式岩体共同出露,如太平一黄山复式岩 体、青阳一九华复式岩体等,两者具有明显的侵入 接触关系。孙鼐等^[4]提出"太平一黄山复式岩体是 2 种不同成因系列花岗岩复合"的观点,认为两阶段 岩体具有不同的源区及构造背景。因此,通过研究 区内多期次侵入的复式岩体侵入时代、演化特征及 岩石成因等,对于理解皖南地区中生代地质构造演 化具有重要意义。

青阳一九华山岩体是皖南地区重要的中生代 复式侵入体。前人对青阳一九华山岩体的年代学、 地球化学特征进行了详细研究^[5-9]。柯村花岗斑岩 位于九华山岩体西部,是青阳一九华山复式岩体的 重要组成部分。本文通过 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及地球化学特征研究,确定了柯村花岗斑岩的 侵位时间、岩石成因及构造背景,为进一步讨论皖 南地区中生代地质演化提供新证据。

1 地质特征

九华山地区位于扬子板块东南缘江南深断裂 与高坦大断裂之间,七都一横百岭复背斜东段。 区内地层主要分布于九华山花岗岩体北西部、南 部和西南部,属于扬子地层分区,以早古生代地层 为主,由下往上依次为寒武纪炭质页岩、炭硅质页 岩、灰岩、泥灰岩和白云质灰岩,奥陶纪白云岩、灰 质白云岩、灰岩、瘤状灰岩、钙质页岩和粉砂质页 岩,志留纪细砂岩、粉砂岩和页岩。此外,第四系 零星分布于河床及沟谷两侧,以砂砾石及亚黏土 为主。

研究区构造以褶皱和断裂为主。褶皱主要有 七都复背斜、太平曹背斜、石门高背斜及鱼龙洞向

^{*} 收稿日期:2017-09-15 修订日期:2017-12-01 责任编辑:谭桂丽 基金項目:九华山国家地质公园科技项目(2013)资助。

第一作者简介:蔡杨,1986年生,男,工程师,主要从事岩石学、矿床地球化学及地质遗迹调查研究。



图 1 皖南地区中生代侵人岩分布简图^[1] Fig. 1 Map showing distribution of the Mesozoic intrusions in southern Anhui Province

斜。区内共发育 26 条断裂,按其走向划分为 SN 向、NNE向、NE向、NW 向和 NNW 向。九华山断 裂横穿全区,是区内最重要的断裂,走向近南北。 区内出露青阳一九华山复式花岗岩体,主体分为 2 个时期(图 2)。



图 2 青阳一九华山岩体地质简图(据 1:25 万安庆市幅 地质图修改)

Fig. 2 Geological map of the Qingyang-Jiuhuashan granite (modified after 1 : 250 000 Anqing Sheet Geologic Map) 早期青阳岩体以花岗闪长岩和二长花岗岩为 主,分布在岩体周围;晚期主要为正长花岗岩和花 岗斑岩,侵入于青阳岩体中,两者接触界线明显,并 可见花岗闪长岩捕虏体。花岗斑岩及正长花岗岩 总体呈近 SN 向展布,与区内九华山断裂走向一致, 表明 SN 向断裂控制了晚期岩浆活动的侵位。柯村 花岗斑岩主要呈岩墙状侵入于早期花岗岩中,平面 上呈近 SN 向的狭长带状,长约 10 km,宽约 500~ 700 m;在两侧分布一系列规模较小的岩墙,钟华 明^[10]将其命名为柯村岩墙群。

本次研究样品采自柯村花岗斑岩,采样位置见 图 2。岩石具斑状结构(图 3),斑晶主要为钾长石 (5%~10%)、石英(约 5%)和少量黑云母,粒径多 为 0.3~3 mm。基质主要为钾长石(60%~70%)、 石英(20%~25%)、黑云母等。副矿物主要有锆 石、磷灰石、磁铁矿、钛铁矿和萤石等。

2 分析方法

将用于挑选锆石的花岗斑岩样品破碎至 60~ 80 目,用常规人工淘洗和电磁法初步筛选锆石,在 双目镜下手工挑选锆石颗粒。将分选出的锆石颗 粒制靶,进行锆石阴极发光(CL)和透反射照相,观 察锆石内部结构,选择合适部位进行测试。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学分析在中国科学院壳幔 物质与环境重点实验室完成。分析仪器为 Agilent 7700x 型质谱仪和 GeoLasPro 193 nm 型激光系统,



Kfs. 钾长石,Qtz. 石英 图 3 九华山柯村花岗斑显微照片(正交偏光) Fig. 3 Photomicrographs of the Kecun granite porphyry in Jiuhuashan (orthogonal)

激光 束 斑 直 径 为 32 μm。原 始 测 试 数 据 经 过 ICPMSDataCal 软件处理完成^[11-12]。锆石 U-Pb 年 龄谐和图由 Isoplot 程序获得^[13]。

全岩主量及微量元素分析在安徽省地质实验研究所(国土资源部合肥矿产资源监督监测中心)完成。主量元素分析利用 X 射线荧光光谱分析法(XRF)完成,分析精度优于 2%;微量元素利用美国Thermo X Series 2 电感耦合等离子质谱联用仪(ICP-MS)完成,分析精度优于 1%~3%。

花岗斑岩(编号:JHS-14)锆石多呈自形柱状,无

色透明,少数棕色。锆石颗粒长宽比为 3:1~1.5:1, 长约 100~200 μ m,有明显的震荡环带(图 4)。共分 析 22 个点,Th 含量为(976~3 679)×10⁻⁶,U含量为 (1 053~2 640)×10⁻⁶,Th/U为 0.81~1.70。22 个 测试点²⁰⁶ Pb/²³⁸U 年龄为 120~132 Ma,比较一致,其 加权平均年龄为 125.8±0.9 Ma(MSWD=0.90),代 表了岩体的侵位年龄(图 5,表 1)。

3.2 岩石地球化学特征

花岗斑岩主量及微量元素地球化学组成见表 2。由表 2 可知,该花岗斑岩总体富硅,SiO₂ 含量为 75.81% ~ 76.98%、富碱(ALK 为 8.35% ~ 9.02%),贫镁(MgO 含量为 0.10% ~ 0.70%)、贫铁(FeO_T 为 1.21% ~ 1.36%)。在 TAS 图解(图 6)



图 4 九华山柯村花岗斑岩(样品编号:JHS-14)代表性锆石阴极发光(CL)图像

Fig. 4 CL images of representative zircons from the Kecun granite porphyry in Jiuhuashan

分析结果

3.1 锆石 U-Pb 年龄

3



九华山柯村花岗斑岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄谐和图(a)和加权平均年龄图(b) 图 5

Fig. 5 U-Pb concordia diagram (a) and weighted average age diagram (b) of zircons from the Kecun granite porphyry in Jiuhuashan

Table 1 LA-ICP-MS U-Pb dating results for zircons from the Kecun granite porphyry in Jiuhuashan													
	T L /	T T/				U-Pb 同·		年龄/Ma					
点号	1 n/ 10 ⁻⁶	10-6	Th/U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	lσ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	10	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ
JHS-14-1	1 938	1 662	1. 17	0.050 2	0.004 6	0.132 9	0.012 7	0.019 4	0.000 4	127	11	124	3
JHS-14-2	1 502	1 440	1.04	0.0494	0.002 8	0.136 4	0.007 5	0.020 1	0.000 3	130	7	128	2
JHS-14-3	1 057	1 131	0.93	0.048 0	0.007 8	0.129 2	0.0194	0.020 2	0.000 6	123	17	129	4
JHS-14-4	1 312	1 281	1. 0 2	0.0500	0.002 6	0.135 3	0.006 1	0.019 9	0.000 3	129	5	127	2
JHS-14-5	1 174	1 187	0.99	0.0497	0.005 1	0.132 2	0.011 3	0.019 8	0.000 5	126	10	126	3
JHS-14-6	925	1 010	0.92	0.048 6	0.002 9	0.129 1	0.0071	0.0197	0.000 4	123	6	126	2
JHS-14-7	1 458	1 264	1.15	0.047 2	0.005 7	0.129 0	0.014 9	0.019 9	0.000 5	123	13	127	3
JHS-14-8	3 391	1 985	1.71	0.047 2	0.002 4	0.129 6	0.007 1	0.019 5	0.000 3	124	6	125	2
JHS-14-9	1 866	1 625	1.15	0.048 0	0.002 6	0.1 29 9	0.006 5	0.019 8	0.000 3	124	6	126	2
JHS-14-10	1 580	1 422	1.11	0.048 8	0.003 0	0.135 0	0.0078	0.0200	0.000 4	129	7	127	2
JHS-14-11	1 627	1 425	1.14	0.048 9	0.003 3	0.1337	0.008 7	0.019 9	0.000 3	127	8	127	2
JHS-14-12	1 579	1 492	1.06	0.048 8	0.003 0	0.131 0	0.0078	0.0196	0.000 3	125	7	125	2
JHS-14-13	1 098	1 028	1.07	0.047 2	0.003 3	0.134 3	0.0100	0.020 2	0.000 4	128	9	129	2
JHS-14-14	1 063	1 288	0. 83	0.048 5	0.002 7	0.130 8	0.007 1	0.0196	0.000 4	125	6	125	2
JHS-14-15	1 660	1 280	1.30	0.049 2	0.002 6	0.136 0	0.007 0	0.020 2	0.000 3	129	6	129	2
JHS-14-16	1 252	1 260	0.99	0.0487	0.002 8	0.129 0	0.0079	0.019 2	0.000 3	123	7	123	2
JHS-14-17	2 923	2 467	1.18	0.049 6	0.002 2	0.132 5	0.007 0	0.019 4	0.000 3	126	6	124	2
JHS-14-18	1 338	1 420	0.94	0.048 5	0.002 5	0.127 7	0.008 5	0.019 2	0.000 3	122	8	123	2
JHS-14-19	2 339	1 784	1.31	0.0478	0.002 8	0.131 3	0.0076	0.019 9	0.000 3	125	7	127	2

0.133 4 0.017 1

0.006 2

0.020 1

0.0194

0.006 2 0.019 6

0.000 4

0.000 3

0.000 2

127

121

124

15

6

6

129

124

125

2

2

1

九华山柯村花岗斑岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分析结果 表 1

JHS-14-20

JHS-14-21

JHS-14-22

1 973

2 125

1 851

1 488

1 744

1 702

1.33

1.22

1.09

0.048 2 0.003 9

0.048 6

0.047 6 0.002 3 0.126 7

0.002 3 0.130 3

Table 2 Major and trace element compositions of the Kecun granite porphyry in Jiuhuashan															
	<i>ω</i> _B /%												A CDUK		
14 2	SiO ₂	TiO2	Al ₂	03	FeO	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na Na	120 I	K ₂ O	P ₂ O ₅	总量	AUNK
JHS-14	75.87	0.18	12.	92	0.26	1.08	0.06	0.1	0. 07	· 4.	96 4	1.06	0. 01	99.99	1. 02
Y10	75.81	0. 12	12.	50	0.60	0.82	0.04	0.7	0. 42	3.	75 4	1.85	0.01	99.62	1.03
Y12	76.98	0.10	12.	50	0.45	0.84	0.06	0. 1	0. 38	3.	24 5	5. 23	0. 01	99.89	1.07
								$\omega_{\rm B}/10^{-6}$							
─────────────────────────────────────	Rb	Sr	Zr	Nb	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	ТЬ	Dy	Ho
JHS-14	270	6.86	256	62. 0	18.4	58.4	108.0	12. 10	41.6	8.42	0. 18	8.65	1.55	10.2	2.04
Y10	284	18.00	266	14.0	37.0	31.3	60.9	5.89	19.4	4.40	0.77	3.17	0.38	2. 22	0.41
Y12	198	15.00	262	18.5	45.0	47.1	93.5	9.70	35.5	7.92	1.48	5.78	0.82	3.94	0.76
	$\omega_{\rm B}/10^{-6}$ 10 000 Zr+Ce+ E									Eu/	(La/				
件亏 -	Er	Tm	ҮЬ	Lu	ı G	a H	lf T	`a]	ſh	U	Ga/Al Y+Nb		ZREE	Eu*	Yb) _N
JHS-14	6.24	1.00	6.40	0. 9	5 –	· 10.	.2 4.	41 18	3.3 4	. 56	_	487	266	0.06	6.54
Y10	1.32	0.24	1.45	0. 2	4 22.	4 11.	.95.	57 33	3.67	. 58	3. 01	341	144	0.61	15.5
Y12	2.00	0. 28	2.07	0.3	1 21.	9 20.	. 6 3.	20 36	5.2 4	. 50	3.10	374	232	0.64	16.3

表 2 九华山柯村花岗斑岩主量元素、微量元素组成

注: Y10, Y12 样品数据据文献[10]。

中,样品落在花岗岩区域。岩石 ACNK 为 1.02~ 1.09,为弱过铝质岩体(图 7);DI 为 93.8~97.6,表 明分异程度较高。



图 6 九华山柯村花岗斑岩 TAS 图解

Fig. 6 TAS classification diagram for the Kecun granite porphyry

柯村花岗斑岩稀土元素总量 ΣREE 为(144~ 232)×10⁻⁶,(La/Yb)_N为6.54~16.3,轻稀土相对 富集; ôEu 为 0.06~0.67, Eu 负异常较明显。岩石 具有相对较高的 Zr、Ga、Nb 等高场强元素含量和相 对较低的 Ba、Sr 含量,在原始地幔标准化微量元素 蛛网图(图 8)中, Rb、Th、U、Nb、Ta 呈正异常, Sr、 Ba、Pb、Ti呈负异常。



图 7 九华山柯村花岗斑岩 ANK-ACNK 图解^[14]

Fig. 7 ACNK vs. ANK diagram for the Kecun granite porphyry in Jiuhuashan

4 讨 论

4.1 成岩时代

研究表明,中生代是中国东部重要的构造-岩浆 活动期,发育一系列大规模的岩浆活动[16-21]。皖南 地区中生代岩浆活动主要分为2期(表3),早期主 要集中在 150~136 Ma, 如青阳岩体、太平岩体、旌 德岩体、殷坑岩体等;晚期主要集中在136~ 120 Ma,如九华山岩体、黄山岩体、牯牛降岩体、大 龙山岩体等。两期岩浆活动之间存在约 10~15 Ma



图 8 九华山柯村花岗斑岩球粒陨石标准化稀土元素配分曲线图(a)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b)(标准化值据 文献[15])

的时间间隔,这种岩浆活动的时间间隔在相邻的浙 西北地区同样得到证实^[3]。柯村花岗斑岩锆石 U-Pb 年龄为 125.8±0.9 Ma,与九华山岩体侵入年龄 相近(126.6±1.6 Ma)^[9],均为早白垩世侵人体,与 区内其他中生代晚期的岩浆活动侵入时间一致,表 明其均为中生代晚期岩浆活动的产物。

表 3 皖南地区中生代侵入岩主要侵入年龄

 Table 3
 Age list of the Mesozoic intrusive rocks in southern

 Anhui Province

岩体名称	岩性	锆石 U-Pb 年齡/Ma	资料来源
青阳岩体	花岗闪长岩	139. 7~140. 0	[8]
九华山岩体	正长花岗岩	127. 5	[8]
青阳岩体	花岗闪长岩	139. 4~141. 6	[1]
九华山岩体	正长花岗岩	130. 3~131. 0	[1]
九华山岩体	正长花岗岩	126. 6	[9]
殷坑岩体	花岗闪长岩	141. 0	[1]
黟县岩体	二长花岗岩	138. 5	[1]
城安岩体	二长花岗岩	150. 3	[1]
牯牛降岩体	二长花岗岩	131. 3~134. 3	[1]
太平岩体	花岗闪长岩	138. 7~142. 9	[1]
黄山岩体	正长花岗岩	125. 8~128. 8	[1]
汀溪岩体	二长花岗岩	139. 7	[1]
榔桥岩体	二长花岗岩	137. 7	[1]
旌德岩体	花岗闪长岩	137.7~139.7	[1]
杨溪岩体	二长花岗岩	136	[1]
伏岭岩体	正长花岗岩	130. 6~133. 0	[1]

4.2 岩石成因

Chappell 和 White^[22]最早提出花岗岩 I 型和 S 型的成因分类,Loiselle 和 Wones^[23]首次提出 A 型 花岗岩的概念,White^[24]提出 M 型花岗岩的概念, 基本确定了 I 型、S 型、M 型和 A 型花岗岩的成因分 类。Xu K Q 等^[25]提出了同熔型花岗岩、陆壳改造 型花岗岩和幔源型花岗岩的成因分类,并被国内外 学者广泛引用。花岗岩的成因及物源是花岗岩研 究的重要内容,通过研究花岗岩成因,可理解区域 大地构造环境及地壳岩石圈的演化特征。

柯村花岗斑岩具有相对较高的全碱、氟、高场 强元素含量、10 000×Ga/Al 比值,同时亏损 Sr、Ba 等元素,与 A 型花岗岩具有相似的地球化学特征。 Watson 等^[26]提出了利用花岗岩锆石饱和温度计算 岩浆结晶温度的公式

 $T_{zr} = 12 900 / [ln D_{zr} (锆石 / 熔体) + 0.85 (M - 1) + 3.80] - 273, (1)$ $式中: <math>T_{zr}$ 为锆石饱和温度, ℃; $D_{zr} (锆石 / 熔体)$ 为锆石和熔体中 Zr 的浓度比, 锆石的 Zr 浓度取值 496 000, 花岗质熔体中的 Zr 浓度用全岩 Zr 含量近似 代表; M 为全岩 (Na+K+2Ca) / (Al×Si)摩尔数。

由于花岗岩大多是绝热式上升就位,岩浆早期 的结晶温度可近似代表岩浆形成时的温度^[27]。根 据全岩主量元素及 Zr 含量可计算花岗岩的结晶温 度。通过上述公式(1)计算,获得九华山岩体和柯 村岩墙群的锆石饱和温度为 830~847 ℃,平均为 839 ℃(表 4),与其他 I 型、A 型花岗岩的形成温度

Fig. 8 Chondrite-normalized REE distribution pattern (a) and primitive mantle-normalized trace element spider diagram (b) for Kecun granite porphyry in Jiuhuashan

相近。在花岗岩岩石成因判别图(图 9)中,花岗斑 岩落在 A 型花岗岩区,表明其属于 A 型花岗岩。

表 4 九华山柯村花岗斑岩锆石饱和温度计算结果

Table 4	The calculated res	ults of saturation	on temperatures f	or zircons fi	rom the Kecu	n granite	porphyry	in Jiuhuashar
---------	--------------------	--------------------	-------------------	---------------	--------------	-----------	----------	---------------

样品编号				ωΒ	/%		$\omega_{\rm B}/10^{-6}$	ひ (株子/検休)	<u></u> ω _B /℃			
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeOt	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P_2O_5	Zr	・ ひな(暗石/)溶体)・	М	T _{Zr}
JHS-14	75.87	12. 92	1. 23	0.10	0.07	4. 96	4.06	0.01	256.0	193. 75	1.386	830
¥10	75.81	12.5	1.34	0.70	0.42	3.75	3.75	0.01	266. 0	186. 47	1.220	847
Y12	76.98	12.5	1. 21	0.10	0. 38	3. 24	5.23	0.01	262. 0	189. 31	1.290	840



图 9 九华山柯村花岗斑岩成因类型判别图解(a 底图据文献[28],b 底图据文献[29]) Fig. 9 Petrogenesis discrimination diagrams for the Kecun granite porphyry in Jiuhuashan

4.3 构造意义

Pitcher^[30]最早指出花岗岩与构造环境具有成 因联系,并将花岗岩形成的构造环境划分出安第斯 型、海西型和阿尔卑斯型。随后,大量学者根据岩 石地球化学特征,提出了多种花岗岩构造成因的判 别方法^[31-36]。

皖南地区中生代主要发育2期岩浆活动。第一 期岩浆活动发生在145 Ma左右,以太平岩体、青阳 岩体等为代表,岩性主要为花岗闪长岩和二长花岗 岩类,成因类型主要属于I型花岗岩^[2]。在构造环 境判别图(图10)中,第一期岩浆活动样品主要落在 火山弧花岗岩和同碰撞花岗岩区域,表明其形成于 相对挤压的构造环境。

第二期岩浆活动主要发生在 130 Ma 左右,柯 村花岗斑岩年代学研究表明,其属于区内第二期岩 浆活动的产物,同一时期的侵人体还有九华山岩体 和黄山岩体,岩性主要为正长花岗岩、正长花岗斑 岩等。柯村花岗斑岩和九华山岩体、黄山岩体均属 于 A 型花岗岩,在构造环境判别图解(图 10)中,主 要落在了板内花岗岩区域,与典型的 A 型花岗岩相 似,指示相对伸展的构造环境。

在九华山地区发育的辉绿岩脉锆石 U-Pb 同位 素年龄为 123.9±3.5 Ma(另文发表),与九华山岩 体、柯村花岗斑岩相近,是同一构造-岩浆活动下的 产物。区内幔源岩浆活动的存在,同样暗示柯村花 岗斑岩形成于相对伸展的构造环境。

在花岗岩 R1-R2 构造判别图(图 11)中,青阳岩 体花岗闪长岩主要落在同碰撞花岗岩区域周围,九 华山岩体和柯村花岗斑岩则落在造山后花岗岩区 域,也表明青阳岩体形成于挤压的构造背景,而九 华山岩体形成于伸展的构造环境。从青阳岩体到 九华山岩体,其形成的构造环境由相对挤压向相对 伸展转变。

皖南及浙西北地区中生代岩浆活动主要分为 2期,早期集中在150~136 Ma,晚期集中在136~ 120 Ma,两期岩浆活动相互叠加形成一系列多期次 侵入的复式岩体,如太平一黄山岩体等^[1,3]。青 阳一九华山岩体为多期次侵入的复式岩体,2期岩,



Fig. 10 Tectonic discrimination diagrams for the Qingyang-Jiuhuashan granite(base map after [30])



①. 地幔分异花岗岩;②. 板块碰撞前花岗岩;③. 板块碰撞后隆起花岗岩;④. 造山晚期花岗岩;⑤. 非造山花岗岩;⑥. 同碰撞花岗岩;⑦. 造山后花岗岩;青阳、九华山岩体数据引自文献[9]。

- 图 11 青阳一九华山复式岩体 R1-R2 构造判别图解(底 图据文献[32])
- Fig. 11 R1-R2 discrimination diagram for the Qingyang-Jiuhuashan granite(base map after [32])

体的侵入时间与皖南中生代 2 期岩浆活动的时间一 致,具有相同的大地构造背景。青阳岩体早期形成 的花岗岩以 I 型花岗岩为主,形成于活动大陆边缘 相对挤压的构造环境。晚期的九华山岩体、柯村花 岗斑岩则以 A 型花岗岩为主,皖南及浙西北地区在 136~120 Ma 发现一系列 A 型花岗岩岩体^[8, 37]。 这些 A 型花岗岩的发育指示该区处于相对伸展的 构造环境。以青阳一九华山复式岩体为代表的皖 南晚中生代 2 期岩浆活动之间存在着约 15 Ma的 时间间隔,表明区内在早白垩世存在构造环境的转 变,从早期挤压环境转变为晚期伸展构造环境。

5 结 论

 (1)柯村花岗斑岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄 为 125.8±0.9 Ma(MSWD=0.90),指示其形成时 代为早白垩世,属于中生代晚期岩浆活动的产物。

(2)柯村花岗斑岩高硅、富碱,富集高场强元素, 亏损 Sr、Ba 和 Ti,具有较高的10 000×Ga/Al 值,表 明柯村花岗斑岩属于 A 型花岗岩。

(3)柯村花岗斑岩形成于后造山伸展环境,表明在125 Ma左右,皖南地区已经由早期相对挤压的构造环境转变为伸展的构造环境。

参考文献

- Wu F Y, Ji W Q, Sun D H, et al. Zircon U-Pb geochronology and Hf isotopic compositions of the Mesozoic granites in southern Anhui Province, China[J]. Lithos, 2012, 150(5): 6-25.
- [2] Su Y P, Zheng J P, Griffin W L, et al. Petrogenesis and geochronology of Cretaceous adakitic, I-and Atype granitoids in the NE Yangtze block: Constraints

on the eastern subsurface boundary between the North and South China blocks [J]. Lithos, 2013, 175/176 (3): 333-350.

- Li Z L, Zhou J, Mao J R, et al. Zircon U-Pb geochronology and geochemistry of two episodes of granitoids from the northwestern Zhejiang Province, SE China: Implication for magmatic evolution and tectonic transition[J]. Lithos, 2013, 179(10): 334-352.
- [4] 孙鼐,刘昌实,赵连泽,等.黄山一太平复式岩基中两 个成因系列花岗岩的复合[C]//徐克勤,涂光炽.花岗 岩类及成矿[M].南京:江苏科技出版社,1982: 144-156.
- [5] 陈道公. 安徽青阳花岗闪长岩体的 K-Ar 和"Ar-³⁹Ar 同 位素年龄[J]. 岩石学报, 1986, 2(2): 66-71.
- [6] 钟华明,姚仲伯,许卫.九华山复式杂岩体的构成及 主要特征[J].安徽地质,1996,6(3):37-47.
- [7] 邱瑞龙.九华山花岗岩岩浆分异特征及岩石成因[J]. 岩石矿物学杂志,1998,17(4):308-315.
- [8] Xu X S, Suzuki K, Liu L, et al. Petrogenesis and tectonic implications of Late Mesozoic granites in the NE Yangtze Block, China: further insights from the Jiuhuashan-Qingyang complex[J]. Geological Magazine, 2009, 147(2): 219-232.
- [9] 蔡杨,吴维平,马涛,等.安徽九华山岩体年代学、地 球化学特征[C].//安徽省地质学会.安徽省 2014 年青 年地质学术讨论会论文集.合肥:安徽科学技术出版 社,2014:27-30.
- [10] 钟华明. 安徽柯村 A 型花岗岩岩墙群地质地球化学特征及构造环境[J]. 安徽地质, 1997, 7(2): 21-26.
- [11] Liu Y S, Gao S, Hu Z C, et al. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths[J]. Journal of Petrology, 2010, 51(1/2): 537-571.
- [12] Liu Y S, Hu Z C, Zong K Q, et al. Reappraisement and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS[J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(15); 1535-1546.
- [13] Ludwing K R. User's manual for isoplot 3.00; A geochronological toolkit for Microsoft Excel [M]. Berkeley: Berkeley Geochronological Center, 2003.
- [14] Maniar P D, Piccoli P M. Tectonic discrimination of granitoids[J]. Geological Society of America Bulletin, 1989, 101(5): 635-643.
- [15] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implication for mantle

composition and processes[J]. Geological Society London Special Publications, 1989, 42(1): 313-345.

- [16] 孙涛. 新编华南花岗岩分布图及其说明[J]. 地质通报, 2006, 25(3): 332-335.
- [17]张旗,金惟俊,李承东,等.中国东部燕山期大规模岩 浆活动与岩石圈减薄:与大火成岩省的关系[J].地学 前缘,2009,16(2):21-51.
- [18] 褚平利,徐晓春,王文俊.安徽石台中生代花岗岩类 地球化学特征[J].资源调查与环境,2014,35(1): 19-30.
- [19] 赵玲,陈志洪.皖南谭山岩体的锆石定年及地质意 义[J].资源调查与评价,2014,35(3):185-191.
- [20] 李玉松,蔡晓兵,汪 晶,等.安徽庐枞盆地黄寅冲铅 锌矿床闪长玢岩锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J].华 东地质,2016,37(1):19-27.
- [21] 邱军强,彭智,陈芳,等.北淮阳东段杨家湾岩体地 球化学特征、锆石 U-Pb 定年及地质意义[J].华东地 质,2016,37(2):89-96.
- [22] Chappell B W, White A J R. Two contrasting granite types[J]. Pacific Geology, 1974(8): 173-174.
- [23] Loiselle M C, Wones D R. Characteristics and origin of anorogenic granites[J]. Geological Society of America Bulletin, 1979(11); 468.
- [24] White A J R. Source of granite magmas[J]. Geological Society of America Bulletin, 1979(11): 539.
- [25] Xu K Q, Tu G C. Geology of granites and their metallogenetic relations[M]. Beijing: Science Press, 1984: 1-13.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] Collins W J, Beams S D, White A J R, et al. Nature and origin of A-type granites with particular reference to southeastern Australia[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1982, 80(2): 189-200.
- [30] Pitcher W S. The nature, ascent and emplacement of granitic magmas[J]. Journal of the Geological Society, 1979, 136(6): 627-662.
- [31] Brown G C, Thorpe R S, Webb P C. The geochemical characteristics of granitoids in contrasting arc and com-

ments on magma sources[J]. Journal of Geological society, 1984, 141(3): 413-426.

- [32] Pearce J A, Harris N B W, Tindle A.G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. Journal of Petrology, 1984, 25 (4): 956-983.
- [33] Pearce J. Sources and settings of granitic rocks[J]. Episodes, 1996, 19(4): 120-125.
- [34] Batchelor R A, Bowden P. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters [J]. Chemical Geology, 1985, 48(1): 43-55.
- [35] Harris N B W, Pearce J A, Tindle A G. Geochemical

characteristics of collision-zone magmatism [M] // Coward M P, Reis A C. Collision tectonics. Geological Society, London, Special Publications, 1986, 19(5): 67-81.

- [36] Barbarin B. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments[J]. Lithos, 1999, 46(3): 605-626.
- [37] 薛怀民,汪应庚,马芳,等.皖南太平一黄山复合岩体的 SHRIMP 年代学:由钙碱性向碱性转变对扬子克拉 通东南部中生代岩石圈减薄时间的约束[J].中国科学 (D辑):地球科学,2009,39(7):979-993.

Chronology and geochemistry of the Kecun granite porphyry in the Jiuhuashan area, Anhui Province and their geological implications

CAI Yang^{1,2}, WU Wei-ping^{1,2}, MA Tao^{1,2}, DONG Ting-ting^{1,2}, LIN Qi-gang³, ZHANG Yin-hu³

(1. Geological Survey of Anhui Province, Hefei 230001, China; 2. Anhui Institute of Geology, Hefei 230001, China; 3. Jiuhuashan National Geopark, Chizhou 242800, China)

Abstract: Kecun granite porphyry is located in the western part of Jiuhuashan National Geopark and in the west side of Jiuhuashan granite. Study of LA-ICP-MS zircon U-Pb dating indicates that granite porphyry emplaced at 125.8 \pm 0.9 Ma, close to the intrusion age of Jiuhuashan granite, suggesting that it should be the product of early Cretaceous magmatic activity. The Kecun granite porphyry is enriched in SiO₂, total alkalis and incompatible elements, depleted in Ba, Sr and Ti, and has high 10 000×Ga/Al values and zircon saturation temperature. All of these features are similar to geochemical characteristics of A-type granite, indicating that the Kecun granite porphyry was formed in an extensional tectonic setting. This study can conclude that the tectonic environment of southern Anhui Province might have transformed from early compression to extensional tectonic settings at ca. 125 Ma.

Key words: Zircon U-Pb dating; geochemistry; tectonic setting; Kecun granite porphyry; Anhui Province