

<http://www.geojournals.cn/georev/ch/index.aspx>

庐山“星子杂岩”中绿帘石花岗岩的定年和成因

李武显 徐夕生 周新民

谢国刚 李均辉

(南京大学地球科学系, 210093) (江西省地质矿产局地质矿产调查研究大队, 向塘, 330201)

李惠民

(中国地质科学院天津地质矿产研究所, 300170)

内容提要 庐山绿帘石花岗岩是“星子杂岩”的一部分, 单颗粒锆石 U-Pb 法定年表明其形成年龄为 $823 \pm 64 \text{ Ma}$ 。绿帘石可能是在较高压力(0.5 GPa)条件下, 由岩浆结晶作用和岩浆自交代作用(角闪石的钾交代)形成的。绿帘石花岗岩的成岩年龄、岩石学和岩石化学特征表明, 它可能是江南新元古代造山带造山晚期的产物。

关键词 定年与成因 绿帘石花岗岩 星子杂岩 庐山

“星子混合杂岩区”一名最早正式见于《江西省区域地质志》^[1], 系指出露于庐山东南山麓, 星子县城北东约 2 km 处呈穹隆状产出的混合岩田, 包括“混合花岗岩-混合岩-片岩”, 面积约 220 km², 简称“星子杂岩”。近年来, 笔者对“星子杂岩”进行了研究, 发现它可分解为三套各具独立成因的地质单元: ①古元古代星子群中深变质岩($1869 \pm 40 \text{ Ma}$, 单颗粒锆石 U-Pb 法)^[2]; ②片麻状绿帘石花岗岩; ③中生代花岗质杂岩体。本文讨论其中绿帘石花岗岩体的形成时代与成因。

1 地质概况

庐山绿帘石花岗岩体出露在星子县城西北观音桥—归宗寺一带(图 1), 面积约 20 km²。岩体的侵入围岩为星子群变粒岩和片岩, 变质温度为 $424 \sim 565^\circ \text{C}$, 压力为 0.53~0.57 GPa(十字石片岩)^[3]。岩体与围岩接触带多被透镜状伟晶岩脉充填, 在观音桥附近见绿帘石花岗岩呈指状侵入星子群变质岩中, 且在岩体边部见少量大小不等的扁豆状、透镜状的片岩和变粒岩捕虏体, 它们与星子群中变质岩的岩性相同, 证明该岩体为一侵入岩体而非混合岩。岩体中部被中生代花岗质杂岩体侵入(东牯山岩体), 东翼被一正断层破坏。

2 庐山绿帘石花岗岩

庐山绿帘石花岗岩呈灰白色, 中—细粒花岗结构, 局部为条痕状构造。主要矿物为石英、更长石($An=15\% \pm$, 表 1)和微斜长石, 三者含量之和大于 90%(体积)。暗色矿物为角闪石、黑云母和绿帘石, 前两者有时共生, 有时只见其中之一。可能是成岩时, 岩体不同部位 H₂O 含量波动所造成的, 因为岩体含水量高有利于形成角闪石, 相反则有利于形成黑云母^[4]。

绿帘石是岩石中的主要副矿物, 含量约 0.2%~0.5%, 呈自形一半自形短柱状或粒状,

无色或具浅黄多色性,多与暗色矿物伴生,或出现在暗色矿物富集的条带区。绿帘石有 3 种产状:①产于浅色矿物(石英、长石)粒间或粒中;②与黑云母共生,且部分被黑云母所包裹;③与黑云母一起共存于交代残余的角闪石中。上述 3 种产状表明绿帘石具两种形成机制,即岩浆直接结晶(产状 1 和 2)和残余岩浆交代角闪石形成(产状 3)。两者在成因上的差异是受岩浆体系中 H_2O 含量不同所控制的,可以由 Naney^[4]实验研究的相图所证实。图 2 为 0.8GPa 条件下的温度- H_2O 含量相图,该图显示黑云母、角闪石和绿帘石的结晶稳定区。当岩浆体系中 H_2O 含量 $<4\%$ 时,只有黑云母和绿帘石能稳定存在,如果绿帘石成核生长,则绿帘石形成于浅色矿物粒间或粒中(产状 1);如果绿帘石成核在先,结晶的黑云母晶体在其表面,由于两种矿物随后共同生长,它将部分被黑云母所包裹(产状 2)。当岩浆体系中 H_2O 含量 $>4\%$ 时,角闪石为新的高温稳定矿物($\geq 680^\circ C$ 稳定存在),而绿帘石为低温稳定矿物($\leq 700^\circ C$ 稳定存在),当岩浆结晶温度低于 $680^\circ C$ 时,角闪石(Hb)将被残余岩浆(富钾)交代为黑云母(Bi)和绿帘石(Ep),其反应式可表达为: $Hb + K^+ \longrightarrow Bi + Ep$ 。

表 1 庐山绿帘石花岗岩单矿物电子探针分析结果

Table 1 The microprobe analyses of single minerals from Lushan epidote granite

	斜长石								角闪石				
	1	2	3	4	5	6	7	平均	1	2	3	4	平均
SiO ₂	64.72	65.01	65.68	64.97	66.15	65.16	65.58	65.32(0.46)	43.56	43.26	43.21	44.33	43.59(0.45)
TiO ₂	0.03	0.00	0.05	0.01	0.01	0.00	0.03	0.02(0.02)	0.41	0.58	0.57	0.47	0.51(0.07)
Al ₂ O ₃	22.94	22.67	22.59	22.28	21.10	21.97	21.74	22.18(0.59)	9.15	9.44	9.43	8.87	9.22(0.23)
FeO ⁺	0.07	0.06	0.03	0.06	0.08	0.12	0.10	0.07(0.03)	18.73	18.69	18.16	17.75	18.33(0.40)
MnO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00(0.00)	1.32	1.42	1.08	1.03	1.21(0.16)
MgO	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00(0.00)	9.53	9.55	9.88	10.38	9.84(0.34)
CaO	3.30	3.45	2.75	2.76	2.64	3.41	3.27	3.08(0.32)	11.31	11.36	11.43	11.26	11.34(0.06)
Na ₂ O	10.05	7.93	9.57	9.62	9.95	9.51	9.21	9.41(0.66)	1.46	1.42	1.46	1.49	1.46(0.02)
K ₂ O	0.20	0.18	0.18	0.20	0.13	0.15	0.15	0.17(0.03)	1.06	1.18	1.20	1.10	1.14(0.06)
总和	101.32	99.30	100.25	99.90	100.05	100.30	100.07	100.17(0.56)	96.52	96.90	96.42	96.68	96.63(0.18)
O	8	8	8	8	8	8	8	8	23	23	23	23	23
Si	2.821	2.863	2.860	2.859	2.904	2.861	2.878	2.864(0.02)	6.719	6.656	6.660	6.777	6.703(0.05)
Ti	0.001	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001(0.001)	0.047	0.067	0.066	0.055	0.059(0.01)
Al ^{IV}	0.179	0.137	0.140	0.141	0.096	0.139	0.122	0.136(0.02)	1.281	1.344	1.340	1.223	1.297(0.05)
Al ^{VI}	1.000	1.040	1.020	1.014	0.996	0.998	1.003	1.010(0.01)	0.383	0.368	0.373	0.375	0.375(0.01)
Fe	0.003	0.002	0.001	0.002	0.003	0.005	0.004	0.003(0.00)	2.416	2.405	2.341	2.269	2.357(0.06)
Mn	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000(0.00)	0.173	0.184	0.141	0.133	0.158(0.02)
Mg	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000(0.00)	2.190	2.191	2.270	2.365	2.254(0.07)
Ca	0.154	0.163	0.128	0.130	0.124	0.160	0.154	0.145(0.02)	1.869	1.873	1.887	1.845	1.869(0.02)
Na	0.850	0.677	0.808	0.812	0.847	0.809	0.784	0.800(0.05)	0.436	0.425	0.436	0.440	0.434(0.01)
K	0.011	0.010	0.010	0.011	0.007	0.008	0.008	0.009(0.00)	0.209	0.232	0.235	0.215	0.223(0.01)
Or	1.1	1.2	1.1	1.2	0.7	0.8	0.8	1.00(0.20)					
Ab	83.7	79.6	85.4	85.3	86.6	82.8	82.9	83.9(2.14)					
An	15.2	19.2	13.5	13.5	12.7	16.4	16.3	15.2(2.09)					

注:括号内为平均值的标准差。样品由澳大利亚 Macquarie 大学 Cameca SX50 电子探针仪分析,测试条件:加速电压 15kv,电流 20nA。

鉴于角闪石与斜长石通常有平直的接触边界和相似的自形程度,表明了平衡结晶的特点,可以采用 Blundy^[5]斜长石-角闪石温度计来确定岩体的形成温度,但该方法必须首先计算出岩体的形成压力。相律分析表明,庐山绿帘石花岗岩含钙碱性的黑云母和角闪石,可以用角

闪石 Al 含量压力计计算岩体形成压力^[6], 笔者选用 Schmidt^[7]改进的计算公式, 据表 1 角闪石的全铝值计算获得岩体的形成压力为 0.5 GPa (平均); 此外, Schmidt^[7]实验资料表明绿帘石晶出压力在 0.45~0.6 GPa 之间; 而庐山绿帘石花岗岩侵入的围岩记录的变质压力为 0.53~0.57 GPa^[3], 这两点进一步佐证计算获得的 0.5 GPa 的成岩压力是可靠的。将该压力值代入 Blundy^[5]斜长石-角闪石温度计公式, 获得成岩温度为 687℃, 这一温度在相图 (图 2) 上, 位于角闪石消失线和绿帘石晶出线附近。绿帘石花岗岩是非常罕见的岩石, 马莫^[8]认为它代表造山运动晚期的侵入岩。

3 锆石 U-Pb 法定年

用作单颗粒锆石 U-Pb 法定年的绿帘石花岗岩样品采自庐山观音桥南约 1 km 处, 样品新鲜, 无蚀变, 经人工粉碎、淘洗、磁选和过重液 (三溴甲烷), 最后在双目镜下挑选出尽可能透明, 不含包裹体的自形锆石送中国地质科学院天津地质矿产研究所测试, 方法见文献^[9]。锆石 U-Pb 同位素分析结果见表 2, 测年谐和图解见图 3。

用于测试的锆石均为无色或浅黄色透明柱状晶体, 所测的 7 粒锆石均为 $t_{207\text{Pb}/^{206}\text{Pb}} > t_{207\text{Pb}/^{235}\text{U}} > t_{206\text{Pb}/^{238}\text{U}}$ 表明有放射性成因铅丢失, 但可以获得一条相关性很好的不一致线, 利用 ISOPLOT 计算程序, 采用实际误差 (实验误差) 计算得其加权离差均方 (MSWD) 为 0.14。该不一致线上交

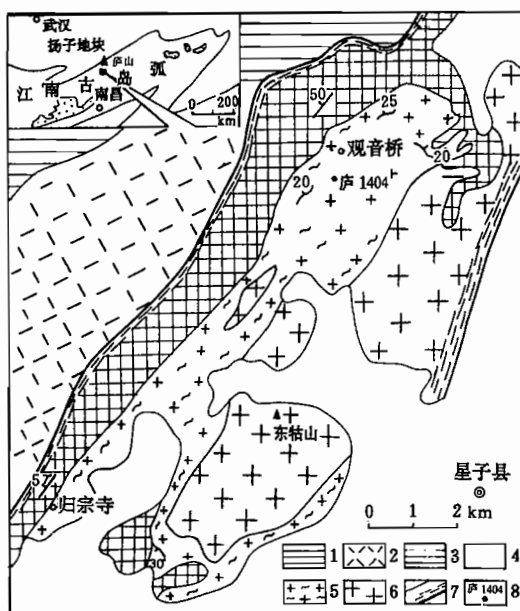


图 1 庐山绿帘石花岗岩体地质简图

Fig. 1 The geological sketch of Lushan epidote granite

1—古元古代星子群; 2—新元古代筲箕洼—汉阳峰组; 3—震旦系; 4—第四系; 5—绿帘石花岗岩; 6—中生代花岗岩; 7—地质界线、断层及片理化带; 8—同位素年龄采样位置及编号
1—Paleoproterozoic Xingzi Group; 2—Neoproterozoic Shaojiwa-Hangyangfeng Formation; 3—Sinian; 4—Quaternary; 5—epidote granite; 6—Mesozoic granite; 7—geological boundary, fault and schistosity belt; 8—isotopic age sampling spot and its number

表 2 庐山绿帘石花岗岩中单颗粒锆石 U-Pb 法同位素测年结果

Table 2 The U-Pb zircon dating data for Lushan epidote granite

样号	点号	重量 (μg)	浓度 (μg/g)		普通 铅总 量 (ng)	原子比率 ^①					表面年龄值(Ma)			
			U	Pb		²⁰⁶ Pb	²⁰⁸ Pb	²⁰⁶ Pb	²⁰⁷ Pb	²⁰⁷ Pb	²⁰⁶ Pb	²⁰⁶ Pb	²⁰⁷ Pb	²⁰⁷ Pb
						²⁰⁴ Pb	²⁰⁶ Pb	²³⁸ U	²³⁵ U	²⁰⁶ Pb	²³⁸ U	²³⁵ U	²⁰⁶ Pb	
庐山 1404	1	20	1284	133	0.13	546	0.1271	0.0904(4)	0.799(13)	0.0640(9)	558	596	743±31	
	2	20	718	74	0.035	1202	0.1180	0.0970(4)	0.866(17)	0.0648(12)	597	634	767	
	3	20	494	51	0.12	236	0.1572	0.0772(3)	0.675(16)	0.0634(14)	479	524	721	
	4	20	611	64	0.025	1573	0.1272	0.0983(4)	0.877(22)	0.0647(16)	605	639	764	
	5	15	663	74	0.064	364	0.1000	0.0951(4)	0.843(31)	0.0643(22)	586	621	751	
	6	20	443	63	0.14	226	0.1366	0.1073(5)	0.966(45)	0.0653(28)	657	687	784	
	7	25	695	61	0.13	296	0.1299	0.0710(3)	0.606(17)	0.0619(16)	442	481	670	

注: ① $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 已对实验空白 ($\text{Pb}=0.05\text{ng}$, $\text{U}=0.002\text{ng}$) 及稀释剂作了校正, 其它原子比率中的铅同位素均为放射成因铅同位素。括号内数字为 2σ 绝对误差。

点年龄值为 $823 \pm 64 \text{ Ma}$, 代表了岩体的形成年龄, 下交点年龄值为 $190 \pm 93 \text{ Ma}$, 因偏差较大, 无法得出精确的地质意义, 但反映出受中生代构造岩浆作用影响的信息。 $823 \pm 64 \text{ Ma}$ 的岩体形成年龄值略晚于邻近新元古代火山岩岩浆活动年龄 ($917 \pm 36 \text{ Ma}$, $878 \pm 51 \text{ Ma}$, 筲箕洼—汉阳峰组)^[2], 亦晚于江南古岛弧碰撞造山高峰期年龄 (0.9 Ga), 而接近造山结束年龄 (0.8 Ga)^[10]。

4 庐山绿帘石花岗岩的成因

前述单颗粒锆石定年表明庐山绿帘石花岗岩形成时间为江南新元古代造山晚期, 该岩体的矿物学和岩石化学资料也支持它为造山晚期花岗岩, 主要的依据是: ① 庐山绿帘石花岗岩以石英、微纹微斜长石和更长石为主, 其中微纹微斜长石 $\geq$ 更长石。暗色矿物为黑云母、角闪石和绿帘石, 它们的矿物学特征与 Maniar^[11] 划分的造山晚期花岗岩的矿物学特征相符。② 化学成分 (表 3) 富硅 ($\text{SiO}_2 > 74\%$), 贫铁镁 ($\text{FeO}^* + \text{MgO}$: $1.62\% \sim 3.34\%$), 弱过铝, 出现标准矿物刚玉分子 ($c = 0 \sim 1.10$), $A/\text{CNK} = 1.00 \sim 1.19$, 高碱 ($\text{ALK} = 8.30\% \sim 9.50\%$), 这些特征与国内外造山晚期花岗岩的特征一致^[11,12]。③ 微量元素成分特点与造山晚期的阿曼花岗岩也非常相似^[13] (图 4 b)。Rogers^[12] 认为, 这类高硅、富碱和过铝的造山晚期花岗岩有 3 种可能的成因: ① SiO_2 在 $65\% \sim 70\%$ 的正常钙碱性岩浆的结晶分异作用; ② 地壳岩石的重熔; ③ 直接来源于地幔。庐山绿帘石花岗岩呈孤立岩体出现, 内部未见中、基性岩石残留, 附近也没有中、基性侵入岩出现, 虽然有同期的岛弧火山岩, 但它们年龄略老, 岩石组合上具双峰式特点, 因此它们之间可能没有成因联系。庐山绿帘石花岗岩的稀土元素曲线具略右倾的“V”字形 (图 4 a), 较明显的 Eu 亏损, 表现出既有 I 型, 又有 S 型花岗岩的特征, 结

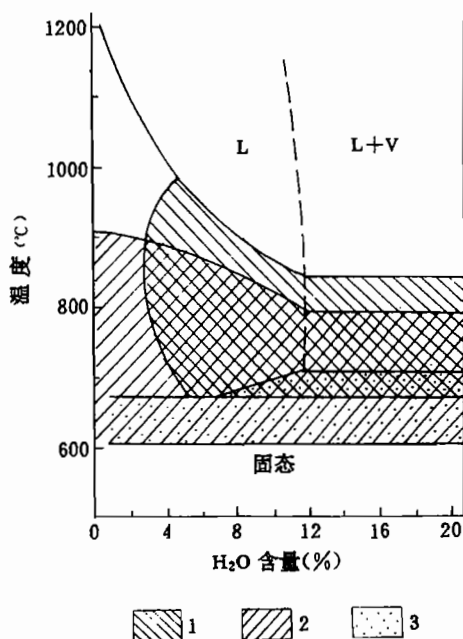


图 2 实验确定的花岗闪长岩体系中角闪石、黑云母和绿帘石稳定区 (0.8 GPa) (据 Naney, 1983)
Fig. 2 Stability of hornblende, biotite and epidote in synthetic granodiorite at 0.8 GPa (after Naney, 1983)
1—角闪石稳定区; 2—黑云母稳定区; 3—绿帘石稳定区
1—Hornblende stable; 2—biotite stable; 3—epidote stable

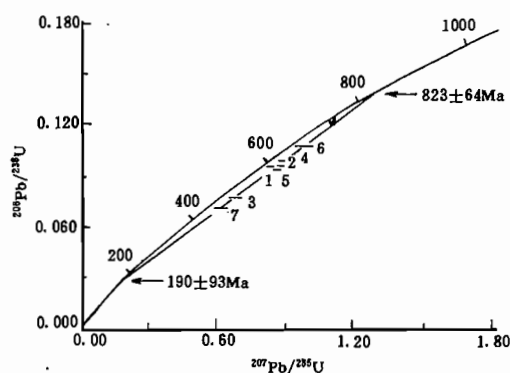


图 3 庐山绿帘石花岗岩锆石 U-Pb 法测年谱和图
Fig. 3 Zircon U-Pb concordia diagram and discordance line of Lushan epidote granite

合其弱过铝、强高硅和 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值 ($\epsilon_{\text{Nd}}(t) = 0.8$, $T_{\text{DM}} = 1.6\text{Ga}$, 表 3) 以及本区星子群斜长角闪岩和中生代花岗岩中获得 $> 2.0\text{Ga}$ 的残留锆石^[14], 说明庐山绿帘石花岗岩源区的物质主要为中元古代低成熟度的陆壳物质, 并含为数不多的新元古代前的再循环物质。这一推论支持了江南新元古代古岛弧是在中元古代被动大陆基础上发育起来的观点^[10]。

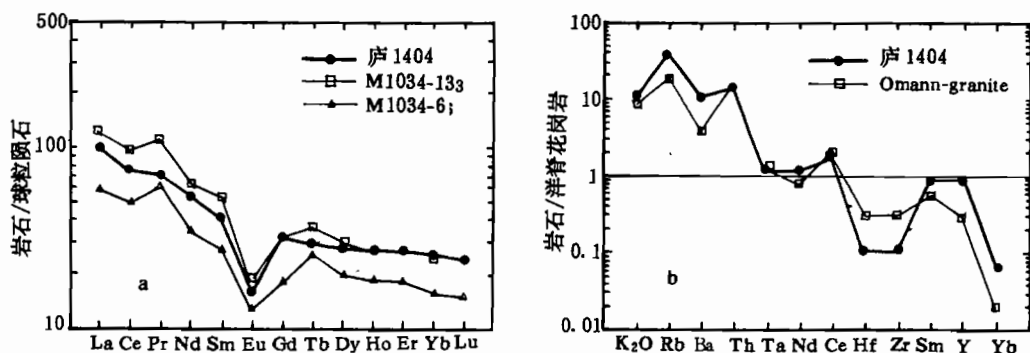


图 4 庐山绿帘石花岗岩稀土配分(a)及微量元素曲线(b)图

Fig. 4 Chondrite-normalized REE pattern (a) and trace elements curve (b) of Lushan epidote granite

表 3 庐山绿帘石花岗岩化学成分、微量元素、稀土元素和 Sm、Nd 同位素分析结果

Table 3 The determined results of major and trace elements, REE and Sm, Nd isotopic composition

样号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	烧失量	总量
庐 1404	75.75	0.11	12.65	0.64	0.76	0.05	0.22	0.81	4.39	4.30	0.03	0.32	99.82
G-19	74.08	0.18	13.35	1.63	1.17	0.05	0.54	0.94	4.08	3.88	0.02	0.24	100.16
G-27	75.80	0.15	12.87	0.03	1.72	0.05	0.35	1.10	3.60	3.60	0.02	0.35	99.64
	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Yb	Lu
庐 1404	31.67	60.86	8.32	32.18	7.77	1.17	8.39	1.46	9.05	2.00	5.57	5.33	0.79
M1034-13	38.92	79.10	12.96	39.31	10.37	1.34	8.34	1.80	9.86	2.00	5.87	5.10	0.78
M1034-6	18.88	40.58	511.9	20.80	5.34	0.96	4.64	1.28	6.66	1.40	3.98	3.35	0.50
	K ₂ O	Rb	Ba	Th	Ta	Nb	Ce	Hf	Zr	S	Y		
庐 1404	4.30	150.78		10.95	0.81	60.86	60.86	0.99	37.4	7.77	60.34		
	¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	$T_{\text{DM}}(\text{Ma})$	c	A/CNK							
庐 1404	0.141477	0.512381	0.8	1620	0.00	1.00							
G-19					0.78	1.13							
G-27					1.10	1.19							

注: 化学成分由江西省地质矿产局地质矿产调查研究大队实验室湿法分析(单位: %); 稀土元素由江西省地质矿产局中心实验室测定(单位: $\times 10^{-6}$); 微量元素由澳大利亚 Macquarie 大学 ICP-MS 分析(单位: $\times 10^{-6}$); Sm、Nd 同位素由中国地质科学院天津地质矿产研究所分析(单位: $\times 10^{-6}$)。

5 结论

(1) 庐山绿帘石花岗岩单颗粒锆石 U-Pb 法测年给出了 $823 \pm 64\text{Ma}$ 年龄值, 接近于江南古岛弧碰撞造山结束时的年龄 (0.8Ga)^[10]。

(2) 庐山绿帘石花岗岩源区的物质主要为中元古代低成熟度的陆壳物质, 并含少量的新元古代前的再循环物质, 表明了江南新元古代古岛弧是在中元古代被动大陆基础上发育起来的。

参 考 文 献

- 1 江西省地质矿产局. 江西省区域地质志. 北京:地质出版社, 1984.
- 2 谢国刚,李均辉,李武显等. 庐山前震旦纪岩石中锆石 U-Pb 法定年与其地质意义. 地质科学, 1997, 32(1): 110~115.
- 3 王凯怡,陈海,叶瑛. 星子杂岩——有关变质作用的 $P-T$ 条件及大地构造背景的初步研究. 见: 岩石圈构造演化丛书: 中国东南陆壳岩石圈构造与演化研究. 北京:中国科学技术出版社, 1992. 133~139 页.
- 4 Naney M T. Phase equilibria of rock-forming ferromagnesian silicates in granitic systems. American J. Sci., 1983, 283: 993~1033.
- 5 Blundy J D, Holland T J B. Calcic amphibole equilibria and a new amphibole-plagioclase geothermometer. Contrib. Mineral Petrol., 1990, 104: 208~224.
- 6 Hammarstrom J M, Zen E. Aluminium in hornblende: an empirical igneous geobarometer. Am. Mineral., 1986, 71: 1297~1313.
- 7 Schmidt M W. Amphibole composition in tonalite as a function of pressure: an experimental calibration of the Al-in hornblende barometer. Contrib. Mineral Petrol., 1992, 110: 304~310.
- 8 马莫. 花岗岩岩石学与花岗岩问题. 北京:地质出版社, 1979.
- 9 李惠民,董传万,周新民,徐夕生. 泉州辉长岩中单颗粒锆石 U-Pb 法定年: 闽东南基性岩浆岩的起源. 科学通报, 1995, 40(2): 158~160.
- 10 周新民,朱云鹤. 中国东南部晚元古代碰撞造山带的岩石学证据. 见: 岩石圈构造演化丛书: 东南大陆岩石圈结构与地质演化. 北京:冶金工业出版社, 1993. 87~97 页.
- 11 Maniar P D, Piccoli P M. Tectonic discrimination of granitoids. Bull. Geol. Soc. Am., 1989, 101: 635~643.
- 12 Rogers J J W, Greenberg J K. Trace elements in continental-margin magmatism. Part III. Alkali granites and their relationship to cratonization; Summary. Bull. Geol. Soc. Am., 1981, 92(1): 6~9.
- 13 Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. J. Petrol., 1984, 25(4): 956~983.
- 14 甘晓春,赵凤清,金文山等. 华南火成岩中捕获锆石的早元古代—太古宙 U-Pb 年龄信息. 地球化学, 1996, 25(2): 112~120.

Epidote Granite in the "Xingzi Complex" of Lushan Mountain: Dating and Genesis

Li Wuxian, Xu Xisheng, Zhou Xinmin

(Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu, 210093)

Xie Guogang, Li Junhui

(Geological and Mineral Resources Investigation Party of Jiangxi Geological and Mineral Resources Bureau, Xiangtang, Jiangxi, 330201)

Li Huimin

(Tianjin Institute of Geology and Mineral Resources, CAGS, Tianjin, 300170)

Abstract

The Lushan epidote granite is a part of the "Xingzi complex". Single-grain zircon U-Pb dating indicates that its age is 823 ± 64 Ma. Epidote may be formed by crystallization and self-metasomatism of magma (K-metasomatism of hornblende) at high pressure (approximate 0.5 GPa). Its age, petrology and geochemistry show that it appears to be late-orogenic granite in the Late Proterozoic Jiangnan Orogenic Belt.

Key words: dating and genesis; epidote granite; Xingzi complex; Lushan Mountain

作者简介

李武显,男,1964年生。1996年于南京大学地球科学系获硕士学位,现为南京大学博士研究生。主要从事花岗岩岩石学、同位素地球化学研究。通讯地址:210093,南京大学地球科学系。