

江南造山带东段旌德岩体锆石 LA-ICPMS 年龄 和 Nd-Sr-Hf 同位素地球化学

周 洁^{1,2} 姜耀辉¹ 曾 勇² 葛伟亚²

(1. 南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室, 地球科学与工程学院, 江苏 南京 210093;

2. 中国地质调查局南京地质调查中心, 江苏 南京 210016)

摘要: 旌德花岗质杂岩体位于安徽南部, 由花岗闪长岩和二长花岗岩组成。本研究得到岩体中锆石 U-Pb 年龄为 (141.0±1.0) Ma, 认为该年龄代表岩体的侵位年龄。岩体全岩主量元素特征显示出中偏酸性 (SiO₂=66.01%~70.87%), 富 Al (Al₂O₃=14.91%~16.24%), 富碱 (alk = 6.64%~8.01%), K₂O/Na₂O 变化范围在 0.78~1.04, 镁、铁含量较低, MgO:0.68%~1.06%, TFe₂O₃ (2.0%~3.34%), 以及低磷 (P₂O₅=0.10%~0.14%) 的特点; 微量元素主要富集 Sr (189×10⁻⁶~452×10⁻⁶), 贫 Nb、Ta、P、Ti、Y、Yb, 高 Sr/Y 比值 (23~66) 和 (La/Yb)_N (13~58), Eu 有轻微的负异常到弱的正异常 (δEu=0.81~1.18)。旌德岩体的地球化学特征与中国东部中生代埃达克质岩相似。I_{Sr}=0.7096~0.7101, ε_{Nd(t)}=-6.28~-7.32, ε_{Hf(t)}值变化于 -6.5~-1.1, 两阶段模式年龄 t_{DM2}=1.4~1.5 Ga。较年轻的 Nd 同位素模式年龄、较高的 ε_{Nd(t)}值和 ε_{Hf(t)}值, 以及岩体中发育有岩浆混合成因的暗色包体, 指示源区可能有地幔物质的贡献。幔源岩浆底侵使下地壳发生部分熔融, 并发生了岩浆混合作用, 形成了旌德岩体。

关键词: 旌德岩体; 岩石地球化学; 锆石 U-Pb 年龄; Sr-Nd-Hf 同位素

中图分类号: P581; P597+.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2013)05-1379-13

中国东南部中生代存在大规模岩浆作用与成矿, 安徽南部祁门县 2008 年发现一处大型钨钼多金属矿, 位于安徽南部的旌德岩体周边也发现大量的钨矿脉^[1]。但到目前为止, 有关旌德岩体的岩石学和地球化学方面的研究成果还很少, 仅 20 世纪 80—90 年代有个别研究^[2,3]。本文通过对旌德岩体进行岩石地球化学、LA-ICPMS 原位锆石 U-Th-Pb 同位素年龄和 Nd-Sr-Hf 同位素地球化学研究, 限定其形成时代, 并探讨其成因, 从而为进一步探讨皖南地区晚中生代构造演化及其成矿提供重要的基础地质资料。

1 地质背景及岩石特征

中国扬子陆块和华夏陆块之间有一条 NE 向带

状分布的元古宙浅变质的沉积地层和一系列岩浆岩单元, 被称为“江南造山带”^[4]。旌德花岗质杂岩体位于安徽南部, 其大地构造位置处于扬子陆块东南缘、江南造山带东段 (图 1-A)。

旌德花岗质杂岩体呈 NE 向展布 (图 1-B), 出露面积约 450 km², 由乔亭单元和尚田单元构成。杂岩体侵入于元古宙到早古生代砂岩、页岩、硅质岩、泥岩、灰岩中, 并被一系列石英脉、花岗斑岩脉、流纹斑岩脉侵入。岩体中有暗色包体分布, 大小可达几十厘米, 椭圆状或透镜状, 并可见花岗闪长岩反向脉体, 表明发生岩浆混合作用。尚田单元岩性为中粒—中粗粒二长花岗岩 (图 2-A, B), 呈岩株状侵入于乔亭侵入体中。尚田单元主要矿物含量为: 石英约 35%, 斜长石约 35%、钾长石约 25%、黑云母约 2%; 石

收稿日期: 2012-11-02; 改回日期: 2013-06-05

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(41002017) 资助。

作者简介: 周洁, 女, 1979 年生, 助理研究员, 专业: 矿物学、岩石学、矿床学; E-mail: zhoujie0517@sina.com。

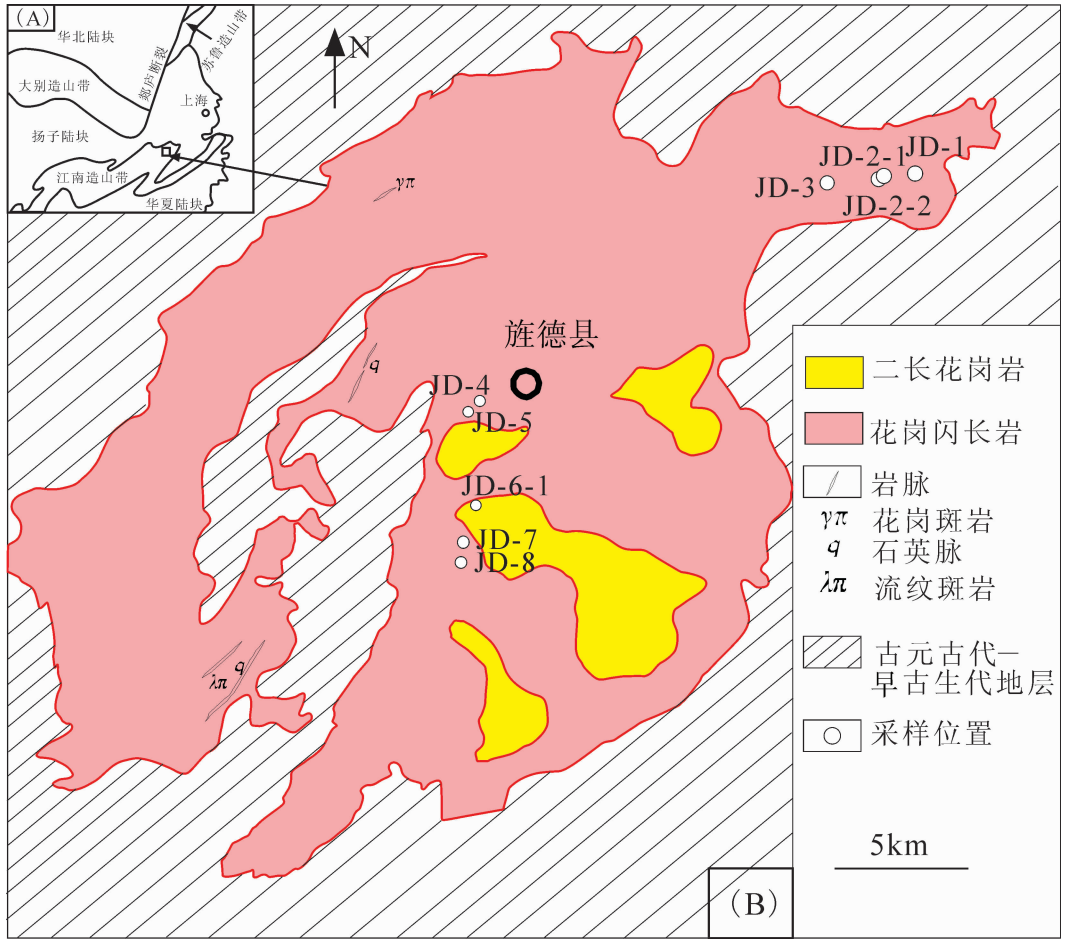


图1 旌德岩体地质简图(据 1:250000 宣城幅、安庆幅地质图)

Fig.1 Simplified geological map of Jingde pluton (modified after 1:250000 Geological Map of Xuancheng Sheet and Anqing Sheet)

英呈他形粒状不均匀分布于长石颗粒间；斜长石呈半自形板柱状，沿解理缝发生绢云母及碳酸盐化；钾长石主要为微斜长石，呈不规则板状体，部分有交代包裹斜长石现象(图 2-C)；黑云母单偏光下呈深褐色，部分颗粒因绿泥石化而致使表面带有绿色，多色性明显，片状；少部分沿解理分解绿泥石；岩石中含有<0.5%金属矿物及锆石、磷灰石等副矿物。乔亭单元岩性为中细-中粗粒花岗闪长岩(图 2-C, D)，半自形粒状结构，主要矿物成分为：斜长石约 45%、钾长石约 10%、石英约 35%、黑云母约 5%(图 2-F, H)；斜长石为中长石，多呈半自形板柱状和宽板状，表面分布数量不一的绢云母，钠长石双晶和环带构造常见(图 2-G)；钾长石为条纹长石，呈不规则板状体，有交代包裹斜长石、黑云母现象，部分钾长石具微文象结构；石英呈他形粒状不均匀分布于长石

颗粒间；黑云母呈褐色，具褐色-浅绿色多色性，板片状，部分颗粒因绿泥石化而使表面带有绿色；岩体中副矿物主要为锆石、磷灰石、榍石、褐帘石、绿帘石、榍石和磁铁矿(图 2-H)。

2 岩石地球化学

本研究 8 件样品采于 N30°21'6.3" ,E118°41'9.2" 至 N30°12'27.1" ,E118°30'38.3" 区域，为沿公路自岩体东北部至中心部位新鲜花岗闪长岩、二长花岗岩样品，具体的采样点位于图 1-B。全岩的主量、微量、稀土元素在国土资源部华东矿产资源监督检测中心测定。主量元素用等离子光谱 ICP-AES 测定，微量、稀土元素用高分辨率等离子质谱 ICP-MS 测定。

2.1 主量元素特征

旌德岩体的岩石化学成分如表 1 所示，该杂体

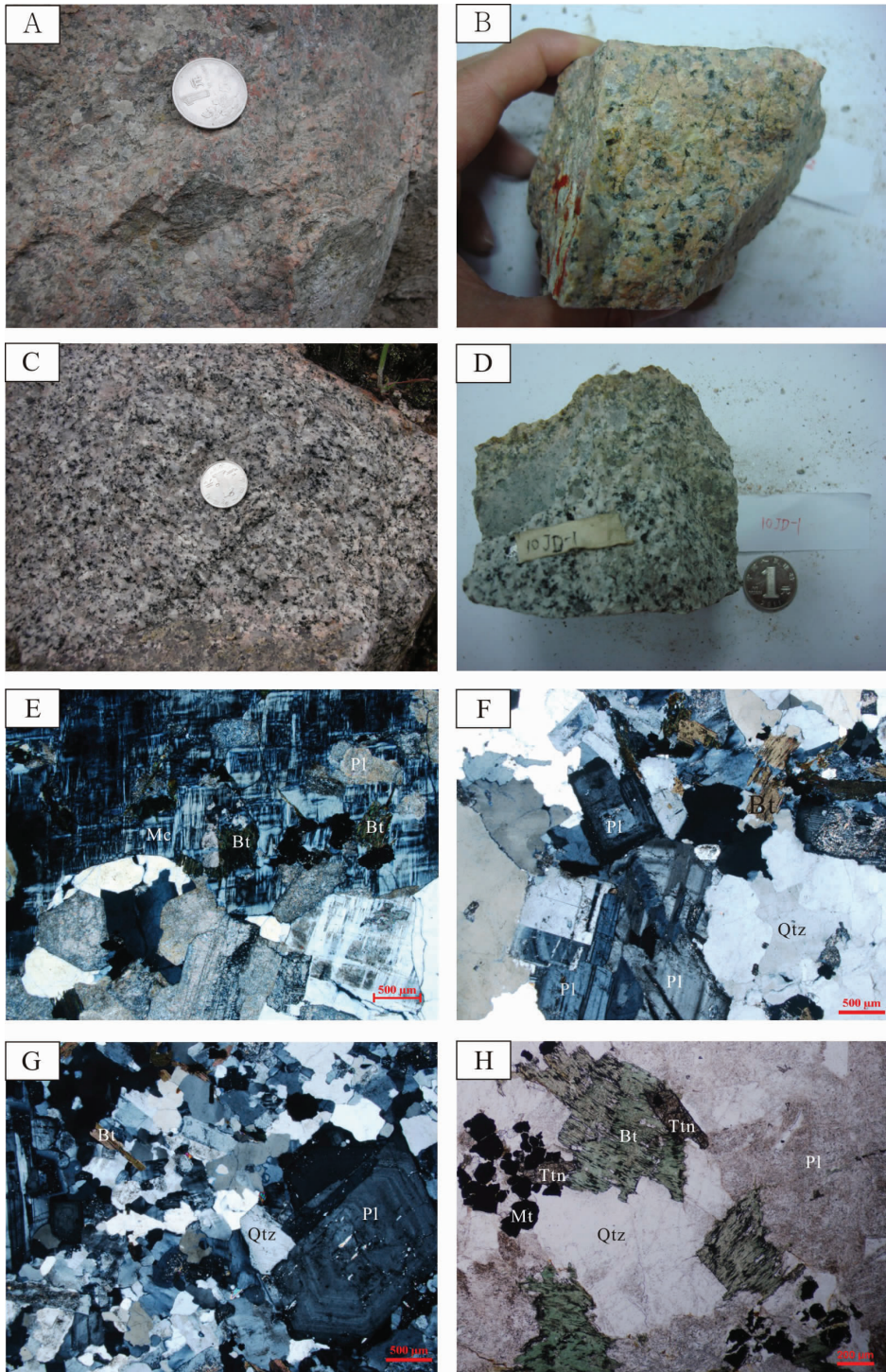


图 2 旌德岩体岩石学特征

A, B—二长花岗岩野外、手标本照片;C, D—花岗闪长岩野外、手标本照片;E—二长花岗岩中微斜长石中包裹有黑云母、斜长石;
 F—花岗闪长岩主要矿物斜长石+黑云母+石英;G—花岗闪长岩环带状斜长石;H—花岗闪长岩中磁铁矿、榍石副矿物
 Qtz—石英;Pl—斜长石;Bt—黑云母;Mc—微斜长石;Mt—磁铁矿;Ttn—榍石

Fig.2 Petrological features of Jingde pluton

A, B—Field and hand specimen photos of monzogranite ; C, D—Field and hand specimen photos of granodiorite; E—Biotite and plagioclase wrapped in microcline in monzogranite; F—Major compositions of plagioclase + biotite + quartz in granodiorite; G—Plagioclases with zoning texture in granodiorite; H—Accessory minerals of magnetite and titanite in granodiorite
 Qtz—Quartz; Pl—Plagioclase; Bt—Biotite; Mc—Microcline; Mt—Magnetite; Ttn—Titanite

表 1 旌德岩体主量元素、微量元素分析结果
Table 1 Major and trace element content of Jingde granitoid

分析项目	10JD-1	10JD-2-1	10JD-2-2	10JD-3	10JD-5	10JD-6-1	10JD-8
主量元素 /%							
SiO ₂	68.68	66.01	68.32	70.87	68.71	67.68	68.17
TiO ₂	0.43	0.40	0.41	0.32	0.50	0.43	0.45
Al ₂ O ₃	15.20	15.61	16.24	14.91	15.23	15.78	15.67
TFe ₂ O ₃	3.07	2.44	2.72	2.00	3.34	3.10	3.08
MnO	0.06	0.04	0.03	0.04	0.05	0.06	0.06
MgO	1.00	0.75	0.80	0.68	1.06	1.06	1.04
CaO	3.04	2.54	2.93	2.18	2.70	3.07	2.81
Na ₂ O	3.81	3.63	3.75	3.97	3.26	3.77	3.81
K ₂ O	3.48	3.21	2.94	4.04	3.38	3.44	3.28
P ₂ O ₅	0.14	0.14	0.14	0.10	0.14	0.14	0.14
LOI	0.97	5.06	1.42	0.66	1.40	1.31	1.34
SUM	99.88	99.83	99.70	99.77	99.77	99.84	99.85
微量元素/10 ⁻⁶							
Li	56.7	132	n.a	36.3	n.a	41.9	56.6
Be	3.08	3.08	2.40	2.85	2.40	3.65	2.87
Sc	6.60	5.20	2.00	3.80	5.00	11.4	6.80
Ti	2580	2400	2460	1920	3000	2580	2700
V	52.0	38.0	46.0	37.1	69.0	58.8	59.2
Cr	27.1	20.5	10.0	23.9	10.0	62.7	16.0
Mn	465	310	232	310	378	465	465
Co	11.1	4.46	4.00	5.52	7.00	10.7	9.69
Ni	20.1	25.9	2.00	10.8	3.00	39.1	10.6
Cu	6.56	6.40	24.0	5.11	5.00	5.89	5.43
Zn	70.2	73.2	73.0	55.9	73.0	71.2	78.8
Ga	17.8	19.6	24.3	19.7	20.5	19.7	19.8
Rb	158	139	121	145	131	129	92.1
Sr	403	240	452	189	335	360	364
Y	13.9	9.50	6.90	6.03	14.5	13.3	11.5
Zr	224	238	182	144	152	177	163
Nb	11.4	11.0	8.50	5.84	8.90	9.38	9.28
Mo	0.54	0.54	n.d	0.21	n.d	0.89	0.23
Cd	0.30	0.39	n.a	0.17	n.a	0.25	0.24
Sn	2.89	3.74	3.00	2.57	3.00	2.84	2.08
Cs	n.a	n.a	15.2	n.a	8.78	n.a	n.a
Ba	897	1413	780	518	572	745	667
La	28.0	33.6	30.9	26.8	25.1	22.3	23.2
Ce	63.4	52.9	63.6	43.2	52.7	34.6	39.5
Pr	6.50	7.91	7.58	5.35	6.39	5.38	5.53
Nd	25.9	32.3	28.4	19.9	24.1	21.7	21.9
Sm	5.04	5.94	5.32	3.34	4.76	4.21	4.10
Eu	1.61	2.06	1.40	0.91	1.20	1.36	1.26
Gd	3.87	4.43	3.92	2.82	4.12	3.24	3.26
Tb	0.61	0.60	0.43	0.35	0.56	0.52	0.50
Dy	2.93	2.26	1.82	1.33	2.94	2.52	2.28
Ho	0.49	0.33	0.23	0.21	0.48	0.44	0.38
Er	1.22	0.90	0.51	0.61	1.28	1.14	1.00
Tm	0.18	0.10	0.06	0.07	0.18	0.17	0.14
Yb	1.16	0.70	0.36	0.52	1.15	1.17	0.97
Lu	0.18	0.10	0.05	0.08	0.17	0.18	0.14
Hf	6.53	6.69	5.10	4.13	4.30	5.14	4.56
Ta	1.22	0.99	0.70	0.56	0.90	0.82	0.87
W	0.62	11.1	36.0	0.82	1.00	0.74	2.67
Pb	35.6	17.4	22.0	28.0	24.0	35.4	29.4
Th	11.9	10.9	9.34	14.6	10.6	10.5	10.1
U	4.47	1.67	2.41	1.66	2.37	2.08	2.79
Σ REE	141.1	144.1	144.6	105.5	125.1	98.9	104.2
(La/Yb) _N	16.3	32.4	58.0	34.8	14.8	12.9	16.2
(La/Sm) _N	3.50	3.56	3.66	5.05	3.32	3.33	3.56
(Gd/Yb) _N	2.70	5.13	8.82	4.40	2.90	2.24	2.72
δ Eu	1.07	1.18	0.90	0.88	0.81	1.09	1.02

注: n.a 表示未测; n.d 表示低于检测限。

岩的常量元素特征显示主要为中偏酸性, 岩性为花岗闪长岩和二长花岗岩。SiO₂ 含量 66.01%~70.87%, 平均 68.35%; 高碱, K₂O+Na₂O 含量 6.64%~8.01%, 平均 7.11%, K₂O/Na₂O 变化范围在 0.78~1.04, 平均为 0.92。在 TAS 图中主要落入钙碱性系列 (图 3)。旌

德岩体富铝, Al₂O₃ 含量 14.91%~16.24%, A/NKC 变化于 0.98~1.11, 平均为 1.05, 显示准铝到弱过铝质; CaO 为 2.18%~3.07%; 较低的 MgO (0.68%~1.06%), TFe₂O₃ (2.0%~3.34%), TiO₂ (0.32%~0.5%), P₂O₅ (0.1%~0.14%)。通过 CIPW 标准矿物计算出的分异指数 DI

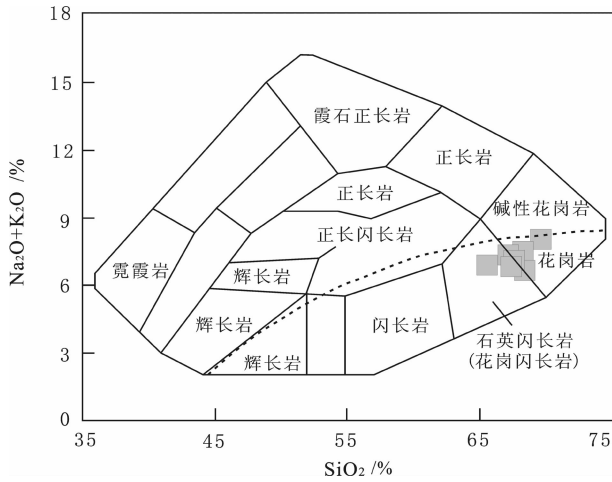


图 3 SiO₂-K₂O+Na₂O 图(据文献[5])

Fig.3 SiO₂-K₂O+Na₂O classification diagram (after Reference [5])

(q + or + ab + ne + lc + kp) 为 77.46~84.35。Mg[#] (MgO/ (MgO+FeO^T)×100 (分子比))为 36.81~42.97, 平均为 40.87。

2.2 微量元素和稀土元素特征

旌德岩体 Sr (189×10⁻⁶~452×10⁻⁶)略低于典型的埃达克岩;Yb 为 0.36×10⁻⁶~1.17×10⁻⁶, 具高的 Sr/Y 比值 (23~66);贫 Nb、Ta、P、Ti、Y、Yb。在原始地幔标准化蛛网图上与相邻元素比较, 有 Nb、Ta、P、Ti 的负异常, Rb、Th 富集 (图 4-a)。

稀土总量∑REE=98.9×10⁻⁶~144.6×10⁻⁶, 轻重稀土分馏明显, 球粒陨石标准化的稀土配分曲线呈明显的右倾模式, (La/Yb)_N=13~58, Eu 有轻微的正异常到弱的正异常 (δ Eu=0.81~1.18) (图 4-b)。

3 锆石 U-Pb 年龄

对较新鲜的 JD-1 花岗闪长岩进行锆石 U-Pb 测年。锆石 CL 照相及 U-Pb 测年在西北大学大陆动力学国家重点实验室采用激光剥蚀—等离子体质谱系统 (LA-ICP-MS)完成, 有关流程见柳小明等 (2002) [7]。

测得旌德杂岩体中花岗闪长岩 (JD-1) 锆石的 22 个 U-Th-Pb 同位素数据, 测试结果列于表 2。从 CL 图像 (图 5) 可以看出, 锆石颗粒大都呈自形、长柱状 (长 150~500 μm, 长宽比 2~5), 晶形比较完整, 裂纹不发育, 发育清晰的岩浆振荡环带, 与之相应的

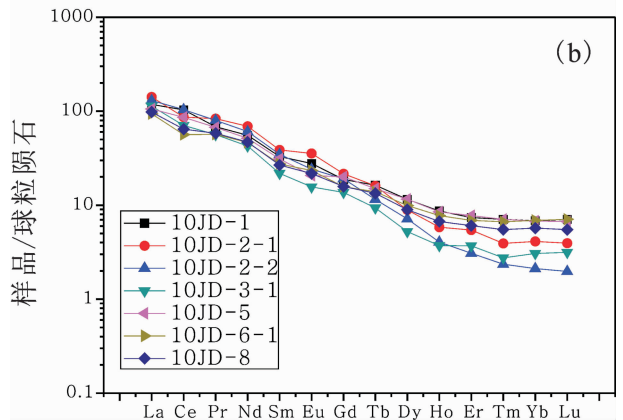
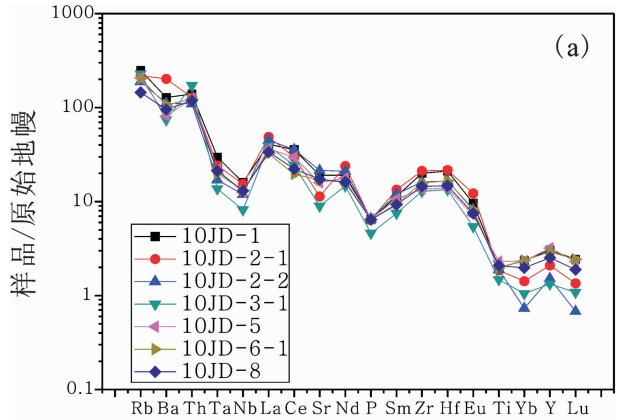


图 4 旌德岩体微量及稀土元素标准化图(标准化数据引自文献[6])

Fig. 4 Normalized trace element and REE patterns for Jinde pluton (normalization data after Reference [6])

锆石测试点 Th/U 比值介于 0.32~0.84。这些 Th/U 比值比变质锆石的 Th/U 值 (<0.1)高, 为典型的岩浆成因锆石。少数锆石晶体的内部还见有继承锆石的残留。

在 ²⁰⁷Pb/²³⁵U-²⁰⁶Pb/²³⁸U 谐和图上 (图 6), 多数样品投影在谐和线上或谐和线附近。22 个分析点中有 16 个分析点的 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄变化于 134~142 Ma, 由 16 个锆石测试点数据计算的 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄值为 (141±1) Ma, MSWD 值为 0.57, 属于早白垩世。另外还有 (150±2) Ma、(162±2) Ma、(419±6) Ma、(718±10) Ma 的锆石, 其中 (718±10) Ma 年龄代表该地区曾经受到新元古代岩浆活动的影响 [8-11], 而 150~419 Ma 的年龄可能表明该地区受到多期变质变形、岩浆活动的影响。还发现 (2492±50) Ma (²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄) 的继承

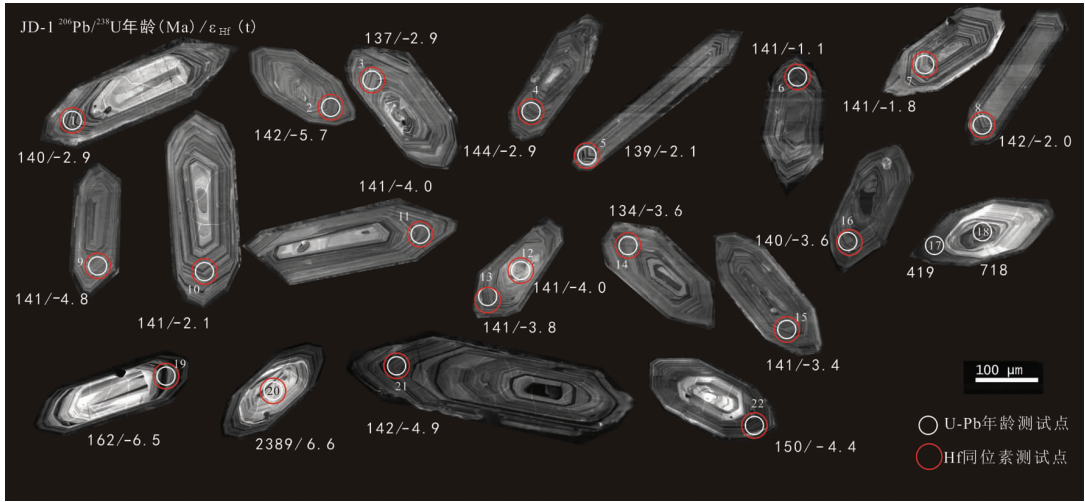


图5 旌德岩体锆石阴极发光图

Fig.5 Zircon cathodoluminescence images of Jingde pluton

核,说明研究区存在古元古代的基底物质。

4 Sr-Nd-Hf 同位素

4.1 全岩 Sr-Nd 同位素特征

全岩 Sr-Nd 同位素在南京大学生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室用德国 Finnigan 公司制造的 Triton TI TIMS 仪器测定,详细的分析流程见濮巍等(2004,2005)^[12-13]。测试过程中选用的标准矿物分别为 NIST SRM 987、Nd-JNd1-1,同位素比值的精度优于 0.005%。

全岩 Sr-Nd 同位素结果如表 3 所示,花岗闪长岩全岩 Sr 初始值 $I_{Sr}=0.7096\sim 0.7101$, 与前人研究得出的 $I_{Sr}:0.710$ 相近^[2-3]。样品的 $^{147}Sm/^{144}Nd$ 比值为 0.1176,接近平均陆壳值 0.118^[14],显示没有明显的 Sm、Nd 分馏。计算得到旌德花岗闪长岩的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 为 $-6.28\sim -7.32$ ($t=140$ Ma),不仅明显高于一般认为的扬子克拉通下地壳的 $\epsilon_{Nd}(t)$ (约 -20)^[15-16]和扬子克拉通北缘岩石圈地幔的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值 ($-8.12\sim -9.06$)^[17]。单阶段模式年龄以及两阶段模式年龄分别为 $t_{DM}=1.44\sim 1.55$ Ga, $t_{DM2}=1.44\sim 1.53$ Ga,明显年轻于扬子克拉通内花岗岩所普遍显示的约 2.1 Ga 的早元古代年龄。

4.2 锆石 Hf 同位素特征

锆石原位 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 多接收等离子质谱和 Newwave UP213 紫外激光剥蚀系统 (LA-MC-ICP-MS) 上进行,相关仪器运行条件及详细分析流程见侯可军等 (2007)^[18]。除 2

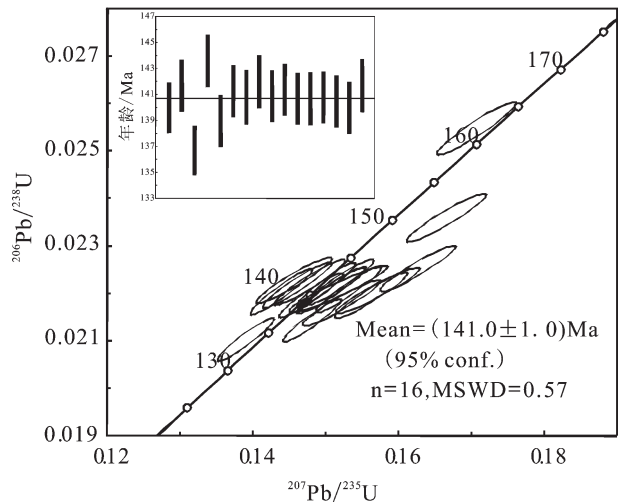


图6 旌德岩体 U-Pb 谐和图

Fig.6 Concordia diagram of zircon U-Pb dating for Jingde pluton

个锆石太薄而未能获得精确数据外,其余锆石 Hf 同位素分析结果如表 4 所示。锆石的 $^{176}Lu/^{177}Hf$ 均小于 0.002,显示锆石在形成之后,具有较少的放射性成因 Hf 的积累^[19]。 $^{176}Hf/^{177}Hf$ 值为 0.282 523~0.282 653, $\epsilon_{Hf}(t)$ 值变化范围: $-5.7\sim -1.1$,二阶段模式年龄 (t_{DM2}) 值变化于 1261~1551 Ma。

5 讨论

埃达克岩,最初的含义为产生于岛弧环境,是 Defant 和 Drummond (1990)^[20]研究阿留申群岛火山岩时提出来的,是具有特定地球化学性质的一套中

表 2 旌德岩体(JD-1)锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年结果
Table 2 LA-ICP-MS zircon U-Pb dating results of Jingde pluton (JD-1), south Anhui Province

点号	Th/U	同位素比值						年龄/Ma					
		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
		比值	1 σ	比值	1 σ	比值	1 σ	年龄	1 σ	年龄	1 σ	年龄	1 σ
1	0.35	0.0489	0.0016	0.1480	0.0029	0.0220	0.0003	141	76	140	3	140	2
2	0.39	0.0495	0.0017	0.1520	0.0031	0.0222	0.0003	173	76	144	3	142	2
3*	0.50	0.0501	0.0016	0.1482	0.0027	0.0214	0.0003	200	73	140	2	137	2
4	0.35	0.0523	0.0018	0.1626	0.0034	0.0225	0.0003	300	75	153	3	144	2
5	0.59	0.0506	0.0018	0.1522	0.0035	0.0218	0.0003	224	80	144	3	139	2
6*	0.35	0.0478	0.0016	0.1461	0.0031	0.0222	0.0003	86	80	138	3	141	2
7	0.51	0.0498	0.0020	0.1518	0.0045	0.0221	0.0003	186	90	144	4	141	2
8	0.45	0.0474	0.0017	0.1456	0.0034	0.0223	0.0003	69	83	138	3	142	2
9	0.39	0.0496	0.0016	0.1511	0.0029	0.0221	0.0003	176	75	143	3	141	2
10	0.32	0.0491	0.0016	0.1501	0.0027	0.0222	0.0003	150	73	142	2	141	2
11	0.42	0.0495	0.0017	0.1507	0.0031	0.0221	0.0003	173	77	143	3	141	2
12	0.84	0.0516	0.0019	0.1571	0.0038	0.0221	0.0003	269	81	148	3	141	2
13	0.39	0.0503	0.0017	0.1532	0.0030	0.0221	0.0003	208	74	145	3	141	2
14*	0.53	0.0479	0.0016	0.139	0.0026	0.0210	0.0003	95	76	132	2	134	2
15	0.42	0.0474	0.0016	0.1439	0.0028	0.0220	0.0003	66	77	137	3	141	2
16	0.41	0.0516	0.0017	0.1562	0.0033	0.0220	0.0003	267	76	147	3	140	2
17*	0.37	0.0609	0.0020	0.5647	0.0103	0.0672	0.0010	636	68	455	7	419	6
18*	0.40	0.0665	0.0020	1.0793	0.0172	0.1177	0.0017	821	63	743	8	718	10
19	0.18	0.0486	0.0016	0.1707	0.0036	0.0255	0.0004	128	78	160	3	162	2
20*	1.09	0.1634	0.0049	10.1092	0.1509	0.4485	0.0064	2492	50	2445	14	2389	29
21	0.44	0.0482	0.0017	0.1478	0.0032	0.0222	0.0003	120	79	140	3	142	2
22	0.44	0.0512	0.0018	0.1665	0.0036	0.0236	0.0003	250	77	6	3	150	2

注: * 表示没有参与年龄计算的点。

酸性火山岩和侵入岩组合的术语,其地球化学标志是:SiO₂≥56%,高铝(Al₂O₃≥15%),MgO<3%(很少>6%),贫Y和Yb(Y≤18×10⁻⁶,Yb≤1.9×10⁻⁶),Sr含量高(>400×10⁻⁶),LREE富集,无Eu异常(或有轻微的负Eu异常),⁸⁷Sr/⁸⁶Sr比值小于0.704,δNd通常大于0。近年来对中国东部燕山期火山岩、侵入岩的研究发现,其多数地球化学特征与埃达克岩十分相似^[21-27],被称为“埃达克质岩”(adakite-like rock or akakitic rock)或“C型”adakite^[23]。旌德杂岩体高的LREE含量,富集Sr、Ba,高的Sr/Y比值和(La/Yb)_N值,贫HREE、Y、Yb,具似埃达克岩地球化学特征,在(La/Yb)_N-Yb_N图解(图7-A)上,旌德岩体落入埃达克岩区。与典型的埃达克岩相比,旌德岩体具有负

的ε_{Nd}(t)和相对高的Sr同位素初始比值,这一点与中国东部中生代岩石相似。在Sr/Y-Y图解(图7-B)上落入中国东部中生代埃达克岩区内。

目前研究表明,埃达克岩的源区主要有下列模式:(1)形成在岛弧环境,由俯冲的玄武质大洋板片部分熔融^[20-21,28];(2)底侵玄武岩部分熔融^[29-32];(3)拆沉下地壳部分熔融^[25,33];(4)加厚下地壳镁铁质岩石部分熔融^[34-38]。旌德岩体的高K₂O、低Mg[#]值特征,负的ε_{Nd}和相对高的Sr同位素初始比值等特征明显不同于典型来自板片熔融的埃达克岩。研究揭示母岩浆为玄武质岩浆部分熔融来源的埃达克质岩浆在地球化学和同位素组成上会显示出明显系统的变化,并且在角闪石、单斜辉石等矿物中通常会发育

表 3 旌德岩体 Sr-Nd 同位素组成
Table 3 Sr, Nd isotopic compositions of Jingde pluton

样号	岩石类型	Rb/ 10^{-6}	Sr/ 10^{-6}	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ($\pm 2\sigma$)	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$	Sm / 10^{-6}	Nd / 10^{-6}	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ ($\pm 2\sigma$)	T_{DM} /Ma	T_{DM2} /Ma	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$
10JD-1	花岗 闪长岩	158	403	1.1348	0.711809 ± 3	0.7096	5.04	25.9	0.1176	0.512244 ± 10	1438	1443	-6.28
10JD-5	花岗 闪长岩	131	335	1.1319	0.712318 ± 11	0.7101	4.76	24.1	0.1194	0.512192 ± 6	1548	1528	-7.32

表 4 旌德岩体(JD-1)中锆石 Hf 同位素数据
Table 4 Hf isotopic data of zircons from Jingde pluton

点号	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$		$(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	t_{DM} /Ma	t_{DM2} /Ma
	/Ma			比值	2σ				
1	140	0.021941	0.000946	0.282607	25	0.282604	-2.9	914	1372
2	142	0.017044	0.000651	0.282525	19	0.282523	-5.7	1021	1551
3	137	0.024108	0.000872	0.282606	23	0.282604	-2.9	914	1375
4	144	0.016399	0.000623	0.282602	21	0.282600	-2.9	914	1379
5	139	0.032065	0.001178	0.282629	26	0.282626	-2.1	889	1325
6	141	0.018129	0.000729	0.282655	22	0.282653	-1.1	841	1261
7	141	0.020752	0.000778	0.282635	25	0.282633	-1.8	870	1306
8	142	0.026523	0.000931	0.282629	23	0.282626	-2.0	883	1322
9	141	0.016563	0.000617	0.282552	22	0.282550	-4.8	983	1492
10	141	0.016260	0.000670	0.282627	23	0.282625	-2.1	879	1324
11	141	0.017995	0.000771	0.282573	23	0.282571	-4.0	957	1445
12	141	0.022944	0.000937	0.282575	24	0.282572	-4.0	959	1443
13	141	0.029805	0.001323	0.282579	33	0.282576	-3.8	963	1435
14	134	0.027297	0.001089	0.282590	23	0.282587	-3.6	941	1413
15	141	0.019446	0.000808	0.282590	21	0.282588	-3.4	935	1409
16	140	0.017064	0.000729	0.282585	21	0.282583	-3.6	940	1420
17	419	-	-	-	-	-	-	-	-
18	718	-	-	-	-	-	-	-	-
19	162	0.039344	0.001380	0.282491	21	0.282487	-6.5	1089	1619
20	2389	0.018331	0.000728	0.281479	31	0.281446	6.6	2464	2507
21	142	0.016403	0.000711	0.282548	20	0.282546	-4.9	991	1501
22	159	0.015480	0.000576	0.282557	28	0.282555	-4.2	975	1470

注：“-”表示未测得。

成分环带^[39],也不同于旌德岩体。拆沉下地壳部分熔融,会导致高的 MgO、Ni 和 Cr 的含量,而旌德岩体与之不同,有较低的 MgO、Ni 和 Cr 含量。因此,不可能是拆沉下地壳熔融形成的。前人研究证实基性的地壳岩石在足够深(≥ 40 km)时,可以产生高 Sr/Y 和高(La/Yb)_N值的岩浆^[34-38]。旌德岩体地球化学特

征显示高的 Sr/Y 比值(23~66)和(La/Yb)_N值(12.9~58.0),弱的 Eu 异常($\delta \text{Eu}=0.81\sim 1.18$),源区有石榴石、角闪石残留,显示了在一个压力较高的条件下发生部分熔融,主要是玄武质下地壳熔融形成的埃达克岩(图 8)。实验研究结果表明,角闪岩在高压条件下(>1000 MPa)熔融时可形成类似埃达克质熔体^[40-45]。

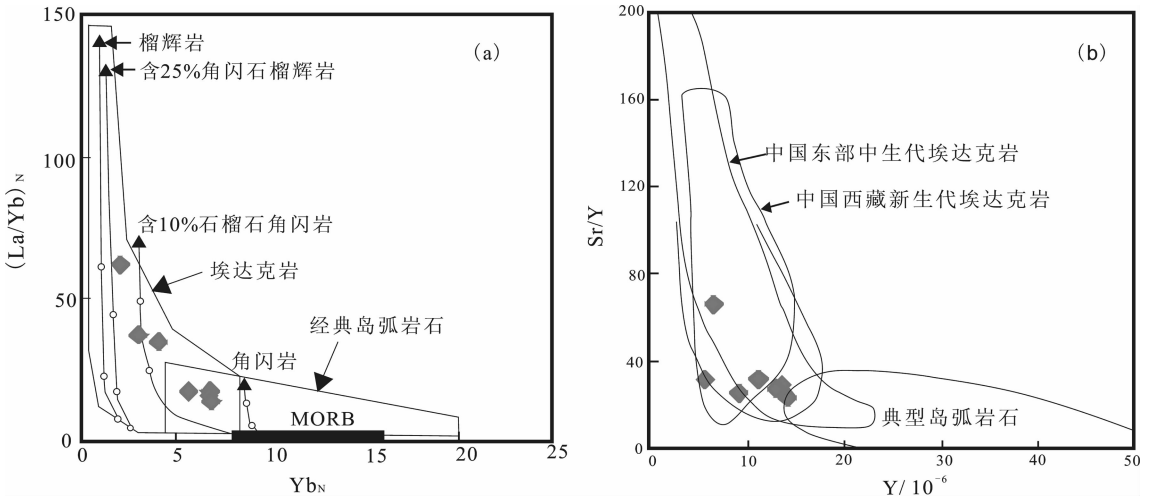


图 7 (La/Yb)_N - Yb_N 图(a)和 Sr/Y - Y 图(b) (底图据文献[20])

Fig.7 (a) (La/Yb)_N versus Yb_N and (b) Sr/Y versus Y diagrams(after Reference[20])

图 7-A 中显示旌德岩体是由石榴角闪岩发生部分熔融形成,与玄武质下地壳熔融结论相一致。

晚中生代时期,中国东南部发生了大规模强烈的岩浆活动,分为两阶段:分布于陆内的早燕山阶段(190~150 Ma)和主要分布在沿海的晚燕山阶段(<145 Ma)。江南造山带虽然主体被认为是一条新元古代的碰撞造山带,其东段广泛出露新元古代的花岗岩^[46],在旌德岩体测年结果中出现的 743.3 Ma 年龄也说明了曾经受到新元古代岩浆活动的影响。印支—燕山运动在该区也引发了较强烈的岩浆活动,并且在皖浙赣相邻区及其西延的带状区域发育独特的 150~135 Ma 的岩浆活动^[47-48]。不同学者对其独特的晚侏罗—早白垩世岩浆活动的构造动力学背景曾

提出不同模式:(1)古太平洋板块在华北克拉通与中国东南部的俯冲角度不同而形成,俯冲角度的变化引起了板片撕裂,并引发了其后的早白垩世岩浆活动^[47];(2)扬子克拉通东南部中生代岩石圈发生了以机械为主的拆沉作用^[17,49]。深部地壳岩石的部分熔融在造山隆升和剥露过程中起重要的作用^[9]。Zeng 等^[51]对雅拉香波花岗岩研究后提出在地壳增厚的条件下,下地壳角闪岩的部分熔融可能是导致造山带从缩短增厚向伸展垮塌转换的主要因素。地球物理剖面工作及广泛分布的由南向北的运动的逆冲-推覆构造指示了江南造山带在中生代为陆内造山带,形成于北部华北与扬子板块发生陆-陆碰撞、南部华南板块向北推挤的区域动力学背景下;带内晚侏

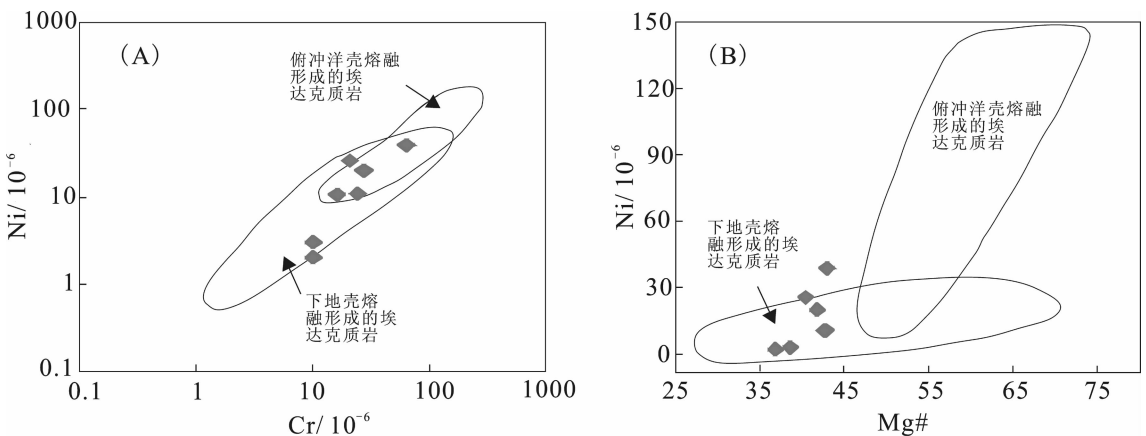


图 8 (A) Ni-Cr 图;(B)Ni-Mg# 图(据文献[55-56])

Fig.8 (A) Ni versus Cr and (B) Ni versus Mg# diagrams(after References [55-56])

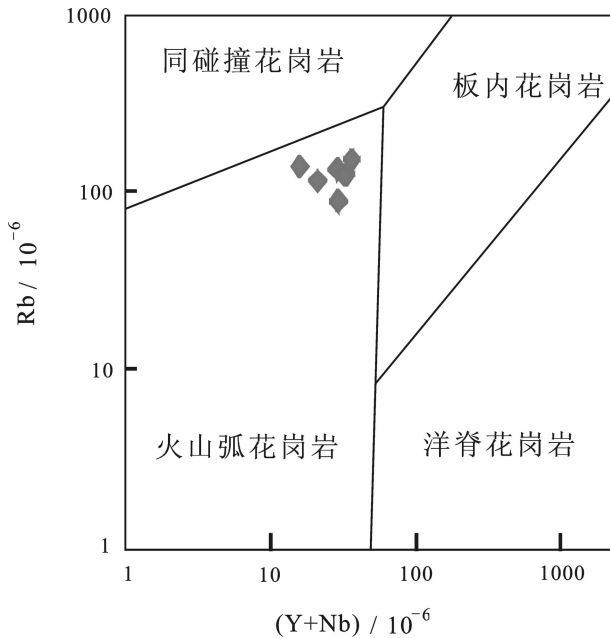


图 9 Rb-(Y+Nb)图(据文献[57])

Fig.9 Rb versus(Y+Nb)plot (after Reference[57])

罗—早白垩世的岩浆岩则与陆内造山无关^[52]。本文发现的皖南早白垩世(约 141 Ma)的由角闪岩的深熔作用形成的旌德岩体可能指示了江南造山带东部从造山增厚向伸展垮塌的转折时期的岩浆活动。之后江南造山带东段区域内广泛发育 A 型花岗岩^[53]。旌德杂岩体在 Rb-(Y+Nb)图解上(图 9),落入火山弧花岗岩区域,说明旌德岩体源区物质受到俯冲板块的影响,可能与古太平洋的俯冲有关,或者可能与江南造山带晋宁期扬子陆块与华夏陆块之间的拼贴有关。通过锆石饱和温度计^[54]计算的旌德岩体温度范围为 823°C~770°C,较年轻的 Nd 同位素模式年龄(1.4~1.5 Ga),较高的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值(-6.28~-7.32)、 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值(-5.7~-1.1)表明有幔源物质参与了旌德岩体的形成,或者是较年轻源区物质的再造。野外观察到岩体内部分布有岩浆混合成因的暗色包体说明有幔源岩浆作用。早白垩世(约 141 Ma)发生幔源岩浆底侵,使下地壳发生部分熔融,并发生了岩浆混合作用,形成了旌德岩体。

6 结 论

(1) LA-ICP-MS 定年结果表明,皖南旌德岩体形成于早白垩世,其年龄为(141.0±1.0) Ma。

(2) 皖南旌德岩体地球化学特征上具埃达克质

岩的地球化学特征,显示高的 Sr/Y 比值和(La/Yb)_N 值,贫 HREE、Y、Yb,钨有轻微的负异常到弱正异常,低的 MgO、Ni、Cr 含量。

(3) 早白垩世由于幔源岩浆底侵,引起基性下地壳发生部分熔融,并发生了岩浆混合作用,形成了旌德岩体。旌德岩体指示了江南造山带东部岩石圈开始从增厚向伸展垮塌的转变。

参考文献 (References):

- [1] 王德恩,周翔,余心起,等. 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 [J]. 地质通报, 2011, 30(10):1514-1529.
Wang De'en, Zhou Xiang, Yu Xinqi, et al. 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 [J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(10): 1514-1529(in Chinese with English abstract).
- [2] 陈江峰,周泰禧,李学明. 安徽南部燕山期中酸性侵入岩的源区 Sr-Nd 同位素制约[J].地球化学, 1993, (3):261-268.
Chen Jiangfeng, Zhou Taixi, Li Xueming. Sr and Nd isotopic constraints on source regions of the intermediate and acied intrusions from southern Anhui Province[J]. Chinese Journal of Geochemistry, 1993, (3):261-268(in Chinese with English abstract).
- [3] 邢凤鸣,徐祥. 皖南中生代花岗岩类 Nd-Sr-Pb 同位素特点[J]. 安徽地质, 1993, 3(1):35-41.
Xing Fengming, Xu Xiang. Nd, Sr, Pb isotopic geochemistry of the Mesozoic granitoids in South Anhui[J]. Geology of Anhui, 1993, 3(1): 35-41(in Chinese with English abstract).
- [4] 于津海,魏振海,王丽娟,等. 华夏地块:一个由古老物质组成的年轻陆块[J]. 高校地质学报, 2006, 12(4):440-447.
Yu Jinhai, Wei Zhenyang, Wang Lijuan, et al. Cathaysia Block: A young continent composed of ancient materials [J]. Geological Journal of China, 2006, 12 (4):440-447 (in Chinese with English abstract).
- [5] Cox K G, Bell J D, Pankhurst R J. The Interpretation of Igneous Rocks[M]. Allen, Unwin. 1979.
- [6] Sun S S, McDonough M J. Chemical and isotopic systematic of oceanic basalt: Implication for mantle composition and Processes[C] //Saunders, A D, Morry, M J(ed.). Magmatism in the Ocean Basin: Geological Society. London Special Publication, 1989: 528-548.
- [7] 柳小明,高山,袁洪林,等. 193nm LA-ICP-MS 对国际地质标准参考物质中 42 种主量和微量元素的分析[J]. 岩石学报, 2002, 18(3): 408-418.
Liu Xiaoming, Gao Shan, Yuan Honglin, et al. Analysis of 42 major and trace elements in glass standard reference materials by 193 nm LA-ICPMS [J]. Acta Petrologica Sinica, 2002, 18 (3):408-418(in Chinese with English abstract).
- [8] 李献华,李正祥,葛文春,等. 华南新元古代花岗岩的锆石 U-Pb

- 年龄及其构造意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2001, 20(4):271-273.
- Li Xianhua, Li Zhengxiang, Ge Wenchun, et al. U-Pb zircon ages of the Neoproterozoic granitoids in South China and their tectonic implications[J]. Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry, 2001, 20 (4):271-273(in Chinese with English abstract).
- [9] 吴荣新, 郑永飞, 吴元保. 皖南石耳山新元古代花岗岩锆石 U-Pb 定年以及元素和同位素地球化学研究 [J]. 高校地质学报, 2005, 11(3):364-382.
- Wu Rongxin, Zheng Yongfei, Wu Yuanbao. Zircon U-Pb age, element and oxygen isotope geochemistry of Neoproterozoic granites at Shiershan in South Anhui Province[J]. Geological Journal of China, 2005, 11(3):364-382(in Chinese with English abstract).
- [10] 吴荣新, 郑永飞, 吴元保. 皖南新元古代花岗闪长岩体锆石 U-Pb 定年以及元素和同位素地球化学研究[J]. 岩石学报, 2005, 21(3):587-606.
- Wu Rongxin, Zheng Yongfei, Wu Yuanbao. Zircon U-Pb age, element and oxygen isotope geochemistry of Neoproterozoic granodiorites in South Anhui [J]. Acta Petrologica Sinica, 2005, 21(3):587-606(in Chinese with English abstract).
- [11] 薛怀民, 马芳, 宋永勤, 等. 江南造山带东段新元古代花岗岩组合的年代学和地球化学: 对扬子与华夏地块拼合时间与过程的约束[J]. 岩石学报, 2010, 26(11):3215-3244.
- Xue Huaimin, Ma Fang, Song Yongqin, et al. Geochronology and geochemistry of the Neoproterozoic granitoid association from eastern segment of the Jiangnan orogen, China: Constraints on the timing and process of amalgamation between the Yangtze and Cathaysia blocks[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26 (11):3215-3244(in Chinese with English abstract).
- [12] 濮巍, 赵葵东, 凌洪飞, 等. 新一代高精度高灵敏度的表面热电离子质谱仪(Triton TI)的 Nd 同位素测定[J]. 地球学报, 2004, 25(2): 271-274.
- Pu Wei, Zhao Kuidong, Ling Hongfei, et al. High precision Nd isotope measurement by Triton TI mass spectrometry [J]. Acta Geoscientia Sinica, 2004, 25(2):271-274(in Chinese with English abstract).
- [13] 濮巍, 高剑峰, 赵葵东, 等. 利用 DCTA 和 HIBA 快速有效分离 Rb-Sr、Sm-Nd 的方法[J]. 南京大学学报, 2005, 41(4):445-450.
- Pu Wei, Gao Jianfeng, Zhao Kuidong, et al. Separation method of Rb-Sr, Sm-Nd using DCTA and HIBA [J]. Journal of Nanjing University, 2005, 41(4):445-450(in Chinese with English abstract).
- [14] Jahn B M, Condie K C. Evolution of the Kaapvaal Craton as viewed from geochemical and Sm-Nd isotopic analyses of intracratonic pelites [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1995, 59:2239-2258.
- [15] Jahn B M, Wu F Y, Lo C H, et al. Crust-mantle interaction induced by deep subduction of the continental crust: Geochemical and Sr-Nd isotopic evidence from post-collisional mafic-ultramafic intrusions of the northern Dabie complex, central China [J]. Chemical Geology, 1999, 157:119-146.
- [16] Ames L, Zhou G, Xiong B. Geochronology and isotopic character of ultrahigh-pressure metamorphism with implications for collision of the Sino-Korean and Yangtze Cratons, central China [J]. Tectonics, 1996, 15:472-489.
- [17] 薛怀民, 汪应庚, 马芳, 等. 高度演化的黄山 A 型花岗岩: 对扬子克拉通东南部中生代岩石圈减薄的约束 [J]. 地质学报, 2009, 83(2):247-260.
- Xue Huaimin, Wang Yinggeng, Ma Fang, et al. The Huangshan A-type granites with tetrad REE: Constraints on Mesozoic lithospheric thinning of the southeastern Yangtze craton?[J]. Acta Geologica Sinica, 2009, 83 (2):247-260 (in Chinese with English abstract).
- [18] 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.
- Hou Kejun, Li Yanhe, Zou Tianren, et al. Laser ablation-MC-ICP-MS technique for Hf isotope microanalysis of zircon and its geological applications [J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23 (10): 2595-2604 (in Chinese with English abstract).
- [19] 吴福元, 李献华, 郑永飞, 等. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用[J]. 岩石学报, 2007, 23(2):185-220.
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Zheng Yongfei, et al. Lu-Hf isotopic systematic and their applications in petrology [J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(2):185-220(in Chinese with English abstract).
- [20] Defant M J, Drummond M S. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subduction lithosphere [J]. Nature, 1990, 347:662-665.
- [21] 王强, 许继峰, 赵振华. 一种新的火成岩: 埃达克岩(adakite)的研究综述[J]. 地球科学进展, 2001, 16(2):201-208.
- Wang Qiang, Xu Jifeng, Zhao Zhenhua. The summary and comment on research on a new kind of igneous rock—adakite[J]. Advance in Earth Science, 2001, 16(2):201-208(in Chinese with English abstract).
- [22] 王强, 赵振华, 许继峰, 等. 扬子地块东部燕山期埃达克质岩与成矿[J]. 中国科学(D), 2002, (增刊):127-136.
- Wang Qiang, Zhao Zhenhua, Xu Jifeng, et al. Petrogenesis and metallogenesis of the Yanshanian adakite-like rocks in the Eastern Yangtze Block[J]. Science in China (D), 2002, 46(Supp.):127-136 (in Chinese with English abstract).
- [23] 张旗, 钱青, 王二七, 等. 燕山中晚期的中国东部高原: 埃达克岩的启示[J]. 地质科学, 2001, 36(2):248-255.
- Zhang Qi, Qian Qing, Wang Erchie, et al. An east China plateau in mid-late Yanshanian period: implication from adakites [J]. Scientia Geologica Sinica, 2001, 36 (2):248-255 (in Chinese with English abstract).
- [24] 张旗, 王焰, 钱青, 等. 中国东部中生代埃达克岩的特征及其构造-成矿意义[J]. 岩石学报, 2001, 17(2):236-244.
- Zhang Qi, Wang Yan, Qian Qing, et al. The characteristics and tectonic-metallogenic significances of the adakites in Yanshan period from eastern China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2001, 17(2): 236-244(in Chinese with English abstract).

- [25] 张旗, 王元龙, 王焰. 燕山期中国东部高原下地壳组成初探: 埃达克质岩 Sr:Nd 同位素制约[J]. 岩石学报, 2001, 17(4):236-244. Zhang Qi, Wang Yuanlong, Wang Yan. Preliminary study on the components of the lower crust in east China Plateau during Yanshanian period: Constraints on Sr and Nd isotopic compositions of adakite-like rocks [J]. Acta Petrologica Sinica, 2001, 17(2):236-244(in Chinese with English abstract).
- [26] 许继峰, 王强, 徐义刚, 等. 宁镇地区中生代安基山中酸性侵入岩的地球化学: 亏损重稀土和钇的岩浆产生的限制 [J]. 岩石学报, 2001, 17(4):576-584. Xu Jifeng, Wang Qiang, Xu Yigang, et al. Geochemistry of Anjishan intermediate-acid intrusive rocks in Ningzhen area: Constraint to origin of the magma with HREE and Y depletion [J]. Acta Petrologica Sinica, 2001, 17 (4):576-584 (in Chinese with English abstract).
- [27] 肖龙, Robert P R, 许继峰. 深部过程对埃达克质岩石成分的制约[J]. 岩石学报, 2004, 20(2):219-228. Xiao Long, Robert P R, Xu Jifeng. The role of deep processes controls on variation of compositions of adakitic rocks [J]. Acta Petrologica Sinica, 2004, 20(2):219-228(in Chinese with English abstract).
- [28] Martin H. Adakitic magmas: Modern analogues of Archean granitoids[J]. Lithos, 1999, 46:411-429.
- [29] Gromet L P, Silver L T. REE variations across the Peninsular Ranges Batholith: Implications for batholithic petrogenesis and crustal growth in magmatic arcs[J]. Journal of Petrology, 1987, 28: 75-125.
- [30] Atherton M P, Petford N. Generation of sodium-rich magmas from newly underplated basaltic crust [J]. Nature, 1993, 362:144-146.
- [31] Petford N, Atherton M. Na-rich partial melts from newly underplated basaltic crust: the Cordillera Blanca Batholith, Peru[J]. Journal of Petrology, 1996, 37:1491-1521.
- [32] Rapp R P. A review of experimental constraints on adakite petrogenesis [C]// Symposium on Adakite-like Rocks and Their Geodynamic Significance (Abstract). Beijing, China. 2001:10-12.
- [33] Kay R W, Kay S M. Andean adakites: Three ways to make them [J]. Acta Petrologica Sinica, 2002, 18(3):303-311.
- [34] Rapp R P, Watson E B. Dehydration melting of metabasalt at 8-21 kbar: Implications for continental growth and crust-mantle recycling [J]. Journal of Petrology, 1995, 36:891-931.
- [35] Rapp R P, Shimizu N, Norman M D, et al. Reaction between slab-derived melts and peridotites in the mantle wedge: Experimental constraints at 3.8 GPa [J]. Chemical Geology, 1999, 160:335-356.
- [36] Rapp R P, Xiao L, Shimizu N M. Experimental constraints on the origin of potassium-rich adakites in east China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2002, 18:29-311.
- [37] Petford N, Gallagher G. Partial melting of mafic (amphibolitic) lower crust by periodic influx of basaltic magma [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2001, 193:483-499.
- [38] Wang Q, Xu J F, Jian P, et al. Petrogenesis of adakitic porphyries in an extensional tectonic setting, Dexing, South China: Implications for the genesis of porphyry copper mineralization [J]. Journal of Petrology, 2006, 47:119-144.
- [39] Castillo P R. An overview of adakite petrogenesis [J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51:257-268.
- [40] Rapp R P, Watson E B, Miller C F. Partial melting of amphibolites/eclogite and the origin of Archean trondhjemites and tonalities [J]. Precambrian Research, 1991, 51:1-25.
- [41] Sen C, Dunn T. Dehydration melting of a basaltic composition amphibolites at 1.5 and 2.0 GPa: Implication for the origin of adakites [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1994, 117:394-409.
- [42] Rapp R P, Watson E B. Dehydration melting of metabasalt at 8-32 kbar: Implications for continental growth and crust-mantle recycling [J]. Journal of Petrology, 1995, 36: 891-931.
- [43] Rapp R P, Shimizu N, Norman M D, et al. Reaction between slab-derived melts and peridotite in the mantle wedge: Experimental constraints at 3.8 GPa [J]. Chemical Geology, 1999, 160: 335-356.
- [44] Xiong X L, Adam T J, Green T H. Rutile stability and rutile/melt HFSE partitioning during partial melting of hydrous basalt: Implications for TTG genesis [J]. Chemical Geology, 2005, 218: 339-359.
- [45] Xiong X L. Trace element evidence for growth of early continental crust by melting of rutile-bearing hydrous eclogite [J]. Geology, 2006, 34(11):945-948.
- [46] 薛怀民, 马芳, 宋永勤, 等. 江南造山带东段新元古代花岗岩组合的年代学和地球化学: 对扬子与华夏地块拼合时间与过程的约束[J]. 岩石学报, 2010, 26(11):3215-3244. Xue Huaimin, Ma Fang, Song Yongqin, et al. Geochronology and geochemistry of the Neoproterozoic granitoid association from eastern segment of the Jiangnan Orogen, China: Constraints on the timing and process of amalgamation between the Yangtze and Cathaysia blocks [J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26 (11):3215-3244(in Chinese with English abstract).
- [47] 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, 150:6-25.
- [48] 周翔, 余心起, 杨赫鸣, 等. 皖南绩溪县靠背尖高 Ba-Sr 花岗闪长斑岩年代学及其成因[J]. 岩石学报, 2012, 28(10): 3430-3417. Zhou Xiang, Yu Xinqi, Yang Heming, et al. Petrogenesis and geochronology of the high Ba-Sr Kaobeijian granodiorite porphyry, Jixi County, South Anhui Province [J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(10): 3430-3417(in Chinese with English abstract).
- [49] Xue H M, Wang Y G, Ma F, et al. Zircon U-Pb SHRIMP ages of the Taiping (calc-alkaline)-Huangshan (alkaline) composite intrusion: Constraints on Mesozoic lithospheric thinning of the southeastern Yangtze craton, China [J]. Science in China, 2009, 39 (7): 1756-1770.

- [50] Hollister L S. The role of melt in the uplift and exhumation of orogenic belts[J]. *Chemical Geology*, 1993, 108:31-48.
- [51] Zeng L S, Liu J, Gao L, et al. Early Oligocene anatexis in the Yadoi gneiss dome, southern Tibet and geological implications [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54(1):104-112.
- [52] 朱光, 刘国生. 皖南江南陆内造山带的基本特征与中生代造山过程[J]. *大地构造与成矿学*, 2000, 24(2):103-111.
Zhu Guang, Liu Guosheng. Basic characteristics and Mesozoic orogenic process of the Jiangnan intracontinental orogenic belt in Southern Anhui [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2000, 24 (2): 103-111(in Chinese with English abstract).
- [53] 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, 55: 1359-1383.
- [54] Waston E B, Harrison T M. Zircon thermometer reveals minimum melting conditions on earliest Earth [J]. *Science*, 2005, 308: 841-844.
- [55] Wang Q, Wyman D A, Xu J F, et al. Petrogenesis of Cretaceous adakitic and shoshonitic igneous rocks in the Luzong area, Anhui Province (Eastern China): Implications for geodynamics and Cu-Au mineralization[J]. *Lithos*, 2006, 89:424-446.
- [56] Wang Q, Xu J F, Jian P, et al. Petrogenesis of adakitic porphyries in an extensional tectonic setting, Dexing, South China: Implications for the genesis of porphyry copper mineralization [J]. *Journal of Petrology*, 2006, 47:119-144.
- [57] 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, 25:956-983.

Zircon U-Pb age and Sr, Nd, Hf isotope geochemistry of Jingde pluton in eastern Jiangnan orogen, South China

ZHOU Jie^{1,2}, JIANG Yao-hui¹, ZENG Yong², GE Wei-ya²

(1. State Key Laboratory for Mineral Deposits Research, School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, Jiangsu, China; 2. Nanjing Center of China Geological Survey, Nanjing 210016, Jiangsu, China)

Abstract: Jingde pluton is one of the Mesozoic plutons in eastern Jiangnan orogen of northeast Yangzte Block. New LA-ICPMS zircon U-Pb dating for one granodiorite yielded an emplacement age of (141.0 ± 1.0) Ma. The pluton is composed of monzogranite and granodiorite. New petrographical and petrochemical data show that the pluton is intermediate-somewhat acid ($\text{SiO}_2=66.01\% \sim 70.87\%$), and has high content of Al_2O_3 ($\text{Al}_2\text{O}_3=14.91\% \sim 16.24\%$) and rich alkali ($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O} = 6.64\% \sim 8.01\%$), with $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ value ranging from 0.78 to 1.04. The pluton has relatively low content of MgO , TFe_2O_3 and P_2O_5 ($\text{MgO} = 0.68\% \sim 1.06\%$, $\text{TFe}_2\text{O}_3=2.0\% \sim 3.34\%$, $\text{P}_2\text{O}_5 = 0.10\% \sim 0.14\%$). As for trace elements, the pluton is enriched in Sr ($189 \times 10^{-6} \sim 452 \times 10^{-6}$) with high Sr/Y ratios (23~66) and also enriched in light rare earth elements (LREE) ($(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 13 \sim 58$), but somewhat depleted in Nb, Ta, P, Ti, Y, Yb, with slightly negligible to positive Eu anomalies ($\delta \text{Eu}=0.81 \sim 1.18$), similar to the geochemical characteristics of Mesozoic adakitoid in eastern China. Jingde pluton has relatively high Nd isotopes ($\varepsilon_{\text{Nd}}(t)=-6.28 \sim -7.32$), high $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ values ($-6.5 \sim -1.1$) and younger t_{DM2} model ages (1.4~1.5Ga), with mafic microgranular enclaves (MMEs), suggesting the importance of mantle material in the magma source. The mafic magmas ascended and heated the lower crust, triggering the partial melting of the lower crust to form the Jingde pluton, with the input of mantle-derived materials.

Key words: Jingde pluton; geochemistry; zircon U-Pb age; Sr, Nd, Hf isotopes

About the first author: ZHOU Jie, female, born in 1979, assistant researcher, majors in mineralogy, petrology and mineral deposits; E-mail: zhoujie0517@sina.com.