

doi:10.3799/dqkx.2015.007

锆石 U-Pb 年代学和地球化学对浙皖 马鞍山高分异岩体成因的约束

张建芳, 汪隆武, 陈津华, 朱朝晖, 刘健, 章明圆

浙江省地质调查院, 浙江杭州 311203

摘要: 为了解由早期(伟晶、巨晶)斑状二长花岗岩、中期(细粒)花岗岩和晚期花岗(斑)岩脉组成的马鞍山杂岩体的成因, 采用 SHRIMP 和 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 法厘定其侵入时代, 年龄显示伟晶斑状二长花岗岩为 132.2 ± 1.6 Ma, 巨晶斑状二长花岗岩为 127.7 ± 1.2 Ma, 细粒花岗岩为 128.3 ± 1.1 Ma, 花岗斑岩脉为 127.4 ± 1.8 Ma. 岩石地球化学研究表明岩体从早到晚具有从钾玄岩系列向高钾钙碱系列演变特征, 分异演化程度逐渐变高; 斑状二长花岗岩具有高 REE 含量, 轻重稀土分异较为明显, 具较强负铕异常和弱右倾的配分曲线特征, 富集 K、Th、U、Rb 等元素, 弱亏损 Ba、Sr、P、Nb、Ta、Ti 等元素; 细粒花岗岩及花岗(斑)岩脉具有较低 REE 含量, 轻重稀土分异不明显, 具强负铕异常和“V”型配分曲线特征, 富集 K、Th、U、Rb 等元素, 强亏损 Ba、Sr、P、Nb、Ti 等元素. 马鞍山岩体为浙西北—皖南地区早白垩世俯冲造山后陆内拉张作用环境下地壳部分熔融的同源岩浆侵位结晶分异作用形成的产物, 具有高分异 I 型花岗岩的特征.

关键词: 锆石 U-Pb; 地球化学; 岩石成因; 马鞍山岩体; 浙皖相邻区.

中图分类号: P581

文章编号: 1000-2383(2015)01-0098-17

收稿日期: 2014-05-01

Genesis of Highly Fractionated Ma'anshan Rock in Zhejiang and Anhui Provinces Constrained by U-Pb Zircon Geochronology and Geochemistry

Zhang Jianfang, Wang Longwu, Chen Jinhua, Zhu Chaohui, Liu Jian, Zhang Mingyuan

Zhejiang Institute of Geological Survey, Hangzhou 311203, China

Abstract: To understand the genesis of Ma'anshan rock composed of early period pegmatite and megacryst porphyritic adamellite, medium period fine granite and late period granite porphyry dykes, intrusion epochs are confirmed using SHRIMP and LA-ICP-MS zircon U-Pb methods. The dating shows that the pegmatite porphyritic adamellite is 132.2 ± 1.6 Ma (MSWD=1.9, $n=11$), the megacrysts porphyritic adamellite 127.7 ± 1.2 Ma (MSWD=1.1, $n=10$), the fine-grained granite 128.3 ± 1.1 Ma (MSWD=1.7, $n=10$) and the granite porphyry dykes 127.4 ± 1.8 Ma (MSWD=0.77, $n=11$). Rock geochemistry shows that the rock from early to late has the characteristic of alkali series shoshonite series evolving to high potassium calc (during evolution), whereas the differentiation degree gradually increases. The porphyritic adamellites have the characteristics of high Σ REE content, obvious differentiation between light rare earth and heavy rare earth elements, with a strong negative Eu anomaly and weak rightward REE distribution patterns. It is enriched in elements of K, Th, U, Rb and weakly depleted in Ba, Sr, P, Nb, Ta, Ti. The fine-grained granite and granite porphyry dyke have the characteristics of lower Σ REE content, not obvious differentiation between light and heavy rare earth elements, with a strong negative Eu anomaly, and “V”-type REE distribution patterns. It is enriched in elements of K, Th, U, Rb, strongly depleted in Ba, Sr, P, Nb, Ti. Ma'anshan rock was formed by the function of partially molten magma emplacement successively crystallization differentiation and it is the product of intraconti-

基金项目: 中国地质调查局地质大调查项目 (No.1212011220527).

作者简介: 张建芳 (1985—), 男, 硕士, 工程师, 现从事区域地质矿产调查与研究. E-mail: zhjianfang@126.com

引用格式: 张建芳, 汪隆武, 陈津华, 等, 2015. 锆石 U-Pb 年代学和地球化学对浙皖马鞍山高分异岩体成因的约束. 地球科学——中国地质大学学报, 40(1): 98-114.

mental extension after the Early Cretaceous subduction orogeny in Northwest Zhejiang-South Anhui, with the characteristic of highly fractionated I-type granites.

Key words: zircon U-Pb; geochemistry; petrogenesis; Ma'anshan rock; Zhejiang and Anhui border area.

中国东南部燕山期火成岩地球化学及年代学研究表明,中晚侏罗世(165~145 Ma)火成岩主要以 S 型花岗岩为主(Collins *et al.*, 2007; Li *et al.*, 2007a; Zhu *et al.*, 2009),少量(高分异)I 型和 A 型花岗岩(张建芳等, 2013; 贾小辉等, 2014),但后期有一部分 S 型花岗岩被厘定为高分异 I 型(Li *et al.*, 2007b)或 A 型花岗岩(柏道远等, 2005);早白垩世(145~100 Ma)火成岩主要以 A 型花岗岩为主(李艳军等, 2010; 李良林等, 2013b),少量 S 型(赵鹏等, 2010)、I-A 复合型(邱检生等, 1999)或(高分异)I 型花岗岩(邱检生等, 2008).浙东南地区燕山期火山-岩浆活动活跃且研究程度较高,而浙西北地区相对要逊色得多且研究程度也较薄弱.近年来一些学者对浙西北地区部分燕山期侵入岩进行了年代学和地球化学研究,如中晚侏罗世的开化桐村地区 I 型花岗(斑)岩和建德岭后 I 型花岗闪长斑岩(江绍拼合带中西段铜多金属矿床区域成矿规律研究与成矿预测, 2013.中国地质大学(北京),浙江省第三地质大队,浙江省核工业二六九大队)、开岭脚一里陈家花岗闪长岩(汪建国等, 2010),早白垩世的开化里山岭 S 型花岗岩(陈帅奇等, 2011)、木瓜花岗斑岩(厉子龙等, 2013)、安吉港口五山关杂岩体(谢玉玲等, 2012; 唐燕文等, 2013)、莫干山 I 型花岗岩(章邦桐等, 2012)、白菊花尖 A 型花岗岩(Wong *et al.*, 2009)以及千亩田-夏色岭花岗岩(黄国成等, 2012a, 2012b)等,这些岩体较好地记录了浙西北及邻区乃至华南地区中生代以来地质构造格局及其转换过程.

马鞍山(刘村)岩体侵入于浙西北与皖东南交界处,出露面积大且岩性复杂,前人将其划分为中细一中粗粒似斑状二长花岗岩(旌德超单元-刘村单元)、似斑状钾长花岗岩(伏岭超单元-小昌溪单元)和细粒钾长花岗岩(伏岭超单元-饭蒸尖单元);并对极少量样品进行地球化学特征及成因分析,认为早期旌德超单元岩石为下地壳(斜长角闪岩)增厚熔融的产物(1:25 万宣城幅区域地质调查报告, 2003.安徽省地质调查院),且具有埃达克岩特征并发生过岩浆混合作用(周洁等, 2013, 2014);晚期伏岭超单元岩石可能为来自地幔岩浆或热源影响下的下地壳发生重熔的产物,具有造山期后 A 型花岗岩的特征.在 1:5 万野外地质矿产填图对马鞍山岩体

进行岩性解体的基础上,笔者拟对该区域各种岩性开展岩石学、地球化学及锆石 U-Pb 年代学研究,与周缘地区同期侵入岩特征进行对比,并深入探讨浙西北及邻区燕山期岩浆作用和构造演化.

1 地质背景及岩体特征

研究区位于下扬子陆块南东部的江南造山带(或江南古陆)北东端,区域南东侧为江山-绍兴断裂带与华夏陆块相邻(图 1a).江南造山带北东端主要分布古生代沉积地层和一系列不同规模侵入岩,该区燕山期岩浆活动频繁,在皖南地区出露有旌德、竹溪岭、牯牛降、月山复式岩体等,浙西北地区出露有马鞍山(刘村)、唐舍、统里庄、仙霞、五山关岩体等,岩性主要为二长花岗岩和花岗岩,具有多期次岩浆侵入的特征.马鞍山岩体出露面积约 71.02 km²,侵入于学川-湖州(孝丰)和绩溪-宁国北东向断裂之间的绩溪-宁国墩北东向复式背斜北东端,呈北东走向从浙西北延伸进入皖东南地区,岩体北西侧和南东侧均与下古生界围岩地层呈侵入接触.1:5 万地质矿产填图将岩体解体为早期(伟晶、巨晶)二长花岗岩、中期细粒花岗岩和晚期一系列北东向花岗(斑)岩脉(图 1b).

二长花岗岩:为岩体的主体岩性,伟晶或巨晶斑状花岗结构,块状构造;斑晶粒径较大,伟晶一般 > 3 cm(图 2a),大者可达 5 cm,巨晶为 1~3 cm(图 2b),主要为斜长石(5%~10%)和钾长石(2%~4%);基质一般为 3~8 mm,主要为石英(20%~25%)、钾长石(25%~30%)、斜长石(20%~25%)和黑云母(5%~10%),少量角闪石(1%~2%);副矿物主要为锆石和磷灰石等.石英呈他形粒状,部分呈不规则状镶嵌在钾长石中形成文象结构;黑云母主要沿长石、石英边缘空隙结晶(图 2g),呈片状集合体(图 2e);钾长石多呈他形粒状,斜长石呈板状,可见斜长石包裹早结晶钾长石呈环带生长(图 2f).

花岗岩:主要以小岩枝形式侵入于二长花岗岩内部或与围岩地层接触带附近侵位,呈不规则长条状,长宽均为 100~1 500 m.花岗岩呈细粒花岗结构,块状构造;造岩矿物主要为石英(30%~35%)、钾长石(45%~50%)和斜长石(15%~20%),少量

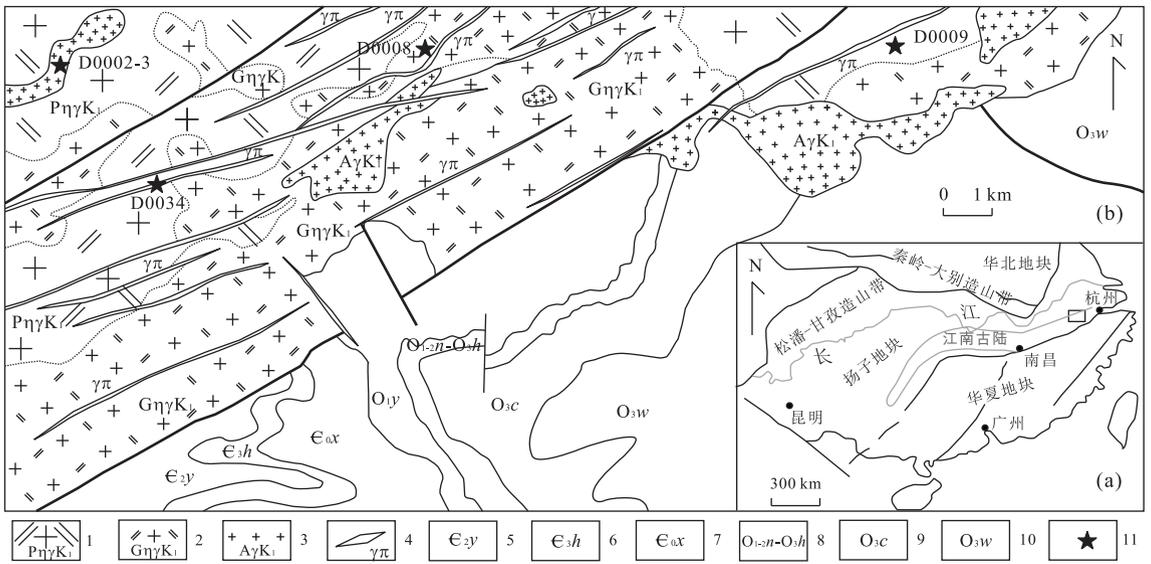


图 1 马鞍山岩体区域地质简图

Fig.1 Sketch geological map of the Ma'anshan pluton

1.伟晶斑状二长花岗岩;2.巨晶斑状二长花岗岩;3.细粒花岗岩;4.花岗斑岩脉;5.杨柳岗组;6.华严寺组;7.西阳山组;8.宁国组—黄泥岗组;9.长坞组;10.文昌组;11.采样位置

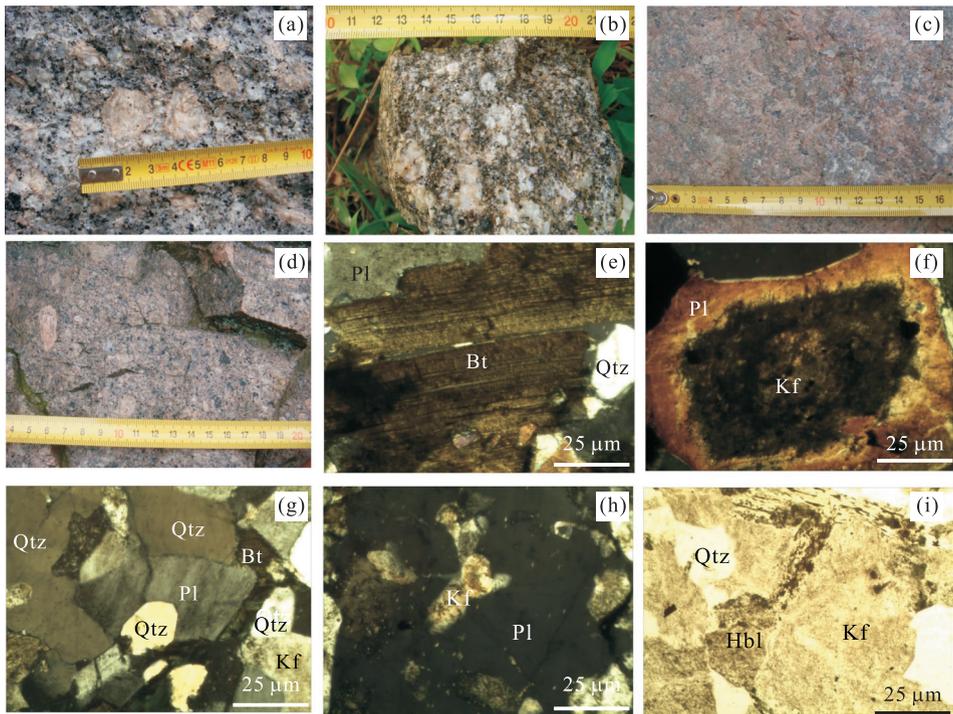


图 2 马鞍山岩体野外照片和岩相学显微照片

Fig.2 Field picture and microphotographs of the Ma'anshan pluton

a.伟晶斑状二长花岗岩;b.巨晶斑状二长花岗岩;c.细粒花岗岩;d.花岗斑岩脉;e.巨晶斑状二长花岗岩中黑云母(Bt)、斜长石(Pl)、石英(Qtz); f.巨晶斑状二长花岗岩中斜长石(Pl)包裹钾长石(Kf)核生长;g.伟晶斑状二长花岗岩中黑云母(Bt)沿石英(Qtz)、斜长石(Pl)和钾长石(Kf)接触边充填结晶;h.伟晶斑状二长花岗岩中斜长石(Pl)包裹钾长石(Hbl);i.细粒花岗岩中石英(Qtz)、钾长石(Kf)和角闪石(Hbl)

黑云母、角闪石等暗色矿物,副矿物为磷灰石、锆石等;矿物粒径一般 $< 2\text{ mm}$ (图 2c);石英呈他形粒状,

长石呈板条状,石英与长石呈等粒相间分布,两者接触边缘可见角闪石、黑云母等结晶(图 2i)。

花岗斑岩:呈脉状侵入于二长花岗岩和花岗岩中,侵入接触产状多为 $310^{\circ}\sim 330^{\circ}/50^{\circ}\sim 80^{\circ}$,界线平直清晰;脉岩长 1~10 km,宽 10~100 m.花岗斑岩呈斑状结构,斑晶分布不均匀,主要为钾长石(3%~10%)、石英(3%~5%)、斜长石(3%~5%)和少量黑云母,粒度一般为 0.6~1.5 mm,少数达 2.0 mm 左右(图 2d).基质成分主要为长石、石英,多呈微粒状出现,局部地方见有隐文象结构,粒度一般 <0.5 mm.

2 分析方法

样品主要采集于采石场、新建民房后面和公路边,以保证样品“新鲜”;对于部分表面风化的样品,首先切除表面的风化层部分,之后对岩石薄片进行显微观察,将挑选的每个“新鲜”样品称量约 1 kg,清洗烘干,无污染完全粉碎至 <200 μm ,使样品均匀且具有代表性.岩石地球化学测试在国土资源部杭州矿产资源监督检测中心完成,主量元素采用湿化学方法分析完成,测试仪器为 ZSX100eX 荧光光谱仪(BR00105),分析精度优于 1%;稀土微量元素采用 ICP-MS 方法分析完成,测试仪器为 Thermo X Series II 电感耦合等离子体质谱联用仪(SN01426C),分析精度优于 5%.

锆石 U-Pb 定年样品在河北省区域地质矿产调查研究所实验室挑选完成,由大约 5 kg 的样品经破碎、重砂淘选、电磁选后,在双目镜下挑选.选出的锆石在北京锆年领航科技有限公司用含有固化剂的环氧树脂胶制成样品靶,并打磨、抛光至锆石颗粒中心露出,并对锆石样品进行阴极发光(CL)图像及背散射电子(BSE)图像分析,研究其内部结构特征. SHRIMP 锆石 U-Pb 同位素定年在中国地质科学院地质研究所 SHRIMP-II 离子探针仪上进行,束斑大小为 30 μm ,具体测试条件及流程见文献(Liu *et al.*, 2006). LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄测定在南京大学内生金属矿床成矿作用国家重点实验室完成,ICP-MS 型号为 Agilent7500a 型,激光剥蚀系统为 New Wave 公司生产的 UP213 固体激光剥蚀系统;采用 He 气作为剥蚀物质的载气,仪器工作参数如下,激光脉冲重复频率 5 Hz,脉冲能量为 10~20 J/cm²,熔蚀孔径为 30~40 μm ,背景测量时间 40 s,剥蚀时间 60 s,积分时间²⁰⁶Pb、²⁰⁷Pb、²⁰⁸Pb、²³²Th 和²³⁸U 依次为 15、30、0、10 和 15 ms;质量分馏校正采用标样 GEMOC/GJ-1(Jackson *et al.*, 2004);分

析数据通过软件 GLITTER(Griffin *et al.*, 2008) 计算获得同位素比值、年龄,误差及 Th 和 U 含量. 用²⁰⁴Pb 进行普通铅校正,单个测试数据误差为 1σ ,²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄误差为 2σ .

3 分析结果

3.1 全岩地球化学

岩石主量、稀土、微量元素分析结果列于表 1. 马鞍山杂岩体均具有高 SiO₂ 含量(67.09%~76.74%)、富碱(Alk = K₂O + Na₂O, 8.02%~8.74%)、高 K₂O/Na₂O 比值(1.24%~1.78);低 MgO 含量(0.18%~1.26%)、低 P₂O₅ 含量(0.01%~0.2%)、低 TiO₂ 含量(0.06%~0.56%). 二长花岗岩、花岗岩和花岗斑岩分异指数 DI 均较高(分别为 78.62~89.28、93.73~95.01 和 94.61),与华南佛冈高分异 I 型花岗岩(82~94)(Li *et al.*, 2007b)相近. CIPW 标准矿物中部分样品出现了少量刚玉(0.16~0.47,个别为 1.63%)和透辉石分子(0.02~0.58,个别为 1.37%).

从早期伟晶-巨晶斑状二长花岗岩→中期细粒花岗岩→晚期花岗斑岩脉, SiO₂、K₂O 含量及 K₂O/Na₂O 比值、分异指数(DI)逐渐增大, TiO₂、Al₂O₃、TFeO、MgO、CaO、P₂O₅ 含量逐渐减小,而 MnO、Na₂O 含量变化不大(表 1). 在 Hark 图解中(图 3), Al₂O₃、CaO、MgO、FeO、TiO₂、P₂O₅、Fe₂O₃ 与 SiO₂ 都呈负相关关系, K₂O 与 SiO₂ 呈弱正相关关系, Na₂O 与 SiO₂ 关系不明显,反映了随着分异演化程度越充分,岩性向酸性方向演化,碱度无太大变化. A/CNK 值为 0.95~1.14,逐渐增大,具有从准铝质向弱过铝质演化特征(图 4a). 里特曼指数(δ)为 1.92~2.77,具有从钾玄岩系列向高钾钙碱性系列演化特征(图 4b). 三者的 TFeO/(TFeO+MgO) 比值分别为 0.75~0.81(0.77)、0.77~0.89(0.81) 和 0.80. TFeO/MgO 比值分别为 3.04~4.37、3.36~7.77 和 3.93,其平均值均与 I 型花岗岩平均值(2.27)(Whalen *et al.*, 1987)相近,而与 A 型花岗岩平均值(13.4)(Turner *et al.*, 1992)相差较大.

伟晶、巨晶斑状二长花岗岩具有高 Σ REE 含量($218.89 \times 10^{-6} \sim 283.63 \times 10^{-6}$),球粒陨石标准化稀土配分曲线具有弱右倾的特征,轻重稀土分异较为明显, La_N/Yb_N 为 4.53~11.18, δEu 为 0.19~0.52,具较强负铕异常. 富集 K、Th、U、Rb,弱亏损

表 1 岩体主量(%)、稀土微量(10^{-6})化学分析数据Table 1 Major element (%) and trace element (10^{-6}) compositions of granites

样号	巨晶斑状二长花岗岩		伟晶斑状二长花岗岩		细粒花岗岩				花岗斑岩
	D0008	D0031	D0001	D0009	D0002	D0002-3	D0007	D0030	D0034
SiO ₂	67.09	73.98	67.79	69.31	75.86	76.51	74.47	76.17	76.74
TiO ₂	0.56	0.15	0.47	0.40	0.09	0.06	0.23	0.07	0.07
Al ₂ O ₃	14.90	13.61	14.63	14.75	12.12	12.55	12.73	12.74	12.66
Fe ₂ O ₃	1.20	0.35	1.07	0.76	0.91	0.23	1.24	0.61	0.81
FeO	2.75	1.19	2.45	2.23	0.58	0.43	0.56	0.36	0.11
MnO	0.10	0.06	0.08	0.08	0.03	0.04	0.06	0.05	0.04
MgO	1.26	0.34	1.08	0.86	0.18	0.19	0.50	0.21	0.21
CaO	2.60	1.49	2.36	2.20	0.71	0.89	0.48	0.80	0.40
Na ₂ O	3.53	3.68	3.34	3.51	3.61	3.48	3.74	3.25	2.90
K ₂ O	4.64	4.57	4.68	4.91	5.08	4.68	5.00	5.22	5.14
P ₂ O ₅	0.20	0.05	0.20	0.14	0.01	0.01	0.08	0.02	0.02
H ₂ O ⁺	0.60	0.40	2.10	0.50	0.60	0.50	0.80	0.40	0.70
Ba	820.00	243.00	762.00	738.00	55.60	22.60	237.00	68.90	135.00
Rb	158.90	192.30	190.80	181.90	351.90	252.30	190.80	255.30	234.40
Sr	210.70	57.20	264.82	163.30	51.21	23.76	54.61	20.32	25.48
Y	37.69	58.03	39.74	42.42	35.47	32.95	28.14	56.30	48.36
Zr	237.00	124.00	210.86	195.00	52.41	64.00	122.00	87.00	100.00
Nb	18.86	18.91	13.88	18.33	11.12	13.78	18.28	22.43	26.28
Th	11.93	13.26	18.06	13.36	18.90	22.13	16.57	20.51	20.95
Hf	9.34	5.65	7.21	7.11	2.46	2.88	4.85	4.72	4.40
Ta	0.74	0.87	1.29	1.15	2.12	1.11	1.57	3.69	2.40
Li	45.90	48.32	—	52.84	—	9.49	19.13	57.29	8.09
Ga	20.00	19.20	—	20.10	—	15.60	17.40	17.00	15.50
Cd	0.11	0.07	—	0.04	—	0.02	0.04	0.08	0.01
Au	0.26	0.27	—	0.35	—	0.53	0.31	0.46	0.57
Cu	7.25	1.92	—	6.53	—	1.42	3.13	1.20	1.33
Pb	20.00	28.00	—	23.00	—	41.00	33.00	35.00	31.00
Zn	62.82	32.97	—	56.39	—	14.68	42.11	22.75	23.70
Ag	0.05	0.04	—	0.06	—	0.03	0.12	0.06	0.09
Sn	4.83	3.59	—	4.56	—	3.69	5.21	8.84	4.14
Be	3.73	4.27	—	4.37	—	5.06	2.91	7.19	2.59
Mo	0.54	0.18	—	1.13	—	0.29	0.13	0.18	0.22
Cs	7.12	6.23	—	7.21	—	5.23	2.86	15.37	3.85
W	0.50	0.06	—	7.06	—	0.42	1.75	2.39	1.12
U	3.49	3.00	—	4.32	—	10.12	4.22	7.78	5.01
La	48.18	39.23	59.36	46.17	14.60	12.90	18.21	12.06	19.95
Ce	96.00	83.10	123.59	92.91	31.86	32.32	43.76	27.52	39.27
Pr	11.60	10.30	14.40	11.10	4.75	4.64	4.64	3.87	5.71
Nd	46.98	41.19	49.93	45.48	19.34	20.23	18.68	17.04	23.92
Sm	8.92	9.46	8.81	8.97	4.58	4.82	3.87	4.99	6.02
Eu	1.37	0.56	1.44	1.29	0.35	0.27	0.46	0.25	0.42
Gd	7.52	8.33	7.95	7.66	3.84	4.20	3.54	4.80	5.80
Tb	1.13	1.55	1.21	1.20	0.78	0.76	0.68	1.05	1.13
Dy	6.55	9.33	6.95	7.15	4.95	4.65	4.29	7.38	7.15
Ho	1.29	1.88	1.30	1.43	1.02	0.99	0.91	1.66	1.52
Er	3.80	5.90	3.80	4.30	3.20	3.30	3.00	5.60	4.90
Tm	0.54	0.91	0.57	0.63	0.56	0.55	0.48	0.99	0.77
Yb	3.48	6.22	3.81	4.14	4.21	3.99	3.59	7.40	5.41
Lu	0.51	0.92	0.52	0.60	0.64	0.64	0.56	1.15	0.82
δEu	0.50	0.19	0.52	0.46	0.25	0.18	0.38	0.15	0.21
LREE	213.08	183.86	257.52	205.95	75.48	75.17	89.62	65.73	95.29
HREE	24.81	35.03	26.11	27.12	19.22	19.11	17.08	30.05	27.50
L/H	8.59	5.25	9.86	7.59	3.93	3.93	5.25	2.19	3.47
(La/Yb) _N	9.92	4.53	11.20	8.00	2.49	2.32	3.64	1.17	2.64
ΣREE	237.90	218.90	283.60	233.10	94.70	94.28	106.70	95.77	122.80

注: D0001、D0002 为国土资源部合肥矿产资源监督检测中心测试; 其中 Au 单位为 10^{-9} , “—”为未分析。

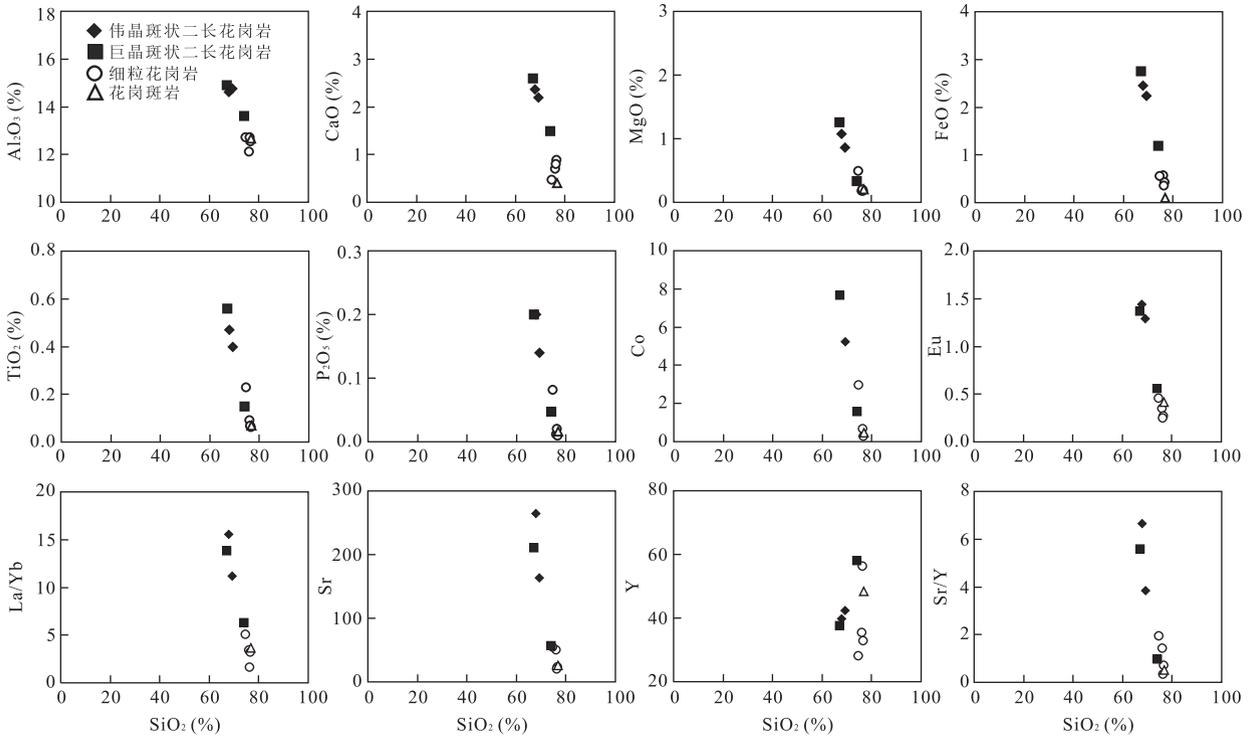


图 3 马鞍山岩体 SiO₂ 哈克图解

Fig.3 Hark diagrams for SiO₂ of the Ma'anshan pluton

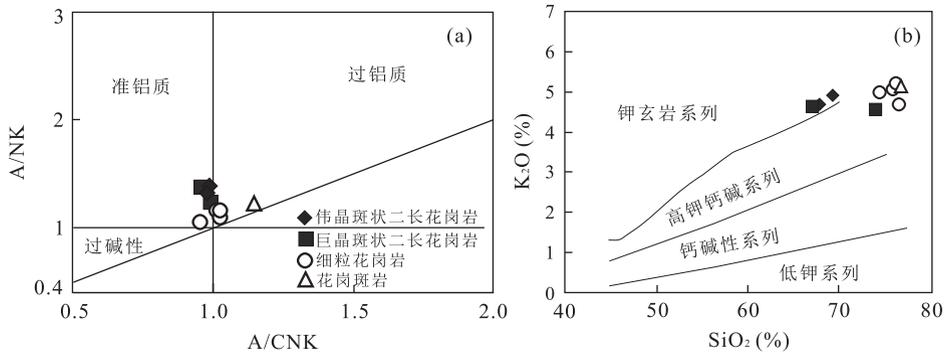


图 4 A/CNK-A/NK 图解 (a) 和 SiO₂-K₂O 图解 (b)

Fig.4 A/CNK vs. A/NK diagram (a) and SiO₂ vs. K₂O diagram (b)

Ba 等大离子亲石元素; 弱亏损 Sr、P、Nb、Ta、Ti 等高场强元素。细粒花岗岩及花岗(斑)岩脉具有较低 Σ REE 含量 ($94.28 \times 10^{-6} \sim 122.78 \times 10^{-6}$), 球粒陨石标准化稀土配分曲线具有“V”型特征, 轻重稀土分异不明显, La_N/Yb_N 为 1.17~3.64, δEu 为 0.15~0.38, 具强负铕异常。同样富集 K、Th、U、Rb 等大离子亲石元素, 但强亏损 Ba 元素; 强亏损 Sr、P、Nb、Ti 等高场强元素(图 5)。

3.2 锆石 U-Pb 定年

斑状二长花岗岩中的锆石多呈不规则长条状, 长度为 100~200 μm , 长宽比为 2:1, 锆石环带结构

发育。细粒花岗岩中的锆石多呈不规则短条状、粒状, 长度一般为 50~100 μm , 极少量长为 100~200 μm , 长宽比为 2:1~1:1, 锆石环带结构也较为发育。花岗斑岩脉中的锆石多呈不规则长柱状、短柱状和粒状, 长度为 50~200 μm , 长宽比为 3:1~1:1, 锆石环带结构也较为发育(图 6)。锆石颗粒的测试结果见表 2。伟晶斑状二长花岗岩、巨晶斑状二长花岗岩、细粒花岗岩和花岗斑岩脉中的锆石 U 含量分别为 $(242 \sim 2041) \times 10^{-6}$ 、 $(100 \sim 2886) \times 10^{-6}$ 、 $(114 \sim 1863) \times 10^{-6}$ 、 $(122 \sim 836) \times 10^{-6}$, Th 含量分别为 $(97 \sim 349) \times 10^{-6}$ 、 $(38 \sim 499) \times 10^{-6}$ 、

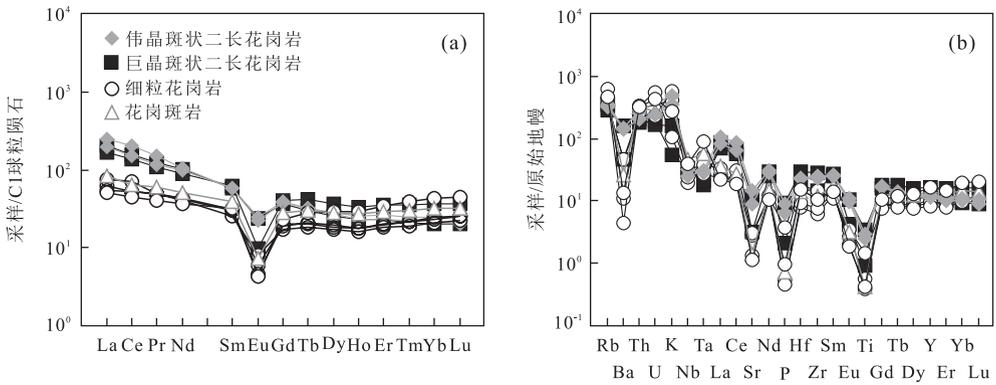


图 5 稀土元素球粒陨石标准化配分型式(a)及微量元素原始地幔标准化蛛网图(b)

Fig.5 Chondrite-normalized REE distribution patterns (a) and primitive mantle-normalized trace element spidergrams (b)

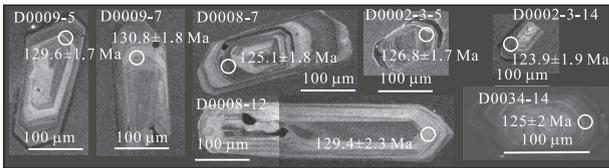


图 6 马鞍山岩体样品主要锆石点 CL 图像和分析位置

Fig.6 Cathodoluminescence (CL) images, localities of the points for measurements of representative detected zircons from the Ma'anshan pluton

$(52\sim 497)\times 10^{-6}$ 、 $(84\sim 1118)\times 10^{-6}$ ，Th/U 比值分别为 0.11~0.41、0.16~1.05、0.22~0.97 和 0.54~1.62，为典型岩浆锆石特征 (Hoskin *et al.*, 2003)。样品点多投影在谐和线上或附近， $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄分别为 $132.2\pm 1.6\text{ Ma}$ (MSWD = 1.9)、 $127.7\pm 1.2\text{ Ma}$ (MSWD = 1.3)、 $128.3\pm 1.1\text{ Ma}$ (MSWD = 1.7) 和 $127.4\pm 1.8\text{ Ma}$ (MSWD = 0.77) (图 7)，代表了马鞍山岩体的结晶年龄。其中样品点 D0009-14 和 D0002-3-8 的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄分别为 414.0 Ma 和 310.5 Ma，显示出较老的年龄结果，可能为捕获锆石。

4 讨论

4.1 岩石成因类型

高分异 I 型和 S 型花岗岩与 A 型花岗岩的地球化学特征及矿物学特征十分相似 (King *et al.*, 1997)。马鞍山岩体具有高 SiO_2 含量 (67.09%~76.74%，平均 73.10%)、高碱 ($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 为 8.02%~8.74%) 和高 FeOT/MgO 比值 (3.04~7.77)、高分异指数 (78.62~95.01，平均 89.1) 特征，表明它们经历了高程度结晶分异作用。研究表明，磷

灰石在准铝质—弱过铝质岩浆中溶解度很低，且随岩浆分异过程中 SiO_2 含量增加而降低，但在强过铝质岩浆中磷灰石溶解度随 SiO_2 含量增加而增加 (Wolf *et al.*, 1994)，因此 P_2O_5 与 SiO_2 含量随岩浆分异演化的变化趋势可以用来区分 I 型、A 型花岗岩和 S 型花岗岩类 (King *et al.*, 1997; Wu *et al.*, 2003; Li *et al.*, 2007b)。马鞍山岩体为准铝质—弱过铝质岩石 ($\text{A}/\text{CNK} < 1.1$)，具有较低的 P_2O_5 含量 (0.01%~0.20%)，且从二长花岗岩到花岗岩，再到花岗斑岩脉， SiO_2 含量逐渐增加，而 P_2O_5 含量逐渐降减少，与 I 型花岗岩演化趋势相同。此外，研究认为在准铝质岩浆演化的早期 Th 和 Y 富集的矿物不会优先结晶，因此高分异 I 型花岗岩的 Th 和 Y 含量往往较高，且与 Rb 含量呈正相关 (Li *et al.*, 2007b)，微量元素表明马鞍山岩体具有较高 Th 含量 (11.93~22.13) 和高 Y 含量 (28.14~58.03)，并与 Rb 含量 (158.9~351.9) 也具有正比关系。马鞍山岩体 $10\,000\times \text{Ga}/\text{Al}$ 比值为 2.31~2.67，平均为 2.50，总体小于 A 型花岗岩的比值 (> 2.60)，且具有高 FeOT/MgO 比值 (3.04~7.77)，与华南佛冈高分异 I 型花岗岩 (Li *et al.*, 2007b) 和西藏冈底斯东部察隅高分异 I 型花岗岩特征 (Zhu *et al.*, 2009) 相似。在 $\text{FeOT}/\text{MgO}-10\,000\times \text{Ga}/\text{Al}$ 、 $10\,000\times \text{Ga}/\text{Al}-\text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y}$ 及 $(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})/\text{CaO}-\text{Al}-\text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y}$ 等图解 (图 8) 中也主要落在高分异 I 型花岗岩区域。因此认为马鞍山岩体很可能为高分异 I 型花岗岩，其与 A 型花岗岩 (Wong *et al.*, 2009; 谢建成等, 2012a) 共同发育于早白垩世的浙西北地区及邻区中。

4.2 岩石成因及演化关系

马鞍山岩体由早期伟晶—巨晶斑状二长花岗

表 2 马鞍山岩体锆石 SHRIMP 和 LA-ICP-MS U-Pb 测试结果
Table 2 Zircon SHRIMP and LA-ICP-MS U-Pb data of Ma'anshan rock

点号	$^{206}\text{Pb}_e$ (%)	U(10^{-6})	Th(10^{-6})	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}^* (10^{-6})$	$^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}^*$	SHRIMP U-Pb 同位素比值				年龄(Ma)			
							$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$	$\pm\%$	$\pm\%$		
D0009 伟晶斑状二长花岗岩, 11 个测点(不包括 1、4、14)加权平均年龄 132.2 ± 1.6 Ma, MSWD=1.9														
D0009-1	0.09	1 218	208	0.18	22.50	46.61	1.2	0.048 86	1.7	0.144 6	2.1	0.021 46	1.2	136.9 \pm 1.7
D0009-2	0.14	1 220	213	0.18	21.90	47.99	1.2	0.048 20	2.2	0.138 5	2.5	0.020 84	1.2	133.0 \pm 1.6
D0009-3	—	1 094	120	0.11	19.80	47.35	1.2	0.048 98	1.6	0.142 6	2.0	0.021 12	1.2	134.7 \pm 1.6
D0009-4	—	1 635	265	0.17	30.40	46.23	1.2	0.049 18	1.3	0.146 7	1.8	0.021 63	1.2	138.0 \pm 1.7
D0009-5	0.46	500	144	0.30	8.76	49.26	1.3	0.046 20	3.3	0.129 3	3.6	0.020 30	1.3	129.6 \pm 1.7
D0009-6	0.44	971	349	0.37	17.40	48.28	1.2	0.046 50	2.3	0.132 9	2.7	0.020 71	1.2	132.1 \pm 1.6
D0009-7	0.48	411	138	0.35	7.27	48.78	1.4	0.045 80	6.4	0.129 4	6.6	0.020 50	1.4	130.8 \pm 1.8
D0009-8	—	242	97	0.41	4.32	47.91	1.4	0.051 60	3.3	0.148 5	3.6	0.020 87	1.4	133.2 \pm 1.9
D0009-9	—	580	229	0.41	10.10	49.13	1.3	0.048 70	2.3	0.136 7	2.6	0.020 36	1.3	129.9 \pm 1.6
D0009-10	0.76	402	148	0.38	7.02	49.54	1.7	0.044 60	4.4	0.124 0	4.7	0.020 19	1.7	128.8 \pm 2.1
D0009-11	0.44	859	230	0.28	15.70	47.19	1.3	0.046 60	4.5	0.136 0	4.7	0.021 19	1.3	135.2 \pm 1.7
D0009-12	0.56	723	186	0.27	12.70	49.19	1.3	0.047 70	3.1	0.133 7	3.4	0.020 33	1.3	129.7 \pm 1.6
D0009-13	—	2 041	306	0.15	37.20	47.14	1.2	0.049 28	1.8	0.144 1	2.2	0.021 21	1.2	135.3 \pm 1.6
D0009-14	0.36	340	101	0.31	19.40	15.08	1.3	0.053 80	2.2	0.492 0	2.5	0.066 32	1.3	414.0 \pm 5.1
D0008 巨晶斑状二长花岗岩, 10 个测点(不包括 1、2、3、9)加权平均年龄 127.7 ± 1.2 Ma, MSWD=1.1														
D0008-1	0.03	1 819	448	0.25	33.40	46.74	1.2	0.047 62	1.4	0.140 5	1.8	0.021 39	1.2	136.5 \pm 1.6
D0008-2	0.37	1 337	210	0.16	24.10	47.88	1.3	0.046 87	1.5	0.135 0	2.0	0.020 88	1.3	133.2 \pm 1.7
D0008-3	0.11	2 886	499	0.18	54.10	45.89	1.2	0.047 01	1.1	0.141 2	1.6	0.021 79	1.2	139.0 \pm 1.6
D0008-4	0.34	400	131	0.34	6.83	50.43	1.3	0.045 80	5.6	0.125 1	5.8	0.019 83	1.3	126.6 \pm 1.7
D0008-5	1.62	114	38	0.34	1.92	51.82	1.8	0.042 90	12.0	0.114 0	12.0	0.019 30	1.8	123.2 \pm 2.1
D0008-6	0.85	326	107	0.34	5.65	49.97	1.4	0.043 50	5.8	0.120 1	5.9	0.020 01	1.4	127.7 \pm 1.8
D0008-7	—	260	110	0.44	4.37	51.02	1.4	0.052 60	5.4	0.142 0	5.6	0.019 60	1.4	125.1 \pm 1.8
D0008-8	0.05	256	123	0.50	4.46	49.38	1.5	0.049 20	9.2	0.137 0	9.3	0.020 25	1.5	129.2 \pm 1.9
D0008-9	—	758	153	0.21	13.80	46.99	1.3	0.050 80	3.1	0.149 0	3.4	0.021 28	1.3	135.8 \pm 1.7
D0008-10	—	454	112	0.26	7.90	49.34	1.3	0.053 10	2.4	0.148 3	2.8	0.020 27	1.3	129.4 \pm 1.7
D0008-11	—	155	63	0.42	2.64	50.30	2.6	0.051 20	4.2	0.140 2	5.0	0.019 86	2.6	126.8 \pm 3.3
D0008-12	0.30	100	102	1.05	1.75	49.30	1.8	0.052 50	9.8	0.147 0	9.9	0.020 28	1.8	129.4 \pm 2.3
D0008-13	0.91	208	92	0.46	3.63	49.69	1.9	0.044 00	23.0	0.121 0	23.0	0.020 13	1.9	128.5 \pm 2.4
D0008-14	0.86	225	144	0.66	3.98	48.93	1.5	0.043 90	6.6	0.123 6	6.8	0.020 44	1.5	130.4 \pm 1.9
D0002-3 细粒花岗岩, 10 个测点(不包括 1、4、6、8)加权平均年龄 128.3 ± 1.1 Ma, MSWD=1.7														
D0002-3-1	0.36	286	267	0.97	5.34	46.19	1.4	0.048 60	10.0	0.145 0	10.0	0.021 65	1.4	138.1 \pm 1.9
D0002-3-2	1.05	520	158	0.31	9.01	50.17	1.4	0.043 30	13.0	0.119 0	13.0	0.019 93	1.4	127.2 \pm 1.7
D0002-3-3	0.45	536	294	0.57	9.40	49.21	1.2	0.044 60	5.3	0.125 1	5.5	0.020 32	1.2	129.7 \pm 1.6
D0002-3-4	1.20	1 240	497	0.41	22.90	47.10	1.2	0.045 40	4.8	0.133 0	4.9	0.021 23	1.2	135.4 \pm 1.5

续表 2

点号	206Pb _c (%)	U(10 ⁻⁶)	Th(10 ⁻⁶)	232Th/238U	206Pb*(10 ⁻⁶)	SHRIMP U-Pb 同位素比值				年龄(Ma)						
						238U/206Pb*	±%	207Pb*/206Pb*	±%	207Pb*/235U	±%	206Pb*/238U	±%			
D0002-3 细粒花岗岩, 10 个测点(不包括 1、4、6、8)加权平均年龄 128.3±1.1 Ma, MSWD=1.7																
D0002-3-5	0.38	1 217	342	0.29	20.90	50.33	1.3	0.046 10	3.0	0.126 4	3.3	0.019 87	1.3	126.8±1.7		
D0002-3-6	0.23	1 863	461	0.26	33.90	47.27	1.1	0.048 16	1.9	0.140 5	2.2	0.021 16	1.1	135.0±1.5		
D0002-3-7	2.61	1 067	243	0.23	19.30	48.71	1.2	0.042 20	9.2	0.120 0	9.3	0.020 53	1.2	131.0±1.6		
D0002-3-8	0.58	114	61	0.55	4.86	20.26	1.7	0.058 70	10.0	0.400 0	10.0	0.049 35	1.7	310.5±5.1		
D0002-3-9	0.10	866	183	0.22	15.10	49.18	1.2	0.049 30	3.2	0.138 1	3.4	0.020 33	1.2	129.8±1.5		
D0002-3-10	1.35	166	52	0.32	2.86	50.64	1.5	0.036 20	9.0	0.098 6	9.2	0.019 75	1.5	126.1±1.9		
D0002-3-11	0.41	889	267	0.31	15.40	49.82	1.2	0.046 20	3.4	0.127 9	3.6	0.020 07	1.2	128.1±1.5		
D0002-3-12	2.80	161	114	0.73	2.83	50.07	1.8	0.034 40	25.0	0.095 0	25.0	0.019 97	1.8	127.5±2.3		
D0002-3-13	5.49	248	81	0.34	4.67	48.31	1.8	0.029 00	42.0	0.081 0	42.0	0.020 70	1.8	132.1±2.3		
D0002-3-14	0.88	440	137	0.32	7.40	51.60	1.5	0.045 50	8.7	0.122 0	8.9	0.019 38	1.5	123.7±1.9		
La-ICP-MS U-Pb 同位素比值																
点号	U(10 ⁻⁶)	Th(10 ⁻⁶)	Th/U	207Pb/206Pb	±%	206Pb/238U	±%	208Pb/232Th	±%	207Pb/206Pb	±%	207Pb/235U	±%	206Pb/238U	±%	年龄(Ma)
D0034 花岗岩岩脉, 11 个测点(不包括 4、6~10)加权平均年龄 127.4±1.8 Ma, MSWD=0.77																
D0034-1	343	240	0.70	0.048 30±0.005 49	0.135 56±0.015 31	0.020 36±0.000 43	0.007 23±0.001 86	114±210	129±14	130±3	146±37					
D0034-2	406	274	0.68	0.047 86±0.005 52	0.131 34±0.015 06	0.019 91±0.000 46	0.004 18±0.000 67	92±210	125±14	127±3	84±13					
D0034-3	671	513	0.76	0.049 49±0.005 94	0.135 69±0.016 05	0.019 88±0.000 56	0.004 14±0.000 98	171±213	129±14	127±4	84±20					
D0034-4	690	1 118	1.62	0.112 97±0.004 46	0.327 33±0.012 77	0.021 02±0.000 42	0.005 40±0.000 68	1 848±42	288±10	134±3	109±14					
D0034-5	325	175	0.54	0.047 35±0.004 85	0.130 57±0.013 34	0.020 00±0.000 38	0.004 46±0.000 89	67±192	125±12	128±2	90±18					
D0034-6	179	166	0.93	0.048 20±0.010 54	0.141 60±0.030 77	0.021 30±0.000 64	0.005 65±0.001 28	109±341	134±27	136±4	114±26					
D0034-7	221	197	0.89	0.050 30±0.007 25	0.151 59±0.021 74	0.021 86±0.000 51	0.006 98±0.001 24	209±271	143±19	139±3	141±25					
D0034-8	219	204	0.93	0.050 03±0.012 05	0.147 13±0.035 12	0.021 32±0.000 77	0.006 83±0.002 56	196±380	139±31	136±5	138±51					
D0034-9	693	634	0.92	0.047 54±0.003 87	0.144 32±0.011 64	0.022 02±0.000 48	0.003 96±0.000 66	76±137	137±10	140±3	80±13					
D0034-10	836	669	0.80	0.047 56±0.002 09	0.141 20±0.006 25	0.021 53±0.000 34	0.006 12±0.000 99	77±70	134±6	137±2	123±20					
D0034-11	264	196	0.74	0.047 90±0.007 36	0.135 96±0.020 73	0.020 59±0.000 51	0.010 18±0.002 69	94±261	129±19	131±3	205±54					
D0034-12	221	159	0.72	0.048 86±0.006 87	0.134 96±0.018 88	0.020 03±0.000 43	0.009 45±0.002 49	141±256	129±17	128±3	190±50					
D0034-13	144	101	0.70	0.047 94±0.012 44	0.135 72±0.035 03	0.020 53±0.000 66	0.011 18±0.003 19	96±397	129±31	131±4	225±64					
D0034-14	422	353	0.84	0.047 49±0.004 34	0.128 44±0.011 67	0.019 61±0.000 38	0.009 02±0.002 30	74±165	123±11	125±2	181±46					
D0034-15	195	172	0.88	0.047 76±0.011 67	0.132 92±0.032 24	0.020 19±0.000 69	0.010 74±0.002 95	87±368	127±29	129±4	216±59					
D0034-16	122	84	0.69	0.047 89±0.014 29	0.129 63±0.038 48	0.019 63±0.000 68	0.008 28±0.002 70	94±447	124±35	125±4	167±54					
D0034-17	272	170	0.63	0.048 60±0.010 18	0.126 71±0.026 31	0.018 91±0.000 62	0.007 69±0.002 32	129±330	121±24	121±4	155±47					

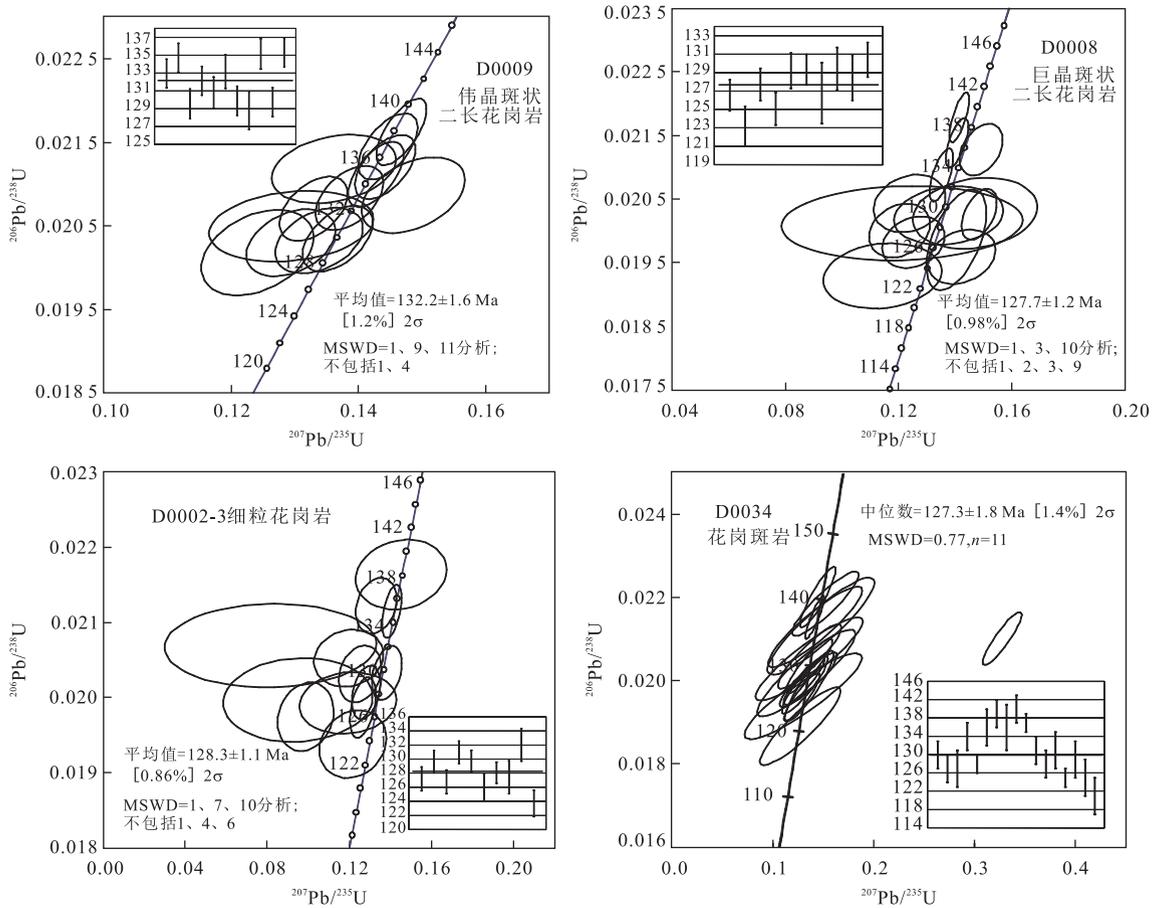


图 7 马鞍山岩体锆石 U-Pb 谐和曲线

Fig.7 U-Pb Concordia diagrams of zircons from the Ma'anshan pluton

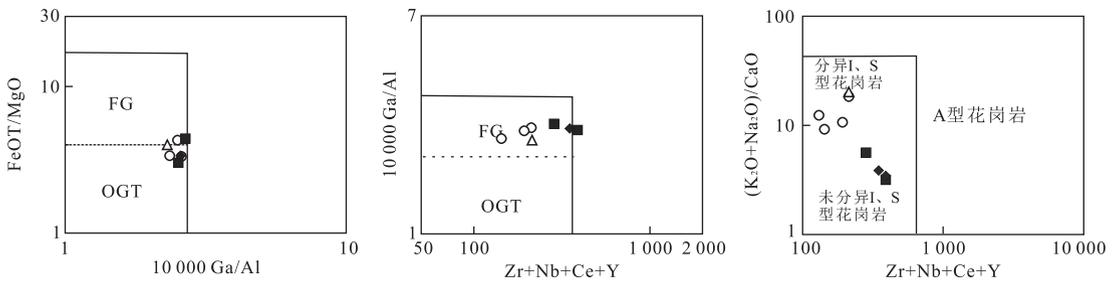


图 8 马鞍山岩体分异判别图解(图例同图 3)

Fig.8 Fractionated discrimination diagrams of the Ma'anshan pluton

FG:分异的 I 型花岗岩;OGT-I,S,M 型花岗岩

岩、中期细粒花岗岩及晚期一系列北东走向花岗(斑)岩脉组成,成岩时代在误差范围内具有一致性,表明它们是在较短的时间内先后侵位.分异指数(DI)逐渐变大的变化规律(78.62~89.28、93.73~95.01 和 94.61)表明马鞍山岩体的侵入时间顺序依次为伟晶-巨晶斑状二长花岗岩、细粒花岗岩、花岗斑岩脉,侵位增生方具有“内侵式”特征(冯佐海等, 2009),这与野外地质侵入的空间顺序特征一致:外

围为伟晶-巨晶斑状二长花岗岩,中间细粒花岗岩“推挤”侵位,最后花岗(斑)岩呈北东脉束状形式叠加侵位其中.

岩石化学成分和微量元素也显示马鞍山岩体从早期二长花岗岩到中-晚期细粒花岗岩和花岗(斑)岩脉, SiO₂、K₂O 和 Rb 等含量逐渐增加, Al₂O₃、CaO、FeO_T、TiO₂ 和 P₂O₅ 等含量逐渐减少,在 SiO₂ 哈克图解中具有明显的线性关系(图 3),各岩

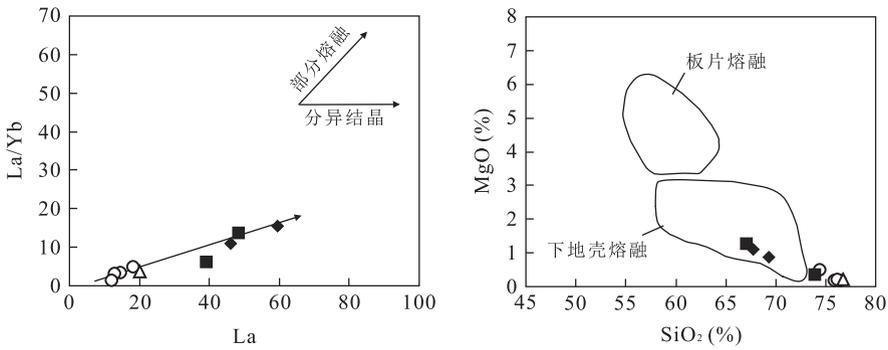


图 9 马鞍山岩体 La-La/Yb、SiO₂-Mg[#]、SiO₂-MgO 图解(图例同图 3)

Fig.9 La-La/Yb, SiO₂-Mg[#] and SiO₂-MgO relations of the Ma'anshan pluton

板片熔融区 (Zhu *et al.*, 2009); 下地壳熔融区 (Hou *et al.*, 2004; Guo *et al.*, 2007; Gao *et al.*, 2010)

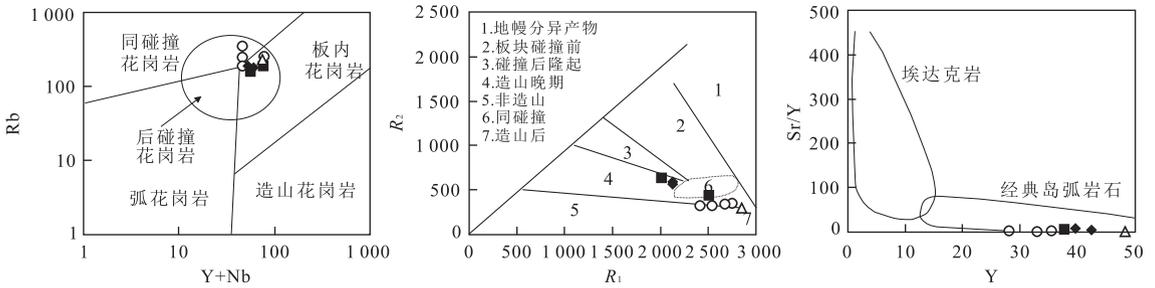


图 10 马鞍山岩体 Y+Nb-Rb、R₁-R₂ 和 Y-Sr/Y 图解(图例同图 3)

Fig.10 Y+Nb-Rb, R₁-R₂ and Y-Sr/Y relations of the Ma'anshan pluton

性的稀土及微量元素配分模式非常相似,与安徽铜陵狮子山矿田中性石英闪长岩—中基性辉石闪长岩特征相似(Guo *et al.*, 2013),也反映了下地壳部分熔融形成的壳源岩浆(图 9)可能具有类似于幔源基性岩浆的稀土和微量元素特征,且从早到晚 REE 总量逐渐减少、Eu 异常逐渐增大和(La/Yb)_N 比值逐渐减小, Sr、V、Zr 和 Co 等微量元素含量及 Sr/Y 比值也明显减少,这种关系指示了马鞍山岩体的同源岩浆结晶分异作用,且从早到晚岩浆演化过程中斜长石和暗色矿物逐渐结晶分离(陈超等, 2013),导致后—晚期岩性中斜长石、角闪石等矿物含量明显减少.上述分析表明早期斑状二长花岗岩与后—晚期细粒花岗岩及花岗(斑)岩脉为下地壳部分熔融同源岩浆先后侵位结晶分异作用形成的.

4.3 成岩时代、构造背景与邻区侵入岩关系

与浙西北—皖南地区侵入岩类似,马鞍山岩体在 Rb-Y+Rb 图解中均落在后碰撞花岗岩区域(图 10); R₁-R₂ 图解中也主要落在造山晚期和造山后期区域; Y-Sr/Y 图解中,马鞍山岩体主要落在经典岛弧岩石区域,但在邻区的皖南地区发育有同时代的较大面积埃达克岩(谢建成等, 2012b; 周洁等,

2014).已有研究实例表明岩浆分离结晶作用可形成埃达克质岩石(Macpherson *et al.*, 2006; Li *et al.*, 2009),这也说明在浙西北—皖南地区早白垩世岩浆演化活动的多样性特征.资料研究表明中侏罗世华南地区从特提斯构造体制向太平洋构造体制进行了转变,但对中晚侏罗世—早白垩世的构造环境分歧较大.部分学者认为华南地区在中侏罗世开始岩石圈伸展,持续性或周期性至白垩纪的区域性岩石圈伸展拉张(Chen *et al.*, 2002; Li *et al.*, 2003, 2007b);部分学者认为华南地区大约在 165±5 Ma 进入太平洋构造域的活动大陆边缘挤压造山阶段,在 140±5 Ma 转换为陆内拉张环境持续大规模岩石圈伸展减薄作用(董树文等, 2007; 邢光福等, 2008; 张岳桥等, 2009);也有部分学者认为晚中生代东南沿海经历了 165~150 Ma 期间太平洋板块俯冲挤压、145~125 Ma 期间左旋走滑和板内环境、115~85 Ma 期间大陆岩石圈伸展减薄 3 个构造阶段(毛建仁等, 2009),同样在浙西北及邻区燕山期岩浆—构造演化也经历了中晚侏罗世(170 Ma 开始)古太平洋板块俯冲—碰撞造山作用阶段、早白垩世(145~123 Ma)碰撞造山后的陆内拉张作用阶段及

表 3 浙西北及邻区燕山期侵入岩时代(锆石 U-Pb 法)

Table 3 The eras of intrusive rocks in Northwest Zhejiang and adjacent area

岩体位置	岩性	成岩年代 (Ma)	来源文献	岩体位置	岩性	成岩年代 (Ma)	来源文献	
浙西北	常山兰花坞铜矿区	花岗斑岩 斑状花岗闪长岩	172±3.0 162±1.0	①	莫干山岩体	花岗岩	128.1±2.1	章邦桐等, 2012
	开化桐村矿	花岗斑岩	167.6~155.6	邱骏挺等, 2011	常山岩前钨锡矿区	二长花岗岩	127±2.0	①
	开化桐村矿	花岗斑岩	168.7±2.3	①	银山多金属矿区	黄石潭花岗岩	126±2.0	厉子龙等, 2013; Li <i>et al.</i> , 2013
	开化桐村矿	花岗斑岩	166±2.0~ 160.3±2.6	①	浙西北夏色岭钨矿区	花岗岩	126.9±1.7	黄国成等, 2012
	开化桐村矿	二长花岗岩	165.7±2.1	①	白菊花尖地区	花岗岩	126±3.0	Wong <i>et al.</i> , 2009
	建德岭后矿区	花岗闪长斑岩	162.9±1.9	①	千亩田钨铍矿区	花岗岩	125.5±1.1、 123.5±2.3	黄国成等, 2012
	漓渚矿区	栅溪闪长岩 广山花岗岩	150.1±2.6 147.2±1.7	顾明光等, 2011 顾明光等, 2011	九里岗岩体	隐伏岩体	124±1.0	厉子龙等, 2013
	闲林埠矿区	花岗闪长岩	151.8±2.2	②	神功村	二长花岗斑岩脉	117.7±2.7	王剑等, 2003
	开岭脚、里陈家	花岗闪长岩	151±3、 148±2	汪建国等, 2010	宁国竹溪岭地区	花岗岩	142.0~138.7	陈雪霏等, 2013
	结蒙岩体	花岗闪长岩	148±1.0	厉子龙等, 2013; Li <i>et al.</i> , 2013b	皖东南铜陵凤凰山岩体	石英二长闪长岩、花岗闪长岩	141.0~139.4	瞿泓滢等, 2010
	上台门铅锌矿	花岗闪长岩	146.8±2.1	②	旌德岩体	花岗闪长岩	141.0~139.7	张俊杰等, 2012
	木瓜岩体	花岗斑岩	142±1.0	厉子龙等, 2013	月山复式岩体	(石英)闪长岩	139 和 123	许逢明等, 2012
	安吉港口矿区	黑云母二长花岗岩	141±1.4	唐燕文等, 2013	牯牛降岩体	花岗岩	130.1	谢建成等, 2012a
	安吉港口矿区	钾长花岗岩	138.1±1.0	唐燕文等, 2013	庐江—枞阳地区	花岗岩	126~124	范裕等, 2008
	安吉港口矿区	花岗闪长岩	137±1.8	唐燕文等, 2013	德兴地区	花岗闪长斑岩	171±3.0	王强等, 2004
	安吉港口矿区	细粒花岗岩	134.5±1.6	谢玉玲等, 2012	永平铜矿区	花岗斑岩	160±2.3 和 135±7.4	丁昕等, 2005
	大铜坑钨矿区	斑状花岗岩 (二长)花岗岩	135.1±1.9 132±1	② ①	赣东北武山铜矿区	花岗闪长斑岩	145±3.9 和 121±2.5	郭博然等, 2013
	淳安县铜山矿区	儒洪岩体 (二长)花岗岩	129	厉子龙等, 2013; Li <i>et al.</i> , 2013	卧龙谷岩体	花岗岩	133±1.0	张招崇等, 2007
	常山里山岭铜矿区	(正长)花岗斑岩	131±2	①	三清山地区	花岗岩	123±2.2 和 115.6±2	赵鹏等, 2010
					鹅湖岩体	花岗岩	121.7±2.9	

注: ①江绍拼合带中西段铜多金属矿床区域成矿规律研究与成矿预测. 中国地质大学(北京), 浙江省第三地质大队, 浙江省核工业二六九大队, 2013.

②浙江 1:5 万临安镇、万市、余杭镇、富阳县幅区调地质调查报告. 浙江省地质调查院, 2014.

晚白垩世(117 Ma 以后)的伸展阶段(厉子龙等, 2013). 根据近十年较可靠的测年数据可知, 浙西北及邻区燕山期侵入岩成岩时代主要为中侏罗世—早白垩世(168~124 Ma), 集中于 168~163 Ma、150~147 Ma 和 142~124 Ma 3 个阶段(表 3), 晚白垩世仅局部地区有 118~115 Ma 的小规模岩浆活动. 马鞍山岩体锆石年代学测定结果表明其成岩时代为 132.2~127.4 Ma, 结合地球化学特征表明其为早白垩世俯冲造山后陆内拉张作用的产物.

4.4 与成矿的关系

马鞍山岩体位于江南古陆北东端, 江南古陆成矿带是皖南地区重要成矿带之一(陈雪霏等, 2013), 已发现了多处钨钼矿, 如旌德凹子山钨钼矿(钱辉等, 2010)、祁门东源大型钨矿(秦燕等, 2010). 区域矿产特征研究表明浙西北地区钨钼矿主要为石英脉型, 分为内接触带石英脉型钨钼矿(千亩田矿床)、外

接触带石英大脉型钨矿(夏色岭)以及变花岗闪长岩型细脉浸染状白钨矿(乌金山)(浙江省安吉淳安一带钨矿成矿规律与成矿预测. 浙江省地质局第一大队, 1982), 且成矿均与早白垩世花岗岩类有关. 区域地球化学异常显示马鞍山地区水系沉积物钨钼异常发育, 与黑钨矿重砂异常套合较好, 岩体中成矿元素含量较高, 锡含量为 $3.59 \times 10^{-6} \sim 8.84 \times 10^{-6}$ (平均 4.98×10^{-6})、钨含量为 $2.59 \times 10^{-6} \sim 7.19 \times 10^{-6}$ (平均 4.30×10^{-6})、铍含量为 $8.09 \times 10^{-6} \sim 57.30 \times 10^{-6}$ (平均 34.40×10^{-6})、铅含量为 $19.8 \times 10^{-6} \sim 41.2 \times 10^{-6}$ (平均 30.1×10^{-6})、钨含量为 $0.056 \times 10^{-6} \sim 7.060 \times 10^{-6}$ (平均 1.90×10^{-6})、铈含量为 $2.86 \times 10^{-6} \sim 15.40 \times 10^{-6}$ (平均 6.84×10^{-6}). 岩体形成于早白垩世碰撞造山后陆内拉张作用阶段, 深部岩浆向浅层侵位并经高分异演化, 同时释放大流量流体促使成矿物质进一步聚集, 而岩体接触带及断

裂构造为成矿提供了所需的空空间,因此在岩体内部及侵入接触带发育钨铍矿化点、银矿点、铋矿及萤石矿等,其中尖子坞萤石矿已达中型规模,显示了该地区良好的钨(铍)、萤石等成矿条件和找矿前景。

5 结论

(1) 马鞍山岩体由伟晶斑状二长花岗岩、巨晶斑状二长花岗岩、细粒花岗岩和花岗斑岩脉等组成,结晶年龄分别为 132.2 ± 1.6 、 127.7 ± 1.2 、 128.3 ± 1.1 和 127.4 ± 1.8 Ma, 显示出它们的形成时代一致,为早白垩世俯冲造山后陆内拉张作用的产物。

(2) 马鞍山岩体可能为高分异 I 型花岗岩,为下地壳部分熔融同源岩浆先后侵位结晶分异作用形成,且在岩浆结晶分异演化过程中斜长石和暗色矿物等逐渐结晶分离。

(3) 马鞍山岩体位于江南古陆成矿带北东端,区域地球化学和岩石地球化学显示在岩体内外接触带发育 W、Sn、Be、Bi、F、Pb、Zn 等元素异常,并发育钨铍矿化点、银矿点、铋矿及萤石矿等,应加强该地区的钨(铍)、萤石等找矿工作。

致谢:成都理工大学张刚阳讲师在论文写作过程中给予了有益的探讨和指导帮助,论文评审阶段审稿专家和编委提出了宝贵的修改意见,作者在此一并深表感谢。

References

Bai, D. Y., Chen, J. C., Ma, T. Q., et al., 2005. Geochemical Characteristics and Tectonic Setting of Qitianling A-Type Granitic Pluton in Southeast Hunan. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 24(4): 255—272 (in Chinese with English abstract).

Chen, C., Lü, X. B., Cao, X. F., et al., 2013. Geochronology, Geochemistry and Geological Significance of Late Carboniferous- Early Permian Granites in Kumishi Area, Xinjiang. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 38(2): 218—232 (in Chinese with English abstract).

Chen, P. R., Hua, R. M., Zhang, B. T., et al., 2002. Early Yanshanian Post-Orogenic Granitoids in the Nanling Region: Petrological Constraints and Geodynamic Settings. *Science in China (Series D)*, 45(8): 756—768. doi:10.1007/BF02878432

Chen, S. Q., 2011. Discussion on the Yanshan Epoch Rock Characteristics and Ore-Forming Background in Zhe-

jiang Kaihua Region (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract).

Chen, X. F., Wang, Y. G., Sun, W. D., et al., 2013. Zircon U-Pb Chronology, Geochemistry and Genesis of the Zhuxiling Granite in Ningguo, Southern Anhui. *Acta Geologica Sinica*, 87(11): 1662—1678 (in Chinese with English abstract).

Collins, W. J., Richards, S. W., 2007. Geodynamic Significance of S-Type Granites in Circum-Pacific Orogens. *Geology*, 36(7): 559—562. doi:10.1130/G24658A.1

Ding, X., Jiang, S. Y., Ni, P., et al., 2005. Zircon SIMS U-Pb Geochronology of Host Granitoids in Wushan and Yongping Copper Deposits, Jiangxi Province. *Geological Journal of China Universities*, 11(3): 383—389 (in Chinese with English abstract).

Dong, S. W., Zhang, Y. Q., Long, C. X., et al., 2007. Jurassic Tectonic Revolution in China and New Interpretation of the Yanshan Movement. *Acta Geologica Sinica*, 81(11): 1449—1461 (in Chinese with English abstract).

Fan, Y., Zhou, T. F., Yuan, F., et al., 2008. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Ages of the A-Type Granites in the Lu-Zong (Lujiang-Zongyang) Area and Their Geological Significances. *Acta Petrologica Sinica*, 24(8): 1715—1724 (in Chinese with English abstract).

Feng, Z. H., Wang, C. Z., Wang, B. H., 2009. Granite Magma Ascent and Emplacement Mechanisms and Their Relation to Mineralization Process. *Journal of Guilin University of Technology*, 29(2): 183—194 (in Chinese with English abstract).

Gao, Y. F., Yang, Z. S., Santosh, M., et al., 2010. Adakitic Rocks from Slab Melt-Modified Mantle Sources in the Continental Collision Zone of Southern Tibet. *Lithos*, 119(3—4): 651—663. doi:10.1016/j.lithos.2010.08.018

Griffin, W. L., Powell, W. J., Pearson, N. J., et al., 2008. GLITTER: Data Reduction Software for Laser Ablation ICP-MS. In: Sylvester, P., ed., *Laser Ablation-ICP-MS in the Earth Sciences, Current Practices and Outstanding Issues*; Mineralogical Association of Canada Short Course, 40: 308—311.

Gu, M. G., Feng, L. X., Hu, Y. H., et al., 2011. LA-ICP-MS U-Pb Dating of Zircons from Guangshan and Zhaxi Plutons in Shaoxing Area, Zhejiang Province: Constraint on the Ore-Forming Epoch of the Lizhu Iron Ore Deposit. *Geological Bulletin of China*, 30(8): 1212—1219 (in Chinese with English abstract).

Guo, B. R., Liu, S. W., Yang, P. T., et al., 2013. Petrology, Geochemistry and Petrogenesis of Wolonggu Granites and Tongchang Granodioritic Porphyries: Constraints on

- Copper Metallogenic Geological Settings in Northeastern Jiangxi Province. *Geological Bulletin of China*, 32 (7): 1035—1046 (in Chinese with English abstract).
- Guo, W.M., Lu, J.J., Jiang, S.Y., et al., 2013. Chronology, Hf Isotopes, Geochemistry, and Petrogenesis of the Magmatic Rocks in the Shizishan Ore Field of Tongling, Anhui Province. *Science China: Earth Sciences*, 56 (6): 993—1013. doi: 10.1007/s11430-013-4589-2
- Guo, Z.F., Wilson, M., Liu, J.Q., 2007. Post-Collisional Adakites in South Tibet: Products of Partial Melting of Subduction-Modified Lower Crust. *Lithos*, 96 (1—2): 205—224. doi: 10.1016/j.lithos.2006.09.011
- Hoskin, P.W.O., Schaltegger, U., 2003. The Composition of Zircon and Igneous and Metamorphic Petrogenesis. *Rev. Mineral. Geochem.*, 53 (1): 27—62. doi: 10.2113/0530027
- Hou, Z.Q., Gao, Y.E., Qu, X.M., et al., 2004. Origin of Adakitic Intrusives Generated during Mid-Miocene East-West Extension in Southern Tibet. *Earth and Planetary Science Letters*, 220 (1—2): 139—155. doi: 10.1016/S0012-821X(04)00007-X
- Huang, G.C., Wang, D.H., Wu, X.Y., 2012a. Characteristics and LA-ICP-MS Zircon U-Pb Geochronology Study of Metallogenic Intrusion in the Xiaseling Tungsten Deposit in Lin'an, Zhejiang Province. *Rock and Mineral Analysis*, 31(5): 915—921 (in Chinese with English abstract).
- Huang, G.C., Wang, D.H., Wu, X.Y., 2012b. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Dating of the Granite from the Qianmutian Tungsten-Beryllium Mine in Lin'an, Zhejiang Province and Its Significance in Regional Exploration. *Geotectonica et Metallogenia*, 36 (3): 392—398 (in Chinese with English abstract).
- Jackson, S.E., Pearson, N.J., Griffin, W.L., et al., 2004. The Application of Laser Ablation-Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry to In-Situ U-Pb Zircon Geochronology. *Chemical Geology*, 211(1—2): 47—69. doi: 10.1016/j.chemgeo.2004.06.017
- Jia, X.H., Wang, X.D., Yang, W.Q., et al., 2014. The Early Jurassic A-Type Granites in Northern Guangxi, China; Petrogenesis and Implications. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 39(1): 21—36 (in Chinese with English abstract). doi: 10.3799/dqkx.2014.003
- King, P.L., White, A.J.R., Chappell, B.W., 1997. Characterization and Origin of Aluminous A Type Granites from the Lachlan Fold Belt, Southeastern Australia. *J. Petrology*, 38(3): 371—391. doi: 10.1093/петroj/38.3.371
- Li, J.W., Zhao, X.F., Zhou, M.F., et al., 2009. Late Mesozoic Magmatism from the Daye Region, Eastern China; U-Pb Ages, Petrogenesis, and Geodynamic Implications. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 157 (3): 383—409. doi: 10.1007/s00410-008-0341-x
- Li, L.L., Zhou, H.W., Chen, Z.H., et al., 2013. Comparison of A-Type Granites from Taimushan and Gushan Regions in Fujian Province and Their Geodynamic Significance. *Geoscience*, 27 (3): 509—524 (in Chinese with English abstract).
- Li, X.H., Chen, Z.G., Liu, D.Y., et al., 2003. Jurassic Gabbro-Granite-Syenite Suites from Southern Jiangxi Province, SE China: Age, Origin, and Tectonic Significance. *International Geological Review*, 45(10): 898—921. doi: 10.2747/0020-6814.45.10.898
- Li, X.H., Li, W.X., Li, Z.X., 2007a. On the Genetic Classification and Tectonic Implications of the Early Yanshanian Granitoids in the Nanling Range, South China. *Chinese Science Bulletin*, 52 (14): 1873—1885. doi: 10.1007/s11434-007-0259-0
- Li, X.H., Li, Z.X., Li, W.X., et al., 2007b. U-Pb Zircon, Geochemical and Sr-Nd-Hf Isotopic Constraints on Age and Origin of Jurassic I- and A-Type Granites from Central Guangdong, SE China: A Major Igneous Event in Response to Foundering of a Subducted Flat-Slab? *Lithos*, 96(1—2): 186—204. doi: 10.1016/j.lithos.2006.09.018
- Li, Y.J., Wei, J.H., Yao, C.L., et al., 2010. Genetic Relationship of the Huaixi Copper-Gold Deposit and the Caomen Alkaline Granite, Southeastern Zhejiang Province, China; Constraint from Geochronologies. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 35(4): 585—596 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z.L., Zhou, J., Mao, J.R., et al., 2013a. Age and Geochemistry of the Granitic Porphyry from the Northwestern Zhejiang Province, SE China, and Its Geological Significance. *Acta Petrologica Sinica*, 29(10): 3607—3622 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z.L., Zhou, J., Mao, J.R., et al., 2013b. 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. *Lithos*, 179: 353—363. doi: 10.1016/j.lithos.2013.07.014
- Liu, D.Y., Jian, P., Kröner, A., et al., 2006. Dating of Prograde Metamorphic Events Deciphered from Episodic Zircon Growth in Rocks of the Dabie-Sulu UHP Complex, China. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 250 (3—4): 650—666. doi: 10.1016/j.epsl.2006.07.043
- MacPherson, C.G., Dreher, S.T., Thirlwall, M.F., 2006. Ada-

- kites without Slab Melting; High Pressure Differentiation of Island Arc Magma, Mindanao, the Philippines. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 243(3-4): 581-593. doi: 10.1016/j.epsl.2005.12.034
- Mao, J. R., Yutaka, T., Li, Z. L., et al., 2009. Correlation of Meso-Cenozoic Tectono-Magmatism between SE China and Japan. *Geological Bulletin of China*, 28(7): 844-856 (in Chinese with English abstract).
- Qian, H., Xia, J., 2010. Discovery of Tungsten-Molybdenum Orebodies and Analysis of Ore-Prospecting Potential at Wazishan, Jingde County in South Anhui Province. *China Mining Magazine*, 19(4): 100-104 (in Chinese with English abstract).
- Qin, Y., Wang, D. H., Wu, L. B., et al., 2010. Zircon SHRIMP U-Pb Dating of the Mineralized Porphyry in the Dongyuan W Deposit in Anhui Province and Its Geological Significance. *Acta Geologica Sinica*, 84(4): 479-484 (in Chinese with English abstract).
- Qiu, J. S., Wang, D. Z., McInnes, B. I. A., 1999. Geochemistry and Petrogenesis of the I- and A Type Composite Granite Masses in the Coastal Area of Zhejiang and Fujian Province. *Acta Petrologica Sinica*, 15(2): 237-246 (in Chinese with English abstract).
- Qiu, J. S., Xiao, E., Hu, J., et al., 2008. Petrogenesis of Highly Fractionated I-Type Granites in the Coastal Area of Northeastern Fujian Province: Constraints from Zircon U-Pb Geochronology, Geochemistry and Nd-Hf Isotopes. *Acta Petrologica Sinica*, 24(11): 2468-2484 (in Chinese with English abstract).
- Qiu, J. T., Yu, X. Q., Zhang, D. H., et al., 2011. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Dating of the Tongcun Porphyry in Kaihua County, Western Zhejiang Province, and Its Geological Significance. *Geological Bulletin of China*, 30(9): 1360-1368 (in Chinese with English abstract).
- Qu, H. Y., Pei, R. F., Li, J. W., et al., 2010. SHRIMP U-Pb Dating of Zircon from the Fenghuangshan Quartz Monzodiorite and Granodiorite in Tongling Area, Anhui Province and Its Geological Implication. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 40(3): 581-590 (in Chinese with English abstract).
- Tang, Y. W., Xie, Y. L., Li, Y. X., et al., 2013. LA-ICP-MS U-Pb Ages, Geochemical Characteristics of the Zircons from Wushanguan Complex Body in Anji Mining Area, Northwestern Zhejiang and Their Geological Significances. *Geological Review*, 59(4): 702-715 (in Chinese with English abstract).
- Turner, S. P., Foden, J. D., Morrison, R. S., 1992. Derivation of Some A-Type Magmas by Fractionation of Basaltic Magama; An Example from the Padthaway Ridge, South Australia. *Lithos*, 28(2): 151-179. doi: 10.1016/0024-4937(92)90029-X
- Wang, J., Bao, C. M., Gao, Y. H., et al., 2003. Zircon SHRIMP U-Pb Dating of Monzogranite-Porphyry Dikes in Shengongcun, Northern Zhejiang, and Its Geological Implications. *Geological Bulletin of China*, 22(9): 729-732 (in Chinese with English abstract).
- Wang, J. G., Wang, L. W., Chen, X. Y., et al., 2010. SHRIMP U-Pb Ages of Zircons from Kailingjiao and Lichenjia Granodiorites in Western Zhejiang and Their Geological Implications. *Geology in China*, 37(6): 1559-1565 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Q., Zhao, Z. H., Jian, P., et al., 2004. SHRIMP Zircon Geochronology and Nd-Sr Isotopic Geochemistry of the Dexing Granodiorite Porphyries. *Acta Petrologica Sinica*, 20(2): 315-324 (in Chinese with English abstract).
- Whalen, J. B., Currie, K. L., Chappell, B. W., 1987. A-Type Granites: Geochemical Characteristics, Discrimination and Petrogenesis. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 95(4): 407-419. doi: 10.1007/BF00402202
- Wolf, M. B., London, D., 1994. Apatite Dissolution into Peraluminous Haplogranitic Melts: An Experimental Study of Solubilities and Mechanism. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 58(9): 4127-4145. doi: 10.1016/0016-7037(94)90269-0
- Wong, J., Sun, M., Xing, G. E., et al., 2009. Geochemical and Zircon U-Pb and Hf Isotopic Study of the Baijuhuajian Metaluminous A-Type Granite: Extension at 125-100 Ma and Its Tectonic Significance for South China. *Lithos*, 112(3-4): 289-305. doi: 10.1016/j.lithos.2009.03.009
- Wu, F. Y., Jahn, B. M., Wilder, S. A., et al., 2003. Highly Fractionated I-Type Granites in NE China (I): Geochronology and Petrogenesis. *Lithos*, 66(3-4): 241-273. doi: 10.1016/S0024-4937(02)00222-0
- Xie, J. C., Chen, S., Rong, W., et al., 2012a. Geochronology, Geochemistry and Tectonic Significance of Guniujiang A-Type Granite in Anhui Province. *Acta Petrologica Sinica*, 28(12): 4007-4020 (in Chinese with English abstract).
- Xie, J. C., Chen, S., Sun, W. D., et al., 2012b. Geochemistry of Early Cretaceous Adakitic Rocks in Tongling Region of Anhui Province: Constraints for Rock- and Ore-Forming. *Acta Petrologica Sinica*, 28(10): 3181-3196 (in Chinese with English abstract).
- Xie, Y. L., Tang, Y. W., Li, Y. X., et al., 2012c. Petrochemistry, Chronology and Ore-Forming Geological Signifi-

- cance of Fine Crystalline Granite in Anji Polymetallic Deposit of Zhejiang Province. *Mineral Deposits*, 31(4): 891—902(in Chinese with English abstract).
- Xing, G. F., Lu, Q. D., Chen, R., et al., 2008. Study on the Ending Time of Late Mesozoic Tectonic Regime Transition in South China—Comparing to the Yanshan Area in North China. *Acta Geologica Sinica*, 82(4): 451—463 (in Chinese with English abstract).
- Xu, F. M., Du, Y. S., Wang, G. W., et al., 2012. Zircon SHRIMP U-Pb Ages, Geochemical Characteristics and Geological Implication of Yueshan Complex, Anhui Province, China. *J. Mineral Petrol.*, 32(1): 61—66 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, B. T., Wang, K. X., Ling, H. F., et al., 2012. Zircon U-Pb and Whole-Rock Rr-Sr Chronology, Sr-Nd-O Isotopes and Petrogenesis of the Moganshan Granite Pluton in the Zhejiang Province. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 31(4): 347—353 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J. F., Xie, H. S., Xu, X. M., et al., 2013. Geological and Geochemical Characteristics and Tectonic and Prospecting Significance of the Shanxi-Guangshan Intrusions in Lizhu Area, Zhejiang Province. *Geology in China*, 40(2): 403—413 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J. J., Wang, G. J., Yang, X. Y., et al., 2012. The Petrogenesis of the Jingde Granodiorite and Its MMEs; Constraints from Geochemistry, Zircon U-Pb Dating and Hf Isotopic Compositions. *Acta Petrologica Sinica*, 28(12): 4047—4063 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. Q., Xu, X. B., Jia, D., et al., 2009. Deformation Record of the Change from Indosinian Collision-Related Tectonic System to Yanshanian Subduction-Related Tectonic System in South China during the Early Mesozoic. *Earth Science Frontiers*, 16(1): 234—247 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z. C., Jian, P., Wei, H. R., 2007. SHRIMP Ages, Geology, Geochemistry and Petrogenetic Type of Granites from the Sanqingshan Geopark, Jiangxi Province. *Geological Review*, 53(Suppl.): 28—40 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, P., Jiang, Y. H., Liao, S. Y., et al., 2010. SHRIMP Zircon U-Pb Age, Sr-Nd-Hf Isotopic Geochemistry and Petrogenesis of the Ehu Pluton in Northeastern Jiangxi Province. *Geological Journal of China Universities*, 16(2): 218—225 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, J., Jiang, Y. H., Ge, W. Y., 2014. High Sr/Y Jingde Pluton in the Eastern Jiangnan Orogen, South China; Formation Mechanism and Tectonic Implications. *Acta Geologica Sinica*, 88(1): 53—62 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, J., Jiang, Y. H., Zeng, Y., et al., 2013. Zircon U-Pb Age and Sr, Nd, Hf Isotope Geochemistry of Jingde Pluton in Eastern Jiangnan Orogen, South China. *Geology in China*, 40(5): 1379—1391 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, D. C., Mo, X. X., Wang, L. Q., et al., 2009a. Petrogenesis of Highly Fractionated I-Type Granites in the Chayu Area of Eastern Gangdese, Tibet: Constraints from Zircon U-Pb Geochronology, Geochemistry and Sr-Nd-Hf Isotopes. *Science in China (Ser. D)*, 52(9): 1223—1239. doi:10.1007/s11430-009-0132-x
- Zhu, D. C., Zhao, Z. D., Pan, G. T., et al., 2009b. Early Cretaceous Subduction-Related Adakite-like Rocks of the Gangdese Belt, Southern Tibet; Products of Slab Melting and Subsequent Melt-Peridotite Interaction? *Journal of Asian Earth Sciences*, 34(3): 298—309. doi:10.1016/j.jseas.2008.05.003
- Zhu, J. C., Wang, R. C., Zhang, P. H., et al., 2009c. Zircon U-Pb Geochronological Framework of Qitianling Granite Batholith, Middle Part of Nanling Range, South China. *Science in China (Ser. D)*, 52(9): 1279—1294. doi:10.1007/s11430-009-0154-4

附中文参考文献

- 柏道远, 陈建超, 马铁球, 等, 2005. 湘东南骑田岭岩体 A 型花岗岩的地球化学特征及其构造环境. *岩石矿物学杂志*, 24(4): 255—272.
- 陈超, 吕新彪, 曹晓峰, 等, 2013. 新疆库米什地区晚石炭世—早二叠世花岗岩年代学、地球化学及其地质意义. *地球科学——中国地质大学学报*, 38(2): 218—232.
- 陈帅奇, 2011. 浙西开化地区燕山期岩体特征及其成矿背景研究(硕士学位论文). 北京: 中国地质大学.
- 陈雪霏, 汪应庚, 孙卫东, 等, 2013. 皖南宁国竹溪岭地区花岗岩锆石 U-Pb 年代学及地球化学及其成因研究. *地质学报*, 87(11): 1662—1678.
- 丁昕, 蒋少涌, 倪培, 等, 2005. 江西武山和永平铜矿含矿花岗岩体锆石 SIMS U-Pb 年代学. *高校地质学报*, 11(3): 383—389.
- 董树文, 张岳桥, 龙长兴, 等, 2007. 中国侏罗纪构造变革与燕山运动新诠释. *地质学报*, 81(11): 1449—1461.
- 范裕, 周涛发, 袁峰, 等, 2008. 安徽庐江—枞阳地区 A 型花岗岩的 LA-ICP-MS 定年及其地质意义. *岩石学报*, 24(8): 1715—1724.
- 冯佐海, 王春增, 王葆华, 2009. 花岗岩侵位机制与成矿作用. *桂林工学院学报*, 29(2): 183—194.
- 顾明光, 冯立新, 胡艳华, 等, 2011. 浙江绍兴地区广山—栅溪

- 岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年:对漓渚铁矿成矿时代的限定.地质通报,30(8):1212—1219.
- 郭博然,刘树文,杨朋涛,等,2013.江西卧龙谷花岗岩和铜厂花岗闪长斑岩的地球化学特征及成因——对赣东北地区铜矿成矿地质背景的制约.地质通报,32(7):1035—1046.
- 黄国成,王登红,吴小勇,2012a.浙江临安夏色岭钨矿含矿岩体特征及 LA-ICP-MS 锆石铀—铅年代学研究.岩矿测试,31(5):915—921.
- 黄国成,王登红,吴小勇,2012b.浙江临安千亩田钨矿矿区花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄及对区域找矿的意义.大地构造与成矿学,36(3):392—398.
- 贾小辉,王晓地,杨文强,等,2014.桂北圆石山早侏罗世 A 型花岗岩的岩石成因及意义.地球科学——中国地质大学学报,39(1):21—36.
- 李良林,周汉文,陈植华,等,2013a.福建太姥山地区和鼓山地区 A 型花岗岩对比及其地球动力学意义.现代地质,27(3):509—524.
- 李艳军,魏俊浩,姚春亮,等,2010.浙东南怀溪铜金矿床与曹门碱性花岗岩体成因关系的年代学制约.地球科学——中国地质大学学报,35(4):585—596.
- 厉子龙,周静,毛建仁,等,2013.浙西北木瓜燕山期花岗斑岩的定年、地球化学特征及其地质意义.岩石学报,29(10):3607—3622.
- 毛建仁,高桥浩,厉子龙,等,2009.中国东南部与日本中—新生代构造—岩浆作用对比研究.地质通报,28(7):844—856.
- 钱辉,夏军,2010.皖南旌德巴子山钨铅矿的发现及找矿潜力分析.中国矿业,19(4):100—104.
- 秦燕,王登红,吴礼彬,等,2010.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.地质学报,84(4):479—484.
- 邱检生,王德滋,McInnes, B. I. A., 1999.浙闽沿海地区 I 型-A 型复合花岗岩体的地球化学及成因.岩石学报,15(2):237—246.
- 邱检生,肖娥,胡建,等,2008.福建北东沿海高分异 I 型花岗岩的成因:锆石 U-Pb 年代学、地球化学和 Nd-Hf 同位素制约.岩石学报,24(11):2468—2484.
- 邱骏挺,余心起,张德会,等,2011.浙西开化地区桐村花岗斑岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义.地质通报,30(9):1360—1368.
- 瞿泓滢,裴荣富,李进文,等,2010.安徽铜陵凤凰山石英二长闪长岩和花岗闪长岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义.吉林大学学报(地球科学版),40(3):581—590.
- 唐燕文,谢玉玲,李应栩,等,2013.浙江安吉多金属矿区坞山关杂岩体锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄、地球化学特征及地质意义.地质论评,59(4):702—715.
- 王剑,包超民,高永华,等,2003.浙北富阳神功村二长花岗斑岩脉 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义.地质通报,22(9):729—732.
- 汪建国,汪隆武,陈小友,等,2010.浙西开岭脚和里陈家花岗闪长岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义.中国地质,37(6):1559—1565.
- 王强,赵振华,简平,等,2004.德兴花岗闪长斑岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学和 Nd-Sr 同位素地球化学.岩石学报,20(2):315—324.
- 谢建成,陈思,荣伟,等,2012a.安徽牯牛降 A 型花岗岩的年代学、地球化学和构造意义.岩石学报,28(12):4007—4020.
- 谢建成,陈思,孙卫东,等,2012b.安徽铜陵早白垩世埃达克质岩地球化学:成岩成矿制约.岩石学报,28(10):3181—3196.
- 谢玉玲,唐燕文,李应栩,等,2012.浙江安吉铅锌多金属矿区细粒花岗岩的岩石化学、年代学及成矿意义探讨.矿床地质,31(4):891—902.
- 邢光福,卢清地,陈荣,等,2008.华南晚中生代构造体制转折结束时限研究——兼与华北燕山地区对比.地质学报,82(4):451—463.
- 许逢明,杜杨松,王功文,等,2012.安徽月山复式岩体锆石 SHRIMP U-Pb 年龄和地球化学特征及其地质意义.矿物岩石,32(1):61—66.
- 章邦桐,王凯兴,凌洪飞,等,2012.浙江莫干山花岗岩体锆石 U-Pb、全岩 Rb-Sr 年代学、Sr-Nd-O 同位素地球化学及成因研究.矿物岩石地球化学通报,31(4):347—353.
- 张建芳,解怀生,许兴苗,等,2013.浙江漓渚地区栅溪—广山岩体地质地球化学特征、构造及找矿意义.中国地质,40(2):403—413.
- 张俊杰,王光杰,杨晓勇,等,2012.皖南旌德花岗闪长岩与暗色包体的成因:地球化学、锆石 U-Pb 年代学与 Hf 同位素制约.岩石学报,28(12):4047—4063.
- 张岳桥,徐先兵,贾东,等,2009.华南早中生代从印支期碰撞构造体系向燕山期俯冲构造体系转换的形变记录.地质前缘,16(1):234—247.
- 张招崇,简平,魏罕蓉,2007.江西三清山国家地质公园花岗岩 SHRIMP 年龄、地质地球化学特征和岩石成因类型.地质论评,53(增刊):28—40.
- 赵鹏,姜耀辉,廖世勇,等,2010.赣东北鹅湖岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄、Sr-Nd-Hf 同位素地球化学与岩石成因.高校地质学报,16(2):218—225.
- 周洁,姜耀辉,葛伟亚,2014.江南造山带东部旌德高 Sr/Y 花岗闪长岩的形成机制及其构造意义.地质学报,88(1):53—62.
- 周洁,姜耀辉,曾勇,等,2013.江南造山带东段旌德岩体锆石 LA-ICP-MS 年龄和 Nd-Sr-Hf 同位素地球化学.中国地质,40(5):1379—1391.