



湘东八团岩体的成因: 地球化学、 锆石 U-Pb 年代学以及 Hf 同位素的制约

郑明泓^{1,2}, 邵拥军^{1,2}, 隗含涛^{1,2}, 熊伊曲^{1,2}, 邹艳红^{1,2}, 谭华杰^{1,2}

(1. 中南大学 有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室, 长沙 410083;
2. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 长沙 410083)

摘要: 通过系统地分析岩石地球化学、LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学和锆石 Hf 同位素组成, 对岩石的成因进行研究。结果表明: 八团岩体中的锆石晶形完好, 内部结构清晰, 震荡生长环带发育, 具有较高的 Th/U 比值(0.42~0.61), 显示岩浆成因的特征。对八团岩体 LA-ICP-MS 的 U-Pb 定年结果为(159.2±4.6) Ma(MSWD=0.62), 表明其属于燕山期岩浆侵入活动的产物。八团岩体属于硅酸过饱和岩石, 具有富钠富钾低钙的特征, 铝饱和指数 A/CNK 值均大于 1.1, 同时又兼具 Rb、Th 强烈富集, Nb、Sr、Ti 强烈亏损的特点, 岩体中轻稀土富集强烈, 重稀土亏损严重, 稀土配分曲线均向右倾且具有明显的负 Eu 异常, 八团岩体中 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为-36.03~-6.09, 以上特征说明八团岩体属于典型的 S 型花岗岩, 是由地壳经不同程度熔融而成的。

关键词: 地球化学; 锆石 U-Pb 年代学; Hf 同位素; 八团岩体

中图分类号: P588.13; P597.3

文献标志码: A

Petrogenesis of Batuan intrusion: Constraints from petro-geochemistry, zircon U-Pb dating and Hf isotope

ZHENG Ming-hong^{1,2}, SHAO Yong-jun^{1,2}, WEI Han-tao^{1,2}, XIONG Yi-qu^{1,2}, ZOU Yan-hong^{1,2}, TAN Hua-jie^{1,2}

(1. Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals and Geological Environment Monitor,
Ministry of Education, Central South University, Changsha 410083, China;
2. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Base on the detail analysis of geochemistry, LA-ICP-MS zircon U-Pb chronology and Hf isotopic composition about the intrusion, the genesis of granite was discussed. The results show that zircons from the intrusions display complete crystal form, clear internal structure and oscillatory zoning and high Th/U ratios (0.42-0.61), implying their magmatic origin. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating results of the Batuan intrusion indicate that the product is Yanshanian magmatic activity with the intercept ages of (159.2±4.6) Ma(MSWD=0.62). Batuan intrusion is a supersaturated silicate rocks with the characteristics of rich sodium and potassium and low calcium. A/CNK aluminium saturation index values are greater than 1.1. At the same time, the intrusion has the characteristics of strong enrichment of Rb and Th, and strong depletion of Nb, Sr, Ti. The rock mass strongly enriches the light rare earth and strongly depletes in the heavy rare earth, rare earth distribution curve inclines to the right and has obvious negative Eu anomaly. The $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ of Batuan intrusion is -36.03~-6.09. Taken together, Batuan intrusion is S-type one formed by the earth crust melt.

Key words: geochronology; zircon U-Pb dating; Hf isotope; Batuan intrusion

邓阜仙复式花岗岩体位于湖南省东部与江西省交接部位, 出露面积达 171 km², 由边部的印支期汉背中粗粒斑状黑云母花岗岩岩体以及核部的燕山期八团二云母花岗岩岩体组成, 其中燕山期的八团岩体与本区钨、锡、铌、钽、铅、锌、金等多金属成矿作用有密切的成因联系^[1]。有研究者对邓阜仙岩体的地质特征、成岩年龄和成矿属性等方面进行了研究^[2-5], 对于二云母花岗岩的年龄存在着争议(黄卉等^[3]对二云母花岗岩进行锆石的 LA-ICP-MS 测试, 其年龄为 154.4±2.2 Ma, 属于燕山期岩体; 而蔡杨等^[4]得出的二云母花岗岩锆石的 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 (222.9±1.6) Ma 和 (224.3±2.4) Ma, 属于印支期岩体), 同时研究者对于八团岩体的成因研究相对薄弱, 因此, 本文作者选取燕山期的八团岩体为研究对象, 通过岩石地球化学、锆石 U-Pb 年代学以及 Hf 同位素进行系统地研究, 确定岩体成岩年龄及成因, 为丰富华南地区花岗岩的深部源区和构造-岩浆演化的认识以及本区成矿作用研究提供佐证。

1 岩体地质特征

八团花岗岩体位于湖南省茶陵县境内, 其侵位受太和仙穹窿以及基底北西向和北东向断裂带控制(见图 1)。总体上为一南北稍长的椭圆形岩株, 岩性主要

为中细粒二云母花岗岩, 风化面呈灰白色, 新鲜面呈灰-灰白色, 细粒结构, 其主要矿物成分及含量为石英 30%~40%(质量分数, 下同)、钾长石 15%~20%、斜长石 10%~15%、微斜长石 5%~10%、白云母 5%~10%、黑云母 2%~5%。主要副矿物为磁铁矿、黄

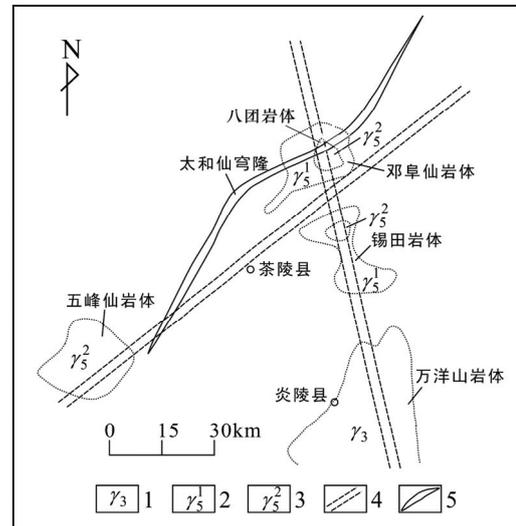


图 1 区域构造略图(据文献[6]修改): 1—加里东期花岗岩; 2—印支期花岗岩; 3—燕山期花岗岩; 4—基底断裂; 5—太和仙穹窿

Fig. 1 Regional tectonic sketch (modified from Ref. [6]): 1—Caledonian granite; 2—Indosinian granite; 3—Yanshanian granite; 4—Basement faults; 5—Taihexian fornix

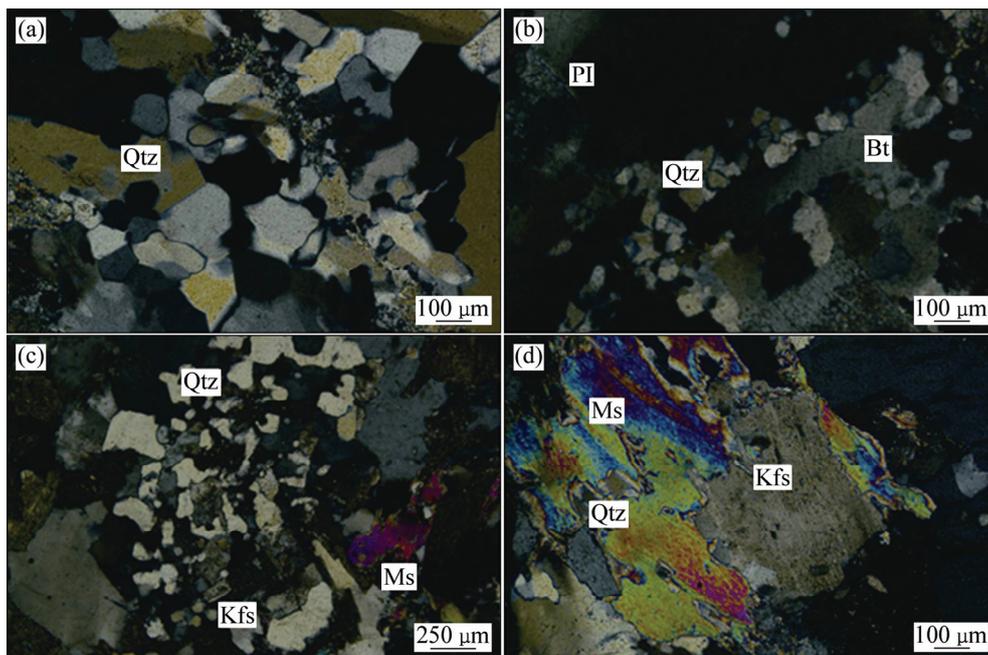


图 2 八团二云母花岗岩显微照片

Fig. 2 Microscopy photographs of Batuan two-mica granite: (a) Granular texture; (b) Hypidiomorphic granular texture; (c) Myrmekitic texture; (d) Poikilitic texture (Qtz—Quartz; Pl—Plagioclase; Bt—Biotite; Ms—Muscovite; Kfs—K-feldspar)

铁矿、锆石和磷灰石等。岩体局部蚀变强烈, 可见绿泥石化、绢云母化、高岭土化。结构以自形-半自形粒状结构为主, 以包含结构(白云母包含石英形成包含结构)以及蠕虫结构(岩石中斜长石交代钾长石后, 由剩余的二氧化硅形成的蠕虫状石英, 镶嵌在钾长石的边部, 形成蠕虫结构)为次(见图 2), 构造以块状构造为主。

2 分析方法

选取来自钻孔的新鲜岩体样品, 在河北省廊坊市区地质调查研究所实验室用常规方法将样品粉碎至 44~55 μm , 并用淘选和电磁选方法进行分离。在双目镜下挑选出晶形较好, 无明显裂痕和包裹体的锆石颗粒, 然后将其粘贴在环氧树脂表面, 打磨抛光后露出锆石的表面。然后对制好靶的锆石进行透射光、反射光及阴极发光图像采集, 根据透射光图像可以观察锆石内部是否存在包裹体, 通过反射光图像可以观察锆石是否有裂开, 通过 CL 图像可以观察锆石内部结构。本次实验在中国冶金局山东局地质分析测试中心进行, 利用配有 193 nm ArF 准分子气体激光剥蚀器系统的电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)完成测试, 其仪器参数主要如表 1 所列。

激光剥蚀过程中采用氦气为载气、氩气为补偿气以调节灵敏度, 根据锆石颗粒大小, 激光剥蚀束斑设定为 30 μm , 频率为 8 Hz, 脉冲输出能量密度为 10 J/cm^2 , 剥蚀方式主要为单点剥蚀, 剥蚀时间为 60 s, 信号采集时间为 50 s。为了保证测试的准确性, 每进行 5 次样品分析后, 均会重新对标准锆石(91500)进行两次测试, 每进行 10 次样品分析后, 均会重新对标准锆石(91500 和 SRM610)进行两次测试。采用 ICPMSDataCal8.4 软件对 LA-ICP-MS 的瞬时信号(固体微区和单个熔融包裹体微量分析、锆石 U-Pb 同位素定年以及锆石微区 Hf 同位素比值分析)进行实时选择、分馏校正以及定量计算, 并对分析结果进行图表

以及报告的输出。通过 ICPMSDataCal8.4^[7] 软件得出的锆石的 U-Pb 年龄特征以及微量元素含量, 通过对微量元素的分析, 剔除热液锆石, 然后用 Isoplot4.15 软件进行锆石 U-Pb 加权平均年龄计算和谐和曲线的绘制。

原位微区锆石 Hf 同位素比值测试在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室(GPMR)完成, 仪器选用激光剥蚀多接收杯等离子体质谱(LA-MC-ICP-MS)。在锆石 U-Pb 定年分析的基础上, 挑选年龄合适的研究锆石, 参照锆石阴极发光图像以及已定年的位置选取 Lu-Hf 同位素测点, 采用单点剥蚀模式, 分析时激光斑束固定为 44 μm 。外部标样选用标准锆石 91500、TEM 和 GJ-1。采用 ICPMSDataCal 对数据进行离线处理(包括对样品和空白信号的选择、同位素质量分馏校正)。

主量元素和痕量元素分析均在广州澳实测试分析实验室中完成。主量元素采用玻璃熔片大型 X 射线荧光光谱法(XRF)分析, 痕量元素则采用等离子质谱仪定量分析。

3 实验结果

3.1 主量元素

在大垡矿区中段采场处(KSD017、KSD027)及钻孔 ZK001 和 ZK003 中采集新鲜岩体样品(岩性为二云母花岗岩)进行岩石化学分析, 其测试结果及岩石化学特征值如表 2 和 3 所列, 结果显示八团岩体 SiO_2 含量在 72.81%~74.62%之间, 平均值为 73.42%, 属于硅酸过饱和岩石。岩石总碱含量($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$)为 8.20%~8.55%, 平均值为 7.14%; $w(\text{Na}_2\text{O})/w(\text{K}_2\text{O})$ 为 0.43~0.59, 平均值为 0.54; 碱度率 AR 值为 3.46~4.20, 平均值为 3.67, 反映了岩体在富钾的背景上富钠, 这可能与岩石中含有较多的云母有关; 其里特曼指数 σ 值介于 2.12~2.45 之间, 平均值为 2.31, 均小于 3.3, 属于钙碱性岩。但 WRIGHT^[8]认为对于 SiO_2 含量小于

表 1 电感耦合等离子体质谱仪主要工作参数

Table 1 Main work parameters of inductively coupled plasma mass spectrometry

RF 功率/W	ICP-MS 工作参数				LA 工作参数				
	雾化气流量/ ($\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$)	辅助气流量/ ($\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$)	冷却气流量/ ($\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$)	能量密度/ ($\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$)	频率/ Hz	斑束/ μm	He 气流量/ ($\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$)	剥蚀 方式	剥蚀 时间/s
1250	0.55	0.72	14.8	10	8	30	0.76	点剥蚀	60

表2 八团岩体主量元素分析结果

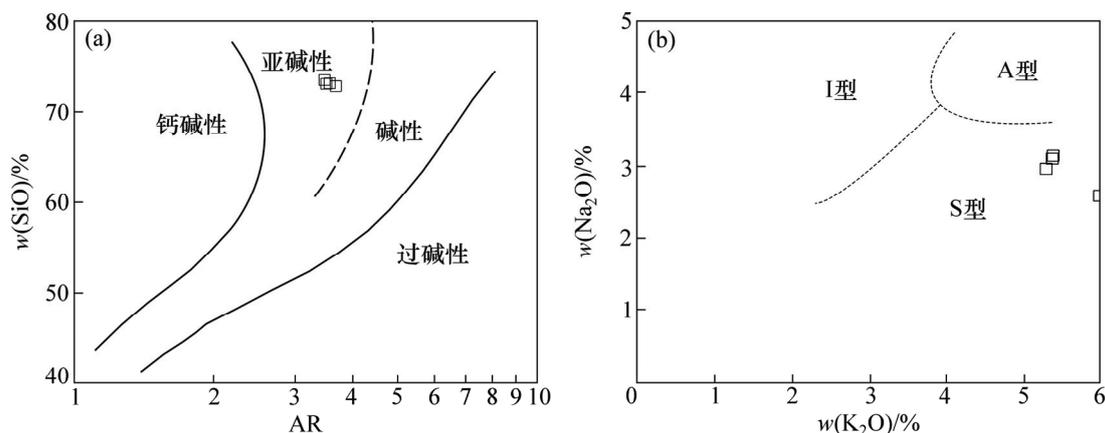
Table 2 Main elements analysis results of Batuan intrusion

Sample	Mass fraction, w/%													
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	TFe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	BaO	TiO ₂	Total	K ₂ O+Na ₂ O
KSD017	73.49	0.13	14.04	1.73	0.03	0.32	0.88	2.96	5.27	0.17	0.03	0.13	99.87	8.23
KSD027	72.81	0.12	14.22	1.71	0.05	0.31	0.76	2.59	5.96	0.19	0.04	0.12	99.84	8.55
ZK001	73.06	0.13	14.33	1.72	0.04	0.31	0.92	3.1	5.35	0.18	0.03	0.13	100.10	8.45
ZK003	73.12	0.12	14.33	1.71	0.04	0.3	0.83	3.14	5.36	0.19	0.03	0.12	100.05	8.50
Average	73.12	0.13	14.23	1.72	0.04	0.31	0.85	2.95	5.49	0.18	0.03	0.13	99.97	8.43

表3 八团岩体的岩石化学特征值

Table 3 Petrochemistry characteristics of Batuan intrusion

Sample	w(Na ₂ O)/w(K ₂ O)	AR	σ	A/CNK	A/NK	SI	DI
KSD017	0.56	3.46	2.22	1.15	1.33	3.11	89.95
KSD027	0.43	3.66	2.45	1.18	1.33	2.93	89.65
ZK001	0.58	3.49	2.37	1.14	1.31	2.96	91.17
ZK003	0.59	3.55	2.39	1.15	1.30	2.85	91.58
Average	0.54	3.54	2.36	1.15	1.33	2.96	90.59

图3 $w(\text{SiO}_2)$ -AR 和 $w(\text{K}_2\text{O})$ - $w(\text{Na}_2\text{O})$ 的关系图Fig. 3 Relationship diagrams of $w(\text{SiO}_2)$ -AR (a) and $w(\text{K}_2\text{O})$ - $w(\text{Na}_2\text{O})$

42%或大于 70%的岩石, 用里特曼指数划分碱度的精确度较差, 因为碱度不仅与 SiO_2 、 K_2O 和 Na_2O 有关, 还与 Al_2O_3 和 CaO 有关, 因此用碱度率指示岩石碱性更精确些。在 SiO_2 -AR(碱度率)变异图(见图 3(a))中, 八团岩体样品均投影到亚碱性区域内, 同时岩体的 A/CNK 值均大于 1, 显示岩体属于过铝质、钙碱性至亚碱性花岗岩类型。八团岩体样品的 CaO 平均含量为 0.75%, K_2O 平均含量为 5.45%, Na_2O 平均含量为 2.49%, 显示出岩体富 K、Na, 贫 Ca 的特征。

综上所述可看出, 本区岩体富 K、富 Na、低 Ca, $w(\text{Na}_2\text{O}) < w(\text{K}_2\text{O})$, $w(\text{SiO}_2)$ 为 65%~79%, 铝饱和指数 A/CNK 值均大于 1.1, 岩浆来源于地壳, 这些特征表

明了八团岩体属于 S 型花岗岩, 在 $w(\text{K}_2\text{O})$ - $w(\text{Na}_2\text{O})$ 关系图(见图 3(b))中, 所以样品都投在 S 型花岗岩区内, 也说明了这一点。

3.2 稀土元素

八团岩体稀土元素分析见表 4, 从表 4 中可知, 岩体的稀土元素总量(ΣREE)为 98.85×10^{-6} ~ 118.88×10^{-6} , 平均值为 110.53×10^{-6} , 轻稀土(LREE)的含量为 91.20×10^{-6} ~ 109.84×10^{-6} , 重稀土(HREE)的含量为 7.65×10^{-6} ~ 9.044×10^{-6} , 轻重稀土比($w(\text{LREE})/w(\text{HREE})$)为 11.94~12.40 之间, 平均值为 12.10, 比值远大于 1, 表明轻稀土富集强烈, 重稀土亏损严重,

表 4 八团岩体稀土元素含量

Table 4 Content of rare earth elements of Batuan intrusion

Element	$w_B/10^{-6}$				
	KSD017	KSD027	ZK001	ZK003	Average
La	25.30	21.80	26.00	23.80	24.23
Ce	51.30	43.50	52.60	47.70	48.78
Pr	5.72	4.84	5.87	5.30	5.43
Nd	19.90	16.90	20.50	18.70	19.00
Sm	4.35	3.77	4.43	4.39	4.24
Eu	0.46	0.39	0.44	0.44	0.43
Gd	3.53	3.06	3.88	3.66	3.53
Tb	0.50	0.46	0.55	0.51	0.51
Dy	2.41	2.24	2.50	2.28	2.36
Ho	0.37	0.32	0.34	0.33	0.34
Er	0.90	0.75	0.87	0.82	0.84
Tm	0.12	0.12	0.11	0.11	0.12
Yb	0.72	0.61	0.71	0.62	0.67
Lu	0.08	0.09	0.08	0.07	0.08
Y	10.80	9.10	10.60	9.90	10.10
Σ REE	115.66	98.85	118.88	108.73	110.53
LREE	107.03	91.20	109.84	100.33	102.10
HREE	8.63	7.65	9.04	8.40	8.43

表 5 八团岩体稀土元素的特征值

Table 5 Features of rare earth elements of Batuan intrusion

$W(LREE)/w(HREE)$	$(La/Yb)_N$	$(La/Sm)_N$	$(Gd/Yb)_N$	δEu	δCe
12.40	25.21	3.75	4.06	0.35	1.00
11.92	25.63	3.73	4.15	0.34	0.99
12.15	26.27	3.79	4.52	0.32	1.00
11.94	27.54	3.50	4.88	0.33	1.00
12.10	26.16	3.69	4.40	0.33	1.00

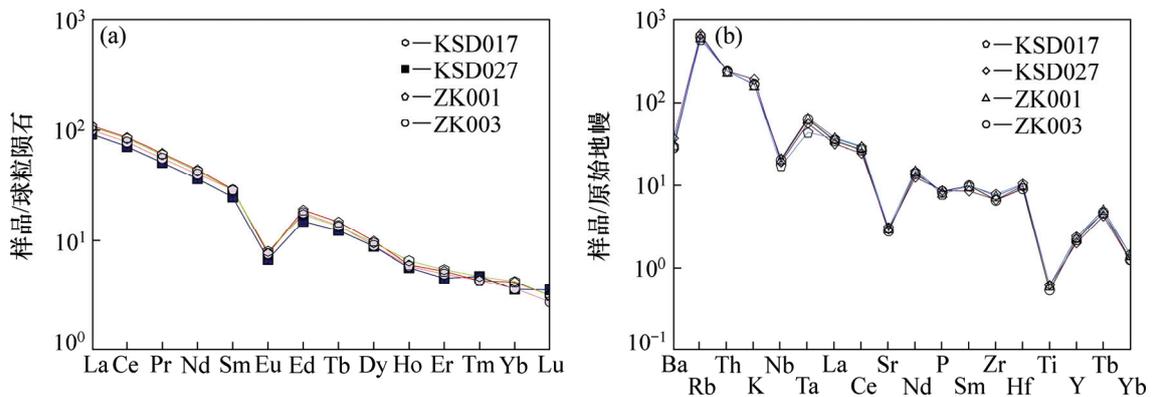


图 4 八团岩体稀土元素配分图和八团岩体微量元素蛛网图

Fig. 4 REE distribution diagram of Batuan intrusion (a) and spider diagram of Batuan intrusion (b)

反映了岩石形成过程中有富集轻稀土的相, 岩浆结晶分异程度较大。 $(La/Sm)_N$ 值范围为 50~3.79, 平均值为 3.69; $(Gd/Yb)_N$ 值范围为 4.06~4.88, 平均值为 4.40, 说明轻稀土分异明显, 重稀土分异相对较小, 重稀土衰减速度比轻稀土慢。铈异常值($\delta(Eu)$)均在 0.32~0.35 之间, 属明显的负铈异常; 铈异常值($\delta(Ce)$)几乎全部为 1, 铈谷不明显, 接近球粒陨石的值。样品球粒陨石标准化配分曲线显示八团岩体稀土元素配分曲线(见图 4(a)) 为一系列向右倾斜、负 Eu 异常明显, 呈现不对称的“V”字形的曲线。上述稀土元素特征与重熔型花岗岩的一致, 表明该类花岗岩是由上地壳经不同程度熔融而形成的^[9-10]。

3.3 微量元素

将八团岩体微量元素测试结果列于表 6, 同时以原始地幔对岩体微量元素进行标准化并作出微量元素蛛网图(见图 4(b))。

从表 6 及图 4(b)中可以看出, 本区岩体以 Rb、Th 强烈富集, Nb、Sr、Ti 强烈亏损为特点, 同时 Ba 及高场强元素 Ta、Nd、Zr、Hf 也表现出一定程度的富集,

表 6 八团岩体微量元素含量

Table 6 Trace element composition of Batuan intrusion

Element	$w_B/10^{-6}$				
	KSD017	KSD027	ZK001	ZK003	Average
Ba	210	260	220	200	222.5
Rb	366	421	393	393	393.25
Th	20	20	20	20	20
K	41100	47200	40600	41000	42475
Nb	12.4	13.7	15.1	14.5	13.925
Ta	1.8	2.3	2.7	2.6	2.35
La	25.3	21.8	26	23.8	24.2
Ce	51.3	43.5	52.6	47.7	48.8
Sr	65	62	64	59	62.5
Nd	19.9	16.9	20.5	18.7	19
P	740	820	780	800	785
Sm	4.35	3.77	4.43	4.39	4.2
Zr	87	75	83	74	79.8
Hf	3.2	3	3.1	2.8	3.0
Ti	800	800	800	700	775
Y	10.8	9.1	10.6	9.9	10.1
Tb	0.5	0.46	0.55	0.51	0.51
Yb	0.72	0.61	0.71	0.62	0.67
U	10	20	10	20	15.00

Nb、Sr、Ti 的强烈亏损, 表明岩浆的形成有地壳物质的参与。DEPAOLO 等^[11]在研究花岗岩类岩石的地球化学特征与岩浆来源时指出, 来自壳源的火成岩选择性地富集 Rb 和 Ba, 推断本区岩浆可能来源于地壳物质, 强不相容元素 Rb 和 Li 具有比较相似的地球化学特征, 往往在花岗岩浆演化末期或花岗岩系列的最晚阶段富集^[12], Rb 的强烈富集说明该岩体的岩浆分异作用进行得很充分。岩体中 Th 的含量均为 20×10^{-6} , U 的含量为 $10 \times 10^{-6} \sim 20 \times 10^{-6}$, 平均值为 15×10^{-6} , 这与华南燕山期壳源重熔型花岗岩^[13] (Th 平均值为 28.74×10^{-6} , U 的平均值为 7.11×10^{-6}) 的特征类似, 亦表明岩体的形成与地壳重熔有成因联系。

3.4 锆石 U-Pb 定年

对研究区内二云母花岗岩中的锆石进行 LA-ICP-MS 的 U-Pb 法测年研究, 以期对本区侵入岩的成岩时代进行精确厘定。本次样品均采自钻孔 ZK001 以及 ZK003, 岩性为二云母花岗岩, 前面对其进行了主微量元素分析, 其岩相学、矿物学及地球化学特征基本一致。本研究对 22 个锆石进行微量元素及 U-Pb 法测年研究, 其中有 6 个锆石的 $^{206}Pb/^{238}U$ 模式年龄介于 947~1926 Ma 之间, 属于继承锆石。其它 16 个锆石样品的阴极发光照片见图 5。

从图 5 中可以看出, 本次研究中的锆石晶形完好, 内部结构清晰, 震荡生长环带发育, 具有典型岩浆锆石的特点^[14]。吴元保等^[15]和简平等^[16]研究认为, 锆石的 Th/U 比值在一定程度上能反应锆石的成因环境, 岩浆的锆石 $w(Th/U)$ 一般较高(普遍大于 0.4), 而变质锆石 Th/U 比值则较低(普遍小于 0.1)。本次研究锆石中 $w(Th/U)$ 为 0.42~0.61, 反应其岩浆锆石的特点, 同时在锆石的 $\delta Eu - \delta Ce$ 图(见图 6(a))中, 有 10 个锆石样品点落入了岩浆锆石的区域内, 将这 10 个样品的特征值列于表 7, 并绘制锆石的 U-Pb 年龄谱和曲线(见图 6(b)), 从图 6(b)中可以看出, 所有样品点均位于谱和线上, 其 $^{207}Pb/^{206}Pb$ 加权平均年龄为 (159.2 ± 4.6) Ma ($N=10$, $MSWD=0.62$), 综上所述可以认为, 这个年龄代表岩体的结晶年龄。

3.5 锆石 Hf 同位素特征

选取 1~8 号点进行原位 Hf 同位素测试, 并将结果列于表 8。从表 8 可以看出, 样品中的 $^{176}Lu/^{177}Hf$ 值介于 0.000904~0.001698 之间, 其平均值平均为 0.001202, 远小于 0.002, 说明锆石形成以后放射性 Hf 的积累很低。 $^{176}Hf/^{177}Hf$ 为 0.281656~0.282501, 极差为 0.0008, 变化不大, 说明锆石 Hf 同位素组成

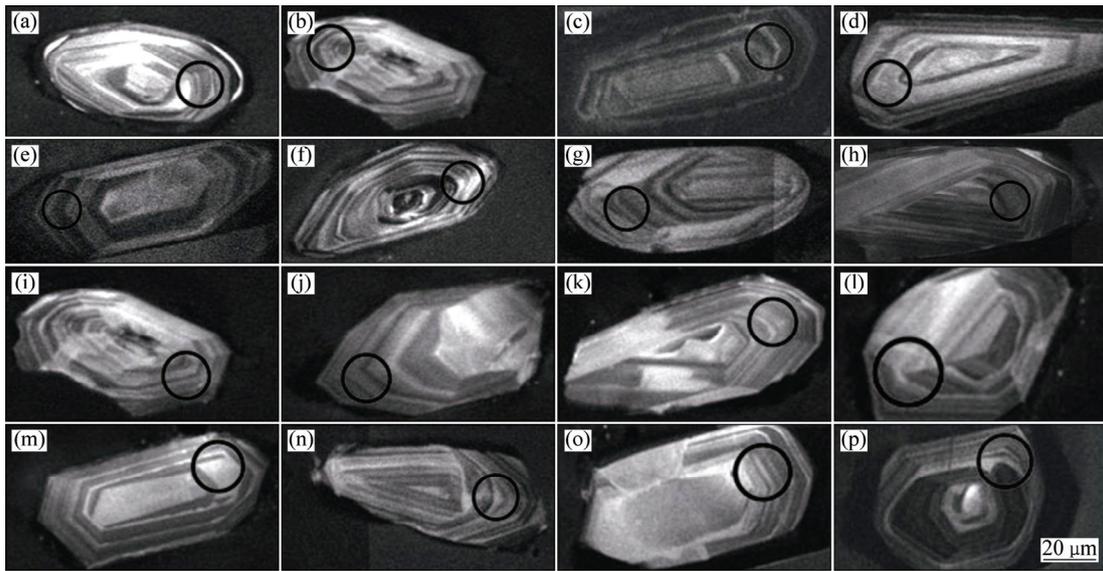


图 5 八团岩体锆石 CL 图像

Fig. 5 CL images of selected zircons for Batuan rock mass: (a) Test point 1; (b) Test point 2; (c) Test point 3; (d) Test point 4; (e) Test point 5; (f) Test point 6; (g) Test point 7; (h) Test point 8; (i) Test point 9; (j) Test point 10; (k) Test point 11; (l) Test point 12; (m) Test point 13; (n) Test point 14; (o) Test point 15; (p) Test point 16

表 7 八团岩体中锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年结果

Table 7 LA-ICP-MS zircon U-Pb date for the Batuan intrusion

Test point	$w/10^{-6}$			Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$			
	Total Pb	Th	U		Specific value	1σ	Age/Ma	1σ
1	13.09	151.46	251.79	0.6	0.0537	0.0027	361	111
2	7.01	75.15	146.02	0.51	0.0576	0.0038	517	144
3	5.51	60.95	109.36	0.56	0.0608	0.0043	632	152
4	6.48	62.15	148.72	0.42	0.0602	0.0038	613	132
5	9.05	92.69	200.66	0.46	0.0519	0.0029	280	160
6	13.54	151.26	269.79	0.56	0.054	0.003	369	129
7	10.72	130.11	226.38	0.57	0.0495	0.0031	172	151
8	14.4	186.42	303.15	0.61	0.0506	0.0025	233	119
9	12.48	151.96	247.44	0.61	0.0499	0.0025	187	119
10	8.28	91.91	190.09	0.48	0.054	0.0036	369	156

Test point	$^{206}\text{Pb}/^{235}\text{U}$				$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$			
	Specific value	1σ	Age/Ma	1σ	Specific value	1σ	Age/Ma	1σ
1	0.0251	0.0004	172	8	0.0251	0.0004	160	3
2	0.0271	0.0006	196	11	0.0271	0.0006	173	4
3	0.0276	0.0007	213	15	0.0276	0.0007	176	4
4	0.0265	0.0006	197	11	0.0265	0.0006	168	4
5	0.0254	0.0005	168	9	0.0254	0.0005	162	3
6	0.0255	0.0005	175	9	0.0255	0.0005	163	3
7	0.025	0.0006	160	9	0.025	0.0006	159	4
8	0.0252	0.0005	162	7	0.0252	0.0005	161	3
9	0.0262	0.0005	166	8	0.0262	0.0005	167	3
10	0.0256	0.0007	171	10	0.0256	0.0007	163	4

Note: σ is mean square error.

均一，且 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值均小于球粒陨石的值，球粒陨石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} \geq 0.282772$ ，说明岩体的成岩物质可能来源于地壳或富集地幔^[17]。根据锆石对应的 U-Pb 年龄计算得出的 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值为 $-36.03 \sim -6.09$ ，平均为 -15.53 ，全部为负数，说明成岩物质主要来源于地壳^[18]。

4 分析与讨论

4.1 岩浆来源

八团岩体为富硅、富碱的过铝质岩石，同时具有

富集 U、Th 的特点，暗示其壳源的地球化学性质。将八团岩体铅同位素组成列于表 9。从表 9 中可以看出， $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} > 15.6$ ，这与壳源型花岗岩的特征相符，同时在铅同位素构造模式图(见图 7(a))上样品均落在位于上地壳演化线以上，说明岩浆来源与地壳，在 $(\text{La}/\text{Yb})_N - \delta\text{Eu}$ 变异图(见图 7(b))上也有类似的显示，说明本区岩浆主要来源于地壳。

BARBARIN^[19]认为含白云母的过铝质花岗岩其物质来源于地壳，且主要产于大陆碰撞环境，白云母花岗岩是大陆俯冲作用的标志。八团岩体白云母含量较高，同时在 $\text{A}/\text{NK} - \text{A}/\text{CNK}$ 图中，所以样品均落入

表 8 八团岩体锆石 Hf 同位素分析结果

Table 8 Zircon Hf isotopic data for Batuan intrusion

Sample No.	Age/Ma	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$\epsilon\text{Hf}(0)$	$\epsilon\text{Hf}(t)$	T_{DM1}/Ma	T_{DM2}/Ma	$f_{\text{Lu/Hf}}$
1	160	0.018063	0.000904	0.282336	-15.42	-12.01	1290	1740	-0.97
2	173	0.034642	0.001419	0.282081	-24.44	-20.82	1667	2234	-0.96
3	176	0.024453	0.000997	0.281970	-28.35	-24.62	1802	2444	-0.97
4	162	0.038703	0.001698	0.282500	-9.61	-6.15	1083	1421	-0.95
5	163	0.025033	0.001142	0.281656	-39.46	-36.03	2244	3055	-0.97
6	159	0.018175	0.000932	0.282390	-13.50	-10.11	1215	1635	-0.97
7	161	0.031740	0.001350	0.282501	-9.60	-6.09	1073	1418	-0.96
8	167	0.023143	0.001175	0.282437	-11.86	-8.41	1158	1544	-0.96

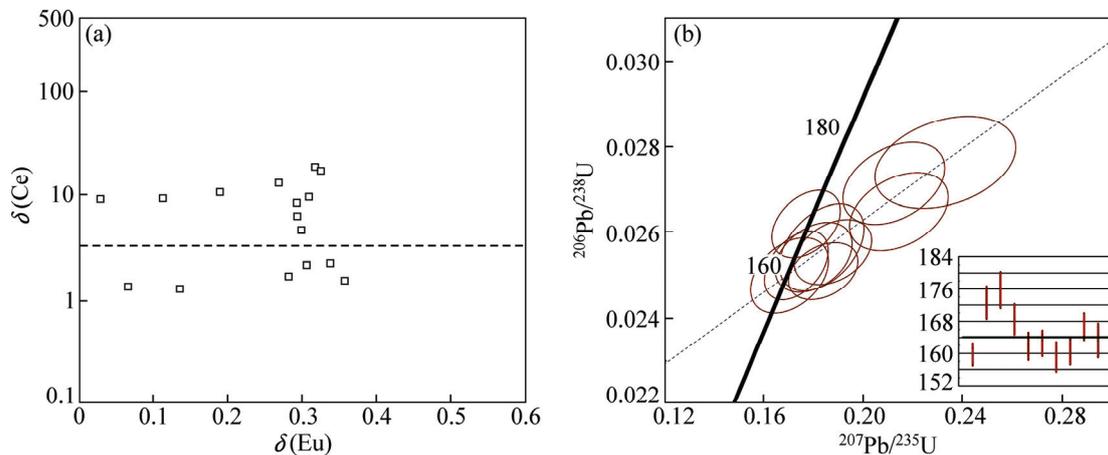


图 6 锆石的 $\delta\text{Eu} - \delta\text{Ce}$ 关系图(a)和锆石 U-Pb 年龄协和曲线(b)

Fig. 6 $\delta\text{Eu} - \delta\text{Ce}$ relationship diagram of zircon (a) and U-Pb concordia diagram summarizing LA-ICP-MS zircon data (b)

表 9 八团岩体全岩铅同位素含量表

Table 9 Lead isotope composition of Batuan intrusion whole rock

Sample	$w/10^{-6}$					
	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$
ZK1707-4	18.52	15.71	38.77	2.093	2.468	1.18
ZK1707-5	18.78	15.75	38.72	2.061	2.457	1.192
ZK1707-6	18.87	15.76	38.78	2.055	2.46	1.198

过铝质区域, 表明八团岩体属于含白云母的过铝质花岗岩(MPG), 岩体的稀土元素特征以及微量元素特征均与重熔型花岗岩的一致, 表明该类花岗岩是由上地壳经不同程度熔融而形成的。

在锆石 $\epsilon\text{Hf}(t)-t$ 图(见图 8(a))中, 大部分样品点落在球粒陨石线和下地壳线演化线之间(2.5Ga), 且离亏损地幔线较远。锆石的两阶段年龄 T_{DM2} 分布范围较大, 大部分集中与 1.418~1.740 Ga 之间, 平均为 1.552 Ga, 说明形成岩体的岩浆可能有古老地壳物质的混入。

4.2 构造环境及成岩类型

花岗岩与大地构造环境之间存在密切的联系, 解决花岗岩成因的关键, 就是推断花岗岩产出的构造环境或其出露的构造位置^[19-20]。在 R1-R2 多参数阳离子图(见图 8(b))和 $w(\text{Y+Nb})-w(\text{Rb})$ 图(见图 9)上, 样品均落入同碰撞花岗岩区域内, 在 A/NK-A/CNK 图(见图 10)中所有的样品点均落入大陆碰撞花岗岩类中(CCG), 同时八团岩体为含白云母的过铝质岩体

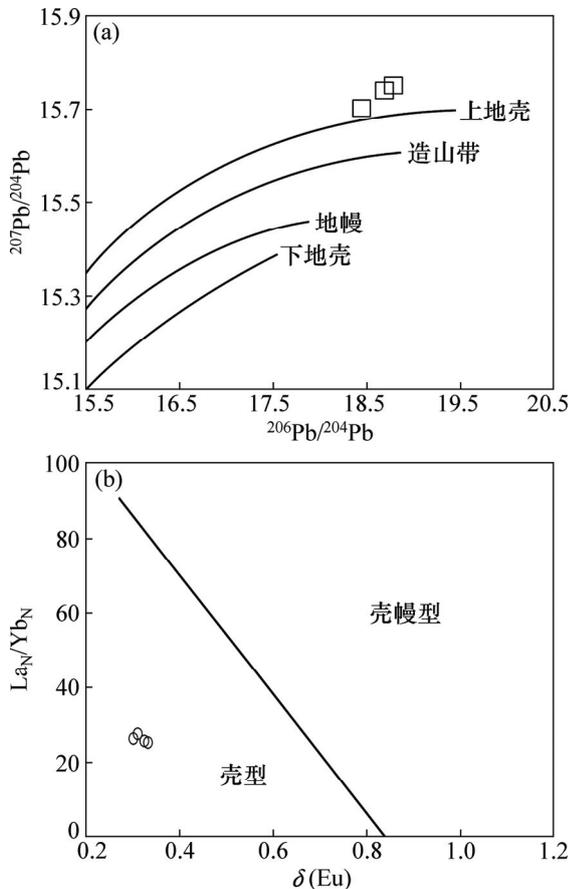


图 7 八团岩体 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}-\delta\text{Eu}$ 曲线
Fig. 7 Curves of $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ intrusion (a) and $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}-\delta\text{Eu}$ (b) of Batuan intrusion

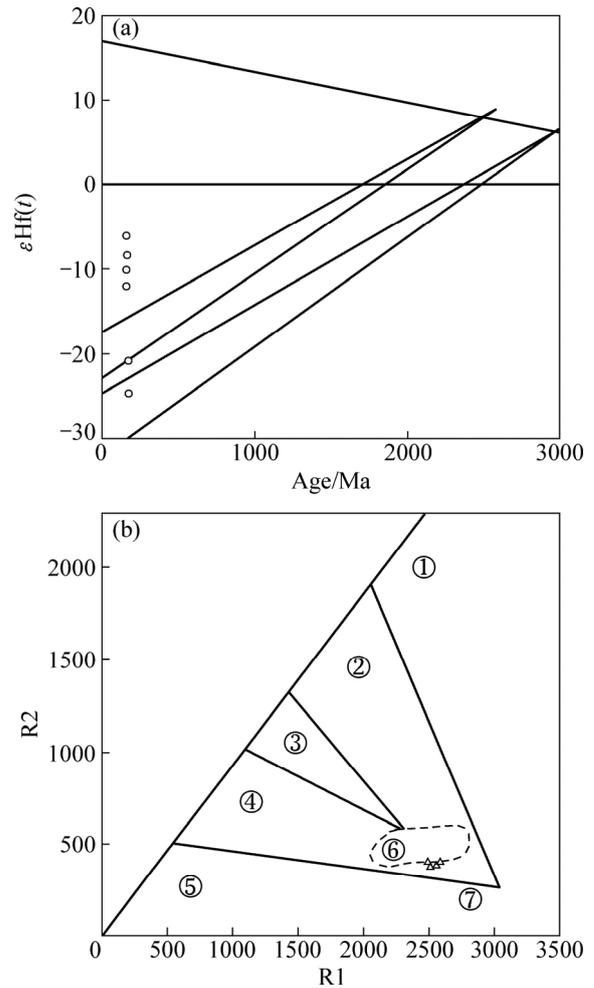


图 8 八团岩体锆石的 Hf 同位素特征和 R1-R2 关系: ①—地幔斜长花岗岩; ②—破坏性活动板块边缘花岗岩; ③—板块碰撞后隆起期花岗岩; ④—晚造期花岗岩; ⑤—非造山区 A 型花岗岩; ⑥—同碰撞(S 型)花岗岩; ⑦—造山期后 A 型花岗岩

Fig. 8 Zircon Hf isotopic features (a) and R1-R2 relationship map (b) for Batuan intrusion: ①—Mantle plagioclase granite; ②—Destructive active plate boundaries granite; ③—Uplift period granite after plate collision; ④—Serorogenic granite; ⑤—A type granite of anorogenic time; ⑥—Syn-collision granite (S type); ⑦—A type granite of Post orogenic

(MPG), 这些特征说明岩体形成环境为同碰撞环境, 具有大陆内部环境下侵入岩的特点。

综上所述可知, 八团岩体属于硅酸过饱和岩石, 具有富钠富钾低钙的特征, 里特曼组合指数(σ)平均为 3.38, 属典型的钙碱性岩浆岩, 铝饱和指数 A/CNK 值均大于 1.1, 同时八团岩体微量元素特征为 Rb、Th 强烈富集, Nb、Sr、Ti 强烈亏损, 岩体中轻稀土富集强

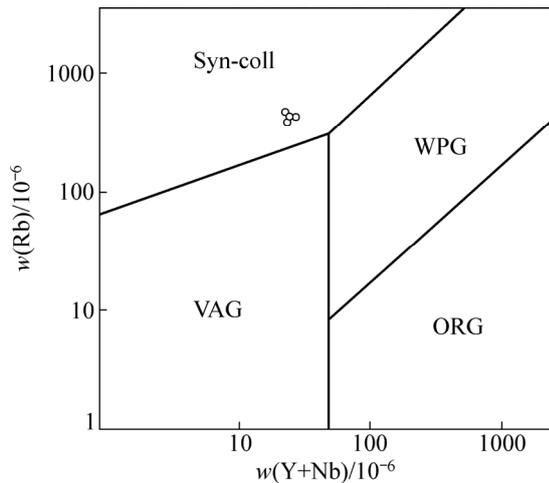


图9 八团岩体 $w(Y+Nb)$ - $w(Rb)$ 关系(WPG—板内花岗岩; Syn-COLG—同碰撞花岗岩; VAG—火山弧花岗岩; ORG—洋脊花岗岩)

Fig. 9 $w(Y+Nb)$ - $w(Rb)$ relationship diagram of Batuan intrusion (WPG—Intraplate granite; Syn-COLG—Syn collision granite; VAG—Volcano arc granite; ORG—Ocean ridge granite)

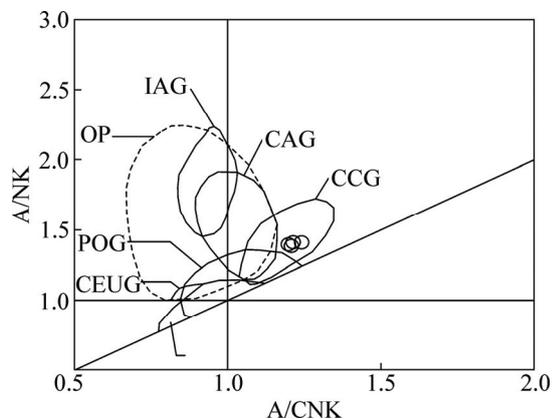


图10 八团岩体 A/CNK - A/NK 关系(据文献[16]修改)(IAG—岛弧花岗岩; CAG—大陆弧花岗岩; CCG—大陆碰撞花岗岩; OP—大洋斜长花岗岩; POG—后造山花岗岩; CEUG—与大陆的造陆抬升有关的花岗岩)

Fig. 10 $w(Y+Nb)$ - $w(Rb)$ relationship diagram of Batuan intrusion modified from Ref. [16] (IAG—Island arc granite; CAG—Continental arc granite; CCG—Continental collision granite; OP—Oceanic plagiogranite; POG—Post orogenic granite; CEUG—Granite related with the epeirogenic uplift)

烈,重稀土亏损严重,分馏明显,稀土配分曲线均向右倾且具有明显的负Eu异常。岩体的Hf同位素特征表明岩体的成岩物质主要来源与地壳,岩体形成的构

造环境属于同碰撞环境。以上特征综合显示:八团岩体为典型的过铝质S型花岗岩,是由地壳经不同程度熔融而形成的。

5 结论

1) 八团花岗岩中岩浆锆石的LA-ICP-MS U-Pb定年结果为 (159.2 ± 4.6) Ma($N=10$, MSWD=0.62),表明其属于燕山期岩浆侵入活动的产物。

2) 八团岩体属于硅酸过饱和岩石,具有富钠富钾低钙的特征,铝饱和指数A/CNK值均大于1.1,同时又兼具Rb、Th强烈富集,Nb、Sr、Ti强烈亏损的特点,岩体中轻稀土富集强烈,重稀土亏损严重,分馏明显,稀土配分曲线均向右倾且具有明显的负Eu异常,表明该类花岗岩是由上地壳经不同程度熔融而形成的。

3) 八团岩体为典型的S型花岗岩,形成于同碰撞的构造背景。

REFERENCES

- [1] 宋新华,周珣若. 邓阜仙花岗岩的构造环境、岩浆来源与演化[J]. 现代地质, 1992, 6(4): 458-469.
SONG Xin-hua, ZHOU Xun-ruo. Tectonic setting, magmatic source and evolution of Dengfuxian granite[J]. Geoscience, 1992, 6(4): 458-469.
- [2] 蔡杨,黄卉,谢旭. 湖南邓阜仙钨矿地质及岩体地球化学特征[J]. 矿床地质, 2010(S1): 1067-1068.
CAI Yang, HUANG Hui, XIE Xu. Geological and rock mass geochemical features of Dengfuxian tungsten deposit[J]. Mineral Deposits, 2010(S1): 1067-1068.
- [3] 黄卉,马东升,陆建军,蔡杨,谢旭. 湖南邓阜仙复式花岗岩体的锆石U-Pb年代学研究[J]. 矿物学报, 2011(S1): 590-591.
HUANG Hui, MA Dong-sheng, LU Jian-jun, CAI Yang, XIE Xu. The study of Zircon U-Pb geochronology of Dengfuxian composite granite mass in eastern Hunan Province, China[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2011(S1): 590-591.
- [4] 蔡杨,陆建军,马东升,黄卉,张怀峰. 湖南邓阜仙印支晚期二云母花岗岩年代学、地球化学特征及其意义[J]. 岩石学报, 2013, 12: 4215-4231.
CAI Yang, LU Jian-jun, MA Dong-sheng, HUANG Hui, ZHANG Huai-feng. Chronology and geochemical characteristics of late Indosinian Dengfuxian two-mica granite in eastern Hunan Province, China and its significance[J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 12: 4215-4231.
- [5] 倪永进,单业华,伍式崇,聂冠军,张小琼,朱浩峰,梁新权.

- 湘东邓阜仙-锡田印支期花岗岩体的侵位机制[J]. 大地构造与成矿学, 2014, 1: 82-93.
- NI Yong-jin, SHAN Ye-hua, WU Shi-chong, NIE Guan-jun, ZHANG Xiao-qiong, ZHU Hao-feng, LIANG Xin-quan. Emplacement mechanism of Indosinian Dengfuxian-Xitian granite pluton in Eastern Hunan, South China[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2014, 1: 82-93.
- [6] 杨毅. 湖南邓阜仙钨矿花岗岩浆演化与成矿作用研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2014: 17-19.
- YANG Yi. The granite magma evolution and metallogeny research of Dengfuxian tungsten deposit in Hunan Province[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2014: 17-19.
- [7] LIU Yong-sheng, GAO Shan, HU Zhao-chu, GAO Chagn-gui, ZONG Ke-qing, WANG Dong-bing. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths[J]. *Journal of Petrology*, 2010, 51(1/2): 537-571.
- [8] WRIGHT J B. A simple alkalinity ratio and its application to questions of non-orogenic granite genesis[J]. *Geological Magazine*, 1969, 106(4): 370-384.
- [9] 李昌年. 火成岩微量元素地球化学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1992: 1-195.
- LI Chang-nian. *Igneous geochemistry of trace elements*[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1992: 1-195.
- [10] 王中刚, 于学员, 赵振华. 稀土元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1989: 133-212.
- WANG Zhong-gang, YU Xue-yuan, ZHAO Zhen-hua. *Geochemistry of rare earth elements*[M]. Beijing: Science Press, 1989: 133-212.
- [11] DEPAOLO D J, FARMER G L. Isotopic data bearing on the origin of Mesozoic and Tertiary granitic rocks in the western United States[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 1984, 310: 743-753.
- [12] 李晓敏, 胡瑞忠, 毕献武, 彭建堂. 湘南骑田岭花岗岩体地球化学特征及锡成矿潜力[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2010, 40(1): 80-92, 108.
- LI Xiao-min, HU Rui-zhong, BI Xian-wu, PENG Jian-tang. Geochemistry and tin metallogenic potential for Qitianling granite mass in Southern Hunan[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2010, 40(1): 80-92, 108.
- [13] 刘昌实, 朱金初, 沈渭洲, 徐士进, 杨心宜. 华南花岗岩物源成因特征与陆壳演化[J]. 大地构造与成矿学, 1990, 14(2): 125-138.
- LIU Chang-shi, ZHU Jin-chu, SHEN Wei-zhou, XU Shi-jing, YANG Xin-xuan. Evolution of continental crust and material source (genesis) of granitoids in South China[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 1990, 14(2): 125-138.
- [14] KOSCHEK G. Origin and significance of the SEM cathodoluminescence from zircon[J]. *Journal of Microscopy*, 1993, 171: 223-232.
- [15] 吴元保, 郑永飞. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约[J]. 科学通报, 2004, 49(16): 1589-1604.
- WU Yuan-bao, ZHENG Yong-fei. Zircon genetic mineralogy research and restriction of U-Pb age interpretation[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(16): 1589-1604.
- [16] 简平, 程裕淇, 刘敦一. 变质锆石成因的岩相学研究高级变质岩 U-Pb 年龄解释的基本依据[J]. 地学前缘, 2001, 8(3): 183-191.
- JIAN Ping, CHENG Yu-qi, LIU Dun-yi. Petrographical study of metamorphic zircon: Basic roles in interpretation of U-Pb age of high grade metamorphic rocks[J]. *Earth Science Frontiers*, 2001, 8(3): 183-191.
- [17] ZHENG Wei, CHEN Mao-hong, ZHAO Hai-jie, ZHAO Cai-sheng, HOU Ke-jun, LIU Jian-xin, LI Xue-meng, CHANG Li-zhong. Zircon U-Pb geochronological and Hf isotopic constraints on petrogenesis of Yingwuling tungsten polymetallic deposit in Guangdong Province and its geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29(12): 4121-4135.
- [18] HAWKESWORTH C, KEMP A I S. Evolution of the continental crust[J]. *Nature*, 2006, 443: 811-817.
- [19] BARBARIN B. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments[J]. *Lithos*, 1999, 46: 605-626.
- [20] 肖庆辉, 邓晋福, 马大铨. 花岗岩研究思维与方法[M]. 北京: 地质出版社, 2002: 1-294.
- XIAO Qing-hui, DENG Jin-fu, MA Da-chuo. *Granite research thinking and method*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2002: 1-294.

(编辑 李艳红)