

柏道远, 陈必河, 钟响, 等. 湘西南印支期五团岩体锆石 SHRIMP U-Pb 年龄、地球化学特征及形成背景[J]. 中国地质, 2014, 41(6): 2002-2018.
Bai Daoyuan, Chen Bihe, Zhong Xiang, et al. Zircon SHRIMP U-Pb age, geochemistry and tectonic setting of Indosinian Wutuan pluton in southwestern Hunan Province[J]. Geology in China, 2014, 41(6): 2002-2018(in Chinese with English abstract).

湘西南印支期五团岩体锆石 SHRIMP U-Pb 年龄、地球化学特征及形成背景

柏道远 陈必河 钟响 贾朋远 熊雄

(湖南省地质调查院, 湖南长沙 410016)

摘要:五团岩体位于湘西南, 主要由黑云母二长花岗岩和二云母二长花岗岩组成, 具块状构造。用 SHRIMP 对黑云母二长花岗岩中的锆石进行了 U-Pb 同位素测试, 其中 9 颗锆石给出的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 (220.5 ± 4.4) Ma, 该年龄被解释为岩体的形成年龄, 表明岩体形成于晚三叠世中期。岩石高硅、富铝、高钾、中碱, SiO_2 含量 70.64%~75.32%, 平均 72.33%; Al_2O_3 含量 13.24%~16.37%, 平均 14.47%; K_2O 含量 4.27%~6.66%, 平均 5.10%; 全碱 ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) 含量为 6.71%~8.46%, 平均 7.65%; $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值为 1.54~5.34, 平均 2.23。ASI 值平均为 1.24, 总体属铁质、高钾钙碱性-钾玄岩系列过铝质花岗岩类。Ba、Nb、Sr、P、Ti 表现为明显亏损, Rb、(Th+U+K)、(La+Ce)、Nd、(Zr+Hf+Sm)、(Y+Yb+Lu) 等则相对富集。 ΣREE 含量为 84.35~222.90 $\mu\text{g/g}$, 平均 156.81 $\mu\text{g/g}$; δEu 值 0.17~0.52, 平均 0.39; $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值为 1.81~17.12, 平均 10.57。 I_{Sr} 值为 0.71813~0.72110, $\epsilon_{\text{Sr}}(t)$ 值为 193.5~235.6, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 -9.78~-9.70, t_{DM} 为 1.78~1.79 Ga。C/MF-A/MF 图解显示源岩为变质泥质岩和碎屑岩。强过铝花岗岩样品的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 比值大部分小于 100。上述地球化学特征表明花岗岩为 S 型花岗岩, 源岩主要为中、上地壳酸性岩石。花岗岩微量元素构造环境判别图解主要显示为后碰撞构造环境。基于岩石成因、构造环境判别以及区域构造演化过程, 推断五团岩体的具体形成机制为: 在中三叠世印支运动之后挤压应力相对松弛、深部压力降低的后碰撞构造环境下, 因地壳增厚而升温的中、上地壳岩石减压熔融并向上侵位; 此外, 深部软流圈上涌和热量的向上传递对五团花岗质岩浆的形成可能起到一定作用。

关键词: 锆石 U-Pb; SHRIMP; 地球化学特征; S 型花岗岩; 后碰撞构造环境; 五团; 湘西南

中图分类号: P588.12; P595 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2014)06-2002-17

早中生代东亚地区大地构造背景发生重要转折、构造动力体制发生剧烈变动时期^[1-3], 华南地区早中生代构造特征及演化因此存在较多争议。如关于中三叠世晚期印支运动特征, 有人认为变形强烈, 区域上古生界中 NNE 向为主的盖层褶皱主要形成于印支运动^[4-11]; 有人认为印支运动强度不大, 上古生界中 NNE 向主体褶皱形成于燕山运动甚至

更晚^[12-17]。再如对印支期花岗岩成因背景, 存在岛弧^[18,19]、后碰撞^[20-22]、早期同碰撞后期后碰撞^[23]、后造山^[24]、挤压加厚地壳局部伸展^[25]等不同观点。鉴于印支运动与印支期花岗岩的时空相关性, 对印支期花岗岩进行更深入全面的研究, 将不仅有助于揭示其成因背景, 也有助于揭示印支运动的构造特征。

近年来笔者对湘西南地区五团岩体的成岩年

收稿日期: 2013-11-13; **改回日期:** 2014-03-12

基金项目: 中国地质调查局“湖南 1:25 万武冈市和永州市幅区调修测”项目(1212011120793)、“中国地质构造区划综合研究与区域地质志修编”项目(1212010811032)联合资助。

作者简介: 柏道远, 男, 1967 年生, 研究员级高级工程师, 长期从事区域地质调查与基础地质研究; E-mail: daoyuanbai@sina.com。

代、地球化学特征、成因及形成构造背景进行了研究,认为其为印支运动之后于后碰撞环境下形成的过铝质花岗岩,主要与陆内造山作用导致的陆壳增厚升温及其后的减压熔融有关。这一认识佐证了华南印支期花岗岩主要形成于后碰撞构造环境的认识,同时也为印支运动的强变形构造特征提供了一定约束。

1 地质概况

五团岩体位于雪峰造山带南段东缘,出露面积约188 km²,呈岩基、岩枝或岩脉状产出,多侵入于新元古代高洞群、南华系中(图1),在干路底、江头司等地与地层呈断层接触。岩体所侵入围岩多具明显热接触变质,形成长英质角岩、堇青石角岩。接触面一般

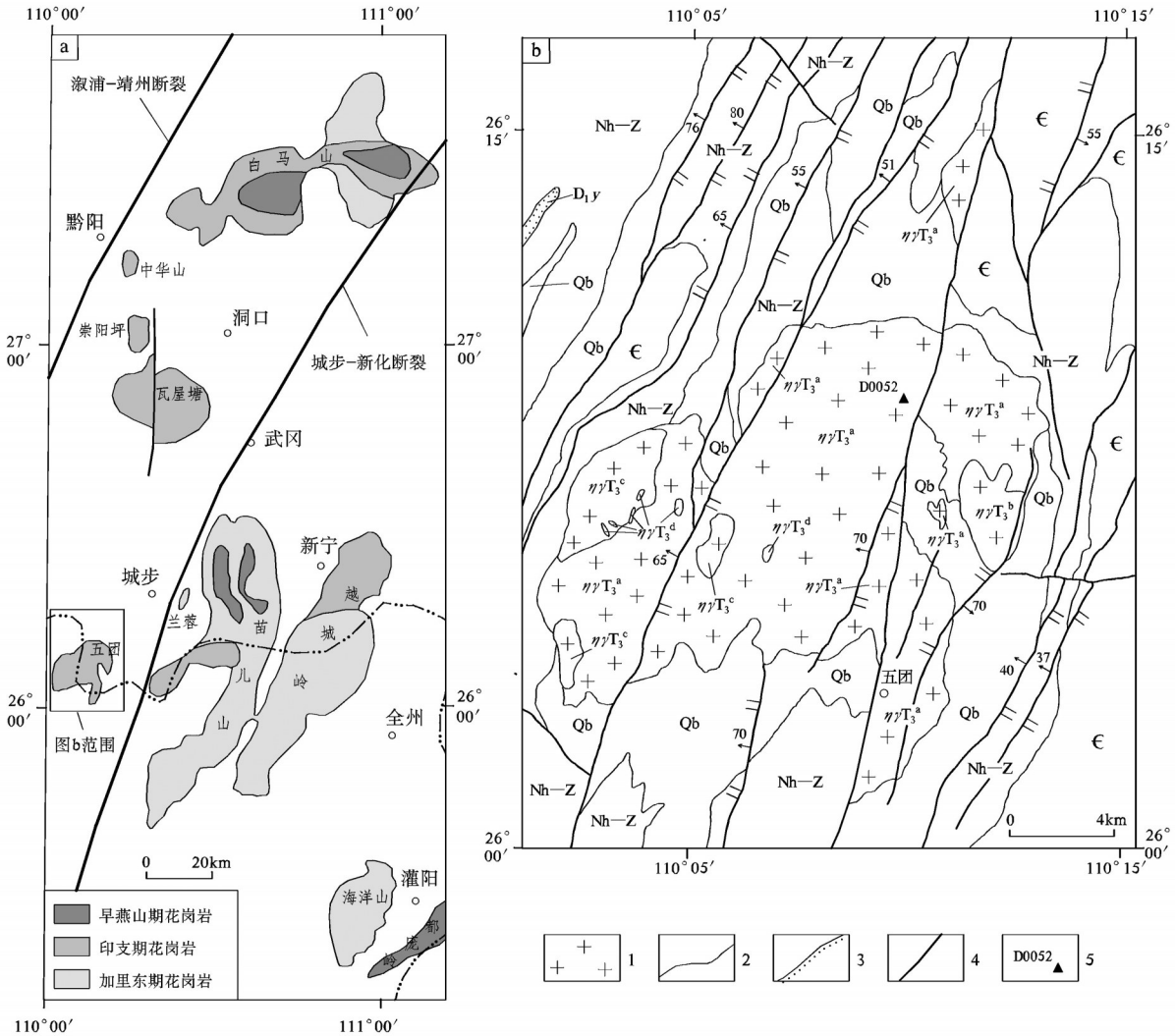


图1 五团岩体地理位置及地质略图

1—花岗岩;2—地质界线;3—角度不整合界线;4—断裂;5—锆石 SHRIMP U-Pb 年龄样品位置及编号;D_{1y}—早泥盆世沅口组;ε—寒武系;Nh-Z—南华系—震旦系;Qb—青白口系高洞群;ηγT₃^a—细中粒斑状黑云母二长花岗岩;ηγT₃^b—粗中粒斑状黑云母二长花岗岩;ηγT₃^c—中细粒黑(二)云母二长花岗岩;ηγT₃^d—细粒二云母二长花岗岩

Fig. 1 Geographic position and geological sketch map of Wutuan pluton

1—Granite; 2—Geological boundary; 3—Unconformity; 4—Fault; 5—Location and serial number of zircon SHRIMP U-Pb dating sample; D_{1y}—Early Devonian Yuankou Formation; ε—Cambrian; Nh-Z—Nanhuan-Sinian; Qb—Gaojian Group of Qingbaikouan System; ηγT₃^a—Fine-medium-grained porphyritic biotite monzogranite; ηγT₃^b—Coarse-medium-grained porphyritic biotite monzogranite; ηγT₃^c—Medium-fine-grained biotite-dimicaceous monzogranite; ηγT₃^d—Fine-grained dimicaceous monzogranite

较平整或呈舒缓波状。局部地段与围岩接触界线附近见有混合岩化现象,围岩中形成宽窄不一的长英质脉体。近接触带的岩体内偶见围岩捕虏体。岩石多具块状构造,同侵位面理构造不发育。

五团岩体岩性组成有黑云母二长花岗岩和二云母二长花岗岩。根据侵入体之间接触关系、岩性和岩石结构以及岩石地球化学等特征,岩体可划分为4个侵入期次(图1),自早至晚依次为细中粒斑状黑云母二长花岗岩($\eta\gamma T_3^a$)、粗中粒斑状黑云母二长花岗岩($\eta\gamma T_3^b$)、中细粒黑云母二长花岗岩($\eta\gamma T_3^c$)和微细粒二云母二长花岗岩($\eta\gamma T_3^d$),以第一次侵入花岗岩($\eta\gamma T_3^a$)为主。各期次侵入体之间多呈脉动侵入接触,部分呈涌动侵入接触,少数界线不明显,甚至出现小范围的岩浆混合现象,表明4个侵入期次为同一阶段岩浆事件产物。造岩矿物主要为钾长石(32%~44%)、斜长石(23%~40%)、石英(22%~35%)和黑云母(4%~8%),晚次侵入体偶见($\eta\gamma T_3^c$)或含少量($\eta\gamma T_3^d$)白云母。较早两次侵入花岗岩斜长石(An值29~36)基性程度明显高于较晚两次花岗岩(An值20~31)。

早中侵入次岩体内发育暗色微粒包体,包体呈椭圆状,大小数至数十厘米,主要岩性为深灰色微细粒斑状角闪石黑云母闪长岩。大部分包体与寄主岩界线清楚,个别呈过渡关系,少量包体边缘具数毫米的冷凝边。部分包体内磷灰石呈细针状。上述特征表明包体为中基性岩浆上侵并混入酸性岩浆的产物。

2 分析方法

年龄测定方法:将五团岩体细中粒斑状黑云母二长花岗岩样品粗碎至60目以下后进行人工分选淘洗,再于双目镜下挑选出晶形较好且透明度较高的锆石。将待测锆石样品与标准锆石样品TEM(年龄为417 Ma)粘帖在一起制作成环氧树脂样品靶,固结后打磨抛光,然后进行可见光和阴极发光显微图像拍摄。锆石的阴极发光照相在中国地质科学院矿产资源研究所电子探针研究室完成。锆石SHRIMP U-Pb分析在北京离子探针中心SHRIMP II上完成,分析原理和流程见Compston等^[26]、Williams等^[27]资料。应用标准锆石TEM(417 Ma)进行元素间的分馏校正。一次离子流 O^+ 强度为5~8 nA。一次离子流束

斑直径为25~30 μm 。样品测定时,在数据采集前用 O^+ 对样品表面进行清洗的时间为120~180 s。数据处理采用Ludwig博士编写的SQUID1.0及ISOPLOT程序^[28,29]。普通铅根据实测 ^{204}Pb 进行校正。

主量元素、微量元素和稀土元素由湖北武汉综合岩矿测试中心测定。将原岩粉碎至200目后测试。主量元素除 CO_2 采用非水滴定法、 H_2O^+ 采用高温加热-浓硫酸吸收-重量法外,其他氧化物均采用X射线荧光光谱法(XRF)分析;样品采用无水四硼酸锂作为熔剂。微量元素分别采用X射线荧光光谱法(XRF)、电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)、原子荧光光谱法(AFS)、发射光谱法(ES)等方法测定;除W、Mo采用碱溶法测定外,其他微量元素均采用酸溶法测定。稀土元素采用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)分析,样品处理采用酸溶法。

Rb-Sr和Sm-Nd同位素测定由武汉地质矿产研究所同位素室完成,分析前将样品粉碎至200目。

Rb-Sr同位素测定:采用阳离子树脂(Dowex50 \times 8)交换法分离和纯化铷、锶,用热电离质谱仪MAT261分析Rb、Sr同位素组成,用同位素稀释法计算试样中的铷、锶含量及锶同位素比值,用GBW04411、NBS607和NBS987标准物质分别对分析流程和仪器进行监控;全流程Rb、Sr空白分别为 $0.4\times 10^{-9}\text{g}$ 和 $0.8\times 10^{-9}\text{g}$ 。

Sm-Nd同位素分析:取加入 $^{145}\text{Nd}+^{149}\text{Sm}$ 混合稀释剂和不加稀释剂的样品各1份,以氢氟酸和高氯酸溶解后用Dowe50 \times 8阳离子交换树脂进行分离和纯化。加了稀释剂的样品用于Sm、Nd含量质谱分析;未加稀释剂的解吸液上P507有机萃取树脂柱分离和纯化Nd以用于Nd同位素比值分析。Sm、Nd含量和Nd同位素比值质谱分析采用热电离质谱仪Triton完成,Sm、Nd含量采用同位素稀释法公式计算得到。用GBW04419和ZkbzNd(JMC)标准物质对分析流程和仪器进行监控。全流程Nd、Sm空白分别为 $1\times 10^{-10}\text{g}$ 和 $0.7\times 10^{-10}\text{g}$ 。

3 锆石SHRIMP U-Pb同位素测定

所分析的锆石U-Pb同位素样品(D0052)是来自五团岩体的中-细粒斑状黑云母二长花岗岩。共测得13颗锆石U-Pb同位素数据(表1、图3)。所分析锆石均为透明自形晶体,阴极发光图像均显示出

表1 黑云母二长花岗岩样品(D0052)中锆石 SHRIMP U-Pb 同位素分析结果

Table 1 U-Pb isotope composition of zircons in the biotite monzogranite sample from Wutuan pluton as measured by SHRIMP

测点	$^{206}\text{Pb}_c/\%$	U /10 ⁻⁶	Th /10 ⁻⁶	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}^*$ 10 ⁻⁶	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ (Ma)	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ (Ma)	$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$ ±%	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$ ±%	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$ ±%	
1.1	0.07	2325	974	0.43	72.1	440.0 ±9.5	508 ±19	0.0574	0.9	0.0706	2.2
2.1	0.07	3476	461	0.14	76.5	221.3 ±4.3	276 ±27	0.0518	1.2	0.0349	2.0
3.1	0.08	3238	388	0.12	44.5	219.6 ±4.3	257 ±30	0.0514	1.3	0.0347	2.0
4.1	0.12	1334	271	0.21	89.1	217.8 ±4.4	315 ±34	0.0527	1.5	0.0344	2.0
5.1	0.60	579	329	0.59	46.3	220.5 ±4.5	317 ±90	0.0527	4.0	0.0348	2.1
6.1	0.52	3740	614	0.17	76.4	228.3 ±5.0	373 ±43	0.0541	1.9	0.0361	2.2
7.1	0.20	2365	527	0.23	58.6	231.1 ±4.6	382 ±32	0.0543	1.4	0.0365	2.0
8.1	0.26	2739	336	0.13	43.3	216.6 ±4.3	281 ±38	0.0519	1.7	0.0342	2.0
9.1	0.38	2337	1151	0.51	73.3	233.1 ±4.6	300 ±41	0.0523	1.8	0.0368	2.0
10.1	0.16	3135	1537	0.51	79.1	211.5 ±4.2	304 ±32	0.0524	1.4	0.0334	2.0
11.1	0.12	1901	449	0.24	72.1	211.3 ±4.2	313 ±41	0.0526	1.8	0.0333	2.0
12.1	0.11	2160	609	0.29	76.5	217.1 ±4.3	281 ±35	0.0519	1.5	0.0343	2.0
13.1	0.08	1113	368	0.34	44.5	217.6 ±4.4	344 ±43	0.0534	1.9	0.0343	2.0

注: $^{206}\text{Pb}_c/\%$ 为全部 ^{206}Pb 中属于普通铅 ^{206}Pb 所占的%; Pb^* 为放射性成因铅的含量, 普通铅根据实测 ^{204}Pb 进行校正。

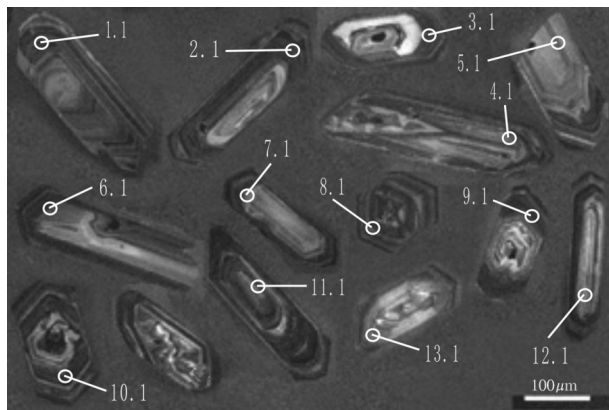


图2 黑云母二长花岗岩样品(D0052)中锆石阴极发光图像
Fig.2 Cathodoluminescence images of zircons from biotite monzogranite (sample D0052)

岩浆结晶成分环带(图2)。

Th/U 含量比值高, 为 0.12~0.57, 表明锆石为岩浆成因(大于 0.1)。所有测点均偏离谐和线而于其右侧分布, 可能与 ^{204}Pb 测得值偏低导致被扣除的 ^{204}Pb 偏低有关, 或者是 ^{204}Pb 测定值正确但测定时背景值偏大导致 ^{204}Pb 相对偏低所致。1.1 测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 (440.0±9.5)Ma, 显然属继承性岩浆锆石, 反映出早古生代后期构造-岩浆事件。其他 12 个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值变化为 211.3~233.1 Ma, 其中 6.1、7.1 和 9.1 等 3 个测点年龄值为 228.3~233.1 Ma, 平均 (230.8±4.7)Ma; 其余 9 个测点年龄值在误差范围内一致, 为 211.3~221.3 Ma, 加权平均年龄为

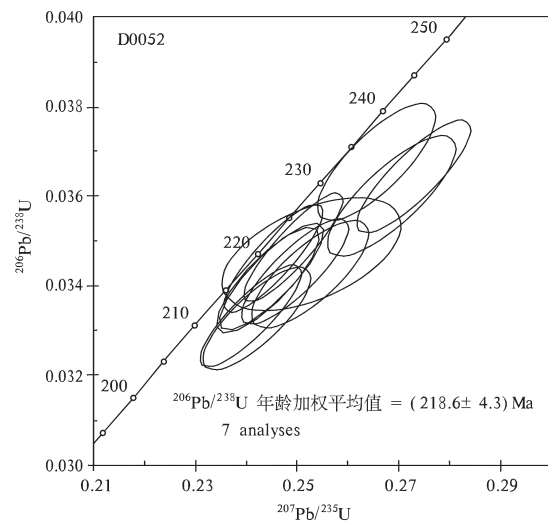


图3 黑云母二长花岗岩样品(D0052)中锆石 U-Pb 谐和图
Fig.3 SHRIMP U-Pb concordia diagram of zircons from biotite monzogranite (sample D0052)

(220.5±4.4)Ma, 可视为五团岩体的侵位年龄, 表明岩体形成于晚三叠世中期。值得指出的是, (230.8±4.7)Ma 的年龄可能反映了中三叠世末—晚三叠世初的岩浆活动, 邻区印支期苗儿山花岗岩中即存在包含先期岩浆锆石的情况^[30]。

4 岩石地球化学特征

4.1 主元素地球化学特征

印支期五团岩体的主元素分析结果如表 2 所示。岩石 SiO_2 含量较高, 为 70.64%~75.32% (SiO_2 及

以下主元素含量值均系无水化处理结果,故与表2略有差别),平均72.33%;自早期至晚期侵入体含量总体逐渐增高。随着SiO₂含量的增加,Al₂O₃、FeO^T、TiO₂、MgO、CaO等总体呈减少趋势但较散乱,而Na₂O、K₂O、P₂O₅则未显示出相关性变化(图4)。Al₂O₃含量高,为13.24%~16.37%,平均14.47%。K₂O含量较高,为4.27%~6.66%,平均5.10%;全碱(ALK)含量中等,(Na₂O+K₂O)为6.71%~8.46%,平均7.65%;K₂O均大于Na₂O,K₂O/Na₂O比值在1.54~5.34,平均为2.23。FeO^T含量较高,为1.55%~3.49%,平均2.99%。TiO₂、MgO、CaO、P₂O₅平均含量分别为0.29%、0.69%、1.27%、0.12%。

根据Frost等^[31]提出的Fe数((FeO)/(FeO+MgO)),这里“FeO”为FeO与Fe₂O₃之和(全铁),修改的碱钙指数(Na₂O+K₂O-CaO)和铝饱和指数(ASI)(Al/(Ca-1.67P+Na+K)(分子比))等3个地球化学变量以及ANK值(Al/(Na+K)(分子比)),印支期五团岩体花岗岩总体属铁质、钙碱性—碱钙性及过铝质花岗岩(图5-a~c)。ASI均大于1.0(1.03~1.70),平均达1.24,属弱过铝—强过铝花岗岩。在硅-钾图中,总体属高钾钙碱性—钾玄岩系列(图5-d)。

在SiO₂-(K₂O+Na₂O)图解中,印支期五团岩体样品均落于花岗岩区(图6)。

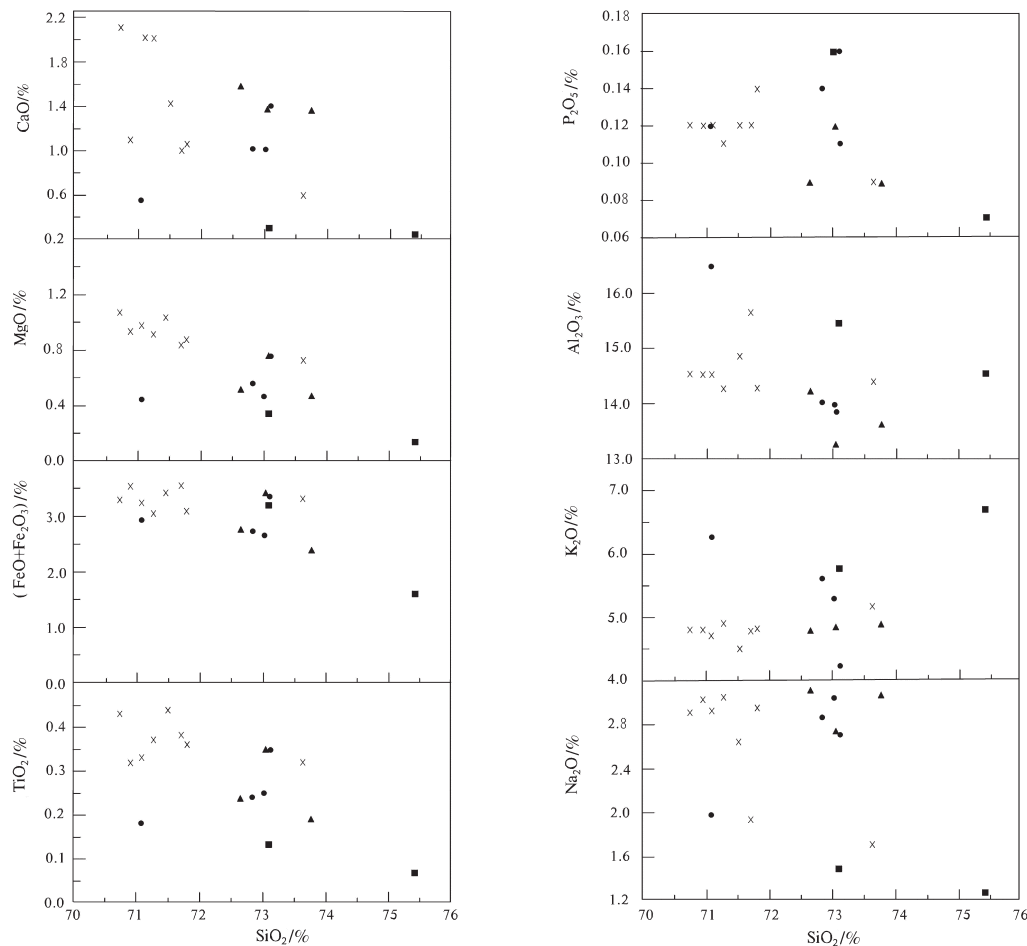


图4 印支期五团岩体主要氧化物Harker图解

×—细中粒斑状黑云母二长花岗岩;●—粗中粒斑状黑云母二长花岗岩;▲—中细粒黑云母二长花岗岩;■—微细粒二云母二长花岗岩

Fig.4 Harker diagrams for the Indosinian Wutuan granitic rocks

×—Fine-medium-grained porphyritic biotite monzogranite; ●—Coarse-medium-grained porphyritic biotite monzogranite; ▲—Medium-fine-grained biotite monzogranite; ■—Fine-grained dimicaceous monzogranite

表2 印支期五团岩体的主量元素组成(%)

Table 2 Petrochemical components of granites in Indosinian Wutuan pluton (%)

样号	代号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	CO ₂	H ₂ O ⁺	总和	ASI	ANK	ALK	K ₂ O/ Na ₂ O	A/MF
CB1071	$\eta\gamma T_3^d$	73.02	0.07	14.08	0.26	1.27	0.02	0.14	0.23	1.21	6.46	0.07	0.12	2.89	99.84	1.51	1.56	7.91	5.34	5.74
CB504	$\eta\gamma T_3^d$	71.01	0.13	15.01	0.74	2.38	0.05	0.34	0.28	1.46	5.61	0.16	0.06	2.69	99.92	1.70	1.77	7.27	3.84	2.95
CB1068	$\eta\gamma T_3^c$	73.19	0.19	13.51	0.01	2.35	0.05	0.47	1.34	3.06	4.88	0.09	0.18	0.50	99.82	1.07	1.31	7.99	1.59	2.98
CB500	$\eta\gamma T_3^c$	72.02	0.24	14.10	0.16	2.57	0.06	0.52	1.58	3.07	4.74	0.09	0.08	0.73	99.96	1.09	1.38	7.87	1.54	2.74
CB496	$\eta\gamma T_3^c$	72.43	0.35	13.14	0.23	3.15	0.06	0.76	1.37	2.72	4.80	0.12	0.11	0.74	99.98	1.09	1.36	7.58	1.76	1.97
HXW2	$\eta\gamma T_3^b$	72.28	0.35	13.67	0.60	2.75	0.05	0.75	1.38	2.67	4.22	0.11	0.02	1.02	99.87	1.20	1.52	6.97	1.58	2.10
CB1102	$\eta\gamma T_3^b$	72.33	0.25	13.85	0.12	2.50	0.05	0.47	1.01	3.02	5.26	0.16	0.10	0.69	99.81	1.12	1.30	8.35	1.74	2.84
CB1057	$\eta\gamma T_3^b$	72.07	0.24	13.88	0.24	2.45	0.05	0.53	1.00	2.83	5.55	0.14	0.10	0.76	99.84	1.13	1.30	8.46	1.96	2.72
CB551	$\eta\gamma T_3^b$	69.45	0.18	16.00	0.55	2.32	0.05	0.44	0.54	1.92	6.09	0.12	0.08	2.20	99.94	1.51	1.64	8.20	3.17	3.17
HXW1	$\eta\gamma T_3^a$	70.40	0.43	14.57	0.47	2.95	0.06	1.01	1.40	2.61	4.43	0.12	0.03	1.36	99.84	1.27	1.60	7.15	1.70	2.00
CB550	$\eta\gamma T_3^a$	71.98	0.31	14.03	0.70	2.52	0.06	0.71	0.59	1.67	5.04	0.09	0.08	2.17	99.95	1.53	1.71	6.86	3.02	2.27
CB489	$\eta\gamma T_3^a$	69.77	0.37	15.23	0.43	3.00	0.06	0.82	0.97	1.89	4.65	0.12	0.11	2.53	99.95	1.56	1.87	6.71	2.46	2.23
CB1105	$\eta\gamma T_3^a$	71.18	0.36	14.12	0.25	2.80	0.05	0.86	1.73	2.91	4.76	0.14	0.08	0.58	99.82	1.09	1.42	7.73	1.64	2.19
CB1090	$\eta\gamma T_3^a$	70.23	0.32	14.37	0.18	3.30	0.06	0.92	1.81	2.99	4.77	0.12	0.08	0.65	99.8	1.08	1.42	7.83	1.60	1.99
CB1028	$\eta\gamma T_3^a$	70.45	0.33	14.39	0.21	3.00	0.06	0.96	2.02	2.88	4.65	0.12	0.12	0.61	99.8	1.08	1.47	7.59	1.61	2.07
CB1051	$\eta\gamma T_3^a$	70.55	0.37	14.14	0.19	2.85	0.05	0.90	1.99	3.01	4.85	0.11	0.10	0.70	99.81	1.03	1.38	7.93	1.61	2.16
CB1085	$\eta\gamma T_3^a$	69.79	0.42	14.33	0.31	2.95	0.06	1.05	2.08	2.84	4.73	0.12	0.12	1.01	99.81	1.07	1.46	7.66	1.67	1.99

注: ASI=Al/(Ca-1.67P+Na+K)(分子比)^[31]; ANK=Al/(Na+K)(分子比); A/MF=Al₂O₃/(MgO+FeO)(分子比)。

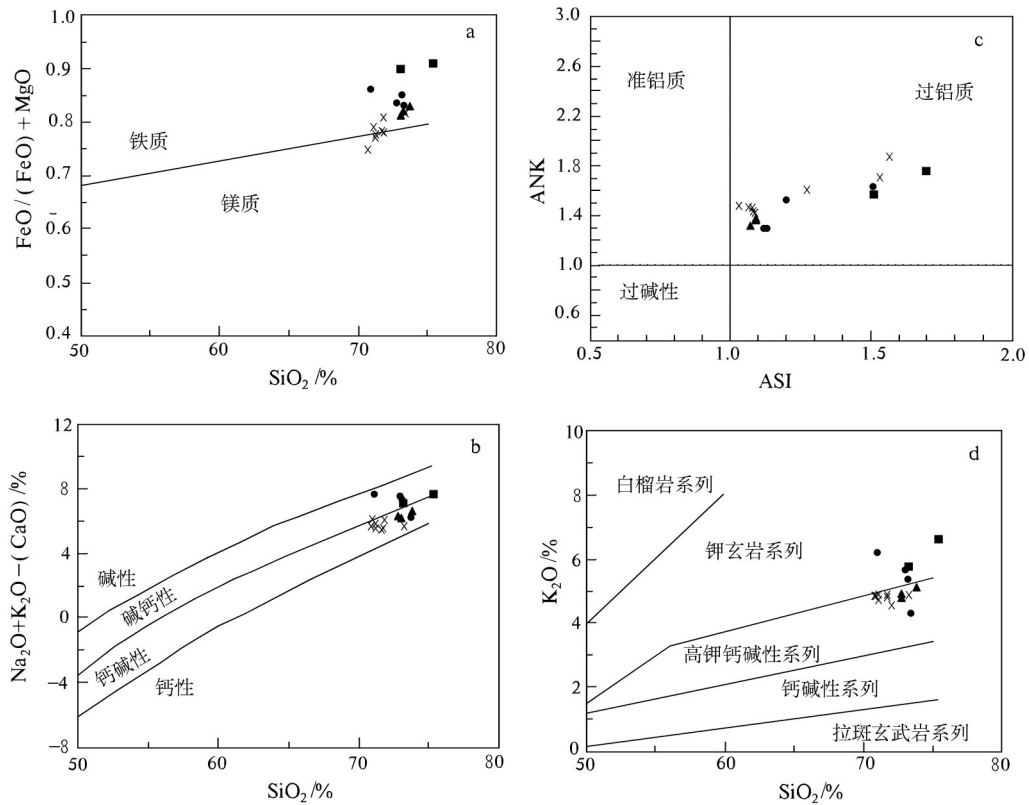


图5 印支期五团岩体地球化学分类图解

(a-c据[31]; d据[32];图例同图4)

Fig.5 Diagrams of geochemical classification for the Indosinian Wutuan granitoids

(a-c after[31]; d after[32]; symbols as for Fig. 4)

4.2 微量和稀土元素地球化学特征

印支期五团岩体微量元素和稀土元素分析结果分别见表3和表4,不相容元素对原始地幔标准化分布曲线和稀土元素球粒陨石标准化曲线分别见图7和图8。

在不相容元素对原始地幔标准化分布曲线图上(图7),五团岩体花岗岩明显富集大离子亲石元素。与相邻元素相比,Ba、Nb、Sr、P、Ti表现为明显或强烈的亏损,而Rb、(Th+U+K)、(La+Ce)、Nd、(Zr+Hf+Sm)、(Y+Yb+Lu)等则相对富集,显示出一般壳源花岗岩特征。Nb和Ta因发生明显分馏而导致前者相对显著亏损,也暗示花岗岩具有壳源花岗岩特征^[34]。Rb、Ba、Sr、Ti含量的变化主要与造岩矿物有关,Rb升高和Sr、Ba降低可能由钾长石、斜长石和黑云母分离结晶所造成,Ti负异常可能与钛铁矿的分离结晶作用有关。P亏损暗示岩浆就位之前可能发生过磷灰石的分离结晶。此外,在总体分布型式相近的情况下,部分样品显示一定变化,如最晚次单元的CB1071具有更强烈的Ba、Nb、Sr、P、Ti亏损,显示出高程度演化特征;样品CB551和CB1028的U表现为谷,而其他样品表现为峰;样品CB504和CB551的(Y+Yb+Lu)明显低于其他样品。

五团岩体花岗岩稀土元素含量较低(表4), ΣREE 为84.35~222.90 $\mu\text{g/g}$,平均为156.81 $\mu\text{g/g}$ 。轻稀土总体上明显相对重稀土富集, $\Sigma\text{Ce}/\Sigma\text{Y}$ 为1.11~6.01,平均为3.93;(La/Yb)_N值为1.81~17.12,平均10.57。Eu显著亏损, δEu 值0.17~0.52,平均为0.39。其中较早两次侵位花岗岩的 δEu 值平均为0.42,高于较晚两次侵位花岗岩(δEu 值平均为0.30),结合前者斜长石基性程度高于后者(见前文)分析,Eu的亏损应与经历了斜长石的分离结晶作用有关。除样品CB1071稀土配分曲线总体近水平而呈海鸥状外,其他样品曲线明显向右倾斜(图8),且除Eu谷外曲线总体平滑,清楚反映出轻、重稀土元素均具有明显的分馏。晚次侵入体的 δEu 值总体($\eta\gamma\text{T}_3^c$ 和 $\eta\gamma\text{T}_3^d$)低于早次侵入体($\eta\gamma\text{T}_3^a$ 和 $\eta\gamma\text{T}_3^b$)(表4),反映岩浆经历了结晶分异的演化过程。尤其是样品CB1071的 δEu 值仅0.17且稀土配分曲线呈水平海鸥状(图8),说明最晚次单元经历了高程度演化。此外,样品CB504和CB551的重稀土含量明显低于其他样品且重稀土分馏明显(图8)。

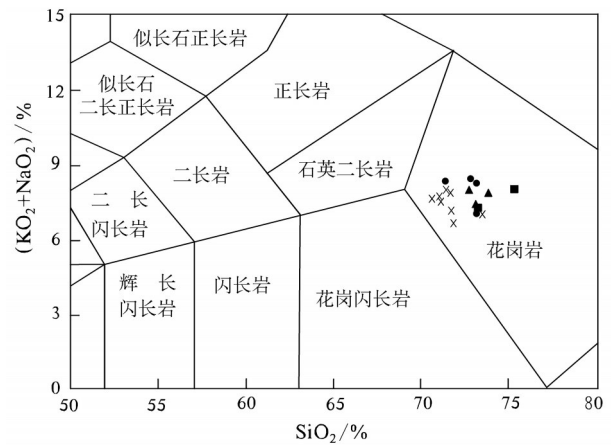


图6 印支期五团岩体 SiO_2 -($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$)图解
(据文献[33];图例同图4)

Fig.6 SiO_2 -($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$) diagram of Indosinian Wutuan pluton
(after)[33]; symbols as for Fig. 4)

五团岩体花岗岩各样品的微量元素蛛网图及稀土元素配分曲线形态总体一致,暗示其为同时代、同来源的产物。

4.3 Sr、Nd同位素地球化学特征

对五团岩体细中粒斑状黑云母二长花岗岩和粗中粒斑状黑云母二长花岗岩分别采集了样品HXW1和HXW2进行Rb-Sr和Sm-Nd同位素测定,分析数据及有关参数值列于表5。由表可知,印支期五团岩体花岗岩 I_{Sr} 值为0.71813~0.72110, $\varepsilon_{\text{Sr}}(t)$ 值为193.5~235.6, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为-9.78~-9.70, $t_{2\text{DM}}$ (两阶段Nd模式年龄)为1.78~1.79 Ga。

5 讨论

5.1 岩浆成因

五团岩体的地球化学特征表明其主要源于地壳重熔:①岩石大部分属ASI值大于1.1的强过铝(SP)花岗岩(ASI值平均达1.24%),而前人研究表明强过铝花岗岩多为地壳物质熔融产物,属于S型花岗岩类^[38,39]。②岩石在微量元素蛛网图(图7)上显示出壳源花岗岩特征(见前述)。③岩体 I_{Sr} 值(0.71813~0.72110)与大陆地壳0.719的 I_{Sr} 平均值^[40]相近;Sr、Nd同位素组成($\varepsilon_{\text{Sr}}(t)=194\sim 236$, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)=-9.78\sim -9.70$)与澳大利亚东南部Lachlan褶皱带S型花岗岩($\varepsilon_{\text{Sr}}(t)=77\sim 204$, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)=-6.1$ 和 -9.8)^[41]类似;在 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)-\varepsilon_{\text{Sr}}(t)$ 图解^[42](图9)中主要落入华南S型花岗

表3 印支期五团岩体微量元素分析结果(10⁻⁶)及有关参数
Table 3 Trace elements analyses of Indosinian Wutuan granites(10⁻⁶)

样号	代号	Sr	Ba	Th	U	Ta	Nb	Zr	Hf	Rb	Cs	Li	B	F	Cl	Sc
CB1071	$\eta\gamma T_3^d$	10.0	29.8	9.6	12.2	1.20	6.6	44.1	2.1	390	23.5	44.3	9.2	246	122	2.90
CB504	$\eta\gamma T_3^d$	33.5	338	18.1	10.4	3.48	15.9	87.3	2.8	341	50.5	56.7	24.1	222	32.0	4.73
CB1068	$\eta\gamma T_3^c$	47.6	221	19.8	8.2	2.90	12.4	82.8	3.1	337	52.2	163	18.5	619	28.6	4.50
CB500	$\eta\gamma T_3^c$	59.7	290	23.5	16.2	2.89	13.5	107	3.4	302	43.0	137	13.0	568	32.1	5.62
CB496	$\eta\gamma T_3^c$	57	353	28.1	11.1	2.58	15.4	126	3.7	284	49.0	123	34.4	643	43.8	7.03
HXW2	$\eta\gamma T_3^b$	82.2	313	42.6	6.3	1.59	14.5	141	4.7	224	41.5	99.1	14.5	496	24.2	6.39
CB1102	$\eta\gamma T_3^b$	41.8	232	31.1	7.6	3.50	19.3	117	3.9	401	35.8	117	19.3	831	29.3	5.00
CB1057	$\eta\gamma T_3^b$	51.3	316	28.4	7.3	2.41	15.4	121	4.0	394	40.2	106	11.5	930	35.0	4.50
CB551	$\eta\gamma T_3^b$	46.9	422	22.2	2.7	2.66	13.2	96.7	3.0	383	34.1	123	24.5	371	32.1	4.63
HXW1	$\eta\gamma T_3^a$	79.6	436	27.2	4.6	2.25	14.6	149	5.0	246	29.7	98.7	5.9	641	44.2	8.31
CB550	$\eta\gamma T_3^a$	37.9	251	27.0	5.4	4.07	17.0	114	4.3	336	58.7	93.0	69.0	536	38.1	7.01
CB489	$\eta\gamma T_3^a$	62.5	532	24.7	4.8	2.17	14.3	144	3.9	250	33.8	87.7	54.1	471	54.7	7.71
CB1105	$\eta\gamma T_3^a$	73.7	263	24.5	7.4	2.00	13.0	129	4.6	309	45.8	74.4	7.1	826	51.1	6.50
CB1090	$\eta\gamma T_3^a$	76.1	395	31.4	7.3	2.60	13.9	135	4.9	321	45.5	93.8	12.2	969	24.5	5.90
CB1028	$\eta\gamma T_3^a$	80.6	372	29.0	3.3	2.00	13.2	140	4.8	298	27.0	109	6.6	800	24.0	6.80
CB1051	$\eta\gamma T_3^a$	78.4	355	21.7	6.0	2.40	13.0	138	5.0	307	39.9	91.3	5.0	795	26.4	7.00
CB1085	$\eta\gamma T_3^a$	81.0	405	25.0	4.4	2.30	11.8	136	4.8	291	43.9	101	4.3	674	26.7	6.90
样号	代号	Be	Cr	Co	Ni	V	W	Sn	Mo	Bi	Cu	Pb	Zn	Sb	Rb/Sr	La/Sm
CB1071	$\eta\gamma T_3^d$	3.6	198	1.7	42.5	7.3	3.40	12.7	4.5	0.69	91.6	62.9	51.2	4.00	39.00	2.89
CB504	$\eta\gamma T_3^d$	5.7	23.6	2.8	16.5	12.3	8.35	20.6	7.6	3.64	33.7	52.8	51.3	2.54	10.18	5.80
CB1068	$\eta\gamma T_3^c$	3.9	12.1	3.3	10.1	21.2	2.00	17.9	5.9	2.29	30.6	45.7	43.0	0.88	7.08	5.03
CB500	$\eta\gamma T_3^c$	5.2	22.0	4.1	12.1	22.1	5.32	18.2	7.7	4.35	25.8	43.6	40.9	1.15	5.06	5.87
CB496	$\eta\gamma T_3^c$	6.4	25.6	5.4	14.1	32.6	1.55	15.9	8.7	4.29	29.8	46.6	52.9	1.27	4.98	5.58
HXW2	$\eta\gamma T_3^b$	5.3	20.9	6.6	10.9	33.1	1.52	9.5	4.3	0.61	16.6	45.6	47.2	1.24	2.72	6.27
CB1102	$\eta\gamma T_3^b$	4.4	13.4	4.0	13.5	27.2	4.40	12.6	7.6	1.69	22.2	36.6	53.0	0.54	9.59	4.58
CB1057	$\eta\gamma T_3^b$	3.0	12.0	3.9	13.3	29.1	1.90	14.2	4.8	5.99	33.4	90.0	87.8	0.56	7.68	4.55
CB551	$\eta\gamma T_3^b$	3.0	28.9	4.3	19.4	18.3	29.50	17.8	9.4	2.54	35.0	97.8	57.5	2.96	8.17	6.17
HXW1	$\eta\gamma T_3^a$	5.3	22.7	8.0	11.9	41.8	13.82	11.4	4.2	3.77	37.1	48.4	72.5	11.33	3.09	6.72
CB550	$\eta\gamma T_3^a$	4.8	25.7	5.2	14.2	28.4	1.01	18.2	6.4	18.4	35.3	44.0	44.5	2.21	8.87	4.73
CB489	$\eta\gamma T_3^a$	3.7	24.2	7.6	16.3	34.8	3.13	12.6	5.9	1.42	29.1	44.2	58.5	1.17	4.00	6.54
CB1105	$\eta\gamma T_3^a$	4.1	16.9	5.8	12.7	38.6	2.30	14.1	4.9	15.3	128	38.8	59.3	0.71	4.19	5.35
CB1090	$\eta\gamma T_3^a$	6.0	28.3	6.1	17.9	37.2	1.20	11.0	8.9	1.59	61.9	42.7	57.9	1.20	4.22	6.09
CB1028	$\eta\gamma T_3^a$	6.0	24.0	6.5	18.3	44.3	1.30	9.1	4.7	0.96	29.9	42.5	59.2	0.81	3.70	5.33
CB1051	$\eta\gamma T_3^a$	4.1	18.4	6.3	15.0	40.8	0.81	13.4	3.8	0.59	51.2	43.3	55.0	0.81	3.92	5.33
CB1085	$\eta\gamma T_3^a$	4.3	18.1	6.5	14.4	44.4	0.81	10.6	3.5	1.69	23.9	40.6	59.9	0.52	3.59	5.45

注: $\epsilon Nd(t)$ 、 $\epsilon Sr(t)$ 、 I_{Sr} 和 t_{2DM} 的计算据陈江峰等^[37]; 计算参数为: $t=220Ma$; $(^{143}Nd/^{144}Nd)_{CHUR}=0.512638$, $(^{147}Sm/^{144}Nd)_{CHUR}=0.1967$, $(^{87}Sr/^{86}Sr)_{UR}=0.7045$, $(^{147}Sm/^{144}Nd)_{CC}=0.118$, $(^{147}Sm/^{144}Nd)_{DM}=0.2137$, $(^{143}Nd/^{144}Nd)_{DM}=0.513151$, $\lambda_{Sm}=6.54 \times 10^{-12} a^{-1}$, $\lambda_{Rb}=1.42 \times 10^{-11} a^{-1}$ 。参数中下角字母代表的含义: UR-锶同位素均一储库; CHUR-球粒陨石均一储库; DM-亏损地幔; CC-大陆地壳。

岩区。④湘桂内陆带花岗岩的Nd模式年龄(t_{DM})背景值为1.8~2.4 Ga^[43,44], 基底的时代主要在1.7~2.7 Ga^[45]; 湘东南地区具地幔物质加入的早燕山期花岗岩

岩 t_{2DM} 多在1.22~1.76 Ga^[45]。由上可见, 印支期五团岩体的两阶段Nd模式年龄值(1.78~1.79 Ga)与基底地壳一致, 并有别于具地幔物质加入的湘东南早燕

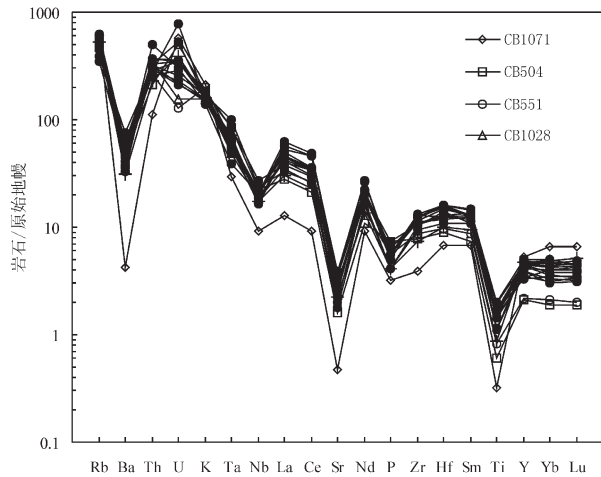


图7 印支期五团岩体微量元素原始地幔标准化蛛网图
(原始地幔值据 Sun et al., 1989^[35])

Fig.7 Primitive mantle-normalized trace element spider diagram for Indosinian Wutuan granites (primitive mantle data after Sun et al., 1989^[35])

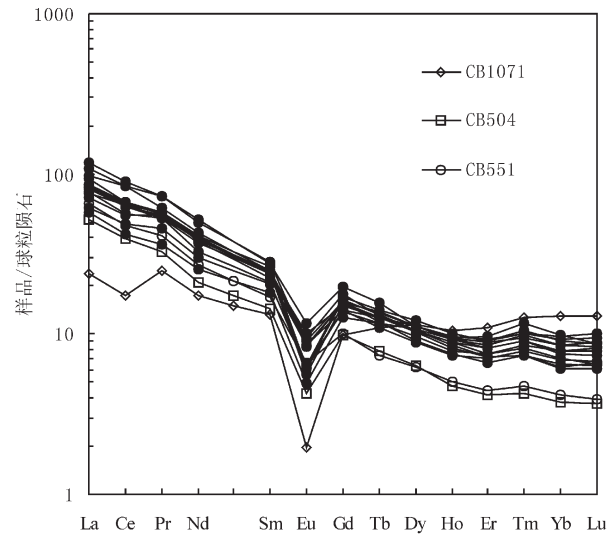


图8 印支期五团岩体稀土元素球粒陨石标准化配分图
(球粒陨石值据 Taylor et al., 1985^[36])

Fig.8 Chondrite-normalized REE patterns of Indosinian Wutuan granites (chondrite data after Taylor et al., 1985^[36])

表4 印支期五团岩体稀土元素分析结果(10⁻⁶)及有关参数
Table 4 REE values of Indosinian Wutuan granites(10⁻⁶)

样号	代号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	ΣREE	ΣCe/ΣY (La/Yb) _N	δEu	
CB1071	$\eta\gamma T_3^d$	8.81	16.56	3.37	12.38	3.05	0.17	3.04	0.64	4.33	0.90	2.75	0.45	3.22	0.49	24.19	84.4	1.11	1.81	0.17
CB504	$\eta\gamma T_3^d$	19.14	37.69	4.51	14.79	3.3	0.37	3.04	0.45	2.43	0.40	1.03	0.15	0.93	0.14	9.72	98.1	4.36	13.59	0.35
CB1068	$\eta\gamma T_3^c$	20.94	40.52	4.99	18.19	4.16	0.43	3.89	0.68	4.12	0.79	2.27	0.36	2.38	0.38	21.50	125.6	2.45	5.81	0.32
CB500	$\eta\gamma T_3^c$	28.42	53.57	7.24	23.28	4.84	0.53	4.35	0.74	4.24	0.78	2.12	0.35	2.10	0.32	20.40	153.3	3.33	8.94	0.35
CB496	$\eta\gamma T_3^c$	31.34	60.73	7.46	27.28	5.62	0.55	5.17	0.82	4.60	0.86	2.28	0.37	2.27	0.33	22.16	171.8	3.42	9.12	0.31
HXW2	$\eta\gamma T_3^b$	35.91	80.53	8.43	30.42	5.73	0.82	5.40	0.75	4.03	0.75	1.87	0.29	1.75	0.25	19.59	196.5	4.67	13.53	0.45
CB1102	$\eta\gamma T_3^b$	25.97	52.46	7.59	27.9	5.67	0.49	4.72	0.73	3.92	0.69	1.79	0.26	1.50	0.23	17.60	151.5	3.82	11.43	0.28
CB1057	$\eta\gamma T_3^b$	27.59	60.66	7.89	29.26	6.06	0.54	4.96	0.77	3.99	0.72	1.80	0.26	1.61	0.24	17.96	164.3	4.09	11.32	0.29
CB551	$\eta\gamma T_3^b$	24.07	45.88	5.65	19.36	3.9	0.58	3.10	0.43	2.36	0.43	1.10	0.17	1.04	0.15	9.76	118.0	5.36	15.28	0.50
HXW1	$\eta\gamma T_3^a$	43.10	85.37	9.94	36.63	6.41	1.02	6.08	0.90	4.27	0.81	2.40	0.41	2.45	0.33	22.78	222.9	4.51	11.63	0.50
CB550	$\eta\gamma T_3^a$	22.62	46.81	6.2	21.55	4.78	0.56	4.18	0.68	3.71	0.67	1.86	0.30	1.95	0.30	15.34	131.5	3.54	7.66	0.38
CB489	$\eta\gamma T_3^a$	34.03	63.28	7.88	27.07	5.2	0.74	4.32	0.63	3.35	0.63	1.74	0.28	1.71	0.26	14.92	166.0	4.96	13.14	0.47
CB1105	$\eta\gamma T_3^a$	30.75	60.42	7.49	28.28	5.75	0.72	4.82	0.8	4.28	0.78	2.02	0.32	1.87	0.28	20.24	168.8	3.77	10.86	0.41
CB1090	$\eta\gamma T_3^a$	39.92	80.98	9.98	35.32	6.55	0.74	4.77	0.69	3.45	0.64	1.65	0.26	1.54	0.25	15.64	202.4	6.01	17.12	0.39
CB1028	$\eta\gamma T_3^a$	29.47	60.23	7.25	26.54	5.53	0.87	4.58	0.74	3.98	0.76	2.05	0.32	1.95	0.31	18.87	163.5	3.87	9.98	0.52
CB1051	$\eta\gamma T_3^a$	30.46	62.5	7.78	28.61	5.72	0.72	4.74	0.73	4.28	0.82	2.30	0.36	2.28	0.36	20.97	172.6	3.69	8.82	0.41
CB1085	$\eta\gamma T_3^a$	31.45	63.89	7.85	28.27	5.77	0.79	4.87	0.78	4.23	0.81	2.21	0.34	2.13	0.34	20.79	174.5	3.78	9.75	0.45

山期壳源花岗岩。

Allégre^[46]指出花岗岩 $\epsilon_{Sr}(t)$ 值大于0,反映同位素与中、上地壳的亲缘性而不是麻粒岩相下地壳。五

团岩体 $\epsilon_{Sr}(t)=194\sim 236$,暗示源岩主要为中、上地壳酸性岩石,而不是下地壳基性岩。花岗岩C/MF-A/MF图解^[47](图10)对此提供了进一步佐证,图中样

表5 印支期五团岩体 Sr、Nd 同位素组成及有关参数计算
Table 5 Sr and Nd isotope compositions of granites in Indosinian Wutuan pluton

样品号	Rb ($\mu\text{g/g}$)	Sr ($\mu\text{g/g}$)	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$\epsilon_{\text{Sr}}(t)$	I_{Sr}
HXW1	294.8	82.93	10.29	0.75033 ± 0.00007	194	0.71813
HXW2	291.9	91.85	9.201	0.74989 ± 0.00002	236	0.72110
样品号	Sm ($\mu\text{g/g}$)	Nd ($\mu\text{g/g}$)	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	$t_{2\text{DM}}(\text{Ga})$
HXW1	5.408	28.13	0.1163	0.512025 ± 0.000005	-9.70	1.78
HXW2	5.680	29.10	0.1181	0.512024 ± 0.000005	-9.78	1.79

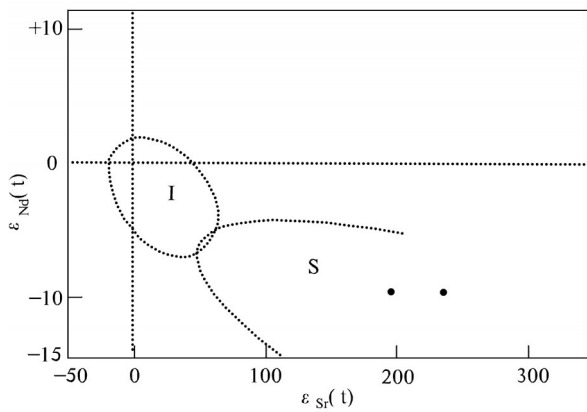


图9 印支期五团岩体 $\epsilon_{\text{Sr}}(t)$ - $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 图解
I—华南I型花岗岩; S—华南S型花岗岩(据刘昌实等,1990^[42])
Fig. 9 $\epsilon_{\text{Sr}}(t)$ - $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ diagram for Indosinian Wutuan granites
I—I-type granite of South China; S—S-type granite of South China, (after Liu Changshi et al., 1990^[42])

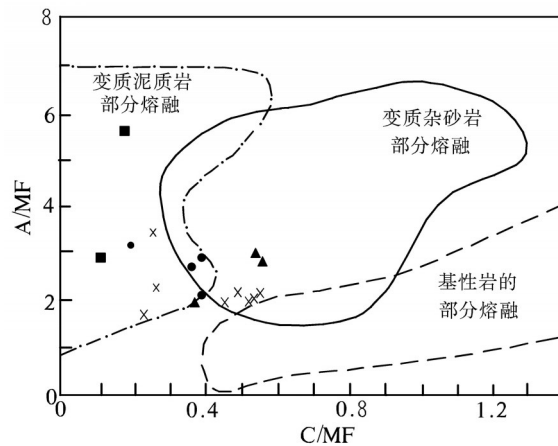


图10 印支期五团岩体 C/MF-A/MF 图解
(据 Alther 等, 2000^[44]; 图例同图4)
Fig.10 C/MF-A/MF diagram of Wutuan granites (after Alther et al., 2000^[44]; symbols as for Fig. 4)

品均落入变质泥质岩和变质杂砂岩部分熔融区。

Silvester^[38]的研究表明,对 SiO₂ 含量在 67%~77%之间的强过铝质花岗岩而言,其 CaO/Na₂O 比值反映其源区成分特征,而 Al₂O₃/TiO₂ 比值则反映其形成时的部分熔融温度。CaO/Na₂O 比值高于 0.3 者其源区属于砂岩或正变质岩成分,而低于 0.3 者其源区为泥岩成分。同时,在发生部分熔融时,温度越高则熔体的 Al₂O₃/TiO₂ 比值越低,一般 Al₂O₃/TiO₂ 比值大于 100 对应的熔融温度在 875℃ 以下(“低温”类型),而小于 100 者熔融温度在 875℃ 以上(“高温”类型)。其中,造山带地壳增厚导致的放射性生热元素衰变热能的聚集是形成“低温”强过铝质花岗岩岩浆的主要热源;而来自软流圈地幔的热传递对形成“高温”强过铝质花岗岩起着重要作用。根据 Silvester 的理论,印支期五团岩体具强过铝特征的花岗岩样品 CaO/Na₂O 比值部分高于 0.3,部分低于

0.3(图 11),指示其源岩既有长英质岩石又有泥质岩石。这一推断与图 10 所反映的信息基本一致。此外,大部分样品 Al₂O₃/TiO₂ 比值均小于 100(图 11),少量大于 100,暗示岩浆主要形成于温度高于 875℃ 的“高温”条件。鉴于,本文认为造山带地壳增厚导致升温为中、上地壳熔融提供了主要热源,软流圈地幔热能向上传递可能使岩浆源区进一步升温而部分具有高温特征。值得指出的是,前文岩体中暗色微粒包体所对应的中基性岩浆很可能为下地壳在高温条件下的熔融产物。

综上,五团岩体花岗质岩浆主要源于中、上地壳变质泥质岩和杂砂岩(或长英质岩石)的部分熔融,导致熔融的岩石升温主要由地壳增厚造成,并可能存在软流圈热能传递的叠加。此外,前述微量元素和稀土元素特征表明,部分熔融作用形成的岩浆在侵位过程中经历了明显的分离结晶演化过程。

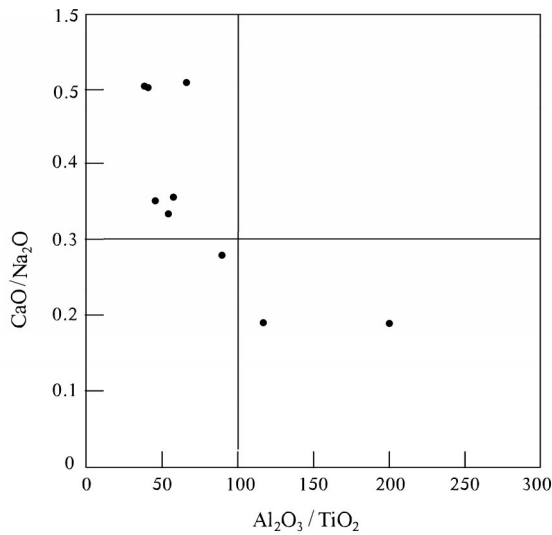


图 11 印支期五团岩体 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 图解
Fig. 11 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ diagram of Indosinian Wutuan granites

5.2 岩体形成构造环境及机制

在 Pearce et al.^[48] 多组微量元素构造环境判别图解中, 五团岩体总体显示为“同碰撞花岗岩(S-COLG)”或“火山弧花岗岩+同碰撞花岗岩(VAG+S-COLG)”(图 12)。

岩石具块状构造, 有别于同碰撞花岗岩通常所具有的挤压面理构造; 区域上印支运动的主幕发生于中三叠世后期^[11, 47], 而五团岩体(220.5±4.4)Ma 的侵位年龄表明其主要形成于晚三叠世中期, 由此推断印支期花岗岩形成于挤压峰期之后的后碰撞构造环境。这与微量元素构造环境判别图解显示的“大陆碰撞花岗岩类”或“同碰撞花岗岩类”的信息相吻合; 已有研究表明, 大量在 Pearce et al. (1984) 图解中的同碰撞花岗岩其实属后碰撞环境下形成^[49]。

据前述岩浆成因, 结合岩浆形成的后碰撞构造环境、岩体被动就位特征以及区域构造演化过程, 推断五团岩体形成背景及机制为: 印支期(中三叠世后期)陆内造山运动导致中、上地壳叠置、增厚和升温, 造山峰期之后在挤压减弱、应力松弛的后碰撞环境下, 中、上地壳酸性岩石(变质泥质岩和杂砂

岩)减压熔融并向上侵位而形成五团岩体。此外, 深部软流圈的上涌和热量的向上传递也可能对五团花岗质岩浆的形成起到一定作用。郭锋等^[50]研究表明湘南地区早中生代(224 Ma 左右)即已存在基性岩浆的底侵作用。

5.3 区域晚三叠世花岗质岩浆活动的构造背景

中三叠世晚期的印支运动是华南东部的一次重要构造事件^[5], 其普遍造成上三叠统(或侏罗系)与泥盆系—中三叠统之间的角度不整合接触^[51, 52]。但由于存在中侏罗世早燕山运动与印支运动构造变形的叠加, 关于印支运动的强度存在明显认识分歧。一种观点认为印支运动使上古生界产生了强烈的褶皱和逆冲断裂变形^[4, 5, 9-11]。一种观点则认为印支运动强度不大, 区域上古生界 NNE 向主体褶皱形成于燕山运动甚至更晚^[12, 13]; 或提出湘中南地区早中生代存在印支早期近东西向褶皱和燕山早期 NE 至 NNE 向褶皱的横跨叠加, 即印支运动仅在涟源—邵阳地区形成强度不大的近 EW 向褶皱^[15, 16]。

本文前述研究表明, 晚三叠世中期侵位的五团岩体为中、上地壳熔融形成的 S 型花岗岩, 其成因与先期强烈陆内变形及地壳增厚密切相关, 因此该岩体暗示中三叠世后期印支运动具有陆内造山和强变形特征, 此与柏道远等^[11]对湘东南进行构造解析所得出的结论一致。

区域上, 雪峰造山带南东侧的湘中南—湘东南地区尚发育大量其他印支期花岗岩体, 除局部形成 240 Ma 左右的印支早期同碰撞花岗岩^[16, 53]外, 瓦屋塘岩体(216.4±2.4) Ma 和(215.3±3.2) Ma (笔者待发表资料)、白马山岩体 205~209 Ma^[54]、(223.3±1.4) Ma 和(204.5±2.2) Ma^[55]、大神山岩体(224.3±1.0) Ma^[56]、桃江岩体(222±2) Ma^①、岩坝桥岩体(220.7±1.0) Ma^②、洑山岩体(211.0±1.6) Ma 和(215.7±1.9) Ma^[57]、歇马岩体(214.6±0.9) Ma^③、紫云山岩体(227.8±3.7) Ma 和(216.6±3.7) Ma^④、丫江桥岩体(224.3±1.8) Ma 和(223.2±1.3) Ma^⑤、关帝庙岩体 203~208^[22]、锡田岩体(230.4±2.3) Ma^[58]和(228.5±2.5) Ma^[59]、王仙岭岩体(235.0±1.3) Ma^[60]、阳明山岩体(218.9±3.4) Ma^[22]、苗

①湖南省地质调查院. 湖南省区域地质志(修编). 2013.

②湖南省地质调查院. 1:25 万邵阳市幅区域地质调查报告. 2013.

③湖南省地质调查院. 1:25 万株洲市幅区域地质调查报告. 2013.

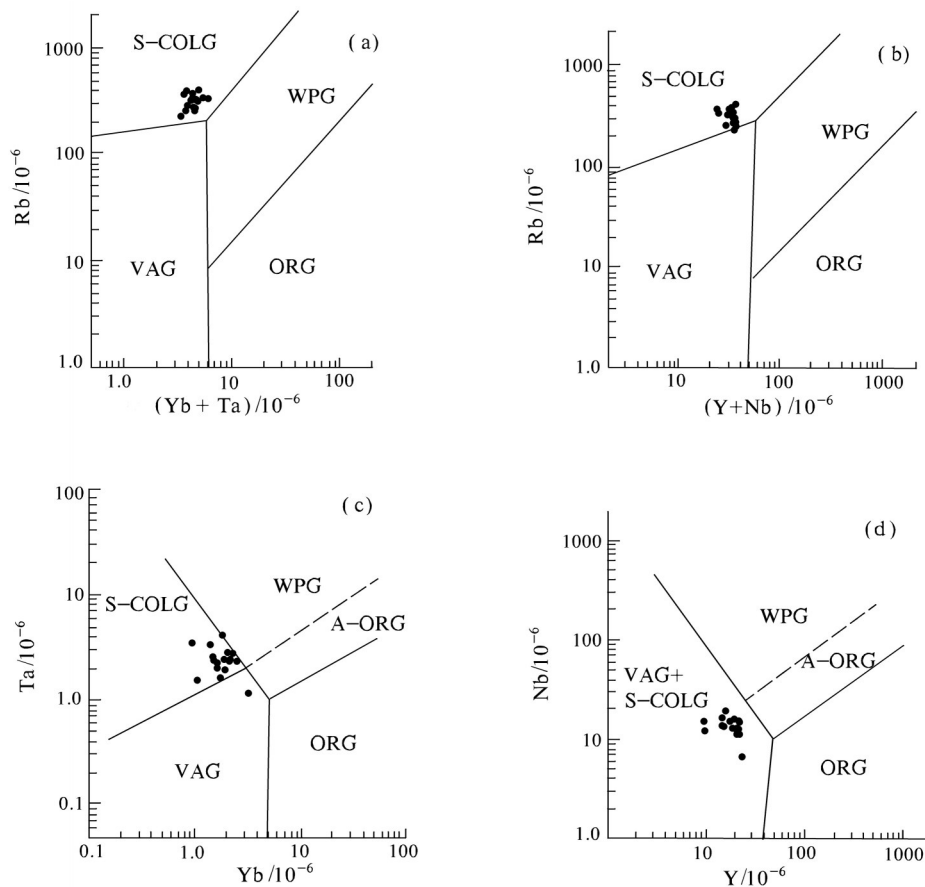


图 12 印支期五团岩体微量元素构造环境判别图解(底图据 Pearce et al.^[48])

VAG—火山弧花岗岩; WPG—板内花岗岩; S-COLG—同碰撞花岗岩; ORG—洋中脊花岗岩;
A-ORG—异常洋中脊花岗岩

Fig. 12 Trace element diagrams for discrimination of structural environment of Wutuan granites (after Pearce et al.^[48])

VAG—volcanic-arc granite; WPG—Intraplate granite; S-COLG—Syncollision granite; ORG—Ocean-ridge granite;

A-ORG—Abnormal Ocean-ridge granite

儿山岩体(局部)(228.7 ± 4.1) Ma 和 (216.8 ± 4.9) Ma^[30] 等锆石 SHRIMP 和 LA-ICP-MS U-Pb 年龄数据, 表明岩体主要形成于 230~205 Ma 期间的晚三叠世。这些岩体大多为壳源强过铝花岗岩, 与五团岩体具有相同成因, 形成于后碰撞构造环境^[20,21]。显然, 晚三叠世如此广泛后碰撞花岗岩的发育, 更充分反映出先期(中三叠世后期)印支运动的陆内强变形特征。

值得指出的是, 雪峰山南段及湘中南—湘东南地区在印支运动中具 NWW 向挤压构造体制^[10,11], 至晚三叠世尽管具应力松弛的后碰撞环境, 但因扬子及其以南各地块向北运移与中朝板块碰撞而具 SN 向挤压^[14-16,61-63], 只是挤压强度低、变形弱。另一方

面, SN 向挤压可导致印支运动中形成的 NNE 向逆断裂产生 EW 向伸展(湘东南 T_3 — J_1 陆相盆地即受此控制^[62]), 这或许也是晚三叠世地壳减压熔融的原因之一。

此外, 尽管上述年龄数据在不同时间段分布不均匀, 似乎暗示岩浆活动在时间上存在强弱变化, 但仍反映出晚三叠世花岗质岩浆活动在区域尺度上具连续特征, 前人提出的多阶段伸展^[25]表现并不明显。不过五团岩体同一样品提供的 (230.8 ± 4.7) Ma、(220.5 ± 4.4) Ma 的 2 组年龄, 说明就具体岩体或局部地区而言可存在具显著时间间断的多阶段岩浆活动。前述白马山岩体、苗儿山岩体的多组年龄值反映同样信息。特定岩体或局部地区晚三叠世

多阶段岩浆活动的成因以及区域晚三叠世岩浆活动可能的强弱变化特征,是今后印支期花岗质岩浆活动需要重点研究的问题。

6 结 论

(1)五团岩体形成于晚三叠世,并可能经历2阶段岩浆活动。总体属铁质、高钾钙碱性—钾玄岩系列过铝质花岗岩类。花岗岩源岩主要为中、上地壳酸性岩石。

(2)岩体在中三叠世印支运动之后挤压应力相对松弛、深部压力降低的后碰撞构造环境下,因地壳增厚而升温的中、上地壳岩石减压熔融并向上侵入而形成。此外,深部软流圈上涌和热量的向上传递可能也对花岗质岩浆的形成起到一定作用。

参考文献(References):

- [1] 赵越, 杨振宇, 马醒华. 东亚大地构造发展中的重要转折[J]. 地质科学, 1994, 29(2): 105-128.
Zhao Yue, Yang Zhenyu, Ma Xinghua. Geotectonic transition from paleo-Asian system and paleotethyan system to paleopacific active continental margin in eastern Asia[J]. Scientia Geological Sinica, 1994, 29(2): 105-128 (in Chinese with English abstract).
- [2] 赵越, 徐刚, 张拴宏, 等. 燕山运动与东亚构造体制的转变[J]. 地质前缘, 2004, 11(3): 319-328.
Zhao Yue, Xu Gang, Zhang Shuanhong, et al. Yanshanian movement and conversion of tectonic regimes in East Asia[J]. Earth Science Frontiers, 2004, 11(3): 319-328 (in Chinese with English abstract).
- [3] 董树文, 张岳桥, 龙长兴, 等. 中国侏罗纪构造变革与燕山运动新诠释[J]. 地质学报, 2007, 81(11): 1449-1461.
Dong Shuwen, Zhang Yueqiao, Long Changxing, et al. Jurassic tectonic revolution in China and new interpretation of the Yanshan Movement[J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(11): 1449-1461 (in Chinese with English abstract).
- [4] 湖南省地质矿产局. 湖南省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1988.
Hunan Bureau of Geology and Mineral Resources. Regional geology of Hunan Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1988 (in Chinese).
- [5] 任纪舜. 印支运动及其在中国大陆构造演化中的意义[J]. 中国地质科学院院报, 1984, 9: 31-42.
Ren Jishun. The Indosinian orogeny and its significance in the tectonic evolution of China[J]. Acta Geoscientia Sinica, 1984, 9: 31-42 (in Chinese with English abstract).
- [6] 丘元禧, 张渝昌, 马文璞. 雪峰山陆内造山带的构造特征与演化[J]. 高校地质学报, 1998, 44(4): 432-443.

- Qiu Yuanxi, Zhang Yichang, Ma Wenpu. Tectonics and geological evolution of Xuefeng intra-continental orogen, south China[J]. Geological Journal of China Universities, 1998, 44(4): 432-443 (in Chinese with English abstract).
- [7] 丁道桂, 郭彤楼, 刘运黎, 等. 对江南—雪峰带构造属性的讨论[J]. 地质通报, 2007, 26(7): 801-809.
Ding Daogui, Guo Tonglou, Liu Yunli, et al. Structural attribute of the Jiangnan—Xuefengshan belt, China: A discussion[J]. Geological Bulletin of China, 2007, 26(7): 801-809 (in Chinese with English abstract).
- [8] Wang Yuejun, Zhang Yanhua, Fan Weiming, et al. Structural signatures and ^{40}Ar - ^{39}Ar geochronology of the Indosinian Xuefengshan tectonic belt, South China Block[J]. Journal of Structural Geology, 2005, 27: 985-998.
- [9] 柏道远, 黄建中, 王先辉, 等. 湖南邵阳—郴州北西向左旋走滑暨水口山—香花岭南北向构造成因[J]. 中国地质, 2006, 33(1): 56-63.
Bai Daoyuan, Huang Jianzhong, Wang Xianhui, et al. Sinistral strike-slip motion of the NW-trending Saoyang—Chenzhou fault and genesis of the N-S-trending Shuikoushan—Xianghualing tectonic zone in Hunan[J]. Geology in China, 2006, 33(1): 56-63 (in Chinese with English abstract).
- [10] 柏道远, 邹宾微, 赵龙辉, 等. 湘东太湖逆冲推覆构造基本特征研究[J]. 中国地质, 2009, 36(1): 53-64.
Bai Daoyuan, Zou Binwei, Zhao Longhui, et al. Basic characteristics of the Taihu thrust system in eastern Hunan[J]. Geology in China, 2009, 36(1): 53-64 (in Chinese with English abstract).
- [11] 柏道远, 贾宝华, 钟响, 等. 湘东南印支运动变形特征研究[J]. 地质论评, 2012, 58(1): 19-29.
Bai Daoyuan, Jia Baohua, Zhong Xiang, et al. Study on the deformation of Indosinian Movement in Southeastern Hunan[J]. Geological Review, 2012, 58(1): 19-29 (in Chinese with English abstract).
- [12] 郭福祥. 中国南方中生代大地构造属性和南华造山带褶皱过程[J]. 地质学报, 1998, 72(1): 22-33.
Guo Fuxiang. Meso-Cenozoic Nanhua (South China) orogenic belt—subaerial tridirectional orogen[J]. Acta Geologica Sinica, 1998, 72(1): 22-33 (in Chinese with English abstract).
- [13] 郭福祥. 华南地台盖层褶皱及其形成时期研究[J]. 地质与勘探, 1999, 35(4): 5-7, 11.
Guo Fuxiang. Folding of cover of south China platform and its folding age[J]. Geology and prospecting, 1999, 35(4): 5-7, 11 (in Chinese with English abstract).
- [14] 舒良树, 周新民, 邓平, 等. 南岭构造带的基本地质特征[J]. 地质论评, 2006, 52(2): 251-265.
Shu Liangshu, Zhou Xinmin, Deng Ping, et al. Principal geological features of Nanling tectonic belt, south China[J]. Geological Review, 2006, 52(2): 251-265 (in Chinese with English abstract).

- English abstract).
- [15] 张岳桥, 徐先兵, 贾东, 等. 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[J]. 地学前缘, 2009, 16(1):234-247.
Zhang Yueqiao, Xu Xianbing, Jia Dong, et al. Deformation record of the change from Indosinian collision-related tectonic system to Yanshanian subduction-related tectonic system in south China during the Early Mesozoic[J]. Earth Science Frontiers, 2009, 16(1): 234-247 (in Chinese with English abstract).
- [16] 徐先兵, 张岳桥, 贾东, 等. 华南早中生代大地构造过程[J]. 中国地质, 2009, 36(3): 573-593.
Xu Xianbing, Zhang Yueqiao, Jia Dong, et al. Early Mesozoic geotectonic processes in South China[J]. Geology in China, 2009, 36(3): 573-593 (in Chinese with English abstract).
- [17] 胡召齐, 朱光, 张必龙, 等. 雪峰隆起北部加里东事件的 K-Ar 年代学研究[J]. 地质论评, 2010, 56(4): 490-500.
Hu Zhaoqi, Zhu Guang, Zhang Bilong, et al. K-Ar Geochronology of the Caledonian Event in the Xuefeng uplift[J]. Geological Review, 2010, 56(4): 490-500 (in Chinese with English abstract).
- [18] Hsü K J, Li Jiliang, Chen Haihong. Tectonics of South China: Key to understanding West Pacific geology[J]. Tectonophysics, 1990, 183:9-39.
- [19] 陈海泓, 肖文交. 多岛海型造山作用——以华南印支期造山带为例[J]. 地学前缘, 1998, 5(增刊): 95-100.
Chen Haihong, Xiao Wenjiao. Archipelago orogenesis——Examples from Indosinian orogenic belts in south China[J]. Earth Science Frontiers, 1998, 5(sup): 95-100(in Chinese with English abstract).
- [20] 柏道远, 陈建成, 马铁球, 等. 王仙岭岩体地质地球化学特征及其对湘东南印支晚期构造环境的制约[J]. 地球化学, 2006, 35(2):113-125.
Bai Daoyuan, Chen Jiancheng, Ma Tieqiu, et al. Geochemical characteristics of Wangxianling granitic pluton and its constraints on Late Indosinian tectonic setting of Southeast Hunan[J]. Geochimica, 2006, 35(2): 113-125 (in Chinese with English abstract).
- [21] 柏道远, 周亮, 马铁球, 等. 湘东南印支期花岗岩成因及构造背景[J]. 岩石矿物学杂志, 2007, 26(3): 197-212.
Bai Daoyuan, Zhou Liang, Ma Tieqiu, et al. Genesis and tectonic setting of Indosinian granites in southeast Hunan[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2007, 26(3): 197-212 (in Chinese with English abstract).
- [22] 陈卫锋, 陈培荣, 周新民, 等. 湖南阳明山岩体的 La-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及成因研究[J]. 地质学报, 2006, 80(7): 1065-1077.
Chen Weifeng, Chen Peirong, Zhou Xinmin, et al. Single-zircon La-ICP-MS U-Pb dating of the Yangmingshan granitic pluton in Hunan, South China and its petrogenetic study[J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(7): 1065-1077 (in Chinese with English abstract).
- [23] 周新民. 对华南花岗岩研究的若干思考[J]. 高校地质学报, 2003, 9(4): 556-565.
Zhou Xinmin. My thinking about granite geneses of south China[J]. Geological Journal of China Universities, 2003, 9(4): 556-565 (in Chinese with English abstract).
- [24] 付建明, 马昌前, 谢才富, 等. 湖南金鸡岭铝质 A 型花岗岩的厘定及构造环境分析[J]. 地球化学, 2005, 34(3): 215-226.
Fu Jianming, Ma Changqian, Xie Caifu, et al. Ascertainment of the Jinjiling aluminous A-type granite, Hunan Province and its tectonic settings[J]. Geochimica, 2005, 34(3): 215-226(in Chinese with English abstract).
- [25] 郭春丽, 郑佳浩, 楼法生, 等. 华南印支期花岗岩类的岩石特征、成因类型及其构造动力学背景探讨[J]. 大地构造与成矿学, 2012, 36(3): 457-472.
Guo Chunli, Zheng Jiahao, Lou Fasheng, et al. Petrography, genetic types and geological dynamical settings of the indosinian granitoids in South China[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2012, 36(3): 457-472 (in Chinese with English abstract).
- [26] Compston W, Williams I S, Kirschvink J L, et al. Zircon U-Pb ages of early Cambrian time-scale[J]. J.Geol.Soc., 1992, 149: 171-184.
- [27] Williams I S, Claesson S. Isotope evidence for the Precambrian province and Caledonian metamorphism of high grade paragneiss from the Seve Nappes, Scandinavian Caledonides, II. Ion microprobe zircon U-Th-Pb[J]. Contrib. Mineral. Petrol., 1987, 97: 205-217.
- [28] Ludwig K R. Using Isoplot/EX, version 2, a Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley Geochronological Center Special Publication 1a, 1999, 47.
- [29] Ludwig K R. Squid 1.02: A User Manual[M]. Berkeley Geochronological Center Special Publication, 2001, 2-19.
- [30] 伍静, 梁华英, 黄文婷, 等. 桂东北苗儿山—越城岭南西部岩体和矿床同位素年龄及华南印支期成矿分析[J]. 科学通报, 2012, 57(13): 1126-1136.
Wu J, Liang H Y, Huang W T, Huang W T, et al. Indosinian isotope ages of plutons and deposits in southwestern Miaoershan-Yuechengling, northeastern Guangxi and implications on Indosinian mineralization in South China[J]. Chin. Sci. Bull., 2012, 57: 1024-1035, doi: 10.1007/s11434-011-4968-z.
- [31] Frost B R, Barnes C G, Collins W J. A geochemical classification for granitic rocks[J]. Journal of Petrology, 2001, 42(11): 2033-2048.
- [32] Peccerillo A, Taylor S R. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey[J]. Contrib. Mineral. Petrol., 1976, 58(1): 63-81.
- [33] Middlemost E A K. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. Earth Sci. Rev., 1994, 37: 215-224.

- [34] 陈小明, 王汝成, 刘昌实, 等. 广东从化佛冈(主体)黑云母花岗岩年代和成因[J]. 高校地质学报, 2002, 8(3): 293-307.
Chen Xiaoming, Wang Rucheng, Liu Changshi, et al. Isotopic dating and genesis for Fogang biotite granites of Conghua area, Guangdong Province[J]. Geological Journal of China Universities, 2002, 8(3): 293-307 (in Chinese with English abstract).
- [35] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implication for mantle composition and process. Saunders A D, Norry M J(eds.). Magmatism in the ocean basins. Geol. Soc. Spec. Pub., London, 1989, 42: 313-345.
- [36] Taylor S R, McLennan S M. The continental crust: Its composition and evolution. Oxford: Blackwell, 1985: 1-312.
- [37] 陈江峰, 江博明. Nd, Sr, Pb 同位素示踪和中国东南大陆地壳演化[C]/郑永飞主编: 化学地球动力学. 北京: 科学出版社, 1999, 262-287.
Chen Jiangfeng, Jiang Boming. Nd, Sr, Pb isotope traces and evolution of continental crust of SE China[C]/Zheng Yongfei, Chemical Geodynamics. Beijing: Science Press, 1999, 262-287 (in Chinese with English abstract).
- [38] Sylvester P J. Post-collisional strongly peraluminous granites[J]. Lithos, 1998, 45: 29-44.
- [39] Zen E. Aluminum enrichment in silicate melts by fractional crystallization: some mineralogic and petrologic constraints[J]. Journal of Petrology, 1986, 27: 1095-1117.
- [40] Faure G. Principles of isotope geology(2 nd ed). New York: John Wiley and Sons, 1986, 567.
- [41] McCulloch M T, Chappell B W. Nd isotopic characteristics of S-type and I-type granites[J]. Earth Planet Sci. Lett., 1982, 58(1): 51-64.
- [42] 刘昌实, 朱金初, 沈渭洲, 等. 华南陆壳改造系列花岗岩类型划分和成岩物质来源[J]. 地质学报, 1990, 64(1): 43-52.
Liu Changshi, Zhu Jinchu, Shen Weizhou, et al. Classification and source materials of continental crust transformation series granitoids in south China[J]. Acta Geol Sinica, 1990, 64(1): 43-52 (in Chinese with English abstract).
- [43] Hong Dawei, Xie Xilin, Zhang Jisheng. Isotope geochemistry of granitoids in South China and their metallogeny[J]. Res. Geol., 1998, 48: 251-263.
- [44] Pei Rongfu and Hong Dawei. The granites of south China and their metallogeny[J]. Episodes, 1995, 18: 77-82.
- [45] 柏道远, 黄建中, 刘耀荣, 等. 湘东南及湘粤赣边区中生代地质构造发展框架的厘定[J]. 中国地质, 2005, 32(4): 557-570.
Bai Daoyuan, Huang Jianzhong, Liu Yaorong, et al. Framework of Mesozoic tectonic evolution in southeastern Hunan and the Hunan-Guangdong-Jiangxi border area[J]. Geology in China, 2005, 32(4): 557-570 (in Chinese with English abstract).
- [46] Allégre C J, Othman D B. Nd-Sr isotopic relationship in granitoid rocks and continental crust development: A chemical approach to orogenesis[J]. Nature, 1980, 286: 335-342.
- [47] Alther R, Holl A, Hegner E, et al. High-potassium, calc-alkaline I-type plutonism in the European Variscides: northern vosges (France) and northern Schwarzwald (Germany)[J]. Lithos, 2000, 50: 51-73.
- [48] Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. J Petrol, 1984, 25(4): 956-983.
- [49] 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, 21-36.
Xiao Qinghui, Deng Jinfu, Ma Daquan. The ways of investigation on granitoids[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2002, 21-36 (in Chinese).
- [50] 郭锋, 范蔚茗, 林舸, 等. 湖南道县辉长岩包体的年代学研究及成因探讨[J]. 科学通报, 1997, 42(15): 1661-1663.
Guo Feng, Fan Weiming, Lin Ge, et al. Chronology and petrogenesis of gabbro inclusion in Daoxian County, Hunan Province[J]. Chinese Science Bulletin, 1997, 42(15): 1661-1663 (in Chinese).
- [51] 金宠, 李三忠, 王岳军, 等. 雪峰山陆内复合构造系统印支-燕山期构造穿时递进特征[J]. 石油与天然气, 2009, 30(5): 598-607.
Jin Chong, Li Sanzhong, Wang Yuejun, et al. Diachronous and progressive deformation during the Indosinian-Yanshanian movements of the Xuefeng Mountain in intracontinental composite tectonic system[J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(5): 598-607(in Chinese with English abstract).
- [52] 李三忠, 王涛, 金宠, 等. 雪峰山基底隆升带及其邻区印支期陆内构造特征与成因[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2011, 41(1): 93-105.
Li Sanzhong, Wang Tao, Jin Chong, et al. Features and causes of Indosinian intracontinental structures in the Xuefengshan Precambrian basement and its neighboring regions[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2011, 41(1): 93-105(in Chinese with English abstract).
- [53] 王岳军, 范蔚茗, 梁新权, 等. 湖南印支期花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其成因启示[J]. 科学通报, 2005, 50(12): 1259-1266.
Wang Yuejun, Fan Weiming, Liang Xinquan, et al. SHRIMP U-Pb zircon dating of the Indosinian granites in Hunan an its petrogenic apocalypse[J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50(12): 1259-1266 (in Chinese).
- [54] 陈卫锋, 陈培荣, 黄宏业, 等. 湖南白马山岩体花岗岩及其包体的年代学和地球化学研究[J]. 中国科学(D辑:地球科学), 2007, 37(7): 873-893.
Chen Weifeng, Chen Peirong, Huang Hongye, et al. Geochronology and geochemistry of granites and their enclaves from Baimashan pluton in Hunan[J]. Science in China(Series D), 2007, 37(7): 873-893(in Chinese).
- [55] 罗志高, 王岳军, 张菲菲, 等. 金滩和白马山印支期花岗岩体

- LA-ICPMS 锆石 U-Pb 定年及其成岩启示[J]. 大地构造与成矿学, 2010, 34(2): 282-290.
- Luo Zhigao, Wang Yuejun, Zhang Feifei, et al. LA-ICPMS zircon U-Pb dating for Baimashan and Jintan Indosinian granitic plutons and its petrogenetic implications[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2010, 34(2): 282-290(in Chinese with English abstract).
- [56] 张龙升, 彭建堂, 张东亮, 等. 湘西大神山印支期花岗岩的岩石学和地球化学特征[J]. 大地构造与成矿学, 2012, 36(1): 137-148.
- Zhang Longsheng, Peng Jiantang, Zhang Dongliang, et al. Geochemistry and petrogenesis of the Indosinian Dashenshan granite, western Hunan, South China[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2012, 36(1): 137-148 (in Chinese with English abstract).
- [57] 丁兴, 陈培荣, 陈卫锋, 等. 湖南浏山花岗岩中锆石 LA-ICPMS U-Pb 定年: 成岩启示和意义[J]. 中国科学 (D 辑 地球科学), 2005, 35(7): 606-616.
- Ding Xing, Chen Peirong, Chen Weifeng, et al. Zircon LA-ICPMS dating for Weishan pluton in Hunan and its apocalypse for rock-forming and significance[J]. *Science in China(Series D)*, 2005, 35(7): 606-616 (in Chinese).
- [58] 付建明, 伍式崇, 徐德明, 等. 湘东锡田钨锡多金属矿区成岩成矿时代的再厘定[J]. 华南地质与矿产, 2009, (3): 1-7.
- Fu Jianming, Wu Shichong, Xu Deming, et al. Reconstraint from zircon SHRIMP U-Pb dating on the age of magma intrusion and mineralization in Xitian tungsten-tin polymetallic orefield, eastern Hunan Province[J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 2009, (3): 1-7 (in Chinese with English abstract).
- [59] 马铁球, 柏道远, 王先辉. 湘东南茶陵地区锡田岩体锆石 SHRIMP 定年及其地质意义[J]. 地质通报, 2005, 24(5): 415-419.
- Ma Tieqiu, Bai Daoyuan, Wang Xianhui. Zircon SHRIMP dating of the Xitian granite pluton, Chaling, southeastern Hunan, and its geological significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 2005, 24(5): 415-419(in Chinese with English abstract).
- [60] 郑佳浩, 郭春丽. 湘南王仙岭花岗岩体的锆石 U-Pb 年代学、地球化学、锆石 Hf 同位素特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 2012, 28(1): 75-90.
- Zheng Jiahao, Guo Chunli. Geochronology, geochemistry and zircon Hf isotopes of the Wangxianling granitic intrusion in South Hunan Province and its geological significance[J]. *Petrologica Sinica*, 2012, 28(1): 75-90 (in Chinese with English abstract).
- [61] 万天丰, 朱鸿. 中国大陆及邻区中生代—新生代大地构造与环境变迁[J]. 现代地质, 2002, 16(2): 107-118.
- Wan Tianfeng, Zhu Hong. Tectonics and environment change of Meso-Cenozoic in China continent and its adjacent areas[J]. *Geoscience*, 2002, 16(2): 107-118(in Chinese with English abstract).
- [62] 柏道远, 钟响, 贾朋远, 等. 湘东南晚三叠世—侏罗纪沉积特征及盆地性质和成因机制[J]. 地质力学学报, 2011, 17(4): 338-349.
- Bai Daoyuan, Zhong Xiang, Jia Pengyuan, et al. Sedimentary characteristics, basin type and dynamic mechanisms during Late Triassic-Jurassic in southeastern Hunan[J]. *Journal of Geomechanics*, 2011, 17(4): 338-349(in Chinese with English abstract).
- [63] 柏道远, 钟响, 贾朋远, 等. 雪峰造山带靖州盆地断裂构造及其形成背景探讨[J]. 大地构造与成矿学, 2013, 37(2): 173-183.
- Bai Daoyuan, Zhong Xiang, Jia Pengyuan, et al. The faults in Jinzhou basin and their tectonic settings[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2013, 37(2): 173-183(in Chinese with English abstract).

Zircon SHRIMP U–Pb age, geochemistry and tectonic setting of Indosinian Wutuan pluton in southwestern Hunan Province

BAI Dao-yuan, CHEN Bi-he, ZHONG Xiang, JIA Peng-yuan, XIONG Xiong

(Hunan Institute of Geological Survey, Changsha 410016, Hunan, China)

Abstract: The Wutuan granitic pluton in southwestern Hunan is mainly composed of biotite monzogranite and dimicaceous monzogranite. U–Pb zircon dating of a biotite monzogranite sample was carried out, and analyses of 9 zircon grains yielded an average age of (220.5 ± 4.4) Ma, which indicates that the granites were formed in middle Late Triassic. The rocks are silicon–high ($\text{SiO}_2=70.64\% \sim 75.32\%$, 72.33% on average), aluminum–rich ($\text{Al}_2\text{O}_3=13.24\% \sim 16.37\%$, 14.47% on average), potassium–high ($\text{K}_2\text{O}=4.27\% \sim 6.66\%$, 5.10% on average) and alkali–moderate ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}=6.71\% \sim 8.46\%$, 7.65% on average) ones, with $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ ratios being 1.54–5.34 (2.23 on average) and ASI value being 1.24 on average, thus belonging to ferric, high–K calc–alkaline series and shoshonite series peraluminous granitoids. Ba, Nb, Sr, P and Ti are pronouncedly depleted, while Rb, (Th+U+K), (La+Ce), Nd, (Zr+Hf+Sm) and (Y+Yb+Lu) are comparatively concentrated. The rocks have low ΣREE values of 84.35–222.90 $\mu\text{g/g}$ (156.81 $\mu\text{g/g}$ on average), δEu values of 0.17–0.52 (0.39 on average), $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ values of 1.81–17.12 (10.57 on average), I_{Sr} values of 0.71813–0.72110, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ values of 193.5–235.6, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ values of –9.78––9.70 and t_{DM} ages of 1.78–1.79 Ga. The C/MF–A/MF diagram indicates that the granites were derived from mudstones and clastic rocks. $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ ratios of most strongly peraluminous granite samples are less than 100. All these data point to S–type granitoids and suggest that the granites might have come mainly from acid rocks of the middle–upper crust. Trace element diagrams for discrimination of the structural environment show that the granites were formed in a post–collisional tectonic setting. According to the petrogenesis, the discrimination of structural environment and regional tectonic evolutionary setting, the authors infer that the formation mechanism of the Wutuan pluton should be as follows: the thickening of the crust in Indosinian movement caused the rise of the temperature of the crust, and later the weakening of the stress in the post–collisional tectonic setting caused the melting of the middle–upper crust, with the magma emplaced in a relatively open environment. In addition, upwelling and heat transference of asthenosphere mantle might have played a certain role in the formation of granitic magma.

Key words: zircon U–Pb; SHRIMP; geochemical characteristics; S–type granitoid; post–collisional tectonic setting; Wutuan; southwestern Hunan Province

About the first author: BAI Dao-yuan, male, born in 1967, senior engineer, engages in regional geological survey; E–mail: daoyuanbai@sina.com.