

doi:10.3969/j.issn.1007-3701.2015.01.004

湘南印支期塔山岩体地球化学特征及形成构造背景

钟 响, 柏道远, 贾朋远, 熊 雄, 黄文义

ZHONG Xiang, BAI Dao-Yuan, JIA Peng-Yuan, XIONG Xiong, HUANG Wen-Yi

(湖南省地质调查院, 湖南 长沙, 410016)

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

摘要:塔山岩体位于华南造山带北缘,形成于晚三叠世。自早至晚由粗中-中粒斑状二云母二长花岗岩、中细粒-细粒斑状二云母二长花岗岩、细粒二云母二长花岗岩组成,具块状构造。岩石具有高硅($\text{SiO}_2=71.57\% \sim 75.01\%$)、富铝($\text{Al}_2\text{O}_3=13.92\% \sim 15.51\%$)、中钾($\text{K}_2\text{O}=3.51\% \sim 5.20\%$)、中碱($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}=6.89\% \sim 8.62\%$)、高 ASI(1.12 ~ 1.52)的特征,总体属铁质、高钾钙碱性系列强过铝质花岗岩类。微量元素中 Ba、Nb、Sr、Ti 表现为明显亏损, Rb、(Th+U+K+Ta)、(La+Ce)、Nd、(Zr+Hf+Sm)、(Y+Yb+Lu)等则相对富集。稀土总量较低(17.9 ~ 184.0 $\mu\text{g/g}$),轻稀土富集($(\text{La/Yb})_N=2.52 \sim 17.89$),具明显的负 Eu 异常($\delta\text{Eu}=0.17 \sim 0.37$)。岩体具有较高的 I_{Sr} 值(0.73271 和 0.72739)和较低的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(-11.05 和 -10.82),两阶段 Nd 模式年龄($t_{2\text{DM}}$)为 1.87 Ga 和 1.89 Ga。C/MF-A/MF 图解显示源岩主要为泥质岩石,部分为长英质岩石。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塔山岩体为 S 型花岗岩,源岩主要为中、上地壳酸性岩石。构造环境地球化学判别图解显示为后碰撞构造环境。基于岩石成因、构造环境及构造演化过程,推断继中三叠世后期印支运动陆内强挤压之后,晚三叠世进入挤压松弛的后碰撞环境,地壳减压重熔而形成了塔山岩体。此外,地壳重熔可能还受到软流圈地幔上隆及其热传递的影响。

关键词:塔山岩体;地球化学特征;S 型花岗岩;后碰撞构造环境;印支运动;湘南

中图分类法:P588

文献标识码:A

文章编号:1007-3701(2015)01-036-11

Zhong X, Bai D Y, Jia P Y, Xiong X and Huang W Y. Geochemistry and tectonic setting of Indosinian Tashan pluton, southern Hunan Province. *Geology and Mineral Resources of South China*, 2015, 31(1):36–47.

Abstract: The Late Triassic Tashan granitic pluton located in the northern South China orogenic belt is composed of early stage coarse-medium-grained to medium-grained porphyritic biotite-dimicaceous monzogranite, medium-fine-grained to fine-grained biotite-dimicaceous monzogranite and late stage fine-grained biotite-dimicaceous monzogranite. All the rocks have massive structure. The rocks are rich in silicon ($\text{SiO}_2=71.57 \sim 75.01 \text{ wt\%}$), aluminium ($\text{Al}_2\text{O}_3=13.92 \sim 15.51 \text{ wt\%}$), potassium ($\text{K}_2\text{O}=3.51 \sim 5.20 \text{ wt\%}$), alkali and ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}=6.89 \sim 8.62 \text{ wt\%}$), high ASI value (1.12 ~ 1.52), thus belong to ferric, high-K calc-alkaline series strong peraluminous granitoids. Ba, Nb, Sr, P and Ti are pronounced depleted, while Rb, (Th+U+K), (La+Ce), Nd, (Zr+Hf+Sm) and (Y+Yb+Lu) are comparatively concentrated. It displays lower total REE content ($\Sigma \text{REE} = 17.9 \sim 184.0 \text{ ppm}$), enrichment of LREE ($(\text{La/Yb})_N=2.53 \sim 17.89$) and negative Eu anomaly ($\delta \text{Eu} = 0.17 \sim 0.37$). It also has slightly higher I_{Sr} (0.73271 and 0.72739) but lower $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ (-11.05 and -10.82) with Nd model ages ($t_{2\text{DM}}$) of 1.87 Ga and

收稿日期:2014-03-12;修回日期:2014-12-03

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(编号:1212011120793)资助。

第一作者:钟响(1984—)男,工程师,长期从事区域地质调查工作, E-mail:108366937@qq.com.

1.89 Ga. The C/MF–A/MF diagram indicates that the granites are mainly originated from argillaceous rocks, some as the felsic rocks. $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ values of most strong peraluminous granite samples are less than 100. All above geochemical characteristics indicate that Tashan granite belongs to S-type granitoids and suggest that the magma should come mainly from acid rocks of the middle and upper crust. The discriminant figures of tectonic setting show that the granites were formed in post-collisional tectonic setting. According to the petrogenesis, discrimination of structural environment and regional tectonic evolutionary setting, the formation mechanism of Tashan pluton is inferred as follows: the thickening of crust in Indosinian Movement during Middle Triassic caused the rise of the crust temperature, and later weakening of stress in post-collisional tectonic setting during Late Triassic caused the melting of middle-upper crust, and the magma emplaced in relative extensional environment. In addition, up-welling and heat transference of asthenosphere mantle might have played an important role in the forming of Tashan granitic magma.

Key words: Tashan granitic pluton; geochemical characteristics; S-type granitoid; post-collisional tectonic setting; Indosinian movement; southern Hunan Province

华南地区印支期花岗岩广泛发育,其中湖南境内总面积超过 5000 km^2 [1-3]。自 20 世纪 70 年代以来,国内外学者针对华南印支期花岗岩及其相关的构造运动展开了大量研究,目前尚存在一些认识分歧。如关于印支运动的性质,有学者认为中三叠世晚期印支运动强度不大,上古生界中 NNE 向主体褶皱形成于燕山运动甚至更晚 [4-9]; 另有研究则强调印支运动的重要性,认为区域上古生界中 NNE 向为主的盖层褶皱主要形成于印支运动 [10-17]。关于印支期花岗岩成因背景,则存在岛弧 [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。

近年来笔者对湘南地区塔山岩体的地球化学特征、成因及形成构造背景进行了研究,结果表明其为印支运动之后形成的后碰撞强过铝花岗岩,认为其形成主要与印支运动陆内碰撞后的陆壳减压熔融有关,并可能受到软流圈地幔上隆的影响。

1 地质概况

塔山岩体位于华南造山带的北西缘、郴州–邵阳 NW 向基底隐伏断裂带的西南侧 [26] (图 1a), 出露面积约 200 km^2 , 侵入于下古生界和泥盆系之中 (图 1b)。接触面倾向围岩, 倾角一般 45° 左右, 陡倾及波状弯曲者也常见, 且常呈脉状伸入围岩中。所侵入围岩热接触变质作用较明显, 常见有角岩化、硅化、大理岩化、矽卡岩化等, 其宽度一般 $500 \sim 800 \text{ m}$, 最宽者达 1500 m 。岩体内部具热液蚀变作

用, 一般为绿泥石化、绢云母化、云英岩化等, 蚀变岩石多循断裂方向零星出露。在岩体各期次接触界线附近发育呈椭球状的暗色同源析离体, 长约 $3 \sim 15 \text{ cm}$ 。在岩体近围岩处常见有小捕虏体。总体呈中深成相的岩基产出, 遭受中等剥蚀。

根据已知的锆石 SHRIMP U–Pb 年龄、不同岩石单元之间的侵入接触关系、岩石学及地球化学特征等, 将塔山岩体划分为 3 个侵入期次 (图 1), 自早到晚依次为粗中–中粒斑状二云母二长花岗岩 ($\eta\gamma\text{T}_3^a, 218 \pm 3 \text{ Ma}^{①}$)、中细粒–细粒斑状二云母二长花岗岩 ($\eta\gamma\text{T}_3^b, 215 \pm 3 \text{ Ma}^{①}$)、细粒二云母二长花岗岩 ($\eta\gamma\text{T}_3^c$)。岩石均呈灰白色, 多具块状构造。造岩矿物主要为钾长石 ($20\% \sim 30\%$)、斜长石 ($18\% \sim 35\%$)、石英 ($22\% \sim 30\%$)、黑云母 ($3\% \sim 4\%$)、白云母 ($1\% \sim 7\%$) 等组成, 副矿物有电气石、磷灰石等, 蚀变矿物为绢云母、粘土矿物及少量斜黝帘石和绿泥石等。

2 分析方法

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。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, 其它氧化物均采用 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

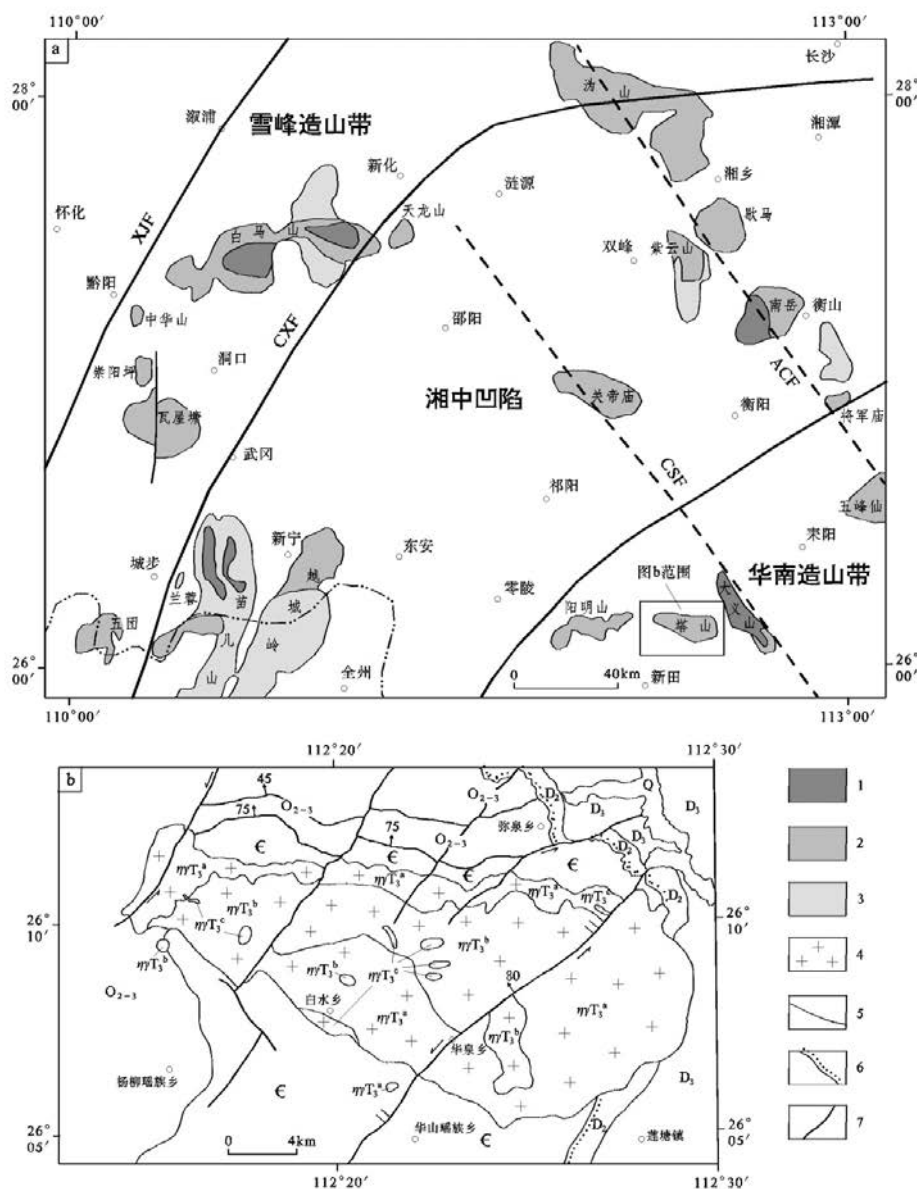


图1 塔山岩体地理位置(a)及地质略图(b)

Fig. 1 Positional(a) and Geological(b) sketch map of Tashan pluton

1-早燕山期花岗岩;2-印支期花岗岩;3-加里东期花岗岩;4-花岗岩;5-地质界线;6-角度不整合界线;7-断裂;Q-第四系; D_3 -上泥盆统; D_2 -中泥盆统; O_{2-3} -中-上奥陶统; ϵ -寒武系; $\eta\gamma T_3^a$ -晚三叠世粗-中粒斑状二云母二长花岗岩; $\eta\gamma T_3^b$ -晚三叠世中细-细粒斑状二云母二长花岗岩; $\eta\gamma T_3^c$ -晚三叠世细粒二云母二长花岗岩;XJF-溆浦-靖州断裂;CXF-城步-新化断裂;CSF-郴州-邵阳隐伏断裂;ACF-安仁-常德隐伏断裂。

定外,其它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。

Rb-Sr 同位素测定:采用阳离子树脂(Dowex50×8)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 $0.4 \times 10^{-9}g$ 和 $0.8 \times 10^{-9}g$ 。

Sm-Nd 同位素分析:取加入 $^{145}Nd+^{149}Sm$ 混合稀释剂和不加稀释剂的样品各 1 份,以氢氟酸和高氯

表1 印支期塔山岩体的主量元素组成(wt%)

Table 1 Petrochemical components of granites in Indosinian Tashan 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
LJ5	$\eta\gamma T_2^c$	72.06	0.08	15.30	0.96	1.60	0.05	0.31	0.15	3.98	3.97	0.21		0.44	99.11	1.41	1.41	8.06	1.00	3.68
LJ4	$\eta\gamma T_2^c$	70.62	0.31	15.07	0.88	2.16	0.04	0.65	0.66	2.88	5.13	0.25		1.02	99.67	1.34	1.46	8.12	1.78	2.63
HX222-1	$\eta\gamma T_2^b$	74.38	0.06	14.28	0.49	0.80	0.03	0.07	0.27	3.82	4.73	0.21	0.02	0.65	99.81	1.23	1.25	8.62	1.24	7.62
HX226-1	$\eta\gamma T_2^a$	73.45	0.18	14.38	0.40	2.13	0.07	0.31	0.17	3.04	4.33	0.16	0.05	1.20	99.87	1.46	1.48	7.47	1.42	3.37
HX227-1	$\eta\gamma T_2^a$	71.76	0.29	14.74	0.40	2.37	0.06	0.58	0.45	2.49	4.71	0.25	0.03	1.72	99.85	1.52	1.60	7.34	1.89	2.78
LJ3	$\eta\gamma T_2^a$	70.64	0.41	14.83	1.14	2.36	0.07	0.73	1.46	3.34	3.46	0.26		0.7	99.4	1.28	1.60	6.89	1.04	2.28
HX223-1	$\eta\gamma T_2^a$	73.12	0.24	14.13	0.25	2.17	0.06	0.41	0.72	3.23	4.40	0.20	0.03	0.90	99.86	1.27	1.40	7.71	1.36	3.21
LJ2	$\eta\gamma T_2^a$	70.86	0.36	13.73	0.52	3.14	0.06	0.73	1.46	2.98	4.58	0.22		0.42	99.06	1.12	1.39	7.66	1.54	1.99

注: LJ2 ~ LJ5来源于资料②, ASI=Al/(Ca-1.67P+Na+K)(分子比); ANK=Al/(Na+K)(分子比); A/MF=Al₂O₃/(MgO+FeO)(分子比).

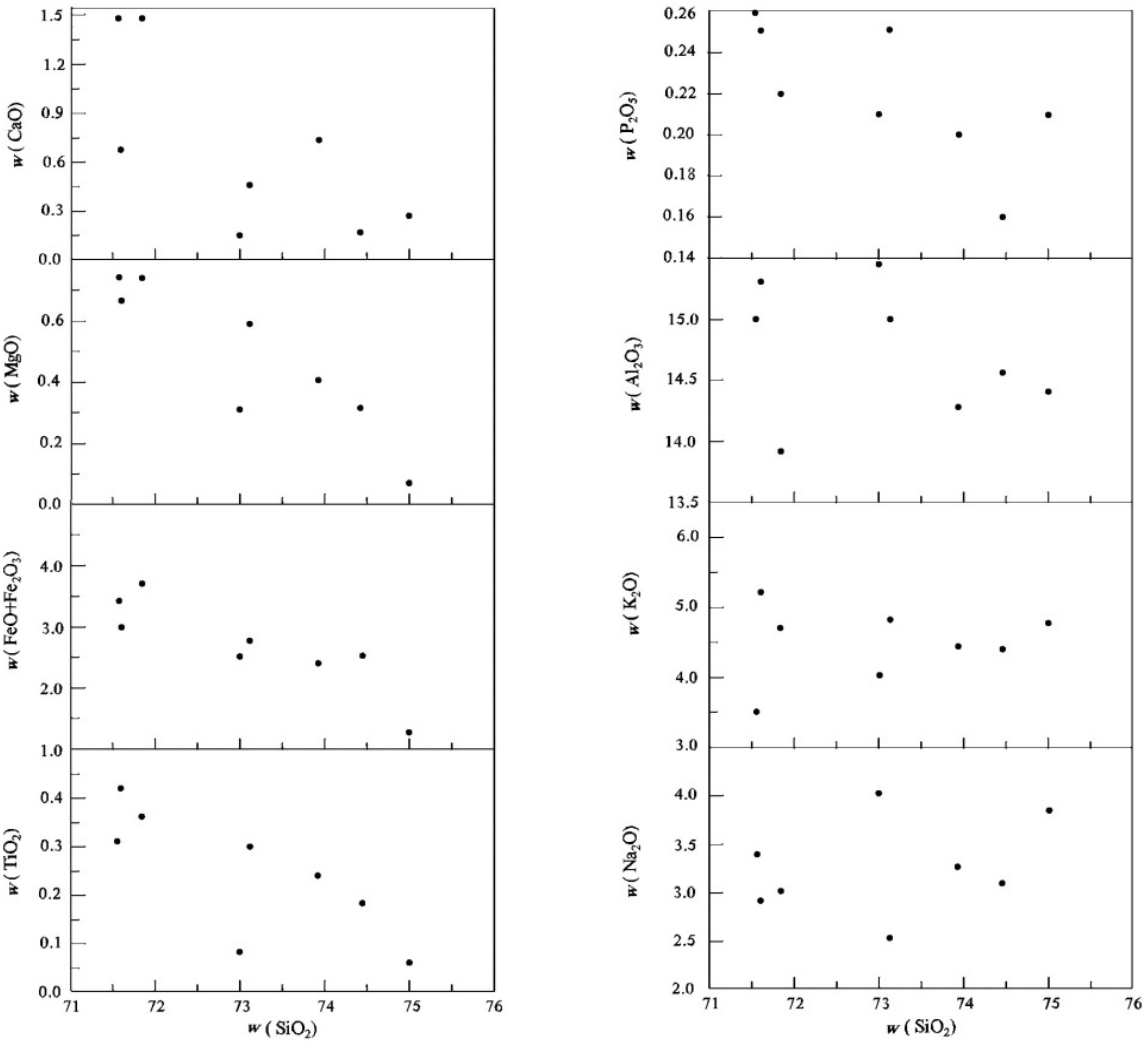


图2 印支期塔山岩体氧化物Harker图解

Fig. 2 Harker diagrams for the Indosinian Tashan granitic rocks

酸溶解后用 Dowe50x8 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子质谱仪 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 1×10^{-10} 和 0.7×10^{-10} g。

3 岩石地球化学特征

3.1 主量元素

印支期塔山岩体样品的主量元素分析结果如表 1 所示。岩石 SiO_2 含量高, 为 71.57% ~ 75.01% (SiO_2 及以下主元素含量值均系无水化处理结果, 故与表 1 略有差别), 平均为 73.06%。随着 SiO_2 含量的增加, Al_2O_3 、 FeO^T 、 TiO_2 、 MgO 、 CaO 、 P_2O_5 等总体呈减少趋势, 而 Na_2O 和 K_2O 则未显示出规律变化(图 2)。 Al_2O_3 含量高, 为 13.92% ~ 15.51%, 平均 14.75%。 K_2O 含量中等, 为 3.51% ~ 5.20%, 平均

4.47%; 全碱(ALK)含量中等, $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 为 6.89% ~ 8.62%, 平均 7.73%; K_2O 均大于 Na_2O , $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值在 1.00 ~ 1.89 之间, 平均为 1.41。 FeO^T 含量中等, 为 0.81% ~ 3.18%, 平均 2.12%。 TiO_2 、 MgO 、 CaO 、 P_2O_5 含量平均分别为 0.24%、0.48%、0.68%、0.22%。

根据 Frost 等^[27]提出的 Fe 数($\text{FeO}/(\text{FeO} + \text{MgO})$), 这里“FeO”为全铁($\text{FeO} + 0.9 \times \text{Fe}_2\text{O}_3$), 修改的碱钙指数($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} - \text{CaO}$)、铝饱和指数(ASI)($\text{Al}/(\text{Ca} - 1.67\text{P} + \text{Na} + \text{K})$ (分子比))等三个地球化学变量以及 ANK($\text{Al}/(\text{Na} + \text{K})$ (分子比)), 印支期塔山岩体花岗岩总体属铁质、碱钙性及过铝质花岗岩(图 3(a) ~ (c))。CIPW 标准矿物 C 含量 1.77% ~ 5.50%, 平均 3.85%; ASI 均大于 1.10(1.12 ~ 1.52), 平均达 1.33, 属典型强过铝花岗岩。在硅-钾图中, 总体属高钾钙碱性系列(图 3(d))。

在 $\text{SiO}_2 - (\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$ 图解中, 印支期塔山岩体样品均落入花岗岩区(图 4)。

3.2 微量和稀土元素

印支期塔山岩体花岗岩微量元素和稀土元素分析结果分别见表 2 和表 3。

在不相容元素对原始地幔标准化分布曲线图

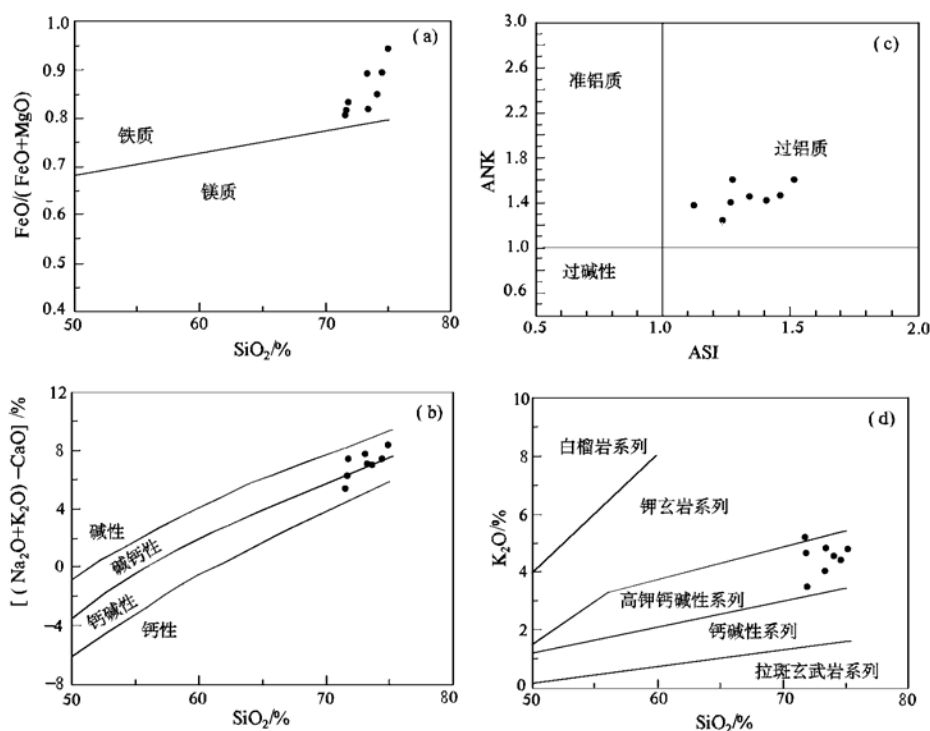


图3 印支期塔山岩体地球化学分类图解

Fig. 3 Diagrams of geochemical classification for the Indosinian Tashan granitoids

a-c据Frost et al.(2001)^[27]; d据Peccerillo et al. (1976)^[28].

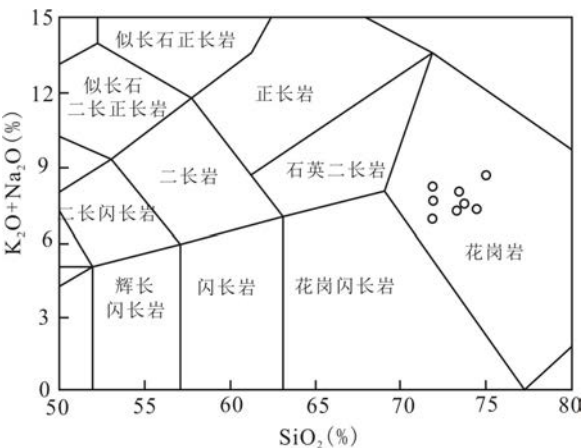


图4 印支期塔山岩体SiO₂-(K₂O+Na₂O)图解
Fig. 4 SiO₂-(K₂O+Na₂O) diagram of Indosinian Tashan pluton
(据Middlemost, 1994)^[29]

上(图 5),除 HX222-1 外的其它样品元素分布特征总体一致,与相邻元素相比,Ba、Nb、Sr、Ti 表现为明显的亏损,而 Rb、(Th+U+K+Ta)、(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 相对 Ta 显著亏损,表明二者间发生过明显分馏,也暗示花岗岩具有壳源花岗岩特征^[30]。Rb、Ba、Sr、Ti 含量的变化主要受造岩矿物控制,Rb 升高和 Sr、Ba 降低一般由钾长石、斜长石和黑云母分离结晶所造成,Ti 负异常反映出钛铁矿的分离结晶作用。与相邻元素相比,P 未显示出

明显异常,暗示磷灰石未经历明显的分离结晶。样品 HX222-1 的微量元素组合特征显然有别于其它样品,主要表现为与相邻元素相比无 Nb 的亏损,但却有 P 的显著富集(图 5),成因可能与其为高度分异强过铝花岗岩有关^[31];S 型花岗岩高度分异后的残余熔浆中,因 Al³⁺+P⁵⁺ 置换 2Si⁴⁺,P 可以进入到碱性长石,使少数强分异 S 型花岗岩和花岗质伟晶岩有很高的 P₂O₅ 含量^[32]。

塔山岩体花岗岩稀土元素含量较低(表 3),ΣREE 为 17.9~184.0 μg/g,平均为 119.1 μg/g。ΣCe/ΣY 为 1.273~5.67,平均为 3.80;(La/Yb)_N 值为 2.52~17.89,平均 10.77,显示轻稀土相对重稀土较明显富集。Eu 显著亏损,δEu 值 0.17~0.37,平均为 0.30,暗示经历了显著的斜长石分离结晶作用。除样品 HX222-1 和 LJ5 外的其它样品轻稀土配分曲线明显右倾(图 6),反映轻、重稀土均具有明显分馏。样品 HX222-1 和 LJ5 的稀土配分曲线特征显著区别于其它样品(图 6),其稀土总量显著偏低,曲线总体呈近水平海鸥状,但具明显的 M 型四分组效应特征,可能与高程度演化的花岗质岩浆结晶晚期流体/熔体的相互作用有关^[33]。

综上,塔山岩体花岗岩多数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。个别样品曲线形态即元素

表2 印支期塔山岩体微量元素分析结果(×10⁻⁶,Au×10⁻⁹)及有关参数
Table 2 Analysis results of trace elements in Indosinian Tashan granites

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
LJ5	ηT ₂ ^c	72.06	0.08	15.30	0.96	1.60	0.05	0.31	0.15	3.98	3.97	0.21		0.44	99.11	1.41	1.41	8.06	1.00	3.68
LJ4	ηT ₂ ^c	70.62	0.31	15.07	0.88	2.16	0.04	0.65	0.66	2.88	5.13	0.25		1.02	99.67	1.34	1.46	8.12	1.78	2.63
HX222-1	ηT ₂ ^b	74.38	0.06	14.28	0.49	0.80	0.03	0.07	0.27	3.82	4.73	0.21	0.02	0.65	99.81	1.23	1.25	8.62	1.24	7.62
HX226-1	ηT ₂ ^a	73.45	0.18	14.38	0.40	2.13	0.07	0.31	0.17	3.04	4.33	0.16	0.05	1.20	99.87	1.46	1.48	7.47	1.42	3.37
HX227-1	ηT ₂ ^a	71.76	0.29	14.74	0.40	2.37	0.06	0.58	0.45	2.49	4.71	0.25	0.03	1.72	99.85	1.52	1.60	7.34	1.89	2.78
LJ3	ηT ₂ ^a	70.64	0.41	14.83	1.14	2.36	0.07	0.73	1.46	3.34	3.46	0.26		0.7	99.4	1.28	1.60	6.89	1.04	2.28
HX223-1	ηT ₂ ^a	73.12	0.24	14.13	0.25	2.17	0.06	0.41	0.72	3.23	4.40	0.20	0.03	0.90	99.86	1.27	1.40	7.71	1.36	3.21
LJ2	ηT ₂ ^a	70.86	0.36	13.73	0.52	3.14	0.06	0.73	1.46	2.98	4.58	0.22		0.42	99.06	1.12	1.39	7.66	1.54	1.99

注:样品由湖北武汉综合岩矿测试中心测定分析,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,其它微量元素均采用酸溶法测定。

表3 印支期塔山岩体稀土元素分析结果($\times 10^{-6}$)及有关参数Table 3 Analysis results of rare earth elements in Indosinian Tashan granites($\times 10^{-6}$)

样号	代号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	ΣREE	$\Sigma\text{Ce}/\Sigma\text{Y}$	$(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$	δEu
LJ5	ηT_2^c	1.91	4.68	0.63	2.10	0.68	0.04	0.73	0.16	0.91	0.16	0.48	0.08	0.50	0.08	4.79	17.9	1.27	2.52	0.17
LJ4	ηT_2^c	30.61	75.18	9.55	33.90	6.77	0.41	4.78	0.69	3.32	0.55	1.33	0.20	1.13	0.17	15.41	184.0	5.67	17.89	0.21
HX222-1	ηT_2^b	3.78	7.31	0.96	3.47	1.01	0.10	1.15	0.21	1.15	0.21	0.59	0.10	0.63	0.11	6.63	27.4	1.54	3.99	0.29
HX226-1	ηT_2^a	16.31	33.90	4.43	15.90	3.54	0.33	2.80	0.47	2.22	0.39	0.98	0.20	1.19	0.17	11.13	94.0	3.81	9.03	0.32
HX227-1	ηT_2^a	33.10	72.05	8.49	31.20	6.15	0.65	5.17	0.62	2.95	0.53	1.40	0.26	1.59	0.23	14.09	178.5	5.65	13.78	0.35
LJ3	ηT_2^a	25.86	52.45	6.51	24.55	4.78	0.49	4.07	0.65	3.40	0.63	1.64	0.26	1.51	0.22	18.44	145.5	3.72	11.31	0.33
HX223-1	ηT_2^a	29.29	61.25	7.07	26.19	5.32	0.59	4.19	0.62	2.89	0.50	1.29	0.22	1.35	0.19	14.74	155.7	4.99	14.35	0.37
LJ2	ηT_2^a	28.82	52.32	7.04	24.91	4.68	0.54	4.15	0.68	3.66	0.64	1.62	0.25	1.43	0.22	19.07	150.0	3.73	13.31	0.37
LJ1	包体	40.90	90.07	11.80	40.48	8.56	0.67	7.60	1.15	6.75	1.25	3.24	0.46	2.74	0.46	33.95	250.1	3.34	9.86	0.25

资料来源:LJ1~LJ5来源于资料②。

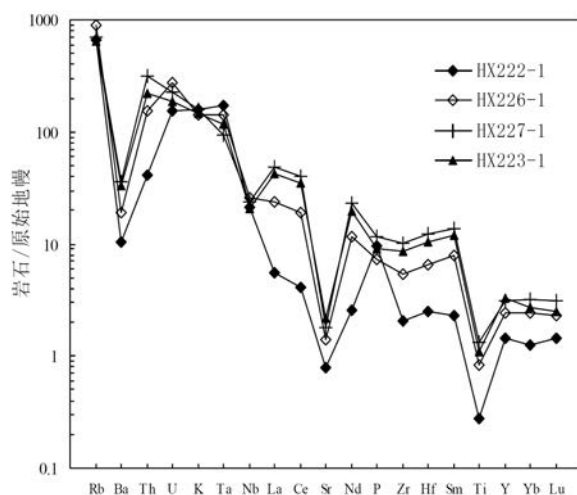


图5 印支期塔山岩体微量元素原始地幔标准化蛛网图

Fig. 5 Primitive mantle-normalized trace element spider diagram for Indosinian Tashan granites

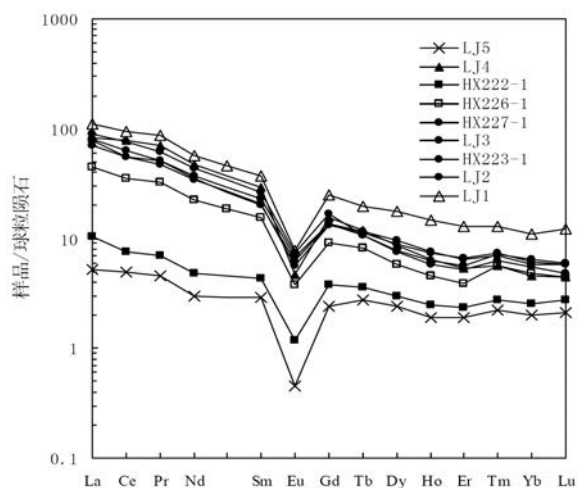
原始地幔据Sun和McDonough (1989)^[34].

图6 印支期塔山岩体稀土元素球粒陨石标准化分布模式

Fig. 6 Chondrite-normalized REE pattern of Indosinian Tashan granites

球粒陨石据Taylor和Mclennan (1985)^[35].

表4 印支期塔山岩体Sr、Nd同位素组成及有关参数计算

Table 4 Sr and Nd isotope compositions of granites in Indosinian Tashan pluton

样品号	Rb ($\mu\text{g/g}$)	Sr ($\mu\text{g/g}$)	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$\varepsilon\text{Sr}(t)$	I_{Sr}
HX223-1	402.1	46.83	25.01	0.80954	400.4	0.73271
HX226-1	529.9	28.98	53.68	0.89229	324.9	0.72739
样品号	Sm ($\mu\text{g/g}$)	Nd ($\mu\text{g/g}$)	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$\varepsilon\text{Nd}(t)$	$t_{\text{DM}}(\text{Ga})$
HX223-1	5.067	25.44	0.1205	0.511964	-11.05	1.89
HX226-1	2.937	13.93	0.1275	0.511986	-10.82	1.87

注: $\varepsilon\text{Nd}(t)$ 、 $\varepsilon\text{Sr}(t)$ 、 I_{Sr} 和 t_{DM} 的计算据陈江峰等^[36];计算参数为: $t=216\text{Ma}$; $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}}=0.512638$, $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}}=0.1967$, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_{\text{UR}}=0.7045$, $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{CC}}=0.118$, $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}}=0.2137$, $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}}=0.513151$, $\lambda_{\text{Sm}}=6.54 \times 10^{-12}\text{a}^{-1}$, $\lambda_{\text{m}}=1.42 \times 10^{-11}\text{a}^{-1}$ 。参数中下角字母代表的含义:UR:铀同位素均一储库;CHUR:球粒陨石均一储库;DM:亏损地幔;CC:大陆地壳。

组成的差异,可能与岩浆结晶晚期强分异及流体/熔体相互作用等有关。

3.3 Sr、Nd 同位素

对印支期塔山岩体早期侵入的粗中—中粒斑状二云母二长花岗岩($\eta\gamma T_3^a$)进行了2个样品的Rb-Sr和Sm-Nd同位素测定,同位素测试数据及有关参数值列于表4。根据岩体的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄(见前文),在计算有关参数时样品年龄取值216 Ma。岩体花岗岩 I_{Sr} 值为0.73271、0.72739(平均0.73005), $\varepsilon_{Sr}(t)$ 值为324.9、400.4, $\varepsilon_{Nd}(t)$ 值为-11.05、-10.82, t_{DM} 为1.87、1.89 Ga。

4 讨论

4.1 岩石成因

印支期塔山岩体与围岩呈清楚的侵入接触关系,外接触带具热接触变质,镜下表现出典型的岩浆结晶结构,因此花岗岩应为岩浆成因。

岩体的地质学、岩石地球化学及Sr、Nd同位素地球化学特征表明其为陆壳重熔型花岗岩,且源岩主要为中、上地壳酸性岩石;岩浆形成与陆壳减压熔融及软流圈热传递有关;岩浆过程受部分熔融、分离结晶及岩浆混合作用控制。具体分析如下:

(1) 岩石为ASI值均大于1.1的强过铝(SP)花岗岩(ASI值平均达1.33),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^[37-38]。

(2) 微量元素蛛网图(图5)上岩石显示出一般

壳源花岗岩特征(见前述)。

(3) 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^[42,43],基底的时代主要在1.7~2.7 Ga间^[44]。湘东南地区具地幔物质加入的早燕山期花岗岩 t_{DM} 多在1.22 Ga~1.76 Ga之间^[44]。由上可见,印支期塔山岩体的两阶段Nd模式年龄值(1.87 Ga、1.89 Ga)与基底地壳相当,并高于有地幔物质加入的湘东南早燕山期壳源花岗岩。鉴此,初步推断岩体主要源于基底地壳的重熔。此外,岩体 I_{Sr} 值(0.73271和0.72739,平均0.73005)与大陆地壳0.719的 I_{Sr} 平均值^[39]相近,Sr、Nd同位素组成($\varepsilon_{Sr}(t)$ = 324.9和400.4, $\varepsilon_{Nd}(t)$ = -11.05和-10.82)与澳大利亚东南部Lachlan褶皱带S型花岗岩($\varepsilon_{Sr}(t)$ = 77和204, $\varepsilon_{Nd}(t)$ = -6.1和-9.8)^[40]类似,在 $\varepsilon_{Nd}(t)$ - $\varepsilon_{Sr}(t)$ 图解^[41](图7)中落入华南S型花岗岩区,也说明岩体主要源于地壳重熔。

(4) Allégre^[45]指出花岗岩 $\varepsilon_{Sr}(t)$ 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。印支期塔山岩体 $\varepsilon_{Sr}(t)$ = 324.9和400.4,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图解显示源岩为变质泥质岩,可能有少量变质杂砂岩^[46](图8),对此提供了进一步佐证。

(5) 根据Sylvester^[37]有关强过铝花岗岩物源和形成温度的理论,具强过铝特征的印支期塔山花岗岩样品CaO/Na₂O比值大多低于0.3,少量高于0.3(图9),暗示其源岩主要为泥质岩石,部分为长英质岩石。这一推断与图8所反映的信息基本一致。

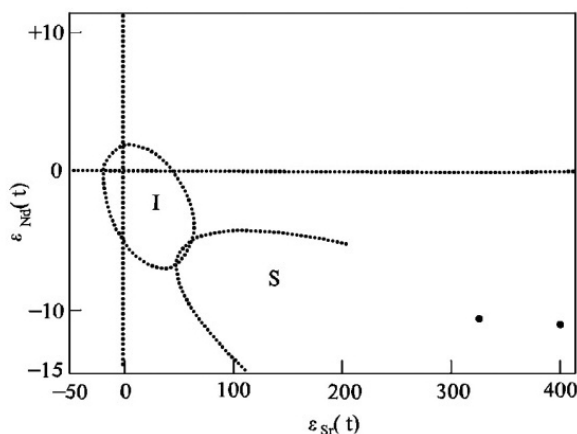


图7 印支期塔山岩体 $\varepsilon_{Nd}(t)$ - $\varepsilon_{Sr}(t)$ 图解

Fig. 7 $\varepsilon_{Nd}(t)$ - $\varepsilon_{Sr}(t)$ diagram for Indosinian Tashan granites

I—华南I型花岗岩; S—华南S型花岗岩, 据刘昌实等, 1990^[41]

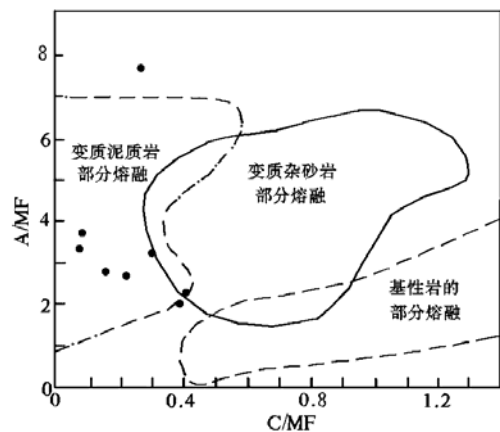


图8 印支期塔山岩体C/MF-A/MF图解^[46]

Fig. 8 C/MF-A/MF diagram of Indosinian Tashan granites

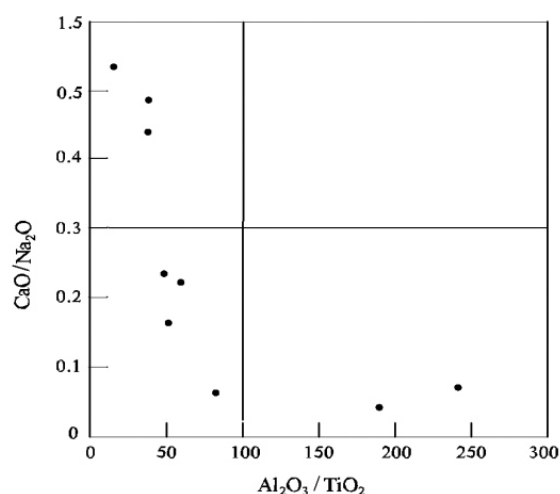
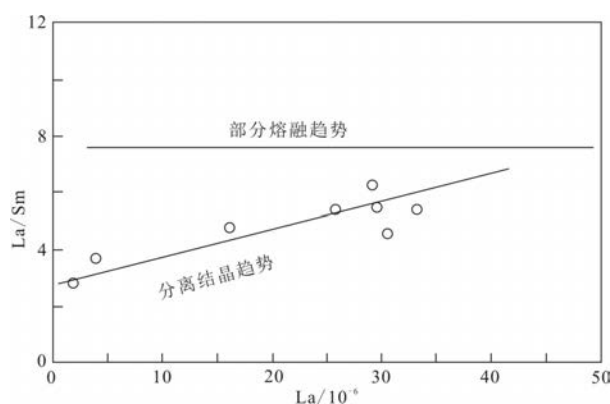
图9 印支期塔山岩体CaO/Na₂O-Al₂O₃/TiO₂图解Fig. 9 CaO/Na₂O-Al₂O₃/TiO₂ plot of Indosinian Tashan granites

图10 印支期塔山岩体La/Sm-La图解

Fig. 10 La/Sm-La plot of Indosinian Tashan granites

此外,大部分样品 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 比值小于 100(图 9),暗示岩浆主要形成于温度高于 875°C 的“高温”条件,除造山带地壳增厚导致升温外,软流圈地幔热能向上传递可能对岩浆形成起到一定作用。

(6)La/Sm-La 图解(图 10)显示,岩浆过程既受部分熔融也受分离结晶作用控制。La/Sm-La 图解中较好的正相关关系显示出部分熔融趋势,但趋势线斜率很低而与分离结晶趋势线靠近。结合前述微量元素和稀土元素特征显示的分离结晶及晚期高度分异岩浆信息,初步推断岩浆过程既受部分熔融也受分离结晶作用控制。

(7)镁铁质微粒包体的发育可能与岩浆混合作用有关,并暗示存在软流圈地幔的上隆和热能向上传递。

4.2 岩体形成构造环境及机制

区域上印支运动的主幕发生于中三叠世后期^[44],而塔山岩体 $(218 \pm 3)\text{Ma}$ 的侵位年龄表明其主要形成于晚三叠世早期,因此岩体应形成于印支运动强烈挤压后的后碰撞构造环境。顺便指出,区域印支运动属板内造山运动,因此塔山岩体相关的“碰撞”作用并非通常所指的大陆板块之间的碰撞,而是陆块内部的强挤压作用。

上述后碰撞构造环境的判断可得到构造环境判别图解的支持。在 Maniar 和 Piccoli^[47]提出的多组主元素构造环境判别图解中,印支期塔山岩体的分

析样品主要落入 IAG+CAG+CCG 区,且有较多样品位于与 POG 重叠区之外(图 11),因此总体应属于 IAG+CAG+CCG 组类型。而岩体的所有样品均属 ASI 值大于 1.1 的强过铝(SP)花岗岩,进而可进一步判断为大陆碰撞花岗岩类(CCG)^[48]。在 Pearce et al^[49]多组微量元素构造环境判别图解中(图 12),塔山岩体所有样品显示为“同碰撞花岗岩(S-COLG)”或“火山弧花岗岩+同碰撞花岗岩(VAG+S-COLG)”。

结合前文岩浆成因和形成环境,推断塔山岩体形成机制为:中三叠世后期印支运动产生强烈陆内变形,导致地壳叠置、增厚和升温,变形峰值后进入地壳伸展阶段,在变形减弱、应力松弛的后碰撞构造环境下,基底地壳减压重熔向上侵位形成塔山岩体。此外,地壳重熔可能尚受软流圈地幔上隆及其热传递的影响。

5 结论

(1)晚三叠世塔山岩体高硅、富铝、中钾、中碱,总体属铁质、高钾钙碱性系列强过铝质花岗岩类。

(2)塔山花岗岩属 S 型花岗岩,源岩主要为中、上地壳泥质岩石,部分为长英质岩石。

(3)塔山花岗岩的形成主要与印支运动陆内强挤压之后的地壳减压熔融有关,并可能受到软流圈地幔上隆的影响。

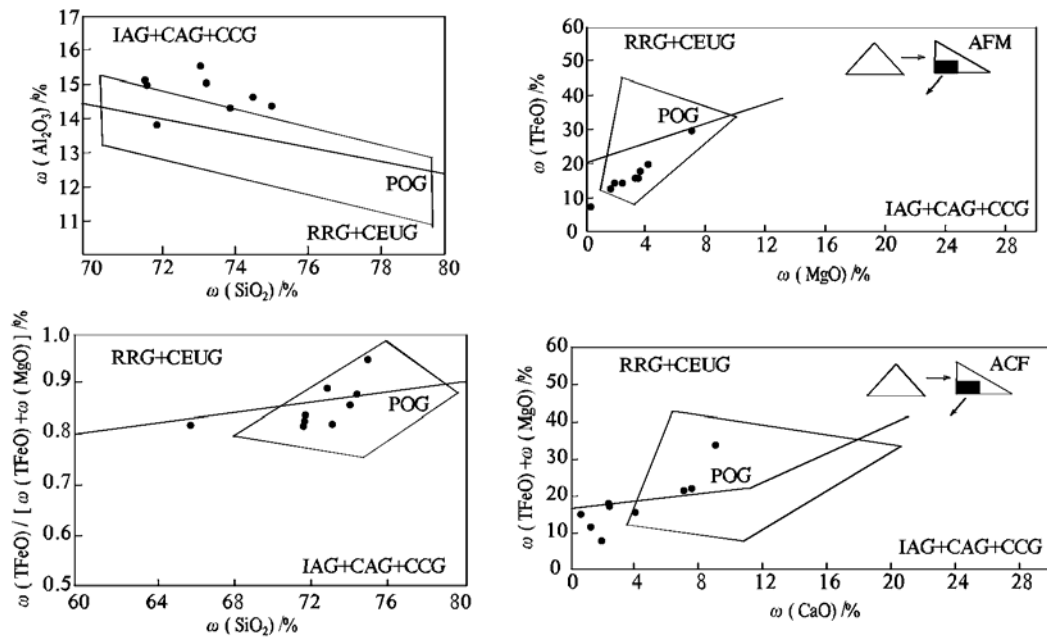


图11 印支期塔山岩体构造环境氧化物判别图

Fig. 11 Diagrams for discrimination of structural enviroment of Indosinian Tashan granites

底图据Maniar and Piccoli (1989)^[47]. IAG: 岛弧花岗岩; RRG: 与裂谷有关的花岗岩; CAG: 大陆弧花岗岩类; CEUG: 大陆的造陆抬升花岗岩类; CCG: 大陆碰撞花岗岩类; POG: 后造山花岗岩类.

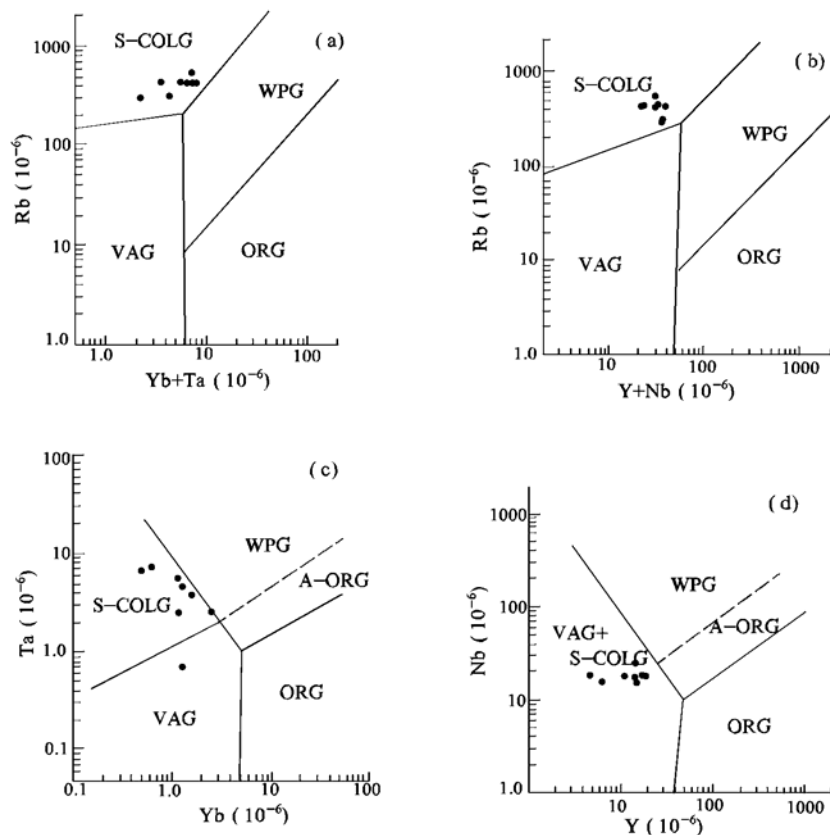


图12 印支期塔山岩体微量元素构造环境判别图解

Fig. 12 Trace element diagrams for discrimination of tectonic environment of Indosinian Tashan granites

底图据Pearce et al.(1984)^[49]. 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.

注释:

- ①湖南省地质调查院. 湖南上堡地区矿产远景调查报告 (野外验收稿)[R].2014.
- ②湖南地质矿产勘查开发局. 1:5万罗家桥幅. 阳嘉洲幅区域地质调查报告[R].1999.

参考文献:

- [1] 陈卫锋,陈培荣,周新民,黄宏业,丁兴,孙涛. 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.
- [2] 陈卫锋,陈培荣,黄宏业,丁兴,孙涛. 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:地球科学,2007,37(7):873-893.
- [3] 丁兴,周新民,孙涛. 华南陆壳基底的幕式生长—来自广东古寨花岗岩长岩中锆石LA-ICPMS定年的信息[J].地质论评,2005,51(4):382-392.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 舒良树,周新民,邓平,余心起. 南岭构造带的基本地质特征[J].地质论评,2006,52(2):251-265.
- [7] 张岳桥,徐先兵,贾东,舒良树. 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.
- [8] 徐先兵,张岳桥,贾东,舒良树,王瑞瑞. 华南早中生代大地构造过程[J].中国地质,2009,36(3):573-593.
- [9] 胡召齐,朱光,张必龙,张力. 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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,1998,4(4):432-443.
- [13] 丁道桂,郭彤楼,刘运黎,翟常博. 对江南-雪峰带构造属性的讨论[J].地质通报,2007,26(7):801-809.
- [14] Wang Y J, Zhang Y H, Fan W M, Peng T P. Structural signatures and ^{40}Ar - ^{39}Ar geochronology of the Indosinian Xuefengshan tectonic belt, South China Block [J]. Journal of Structural Geology,2005,27(6):985-998.
- [15] 柏道远,黄建中,王先辉,马铁球,张晓阳,陈必河. 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.
- [16] 柏道远,邹宾微,赵龙辉,李泽泓,王先辉,马铁球,肖冬贵,彭云益. 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.
- [17] 柏道远,贾宝华,钟响,刘耀荣,贾鹏远,黄文义. 湘东南印支运动变形特征研究[J].地质论评,2012,58(1):19-29.
- [18] Hsü K J, Li J L, Chen H H. Tectonic 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.
- [20] 柏道远,陈建成,马铁球,王先辉. 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.
- [21] 柏道远,周亮,马铁球,王先辉. 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.
- [22] 陈卫锋,陈培荣,周新民,黄宏业,丁兴,孙涛. 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.
- [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.
- [24] 付建明,马昌前,谢才富,张业明,彭松柏. 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.
- [25] 郭春丽,郑佳浩,楼法生,曾载淋. 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.
- [26] 柏道远,李建清,周柯军,马铁球,王先辉. 祁阳山字型构造质疑[J].大地构造与成矿学,2008,32(3):265-275.
- [27] Frost B R, Barnes C G, Collins W J. A geochemical classification for granitic rocks [J]. Journal of Petrology, 2001, 42(11): 2033-2048.
- [28] Peccerillo A, Taylor S R. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey [J]. Contribution to Mineralogy and Petrology, 1976, 58(1):63-81.
- [29] Middlemost E A K. Naming materials in the magma/igneous rock system [J]. Earth Science Review, 1994, 37:215-224.
- [30] 陈小明,王汝成,刘昌实,胡欢,张文兰,高剑锋. 广东从化佛冈(主体)黑云母花岗岩定年和成因[J].高校地质学报,2002,8(3):293-307.
- [31] 李献华,李武显,李正祥. 再论南岭燕山早期花岗岩的成因类型及构造意义[J].科学通报,2007,52(9):981-991.
- [32] London D, Wolf M B, Morgan G B, Garrido M G. Experimental Silicate - Phosphate Equilibria in Peraluminous Granitic Magmas, with a Case Study of the Alburquerque Batholith at Tres Arroyos, Badajoz, Spain [J]. Journal of

- Petrology, 1999, 40:215–240.
- [33] 赵振华,熊小林,韩小东.花岗岩稀土元素四分组效应形成机理探讨—以千里山和巴尔哲花岗岩为例[J].中国科学(D辑),1999, 29(4):331–338.
- [34] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implication for mantle composition and process[A]//Saunders A D, Norry M J(eds.). Magmatism in the ocean basins [C]. Geological Society Special Publication, London, 1989, 42: 313–345.
- [35] Taylor S R, McLennan S M. The continental crust: Its composition and evolution[J]. Oxford: Blackwell,1985: 1–312.
- [36] 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[A]//郑永飞(主编).化学地球动力学[C].北京:科学出版社,1999:262–287.
- [37] Sylvester P J. Post-collisional strongly peraluminous granites [J]. Lithos, 1998,45:29–44.
- [38] Zen E. Aluminum enrichment in silicate melts by fractional crystallization: some mineralogic and petrologic constraints [J]. Journal of Petrology, 1986, 27:1095–1117.
- [39] Faure G. Principles of isotope geology (2nd ed). New York: John Wiley and Sons,1986, 567p.
- [40] McCulloch M T, Chappell B W. Nd isotopic characteristics of S-type and I-type granites [J]. Earth and Planet Science Letter, 1982, 58(1):51–64.
- [41] 刘昌实,朱金初,沈渭洲,徐士进.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.
- [42] Hong D W, Xie X L, Zhang J S. Isotope geochemistry of granitoids in South China and their metallogeny[J]. Resource Geology, 1998, 48:251–263.
- [43] Pei R F, Hong D W. The granites of south China and their metallogeny[J]. Episodes, 1995, 18:77–82.
- [44] 柏道远,黄建中,刘耀荣,伍光英,马铁球,王先辉.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.
- [45] All é gre C J, Othman D B. Nd–Sr isotope relationship in granitoid rocks and continental crust development: A chemical approach to orogenesis [J]. Nature, 1980, 286: 335–342.
- [46] Alther R, Holl A, Hegner E, Langer C, Kreuzer H. High-potassium, calc-alkaline I-type plutonism in the European Variscides: northern vosges (France) and northern Schwarzwald (Germany)[J]. Lithos, 2000, 50: 51–73.
- [47] Maniar P D, Piccoli P M. Tectonic discrimination of granitoids [J]. Geological Society of America Bulletin, 1989, 101: 635–643.
- [48] 肖庆辉,邓晋福,马大铨,等.花岗岩研究思维与方法[M].北京:地质出版社,2002:21–36.
- [49] Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. Journal of Petrology, 1984, 25(4):956–983.