

文章编号: 1009-3850(2016)04-0085-10

老挝-越南长山成矿带北西段高分异 I 型花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义

高建华, 吴振波, 范文玉, 王宏

(中国地质调查局成都地质调查中心, 四川 成都 610081)

摘要: 马江结合带俯冲时代一直是地质研究的热点问题, 老挝-越南长山成矿带花岗岩的构造属性是对马江洋闭合时间的重要制约。本文报道了老挝-越南长山成矿带北西段的中细粒花岗岩, 其 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 261.34 ± 0.69 Ma (MSWD = 1.4), 为晚二叠世。岩石具有高 SiO_2 (77.01% ~ 78.07%)、高 K_2O (4.32% ~ 4.57%)、低钙镁 ($\text{CaO} = 0.32\% \sim 0.34\%$; $\text{MgO} = 0.04\% \sim 0.06\%$) 和低 P_2O_5 含量特征, 富集 Rb、U、Th, 明显亏损 Ba、Sr、P、Ti 和 Eu 等, 属高分异 I 型花岗岩。该岩体可能是马江洋岩石圈南向俯冲的背景下, 由俯冲海洋岩石圈诱导的幔源岩浆侵入古老地壳, 形成初生地壳, 在后期持续的热事件的影响下, 提供足够的热引起初生地壳和古老地壳的混合地壳部分熔融, 形成母岩浆, 再经历高度分离结晶作用形成。

关键词: 锆石 U-Pb 年龄; 高分异 I 型花岗岩; 长山成矿带; 老挝; 越南

中图分类号: P597

文献标识码: A

引言

老挝-越南长山成矿带是东南亚地区一条重要的成矿带, 其位于马江缝合带与哀牢山-斯雷博河缝合带之间, 带内铁、铜、金等矿产十分丰富^[1-5]。成矿带内广泛发育晚古生代一早中生代花岗岩, 前人对这些花岗岩进行了大量研究^[6-9], 但对高分异 I 型花岗岩鲜有报道。本文拟从高分异 I 型花岗岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄和岩石地球化学方面, 探讨岩浆成因及演化历史, 进一步探讨其形成环境和构造意义。

1 地质概况及岩石学

长山成矿带范围大体相当于长山褶皱带, 呈北西-南东向展布(图1)。长山褶皱带贯穿老挝中北部及越南中部, 大地构造位置位于印支陆块东部,

马江结合带为其北界, 色潘-三岐为其南界, 北西以哀牢山斯雷博河缝合带为界^[10-13]。

长山褶皱带由一系列近平行的右旋走滑断裂所控制, 带内发育与糜棱岩化和高温变质作用相关的剪切带^[6,8]。带内地层主要发育有奥陶纪至白垩纪的沉积岩, 最老的岩石在福华特, 含有可能为元古代和寒武纪的低级到高级的变质岩, 有角闪岩、石英岩和斜长片麻岩^[13]。带内岩浆岩极其发育, 呈多期次多成分的特点, 形成时代主要有加里东期、华力西期、印支期等^[9]。

研究区位于长山成矿带北西侧(图1), 在老挝 1:20 万地质图上^①(图2), 该岩体为花岗岩, 侵位于上亚组绢云母片岩及 Houei Sao 组灰色片岩、绢云母砂岩中。单个岩体出露面积大于 90 km²。

镜下鉴定该岩体的岩性为中细粒花岗岩, 岩石为灰白色, 具中细粒花岗结构, 粒度 1~5 mm(图3a),

收稿日期: 2016-03-16; 改回日期: 2016-04-29

作者简介: 高建华(1980-), 男, 工程师, 从事矿床勘查及成矿规律研究。E-mail: 21394450@qq.com

通讯作者: 吴振波(1965-), 男, 高级工程师, 从事区域地质调查工作。E-mail: 940511142@qq.com

资助项目: 国土资源大调查项目(编号: 12120114018701)、老挝沙耶武里及邻区优势矿产资源潜力调查与分析项目

块状构造。石英(Q): 30% ~ 35% ,它形粒状 ,部分有碎粒化现象 ,部分略有塑性形变现象。斜长石(Pl): 20% ~ 25% ,半自形板状 ,有卡钠复合双晶 ,不均匀尘状蚀变 ,边缘常被钾长石交代。钾长石(Kfs): 35% ~ 40% ,可见卡式双晶 ,有不甚发育的条纹 ,不均匀弱尘状蚀变。黑云母: 3% ~ 5% ,多色性为暗褐色 ~ 浅黄褐色(图 3b) ,不均匀 ,有少量绿泥石交代 ,有不透明矿物包裹体。不透明矿物少量 ,自形-它形粒状 $\rho. 0.001 \sim 0.2\text{mm}$,零星分布。岩石受应力作用 ,略有塑性形变及定向现象。

2 样品分析方法

样品采集时注意避开岩石蚀变严重地带。主量、微量、稀土元素分析在国家地质实验测试中心完成。主量元素采用熔片 XRF 方法在 X 荧光光谱仪 2100 上测定 ,其中 FeO 采用容量滴定法 稀土和微量元素用 ICP-MS 进行测定 相对标准偏差优于 5%。

将采集的样品破碎 ,按重力和磁选方法分选 ,最后在双目镜下根据锆石颜色、自形程度、形态等特征初步分类 ,挑选出具有代表性的锆石。将分选好的锆石用环氧树脂制靶、打磨和抛光。锆石的阴极发光(CL) 图像在北京锆年领航科技有限公司完成 ,仪器为日本 JEOL 公司生产的 JSM6510 型扫描电子显微镜。

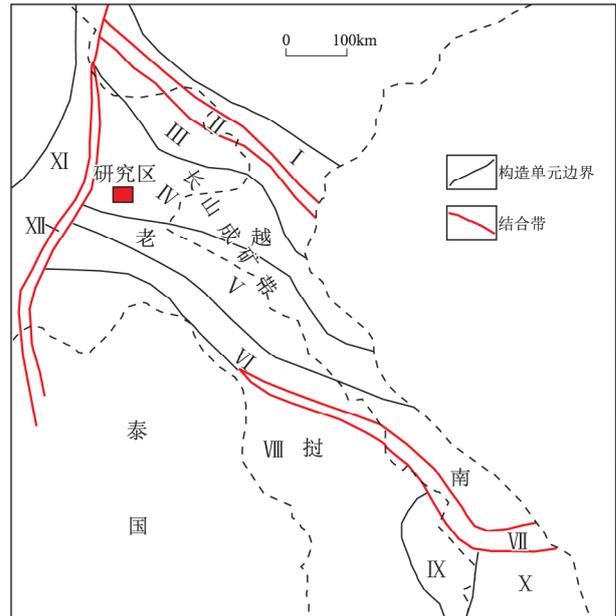


图 1 老挝及邻国大地构造图^[14]

I. 莱州-清化断隆带; II. 金沙江-哀牢山-马江结合带; III. 绿春-桑怒裂谷带; IV. 福华特火山弧带; V. 大江弧后盆地; VI. 甘蒙-顺化火山弧带; VII. 色潘-岷港结合带; VIII. 呵叻中生代盆地; IX. 公河构造带; X. 昆嵩地块; XI. 墨江-黎府-罗文真火山弧带; XII. 哀牢山-斯雷博河结合带

Fig. 1 Tectonic map of Laos and its adjacent countries (after Zhu Huaping et al. ,2012)

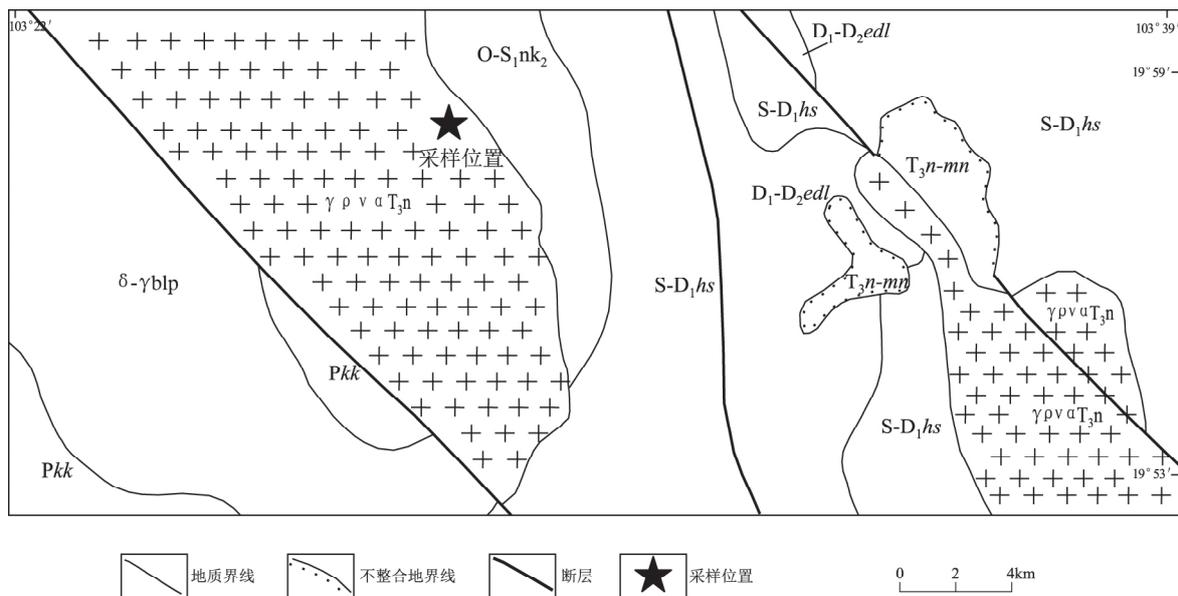


图 2 研究区地质简图

T_3n-mn . Nam Neun 组上部; Pkk . Khang Kai 组; D_1-D_2edl . Eifeli Tin Pholen 组; $S-D_1hs$. Houei Sao 组; $O-S_1nk_2$. 上亚组; $\gamma\rho\nu\alpha T_3n$. Phou Say Vay 岩体; $\delta-\gamma blp$. Ban Lao 杂岩

Fig. 2 Simplified geological map of the Truong Son metallogenic belt

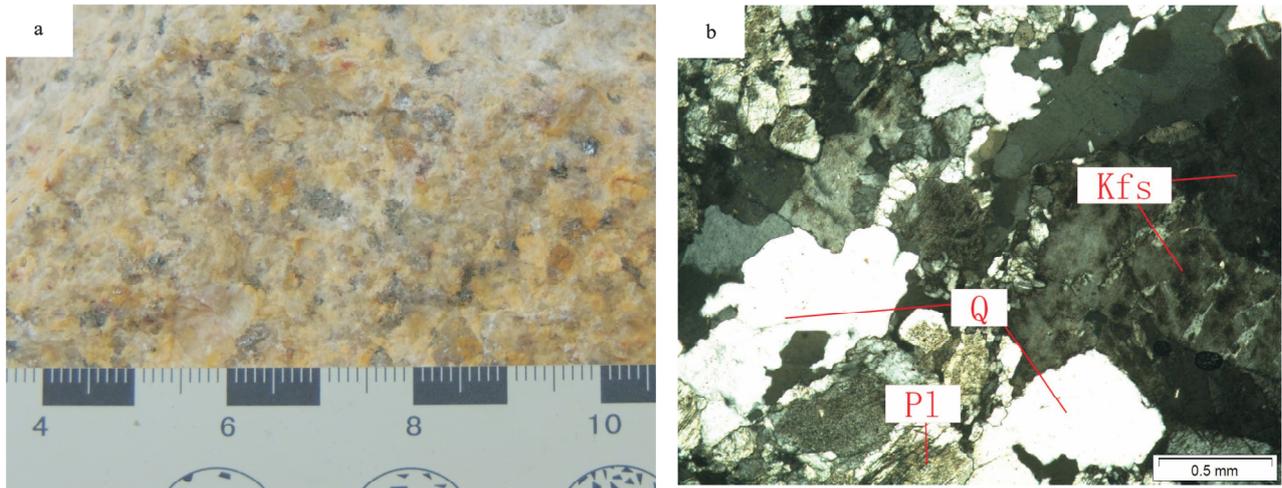


图3 研究区花岗岩野外及镜下照片

Fig. 3 Field picture (a) and photomicrograph (b) for the granites from the Truong Son metallogenic belt

表1 研究区花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素分析结果

Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb age determinations of the granites from the Truong Son metallogenic belt

点号	同位素比值						年龄 (Ma)						Th/U
	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	
1	0.0533	0.0004	0.3059	0.0027	0.0417	0.0003	338.95	14.82	270.96	2.13	263.25	1.95	1.26
2	0.0515	0.0003	0.2922	0.0034	0.0412	0.0004	261.18	10.19	260.32	2.71	260.00	2.55	0.98
3	0.0534	0.0002	0.3073	0.0028	0.0417	0.0004	346.35	7.41	272.06	2.18	263.50	2.34	0.88
4	0.0515	0.0005	0.2966	0.0035	0.0418	0.0004	264.88	13.89	263.75	2.76	263.73	2.25	0.80
5	0.0516	0.0003	0.2967	0.0022	0.0417	0.0002	333.39	14.81	263.79	1.69	263.27	0.97	0.86
6	0.0514	0.0004	0.2902	0.0025	0.0409	0.0001	261.18	16.67	258.73	2.00	258.63	0.85	1.06
7	0.0517	0.0003	0.2961	0.0020	0.0415	0.0002	272.29	11.11	263.35	1.55	262.27	1.20	0.69
8	0.0519	0.0009	0.2944	0.0052	0.0412	0.0005	279.69	37.03	262.04	4.08	260.13	2.93	0.66
9	0.0520	0.0003	0.2969	0.0024	0.0414	0.0003	283.40	11.11	263.99	1.86	261.77	1.58	0.87
10	0.0517	0.0002	0.2956	0.0030	0.0415	0.0004	333.39	11.11	262.97	2.31	262.07	2.26	0.86
11	0.0515	0.0002	0.2938	0.0019	0.0414	0.0002	261.18	39.81	261.57	1.51	261.57	1.42	0.68
12	0.0515	0.0002	0.2952	0.0015	0.0416	0.0002	264.88	9.26	262.65	1.15	262.64	0.99	0.60
13	0.0515	0.0014	0.2904	0.0082	0.0409	0.0002	261.18	64.80	258.84	6.45	258.57	1.49	0.70
14	0.0526	0.0002	0.2984	0.0020	0.0412	0.0003	322.28	7.41	265.18	1.58	260.14	1.76	0.72
15	0.0529	0.0004	0.3009	0.0026	0.0413	0.0003	324.13	16.67	267.14	2.05	260.68	1.59	0.73
16	0.0517	0.0002	0.2943	0.0011	0.0413	0.0001	272.29	7.41	261.94	0.90	260.85	0.79	0.54
17	0.0518	0.0003	0.2942	0.0021	0.0412	0.0002	275.99	12.96	261.84	1.61	260.32	0.98	0.94
18	0.0516	0.0006	0.2909	0.0061	0.0409	0.0006	264.88	28.70	259.27	4.80	258.41	3.83	0.78
19	0.0515	0.0014	0.2959	0.0091	0.0417	0.0006	264.88	62.95	263.22	7.11	263.15	3.47	0.74
20	0.0523	0.0002	0.3006	0.0022	0.0417	0.0002	301.91	4.63	266.90	1.73	263.07	1.49	0.99
21	0.0543	0.0004	0.3126	0.0032	0.0417	0.0002	383.39	50.92	276.16	2.48	263.46	1.30	0.72
22	0.0533	0.0014	0.3021	0.0106	0.0411	0.0004	338.95	59.26	268.05	8.29	259.58	2.49	0.96
23	0.0543	0.0004	0.3117	0.0027	0.0417	0.0003	383.39	16.67	275.50	2.07	263.52	1.69	0.78
24	0.0523	0.0005	0.2970	0.0035	0.0412	0.0003	301.91	24.07	264.09	2.71	260.36	2.04	0.75
25	0.0520	0.0012	0.2923	0.0080	0.0408	0.0006	283.40	56.48	260.40	6.28	257.82	3.46	1.20
26	0.0543	0.0014	0.3125	0.0118	0.0419	0.0014	383.39	59.26	276.09	9.15	264.29	8.70	1.08

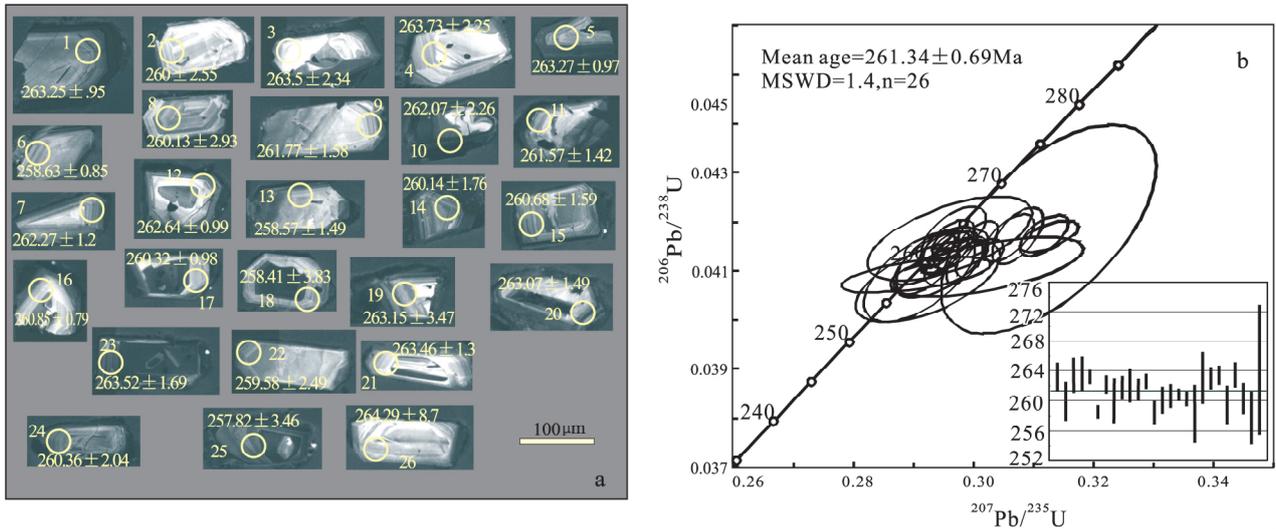


图4 研究区花岗岩锆石阴极发光图(a)和U-Pb年龄谐和图(b)

Fig. 4 Cathodoluminescence images of zircons (a) and concordia plot (b) of zircon data for the granites from the Truong Son metallogenic belt

3 年代学

LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年测试分析在中国地质科学院矿产资源研究所成矿作用与资源评价重点实验室完成。本次挑选出来的锆石大多呈长柱状、椭圆状,无色透明-半透明,具较好的自形晶,粒度在 $100 \sim 150 \mu\text{m}$ 之间(图 4a)。选择打点的锆石时尽量选择晶型相对完整,有明显岩浆环带结构的锆石,以确保其为岩浆锆石,打点的位置选择锆石

的核部与边部之间的环带过渡部位。

本次共选定了 26 个锆石颗粒进行 LA-ICP-MS 测年,分析结果如表 1 所示。样品的同位素比值和元素含量计算采用 ICP-MS-DataCal V4.6 程序处理,锆石年龄谐和图用 Isoplot3.0 程序获得。Th/U 比值范围为 $0.54 \sim 1.26 (> 0.1)$,显示典型岩浆成因锆石的特点^[15]。在 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 谐和图上,26 个分析点均位于谐和线上或附近(图 4)。最后计算出来的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 $261.34 \pm 0.69 \text{ Ma}$,

表 2 花岗岩主要元素含量及特征参数(wt%)

Table 2 Major element contents and characteristic parameters for the granites from the Truong Son metallogenic belt (wt%)

元素	D926-1	D926-2	D926-3	D926-4	D926-5	D926-6
SiO ₂	77.13	77.01	77.95	78.07	77.82	77.61
Al ₂ O ₃	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.07
Fe ₂ O ₃	12.48	12.35	11.46	11.59	11.65	11.98
MgO	0.7	0.68	0.72	0.56	0.64	0.55
CaO	0.16	0.09	0.16	0.27	0.2	0.13
Na ₂ O	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
K ₂ O	0.05	0.05	0.06	0.04	0.04	0.04
MnO	0.34	0.34	0.32	0.32	0.32	0.33
TiO ₂	3.46	3.44	3	3.21	3.24	3.35
P ₂ O ₅	4.57	4.49	4.55	4.32	4.37	4.41
FeO	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
烧失量	0.63	0.76	0.85	0.72	0.76	0.64
TOTAL	99.6	99.29	99.15	99.18	99.12	99.13
DI	95.85	95.96	96.06	96.13	96.17	96.25
FeO ^T	0.79	0.70	0.81	0.77	0.78	0.62
AR	4.35	4.33	4.57	4.44	4.49	4.41
A/CNK	1.109	1.109	1.097	1.1	1.095	1.101

表 3 花岗岩微量和稀土元素含量及特征参数($\times 10^{-6}$)Table 3 Trace element and REE contents and characteristic parameters for the granites from the Truong Son metallogenic belt ($\times 10^{-6}$)

元素	D926-1	D926-2	D926-3	D926-4	D926-5	D926-6	陆壳*	洋壳*	大陆弧※	岛弧※	adakite※
Rb	274	262	295	271	248	272	32	2.2	83	109	41
Sr	12.1	11.6	11.1	9.79	8.08	8.87	260	1.3	424	229	668
Ba	108	108	113	112	86	117	250	2.5	501	514	615
Ga	13.8	14.5	14	14.1	12.7	14.4	18	1.7	\	\	\
Nb	10.7	11.1	12.1	11.3	10.8	11.2	11	2.2	15	15.8	6.5
Ta	1.71	1.91	2.09	2	1.88	1.77	1	0.3	1.17	0.49	0.54
Zr	99.8	109	91.2	107	97	105	100	8	190	133	131
Hf	4.54	5.12	4.68	4.85	4.45	4.96	3	2.5	5.5	2.6	3.4
Th	30.6	31.7	26.8	27.3	24.6	23.8	3.5	2.2	13.2	4.96	4.5
V	1.43	1.27	1.45	1.37	1.21	1.34	230	2.5	84	71	61
Cr	3.39	2.75	3.06	6.4	3.51	2.92	185	2.7	29	21	38
Co	0.15	0.13	0.3	0.16	0.12	0.15	29	4.7	12	19	15
Ni	0.82	0.37	0.44	1.98	0.86	0.58	105	1.35	19	9	26
Sc	1.67	2.01	2.06	1.87	1.59	1.63	30	3.8	12.1	10.9	7.4
U	6.73	7.02	6.19	6.85	5.92	6.78	0.91	1	3.61	0.67	0.96
La	6.45	7.82	6.87	6.38	4.97	5.88	16	3.7	29.94	32.01	22.62
Ce	14.7	17.5	15.3	13.3	9.14	9.88	33	1.15	60.15	55.27	41.03
Pr	2.22	2.62	2.05	2.09	1.65	1.92	3.77	2.99	\	\	\
Nd	8.33	10.4	7.65	7.57	6.42	7.54	16	1	28.27	17.85	18.53
Sm	2.27	2.8	1.92	2.14	1.75	2.05	3.5	3.3	5.28	6.4	2.88
Eu	0.15	0.15	0.12	0.13	0.11	0.12	1.1	1.3	1.81	3.6	0.91
Gd	2.97	3.38	2.25	2.64	2.29	2.62	3.3	4.6	4.26	6.99	2.05
Tb	0.64	0.71	0.5	0.58	0.47	0.54	0.6	8.7	0.72	0.76	0.3
Dy	4.65	5.13	3.71	4.05	3.67	3.84	3.7	5.7	3.57	6.88	1.22
Ho	1.12	1.15	0.94	0.95	0.88	0.92	0.78	1.3	\	\	\
Er	3.62	3.96	3.3	3.21	2.88	3.1	2.2	3.7	2.2	5.03	0.64
Tm	0.56	0.62	0.53	0.51	0.45	0.46	0.32	5.4	\	\	\
Yb	4.01	4.31	3.96	3.62	3.19	3.35	2.2	5.1	2.44	4.26	0.65
Lu	0.62	0.68	0.64	0.56	0.52	0.51	0.3	5.6	0.39	0.47	0.11
Y	30	31.6	24.9	26.3	22.8	25.2	20	3.2	27.4	28.5	8.8
δ Eu	0.18	0.15	0.18	0.17	0.17	0.16	0.99	1.02	1.17	1.65	1.14
Rb/Sr	22.64	22.59	26.58	27.68	30.69	30.67	0.12	1.69	0.2	0.48	0.06
Nb/Ta	6.26	5.81	5.79	5.65	5.74	6.33	11	7.33	12.82	32.24	12.04
Th/U	4.55	4.52	4.33	3.99	4.16	3.51	3.85	2.2	3.66	7.4	4.69
Sr/Y	0.40	0.37	0.45	0.37	0.35	0.35	13	0.41	15.47	8.04	75.91
Rb/Ba	2.54	2.43	2.61	2.42	2.88	2.32	0.13	0.88	0.17	0.21	0.07

注: 陆壳和洋壳稀土元素含量引自文献[31], 以“★”标记; 岛弧、大陆弧及 adakite 岩稀土元素含量引自文献[32], 以“※”标记“\”表示未作分析

MSWD = 1.4, $n = 26$ 。样品的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄在误差范围内可信, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄能够代表本区花岗岩的成岩年龄。

4 地球化学特征

4.1 常量元素

花岗岩主量元素分析结果见表 2。岩体中 SiO_2

含量较高, 为 77.01% ~ 78.07%, 平均 77.6%; ($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$) 较富, 为 7.53% ~ 8.03%, 平均 7.74%。 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 大于 1, 为 1.31 ~ 1.52, 平均 1.36, 富钾; CaO 含量较低, 为 0.32% ~ 0.34%, 平均 0.33; MgO 含量较低, 为 0.04% ~ 0.06%, 平均 0.05; FeO^T/MgO 比值较高, 一般 14.04 ~ 19.4, 平均 16.28, 远高于一般 I 型、S 型、M 型花岗岩^[16]。

分异指数(DI)为95.85~96.25,平均为96.07,分离结晶程度较高;碱度率(AR)4.33~4.57,平均4.43。在SiO₂-K₂O图上(图5),样品投点全部落在高钾钙碱性区域;铝饱和指数(A/CNK)平均1.102,有弱过铝质的特点。在A/NK-A/CNK图解上(图6)样品投点落入弱过铝质岩石区。

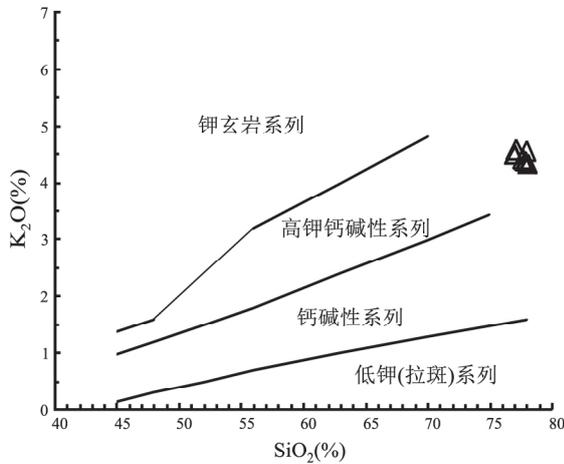


图5 花岗岩 SiO₂-K₂O 图解^[17]

Fig. 5 SiO₂ vs. K₂O diagram for the granites from the Truong Son metallogenic belt (after Peccerillo et al., 1976)

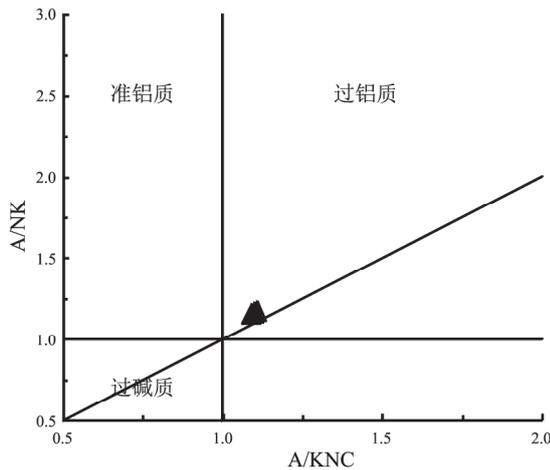


图6 花岗岩 A/KNC-A/NK 图

Fig. 6 A/NK vs. A/KNC diagram for the granites from the Truong Son metallogenic belt

4.2 微量元素和稀土元素特征

研究区微量元素及稀土元素含量见表3。微量元素原始地幔配分模式图(图7)总体表现为右倾的锯齿状,富集大离子亲石元素 Rb、U、Th、Ba、Sr 含量很低;高场强元素含量低。强烈亏损 P、Ti,其亏损 P、Ti 的特点反映岩浆经历了高度的钛铁矿、磷灰石等矿物的分离结晶作用。

该区岩体以低 Ba、Sr 和高 Rb/Sr 值为特征。其中 Rb 的含量为(248~295) × 10⁻⁶,Ba、Sr 含量分别为(86~117) × 10⁻⁶和(8.08~12.1) × 10⁻⁶,Rb/Sr 值为22.59~30.69。Zr、Nb、Y、Yb、P、Ti 含量较低,Zr + Nb + Ce + Y 总量较低,为(139.74~169.2) × 10⁻⁶。

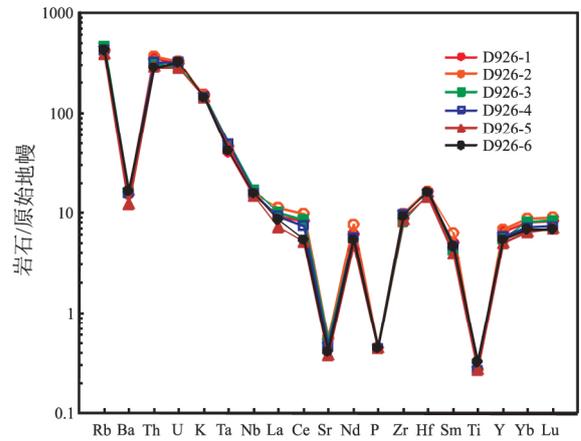


图7 花岗岩原始地幔标准化微量元素蛛网图^[18]

Fig. 7 Primitive mantle-normalized trace element spidergram for the granites from the Truong Son metallogenic belt (after Sun et al., 1989)

研究区岩体稀土总量为(42.73~61.23) × 10⁻⁶,含量偏低。LREE/HREE 为1.68~2.14,稍微富集轻稀土。(La/Sm)_N 为1.80~2.31,(Gd/Yb)_N 为0.47~0.65,表明轻稀土分馏程度相对较明显,而重稀土分馏程度差异不明显。δEu 为0.15~0.18,具强的负铕异常,说明源区有强烈的斜长石分离结晶。δCe 为0.72~0.99,平均0.88。稀土元素球粒陨石标准化模式图(图8)呈海鸥型分布。

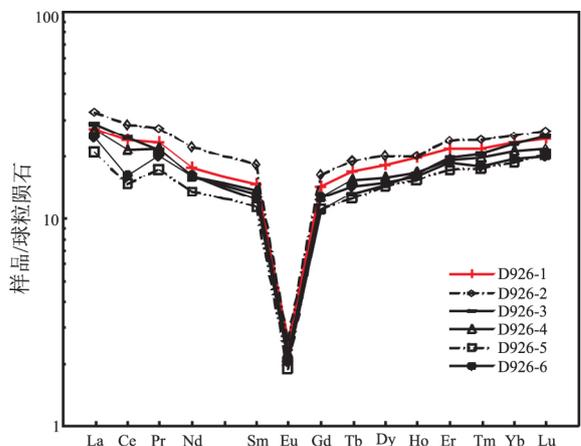


图8 花岗岩球粒陨石稀土元素配分图^[18]

Fig. 8 Chondrite-normalized REE distribution patterns for the granites from the Truong Son metallogenic belt (after Sun et al., 1989)

5 讨论

5.1 形成时代

已有资料显示,研究区花岗岩一直被认为形成于晚三叠世^①,在老挝 1:20 万地质图上标注为 $\gamma\rho\nu\alpha T_3n$ 。本次获得的高精度锆石 U-Pb 年龄,相比前人由生物化石及地层对比推断的年龄要早。由于化石及地层对比有一定的时间段,因此存在一定的不一致性。同时,老挝的地质工作程度较低,未做过详细的测年工作,仅由推断、对比所得的年龄值需进一步考证。本次研究获得的年龄均由有震荡环发育的岩浆锆石所获得,可以代表锆石结晶的时间。年龄数据谐和性较好,加权平均年龄为 $261.34 \pm 0.69\text{Ma}$,代表了该花岗岩的形成年龄。该年龄值属晚二叠世(P_3),为印支运动早期构造阶段。

5.2 岩石成因

I型、S型、A型高分异花岗岩,由于矿物组合和化学成分都趋近于最低共熔点组分,其具有相似的地球化学特征(尤其是微量元素特征),难以区分^[19-21]。

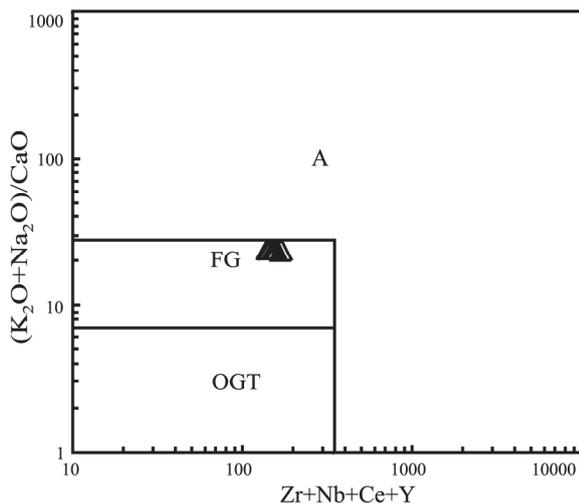


图9 花岗岩 $(Zr + Nb + Ce + Y) - (K_2O + Na_2O) / CaO$ 关系图^[16]

OGT: I、S 和 M 型花岗岩区; FG: 分异的 I 型花岗岩区; A: A 型花岗岩区

Fig. 9 $(K_2O + Na_2O) / CaO$ vs. $(Zr + Nb + Ce + Y)$ diagram for the granites from the Truong Son metallogenic belt (after Whalen et al., 1987)

研究区花岗岩高硅($SiO_2 > 72\%$),为超酸性岩石。较高的 Rb/Sr 比值(22.59 ~ 30.69)及明显的 Eu 负异常(0.15 ~ 0.18),表明岩石经历了强烈的结

晶分异作用。尽管区内岩体表现出一些 S 型花岗岩的特点(A/CNK 平均 1.102,接近 1.1),但 P_2O_5 的含量在 0.01% 左右,这点与相对富铝的 S 型花岗岩有明显差别,后者常常具有较高的 P_2O_5 含量(一般大于 0.1%),而且随着分异作用的进行其含量有递增的趋势,但本区岩体并没有此特征。岩石中未见有白云母、堇青石和石榴石等富铝矿物,不同于 S 型花岗岩的强过铝特征。Nb、Ta 在微量元素蛛网图上没有形成明显亏损的谷,而 S 型花岗岩在蛛网图上亏损谷最明显。因此可排除岩体属于 S 型花岗岩的可能,其成因类型为 A 型或为高分异的 I 型花岗岩。

岩体中 SiO_2 平均含量 77.6%, $K_2O + Na_2O$ 平均为 7.74%, CaO 平均含量 0.33, FeO^T / MgO 比值平均为 16.28,符合 Eby^[22] 提出的 A 型花岗岩在 SiO_2 含量为 70% 时, $Na_2O + K_2O = 7\% \sim 11\%$ 、 $CaO < 1.8\%$ 、 $FeO^T / MgO = 8 \sim 80$ 的特征,也符合 A 型花岗岩显著富铁的特征($FeO^T / MgO > 10$)^[23]。但综合分析研究区岩体,其具有明显不同于 A 型花岗岩的一系列化学组成特征,主要表现在:(1) 岩体没有特征的碱性暗色矿物,且 Ga 含量较低, $10000 \times Ga / Al$ 比值变化在 2.06 ~ 2.31,明显小于 Whalen 等^[23] 建议的 A 型花岗岩下限值(2.6);(2) Zr、Nb、Ce、Y 等元素含量低, $Zr + Nb + Ce + Y$ 为 $(139.74 \sim 169.2) \times 10^{-6}$,远低于 A 型花岗岩的下限值 350×10^{-6} ^[23];(3) 岩体中稀土元素总量较低,含量为 $(42.73 \sim 61.23) \times 10^{-6}$,远低于国内 A 型花岗岩(219.03×10^{-6})及 S 型花岗岩(173.14×10^{-6}),甚至低于 I 型花岗岩(114.71×10^{-6})的 1/2^[24]。我们注意到,这些样品的 MgO 值均 < 0.1 ,接近仪器的检测极限,很难给出准确的含量,这很可能是导致 FeO^T / MgO 高比值的原因。在 $(Na_2O + K_2O) / CaO$ 与 $Zr + Nb + Ce + Y$ 关系图(图 9)上,样品全部落入分异的 I 型花岗岩区域。此外, $(Al_2O_3 + CaO) / (FeO^T + Na_2O + K_2O)$ 与 $100 \times (MgO + FeO^T + TiO_2)$ 关系图被认为能够有效地将碱性花岗岩与钙碱性和强过铝质花岗岩区分开^[25]。本文所有样品都投在高分异钙碱性花岗岩区域(图 10)。此结果进一步表明,本区花岗岩应属于强烈分异的钙碱性 I 型花岗岩,而不是 S 型或 A 型花岗岩。

高场强元素(HFSE)的质量分数及两个共生的元素质量分数比值例如 Nb/Ta、Sr/Y、Rb/Sr 等,能够较为准确地反映岩浆岩的物质源区^[26]。从表 3 可以看出,本区花岗岩的质量分数及 Nb/Ta、Sr/Y、Rb/Sr 值更接近于洋壳平均值,这说明洋壳物质为

花岗岩的物质源区。另外, Sm/Nd 的比值为 $0.25 \sim 0.28$, 小于 0.33 ^[27], 说明岩浆源区可能以壳源为主。

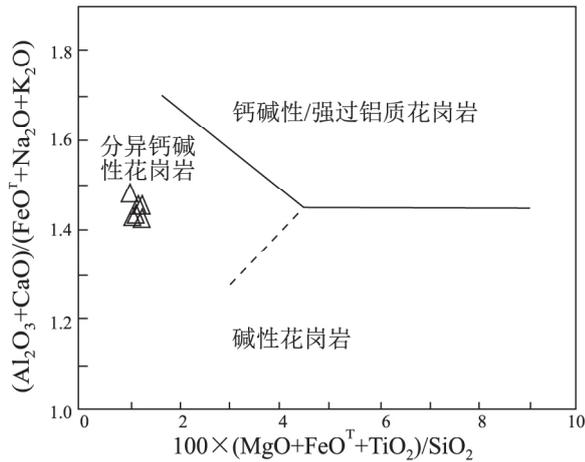


图 10 花岗岩主量元素判别图解^[25]

Fig. 10 $(Al_2O_3 + CaO) / (FeO^T + Na_2O + K_2O)$ vs. $100 \times (MgO + FeO^T + TiO_2) / SiO_2$ diagram for the granites from the Truong Son metallogenic belt (after Sylvester, 1989)

前人研究认为, I 型花岗岩被认为是壳幔混源, 而非全部来自下地壳物质熔融, 因此许多学者又称其为同熔型花岗岩或壳幔混源花岗岩^[28]。地幔组分参与花岗岩成岩过程的方式可能有两种情形: 其一为幔源岩浆与其诱发的地壳物质部分熔融形成的长英质岩浆在地壳深部混合形成壳幔混源岩浆; 第二种方式是幔源岩浆首先侵入到地壳基底岩石中形成初生地壳, 然后在后期热事件的影响下, 这种既有初生地壳又有古老基底地壳构成的混合地壳原岩发生部分熔融^[29]。由于花岗岩主要为地壳物质部分熔融的产物, 因此, 对于壳幔混源的 I 型花岗岩, 多数学者主张第二种模式^[30]。

显然, 如果仅仅是幔源物质和占优势的壳源物质混合形成的母岩浆直接结晶, 并不能解释本区岩体富硅、明显亏损 Ba、Sr、P、Ti 和 Eu 等地球化学特征, 这些特征指示其母岩经历了显著的分异结晶作用。比如 P 的强烈亏损表明发生了磷灰石的分离结晶; Ti 的亏损指示富钛矿物相(钛铁矿、金红石)的分离; Eu 的亏损表明发生了斜长石和(或)钾长石的分离结晶, Sr 和 Ba 的强烈亏损进一步支持了这点。因此, 本区花岗岩体应是由幔源岩浆底侵形成的初生地壳与古老基底地壳混合的地壳发生部分熔融, 并经历了强烈的分异演化作用形成的。

5.3 构造意义

马江洋被认为在早寒武世开始向南、向北双向俯冲, 分别在南北形成福华特和马江硅镁质火山

弧, 并在马江岛弧和红河前寒武纪地块之间形成一个边缘海^[33], 即相当于黑河带。马江结合带形成时代尚有争议, 有人认为洋盆发育于早石炭世到三叠纪, 闭合于晚三叠世, 印支陆块与华南陆块沿马江带碰撞拼合^[34]。Le Van De^[33] 根据滑来层(野复理石, *olistostrome*) 中有泥盆纪灰岩而无石炭纪岩石, 认为北长山带沿马江蛇绿岩带与马江火山弧带之间的连接发生在泥盆纪末到石炭纪初。早一中石炭世发生的大规模褶皱、冲断和推覆表明发生了陆-陆碰撞, 印支和华南拼合成“东亚大陆”或“华夏大陆”。因此, 认为马江结合带在早石炭世时, 可能是华南和印支陆块的焊接带^[35]。近几年, 有人确定在印支陆块北缘(即马江结合带南西侧)有一 $280 \sim 240$ Ma 的岩浆弧, 马江地区存在 240 Ma 的变质带, 认为印支陆块和华南陆块的碰撞发生在早三叠世^[36-38]。本文研究认为, 本区侵位时间为 261.34 ± 0.69 Ma 的高分异 I 型花岗岩是在俯冲背景下的产物, 马江洋在晚二叠世(P_3) 早期仍未闭合。这是因为, 要发生大面积的与古老地壳物质的深熔或重熔有关的花岗岩类的侵位需要大量的热源。在马江洋岩石圈向南俯冲背景下, 由俯冲海洋岩石圈诱导的幔源岩浆, 侵入古老地壳形成初生地壳, 在后期持续的热事件的影响下, 可以提供足够的热引起初生地壳和古老地壳的混合地壳部分熔融, 形成高分异 I 型花岗岩类的母岩浆, 并最终侵入围岩, 形成高分异 I 型花岗岩。与前人研究的北长山带印支期花岗岩岩浆锆石 U-Pb 年龄为 $276 \sim 202$ Ma、且 245 Ma 之前的花岗岩为马江洋壳板片向印支陆块之下连续俯冲的产物^[7] 这一结论一致。

6 结论

(1) 锆石 U-Pb 定年结果表明, 本区花岗岩岩体侵位于 261.34 ± 0.69 Ma, 为晚二叠世。

(2) 本区岩体具有高硅、高钾和低磷含量特征, 富集 Rb、Th 和 U, 明显亏损 Ba、Sr、P、Ti 和 Eu 等, 属高分异壳幔混源 I 型花岗岩。

(3) 本区岩体很可能是马江洋岩石圈南向俯冲背景下, 由俯冲带之上的幔源岩浆首先侵入古老地壳形成初生地壳, 并持续提供热量使初生地壳和古老地壳部分熔融形成母岩浆, 再经历高程度分异结晶作用形成的。

注释:

①高建华, 吴振波, 刘书生, 等. 老拐 14 号探矿权区普查报告(内部

资料). 成都: 成都地质调查中心, 2014.

参考文献:

- [1] 高建华, 范文玉, 吴振波, 等. 老挝爬立山铁矿二长花岗斑岩地球化学特征及其成矿意义[J]. 沉积与特提斯地质, 2015, 35(3): 102-108.
- [2] 卢映祥, 刘洪光, 黄静宇, 等. 东南亚中南半岛成矿带初步划分与区域成矿特征[J]. 地质通报, 2009, 28(2/3): 314-325.
- [3] 赵红娟, 陈永清, 卢映祥. 老挝长山成矿带与花岗岩有关的铜金铁矿床的成矿模式[J]. 地质通报, 2011, 30(10): 1619-1627.
- [4] 吴良士. 老挝人民民主共和国矿产资源及其地质特征[J]. 矿床地质, 2009, 28(2): 224-226.
- [5] 李景春, 徐庆国, 庞庆邦. 老挝人民民主共和国地质矿产概况[J]. 贵金属地质, 2000, 9(4): 235-239.
- [6] LEPVRIER C, MALUSKI H, VUONG N V, et al. Indosinian NW-trending shear zones within the Truong Son belt (Vietnam): Ar-Ar Triassic ages and Cretaceous to Cenozoic overprints [J]. Tectonophysics, 1997, 283: 105-127.
- [7] LIU J L, TRAN M D, TANG Y, et al. Permo-Triassic granitoids in the northern part of the Tuong Son belt, NW Vietnam: Geochronology, geochemistry and tectonic implication [J]. Gondwana Research, 2012, 22: 628-644.
- [8] HOA T T, ANH T T, PHUONG N T. Permo-Triassic intermediate-felsic magmatism of the Truong Son belt, eastern margin of Indochina [J]. Geoscience, 2008, 340: 112-126.
- [9] 王疆丽, 林方成, 彭正, 等. 老挝-越南长山褶皱带似斑状角闪黑云二长花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 地质科技情报, 2014, 33(5): 66-74.
- [10] OSANAI Y, OWADA M, TSUNOGAE T, et al. Ultrahigh-temperature pelitic granulites from Kontum Massif, Central Vietnam: Evidence for East Asian juxtaposition at ca. 250Ma [J]. Gondwana Research, 2001, 4: 720-723.
- [11] NAKANO N, OSANAI Y, OWANDA M, et al. Geologic and metamorphic evolution of the basement complexes in the Kontum Massif, Central Vietnam [J]. Gondwana Research, 2007, 12: 438-453.
- [12] OWANDA M, OSANAI Y, NAKANO N, et al. Crustal anatexis and formation of two types of granitic magmas in the Kontum Massif, Central Vietnam: Implications for magma processes in collision zones [J]. Gondwana Research, 2007, 12: 428-437.
- [13] 林方成, 施美凤, 李兴振, 等. 三江-湄公河成矿带地质背景和成矿规律对比研究专题成果报告[R]. 成都: 成都地质矿产研究所, 2011.
- [14] 朱华平, 范文玉, 罗茂金. 老挝色贡省格棱铁矿地质特征及找矿标志[J]. 桂林理工大学学报, 2012, 32(4): 469-474.
- [15] HOSKIN P W O, BLACK L P. Metamorphic zircon formation by solid-state recrystallization of protolith igneous zircon [J]. Journal of Metamorphic Geology, 2000, 18: 423-439.
- [16] WHALEN J B, CARRIE K L, CHAPPELL B W. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1987, 95: 407-419.
- [17] PECCERILLO A, TAYLOR S R. Geochemistry of Eocene calcalkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1976, 58: 68-81.
- [18] SUN S S, MCDONOUGH W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [A]. Saunders A D, Norry M J. Magmatism in the Ocean Basins [C]. London: Geological Society, Special Publications 42, 1989. 313-345.
- [19] CHAPPELL B W. Aluminium saturation in I- and S-type granites and the characterization of fractionated haplogranites [J]. Lithos, 1999, 46: 535-551.
- [20] LI X H, LI Z X, LI W X, et al. U-Pb zircon, geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic constraints on age and origin of Jurassic I- and A-type granites from central Guangdong, SE China: A major igneous event in response to foundering of a subducted flat-slab? [J]. Lithos, 2007, 96: 186-204.
- [21] 吴福元, 李献华, 杨进辉, 等. 花岗岩成因研究的若干问题[J]. 岩石学报, 2007, 23(6): 1217-1238.
- [22] EBY G N. The A-type granitoids: A review of their occurrence and chemical characteristics and speculations on their petrogenesis [J]. Lithos, 1990, 26: 115-134.
- [23] WHALEN J B, CURRIE K L, CHAPPELL B W. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis [J]. Contrib. Mineral. Petrol., 1987, 95: 407-419.
- [24] 吴锁平, 王梅英, 戚开静. A型花岗岩研究现状及其评述[J]. 岩石矿物学杂志, 2007, 26(1): 57-66.
- [25] SYLVESTER P J. Post-collisional alkaline granites [J]. Journal of Geology, 1989, 97: 261-280.
- [26] 陈军林, 何雨粟, 杨国林, 等. 内蒙古苏左旗北部晚二叠世花岗岩地球化学特征及意义[J]. 高校地质学报, 2014, 20(1): 68-80.
- [27] 陈德潜, 陈刚. 稀土地球化学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1990. 226-242.
- [28] 徐克勤, 胡受奚, 孙明志, 等. 论花岗岩的成因系列-以华南中生代花岗岩为例[J]. 地质学报, 1983, 2: 107-118.
- [29] 邱检生, 肖娥, 胡建, 等. 福建北东沿海高分异I型花岗岩的成因: 锆石 U-Pb 年代学、地球化学和 Nd-Hf 同位素制约[J]. 岩石学报, 24(1): 2468-2484.
- [30] WU F, JAHNB, WILDE S A, et al. Highly fractionated I-type granites in NE China (II): isotopic geochemistry and implications for crustal growth in the Phanerozoic [J]. Lithos, 2003, 67(3): 191-204.
- [31] TAYLOR S R, MCLENNAN S M. The continental crust: its composition and evolution [M]. London: Blackwell Scientific Publications, 1985. 57-71.
- [32] 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. 172-191.
- [33] LE VAN DE. Outline of plate-tectonic evolution of continental crust of Vietnam [A]. Dheeradiok P. Proceedings of the International Conferences on Stratigraphy and Tectonic Evolution of Southeast Asia and the South Pacific [C]. 1997. 832-847.

- [34] SENGOR A M C , ALTINER D , CIN A , et al. Origin and assembly of the Tethyside orogenic collage at the expense of Gondwana Land [A]. Audley-Charles , Hallem A. Gondwana and Tethys [C]. Geol. Soc. Spec. London: Oxford University Press ,1988 37(1) :119 – 181.
- [35] METCALFE I. Gondwana dispersion and Asian accretion: an overview [A]. Metcalfe I. Gondwana Dispersion and Asian Accretion , Final Results Volume for IGCP Project 321 [C]. Rotterdam: Balkema ,1999.9 – 28.
- [36] LEPVRIER C , MALUSKI H , VUONG N V , et al. Indosinian NW-trending shear zones within the Truong Son belt (Vietnam) : ^{40}Ar - ^{39}Ar Triassic ages and Cretaceous to Cenozoic overprints [J]. Tectonophysics ,1997 ,283: 105 – 127.
- [37] CHUNG S L , LAN C Y , LO C H , et al. The Indosinian orogeny and closure of eastern Paleo-Tethys: amalgamation between the Indochina and South China blocks in the Early Triassic [J]. In GEOSEA 98 , Malaysia , 1998. 17 – 19.
- [38] LAN C Y , CHUNG S L , SHEN J S , et al. Geochemical and Sr-Nd isotopic characteristics of granitic rock from northern Vietnam [J]. Journal of Asian Earth Sciences ,2000 ,18: 267 – 280.

Highly fractionated I-type granites in the northwestern part of Truong Son metallogenic belt , Laos-Vietnam: LA-ICP-MS zircon U-Pb age and its geological implications

GAO Jian-hua , WU Zhen-bo , FAN Wen-yu , WANG Hong
(Chengdu Center , China Geological Survey , Chengdu 610081 , Sichuan , China)

Abstract: The subduction age of the Song Ma suture zone has long been the hot spot for geological research in this region. The tectonic attributes of the granites from the Truong Son metallogenic belt in Laos-Vietnam zone are an important clue to the timing of the closure of the Song Ma Ocean. The present paper reports the LA-ICP-MS zircon U-Pb age of 261.34 ± 0.69 Ma (MSWD = 1.4) for the medium- to fine-grained granites from the northwestern part of Truong Son metallogenic belt , Laos-Vietnam zone. This age shows that the emplacement of the granites may be traced back to the Late Permian. The granites are characterized by high SiO_2 (77.01% – 78.07%) , high K_2O (4.32% – 4.57%) , low Ca and Mg ($\text{CaO} = 0.32\% - 0.34\%$; $\text{MgO} = 0.04\% - 0.06\%$) and low P_2O_5 , enrichment of Rb , U and Th , and depletion of Ba , Sr , P , Ti and Eu , suggesting the highly fractionated I-type granites. During the southward subduction of the Song Ma Ocean lithosphere , the mantle-derived magmas above the subduction zone firstly penetrated into the ancient crust giving rise to the generation of the juvenile crust , followed by the formation of the parent magmas caused by the mixed partial melting of the juvenile crust and ancient crust. Finally the highly fractional crystallization resulted in the formation of the granites in the study area.

Key words: zircon U-Pb age; highly fractionated I-type granite; Truong Son metallogenic belt; Laos; Vietnam