

滇西高黎贡山南段奥陶纪花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 测年和地球化学特征

刘琦胜, 叶培盛, 吴中海

LIU Qi-sheng, YE Pei-sheng, WU Zhong-hai

中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081

Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China

摘要: 在 1:5 万马厂幅、道街坝幅区域地质调查工作的基础上, 对高黎贡山南段的 2 个二长花岗质糜棱片麻岩样品所作的 SHRIMP 锆石 U-Pb 测年结果分别为 $(473.5 \pm 2.9)\text{Ma}$ 和 $(461.5 \pm 7.3)\text{Ma}$, 属于中奥陶世侵入岩。岩石地球化学分析结果表明, 岩石的 SiO_2 、 Al_2O_3 、 K_2O 含量高 ($\text{SiO}_2=71.06\%\sim 73.88\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3=13.03\%\sim 14.27\%$, $\text{K}_2\text{O}=2.81\%\sim 5.53\%$), CaO 含量低 ($\text{CaO}=0.67\%\sim 1.71\%$), 属于过铝质 ($\text{Al}/\text{CNK}=1.4\sim 1.8$) 钙碱性岩; 稀土元素 Eu 明显亏损 ($\delta\text{Eu}=0.19\sim 0.47$); 微量元素中 Rb、Th 相对富集, Ba 相对亏损; Sm、Nd 同位素分析结果: $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 为 0.512022、0.512056。结合野外地质调查所作的综合研究认为该期花岗岩为壳源岩石, 反映了泛非运动晚期冈瓦纳大陆北部陆-陆碰撞环境的岩浆活动。

关键词: SHRIMP 锆石 U-Pb 测年; 中奥陶世花岗岩; 高黎贡山南段; 滇西

中图分类号: P597+.3; P595

文献标志码: A

文章编号: 1671-2552(2012)02/03-0250-08

Liu Q S, Ye P S, Wu Z H. SHRIMP zircon U-Pb dating and petrogeochemistry of Ordovician granite bodies in the southern segment of Gaoligong Mountain, western Yunnan Province. *Geological Bulletin of China*, 2012, 31(2/3):250-257

Abstract: SHRIMP U-Pb dating of zircons from two representative samples of the batholith shows that the crystallization age is $473.5 \pm 2.9\text{Ma}$ and $461.5 \pm 7.3\text{Ma}$ respectively. Petrochemical and geochemical analyses show that the granite is high-silica ($\text{SiO}_2=71.06\%\sim 73.88\%$), high-aluminous ($\text{Al}_2\text{O}_3=13.03\%\sim 14.27\%$), high-K ($\text{K}_2\text{O}=2.81\%\sim 5.53\%$), low-Ca ($\text{CaO}=0.67\%\sim 1.71\%$) and peraluminous ($\text{ASI}=1.4\sim 1.8$). There is an evident negative Eu anomaly ($\delta\text{Eu}=0.19\sim 0.47$) in its REE patterns. In the diagrams of trace element patterns, there are very high peaks of Rb and Th and strong depletion of Ba. As for the Sm and Nd isotopes, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ ratio is 0.512022 and 0.512056 respectively. The above data show that the magma of the granite was derived mainly from the melting of the upper crust. The authors have come to the conclusion that the emplacement and crystallization of the granite batholith had a close relationship with the collisional orogeny and crustal thickening and were also closely related to the crustal partial melting in the late period of the Pan-African orogeny.

Key words: SHRIMP zircon U-Pb dating; Middle Ordovician granite; southern Gaoligong Mountain; western Yunnan Province

1 地质概况

研究区位于云南西部保山地区, 高黎贡山的南段。侵入岩分布在腾冲地块与保山地块之间的构造杂岩带内(图 1), 区域上属于三江构造带的南段。

根据 1:5 万区域地质调查结果, 中奥陶世的侵入岩沿高黎贡山山脊出露, 可划分出 3 个岩体, 总出露面积约 25km^2 。岩体的长轴呈南北向延伸, 空间分布特征与现今的南北向构造一致。岩体侵入古生界蒲满哨群(Pzpm^2)变质砂岩、板岩、二云片岩等浅变

收稿日期: 2011-12-20; 修订日期: 2012-01-17

资助项目: 中国地质调查局区调项目《云南 1:5 万马厂幅(G47E018012)、道街坝幅(G47E019012)区域地质调查》(编号: 1212010784004) 与中国地质调查局工作项目《腾冲新近纪火山活动新构造背景与地热资源开发利用前景评价》(编号: 1212011120166)

作者简介: 刘琦胜(1947-), 男, 研究员, 从事区域地质调查工作。E-mail: tianshanmuren@263.net

质岩和古元古界烂泥坝组(Pt_1l)糜棱岩、片岩中,局部侵入古元古界丹阳寺岩组(Pt_1d)变粒岩、片岩中。岩体对围岩的热变质作用较弱,围岩的重结晶和其它热变质现象均不明显。岩体西部与围岩之间的侵入接触关系被始新世以来的韧性剪切作用强烈改造并叠加了断层形迹。岩体的中部被晚白垩世的花岗岩侵入。岩体中现今的主要构造现象为南北走向的韧性剪切带(图 1)。

中奥陶世侵入岩由于经受过区域变质和韧性剪切作用的改造已变质为花岗质糜棱片麻岩,岩石普遍发育糜棱面理、片麻理、眼球状构造、条带状构造等变形、变质形迹(图 2),矿物成分中含有矽线石等高级变质矿物。根据野外露头调查和大量岩石薄片镜下鉴定的结果,岩石具有变余似斑状结构、变余花岗岩结构,眼球成分为长石残斑或花岗岩小岩块,矿物之间的交代现象不普遍,恢复其原岩为似斑状二长花岗岩。岩体与围岩之间的接触关系清楚,属于变质、变形的深成侵入体。

2 测年样品和锆石特征

在研究区北部和南部的中奥陶世岩体中各选一块岩石作为测年样品(样品编号为 b0721-1、b0794-1),取样位置见图 1。样品岩石经过镜下鉴定,定名为二云二长花岗质糜棱片麻岩。岩石具鳞片粒状变晶结构,变余糜棱纹理构造、片麻状构造,花岗岩残斑清晰,似眼球状、透镜状,平行糜棱纹理、片麻理分布。主要矿物成分和含量:斜长石(30%~35%)、钾长石(35%~40%)、石英(20%~25%)、黑云母(1%~5%)、白云母(2%~3%)、矽线石(1%)。

用于测年的锆石形态为自形一半自形柱状,多数晶面光滑、晶棱平直。阴极发光图像显示大部分锆石环带清晰,具有岩浆锆石的特征,部分锆石的核为继承锆石,有的具有熔蚀现象,有的具有很窄的变质增生边(图 3)。

3 测试方法和结果

锆石离子探针 U-Pb 同位素分析在北京离子探针中心的 SHRIMP-Ⅱ 上完成。分析原理和流程请参见文献[1-2],数据处理采用 Ludwig 的 SQUID1.0d 和 ISOPLOT2.49h 程序^[3],普通铅根据实测 ^{204}Pb 进行校正。分析用的锆石与澳大利亚国立大学地质地球科学研究所的标准锆石 TEM 用环氧树脂制

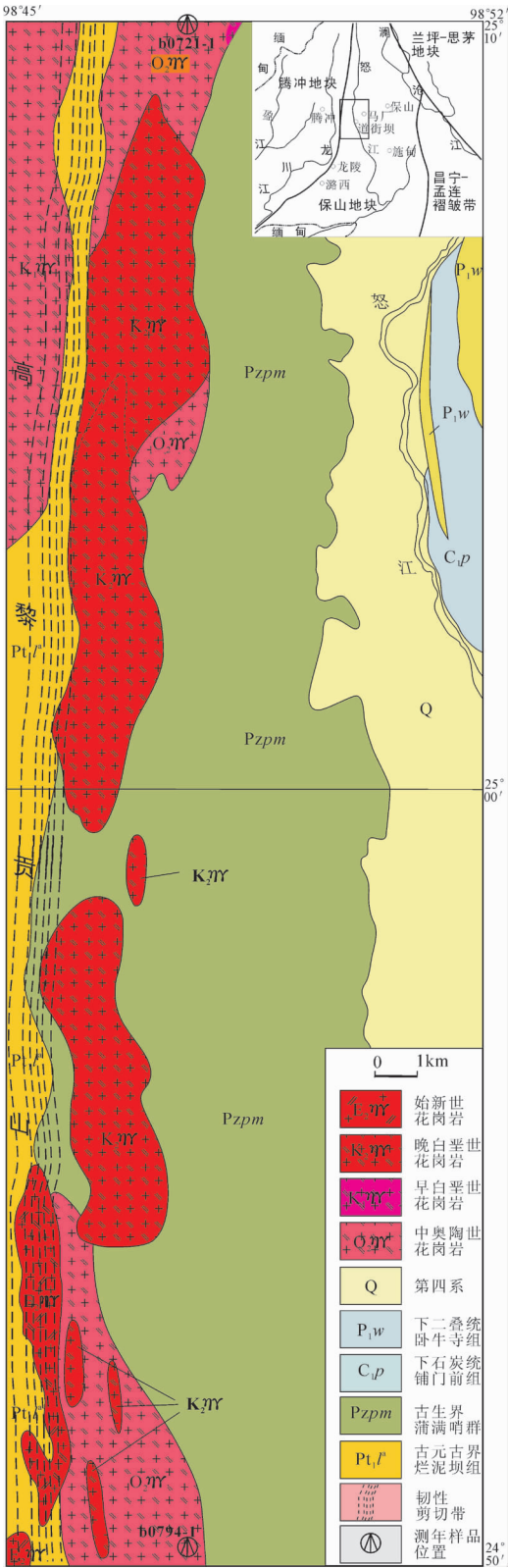


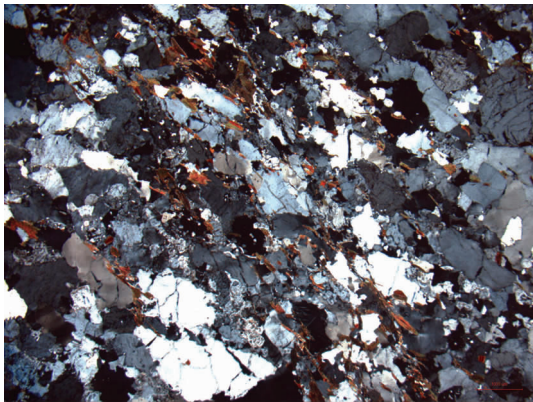
图 1 研究区地质略图及采样位置
Fig. 1 Geological sketch map of the study area, showing distribution of the sampling sites



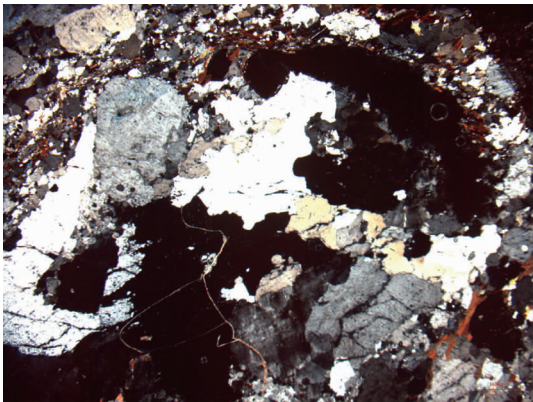
中奥陶世花岗质糜棱片麻岩及其片麻状构造



片麻岩及其中的透镜状、似眼球状花岗岩残斑



二云二长糜棱片麻岩的鳞片粒状变晶结构



二云二长糜棱片麻岩的似眼球状花岗岩残斑

图 2 高黎贡山奥陶纪花岗质片麻岩露头 and 岩石显微照片(正交偏光)

Fig. 2 Occurrence and micrographs(cross-polarized) of Ordovician granitic gneiss in Gaoligong Mountains

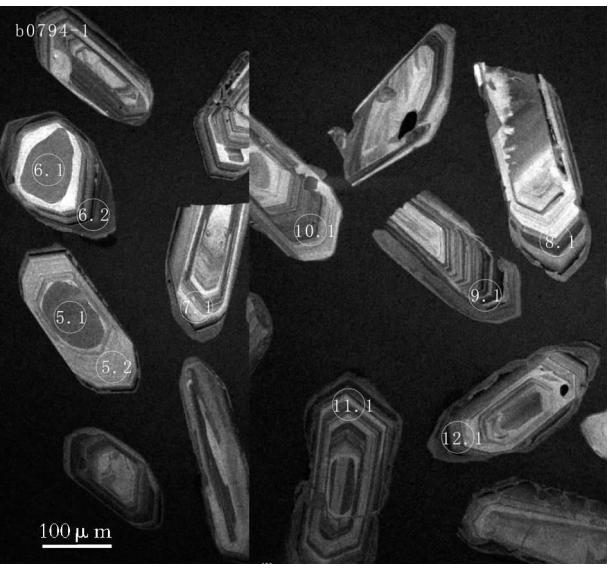
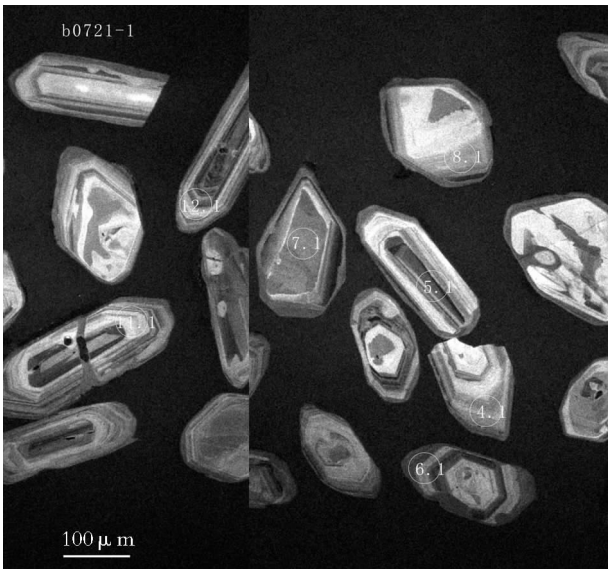


图 3 部分锆石样品的阴极发光图像、分析点位置和编号

Fig. 3 Morphological features of cathodoluminescence images, testing spots and their serial number of some zircons

表 1 样品 b0721-1 和 b0794-1 锆石离子探针 U-Pb 同位素分析数据

Table 1 SHRIMP U-Th-Pb zircon testing results of samples b0721-1 and b0794-1

点号	U 含量 /10 ⁻⁶	Th 含量 /10 ⁻⁶	²³² Th/ ²³⁸ U	²⁰⁶ Pb* /10 ⁻⁶	²⁰⁶ Pb _c /%	²⁰⁷ Pb*/ ²³⁵ U 及其误差	²⁰⁶ Pb*/ ²³⁸ U 及其误差	误差相 关系数	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U 年龄/Ma	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb 年龄/Ma	不谐和 度/%
b0721-1(二云二长花岗质糜棱片麻岩)											
1.1	1507	282	0.193	142	0.11	0.9477±0.0071	0.10967±0.00041	0.498	670.8±2.4	697±14	4
2.1	762	76	0.103	50.3	0.19	0.6058±0.0093	0.07674±0.00040	0.342	476.6±2.4	501±32	5
3.1	1713	98	0.059	113	0.12	0.5891±0.0074	0.07654±0.00030	0.311	475.4±1.8	445±27	-6
4.1	1083	77	0.074	70.2	0.13	0.5862±0.0081	0.07538±0.00036	0.348	468.5±2.2	468±29	0
5.1	1237	479	0.400	81.4	0.13	0.5876±0.0080	0.07650±0.00033	0.317	475.2±2.0	441±29	-7
6.1	2564	93	0.038	167	0.10	0.5766±0.0065	0.07555±0.00025	0.291	469.5±1.5	426±24	-9
7.1	873	281	0.332	139	0.26	10.948±0.025	0.18442±0.00087	0.369	1,091.1±4.7	1,111±24	2
8.1	1208	78	0.067	78.1	0.10	0.5773±0.0064	0.07517±0.00032	0.384	467.2±1.9	441±23	-6
9.1	1006	366	0.376	66.0	0.21	0.5906±0.0087	0.07617±0.00037	0.328	473.2±2.2	462±31	-2
10.1	474	166	0.363	31.5	0.78	0.588±0.020	0.07664±0.00053	0.207	476.0±3.2	438±73	-8
11.1	2026	112	0.057	135	0.20	0.5838±0.0069	0.07726±0.00041	0.444	479.8±2.4	404±24	-16
12.1	762	73	0.099	50.4	0.41	0.581±0.016	0.07660±0.00045	0.217	475.8±2.7	412±59	-13
13.1	219	159	0.749	19.9	0.65	0.887±0.032	0.10515±0.00099	0.262	644.5±5.8	644±75	0
13.2	860	63	0.076	40.8	0.27	0.4126±0.0089	0.05515±0.00055	0.459	346.1±3.3	382±43	10
14.1	951	89	0.097	61.9	0.27	0.5815±0.0096	0.07559±0.00038	0.302	469.7±2.3	444±35	-5
15.1	1586	139	0.090	106	0.13	0.5901±0.0060	0.07749±0.00032	0.401	481.1±1.9	422±21	-12
b0794-1(二云二长花岗质糜棱片麻岩)											
1.1	232	123	0.55	75.5	0.20	8.449±0.077	0.3783±0.0027	0.790	2,068 ±13	2,476.6±9.4	20
1.2	5224	238	0.05	372	0.10	0.6394±0.0039	0.08274±0.00030	0.608	512.4 ±1.8	454±11	-11
2.1	867	139	0.17	68.0	0.40	0.766±0.014	0.09091±0.00046	0.288	560.9 ±2.7	642±36	14
3.1	396	216	0.56	56.9	0.84	1.661±0.040	0.16591±0.0010	0.249	989.5 ±5.5	1,003±47	1
4.1	2657	789	0.31	168	0.24	0.5615±0.0055	0.07321±0.00024	0.332	455.4 ±1.4	438±21	-4
5.1	469	177	0.39	74.8	0.25	1.940±0.022	0.18535±0.00097	0.471	1,096.1±5.3	1,093±20	0
5.2	793	94	0.12	50.1	0.22	0.5602±0.0082	0.07337±0.00033	0.307	456.5 ±2.0	427±31	-6
6.1	337	132	0.40	31.7	0.23	0.933±0.021	0.1090±0.0013	0.521	667.0 ±7.3	678±40	2
6.2	4287	215	0.05	285	0.04	0.6019±0.0029	0.07739±0.00018	0.472	480.5 ±1.1	468.4±9.4	-3
7.1	1370	170	0.13	88.4	0.09	0.5840±0.0054	0.07503±0.00026	0.377	466.4 ±1.6	470±19	1
8.1	1075	121	0.12	71.8	0.09	0.6032±0.0064	0.07767±0.00032	0.395	482.2 ±1.9	465±21	-4
9.1	5650	393	0.07	385	0.05	0.6091±0.0028	0.07928±0.00018	0.494	491.8 ±1.1	441.3±8.8	-10
10.1	757	232	0.32	49.3	0.38	0.592±0.012	0.07560±0.00039	0.262	469.8 ±2.3	483±42	3
11.1	1746	152	0.09	114	0.20	0.5862±0.0063	0.07607±0.00026	0.322	472.7 ±1.6	448±23	-5
12.1	1456	189	0.13	93.3	0.08	0.5781±0.0066	0.07451±0.00026	0.301	463.3 ±1.5	463±24	0
13.1	3042	314	0.11	208	0.10	0.6249±0.0046	0.07960±0.00022	0.370	493.7 ±1.3	489±15	-1

注: ²⁰⁶Pb* 为放射成因的 ²⁰⁶Pb 的含量, ²⁰⁶Pb_c 为普通铅的 ²⁰⁶Pb 占全部 ²⁰⁶Pb 的百分比。b0721-1 和 b0794-1 两个样品在测定时, 与标准样品 TEM 交替测定(标准样品与 b0721-1 和 b0794-1 的比例为 1:3)。b0721-1 分两段校正, 其中 1.1~6.1 为第一段, 7.1~15.1 为第二段, 各自所对应的 TEM 测定的误差分别为 0.43%(σ) 和 0.59%(σ); b0794-1 测定时对应的 TEM 的误差为 0.31%(σ)

靶,制靶方法见文献[4]。分析时离子束斑直径为 $30\mu\text{m}$ 。依据锆石阴极发光照片选择具有岩浆成因特征的锆石进行测试,分析点选在锆石自形生长环带较清晰、较规则的部位,以获得较准确的成岩年龄。

2 个岩石样品(b0721-1、b0794-1)的锆石分析数据见表 1,单个数据点的误差为 1σ ,分析数据采用分段校正,如样品 b0721-1,如不分为 2 段校正,则 1.1~6.1、7.1~15.1 数据之间存在明显的系统差异,有关分段校正的详细论述见文献[5]。成岩年龄采用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄数据进行统计分析(图 4)。需要说明的是,由于分析点的 U 含量高,因此每个单独测定点的数据误差较小,导致较为集中的几个数据的平均值对应的 MSWD 偏大。

样品 b0721-1 共计 16 个分析点,其中有 3 个分析点(分析点号:1.1、7.1、13.1)分析的是继承锆石的年龄。另有 1 个分析点(13.2)根据锆石阴极发光图像特征判断是变质年龄。其余的 12 个分析点均位于岩浆锆石的生长环带上,得出的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $473.5\text{Ma}\pm 2.9\text{Ma}$,代表成岩年龄。

样品 b0794-1 共计 16 个分析点,其中有 5 个分析点位于锆石的核部(1.1、2.1、3.1、5.1、6.1),所测的年龄值为继承锆石的年龄,不参与成岩年龄的加权平均计算。其余 12 个点的分析数据比较离散,所测的年龄值在 $455.4\sim 560.9\text{Ma}$ 之间。结合阴极发光图

像分析,有的锆石颗粒年龄较大是分析点位置选择不当造成的,如 2.1、13.1 点分析时离子束接触了核部继承锆石的边缘,分析过程混入了老锆石的成分,为无效的年龄值,在统计分析时,需要去除上述 2 个锆石颗粒。其余的年龄值在 $455.4\sim 493.7\text{Ma}$ 之间,仍然比较离散。对于年龄值测定结果比较离散的地质解释仍然是一个需要研究的问题。与火山岩不同,由于规模较大的深成岩具有相对稳定的结晶环境,矿物结晶过程通常会延续较长的时间,不会由于岩浆迅速冷凝而几乎同时结晶。岩浆房的不同位置由于温、压条件存在差别,锆石结晶的早、晚也不同,在岩浆缓慢运移的过程中它们可能共存于熔体中。因此,依据锆石阴极发光图像的特征进一步排除可能是早期结晶的不同世代的锆石(如 1.2、6.2),采用锆石特征相似、较晚结晶的 5 颗锆石(4.1、5.2、7.1、10.1、12.1)的年龄加权平均值($461.5\text{Ma}\pm 7.3\text{Ma}$)代表岩浆主体的结晶成岩年龄是比较合适的。对于这样的岩石样品,增多测定锆石颗粒的数量,对于分析年龄的分布特征,获得更为准确的成岩年龄并给予更为合理的地质解释是必要的。

2 个样品中继承锆石的测年结果反映年龄值变化很大,既有古元古代的($2476.6\text{Ma}\pm 9.4\text{Ma}$),也有中元古代($1091.1\text{Ma}\pm 4.7\text{Ma}$ 、 $1096.1\text{Ma}\pm 5.3\text{Ma}$ 、 $989.5\text{Ma}\pm 5.5\text{Ma}$)和新元古代的($670.8\text{Ma}\pm 2.4\text{Ma}$ 、 $644.5\text{Ma}\pm 5.8\text{Ma}$ 、 $667.0\text{Ma}\pm 7.3\text{Ma}$),这些年龄值不具

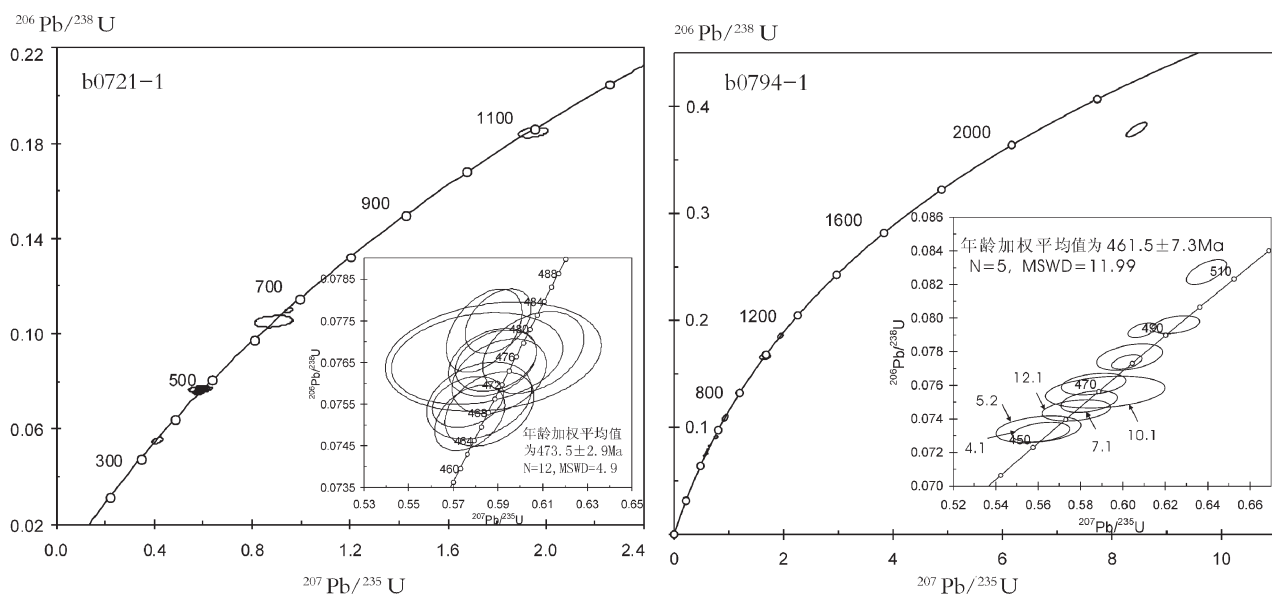


图 4 两个样品锆石 U-Pb 同位素谐和图

Fig. 4 Zircon U-Pb concordia diagram of the samples

有统计意义,可作为研究三江构造带变质结晶基底的时代和构造演化的参考。

4 岩石地球化学特征

用于岩石地球化学分析的样品取自 1:50000 填图的实测剖面 and 重点地质调查路线上。样品岩石新鲜,岩石类型为二云二长花岗质糜棱片麻岩、二长花岗质糜棱片麻岩和变质细粒斑状黑云二长花岗岩。

样品测试分析方法和测试单位:主量元素分析采用顺序式 X 射线荧光光谱仪(XRF-1500),微量元素和稀土元素分析采用 VG 公司的 PQ2 Turbo ICP-MS 等离子质谱仪,由国家地质实验测试中心完成;同位素分析采用稀释法,使用仪器为 MAT262 固体同位素质谱仪,由中国地质科学院地质研究所同位素实验室完成。

岩石地球化学分析结果(表 2)显示,主量元素总的特点是 Si、Al、K 含量高,Mg、Ti 含量低,总碱量高。 $w(\text{SiO}_2)=71.06\%\sim73.88\%$, $w(\text{Al}_2\text{O}_3)=13.03\%\sim$

14.27% , $w(\text{K}_2\text{O})=2.81\%\sim5.53\%$, $w(\text{K}_2\text{O})+w(\text{Na}_2\text{O})=6.64\%\sim7.82\%$, $w(\text{TiO}_2)=0.25\%\sim0.52\%$, $w(\text{MgO})=0.38\%\sim0.97\%$;AL/CNK=1.4~1.8,属过铝质岩石,应用 $(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})-\text{SiO}_2$ 图分类,属于钙碱性岩。样品的微量元素分配模式相似,Ba、Nb、Sr、Ti 相对亏损,Rb、U、Th 等元素相对富集(图 5),Rb/Sr 比值较高(2.02~10.04),Sm/Nd<1(0.20~0.22)。稀土元素总量 $\Sigma\text{REE}=156.10\sim263.10\mu\text{g/g}$; $\delta\text{Eu}=0.19\sim0.47$,具中等—强烈的负 Eu 异常; $w_{\text{N}}(\text{La})/w_{\text{N}}(\text{Yb})=5.4\sim17.0$, $w_{\text{N}}(\text{La})/w_{\text{N}}(\text{Sm})=3.3\sim3.9$, $w(\Sigma\text{Ce})/w(\Sigma\text{Y})=5.2\sim10.6$,反映轻、重稀土元素分异程度较高。稀土元素标准化模式图均呈向右倾斜的 V 字形曲线,属轻稀土元素富集型(图 6)。2 个样品(b0721-1、b0794-1)的同位素 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值分别为 0.512022 和 0.512056(表 3),以样品成岩年龄计算的 ε_{Nd} 分别为-19.5 和-18.7,均为负值。上述岩石地球化学和同位素分析结果表明岩石为壳源岩石。又据野外地质调查,在岩体中没有发现在花岗岩岩基中常见的基

表 2 样品主量、微量、稀土元素分析结果
Table 2 Analytical results of major, trace elements and REE of the samples

样品号	b0721-1	b1301-1	b0731-2	b0782-1	b0794-1	b0233	b0234	样品号	b0721-1	b1301-1	b0731-2	b0782-1	b0794-1	b0233	b0234
SiO ₂	72.24	73.88	72.78	72.44	73.71	71.06	72.83	Cu	4.22	9.81	14.8	2.74	7.63	12	6.05
TiO ₂	0.43	0.4	0.52	0.25	0.39	0.46	0.37	Ni	5.76	5.59	8.4	1.53	5.54	6.03	3.87
Al ₂ O ₃	13.7	13.03	13.37	13.98	13.04	14.27	13.74	Li	90.5	76.6	50.7	90.2	160	92.9	84
Fe ₂ O ₃	0.7	0.73	0.63	0.5	0.78	0.51	0.09	Sr	56.2	45.4	60.9	28.3	55.6	93	91.6
FeO	1.96	1.85	2.5	1.17	1.81	2.46	2.12	V	33.8	31.3	44.7	13.9	32	41.9	32.5
MnO	0.03	0.04	0.04	0.03	0.04	0.05	0.03	Zn	76.4	69.4	75.7	38.4	52	48.3	35.2
MgO	0.93	0.72	0.97	0.38	0.66	0.83	0.62	Sc	5.95	6.02	6.77	2.62	5.71	7.4	5.42
CaO	1.3	1.01	1.68	0.67	1.46	1.52	1.71	Zr	146	87.2	130	142	163	174	153
Na ₂ O	3.91	3.25	3.83	1.88	3.59	3.17	3.33	Nb	30.6	18.5	16	12.2	14.6	15.9	15.7
K ₂ O	3.91	3.97	2.81	5.53	3.47	4.37	4.04	Hf	4.12	2.6	3.52	4.18	4.54	0.87	2.84
P ₂ O ₅	0.11	0.13	0.15	0.07	0.12	0.14	0.12	Ta	4.57	2.9	1.96	1.2	2.34	2.25	2.78
H ₂ O ⁺	0.74	0.7	0.62	2.22	0.34	0.56	0.36	Be	5.01	4.01	4.01	2.71	6.18	6.12	5.21
CO ₂	0.22	0.17	0.3	0.3	0.3	0.16	0.18	Y	19.1	30.8	31.8	25	41.3	32.4	40.8
LOI	0.62	0.67	0.58	2.35	0.54	0.59	0.46	La	33.1	32.4	34.9	35.5	35.7	57.5	43
AL/CNK	1.4	1.5	1.4	1.8	1.4	1.5	1.4	Ce	65.4	63.4	66.4	71.9	64	113	81.3
Ga	26.5	22.2	21.4	19.4	20	21	19.9	Pr	7.55	7.69	8.23	8.45	8.25	13.4	9.12
Rb	265	295	219	284	214	240	185	Nd	28.2	28.9	30.7	30.9	30.1	46.2	33.2
Cd	0.08	0.08	0.13	<0.05	0.16	0.01	0.05	Sm	5.82	6.09	6.49	6.57	6.62	9.2	7.08
Cs	17.5	13.4	8.65	8.61	21.7	17.1	16.2	Eu	0.6	0.52	0.79	0.39	0.7	1.11	1.02
Pb	26.5	26.9	26.1	34	26.4	30.6	28.6	Gd	5.13	6.06	6.39	5.73	6.75	7.73	6.03
Th	22.7	24.1	22.7	32.3	25.1	34.2	26.3	Tb	0.84	1.02	1.09	0.95	1.21	1.2	0.99
U	58.6	7.84	5.27	4.86	6.5	4.59	2.85	Dy	4.51	6.16	6.39	5.28	7.75	6.67	6.47
Mo	0.38	0.16	0.13	0.05	0.94	0.59	0.55	Ho	0.75	1.2	1.25	1.01	1.61	1.12	1.32
Sn	10.3	10.3	5.99	4.01	12.4	9.94	9.28	Er	2.05	3.43	3.35	2.79	4.63	3.01	3.93
W	1.85	7	1.02	0.3	2.05	2.52	1.65	Tm	0.26	0.49	0.46	0.41	0.69	0.39	0.56
Ba	322	303	335	348	335	683	639	Yb	1.66	3.11	2.88	2.59	4.46	2.28	3.32
Co	4.46	4.95	7.03	2.67	4.8	6.45	4.18	Lu	0.23	0.41	0.38	0.37	0.61	0.29	0.44
Cr	17.4	17.3	23.1	4.86	15	17.9	11.3	ΣREE	156.10	160.88	169.70	172.84	173.08	263.10	197.78

注:氧化物含量单位为%,微量和稀土元素为 10⁻⁶

表 3 样品 Sm、Nd 同位素分析结果

Table 3 Sm、Nd isotopic analytical results of the samples

样品编号	Sm/ 10^{-6}	Nd/ 10^{-6}	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$\pm 2s$
b0721-1	5.482	26.040	0.1237	0.512022	7
b0794-1	6.394	30.963	0.1249	0.512056	5

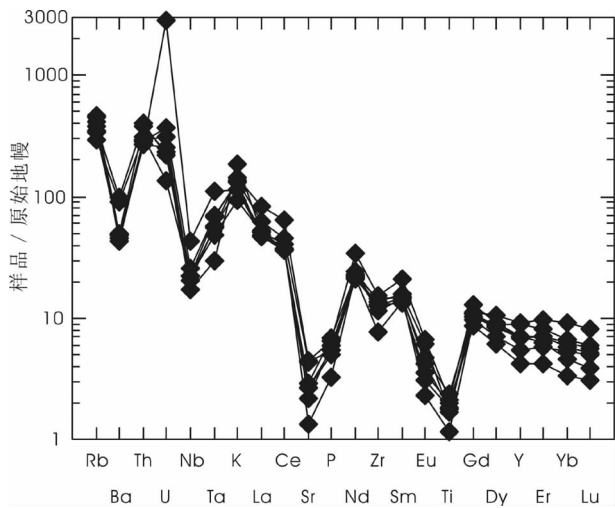


图 5 微量元素蛛网图
(原始地幔标准化值据 Sun 等, 1989)

Fig. 5 Primitive mantle-normalized trace elements spider diagrams

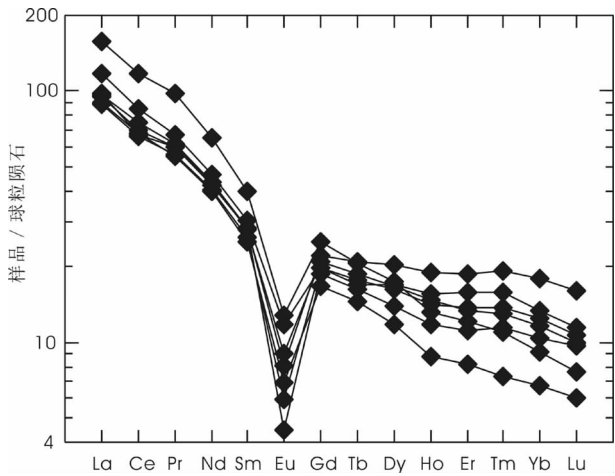


图 6 稀土元素配分图
(球粒陨石标准化值据 Taylor 等, 1985)

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns

性微细粒包体，这在一定程度上反映了其与幔源岩浆之间可能不存在岩浆混合作用或明显的物质交换

过程；在锆石 CL 图像中常见锆石核部存在不同年龄的继承锆石,其形态呈浑圆状或次棱角状,具有碎屑锆石的特征。综合地质调查与岩石地球化学分析结果,研究区内的中奥陶世花岗岩的岩浆应源于轻稀土元素富集的中上地壳的重熔。陆-陆碰撞环境致使地壳增厚的过程可能是造成地壳重熔的主要构造因素。

5 地质意义讨论

根据 1:50000 野外地质调查并结合岩石薄片镜下观察,高黎贡山南段中奥陶世花岗质糜棱片麻岩是经过后期区域变质和动力变质形成的,其原岩为似斑状二长花岗岩。地球化学和同位素分析结果表明,岩石属于过铝质、钙碱性的壳源花岗岩,岩浆来自于中上地壳的重熔,陆-陆碰撞过程可能是造成地壳重熔的主要构造因素。

应用 SHRIMP 锆石 U-Pb 测年技术对 2 个有代表性的岩石样品的测年结果分别为 $473.5\text{Ma} \pm 2.9\text{Ma}$ 和 $461.5\text{Ma} \pm 7.3\text{Ma}$ 。近年来的地质调查成果表明与之年龄接近的早古生代侵入岩在西藏和滇西的其它地区也有发现^[6-8]。从区域大地构造上看,研究区的中奥陶世花岗岩与高黎贡山向北沿着班公湖-怒江缝合带的福贡、八宿、安多等处的早古生代岩浆岩应属于同一个岩浆岩带,属于早古生代大规模岩浆活动的组成部分。测年结果与通常认为的冈瓦纳大陆汇聚阶段的时间范围($600 \sim 550\text{Ma}$)^[9]有较大的差距。就现在的研究成果来看,对冈瓦纳大陆北界的位置仍然存在不同的划分意见^[10-16],对于泛非运动结束时间的认识也在不断更新,如认为泛非事件的时限可能延续到了早古生代^[17-18],与印度大陆北缘泛非运动结束的时间基本是同期的,为早奥陶世—中奥陶世^[19]等。由于泛非运动是一次全球范围的地质构造运动,经历了长期复杂的演化历程,因此对于泛非运动更全面的认识还有待于更广泛、深入的地质调查和研究。按照目前的研究程度,笔者认为高黎贡山南段的中奥陶世侵入岩反映了泛非运动晚期陆-陆碰撞环境的岩浆活动。

致谢：项目组成员参加了野外调查和研究工作,锆石离子探针测年样品的制备和分析得到北京离子探针中心工作人员的支持和指导,论文写作过程中得到宋彪研究员的热心帮助,在此一并表示感谢。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 刘敦一, 简平, 张旗, 等. 内蒙古图林凯蛇绿岩中埃达克岩 SHRIMP 测年: 早古生代洋壳消减的证据[J]. 地质学报, 2003, 77(3): 317-327.
- [3] Ludwig K R. User's manual for ISOPLOT/Ex version 2.4. Geochronological toolkid for Microsoft excel[M]. Berkeley Geochronology Center, Special Publication No.1a, 2000:1-53.
- [4] 宋彪, 张玉海, 万渝生, 等. 锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论[J]. 地质评论, 2002, 48(增刊): 26-30.
- [5] 宋彪, 张拴红, 王彦斌, 等. 锆石 SHRIMP 年龄测定数据处理时系统偏差的避免——标准锆石分段校正的必要性[J]. 岩矿测试, 2006, 25(1): 9-14.
- [6] 宋述光, 季建清, 魏春景, 等. 滇西北怒江早古生代片麻状花岗岩的确定及其构造意义[J]. 科学通报, 2007, 52(8): 927-930.
- [7] 陈福坤, 李秋立, 王秀丽, 等. 云南特提斯带保山-腾冲地块早古生代岩浆岩[J]. 地球学报, 2005, 26(增刊): 93.
- [8] 解超明, 李才, 苏黎, 等. 藏北安多地区花岗片麻岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年[J]. 地质通报, 2010, 29(12): 1737-1744.
- [9] Kroner A. The Pan-African belt of northeastern and eastern Africa. Madagascar, southern India, Sri Lanka and East Antarctic: terrane amalgamation during formation of the Gondwana supercontinent [C]// Thorweihe U, Schandelmeyer H. Geoscientific Research in Northeast Africa. Balkema, Rotterdam, 1993: 3-9.
- [10] 常成法, 郑锡澜. 珠穆朗玛峰地区的地质构造特征和关于喜马拉雅山及青藏高原东西向诸山系形成的探讨[C]//中国科学院西藏考察队. 珠穆朗玛峰地区科学考察(1966—1968). 北京: 科学出版社, 1974: 273-299.
- [11] 尹集祥. 青藏高原及邻区冈瓦纳相地层地质学[M]. 北京: 科学出版社, 1997: 1-20.
- [12] Smith A B, XU Juntao. Palaeontology of the 1985 Tibet geotraverse, Lhasa to Golmud[C]//The Geological Evolution of Tibet. Phil. Trans. R. Soc., 1988, A327: 53-106.
- [13] 李兴振, 潘桂棠, 罗建宁. 论三江地区冈瓦纳和劳亚大陆的分界[C]//青藏高原地质文集编委会. 青藏高原地质文集(20): 三江论文专辑. 北京: 地质出版社, 1990: 217-233.
- [14] 李才, 程立人, 胡克, 等. 西藏龙木错-双湖古特提斯缝合带研究[M]. 北京: 地质出版社, 1995: 1-131.
- [15] 鲍佩声, 肖序常, 王军, 等. 西藏中北部双湖地区蓝片岩带及其构造含义[J]. 地质学报, 1999, 73(4): 302-314.
- [16] 潘桂棠, 朱弟成, 王立全, 等. 班公湖-怒江缝合带作为冈瓦纳大陆北界的地质地球物理证据[J]. 地学前缘, 2004, 11(4): 371-382.
- [17] 许志琴, 杨经绥, 梁凤华, 等. 喜马拉雅地体的泛非—早古生代造山事件年龄记录[J]. 岩石学报, 2005, 21: 1-12.
- [18] DeCelles P G, Gehrels G E, Quade J, et al. Tectonic implications of U-Pb zircon ages of the Himalayan Orogenic Belt in Nepal[J]. Science, 2000, 288(5456): 479-499.
- [19] 李才, 吴彦旺, 王明, 等. 青藏高原泛非—早古生代造山事件研究重大进展[J]. 地质通报, 2010, 29(12): 1733-1736.