

doi: 10.12029/gc20170608

孙转荣, 董国臣, 赵作新, 王伟清, 刘圣强. 2017. 滇西来利山花岗岩年代学、地球化学特征及其壳源部分熔融成因[J]. 中国地质, 44(6): 1140–1158.

Sun Zhuanrong, Dong Guochen, Zhao Zuoxin, Wang Weiqing, Liu Shengqiang. 2017. Petrological, geochemical and geochronological features of Lailishan granitoids in western Yunnan and their genesis of partial melting of crustal source[J]. Geology in China, 44(6):1140–1158(in Chinese with English abstract).

滇西来利山花岗岩年代学、地球化学特征 及其壳源部分熔融成因

孙转荣¹ 董国臣¹ 赵作新² 王伟清¹ 刘圣强¹

(1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083; 2. 云南省地质矿产勘查院, 云南昆明 650011)

摘要:与锡矿有关的花岗岩成因一直是地学界关注的焦点。来利山花岗岩位于云南省腾冲—梁河地区(花岗岩带上), 构造上属于腾梁花岗岩带。该花岗岩带总体呈北东向带状展布, 构成冈底斯的南延部分。来利山岩体主要由似斑状黑云母二长花岗岩和中粗粒黑云母正长花岗岩组成。本次工作在前人研究的基础上对来利山花岗岩进行了岩石学、地球化学和年代学研究, 获得二长花岗岩(14L-4)锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 $(52.34 \pm 0.68) \text{ Ma}$ (MSWD=1.4, $n=26$)。地球化学数据显示二长花岗岩相对富铝($\text{Al}_2\text{O}_3=14.70\% \sim 15.27\%$)、碱($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}=8.07\% \sim 8.50\%$)、钙($\text{CaO}=1.64\% \sim 2.56\%$)、REE、Ba。铝饱和度(A/CNK)为 0.97~1.12, 平均为 1.04, 属偏铝质到弱过铝质岩石。正长花岗岩相对富硅($\text{SiO}_2=74.57\% \sim 76.69\%$)、Rb, 强烈亏损 Ba、Sr、P、Ti、Eu, 铝饱和度(A/CNK)为 1.05~1.18, 平均为 1.09, 属弱过铝质岩石。两类花岗岩系同源岩浆于不同阶段侵位形成, 二者在矿物学、地球化学、年代学等方面表现出良好的演化关系, 均显示 S 型花岗岩的特征。其形成与印度大陆和亚洲大陆碰撞过程中地壳物质部分熔融有关。

关键词: 岩石学; 地球化学; 锆石 U-Pb 定年; 来利山花岗岩; 滇西

中图分类号: P597.3; P584 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2017)06-1140-19

Petrological, geochemical and geochronological features of Lailishan granitoids in western Yunnan and their genesis of partial melting of crustal source

SUN Zhuanrong¹, DONG Guochen¹, ZHAO Zuoxin², WANG Weiqing¹, LIU Shengqiang¹

(1. School of Earth Science and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;

2. Exploration Institute of Geology and Mineral Resources of Yunnan, Kunming 650011, Yunnan, China)

Abstract: Granites genetically related to tin ore deposits always constitute the focus of geological studies. The Lailishan granitoids are located in the Tengchong–Lianghe area of western Yunnan and belong tectonically to Tengliang granitoids. These granites extend in NNE direction as a belt, connected with Gangdise belt on the north. The Lailishan granitoids are mainly composed of

收稿日期: 2016-01-21; 改回日期: 2016-04-05

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(2015CB452604)及中国地质调查局腾梁锡矿整装勘查项目(12120114013801)联合资助。

作者简介: 孙转荣, 女, 1994年生, 博士生, 矿物学、岩石学、矿床学专业; E-mail: 834992943@qq.com。

通讯作者: 董国臣, 男, 1962年生, 教授, 博士生导师, 主要从事岩石学及矿床学研究; E-mail: donggc@cugb.edu.cn。

porphyaceous biotite monzogranite and medium to coarse-grained biotite syenogranite. Based on the data available, the authors conducted petrological, geochemical and geochronological studies of the Lailishan granitoids. The zircon LA-ICP-MS U-Pb age of the monzogranite (14L-4) is 52.34 ± 0.68 Ma (MSWD=1.4, n=26). Geochemically, the monzogranite is relatively rich in Al ($Al_2O_3 = 14.70\% - 15.27\%$), alkalis ($K_2O + Na_2O = 8.07\% - 8.50\%$), Ca ($CaO = 1.64\% - 2.56\%$), REE, and Ba. The ASI values range from 0.97 to 1.12, 1.04 on average, indicating that monzogranite is from metaluminous to weakly peraluminous. The syenogranite is relatively rich in Si ($SiO_2 = 74.57\% - 76.69\%$) and Rb, and strongly depleted in Ba, Sr, P, Ti, and Eu. The ASI values range from 1.05 to 1.18, 1.09 on average, indicating weakly peraluminous features. The monzogranite and syenogranite originated from the same magma reservoir but emplaced at different stages; the evolution of them in mineralogy, geochemistry and chronology was obvious, suggesting S-type granites. It is therefore held that the Lailishan granitoids originated from crust partial melting in deep crust during main Indian-Euro-Asian collision period, responding to the interaction between the Indian-Euro-Asian continents.

Key words: petrology; geochemistry; zircon U-Pb dating; Lailishan granitoids; western Yunnan

Fund Support: Supported by National Key Projects for Basic Research of China (No. 2015CB452604) and Prospecting Program for Tengliang Tin Mineralized Belt (No. 12120114013801)

About the first author: SUN Zhuanrong, female, born in 1994, doctor candidate, majors in mineralogy, petrology and mineral deposits; E-mail: 834992943@qq.com.

About the corresponding author: DONG Guochen, male, born in 1962, professor, supervisor of doctor candidates, engages in the study of petrology and mineral deposits; E-mail: donggc@cugb.edu.cn.

1 引言

来利山花岗岩位于滇西腾冲—梁河花岗岩带西段(陈吉琛等, 1991), 大地构造位置位于腾冲微陆块, 其东侧以怒江缝合带与保山地块相连, 西侧以密支那缝合带与东缅甸地块相连(图 1a)(高永娟等, 2014), 主要岩性为似斑状黑云母二长花岗岩和中粗粒黑云母正长花岗岩, 因该区产出锡矿而备受地质学家关注(金灿海等, 2013)。20 世纪 80-90 年代, 前人对该地区进行过大量工作, 多集中于花岗岩和成矿关系的研究(李景略, 1984; 施琳等, 1984; 毛景文等, 1987, 1988; 陈吉琛等, 1991; 罗君烈, 1991)。近年来, 部分学者对该区花岗岩的岩石学、年代学、地球化学及其所反映的地质意义做了一定的工作(董方浏等, 2006; 杨启军等, 2009), 但是仍然存在很多问题。例如对于花岗岩的年代学特征, 前人测得研究区正长花岗岩的年龄范围主要为 50~54 Ma(李景略, 1984; 陈吉琛等, 1987, 1991; 吕伯西等, 1993; 董方浏等, 2006; 林清茶等, 2009; 金灿海等, 2013; Chen et al., 2015), 较为集中, 而主体的二长花岗岩年龄则为 41~58 Ma(李景略, 1984; 陈吉琛等, 1987; 吕伯西等, 1993; 董方浏等, 2006; Xu et al., 2012; 林进展, 2013; Chen et al., 2015), 变化范围较大, 且测年方法多以 Rb-Sr、K-Ar 法为主。对于花

岗岩的成因类型, 部分学者认为是 S 型花岗岩(陈吉琛等, 1991; 罗君烈, 1991; 陈晓翠, 2011, 金灿海等, 2013), 也有学者认为是 A 型花岗岩(林进展, 2013, Chen et al., 2015)。因此, 本文以来利山岩体为研究对象, 报道了滇西来利山地区花岗岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄, 全岩主微量数据, 进一步约束该地区花岗岩的成岩年龄, 探讨该地区花岗岩的成因类型并限定其形成的构造背景。

2 区域地质背景

腾冲—梁河地区属腾冲地块, 构造位置位于印度板块和亚洲板块的碰撞缝合部位(金灿海等, 2013; 林进展, 2013), 属弧后大陆陆缘地带(施琳等, 1984; 徐恒, 2007; 张苗红, 2010)。腾梁地区广泛分布的花岗岩属于那加山俯冲形成的弧后岩浆带, 由于俯冲带的位置由早到晚自东向西迁移, 腾冲—梁河地区形成 3 个近南北向、相互平行的自东向西年龄逐渐减小的花岗岩带(施琳等, 1984), 分别为早白垩世东河花岗岩带(143.0~111.7 Ma)、晚白垩世古永花岗岩带(84.3~65.9 Ma)、古近纪槟榔江花岗岩带(66.4~41.2 Ma)(陈吉琛等, 1991; 吕伯西等, 1993), 它们共同组成腾梁弧后花岗岩带。来利山花岗岩体位于云南省梁河县西北向约 13 km 处, 属于槟榔江花岗岩带南段(图 1b)(林文信,

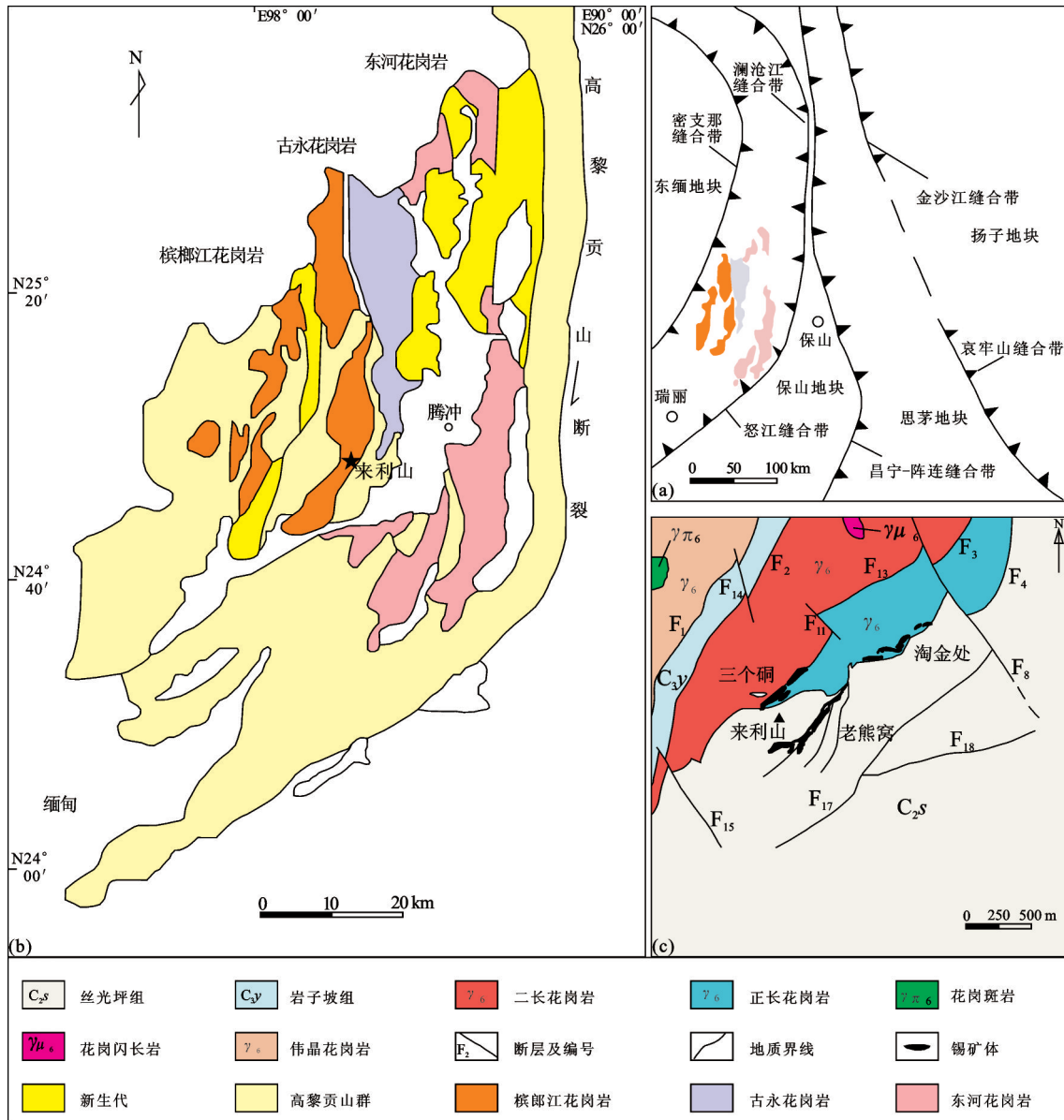


图1 腾冲地块大地构造位置图(a)(据金灿海等,2013修改)和腾梁花岗岩(b)(据董方洵等,2006修改)及来利山花岗岩(c)(据金灿海等,2013修改)分布图

Fig. 1 Tectonic position (a) (after Jin et al., 2013) of Tengchong Block, distribution of Tengchong-Lianghe granites (b) (after Dong et al., 2006) and Lailishan granites (c) (after Jin et al., 2013)

1987),来利山锡矿分布(图1c),位于槟榔江断裂和大盈江断裂之间(李景略,1984),为喜山早期形成的复式岩体。来利山花岗岩体主要由似斑状黑云母二长花岗岩组成,其东南侧发育中粗粒黑云母正长花岗岩。

3 岩石学特征

来利山花岗岩大体呈北东向带状展布,其中F1

断裂以西主要为伟晶花岗岩,但在本次野外工作中并未见到;位于F2断裂和F3断裂之间的为构成来利山花岗岩主体的似斑状黑云母二长花岗岩,其中局部发育小型花岗闪长岩及辉绿玢岩岩脉;F3断裂以东为中粗粒黑云母正长花岗岩,在三个洞和淘金处较为发育,其东南侧见少量细粒黑云母正长花岗岩,分布不连续。本次工作以构成来利山花岗岩主体的二长花岗岩和正长花岗岩为研究对象,其主要

特征如下:

二长花岗岩(图2a、b):似斑状结构,块状构造。斑晶矿物主要为正长石,少量微斜长石、斜长石、石英及黑云母,斑晶大小多为1.5 cm×1 cm左右,基质主要由斜长石、钾长石、石英、黑云母等组成;副矿物主要由锆石、磷灰石、独居石、榍石等组成。镜下鉴定其矿物含量分别为:斜长石40%左右,钾长石35%左右,石英20%左右,黑云母5%左右,可见少量绢云母。其中钾长石以正长石为主,板状,柱状,大小1 mm×0.5 mm左右,发育卡式双晶。斜长石主要为更长石,板状,大小1 mm×0.5 mm左右,发育聚片双晶和卡钠复合双晶,部分斜长石可见环带。石英呈不规则粒状广泛分布于长石缝隙中,大小0.2 mm左右。黑云母大小0.5 mm×

0.2 mm左右,板状,长条状。

正长花岗岩(图2c、d):中粗粒结构,块状构造。主要组成矿物为钾长石、石英、斜长石、黑云母,副矿物主要为锆石、磷灰石、独居石、榍石等。镜下鉴定其矿物含量分别为:钾长石40%左右,斜长石25%左右,石英30%左右,黑云母3%左右,可见少量白云母。其中钾长石以正长石为主,多数为板状,少量为块状,大小0.5 mm×0.25 mm左右,主要发育卡式双晶,还可见少量发育格子双晶的微斜长石。斜长石主要是更长石,板状,长条状,大小0.5 mm×0.25 mm左右,主要发育聚片双晶和卡钠复合双晶。石英为不规则粒状,大小为0.2~0.25 mm,主要分布于长石缝隙之间。黑云母大小为0.6 mm×0.2 mm左右,板状。细粒正长花岗岩矿物成分与中

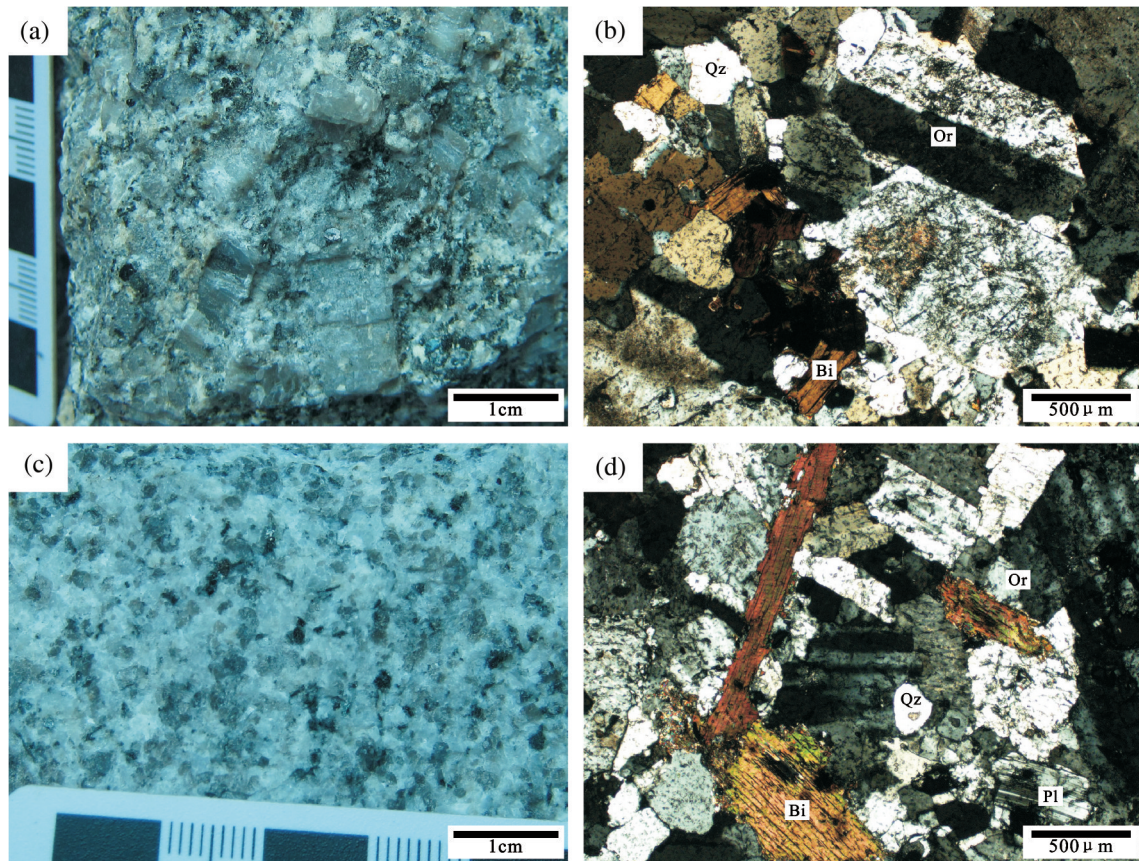


图2 来利山花岗岩岩石学特征

a—似斑状黑云母二长花岗岩;b—二长花岗岩镜下照片;c—中粗粒黑云母正长花岗岩;d—正长花岗岩镜下照片;Or—正长石;Qz—石英;Bi—黑云母;Pl—斜长石

Fig.2 Petrologic characteristics of Lailishan granites

a—Porphyroblastic biotite monzogranite; b—Microphotograph of monzogranite; c—Medium to coarse-grained biotite syenogranite; d—Microphotograph of syenogranite; Or—Orthoclase; Qz—Quartz; Bi—Biotite; Pl—Plagioclase

粗粒正长花岗岩相近,仅粒度较小,部分黑云母出现白云母化现象。

4 分析方法

4.1 全岩主量元素和微量元素分析

用于主量元素和微量元素测试的200目无污染粉碎样及锆石单矿物的分选均由河北省欣航测绘院完成。主要的操作步骤:原样整理、表面去污、人工捣碎、清洗烘干、机械细碎、球磨和入袋等。首先用清洗过的钢锤将样品碎成小块,取其中约1 cm以上粒径小块,放入纯净水中利用超声波清洗干净,再将其放入干净清洁的环境中烘干,最后利用球磨机磨成粉末。

全岩主量元素测试在中国地质大学(北京)科学研究院地球化学实验室完成。采用X射线荧光光谱仪进行元素测定,分析精读优于1%,具体测试方法及流程见李怀坤等(2009)。全岩微量元素测试在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成,测试方法为溶液稀释法电感耦合等离子质谱(ICP-MS),测试过程中的分析精度优于5%,具体测试方法和分析流程见Gao et al. (2002)。在测试过程中每隔10个样品选取测试第十一个进行重复测定,以确定实验的精密度。并选取AGV-2、BHVO-2、BCR-2及RGM-2等四份标准样来监测测试的准确度。同时利用空白分析来控制流程污染。

4.2 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年

在进行锆石U-Pb测年前,先将原岩样品进行粉碎,按常规重力和磁选分选出锆石,然后在双目镜下挑出锆石颗粒。将大约150颗完整的典型锆石颗粒置于环氧树脂中,等固结后抛磨,使锆石内部充分暴露,然后进行锆石阴极发光、透射光和反射光照相。锆石单矿物分离在河北省欣航测绘院完成,锆石的阴极发光等照相在北京锆石领航科技有限公司完成。

利用锆石阴极发光图像,重点选择环带清晰,无包体,形态相似的锆石进行U-Pb定年。锆石激光剥蚀测年在中国科学院青藏高原研究所进行,通过Neptune质谱仪利用LA-ICP-MS方法完成测定,利用193 nm FX激光仪对锆石进行剥蚀,激光斑束设为30 μm ,每六个样品点对应一个91500点,使

用标准硅酸盐玻璃NIST610优化仪器,采用Andersen(2002)方法对普通铅进行校正,具体分析方法及仪器参数见李怀坤等(2010),年龄计算和谐和年龄图是通过Isoplot软件完成。

5 地球化学

5.1 主量元素特征

从来利山花岗岩主量元素含量(表1)可以看出,二长花岗岩的 SiO_2 含量为66.32%~67.87%,平均为67.44%,属酸性岩。在TAS图解中,所有样品均落入碱性花岗岩-亚碱性花岗岩区域(图3a)。将CIPW标准矿物计算结果在Q-ANOR图解中投图,多数样品落入二长花岗岩区(图3b)。二长花岗岩的里特曼指数 σ 为2.91~3.2,平均为3.05(<3.3),为钙碱性岩系列。 Al_2O_3 的含量为14.70%~15.27%, Na_2O 和 K_2O 的含量分别为2.53%~2.94%和5.37%~5.97%,全碱ALK($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$)含量为8.07%~8.50%,样品相对富钾,在 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图解上落入钾玄岩系列(图3c), $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} > 1$ (1.83~2.36),为钾质-超钾质系列。 Al_2O_3 饱和度A/CNK($\text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$)为0.97~1.12,平均为1.04>1,为弱过铝质岩石(图3d)。

正长花岗岩的 SiO_2 含量为74.57%~76.69%,平均为75.38%,属酸性岩。在TAS图解中,所有样品均落入碱性花岗岩-亚碱性花岗岩区域(图3a)。将CIPW标准矿物计算结果在Q-ANOR图解中投图,样品落入花岗岩和碱长花岗岩的过渡区(图3b)。正长花岗岩的里特曼指数 σ 为1.94~2.37,平均为2.13(<3.3),为钙碱性岩系列。 Al_2O_3 的含量为12.25%~12.90%, Na_2O 和 K_2O 的含量分别为2.64%~3.82%和4.14%~5.17%,全碱ALK($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$)含量为7.81%~8.46%,样品相对富钾,CaO含量为0.34%~0.6%,具高碱、低钙的特点。在 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图解中落入高钾钙碱性系列(图3c), $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} > 1$ (1.08~1.96),为钾质系列。 Al_2O_3 饱和度A/CNK($\text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$)为1.05~1.18,平均为1.09(>1),为弱过铝质岩石到强过铝质岩石(图3d)。

5.2 微量元素特征

从来利山花岗岩稀土和微量元素分析结果(表1)显示,二长花岗岩稀土总量较高(ΣREE 为 330.77×10^{-6} ~ 369.11×10^{-6}),轻稀土和重稀土含量分别为

表1 来利山花岗岩主量元素(%), 稀土元素(10^{-6})及微量元素(10^{-6})分析结果Table 1 Composition of major elements (%), rare earth elements (10^{-6}) and trace elements (10^{-6}) for Lailishan granites

测试项目	14L-2	14L-11	14L-16	14L-17	14L-3	14L-4	14L-5	14L-12	14L-13	14L-14	14L-15
	正长花岗岩						二长花岗岩				
SiO ₂	74.87	74.57	75.37	76.69	67.87	67.40	67.24	67.69	67.79	67.75	66.32
TiO ₂	0.13	0.07	0.05	0.03	0.49	0.54	0.55	0.53	0.49	0.51	0.54
Al ₂ O ₃	12.58	12.90	12.66	12.25	15.27	14.94	14.78	14.73	14.80	14.70	15.15
TFe ₂ O ₃	2.74	2.39	2.12	1.60	4.34	4.56	4.40	4.34	4.59	3.98	4.80
MnO	0.04	0.03	0.04	0.02	0.06	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07
MgO	0.18	0.06	0.04	0.02	0.90	1.00	0.93	0.97	1.01	0.94	0.94
CaO	0.42	0.59	0.60	0.34	1.64	2.17	2.05	2.24	2.56	2.52	1.98
Na ₂ O	2.64	3.38	3.51	3.82	2.53	2.61	2.78	2.72	2.94	2.82	2.62
K ₂ O	5.17	5.08	4.84	4.14	5.97	5.46	5.49	5.47	5.37	5.49	5.54
P ₂ O ₅	0.02	0.05	0.04	0.02	0.13	0.17	0.15	0.20	0.15	0.17	0.24
烧失量	0.64	0.43	0.19	0.27	0.88	0.79	0.72	0.54	0.45	0.57	0.89
Total	99.43	99.55	99.46	99.20	100.08	99.71	99.16	99.50	100.22	99.52	99.09
K ₂ O+Na ₂ O	7.81	8.46	8.35	7.96	8.50	8.07	8.27	8.19	8.31	8.31	8.16
K ₂ O/Na ₂ O	1.96	1.50	1.38	1.08	2.36	2.09	1.97	2.01	1.83	1.95	2.11
A/CNK	1.18	1.06	1.05	1.08	1.12	1.06	1.04	1.02	0.97	0.97	1.09
A/NK	1.61	1.52	1.52	1.54	1.80	1.85	1.79	1.80	1.78	1.77	1.86
分异指数	92.58	93.67	94.17	95.72	83.02	80.73	81.8	81.3	80.35	81.1	81.12
Li	19.2	69.6	75.7	50.4	34.0	39.8	32.1	28.8	31.1	30.0	32.3
Be	6.11	7.00	17.1	6.25	4.63	5.56	4.87	4.64	4.58	4.07	5.04
Sc	3.86	6.01	5.85	3.78	8.53	9.27	8.59	8.95	8.64	8.58	9.03
V	5.75	3.54	2.29	2.77	36.8	41.4	38.3	39.2	37.0	36.9	38.3
Cr	26.9	34.7	24.7	54.8	33.6	30.3	24.8	18.2	43.1	11.2	33.7
Co	1.37	0.86	0.55	0.66	5.56	6.16	5.74	5.70	5.80	5.39	6.03
Ni	2.40	1.83	1.62	1.96	4.29	5.10	4.41	3.98	6.93	5.18	4.12
Cu	3.14	2.10	1.46	1.59	3.00	3.71	8.91	5.97	24.5	9.19	4.73
Zn	40.2	22.9	27.5	14.4	44.6	55.7	49.5	55.7	71.2	52.9	53.2
Ga	17.5	21.8	22.2	20.5	19.0	18.9	18.4	18.8	18.2	18.1	18.5
Rb	337	714	758	630	293	288	273	274	267	267	262
Sr	63.9	22.7	13.1	7.08	230	246	270	265	275	291	250
Y	42.0	165	132	41.5	38.8	42.5	38.6	42.4	39.1	37.1	39.9
Zr	102	124	111	96.5	236	254	199	207	242	240	256
Nb	37.3	87.2	81.8	61.7	22.3	24.5	21.9	23.2	22.0	20.6	22.6
Sn	3.30	16.0	17.9	6.85	5.93	5.75	4.80	4.72	4.87	4.46	4.23
Cs	7.77	21.3	25.8	16.0	11.1	10.5	12.5	9.42	11.8	8.15	8.17
Ba	129	56.5	28.8	11.4	738	716	713	651	651	735	770
La	32.6	32.8	19.8	11.9	81.7	73.9	86.4	85.0	76.5	79.4	77.5
Ce	68.9	46.7	50.6	15.3	153	143	160	162	146	151	146
Pr	7.51	9.37	6.50	3.45	17.0	15.3	17.1	17.1	15.4	15.7	15.9
Nd	28.3	40.9	28.7	14.1	63.4	57.5	62.3	63.2	57.5	58.5	59.6
Sm	7.33	16.8	12.7	5.42	12.0	11.7	12.0	12.2	11.2	11.4	11.8
Eu	0.45	0.26	0.12	0.069	1.62	1.60	1.70	1.62	1.57	1.62	1.70
Gd	5.88	17.8	14.2	5.09	8.66	8.64	8.54	9.07	8.52	8.38	8.84
Tb	1.08	3.79	3.17	1.10	1.27	1.33	1.30	1.35	1.26	1.21	1.33
Dy	6.88	25.0	20.9	7.39	7.23	7.49	7.05	7.72	7.10	6.62	7.37
Ho	1.33	5.11	4.22	1.49	1.30	1.42	1.30	1.41	1.36	1.28	1.34
Er	3.94	15.0	12.4	4.51	3.50	3.92	3.48	3.91	3.67	3.36	3.77
Tm	0.66	2.37	2.12	0.78	0.52	0.58	0.50	0.58	0.55	0.49	0.57
Yb	4.44	15.6	13.9	5.33	3.35	3.91	3.30	3.55	3.41	3.14	3.56
Lu	0.67	2.18	2.00	0.78	0.47	0.56	0.50	0.53	0.49	0.47	0.54
Hf	3.87	7.39	6.88	6.59	6.64	7.27	5.68	5.93	6.81	6.95	7.28
Ta	3.24	9.75	9.75	10.0	1.64	2.09	1.68	1.73	1.72	1.37	1.65
Tl	1.83	4.45	4.52	3.91	1.62	1.62	1.58	1.65	1.55	1.57	1.53
Pb	61.8	68.0	69.1	68.4	28.9	33.4	30.5	32.5	45.7	38.3	31.6
Th	49.8	59.8	48.9	37.0	43.7	39.3	38.8	43.9	42.0	40.5	39.3
U	8.88	26.3	21.2	19.7	5.34	4.54	5.35	4.95	6.09	7.62	3.89
LREE	145.14	146.86	118.44	50.27	328.59	302.92	339.37	340.99	308.39	317.80	312.99
HREE	24.89	86.83	72.87	26.46	26.30	27.85	25.97	28.12	26.36	24.95	27.32
ΣREE	170.03	233.69	191.31	76.73	354.89	330.77	365.33	369.11	334.75	342.74	340.32
LREE/HREE	5.83	1.69	1.63	1.90	12.49	10.88	13.07	12.13	11.70	12.74	11.46
(La/Yb) _N	5.26	1.51	1.03	1.61	17.50	13.57	18.79	17.18	16.09	18.16	15.64
δ Eu	0.20	0.05	0.03	0.04	0.47	0.46	0.49	0.45	0.47	0.48	0.49
δ Ce	1.04	0.64	1.09	0.58	0.95	0.99	0.96	0.98	0.99	0.99	0.97

表2 来利山花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素测试结果
Table 2 Zircon U-Pb isotopic data analyzed by LA-ICP-MS for Lailishan granites

测点号	含量/ 10^{-6}			Th/U	同位素比值						表面年龄/Ma							
	Pb	^{232}Th	^{238}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		
14L-4-1	18	321	447	0.72	0.04573	0.00434	0.05002	0.00463	0.00793	0.00014	0.00222	0.00007	-16	169	50	4	50.9	0.9
14L-4-2	9	140	191	0.73	0.05058	0.00909	0.05445	0.00966	0.00781	0.00021	0.00226	0.00014	222	310	54	9	50	1
14L-4-3	15	239	353	0.68	0.05935	0.00697	0.06594	0.00763	0.00806	0.00016	0.00249	0.00003	580	266	65	7	52	1
14L-4-4	17	264	399	0.66	0.05237	0.00632	0.05884	0.007	0.00815	0.00017	0.00256	0.00005	302	273	58	7	52	1
14L-4-5	13	204	333	0.61	0.04534	0.00567	0.04929	0.00606	0.00788	0.00016	0.00244	0.00011	-2	205	49	6	51	1
14L-4-6	12	198	272	0.73	0.04089	0.00585	0.04746	0.00671	0.00842	0.00017	0.00267	0.0001	-239	202	47	7	54	1
14L-4-7	14	229	335	0.68	0.04979	0.00787	0.05496	0.00855	0.008	0.00021	0.0024	0.00014	185	276	54	8	51	1
14L-4-8	11	166	234	0.71	0.05306	0.00835	0.06058	0.00939	0.00828	0.00021	0.00251	0.00015	331	300	60	9	53	1
14L-4-9	22	243	536	0.45	0.05316	0.00503	0.06093	0.00561	0.00831	0.00016	0.00288	0.00013	336	173	60	5	53	1
14L-4-10	10	127	186	0.68	0.04562	0.01443	0.05219	0.01639	0.0083	0.0003	0.00314	0.00026	-22	454	52	16	53	2
14L-4-11	16	180	270	0.67	0.03065	0.01453	0.03559	0.01682	0.00842	0.0003	0.0032	0.00025	-256	564	36	16	54	2
14L-4-12	34	450	602	0.75	0.07128	0.0101	0.08975	0.01252	0.00913	0.00023	0.00277	0.00004	965	307	87	12	59	1
14L-4-13	77	562	1703	0.33	0.04766	0.00454	0.05553	0.00516	0.00845	0.00015	0.00189	0.00013	82	173	55	5	54.2	1
14L-4-14	43	229	636	0.36	0.07883	0.0275	0.08515	0.02933	0.00783	0.00043	0.00235	0.0003	1168	744	83	27	50	3
14L-4-15	66	183	455	0.40	0.06768	0.02483	0.07024	0.02558	0.00753	0.00034	0.00229	0.00039	859	750	69	24	48	2
14L-4-16	37	155	188	0.82	-0.02268	0.05444	-0.02637	0.06326	0.00843	0.00062	0.00385	0.00067	-262	1781	-27	66	54	4
14L-4-17	46	279	555	0.50	0.00912	0.02269	0.01062	0.02642	0.00845	0.00036	0.00256	0.00048	-1384	963	11	27	54	2
14L-4-18	51	335	360	0.93	0.03598	0.03889	0.04163	0.04494	0.00839	0.00049	0.00476	0.00045	-34	1119	41	44	54	3
14L-4-19	66	78	125	0.62	0.06917	0.14703	0.08048	0.17055	0.00844	0.0014	0.00892	0.00248	904	3312	79	160	54	9
14L-4-20	15	132	152	0.87	-0.00184	0.0508	-0.00214	0.05911	0.00844	0.00058	0.00227	0.00056	-2155	1865	-2	60	54	4
14L-4-21	414	129	186	0.69	0.31539	0.10965	0.90331	0.29723	0.02077	0.00233	0.00543	0.00319	3547	712	653	159	133	15
14L-4-22	16	98	150	0.65	0.02555	0.04244	0.02953	0.04902	0.00838	0.00051	0.00391	0.00056	-486	1105	30	48	54	3
14L-4-23	35	161	383	0.42	0.04792	0.02289	0.05534	0.02634	0.00838	0.00032	0.00574	0.00049	95	754	55	25	54	2
14L-4-24	31	212	412	0.51	0.00978	0.03489	0.01128	0.04024	0.00836	0.00052	0.00325	0.00071	-1343	1136	11	40	54	3
14L-4-25	33	204	207	0.98	0.18467	0.06765	0.21617	0.0765	0.00849	0.00081	0.00238	0.00071	2695	528	199	64	54	5
14L-4-26	19	178	280	0.64	0.05942	0.0165	0.07332	0.02021	0.00895	0.00031	0.00277	0.00021	583	545	72	19	57	2
14L-4-27	9	109	96	1.13	0.00849	0.03914	0.00982	0.04528	0.00839	0.00046	0.00232	0.00035	-1425	1233	10	46	54	3
14L-4-28	19	137	253	0.54	0.03633	0.01723	0.05157	0.02439	0.0103	0.00036	0.00404	0.0004	-20	650	51	24	66	2
14L-4-29	34	389	588	0.66	0.08366	0.01287	0.09727	0.01463	0.00843	0.00027	0.00276	0.0002	1285	250	94	14	54	2
14L-4-30	33	166	272	0.61	0.09708	0.02818	0.13181	0.03781	0.00985	0.00044	0.00288	0.00018	1569	637	126	34	63	3

表3 来利山花岗岩的锆石稀土元素数据(10^{-6})
Table 3 Rare earth elements data (10^{-6}) of zircon from Lailishan granites

测点号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er
14L-4-1	<0.054	18.33	0.124	2.45	5.38	0.428	24.76	8.17	95.31	32.73	140.58
14L-4-2	<0.058	11.3	0.111	1.89	4.54	0.941	19.48	6.53	75.4	26.3	113.73
14L-4-3	1.759	23.24	0.996	6.65	5.62	1.432	19.04	6.33	71.84	25.85	107.18
14L-4-4	<0.044	18.75	0.072	1.24	3.53	0.302	16.78	5.98	71.54	25.79	110.17
14L-4-5	<0.052	16.48	0.048	1.19	2.89	0.311	14.47	5.21	62.93	22.13	96.56
14L-4-6	<0.042	17.47	<0.033	0.52	1.07	0.127	5.57	2.16	28.23	10.83	53.63
14L-4-7	0.37	19.64	0.264	2.65	4.75	0.475	18.12	6.38	75.03	26.03	111.88
14L-4-8	<0.051	14.22	0.081	1.96	3.82	0.547	18.02	5.92	68.09	23.89	99.89
14L-4-9	6	22.33	1.903	9.26	4.08	0.245	13.53	4.91	59.78	22.02	98.27
14L-4-10	<0.072	10.64	0.091	2.05	4.38	0.919	18.73	6.15	71.08	24.37	102.28
14L-4-11	<0.109	10.79	0.144	2.1	4.59	0.611	19.65	6.73	75.52	26.39	110.13
14L-4-12	160	533.03	86.61	466.32	141.41	5.51	125.45	21.65	161.66	40.71	146.43
14L-4-13	2.3	12.98	1.26	8.12	6.56	1.31	24.91	10.41	128.28	45.58	200.14
14L-4-14	31.16	96.95	14.73	80.44	28.05	0.79	30.82	7.1	72.58	22.7	94.66
14L-4-15	<0.6	11.38	<0.4	<3.08	3.84	<1.02	10.48	3.6	47.63	19.05	81.51
14L-4-16	<0.55	12.69	<0.42	3.91	6.83	<0.86	21.71	6.6	73.8	25.45	102.1
14L-4-17	1.3	16.63	<0.49	3.23	5.47	<0.88	16.27	5.91	68.78	22.44	89.74
14L-4-18	1.87	21.85	<0.69	9.06	6.99	<1.1	32.08	11.84	135.98	41.01	169.2
14L-4-19	<1.11	7.66	<0.95	6.05	<7.21	<1.85	11.07	3.48	44.4	14.59	56.27
14L-4-20	<0.208	9.07	0.125	2.46	5.41	0.96	20.34	6.74	74.1	24.21	101.73
14L-4-21	20.19	24.65	4.27	17.69	6.31	1.17	11.8	3.6	39.91	13.31	53.55
14L-4-22	<0.229	13.17	<0.19	1.46	2.31	0.39	10.68	3.7	41.17	15.49	63.5
14L-4-23	<0.5	12.51	<0.3	<1.93	2.79	<0.73	11.67	3.78	39.15	14.48	59.11
14L-4-24	7.6	38.02	5.17	29.46	10.28	0.56	16.81	5.25	57.34	22.57	96.16
14L-4-25	<0.48	16.39	0.47	3.8	6.49	1.67	32.21	9.72	102.67	34.61	130.07
14L-4-26	2.51	14.07	0.86	5.04	3.73	0.455	15.1	5.62	65.46	24.5	104.71
14L-4-27	<0.152	13.77	0.13	1.82	4.67	1.15	17.19	5.55	64.47	21.13	86.87
14L-4-28	5.76	27.44	3.24	22.11	12.79	0.83	25.37	7.32	74.09	26.61	108.3
14L-4-29	1.62	82.95	0.944	6.93	5.53	1.85	16.97	5.76	68.11	24.98	107.17
14L-4-30	0.379	13.2	0.254	1.39	4.14	0.61	15.14	5.89	68.29	24.24	106.8
测点号	Tm	Yb	Lu	Th	U	Th/U	Total REE	LREE	HREE	L/H	
14L-4-1	33.41	367.3	47.83	320.83	446.54	0.71848	1696.836	26.766	750.09	0.035684	
14L-4-2	27.14	303	40.76	139.54	190.78	0.731418	1381.17	18.84	612.34	0.030767	
14L-4-3	26.04	287.92	37.43	238.85	352.97	0.676686	1337.307	39.697	581.63	0.068251	
14L-4-4	25.58	284.25	36.88	264.07	399.14	0.661597	1328.548	23.938	576.97	0.041489	
14L-4-5	23.02	258.76	34.55	203.56	332.97	0.611346	1176.131	20.971	517.63	0.040513	
14L-4-6	15.2	194.53	28.16	198.14	272.14	0.728081	669.222	19.262	338.31	0.056936	
14L-4-7	26.3	294.73	37.62	228.58	335.07	0.682186	1367.579	28.149	596.09	0.047223	
14L-4-8	23.76	267.71	34.34	166.3	233.86	0.711109	1230.279	20.679	541.62	0.03818	
14L-4-9	24.62	285.71	36.93	243.11	535.84	0.453699	1226.868	43.818	545.77	0.080287	
14L-4-10	24.53	281.27	35.21	127.26	186.47	0.682469	1265.772	18.152	563.62	0.032206	
14L-4-11	25.25	272.55	36.44	180.27	270.45	0.666556	1331.584	18.344	572.66	0.032033	
14L-4-12	31.24	321.93	44.59	450.43	602.33	0.747813	3512.88	1392.88	893.66	1.558624	
14L-4-13	46.89	500.38	63.98	562.38	1703.18	0.330194	2346.18	32.53	1020.57	0.031874	
14L-4-14	22.51	265.9	35.22	229.05	635.97	0.360158	1490.8	252.12	551.49	0.457162	
14L-4-15	19.47	253.27	30.7	183.02	454.71	0.402498	1048.3	20.32	465.71	0.043632	
14L-4-16	22.51	262.99	30.48	154.57	187.62	0.823846	1267.96	25.26	545.64	0.046294	
14L-4-17	21.85	246.28	28.77	278.96	554.54	0.503048	1166.45	28	500.04	0.055996	
14L-4-18	35.96	401.05	44.63	335.05	359.69	0.931497	2082.75	41.56	871.75	0.047674	
14L-4-19	13.53	137.31	18.94	77.93	125.16	0.622643	718.76	24.83	299.59	0.08288	
14L-4-20	22.56	239.6	32.62	132.47	151.75	0.872949	1242.603	18.233	521.9	0.034936	
14L-4-21	12.74	145.79	18.33	128.7	185.89	0.692345	756.19	74.28	299.03	0.248403	
14L-4-22	14.92	168.38	22.3	98.33	150.39	0.653833	786.759	17.749	340.14	0.052181	
14L-4-23	13.84	167.2	18.63	160.64	383.47	0.418912	754.72	18.76	327.86	0.05722	
14L-4-24	22.58	260.49	37.55	211.54	412.27	0.51311	1257.89	91.09	518.75	0.175595	
14L-4-25	28.7	314.79	39.43	203.79	207.38	0.982689	1662.73	29.3	692.2	0.042329	
14L-4-26	25.22	261.87	37.99	177.82	279.9	0.635298	1271.435	26.665	540.47	0.049337	
14L-4-27	19.64	208.84	29.13	109.16	96.2	1.134719	1071.042	21.692	452.82	0.047904	
14L-4-28	25.02	265.06	38.53	136.77	253.28	0.539995	1391.82	72.17	570.3	0.126547	
14L-4-29	25.16	282.34	38.01	389.28	587.88	0.662176	1389.944	99.824	568.5	0.175592	
14L-4-30	25.2	271.78	39.75	166.13	272.45	0.609763	1276.123	19.973	557.09	0.035852	

表4 来利山花岗岩年龄统计表
Table 4 Statistics of age data of Lailishan granites

岩石名称	位置	定年对象	定年方法	年龄/Ma	资料来源
中粗粒黑云母花岗岩	来利山 TC130 探槽附近	黑云母	Rb-Sr	51	云南省地质科学研究所, 1982
中粗粒黑云二长花岗岩	——	黑云母	K-Ar	54	李景略, 1984
中细粒黑云二长花岗岩	——	黑云母	K-Ar	52	李景略, 1984
正长花岗岩	淘金处	全岩	Rb-Sr	53.5	1:5 万区调 ^o
中粒黑云母花岗岩	——	全岩	Rb-Sr	51.1	陈吉琛, 1987
中粒黑云母花岗岩	——	黑云母	K-Ar	51	陈吉琛, 1987
中粒黑云母花岗岩	——	钾长石	K-Ar	51.3	陈吉琛, 1987
正长花岗岩	淘金处	黑云母	K-Ar	54.0	吕伯西等, 1993
正长花岗岩	淘金处	黑云母	Ar-Ar	50.06	董方浏等, 2006
正长花岗岩	淘金处	黑云母	Ar-Ar	52.28	董方浏等, 2006
等粒黑云母钾长花岗岩	——	全岩	Rb-Sr	52.1	林清茶等, 2009
粗粒花岗岩	TCLL-1	锆石	U-Pb	53	杨启军等, 2009
粗粒花岗岩	TCLL-2	锆石	U-Pb	53	杨启军等, 2009
粗粒花岗岩	TCLL-9	锆石	U-Pb	53	杨启军等, 2009
中细粒正长花岗岩	淘金处	锆石	U-Pb	52.53	金灿海等, 2013
粗粒花岗岩	——	锆石	U-Pb	52.7	Chen et al., 2015
细粒斑状黑云花岗岩	——	黑云母	K-Ar	52	云南省地质科学研究所, 1982
斑状紫苏花岗岩	——	黑云母	K-Ar	58	李景略, 1984
二长花岗岩	三个硐	黑云母	K-Ar	54	1:5 万区调 ^o
二长花岗岩	三个硐	黑云母	K-Ar	52	1:5 万区调 ^o
二长花岗岩	三个硐	钾长石	K-Ar	41.2	1:5 万区调 ^o
斑状角闪黑云母二长花岗岩	——	全岩	Rb-Sr	58.4	陈吉琛, 1987
斑状角闪黑云母二长花岗岩	——	黑云母	Rb-Sr	52.5	陈吉琛, 1987
斑状角闪黑云母二长花岗岩	——	黑云母	K-Ar	52	陈吉琛, 1987
斑状角闪黑云母二长花岗岩	——	钾长石	K-Ar	41.2	陈吉琛, 1987
二长花岗岩	三个硐	全岩	Rb-Sr	59.0	吕伯西等, 1993
二长花岗岩	三个硐	黑云母	K-Ar	58.0	吕伯西等, 1993
二长花岗岩	三个硐	钾长石	Ar-Ar	42.88	董方浏等, 2006
二长花岗岩	三个硐	钾长石	Ar-Ar	41.86	董方浏等, 2006
二长花岗岩	——	锆石	U-Pb	50.39	林进展, 2013
似斑状花岗岩	——	锆石	U-Pb	53.0	Chen et al., 2015

注:“——”表示原文献没有说明测年样品的具体位置。

$302.92 \times 10^{-6} \sim 340.99 \times 10^{-6}$ 和 $24.95 \times 10^{-6} \sim 28.12 \times 10^{-6}$, 轻重稀土比值为 10.88~13.07, $(La/Yb)_N = 13.57 \sim 18.79$, δEu 变化范围为 0.45~0.49, 具有较明显的负 Eu 异常, 从稀土元素球粒陨石标准化分布图(图 4a)可以看出, 二长花岗岩表现为轻稀土陡倾, 重稀土平缓的 L 型右倾模式, 且轻重稀土分馏相对比较明

显, 表现为轻稀土富集重稀土亏损的特征。从原始地幔标准化蛛网图(图 4b)可以看出, 二长花岗岩亏损 Ba、Sr、P、Ti, 相对富集 Rb、Th、La、Nd、Sm 等元素。 δCe 为 0.95~0.99, 基本不存在 Ce 异常。

正长花岗岩稀土总量相对于二长花岗岩较低 (ΣREE 为 $76.73 \times 10^{-6} \sim 233.69 \times 10^{-6}$), 变化范围较大,

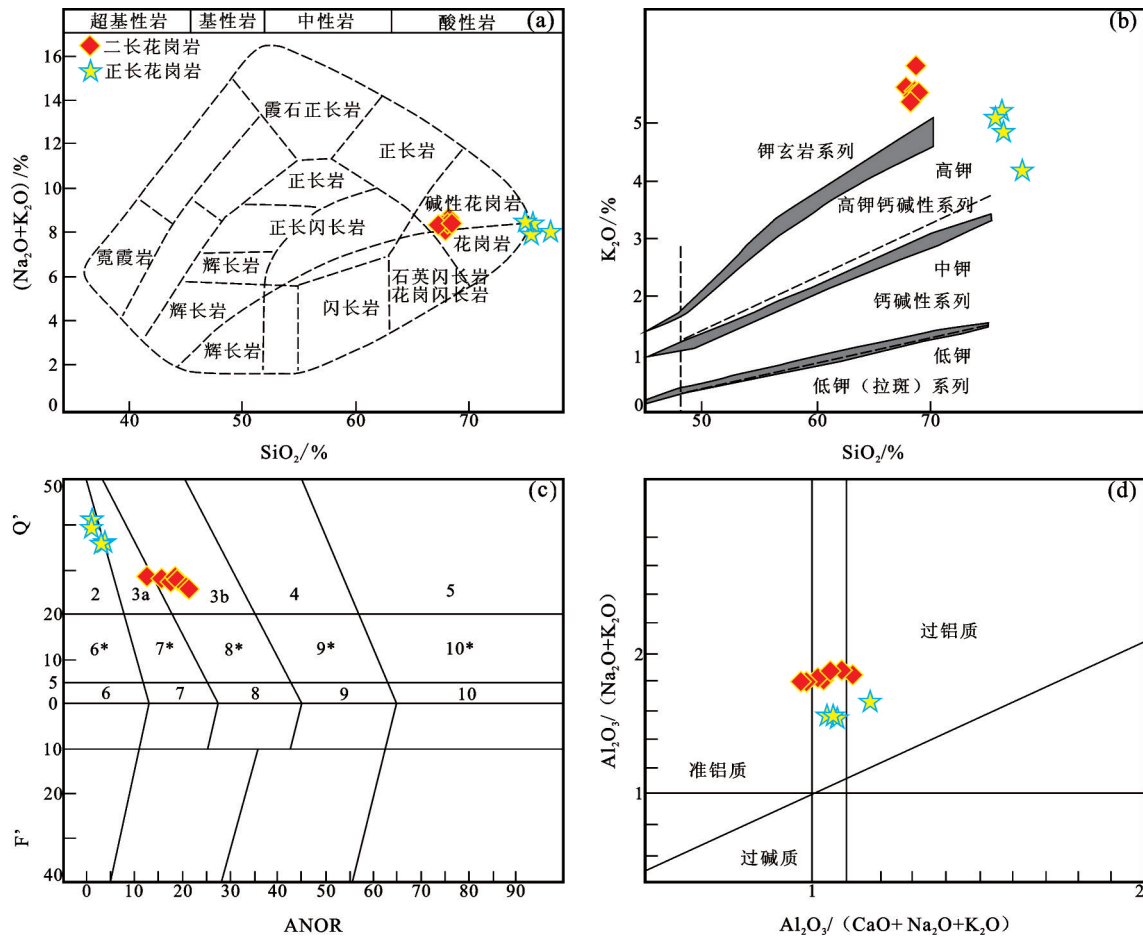


图3 来利山花岗岩分类图解

(a)底图据 Wilson, 1989; b虚线底图据 Le Maitre et al., 1989, 阴影部分底图据 Rickwood, 1989; c底图据 Streckeisen&Le Maitre, 1979; d底图据 Maniar&Piccoli, 1989)

c图: 2—碱长花岗岩; 3a—正长花岗岩/花岗岩; 3b—二长花岗岩; 4—花岗闪长岩; 5—英云闪长岩; 6*—石英碱长正长岩; 7*—石英二长岩; 8*—石英二长闪长岩; 9*—石英二长闪长岩/石英二长辉长岩; 10*—石英闪长岩/石英辉长岩/石英斜长岩; 6—碱长正长岩; 7—正长岩; 8—二长岩; 9—二长闪长岩/二长辉长岩; 10—闪长岩/辉长岩/斜长岩

Fig.3 Classification of Lailishan granites

(a, after Wilson, 1989; b, imaginary line after Le Maitre et al., 1989, dash area after Rickwood, 1989; c, after Streckeisen&Le Maitre, 1979; d, after Maniar&Piccoli, 1989)

b: 2—Alkaline feldspar granite; 3a—Syenogranite/granite; 3b—Monzogranite; 4—Granodiorite; 5—Tonalite; 6*—Quartz alkali feldspar syenite; 7*—Quartz monzonite; 8*—Quartz monzodiorite; 9*—Quartz monzodiorite/quartz monzogabbro; 10*—Quartz diorite/quartz gabbro/quartz anorthosite; 6—Alkali feldspar syenite; 7—Syenite; 8—Monzonite; 9—Monzodiorite/monzogabbro; 10—Diorite/gabbro/anorthosite

轻稀土和重稀土含量分别为 $50.27 \times 10^{-6} \sim 146.86 \times 10^{-6}$ 和 $24.87 \times 10^{-6} \sim 86.83 \times 10^{-6}$, 轻重稀土比值为 1.63~5.83, $(La/Yb)_N = 1.03 \sim 5.26$, δEu 变化范围为 0.03~0.2, Eu 强烈亏损, 从稀土元素球粒陨石标准化分布图(图 4c)可以看出, 正长花岗岩表现为轻重稀土分馏不明显, 负 Eu 异常严重的 V 形稀土分布型式, 具有明显的四分组效应, 即 La-Ce-Pr-Nd、Pm-Sm-

Eu-Gd、Gd-Tb-Dy-Ho、Er-Tm-Yb-Lu 组成四条上凸曲线, 而 Ce、Sm、Dy、Yb 分别是四条上凸曲线的最高点, 其中 Ce 和 Eu 由于负异常而偏离曲线, Ce 负异常可能和岩石风化有关, 因为风化可以把 Ce^{3+} 变成 Ce^{4+} 从而流失(牟保磊, 1999)。从原始地幔标准化蛛网图(图 4d)可以看出, 正长花岗岩强烈亏损 Ba、Sr、P、Ti, 相对富集高场强元素(Ta、Zr、Hf、Th、

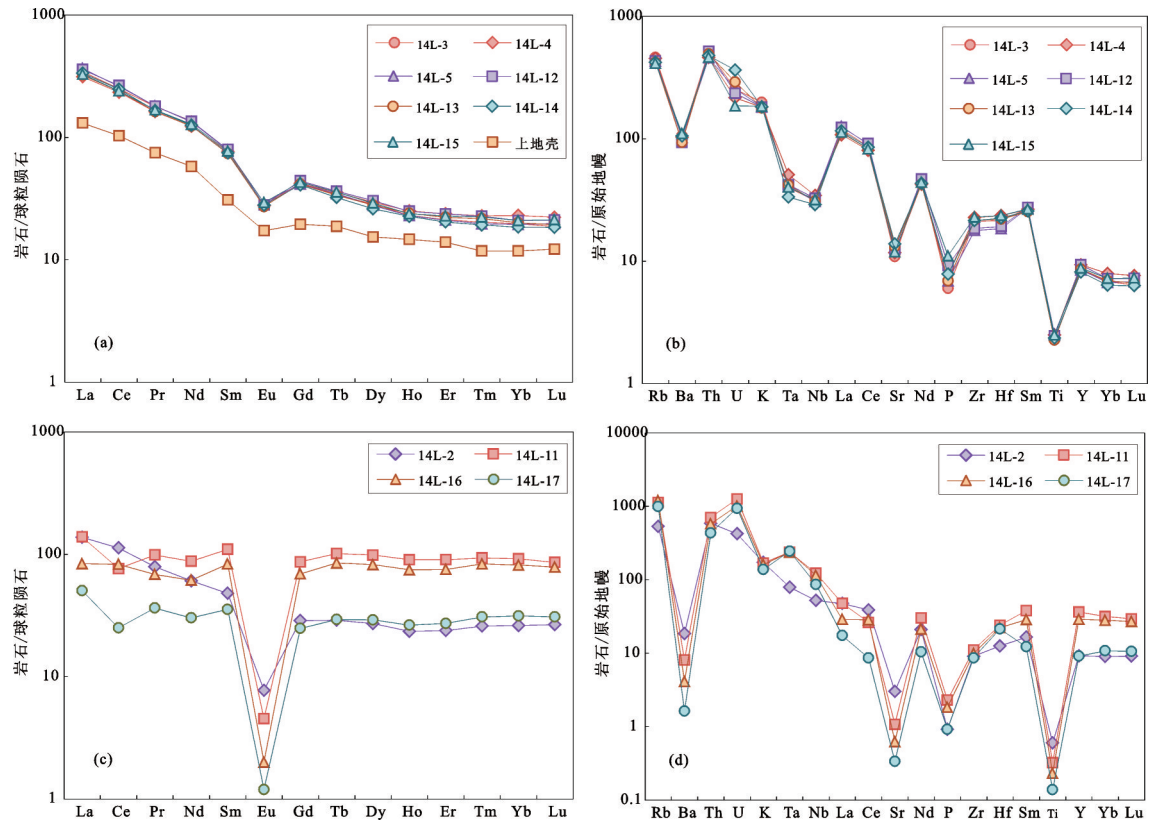


图4 来利山花岗岩稀土元素球粒陨石标准化分布型式图及微量元素原始地幔标准化蛛网图(球粒陨石及原始地幔标准化值据 Sun&McDonough, 1989, 上地壳稀土元素组成据 Rudnick&Gao, 2014)

Fig.4 Chondrite-normalized REE patterns and primitive mantle-normalized trace element spider diagrams of Lailishan granites (chondrite-normalized and primitive mantle-normalized data from Sun&McDonough, 1989, REE composition of upper crust from Rudnick&Gao, 2014)

HREE、U)和大离子亲石元素(Rb、K)。

6 锆石U-Pb年代学及微量元素特征

6.1 锆石U-Pb年代学特征

为了确定来利山花岗岩的形成时代,本文选取似斑状黑云母二长花岗岩样品 14L-4 进行锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年。样品中锆石多数呈无色半透明,以自形-半自形短柱状-柱状为主,长 100~200 μm ,长宽比为 1:1 至 2.5:1。从锆石阴极发光(CL)图像可以看出,多数锆石发育清晰的同心环带,少数发育板状环带,为典型的岩浆锆石。本次研究选取 30 个锆石颗粒进行测年,以获得花岗岩体的侵位年龄。除去一些年龄较大的点,可能为继承锆石的数据点,其余 26 颗锆石落于谐和线上(表 2,图 5),它们的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权年龄平均值为 $(52.34 \pm 0.68)\text{Ma}$ (MSWD=1.4, $n=26$),说明来利山二长花岗岩大约于 52 Ma 上升侵位。

6.2 锆石微量元素特征

锆石微量元素特征对于研究主岩的成分演化、熔融源区性质具有重要作用。微量元素如 U、Th、Hf、REE 等是识别源区性质极其重要的示踪元素。它们具有离子半径大和价态高的特征,在多数硅酸盐类造岩矿物中不容易存在,但是可以广泛存在于锆石中(Hoskin et al.,2003)。锆石微量元素记录了寄主岩石的成因等丰富信息(Hoskin et al.,2000,2003; Belousova et al.,2002; Griffin et al.,2002; Rubatto et al.,2002; 吴元保等,2004; Hanchar et al.,2007),所以近年来其广泛被用于鉴定岩浆岩的源区性质(Hoskin et al.,2000; Belousova et al.,2002; Rubatto et al.,2002)。尽管不同类型锆石的稀土元素含量有一定差异,但由于重稀土的离子半径更加接近 Zr 的离子半径,所以锆石大体上均亏损轻稀土元素,富集重稀土元素,同时 Ce 正异常和 Eu 负异常

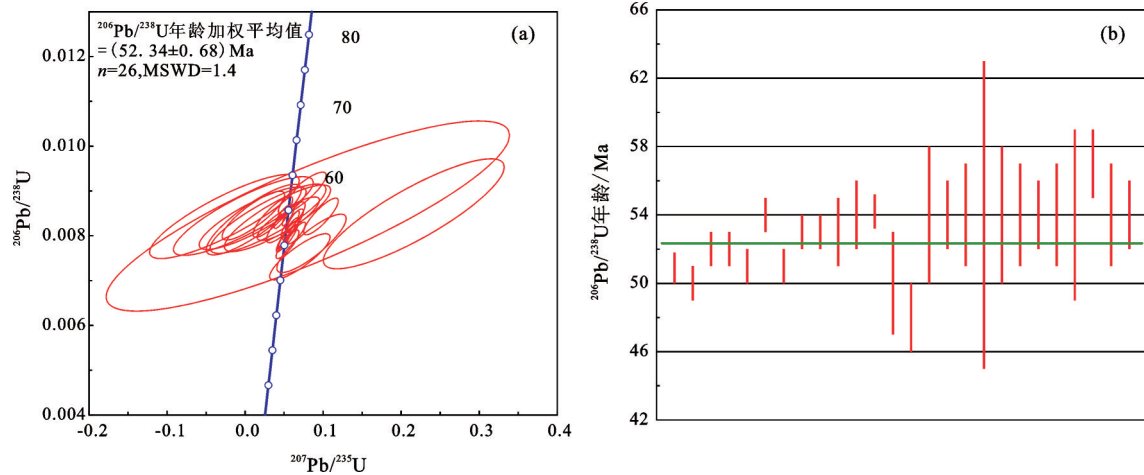


图5 来利山花岗岩锆石 U-Pb 谐和图及年龄平均值图
Fig. 5 Zircon U-Pb concordia diagram and average age of Lailishan granites

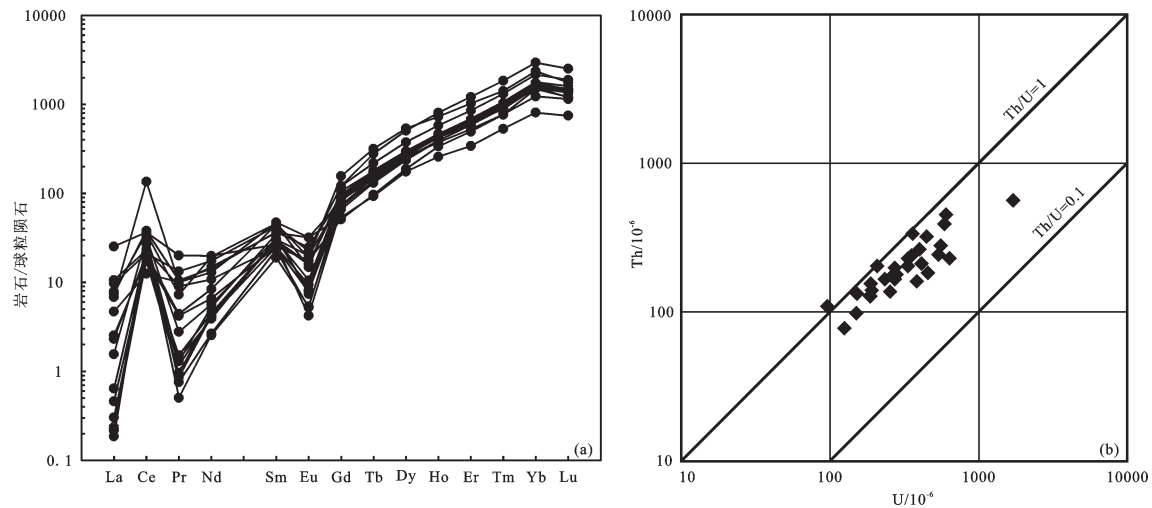


图6 来利山花岗岩及稀土元素球粒陨石标准化分布型式图(a)及锆石 Th/U 比值图(b)
Fig. 6 chondrite-normalized REE patterns and Zircon Th/U ratio of Lailishan granites

也相对较明显(Belousova et al.,2002)。通过近年来对锆石稀土元素的分析,发现岩浆锆石稀土元素从La到Lu含量急剧增加,重稀土强烈富集,其稀土元素配分模式呈陡左倾型(赵振华,2010)。

锆石微量元素(表3)共分析了30颗锆石,其稀土总量为 $669 \times 10^{-6} \sim 3512 \times 10^{-6}$,变化范围较大,平均含量为 1350×10^{-6} ,轻稀土LREE含量为 $17 \times 10^{-6} \sim 252 \times 10^{-6}$,除去含量极高的 1392×10^{-6} ,其它29颗锆石的轻稀土含量平均为 41×10^{-6} ,重稀土HREE含量为 $299 \times 10^{-6} \sim 1020 \times 10^{-6}$,平均含量为 557×10^{-6} ,轻重稀土比值为0.03~0.46,除去较高的1.56,其29颗锆

石的轻重稀土比值平均为0.08, $(Sm/La)_N = 0.48 \sim 154.33$,平均为34.97,轻稀土亏损,重稀土明显富集,且轻稀土含量较高,为壳源岩浆锆石的特征(吴元保等,2003)。 δCe 平均为18.27(0.62~108.83), δEu 平均为0.24(0.09~0.63),且变化范围较大,但均在壳源锆石的Ce异常和Eu异常范围内(Li et al.,2000),为典型的岩浆锆石(Belousova et al.,2002; Hoskin et al.,2003;吴元保等,2004)。通过锆石稀土元素球粒陨石标准化分布型式图(图6a)(数据异常点未在图中表示)同样可以看出,锆石稀土元素具有轻稀土亏损、重稀土呈阶梯状富集、Ce正异常和

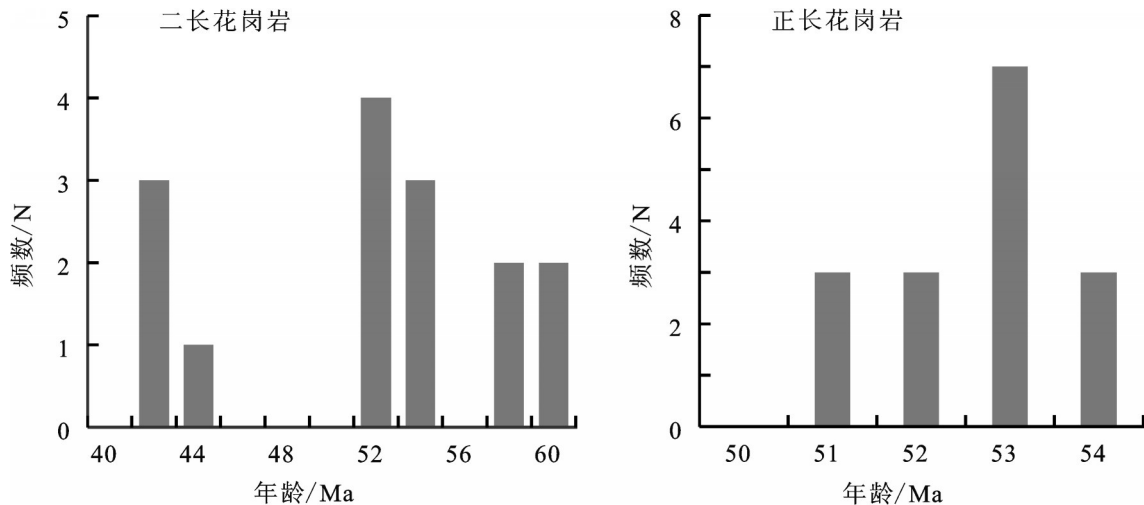


图7 来利山花岗岩年龄直方图
Fig.7 Age histogram of Lailishan granites

Eu负异常都比较明显的特征,显示典型的岩浆岩锆石特征(丛峰等,2010)。大量研究表明,不同成因的锆石其Th、U含量以及Th/U比值也有所不同,其中岩浆锆石通常Th、U含量较高,Th/U比值也较大(一般大于0.4)(Rubatto et al.,2000; Miller et al.,2003)。锆石微量元素分析结果显示:30颗锆石的Th含量为 $77 \times 10^{-6} \sim 562 \times 10^{-6}$,平均为 216×10^{-6} ,U含量为 $96 \times 10^{-6} \sim 1703 \times 10^{-6}$,平均为 372×10^{-6} 。Th/U比值除去两颗小于0.4的0.33和0.36,其它全部大于0.4,为0.40~1.13,30颗锆石的Th/U平均比值为0.66,具有高Th、U以及高Th/U(图6b)的特征,显示了典型的壳源岩浆锆石特征(吴元保等,2003)。

7 讨论

7.1 来利山花岗岩形成时代

前人利用Rb-Sr、K-Ar等时线法对来利山岩体的年龄进行了大量研究,给出来利山花岗岩的年龄范围为41~59 Ma(表4)(李景略,1984;陈吉琛等,1987,1991;吕伯西等,1993;董方浏等,2006;林清茶等,2009;Xu et al.,2012;金灿海等,2013;林进展,2013;Chen et al.,2015)。将这些年龄数据进行统计分析(图7)可以看出,正长花岗岩形成时代相对集中,而二长花岗岩则较分散。16个正长花岗岩年龄主要集中于51~54 Ma,以53 Ma居多,结合近年来高精度的锆石U-Pb年龄52.53和52.7 Ma(金灿海等,2013;Chen et al.,2015),可以认为正长花岗岩形成于52~53 Ma;15个二长花岗岩年龄主要集中于三

个阶段,分别为42~44 Ma、52~54 Ma及58~60 Ma,以52~54 Ma居多。为了精确厘定二长花岗岩的年龄,本次工作针对矿区代表性样品(14L-4)进行锆石U-Pb定年,其结果显示,二长花岗岩的形成年龄为 $(52.34 \pm 0.68) \text{ Ma}$ (MSWD=1.4, $n=26$)。结合前人高精度的锆石U-Pb年龄值53.0和53.2 Ma(Xu et al.,2012;Chen et al.,2015),可以确定来利山二长花岗岩形成于53 Ma左右。因此来利山二长花岗岩和正长花岗岩的侵位年龄在误差范围内一致,正长花岗岩略晚于二长花岗岩。

7.2 岩浆演化

来利山岩体具有一定的相带特征,其中似斑状花岗岩相带不明显,而正长花岗岩呈粗粒结构、中粒结构及细粒结构变化特征,相带比较完整。岩石化学计算显示,二长花岗岩的分异指数为80.35~83.02,平均为81.35,正长花岗岩的分异指数为92.58~95.72,平均为94.04,呈现高度分异的特征。从二长花岗岩到正长花岗岩,岩石的酸性程度升高,分异程度也升高, K_2O/Na_2O 值降低,镁、铁含量降低,暗色矿物含量减少, Al_2O_3 、CaO、 P_2O_5 含量减少,碱性长石含量增加。稀土元素数据显示,正长花岗岩相对二长花岗岩稀土总量降低,Eu亏损更加强烈,表明存在富含Eu、Al及LREE的斜长石的分离结晶。主微量数据表明, SiO_2 和 Al_2O_3 、CaO、Sr、Ba、Eu呈负相关,由于Al、Eu、Sr、Ca、Ba等元素主要存在于斜长石中,该变化趋势可能与斜长石的分离结晶有关。正长花岗岩Sr和P的强烈亏损是由斜长

石和磷灰石的分离结晶导致的,而Ba的亏损则是残余岩浆的体现。

从稀土元素配分曲线可以看出,二长花岗岩的稀土元素分布特点和上地壳的非常相似(Rudnick and Gao, 2014),为轻稀土较陡、重稀土较缓的L型模式,暗示其源区可能与上地壳物质有关。正长花岗岩相对二长花岗岩和上地壳有较大差异,具体表现为轻稀土含量降低,重稀土含量升高,稀土元素分布型式为近V型模式,具有明显的四分组效应,可能是由花岗质熔体和富挥发分的流体相互作用形成的(赵振华等,1992)。据赵振华研究,具有稀土元素四分组效应的花岗岩几乎都是岩浆作用晚期阶段残余熔体的产物。强烈的结晶分异会使得挥发分在残余熔体中富集,为流体-熔体相互作用提供物质基础。富挥发分的流体对熔体中的稀土元素具有很大的萃取能力,稀土元素在熔体和流体之间的分配,使得残余熔体形成稀土元素四分组效应(赵振华等,1999)。该正长花岗岩稀土元素四分组效应表明上地壳物质部分熔融形成初始岩浆,然后上升侵位经过高度的结晶分异,形成富挥发分的流体和熔体,熔体和流体之间发生相互作用,形成正长花岗岩稀土元素四分组效应。正长花岗岩的Nb、Ta含量远大于二长花岗岩,也暗示岩浆经历了结晶分异和流体相互作用(李凤宪等,2015)。

综合以上研究,来利山二长花岗岩和正长花岗岩为同源岩浆作用的产物,源区物质部分熔融形成花岗质岩浆后,在53 Ma上升侵位形成似斑状二长花岗岩,残余岩浆随后结晶形成中粗粒正长花岗岩,两者为一个侵位过程的两个阶段,其侵入时间是连续的。

7.3 源岩及成因类型

对于花岗岩的研究,其源区一直存在较大争议。来利山正长花岗岩和二长花岗岩均显示Rb、Th、U的富集和Ba、Sr、P、Ti的亏损,具有极高的Th(正长花岗岩为 37.0×10^{-6} ~ 59.8×10^{-6} 、二长花岗岩为 38.8×10^{-6} ~ 43.9×10^{-6})、U(正长花岗岩为 8.88×10^{-6} ~ 26.3×10^{-6} 、二长花岗岩为 3.89×10^{-6} ~ 7.62×10^{-6})、Pb(正长花岗岩为61.8~69.1,二长花岗岩为28.9~45.7)含量以及强烈的负Eu异常(正长花岗岩的 δEu 为0.03~0.2,二长花岗岩的 δEu 为0.45~0.49),表明其源岩是典型的上地壳岩石(Rudnick et al.,1995)。这一

结论与区内Sr同位素研究结果一致。已有研究表明,来利山二长花岗岩和正长花岗岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值比较接近且较高,均大于0.7120(林文信,1987;毛景文,1987;罗君烈,1991;张琪等,2008),说明两者同源,且来源较浅,为上地壳部分熔融的产物。

研究认为,花岗岩成因类型主要取决于源岩(Brown et al., 1984;毛建仁等,1990;李兆鼎等,2003),S型花岗岩的母岩是变质沉积岩,而I型花岗岩的母岩是变质火成岩(Chappell and White, 1974)。其中I型花岗岩Nd同位素初始比值较高,Sr同位素初始比值较低,而S型花岗岩Nd同位素初始比值较低,Sr同位素初始比值较高(张琪等,2008)。来利山岩体Sr同位素初始比值较高,其Rb/Sr均 >0.9 ,显示S型花岗岩的特征(王德滋等,1993)。二长花岗岩的地球化学特征与沉积岩区熔融的S型花岗岩($\text{SiO}_2 < 74\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2 < 100$, $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O} > 0.3$, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} > 1$)非常相似(路凤香和桑隆康,2002),其 SiO_2 含量较高且变化范围较窄、碱含量中等且相对富钾,不同于I型、A型花岗岩,其 P_2O_5 和 TiO_2 含量高,有别于A型花岗岩(Whalen et al., 1987);随 SiO_2 含量增加,岩石 P_2O_5 含量变化不大(Chappell, 1999),轻重稀土分馏较明显,配分模式为轻稀土富集,重稀土亏损的右倾型,均显示S型花岗岩的特征;其锆石稀土配分模式(图6a)也显示S型花岗岩特征(Wang et al., 2012)。而正长花岗岩呈现高分异特征。高度分异的花岗岩,不论是S型、I型还是A型,其矿物特征和化学成分都接近低共结花岗岩,难以区分其成因类型(吴福元等,2007a)。但本次研究表明,来利山正长花岗岩和二长花岗岩具有同源岩浆演化关系,应属于S型花岗岩。

7.4 构造背景

前人研究表明,青藏高原南部地区的花岗岩类记录着印度-亚洲大陆作用过程的大量信息(Patriat and Achache, 1984; Yin and Harrison, 2000; 莫宣学等,2003),导致了一系列的花岗岩类岩浆活动(毛景文等,1987),因此,对这些岩浆岩的研究可以确定印度-亚洲大陆碰撞时限及其发育的构造背景。前人研究成果显示,新特提斯洋向北俯冲的时间为75 Ma(钟大赉,1999),印度板块和亚洲板块初始碰撞时间为65Ma(Patriat and Achache, 1984; Beck et al., 1995; Yin and Harrison, 2000; 莫宣学等,2003;

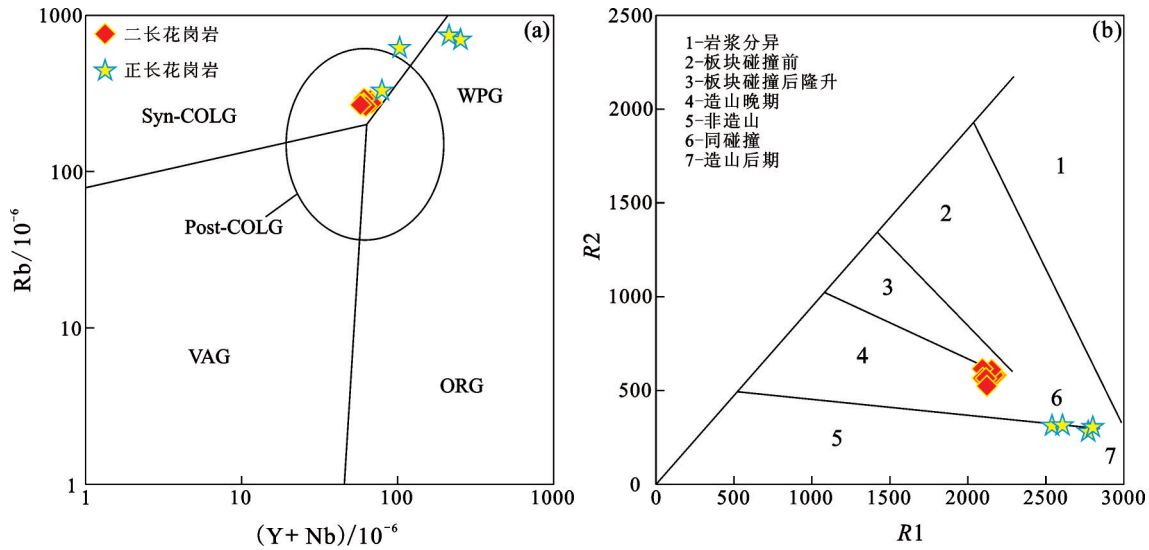


图8 来利山花岗岩构造环境判别图解(图a据 Pearce et al., 1984; 图b据 Batchelor et al., 1985)

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

Fig.8 Tectonic setting discrimination diagrams of Lailishan granites (a, after Pearce et al., 1984; b, after Batchelor et al., 1985)

VAG—Volcanic arc granites; Syn-COLG—Syn-collision granites; WPG—Within plate granites; ORG—Ocean ridge granites

王成善等, 2003), 主碰撞时间为 55~50Ma (Besse et al., 1984; Beck et al., 1995; 王成善等, 2003; 朱弟成等, 2004; Ding et al., 2005; 莫宣学等, 2011)。对比来利山花岗岩及腾冲地块内其他新生代岩浆岩, 其侵位时间与印度-亚洲大陆主碰撞时间相近, 应属于印度和亚洲大陆主碰撞期的岩浆响应。

来利山二长花岗岩在 Pearce 等 (1984) 的 $Y+Nb-Rb$ 判别图解 (图 8a) 中主要集中在同碰撞及后碰撞构造区域, 显示大陆碰撞作用阶段产物; Batchelor 等 (1985) 的 $R1-R2$ 图解涉及 8 个元素, 充分考虑了岩石地球化学总体特征。在该图解 (图 8b) 中, 二长花岗岩均落入同碰撞花岗岩区域。而正长花岗岩因为其高分异特征, 这些判别图解难以确定其形成的构造背景。因此来利山花岗岩是印度-亚洲大陆主碰撞构造背景下, 地壳物质发生熔融形成的。

8 结 论

本次工作通过详细的野外调查和岩石学研究, 结合地球化学、锆石 U-Pb 年代学数据, 探讨了来利山岩体的岩石成因、源区特征, 对岩体形成的地球动力学背景进行约束。

(1) 来利山二长花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 (52.34 ± 0.68) Ma, 核定了该地区二长花岗

岩的年龄, 正长花岗岩与二长花岗岩形成年龄一致, 两者属于同源岩浆作用先后侵位结晶的产物。

(2) 岩石学、地球化学及同位素特征显示二长花岗岩和正长花岗岩源于陆壳物质的熔融, 具同源岩浆演化关系, 为上地壳物质部分熔融形成的 S 型花岗岩。

(3) 来利山花岗岩是印度-亚洲大陆主碰撞构造背景下, 由地壳物质发生部分熔融形成。

致谢: 董美玲、杨洋、王伟清、刘圣强等在野外期间给予的帮助, 中国科学院青藏高原研究所岳雅惠老师在锆石 U-Pb 测年实验中的指导, 中国地质大学 (北京) 科学研究院秦红老师在岩石主量元素测试方面给予的帮助, 在此一并感谢。

注释

① 云南省地矿局区域地质调查大队. 1985.1:5 万腾冲幅、朗蒲寨幅区域地质调查报告。

References

- Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. *Chemical Geology*, 192(1): 59-79.
- Batchelor R A, Bowden P. 1985. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters[J]. *Chemical Geology*, 48(1): 43-55.
- Beck R A, Burbank D W, Sercombe W J, Riley G W, Barndt J K, Berry

- J R, Afzal J, Khan A M, Jurgen H, Metje J, Cheema A, Shafique N A, Lawrence R D, Khan M A. 1995. Stratigraphic evidence for an early collision between northwest India and Asia[J]. *Nature*, 373: 55–58.
- Belousova E A, Griffin W L, O'reilly S Y, Fisher N I. 2002. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 143(5): 602–622.
- Besse J, Courtillot V, Pozzi J P, Westphal M, Zhou Y X. 1984. Palaeomagnetic estimates of crustal shortening in the Himalayan thrusts and Zangbo suture[J]. *Nature*, 311: 621–626.
- Brown G C, Thorpe R S, Webb P C. 1984. The geochemical characteristics of granitoids in contrasting arcs and comments on magma sources[J]. *Journal of the Geological Society*, 141(3): 413–426.
- Chappell B W, White A J R. 1974. Two contrasting granite types[J]. *Pacific Geology*, 8(2): 173–174.
- Chappell B W. 1999. Aluminium saturation in I- and S-type granites and the characterization of fractionated haplogranites[J]. *Lithos*, 46(3): 535–551.
- Chen Jishen. 1987. Discussion on the age division and the selects of isotopic age determination for granitic rock in western Yunnan[J]. *Yunnan Geology*, 6(2): 101–113(in Chinese with English abstract).
- Chen Jishen, Lin Wenxin, Chen Liangzhong. 1991. Series and unit research on tin-bearing granites of Tengchong-Lianghe area[J]. *Yunnan Geology*, 10(3): 241–289(in Chinese with English abstract).
- Chen Xiaocui. 2011. Lailishan tin deposit geological characteristics and relevant granite geochemical characteristics in Lianghe, western Yunnan[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, S1: 565–566(in Chinese).
- Chen X C, Hu R Z, Bi X W, Zhong H, Lan J B, Zhao C H, Zhu J J. 2015. Petrogenesis of metaluminous A-type granitoids in the Tengchong-Lianghe tin belt of southwestern China: Evidences from zircon U-Pb ages and Hf-O isotopes, and whole-rock Sr-Nd isotopes[J]. *Lithos*, 212: 93–110.
- Cong Feng, Lin Shiliang, Tang Hongfeng, Xie Tao, Li Zaihui, Zou Guangfu, Pengzhimin, Liang Ting. 2010. Trace elements and Hf isotope compositions and U-Pb age of igneous zircons from the Triassic granite in Lianghe, western Yunnan[J]. *Acta Geologica Sinica*, 84(8): 1155–1164(in Chinese with English abstract).
- Ding L, Kapp P, Wan X Q. 2005. Paleocene-Eocene record of ophiolite obduction and initial India-Asia collision, south central Tibet[J]. *Tectonics*, 24(3): 1–18.
- Dong Fangliu, Hou Zengqian, Gao Yongfeng, Zeng Pusheng, Jiang Chengxing. 2006. Cenozoic granitoid in Tengchong, western Yunnan: Genesis type and implication for tectonics[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(4): 927–937(in Chinese with English abstract).
- Gao S, Liu X M, Yuan H L, Hattendorf B, Günther D, Chen L, Hu S H. 2002. Determination of forty two major and trace elements in USGS and NIST SRM glasses by laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry[J]. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 26(2): 191–196.
- Gao Yongjuan, Lin Shiliang, Cong Feng, Zou Guangfu, Xie Tao, Tang Fawei, Li Zaihui, Liang Ting. 2014. Zircon U-Pb geochronology, zircon Hf isotope and bulk geochemistry of Paleogene granite in the Tengchong-Lianghe area, western Yunnan[J]. *Acta Geologica Sinica*, 88(1): 63–71(in Chinese with English abstract).
- Griffin W L, Wang X, Jackson S E, Pearson N J, O'Reilly S Y, Xu X S, Zhou X M. 2002. Zircon chemistry and magma mixing, SE China: In-situ analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtan igneous complexes[J]. *Lithos*, 61(3): 237–269.
- Hanchar J M, Van Westrenen W. 2007. Rare earth element behavior in zircon-melt systems[J]. *Elements*, 3(1): 37–42.
- Hoskin P W O, Black L P. 2000. Metamorphic zircon formation by solid-state recrystallization of protolith igneous zircon[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 18(4): 423–439.
- Hoskin P W O, Schaltegger U. 2003. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1): 27–62.
- Jin Canhai, Fan Wenyu, Zhang Hai, Zhang Yu, Shen Zhanwei. 2013. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of syenite granite in the Lailishan tin deposit of western Yunnan Province and its geological significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 87(9): 1211–1220(in Chinese with English abstract).
- Le Maitre R W, Bateman P, Dudek A, Keller J, Lameyre J, Le Bas M.J, Sabine P A, Schmid R, Sorensen H, Streckeisen A, Wooley A R, Zanettin B. 1989. A Classification of Igneous Rocks and Glossary of terms: Recommendations of the IUGS sub-commission on the Systematics of Igneous Rocks[M]. Oxford: Blackwell, 1–193.
- Li Huaikun, Geng Jianzhen, Hao Shuang, Zhang Yongqing, Li Huimin. 2009. Study on zircon U-Pb dating by LA-ICP-MS[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 29(1): 600–601(in Chinese with English abstract).
- Li Huaikun, Zhu Shixing, Xiang Zhenqun, Su Wenbo, Lu Songnian, Zhou Hongying, Geng Jianzhen, Li Sheng, Yang Fengjie. 2010. Zircon U-Pb dating on tuff bed from Gaoyuzhuang Formation in Yanqing, Beijing: Further constraints on the new subdivision of the Mesoproterozoic stratigraphy in the northern North China Craton[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(7): 2131–2140 (in Chinese with English abstract).
- Li Jinglue. 1984. Genesis and geological characteristics of Lailishan tin deposit in Lianghe[J]. *Yunnan Geology*, 3(1): 47–58(in Chinese).
- Li X H, Liang X R, Sun M, Liu Y, Tu X L. 2000. Geochronology and geochemistry of single-grain zircons Simultaneous in-situ analysis of U-Pb age and trace elements by LAM-ICP-MS[J].

- European Journal of Mineralogy, 12(5): 1015–1024.
- Li Zhaonai, Quan Heng, Li Zhitong, Mao Jianren, Li Hansheng, Wu Cailai, Hao Yanli, Zhang Zhaochong, Wang Bixiang, Liu Yan. 2003. Meso–Cenozoic Volcanic Rocks and Their Deep Process in Eastern China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1–357 (in Chinese).
- Li Fengxian, Bai Xinhui, Wan Le, Guan Qingbin, Li Pengchuan. 2015. Zircon LA–ICP–MS U–Pb dating, geochemistry of the Jibuhulengtu garnet–bearing muscovite granitic pluton in Mongolia and its geological significance[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 45(2): 429–440(in Chinese with English abstract).
- Liang xirong, Li Xianhua, Liu Yongkang, Liu Ying, Wang Ganlin. 1999. Simultaneous determination of U–Pb ages and trace elements in single zircon by using LAM–ICP MS[J]. Rock and Mineral Analysis, 18(4): 253–258(in Chinese with English abstract).
- Lin Wenxin. 1987. Analyzing on genesis and geological characteristics of Lailishan charnockite in Lianghe[J]. Yunnan Geology, 6(1): 83–87(in Chinese).
- Lin Qingcha, Cheng Xiongwei, Zhang Yuquan. 2009. Study on geological age and implications of composite granite in western Yunnan[J]. Journal of Anhui University of Science and Technology: Natural Science, 29(3): 7–10(in Chinese with English abstract).
- Lin Jinzhan. 2013. Geological and Geochemical Characteristics of Lailishan granites in Tengchong Tin Belt, Western Yunnan, and Their Relation to Mineralization[D]. Beijing: China University of Geosciences, 1–71(in Chinese with English abstract).
- Lu Fengxiang, Sang Longkang, Wu Jinhua, Wu Jinhua, Liao Qunan. 2002. Petrology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1–399 (in Chinese).
- Luo Junlie. 1991. Granitoids related to western Yunnan (Dianxi) tin deposits and their metallization[J]. Mineral Deposits, 10(1): 81–96 (in Chinese with English abstract).
- Lv Boxi, Wang Zeng, Zhang Nengde, Duan Jianzhong, Gao Ziyang, Shen Ganfu, Pan Changyun, Yao Peng. 1993. Granitoids in the Sanjiang Region (Nujiang–Lancangjiang–Jinshajiang Region) and Their Metallogenic Specialization[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1–328(in Chinese with English abstract).
- Mao Jingwen, Zhang Shilu, Rossi P. 1987. The tin–granites and their relation to mineralization in Tengchong, Yunnan[J]. Acta Petrologica Sinica, 4: 32–43(in Chinese with English abstract).
- Mao Jingwen. 1988. The igneous rock series and the tin polymetallic minerogenetic series in the Tengchong area, Yunnan[J]. Acta Geologica Sinica, 4: 342–352(in Chinese with English abstract).
- Mao Jianren, Su Yuxiang, Chen Sanyuan, Yue Yuanzhen, Zhao Shuliang, Cheng Qifen. 1990. The intermediate–acid intrusive rocks and metallization in the middle–lower reaches of the changjiang river[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1–191 (in Chinese with English abstract).
- Mo Xuanxue, Zhao Zhidan, Deng Jinfu, Dong Guochen, Zhou Su, Guo Tiejing, Zhang Shuangquan, Wang Liangliang. 2003. Response of volcanism to the India–Asia collision[J]. Earth Science Frontiers, 10(3): 135–148(in Chinese with English abstract).
- Mo Xuanxue. 2011. Magmatism and evolution of the Tibetan Plateau[J]. Geological Journal of China Universities, 17(3): 351–367(in Chinese with English abstract).
- Möller A, O’Brien P J, Kennedy A, Kroner A. 2003. Linking growth episodes of zircon and metamorphic textures to zircon chemistry: An example from the ultrahigh–temperature granulites of Rogaland (SW Norway). Geological Society, London, Special Publications, 220: 65–81.
- Mu Baolei, Shao Ji’an, Bian Zhenhui. 1999. Discovery of carbonatite in the Fanshan alkaline igneous complex in Hebei Province, China[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinesis, 35(2): 243–247(in Chinese with English abstract).
- Patriat P, Achache J. 1984. India–Eurasia collision chronology has implications for crustal shortening and driving mechanism of plates[J]. Nature, 311: 615–621.
- Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. Journal of Petrology, 25(4): 956–983.
- Rickwood P C. 1989. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements[J]. Lithos, 22(4): 247–263.
- Rubatto D, Gebauer D. 2000. Use of cathodoluminescence for U–Pb zircon dating by ion microprobe: Some examples from the Western Alps[M]//Cathodoluminescence in Geosciences. Springer Berlin Heidelberg, 373–400.
- Rubatto D. 2002. Zircon trace element geochemistry: Partitioning with garnet and the link between U–Pb ages and metamorphism[J]. Chemical Geology, 184(1): 123–138.
- Rudnick R L, Fountain D M. 1995. Nature and composition of the continental crust: A lower crustal perspective[J]. Reviews of Geophysics, 33(3): 267–309.
- Rudnick R L, Gao S. 2014. Composition of the continental crust[J]. Treatise on Geochemistry(Second Edition), 4: 1–51.
- Shi Lin, Chen Jishen. 1984. The relation between stanniferous granite and platemotion in western Yunnan[J]. Geological Bulletin of China, 3: 71–83(in Chinese with English abstract).
- Streckeisen A, Le Maitre R.W. 1979. A chemical approximation to the modal QAPF classification of igneous rocks[J]. Neues Jahrbuch für Mineralogie, Abhandlungen, 136: 169–206.
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[J]. Geological Society, London, Special Publications, 42: 313–345.

- Wang Dezi, Liu Changshi, Shen Weizhou, Chen Fanrong. 1993. The contrast between Tonglu I- type and Xiangshan S- type clastoporphyritic lava[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 9(1): 44-54(in Chinese with English abstract).
- Wang Chengshai, Li Xianghui, Hu Xiumian. 2003. Age of initial collision of India with Asia: Review and constraints from sediments in southern Tibet[J]. *Acta Geologica Sinica*, 77(1): 16-24(in Chinese with English abstract).
- Wang Q, Zhu D C, Zhao Z D, Guan Q, Zhang X Q, Sui Q L, Hu Z C, Mo X X. 2012. Magmatic zircons from I-, S- and A- type granitoids in Tibet: Trace element characteristics and their application to detrital zircon provenance study[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 53: 59-66.
- Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. 1987. A- type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95(4): 407-419.
- Wilson M. 1989. *Igneous petrogenesis: A globe tectonic approach*[M]. London: Unwin Hyman, 1-464.
- Wu Yuanbao, Chen Daogong, Xia Qunke, Tu Xianglin, Cheng Hao, Yang Xiaozhi. 2003. In-situ trace element analyses and Pb-Pb dating of zircons in granulite from Huangtuling, Dabieshan by LAM-ICP-MS[J]. *Science in China: Series D*, 33(1): 20-28(in Chinese).
- Wu Yuanbao, Zheng Yongfei. 2004. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U-Pb age[J]. *Chinese Science Bulletin*, 49(16): 1589-1604(in Chinese).
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Yang Jinhui, Zheng Yongfei. 2007. Discussions on the petrogenesis of granites[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1217-1238(in Chinese with English abstract).
- Xu Heng. 2007. An approach to geological features and genesis for the Lianghe Sn deposit[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 1-70(in Chinese with English abstract).
- Xu Y G, Yang Q J, Lan J B, Luo Z Y, Huang X L, Shi Y R, Xie L W. 2012. Temporal-spatial distribution and tectonic implications of the batholiths in the Gaoligong-Tengliang-Yingjiang area, western Yunnan: Constraints from zircon U-Pb ages and Hf isotopes[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 53: 151-175.
- Yang Qijun, Xu Yigang, Huang Xiaolong, Luo Zhenyu, Shi Yuruo. 2009. Geochronology and geochemistry of granites in the Tengliang area, western Yunnan: Tectonic implication[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(5): 1092-1104(in Chinese with English abstract).
- Yin A, Harrison T M. 2000. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28(1): 211-280.
- Yunnan Institute of Geological Sciences. 1982. Isotopic age of Guyong tin-bearing granite in Tengchong[J]. *Yunnan Geology*, 1(4): 409-412(in Chinese).
- Zhang Qi, Wang Yan, Pan Guoqiang, Li Chengdong, Jin Weijun. 2008. Sources of granites: Some crucial questions on granite study (4)[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(6): 1193-1204(in Chinese with English abstract).
- Zhang Miaohong, Xu Heng, Zhu Shuzhen, Ran Qisheng. 2010. Study on the characteristics of relationship between granite in the Lianghe tin deposit district and tin mineralization[J]. *West-China Exploration Engineering*, 4: 115-117(in Chinese).
- Zhao Zhenhua, Akimasa M, Shabani M B. 1992. Tetrad effects of rare-earth elements in rare-metal granites[J]. *Geochimica*, 3: 221-233 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Zhenhua, Xiong Xiaolin, Han Xiaodong. 1999. REE tetrad effect granite formation mechanism: A case study of Qianlishan and Baerzhe granite[J]. *Science in China: Series D*, 29(4): 331-338(in Chinese).
- Zhao Zhenhua. 2010. Trace element geochemistry of accessory minerals and its applications in petrogenesis and metallogenesis[J]. *Earth Science Frontiers*, 17(1): 267-286(in Chinese with English abstract).
- Zhong Dalai. 1998. Paleotethys orogenic belt in western Yunnan and Sichuan[M]. Beijing: Science Press, 1-232(in Chinese).
- Zhu Dicheng, Pan Guitang, Mo Xuanxue, Duan Liping, Liao Zhongli. 2004. The age of collision between India and Eurasia[J]. *Advance in Earth Sciences*, 19(4): 564-571(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈吉琛. 1987. 滇西花岗岩类时代划分及同位素年龄值选用的讨论[J]. *云南地质*, 6(2): 101-113.
- 陈吉琛, 林文信, 陈良忠. 1991. 腾冲—梁河地区含锡花岗岩序列—单元研究[J]. *云南地质*, 10(3): 241-289.
- 陈晓翠. 2011. 滇西梁河来利山锡矿床地质及其有关的花岗岩地球化学特征[J]. *矿物学报*, S1: 565-566.
- 丛峰, 林仕良, 唐红峰, 谢韬, 李再会, 邹光富, 彭智敏, 梁婷. 2010. 滇西梁河三叠纪花岗岩的锆石微量元素、U-Pb 和 Hf 同位素组成[J]. *地质学报*, 84(8): 1155-1164.
- 董方浏, 侯增谦, 高永丰, 曾普胜, 蒋成兴. 2006. 滇西腾冲新生代花岗岩: 成因类型与构造意义[J]. *岩石学报*, 22(4): 927-937.
- 高永娟, 林仕良, 丛峰, 邹光富, 谢韬, 唐发伟, 李再会, 梁婷. 2014. 滇西腾冲—梁河古近纪花岗岩锆石 U-Pb 定年、Hf 同位素及地球化学[J]. *地质学报*, 88(1): 63-71.
- 金灿海, 范文玉, 张海, 张巧, 沈战武. 2013. 滇西来利山锡矿正长花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J]. *地质学报*, 87(9): 1211-1220.
- 李怀坤, 耿建珍, 郝爽, 张永清, 李惠民. 2009. 用激光烧蚀多接收器等离子体质谱仪(LA-MC-ICPMS)测定锆石 U-Pb 同位素年龄的研究[J]. *矿物学报*, 29(1): 600-601.
- 李怀坤, 朱士兴, 相振群, 苏文博, 陆松年, 周红英, 耿建珍, 李生, 杨锋杰. 2010. 北京延庆高于庄组凝灰岩的锆石 U-Pb 定年研究及其对华北北部中元古界划分新方案的进一步约束[J]. *岩石学报*,

- 26(7): 2131-2140.
- 李景略. 1984. 梁河来利山锡矿床地质特征及其成因[J]. 云南地质, 3(1): 47-58.
- 李兆鼎, 权恒, 李之彤, 毛建仁, 李汉声, 吴才来, 郝艳丽, 张招崇, 王碧香, 刘焰. 2003. 中国东部中、新生代火成岩及其深部过程[M]. 北京: 地质出版社, 1-357.
- 李凤宪, 白新会, 万乐, 关庆彬, 李鹏川. 2015. 内蒙苏尼特右旗吉布胡楞土岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年、地球化学特征及地质意义[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 45(2): 429-440.
- 梁细荣, 李献华, 刘永康, 刘颖, 王甘霖. 1999. 激光探针等离子体质谱同时测定锆石微区铀-铅年龄及微量元素[J]. 岩矿测试, 18(4): 253-258.
- 林文信. 1987. 梁河来利山紫苏辉石花岗岩的地质特征及成因浅析[J]. 云南地质, 6(1): 83-87.
- 林清茶, 程雄卫, 张玉泉. 2009. 滇西复式花岗岩体的时代及地质意义研究[J]. 安徽理工大学学报: 自然科学版, 29(3): 7-10.
- 林进展. 2013. 滇西腾冲锡矿带来利山花岗岩地质地球化学特征与成矿关系分析[D]. 北京: 中国地质大学, 1-71.
- 路凤香, 桑隆康, 邬金华, 廖群安. 2002. 岩石学[M]. 北京: 地质出版社, 1-399.
- 罗君烈. 1991. 滇西锡矿的花岗岩类及其成矿作用[J]. 矿床地质, 10(1): 81-96.
- 吕伯西, 王增, 张能德, 段建中, 高子英, 沈敢富, 潘长云, 姚鹏. 1993. 三江地区花岗岩类及其成矿属性[M]. 北京: 地质出版社, 1-328.
- 毛景文, 张士鲁, Ph Rossi. 1987. 云南腾冲地区含锡花岗岩及其与成矿关系[J]. 岩石学报, 4: 32-43.
- 毛景文. 1988. 云南腾冲地区火成岩系列和锡多金属矿床成矿系列的初步研究[J]. 地质学报, 4: 342-352.
- 毛建仁, 苏郁香, 陈三元, 岳元珍, 赵曙良, 程啟芬. 1990. 长江中下游酸性侵入岩与成矿[M]. 北京: 地质出版社, 1-191.
- 莫宣学, 赵志丹, 邓晋福, 董国臣, 周肃, 郭铁鹰, 张双全, 王亮亮. 2003. 印度-亚洲大陆主碰撞过程的火山作用响应[J]. 地学前缘, 10(3): 135-148.
- 莫宣学. 2011. 岩浆作用与青藏高原演化[J]. 高校地质学报, 17(3): 351-367.
- 牟保磊, 邵吉安, 边振辉. 1999. 矾山碱性杂岩体中发现碳酸岩[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 35(2): 243-247.
- 施林, 陈吉琛. 1984. 滇西含锡花岗岩与板块活动的关系[J]. 地质通报, 3: 71-83.
- 王德滋, 刘昌实, 沈渭洲, 陈繁荣. 1993. 桐庐I型和相山S型两类碎斑熔岩对比[J]. 岩石学报, 9(1): 44-54.
- 王成善, 李祥辉, 胡修棉. 2003. 再论印度-亚洲大陆碰撞的启动时间[J]. 地质学报, 77(1): 16-24.
- 吴元保, 陈道公, 夏群科, 涂湘林, 程昊, 杨晓志. 2003. 大别山黄土岭麻粒岩中锆石 LA-ICP-MS 微区微量元素分析和 Pb-Pb 定年[J]. 中国科学: D 辑, 33(1): 20-28.
- 吴元保, 郑永飞. 2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约[J]. 科学通报, 49(16): 1589-1604.
- 吴福元, 李献华, 杨进辉, 郑永飞. 2007. 花岗岩成因研究的若干问题[J]. 岩石学报, 23(6): 1217-1238.
- 徐恒. 2007. 梁河锡矿床地质特征及成因探讨[D]. 昆明: 昆明理工大学, 1-70.
- 杨启军, 徐义刚, 黄小龙, 罗震宇, 石玉若. 2009. 滇西腾冲-梁河地区花岗岩的年代学、地球化学及其构造意义[J]. 岩石学报, 25(5): 1092-1104.
- 云南省地质科学研究所. 1982. 腾冲古永含锡花岗岩的同位素年龄[J]. 云南地质, 1(4): 409-412.
- 张旗, 王焰, 潘国强, 李承东, 金惟俊. 2008. 花岗岩源岩问题——关于花岗岩研究的思考之四[J]. 岩石学报, 24(6): 1193-1204.
- 张苗红, 徐恒, 朱淑楨, 冉启胜. 2010. 梁河锡矿区中的花岗岩与锡的成矿关系特征研究[J]. 西部探矿工程, 4: 115-117.
- 赵振华, 增田彰正, M.B.夏巴尼. 1992. 稀有金属花岗岩的稀土元素四分组效应[J]. 地球化学, 3: 221-233.
- 赵振华, 熊小林, 韩小东. 1999. 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, 29(4): 331-338.
- 赵振华. 2010. 副矿物微量元素地球化学特征在成岩成矿作用研究中的应用[J]. 地学前缘, 17(1): 267-286.
- 钟大赉. 1998. 滇川西部古特提斯造山带[M]. 北京: 科学出版社, 1-232.
- 朱弟成, 潘桂棠, 莫宣学, 段丽萍, 廖忠礼. 2004. 印度大陆和欧亚大陆的碰撞时代[J]. 地球科学进展, 19(4): 564-571.