

doi: 10.12029/gc20200310

刘军平, 孙柏东, 崔晓庄, 熊波, 宋冬虎, 白春东, 张坤, 杨仕潘. 2020. 云南安宁地区石虎山花岗岩年代学、地球化学特征和锆石 Hf 同位素组成及其成因[J]. 中国地质, 47(3): 693–708.

Liu Junping, Sun Baidong, Cui Xiaozhuang, Xiong Bo, Song Donghu, Bai Chundong, Zhang Kun, Yang Shipan. 2020. Geochronology, geochemistry, zircon Hf isotopic composition and genesis of Shihushan granite in Anning, Yunnan Province[J]. Geology in China, 47(3): 693–708(in Chinese with English abstract).

云南安宁地区石虎山花岗岩年代学、地球化学特征和 锆石 Hf 同位素组成及其成因

刘军平¹, 孙柏东¹, 崔晓庄², 熊波¹, 宋冬虎¹, 白春东³, 张坤¹, 杨仕潘¹

(1. 云南省地质调查院, 云南 昆明 650216; 2. 中国地质调查局成都地质调查中心, 四川 成都 610081; 3. 河北省区域地质调查院, 河北 廊坊 065000)

摘要: 石虎山花岗岩岩体位于安宁市德滋村附近, 本文对该岩体开展了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年、岩石地球化学、锆石 Hf 同位素组成研究。结果获得(616±20) Ma 的岩浆结晶年龄和(839±17) Ma、(766±15) Ma、(705.5±9.4) Ma 的继承性年龄, 说明岩体形成于新元古代埃迪卡拉纪; 其中(839±17) Ma、(766±15) Ma、(705.5±9.4) Ma 的继承性年龄组合可能是 Rodinia 超大陆裂解构造过程的记录, 839 Ma、616 Ma 可能是 Rodinia 超大陆在扬子板块西缘开始裂解与最终裂解时限。花岗岩主量、微量元素特征显示, 其产生于伸展环境的高硅、过铝、高钾的 A 型花岗岩; 锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值均小于 0, 在 $t-t(\text{Ma})$ 和 $t-(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})$ 图上, 所有样品点均落在上地壳演化线之上, 二阶段模式年龄变化范围为 1.77~2.31 Ga, 结合 Nb/Y—Rb/Y 图解, 表明成岩物质主要来源于古元古代古老下地壳页岩 60% 部分熔融。

关键词: 锆石 U-Pb 测年; A 型花岗岩; Rodinia 超大陆; 地质调查工程; 安宁; 云南

中图分类号: P588.12; P597

文献标志码: A

文章编号: 1000-3657(2020)03-0693-16

Geochronology, geochemistry, zircon Hf isotopic composition and genesis of Shihushan granite in Anning, Yunnan Province

LIU Junping¹, SUN Baidong¹, CUI Xiaozhuang², XIONG Bo¹, SONG Donghu¹, BAI Chundong³,
ZHANG Kun¹, YANG Shipan¹

(1. Yunnan Institute of Geological Survey, Kunming 650216, Yunnan, China; 2. Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu 610081, Sichuan, China; 3. Hebei Institute of Geological Survey, Langfang 065000, Hebei, China)

Abstract: The LA-ICP-MS zircon U-Pb age, rock geochemistry and zircon Hf isotopic composition of the Shihushan granite

收稿日期: 2019-04-20 改回日期: 2020-04-28

基金项目: 云南省国土资源厅基金项目“云南省 1:5 万撒马基幅、因民幅、贵城幅、舒姑幅区域地质调查(D201905)”及中国地质调查局项目“云南 1:5 万二街、易门、鸣矣河、上浦贝幅区域地质调查”(DD20160017)、“云南区域地质调查片区总结与服务产品开发”(121201102000150012-02)共同资助。

作者简介: 刘军平, 男, 1983 年生, 硕士, 高级工程师, 从事区域地质与构造地质调查研究; E-mail: 271090834@qq.com。

通讯作者: 孙柏东, 男, 1986 年生, 硕士, 工程师, 主要从事区域地质与构造地质调查研究; E-mail: sunbd1986@163.com。

located in Dezi Village of Anning area were investigated in this study. The zircon U-Pb dating yielded a magmatic crystallization age of (616 ± 20) Ma and inherited ages of (839 ± 17) Ma, (766 ± 15) Ma and (705.5 ± 9.4) Ma, indicating pluton emplacement in Neoproterozoic Ediacaran Stage. The authors hold that the magmatic crystallization age of (616 ± 20) Ma indicates the pluton emplacement in Neoproterozoic Ediacaran Stage, and the assemblage of inherited ages of (839 ± 17) Ma, (766 ± 15) Ma and (705.5 ± 9.4) Ma represents the splitting of the Rodinia supercontinent. The age of (839 ± 17) Ma may represent the initiation of the breakup of the Rodinia supercontinent, while the age of (616 ± 20) Ma may represent the final stage of the breakup event. The major and trace elements of alkali feldspar granite show the characteristics of A-type granite with high SiO_2 - K_2O - Al_2O_3 content, indicating an extensional environment. Zircons from samples have low $\epsilon\text{Hf}(t)$ value (<0). All samples are plotted on the upper crustal evolution area on $t-t$ (Ma) and $t-(176\text{Hf}/177\text{Hf})$ diagrams. The two-stage Hf model ages range from 1.77 Ga to 2.31 Ga. According to the Nb/Y-Rb/Y diagram, the petrogenic material mainly originated from the 60% melting of the shale of the Paleoproterozoic lower crust.

Key words: zircon U-Pb dating; A-type granite; Rodinia supercontinent; geological survey engineering; Anning; Yunnan

About the first author: LIU Junping, male, born in 1983, senior engineer, master, engages in regional geological and structural geological investigation and research; E-mail:271090834@qq.com.

Fund support: Supporting by Project of 1:50000 Regional Geological Survey of Samaki, Yinmin, Guicheng and Shugu Sheets in Yunnan Province by Land and Resources Department of Yunnan Province (No. D201905); Project of 1:50000 Regional Geological Survey of Erjie, Yimen, Mingyihe and Shangpubei Sheets in Yunnan Province (No. DD20160017) and Regional Geological Survey Area Summary and Service Product Development in Yunnan Province by China Geological Survey (No. 121201102000150012-02)

1 引 言

扬子地块西缘地区新元古代构造-岩浆活动较强烈,形成大量以中酸性火成岩为主的侵入岩浆岩群。这些构造-岩浆岩体的形成时代主要集中在740~830 Ma,主要侵位于中新元古界扬子型变质基底岩系中,并多被南华系或震旦系及少量被中生代地层不整合覆盖。由于其形成构造环境对研究扬子地块大地构造格局和形成演化以及Rodinia超大陆的恢复重建具有重要意义而受到广泛关注;大量对新元古代岩浆岩成因及热源研究认为,扬子板块周缘经历了早期大洋板片俯冲作用930~1160 Ma和晚期大规模陆缘裂解635~830 Ma(李献华等,2001;凌文黎等,2006;李献华等,2008;裴先治等,2009;刘树文等,2009;夏林圻等,2016;刘军平等,2017)。深入了解这些新元古代岩浆岩的成因和形成的构造环境对研究扬子地块大地构造格架和形成演化及其在Rodinia超大陆的聚合-裂解演化中的作用具有重要的科学意义(李献华等,2008)。

目前学术界对这些岩浆岩的成因和形成的构造背景存在3种不同的认识(李献华等,2008;张沛等,2008;谢士稳等,2009):一种观点认为与地幔柱有关,这些岩浆岩是与Rodinia超大陆裂解有关的地幔柱活动引发岩石圈地幔和下地壳熔融的产物;另一种观点认为与岛弧有关,早期(830~820 Ma)岩浆

岩为弧-陆碰撞造山带拉张垮塌熔融产物,而晚期740~780 Ma为Rodinia超大陆裂解过程中裂谷岩浆活动产物;第三种观点介于上述两种观点之间,认为扬子地块周缘新元古代岩浆活动是早期弧-陆碰撞、晚期伸展垮塌和大陆裂谷再造产物(颜丹平等,2002;凌文黎等,2006),认为扬子和华夏地块的造山运动持续到约820 Ma,大规模的820~830 Ma花岗岩形成于造山带垮塌阶段,而随后的岩浆活动形成于岩石圈伸展-裂谷阶段(Zheng et al.,2006;Wu et al.,2006)。

王梦玺等(2006)对扬子北缘随枣盆地中周庵超镁铁质岩体(637 ± 4) Ma进行了锆石Hf-O同位素分析,认为Rodinia超大陆在扬子板块北缘的最终裂解时限为约635 Ma,扬子北缘俯冲-伸展的转换时间可能在635~740 Ma的观点(颜丹平等,2002;王梦玺等,2006)。本文对扬子地块西缘云南安宁地区出露的石虎山花岗岩进行了锆石U-Pb年代学、岩石地球化学和Hf同位素分析,并探讨其侵位时代、岩石成因、物质来源和构造背景,为Rodinia超大陆裂解时限提供新证据,为扬子地块西缘新元古代的构造-岩浆活动提供新的约束。

研究区位于滇中安宁地区,属扬子陆块区之上扬子古陆块的康滇基底断隆带,地层区划隶属华南地层大区扬子地层区康滇地层分区之昆明地层小区(图1)。研究区出露地层有中元古界昆阳群黑山

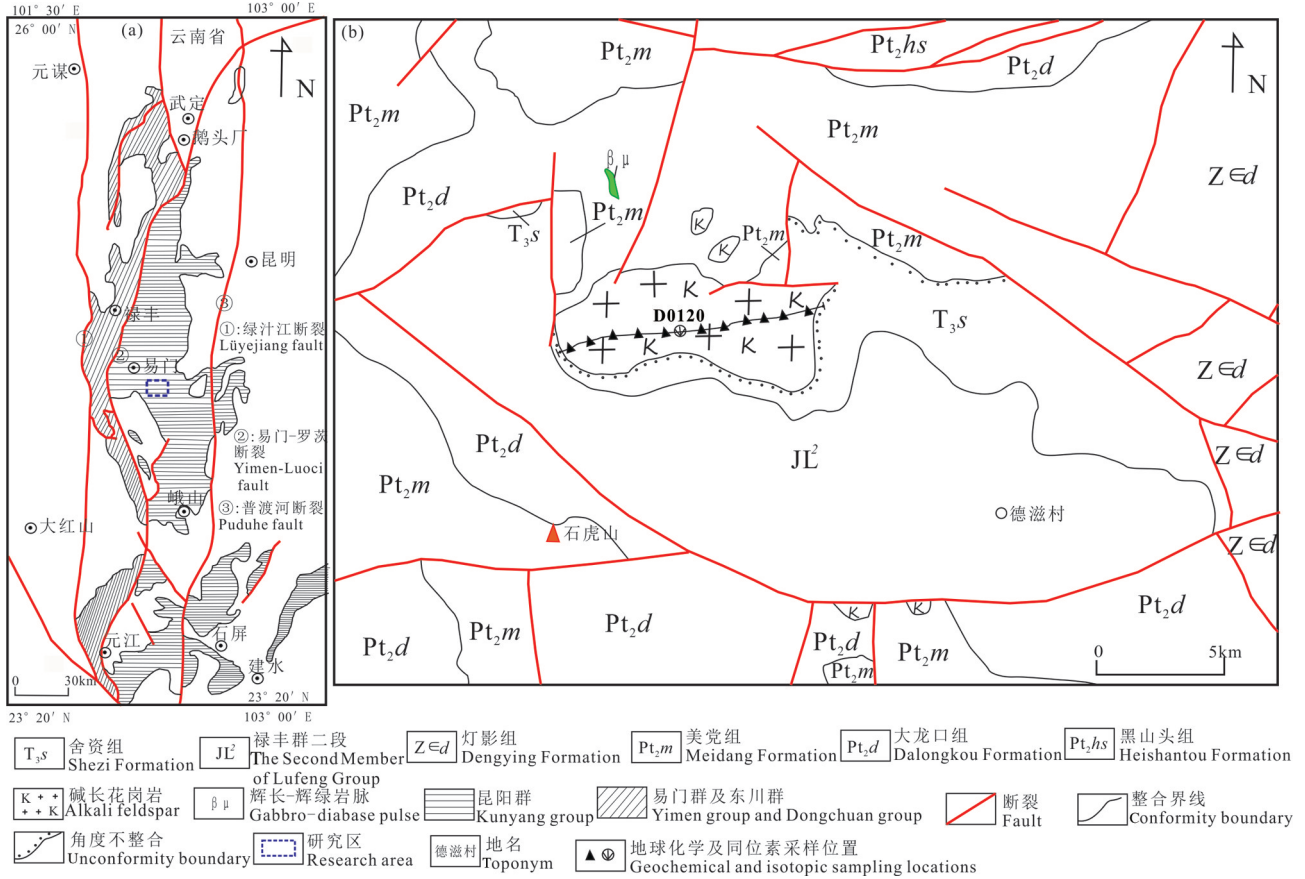


图1 研究区大地构造位置(a)及样品采集位置图(b)
Fig.1 Geotectonic location in study area(a)and sampling location diagram(b)

头组、中元古界昆阳群大龙口组、中元古界昆阳群美党组、新元古界灯影组、三叠系舍资组及侏罗系禄丰群(图1)。中元古界昆阳群为一套浅变质的陆源碎屑-碳酸盐岩及少量火山岩,新元古界灯影组为一套含磷矿层的碳酸盐岩建造,三叠系舍资组为一套湖泊砂岩-粉砂岩组合,侏罗系禄丰群为一套潮湿-干旱气候环境的红色碎屑岩建造;区内早期断裂为北西-南东向,晚期断裂为北北东向及近南北向,岩浆活动主要以石虎山花岗岩为主,少量晚期辉长-辉绿岩脉发育。

2 样品采集及测试

2.1 样品采样

本次研究的样品采自易门-罗茨断裂以东,地点在安宁市八街镇德滋村(图1),地理坐标为:102°20'02"E, 24°35'15"N。在八街镇德滋村地区,石虎山花岗岩岩体呈岩株状产出,出露面积约5 km²,岩性以碱长花岗岩为主,少量粗中粒似斑状黑云二长

花岗岩,岩石结构上由细粒向粗粒含斑演化,变化的有序性和单向性明显,且在空间上紧密共生,形成时间、成分及结构变化上表现出清楚的亲缘和演化关系,说明它们是同一岩浆热事件的产物。野外两者为渐变过渡接触,整个岩体由中心至边部矿物颗粒由中粗粒变为中细粒;岩体侵入于昆阳群大龙口组碳酸盐岩及美党组碎屑岩中,围岩普遍角岩化,南、南东面被三叠系舍资组(T₃s)角度不整合覆盖(图1);岩石受后期构造影响仅发生碎裂岩化。因黑云二长花岗岩风化较强并未采集相应地化样品,仅为薄片样;本次采集较新鲜的碱长花岗岩(D0120)为主要的研究对象,岩石主要由钾长石(65%~70%)、钠长石(2%~3%)和石英(30%~35%)组成,少量黑云母(0~2%)。钾长石呈半自形-他形粒状,条纹发育,部分颗粒可见裂纹,粒径一般为0.56~1.4 mm,均匀分布。石英呈他形粒状,干净透亮,具波状消光,粒径一般为0.4~1.4 mm,与钾长石镶嵌分布。岩石受构造作用,裂隙发育,裂隙内充

填绢-白云母、铁质物,穿插分布。此外,岩石中还可可见磁铁矿、锆石、钠闪石,零星分布;本次对岩石后期的碎裂岩化、波状消光及充填的铁质物进行了相关处理,对本文获得的岩石地球化学数据准确性并无影响。样品镜下特征见图2。

粗中粒似斑状黑云二长花岗岩:肉红色,风化后呈浅灰-灰白色,粗中粒似斑状花岗结构,块状构造,岩石由钾长石(20%~40%)、斜长石(20%~35%)、石英(20%~40%)组成,含少量黑云母(5%~15%)、白云母(≤ 1);副矿物为锆石、磷灰石、金红石。似斑晶主要为微斜微纹长石(10%~15%),粒径一般在7~15 mm,最大可达3.5 cm,分布稀疏不均,半自形板状;基质以中粒($d > 2 \sim 4.5$ mm)花岗结构为主。斜长石多为更长石($An_{20\pm}$),自形、半自形板柱状;钾长石的自形程度相对较差,多为他形、半自形板状。中粒钾长石常有细粒半自形斜长石等包晶,包晶多具净边结构。黑云母Ng褐黑,Np黄白。蚀变特征:多数片状黑云母已绿泥石化,长石具轻微黏土化、绢云母化。

2.2 样品测试

样品D0121新鲜色为浅灰-浅肉红色,岩性为碱长花岗岩,块状构造;锆石分选在南京宏创地矿完成,将样品先经手工粉碎,后按常规重力及电磁法浮选出锆石颗粒,最后在实体镜下挑选出纯正锆石约250余粒。锆石多为无色透明,个别呈浅黄色,粒状、短柱状、碎粒状,金刚光泽,透明,表面多具磨蚀特征,锆石长度一般为70~150 μm ,少数达180 μm 。

选择晶型较好,无裂隙的锆石颗粒黏贴在环氧树脂表面制成锆石样品靶,打磨样品靶,使锆石的中心部位暴露出来,然后进行抛光。对锆石进行反射光、透射光显微照相和阴极发光(CL)图像分析,最后根据反射光、透射光及锆石CL图像选择代表性的锆石颗粒和区域进行U-Pb测年。

U-Pb同位素定年在湖北省地质实验室测试中心岩石矿物研究室利用LA-ICP-MS分析完成。测试仪器采用的是由美国Coherent Inc公司生产的GeoLasPro全自动版193 nm ArF准分子激光剥蚀系统(LA)和美国Agilent公司生产的7700X型电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)联用构成的激光剥蚀电感耦合等离子质谱分析系统(LA-ICP-MS)。另外激光剥蚀系统配置了由澳大利亚国立大学开发

研制的匀化器,由10根长度不同的细PV管组成,激光剥蚀产生的细小粉末样品通过匀化器装置后,因通过长短不同的管道所需的时间略有不同而使样品脉冲信号得到平滑,从而能有效降低激光脉冲剥蚀样品而产生的信号波动(Hoskin et al., 2003)。锆石微量元素含量利用NIST610作为外标,Si作为内标进行定量计算。锆石U-Pb定年分析采用锆石标准年龄物质91500作为外标进行同位素分馏校正,每分析6~8个样品点分析2次91500。样品测试时,背景信号采集10 s,样品剥蚀40 s,管路吹扫10 s,信号采集时间总共为60 s。样品的同位素比值和元素含量采用ICPMSDataCal 9.0进行处理分析,加权平均年龄的计算及锆石年龄谐和图的绘制采用Isoplot3.0 (Ludwig, 2003)来完成。采用年龄为 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄,其加权平均值的误差为 2σ , $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ (和 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$)平均年龄误差为95%置信度。

锆石Hf同位素分析在武汉上谱分析科技有限责任公司完成。锆石原位Hf同位素测定由激光剥蚀多接收器电感耦合等离子体质谱仪完成,激光进样系统为NWR213nm固体激光器,分析系统为多接收等离子体质谱仪(NEPTUNE plus),激光剥蚀的斑束直径一般为55 μm ,能量密度为7~8 J/cm^2 ,频率为10 Hz, ^{176}Lu 和 ^{176}Yb 对 ^{176}Hf 的同质异位素干扰通过监测 ^{175}Lu 和 ^{172}Yb 信号强度,采用 $^{175}\text{Lu}/^{176}\text{Lu}=0.02655$ 和 $^{176}\text{Yb}/^{172}\text{Yb}=0.5886$ 进行校正,以标准锆石91500、GJ-1与样品锆石交叉分析对仪器漂移进行外部监控。分析结果所获得标准样品91500和GJ-1的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值分别为 0.282283 ± 0.000041 ($n=4$, 2σ)和 0.282019 ± 0.000029 ($n=4$, 2σ),在误差范围内与参考值吻合(吴福元, 2007)。计算 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 时,球粒陨石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为0.282772, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值为0.0332,单阶段Hf模式年龄(T_{DM1})计算时,亏损地幔的值采用 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}=0.28325$, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}=0.0384$,两阶段Hf模式年龄(T_{DM2})计算时,平均地壳的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值为0.015(吴福元, 2007; 谢士稳, 2009)。

选择11件岩石样品分别进行主量元素和微量元素分析(表1)。样品磨碎至200目后,在中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室进行主量和微量元素分析测试。主量元素使

表1 石虎山岩体碱长花岗岩的主量元素(%)和微量元素(10^{-6})分析结果
 Table 1 Major (%) and trace element (10^{-6}) compositions of the Shihushan granite

样品编号	D0120-1-1	D0120-1-2	D0120-1-3	D0120-1-4	D0120-1-5	D0120-2-1	D0120-2-2	D0120-2-3	D0120-2-4	D0120-2-5	D0120-2-6
SiO ₂	74.76	75.83	75.57	75.09	75.55	71.54	73.31	72.95	72.37	72.21	70.22
TiO ₂	0.10	0.12	0.10	0.09	0.12	0.25	0.27	0.23	0.24	0.25	0.28
Al ₂ O ₃	12.53	12.47	12.36	12.69	12.37	14.23	13.66	14.17	14.45	14.29	14.34
Fe ₂ O ₃	2.43	1.75	1.96	2.15	2.07	1.61	1.76	1.35	1.77	1.95	3.82
FeO	0.39	0.32	0.29	0.32	0.36	0.43	0.39	0.39	0.29	0.32	0.57
MnO	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
MgO	0.20	0.31	0.22	0.21	0.21	0.67	0.52	0.48	0.49	0.55	0.68
CaO	0.21	0.19	0.18	0.28	0.32	0.49	0.27	0.19	0.17	0.14	0.14
Na ₂ O	3.29	2.76	3.10	3.10	3.26	1.53	1.86	1.78	1.76	1.38	0.88
K ₂ O	5.73	5.41	5.67	5.63	5.35	7.03	6.44	6.82	6.97	7.32	6.88
P ₂ O ₅	0.04	0.03	0.03	0.04	0.05	0.05	0.06	0.05	0.04	0.04	0.07
烧失量	0.33	0.69	0.30	0.33	0.26	1.91	1.26	1.38	1.21	1.32	1.91
总量	100.03	99.90	99.80	99.93	99.93	99.75	99.81	99.81	99.79	99.77	99.81
ANOR	2.23	2.26	1.96	3.33	3.87	4.81	2.46	1.44	1.37	1.01	0.53
Mg [#]	21	34	26	23	24	53	45	49	45	46	34
Rb	104.4	105.4	106.4	107.4	108.4	110.4	111.4	112.4	113.4	114.4	115.4
Ba	409.5	410.5	411.5	412.5	413.5	415.5	416.5	417.5	418.5	419.5	420.5
Th	8.90	9.90	10.90	11.90	12.90	14.90	15.90	16.90	17.90	18.90	19.90
U	1.11	2.11	3.11	4.11	5.11	7.11	8.11	9.11	10.11	11.11	12.11
Nb	10.63	11.63	12.63	13.63	14.63	16.63	17.63	18.63	19.63	20.63	21.63
Zr	254.1	255.1	256.1	257.1	258.1	260.1	261.1	262.1	263.1	264.1	265.1
Hf	9.4	10.4	11.4	12.4	13.4	15.4	16.4	17.4	18.4	19.4	20.4
Sr	72	73	69	65	76	158	168.6	151.3	147.1	147.6	147.4
Pb	6.48	7.48	8.48	9.48	10.48	12.48	13.48	14.48	15.48	16.48	17.48
La	21.5	27.7	22.7	20.0	31.3	74.48	80.72	68.43	68.23	67.69	77.23
Ce	45.1	55.6	49	42.0	64.3	138.90	149.6	134	129.5	130.4	139.5
Pr	6.05	7.9	6.4	5.87	8.9	16.98	17	16.07	15.37	15.22	16.01
Nd	22.6	29.9	23.9	22.1	33.0	59.61	59.07	56.57	53.97	53.02	55.15
Sm	5.46	7.07	5.71	5.43	7.63	11.48	10.36	10.6	10.09	9.6	9.783
Eu	0.64	0.92	0.69	0.66	0.72	1.92	1.904	1.813	1.901	1.955	1.93
Gd	4.36	5.55	4.42	4.23	5.86	9.66	8.899	8.865	8.41	8.315	8.47
Td	0.79	0.99	0.78	0.79	1.02	1.49	1.303	1.371	1.301	1.26	1.34
Dy	4.86	5.98	4.73	5.07	5.52	8.17	7.064	7.526	7.204	6.925	7.68
Ho	0.96	1.10	0.88	0.94	0.92	1.46	1.283	1.353	1.304	1.261	1.42
Er	2.78	3.29	2.67	2.88	2.68	4.30	3.887	4.049	3.849	3.727	4.27
Tm	0.53	0.55	0.46	0.50	0.43	0.68	0.623	0.624	0.613	0.573	0.687
Yb	3.32	3.68	3.11	3.41	2.74	4.39	3.994	3.949	3.844	3.54	4.33
Lu	0.57	0.61	0.53	0.58	0.47	0.73	0.674	0.669	0.636	0.58	0.71
Y	29.3	35.0	27.9	29.9	30.7	48.7	40.93	44.91	42.74	40.27	45.4
ΣREE	148.8	185.7	153.9	144.3	196.1	383.0	387.3	360.8	349.0	344.3	373.9
δEu	0.39	0.43	0.41	0.41	0.32	0.54	0.59	0.56	0.61	0.65	0.63
(La/Yb) _N	4.37	5.07	4.92	3.96	7.70	11.45	13.63	11.68	11.97	12.89	12.02

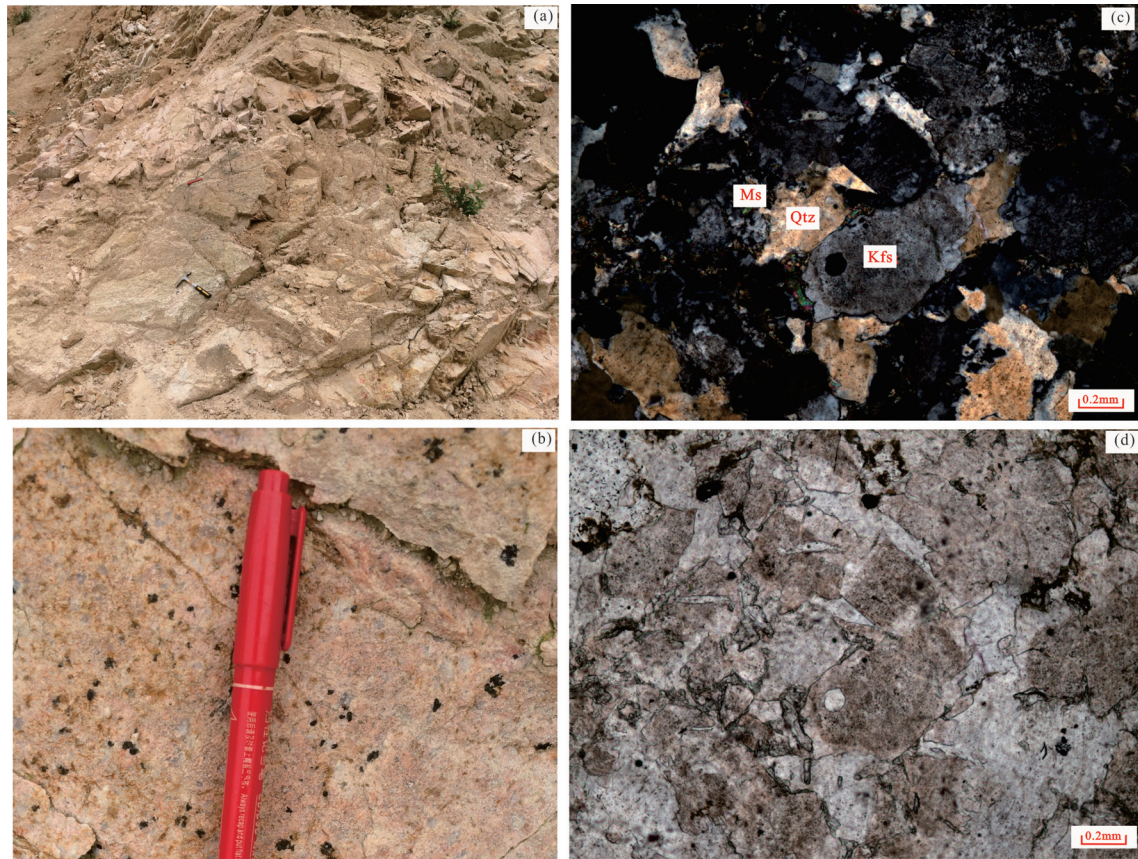


图2 碱长花岗岩野外(a,b)及典型结构显微(c,正交偏光;d,单偏光)照片
Kfs—钾长石;Qtz—石英;Ms—白云母

Fig.2 Outcrop photos (a,b)and micrographs showing typical textures(c, crossed nicols;d, plainlight)of the alkali-feldspar granite
Kfs—K—Feldspar;Qtz—Quartz;Ms—Muscovite

用X-射线荧光光谱仪(XRF-1500)法测试。用0.6 g 样品和6 g 四硼酸锂制成的玻璃片在ShimadzuXRF-1500上测定氧化物的质量分数值,精度优于2%~3%。微量元素及稀土元素利用酸溶法制备样品,使用ICP-MS(Element II)测试,分析精度(按照GSR-1和GSR-2国家标准):当元素质量分数值大于 10×10^{-6} 时,精度优于5%,当质量分数值小于 10×10^{-6} 时,精度优于10%。

3 岩石地球化学特征

3.1 主量元素

石虎山岩体主体岩性为碱长花岗岩,岩石主量元素含量见表1。

碱长花岗岩样品 SiO_2 含量70.22%~75.09%,平均73.58%,高于中国花岗岩平均含量71.63%(黎彤等,1998); Al_2O_3 含量为12.36%~14.45%,平均13.41%; MgO =0.20%~0.68%,平均0.41%, $\text{Mg}^\#$ =21~

49,平均36; K_2O =5.35%~7.32%,平均6.29%;铝饱和指数 A/CNK =1.04~1.57,平均1.24,大于1.1,属强过铝花岗岩; $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ =1.64~7.81,平均3.45,具有富钾特征;全碱含量 alk =7.76%~9.02%,平均8.54%;在ANOR-Q'分类图解(图3)中11件样品点落入碱长花岗岩区域,岩体中黑云母二长花岗岩因风化强未采集样品分析,11件样品定名与镜下鉴定成果无差别;在 A/CNK - A/NK 图解(图4a)中,样品点均落入过铝质区;在C.I.P.W.标准矿物组合中普遍存在刚玉分子;在 SiO_2 - K_2O 图解中(图4b),由于样品点 SiO_2 含量偏高,样品点投到钾玄岩系列区域。总体上,石虎山岩体主体岩性显示出相对富钾的特征。

3.2 稀土元素

石虎山岩体样品稀土元素含量如表1所示。

石虎山岩体岩石样品稀土元素总量为 148.8×10^{-6} ~ 387.3×10^{-6} ,含量较高且差异较大。配分曲线

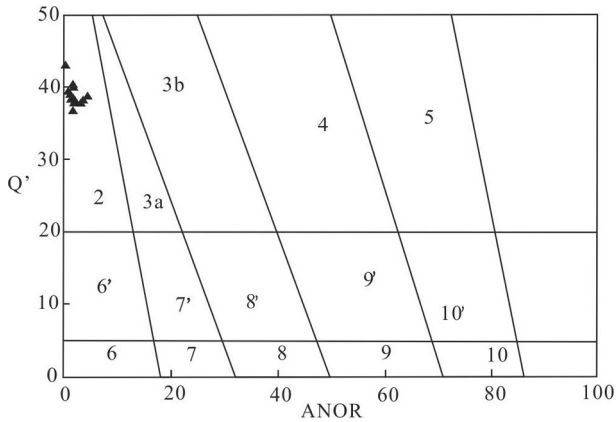


图3 石虎山花岗岩类 Q'-ANOR 图解(据 Streckeisen and Le Maitre, 1979)

2—碱长花岗岩;3a—正长花岗岩;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—石英正长岩;8—石英二长岩;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 Q'-ANOR diagram of the Shihushan granite(after Streckeisen and Le Maitre, 1979)

2-Alkali-feldspar granite;3a-Syen granite;3b-Monzonitic granite; 4-Granodiorite; 5-Yingyun diorite;6'-Quartz alkali long syenite 7'-Quartz syenite; 8'-Quartz monzonite; 9'-Quartz diorite Quartz two long gabbro;10'-Quartz diorite, quartz gabbro, quartz plagioclase; 6-alkali syenite; 7-Syenite; 8-Monzonite; 9-Two long Diorite, Erchang gabbro;10-Diorite, gabbro, plagioclase

呈右倾的“L”型(图 5a)展布。LREE/HREE=0.85~6.17, 平均 4.08, 富集轻稀土元素;(La/Yb)_n=3.95~13.63, 平均 9.06; (La/Sm)_n=2.32~4.97, 平均 3.55, (Gd/Yb)_n=1.00~1.90, 平均 1.53, 轻稀土元素分馏较重稀土元素略明显;δEu=0.32~0.65, 平均 0.50, 具有

明显的 Eu 负异常,说明岩浆在演化过程中发生了较明显的斜长石分离结晶作用,δCe=0.89~0.94, 平均 0.93, 说明岩石受后期低温蚀变作用较弱。

3.3 微量元素

石虎山岩体岩石样品微量元素含量如表 1 所示。

石虎山岩体岩石样品微量元素比值蛛网图(图 5b)表现为 K、Rb、Th 明显富集的大隆起形式,Ce、Sm 选择性富集,Ba 的负异常,说明斜长石作为熔融残留相或结晶分离相存在,Nb、Hf、Zr 等元素明显亏损,与板内花岗岩、火山弧花岗岩均有一些相似之处,形成于拉张环境。样品曲线形态趋势相近,它们应该具有相似的源区。

4 分析结果

4.1 锆石 U-Pb 年龄

本次工作用于锆石 U-Pb 年龄测试的样品采位置见图 1, 样品分析数据见表 2。

样品锆石颗粒为无色透明或浅黄色,半自形-自形,形态有长柱状、短柱状、粒状和不规则状,粒径大小为 110~180 μm, 颗粒长宽比为 1~4。在阴极发光图像上(图 6), 锆石结构比较复杂,一类锆石具核-边结构,核、边部具有环带结构(点 27、28、29、33 等),为岩浆成因锆石特征;另一类锆石核部具扇形结构或椭圆状结构,没有环带结构、呈暗色区或少量环带(点 8、10、17、20),为继承性锆石特征。选择 33 颗锆石进行定年分析。33 个分析点获得 4 组相对集中年龄(图 7), 其中 A 组打在锆石核部,有 10 颗锆石数据较为集中,无振荡环带,且获得了较为一

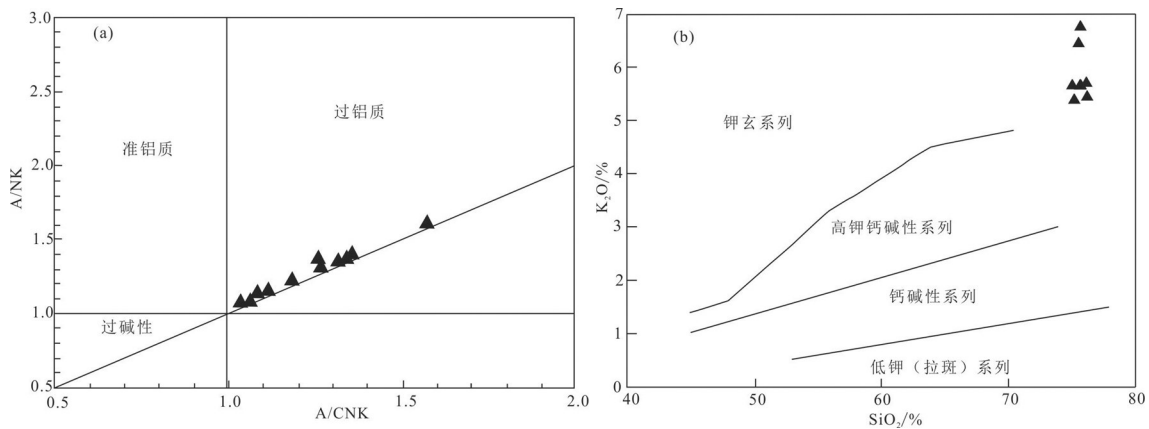


图4 石虎山岩体 A/CNK-A/NK 及 SiO₂-K₂O 图解(据 Rickwood, 1989)

Fig.4 A/CNK-A/NK(a) and SiO₂-K₂O (b) diagram of the Shihushan granite(after Rickwood, 1989)

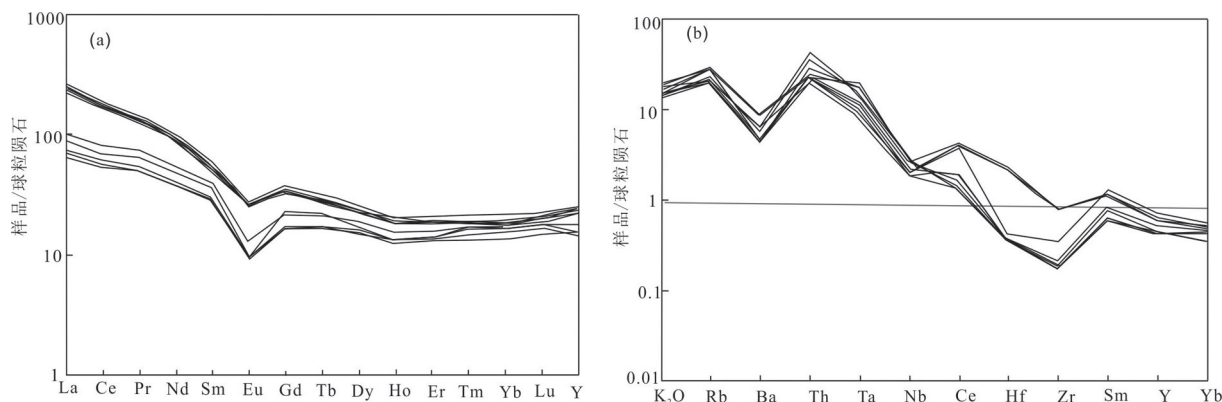


图5 石虎山岩体稀土元素配分样式图及微量元素原始地幔标准化蜘蛛网图
(原始地幔数据引自 Sun and McDonough, 1989)

Fig.5 Chondrite-normalized REE patterns (a) and normalized diagram for trace elements (b) of Shihushan granite
(Chondrite values are from Sun and McDonough, 1989)

致的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄 (839 ± 17) Ma (MSWD=2.3, $n=10$); 该年龄代表了石虎山岩体早期继承性年龄或捕获围岩年龄, 与区域上新元古界澄江组年龄相当。B组有10颗锆石, 数据也较为集中, 获得了较为一致的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄 (767 ± 15) Ma (MSWD=2.9, $n=10$), 与区域上新元古界牛头山组年龄相当。C组有6颗锆石数据较为集中, 获得了 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄 (705.5 ± 9.4) Ma (MSWD=0.44, $n=6$), 与区域上新元古界南坨组年龄相当; 年龄均代表了石虎山岩体捕获围岩年龄。D组有7颗锆石数据集中, 锆石微区 Th/U 比值 0.4~1.0, 具有典型的振荡环带, 为岩浆成因, 获得 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄 (616 ± 20) Ma (MSWD=2.1, $n=7$), 该年龄代表了石虎山岩体岩浆结晶年龄, 也代表了岩体侵位地表时间, 与区域上新元古界观音崖组、陡山坨组时代相当; 综合年龄分析结果、岩石地化及岩相学特征, 616~839 Ma 年代记录, 与 Rodinia 超大陆裂解事件有关。

4.2 锆石 Lu-Hf 同位素

对锆石进行了33组 Hf 同位素测试, 点位与 U-Pb 定年点位相同, Hf 同位素分析数据表明, 不同年龄锆石具有不同的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和两阶段模式年龄 T_{DM2} 值 (表3)。其中表面年龄约 839 Ma 的锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 $-1.07 \sim -6.32$, T_{DM2} 为介于 1733~2074 Ma; 约 767 Ma 锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于 $-2.71 \sim -7.70$, T_{DM2} 介于 1851~2131 Ma; 约 705.5 Ma 锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于 $-6.0 \sim -7.51$, T_{DM2} 介于 1977~2104 Ma; 约 616 Ma 锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于 $-6.78 \sim -8.96$, T_{DM2} 介于 1991~2117

Ma; 样品锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值均小于 0, 在 $t-t(\text{Ma})$ 和 $t-(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})$ 图上, 所有样品点均落在上地壳演化线之上 (图8), 二阶段模式年龄变化范围为 1.73~2.31 Ga; 表明成岩物质主要来源于古元古代古老下地壳物质的部分熔融。

5 讨论

5.1 花岗岩源区

近年来对过铝质花岗岩的研究中, 普遍接受的观点是它们的源区虽具有多样性, 但变质沉积岩 (如泥质岩、砂屑岩或杂砂岩等) 是主要的源区 (Chappell et al., 1992; Harris et al., 1992)。石虎山岩体花岗岩具有较高的 SiO_2 (70.22%~75.09%) 含量及低的 TiO_2 (0.09%~0.28%) 含量, $A/\text{CNK}=1.04 \sim 1.57$, $A/\text{NK}=1.08 \sim 1.61$, 表现出过铝质的特征, 在 $(\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y})-(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})/\text{CaO}$ 图解 (图9a) 上, 所有样品均位于 A 型花岗岩区域内, 结合石虎山花岗岩其他主量元素和微量元素特征, 认为石虎山岩体花岗岩为铝质 A 型花岗岩。花岗岩类岩石 $\text{Rb}/\text{Y}-\text{Nb}/\text{Y}$ (图9b)、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2-\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ (图10a)、 $\text{Rb}/\text{Sr}-\text{Rb}/\text{Ba}$ (图10b) 源区判别图解及 $\text{Sr}-\text{Yb}$ 图解 (图11a), 结合锆石 Hf 同位素特征, 表明石虎山岩体花岗岩原始岩浆形成于古元古代古老下地壳贫黏土源区的页岩 60% 左右的部分熔融, 残留相为麻粒岩, 主要组成矿物斜长石+角闪石 (张旗, 2006), 其物源可能为滇中地区新近发现的古元古界易门群 (刘军平等, 2018, 2020a, b, c)。

表2 碱长花岗岩(D0120)锆石 LA-ICP-MS U-Th-Pb 同位素分析结果
Table 2 LA-ICP-MS zircon U-Pb age data of alkali-feldspar granite (D0120)

测点号	含量/ 10^{-6}		同位素比值						U-Pb 年龄/Ma						谐和度/%	Th/U
	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	223.6	237.2	0.0634	0.0012	1.2296	0.0322	0.1397	0.0028	724	38.9	814	14.7	843	15.6	96%	0.9
2	280.7	422.6	0.0729	0.0016	1.3463	0.0307	0.1342	0.0026	1013	42.6	866	13.3	812	14.7	93%	0.7
3	215.5	241.4	0.0705	0.0015	1.3165	0.0371	0.1353	0.0028	944	42.6	853	16.3	818	16.1	95%	0.9
4	602.2	350.1	0.0690	0.0016	1.3537	0.0398	0.1420	0.0029	898	48.1	869	17.2	856	16.4	98%	1.7
5	141.3	245.8	0.0678	0.0030	1.2742	0.0666	0.1346	0.0030	863	90.7	834	29.8	814	16.9	97%	0.6
6	140.2	274.7	0.0646	0.0013	1.1976	0.0320	0.1340	0.0027	761	42.6	799	14.8	811	15.1	98%	0.5
7	120.1	267.9	0.0681	0.0014	1.3137	0.0333	0.1399	0.0025	872	47.2	852	14.6	844	13.9	99%	0.4
8	199.4	388.9	0.0673	0.0013	1.2906	0.0317	0.1391	0.0027	856	40.7	842	14.1	840	15.5	99%	0.5
9	162.4	364.6	0.0665	0.0013	1.3327	0.0328	0.1452	0.0028	820	36.1	860	14.3	874	15.5	98%	0.4
10	270.7	277.5	0.0717	0.0012	1.4150	0.0232	0.1438	0.0024	977	33.3	895	9.8	866	13.6	96%	1.0
11	196.1	345.6	0.0739	0.0019	1.3393	0.0405	0.1312	0.0026	1039	50.5	863	17.6	794	15.1	91%	0.6
12	297.5	389.7	0.0622	0.0013	1.1365	0.0318	0.1318	0.0026	680	44.4	771	15.1	798	14.6	96%	0.8
13	223.0	481.3	0.0744	0.0018	1.2897	0.0396	0.1256	0.0029	1052	47.4	841	17.6	763	16.7	90%	0.5
14	173.2	292.4	0.0669	0.0013	1.1564	0.0296	0.1254	0.0025	835	41.8	780	13.9	762	14.3	97%	0.6
15	301.7	578.8	0.0734	0.0017	1.2504	0.0330	0.1246	0.0028	1026	47.4	824	14.9	757	16.2	91%	0.5
16	249.0	353.4	0.0690	0.0026	1.2100	0.0389	0.1279	0.0030	898	79.6	805	17.9	776	17.4	96%	0.7
17	197.0	315.6	0.0740	0.0018	1.2498	0.0344	0.1223	0.0023	1043	54.2	823	15.6	744	13.3	89%	0.6
18	488.3	327.6	0.0735	0.0018	1.3091	0.0388	0.1286	0.0025	1028	50.0	850	17.1	780	14.1	91%	1.5
19	252.7	254.0	0.0753	0.0019	1.3006	0.0365	0.1252	0.0024	1076	47.2	846	16.1	760	13.8	89%	1.0
20	143.6	463.6	0.0680	0.0020	1.1362	0.0500	0.1199	0.0030	878	61.1	771	23.8	730	17.5	94%	0.3
21	512.9	376.8	0.0645	0.0042	1.0442	0.0711	0.1174	0.0024	761	139.7	726	35.3	716	13.7	98%	1.4
22	309.0	468.0	0.0636	0.0037	1.0170	0.0668	0.1131	0.0025	728	127.9	712	33.6	691	14.7	96%	0.7
23	153.4	284.0	0.0650	0.0044	1.0188	0.0699	0.1142	0.0022	776	147.2	713	35.1	697	12.5	97%	0.5
24	327.0	531.9	0.0606	0.0008	0.9711	0.0142	0.1160	0.0013	628	30.7	689	7.3	708	7.2	97%	0.6
25	211.3	403.1	0.0582	0.0021	0.9112	0.0240	0.1167	0.0029	539	79.6	658	12.7	712	16.5	92%	0.5
26	262.9	305.1	0.0577	0.0025	0.8923	0.0322	0.1158	0.0025	517	96.3	648	17.3	707	14.3	91%	0.9
27	420.6	570.7	0.0534	0.0030	0.7750	0.0454	0.1043	0.0020	346	125.9	583	26.0	640	11.6	90%	0.7
28	344.6	473.8	0.0660	0.0057	0.8711	0.0683	0.1017	0.0029	806	179.6	636	37.0	624	16.8	98%	0.7
29	260.6	609.7	0.0664	0.0028	0.9339	0.0437	0.1021	0.0026	818	88.9	670	22.9	627	15.0	93%	0.4
30	323.0	668.0	0.0573	0.0025	0.8342	0.0522	0.1056	0.0044	506	65.7	616	28.9	647	25.9	95%	0.5
31	213.7	343.8	0.0612	0.0035	0.8134	0.0533	0.0982	0.0034	656	125.9	604	29.9	604	20.2	99%	0.6
32	281.6	630.9	0.0681	0.0021	0.9035	0.0307	0.0961	0.0017	872	95.4	654	16.4	592	10.0	90%	0.4
33	454.1	450.7	0.0595	0.0033	0.8169	0.0483	0.0995	0.0029	587	120.4	606	27.0	611	17.0	99%	1.0

5.2 构造环境

过铝质花岗岩可形成于多种构造环境,如陆-陆碰撞过程中早期挤压环境下的地壳加厚环境(Harris et al., 1986),也可形成于碰撞高峰期后的岩石圈伸展环境(Kalsbeek et al., 2001)。石虎山岩体样品微量元素比值蛛网图(图5b)表现为K、Rb、Th明显富集的大隆起形式,Ce、Sm选择性富集,Nb、Hf、Zr等元素明显亏损,与板内花岗岩较为相似,形成于拉张环境。在(Y+Nb)-Rb图解(Pearce, 1996)上,样品点均落入板内花岗岩区(WPG)(图11b);其主量、微量元素特征显示为高K₂O+Na₂O,且K₂O/Na₂O=1.64~7.81,平均3.45,高含铁指数,强烈亏损Eu、Ba、P、Ti,类似于A型花岗岩的地球化学特征

(Collins et al., 1982; Whalen et al., 1987),且在(Zr+Nb+Ce+Y)-(K₂O+Na₂O)/CaO图解(图9a)上,所有样品均位于A型花岗岩区域内;结合岩体主要岩性为碱长花岗岩,见钠长石,表明其形成环境为伸展环境。李献华等(2012)认为750~830 Ma是Rodinia超级地幔柱与超大陆裂解的时期,其中795~830 Ma和745~780 Ma分别是Rodinia超大陆开始张裂和最终裂解两个阶段(Li et al., 2003)。王梦玺等(2012)认为Rodinia超大陆在扬子板块北缘的最终裂解时限为约635 Ma。综上所述,石虎山花岗岩岩体形成于拉张伸展构造背景,与华南新元古代裂谷盆地发育时限高度一致,是与Rodinia超大陆裂谷化-裂解事件有关的新元古代中晚期全球性大陆裂谷事件

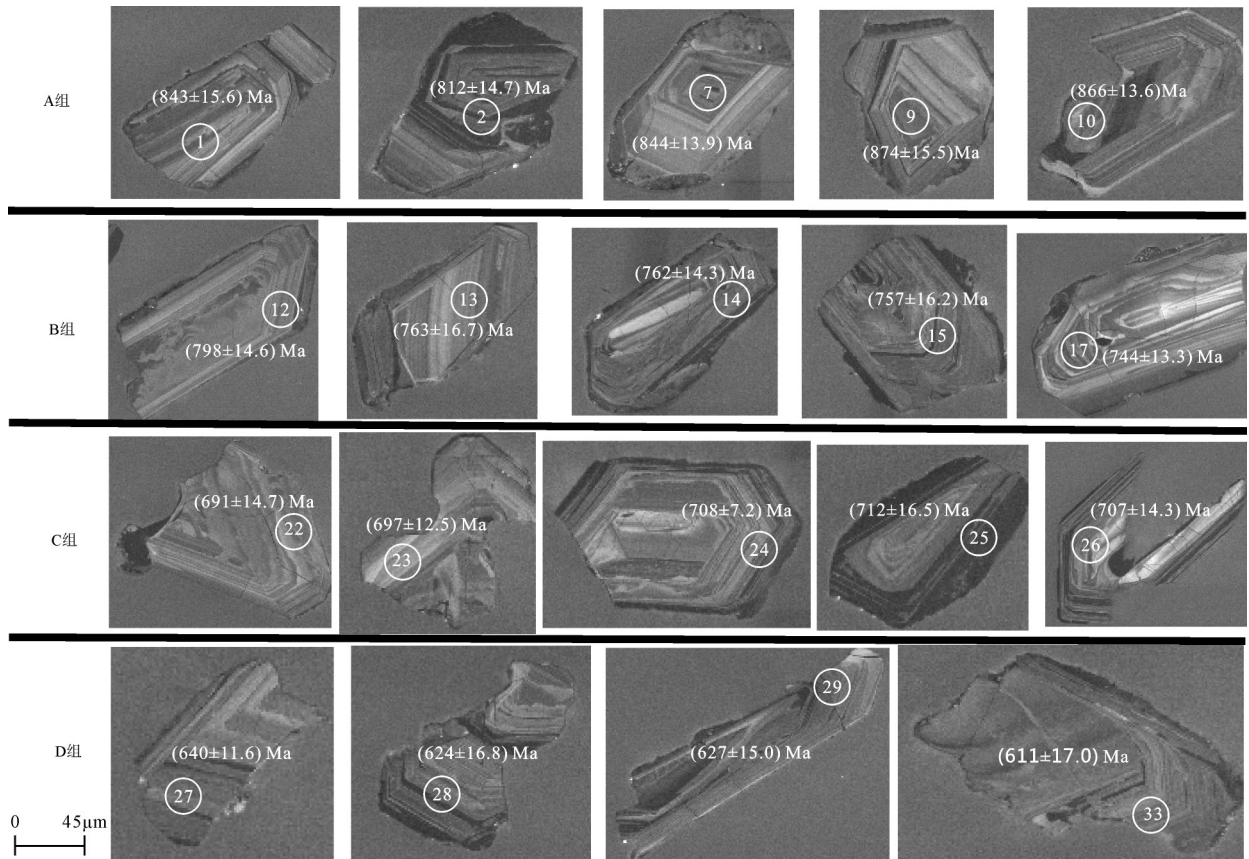


图6 石虎山岩体代表性锆石阴极发光(CL)图像
Fig.6 The CL images of zircons from Shihushan granite

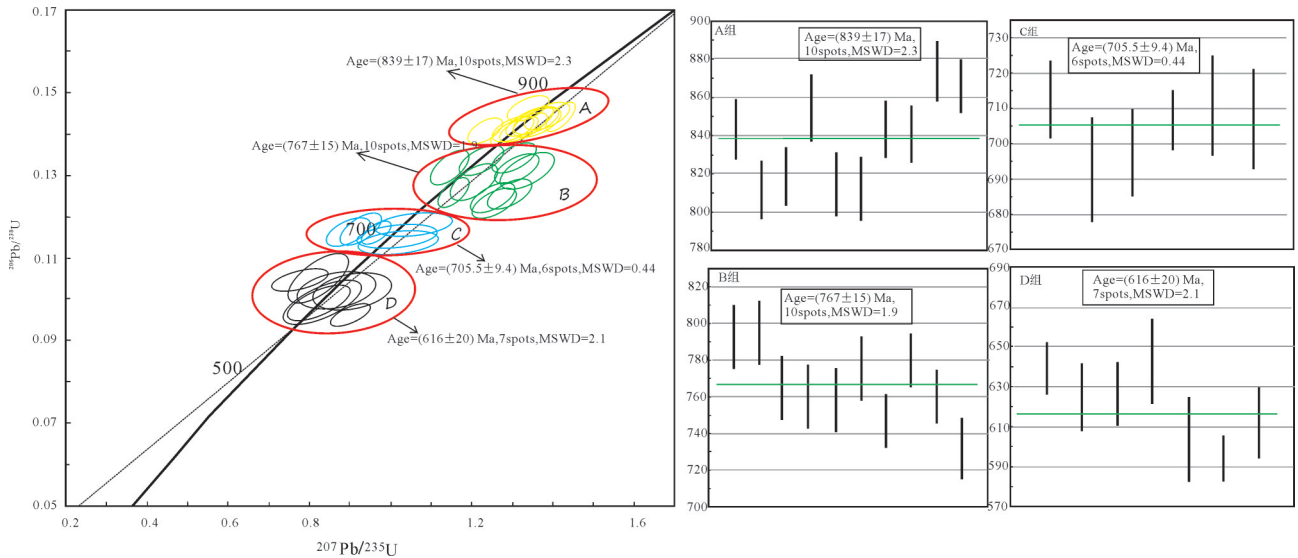


图7 碱长花岗岩(样品D0120)锆石U-Pb年龄谱和线图
Fig.7 Concordia plot of the zircon U-Pb age data for alkali-feldspar granite(Sample D0120)

表3 碱长花岗岩(D0120)Hf同位素组成

Table 3 Analytical data of zircon Hf isotope composition of alkali-feldspar granite (D0120)

测点号	年龄/Ma	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf	(¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf) _i	¹⁷⁶ Yb/ ¹⁷⁷ Hf	2σ	ε _{Hf} (0)	ε _{Hf} (t)	T _{DM1}	T _{DM2}	f _{LuHf}
1	843	0.282155	0.001468	0.282132	0.055089	0.000017	-21.8035	-4.01	1564	1982	-0.956
2	812	0.282283	0.003186	0.282235	0.152735	0.000015	-17.2769	-1.07	1450	1773	-0.904
3	818	0.282095	0.000829	0.282083	0.033246	0.000020	-23.9268	-6.32	1621	2108	-0.975
4	856	0.282171	0.002079	0.282137	0.083935	0.000022	-21.2589	-3.54	1568	1962	-0.937
5	814	0.282165	0.001903	0.282136	0.086459	0.000020	-21.4499	-4.51	1568	1991	-0.943
6	811	0.282136	0.000725	0.282125	0.028089	0.000017	-22.4961	-4.99	1561	2019	-0.978
7	844	0.282106	0.001001	0.282090	0.041026	0.000018	-23.5463	-5.47	1614	2074	-0.970
8	840	0.282144	0.001690	0.282118	0.075325	0.000020	-22.1991	-4.60	1590	2016	-0.949
9	874	0.282121	0.000682	0.282110	0.022319	0.000016	-23.0157	-4.11	1579	2011	-0.979
10	866	0.282162	0.000915	0.282147	0.036874	0.000018	-21.5660	-2.96	1532	1933	-0.972
11	794	0.282125	0.001585	0.282101	0.069500	0.000015	-22.8932	-6.20	1613	2082	-0.952
12	798	0.282147	0.001175	0.282130	0.050226	0.000017	-22.0867	-5.10	1563	2016	-0.965
13	763	0.282148	0.001278	0.282130	0.051166	0.000017	-22.0529	-5.88	1566	2038	-0.961
14	762	0.282149	0.001019	0.282134	0.041636	0.000018	-22.0433	-5.75	1555	2029	-0.969
15	757	0.282127	0.001213	0.282109	0.050218	0.000016	-22.8228	-6.73	1594	2087	-0.963
16	776	0.282097	0.000878	0.282084	0.035147	0.000019	-23.8611	-7.19	1621	2131	-0.974
17	744	0.282184	0.001823	0.282158	0.076263	0.000017	-20.7958	-5.29	1539	1986	-0.945
18	780	0.282247	0.002629	0.282209	0.106497	0.000032	-18.5554	-2.71	1481	1851	-0.921
19	760	0.282155	0.001324	0.282136	0.052390	0.000016	-21.8172	-5.71	1559	2026	-0.960
20	730	0.282112	0.000918	0.282099	0.035674	0.000018	-23.3517	-7.70	1602	2128	-0.972
21	716	0.282132	0.001349	0.282114	0.055464	0.000016	-22.6426	-7.51	1593	2104	-0.959
22	691	0.282197	0.001457	0.282178	0.059538	0.000017	-20.3406	-5.78	1506	1977	-0.956
23	697	0.282154	0.001411	0.282136	0.060623	0.000017	-21.8476	-7.13	1564	2067	-0.958
24	708	0.282180	0.002433	0.282148	0.106944	0.000024	-20.9342	-6.48	1570	2033	-0.927
25	712	0.282175	0.001227	0.282159	0.050410	0.000018	-21.1105	-6.00	1527	2007	-0.963
27	640	0.282180	0.001413	0.282163	0.058048	0.000016	-20.9424	-7.45	1528	2043	-0.957
28	624	0.282172	0.002285	0.282146	0.108010	0.000017	-21.2029	-8.40	1575	2091	-0.931
29	627	0.282226	0.003097	0.282190	0.145962	0.000022	-19.3025	-6.78	1531	1991	-0.907
30	647	0.282148	0.001171	0.282133	0.048334	0.000016	-22.0843	-8.33	1563	2104	-0.965
31	604	0.282196	0.002513	0.282167	0.116392	0.000014	-20.3872	-8.09	1551	2057	-0.924
32	592	0.282144	0.001505	0.282127	0.062572	0.000014	-22.2257	-9.79	1583	2154	-0.955
33	611	0.282151	0.001175	0.282138	0.049862	0.000020	-21.9519	-8.96	1558	2117	-0.965

群的组成单元(刘军平等,2019)。

5.3 与 Rodinia 超大陆裂解的关系

前寒武纪地质体的形成、增生与再造历史对超大陆的重建具有重要意义。大量对新元古代岩浆岩成因及热源研究认为,扬子板块周缘经历了早期大洋板片俯冲作用(930~1160 Ma)和晚期大规模陆缘裂解(700~830 Ma),然而,俯冲-伸展的转换时间和机制仍然存在争论。扬子地块周缘地区新元古代构造-岩浆活动非常强烈,形成大量以中酸性火成岩为主的侵入岩浆岩群。这些构造-岩浆岩体的形成时代主要集中在740~830 Ma,主要侵位于中新元古界扬子型变质基底岩系中,并多被南华系或震旦系不整合覆盖(李献华等,2008;裴先治等,2009;鄯圣武等,2017)。王梦玺等(2006)对扬子北缘

枣盆地中周庵超镁铁质岩体(637±4) Ma进行了锆石 Hf-O同位素分析,认为Rodinia超大陆在扬子板块北缘的最终裂解时限应该是约635 Ma;扬子北缘俯冲-伸展的转换时间可能在635~740 Ma的观点;结合区域相关研究资料,认为扬子西缘存在一个自约800 Ma持续至725 Ma的幕式双峰式岩浆岩带,澄江组底部玄武岩和苏雄组火山岩均为约800 Ma双峰式岩浆活动的产物,且双峰式岩浆岩带形成于大陆裂谷环境(崔晓庄等,2013,2015;刘军平等,2019)。Li et al.(2010)研究发现侵入至盐边同德杂岩中的苦橄质岩墙来源于比同期周边洋中脊玄武岩源地幔高200℃的异常高温地幔,该地幔温度与现代地幔柱相当,从而认为同德苦橄质岩墙应该是800 Ma左右地幔柱岩浆作用的可靠证据。值得注

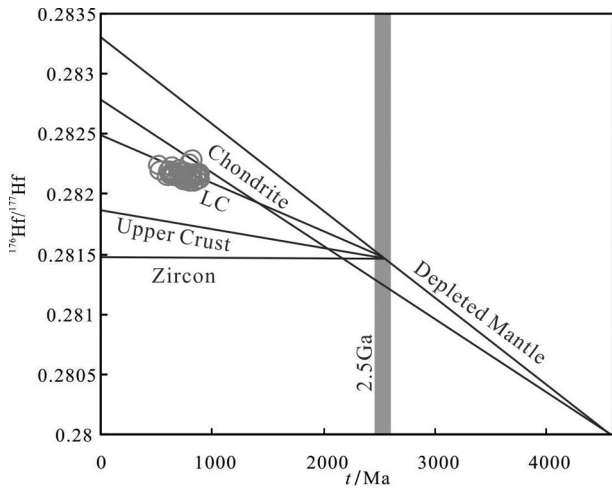


图8 石虎山花岗岩Hf同位素 $t-t(\text{Ma})$ 和 $t-(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})$ 图解
Fig.8 $t-t(\text{Ma})$ 和 $t-(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})$ diagram of the Hf isotope of Shihushan granite

意的是,云南东川下田坝黑云母二长花岗岩的成岩年龄为 $(769\pm 4.4)\text{Ma}$,属于典型的A型花岗岩,形成于板内伸展环境(程佳孝等,2014);这些证据均表明扬子西缘康滇裂谷应为与地幔柱活动有关的大陆裂谷;云南宾川地区响水花岗质岩体锆石U-Pb同位素测年显示,响水花岗质岩体侵位与冷凝时期为 $(761.9\pm 4.1)\text{Ma}$,与扬子地台周缘Rodinia超大陆裂解时期形成的花岗岩年龄峰值相对应;汪正江等(2011)报道了川西南峨边县牛郎坝A型花岗岩,该花岗岩具有高硅、低钙、贫镁、铝质的特征,其SHRIMP锆石U-Pb测年结果为 $(826\pm 21.4)\text{Ma}$,认

为牛郎坝A型花岗岩是新元古代中期在Rodinia超大陆裂解背景下与地幔柱构造相关的壳幔相互作用的产物。

大量资料表明扬子板块西缘存在约830 Ma、800 Ma、760 Ma、700 Ma及635 Ma构造热事件,这些构造热事件与Rodinia超大陆裂解的幕式地幔柱活动有关(Li et al., 2002a; 江新胜, 2012; 崔晓庄等, 2015)。本文对石虎山岩体进行锆石U-Pb及Hf同位素分析,获得的岩浆结晶年龄为616 Ma,其锆石所有分析点Th/U比值均较高,在0.4~1.0,显示出岩浆锆石的高Th/U比值特征,由于这些分析点的年龄均是从具有岩浆结晶环带的锆石微区所获得,且其形成于拉张伸展环境,可以说明该期岩浆组合应是Rodinia超大陆裂解的响应,616 Ma可能是Rodinia超大陆在扬子板块西缘最终裂解时限,与王梦玺等(2012)认识一致;而 $(839\pm 17)\text{Ma}$ 、 $(766\pm 15)\text{Ma}$ 、 $(705.5\pm 9.4)\text{Ma}$ 的构造热事件年龄组合可能是Rodinia超大陆裂解构造过程在扬子西缘的记录,该期岩浆组合可能与导致Rodinia超大陆裂解的幕式地幔柱活动有关(Li et al., 2002a; 崔晓庄等, 2015; 毕政家等, 2016; 刘军平等, 2019)。

6 结论

通过对扬子地块西缘后石虎山花岗岩的锆石U-Pb年代学和岩石地球化学研究,得到如下结论:

(1) 锆石LA-ICP-MS U-Pb法测得石虎山碱长花岗岩样品(D0120)的锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权

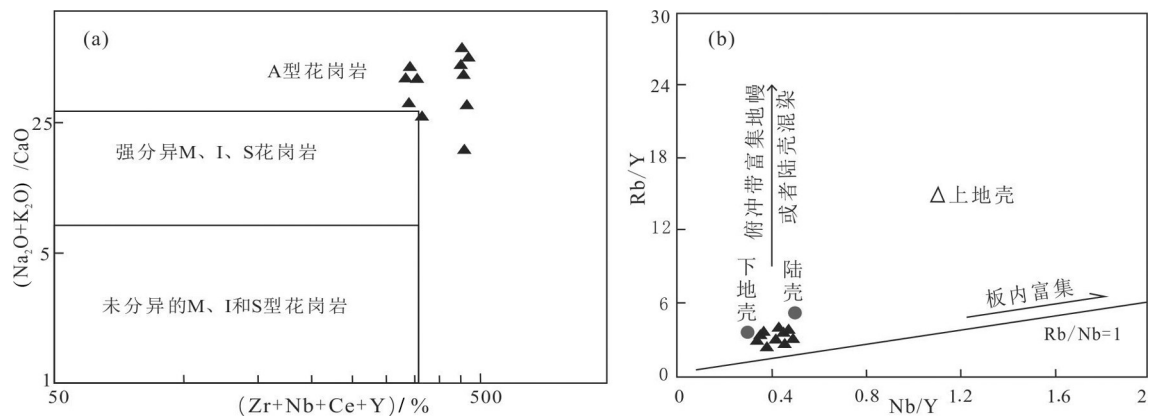


图9 石虎山岩体花岗岩类岩石 $(\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y})-(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})/\text{CaO}$ 图解(a, 据 Whalen et al., 1987)及 $\text{Nb}/\text{Y}-\text{Rb}/\text{Y}$ 图解(b, 据 Jahn et al., 1999)

Fig.9 $(\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y})-(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})/\text{CaO}$ diagram (a, after Whalen et al., 1987) and $\text{Nb}/\text{Y}-\text{Rb}/\text{Y}$ of the Shihushan granite (b, after Jahn et al., 1999)

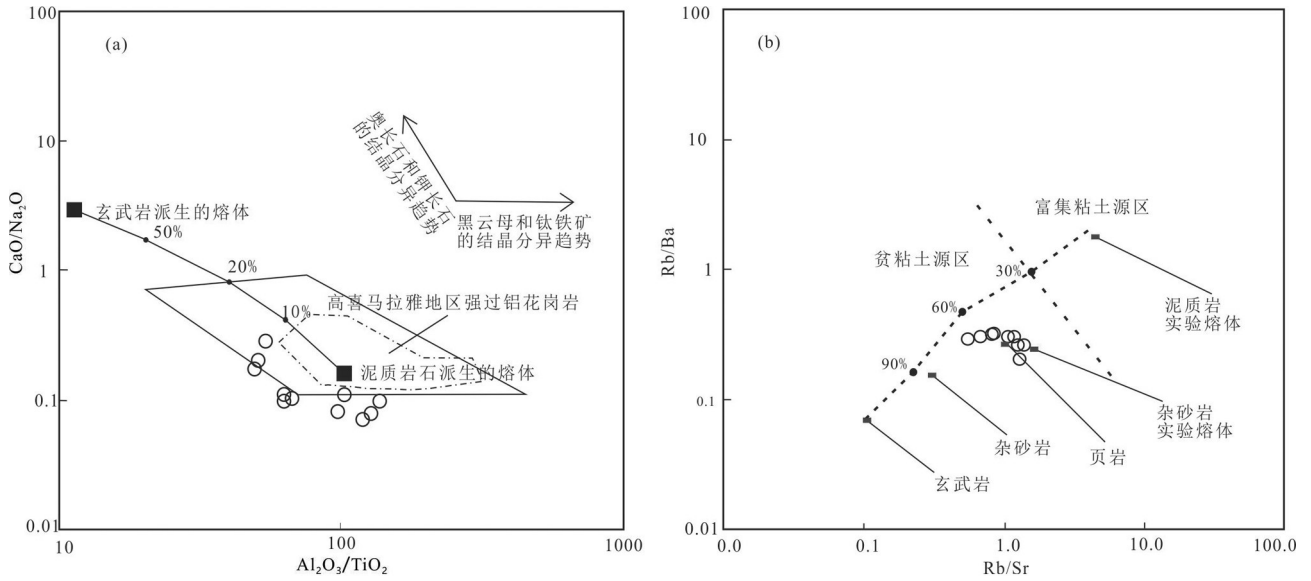


图 10 石虎山岩体花岗岩类岩石 Al_2O_3/TiO_2 - CaO/Na_2O (a)及 Rb/Sr - Rb/Ba (b)源区判别图解(据 Sylvester, 1998)
Fig.10 Al_2O_3/TiO_2 - CaO/Na_2O (a)and Rb/Sr - Rb/Ba (b) of the Shihushan granite(after Sylvester, 1998)

平均值为 (839 ± 17) Ma、 (767 ± 15) Ma、 (705.5 ± 9.4) Ma 及 (616 ± 20) Ma 四组年龄值;其中 616 Ma 代表了该花岗岩岩体的侵位时代; (839 ± 17) Ma、 (766 ± 15) Ma、 (705.5 ± 9.4) Ma 为继承性年龄或捕获年龄。石虎山花岗岩岩体形成于板内伸展环境,说明该期岩浆应是 Rodinia 超大陆裂解构造过程的响应,616 Ma 可能是 Rodinia 超大陆在扬子板块西缘最终裂解时限;而 (839 ± 17) Ma、 (766 ± 15) Ma、

(705.5 ± 9.4) Ma 的构造热事件年龄组合可能是 Rodinia 超大陆裂解构造过程在扬子西缘的记录,该期岩浆组合可能与导致 Rodinia 超大陆裂解的幕式地幔柱活动有关。

(2)石虎山花岗岩的岩石地球化学化学特征及 Hf 同位素反映出该岩体具有板内-裂谷型的地球化学特征;其原始岩浆为古元古代下地壳页岩 60% 部分熔融的同源岩浆产物,其物源可能为古元古界易门群。

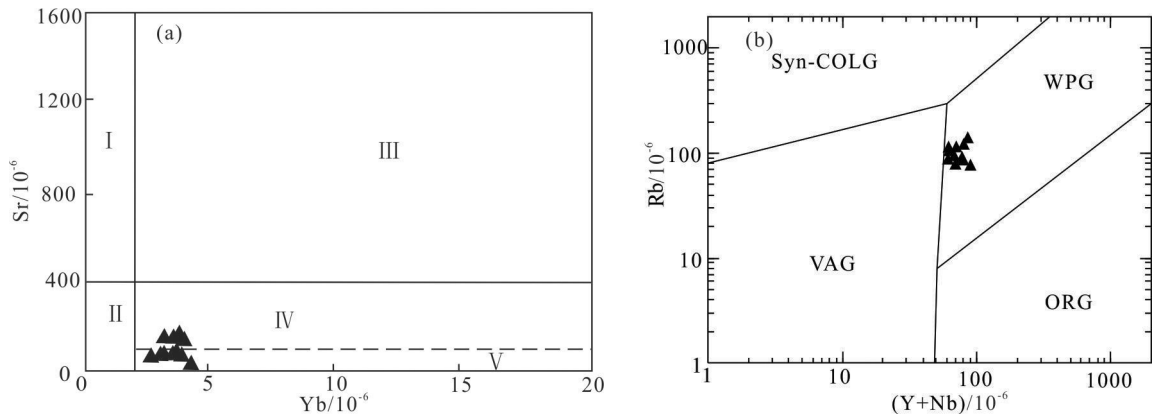


图 11 石虎山岩体岩石 Yb-Sr(a, 据 Zhang Qi, 2006)及 $(Y+Rb)$ - Rb (b, 据 Pearce, 1996)图解

I—高 Sr 低 Yb 花岗岩; II—低 Sr 低 Yb 花岗岩; III—高 Sr 高 Yb 花岗岩; IV—低 Sr 高 Yb 花岗岩;
V—极低 Sr 高 Yb 花岗岩 VAG—火山弧花岗岩; Syn-COLG—同碰撞花岗岩; WPG—板内花岗岩; ORG—洋脊花岗岩

Fig.11 Yb-Sr diagram of the (a, after Zhang Qi, 2006)and $(Y+Rb)$ - Rb of the Shihushan granite(b, after Pearce, 1996)

I—granite with high Sr and low Yb; II—granite with low Sr and low Yb; III—granite with high Sr and high Yb;
IV—granite with low Sr and high Yb; V—granite with overly low Sr and high Yb; VAG—Volcanic arc granites;
Syn-COLG—syn-collision granites; WPG—within plate granites; ORG—ocean ridge granites

致谢: 论文写作过程中得到了云南省地质调查教授级高工李静的热心帮助; 锆石 LA-ICP-MS 分析和阴极发光照片得到了南京宏创地矿袁秋云及湖北省地质实验室测试中心岩石矿物研究室朱丹、潘诗洋的帮助; 审稿人提出了宝贵的修改意见。在此一并表示衷心感谢。

References

- Bi Zhengjia, Zeng Zhongcheng, Zhang Kunkun, Cao Tongli, Liu Demin, Chen Ning, Zhao Jianglin, Li Qi, Li Dewei. 2016. Geochronology, geochemical characteristics and tectonic implications of the amphibolite from Paxialayidang area on the southern margin of Altun terrain[J]. *Geology in China*, 43(4):1149–1164(in Chinese with English abstract).
- Boynnton W W. 1984. Cosmochemistry of the rare earth element: Meteorite studies[C]//Henderson P(eds). *Rare Earth Element Geochemistry: Development in Geochemistry*. Amsterdam: Elsevier, 63–114.
- Chappell B W, White A J R. 1992. I- and S- type granites in the Lachlan fold belt[J]. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 83(83):1–26.
- Cheng Jiaxiao, Luo Jinhai, Wu Yudong, Han Kui, Wang Shidi. 2014. Geochronology, geochemistry and tectonic significance of the Xiadianba granite in northeastern Yunnan[J]. *Acta Geologica Sinica*, 88(3):337–346(in Chinese with English abstract).
- Cui Xiaozhuang, Jiang Xinsheng, Wang Jian, Zhuo Wenwen, Xiong Guoqing, Lu Junze, Deng Qi, Wu Wei, Liu Jianhui. 2013. Zircon U–Pb geochronology for the stratotype section of the Neoproterozoic Chengjiang Formation in Central Yunnan and its geological significance[J]. *Geoscience*, 27(3):547–556(in Chinese with English abstract).
- Cui Xiaozhuang, Jiang Xinsheng, Wang Jian, Zhuo Wenwen, Jiang Zhuofei, Wu Yi, Deng Qi, Wei Yanan. 2015. New evidence for the formation age of basalts from the lowermost Chengjiang Formation in the western Yangtze Block and its geological implications[J]. *Acta Petrologica Mineralogica*, 33(1):1–13(in Chinese with English abstract).
- Du Lilin, Geng Yuanshen, Yang Chonghui, Wang Xinshe, Ren Liudong, Zhou Xiwen, Wang Yanbin, Yang Zhushen. 2006. The stipulation of Neoproterozoic TTG in western Yangtze block and its significance[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 25(4):273–281(in Chinese with English abstract).
- Harris N B W, Inger S. 1992. Trace element modelling of pelite-derived granites[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 110(1):46–56.
- Harris N B W, Pearce J A, Tindle A G. 1986. Geochemical characteristics of collision-zone magmatism[J]. *Geological Society, London, Special Publication*, 19:67–81.
- Hoskin PWO, Schaltegger U. 2003. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53:27–62.
- Jiang Xinsheng, Wang Jian, Cui Xiaozhuang, Zhuo Wenwen, Xiong Guoqing, Lu Junze, Liu Jianhui. 2012. Zircon SHRIMP U–Pb geochronology of the Neoproterozoic Chengjiang Formation in central Yunnan Province (SW China) and its geological significance[J]. *Sci. China (Earth Sci.)*, 42(10):1496–1507(in Chinese with English abstract).
- Ji Bo, Huang Botao, Li Xiangmin, Wang Lei. 2019. Geochronology and geochemical characteristics of the Early Ordovician granite from Hongmiaogou area in northwest margin of South Qilian and its geological significance[J]. *Northwestern Geology*, 52(4): 63–75(in Chinese with English abstract).
- Kalsbeek F, Jepsen H, Nutman A. 2001. From source migmatites to plutons: tracking the origin of ca.435Ma S-type granites in the East Greenland Caledonian orogen[J]. *Lithos*, 57:1–21.
- Li Tong, Yuan Huayu, Wu Shengxi. 1998. On the average chemical composition of granitoids in China and the world[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 22(1):29–34(in Chinese with English abstract).
- Li Xianhua, Zhou Hanwen, Li Zhengxiang, Liu Ying, Kinny P. 2001. Zircon U–Pb age and petrochemical characteristics of the Neoproterozoic bimodal volcanics from western Yangtze block[J]. *Geochimica*, 30(4):315–322(in Chinese with English abstract).
- Li Xianhua, Wang Xuance, Li Wuxian, Li Zhengxiang. 2008. Petrogenesis and tectonic significance of Neoproterozoic basaltic rocks in South China: From orogenesis to intracontinental rifting[J]. *Geochimica*, 37(4):382–398(in Chinese with English abstract).
- Li Pengchun, Chen Guanghao, Xu Deru, He Zhuanli, Fu Gonggu. 2007. Petrogeochemical and Geochemical characteristics and petrogenesis of Neoproterozoic peraluminous granites in northeastern Hunan Province[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 31(1):126–136(in Chinese with English abstract).
- Ling Wenli, Gao Shan, Cheng Jianping, Jiang Linsheng, Yuan Honglin, Hu Zhaochu. 2006. Neoproterozoic magmatic events within the Yangtze continental interior and along its northern margin and their tectonic implication: constraint from the ELA–ICPMS U–Pb geochronology of zircons from Huangling and Hannan complexes[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(2):387–396(in Chinese with English abstract).
- Liu Shuwen, Yan Quanren, Li Qiugen, Wang Zongqi. 2009. Petrogenesis of granitoid rocks in the Kangding Complex, western margin of the Yangtze Craton and its tectonic significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(8):1883–1896(in Chinese with English abstract).
- Liu Junping, Zeng Wentao, Xu Yunfei, Sun Baidong, Hu Shaobin, Liu Guichun, Song Donghu, Lu Bozhen, Wang Xiaofeng. 2018. The definition and geological significance of tuffs about 1.85 Ga in Yimen area, central Yunnan Province[J]. *Geological Bulletin of China*, 37(11): 2055–2062(in Chinese with English abstract).

- Liu Junping, Xia Caixiang, Sun Baidong, Hu Shaobin, Wang Xiaofeng, Wang Wei, Guan Xueqing, Song Donghu, Lu Boye. 2019. Tuffs from the Neoproterozoic Chengjiang Formation in the Yimen region, central Yunnan: Zircon U–Pb dating and its geological implications[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 39(1):14–21(in Chinese with English abstract).
- Liu Junping, Tian Sumei, Cong Feng, Sun Baidong, Huan Xiaoming, Xun Yunfei. 2017. The Sale granite from the southern part of the Lancang River, western Yunnan: Zircon U–Pb age, geochemistry and geological implications[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 37(4):59–70(in Chinese with English abstract).
- Liu Junping, Li Jing, Wang Genhou, Sun Baidong, Hu Shaobin, Yu Saiying, Wang Xiaohu, Song Donghu. 2020a. Geochemistry and U–Pb age of zircons of mafic intrusion in the southwestern margin of the Yangtze plate: Response to breakup of the Columbia supercontinent [J]. *Geological Review*, 66(2):350–364(in Chinese with English abstract).
- Liu Junping, Sun Baidong, Wang Xiaofeng, Liu Wei, Ma Jinhua, Guan Xueqing, Song Donghu, Lü Boye. 2020b. The zircon U–Pb age, geochemical characteristics and tectonic significance of the spherical basalt in the early Mesoproterozoic in Lufeng area central Yunnan[J]. *Geological Review*, 66(1):35–51(in Chinese with English abstract).
- Liu Junping, Li Jing, Duan Xiangdong, Cao Xiaomin, Hu Shaobin, Li Kaibi, Wang Lu, Guan Xueqing, Zeng Wentao, Liu Fagang, Zhang Hu, Yu Saiying. 2020c. Material sources of selenium–rich soil and its natural selenium–rich wild bacteria in Yimen area, central Yunnan[J]. *Geological Review*, 66(3):786–794(in Chinese with English abstract).
- Ludwig K R. 2003. Isoplot 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[J]. Berkeley: Berkeley Geochronology Center, California 39.
- Pearce J A. 1996. Sources and setting of granitic rocks[J]. *Episodes*, 19: 120–125.
- Pei Xianzhi, Li Zuochen, Ding Saping, Li Ruibao, Feng Jianyun, Sun Yu, Zhang Yafeng, Liu Zhanqing. 2009. Neoproterozoic Jiaoziding peraluminous granite in the northwest margin of Yangtze Block: Zircon SHRIMP U–Pb age and geochemistry, and their tectonic significance[J]. *Earth Science Frontiers*, 6(3):232–249(in Chinese with English abstract).
- Richwood P C. 1989. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements[J]. *Lithos*, 22(4): 247–263.
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotope systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[C]//Saunders A D, Norry M J. *Magmaism in the Ocean Basins*. Geological Society Special Publication, 42:313–345.
- Wang Mengxi, Wang Yan, Zhao Hongjun. 2012. Zircon U/Pb dating and Hf–O isotopes of the Zhouan ultramafic intrusion in the northern margin of the Yangtze Block, SW China: Constraints on the nature of mantle source and timing of the supercontinent Rodinia breakup[J]. *Chin. Sci. Bull.*, 57(34):3283–3294(in Chinese with English abstract).
- Wang Hairan, Zhao Hongge, Qiao Jianxin, Gao Shaohua. 2013. Theory and application of zircon U–Pb isotope dating technique[J]. *Geology and Resources*, 22(3):229–242(in Chinese with English abstract).
- Wang Zhengjiang, Wang Jian, Yang Ping, Xie Shangke, Zhuo Wenwen, He Jianglin. 2011. The discovery and geological implications of the Neoproterozoic A–type granites in the upper Yangtze craton[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 31(2):1–11(in Chinese with English abstract).
- 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.
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Zheng Yongfei, Gao Shan. 2007. Lu–Hf isotopic systematics and their applications in petrology[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2):185–220(in Chinese with English abstract).
- Xia Linqi, Li Xiangmin, Yu Jiyuan, Wang Guoqiang. 2016. Mid–Late Neoproterozoic to Early Paleozoic volcanism and tectonic evolution of the Qilian Mountain[J]. *Geology in China*, 43(4): 1087–1138(in Chinese with English abstract).
- Xie Shiwen, Gao Shan, Liu Xiaoming, Gao Rishen. 2009. U–Pb Ages and Hf Isotopes of Detrital Zircons of Nanhua Sedimentary Rocks from the Yangtze Gorges: Implications for Genesis of Neoproterozoic Magmatism in South China[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 34(1):117–126(in Chinese with English abstract).
- Yan Danping, Zhou Meifu, Song Honglin, John Malpas. 2002. Where was south China located in the reconstruction of Rodinia[J]. *Earth Science Frontiers*, 9(4):249–256(in Chinese with English abstract).
- Yan Shengwu, Bai Xianzhou, Wu Wenxiang, Zhu Bing, Zhan Qiongyao, Wen Long, Yang Hui, Wang Yuting. 2017. Genesis and geological implications of the Neoproterozoic A–type granite from the Lugu area, western Yangtze block[J]. *Geology in China*, 44(1): 136–150(in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Wang Yan, Li Chengdong, Wang Yuanlong, Jin Weijun, Jia Xiuqin. 2006. Granite classification on the basis of Sr and Yb contents and its implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(9): 2249–2269(in Chinese with English abstract).
- Zhang Pei, Zhou Zuyi, Xu Changhai, Zhang Qinglin. 2008. Geochemistry of Pengguan complex in the longmenshan region, western Sichuan province, SW China: Petrogenesis and tectonic implications[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 32(1):105–116(in Chinese with English abstract).
- Zhao Fengqing, Zhao Wenping, Zuo Yicheng, Li Zonghui, Xue Keqin. 2006. U–Pb geochronology of Neoproterozoic magmatic rocks in Hanzhong, southern Shanxi, China [J]. *Geological Bulletin of*

- China, 25(3):383-389(in Chinese with English abstract).
- Zhu Weiguang, Liu Bingguang, Deng Hailin, Zhong Hong, Li Chaoyang, Pi Daohui, Li Zhide, Qin Yu. 2004. Advance in the study of Neoproterozoic Mafic-Ultramafic Rocks in the Western Margin of the Yangtze Craton [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 23(3):255-264(in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 毕政家, 曾忠诚, 张昆昆, 曹同礼, 刘德民, 陈宁, 赵江林, 李琦, 李德威. 2016. 阿尔金南缘帕夏拉依档沟斜长角闪岩年代学、地球化学及其构造意义[J]. 中国地质, 43(4):1149-1164.
- 程佳孝, 罗金海, 武昱东, 韩奎, 王师迪. 2014. 滇东北下田坝花岗岩年代学、地球化学及其构造意义[J]. 地质学报, 88(3):337-346.
- 崔晓庄, 江新胜, 王剑, 卓皆文, 熊国庆, 陆俊泽, 邓奇, 伍皓, 刘建辉. 2013. 滇中新元古代澄江组层型剖面锆石 U-Pb 年代学及其地质意义[J]. 现代地质, 27(3):547-556.
- 崔晓庄, 江新胜, 王剑, 卓皆文, 江卓斐, 伍皓, 邓奇, 魏亚楠. 2015. 扬子西缘澄江组底部玄武岩形成时代新证据及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 33(1):1-13.
- 杜利林, 耿元生, 杨崇辉, 王新社, 任留东, 周喜文, 王彦斌, 杨铸生. 2006. 扬子地台西缘新元古代 TTG 的厘定及其意义[J]. 岩石矿物学杂志, 25(4):273-281.
- 计波, 黄博涛, 李向民, 王磊. 2019. 南祁连西北缘肃北红庙沟地区早奥陶世花岗岩年代学、地球化学特征及其地质意义[J]. 西北地质, 52(4):63-75.
- 江新胜, 王剑, 崔晓庄, 卓皆文, 熊国庆, 陆俊泽, 刘建辉. 2012. 滇中新元古代澄江组锆石 SHRIMP U-Pb 年代学研究及其地质意义[J]. 中国科学:地球科学, 42(10):1496-1507.
- 黎彤, 袁怀雨, 吴胜昔. 1998. 中国花岗岩类和世界花岗岩类平均化学成分的对比如研究[J]. 大地构造与成矿学, 22(1):29-34.
- 李献华, 周汉文, 李正祥, 刘颖, Kinny P. 2001. 扬子地块西缘新元古代双峰式火山岩的锆石 U-Pb 年龄和岩石化学特征[J]. 地球化学, 30(4):315-322.
- 李献华, 王选策, 李武显, 李正祥. 2008. 华南新元古代玄武质岩石成因与构造意义:从造山运动到陆内裂谷[J]. 地球化学, 37(4):382-398.
- 李鹏春, 陈广浩, 许德如, 贺转利, 符巩固. 2007. 湘东北新元古代过铝质花岗岩的岩石地球化学特征及其成因讨论[J]. 大地构造与成矿学, 31(1):126-136.
- 凌文黎, 高山, 程建萍, 江麟生, 袁洪林, 胡兆初. 2006. 扬子陆核与陆缘新元古代岩浆事件对比及其构造意义——来自黄陵和汉南侵入杂岩 ELAICPMS 锆石 U-Pb 同位素年代学的约束[J]. 岩石学报, 22(2):387-396.
- 刘军平, 曾文涛, 徐云飞, 孙柏东, 胡绍斌, 刘桂春, 宋冬虎, 吕勃焱, 王晓峰. 2018. 滇中易门地区约 1.85Ga 凝灰岩的厘定及其地质意义[J]. 地质通报, 37(11):2055-2062.
- 刘军平, 夏彩香, 孙柏东, 胡绍斌, 王晓峰, 王伟, 关学卿, 宋冬虎, 吕勃焱. 2019. 滇中易门地区新元古代澄江组凝灰岩锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 沉积与特提斯地质, 39(1):14-21.
- 刘军平, 田素梅, 丛峰, 孙柏东, 黄晓明, 徐云飞. 2017. 滇西澜沧江南段沙乐花岗岩的锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其地质意义[J]. 沉积与特提斯地质, 37(4):59-70.
- 刘军平, 李静, 王根厚, 孙柏东, 胡绍斌, 俞赛赢, 王小虎, 宋冬虎. 2020a. 扬子板块西南缘基性侵入岩锆石定年及地球化学特征——Columbia 超级大陆裂解的响应[J]. 地质论评, 66(2):350-364.
- 刘军平, 孙柏东, 王晓峰, 刘伟, 马进华, 关学卿, 宋冬虎, 吕勃焱. 2020b. 滇中禄丰地区中元古代早期球状玄武岩的锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其大地构造意义[J]. 地质论评, 66(1):35-51.
- 刘军平, 李静, 段向东, 曹晓民, 胡绍斌, 李开毕, 王路, 关学卿, 曾文涛, 刘发刚, 张虎, 俞赛赢. 2020c. 滇中易门地区富硒土壤物质来源及其天然富硒野生菌初步研究[J]. 地质论评, 66(3):786-794.
- 刘树文, 闫全人, 李秋根, 王宗起. 2009. 扬子克拉通西缘康定杂岩中花岗岩质石的成因及其构造意义[J]. 岩石学报, 25(8):1883-1896.
- 裴先治, 李佐臣, 丁仁平, 李瑞保, 冯建赞, 孙雨, 张亚峰, 刘战庆. 2009. 扬子地块西北缘轿子顶新元古代过铝质花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄和岩石地球化学及其构造意义[J]. 地学前缘, 16(3):231-249.
- 王梦玺, 王焰, 赵红军. 2012. 扬子板块北缘周庵超镁铁质岩体锆石 U-Pb 年龄和 Hf-O 同位素特征:对源区性质和 Rodinia 超大陆裂解时限的约束[J]. 科学通报, 57(34):3283-3294.
- 王海燕, 赵红格, 乔建新, 高少华. 2013. 锆石 U-Pb 同位素测年原理及应用[J]. 地质与资源, 22(3):229-242.
- 汪正江, 王剑, 杨平, 谢尚克, 卓皆文, 何江林. 2011. 上扬子克拉通内新元古代 A 型花岗岩的发现及其地质意义[J]. 沉积与特提斯地质, 31(2):1-11.
- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 高山. 2007. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用[J]. 岩石学报, 23(2):185-220.
- 夏林圻, 李向民, 余吉远, 王国强. 2016. 祁连山新元古代中-晚期至早古生代火山作用与构造演化[J]. 中国地质, 43(4):1087-1138.
- 谢士稳, 高山, 柳小明, 高日胜. 2009. 扬子克拉通南华纪碎屑锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素对华南新元古代岩浆事件的指示[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 34(1):117-126.
- 颜丹平, 周美夫, 宋鸿林, John Malpas. 2002. 华南在 Rodinia 古陆中位置的讨论——扬子地块西缘变质-岩杂岩证据及其与 Seychelles 地块的对比[J]. 地学前缘, 9(4):249-256.
- 鄢圣武, 白宪洲, 伍文湘, 朱兵, 詹琼窑, 文龙, 杨辉, 王玉婷. 2017. 扬子地块西缘新元古代泸沽 A 型花岗岩成因与变泥质岩熔融[J]. 中国地质, 44(1):136-150.
- 张旗, 王焰, 李承东, 王元龙, 金惟俊, 贾秀勤. 2006. 花岗岩的 Sr-Yb 分类及其地质意义[J]. 岩石学报, 22(9):2249-2269.
- 张沛, 周祖翼, 许长海, 张青林. 2008. 川西龙门山彭灌杂岩地球化学特征:岩石成因与构造意义[J]. 大地构造与成矿学, 32(1):105-116.
- 赵凤清, 赵文平, 左义成, 李宗会, 薛克勤. 2006. 陕南汉中地区新元古代岩浆岩 U-Pb 年代学[J]. 地质通报, 25(3):383-389.
- 朱维光, 刘秉光, 邓海琳, 钟宏, 李朝阳, 皮道会, 李志德, 覃喻. 2004. 扬子地块西缘新元古代镁铁-超镁铁质岩研究进展[J]. 矿物岩石地球化学通报, 23(3):255-264.