

doi: 10.12029/gc20210517

杜云,郭爱民,卢友月,田磊,王敬元,周立同,樊晖,罗小亚. 2021. 湘西南苗儿山岩体北段加里东期花岗岩成因:来自岩石学、地球化学和锆石 U-Pb 年代学的证据[J]. 中国地质, 48(5): 1540-1561.

Du Yun, Guo Aimin, Lu Youyue, Luo Xiaoya, Tian Lei, Wang Jingyuan, Zhou Litong, Fan Hui. 2021. Petrogenesis of the Caledonian granites in the northern part of Miaoershan pluton, southwestern Hunan Province: evidence from petrology, geochemistry and zircon U-Pb age[J]. *Geology in China*, 48(5): 1540-1561(in Chinese with English abstract).

湘西南苗儿山岩体北段加里东期花岗岩成因:来自岩石学、地球化学和锆石 U-Pb 年代学的证据

杜云¹,郭爱民¹,卢友月²,田磊¹,王敬元¹,周立同¹,樊晖¹,罗小亚¹

(1. 湖南省地质调查院,湖南长沙 410116;2. 中国地质调查局武汉地质调查中心,湖北武汉 430205)

摘要:苗儿山岩体位于湘西南与桂北交界处,为由晋宁期、加里东期、印支期和燕山期花岗岩组成的复式岩体。其中,加里东期花岗岩构成该复式岩体的主体,可划分为六个侵入次。本次通过锆石 LA-ICP-MS 测年,获得第一、第二、第六侵入次的年龄分别为(428.1±3.6) Ma、(420.3±3.4)~(421.3±3.2) Ma 和(408.3±3.5) Ma。加里东期花岗岩的(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i为0.71765,ε_{Nd}(t)为-9.7,δ¹⁸O 值为9.8‰,总体属壳源弱过铝-强过铝质花岗岩,形成于碰撞挤压峰期之后挤压减弱、应力松弛的后碰撞构造环境,其早期和晚期的源区岩石类型和形成温度有所区别:早期花岗岩的上地壳源区成分较为复杂,不仅存在泥岩,还有砂屑岩和/或变质火成岩,其形成温度较高(>875℃);晚期花岗岩的源岩为上地壳泥岩,属典型的 S 型花岗岩,其形成温度较低(<875℃)。

关键词:锆石 U-Pb 测年;地球化学;岩石成因;加里东期;苗儿山岩体;湘西南;地质调查工程;江西省

中图分类号:P588.12;P597 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2021)05-1540-22

Petrogenesis of the Caledonian granites in the northern part of Miaoershan pluton, southwestern Hunan Province: Evidence from petrology, geochemistry and zircon U-Pb age

DU Yun¹, GUO Aimin¹, LU Youyue², TIAN Lei¹,
WANG Jingyuan¹, ZHOU Litong¹, FAN Hui¹, LUO Xiaoya¹

(1. Hunan Institute of Geological Survey, Changsha 410116, Hunan, China; 2. Wuhan Center of China Geological Survey, Wuhan 430205, Hubei, China)

Abstract: The Miaoershan pluton, located at the junction of southwestern Hunan and Northern Guangxi, is a composite batholith composed of Jinningian, Caledonian, Indosinian and Yanshanian granites. Among them, Caledonian granites constitute the main body of the composite batholith, which can be divided into six intruding episodes. Through zircon LA-ICP-MS dating, the ages of the first, second and sixth episodic granites were measured at (428.1±3.6) Ma, (420.3±3.4)~(421.3±3.2) Ma and (408.3±3.5) Ma, respectively. The average (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i, ε_{Nd}(t) and the δ¹⁸O values of the Caledonian granites are 0.71765, -9.7, and 9.8, respectively.

收稿日期:2021-07-06;改回日期:2021-07-20

基金项目:中国地质调查局项目(121201009000150002)资助。

作者简介:杜云,1986年生,男,工程师,从事矿床地球化学与成矿规律研究工作;E-mail: 570358861@qq.com。

Caledonian granites are generally crust derived weak peraluminous–strong peraluminous granites, formed in post– collisional tectonic environment characterized by weakened compression and relaxed stress after the peak period of collision and extrusion. Their material and heat sources are different in the early and late stages. The early stage granites were derived from upper crustal metamorphic mudstone, psammite and/or metamorphic igneous rocks, and their formation temperature is relatively high(> 875°C). The late stage granites were derived from upper crustal metamorphic mudstone with lower formation temperature (< 875°C), showing the characteristics of typical S–type granites.

Key words: Zircon U– Pb dating; geochemistry; petrogenesis; Caledonian period; Miaoershan pluton; southwestern Hunan Province; geological survey engineering

About the first author: DU Yun, male, born in 1986, engineer, engaged in the study of deposit geochemistry and metallogenic regularity; E–mail: 77867876@qq.com.

Fund support: Supported by the project of China Geological Survey (No. 121201009000150002).

1 引言

花岗岩是组成地球大陆地壳的重要岩石类型,是地球大陆地壳与地球大洋地壳乃至太阳系中其他类行星的地壳相区别的最重要的标志(Pitcher, 1997)。花岗岩在大陆地壳增生和再循环的过程中起到了不可或缺的重要作用,在岩石圈构造演化、地球动力学和成矿作用研究中具有重要的意义(Barbarin, 1999; 李金东, 2005; 柏道远, 2008; 华仁民等, 2012, 2013; 陈骏等, 2014)。

华南加里东期花岗岩主要分布在湖南、江西、广西、广东和福建等省份,总面积超过2.2万 km²(程顺波等, 2013)。黄汲清早在1937年就提出华南可能存在加里东期花岗岩(黄汲清, 1994)。徐克勤在1957年首先发现并证实华南存在加里东期花岗岩体(徐克勤等, 1960)。此后,华南加里东期花岗岩逐渐引起地质界重视,吸引了众多地质工作者加入到研究行列中(徐克勤等, 1963; 王德滋等, 1978)。从20世纪80年代开始,随着地球化学、同位素地球化学分析方法和岩石定年方法的不断更新进步,对华南加里东期花岗岩的研究告别了单纯的经验判断;特别是到了90年代,随着高精度 SHRIMP 和 LA–ICP–MS 单颗粒锆石定年和锆石 Lu–Hf 同位素示踪技术的诞生,对华南加里东期花岗岩的研究有了强有力的科学技术支撑,研究水平不断提高。但是与华南燕山期花岗岩研究程度相比,华南加里东期花岗岩的研究明显不足,对其与成矿的关系认识不清,对其形成的构造背景的认识也存在很大的争议,目前主要有洋壳俯冲造山和板内挤压造山两种观点(孙明志等, 1990; 周新民等, 2003; 许德如等,

2006; 孙涛等, 2006)。

苗儿山岩体位于湘西南和桂北交界处,为一个以加里东期花岗岩为主体,包括晋宁期、印支期和燕山期花岗岩的复式岩体,由于其构造岩浆活动强烈、形成时间跨度长,因此对于研究华南地区的花岗岩成因、成矿作用和大地构造演化具有重要的意义。另外,近几年针对苗儿山岩体的找矿工作连续取得较大突破,发现了多个大、中、小型钨(锡、钼、铜)矿床(刘伟等, 2011; 伍静等, 2012; 杜云等, 2017),引起了越来越多学者的关注和研究。本文利用 LA–ICP–MS 单颗粒锆石 U–Pb 定年、X 射线荧光光谱分析、高分辨等离子体质谱分析、Sr–Nd 同位素分析和 O 同位素分析等高精度的分析测试手段,结合前人研究成果,对苗儿山岩体加里东期花岗岩的地球化学、锆石 U–Pb 年代学、Sr–Nd 同位素和 O 同位素特征进行了系统研究,在此基础上,讨论加里东期花岗岩的形成构造背景和成因,可为华南地区花岗岩成岩理论研究的完善提供依据。

2 岩体地质概况

苗儿山复式岩体位于湘西南与桂北交界处,总出露面积约 1600 km²,其北段处于湖南省境内,呈南北向展布,出露面积约 450 km²,南段主要位于广西区境内,呈北东向展布。苗儿山复式岩体由加里东期花岗岩构成主体,晋宁期、印支期和燕山期花岗岩呈小岩株状广泛分布其中,构成补体(图 1)。

苗儿山复式岩体出露于苗儿山复式背斜核部,其中加里东期花岗岩构成的主体与前泥盆纪地层呈侵入接触关系,而与泥盆系、白垩系则呈沉积接触关系。前泥盆纪地层主要包括青白口系、南华

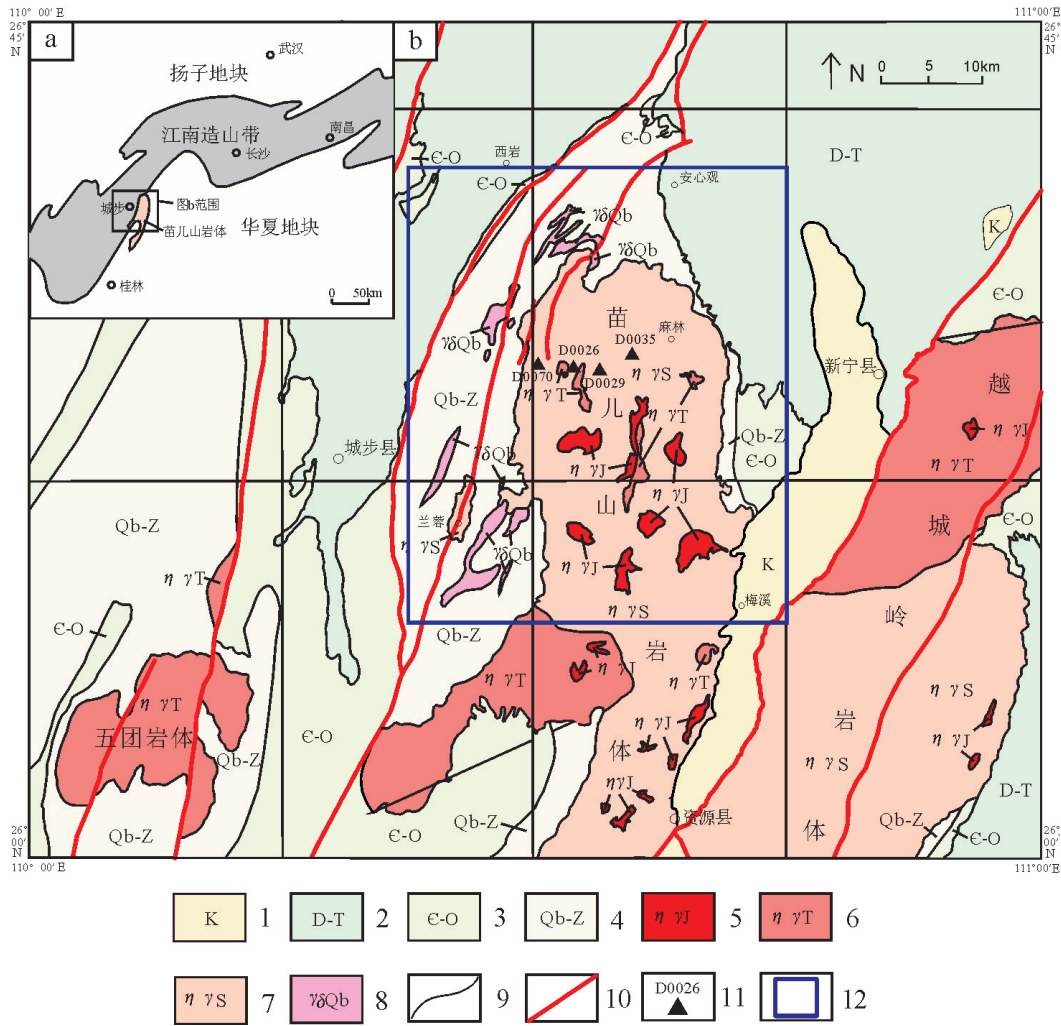


图1 大地构造位置(a)和区域地质略图(b)

1—白垩系;2—泥盆系至三叠系;3—寒武系至奥陶系;4—新元古界青白口系至震旦系;5—燕山期花岗岩;6—印支期花岗岩;7—加里东期花岗岩;8—新元古代晋宁期花岗闪长岩;9—地质界线;10—断层;11—U—Pb年龄样采样位置及编号;12—研究区范围

Fig.1 Tectonic location (a) and regional geological map(b)

1—Cretaceous system; 2—Devonian system to Triassic system; 3—Cambrian system to Ordovician system; 4—Neoproterozoic Qingbaikou system to Sinian system; 5—Yanshanian granite; 6—Indosinian granite; 7—Caledonian granite; 8—Neoproterozoic Jinningian granodiorite; 9—Geological boundary; 10—Fault; 11—U—Pb age sampling location and numbering; 12—The study area

系、震旦系和奥陶系(缺失志留系),为一套浅海—半深海相类复理石砂泥质碎屑沉积夹硅质、炭泥质沉积,部分层位夹碳酸盐岩;泥盆系为滨浅海碎屑岩—浅海台地、台盆相碳酸盐岩沉积;白垩系为陆相红盆碎屑沉积。苗儿山岩体及其四周围岩中断裂十分发育,其中NNE—NE向断裂规模最大,数量最多,构造形迹非常醒目,所谓的“城步—江口大断裂”,即为该组出露总宽度达数十千米的断裂的统称,它控制了苗儿山岩体的空间展布,并在多次继承性活动中对苗儿山岩体造成了明显的切割破坏作用。

3 岩石学特征

按地球化学、同位素年代学及野外地质特征,加里东期花岗岩从早到晚可分为六个侵入次,分别为第一侵入次中细粒斑状黑云母二长花岗岩($\eta\gamma S^a$)、第二侵入次中粗粒斑状黑云母二长花岗岩($\eta\gamma S^b$)、第三侵入次中粒斑状黑云母二长花岗岩($\eta\gamma S^c$)、第四侵入次中细粒黑云母二长花岗岩($\eta\gamma S^d$)、第五侵入次细粒斑状黑云母二长花岗岩($\eta\gamma S^e$)、第六侵入次细粒黑云母二长花岗岩($\eta\gamma S^f$)。

各个侵入次之间均为侵入接触关系,具有较为明显的分界线(图2a、b)。

第一侵入次中细粒斑状黑云母二长花岗岩($\eta\gamma S^a$),主要由粒径10~30 mm的自形一半自形板状钾长石为斑晶(含量10%~30%)和粒径0.7~4.4 mm的他形石英、钾长石、半自形板状斜长石、片状黑云母、菱柱状角闪石等为基质(含量70%~90%)组成,构成似斑状结构,基质为中—细粒花岗结构(图3a、b)。钾长石含量31%~45%,他形为主,具条纹结构、格子双晶,表面见石英、斜长石、黑云母等嵌晶。斜长石含量18%~29%,半自形板柱状,强绢云母化,发育聚片双晶,部分显环带构造。石英含量28%~33%,他形粒状、粒状集合体状,与长石互嵌或填隙长石粒间,微区可见石英呈文象状嵌布在钾长石中。黑云母含量4%~11%,片状、片状集合体状,褐色,含磷灰石、锆石、绿帘石等包体。角闪石含量微至1%,菱柱状,绿色,分散分布或包嵌于钾长石中。副矿物主要有金红石、磷灰石、锆石、绿帘石和黄铁矿,含少量方铅矿和磁铁矿。第一侵入次中可见少量暗色微粒包体,包体多呈不规则状或椭圆状,与围岩界线截然,直径一般在2~10 cm(图3c)。包体具似斑状结构,块状构造。斑晶含量约4%,主要为斜长石斑晶,直径1.5~3 mm。基质含量约96%,具半自形粒状结构,颗粒间紧密镶嵌,主要由主要由斜长石(44%)、黑云母(30%)和石英(19%)组成,含少量磷灰石(2%),及微量锆石(图3d)。黑

云母,棕褐色,自形一半自形板片状,部分可见针状金红石沿解理缝析出;石英,他形粒状,粒径约0.2~0.96 mm;磷灰石,无色,细小针柱状;锆石,无色粒状,粒径约0.2 mm。暗色微粒包体的岩性与寄主岩的岩性特征有显著差异,主要表现在颜色明显较深,矿物粒度明显较细,不含钾长石,斜长石和黑云母含量显著增加,石英含量明显减少。由于暗色微粒包体由两期先后结晶的矿物构成,具有明显的火成结构,且其组成矿物主要为斜长石、黑云母和石英,与火成岩、沉积岩部分熔融残余物(Tindle and Pearce, 1982)和壳幔混合成因的镁铁质微粒包体(MME)几乎不含石英的特征明显不同(Barbarin, 2005),因此应该既不是地壳部分熔融过程中形成的耐熔残余物,也不是壳幔混合的产物,而是地壳中偏基性的岩石的熔融物,反映了地壳源区成分的不均一性。

第二侵入次中粗粒斑状黑云母二长花岗岩($\eta\gamma S^b$),主要由粒径8~40 mm的自形—他形钾长石、斜长石、石英为斑晶(含量10%~20%)和粒径2~7mm的他形钾长石、石英、半自形板状斜长石、片状黑云母等为基质(含量80%~90%)组成,构成似斑状结构,基质为中—粗粒花岗结构。钾长石含量34%~48%,他形为主,具条纹结构、格子双晶,表面见石英、斜长石、黑云母等嵌晶。斜长石含量18%~38%,半自形板柱状,绢云母化、黏土化,发育聚片双晶,部分显环带构造。石英含量22%~35%,他形粒状、

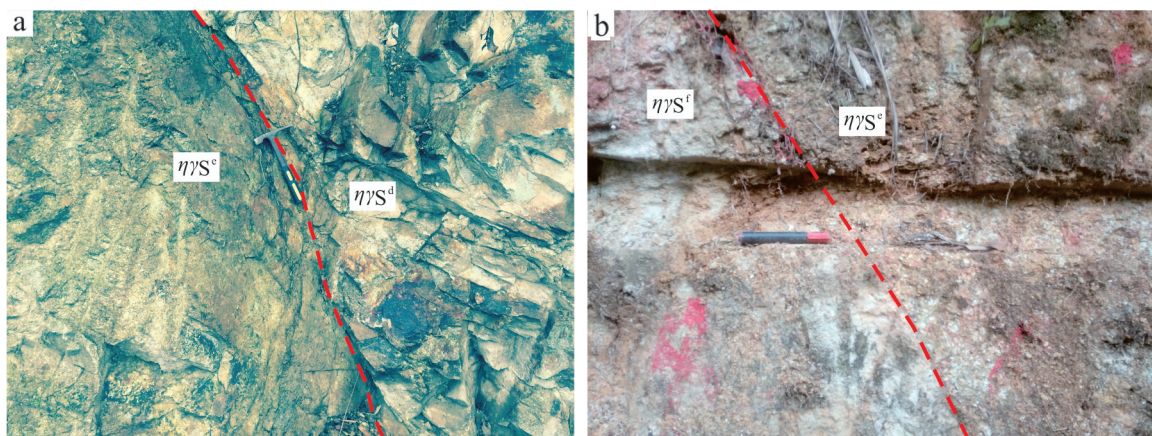


图2 加里东期不同侵入次花岗岩之间的典型接触特征

a—第五侵入次花岗岩侵入于第四侵入次花岗岩中;b—第六侵入次花岗岩侵入于第五侵入次花岗岩中

Fig.2 Representative contacts between the different episodes of Caledonian granites

a—A representative photo of the fifth episodic granites intruding into the fourth episodic granites; b— A representative photo of the sixth episodic granites intruding into the fifth episodic granites

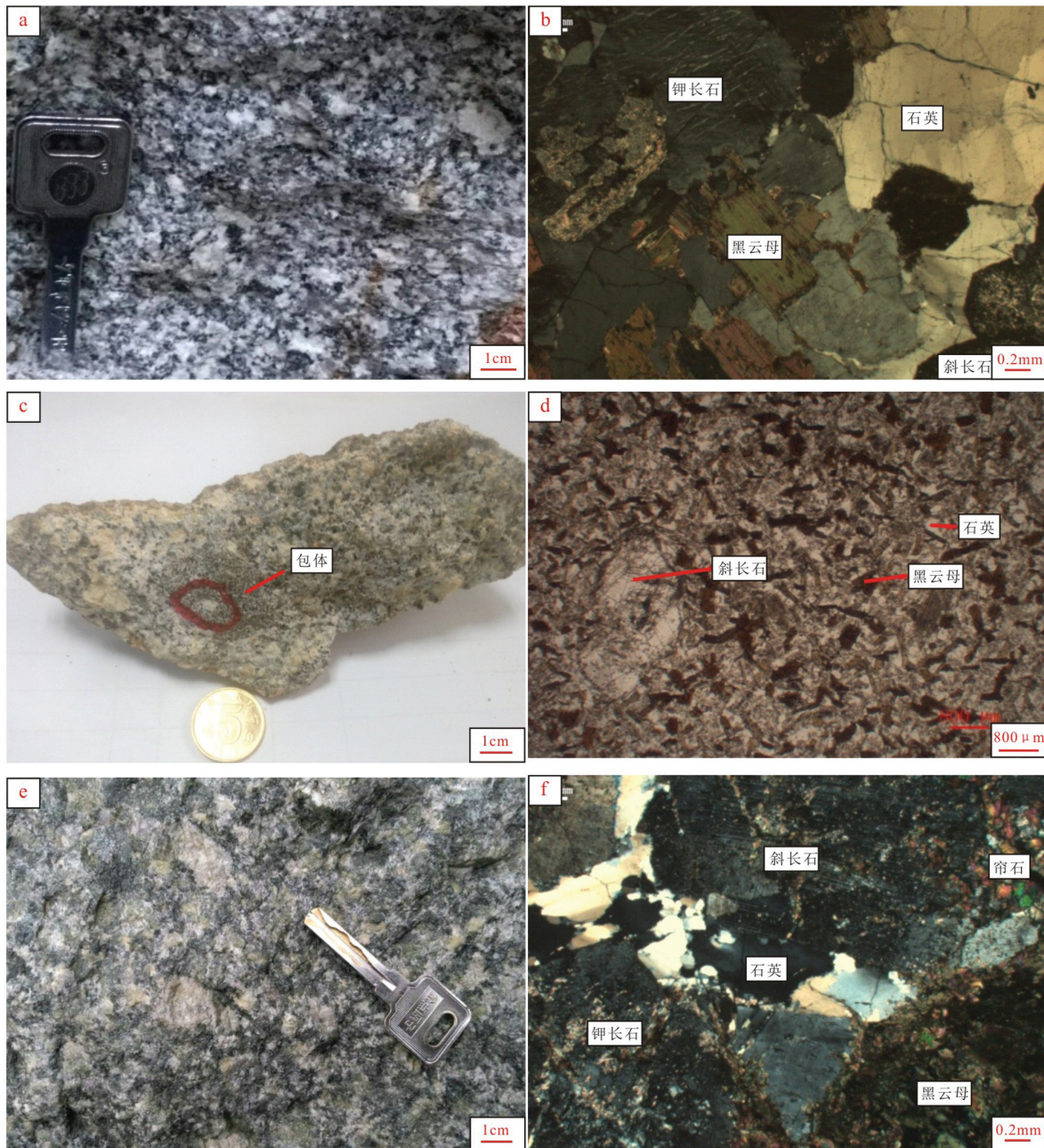


图3 加里东期第一、三侵入次花岗岩及包体的照片和显微照片

a—第一侵入次花岗岩露头;b—第一侵入次花岗岩显微照片;c—细粒暗色包体手标本;d—细粒暗色包体显微照片;e—第三侵入次花岗岩露头;f—第三侵入次花岗岩显微照片

Fig.3 Representative photographs and photomicrographs of the first and third episodic granites and enclaves from the Miaoshan pluton

a—A representative outcrop of the first episodic granites; b—A representative photomicrograph of the first episodic granites; c—A representative hand specimen of the fine-grained dark enclaves; d—A representative photomicrograph of the fine dark enclaves; e—A representative outcrop of the third episodic granites; f—A representative photomicrograph of the third episodic granites

粒状集合体状,与长石互嵌或填隙长石粒间。黑云母含量约3%~6%,片状、细片集合体状,绿泥石化,解理缝析出钛铁质,生成绿帘石,含磷灰石包体。副矿物主要有金红石、磷灰石、锆石、绿帘石、黄铁矿和方铅矿,含少量黄铜矿和磁铁矿。

第三侵入次中粒斑状黑云母二长花岗岩($\eta\gamma S^c$),主要由粒径8~35 mm的自形一半自形板状钾长石为斑晶(含量10%~20%)和粒径2~5 mm的他形钾长石、石英、半自形板状斜长石、片状黑云母、细柱状帘石等为基质组成,构成似斑状结构,基质为中粒花岗结构(图3e、f)。钾长石含量28%~50%,他形为主,具条纹结构、格子双晶,表面碎裂,裂隙中充填帘石、微晶石英等。斜长石含量18%~29%,半自形板柱状,强绢云母化,发育聚片双晶,部分显环带构造。石英含量28%~33%,他形粒状、粒状集合体状,与长石互嵌,部分细粒化重结晶的石英分布于石英或长石微裂隙中。黑云母含量4%~11%,片状、片状集合体状,绿泥石化,解理缝析出钛铁质,生成绿帘石,含磷灰石包体。绿帘石含量微至2%,柱状、柱粒状,主要与黑云母共生或分布在岩石微裂隙中。副矿物主要有金红石、磷灰石、锆石、绿帘石和黄铁矿,含少量方铅矿和磁铁矿。

第四侵入次中细粒黑云母二长花岗岩($\eta\gamma S^d$),主要由粒径0.5~3.6 mm的他形一半自形钾长石、半自形板状斜长石、它形粒状石英、片状黑云母等互相镶嵌组成,构成中细粒花岗结构。钾长石含量25%~43%,他形为主,隐显条纹结构、格子双晶,碎裂,具微裂隙,裂隙中充填氧化铁质物,表面嵌圆粒状石英、斜长石、黑云母等。斜长石含量20%~45%,半自形-自形板条状,绢云母化,发育聚片双晶。石英含量29%~33%,他形粒状、粒状集合体状,具微裂隙,裂隙中充填氧化铁质物,嵌微晶长石。黑云母含量6%~8%,片状、片状集合体状,弱绿泥石化,解理缝析出铁质,生成绿帘石,含磷灰石包体。副矿物主要有金红石、磷灰石、锆石、绿帘石和黄铁矿,含少量方铅矿和磁铁矿。

第五侵入次细粒斑状黑云母二长花岗岩($\eta\gamma S^e$),主要由粒径4~8 mm的自形一半自形板状钾长石、斜长石为斑晶(含量5%~20%)和粒径0.18~2.18 mm的他形石英、钾长石、自形一半自形板状斜长石、片状黑云母及少量片状白云母、碎粒状电气

石等为基质(含量80%~95%)组成,构成似斑状结构,基质为细粒花岗结构(图4a、b)。钾长石含量20%~35%,他形为主,具条纹结构、格子双晶,见较多石英、长石包裹体。斜长石含量25%~33%,半自形板柱状,弱-中等程度绢云母化,发育聚片双晶,部分显环带构造。石英含量20%~30%,他形粒状、粒状集合体状,晶粒切面上具明显的波状消光和显微裂缝。黑云母含量约6%~8%,片状、片状集合体状,绿泥石化,解理缝析出铁质,生成绿帘石、榍石,含磷灰石、锆石等包体。白云母含量微至1%,片状,星散分布或与黑云母共生。电气石含量微至1%,碎粒状,具电气石式吸收,零散分布。副矿物主要有金红石、磷灰石、锆石、绿帘石、黄铁矿和方铅矿,含少量磁铁矿和榍石。

第六侵入次细粒黑云母二长花岗岩($\eta\gamma S^f$),主要由粒径0.2~2 mm的细粒他形钾长石、石英、半自形板状斜长石、片状黑云母及少量碎粒状电气石、片状白云母等组成,构成细粒花岗结构(图4c、d)。钾长石含量28%~44%,他形为主,具条纹结构,与石英互嵌。石英含量32%~34%,他形粒状、粒状集合体状,与长石互嵌或填隙长石粒间。斜长石含量20%~40%,半自形板柱状,绢云母化、黏土化,发育聚片双晶。黑云母含量2%~5%,片状、细片集合体状,绿泥石化,解理缝析出铁质,生成绿帘石,含磷灰石包体。电气石含量微至3%,碎粒状,具电气石式吸收,零散分布,局部富集形成电气石团块或细脉。白云母含量微至1%,片状,星散分布或与黑云母共生。副矿物主要有金红石、磷灰石、锆石和方铅矿,含少量绿帘石、黄铁矿、磁铁矿及富铝矿物石榴子石。

加里东期六个侵入次的岩性特征表明,加里东期花岗岩从早期到晚期,矿物颗粒的粒度逐渐减小,暗色矿物黑云母总体逐渐降低,角闪石从有到无,电气石、白云母和石榴子石从无到有,反映随着岩浆的演化,镁铁质成分逐渐减少,酸性程度逐渐增大,挥发份含量也逐渐提高。

4 样品处理与分析方法

岩石地球化学分析:包括主量、微量和稀土元素分析,分析方法为先将新鲜样品粉碎、研磨至200目,再采用高精度的专业仪器进行测试,所有分析测试工作均在中国科学院地球化学研究所完成。

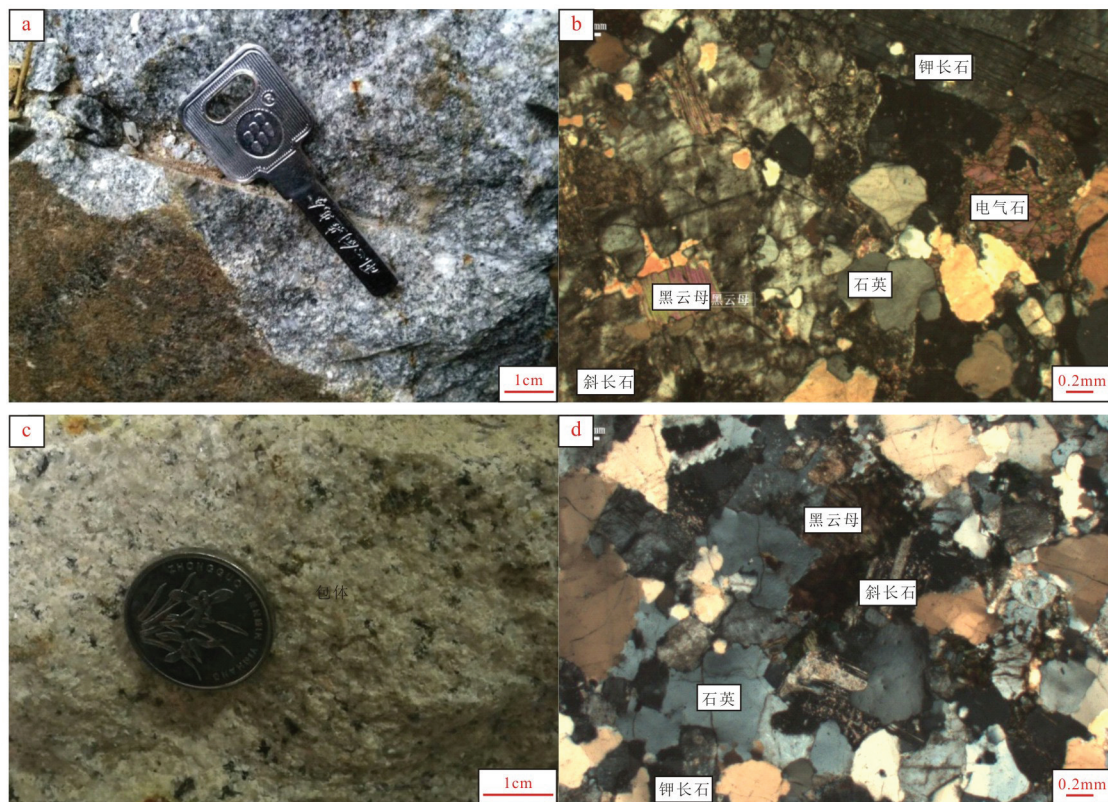


图4 加里东期第五、六侵入次花岗岩的照片和显微照片

a—第五侵入次花岗岩露头;b—第五侵入次花岗岩显微照片;c—第六侵入次花岗岩手标本;d—第六侵入次花岗岩显微照片

Fig.4 Representative photographs and photomicrographs of the fifth and sixth episodic granites and enclaves from the Miao'ershan pluton

a—A representative outcrop of the fifth episodic granites; b—A representative photomicrograph of the fifth episodic granites; c—A representative outcrop of the sixth episodic granites; d—A representative photomicrograph of the sixth episodic granites

其中主量元素测试方法为X射线荧光光谱法(XRF),测试仪器为Axios(PW4400)X射线荧光光谱仪;微量和稀土元素测试方法电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS),测试仪器为Finnigan MAT公司ELEMENT型高分辨等离子体质谱仪。

锆石U-Pb在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室完成。先将样品破碎、筛选、重选及磁选,在双目镜下挑选出透明度较好、晶形完整、无明显裂隙的锆石颗粒,再将锆石制成锆石样品靶,利用阴极荧光仪对锆石样品靶进行锆石显微照相,然后在此基础上进行锆石的U-Pb同位素测定工作。分析仪器为Perkinelmer生产的ELAN DRC-e型等离子质谱仪。原始测试数据用ICPMSDataCal软件进行处理(Liu et al., 2008)。普通Pb校正方法参照Andersen(2002), $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄及谐和图解采用ISOPLOT软件制作

(Ludwig, 2003)。

Sr-Nd同位素分析在南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室完成,测试仪器为德国Thermo Fisher Scientific公司生产的Triton型热电离同位素质谱仪。Sr-Nd同位素分析采用Teflon溶样器,加 NHO_3 和 HF 混合溶样,用专用的阳离子交换柱进行分离,分别采用 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr}=0.1194$ 和 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.7219$ 对Sr和Nd同位素进行分馏校正。在本次测试中,仪器测定的Sr同位素国际标准样品NBS987的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值为 $0.710254\pm 16(2\sigma)$,岩石标样BCR-1中的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值为 $0.512638\pm 3(2\sigma)$ 。Rb-Sr和Sr-Nd的全流程本底分别为小于100 pg和50 pg。

氧同位素分析:在中国地质科学院地质研究所完成,测试仪器为MAT-253气体同位素质谱计, $\delta^{18}\text{O}$ 全流程分析误差分别优于 $\pm 3\%$ 和 $\pm 0.2\%$ 。首先采用

无污染玛瑙球磨技术将样品粉碎至 <200 目,再采用 BrF_5 法提取样品中的氧,然后将氧与碳棒反应转化成 CO_2 ,再对样品中的氧同位素进行质谱测定。分析结果均以相对于SMOW(全球标准平均大洋水)同位素比值的千分变化值表示。

5 地球化学特征

5.1 主量元素特征

加里东期花岗岩主量元素化学分析结果、CIPW标准矿物计算及有关岩石化学分析参数见表1。

加里东期花岗岩侵入次较多,为了便于阐述,

本文将其按照矿物和化学成分特征分为早、中、晚三期,其中早期包括第一侵入次,中期包括第二、三、四、五侵入次,晚期包括第六侵入次。加里东期花岗岩 SiO_2 含量高,且变化范围大,为67.96%~75.99%,平均72.65%,其中早期花岗岩 SiO_2 含量为67.96%~73.37%,平均70.92%;中期花岗岩 SiO_2 含量为70.54%~75.99%,平均72.90%;晚期花岗岩 SiO_2 含量为72.94%~74.55%,平均73.74%;表明从早期到晚期 SiO_2 含量具有逐渐升高的趋势。 Al_2O_3 含量高,为12.4%~14.86%,平均13.29%;其中早期花岗岩 Al_2O_3 含量为12.93%~14.47%,平均13.44%;中期

表1 加里东期花岗岩主量元素组成(%)及部分特征参数

Table 1 Major element composition (%) and some characteristic parameters of the Caledonian granites

样号	代号号	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	TFeO	CaO	MgO	MnO	K_2O	Na_2O	P_2O_5	LOI	sum
D0015	$\eta\gamma\text{S}^a$	67.96	0.35	14.47	2.73	2.12	1.39	0.06	3.43	4.16	0.12	1.02	97.80
D0026	$\eta\gamma\text{S}^a$	73.37	0.09	12.43	0.95	0.85	0.26	0.04	4.87	4.75	0.04	0.63	98.28
D0052	$\eta\gamma\text{S}^a$	70.81	0.51	12.93	3.60	2.57	1.25	0.08	4.47	2.24	0.16	0.69	99.31
D0062	$\eta\gamma\text{S}^a$	71.55	0.18	13.94	1.91	0.45	0.68	0.08	3.97	3.39	0.03	1.84	98.02
D0029	$\eta\gamma\text{S}^b$	70.54	0.23	14.86	1.89	0.71	0.64	0.04	4.41	3.75	0.08	1.66	98.79
D0035	$\eta\gamma\text{S}^b$	75.99	0.14	12.26	1.83	0.32	0.65	0.04	4.44	3.63	0.05	1.02	100.35
D0012	$\eta\gamma\text{S}^c$	71.01	0.26	13.24	2.22	1.33	0.80	0.05	4.87	2.58	0.09	0.85	97.32
D0016	$\eta\gamma\text{S}^d$	73.16	0.13	13.95	1.51	0.86	0.45	0.05	4.88	4.15	0.12	0.74	99.99
D0044	$\eta\gamma\text{S}^d$	73.31	0.03	12.91	0.46	0.43	0.19	0.13	4.31	4.72	0.05	0.74	97.28
D0068	$\eta\gamma\text{S}^e$	73.39	0.09	13.08	1.36	0.24	0.26	0.05	4.04	3.32	0.04	2.06	97.92
D0031	$\eta\gamma\text{S}^f$	73.30	0.06	12.71	1.17	0.36	0.17	0.03	4.55	3.99	0.03	0.56	96.93
D0032	$\eta\gamma\text{S}^f$	72.94	0.08	12.40	1.46	0.47	0.31	0.03	5.56	6.67	0.04	0.64	100.60
D0033	$\eta\gamma\text{S}^f$	74.55	0.06	14.04	1.11	0.39	0.26	0.04	5.04	4.19	0.03	0.90	100.60
D0051	$\eta\gamma\text{S}^f$	74.53	0.06	12.57	1.12	0.72	0.23	0.04	5.16	2.94	0.03	1.14	98.52
D0070	$\eta\gamma\text{S}^f$	73.36	0.06	13.58	0.52	0.58	0.23	0.04	4.63	4.86	0.03	0.51	98.39
样号	代号	锆辉石(Ac)	硅酸钠(Ns)	C值	A/CNK	ASI	σ_{43}	R1	R2	DI	SI	A/NK	K/Na
D0015	$\eta\gamma\text{S}^a$	0	0	0.36	1.01	1.17	2.26	2233	598	81	11.78	1.37	0.83
D0026	$\eta\gamma\text{S}^a$	0.63	0.63	0	0.85	0.90	3.02	2082	356	94.76	2.37	0.95	1.03
D0052	$\eta\gamma\text{S}^a$	0	0	0.12	0.98	1.21	1.61	2800	598	78.35	10.74	1.52	2.00
D0062	$\eta\gamma\text{S}^a$	0	0	3.46	1.31	1.36	1.86	2677	369	89.22	6.84	1.41	1.17
D0029	$\eta\gamma\text{S}^b$	0	0	2.9	1.22	1.29	2.38	2342	410	88.94	5.92	1.36	1.17
D0035	$\eta\gamma\text{S}^b$	0	0	1.03	1.08	1.11	1.97	2696	308	92.92	6.13	1.14	1.22
D0012	$\eta\gamma\text{S}^c$	0	0	1.6	1.11	1.25	1.95	2701	458	86.04	7.64	1.39	1.89
D0016	$\eta\gamma\text{S}^d$	0	0	0.56	1.02	1.09	2.69	2229	391	91.95	4.09	1.15	1.17
D0044	$\eta\gamma\text{S}^d$	0	0	0	0.98	1.01	2.66	2263	320	96.8	1.96	1.04	0.91
D0068	$\eta\gamma\text{S}^e$	0	0	3.03	1.27	1.31	1.75	2844	308	92.81	2.93	1.33	1.22
D0031	$\eta\gamma\text{S}^f$	0	0	0.65	1.05	1.08	2.37	2457	307	95.16	1.68	1.11	1.14
D0032	$\eta\gamma\text{S}^f$	0.94	5.25	0	0.70	0.71	4.99	1148	309	89.85	2.20	0.73	0.83
D0033	$\eta\gamma\text{S}^f$	0	0	1.05	1.08	1.11	2.70	2273	331	94.6	2.41	1.14	1.20
D0051	$\eta\gamma\text{S}^f$	0	0	0.93	1.07	1.14	2.06	2755	344	93	2.38	1.21	1.76
D0070	$\eta\gamma\text{S}^f$	0	0	0	0.97	1.01	2.95	2105	347	96.37	2.24	1.04	0.95

花岗岩 Al_2O_3 含量为 12.26%~14.86%，平均 13.38%；晚期花岗岩 Al_2O_3 含量为 12.40%~14.04%，平均 13.06%；表明从早期到晚期 Al_2O_3 含量变化不大，仅显示出略微降低的趋势。全碱(ALK)含量高，($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$)绝大多数都在 6.71%~9.62% (D0026 和 D0032 两个样品的 ALK 含量分别为 9.62% 和 12.23%，显著高于其他样品，明显是后期碱交代作用的结果)，平均 8.53%； K_2O 含量较高，为 3.43%~5.56%，平均 4.58%； $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值较大，为 0.83~2.0，平均 1.23，与华南壳源花岗岩 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值大于 1 的特征明显相符，显示出壳源 S 型花岗岩的特征(凌洪飞等, 2005)。早期花岗岩的全碱(ALK)、 K_2O 及 Na_2O 含量分别为 7.82%、4.19% 和 3.63%；中期花岗岩的全碱(ALK)、 K_2O 及 Na_2O 含量分别为 8.81%、4.49% 和 3.69%；晚期花岗岩的全碱(ALK)、 K_2O 及 Na_2O 含量分别为 9.52%、4.99% 和 4.53%；表明从早期到晚期全碱(ALK)、 K_2O 及 Na_2O 的含量都有逐渐升高的趋势。TFeO 含量较低，为 0.46%~3.60%，平均 1.59%；MgO 含量较低，为 0.17%~1.39%，平均 0.52%。其中早期花岗岩的 TFeO 和 MgO 的平均含量分别为 2.30% 和 0.89%；中期花岗岩的 TFeO 和 MgO 的平均含量分别为 1.54% 和 0.50%；晚期花岗岩的 TFeO 和 MgO 的平均含量分别为 1.08% 和 0.24%；表明从早期到晚期 TFeO 和 MgO 有逐渐降低的趋势，反映岩浆向着铁镁质成分降低、酸性程度增大的方向演化。 TiO_2 、 MnO 、 CaO 、 P_2O_5 含量较低，多在 1% 以下，且从早期到晚期具有含量逐渐降低的趋势。综上，主量元素的规律性变化，表明从早期到晚期，加里东期花岗岩一直向着富硅、富碱、贫铁镁质的方向演化，且其结晶分异程度不断增高。

加里东期花岗岩的分异指数(DI)介于 78.35~96.37，平均 90.78，远大于未经分异的原生基性岩浆的 DI 值(DI=25~45，朴成哲, 2016)；早期、中期、晚期花岗岩的平均 DI 值分别为 85.83、91.58、93.80。固结指数(SI)介于 1.68~11.78，平均 4.75，小于未经分异的原生基性岩浆的 SI 值(SI=25~45，朴成哲, 2016)；早期、中期、晚期花岗岩的平均 SI 值分别为 7.93、4.78、2.18。分异指数和固结指数表明加里东期花岗岩是经过充分结晶分异的产物，并且具有从早期到晚期结晶分异程度不断增高的特征。

CIPW 标准矿物计算表明，加里东期花岗岩样品中大多数都出现刚玉，C 值为 0.12~3.03，平均 1.05，总体显示出铝过饱和的特征。另外，D0026 和 D0032 两个样品的 CIPW 标准矿物中还出现了锥辉石和硅酸钠两种碱性矿物，反映这 2 个样品均为碱过饱和花岗岩，结合这两个样品 ALK 值偏大，A/CNK 值和 C 值偏小等特征，推断这 2 个样品受到了显著的后期碱交代作用。

在 $\text{SiO}_2-(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})$ 图解中，加里东期花岗岩样品基本都落入花岗岩区，仅有 1 个早期花岗岩的样品落入花岗闪长岩区，表明加里东期花岗岩总体属酸性岩浆岩(图 5)。铝饱和度(A/CNK)介于 0.98~1.31，平均 1.09 (D0026 和 D0032 两个样品 A/CNK 值分别为 0.85 和 0.70，远小于 1，受到后期碱交代的影响，不计入平均值)，总体属过铝质花岗岩(Sylvester et al., 1998; Chappell and White, 2001; 肖庆辉等, 2002)。

根据 Frost et al. (2001) 提出的地球化学分类法，花岗岩可以通过 Fe 数(TFeO/(TFeO+MgO))、改良碱钙指数($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}-\text{CaO}$)和铝饱和指数(ASI) ($\text{Al}/(\text{Ca}-1.67\text{P}+\text{Na}+\text{K})$)这三个地球化学变量加以有效区分。投图结果显示，加里东期花岗岩总体属铁质-镁质(早期偏向镁质，晚期偏向铁质)、碱钙性-钙碱性、弱过铝-强过铝质花岗岩(图 6a~c)。另外，在 $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}$ 图解中，加里东期花岗岩样品绝大多数都落入高钾钙碱性系列范围，总体属高钾钙碱性系列(图 6d)。

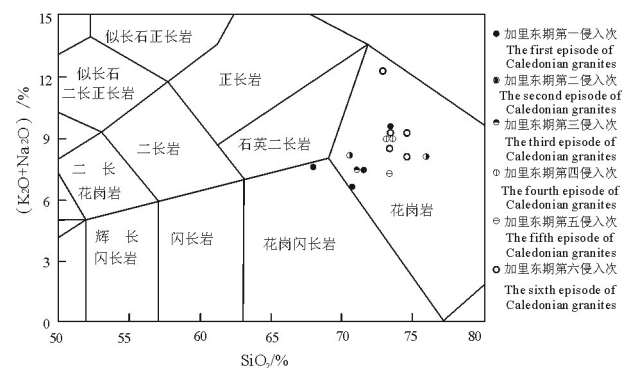


图 5 加里东期花岗岩 $\text{SiO}_2-(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})$ 图解
(据 Middlemost, 1994)

Fig.5 $\text{SiO}_2-(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})$ diagram of the Caledonian granites
(after Middlemost, 1994)

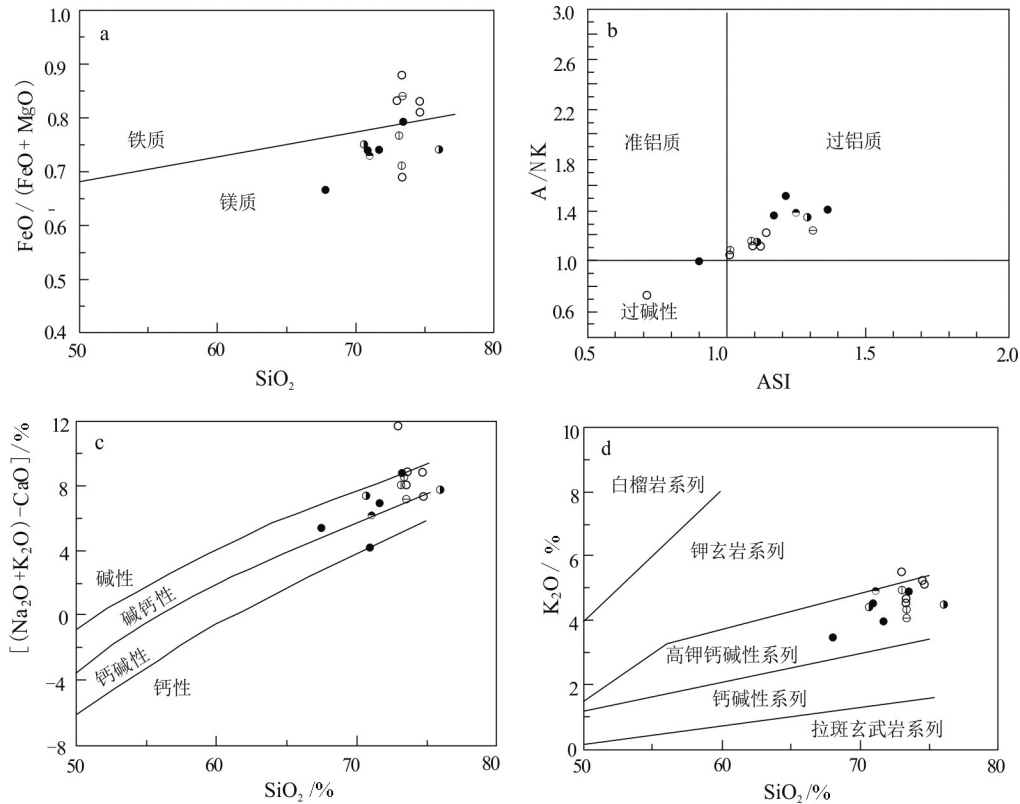


图6 加里东期花岗岩地球化学分类图解(图例同图4)

(a—c据Frost et al., 2001; d据Peccerillo et al., 1976)

Fig.6 Geochemical classification diagram of the Caledonian granites

(a—c, after Frost et al., 2001; d, after Peccerillo et al., 1976)

5.2 微量元素特征

在不相容元素对原始地幔标准化蛛网图上(图7a),加里东期花岗岩样品的元素分布特征总体一致,各样品的Ba、Nb、Sr、P、Ti元素均表现为明显的亏损,其中Ba、Sr、Ti亏损最为显著,呈深“V”型,而(Rb+K)、(Th+U)、(La+Ce)、Nd、(Zr+Hf+Sm)、(Y+Yb+Lu)等则相对富集,显示出壳源花岗岩的特征。Sr、Ba亏损一般与斜长石熔融残留或结晶分离作用有关(Patino Douce et al., 1991, 1995)。P、Ti亏损可能与磷灰石、钛铁矿的分离结晶作用有关。Nb的亏损表明源区岩石中以陆壳组分为主(Green, 1995; Barth et al., 2000)。

高场强元素中Nb与Ta、Zr与Hf的原子价和原子半径相同,化学性质极为相似,一般情况下彼此难分离。但壳、幔分离时,Nb、Ta分别优先进入地幔和地壳,使得Nb、Ta分别在地幔和地壳中富集,因此Nb/Ta比可用来示踪火成岩岩浆形成时地壳组分的参与程度(Green, 1995)。岩石微量元素丰度及部

分特征参数计算结果表明(表2),加里东期花岗岩Nb/Ta比值介于3.36~9.89之间,平均5.41,低于地壳的平均值12.22(Rudnick and Fountain, 1995)及原始地幔平均值17.4(Sun and McDonough, 1989),说明其属壳源成因类型(陈小明等, 2002)。Zr/Hf比值(18.40~35.61, 平均24.55),不仅低于中国东部(36.72,高山等, 1999)上地壳平均值和全球地壳平均值(86.67,黎彤, 1976),也低于原始地幔平均值(29.64, Taylor and McLennan, 1985),意味着可能在岩浆演化过程中Zr/Hf发生了较明显的分馏。

部分大离子亲石元素和高场强元素的比值可以示踪岩浆岩物质来源。Rb/Sr比值(变化范围大,为1.55~30.34,平均12.08)远高于中国东部(0.31,高山等, 1999)和全球(0.32, Taylor and McLennan, 1985)上地壳的平均值,Rb/Nb比值(8.10~26.92平均15.20)高于中国东部(6.8,高山等, 1999)以及全球(4.5, Taylor and McLennan, 1985)上地壳的平均值,反映加里东期花岗岩具有高成熟度的壳源成因的

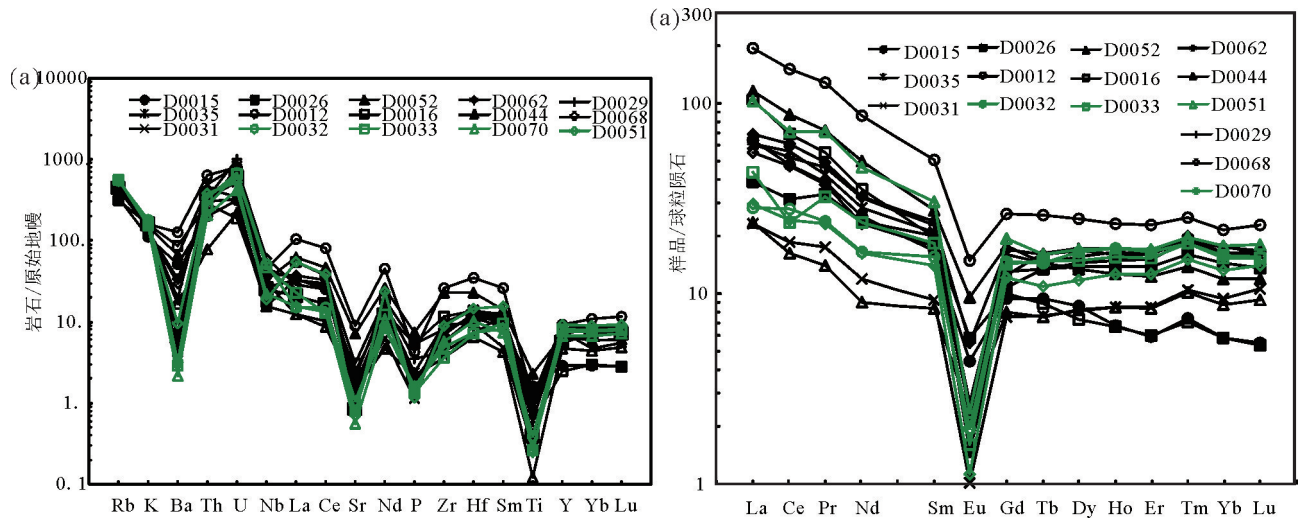


图7加里东期花岗岩微量元素原始地幔标准化蛛网图(a)与稀土元素球粒陨石标准化分布型式图(b)
(原始地幔值据 Sun and McDonough, 1989; 球粒陨石值据 Taylor and McLennan, 1985)

Fig.7 Primitive mantle-normalized trace elements spider diagram (a) and chondrite-normalized REE distribution pattern diagram (b) of the Caledonian granites

(Primitive mantle value is after Sun and McDonough, 1989; Chondrite value is after Taylor and McLennan, 1985)

特征(Harris and Inger, 1992; 李献华等, 2002)。Rb/Sr 比值高,且变化范围大,除岩浆本身因为高度分异而具有富Rb 贫Sr 的特征外,可能也如前述主量元素特征所反映的一样,部分样品后期发生了不同程度的碱交代作用导致了Rb 的富集。

5.3 稀土元素特征

岩石稀土元素丰度及部分特征参数计算结果表明(表3),加里东期花岗岩稀土总量基本都介于 $46.60 \times 10^{-6} \sim 198.42 \times 10^{-6}$ (仅1个为 344.12×10^{-6}),变化较大,平均 128.22×10^{-6} ,小于地壳 165.35×10^{-6} 的平均含量,但远高于上地幔 17.48×10^{-6} 的平均含量(黎彤等, 1976)。轻重稀土总和比值($\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$)较大,介于2.50~13.74,平均5.66,反映轻、重稀土分馏明显,轻稀土较为富集。 $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 值介于1.90~18.74,变化大,平均5.84,由于 $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 值越大,反映轻稀土(LREE)越富集, $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 值大于1,即为轻稀土富集型(韩吟文等, 2003),因此加里东期花岗岩属于典型的轻稀土富集型花岗岩。 δEu 值介于0.09~0.42,平均0.21,显示铕具有明显的亏损,表明斜长石大量存在于部分熔融残余体中或斜长石在岩浆作用过程中发生了显著的分馏结晶作用(Visonà and Lombardo, 2002)。

加里东期不同侵入次的花岗岩在 $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 和 δEu 值方面表现出一定的差异性。早期花岗岩

$(\text{La}/\text{Sm})_N$ 值介于2.83~11.72,平均7.33; δEu 值介于0.1~0.42,平均0.28。中期花岗岩 $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 值介于2.87~18.74,平均7.04; δEu 值介于0.14~0.39,平均0.25。晚期花岗岩 $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 值介于1.9~6.12,平均3.20; δEu 值介于0.09~0.13,平均0.12。上述事实表明从早期到晚期,加里东期花岗岩 $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 和 δEu 值逐渐减小,分异演化特征较为明显。

在稀土元素配分型式图(图7b)中,加里东期花岗岩变化特征基本一致,总体为向右倾斜曲线,均出现铕的低谷。其中,轻稀土一侧的曲线较陡,重稀土一侧的曲线十分平缓,表明轻稀土发生了显著的分馏作用,而重稀土没有发生明显的分馏作用。

6 锆石U-Pb年代学特征

本次共对加里东期花岗岩采集了4个锆石U-Pb 测年样品,其中D0026 采自加里东期第一侵入次中细粒斑状黑云母二长花岗岩,D0029 和D0035 采自加里东期第二侵入次中粗粒斑状黑云母二长花岗岩,D0070 采自加里东期第六侵入次细粒黑云母二长花岗岩。

从4个样品中所获锆石颗粒较大,粒径50~300 μm ,自形程度高,多为自形柱状,颜色以褐色、浅褐色为主,透明到半透明,阴极发光图像(图8)均显示清晰的韵律环带结构,且Th/U 值高,为0.17~

表2 加里东期花岗岩微量元素丰度(Ag为 10^{-9} ;其余为 10^{-6})Table 2 Trace element abundance of the Caledonian granites (Ag: 10^{-9} , the other elements: 10^{-6})

样品	D0015	D0026	D0052	D0062	D0029	D0035	D0012	D0016	D0044	D0068	D0031	D0032	D0033	D0051	D0070
代号	$\eta\gamma S^a$	$\eta\gamma S^a$	$\eta\gamma S^a$	$\eta\gamma S^a$	$\eta\gamma S^b$	$\eta\gamma S^b$	$\eta\gamma S^c$	$\eta\gamma S^d$	$\eta\gamma S^d$	$\eta\gamma S^c$	$\eta\gamma S^f$	$\eta\gamma S^f$	$\eta\gamma S^f$	$\eta\gamma S^f$	$\eta\gamma S^f$
Li	48.40	12.50	156.00	140.00	46.40	26.40	83.90	61.00	17.00	28.90	9.89	14.50	31.70	20.50	61.60
Be	4.95	8.68	6.26	7.49	7.50	8.13	12.30	3.47	30.11	13.56	7.29	5.14	11.19	5.93	5.73
Sc	4.36	3.36	11.00	5.59	4.14	4.24	17.90	4.84	3.47	4.91	3.22	3.93	4.32	4.70	3.71
V	11.30	0.68	64.50	17.10	2.43	8.93	81.90	20.40	0.00	2.36	0.00	2.94	0.00	0.00	0.47
Cr	7.59	1.70	30.18	16.52	3.80	4.84	60.40	13.64	0.96	3.35	0.80	3.05	2.52	0.26	32.79
Co	2.36	0.78	9.66	3.24	1.04	2.63	11.50	3.25	0.71	2.01	0.67	1.21	0.73	1.00	0.75
Ni	3.29	0.26	14.24	10.58	1.06	3.40	25.63	5.00	0.63	1.65	0.32	5.53	0.14	0.78	0.85
Cu	4.66	16.38	11.16	15.97	3.44	7.02	47.58	9.13	8.80	84.74	18.41	3.72	1.88	48.07	1.50
Zn	27.31	9.22	54.97	41.05	12.15	17.29	54.71	28.37	13.83	60.47	11.62	16.05	18.89	26.60	15.96
Ga	14.10	10.30	19.30	18.60	12.40	14.80	29.50	14.30	10.50	17.20	14.50	14.60	15.40	13.70	12.80
Ge	1.92	1.84	2.36	2.48	1.99	2.00	3.95	1.58	2.31	3.03	2.57	2.53	2.91	2.89	2.91
As	2.04	2.55	1.95	3.29	2.66	2.06	6.04	8.62	0.98	2.80	4.13	2.13	2.52	4.75	2.32
Rb	217.00	291.00	276.00	366.00	273.00	293.00	296.00	199.00	290.00	358.00	353.00	354.00	361.00	366.00	361.00
Sr	52.70	18.20	150.00	45.20	20.20	27.80	191.00	66.30	31.30	35.50	30.50	22.60	17.00	15.00	11.90
Zr	92.00	65.40	255.00	111.00	48.20	106.00	291.00	131.00	40.50	78.40	103.00	55.20	41.40	100.00	65.00
Nb	11.32	18.23	23.30	27.41	19.26	32.12	32.78	13.01	11.25	44.17	22.05	37.26	33.07	13.60	15.88
Mo	0.06	0.17	0.27	0.10	6.29	0.06	20.70	0.15	0.44	0.47	0.78	0.07	0.00	0.06	0.09
Ag	0.14	0.30	0.29	0.37	0.29	0.37	0.90	0.18	0.21	0.98	0.23	0.56	0.47	0.60	0.18
Cd	0.30	0.34	0.28	0.65	0.32	0.32	0.65	0.32	0.19	0.84	0.23	0.23	0.28	0.36	0.40
In	0.12	0.05	0.11	0.16	0.08	0.09	0.16	0.07	0.05	0.26	0.05	0.06	0.07	0.08	0.11
Sn	15.50	14.00	14.70	26.80	17.10	14.40	28.90	15.50	7.96	34.70	9.71	10.50	14.20	11.70	20.50
Sb	0.15	0.21	0.14	0.24	0.24	0.21	0.43	0.20	0.13	0.31	0.14	0.16	0.23	0.14	0.21
Cs	23.30	32.10	36.00	32.90	39.20	7.08	34.70	23.50	15.60	37.60	19.80	21.70	38.50	22.00	40.80
Ba	368.00	45.40	471.00	241.00	52.60	136.00	897.00	612.00	118.00	208.00	30.50	22.40	20.30	66.80	15.20
Hf	3.51	3.46	7.16	4.22	2.22	4.42	10.90	4.32	2.04	3.94	3.00	2.31	2.25	4.57	3.21
Ta	2.82	3.66	3.06	4.38	4.16	5.42	6.59	2.07	3.35	12.98	3.08	3.77	6.59	4.05	3.71
W	7.47	3.11	19.80	13.50	13.10	8.01	89.90	16.80	22.60	20.30	2.19	7.16	5.98	93.80	10.40
Tl	1.53	2.59	2.17	3.37	2.36	2.06	2.90	1.45	2.45	3.49	2.65	2.89	3.39	2.99	2.58
Pb	46.02	67.05	49.65	37.83	78.20	44.59	118.22	42.56	65.70	64.35	62.57	80.39	91.20	111.47	86.13
Bi	0.60	0.63	0.27	0.35	0.16	0.72	4.55	0.48	4.63	13.22	0.58	0.32	0.60	2.01	1.22
Th	17.10	31.50	36.90	26.50	28.80	42.10	54.90	24.40	6.79	22.50	29.10	28.50	22.60	32.30	17.90
U	6.56	12.60	7.30	6.95	21.60	17.60	17.00	4.03	4.60	17.10	11.20	14.70	13.80	11.00	9.02

1.44, 皆大于 0.1, 应为典型的岩浆结晶锆石(周剑雄等, 2007)。

样品 D0026 共分析了 12 颗锆石, 分析结果见表 4。12 个测点的年龄集中在 427.1~428.6 Ma, 加权平均年龄为(428.1±3.6)Ma, MSWD=0.0039(图 9a), 误差小, 精度高, 可靠性大, 代表了加里东期第一侵入岩体的形成年龄。

样品 D0029 共分析了 12 颗锆石, 分析结果见表 5。12 个测点的年龄集中在 419.4~420.8 Ma, 加权平均年龄为(420.3±3.4)Ma, MSWD=0.0035(图 9b), 误

差小, 精度高, 可靠性大, 代表了加里东期第二侵入岩体的形成年龄。

样品 D0035 共分析了 16 颗锆石, 分析结果见表 6。16 个测点的年龄集中在 420.1~421.9 Ma, 加权平均年龄为(421.3±3.2)Ma, MSWD=0.0038(图 9c), 误差小, 精度高, 可靠性大, 代表了加里东期第二侵入岩体的形成年龄。

样品 D0070 共分析了 14 颗锆石, 分析结果见表 7。其中 14 个测点的年龄集中在 407.7~408.9 Ma 之间, 加权平均年龄为(408.3±3.5)Ma, MSWD=0.0024

表3 加里东期花岗岩稀土元素丰度(10^{-6})及有关参数
Table 3 REE abundance (10^{-6}) and its related parameters of the Caledonian granites

样品	D0015	D0026	D0052	D0062	D0029	D0035	D0012	D0016	D0044	D0068	D0031	D0032	D0033	D0051	D0070
代号	$\eta\gamma^a$	$\eta\gamma^b$	$\eta\gamma^c$	$\eta\gamma^d$	$\eta\gamma^e$	$\eta\gamma^f$	$\eta\gamma^g$	$\eta\gamma^h$	$\eta\gamma^i$	$\eta\gamma^j$	$\eta\gamma^k$	$\eta\gamma^l$	$\eta\gamma^m$	$\eta\gamma^n$	$\eta\gamma^o$
La	71.80	23.70	38.40	14.20	22.40	8.58	10.50	16.10	22.60	8.72	37.70	42.60	20.10	25.40	20.20
Ce	146.00	45.90	66.60	30.00	49.60	18.00	26.90	22.80	53.70	15.60	68.30	83.80	49.80	59.20	44.70
Pr	17.60	5.33	7.64	4.59	6.38	2.42	3.32	4.47	5.81	1.94	9.77	9.91	5.20	6.77	5.13
Nd	61.80	18.30	25.40	17.10	22.60	8.50	11.90	16.90	20.10	6.41	32.80	35.30	19.40	23.20	16.70
Sm	11.70	3.88	4.62	4.65	5.36	2.15	3.60	4.28	4.85	1.94	7.04	6.40	3.97	5.55	4.12
Eu	1.30	0.39	0.52	0.13	0.22	0.09	0.17	0.14	0.24	0.21	0.21	0.84	0.18	0.48	0.21
Gd	8.06	2.88	3.06	3.30	3.82	2.31	4.53	4.41	4.94	2.46	6.01	5.51	3.69	5.22	4.02
Tb	1.51	0.55	0.52	0.79	0.95	0.45	0.84	0.87	0.85	0.44	0.94	0.84	0.61	0.93	0.78
Dy	9.45	3.31	2.82	5.32	6.64	3.12	6.35	5.69	5.95	3.17	6.51	5.12	4.13	6.46	5.55
Ho	2.00	0.58	0.57	1.19	1.47	0.73	1.48	1.33	1.41	0.73	1.48	1.09	0.92	1.37	1.28
Er	5.76	1.49	1.52	3.46	4.24	2.13	4.13	3.84	4.05	2.09	4.24	3.10	2.69	4.02	3.81
Tm	0.90	0.27	0.25	0.58	0.69	0.37	0.66	0.65	0.69	0.36	0.71	0.50	0.50	0.72	0.68
Yb	5.36	1.45	1.47	3.60	4.35	2.36	3.97	3.81	4.00	2.18	4.42	2.96	3.15	4.09	4.41
Lu	0.88	0.21	0.21	0.53	0.63	0.41	0.60	0.59	0.61	0.36	0.70	0.46	0.49	0.63	0.65
Y	42.10	13.40	11.40	25.40	31.60	35.30	37.20	34.90	38.50	21.40	42.80	31.00	27.20	38.60	37.10
Σ REE	108.24	89.44	198.42	144.05	129.36	129.78	344.12	153.60	46.60	112.24	51.61	78.95	85.88	180.82	70.22
LREE	97.50	70.67	178.85	120.60	106.56	107.29	310.20	143.17	34.81	91.06	39.74	56.39	64.69	155.82	52.68
HREE	10.74	18.77	19.58	23.45	22.80	22.49	33.92	10.42	11.78	21.17	11.87	22.56	21.19	25.01	17.54
LREE/ HREE	9.08	3.77	9.14	5.14	4.67	4.77	9.14	13.74	2.96	4.30	3.35	2.50	3.05	6.23	3.00
(La/Sm) _N	11.72	2.83	10.32	4.45	3.69	4.05	9.61	18.74	2.87	3.29	2.61	1.90	3.03	6.12	2.36
δ Eu	0.34	0.10	0.42	0.27	0.14	0.15	0.39	0.39	0.29	0.16	0.12	0.13	0.10	0.09	0.09
δ Ce	0.96	0.91	0.96	1.08	1.00	1.12	0.98	0.90	0.89	1.05	0.95	1.11	0.65	0.85	0.97
TE _{1,3}	1.09	1.09	0.98	1.07	1.13	1.04	1.05	1.00	1.00	1.07	1.04	1.07	0.93	0.96	0.99

(图9d),误差小,精度高,可靠性大,代表了加里东期第六侵入次岩体的形成年龄。

综合上述U-Pb年龄((428.1±3.6)Ma、(420.3±3.4)Ma、(421.3±3.2)Ma和(408.3±3.5)Ma),笔者认为表明苗儿山岩体加里东期花岗岩侵位开始于(428.1±3.6)Ma,相当于志留纪兰多维列世末—温洛克世初,结束于(408.3±3.5)Ma,相当于志留纪末—泥盆纪初,持续了大约20 Ma。

7 Sr-Nd同位素特征

Sr-Nd同位素样品分析数据及相关参数计算结果见表8。志留纪花岗岩($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i介于0.71138~0.72453,平均0.71765, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 介于-8.8~-10.6,平均-9.7,两阶段Nd模式年龄(T_{DM2})为1.87~2.02 Ga。加里东期花岗岩皆具高($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i值、低 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值的特点和基本一致的两阶段Nd模式年龄。

8 O同位素特征

O同位素样品分析结果见表9。加里东期花岗岩 $\delta^{18}\text{O}$ 值为8.2‰~10.6‰,平均为9.8‰,其 $\delta^{18}\text{O}$ 值显著高于地幔 $\delta^{18}\text{O}$ 值((5.7±0.3)‰; Taylor et al., 1980),反映其原岩经历过沉积循环。

9 讨论

9.1 成岩物质来源

加里东期花岗岩的SiO₂含量(72.65%)较高,铁镁质成分TFeO和MgO含量(1.59%和0.52%)低,K/Na值(1.23)大于1,铝饱和度(A/CNK)大于1或1.1,显著富集Rb、K、Th、U和稀土元素,强烈亏损Ba、Nb、Sr、P、Ti元素,Nb/Ta值(5.41)较小,显示出地壳物质熔融形成的S型花岗岩的特征。加里东期花岗岩分异指数(90.78)大,固结指数(4.75)小,Ba、Nb、

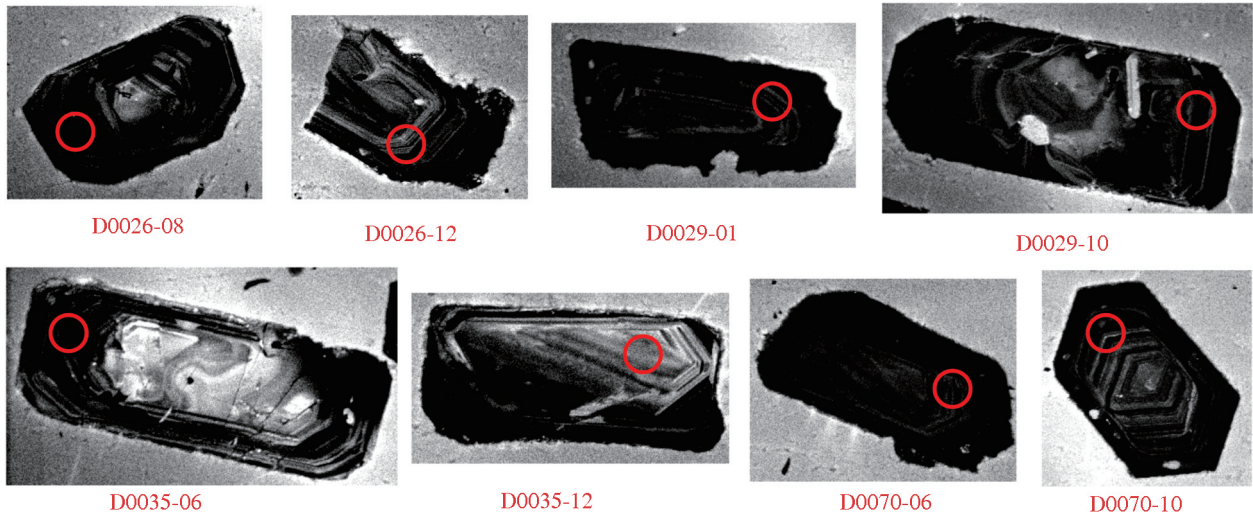


图8 加里东期花岗岩部分代表性锆石阴极发光图像(CL)
Fig.8 Cathodoluminescence(CL)images of representative zircons from Caledonian granites

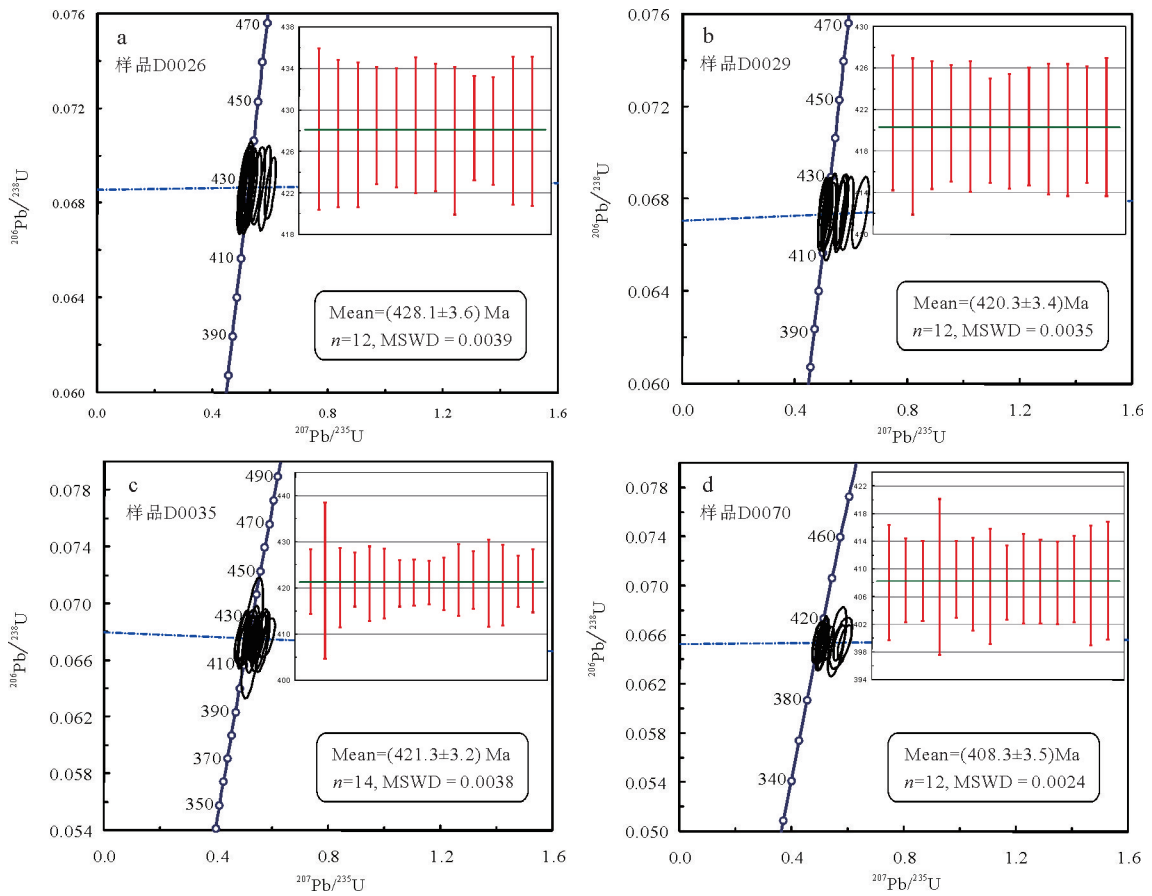


图9 加里东期花岗岩锆石U-Pb谐和图
Fig. 9 U-Pb concordia diagram of zircons from the Caledonian granites

表 4 加里东期花岗岩样品 D0026 锆石 U-Pb 定年结果
Table 4 Zircon U-Pb dating results for the sample D0026 of Caledonian granite

测试点号	Th/10 ⁻⁶	U/10 ⁻⁶	Th/U	同位素比值				表面年龄/Ma							
				²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ		
D0026-01	615.0446	1707.467	0.36	0.054597	0.001237	0.520363	0.013739	0.068678	0.001287	394.495	56.475	425.3935	9.175746	428.1847	7.761999
D0026-02	229.404	1315.863	0.17	0.053776	0.001293	0.51424	0.014889	0.068613	0.001176	361.165	55.55	421.2965	9.984473	427.7963	7.093823
D0026-03	230.1413	551.6627	0.42	0.055585	0.001766	0.527888	0.017373	0.068589	0.001154	435.23	70.3625	430.4071	11.54569	427.6489	6.959734
D0026-04	1187.196	1231.5	0.96	0.05408	0.001401	0.514208	0.012741	0.068738	0.000936	375.98	54.625	421.2747	8.543874	428.5505	5.647631
D0026-05	466.8291	1875.087	0.25	0.057658	0.001379	0.549897	0.013416	0.068696	0.000949	516.705	51.845	444.9294	8.789221	428.2937	5.723003
D0026-06	1098.399	1898.353	0.58	0.058496	0.00159	0.557345	0.01554	0.068741	0.00108	550.035	59.2475	449.7968	10.13245	428.5668	6.51628
D0026-07	447.8415	654.4288	0.68	0.054979	0.001523	0.52277	0.014573	0.068707	0.001017	413.01	61.105	427.0003	9.717834	428.3635	6.135274
D0026-08	379.7552	891.6441	0.43	0.053242	0.001369	0.50676	0.014552	0.068494	0.001181	338.945	57.4025	416.2681	9.806961	427.0738	7.126989
D0026-09	639.9673	2303.411	0.28	0.055229	0.001275	0.527492	0.012264	0.068691	0.000835	420.42	51.8475	430.1436	8.152796	428.2624	5.03928
D0026-10	1785.541	7126.615	0.25	0.062856	0.001351	0.600277	0.013347	0.068644	0.000859	701.86	46.2925	477.4094	8.468924	427.9826	5.180112
D0026-11	896.6918	3378.401	0.27	0.060709	0.00123	0.580731	0.014208	0.068657	0.001179	627.795	44.4375	464.9309	9.12651	428.0599	7.110114
D0026-12	403.017	791.4372	0.51	0.053753	0.001568	0.511695	0.015256	0.068642	0.001188	361.165	69.4375	419.5881	10.24742	427.9709	7.165756

表 5 加里东期花岗岩样品 D0029 锆石 U-Pb 定年结果
Table 5 Zircon U-Pb dating results for the sample D0029 of Caledonian granite

测试点号	Th/10 ⁻⁶	U/10 ⁻⁶	Th/U	同位素比值				表面年龄/Ma							
				²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ		
D0029-01	508.6783	1057.507	0.48	0.060941	0.001564	0.567035	0.014372	0.067449	0.001078	638.905	55.5475	456.0948	9.31266	420.7701	6.511008
D0029-02	408.3206	550.5497	0.74	0.056723	0.00165	0.525253	0.016429	0.067228	0.001246	479.67	62.9575	428.6542	10.93719	419.4354	7.526261
D0029-03	1037.793	1949.052	0.53	0.068401	0.002239	0.632764	0.019858	0.067413	0.001017	879.63	66.665	497.8161	12.34997	420.55	6.141391
D0029-04	987.694	1010.26	0.98	0.053702	0.001433	0.501741	0.014394	0.067439	0.000929	366.72	59.2525	412.8801	9.732873	420.7109	5.607603
D0029-05	857.0636	3970.577	0.22	0.062118	0.001346	0.583682	0.016007	0.067386	0.001043	679.64	46.29	466.8251	10.26342	420.3888	6.297206
D0029-06	697.8977	3751.057	0.19	0.055229	0.001134	0.516212	0.011405	0.067328	0.000832	420.42	44.44	422.618	7.637807	420.0371	5.026588
D0029-07	416.8357	1420.579	0.29	0.055154	0.001616	0.519182	0.018024	0.067308	0.000917	416.715	66.66	424.605	12.04712	419.9176	5.540426
D0029-08	817.4348	1026.407	0.80	0.053909	0.001517	0.504998	0.01478	0.06739	0.000942	368.57	62.9575	415.0799	9.971819	420.4092	5.686719
D0029-09	452.4692	1788.042	0.25	0.053298	0.001222	0.498781	0.012077	0.067347	0.001041	342.65	51.845	410.8772	8.181719	420.154	6.287893
D0029-10	414.6768	944.2972	0.44	0.054634	0.001375	0.512072	0.013773	0.067332	0.001054	398.2	57.4025	419.8417	9.249252	420.0635	6.364423
D0029-11	1319.762	1989.567	0.66	0.059389	0.001315	0.559063	0.012586	0.067419	0.000928	588.915	48.1375	450.9161	8.197178	420.5901	5.607389
D0029-12	361.6897	392.2215	0.92	0.060064	0.001679	0.561932	0.015132	0.067383	0.001103	605.575	61.1	452.7831	9.837609	420.3721	6.660405

表6 加里东期花岗岩样品D0035锆石U-Pb定年结果
Table 6 Zircon U-Pb dating results for the sample D0035 of Caledonian granite

测试点号	Th/ ^{10⁻⁶}	U/ ^{10⁻⁶}	Th/U	同位素比值				表面年龄/Ma							
				²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U				
				1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ				
D0035-01	995.9355	4344.721	0.23	0.058149	0.001998	0.547017	0.020302	0.06757	0.001158	600.025	75.915	443.0409	13.32617	421.4963	6.992247
D0035-02	310.4742	345.1439	0.90	0.058058	0.002792	0.528037	0.025312	0.067591	0.002803	531.52	100.91	430.5061	16.82145	421.6274	16.92414
D0035-03	973.7607	2701.82	0.36	0.060756	0.001652	0.564591	0.016351	0.067337	0.001422	631.5	57.3975	454.5101	10.61212	420.0899	8.588845
D0035-04	623.7353	1538.608	0.41	0.055189	0.001384	0.520872	0.013739	0.067629	0.000973	420.42	57.4025	425.7335	9.172916	421.8557	5.872278
D0035-05	668.0603	823.1549	0.81	0.053116	0.001533	0.496316	0.014348	0.067481	0.001343	344.5	32.405	409.2053	9.736742	420.9612	8.109345
D0035-06	1031.716	1251.555	0.82	0.053012	0.001344	0.49554	0.012148	0.067494	0.001254	327.835	26.85	408.6785	8.247948	421.0378	7.572905
D0035-07	887.3728	2927.833	0.30	0.058184	0.001212	0.547736	0.011147	0.067499	0.000839	600.025	41.66	443.5127	7.312774	421.0698	5.065082
D0035-08	1047.949	4295.55	0.24	0.056323	0.001159	0.530686	0.010792	0.067522	0.000835	464.86	44.44	432.2649	7.159032	421.211	5.040148
D0035-09	1363.756	6195.939	0.22	0.056992	0.001182	0.537451	0.010664	0.067531	0.000784	500.04	72.2125	436.7423	7.042858	421.2628	4.734702
D0035-10	1016.32	1302.204	0.78	0.057147	0.001507	0.536439	0.013119	0.067483	0.00094	498.19	57.4025	436.0737	8.670267	420.9719	5.678447
D0035-11	279.7888	226.4134	1.24	0.054947	0.0024	0.511865	0.021821	0.06762	0.001288	409.31	98.1375	419.7027	14.65607	421.8018	7.777859
D0035-12	832.0241	647.7623	1.28	0.054841	0.001555	0.51624	0.014968	0.067623	0.001034	405.605	67.585	422.6365	10.0239	421.8162	6.244838
D0035-13	660.6489	2023.073	0.33	0.05634	0.001136	0.53029	0.015218	0.067504	0.001564	464.86	44.44	432.0018	10.0977	421.1018	9.44479
D0035-14	480.4897	607.5338	0.79	0.05866	0.001662	0.554957	0.019751	0.067439	0.001451	553.74	58.3225	448.2386	12.89778	420.7099	8.765336
D0035-15	725.5369	503.2324	1.44	0.062122	0.002056	0.581257	0.018773	0.06757	0.000922	679.64	70.3625	465.2687	12.05568	421.4965	5.568714
D0035-16	403.7886	380.7192	1.06	0.052703	0.001808	0.490977	0.016189	0.067583	0.001124	316.725	77.77	405.5758	11.02515	421.578	6.78546

表7 加里东期花岗岩样品D0070锆石U-Pb定年结果
Table 7 Zircon U-Pb dating results for the sample D0070 of Caledonian granite

测试点号	Th/ ^{10⁻⁶}	U/ ^{10⁻⁶}	Th/U	同位素比值				表面年龄/Ma							
				²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U				
				1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ				
D0070-01	472.437	2289.962	0.21	0.063394	0.002604	0.575192	0.026575	0.065346	0.001373	720.38	87.0275	461.3666	17.13235	408.0573	8.306059
D0070-02	210.8628	1009.082	0.21	0.055143	0.0013	0.50142	0.012273	0.065404	0.000999	416.715	56.475	412.6635	8.300314	408.4058	6.0443
D0070-03	1705.013	2008.745	0.85	0.062313	0.001382	0.56864	0.013639	0.06539	0.000952	683.345	48.145	457.1345	8.828717	408.3239	5.762279
D0070-04	304.2656	438.1205	0.69	0.063013	0.002441	0.561224	0.021785	0.065484	0.001862	709.27	78.695	452.3231	14.16928	408.8891	11.26431
D0070-05	459.1989	1015.865	0.45	0.064424	0.001761	0.587913	0.016678	0.065422	0.000917	766.67	57.4	469.534	10.66532	408.5178	5.546923
D0070-06	479.1761	996.7212	0.48	0.055386	0.001384	0.503199	0.013607	0.065314	0.001113	427.825	55.55	413.8655	9.191758	407.8611	6.737427
D0070-07	544.5492	887.1301	0.61	0.056642	0.001556	0.510689	0.014762	0.065259	0.001384	475.97	61.105	418.9122	9.922117	407.5276	8.376482
D0070-08	1003.135	1867.606	0.54	0.058176	0.001309	0.530555	0.012231	0.065351	0.00089	600.025	48.14	432.1776	8.114081	408.0877	5.383194
D0070-09	334.572	1234.679	0.27	0.053951	0.001487	0.491962	0.013911	0.065442	0.001074	368.57	62.9575	406.2465	9.467362	408.6366	6.496694
D0070-10	746.148	1580.056	0.47	0.053792	0.00129	0.491195	0.011533	0.065374	0.000999	361.165	55.55	405.7246	7.853002	408.2267	6.044266
D0070-11	751.2659	1972.107	0.38	0.055684	0.001244	0.51017	0.011692	0.065347	0.000987	438.935	48.145	418.5631	7.861675	408.0645	5.97532
D0070-12	973.2582	1798.05	0.54	0.053486	0.0012	0.490594	0.010811	0.065439	0.001033	350.055	49.995	405.3156	7.364509	408.6186	6.248313
D0070-13	752.942	570.3422	1.32	0.055931	0.001837	0.508141	0.015679	0.065287	0.001423	450.045	72.215	417.1981	10.5568	407.6978	8.613744
D0070-14	496.1085	2293.794	0.22	0.05529	0.001294	0.509748	0.012727	0.065401	0.001404	433.38	51.8475	418.2796	8.559904	408.3902	8.495066

表8 加里东期花岗岩的Sr-Nd同位素组成
Table 8 Sr-Nd isotopic composition of the Caledonian granites

同位素组成 及其主参数	样品号			
	D0026	D0029	D0035	D0070
<i>t</i> /Ma	428.1	420.3	421.3	408.3
Rb/10 ⁻⁶	291.00	273.00	293.00	361.00
Sr/10 ⁻⁶	18.2	20.2	27.8	11.9
⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	46.22	39.07	30.47	87.69
(⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr) ₀	0.99716	0.95839	0.90217	1.22128
(⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr) _i	0.715335	0.724527	0.719356	0.711380
ε _{Sr} (<i>t</i>)	161.1	291.5	218.1	104.6
Sm/(μg/g)	4.65	5.36	4.85	3.28
Nd/(μg/g)	17.10	22.60	20.10	11.60
¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	0.1648	0.1438	0.1463	0.1714
(¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd) ₀	0.512006	0.512042	0.512040	0.512033
(¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd) _i	0.511544	0.511646	0.511636	0.511575
ε _{Nd} (<i>t</i>)	-10.6	-8.8	-9.0	-10.5
<i>T</i> _{DM2}	2021.5	1873.6	1887.7	1995.0

表9 加里东期花岗岩的O同位素分析结果
Table 8 Analysis results of O isotope for the Caledonian granites

序号	样品编号	代号	测定对象	结果
				δ ¹⁸ O/‰(V-SMOW)
1	D0026	η ₇ S ^a	全岩	10.3
2	D0029	η ₇ S ^b	全岩	10.6
3	D0035	η ₇ S ^b	全岩	8.2
4	D0070	η ₇ S ^f	全岩	10.1

注: ε_{Nd}(*t*), ε_{Sr}(*t*), *I*_{Sr}和 *T*_{DM2}的计算据陈江峰等(1999); 计算参数为: *t*=428.1Ma, 420.3Ma, 421.3Ma, 408.3Ma, 210.6; (¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd)_{CHUR}=0.512638, (¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd)_{CHUR}=0.1967, (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_{UR}=0.7045, (¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd)_{CC}=0.118, (¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd)_{DM}=0.2137, (¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd)_{DM}=0.513151, λ_{Sm}=6.54 × 10⁻¹²a⁻¹, λ_{Rb}=1.42 × 10⁻¹¹a⁻¹. 参数中下角字母代表的含义: UR—铷同位素均一储库; CHUR—球粒陨石均一储库; DM—亏损地幔; CC—大陆地壳。

Sr、P、Ti元素强烈亏损, Zr/Hf比值较小(24.55), 以及δEu值较小(0.21)的特征反映岩浆离开源区向上侵位的过程中经过了充分的结晶分异作用。

加里东期花岗岩的CaO/Na₂O比值介于0.07~1.15, 变化范围较大, 其中第一侵入次(早期)的CaO/Na₂O值有一半<0.3, 另一半>0.3, 表明其源岩部分为泥岩, 部分为砂屑岩(或者变质火成岩), 或者源岩为泥岩夹变质火成岩, 而第二、三、四、五、六侵入次(晚期)的CaO/Na₂O值基本都<0.3, 表明其源岩为泥岩(Sylvester, 1998)。比在Rb/Sr-Rb/Ba图

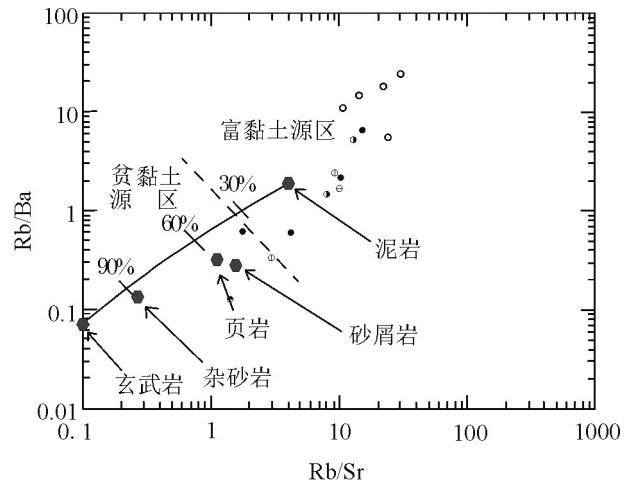


图10 加里东期花岗岩Rb/Sr-Rb/Ba图解(图例同图5; 据Sylvester, 1998)

Fig. 10 Rb/Sr-Rb/Ba diagram of the Caledonian granites (Symbols as Fig.5; after Sylvester, 1998)

解中, 加里东期花岗岩样品大部分落在富黏土源区, 表明其源岩主要是易熔的高成熟度的泥岩, 但第一侵入次的个别样品落在富黏土源区与贫黏土源区的交界位置(图10), 表明其源岩可能有一部分为难熔的低成熟度的砂屑岩。加里东早期和晚期花岗岩的CaO/Na₂O值和Rb/Sr-Rb/Ba值的差别反映了地壳源区成分不均一, 早期源区除了泥岩外, 可能还存在少量砂屑岩和/或变质火成岩, 而到了晚期源区的砂屑岩和/或变质火成岩已基本消耗光, 只剩下了泥岩。

加里东期花岗岩Al₂O₃/TiO₂比值介于25.25~478.07, 变化范围较大, 其中第一、二、三侵入次的Al₂O₃/TiO₂值基本都<100, 表明其形成温度高于875℃, 而第四、五、六侵入次的Al₂O₃/TiO₂值都>100, 表明其形成温度低于875℃(Sylvester, 1998), 反映加里东期花岗岩的源区在早阶段为高温环境, 而在晚阶段则为低温环境。

加里东期花岗岩(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i介于0.71138~0.72453, 平均0.71765, 与大陆地壳(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i平均值0.719(Faur, 1986)相近, ε_{Nd}(*t*)较小, 介于-8.8~-10.6, 平均-9.7, 符合壳源S型花岗岩的特征。两阶段Nd模式年龄(*T*_{DM2})为1.87~2.02 Ga, 与湘桂内陆带花岗岩的Nd模式年龄(*t*_{DM})背景值1.8~2.4 Ga (Pei et al., 1995; Hong et al., 1998)基本一致, 与华南古一中元古代变质基底年龄1.7~2.7 Ga(洪大卫等,

2002)相当,反映加里东期花岗岩源于古一中元古代变质基底的重熔。在 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i-\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 图解(图11a)中,样品都落入S型花岗岩区,也说明加里东期花岗岩源于地壳重熔。在 $t-\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 图解(图11b)中,样品都落入南岭地区前寒武纪地壳Sm-Nd同位素演化区域,进一步表明加里东期花岗岩源自前寒武纪基底地壳重熔。

锆石Lu-Hf同位素数据显示,加里东期花岗岩的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值在 $-4.0\sim-10.0$,两阶段Hf模式年龄($T_{\text{DM}2}$)介于1760~2010 Ma (Zhang et al., 2012; Zhao et al., 2013),也表明加里东期花岗岩来源于古一中元古代地壳部分熔融,但是不同侵入次同位素组成有一定差别,暗示源区变质沉积岩成分不均匀,或者变质沉积岩中混有不同比例的火成岩一起发生了部分熔融。

加里东期花岗岩 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 $8.2\%\sim 10.6\%$,平均为 9.8% ,符合壳源花岗岩的特征,与Taylor(1974)计算的原生岩浆水区域所确定 $\delta^{18}\text{O}$ 值($5.5\%\sim 9.0\%$)大致相符,与英国西南部由地壳部分熔融形成的二叠纪Cornwall花岗岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 值($9.5\%\sim 13.0\%$)(Sheppard, 1977)也基本一致。

综上,加里东期花岗岩源于古一中元古代地壳部分熔融,但是早期和晚期花岗岩的源区岩石类型和热量来源有所区别:早期花岗岩的上地壳源区成分较为复杂,不仅存在泥岩,还有砂屑岩和/或变质火成岩,其形成温度较高($>875^\circ\text{C}$),暗示当时可能受到地幔的高温热对流作用。晚期花岗岩的源岩为上地壳泥岩,属典型的S型花岗岩,导致其形成的

热量主要来自加厚地壳中的放射性元素生热,另外还有少部分热量由软流圈地幔传导而来。

9.2 岩体形成构造背景与成岩过程

在Pearce et al.(1984)多组微量元素构造环境判别图解(图12)中,苗儿山加里东期花岗岩样品绝大多数落在同碰撞花岗岩与板内花岗岩的交接部位,表明其应形成于造山碰撞挤压向非造山的板内环境过渡阶段,即为后碰撞花岗岩。U-Pb测年结果表明,苗儿山加里东期花岗岩分多期次形成于 $(428.1\pm 3.6)\sim (408.3\pm 3.5)$ Ma,在时间上相当于北流(崇余)运动晚期—广西运动早期,即形成于北流(崇余)运动挤压峰期之后挤压减弱、应力松弛的后碰撞构造环境(柏道远等,2014),与Pearce et al.(1984)多组微量元素构造环境判别图解反映的结果一致。

虽然苗儿山岩体加里东期花岗岩都形成于后碰撞构造环境中,但是由于其形成时间跨度大(约20 Ma),导致早期和晚期花岗岩的地壳源区的环境、岩石类型和热量来源发生了变化,因此其形成过程应分为两个明显不同的阶段,推断如下:

晋宁运动使华南洋东段完全闭合形成江绍缝合带,而此段以西仍然存在一个延续到加里东期的残留洋盆(胡受奚等,2006;于津海等,2006;马瑞士,2006;王鹤年等,2006;杨明桂等,2009;杜云等,2017b),在南华纪持续接受沉积。加里东运动使扬子地块向华夏地块俯冲—碰撞,残留洋盆不断消减,至志留纪末关闭(钦防海槽除外)形成加里东褶皱带。强烈的陆陆碰撞挤压使得地壳急剧增厚,放

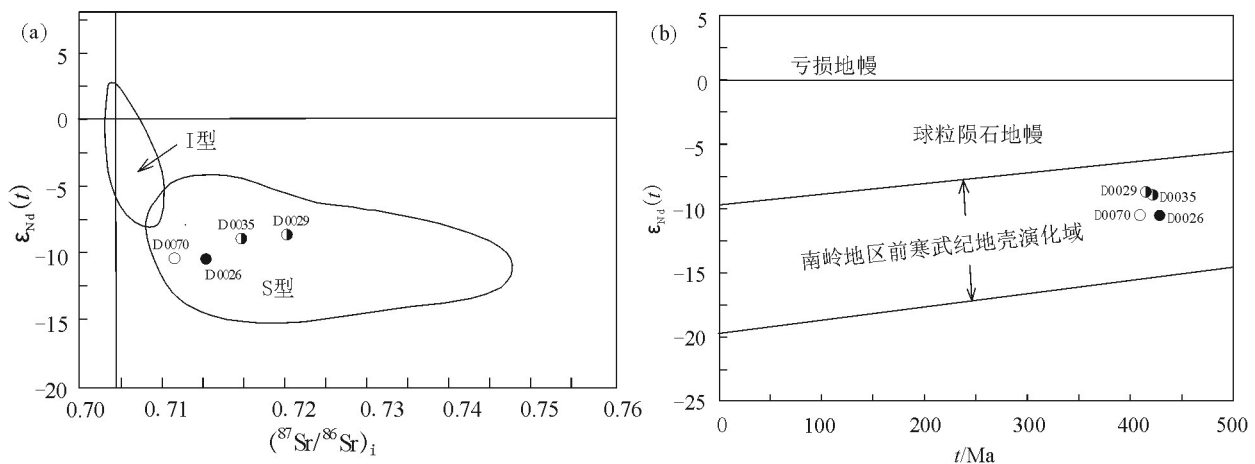


图11 加里东期花岗岩 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i-\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ (a)与 $t-\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 图解(b)(图例同图5,据凌洪飞等,2004)

Fig.11 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i-\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ and $t-\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ diagram for Caledonian granites (Symbols as Fig.5, after Ling Hongfei, 2004)

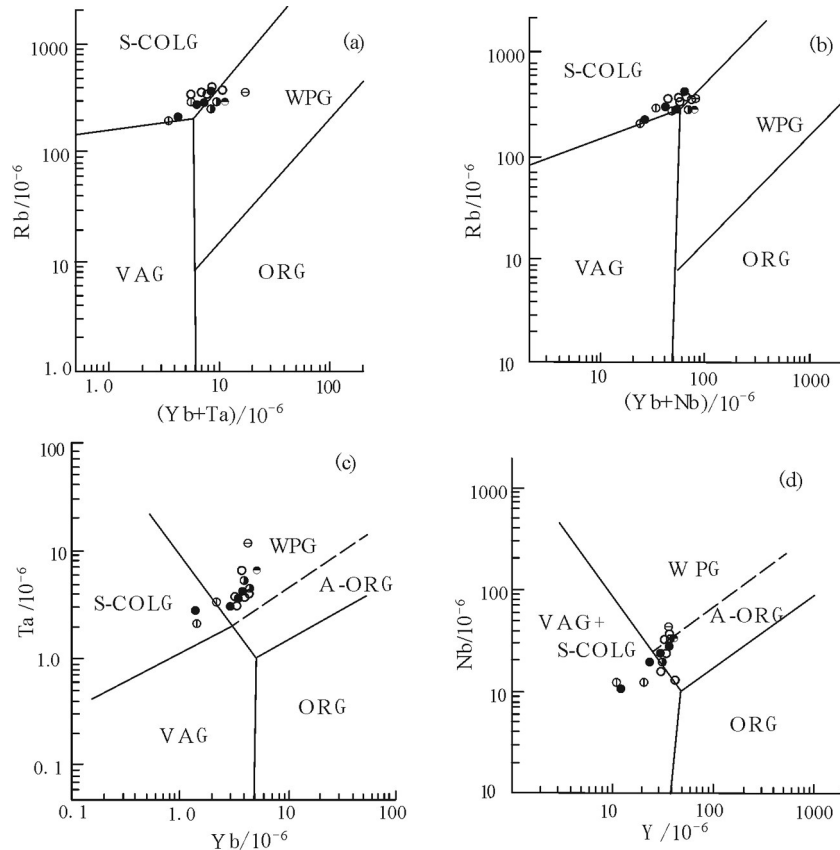


图12 加里东期花岗岩微量元素构造环境判别图解(图例同图5, 据Pearce et al., 1984)

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

Fig.12 Trace element tectonic environment discrimination diagram of the Caledonian granites (Symbols as Fig.5, after Pearce et al., 1984)

VAG—Volcanic arc granite; WPG—Intraplate granite; S-COLG—Syn-collisional granite; ORG—Mid-ocean ridge granite

放射性元素大量生热,压力和温度梯度升高。挤压峰期过后,进入应力松弛、伸展拉张阶段,地壳中压力急剧减小,岩石熔点降低,在大约428.1 Ma时,累积的大量放射性元素产生的热量引起上地壳中的泥岩、砂屑岩和/或变质火成岩发生部分熔融,形成加里东期第一侵入次高温(>875℃)弱过铝-强过铝质花岗岩,暗示当时可能受到软流圈高温热对流作用(Sylvester, 1998)。之后(421.3~408.3 Ma),随着软流圈高温热对流作用的减弱和停止,在放射性元素生热和减压熔融的作用下,上地壳中高成熟度的泥岩继续发生部分熔融,形成大量低温(<875℃)弱过铝-强过铝质的花岗质岩浆。岩浆通过伸展拉张形成的断裂——城步—桃江深大断裂向上运移,不断同化吸收上升通道中的围岩碎块(特别是加里东期第一侵入次花岗岩还同化吸收了少量晋

宁期花岗岩),最终在地壳浅部的苗儿山复式背斜中侵位,形成加里东期S型花岗岩。

10 结论

(1)苗儿山岩体中加里东期花岗岩可划分为六个侵入次,其中第一侵入次的年龄为(428.1±3.6)Ma,第二侵入次的年龄为(420.3±3.4)~(421.3±3.2)Ma,第六侵入次的年龄为(408.3±3.5) Ma。加里东期岩浆活动时间较长,从(408.3±3.5) Ma到(428.1±3.6)Ma,持续了约20 Ma。

(2)加里东期花岗岩总体属铁质-镁质(早期偏向镁质,晚期偏向铁质)、高钾碱钙性-钙碱性、弱过铝-强过铝质花岗岩,且经过了充分的结晶分异作用。

(3)加里东期花岗岩源于古一中元古代地壳部分熔融,形成于北流(崇余)运动挤压峰期之后挤压

减弱、应力松弛的后碰撞构造环境,其早期和晚期的源区岩石类型和热量来源有所区别:早期花岗岩的上地壳源区成分较为复杂,不仅存在泥岩,还有砂屑岩和/或变质火成岩,其形成温度较高($> 875^{\circ}\text{C}$),暗示当时可能受到地幔的高温热对流作用。晚期花岗岩的源岩为上地壳泥岩,属典型的S型花岗岩,导致其形成的热量主要来自加厚地壳的放射性元素生热,另外还有少部分热量由软流圈地幔传导而来。

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.
- Bai Daoyuan, Ma Tieqiu, Wang Xianhui, Zhang Xiaoyang, Chen Bihe. 2008. Progress in the study of Mesozoic tectono-magmatism and mineralization in the central segment of the Nanling Mountains—Summary of major achievements of the 1: 250000 geological survey in southeastern Hunan[J]. *Geology in China*, 35(3): 436–455(in Chinese with English abstract).
- Barbarin B. 1999. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments[J]. *Lithos*, 46: 605–626.
- Barbarin B. 2005. Mafic magmatic enclaves and mafic rocks associated with some granitoids of the central Sierra Nevada batholith, California: nature, origin, and relations with the hosts[J]. *Lithos*, 80(1):155–177.
- Barth M G, Mc Donough W F, Rudnick R L. 2000. Tracking the budget of Nb and Ta in the continental crust[J]. *Chemical Geology*, 165(3/4): 197–213.
- Chappell B W, White A J R. 2001. Two contrasting granite types: 25 years later[J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 48(4): 489–499.
- Chen Jiangfeng, Jiang Boming. 1999. Nd, Sr, Pb isotope traces and evolution of continental crust of SE China [C]//Zheng Yongfei(ed.). *Chemical Geodynamics*. Beijing: Science Press, 262–287 (in Chinese with English abstract).
- Chen Jun, Wang Rucheng, Zhu Jinchu, Lu Jianjun, Ma Dongsheng. 2014. Multiple-aged granitoids and related tungsten-tin mineralization in the Nanling Range, South China[J]. *Science in China (Series D)*, 41(1): 111–121(in Chinese).
- Cheng Shunbo, Fu Jianming, Ma Liyan, Chen Xiqing, Zhang Liguo, Lu Youyue. 2013b. Geochemical characteristics, petrogenesis and ore potential evaluation of Caledonian granitoids in Nanling Range, South China[J]. *Geology & Mineral Resources of South China*, 29(1): 1–11(in Chinese with English abstract).
- Du Yun, Luo Xiaoya, Huang Gefei, Tian Lei, Wang Jingyuan, Fan Hui, Zhou Litong. 2017a. Geological features and analysis of prospecting potential of Luojiaochong tungsten deposit in Chengbu County, Hunan Province [J]. *Geological Science and Technology Information*, 36(5):177–184(in Chinese with English abstract).
- Du Yun, Luo Xiaoya, Huang Gefei, Tian Lei, Wang Jingyuan, Zhou Litong. 2017b. Geochemical characteristics and forming tectonic setting of Neoproterozoic granite in the northern section of Miaoershan Pluton in Southwestern Hunan [J]. *Geological Science and Technology Information*, 36(6): 143–154(in Chinese with English abstract).
- Frost B R, Barnes C G, Collins W J. 2001. A geochemical classification for granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 42(11): 2033–2048.
- Gao Shan, Luo Tingchuan, Zhang Benren, Zhang Hongfei, Han Yinwen, Zhao Zhidan. 1999. The structures and compositions of the crust in Eastern China [J]. *Science in China (Series D)*, 29(3): 204–213(in Chinese).
- Green T H. 1995. Significance of Nb/Ta as an indicator of geochemical processes in the crust-mantle system[J]. *Chemical Geology*, 120(3/4): 347–359.
- Han Yinwen, Ma Zhenhong, Zhang Hongfei. 2003. *Geochemistry* [M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- Hong Dawei, Xie Xilin, Zhang Jisheng. 2002. Geological significance of the Hangzhou-Zhuguangshan-Huashan high- ϵ_{Nd} granite belt[J]. *Geological Bulletin of China*, 21(6): 348–354(in Chinese with English abstract).
- Hu Shouxi, Ye Ying. 2006. Questions to "Cathaysia Old Land", "Cathaysia Block" and "United Yantze-Cathaysia Old Land" of South China[J]. *Geological Journal of China Universities*, 12(4): 432–439(in Chinese with English abstract).
- Hua Renmin, Wang Denghong. 2012. Clarification of some basic concepts concerning the granite-related mineralization[J]. *Mineral Deposits*, 31(1):165–175(in Chinese with English abstract).
- Hua Renmin, Zhang Wenlan, Chen Peirong, Zhai Wei, Li Guanglai. 2013. Relationship between Caledonian granitoids and large-scale mineralization in South China[J]. *Geological Journal of China Universities*, 19(1): 1–11 (in Chinese with English abstract).
- Huang Jiqing. 1994. *Major Geotectonic Units in China* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1–87(in Chinese).
- Harris N B W, Inger S. 1992. Trace element modeling pelite-derived granites [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 110(1): 46–56.
- Hong Dawei, Xie Xilin, Zhang Jisheng. 1998. Isotope geochemistry of granitoids in South China and their metallogeny[J]. *Res. Geol.*, 48(4): 251–263.
- Li Jindong. 2005. Mesozoic Tectonic-Magma-Mineralization in Southeastern Hunan Province[D]. *Geology University of China (Beijing)* (in Chinese with English abstract).
- Ling Hongfei, Shen Weizhou, Deng Ping, Jiang Shaoyong, Jiang Yaohui, Qiu Chensheng, Huang Guolong, Ye Haimin, Tan Zhengzhong. 2005. Study of geochemistry and petrogenesis of the Maofeng granite, northern Guangdong Province(in Chinese with English abstract).

- English abstract).
- Liu Wei, Liu Yaorong, Zhang Xiaoyang, Chen Bihe, Ni Yanjun, Zhong Xiang, He Chunping. 2011. New Progresses in 1: 50000 regional geological survey in Chengbu Area, Hunan Province[J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 27(4): 307–313(in Chinese with English abstract).
- Liu Y, Hu Z, Gao S, Günther D, Xu J, Gao C, Chen H. 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP – MS without applying an internal standard[J]. *Chemical Geology*, 257(1):34–43.
- Ludwig K R. 2003. User's Manual for Isoplot 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel [M]. Berkeley Geochronology Center, Berkeley, California.
- Ma Ruishi. 2006. New thought about the tectonic evolution of the South China: With discussion on several problems of the Cathaysian Old Land[J]. *Geological Journal of China Universities*, 12(4): 448–456(in Chinese with English abstract).
- Middlemost E A K. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. *Earth Science Reviews*, 37:215–224.
- Patino Douce A E, Johnston A D. 1991. Phase equilibria and melt productivity in the pelitic system: Implications for the origin of peraluminous granitoids and aluminous granulites[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 107(2) : 202–218.
- Patino Douce A E, Beard J. 1995. Dehydration – melting of biotite gneiss and quartz amphibolite from 3 to 15 kbar[J]. *Journal of Petrology*, 36(3): 707–738.
- 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.
- Peccerillo A, Taylor S R. 1976. Geochemistry of Eocene calc–alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 58(1): 63–81.
- Pei Rongfu, Hong Dawei. 1995. The granites of South China and their metallogeny[J]. *Episodes*, 18(1/2): 77–82.
- Piao Chengzhe, Jin Dongxu, Zhao Yen, Jin Shouzhe, Jin Renzhe. 2016. Scoriae magma evolution at Paekdu volcano, Democratic People's Republic of Korea[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 32(10):3214–3224 (in Chinese with English abstract).
- Pitcher W S. 1993. *The Nature and Origin of Granite*[M]. London: Blackie Academic & Professional Publication.
- Rudnick R L, Fountain D M. 1995. Nature and composition of the continental crust: A lower crustal Perspective[J]. *Review of Geophysics*, 33(3):267–309.
- Sheppard S.M.P. 1977. The Cornubian Batholith, SW England: D/H $\delta^{18}\text{O}$: $\delta^{16}\text{O}$ studies of kaolinite and other alteration minerals [J]. *Journa of the Geological Society*, 133:573–591.
- Sun Mingzhi, Xu Keqin. 1990. Caledonian granite in South China and its formation geological environment [J]. *Journal of Nanjing University(Natural Sciences)*, (4): 10–22(in Chinese).
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [J]. *Geological Society London Special Publication*, 42 (1): 313–345.
- Sun Tao. 2006. New distribution map of granite in South China and its description [J]. *Geological Bulletin of China*, 25(3): 332–335, 426–427(in Chinese).
- Sylvester P J. 1998. Post–collisional strongly peraluminous granites[J]. *Lithos*, 45(1): 29–44.
- Taylor H P. 1974. The application of oxygen and hydrogen isotope studies to problems of hydrothermal alteration and ore deposit [J]. *Economic Geology*, 69: 843–883.
- Taylor P N, Moorbath S, Goodwin R, Petrykowski A C. 1980. Crustal contamination as an indicator of the extent of early Archaean continental crust: Pb isotopic evidence from the late Archaean gneisses of west Greenland [J]. *Geochim.Cosmochim. Acta*, 44(10): 1437–1453.
- Taylor S R, McLennan S M. 1985.*The Continental Crust: Its Composition and Evolution*[M]. Oxford: Black well Scientific Publications.
- Tindle A G, Pearce J A. 1983. Assimilation and partial melting of continental crust: Evidence from the mineralogy and geochemistry of autoliths and xenoliths[J]. *Lithos*, 16(3):185–202.
- Visonà, Lombardo B. 2002.Two – mica and tourmaline leucogranites from the Everest – Makalu region (Nepal – Tibet), Himalayan leucogranite genesis by isobaric heating? [J]. *Lithos*, 62(3):125 – 150.
- Wang Dezi, Lin Chengyi, Zhou Xinmin. 1978. Petrogenesis of the Cizhu Yingyun diorite pluton and its surrounding metamorphic rocks in Jiangxi Province[J]. *Journal of Nanjing University(Natural Sciences)*, (1):81–99(in Chinese).
- Wang Henian, Zhou LiYa. 2006. A further understanding in geological structure of South China[J]. *Geological Journal of China Universities*, 12(4): 457–465.
- Wu Jing, Liang Huaying, Huang Wenting, Wang Chunlong, Sun Weidong, Sun Yali, Li Jing, Moji Hai, Wang Xiuzhang. 2012. Isotopic age of rocks and deposits in the western part of Miaoershan– Yuechengling Mountains in Northeast Guangxi and metallogenic analysis of Indosinian Period in South China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 57(13): 1126–1136(in Chinese).
- Xiao Qinghui, Deng Jinfu, Ma Daquan. 2002. *The Ways of Investigation on Granitoids*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 21–36 (in Chinese).
- Xu Keqin, Liu Yingjun, Yu Yuyu, Wang Henian, Wei Xiuzhao. 1960. Discovery of granites of the Caledonian age in Southern Kiangsi[J]. *Geological Review*, 20(3):112–114.
- Xu Keqin, Sun Nao, Wang Dezi, Hu Yixi. 1963. Investigation on the polycyclic intrusions of South China, with special notice on their ages of intrusions, distribution, characteristics, and their genetic relations to mineral deposits (continued) [J]. *Acta Geologica Sinica*, 43:141–155(in Chinese with English abstract).
- Xu Deru, Chen Guanghao, Xia Bin, Li Pengchun, He Zhuanli. 2006. The Caledonian adakite – like granodiorites in Banshanpu area,

- eastern Hunan Province, South China: Petrogenesis and geological significance[J]. Geological Journal of China Universities, 12(4): 507-521 (in Chinese with English abstract).
- Yang Mingguai, Huang Shuibao, Lou Fasheng, Tang Weixin, Mao Subin. 2009. Lithospheric structure and large-scale metallogenic process in Southeast China continental area[J]. Geology in China, 36(3):528-543 (in Chinese with English abstract).
- Yu Jinhai, Wei Zhenyang, Wang Lijuan, Shu Liangshu, Sun Tao. 2006. Cathaysia Block: A young continent composed of ancient Materials[J]. Geological Journal of China Universities, 12(4): 440-447 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Feifei, Wang Yuejun, Zhang Aimei, Fan Weiming, Zhang Yuzhi, Zi Jianwei. 2012. Geochronological and geochemical constraints on the petrogenesis of Middle Paleozoic (Kwangian) massive granites in the eastern South China Block [J]. Lithos, 150(5):188-208.
- Zhao Kuidong, Jiang Shaoyong, Sun Tao, Chen Weifeng, Ling Hongfei, Chen Peirong. 2013. Zircon U-Pb dating, trace element and Sr-Nd-Hf isotope geochemistry of Paleozoic granites in the Miao'ershan-Yuechengling batholith, South China: Implication for petrogenesis and tectonic-magmatic evolution[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 74(Complete):244-264.
- Zhou Jianxiong, Chen Zhenyu. 2007. Study on Cathodoluminescence of Zircon under Electron Probe [M]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology Press (in Chinese).
- Zhou Xinmin. 2003. My thinking about granite geneses of South China [J]. Geological Journal of China Universities, 9(4): 556-565 (in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献**
- 柏道远, 马铁球, 王先辉, 张晓阳, 陈必河. 2008. 南岭中段中生代构造-岩浆活动与成矿作用研究进展[J]. 中国地质, 35(3): 436-455.
- 陈江峰, 江博明. 1999. Nd, Sr, Pb同位素示踪和中国东南大陆地壳演化[C]/郑永飞主编. 化学地球动力学. 北京: 科学出版社, 262-287.
- 陈骏, 王汝成, 朱金初, 陆建军, 马东升. 2014. 南岭多时代花岗岩的钨锡成矿作用[J]. 中国科学:地球科学, 41(1): 111-121.
- 程顺波, 付建明, 马丽艳, 陈希清, 张利国, 卢友月. 2013. 南岭地区加里东期花岗岩地球化学特征、岩石成因及含矿性评价[J]. 华南地质与矿产, 29(1): 1-11.
- 杜云, 罗小亚, 黄革非, 田磊, 王敬元, 樊晖, 周立同. 2017a. 湖南省城步县落家冲钨矿床地质特征及找矿前景分析[J]. 地质科技情报, 36(5): 177-184.
- 杜云, 罗小亚, 黄革非. 2017b. 湘西南苗儿山岩体北段新元古代花岗岩地球化学特征及其形成构造背景[J]. 地质科技情报, 36(6): 143-154.
- 高山, 骆庭川, 张本仁, 张宏飞, 韩吟文, 赵志丹. 1999. 中国东部地壳的结构和组成[J]. 中国科学(D辑), 29(3): 204-213.
- 韩吟文, 马振东, 张宏飞. 2003. 地球化学[M]. 北京: 地质出版社.
- 洪大卫, 谢锡林, 张季生. 2002. 试析杭州诸广山花山高 ϵ_{Nd} 值花岗岩带的地质意义[J]. 地质通报, 21(6): 348-354.
- 胡受奚, 叶瑛. 2006. 对“华夏古陆”、“华夏地块”及“扬子-华夏古陆统一体”等观点的质疑[J]. 高校地质学报, 12(4): 432-439.
- 华仁民, 王登红. 2012. 关于花岗岩与成矿作用若干基本概念的再认识[J]. 矿床地质, 31(1): 165-175.
- 华仁民, 张文兰, 陈培荣, 翟伟, 李光来. 2013. 初论华南加里东花岗岩与大规模成矿作用的关系[J]. 高校地质学报, 19(1): 1-11.
- 黄汲清. 1994. [M]. 北京: 地质出版社, 1-87.
- 李金冬. 2005. 湘东南地区中生代构造-岩浆-成矿动力学研究[D]. 中国地质大学(北京).
- 凌洪飞, 沈渭洲, 邓平, 蒋少涌, 姜耀辉, 邱检生, 黄国龙, 叶海敏, 谭正中. 2005. 粤北帽峰花岗岩体地球化学特征及成因研究[J]. 岩石学报, 21(3): 677-687.
- 刘伟, 刘耀荣, 张晓阳, 陈必河, 倪艳军, 钟响, 贺春平. 2011. 湖南城步地区1:5万区调主要成果与进展[J]. 华南地质与矿产, 27(4): 307-313.
- 马瑞士. 2006. 华南构造演化新思考兼论“华夏古陆”说中的几个问题. 高校地质学报, 12(4): 448-456.
- 朴成哲, 金东旭, 赵日元, 金守哲, 金仁哲. 2016. 白头山火山渣锥的岩浆演化研究[J]. 岩石学报, 32(10): 3214-3224.
- 孙明志, 徐克勤. 1990. 华南加里东花岗岩及其形成地质环境试析[J]. 南京大学学报(自然科学版), (4): 10-22.
- 孙涛. 2006. 新编华南花岗岩分布图及其说明[J]. 地质通报, 25(3): 332-335, 426-427.
- 王德滋, 林承毅, 周新民. 1978. 江西慈竹英云闪长岩体及其周围区域变质岩石的成因[J]. 南京大学学报(自然科学版), (1): 81-99.
- 王鹤年, 周丽娅. 2006. 华南地质构造的再认识. 高校地质学报, 12(4): 457-465.
- 伍静, 梁华英, 黄文婷, 王春龙, 孙卫东, 孙亚莉, 李晶, 莫济海, 王秀璋. 2012. 桂东苗儿山-越城岭西部岩体和矿床同位素年龄及华南印支期成矿分析 [J]. 科学通报, 57(13): 1126-1136.
- 肖庆辉, 邓晋福, 马大铨. 2002. 花岗岩研究思维与方法[M]. 北京: 地质出版社, 79.
- 徐克勤, 刘英俊, 俞受璠, 王鹤年, 魏秀喆. 1960. 江西南部加里东花岗岩的发现[J]. 地质论评, 20(3): 112-114.
- 徐克勤, 孙鼎, 王德滋, 胡受奚. 1963. 华南多旋回的花岗岩的侵入时代、岩性特征、分布规律及其成矿专属性的探讨(续) [J]. 地质学报, 43: 141-155.
- 许德如, 陈广浩, 夏斌, 李鹏春, 贺转利. 2006. 湘东地区板杉铺加里东期埃达克质花岗闪长岩的成因及地质意义[J]. 高校地质学报, 12(4): 507-521.
- 杨明桂, 黄水保, 楼法生, 唐维新, 毛素斌. 2009. 中国东南陆区岩石圈结构与大规模成矿作用[J]. 中国地质, 36(3): 528-543.
- 于津海, 魏震洋, 王丽娟, 舒良树, 孙涛. 2006. 华夏地块: 一个由古老物质组成的年轻陆块[J]. 高校地质学报, 12(4): 440-447.
- 周剑雄, 陈振宇. 2007. 电子探针下锆石阴极发光的研究[M]. 电子科技大学出版社.
- 周新民. 2003. 对华南花岗岩研究的若干思考[J]. 高校地质学报, 9(4): 556-565.