

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.393>



东昆仑加鲁河中三叠世含石榴石 二云母花岗岩的成因及地质意义

王珂, 王连训*, 马昌前, 朱煜翔, 高利远

中国地质大学地球科学学院, 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北武汉 430074

摘要: 东昆仑造山带广泛发育晚古生代—早中生代富含暗色微粒包体的花岗闪长岩类, 被认为是研究壳幔岩浆混合作用的天然实验室, 然而同时代的过铝质—强过铝质型花岗岩在该地区鲜有报道. 在东昆仑东段加鲁河地区新识别出一套含石榴石二云母花岗岩, 为了探究其成因归属及地质意义, 我们对其开展了详细的矿物学、岩石学、锆石 U-Pb 年代学、岩石地球化学及锆石 Lu-Hf 同位素研究. 该套岩石呈多条近平行脉状侵入花岗闪长岩中, 主要组成矿物包括石英、斜长石、钾长石、黑云母和白云母, 副矿物中可见少量石榴石. LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年获得含石榴石二云母花岗岩成岩年龄为 242.0 ± 1.4 Ma, 属于中三叠世岩浆活动产物. 化学成分上, 该岩石具有高 SiO_2 (74.49%~75.24%)、高 K_2O (4.21%~4.33%)、低 P_2O_5 (0.02%~0.03%) 含量和过铝质—强过铝质 (A/CNK 值为 1.08~1.12) 特征, 表现出较高的分异程度. 其 U、Th、Pb、Rb 等元素相对富集, Nb、Ta、P、Ti 等元素相对亏损, 其中 P、Ti 强烈亏损, 这可能与磷灰石及钛磁铁矿的早期结晶分异有关. 稀土元素总量较低为 (61.55×10^{-6} ~ 119.05×10^{-6}), 有弱负 Eu 异常 ($\delta\text{Eu} = 0.51 \sim 0.65$). 锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化范围为 $-8.19 \sim -2.78$ (均值为 -5.61), 二阶段模式年龄 (T_{DM2}) 为 1.3~1.6 Ga, 全岩 Nb/Ta 比值 8.22~9.67 (接近地壳比值 10.91), 这与区域内近同期的黑云母二长花岗岩特征相似, 均指示该岩石可能源于下地壳的重熔. 岩石中广泛发育的富云包体暗示岩浆上升途中捕获围岩物质, 岩浆存在明显同化混染作用. 综上, 本文认为东昆仑加鲁河地区的含石榴石二云母花岗岩脉为一套过铝质—强过铝质的高分异 I 型花岗岩, 是下地壳部分熔融产生的长英质岩浆经历长期结晶分异作用并在上升途中受到围岩同化混染作用之后的产物.

关键词: 东昆仑; 含石榴石二云母花岗岩; 高分异 I 型花岗岩; 富云包体; 同碰撞; 地球化学.

中图分类号: P581

文章编号: 1000-2383(2020)02-400-19

收稿日期: 2018-12-16

Petrogenesis and Geological Implications of the Middle Triassic Garnet-Bearing Two-Mica Granite from Jialuhe Region, East Kunlun

Wang Ke, Wang Lianxun*, Ma Changqian, Zhu Yuxiang, Gao Liyuan

State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: Late Paleozoic to Early Mesozoic I-type granodiorites enriched in mafic microgranular enclaves are widespread in Eastern Kunlun orogen, which therefore has been considered as a natural laboratory for studying magma mixing between mantle- and crust-derived melts. In contrast, coeval peraluminum to strong peraluminous granitoids are rarely reported in this region. Recently, we identified a set of garnet-bearing two-mica granites in the Jialuhe region at eastern part of the East Kunlun Orogen. Hereby we present a synthetical mineralogy, petrology, zircon U-Pb geochronology, and lithogeochemistry and Lu-Hf isotope

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目 (Nos. DD20160123-01, DD20160030); 国家自然科学基金项目 (No. 41502046).

作者简介: 王珂 (1994-), 男, 硕士研究生, 主要从事矿物学、岩石学、矿床学研究. ORCID: 0000-0003-1931-2883. E-mail: 1243401962@qq.com

*通讯作者: 王连训, ORCID: 0000-0002-5389-6782. E-mail: lianxunwang@cug.edu.cn

引用格式: 王珂, 王连训, 马昌前, 等, 2020. 东昆仑加鲁河中三叠世含石榴石二云母花岗岩的成因及地质意义. 地球科学, 45(2):400-418.

study on it, aiming to constrain its petrogenesis and tectonic implications. The rock outcropped as multiple sub-parallel dykes in the field, intruding into granodiorite. It mainly consists of quartz, plagioclase, k-feldspar, biotite and muscovite, with minor garnet as accessory minerals. LA-ICP-MS zircon U-Pb isotopic dating yields an age of 242.0 ± 1.4 Ma, indicating that the garnet-bearing two-mica granites were formed in the Middle Triassic. Chemical analyses show that the rocks have characteristics of high SiO_2 (74.49%~75.24%), K_2O (4.21%~4.33%), but low P_2O_5 (0.02%~0.03%) contents, belonging to peraluminous to strong peraluminous series ($A/\text{CNK}=1.08\sim 1.12$), showing a high degree of differentiation. They are relatively enriched in elements such as U, Th, Pb, Rb, but depleted in Nb, Ta and other related elements. Note that, P and Ti are strongly depleted, which may indicate early crystallization of apatite and titanomagnetite. The rocks also have a low total amounts of rare earth elements ($61.55 \times 10^{-6} \sim 119.05 \times 10^{-6}$), and show a weak negative Eu anomaly ($\delta\text{Eu}=0.51\sim 0.65$). Their zircon $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values ranged from -8.19 to -2.78 (mean of -5.61), with a two-stage model ages (T_{DM2}) of 1.3 Ga to 1.6 Ga Ma and whole-rock Nb/Ta ratios are 8.22~9.67 (close to continental crust ratio of 10.91). These features are similar to those of nearly coeval biotite monzogranite in the region, indicating that the rocks may be originated from remelting of lower crust. The biotite-rich enclaves are widely developed in the rocks, suggesting that the wall rock materials are captured during magma ascent, with obvious assimilation and contamination. Thus, we propose that the garnet-bearing two-mica granitic dykes belong to high-fractionated and peraluminous to strongly peraluminous I-type granites series, which are products of felsic magma produced by partial melting of lower crust undergoing long-term fractionation and being subjected to surrounding rocks assimilation during its ascent.

Key words: East Kunlun; garnet-bearing two-mica granites; highly fractionated I-type granite; Biotite-rich enclaves; intercontinental collision; geochemistry.

0 引言

花岗岩是大陆地壳的重要组成部分,通过对花岗岩的研究,来追踪壳幔相互作用的演化轨迹,进而推演大陆的生长和演化历史,是花岗岩研究的重要方向(肖庆辉等,2007).前人根据花岗质岩浆源区物质的差异,将花岗岩划分为S型花岗岩和I型花岗岩两类.近年来研究发现,当I型花岗质岩浆演化到晚期,特别是经历强烈结晶分异作用后产生的高分异花岗岩可以表现出一定的S型花岗岩特征,比如出现富铝矿物白云母和石榴石等(Wu *et al.*, 2003; 朱弟成等,2009; 陶继华等,2013; Wang *et al.*, 2014).然而也有一些学者认为花岗质岩浆具有高的粘度和低的密度,其在演化过程中较难发生有效的结晶分异(张旗等,2007; Castro, 2013).因此对于过铝质-强过铝质花岗岩的类型归属问题是一个值得进一步深入探讨的科学问题:(1)简单的强过铝质矿物组合可能并不是判别S型花岗岩的唯一标准;(2)过铝质-强过铝质的高分异I型花岗岩是否存在,该如何鉴定(吴福元等,2007a, 2007b, 2017; Wang *et al.*, 2014).

东昆仑广泛出露晚古生代-早中生代的准铝质-弱过铝质I型花岗岩类,而同时代的过铝质-强过铝质型花岗岩鲜有报道.近年来,也有研究认为东昆仑地区的花岗岩类存在少量高分异I型花岗质岩脉,如熊富浩(2014)曾认为香日德地区中三叠

世正长花岗岩为高分异I型花岗岩,何成等(2018)认为东昆仑哈拉森地区的中三叠世花岗岩具有高分异I型花岗岩的特征.实际上这些报道的高分异花岗岩中并未出现石榴石、白云母等强过铝质矿物.

笔者近期在东昆仑东段加鲁河地区首次识别出一套淡色含石榴石二云母花岗岩脉,岩石中普遍发育原生白云母并零星出现石榴石,具有过铝质-强过铝质特征,这为研究过铝质-强过铝质花岗岩的成因分类提供了理想素材,对于研究东昆仑花岗质岩浆演化过程也具有重要意义.本文在系统的野外地质调查和岩相观察的基础上,利用锆石U-Pb年代学,全岩地球化学及锆石原位Lu-Hf同位素方法,通过综合对比分析该岩石与周边同时代花岗岩类的特征差异,来探讨该花岗岩的成因归属,其与周边岩石的成因关系,以及其所指示的区域构造意义.同时这也为研究过铝质高分异花岗岩的成因演化提供案例.

1 地质背景

东昆仑造山带处于青藏高原北缘,夹持于北中国板块群与南中国板块群之间,是横贯中国大陆的巨型构造带-中央造山系的重要组成部分(许志琴等,2006).它由北到南可划分为东昆北构造带、东昆中蛇绿构造混杂岩带、东昆南构造带和布青山-阿尼玛卿蛇绿构造混杂岩带(殷鸿福和张克信,

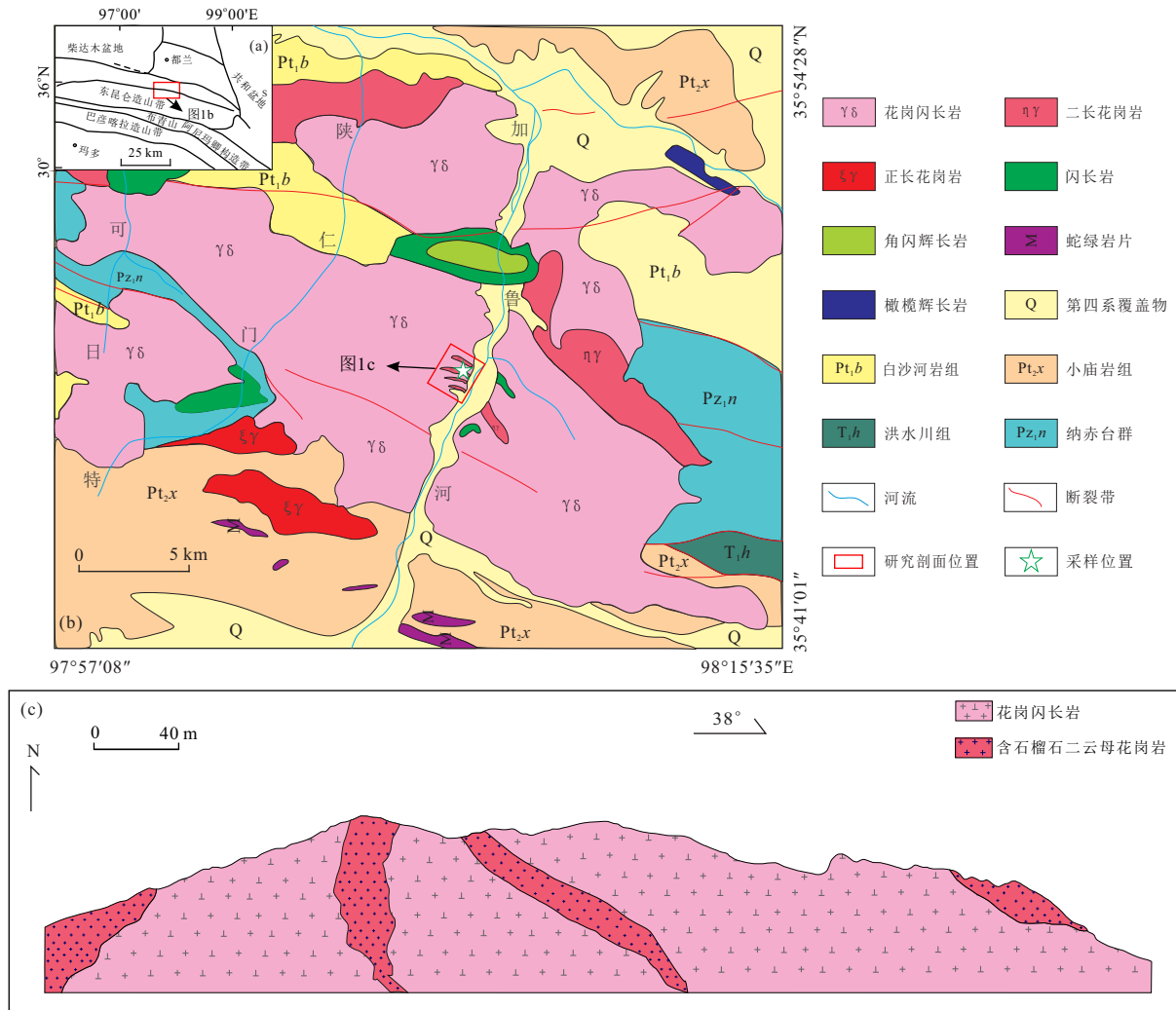


图 1 (a) 东昆仑造山带及邻区构造单元划分简图; (b) 东昆仑东段加鲁河岩体分布示意图; (c) 含石榴石二云母花岗岩岩脉剖面示意图(图 a 据陈国超等, 2016; 图 b 据 1:25 万冬给措纳湖幅修改)

Fig.1 (a) Tectonic units division of the East Kunlun Orogen and its adjacent area; (b) Distribution diagram for Jialuhe pluton in eastern part of Eastern Kunlun; (c) Profile geological map of the garnet-bearing two-mica granite dykes

1997; 许志琴等, 2006; Meng *et al.*, 2013; 裴先治等, 2015). 研究区位于东昆北构造带东段, 区域上东昆北构造带呈近 EW 向延伸, 东侧至共和盆地, 西延至新疆, 与西昆仑造山带接壤(图 1a). 该构造带基底由古、中元古界岩石共同组成, 主要为前寒武纪中深变质岩系. 东昆仑造山带内花岗岩类广泛发育, 以华力西晚期—印支期为主, 前人认为该阶段的花岗岩可能是东昆仑地区在晚古生代—早中生代 (270~210 Ma) 的洋盆闭合事件的地质响应, 受控于东昆仑地区古特提斯洋的构造演化, 记录着东昆仑地区古特提斯洋的洋壳俯冲、陆陆(弧)碰撞和后碰撞构造事件(莫宣学等, 2007). 研究区内岩浆岩岩性变化较大, 辉长闪长岩、闪长岩、石英二长岩、花岗闪长岩、黑云母二长花岗岩、正长花岗岩等均

有出露, 但主要以 I 型的花岗闪长岩及黑云母二长花岗岩为主, 大部分花岗岩含有暗色微粒包体, 显示岩浆混合特征(刘成东等, 2004; 陈国超等, 2016; 王连训等, 2017), 而区域内过铝质—强过铝质花岗岩非常少见, 仅在察尔汗陶勒盖(邓文兵等, 2016) 和东大滩(柴耀楚等, 1983) 报道存在该类型岩石.

2 野外地质及岩相学特征

2.1 岩体地质

加鲁河岩体地理位置位于都兰县境内, 处于香日德东南方向、清水泉以北. 裸露面积约 (60×20) km², 呈不规则状, 整体沿 EW 方向延伸. 岩体主体侵位于中元古界小庙岩组 (Pt₂x) 和古元古界白沙河

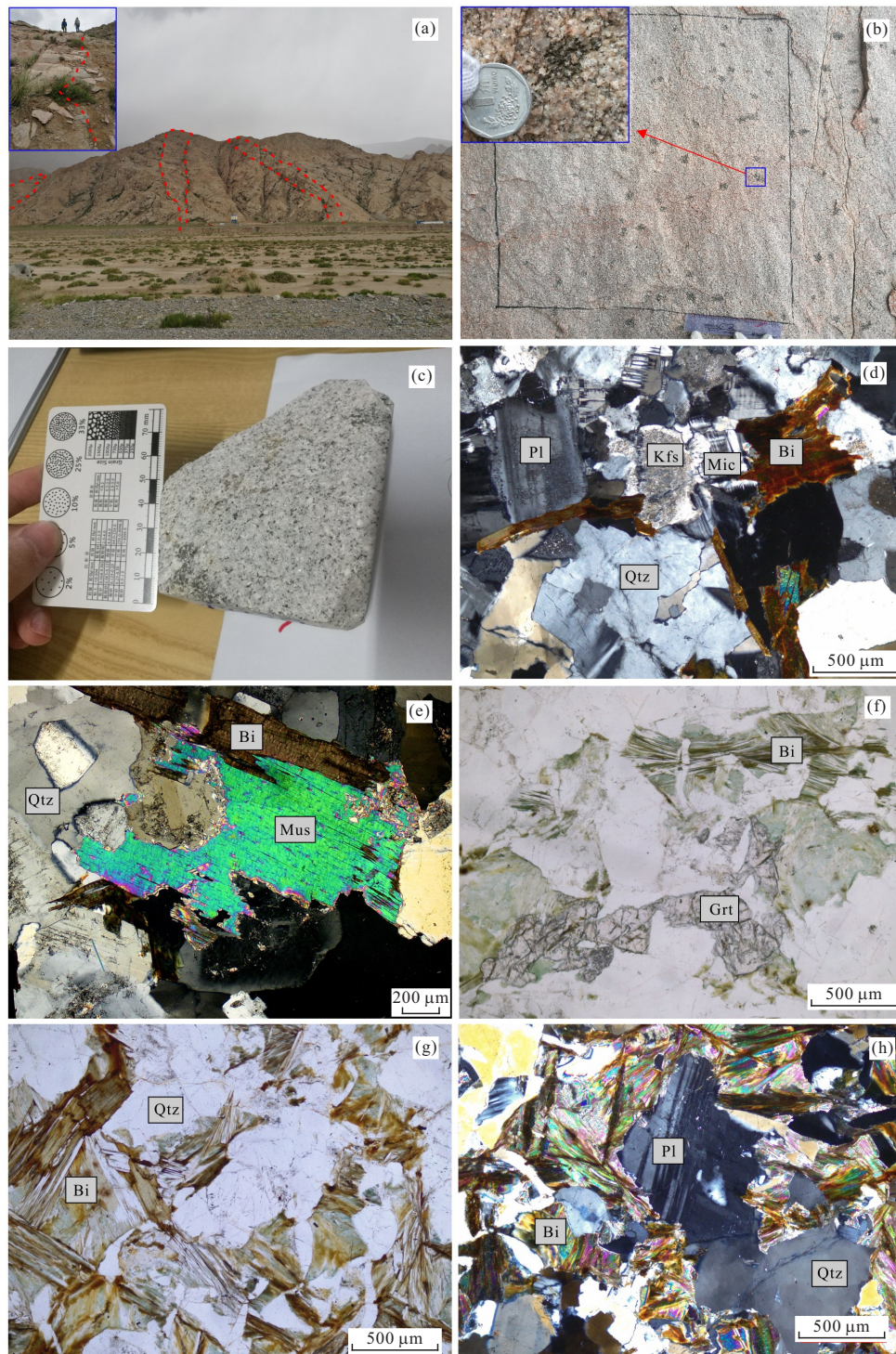


图 2 野外露头 and 镜下显微照片

Fig.2 Outcrop photograph and microscopic photograph

a. 含石榴石二云母花岗岩脉野外地质特征; b. 富云母包体野外特征; c. 含石榴石二云母花岗岩; d. 含石榴石二云母花岗岩镜下特征 (Qtz. 石英、Pl. 斜长石、Kfs. 钾长石、Mic. 微斜长石、Bi. 黑云母; 正交偏光镜); e. 原生白云母 (Mus; 正交偏光镜); f. 石榴石 (Grt): 裂隙发育 (单偏光镜); g. 富云母包体中黑云母特征 (蚀变及扭折现象; 单偏光镜); h. 包体中斜长石及石英颗粒分布 (正交偏光镜)

岩组 (Pt_{1b}), 与奥陶—志留系纳赤台群呈断层接触。其中, 小庙岩组为黑云母石英片岩、大理岩、斜长片麻岩等; 白沙河岩组为混合岩、大理岩、斜长角闪

岩、黑云母石英片岩 (莫宣学等, 2007)。加鲁河岩体为一复式杂岩体, 主要岩性包括橄榄辉长岩、闪长岩 (角闪辉长岩)、石英闪长岩、花岗闪长岩、黑云母

二长花岗岩、正长花岗岩以及本文研究新识别出含石榴石的二云母花岗岩。花岗闪长岩作为该岩体的主体,含有大量的暗色微粒包体,显示强烈的岩浆混合特征,被视为岩浆混合的产物;其次为基性端元的角闪长辉长岩等和酸性端元的黑云母二长花岗岩(见图 1b)。含石榴石二云母花岗岩呈脉状侵入加鲁河花岗闪长岩中(GPS: E98° 7'205" N35° 45'448"),4 条岩脉(脉宽 20~35 m)呈 NWW 向彼此近平行产出,倾角约 55°,其与花岗闪长岩围岩呈截然接触关系。岩石整体呈浅灰白色,局部地区因遭受后期蚀变呈肉红色(图 1c、2a)。

2.2 岩相学特征

含石榴石二云母花岗岩呈中细粒花岗结构,主要组成矿物包括石英(20%~25%)、钾长石(30%~35%)、斜长石(24%~30%);次要矿物为黑云母(6%~8%)、白云母(4%~5%);副矿物为锆石、石榴石、金属氧化物等,无角闪石产出(图 2c)。镜下所有矿物粒径大致为约 1~4 mm,其中斜长石自形程度较高,呈板状、环带结构,聚片双晶及卡式双晶等,部分表面发生了轻微的蚀变,主要为绢云母化;钾长石多为半自形板状、柱状,常见简单双晶、卡斯巴双晶及条纹结构;黑云母多为半自形—自形、部分可见暗化边熔蚀结构等(图 2d);白云母粒径较大,自形程度好,鳞片状分布,为原生岩浆白云母(图 2e);石榴石呈粒状结构,表面裂隙发育,镜下可见数量较少(图 2f)。

2.3 富云包体地质特征

含石榴石二云母花岗岩脉中局部可见大量富黑云母包体,远观似雨后落在岩石上的雨点。包体大小较为均一、直径 1~4 cm,整体呈椭圆状,少数呈近圆状在岩脉局部均匀分布(如图 2b)。包体主要由黑云母、石英及少量斜长石、钾长石等组成。其与寄主岩界线较为清晰,部分包体边部黑云母圈显示解体趋势,边部黑云母往往表现出较强的绿泥石化蚀变现象,并伴随明显的扭折弯曲特征(图 2g, 2h)。包体边部还发育颗粒细小的他形石英、斜长石颗粒;核部可见颗粒较大、自形程度较好的斜长石及石英。

3 分析方法

本工作对含石榴石二云母花岗岩开展了锆石测年研究。样品破碎和锆石分选由廊坊市宇能岩石矿物分选技术服务有限公司完成。锆石透射光、反

射光和阴极发光(CL)图像在武汉市上谱测试分析科技有限责任公司拍摄。在锆石原位 U-Pb 同位素测试分析之前,通过透射光和 CL 图像对锆石的晶体形貌和内部结构特征进行了详细研究,并挑选出适合同位素分析的最佳测试点。锆石 U-Pb 同位素测试分析在武汉上谱分析科技有限责任公司采用四级杆质谱 Agilent 7700 及与之配套的 193 nm 准分子激光剥蚀系统(GeoLasPro)完成。激光剥蚀斑束直径为 32 μm ,每个分析数据包括 20~30 s 的空白信号和 50 s 的样品信号,激光剥蚀深度为 20~40 μm 。锆石年龄计算采用标准锆石 91500 作为外标,元素含量采用美国国家标准物质局人工合成硅酸盐玻璃 NIST610 作为外标, ^{29}Si 作为内标元素进行校正。数据处理采用 ICPMSDataCal (Liu *et al.*, 2008a, 2008b) 程序,锆石年龄协和图用 Isoplot3.0 程序获得。

全岩主量元素分析在广州澳实分析检测有限公司完成,测试方法为 X-射线荧光光谱法,详细的仪器参数、操作流程等见 Ma *et al.* (2012)。微量元素测定在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室(GPMR)运用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)完成,测试仪器为 Agilent7700e,具体的实验流程见 Liu *et al.* (2008a, 2008b),全岩地球化学图解利用 Geoplot3.0 软件制作。受限于实际操作难度,在全岩粉末准备过程中,含石榴石二云母花岗岩的细小富云包体难以彻底分离。

基于在阴极发光(CL)图像和 U-Pb 定年测试的结果,锆石 Lu-Hf 原位同位素分析在武汉上谱分析科技有限责任公司利用激光剥蚀多接收杯等离子质谱仪 LA-MC-ICP-MS(Nu Plasma)上完成,束斑直径 44 μm ,详细仪器操作和数据操作处理方法可参考 Hu *et al.* (2012)。

电子探针成分分析在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室利用配备有 4 道波谱仪的 JEOL JXA-8100 电子探针完成。加速电压为 15 kv,加速电流为 20 nA,石榴石、云母和斜长石的束斑直径分别为 1 μm 、10 μm 和 5 μm ,具体的实验流程见 Zhang and Yang (2016)。

4 测试结果

4.1 锆石年龄

含石榴石二云母花岗岩的 U-Pb 同位素分析结

果如表1. 锆石颗粒半自形—自形, 晶型较为完整, 震荡环带发育(如图3a). 16个锆石分析点的测试结果显示了两组不同的年龄, 第一组年龄为237~250 Ma, Th含量 $63.83\sim 690.06(\times 10^{-6})$, U含量 $206.83\sim 1\ 779.37(\times 10^{-6})$, Th/U=0.27~1.05; 第二组年龄为399~895 Ma, Th含量 $29.23\sim 137.04(\times 10^{-6})$, U含量 $79.93\sim 1\ 114.43(\times 10^{-6})$, Th/U=0.12~0.99(表1). 第一组锆石均发育较为明显的振荡环带, 轻、重稀土分馏明显, 表现为左倾斜模式的轻稀土亏损型(图3b), 以上特征指示它们均为岩浆锆石(吴元保和郑永飞, 2004). 11个较为集中的数据点给出 242.0 ± 1.4 Ma的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄(MSWD=0.63, $n=11$), 代表了含石榴石二云母花岗岩的成岩年龄(图3c, 3d), 属于中三叠世岩浆活动的产物. 第二组锆石阴极发光(CL)图像常见明显的继承核, 轻稀土含量相对较低, 年龄分别895 Ma、440 Ma、399 Ma, 它们可能是岩浆上升侵位过程中捕获的新元古代及早古生代围岩的锆石.

4.2 岩石地球化学

含石榴石二云母花岗岩全岩地球化学分析结果见表2. 所有样品的主量元素特征可归纳为:(1)

高硅, $\text{SiO}_2=74.49\%\sim 75.24\%$; (2) 铝过饱和, $\text{Al}_2\text{O}_3=13.46\%\sim 13.80\%$, 铝饱和指数(A/CNK)为1.08~1.12, 属于过铝质—强过铝质系列(图4c); (3) 全碱含量($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}=7.47\%\sim 7.69\%$)中等偏低, 其中 K_2O 含量为 $4.21\%\sim 4.33\%$; 在TAS分类图解(Middlemost, 1994)与 SiO_2 - K_2O 图解(Pecerillo and Taylor, 1976)上, 样品均落在亚碱性和高钾钙碱性系列(图4b); (4) 相对贫铁($\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}=1.10\%\sim 1.47\%$)、镁($\text{MgO}=0.16\%\sim 0.21\%$)、钙($\text{CaO}=1.16\%\sim 1.34\%$)、钛($\text{TiO}_2=0.05\%\sim 0.07\%$)和磷($\text{P}_2\text{O}_5=0.02\%\sim 0.03\%$); (5) 在哈克图解上(图5), 含石榴石二云母花岗岩与加鲁河同时代的黑云母二长花岗岩、花岗闪长岩和闪长岩的 Al_2O_3 、 MgO 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$ 、 CaO 、 TiO_2 、 P_2O_5 等与 SiO_2 含量表现出一定的负相关性, 而 $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 、 K_2O 含量与 SiO_2 含量有一定的正相关性, 结合区域地质资料, 这可能反映出含石榴石二云母花岗岩与黑云母二长花岗岩存在一定的演化关系. 在前人研究中花岗闪长岩为壳幔岩浆混合产物, 黑云母二长花岗岩和闪长岩类分别代表了岩浆混合的酸性和基性端元(王连训等, 2017).

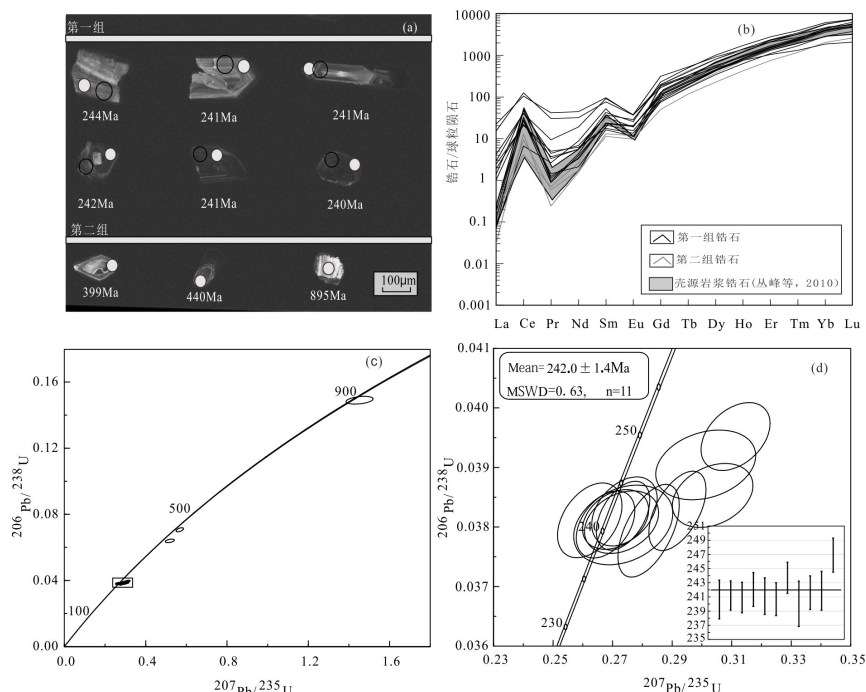


图3 (a)锆石CL图像(白色圈—锆石年测点、空心圈—Hf同位素测点);(b)锆石稀土配分模式图(球粒陨石标准化值据Sun and McDonough, 1989);(c)和(d)含石榴石二云母花岗岩U-Pb年龄谱和图

Fig.3 (a) Cathodoluminescence (CL) images of zircons (White circle - U-Pb dating; Vacant circle-Hf isotope); (b) Chondrite-normalized REE distribution pattern of the zircons; (c) and (d) Zircon U-Pb concordia diagram of Garnet-bearing two-mica granites from Jialuhe

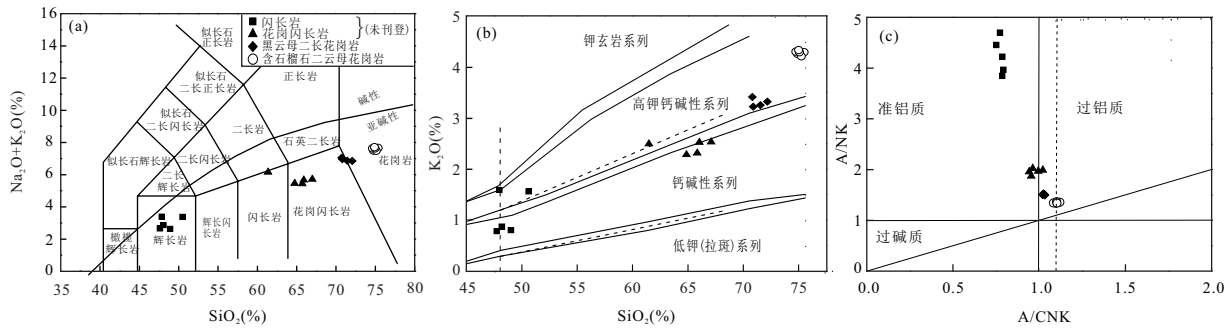


图 4 含石榴石二云母花岗岩主要元素判别图解

Fig. 4 Major elements discrimination diagrams for the garnet-bearing two-mica granites

a. TAS 判别图解, 据 Middlemost (1994); b. SiO_2 - K_2O 判别图解, 据 Peccerillo and Taylor (1976); c. A/NK - A/CNK 判别图解, 据 Peccerillo and Taylor (1976)

含石榴石二云母花岗岩的全岩微量元素测定结果列于表 2. 原始地幔标准化微量元素蛛网图显示(图 6a), 该岩脉相对富集大离子亲石元素(如 U、Th、K、Rb、Ba 等), 亏损高场强元素(如 Nb、Ta、Zr、Hf 等), 具有“Nb-Ta 槽”和“Ti、Ba、P 谷”特征. 岩石的稀土元素总量较低[$\sum \text{REE}=61.55\sim 119.05$ ($\times 10^{-6}$)], 平均值为 97.70 ($\times 10^{-6}$)、富集轻稀土(LREE/HREE=6.34~11.28), 其轻稀土分馏相对较为明显($\text{La}_N/\text{Sm}_N=4.69\sim 7.31$), 而重稀土分馏不明显($\text{Gd}_N/\text{Yb}_N=0.95\sim 1.16$). 球粒陨石标准化 REE 配分曲线整体呈右倾模式(图 6b), 具有弱的 Eu 负异常($\delta \text{Eu}=0.51\sim 0.65$), 这可能是岩浆演化的过程中发生了斜长石的分离结晶. 含石榴石二云母花岗岩的微量元素和稀土元素配分曲线总体与加鲁河地区的黑云母二长花岗岩较为相似, 明显不同于同期的闪长岩, 这可能与岩浆源区差异有关(图 6).

4.3 Hf 同位素分析

锆石 Lu-Hf 同位素分析是示踪岩浆源区的重要手段之一. 因此, 本文对测年样品 D10086 的 12 个岩浆锆石点进行了原位激光 Hf 同位素分析(图 3c). 结果显示, 12 颗岩浆锆石的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 变化范围为 $0.001\ 272\sim 0.002\ 170$ (表 3), 其比值非常接近 0.002, 表明这些锆石在形成以后, 仅有较少的放射成因 Hf 的积累, 所测定的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 可以较好地反映其形成过程中 Hf 同位素的组成特征(吴福元等, 2007a). 12 颗岩浆锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 $-2.78\sim -8.19$, 平均值为 -5.61 , 变化范围达 -5.41 个 ϵ 单位(图 7a), 总体具有壳源特征. 该岩脉具有较宽的二阶段模式年龄($T_{\text{DM}2}=1\ 269\sim 1\ 597$ Ma)(如图 7b), 平均值为 $1\ 410$ Ma. 而熊富浩(2014)曾报道加鲁河地区

的花岗岩闪长岩 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 $-1.10\sim -2.74$, 二阶段模式年龄为 $1\ 330\sim 1\ 480$ Ma 和高分异的正长花岗岩 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 $-3.90\sim -6.89$, 二阶段模式年龄为 $1\ 510\sim 1\ 700$ Ma. 由图 7a 可见, 含石榴石二云母花岗岩的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值总体与区域内正长花岗岩的结果较为相近, 略低于加鲁河花岗闪长岩.

4.4 矿物化学

含石榴石二云母花岗岩中的矿物电子探针数据见附件 1. 石榴石以富 Mn(1.87~1.88, apfu 值, 下同)、Al(1.99~2.01)、贫 Mg(~ 0.33)及较高的 Mn/(Mn+Fe) 比值(0.69~0.70)为特征, 属于铁铝榴石系列中的锰铝榴石. 在 Mg-Fe-Mn 三角图中, 两个样品点均落于岩浆型石榴石区域(图 8a). 样品中的白云母表现出较高的 Na(0.17~0.19)、Ti(0.05~0.08)、Al(5.40~5.43)、低的 Mg(0.11~0.12) 值及较低的 Fe/(Fe+Mg) 比值(0.72~0.73), 具有原生白云母特征. 在 Fe/(Fe+Mg)-Al 和 Fe/(Fe+Mg)-Na 图解上(图 8b, 8c), 样品点落在原生白云母的边界区域.

为了对比含石榴石花岗岩和富云包体中的矿物成分差异, 本研究分别选取了花岗岩和富云包体中的斜长石分别对应进行了主要元素含量测定, 数据结果见附件 1. 如图 8d~8f 显示, 花岗岩中的斜长石具有较高的 Si(2.74~2.82)、较低的 Ca(0.18~0.27)、Al(1.17~1.25) 和 An 牌号(18~26), 而富云母包体中的斜长石具有较低的 Si(2.69~2.75)、较高的 Ca(0.25~0.29)、Al(1.25~1.31) 和 An(25~29), 两者都属于更长石系列.

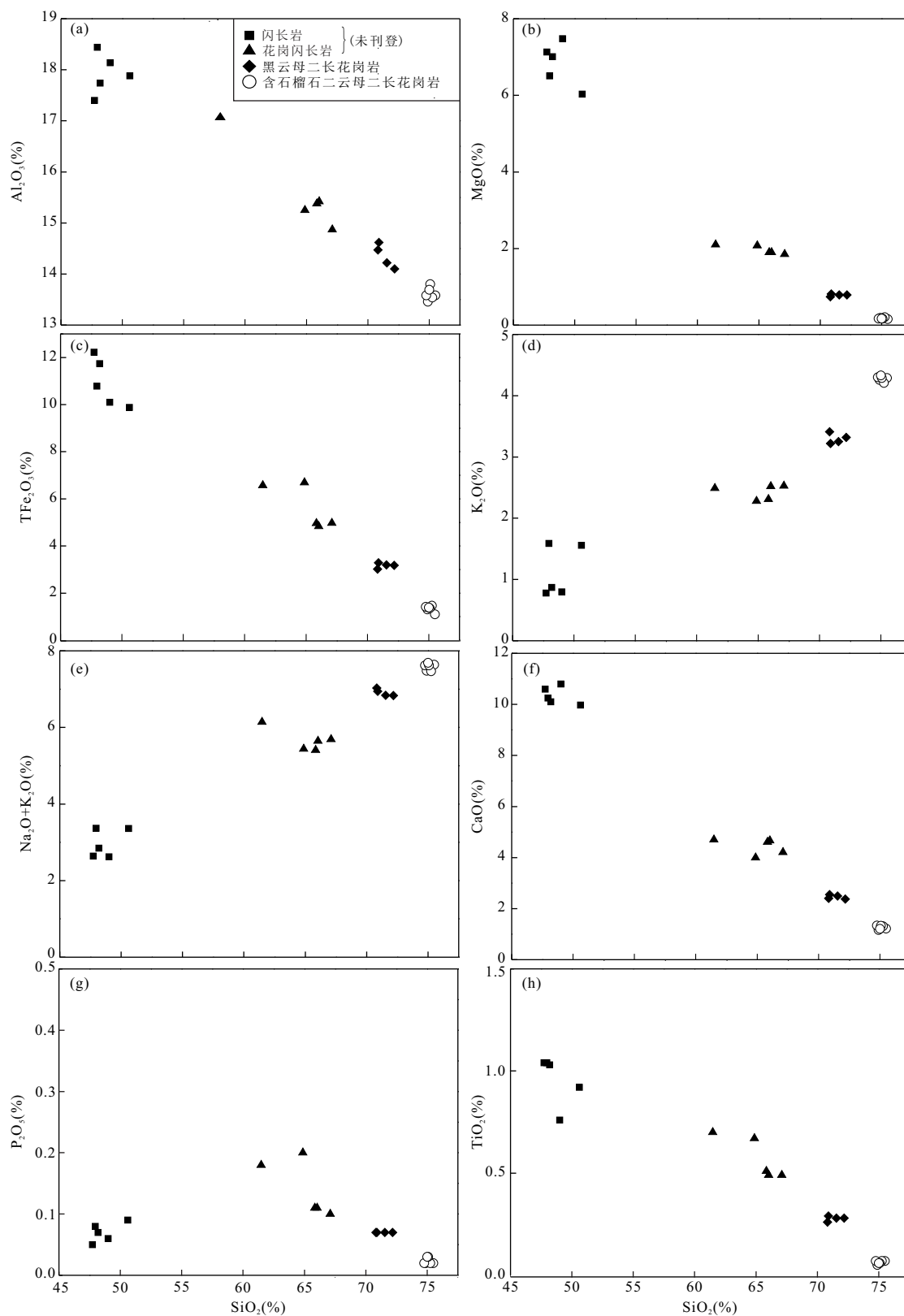


图 5 含石榴石二云母花岗岩 Harker 图解

Fig.5 Harker diagrams for Garnet-bearing two-mica granites

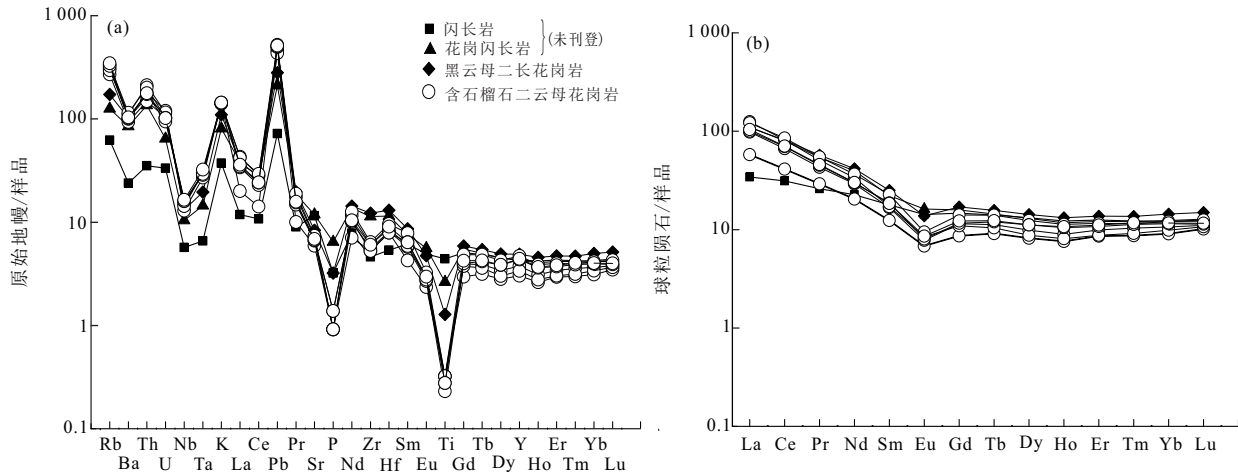


图 6 (a)含石榴石二云母花岗岩原始地幔标准化微量元素蛛网图和(b)球粒陨石标准化稀土元素配分模式图

Fig.6 (a) Primitive mantle-normalized trace element spider diagram and (b)Chondrite-normalized REE distribution pattern of Garnet-bearing two-mica granites

原始地幔标准化值和球粒陨石标准化值据 Sun and McDonough(1989)

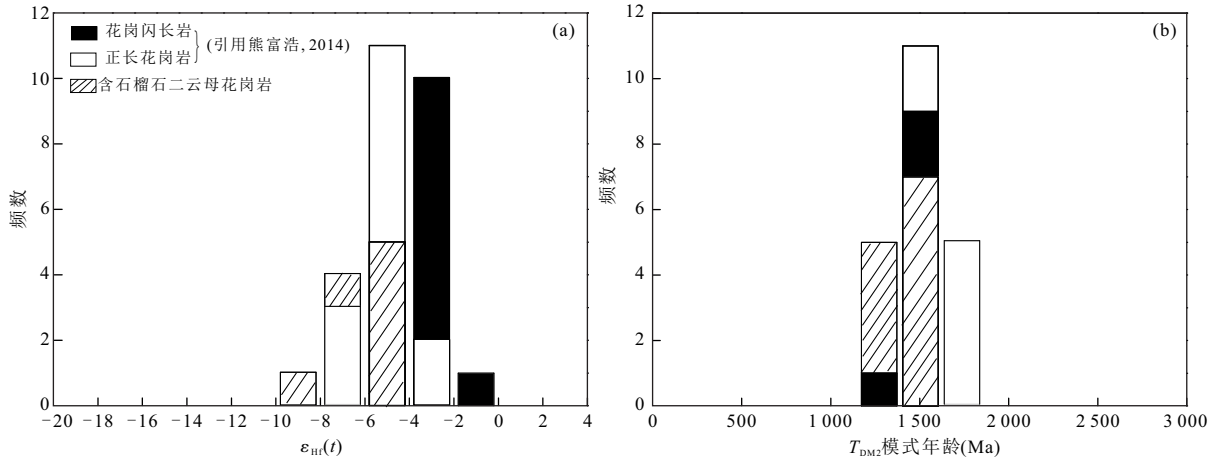


图 7 含石榴石二云母花岗岩脉 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值和地壳模式年龄 (T_{DM2}) 柱状图

Fig.7 Histograms (a) ϵ_{Hf} values and (b) crust model ages of garnet-bearing two-mica granites

5 讨论

5.1 成因类型归属

花岗岩成因类型的分类方案众多,如今被广泛认可的划分方案是 ISMA 型,基于这种花岗岩成因分类,一个花岗岩体被赋予了不同的成因和构造背景. I 和 S 型花岗岩的分类是根据源区的性质, A 型花岗岩主要是具有特殊的成分特征和构造意义,即碱性、无水和非造山,并且具有较高的形成温度特征 (Whalen *et al.*, 1987). M 型花岗岩主要与地幔岩浆演化相关 (Pitcher, 1983). 然而, M 型花岗岩在自然界极少,花岗岩的成因类型主要为 I、S、A 型 3 种.

含石榴石二云母花岗岩中未见碱性暗色矿物,

且相对亏损高场强元素 (HFSE), 具有低的 Rb/Sr (1.24~1.51)、Rb/Ba (0.24~0.28) 和 10 000 Ga/Al 比值 (1.24~1.41), 不同于典型的 A 型花岗岩的矿物学和微量元素特征 (Whalen *et al.*, 1987). 此外, 海西—印支期研究区整体处于俯冲—碰撞造山加厚构造阶段, 这与 A 型花岗岩一般产于伸展减薄的环境不符. S 型花岗岩以存在石榴石及原生白云母等富铝矿物为典型特征, 但是受岩浆结晶过程中初始岩浆成分、温压条件和岩浆—热液作用的影响, 也可以使石榴石和白云母出现在 I 型花岗岩中 (Chappell, 1999; 吴福元等, 2007b). 因此, 对于 I 型和 S 型花岗岩的判别, 不能以简单的矿物组合作为判定依据, 往往需要结合各方面特征予以综合判定.

全岩地球化学分析表明, 含石榴石二云母花岗

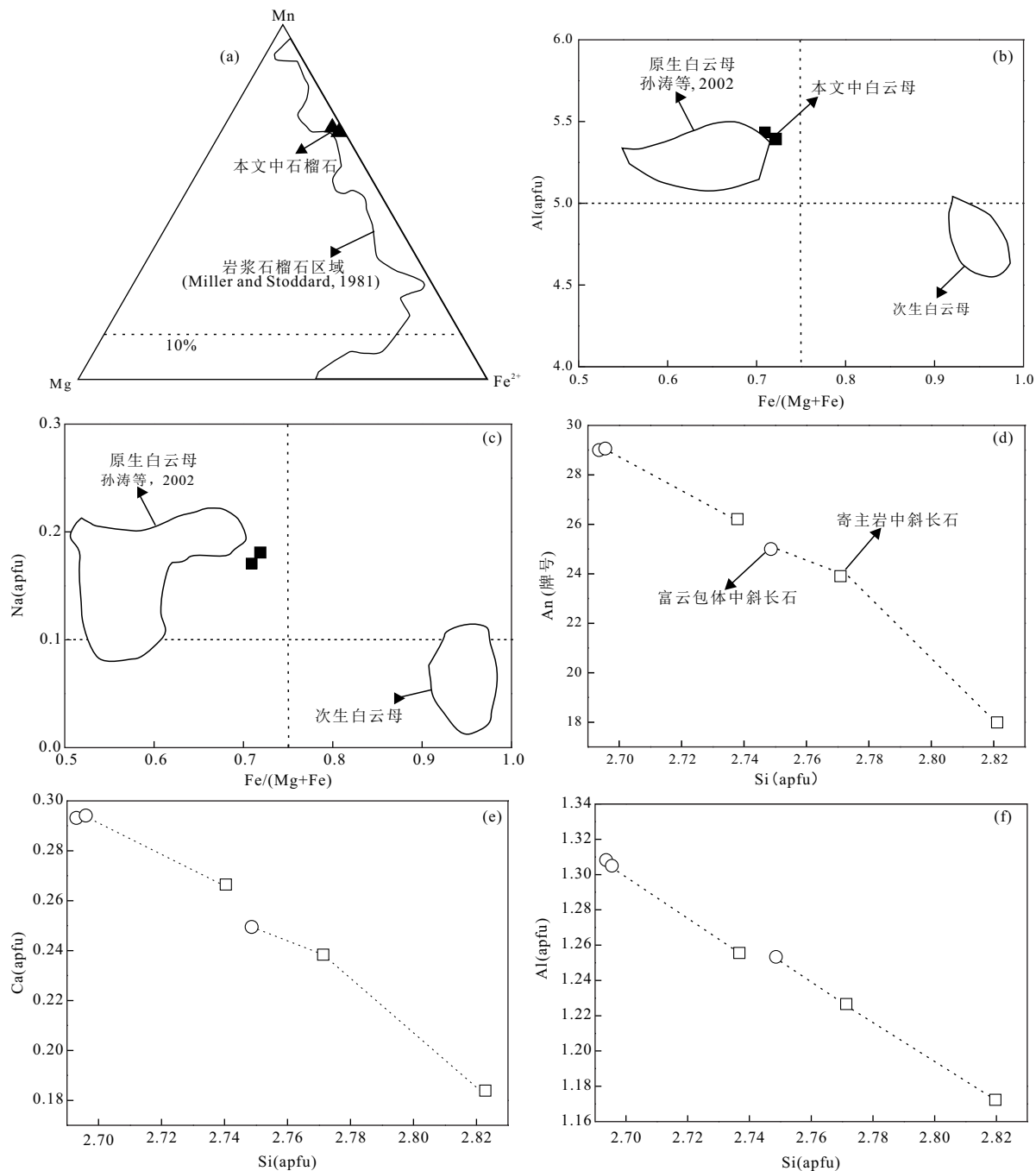


图 8 含石榴石二云母花岗岩中石榴石、白云母和斜长石主量元素图解

Fig.8 The major elements diagrams of garnet, muscovite and plagioclase in garnet-bearing two mica granites

a. 石榴石成分投影图, 据 Miller and Stoddard (1981); b, c. 白云母成分判别图, 据孙涛等(2002); d~f. 寄主岩和富云包体中斜长石成分对比图 (虚线连接代表同一个薄片)

岩整体为过铝质—强过铝质 ($A/CNK=1.08\sim 1.12$), 与形成于变沉积岩部分熔融的典型的 S 型花岗岩所具有的普遍强过铝质特征略有差异 (Chappell, 1999). 在 K_2O-Na_2O 判别图解 (图 9a) 和花岗岩 ACF 图解上 (图 9b), 本研究样品点均落入 I 型花岗岩区域, 而远离 S 型花岗岩区域. 前人研究认为磷

灰石在 I 型花岗岩浆 (准铝质或弱过铝质) 中的溶解度很低, 因而在岩浆分异的过程中表现出 P_2O_5 随 SiO_2 的增加而降低的趋势, 而在 S 型花岗岩浆 (强过铝质) 中, 表现出完全相反的趋势 (Chappell, 1999; Wu *et al.*, 2003; Li *et al.*, 2007; Zhu *et al.*, 2015). 加鲁河含石榴石二云母花岗岩具有极低的 P_2O_5 含

量(0.02~0.03%),明显低于大部分S型花岗岩的 P_2O_5 含量(>0.1%),并且 P_2O_5 含量随 SiO_2 的增加而逐渐减少,符合I型花岗岩的演化趋势(图9c).这种趋势也得到了 SiO_2 和Pb含量正相关性的支持(图9d),因为I型花岗质岩浆演化早期往往不会结晶出富Pb矿物,从而在演化晚期表现出较高的Pb含量(Wu *et al.*, 2003).

此外,含石榴石二云母花岗岩不出现角闪石,具有较高的硅(高达75.24%)、较低的CaO、FeO、MgO、 TiO_2 、 P_2O_5 、Eu含量(图5、图6b),表明它们经历了较高度度的结晶分异作用,富铁镁矿物、斜长石、磷灰石等在岩浆早期冷却过程中发生了结晶分离.在 $100 \times (MgO + FeO^T + TiO_2) / SiO_2 - (Al_2O_3 + CaO) / (FeO^T + Na_2O + K_2O)$ 图解中,所有样品均落入分异钙碱性花岗岩区域,在 $(Zr + Nb + Ce + Y) - (Na_2O + K_2O / CaO)$ 与 $(Zr + Nb + Ce + Y) - FeO^T / MgO$ 关系图上,样品点大多落入了分异的I型花岗岩区域(图10a~10c).这些特征均指示加鲁河含石榴石二云母花岗岩为一套高分异I型花岗岩,而非典型的S型花岗岩.Wang *et al.* (2014)在研究华南花岗岩中认为I型花岗岩在经历高程度结晶分异过程后也可形成过铝质—强过铝质二云母淡色花岗岩类.鉴于加鲁河岩体中部出露有244 Ma(项目组未发表资料)左右的黑云母二长花岗岩,在哈克图解上其与含石榴石二云母花岗岩具有一定的演化关系,且二者具有相似的同位素组成,因此它们可能在成因上具有一定联系.

已有研究表明,随着岩浆演化,剩余岩浆的 $Mn / (Ca + Fe + Mn)$ 的比值会逐渐增加,因此富Mn贫Ca的石榴石最适合晚期形成(Miller and Stoddard, 1981).于津海等(2004)曾对闽东南I型花岗岩中的石榴石和白云母矿物化学分析,表明它们是由I花岗岩经强演化之后,在相对低温低压的条件下形成.吴福元等(2017)在论述高分异花岗岩中提到I型花岗岩经过强烈的结晶分异过程,会导致岩石向富铝的方向演化(即铝饱和指数增加),从而出现白云母和石榴石(锰铝榴石).从矿物学角度而言,含石榴石二云母花岗岩中的石榴石颗粒细小、半自形、内无包裹体,与变质岩石榴石一般以他形及内部存在较多包裹体产出相区别(高利娥等, 2012).在成分上,石榴石富Al、Mn、Fe;贫Mg,在成分投图上全落在岩浆型石榴石区域(图8a).同样白云母具有较高的Na(0.17~0.19)、Ti(0.05~0.08)、

Al(5.40~5.43)、较低的Mg(0.11~0.12) apfu值及 $Fe / (Fe + Mg)$ 比值(0.72~0.73),与孙涛等(2002)对南岭东段过铝质花岗岩中的原生白云母较为一致.因此,笔者认为加鲁河含石榴石二云母花岗岩中石榴石及白云母的存在是经历过高程度结晶分异作用的残余花岗质岩浆的进一步结晶的结果,其形成条件可能为一种相对低温低压的环境.该花岗质母岩浆可能与黑云母二长花岗岩的岩浆同源.

5.2 岩浆来源及演化过程

加鲁河含石榴石二云母花岗岩脉属于高钾钙碱性系列岩石,岩石具有高硅(74.49%~75.24%)、较高的 K_2O (4.21%~4.33%)和较低的 Na_2O / K_2O 比值(0.76~0.78),且该岩石的Nb/Ta比值为8.22~9.67,接近地壳比值(Nb/Ta=10.91),这与地壳部分熔融的岩浆相似.在花岗岩源区性质判别图解中,含石榴石二云母花岗岩与黑云母二长花岗岩均分布在变质杂砂岩熔体与角闪岩熔体过渡区域(图11a; Douce, 1999),并且两者具有较高的 Na_2O / K_2O 和 $(Na_2O + K_2O) / (MgO + FeO^T + TiO_2)$ 比值,这表明其源区可能更偏向于类似变质杂砂岩的特征.

熊富浩(2014)获得同时代的香日德正长花岗岩和花岗闪长岩 $\epsilon_{Hf}(t)$ 为(-6.89~-3.90)与(-3.41~-1.10),叶蕾等(2014)曾获得巴隆地区的黑云母二长花岗岩 $\epsilon_{Hf}(t)$ 为(-4.33~-3.90).本文研究对象含石榴石二云母花岗岩 $\epsilon_{Hf}(t)$ 为(-8.19~-2.78),平均值(-5.61)与香日德正长花岗岩较为接近(图11b),略低于香日德花岗闪长岩和巴隆黑云母二长花岗岩,表明它可能为下地壳部分熔融的产物,后期存在一定程度的围岩的混染.该岩石的模式年龄(T_{DM2})=1 269~1 597 Ma,大致对应着东昆仑北部的金水口群变质碎屑岩的锆石年龄(1 000~1 900 Ma)(王国灿等, 2007),据此推测中元古代下地壳可能为含石榴石二云母花岗岩的主要源区.

含石榴石二云母花岗岩和加鲁河地区的黑云母二长花岗岩具有相近的时代;在哈克图解上,含石榴石二云母花岗岩与黑云母花岗岩呈现一定的结晶分异趋势,且具有更高的分异指数(DI)=91.47~92.10;在微量元素图解上显示,含石榴石二云母花岗岩具有更明显的P、Ti、Eu等异常的特征,这均可能表明含石榴石二云母花岗岩是黑云母二长花岗岩结晶分异的产物.含石榴石二云母花岗

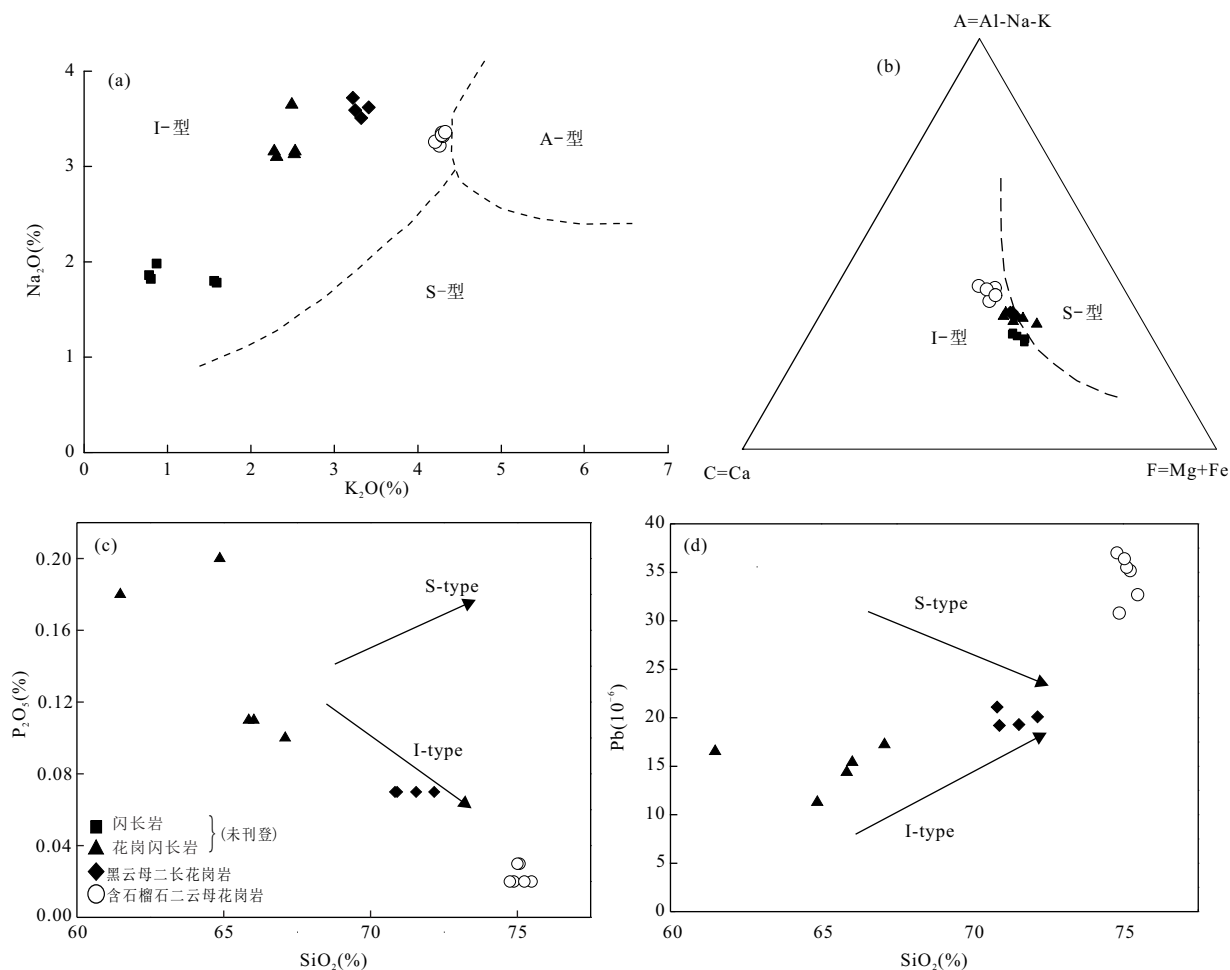


图9 含石榴石二云母花岗岩成因判别图

Fig.9 Discrimination diagrams of genesis type for garnet-bearing two-mica granites.

a. K_2O - Na_2O 判别图; b. 花岗岩 ACF 图解; c. SiO_2 - P_2O_5 散点图; d. SiO_2 -Pb 散点图

岩的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 平均值较前人对该地区 I 型花岗岩所测的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 更偏负值(图 11b), 联合在该岩石中发现的围岩捕虏锆石以及局部较为发育的暗色富云包体, 可以推断岩浆在侵位过程中可能存在一定程度的围岩的混染。

综上所述, 含石榴石二云母花岗岩可能是由幔源岩浆底侵导致中元古下地壳岩石发生部分熔融, 形成的长英质岩浆在地壳深部岩浆房经历了较强的结晶分异作用, 并在上升侵位过程中遭受了围岩的混染, 最终形成一套含富云包体的高分异 I 型花岗岩。

5.3 富云包体成因

包体按成因和来源可分为以下几种: 捕虏体、混杂包体(暗色微粒包体 MME)、富云母包体、冷凝边包体、同源堆积包体等(王德滋等, 1992; 周涛发和岳书仓, 1994)。暗色微粒包体(MME)在花岗岩体中最为常见, 内部常出现角闪石、黑云母等暗色

矿物, 多为浑圆状、椭圆状或卵状, 在岩体边部往往具有定向排列, 它通常被认为是岩浆混合后的产物(刘成东等, 2004; 陈国超等, 2016; 王连训等, 2017)。富云包体不同于暗色微粒包体(MME), 其特征是富含云母(黑云母为主), 常见石英和长石, 偶见富铝矿物矽线石、刚玉和尖晶石等, 多呈不规则状或透镜状, 包体边缘有时有重结晶现象。富云包体的成因模式多种多样, 但概括起来有: (1) 残留体模式; (2) 围岩捕虏体模式; (3) 析离体模式(徐夕生和周新民, 1991; 马昌前等, 1992)。“残留体”包体往往具有以下特征: 花岗变晶结构、叶理组构、高温、贫水、耐熔矿物组合; 贫 SiO_2 、贫碱; 化学成分与寄主岩有一定的互补性。“围岩捕虏体”包体是岩浆上升侵位过程中捕获的围岩或基底的岩石碎块, 定向性不明显, 呈棱角一次棱角状、透镜状或浑圆状等, 常发生重结晶现象产生新的结构, 如反应边结构、环带结构等, 黑云母多向寄主岩扩散, 从包体边

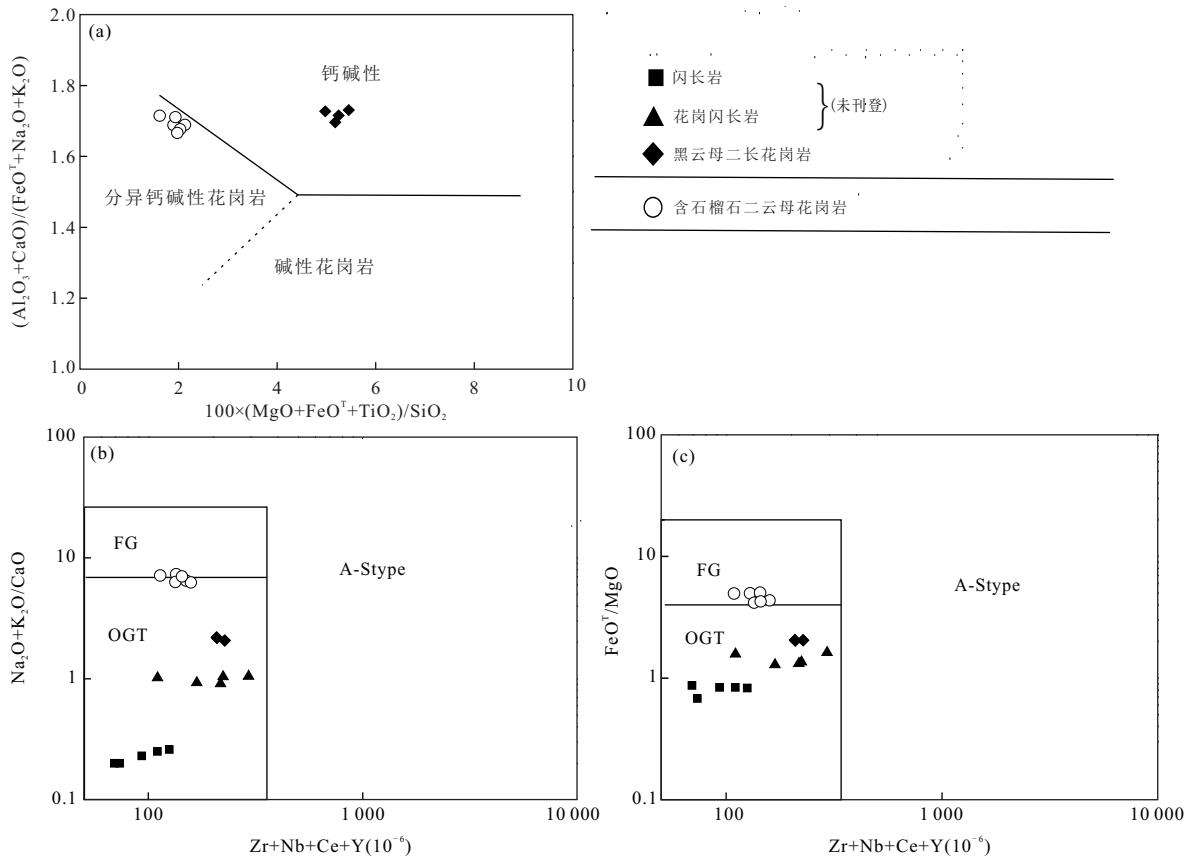


图 10 含石榴石二云母花岗岩类型判别图解

Fig.10 Type discrimination diagram of garnet-bearing two-mica granites

a. $100 \times (\text{MgO} + \text{FeO}^{\text{T}} + \text{TiO}_2) / \text{SiO}_2 - (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}) / (\text{FeO}^{\text{T}} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$; b. $(\text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y}) - (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) / \text{CaO}$; c. $(\text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y}) - (\text{FeO}^{\text{T}} / \text{MgO})$; 其中: OGT, I、S 和 M 型花岗岩区; FG, 分异的 I 型花岗岩; 图 a 据 Sylvester (1989); 图 b, c 据 Eby (1990)

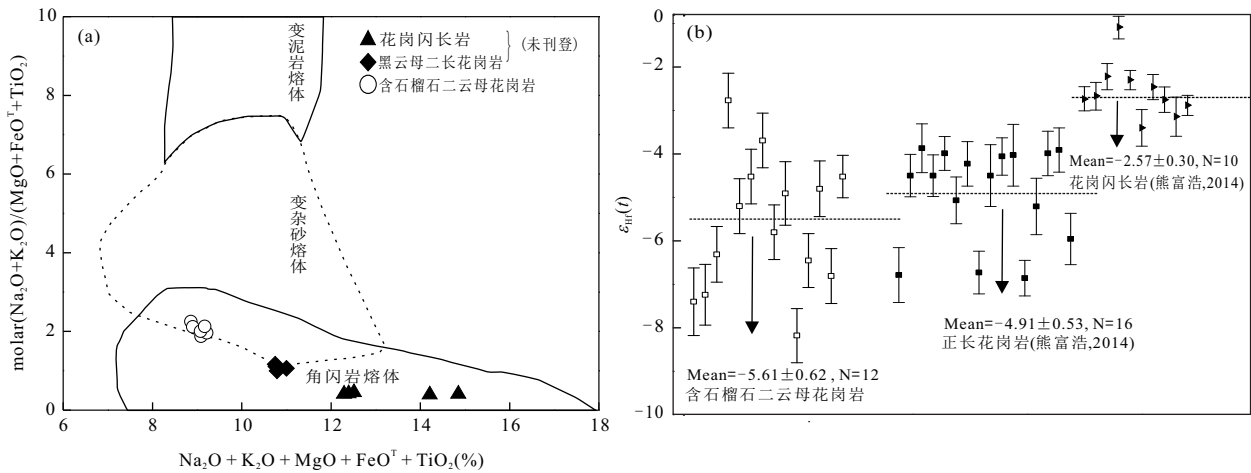


图 11 含石榴石二云母花岗岩的岩浆源区判别图解和锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 平均值图解

Fig.11 Source discrimination diagram and Weighted average $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ of zircons from garnet-bearing two-mica granites
图 a 据 Douce (1999)

缘到中心,同化改造程度减弱。“析离体”包体是由岩浆早期结晶的矿物聚集而成,矿物多以集合体的形式出现,自形程度较好,具有明显火成堆积结构

的特征。

含石榴石二云母花岗岩中含有大量粒径细小的富云包体,包体整体呈椭圆状,部分可见包体由

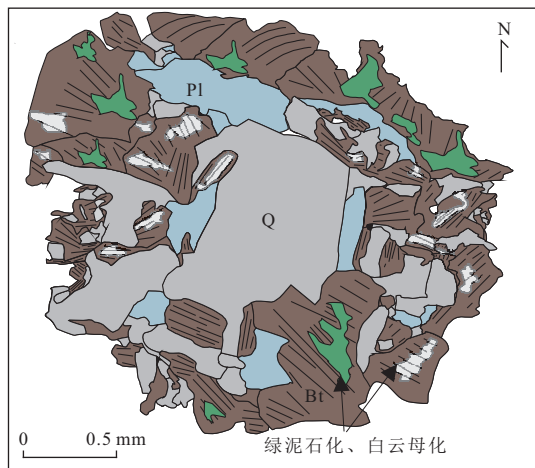


图12 含石榴石二云母花岗岩中富云包体素描图

Fig.12 Sketched map of the biotite-rich enclaves in garnet-bearing two-mica granites

内向外逐渐解体的特征。包体边部多发育颗粒细小的它形石英和斜长石,部分颗粒细小的石英可见充填在包体边部黑云母中;核部可见颗粒较大且自形的斜长石及石英,呈港湾状(图12),这可能是低温岩浆对围岩捕虏体未完全熔融后重结晶的结果(徐夕生和周新民,1991)。相对于寄主岩中的黑云母而言,包体中的黑云母发生了较强的绿泥石化,并具有明显的扭折弯曲的变形特征(图12),这可能是岩浆流体、释放的热量等对包体交代及运移产生的结果(赫英,1995;彭卓伦等,2008)。矿物化学显示(图8d~8f),相对寄主岩,包体内的斜长石具有略高的 Al_2O_3 、CaO、An牌号和略低的 SiO_2 含量,这也可能间接表明包体的来源属于围岩物质。因此本文认为含石榴石二云母花岗岩中的富云包体更可能为围岩捕虏体,是岩浆同化围岩后的产物。即长英质岩浆在深部上升侵位的过程中同化了围岩中的物质,由于部分熔融程度较低,发生重结晶现象,造成包体边部晶体颗粒细小,而核部颗粒较粗,后期的岩浆流动造成了黑云母圈的解体、蚀变及扭折塑性形变。

5.4 构造环境

东昆仑造山带广泛发育与俯冲和碰撞相关的花岗质岩类,年龄多分布于晚二叠世—晚三叠世(莫宣学等,2007;Xia *et al.*, 2014)。尽管诸多学者已经该地区进行了大量的研究,但在构造演化方面仍存在一定的争议,主要有以下观点:(1)阿尼玛卿古特提斯洋的俯冲一直持续到早三叠世,至晚三叠世才全面转入陆内碰撞造山阶段(罗照华等,2002;

莫宣学等,2007;张明东等,2018);(2)阿尼玛卿古特提斯洋闭合于中二叠世,晚二叠世该区已全面进入后碰撞造山阶段(任纪舜等,2004;Yang *et al.*, 2009;Pan *et al.*, 2012);(3)晚二叠世—早三叠世花岗岩类多为俯冲型岩浆岩,中三叠世才开始碰撞造山运动(孙雨等,2009;熊富浩,2014)。其中,这些观点的主要分歧在于阿尼玛卿古特提斯洋何时闭合以及岩浆活动究竟形成于何种动力学背景之下。

近年研究表明,东昆仑地区大量与俯冲相关的岩浆活动的时限定为264~240 Ma,随后在240Ma左右进入洋壳俯冲晚期(刘成东等,2004;湛宏伟等,2005;Huang *et al.*, 2014)。例如,许志琴等(2001)获得东昆仑东西大滩断裂带内发育的同造山花岗岩年龄为237 Ma;刘成东等(2002)获得香日德南侧中三叠世早期的花岗岩闪长岩年龄为242 Ma,其形成于阿尼玛卿洋壳俯冲晚期向同碰撞转换环境;李瑞保等(2014)认为在中三叠世古特提斯洋闭合接近尾声,局部开始出现差异性碰撞;熊富浩(2014)获得香日德东部地区正长花岗岩侵入年龄为238 Ma,并提出了洋盆俯冲持续到中三叠世,然后开始发生碰撞造山运动。

含石榴石二云母花岗岩形成于中三叠世,锆石U-Pb年龄数据显示其形成于242Ma,对应着阿尼玛卿洋壳由俯冲晚期向同碰撞转换的时限。全岩地球化学分析表明该岩脉相对富集大离子亲石元素,而亏损高场强元素,显示了岛弧岩浆活动的特点。然而部分研究表明高场强元素(Nb、Ta、Ti)的亏损特征在碰撞—后碰撞花岗岩中也时常出现(Zhang *et al.*, 2012;Xu *et al.*, 2016),主要由于新生的壳源物质继承了原岩的特征。在Y-Nb图解(图13a)和 R_1 - R_2 (图13b)图解上,含石榴石二云母花岗岩几乎都落入同碰撞构造环境区域。因此,结合区域地质背景资料,本文认为含石榴石二云母花岗岩形成于同碰撞构造环境,这也一定程度上限定了至少在中三叠世早期(242 Ma)时阿尼玛卿古特提斯洋盆已经处于关闭状态。

6 结论

(1)含石榴石二云母花岗岩脉以原生岩浆白云母和石榴石为特征矿物,是东昆仑地区鲜有报道的一套过铝质—强过铝质岩石,其化学成分表现出富Si,贫Fe、Ti、Ca和Mg等特征,具有明显的Eu负异常,为一套高分异I型花岗岩。

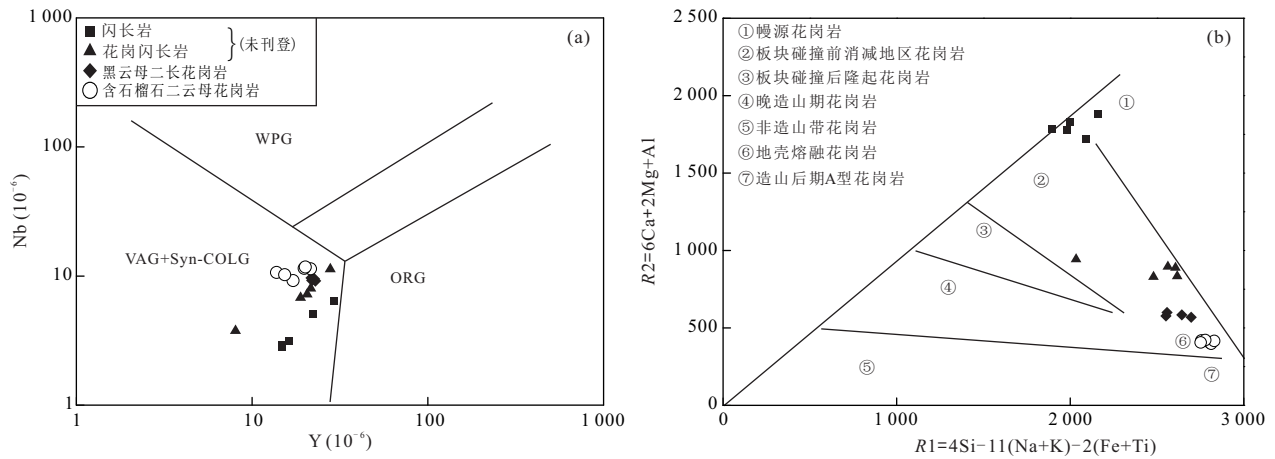


图 13 含石榴石二云母花岗岩构造环境判别图

Fig.13 Tectonic discrimination diagram of the garnet-bearing two-mica granites

WPG. 板内花岗岩; ORG. 大洋中脊花岗岩; VAG. 火山弧花岗岩; Syn-COLG. 同碰撞花岗岩; 图 a 据 Pearce *et al.* (1984); 图 b 据 Batchelor and Bowden (1985)

(2) 含石榴石二云母花岗岩具有相对负的锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ ($-8.19 \sim -2.78$) 值, 二阶段模式年龄 (T_{DM2}) 为 1.3~1.6 Ga, 总体上与区域内正长花岗岩和黑云母二长花岗岩同位素特征相近, 因此其成因可能为幔源岩浆底侵诱发中元古代下地壳发生部分熔融, 产生的长英质岩浆在地壳深部岩浆房发生高程度结晶分异作用, 并在上升侵位过程中发生了同化混染作用。

(3) 含石榴石二云母花岗岩中的富云包体可能为围岩捕虏体, 即为岩浆同化围岩的结果。

(4) 含石榴石二云母花岗岩形成于 242.0 ± 1.4 Ma, 在构造判别图上位于同碰撞范围, 这也一定程度上限定了中三叠世早期 (242 Ma) 时阿尼玛卿古特提斯洋盆已经处于关闭状态。

致谢: 本论文受中国地质调查局地质调查项目 (DD20160123-01, DD20160030) 和国家自然科学基金项目 (No.41502046) 资助。感谢熊富浩、郭富涛、刘敬、高珂等同志在野外采样工作中给予的支持; 感谢中国地质大学 (武汉) 张明东、邹博文、范子阳等在室内数据处理方面给予的帮助; 感谢实验室有关工作人员在测试过程中给予的指导和帮助。

表格文件参考本刊官网: www.earth-science.net。

References

Batchelor, R. A., Bowden, P., 1985. Petrogenetic Interpretation of Granitoid Rock Series Using Multicationic Parameters. *Chemical Geology*, 48(1/2/3/4): 43–55. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(85\)90034-8](https://doi.org/10.1016/0009-2541(85)90034-8)

Blichert-Toft, J., Gleason, J. D., Télouk, P., *et al.*, 1999.

The Lu-Hf Isotope Geochemistry of Shergottites and the Evolution of the Martian Mantle-Crust System. *Earth and Planetary Science Letters*, 173(1/2): 25–39. [https://doi.org/10.1016/s0012-821x\(99\)00222-8](https://doi.org/10.1016/s0012-821x(99)00222-8)

Castro, A., 2013. Erratum to ‘Tonalite-Granodiorite Suites as Cotectic Systems: A Review of Experimental Studies with Applications to Granitoid Petrogenesis’. *Earth-Science Reviews*, 129: 178. <https://doi.org/10.1016/j.ear-scirev.2013.05.006>

Chai, Y. C., Feng, B. G., Yang, J. S., 1983. On the Geological Feature and Genesis of the Granitic Zone in the Dong-Xi-Da Tan Area of Middle-Eastern Kunlun Mountains. *Contribution to the Geology of the Qinghai-Xizang (TIBET) Plateau*, (15):78–90 (in Chinese).

Chappell, B. W., 1999. Aluminium Saturation in I- And S-Type Granites and the Characterization of Fractionated Haplogranites. *Lithos*, 46(3): 535–551. [https://doi.org/10.1016/s0024-4937\(98\)00086-3](https://doi.org/10.1016/s0024-4937(98)00086-3)

Chen, G. C., Pei, X. Z., Li, R. B., *et al.*, 2016. Genesis of Magma Mixing and Mingling from Xiangjia’ nanshan Granite Batholith in the Eastern Section of East Kunlun Orogen: Evidence of Mafic Microgranule Enclaves (MMEs). *Earth Science Frontier*, 23(4): 226–240 (in Chinese with English abstract).

Chen, H. W., Luo, Z. H., Mo, X. X., *et al.*, 2005. Underplating Mechanism of Triassic Granite of Magma Mixing Origin in the East Kunlun Orogenic Belt. *Chinese Geology*, 32(3):393–395 (in Chinese with English abstract).

Deng, W. B., Pei, X. Z., Liu, C. J., *et al.*, 2016. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of the Chahantaolegai Syenogran-

- ites in Xiangride Area of East Kunlun and Its Geological Significance. *Geological Bulletin of China*, 35(5):687—699 (in Chinese with English abstract).
- Douce, A. E., 1999. What do Experiments Tell us about the Relative Contributions of Crust and Mantle to the Origin of Granitic Magmas? Geological Society, London, Special Publications, 168(1): 55—75. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1999.168.01.05>
- Eby, G. N., 1990. The A-Type Granitoids: A Review of their Occurrence and Chemical Characteristics and Speculations on their Petrogenesis. *Lithos*, 26(1/2): 115—134. [https://doi.org/10.1016/0024-4937\(90\)90043-z](https://doi.org/10.1016/0024-4937(90)90043-z)
- Gao, L. E., Zeng, L. S., Shi, W. G., et al., 2012. Two Types of Garnets in the Cenozoic Granites from the Himalayan Orogenic Belt: Geochemical Characteristics and Implications for Crustal Anatexis. *Acta Petrologica Sinica*, 28(9):2963—2980 (in Chinese with English abstract).
- Griffin, W. L., Pearson, N. J., Belousova, E., et al., 2000. The Hf Isotope Composition of Cratonic Mantle: LAM-ICP-MS Analysis of Zircon Megacrysts in Kimberlites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(1): 133—147. [https://doi.org/10.1016/s0016-7037\(99\)00343-9](https://doi.org/10.1016/s0016-7037(99)00343-9)
- Griffin, W. L., Belousova, E. A., Shee, S. R., et al., 2004. Archean Crustal Evolution in the Northern Yilgarn Craton: U-Pb and Hf-Isotope Evidence from Detrital Zircons. *Precambrian Research*, 131(3/4): 231—282. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2003.12.011>
- He, Y., 1995. Inclusions and Their Origin in Xihuashan Granite Body. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, (3):241—244 (in Chinese with English abstract).
- He, C., Wang, L. Y., Tian, L. M., et al., 2018. Petrogenesis and Geological Implication of Granitoids from Halasen, East Kunlun. *Earth Science*, 43(4):1207—1208 (in Chinese with English abstract).
- Huang, H., Niu, Y. L., Nowell, G., et al., 2014. Geochemical Constraints on the Petrogenesis of Granitoids in the East Kunlun Orogenic Belt, Northern Tibetan Plateau: Implications for Continental Crust Growth through Syn-Collisional Felsic Magmatism. *Chemical Geology*, 370: 1—18. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2014.01.010>
- Hu, Z. C., Liu, Y. S., Gao, S., et al., 2012. Improved In Situ Hf Isotope Ratio Analysis of Zircon Using Newly Designed X Skimmer Cone and Jet Sample Cone in Combination with the Addition of Nitrogen by Laser Ablation Multiple Collector ICP-MS. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 27(9): 1391. <https://doi.org/10.1039/c2ja30078h>
- Li, X. H., Li, Z. X., Li, W. X., et al., 2007. U-Pb Zircon, Geochemical and Sr-Nd-Hf Isotopic Constraints on Age and Origin of Jurassic I- And A-Type Granites from Central Guangdong, SE China: A Major Igneous Event in Response to Foundering of a Subducted Flat-Slab? *Lithos*, 96(1/2): 186—204. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2006.09.018>
- Liu, C. D., Zhang, W. Q., Mo, X. X., et al., 2002. Features and Origin of Mafic Microgranular Enclaves in the Yuegeli Granite in the Eastern Kunlun. *Geological Bulletin of China*, 21(11):739—744 (in Chinese with English abstract).
- Liu, C. D., Mo, X. X., Luo, Z. H., et al., 2004. Crust—Mantle Magma Mixing in East Kunlun: Evidence from Zircon SHRIMP Chronology. *Chinese Science Bulletin*, 47(6):596—602 (in Chinese).
- Liu, Y. S., Hu, Z. C., Gao, S., et al., 2008a. In Situ Analysis of Major and Trace Elements of Anhydrous Minerals by LA-ICP-MS without Applying an Internal Standard. *Chemical Geology*, 257(1/2): 34—43. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.08.004>
- Liu, Y. S., Zong, K. Q., Kelemen, P. B., et al., 2008b. Geochemistry and Magmatic History of Eclogites and Ultramafic Rocks from the Chinese Continental Scientific Drill Hole: Subduction and Ultrahigh-Pressure Metamorphism of Lower Crustal Cumulates. *Chemical Geology*, 247(1/2): 133—153. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2007.10.016>
- Luo, Z. H., Ke, S., Cao, Y. Q., et al., 2012. Late Indosinian Mantle-Derived Magmatism in the East Kunlun. *Regional Geology of China*, 21(6):292—297 (in Chinese with English abstract).
- Ma, C. Q., Wang, R. J., Qiu, J. R., 1992. Enclaves as Indicators of the Origin of Granitoid Magma and Repeater Magma Mingling: An Example from the Zhoukoudian Intrusion, Beijing. *Geological Review*, 38(2):109—119 (in Chinese with English abstract).
- Ma, Q., Zheng, J. P., Griffin, W. L., et al., 2012. Triassic “Adakitic” Rocks in an Extensional Setting (North China): Melts from the Cratonic Lower Crust. *Lithos*, 149: 159—173. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.04.017>
- Meng, F. C., Zhang, J. X., Cui, M. H., 2013. Discovery of Early Paleozoic Eclogite from the East Kunlun, Western China and its Tectonic Significance. *Gondwana Research*, 23(2): 825—836. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2012.06.007>
- Miller, C. F., Stoddard, E. F., 1981. The Role of Manganese in the Paragenesis of Magmatic Garnet: An Example from the Old Woman-Piute Range, California: A Reply. *The Journal of Geology*, 89(6): 770—772. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2007.10.016>

- org/10.1086/628645
- Middlemost, E. A. K., 1994. Naming Materials in the Magma/Igneous Rock System. *Earth-Science Reviews*, 37(3/4): 215–224. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(94\)90029-9](https://doi.org/10.1016/0012-8252(94)90029-9)
- Mo, X. X., Luo, Z. H., Deng, J. F., et al., 2007. Granitoids and Crustal Growth in the East-Kunlun Orogenic Belt. *Geological Journal of China Universities*, 13(3): 403–414 (in Chinese with English abstract).
- Pan, G. T., Wang, L. Q., Li, R. S., et al., 2012. Tectonic Evolution of the Qinghai-Tibet Plateau. *Journal of Asian Earth Sciences*, 53: 3–14. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2011.12.018>
- Pearce, J. A., Harris, N. B. W., Tindle, A. G., 1984. Trace Element Discrimination Diagrams for the Tectonic Interpretation of Granitic Rocks. *Journal of Petrology*, 25(4): 956–983. <https://doi.org/10.1093/petrology/25.4.956>
- Peccerillo, A., Taylor, S. R., 1976. Geochemistry of Eocene Calc-Alkaline Volcanic Rocks from the Kastamonu Area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58(1): 63–81. <https://doi.org/10.1007/bf00384745>
- Pei, X. Z., Hu, N., Liu, C. J., et al., 2015. Detrital Composition, Geochemical Characteristic and Provenance Analysis for the Marerzheng Formation Sandstone in Gerizhuotuo Area, Southern Margin of East Kunlun Region. *Geological Review*, 61(2): 307–323 (in Chinese with English abstract).
- Peng, Z. L., Cheng, G. N., Grapes, R., 2008. Water in Mafic Microgranular Enclave of Granite and Its Significance for Researches of Enclave Genesis. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni (Natural Science Edition)*, 47(1): 118–120 (in Chinese with English abstract).
- Pitcher, W. S., 1983. Granite Type and Tectonic Environment. In: Hsu, K. J., ed., *Mountain Building Processes*. Academic Press, London, 19–40.
- Ren, J. S., 2004. Some Problems on the Kunlun-Qinling Orogenic System. *North Eastern Geology*, 37(1): 1–5 (in Chinese with English abstract).
- Söderlund, U., Patchett, P. J., Vervoort, J. D., et al., 2004. The ¹⁷⁶Lu Decay Constant Determined by Lu-Hf and U-Pb Isotope Systematics of Precambrian Mafic Intrusions. *Earth and Planetary Science Letters*, 219(3/4): 311–324. [https://doi.org/10.1016/s0012-821x\(04\)00012-3](https://doi.org/10.1016/s0012-821x(04)00012-3)
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313–345. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1989.042.01.19>
- Sun, T., Chen, P., Zhou, X., et al., 2002. Strongly Peraluminous Granites in Eastern Nanling Mountains, China: Study on Muscovites. *Geological Review*, 48(5): 518–525 (in Chinese with English abstract).
- Sun, Y., Pei, X. Z., Ding, S., et al., 2009. Halagatu Magma Mixing Granite in the East Kunlun Mountains—Evidence from Zircon U-Pb Dating. *Acta Geologica Sinica*, 83(7): 1000–1010 (in Chinese with English abstract).
- Sylvester, P. J., 1989. Post-Collisional Alkaline Granites. *The Journal of Geology*, 97(3): 261–280. <https://doi.org/10.1086/629302>
- Tao, J. H., Li, W. X., Li, X. H., et al., 2013. Petrogenesis of Early Yanshanian Highly Evolved Granites in the Longyuanba Area, Southern Jiangxi Province: Evidence from Zircon U-Pb Dating, Hf-O Isotope and Whole-Rock Geochemistry. *Science China Earth Sciences*, 56(6): 922–939 (in Chinese with English abstract).
- Wang, D. Z., Zhou, X. M., Xu, X. S., 1992. On Geneses of Microgranitoid Enclaves. *Journal of Guilin Institute of Technology*, (3): 235–241 (in Chinese with English abstract).
- Wang, G. C., Wei, Q. R., Jia, C. X., et al., 2007. Some Ideas of Precambrian Geology in the East Kunlun, China. *Geological Bulletin of China*, 26(8): 929–937 (in Chinese with English abstract).
- Wang, L. X., Ma, C. Q., Zhang, C., et al., 2014. Genesis of Leucogranite by Prolonged Fractional Crystallization: A Case Study of the Mufushan Complex, South China. *Lithos*, 206–207: 147–163.
- Wang, L. X., Ma, C. Q., Xiong, F. H., et al., 2017. Geological Mapping Approach to Hybrid Type Granitic Batholiths: A Case Study of the Jialuhe Complex from East Kunlun Orogen. *Geological Bulletin of China*, 36(11): 1971–1986 (in Chinese with English abstract).
- Whalen, J. B., Currie, K. L., Chappell, B. W., 1987. A-Type Granites: Geochemical Characteristics, Discrimination and Petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95(4): 407–419. <https://doi.org/10.1007/bf00402202>
- Wu, F. Y., Jahn, B. M., Wilde, S. A., et al., 2003. Highly Fractionated I-Type Granites in NE China (II): Isotopic Geochemistry and Implications for Crustal Growth in the Phanerozoic. *Lithos*, 67(3/4): 191–204. [https://doi.org/10.1016/s0024-4937\(03\)00015-x](https://doi.org/10.1016/s0024-4937(03)00015-x)
- Wu, F. Y., Jahn, B. M., Wilde, S. A., et al., 2003. Highly Fractionated I-Type Granites in NE China (II): Isotopic Geochemistry and Implications for Crustal Growth in the Phanerozoic. *Lithos*, 67(3/4): 191–204. [https://doi.org/10.1016/s0024-4937\(03\)00015-x](https://doi.org/10.1016/s0024-4937(03)00015-x)

- org/10.1016/s0024-4937(03)00015-x
- Wu, F. Y., Li, X. H., Yang, J. H., et al., 2007a. Discussions on the Petrogenesis of Granites. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6):1217—1238 (in Chinese with English abstract).
- Wu, F. Y., Li, X. H., Zheng, Y. F., et al., 2007b. Lu-Hf Isotopic Systematics and Their Applications in Petrology. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 185—220 (in Chinese with English abstract).
- Wu, F. Y., Liu, X. C., Ji, W. Q., et al., 2017. Highly Fractionated Granites: Recognition and Research. *Science China Earth Sciences*, 60(7): 1201—1219 (in Chinese with English abstract).
- Wu, Y. B., Zheng, Y. F., 2004. Genesis of Zircon and Its Constraints on Interpretation of U-Pb Age. *Chinese Science Bulletin*, 49(16):1589—1604 (in Chinese).
- Xia, R., Wang, C. M., Deng, J., et al., 2014. Crustal Thickening Prior to 220 Ma in the East Kunlun Orogenic Belt: Insights from the Late Triassic Granitoids in the Xiao-Nuomuhong Pluton. *Journal of Asian Earth Sciences*, 93: 193—210. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2014.07.013>
- Xiao, Q. H., Qiu, R. Z., Xing, Z. Y., et al., 2007. Major Frontiers on Studies of Granite Formation. *Geological Review*, 53:17—27 (in Chinese with English abstract).
- Xiong, F. H., 2014. Spatial-Temporal Pattern, Petrogenesis and Geological Implication of Paleo-Tethyan Granitoids in the East Kunlun Orogenic Belt (Eastern segment) (Dissertation). China University of Geoscience, Wuhan (in Chinese with English abstract).
- Xu, X. S., Zhou, X. M., 1991. Rock Inclusions within Precambrian Granitoids in South Anhui Province. *Mineralogy and Petrology*, (1):24—28 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Z. Q., Yang, J. S., Jiang, M., et al., 2001. Deep Structure and Lithospheric Shear Faults in the East Kunlun-Qiangtang Region, Northern Tibetan Plateau. *Science in China*, 44(1):1—9 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Z. Q., Li, H. B., Yang, J. S., 2006. An Orogenic Plateau: The Orogenic Collage and Orogenic Types of the Qinghai-Tibet Plateau. *Earth Science Frontiers*, 13(4): 1—17 (in Chinese with English abstract).
- Xu, J., Zheng, Y. Y., Sun, X., et al., 2016. Geochronology and Petrogenesis of Miocene Granitic Intrusions Related to the Zhibula Cu Skarn Deposit in the Gangdese Belt, Southern Tibet. *Journal of Asian Earth Sciences*, 120: 100—116.
- Yang, J. S., Shi, R. D., Wu, C. L., et al., 2009. Dur'ngoi Ophiolite in East Kunlun, Northeast Tibetan Plateau: Evidence for Paleo-Tethyan Suture in Northwest China. *Journal of Earth Science*, 20(2): 303—331. <https://doi.org/10.1007/s12583-009-0027-y>
- Ye, L., Niu, Y. L., Hu, Y., et al., 2014. U-Pb Zircon Chronology, Geochemistry and Sr-Nd-Hf Isotopes of Granite in Balong Area, East Kunlun. Annual Meeting of Chinese Geoscience Union., Beijing, 2034—2036 (in Chinese).
- Yin, H. F., Zhang, K. X., 1997. Characteristics of the Eastern Kunlun Orogenic Belt. *Earth Science*, 22(4):339—342 (in Chinese with English abstract).
- Yu, J. H., Zhao, L., Zhou, X., et al., 2004. Mineralogical Characteristics and Origin of Garnet-Bearing I-Type Granitoids in Southeastern Fujian Province. *Geological Journal of China Universities*, (3): 364—377 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J. Y., Ma, C. Q., Xiong, F. H., et al., 2012. Petrogenesis and Tectonic Significance of the Late Permian-Middle Triassic Calc-Alkaline Granites in the Balong Region, Eastern Kunlun Orogen, China. *Geological Magazine*, 149(5): 892—908. <https://doi.org/10.1017/s0016756811001142>
- Zhang, M. D., Ma, C. Q., Wang, L. X., et al., 2018. Subduction-Type Magmatic Rocks in Post-Collision Stage: Evidence from Late Triassic Diorite-Porphyrite of Naomuhungou Area, East Kunlun Orogen. *Earth Science*, 43(4):1183—1206 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Q., Pan, G. Q., Li, C. D., et al., 2007. Does Fractional Crystallization Occur in Granitic Magma? Some Crucial Questions on Granite Study (2). *Acta Petrologica Sinica*, 23(6):1239—1251 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, R. X., Yang, S. Y., 2016. A Mathematical Model for Determining Carbon Coating Thickness and its Application in Electron Probe Microanalysis. *Microscopy and Microanalysis*, 22(6): 1374—1380. <https://doi.org/10.1017/s143192761601182x>
- Zhou, T. F., Yue, C. S., 1994. Genetic Types, Models and Significance of Rock Enclaves in Granitoids. *Journal of Hefei University of Technology (Natural Science Edition)*, (2):146—152 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, D. C., Mo, X. X., Wang, L. Q., et al., 2009. Petrogenesis of Highly Fractionated I-Type Granites in the Zayu Area of Eastern Gangdese, Tibet: Constraints from Zircon U-Pb Geochronology, Geochemistry and Sr-Nd-Hf Isotopes. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 52(9): 1223—1239 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, R. Z., Lai, S. C., Qin, J. F., et al., 2015. Early-Cretaceous Highly Fractionated I-Type Granites from the Northern Tengchong Block, Western Yunnan, SW China: Petrogenesis and Tectonic Implications. *Journal of*

Asian Earth Sciences, 100: 145—163.

附中文参考文献

- 柴耀楚, 冯秉贵, 杨经绥, 1983. 东昆仑中段东西大滩花岗岩带的基本特征及其成因的探讨. 青藏高原地质文集, (15):78—90.
- 陈国超, 裴先治, 李瑞保, 等, 2016. 东昆仑东段香加南山花岗岩基的岩浆混合成因:来自镁铁质微粒包体的证据. 地质学前沿, 23(4):226—240.
- 谌宏伟, 罗照华, 莫宣学, 等, 2005. 东昆仑造山带三叠纪岩浆混合成因花岗岩的岩浆底侵作用机制. 中国地质, 32(3):386—395.
- 邓文兵, 裴先治, 刘成军, 等, 2016. 东昆仑东段香日德地区察汗陶勒盖正长花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. 地质通报, 35(5):687—699.
- 高利娥, 曾令森, 石卫刚, 等, 2012. 喜马拉雅造山带新生代花岗岩中两类石榴石的地球化学特征及其在地壳深熔作用中的意义. 岩石学报, 28(9):2963—2980.
- 赫英. 1995. 西华山花岗岩中的包体和成因. 西北大学学报:自然科学版, (3):241—244.
- 何成, 王力圆, 田立明, 等, 2018. 东昆仑哈拉森地区花岗岩类岩石成因及地质意义. 地球科学, 43(4):1207—1208.
- 李瑞保, 裴先治, 李佐臣, 等, 2014. 东昆仑南缘布青山构造混杂带哥日卓托洋岛玄武岩地球化学特征及构造意义. 地质学前沿, 21(1):183—195.
- 刘成东, 张文秦, 莫宣学, 等, 2002. 东昆仑约格鲁岩体暗色微粒包体特征及成因. 地质通报, 21(11):739—744.
- 刘成东, 莫宣学, 罗照华, 等, 2004. 东昆仑壳—幔岩浆混合作用:来自锆石 SHRIMP 年代学的证据. 科学通报, 49(6):596—602.
- 罗照华, 柯珊, 曹永清, 等, 2002. 东昆仑印支晚期幔源岩浆活动. 地质通报, 21(6):292—297.
- 马昌前, 王人镜, 邱家骧, 1992. 花岗岩岩浆起源和多次岩浆混合的标志:包体——以北京周口店岩体为例. 地质论评, 38(2):109—119.
- 莫宣学, 罗照华, 邓晋福, 等, 2007. 东昆仑造山带花岗岩及地壳生长. 高校地质学报, 13(3):403—414.
- 裴先治, 胡楠, 刘成军, 等, 2015. 东昆仑南缘哥日卓托地区马尔组砂岩碎屑组成、地球化学特征与物源构造环境分析. 地质论评, 61(2):307—323.
- 彭卓伦, 陈国能, Grapes R., 2008. 花岗岩暗色微粒包体中的水及其在包体研究中的意义. 中山大学学报(自然科学版), 47(1):118—120.
- 任纪舜, 2004. 昆仑—秦岭造山系的几个问题. 西北地质, 37(1):1—5.
- 孙涛, 陈培荣, 周新民, 等, 2002. 南岭东段强过铝质花岗岩中白云母研究. 地质论评, 48(5):518—525.
- 孙雨, 裴先治, 丁仁平, 等, 2009. 东昆仑哈拉杂吐岩浆混合花岗岩:来自锆石 U-Pb 年代学的证据. 地质学报, 83(7):1000—1010.
- 陶继华, 李武显, 李献华, 等, 2013. 赣南龙源坝地区燕山期高分异花岗岩年代学, 地球化学及锆石 Hf-O 同位素研究. 中国科学:地球科学, 43(5):760—778.
- 肖庆辉, 邱瑞照, 邢作云, 等, 2007. 花岗岩成因研究前沿的认识. 地质论评, 53(s1):17—27.
- 许志琴, 杨经绥, 姜枚, 等, 2001. 青藏高原北部东昆仑—羌塘地区的岩石圈结构及岩石圈剪切断层. 中国科学:地球科学, (S1):1—7.
- 许志琴, 李海兵, 杨经绥, 2006. 造山的高原——青藏高原巨型造山拼贴体和造山类型. 地质学前沿, 13(4):1—17.
- 王德滋, 周新民, 徐夕生, 等, 1992. 微粒花岗岩类包体的成因. 桂林冶金地质学院学报, (3):235—241.
- 王国灿, 魏启荣, 贾春兴, 等, 2007. 关于东昆仑地区前寒武纪地质的几点认识. 地质通报, 26(8):929—937.
- 王连训, 马昌前, 熊富浩, 等, 2017. 浆混花岗岩专题填图方法初探——以东昆仑加鲁河地区为例. 地质通报, 36(11):2061—2076.
- 吴福元, 李献华, 杨进辉, 等, 2007a. 花岗岩成因研究的若干问题. 岩石学报, 23(6):1217—1238.
- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 等, 2007b. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用. 岩石学报, 23(2):185—220.
- 吴福元, 刘小驰, 纪伟强, 等, 2017. 高分异花岗岩的识别与研究. 中国科学:地球科学, 47(7):745—765.
- 吴元保, 郑永飞, 2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约. 科学通报, 49(16):1589—1604.
- 熊富浩, 2014. 东昆仑造山带东段古特提斯域花岗岩类时空分布、岩石成因及其地质意义(博士学位论文). 武汉:中国地质大学.
- 徐夕生, 周新民. 1991. 皖南前寒武纪花岗岩类中的岩石包体. 矿物岩石, (1):24—28.
- 叶蕾, 牛耀龄, 胡妍, 等, 2014. 东昆仑巴隆地区花岗岩锆石 U-Pb 年代学、元素及 Sr-Nd-Hf 同位素地球化学. 北京:中国地球科学联合学术年会, 2034—2036.
- 殷鸿福, 张克信, 1997. 东昆仑造山带的一些特点. 地球科学, 22(4):339—342.
- 于津海, 赵蕾, 周旋, 2004. 闽东南含石榴子石 I 型花岗岩的矿物学特征及成因. 高校地质学报, (3):364—377.
- 周涛发, 岳书仓, 1994. 花岗质岩石中的包体及其研究. 合肥工业大学学报(自然科学版), (2):146—152.
- 张明东, 马昌前, 王连训, 等, 2018. 后碰撞阶段的“俯冲型”岩浆岩:来自东昆仑瑙木浑沟晚三叠世闪长玢岩的证据. 地球科学, 43(4):1183—1206.
- 张旗, 潘国强, 李承东, 等, 2007. 花岗岩结晶分离作用问题——关于花岗岩研究的思考之二. 岩石学报, 23(6):25—37.
- 朱弟成, 莫宣学, 王立全, 等, 2009. 西藏冈底斯东部察隅高分异 I 型花岗岩的成因:锆石 U-Pb 年代学、地球化学和 Sr-Nd-Hf 同位素约束. 中国科学:地球科学, 39(7):833—848.

表 1 含石榴石二云母花岗岩中锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素分析结果

Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb ages of garnet-bearing two-mica granites

测点 编号	含量($\times 10^{-6}$)				同位素比值						年龄 (Ma)					
	Pb	Th	U	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1δ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1δ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1δ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1δ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1δ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1δ
D1008-6-01	13.50	63.83	206.83	0.31	0.052 1	0.002	0.273 6	0.011	0.038 0	0.000	300.1	95.4	245.6	8.8	240.6	2.7
D1008-6-02	78.68	454.04	670.74	0.68	0.051 4	0.001	0.271 0	0.007	0.038 1	0.000	261.2	59.2	243.5	5.9	241.2	2.1
D1008-6-03	41.74	249.80	396.94	0.63	0.051 9	0.001	0.273 0	0.008	0.038 1	0.000	283.4	66.7	245.1	6.6	240.9	2.2
D1008-6-04	76.19	347.39	1079.65	0.32	0.051 9	0.001	0.274 0	0.007	0.038 3	0.000	279.7	62.0	245.9	5.8	242.0	2.4
D1008-6-05	95.33	649.85	639.42	1.02	0.049 9	0.001	0.262 3	0.007	0.038 1	0.000	190.8	61.1	236.5	5.7	241.1	2.6
D1008-6-06	84.58	137.04	1114.43	0.12	0.058 0	0.001	0.567 9	0.011	0.070 6	0.000	527.8	32.4	456.6	7.7	439.9	4.9
D1008-6-07	52.49	321.96	307.56	1.05	0.062 6	0.002	0.320 9	0.010	0.037 4	0.000	696.0	74.8	282.6	8.0	236.5	2.7
D1008-6-08	109.68	690.43	880.66	0.78	0.050 9	0.001	0.267 6	0.006	0.038 0	0.000	235.3	55.5	240.8	5.2	240.7	2.3
D1008-6-9	51.35	296.14	437.69	0.68	0.057 2	0.001	0.303 6	0.008	0.038 5	0.000	498.2	70.4	269.2	7.0	243.7	2.2
D1008-6-10	48.09	78.92	79.93	0.99	0.070 8	0.002	1.452 1	0.044	0.149 0	0.001	953.7	63.7	910.7	18.2	895.5	8.6
D1008-6-11	92.85	509.53	938.78	0.54	0.057 0	0.001	0.311 3	0.007	0.039 5	0.000	500.0	55.6	275.2	5.9	249.9	2.3
D1008-6-12	107.58	475.20	1779.37	0.27	0.053 9	0.001	0.282 1	0.006	0.037 9	0.000	364.9	47.2	252.3	5.4	240.0	3.2
D1008-6-13	17.35	29.23	247.78	0.12	0.058 7	0.001	0.518 7	0.014	0.063 9	0.000	566.7	59.2	424.3	9.7	399.4	4.3
D1008-6-14	113.10	588.77	1288.39	0.46	0.051 8	0.001	0.273 5	0.005	0.038 2	0.000	279.7	48.1	245.5	4.7	241.6	2.4
D1008-6-15	140.18	690.06	1528.05	0.45	0.056 5	0.001	0.298 2	0.006	0.038 2	0.000	472.3	41.7	265.0	5.0	241.9	2.7
D1008-6-16	38.90	224.26	297.35	0.75	0.055 8	0.002	0.301 3	0.011	0.039 0	0.000	455.6	79.6	267.4	8.7	246.9	2.4

表 2 加鲁河含石榴石二云母花岗岩全岩主量元素(wt.%)、微量元素(ppm)成分

Table 2 Whole rock major and trace element contents of the Jialuhe garnet-bearing two-mica granites

样品	16JL08-1	16JL08-2	16JL08-3	17JL01-1	17JL02-1	17JL02-2
主量元素 (%)						
SiO ₂	75.49	74.88	75.24	74.75	75.08	75.00
Al ₂ O ₃	13.58	13.46	13.54	13.58	13.8	13.69
TiO ₂	0.07	0.05	0.07	0.07	0.06	0.06
Fe ₂ O ₃ ^T	1.10	1.31	1.47	1.42	1.36	1.39
MnO	0.06	0.07	0.04	0.06	0.07	0.07
MgO	0.16	0.19	0.21	0.17	0.17	0.17
K ₂ O	4.29	4.26	4.21	4.30	4.29	4.33
Na ₂ O	3.35	3.22	3.26	3.32	3.33	3.36
CaO	1.22	1.16	1.31	1.34	1.33	1.21
P ₂ O ₅	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03
SO ₃	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
SrO	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
BaO	0.07	0.08	0.09	0.09	0.08	0.09
Cr ₂ O ₃	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
烧失量	0.71	0.6	0.59	0.65	0.75	0.63
总计	100.14	99.32	100.07	99.79	100.37	100.05
A/NK	1.34	1.36	1.36	1.34	1.36	1.34
A/CNK	1.10	1.12	1.10	1.08	1.10	1.10
FeO ^T /MgO	6.19	6.20	6.30	7.52	7.20	7.36
DI	92.10	92.01	91.49	91.60	91.47	92.04
微量元素($\times 10^{-6}$)						
Sc	1.89	2.08	2.12	2.33	2.06	2.20
V	2.17	2.02	2.55	3.08	2.84	2.29
Cr	0.38	1.32	7.20	8.43	5.13	8.87
Co	0.55	0.59	0.99	0.67	0.60	0.61
Ni	2.47	0.54	1.24	0.89	0.80	1.24
Sn	1.92	2.88	2.37	3.00	3.22	3.33
Rb	171.62	196.49	187.97	212.00	207.00	220.00
Sr	125.01	139.80	152.00	156.00	141.00	145.00
Zr	59.25	62.05	68.03	71.90	58.70	67.70
Ba	652.03	698.74	770.70	800.00	708.00	723.00
Cs	2.01	10.97	5.11	5.91	5.76	6.16
Hf	2.44	2.51	2.66	2.97	2.45	2.80
Ta	1.24	1.11	1.24	1.17	1.20	1.32
Nb	10.67	9.21	10.22	11.40	11.50	11.80
Ga	13.68	14.60	14.20	15.30	15.00	15.40
Y	13.77	17.10	15.33	21.50	19.80	20.10

Be	1.96	3.44	2.07	2.09	2.65	2.40
Pb	32.69	30.81	35.17	37.00	35.50	36.40
Th	12.63	15.43	18.00	17.00	14.80	15.10
U	2.16	2.51	2.42	2.15	1.99	2.13
La	13.72	23.28	29.59	28.80	23.70	24.70
Ce	25.19	40.64	50.00	52.10	42.80	43.10
Pr	2.76	4.08	4.83	5.20	4.28	4.36
Nd	9.54	13.59	15.76	17.10	13.90	14.10
Sm	1.89	2.56	2.61	3.47	2.85	2.83
Eu	0.40	0.45	0.49	0.55	0.47	0.50
Gd	1.77	2.36	2.24	2.89	2.38	2.52
Tb	0.34	0.42	0.39	0.52	0.45	0.46
Dy	2.07	2.51	2.22	3.14	2.83	2.84
Ho	0.43	0.51	0.46	0.64	0.59	0.60
Er	1.42	1.64	1.45	1.92	1.78	1.84
Tm	0.22	0.26	0.23	0.29	0.29	0.30
Yb	1.54	1.81	1.67	2.06	1.95	1.98
Lu	0.26	0.28	0.27	0.32	0.29	0.29
Zr+Nb+Ce+Y	108.88	129.00	143.57	156.88	132.78	142.66
10 000Ga/Al	1.90	2.05	1.98	2.14	2.06	2.12
Rb/Sr	1.37	1.41	1.24	1.36	1.47	1.51
Rb/Ba	0.26	0.28	0.24	0.26	0.29	0.30
Nb/Ta	8.60	8.33	8.22	9.67	9.55	8.89
∑REE	61.55	94.38	112.22	119.05	98.61	100.38
LREE/HREE	6.34	8.76	11.28	9.30	8.51	8.29
δEu	0.65	0.55	0.60	0.51	0.53	0.56
(La/Sm) _N	4.69	5.88	7.31	5.36	5.39	5.64
(Gd/Yb) _N	0.95	1.08	1.11	1.16	1.01	1.05

注: $\delta Eu = 2 * [Eu]_N / ([Sm]_N + [Gd]_N)$; $DI = (\text{标准矿物 } Q + Af + Ab + Ne + Kp + Lc)$

表 3 含石榴石二云母花岗岩中锆石原位 Lu-Hf 同位素分析结果

Table 3 Zircon situ Lu-Hf isotopic compositions of garnet-bearing two-mica granites

测试点	Age(Ma)	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	1σ	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	1σ	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	1σ	$\epsilon_{\text{Hf}}(0)$	1σ	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	1σ	T_{DM1}	T_{DM2}	$f_{\text{Lu/Hf}}$
D1008-6-01	242	0.282 548	0.000 010	0.001 300	0.000 063	0.029 909	0.001 456	-7.94	0.61	-7.41	0.78	1 005	1 296	-0.96
D1008-6-02	242	0.282 561	0.000 009	0.001 344	0.000 033	0.031 940	0.000 851	-7.45	0.61	-7.25	0.70	986	1 269	-0.96
D1008-6-03	242	0.282 448	0.000 010	0.001 677	0.000 030	0.037 289	0.000 680	-11.45	0.63	-6.32	0.64	1 157	1 494	-0.95
D1008-6-04	242	0.282 547	0.000 009	0.001 272	0.000 032	0.029 326	0.000 843	-7.97	0.61	-2.78	0.63	1 005	1 298	-0.96
D1008-6-05	242	0.282 481	0.000 009	0.001 872	0.000 045	0.045 088	0.001 153	-10.31	0.61	-5.21	0.63	1 117	1 432	-0.94
D1008-6-06	242	0.282 499	0.000 010	0.001 725	0.000 022	0.040 779	0.000 559	-9.65	0.61	-4.53	0.63	1 086	1 394	-0.95
D1008-6-07	242	0.282 525	0.000 009	0.002 170	0.000 043	0.049 044	0.001 149	-8.75	0.61	-3.70	0.63	1 062	1 348	-0.93
D1008-6-8	242	0.282 463	0.000 009	0.001 665	0.000 099	0.040 629	0.002 467	-10.94	0.61	-5.81	0.63	1 136	1 465	-0.95
D1008-6-9	242	0.282 490	0.000 014	0.002 127	0.000 035	0.049 898	0.000 867	-9.98	0.71	-4.92	0.73	1 111	1 416	-0.94
D1008-6-10	242	0.282 396	0.000 009	0.001 906	0.000 021	0.050 290	0.000 601	-13.28	0.61	-8.19	0.62	1 238	1 597	-0.94
D1008-6-11	242	0.282 444	0.000 009	0.001 735	0.000 041	0.040 996	0.001 003	-11.58	0.60	-6.46	0.62	1 164	1 501	-0.95
D1008-6-12	242	0.282 492	0.000 010	0.001 973	0.000 041	0.047 125	0.001 003	-9.89	0.62	-4.81	0.64	1 103	1 410	-0.94

注： $\epsilon_{\text{Hf}}(t)=10\ 000\times\{[(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}}-(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}}\times(e^{\lambda t}-1)]/[(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0}-(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}}\times(e^{\lambda t}-1)]-1\}$ ； $T_{\text{DM}}=1/\lambda\times\ln\{1+[(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}}(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}]/[(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}}-(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}]\}$ ； $T_{\text{DM}}^{\text{C}}=T_{\text{DM}}-(T_{\text{DM}}-t)\times[(f_{\text{cc}}-f_{\text{s}})/(f_{\text{cc}}-f_{\text{DM}})]$ ； $f_{\text{Lu/Hf}}=(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}}/(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}}-1$ ，其中： $\lambda=1.867\times 10^{-11}/\text{a}$ (Söderlund et al., 2004)； $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}}$ 和 $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}}$ 为样品测量值； $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}}=0.033\ 200$ ， $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0}=0.282\ 772$ (Blichert-Toft et al., 1998)； $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}=0.038\ 400$ ， $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}=0.283\ 250$ (Griffin et al., 2000, 2004)； $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{平均地壳}}=0.015$ ； $f_{\text{cc}}=[(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{平均地壳}}/(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}}]-1$ ； $f_{\text{s}}=f_{\text{Lu/Hf}}$ ； $f_{\text{DM}}=[(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}/(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}}]-1$ ； t 为锆石结晶年龄