

东昆仑造山带东段早泥盆世侵入岩的成因及其对早古生代造山作用的指示*

刘彬¹ 马昌前^{1,2**} 张金阳³ 熊富浩¹ 黄坚¹ 蒋红安¹

LIU Bin¹, MA ChangQian^{1,2,**}, ZHANG JinYang³, XIONG FuHao¹, HUANG Jian¹ and JIANG HongAn¹

1. 中国地质大学地球科学学院, 武汉 430074

2. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 武汉 430074

3. 中国地质大学资源学院, 武汉 430074

1. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2012-02-01 收稿, 2012-04-15 改回.

Liu B, Ma CQ, Zhang JY, Xiong FH, Huang J and Jiang HA. 2012. Petrogenesis of Early Devonian intrusive rocks in the east part of Eastern Kunlun Orogen and implication for Early Palaeozoic orogenic processes. *Acta Petrologica Sinica*, 28(6): 1785 – 1807

Abstract Large scale of Early Devonian magmatism was found in both east and west parts of Eastern Kunlun Orogen. But few studies were focused on its origin, geodynamic mechanism and relationship with Proto-tethys. This paper reports a typical Early Devonian intrusion from the east part of the Eastern Kunlun Orogen, which named Yuejinshan intrusion. The intrusion is mainly composed of monzogranite, granodiorite, some gabbro and cordierite-bearing granite, in which the nature of the first three rock types is the study object of this paper. Monzogranite and granodiorite samples are absence of hornblende and cordierite, and are characterized by relatively high contents of silicon and potassium, low contents of iron, magnesium and calcium, with moderate alumina saturation index ($A/NCK = 1.0 \sim 1.1$) and enrichment of large ion lithophile elements (LILE; Rb, Th and K) and distinct depletion of Ba, Sr, Nb, Ta, Ti, P, Eu, etc., belonging to peraluminous I-S transition type granites. Gabbros are characterized by significantly high contents of iron and titanium (the contents of FeO^T and TiO_2 are 8.17% ~ 12.70% and 4.50% ~ 6.54%, respectively), relatively high Cu contents ($11.5 \times 10^{-6} \sim 30.6 \times 10^{-6}$) and Cu/Ni values (1.41 ~ 6.41), enriched in LREE (the values of $(La/Yb)_N$ and LREE/HREE are 1.94 ~ 3.15 and 2.65 ~ 3.48, respectively), relatively low $Mg^{\#}$ (48 ~ 50), Cr ($3.8 \times 10^{-6} \sim 60.4 \times 10^{-6}$) and Ni ($1.8 \times 10^{-6} \sim 12.5 \times 10^{-6}$), Nb-Ta-Ti anomalies relative to primitive mantle. Monzogranites and granodiorites have relatively high I_{Sr} values (0.710 ~ 0.740 and 0.710, respectively), low $\varepsilon_{Nd}(t)$ values ($-4.05 \sim -5.80$ and $-3.54 \sim -3.71$, respectively) and old Nd isotope model ages (the t_{2DM} values are 1.47 ~ 1.62Ga and 1.43 ~ 1.45Ga, respectively). But the granodiorites have relatively higher $\varepsilon_{Hf}(t)$ values ($-3.00 \sim 0.86$). Gabbros have relatively high I_{Sr} values (0.711 ~ 0.714), low $\varepsilon_{Nd}(t)$ ($-3.44 \sim -6.82$) and more concentrated $\varepsilon_{Hf}(t)$ values ($-2.19 \sim 1.05$), which show the characteristics of an enriched mantle. The LA-ICP-MS zircon U-Pb analyses suggest that the formation ages of granodiorites and gabbros are 407 ± 3 Ma and 406 ± 3 Ma, respectively. With a comprehensive consideration on petrology, geochemistry, whole rock Sr-Nd isotopes and zircon Lu-Hf isotope analyses, and so on, we consider the formation of Yuejinshan pluton had experienced the following processes. Mantle derived magmas rose to the crust and provided enough heat for partial melting of crust materials (meta-greywacke) which produced S-type cordierite-bearing granites. Meanwhile, they mixed with crust derived magmas and produced I-S transition type monzogranite and granodiorite. The Yuejinshan and other Early Devonian magmatisms in the Eastern Kunlun orogeny have the same rock assemblages as typical post-collisional magmatisms and show obvious marks of mantle magmatism, which suggests the Eastern Kunlun orogeny at least begun its post-collisional extension

* 本文受中国地质调查局计划项目(1212010918002、1212011121270)和国家自然科学基金重点项目(90814004)联合资助。

第一作者简介: 刘彬,男,1987年生,博士生,矿物学、岩石学、矿床学专业,E-mail: liubincug@126.com

** 通讯作者: 马昌前,男,教授,岩石学与地球化学专业,E-mail: cqma@cug.edu.cn

in Early Devonian. Combining with regional studies, this paper suggests that Early Devonian is a critical period for the tectonic transformation of the Central orogenic belt (especially for Eastern Kunlun, North Qinling and Northern margin of Qaidam basin). During this period, the merging of terranes had finished and the tectonic framework begun to transfer from compression to extension.

Key words Early Devonian; Intrusive rocks; Proto-tethys; Tectonic evolution; Eastern Kunlun Orogen

摘要 研究发现,早泥盆世东昆仑造山带东段和西段均发育较大规模的岩浆活动。然而对于其成因、深部动力学机制以及始特提斯构造演化的关联等问题一直缺乏系统的研究。本文以东昆仑东段地区跃进山岩体为例,探讨早泥盆世岩浆活动机理及其构造意义。该岩体主体由二长花岗岩和花岗闪长岩组成,含少量的辉长岩和含堇青石花岗岩,前三种岩性是本文的重点。其中,二长花岗岩和花岗闪长岩无角闪石和堇青石,具有高硅和钾,低铁、镁和钙,铝饱和指数(A/CNK)多数在1.0~1.1之间,富集大离子亲石元素(LILE: Rb、Th和K)和轻稀土(LREE),明显亏损Ba、Sr、Nb、Ta、Ti、P和Eu等元素,属过铝质I-S过渡型花岗岩;辉长岩具有显著高的Fe和Ti(FeO^T 为8.17%~12.70%, TiO_2 为4.50%~6.54%)含量,高Cu(11.5×10^{-6} ~ 30.6×10^{-6})和Cu/Ni值(1.41~6.41),相对富集的LREE($(La/Yb)_N$ 为1.94~3.15,LREE/HREE为2.65~3.48),相对低的 $Mg^\#$ (48~50)、Cr(3.8×10^{-6} ~ 60.4×10^{-6})、Ni(1.8×10^{-6} ~ 12.5×10^{-6})值,相对于原始地幔具有明显的Nb-Ta-Ti正异常。二长花岗岩和花岗闪长岩均具有相对高的 I_{Sr} 值(分别为0.710~0.740和0.710)、相对低的 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 值(分别为-4.05~-5.80和-3.54~-3.71)和偏古老的 t_{2DM} (分别为1.47~1.62Ga和1.43~1.45Ga),但花岗闪长岩具有相对高的 $\varepsilon_{Hf}(t)$,其变化在-3.00~0.86。跃进山辉长岩具有相对高的 I_{Sr} (0.711~0.714)、相对低的 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 值(-3.44~-6.82)和较为集中的 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值(-2.19~1.05),显示富集地幔的特征。本次利用LA-ICP-MS锆石U-Pb定年方法获得花岗闪长岩的形成年龄为 407 ± 3 Ma,辉长岩的形成年龄为 406 ± 3 Ma。综合岩石学、地球化学和Sr-Nd-Hf同位素等多方面的指标,可以判断该岩体的形成为:幔源岩浆上侵至地壳,供热诱发古老的地壳物质部分熔融产生S型岩浆最终形成含堇青石花岗岩,同时与壳源熔体发生混合产生I-S过渡型岩浆并经历较高分异的最终形成二长花岗岩和花岗闪长岩。跃进山与东昆仑造山带其他地区早泥盆世岩浆活动均具有与典型后碰撞岩浆作用类似的岩石组合,并且显示很强的幔源岩浆作用的印记。这表明,至少从早泥盆世开始,东昆仑地区已经进入后碰撞的伸展阶段。综合区域上的研究成果,本文认为早泥盆世应为中央造山带(特别是东昆仑、北秦岭和柴北缘)始特提斯构造体制转换的关键时期,这一时期相关地体的碰撞拼合已基本完成,区域构造体制由挤压开始转向伸展。

关键词 早泥盆世;侵入岩;始特提斯;构造演化;东昆仑造山带

中图法分类号 P588.12; P597.3

造山带是大陆构造的基本单元,是研究和理解大陆动力学的天然实验室(邓晋福等,2004)。侵入岩是造山带的重要组成部分,与造山带的形成与演化关系密切,既是不同造山事件(如洋-陆俯冲、陆-陆碰撞、底侵作用和拆沉作用等)中物质与能量再分配的记录者,又是探测造山带壳幔结构及深部过程的岩石探针(Bonin *et al.*, 1998;肖庆辉等,2002;邓晋福等,2004)。因此,对古老造山带不同时代不同类型侵入岩的成因开展细致的研究,不仅能反演整个造山带具体的构造演化阶段,而且还能深入地了解造山事件中深部壳幔相互作用的过程。

东昆仑造山带位于青藏高原的北缘,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(长约5000km)构造带——中央造山带的重要组成部分(许志琴等,2006;杨经绥等,2010),同时也是青藏高原内另一条可与冈底斯带相媲美的巨型岩浆岩带(莫宣学等,2007)。该造山带东段大量出露早古生代和晚古-早中生代两个时期的侵入岩(图1),分别对应始特提斯和古特提斯两期不同的构造演化。因此,对这两套不同时期侵入岩开展细致的研究,能够为反演东昆仑造山带始特提斯和古特提斯具体的构造演化过程提供重要的岩石学和年代学证据。然而,相比晚古-早

中生代侵入岩,该造山带早古生代侵入岩的研究非常薄弱。本文作者及所在项目组通过三年多的野外和室内的详细工作,重新查明了东昆仑东段早古生代侵入岩的时空分布特征,并且发现该区早泥盆世的侵入岩分布规模较大,其面积可占全部早古生代岩体的60%。而相关研究显示在东昆仑的西段地区同样出露大量早泥盆世的侵入岩(肖庆辉等,2009;赵振明等,2008;湛宏伟等,2006)。早泥盆世时期,东昆仑造山带东段和西段同时出现如此大规模的岩浆活动,其成因与深部的动力学机制是什么?其与始特提斯的构造演化究竟有何关系?这些问题值得去深入探讨。

本研究主要选取该造山带东段跃进山岩体为对象,开展详细的岩石学、锆石U-Pb年代学和Sr-Nd-Hf同位素等工作,综合分析其岩石成因与深部动力学机制,在此基础上,结合区域资料来探讨其对东昆仑造山带乃至整个中央造山带始特提斯构造演化的指示意义。

1 区域地质背景与岩体地质特征

以昆中缝合带和昆南缝合带为界,东昆仑造山带可分为昆北地体、昆南地体和巴颜喀拉地体(许志琴等,2007)。昆

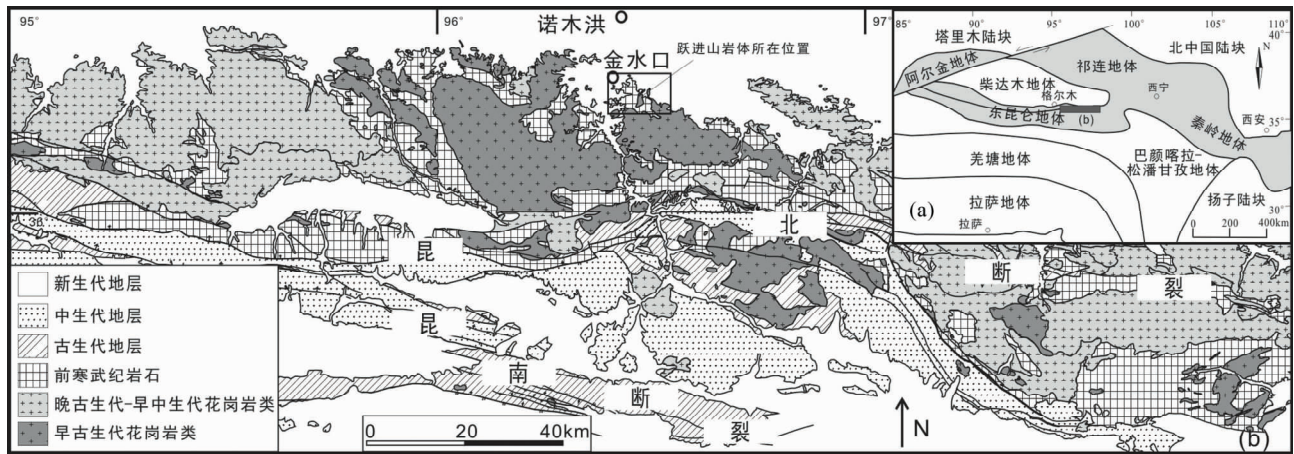


图1 东昆仑造山带东段大地构造位置(a)和侵入岩地质分布简图(b)

Fig.1 The tectonic location (a) and simplified geological map (b) of east part of the Eastern Kunlun Orogen

北地体位于东昆仑北缘逆冲断裂与祁漫塔格-昆中早古生代火山岛弧岩浆岩带之间,由于东昆仑北缘逆冲断裂的作用,使得东昆仑北地体向北推覆于柴达木盆地之上。该地体以大面积出露前寒武纪的变质基底和早古生代-中生代的侵入杂岩为特征。古元古代金水口群在区内广泛分布,主要由一套古老的深变质岩系(主要为高角闪岩相-麻粒岩相)组成,以发育强烈变形的变基性火山岩(斜长角闪岩)-陆源碎屑岩(片麻岩)-镁质碳酸盐岩组合为特征。张建新等(2003)测定金水口群麻粒岩相的夕线黑云-二长片麻岩的变质年龄为 $460 \pm 8\text{Ma}$,具有深熔成因的花岗质岩石的深熔年龄为 $402 \pm 6\text{Ma}$,反映金水口群经历了早古生代的约 460Ma 的麻粒岩相变质作用和随后约 402Ma 左右与深熔作用有关的构造热事件,这表明东昆仑北地体前寒武纪基底在早古生代造山过程中发生了明显的再活化,与祁连-阿尔金地体类似。该地体分布有大量的早古生代-中生代的侵入岩,其中早古生代侵入岩以晚奥陶世-中泥盆世花岗岩为主体,并含少量的闪长岩和辉长岩,而中生代侵入岩以晚二叠世-三叠纪花岗岩为主,并出露较多的基性岩体和基性岩墙群。

本文报道的早泥盆世跃进山岩体正位于昆北地体内,并且隶属青海省海西州都兰县诺木洪乡($N36^{\circ}13.244'$ 、 $E96^{\circ}28.702'$,海拔约 3200m 以上)(图1)。该岩体侵入古元古代金水口群白沙河岩组(其形成时代可约束在 $2.0 \sim 1.9\text{Ga}$,据王国灿等(2007))中,在岩体的南部有较多中生代酸性侵入岩(图2)。该岩体岩性复杂,主要是由二长花岗岩、花岗闪长岩、含堇青石花岗岩和少量的辉长岩组成(图2)。前人已对该岩体中的含堇青石花岗岩的年代学、地球化学和同位素等开展了比较详尽的研究(龙晓平等,2005,2006;余能等,2005;张建新等,2003),因此,本文主要对其中的二长花岗岩、花岗闪长岩和辉长岩开展具体的研究工作。这三个岩石单元的主要特征如下。

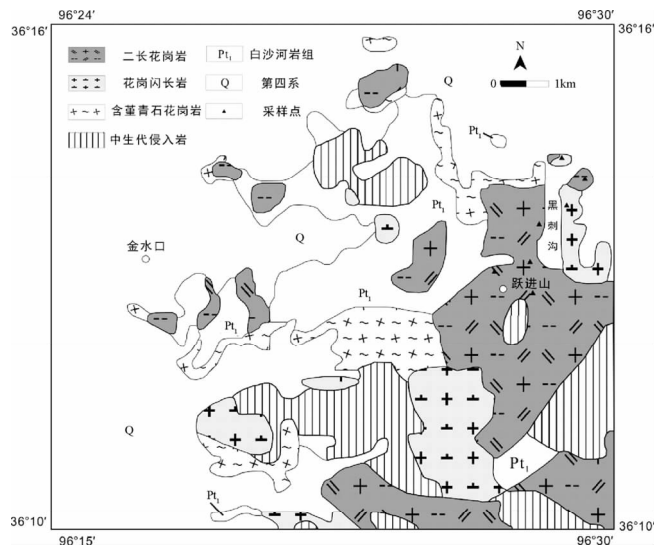


图2 跃进山岩体地质简图(底图据青海省区调综合地质大队,1996^①修改)

Fig.2 Simplified geological map of the Yuejinshan intrusive rocks

(1) 二长花岗岩分布面积相对较大,主要位于跃进山主峰周围(图2)。岩石局部发育面理,面理产状为 $68^{\circ} \angle 50^{\circ}$,可见大量的围岩捕掳体(图3c),捕掳体成分主要为黑云斜长片麻岩,其大小为 $10\text{cm} \times 10\text{cm} \sim 10\text{m} \times 2\text{m}$,最大甚至可达 $20\text{m} \times 5\text{m}$,并且越靠近围岩,捕掳体数量增多,体积增大。在岩体与围岩接触部位可见围岩明显的混合岩化现象(图3b)。此外,岩石中出现少量的富云母包体,推测其可能为地壳发生深融作用产生花岗岩浆后残留下来的耐融残余

① 青海省区调综合地质大队. 1996. 1:5万金水口幅地质调查报告

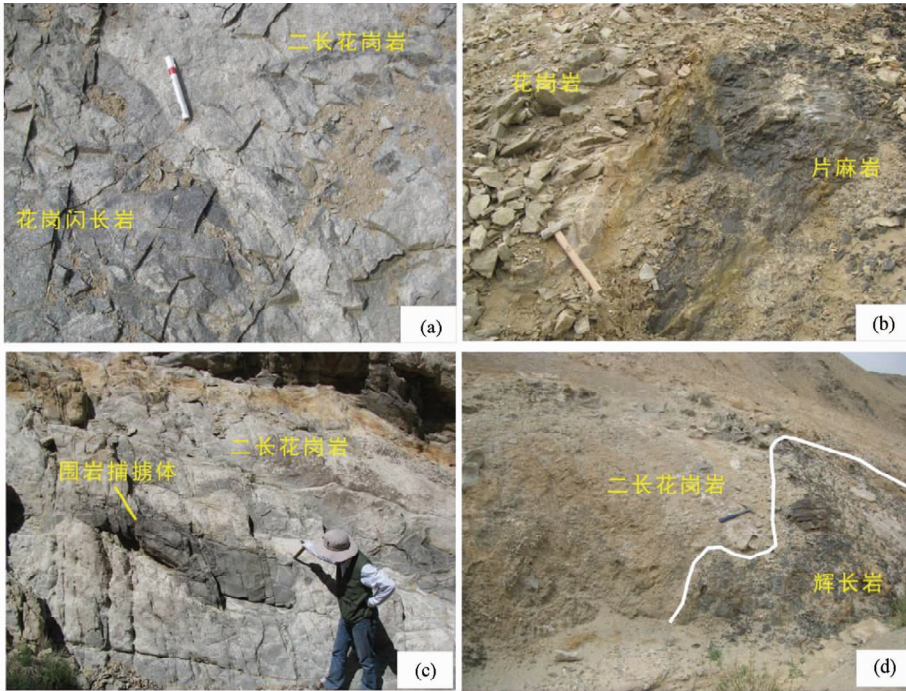


图3 跃进山岩体野外露头照片

(a)-二长花岗岩与花岗闪长岩的接触界限;(b)-片麻岩与二长花岗岩接触处可见混合岩化;(c)-二长花岗岩中的围岩捕掳体;(d)-辉长岩侵入二长花岗岩中

Fig.3 Outcrop photos of the Yuejinshan intrusive rocks

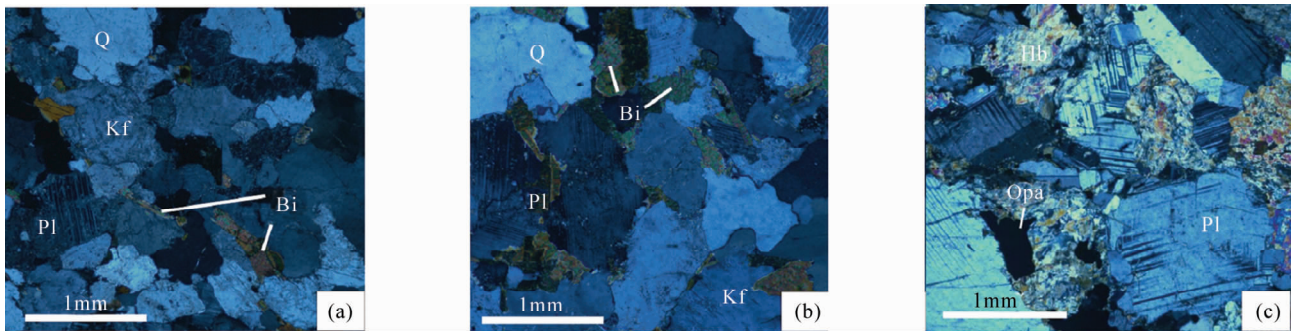


图4 跃进山岩体三个不同岩石单元显微镜下照片

(a)-二长花岗岩;(b)-花岗闪长岩;(c)-中粒辉长岩. Bi-黑云母;Hb-角闪石;Kf-钾长石;Opa-不透明矿物;Pl-斜长石

Fig.4 Photomicrographs of the typical textures of the Yuejinshan intrusive rocks

(Barbarin, 1999; 肖庆辉等, 2002); 该岩石为灰白色, 半自形中细粒结构, 块状构造, 典型的矿物组合为石英(25% ~ 30%)、斜长石(30% ~ 35%)、钾长石(30% ~ 35%)和黑云母(2% ~ 7%), 部分样品中含有少量的石榴子石(图4a)。5个岩石样品在QAP和TAS分类图投点, 均落在二长花岗岩的范围内(图5)。

(2) 花岗闪长岩分布面积相对较小, 主要出露于跃进山以北和以南地区(图2), 局部发育发育面理, 面理产状为 $85^{\circ} \angle 75^{\circ}$, 与围岩接触处同样可见围岩混合岩化现象。该岩石与二长花岗岩接触边界模糊, 两者互相穿插与捕掳。岩石为灰-灰白色, 半自形中细粒结构, 块状构造, 典型矿物组合为

石英(25% ~ 30%)、斜长石(40% ~ 50%)、钾长石(20% ~ 26%)和黑云母(4% ~ 10%), 不含石榴子石矿物(图4b)。5个岩石样品在QAP和TAS分类图投影多数落在花岗闪长岩的范围内(图5)。

(3) 辉长岩分布于跃进山以北黑刺沟的西侧, 侵入于二长花岗岩中(图3c), 局部条带状构造较明显。该岩石为深灰色-灰色, 中-粗粒辉长结构, 镜下可见大部分辉石均被角闪石替代。典型矿物组合为角闪石(35% ~ 42%)、辉石(5% ~ 8%)、斜长石(40% ~ 45%)、黑云母(3% ~ 5%)和不透明矿物(5% ~ 8%), 部分样品还含有少量的金红石。

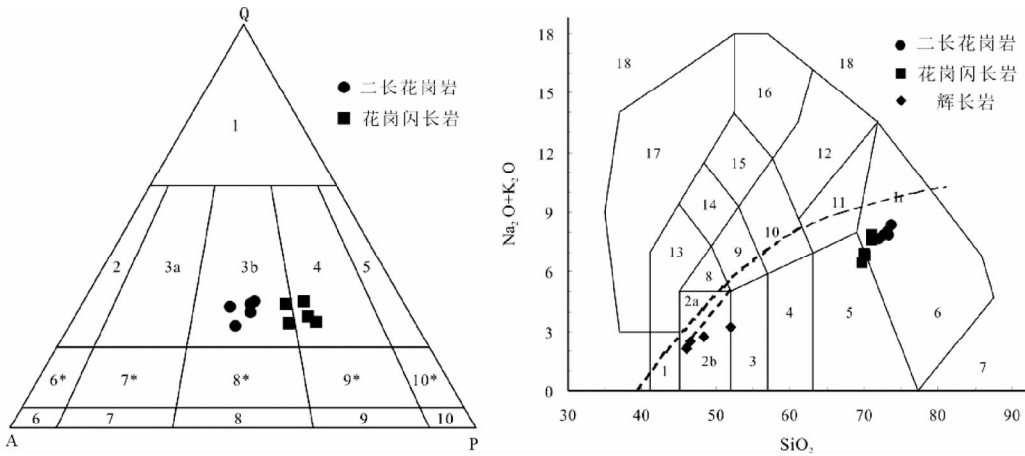


图5 火成岩 QAP 分类三角图(底图据 IUGS 1972 推荐, Le Maitre, 1989) 和化学成分 TAS 分类图(底图据 Middlemost, 1994)

QAP 图中: 3b-二长花岗岩; 4-花岗闪长岩。TAS 图中: 2b-亚碱性辉长岩; 3-辉长闪长岩; 4-闪长岩; 5-花岗闪长岩; 6-二长花岗岩

Fig. 5 The QAP (after Le Maitre, 1989) and TAS (after Middlemost, 1994) classification diagrams

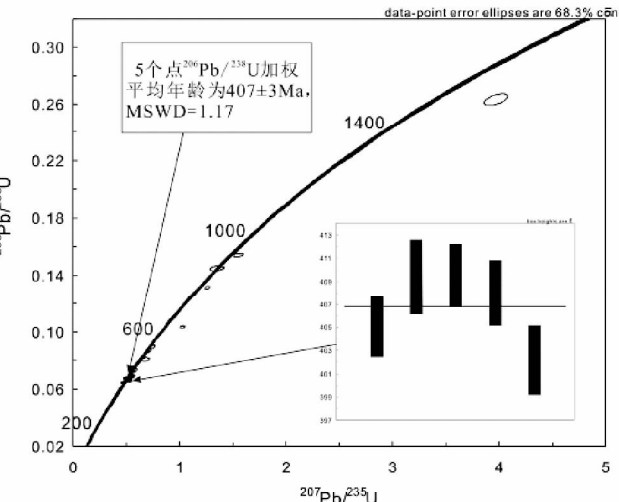
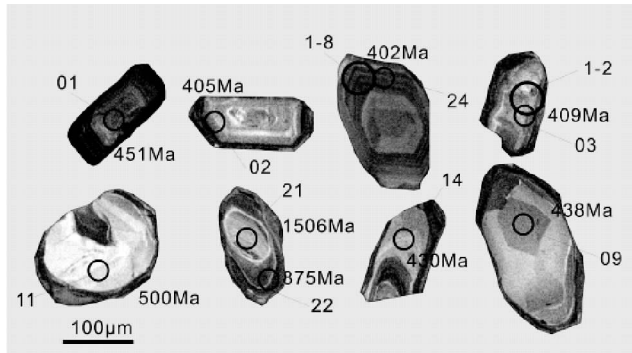


图6 花岗闪长岩(NM06-1)典型锆石阴极发光图像和锆石 U-Pb 谐和图

小圈表示锆石 U-Pb 定年测试点, 大圈表示锆石 Lu-Hf 同位素测试点

Fig. 6 Zircon CL images and U-Pb concordia diagram for the Yuejinshan granodiorite (NM06-1)

2 样品处理与测试方法

选取具有代表性的样品进行锆石的分选,分选按照标准程序进行,经过机械粉碎、重磁和电磁分析后,在双目镜下手工挑纯,随机选择晶形完好并且纯净透明的锆石来制靶(分选工作主要是在河北省廊坊诚信地质服务公司完成)。锆石样品靶制成后,对锆石进行透射光、反射光和阴极发光照相,以供测试选点用。锆石 U-Pb 同位素定年在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室(GPMR)利用 LA-ICP-MS 完成。激光剥蚀系统为 GeoLas 2005, ICP-MS 为 Agilent 7500a。激光剥蚀过程中采用氦气作载气、氩气为补偿气以调节灵敏度。在等离子体中心气流(Ar + He)中加入了少量氮气,以提高仪器灵敏度、降低检出限和改善分析精密度(Hu *et al.*, 2008)。每个时间分辨分析数据包括大约 20~30s 的空白信号和 50s 的样品信号。对分析数据的离线处理(包括对样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正、元素含量及 U-Th-Pb 同位素比值和年龄计算)采用软件 ICPMSDataCal(Liu *et al.*, 2008a, 2010a)完成。详细的仪器操作条件和数据处理方法同 Liu *et al.* (2008a, 2010a, b)。锆石 U-Pb 谐和图和年龄加权平均图主要采用 ISOPLOT 程序(Ver3.23)(Ludwig, 2003)来绘制。

在手标本和薄片镜下对野外采集的样品进行详细的观察,选择具有代表性样品,并去掉岩石样品表面的风化物,保证测试的样品新鲜,没有裂隙和后期的脉体。此外将样品粉碎至 200 目以下,以备测试。全岩主量元素分析主要在湖北省地质实验研究所武汉综合岩矿测试中心完成,氧化物测定采用 X 荧光光谱 α 系数测定法, H_2O 的测定采用重量法, CO_2 的测定采用非水滴定法,分析精度均为 1% (H_2O 除外)。其中有两个样品(NM06-5 和 NM06-7)的主量元素是在澳实矿

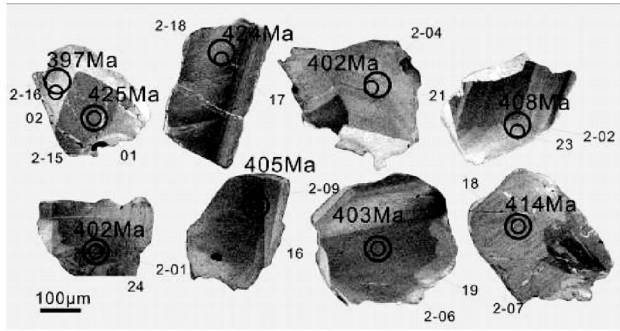


图7 辉长岩(YJ05-4)典型锆石阴极发光图像和锆石 U-Pb 谐和图

小圈表示锆石 U-Pb 定年测试点,大圈表示锆石 Lu-Hf 同位素测试点

Fig. 7 Zircon CL images and U-Pb concordia diagram for the Yuejinshan gabbro (YJ05-4)

物实验室(广州)利用 X 荧光光谱分析完成。全岩稀土和微量元素分析是在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室(GPMR)利用 Agilent 7500a ICP-MS 分析完成。用于 ICP-MS 分析的样品处理如下:(1)称取粉碎至大约 200 目的岩石粉末 50mg 于 Teflon 溶解器中;(2)采用 Teflon 溶解弹将样品用 HF + HNO₃ 在 195℃ 条件下消解 48h;(3)将在 120℃ 条件下蒸干除 Si 后的样品用 2% HNO₃ 稀释 2000 倍,定容于干净的聚酯瓶。详细的样品消解处理过程、分析精密度和准确度同 Liu *et al.* (2008b)。

全岩 Sr-Nd 同位素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(GPMR)采用 Finnigan 公司的 MAT-261 热电离同位素质谱仪进行比值测量,仪器的准确度通过标样 NBS987 和 La Jolla 国际标样进行监测, Sr 同位素的质量分馏用⁸⁸Sr/⁸⁶Sr = 8.375209 校正, Nd 同位素质量分馏用¹⁴⁶Nd/¹⁴⁴Nd = 0.721900 校正,详细流程见 Gao *et al.* (2004)。锆石 Lu-Hf 同位素分析主要是在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。使用仪器为 Nu Plasma HR (Nu

Instruments, UK)多接收电感耦合等离子质谱仪,其激光系统为 Geolas2005 193nm 准分子激光,其脉冲频率为 8Hz,激光束直径为 44μm,激光束的能量为 10J · cm⁻²。¹⁷⁶Lu 和¹⁷⁶Yb 对¹⁷⁶Hf 的同质异位干扰通过监测¹⁷⁵Lu 和¹⁷²Yb 信号强度,采用¹⁷⁵Lu/¹⁷⁶Lu = 0.02655 和¹⁷⁶Yb/¹⁷²Yb = 0.5886 进行校正。其仪器详细的运行过程和分析过程可参见 Yuan *et al.* (2008)。

3 测试结果

3.1 锆石 U-Pb 年代学

本次主要是对跃进山岩体中的花岗闪长岩和辉长岩样品进行锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年。其中,花岗闪长岩样品(NM06-1)的锆石均为无色或浅黄色,透明或半透明,多为柱状晶形,长宽比在 1:1 到 3:1 之间,部分锆石内可见包裹体。本次共测定 23 颗锆石共 26 个点(图 6),具体的测试数据见表 1。该样品中有大量的捕获锆石,岩浆环带较发育,边部较黑,可能受到后期热液改造,年龄有 430Ma、451Ma、875Ma、1506Ma。另外样品还存在少量的变质锆石,具有圆形的核和增生的边,但不具明显的环带特征,可能与变质重结晶作用有关,测得增生边的年龄约为 500Ma。在测定的锆石中,有 5 颗锆石具有明显的岩浆振荡环带特征,其 Th/U 比值(0.4 ~ 0.65)均大于 0.4,为典型的岩浆锆石(Belousova *et al.*, 2002; 钟玉芳等, 2006),其²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄(图 6)为 407 ± 3Ma (MSWD = 1.17),应代表该花岗闪长岩的形成年龄。

辉长岩样品(YJ05-4)的锆石均为浅黄褐色,半透明,多为宽板状晶形(图 7)。本次共测定共测定 22 颗锆石 25 个点,具体的测试数据见表 2。多数锆石具有明显的岩浆振荡环带,边部与多数核部均给出一致的年龄(图 7),共测试 17 组数据,其 Th/U 比值为 0.36 ~ 0.56, ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄加权平均值为 406 ± 3Ma (图 7),代表了该辉长岩的形成年龄,该年龄在误差范围内与花岗闪长岩年龄完全一致。此外,有部分核部不具明显的环带特征(图 7),此次共测定 8 个点, ²⁰⁶Pb/²³⁸U 表面年龄的加权平均值为 424 ± 3Ma (MSWD = 1.8),可能代表从围岩捕获的锆石的年龄。

3.2 地球化学

表 3 中列出跃进山岩体三个不同岩石单元的主量、稀土和微量元素以及全岩 Sr-Nd 同位素测定结果以及计算得到的相关参数,文中主量元素、稀土和微量元素相关图解均采用 GEOKIT 软件绘制(路远发, 2004)。

二长花岗岩和花岗闪长岩在主量元素组成上相似,均具有相对高的硅(SiO₂ 分别为 72.02% ~ 73.72% 和 69.69% ~ 71.02%),相对低的铁(FeO^T 分别为 1.14% ~ 1.89% 和 2.17% ~ 2.94%)、镁(MgO 分别为 0.30% ~ 0.75% 和 0.86% ~ 1.28%, Mg[#] 分别为 32 ~ 42 和 40 ~ 48)、钛(TiO₂ 分别

表 1 跃进山花岗闪长岩的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年结果

Table 1 Zircon LA-ICP-MS U-Pb data for the Yuejinshan granodiorite (NM06-1)

测点号	元素含量 ($\times 10^{-6}$)		元素 比值 $\frac{\text{Th}}{\text{U}}$	同位素比值				同位素年龄 (Ma)							
	^{232}Th	^{238}U		$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	$\pm 1\sigma$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	$\pm 1\sigma$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$\pm 1\sigma$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	$\pm 1\sigma$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	$\pm 1\sigma$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$\pm 1\sigma$
NM06-1-01	111.95	302.76	0.37	0.05725	0.00150	0.57412	0.01538	0.07239	0.00045	502	62	461	10	451	3
NM06-1-02	187.43	376.86	0.50	0.05521	0.00133	0.49442	0.01146	0.06485	0.00043	420	54	408	8	405	3
NM06-1-03	119.44	296.70	0.40	0.05929	0.00149	0.53794	0.01421	0.06556	0.00053	576	56	437	9	409	3
NM06-1-04	176.58	344.13	0.51	0.05745	0.00146	0.51817	0.01222	0.06560	0.00045	509	56	424	8	410	3
NM06-1-05	179.59	216.60	0.83	0.05597	0.00145	0.52019	0.01361	0.06736	0.00054	450	59	425	9	420	3
NM06-1-06	38.95	621.05	0.06	0.07188	0.00094	1.02754	0.01524	0.10333	0.00069	983	21	718	8	634	4
NM06-1-07	155.68	566.91	0.27	0.05876	0.00113	0.56297	0.01172	0.06924	0.00050	567	41	453	8	432	3
NM06-1-08	166.39	477.43	0.35	0.06954	0.00093	1.26512	0.01716	0.13169	0.00072	917	28	830	8	797	4
NM06-1-09	26.84	440.99	0.06	0.05571	0.00121	0.54134	0.01265	0.07022	0.00053	439	48	439	8	438	3
NM06-1-10	163.49	158.80	1.03	0.05735	0.00190	0.53716	0.01790	0.06781	0.00063	506	72	437	12	423	4
NM06-1-11	62.45	114.81	0.54	0.06141	0.00222	0.68074	0.02466	0.08065	0.00086	654	78	527	15	500	5
NM06-1-12	281.15	259.45	1.08	0.05465	0.00146	0.51162	0.01322	0.06790	0.00054	398	56	420	9	423	3
NM06-1-13	76.36	142.41	0.54	0.05662	0.00201	0.57111	0.02040	0.07314	0.00077	476	80	459	13	455	5
NM06-1-14	150.31	351.33	0.43	0.05638	0.00135	0.53730	0.01249	0.06890	0.00046	478	54	437	8	429	3
NM06-1-15	50.77	173.70	0.29	0.07266	0.00133	1.55466	0.02977	0.15426	0.00106	1006	37	952	12	925	6
NM06-1-16	269.45	413.08	0.65	0.05411	0.00125	0.49033	0.01107	0.06534	0.00047	376	52	405	8	408	3
NM06-1-17	52.76	92.58	0.57	0.06717	0.00201	1.34883	0.04123	0.14478	0.00126	843	58	867	18	872	7
NM06-1-18	115.98	117.55	0.99	0.05570	0.00230	0.52222	0.02143	0.06768	0.00076	439	93	427	14	422	5
NM06-1-19	120.71	126.28	0.96	0.05545	0.00211	0.51439	0.01929	0.06746	0.00064	432	90	421	13	421	4
NM06-1-20	88.64	102.04	0.87	0.05738	0.00276	0.54006	0.02482	0.06857	0.00077	506	106	438	16	428	5
NM06-1-21	139.36	290.18	0.48	0.10787	0.00127	3.96947	0.07280	0.26320	0.00269	1765	21	1628	15	1506	14
NM06-1-22	54.97	1147.30	0.05	0.06954	0.00071	1.40188	0.01467	0.14529	0.00067	915	53	890	6	875	4
NM06-1-23	97.25	256.03	0.38	0.05322	0.00161	0.49769	0.01573	0.06743	0.00064	339	36	410	11	421	4
NM06-1-24	172.87	422.86	0.41	0.05282	0.00136	0.47075	0.01217	0.06438	0.00049	320	64	392	8	402	3
NM06-1-25	1368.32	4207.26	0.33	0.05949	0.00085	0.71757	0.01172	0.08686	0.00073	583	31	549	7	537	4
NM06-1-26	1509.85	4295.33	0.35	0.06030	0.00103	0.75011	0.01448	0.08953	0.00082	613	37	568	8	553	5

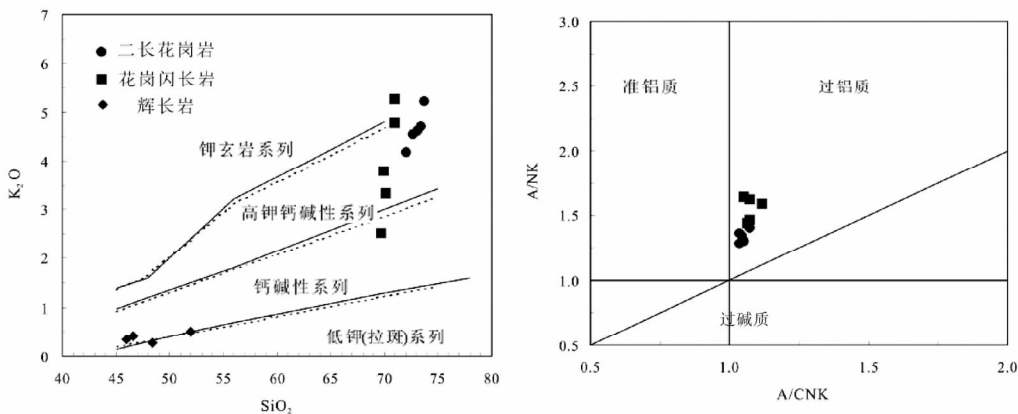


图 8 跃进山岩体 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ (底图据 Peccerillo and Taylor, 1976) 和 $\text{A}/\text{NK}-\text{A}/\text{CNK}$ 图解 (底图据 Shand, 1927)

Fig. 8 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ (after Peccerillo and Taylor, 1976) and $\text{A}/\text{NK}-\text{A}/\text{CNK}$ (after Shand, 1927) diagrams

为 0.19% ~ 0.28% 和 0.32% ~ 0.43%) 及钙 (CaO 分别为 1.43% ~ 1.79% 和 1.94% ~ 2.85%)。两种岩石碱的含量均较高 ($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 分别为 7.69% ~ 8.40% 和 6.45% ~

7.88%), 并且多数样品相对富钾, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 分别为 1.18 ~ 1.63 和 0.64 ~ 2.02, 在 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图上投影多数落入高钾钙碱性系列内 (图 8)。两种岩石的 Al_2O_3 含量分别为 13.93%

表2 跃进山辉长岩的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年结果

Table 2 Zircon LA-ICP-MS U-Pb data for the Yuejinshan gabbro (YJ05-4)

测点号	元素含量 ($\times 10^{-6}$)		元素 比值	同位素比值						同位素年龄 (Ma)					
	^{232}Th	^{238}U		$\frac{\text{Th}}{\text{U}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	$\pm 1\sigma$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	$\pm 1\sigma$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$\pm 1\sigma$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	$\pm 1\sigma$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	$\pm 1\sigma$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$
	YJ05-4-01	132.22	259.14	0.51	0.05906	0.00186	0.55940	0.01705	0.06822	0.00059	569	69	451	11	425
YJ05-4-02	13.37	109.02	0.12	0.06081	0.00261	0.53246	0.02248	0.06351	0.00072	632	62	433	15	397	4
YJ05-4-03	66.40	190.96	0.35	0.05375	0.00187	0.51108	0.01765	0.06858	0.00065	361	80	419	12	428	4
YJ05-4-04	74.90	207.58	0.36	0.05419	0.00181	0.51781	0.01731	0.06900	0.00071	389	76	424	12	430	4
YJ05-4-05	77.57	183.74	0.42	0.05733	0.00212	0.55161	0.02012	0.06955	0.00058	506	81	446	13	433	3
YJ05-4-06	105.41	277.43	0.38	0.05623	0.00162	0.53989	0.01576	0.06925	0.00053	461	63	438	10	432	3
YJ05-4-07	111.21	288.98	0.38	0.05318	0.00159	0.50247	0.01430	0.06846	0.00054	345	67	413	10	427	3
YJ05-4-08	144.73	285.92	0.51	0.05438	0.00143	0.48904	0.01295	0.06494	0.00056	387	64	404	9	406	3
YJ05-4-09	153.19	361.56	0.42	0.05696	0.00159	0.53844	0.01443	0.06841	0.00055	500	61	437	10	427	3
YJ05-4-10	108.29	304.33	0.36	0.05365	0.00172	0.48266	0.01498	0.06547	0.00066	367	72	400	10	409	4
YJ05-4-11	132.09	268.01	0.49	0.05946	0.00193	0.53706	0.01713	0.06562	0.00066	583	66	436	11	410	4
YJ05-4-12	190.58	360.77	0.53	0.05697	0.00151	0.51233	0.01344	0.06513	0.00060	500	57	420	9	407	4
YJ05-4-13	74.95	200.15	0.37	0.05842	0.00216	0.52043	0.01902	0.06459	0.00063	546	86	425	13	403	4
YJ05-4-14	94.51	244.38	0.39	0.05704	0.00191	0.52285	0.01753	0.06619	0.00066	494	74	427	12	413	4
YJ05-4-15	70.78	168.81	0.42	0.05694	0.00233	0.51444	0.02021	0.06580	0.00074	500	91	421	14	411	4
YJ05-4-16	72.78	196.72	0.37	0.05746	0.00193	0.51460	0.01688	0.06489	0.00070	509	74	422	11	405	4
YJ05-4-17	109.61	224.06	0.49	0.07269	0.00342	0.69029	0.03952	0.06801	0.00090	1006	96	533	24	424	5
YJ05-4-18	87.00	223.11	0.39	0.05291	0.00166	0.48720	0.01587	0.06631	0.00064	324	70	403	11	414	4
YJ05-4-19	207.37	383.94	0.54	0.05545	0.00146	0.49584	0.01308	0.06451	0.00052	432	59	409	9	403	3
YJ05-4-20	148.95	318.67	0.47	0.05925	0.00159	0.53964	0.01445	0.06566	0.00050	576	59	438	10	410	3
YJ05-4-21	89.81	257.32	0.35	0.05818	0.00188	0.51542	0.01597	0.06430	0.00051	600	70	422	11	402	3
YJ05-4-22	72.62	181.43	0.40	0.05483	0.00198	0.48028	0.01662	0.06379	0.00057	406	81	398	11	399	3
YJ05-4-23	367.98	645.37	0.57	0.05903	0.00121	0.53444	0.01113	0.06537	0.00046	569	44	435	7	408	3
YJ05-4-24	147.83	278.82	0.53	0.05716	0.00189	0.50743	0.01639	0.06442	0.00059	498	68	417	11	402	4
YJ05-4-25	445.75	790.63	0.56	0.05463	0.00121	0.48329	0.01068	0.06398	0.00050	398	55	400	7	400	3

~14.49%和14.37%~15.11%, A/CNK 分别为 1.03~1.07 和 1.05~1.12, 均大于 1.0, 在 A/NK-A/CNK 图解中均落在过铝质的范围, 与 S 型花岗岩的强烈富铝有差别 (A/CNK 大于 1.1)。在以 SiO_2 为横坐标的哈克图解上 (图 9), 两种 FeO^T 、 MgO 、 TiO_2 、 Al_2O_3 、 P_2O_5 和 MnO 与 SiO_2 呈明显的负线性相关关系, 类似于同源岩浆演化的特点。在稀土和微量元素组成上, 两种岩石同样显示相似的特征。岩石稀土元素总量 (ΣREE) 均较高, 分别为 160.2×10^{-6} ~ 197.8×10^{-6} 和 148.5×10^{-6} ~ 248.1×10^{-6} , 稀土元素球粒陨石标准化分布型式图 (图 10) 显示两种岩石轻重稀土分异较明显, 轻稀土富集, 重稀土相对亏损, 其中 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 分别为 6.39~33.71 和 7.65~44.70, LREE/HREE 分别为 6.21~16.78 和 7.59~26.84, 具有明显的 Eu 负异常, δEu 分别为 0.42~0.58 和 0.43~0.71, 反映其源区均有大量斜长石晶出; 微量元素原始地幔标准化蛛网图 (图 10) 显示两种岩石均富集大离子亲石元素 (LILE: Rb、Th 和 K) 和轻稀土 (LREE), 明显亏损高场强元素 (HFSE: Nb、Ta、Ti 和 P), 相对于 Rb 和 Th 亏损 Ba, 具有陆壳物质的特点。

与二长花岗岩和花岗闪长岩相比, 辉长岩具有相对低的

硅 (SiO_2 为 45.98%~51.96%), 相对高的铁 (FeO^T 为 8.17%~12.70%)、镁 (MgO 为 4.60%~6.42%, $\text{Mg}^\#$ 为 48~50)、钛 (TiO_2 为 4.50%~6.54%) 和钙 (CaO 为 8.98%~10.32%)。而与传统的辉长岩相比, 跃进山辉长岩具有异常高的 Fe 和 Ti 含量 (图 11), 反映其应具有特殊的成因。岩石碱含量较低, 并且相对富钠 ($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 为 2.08%~3.23%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 为 0.11~0.20), 在火成岩化学成分 TAS 分类图 (图 5) 落在亚碱性辉长岩的范围内, 在 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图中落在钙碱性系列与低钾 (拉斑) 系列的交界处 (图 8)。岩石 Al_2O_3 含量为 14.55%~16.28%, A/CNK 和 A/NK 分别为 0.66~0.74 和 3.23~4.50, 为准铝质岩石。稀土元素总量最低, ΣREE 为 36.22×10^{-6} ~ 52.37×10^{-6} 。稀土元素球粒陨石标准化分布型式图 (图 10) 显示其轻重稀土分异不太明显, 轻稀土略微富集, 重稀土相对略微亏损, 其中 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 为 1.94~3.15, LREE/HREE 为 2.65~3.48, Eu 正异常明显, δEu 为 1.17~1.69。微量元素原始地幔标准化蛛网图 (图 10) 显示该辉长岩具有明显的 Nb-Ta-Ti 正异常。

3.3 Sr-Nd-Hf 同位素

全岩 Sr-Nd 同位素分析共测试二长花岗岩样品 3 件、花

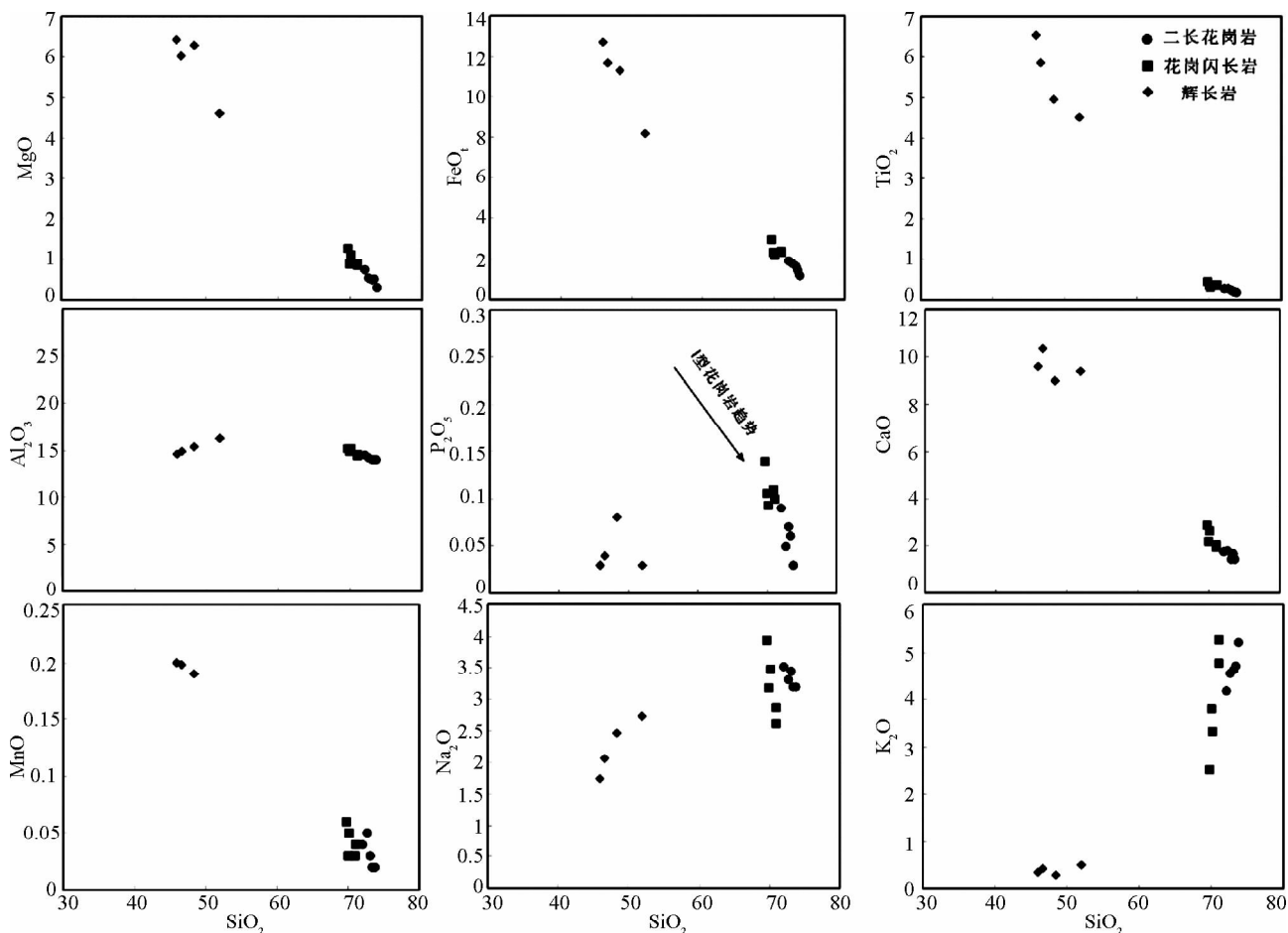


图9 跃进山岩体不同岩石单元哈克图解

Fig.9 Harker diagrams of major elements for the Yuejinshan intrusive rocks

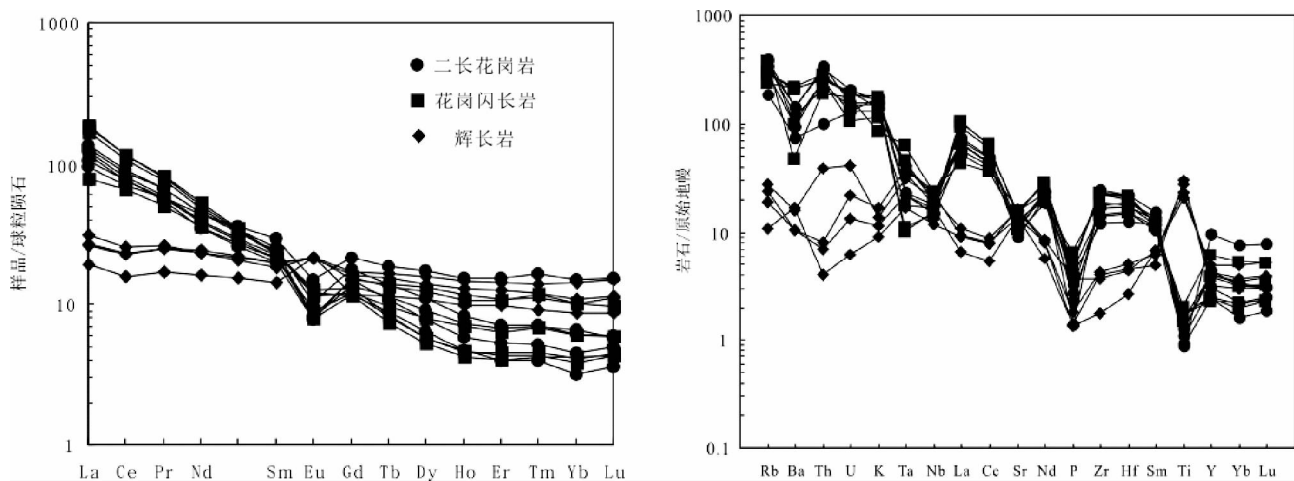


图10 跃进山岩体不同岩石单元稀土元素球粒陨石标准化分布型式图(标准化值据 Talyor, 1985)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig.10 Chondrite-normalized REE patterns (normalizing data after Talyor, 1985) and primitive mantle-normalized trace element spidergrams (normalizing data after Sun and McDonough, 1989) of the Yuejinshan intrusive rocks

表3 跃进山岩体主量元素(wt%)、稀土和微量元素($\times 10^{-6}$)以及全岩 Sr-Nd 同位素组成
 Table 3 Whole-rock major elements (wt%), trace elements ($\times 10^{-6}$) and Sr-Nd isotopic compositions of the Yuejishan intrusive rocks

样品号 岩石类型	二长花岗岩			花岗闪长岩			辉长岩							
	NM05-3	NM08-1	YJ02-1	YJ05-1	YJ06-3	NM05-1	NM06-1	NM06-3	NM06-5	NM06-7	YJ03-1	YJ05-4	NM02-1	NM02-3
SiO ₂	73.72	72.66	73.35	72.02	73.11	69.69	71.00	71.02	69.96	70.17	45.98	48.39	46.57	51.96
TiO ₂	0.19	0.28	0.20	0.28	0.24	0.43	0.36	0.37	0.36	0.32	6.54	4.94	5.87	4.50
Al ₂ O ₃	13.94	14.12	13.96	14.49	13.93	15.10	14.37	14.52	14.85	15.11	14.55	15.33	14.80	16.28
Fe ₂ O ₃	0.23	0.16	0.13	0.18	0.18	0.19	0.32	0.25	0.44	0.23	1.94	1.48	1.77	0.86
FeO	0.93	1.63	1.25	1.73	1.45	2.77	2.00	2.13	1.91	1.96	10.95	10.00	10.10	7.40
FeO ^T	1.14	1.77	1.37	1.89	1.61	2.94	2.29	2.35	2.31	2.17	12.70	11.33	11.69	8.17
MnO	0.02	0.05	0.02	0.04	0.03	0.06	0.03	0.04	0.03	0.05	0.20	0.19	0.20	0.12
MgO	0.30	0.52	0.50	0.75	0.49	1.28	0.86	0.87	0.88	1.12	6.42	6.28	6.04	4.60
CaO	1.43	1.79	1.66	1.76	1.43	2.85	1.94	2.02	2.18	2.63	9.58	8.98	10.32	9.38
Na ₂ O	3.19	3.31	3.20	3.52	3.44	3.94	2.61	2.86	3.18	3.48	1.74	2.47	2.06	2.73
K ₂ O	5.21	4.56	4.71	4.17	4.63	2.51	5.27	4.78	3.80	3.33	0.34	0.27	0.41	0.50
P ₂ O ₅	0.03	0.05	0.06	0.09	0.07	0.14	0.11	0.10	0.11	0.09	0.03	0.08	0.04	0.03
CO ₂	0.10	0.04	0.17	0.15	0.04	0.17	0.10	0.08	0.10	0.09	0.04	0.10	0.08	0.04
H ₂ O ⁺	0.54	0.62	0.57	0.63	0.71	0.69	0.76	0.68	1.05	1.07	1.48	1.30	1.55	1.42
LOI	0.64	0.54	0.51	0.60	0.62	0.63	0.64	0.48	1.05	1.07	0.37	0.33	0.48	0.59
Total	100.47	100.33	100.29	100.41	100.37	100.45	100.37	100.20	98.75	99.56	100.16	100.14	100.28	100.40
K ₂ O + Na ₂ O	8.40	7.87	7.91	7.69	8.07	6.45	7.88	7.64	6.98	6.81	2.08	2.74	2.47	3.23
K ₂ O/Na ₂ O	1.63	1.38	1.47	1.18	1.35	0.64	2.02	1.67	1.19	0.96	0.20	0.11	0.20	0.18
A/CNK	1.03	1.04	1.04	1.07	1.05	1.05	1.06	1.07	1.12	1.07	0.70	0.74	0.66	0.74
A/NK	1.28	1.36	1.35	1.41	1.31	1.64	1.44	1.47	1.59	1.62	4.50	3.52	3.87	3.23
Mg [#]	32	34	40	42	35	44	40	40	41	48	48	50	48	50
T(°C)	836	804	785	774	800	805	825	824	832	783				
刚玉(C)	0.68	0.62	1.03	1.49	0.83	1.41	1.21	1.26	1.70	1.16				
分异指数(DI)	90	86	88	85	88	77	83	83	81	79				
Li	25.8	42.8	35.4	39.6	31.5	53.6	42.7	44.9	24.0	48.4	12.3	12.8	15.3	10.4
Be	1.98	2.69	2.13	3.53	2.48	4.75	1.56	1.40	1.22	3.36	0.49	0.71	0.91	0.82
Sc	14.2	4.6	4.3	5.4	4.5	7.1	5.4	5.9	5.7	6.1	53.8	50.7	37.4	49.8
V	68	21	14	22	18	34	32	31	31	28	542	529	314	471
Cr	5.9	5.9	7.7	26.9	6.0	25.8	9.8	11.2	9.3	19.4	10.6	60.4	3.8	36.8
Co	9.5	2.6	2.0	3.4	2.4	6.3	4.1	4.3	44.7	87.4	47.1	42.6	54.4	75.0
Ni	1.7	2.3	3.6	14.4	2.2	12.8	3.5	4.9	4.1	10.3	10.5	12.5	1.8	7.0
Cu	3.3	1.8	2.3	3.7	3.2	3.0	6.1	4.0	1.3	0.8	30.6	17.7	11.5	19.6
Zn	72.3	41.8	46.8	49.8	49.4	55.0	39.1	42.6	45.2	48.5	93.7	105.7	77.8	103.7
Ga	20.7	18.1	16.0	19.3	16.6	19.8	17.0	16.4	16.6	17.2	16.1	17.3	17.9	17.0
Rb	115	217	215	246	244	232	182	188	148	185	11.7	6.8	17.6	15.0
Sr	334	217	210	188	246	264	293	325	304	223	289	339	330	283
Y	43.7	19.7	11.1	18.2	14.0	27.7	10.9	10.7	10.0	17.2	14.4	19.0	18.0	22.4

续表 3

Continued Table 3

样品号	NM05-3		NM08-1		YJ02-1		YJ05-1		YJ06-3		NM05-1		NM06-1		NM06-3		NM06-5		NM06-7		YJ03-1		YJ05-4		NM02-1		NM02-3				
	二长花岗岩																花岗岩长岩										辉长岩				
Zr	275	196	155	135	185	205	245	241	252	155	45	41	47	20																	
Nb	12.6	16.9	10.5	14.0	12.4	16.6	10.1	10.7	11.6	13.6	11.4	8.5	14.5	16.0																	
Cs	5.54	4.66	4.26	7.62	6.24	28.00	5.07	6.23	2.38	11.95	1.95	2.71	2.09	1.25																	
Ba	521	826	979	649	996	320	1489	1389	1423	668	74	117	110	73																	
La	35.3	47.9	39.2	45.4	50.4	29.1	67.9	63.0	69.5	43.7	4.5	6.2	7.4	6.4																	
Ce	67.8	84.6	74.0	77.0	87.9	63.8	113.9	104.5	111.7	74.6	9.6	14.0	15.6	14.1																	
Pr	7.87	9.08	7.53	8.10	9.16	7.00	11.52	10.55	11.23	8.00	1.58	2.37	2.48	2.40																	
Nd	31.6	32.5	25.2	28.3	31.9	25.6	38.5	34.7	36.3	27.7	7.6	11.5	10.9	10.8																	
Sm	6.83	5.98	4.58	5.24	5.66	5.00	5.44	5.34	5.32	4.97	2.17	3.00	2.74	3.02																	
Eu	1.29	0.90	0.69	0.71	0.72	0.70	1.12	1.01	1.07	0.80	1.26	1.23	1.25	1.24																	
Gd	6.62	5.39	3.59	4.16	4.56	4.76	4.05	3.72	3.56	3.71	2.36	3.28	3.03	3.45																	
Tb	1.08	0.81	0.51	0.65	0.63	0.79	0.49	0.48	0.43	0.57	0.43	0.57	0.52	0.62																	
Dy	6.54	4.24	2.46	3.51	2.98	4.74	2.22	2.25	2.02	3.07	2.74	3.53	3.33	4.00																	
Ho	1.29	0.70	0.40	0.63	0.49	0.92	0.39	0.40	0.36	0.60	0.55	0.72	0.66	0.82																	
Er	3.83	1.80	1.00	1.70	1.33	2.69	1.15	1.10	1.01	1.62	1.61	2.07	1.79	2.36																	
Tm	0.59	0.25	0.14	0.25	0.19	0.43	0.16	0.16	0.15	0.25	0.23	0.30	0.28	0.35																	
Yb	3.74	1.54	0.78	1.63	1.10	2.57	1.03	0.95	1.05	1.53	1.46	1.81	1.69	2.38																	
Lu	0.58	0.23	0.14	0.23	0.19	0.37	0.17	0.17	0.17	0.23	0.22	0.28	0.28	0.38																	
Hf	6.78	5.80	4.65	3.83	5.34	5.34	6.26	5.98	6.52	4.53	1.38	1.34	1.57	0.82																	
Ta	0.94	1.55	0.90	1.68	1.42	2.52	0.45	0.41	0.71	1.84	0.88	0.69	1.25	1.56																	
Pb	23.96	148.61	44.67	43.36	154.87	38.01	36.79	41.12	20.55	20.31	23.86	473.87	6.59	5.41																	
Th	8.40	17.84	26.94	22.19	28.97	15.63	23.29	21.76	21.17	20.32	0.60	0.34	0.33	0.69																	
U	2.72	3.09	4.30	4.07	3.19	3.57	3.77	3.83	2.63	2.17	0.28	0.13	0.87	0.45																	
Nb/Ta	13.30	10.91	11.68	8.31	8.77	6.60	22.60	26.31	16.39	7.39	12.92	12.35	11.57	10.20																	
Zr/Hf	40.55	33.83	33.30	35.33	34.56	38.37	39.21	40.23	38.63	34.20	32.28	30.84	30.02	24.35																	
Cu/Ni	1.99	0.80	0.66	0.26	1.44	0.24	1.72	0.81	0.31	0.08	2.90	1.41	6.41	2.81																	
δEu	0.58	0.47	0.50	0.45	0.42	0.43	0.70	0.66	0.71	0.54	1.69	1.19	1.32	1.17																	
ΣREE	175.0	195.9	160.2	177.6	197.3	148.5	248.1	228.3	243.9	171.3	36.22	50.85	51.91	52.37																	
(La/Yb) _N	6.39	20.98	33.71	18.78	31.01	7.65	44.70	44.65	44.59	19.32	2.20	2.46	3.15	1.94																	
LREE/HREE	6.21	12.10	16.78	12.91	16.22	7.59	24.69	23.75	26.84	13.80	2.77	3.05	3.48	2.65																	
$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	1.0012		2.9642		2.8692	2.5401	1.7967				0.1175	0.0580	0.1546	0.1532																	
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	0.746062		0.726635		0.730002	0.724720	0.720021				0.711842	0.713399	0.712495	0.715302																	
($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) _i (I_{sp})	0.740		0.710		0.714	0.710	0.710				0.711	0.713	0.712	0.714																	
$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	0.1307		0.1098		0.1072	0.1181	0.0854				0.1732	0.1578	0.1529	0.1694																	
($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$) _i	0.512168		0.512188		0.512196	0.512242	0.512165				0.5124	0.512264	0.512289	0.512217																	
$\epsilon_{\text{Nd}}(t=400\text{Ma})$	-5.80		-4.34		-4.05	-3.71	-3.54				-3.44	-5.31	-4.57	-6.82																	
$I_{2\text{DM}}(\text{Ga})$	1.62		1.50		1.47	1.45	1.43				1.43	1.58	1.52	1.70																	

注:表中FeO^r表示全铁,空白处表示未测试或计算

表4 跃进山花岗闪长岩和辉长岩的锆石 Lu-Hf 同位素组成

Table 4 Zircon Lu-Hf isotopic compositions of the Yuejinshan granodiorite (NM06-1) and gabbro (YJ05-4)

测点号	年龄 (Ma)	$\frac{^{176}\text{Yb}}{^{177}\text{Hf}}$ (corr)	$\frac{^{176}\text{Lu}}{^{177}\text{Hf}}$ (corr)	$\frac{^{176}\text{Hf}}{^{177}\text{Hf}}$ (corr)	$\pm 2\sigma$	$\left(\frac{^{176}\text{Hf}}{^{177}\text{Hf}}\right)_i$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	$\pm 2\sigma$	t_{DM} (Ga)	t_{DM2} (Ga)	$f_{\text{Lu/Hf}}$
1-1	405	0.029934	0.001079	0.282467	0.000010	0.282459	-10.79	-2.17	0.35	1.11	1.53	-0.97
1-2	409	0.016776	0.000648	0.282547	0.000009	0.282542	-7.97	0.86	0.31	0.99	1.34	-0.98
1-3	410	0.016959	0.000631	0.282481	0.000007	0.282476	-10.3	-1.45	0.25	1.08	1.49	-0.98
1-4	407	0.022229	0.000805	0.282440	0.000007	0.282434	-11.73	-3.00	0.25	1.14	1.59	-0.98
1-5	408	0.046244	0.001680	0.282474	0.000009	0.282462	-10.52	-2.00	0.31	1.12	1.52	-0.95
1-6	407	0.023001	0.000845	0.282483	0.000007	0.282477	-10.21	-1.49	0.26	1.08	1.49	-0.97
1-7	407	0.020612	0.000784	0.282465	0.000009	0.282459	-10.85	-2.11	0.33	1.11	1.53	-0.98
1-8	402	0.020787	0.000850	0.282536	0.000007	0.282530	-8.34	0.28	0.26	1.01	1.38	-0.97
2-1	402	0.016050	0.000605	0.282509	0.000008	0.282504	-9.3	-0.62	0.27	1.04	1.43	-0.98
2-2	408	0.031573	0.001159	0.282518	0.000008	0.282509	-8.97	-0.31	0.29	1.04	1.42	-0.97
2-3	399	0.011663	0.000447	0.282506	0.000009	0.282502	-9.42	-0.76	0.3	1.04	1.44	-0.99
2-4	402	0.018671	0.000737	0.282483	0.000008	0.282478	-10.2	-1.56	0.28	1.08	1.49	-0.98
2-5	410	0.017333	0.000665	0.282519	0.000009	0.282513	-8.96	-0.12	0.32	1.03	1.41	-0.98
2-6	403	0.027923	0.001010	0.282559	0.000008	0.282551	-7.55	1.05	0.27	0.98	1.33	-0.97
2-7	414	0.017908	0.000694	0.282509	0.000008	0.282504	-9.29	-0.37	0.29	1.04	1.43	-0.98
2-8	424	0.009730	0.000377	0.282524	0.000008	0.282521	-8.79	0.44	0.28	1.01	1.38	-0.99
2-9	405	0.009823	0.000375	0.282479	0.000008	0.282476	-10.36	-1.55	0.28	1.08	1.49	-0.99
2-10	411	0.011475	0.000442	0.282472	0.000008	0.282469	-10.6	-1.68	0.27	1.09	1.51	-0.99
2-11	413	0.013677	0.000533	0.282510	0.000008	0.282506	-9.26	-0.31	0.29	1.04	1.42	-0.98
2-12	410	0.016460	0.000618	0.282501	0.000008	0.282496	-9.58	-0.73	0.3	1.05	1.45	-0.98
2-13	403	0.012149	0.000462	0.282463	0.000008	0.282459	-10.93	-2.19	0.29	1.1	1.53	-0.99
2-14	406	0.018982	0.000725	0.282541	0.000009	0.282535	-8.17	0.57	0.33	1	1.36	-0.98
2-15	425	0.021906	0.000824	0.282528	0.000008	0.282521	-8.63	0.49	0.28	1.02	1.38	-0.98
2-16	397	0.007417	0.000313	0.282470	0.000009	0.282468	-10.68	-2.03	0.31	1.09	1.52	-0.99

注:测点 1-1 ~ 1-8 为花岗闪长岩 (NM06-1) 样品,测点 2-1 ~ 2-16 为辉长岩 (YJ05-4) 样品,其中 2-8 和 2-15 为锆石继承核的测点. 表中相关参数的计算公式为: $\varepsilon_{\text{Hf}}(0) = ((^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_s / (^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0} - 1) \times 10000$, $f_{\text{Lu/Hf}} = (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_s / (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} - 1$, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = ((^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_s - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_s \times (e^{\lambda t} - 1)) / ((^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} \times (e^{\lambda t} - 1)) - 1) \times 10000$, $t_{\text{DM}} = 1/\lambda \times (1 + ((^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_s - (^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}) / ((^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_s - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}))$, $t_{\text{DM2}} = t_{\text{DM}}(\text{Hf}) - (t_{\text{DM}}(\text{Hf}) - t) \times ((f_{\text{CC}} - f_s) / (f_{\text{CC}} - f_{\text{DM}}))$, $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_s$ 和 $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_s$ 为样品测量值, $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} = 0.0332$, $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0} = 0.282772$ (Blichert-Toft and Albarede, 1997), $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} = 0.0384$ and $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} = 0.28325$ (Griffin *et al.*, 2000), $f_{\text{CC}} = -0.548$, $f_{\text{DM}} = 0.16$, t 为锆石结晶时间, $\lambda = 1.865 \times 10^{-11} \text{ yr}^{-1}$ (Soderland *et al.*, 2004)

花岗闪长岩样品 2 件以及辉长岩 4 件,其测试结果及计算得到的相关参数可见表 3. 其中,二长花岗闪长岩样品的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值 (I_{Sr}) 变化范围较大,为 0.710 ~ 0.740,其 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值较低,为 -4.05 ~ -5.80, $t_{2\text{DM}}$ 为 1.47 ~ 1.62Ga; 花岗闪长岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值 (I_{Sr}) 为 0.710,其 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值相对较高,为 -3.54 ~ -3.71, $t_{2\text{DM}}$ 为 1.43 ~ 1.45Ga; 辉长岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值 (I_{Sr}) 总体较高, I_{Sr} 为 0.711 ~ 0.714,其 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值变化相对较大,为 -3.44 ~ -6.82, $t_{2\text{DM}}$ 为 1.43 ~ 1.70Ga. 锆石 Lu-Hf 同位素分析共测试花岗闪长岩样品 8 个点 (典型的测点位置可见图 6), 辉长岩样品 16 个点 (有效点 14 个,典型的测点位置可见图 7), 具体的测试结果和计算得到的相关参数可见表 4. 其中,花岗闪长岩样品的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 变化在 -3.00

~ 0.86 之间, t_{DM2} 为 1.34 ~ 1.59Ga; 辉长岩的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 变化在 -2.19 ~ 1.05 之间, t_{DM2} 为 1.33 ~ 1.53Ga.

4 讨论

4.1 年代学意义

关于跃进山岩体的形成时代,前人开展了不少工作. 最初,1:5 万金水口幅地质图 (青海省区调综合地质大队, 1996) 根据二长花岗闪长岩的全岩 Sm-Nd 同位素年龄 (1295Ma) 判断该岩体的形成时代为中元古代. 随后张建新等 (2003) 和龙晓平等 (2006) 分别利用 SHRIMP 和 LA-ICP-MS 获得跃进山以西金水口含堇青石花岗岩的锆石 U-Pb 年龄为 402 ±

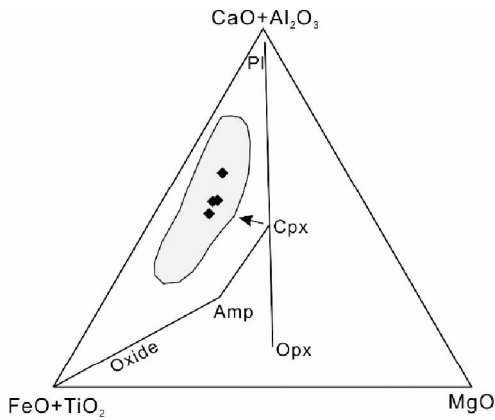


图 11 (CaO + Al₂O₃)-(FeO^T + TiO₂)-MgO 图解(底图据 Zhou *et al.*, 2005)

图中,Pl 表示斜长石,Cpx 表示单斜辉石,Opx 表示斜方辉石;阴影部分表示攀枝花富 Fe-Ti 辉长岩(数据据 Zhou *et al.*, 2005),Pl 和 Cpx 组成的线代表传统的辉长岩变化范围,箭头表示富 Fe 趋势

Fig. 11 (CaO + Al₂O₃)-(FeO^T + TiO₂)-MgO diagram of the Yuejinshan gabbros (after Zhou *et al.*, 2005)

6Ma 或 411 ± 17 Ma,表明该岩石的形成时代应为早泥盆世。然而,对于该岩体其他三个岩石单元一直缺乏精确的年代学工作。本次研究利用锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年获得花岗闪长岩的形成年龄为 407 ± 3 Ma,辉长岩的形成年龄为 406 ± 3 Ma,与金水口含堇青石花岗岩的锆石 U-Pb 年龄基本一致。由于二长花岗岩的捕获锆石过多和测试仪器的限制,因此此次无法获得其准确的年龄。然而,野外露头的观察显示二长花岗岩与花岗闪长岩的接触界限模糊,接触处二者相互穿插与捕获,这表明两者的形成应近于同时。综合上述认识,可以判断跃进山岩体形成时代应为早泥盆世。

值得注意的是,本文研究的跃进山早泥盆世岩浆活动并不是一个孤立的岩浆事件,在东昆仑造山带的东段和西段同样存在着大量早泥盆世的岩浆活动记录。在东昆仑造山带的东段地区,整个早古生代侵入岩的分布中,早泥盆世侵入岩面积可达 60% 左右,除了跃进山早泥盆世侵入岩外,本项目组利用 LA-ICP-MS 对该区域内其他典型的早泥盆世岩体进行准确的锆石 U-Pb 定年,获得金水口以西黑熊沟花岗闪长岩的锆石 U-Pb 年龄为 408 ± 5 Ma,闪长岩的锆石 U-Pb 年龄为 409 ± 5 Ma,大格勒富含暗色微粒包体的二长花岗岩的锆石 U-Pb 年龄为 403 ± 3 Ma(据马昌前等,未刊资料)。在东昆仑造山带的西段地区,祁漫塔格喀雅克登杂岩体中辉长岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 403 ± 7 Ma(谌宏伟等,2006);茶德尔塔格西英云闪长岩的锆石 U-Pb 年龄为 413 ± 14 Ma,阿尔格山北英云闪长岩的锆石 U-Pb 年龄为 403 ± 3 Ma,塔鹤托坂日花岗闪长岩黑云母⁴⁰Ar-³⁹Ar 坪年龄为 406 ± 3 Ma,喀雅克登塔格石英闪长岩和二长花岗岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄分别为 408 ± 8 Ma 和 408 ± 5 Ma,祁漫塔格山北侧东沟二长花

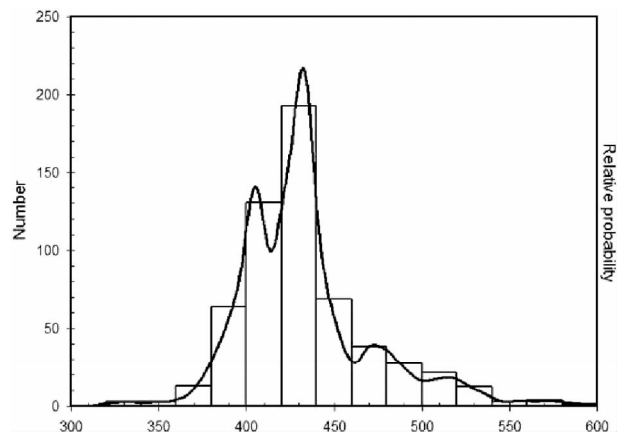


图 12 东昆仑造山带早古生代岩浆岩锆石 U-Pb 年龄统计直方图

图中 673 个锆石 U-Pb 定年数据分别据本文、马昌前等未刊资料、崔美慧等(2011)、高永宝和李文渊(2011)、高晓峰等(2010)、张亚峰等(2010)、张耀玲等(2010a)、周春景等(2010)、陆露等(2010)、龙晓平等(2006)、任军虎等(2009)、谌宏伟等(2006)和张建新等(2003)

Fig. 12 The histogram of zircon U-Pb ages of Early Paleozoic magmatic rocks in the Eastern Kunlun Orogen

岗岩的锆石 U-Pb 年龄为 410 ± 2 Ma(转引自赵振明等,2008);祁漫塔格地区石英二长闪长岩和二长花岗岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄分别为 408 ± 2 Ma 和 408 ± 5 Ma(肖庆辉等,2009)。此外,对东昆仑造山带早古生代岩浆岩中现已测定的 673 个锆石 U-Pb 年龄数据进行统计并作图,在年龄直方图上出现了两个明显的峰值(图 12),分别为 433Ma 和 405Ma,同样表明早泥盆世时期整个东昆仑造山带应存在大规模的岩浆事件。

4.2 岩石成因

4.2.1 花岗质岩石成因

本次研究的跃进山岩体中花岗质岩石类型较多,成分相对复杂,因此准确地识别这些花岗质岩石的成因类型,对于深入了解跃进山岩体的成因机制及构造背景具有非常重要的意义。该岩体中二长花岗岩和花岗闪长岩中均不含堇青石,具有相对高的钠含量(Na₂O 含量分别为 3.19% ~ 3.52% 和 2.61% ~ 3.94%),A/CNK(分别为 1.03 ~ 1.07 和 1.05 ~ 1.12)均大于 1.0 但多数小于 1.1,各元素氧化物含量与 SiO₂ 含量的协变图大多具有线性的关系(图 9),P₂O₅ 随着 SiO₂ 的增加而降低符合 I 型花岗岩的演化趋势(Wolf *et al.*, 1994;Chappell *et al.*, 1999),这些特征与典型的 S 型花岗岩相区别(Chappell and White, 1974, 2001)。但是其 CIPW 标准矿物计算中同样出现刚玉分子,含量分别为 0.62% ~ 1.49% 和 1.21% ~ 1.70%,多数大于 1%,矿物成分缺少角闪石,与典型的 I 型花岗岩具有较大的区别(Chappell and

White, 1974, 2001), 具有 I-S 型过渡的特征。然而, 余能等 (2005) 的研究结果显示, 含堇青石花岗岩含有堇青石和石榴子石等富铝矿物, 具有相对低的钠 (Na_2O 含量为 1.11% ~ 2.62%), A/CNK 值 (1.12 ~ 2.05) 大于 1.1, CIPW 标准矿物计算中出现刚玉分子, 并且其含量 (1.21% ~ 6.54%) 均大于 1%, 为典型的 S 型花岗岩 (Chappell and White, 1974; 吴福元等, 2007)。

花岗岩的多样性主要取决于源岩的特征 (张旗等, 2008)。大量实验岩石学资料显示, 不同的源岩可以熔出不同的花岗质岩浆 (Gerdes *et al.*, 2000; Altherr *et al.*, 2000; Topuz *et al.*, 2005)。关于 I 型花岗岩的源岩, 最初被认为是地壳深部中基性变火成岩 (Chappell and White, 1974; Chappell, 1988)。然而, 近几年基于锆石 Lu-Hf 和 O 同位素的研究结果发现, 受幔源岩浆改造的变沉积物部分熔融同样可以形成 I 型花岗岩 (Kemp *et al.*, 2007), 此外, 在地壳重熔过程中, 源岩中沉积物贡献的减少和变火成岩等成分的增多同样也可以使岩浆成分由 S 型向 I 型转变, 形成典型的 I 型或者 I-S 过渡类型岩浆 (Collins and Richards, 2008)。跃进山二长花岗岩和花岗闪长岩相对富集 LILE 和 LREE, 亏损 HFSE, 不相容元素 Nb-Ta-Ti 具明显的负异常 (图 10), 具有相对高的 I_{Sr} 值 (分别为 0.710 ~ 0.740 和 0.710)、相对低的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值 (分别为 -4.05 ~ -5.80 和 -3.54 ~ -3.71) 和偏古老的 $t_{2\text{DM}}$ (分别为 1.47 ~ 1.62Ga 和 1.43 ~ 1.45Ga), 类似于地壳物质的特征。但是值得注意的是, 在花岗闪长岩样品中, 除 NM05-1 和 NM06-7 外, 其余 3 个样品 Nb/Ta 值 (16.39 ~ 22.60), 接近或高于幔源岩石的 Nb/Ta 值 (约 17.5, Hofmann, 1988; Green, 1995), 明显高于壳源岩石的 Nb/Ta 值 (约为 11, Taylor and McLennan, 1985; Green, 1995), 并且所有样品的 Zr/Hf 值 (34.20 ~ 40.23) 接近或高于幔源岩石 (约 36.3, Hofmann, 1988; Green, 1995), 明显高于地壳岩石的 Zr/Hf 值 (约 33, Taylor and McLennan, 1985; Green, 1995); 二长花岗岩样品 Nb/Ta 值 (8.31 ~ 13.30) 和 Zr/Hf 值 (33.30 ~ 40.55) 多数同样明显高于地壳岩石。另外, 花岗闪长岩样品具有相对高的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值, 其变化在 -3.00 ~ 0.86。上述特征表明跃进山花岗闪长岩与二长花岗岩的成因并非由单纯的老地壳物质重熔, 其形成可能有地幔物质的参与。与二长花岗岩相比, 花岗闪长岩具有明显高的 $\text{Mg}^\#$ 、Nb/Ta 和 Zr/Hf 值, 相对低的 I_{Sr} 值和相对高的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值 (图 13) 及偏年轻的 $t_{2\text{DM}}$, 应反映古老地壳物质的熔体与幔源熔体不同比例混合的结果。但是野外和镜下均未发现明显的岩浆混合证据 (如暗色微粒包体和各种不平衡结构等), 暗示着幔源和壳源两种熔体的成分应发生了较为均一的混合。二长花岗岩和花岗闪长岩均高硅、富碱, 明显亏损 Ba、Sr、P、Ti、Eu、Nb、Ta 等元素, 并且具有高的分异指数 (DI 分别为 85 ~ 90 和 77 ~ 83), 充分说明两种岩石均经历了较高分异演化 (邱检生等, 2008; 朱弟成等, 2009)。其中, P 的亏损与磷灰石的分离结晶作用有关; Nb、Ta 和 Ti 的亏损与富钛矿物

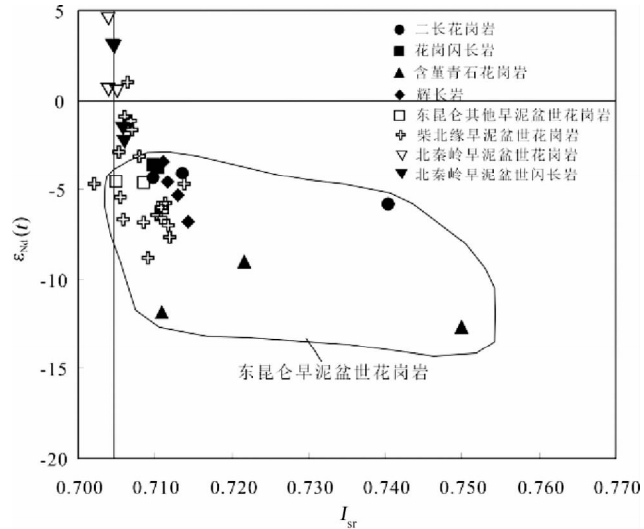


图 13 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ - I_{Sr} 协变图解

图中含堇青石花岗岩数据引自余能等 (2005), 东昆仑其他早泥盆世侵入岩数据据马昌前等未刊资料; 柴北缘早泥盆世花岗岩数据据吴锁平 (2008) 和马昌前等未刊资料; 北秦岭早泥盆世花岗岩和闪长岩分别据田伟和魏春景 (2005) 和张宗清等 (2006)

Fig. 13 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ vs. I_{Sr} diagram

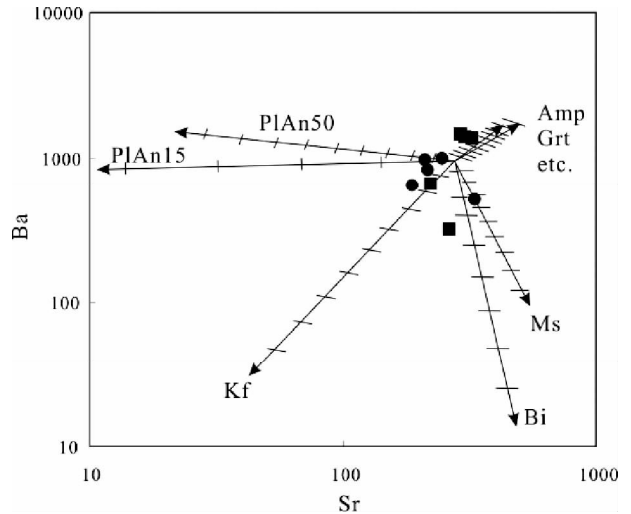
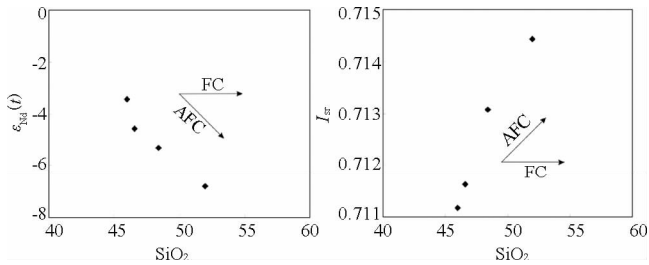


图 14 Ba-Sr 图解 (底图据 Li *et al.*, 2007)

图中 P/An50-斜长石 ($\text{An} = 50$); P/An15-斜长石 ($\text{An} = 15$). Kf-钾长石; Bi-黑云母; Ms-白云母; Amp-角闪石; Grt-石榴子石; 矢量表示主要的造岩矿物发生了 50% 的分离结晶作用. 图例同图 13

Fig. 14 Ba-Sr diagram (after Li *et al.*, 2007)

相 (如钛铁矿和金红石等) 有关; Eu 的亏损与斜长石或钾长石的分离结晶作用有关, Ba 和 Sr 亏损基本上支持斜长石和钾长石的分离结晶作用 (图 14); MgO 和 FeO^{T} 随 SiO_2 的降低 (图 9) 可能与黑云母或角闪石的分离结晶作用有关。因此, 本文认为跃进山二长花岗岩和花岗闪长岩的形成应经历了两个阶段, 首先是壳源熔体与幔源熔体在源区发生不同程

图 15 跃进山辉长岩 SiO_2 和 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 以及 I_{Sr} 协变图Fig. 15 SiO_2 vs. $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ and I_{Sr} diagram

度的混合形成母岩浆,随后又经历了较高分异演化并最终固结成岩。

相对于 I 型花岗岩而言, S 型花岗岩的源区较为单一,通常为上地壳经历风化作用的沉积岩(主要是变泥质岩和变杂砂岩为主)(Chappell and White, 1974; Harris, 2000)。余能等(2005)的研究显示,含堇青石花岗岩富集 LILE 和 LREE,亏损 HFSE(Nb、Ta、Ti 等),具有相对高的 I_{Sr} (0.711 ~ 0.750) 和低的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(-9.04 ~ -11.84)(图 13),其 $t_{2\text{DM}}$ (1.88 ~ 2.11 Ga) 与古元古代金水口群白沙河组的形成年龄基本一致,表明该岩石应主要为古元古代金水口群白沙河组变沉积物部分熔融的产物。Sylvester(1998)根据脱水熔融实验的成果提出可用 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值可以作为判断强过铝质花岗岩(特别是 S 型花岗岩)源区的重要指标,通常由变泥质岩熔融形成的强过铝花岗岩的 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值一般小于 0.3,而由变杂砂岩熔融形成的强过铝花岗岩的 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值一般大于 0.3。利用余能等(2005)的数据重新计算 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值为 0.53 ~ 0.92,明显大于 0.3,因此可以综合判断跃进山含堇青石花岗岩应为元古代金水口群白沙河组中变沉积物(主要是变杂砂岩)部分熔融的产物。

4.2.2 辉长岩成因

跃进山辉长岩具有相对高的 I_{Sr} (0.711 ~ 0.714) 和相对低的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(-3.44 ~ -6.82),显示了富集地幔的特征(图 13)。将辉长岩样品在 SiO_2 和 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 以及 I_{Sr} 协变图(图 15)投影发现, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值与 SiO_2 呈现明显的负线性关系,而 I_{Sr} 却与 SiO_2 呈现明显的正相关关系,表明该辉长岩的形成过程中受到了地壳物质的混染,经历了较为明显的 AFC 过程(Halama *et al.*, 2004; DePaolo, 1981)。但是,锆石 Lu-Hf 同位素研究结果显示辉长岩的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值相对集中,为 -2.19 ~ 1.05, Hf 的二阶段模式年龄($t_{2\text{DM}}$)为 1.33 ~ 1.53 Ga 远大于其形成年龄($406 \pm 3\text{Ma}$),这表明该辉长岩受地壳混染的程度较低,应来自富集地幔的源区。此外,该辉长岩具有明显的 Nb、Ta 和 Ti 的正异常(图 10),反映其地壳混染对辉长岩成分的影响较少。综上,可以将辉长岩的成因解释为富集地幔部分熔融产生熔体,在上升侵位的过程中与围岩发生了较低程度的混染并发生了分离结晶作用最终固结成岩。

然而,这种成因模式难以解释跃进山辉长岩显著高 Fe

和 Ti (FeO^T 为 8.17% ~ 12.70%, TiO_2 为 4.50% ~ 6.54%) 的特征(图 11), 因为由地幔部分熔融产生的富 Fe 熔体通常具有很高的密度,其很难从地幔迁移到地壳中(Zhou *et al.*, 2005)。研究表明,橄榄石、单斜辉石和斜长石等矿物的分离结晶作用会使残余的熔体更富 Fe(如 Hanski, 1992),因此国内外不少学者倾向用拉斑玄武质母岩浆的高度分异模式来解释这种富 Fe-Ti 的辉长岩,如四川攀枝花辉长岩,格陵兰 Skaergaard 辉长岩和索马里北部 Barkasan 辉长岩等(Zhou *et al.*, 2005; Brooks *et al.*, 1991; Aden *et al.*, 1996)。本文研究的跃进山辉长岩与上述地区的辉长岩的成分非常相似,具有相对高的 TiO_2 (为 4.50% ~ 6.54%)、 FeO^T (8.17% ~ 12.70%)、Cu (11.5×10^{-6} ~ 30.6×10^{-6}) 和 Cu/Ni 值(1.41 ~ 6.41),相对富集的 LREE ($(\text{La}/\text{Yb})_N$ 为 1.94 ~ 3.15, LREE/HREE 为 2.65 ~ 3.48),相对低的 $\text{Mg}^\#$ (48 ~ 50)、Cr (3.8×10^{-6} ~ 60.4×10^{-6})、Ni (1.8×10^{-6} ~ 12.5×10^{-6}) 值,这表明该辉长岩应为拉斑玄武质母岩浆经过高度结晶分异的晚期产物(Zhou *et al.*, 2005; Leshner and Stone, 1996, Leshner and Keays, 2002)。其中, Ni 相对于 Cu 亏损应与早期橄榄石的结晶分异有关(Barnes *et al.*, 1985),而 Eu 的正异常则表明斜长石在早期未发生强烈的分异。因此,本文认为辉长岩的形成应经历了如下过程:首先是富集地幔部分熔融产生低 Fe-Ti 拉斑玄武质熔体,接着这种低 Fe-Ti 熔体上升侵位至地壳同时发生分异,在这一过程中受到了地壳物质的少量混染,在经历了较高分异的结晶分异后产生高 Fe-Ti 的熔体并最终固结成岩。

4.2.3 形成的动力学机制

对跃进山岩体的成因分析表明,跃进山花岗闪长岩和二长花岗岩形成与地幔物质加入存在联系,而含堇青石花岗岩则主要是与古老地壳物质的重熔有关,其与地幔的关系似乎不大。但是利用 Waston (1979)、Waston and Harrison (1983) 锆石饱和温度公式计算估算跃进山岩体不同岩石单元的形成温度发现含堇青石花岗岩锆石饱和温度(823 ~ 853°C, 平均为 833°C)明显高于二长花岗岩(774 ~ 836°C, 平均为 800°C)和花岗闪长岩(783 ~ 832°C, 平均为 814°C)(图 16),表明该堇青石花岗岩的形成需要很高的热量,其最可能的途径应是玄武质岩浆底侵供热。因此,本文认为跃进山岩体的形成应该经过了如下过程:首先是富集地幔发生部分熔融产生玄武质岩浆,玄武质岩浆上升侵位至地壳,一方面提供热源,引起古老的地壳物质(主要是变杂砂岩)的部分熔融,产生 S 型岩浆,最终形成了含堇青石花岗岩;另一方面提供物源,注入壳源岩浆并与其发生混合作用产生 I-S 过渡型岩浆,经历较高分异的最终形成二长花岗岩和花岗闪长岩。而富 Fe-Ti 辉长岩则是玄武质岩浆经过高度演化后的晚期产物。

前文提到,跃进山侵入岩并不是一个孤立的岩浆事件,早泥盆世时期在东昆仑造山带西段以及东段的其他地区均出现大规模的岩浆活动。这些岩浆活动与跃进山侵入岩类

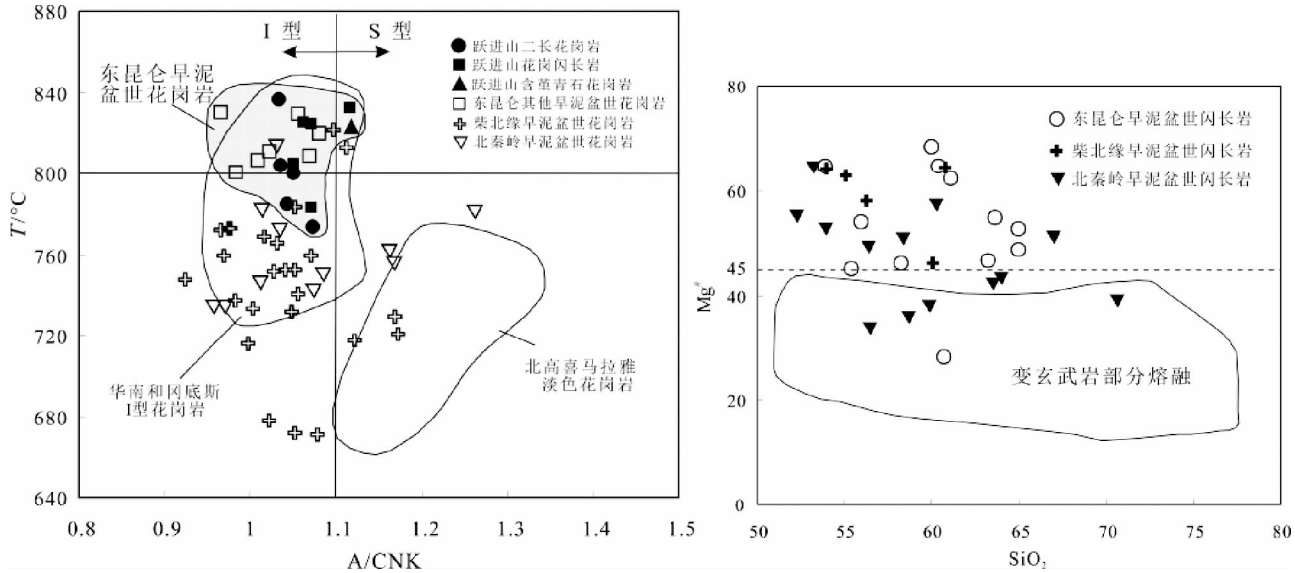


图 16 花岗岩铝饱和指数 (A/CNK)-锆石饱和温度 (T) 和闪长岩 $Mg^{\#}$ - SiO_2 图解 (据 Kaygusuz *et al.*, 2008 修改)

跃进山含堇青石花岗岩数据据余能等(2005);东昆仑其他早泥盆世花岗岩和闪长岩数据据马昌前等未刊资料和赵振明等(2008);柴北缘早泥盆世花岗岩和闪长岩数据据吴锁平(2008)、吴才来等(2004)和马昌前等未刊资料;北秦岭早泥盆世花岗岩及闪长岩数据据 Lerch *et al.* (1995)和田伟和魏春景(2005);华南和冈底斯 I 型花岗岩分别据 Li *et al.* (2007)和朱弟成等(2009);北高喜马拉雅淡色花岗岩数据据 Zhang *et al.* (2004)

Fig. 16 Alumina saturation index (A/CNK) vs. zircon saturated temperature diagram of granites and $Mg^{\#}$ - SiO_2 diagram of diorites

似,主要是以出露过铝质花岗岩(包括花岗闪长岩和二长花岗岩)、闪长岩(主要以英云闪长岩和石英闪长岩为主)和少量辉长岩为特征。其中,弱过铝质岩石均具有较高的锆石饱和温度,明显不同于北高喜马拉雅淡色花岗岩,而与华南和西藏冈底斯有幔源参与的 I 型花岗岩的锆石饱和温度类似(图 16),暗示其形成过程中可能有幔源物质的参与。而准铝质闪长岩多数具有高的 $Mg^{\#}$ 值,其 $Mg^{\#}$ 值分布在 46.3 ~ 68.7 之间,均大于 45(数据据赵振明等(2008)和马昌前等未刊资料),这些岩石不可能由变质玄武岩部分熔融产生(图 16, Altherr *et al.*, 2000),其形成应与富集地幔的部分熔融或者壳幔混合作用有关。另外,在东昆仑东段大格勒二长花岗岩体中发现了较多的暗色微粒包体,具有岩浆混合成因的特点。以上这些特征均表明,早泥盆世时期,东昆仑地区幔源岩浆活动频繁,整个地区可能处于强烈伸展的环境。

4.3 对始特提斯构造演化的指示

现有的研究认为,东昆仑造山带应主要经历了始特提斯和古特提斯两期重要演化过程。然而,由于该造山带缺乏系统的研究工作,对始特提斯洋构造演化的相关问题(如洋盆闭合、地体的碰撞以及造山事件的结束等)一直未能得到很好的解决。

已有的研究为东昆仑始特提斯洋的打开、扩张和消减的时限提供了一些资料。东昆仑始特提斯洋的打开和扩张应发生在早寒武世之前(Yang *et al.*, 1996;陆松年,2002)。早寒武世末期,始特提斯洋开始俯冲消减,东昆仑造山带的东

段和西段均出现与板块俯冲有关的岩浆与变质事件记录。如张亚峰等(2010)测定都兰可可沙地区石英闪长岩的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 515.2 ± 4.4 Ma,可能代表了昆中洋盆俯冲开始的时间。崔美慧等(2011)测定东昆仑祁漫塔格山鸭子泉岛弧闪长岩的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 480 ± 3 Ma;李怀坤等(2006)测定的昆中缝合带清水泉麻粒岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 507 ± 8.3 Ma,表明大洋岩石圈已俯冲至 40 ~ 45 km 深处发生了高温中压麻粒岩相变质作用。张建新等(2003)测定诺木洪南部金水口群中夕线黑云二长片麻岩的变质时代为 460 Ma,表明昆北带在 460 Ma 左右时发生岛弧型低角闪岩相-麻粒岩相变质。陈能松等(2002)测定对昆中断裂附近与岛弧有关的玄武质-英安质熔岩的单颗粒锆石 U-Pb 年龄为 448 ± 4 Ma,陈能松等(2000)测定香日德南部与岛弧构造有关的变质变形闪长岩的锆石 U-Pb 年龄为 446.5 ± 9.1 Ma,张耀玲等(2010a)对纳亦台群流纹岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 450.4 ± 4.3 Ma,本项目组测定胡晓钦地区具有火山弧玄武岩特征的辉长闪长岩锆石 U-Pb 年龄为 444 ± 2 Ma(据马昌前等,未刊资料)。以上均表明早寒武世末到晚奥陶世,东昆仑地区存在明显的始特提斯洋持续的俯冲消减过程。然而对于始特提斯洋何时关闭及地体碰撞何时开始等问题还存在着较多的争论。比较典型的有两种观点:一种认为是晚奥陶世,以吐木勒克蓝闪石片岩及其伴生的辉长岩(Ar-Ar 年龄为 445 ± 2 Ma)的出现作为可能代表俯冲结束和碰撞开始的标志(莫宣学等,2007);另外一种则认为晚奥陶世-早志留世时期为弧后裂解拉张阶段,以基性岩墙群、

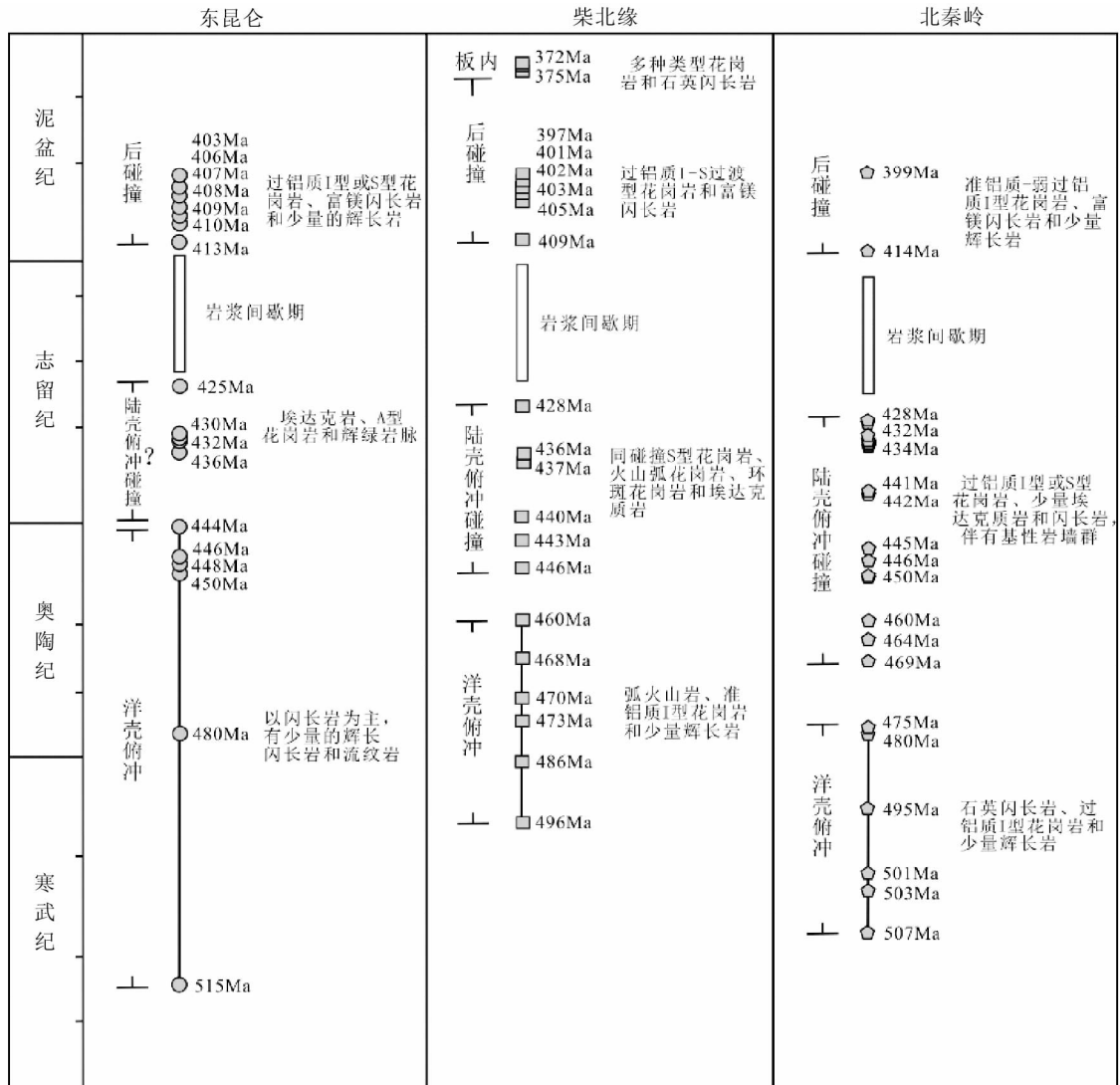


图 17 东昆仑、柴北缘和北秦岭早古生代 (Є - D) 构造-岩浆演化序列

东昆仑早古生代岩浆作用数据据本文、马昌前等未刊资料、崔美慧等(2011)、高永宝和李文渊(2011)、高晓峰等(2010)、李瑞保等(2011)、张亚峰等(2010)、张耀玲等(2010a)、陆露等(2010)、龙晓平等(2006)、任军虎等(2009)、肖庆辉等(2009)、赵振明等(2008)、谌宏伟等(2006)、张建新等(2003)和陈能松等(2002,2000);柴北缘早古生代岩浆作用数据据 Yu *et al.* (2012)、朱小辉等(2010)、吴才来等(2008)、吴锁平(2008)、袁桂邦等(2002)和马昌前等未刊资料;北秦岭早古生代岩浆作用数据据雷敏(2010)、王涛等(2009)、Yan *et al.* (2008)、李惠民等(2006)、张宗清等(2006)、田伟和魏春景(2005)、裴先治等(2003)和陈岳龙等(1999)

Fig. 17 Summary of Early Paleozoic tectonic and magmatic evolution of Eastern Kunlun, North Qiling and northern margin of Qaidam basin

A 型花岗岩和弧后复理石沉积为标志(任军虎等,2009;高晓峰等,2010;高永宝和李文渊,2011;黎敦朋等,2003),洋盆最终关闭的时间可能为中志留世(陈能松等,2002;陆露等,2010)。本项目组的工作曾在东昆仑东段发现了早志留世高钾埃达克岩,表明早志留世时期该地区地壳厚度很大,可能与地体的碰撞加厚有关,因此,本文更倾向将晚奥陶世作为洋盆主体关闭和陆壳开始俯冲碰撞的时间,基性岩墙群、A 型花岗岩和弧后复理石沉积可能只代表局部的拉张裂解,当然这仍需要更多的地质事实去验证。早泥盆世时期东昆仑

造山带东段和西段开始出现大量的过铝质花岗岩(I 型或 S 型)和闪长岩-辉长岩组合,该组合与 Bonin(2004)总结的后碰撞岩石组合(过铝质酸性岩石与准铝质镁铁质-长英质岩石共生)类似,此外这些岩石具有很强的幔源岩浆作用的印记,时代与牦牛山组伸展型磨拉石建造的形成时限($423 \pm 2 \sim 406 \pm 3$ Ma,据张耀玲等,2010b;陆露等,2010)一致,表明至少从早泥盆世开始,东昆仑地区已由碰撞挤压环境转向后碰撞的伸展环境。

位于中央造山带北部的“北中央早古生代造山带”具有

“多地体、多岛弧”的地体构架和“多俯冲和多碰撞造山”的动力学作用(许志琴等,2006),已经得到了众多资料的证实。然而对于其不同地区(包东昆仑、秦岭和柴北缘等)的始特提斯俯冲造山作用是否具有统一的时间、演化序列和动力学体系等问题的认识还不是很清楚。前人的工作已经利用造山带花岗岩类(包括花岗岩和闪长岩等)组合和时空分布特征划分出北秦岭和柴北缘两个地区的始特提斯俯冲造山过程(王涛等,2009;雷敏,2010;吴才来等,2008;吴锁平,2008)。因此本文主要是在此基础上,结合区域上其他资料,对上述划分方案作进一步的补充(图17)。其中,北秦岭始特提斯造山过程为:中寒武世-早奥陶世(507~475Ma)为洋壳俯冲阶段,出现石英闪长岩、过铝质I型花岗岩和少量辉长岩;中奥陶世-早志留世末(469~428Ma)为陆壳俯冲碰撞阶段,出现过铝质I型或S型花岗岩、少量的埃达克岩和闪长岩,并伴生有基性岩墙群;早泥盆世(415~400Ma)为后碰撞阶段,出现准铝质-弱过铝质I型花岗岩、富镁闪长岩和少量辉长岩。柴北缘始特提斯造山过程为:晚寒武世-中奥陶世(496~460Ma)为洋壳俯冲阶段,产生弧火山岩、过铝质I型花岗岩和少量辉长岩;晚奥陶世-早志留世末(446~428Ma)为块体拼合阶段,出现同碰撞S型花岗岩、火山弧花岗岩、环斑花岗岩和埃达克岩;早泥盆世(410~395Ma)为后碰撞阶段,出现过铝质I-S过渡型花岗岩和富镁闪长岩;晚泥盆世晚期(375~370Ma)为板内阶段,出现多种类型的花岗岩和石英闪长岩。将东昆仑与北秦岭、柴北缘进行对比可以发现(图17),东昆仑初始俯冲的时间最早,北秦岭次之,柴北缘最晚;尽管目前对东昆仑洋盆关闭和陆壳开始俯冲碰撞的时间还不确定,但是在中泥盆世-早志留世时期,三个地区均出现明显的岩浆间断,可能暗示着该时期为三个地区陆壳的主碰撞期;早泥盆世时期,三个地区均出现较多的岩浆活动,并且以出露过铝质花岗岩、高镁闪长岩或辉长岩为特征,其中北秦岭花岗岩和闪长岩均具有相对高的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值,部分为正值(图13),表明其形成可能有深部地幔物质的参与。三个地区早泥盆世花岗岩多数具有高的锆石饱和温度,闪长岩多数富镁($Mg^{\#}$ 大于45,图16),均显示了很强的幔源岩浆作用印记,此外东昆仑早泥盆世花岗岩的饱和温度明显高于秦岭和柴北缘花岗岩(图16),可能反映该区存在更多的幔源岩浆底侵供热。以上均表明,早泥盆世时期,三个地区存在大量的幔源岩浆活动,这一时期相关地体的碰撞拼合已完成,区域构造体制开始由挤压转向伸展,并且在东昆仑地区伸展作用更强烈。

5 结论

本文在对跃进山岩体的岩石学、锆石 U-Pb 年代学和 Sr-Nd-Hf 同位素的研究基础上,结合区域上的研究成果,分析跃进山岩体的成因并探讨东昆仑造山带及中央造山带始特提斯构造演化过程,获得了以下结论:

(1) 利用 LA-ICP-MS U-Pb 定年方法获得花岗闪长岩的形成年龄为 $407 \pm 3\text{Ma}$, 辉长岩的形成年龄为 $406 \pm 3\text{Ma}$;

(2) 跃进山花岗质岩石的形成均与幔源岩浆作用关系密切。幔源岩浆诱发古老的地壳物质部分熔融产生 S 型岩浆最终形成含基青石花岗岩,同时与壳源熔体发生混合产生 I-S 过渡型岩浆并经历较高分异最终形成二长花岗岩和花岗闪长岩。

(3) 跃进山富 Fe-Ti 辉长岩为富集地幔部分熔融产生熔体经过高度分异演化的晚期产物,其形成过程中受到了地壳物质的混染;

(4) 早泥盆世为中央造山带(特别是东昆仑、北秦岭和柴北缘)始特提斯构造体制转换的关键时期,这一时期相关地体的碰撞拼合已基本完成,区域构造体制开始由挤压转向伸展。

致谢 研究工作得到了许志琴院士和杨经绥研究员的关心与指导;文章撰写得到了廖群安教授的指导与帮助;野外地质考察和室内工作得到斯提瓦力地、郭盼、何优靖和李志磊等的帮助;样品处理与实验测试得到了中国地质大学(武汉)刘勇胜、胡兆初、陈海红和周炼等老师的帮助与指导;吴才来研究员和王涛研究员认真审阅本文,并提供了非常宝贵的意见;在此特表谢意。

References

- Aden AJ and Frizzo P. 1996. Geochemistry and origin of low and high TiO_2 mafic rocks in the Barkasan complex: A comparison with common Neoproterozoic gabbros of northern Somali crystalline basement. *Journal of African Earth Sciences*, 22(1): 43–54
- Altherr R, Holl A, Hegner E, Langer C and Kreuzer H. 2000. High-potassium, calc-alkaline I-type plutonism in the European Variscides: Northern Vosges (France) and northern Schwarzwald (Germany). *Lithos*, 50(1–3): 51–73
- Barbarin B. 1999. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments. *Lithos*, 46(3): 605–626
- Barnes SJ, Naldrett AJ and Gorton M. 1985. The origin of the fractionation of platinum-group elements in terrestrial magmas. *Chemical Geology*, 53: 303–323
- Belousova EA, Griffin WL, O'Reilly SY and Fisher NI. 2002. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 143(5): 602–622
- Blichert-Toft J and Albarède F. 1997. The Lu-Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system. *Earth and Planetary Science Letters*, 148: 243–258
- Bonin B, Azzouni-Sekkal A, Bussy B and Ferrag S. 1998. Alkali-calcic and alkaline post-orogenic (PO) granite magmatism: Petrologic constraints and geodynamic settings. *Lithos*, 45: 45–70
- Bonin B. 2004. Do coeval mafic and felsic magmas in post-collisional to within-plate regimes necessarily imply two contrasting, mantle and crustal, source? A review. *Lithos*, 78: 1–24
- Brooks CK, Larsen IM and Nielsen TFD. 1991. Importance of iron-rich

- tholeiitic magmas at divergent plate margins: A reappraisal. *Geology*, 19: 269 – 272
- Chappell BW and White AJR. 1974. Two contrasting granite types. *Pacific Geology*, 8: 173 – 174
- Chappell BW. 1988. Origin of infracrustal (I-type) granite magmas. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 79: 71 – 86
- Chappell BW. 1999. Aluminium saturation in I- and S- type granites and the characterization of fractionated haplogranites. *Lithos*, 46: 535 – 551
- Chappell BW and White AJR. 2001. Two contrasting granite types: 25 years later. *Australian Journal of Earth Sciences*, 48(4): 489 – 499
- Chen HW, Luo ZH, Mo XX, Zhang XT, Wang J and Wang BZ. 2006. SHRIMP ages of Kayakedengtage complex in the East Kunlun Mountains and their geological implications. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 25(1): 25 – 32 (in Chinese with English abstract)
- Chen NS, Sun M, Zhang KX and Zhu YH. 2000. ^{40}Ar - ^{39}Ar and U-Pb ages of metadiorite from the East Kunlun Orogenic Belt: Evidence for Early Paleozoic magmatic zone and excess argon in amphibole minerals. *Chinese Science Bulletin*, 45 (21): 2337 – 2342 (in Chinese)
- Chen NS, He L, Sun M, Wang GC and Zhang KX. 2002. Precise timing of the Early Paleozoic metamorphism and thrust deformation in the Eastern Kunlun Orogen. *Chinese Science Bulletin*, 47(8): 628 – 631 (in Chinese)
- Chen YL. 1999. *Geochemistry of Granitoids from the Eastern Tianshan Mountains and the Northern Qinling Belt*. Beijing: Geological Publishing House, 1 – 141 (in Chinese)
- Collins WJ and Richards SW. 2008. Geodynamic significance of S-type granite in circum-Pacific orogens. *Geology*, 36(7): 559 – 562
- Cui MH, Meng FC and Wu XK. 2011. Early Ordovician island arc of Qimantag Mountain, eastern Kunlun; Evidences from geochemistry, Sm-Nd isotope and geochronology of intermediate-basic igneous rocks. *Acta Petrologica Sinica*, 27(11): 3365 – 3379 (in Chinese with English abstract)
- Deng JF, Luo ZH and Su SG, *et al.* 2004. *Petrogenesis, Tectonic Setting and Mineralization*. Beijing: Geological Publishing House, 1 – 381 (in Chinese)
- DePaolo DJ. 1981. Trace element and isotopic effects of combined wallrock assimilation and fractional crystallization. *Earth and Planetary Science Letters*, 53: 189 – 202
- Gao S, Rudnick RL, Yuan HL, Liu XM, Liu YS, Xu WL, Ling WL, Ayers J, Wang XC and Wang QH. 2004. Recycling lower continental crust in the North China Craton. *Nature*, 432(7019): 892 – 897
- Gao XF, Xiao PX, Xie CR, Fan LY, Guo L and Xi RG. 2010. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating and geological significance of Bashierxi granite in the eastern Kunlun area, China. *Geological Bulletin of China*, 29(7): 1001 – 1008 (in Chinese with English abstract)
- Gao YB and Li WY. 2011. Petrogenesis of granites containing tungsten and tin ores in the Baiganhu deposit, Qimantage, NW China: Constraints from petrology, chronology and geochemistry. *Geochimica*, 40(4): 324 – 336 (in Chinese with English abstract)
- Gerdes A, Montero P and Bea F. 2002. Peraluminous granites frequently with mantle-like isotope compositions the continental-type Murzinka and Dzhabyk batholiths of the eastern Urals. *Int. J. Earth Sciences (Geol. Rundsch)*, 91: 3 – 19
- Green TH. 1995. Significance of Nb/Ta as an indicator of geochemical processes in the crust-mantle system. *Chemical Geology*, 120: 347 – 359
- Griffin WL, Pearson NJ, Belousova E, Van Ach-terbergh E, O' Reilly SY and Shee SR. 2000. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(1): 133 – 147
- Halama R, Marks M, Brüggmann G, Siebel W, Wenzel T and Markl G. 2004. Crustal contamination of mafic magmas: Evidence from a petrological, geochemical and Sr-Nd-Os-O isotopic study of the Proterozoic Isortoq dike swarm, South Greenland. *Lithos*, 74: 199 – 232
- Hanski EJ. 1992. Petrology of the Pechenga ferropicrites and cogenetic, Ni-bearing gabbro-wehrlite intrusions, Kola Peninsula, Russia. *Geological Survey of Finland Bulletin*, 367: 192
- Harris N, Vance D and Ayres M. 2000. From sediment to granite: Timescales of anatexis in the upper crust. *Chemical Geology*, 162(2): 155 – 167
- Hofmann AW. 1988. Chemical differentiation of the Earth: The relationship between mantle, continental crust, and oceanic crust. *Earth and Planetary Science Letters*, 90(3): 297 – 314
- Hu ZC, Gao S, Liu YS, Hu SH, Chen HH and Yuan HL. 2008. Signal enhancement in laser ablation ICP-MS by addition of nitrogen in the central channel gas. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 23(8): 1093 – 1101
- Kaygusuz A, Siebel W, Sen C and Stair M. 2008. Petrochemistry and petrology of I-type granitoids in an arc setting: The composite Torul pluton, Eastern Pontides, NE Turkey. *International Journal of Earth Sciences*, 97: 739 – 764
- Kemp AIS, Hawkesworth CJ, Foster GL, Paterson A, Woodhead JD, Hergt JM, Gray CM and Whitehouse MJ. 2007. Magmatic and crustal differentiation history of granitic rocks from Hf-O isotope in zircon. *Science*, 315: 980 – 983
- Le Maitre RW, Bateman P, Dudek A, Keller J, Lameyre J, Le Bas MJ, Sabine PA, Schmid R, Sorensen H, Streckeisen A, Woolley AR and Zanettin B. 1989. *A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms: Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks*. Oxford: Blackwell Scientific
- Lei M. 2010. *Petrogenesis of granites and their relation to tectonic evolution of orogen in the east part of Qingling orogenic belt*. Ph. D. Dissertation. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 1 – 162 (in Chinese with English summary)
- Lerch MF, Xue F, Kröner A, Zhang GW and Tod W. 1995. A Middle Silurian-Early Devonian magmatic arc in the Qinling Mountains of Central China. *The Journal of Geology*, 103(4): 437 – 449
- Leshner CM and Stone WE. 1996. *Exploration geochemistry of komatiites*. In: Wyman DA (ed.). *Igneous Trace Element Geochemical Applications for Massive Sulphide Exploration*. Geological Association of Canada, Short Course Notes, 12: 153 – 204
- Leshner CM and Keays RR. 2002. Komatiite-associated Ni-Cu-(PGE) deposits. In: Cabri LJ (ed.). *The Geology, Geochemistry, Mineralogy, Mineral Beneficiation of the Platinum-Group Elements*. Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, Special Volume, 54: 579 – 618
- Li DP, Li J, Zhang HJ, Li XL, Zhou XK and Du SX. 2003. The turbidite of the Silurian Baiganhu Formation in the Qimantage mountain Eastern Kunlun. *Geology of Shaanxi*, 21(2): 39 – 44 (in Chinese with English abstract)
- Li HK, Lu SN, Xiang ZQ, Zhou HY, Guo H, Song B, Zheng JK and Gu Y. 2006. SHRIMP U-Pb zircon age of the granulite from the Qingshuiquan area, Central Eastern Kunlun Suture Zone. *Earth Science Frontiers*, 13(6): 311 – 321 (in Chinese with English abstract)
- Li HM, Chen ZH, Xiang ZQ, Li HK, Lu SN, Zhou HY and Song B.

2006. Difference in U-Pb isotope ages between baddeleyite and zircon in metagabbro from the Fushui complex in the Shangnan-Xixia area, Qinling orogen. *Geological Bulletin of China*, 25(6): 653 – 659 (in Chinese with English abstract)
- Li RB, Pei XZ, Li ZC, Liu ZQ, Chen YX, Wang XL, Wei FG, Zhang G, Yang ZZ. 2011. The change of tectonic framework of East Kunlun orogen at the late stage of Early Paleozoic: Constrained by geochemistry and geochronology of Helegangna alkali granites. Xi'an; Abstracts of the National Symposium on Petrology and Geodynamics, 330 (in Chinese)
- Li XH, Li ZX, Li WX, Liu Y, Yuan C, Wei GJ and Qi CS. 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 founding of a subducted flat-slab? *Lithos*, 96: 186 – 204
- Liu YS, Hu ZC, Gao S, Günther D, Xu J, Gao CG and Chen HH. 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
- Liu YS, Zong KQ, Kelemen PB and Gao S. 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: 133 – 153
- Liu YS, Gao S, Hu ZC, Gao CG, Zong KQ and Wang DB. 2010a. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths. *Journal of Petrology*, 51(1–2): 537 – 571
- Liu YS, Hu ZC, Zong KQ, Gao CG, Gao S, Xu J and Chen HH. 2010b. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS. *Chinese Science Bulletin*, 55(15): 1535 – 1546
- Long XP, Jin W and Yu N. 2005. Raman spectroscopic study of zircons in the Jinshuikou gneissic in east Golmud, East Kunlun. *Geological Bulletin of China*, 24(1): 36 – 40 (in Chinese with English abstract)
- Long XP, Jin W, Ge WC and Yu N. 2006. Zircon U-Pb geochronology and geological implications of the granitoids in Jinshuikou, East Kunlun, NW China. *Geochimica*, 35(4): 333 – 345 (in Chinese with English abstract)
- Lu L, Wu ZH, Hu DG, Barosh PJ, Hao S and Zhou CJ. 2010. Zircon U-Pb ages for rhyolite of the Maoniushan Formation and its tectonic significance in the East Kunlun Mountains. *Acta Petrologica Sinica*, 26(4): 1150 – 1158 (in Chinese with English abstract)
- Lu SN. 2002. *Precambrian Geology in Northern Tibetan Plateau*. Beijing: Geological Publishing House, 1 – 125 (in Chinese with English abstract)
- Lu YF. 2004. Geokit-Ageochemical toolkit for Microsoft Excel. *Geochimica*, 33(5): 459 – 464 (in Chinese with English abstract)
- Ludwig KR. 2003. Users manual for Isoplot 3.00: A geochronological toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochron. Cent. Spec. Pub., 25 – 32
- Middlemost EAK. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system. *Earth-Science Reviews*, 37: 215 – 224
- Mo XX, Luo ZH, Deng JF, Yu XH, Liu CD, Chen HW, Yuan WM and Liu Yunhua. 2007. Granitoids and crustal growth in East-Kunlun orogenic Belt. *Geological Journal of China Universities*, 13(3): 403 – 414 (in Chinese with English abstract)
- Peccerillo A and Taylor SR. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58(1): 63 – 81
- Pei XZ, Wang T, Ding SP, Li Y and Hu B. 2003. Geochemical characteristics and geological significance of Neoproterozoic adakitic granitoids on the north side of the Shangdan zone in the East Qinling. *Geology in China*, 30(4): 373 – 381 (in Chinese with English abstract)
- Qiu JS, Xiao E, Hu J, Xu XS, Jiang SY and Li Z. 2008. Petrogenesis of highly fractionated I-type granites in the coastal area of northeastern Fujian Province: Constrains from zircon U-Pb geochronology, geochemistry and Nd-Hf isotopes. *Acta Petrologica Sinica*, 24(11): 2468 – 2484 (in Chinese with English abstract)
- Ren JH, Liu YQ, Feng Q, Han WZ, Gao H and Zhou DW. 2009. LA-ICP-MS U-Pb zircon dating and geochemical characteristics of diabase-dykes from the Qingshuiquan area, eastern Kunlun orogenic belt. *Acta Petrologica Sinica*, 25(5): 1135 – 1145 (in Chinese with English abstract)
- Sylvester PJ. 1998. Post-collisional strongly peraluminous granites. *Lithos*. 45: 29 – 44
- Shand SJ. 1927. *Eruptive Rocks*. New York: Wiley & Sons
- Soderlund U, Patchett P J, Vervoort J D and Isachsen CE. 2004. The ¹⁷⁶Lu decay constant determined by Lu-Hf and U-Pb isotope systematics of Precambrian mafic intrusions. *Earth and Planetary Science Letters*, 219: 311 – 324
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in Oceanic Basins*. Geological Society, London, Special Publications, 42: 313 – 345
- Taylor SR and McLennan SM. 1985. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1 – 328
- Tian W and Wei CJ. 2005. Caledonian low Al-TTG series rocks in North Qinling: The characters, petrology and geological significations. *Science in China (Series D)*, 35(3): 215 – 224 (in Chinese)
- Topuz G, Altherr R, Schwarz WH, Siebel W, Satir M and Dokuz A. 2005. Post-collisional plutonism with adakite-like signatures the Eocene Saraycik granodiorite (Eastern Pontides, Turkey). *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 150: 441 – 455
- Wang GC, Wei QR, Jia CX, Zhang KX, Li DW, Zhu YH and Xiang SY. 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 T, Wang XX, Tian W, Zhang CL, Li WP and Li S. 2009. North Qinling Paleozoic granite associations and their variation in space and time: Implications for orogenic processes in the orogens of central China. *Science in China (Series D)*, 39(7): 949 – 971 (in Chinese)
- Waston EB. 1979. Zircon saturation in felsic liquids: Experimental results and applications to trace element geochemistry. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 70(4): 407 – 419
- Waston EB and Harrison TM. 1983. Zircon saturation revisited: Temperature and composition effects in a variety of crustal magma types. *Earth and Planetary Science Letters*, 64(2): 295 – 304
- Wolf MB and London D. 1994. Apatite dissolution into peraluminous haplogranite melts: An experimental study of solubilities and mechanism. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 58: 4127 – 4145
- Wu CL, Yang JS, Wooden J L, Shi RD and Chen SY. 2004. Zircon U-Pb SHRIMP dating of the Yematan batholith in Dulan, North Qaidam, NW China. *Chinese Science Bulletin*, 49(16): 1667 – 1672 (in Chinese)
- Wu CL, Gao YH, Wu SP and Chen QL, Wooden JL, Mazadab FK and

- Mattinson C. 2008. Zircon SHRIMP U-Pb ages and geochemistry of granites in the west part of northern margin of Qaidam Basin, NW China. *Science in China (Series D)*, 38(8): 930 – 949 (in Chinese)
- Wu FY, Li XH, Yang JH and Zheng YF. 2007. Discussions on the petrogenesis of granites. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1217 – 1238 (in Chinese with English abstract)
- Wu SP. 2008. The petrogenesis of Paleozoic granitoids in the north margin of Qaidam Basin and their orogenic response. Ph. D. Dissertation. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 1 – 152 (in Chinese with English summary)
- Xiao QH, Deng JF, Ma DQ *et al.* 2002. The Ways of Investigation on Granitoids. Beijing: Geological Publishing House, 1 – 294 (in Chinese)
- Xiao QH, Wang T, Deng JF, Mo XX, Lu XX, Hong DW, Xie CF, Luo ZH, Qiu RZ and Wang XX. 2009. Granitoids and Continent Growth of Key Orogenic in China. Beijing: Geological Publishing House, 1 – 528 (in Chinese)
- Xu ZQ, Yang JS, Li HB and Yao JX. 2006. The Early Palaeozoic tectonic framework and the formation of the high pressure (HP) and ultra-high pressure (UHP) metamorphic belts at the central orogenic belt (COB) *Acta Geologica Sinica*, 80(12): 1793 – 1806 (in Chinese with English abstract)
- Xu ZQ, Yang JS, Li HB, Zhang JX, Wu CL *et al.* 2007. Orogenic Plateau: Terrane Amalgamation, Collision and Uplift in the Qinghai-Tibet Plateau. Beijing: Geological Publishing House, 1 – 458 (in Chinese with English abstract)
- Yan QR, Chen JL, Wang ZQ, Yan Z, Wang T, Li QG, Zhang ZQ and Jiang CF. 2008. Zircon U-Pb and geochemical analyses for leucocratic intrusive rocks in pillow lavas in the Danfeng Group, north Qinling Mountains, China. *Science in China (Series D)*, 51(2): 249 – 262
- Yang JS, Robinson PT, Jiang CF and Xu ZQ. 1996. Ophiolites of the Kunlun Mountains, China and their tectonic implications. *Tectonophysics*, 258: 215 – 231
- Yang JS, Xu ZQ, Ma CQ, Zhang JX, Wang ZQ, Wang GC, Zhang HF, Dong YP and Lai SC. 2010. Compound orogeny and scientific problems concerning the Central Orogenic Belt of China. *Geology in China*, 37(1): 1 – 11 (in Chinese with English abstract)
- Yu N, Jin W, Ge WC and Long XP. 2005. Geochemical study on peraluminous granite from Jinshuikou in East Kunlun. *Global Geology*, 24(2): 123 – 128 (in Chinese with English abstract)
- Yu SY, Zhang JX and Del Real PG. 2012. Geochemistry and zircon U-Pb ages of adakitic rocks from the Dulan area of the North Qaidam UHP terrane, north Tibet: Constraints on the timing and nature of regional tectonothermal events associated with collisional orogeny. *Lithos*, 21(1): 167 – 179
- Yuan GB, Wang HC, Li HM, Hao GJ, Xin HT, Zhang BH, Wang QH and Tian Q. 2002. Zircon U-Pb age of the gabbros in Luliangshan area on the northern margin of Qaidam Basin and its geological implication. *Progress in Precambrian Research*, 25(1): 37 – 40 (in Chinese with English abstract)
- Yuan HL, Gao S, Dai MN, Zong CL, Günther D, Fontaine GH, Liu XM and Diwu CR. 2008. Simultaneous determinations of U-Pb age, Hf isotopes and trace element compositions of zircon by excimer laser-ablation quadrupole and multiple-collector ICP-MS. *Chemical Geology*, 247: 100 – 118
- Zhang HF, Harris N, Parrish R, Kelley S, Zhang L, Rogers N, Argles T and King J. 2004. Causes and consequences of protracted melting of the mid-crust exposed in the North Himalayan. *Earth and Planetary Science Letters*, 228(1–2): 195 – 212
- Zhang JX, Meng FC, Wang YS, Yang JS and Dong GA. 2003. Early Paleozoic tectono-thermal event of the Jinshuikou Group on the southern margin of Qaidam: Zircon U-Pb SHRIMP age evidence. *Geological Bulletin of China*, 22(6): 397 – 404 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Q, Wang Y, Pan GQ, Li CD and Jin WJ. 2008. Source of granites: Some crucial questions on granite study (4) *Acta Petrologica Sinica*, 24(6): 1193 – 1204 (in Chinese with English abstract)
- Zhang YF, Pei XZ, Ding SP, Li RB, Feng JY, Sun Y, Li ZC and Chen YX. 2010. LA-ICP-MS zircon U-Pb age of quartz diorite at the Kekesha area of Dulan County, eastern section of the East Kunlun orogenic belt, China and its significance. *Geological Bulletin of China*, 29(1): 79 – 85 (in Chinese with English abstract)
- Zhang YL, Zhang XJ, Hu DG, Shi YN and Lu L. 2010a. SHRIMP zircon U-Pb ages of rhyolite from the Naiji Tal Group in the East Kunlun orogenic belt. *Journal of Geomechanics*, 16(1): 21 – 27 (in Chinese with English abstract)
- Zhang YL, Hu DG, Shi YN and Lu L. 2010b. SHRIMP zircon U-Pb ages and tectonic significance of Maoniushan Formation volcanic rocks in East Kunlun orogenic belt, China. *Geological Bulletin of China*, 29(11): 1614 – 1618 (in Chinese with English abstract)
- Zhang ZQ, Zhang GW, Liu DY, Wang ZQ, Tang SH and Wang JH. 2006. Isotopic Geochronology and Geochemistry of Ophiolites, Granites and Calstic Sedimentary Rocks in the Qinling Orogenic Belt. Beijing: Geological Publishing House, 1 – 348 (in Chinese)
- Zhao ZM, Ma HD, Wang BZ, Bai YS, Li RS and Ji WH. 2008. The evidence of intrusive rocks about collision-orogeny during Early Devonian in Eastern Kunlun area. *Geological Review*, 54(1): 47 – 56 (in Chinese with English abstract)
- Zhong YF, Ma CQ and She ZB. 2006. Geochemical characteristics of zircon and its applications in Geosciences. *Geological Science and Technology Information*, 25(1): 27 – 34 (in Chinese with English abstract)
- Zhou CJ, Hu DG, Barosh PJ, Wu ZH, Zhang YQ, Geng JZ, Hao S, Ni JY and Zhang YL. 2001. Zircon U-Pb dating of the rhyolite-dacite porphyry in the Sandaowan of East Kunlun Mountains and its geological significance. *Journal of Geomechanics*, 16(1): 28 – 35 (in Chinese with English abstract)
- Zhou MF, Robinson PT, Leshner CM, Keays RR, Zhang CJ and Malpas J. 2005. Geochemistry, petrogenesis and metallogenesis of the Panzhihua gabbroic layered intrusion and associated Fe-Ti-V oxide deposits, Sichuan Province, SW China. *Journal of petrology*, 46(11): 2253 – 2280
- Zhu DC, Mo XX, Wang LQ, Zhao ZD, Niu YL, Zhou CY and Yang YH. 2009. Petrogenesis of highly fractionated I-type granites in the Chayu area of eastern Gangdese, Tibet: Constraints from zircon U-Pb geochronology, geochemistry and Sr-Nd-Hf isotopes. *Science in China (Series D)*, 39(7): 833 – 848 (in Chinese)
- Zhu XH, Chen DL, Liu L and Li D. 2010. LA-ICP-MS U-Pb dating of Wanggaxiu gabbro complex in the Dulan area, northern margin of Qaidam Basin, China and its geological significance. *Geological Bulletin of China*, 29(2–3): 227 – 236 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 谯宏伟, 罗照华, 莫宜学, 张雪亭, 王瑾, 王秉璋. 2006. 东昆仑喀雅克登塔格杂岩体的 SHRIMP 年龄及其地质意义. *岩石矿物学杂志*, 25(1): 25 – 32

- 陈能松, 孙敏, 张克信, 朱云海. 2000. 东昆仑变闪长岩体的⁴⁰Ar-³⁹Ar和U-Pb年龄: 角闪石过剩Ar和东昆仑早古生代岩浆岩带证据. 科学通报, 45(21): 2337-2342
- 陈能松, 何蕾, 孙敏, 王国灿, 张克信. 2002. 东昆仑造山带早古生代变质峰期和逆冲构造变形年代的精确限定. 科学通报, 47(8): 628-631
- 陈岳龙. 1999. 东天山、北秦岭花岗岩类地球化学. 北京: 地质出版社, 1-141
- 崔美慧, 孟繁聪, 吴祥珂. 2011. 东昆仑祁漫塔格早奥陶世岛弧: 中基性火成岩地球化学、Sm-Nd同位素及年代学证据. 岩石学报, 27(11): 3365-3379
- 邓晋福, 罗照华, 苏尚国等. 2004. 岩石成因、构造环境与成矿作用. 北京: 地质出版社, 1-381
- 高晓峰, 校培喜, 谢从瑞, 范立勇, 过磊, 奚仁刚. 2010. 东昆仑阿牙克库木湖北巴什尔希花岗岩锆石LA-ICP-MS U-Pb定年及其地质意义. 地质通报, 29(7): 1001-1008
- 高永宝, 李文渊. 2011. 东昆仑造山带祁漫塔格地区白干湖含钨锡矿花岗岩: 岩石学、年代学、地球化学及岩石成因. 地球化学, 40(4): 324-336
- 雷敏. 2010. 秦岭造山带东部花岗岩成因及其与造山带构造演化的关系. 博士学位论文. 北京: 中国地质科学院, 1-162
- 黎敦朋, 李静, 张汉军, 李新林, 周小康, 杜少喜. 2003. 东昆仑祁漫塔格山志留系白干湖组浊积岩特征. 陕西地质, 21(2): 39-44
- 李惠民, 陈志宏, 相振群, 李怀坤, 陆松年, 周红英, 宋彪. 2006. 秦岭造山带商南-西峡地区富水杂岩的变辉长岩中斜锆石与锆石U-Pb同位素年龄的差异. 地质通报, 25(6): 653-659
- 李怀坤, 陆松年, 相振群, 周红英, 郭虎, 宋彪, 郑健康, 顾瑛. 2006. 东昆仑中部缝合带清水泉麻粒岩锆石SHRIMP U-Pb年代学研究. 地学前缘, 13(6): 311-321
- 李瑞保, 裴先治, 李佐臣, 刘战庆, 陈有焯, 王学良, 魏方刚, 张刚, 杨钟智. 2011. 东昆仑造山带早古生代晚期区域构造体制转变记录——来自东昆仑东段和勒岗那碱长花岗岩年代学及地球化学的约束. 西安: 2011年岩石学与地球动力学研讨会论文集摘要, 330
- 龙晓平, 金巍, 余能. 2005. 东昆仑格木东部金水口片麻状富铝花岗岩锆石微区Raman光谱研究. 地质通报, 24(1): 36-40
- 龙晓平, 金巍, 葛文春, 余能. 2006. 东昆仑金水口花岗岩体锆石U-Pb年代学及其地质意义. 地球化学, 35(4): 333-345
- 陆露, 吴珍汉, 胡道功, Barosh PJ, 郝爽, 周春景. 2010. 东昆仑牦牛山组流纹岩锆石U-Pb年龄及构造意义. 岩石学报, 26(4): 1150-1158
- 路远发. 2004. Geokit: 一个用VBA构建的地球化学工具软件包. 地球化学, 33(5): 459-464
- 陆松年. 2002. 青藏高原北部前寒武纪地质初探. 北京: 地质出版社, 1-125
- 莫宣学, 罗照华, 邓晋福, 喻学惠, 刘成东, 谌宏伟, 袁万明, 刘云华. 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, 王涛, 丁仁平, 李勇, 胡波. 2003. 东秦岭商丹带北侧新元古代埃达克质花岗岩及其地质意义. 中国地质, 30(4): 373-381
- 邱检生, 肖娥, 胡建, 徐夕生, 蒋少涌, 李真. 2008. 福建北东沿海高分异I型花岗岩的成因: 锆石U-Pb年代学、地球化学和Nd-Hf同位素制约. 岩石学报, 24(11): 2468-2484
- 任军虎, 柳益群, 冯乔, 韩文中, 高辉, 周鼎武. 2009. 东昆仑清水泉辉绿岩脉地球化学及LA-ICP-MS锆石U-Pb定年. 岩石学报, 25(5): 1135-1145
- 田伟, 魏春景. 2005. 北秦岭造山带加里东期低Al-TTD系列: 岩石特征、成因模拟及地质意义. 中国科学(D辑), 35(3): 215-224
- 王国灿, 魏启荣, 贾春兴, 张克信, 李德威, 朱云海, 向树元. 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
- 王涛, 王晓霞, 田伟, 张成立, 李伍平, 李舫. 2009. 北秦岭古生代花岗岩组合、岩浆时空演变及其对造山作用的指示. 中国科学(D辑), 39(7): 949-971
- 吴才来, 杨经绥, Wooden JL, 史仁灯, 陈松永. 2004. 柴达木北缘都兰野马滩花岗岩锆石SHRIMP定年. 科学通报, 49(16): 1667-1672
- 吴才来, 郜源红, 吴锁平, 陈其龙, Wooden JL, Mazadab FK, Mattinson C. 2008. 柴北缘西段花岗岩锆石SHRIMP U-Pb定年及其岩石地球化学特征. 中国科学(D辑), 38(8): 930-949
- 吴锁平. 2008. 柴北缘古生代花岗岩类成因及其造山响应. 博士学位论文. 北京: 中国地质科学院, 1-152
- 吴福元, 李献华, 杨进辉, 郑永飞. 2007. 花岗岩成因研究的若干问题. 岩石学报, 23(6): 1217-1238
- 肖庆辉, 邓晋福, 马大铨等. 2002. 花岗岩研究思维与方法. 北京: 地质出版社, 1-294
- 肖庆辉, 王涛, 邓晋福, 莫宣学, 卢欣祥, 洪大卫, 谢才富, 罗照华, 邱瑞照, 王晓霞等. 2009. 中国典型造山带花岗岩与大陆地壳生长研究. 北京: 地质出版社, 1-528
- 许志琴, 杨经绥, 李海兵, 姚建新. 2006. 中央造山带早古生代地体构架与高压/超高压变质带的形成. 地质学报, 80(12): 1793-1806
- 许志琴, 杨经绥, 李海兵, 张建新, 吴才来等. 2007. 造山的高原——青藏高原地体拼合、碰撞造山及隆升机制. 北京: 地质出版社, 1-458
- 杨经绥, 许志琴, 马昌前, 吴才来, 张建新, 王宗起, 王国灿, 张宏飞, 董云鹏, 赖绍聪. 2010. 复合造山作用和中国中央造山带的科学问题. 中国地质, 37(1): 1-11
- 余能, 金巍, 葛文春, 龙晓平. 2005. 东昆仑金水口过铝花岗岩的地球化学研究. 世界地质, 24(2): 123-128
- 袁桂邦, 王惠初, 李惠民, 郝国杰, 辛后田, 张宝华, 王青海, 田琪. 2002. 柴北缘绿梁山地区辉长岩的锆石U-Pb年龄及意义. 前寒武纪研究进展, 25(1): 37-40
- 张建新, 孟繁聪, 万渝生, 杨经绥, 董国安. 2003. 柴达木盆地南缘金水口群的早古生代构造热事件: 锆石U-Pb SHRIMP年龄证据. 地质通报, 22(6): 397-404
- 张旗, 王焰, 潘国强, 李承东, 金惟俊. 2008. 花岗岩源岩问题——关于花岗岩研究的思考之四. 岩石学报, 24(6): 1193-1204
- 张亚峰, 裴先治, 丁仁平, 李瑞保, 冯建赞, 孙雨, 李佐臣, 陈有焯.

2010. 东昆仑都兰县可可沙地区加里东期石英闪长岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄及其意义. 地质通报, 29(1): 79-85
- 张耀玲, 张绪教, 胡道功, 石玉若, 陆露. 2010a. 东昆仑造山带纳赤台群流纹岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄. 地质力学学报, 16(1): 21-27
- 张耀玲, 胡道功, 石玉若, 陆露. 2010b. 东昆仑造山带牦牛山组火山岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其构造意义. 地质通报, 29(11): 1614-1618
- 张宗清, 张国伟, 刘敦一, 王宗起, 唐索寒, 王进辉. 2006. 秦岭造山带蛇绿岩、花岗岩和碎屑沉积岩同位素年代学和地球化学. 北京: 地质出版社, 1-348
- 赵振明, 马华东, 王秉璋, 拜永山, 李荣社, 计文化. 2008. 东昆仑早泥盆世碰撞造山的侵入岩证据. 地质论评, 54(1): 47-56
- 钟玉芳, 马昌前, 余振兵. 2006. 锆石地球化学特征及地质应用研究综述. 地质科技情报, 25(1): 27-34
- 周春景, 胡道功, Barosh PJ, 吴珍汉, 张永清, 耿建珍, 郝爽, 倪晋宇, 张耀玲. 2010. 东昆仑三道湾流纹英安斑岩锆石 U-Pb 年龄及地质意义. 地质力学学报, 16(1): 28-35
- 朱弟成, 莫宣学, 王立全, 赵志丹, 牛耀龄, 周长勇, 杨岳横. 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 同位素约束. 中国科学(D 辑), 39(7): 833-848
- 朱小辉, 陈丹玲, 刘良, 李涤. 2010. 柴达木盆地北缘都兰地区旺尕秀辉长杂岩的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄及地质意义. 地质通报, 29(2-3): 227-236