

https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.716



东昆仑哈拉森地区花岗岩类岩石成因及地质意义

何成^{1,2}, 王力圆^{3*}, 田立明⁴, 徐净⁵

1. 中国地震局地震研究所, 地震预警湖北省重点实验室, 湖北武汉 430071
2. 武汉地震工程研究院有限公司, 湖北武汉 430071
3. 福州大学紫金矿业学院, 福建福州 350116
4. 江西省地矿局物化探大队, 江西南昌 330201
5. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

摘要: 哈拉森地区位于东昆仑东段, 分布着大量花岗岩, 对其研究不仅有助于认识东昆仑造山带在晚古生代—早中生代的构造—岩浆演化历史, 而且可以为东昆仑古特提斯洋俯冲时限及洋盆闭合时限提供约束。对区内花岗岩进行了岩石学、年代学以及岩石地球化学分析, 结果表明哈拉森地区的钾长花岗岩和细粒二长花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄分别为 239.2 ± 1.7 Ma (MSWD=0.19) 和 232.4 ± 1.2 Ma (MSWD=0.76), 属中三叠世花岗岩类岩浆作用的产物。岩石主微量元素分析显示该地区花岗岩具有高硅铝、富碱和低钛特征, 属于高钾钙碱性到钾玄岩系列的过铝质花岗岩, 富集轻稀土元素 (LREE) 及 K、Th、Rb 等大离子亲石元素 (LILE), 明显亏损 Nb、Ti、P、Ta 等高场强元素 (HFSE), 具有非常明显的 Eu 负异常 (δEu 为 0.27~0.65)。哈拉森地区花岗岩具有高分异 I 型花岗岩的特征, 是同碰撞背景下幔源岩浆与其诱发地壳物质熔融产生的长英质岩浆在地壳深部混合, 随后这一混合岩浆又经过高分化的分异演化形成的, 进一步证明东昆仑古特提斯洋的俯冲作用一直持续到早三叠世, 至中三叠世才逐渐转入陆内碰撞造山阶段。

关键词: 花岗岩; 地质年代学; 地球化学; 哈拉森; 东昆仑。

中图分类号: P581

文章编号: 1000-2383(2018)04-1207-12

收稿日期: 2017-12-18

Petrogenesis and Geological Implications of Granitoids from Halasen, East Kunlun

He Cheng^{1,2}, Wang Liyuan^{3*}, Tian Liming⁴, Xu Jing⁵

1. Hubei Key Laboratory of Earthquake Early Warning, Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Wuhan 430071, China
2. Wuhan Institute of Earthquake Engineering Co., Ltd., Wuhan 430071, China
3. College of Zijin Mining, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China
4. Geophysical and Geochemical Exploration Brigade of Jiangxi, Nanchang 330201, China
5. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

Abstract: A large amount of granites widely distributes in Halasen area in the East Kunlun Mountains. The study of the granites not only help us to understand the tectono-magmatic evolution history of East Kunlun orogenic belt in the Late Paleozoic and Early Mesozoic, but also provides constraints for the subduction and closed time limit of the Paleo-Tethys Ocean. In this paper, we constrain geochronology and petrogenesis of the Halasen granites by zircon U-Pb dating and geochemical analyses. The LA-ICP-MS U-Pb analyses show that the formation ages of K-feldspar granite and fine-grained monzogranite are 239.2 ± 1.7 Ma (MSWD=0.19) and 232.4 ± 1.2 Ma (MSWD=0.76), respectively, which are the products of the Middle Triassic granitic magmatism. The geochemistry data show that granites are high-potassium calcalkaline-shoshonite, peraluminous rock which is characterized by high silicon and aluminum, enriched alkali, low titanium, as well as enriched light rare earth elements (LREE) and large ion lithophile elements (LILE, e.g., K,

基金项目: 国家自然科学基金(No.41402098); 青藏高原矿产调查评价专项项目(No.1212011220664)。

作者简介: 何成(1989—), 男, 硕士研究生, 主要从事矿床学及矿床地球化学研究方向。ORCID: 0000-0001-6414-2604. E-mail: 466283455@qq.com

***通讯作者:** 王力圆, ORCID: 0000-0001-5171-6584. E-mail: wangliyuan030101@163.com

引用格式: 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): 1207-1218.

Th and Rb), and depleted in high field-strength elements (HFSE, e.g., Nb, Ti, P, and Ta) with obvious Eu negative anomaly (the value of δEu is between 0.27 and 0.65). Halasen granites belong to highly fractionated I-type granite. It is suggested that the Halasen granites were most likely derived from parental magma by mixing of depleted mantle-derived magma and induced crustal-melted felsic magma in the deep crust, and then suffered further differentiation during magma ascent. The subduction of the East Kunlun Paleotethys Ocean lasted to the Early Triassic, and the Middle Triassic witnessed the intracontinental collision.

Key words: granite; geochronology; geochemistry; Halasen; East Kunlun.

东昆仑造山带位于青藏高原东北缘,属于中央造山带之秦祁昆褶皱系的一部分,岩浆活动强烈,是青藏高原内可与冈底斯媲美的又一条巨型构造岩浆岩带,统计显示其显生宙花岗岩出露面积约 47 500 km².该岩浆岩带在空间上呈东西向带状分布;在时间上,莫宣学等(2007)将该带内的花岗岩划分为前寒武纪、早古生代、晚古生代—早中生代和晚中生代—新生代 4 个时段,其中尤以晚古生代—早中生代这一阶段内的中—晚三叠世花岗岩最为发育,广泛分布于东昆仑北部,前人认为该阶段花岗岩可能是东昆仑地区在晚古生代—早中生代(270~210 Ma)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;陈国超,2014;熊富浩,2014).但是有关该期花岗岩形成的构造背景及其深部演化过程一直存在争议,对洋盆闭合时间有不同观点.目前的研究表明与古特提斯洋相关的花岗岩以洋盆闭合前的洋壳俯冲阶段和洋盆闭合后的后碰撞阶段为主,积累了大量年代学及地球化学资料,如哈拉杂吐花岗岩体(256 Ma、254.9 Ma)、巴隆花岗闪长岩(252 Ma)、五龙沟花岗闪长岩(247~249 Ma)、香日德闪长岩(243~248 Ma)和花岗闪长岩(241 Ma)代表了晚二叠世—早三叠世大洋俯冲环境形成的花岗岩(孙雨等,2009;熊富浩,2014;陈国超,2014;严威等,2016);而香日德斑状花岗闪长岩、花岗岩(220~225 Ma;罗明非等,2014)、热水二长花岗岩(231 Ma;国显正等,2016a)、莫格通花岗闪长斑岩(209~212 Ma)、勒冈希里克特岩体(230.2 Ma、225 Ma)与科鄂阿龙岩体(221 Ma)则代表了后碰撞环境形成的花岗岩(李瑞保,2012).对于古特提斯洋最终闭合时限的研究,主要以沉积地层和后碰撞岩浆岩的约束为主,相对缺乏俯冲晚期特别是同碰撞阶段的花岗岩证据,这在一定程度上使得东昆仑地区在晚古生代—早中生代构造演化过程中的岩浆活动序列不够完善.本文以位于东昆仑东段昆中断裂北侧哈拉森地区花岗岩体为研究对象,在野外地质调查

的基础上,对钾长花岗岩和细粒二长花岗岩进行岩相学、岩石地球化学及锆石 U-Pb 年代学研究,探讨其岩石成因、形成环境以及岩浆作用的动力学背景,结合前人研究成果,为东昆仑地区晚古生代—早中生代古特提斯洋闭合时限的研究提供科学依据.

1 地质背景

东昆仑地处秦、祁、昆三大构造带的接合部位,具有十分复杂的地质构造特征,造山带内发育有 3 条近 EW 向的断裂(昆北断裂、昆中断裂和昆南断裂).前人以昆中断裂为界将其进一步分为东昆北构造带和东昆南构造带.本次工作区位于青海省都兰县香日德镇东侧,区域大地构造位置为东昆仑东段,北邻柴达木南缘,南邻东昆中缝合带,隶属东昆北构造带(图 1a).研究区内出露大量的前寒武纪变质岩系,形成了以古—中元古界金水口群和中元古代小庙岩组地层为结晶基底,同时广泛分布晚古生代—早中生代侵入岩.其中金水口群为一套高角闪岩相—麻粒岩相变质岩系,形成时代为 1.8~2.5 Ga,小庙岩组为一套角闪岩相的变质岩,形成时代为 1.6~1.0 Ga(王国灿等,2004;陈有炳等,2011).晚古生代—早中生代侵入岩出露于香日德镇东南地区,出露面积近 100 km²,部分花岗岩侵入到早期的结晶基底中,形成广泛的接触带构造.区内构造受昆中断裂的影响,主要以近 EW 向压扭性断裂为主(图 1b).

2 样品特征与分析方法

研究区主要出露的花岗岩岩性为钾长花岗岩和细粒二长花岗岩.钾长花岗岩为肉红色,中粗粒花岗结构,块状构造,主要矿物有钾长石(50%~60%)、斜长石(5%~10%)、石英(>35%)、黑云母(~2%) (图 2a,2b);细粒二长花岗岩为灰色微带浅红色,细粒花岗结构,块状构造,主要矿物有钾长石(35%~45%)、斜长石(20%~30%)、石英(20%~25%)和黑云母(~5%).其中钾长石为半自形—自形长板

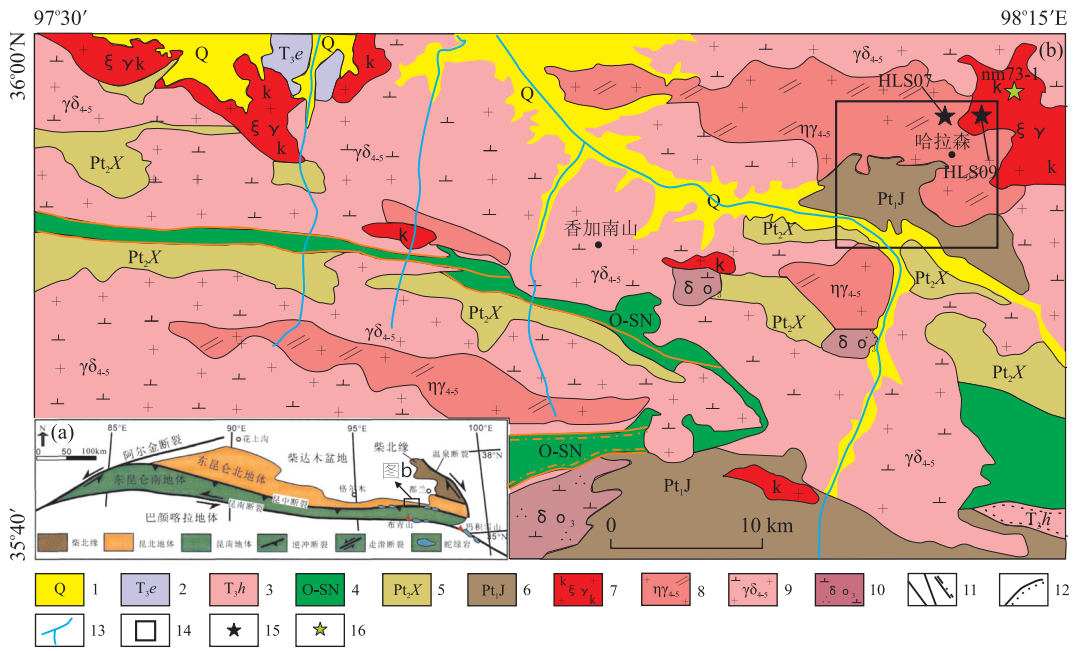


图 1 东昆仑东段大地构造位置(a)和香日德地区地质简图(b)

Fig.1 Tectonic location of eastern part of the East Kunlun orogen (a) and simplified geological map of the Xiangride intrusive rocks (b). 1.第四系;2.上三叠统鄂拉山组;3.下三叠统洪水川组;4.奥陶系-志留系纳赤台群;5.中元古界小庙岩组;6.古元古界金水口群;7.晚海西-印支期钾长花岗岩;8.晚海西-印支期细粒二长花岗岩;9.晚海西期花岗闪长岩;10.加里东期石英闪长岩;11.脆性断层/韧性断层;12.角度不整合;13.河流;14.研究区;15.采样位置;16.样品数据引自熊富浩(2014).据王学良(2011)修改

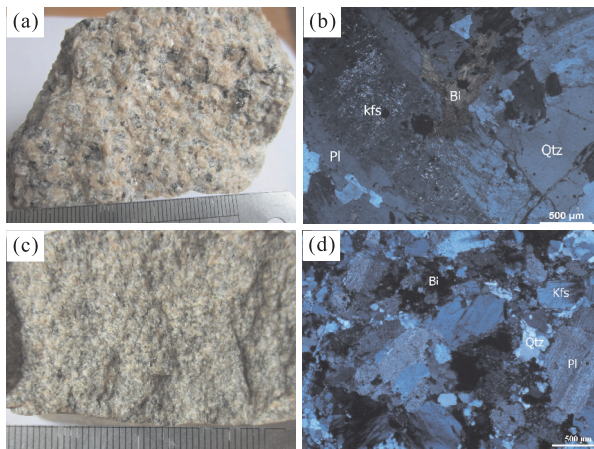


图 2 哈拉森地区花岗岩手标本及镜下照片

Fig.2 Specimen photographs and microscopic images of granites in the Halasen area

a,b.钾长花岗岩;c,d.细粒二长花岗岩.Kfs.钾长石;Pl.斜长石;Bi.黑云母;Qtz.石英

状,发育格子双晶;斜长石多为板状自形晶,发育聚片双晶,偶见卡钠复合双晶;石英呈他形粒状充填于斜长石和钾长石的间隙中,黑云母为深褐色-黄褐色,不规则状(图 2c,2d).

锆石分选在河北廊坊区域地质矿产研究所实验室完成,锆石制靶和阴极发光照相均在武汉上谱分析科技有限责任公司完成.锆石 LA-ICP-MS U-Pb

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完成,分析仪器为 LA-ICP-MS,仪器操作条件和数据选取及处理方法参见 Liu et al.(2009)相关文献,实验中采用 He 作为剥蚀物质的载气,以 NISTSRM610 作为内标,以标准锆石 91500 作为外标(每分析 6 个样品点,分析 2 次 91500),实验采用的激光束斑直径为 32 μm.数据处理采用软件 ICPMSDataCal,使用 GLITTER 程序计算样品的同位素比值,加权平均计算使用 Ludwig (2001)编写的 Isoplot 软件,采用 Andersen(2002)方法扣除普通 Pb,因样品较年轻,故采用 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄,加权平均值的误差为 1σ.

本文主、微量元素含量分析由武汉综合岩矿测试中心完成.主量元素使用 GB/T14506.28-2010 硅酸盐岩石化学分析方法 X 射线荧光光谱法(XRF),微量元素含量分析依据 DZG20-06 电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)方法通则.

3 分析结果

3.1 锆石 U-Pb 年龄

钾长花岗岩(HLS07):锆石均呈自形柱状,其大小为 100~200 μm、长宽比介于 1~3,锆石 CL 图

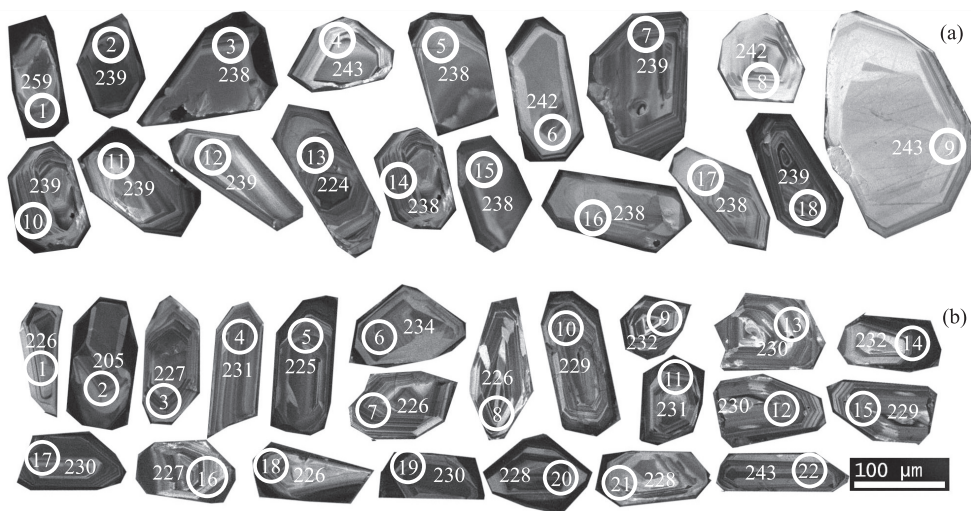


图 3 哈拉森地区钾长花岗岩(a)与细粒二长花岗岩(b)锆石阴极发光(CL)图像(单位:Ma)

Fig.3 Zircon cathodoluminescence (CL) images of moyite (a) and fine-grained monzogranite (b) in the Halasen area

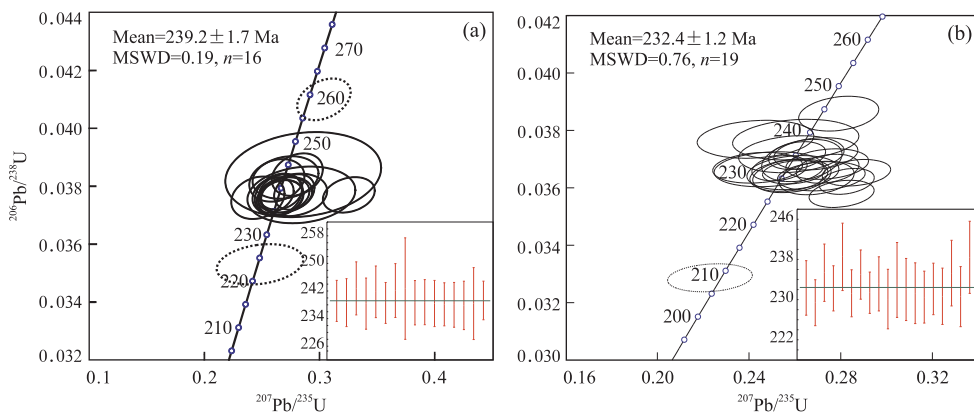


图 4 哈拉森地区钾长花岗岩(a)与细粒二长花岗岩 U-Pb 谐和图(b)

Fig.4 Zircon U-Pb concordia diagrams of moyite (a) and fine-grained monzogranite (b) in Halasen area

像上见明显的岩浆振荡环带(图 3a).该样品共测试 18 个点,分析结果见附表 1,其中 Th 和 U 含量分别为 $67 \times 10^{-6} \sim 574 \times 10^{-6}$ 和 $117 \times 10^{-6} \sim 787 \times 10^{-6}$,对应的 Th/U 比值为 0.46~0.76,显示了岩浆成因锆石的特征. $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于 224~259 Ma,样品点均落在谐和曲线或附近(10 号测点有铅的丢失),其中一号测点年龄偏大,为 259 Ma.颗粒存在微小的继承核,分析点来自于锆石核部和边部的过渡位置,少量跨上了较老的继承核位置,混合了部分较老的年龄,可能受前残留的继承岩浆锆石的影响,代表该岩浆系统的早期岩浆活动.对其中年龄较为集中的 16 个测点进行年龄加权平均计算得到其结晶年龄为 239.2 ± 1.7 Ma (MSWD=0.19)(图 4a).

细粒二长花岗岩(HLS09): 锆石均呈自形柱状,其大小为 $50 \sim 150 \mu\text{m}$ 、长宽比介于 1~3,锆石 CL 图像上见岩浆振荡环带(图 3b),部分锆石因

Th、U 含量过高导致 CL 图像表面呈黑色,使振荡环带不明显.该样品共测试 22 个点,分析结果见附表 1,其中 Th 和 U 含量分别为 $170 \times 10^{-6} \sim 877 \times 10^{-6}$ 和 $463 \times 10^{-6} \sim 1281 \times 10^{-6}$,对应的 Th/U 比值为 0.37~1.06,显示了岩浆成因锆石的特征. $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于 208~244 Ma,样品点均落在谐和曲线或附近(7 号测点有铅的丢失),其中 2 号测点锆石发生蜕晶化,锆石颗粒的边缘出现不规则黑色斑带,局部振荡环带受到破坏,可能是受到后期地质事件扰动或流体蚀变的影响而导致少量放射性成因 Pb 的丢失,给出了较年轻的年龄 209 Ma.对其中年龄较为集中的 19 个测点进行年龄加权平均计算,得到细粒二长花岗岩的结晶年龄为 232.4 ± 1.2 Ma (MSWD=0.76)(图 4b).

3.2 岩石地球化学特征

本次研究工作共采集全岩分析样品共 9 件(3

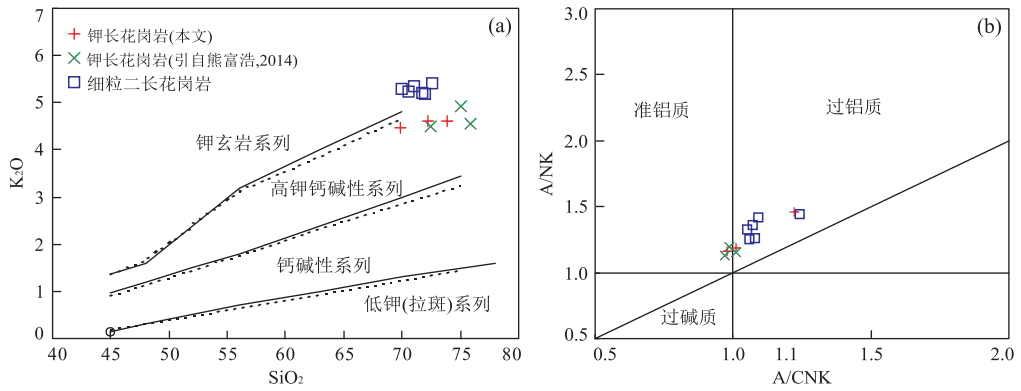


图 5 哈拉森地区花岗岩分类图解

Fig.5 Genetic discrimination diagrams for the Halasen granitoids

图 a 底图据 Peccerillo and Taylor(1976);图 b 底图据 Maniar and Piccoli(1989)

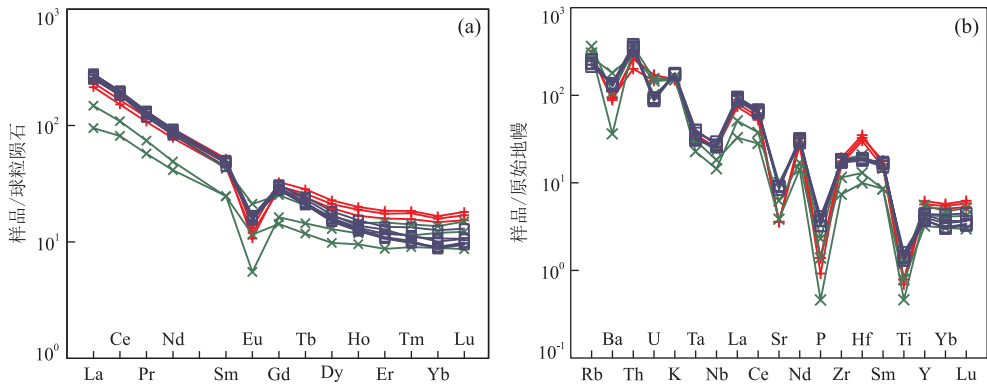


图 6 哈拉森地区花岗岩稀土元素球粒陨石标准化配分图(a)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b)

Fig.6 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized trace element diagram (b) for the Halasen granitoids
标准化值据 Sun and McDonough(1989);图例同图 5

件钾长花岗岩和 6 件细粒二长花岗岩),分析结果见附表 2.为了便于对比研究,使研究的结果更加可靠,本文还引用了熊富浩(2014)的 3 个钾长花岗岩数据见附表 2,其中 nm73-1 测得²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄为 238.5±1.5 Ma(熊福浩,2014),误差范围内与本次测得的钾长花岗岩(HLS07)年龄一致,采样位置相邻(图 1),应属于同一期岩浆活动的产物.引用数据原则为:(1)数据要和本文研究的时间和空间上紧密相关;(2)引用数据所代表的岩石样品岩性接近;(3)数据要具有可靠性和配套性.

3.2.1 主量元素 从附表 2 可以看出,研究区花岗岩整体具有高 SiO₂ (69.88%~75.83%),相对低 FeO^T (1.21%~2.31%)、MgO (0.20%~0.57%)、CaO (0.84%~1.79%)、TiO₂ (0.10%~0.35%) 和 P₂O₅ (0.01%~0.09%) 的特征.K₂O+Na₂O 含量为 8.26%~8.90%,样品均富钾, K₂O/Na₂O 值为 1.07~1.73,在 SiO₂-K₂O 图中落入高钾钙碱性至钾玄岩系列(图 5a).岩石中 Al₂O₃ 含量为 12.79%~

16.94%,A/CNK 为 0.97~1.24,在 A/CNK-A/NK 图中多数落入过铝质系列范围(图 5b).

3.2.2 稀土微量元素 岩石的稀土总量(∑REE)为 113.61×10⁻⁶~267.92×10⁻⁶ (平均 230.86×10⁻⁶).LREE/HREE=8.12~16.22, [La/Yb]_N=7.95~31.75,显示强烈富集轻稀土特征,且具有较高的负铕异常 δEu=0.27~0.65(平均 0.42),基本不显示铈异常(δCe=0.99~1.10).在稀土元素配分模式图中(图 6a)显示为平滑右倾的 V 型曲线,斜率中等偏大,可能暗示源区岩浆分离结晶过程中斜长石发生了结晶分异作用或者部分熔融过程中源区残留了斜长石.

原始地幔标准化微量元素蛛网图(图 6b)显示岩石富集大离子亲石元素(LILE:K、Th、Rb),明显亏损高场强元素(HFSE:Nb、Ti、P、Ta),表现出“Nb-Ta 槽”和“Ti、Sr、Ba、P 谷”的特点.其中 Nb、Ta、Ti 的亏损可能与富钛矿物相(钛铁矿和/或金红石)结晶分离有关,暗示岩浆来源于地壳且可能遭受

了地壳物质的部分混染,而 P 的亏损可能是磷灰石和榧石等副矿物的分离结晶作用所致。

4 讨论

4.1 成岩时代

如前所述,研究区处于东昆仑造山带的东段,广泛分布大量晚古生代—早中生代花岗岩,形成了一条规模宏大的花岗岩带,除哈拉森花岗岩体外,还有邻区的香日德岩基(部分文献称之为约鲁格岩体)(263~226 Ma;Chen *et al.*, 2012;熊富浩,2014)、香加南山岩体(251 Ma;王学良,2011)、沟里地区阿斯哈岩体(238.4 Ma;李金超等,2014)等。锆石 U-Pb 年龄数据的统计表明,这些岩体大多形成于 255~235 Ma 之间,熊富浩(2014)将香日德地区岩浆活动划分为 3 个阶段:晚二叠世—早三叠世(270~238 Ma)、中三叠世(238~230 Ma)和晚三叠世(230~185 Ma),同时,存在多期次岩浆活动的特征(如香日德岩基)。前人在该岩体不同的地区连续测得锆石 U-Pb 年龄介于 263~226 Ma,这说明东昆仑东段在海西期到印支期的岩浆活动序列是连续的。

用于本次 U-Pb 测年的锆石多为自形、半自形柱状,具有清晰的内部结构和典型岩浆成因的振荡环带(图 3)。锆石年龄数据较为集中,谐和度较高,MSWD 小于 1,说明数据的可信度较高。本文获得了东昆仑东段哈拉森地区细粒二长花岗岩和钾长花岗岩的年龄分别为 232.4 ± 1.2 Ma 和 239.2 ± 1.7 Ma,属于中三叠世,与熊福浩(2014)测得相邻地区钾长花岗岩(nm73-1)年龄 238.5 ± 1.5 Ma 在误差范围内一致,结合区域内已测得的中三叠世花岗岩年龄(邓文兵等,2016;国显正等,2016b;李金超等,2017),认为哈拉森地区存在中三叠世的构造岩浆活动。

4.2 岩石成因类型及源区性质

研究区花岗岩主要矿物中未见碱性暗色矿物,且相对亏损高场强元素(HFSE),具有较低 Zr ($<250 \times 10^{-6}$)、Nb、Y ($<60 \times 10^{-6}$)、Ce ($<140 \times 10^{-6}$)含量,与典型的 A 型花岗岩的矿物学和微量元素特征不同(Whalen *et al.*, 1987)。此外,前人的研究表明,研究区在海西—印支期整体处于一个俯冲—碰撞造山加厚构造环境,这也与 A 型花岗岩一般产于伸展减薄的环境不符,因此基本可以排除 A 型花岗岩的可能(Collins *et al.*, 1982)。对于 I 型、S 型花岗岩的判定,Chappell and White(1974)最初以 $A/CNK=1.1$ 作为两者的界线,但这一指标在高分异的花岗岩判别中失效(吴福元等,2007)。哈拉森花岗岩类具有较高 Rb/Sr 值(平均 1.41)以及极高的分异指数(DI)和极低的固结系数(SI),暗示了岩石经过了高度分异(Whalen *et al.*, 1987)。SiO₂ 与 P₂O₅ 呈现负相关,且 P₂O₅ 的含量较低($<0.1\%$),是 I 型花岗岩的特征(图 7a),岩石样品落在分异的 I、S 型花岗岩区域中(图 7b);SiO₂-La 分异特征也显示其具有 I 型花岗岩的特征(图 7c)。主量元素和微量元素地球化学特征上则表现出随着 Zr 含量的降低,MgO、MnO、CaO、P₂O₅、Sr 和 Ba 的含量降低,K₂O 和 Rb 的含量增加。这些特征都表明该区花岗岩在岩浆演化过程中经历了强烈的结晶分异作用,导致了镁铁质矿物、长石、磷灰石和锆石的分离结晶(Li *et al.*, 2007),从而表现出高分异的 I 型花岗岩的特点。此外该区花岗岩也没有出现 S 型花岗岩的特征矿物堇青石和白云母。因此,笔者认为研究区中三叠世花岗岩属于高分异 I 型花岗岩,且长石的分离结晶是主要的结晶分异过程(图 8)。

大量高精度的同位素数据研究表明高分异的 I 型花岗岩成因主要有两种:(1)由于幔源分异的岩浆底侵,导致地壳物质发生部分熔融形成高分异 I 型

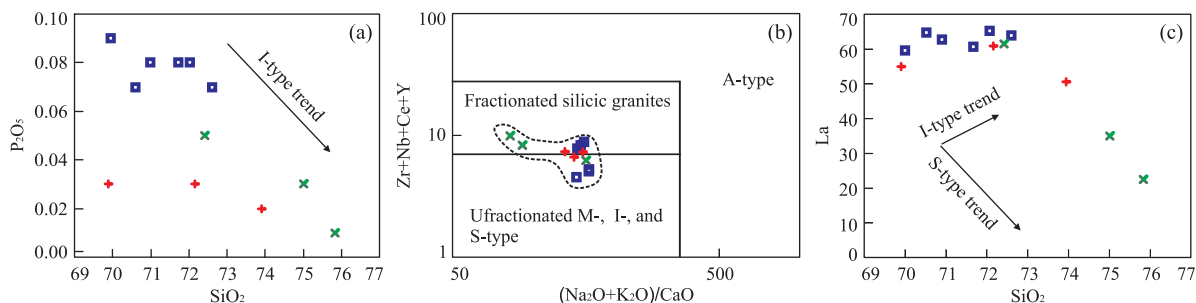


图 7 哈拉森地区花岗岩岩石成因类型

Fig.7 Genetic discrimination diagrams for the Halasen granitoids

图 b 底图据 Whalen *et al.*(1987);图例同图 5

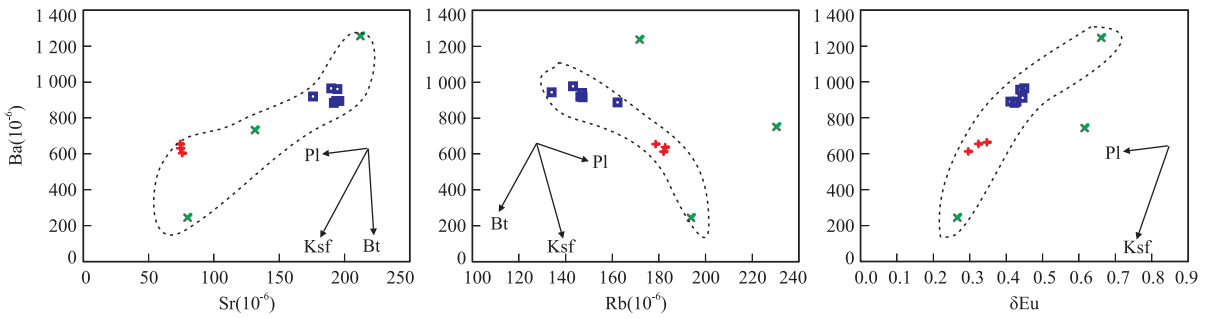


图 8 哈拉森地区花岗岩结晶分异特征

Fig.8 Characteristics of Halasen granitoids resulting from crystallization differentiation

图例同图 5

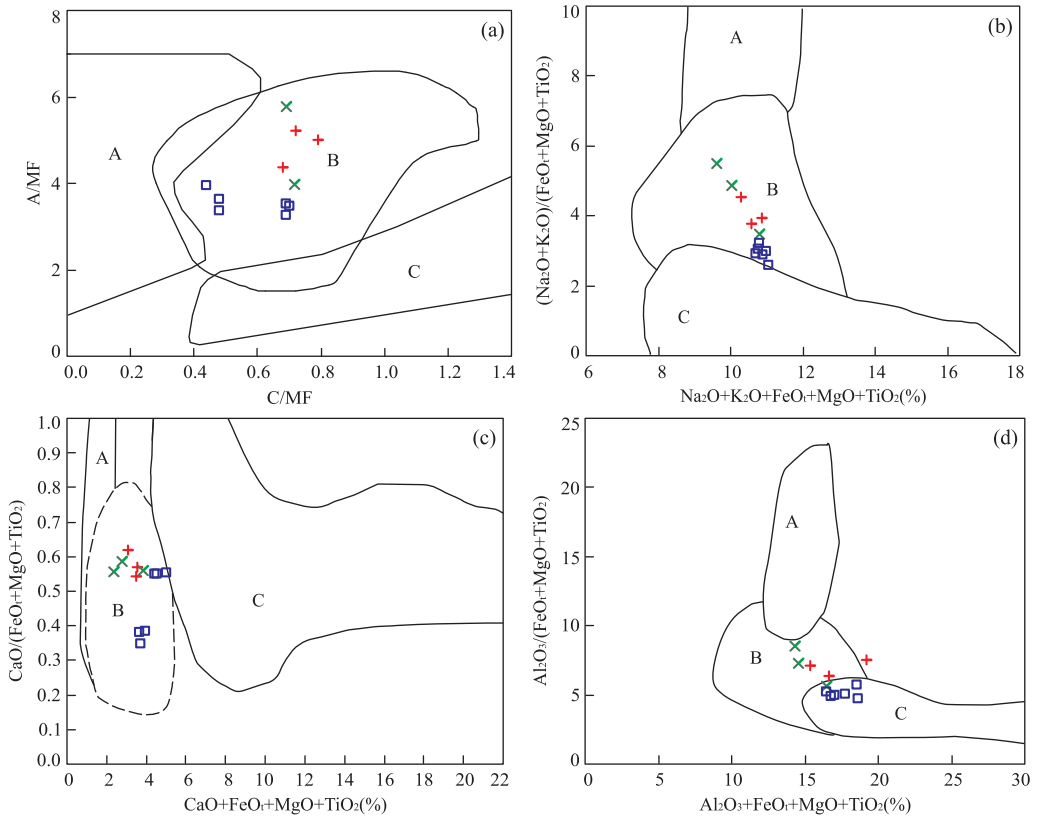


图 9 哈拉森地区花岗岩源区性质判别图解

Fig.9 Source characteristics discrimination diagrams for the Halasen granitoids

图 a 底图据 Altherra *et al.* (2000); 图 b~d 底图据 Douce (1999); 图例同图 5. A. 变质泥岩部分熔融; B. 变质砂岩部分熔融; C. 基性岩(角闪岩)的部分熔融

花岗岩(Zheng *et al.*, 2007; Richards, 2011); (2) 由幔岩岩浆底侵下地壳并与其诱发地壳物质熔融产生的长英质岩浆在地壳深部混合形成(邱检生等, 2008; Zhao *et al.*, 2012). 哈拉森花岗岩 $Nb/Ta = 10.48 \sim 14.80$ (平均值 12.73), $Th/U = 5.54 \sim 17.43$ (平均值 12.07), 接近壳源成分(Gao *et al.*, 2004), 且整体表现出铝过饱和的趋势, 同时具有中等偏低的 $Mg^\#$ 值(18.80~30.55, 平均 25.46) 暗示了该花岗岩可能与地壳物质有关, 在花岗岩源区性质判别图

解中, 绝大部分样品落入变质砂岩部分熔融的区域(图 9a), 部分样品分布在变质砂岩和基性岩熔融的过渡区域(图 9b, 9c), 在图解 9d 中部分样品落入基性岩部分熔融位置, 可能指示花岗岩主要由壳源物质形成, 并有幔源玄武质岩浆的叠加和混合作用.

本文倾向于将哈拉森花岗岩成因解释为壳幔岩浆混合的方式参与并发生后期分离结晶的共同作用, 另得到以下证据的支持: (1) 熊富浩(2014) 发现东昆仑东段香日德地区中三叠世花岗岩具有较高的

初始⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值(0.708 65~0.713 55)和较低的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值(-4.8~7.8), $\epsilon_{Hf}(t)$ 介于-3.90~-6.89, ϵ_{Hf} 主要为负值, ϵ_{Nd} 散布于正值与负值之间,可能是幔源组分通过与其诱发地壳物质熔融产生的长英质岩浆混合的方式参与成岩.Nd-Hf 同位素组成特征均指示其最可能为壳幔岩浆混合成因;(2)邻近的哈日扎岩体石英闪长岩年龄为 239 Ma,其中富含镁铁质暗色包体(国显正等,2016b),镁铁质包体的岩相学和年代学特征直接指示壳幔岩浆混合作用,这些野外证据均反映哈拉森地区在 239 Ma 左右曾发生过岩浆混合作用。

哈拉森花岗岩富 Si, 贫 Ca、Mg、Fe, 亏损 Ba、Sr、P、Ti 和 Eu, 反映了地壳深部形成的壳幔混源岩浆在随后的演化过程中又经历了进一步的分离结晶作用.其中微量元素 Sr、Ba、Eu 的亏损反映了岩浆冷却结晶的成岩过程中斜长石的分离结晶(图 8),而 P 和 Ti 的亏损则分别与磷灰石及含钛矿物(如钛铁矿、榍石等)的分离结晶有关.因此该区的花岗岩由幔源岩浆与其诱发地壳物质熔融形成的长英质岩浆混合形成壳幔混源岩浆,经历了高程度的分异形成的。

4.3 构造动力学背景

东昆仑造山带有着复杂而独特的构造演化史,经历了多次大洋俯冲到陆内碰撞的转换过程(陈加杰等,2016),但其演化模式存在着很大的分歧,主要有开—合构造、多次裂解模式(殷鸿福和张克信,1998;姜春发等,2000)和边缘造山、地体增生模式(李廷栋和肖序常,1996).前者认为东昆仑存在多次洋盆闭合—裂开以此来实现多次俯冲—碰撞的转换,而后者认为东昆仑在古生代到中生代这段地质时期内只存在一个海洋,而俯冲—碰撞的转换则是由于大洋中间的昆南带是洋壳上发育的大洋玄武岩高原,且由南向北不断拼贴,并最终闭合.到晚古生代—早中生代,前人研究认为在该构造旋回内东昆仑经历了一次大洋(古特提斯洋)俯冲到陆内碰撞的转换过程(殷鸿福和张克信,1998).但对于洋盆闭合的准确时限有分歧,主要有中二叠世(任纪舜,2004)、晚二叠世(Huang *et al.*, 2014)、中三叠世(Liu, 2005)和晚三叠世(李瑞保,2012)之说,东昆仑晚泥盆世托牛山组陆相磨拉石构造、区域性不整合的存在,标志着本区加里东旋回的结束和华力西—印支造山旋回的开始,但是由于目前对东昆仑演化模式的分歧,导致无法判断晚古生代早期东昆仑地区是裂解成洋,还是俯冲带南移、持续俯冲.越来越多的研究表明,在晚古生代晚期(二叠纪)开始,东昆

仑古特提斯洋不断地向北俯冲,熊富浩(2014)认为俯冲作用至少始于 277 Ma, 结束于 238 Ma;陈国超(2014)认为古特提斯洋俯冲阶段介于 260~237 Ma,这一时期内形成规模巨大的安第斯型弧岩浆岩带,具有活动大陆边缘安第斯型弧岩浆岩特征。

研究区花岗岩岩石微量元素特征(富集 LILE, 亏损 HFSE)具有弧岩浆岩的特点(Richards, 2003),但是亏损高场强元素 Nb、Ta、Ti 的微量元素分布特征在碰撞—后碰撞花岗岩中也时常出现(Zhang *et al.*, 2012; Xu *et al.*, 2016),岩石类型属于高分异的 I 型花岗岩,其岩浆源区可能来自于幔源岩浆与其诱发地壳物质熔融形成的长英质岩浆混合形成的壳幔混源岩浆.亏损高场强元素 Nb、Ta、Ti 的原因可能是新生的壳源物质继承了原岩的亏损特征.在 Pearce *et al.*(1984)的 Nb-Y(图 10a)判别图解中,所有样品均落入火山弧—同碰撞花岗岩区域;在 R_1 - R_2 构造环境判别图中(图 10b)样品基本上落入同碰撞的区域。

东昆仑古特提斯域岩浆活动出现于 270~200 Ma 之间,存在着多个峰期(马昌前等,2015),早三叠世岩浆活动与晚二叠世阿尼玛卿板片向北俯冲、源区受到板片沉积物与流体富集改造有关(Xiong *et al.*, 2013; Liu *et al.*, 2014);中三叠世时期,Hf 同位素组成较为均一,岩浆活动主要起源于加厚的陆壳熔融,可能与同碰撞环境有关(Zhang *et al.*, 2012);晚三叠世时期,Hf 同位素组成范围很宽,常见铁镁质暗色包体,表明幔源物质的贡献明显增多,岩石形成于碰撞后伸展环境,深部地幔岩浆上涌,并促使原先加厚的地壳发生熔融形成了花岗质岩浆(罗明非等,2014)。

东昆仑香日德地区岩浆活动可分为 3 个阶段(熊富浩,2014),主体属于早三叠世岩浆活动产物(258 Ma),其次为中三叠世岩浆活动产物(231~244 Ma),最后为晚三叠世岩浆活动产物(224 Ma).马昌前等(2015)依据锆石 Th 和 U 的比值以及含量的变化,发现岩石成因过程中流体贡献逐渐减弱,锆石 Hf 同位素组成逐渐升高,也表明板片沉积物的贡献较弱,而玄武质熔体的贡献较强.中三叠世中期古特提斯洋盆已经闭合,羌塘和昆仑—柴达木碰撞作用开始(莫宣学等,2007),在碰撞过程中羌地块与昆仑—柴达木造山带之间形成大型松潘前陆盆地.Zhang *et al.*(2012)获得香日德巴隆地区的正长花岗岩年龄为 231 Ma,属于同碰撞环境,东昆仑地区中三叠统希里可特组和中三叠统闹仓坚沟组,均为

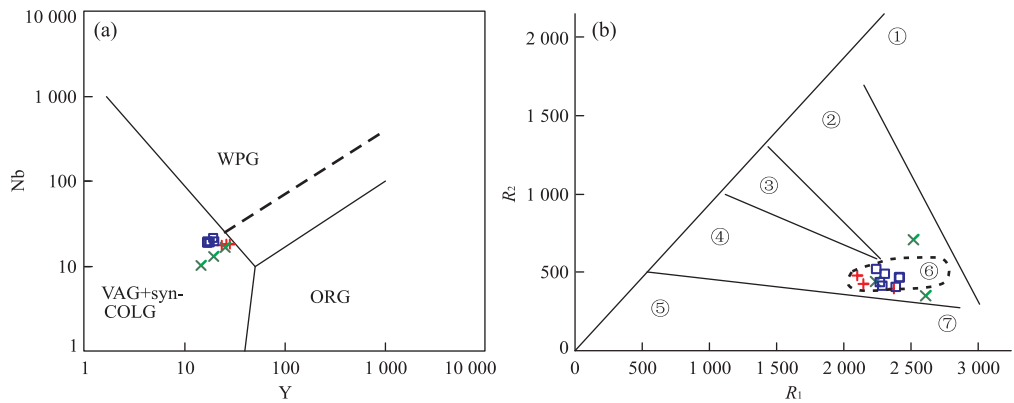


图 10 哈拉森地区花岗岩构造环境判别图解(a)和 R_1-R_2 判别图解(b)

Fig.10 Tectonic setting discrimination diagrams (a) and R_1-R_2 (b) for the Halasen granitoids

图 a 据 Pearce *et al.* (1984); 图 b 据 Batchelor and Bowden (1985); 图例同图 5. VAG. 火山弧花岗岩; syn-COLG. 同碰撞花岗岩; WPG. 板内花岗岩; ORG. 洋脊花岗岩; ① 地幔分异产物; ② 板块碰撞前; ③ 板块碰撞后隆起; ④ 造山晚期; ⑤ 非造山; ⑥ 同碰撞; ⑦ 造山期后

一套海陆交互沉积,是洋陆转换阶段的关键产物,代表了大洋最终闭合和陆内碰撞的开始.因此,哈拉森地区中三叠世花岗岩形成于同碰撞环境,东昆仑古特提斯洋的俯冲作用一直持续到早三叠世,至中三叠世才逐渐转入陆内碰撞造山阶段.

洋盆闭合后的碰撞造山作用分为同碰撞和后碰撞造山,中三叠世形成的花岗岩是由于洋盆闭合、陆内同碰撞作用产生的,主体受挤压应力作用.而后碰撞阶段主体受拉张应力作用,这一阶段经历了挤压环境向陆内伸展—拉张环境的转换过程,大洋地壳发生拆沉(离)作用,产生了幔源岩浆底侵作用,导致中下地壳的熔融,发生了广泛的壳—幔相互作用.这期间形成的花岗岩一般 K 含量较高,含有大量的暗色微粒包体,有时与基性侵入岩共同产出,显示双峰式特征.在晚三叠世东昆仑地区存在着大量这种类型的岩浆岩:熊富浩(2014)获得香日德斑状花岗闪长岩和莫格通花岗闪长斑岩 U-Pb 年龄分别为 223~225 Ma 和 209~212 Ma,认为岩浆作用具有加厚地壳熔融和壳幔作用;陈国超(2014)获得和勒冈希里克特岩体 U-Pb 年龄为 230.2 ± 4.6 Ma,认为东昆仑南缘地区在中晚三叠世进入了全面造山阶段;李瑞保(2012)认为和勒冈希里克特岩体和科科鄂阿龙岩体(225~221 Ma)代表后碰撞环境形成的花岗岩;张炜等(2016)认为东昆仑莫拉下河花岗斑岩(221.4 ± 1.1 Ma)属于后碰撞花岗岩;罗明非等(2014)认为香日德地区晚三叠世花岗岩(223~220 Ma)的成因与起源与碰撞后的背景下岩石圈的拆沉诱发的古老地壳物质的部分熔融作用有关,这说明在中三叠世晚期(230 Ma)东昆仑地区已经进入后碰撞环境,而洋盆的闭合可能是在这之前的

中三叠世(240 Ma).

5 结论

(1)东昆仑东段哈拉森地区的钾长花岗岩和细粒二长花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄分别为 239.2 ± 1.7 Ma 和 232.4 ± 1.2 Ma,形成于中三叠世,属于东昆仑海西—印支期岩浆演化连续序列的一部分.

(2)该地区花岗岩属于高钾钙碱性到钾玄岩系列的过铝质花岗岩,具有高分异 I 型花岗岩的特征,是同碰撞背景下,幔源岩浆与其诱发地壳物质熔融产生的长英质岩浆在地壳深部混合,并在侵位与成岩后期经历高分化的分异演化形成的.

(3)东昆仑造山带在晚古生代—早中生代期间经历了大洋俯冲到陆内碰撞的转换过程,诱发了大规模的岩浆活动,而在哈拉森地区广泛分布的中酸性侵入岩可能就是这一地质事件的响应,根据本文对该地区花岗质岩石的研究,结合前人的资料,笔者认为洋盆的闭合时限可能是在中三叠世(240 Ma).

References

Altherra, R., Holl, A., Hegner, E., et al., 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. [https://doi.org/10.1016/s0024-4937\(99\)00052-3](https://doi.org/10.1016/s0024-4937(99)00052-3)

Andersen, T., 2002. Correction of Common Lead in U-Pb Analyses That do not Report ^{204}Pb . *Chemical Geology*, 192(1-2): 59-79. [https://doi.org/10.1016/s0009-2541\(02\)00195-x](https://doi.org/10.1016/s0009-2541(02)00195-x)

Batchelor, R. A., Bowden, P., 1985. Petrogenetic Interpretation

- tion of Granitoid Rock Series Using Multicationic Parameters, *Chemical Geology*, 48 (1—4): 43—55. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(85\)90034-8](https://doi.org/10.1016/0009-2541(85)90034-8)
- Chappell, B. W., White, A. J. K., 1974. Two Contrasting Granite Types, *Pacific Geology*, 8(2): 173—174.
- Chen, X. H., George, G., Yin, A., et al., 2012. Paleozoic and Mesozoic Basement Magmatism of Eastern Qaidam Basin, Northern Qinghai-Tibet Plateau; LA-ICP-MS Zircon U-Pb Geochronology and Its Geological Significance. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 86 (2): 350—369. <https://doi.org/10.1111/j.1755-6724.2012.00665.x>
- Chen, G. C., 2014. Petrology, Genesis and Geological Significance of Late Paleozoic-Early Mesozoic Granitoids in East Kunlun Orogen (Dissertation). Chang'an University, Xi'an (in Chinese with English abstract).
- Chen, J. J., Fu, L. B., Wei, J. H., et al., 2016. Geochemical Characteristics of Late Ordovician Granodiorite in Gouli Area, Eastern Kunlun Orogenic Belt, Qinghai Province; Implications on the Evolution of Proto-Tethys Ocean. *Earth Science*, 41 (11): 1863—1882 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2016.129>
- Chen, Y. X., Pei, X. Z., Li, R. B., et al., 2011. Zircon U-Pb Age of Xiaomiao Formation of Proterozoic in the Eastern Section of the East Kunlun Orogenic Belt. *Geoscience*, 25 (3): 510—521 (in Chinese with English abstract).
- Collins, W. J., Beams, S. D., White, A. J. R., et al., 1982. Nature and Origin of A-Type Granites with Particular Reference to Southeastern Australia. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 80 (2): 189—200. <https://doi.org/10.1007/bf00374895>
- Deng, W. B., Pei, X. Z., Liu, C. J., et al., 2016. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Dating of the Chahantaolegai Syenogranites 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. P., 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>
- Gao, S., Rudnick, R. L., Yuan, H. L., et al., 2004. Recycling Lower Continental Crust in the North China Craton. *Nature*, 432 (7019): 892—897. <https://doi.org/10.1038/nature03162>
- Guo, X. Z., Jia, Q. Z., Kong, H. L., et al., 2016a. Zircon U-Pb Geochronology and Geochemistry of Harizha Quartz Diorite in the Eastern Section from East Kunlun. *Geological Science and Technology Information*, 36(5): 19—26 (in Chinese with English abstract).
- Guo, X. Z., Jia, Q. Z., Li, Y. Z., et al., 2016b. Zircon U-Pb Geochronology and Geochemical Characteristics of the Reshui Monzogranite in the Eastern Kunlun and Their Tectonic Significances. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 35(6): 1318—1328 (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>
- Jiang, C. F., Wang, Z. Q., Li, J. Y., et al., 2000. Open-Close Tectonics in the Central Orogenic Belt. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Li, J. C., Jia, Q. Z., Du, W., et al., 2014. LA-ICP-MS Zircon Dating and Geochemical Characteristics of Quartz Diorite in Asihai Gold Deposit in East Segment of the Eastern Kunlun. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 44 (4): 1188—1199 (in Chinese with English abstract).
- 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>
- Li, J. C., Kong, H. L., Li, Y. Z., et al., 2017. Ar-Ar Age of Altered Sericite, Zircon U-Pb Age of Quartz Diorite and Geochemistry of the Naomuhun Gold Deposit, East Kunlun. *Acta Geologica Sinica*, 91 (5): 979—991 (in Chinese with English abstract).
- Li, R. B., 2012. Research on the Late Paleozoic-Early Mesozoic Orogeny in East Kunlun Orogen (Dissertation). Chang'an University, Xi'an (in Chinese with English abstract).
- Li, T. D., Xiao, X. C., 1996. Tectonic Analysis; Structure and Evolution of Lithosphere of Qinghai-Xizang Plateau. *People's Republic of China Ministry of Geology and Mineral Resources Geological Memoirs*, 20 (5): 6—20 (in Chinese with English abstract).
- Liu, H. T., 2005. Petrology, Geochemistry and Geochronology of Late Triassic Volcanics, Kunlun Orogenic Belt, Western China; Implications for Tectonic Setting and Petrogenesis. *Geochemical Journal*, 39 (1): 1—20. <https://doi.org/10.2343/geochemj.39.1>
- Liu, B., Ma, C. Q., Zhang, J. Y., et al., 2014.⁴⁰Ar-³⁹Ar Age and Geochemistry of Subduction-Related Mafic Dikes in Northern Tibet, China; Petrogenesis and Tectonic Implications. *International Geology Review*, 56 (1): 57—73. <https://doi.org/10.1080/00206814.2013.818804>.

- Liu, Y. S., Gao, S., Hu, Z. C., et al., 2009. 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. <https://doi.org/10.1093/petrology/egp082>
- Ludwig, K. R., 2001. Users Manual for Isoplot/Ex Rev. 2.49: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel (Special Publication No. 1a, 55p). Berkeley Geochronological Center Special Publication, Berkeley
- Luo, M. F., Mo, X. X., Yu, X. H., et al., 2014. Zircon LA-ICP-MS U-Pb Age Dating, Petrogenesis and Tectonic Implications of the Late Triassic Granites from the Xiangride Area, East Kunlun. *Acta Petrologica Sinica*, 30(11): 3229-3241 (in Chinese with English abstract).
- Ma, C. Q., Xiong, F. H., Yin, S., et al., 2015. Intensity and Cyclicity of Orogenic Magmatism: An Example from a Paleotethyan Granitoid Batholith, Eastern Kunlun, Northern Qinghai-Tibetan Plateau. *Acta Petrologica Sinica*, 31(12): 3555-3568 (in Chinese with English Abstract).
- Maniar, P. D., Piccoli, P. M., 1989. Tectonic Discrimination of Granitoids. *Geological Society of America Bulletin*, 101(5): 635-643. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1989\)101<0635:tdog>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1989)101<0635:tdog>2.3.co;2)
- 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).
- 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>
- Qiu, J. S., Xiao, E., Hu, J., et al., 2008. Petrogenesis of Highly Fractionated I-Type Granites in the Coastal Area of Northeastern Fujian Province: Constraints from Zircon U-Pb Geochronology, Geochemistry and Nd-Hf Isotopes. *Acta Petrologica Sinica*, 24(11): 2468-2484 (in Chinese with English abstract).
- Ren, J. S., 2004. Some Problems on the Kunlun-Qinling Orogenic System. *Northwestern Geology*, 37(1): 1-5 (in Chinese with English abstract).
- Richards, J. P., 2003. Tectono-Magmatic Precursors for Porphyry Cu-(Mo-Au) Deposit Formation. *Economic Geology*, 98(8): 1515-1533. <https://doi.org/10.2113/98.8.1515>
- Richards, J. P., 2011. Magmatic to Hydrothermal Metal Fluxes in Convergent and Collided Margins. *Ore Geology Reviews*, 40(1): 1-26. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2011.05.006>
- 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, Y., Pei, X. Z., Ding, S. P., et al., 2009. Halagatu Magma Mixing Granites in the East Kunlun Mountains—Evidence from Zircon U-Pb Dating. *Acta Geologica Sinica*, 83(7): 1000-1010 (in Chinese with English abstract).
- Wang, G. C., Wang, Q. H., Jian, P., et al., 2004. Zircon SHRIMP Ages of Precambrian Metamorphic Basement Rocks and Their Tectonic Significance in the Eastern Kunlun Mountains, Qinghai Province, China. *Earth Science Frontiers*, 11(4): 481-490 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X. L., 2011. Studies on Geological Characteristics and Forming Age of Southern Xiangjia Mountain Granitic Pluton at East Section of East Kunlun Orogenic Belt (Dissertation). Chang'an University, Xi'an (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., Li, X. H., Yang, J. H., et al., 2007. Discussions on the Petrogenesis of Granites. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1217-1238 (in Chinese with English abstract).
- Xiong, F. H., 2014. Spatial-Temporal Pattern, Petrogenesis and Geological Implications of Paleo-Tethyan Granitoids in the East Kunlun Orogenic Belt (Eastern Segment) (Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan (in Chinese with English abstract).
- Xiong, F. H., Ma, C. Q., Jiang, H. A., et al., 2013. Petrogenetic and Tectonic Significance of Permian Calc-Alkaline Lamprophyres, East Kunlun Orogenic Belt, Northern Qinghai-Tibet Plateau. *International Geology Review*, 55(14): 1817-1834. <https://doi.org/10.1080/00206814.2013.804683>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2016.01.026>
- Yan, W., Qiu, D. M., Ding, Q. F., et al., 2016. Geochronology, Petrogenesis, Source and Its Structural Significance of Houtougou Monzogranite of Wulonggou Area in Eastern Kunlun Orogenic Belt. *Acta Petrologica Sinica*, 32(12): 3555-3568 (in Chinese with English Abstract).

- ny. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 46 (2): 443–460 (in Chinese with English abstract).
- Yin, H. F., Zhang, K. X., 1998. Evolution and Characteristics of the Central Orogenic Belt. *Earth Science*, 23 (5): 438–442 (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, W., Zhou, H. W., Zhu, Y. H., et al., 2016. The Evolution of Triassic Granites Associated with Mineralization within East Kunlun Orogenic Belt: Evidence from the Petrology, Geochemistry and Zircon U-Pb Geochronology of the Mohexiala Pluton. *Earth Science*, 41 (8): 1334–1348 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2016.520>
- Zhao, K. D., Jiang, S. Y., Yang, S. Y., et al., 2012. Mineral Chemistry, Trace Elements and Sr-Nd-Hf Isotope Geochemistry and Petrogenesis of Cailing and Furong Granites and Mafic Enclaves from the Qitianling Batholith in the Shi-Hang Zone, South China. *Gondwana Research*, 22 (1): 310–324. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2011.09.010>
- Zheng, Y. F., Zhang, S. B., Zhao, Z. F., et al., 2007. Contrasting Zircon Hf and O Isotopes in the Two Episodes of Neoproterozoic Granitoids in South China: Implications for Growth and Reworking of Continental Crust. *Lithos*, 96 (1–2): 127–150. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2006.10.003>
- ### 附中文参考文献
- 陈国超, 2014. 东昆仑造山带(东段)晚古生代—早中生代花岗岩类岩石特征、成因及地质意义(博士学位论文). 西安: 长安大学.
- 陈加杰, 付乐兵, 魏俊浩, 等, 2016. 东昆仑沟里地区晚奥陶世花岗闪长岩地球化学特征及其对原特提斯洋演化的制约. *地球科学*, 41(11): 1863–1882.
- 陈有妍, 裴先治, 李瑞保, 等, 2011. 东昆仑造山带东段元古界小庙岩组的锆石 U-Pb 年龄. *现代地质*, 25 (3): 510–521.
- 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.
- 国显正, 贾群子, 孔会磊, 等, 2016a. 东昆仑东段哈日扎石英闪长岩时代, 成因及其地质意义. *地质科技情报*, 36(5): 19–26.
- 国显正, 贾群子, 栗亚芝, 等, 2016b. 东昆仑热水二长花岗岩地球化学特征、年代学及其构造意义. *矿物岩石地球化学通报*, 35(6): 1318–1328.
- 姜春发, 王宗起, 李锦轶, 等, 2000. 中央造山带开合构造. 北京: 地质出版社.
- 李金超, 贾群子, 杜玮, 等, 2014. 东昆仑东段阿斯哈矿床石英闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及岩石地球化学特征. *吉林大学学报(地球科学版)*, 44(4): 1188–1199.
- 李金超, 孔会磊, 栗亚芝, 等, 2017. 青海东昆仑瑞木浑金矿蚀变绢云母 Ar-Ar 年龄、石英闪长岩锆石 U-Pb 年龄和岩石地球化学特征. *地质学报*, 91(5): 979–991.
- 李瑞保, 2012. 东昆仑造山带(东段)晚古生代—早中生代造山作用研究(博士学位论文). 西安: 长安大学.
- 李廷栋, 肖序常, 1996. 青藏高原地体构造分析——青藏高原岩石圈结构构造和形成演化. 中华人民共和国地质矿产部地质专报(五), 20: 6–20.
- 罗明非, 莫宣学, 喻学惠, 等, 2014. 东昆仑香日德地区晚三叠世花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年、岩石成因和构造意义. *岩石学报*, 30(11): 3229–3241.
- 马昌前, 熊富浩, 尹烁, 等, 2015. 造山带岩浆作用的强度和旋回性: 以东昆仑古特提斯花岗岩类岩基为例. *岩石学报*, 31(12): 3555–3568.
- 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.
- 邱检生, 肖娥, 胡建, 等, 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.
- 任纪舜, 2004. 昆仑—秦岭造山系的几个问题. *西北地质*, 37 (1): 1–5.
- 孙雨, 裴先治, 丁仁平, 等, 2009. 东昆仑哈拉苏吐岩浆混合花岗岩: 来自 U-Pb 年代学的证据. *地质学报*, 83 (7): 1000–1010.
- 王国灿, 王青海, 简平, 等, 2004. 东昆仑前寒武纪基底变质岩系的锆石 SHRIMP 年龄及其构造意义. *地学前缘*, 11 (4): 481–490.
- 王学良, 2011. 东昆仑东段香加南山花岗岩体地质特征及其形成年代研究(硕士学位论文). 西安: 长安大学.
- 吴福元, 李献华, 杨进辉, 等, 2007. 花岗岩成因研究的若干问题. *岩石学报*, 23(6): 1217–1238.
- 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.
- 严威, 邱殿明, 丁清峰, 等, 2016. 东昆仑五龙沟地区猴头沟二长花岗岩年龄、成因、源区及其构造意义. *吉林大学学报(地球科学版)*, 46(2): 443–460.
- 殷鸿福, 张克信, 1998. 中央造山带的演化及其特点. *地球科学*, 23(5): 438–442.
- 张炜, 周汉文, 朱云海, 等, 2016. 东昆仑与成矿有关的三叠纪花岗岩演化: 基于莫河下拉岩体岩石学, 地球化学和锆石 U-Pb 年代学的证据. *地球科学*, 41(8): 1334–1348.