

DOI: 10.12401/j.nwg.2023133

东昆仑东段到木提岩体成因及构造意义：来自年代学及地球化学的约束

韩建军¹, 李红刚^{2,3,*}, 何俊⁴, 赵明福¹, 韩旭⁵, 张新远^{2,3}, 柴云¹

(1. 青海省地质调查局, 青海 西宁 810001; 2. 青海省青藏高原北部地质过程与矿产资源重点实验室, 青海 西宁 810012; 3. 青海省地质调查院, 青海 西宁, 810012; 4. 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 安徽 合肥 230026; 5. 合肥工业大学资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要: 到木提岩体位于东昆仑造山带东段, 主要岩性有二长花岗岩、花岗闪长岩及闪长岩。笔者对新发现的闪长岩进行了锆石 U-Pb 测年和岩石地球化学测试, 以确定其形成时代及岩石成因, 结合二长花岗岩和花岗闪长岩的岩石地球化学特征, 综合探讨到木提岩体的侵位时代、岩石成因及构造演化程。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年获得的闪长岩 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 $(244.6 \pm 1.8)\text{Ma}$, 到木提闪长岩体结晶时代为早三叠世。二长花岗岩和花岗闪长岩的地球化学特征显示: 里特曼指数小于 3.3, 具钙碱性-高钾钙碱性特征; 铝饱和指数 A/CNK 值均小于 1.1; 岩石中 P_2O_5 含量普遍较低, 且与 SiO_2 含量呈负相关性; 富集 K、Rb、La 等 LILE, 亏损 Nb、Ta、Ti、P 等 HFSE。地球化学特征表明, 到木提岩体属于 I 型花岗岩。综合分析认为, 东昆仑东段到木提岩体是下地壳岩石发生部分熔融形成的火山弧花岗岩, 阿尼玛卿洋俯冲作用可以持续到早—中三叠世, 俯冲过程中形成区域性的地幔岩浆底侵就是导致下地壳熔融的热源, 且幔源岩浆不同程度混入到到木提岩浆演化中, 岩浆演化中伴有一定的结晶分异发生。

关键词: 闪长岩; 花岗闪长岩; 二长花岗岩; 地球化学; 锆石 U-Pb 年龄; 构造环境; 东昆仑东段

中图分类号: P595; P597+1

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2023)06-0140-15

Petrogenesis and Tectonic Implications of Daomuti Intrusive Rocks in East Kunlun Orogen: Constraints from the Geochronology and Geochemistry

HAN Jianjun¹, LI Honggang^{2,3,*}, HE Jun⁴, ZHAO Mingfu¹, HAN Xu⁵, ZHANG Xinyuan^{2,3}, CHAI Yun¹

(1. Qinghai Geological Survey, Xining 810001, Qinghai, China; 2. Qinghai Provincial Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources of Northern Qinghai-Tibetan Plateau, Xining 810012, Qinghai, China; 3. Qinghai Geological Survey Institute, Xining 810012, Qinghai, China; 4. School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China; 5. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China)

Abstract: The Daomuti intrusive rocks is located in the eastern section of the East Kunlun orogenic belt, and mainly includes monzogranite, granodiorite and diorite. In this paper, zircon U-Pb dating and petrogeochemical tests are performed on newly discovered diorite to determine its crystalline age and petrogenesis. Comprehensively analyse the petrogeochemical characteristics of monzogranite and granodiorite, and discuss the emplace-

收稿日期: 2021-11-15; 修回日期: 2022-04-24; 责任编辑: 吕鹏瑞

基金项目: 青海省地质勘查项目“青海省都兰县昂日塔地区 1: 25000 万区域地质矿产调查”(2017042034jc015)资助。

作者简介: 韩建军(1991-), 男, 硕士, 工程师, 从事构造地质学及矿产勘查工作。E-mail: wsxh91@foxmail.com。

* 通讯作者: 李红刚(1973-), 男, 工程师, 从事区域地质调查和矿产调查工作。E-mail: 674833190@qq.com。

ment age, rock genesis and tectonic evolution of the Daomuti intrusive rocks. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating analysis shows that the $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ weighted average age of diorite is (244.6 ± 1.8) Ma, and the crystallization age of the diorite is Early Triassic. The geochemical characteristics of the monzogranite and granodiorite show that the Ritman index is greater than 3.3 and has the characteristics of calcium alkalinity-high potassium calcium alkalinity; the aluminum saturation index A/CNK values are less than 1.1; the P_2O_5 content in the rocks is low, and it has a negative correlation with SiO_2 content; It is enriched with LILE such as K, Rb, La, and loses HFSE such as Nb, Ta, Ti and P. The above characteristics indicate that the Daomuti intrusive rocks belongs to type I granite. Based on the research results of this paper, it can be considered that the Daomuti intrusive rocks is a volcanic arc granite, its formed by partial melting of the lower crust rocks, and the Animaqing Ocean subduction continued to the Early-Middle Triassic. The mantle magma underplating during the subduction process is the heat source that causes the melting of the lower crust, and the mantle source magma is mixed into the Daomuti intrusive rocks' magma evolution, and during the Daomuti intrusive rocks' magma evolution occurred fractional crystallization.

Keywords: diorite; granodiorite; monzogranite; geochemistry; zircon U-Pb dating; tectonic setting; east Kunlun orogeny

东昆仑造山带是中央造山带的一部分,位于华南板块与西域板块南缘活动带接合带上,昆北、昆中及昆南断裂可将东昆仑地区分为昆北、昆中和昆南3个构造带。早古生代早期进入加里东构造旋回,直至晚泥盆世旋回结束,泥盆纪是地质构造发展的重要转换期,此后又进入了石炭纪—晚三叠世的古特提斯洋演化旋回,三叠纪以后为陆内造山阶段,经受了喜山期构造运动的强烈挤压、增厚抬升作用,形成了总体呈东西向展布的巨型复合造山带(罗照华等, 2002; 杨经绥等, 2003; 许志琴等, 2006; 莫宣学等, 2007; 许长坤等, 2012)。在经历了复杂多期的构造演化阶段后,形成了东昆仑如今与三大断裂带走向一致的构造行迹,昆中断裂带中也相继发现了超高压变质产生的标志岩石——榴辉岩(Meng et al., 2013; 祁生胜等, 2014; 祁晓鹏等, 2016a; 张照伟等, 2017),其包含了大陆造山带俯冲及碰撞过程中的地球动力学记录。在俯冲碰撞过程中伴生了同碰撞或后碰撞的岩浆岩,东昆仑地区广泛出露晚华力西期—印支期的花岗岩就是其最显明的特征之一。前人对于该期花岗岩的研究,认为其归属于东昆仑造山带晚古生代—早中生代碰撞造山旋回中的同碰撞(袁万明等, 2000; Zhang et al., 2012; Xiong et al., 2014)。但近些年的研究逐渐偏向另一种观点,该期花岗质岩浆弧的就位与布青山—阿尼玛卿洋的向北俯冲关系密切,而且是东昆仑地区三叠纪岩浆弧的主要形成机制(熊富浩等, 2011; 李瑞保等, 2012, 2018; 马昌前等, 2015; 陈国超等, 2016; 韩建军等, 2020; 吴树宽等, 2023)。

近年来,笔者在东昆仑东段昂日塔地区开展精细的1:2.5万地质矿产调查工作期间,在前人工作确定的花岗岩区内(祁晓鹏等, 2016b)新解体出闪长岩岩体,主要出露在昂日塔地区的到木提一带,分布有限且与花岗质侵入岩呈脉动接触。文中以该闪长岩体及花岗质侵入岩为研究对象,确定闪长岩体的LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄,通过岩石学及地球化学等方面分析,探讨岩体的时代关系、岩石成因及构造意义。

1 区域地质概况

东昆仑造山带是中央造山系西段部分,主要分布在青海省境内,是经历了早古生代和晚古生代—早中生代这两大碰撞造山旋回而形成的复合型造山带,其向西可延伸至新疆境内,被阿尔金大型左行断裂带错开(许志琴等, 1999),东侧与西秦岭造山带相连,北侧为柴达木盆地,南侧为布青山—阿尼玛卿蛇绿混杂岩带(图 1a)。

研究区位于东昆仑造山带东段,构造位置在昆北岩浆弧和昆南俯冲增生杂岩带的接触部位,近 EW 向展布的昆中断裂带横穿本区,大面积出露的前寒武纪变质基底岩系和两大造山期的中酸性侵入岩,侵入岩主要为加里东期和晚华里西期—印支期区域上碰撞造山的产物;变质基底主要为古元古代金水口岩群,系一套层状无序的中高级变质岩系,昆中断裂南北均有不同程度的发育,被断裂构造破坏呈大小不一、形

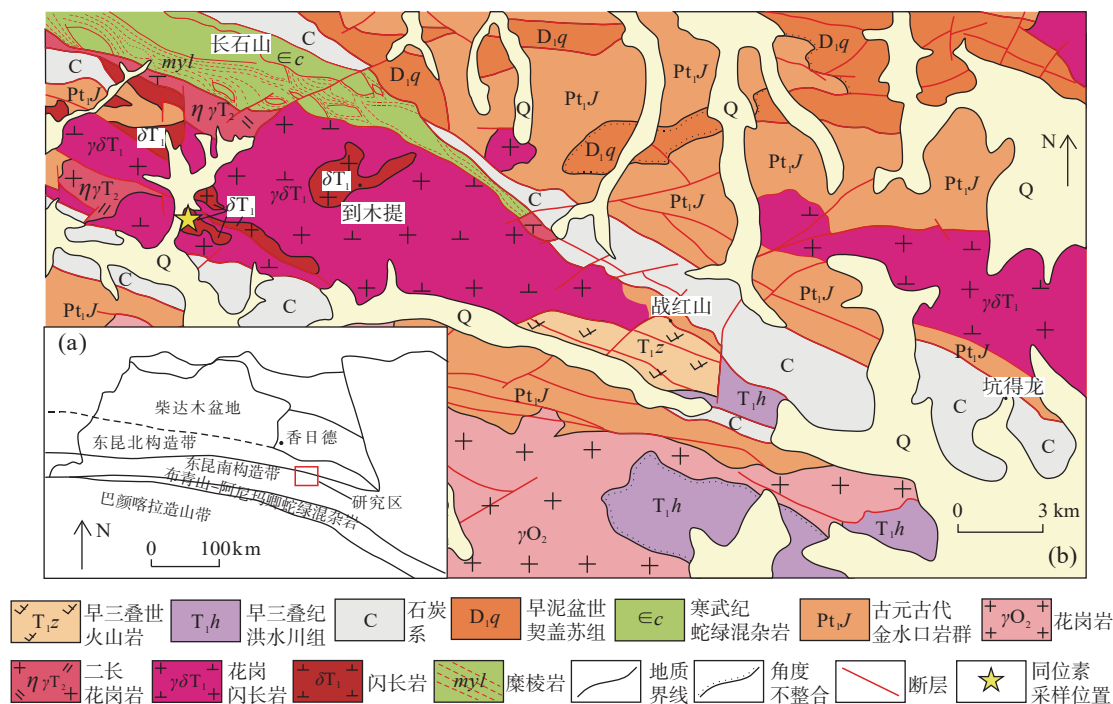


图1 东昆仑东段到木提地区大地构造位置(a)及地质简图(b)

Fig. 1 (a) Geotectonic location and (b) geological map in Daomuti area of east Kunlun orogeny

态各异的 NNW 向展布的构造块体, 其与早泥盆世契盖苏组及早三叠世洪水川组呈不整合或断层接触, 与石炭纪浩特洛哇组呈断层接触。契盖苏组为碎屑岩和火山岩组成了一套磨拉石相建造; 浩特洛哇组为滨浅海-陆棚相的粉砂岩偶夹火山岩建造; 洪水川组是碎屑岩夹火山岩, 该套地层中火山岩与区域上前人新发现的晚二叠世大灶火沟组火山(史连昌等, 2016)应同属古特提斯洋俯冲环境下的产物。区内构造主要为 NW、NE 向 2 组, NW 向为昆中断裂系, 为区内蛇绿构造混杂岩带的北缘断裂, 整体呈向北突出的弧形; NE 向的为后期脆性断裂。

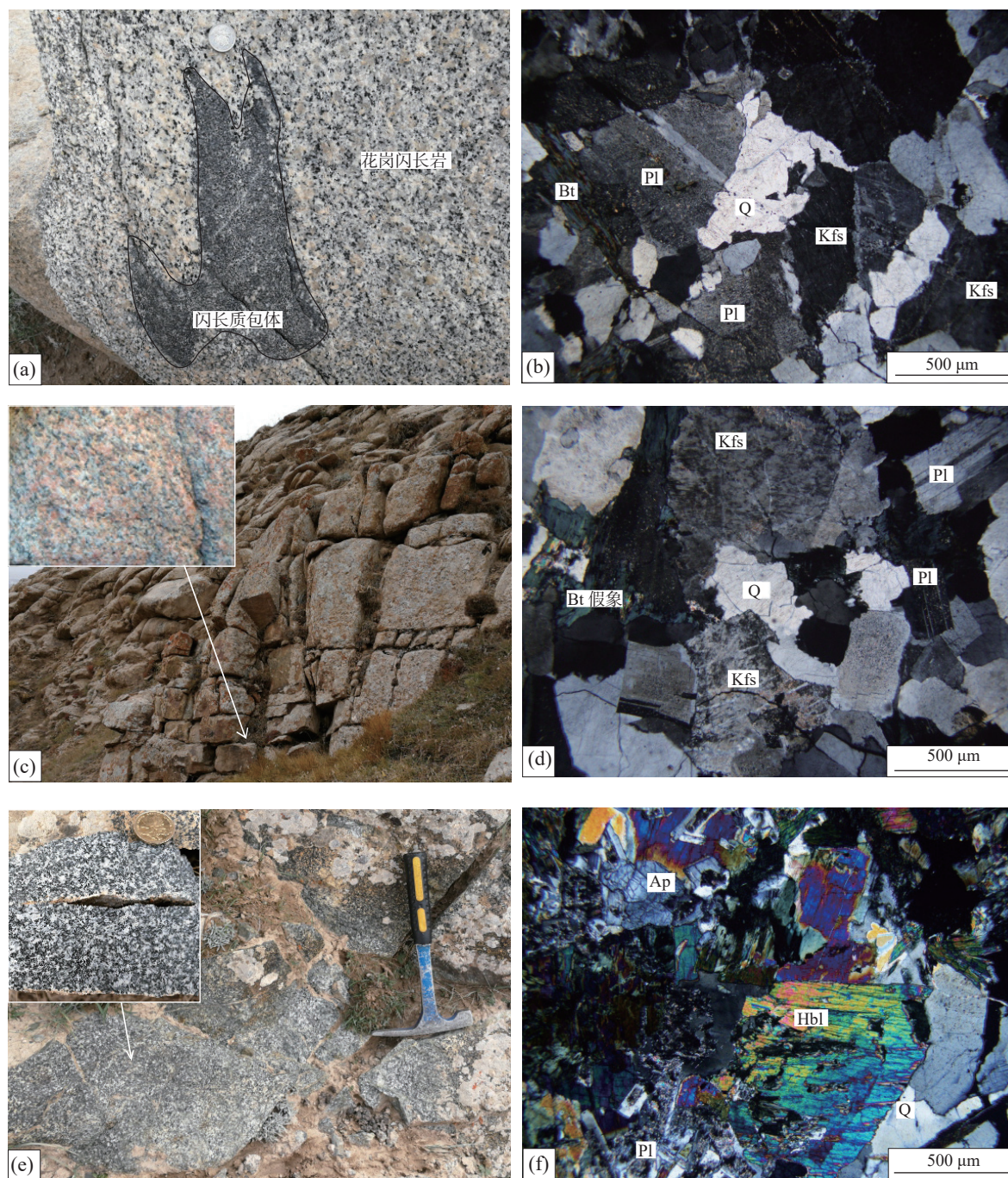
2 岩体地质和岩相学特征

到木提岩体位于东昆仑造山带东段的俯冲增生杂岩带中, 分布较广泛, 岩体分布总体上呈近东西向带状, 走向上延伸约 20 km, 与区域构造基本保持一致, 前人的区域地质调查工作中识别出该岩体主要以二长花岗岩、花岗闪长岩为主, 并对其二者的年龄做出了限定。根据最新的 1:2.5 万区域地质矿产调查项目成果, 笔者对该岩体重新进行了精细填图, 重绘了二长花岗岩和花岗闪长岩的界线, 又识别出了闪长岩体 10 余处(图 1b, 图 2e), 出露面积均小于 2.5 km², 多

为岩珠、岩墙产出, 与二长花岗岩和花岗闪长岩呈脉动接触, 北部岩体与东昆中蛇绿构造混杂岩带呈断层接触, 围岩既有古元古代金水口岩群, 也有石炭系和三叠系, 侵位界线呈浑圆状-港湾状。此外, 在花岗闪长岩中见暗色的闪长质捕虏体, 呈灰黑色浑圆状、椭圆状, 或具一定塑性流动特征(图 2a)。

花岗闪长岩: 浅灰白色细粒自形-半自形结构(图 2a), 块状构造。岩石成分为斜长石、石英、钾长石, 暗色矿物假象及副矿物(图 2b)。斜长石约为 50%, 呈半自形板状、粒状长短轴比为 0.85~3.5 mm, 显示有环带构造, 具较强黏土化, 伴绢云母化、帘石化, 发育钠长聚片双晶。石英含量约为 30%, 呈他形粒状(大小为 1~3.5 mm), 以集合体形式充填于其他矿物间。钾长石含量为 11%, 呈他形粒状(大小为 0.5~1.3 mm), 负突起, 轻微红褐色黏土化蚀变, 形状明显受空间影响。暗色矿物假象约为 9%, 呈片状、柱状, 大小为 0.5~1.25 mm, 已被绿泥石交代并伴帘石化, 从形态判断有黑云母和角闪石。副矿物锆石含量极少, 呈粒状分布在暗色矿物假象中。

二长花岗岩: 浅肉红色, 细粒花岗结构(图 2c), 块状构造。矿物成分有斜长石、钾长石、石英, 少量角闪石、黑云母及副矿物(图 2d)。斜长石约为 25%, 呈半自形粒状, 长短轴比为 0.16~1.7 mm, 具强黏土化、



a.花岗闪长岩及闪长质包体; b.花岗闪长岩显微照片; c.二长花岗岩; d.二长花岗岩显微照片; e.闪长岩;
f.闪长岩显微照片; Pl.斜长石; Kfs.钾长石; Q.石英; Bt.黑云母; Hbl.角闪石; Ap.磷灰石

图2 到木提岩体的野外和显微照片

Fig. 2 Field photos and microphotographs of the Daomuti intrusive rocks

帘石化蚀变, 见环带构造, 具正突起, 为中长石。钾长石约为 44%, 多呈他形粒状, 具黏土化蚀变, 见不明显的格子双晶、显微条纹构造, 为微斜条纹长石。石英为 28%, 呈他形粒状。角闪石约为 2%, 具绿色-褐黄色的多色性, 半自形短柱状。黑云母不足 1%, 具褐色-浅黄色的多色性, 发生一定的绿泥石化蚀变。少

量磷灰石等副矿物。

闪长岩: 呈灰绿色, 中粒半自形粒结构(图 2e), 块状构造。岩石主要由角闪石、斜长石及少量石英和副矿物磷灰石组成(图 2f)。角闪石为普通角闪石, 含量约为 56%, 呈柱状、粒状, 具多色性, 呈黄褐色-褐绿色, 粒径为 0.4~1.4 mm, 具角闪式解理, 沿解理见绿泥石

化蚀变。斜长石约为 41%，呈半自形板状、粒状，长短轴平均为 0.3~1.3 mm，中长石具环带构造，环带中心具帘石化蚀变，钠长石发育聚片双晶。石英为 2%，他形粒状，为 0.2~0.3 mm，充填于其他矿物间。磷灰石不足 1%，零星偶见，呈粒状，大小为 0.2~0.3 mm。

3 分析方法

测年样品的锆石挑选、制靶及锆石阴极发光图 (CL) 拍摄由北京中兴美科科技有限公司完成，先对样品进行粗碎、细碎，用摇床进行淘洗，再依次进行强磁选、电磁选，无磁部分用酒精进行精淘并挑选纯锆石。在双目体视镜下将锆石固定于双面胶上，选取合适模具注入配比好的树脂 (环氧树脂是美国标乐 20-8140-32 组合系列，比例为 100 : 42) 抽取真空加入靶号，放入烘箱凝固后取出靶，用砂纸打磨靶正反面，正面锆石表面裸露出来，用金刚石悬浮液进行抛光处理，超声波清洗靶，完成制靶。阴极发光照相设备型号及参数：电镜是 FEI Quanta450，阴极发光为 Gatan Mono-CL4。

锆石测年工作由北京燕都中实测试技术有限公司负责完成。测试锆石 U-Pb 同位素定年利用 LA-ICP-MS 分析完成。激光剥蚀系统为 New Wave UP213，ICP-MS 为布鲁克 M90。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，二者在进入 ICP 之前通过一个匀化混合器混合。每个样品点分辨包括大约 20~30 s 的空白信号和 50 s 的样品信号。分析数据的处理采用软件 ICP MS DataCal 来完成。U-Pb 同位素定年中采用锆石标准 91500 和 Plesovice 作为外标进行同位素分馏校正。锆石微量元素含量利用 SRM610 作为多外标、Si 作内标的方法进行定量计算 (Liu et al., 2010; 李艳广等, 2023)。测试剥蚀光斑直径根据实际情况选择 25 μm 。锆石样品的 U-Pb 年龄谱和图绘制与年龄加权平均图均采用 Isoplot 4.15 完成。

硅酸盐全分析在北京燕都中实测试技术有限公司完成，测试样品处理流程如下：将岩石粉碎粗碎至厘米级的块体，选取无蚀变及脉体穿插的新鲜样品用纯化水冲洗干净，烘干并粉碎至 200 目以备测试使用。主量元素测试首先将粉末样品称量后加 $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ (1 : 8) 助熔剂混合，并使用融样机加热至 1 150 $^{\circ}\text{C}$ 使其在金铂坩埚中熔融成均一玻璃片体，后使用 XRF (Zetium, PANalytical) 测试，测试结果保证数据误差小于 1%。

微量元素测试将 200 目粉末样品称量并置放入聚四氟乙烯溶样罐并加入 HF、 HNO_3 ，在干燥箱中将的高压消解罐保持在 190 $^{\circ}\text{C}$ 温度 72 h，后取出经过赶酸并将溶液定容为稀溶液上机测试。测试使用 ICP-MS (M90, analytikjena) 完成，所测数据根据监控标样 GSR-2 显示误差小于 5%，部分挥发性元素及极低含量元素的分析误差小于 10%。

4 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年

本次测年的岩石采自都兰县沟里乡到木提地区的闪长岩进行了锆石 U-Pb 年龄测试，同位素年龄采样点地理坐标为 N 35 $^{\circ}$ 35'59"，E 98 $^{\circ}$ 34'13"。锆石多呈自形-半自形柱状，颗粒长度为 150~200 μm ，长宽比为 2~3。通过锆石阴极发光图像下形态及内部结构的观察，其中环带结构发育不明显，部分环带整体较宽，暗示锆石从岩浆中结晶时的温度较高 (Rubatto et al., 2000; 吴元保等, 2004; 雷玮琰等, 2013; 王梓桐等, 2022; 牛腾等, 2023)，锆石中也无残留晶核 (图 3a)，部分锆石结晶时熔体环境变化导致各晶面生长速度不同，从而出现扇形分带的结构 (Vavra et al., 1996)，不同晶面生长环带明显的有无或宽窄差异。

到木提地区闪长岩 (PB48-1) LA-ICP-MS U-Pb 锆石测年获得 22 个有效分析结果 (表 1)。锆石 Th 含量为 $9.4 \times 10^{-6} \sim 20.8 \times 10^{-6}$ ，U 含量为 $23.0 \times 10^{-6} \sim 64.1 \times 10^{-6}$ ，Th/U 值为 0.3~0.54； $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄大多为 241~249 Ma，对应的加权平均年龄为 $(244.6 \pm 1.8) \text{Ma}$ (MSWD=0.26, n=22)，其代表闪长岩的结晶年龄 (图 3b)。

5 岩石地球化学

笔者对沟里乡到木提地区二长花岗岩、花岗闪长岩和闪长岩进行了岩石地球化学测试分析 (表 2)。测试结果表明，二长花岗岩 SiO_2 含量变化不大，为 70.32%~77.09%， Al_2O_3 含量 12.29%~14.97%， Na_2O 含量较高，为 3.6%~5.15%， K_2O 含量为 2.73%~4.81%，全碱含量 ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) 为 7%~8.43%，在 TAS 图解中多落入亚碱性花岗岩区 (图 4a)。里特曼指数 (σ) 平均为 1.81，均小于 3.3，表现为钙碱性，在 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图解中也落入高钾-中钾钙碱性系列区域中 (图 4b)；铝饱和指数 A/CNK 值 > 1 (1.04~1.1)，A/NK 值 > 1 (1.11~1.52) (图 4c)，均显示出具有过铝质岩石的特征。二长花岗岩稀土总量为 $110.98 \times 10^{-6} \sim 202.91 \times 10^{-6}$ ，LREE 值为

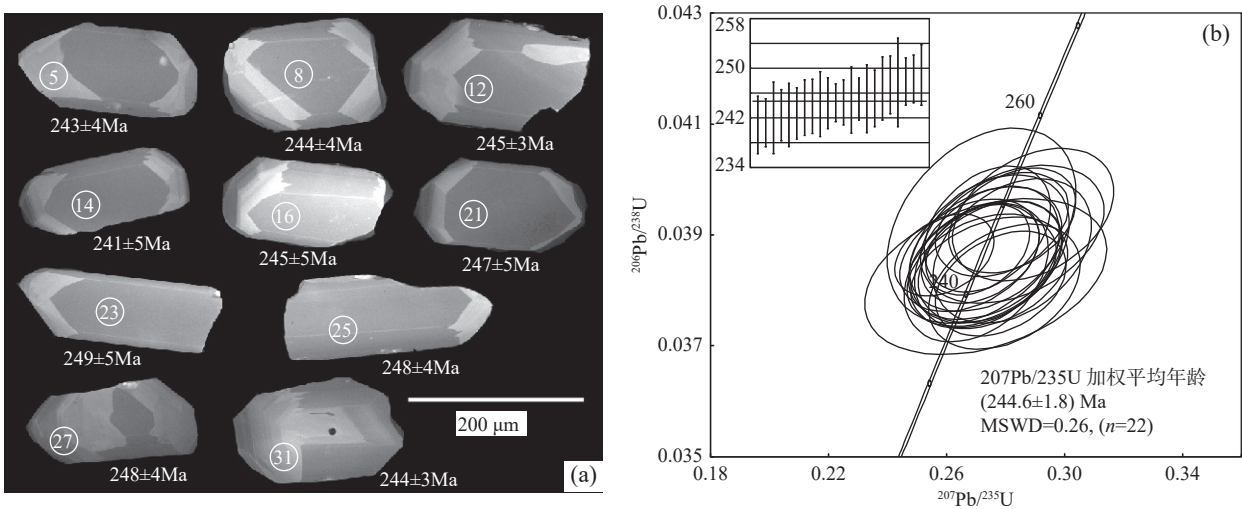


图 3 闪长岩的锆石阴极发光图像(a)和谐和图(b)
Fig. 3 (a) CL images and (b) U-Pb concordia diagrams of zircons from diorite

表 1 闪长岩的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测年分析结果统计表
Tab. 1 LA-ICP-MS U-Pb zircon analysis results for diorite

样品 编号	元素含量 (10 ⁻⁶)		Th/U 比值	同位素比值						同位素年龄					
	Th	U		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ
T05	11.4	28.2	0.405 8	0.052 3	0.003 2	0.272 0	0.016 7	0.038 4	0.000 7	300	139	244	13	243	4
T06	15.7	40.9	0.384 8	0.052 7	0.003 6	0.273 3	0.017 0	0.038 8	0.000 7	318	153	245	14	245	5
T07	12.8	27.4	0.466 2	0.053 4	0.003 5	0.274 6	0.017 9	0.038 7	0.000 9	348	148	246	14	245	5
T08	13.7	36.3	0.377 4	0.052 3	0.003 4	0.267 9	0.015 6	0.038 6	0.000 7	300	146	241	13	244	4
T09	14.9	39.6	0.375 7	0.053 2	0.003 5	0.273 2	0.017 1	0.038 5	0.000 7	339	150	245	14	244	4
T10	11.9	32.5	0.366 1	0.054 8	0.003 1	0.278 4	0.014 6	0.038 1	0.000 6	405	125	249	12	241	4
T12	15.5	45.3	0.341 6	0.051 6	0.002 3	0.270 7	0.011 6	0.038 7	0.000 5	266	102	243	9	245	3
T13	9.4	26.3	0.356 3	0.053 8	0.003 5	0.274 6	0.017 6	0.038 3	0.000 7	361	147	246	14	242	4
T14	15.2	34.2	0.443 5	0.054 0	0.003 3	0.279 8	0.016 9	0.038 1	0.000 7	370	137	250	13	241	5
T15	12.4	23.0	0.540 0	0.055 4	0.005 9	0.273 3	0.027 1	0.038 3	0.000 9	428	236	245	22	242	6
T16	15.8	41.1	0.383 6	0.054 2	0.003 6	0.282 3	0.017 7	0.038 7	0.000 9	381	149	252	14	245	5
T20	19.1	64.1	0.298 1	0.052 1	0.003 1	0.273 8	0.016 2	0.038 6	0.000 8	290	136	246	13	244	5
T21	16.6	42.1	0.394 2	0.054 1	0.004 1	0.282 3	0.020 6	0.039 0	0.000 8	375	171	253	16	247	5
T22	14.5	34.6	0.417 9	0.051 4	0.004 1	0.271 9	0.021 1	0.039 2	0.001 2	258	184	244	17	248	7
T23	13.5	37.8	0.358 9	0.054 3	0.003 3	0.289 4	0.018 0	0.039 4	0.000 8	385	138	258	14	249	5
T24	10.7	31.6	0.338 0	0.052 9	0.002 8	0.273 8	0.014 1	0.039 1	0.000 7	324	119	246	11	247	5
T25	19.2	41.7	0.461 0	0.053 8	0.003 2	0.278 8	0.014 8	0.039 2	0.000 6	362	136	250	12	248	4
T26	16.0	48.1	0.333 2	0.051 8	0.003 2	0.270 1	0.016 1	0.038 3	0.000 8	274	140	243	13	242	5
T27	13.9	39.4	0.351 9	0.053 3	0.002 8	0.282 2	0.014 2	0.039 3	0.000 6	340	118	252	11	248	4
T29	11.2	28.6	0.392 5	0.055 0	0.003 4	0.275 0	0.016 1	0.038 5	0.000 7	410	140	247	13	244	4
T30	13.7	37.8	0.361 7	0.052 5	0.002 8	0.271 5	0.013 3	0.038 7	0.000 6	306	121	244	11	244	4
T31	20.8	63.7	0.326 0	0.049 1	0.002 1	0.259 3	0.011 2	0.038 6	0.000 5	150	101	234	9	244	3

注: 测试单位为北京燕都中实测试技术有限公司, 测试时间为2019年。

表 2 到木提岩体的常量元素(%)、稀土和微量元素数据(10^{-6})统计表
Tab. 2 Major (%) and trace (10^{-6}) element compositions of Daomuti intrusive rocks

岩性	二长花岗岩										花岗闪长岩					闪长岩		
	样品号	2PM2-1	2PM37-1	3PM2-1	3PM3-1	3PM4-1	3PM10-1	3PM14-1	2PM8-1	2PM18-1	2PM30-1	3PM1-1	3PM5-1	3PM8-1	2PM47-1	2PM48-1	2PM48-2	
SiO ₂	74.47	72.12	77.06	76.61	76.65	70.32	77.09	74.98	72.93	69.65	76.55	71.57	69.03	58.82	50.09	49.51		
TiO ₂	0.13	0.23	0.04	0.04	0.06	0.29	0.04	0.08	0.25	0.35	0.04	0.32	0.37	1.25	1.45	1.48		
Al ₂ O ₃	13.63	14.24	12.29	12.71	12.41	14.97	12.43	13.09	13.44	15.19	12.62	14.22	15.26	15.06	18.63	18.63		
TF _{e2} O ₃	1.63	2.80	1.41	1.41	1.57	3.10	1.33	2.01	3.44	3.58	1.37	3.26	3.76	8.80	13.40	14.26		
MnO	0.04	0.09	0.06	0.05	0.07	0.09	0.04	0.05	0.09	0.08	0.06	0.08	0.10	0.16	0.21	0.23		
MgO	0.33	0.65	0.16	0.13	0.21	0.77	0.15	0.38	0.48	0.89	0.15	0.72	0.94	2.88	1.79	1.92		
CaO	0.88	1.53	0.79	0.70	0.86	2.21	0.30	0.79	2.05	3.57	0.78	3.00	3.06	5.92	7.89	8.07		
Na ₂ O	5.15	4.18	3.92	3.82	3.75	4.18	3.60	3.98	4.46	4.02	3.81	3.87	3.91	2.74	3.29	3.23		
K ₂ O	2.73	3.00	3.61	3.98	3.71	2.74	4.81	4.00	1.75	1.49	4.09	1.91	2.45	2.34	1.08	0.87		
P ₂ O ₃	0.06	0.07	0.02	0.02	0.02	0.09	0.01	0.04	0.06	0.11	0.02	0.08	0.12	0.13	0.48	0.48		
LOI	0.90	0.99	0.65	0.36	0.49	1.14	0.31	0.97	0.77	0.70	0.35	0.58	0.67	1.50	1.08	0.71		
Total	99.94	99.91	100.01	99.83	99.79	99.89	100.10	100.37	99.72	99.64	99.83	99.59	99.66	99.60	99.39	99.40		
A/CNK	1.05	1.10	1.04	1.07	1.05	1.08	1.06	1.06	1.04	1.03	1.04	1.02	1.04	0.84	0.89	0.89		
A/NK	1.19	1.40	1.19	1.20	1.22	1.52	1.11	1.20	1.45	1.85	1.18	1.69	1.68	2.14	2.83	2.98		
Mg [#]	28.43	31.60	18.58	15.77	20.89	32.94	18.30	27.47	21.58	32.93	17.71	30.37	33.19	39.33	20.95	21.08		
K ₂ O/Na ₂ O	0.53	0.72	0.92	1.04	0.99	0.66	1.33	1.01	0.39	0.37	1.07	0.49	0.63	0.85	0.33	0.27		
σ	1.97	1.76	1.66	1.81	1.65	1.74	2.07	1.99	1.28	1.13	1.86	1.16	1.54	1.58	2.48	2.41		
La	42.36	34.01	38.28	36.21	42.56	53.79	13.90	18.77	58.25	19.08	36.03	70.02	46.41	21.69	45.80	42.20		
Ce	70.63	60.52	63.91	61.96	72.30	93.99	33.33	34.71	108.19	34.65	63.26	121.93	84.38	43.62	83.51	83.15		
Pr	6.65	5.44	5.46	5.22	5.98	7.16	3.28	3.16	10.00	3.03	5.60	9.09	6.51	4.56	8.40	8.37		
Nd	25.83	20.28	23.49	22.89	26.21	29.48	18.42	13.75	39.99	12.85	23.54	39.03	28.03	21.43	41.78	41.04		
Sm	4.67	3.57	4.24	4.27	4.64	4.06	5.19	2.84	7.16	2.13	4.66	5.32	4.34	4.99	7.58	7.61		
Eu	1.37	1.07	1.10	1.00	1.14	1.38	0.31	0.86	2.61	1.42	0.94	1.69	1.51	1.88	3.56	3.44		
Gd	6.21	4.46	5.15	5.29	5.98	5.10	7.64	3.67	8.61	2.66	5.65	7.43	5.45	6.53	8.73	8.74		
Tb	0.81	0.67	0.75	0.80	0.81	0.58	1.65	0.66	1.21	0.34	0.84	0.81	0.69	1.12	1.20	1.22		
Dy	4.43	3.75	3.88	4.82	4.45	2.74	10.17	4.17	5.67	1.65	4.88	3.71	3.28	6.00	5.83	5.91		
Ho	0.89	0.82	0.87	1.02	0.93	0.59	2.33	0.92	1.24	0.36	1.01	0.84	0.74	1.36	1.29	1.35		

续表2

岩性	二长花岗岩												花岗闪长岩				闪长岩			
	样品号	2PM2-1	2PM37-1	3PM2-1	3PM3-1	3PM4-1	3PM10-1	3PM14-1	2PM8-1	2PM18-1	2PM30-1	3PM1-1	3PM5-1	3PM8-1	2PM47-1	2PM48-1	2PM48-2			
Er		2.50	2.45	2.55	3.06	2.75	1.76	6.58	2.83	3.43	1.09	2.99	2.43	2.13	3.78	3.66	3.84			
Tm		0.39	0.40	0.40	0.50	0.46	0.29	0.99	0.48	0.46	0.19	0.48	0.37	0.31	0.53	0.50	0.52			
Yb		2.48	2.59	2.57	3.19	2.99	1.74	6.49	3.13	2.67	1.30	3.06	2.43	2.09	3.35	3.13	3.25			
Lu		0.38	0.39	0.34	0.42	0.40	0.25	0.70	0.47	0.38	0.24	0.40	0.33	0.27	0.46	0.45	0.47			
ΣREE		169.59	140.41	153.00	150.65	171.60	202.91	110.98	90.43	249.86	81.00	153.33	265.43	186.12	121.30	215.43	211.12			
LREE		151.51	124.88	136.48	131.55	152.83	189.86	74.44	74.09	226.20	73.16	134.02	247.08	171.17	98.17	190.63	185.82			
HREE		18.08	15.53	16.52	19.10	18.77	13.05	36.54	16.33	23.67	7.84	19.32	18.35	14.95	23.13	24.79	25.30			
LREE/HREE		8.38	8.04	8.26	6.89	8.14	14.55	2.04	4.54	9.56	9.33	6.94	13.47	11.45	4.24	7.69	7.34			
δEu		0.78	0.82	0.72	0.64	0.66	0.92	0.15	0.81	1.01	1.82	0.56	0.82	0.95	1.01	1.33	1.29			
Ba		692.59	775.97	1477.96	1330.70	1535.58	956.45	251.43	895.83	880.88	659.55	1234.95	761.41	954.30	549.35	361.61	261.73			
Th		10.97	23.70	25.93	30.34	25.06	17.60	15.94	22.32	11.25	12.02	30.53	14.74	15.09	11.72	9.10	8.75			
Nb		10.43	12.63	15.10	15.89	12.53	14.77	21.91	10.74	18.55	10.89	15.53	13.69	12.63	47.53	16.68	16.51			
Sr		203.31	192.30	74.15	78.71	268.33	63.24	32.08	137.87	230.91	303.60	65.77	247.06	307.76	290.15	481.48	465.38			
Zr		126.42	114.50	61.95	89.23	104.56	197.03	113.27	104.32	240.48	242.56	74.99	295.24	203.41	219.86	416.36	623.22			
Ti		1059.90	1601.06	448.00	421.98	558.29	2123.53	413.66	724.60	1843.01	2377.33	385.92	2212.97	2361.55	8420.51	9460.81	9216.83			
Rb		68.16	80.96	86.36	110.23	109.17	58.06	180.23	110.88	62.36	58.14	125.74	56.94	66.82	88.97	39.04	32.11			
Ta		0.92	0.94	1.14	1.01	1.51	0.74	2.28	1.26	1.37	0.58	1.19	0.79	0.65	2.29	0.84	0.84			
Hf		4.16	3.45	2.43	3.26	3.86	5.33	6.03	3.57	6.76	6.45	2.78	7.77	5.69	5.28	8.76	12.98			
U		0.02	0.06	0.02	0.02	0.03	0.04	0.06	0.03	0.07	0.03	0.09	0.02	0.02	0.12	0.15	0.08			
Sc		2.96	4.86	3.40	3.45	4.00	4.91	1.11	3.13	8.63	4.41	3.22	8.43	7.40	40.47	43.03	45.41			
Cs		0.83	1.73	0.80	2.03	3.52	0.49	1.66	1.38	1.38	1.70	2.71	2.03	1.40	0.89	1.18	1.55			
V		9.98	20.96	2.20	2.46	4.11	26.05	1.99	9.63	13.77	35.26	1.60	26.47	30.99	168.41	85.76	84.99			
Co		1.95	3.75	0.93	0.89	1.10	4.13	0.78	2.29	3.23	5.68	0.77	4.64	4.95	18.38	13.19	13.66			
Ni		3.27	3.33	2.91	1.24	1.88	5.55	1.44	3.19	2.07	3.32	1.60	2.79	3.07	6.05	3.02	16.55			
Y		26.87	24.41	26.83	30.93	28.48	16.38	56.04	27.87	29.96	9.84	30.47	23.43	19.75	33.94	31.90	32.45			
Th/Ce		0.16	0.39	0.41	0.49	0.35	0.19	0.48	0.64	0.10	0.35	0.48	0.12	0.18	0.27	0.11	0.11			
Th/La		0.26	0.70	0.68	0.84	0.59	0.33	1.15	1.19	0.19	0.63	0.85	0.21	0.33	0.54	0.20	0.21			
Nb/Ta		11.29	13.46	13.29	14.56	10.51	16.84	9.60	8.55	13.58	18.76	13.02	17.24	19.44	20.79	19.76	19.66			

注: $Mg^{\#}=100 \times Mg/(Mg+Fe)$; 测试单位为北京燕都中实测试技术有限公司, 测试时间为2019年。

$74.44 \times 10^{-6} \sim 189.86 \times 10^{-6}$, LREE/HREE 值为 $2.04 \sim 14.55$, 平均为 8.04; 在球粒陨石标准化稀土元素配分图解上

(图 5a), 表现为右倾型; 元素分馏较强, 重稀土亏损、轻稀土富集。 δEu 值为 $0.15 \sim 0.92$, 显示 Eu 负异常。

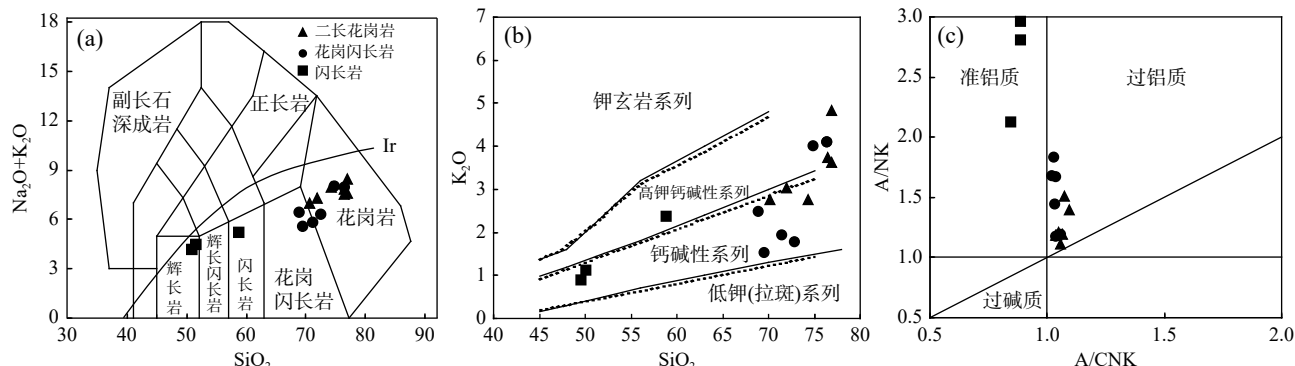


图 4 到木提岩体的 TAS 图解(a)(据 Irvine et al., 1971; Middlemost, 1994)、 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图解(b)(据 Rickwood, 1989)和 A/CNK-A/NK 图解(c)(据 Maniar et al., 1989)

Fig. 4 (a) TAS diagram, (b) $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ diagram and (c) A/CNK-A/NK diagram for Daomuti intrusive rocks

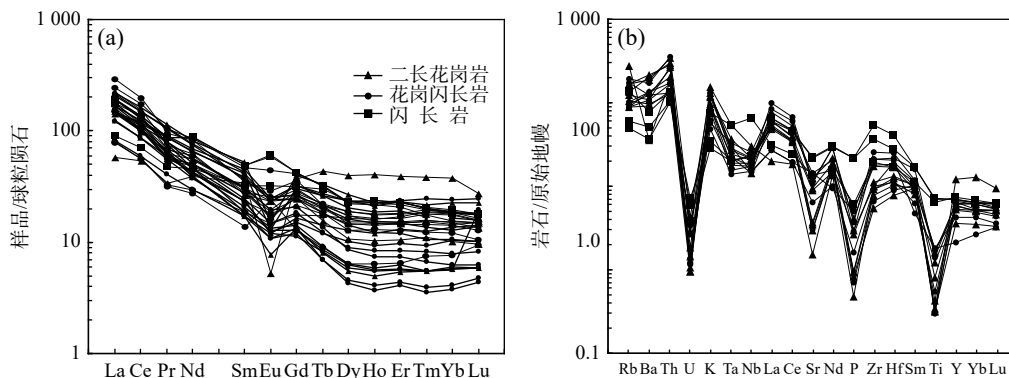


图 5 到木提岩体的球粒陨石标准化稀土元素配分图(a)(标准化值据 Boynton, 1984)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b)(标准化值据 Sun et al., 1989)

Fig. 5 (a) Chondrite-normalized rare earth element distribution patterns and (b) primitive mantle-normalized trace element spidergrams for Daomuti intrusive rocks

花岗闪长岩的 SiO_2 含量为 $69.03\% \sim 76.55\%$, Al_2O_3 含量为 $12.62\% \sim 15.26\%$, Na_2O 含量为 $3.81\% \sim 4.46\%$, K_2O 含量为 $1.75\% \sim 4.09\%$, 全碱含量($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$)为 $5.57\% \sim 8.03\%$, 样品投在 TAS 图解的花岗岩-花岗闪长岩区内; σ 指数(< 3.3)和 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 投图一致显示为钙碱性-高钾钙碱性系列; A/CNK 大于 1 ($1.02 \sim 1.06$), A/NK 均大于 1 ($1.18 \sim 1.68$), 显示出弱过铝质岩石的特征。花岗闪长岩的稀土总量为 $81.0 \times 10^{-6} \sim 265.43 \times 10^{-6}$, LREE 值为 $73.16 \times 10^{-6} \sim 247.08 \times 10^{-6}$, LREE/HREE 值为 $4.54 \sim 13.47$, 平均为 9.21。在球粒陨石标准化稀土元素配分图解上(图 5a), 整体表现为右倾型, 元素分馏较强, 重稀土亏损、轻稀土富集。 δEu 值为 $0.56 \sim 1.82$, 显示弱 Eu 负异常。

闪长岩的 SiO_2 含量为 $50.09\% \sim 58.82\%$, Al_2O_3 含

量为 $15.06\% \sim 18.63\%$, Na_2O 含量为 $2.74\% \sim 3.29\%$, K_2O 含量为 $0.87\% \sim 2.34\%$, 全碱含量($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$)为 $4.15\% \sim 5.18\%$, TAS 图解中落入闪长岩类区; σ 指数(< 3.3)和 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 投图一致显示为钙碱性系列。闪长岩的 ΣREE 值为 $121.3 \times 10^{-6} \sim 215.43 \times 10^{-6}$, LREE 总量为 $98.17 \times 10^{-6} \sim 190.63 \times 10^{-6}$, LREE/HREE 值为 $4.24 \sim 7.69$ 。稀土元素配分图解上(图 5a)表现为右倾型, 元素分馏较强, 重稀土元素亏损, 轻稀土元素富集。样品 δEu 值为 $1.01 \sim 1.33$, 显示 Eu 正异常。

6 讨论

6.1 东昆仑东段三叠纪岩浆作用

野外地质调查最新结果显示, 到木提岩体主要包

括二长花岗岩、花岗闪长岩及文中首次发现的闪长岩。前人地质调查中将二长花岗岩(N 35°43'25", E 98°46'11")和花岗闪长岩(N 35°36'08", E 98°33'35")的侵位年龄限定于早三叠世(祁晓鹏等, 2016b), 岩体 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄分别为(248.1±1.8)Ma(MSWD=0.023, n=21)和(256.4±3.4)Ma(MSWD=0.005 2, n=17)。笔者对闪长岩进行了锆石 U-Pb 测年, 得到 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄大多为 241~249 Ma, 加权平均年龄为(244.6±1.8)Ma, 表明该闪长岩的结晶于早三叠世。

区域上发育大量同期闪长-花岗质岩体。近年来, 在东昆仑东段都兰一带有大量岩浆活动报道, 包括卡可特河闪长岩体(243.8 Ma)(李碧乐等, 2012)、和勒冈希里克特花岗岩体(225 Ma)(陈国超等, 2013)、香日德花岗岩体(218~258 Ma)(罗明非等, 2014; 马昌前等, 2015; 陈国超等, 2017)、乌妥花岗岩体(245~248 Ma)(李瑞保等, 2018)、可日正长花岗岩体(231.6 Ma)(陈国超等, 2018a)、香加南山千瓦大桥花岗岩体(251 Ma)(陈国超等, 2018b)。此类岩体多属于钙碱性岩石, 且其中多发育同期的闪长质暗色包体(252.8 Ma)(陈国超等, 2018b), 广泛分布在东昆仑造山带东段, 在布青山-阿尼玛卿古特提斯洋向东昆仑俯冲环境下沿着昆中断裂南北两侧侵入就位, 构成了东昆仑岩浆弧的主要部分。

6.2 岩石成因及源区特征

根据二长花岗岩和花岗闪长岩的年代学, 以及两者稀土元素配分图和微量元素蛛网图(图 5)中各样品具有相似的分配型式, 可以推测二者应是同一岩浆-构造期的产物, 是同源演化的产物。从岩石地球化学特征可以看出, 二长花岗岩和花岗闪长岩 K_2O 含量均

较高, 里特曼指数均小于 3.3, 表现为高钾钙碱性特征, $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 的投图也在高钾钙碱性-钙碱性系列区(图 4b); 铝饱和指数 A/CNK 值均小于 1.1(1.02~1.1), 不同于 S 型花岗岩的普遍特征(A/CNK>1.1); 岩石中 P_2O_5 含量普遍偏低(0.01%~0.12%), 并与 SiO_2 呈负相关变化(表 2), 也与 S 型花岗岩的特征不同(Green et al., 1982; Wolf et al., 1994; Chappell et al., 1999)。在 Y- SiO_2 和 $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}$ 花岗岩分类图解中样品大多数落入 I 型花岗岩区(图 6), 个别偏离进入 A 型区, 从区域上的研究表明三叠纪应处于俯冲碰撞环境, 显然与 A 型花岗岩产于地壳减薄的环境不相符。因此, 以上证据综合表明到木提二长花岗岩和花岗闪长岩属于 I 型花岗岩。

目前研究表明, 形成花岗岩的源区大概有以下几种: 地壳部分熔融、壳幔岩浆混合及幔源基性岩浆的分离结晶等。到木提 I 型花岗岩体富集 K、Rb、La 等 LILE, 亏损 Nb、Ta、Ti、P 等 HFSE, $\text{Mg}^\#$ 值为 15.77~33.10, 远低于原始地幔标准值($\text{Mg}^\#=67\sim73$), Co、Ni 含量也明显低于幔源特征的岩浆(Frey et al., 1978), 幔源玄武质岩浆分异形成的花岗质岩石在地球化学元素组成上应存在与玄武质岩浆相近的幔源特征, 所以到木提花岗岩体应该不会来源于玄武质岩浆的结晶分异, 区域上近东西向展布的岩浆岩带也大多是花岗岩类, 少有基性岩。岩体具有较高的 Th/Ce 值(0.1~0.64)和 Th/La 值(0.21~1.19), 处于壳源岩浆的范围(Sun et al., 1989), 过铝质 I 型花岗岩的特征也与壳源相配套, 表明到木提花岗岩体应起源于下地壳源区。前人对岩体的 Nb/Ta 值的大量研究表明壳源岩石 Nb/Ta 值为 11(Taylor et al., 1985; Green, 1995; Bar-

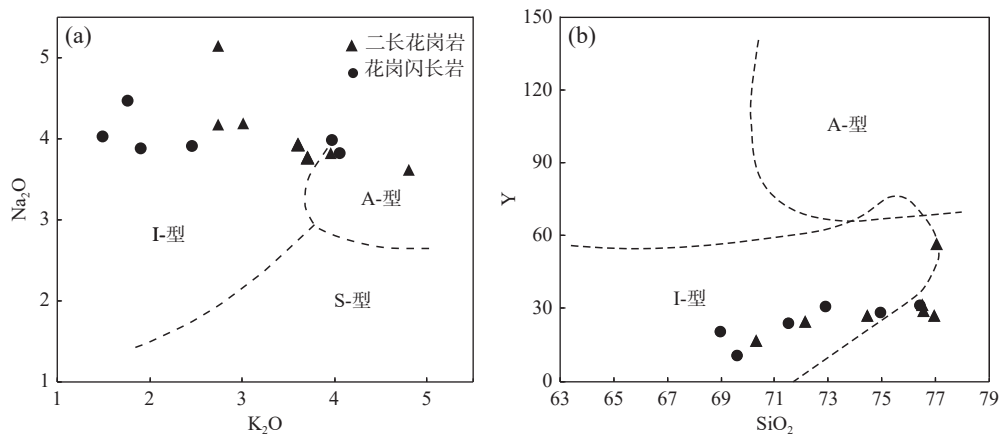


图 6 到木提岩体的成因判别图解(据 Collins et al., 1982)

Fig. 6 Origin distinguishing diagram of Daomuti intrusive rocks

barin, 1999), 幔源 Nb/Ta 值为 17.5 (McDonough et al., 1995; Weyer et al., 2003)。到木提花岗岩 Nb/Ta 值为 9.6~19.44, 多数都接近壳源, 部分比值明显大于壳源, 可能在下地壳部分熔融形成岩浆源区的过程中有一定比例的幔源物质加入, 二长花岗岩和花岗闪长岩的野外露头上发育大量被塑性拉伸呈椭圆体的闪长质包体也似乎印证了这一结论。东昆仑地区的研究也表明区域上存在幔源岩浆底侵作用(罗照华等, 2002; 熊富浩等, 2011), 到木提岩体的演化也可能与此次底侵有关, 底侵过程中有了幔源物质的加入。闪长岩 $Mg^\#$ 值、Th/Ce 值及 Th/La 值与二长花岗岩和花岗闪长岩相似, 三者的球粒陨石标准化稀土元素配分曲线和原始地幔标准化微量元素蛛网图也较为接近, 具有相同的岩浆源区。

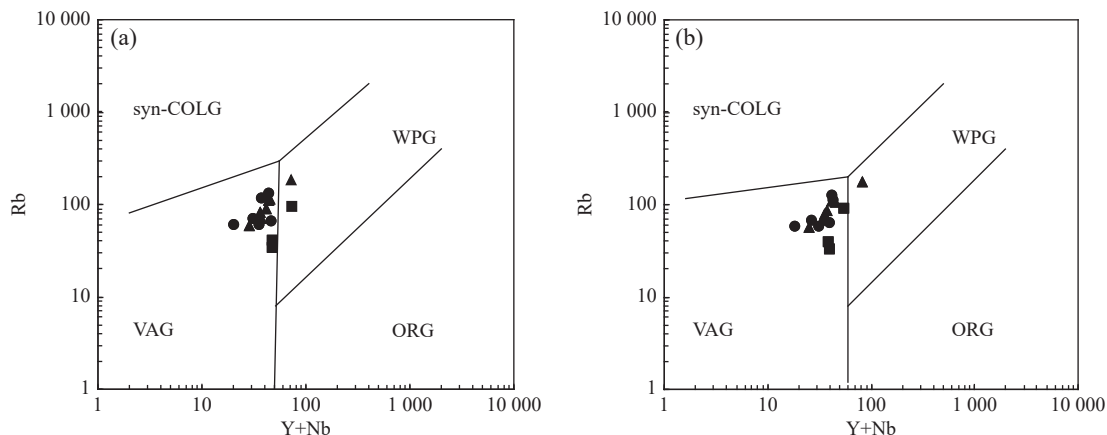
二长花岗岩和花岗闪长岩的球粒陨石标准化稀土元素配分图(图 5)中显示较明显 Eu 负异常, 指示其岩浆源区肯残留了一定斜长石或在演化过程中发生了斜长石分离结晶作用, 同时在原始地幔标准化微量元素蛛网图也出现明显的 P 和 Ti 元素负异常, 可能发生了磷灰石和钛铁矿的分离结晶, 表明二长花岗岩和花岗闪长岩在岩浆演化中发生了结晶分异作用, 岩体发生分异也是岩石呈过铝质特征的原因之一。而闪长岩 Eu、P 及 Ti 元素异常不明显或弱正(负)异常, 表明闪长岩从源区开始演化过程中没有或没明显发生结晶分异作用。

6.3 构造环境及演化

东昆仑构造带主要经历了早古生代和晚古生代—早中生代两大造山运动期。东昆仑已有早—中泥盆世碰撞型花岗岩报道(许荣华等, 1990; 高永宝等,

2014), 加上广泛发育的晚泥盆世陆相磨拉石建造(莫宣学等, 2007), 可以认为早古生代构造—岩浆旋回于晚泥盆世结束。印支造山期造成了东昆仑花岗岩广泛出露, 一直以来, 对东昆仑东段产出的晚二叠世—早三叠世岩浆作用的构造背景及形成机制存在不同意见。一些学者认为东昆仑古特提斯洋在晚二叠世闭合, 东昆仑印支期花岗岩属于碰撞造山阶段的产物(袁万明等, 2000; 李荣社等, 2008; Zhang et al., 2012; Xiong et al., 2014)。但从东昆仑地区分布的早三叠世沉积记录以及早中三叠世的岩浆岩记录(杨经绥等, 2005; 马昌前等, 2013)来看, 将东昆仑该时期确定为碰撞造山期确有不妥之处: ①认为早三叠世洪水川组(图 1b)是古特提斯洋俯冲时期留下的沉积记录(李瑞保等, 2012, 2015)。②已有该时期基性岩墙群(马昌前等, 2013)。③俯冲过程中岩石圈地幔部分熔融导致了区域上底侵作用也很明显(251~220 Ma)(罗照华等, 2002; 熊富浩等, 2011; 李积清等, 2021), 底侵的高温对下地壳影响是幔源熔体的加入及下地壳岩石部分熔融, 从而形成东昆仑广泛发育的印支期花岗岩岩石组合。由此看来, 阿尼玛卿古特提斯洋的俯冲可以持续到早中三叠世, 随后晚三叠世进入碰撞造山阶段。

早三叠世(256~245 Ma)到木提岩体为源于下地壳的 I 型花岗岩, 富集大离子亲石元素而亏损高场强元素的特征具有俯冲形成的弧岩浆岩特征(Rogers et al., 1990; Sajona et al., 1996), 样品在 Rb-(Y+Nb)和 Rb-(Yb+Ta)双变量构造环境判别图解(图 7a、图 7b)



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

图 7 二长花岗岩和花岗闪长岩构造环境判别图解(据 Pearce et al., 1984)

Fig. 7 Diagrams of the tectonic setting for monzogranite and granodiorite

中多数也均落入火山弧花岗岩区。综合来看,到木提岩体是阿尼玛卿古特提斯洋壳俯冲过程中受幔源岩浆底侵作用的影响,下地壳部分熔融形成岩浆源区沿着昆中断裂两侧及次级断裂侵位的弧花岗岩,而闪长岩体及闪长质包体都是底侵幔源物质加入的表现,在岩浆演化过程中明显有别于花岗岩类,未发生明显结晶分异。

7 结论

(1) 到木提地区新发现了闪长岩体并对其进行了锆石 U-Pb 测年,结果表明闪长岩的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄 $(244.6\pm 1.8)\text{Ma}$,形成于早三叠世。

(2) 二长花岗岩和花岗闪长岩地球化学特征研究表明其属于I型花岗岩,岩浆起源于下地壳的部分熔融,在岩浆演化过程中发了明显的结晶分异形成过铝质花岗岩;闪长岩与之属于同源演化的产物,但后期岩浆演化过程中未发生结晶分异作用。

(3) 阿尼玛卿古特提斯洋的俯冲可以持续到早中三叠世,俯冲过程中地幔岩浆底侵作用明显,导致下地壳岩石发生部分熔融,形成沿断裂等构造薄弱带侵位的大面积弧花岗岩,闪长岩及包体就是源区幔源物质混入导致的。

致谢: 本文撰写过程中得到了诸多帮助,野外工作由缪明亮、严兴鹏等人参与完成,岩矿鉴定由青海省地质调查院岩矿鉴定中心完成,审稿专家也提出了宝贵的修改意见,在此一并表示衷心的感谢。

参考文献(References):

- 陈国超,裴先治,李瑞保,等. 东昆仑造山带东段南缘和勒冈希里克特花岗岩体时代、成因及其构造意义[J]. 地质学报, 2013, 87(10): 1525-1541.
- CHEN Guochao, PEI Xianzhi, LI Ruibao, et al. Geochronology and genesis of the Helegang Xilikete granitic plutons from the southern margin of the Eastern East Kunlun Orogenic Belt and Their Tectonic Significance[J]. Acta Geologica Sinica, 2013, 87(10): 1525-1541.
- 陈国超,裴先治,李瑞保,等. 东昆仑东段香加南山花岗岩基的岩浆混合成因: 来自镁铁质微粒包体的证据[J]. 地学前缘, 2016, 23(4): 226-240.
- CHEN Guochao, PEI Xianzhi, LI Ruibao, et al. Genesis of magma mixing and mingling of Xiangjiananshan granite batholith in the eastern section of East Kunlun Orogen: Evidence from mafic microgranular Enclaves (MMEs)[J]. Earth Science Frontiers, 2016, 23(4): 226-240.
- 陈国超,裴先治,李瑞保,等. 东昆仑东段香加南山花岗岩基中加鲁河中性岩体形成时代、成因及其地质意义[J]. 大地构造与成矿学, 2017, 41(06): 1097-1115.
- CHEN Guochao, PEI Xianzhi, LI Ruibao, et al. Age and Petrogenesis of Jialuhe Basic-Intermediate Pluton in Xiangjia 'nanshan Granite Batholith in the Eastern Part of East Kunlun Orogenic Belt, and its Geological Significance[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2017, 41(06): 1097-1115.
- 陈国超,裴先治,李瑞保,等. 东昆仑东段可日正长花岗岩年龄和岩石成因对东昆仑中三叠世构造演化的制约[J]. 岩石学报, 2018a, 34(3): 567-585.
- CHEN Guochao, PEI Xianzhi, LI Ruibao, et al. Age and lithogenesis of Keri syenogranite from eastern part of East Kunlun Orogenic Belt: Constraint on the Middle Triassic tectonic evolution of East Kunlun[J]. Acta Petrologica Sinica, 2018a, 34(3): 567-585.
- 陈国超,裴先治,李瑞保,等. 东昆仑东段三叠纪岩浆混合作用: 以香加南山花岗岩基为例[J]. 岩石学报, 2018b, 34(8): 2441-2480.
- CHEN Guochao, PEI Xianzhi, LI Ruibao, et al. , Triassic magma mixing and mingling at the eastern section of Eastern Kunlun: A case study from Xiangjiananshan granitic batholith[J]. Acta Petrologica Sinica, 2018b, 34(8): 2441-2480.
- 高永宝,李文渊,钱兵,等. 东昆仑野马泉铁矿相关花岗质岩体年代学、地球化学及 Hf 同位素特征[J]. 岩石学报, 2014, 30(6): 1647-1665.
- GAO Yongbao, LI Wenyuan, QIAN Bing, et al. Geochronology, geochemistry and Hf isotopic compositions of the granitic rocks related with iron mineralization in Yemaquan deposit, East Kunlun, NW China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30(6): 1647-1665.
- 韩建军,李运冬,宋传中,等. 东昆仑东段都兰热水花岗岩锆石 U-Pb 年龄、地球化学及构造意义[J]. 地质学报, 2020, 94(3): 768-781.
- HAN Jianjun, LI Yundong, SONG Chuanzhong, et al. Zircon U-Pb dating and geochemistry of granite in the Reshui area of Dulan County, eastern section of east Kunlun orogeny and its tectonic implications[J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(3): 768-781.
- 雷玮琰,施光海,刘迎新. 不同成因锆石的微量元素特征研究进展[J]. 地学前缘, 2013, 20(4): 273-284.
- LEI Weiyan, SHI Guanghai, LIU Yingxin. Research progress on trace element characteristics of zircons of different origins[J]. Earth Science Frontiers, 2013, 20(4): 273-284.
- 李碧乐,孙丰月,于晓飞,等. 东昆仑隆起带东段闪长岩 U-Pb 年代学和岩石地球化学研究[J]. 岩石学报, 2012, 28(4): 1163-1172.

- LI Bile, SUN Fengyue, YU Xiaofei, et al. U-Pb dating and geochemistry of diorite in the eastern section from eastern Kunlun middle uplifted basement and granitic belt[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(4): 1163–1172.
- 李积清, 张鑫利, 王涛, 等. 东昆仑东段红山地区花岗斑岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年及岩石地球化学特征[J]. *西北地质*, 2021, 54(1): 30–40.
- LI Jiqing, ZHANG Xinli, WANG Tao, et al. Zircon U-Pb dating and geochemical characteristics of granite porphyry in zhanhongshan area, east Kunlun[J]. *Northwestern Geology*, 2021, 54(1): 30–40.
- 李荣社, 计文化, 杨永成, 等. 昆仑山及邻区地质[M]. 北京: 地质出版社, 2008: 1–400.
- LI Rongshe, JI Wenhua, YANG Yongcheng, et al. *Geology of Kunlun Mountain and adjacent areas*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2008: 1–400.
- 李瑞保, 裴先治, 李佐臣, 等. 东昆仑东段晚古生代-中生代若干不整合面特征及其对重大构造事件的响应[J]. *地学前缘*, 2012, 19(5): 244–254.
- LI Ruibao, PEI Xianzhi, LI Zuochen, et al. Geological characteristics of Late Palaeozoic-Mesozoic unconformities and their response to some significant tectonic events in eastern part of Eastern Kunlun[J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(5): 244–254.
- 李瑞保, 裴先治, 李佐臣, 等. 东昆仑东段下三叠统洪水川组沉积序列与盆地构造原型恢复[J]. *地质通报*, 2015, 34(12): 2302–2314.
- LI Ruibao, PEI Xianzhi, LI Zuochen, et al. The depositional sequence and prototype basin for Lower Triassic Hongshuichuan Formation in the eastern segment of East Kunlun Mountains[J]. *Geological Bulletin of China*, 2015, 34(12): 2302–2314.
- 李瑞保, 裴先治, 李佐臣, 等. 东昆仑东段古特提斯洋俯冲作用——乌妥花岗岩体锆石 U-Pb 年代学和地球化学证据[J]. *岩石学报*, 2018, 34(11): 3399–3421.
- LI Ruibao, PEI Xianzhi, LI Zuochen, et al. Paleo-Tethys Ocean subduction in eastern section of East Kunlun Orogen: Evidence from the geochronology and geochemistry of the Wutuo pluton[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2018, 34(11): 3399–3421.
- 李艳广, 靳梦琪, 汪双双, 等. LA-ICP-MS U-Pb 定年技术相关问题探讨[J]. *西北地质*, 2023, 56(4): 274–282.
- LI Yanguang, JIN Mengqi, WANG Shuangshuang, et al. Exploration of Issues Related to the LA-ICP-MS U-Pb Dating Technique[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(4): 274–282.
- 罗明非, 莫宣学, 喻学惠, 等. 东昆仑香山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[J]. *岩石学报*, 2014, 30(11): 3229–3241.
- LUO Mingfei, MO Xuanxue, YU Xuehui, et al. Zircon LA-ICP-MS U-Pb age dating, petrogenesis and tectonic implications of the Late Triassic granites from the Xiangride area, East Kunlun[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(11): 3229–3241.
- 罗照华, 柯珊, 曹永清, 等. 东昆仑印支晚期幔源岩浆活动[J]. *地质通报*, 2002, 21(6): 292–297.
- LUO Zhaohua, KE Shan, CAO Yongqing, et al. Late indosinian mantle-derived magmatism in the East Kunlun[J]. *Geological Bulletin of China*, 2002, 21(6): 292–297.
- 马昌前, 熊富浩, 张金阳, 等. 从板块俯冲到造山后阶段俯冲板片对岩浆作用的影响: 东昆仑早二叠世-晚三叠世镁铁质岩墙群的证据[J]. *地质学报*, 2013, 87(S1): 79–81.
- MA Changqian, XIONG Fuhao, ZHANG Jinyang, et al. Impact of subducted slabs on magmatism from plate subduction to post-orogenic stage: Evidence from the Early Permian-Late Triassic Magnesite Wall Group in East Kunlun[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2013, 87(S1): 79–81.
- 马昌前, 熊富浩, 尹烁, 等. 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[J]. *岩石学报*, 2015, 31(12): 3555–3568.
- MA Changqian, XIONG Fuhao, YIN Shuo, et al. Intensity and cyclicity of orogenic magmatism: An example from a Paleo-Tethyan granitoid batholith, Eastern Kunlun, northern Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2015, 31(12): 3555–3568.
- 莫宣学, 罗照华, 邓晋福, 等. 东昆仑造山带花岗岩及地壳生长[J]. *高校地质学报*, 2007, 13(03): 403–414.
- MO Xuanxue, LUO Zhaohua, DENG Jinfu, et al. Granitoids and crustal growth in the East-Kunlun Orogenic Belt[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2007, 13(03): 403–414.
- 牛腾, 倪志耀, 孟宝航, 等. 冀北康保芦家营巨斑状花岗岩: 华北克拉通北缘中段 1.3~1.2Ga B.P. 伸展-裂解事件的地质记录[J]. *成都理工大学学报 (自然科学版)*, 2023, 50(4): 486–503.
- NIU Teng, NI Zhiyao, MENG Baohang, et al. The Lujiaying megaporphyritic granite in Kangbao area, North Hebei: A geological record of extension and breakup event at 1.3~1.2Ga B.P. in the central segment of northern margin of North China Craton [J], *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2023, 50(4): 486–503.
- 祁生胜, 宋述光, 史连昌, 等. 东昆仑西段夏日哈木-苏海图早古生代榴辉岩的发现及意义[J]. *岩石学报*, 2014, 30(11): 3345–3356.
- QI Shengsheng, SONG Shuguang, SHI Lianchang, et al. Discovery and its geological significance of Early Paleozoic eclogite in Xiarihamu-Suhaitu area, western part of the East Kunlun[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(11): 3345–3356.
- 祁晓鹏, 范显刚, 杨杰, 等. 青海省都兰县杂日当地区 1: 5 万 I47E002011、I47E003011、I47E004011、I47E004012 四幅区域地质调查成果报告[R]. 陕西省核工业地质调查院, 2016a.
- QI Xiaopeng, FAN Xiangang, YANG Jie, et al. Report from 1: 50000

- regional geological survey results in the Jiedang area, Dulan County, Qinghai[R]. Shanxi Institute of Nuclear Geology, 2016a.
- 祁晓鹏, 范显刚, 杨杰, 等. 东昆仑东段浪木日上游早古生代榴辉岩的发现及其意义[J]. 地质通报, 2016b, 35(11): 1771–1783.
- QI Xiaopeng, FAN Xiangang, YANG Jie, et al. The discovery of Early Paleozoic eclogite in the upper reaches of Langmuri in eastern East Kunlun Mountains and its significance[J]. Geological Bulletin of China, 2016b, 35(11): 1771–1783.
- 史连昌, 常革红, 祁生胜, 等. 东昆仑大灶火沟-万宝沟晚二叠世陆缘弧火山岩的发现及意义[J]. 地质通报, 2016, 35(7): 1115–1122.
- SHI Lianchang, CHANG Gehong, QI Shengsheng, et al. The discovery of Dazaohuogou-Wanbaogou Late Permian epicontinental arc volcanic rocks in Eastern Kunlun Mountains and its significance[J]. Geological Bulletin of China, 2016, 35(7): 1115–1122.
- 王梓桐, 王根厚, 张维杰, 等. 阿拉善地块南缘志留纪花岗岩闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及地球化学特征[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2022, 49(5): 586–600.
- WANG Zitong, WANG Genghou, ZHANG Weijie, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating and geochemical characteristics of the Silurian granodiorite in the southern margin of Alxa Block, China [J], Journal of Chengdu University of Technology (Science Technology Edition), 2022, 49(5): 586–600.
- 吴树宽, 陈国超, 李积清, 等. 东昆仑东段沟里地区战红山过铝质流纹斑岩年代学、岩石成因及构造意义[J]. 西北地质, 2023, 56(2): 92–108.
- WU Shukuan, CHEN Guochao, LI Jiqing, et al. Geochronology, Petrogenesis and Tectonic Significance of Zhanhongshan Peraluminous Rhyolite Porphyry in Gouli Area, Eastern Section of East Kunlun[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(2): 92–108.
- 吴元保, 郑永飞. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约[J]. 科学通报, 2004, 49(16): 1589–1604.
- WU Yuanbao, ZHENG Yongfei. Study on the mineralogy of zircon and its constraints on the interpretation of U-Pb age[J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49(16): 1589–1604.
- 熊富浩, 马昌前, 张金阳, 等. 东昆仑造山带早中生代镁铁质岩墙群 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年、元素和 Sr-Nd-Hf 同位素地球化学[J]. 岩石学报, 2011, 27(11): 3350–3364.
- XIONG Fuhao, MA Changqian, ZHANG Jinyang, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating, elements and Sr-Nd-Hf isotope geochemistry of the Early Mesozoic mafic dyke swarms in East Kunlun orogenic belt[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(11): 3350–3364.
- 许荣华, Harris N B W, Lewis C L, 等. 拉萨至格尔木的同位素地球化学. 青藏高原地质演化[M]. 北京: 科学出版社, 1990: 282–302.
- XU Ronghua, Harris N B W, Lewis C L, et al. Isotope geochemistry of the Tibet Geotraverse, Lhasa to Golmud. The geological evolution of the Tibet Plateau[M]. Beijing: Science Press, 1990: 282–302.
- 许长坤, 刘世宝, 赵子基, 等. 青海省东昆仑成矿带铁矿成矿规律与找矿方向研究[J]. 地质学报, 2012, 86(10): 1621–1678.
- XU Changkun, LIU Shibao, ZHAO Ziji, et al. Metallogenic law and prospect direction of iron deposits in the East Kunlun metallogenic belt in Qinghai[J]. Acta Geologica Sinica, 2012, 86(10): 1621–1678.
- 许志琴, 杨经绥, 张建新, 等. 阿尔金断裂两侧构造单元的对比及岩石圈剪切机制[J]. 地质学报, 1999, 73(03): 193–205.
- XU Zhiqin, YANG Jingsui, ZHANG Jianxin, et al. A Comparison between the Tectonic Units on the Two Sides of the Altun Sinistral Strike-slip Fault and the Mechanism of Lithospheric Shearing[J]. Acta Geologica Sinica, 1999, 73(03): 193–205.
- 许志琴, 杨经绥, 李海兵, 等. 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[J]. 地质学报, 2006, 80(12): 1793–1806.
- XU Zhiqin, YANG Jingsui, LI Haibing, et al. The Early Palaeozoic Terrene Framework and the Formation of the High-Pressure (HP) and Ultra-High Pressure (UHP) Metamorphic Belts at the Central Orogenic Belt (COB)[J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(12): 1793–1806.
- 杨经绥, 刘福来, 吴才来, 等. 中央碰撞造山带中两期超高压变质作用: 来自含柯石英锆石的定年证据[J]. 地质学报, 2003, 77(4): 463–477.
- YANG Jingsui, LIU Fulai, WU Cailai, et al. Two Ultrahigh Pressure Metamorphic Events Recognized in the Central Orogenic Belt of China: Evidence from the U-Pb Dating of Coesite-bearing Zircon[J]. Acta geologica sinica, 2003, 77(4): 463–477.
- 杨经绥, 许志琴, 李海兵, 等. 东昆仑阿尼玛卿地区古特提斯火山作用和板块构造体系[J]. 岩石矿物学杂志, 2005, 24(5): 369–380.
- YANG Jingsui, XU Zhiqin, LI Haibing, et al. The paleo-Tethyan volcanism and plate tectonic regime in the A nyemaqen region of East Kunlun, northern Tibet Plateau[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2005, 24(5): 369–380.
- 袁万明, 莫宣学, 喻学惠, 等. 东昆仑印支期区域构造背景的花岗岩记录[J]. 地质论评, 2000, 46(2): 203–211.
- YUAN Wanming, MO Xuanyue, YU Xuehui, et al. The Record of Indosinian Tectonic Setting from the Granotoid of Eastern Kunlun Mountains[J]. Geological Review, 2000, 46(2): 203–211.
- 张照伟, 钱兵, 李文渊, 等. 东昆仑夏日哈木铜镍矿区发现早古生代榴辉岩: 锆石 U-Pb 定年证据[J]. 中国地质, 2017, 44(04): 816–817.

- ZHANG Zhaowei, QIAN Bing, LI Wenyuan, et al. The discovery of Early Paleozoic eclogite from the Xiarihamu magmatic Ni-Cu sulfide deposit in eastern Kunlun orogenic belt: Zircon U-Pb chronologic evidence[J]. *Geology in China*, 2017, 44(04): 816–817.
- Barbarin B. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments[J]. *Lithos*, 1999, 46(3): 605–626.
- Boynnton W V. Geochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies[J]. *Developments in Geochemistry*, 1984, 2: 63–114.
- Chappell B W. Aluminium saturation in I- and S-type granites and the characterization of fractionated haplogranites[J]. *Lithos*, 1999, 46(3): 535–551.
- Collins W J, Beams S D, White A J R, et al. Nature and origin of A-type granites with particular reference to southeastern Australia[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1982, 80: 189–200.
- Frey F A, Prinz M. Ultramafic inclusions from San Carlos, Arizona: petrologic and geochemical data bearing on their petrogenesis[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1978, 38: 129–176.
- Green T H, Watson E B. Crystallization of apatite in natural magmas under high pressure, hydrous conditions, with particular reference to ‘orogenic’ rock series[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1982, 79(1): 96–105.
- Green T H. Significance of Nb /Ta as an indicator of geochemical processes in the crust-mantle system[J]. *Chemical Geology*, 1995, 120(3): 347–359.
- Irvine T N, Baragar W R A. A guide to chemical classification of the common volcanic rock[J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1971, 8: 523–548.
- Liu Y S, Gao S, Hu Z C, et al. 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[J]. *Journal of Petrology*, 2010, 51(1/2): 537–571.
- Maniar PD, Piccoli PM. Tectonic discrimination of granitoids. *GSA Bulletin*, 1989, 101(5): 635–643.
- McDonough W F, Sun S S. The composition of the Earth[J]. *Chemical Geology*, 1995, 120(3–4): 223–253.
- Meng F C, Zhang J X, Cui M H. Discovery of Early Paleozoic eclogite from the East Kunlun, western China and its tectonic significance[J]. *Gondwana Research*, 2013, 23(2): 825–836.
- Middlemost E A K. Naming materials in the magma /igneous rock system[J]. *Earth-Science Review*, 1994, 37(3–4): 215–224.
- Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 1984, 25: 956–983.
- Rickwood P C. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements[J]. *Lithos*, 1989, 22(4): 247–263.
- Rogers G, Hawkesworth C J. Reply to comment of C. R. Sternon “A geochemical traverse across the North Chilean Andes: Evidence for crust generation from the mantle wedge” [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1990, 101(1): 134–137.
- Rubatto D, Gebauer D. Use of cathodoluminescence for U-Pb zircon dating by IOM Microprobe: Some examples from the western Alps[J]. *Cathodoluminescence in Geoscience*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany. 2000, 373–400.
- Sajona F G, Maury R C, Bellon H, et al. High field strength element enrichment of Pliocene-Pleistocene island arc basalts, Zamboanga Peninsula, Western Mindanao (Philippines)[J]. *Journal of Petrology*, 1996, 37(3): 693–726.
- Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders A D, Norry M J, eds. *magmatism in the ocean basins*[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1989, 42: 313–345.
- Taylor S R, McLennan S M. The continental crust: Its composition and evolution[J]. *Journal of Geology*, 1985, 94(4): 632–633.
- Vavra G, Gebauer D, Schmid R. Multiple zircon growth and recrystallization during polyphase Late Carboniferous to Triassic metamorphism in granulites of the Ivrea Zone (Southern Alps): Anion microprobe (SHRIMP) study[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1996, 122(4): 337–358.
- Weyer S, Munker C, Mezger K. Nb /Ta, Zr /Hf and REE in the depleted mantle: Implications for the differentiation history of the crust-mantle system[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, 205(3–4): 309–324.
- Wolf M B, London D. Apatite dissolution into peraluminous haplogranitic melts: An experimental study of solubilities and mechanisms[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1994, 58(19): 4127–4145.
- Xiong F H, Ma C Q, Zhang J Y, et al. Reworking of old continental lithosphere: An important crustal evolution mechanism in orogenic belts, as evidenced by Triassic I-type granitoids in the East Kunlun orogen, Northern Tibetan Plateau[J]. *Journal of the Geological Society*, 2014, 171(6): 847–863.
- Zhang J Y, Ma C Q, Xiong F H, et al. Petrogenesis and tectonic significance of the Late Permian-Middle Triassic calcalkaline granites in the Balong region, eastern Kunlun Orogen, China[J]. *Geological Magazine*, 2012, 149(5): 892–908.