

DOI: 10.12401/j.nwg.2023186

造山带洋陆转换过程与岩浆作用: 以东昆仑 都兰地区古生代花岗岩为例

熊万宇康¹, 赵梦琪², 于淼^{1,*}, 刘潇扬¹, 龚磊¹, 曾庆鸿¹

(1. 中南大学地球科学与信息物理学院, 湖南 长沙 410083; 2. 青海省地质调查局, 青海 西宁 810008)

摘要: 洋陆转换过程中俯冲-碰撞(增生)-后碰撞各阶段具有不同岩浆作用, 其中板片俯冲和岩石圈拆沉-减薄机制尤其受到关注。东昆仑造山带位于青藏高原北部, 是秦祁昆中央造山带的重要组成部分, 在早古生代经历了原特提斯洋陆转化过程。笔者通过对东昆仑东段都兰地区古生代花岗岩进行年代学、全岩地球化学和 Sr-Nd-Hf 同位素研究, 认为浪木日中志留世 (429 ± 4 Ma) 花岗岩形成于洋壳俯冲阶段, 具有埃达克质岛弧岩浆属性, 与热俯冲机制下的洋壳部分熔融有关; 希望沟与哈日扎早泥盆世 (416~403 Ma) 花岗岩形成于后碰撞阶段, 分别显示 I 型和 A 型花岗岩特征, 与新生下地壳的部分熔融和岩石圈减薄作用有关。综合区域古生代花岗岩地球化学资料表明, 东昆仑东西段岩浆岩差异可能是洋脊俯冲所致。

关键词: 地球化学; 洋脊俯冲; 埃达克岩; 锆石 U-Pb 年代学; Sr-Nd-Hf 同位素; 东昆仑

中图分类号: P581

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2023)06-0113-27

Ocean-Continent Transition Process and Magmatism in Orogenic Belts: A Case Study of Paleozoic Granites in the Dulan Area of East Kunlun

XIONG Wanyukang¹, ZHAO Mengqi², YU Miao^{1,*}, LIU Xiaoyang¹, GONG Lei¹, ZENG Qinghong¹

(1. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China; 2. Qinghai Geological Survey, Xining 810008, Qinghai, China)

Abstract: The subduction-collision (accretion)-post-collision stages in the ocean-continent transition process have different magmatisms, among which the slab subduction and lithosphere delamination-thinning mechanisms have received special attention. The East Kunlun orogenic belt is located in the northern part of the Qinghai-Tibet Plateau, and is an important part of the Qin-Qi-Kun central orogenic belt, which has experienced the transformation process of the Proto-Tethys Ocean and Continent in the Early Paleozoic. Based on the geochronology, whole-rock geochemistry and Sr-Nd-Hf isotope studies of the Paleozoic granites in the Dulan area, eastern Kunlun, this paper suggests that the Langmuri Middle Silurian (429 ± 4 Ma) granites were formed in the subduction stage of the oceanic crust. It has the property of adakitic island arc magma, which is related to the partial melting of oceanic crust under the mechanism of thermal subduction. The Xiwanggou and Harizha Early Devonian (416~403 Ma) granites were formed in the post-collision stage, showing the characteristics of I-type

收稿日期: 2023-08-05; 修回日期: 2023-10-01; 责任编辑: 吕鹏瑞

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41802080、42030809、41873043、41302056、41702073), 中南大学创新驱动计划项目 (2019CX035) 和中国地质调查局项目 (DD20221684、1212011085528) 联合资助。

作者简介: 熊万宇康 (2001-), 男, 硕士研究生, 矿产普查与勘探专业。E-mail: 1203209947@qq.com。

* 通讯作者: 于淼 (1987-), 男, 副教授, 博士, 从事东昆仑岩浆岩和成矿规律研究。E-mail: yumiao1987@csu.edu.cn。

and A-type granites, respectively, which are related to the partial melting of the young lower crust and thinning of the lithosphere. The comprehensive regional Paleozoic granite geochemical data indicate that the difference of magmatic rocks in the east and west of East Kunlun may be caused by ocean ridge subduction.

Keywords: geochemistry; ridge subduction; adakite; zircon U-Pb chronology; Sr-Nd-Hf isotope; East Kunlun

洋陆转换过程记录了从洋壳俯冲-陆壳碰撞到后碰撞结束的重要地质过程,反映了造山带的形成与演化信息(Wilson, 1989; 吴福元等, 2020; Yang et al., 2021; 尹福光等, 2022),但不同的地质过程中往往具有不同的岩浆作用,特别是不同板片俯冲机制下的和岩石圈拆沉-减薄作用下的岩浆活动所形成的侵入岩地球化学特征差异显著。板片俯冲过程中,铁镁质下地壳部分熔融或幔源铁镁质与壳源长英质岩浆混合形成 I 型花岗岩(Roberts et al., 1993; Yang et al., 2007),但冷俯冲和热俯冲两种不同的机制往往对应着不同的岩浆活动(Kong et al., 2016)。已有研究表明,相对老的、冷的俯冲带通常在地幔楔深部发生脱水作用,进而诱发深部地幔物质熔融形成正常 I 型花岗岩;而相对年轻的、热的大洋岩石圈板片发生俯冲时可以导致洋壳部分熔融形成 I 型埃达克质花岗岩(埃达克岩)(Molnar et al., 1995; 张泽明等, 2020)。埃达克岩通常以高 Sr/Y 和 La/Yb 值为显著特征,对揭示洋壳冷热俯冲机制具有重要意义(Breitsprecher et al., 2003; Kong et al., 2016; Windley et al., 2018)。后碰撞伸展过程往往伴随下地壳拆沉、岩石圈减薄和软流圈上涌等一系列过程,导致下地壳部分熔融形成 I 型花岗岩,而高热环境条件下则形成无水碱性 A 型花岗岩(Bonin, 2007; Xin et al., 2018; 张亮等, 2021)。

东昆仑造山带位于青藏高原北部,形成于特提斯构造域,是研究特提斯构造作用的天然实验室(刘成东等, 2003; 陆露等, 2013),已有许多证据指示东昆仑造山带古生代经历了俯冲-碰撞(增生)-后碰撞的洋陆转换过程(Yu et al., 2020; Dong et al., 2020; Chen et al., 2020b)。目前,前人对原特提斯俯冲过程的研究已揭露早古生代昆南阳中存在极性相反的双向俯冲(陈加杰等, 2016),昆南阳壳向北俯冲过程中在昆南地体内形成正常 I 型花岗岩与 I 型埃达克质花岗岩(Li et al., 2015; Zhou et al., 2016; Dong et al., 2018a),同时出现高温高压变质的麻粒岩和榴辉岩(李怀坤等, 2006; Meng et al., 2013; 国显正等, 2017),为限定原特提斯俯冲构架提供依据。然而,对于东昆仑造山带东

段的冷热俯冲性质缺乏讨论,东昆仑造山带东西两段的冷热俯冲性质是否存在差异有待研究。

针对上述问题,笔者选取东昆仑东段都兰地区(浪木日、哈日扎和希望沟)侵入岩为研究对象,通过锆石 U-Pb 年代学、岩石学和地球化学研究阐述岩石成因及构造意义。结合前人研究成果,在为约束东昆仑造山带原特提斯洋壳俯冲和后碰撞伸展时间提供依据的同时,探讨东昆仑洋陆转换的热结构,指出东昆仑造山带东段在俯冲时期具有相对热的俯冲性质,并推测可能与洋脊俯冲有关,以此探讨东昆仑早古生代的全新俯冲构造格局。

1 区域地质背景

东昆仑造山带位于青藏高原北部,北临柴达木盆地,南接巴颜喀拉地体,东接秦岭造山带,西至阿尔金断裂。从北到南,造山带被昆北断裂、昆中断裂和昆南断裂 3 条断裂带(吴树宽等, 2023)分割为昆北地体、昆南地体、幕士塔格-阿尼玛卿地体和可可西里-巴颜喀拉地 4 个地体,其中分布有 2 条蛇绿岩带(Xia et al., 2015; 李文渊, 2018; Yu et al., 2020)(图 1)。整个断层系统经历了多级叠加结构演化(寇林林等, 2015),昆中断裂(缝合带)形成于华力西期(丰成友等, 2012),昆南断裂(缝合带)形成于印支期(许志琴等, 2006),分别对应于原特提斯洋(元古代—早古生代)和古特提斯洋(晚古生代—中生代)的演化阶段(Yang et al., 1996)。

东昆仑造山带分布有从元古代至早中生代地层(图 1a)。昆北地体内主要出露有元古代中高级变质岩基底(He et al., 2016; 魏小林等, 2016),上覆早古生代低级变质岩和火山岩(陈有炘等, 2013),均被泥盆纪牦牛山组不整合覆盖(陆露等, 2010; 张耀玲等, 2010)。石炭世—中三叠世海相岩石主要产于昆南地体,石炭纪至二叠纪沉积有灰岩、碎屑沉积岩和火山岩,三叠纪地层以陆相火山岩夹火山碎屑岩为主(罗明非, 2015; 陈加杰等, 2022)。东昆仑内岩浆岩主要

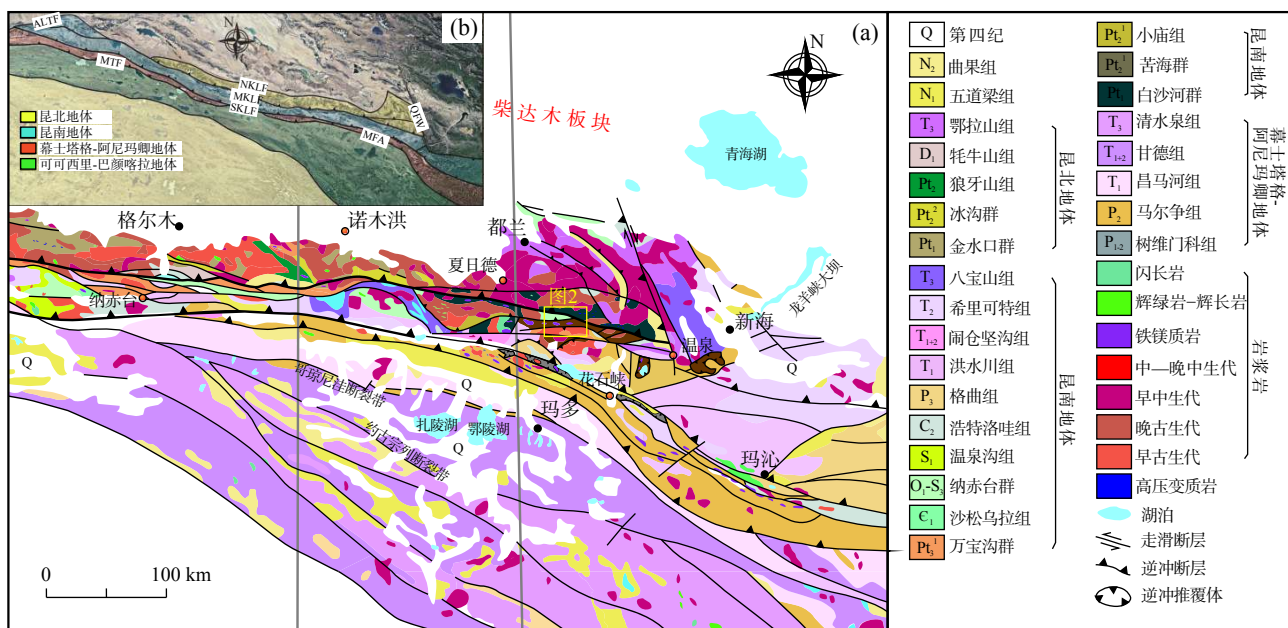


图1 东昆仑造山带地质图(a)和构造地块划分图(b)(据 Yu et al., 2020)

Fig. 1 (a) Geological map and (b) tectonic block division map of the East Kunlun Orogenic Belt

由花岗岩组成, 岩浆作用可分为前寒武纪、早古生代、晚古生代—早中生代和晚中生代—新生代 4 个阶段(莫宣学等, 2007; 田龙等, 2023), 早在古元古代溥沱纪就有少量花岗岩热事件记录(陈能松等, 2006)。昆中—南构造带内早古生代火山活动集中在晚奥陶世—晚志留世, 晚泥盆世普遍发育 I-A 型花岗岩, 磨拉石沉积出现标志着原特提斯造山事件的结束; 侏罗纪古特提斯洋的闭合和随后白垩纪雅鲁藏布江洋盆向北俯冲的影响导致了一系列岩浆热事件作用, 中生代火山活动集中于二叠世—三叠世(罗明非, 2015; Dong et al., 2018a)。

研究区位于东昆仑造山带的东端(图 1a), 区域经历了加里东期、华力西期、印支期等多期次的构造活动, 发育较多次级张性、扭性断裂, 展布方向为 NWW 和 NW 向, 具多期活动的特点(孟庆鹏, 2019; 孔会磊等, 2021), 由蛇绿岩指示的昆中缝合带从区域中部穿过(图 2)。元古代中高级变质基岩遍布全区, 基岩上覆有分布于区域中部的纳赤台群奥陶系—志留系低级变质岩, 及分布于区域东部的泥盆系牦牛山组和区域中南部的石炭系—三叠系沉积岩和火山岩。岩浆岩的岩性包括从镁铁质—超镁铁质侵入体/岩脉到长英质花岗岩。镁铁质—超镁铁质岩石主要形成于寒武纪和泥盆纪—石炭纪, 长英质花岗岩主要有奥陶纪—泥盆纪和二叠纪—三叠纪 2 个形成时期(图 2)(冯建赞等, 2010; Chen et al., 2020a)。

2 采样与测试分析方法

2.1 采样位置及样品特征

文中选取的研究对象——浪木日(LMR)、哈日扎(HRZ)和希望沟(XW)岩石样品均位于都兰县境内。其中, LMR-9 为黑云母花岗闪长岩, HRZ-1 为似斑状二长花岗岩, HRZ-3 为花岗闪长岩, XW-12 为闪长花岗岩, 具体特征描述见表 1。

2.2 锆石 U-Pb 定年

选取具有代表性的样品进行锆石的分选, 经过机械粉碎、重磁和电磁分析后, 在双目镜下手工挑纯, 随机挑出晶形完好且纯净透明的锆石并开展透反射光和阴极发光(CL)观察照相, 选取无裂隙无包体区域以待分析。锆石微量元素含量测试和 U-Pb 同位素定年在京燕都中实测试技术有限公司利用 LA-ICP-MS 同时分析完成。激光剥蚀系统为 New Wave UP213, ICP-MS 为布鲁克 M90。测试剥蚀光斑直径根据实际情况选择 25 μm。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。U-Pb 同位素定年中采用锆石标准 91 500 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。

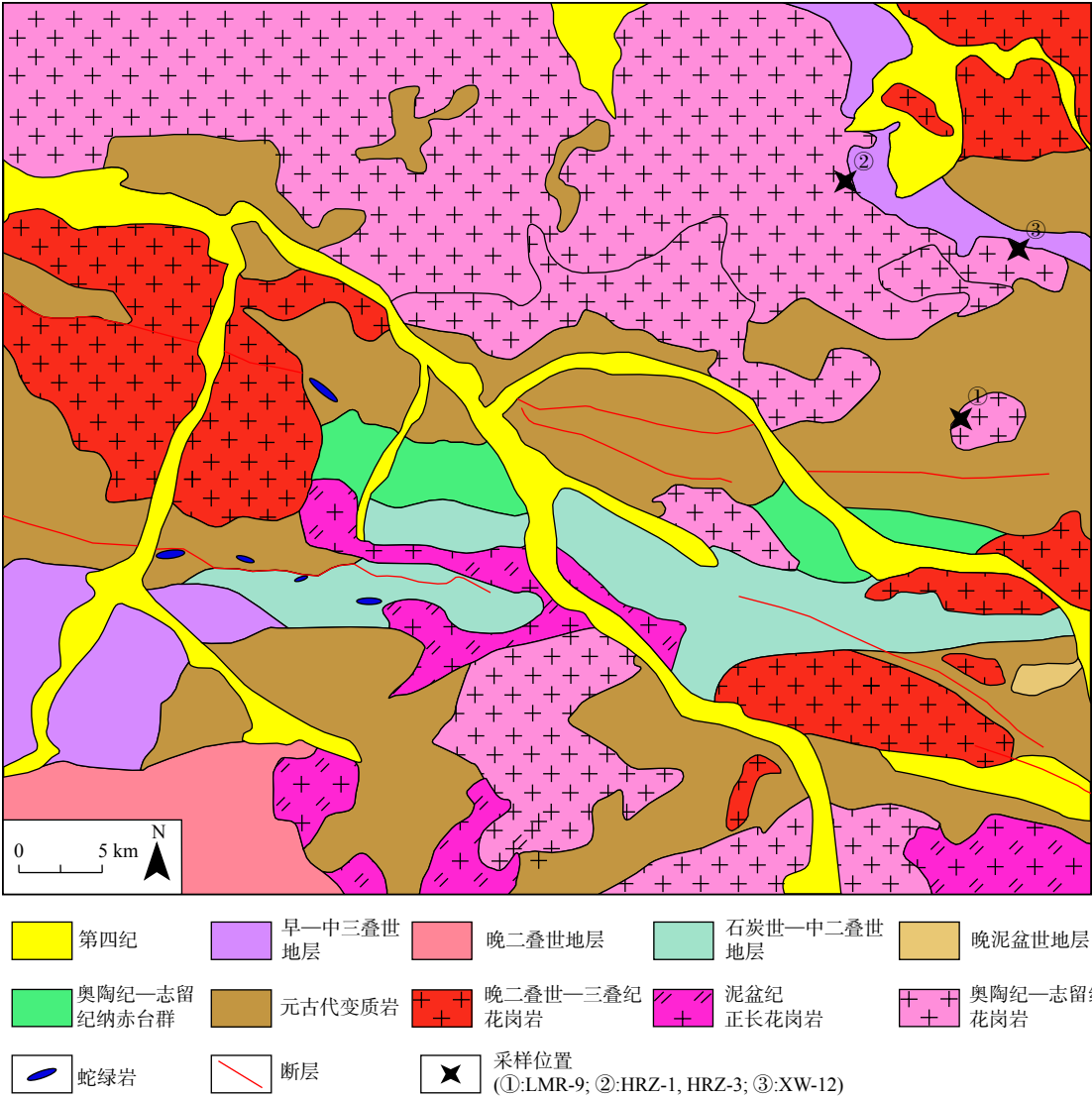
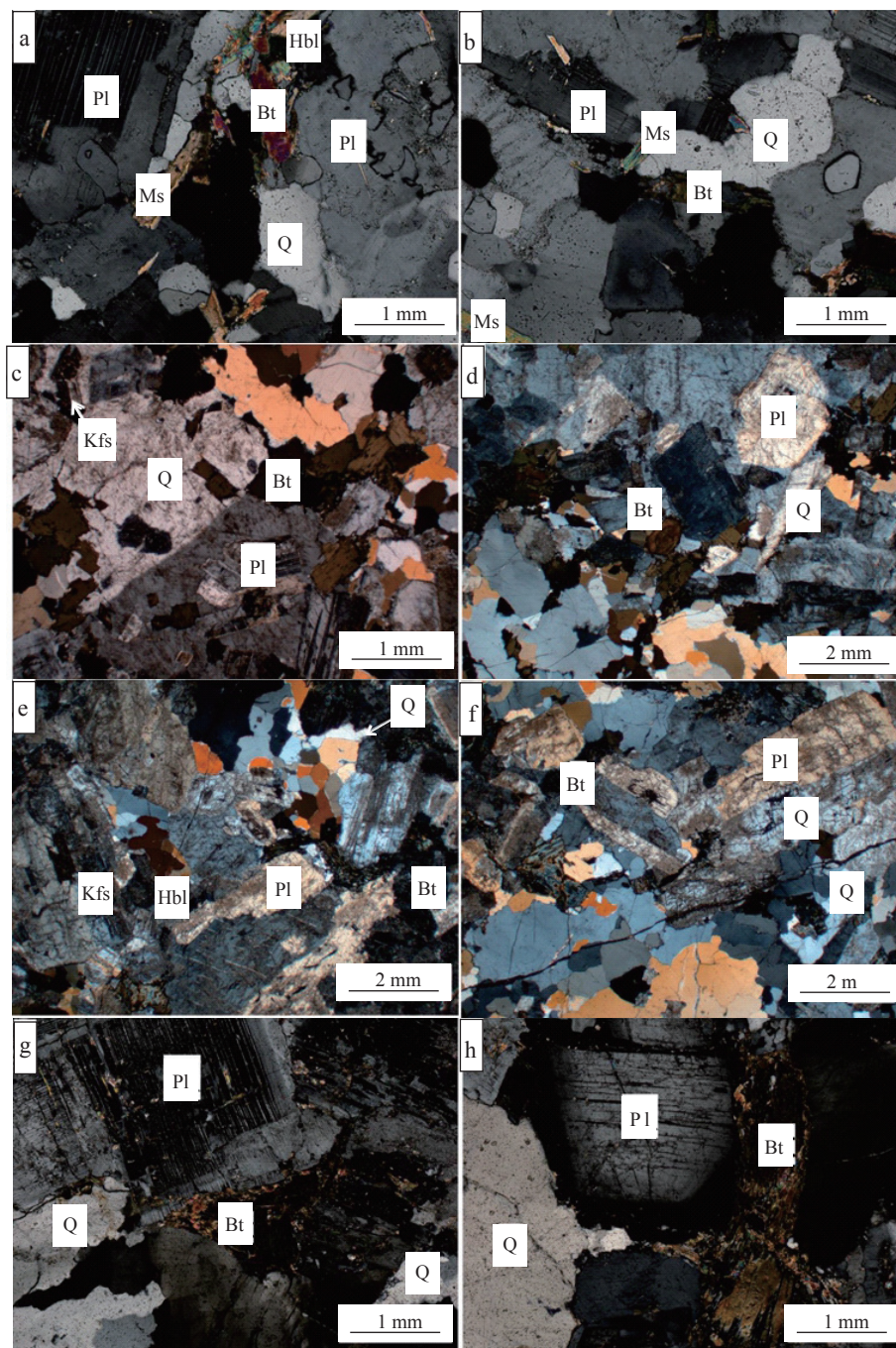


图 2 研究区地质图及采样位置(据 Chen et al., 2020a 修改)
Fig. 2 Geological map of the study area and sampling locations

表 1 都兰地区样品岩相学特征描述

Tab. 1 Petrographic characteristics of samples from the Dulan area

样品地点	样品号	采样位置	岩性特征	矿物组成	样品特征
浪木日	LMR-9	N 35°46'21" E 98°38'47"	黑云母花 岗闪长岩	长石(60%) 石英(20%) 黑云母(15%) 白云母(5%)	斜长石晶体粒径为1~4.5 mm, 可见明显绢云母化; 石英晶体呈粒状, 无色, 正低突起, 粒径为1~2.5 mm; 黑云母呈褐色, 多色性明显, 同时可见少量片状白云母, 发育一组极完全解理, 粒径为0.25~1 mm(图3a、图3b)
	HRZ-1	N 35°54'26" E 98°36'28"	似斑状二 长花岗岩	斜长石(40%) 碱性长石(30%) 石英(20%) 黑云母(10%)	斜长石粒径为1.5~4 mm, 蚀变程度低; 石英呈粒状, 粒径为1.5~4 mm, 呈乳白色, 包裹体较多, 表面较浑浊; 黑云母呈深褐色, 片状, 粒径为0.5~1 mm, 多色性明显; 碱性长石为钾长石, 晶体形态呈粒状, 部分泥化, 粒径为0.5~1 mm(图3c、图3d)
哈日扎	HRZ-3	N 35°54'26" E 98°36'28"	花岗闪 长岩	斜长石(60%) 碱性长石(15%) 石英(15%) 黑云母(10%)	斜长石晶体粒径为1~4 mm; 石英晶体呈粒状, 无色, 正低突起, 粒径为0.5~4 mm; 碱性长石为钾长石, 呈粒状, 部分泥化, 粒径为1~2 mm; 黑云母呈深褐色, 多色性明显; 镜下可见角闪石, 褐色, 蚀变不明显(图3e、图3f)
希望沟	XW-12	N 35°52'51" E 98°42'24"	花岗闪 长岩	斜长石(70%) 石英(20%) 黑云母(10%)	斜长石晶体粒径为1~3 mm, 绢云母化明显; 石英晶体呈粒状, 颜色为无色, 粒径为1~4 mm, 由于包裹体较多, 表面浑浊; 黑云母呈黑-棕色, 具一组极完全解理, 多色性明显(图3g、图3h)



a、b. 浪木目黑云母花岗闪长岩(LMR-9)正交偏光照片; c、d. 哈日扎似斑状二长花岗岩(HRZ-1)正交偏光照片; e、f. 哈日扎花岗闪长岩(HRZ-3)正交偏光照片; g、h. 希望沟花岗闪长岩(XW-12)正交偏光照片;

Ms. 白云母; Kfs. 钾长石; Pl. 斜长石; Bt. 黑云母; Q. 石英; Hbl. 角闪石

图 3 都兰地区典型花岗岩样品显微照片

Fig. 3 Microphotographs of typical granite samples in Dulan area

2.3 全岩主微量元素

全岩主微量元素含量测定由北京燕都中实测试技术有限公司完成。选取具有代表性的新鲜(无蚀变风化或去掉了岩石样品表面的风化物)的样品进行破碎,并研磨至 200 目以下,以待进行全岩主微量元素

分析分析。主量元素实验方法详细如下:粉末样品称重并与 $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 混合(1:8)助熔剂,在金铂坩埚中加热至 1150°C ,熔化成均匀的玻璃片,然后用 X 射线荧光光谱法进行测试以确保数据误差小于 1%。微量元素实验方法详细如下:称量粉末样品,并将其放入含

HF+HNO₃ 的聚四氟乙烯溶液罐中。高压净化罐在 190 ℃ 烘干机中放置 72 h, 然后去除酸液, 并将溶液作为稀释液固定, 供机器测试。使用电感耦合等离子体质谱法进行分析, 以 GSR-2 为控制样本, 测量数据显示部分挥发性和极低含量元素的误差小于 5 %, 分析误差小于 10 %。

2.4 Hf-Sr-Nd 同位素

锆石原位 Lu-Hf 同位素分析是由北京燕都中实测试技术有限公司的美国热电 Neptune-plus MC-ICP-MS 与 NewWave UP213 激光烧蚀进样系统完成测试的。锆石剥蚀使用频率为 8 Hz, 能量为 16 J/cm² 的激光剥蚀 31 s, 剥蚀出直径约为 30 μm 的剥蚀坑。测试时, 由于锆石中的 ¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf 值极其低(一般小于 0.002), ¹⁷⁶Lu 对 ¹⁷⁶Hf 的同位素干扰可以忽略不计。每个测试点的 ¹⁷³Yb/¹⁷²Yb 平均值用于计算 Yb 的分馏系数, 然后再扣除 ¹⁷⁶Yb 对 ¹⁷⁶Hf 的同质异位素干扰。

¹⁷³Yb/¹⁷²Yb 的同位素比值为 1.352 74。全岩 Sr-Nd 同位素分析使用 Thermo Fisher Scientific 多接收电感耦合等离子体质谱仪 Neptune Plus MC-ICP-MS 分别测定 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值和 ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 值, 根据 ⁸⁸Sr/⁸⁶Sr 值(8.373 209)和 ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 值(0.721 8)指数规律对测定的 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值和 ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 值进行在线质量分馏校正。⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值和 ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 值的不确定度为 2σ, 仅包含质谱测定的不确定度。

3 测试结果

3.1 锆石 U-Pb 年代学特征

文中主要对浪木日、哈日扎和希望沟等地采集的花岗岩样品进行锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年。所有花岗岩样品的锆石均以短柱状晶体为主, 长宽比为 2 : 1~4 : 1, 呈半自形至自形晶(图 4), 但粒径上存在



a. 浪木日黑云母花岗闪长岩(LMR-9); b. 哈日扎似斑状二长花岗岩(HRZ-1);
c. 哈日扎花岗闪长岩(HRZ-3); d. 希望沟花岗闪长岩(XW-12)

图 4 都兰地区花岗岩样品典型锆石 CL 图像

Fig. 4 Typical zircon CL images of granite samples in the Dulan area

差异, 其中样品 LMR-9 的锆石粒径为 100~200 μm , 样品 HRZ-1 的锆石粒径为 150~200 μm , 样品 HRZ-3 的锆石粒径为 100~150 μm , 样品 XW-12 的锆石较小, 为 75~150 μm 。多数锆石具有明显的震荡环带特征(图 4), 指示分析的锆石均为岩浆成因锆石(吴元保等, 2004)。

文中年龄分析选取了三地花岗岩各 25 颗锆石开展 U-Pb 同位素分析, 排除捕获锆石年龄数据, 获取加权平均年龄与谐和年龄(图 5)。其中, 浪木日黑云母花岗闪长岩(LMR-9)定年数据见表 2, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $(431.2 \pm 1.6)\text{Ma}$ (MSWD=7.4), 谐和年龄为 $(429.0 \pm 4.0)\text{Ma}$ (MSWD=1.4)(表 2); 哈日扎似斑状二长花岗岩(HRZ-1) $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $(415 \pm 3.1)\text{Ma}$ (MSWD=1.5), 谐和年龄为 $(412.2 \pm 3.3)\text{Ma}$ (MSWD=2.1)(表 3); 哈日扎花岗闪长岩(HRZ-3) $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $(416.6 \pm 2.5)\text{Ma}$ (MSWD=0.44), 谐和年龄为 $(416.7 \pm 2.3)\text{Ma}$ (MSWD=0.43)(表 4); 希望沟花岗闪长岩(XW-12) $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $(404.2 \pm 1.5)\text{Ma}$ (MSWD=2.6), 谐和年龄为 $(403.6 \pm 3.1)\text{Ma}$ (MSWD=0.15)(表 5, 图 5)。

3.2 全岩地球化学特征

本次分析共选取了都兰地区浪木日、哈日扎、希望沟的 12 件中酸性岩体样品开展全岩主微量元素分析(表 6), 主量元素、稀土和微量元素相关图解均采用 CorelKit 软件绘制(Zhang et al., 2022)。

3.2.1 主量元素

浪木日黑云母花岗闪长岩(LMR-9)与希望沟花岗闪长岩(XW-12)主量元素组成特征相似, SiO_2 含量分别为 71.34%~71.65% 和 71.06%~72.60%; Al_2O_3 含量分别为 15.43%~15.79% 和 14.37%~15.13%; 全碱($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$)含量分别为 6.58%~7.15% 和 5.85%~7.74%, 均具有高 Si、富 Al、富碱质的特点(表 6)。在 TAS 图解中, 样品均落于花岗岩区域(图 6a)。样品 LMR-9 的 A/CNK 值为 1.04~1.06, 均小于 1.10; 样品 XW-12 的 A/CNK 值相对变化较大, 为 0.98~1.17(平均为 1.11), 两者均集中于过铝质区域(图 6b)。 SiO_2 与 Na_2O 、 K_2O 、 CaO 的关系图解显示样品 LMR-9 与 XW-12 岩样均属于钙碱性系列(图 6c、图 6d)。

哈日扎似斑状二长花岗岩(HRZ-1)与哈日扎花岗闪长岩(HRZ-3)主量元素组成上同样近似(表 6), 表现在 SiO_2 (HRZ-1: 68.71%~70.48%; HRZ-3: 69.42%~

71.07%)、 Al_2O_3 (HRZ-1: 14.50%~15.81%; HRZ-3: 14.44%~15.81%)、 K_2O (HRZ-1: 3.10%~3.20%; HRZ-3: 2.99%~3.29%) 和 Na_2O (HRZ-1: 3.58%~3.99%; HRZ-3: 3.65%~3.86%) 含量差异较小。在 TAS 图解中, 样品均落于花岗闪长岩区域(图 6a)。A/CNK 值均为 1.03~1.06, 呈弱过铝质特征(图 6b)。由 SiO_2 与 Na_2O 、 K_2O 、 CaO 的关系图解可知, HRZ-1 和 HRZ-3 岩样为钙碱性花岗岩(图 6c), 进一步细分属于高钾钙碱性系列(图 6d)。

3.2.2 微量元素

样品 LMR-9 与样品 XW-12 在微量元素组成上同样相似(表 6)。LMR-9 与 XW-12 的稀土元素含量均较低(分别为 52.22×10^{-6} ~ 57.28×10^{-6} 和 63.48×10^{-6} ~ 98.99×10^{-6}), $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 值较大, 均值分别为 3.95 和 2.70, 表明 LREE 相对于 HREE 富集。LMR-9 的 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 值为 11.07~11.86, $(\text{Sm}/\text{Nd})_{\text{N}}$ 值为 0.60~0.70; XW-12 的 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 值为 6.61~13.37, $(\text{Sm}/\text{Nd})_{\text{N}}$ 值为 0.57~0.67, 两者均具有弱 Eu 负异常(LMR-9: 0.73~0.86; XW-12: 0.65~1.20)。稀土元素配分图显示两者均呈“右倾式”分布(图 7a、图 7c), 微量元素蛛网图可见两者具均亏损 Ba、Nb、Ti 等高场强元素, 富集 Rb、Th、K 等大离子亲石元素, 但 LMR-9 相对 XW-12 还存在 Sr 的正异常(图 7b、图 7d)。

与浪木日和希望沟的样品相比, 哈日扎样品(HRZ-1, HRZ-3)稀土元素含量均较高(HRZ-1: 194.21×10^{-6} ~ 208.36×10^{-6} ; HRZ-3: 206.46×10^{-6} ~ 220.42×10^{-6})。LREE/HREE 值分别为 4.12~4.59 和 3.86~4.54, 说明 LREE 相对富集。HRZ-1 中 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 值为 13.46~16.44, $(\text{Sm}/\text{Nd})_{\text{N}}$ 值为 0.59~0.62; HRZ-3 中 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 值为 13.91~15.75, $(\text{Sm}/\text{Nd})_{\text{N}}$ 值为 0.61~0.68, 反映两者均有 LREE 之间分异强而 HREE 之间分异弱的特点(图 7e)。同时与 LMR-9 和 XW-12 不同的是, 哈日扎样品具有较明显的 Eu 负异常(δEu 值分别为 0.34~0.35 和 0.30~0.36)。微量元素蛛网图显示, 其均明显富集 Rb、Th、La, 亏损 Ba、Sr、Sm、Ti 等元素(图 7f)。

3.3 Sr-Nd-Hf 同位素地球化学

样品 LMR-9 的 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 值为 0.400 268~0.414 724, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为 0.707 862~0.707 943, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 为 0.705 365~0.705 418; $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 值为 0.142 422~0.145 764, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值为 0.512 486~0.512 503, $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值为 -0.05~0.20, 二阶段模式年龄 TDMC(Nd) 值为 1 155~1 176 Ma(表 7)。样品 XW-12 的 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 值为 0.679 440~

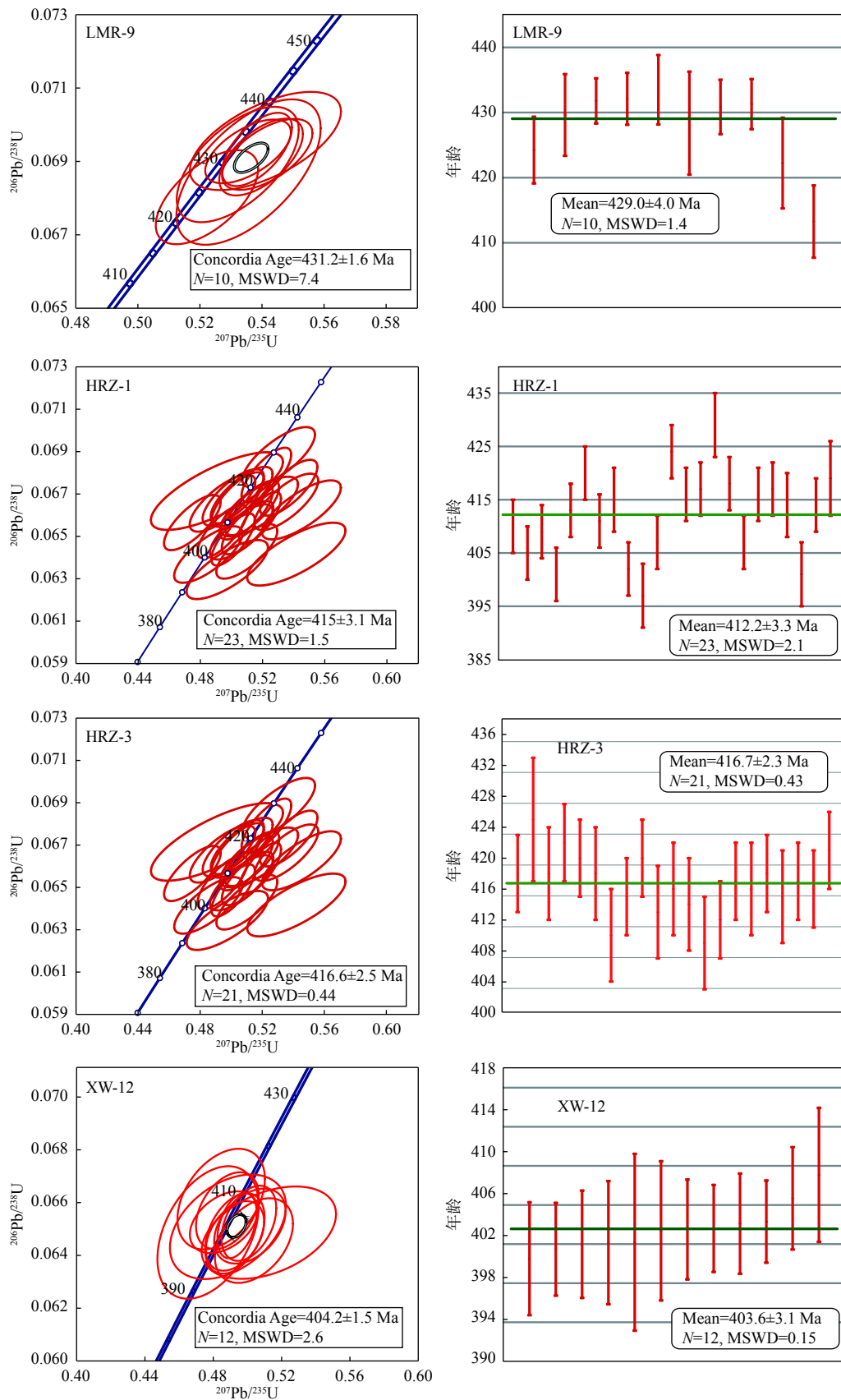


图5 都兰地区花岗岩锆石 U-Pb 谐和图和加权平均年龄图

Fig. 5 Zircon U-Pb consonance map and weighted average age map of granites in the Dulan area

表 2 东昆仑都兰地区浪木日黑云母花岗闪长岩(LMR-9)锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年数据表

Tab. 2 Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating data of biotite granodiorite (LMR-9) in Langmuri, Dulan area, East Kunlun

测点号	²³⁸ U	²³² Th	Th/U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁸ Pb/ ²³² Th	
	10 ⁻⁶	10 ⁻⁶		比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ
LMR-9-02	316.325	6.351	0.020 077	0.056 335	0.001 638	0.541 065	0.016 034	0.069 559	0.000 885	0.098 356	0.021 291
LMR-9-04	698.218	29.668	0.042 491	0.056 643	0.000 818	0.539 660	0.008 877	0.069 121	0.000 693	0.021 201	0.000 840
LMR-9-07	1281.839	110.004	0.085 817	0.057 725	0.001 061	0.526 948	0.011 890	0.066 208	0.000 916	0.033 476	0.001 380
LMR-9-08	671.123	9.016	0.013 434	0.055 888	0.001 016	0.532 169	0.012 949	0.068 916	0.001 040	0.028 004	0.002 348
LMR-9-09	1120.577	300.149	0.267 852	0.056 240	0.000 904	0.535 645	0.015 310	0.068 710	0.001 311	0.023 340	0.000 794
LMR-9-10	421.336	58.694	0.139 306	0.056 000	0.000 827	0.535 485	0.009 094	0.069 275	0.000 574	0.025 243	0.000 969
LMR-9-11	2289.009	42.755	0.018 679	0.056 511	0.000 848	0.541 654	0.009 595	0.069 193	0.000 639	0.029 508	0.001 831
LMR-9-17	1394.080	76.079	0.054 573	0.056 275	0.000 703	0.538 376	0.007 418	0.069 328	0.000 661	0.020 995	0.000 658
LMR-9-19	753.590	51.631	0.068 513	0.058 110	0.001 524	0.539 648	0.016 456	0.067 694	0.001 153	0.004 164	0.001 038
LMR-9-23	318.174	13.328	0.041 888	0.055 494	0.001 028	0.522 255	0.010 862	0.068 024	0.000 848	0.021 305	0.001 701

测点号	²³⁸ U/ ²³² Th		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁸ Pb/ ²³² Th	
	年龄 (Ma)	1σ	年龄 (Ma)	1σ	年龄 (Ma)	1σ	年龄 (Ma)	1σ	年龄 (Ma)	1σ
LMR-9-02	130.655 000	18.584 22	465.6	64.4	439.1	10.6	433.5	5.3	1896.2	391.8
LMR-9-04	23.236 260	0.463 315	477.7	31.9	438.2	5.9	430.9	4.2	424.0	16.6
LMR-9-07	12.144 750	0.578 212	519.3	40.3	429.8	7.9	413.3	5.5	665.5	27.0
LMR-9-08	80.145 330	4.656 936	447.9	40.4	433.2	8.6	429.6	6.3	558.2	46.2
LMR-9-09	3.582 419	0.084 373	461.9	35.6	435.5	10.1	428.4	7.9	466.3	15.7
LMR-9-10	9.336 152	0.477 850	452.4	32.8	435.4	6.0	431.8	3.5	503.9	19.1
LMR-9-11	52.205 370	1.212 468	472.5	33.2	439.5	6.3	431.3	3.9	587.8	35.9
LMR-9-17	18.235 300	0.440 723	463.2	27.7	437.4	4.9	432.1	4.0	420.0	13.0
LMR-9-19	15.621 370	0.719 202	533.9	57.4	438.2	10.9	422.2	7.0	84.0	20.9
LMR-9-23	24.343 330	0.497 610	432.2	41.3	426.7	7.2	424.2	5.1	426.1	33.7

表 3 东昆仑都兰地区哈日扎似斑状二长花岗岩(HRZ-1)锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年数据表

Tab. 3 Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating data of porphyritic monzogranite (HRZ-1) in Harizha, Dulan area, East Kunlun

测点号	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁸ Pb/ ²³² Th		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁸ Pb/ ²³² Th	
	比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	年龄 (Ma)	1σ	年龄 (Ma)	1σ	年龄 (Ma)	1σ	年龄 (Ma)	1σ
HRZV-1-01	0.052 45	0.001 31	0.474 83	0.012 02	0.065 66	0.000 86	0.021 22	0.000 35	305.0	34.0	395.0	8.0	410.0	5.0	424.0	7.0
HRZV-1-02	0.056 03	0.000 98	0.501 06	0.009 23	0.064 86	0.000 81	0.020 84	0.000 28	454.0	20.0	412.0	6.0	405.0	5.0	417.0	6.0
HRZV-1-03	0.056 58	0.001 18	0.510 35	0.010 92	0.065 42	0.000 83	0.021 81	0.000 35	475.0	26.0	419.0	7.0	409.0	5.0	436.0	7.0
HRZV-1-04	0.054 85	0.001 64	0.485 13	0.014 5	0.064 15	0.000 88	0.020 55	0.000 42	406.0	42.0	402.0	10.0	401.0	5.0	411.0	8.0
HRZV-1-05	0.055 86	0.001 21	0.509 52	0.011 27	0.066 15	0.000 85	0.021 8	0.000 34	447.0	27.0	418.0	8.0	413.0	5.0	436.0	7.0
HRZV-1-06	0.057 84	0.001 29	0.536 81	0.012 19	0.067 31	0.000 87	0.022 88	0.000 35	524.0	28.0	436.0	8.0	420.0	5.0	457.0	7.0
HRZV-1-07	0.057 06	0.000 92	0.518 35	0.008 91	0.065 88	0.000 81	0.020 82	0.000 26	494.0	18.0	424.0	6.0	411.0	5.0	416.0	5.0
HRZV-1-08	0.056 54	0.001 81	0.517 8	0.016 51	0.066 42	0.000 93	0.020 27	0.000 43	474.0	46.0	424.0	11.0	415.0	6.0	406.0	9.0
HRZV-1-09	0.057 51	0.001 44	0.509 9	0.012 94	0.064 3	0.000 85	0.021 9	0.000 4	511.0	33.0	418.0	9.0	402.0	5.0	438.0	8.0
HRZV-1-11	0.056 85	0.001 99	0.497 31	0.017 29	0.063 44	0.000 92	0.020 74	0.000 49	486.0	51.0	410.0	12.0	397.0	6.0	415.0	10.0
HRZV-1-12	0.054 94	0.001 14	0.494 19	0.010 58	0.065 23	0.000 83	0.020 01	0.000 27	410.0	26.0	408.0	7.0	407.0	5.0	400.0	5.0
HRZV-1-13	0.055 8	0.001 09	0.522 47	0.010 54	0.067 91	0.000 85	0.016 99	0.000 25	444.0	24.0	427.0	7.0	424.0	5.0	341.0	5.0
HRZV-1-14	0.058 25	0.001 46	0.535 3	0.013 54	0.066 64	0.000 88	0.022 16	0.000 37	539.0	33.0	435.0	9.0	416.0	5.0	443.0	7.0
HRZV-1-15	0.054 76	0.001 17	0.504 01	0.011 07	0.066 75	0.000 85	0.021 91	0.000 31	402.0	27.0	414.0	7.0	417.0	5.0	438.0	6.0
HRZV-1-16	0.055 95	0.001 62	0.530 39	0.015 41	0.068 75	0.000 94	0.021 64	0.000 44	450.0	40.0	432.0	10.0	429.0	6.0	433.0	9.0
HRZV-1-17	0.054 87	0.001 41	0.506 57	0.013 13	0.066 96	0.000 88	0.019 86	0.000 35	407.0	35.0	416.0	9.0	418.0	5.0	397.0	7.0
HRZV-1-18	0.056 31	0.001 47	0.506 36	0.013 33	0.065 22	0.000 86	0.018 06	0.000 34	465.0	35.0	416.0	9.0	407.0	5.0	362.0	7.0
HRZV-1-19	0.053 84	0.001 51	0.494 25	0.013 91	0.066 58	0.000 89	0.020 86	0.000 34	364.0	40.0	408.0	9.0	416.0	5.0	417.0	7.0
HRZV-1-20	0.054 36	0.001 39	0.501 14	0.012 98	0.066 85	0.000 88	0.020 05	0.000 35	386.0	35.0	412.0	9.0	417.0	5.0	401.0	7.0
HRZV-1-22	0.059 65	0.001 83	0.545	0.016 75	0.066 26	0.000 92	0.019 87	0.000 4	591.0	43.0	442.0	11.0	414.0	6.0	398.0	8.0
HRZV-1-23	0.061 22	0.002 38	0.541 74	0.020 87	0.064 17	0.000 98	0.009 02	0.000 2	647.0	56.0	440.0	14.0	401.0	6.0	181.0	4.0
HRZV-1-24	0.056 1	0.001 23	0.513 25	0.011 52	0.066 35	0.000 85	0.019 58	0.000 28	456.0	28.0	421.0	8.0	414.0	5.0	392.0	6.0
HRZV-1-25	0.052 99	0.003 08	0.490 66	0.028 04	0.067 15	0.001 21	0.020 55	0.000 57	328.0	97.0	405.0	19.0	419.0	7.0	411.0	11.0

表 4 东昆仑都兰地区哈拉扎花岗闪长岩 (HRZ-3) 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年数据表
Tab. 4 Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating data of granodiorite (HRZ-3) in Harizha, Dulan, East Kunlun

测点号	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$			$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$			$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$			$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$			$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$			$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$		
	比值	1 σ	1 σ	比值	1 σ	1 σ	比值	1 σ	1 σ	比值	1 σ	1 σ	比值	1 σ	1 σ	比值	1 σ	1 σ
HRZV-3-01	0.053 56	0.001 54	0.494 79	0.014 27	0.000 91	0.000 36	0.020 58	0.000 36	353.0	41.0	408.0	10.0	418.0	5.0	412.0	7.0		
HRZV-3-02	0.053 23	0.003 18	0.500 27	0.029 34	0.001 26	0.000 81	0.021 21	0.000 81	339.0	99.0	412.0	20.0	425.0	8.0	424.0	16.0		
HRZV-3-03	0.056 41	0.001 97	0.521 01	0.018 04	0.000 97	0.000 35	0.018 99	0.000 35	469.0	51.0	426.0	12.0	418.0	6.0	380.0	7.0		
HRZV-3-04	0.056 14	0.001 37	0.523 22	0.012 9	0.000 88	0.000 31	0.021 78	0.000 31	458.0	32.0	427.0	9.0	422.0	5.0	435.0	6.0		
HRZV-3-06	0.056 29	0.001 13	0.522	0.010 79	0.000 85	0.000 31	0.020 18	0.000 31	464.0	25.0	426.0	7.0	420.0	5.0	404.0	6.0		
HRZV-3-07	0.058 65	0.002 23	0.541 27	0.020 36	0.006 95	0.001 01	0.021 36	0.000 54	554.0	56.0	439.0	13.0	418.0	6.0	427.0	11.0		
HRZV-3-08	0.053 26	0.002 45	0.482 31	0.021 92	0.006 69	0.001 05	0.020 96	0.000 56	340.0	74.0	400.0	15.0	410.0	6.0	419.0	11.0		
HRZV-3-09	0.055 9	0.001 56	0.512 41	0.014 35	0.006 49	0.000 9	0.019 15	0.000 37	448.0	38.0	420.0	10.0	415.0	5.0	383.0	7.0		
HRZV-3-10	0.057 35	0.001 42	0.531 92	0.013 33	0.006 29	0.000 88	0.020 72	0.000 33	505.0	33.0	433.0	9.0	420.0	5.0	415.0	7.0		
HRZV-3-11	0.052 32	0.001 7	0.477 74	0.015 52	0.006 24	0.000 93	0.020 87	0.000 48	299.0	48.0	397.0	11.0	413.0	6.0	417.0	10.0		
HRZV-3-13	0.054 93	0.001 68	0.504 21	0.015 41	0.006 58	0.000 92	0.021 04	0.000 41	409.0	44.0	415.0	10.0	416.0	6.0	421.0	8.0		
HRZV-3-15	0.058 02	0.001 67	0.530 33	0.015 34	0.006 3	0.000 91	0.021 9	0.000 4	531.0	39.0	432.0	10.0	414.0	6.0	438.0	8.0		
HRZV-3-16	0.056 8	0.002 03	0.512 54	0.018 19	0.006 44	0.000 95	0.019 28	0.000 35	484.0	53.0	420.0	12.0	409.0	6.0	386.0	7.0		
HRZV-3-17	0.053 71	0.001 29	0.488 4	0.011 9	0.006 95	0.000 86	0.020 98	0.000 36	359.0	32.0	404.0	8.0	412.0	5.0	420.0	7.0		
HRZV-3-18	0.054 14	0.001 54	0.498 83	0.014 22	0.006 83	0.000 9	0.020 72	0.000 32	377.0	40.0	411.0	10.0	417.0	5.0	415.0	6.0		
HRZV-3-19	0.053 95	0.001 89	0.495 93	0.017 26	0.006 66	0.000 96	0.021 5	0.000 43	369.0	52.0	409.0	12.0	416.0	6.0	430.0	9.0		
HRZV-3-20	0.054 31	0.001 17	0.502 2	0.011 11	0.006 05	0.000 86	0.018 98	0.000 25	384.0	28.0	413.0	8.0	418.0	5.0	380.0	5.0		
HRZV-3-21	0.055 99	0.002 27	0.513 65	0.020 61	0.006 52	0.001 02	0.020 83	0.000 47	452.0	62.0	421.0	14.0	415.0	6.0	417.0	9.0		
HRZV-3-22	0.055 82	0.001 49	0.514 25	0.013 87	0.006 68	0.000 89	0.021 56	0.000 41	445.0	37.0	421.0	9.0	417.0	5.0	431.0	8.0		
HRZV-3-23	0.054 97	0.001 13	0.504 89	0.010 68	0.006 61	0.000 85	0.020 14	0.000 31	411.0	26.0	415.0	7.0	416.0	5.0	403.0	6.0		
HRZV-3-24	0.055 4	0.001 46	0.515 74	0.013 73	0.006 75	0.000 9	0.021 75	0.000 36	428.0	36.0	422.0	9.0	421.0	5.0	435.0	7.0		

表 5 东昆仑都兰地区希望沟花岗闪长岩(XW-12)锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年数据表

Tab. 5 LA-ICP-MS U-Pb dating data of the granodiorite (XW-12) zircon in Xiwanggou, Dulan area, East Kunlun

测点号	²³⁸ U	²³² Th	Th/U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁸ Pb/ ²³² Th	
	10 ⁻⁶	10 ⁻⁶		比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ
XW-12-03	222.038	77.943	0.351 037	0.053 771	0.002 176	0.476 970	0.019 547	0.064 376	0.001 493	0.020 698	0.000 928
XW-12-05	390.010	224.742	0.576 248	0.055 657	0.001 278	0.492 616	0.011 468	0.064 342	0.000 907	0.019 634	0.000 446
XW-12-06	308.777	3.886	0.012 587	0.054 606	0.001 612	0.486 234	0.013 135	0.064 725	0.000 695	0.024 073	0.003 252
XW-12-07	2705.775	36.420	0.013 460	0.057 055	0.002 729	0.512 476	0.025 946	0.064 37	0.001 040	0.066 743	0.003 946
XW-12-08	243.035	66.346	0.272 987	0.056 431	0.001 616	0.501 419	0.013 779	0.064 593	0.000 844	0.021 364	0.001 055
XW-12-09	200.146	87.528	0.437 321	0.054 623	0.002 524	0.488 593	0.022 397	0.064 57	0.001 177	0.021 824	0.000 926
XW-12-17	282.261	106.744	0.378 176	0.056 385	0.001 208	0.500 838	0.010 560	0.064 691	0.000 847	0.020 414	0.000 683
XW-12-19	245.495	104.976	0.427 609	0.053 623	0.002 023	0.484 635	0.016 876	0.065 515	0.001134	0.020 101	0.001 307
XW-12-20	435.646	51.163	0.117 441	0.057 011	0.001 658	0.503 790	0.015 055	0.064 099	0.000 953	0.036 289	0.002 546
XW-12-21	3968.980	47.722	0.012 024	0.055 292	0.000 751	0.493 886	0.007 562	0.064 609	0.000 736	0.020 955	0.000 869
XW-12-22	257.169	118.039	0.458 993	0.055 688	0.001 387	0.492 718	0.011 250	0.064 258	0.000 783	0.020 524	0.000 624
XW-12-23	202.007	91.347	0.452 196	0.054 323	0.001 255	0.488 256	0.012 107	0.065 118	0.000 866	0.020 815	0.000 599

测点号	²³⁸ U/ ²³² Th		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁸ Pb/ ²³² Th	
	年龄 (Ma)	1σ	年龄 (Ma)	1σ	年龄 (Ma)	1σ	年龄 (Ma)	1σ	年龄 (Ma)	1σ
XW-12-03	2.835 826	0.081 675	361.5	91.3	396.0	13.4	402.2	9.0	414.1	18.4
XW-12-05	1.812 681	0.043 438	438.7	51.1	406.7	7.8	402.0	5.5	393.0	8.8
XW-12-06	106.235 400	9.505 966	396.1	66.2	402.3	9.0	404.3	4.2	480.8	64.2
XW-12-07	75.778 780	2.710 546	493.7	105.4	420.1	17.4	402.1	6.3	1 305.9	74.8
XW-12-08	3.770 071	0.073 742	469.4	63.4	412.7	9.3	403.5	5.1	427.3	20.9
XW-12-09	2.325 497	0.074 162	396.8	103.6	404.0	15.3	403.4	7.1	436.4	18.3
XW-12-17	2.512 113	0.106 452	467.6	47.4	412.3	7.1	404.1	5.1	408.5	13.5
XW-12-19	2.258 608	0.074 207	355.3	85.2	401.2	11.5	409.1	6.9	402.2	25.9
XW-12-20	8.548 346	0.440 448	492.0	64.1	414.3	10.2	400.5	5.8	720.5	49.7
XW-12-21	81.329 490	2.320 900	424.1	30.3	407.6	5.1	403.6	4.5	419.2	17.2
XW-12-22	2.146 288	0.071 575	439.9	55.4	406.8	7.7	401.5	4.7	410.6	12.4
XW-12-23	2.296 398	0.080 975	384.4	51.9	403.7	8.3	406.7	5.2	416.4	11.9

2.241 489, ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值为 0.712 399~0.719 008, (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i 值为 0.706 106~0.708 488; ¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd 值为 0.138 614~0.150 046, ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 值为 0.512 511~0.512 619, εNd(*t*) 值为-0.02~2.63, 二阶段模式年龄 TDMC(Nd)值为 935~1 151 Ma。

所有样品 ¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf 值为 0.000 04~0.002 47, 除个别较大外(0.002 47, 0.002 24)其余均小于 0.002(表 8、表 9), 表明锆石形成后放射性成因 Hf 积累少, 可以较好地反映锆石形成时岩浆的 Hf 同位素组成(吴福元等, 2007a)。样品 LMR-9 锆石的 ¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf 值为 0.000 04~0.001 02, ¹⁷⁶Yb/¹⁷⁷Hf 值为 0.001 52~0.040 40, ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf

值为 0.281 96~0.282 61, εHf(*t*)变化范围较大(-19.445~3.176), 对应的 Hf 同位素二阶段模式年龄(TDMC)值为 1 200~2 641 Ma。样品 XW-12 锆石的 ¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf 值为 0.000 13~0.002 47, ¹⁷⁶Yb/¹⁷⁷Hf 值为 0.005 96~0.095 41, ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 值为 0.282 22~0.282 88, εHf(*t*)变化范围较大(-10.597~12.490), 对应的 Hf 同位素二阶段模式年龄为 597~2 065 Ma。所有样品 ¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf 值为 0.000 04~0.002 47, 除个别较大外(0.002 47 和 0.002 24)其余均小于 0.002, 表明锆石形成后放射性成因 Hf 积累少, 可以较好地反映锆石形成时岩浆的 Hf 同位素组成(吴福元等, 2007a)。样品 LMR-9 锆石的 ¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf 值为

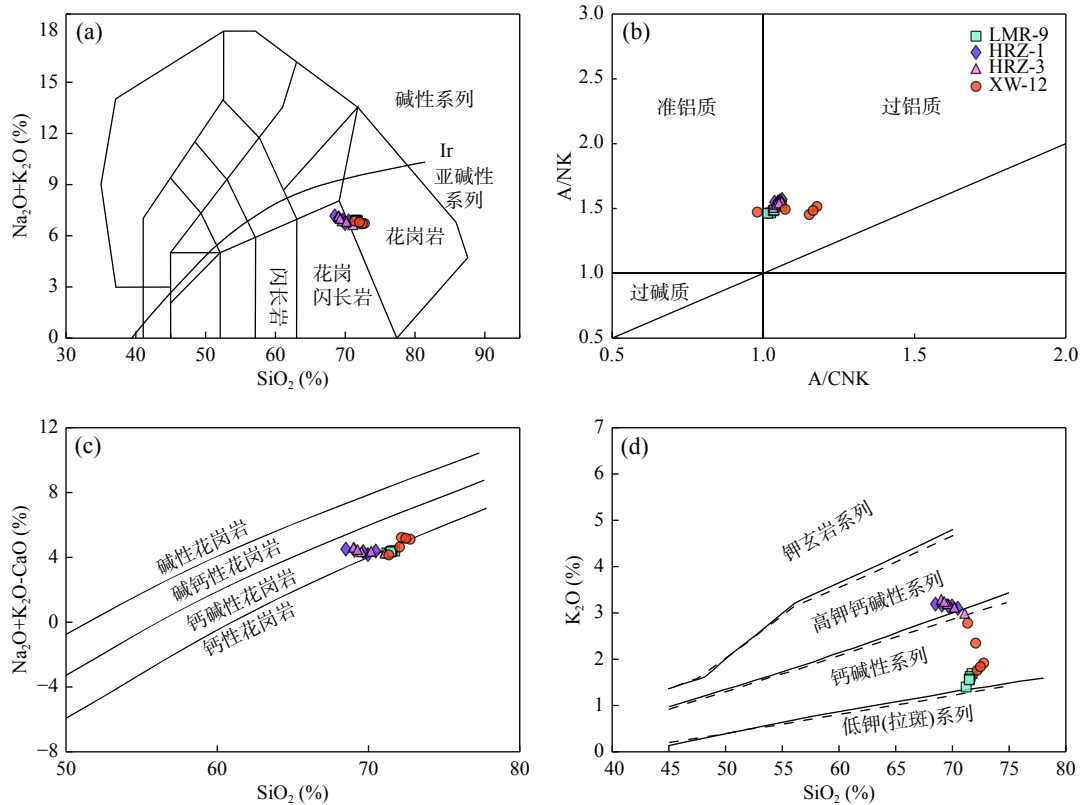
表 6 东昆仑都兰地区 LMR-9、HRZ-1、HRZ-3 和 XW-12 花岗岩主微量元素统计表
Tab. 6 Major and trace elements of LMR-9, HRZ-1, HRZ-3 and XW-12 granites in the Dulan area of East Kunlun

样品号	LMR-9-1	LMR-9-2	LMR-9-3	LMR-9-4	LMR-9-5	HRZ-1-1	HRZ-1-2	HRZ-1-3	HRZ-1-4	HRZ-1-5	HRZ-3-1	HRZ-3-2	HRZ-3-3	HRZ-3-4	HRZ-3-5	XW-12-1	XW-12-2	XW-12-3	XW-12-4	XW-12-5
SiO ₂	71.73	71.57	71.21	71.50	71.48	68.50	70.48	69.96	69.64	69.07	69.01	69.54	71.08	69.27	70.17	72.18	72.75	71.34	72.47	72.05
Al ₂ O ₃	15.87	15.41	15.39	15.56	15.61	15.76	14.72	14.44	14.97	15.36	15.02	14.88	14.44	14.95	14.69	14.65	15.20	14.42	14.93	14.81
TFe ₂ O ₃	1.94	1.94	1.90	1.93	1.92	3.19	3.16	3.14	3.16	3.18	3.14	3.30	3.06	3.22	3.14	1.76	1.83	2.51	1.80	2.17
MgO	0.85	0.85	0.89	0.86	0.86	1.07	1.07	1.06	1.07	1.07	1.08	1.11	1.01	1.10	1.05	0.94	0.81	0.89	0.88	0.85
CaO	2.51	2.52	2.58	2.53	2.54	2.66	2.49	2.54	2.56	2.61	2.53	2.53	2.39	2.53	2.46	1.47	1.60	2.72	1.54	2.16
Na ₂ O	5.21	5.29	5.45	5.32	5.33	3.98	3.77	3.57	3.77	3.88	3.86	3.67	3.65	3.77	3.71	4.95	4.81	4.10	4.88	4.45
K ₂ O	1.69	1.63	1.40	1.57	1.56	3.19	3.10	3.15	3.15	3.17	3.29	3.20	2.99	3.25	3.12	1.76	1.92	2.78	1.84	2.35
TiO ₂	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.42	0.40	0.40	0.41	0.41	0.39	0.43	0.42	0.41	0.41	0.16	0.16	0.15	0.16	0.16
P ₂ O ₅	0.08	0.07	0.07	0.07	0.07	0.14	0.13	0.14	0.14	0.14	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
MnO	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.04	0.04	0.07	0.04	0.05
LOI	0.44	0.37	0.56	0.45	0.48	0.73	0.61	1.13	0.83	0.78	0.90	1.29	0.78	1.09	0.94	1.44	1.26	1.35	1.35	1.31
A/CNK	1.06	1.02	1.01	1.03	1.04	1.06	1.04	1.04	1.05	1.05	1.03	1.05	1.06	1.04	1.05	1.15	1.18	0.98	1.16	1.08
Na ₂ O+K ₂ O	6.90	6.92	6.85	6.89	6.88	7.16	6.88	6.72	6.92	7.04	7.15	6.87	6.65	7.01	6.83	6.71	6.73	6.88	6.72	6.80
Li	9.26	8.06	9.41	8.91	9.19	29.92	29.56	27.25	28.91	29.41	14.87	23.59	24.37	19.23	21.80	11.56	11.57	6.88	11.57	9.22
Be	1.94	1.69	1.62	1.75	1.77	3.61	3.44	3.02	3.36	3.48	3.56	3.26	3.38	3.41	3.40	2.35	2.28	2.36	2.32	2.32
Sc	3.81	3.54	3.69	3.68	3.72	8.09	7.64	6.92	7.55	7.82	8.68	7.79	6.90	8.24	7.57	3.86	4.24	3.07	4.05	3.66
Ti	1108.422	1229.558	1273.744	1203.908	1195.358	3066.467	2986.563	2943.558	2998.863	3032.665	3018.183	3148.628	3096.428	3083.405	3089.916	936.65	1147.271	979.35	1041.96	1063.31
V	14.95	15.73	17.13	15.94	16.01	49.32	48.53	46.95	48.27	48.80	49.85	48.88	47.29	49.36	48.32	11.34	12.90	15.70	12.12	14.30
Mn	299.72	279.84	275.23	284.93	286.63	587.28	600.79	564.37	584.15	585.71	561.75	584.52	561.32	573.13	567.23	304.24	384.02	635.96	344.13	509.99
Co	3.97	3.01	3.10	3.36	3.48	7.97	7.44	7.36	7.59	7.78	8.00	7.55	6.88	7.78	7.33	3.15	2.91	2.40	3.03	2.65
Ni	3.58	4.57	5.51	4.55	4.55	13.03	9.91	8.52	10.49	11.76	9.20	9.56	8.51	9.38	8.95	1.83	4.65	3.02	3.24	3.83
Cu	4.12	3.00	2.81	3.31	3.41	7.13	6.52	5.28	6.31	6.72	6.52	5.99	4.85	6.26	5.55	4.26	4.32	4.27	4.29	4.30
Zn	36.40	30.31	30.40	32.37	33.05	63.87	62.73	61.64	62.75	63.31	61.48	63.44	56.32	62.46	59.39	32.14	19.26	15.93	25.70	17.59
Ga	18.39	19.59	20.25	19.41	19.35	25.32	24.08	22.70	24.03	24.68	25.30	23.99	23.73	24.65	24.19	17.42	21.47	19.58	19.45	20.53
As	0.51	0.36	0.45	0.44	0.47	1.92	1.65	1.66	1.74	1.83	2.21	1.64	2.08	1.92	2.00	0.91	0.92	1.04	0.91	0.98
Rb	49.89	51.81	48.12	49.94	49.31	109.38	112.15	98.21	106.58	107.98	94.81	96.53	108.32	95.67	101.99	55.74	61.19	109.01	58.46	85.10
Sr	400.01	384.93	395.64	393.53	396.39	308.50	290.25	280.95	293.23	300.87	325.46	306.96	278.41	316.21	297.31	270.62	316.08	171.27	293.35	243.68
Y	6.16	6.37	5.94	6.16	6.09	24.23	22.36	20.63	22.41	23.32	22.31	23.26	26.13	22.78	24.46	11.71	15.16	15.39	13.44	15.28
Zr	88.92	85.44	91.68	88.68	89.76	225.93	227.59	206.98	220.17	223.05	195.79	192.46	204.06	194.13	199.09	132.14	108.16	79.44	120.15	93.80
Nb	3.05	2.69	2.75	2.83	2.88	14.29	13.55	12.80	13.55	13.92	13.61	15.18	15.84	14.40	15.12	4.65	4.47	3.48	4.56	3.97

续表 6

样品号	LMP-9-1	LMR-9-1	LMR-9-2	LMR-9-3	LMR-9-4	LMR-9-5	HRZ-1-1	HRZ-1-2	HRZ-1-3	HRZ-1-4	HRZ-1-5	HRZ-3-1	HRZ-3-2	HRZ-3-3	HRZ-3-4	HRZ-3-5	XW-12-1	XW-12-2	XW-12-3	XW-12-4	XW-12-5
Mo	1.36	0.09	0.03	0.32	0.59	0.76	0.49	0.54	0.47	0.50	0.49	0.61	1.22	0.58	0.91	0.75	0.55	0.23	0.11	0.39	0.17
Cd	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.27	0.24	0.23	0.25	0.26	0.18	0.27	0.21	0.22	0.22	0.03	0.04	0.08	0.04	0.06
In	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.05	0.06	0.06	0.03	0.01	0.04	0.02	0.02
Cs	2.15	2.63	2.11	2.11	2.30	2.19	5.88	5.94	3.32	5.05	5.46	4.62	5.88	8.12	5.25	6.68	2.76	3.42	3.54	3.09	3.48
Ba	172.80	208.31	160.70	160.70	180.60	171.36	446.67	394.25	439.75	426.89	436.78	540.73	548.37	387.79	544.55	466.17	260.98	310.79	246.74	285.89	278.77
La	7.89	9.02	8.18	8.18	8.36	8.14	40.74	39.40	38.12	39.42	40.08	41.33	43.18	40.95	42.25	41.60	10.97	13.61	8.97	12.29	11.29
Ce	18.06	19.93	17.55	17.55	18.51	18.04	79.90	76.81	76.98	77.89	78.89	80.79	87.51	81.96	84.15	83.06	25.87	32.43	19.17	29.15	25.80
Pr	2.56	2.91	2.72	2.72	2.73	2.67	9.14	8.72	8.66	8.84	8.99	9.27	9.85	9.51	9.56	9.53	3.60	4.72	2.78	4.16	3.75
Nd	10.72	11.44	10.64	10.64	10.93	10.76	30.90	29.48	29.45	29.94	30.42	30.57	32.91	32.10	31.74	31.92	13.84	18.35	10.31	16.10	14.33
Sm	2.45	2.26	2.07	2.07	2.26	2.26	6.26	5.71	5.61	5.86	6.06	6.06	6.49	7.07	6.27	6.67	3.03	3.67	1.91	3.35	2.79
Eu	0.53	0.51	0.54	0.54	0.53	0.53	0.71	0.66	0.66	0.68	0.69	0.72	0.73	0.70	0.72	0.71	0.63	0.75	0.70	0.69	0.72
Gd	1.86	1.74	1.64	1.64	1.75	1.75	6.23	5.88	5.72	5.94	6.08	6.06	6.45	6.92	6.26	6.59	2.79	2.97	1.53	2.88	2.25
Tb	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.80	0.75	0.71	0.75	0.78	0.77	0.83	1.01	0.80	0.91	0.42	0.53	0.25	0.47	0.39
Dy	1.37	1.30	1.21	1.21	1.29	1.29	3.84	3.47	3.14	3.48	3.66	3.45	3.96	4.75	3.70	4.23	2.39	2.86	1.16	2.62	2.01
Ho	0.22	0.26	0.24	0.24	0.24	0.23	0.75	0.71	0.65	0.71	0.73	0.71	0.75	0.88	0.73	0.81	0.43	0.60	0.21	0.52	0.41
Er	0.56	0.59	0.58	0.58	0.58	0.57	2.20	2.00	1.81	2.00	2.10	2.04	2.10	2.35	2.07	2.21	1.20	1.49	0.51	1.34	1.00
Tm	0.08	0.09	0.08	0.08	0.08	0.08	0.31	0.27	0.25	0.28	0.29	0.28	0.28	0.32	0.28	0.30	0.17	0.25	0.07	0.21	0.16
Yb	0.45	0.51	0.50	0.50	0.49	0.48	2.04	1.78	1.56	1.80	1.92	1.80	1.85	1.98	1.82	1.90	1.03	1.39	0.45	1.21	0.92
Lu	0.08	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.32	0.28	0.26	0.29	0.31	0.29	0.28	0.29	0.28	0.29	0.16	0.22	0.06	0.19	0.14
Hf	2.59	2.50	2.66	2.66	2.58	2.61	5.67	5.62	5.18	5.49	5.58	5.00	4.86	5.05	4.93	4.99	3.95	3.24	2.30	3.59	2.77
Ta	0.24	0.25	0.26	0.26	0.25	0.25	1.38	0.98	0.84	1.06	1.22	0.93	1.11	1.50	1.02	1.26	0.51	0.42	0.22	0.47	0.32
W	0.11	0.15	0.17	0.17	0.14	0.14	0.22	0.20	0.23	0.21	0.22	0.25	0.26	0.23	0.26	0.24	0.54	0.84	0.64	0.69	0.74
Tl	0.32	0.31	0.28	0.28	0.30	0.30	0.96	0.94	0.81	0.91	0.94	0.82	0.88	0.93	0.85	0.89	0.35	0.39	0.58	0.37	0.49
Pb	11.59	12.02	11.66	11.66	11.76	11.67	22.84	21.37	19.21	21.14	21.99	20.90	17.62	17.93	19.26	18.60	12.87	14.23	2.95	13.55	8.59
Bi	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.06	0.06	0.07	0.06	0.06	0.06	0.04	0.05	0.05	0.05	0.09	0.11	0.13	0.10	0.12
Th	2.16	2.38	2.24	2.24	2.26	2.22	16.58	16.93	19.22	17.57	17.08	30.65	19.31	28.75	24.98	26.86	4.83	5.33	1.49	5.08	3.41
U	0.84	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	3.66	3.37	6.74	4.59	4.13	2.83	4.33	3.56	3.58	3.57	1.67	1.64	0.91	1.66	1.27
Sr/Y	64.92	60.46	66.57	66.57	63.98	65.16	12.73	12.98	13.62	13.11	12.92	14.59	13.20	10.66	13.89	12.28	23.11	20.84	11.13	21.98	15.99
La/Yb	17.55	17.60	16.43	16.43	17.19	17.06	19.96	22.10	24.39	22.15	21.05	22.94	23.37	20.63	23.15	21.89	10.63	9.82	19.83	10.22	14.82
ΣREE	53.26	57.28	52.22	52.22	54.25	53.25	208.36	198.28	194.21	200.28	204.32	206.46	220.42	216.92	213.44	215.18	78.24	98.99	63.48	88.61	81.23

注: 主量元素含量为%, 微量元素含量为 10^{-6} 。



a. TAS 图解(据 Middlemost, 1994); b. A/NK-A/CNK 图解(据 Maniar, 1989); c. $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}-\text{CaO})-\text{SiO}_2$ 图解(据 Frost, 2001); d. $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图解(据 Peccerillo, 1976)

图 6 浪木日、哈日扎与希望沟花岗岩主量元素图解

Fig. 6 Diagram of major elements in Langmuri, Harizha and Xiwanggou granites

0.000 04~0.001 02, $^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.001 52~0.040 40, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.281 96~0.282 61, $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 变化范围较大(-19.445~3.176), 对应的 Hf 同位素二阶段模式年龄(TDMC)值为 1 200~2 641 Ma。样品 XW-12 锆石的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.000 13~0.002 47, $^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.005 96~0.095 41, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.282 22~0.282 88, $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 变化范围较大(-10.597~12.490), 对应的 Hf 同位素二阶段模式年龄为 597~2 065 Ma。

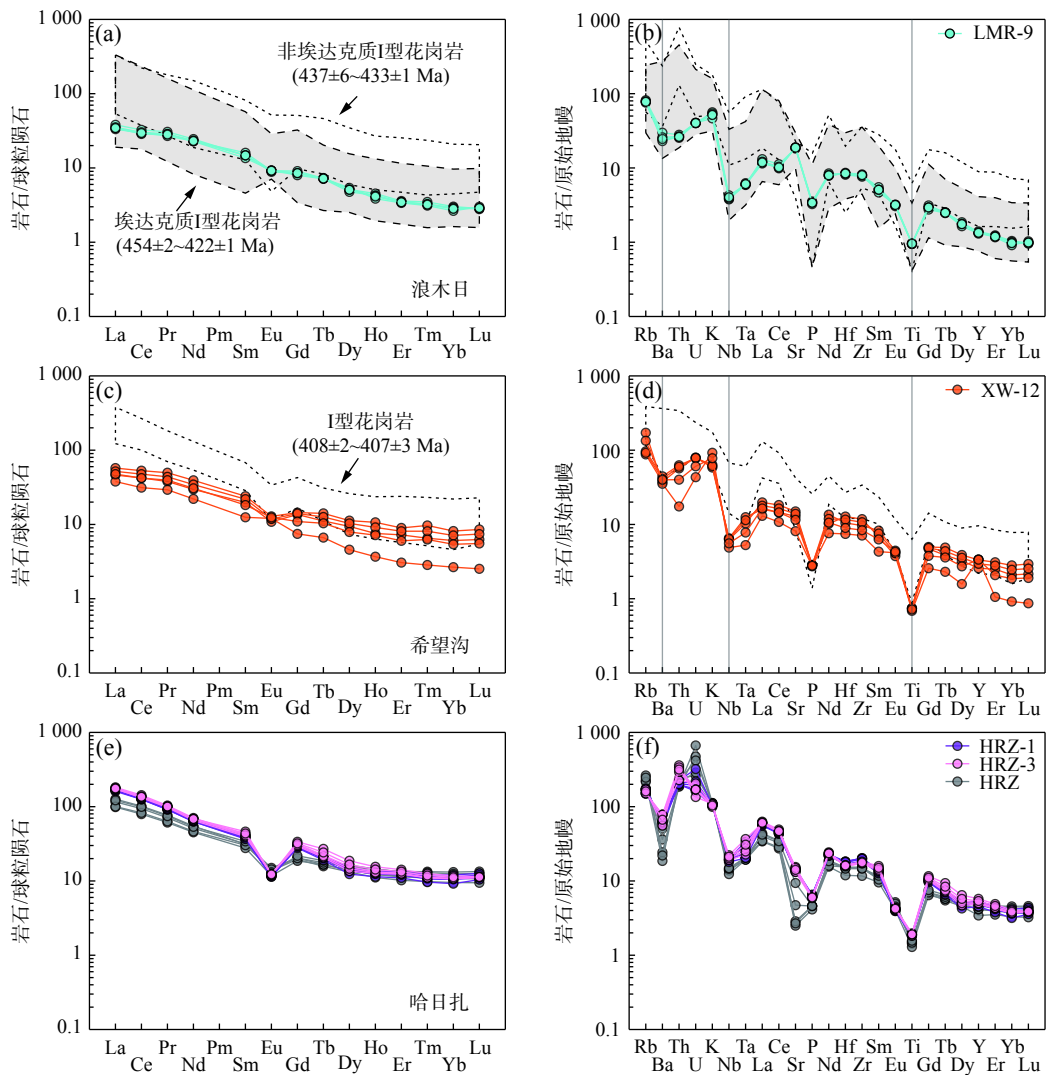
4 讨论

4.1 岩石成因分类

样品 LMR-9 和样品 XW-12 均具有较低碱质含量(LMR-9: 6.58%~7.15%; XW-12: 5.85%~7.74%), 较低的 10 000 Ga/Al 值(LMR: 2.18~2.48; XW-12: 2.24~2.66) 以及低的 HFSE 含量(LMR-9: $\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y}=114.4\times 10^{-6}$ ~ 117.9×10^{-6} , 均值为 116.2×10^{-6} ; XW-12: $\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y}=117.5\times 10^{-6}$ ~ 174.4×10^{-6} , 均值为 150.7×10^{-6}), 集中落在

I & S 型花岗岩区域(图 8a), 明显区别于典型的 A 型花岗岩的特征。此外, 样品 LMR-9 和样品 XW-12 中缺少 S 型花岗岩中特征的富铝矿物, 如堇青石(图 3), 铝饱和指数 A/CNK 同样说明其具有 I 型花岗岩特征(吴福元等, 2007b; 邓晋福等, 2015)(图 6b)。哈日扎早泥盆世花岗岩以较高的 HFSE 含量($\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y}=298.9\times 10^{-6}$ ~ 330.1×10^{-6})和 Ga/Al 值($10\ 000\ \text{Ga}/\text{Al}=2.97$ ~ 3.10 , >2.6)为特征, 显示与 A 型花岗岩的亲性(图 8a); 利用 Nb-Y-Ce 图解进一步分类, 可知其为 A2 型花岗岩(图 8b), 暗示其形成于后造山拉张环境。综上所述, 认为哈日扎花岗岩应为 A 型花岗岩。

但值得注意的是, 浪木日与希望沟花岗岩具有不同的 Sr-Y 元素特征: LMR-9 的 Sr 含量为 384.9×10^{-6} ~ 400.0×10^{-6} (平均为 393.5×10^{-6}), Y 含量为 5.9×10^{-6} ~ 6.4×10^{-6} (平均为 6.16×10^{-6}), Sr/Y 值为 60.46~66.57, 样品集中于埃达克岩区域(图 8c); XW-12 中 Sr 含量为 171.27×10^{-6} ~ 316.08×10^{-6} (平均为 252.66×10^{-6}), Y 含量为 11.71×10^{-6} ~ 15.39×10^{-6} (平均为 14.09×10^{-6}), Sr/Y



>420 Ma 的埃达克/非埃达克质花岗岩数据(据 Li et al., 2015; 陈加杰等, 2016; Zhou et al., 2016; Dong et al., 2018a; Norbu et al., 2021); <420 Ma 的 I 型花岗岩数据(据刘彬等, 2012; Zhou et al., 2016); HRZ 数据(据张斌等, 2016)

图 7 球粒陨石标准化稀土元素分配图(a、c、e)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b、d、f)
(标准化值据 Sun et al., 1989)

Fig. 7 (a, c, e) Normalized rare earth element distribution map of chondrites and (b, d, f) normalized trace element spider web map of primitive mantle

表 7 都兰地区希望沟(XW-12)和浪木日(LMR-9)花岗岩 Sr–Nd 同位素分析结果统计表

Tab. 7 Sr–Nd isotope analysis results of Xiwanggou (XW-12) and Langmuri (LMR-9) granites in Dulan area

样品	t	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	2σ	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	2σ	εNd(t)	TDM	TDMC
XW-12-1	404.2	0.703 068	0.712 507	0.000 006	0.708 460	0.149 059	0.512 511	0.000 007	−0.02	1 509	1 151
XW-12-2	404.2	0.679 441	0.712 399	0.000 007	0.708 488	0.150 046	0.512 537	0.000 007	0.44	1 470	1 114
XW-12-3	404.2	2.241 488	0.719 008	0.000 006	0.706 106	0.138 614	0.512 619	0.000 009	2.63	1 081	935
LMR-9-1	431.2	0.411 167	0.707 943	0.000 008	0.705 418	0.145 764	0.512 503	0.000 009	0.17	1 454	1 157
LMR-9-2	431.2	0.414 724	0.707 912	0.000 010	0.705 365	0.143 810	0.512 486	0.000 010	−0.05	1 450	1 176
LMR-9-3	431.2	0.400 268	0.707 862	0.000 011	0.705 404	0.142 422	0.512 495	0.000 009	0.2	1 403	1 155

值为 11.13~23.11, 样品主要位于经典岛弧岩石区域(图 8c)。同时, 样品 LMR-9 稀土元素配分曲线与微

量元素原始地幔标准化曲线均位于“埃达克质花岗岩”区域(图 7a、图 7b); 以五龙沟地区为界划分东昆

表 8 都兰地区浪木日花岗岩(LMR-9)锆石 Hf 同位素分析结果统计表

Tab. 8 Zircon Hf isotope analysis results of the Langmuri granite (LMR-9) in the Dulan area

测点号	¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Yb/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf	1σ	年龄 (Ma)	εHf(0)	εHf(<i>t</i>)	TDM	TDMC	fs
LMR-9-02	0.001 02	0.040 28	0.281 96	0.000 02	433.500	-28.7	-19.445	1 816	2 641	-0.969 158
LMR-9-04	0.000 06	0.002 72	0.282 26	0.000 02	430.856	-18.2	-8.776	1 370	1 970	-0.998 141
LMR-9-07	0.000 40	0.015 83	0.282 61	0.000 02	413.270	-5.8	3.176	898	1 200	-0.988 073
LMR-9-08	0.000 07	0.002 90	0.282 28	0.000 02	429.622	-17.3	-7.856	1 334	1 911	-0.997 936
LMR-9-09	0.001 00	0.040 40	0.282 10	0.000 02	428.381	-23.7	-14.589	1 620	2 334	-0.969 885
LMR-9-10	0.000 54	0.023 66	0.282 24	0.000 02	431.785	-18.9	-9.598	1 415	2 023	-0.983 855
LMR-9-11	0.000 39	0.018 30	0.282 24	0.000 02	431.293	-18.9	-9.548	1 409	2 019	-0.988 149
LMR-9-17	0.000 03	0.001 52	0.282 22	0.000 02	432.107	-19.6	-10.153	1 424	2 058	-0.999 027
LMR-9-19	0.000 17	0.007 71	0.282 34	0.000 02	422.247	-15.4	-6.147	1 264	1 798	-0.994 911
LMR-9-23	0.000 04	0.001 70	0.282 16	0.000 01	424.241	-21.6	-12.253	1 498	2 184	-0.998 878

表 9 都兰地区希望沟花岗岩(XW-12)锆石 Hf 同位素分析结果统计表

Tab. 9 Zircon Hf isotope analysis results of Xixigou granite (XW-12) in Dulan area

测点号	¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Yb/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf	1σ	年龄 (Ma)	εHf(0)	εHf(<i>t</i>)	TDM	TDMC	fs
XW-12-03	0.000 70	0.029 57	0.282 88	0.000 02	402.183	3.8	12.490	523	597	-0.978 974
XW-12-05	0.001 00	0.043 04	0.282 86	0.000 02	401.979	3	11.628	559	652	-0.969 740
XW-12-06	0.000 13	0.005 96	0.282 22	0.000 02	404.299	-19.4	-10.597	1 420	2 065	-0.996 001
XW-12-07	0.002 47	0.095 41	0.282 44	0.000 02	402.146	-11.6	-3.438	1 189	1 611	-0.925 707
XW-12-08	0.000 98	0.039 53	0.282 82	0.000 02	403.495	1.7	10.338	611	736	-0.970 458
XW-12-09	0.001 77	0.079 19	0.282 84	0.000 02	403.356	2.3	10.751	599	709	-0.946 745
XW-12-17	0.000 79	0.033 14	0.282 86	0.000 02	404.089	3.2	11.863	550	639	-0.976 080
XW-12-19	0.000 49	0.020 10	0.282 42	0.000 02	409.077	-12.5	-3.655	1 163	1 630	-0.985 350
XW-12-21	0.002 24	0.086 49	0.282 42	0.000 02	403.594	-12.4	-4.140	1 214	1 656	-0.932 477
XW-12-22	0.000 93	0.037 91	0.282 82	0.000 02	401.470	1.7	10.265	612	739	-0.971 948
XW-12-23	0.000 65	0.026 48	0.282 87	0.000 02	406.677	3.5	12.284	535	614	-0.980 550

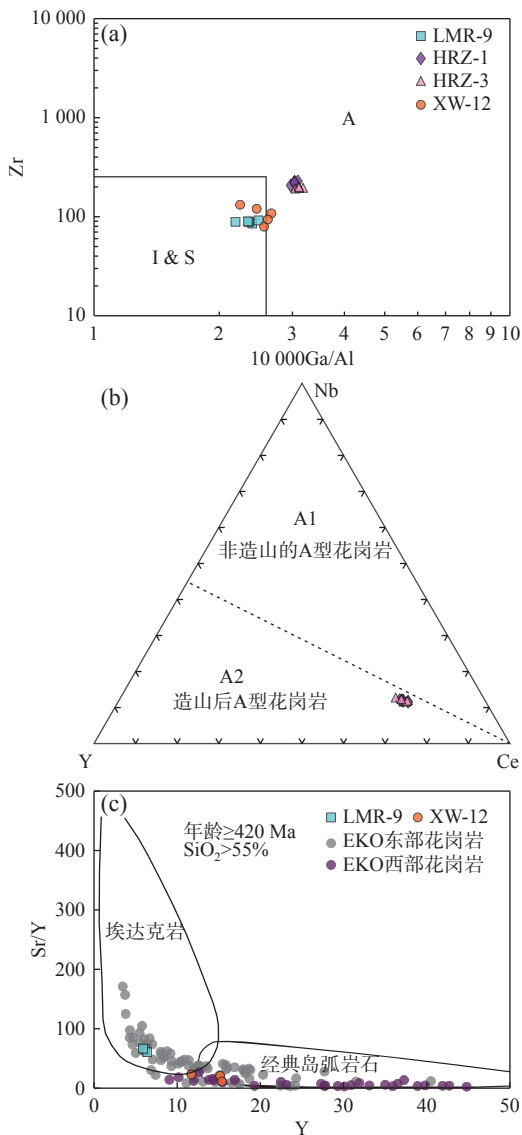
仑造山带为东西两段,其地球化学特征(高 Sr/Y)同样与东昆仑造山带东段同时代埃达克质花岗岩基本一致(图 8c),XW-12 以其低 Sr/Y 值明显不同于埃达克花岗岩。综上所述,认为浪木日花岗岩为 I 型埃达克质花岗岩,而希望沟花岗岩不属于埃达克岩。

4.2 岩浆源区

浪木日中志留世花岗岩富集大离子亲石元素(Ba、K、Sr、U),相对亏损高场强元素(Ti、P、Ta)(图 7a、图 7b),指示可能与地幔楔俯冲洋壳的脱水熔融有关;Nb/Ta 值(10.73~12.63)近似壳源岩石的 Nb/Ta 值(11),不同于地幔平均值(17)(Barth et al., 2000);Nd/Th 值(4.74~4.96)靠近壳源值(约为 3)而与幔源值(大于 15)有显著差异(图 9a);Rb/Sr 值为 0.12~0.13,

介于壳幔混合源比值之间(0.05~0.5)(王德滋等, 1993),反映其壳源特征。希望沟早泥盆世花岗岩 Nb/Ta 值(6.83~10.58)接近壳源参考值(地壳 Nb/Ta ≈ 11);Nd/Th 值(2.87~6.94)接近壳源参考值(地壳 Nd/Th ≈ 3)(图 9a);Rb/Sr 值为 0.19~0.64(均值为 0.35),呈现壳幔源混合特征。综上所述,认为其具有壳源属性,同时具有幔源参与特征。

哈日扎样品相对富集 Rb、K 等大离子亲石元素, Th、U 等不相容元素和 La、Ce 等轻稀土元素(LREE),亏损高场强元素(Nb、Ta 和 Ti)(图 7e、图 7f),可能是岩浆受到地壳物质的混染或是岩浆源区残留有含 Ta、Nb、Ti 的矿物导致岩体呈现“TNT”亏损(Mckenzie, 1989),同时 Ba 相对于 Th 和 Rb 亏损,暗示地壳物质



a. Zr-10000Ga/Al 图解(据 Whalen, 1987); b. Nb-Y-Ce 图解(据 Eby, 1992); c. Sr/Y-Y 图解(据 Defant, 1990)

图8 东昆仑花岗岩成因分类(a,b)及埃达克岩图解(c)
Fig. 8 (a, b) Genetic classification of East Kunlun granites and (c) diagrams of adakites

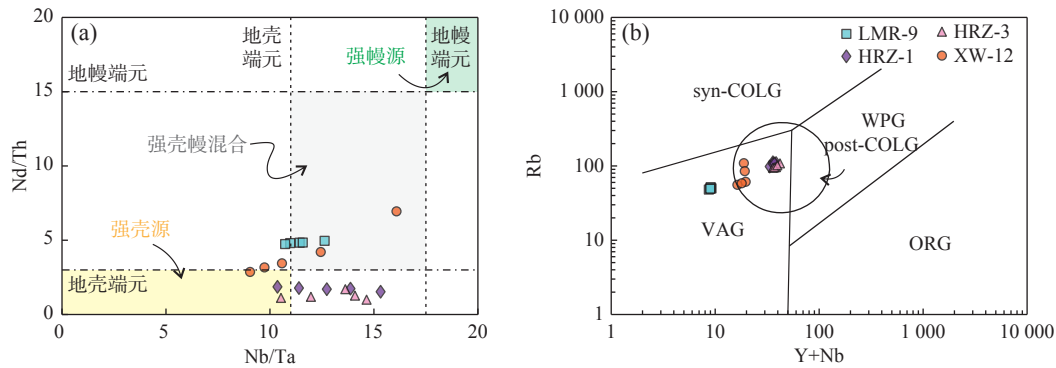
的部分熔融(徐恒等, 2022)。Nb/Ta 值(HRZ-1: 10.36~15.32; HRZ-3: 10.53~14.65)接近地壳岩石的 Nb/Ta 值; Nd/Th 值(HRZ-1: 1.53~1.86; HRZ-3: 1.00~1.70)与幔源岩石(地幔 Nd/Th > 15)有显著区别(图 9a); Rb/Sr 值(HRZ-1: 0.350~0.386; HRZ-3: 0.291~0.389)接近壳幔混合源比值。综上所述, 哈日扎花岗岩可能形成于地壳物质的部分熔融, 同时有部分地幔物质的参与, 具有壳幔混合物质来源特征(张斌等, 2016)。

锆石 Hf 同位素常用来进一步约束岩浆的源区特征(Griffin et al., 2000)。LMR-9 中锆石的 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值变

化范围大, 暗示其岩浆来源不均一(崔圆等, 2013)。在 T- $\epsilon\text{Hf}(t)$ 图解上, 数据点均落在球粒陨石 Hf 同位素演化线之下, 以落在下地壳区域的锆石居多(图 10a、图 10b), 大部分集中位于 1.8 Ga 左右的地壳演化线周围(图 11a、图 11b), 表明其源区主要为下地壳。此外, T_{DM}^{C} 值为 1.8~2.2 Ga, 与白沙河群年龄吻合(He et al., 2016)。XW-12 中锆石的 Hf 同位素数据显示存在两类锆石, 大多数锆石 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值较为接近为一类, 其余锆石 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值均小于 0 为一类(图 10c、图 10d), 后者二阶段 Hf 模式年龄与白沙河群和苦海群年龄吻合(He et al., 2016)。前者 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值变化范围小且以靠近原始地幔的锆石居多(图 10c、图 10d), 在 T- $\epsilon\text{Hf}(t)$ 图解(图 11a、图 11b)中均位于亏损地幔与球粒陨石间范围内, 指示物源以亏损地幔或新生地壳为主导, 同时混入少部分古老基底地壳物质。相对年轻的二阶段模式年龄(597~739 Ma)可能指示了东昆仑地区新元古代形成了新生玄武质下地壳(任军虎等, 2010)。在 Sr-Nd 同位素方面, LMR-9 的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值为 0.705 36~0.705 40(表 4), 接近幔源端元(0.702~0.706)而不同于壳源端元(0.719)(Faure, 1986), 指示受到地壳物质的污染较少, 源区应是以幔源为主的壳幔混合来源; $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值为 -0.05~0.20(均值为 0.16), 位于球粒陨石演化线附近, 可以排除单一壳源或单一幔源模式, 指示可能存在壳源与幔源相当程度的混合成因(图 11c、图 11d)。XW-12 的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值为 0.706 11~0.708 49, 可能受到了壳源物质污染; $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值为 -0.02~2.63, 主体位于球粒陨石演化线附近, 但靠近亏损地幔, 说明有幔源物质的贡献(图 11c、图 11d)。

4.3 构造背景

从寒武纪开始东昆仑造山带便进入了原特提斯洋闭合、洋壳俯冲的阶段。发现于可可沙地区的石英闪长岩(515.2±4.4 Ma), 被认为是最早的原特提斯洋俯冲侵入岩记录(张亚峰等, 2010); 香日德地区发现了年龄为(446.5±1.9)Ma 的俯冲弧环境有关的变质闪长岩(陈能松等, 2000)。进入中志留世俯冲转变为碰撞, 诺木洪地区变火山岩(401±6 Ma)和玄武岩(419±5 Ma)的研究认为洋壳俯冲至少持续到早泥盆世(朱云海等, 2005); 浪木日上游、温泉、夏日哈木等地区榴辉岩变质年龄数据的峰值(432 Ma)指示陆陆碰撞的构造背景(国显正等, 2018); 昆中高压变质带东西侧的榴辉岩、麻粒岩年龄指示碰撞从东部的中志留纪(432 Ma)持续到西部的早泥盆世(411 Ma)(Yu et al.,



WPG. 板内花岗岩; VAG. 火山弧花岗岩; Sys-COLG. 同碰撞花岗岩; post-COLG. 后碰撞花岗岩; ORG. 洋中脊斜长花岗岩

图 9 东昆仑东段花岗岩 Nb-Ta-Nd/Th 图解(a)(据 Barth et al., 2000)和构造环境图解(b)(据 Pearce, 1996)

Fig. 9 (a) Nb-Ta-Nd/Th diagram and (b) tectonic environment diagram of granites in the eastern section of East Kunlun

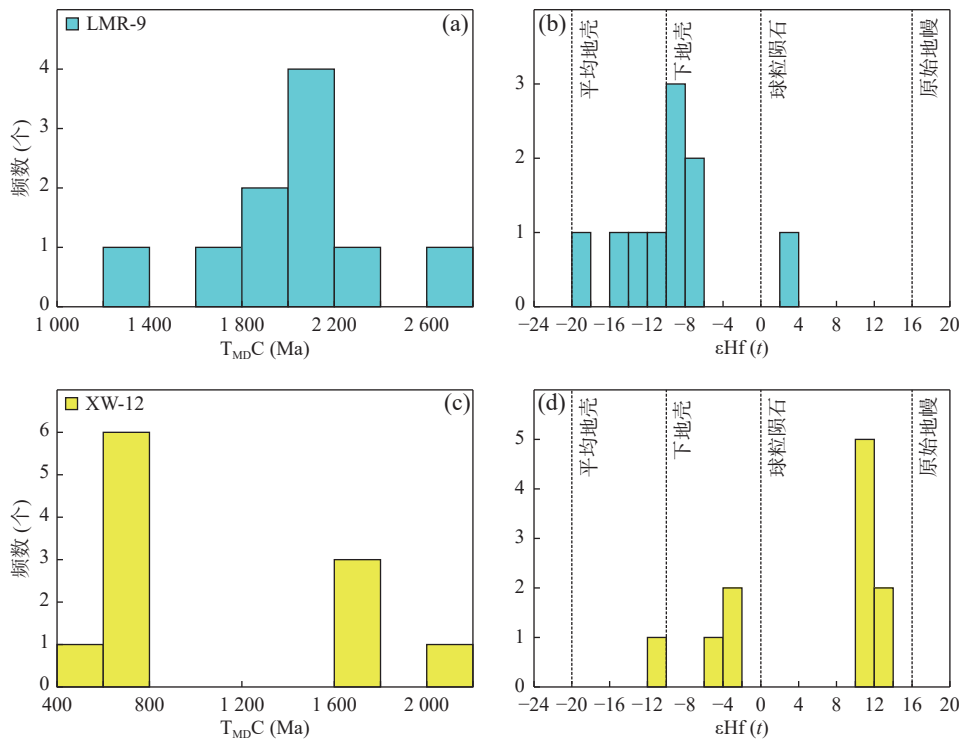


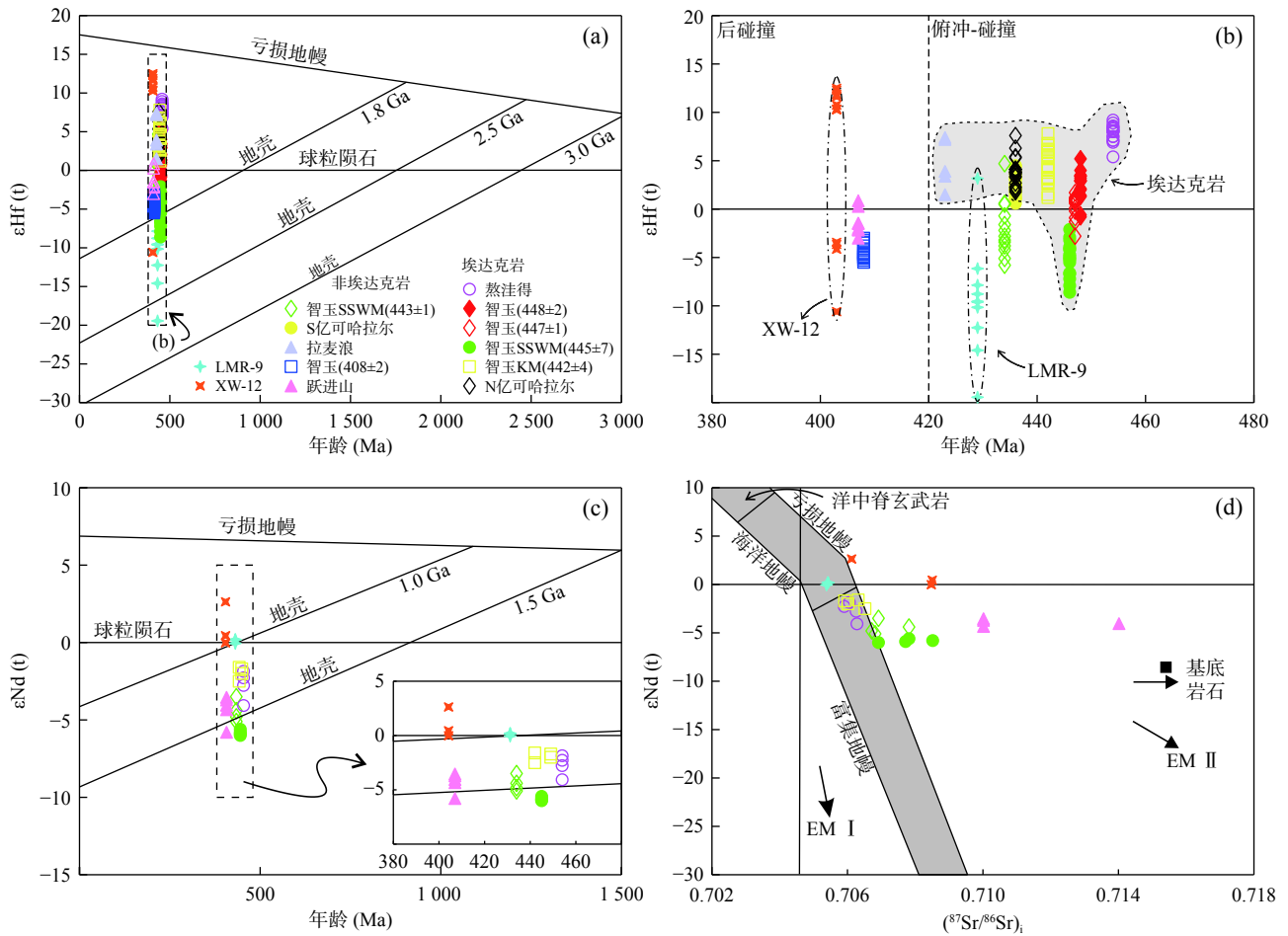
图 10 LMR-9 和 XW-12 锆石 T_{DM}^C (Ma) 和 $\epsilon Hf(t)$ 频数直方图(据吴福元等, 2007a)

Fig. 10 LMR-9 and XW-12 zircon T_{DM}^C (Ma) and $\epsilon Hf(t)$ frequency histograms

2020)。中—晚志留世东昆仑造山带中大量 A 型花岗岩指示经历后碰撞拉伸环境(王艺龙等, 2018; 刘彬等, 2013), 泥盆纪牦牛山组磨拉石建造的出现(400~423 Ma)指示了挤压到伸展的构造转变(陆露等, 2010); 五龙沟的 A 型长英质花岗岩(424.2±1.5~425.5±2.6 Ma)说明在东昆仑已经出现俯冲增生后的伸展环境(Xin et al., 2018)。

浪木日花岗岩形成年龄为(429.0±4)Ma, 处于俯冲—碰撞时期。在 Rb-Y+Nb 构造判别图解中, 投点位于 VAG(火山弧花岗岩)区域(图 9b), 反映浪木日花

岗岩的构造环境与板片俯冲有关, 佐证了东昆仑造山带在早—中志留世处于俯冲—碰撞阶段。LMR-9 的 Hf 同位素与 Sr-Nd 同位素的解耦指示其具有复杂的物源: 与同时期/更早时期的埃达克岩相比具有更亲和壳源的 $\epsilon Hf(t)$ 值(图 11b), Sr-Nd 同位素显示壳源物质污染较少(图 11d)。关于这一解耦现象, 可能是岩浆演化晚期水岩作用(Luais et al., 2009)所致, 或是岩浆通过次大陆岩石圈地幔上升过程中, 板块熔融形成的闪长岩熔体被富集的地幔源交代所致(Dong et al., 2018b), 也可能是特殊矿物的影响(Huang et al., 2017)。



熬洼得数据(据陈加杰等, 2016); 智玉数据(据 Zhou et al., 2016); 亿可拉哈尔数据(据 Li et al., 2015); 智玉 Kumo 和智玉 Sangsangwama 数据(据 Dong et al., 2018a), 拉浪麦数据(据 Norbu et al., 2021); 跃进山数据(据刘彬等, 2012)

图 11 浪木日、希望沟花岗岩锆石 Hf-Sr-Nd 同位素特征图(底图 d 据 Zhang et al., 2021)

Fig. 11 Zircon Hf-Sr-Nd isotopic characteristics of the Langmuri and Xiwanggou granites

样品 LMR-9 镜下特征缺少蚀变现象可以排除水岩作用的因素; 岩石源区如果存在石榴子石等高压矿物残留, 则会导致岩浆具有埃达克质特征, 同时强烈富集重稀土的石榴子石会导致放射性 ^{176}Hf 的富集, 使平衡出熔岩浆的 Nd-Hf 数据点位于陆地线之下(Huang et al., 2017; 陈加杰等, 2022), 这与样品 LMR-9 具有的埃达克质特征及特殊的 Hf 同位素值恰好相符。因此, 源区存在特殊矿物可能是导致 Nd-Hf 同位素解耦及特殊 $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 的主要原因。综上所述, 认为其可能受到多源区的影响所致, 俯冲大洋板片熔融形成的埃达克质岩浆与古老壳源物质和下地壳发生混合, 同时有特殊高压矿物(如石榴子石)的参与。Hf 二阶段模式年龄与基底岩石的吻合可以指示基底壳源物质, 同时岩石具有较年轻的年龄($429 \pm 4 \text{ Ma}$)形成于俯冲后期, 说明软流圈地幔可能经过了长时间的熔融-分异形成了铁镁质下地壳。

近些年, 研究表明以高 Sr 含量($>300 \times 10^{-6} \sim 2000 \times 10^{-6}$), 低 Y、Yb 含量($\text{Yb} \leq 1.8 \times 10^{-6}$, $\text{Y} \leq 18 \times 10^{-6}$)为显著特征的埃达克岩具有多种成因模型(许继峰等, 2014; 陈加杰等, 2016)。例如, ①年轻俯冲洋壳部分熔融(Molnar et al., 1995; 张泽明等, 2020)。②加厚下地壳部分熔融(Hou et al., 2004; Wang et al., 2005)。③拆沉下地壳部分熔融(Xu et al., 2002; 王强等, 2004)。④俯冲板片脱水诱发地幔楔熔融(Tatsumi et al., 2003)。其中, 加厚下地壳部分熔融形成的岩浆具有高 SiO_2 , 低 MgO 并常见继承锆石与下地壳包体, 然而样品 LMR-9 内未见下地壳包体并缺乏继承锆石, 同时 $\varepsilon\text{Nd}(t)$ 明显不同于基底岩石(图 11d), 故其不属于此成因模式。拆沉下地壳熔融形成的岩浆因上升过程中与地幔橄榄岩发生反应而使相容元素(Cr、Ni)和 MgO 含量明显升高, 而样品 LMR-9 中 Ni($3.58 \times 10^{-6} \sim 5.51 \times 10^{-6}$)、MgO($0.85 \times 10^{-6} \sim 0.89 \times 10^{-6}$)含量偏低, 且

Sr-Nd 同位素的解耦无法明确佐证其源区主体为古老地壳,可见样品 LMR-9 的成因与拆沉下地壳熔融模型不一致;地幔楔熔融形成的熔体具有高 Mg、低 Si、低 Al 的特征及较低的 $\epsilon\text{Nd}(t)$,同时俯冲环境下流体的加入会导致熔体中 Ba/Th 值较高(Elburg et al., 2002),而样品 LMR-9 的地球化学特征与其明显不同,因此也排除此成因模型。结合样品 LMR-9 的地球化学特征及同位素特征来看,高 SiO_2 、 AlO_2 、CaO 含量及壳幔混合的源区特征,反映其可能形成于年轻大洋板片俯冲导致的部分熔融,同时 Sd-Nd 同位素解耦又使得其与同一时期的其他埃达克岩存在些许不同。

哈日扎花岗岩形成年龄为 $(412.2 \pm 3.3)\text{Ma}$ (HRZ-1)和 $(416.6 \pm 2.5)\text{Ma}$ (HRZ-3),均处于后碰撞伸展阶段。在 Rb-Y+Nb 构造判别图解中,投点均位于 post-COLG(后碰撞花岗岩)区域(图 9b),在 Y-Nb-Ce 图解中投点集中于 A2 区域(图 8b),反映其形成于碰撞后或岩浆作用结束阶段,佐证了东昆仑造山带在晚志留世处于碰撞后伸展阶段。晚志留世—早泥盆世时期,随着昆南洋(原特提斯洋分支)的闭合和碰撞后伸展,大量镁铁质岩浆沿着区内断裂上升至浅部地壳,不仅为东昆仑夏日哈木等大型—超大型铜镍硫化物矿床的形成提供了物源(王涛等, 2016),还为地壳物质的部分熔融提供了热源。随着后碰撞的进行,下地壳物质受幔源物质上侵带来的热发生部分熔融,形成大量的中酸性岩浆;同时有少量地幔熔融物质上涌与壳源岩浆发生混染,形成文中的哈日扎 A2 型花岗岩。

希望沟花岗岩形成年龄为 $(403.6 \pm 3.1)\text{Ma}$,同样处于后碰撞伸展阶段。在 Rb-Y+Nb 构造判别图解中投点均位于 post-COLG(后碰撞花岗岩)区域(图 9b),反映希望沟花岗岩与碰撞后伸展环境有关,这与晚志留世—早泥盆世东昆仑普遍处于后碰撞拉伸阶段的认知并不冲突。在后碰撞阶段,在有外部热源供给的情况下,I 型花岗岩也可以产出,这种热源可能是玄武岩底垫作用或者软流圈直接上涌提供的(Roberts et al., 1993; Thompson et al., 1999),这时期产出的 I 型花岗岩有一定的俯冲弧的特征,在这种认知背景下,样品 XW-12 中 I 型花岗岩的出现可以得到合理的解释。因其具有幔源主导的壳幔混合来源,笔者认为其可能经历了后碰撞伸展时期软流圈直接上涌,同时提供热与幔源物质,使新生玄武质下地壳熔融并混合的形成过程。

4.4 造山带热俯冲

Martin(1999)指出,老的($>20\text{ Ma}$)、冷的俯冲板

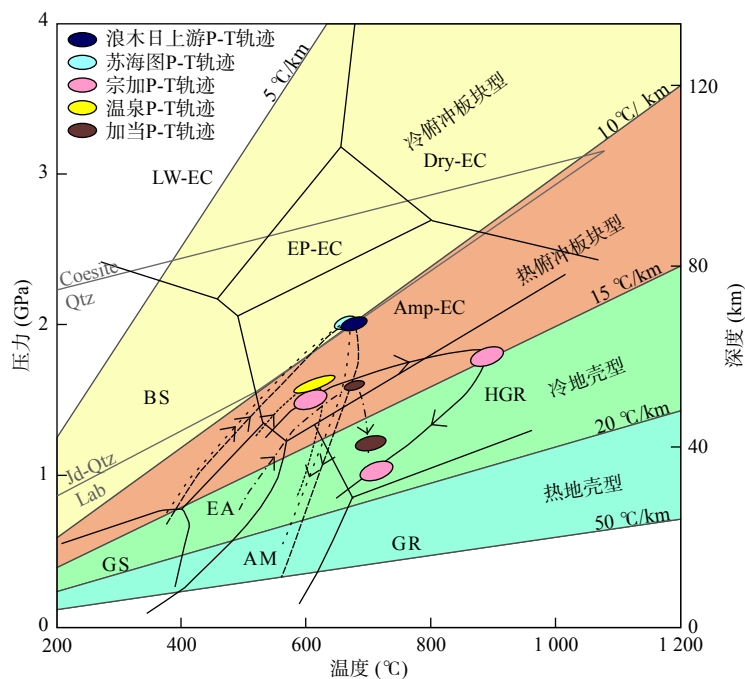
片在其达到湿基性岩固相线之前发生脱水,导致俯冲到弧下时难以熔融;但当年轻的($<20\text{ Ma}$)、热的洋壳发生俯冲时,在发生脱水前就可达到湿基性岩固相线,从而在弧下发生部分熔融(Martin, 1999)。埃达克岩的形成通常需要角闪石作为反应物和石榴石作为稳定的残余相(Drummond et al., 1996)。因此,在 P-T 图中埃达克形成区域位于以 wet basalt、garnet-in 线和 hornblende-out 线为边界的区域,高 Sr/Y 和 La/Yb 值成为埃达克质岩浆岩的典型判别特征。在俯冲环境下,通常只有年轻的且热的洋壳板块俯冲至中等深度发生熔融,并且与地幔间相互作用,才能达到产生埃达克岩的温压条件(高温高压),如在智利南部扩张洋脊发生俯冲形成埃达克质熔岩(McCrory et al., 2009)。同时,“年轻的、热的大洋板片发生俯冲”这一前提且必需的条件,也约束了热俯冲环境通常出现在洋脊产生的新生洋壳俯冲或是洋脊俯冲 2 种机制中。

东昆仑东段在早古生代发生了年轻的、热的板片俯冲作用有多方面的证据。近年研究表明,埃达克岩根据成因模式不同可分为 O 型(Martin et al., 1999)与 C 型(Gao et al., 2005),而东昆仑造山带在寒武纪—志留纪期间处于洋壳俯冲阶段(Li et al., 2018),在造山带东段发育有广泛的早古生代(晚奥陶世—中志留世)O 型埃达克质岩浆,并且大多发育于昆南地体内,昆北地体内较少,包括沟里地区熬洼得花岗闪长岩(陈加杰等, 2016)、智玉地区的二长花岗岩和花岗闪长岩(Zhou et al., 2016)、智玉以南 Kumo 地区花岗闪长岩, Sangsangwama 地区的闪长岩与二长花岗岩(Dong et al., 2018a)以及拉浪麦英云闪长岩(Norbu et al., 2021),都具有高 Sr、低 Y、高 Sr/Y 和 $(\text{La/Yb})_N$ 值,这可能与东昆仑东段热俯冲结构有关,从而导致俯冲板片在浅部发生脱水熔融形成埃达克质岩浆。在热环境方面,国显正等(2017)整理了浪木日上游、苏海图、宗加、温泉和加当的榴辉岩数据,发现其温压条件一致($T \geq 575\text{ }^\circ\text{C}$, $P = 1.2 \sim 2.0\text{ GPa}$),东昆仑东段内的宗加、加当、温泉的变质峰值位于“热俯冲板块”区域(张泽明等, 2021),峰值和退变质作用都在 $13\text{ }^\circ\text{C/km}$ 和 $20\text{ }^\circ\text{C/km}$ 的地热梯度之间(图 12),明显高于现代俯冲带中平均海洋地壳的冷地热梯度($\leq 8\text{ }^\circ\text{C/km}$)(Peacock et al., 1999),说明东昆仑东段在早古生代处于高地温梯度的热环境。

针对东昆仑造山带东段是否存在热俯冲的讨论,学者们不禁思考处于同一构造演化域的东昆仑造山

带西段是否也具有相同的热俯冲作用, 是什么因素导致东昆仑造山带在原特提斯演化阶段出现热俯冲过程? 事实上不难发现, 以东昆仑五龙沟-昆仑河地区为界, 东昆仑造山带西端俯冲构架与东段存在显著差异。①东昆仑造山带东西两端埃达克岩发育存在明显差异, 表现在东部发育较多, 西部发育较少(图 8c)。②东昆仑西端夏日哈木-苏海图榴辉岩峰值变质条件为 $T \approx 660 \sim 700^{\circ}\text{C}$, $P \approx 2 \text{ GPa}$ (祁生胜等, 2014), 对应于约 10°C/km 的低地温梯度和“冷俯冲板块”区(图 12), 与东段热环境不同。③东昆仑西段在昆北地体有大量泥盆世花岗岩发育($\sim 400 \text{ Ma}$), 可能与冷俯冲板块在深部发生脱水作用释放流体有关, 而东部昆北地体内缺乏此时期花岗岩, 指示热俯冲板块在浅部已发生熔融。这样同一时期俯冲板块却在东西部存在差异的现象, 似乎用洋脊形成的新生洋壳俯冲模型无法解释。同时, 结合造山带岩浆产出情况来看, 东昆仑造山带东部在昆南地体内广泛发育早古生代埃达克岩, 中部缺少弧岩浆但发育有早古生代无水碱性 A 型花岗岩(Wang et al., 2012), 造山带西部内在靠近中部的五龙沟-昆仑河地区发育有少量同时期埃达克

岩(王秉璋等, 2023), 再往西则缺乏埃达克岩报道, 这一岩浆岩分布格局恰好可以用洋脊俯冲(ridge subduction)进行解释。当扩张的洋中脊发生俯冲时, 大洋板块在洋脊与俯冲带的结合点处发生分离形成板片窗, 俯冲板片之下的软流圈地幔通过板片窗直接接触上覆板块形成高热流区域, 同时洋中脊两侧板片停止发育并各自进行独立的俯冲活动。俯冲板片的不同部位发生不同的熔融或变质作用, 近板片窗区域的俯冲洋壳因转换断层形成的羽状边缘受热面积增大, 更易发生热侵蚀而熔融形成埃达克岩; 远板片窗的岩石则发生高温高压变质作用形成榴辉岩(Breitsprecher et al., 2003; Thorkelson et al., 2005; Windley et al., 2018)。据此模型认为, 在原特提斯时期, 昆南洋内可能发育有一倾斜的洋脊, 在向北俯冲的过程中洋脊两侧板块分离, 形成了埃达克弧-A 型花岗岩-埃达克弧的岩浆岩格局和“西冷东热”的俯冲差异(图 13)。东昆仑东部因低角度俯冲使俯冲板片羽状边缘在浅部熔融形成埃达克质岩浆而大范围侵入于昆南地体, 样品 LMR-9 也是俯冲板片羽状边缘熔融的结果; 东昆仑西部则可能因相对较大角度的俯冲使得仅在靠近板片窗区



GS. 绿片岩相; EA. 绿帘角闪岩相; BS. 蓝片岩相; AM. 角闪岩相; GR. 麻粒岩相; HGR. 高压麻粒岩相; Amp-EC. 角闪榴辉岩相; EP-EC. 绿帘石榴辉岩相; LW-EC. 硬柱石榴辉岩相; Dry-EC. 干榴辉岩相; Coesite. 柯石英; Qtz. 石英; Jd. 硬玉; Lab. 钠长石

图 12 俯冲带变质环境及榴辉岩 P-T 轨迹(据国显正等, 2017; 张泽明等, 2021 修改)

Fig. 12 Metamorphic environment and P-T path of eclogite in subduction zone

域有埃达克质岩浆侵入(王秉璋等, 2023), 大部分板片进入深俯冲发生熔融而在昆北地体内形成岩浆弧,

中断东西两段岛弧的早古生代 A 型岩浆岩则是板片窗的证据(Wang et al., 2012)(图 13)。

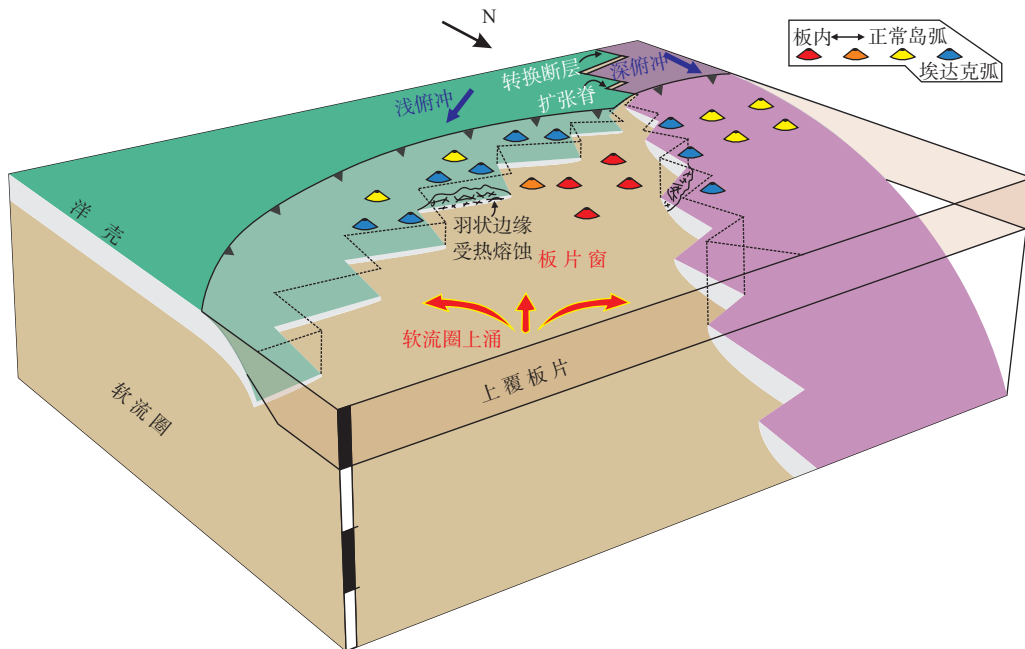


图 13 东昆仑造山带原特提斯洋脊俯冲模型图(据 Windley et al., 2018 修改)

Fig. 13 Subduction model of the Proto-Tethys mid-ocean ridge in the East Kunlun orogenic belt

5 结论

(1)浪木日花岗岩形成于(429.0±4.0)Ma, 为 I 型埃达克质花岗岩; 哈日扎花岗岩形成于(415±3)~(416±2)Ma, 为 A2 型花岗岩; 希望沟花岗岩形成于(403.1±1.6)Ma, 属于正常 I 型花岗岩。

(2)浪木日花岗岩 Sr-Nd 和锆石 Hf 同位素特征显示其形成于俯冲洋壳熔融形成的埃达克质岩浆与古老壳源物质和地下壳的混合, 同时有特殊矿物的参与; 哈日扎花岗岩以地壳物质来源为主, 兼有幔源物质贡献; 希望沟花岗岩则显示幔源物质主导的壳幔混合来源, 源区为新生玄武质下地壳。

(3)浪木日花岗岩指示东昆仑造山带在早-中志留世处于俯冲碰撞阶段; 哈日扎及希望沟花岗岩指示东昆仑造山带东段在早泥盆世处于后碰撞拉伸背景下。

(4)东昆仑东段早古生代的俯冲弧岩浆岩(埃达克岩), 变质岩(麻粒岩和榴辉岩)以及昆南地体与昆北地体内早泥盆世花岗岩的分布差异, 指示东昆仑造山带东段在原特提斯时期具有不同于西段的热俯冲机制。同时结合造山带东西两段俯冲(埃达克质)弧

被早古生代 A 型花岗岩截断这一岩浆岩格架, 认为可能存在板片窗及板片窗附近的俯冲板片羽状边缘熔融作用, 是洋脊俯冲的结果。

参考文献(References):

- 陈加杰, 付乐兵, 魏俊浩, 等. 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[J]. 地球科学, 2016, 41(11): 1863-1882.
- CHEN Jiajie, FU Lebing, WEI Junhao, et al. Geochemical characteristics of late ordovician granodiorite in Gouli Area, eastern Kunlun orogenic belt, Qinghai Province: Implications on the evolution of Proto-Tethys ocean[J]. Earth Science, 2016, 41(11): 1863-1882.
- 陈加杰, 冷成彪, 付乐兵, 等. 东昆仑德龙花岗岩成因及对古特提斯洋演化的制约[J/OL]. 地球科学, 2022: 1-17.
- CHEN Jiajie, LENG Chengbiao, FU Lebing, et al. Genesis of Delong Granite in East Kunlun Orogen and Its Implication on the Evolution of Paleo-Tethys Ocean[J/OL]. Earth Science, 2022: 1-17.
- 陈能松, 孙敏, 张克信, 等. 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[J]. 科学通报, 2000, 45(21): 2337-2342.
- CHEN Nengsong, SUN Min, ZHANG Kexin, et al. ⁴⁰Ar-³⁹Ar and U-

- Pb ages of metadiorite from the East Kunlun Orogenic Belt: Evidence for Early-Paleozoic magmatic zone and excess argon in amphibole minerals[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(21): 2337–2342.
- 陈能松, 李晓彦, 张克信, 等. 东昆仑山香日德南部白沙河岩组的岩石组合特征和形成年代的锆石 Pb-Pb 定年启示[J]. *地质科技情报*, 2006, 25(6): 1–7.
- CHEN Nengsong, LI Xiaoyan, ZHANG Kexin, et al. Lithological characteristics of the Baishahe Formation to the south of Xiangride town, eastern Kunlun Mountains and its age constrained from zircon Pb-Pb dating[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2006, 25(6): 1–7.
- 陈有旸, 裴先治, 李瑞保, 等. 东昆仑东段纳赤台岩群变火山岩锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其构造意义[J]. *地学前缘*, 2013, 20(6): 240–254.
- CHEN Youxin, PEI Xianzhi, LI Ruibao, et al. Zircon U-Pb age, geochemical characteristics and tectonic significance of metavolcanic rocks from Naij Tal Group, east section of East Kunlun[J]. *Earth Science Frontiers*, 2013, 20(6): 240–254.
- 崔圆圆, 赵志丹, 蒋婷, 等. 赣南早古生代晚期花岗岩类年代学、地球化学及岩石成因[J]. *岩石学报*, 2013, 29(11): 4011–4024.
- CUI Yuanyuan, ZHAO Zhidan, JIANG Ting, et al. Geochronology, geochemistry and petrogenesis of the Early Paleozoic granitoids in southern Jiangxi Province, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29(11): 4011–4024.
- 邓晋福, 刘翠, 冯艳芳, 等. 关于火成岩常用图解的正确使用: 讨论与建议[J]. *地质论评*, 2015, 61(4): 717–734.
- DENG Jinfu, LIU Cui, FENG Yanfang, et al. On the correct application in the common igneous petrological diagrams: discussion and suggestion[J]. *Geological Review*, 2015, 61(4): 717–734.
- 丰成友, 王松, 李国臣, 等. 青海祁漫塔格中晚三叠世花岗岩: 年代学、地球化学及成矿意义[J]. *岩石学报*, 2012, 28(2): 665–678.
- FENG Chengyou, WANG Song, LI Guocheng, et al. Middle to Late Triassic granitoids in the Qimantage area, Qinghai Province, China: Chronology, geochemistry and metallogenic significances[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(2): 665–678.
- 冯建赟, 裴先治, 于书伦, 等. 东昆仑都兰可可沙地区镁铁-超镁铁质杂岩的发现及其 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄[J]. *中国地质*, 2010, 37(1): 28–38.
- FENG Jianbin, PEI Xianzhi, YU Shulun, et al. The discovery of the mafic-ultramafic melange in Kekesha area of Dulan County, East Kunlun region, and its LA-ICP-MS zircon U-Pb age[J]. *Geology in China*, 2010, 37(1): 28–38.
- 国显正, 贾群子, 钱兵, 等. 东昆仑高压变质带榴辉岩和榴闪岩地球化学特征及形成动力学背景[J]. *地球科学与环境学报*, 2017, 39(6): 735–750.
- GUO Xianzheng, JIA Qunzi, QIAN Bing, et al. Geochemical characteristics of eclogites and garnet-amphibolites in East Kunlun high pressure metamorphic belt and their geodynamic setting[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2017, 39(6): 735–750.
- 国显正, 贾群子, 李金超, 等. 东昆仑高压变质带榴辉岩年代学、地球化学及其地质意义[J]. *地球科学*, 2018, 43(12): 4300–4318.
- GUO Xianzheng, JIA Qunzi, LI Jinchao, et al. Zircon U-Pb geochronology and geochemistry and their geological significances of eclogites from east Kunlun high-pressure metamorphic belt[J]. *Earth Science*, 2018, 43(12): 4300–4318.
- 孔会磊, 栗亚芝, 李金超, 等. 东昆仑希望沟橄辉岩的岩石成因: 地球化学、锆石 U-Pb 年龄与 Hf 同位素制约[J]. *中国地质*, 2021, 48(1): 173–188.
- KONG Huilei, LI Yazhi, LI Jinchao, et al. Petrogenesis of Xi-wanggou olivine gabbro in East Kunlun Mountains: Constraints from geochemistry, zircon U – Pb dating and Hf isotopes[J]. *Geology in China*, 2021, 48(1): 173–188.
- 寇林林, 张森, 钟康惠, 等. 东昆仑五龙沟金矿集区韧性剪切带构造变形特点研究[J]. *中国地质*, 2015, 42(2): 495–503.
- KOU Linlin, ZHANG Sen, ZHONG Kanghui, et al. A study of the deformation characteristics of the ductile shear zone in the Wulonggou gold ore concentration area, East Kunlun, Qinghai[J]. *Geology in China*, 2015, 42(2): 495–503.
- 李怀坤, 陆松年, 相振群, 等. 东昆仑中部缝合带清水泉麻粒岩锆石 SHRIMP U-Pb 年代学研究[J]. *地学前缘*, 2006, 13(6): 311–321.
- LI Huaikun, LU Songnian, XIANG Zhenqun, et al. SHRIMP U-Pb zircon age of the granulite from the Qingshuiquan area, Central Eastern Kunlun Suture Zone[J]. *Earth Science Frontiers*, 2006, 13(6): 311–321.
- 李文渊. 古亚洲洋与古特提斯洋关系初探[J]. *岩石学报*, 2018, 34(8): 2201–2210.
- LI Wenyuan. The primary discussion on the relationship between Paleo-Asian Ocean and Paleo-Tethys Ocean[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2018, 34(8): 2201–2210.
- 刘彬, 马昌前, 张金阳, 等. 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[J]. *岩石学报*, 2012, 28(6): 1785–1807.
- LIU Bin, MA Changqian, ZHANG Jinyang, et al. Petrogenesis of Early Devonian intrusive rocks in the east part of Eastern Kunlun Orogen and implication for Early Palaeozoic orogenic processes[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(6): 1785–1807.
- 刘彬, 马昌前, 郭盼, 等. 东昆仑中泥盆世 A 型花岗岩的确定及其构造意义[J]. *地球科学(中国地质大学学报)*, 2013, 38(5): 947–962.
- LIU Bin, MA Changqian, GUO Pan, et al. Discovery of the Middle

- Devonian A-type granite from the Eastern Kunlun Orogen and its tectonic implications[J]. *Earth Science*, 2013, 38(5): 947–962.
- 刘成东, 莫宣学, 罗照华, 等. 东昆仑造山带花岗岩类 Pb-Sr-Nd-O 同位素特征[J]. *地球学报*, 2003, 24(6): 584–588.
- LIU Chengdong, MO Xuanxue, LUO Zhaohua, et al. Pb-Sr-Nd-O isotope characteristics of granitoids in East Kunlun orogenic belt[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2003, 24(6): 584–588.
- 陆露, 吴珍汉, 胡道功, 等. 东昆仑牦牛山组流纹岩锆石 U-Pb 年龄及构造意义[J]. *岩石学报*, 2010, 26(4): 1150–1158.
- LU Lu, WU Zhenhan, HU Daogong, et al. Zircon U-Pb age for rhyolite of the Maoniushan Formation and its tectonic significance in the East Kunlun Mountains[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(4): 1150–1158.
- 陆露, 张延林, 吴珍汉, 等. 东昆仑早古生代花岗岩锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. *地球学报*, 2013, 34(4): 447–454.
- LU Lu, ZHANG Yanlin, WU Zhenhan, et al. Zircon U-Pb dating of Early Paleozoic granites from the East Kunlun Mountains and its geological significance[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2013, 34(4): 447–454.
- 罗明非. 东昆仑东段早古生代—早中生代花岗岩类时空格架及构造意义[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2015.
- LUO Mingfei. Spatial-temporal pattern and geological implications of Early Paleozoic-Early Mesozoic granitoids in the East Kunlun Orogenic Belt (eastern segment)[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2015.
- 孟庆鹏. 青海东昆仑浪木日铜镍矿床地质特征及成因探讨[D]. 长春: 吉林大学, 2019.
- MENG Qingpeng. Study on geological characteristics and genesis of Langmuri copper-nickel deposit in Eastern Kunlun, Qinghai [D]. Changchun: Jilin University, 2019.
- 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(3): 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(3): 403–414.
- 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.
- 任军虎, 柳益群, 周鼎武, 等. 东昆仑小庙基性岩脉地球化学及 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2010, 40(4): 859–868.
- REN Junhu, LIU Yiqun, ZHOU Dingwu, et al. Geochemical Characteristics and LA-ICP-MS Zircon U-Pb Dating of Basic Dykes in the Xiaomiao Area, Eastern Kunlun[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2010, 40(4): 859–868.
- 田龙, 康磊, 刘良, 等. 东昆仑巴什尔希晚奥陶世二长花岗岩成因及其地质意义[J]. *西北地质*, 2023, 56(2): 28–45.
- TIAN Long, KANG Lei, LIU Liang, et al. Petrogenesis and Geological Implications of Bashenerxi Monzogranite from East Kunlun Orogen Belt[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(2): 28–45.
- 王秉璋, 张金明, 李五福, 等. 昆仑河早古生代两期埃达克质侵入岩的发现及其对东昆仑碰撞造山过程的启示[J]. *岩石学报*, 2023, 39(3): 763–784.
- WANG Bingzhang, ZHANG Jinming, LI Wufu, et al. Discovery of two stages of the Early Paleozoic adakitic intrusive rocks in the Kunlun River area, East Kunlun: Implications for collisional orogenic processes[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2023, 39(3): 763–784.
- 王强, 赵振华, 简平, 等. 德兴花岗闪长斑岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学和 Nd-Sr 同位素地球化学[J]. *岩石学报*, 2004, 20(2): 315–324.
- WANG Qiang, ZHAO Zhenhua, JIAN Ping, et al. SHRIMP zircon geochronology and Nd-Sr isotopic geochemistry of the Dexing granodiorite porphyries[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2004, 20(2): 315–324.
- 王德滋, 刘昌实, 沈渭洲, 等. 桐庐 I 型和相山 S 型两类碎斑岩对比[J]. *岩石学报*, 1993, 9(1): 44–54.
- WANG Dezi, LIU Changshi, SHEN Weizhou, et al. The contrast between Tonglu I-type and Xiangshan S-type clastoporphyrityc lava[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1993, 9(1): 44–54.
- 王涛, 李彬, 陈静, 等. 东昆仑五龙沟地区早志留世花岗岩锆石年代学、地球化学特征及其地质意义[J]. *矿物岩石*, 2016, 36(2): 62–70.
- WANG Tao, LI Bin, CHEN Jing, et al. Characteristics of chronology and geochemistry of the early Silurian monzogranite in the Wulonggou area, East Kunlun and its geological significance[J]. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, 2016, 36(2): 62–70.
- 王艺龙, 李艳军, 魏俊浩, 等. 东昆仑五龙沟地区晚志留世 A 型花岗岩成因: U-Pb 年代学、地球化学、Nd 及 Hf 同位素制约[J]. *地球科学*, 2018, 43(4): 1219–1236.
- WANG Yilong, LI Yanjun, WEI Junhao, et al. Origin of Late Silurian A-type granite in Wulonggou area, East Kunlun orogen: Zircon U-Pb age, geochemistry, Nd and Hf isotopic compositions[J]. *Earth Science*, 2018, 43(4): 1219–1236.
- 魏小林, 张得鑫, 甘承萍, 等. 卡而却卡地区新元古代变质侵入岩体的发现及其地质意义[J]. *地质找矿论丛*, 2016, 31(2): 236–244.
- WEI Xiaolin, ZHANG Dexin, GAN Chengping, et al. Discovery and body in the geological significance of Neoproterozoic intrusive

- Kaerqueka area of the East Kunlun Mountain[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2016, 31(2): 236–244.
- 吴福元, 李献华, 杨进辉, 等. 花岗岩成因研究的若干问题[J]. 岩石学报, 2007b, 23(6): 1217–1238.
- WU Fuyuan, LI Xianhua, YANG Jinhui, et al. Discussions on the petrogenesis of granites[J]. Acta Petrologica Sinica, 2007b, 23(6): 1217–1238.
- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 等. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用[J]. 岩石学报, 2007a, 23(2): 185–220.
- WU Fuyuan, LI Xianhua, ZHEN Yongfei, et al. Lu-Hf isotopic systematics and their applications in petrology[J]. Acta Petrologica Sinica, 2007a, 23(2): 185–220.
- 吴福元, 万博, 赵亮, 等. 特提斯地球动力学[J]. 岩石学报, 2020, 36(06): 1627–1674.
- WU Fuyuan, WAN Bo, ZHAO Liang, et al. Tethyan geodynamics[J]. Acta Petrologica Sinica, 2020, 36(6): 1627–1674.
- 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. Zircon genetic mineralogy and its constraints on U-Pb age interpretation[J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49(16): 1589–1604.
- 徐恒, 豆松, 李晓峰, 等. 云南凤庆邦漂地区花岗伟晶岩地球化学及其成因[J]. 矿物岩石, 2022, 42(1): 42–53.
- XU Heng, DOU Feng, LI Xiaofeng, et al. Geochemistry and genesis of granitic pegmatite in Bangpiao area, Fengqing county, Yunnan province[J]. Mineralogy and Petrology, 2022, 42(1): 42–53.
- 许继峰, 邬建斌, 王强, 等. 埃达克岩与埃达克质岩在中国的研究进展[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2014, 33(1): 6–13.
- XU Jifeng, WU Jianbin, WANG Qiang, et al. Research advances of adakites and adakitic rocks in China[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2014, 33(1): 6–13.
- 许志琴, 杨经绥, 李海兵, 等. 青藏高原与大陆动力学——地体拼合、碰撞造山及高原隆升的深部驱动力[J]. 中国地质, 2006, 33(2): 221–238.
- XU Zhiqin, YANG Jingsui, LI Haibin, et al. Qinghai-Tibet Plateau and continental dynamics: Deep driving forces of terrane consolidation collisional orogenesis and plateau uplift[J]. Geology of China, 2006, 33(2): 221–238.
- 尹福光, 罗亮, 任飞. 再造西南“三江”造山带洋陆转换过程中的构造与古地理[J]. 地质通报, 2022, 41(11): 1899–1914.
- YIN Fuguang, LUO Liang, REN Fei. Reconstructing the tectonics and paleogeography during the ocean-land transition of the “Sanjiang” orogenic belt in southwest China[J]. Geological Bulletin of China, 2022, 41(11): 1899–1914.
- 张斌, 孔会磊, 李智明, 等. 东昆仑哈日扎铅锌多金属矿区英云闪长岩锆石 U-Pb 定年、地球化学及其地质意义[J]. 地质科技情报, 2016, 35(5): 9–17.
- ZHANG Bin, KONG Huilei, LI Zhiming, et al. Zircon U-Pb dating, geochemical and geological significance of the tonalites from the Harizha lead-zinc polymetallic mine in east Kunlun mountains[J]. Geological Science and Technology Information, 2016, 35(5): 9–17.
- 张亮, 李碧乐, 刘磊, 等. 东昆仑五龙沟地区早泥盆世双峰式侵入岩年代学、地球化学及其地质意义[J]. 岩石学报, 2021, 37(7): 2007–2028.
- ZHANG Liang, LI Bile, LIU Lei, et al. Geochronology, geochemistry and geological significance of the Early Devonian bimodal intrusive rocks in Wulonggou area, East Kunlun Orogen[J]. Acta Petrologica Sinica, 2021, 37(7): 2007–2028.
- 张亚峰, 裴先治, 丁仁平, 等. 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[J]. 地质通报, 2010, 29(1): 79–85.
- ZHANG Yafeng, PEI Xianzhi, DING Sanping, et al. 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[J]. Geological Bulletin of China, 2010, 29(1): 79–85.
- 张耀玲, 胡道功, 石玉若, 等. 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[J]. 地质通报, 2010, 29(11): 1614–1618.
- ZHANG Yaolin, HU Daogong, SHI Yuruo, et al. SHRIMP zircon U-Pb ages and tectonic significance of Maoniushan Formation volcanic rocks in East Kunlun orogenic belt, China[J]. Geological Bulletin of China, 2010, 29(11): 1614–1618.
- 张泽明, 丁慧霞, 董昕, 等. 俯冲带部分熔融[J]. 岩石学报, 2020, 36(9): 2589–2615.
- ZHANG Zeming, DING Huixia, DONG Xin, et al. Partial melting of subduction zones[J]. Acta Petrologica Sinica, 2020, 36(9): 2589–2615.
- 张泽明, 丁慧霞, 董昕, 等. 俯冲带变质作用与构造机制[J]. 岩石学报, 2021, 37(11): 3377–3398.
- ZHANG Zeming, DING Huixia, DONG Xin, et al. Metamorphism and tectonic mechanisms of subduction zones[J]. Acta Petrologica Sinica, 2021, 37(11): 3377–3398.
- 朱云海, 林启祥, 贾春兴, 等. 东昆仑造山带早古生代火山岩锆石 SHRIMP 年龄及其地质意义[J]. 中国科学(D辑:地球科学), 2005, 35(12): 1112–1119.
- ZHU Yunhai, LIN Qixiang, JIA Chunxing, et al. SHRIMP zircon

- ages of the Early Paleozoic volcanic rocks in the East Kunlun Orogen and their geological significance[J]. *Science in China: SerD*, 2005, 35(12): 1112–1119.
- Barth M G, McDonough W F, Rudnick Roberta L. Tracking the budget of Nb and Ta in the continental crust[J]. *Chemical Geology*, 2000, 165: 197–213.
- Bonin B. A-type granites and related rocks: evolution of a concept, problems and prospects[J]. *Lithos*, 2007, 97(1): 1–29.
- Breitsprecher K, Thorkelson D J, Groome W G, et al. Geochemical confirmation of the Kula-Farallon slab window beneath the Pacific Northwest in Eocene time[J]. *Geol*, 2003, 31: 351.
- Chen J J, Fu L B, Selby D, et al. Multiple episodes of gold mineralization in the East Kunlun Orogen, western Central Orogenic Belt, China: Constraints from Re-Os sulfide geochronology[J]. *Ore Geology Reviews*, 2020a, 123: 103587.
- Chen J J, Fu L B, Wei J H, et al. Proto-Tethys magmatic evolution along northern Gondwana: Insights from Late Silurian–Middle Devonian A-type magmatism, East Kunlun Orogen, Northern Tibetan Plateau, China[J]. *Lithos*, 2020b, 356–357(3): 105304.
- Defant M J, Drummond M S. Derivation of some modern arc magmas by of young subducted lithosphere[J]. *Nature*, 1990, 347: 662–665.
- Dong G C, Luo M F, Mo X X, et al. Petrogenesis and tectonic implications of early Paleozoic granitoids in East Kunlun belt: Evidences from geochronology, geochemistry and isotopes[J]. *Geoscience Frontiers*, 2018a, 9(5): 1383–1397.
- Dong J L, Song S G, Su L, et al. Early Devonian mafic igneous rocks in the East Kunlun Orogen, NW China: Implications for the transition from the Proto- to Paleo-Tethys oceans[J]. *Lithos*, 2020, 376–377(11): 105771.
- Dong Y P, He D F, Sun S S, et al. Subduction and accretionary tectonics of the East Kunlun orogen, western segment of the Central China Orogenic System[J]. *Earth-Science Reviews*, 2018b, 186(11): 231–261.
- Drummond M S, Defant M J, Kepezhinskis P K. Petrogenesis of slab-derived trondhjemite-tonalite-dacite/adakite magmas[J]. *Earth and Environmental Science Transactions of The Royal Society of Edinburgh*, 1996, 87(1–2): 205–215.
- Eby G N. Chemical subdivision of the A-type granitoids: Petrogenetic and tectonic implications[J]. *Geology*, 1992, 20(7): 641–644.
- Elburg M A, Van Bergen M, Hoogewerff J, et al. Geochemical trends across an arc-continent collision zone: magma sources and slab-wedge transfer processes below the Pantar Strait volcanoes, Indonesia[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2002, 66(15): 2771–2789.
- Faure G. Principles of Isotope Geology[M]. 2nd ed. New York: John Wiley and Sons, 1986: 567.
- Frost B R, Barnes C G, Collins W J, et al. A Geochemical Classification for Granitic Rocks[J]. *Journal of Petrology*, 2001, 42(11): 2033–2048.
- Gao S, Rudnick R L, Yuan H L, et al. Recycling lower continental crust in the North China craton[J]. *Nature*, 2005, 432(7019): 892–897.
- Griffin W L, Pearson N J, Belousova E, et al. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000, 64(1): 133–147.
- He D F, Dong Y P, Liu X M, et al. Tectonothermal events in East Kunlun, Northern Tibetan Plateau: evidence from zircon U-Pb geochronology[J]. *Gondwana Res*, 2016, 30: 179–190.
- Hou Z Q, Gao Y F, Qu X M, et al. Origin of adakitic intrusives generated during mid-Miocene east–west extension in southern Tibet[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 220(1–2): 139–155.
- Huang H, Niu Y L, Mo X X. Garnet effect on Nd-Hf isotope decoupling: evidence from the Jinfoli batholith, Northern Tibetan Plateau[J]. *Lithos*, 2017, 274: 31–38.
- Kong X C, Li S Z, Suo Y H, et al. Hot and cold subduction systems in the Western Pacific Ocean: insights from heat flows: Heat flows in the Western Pacific Ocean[J]. *Geol. J*, 2016, 51: 593–608.
- Li R B, Pei X Z, Li Z C, et al. Geochemistry and zircon U–Pb geochronology of granitic rocks in the Buqingshan tectonic mélange belt, northern Tibet Plateau, China and its implications for Prototethyan evolution[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 105: 374–389.
- Li S Z, Zhao S J, Liu X, et al. Closure of the Proto-Tethys Ocean and Early Paleozoic amalgamation of microcontinental blocks in East Asia[J]. *Earth Sci. Rev*, 2018, 186: 37–75.
- Luais B, de Veslud C L C, Géraud Y, et al. Comparative behavior of Sr, Nd and Hf isotopic systems during fluid-related deformation at middle crust levels[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2009, 73(10): 2961–2977.
- Maniar P D, Piccoli P M. Tectonic discrimination of granitoids[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1989, 101(5): 635–643.
- Martin H. Adakitic magmas: Modern analogues of Archaean granitoids[J]. *Lithos*, 1999, 46(3): 411–429.
- McCrory P A, Willson D S, Stanley R G. Continuing evolution of the Pacific-Juan de Fuca-North America slab window system—A Trench-ridge-transform example from the Pacific rim[J]. *Tectonophysics*, 2009, 464(1–4): 30–42.
- Mckenzie D P. Some remarks on the movement of small melt fractions in the mantle[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1989, 95: 53–72.

- 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 Reviews*, 1994, 37(3-4): 215–224.
- Molnar P, England P. Temperatures in zones of steady-state underthrusting of young oceanic lithosphere. *Earth and Planetary Science Letters* [J], 1995, 131(1-2): 57-70.
- Norbu N, Liu Y G, Li J C, et al. The Silurian-Devonian granitoids in the East Kunlun orogenic belt, northern Qinghai-Tibetan plateau, China: origin and tectonic implications[J]. *Geosci J*, 2021, 25: 763–786.
- Pearce J A. Sources and settings of granitic rocks[J]. *Episodes* 19, 1996, 120–125.
- Peacock S M, Wang K. Seismic consequences of warm versus cool subduction metamorphism: Examples from southwest and northeast Japan[J]. *Science*, 1999, 286(5441): 937–939.
- Peccerillo A, Taylor S R. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1976, 58: 63–81.
- Roberts M P, Clemens J D. Origin of high-potassium, talc-alkaline, I-type granitoids[J]. *Geology*, 1993, 21(9): 825–828.
- Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[J]. *Geological Society, London, Special Publication*, 1989, 42: 313–345.
- Tatsumi Y, Hanyu T. Geochemical modeling of dehydration and partial melting of subducting lithosphere: Toward a comprehensive understanding of high - Mg andesite formation in the Setouchi volcanic belt, SW Japan[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2003, 4(9).
- Thompson A B. Some time-space relationships for crustal melting and granitic intrusion at various depths[J]. *Geological Society*, 1999, 168(1): 7–5.
- Thorkelson D J, Breitsprecher K. Partial melting of slab window margins: genesis of adakitic and non-adakitic magmas[J]. *Lithos*, 2005, 79: 25–41.
- Wang Q, McDermott F, Xu J F, et al. Cenozoic K-rich adakitic volcanic rocks in the Hohxil area, northern Tibet: lower-crustal melting in an intracontinental setting[J]. *Geology*, 2005, 33(6): 465–468.
- Wang X X, Hu N G, Wang T, et al. Late Ordovician Wanbaogou granitoid pluton from the southern margin of the Qaidam basin: Zircon SHRIMP U-Pb age, Hf isotope and geochemistry[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(9): 2950–2962.
- Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. A-Type Granites: Geochemical Characteristics, Discrimination and Petrogenesis[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1987, 95(4): 407–419.
- Wilson M. *Igneous Petrogenesis: A Global Tectonic Approach*[M]. Chapman and Hall, London, 1989.
- Windley B F, Xiao W J. Ridge subduction and slab windows in the Central Asian Orogenic Belt: Tectonic implications for the evolution of an accretionary orogen[J]. *Gondwana Research*, 2018, 61: 73–87.
- Xia R, Wang C, Qing M, et al. Molybdenite Re-Os, zircon U-Pb dating and Hf isotopic analysis of the Shuangqing Fe-Pb-Zn-Cu skarn deposit, East Kunlun Mountains, Qinghai Province, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2015, 66: 114–131.
- Xin W, Sun F Y, Li L, et al. The Wulonggou metaluminous A2-type granites in the Eastern Kunlun Orogenic Belt, NW China: Rejuvenation of subduction-related felsic crust and implications for post-collision extension[J]. *Lithos*, 2018, 312–313, 108–127.
- Xu J F, Shinjo R, Defant M J, et al. Origin of Mesozoic adakitic intrusive rocks in the Ningzhen area of east China: partial melting of delaminated lower continental crust?[J]. *Geology*, 2002, 30(12): 1111–1114.
- Yang H, Zhang H F, Xiao W J, et al. Multiple Early Paleozoic granitoids from the southeastern Qilian orogen, NW China: Magma responses to slab roll-back and break-off[J]. *Lithos*, 2021, 380–381: 105910.
- Yang J H, Wu F Y, Wilde S A, et al. Tracing magma mixing in granite genesis: In situ U-Pb dating and Hf-isotope analysis of zircons[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2007, 153(2): 177–190.
- Yang J S, Robinson P T, Jiang C F, et al. Ophiolites of the Kunlun Mountains, China and their tectonic implications[J]. *Tectonophysics*, 1996, 258(1-4): 215–231.
- Yu M, Dick J M, Feng C Y, et al. The tectonic evolution of the East Kunlun Orogen, northern Tibetan Plateau: A critical review with an integrated geodynamic model[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2020, 191(4): 104168.
- Zhang J, Yu M, Wang H, et al. Geodynamic Setting and Cu-Ni Potential of Late Permian Xiwanggou Mafic-Ultramafic Rocks, East Kunlun Orogenic Belt, NW China[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2021, 9: 666967.
- Zhang J W, Liang X, Wang F Y, et al. CorelKit: An Extensible CorelDraw VBA Program for Geoscience Drawing[J]. *Journal of Earth Science*, 2022, 1-23.
- Zhou B, Dong Y, Zhang F, et al. Geochemistry and zircon U-Pb geochronology of granitoids in the East Kunlun Orogenic Belt, northern Tibetan Plateau: origin and tectonic implications[J]. *Journal of Asian Earth Sciences, Special Issue on Crustal evolution in Asia: Correlations and connections*, 2016, 130: 265–281.