

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2020.270>



东昆仑造山带索拉沟地区三叠纪赞岐质闪长岩的成因机制及其对古特提斯造山作用的启示

王巍¹, 熊富浩^{1,2*}, 马昌前³, 陈越¹, 黄虎²

1. 成都理工大学地球科学学院, 四川成都 610059

2. 成都理工大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川成都 610059

3. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

摘要: 具有特殊成因机制的赞岐岩是探究深部岩浆动力学过程与区域构造演化的重要岩石探针之一。以东昆仑索拉沟地区赞岐质闪长岩为研究对象, 开展系统的岩石学、年代学、元素地球化学和 Lu-Hf 同位素分析, 厘定其岩石成因, 揭示其对古特提斯造山作用的启示。锆石 U-Pb 年代学分析表明, 索拉沟闪长岩形成于中三叠世 (~243 Ma)。岩石具有较低含量的 SiO₂ (50.26%~57.40%), 较高的全碱成分 (Na₂O+K₂O=3.5%~6.3%)、MgO (6.0%~7.1%) 和 Mg# 值 (50.1~60.9), 属于高镁钙碱性准铝质岩石。索拉沟闪长岩具有较高的 Sr ($622 \times 10^{-6} \sim 1041 \times 10^{-6}$)、Cr ($30 \times 10^{-6} \sim 161 \times 10^{-6}$) 和 Ni ($19 \times 10^{-6} \sim 79 \times 10^{-6}$) 以及中等的 Y ($7.6 \times 10^{-6} \sim 24.3 \times 10^{-6}$) 和 Yb (0.62~1.87) 含量, 与典型的高镁安山质赞岐岩成分类似。岩石富集轻稀土和大离子亲石元素 (如 Rb、K 和 Pb), 亏损高场强元素 (如 Ta、Nb 和 Zr), 具有弧岩浆岩的化学属性。Lu-Hf 同位素研究揭示, 索拉沟闪长岩起源于富集岩石圈地幔 ($\epsilon_{\text{Hf}}(t) = -2.4 \sim -0.4$, $T_{\text{DM}} = 0.89 \sim 0.99$ Ga)。岩石成因分析表明, 东昆仑索拉沟中三叠世赞岐质高镁闪长岩形成于陆缘弧背景, 岩浆起源于富集岩石圈地幔, 且岩浆经历了以角闪石和黑云母为主的分离结晶作用。中三叠世是东昆仑造山带古特提斯洋壳俯冲和地体碰撞的构造转换阶段, 索拉沟赞岐质高镁闪长岩可能是俯冲作用结束时板片断离的岩浆响应。

关键词: 东昆仑; 三叠纪; 高镁闪长岩; 赞岐岩; 古特提斯; 地球化学; 地质年代学。

中图分类号: P581

文章编号: 1000-2383(2021)08-2887-16

收稿日期: 2020-08-16

Petrogenesis of Triassic Suolagou Sanukitoid-like Diorite in East Kunlun Orogen and Its Implications for Paleo-Tethyan Orogeny

Wang Wei¹, Xiong Fuhao^{1,2*}, Ma Changqian³, Chen Yue¹, Huang Hu²

1. College of Earth Science, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

2. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

3. School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: Sanukitoid with special genetic mechanism is one important petrological probe to study the magma dynamic processes and associated tectonic process. In this study, it presents petrology, geochronology, elemental geochemistry and Lu-Hf isotopic data on the Suolagou sanukitoid-like diorite in East Kunlun, aiming to characterize its petrogenesis and to reveal its implications on

基金项目: 国家自然科学基金项目 (Nos. 41602049, 41972066)。

作者简介: 王巍 (1996—), 男, 硕士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业。ORCID: 0000-0003-2023-9812。E-mail: 923003880@qq.com

*** 通讯作者:** 熊富浩, ORCID: 0000-0003-1121-3370。E-mail: xiongfuhao2014@cdut.edu.cn

引用格式: 王巍, 熊富浩, 马昌前, 等, 2021. 东昆仑造山带索拉沟地区三叠纪赞岐质闪长岩的成因机制及其对古特提斯造山作用的启示. 地球科学, 46(8):2887-2902.

the Paleo-Tethyan orogeny. Zircon U-Pb dating shows that the Suolagou diorite was formed in the Middle Triassic (~ 243 Ma). Geochemically, they have low contents of SiO_2 ($50.26\% - 57.40\%$), but high contents of total alkaline ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 3.5\% - 6.3\%$), MgO ($6.0\% - 7.1\%$) and high $\text{Mg}^\#$ ($50.1 - 60.9$), belonging to high magnesium, calc-alkaline and metaluminous series. The Suolagou diorites show geochemical similarities to high $\text{Mg}^\#$ andesitic sanukitoids with high contents of Sr ($622 \times 10^{-6} - 1\,041 \times 10^{-6}$), Cr ($30 \times 10^{-6} - 161 \times 10^{-6}$) and Ni ($19 \times 10^{-6} - 79 \times 10^{-6}$), and moderate contents of Y ($7.6 \times 10^{-6} - 24.3 \times 10^{-6}$) and Yb ($0.62 \times 10^{-6} - 1.87 \times 10^{-6}$). These rocks display remarkable enrichment in light rare earth elements and large-ion lithophile elements (such as Cs, Rb, K and Pb) but depletion in high-field strength elements (such as Ta, Nb and Zr), resembling the arc-related magmatic rocks above subduction zone. Lu-Hf isotopes show that the Suolagou diorites were derived from partial melting of enriched lithospheric mantle ($\epsilon_{\text{Hf}}(t) = -2.4$ to -0.4 , $T_{\text{DM}} = 0.89 - 0.99$ Ga). The ~ 243 Ma sanukitoid-like diorite in East Kunlun were formed in a continental arc setting, i.e., the parent magma derived from partial melting of enriched lithospheric mantle, subsequently followed by fractional crystallization of amphibole and biotite. This study suggests that the transition from Paleo-Tethyan oceanic slab subduction to terranes collision in East Kunlun occurred at Middle Triassic, and the Suolagou sanukitoid-like high-Mg diorites could be the magmatic response to the slab break-off at the end of subduction.

Key words: East Kunlun; Triassic; high-Mg diorite; sanukitoid; Paleo-Tethyan; geochemistry; geochronology.

0 引言

特提斯造山作用控制着青藏高原显生宙以来的岩石圈演化和成岩成矿作用,其动力学过程是认识青藏高原地壳生长机制与区域构造演化的关键. 青藏高原北部的东昆仑造山带是典型的复合型增生造山带,记录了原特提斯和古特提斯造山作用过程. 伴随着晚古生代—早中生代古特提斯造山作用,东昆仑地区发育二叠纪—三叠纪长英质岩浆活动和矽卡岩/斑岩型多金属矿床,形成了规模宏大的古特提斯域构造—岩浆—成矿带(莫宣学等, 2007; 詹发余等, 2007; Xiong *et al.*, 2014; 袁万明等, 2017; Dong *et al.*, 2018). 前人对东昆仑晚古生代—早中生代长英质岩浆岩开展了大量的岩石学、年代学和地球化学研究,在岩石成因机制、动力学过程和成矿背景等方面取得了丰硕成果(Xiong *et al.*, 2014; Dong *et al.*, 2018; 张航等, 2018). 然而,有关东昆仑古特提斯造山带的构造演化过程仍存在较大争议,主要观点包括:(1)东昆仑阿尼玛卿古特提斯洋于晚二叠世开始向北俯冲,洋盆于中三叠世闭合(莫宣学等, 2007; Xiong *et al.*, 2014; Li *et al.*, 2018; 赵旭等, 2018; 国显正等, 2019);(2)古特提斯洋于晚二叠世闭合,东昆仑于三叠纪时期处于碰撞造山阶段(王国灿等, 2007; 陈守建等, 2010; Huang *et al.*, 2014; Shao *et al.*, 2017);(3)东昆仑古特提斯洋俯冲作用持续至晚三叠世,洋盆于晚三叠世—早侏罗世闭合(Yuan *et al.*, 2009; Dong *et al.*, 2018). 显然,厘定具有特殊成因机制和构造指示意义的岩浆岩是探讨和解决上述争议的

关键,也是准确刻画古特提斯造山作用过程和深入认识东昆仑三叠纪成岩成矿机制的重要基础.

赞岐岩是一类具有特征地球化学组成和特定成岩动力学背景的岩浆岩,是揭示洋壳俯冲阶段岩浆作用机制和造山带构造演化过程的重要探针之一(Tatsumi, 2001; 张旗等, 2005; Heilimo *et al.*, 2010; Chiaradia *et al.*, 2014). 该类岩石最早发现于日本 Setouchi 地区中新世岩浆岩带,岩石以闪长岩和安山岩为主,具有富 MgO ($>5\%$) 和 Cr ($>100 \times 10^{-6}$) 以及高 Ba、Sr ($(\text{Ba} + \text{Sr}) > 1\,000 \times 10^{-6} \sim 1\,400 \times 10^{-6}$)、 $\text{Mg}^\#$ ($45 \sim 65$) 的特征(Tatsumi, 2001, 2006; Martin *et al.*, 2010). 具有上述地球化学特征的岩石被称为赞岐岩或赞岐质岩石系列,成分上包括赞岐质闪长岩类($\text{SiO}_2 = 50\% \sim 62\%$, $\text{MgO} > 6\%$)和赞岐质花岗岩类($\text{SiO}_2 = 62\% \sim 70\%$, $\text{MgO} > 1\%$)(Heilimo *et al.*, 2010; Martin *et al.*, 2010). 尽管赞岐岩的起源机制包括弧下富集岩石圈地幔的部分熔融或板片熔体与上覆地幔楔的混合等多种成因模式,但大量研究均揭示其成因机制与洋壳的俯冲作用密切相关(Stern *et al.*, 1989; 张旗等, 2005; Tatsumi, 2006; Heilimo *et al.*, 2010; Chiaradia *et al.*, 2014). 因此,具有特定构造指示意义的赞岐岩是探讨和揭示古洋壳俯冲作用过程与区域构造演化的重要窗口. 本文以新近厘定的东昆仑索拉沟地区三叠纪赞岐质闪长岩为研究对象,开展系统的野外地质学、岩石学、年代学和地球化学研究,探讨其岩浆源区和岩浆演化过程. 在此基础上,综合对比东昆仑三叠纪特殊类型岩浆岩的成因机制,刻画东昆仑三叠纪岩浆动力学背景

的演变过程,能为深入认识东昆仑古特提斯洋壳俯冲和地体碰撞的时限提供岩石学约束.

1 区域地质背景

东昆仑造山带是青藏高原的重要组成部分,位于青藏高原北部,北邻柴达木盆地,南接巴颜喀拉地体,向东可与西秦岭造山带衔接,向西则以阿尔金断裂为界与西昆仑相隔(图 1a).分隔东昆仑造山带与巴颜喀拉地体的布青山—阿尼玛卿缝合带代表了消亡的特提斯古洋盆,而东昆仑造山带广泛发育的显生宙岩浆岩则记录了原特提斯和古特提斯造山旋回的板块汇聚历史和碰撞造山过程(殷鸿福和张克信, 1997; 莫宣学等, 2007).

以昆中断裂带为界,可将东昆仑造山带划分为东昆北地体和东昆南地体(图 1b).昆北地体北邻柴达木盆地,以发育寒武纪—泥盆纪和三叠纪长英质岩浆岩为主要特征.昆北地体的基底以古元古代白沙河岩群和中元古代小庙岩群为主,下部多为高角闪岩相—低麻粒岩相变质岩系,上部不整合覆盖浅变质的震旦纪—奥陶纪滨浅海碎屑岩和碳酸盐岩建造、中三叠统洪水川组 and 晚三叠世鄂拉山组火山岩(王国灿等, 2004; 莫宣学等, 2007; 陈有炘等, 2014).晚古生代时期,昆北地体相对稳定,缺少同期岩浆岩记录(莫宣学等, 2007; Xiong *et al.*, 2014; Dong *et al.*, 2018).昆南地体发育早古生代和二叠纪—三叠纪花岗岩类,其基底岩石组合较为复杂,包括白沙河岩群、小庙岩群和苦海杂岩(张航等,

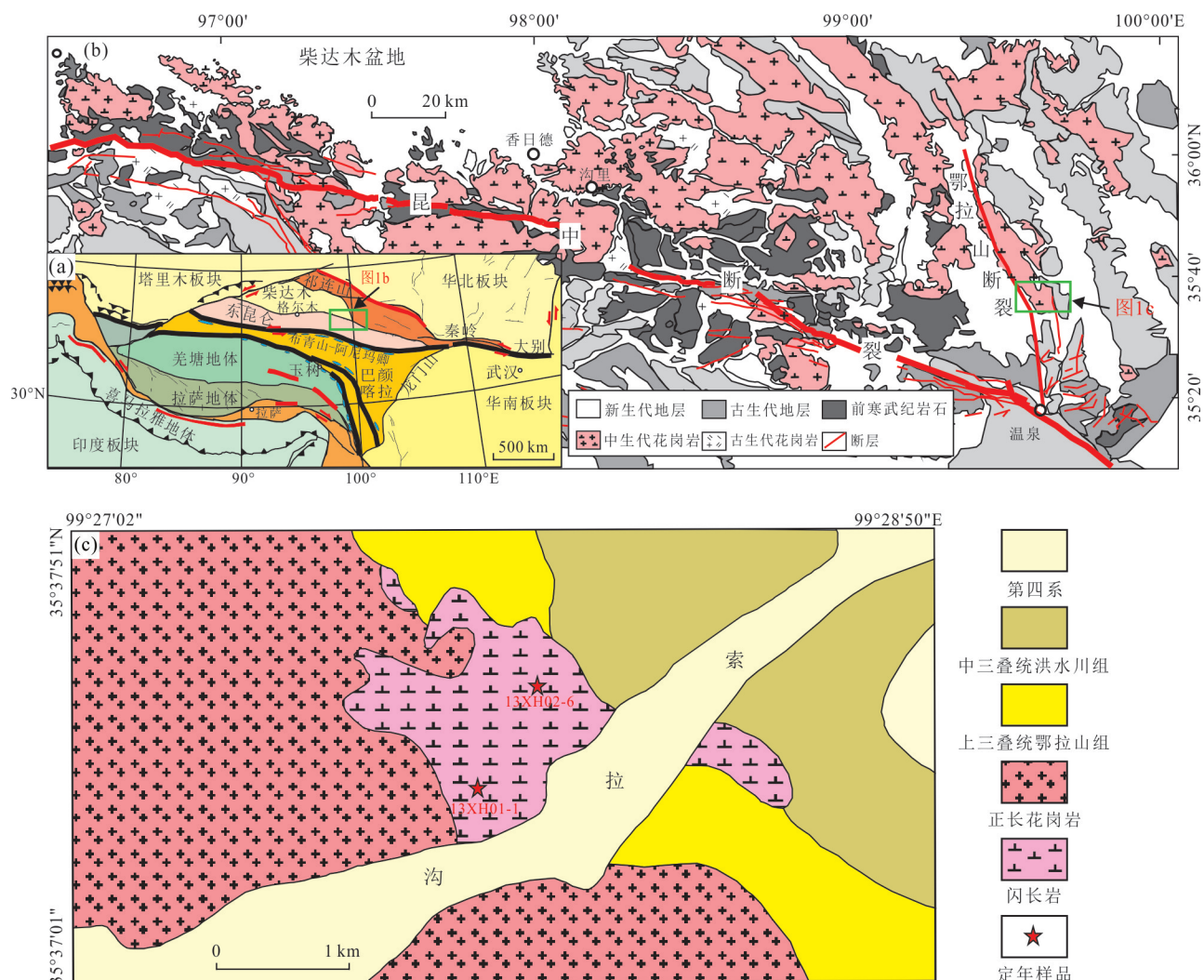


图 1 东昆仑及其邻区的构造单元划分简图(a)、东昆仑东段花岗岩基分布(b)和索拉沟岩体地质简图(c)
Fig.1 Tectonic outline of the East Kunlun Orogen and its adjacent area (a), the distribution of the granitic batholith in the eastern part of East Kunlun (b) and simplified geological map of the Suolagou pluton (c)

图 a 据 Roger *et al.*(2003); 图 b 据 Xiong *et al.*(2014)

2018). 昆南地体的显生宙盖层主要为下石炭统一—三叠统火山—沉积建造, 包括石炭系哈拉郭勒组、浩特洛洼组, 二叠系树维门科组、格曲组以及三叠系洪水川组、闹仓坚沟组、希里可特组等(陈守建等, 2010; 李瑞保等, 2012).

2 岩体地质与岩相学特征

索拉沟闪长岩位于昆北地体东段的鄂拉山地区, 距南面的温泉乡约 40 km, 岩体呈岩株状产出, 出露面积约 8 km²(图 1c). 岩体东部侵入中三叠统洪水川组, 西部则侵入正长花岗岩, 岩体局部被晚三叠世鄂拉山组英安质—流纹质火山熔岩覆盖, 且岩体内部发育多组节理构造(图 1c, 图 2a). 岩体以闪长岩为主, 局部可见石英闪长岩. 中粒灰黑色闪长岩的内部可见富斜长石的淡色闪长岩条带, 两者并无显著的冷凝边和烘烤边(图 2b).

主要单元闪长岩呈灰黑色, 中粒粒状结构, 块状构造, 由斜长石(55%~60%)、角闪石(20%~25%)、黑云母(10%~15%)和石英(1%~3%)组成(图 2c). 副矿物可见锆石、磷灰石和磁铁矿. 斜长石

多呈自形板状, 发育聚片双晶, 但罕见环带结构, 其成分为中长石或拉长石, 粒径为 2 mm×0.5 mm~4 mm×1 mm. 角闪石为自形一半自形柱状, 具有简单双晶, 粒径为 1 mm×0.5 mm~2 mm×1 mm. 黑云母为半自形片状, 粒径为 0.5 mm×0.5 mm~1 mm×0.5 mm. 石英闪长岩为中—细粒结构(图 2d), 块状构造, 主要矿物为斜长石(60%~65%)、角闪石(15%~20%)、黑云母(5%~10%)和石英(6%~8%), 含少量的锆石和磷灰石等副矿物. 索拉沟闪长岩和石英闪长岩的主要矿物均较为新鲜, 未见明显的蚀变特征.

本文共采集 10 件样品用于岩石地球化学研究, 并对样品 13XH01-1 (35° 37.1'N, 99° 28.5'E) 和 13XH02-6 (35° 37.3'N, 99° 28.7'E) 开展了锆石 U-Pb 和 Lu-Hf 同位素分析测试.

3 分析方法

3.1 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 定年与 Lu-Hf 同位素分析

用于锆石 U-Pb 年代学分析的样品均采自新鲜露头, 去除表面风化层, 经粗碎、淘洗、磁选等分离

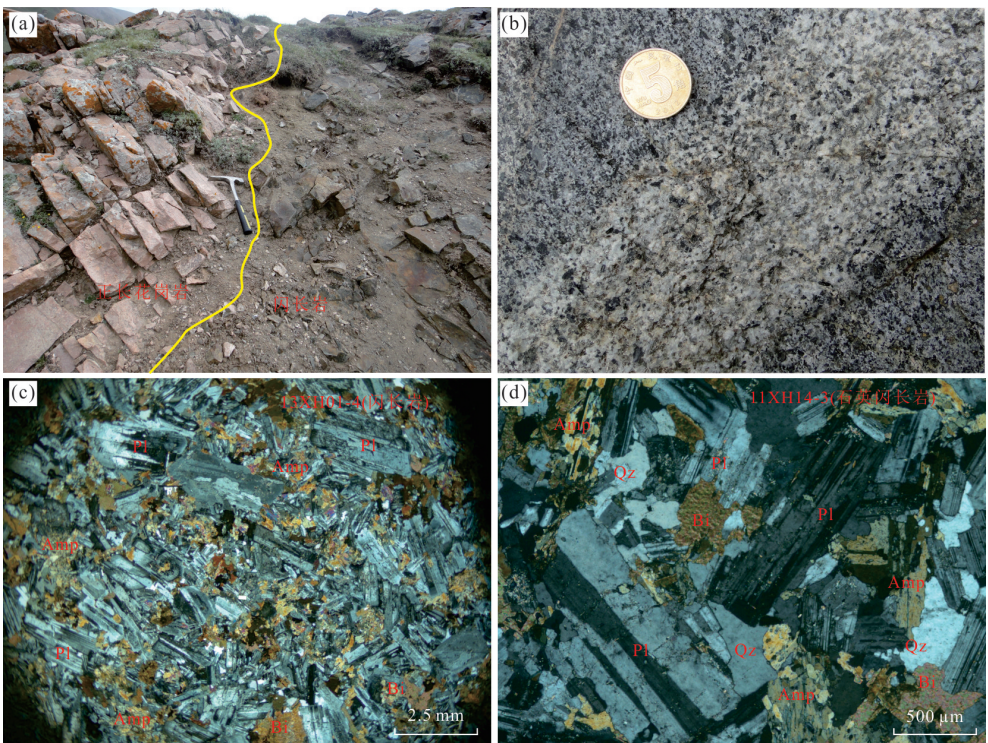


图 2 东昆仑索拉沟闪长岩体的野外地质和显微镜下特征
Fig.2 Field and microscope features of the Suolagou diorite pluton in the East Kunlun
Amp. 角闪岩; Pl. 斜长岩; Qz. 石英; Bi. 黑云母

方法分选锆石.在双目镜下仔细选择不同晶形、不同颜色的锆石颗粒,粘在双面胶上并用环氧树脂固定,待环氧树脂充分固化后将锆石靶表面抛光,然后进行锆石颗粒内部结构分析(反射光和透射光照相、阴极发光图像研究).在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室(GPMR)采用 Agilent 7500a 型号 ICP-MS 仪器开展锆石 U-Pb 同位素定年分析,分析的激光束斑和频率分别为 $32\text{ }\mu\text{m}$ 和 10 Hz . U-Pb 同位素定年和微量元素含量处理中采用锆石标准 91500 和玻璃标准物质 NIST610 作外标分别进行同位素和微量元素分馏校正.数据处理采用软件 ICPMSDataCal 完成,年龄计算和谐和图绘制则采用 Isoplot/Ex_ver3 完成,详细的实验分析流程见 Liu *et al.* (2010). 锆石 Lu-Hf 同位素是在 GPMR 实验室利用 Neptune Plus 型号 LA-MC-ICPMS 进行分析测试,所有分析的锆石均开展了 U-Pb 同位素年代学的测定.分析束斑为 $44\text{ }\mu\text{m}$. 为确保分析数据的可靠性,对 91500 和 GJ-1 两个国际锆石标准与实际样品同时分析.详细的 LA-MC-ICPMS 锆石 Lu-Hf 同位素分析方法见 Hu *et al.* (2012).

3.2 全岩地球化学分析

用于全岩地球化学分析的样品均为 200 目以下的新鲜粉末样.全岩主量元素的测试采用湖北地质

矿产开发局的 Regaku 3080E1 型光谱仪进行 XRF 分析,样品分析精度好于 5%.微量元素分析则在中国地质大学(武汉)GPMR 实验室使用 Agilent 7500a 型 ICP-MS 完成,元素含量由国际岩石标样 G-2、AGV-1 和国家岩石标样 GSR-3 等双变量拟合的工作曲线确定,稀土元素样品精度好于 5%,其他微量元素精度好于 5%~12%.详细的样品消解处理过程、分析精密度和准确度同 Liu *et al.* (2008).

4 分析结果

4.1 锆石 U-Pb 年代学

LA-ICPMS 锆石 U-Pb 年代学分析结果见附表 1. 锆石颗粒以无色或浅黄色为主,且均为自形一半自形晶体.样品 13XH01-1 的锆石颗粒晶形较好,多为长柱状,粒径长约 $100\sim 200\text{ }\mu\text{m}$,宽约 $30\sim 50\text{ }\mu\text{m}$,长宽比为 $2:1\sim 4:1$ (图 3a). 锆石多具有宽板状环带结构,内部环带较宽,成分较为均一,且不发育继承核(图 3a).所分析的 15 颗锆石均具有较高含量的 Th ($586\times 10^{-6}\sim 2\text{ }971\times 10^{-6}$) 和 U ($452\times 10^{-6}\sim 2\text{ }085\times 10^{-6}$) 以及较高的 Th/U 比值 ($1.24\sim 1.75$). 锆石阴极发光图像和微量元素特征均指示所分析的锆石为典型的岩浆锆石(图 3a,附表 1). 15 颗锆石分析点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄介于 $240\sim 248\text{ Ma}$,且样品的谐和度较好,其谐和年龄为

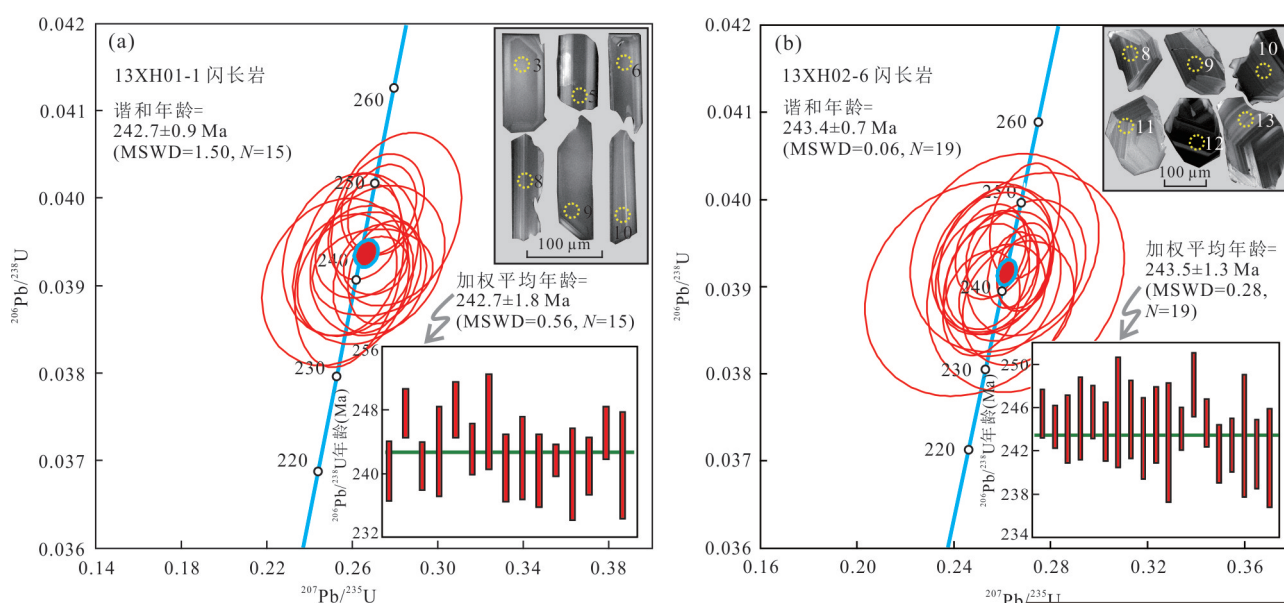


图3 东昆仑索拉沟闪长岩的代表性锆石阴极发光图像和 U-Pb 年龄谐和图

Fig.3 CL images of representative zircon grains and U-Pb concordia diagrams for zircons from the Suolagou diorite in the East Kunlun

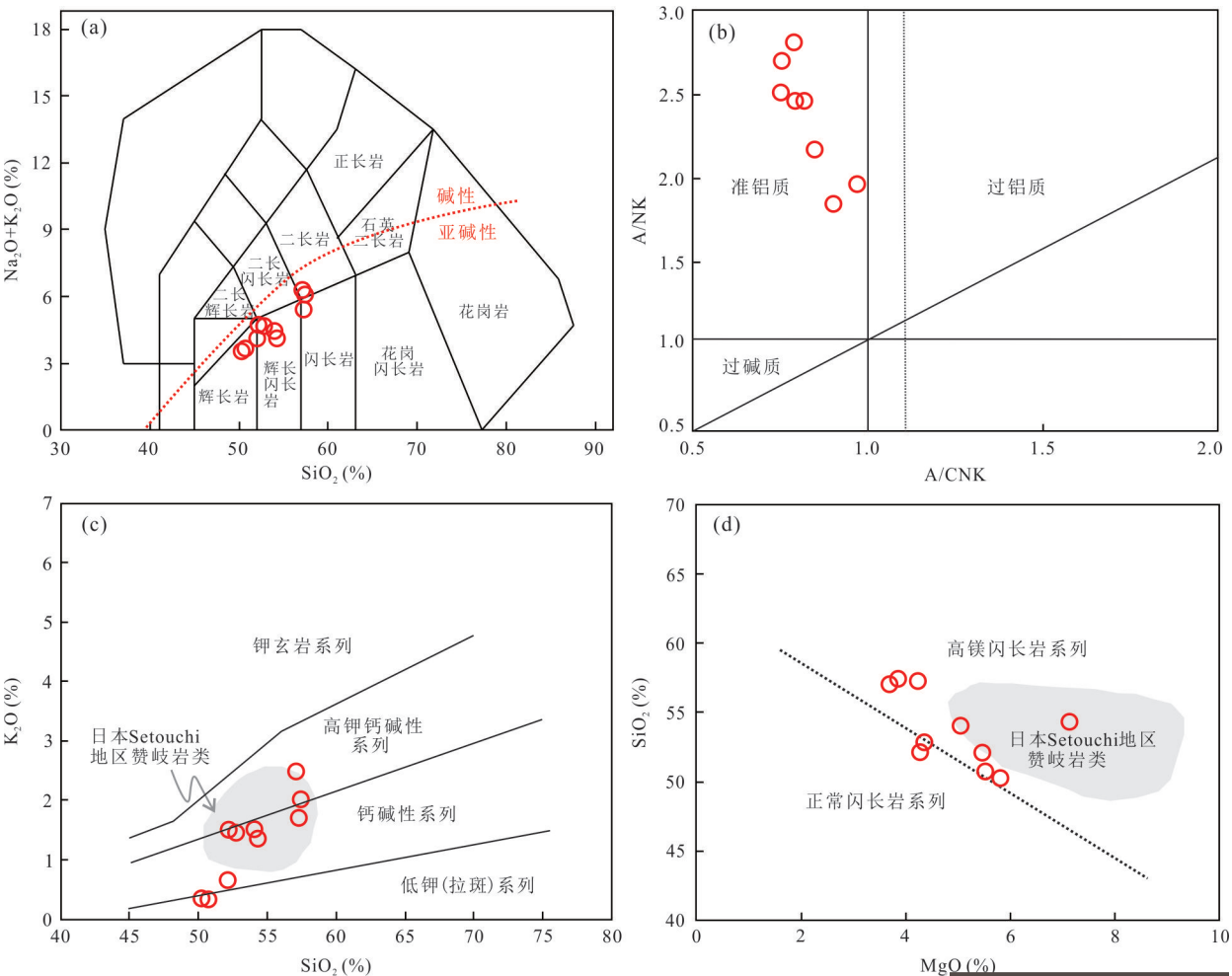


图4 索拉沟闪长岩的 TAS 分类命名图(a), A/NK—A/CNK 图(b), SiO₂—K₂O 判别图(c)和 SiO₂—MgO 成分关系图(d)
Fig.4 TAS classification and nomenclature diagram (a), A/NK vs. A/CNK diagram (b), SiO₂ vs. K₂O diagram (c) and SiO₂—MgO diagram (d) for the Suolagou diorite

a. 据 Middlemost(1994); b. 据 Chappell and White(1974); c. 据 Peccerillo and Taylor(1976); d. 日本 Setouchi 地区赞岐岩的成分资料据 Tatsumi *et al.* (2003) 和 Tatsumi (2006)

242.7±0.9 Ma(MSWD=1.50). 样品的加权平均年龄为 242.7±1.8 Ma(MSWD=0.56), 与其谐和年龄在误差范围内一致, 可代表其结晶年龄(图 3a).

样品 13XH02-6 的锆石颗粒大多为短柱状或粒状, 粒径长约 100~200 μm, 宽约 100~200 μm, 长宽比为 1:1~2:1. 锆石阴极发光图像显示, 样品 13XH02-6 的锆石多具有扇状环带或宽板状环带特征, 部分颗粒发育振荡环带(图 3b). 所分析的 19 颗锆石的 Th 含量为 321×10⁻⁶~4 384×10⁻⁶, U 含量为 320×10⁻⁶~2 023×10⁻⁶, Th/U 比值为 0.61~2.44, 符合岩浆锆石的成分和结构特征(附表 1). 19 个分析测试点均具有较好谐和度, 其 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 表面年龄介于 241~245 Ma, ²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄(243.5±1.3 Ma)与谐和年龄(243.4±0.7 Ma)在误

差范围内一致(图 3b). 两件样品的锆石年代学分析揭示, 索拉沟闪长岩的侵位结晶时代约为 243 Ma.

4.2 全岩元素地球化学

东昆仑索拉沟闪长岩的全岩地球化学分析结果见附表 2. 岩石的 SiO₂ 含量变化于 50.26%~57.40% 之间, 均值为 53.79%, 属中性岩浆岩(图 4a). 样品具有较高含量的 Al₂O₃ (16.19%~18.31%)、FeO (4.17%~5.00%)、CaO (5.1%~9.7%) 和 MgO (3.6%~7.1%), 以及中等含量的 TiO₂ (0.55%~1.23%). 同时, 岩石具有较高的全碱成分(3.54%~6.30%)、Mg[#] (50~68, 均值 57) 和 Na₂O/K₂O 比值(1.53~10.20)以及较低的铝饱和指数(A/CNK=0.75~0.97), 属于典型的(高钾)钙碱

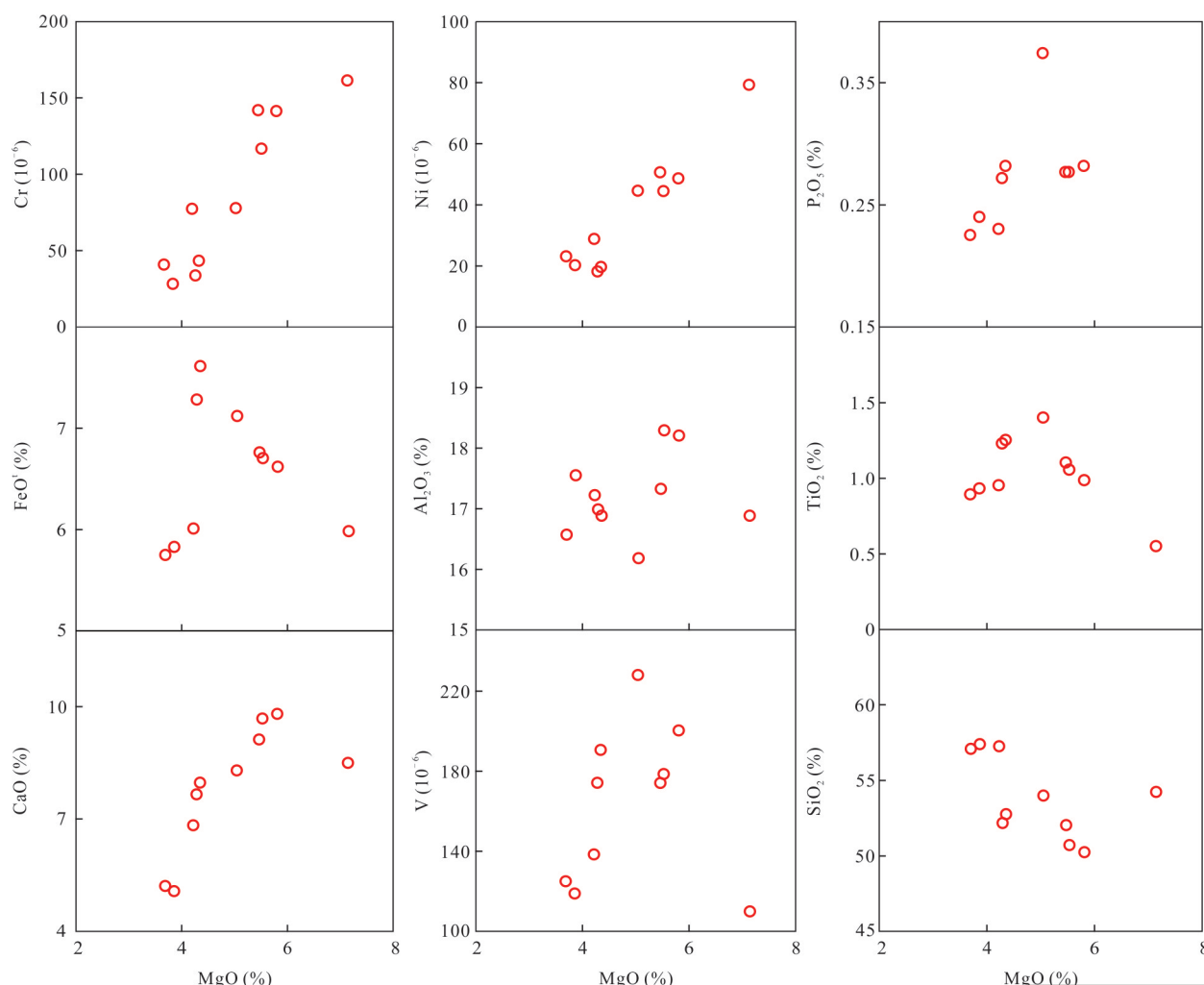


图 5 东昆仑索拉沟闪长岩的全岩地球化学成分哈克图解

Fig.5 Harker diagrams for the whole-rock geochemical composition of the Suolagou diorite in the East Kunlun

性准铝质高镁闪长岩(图 4a~4c).索拉沟闪长岩的 MgO 含量显著高于正常闪长岩,而与日本 Setouchi 地区赞岐岩的成分相似(图 4d)(Tatsumi *et al.*, 2003; Tatsumi, 2006).

除了具有高 MgO 和 $Mg^{\#}$ 特征,索拉沟闪长岩还具有富集相容元素 Cr($28 \times 10^{-6} \sim 161 \times 10^{-6}$)和 Ni ($18 \times 10^{-6} \sim 79 \times 10^{-6}$)的特征.同时,索拉沟闪长岩较为富集不相容元素 Ba、Sr 和 K,其 Ba 含量为 $237 \times 10^{-6} \sim 907 \times 10^{-6}$,而 Sr 含量为 $622 \times 10^{-6} \sim 1042 \times 10^{-6}$,与典型的中性赞岐岩具有相似的特征(Tatsumi *et al.*, 2003; 张旗等, 2005; Tatsumi, 2006; Martin *et al.*, 2010).全岩地球化学数据分析显示,索拉沟闪长岩的化学成分具有较好的线性演化关系(图 5).随着 MgO 含量的降低,岩石的 P_2O_5 、CaO、Cr、Ni 和 V 含量具有显著的降低趋势,而 SiO_2 和 FeO 含量则具有增加趋势(图 5).样品的 Al_2O_3 含

量不具有明显的线性演化关系(图 5),而 TiO_2 含量具有先升高再降低的二阶段演化特征(图 5).东昆仑索拉沟闪长岩具有相似的稀土和微量元素组成,且与日本 Setouchi 地区赞岐岩具有较为相似的分配特征(图 6).索拉沟闪长岩的稀土元素总量变化于 $60.5 \times 10^{-6} \sim 194.0 \times 10^{-6}$,球粒陨石标准化稀土元素配分曲线呈右倾配分模式,具有显著的轻稀土富集和重稀土亏损特征(图 6a),其 $(La/Yb)_N$ 比值为 9.63~13.57(附表 2).样品 13XH02-4 具有中等的铈负异常特征($\delta Eu=0.62$),同时,3 件样品具有铈正异常特征($\delta Eu=1.17 \sim 1.69$),而其余样品不具有明显的铈异常($\delta Eu=0.89 \sim 1.03$)(图 6a).原始地幔标准化微量元素蛛网图解显示,索拉沟闪长岩富集大离子亲石元素(如 Cs、Rb、Ba、Th、K 和 Pb 等),亏损高场强元素(如 Nb、Ta、Zr 和 Hf 等),具有显著的 Na、Ta、Zr、Hf 负异常特征(图 6b).

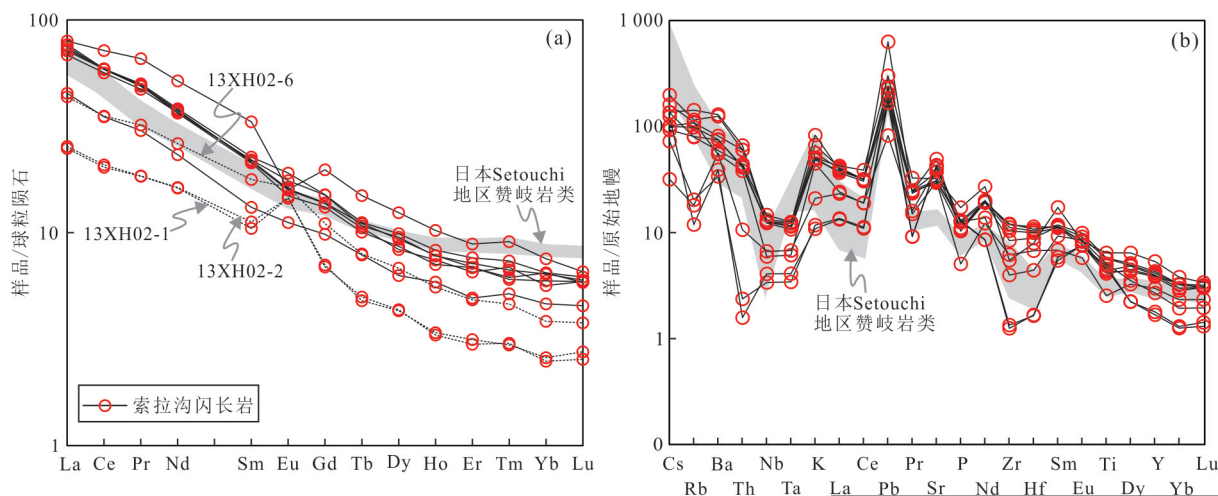


图6 索拉沟闪长岩的球粒陨石标准化稀土元素图(a)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b)

Fig. 6 Chondrite-normalized REE pattern (a) and primitive mantle-normalized trace element spider diagram (b) of the Suolagou diorite

标准化值分别据 Taylor and McLennan (1985) 和 Sun and McDonough (1989)

4.3 锆石 Lu-Hf 同位素

本文对索拉沟闪长岩开展了锆石原位 Lu-Hf 同位素研究(样品 13XH01-1 和 13XH02-6),并以结晶年龄 243 Ma 进行比值计算,详细数据见附表 3.

锆石 Lu-Hf 同位素分析显示,样品 13XH01-1 和 13XH02-6 的锆石具有相似的 Hf 同位素组成,其锆石 Hf 同位素初始值 ($^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$)_i 分别为 0.282 545~0.282 609 和 0.282 557~0.282 647,锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t = 243 \text{ Ma})$ 值分别为 -2.7~-0.4 和 -2.4~+0.9,而一阶段模式年龄分别为 0.90~0.99 Ga 和 0.89~0.98 Ga,显著大于岩石的结晶年龄.

5 讨论

5.1 岩石成因类型

索拉沟闪长岩具有高 Sr 的特征 ($622 \times 10^{-6} \sim 1\,042 \times 10^{-6}$),但其中等偏高的 Y ($6.62 \times 10^{-6} \sim 24.30 \times 10^{-6}$) 和 Yb ($0.62 \times 10^{-6} \sim 1.87 \times 10^{-6}$),以及偏低的 Sr/Y (28~120, 平均值 58) 和 (La/Yb)_N (9.62~13.60) 比值,显著不同于典型的埃达克岩或埃达克质岩石 (Defant and Drummond, 1990) (图 7a, 7b). 同时,与典型埃达克质岩石不同,索拉沟闪长岩不仅富集大离子亲石元素和轻稀土元素等不相容元素,还较为富集 Mg、Ni 和 Cr 等相容元素(附表 2). 索拉沟闪长岩的高 MgO (3.6%~7.1%)、 $\text{Mg}^\#$ (50~68)、Cr ($28 \times 10^{-6} \sim 161 \times 10^{-6}$)、Ni ($18 \times 10^{-6} \sim 79 \times 10^{-6}$)、Ba ($237 \times 10^{-6} \sim 907 \times 10^{-6}$)、Sr

($622 \times 10^{-6} \sim 1\,042 \times 10^{-6}$) 的特征与日本 Setouchi 地区中新世赞岐岩、芬兰 Karelian 地区新太古代赞岐岩和厄瓜多尔 Chacana 地区第四纪赞岐岩类似 (Tatsumi, 2006; Heilimo *et al.*, 2010; Chiaradia *et al.*, 2014). 样品较高含量的 Y 和铁镁指数 ($\text{FeO} + \text{MnO} + \text{MgO} + \text{TiO}_2 = 10.4\% \sim 13.8\%$) 与典型的赞岐岩类似,而不同于典型的埃达克岩或普通的钙碱性花岗岩类(图 7b, 7c). 同时,索拉沟闪长岩具有中等的 TiO_2 含量 (0.55%~1.23%) 和较高的 MgO/TiO_2 比值 (3.5~13.0),属于低 Ti 赞岐岩类(图 7d). 结合索拉沟闪长岩的低 SiO_2 、高 Y、高 Mg、高 Cr 和高 Ba+Sr 等地球化学特征,并与典型赞岐岩进行综合对比,本文认为索拉沟闪长岩为低钛赞岐质高镁闪长岩.

5.2 岩浆源区与岩浆过程

实验岩石学研究表明壳源变玄武质岩石在高温条件下 (1 100 °C) 可发生部分熔融,形成低 Si 的准铝质熔体,但这类熔体通常具有低镁和富钠的成分特征 ($\text{Mg}^\# < 44$, $\text{Na}_2\text{O} > 4.3\%$) (Rapp and Watson, 1995). 然而,索拉沟闪长岩具有高 $\text{Mg}^\#$ (50~68) 和低 Na_2O (2.77%~4.09%) 的特征,显著不同于变玄武岩熔融产物. 而索拉沟闪长岩未见暗色微粒包体,且斜长石和角闪石等矿物均不具有成分环带特征,这与壳-幔岩浆混合成因模式也不同 (Tatsumi, 2006; Martin *et al.*, 2010; Chiaradia *et al.*, 2014). 索拉沟赞岐质闪长岩的高 $\text{Mg}^\#$ 、高 Cr 和高 Ni 等特征指示其成因机制与地幔源区密切相关 (Heili-

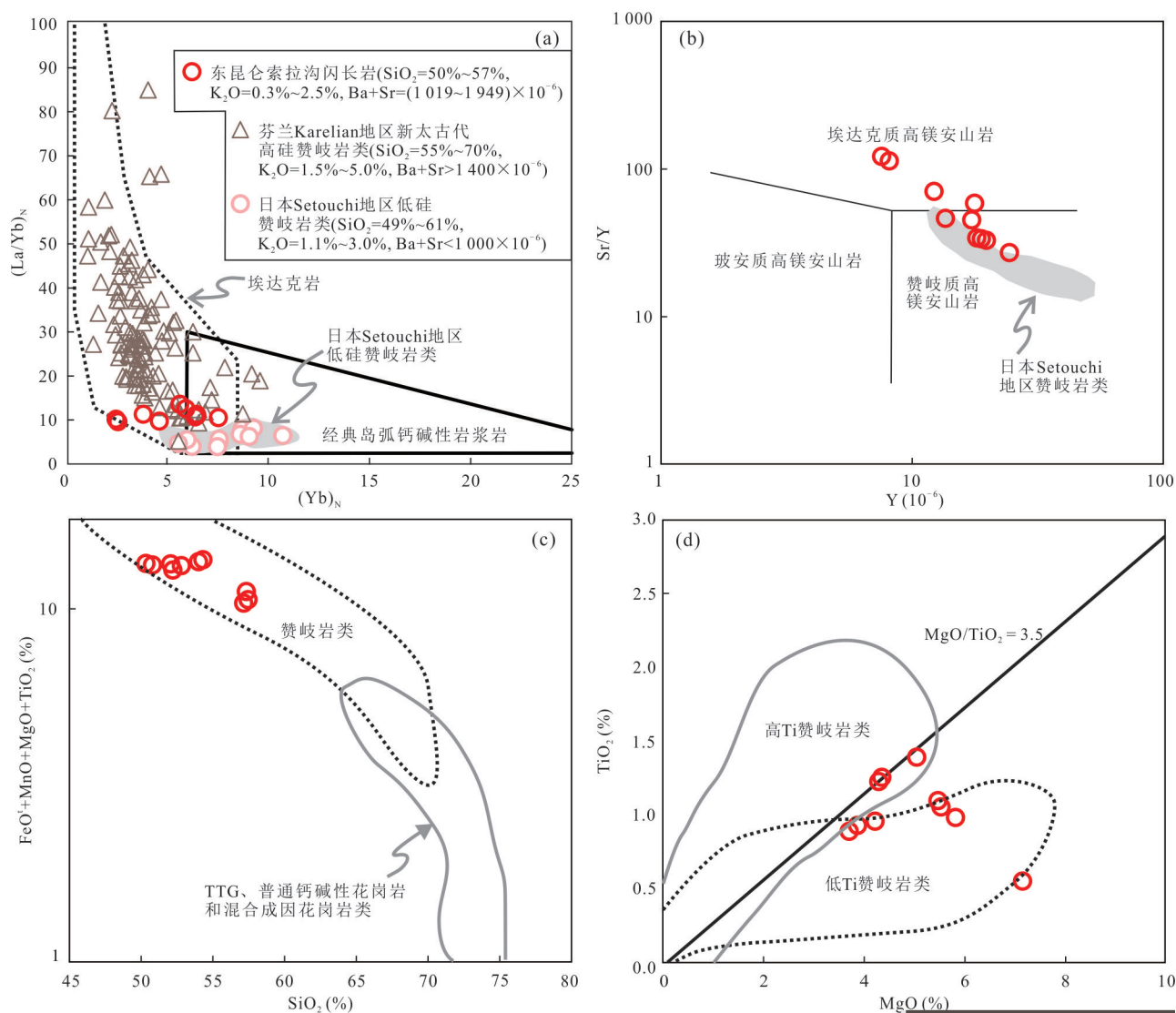


图7 东昆仑索拉沟闪长岩与典型赞岐岩的成因分类判别图解

Fig.7 Comparative diagrams for the Suolagou diorite and typical sanukitoid

a. 据 Defant and Drummond (1990); b. 据 Kamei *et al.* (2004); c. 据 Laurent *et al.* (2014); d. 据 Martin *et al.* (2010)

mo *et al.*, 2010; Martin *et al.*, 2010). 索拉沟赞岐质闪长岩的 Mg[#] 显著高于同期东昆仑三叠纪壳源成因埃达克质花岗岩类 (图 8a), 且锆石 Hf 同位素组成与东昆仑二叠纪—三叠纪幔源岩浆岩相似, 具有富集岩石圈地幔的同位素组成 ($\epsilon_{\text{Hf}}(t) = -2.7 \sim +0.9$), 且略高于同期花岗岩类的平均值 (图 8b).

索拉沟闪长岩样品的高场强元素比值与地幔源区相近, 其 Nb/Ta 值为 16.8~20.2 (平均值 18.3), 接近地幔平均值 (Nb/Ta=17.7) (Sun and McDonough, 1989), 显著高于地壳平均值 (Nb/Ta=11) (Taylor and McLennan, 1985). 索拉沟闪长岩的 SiO₂ 与 Mg[#] 成分也与幔源成因模式一致, 而与壳源熔体和壳—幔混合的产物显著不同 (图 8c). 以上全

岩地球化学和 Lu-Hf 同位素特征均表明, 索拉沟闪长岩起源于地幔源区, 与全球典型赞岐岩的岩浆源区一致 (张旗等, 2005; Tatsumi, 2006; Heilimo *et al.*, 2010; Chiaradia *et al.*, 2014). 索拉沟闪长岩具有中等的 Sm/Yb (2.65~4.30) 和较高的 La/Sm 比值 (3.80~5.65), 表明岩浆起源于石榴石橄榄岩的低程度部分熔融 (8%~12%) (图 8d).

索拉沟赞岐质闪长岩具有富集大离子亲石元素而亏损高场强元素的特征, 表明其地幔源区在部分熔融之前曾经历了显著的富集改造, 这与全球典型赞岐岩起源于富集岩石圈地幔的认识一致 (Stern *et al.*, 1989; Tatsumi, 2006; Martin *et al.*, 2010). 索拉沟赞岐质闪长岩具有较高的 Ba/Yb 和中等的

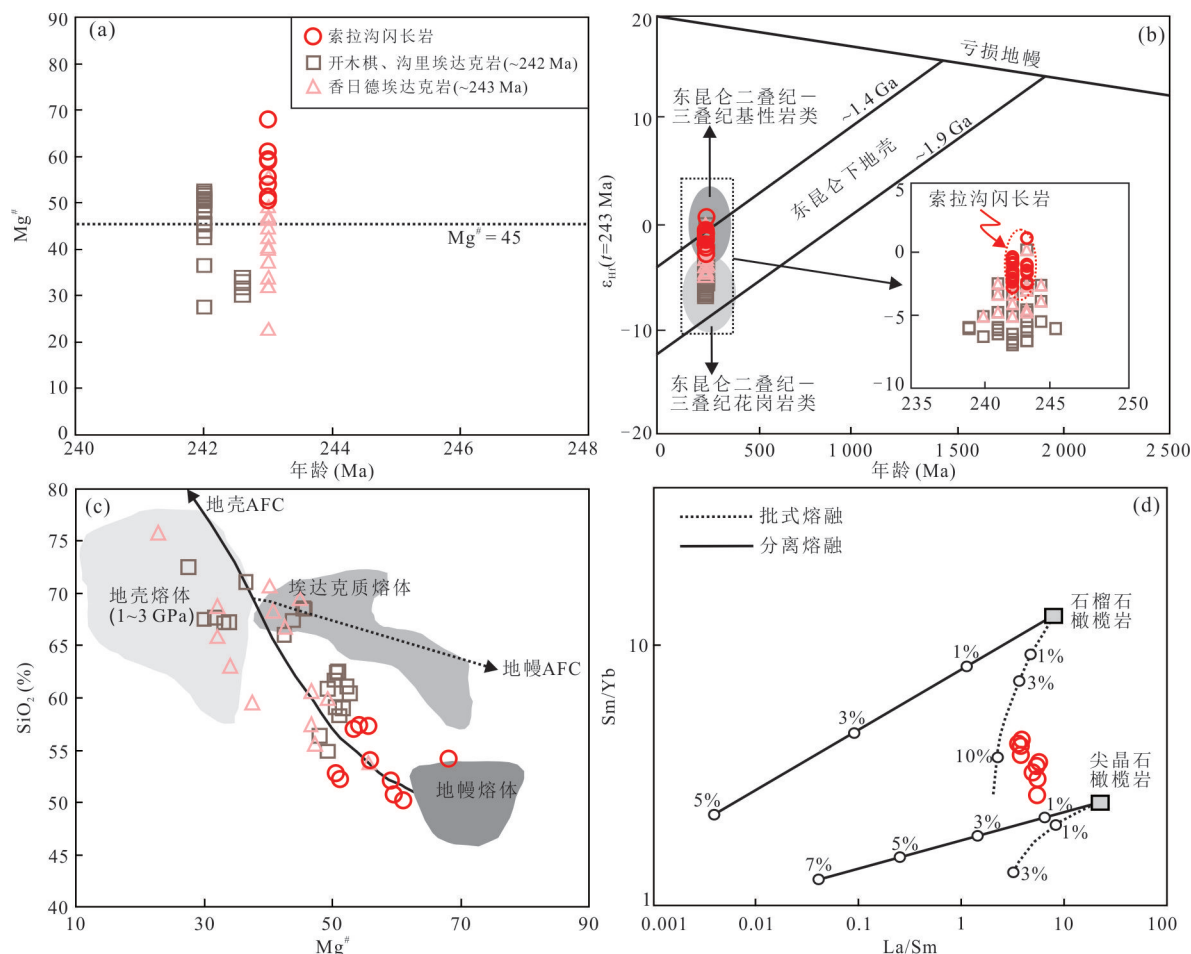


图 8 东昆仑索拉沟闪长岩与中三叠世埃达克岩的成分对比图及地幔源区判别图

Fig.8 Comparative diagrams for the Suolagou diorites and Middle Triassic adakites in the East Kunlun and discrimination diagram of mantle source for the Soulagou diorites

开木棋、沟里和香日德埃达克岩资料据 Chen *et al.* (2015, 2017) 和 Xiong *et al.* (2014)

Ta/Yb 比值,也指示其源区受到了显著的俯冲板片富集改造(图 9a).大量研究表明,赞岐岩富集 Ba、Sr 和 K 等元素的属性与地幔源区受俯冲组分的交代作用密切相关(Stern *et al.*, 1989; Heilimo *et al.*, 2010),其交代富集的组分可能来源于与俯冲板片相关的熔体(Martin *et al.*, 2010; Laurent *et al.*, 2014)、俯冲板片或沉积物起源的流体(Tatsumi, 2006; Heilimo *et al.*, 2010)或俯冲带碳酸盐岩沉积物.相较于稀土元素,高场强元素在碳酸岩熔体和俯冲板片流体中具有较低的相容性和活动性(Stern *et al.*, 1989; Jones *et al.*, 1995; la Flèche *et al.*, 1998),因此,碳酸岩熔体和流体的交代作用均将导致地幔源区发生系统的高场强元素亏损(如 Hf 和 Ta).然而,索拉沟赞岐质闪长岩具有较高的原始地幔标准化 Hf/Sm 比值,表明岩浆源区并未遭受显著的碳酸岩熔体和流体交代改造(图 9b).索拉沟闪长

岩具有与日本 Setouchi 地区赞岐岩相似的 Th/Yb 和 Ba/La 比值,反映其地幔源区遭受了俯冲沉积物熔体的富集交代作用(图 9c).

岩相学和岩石化学分析显示,索拉沟闪长岩具有明显的分离结晶特征(图 2b,图 5),这与索拉沟闪长岩具有较大变化范围的 Mg[#](50~68)、Cr(28×10⁻⁶~161×10⁻⁶)和稀土总量(60.5×10⁻⁶~194.0×10⁻⁶)等特征吻合.全岩主量元素和微量元素协变图解显示(图 10a、10b),索拉沟闪长岩的成分变化主要受控于分离结晶作用,与岩浆混合印记明显的东昆仑中三叠世开木棋、沟里和香日德埃达克岩显著不同(Xiong *et al.*, 2014; Chen *et al.*, 2015, 2017).索拉沟闪长岩的 Sr 和 Ni 含量与 SiO₂ 存在负相关性,而 Zr 和 La 含量与 SiO₂ 存在正相关性.随着 Sr 和 Ni 含量的降低,索拉沟闪长岩的 Ba 具有升高趋势,反映岩浆经历了角闪石、黑云母和单斜辉石为主的

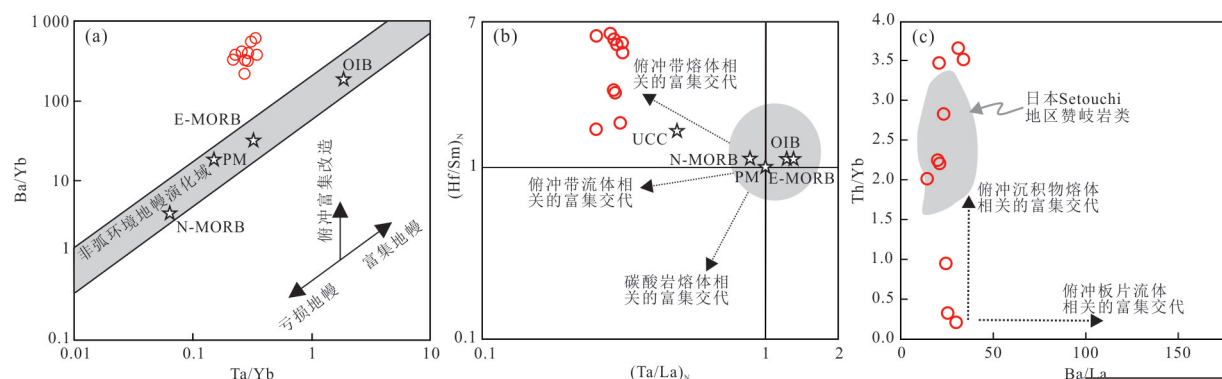
图9 东昆仑索拉沟闪长岩的Ba/Yb-Ta/Yb(a)、(Hf/Sm)_N-(Ta/La)_N(b)和Th/Yb-Ba/La(c)成分关系图解

Fig.9 Ba/Yb-Ta/Yb (a), (Hf/Sm)_N-(Ta/La)_N (b) and Th/Yb-Ba/La (c) diagrams for the Suolagou diorite in the East Kunlun

洋中脊玄武岩、洋岛玄武岩和地幔值据 Sun and McDonough (1989)

分离结晶作用,并未发生显著的斜长石分离结晶(图10c).索拉沟闪长岩大多具有轻微的负铕异常($\delta\text{Eu}=0.89\sim 1.03$),而3件样品具铕正异常特征($\delta\text{Eu}=1.17\sim 1.69$),这也反映其岩浆源区并未发生显著的斜长石分离结晶作用.样品的 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 与La存在弱正相关性,也指示岩浆发生了黑云母和角闪石的分离结晶作用(图10d).而微量元素蛛网图未显示显著的Ti异常现象(图6b),表明岩浆未发生显著的钛铁氧化物分离.

5.3 成岩动力学背景与地质意义

如前所述,尽管有关赞岐岩质高镁安山岩/闪长岩类的成因机制还存在着富集地幔熔融、榴辉岩化俯冲板片熔融和板片熔体与地幔橄榄岩相互作用等多种观点,但有关赞岐岩的成岩动力学背景则具有较为一致的认识,即安山质赞岐岩主要起源于洋壳俯冲环境(Stern *et al.*, 1989; Tatsumi, 2006; Heilimo *et al.*, 2010; Martin *et al.*, 2010).俯冲洋壳沉积物或板片将为地幔楔提供大量流体或熔体,促使地幔源区发生富集交代作用,从而导致岩浆显著富集大离子亲石元素和亏损高场强元素.岩石成因分析已表明,索拉沟闪长岩的地幔源区经历了俯冲沉积物熔体主导的富集交代作用,也反映了其成岩背景与洋壳俯冲作用密切相关.然而,俯冲背景下富集的岩石圈地幔发生部分熔融作用还需异常高热的动力学环境.相关研究表明,造山旋回中这种异常高热的动力学环境可能与洋脊俯冲有关(Tatsumi, 2006; Martin *et al.*, 2010),也可能与洋壳俯冲和地体碰撞转换阶段的特殊构造背景相关(Stern *et al.*, 1989; 张旗等, 2005; Chiaradia *et al.*, 2014),例如,板片俯冲作用结束和地体同碰撞环境

下的俯冲板片断离、板片回卷或岩石圈拆沉(Heilimo *et al.*, 2010; Laurent *et al.*, 2014; Xiong *et al.*, 2014).目前,有关东昆仑三叠纪岩浆岩的研究均未报道N-MORB等亏损地幔起源的基性岩浆岩,暗示东昆仑造山带东段不可能存在三叠纪洋脊俯冲作用.同时,东昆仑造山带三叠纪岩浆岩并不具有俯冲角度变化引起的时空分布迁移特征,也不支持板片回卷模型(Xiong *et al.*, 2014; Dong *et al.*, 2018; Li *et al.*, 2018).

综合东昆仑三叠纪特殊类型岩浆岩的成因分析,本文认为东昆仑索拉沟中三叠世赞岐质闪长岩的成岩动力学背景与岩石圈拆沉无关,而与俯冲板片的断离作用密切相关.岩石圈拆沉会导致加厚的榴辉岩化地壳发生部分熔融,所产生的熔体将与地幔橄榄岩发生作用,从而形成高Mg[#]和高Cr岩浆岩(Rapp and Watson, 1995; Rapp *et al.*, 1999; Xiong *et al.*, 2014).但是,这类岩浆常常具有高Sr、低Y和低Yb的埃达克质地球化学特征,其结晶的矿物常具有反环带结构(Kamei *et al.*, 2004; Tatsumi, 2006),这显著不同于东昆仑索拉沟赞岐质闪长岩的地球化学和岩相学特征(图2,图7).同时,有关同期埃达克岩类的成因研究也支持中三叠世时东昆仑造山带处于俯冲板片断离的动力学背景.东昆仑开木棋、沟里和香日德花岗闪长岩体均形成于~243 Ma的中三叠世时期,且3个岩体具有典型的埃达克质地球化学特征;但岩石均具有较低的Cr、Ni和Mg[#],显著不同于岩石圈拆沉相关的埃达克岩类,而与加厚地壳熔融相似(Xiong *et al.*, 2014; Chen *et al.*, 2015, 2017).锆石Hf同位素组成和全岩成分则进一步揭示,东昆仑中三叠世埃达克质岩

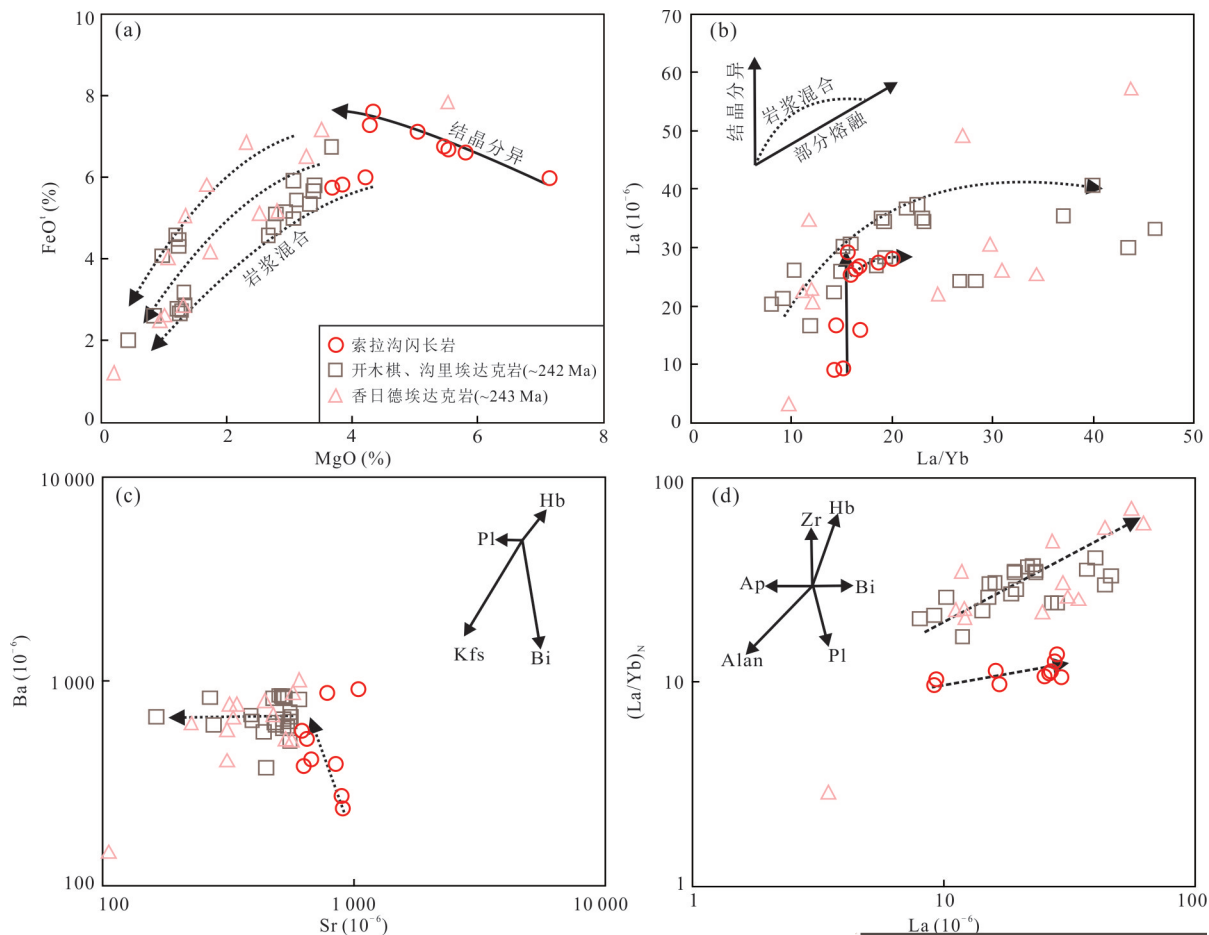


图 10 东昆仑索拉沟闪长岩与同期埃达克岩的岩浆演化过程分析

Fig.10 Discrimination diagrams of magmatic evolution process for the Suolagou diorite and coeval adakite in East Kunlun
Pl. 斜长石; Kfs. 钾长石; Bi. 黑云母; Hb. 普通角闪石; Alan. 褐帘石; Ap. 磷灰石; Zr. 锆石

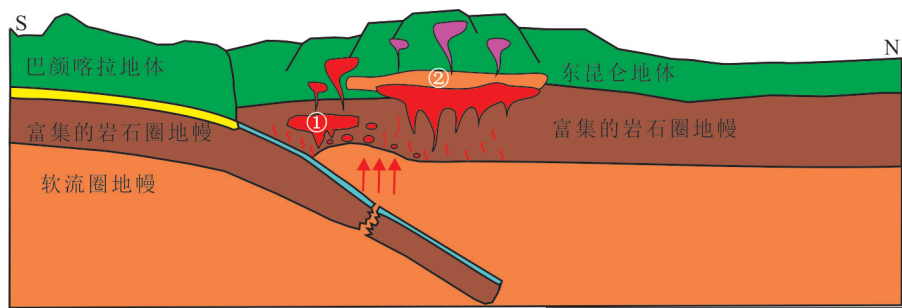


图 11 东昆仑中三叠世古特提斯构造—岩浆动力学模式

Fig.11 Schematic cartoon showing paleo-Tethyan tectono-magma dynamic model at Middle Triassic in the East Kunlun

① 俯冲沉积物相关的熔体交代地幔楔,使其发生富集改造;随后,俯冲板片发生断离,高温岩浆底侵促使地幔楔发生部分熔融,形成索拉沟赞岐岩;② 幔源岩浆底侵背景下,加厚地壳发生部分熔融+壳—幔岩浆混合,形成中三叠世香日德和沟里等埃达克岩

浆主要起源于东昆仑陆壳基底的重熔,同时还存在不同比例的幔源物质贡献(图 8a~8c).而东昆仑阿斯木辉长岩(~241 Ma)、按纳格辉长岩(~242 Ma)和加鲁河角闪辉长岩(~239 Ma)等幔源岩浆活动的大量报道则表明东昆仑造山带在中三叠世时曾发生了一次显著的幔源岩浆底侵事件(莫宣学等,

2007; 张玉等, 2017; 赵旭等, 2018).东昆仑造山带昆中带独居石(~246 Ma)的生长与古特提斯消亡的构造变质时间相联系(陈能松等, 2007),同位素测年表明古特提斯缝合带的走滑剪切运动在 240 Ma 以前已经开始(Xu *et al.*, 2001; Liu *et al.*, 2005),因此本文认为古特提斯洋于中三叠世闭合,

这与区域上出现的微角度不整合面一致(上覆中三叠世希里克特组,下伏中三叠世闹仓坚沟组)(李瑞保等, 2012)。综上所述,本文认为东昆仑中三叠世时期并未发生岩石圈拆沉,同期埃达克岩和赞岐岩的成因机制与俯冲板片断离引起的高温幔源岩浆上升和岩石圈熔融作用密切相关(图 11)。东昆仑于中三叠世时期处于洋壳俯冲和地体碰撞的构造转换阶段,索拉沟赞岐质高镁闪长岩形成于俯冲结束时的板片断离背景。之后,随着地体碰撞作用的持续,起源于加厚地壳的中—晚三叠世埃达克质岩浆岩逐渐发育(詹发余等, 2007; 刘金龙等, 2015; Xiong *et al.*, 2016),而晚三叠世—早侏罗世 A 型花岗岩和基性岩墙群的发现则暗示东昆仑古特提斯域造山作用的结束(Xiong *et al.*, 2014; Liu *et al.*, 2017; 张明玉等, 2018)。

6 结论

(1) LA-ICPMS 锆石 U-Pb 年代学分析表明,东昆仑索拉沟闪长岩体形成于中三叠世(~243 Ma)。索拉沟闪长岩具有高 Mg、Cr、Ni、Sr 和 Ba 的特征,属于典型的高镁安山质赞岐岩。

(2) 岩石学、地球化学和 Lu-Hf 同位素分析揭示,索拉沟闪长岩起源于富集岩石圈地幔,且地幔源区受到俯冲沉积物熔体的富集改造;其母岩浆发生了以角闪石和黑云母为主导的分离结晶作用。

(3) 综合分析表明,中三叠世是东昆仑古特提斯大洋岩石圈俯冲和地体碰撞的构造转换阶段,索拉沟赞岐质高镁闪长岩可能是俯冲作用结束时板片断离的构造—岩浆响应。

致谢:感谢中国地质大学(武汉)蒋红安和张航研究生在野外调查过程中给予的有益帮助。感谢中国地质大学(武汉)陈海红和张文老师在分析测试实验方面的积极支持和技术指导。

附表见本刊官网(<http://www.earth-science.net>)。

References

- Chappell, B. W., White, A. J. R., 1974. Two Contrasting Granite Types. *Pacific Geology*, 8: 173—174.
- Chen, J., Wang, B. Z., Li, B., et al., 2015. Zircon U-Pb Ages, Geochemistry, and Sr-Nd-Pb Isotopic Compositions of Middle Triassic Granodiorites from the Kaimuqi Area, East Kunlun, Northwest China: Implications for Slab Breakoff. *International Geology Review*, 57(2): 257—270. <https://doi.org/10.1080/00206814.2014.1003105>
- Chen, J. J., Wei, J. H., Fu, L. B., et al., 2017. Multiple Sources of the Early Mesozoic Gouli Batholith, Eastern Kunlun Orogenic Belt, Northern Tibetan Plateau: Linking Continental Crustal Growth with Oceanic Subduction. *Lithos*, 292—293: 161—178. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2017.09.006>
- Chen, N. S., Sun, M., Wang, Q. Y., et al., 2007. EMP Chemical Ages of Monazites from Central Zone of the Eastern Kunlun Orogen: Records of Multi-Tectonometamorphic Events. *Chinese Science Bulletin*, 52(11): 1297—1306 (in Chinese).
- Chen, S. J., Li, R. S., Ji, W. H., et al., 2010. The Permian Lithofacies Paleogeographic Characteristics and Basin-Mountain Conversion in the Kunlun Orogenic Belt. *Geology in China*, 37(2): 374—393 (in Chinese with English abstract).
- Chen, Y. X., Pei, X. Z., Li, R. B., et al., 2014. Rock Association, Geochemical Characteristics and Tectonic Setting of the Xiaomiao Formation, East Region of East Kunlun Orogenic Belt. *Acta Geologica Sinica*, 88(6): 1038—1054 (in Chinese with English abstract).
- Chiaradia, M., Müntener, O., Beate, B., 2014. Quaternary Sanukitoid-Like Andesites Generated by Intracrustal Processes (Chacana Caldera Complex, Ecuador): Implications for Archean Sanukitoids. *Journal of Petrology*, 55(4): 769—802. <https://doi.org/10.1093/petrology/egu006>
- Defant, M. J., Drummond, M. S., 1990. Derivation of Some Modern Arc Magmas by Melting of Young Subducted Lithosphere. *Nature*, 347(6294): 662—665. <https://doi.org/10.1038/347662a0>
- Dong, Y. P., He, D. F., Sun, S. S., et al., 2018. Subduction and Accretionary Tectonics of the East Kunlun Orogen, Western Segment of the Central China Orogenic System. *Earth-Science Reviews*, 186: 231—261. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.12.006>
- Guo, X. Z., Xie, W. H., Zhou, H. B., et al., 2019. Zircon U-Pb Chronology and Geochemistry of the Rhyolite Porphyry in the Nagengkangqieer Silver Polymetallic Deposit, East Kunlun and Their Geological Significance. *Earth Science*, 44(7): 2505—2518 (in Chinese with English abstract).
- Heilimo, E., Halla, J., Hölttä, P., 2010. Discrimination and Origin of the Sanukitoid Series: Geochemical Constraints from the Neoproterozoic Western Karelian Province (Finland). *Lithos*, 115(1—4): 27—39. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2009.11.001>

- Hu, Z. C., Liu, Y. S., Gao, S., et al., 2012. Improved In Situ Hf Isotope Ratio Analysis of Zircon Using Newly Designed X Skimmer Cone and Jet Sample Cone in Combination with the Addition of Nitrogen by Laser Ablation Multiple Collector ICP-MS. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 27(9): 1391–1399. <https://doi.org/10.1039/c2ja30078h>
- Huang, H., Niu, Y. L., Nowell, G., et al., 2014. Geochemical Constraints on the Petrogenesis of Granitoids in the East Kunlun Orogenic Belt, Northern Tibetan Plateau: Implications for Continental Crust Growth through Syn-Collisional Felsic Magmatism. *Chemical Geology*, 370: 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2014.01.010>
- Jones, J. H., Walker, D., Pickett, D. A., et al., 1995. Experimental Investigations of the Partitioning of Nb, Mo, Ba, Ce, Pb, Ra, Th, Pa, and U between Immiscible Carbonate and Silicate Liquids. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(7): 1307–1320. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00045-2](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00045-2)
- Kamei, A., Owada, M., Nagao, T., et al., 2004. High-Mg Diorites Derived from Sanukitic HMA Magmas, Kyushu Island, Southwest Japan Arc: Evidence from Clinopyroxene and Whole Rock Compositions. *Lithos*, 75(3–4): 359–371. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2004.03.006>
- la Flèche, M. R., Camiré, G., Jenner, G. A., 1998. Geochemistry of Post-Acadian, Carboniferous Continental Intraplate Basalts from the Maritimes Basin, Magdalen Islands, Québec, Canada. *Chemical Geology*, 148(3–4): 115–136. [https://doi.org/10.1016/s0009-2541\(98\)00002-3](https://doi.org/10.1016/s0009-2541(98)00002-3)
- Laurent, O., Martin, H., Moyen, J. F., et al., 2014. The Diversity and Evolution of Late-Archean Granitoids: Evidence for the Onset of “Modern-Style” Plate Tectonics between 3.0 and 2.5 Ga. *Lithos*, 205: 208–235. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2014.06.012>
- Li, R.B., Pei, X.Z., Li, Z.C., et al., 2012. Geological Characteristics of Late Palaeozoic-Mesozoic Unconformities and Their Response to Some Significant Tectonic Events in Eastern Part of Eastern Kunlun. *Earth Science Frontiers*, 19(5): 244–254 (in Chinese with English abstract).
- Li, R. B., Pei, X. Z., Pei, L., et al., 2018. The Early Triassic Andean-Type Halagatu Granitoids Pluton in the East Kunlun Orogen, Northern Tibet Plateau: Response to the Northward Subduction of the Paleo-Tethys Ocean. *Gondwana Research*, 62: 212–226. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2018.03.005>
- Liu, B., Ma, C. Q., Huang, J., et al., 2017. Petrogenesis and Tectonic Implications of Upper Triassic Appinite Dykes in the East Kunlun Orogenic Belt, Northern Tibetan Plateau. *Lithos*, 284–285: 766–778. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2017.05.016>
- Liu, J.L., Sun, F.Y., Li, L., et al., 2015. Geochronology, Geochemistry and Hf Isotopes of Gerizhuotuo Complex Intrusion in West of Anyemaqen Suture Zone. *Earth Science*, 40(6): 965–981 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y. J., Genser, J., Neubauer, F., et al., 2005. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Mineral Ages from Basement Rocks in the Eastern Kunlun Mountains, NW China, and Their Tectonic Implications. *Tectonophysics*, 398(3–4): 199–224. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2005.02.007>
- Liu, Y. S., Hu, Z. C., Gao, S., et al., 2008. In Situ Analysis of Major and Trace Elements of Anhydrous Minerals by LA-ICP-MS without Applying an Internal Standard. *Chemical Geology*, 257(1–2): 34–43. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.08.004>
- Liu, Y. S., Gao, S., Hu, Z. C., et al., 2010. Continental and Oceanic Crust Recycling-Induced Melt-Peridotite Interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb Dating, Hf Isotopes and Trace Elements in Zircons from Mantle Xenoliths. *Journal of Petrology*, 51(1–2): 537–571. <https://doi.org/10.1093/petrology/egp082>
- Martin, H., Moyen, J. F., Rapp, R., 2010. The Sanukitoid Series: Magmatism at the Archean-Proterozoic Transition. *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 100(1–2): 15–33. <https://doi.org/10.1017/s1755691009016120>
- Middlemost, E. A. K., 1994. Naming Materials in the Magma/Igneous Rock System. *Earth-Science Reviews*, 37(3–4): 215–224. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(94\)90029-9](https://doi.org/10.1016/0012-8252(94)90029-9)
- Mo, X.X., Luo, Z.H., Deng, J.F., et al., 2007. Granitoids and Crustal Growth in the East-Kunlun Orogenic Belt. *Geological Journal of China Universities*, 13(3): 403–414 (in Chinese with English abstract).
- Peccerillo, A., Taylor, S. R., 1976. Geochemistry of Eocene Calc-Alkaline Volcanic Rocks from the Kastamonu Area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58(1): 63–81. <https://doi.org/10.1007/bf00384745>
- Rapp, R. P., Shimizu, N., Norman, M. D., et al., 1999. Reaction between Slab-Derived Melts and Peridotite in the Mantle Wedge: Experimental Constraints at 3.8 GPa. *Chemical Geology*, 160(4): 335–356. [https://doi.org/10.1016/s0009-2541\(99\)00106-0](https://doi.org/10.1016/s0009-2541(99)00106-0)

- Rapp, R. P., Watson, E. B., 1995. Dehydration Melting of Metabasalt at 8–32 kbar: Implications for Continental Growth and Crust–Mantle Recycling. *Journal of Petrology*, 36(4): 891–931. <https://doi.org/10.1093/petrology/36.4.89>
- Roger, F., Arnaud, N., Gilder, S., et al., 2003. Geochronological and Geochemical Constraints on Mesozoic Suture in East Central Tibet. *Tectonics*, 22(4): 1037. <https://doi.org/10.1029/2002tc001466>
- Shao, F. L., Niu, Y. L., Liu, Y., et al., 2017. Petrogenesis of Triassic Granitoids in the East Kunlun Orogenic Belt, Northern Tibetan Plateau and Their Tectonic Implications. *Lithos*, 282–283: 33–44. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2017.03.002>
- Stern, R. A., Hanson, G. N., Shirey, S. B., 1989. Petrogenesis of Mantle-Derived, LILE-Enriched Archean Monzodiorites and Trachyandesites (Sanukitoids) in Southwestern Superior Province. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 26(9): 1688–1712. <https://doi.org/10.1139/e89-145>
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313–345. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1989.042.01.19>
- Tatsumi, Y., 2001. Geochemical Modeling of Partial Melting of Subducting Sediments and Subsequent Melt–Mantle Interaction: Generation of High-Mg Andesites in the Setouchi Volcanic Belt, Southwest Japan. *Geology*, 29(4): 323–326. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2001\)0290323:gmopmo>2.0.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2001)0290323:gmopmo>2.0.co;2)
- Tatsumi, Y., 2006. High-Mg Andesites in the Setouchi Volcanic Belt, Southwestern Japan: Analogy to Archean Magmatism and Continental Crust Formation? *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 34(1): 467–499. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.34.031405.125014>
- Tatsumi, Y., Shukuno, H., Sato, K., et al., 2003. The Petrology and Geochemistry of High-Magnesium Andesites at the Western Tip of the Setouchi Volcanic Belt, SW Japan. *Journal of Petrology*, 44(9): 1561–1578. <https://doi.org/10.1093/petrology/egg049>
- Taylor, S. R., McLennan, S. M., 1985. The Continental Crust: Its Composition and Evolution. Blackwell Scientific Publications, Oxford.
- Wang, G. C., Wang, Q. H., Jian, P., et al., 2004. Zircon SHRIMP Ages of Precambrian Metamorphic Basement Rocks and Their Tectonic Significance in the Eastern Kunlun Mountains, Qinghai Province, China. *Earth Science Frontiers*, 11(4): 481–490 (in Chinese with English abstract).
- Wang, G. C., Xiang, S. Y., Wang, A., et al., 2007. Thermochronological Constraint to the Processes of the East Kunlun and Adjacent Areas in Mesozoic–Early Cenozoic. *Earth Science*, 32(5): 605–614 (in Chinese with English abstract).
- Xiong, F. H., Ma, C. Q., Jiang, H. A., et al., 2016. Geochronology and Petrogenesis of Triassic High-K Calc-Alkaline Granodiorites in the East Kunlun Orogen, West China: Juvenile Lower Crustal Melting during Post-Collisional Extension. *Journal of Earth Science*, 27(3): 474–490. <https://doi.org/10.1007/s12583-016-0674-6>
- Xiong, F. H., Ma, C. Q., Zhang, J. Y., et al., 2014. 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. *Journal of the Geological Society*, 171(6): 847–863. <https://doi.org/10.1144/jgs2013-038>
- Xu, Z. Q., Yang, J. S., Jiang, M., et al., 2001. Deep Structure and Lithospheric Shear Faults in the East Kunlun–Qiangtang Region, Northern Tibetan Plateau. *Science China Earth Sciences*, 44(1): 1–9. <https://doi.org/10.1007/bf02911965>
- Yin, H. F., Zhang, K. X., 1997. Some Characteristics of the East Kunlun Orogenic Belt. *Earth Science*, 22(4): 3–6 (in Chinese).
- Yuan, C., Sun, M., Xiao, W. J., et al., 2009. Garnet-Bearing Tonalitic Porphyry from East Kunlun, Northeast Tibetan Plateau: Implications for Adakite and Magmas from the MASH Zone. *International Journal of Earth Sciences*, 98(6): 1489–1510. <https://doi.org/10.1007/s00531-008-0335-y>
- Yuan, W. M., Mo, X. X., Zhang, A. K., et al., 2017. Discovery of New Porphyry Belts in Eastern Kunlun Mountains, Qinghai–Tibet Plateau. *Earth Science Frontiers*, 24(6): 1–9 (in Chinese with English abstract).
- Zhan, F. Y., Gu, F. B., Li, D. S., et al., 2007. Tectonic Environment of Adakite in Eastern Kunlun Area, Qinghai, and Its Ore-Forming Significance. *Acta Geologica Sinica*, 81(10): 1352–1368 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, H., Wang, Z. Q., Ma, C. Q., et al., 2018. Proto-Tethys Record in Paleo-Tethys Belt of East Kunlun: Evidence from Kuhai Mafic Blocks. *Earth Science*, 43(4):

- 1164—1188 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, M.Y., Feng, C.Y., Wang, H., et al., 2018. Petrogenesis and Tectonic Implications of the Late Triassic Syenogranite in Qimantag Area, East Kunlun Mountains. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 37(2): 197—210 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Q., Qian, Q., Zhai, M.G., et al., 2005. Geochemistry, Petrogenesis and Geodynamic Implications of Sanukite. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 24(2): 117—125 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y., Pei, X.Z., Li, R.B., et al., 2017. Zircon U-Pb Geochronology, Geochemistry of the Alasimu Gabbro in Eastern Section of East Kunlun Mountains and the Closing Time of Paleo-Ocean Basin. *Geology in China*, 44(3): 526—540 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, X., Fu, L.B., Wei, J.H., et al., 2018. Geochemical Characteristics of An' nage Hornblende Gabbro from East Kunlun Orogenic Belt and Its Constraints on Evolution of Paleo-Tethys Ocean. *Earth Science*, 43(2): 354—370 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 陈能松, 孙敏, 王勤燕, 等, 2007. 东昆仑造山带昆中带的独居石电子探针化学年龄: 多期构造变质事件记录. *科学通报*, 52(11): 1297—1306.
- 陈守建, 李荣社, 计文化, 等, 2010. 昆仑造山带二叠纪岩相古地理特征及盆山转换探讨. *中国地质*, 37(2): 374—393.
- 陈有炘, 裴先治, 李瑞保, 等, 2014. 东昆仑东段中元古代小庙岩组岩石组合、地球化学特征及构造环境分析. *地质学报*, 88(6): 1038—1054.
- 国显正, 谢万洪, 周洪兵, 等, 2019. 东昆仑那更康切尔银多金属矿床流纹斑岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学特征及其地质意义. *地球科学*, 44(7): 2505—2518.
- 李瑞保, 裴先治, 李佐臣, 等, 2012. 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. *地学前缘*, 19(5): 244—254.
- 刘金龙, 孙丰月, 李良, 等, 2015. 青海阿尼玛卿蛇绿混杂岩带西段哥日卓托杂岩体年代学、地球化学及 Hf 同位素. *地球科学*, 40(6): 965—981.
- 莫宣学, 罗照华, 邓晋福, 等, 2007. 东昆仑造山带花岗岩及地壳生长. *高校地质学报*, 13(3): 403—414.
- 王国灿, 王青海, 简平, 等, 2004. 东昆仑前寒武纪基底变质岩系的锆石 SHRIMP 年龄及其构造意义. *地学前缘*, 11(4): 481—490.
- 王国灿, 向树元, 王岸, 等, 2007. 东昆仑及相邻地区中生代—新生代早期构造过程的热年代学记录. *地球科学*, 32(5): 605—614.
- 殷鸿福, 张克信, 1997. 东昆仑造山带的一些特点. *地球科学*, 22(4): 3—6.
- 袁万明, 莫宣学, 张爱奎, 等, 2017. 青海省东昆仑斑岩带新发现. *地学前缘*, 24(6): 1—9.
- 詹发余, 古风宝, 李东生, 等, 2007. 青海东昆仑埃达克岩的构造环境及成矿意义. *地质学报*, 81(10): 1352—1368.
- 张航, 王宗起, 马昌前, 等, 2018. 东昆仑古特提斯构造带中的原特提斯记录: 来自苦海镁铁质岩块的证据. *地球科学*, 43(4): 1164—1188.
- 张明玉, 丰成友, 王辉, 等, 2018. 东昆仑祁漫塔格地区晚三叠世正长花岗岩岩石成因及构造意义. *岩石矿物学杂志*, 37(2): 197—210.
- 张旗, 钱青, 翟明国, 等, 2005. Sanukite(赞岐岩)的地球化学特征、成因及其地球动力学意义. *岩石矿物学杂志*, 24(2): 117—125.
- 张玉, 裴先治, 李瑞保, 等, 2017. 东昆仑东段阿拉思木辉长岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学特征及洋盆闭合时限界定. *中国地质*, 44(3): 526—540.
- 赵旭, 付乐兵, 魏俊浩, 等, 2018. 东昆仑按纳格角闪辉长岩体地球化学特征及其对古特提斯洋演化的制约. *地球科学*, 43(2): 354—370.