

doi:10.3799/dqkx.2016.129

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

陈加杰¹, 付乐兵^{1*}, 魏俊浩¹, 田宁¹, 熊乐¹, 赵玉京¹, 张玉洁², 祁月清³

1. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074
2. 青海有色地质矿产勘查院, 青海西宁 810007
3. 青海省有色地质矿产勘查局八队, 青海西宁 810012

摘要: 原特提斯洋的俯冲时限以及俯冲极性还存在较大争议, 对位于东昆仑造山带东端的昆南亚带中敖洼得花岗闪长岩体开展详细的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学、元素地球化学和同位素地球化学研究。结果表明, 其单颗粒锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年结果为 454 ± 2 Ma, 指示侵位时代为晚奥陶世。岩石 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 比值为 $0.92 \sim 2.68$, $\text{Mg}^\#$ 为 $39 \sim 43$, A/CNK 为 $1.00 \sim 1.03$, 属准铝质钙碱性—高钾钙碱性系列。岩石稀土元素标准化图显示右倾, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 介于 $17 \sim 46$, 具有明显的轻重稀土分异及中等—弱的 Eu 负异常 ($0.48 \sim 0.96$)。花岗闪长岩富集大离子亲石元素 (Rb、Ba、K、La、Sr), 亏损高场强元素 (Nb、Ta、P、Ti), Cr、Ni 含量较低, Sr/Y 均值为 55。全岩 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_{\text{i}}$ 较为均一 ($0.7059 \sim 0.7063$), $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 变化范围为 $-4.1 \sim -1.9$, 对应的二阶段模式年龄为 $1.3 \sim 1.5$ Ga, 锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 变化范围为 $+5.4 \sim +9.2$ 。敖洼得花岗闪长岩具有低镁埃达克质岩的特征, 为俯冲洋壳部分熔融的产物, 熔融后的洋壳残留应为含石榴子石角闪岩, 岩浆演化过程中经历了角闪石和斜长石的分离结晶。微量元素组成特征指示岩体形成于火山弧环境, 结合昆中断裂带内蛇绿岩及其两侧相关变质岩、弧花岗岩、弧后盆地火山岩等的综合对比, 笔者认为昆中缝合带原特提斯洋(昆中洋)在晚奥陶世存在双向俯冲, 敖洼得岩体形成于原特提斯洋的南向俯冲消减过程。

关键词: 低镁埃达克质岩; 晚奥陶世; 昆中缝合带; 原特提斯洋; 双向俯冲; 东昆仑; 地球化学。

中图分类号: P597 文章编号: 1000-2383(2016)11-1863-20 收稿日期: 2016-02-01

Geochemical Characteristics of Late Ordovician Granodiorite in Gouli Area, Eastern Kunlun Orogenic Belt, Qinghai Province: Implications on the Evolution of Proto-Tethys Ocean

Chen Jiajie¹, Fu Lebing^{1*}, Wei Junhao¹, Tian Ning¹, Xiong Le¹, Zhao Yujing¹, Zhang Yujie², Qi Yueqing³

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

2. Qinghai Institute of Geology and Mineral Resources, Xining 810007, China

3. No.8 Geological Team of Qinghai Nonferrous Metals Geological Exploration Bureau, Xining 810012, China

Abstract: The Aowade granodiorite in the east-end of Kunlun terrain, a part of Kunlun Orogenic belt, belongs to Proto-Tethyan tectonic domain. Detailed study of the granodiorite can offer important information to constrain the evolution of the Proto-Tethys Ocean. Detailed study of the granodiorite can offer important information to constrain the evolution of the Proto-Tethys Ocean. In this study, LA-ICP-MS zircon U-Pb dating yields a weighted mean age of 454 ± 2 Ma for the intrusion. It is characterized by low $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ ($0.92 \sim 2.68$) and $\text{Mg}^\#$ ($39 \sim 43$), and the A/CNK is between 1.00 and 1.03. The REE exhibits right-dipping patterns with negative anomalies of Eu/Eu^* ($0.48 \sim 0.96$) and high $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ ratios. LILE (Rb, Ba, K, La, Sr) is enriched in this intrusion, while HFSE (Nb, Ta, P, Ti) is depleted relative to the primitive mantle, and the concentra-

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No.41302065); 中国地质调查局整装勘查关键基础地质研究项目 (No.12120114081401); 中国地质调查局整装勘查区找矿预测与技术创新示范项目 (No.12120114081401); 青海省东昆仑典型金矿床成矿控制条件与找矿方向综合调查项目 (No.12120114000701)。

作者简介: 陈加杰 (1989—), 男, 博士研究生, 主要从事矿床地球化学、成矿规律与成矿预测研究。E-mail: cjjcwahbc@163.com

*** 通讯作者:** 付乐兵, E-mail: fulebing1212@126.com

引用格式: 陈加杰, 付乐兵, 魏俊浩, 等, 2016. 东昆仑沟里地区晚奥陶世花岗闪长岩地球化学特征及其对原特提斯洋演化的制约. 地球科学, 41 (11): 1863—1882.

tions of transition elements such as Cr and Ni are low. The ratios of Sr/Y (average of 55) are relatively high. All the samples have high initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ values (0.705 9–0.706 3) and $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ (+5.4 to +9.2), but with relatively low $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ (−4.1 to −1.9) and old two stage model age ($T_{2\text{DM}}\text{Nd}=1.3\text{--}1.5\text{ Ga}$). In combination with the lithology, geochemical signature and isotopic compositions of the intrusion, we propose that the Aowade granodiorite was derived from melting of the subducted oceanic crust with minor involvement of continent crust. The possible residual of the source region is garnet amphibolite. Fractional crystallization of pyroxene, amphibole and plagioclase may have also occurred during the evolution of magma. Integrating evidences from the geodynamic setting of the Aowade granodiorite, the ophiolites in the Kunzhong structure zone, and the metamorphic rocks, arc-related igneous rocks on either side of the Kunzhong structure zone, it is concluded that the Aowade granodiorite was formed during the subduction of Proto-Tethys Ocean, which further reveals the nature of bidirectional subduction of the Proto-Tethys in the Late Ordovician.

Key words: low-Mg adakitic granodiorite; Late Ordovician; Kunzhong suture belt; Proto-Tethys Ocean; bidirectional subduction; eastern Kunlun; geochemistry.

东昆仑造山带位于青藏高原北缘、柴达木盆地以南,该区主要经历了与晚元古—早古生代原特提斯洋和晚古生代—三叠纪古特提斯洋演化相关的两期造山旋回(Matte *et al.*, 1996; Mattern *et al.*, 1996; 莫宣学等, 2007; Chen *et al.*, 2008; 李瑞保等, 2015). 以昆中断裂带(昆中缝合带)和昆南断裂带(布青山蛇绿混杂岩带)为界,可将东昆仑造山带由北向南划分为 3 个构造单元,即昆北地体、昆南地体和巴颜喀拉地体(图 1a; 许志琴, 2007). 昆中缝合带和昆南缝合带分别代表了原特提斯洋和古特提斯洋的闭合边界,其中与晚期古特提斯洋演化相关的岩浆岩在区域上大面积出露,研究成果较为丰富. 昆南缝合带内德尔尼(345 Ma; Chen *et al.*, 2001; 陈亮等, 2003)和哈尔郭勒(333 Ma; 刘战庆等, 2011)两处蛇绿岩的出现代表了古特提斯洋在早石炭世打开,而中晚二叠世到早三叠世东昆仑地区广泛出露与火山弧相关的中酸性侵入岩和镁铁质岩墙群则是古特提斯洋北向俯冲的产物(孙雨等, 2009; 熊富浩等, 2011; Xiong *et al.*, 2012; 张刚, 2012; 熊富浩, 2014),中晚三叠世区域上大面积出露与碰撞和后碰撞伸展环境相关的中酸性侵入岩则进一步指示古特提斯洋已经闭合,东昆仑地区进入了碰撞造山阶段(陈国超等, 2013; 李佐臣等, 2013; 王冠等, 2014; 夏锐等, 2014; 许庆林等, 2014; 刘金龙等, 2015; Xiong *et al.*, 2016).

但是,东昆仑地区更早阶段原特提斯洋的演化过程研究目前仍显得较为薄弱. 关于原特提斯洋的闭合时限,前人的观点基本一致,认为其在早中泥盆世时期已完成俯冲过程并进入陆内碰撞造山阶段(龙晓平, 2004; 湛宏伟等, 2006; 赵振明等, 2008; Xiong *et al.*, 2012; 刘彬等, 2013a),然而有关该古大洋的俯冲时限以及俯冲极性还存在较大争议. Yang *et al.* (1996)通过研究昆中断裂带中的清水泉蛇绿岩($518\pm 3\text{ Ma}$)及其西部的万宝沟枕状玄武岩

(684 Ma)认为,古元古代东昆仑西部先开始裂解导致万宝沟枕状玄武岩喷发,清水泉蛇绿岩形成于原特提斯洋俯冲阶段,同时结合昆中断裂带以北早古生代花岗岩的出现,认为原特提斯洋应为北向俯冲. Chen *et al.* (2002)通过对昆中断裂带以北地区(图 1a)约 448 Ma 岛弧火山岩的研究,进一步确定了原特提斯洋北向俯冲的存在. 高晓峰等(2010)、刘彬(2011)以及 Meng *et al.* (2013)对昆北地体内早古生代中酸性岩、镁铁质岩和变质岩分别进行的研究则进一步将原特提斯洋的北向俯冲限定为 451 ~ 436 Ma. 但殷鸿福等(2000)则认为,晚元古—早古生代昆中洋(原特提斯洋的一部分)的消减应为南北双向俯冲. 陈有炘等(2014)对昆南地体纳赤台群变质火山岩(474 Ma)的研究表明该套火山岩可能形成于原特提斯洋相关的拉张弧后盆地环境. 刘彬等(2013b)报道的昆南地体内与俯冲相关的镁铁质岩(438 Ma)可能是原特提斯洋南向俯冲晚阶段的产物. 因此,原特提斯在奥陶—志留纪确实存在北向俯冲,但其是否同时存在南向俯冲还缺乏确凿证据.

具有高 Sr 及低 Y、Yb 元素含量的埃达克岩(埃达克质岩)是近些年的研究热点,其最初被解释为起源于年轻的($< 25\text{ Ma}$)、热的俯冲洋壳部分熔融(Defant and Drummond, 1990). 基于这一成因模型,学者们认为这类岩石可能产出于洋壳俯冲这一动力学过程. 但近些年的研究表明,这类岩石可以有多种成因模式,包括加厚下地壳熔融(王强等, 2001)、拆沉下地壳熔融(Gao *et al.*, 2004)、底侵玄武质下地壳熔融(Atherton and Petford, 1993)、玄武质岩浆高压分异(Castillo *et al.*, 1999)等. 这意味着该类岩石成因复杂,成岩构造环境多样,既可以形成于俯冲环境、碰撞造山过程,也可以形成于活动板块边缘,产出于板内环境. 不同成因模式、不同构造

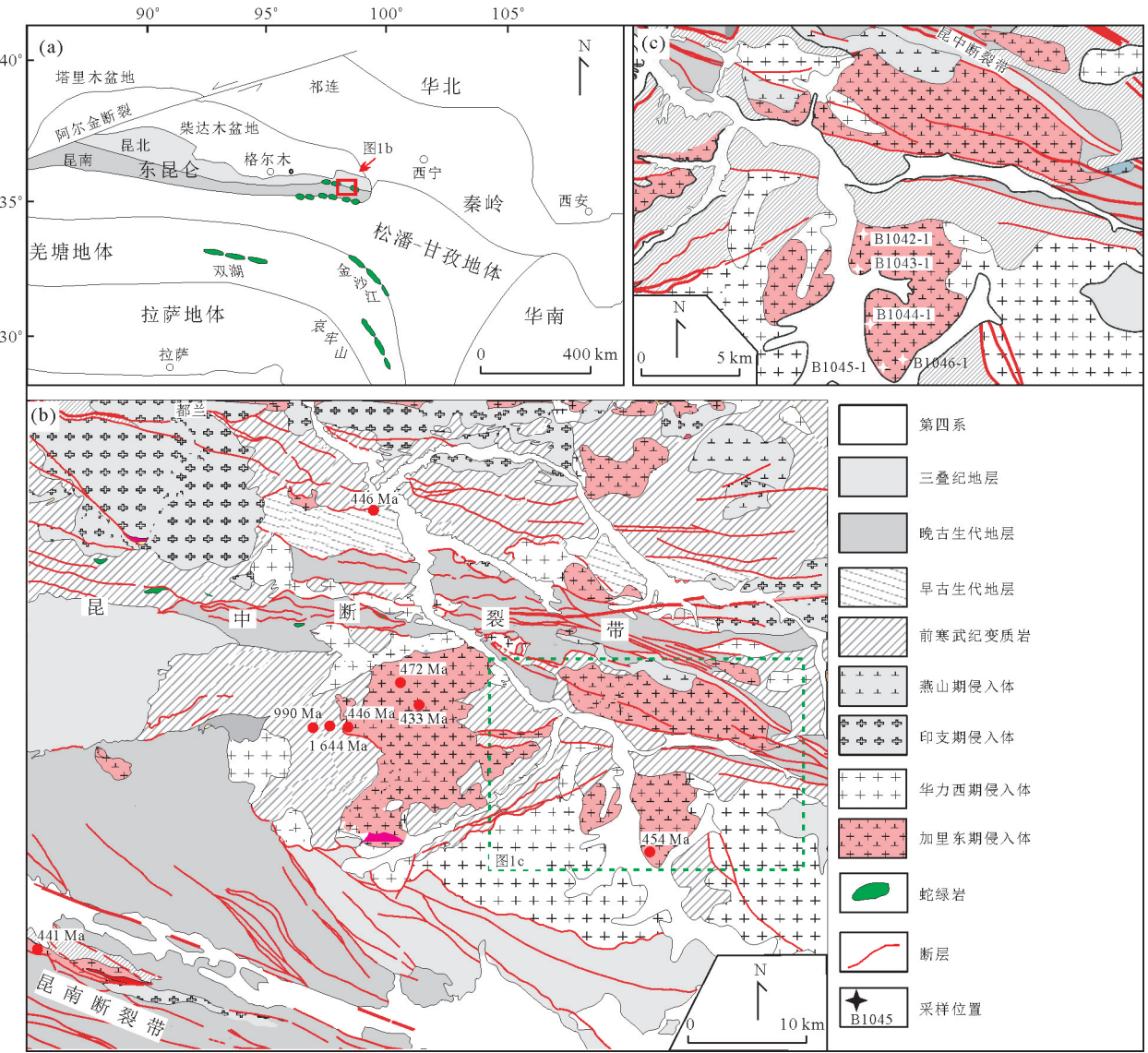


图 1 (a)东昆仑构造位置、(b)沟里地区地质简图和(c)敖注得岩体地质简图

Fig.1 Geotectonic framework of the East Kunlun orogenic belt (a), geological map of the Gouli area (b) and simplified geological map of the Aowade pluton (c)

图中年龄均为锆石 U-Pb 年龄,数据据殷鸿福等(2000)及本文测试;a.据 Xu *et al.*(2001);b.修编自殷鸿福等(2000)

环境下形成的埃达克质岩除了具备高 Sr 低 Yb、Y 的共性特征外(源区可能为榴辉岩相或含石榴子石角闪岩相岩石),尚有许多其他的差异,如岩石组合、微量元素、Mg[#]、Sr-Nd 同位素等方面(王强等, 2008),而这些差异是笔者追踪岩浆源区、判别成岩构造背景的重要参数.本文选择东昆仑东段沟里地区昆中缝合带南侧敖注得埃达克质花岗闪长岩为研究对象,开展详细的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学、元素地球化学和同位素地球化学研究,探讨岩石成因及成岩构造背景,为原特提斯洋的俯冲极性及其演化过程提供限定.

1 地质背景及岩石学特征

东昆仑造山带由北向南划分为昆北地体、昆南地体和巴颜喀拉地体 3 个构造单元.其中,北部的昆北地体位于昆中断裂带以北,该地体内大面积出露前寒武纪金水口群变质基底及加里东期—印支期岩浆岩.金水口群主要为一套古老的角闪岩相—麻粒岩相深变质岩系,由强烈变形的斜长角闪岩、片麻岩、片岩、大理岩所组成.对金水口地区该群麻粒岩的研究表明麻粒岩原岩形成于 817 Ma,后期经历了前寒武纪(621 Ma; 龙晓平, 2004)和早古生代(460 Ma)两期麻粒岩相变质事件,此后经历了与造

山后伸展相关的深熔事件(402 Ma; 张建新等, 2003). 该地体内广泛发育加里东期—印支期中酸性侵入岩, 另可见少量镁铁质岩和基性岩墙群(崔美慧等, 2011; 孟繁聪等, 2013; 李希等, 2014). 南部的巴颜喀拉地体位于昆南断裂以南, 主要出露二叠纪布青山群和三叠纪巴颜喀拉山群, 布青山群以浅海相碳酸盐岩、碎屑岩为主, 巴颜喀拉山群主要为一套斜坡相和盆地相的碎屑岩和浊积岩.

昆南地体位于北部的昆中断裂与南部的昆南断裂之间, 其基底主要由中元古代苦海中高级变质杂岩组成, 岩性复杂, 包括片岩、片麻岩、斜长角闪岩、变粒岩等, 对其变粒岩进行的锆石 U-Pb 年代学研究获得上交点年龄为 1 644 Ma, 代表了岩石形成的时间下限. 另外, 该地体内还大量出露中元古代万宝沟群和早古生代纳赤台群浅变质岩系, 万宝沟群以岩片产出, 主要为碳酸盐岩片、复理石岩片和玄武岩岩片, 纳赤台群则为一套复理石火山岩岩片. 区内盖层以晚古生代和三叠纪滨—浅海相碎屑岩、灰岩、火山岩为主, 同时可见加里东期、印支期及少量华力西期中酸性侵入岩分布(图 1b; 殷鸿福等, 2000). 本文研究对象敖洼得岩体位于昆南地体东端, 区内主要出露苦海变质杂岩、晚古生代灰岩、碎屑岩和加里东期—海西期侵入体(图 1c). 加里东期岩体主要为花岗闪长岩、二长闪长岩, 成岩年龄为 433~472 Ma(图 1c), 海西期侵入体主要为二长花岗岩、花岗闪长岩.

敖洼得岩体位于昆南地体内, 侵位于苦海变质杂岩中, 出露面积约为 36 km². 岩石岩性单一, 为灰白色花岗闪长岩, 呈花岗结构, 弱定向—块状构造, 主要由斜长石(30%~40%)、碱性长石(20%~30%)、石英(20%~25%)、黑云母(5%~8%)、角闪石(3%~5%)等矿物组成, 含少量锆石、磷灰石、榍石等副矿物. 斜长石灰白色, 可见聚片双晶, 部分发育环带结构, 半自形, 粒径为 0.5~2.5 mm, 表面泥化、绢云母化, 局部可见补片状钾长石(图 2a); 碱性长石见简单双晶、格子双晶, 多为条纹长石和微斜长石, 半自形—他形, 粒径 0.5~2.5 mm, 局部包裹黑云母(图 2b, 2c); 石英多为他形, 粒径为 0.2~3.0 mm; 黑云母为深褐色, 半自形, 粒径多为 0.4~2.0 mm, 表面见绿泥石化(图 2c); 角闪石为黄绿色, 可见两组明显的解理, 局部可见简单双晶, 多为半自形—自形, 粒径为 0.5~1.0 mm(图 2d).

2 测试方法

2.1 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年和 Hf 同位素分析
用于锆石 LA-ICP-MS 定年的样品采自未风化的新鲜露头(B1045-1), 采样位置如图 1c 所示(35°28'50"N, 98°35'32"E). 样品的破碎挑选由河北省区域地质调查研究所完成, 分选过程遵循标准程序, 经破碎、重磁分选之后, 在双目镜下选择晶型完好并且

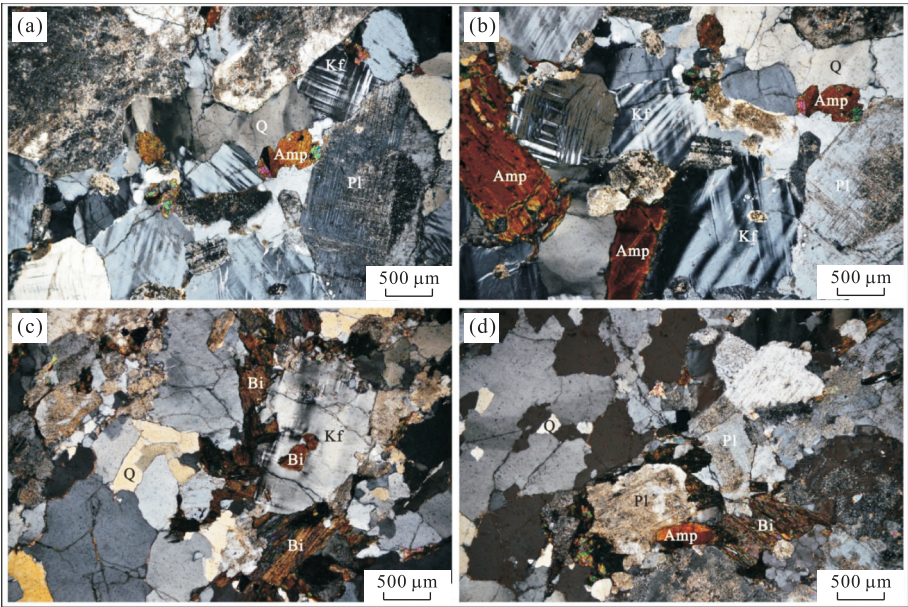


图 2 沟里地区敖洼得花岗闪长岩镜下照片(正交偏光)

Fig.2 Microphotographs of Aowade granodiorite from Gouli area
Pl.斜长石; Kf.钾长石; Amp.角闪石; Bi.黑云母; Q.石英

纯净透明的锆石制靶.制靶之后磨蚀至锆石核部出露,并进行透射光、反射光和阴极发光(CL)照相.

锆石原位微区 U-Pb 同位素测试利用中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室(GPMR)激光剥蚀等离子质谱仪(LA-ICP-MS)完成.激光剥蚀系统为 GeoLas2005, ICP-MS 为 Agilent 7500a.选取无裂隙、无包裹体的锆石,并在环带清晰的部位布点,激光束斑直径为 32 μm ,实验过程中用 He 气作为载气.测试过程中选用 91500 作为内标对 U-Th-Pb 同位素进行校正,并选用 GJ-1 作为监测样.选用 NIST610 作为外标, ^{29}Si 作为内标进行微量元素校正计算,详细的分析流程及仪器参数参见 Liu *et al.*(2010).锆石年龄数据及微量元素数据处理采用 ICPMSDataCal 9.5 软件完成.U-Pb 年龄协和图和加权平均年龄的计算采用 Isoplot 3 软件(Ludwig,2012).

锆石 Hf 同位素分析在 GRMR 采用 LA-MC-ICP-MS 进行,激光剥蚀系统和质谱仪与 U-Pb 测试系统一致.Hf 同位素测试点位置与 U-Pb 测试点一致,或者在同一颗锆石相同环带内.激光束斑直径 44 μm ,详细的分析流程参照 Hu *et al.*(2012).

2.2 全岩地球化学测试

在室内详细的岩相学鉴定的基础上选取新鲜无蚀变的样品,清除其表面粉尘,粉碎至 200 目以下,然后进行主量元素、微量元素和 Sr-Nd 同位素分析.

主量元素分析采用澳实矿物实验室集团澳实分析监测(广州)有限公司 ME-XRF06 方法分析完成.分析流程如下:先称取 0.9 g 样品,然后加入 9 g $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ -

LiBO_2 助熔物充分混合后在 1 050~1 100 $^{\circ}\text{C}$ 下熔融,熔融物冷却后形成扁平玻璃片,再用 XRF 荧光光谱仪分析,相对误差小于 5%.微量和稀土元素分析在 GPMR 采用 ICP-MS 完成,分析流程为:(1)称取全岩粉末样 50 mg 置于 Telon 中;(2)用 1.5 mL HNO_3 和 1.5 mL HF 在 195 $^{\circ}\text{C}$ 条件下消解 48 h,在 120 $^{\circ}\text{C}$ 条件下蒸干除 Si;(3)加入 3 mL HNO_3 ,并在 195 $^{\circ}\text{C}$ 加热 12 h,溶液转入聚乙烯瓶中,并用 2% HNO_3 稀释至约 100 g 后,密封保存以待 ICP-MS 测试.详细的分析流程及分析精密度和准确度见文献 Liu *et al.*(2008).

全岩 Sr-Nd 同位素分析在 GPMR 采用 Triton-TI 型热电离同位素质谱仪完成,分析流程如下:(1)将全岩粉末样置于 Teflon 坩埚中用 HNO_3 -HF 在 195 $^{\circ}\text{C}$ 条件下溶解 48 h,蒸干后加入 1 mL HCl;(2)用 AG50X8 阳离子交换树脂分离 Rb 和 Sr,用 HDEHP 萃淋树脂分离 Sm 和 Nd,以待测试.Sr、Nd 同位素的质量分馏用 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr}=0.119\ 4$ 和 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.721\ 9$ 进行校正.Sr-Nd 同位素分析采用 NBS987 和 JNdi-1 进行标准化,本次分析过程中标样 NBS987 的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 测试结果为 $0.710\ 271\pm\ 8$,标样 JNdi-1 的分析结果为 $0.512\ 115\pm\ 6$,详细的测试流程和分析方法参照文献 Cao *et al.*(2004).

3 分析结果

3.1 锆石 U-Pb 年代学

花岗闪长岩中典型锆石的 CL 图像、U-Pb 测试

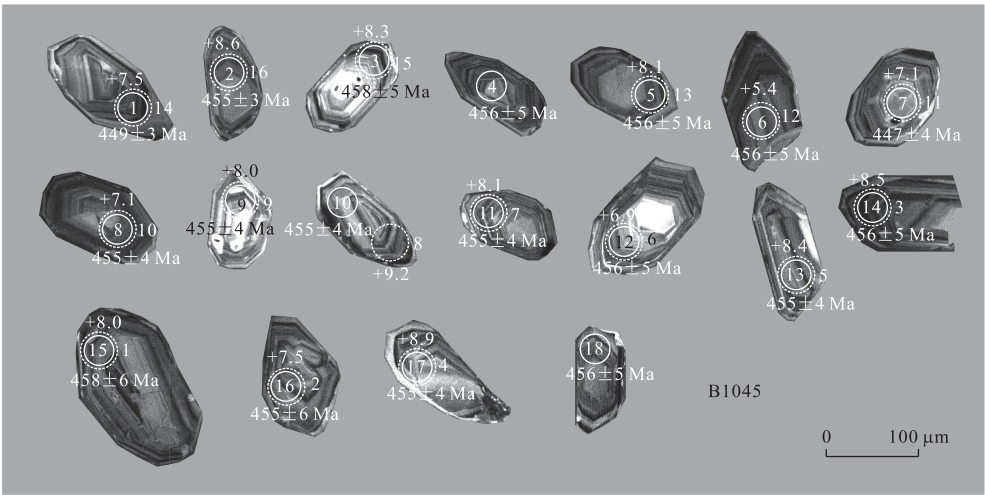


图 3 敖汪得花岗闪长岩样品(B1045-1)典型锆石 CL 图

Fig.3 Cathodoluminescence images for zircons of sample B1045-1
实线圈和虚线圈分别代表 U-Pb 和 Hf 同位素分析测试点

表 1 沟里地区敖洼得花岗岩长岩(BI045)锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年分析数据

Table 1 Zircon LA-ICP-MS U-Pb data of the Aowade granodiorite sample (BI045) from Gouli area

点号	²³² Th (10 ⁻⁶)	²³⁸ U (10 ⁻⁶)	Th/U	同位素比值				年龄(Ma)			
				²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	±σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	±σ	²⁰⁸ Pb/ ²³⁸ U	±σ	²⁰⁸ Pb/ ²³⁵ U	±σ
BI045-1-1	840	880	0.95	0.056 5	0.001 3	0.565 2	0.012 7	0.072 2	0.000 5	0.022 0	0.000 3
BI045-1-2	396	540	0.73	0.056 0	0.001 3	0.566 0	0.013 1	0.073 1	0.000 5	0.022 2	0.000 4
BI045-1-3	470	630	0.75	0.056 4	0.001 5	0.576 8	0.016 8	0.073 7	0.000 8	0.024 4	0.000 6
BI045-1-4	149	342	0.44	0.060 9	0.001 7	0.616 9	0.018 0	0.073 3	0.000 7	0.023 6	0.000 6
BI045-1-5	277	545	0.51	0.055 5	0.001 5	0.562 9	0.014 9	0.073 3	0.000 8	0.023 0	0.000 5
BI045-1-6	76	203	0.37	0.053 6	0.002 1	0.545 5	0.021 7	0.073 2	0.000 8	0.021 2	0.000 6
BI045-1-7	511	629	0.81	0.066 0	0.001 8	0.657 3	0.018 9	0.071 8	0.000 7	0.022 5	0.000 5
BI045-1-8	47	374	0.13	0.054 7	0.001 6	0.555 6	0.016 4	0.073 2	0.000 7	0.025 8	0.000 9
BI045-1-9	375	545	0.69	0.066 9	0.001 5	0.680 5	0.016 5	0.073 2	0.000 7	0.025 5	0.000 5
BI045-1-10	351	565	0.62	0.058 4	0.001 3	0.591 1	0.012 9	0.073 2	0.000 6	0.023 3	0.000 4
BI045-1-11	190	362	0.53	0.055 7	0.001 5	0.563 5	0.015 3	0.073 1	0.000 6	0.022 7	0.000 5
BI045-1-12	121	238	0.51	0.055 5	0.001 9	0.559 9	0.019 2	0.073 2	0.000 9	0.025 2	0.000 7
BI045-1-13	309	527	0.59	0.059 5	0.001 5	0.603 2	0.015 2	0.073 2	0.000 6	0.023 2	0.000 5
BI045-1-14	183	413	0.44	0.056 6	0.001 5	0.575 0	0.015 5	0.073 4	0.000 8	0.023 4	0.000 5
BI045-1-15	192	428	0.45	0.061 7	0.001 9	0.633 2	0.022 2	0.073 7	0.001 0	0.024 9	0.000 8
BI045-1-16	218	408	0.53	0.056 7	0.001 6	0.572 7	0.015 6	0.073 2	0.001 0	0.022 7	0.000 5
BI045-1-17	191	393	0.49	0.060 9	0.001 7	0.616 1	0.017 5	0.073 2	0.000 7	0.024 9	0.000 6
BI045-1-18	215	469	0.46	0.054 8	0.001 3	0.557 5	0.014 1	0.073 3	0.000 8	0.022 6	0.000 5

表 2 沟里地区敖洼得花岗岩长岩(BI045)锆石微量元素分析数据(10⁻⁶)

Table 2 Zircon LA-ICP-MS trace elements (10⁻⁶) data of the Aowade granodiorite sample (BI045) from Gouli area

点号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	Hf	Ta	Ti	Nb	Eu/Eu*
BI045-1-1	0.76	217.9	0.83	11.66	25.8	7.13	155.5	49.0	568	196	837	160	1 572	267	6 358	25 580	4.50	11.8	21.11	0.27
BI045-1-2	5.24	82.6	1.30	9.22	12.9	4.20	67.3	23.2	275	100	468	97	1 019	188	3 475	26 759	2.41	3.7	8.99	0.35
BI045-1-3	11.84	81.7	3.57	17.59	8.6	2.69	41.0	13.2	158	55	260	55	585	109	1 905	30 811	2.56	6.8	6.55	0.36
BI045-1-4	1.15	37.5	0.52	2.73	4.0	1.73	24.7	9.0	102	39	191	41	444	85	1 368	30 358	1.66	13.0	4.39	0.41
BI045-1-5	0.66	72.0	0.63	6.56	8.7	2.98	56.9	19.3	235	87	420	87	941	173	3 004	30 301	3.51	6.1	11.37	0.31
BI045-1-6	0.14	27.4	0.00	0.87	2.7	0.72	17.3	6.5	85	33	169	38	429	85	1 192	39 140	1.36	4.9	3.24	0.24
BI045-1-7	4.48	118.4	3.65	28.41	22.7	4.67	75.1	23.8	279	104	494	101	1 096	202	3 587	29 690	3.57	20.5	14.78	0.31
BI045-1-8	0.02	22.9	0.05	0.53	1.7	0.88	16.3	5.3	81	36	200	46	541	107	1 317	31 009	2.37	10.7	6.02	0.34
BI045-1-9	27.79	172.1	16.53	99.35	44.7	8.34	71.8	15.9	175	61	285	59	631	116	2 096	30 022	2.75	1.9	8.27	0.45
BI045-1-10	51.58	207.6	20.16	112.57	35.0	8.12	79.2	20.8	233	84	390	81	871	158	2 846	29 790	3.04	11.5	10.62	0.46
BI045-1-11	1.24	49.3	0.51	4.16	7.1	2.51	38.5	13.5	168	63	308	65	725	136	2 204	27 639	1.90	8.3	6.30	0.37
BI045-1-12	1.71	53.5	0.40	3.75	4.9	2.41	36.3	12.0	152	58	281	61	680	128	2 012	27 165	2.92	26.4	8.71	0.40
BI045-1-13	26.26	139.8	9.71	51.73	21.5	4.40	66.7	19.4	237	86	409	85	900	163	2 968	32 423	3.30	111.1	14.28	0.33
BI045-1-14	9.26	89.0	5.17	32.60	18.4	3.67	48.7	14.0	174	66	321	67	734	138	2 281	30 574	2.46	5.3	9.00	0.35
BI045-1-15	12.59	70.0	3.33	16.08	7.1	1.83	33.4	10.5	136	50	242	52	566	105	1 727	30 786	2.73	12.1	8.55	0.30
BI045-1-16	18.81	95.9	5.61	26.27	11.1	2.73	41.4	12.4	154	55	255	53	573	105	1 897	28 803	2.39	10.1	7.51	0.34
BI045-1-17	4.59	60.8	1.64	8.44	7.7	2.05	45.2	15.0	186	68	327	69	737	137	2 375	29 591	2.56	3123.0	14.72	0.26
BI045-1-18	3.31	56.5	1.10	5.25	6.1	1.80	34.7	12.3	156	61	297	64	713	137	2 127	33 711	2.97	13.6	9.46	0.30

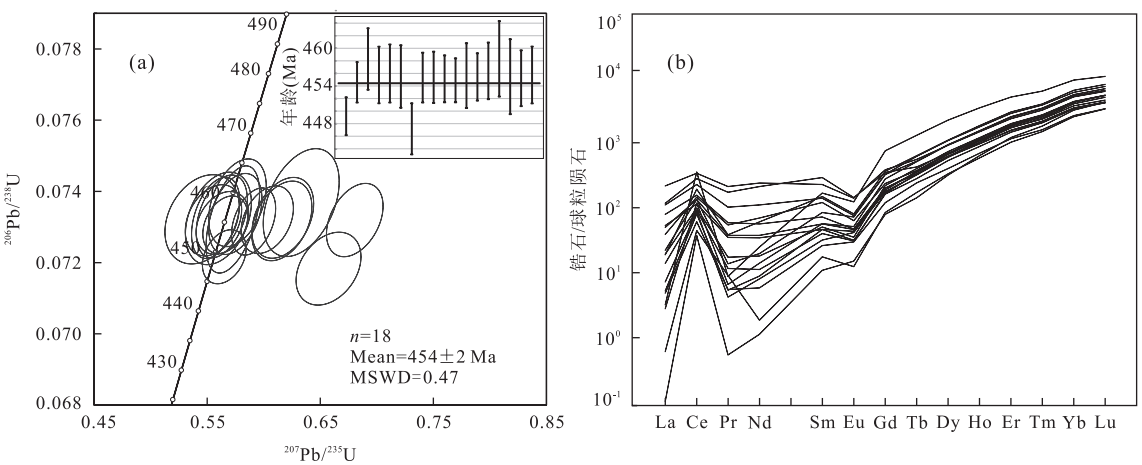


图 4 敖汪得花岗闪长岩样品(B1045-1)U-Pb 协和图(a)和锆石稀土元素球粒陨石标准化配分图(b)

Fig.4 Zircon U-Pb concordia diagram of sample B1045-1 of Aowade granodiorite (a) and chondrite normalized REE patterns for zircons (b)

球粒陨石数据据 Sun and McDonough(1989)

点位和相应年龄结果见图 3。锆石为无色—淡黄色，呈自形—半自形椭圆状，长轴为 100~250 μm，长宽比为 1.5 : 1~3 : 1，阴极发光显示明显振荡环带，指示其岩浆成因。18 颗锆石内 18 个测点的 U-Pb 同位素和微量元素测试结果列于表 1 和表 2 中。锆石的 Th 和 U 含量分别为 $47\times10^{-6}\sim840\times10^{-6}$ ， $203\times10^{-6}\sim880\times10^{-6}$ ，Th/U 为 0.13~0.93，与岩浆成因锆石的 Th/U 一致 (>0.1 ; Griffin *et al.*, 2004)。锆石轻重稀土分异明显，相对富集重稀土元素，具有明显的 Ce 正异常和 Eu 弱负异常(图 4b)，表明锆石为典型的岩浆锆石。在锆石 U-Pb 协和图上(图 4a)，数据点均落在协和线上或其附近，单颗粒锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于 447~458 Ma，其加权平均年龄为 454 ± 2 Ma (MSWD=0.5)。该年龄代表了花岗闪长岩的结晶年龄，表明岩体为晚奥陶世岩浆活动的产物。

3.2 元素地球化学

全岩主量和微量测试数据列于表 3。样品 SiO₂ 含量变化于 67.80%~70.40%，K₂O+Na₂O 为 6.33%~7.53%，K₂O/Na₂O 为 0.4~1.1。在 TAS 岩石分类图解上样品点主要集中在花岗闪长岩区域(图 5a)，图 5b 指示岩石属钙碱性系列—高钾钙碱性系列。样品 Fe₂O₃^T 含量较低(2.57%~3.01%)，MgO 含量变化于 0.83%~1.12%，Mg[#] 变化于 39~43。样品 Al₂O₃ 含量为 14.85%~16.45%，CaO 含量为 2.41%~3.46%，A/CNK 为 1.00~1.03，显示弱过铝质 I 型花岗岩特征(图 5c)。在岩石哈克图解中 MgO、Al₂O₃、Fe₂O₃^T、Na₂O、TiO₂、P₂O₅、CaO 与

SiO₂ 大致呈反比关系，而 K₂O 与 SiO₂ 呈弱的正比关系(图 6)，指示可能存在角闪石、斜长石和磷灰石等的分离结晶。

岩体稀土元素(ΣREE)总量较高，含量介于 $98.7\times10^{-6}\sim198.0\times10^{-6}$ 。图 7a 中，曲线呈明显右倾，轻重稀土分异较明显。岩石 (La/Yb)_N 介于 17~46，图 5d 中 3 个样品落在埃达克岩范围，1 个样品落在埃达克岩与正常岛弧岩浆岩之间，1 个样品点落在正常岛弧岩浆岩靠近埃达克岩位置，整体显示埃达克质岩的特征。岩石 Eu/Eu* 为 0.60~0.96，显示中等至弱的 Eu 负异常。微量元素显示岩石富集大离子亲石元素(LILE、Rb、Ba、K、La、Sr)，相对亏损高场强元素(HFSE、Nb、Ta、P、Ti)。相容元素 Co 的含量较高，介于 $20.28\times10^{-6}\sim78.37\times10^{-6}$ ；Ni 的含量较低，介于 $2.69\times10^{-6}\sim4.50\times10^{-6}$ ，在图 7 中，曲线总体呈右倾，强烈富集 Pb。总体上，敖汪得岩体地球化学特征与东昆仑地区同时代埃达克质花岗岩及正常岛弧花岗岩过渡的趋势。

3.3 Sr-Nd-Hf 同位素地球化学

敖汪得花岗闪长岩 Sr-Nd 同位素测试结果列于表 4，其中 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值介于 0.707 565~0.713 960，($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 介于 0.705 889~0.706 264， $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值介于 0.512 166~0.512 259，ε_{Nd}(t)变化于 -4.1~-1.9，对应的二阶段模式年龄为 1 339~1 518 Ma，同前寒武纪基底变质岩的年龄一致。

锆石 Hf 同位素分析结果见表 5， $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比

表 3 沟里地区敖洼得花岗闪长岩主量元素(%)、微量元素和稀土元素(10^{-6})分析结果

Table 3 Major elements (%), trace elements and rare earth elements (10^{-6}) data of Aowade granodiorite from Gouli area

样号	B1042-1	B1043-1	B1044-1	B1045-1	B1046-1
SiO ₂	70.40	68.30	67.80	68.80	69.10
Al ₂ O ₃	14.85	15.45	16.45	15.95	15.50
Fe ₂ O ₃	2.57	2.85	3.01	2.71	2.73
MgO	0.83	0.98	1.12	1.00	1.02
CaO	2.41	3.04	3.46	3.39	3.07
Na ₂ O	3.61	3.98	4.67	4.61	4.29
K ₂ O	3.92	3.11	2.10	1.72	2.24
TiO ₂	0.35	0.41	0.43	0.37	0.39
P ₂ O ₅	0.10	0.13	0.16	0.13	0.13
MnO	0.04	0.05	0.05	0.04	0.04
BaO	0.11	0.08	0.08	0.08	0.14
Total	100.00	99.38	100.20	99.74	99.81
LOI	0.70	0.91	0.78	0.82	1.05
Na ₂ O/K ₂ O	0.92	1.28	2.22	2.68	1.92
Na ₂ O+K ₂ O	7.53	7.09	6.77	6.33	6.53
A/CNK	1.02	1.00	1.01	1.02	1.03
Mg [#]	39.00	41.00	43.00	42.00	43.00
Li	29.81	17.58	10.23	7.40	20.33
Be	1.37	1.39	1.30	1.17	1.07
Sc	4.83	6.54	1.62	2.30	3.34
V	32.20	43.79	38.44	34.91	36.56
Cr	6.59	5.17	6.09	6.60	7.51
Co	54.26	78.37	20.28	51.59	37.80
Ni	2.86	2.69	3.56	4.39	4.50
Cu	2.65	1.72	2.73	4.00	1.19
Zn	50.97	51.07	55.44	52.81	57.53
Ga	17.44	17.42	16.05	16.50	16.44
Rb	119.89	96.02	40.69	45.65	70.36
Sr	291.96	339.82	509.43	560.59	536.89
Y	18.68	15.21	5.48	6.68	9.19
Zr	179.94	186.81	169.19	141.07	196.52
Nb	18.45	15.46	10.51	9.74	10.47
Sn	1.86	1.64	0.81	0.78	1.25
Cs	1.57	1.50	1.71	1.10	2.64
Ba	952.01	735.43	668.52	712.45	1194.43
La	49.35	33.49	31.34	25.23	40.54
Ce	89.05	60.50	50.98	44.81	67.90
Pr	8.95	6.21	5.24	4.45	6.67
Nd	31.36	22.74	17.98	15.78	23.02
Sm	5.61	4.20	2.71	2.65	3.88
Eu	0.79	0.75	0.72	0.71	0.92
Gd	4.20	3.29	1.68	1.91	2.73
Tb	0.60	0.49	0.22	0.25	0.37
Dy	3.43	2.89	1.15	1.35	1.87
Ho	0.65	0.56	0.20	0.23	0.33
Er	1.84	1.48	0.49	0.60	0.88
Tm	0.26	0.21	0.07	0.09	0.12
Yb	1.65	1.38	0.49	0.58	0.75
Lu	0.24	0.21	0.08	0.08	0.10
Hf	4.63	4.74	4.04	3.40	4.65
Ta	1.25	1.21	0.57	0.75	0.83
Tl	0.73	0.64	0.41	0.32	0.45
Pb	25.52	23.40	17.80	15.14	15.54
Th	13.18	8.79	7.40	7.13	9.54
U	1.61	1.65	1.50	0.95	1.27
REE	197.99	138.40	113.35	98.72	150.08
(La/Yb) _N	21.52	17.36	45.97	31.40	38.63
δEu	0.48	0.60	0.96	0.92	0.82

注: LOI, 烧失量; Mg[#] = mole[Mg/(Ma + Fe) × 100]; A/CNK = mole [Al₂O₃/(CaO + Na₂O + K₂O)].

值变化于 0.000 531~0.001 055, ¹⁷⁶Yb/¹⁷⁷Hf 比值介于 0.012 156~0.024 713, ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 比值变化于

0.282 645~0.282 755, ε_{Hf}(*t*) 相对较高, 变化范围为 +5.4~+9.2, 对应的二阶段模式年龄为 800~1 100 Ma.

4 讨论

4.1 岩石成因

敖洼得花岗闪长岩具有较低的 Mg[#] (39~43), 中等 Al₂O₃ 含量及较高的 CaO 含量, 为高钾钙碱性—钙碱性弱过铝质岩石. 岩体富集 Rb、Ba、K、Pb 等大离子亲石元素, 相对亏损 Nb、Ta、P、Ti 等高场强元素, 显示较高的 Sr/Yb (16~93) 和 (La/Yb)_N (17~46) 比值, 具有俯冲带埃达克质岩浆岩的地球化学特征 (Defant and Drummond, 1990). 综合来看, 敖洼得岩体属于低 Mg[#] 埃达克质岩石, 其深部岩浆过程可能有如下几种模型: (1) 俯冲洋壳部分熔融 (Defant and Drummond, 1990; Rapp *et al.*, 1999); (2) 加厚下地壳部分熔融 (Atherton and Petford, 1993; Chung *et al.*, 2003); (3) 拆沉下地壳熔融 (Xu *et al.*, 2002; Gao *et al.*, 2004); (4) 俯冲板片脱水诱发地幔楔部分熔融 (Crawford *et al.*, 1989; Tatsumi, 1995); (5) 俯冲沉积物部分熔融形成的富硅质熔体与地幔楔反应 (Tatsumi, 2001; Tatsumi and Hanyu, 2003).

加厚下地壳部分熔融形成的岩浆通常具有高 SiO₂、低 MgO 和 Mg[#] 等特征, 并常见继承锆石或者下地壳包体, 其源区残留为麻粒岩相—榴辉岩相时, 熔体还具有高 Sr、低 Y、高 Sr/Y 和 (La/Yb)_N 比值等特征 (Chung *et al.*, 2003). 敖洼得花岗闪长岩虽然具有较高的 SiO₂ 含量、较低的 MgO 含量和 Mg[#] 以及高 Sr 和低 Y 等特征, 但是野外观察并未见到岩体中存在具有变质、变形特征的壳源包体, 锆石显微观察及 U-Pb 定年也未发现明显的继承锆石, 这些都与典型的下地壳部分熔融来源的岩石特征不一致. Sr-Nd 同位素方面, 敖洼得花岗闪长岩具有相对更低的初始锶比值 (0.703 240~0.706 264) 及更高的 ε_{Nd}(*t*) (−4.6~−1.9), 与基底岩石明显不一致 (图 8a), 进一步排除了加厚下地壳熔融形成敖洼得岩体的成因模式. 拆沉下地壳熔融同加厚下地壳熔融类似, 其源区成分以古老地壳为主, 同时由于此过程中熔体不可避免的会与地幔橄榄岩发生反应, 这将导致熔体中 Cr、Ni、MgO 含量明显升高, 而与敖洼得花岗闪长岩中极低的 Cr (5.17 × 10^{−6}~7.51 × 10^{−6})、Ni (2.69 × 10^{−6}~4.50 × 10^{−6}) 含量和

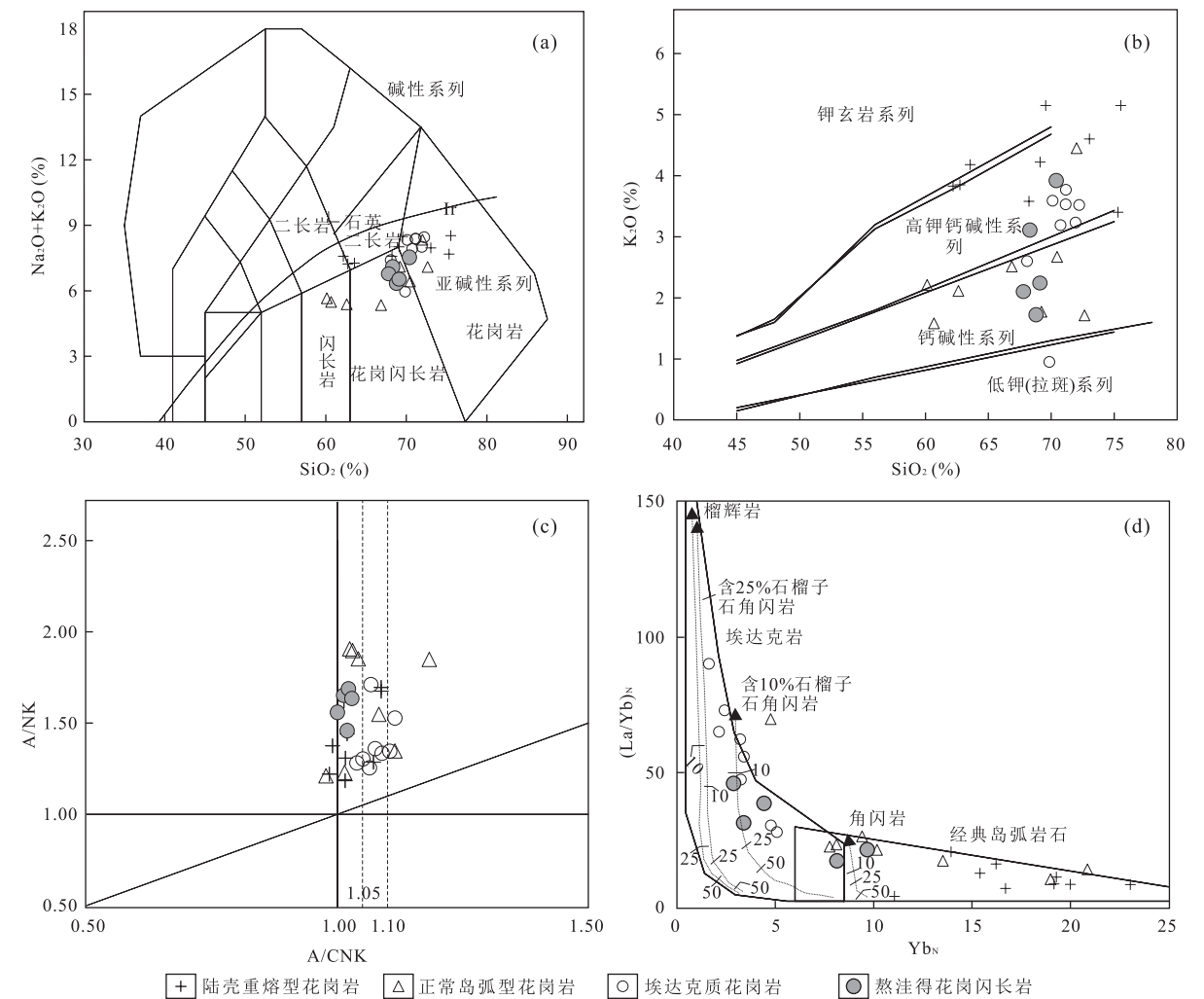


图 5 沟里地区敖洼得花岗闪长岩 (a) TAS 图解、(b) K₂O-SiO₂ 关系、(c) A/NK-A/CNK 关系和 (La/Yb)_N-Yb_N 关系
Fig.5 Major-element plots for the Aowade granodiorite from Gouli area (a) total alkalis vs. silica (TAS) diagram, (b) K₂O vs. SiO₂ diagram, (c) A/NK vs. A/CNK diagram, (d) (La/Yb)_N vs. Yb_N diagram
数据来源:东昆仑陆壳重熔型花岗岩(441 Ma;王晓霞等, 2012),东昆仑正常岛弧花岗岩(437 Ma)和板片熔融埃达克质花岗岩(436 Ma; Li *et al.*, 2015); a 图据 Wison(1989); b 图据 Rollinson(1993); c 图据 Maniar and Piccoli(1989); d 图据 Defant and Drummond(1990), 图中带小短线的虚线为部分熔融曲线

Mg[#] 明显不一致.另外,敖洼得花岗闪长岩具有较高的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ (5.4~9.2),更进一步否定了岩浆源区主体为古老地壳物质.新生的玄武质地壳熔融(Ather-ton and Petford, 1993; Zhao *et al.*, 2016)也可以形成类似敖洼得岩体的地球化学特征,但是研究区在 450 Ma 左右并没有进入造山阶段,地壳缩短加厚的程度有限,新生的玄武质地壳部分熔融难以进行;此外研究区并没有发现 450 Ma 左右的来源于软流圈的岩石记录,最早的软流圈上涌记录在 430 Ma 左右(Zhang *et al.*, 2014),明显晚于敖洼得岩体的侵位时间,因此软流圈也不可能为玄武质地壳熔融提供热能,新生玄武质地壳熔融不太可能形成敖洼得岩体.综上所述可以排除加厚下地壳及拆沉下

地壳熔融产生敖洼得岩体的可能性.

俯冲板片脱水诱发地幔楔熔融或者俯冲沉积物形成的富硅熔体与地幔楔反应产生的熔体通常含有较高的 MgO,较低的 SiO₂ 和 Al₂O₃,这与敖洼得岩体地球化学特征不一致.同时,敖洼得花岗闪长岩 Sr-Nd 同位素组成与来源于分异演化的富集地幔岩浆形成的花岗岩类(刘彬, 2011;贾儒雅, 2013)明显不一致,尤其是前者的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ (-4.6~-1.9)明显高于后者,也排除了上述可能性(图 8a).再者,俯冲带环境下流体的加入会使熔体中的 Ba/Th 比值明显增高(Elburg *et al.*, 2002),而敖洼得花岗闪长岩 Ba/Th 比值均较低(<100),进一步排除了俯冲流体的影响.因此,敖洼得岩体不可能起源于俯冲板片

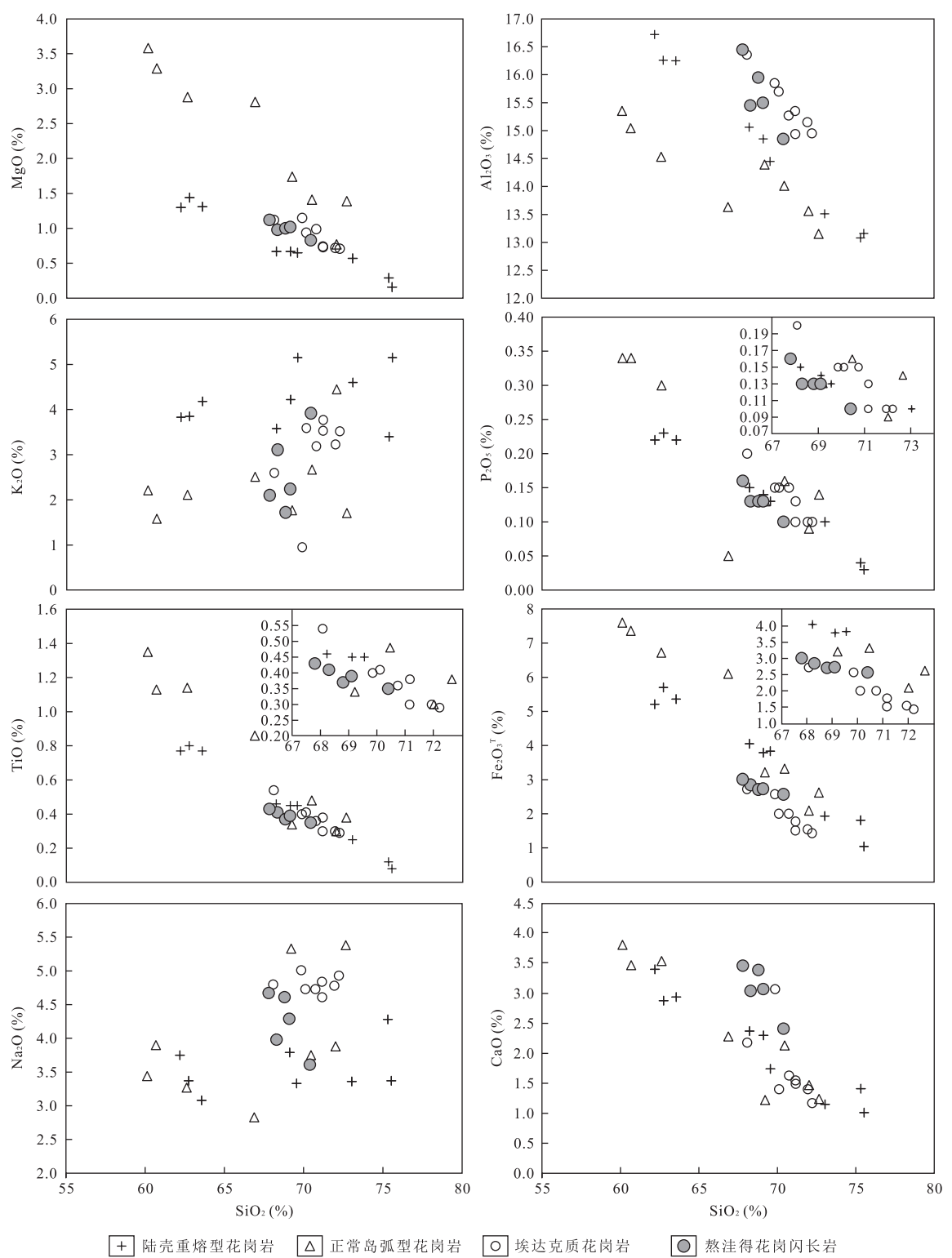


图 6 沟里地区熬洼得花岗闪长岩哈克图解

Fig.6 Harker variation diagrams showing the concentrations of major elements for the Aowade granodiorite from Gouli area and other related rocks in the East Kunlun orogenic belt
数据来源同图 5

脱水诱发的地幔楔部分熔融,也不可能来源于富硅
熔体与地幔楔反应这一过程.

排除上述成岩模型后,笔者认为熬洼得花岗闪
长岩可能是俯冲的大洋地壳部分熔融的产物,熔体

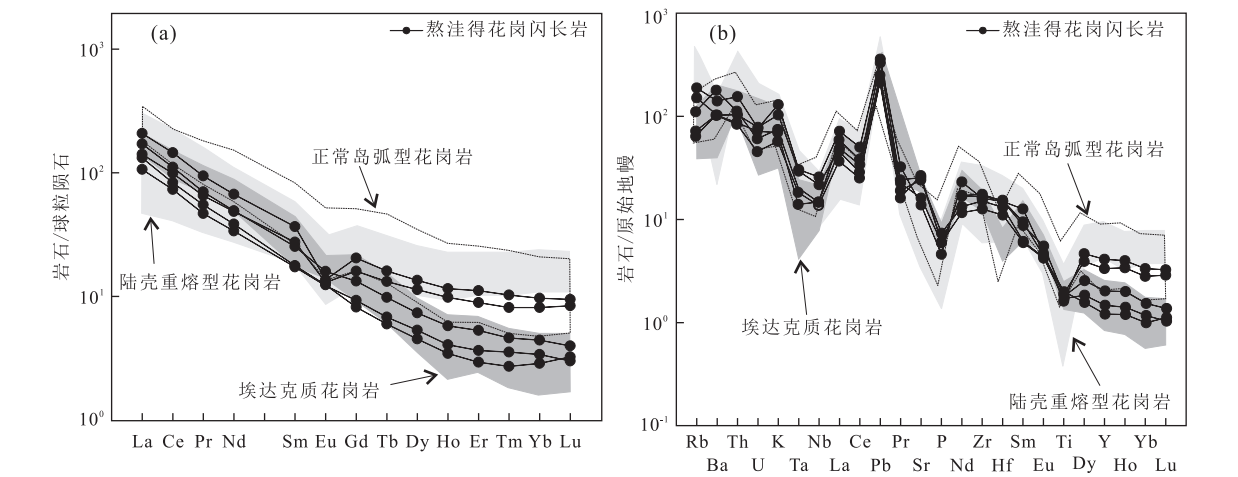


图 7 沟里地区敖洼得花岗闪长岩稀土元素配分图(a)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b)

Fig.7 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized trace elements spider diagram (b) for Aowade granodiorite from Gouli area

数据来源同图 5;球粒陨石和原始地幔标准化数据据 Sun and McDonough(1989)

表 4 沟里地区敖洼得花岗闪长岩全岩 Sr-Nd 同位素分析结果

Table 4 Sr-Nd isotopic compositions of Aowade granodiorite from Gouli area									
样品号	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	±2σ	(⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr) _i	¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	±2σ	ε _{Nd} (t)	T _{2DM} Nd(Ma)
B1042-1	1.188 8	0.713 960	0.000 006	0.706 264	0.108 1	0.512 166	0.000 003	-4.07	1 518
B1043-1	0.817 8	0.711 533	0.000 007	0.706 239	0.111 6	0.512 243	0.000 002	-2.77	1 412
B1045-1	0.235 6	0.707 565	0.000 006	0.706 040	0.101 4	0.512 259	0.000 004	-1.86	1 339
B1046-1	0.379 2	0.708 343	0.000 006	0.705 889	0.101 8	0.512 239	0.000 003	-2.28	1 373

注:ε_{Nd}(t)值计算采用(¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd)_{CHUR}=0.196 7;(¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd)_{CHUR}=0.512 638;t 代表成岩年龄(454 Ma);同位素亏损地幔模式年龄(T_{2DM})计算采用(¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd)_{DM}=0.213 7;(¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd)_{DM}=0.513 15.

表 5 敖洼得花岗闪长岩(B1045-1)锆石 Hf 同位素分析结果

Table 5 Hf isotopic data for zircon of sample B1045-1 from Aowade granodiorite										
点号	¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Yb/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf	1σ	年龄(Ma)	ε _{Hf} (0)	ε _{Hf} (t)	T _{DM}	T _{2DM} Hf	f _{Lu/Hf}
01	0.000 808	0.018 803	0.282 720	0.000 011	458	-1.8	8.0	750	867	-0.98
02	0.000 583	0.013 502	0.282 706	0.000 012	455	-2.3	7.5	765	892	-0.98
03	0.000 797	0.018 284	0.282 735	0.000 014	456	-1.3	8.5	728	838	-0.98
04	0.000 976	0.022 795	0.282 749	0.000 014	455	-0.8	8.9	712	814	-0.97
05	0.000 836	0.019 386	0.282 734	0.000 012	455	-1.3	8.4	730	841	-0.97
06	0.000 855	0.019 291	0.282 692	0.000 016	456	-2.8	6.9	791	925	-0.97
07	0.000 859	0.019 370	0.282 724	0.000 017	455	-1.7	8.1	746	862	-0.97
08	0.000 844	0.019 281	0.282 755	0.000 011	455	-0.6	9.2	701	800	-0.97
09	0.000 843	0.019 255	0.282 723	0.000 014	455	-1.7	8.0	747	863	-0.97
10	0.000 818	0.018 019	0.282 697	0.000 011	455	-2.6	7.1	782	913	-0.98
11	0.001 055	0.024 713	0.282 703	0.000 016	447	-2.4	7.1	779	909	-0.97
12	0.000 531	0.012 156	0.282 645	0.000 021	456	-4.5	5.4	849	1 010	-0.98
13	0.000 827	0.018 996	0.282 725	0.000 015	456	-1.7	8.1	743	858	-0.98
14	0.000 687	0.015 422	0.282 710	0.000 015	449	-2.2	7.5	761	888	-0.98
15	0.000 805	0.018 406	0.282 728	0.000 015	458	-1.6	8.3	739	852	-0.98
16	0.000 975	0.022 486	0.282 739	0.000 016	455	-1.2	8.6	726	834	-0.97

注:ε_{Hf}(0)=10 000×[(¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf)_S/(¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf)_{CHUR,0}-1];f_{Lu/Hf}=(¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf)_S/[(¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf)_{CHUR,0}-1];ε_{Hf}(t)=10 000×{[(¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf)_S-(¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf)_S×(e^{λt}-1)]/[(¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf)_{CHUR,0}-(¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf)_{CHUR,0}×(e^{λt}-1)]-1};T_{DM}=1/λ×ln{1+[(¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf)_S-(¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf)_{DM}]/[(¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf)_S-(¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf)_{DM}]};T_{2DM}=T_{DM}Hf-(T_{DM}Hf-t)×[(f_{CC}-f_S)/(f_{CC}-f_{DM})];(¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf)_{CHUR,0}=0.033 2, (¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf)_{CHUR,0}=0.282 772(Blichert-Toft *et al.*, 1997), (¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf)_{DM}=0.033 2, (¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf)_{DM}=0.282 772(Griffin *et al.*, 2000), f_{CC}=0.015, f_{DM}=-0.548, λ=1.867×10⁻¹¹yr⁻¹(Söderlund *et al.*, 2004).

上升过程中混杂了部分古老的地壳物质,且岩浆演化过程中伴有角闪石、黑云母、斜长石和磷灰石等分离结晶.岩体中较高的 SiO₂、Al₂O₃、CaO 含量,低 Mg[#] 等特征与俯冲洋壳熔融形成的熔体特征基本

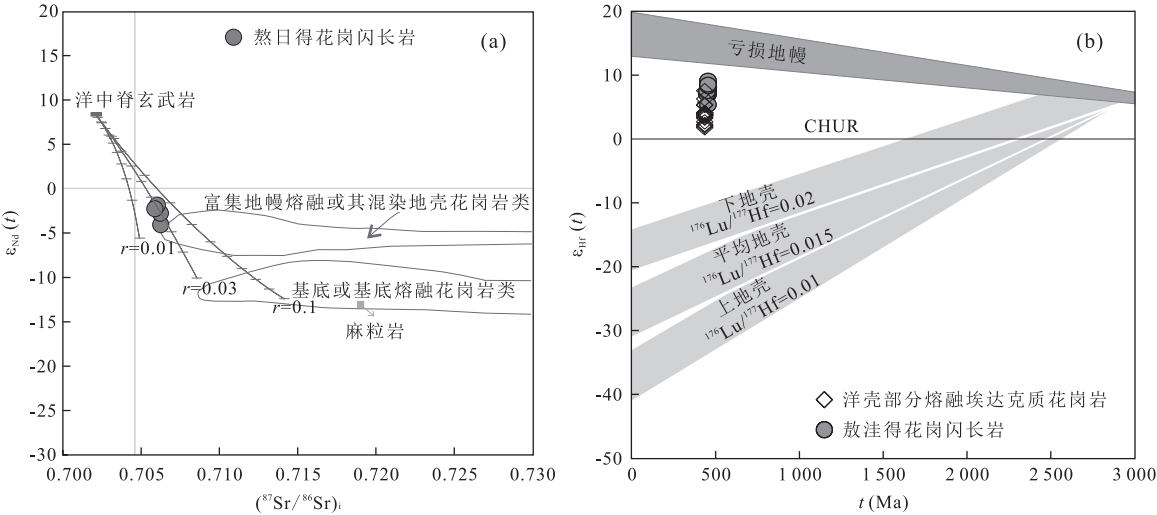


图 8 沟里地区敖洼得花岗闪长岩 Sr-Nd 同位素组成图解 (a) 和锆石 Hf 同位素组成图解 (b)

Fig.8 Plots of initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vs. $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ (a) and Hf isotopic compositions of zircons (b) from the Aowade granodiorite
数据来源: a 图数据来源同图 5, $t=454\text{ Ma}$; b 图洋中脊玄武岩 (Workman and Hart, 2005); 麻粒岩 (龙晓平, 2004); 富集地幔熔融或其混染地壳花岗岩类 (刘彬, 2011; 贾儒雅, 2013); 基底或基底熔融花岗岩类 (余能等, 2005; 贾儒雅, 2013). b 图带小短线曲线为洋中脊玄武岩同化混染麻粒岩伴随分离结晶 (AFC) 曲线, 图中 r 表示同化混染与结晶速率之比

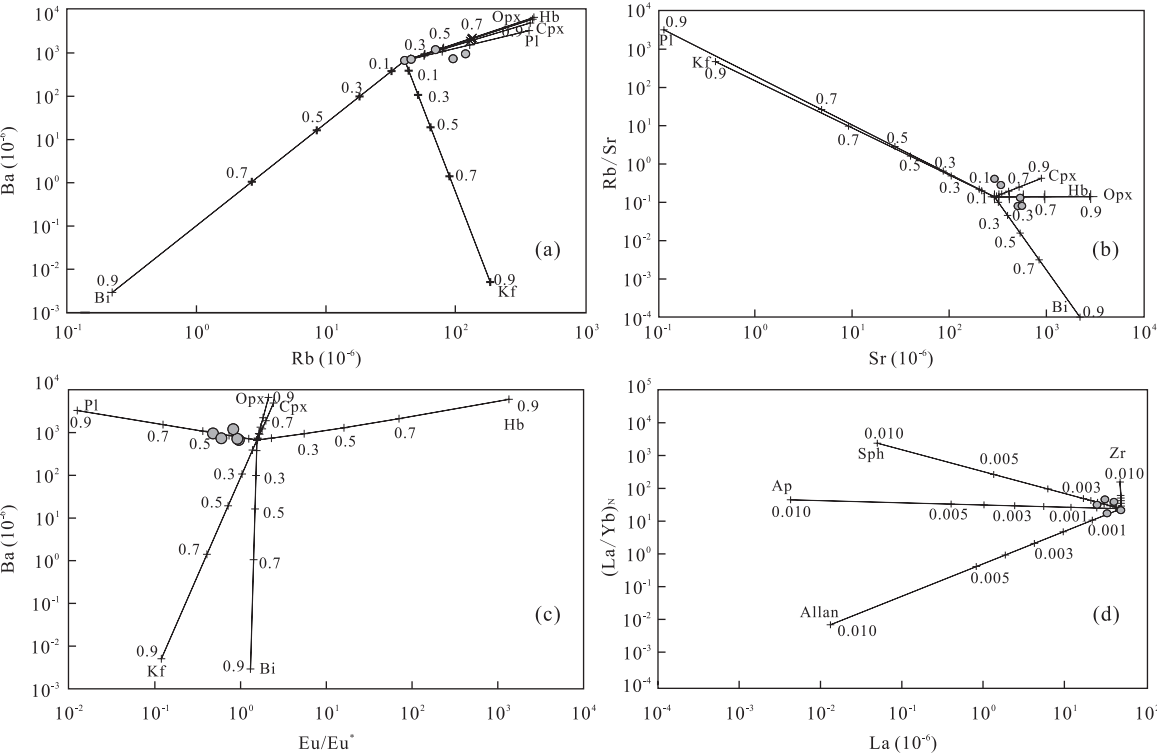


图 9 沟里地区敖洼得花岗闪长岩矿物分离结晶图解

Fig.9 Ba vs. Rb (a), Rb/Sr vs. Sr (b), Ba vs. Eu/Eu^* (c) and $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ vs. La (d) diagrams for the Aowade intrusion illustrating fractional crystallization of apatite, biotite and minor hornblende and plagioclase
Opx. 斜方辉石; Cpx. 单斜辉石; Hb. 角闪石; Kf. 黑云母; Pl. 斜长石; Zr. 锆石; Ap. 磷灰石; Sph. 榍石; Allan. 褐帘石. 图中 “+” 所标数值为 $1-F$, F 为剩余岩浆占原始岩浆的比例

一致 (Rapp *et al.*, 1999). 岩石富集 Rb、Ba、K 等大离子亲石元素, 相对亏损 Nb、Ta、P、Ti 等高场强元

素, 以及高 Sr、低 Y、Yb 等特征也表明岩浆源区可能为俯冲环境下的 大洋地壳. 同时区域上源于洋壳

的高 Mg 闪长岩(432 Ma; Zhang *et al.*, 2014) 的出现也支持洋壳熔融是可以发生的, 埃达克质岩和高镁闪长岩的岩石组合也符合俯冲环境下一般的岩石组合特征。此外岩体 Nb/Ta (13~18)、Ba/Th 比值 (72~125) 介于下地壳 (Rudnick and Gao, 2003) 与正常洋中脊玄武岩 (Hofmann, 1988) 之间, 并且更接近后者, 进一步指示岩浆源区可能以洋壳为主, 并伴有有陆壳物质的混染。再者, 岩体较低的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ (0.703 240~0.706 264) 和较高的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ ($-4.6 \sim -1.9$)、 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ (5.4~9.2) 明显不同于单独壳源或富集地幔来源岩浆分析演化的花岗岩 (图 8), 尤其是 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$, 其介于壳幔演化线之间, 并靠近亏损地幔演化线, 表明岩浆源区应主要为同位素亏损的洋壳, 岩浆演化过程中可能存在地壳物质的混染。另外, 岩体 Nd 同位素二阶段模式年龄 ($T_{2\text{DM}}\text{Nd}$) 介于 1 339~1 518 Ma, 该年龄介于岩体的围岩 (苦海变质杂岩) 时代 (1 000~1 600 Ma; 殷鸿福等, 2000) 和岩体的结晶年龄之间, 也说明岩浆演化过程中可能存在地壳物质的混染。

图 6 显示 MgO 、 Al_2O_3 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$ 、 Na_2O 、 TiO_2 、 P_2O_5 、 CaO 与 SiO_2 大致呈反比关系, 指示可能存在角闪石、黑云母、斜长石和磷灰石的分离结晶, Eu/Eu^* 负异常及镜下鉴定中少量的角闪石、黑云母等的出现也支持这一观点。再者以特征元素或元素比值对来模拟矿物分离结晶 (图 9) 得出的结论与岩相学观察和哈克图解得出的结论基本一致, 即岩浆演化过程中可能存在角闪石、黑云母、斜长石和磷灰石的分离结晶。

按照上述分析, 笔者以基底变质岩和洋中脊玄武岩为端元对岩浆演化的 AFC 过程进行了数值模拟 (图 8b), 结果显示, 当 r (同化混染与结晶速率之比) 为 0.03, 残余熔体为 30%~40% 时, 模拟结果与敖洼得花岗闪长岩同位素特征一致。从模拟的数值特征看, 原岩发生了较高级别的熔融, 后期经历了分离结晶和基底岩石的同化混染, 但同化混染的程度有限。

俯冲洋壳熔融产生埃达克质熔体的同时, 其残留相可以为榴辉岩相、含石榴子石角闪岩相、也可以是角闪岩相 (Foley *et al.*, 2002; Rapp *et al.*, 2003)。(La/Yb)_N 和 Yb_N 的联合反演可以进一步确定源区残留相特征 (Defant and Drummond, 1990), 在图 5d 中, 敖洼得花岗闪长岩样品均落入含 10% 石榴子石角闪岩相和角闪岩相平衡演化线附近, 指示源区为含石榴子石角闪岩相。此外稀土元素配分图解显示岩

体重稀土元素强烈亏损 (图 7a), 这很可能是源区残留石榴子石富集重稀土导致的。再者, 敖洼得岩体同位素数据显示较强的 Nd-Hf 同位素解耦现象, 在 ϵ_{Hf} 和 ϵ_{Nd} 关系图 (图略) 中数据点明显偏离地球演化线 ($\epsilon_{\text{Hf}} = 1.36\epsilon_{\text{Nd}} + 2.95$; Vervoort *et al.*, 1999), 显示相对较高的 ϵ_{Hf} 特征。Salters and Hart (1989) 提出当岩浆源区存在石榴子石残留时, 熔体相富集放射性成因 Hf 和高的 ϵ_{Hf} , 但石榴子石对 Nd 同位素的影响可以忽略不计 (Schmitz *et al.*, 2004; 赵葵东等, 2006), 因此岩体相对较高的 ϵ_{Hf} 进一步佐证岩浆源区应该存在石榴子石。

综上所述, 敖洼得花岗闪长岩形成过程可以概括为: 俯冲的洋壳部分熔融, 产生具有高 Sr/Y、(La/Yb)_N 和 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$, 低 $\text{Mg}^\#$ 的埃达克质熔体, 其源区为含石榴子石角闪岩相。熔体上升过程中同化混染少量古老的下地壳物质, 并伴有角闪石、黑云母、斜长石和磷灰石等的分离结晶。

4.2 成岩地球动力学背景

昆中断裂带是东昆仑地区一条重要而复杂的蛇绿混杂岩带, 前人在该带内发现了中元古代、晚元古—早古生代多条蛇绿岩带 (朱云海等, 1999), 其中晚元古—早古生代的蛇绿岩带被认为与原特提斯洋相关。Yang *et al.* (1996) 和陆松年等 (2002) 对断裂带内清水泉蛇绿岩中的辉长岩进行了单颗粒锆石 U-Pb 定年, 得出辉长岩年龄分别为 518 Ma 和 522 Ma, 冯建赟等 (2010) 对清水泉西部可可沙镁铁质—超镁铁质岩中辉长岩进行的锆石 U-Pb 年代学研究表明其形成于 509 Ma, 并认为其是清水泉蛇绿岩带的一部分。这些寒武纪蛇绿岩的出现证明该地质历史时期存在一个古洋盆, 且 522~509 Ma 间洋盆仍处于扩张状态。

昆中洋 (原特提斯洋分支) 在 448 Ma 左右发生北向俯冲, 并在昆中断裂北侧都兰县南部地区形成了岛弧火山岩 (Chen *et al.*, 2002)。与此同时, 受俯冲作用的影响弧后发生裂解形成弧后盆地, 并伴随与弧后拉张相关的二长花岗岩和辉绿岩脉发育 (458~436 Ma; 高晓峰等, 2010; 任军虎等, 2009)。研究表明, 由于俯冲加厚, 在俯冲带深部高压条件下形成了榴辉岩 (451~428 Ma; Meng *et al.*, 2013; 贾丽辉等, 2014)。在 401 Ma 左右大洋北向俯冲结束, 昆北地体进入了碰撞挤压—伸展阶段。

昆中断裂以南, 前人研究主要集中在镁铁质岩和火山岩, 陈有忻等 (2013) 和张耀玲等 (2010) 分别对昆南纳赤台群变玄武岩 (474 Ma) 和流纹岩

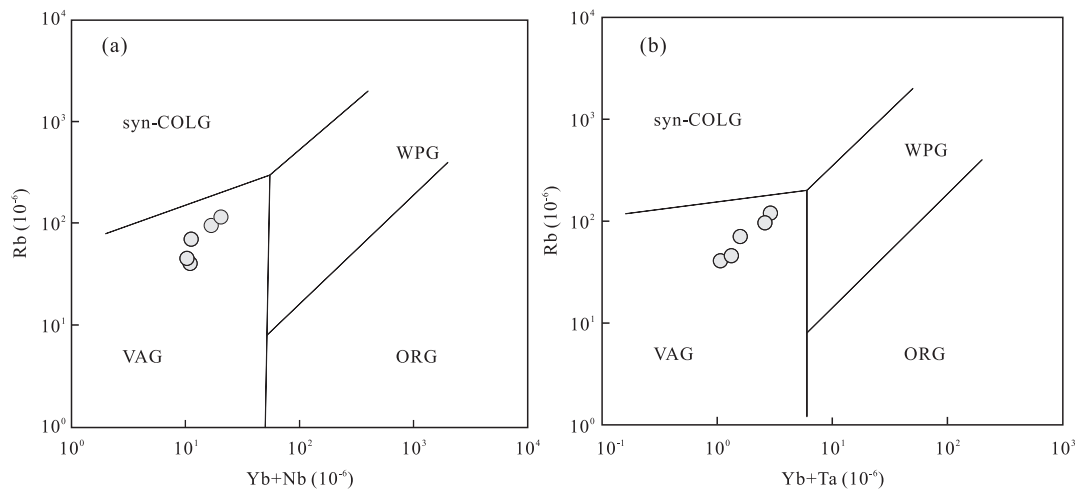


图 10 沟里地区敖洼得花岗闪长岩 Rb-(Yb+Nb)(a)和 Rb-(Yb+Ta)(b)构造环境判别图解

Fig.10 Rb vs. Yb+Nb (a) and Rb vs. Yb+Ta (b) discrimination diagrams for Aowade granodiorite from Gouli area syn-COLG.同碰撞花岗岩;WPG.板内花岗岩;VAG.岛弧花岗岩;ORG.洋中脊花岗岩.底图据 Pearce *et al.*(1984)

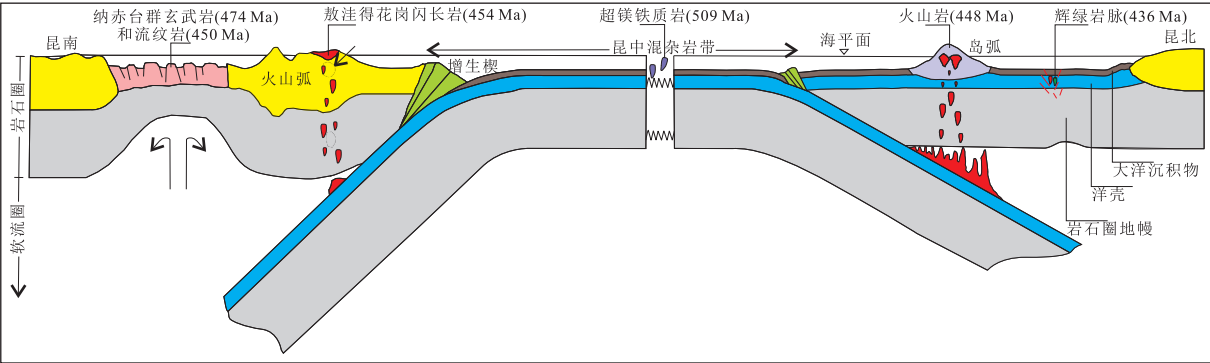


图 11 晚奥陶世昆中洋俯冲构造演化

Fig.11 A suggested model for the evoloution of Kunzhong ocean during Late Ordovician

图中年龄来源见 4.2 成岩地球动力学背景一节

(450 Ma)进行了研究,认为其为原特提斯洋俯冲导致弧后拉张形成.刘彬等(2013b)对昆中断裂带南侧的胡晓钦镁铁质岩(438±2 Ma)进行了研究,认为其是昆中洋俯冲晚阶段的产物;Zhu *et al.*(2006)确定了昆南诺木洪地区纳赤台群变火山岩的年龄为401 Ma,代表了洋壳闭合时间.以上研究表明昆中洋在加里东期很可能存在南向俯冲,但还缺乏与俯冲相关的弧火成岩的关键证据支持.本文对昆中断裂带南侧的敖洼得花岗闪长岩进行了研究,结果表明该岩石为洋壳熔融混染地壳形成,可能的构造背景为俯冲环境,在 Rb-(Yb+Ta)和 Rb-(Yb+Nb)图解(图 10)中,样品点均落入火山弧环境(Pearce *et al.*,1984),指示昆南地体在 454 Ma 存在火山弧.综合以上的证据链基本可以确定昆中洋在 474~419 Ma 存在南向俯冲,并在昆南地体形成了以纳赤

台群火山岩为代表的弧后盆地和以敖洼得侵入岩为代表的火山弧,在 401 Ma 南向俯冲结束进入了碰撞阶段.

综上所述,昆中洋在寒武纪仍然存在扩张,此后于奥陶纪昆中洋首先向南俯冲,稍晚北向俯冲开始,至此昆中洋发生南北双向俯冲.此后南北俯冲分别在昆中断裂带两侧形成岛弧和弧后盆地,志留纪洋壳继续俯冲,直至泥盆纪早期昆中洋闭合,昆中带进入了碰撞与碰撞后伸展阶段并在昆北地体形成了大量泥盆纪同碰撞花岗岩类(图 11).

5 结论

通过对东昆仑东端沟里地区敖洼得花岗闪长岩开展详细的岩相学、岩石地球化学和同位素地球化

学研究,结合前人的研究成果,本文得出以下主要结论:

(1)沟里地区敖洼得花岗闪长岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 454 ± 2 Ma,指示岩体侵位于晚奥陶世。(2)敖洼得花岗闪长岩的形成与洋壳俯冲熔融有关,岩浆上升过程中有少量地壳物质的加入并伴随有角闪石和斜长石等的分离结晶,其源区残留物可能为含石榴子石角闪岩相岩石。(3)敖洼得花岗闪长岩代表了昆中洋(原特提斯洋的分支)南向俯冲时于昆南地体北缘形成的弧花岗岩,指示昆中洋在早古生代时期存在双向俯冲。

致谢:论文撰写过程中得到了中国地质大学(武汉)李艳军老师的指导,野外工作得到了谭俊、王小龙、赵少卿、王震等的帮助,在此一并表示感谢。同时感谢匿名审稿人在论文评审过程中给本文提出的宝贵意见。

References

- Atherton, M. P., Petford, N., 1993. Generation of Sodium-Rich Magmas from Newly Underplated Basaltic Crust. *Nature*, 362(6416): 144—146. doi:10.1038/362144a0
- Blichert-Toft, J., Chauvel, C., Albarède, F., 1997. Separation of Hf and Lu for High-Precision Isotope Analysis of Rock Samples by Magnetic Sector-Multiple Collector ICP-MS. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 127(3): 248—260. doi:10.1007/s004100050278
- Castillo, P. R., Janney, P. E., Solidum, R. U., 1999. Petrology and Geochemistry of Camiguin Island, Southern Philippines: Insights to the Source of Adakites and Other Lavas in a Complex Arc Setting. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 134(1): 33—51. doi:10.1007/s004100050467
- Chen, G. C., Pei, X. Z., Li, R. B., et al., 2013. Zircon U-Pb Geochronology, Geochemical Characteristics and Geological Significance of Cocoe along Quartz Diorites Body from the Hongshuichuan Area in East Kunlun. *Acta Geologica Sinica*, 87(2): 178—196 (in Chinese with English abstract).
- Chen, H. W., Luo, Z. H., Mo, X. X., et al., 2006. SHRIMP Ages of Kayakedengtage Complex in the East Kunlun Mountains and Their Geological Implications. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 25(1): 25—32 (in Chinese with English abstract).
- Chen, L., Sun, Y., Pei, X. Z., et al., 2001. Northernmost Paleo-Tethyan Oceanic Basin in Tibet: Geochronological Evidence from $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Age Dating of Dur'ngoi Ophiolite. *Chinese Science Bulletin*, 46(14): 1203—1205. doi:10.1007/bf02900603
- Chen, L., Sun, Y., Pei, X. Z., et al., 2003. Comprehensive Comparison of Paleo-Tethys Ophiolite and Its Geodynamic Significance—An Example from Dur'ngoi Ophiolite. *Science in China (Series D)*, 33(12): 1136—1142 (in Chinese with English abstract).
- Chen, N. S., Sun, M., He, L., et al., 2002. Precise Timing of the Early Paleozoic Metamorphism and Thrust Deformation in the Eastern Kunlun Orogen. *Chinese Science Bulletin*, 47(13): 1130—1133. doi:10.1360/02tb9253
- Chen, N. S., Sun, M., Wang, Q. Y., et al., 2008. U-Pb Dating of Zircon from the Central Zone of the East Kunlun Orogen and Its Implications for Tectonic Evolution. *Science in China (Series D)*, 51(7): 929—938. doi:10.1007/s11430-008-0072-x
- Chen, Y. X., Pei, X. Z., Li, R. B., et al., 2013. Zircon U-Pb Age, Geochemical Characteristics and Tectonic Significance of Metavolcanic Rocks from Naij Tal Group, East Section of East Kunlun. *Earth Science Frontiers*, 20(6): 240—254 (in Chinese with English abstract).
- Chen, Y. X., Pei, X. Z., Li, R. B., et al., 2014. Geochemical Characteristics and Tectonic Significance of Meta-Sedimentary Rocks from Naij Tal Group, Eastern Section of East Kunlun. *Geoscience*, 28(3): 489—500 (in Chinese with English abstract).
- Chung, S. L., Liu, D. Y., Ji, J. Q., et al., 2003. Adakites from Continental Collision Zones: Melting of Thickened Lower Crust beneath Southern Tibet. *Geology*, 31(11): 1021. doi:10.1130/g19796.1
- Crawford, A. J., Fall, T. J., Green, D. H., et al., 1989. Classification, Petrogenesis and Tectonic Setting of Boninites. Academic Division of Unwin Hyman Ltd., London.
- Cui, M. H., Meng, F. C., Wu, X. K., 2011. Early Ordovician Island Arc of Qimantag Mountain, Eastern Kunlun: Evidences from Geochemistry, Sm-Nd Isotope and Geochronology of Intermediate-Basic Igneous Rocks. *Acta Petrologica Sinica*, 27(11): 3365—3379 (in Chinese with English abstract).
- Defant, M. J., Drummond, M. S., 1990. Derivation of Some Modern Arc Magmas by Melting of Young Subducted Lithosphere. *Nature*, 347(6294): 662—665. doi:10.1038/347662a0
- Elburg, M. A., van Bergen, M. V., Hoogewerff, J., et al., 2002. Geochemical Trends across an Arc-Continent Collision Zone: Magma Sources and Slab-Wedge Transfer Processes below the Pantar Strait Volcanoes, Indonesia. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 66(15): 2771—2789. doi:10.1016/s0016-7037(02)00868-2

- Feng, J. Y., Pei, X. Z., Yu, S. L., et al., 2010. 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. *Geology in China*, 37(1): 28—38 (in Chinese with English abstract).
- Foley, S., Tiepolo, M., Vannucci, R., 2002. Growth of Early Continental Crust Controlled by Melting of Amphibolite in Subduction Zones. *Nature*, 417(6891): 837—840. doi: 10.1038/nature00799
- Gao, S., Rudnick, R. L., Yuan, H. L., et al., 2004. Recycling Lower Continental Crust in the North China Craton. *Nature*, 432(7019): 892—897. doi: 10.1038/nature03162
- Gao, X. F., Xiao, P. X., Xie, C. R., et al., 2010. Zircon LA-ICP-MS U-Pb Dating and Geological Significance of Bashierxi Granite in the Eastern Kunlun Area, China. *Geological Bulletin of China*, 29(7): 1001—1008 (in Chinese with English abstract).
- Griffin, W. L., Belousova, E. A., Shee, S. R., et al., 2004. Archean Crustal Evolution in the Northern Yilgarn Craton: U-Pb and Hf-Isotope Evidence from Detrital Zircons. *Precambrian Research*, 131(3—4): 231—282. doi: 10.1016/j.precamres.2003.12.011
- Hofmann, A. W., 1988. Chemical Differentiation of the Earth: The Relationship between Mantle, Continental Crust, and Oceanic Crust. *Earth and Planetary Science Letters*, 90(3): 297—314. doi: 10.1016/0012-821x(88)90132-x
- 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. doi: 10.1039/c2ja30078h
- Jia, L. H., Meng, F. C., Feng, H. B., 2014. Fluid Activity during Eclogite-Facies Peak Metamorphism: Evidence from a Quartz Vein in Eclogite in the East Kunlun, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 30(8): 2339—2350 (in Chinese with English abstract).
- Jia, Y. R., 2013. Petrogenesis and Tectonic Implications of Qikesu Granite Pluton and Its Enclaves in the Western Kunlun Orogen Belt, NW China (Dissertation). Nanjing University, Nanjing (in Chinese with English abstract).
- Li, R. B., Pei, X. Z., Li, Z. C., et al., 2015. 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. *Journal of Asian Earth Sciences*, 105: 374—389. doi: 10.1016/j.jseae.2015.02.004
- Li, R. B., Pei, X. Z., Li, Z. C., et al., 2015. Geological and Geochemical Features of Delisitannan Basalts and Their Petrogenesis in Buqingshan Tectonic Mélange Belt, Southern Margin of East Kunlun Orogen. *Earth Science*, 40(7): 1148—1162 (in Chinese with English abstract).
- Li, X., Yuan, W. M., Hao, N. N., et al., 2014. Characteristics and Tectonic Setting of Granite in Wulonggou Area, East Kunlun Mountains. *Globe Geology*, 33(2): 275—288 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z. C., Pei, X. Z., Liu, Z. Q., et al., 2013. Geochronology and Geochemistry of the Gerizhuotuo Diorites from the Buqingshan Tectonic Mélange Belt in the Southern Margin of East Kunlun and Their Geologic Implications. *Acta Geologica Sinica*, 87(8): 1089—1103 (in Chinese with English abstract).
- Liu, B., 2011. Petrology, Zircon U-Pb Geochronology, and Petrogenesis of Early Devonian Yuejinshan Intrusive Complex in the Eastern Kunlun Orogen (Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan (in Chinese with English abstract).
- Liu, B., Ma, C. Q., Guo, P., et al., 2013a. Discovery of the Middle Devonian A-Type Granite from the Eastern Kunlun Orogen and Its Tectonic Implications. *Earth Science*, 38(5): 947—962 (in Chinese with English abstract).
- Liu, B., Ma, C. Q., Jiang, H. A., et al., 2013b. Early Paleozoic Tectonic Transition from Ocean Subduction to Collisional Orogeny in the Eastern Kunlun Region: Evidence from Huxiaoqin Mafic Rocks. *Acta Petrologica Sinica*, 29(6): 2093—2106 (in Chinese with English abstract).
- 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. 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. doi: 10.1016/j.chemgeo.2008.08.004
- Liu, Y. S., Hu, Z. C., Zong, K. Q., et al., 2010. Reappraisal and Refinement of Zircon U-Pb Isotope and Trace Element Analyses by LA-ICP-MS. *Chinese Science Bulletin*, 55(15): 1535—1546. doi: 10.1007/s11434-010-3052-4
- Liu, Z. Q., Pei, X. Z., Li, R. B., et al., 2011. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Geochronology of the Two Suites of Ophiolites at the Buqingshan Area of the A'nyemaqen Orogenic Belt

- in the Southern Margin of East Kunlun and Its Tectonic Implication. *Acta Geologica Sinica*, 85(2): 185—194 (in Chinese with English abstract).
- Long, X. P., 2004. The Research of Zircon Chronology in Orogenic Belts—A Case Study in Jinshuikou Zone (Dissertation). Jilin University, Changchun (in Chinese with English abstract).
- Lu, S. N., Yu, H. F., Zhao, F. Q., 2002. Cambrian Geology in the Northern Part of the Tibetan Plateau. Geological Press, Beijing (in Chinese).
- Ludwig, K. R., 2012. User's Manual for Isoplot 3.75—A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center Special Publication, Berkeley.
- Maniar, P., D., Piccoli, P. M., 1989. Tectonic Discrimination of Granitoids. *Geological Society of America Bulletin*, 101(5): 635—643. doi: 10.1130/0016—7606(1989)101<0635:tdog>2.3.co;2
- Matte, P., Tapponnier, P., Arnaud, N., et al., 1996. Tectonics of Western Tibet, between the Tarim and the Indus. *Earth and Planetary Science Letters*, 142(3—4): 311—330. doi: 10.1016/0012—821x(96)00086—6
- Mattern, F., Schneider, W., Li, Y., et al., 1996. A Traverse through the Western Kunlun (Xinjiang, China): Tentative Geodynamic Implications for the Paleozoic and Mesozoic. *Geologische Rundschau*, 85(4): 705—722. doi: 10.1007/bf02440106
- Meng, F. C., Cui, M. H., Wu, X. K., et al., 2013. Magmatic and Metamorphic Events Recorded in Granitic Gneisses From the Qimantag, East Kunlun Mountains, Northwest China. *Acta Petrologica Sinica*, 29(6): 2107—2122 (in Chinese with English abstract).
- Meng, F. C., Zhang, J. X., Cui, M. H., 2013. Discovery of Early Paleozoic Eclogite from the East Kunlun, Western China and Its Tectonic Significance. *Gondwana Research*, 23(2): 825—836. doi: 10.1016/j.gr.2012.06.007
- Mo, X. X., Luo, Z. H., Deng, J. F., et al., 2007. Granitoids and Crustal Growth in the East-Kunlun Orogenic Belt. *Geological Journal of China Universities*, 13(3): 403—414 (in Chinese with English abstract).
- Pearce, J. A., Harris, N. B. W., Tindle, A. G., 1984. Trace Element Discrimination Diagrams for the Tectonic Interpretation of Granitic Rocks. *Journal of Petrology*, 25(4): 956—983. doi: 10.1093/petrology/25.4.956
- Rollinson, H. R., 1993. Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation. Longman Group UK Ltd., New York.
- Rapp, R. P., Shimizu, N., Norman, M. D., 2003. Growth of Early Continental Crust by Partial Melting of Eclogite. *Nature*, 425(6958): 605—609. doi: 10.1038/nature02031
- 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. doi: 10.1016/S0009—2541(99)00106—0
- Ren, J. H., Liu, Y. Q., Feng, Q., et al., 2009. LA-ICP-MS U-Pb Zircon Dating and Geochemical Characteristics of Diabase-Dykes from the Qingshuiquan Area, Eastern Kunlun Orogenic Belt. *Acta Petrologica Sinica*, 25(5): 1135—1145 (in Chinese with English abstract).
- Rudnick, R. L., Gao, S., 2003. Composition of the Continental Crust. In: Rudnick, R. L., ed., *The Crust*. Elsevier-Peramon, Oxford.
- Salters, V. J. M., Hart, S. R., 1989. The Hafnium Paradox and the Role of Garnet in the Source of Mid-Ocean-Ridge Basalts. *Nature*, 342(6248): 420—422. doi: 10.1038/342420a0
- Schmitz, M. D., Vervoort, J. D., Bowring, S. A., et al., 2004. Decoupling of the Lu-Hf and Sm-Nd Isotope Systems during the Evolution of Granulitic Lower Crust Beneath Southern Africa. *Geology*, 32(5): 405. doi: 10.1130/g20241.1
- Söderlund, U., Patchett, P. J., Vervoort, J. D., et al., 2004. The ¹⁷⁶Lu Decay Constant Determined by Lu-Hf and U-Pb Isotope Systematics of Precambrian Mafic Intrusions. *Earth and Planetary Science Letters*, 219(3—4): 311—324. doi: 10.1016/s0012—821x(04)00012—3
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalt: Implications for Mantle Composition and Processes. In: Saunders, A. D., Norry, M. J., eds., *Magmatism in the Ocean Basins*. *Geological Society Special Publications, London*, 42: 313—345. doi: 10.1144/gsl.sp.1989.042.01.19
- Sun, Y., Pei, X. Z., Ding, S. P., et al., 2009. Halagatu Magma Mixing Granite in the East Kunlun Mountains—Evidence from Zircon U-Pb Dating. *Acta Geologica Sinica*, 83(7): 1000—1010 (in Chinese with English abstract).
- Tatsumi, Y., 1995. Subduction Zone Magmatism. Blackwell Publishing House, Boston.
- 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. doi: 10.1130/0091—7613(2001)029<0323:gmopmo>2.0.co;2
- Tatsumi, Y., Hanyu, T., 2003. Geochemical Modeling of De-

- hydration and Partial Melting of Subducting Lithosphere: Toward a Comprehensive Understanding of High-Mg Andesite Formation in the Setouchi Volcanic Belt, SW Japan. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 4(9): 1–19. doi: 10.1029/2003gc000530
- Vervoort, J. D., Patchett, P. J., Blichert-Toft, J., et al., 1999. Relationships between Lu-Hf and Sm-Nd Isotopic Systems in the Global Sedimentary System. *Earth and Planetary Science Letters*, 168(1–2): 79–99. doi: 10.1016/S0012-821X(99)00047-3
- Wang, G., Sun, F. Y., Li, B. Y., et al., 2014. Zircon U-Pb Geochronology and Geochemistry of Diorite in Xiarihamu Ore District from East Kunlun and Its Geological Significance. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 44(3): 876–891 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Q., Xu, J. F., Zhao, Z. H., et al., 2001. The Petrogenesis and Geodynamic Significances of HREE Depleted Granitoids during Yanshan Period in the Dabie Mountains. *Acta Petrologica Sinica*, 17(4): 551–564 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Q., Xu, J. F., Zhao, Z. H., et al., 2008. Tectonic Setting and Associated Rock Suites of Adakitic Rocks. *Bulletin of Mineralogy Petrology & Geochemistry*, 27(4): 344–350 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X. X., Hu, N. G., Wang, T., et al., 2012. Late Ordovician Wanbaogou Granitoid Pluton from the Southern Margin of the Qaidam Basin: Zircon SHRIMP U-Pb Age, Hf Isotope and Geochemistry. *Acta Petrologica Sinica*, 28(9): 2950–2962 (in Chinese with English abstract).
- Wison, M., 1989. Igneous Petrogenesis. Unwim Hyman, London.
- Workman, R. K., Hart, S. R., 2005. Major and Trace Element Composition of the Depleted MORB Mantle (DMM). *Earth and Planetary Science Letters*, 231(1–2): 53–72. doi: 10.1016/j.epsl.2004.12.005
- Xia, R., Qing, M., Wang, C. M., 2014. The Genesis of the Ore-Bearing Porphyry of the Tuoketuo Porphyry Cu-Au (Mo) Deposit in the East Kunlun, Qinghai Province: Constraints from Zircon U-Pb Geochronological and Geochemistry. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 44(5): 1502–1524 (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*, 26(3): 474–490.
- Xiong, F. H., 2014. Spatial-Temporal Pattern, Petrogenesis and Geological Implications of Paleo-Tethyan Granitoids in the East Kunlun Orogenic Belt (Eastern Segment) (Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan (in Chinese with English abstract).
- Xiong, F. H., Ma, C. Q., Zhang, J. Y., et al., 2011. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Dating, Elements and Sr-Nd-Hf Isotope Geochemistry of the Early Mesozoic Mafic Dyke Swarms in East Kunlun Orogenic Belt. *Acta Petrologica Sinica*, 27(11): 3350–3364 (in Chinese with English abstract).
- Xiong, F. H., Ma, C. Q., Zhang, J. Y., et al., 2012. The Origin of Mafic Microgranular Enclaves and Their Host Granodiorites from East Kunlun, Northern Qinghai-Tibet Plateau: Implications for Magma Mixing during Subduction of Paleo-Tethyan Lithosphere. *Mineralogy and Petrology*, 104(3–4): 211–224. doi: 10.1007/s00710-011-0187-1
- Xu, J. F., Shinjo, R., Defant, M. J., et al., 2002. Origin of Mesozoic Adakitic Intrusive Rocks in the Ningzhen Area of East China: Partial Melting of Delaminated Lower Continental Crust? *Geology*, 30(12): 1111. doi: 10.1130/0091-7613(2002)030<1111:oomair>2.0.co;2
- Xu, Q. L., Sun, F. Y., Li, B. Y., et al., 2014. Geochronological Dating, Geochemical Characteristics and Tectonic Setting of the Granite-Porphyry in the Mohexiala Silver Polymetallic Deposit, Eastern Kunlun Orogenic Belt. *Geotectonica et Metallogenia*, 38(2): 421–433 (in Chinese with English abstract).
- 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 in China (Series D)*, 44(S1): 1–9. doi: 10.1007/bf02911965
- Xu, Z. Q., 2007. The Mechanism of Collage, Collision and Uplift of the Qinghai-Tibet Plateau, an Orogenic Plateau. Geology Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Yang, J. S., Robinson, P. T., Jiang, C. F., et al., 1996. Ophiolites of the Kunlun Mountains, China and Their Tectonic Implications. *Tectonophysics*, 258(1–4): 215–231. doi: 10.1016/0040-1951(95)00199-9
- Yin, H. F., Zhang, K. X., Chen, N. S., et al., 2000. The Report on the Regional Geological Survey of Donggeicunahu. China University of Geosciences Press, Wuhan (in Chinese).
- Yu, N., Jin, W., Ge, W. C., et al., 2005. Geochemical Study on Peraluminous Granite from Jinshuikou in East Kunlun. *Global Geology*, 24(2): 123–128 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G., 2012. Research on Geological Characteristics, Ages and Geological Significance of the Halagatu Granitic Rocks in East Segment of the East Kunlun Orogen

- (Dissertation). Chang'an University, Xi'an (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J. X., Meng, F. C., Wan, Y. S., et al., 2003. Early Paleozoic Tectono-Thermal Event of the Jinshuiou Group on the Southern Margin of Qaidam: Zircon U-Pb SHRIMP Age Evidence. *Geological Bulletin of China*, 22(6): 397—404 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J. Y., Ma, C. Q., Xiong, F. H., et al., 2014. Early Paleozoic High-Mg Diorite-Granodiorite in the Eastern Kunlun Orogen, Western China: Response to Continental Collision and Slab Break-Off. *Lithos*, 210—211: 129—146. doi:10.1016/j.lithos.2014.10.003
- Zhang, Y. L., Zhang, X. J., Hu, D. G., et al., 2010. SHRIMP Zircon U-Pb Ages of Rhyolite from the Nachitai Group in the East Kulun Orogenic Belt. *Journal of Geomechanics*, 16(1): 21—27 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, K. D., Jiang, S. Y., Sun, T., et al., 2006. The Hf-Nd Isotopes Decoupling of Indosinian Granite and Its Implication on Petrogenesis, Western of Nanling. National Symposium on Petrology and Geodynamics. Nanjing (in Chinese).
- Zhao, Z. M., Ma, H. D., Wang, B. Z., et al., 2008. The Evidence of Intrusive Rocks about Collision-Orogeny during Early Devonian in Eastern Kunlun Area. *Geological Review*, 54(1): 47—56 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, T. Y., Qian, X., Feng, Q. L., 2016. Geochemistry, Zircon U-Pb Age and Hf Isotopic Constraints on the Petrogenesis of the Silurian Rhyolites in the Loei Fold Belt and Their Tectonic Implications. *Journal of Earth Science*, 26(3): 391—402.
- Zhu, Y. H., Lin, Q. X., Jia, C. X., et al., 2006. SHRIMP Zircon U-Pb Age and Significance of Early Paleozoic Volcanic Rocks in East Kunlun Orogenic Belt, Qinghai Province, China. *Science in China (Series D)*, 49(1): 88—96. doi: 10.1007/s11430-004-5317-8
- Zhu, Y. H., Zhang, K. X., Chen, N. S., et al., 1999. Determination of Different Ophiolitic Belts in Eastern Kunlun Orogenic Belt and Its Tectonic Significance. *Earth Science*, 24(2): 26—30 (in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献**
- 陈国超, 裴先治, 李瑞保, 等, 2013. 东昆仑洪水川地区科科鄂阿龙岩体锆石 U-Pb 年代学、地球化学及其地质意义. *地质学报*, 87(2): 178—196.
- 谌宏伟, 罗照华, 莫宣学, 等, 2006. 东昆仑喀雅克登塔格杂岩体的 SHRIMP 年龄及其地质意义. *岩石矿物学杂志*, 25(1): 25—32.
- 陈亮, 孙勇, 裴先治, 等, 2003. 古特提斯蛇绿岩的综合对比及其动力学意义——以德尔尼蛇绿岩为例. *中国科学(D 辑)*, 33(12): 1136—1142.
- 陈有炘, 裴先治, 李瑞保, 等, 2013. 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. *地质前缘*, 20(6): 240—254.
- 陈有炘, 裴先治, 李瑞保, 等, 2014. 东昆仑东段纳赤台岩群变沉积岩地球化学特征及构造意义. *现代地质*, 28(3): 489—500.
- 崔美慧, 孟繁聪, 吴祥珂, 2011. 东昆仑祁漫塔格早奥陶世岛弧: 中基性火成岩地球化学、Sm-Nd 同位素及年代学证据. *岩石学报* 27(11): 3365—3379.
- 冯建赞, 裴先治, 于书伦, 等, 2010. 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. *中国地质*, 37(1): 28—38.
- 高晓峰, 校培喜, 谢从瑞, 等, 2010. 东昆仑阿牙克库木湖北巴什尔希花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年及其地质意义. *地质通报*, 29(7): 1001—1008.
- 贾丽辉, 孟繁聪, 冯惠彬, 2014. 榴辉岩相峰期流体活动: 来自东昆仑榴辉岩石英脉的证据. *岩石学报*, 30(8): 2339—2350.
- 贾儒雅, 2013. 西昆仑造山带丘克苏花岗岩与暗色微粒包体岩石成因及其构造意义(硕士学位论文). 南京: 南京大学.
- 李瑞保, 裴先治, 李佐臣, 等, 2015. 东昆仑南缘布青山构造混杂带得力士坦南 MOR 型玄武岩地质、地球化学特征及岩石成因. *地球科学*, 40(7): 1148—1162.
- 李希, 袁万明, 郝娜娜, 等, 2014. 东昆仑五龙沟花岗岩特征及其构造背景. *世界地质*, 33(2): 275—288.
- 李佐臣, 裴先治, 刘战庆, 等, 2013. 东昆仑南缘布青山构造混杂岩带哥日卓托闪长岩体年代学、地球化学特征及其地质意义. *地质学报*, 87(8): 1089—1103.
- 刘彬, 2011. 东昆仑跃进山早泥盆世侵入杂岩体岩石学、锆石 U-Pb 年代学及岩石成因(硕士学位论文). 武汉: 中国地质大学.
- 刘彬, 马昌前, 郭盼, 等, 2013a. 东昆仑中泥盆世 A 型花岗岩的确定及其构造意义. *地球科学*, 38(5): 947—962.
- 刘彬, 马昌前, 蒋红安, 等, 2013b. 东昆仑早古生代洋壳俯冲与碰撞造山作用的转换: 来自胡晓钦镁铁质岩石的证据. *岩石学报*, 29(6): 2093—2106.
- 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.
- 刘战庆, 裴先治, 李瑞保, 等, 2011. 东昆仑南缘阿尼玛卿构造带布青山地区两期蛇绿岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及其构造意义. *地质学报*, 85(2): 185—194.
- 龙晓平, 2004. 造山带锆石年代学研究——以金水口地区为例(硕士学位论文). 长春: 吉林大学.
- 陆松年, 于海峰, 赵凤清, 2002. 青藏高原北部前寒武纪地质初探. 北京: 地质出版社.

- 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.
- 孟繁聪,崔美慧,吴祥珂,等,2013.东昆仑祁漫塔格花岗片麻岩记录的岩浆和变质事件.岩石学报,29(6):2107—2122.
- 任军虎,柳益群,冯乔,等,2009.东昆仑清水泉辉绿岩脉地球化学及 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年.岩石学报,25(5):1135—1145.
- 孙雨,裴先治,丁仁平,等,2009.东昆仑哈拉尕吐岩浆混合花岗岩:来自锆石 U-Pb 年代学的证据.地质学报,83(7):1000—1010.
- 王冠,孙丰月,李碧乐,等,2014.东昆仑夏日哈木矿区闪长岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学及其地质意义.吉林大学学报(地球科学版),44(3):876—891.
- 王强,许继锋,赵振华,等,2001.大别山燕山期亏损重稀土元素花岗岩类的成因及动力学意义.岩石学报,17(4):551—564.
- 王强,许继峰,赵振华,等,2008.埃达克质岩的构造背景与岩石组合.矿物岩石地球化学通报,27(4):344—350.
- 王晓霞,胡能高,王涛,等,2012.柴达木盆地南缘晚奥陶世万宝沟花岗岩:锆石 SHRIMP U-Pb 年龄、Hf 同位素和元素地球化学.岩石学报,28(9):2950—2962.
- 熊富浩,2014.东昆仑造山带东段古特提斯域花岗岩类时空分布、岩石成因及其地质意义(博士学位论文).武汉:中国地质大学.
- 熊富浩,马昌前,张金阳,等,2011.东昆仑造山带早中生代镁铁质岩墙群 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年、元素和 Sr-Nd-Hf 同位素地球化学.岩石学报,27(11):3350—3364.
- 夏锐,卿敏,王长明,2014.青海东昆仑托克妥 Cu-Au(Mo)矿床含矿斑岩成因:锆石 U-Pb 年代学和地球化学约束.吉林大学学报(地球科学版),44(5):1502—1524.
- 许庆林,孙丰月,李碧乐,等,2014.东昆仑莫河下拉银多金属矿床花岗斑岩年代学、地球化学特征及其构造背景.大地构造与成矿学,38(2):421—433.
- 许志琴,2007.造山的高原——青藏高原的地体拼合、碰撞造山及隆升机制.北京:地质出版社.
- 殷鸿福,张克信,陈能松,等,2000.中华人民共和国区域地质调查报告冬给措纳湖幅.武汉:中国地质大学出版社.
- 余能,金巍,葛文春,等,2005.东昆仑金水口过铝花岗岩的地球化学研究.世界地质,24(2):123—128.
- 张刚,2012.东昆仑造山带东段哈拉尕吐花岗岩体地质特征、形成时代及地质意义(硕士学位论文).西安:长安大学.
- 张建新,孟繁聪,万渝生,2003.柴达木盆地南缘金水口群的早古生代构造热事件:锆石 U-Pb SHRIMP 年龄证据.地质通报,22(6):397—404.
- 张耀玲,张绪教,胡道功,等,2010.东昆仑造山带纳赤台群流纹岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄.地质力学学报,16(1):21—27.
- 赵葵东,蒋少涌,孙涛,等,2006.南岭西段印支期花岗岩 Hf-Nd 同位素解耦现象及岩石成因意义.南京:2006 年全国岩石学与地球动力学研讨会.
- 赵振明,马华东,王秉璋,等,2008.东昆仑早泥盆世碰撞造山的侵入岩证据.地质论评,54(1):47—56.
- 朱云海,张克信,陈能松,等,1999.东昆仑造山带不同蛇绿岩带的厘定及其构造意义.地球科学,24(2):26—30.