

# 东昆仑南缘布青山构造混杂带亿可哈拉尔花岗闪长岩年代学、地球化学特征及构造意义研究

李瑞保<sup>1,2)</sup>, 裴先治<sup>1,2)\*</sup>, 李佐臣<sup>1,2)</sup>, 陈国超<sup>1)</sup>, 刘成军<sup>1)</sup>,  
陈有忻<sup>1)</sup>, 刘战庆<sup>3)</sup>, 裴磊<sup>4)</sup>

1) 长安大学西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室, 陕西西安 710054;

2) 长安大学地球科学与资源学院, 陕西西安 710054; 3) 桂林理工大学地球科学学院, 广西桂林 541004;

4) 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083

**摘要:** 亿可哈拉尔花岗闪长岩体呈构造混杂块体出露于东昆仑南缘布青山构造混杂带, 主要岩性为灰白色片麻状、似斑状粗粒花岗闪长岩和细粒花岗闪长岩。该岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年结果为  $(436.9 \pm 5.7)$  Ma, 形成于早志留世。岩石地球化学特征显示, 岩体具有高硅(66.08%~72.22%)、富钠(4.61%~5.01%)、弱过铝(A/CNK 介于 1.04~1.11)钙碱性花岗岩特征, 微量元素显示出典型的埃达克质花岗岩特征, 即高 Sr( $280 \times 10^{-6}$ ~ $493 \times 10^{-6}$ )、低 Y( $3.76 \times 10^{-6}$ ~ $11.7 \times 10^{-6}$ )、Yb( $0.28 \times 10^{-6}$ ~ $0.86 \times 10^{-6}$ )、高 Sr/Y(23.93~125.0)、轻重稀土元素分馏强烈、稀土元素配分曲线为向右倾斜型及铈异常不明显特征。岩石成因研究表明, 亿可哈拉尔花岗闪长岩与俯冲洋壳板片熔融密切相关, 为由俯冲洋壳变质形成的约含 10%~20%的石榴石角闪岩部分熔融形成, 源区熔融残留物主要为石榴石与角闪石。区域构造研究表明原特提斯构造域东昆仑古洋盆于寒武纪开始发生俯冲, 俯冲作用可能持续至早志留世(437 Ma), 并发生洋壳熔融事件。

**关键词:** 东昆仑; 埃达克质花岗岩; 布青山; 亿可哈拉尔; 地球化学

中图分类号: P588.122; P597.1 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2014.04.05

## Age, Geochemical Characteristics and Tectonic Significance of Yikehalaer Granodiorite in Buqingshan Tectonic Mélange Belt, Southern Margin of East Kunlun

LI Rui-bao<sup>1,2)</sup>, PEI Xian-zhi<sup>1,2)\*</sup>, LI Zuo-chen<sup>1,2)</sup>, CHEN Guo-chao<sup>1)</sup>, LIU Cheng-jun<sup>1)</sup>,  
CHEN You-xin<sup>1)</sup>, LIU Zhan-qing<sup>3)</sup>, PEI Lei<sup>4)</sup>

1) Key Laboratory of Western China's Mineral Resources and Geological Engineering, Ministry of Education, Xi'an, Shaanxi 710054;

2) School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054;

3) College of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004;

4) School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083

**Abstract:** Located in Buqingshan tectonic mélange belt on the southern margin of Eastern Kunlun Orogeny, Yikehalaer granitoid comprises mainly of grayish white coarse grained granodiorite and fine grained granodiorite with gneissic structure and porphyaceous texture. The zircons of the rock assume typical magmatic zoning

本文由国家自然科学基金项目(编号: 41172186; 40972136)、中央高校基本科研业务费专项资金项目(编号: CHD2011TD020; 2013G1271091; 2013G1271092)和青海省国土资源厅-中国铝业公司公益性区域地质矿产调查基金项目(编号: 200801)联合资助。

收稿日期: 2013-08-20; 改回日期: 2013-11-01。责任编辑: 张改侠。

第一作者简介: 李瑞保, 男, 1982年生。博士, 讲师。从事东昆仑地区新元古代—早古生代构造岩浆事件研究。通讯地址: 710054, 陕西省西安市雁塔路南段126号。E-mail: liruibao0971@163.com。

\*通讯作者: 裴先治, 男, 1963年生。教授, 博士生导师。主要从事构造地质学研究。通讯地址: 710054, 陕西省西安市雁塔路南段126号。E-mail: peixzh@sina.com。

structure, suggesting the characteristics of magmatic zircon. The LA-ICP-MS zircon U-Pb age is  $(436.9 \pm 5.7)$  Ma, suggesting the formation of granitoid in Early Silurian. The authors studied in detail the geological and geochemical characteristics of Yikehalaer granitoid, and the results show that  $\text{SiO}_2$  content ranges from 66.08% to 72.22%,  $\text{Na}_2\text{O}$  content ranges from 4.61% to 5.01%, and  $\text{K}_2\text{O}$  content ranges from 0.95% to 3.59%, similar to the characteristics of high potassium calc-alkali granite. The trace elements and rare earth elements (RRE) data show that the Yikehalaer granitoid is also classified as a adakitic granite, with high content of Sr ranging from  $280 \times 10^{-6}$  to  $493 \times 10^{-6}$ , low content of Y ranging from  $3.76 \times 10^{-6}$  to  $11.7 \times 10^{-6}$ , low content of Yb ranging from  $0.28 \times 10^{-6}$  to  $0.86 \times 10^{-6}$ , and high content of Sr/Y ranging from 23.93 to 125.0. Moreover, the chondrite-normalized REE patterns show rightly-dipping style, suggesting enrichment of LREE, with no obvious Eu anomaly. Petrogenetic research shows that the granitoid was most probably derived from the partial melting of the 10%~20% garnet amphibolite connecting the subducting oceanic crust. Regional tectonic research shows that the East Kunlun paleo-ocean basin in proto-Tethys domain experienced subduction from Cambrian until Early Silurian, which led to an important oceanic crust melting event at the late stage of oceanic crust subduction in Early Silurian.

**Key words:** East Kunlun; adakitic granite; Buqingshan; Yikehalaer; geochemistry

经典的埃达克岩是一种产在俯冲带构造环境却又不同于普通钙碱性弧岩浆岩,它是产于现代岛弧中的具有独特岩石地球化学组成的中酸性火成岩,是早期俯冲消减的洋壳板片部分熔融及其演化的产物(Defant et al., 1990, 1993; Drummond et al., 1990; Kay et al., 1993)。随后又有学者研究发现具有埃达克质地球化学特征的岩石不仅局限于洋壳俯冲带构造环境,在大陆碰撞背景中由俯冲陆壳部分熔融(张宏飞等, 2007)或在地壳拆沉构造背景下也可产出(张旗等, 2001)。近年来,学者在东昆仑南缘厘定出一条包含有混杂基质与众多构造混杂岩块的布青山—阿尼玛卿构造混杂岩带(裴先治等, 2011, 2013; 刘战庆, 2011)。布青山构造混杂带是一条浓缩了东昆仑地区新元古代晚期—古生代洋陆演化信息的重要的构造混杂带。迄今为止,学者陆续在东昆仑造山带及其南缘布青山地区发现了较多早古生代构造岩浆事件,包括东昆仑寒武纪科科可特镁铁—超镁铁质岩带(冯建赞等, 2010)、寒武纪乌妥蛇绿岩(朱云海等, 2000; 王国灿等, 1999)、寒武纪可可沙弧石英闪长岩(张亚峰等, 2010)、志留纪和勒岗那仁后碰撞花岗岩(Li et al., 2013), 志留纪五龙沟碰撞型二长花岗岩(陆露等, 2013)等,这些岩浆岩形成于原特提斯洋构造演化的不同构造阶段,对探讨原特提斯构造域东昆仑早古生代洋陆构造演化具有重要意义。近年来,笔者在东昆仑南缘布青山构造混杂带进行 1:5 万区域地质填图过程中,发现多个早古生代与原特提斯洋演化相关的构造岩浆事件,通过地质、地球化学及同位素年代学手段在布青山地区确证发育有志留纪埃达克质岩浆岩,这对恢复东昆仑造山带早古生代洋壳俯冲时限、洋陆构造演化历史及早古生代晚期地壳生长具有重要理论意义。

## 1 区域地质背景及岩体地质特征

布青山构造混杂带位于东昆仑造山带南缘布青山—马尼特一带,其南侧为巴颜喀拉构造带,北邻东昆仑造山带,东接阿尼玛卿构造带。该构造混杂带呈近东西向展布,南北宽约 10 km,东西长约 35 km,向东延伸与阿尼玛卿构造带相接(图 1a)。因其产出的特殊大地构造位置,前人从不同角度对东昆仑造山带及南缘布青山地区做了大量研究,并取得了较多研究成果(刘成东等, 2003; Bian et al., 2004; 丰成友等, 2004; 杨经绥等, 2005; 郭安林等, 2006; 边千韬等, 2007; 刘战庆, 2011; 刘战庆等, 2011; 李瑞保等, 2012)。野外调查与室内详细研究表明,布青山构造混杂带主要由众多不同时代、不同构造属性的混杂岩块及二叠纪马尔争组(Pm)浊积岩系组成。混杂岩块呈大小不等的构造透镜体产出,与围岩马尔争组(Pm)为断层接触关系。混杂岩块主要包括中元古界基底岩块苦海岩群(Pt<sub>2</sub>K)、早古生代洋壳型岩块和岛弧型岩块、晚古生代 MORB 型岩块和 OIB 型岩块等(刘战庆, 2011)。亿可哈拉尔花岗闪长岩体位于东昆仑南缘布青山构造混杂带得力斯坦—亿可哈拉尔地区,呈近北西西向展布,东西长 8~10 km,南北宽 1~2 km,出露面积约 15~20 km<sup>2</sup>,岩体北侧与中元古界苦海岩群(Pt<sub>2</sub>K)大理岩呈断层接触,南侧与二叠系马尔争组砂板岩(Pm)及上二叠统格曲组(P<sub>3</sub>g)复成分砾岩为断裂接触,东侧与印支期闪长岩体亦呈断裂接触,岩体局部有印支期闪长岩脉体侵入(图 1b, 图 2)。岩体岩性主要为灰白色片麻状、似斑状中粗粒花岗闪长岩,普遍发育片麻理构造,产状主体南倾。

灰白色似斑状中粗粒花岗闪长岩: 岩石为灰-灰白色,呈似斑状结构,基质为中粒花岗结构,片麻状构造。主要矿物组成为斜长石(45%~60%)、石

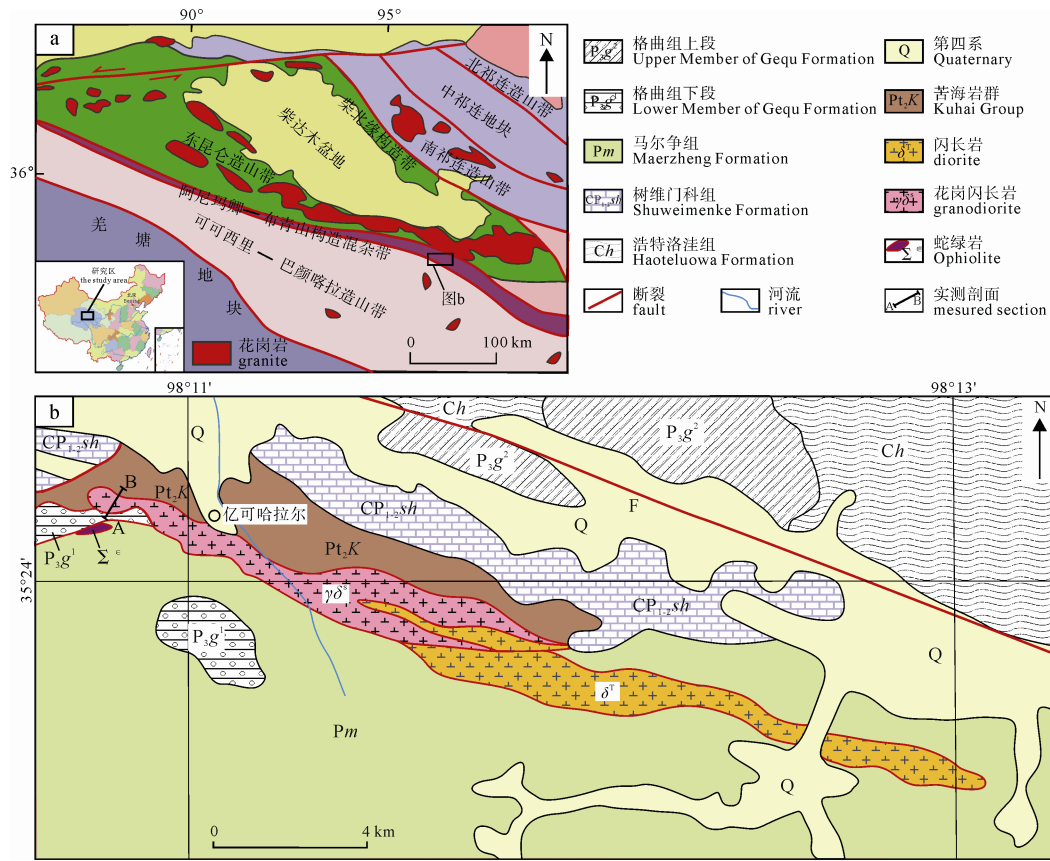


图 1 布青山构造混杂带大地构造背景(a)及地质简图(b)(据刘战庆, 2011 略改)

Fig. 1 Tectonic background(a), and the simplified geological map(b) of Buqingshan Tectonic Mélange Belt (modified after LIU, 2011)

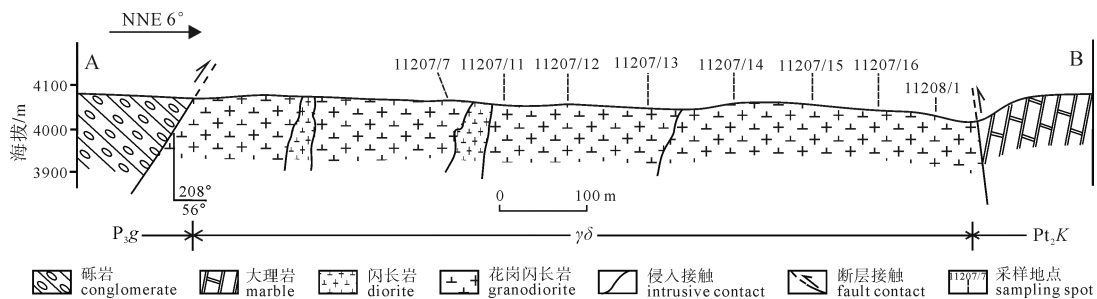


图 2 亿可哈拉尔花岗岩体实测剖面图(剖面 AB 位置见图 1b)

Fig. 2 Measured geological section of Yikehalar granodiorite(see Fig. 1b for section AB)

P<sub>3g</sub>-格曲组;  $\gamma\delta$ -花岗闪长岩; Pt<sub>2</sub>K-苦海岩群

P<sub>3g</sub>-Gequ Formation;  $\gamma\delta$ -granodiorite; Pt<sub>2</sub>K-Kuhai Group

英(20%~25%)、钾长石(15%)、角闪石(10%~15%)、黑云母(2%~5%)，还有少量的磷灰石、锆石、磁铁矿等副矿物。部分斜长石颗粒较粗大，呈斑晶零散分布，斑晶呈宽板状，聚片双晶发育，粒径为3~5 mm，斑晶约占1%左右。基质中斜长石粒径为0.5~2.0 mm，呈柱状及板条状杂乱分布。钾长石呈半自形粒状，石英呈它形粒状分布于长石之间，具波状消光现象。角闪石呈长柱状，黑云母呈片状分布，可见黑云母中包裹较自形的磷灰石矿物。岩石蚀变主要表现为长石的高岭土化及绢云母化，角闪石与黑云母的绿泥石化及绿帘石化。

## 2 测试方法

样品分别进行主量元素和微量元素分析。样品磨碎至200目后，在中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室进行主量和微量元素分析测试。主量元素使用X-射线荧光光谱仪(XRF-1500)测试，精度优于3%。微量元素及稀土元素利用酸溶法制备样品，使用ICP-MS(Element II)测试，分析精度优于10%。化学分析测试流程参考Chen等(2000, 2002)的方法。

锆石 U-Pb 同位素测试在西北大学大陆动力学

国家重点实验室的 LA-ICP-MS 仪器上用标准测定程序进行。分析仪器为 Elan6100DRC 型四级杆质谱仪和 Geolas200M 型激光剥蚀系统, 激光器为 193 nm ARF 准分子激光器。激光剥蚀斑束直径为 30 μm, 激光剥蚀深度为 20~40 μm。锆石年龄计算采用国际校准锆石 91500 作为外标, 元素含量采用美国国家标准物质局人工合成硅酸盐玻璃 NIST610 作为外标, <sup>29</sup>Si 作为内标元素进行校正。样品的同位素比值和元素含量采用 GLITTER(4.0 版本, Macquarie University)程序处理, 并采用 Anderson(2002) 软件对测试数据进行普通铅校正, 年龄计算及谐和图绘制采用 Isoplot(2.49 版)软件完成。详细的实验原理和测试流程及仪器参见相关文献 Yuan 等 (2004)。

### 3 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学特征

为了精确限定亿可哈拉尔花岗闪长岩的形成时代, 对该岩体(样品 11207-7)进行高精度 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素年代学研究。采样地理坐标为北纬 35°25.420', 东经 97°59.021'。

亿可哈拉尔花岗闪长岩的锆石晶体呈浅黄色—无色透明, 自形程度较高, 多呈长柱状, 粒径多为 200~400 μm, 长宽比为 1:2~1:4。锆石阴极发光(CL)照片显示(图 3), 锆石具明显的生长震荡环带结构, 表明为岩浆锆石。另有极少数锆石发育有古老锆石的残留核(11207-7-09、11207-7-12 等), 在 CL 图像中呈黑色椭圆状。为避免继承锆石对测年结果的影响, 所选测点均位于明显的岩浆环带上。前人研究表明, 不同成因锆石具有不同的 Th/U 比值, 岩浆成因锆石 Th/U 比值一般大于 0.4, 变质成因锆石 Th/U 比值一般小于 0.1。在 23 个测点中, 锆石 Th 含量介于 31.92×10<sup>-6</sup>~217.97×10<sup>-6</sup>, U 含量介于 49.8×10<sup>-6</sup>~307.8×10<sup>-6</sup>, 且 Th、U 呈较好的线型关系

(图略), 与典型的岩浆锆石特征一致。Th/U 介于 0.34~0.97, 主体大于 0.4, 也显示了岩浆成因锆石特征。剔除五个不谐和的数据外, 剩余 18 个数据 <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 加权平均年龄值为 (436.9±5.7) Ma (MSWD=3.0)(图 4), 时代为早志留世, 代表亿可哈拉尔花岗闪长岩的结晶年龄。

## 4 岩石地球化学特征

### 4.1 主量元素

亿可哈拉尔花岗闪长岩体 SiO<sub>2</sub> 表现出较宽的变化范围, 介于 66.08%~72.22%, 属于中酸性岩石。岩石具有较高的 Na<sub>2</sub>O 含量(4.61%~5.01%), Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O 比值主体大于 1.0(1.22~5.27), 平均为 1.92, 显示出 I 型花岗岩特征。全碱含量(Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O) 介于 5.96%~8.45%。样品 TiO<sub>2</sub> 含量变化较大, 介于 0.29%~0.54%。MgO 含量介于 0.71%~1.15%, Mg<sup>#</sup> 值介于 53.52~57.39, 高于埃达克岩平均值 47(钱青, 2001); Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量主体大于 15%(14.94%~16.36%), A/CNK 主体小于 1.1(1.04~1.11), 为准铝质-弱过铝质。里特曼指数 σ 介于 1.32~2.55, 表明其为钙碱性系列, 在 SiO<sub>2</sub>-(Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O)图解中, 样品落入亚碱性区域(图 5a), 在 SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O 图解中, 样品主体落入高钾钙碱性系列范围(图 5b), 只有极个别样品

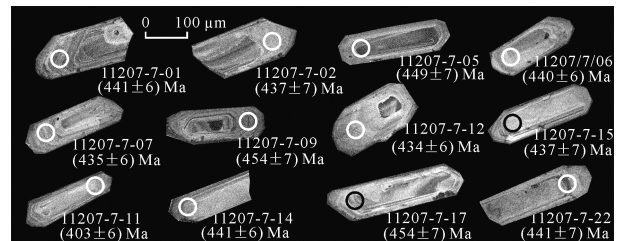


图 3 亿可哈拉尔花岗闪长岩(样品 11207-7)代表性锆石的阴极发光图像

Fig. 3 Cathodoluminescence images of representative zircons from Yikehalaer granodiorite (Sample No. 11207-7)

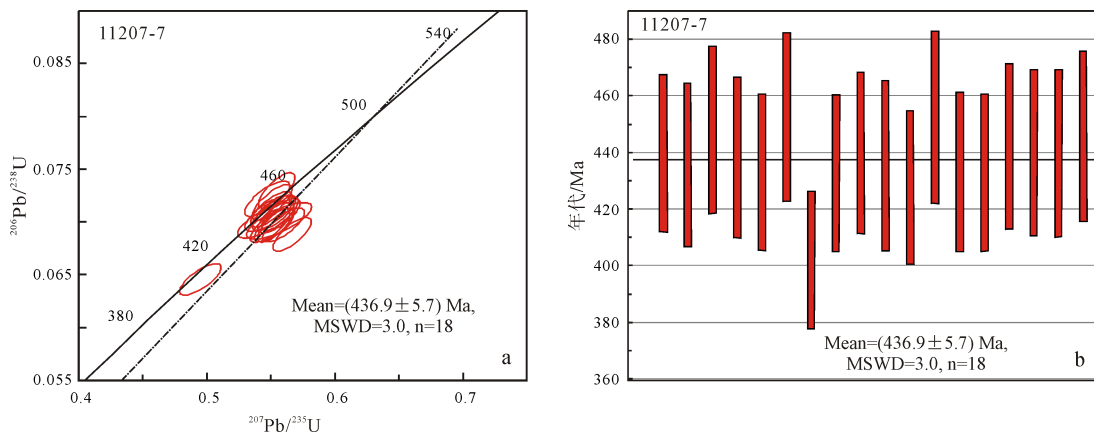


图 4 亿可哈拉尔花岗闪长岩(样品 11207-7)LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄谐和图和直方图

Fig. 4 LA-ICP-MS zircon U-Pb concordia diagram and weighted average diagram for Yikehalaer granodiorite (Sample No. 11207-7)

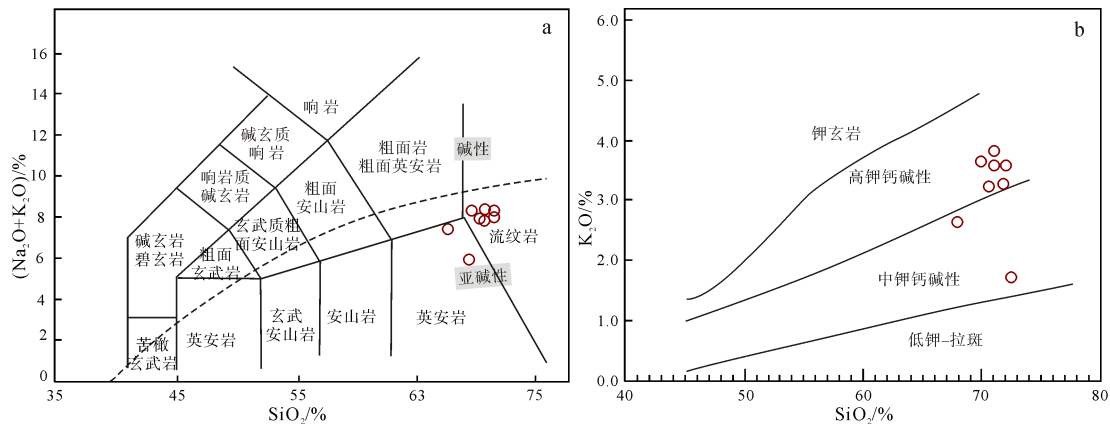
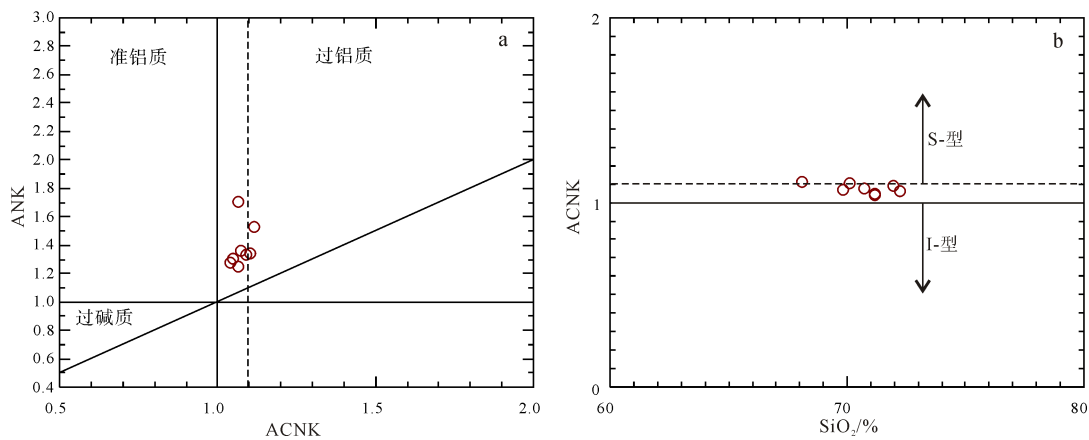


图 5 亿可哈拉尔花岗岩分类图解

Fig. 5 Rock classification of Yikehalaer granodiorite

图 6 亿可哈拉尔花岗岩 ACNK-ANK 图解(a)、SiO<sub>2</sub>-ACNK 图解(b)Fig. 6 ACNK-ANK diagram (a), SiO<sub>2</sub>-ACNK diagram (b) of Yikehalaer granodiorite

ACNK=Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/(CaO+Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O)(分子摩尔数); ANK=Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/(Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O)(分子摩尔数)

ACNK=Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/(CaO+Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O) (molecular molar concentration); ANK=Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/(Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O) (molecular molar concentration)

落入中钾钙碱性范围,可能系分析误差所致或者同一源区产生的岩浆在上侵过程中,不同部位的岩浆成分有一定差异(杨岳清等, 2013);在 ANK-ACNK 图解上(Maniar et al., 1989),样品主体落入弱过铝质区域(图 6)。总之,亿可哈拉尔花岗岩闪长岩主要表现出高硅、富钠、弱过铝质钙碱性花岗岩特征。

#### 4.2 稀土元素、微量元素

亿可哈拉尔花岗岩闪长岩稀土总量( $\Sigma$ REE)为  $123.47 \times 10^{-6} \sim 204.24 \times 10^{-6}$ , LREE/HREE 比值为 15.11~31.73, 平均值为 22.94, 反映了岩石具有较强的轻重稀土分馏。 $(La/Sm)_N$  为 4.43~8.05,  $(La/Yb)_N$  较化较大, 为 26.30~84.76, 均大于 20.0。 $\delta Eu$  介于 0.62~1.10 之间, 主体为 1.0 左右, 具 Eu 弱负异常或弱正异常特征, 表明熔融源区几乎没有斜长石的残留。在球粒陨石标准化稀土元素配分曲线图解上(图 7a), 样品表现出轻稀土富集、重稀土显著亏损的曲线平滑的右倾特征, 与埃达克岩

稀土元素配分曲线基本一致(Defant et al., 1990, 1993; Kay et al., 1993; Stern et al., 1996; Drummond et al., 1996; Sajona et al., 2000; Martin et al., 2005)。

微量元素特征方面, 岩体表现出明显的高 Sr 及低 Y、Yb 特征。其中, Sr 含量较高, 介于  $280 \times 10^{-6} \sim 493 \times 10^{-6}$ , 主体大于  $400 \times 10^{-6}$ , Y、Yb 含量较低, Y 介于  $3.76 \times 10^{-6} \sim 11.7 \times 10^{-6}$ , 均小于  $18.0 \times 10^{-6}$ , Yb 介于  $0.28 \times 10^{-6} \sim 0.86 \times 10^{-6}$ , 均小于  $1.9 \times 10^{-6}$ 。Sr/Y 比值介于 23.93~125.0, 主体大于 40, 平均值为 67.34。样品相容元素 Cr、Ni 含量较低,  $Cr < 14 \times 10^{-6}$ ,  $Ni < 17 \times 10^{-6}$ 。在 N-MORB 标准化不相容元素蛛网图中(图 7b), 岩体在具有富集大离子亲石元素(如 Cs、Rb、Ba、Th、U)和轻稀土元素、亏损高场强元素(Nb、Ta、Hf)及 Ti 的弧岩浆岩特征基础上, 突出表现为 Y、Yb、Lu 元素的亏损和 Sr 元素的富集, 表现出与 N-MORB 标准化埃达克质花岗岩相似的特征(Defant et al., 1990, 1993; Kay et al., 1993; Drummond et al., 1996; Stern et al., 1996; Sajona et al., 2000; Martin et al., 2005)。



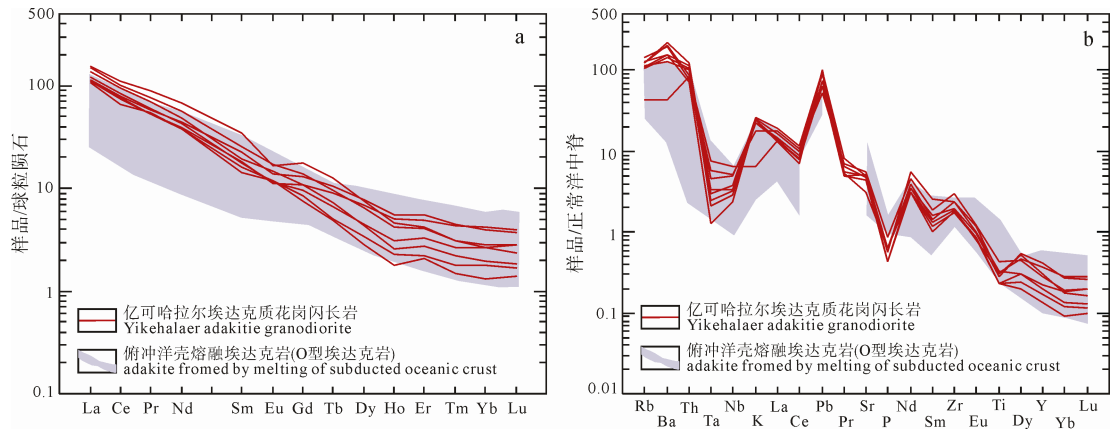


图7 亿可哈拉尔花岗闪长岩稀土元素球粒陨石标准化配分图(a)和正常洋中脊标准化微量元素蛛网图(b)

Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns (a) and NMORB-normalized spidergram (b) of Yikehalaer granodiorite  
球粒陨石标准值据 Boynton, 1984; 正常洋中脊标准值据 Pearce et al., 1993; 俯冲洋壳熔融形成埃达克岩据 Defant et al., 1990, 1993; Kay et al., 1993; Drummond et al., 1996; Stern et al., 1996; Sajona et al., 2000; 裴先治等, 2003; Martin et al., 2005; 边千韬等, 2007  
chondrite data for normalization after Boynton, 1984; N-MORB data for normalization after Pearce et al., 1993; adakite formed by melting of subducted oceanic crust data after Defant et al., 1990, 1993; Kay et al., 1993; Drummond et al., 1996; Stern et al., 1996; Sajona et al., 2000; PEI et al., 2003; Martin et al., 2005; BIAN et al., 2007

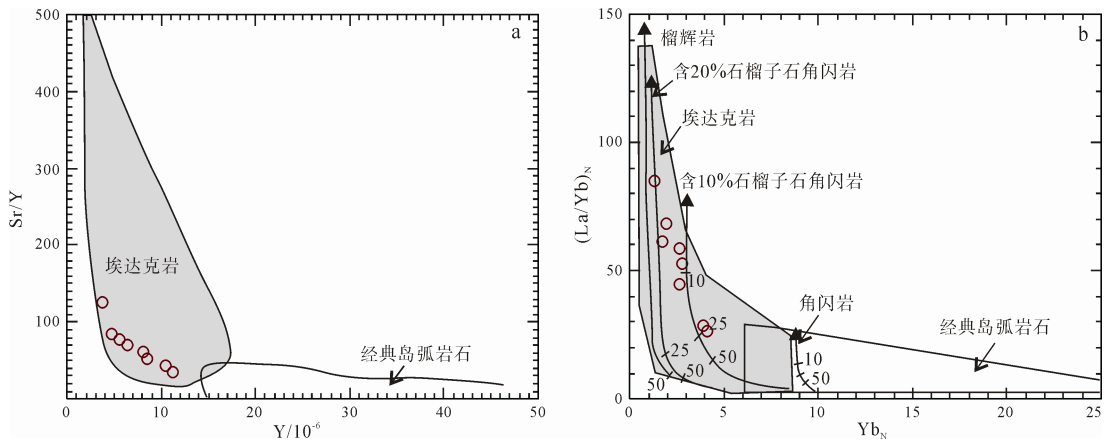


图8 亿可哈拉尔花岗岩 Y-Sr/Y 图解(a)、(La/Yb)<sub>N</sub>-Yb<sub>N</sub> 图解(b)

Fig. 8 Y-Sr/Y diagram (a), (La/Yb)<sub>N</sub>-Yb<sub>N</sub> diagram (b) of Yikehalaer granodiorite

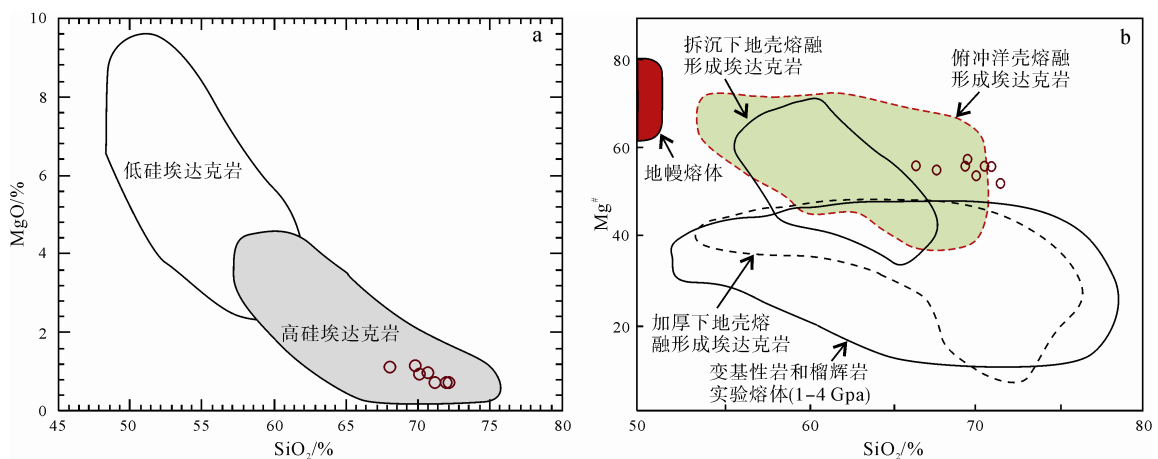


图9 亿可哈拉尔花岗岩 SiO<sub>2</sub>-MgO 判别图解(a)和熔融源区 SiO<sub>2</sub>-Mg<sup>#</sup>判别图解(b)

Fig. 9 SiO<sub>2</sub>-MgO discrimination diagram (a), and SiO<sub>2</sub>-Mg<sup>#</sup> melting source (b) of Yikehalaer granodiorite

俯冲洋壳熔融形成埃达克岩数据自 Wang et al., 2006; 拆沉下地壳熔融形成埃达克岩数据自 Xu et al., 2002; Gao et al., 2004; Wang et al., 2006; 变基性岩和榴辉岩实验熔体数据自 Rapp et al., 1999, 2002; 加厚下地壳熔体数据自 Atherton et al., 1993; Petford et al., 1996; Johnson et al., 1997  
subducted oceanic crust-derived adakites after Wang et al., 2006; delaminated lower crust-derived akakites after Xu et al., 2002; Gao et al., 2004; Wang et al., 2006; metabasaltic and eclogitic experimental melts after Rapp et al., 1999, 2002; thick lower crust-derived adakites after Atherton et al., 1993, Petford et al., 1996, Johnson et al., 1997

## 5 讨论

### 5.1 岩石类型及岩石成因

亿可哈拉尔花岗闪长岩体表现为弱过铝质、钙碱性系列 I 型花岗岩, 岩石成因可能与俯冲带岩浆弧构造环境相关。该岩体表现出典型的埃达克岩地球化学特征(Defant et al., 1990, 1993; Kay et al., 1993; Petford et al., 1996; Stern et al., 1996), 如  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量大于 15%, Sr 含量明显大于  $400 \times 10^{-6}$ , Y 含量全部小于  $18 \times 10^{-6}$ , Yb 含量均小于  $1.9 \times 10^{-6}$ ,  $\text{Sr/Y} > 40$ 。在 Sr/Y-Y 图解(Defant et al., 1990)和  $(\text{La/Yb})_N$ - $\text{Yb}_N$  图解上(Drummond et al., 1990)(图 8a, b), 全部落入埃达克岩区域。在  $\text{SiO}_2$ -MgO 图解中落入高硅埃达克岩区域(Martin et al., 2005)(图 9a)。

目前, 有关埃达克质岩石的形成机制有多种, 主要包括: (1)俯冲洋壳熔融(Defant et al., 1990); (2)增厚下地壳熔融(Atherton et al., 1993; Condie et al., 2005); (3)拆沉下地壳熔融(Kay et al., 1993; Xu et al., 2002; Gao et al., 2004; Wang et al., 2006); (4)玄武质岩浆的结晶分异(Castillo et al., 1999)等。亿可哈拉尔花岗岩岩石学、地球化学研究表明其岩石类型为富  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、富  $\text{Na}_2\text{O}$ 、高 Sr 低 Y、Yb 的钙碱性岩浆, 与俯冲洋壳熔融形成的埃达克岩特征相似(Defant et al., 1990, 1993), 而明显有别于下地壳镁铁质岩石和拆沉下地壳物质熔融产生的埃达克质岩通常所具有的富  $\text{K}_2\text{O}$ 、富碱、低  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的特征(Kay et al., 1993; 张旗等, 2001; Xu et al., 2002; Wang et al., 2007)。在  $\text{SiO}_2$ -Mg<sup>#</sup>图解中(图 9b), 样品落入俯冲洋壳起源区域, 表明其形成与俯冲洋壳板片熔融密切相关。在角闪石、石榴石和单斜辉石中, Sr 的分配系数很小, 而 Y 的分配系数较高, 熔融残留相中存在石榴石和角闪石将导致埃达克质岩浆亏损 Y 和 HREE 并具高 Sr/Y 和 La/Yb 比值(Drummond et al., 1990; Defant et al., 1990, 1993)。在重稀土元素中, Ho 的正异常和 Er 的负异常可能与角闪石的分异作用有关(马昌前等, 2004), 而本文重稀土表现出的 Ho 负异常和 Er 正异常特征, 很可能与熔融源区角闪石的富集相关。亿可哈拉尔花岗岩表现出以上属性, 表明源区主要熔融残留相为石榴石和角闪石, 以及 Fe-Ti 氧化物、金红石等。另外, 埃达克质花岗岩的稀土元素配分图解显示重稀土元素区段呈适度平坦状, 表明角闪石为主要矿物残留相, 因此推测熔融源区岩石为含石榴石角闪岩而非榴辉岩, 并估算为约含 10%~20%石榴石角闪岩熔融的产物(图 8b)。实验岩石学研究表明, 在 1~4 GPa 的压力条件下, 玄武质源岩部分熔融形成的埃达克岩的  $\text{Mg}^\# < 50$ 。但是, 当板片熔体被地幔楔橄榄岩混染后

其  $\text{Mg}^\#$  迅速增加可大于 50(Peacock et al., 1994)。亿可哈拉尔岩体  $\text{Mg}^\#$  略高, 而 Cr、Ni 值较低, 可能反映了地幔楔橄榄岩对其的轻微混染。总之, 亿可哈拉尔花岗闪长岩体为俯冲洋壳 10%~20%石榴石角闪岩部分熔融的产物, 并遭受地幔楔对其轻微混染。

### 5.2 区域大地构造意义

前人对东昆仑造山带新元古代晚期—早古生代构造岩浆事件进行了较多研究, 基本认为东昆仑造山带是一个以加里东造山作用为主造山期、叠置有晚古生代古特提斯洋陆演化的复合造山带。区域上, 代表早期拉张裂解的构造岩浆事件有东昆仑金水口南具裂谷属性的变辉长岩和小庙基性岩墙, LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分别为  $(796 \pm 41)$  Ma 和  $(733.66 \pm 6.6)$  Ma(任军虎等, 2011), 基本与 Rodinia 超大陆裂解时间相对应。随着东昆仑地区进一步拉张裂解、成洋, 形成了寒武纪乌妥蛇绿岩(王国灿等, 1999)、科科可特镁铁-超镁铁质岩(冯建赞等, 2010)、东昆仑南缘得力斯坦蛇绿岩(511 Ma)(刘战庆, 2011; 刘战庆等, 2011)以及玛积洋岛辉长岩(李王晔, 2008)等。之后, 洋壳开始发生复杂的俯冲作用, 区域上, 东昆仑清水泉地区出露一套原岩为 N-MORB 型基性熔岩的中高压麻粒岩, 其变质年龄为 508 Ma, 代表洋壳于 508 Ma 左右已俯冲至地下 45~40 km 深处并发生中高压麻粒岩相变质作用(李怀坤等, 2006)。东昆仑地区发育一套早古生代纳赤台岩群变中基性弧火山岩, LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 474 Ma(裴先治等, 2013), 东昆仑万宝沟地区发育一套弧花岗岩, 侵入年龄为 450 Ma, 东昆仑香日得以南发育一套岛弧性质的变形变质闪长岩体, 单颗粒锆石 U-Pb 年龄为  $(446.5 \pm 9.1)$  Ma(陈能松等, 2000), 这些均为洋壳俯冲阶段的构造岩浆响应。

岩石成因研究表明亿可哈拉尔花岗闪长岩熔融源区相当于含 10%~20%的石榴石角闪岩而非榴辉岩, 以及岩石类型为 O 型埃达克质花岗岩特征, 表明早志留世仍处于洋壳俯冲阶段, 而非源区相当于榴辉岩相的大陆碰撞及陆壳加厚的构造背景。刘战庆(2011)报道布青山地区白日切特弧花岗闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为  $(441.1 \pm 6.3)$  Ma, 弧流纹斑岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为  $(437.75 \pm 2.8)$  Ma。本项研究新获得亿可哈拉尔花岗闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为  $(436.9 \pm 5.7)$  Ma, 与上述学者报道的布青山地区弧花岗岩年龄近乎一致。因此, 本文确定布青山构造带于 441~437 Ma 期间, 仍发育有一期重要的与洋壳俯冲相关的构造岩浆事件。综合东昆仑造山带及

其南缘布青山构造混杂带新元古代以来具有不同构造属性岩浆事件群, 认为东昆仑古洋盆于寒武纪开始发生俯冲, 俯冲作用持续时间可能较长。本文数据进一步表明洋壳俯冲作用至少持续到早志留世(437 Ma), 并于俯冲晚期引发洋壳熔融事件(边千韬等, 2007), 造成东昆仑地区志留纪一次重要的地壳生长。

中晚志留志以来东昆仑地区转入后碰撞及陆内演化阶段。区域上, 东昆仑东段早古生代晚期 A 型花岗岩标志东昆仑造山带转入后碰撞构造阶段(Li et al., 2013)。东昆仑中断裂高角度韧性逆冲变形时代为 426—408 Ma(Wang et al., 2003), 应为洋盆关闭后碰撞造山阶段的地壳中深层次构造响应。沿昆中断裂带西段产出的同构造花岗斑岩(锆石  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄为 408 Ma 和 391 Ma)为加里东末期陆内构造变形的产物(陆露等, 2010)。泥盆纪托牛山组磨拉石组合的沉积则宣告东昆仑造山带早古生代洋陆演化及加里东期主造山作用的彻底结束, 和新一轮与北古特提斯洋相关的洋陆旋回演化的开启(陈能松等, 2008; 李瑞保等, 2012; Li et al., 2013)。

## 6 结论

1) 布青山构造混杂带亿可哈拉尔岩体主体岩性为灰白色似斑状、片麻状中粒花岗闪长岩, 与围岩为断层接触关系, 主量元素表现出高  $\text{SiO}_2$ 、富  $\text{Na}_2\text{O}$ 、准铝-弱过铝钙碱性花岗岩特征。稀土元素和微量元素特征表明其为典型的埃达克质花岗闪长岩。

2) 亿可哈拉尔花岗闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为(436.45±6.8) Ma, 时代为早志留世, 代表该岩体于早志留世形成侵位。

3) 亿可哈拉尔花岗闪长岩是由俯冲洋壳变质形成的约含 10%~20% 的石榴石角闪岩部分熔融形成, 源区主要熔融残留物为石榴石与角闪石。区域构造研究表明, 原特提斯构造域东昆仑古洋盆于寒武纪开始发生俯冲, 俯冲作用持续时间较长, 可能持续至早志留世(437 Ma), 并于俯冲晚期引发了一期重要的洋壳熔融事件。

## 参考文献:

边千韬, POSPELOV I I, 李惠民, 常承法, 李继亮. 2007. 青海省布青山早古生代末期埃达克岩的发现及其构造意义[J]. 岩石学报, 23(5): 925-934.

陈能松, 孙敏, 王勤燕, 张克信, 万渝生, 陈海红. 2008. 东昆仑造山带中带的锆石 U-Pb 定年与构造演化启示[J]. 中国科学(D 辑), 38(6): 657-666.

陈能松, 孙敏, 张克信, 朱云海. 2000. 东昆仑变闪长岩体的  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  和 U-Pb 年龄: 角闪石过剩和东昆仑早古生代岩浆

岩带证据[J]. 科学通报, 45(21): 2337-2342.

丰成友, 张德全, 王富春, 余宏全, 李大新, 王彦. 2004. 青海东昆仑复合造山过程及典型造山型金矿地质[J]. 地球学报, 25(4): 415-422.

冯建赞, 裴先治, 于书伦, 丁仁平, 李瑞保, 孙雨, 张亚峰, 李佐臣, 陈有炘, 张晓飞, 陈国超. 2010. 东昆仑都兰可沙地区镁铁-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, 37(1): 28-37.

郭安林, 张国伟, 孙延贵, 郑健康, 刘晔, 王建其. 2006. 阿尼玛卿蛇绿岩带 OIB 和 MORB 的地球化学及空间分布特征: 玛积雪山古洋脊热点构造证据[J]. 中国科学(D 辑): 地球科学, 36(7): 618-629.

李怀坤, 陆松年, 相振群, 周红英, 郭虎, 宋彪, 郑健康, 顾瑛. 2006. 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, 13(6): 311-321.

李瑞保, 裴先治, 李佐臣, 刘战庆, 陈国超, 陈有炘, 魏方辉, 高景民, 刘成军, 裴磊. 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[J]. 地学前缘, 19(5): 244-254.

李王晔. 2008. 西秦岭—东昆仑造山带蛇绿岩及岛弧型岩浆岩的年代学和地球化学研究-对特提斯洋演化的制约[D]. 合肥: 中国科学技术大学.

刘成东, 莫宣学, 罗照华, 喻学惠, 谌宏伟, 李述为, 赵欣. 2003. 东昆仑造山带花岗岩类 Pb-Sr-Nd-O 同位素特征[J]. 地球学报, 24(6): 584-588.

刘战庆, 裴先治, 李瑞保, 李佐臣, 陈有炘, 高景民, 刘成军, 王学良, 魏方辉, 张刚, 杨忠智. 2011. 东昆仑南缘布青山构造混杂岩带的地质特征及大地构造意义[J]. 地质通报, 30(8): 1182-1195.

刘战庆. 2011. 东昆仑南缘布青山构造混杂岩带地质特征及区域构造研究[D]. 西安: 长安大学.

陆露, 胡道功, 张永清, 吴珍汉. 2010. 昆中断裂带同构造花岗斑岩锆石 U-Pb 年龄及其构造意义[J]. 地质力学学报, 16(1): 36-43.

陆露, 张延林, 吴珍汉, 胡道功. 2013. 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, 34(4): 447-454.

马昌前, 余振兵, 许聘, 王琳燕. 2004. 桐柏-大别山南缘的志留纪 A 型花岗岩类: SHRIMP 锆石年代学和地球化学证据[J]. 中国科学(D 辑), 34(12): 1100-1110.

裴先治, 李瑞保, 李佐臣, 陈国超, 丁仁平. 2013. 青海省都兰县阿拉克湖—红水川地区七幅 1: 50000 区域地质矿产调查报告[R]. 西安: 长安大学地质调查研究院.

裴先治, 李瑞保, 刘战庆, 李佐臣, 陈有炘, 刘成军, 高景民, 王学良, 魏方辉, 张刚. 2011. 东昆仑南缘布青山构造混杂岩带的组成特征及其大地构造意义[C]//2011 年岩石学与地球动力学研讨会论文摘要: 223-224.

裴先治, 王涛, 丁仁平, 李勇, 胡波. 2003. 东秦岭商丹带北侧新元古代埃达克质花岗岩及其地质意义[J]. 中国地质, 30(4): 372-381.

钱青. 2001. Adakite 的地球化学特征及成因[J]. 岩石矿物学杂志, 20(3): 297-306.

任军虎, 张琨, 柳益群, 周鼎武, 冯乔. 2011. 东昆仑金水口南



- 变余辉长岩地球化学及锆石定年[J]. 西北大学学报(自然科学版), 41(1): 100-106.
- 王国灿, 张天平, 梁斌, 陈能松, 朱云海, 朱杰, 拜永山. 1999. 东昆仑造山带东段昆中复合蛇绿混杂岩带及“东昆中断裂带”地质涵义[J]. 地球科学, 24(2): 129-133.
- 杨经绥, 许志琴, 李海兵, 史仁灯. 2005. 东昆仑阿尼玛卿地区古特提斯火山作用和板块构造体系[J]. 岩石矿物学杂志, 24(5): 369-380.
- 杨岳清, 吕博, 孟贵祥, 严加永, 赵金花, 王守光, 贾玲珑, 韩建刚. 2013. 内蒙古东七一山花岗岩地球化学、锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及岩体形成环境探讨[J]. 地球学报, 34(2): 163-175.
- 张宏飞, 王婧, 徐旺春, 袁洪林. 2007. 俯冲陆壳部分熔融形成埃达克质岩浆[J]. 高校地质学报, 13(2): 224-234.
- 张旗, 王焰, 钱青, 杨进辉, 王元龙, 赵太平, 郭光军. 2001. 中国东部燕山期埃达克岩的特征及其构造-成矿意义[J]. 岩石学报, 17: 236-24.
- 张亚峰, 裴先治, 丁仁平, 李瑞保, 冯建赟, 孙雨, 李佐臣, 陈有妍. 2010. 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, 29(1): 79-85.
- 朱云海, PAN Yuan-ming, 张克信, 陈能松, 王国灿, 侯光久. 2000. 东昆仑造山带蛇绿岩矿物学特征及其岩石成因讨论[J]. 矿物学报, 20(2): 128-142.
- References:**
- ANDERSON T. 2002. Correction of common Pb in U-Pb analyses that do not report  $^{204}\text{Pb}$ [J]. *Chemical Geology*, 192(1-2): 59-79.
- ATHERTON M P, PETFORD N. 1993. Generation of sodium-rich magmas from newly underplated basaltic crust[J]. *Nature*, 362: 144-146.
- BIAN Qian-tao, LI Di-hui, POSPELOV I, YIN Lei-ming, LI Hong-sheng, ZHAO Da-heng, CHANG Cheng-fa, LUO Xiao-quan, GAO Shan-lin, ASTRAKHANTSEV O, CHANOV N. 2004. Age, Geochemistry and tectonic setting of Buqinshan ophiolites, North Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23: 577-596.
- BIAN Qian-tao, POSPELOV I I, LI Hui-min, CHANG Cheng-fa, LI Ji-liang. 2007. Discovery of the end-Early Paleozoic adakite in the Buqingshan area, Qinghai province, and its tectonic implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(5): 925-934(in Chinese with English abstract).
- BOYNTON W V. 1984. Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies[M]. Elsevier: 63-114.
- 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[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 134(1): 33-51.
- CHEN Fu-kun, HEGNER E, TODT W. 2000. Zircon ages, Nd isotopic and chemical compositions of orthogneisses from the Black Forest, Germany: Evidence for a Cambrian magmatic arc[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 88: 791-802.
- CHEN Fu-kun, SIEBEL W, SATIR M, TERZIOGLU M, SAKA K. 2002. Geochronology of the Karadere basement(NW Turkey) and implications for the geological evolution of the Istanbul zone[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 91(3): 469-481.
- CHEN Neng-song, SUN Min, WANG Qin-yan, ZHANG Ke-xin, WAN Yu-sheng, CHEN Hai-hong. 2008. Zircon U-Pb geochronology of the Middle Belt of East Kunlun and the enlightenment on tectonic evolution[J]. *Science in China(Series D: Earth Science)*, 38(6): 657-666(in Chinese).
- CHEN Neng-song, SUN Min, ZHANG Ke-xin, ZHU Yun-hai. 2000. Epidiorite  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  and U-Pb Geochronology of East Kunlun: the proof of remaining Hornblende and Early Paleozoic magmatic Belt of East Kunlun[J]. *Chinese Science Bulletin*, 45(21): 2337-2342(in Chinese).
- CONDIE K C. 2005. TTGs and adakites: Are they both slab melts?[J]. *Lithos*, 80(1-4): 33-44.
- DEFANT M J, DRUMMOND M S, MOUNT S T. 1993. Potential example of the partial melting of the subducted lithosphere in a volcanic arc[J]. *Geology*, 21: 547-550.
- DEFANT M J, DRUMMOND M S. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subduction lithosphere[J]. *Nature*, 347: 662-665.
- DRUMMOND M S, DEFANT M J, KEPEZHINSKAS P K. 1996. The petrogenesis of slab derived trondhjemite-tonalite-dacite/adakite magmas[J]. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh Earth Sciences*, 87: 205-216.
- DRUMMOND M S, DEFANT M J. 1990. A model for trondhjemite-tonalite-dacite genesis and crustal growth via slab melting: Archean to modern comparisons[J]. *Journal of Geophysics Research*, 95(B13): 503-521.
- FENG Cheng-you, ZHANG De-quan, WANG Fu-chun, SHE Hong-quan, LI Da-xin, WANG Yan. 2004. Multiple Orogenic Processes and Geological Characteristics of the Major Orogenic Gold Deposits in East Kunlun Area, Qinghai Province[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 25(4): 415-422(in Chinese with English abstract).
- FENG Jian-yun, PEI Xian-zhi, YU Shu-lun, DING Sa-ping, LI Rui-bao, SUN Yu, ZHANG Ya-feng, LI Zuo-chen, CHEN You-xin, ZHANG Xiao-fei, CHEN Guo-chao. 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[J]. *Geology in China*, 37(1): 28-37(in Chinese with English abstract).
- GAO Shan, RUDNICK R L, YUAN Hong-ling, LIU Xiao-ming, LIU Yong-sheng, XU Wen-liang, LING Wen-li, AYERS J, WANG Xuan-che, WANG Qing-hai. 2004. Recycling lower continental crust in the North China craton[J]. *Nature*, 432: 892-897.
- GUO An-lin, ZHANG Guo-wei, SUN Yan-gui, ZHENG Jian-kang,

- LIU Ye, WANG Jian-qi. 2006. The OIB and MORB Geochemical and space distribution features of the Ophiolite Belt of A'nyemaqen Orogenic Belt: the tectonic proof of Maji snow Mountain Old Ocean Ridge[J]. *Science in China(Series D: Earth Science)*, 36(7): 618-629(in Chinese).
- JONHNSON K, BARNES C G, MILLER C A. 1997. Petrology, geochemistry, and genesis of high-Al tonalite and trondhjemites of the Cornucopia stock, Blue Mountains, Northeastern Oregon[J]. *Journal of Petrology*, 38: 1585-1611.
- KAY R W, KAY S M. 1993. Delamination and delamination magmatism[J]. *Tectonophysics*, 219(1-3): 177-189.
- LI Huai-kun, LU Song-nian, XIANG Zhen-qun, ZHOU Hong-ying, GUO Hu, SONG Biao, ZHENG Jian-kang, GU Ying. 2006. SHRIMP U-Pb zircon age of the granulite from the Qing-shuiquan area, Central Eastern Kunlun Suture Zone[J]. *Earth Science Frontiers*, 13(6): 311-321(in Chinese with English abstract).
- LI Rui-bao, PEI Xian-zhi, LI Zuo-chen, LIU Zhan-qing, CHEN Guo-chao, CHEN You-xin, WEI Fang-hui, GAO Jing-min, LIU Cheng-jun, PEI Lei. 2013. Geological characteristics of Late Palaeozoic-Mesozoic unconformities and their response to some significant tectonic events in eastern part of Eastern Kunlun[J]. *Earth Science Frontiers*, 19(5): 244-254(in Chinese with English abstract).
- LI Rui-bao, PEI Xian-zhi, LI Zuo-chen, SUN Yu, PEI Lei, CHEN Guo-chao, CHEN You-xin, LIU Cheng-jun, WEI Fang-hui. 2013. Regional tectonic transformation in East Kunlun Orogenic Belt in Early Paleozoic: Constraints from the Geochronology and Geochemistry of Helegangnaren Alkali-feldspar Granite[J]. *Acta Geologica Sinica(English Edition)*, 87(2): 333-345.
- LI Wang-ye. 2008. Geochronology and geochemistry of the ophiolites and island-arc-type igneous rocks in the Western Qinling orogen and the Eastern Kunlun orogen: Implication for the evolution of the Tethyan Ocean[D]. Hefei: University of Science and Technology of China(in Chinese with English abstract).
- LIU Cheng-dong, MO Xuan-xue, LUO Zhao-hua, YU Xue-hui, SHEN Hong-Wei, LI Shu-wei, ZHAO Xin. 2003. Pb-Sr-Nd-O Isotope Characteristics of Granitoids in East Kunlun Orogenic Belt[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 24(6): 584-588(in Chinese with English abstract).
- LIU Zhan-qing. 2011. Study on the Geological Characteristics and tectonic of Buqingshan Melanges Belt, the South Margin of East Kunlun Mountains[D]. Xi'an: Chang'an University(in Chinese with English abstract).
- LIU Zhan-qing, PEI Xian-zhi, LI Rui-bao, LI Zuo-chen, CHEN You-xin, GAO Jing-min, LIU Cheng-jun, WANG Xue-liang, WEI Fang-hui, ZHANG Gang, YANG Zhong-zhi. 2011. Geological characteristics of the Buqingshan tectonic melange belt in the southern margin of East Kunlun and its tectonic implications[J]. *Geological Bulletin of China*, 30(8): 1182-1195(in Chinese with English abstract).
- LU Lu, HU Dao-gong, ZHANG Yong-qing, WU Zhen-han. 2010. Zircon U-Pb Age from Syntectonic Granitic Porphyry in the Middle Kunlun Fault Belt and its Tectonic Significance[J]. *Journal of Geomechanics*, 16(1): 36-43(in Chinese with English abstract).
- MA Chang-qian, YU Zheng-bing, XU Pin, WANG Lin-yan. 2004. SHRIMP zircon chronology and geochemical evidence of Silurian A-type granite in southern margin of Tongbai-dabie area[J]. *Science in China(Series D: Earth Science)*, 34(12): 1100-1110(in Chinese).
- MANIAR P D, PICCOLI P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 101: 635-643.
- MARTIN H, SMITHIES R H, RAPP R, MOYEN J F, CHAMPION D. 2005. An overview of adakite, tonalite-trondhjemite-granodiorite(TTG), and sanukitoid: Relationships and some implications for crustal evolution[J]. *Lithos*, 79: 1-24.
- PEACOCK S M, RUSHMER T, THOMPSON A B. 1994. Partial melting of subducting oceanic crust[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 121: 227-244.
- PEARCE J A, PARKINSON I J. 1993. Trace element models for mantle melting: application to volcanic arc petrogenesis. In: Prichard HM, Magmatic Processes and Plate Tectonics[M]. *Geol. Soc. Spec. Publ.*, 76: 373-403.
- PEI Xian-zhi, LI Rui-bao, LIU Zhan-qing, LI Zuo-chen, CHEN You-xin, LIU Chen-jun, GAO Jing-ming, WANG Xue-liang, WEI Fang-hui, ZHANG Gang. 2011. Composition characteristics of the Buqingshan tectonic melange belt in the southern margin of East Kunlun and its tectonic implications[C]//The 2011 National Symposium on Petrology and Geodynamics: 223-224(in Chinese).
- PEI Xian-zhi, LI Rui-bao, LI Zuo-chen. 2013. Seven 1:50000 regional geological survey report of Alake Lake-Hongshuichuan area in Dulan County, Qinghai province[R]. Xi'an: Geological Survey Institute of Chang'an University(in Chinese).
- PEI Xian-zhi, WANG Tao, DING Sa-ping, LI Yong, HU Bo. 2003. Geochemical characteristics and geological significance of Neoproterozoic adakitic granitoids on the north side of the Shangdan zone in the East Qinling[J]. *Chinese Geology*, 30(4): 372-381(in Chinese with English abstract).
- PETFORD N, ATHERTON M. 1996. Na-rich partial meltings from newly underplated basaltic crust: the Cordillera Blanca Batholith, Peru[J]. *Journal of Petrology*, 37: 1491-1521.
- QIAN Qing. 2001. Adakite: Geochemical characteristics and genesis[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 20(3): 297-306(in Chinese with English abstract).
- RAPP R P, SHIMIZU N, NORMAN M D, APPLGATE G S. 1999. Reaction between slab derived melts and peridotite in the mantle wedge: experimental constraints at 3.8 GPa[J]. *Chemical Geology*, 160: 335-356.

- RAPP R P, XIAO Long, SHIMIZU N. 2002. Experimental constraints on the origin of potassium-rich adakites in east China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 18: 293-311.
- REN Jun-hu, ZHANG Kung, LIU Yi-qun, ZHOU Ding-wu, FENG Qiao. 2011. Geochemical characteristics and zircon dating of blasto-gabro from the South Jinshuikou area, Eastern Kunlun[J]. *Journal of Northwest University(Natural Science Edition)*, 41(1): 100-106(in Chinese with English abstract).
- SAJONA F G, NAURY R C, PUBELLIER M, LETERRIER J, BELLON H, COTTON J. 2000. Magmatic source enrichment by slab-derived melts in a young post-collision setting, central Mindanao[J]. *Lithos*, 54: 173-206.
- STERN C R, KILIAN R. 1996. Role of the subducted slab, mantle wedge and continental crust in the generation of adakites from the Austral Volcanic Zone[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 123: 263-281.
- WANG Guo-can, CHEN Neng-song, ZHU Yun-hai, ZHANH Ke-xin. 2003. Late Caledonian ductile thrusting deformation in the Central East Kunlun Belt, Qinghai, China and Its Significance: Evidence from geochronology[J]. *Acta Geologica Sinica(English Edition)*, 77(3): 311-319.
- WANG Guo-can, ZHANG Tian-ping, LIANG Bin, CHEN Neng-song, ZHUYun-hai, ZHU Jie. 1999. Composite ophiolitic melange zone in central part of Eastern section of Eastern Kunlun orogenic zone and geological significance of "fault belt in central part of Eastern section of Eastern Kunlun orogenic zone[J]. *Earth Science*, 24(2): 129-133(in Chinese with English abstract).
- WANG Qiang, WYMAN D A, XU Ji-feng, ZHAO Zhen-hua, JIAN Ping, ZI Feng. 2007. Partial melting of thickened or delaminated lower crust in the middle of eastern China: Implications for Cu-Au mineralization[J]. *Journal of Geology*, 115(2): 149-161.
- WANG Qiang, XU Ji-feng, JIAN Ping, BAO Zhi-wei, ZHAO Zhen-hua, XIONG Xiao-lin, MA Jin-long. 2006. Petrogenesis of adakitic porphyries in an extensional tectonic setting, Dexing, South China: implications for the genesis of porphyry copper mineralization[J]. *Journal of Petrology*, 47: 119-144.
- XU Ji-feng, SHINJIO R, DEFANT M J, WANG Qiang, RAPP R P. 2002. Origin of Mesozoic adakitic intrusive rocks in the Ningzhen area of east China: partial melting of delaminated lower continental crust?[J]. *Geology*, 30(12): 1111-1114.
- YANG Jing-sui, XU Zhi-qin, LI Hai-bing, SHI Ren-deng. 2005. The paleo Tethyan volcanism and plate tectonic regime in the A 'nyemaqen region of East Kunlun, northern Tibet Plateau[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 24(5): 369-380(in Chinese with English abstract).
- YANG Yue-qing, LÜ Bo, MENG Gui-xiang, YAN Jia-yong, ZHAO Jin-hua, WANG Shou-guang, JIA Ling-long, HAN Jian-gang. 2013. Geochemistry, SHRIMP Zircon U-Pb Dating and Formation Environment of Dongqiyishan Granite, Inner Mongolia[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 34(2): 163-175(in Chinese with English abstract).
- YUAN Hong-lin, GAO Shan, LIU Xiao-min, LI Hui-ming, GUNTHER D, WU Fu-yuan. 2004. Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry[J]. *Geostandard and Geoanalytical Research*, 28: 353-370.
- ZHANG Hong-fei, WANG Jing, XU Wang-chun, YUAN Hong-lin. 2007. Derivation of Adakitic Magma by Partial Melting of Subducted Continental Crust[J]. *Geological Journal of China Universities*, 13(2): 224-234(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Qi, WANG Yan, QIAN Qing, YANG Jin-hui, WANG Yuan-long, ZHAO Tai-ping, GUO Guang-jun. 2001. The characteristics and tectonic-metallogenic significances of the adakites in Yanshan period from eastern China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 17(2): 236-244(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Ya-feng, PEI Xian-zhi, DING Sa-ping, LI Rui-bao, FENG Jian-yun, SUN Yu, LI Zuo-chen, CHEN You-xin. 2010. 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*, 29(1): 79-85(in Chinese with English abstract).
- ZHU Yun-hai, PAN Yuan-ming, ZHANG Ke-xin, CHEN Neng-song, WANG Guo-can, HOU Guang-jiu. 2000. Mineralogical characteristics and petrogenesis of ophiolites in East Kunlun orogenic belt in Qinghai province[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 20(2): 128-142(in Chinese with English abstract).