

新疆东准噶尔早志留世埃达克岩

——来自锆石 U-Pb 年龄、地球化学及 Sr-Nd-Hf 同位素的证据

黄 岗, 牛广智, 王新录, 郭 俊, 宇 峰

(陕西区域地质矿产研究院, 陕西 咸阳 712000)

摘 要: 新疆东准噶尔野马泉地区索尔巴斯塔乌石英闪长岩锆石 U-Pb 年龄为 442.5 ± 5.6 Ma。该岩体 SiO_2 为 63.75%~65.40%, Al_2O_3 为 17.07%~18.00%, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 比值为 5.28~6.82, MgO 为 1.11%~1.35%; 富集大离子亲石元素(LILE, 如 K、Rb、Ba 和 Sr), 而亏损高场强元素(HFSE, 如 Ta、Nb、Zr 和 Ti)及 P, Sr 为 $783 \times 10^{-6} \sim 1030 \times 10^{-6}$, Y 为 $8.10 \times 10^{-6} \sim 10.80 \times 10^{-6}$, Yb 为 $0.84 \times 10^{-6} \sim 1.04 \times 10^{-6}$, Sr/Y 比值为 82.59~112.32, 具埃达克岩的典型特征; 具有相对低的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值(0.703 77~0.704 04)和相对高的 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值(+6.9~+7.2), 且锆石具有相对高的 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值(+10.7~+13.7), 暗示岩浆很可能起源于亏损的年轻地幔源区, 与俯冲洋壳熔融形成的埃达克岩相似。结合区域地质背景, 认为索尔巴斯塔乌石英闪长岩是由俯冲的大洋板片边缘受到来自板片窗高温软流圈地幔物质的烘烤发生部分熔融形成的, 为阿尔曼泰蛇绿岩代表的古亚洲洋于早志留世向南俯冲消减过程中形成的岩浆弧记录。

关键词: 早志留世; 埃达克岩; 岩浆弧; 索尔巴斯塔乌岩体; 东准噶尔

中图分类号: P588.12⁺2; P597⁺.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2016)05-0751-17

Early Silurian adakitic rocks of East Junggar, Xinjiang: Evidence from zircon U-Pb age, geochemistry and Sr-Nd-Hf isotope of the quartz diorite

HUANG Gang, NIU Guang-zhi, WANG Xin-lu, GUO Jun and YU Feng

(Regional Institute of Shaanxi Bureau of Geological Exploration, Xianyang 712000, China)

Abstract: The Suoerbasitawu quartz diorite in the Yemaquan area of East Junggar, Xinjiang, has a zircon U-Pb age of 442.5 ± 5.6 Ma. The quartz diorite has the data $\text{SiO}_2 = 63.75\% \sim 65.40\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 17.07\% \sim 18.00\%$, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} = 5.28 \sim 6.82$, and $\text{MgO} = 1.11\% \sim 1.35\%$. They are characterized by enrichment of large ion lithophile elements (LILEs, such as K, Rb, Ba, and Sr), and depletion of high field strength elements (HFSEs, such as Ta, Nb, Zr, and Ti) and P. They also have the data $\text{Sr} = 783 \times 10^{-6} \sim 1030 \times 10^{-6}$, $\text{Y} = 8.10 \times 10^{-6} \sim 10.80 \times 10^{-6}$, $\text{Yb} = 0.84 \times 10^{-6} \sim 1.04 \times 10^{-6}$, and $\text{Sr}/\text{Y} = 82.59 \sim 112.32$, showing typical characteristics of adakitic rocks. The rocks have relatively low $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ (0.703 77~0.704 04) and high $\epsilon\text{Nd}(t)$ (+6.9~+7.2), and relatively high zircon $\epsilon\text{Hf}(t)$ (+10.7~+13.7), indicating that the magma was probably derived from an depleted juvenile mantle, similar to the adakitic rocks formed by the partial melting of subducted oceanic crust. In combination with the regional geological background, the authors hold that the Suoerbasitawu quartz diorite was formed by the partial melting of subducted oceanic slab edge heated by the asthenospheric mantle, which was the magmatic arc formed by the southward subduction of the Paleo-Asian oceanic crust

收稿日期: 2016-01-22; 接受日期: 2016-06-14

基金项目: 中国地质调查局资助项目(1212011120500, 121201011000150003)

作者简介: 黄 岗(1984-), 男, 工程师, 主要从事区域地质矿产调查研究, E-mail: huangg523@163.com。

in the early Silurian period.

Key words: Early Silurian; adakitic; magmatic arc; Suoerbaitwu quartz diorite intrusion; East Junggar

Fund support: China Geological Survey(1212011120500, 121201011000150003)

中亚造山带是世界上典型的增生型造山带,是在古亚洲洋在长期而复杂的俯冲-消减过程中由不同地体拼贴、碰撞形成的(Coleman, 1989; Şengör *et al.*, 1993; 王强等, 2006; Xiao *et al.*, 2009, 2010, 2014)。新疆东准噶尔造山带作为中亚造山带的重要组成部分,其古生代的构造格局及洋盆演化客观记录了中亚造山带的形成过程,被认为是由古生代时期古亚洲演化过程中形成的俯冲-增生杂岩、蛇绿岩和岩浆弧等地体共同构成的典型增生型造山带(Long *et al.*, 2012; 徐学义等, 2014)。该造山带内以阿尔曼泰和卡拉麦里两条蛇绿混杂岩带(李锦轶, 1995; 何国琦等, 2001; 简平等, 2003; 肖文交等, 2006; Zhang *et al.*, 2009; 张元元等, 2010; 黄岗等, 2012; Huang *et al.*, 2013; 胡超斌等, 2014)和广泛发育具有正 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值的晚古生代花岗岩(韩宝福等, 2006; 毛启贵等, 2008)为典型特征,成为研究中国西部造山带形成过程乃至中亚地区古生代洋盆演化的关键地区。

东准噶尔造山带以出露晚古生代地质体为主,早古生代地质体出露相对局限。前人对该造山带的研究多集中于蛇绿岩、晚古生代岩浆岩和相关矿产。然而,大量研究资料表明,东准噶尔造山带是由早古生代和晚古生代两个不同时期的造山作用共同形成的(李锦轶, 1991; 李锦轶等, 2006; 李亚萍等, 2009; 董连慧等, 2009),即经历了早古生代稳定大陆边缘和晚古生代活动大陆边缘两个不同地质演化阶段。尽管早古生代被认为是东准噶尔造山带构造演化的重要阶段,但是由于该时期的地质现象被晚期强烈的地质作用所改造而保存较差,致使其研究难度增大。近年来,尽管部分研究者先后在该造山带内巴里坤、琼河坝及和尔赛地区识别出了早古生代花岗岩(李亚萍等, 2009; 郭丽爽等, 2009; 杜世俊等, 2010; 张永等, 2010; Xu *et al.*, 2013; 郭晓俊等, 2013),但对这些岩体的形成构造环境依然存在有形成于古亚洲洋洋盆闭合后伸展环境(李亚萍等, 2009)、古亚洲洋洋盆俯冲过程中的岛弧环境(郭丽爽等, 2009; 张永等, 2010)及大陆边缘岛弧(Xu *et al.*, 2013)等不同认识。正是这些不同认识导致对于早古生代时期古亚洲洋俯冲方向及闭合时限存在

争议(董连慧等, 2009; Long *et al.*, 2012; Xu *et al.*, 2013),从而进一步制约了人们对古亚洲洋演化过程的认识。所以,对东准噶尔早古生代花岗岩开展年代学、岩石地球化学和同位素地球化学的系统研究,不仅可为揭示古生代岩浆作用与古亚洲洋的演化历史提供直接证据,还能为合理认识东准噶尔造山带构造演化提供岩浆演化证据。

本文选择东准噶尔造山带野马泉地区索尔巴斯塔乌石英闪长岩体为研究对象,对其开展系统的锆石 U-Pb 年代学、Sr-Nd-Hf 同位素及岩石地球化学研究,分析该岩体的形成时代、成因及构造环境,从而为东准噶尔乃至中亚造山带早古生代构造演化过程提供依据。

1 地质背景及岩石学特征

东准噶尔造山带位于新疆准噶尔盆地的东北缘(图 1a),其北侧以额尔齐斯构造带为界与阿勒泰造山带相邻,南以卡拉麦里断裂带为界与准噶尔盆地和天山造山带毗连,为一大型的增生型造山带(徐学义等, 2014)。本文研究区位于东准噶尔造山带中部的野马泉一带(图 1b),其南北两侧分别出露阿尔曼泰蛇绿构造混杂岩带和卡拉麦里蛇绿岩带。区内出露的地层主要为奥陶系、泥盆系及石炭系,其中奥陶纪地层零星出露,由中奥陶统乌列盖组(O_2w)构成,其岩石组合类型为变砂岩、粉砂质板岩、凝灰质板岩、安山岩、英安岩。泥盆纪地层出露广泛,由下泥盆统卓木巴斯陶组(D_1zh)、托让格库都克组(D_1t)和中泥盆统北塔山组(D_2bt)构成。其中卓木巴斯陶组(D_1zh)主要以陆源碎屑岩为主,含少量安山质火山碎屑岩和碳酸盐,产丰富珊瑚类、腕足类、三叶虫、螺类等化石;托让格库都克组(D_1t)总体为一套碎屑岩、火山碎屑岩夹火山熔岩组合;北塔山组(D_2bt)主要为一套火山-沉积岩系并夹有少量灰岩透镜体,有丰富的腕足类、海百合茎和植物化石。石炭纪地层仅出露上石炭统巴塔玛依内山组(C_2bt),为一套火山-沉积岩系;二叠纪地层主要为下二叠统哈尔加乌组(P_1h),是一套以火山熔岩为主的火山-沉积岩系。晚古生代岩浆活动强烈,广泛分布于东准噶尔

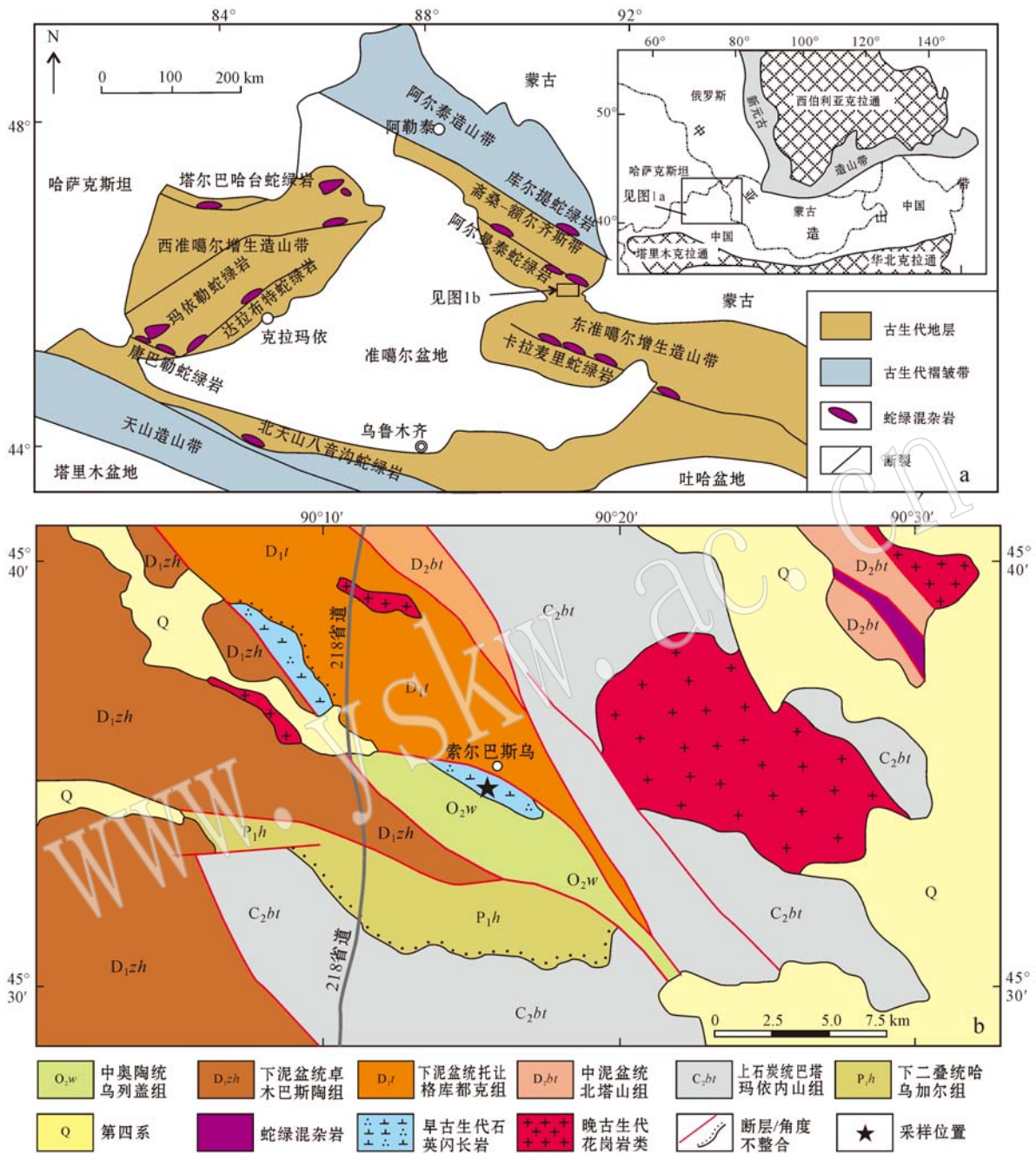


图 1 新疆准噶尔及邻区(a, 据 Chen and Jahn, 2004)和野马泉一带(b, 据陕西省区域地质矿产研究院修编^①)地质简图
Fig. 1 Simplified geological map of the Junggar terrane (a, after Chen and Jahn, 2004) and Yemaquan area in eastern Junggar of northern Xinjiang (b)^①

造山带各个构造带中,但多成椭圆状形态侵入于前石炭系不同地层中。

索尔巴斯塔乌石英闪长岩体呈岩滴或岩枝状产出,呈北西向条带状展布,侵位于中奥陶统乌列盖组

(O_2w)之中,局部地段被下泥盆统托让格库都克组(D_1t)不整合覆盖于其上。岩体岩性单一,主要为细粒石英闪长岩,手标本岩石为灰色,具有变余半自形粒状结构,块状构造(图 2a)。在镜下,岩石主要组成

^① 陕西省区域地质矿产研究院. 2015. 新疆 1:25 万北塔山牧场幅(L46C003001)区调修测成果报告.

矿物为斜长石和石英,次要矿物为角闪石和黑云母。其中斜长石呈半自形粒状,大部分钠黝帘石化,部分绢云母化,有的仍保留斜长石的环带结构,粒径为 0.5~2 mm,含量约为 75%;石英呈它形粒状,粒径为

0.3~1.2 mm,具明显波状消光,含量为 5%~10%;黑云母呈片状,片径 0.4~1.2 mm,全绿泥石化、绿帘石化,含量 3%~5%;角闪石呈柱状,粒径为 0.1~0.3 mm,弱绿帘石化,含量为 5%~10%(图 2b)。

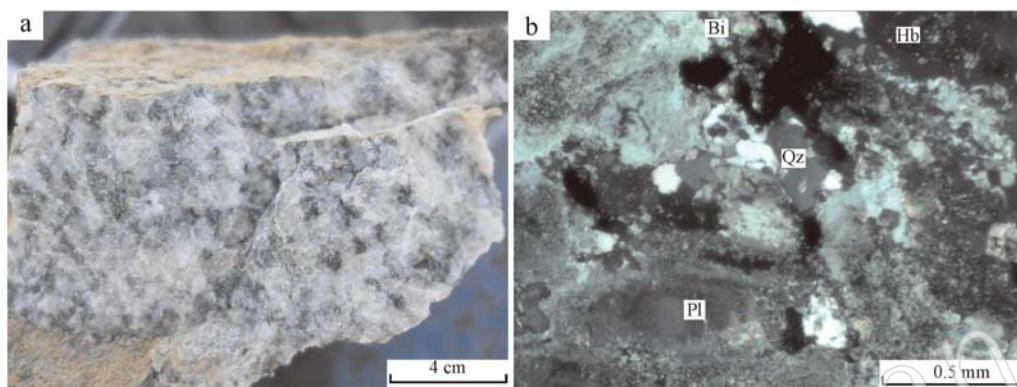


图 2 石英闪长岩手标本及显微特征照片

Fig. 2 Specimen and microphotographs of the Suoerbaitawu quartz diorite

Pl—斜长石; Qz—石英; Hb—角闪石; Bi—黑云母

Pl—plagioclase; Qz—quartz; Hb—hornblende; Bi—biotite

2 分析方法

本文分析样品均采自索尔巴斯塔乌石英闪长岩体,地理坐标为 90°15′16.5″E、45°35′43.2″N。其中锆石 U-Pb 同位素样品 1 件、全岩地球化学样品 7 件和 Sr-Nd 同位素样品 4 件。

锆石单矿物分离在廊坊区域地质调查研究院完成;锆石阴极发光(CL)显微照相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的 LEO1450VP 扫描电子显微镜上完成。锆石 U-Pb 年代学和微量元素含量测试在中国科学院青藏高原研究所大陆碰撞与高原隆升重点实验室利用激光剥蚀电感耦合等离子体质谱仪(LA-ICP-MS)测试完成。LA-ICP-MS 激光剥蚀系统为美国 NewWave 公司生产的 UP193FX 型 193 nm ArF 准分子系统,激光器来自于德国 ATL 公司,ICP-MS 为 Agilent 7500a。采用 Plesovice(Sláma *et al.*, 2008)和 Qinghu(Li *et al.*, 2009)标准锆石作为外标进行基体校正,成分标样采用 NIST SRM 612,其中²⁹Si 作为内标元素。在测试过程中每 5 个未知样品点插入一组标样(锆石标样和成分标样)。分析样品的同位素比值及元素含量计算均采用 GLITTER(ver 4.0, Macquarie University)程序,普通铅校正采用 Anderson(2002)提

出的 ComPbCorr# 3.17 校正程序,U-Pb 谐和图和年龄权重平均计算采用 Isoplot(Ver 3.0)程序(Ludwig, 2003)完成。

锆石的 Lu-Hf 同位素分析在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成,使用仪器为 Nu Plasma HR(Wrexham, UK)多接收电感耦合等离子体质谱仪(MC-ICPMS)和 GeoLas200M 激光剥蚀系统 Neptune 型,具体的分析步骤和流程见 Yuan 等(2008)。采用 $^{176}\text{Lu}/^{175}\text{Lu} = 0.026\ 69$ (Bievre and Taylor, 1993)和 $^{176}\text{Yb}/^{172}\text{Yb} = 0.588\ 6$ (Chu *et al.*, 2002)进行样品 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 和 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值同量异位干扰校正。在样品测定期间,使用标准锆石 91500 和 GJ-1 进行仪器状态监控和样品校正。91500 的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 为 $0.282\ 295 \pm 0.000\ 029$ ($n = 17, 2\sigma$), GJ-1 的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 为 $0.282\ 049 \pm 0.000\ 023$ ($n = 10, 2\sigma$),与二者推荐值[分别为 $0.282\ 307\ 5 \pm 0.000\ 058$ (2σ) (Wu *et al.*, 2006)]和 $0.282\ 015 \pm 0.000\ 019$ (2σ) (Elhlou *et al.*, 2006)基本吻合。计算 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 时, ^{176}Lu 的衰变系数为 $1.865 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$ (Scherer *et al.*, 2001),球粒陨石 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 $0.282\ 772$, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 $0.033\ 2$ (Blichert-Toft and Albarede, 1997),单阶段 Hf 模式年龄(t_{DM1})计算时,亏损地幔 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 和 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 分别为 $0.283\ 25$ 和 $0.038\ 4$ (Vervoort and Blichert-Toft,

1999), 两阶段 Hf 模式年龄(t_{DM2})计算时, 下地壳 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 0.022 (Amelin *et al.*, 2000)。

岩石主、微量元素和 Sr-Nd 同位素分析均在核工业北京地质研究院分析测试中心完成, 其中主量元素测试采用 XRF 法在 PW2404X 仪器上分析完成, 分析精度优于 1%, 微量元素测试利用 ELEMENTII 高分辨电感耦合等离子体质谱分析仪分析完成, 分析精度优于 5%~10%。Sr-Nd 同位素分析采用 ISOPROBE-T 热电离质谱计 (TIMS) 进行分析, Sr 和 Nd 同位素的分馏校正分别采用 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr}=0.1194$ 和 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.7219$ 。分析期间, Nd 标样 SHINESTU 的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 测定值的平均值为 $0.512118 \pm 3(2\sigma)$, Sr 标样 NBS987 标准 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 测定值的平均值为 $0.710250 \pm 7(2\sigma)$ 。本次获得样品的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值和 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值是按照 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年得出的年龄进行校正的, 亏损地幔 Nd 模式年龄(t_{DM})参考 DePaolo (1981) 中的模式进行计算。

3 结果分析

3.1 锆石 U-Pb 年代学

石英闪长岩样品 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素分析结果见表 1。石英闪长岩样品的锆石干净、透明, 在形态上以长柱状为主, 粒径介于 80~120 μm 之间。CL 图像分析显示 (图 3), 绝大部分锆石具较好的晶形, 呈现清晰的岩浆韵律环带, 内部无残留老核, 外部无变质边, 为典型的岩浆结晶锆石。对该样品中 17 粒锆石进行了 U-Pb 同位素分析, 显示锆石 Pb、U、Th 含量分别为 $4 \times 10^{-6} \sim 16 \times 10^{-6}$ 、 $56 \times 10^{-6} \sim 206 \times 10^{-6}$ 和 $19 \times 10^{-6} \sim 128 \times 10^{-6}$, Th/U 比值为 0.33~0.62, 大多数大于 0.4, 反映岩浆成因锆石的特征。在锆石 U-Pb 年龄谐和图中 (图 4a), 17 粒锆石的分析点均位于 U-Pb 谐和线上或其附近的一个很小的区域内, 表面年龄介于 437~447 Ma 之间, 其加权平均年龄为 442.5 ± 2.5 Ma (MSWD=0.19) (图 4b)。

3.2 锆石 Hf 同位素

本文对锆石 U-Pb 定年样品均进行了 LA-MC-ICPMS 锆石 Lu-Hf 同位素组成分析, 其结果见表 2。从测试结果可以看出, 样品的所有分析点均具有低 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值 (绝大多数小于 0.002), 表明锆石在形成以后具有较低的放射成因 Hf 的积累, 所测定的

$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 基本代表了其形成时体系的 Hf 同位素组成 (Wu *et al.*, 2006)。其中 17 个分析点的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值介于 0.282806~0.282868 之间, 对应 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值均为高的正值, 变化于 10.9~13.1 之间, 表明这些岩石可能主要来源于亏损地幔分异形成的新生地壳 (图 5a), 两阶段模式年龄(t_{DM2})为 588~720 Ma (图 5b), 与全岩 Sr-Nd 同位素测试结果一致, 进一步说明其源区主要为新元古代晚期-早古生代新生陆壳物质。

3.3 岩石地球化学

本文对 7 件石英闪长岩样品进行了岩石地球化学分析, 分析结果见表 3。分析样品 SiO_2 含量介于 63.75%~65.40% 之间, 平均值为 64.70%; Al_2O_3 含量为 17.07%~18.00%, 平均值为 17.42%, 均大于 15%, 显示高铝特征; 岩石具明显的富钠贫钾特征, 其中 Na_2O 含量为 6.28%~6.72%, K_2O 含量为 0.94%~1.21%, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 为 5.28~6.82, 同时在 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图解上 (图 6), 样品大部分落入中钾钙碱性系列的区域内; 铝饱和指数 (A/CNK) 值介于 0.99~1.02 之间, 平均为 1.00, 在 A/CNK-A/NK 图解上 (图 7), 岩石样品全部落于弱过铝质区域内。

样品稀土总量 (ΣREE) 较低, 其值介于 $48.53 \times 10^{-6} \sim 64.83 \times 10^{-6}$ 之间, 在球粒陨石标准化稀土元素配分模式图上 (图 8a), 所有样品均具有相似的配分模式, 呈现“右倾型”, 且样品均显示轻稀土元素 (LREE) 富集、重稀土元素 (HREE) 相对亏损且分馏不明显和正的 Eu 弱异常 ($\delta\text{Eu}=1.02 \sim 1.09$) 等特征。在原始地幔标准化的微量元素蛛网图上 (图 8b) 显示, 样品均具有相似的配分曲线模式, 总体富集大离子亲石元素 (LILE, 如 K、Ba 和 Sr), 而亏损高场强元素 (HFSE, 如 Ta、Nb 和 Ti) 及 P。同时样品具有较高 Sr 及较低 Yb、Y 含量, 其中 Sr 含量为 $783 \times 10^{-6} \sim 1030 \times 10^{-6}$, Yb 含量为 $0.84 \times 10^{-6} \sim 1.04 \times 10^{-6}$, Y 含量为 $8.10 \times 10^{-6} \sim 10.80 \times 10^{-6}$, Sr/Y 比值为 82.59~112.32, 显示了与埃达克岩相似的微量元素特征。

3.4 全岩 Sr-Nd 同位素

表 4 列出了索尔巴斯塔乌石英闪长岩代表性样品的 Sr、Nd 同位素组成及根据年龄计算的有关参数, 由表中数据可以看出, 石英闪长岩样品的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值为 0.70377~0.70404, $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$ 值为 0.51242~0.51244, $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值为 +6.9~+7.2。根据 Nd 同位素相关计算公式, 利用石英闪长岩形成时

表 1 东准噶尔索尔巴斯塔乌石英闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 同位素分析结果
Table 1 U-Th-Pb composition of zircons from the Suoerbastawu quartz diorite measured by LA-ICP MS in the Yemaquan region of East Junggar

分析点号	$\omega_{\text{B}}/10^{-6}$			Th/U	同位素比值						同位素年龄/Ma							
	Pb	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ
YMQ01-1	6	28	82	0.34	0.055 9	0.004 8	0.549 3	0.045 9	0.071 3	0.001 5	0.032 5	0.001 9	448	51	445	20	444	6
YMQ01-2	9	52	118	0.44	0.054 9	0.003 8	0.537 1	0.036 3	0.071 0	0.001 2	0.027 4	0.001 2	408	121	436	14	442	7
YMQ01-3	7	31	89	0.35	0.055 8	0.007 0	0.544 0	0.066 2	0.070 7	0.002 2	0.032 0	0.002 7	445	67	441	24	441	5
YMQ01-4	16	128	206	0.62	0.056 3	0.002 8	0.551 8	0.026 8	0.071 1	0.001 0	0.028 8	0.000 7	466	83	446	18	443	6
YMQ01-5	7	37	94	0.39	0.055 5	0.004 2	0.545 4	0.040 4	0.071 3	0.001 4	0.026 1	0.001 4	434	132	442	17	444	5
YMQ01-6	10	63	128	0.49	0.057 7	0.006 0	0.565 4	0.056 8	0.071 1	0.001 9	0.025 2	0.001 6	518	76	455	27	443	5
YMQ01-7	9	57	118	0.49	0.055 1	0.004 3	0.539 9	0.041 1	0.071 1	0.001 3	0.023 2	0.001 1	416	137	438	17	443	8
YMQ01-8	10	72	132	0.55	0.055 5	0.004 9	0.548 5	0.047 7	0.071 8	0.001 4	0.020 9	0.001 2	431	60	444	21	447	6
YMQ01-9	5	25	67	0.37	0.056 9	0.009 5	0.561 2	0.092 6	0.071 5	0.002 2	0.020 3	0.003 0	489	111	452	20	445	5
YMQ01-10	8	39	109	0.36	0.054 7	0.005 3	0.536 8	0.050 9	0.071 2	0.001 4	0.016 9	0.001 5	402	78	436	14	443	6
YMQ01-11	8	57	106	0.54	0.054 7	0.005 0	0.531 0	0.047 1	0.070 5	0.001 4	0.016 3	0.001 0	399	64	432	31	439	5
YMQ01-12	4	20	61	0.33	0.057 0	0.007 9	0.558 1	0.075 8	0.071 0	0.001 9	0.021 4	0.002 5	493	56	450	19	442	5
YMQ01-13	7	50	100	0.50	0.055 5	0.004 4	0.541 3	0.041 4	0.070 8	0.001 3	0.020 4	0.000 9	432	138	439	27	441	8
YMQ01-14	7	40	92	0.43	0.055 0	0.004 5	0.536 9	0.042 4	0.070 9	0.001 4	0.021 2	0.001 1	413	83	436	28	441	6
YMQ01-15	7	48	102	0.47	0.058 9	0.006 5	0.579 4	0.061 8	0.071 4	0.002 0	0.018 0	0.001 4	565	86	464	20	444	4
YMQ01-16	4	19	56	0.34	0.057 3	0.007 1	0.553 4	0.067 0	0.070 1	0.001 8	0.020 7	0.001 8	502	55	447	24	437	5
YMQ01-17	9	74	130	0.57	0.056 1	0.005 2	0.549 5	0.050 3	0.071 1	0.001 3	0.015 1	0.001 0	456	71	445	33	443	4

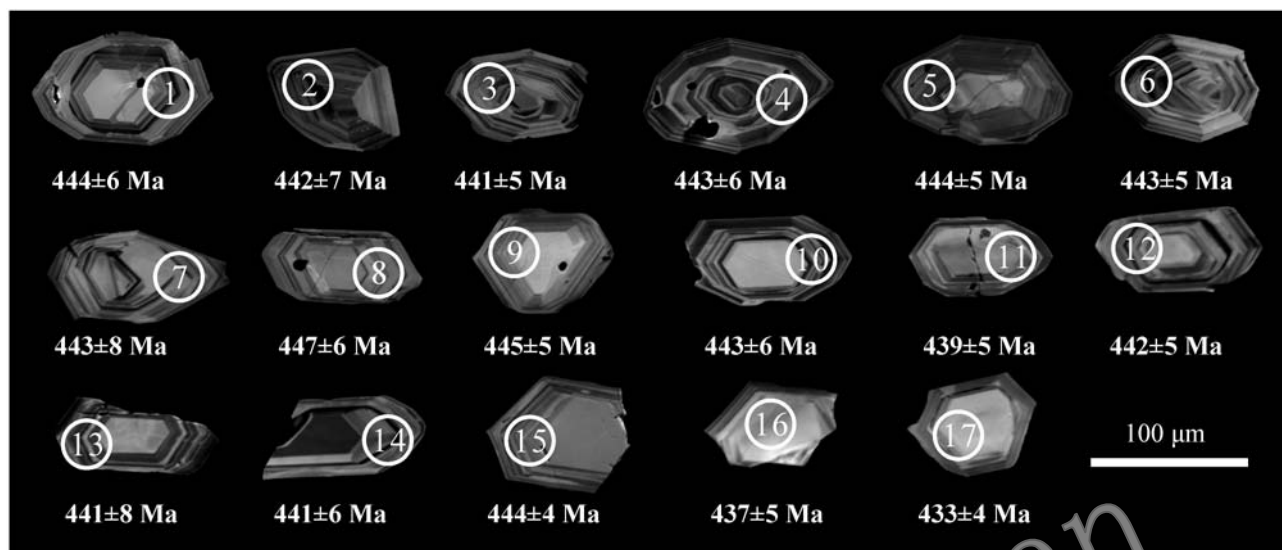
图3 索尔巴斯塔乌石英闪长岩锆石阴极发光图像及 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄

Fig. 3 CL images of zircons from the Suoerbasitawu quartz diorite, and their $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages measured with LA-ICP-MS

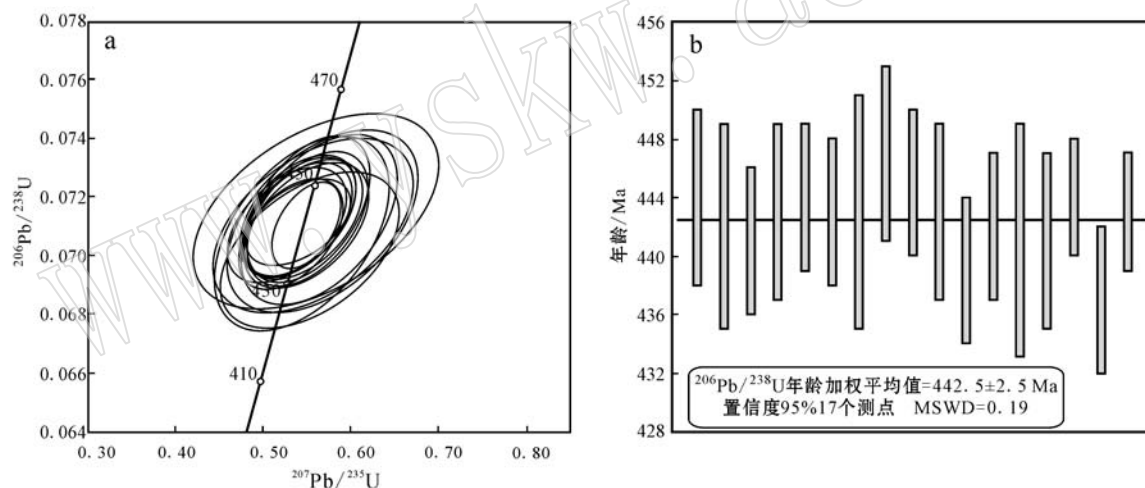
图4 索尔巴斯塔乌石英闪长岩锆石 U-Pb 年龄谐和图及 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄

Fig. 4 CL images of zircons from the Suoerbasitawu quartz diorite, and its $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages measured with LA-ICP-MS

代(442 Ma)计算获得其 Nd 模式年龄 t_{DM} 为 589 ~ 613 Ma, 暗示岩浆很可能起源于同位素组成亏损的年轻地幔源区或者源自新元古代晚期-早古生代新生陆壳物质的部分熔融。

4 讨论

4.1 岩石成因

索尔巴斯塔乌石英闪长岩具有与埃达克岩相似的地球化学特征, 主要表现为: SiO_2 含量为 63.75%

~65.40%, 均大于 56%; Al_2O_3 含量为 17.07% ~ 18.00%, 均大于 15%; $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 比值为 5.28 ~ 6.82, 富钠; MgO 含量为 1.11% ~ 1.35%, 均小于 3%; Sr 含量为 783×10^{-6} ~ 1030×10^{-6} , 均大于 400×10^{-6} ; Y 含量为 8.10×10^{-6} ~ 10.80×10^{-6} , 均小于 19×10^{-6} ; Yb 含量分别为 0.84×10^{-6} ~ 1.04×10^{-6} , 均小于 1.9×10^{-6} , Sr/Y 比值分别为 82.59 ~ 112.32, 均大于 40, 在 $\text{Sr}/\text{Y} - \text{Y}(\text{图 } 9\text{a})$ 和 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} - (\text{Yb})_{\text{N}}$ 图解(图 9b)中, 所有样品点均落入埃达克岩区域内。

表 2 索尔巴斯塔乌石英闪长岩的锆石 Hf 同位素组成
Table 2 Hf isotopic composition of zircons from the Suerbastawu quartz diorite in the Yemaquan region of East Junggar

分析点号	年龄 /Ma	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$	$\epsilon\text{Hf}(0)$	$\epsilon\text{Hf}(t)$	t_{DM1}/Ma	t_{DM2}/Ma	$f_{\text{Lu/Hf}}$
YMQ01-1	444	0.013 235	0.000 625	0.282 853	0.000 008	0.282 847	2.9	12.4	560	633	-0.98
YMQ01-2	442	0.008 380	0.000 381	0.282 886	0.000 011	0.282 883	4.0	13.7	510	553	-0.99
YMQ01-3	441	0.017 096	0.000 770	0.282 818	0.000 008	0.282 812	1.6	11.1	611	714	-0.98
YMQ01-4	443	0.010 560	0.000 461	0.282 854	0.000 009	0.282 850	2.9	12.5	557	628	-0.99
YMQ01-5	444	0.014 349	0.000 599	0.282 859	0.000 011	0.282 854	3.1	12.6	551	618	-0.98
YMQ01-6	443	0.016 554	0.000 688	0.282 806	0.000 008	0.282 801	1.2	10.7	627	740	-0.98
YMQ01-7	443	0.013 716	0.000 586	0.282 869	0.000 009	0.282 865	3.4	13.0	536	595	-0.98
YMQ01-8	447	0.015 725	0.000 711	0.282 869	0.000 011	0.282 863	3.4	13.0	538	597	-0.98
YMQ01-9	445	0.013 043	0.000 582	0.282 883	0.000 011	0.282 878	3.9	13.5	517	563	-0.98
YMQ01-10	443	0.026 358	0.001 028	0.282 888	0.000 009	0.282 879	4.1	13.5	517	561	-0.97
YMQ01-11	439	0.013 976	0.000 667	0.282 806	0.000 010	0.282 801	1.2	10.8	626	739	-0.98
YMQ01-12	442	0.019 729	0.000 966	0.282 854	0.000 009	0.282 846	2.9	12.3	564	637	-0.97
YMQ01-13	441	0.010 837	0.000 626	0.282 864	0.000 009	0.282 859	3.3	12.8	545	608	-0.98
YMQ01-14	441	0.024 409	0.001 056	0.282 829	0.000 009	0.282 820	2.0	11.5	600	694	-0.97
YMQ01-15	444	0.015 923	0.000 755	0.282 843	0.000 009	0.282 837	2.5	12.0	575	657	-0.98
YMQ01-16	437	0.014 120	0.000 679	0.282 869	0.000 008	0.282 864	3.4	13.0	538	597	-0.98
YMQ01-17	443	0.012 909	0.000 684	0.282 828	0.000 009	0.282 822	2.0	11.5	596	690	-0.98

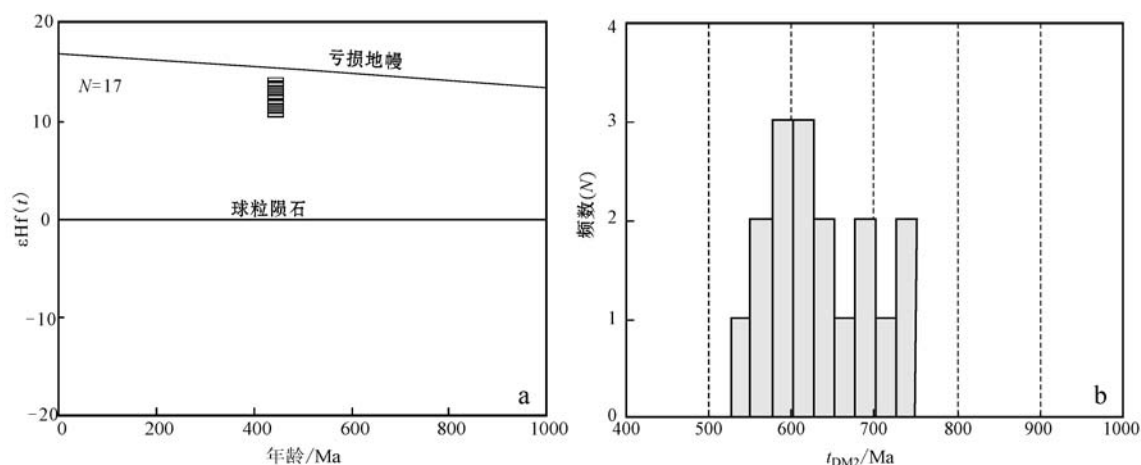
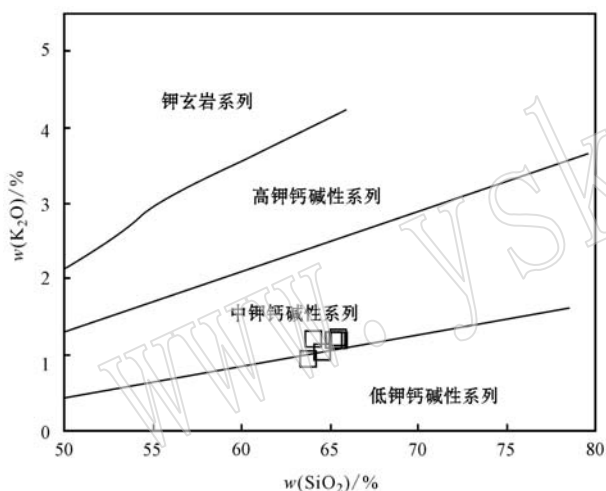
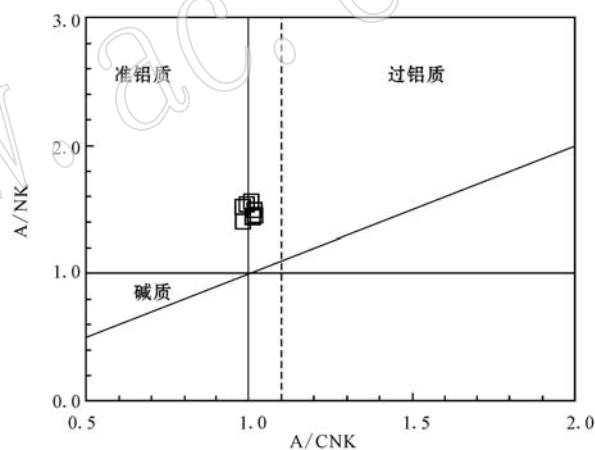
图5 索尔巴斯塔乌石英闪长岩 $\epsilon\text{Hf}(t)$ -年龄图解(a)和频数- t_{DM2} 图解(b)Fig. 5 $\epsilon\text{Hf}(t)$ -Age (a) and frequency- t_{DM2} (b) diagrams for the Suoerbasitawu quartz diorite图6 索尔巴斯塔乌石英闪长岩 K_2O - SiO_2 图解
(据 Middlemost, 1985)Fig. 6 K_2O - SiO_2 diagram of the Suoerbasitawu quartz diorite (after Middlemost, 1985)图7 索尔巴斯塔乌石英闪长岩 A/NK - A/CNK 图解
(据 Maniar and Piccoli, 1989)

Fig. 7 A/NK - A/CNK diagram of the Suoerbasitawu quartz diorite (after Maniar and Piccoli, 1989)

索尔巴斯塔乌石英闪长岩具明显富铝富钠贫钾的特征(Al_2O_3 含量为 17.07% ~ 18.00%, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 为 5.28 ~ 6.82), 与俯冲洋壳熔融形成的埃达克岩一致(Defant and Drummond, 1990; Defant *et al.*, 2002), 而明显不同于中国东部增厚的玄武质下地壳熔融形成的埃达克质火山岩(张旗等, 2001, 20003)。本文分析样品具极低的相容元素如 Cr、Ni 含量, 这与角闪岩或榴辉岩实验形成的熔体中这些元素的低浓度一致(Rapp *et al.*, 1991), 而明显不同于俯冲板片并可能经历交代地幔楔物质混染、玄武质岩浆底侵作用导致下地壳部分熔融以及拆沉下地壳部分熔融形成的埃达克岩, 一般后者具高 $\text{Mg}^\#$ 、

Cr、Ni 等幔源岩浆特征(Yogodzinski *et al.*, 1995; Martin, 1999; Gao *et al.*, 2004)。所有分析样品均强烈亏损高场强元素(Ta、Nb 和 Ti)和重稀土元素(HREE), 以及不明显的 Eu 异常($\delta\text{Eu} = 1.02 \sim 1.09$)和 Sr 正异常, 表明其源区中斜长石已经消失而源区由石榴石 + 辉石组成, 残留相为榴辉岩(Castillo, 2006)。分析样品表现出相对低的 MgO 含量(1.11% ~ 1.35%)和 $\text{Mg}^\#$ 值(46.98 ~ 49.28), 与 MORB 部分熔融产生的熔体相似, 暗示俯冲板片形成的熔体未与地幔楔发生明显的熔体-岩石反应, 而不同于由洋中脊玄武岩产生的熔体, 后者在上升过程中与地幔楔发生交代作用, 其 $\text{Mg}^\#$ 值会升高(董申保等, 2004)。

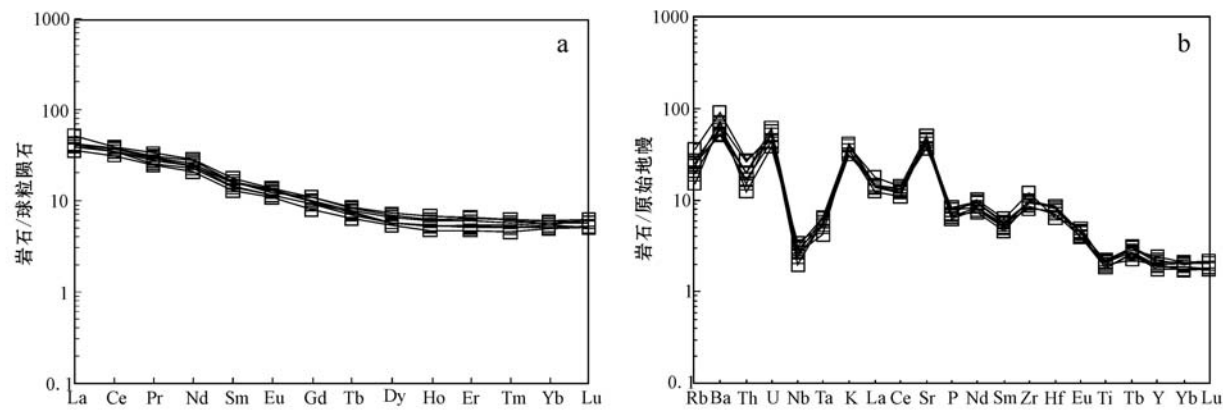


图 8 索尔巴斯塔乌石英闪长岩稀土元素配分曲线图 (a) 和微量元素蛛网图 (b) (球粒陨石和原始地幔标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 8 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized spidergrams of trace elements (b) of the Suoerbasitawu quartz diorite (after Sun and McDonough, 1989)

表 3 索尔巴斯塔乌石英闪长岩主量($w_B/\%$)和微量($w_B/10^{-6}$)元素分析结果

Table 3 Major oxide ($w_B/\%$) and trace element ($w_B/10^{-6}$) compositions of the Suoerbasitawu quartz diorite

样号	YMQ01	YMQ02	YMQ03	YMQ04	YMQ05	YMQ06	YMQ07
SiO ₂	65.35	65.40	65.36	64.53	64.01	64.51	63.75
TiO ₂	0.39	0.39	0.42	0.45	0.48	0.42	0.47
Al ₂ O ₃	17.07	17.12	17.15	17.43	17.47	17.72	18.00
Fe ₂ O ₃ ^T	2.83	2.89	2.92	3.28	3.18	2.93	3.06
MnO	0.05	0.05	0.05	0.08	0.09	0.05	0.06
MgO	1.18	1.18	1.11	1.35	1.22	1.22	1.20
CaO	2.74	2.71	2.86	3.42	2.95	3.42	3.46
Na ₂ O	6.44	6.39	6.28	6.29	6.72	6.34	6.41
K ₂ O	1.17	1.21	1.18	1.03	1.21	1.03	0.94
P ₂ O ₅	0.13	0.14	0.15	0.17	0.18	0.15	0.17
LOI	2.60	2.51	2.50	1.96	2.49	2.19	2.47
Total	99.96	99.99	99.98	99.99	100.00	99.98	99.99
A/CNK	1.01	1.02	1.02	0.99	0.99	1.00	1.01
Na ₂ O/K ₂ O	5.50	5.28	5.32	6.11	5.55	6.16	6.82
Na ₂ O+K ₂ O	7.61	7.60	7.46	7.32	7.93	7.37	7.35
Mg [#]	49.28	48.76	46.98	48.96	47.20	49.25	47.75
AR	2.25	2.24	2.19	2.08	2.27	2.07	2.04
La	9.58	9.4	12.3	9.78	10.2	8.52	10.1
Ce	21.2	21.4	24.7	21.8	23.8	19.5	22.9
Pr	2.49	2.66	3.22	2.87	3.01	2.37	2.89
Nd	10.7	11.4	13.7	11.4	12.9	10.0	12.4
Sm	2.21	2.42	2.78	2.25	2.54	2.02	2.49
Eu	0.68	0.746	0.82	0.68	0.73	0.65	0.77
Gd	1.92	2.08	2.28	1.94	2.26	1.7	2.13
Tb	0.273	0.28	0.332	0.29	0.32	0.24	0.3
Dy	1.49	1.51	1.91	1.49	1.82	1.38	1.73
Ho	0.298	0.314	0.39	0.3	0.36	0.27	0.34
Er	0.876	0.86	1.13	0.9	1.08	0.79	1.01
Tm	0.132	0.133	0.160	0.140	0.16	0.120	0.15
Yb	0.87	0.94	0.95	0.99	1.04	0.84	1.03
Lu	0.137	0.13	0.16	0.15	0.16	0.13	0.15
ΣREE	52.85	54.27	64.83	54.98	60.38	48.53	58.39

续表 3

Continued Table 3

样号	YMQ01	YMQ02	YMQ03	YMQ04	YMQ05	YMQ06	YMQ07
δEu	1.04	1.08	1.08	1.03	1.02	1.06	1.09
$(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$	7.94	6.73	8.40	6.58	7.04	6.80	6.58
Y	8.10	8.66	10.20	8.85	9.48	9.01	10.80
Li	7.57	7.57	8.74	9.23	8.45	13.50	17.50
Be	1.14	1.38	1.16	1.33	0.86	1.02	1.12
Sc	5.29	5.80	6.61	5.82	5.92	5.12	5.77
V	69.3	70.0	84.8	70.2	66.1	64.3	73.9
Cr	6.4	8.2	8.4	8.5	7.6	3.6	4.4
Co	63.7	52.1	66.0	58.1	67.9	62.6	62.5
Ni	4.0	4.5	5.0	4.3	4.9	2.9	2.8
Cu	8.57	5.24	6.95	6.95	6.95	2.23	3.02
Zn	41.9	42.3	52.3	45.6	57.1	35.2	50.8
Ga	20.3	20.5	25.3	20.8	20.4	20.3	21.2
Cs	0.29	0.28	0.41	0.33	0.27	0.37	0.34
Rb	16.0	16.3	17.2	22.3	9.7	12.0	14.6
Sr	850	856	1 030	994	783	954	992
Ba	355	368	424	628	475	413	497
Th	1.44	1.69	1.69	2.35	2.26	1.28	1.04
U	0.90	1.06	1.26	0.95	1.06	1.19	0.81
Nb	1.87	1.69	2.19	1.89	1.38	2.05	2.44
Ta	0.17	0.22	0.27	0.26	0.24	0.21	0.21
Pb	7.36	7.30	8.66	6.94	8.22	4.23	6.28
Zr	96.20	110.70	136.20	111.00	105.00	102.00	91.20
Hf	2.20	2.68	1.99	2.52	2.67	2.65	2.32
Sr/Y	104.94	98.85	100.98	112.32	82.59	105.88	91.85

表 4 索尔巴斯塔乌石英闪长岩 Sr-Nd 同位素分析结果
Table 4 Sr-Nd isotopic compositions of the Suoerbasitawu quartz diorite in the Yemaquan region of East Junggar

样号	YMQ01	YMQ02	YMQ03	YMQ04
$\text{Rb}(\times 10^{-6})$	16.00	16.30	17.20	22.30
$\text{Sr}(\times 10^{-6})$	850	856	1 030	994
$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	0.056 11	0.056 76	0.069 78	0.066 88
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	0.704 40	0.704 25	0.704 21	0.704 45
$\pm 2\sigma$	0.000 013	0.000 011	0.000 014	0.000 012
$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_{\text{i}}$	0.704 04	0.703 89	0.703 77	0.704 03
$\text{Sm}(\times 10^{-6})$	2.01	2.42	2.93	2.12
$\text{Nd}(\times 10^{-6})$	10.70	11.40	13.70	11.40
$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	0.113 57	0.118 34	0.119 30	0.112 43
$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	0.512 77	0.512 77	0.512 78	0.512 75
$\pm 2\sigma$	0.000 008	0.000 007	0.000 007	0.000 008
$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{i}}$	0.512 44	0.512 43	0.512 44	0.512 42
$\epsilon\text{Nd}(t)$	7.2	7.0	7.2	6.9
$t_{\text{DM}}(\text{Ma})$	589	613	596	607
$f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$	-0.42	-0.40	-0.39	-0.43

索尔巴斯塔乌石英闪长岩具有较高的锆石 Hf 同位素 $[\epsilon\text{Hf}(t) = 10.9 \sim 13.1]$ 和全岩 Nd 同位素组成 $[\epsilon\text{Nd}(t) = 6.9 \sim 7.2]$, 类似于洋岛玄武岩(OIB)或洋脊玄武岩(MORB)的特征, 表明它的岩浆源区

可能继承了俯冲洋壳(MORB)的特点, 与典型的来自 Cook Island 和 Aleutians 的俯冲板片熔融形成的埃达克质岩类(Kay, 1978; Stern and Kilian, 1996)相似。同时在 $\epsilon\text{Nd}(t) - (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_{\text{i}}$ 图解(图 10)上, 样品均落入阿尔曼泰蛇绿岩区域内, 暗示了它们可能是俯冲洋壳板片部分熔融的产物。在 $\text{MgO} - \text{SiO}_2$ 图解(图 11)中, 样品也均落入俯冲洋壳熔融形成的埃达克岩的区域内。另外石英闪长岩所表现的锆石 Hf 同位素特征与扎河坝蛇绿岩中形成于 494~498 Ma 的斜长花岗岩(Zeng *et al.*, 2015)和东准噶尔早古生代花岗岩体相似(张永等, 2010; 郭晓俊等, 2013; Xu *et al.*, 2013), 进一步表明了索尔巴斯塔乌石英闪长岩可能为以新元古代晚期至早古生代早期由亏损地幔演化而来的俯冲洋壳物质部分熔融的产物。综合上述分析, 认为索尔巴斯塔乌埃达克质岩石可能是由俯冲洋壳板片在榴辉岩相部分熔融形成的。

埃达克岩最初被认为是由年轻的俯冲大洋板片在榴辉岩相下熔融形成的(Defant and Drummond, 1990), 然而随着研究的不断深入, 大量证据表明老的

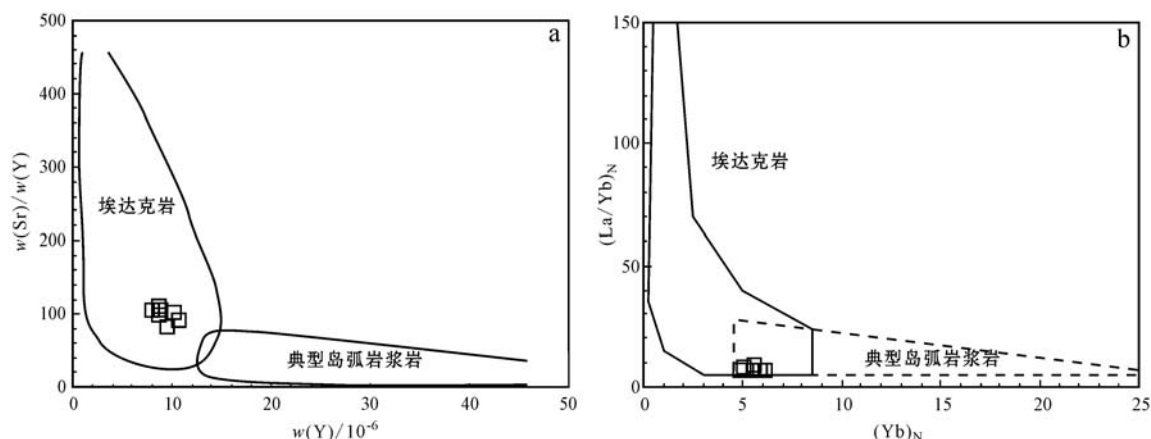


图 9 索尔巴斯塔乌石英闪长岩的 Sr/Y-Y 图解(a)和 (La/Yb)_N-(Yb)_N 图解(b)(据 Defant and Drummond, 1990)

Fig. 9 Sr/Y-Y (a) and (La/Yb)_N-(Yb)_N (b) diagrams for the Suoerbasitawu quartz diorite (after Defant and Drummond, 1990)

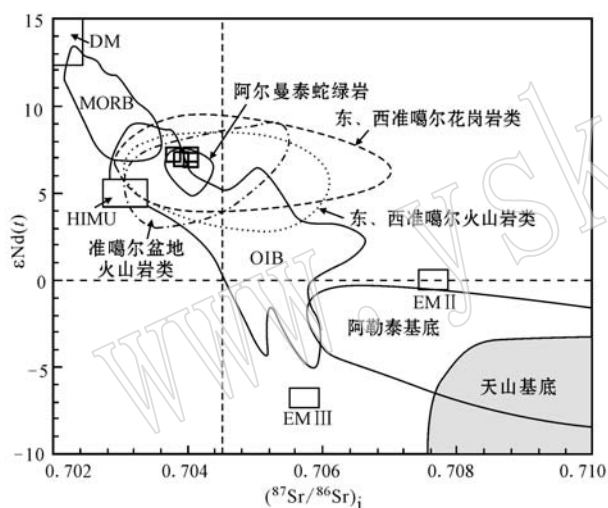


图 10 索尔巴斯塔乌石英闪长岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ -($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 图解

Fig. 10 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ -($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i diagrams for the Suoerbasitawu quartz diorite

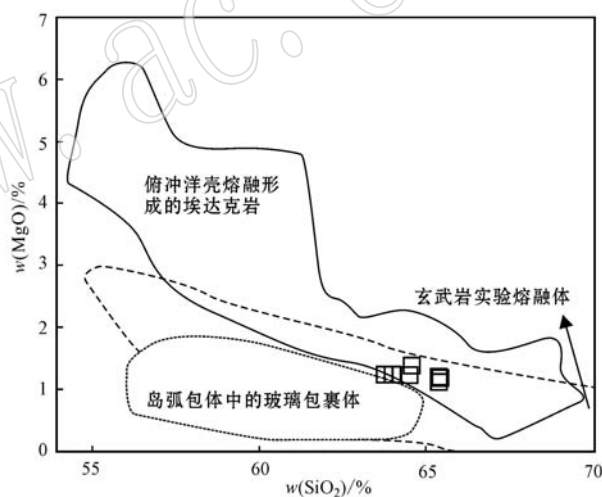


图 11 索尔巴斯塔乌石英闪长岩 MgO-SiO₂ 图解

(据 Defant *et al.*, 2002)

Fig. 11 MgO-SiO₂ diagrams for the Suoerbasitawu quartz diorite (after Defant *et al.*, 2002)

(大于 20 Ma)洋壳在特定的俯冲作用下也能形成埃达克岩(Defant *et al.*, 2002)。同时,在增厚的下地壳环境中,拆沉和低侵作用导致玄武质下地壳的熔融也可以形成于埃达克岩的地球化学特征类似的岩石(Atherton and Petford, 1993; Gao *et al.*, 2004)。研究证实,岛弧火山作用是洋壳俯冲过程中的正常结果,主要形成于地幔楔的水化作用,来自于俯冲洋壳板片并经历交代地幔楔物质混染形成的埃达克岩往往具有高 Mg[#] 及 Cr、Ni 含量(Yogodzinski *et al.*, 1995),然而索尔巴斯塔乌早志留世埃达克质岩石主要由俯冲洋壳板片部分熔融形成的,未与地幔楔发

生明显的熔体-岩石反应。近年来,一些学者提出俯冲洋壳的撕裂或洋脊俯冲形成的板片窗环境会减弱岛弧地区地幔楔水化作用,并会使正常的岛弧火山作用减弱或停止(Hole *et al.*, 1991; Thorkelson, 1996; 李三忠等, 2004; Thorkelson and Breitsprecher, 2005)。实例研究和理论模拟都证实,在板片窗的环境下,由于软流圈的加热作用,不仅可以使俯冲板片,特别是板缘及其上覆的岛弧下地壳发生部分熔融,同时由于减压作用还可以促使软流圈自身部分熔融,而板片窗边缘的部分熔融是火山作用的一个重要源区(Thorkelson, 1996),由年轻的俯冲岩石

圈在板片窗边缘的板片末端受到来自板片窗高温软流圈地幔物质的烘烤发生部分熔融,产生特殊的有别于正常岛弧钙碱性火成岩,如埃达克岩、高镁安山岩和富铌玄武岩等(Vema and Nelson, 1989; Stern and Kilian, 1996; Thorkelson, 1996; Smithies, 2000; Prouteau *et al.*, 2001; Thorkelson and Breitsprecher, 2005; Viruete *et al.*, 2007)。结合区域上早志留世之后火山活动不发育的地质事实,推测索尔巴斯塔乌早志留世埃达克质岩石很可能是在俯冲洋壳的局部撕裂(可能俯冲速率或角度的差异造成的)形成的板片窗环境下,由俯冲的大洋板片边缘受到来自板片窗高温软流圈地幔物质的烘烤发生部分熔融形成的。

4.2 地质意义

索尔巴斯塔乌石英闪长岩体锆石 U-Pb 年龄为 442.5 ± 2.5 Ma, 形成于早志留世,这与在北塔山乌拉斯台口岸一带呈构造岩块产于蛇绿混杂岩带中的变闪长岩年龄 438.3 ± 2.5 Ma(未发表数据)相一致。近年来在东准噶尔其他地区识别出了早志留世火成岩,如郭晓俊等(2013)获得巴里坤地区怪石山二长花岗岩锆石 U-Pb 年龄 440.6 ± 3.7 Ma,张永等(2010)获得琼河坝地区花岗斑岩锆石 U-Pb 年龄 442.2 ± 3.5 Ma, Xu 等(2013)获得塔黑尔片理化花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 443.2 ± 1.7 Ma、粗面岩锆石 U-Pb 年龄为 441.7 ± 1.0 Ma 及粗安岩锆石 U-Pb 年龄为 442.4 ± 1.9 Ma, 暗示了中亚造山带在东准噶尔地区早志留世期间存在重要的一次岩浆活动事

件。李锦轶(1991)和董连慧等(2009)认为其成因与北侧的阿尔曼泰蛇绿岩带为代表的古亚洲洋的南向俯冲有关。Xu 等(2013)最近基于对东准噶尔地区的塔黑尔构造窗详细的研究,并获得了大量形成于早古生代弧岩浆岩的年龄数据,并认为额尔齐斯代表的古亚洲洋向南俯冲于准噶尔大陆之下形成野马泉陆缘弧。然而位于研究区南侧的卡拉麦里蛇绿岩的形成时代为早泥盆世(黄岗等, 2012; 胡超斌等, 2014),而北侧的阿尔曼泰蛇绿混杂岩带是晚寒武—早奥陶世古亚洲洋的残片(简平等, 2003; 肖文交等, 2006; 张元元等, 2010)。显然,东准噶尔地区早志留世期间存在的这次重要的岩浆活动事件可能与阿尔曼泰蛇绿岩带所代表的古亚洲洋俯冲消减相关。索尔巴斯塔乌早志留世石英闪长岩体所表现出由俯冲洋壳部分熔融形成埃达克岩的典型特征,具明显的 Nb、Ta 和 Ti 的负异常,与典型岛弧花岗岩地球化学特征一致。在 Nb-Y 图解(图 12a),样品均落在火山弧花岗岩区域内;在 Th/Yb-Ta/Yb 图解中(图 12b),样品均落在陆缘弧的区域内。因此,推测东准噶尔地区至少在早志留世期间,以阿尔曼泰蛇绿岩带为代表的古亚洲洋向南俯冲至准噶尔地块之下并形成以索尔巴斯塔乌石英闪长岩为代表的陆缘弧(李锦轶, 1991; 董连慧等, 2009; Xu *et al.*, 2013)。中晚志留世期间,可能发生了弧陆或陆陆碰撞,区域上中-顶志留统地层与下伏奥陶纪火山-沉积地层(何国琪等, 2001)和下泥盆统地层与早古生代(尤其是早志留世)花岗岩之间的区域性的角度不

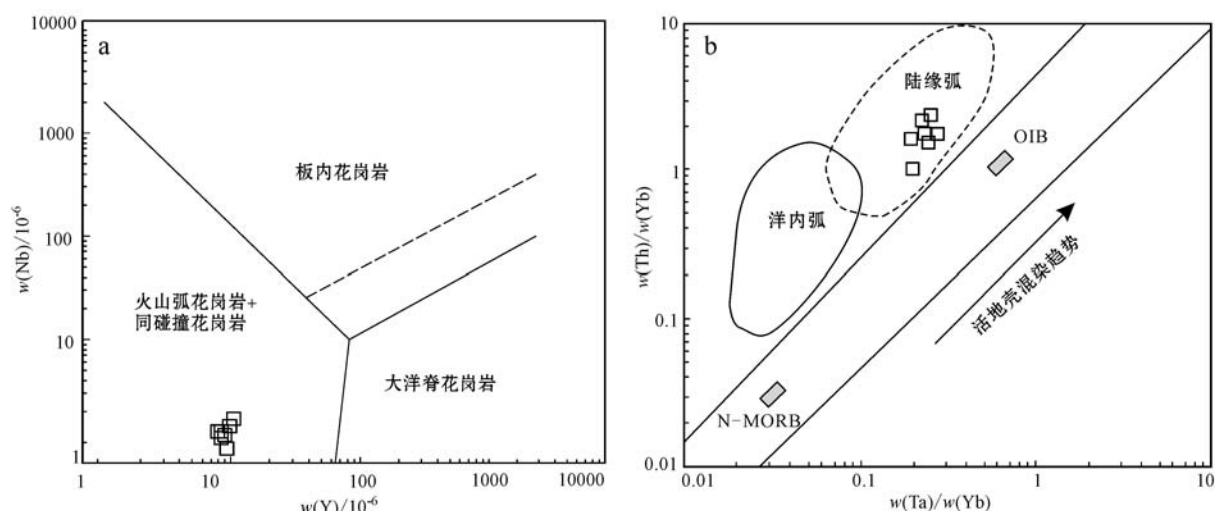


图 12 索尔巴斯塔乌石英闪长岩的 Nb-Y 图解(a, 据 Pearce *et al.*, 1984) 和 Th/Yb-Ta/Yb 图解(b, 据 Pearce, 1982)

Fig. 12 Nb-Y (a, after Pearce *et al.*, 1984) and Th/Yb-Ta/Yb (b, after Pearce, 1982) diagrams for the Suoerbasitawu quartz diorite

整合(李锦轶, 1991; 李亚萍等, 2009; 郭晓俊等, 2013)的接触关系应是此次构造事件在东准噶尔的具体表现。同时东准噶尔地区含局限于西伯利亚地台南缘浅水区的地方性冷水生物群——图瓦贝化石(苏养正, 1981; 张梓歆等, 1983)以及在阿尔曼泰蛇绿岩中识辨出的晚志留世沉积岩块物源主要为北侧的阿尔泰造山带(Huang *et al.*, 2013), 进一步揭示了中晚志留世期间东准噶尔早古生代洋盆体系已发生了关闭。

5 结论

(1) 新疆东准噶尔野马泉地区的索尔巴斯塔乌石英闪长岩体锆石 U-Pb 年龄为 442.5 ± 5.6 Ma, 形成于早志留世。

(2) 索尔巴斯塔乌石英闪长岩体具埃达克岩的地球化学特征, 由俯冲的大洋板片边缘受到来自板片窗高温软流圈地幔物质的烘烤发生部分熔融形成的。

(3) 索尔巴斯塔乌岩体是古亚洲洋在早志留世时期向南俯冲消减过程中形成的岩浆弧, 东准噶尔早志留世埃达克岩的发现, 对认识中亚造山带及邻区古生代构造演化具有重要的意义。

致谢 在野地质工作过程中得到了西安地质矿产研究所陈隽璐研究员的悉心指点; 文中锆石 LA-ICPMS U-Pb 定年测试和解释得到了中国科学院青藏高原研究所岳雅慧副研究员的热情帮助; 在成稿过程中得到成都地质调查中心徐学义研究员、中国地科院闫臻研究员、陕西区域地质矿产研究院李海平教授级高工及审稿人的建设性的意见和建议, 在此表示衷心地感谢!

References

- Amelin Y, Lee D C and Halliday A N. 2000. Early-Middle Archean crustal evolution deduced from Lu-Hf and U-Pb isotopic studies of single zircon grains[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 64: 4 205~4 225.
- Andersen T. 2002. Correction of common Pb in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. *Chem. Geol.*, 192: 59~79.
- Atherton M P and Petford N. 1993. Generation of sodium-rich magmas from newly underplated basaltic crust[J]. *Nature*, 362: 144~146.
- Bievre D P and Taylor P D. 1993. Table of the isotopic compositions of the elements[J]. *Int. J. Mass Spectrom Ion Process*, 123: 149~166.
- Blichert-Toft J and Albarède F. 1997. The Lu-Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 148: 243~258.
- Castillo P R. 2006. An overview of adakite petrogenesis[J]. *Chinese Science Bulletin*, 51: 257~268.
- Chen B and Jahn B M. 2004. Genesis of post-collisional granitoids and basement nature of the Junggar Terrane, NW China: Nd-Sr isotope and trace element evidence[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23: 691~703.
- Coleman R. 1989. Continental growth of Northwest China[J]. *Tectonics*, 8: 621~625.
- Chu N C, Taylor R N, Chavagnac V, *et al.* 2002. Hf isotope ratio analysis using multi-collector inductively coupled plasma mass spectrometry: An evaluation of isobaric interference corrections[J]. *J. Anal. at Spectrom.*, 17: 1 567~1 574.
- Defant M J and Drummond M S. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere[J]. *Nature*, 347 (6 294): 662~665.
- Defant M J, Xu J F, Kepezhinskis P, *et al.* 2002. Adakites: some variations on a theme[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 18(2): 129~142.
- DePaolo D J. 1981. Trace element and isotopic effects of combined wall rock assimilation and fractional crystallization[J]. *Earth Planetary Science Letters*, 53: 189~202.
- Dong Lianhui, Xu Xingwang, Qu Xun, *et al.* 2009. Tectonic setting and formation mechanism of the circum-Junggar porphyritic copper deposit belts[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(4): 713~737 (in Chinese with English abstract).
- Dong Shenbao and Tian Wei. 2004. The nomenclature, characteristics and petrogenesis of adakite[J]. *Earth Science Frontiers*, 11(4): 585~594 (in Chinese with English abstract).
- Du Shijun, Qu Xun, Deng Gang, *et al.* 2010. Chronology and tectonic setting of the intrusive bodies and associated porphyry copper deposit in Hersai area, East Junggar[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26: 2 981~2 996 (in Chinese with English abstract).
- Elhlou S, Belousova E, Griffin W L, *et al.* 2006. Trace element and isotopic composition of GJ red zircon standard by laser ablation[J]. *Geochim Cosmochim. Acta*, 70(Suppl): A158, doi: 10.1016/j.gca.2006.06.1383.

- Gao S, Rudnick R L, Yuan H L, *et al.* 2004. Recycling lower continental crust in the North China Craton[J]. *Nature*, 432: 892~897.
- Guo Lishuang, Zhang Rui, Liu Yulin, *et al.* 2009. Zircon U-Pb age of Tonghualing intermediate-acid intrusive rocks, Eastern Junggar, Xinjiang[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 45(5): 819~824 (in Chinese with English abstract).
- Guo Xiaojun, Zhang Chengli, Li Lei, *et al.* 2013. Determination of Silurian granitic plutons in the Balikun area, Xinjiang and its implications[J]. *Chinese Journal of Geology*, 48(4): 1050~1068 (in Chinese with English abstract).
- Han Baofu, Ji Jianqing, Song Biao, *et al.* 2006. Late Paleozoic vertical growth of continental crust around the Junggar Basin, Xinjiang, China (Part I): Timing of post-collisional plutonism[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1077~1086 (in Chinese with English abstract).
- He Guoqi, Li Maosong, Jia Jindou, *et al.* 2001. A discussion on age and tectonic significance of ophiolite in Eastern Junggar, Xinjiang [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 45(5): 819~824 (in Chinese with English abstract).
- Hole M J, Rogers G, Saunders A D, *et al.* 1991. Relation between alkalalic volcanism and slab-window formation[J]. *Geology*, 19: 657~660.
- Hu Chaobin, Liao Qun'an, Fan Guangming, *et al.* 2014. Discovery of MOR-type ophiolites from the Dishuiquan region, eastern Junggar [J]. *Chin. Sci. Bull.*, 59: 2213~2222 (in Chinese with English abstract).
- Huang Gang, Niu Guangzhi, Wang Xinlu, *et al.* 2012. Formation and emplacement age of Karamaili ophiolite: LA-ICP-MS zircon U-Pb age evidence from the diabase and tuff in eastern Junggar, Xinjiang [J]. *Geological Bulletin of China*, 31: 1267~1278 (in Chinese with English abstract).
- Huang G, Niu G Z, Zhang Z W, *et al.* 2013. Discovery of ~4.0 Ga detrital zircons in the Aermantai ophiolitic mélange, East Junggar, northwest China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 58: 3645~3663.
- Jian Ping, Liu Dunyi, Zhang Qi, *et al.* 2003. SHRIMP dating of rocks ophiolite and leucocratic with in ophiolite[J]. *Earth Science Frontiers*, 10(4): 439~456 (in Chinese with English abstract).
- Kay R W. 1978. Aleutian magnesian andesites: Melts from subducted Pacific Ocean crust[J]. *J. Volcanol Geotherm Res*, 4: 117~132.
- Li Jinyi. 1991. Early Paleozoic evolution of lithosphere plate, East Junggar, Xinjiang[J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences*, 23: 1~12 (in Chinese with English abstract).
- Li Jinyi. 1995. Main characteristics and Emplacement processes of the East Junggar ophiolites, Xinjing, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 11: 73~84 (in Chinese with English abstract).
- Li Jinyi, He Guoqi, Xu Xin, *et al.* 2006. Crustal tectonic framework of Northern Xinjiang and adjacent regions and its formation[J]. *Acta Geologica Sinica*, 80: 148~167 (in Chinese with English abstract).
- Li Sanzhong, Guo Xiaoyu, Hou Fanghui, *et al.* 2004. Slap window in the active continental margin[J]. *Marine Geology Letters*, 20(1): 6~18 (in Chinese with English abstract).
- Li X H, Liu Y, Li Q L, *et al.* 2009. Precise determination of Phanerozoic zircon Pb/Pb age by multicollector SIMS without external standardization[J]. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 10: Q04010, doi: 10.1029/2009GC002400.
- Li Yaping, Li Jinyi, Sun Guihua, *et al.* 2009. Determination of the Early Devonian granite in East Junggar, Xinjiang, China and its geological implications[J]. *Geological Bulletin of China*, 28(12): 1885~1893 (in Chinese with English abstract).
- Long X P, Yuan C and Sun M. 2012. Geochemistry and U-Pb detrital zircon dating of Paleozoic graywackes in East Junggar, NW China: Insights into subduction-accretion processes in the southern Central Asian Orogenic Belt[J]. *Gondwana Research*, 21: 637~653.
- Ludwig K R. 2003. ISOPLLOT 3.0-A geochronological toolkit for Microsoft Excel[J]. *Berkeley Geochronology Center, Special Publication*, 4: 70.
- Maniar P D and Piccoli P M. 1989. Tectonics discrimination of granitoids[J]. *GSA Bulletin*, 101: 635~643.
- Mao Qigui, Xiao Wenjiao, Han Chunming, *et al.* 2008. Late Paleozoic south-ward accretionary polarity of the eastern Junggar orogenic belt: insight from the Dajianshan and other A-Type granites[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(4): 733~742 (in Chinese with English abstract).
- Martin H. 1999. Adakitic magmas: Modern analogues of Archaean granitoids[J]. *Lithos*, 46(3): 411~429.
- Middlemost E A K. 1985. *Magams and Magmatic Rocks*[R]. London: Longman, 1~266.
- Pearce J A. 1982. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries[A]. Thorps R S. *Andesites*[C]. New York: John Wiley and Sons, 525~548.
- Pearce J A, Harris B W and Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. *Journal Petrol.*, 25(4): 956~983.
- Prouteau G, Scaillet B, Pichavant M, *et al.* 2001. Evidence for mantle metasomatism by hydrous silicic melts derived from subducted o-

- ceanic crust[J]. *Nature*, 410: 197~200.
- Rapp R P, Watson E B and Miller C F. 1991. Partial melting of amphibolite/eclogite and the origin of Archaean trondhjemites and tonalities[A]. Happala I and Condie K C. Precambrian Granitoids-Petrogenesis, Geochemistry and Metallogeny[C]. *Precamb Res.*, 51: 1~25.
- Scherer E, Munker C and Mezger K. 2001. Calibration of the lutetium-hafnium clock[J]. *Science*, 293: 683~687.
- şengör A M C, Natal'in B A and Burtman V S. 1993. Evolution of the Altaid tectonic collage and Paleozoic crustal growth in Asia[J]. *Nature*, 364: 299~307.
- Sláma J, Koöler J, Daniel J, *et al.* 2008. Plesovice zircon-A new natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis[J]. *Chemical Geology*, 249: 1~359.
- Smithies R H. 2000. The Archaean tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG) series is not an analogue of Cenozoic adakite[J]. *Earth Planet Sci. Lett.*, 182: 115~125.
- Stern C R and Kilian R. 1996. Role of the subducted slab, mantle wedge and continental crust in the generation of adakites from the Andean austral volcanic zone[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 123: 263~281.
- Su Yangzheng. 1981. On the geological and geographical distribution of Tuvaella with reference to its habitat[J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, 20: 567~576(in Chinese with English abstract).
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes [A]. Saunders A D and Norry M J. Magmatism in Ocean Basins [C]. *Geol. Soc. Spec. Pub.*, 42: 315~345.
- Thorkelson D J. 1996. Subduction of diverging plates and the principles of slab window formation[J]. *Tectonophysics*, 255: 47~63.
- Thorkelson D J and Breitsprecher K. 2005. Partial melting of slab window margins: genesis of adakitic and non-adakitic magmas[J]. *Lithos*, 79: 24~41.
- Vema S P and Nelson S A. 1989. Isotopic and trace element constraints on the origin and evolution of alkaline and calc-alkaline magmas in the northwestern Mexican volcanic belt[J]. *J. Geophys. Res.*, 94: 531~544.
- Vervoort J D and Blichert-Toft J. 1999. Evolution of the depleted mantle: Hf isotope evidence from juvenile rocks through time[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 63: 533~556.
- Virtue J E, Contreras F, Stein C, *et al.* 2007. Magmatic relationships and ages between adakites, magnesian andesites and Nb-enriched basalt-andesites from Hipaniola: record of a major change in the Caribbean island arc magma sources[J]. *Lithos*, doi: 10.1016/j.lithos.2007.01.008.
- Wang Qiang, Zhao Zhenhua, Xu Jifeng, *et al.* 2006. Carboniferous adakite-high-Mg andesite-Nb-enriched basaltic rock suites in the Northern Tianshan area: Implications for Phanerozoic crustal growth in the Central Asia Orogenic Belt and Cu-Au mineralization [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(1): 11~30(in Chinese with English abstract).
- Wu F Y, Yang Y H, Xie L W, *et al.* 2006. Hf isotopic compositions of the standard zircons and baddeleyites used in U-Pb geochronology [J]. *Chem. Geol.*, 234: 105~126.
- Xiao W J, Huang B C, Han C M, *et al.* 2010. A review of the western part of the Altaids: A key to understanding the architecture of accretionary orogens[J]. *Gondwana Research*, 18: 253~273.
- Xiao W J, Kröner A and Windley B F. 2009. Geodynamic evolution of Central Asia in the Paleozoic and Mesozoic [J]. *International Journal of Earth Sciences*, 98: 1185~1188.
- Xiao W J and Santosh M. 2014. The western Central Asian Orogenic Belt: A window to accretionary orogenesis and continental growth [J]. *Gondwana Research*, 25: 1429~1444.
- Xiao Wenjiao, Windley B F, Yan Quanren, *et al.* 2006. SHRIMP zircon age of the Aermantai ophiolite in the North Xinjiang area, China and its tectonic implications[J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(1): 32~37(in Chinese with English abstract).
- Xu X W, Jiang N, Li X H, *et al.* 2013. Tectonic evolution of the East Junggar terrane: Evidence from the Taheir tectonic window, Xinjiang, China[J]. *Gondwana Research*, 24: 578~600.
- Xu Xueyi, Li Runshe, Chen Juanlu, *et al.* 2014. New constraints on the Paleozoic tectonic evolution of the northern Xinjiang area[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(6): 1521~1534(in Chinese with English abstract).
- Yogodzinski G M, Kay R W, Volynets O N, *et al.* 1995. Magnesian andesite in the western Aleutian Komandorsky region: implications for slab melting and processes in the mantle wedge[J]. *Geological Society America Bulletin*, 107: 505~519.
- Yuan H L, Gao S, Dai M N, *et al.* 2008. Simultaneous determinations of U-Pb age, Hf isotopes and trace element compositions of zircon by excimer laser ablation quadrupole and multiple collectors ICP-MS [J]. *Chem. Geol.*, 247: 100~118.
- Zeng L J, Niu H C, Bao Z W, *et al.* 2015. Petrogenesis and tectonic significance of the plagiogranites in the Zhaheba ophiolite, Eastern Junggar orogen, Xinjiang, China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 113: 137~150.

- Zhang Qi, Qian Qing, Wang Erqi, *et al.* 2001. An East China plateau in Mid-Late Yanshanian period implication from dadakites[J]. Chinese Journal of Geology, 36 (2): 248~255(in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Wang Yan, Wang Yuanlong, *et al.* 2003. On the relationship adakite and its tectonic setting[J]. Geotectonica et Metallogenia, 27: 101~108(in Chinese with English abstract).
- Zhang Yong, Liang Guanglin, Qu Xun, *et al.* 2010. Evidence of U-Pb age and Hf isotope of zircons for Early Paleozoic magmatism in the Qionghaba arc, East Junggar[J]. Acta Petrologica Sinica, 26: 2389~2398(in Chinese with English abstract).
- Zhang Yuanyuan and Guo Zhaojie. 2010. New constraints on formation age of ophiolites in northern Junggar and comparative study of their connection[J]. Acta Petrologica, 26: 422~430(in Chinese with English abstract).
- Zhang Z C, Zhou G, Kusky T M, *et al.* 2009. Late Paleozoic volcanic record of the Northern Junggar Terrane, Xinjiang, northwestern China: Major and trace element characteristics, Sr-Nd isotopic systematics and implications for tectonic evolution[J]. Gondwana Research, 16(2): 201~215.
- Zhang Zixin, Run Jiayu and Di Qiaoling. 1983. Silurian Tuvaela gigantean faunule of the Barkol area, Northeastern Xinjiang[J]. Acta Palaeontologica Sinica, 22: 278~294(in Chinese with English abstract).
- 董连慧, 徐兴旺, 屈迅, 等. 2009. 初论环准噶尔斑岩铜矿带的地质构造背景与形成机制[J]. 岩石学报, 25(4): 713~737.
- 董申宝, 田伟. 2004. 埃达克岩的原义、特征与成因[J]. 地学前缘, 11(4): 585~594.
- 杜世俊, 屈迅, 邓刚, 等. 2010. 东准噶尔和尔赛斑岩铜矿成岩成矿时代与形成的构造背景[J]. 岩石学报, 26: 2981~2996.
- 郭丽爽, 张锐, 刘玉琳, 等. 2009. 新疆东准噶尔铜华岭中酸性侵入体锆石 U-Pb 年代学研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 45(5): 819~824.
- 郭晓俊, 张成立, 李雷, 等. 2013. 新疆巴里坤地区志留纪花岗岩的确定及其地质意义[J]. 地质科学, 48(4): 1050~1068.
- 韩宝福, 季建清, 宋彪, 等. 2006. 新班准噶尔晚古生代陆壳垂向生长(I)-后碰撞深成岩浆活动的时限[J]. 岩石学报, 22(5): 1077~1086.
- 何国琦, 李茂松, 贾进斗, 等. 2001. 论新疆东准噶尔蛇绿岩的时代及其意义[J]. 北京大学学报(自然科学版), 37(6): 852~858.
- 胡朝斌, 廖群安, 樊光明, 等. 2014. 东准噶尔滴水泉地区发现洋中脊型蛇绿岩[J]. 科学通报, 59: 2213~2222.
- 黄岗, 牛广智, 王新录, 等. 2012. 新疆东准噶尔卡拉麦里蛇绿岩形成和侵位时限——来自辉绿岩和凝灰岩的年代学证据[J]. 地质通报, 31: 1267~1278.
- 简平, 刘敦一, 张旗, 等. 2003. 蛇绿岩及蛇绿岩中浅色岩的 SHRIMP U-Pb 测年[J]. 地学前缘, 10(4): 439~456.
- 李锦轶. 1991. 试论新疆东准噶尔早古生代岩石圈板块构造演化[J]. 中国地质科学院院报, 23: 1~12.
- 李锦轶. 1995. 新疆东准噶尔蛇绿岩的基本特征和侵位历史[J]. 岩石学报, 11: 73~84.
- 李锦轶, 何国琦, 徐新, 等. 2006. 新疆北部及邻区地壳构造格架及其形成过程的初步探讨[J]. 地质学报, 80(1): 148~168.
- 李三忠, 郭晓玉, 侯方辉, 等. 2004. 活动大陆边缘的板片窗构造[J]. 海洋地质动态, 20(1): 6~18.
- 李亚萍, 李锦轶, 孙桂华, 等. 2009. 新疆东准噶尔早泥盆世早期花岗岩的确定及其地质意义[J]. 地质通报, 28(12): 1885~1893.
- 毛启贵, 肖文交, 韩春明, 等. 2008. 东准噶尔地区晚古生代向南增生来自 A 型花岗岩的启示[J]. 岩石学报, 24(4): 733~742.
- 苏养正. 1981. 论图瓦贝 Tuvaela 的时空分布和生态环境[J]. 古生物学报, 20(6): 567~576.
- 王强, 赵振华, 许继峰, 等. 2006. 天山北部石炭纪埃达克岩-高镁安山岩-富 Nb 岛弧玄武质岩: 对中亚造山带显生宙地壳增生与铜金成矿的意义[J]. 岩石学报, 22(1): 11~30.
- 肖文交, Windley B F, 阎全人, 等. 2006. 北疆地区阿尔曼太蛇绿岩锆石 SHRIMP 年龄及其大地构造意义[J]. 地质学报, 80(1): 32~37.
- 徐学义, 李荣社, 陈隽璐, 等. 2014. 新疆北部古生代构造演化的几点认识[J]. 岩石学报, 30(6): 1521~1534.
- 张旗, 钱青, 王二七, 等. 2001. 燕山中晚期的中国东部高原: 埃达克岩的启示[J]. 地质科学, 36(2): 248~255.
- 张旗, 王焰, 王元龙, 等. 2003. 埃达克岩与构造环境[J]. 大地构造与成矿学, 27: 101~108.
- 张永, 梁广林, 屈迅, 等. 2010. 东准噶尔琼河坝岛弧早古生代岩浆活动的锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素证据[J]. 岩石学报, 26: 2389~2398.
- 张元元, 郭召杰. 2010. 准噶尔北部蛇绿岩形成时限新证据及其东、西准噶尔蛇绿岩的对比研究[J]. 岩石学报, 26: 422~430.
- 张梓歆, 戎嘉余, 邸巧玲. 1983. 新疆巴里坤地区志留纪的大型图瓦贝组合[J]. 古生物学报, 22(3): 278~294.

附中文参考文献