

东昆仑东段都兰热水花岗岩锆石 U-Pb 年龄、 地球化学及构造意义

韩建军¹⁾, 李运冬²⁾, 宋传中³⁾, 何俊⁴⁾, 韩旭³⁾, 祁昌炜¹⁾, 赵明福¹⁾, 何孝良²⁾

1) 青海省地质调查局, 西宁, 810001; 2) 河南省地质矿产勘查开发局第三地质矿产调查院, 郑州, 450008;
3) 合肥工业大学资源与环境工程学院, 合肥, 230009; 4) 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 合肥, 230026

内容提要:都兰热水地区位于东昆仑造山带东段, 发育着大量花岗岩岩石组合, 主要岩石类型为二长花岗岩和花岗闪长岩, 本文报道了对都兰热水地区二长花岗岩和花岗闪长岩的地球化学、LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年的研究结果, 为建立完善的年代学格架和构造演化提供了新资料。锆石 U-Pb 同位素定年研究表明东昆仑东段都兰热水地区的二长花岗岩和花岗闪长岩的结晶侵位时代分别是 232.4 ± 1.3 Ma、 230.8 ± 1.1 Ma, 属中三叠世花岗岩浆作用的产物。岩矿特征和岩石地球化学特征显示二长花岗岩和花岗闪长岩属高钾钙碱性 I 型花岗岩, 具较高的 K_2O 含量(2.2%~4.74%); 铝饱和指数 A/CNK 值都小于 1.1, 显示准铝质特征; P_2O_5 与 SiO_2 之间存在明显的负相关性, 还表现出富集轻稀土元素、大离子亲石元素(如 K、Rb、La), 亏损重稀土元素和高场强元素(如 Nb、Ta、Ti、P) 及 Eu 负异常特征。结合前人区域地质研究, 我们认为东昆仑东段都兰热水地区花岗岩岩石组合是受幔源岩浆的底侵作用导致下地壳部分熔融而形成, 幔源岩浆与壳源岩浆发生不同比例混合, 并在岩浆演化过程中发生了一定的分离结晶作用。晚二叠世阿尼玛卿洋向东昆仑板块俯冲, 直至中三叠世都兰热水地区仍处于洋壳俯冲而产生的火山弧环境, 二长花岗岩和花岗闪长岩就是这一阶段的典型产物。

关键词:二长花岗岩; 花岗闪长岩; 地球化学; 锆石 U-Pb 年龄; 构造环境; 都兰热水

都兰地区是超高压变质作用和碰撞造山作用研究较为成熟的地区之一, 是两大造山带的结合部位。北部处于柴北缘构造带构造中, 众多学者于本世纪在柴北缘构造带就报道了柯石英这一超高压指示矿物的存在(Yang Jingsui et al., 2001; Yang J S et al., 2002; Song S G et al., 2003), 后续几年中也在榴辉岩中发现了典型的柯石英(Zhang G B et al., 2009; Zhang Jianxin et al. 2009, Zhang J X et al., 2010), 近十年的研究厘定了柴北缘超高压变质带; 南部位于东昆仑造山带东段, 东昆仑构造带是中央造山系的西段部分, 广泛发育各时代不同成因、不同构造环境下的岩浆岩石组合, 但造山带的主要组成还是晚古生代-早中生代碰撞拼合形成的弧岩浆岩(姜春发等, 2000; Mo Xuanxue et al., 2007; Xu Zhiqin et al., 2013; Luo Mingfei et al., 2014)。都

兰地区的岩浆岩旋回主要与东昆仑构造带早古生代(加里东期)、晚古生代-早中生代(海西-印支期)两大造山旋回关系密切, 区域上花岗岩年代学研究可以看出古生代花岗岩年龄可分为三期(Yu Shengyao et al., 2011; Wu Cailai et al., 2014), 分别是 432~434Ma、407~397Ma 和 383~373Ma; 晚古生代-早中生代的岩浆岩形成年龄主要集中在晚二叠世-中三叠世(263~239Ma, Li Ruibao et al., 2018)。

都兰热水位于东昆仑造山带东段, 地质构造复杂, 岩浆活动频繁, 发育大量的花岗质岩体, 空间上也伴有大面积的火山岩出露。大面积出露的花岗质岩体必定伴随一期或多期次的构造运动, 其岩石成因与构造带的形成、演化关系密切, 对此类岩体的深入研究可以进一步了解汇聚板块边缘和大陆内部壳幔相互作用及地球动力学过程(Castro et al., 1991;

注: 本文为青海省地质勘查基金项目(编号青国土资矿[2009]239号)资助的成果。

收稿日期: 2019-06-19; 改回日期: 2019-08-23; 网络发表日期: 2019-12-16; 责任编委: 张招崇; 责任编辑: 黄敏。

作者简介: 韩建军, 男, 1991 年生。硕士, 工程师。主要从事构造地质学及矿产勘查工作。Email: wsxh91@foxmail.com。通讯作者: 李运冬, 男, 1984 年生。高级工程师。主要从事区域地质矿产调查工作。Email: 184264846lyd@163.com。

引用本文: 韩建军, 李运冬, 宋传中, 何俊, 韩旭, 祁昌炜, 赵明福, 何孝良. 2020. 东昆仑东段都兰热水花岗岩锆石 U-Pb 年龄、地球化学及构造意义. 地质学报, 94(3): 768~781, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2020031.

Han Jianjun, Li Yundong, Song Chuanzhong, He Jun, Han Xu, Qi Changwei, Zhao Mingfu, He Xiaoliang. 2020. Zircon U-Pb dating and geochemistry of granite in the Reshui area of Dulan County, eastern section of east Kunlun orogen and its tectonic implications. Acta Geologica Sinica, 94(3): 768~781.

Xiao Qinghui et al., 2007; Jia X L et al., 2016),花岗岩成因研究也成为了近年来地球科学研究领域的热点之一(Xiao Qinghui et al., 2003, 2009; Liu Bin et al., 2012; Luo Mingfei et al., 2014; Chen Guochao et al., 2013, 2018)。在都兰热水一带分布的花岗质岩体与上三叠统鄂拉山组火山岩,两者的年龄几乎一致(Pan Guitang et al., 1997; Li Yundong et al., 2014),为进一步明确该套花岗质岩体的准确结晶年龄,全面了解这一期岩浆岩石成因、岩浆源区及构造意义,笔者以都兰热水一带出露的花岗岩类岩石为研究对象,提供了LA-ICP-MS锆石U-Pb年代学和岩石地球化学资料,探讨了这一套侵入岩的成因及花岗质岩浆的形成过程,对岩浆作用的构造环境进行分析讨论。

1 地质背景及样品特征

都兰热水地区构造位置处于东昆北岩浆弧构造

单元中,大地构造位置在秦祁昆三大构造结合部位(图1a),位于祁漫塔格-都兰铁、铜、铅、锌、钨、锡、铋、金、钼成矿亚带中,经历了早古生代和晚古生代-早中生代的多期强烈的造山运动,伴有多期构造-岩浆活动和成矿作用,区域上的大多矿床也以铁、铜、铅、锌为主(Xu Changkun et al., 2012; Pan Tong et al., 2004; Zhang Zhanyu et al., 2011),其中铁矿与中酸性岩浆活动关系密切,在碳酸盐岩发育的地段形成矽卡岩型铁矿床(Feng Chengyou et al., 2011);另外,斑岩-矽卡岩型铜多金属矿也大多与花岗质岩浆作用后的热液有关(Wu Jianhui et al., 2010),可以看出,都兰地区出露的中酸性岩浆活动对区域成矿影响较为重要。

区域地层主要为石炭系、晚三叠世鄂拉山组,分布较零散。构造线方向以NW、NNW向为主,NE向次之。研究区出露的地层为三叠世鄂拉山组(T_3e ,图1b),主要是一套陆相中酸性火山碎屑岩为

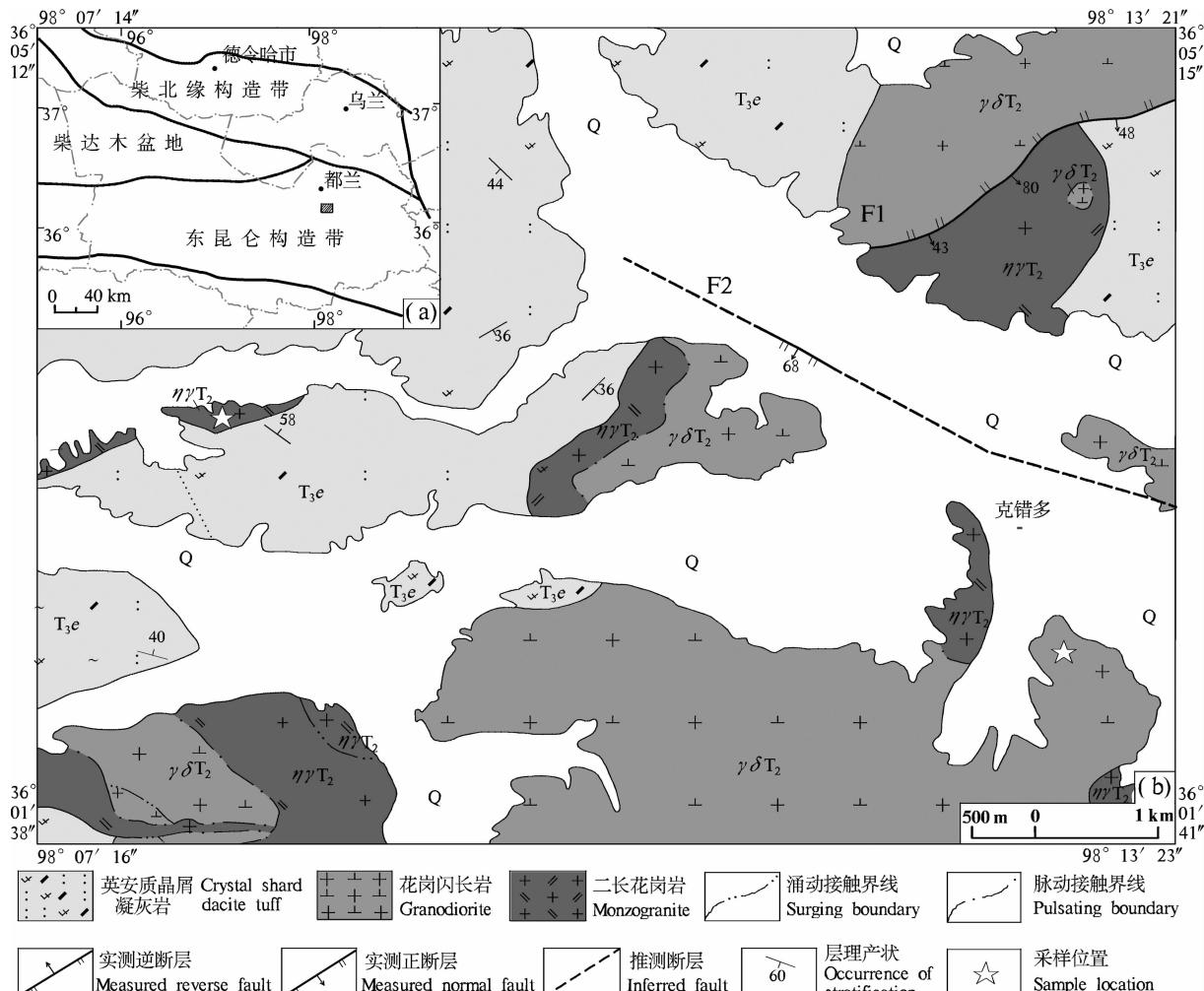


图1 东昆仑东段都兰热水地区大地构造位置(a)及地质简图(b)

主的夹火山熔岩及不稳定沉积碎屑岩的地层(青海省岩石地层,1997),喷发不整合于侵入岩之上(图2a,b)。区内有一条倾向SE的逆断层(F1)和一条倾向SW的隐伏正断层(F2),地形上对应沟谷,F1逆断层切割了花岗闪长岩体、二长花岗岩体(图2d)和晚三叠世鄂拉山组地层,F2切割了花岗闪长岩体,断层形成时间晚于花岗闪长岩体侵位时代。

研究区出露的侵入岩主要是花岗闪长岩体、二长花岗岩体,是本次研究的主要对象,测试样品位置在七道班南部出露的二长花岗岩体和克错多南部的花岗闪长岩体(图1),两者呈脉动接触,局部地区呈断层接触(F1)。花岗闪长岩主要分布在克错多周边,大小岩体约5处,侵入体产状有岩基和小岩株,岩体中多见闪长岩包体(图2c),在较大的侵入岩体内部岩石结构变化较大,外围花岗闪长岩多呈中细粒结构,内部结晶较好,呈中粗粒似斑状结构,二者

之间呈涌动接触。二长花岗岩体大小约7处,研究区外的西北部侵入体以岩基形式大量出露,岩体从外围到内部,岩体中暗示矿物减少,矿物粒度逐渐变粗,另外,在岩体外围也可见闪长岩暗色包体。

花岗闪长岩呈灰白色,中细粒花岗结构,块状构造。主要矿物组合为斜长石、钾长石、石英及暗色矿物。斜长石(35%~40%):呈自形-半自形,主要为更长石和中长石,发育环带结构及细密的聚片双晶。钾长石(10%~25%):多为半形粒状,主要是正长石和条纹长石,见卡式双晶、条纹结构,少见具格子双晶的微斜长石。石英约25%,多呈它形填充在其他矿物之间。暗色矿物主要是角闪石和黑云母,含量10%左右,多色性明显,角闪石具斜消光,中高突起,黑云母发育平行解理,具平行消光。

二长花岗岩呈肉红色,风化面淡肉红色,中粗粒花岗结构,块状构造。主要矿物组合为斜长石、钾长



图 2 东昆仑东段都兰热水地区岩体野外照片

Fig. 2 Field photos of intrusive rock from Reshui area in Dulan county, eastern section of east Kunlun orogen

(a)—花岗闪长岩与鄂拉山组不整合接触;(b)—二长花岗岩与鄂拉山组不整合接触;

(c)—花岗闪长岩中闪长岩包体;(d)—二长花岗岩与花岗闪长岩断层接触

(a)—Invasive boundary between granodiorite and Elashan formation;(b)—Invasive boundary between monzogranite and Elashan formation;

(c)—Dioritic xenoliths in granodiorite;(d)—Fault contact between granodiorite and monzogranite

石、石英、黑云母。斜长石(30%~40%):呈自形-半自形,主要为更长石和中长石,发育细密的聚片双晶纹和环带结构,具黏土化、绢云母化。钾长石(30%~35%):主要是正长石和条纹长石,正长石呈半自形粒状,具卡式双晶,条纹长石有明显的条纹结构,其中有石英的包体;见少量微斜长石,具黏土化。石英约25%,它形粒状充填在其他矿物间。暗色矿物1%~2%,主要是黑云母,具平行解理,呈褐-浅黄多色性,具绿泥石化。

2 分析方法

锆石分选、U-Pb测年工作均在中国地质调查局天津地质矿产研究所同位素实验室完成,使用的测试仪器是一套激光烧蚀多接收器电感耦合等离子体质谱仪(LA-MC-ICPMS)系统,该系统的多接收器电感耦合等离子体质谱仪为Thermo Fisher公司制造的Neptune,其离子光学通路采用能量聚焦和质量聚焦的双聚焦设计,并采用动态变焦(ZOOM)使质量色散达到17%,仪器配有9个法拉第杯接收器和4个离子计数器接收器。激光器为美国ESI公司生产的UP193-FX ArF准分子激光器,激光波长193nm,脉冲宽度5ns,束斑直径为1、2、10、20、25、35、50、75、76、100和150 μm 可调,脉冲频率1~200Hz连续可调。

锆石测年方法:先将挑选出的粘到载玻片上,套上PVC环,将环氧树脂和固化剂混合注入环内,待充分固化后从玻片上剥离,进行打磨、剖光,制靶完成。对靶上锆石样进行显微镜下的反射光和透射光拍照以及阴极发光(cathode luminescence)拍照,根据锆石阴极发光照片、反射光和透射光照片在锆石表面选择合适的测年点域(Song Biao et al., 2002),用无水乙醇清理锆石表面,用激光器进行剥蚀测试,激光剥蚀的斑束直径为35 μm 或50 μm ,利用动态变焦扩大色散可以同时接收质量数相差很大的U-Pb同位素从而进行锆石U-Pb同位素原位测定。测试过程中利用SRM610、GJ-1两个外部标样,对仪器的工作状态进行校准,先对SRM610、GJ-1分别测试两个点,然后每8个样品点测试两个GJ-1,每32个点加测两个SRM610。数据处理软件使用ICPMsDataCal程序(Liu Y S et al., 2010)和Isoplot程序(Ludwig, 2001)进行数据处理,采用 ^{208}Pb 校正法对普通铅进行校正。利用SRM610玻璃标样作为外标计算锆石样品的Pb、U、Th含量。

硅酸盐、微量、稀土元素测试在澳实分析检测

(广州)有限公司分析。硅酸盐岩主量分析用X荧光光谱仪检测,仪器型号 PANalytical PW2424,试样加入含硝酸锂的硼酸锂-硝酸锂熔融助熔剂,充分混合后,高温熔融,熔融物倒入铂金模子形成扁平玻璃片后,再用X荧光光谱仪分析;另外,用氢氟酸和硫酸分解试样,以二苯胺磺酸钠为指示剂,用基准重铬酸钾溶液滴定,计算氧化亚铁含量。微量、稀土元素测试分别用电感耦合等离子体发射光谱(ICP-AES)和电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)检测,称取两份试样,一份试样用高氯酸、硝酸、氢氟酸消解。蒸至近干后的样品用稀盐酸溶解定容,再用等离子体发射光谱与等离子体质谱进行分析。另一份试样加入到偏硼酸锂/四硼酸锂熔剂中,混合均匀,在1025°C以上的熔炉中熔化。熔液冷却后,用硝酸、盐酸和氢氟酸定容,再用等离子体质谱仪分析。

3 分析结果

3.1 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年

测试的二长花岗岩和花岗闪长岩中锆石晶形相似,大多呈自形-半自形短柱状,锆石颗粒长多数在110~150 μm 之间,长宽比大部分为2:1,锆石阴极发光图像(CL)显示锆石晶形较完好,岩浆振荡环带发育完整(图3a、b),表现出岩浆锆石的特征。锆石中Th/U比值均大于0.4,因此,从锆石的内部结构特征和成分综合判断其为岩浆结晶成因锆石(Rubatto et al., 2000; Wu Yuanbao et al., 2004),获得的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄(图3b、d)即代表岩体的结晶年龄。

LA-ICP-MS锆石U-Pb测年分析结果(表1)表明,二长花岗岩样品(YP5)测得32个有效测试点,锆石中Th含量为 $103 \times 10^{-6} \sim 857 \times 10^{-6}$,U含量为 $200 \times 10^{-6} \sim 979 \times 10^{-6}$,Th/U比值介于0.4601~0.8757之间,得到 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄集中于223~240Ma,对应的加权平均年龄为 232.4 ± 1.3 Ma(MSWD=1.2,N=32),其代表了二长花岗岩的结晶年龄。

花岗闪长岩样品(YP8)测得35个有效测试点,锆石中Th含量为 $140 \times 10^{-6} \sim 793 \times 10^{-6}$,U含量为 $222 \times 10^{-6} \sim 713 \times 10^{-6}$,Th/U比值介于0.5354~1.2962之间,得到 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄集中于225~234Ma,对应的加权平均年龄为 230.8 ± 1.1 Ma(MSWD=0.68,N=35),其代表了花岗闪长岩的结晶年龄。

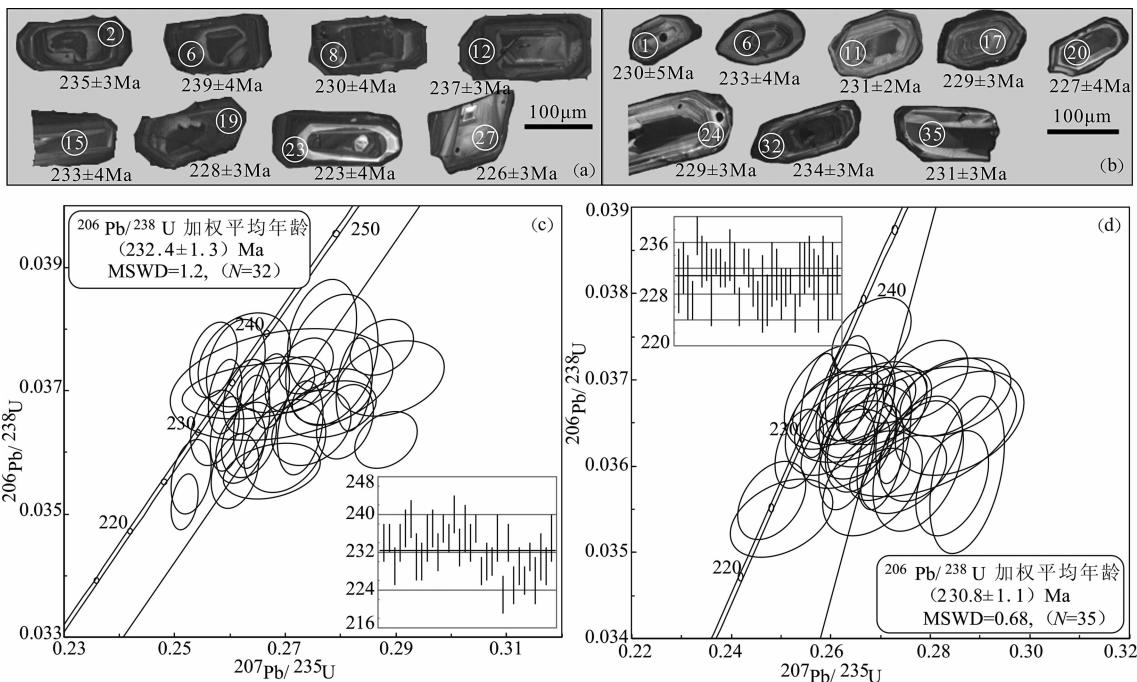


图 3 二长花岗岩(a、c)、花岗闪长岩(b、d)的锆石阴极发光图像(CL)和谐和图

Fig. 3 CL images and U-Pb concordia diagrams of zircons from monzogranite(a, c) and granodiorite(b, d)

3.2 岩石地球化学

都兰县热水地区二长花岗岩和花岗闪长岩的主要元素分析见表 2。二长花岗岩样品中 SiO_2 含量 $70.28\% \sim 75.94\%$, Al_2O_3 含量介于 $11.83\% \sim 14.24\%$ 之间, 含量变化不大, 岩石中 MgO 含量 $0.4\% \sim 1.21\%$ 左右, 全碱含量 ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) 介于 $6.89\% \sim 8.13\%$ 之间, TAS 图解中样品全部落入花岗闪长岩(图 4a), 里特曼(系列)指数(σ)为 $1.58 \sim 2.28$, 表现为钙碱性; 主量元素地球化学特征可以确定二长花岗岩样品的铝饱和指数 A/CNK 几乎都小于 1 ($0.84 \sim 1.01$), A/NK 全部大于 1 ($1.16 \sim 1.31$), 样品均显示出具准铝质岩石的特征(图 4b)。二长花岗岩样品的稀土总量变化较大, $\sum \text{REE}$ 值介于 $143.3 \times 10^{-6} \sim 234.5 \times 10^{-6}$ 间, 轻稀土含量明显高, 介于 $112.29 \times 10^{-6} \sim 209.1 \times 10^{-6}$ 之间, 重稀土含量偏低, LREE/HREE 比值为 $8.23 \sim 19.77$, 稀土元素球粒陨石标准化图(图 4c)一致表现为右倾型曲线, 具较明显的 Eu 异常。轻稀土富集, 岩石属轻稀土富集型; 而重稀土元素 Ho 到 Lu 的曲线分布平坦, 说明重稀土亏损。在微量元素原始地幔标准化微量元素蛛网图(图 4d)中, 各样品具相似的分配型式, 显示富集 K、Rb、La 等大离子亲石元素, 亏损 Nb、Ta、Ti、P 等高场强元素。

花岗闪长岩样品的 SiO_2 含量 $61.26\% \sim 72.74\%$, Al_2O_3 含量介于 $13.72\% \sim 17.2\%$ 之间, 含

量变化不大, MgO 含量 $0.77\% \sim 2.73\%$, 全碱含量 ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) 介于 $6.26\% \sim 7.4\%$ 之间, TAS 图解中大多数样品落入花岗闪长岩中(图 4a), 里特曼(系列)指数(σ)为 $1.47 \sim 2.32$, 表现为钙碱性; 主量元素地球化学特征可以确定花岗闪长岩样品 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值几乎都小于 1 ($0.55 \sim 1.1$), 岩石相对表现为富钠; 铝饱和指数 A/CNK 几乎都小于 1 ($0.90 \sim 1.03$), A/NK 均大于 1 ($1.34 \sim 1.86$), 样品显示出具准铝质岩石的特征(图 4b)。

岩石样品稀土总量 ($\sum \text{REE}$) 变化范围大, 介于 $83.76 \times 10^{-6} \sim 210.06 \times 10^{-6}$ 间, 轻稀土为 $77.14 \times 10^{-6} \sim 195.74 \times 10^{-6}$, LREE/HREE 比值为 $6.73 \sim 27.24$, 稀土元素球粒陨石标准化图(图 4c)十分一致地表现为右倾型曲线, 具有弱的负 Eu 异常。轻稀土富集, 岩石属轻稀土富集型; 而重稀土元素 Ho 到 Lu 的曲线分布平坦, 说明重稀土略微亏损。在微量元素原始地幔标准化微量元素蛛网图(图 4d)中, 显示明显富集 K、Rb、La 等大离子亲石元素, 亏损 Nb、Ta、Ti、P 等高场强元素。

4 讨论

4.1 形成时代

都兰县地区处于东昆仑东段, 发育大量的古生代-中生代花岗质岩体, 具有明显的多期次的特征。针对都兰县地区的古生代花岗岩序列, Wu Cailai et

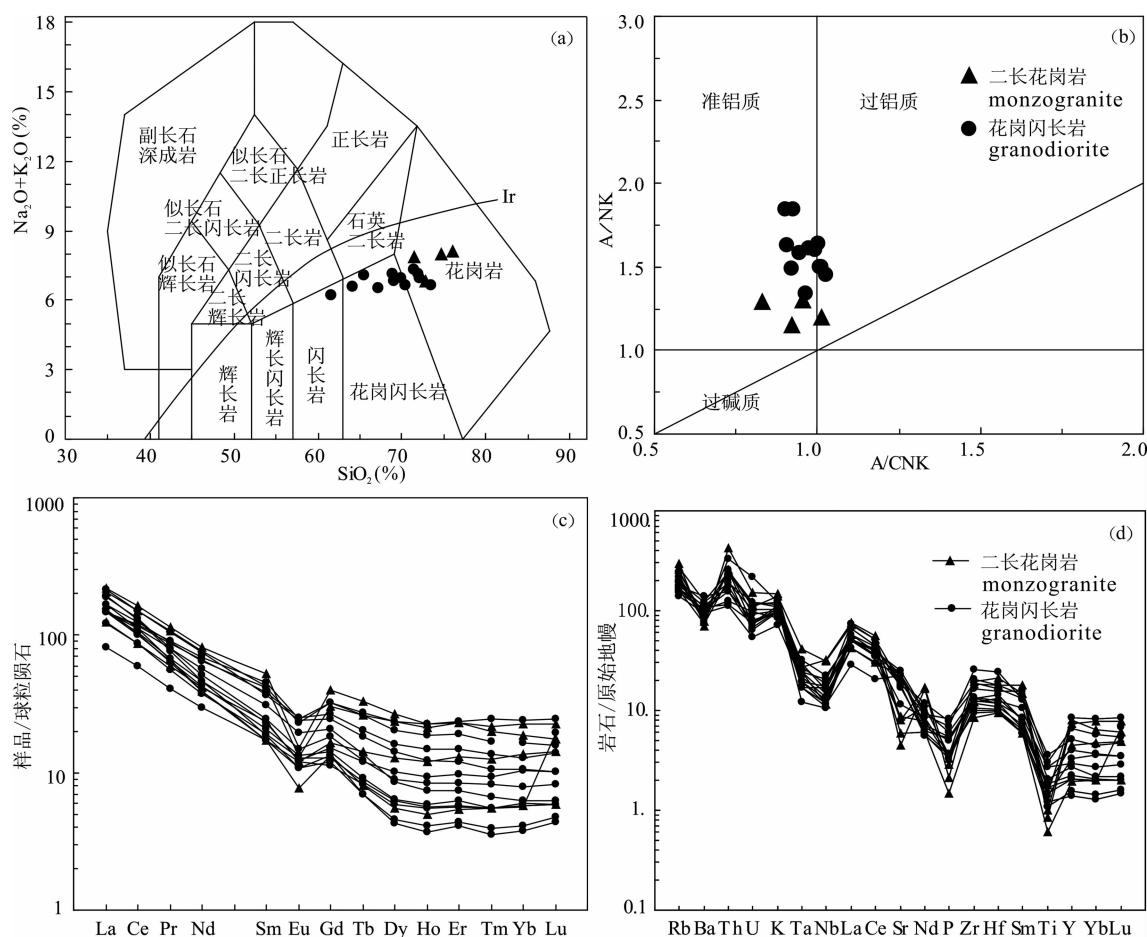


图4 二长花岗岩、花岗闪长岩的TAS图解(a, Middlemost, 1994); A/CNK-A/NK图解(b, Shand, 1927);球粒陨石标准化稀土元素配分图(c, 标准化值据 Boynton, 1984)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(d, 标准化值据 Sun S Set al., 1989)

Fig. 4 TAS diagram(a, Middlemost, 1994); A/CNK vs. A/NK diagram(b, Shand, 1927); Chondrite-normalized rare earth element distribution patterns(c, normalization values after Boynton, 1984) and primitive mantle-normalized trace element spidergrams(d, normalization values after Sun S S et al., 1989) for monzogranite and granodiorite

al. (2014) 和 Yu Shengyao et al. (2011) 对都兰地区花岗岩进行了 SHRIMP 和锆石 U-Pb 定年研究, 该区花岗岩岩石组合明显分为三期, 早期为 432~434 Ma, 与深俯冲/碰撞有关的高压-超高压变质事件的时代基本一致; 中期是 407~397 Ma, 与俯冲板片断离折返有关; 晚期是 383~373 Ma, 与造山带岩石圈地幔拆沉作用有关。东昆仑东段地区广泛发育的晚古生代-早中生代花岗质侵入岩是布青山-阿尼玛卿古特提斯洋向北俯冲于东昆仑地块之下而形成的 (Li Ruobao, 2012; Li Bile et al., 2012; Ma Changqian et al., 2015), 形成时间集中于晚二叠世-中三叠世, 代表了东昆仑南缘古特提斯洋的闭合阶段, 构成了东昆仑造山带弧岩浆岩的主要组成。

本文对都兰热水地区二长花岗岩和花岗闪长岩进行了锆石 U-Pb 年龄测试, 结果表明二长花岗岩样品 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 232.4 ± 1.3 Ma, 花

岗闪长岩样品年龄为 230.8 ± 1.1 Ma, 两者的结晶侵位年龄非常相近, 应属于同一岩浆-构造活动期的产物, 均形成于中三叠世, 单从岩体的侵位时间来看, 可初步推断该期岩浆活动与古特提斯洋闭合阶段有关。

4.2 岩石成因及源区

二长花岗岩和花岗闪长岩的形成年龄非常相近, 它们很可能是同源岩浆演化的产物, 但也可以是由不同源岩浆差异性的部分熔融导致的。本文研究可以看出, 二长花岗岩和花岗闪长岩中含有少量黑云母、角闪石, 未见白云母等过铝质矿物, 具有较高的 K₂O 和 SiO₂ 含量, 表现为高钾钙碱性系列岩石特征(图 5a), 铝饱和指数 A/CNK 值都小于 1.1(图 4b), 与 I 型花岗岩的典型特征极为接近, 且明显区别于 S 型花岗岩特征(Sylvester, 1998): 含有白云母、堇青石、石榴子石等过铝质矿物, A/CNK > 1.1, 且 K₂O > Na₂O。另外, 在 I 型花岗岩中 P₂O₅ 含量

表 1 二长花岗岩、花岗闪长岩的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测年分析结果

Table 1 LA-ICP-MS U-Pb zircon analysis results for monzogranite and granodiorite

样品 编号	元素含量($\times 10^{-6}$)			Th/U	同位素比值					同位素年龄(Ma)				
	Pb	Th	U	Ratio	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
YP5(二长花岗岩)														
1	8	103	200	0.5166	0.0520	0.0018	0.2651	0.0091	0.0370	0.0003	239	283	234	4
2	23	336	576	0.5827	0.0532	0.0007	0.2718	0.0036	0.0371	0.0003	244	336	235	3
3	17	336	417	0.8063	0.0578	0.0007	0.2882	0.0037	0.0362	0.0003	257	523	229	4
4	27	425	688	0.6172	0.0524	0.0004	0.2675	0.0022	0.0370	0.0004	241	302	234	4
5	24	332	613	0.5418	0.0497	0.0005	0.2570	0.0028	0.0375	0.0004	232	182	237	4
6	20	343	493	0.6963	0.0553	0.0007	0.2875	0.0038	0.0377	0.0003	257	425	239	4
7	24	374	634	0.5902	0.0558	0.0006	0.2808	0.0034	0.0365	0.0004	251	443	231	5
8	29	449	746	0.6015	0.0544	0.0005	0.2727	0.0027	0.0364	0.0005	245	386	230	4
9	20	314	491	0.6389	0.0524	0.0009	0.2683	0.0046	0.0371	0.0003	241	304	235	5
10	18	347	431	0.8047	0.0506	0.0007	0.2611	0.0035	0.0374	0.0005	236	224	237	4
11	17	284	412	0.6893	0.0550	0.0011	0.2783	0.0054	0.0367	0.0003	249	414	232	4
12	16	311	375	0.8285	0.0539	0.0009	0.2784	0.0055	0.0375	0.0007	249	365	237	3
13	32	530	716	0.7408	0.0564	0.0012	0.2891	0.0064	0.0372	0.0004	258	469	235	3
14	15	228	372	0.6131	0.0529	0.0008	0.2767	0.0041	0.0379	0.0006	248	324	240	4
15	31	457	817	0.5595	0.0510	0.0004	0.2592	0.0020	0.0369	0.0004	234	240	233	4
16	27	446	659	0.6770	0.0530	0.0007	0.2738	0.0032	0.0374	0.0003	246	330	237	5
17	19	234	508	0.4601	0.0517	0.0005	0.2630	0.0028	0.0369	0.0004	237	271	234	4
18	10	148	256	0.5800	0.0509	0.0010	0.2626	0.0055	0.0375	0.0005	237	234	237	3
19	19	354	484	0.7316	0.0527	0.0006	0.2619	0.0029	0.0361	0.0004	236	314	228	3
20	18	267	485	0.5509	0.0513	0.0006	0.2572	0.0029	0.0364	0.0004	232	253	230	4
21	26	425	685	0.6209	0.0519	0.0004	0.2594	0.0020	0.0363	0.0004	234	281	230	3
22	36	527	756	0.6966	0.0526	0.0021	0.2694	0.0133	0.0371	0.0006	242	312	235	5
23	38	857	979	0.8757	0.0519	0.0003	0.2518	0.0016	0.0352	0.0003	228	281	223	4
24	13	160	343	0.4666	0.0547	0.0009	0.2784	0.0047	0.0369	0.0003	249	401	234	4
25	23	409	615	0.6646	0.0515	0.0005	0.2530	0.0024	0.0356	0.0004	229	265	225	4
26	21	400	523	0.7657	0.0528	0.0007	0.2634	0.0033	0.0362	0.0004	237	319	229	4
27	9	130	230	0.5665	0.0543	0.0011	0.2675	0.0058	0.0357	0.0003	241	385	226	3
28	12	182	312	0.5834	0.0547	0.0010	0.2747	0.0047	0.0364	0.0004	246	398	231	3
29	22	306	606	0.5042	0.0529	0.0006	0.2609	0.0028	0.0357	0.0004	235	327	226	5
30	23	312	617	0.5058	0.0524	0.0004	0.2639	0.0022	0.0365	0.0005	238	301	231	5
31	10	137	278	0.4945	0.0542	0.0009	0.2699	0.0049	0.0361	0.0005	243	379	229	4
32	39	662	958	0.6910	0.0552	0.0006	0.2825	0.0022	0.0371	0.0005	253	422	235	5
YP8(花岗闪长岩)														
1	14	243	345	0.7029	0.0531	0.0009	0.2661	0.0047	0.0363	0.0004	240	334	230	5
2	16	254	392	0.6483	0.0528	0.0007	0.2672	0.0037	0.0367	0.0003	240	321	232	4
3	17	294	387	0.7598	0.0558	0.0010	0.2781	0.0055	0.0362	0.0004	249	443	229	5
4	29	793	612	1.2962	0.0545	0.0008	0.2699	0.0040	0.0359	0.0002	243	393	227	3
5	16	272	374	0.7271	0.0519	0.0010	0.2682	0.0053	0.0375	0.0003	241	282	237	3
6	9	170	228	0.7456	0.0562	0.0015	0.2847	0.0076	0.0368	0.0003	254	459	233	4
7	19	410	459	0.8928	0.0538	0.0008	0.2729	0.0042	0.0368	0.0002	245	364	233	3
8	19	333	483	0.6903	0.0542	0.0007	0.2699	0.0031	0.0361	0.0004	243	381	229	6
9	16	257	387	0.6634	0.0520	0.0008	0.2642	0.0042	0.0368	0.0002	238	287	233	2
10	9	164	233	0.7020	0.0536	0.0012	0.2708	0.0063	0.0367	0.0003	243	353	232	3
11	26	443	638	0.6941	0.0526	0.0010	0.2651	0.0048	0.0366	0.0002	239	311	231	2
12	18	320	456	0.7025	0.0518	0.0006	0.2636	0.0031	0.0369	0.0004	238	277	234	4
13	19	330	487	0.6782	0.0510	0.0005	0.2577	0.0025	0.0367	0.0004	233	240	232	4
14	12	226	320	0.7059	0.0505	0.0009	0.2482	0.0045	0.0356	0.0003	225	219	226	3
15	15	237	365	0.6506	0.0559	0.0012	0.2834	0.0063	0.0368	0.0003	253	448	233	2
16	9	151	240	0.6307	0.0523	0.0016	0.2647	0.0082	0.0367	0.0003	238	299	232	3
17	21	388	524	0.7396	0.0526	0.0010	0.2629	0.0059	0.0362	0.0003	237	313	229	3
18	11	168	281	0.5966	0.0544	0.0013	0.2684	0.0066	0.0358	0.0004	241	389	227	3

续表1

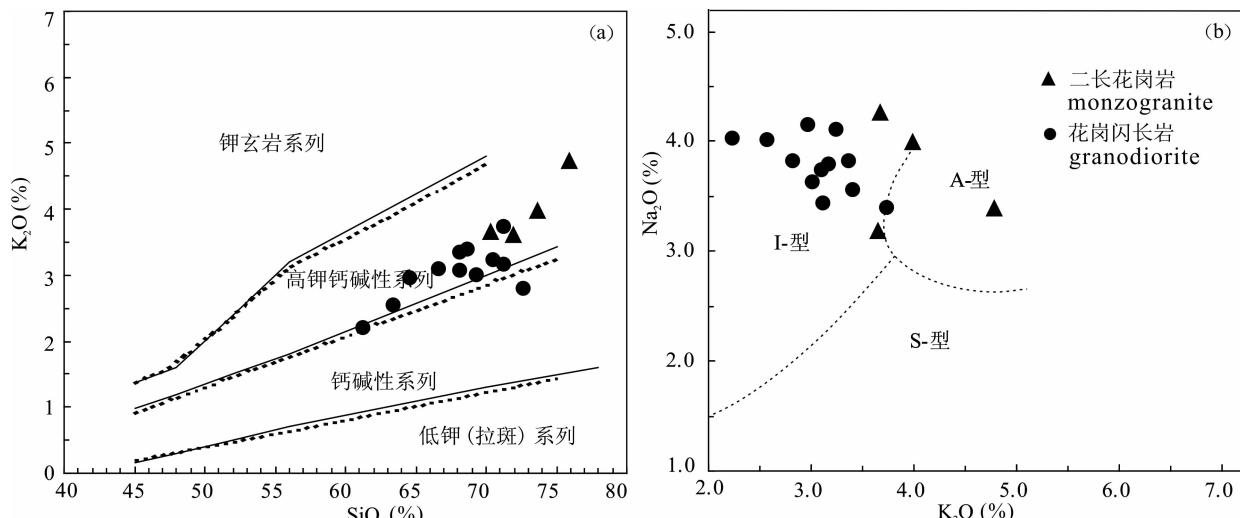
样品 编号	元素含量($\times 10^{-6}$)			Th/U		同位素比值				同位素年龄(Ma)				
	Pb	Th	U	Ratio	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
19	14	201	376	0.5354	0.0580	0.0010	0.2874	0.0050	0.0359	0.0006	257	530	228	6
20	14	237	357	0.6645	0.0576	0.0010	0.2844	0.0048	0.0358	0.0004	254	515	227	4
21	28	500	713	0.7010	0.0543	0.0005	0.2726	0.0024	0.0364	0.0004	245	383	231	5
22	10	177	242	0.7328	0.0533	0.0014	0.2685	0.0072	0.0366	0.0004	241	340	231	4
23	16	330	397	0.8303	0.0530	0.0008	0.2633	0.0037	0.0361	0.0004	237	327	228	4
24	17	347	431	0.8060	0.0508	0.0006	0.2537	0.0032	0.0362	0.0003	230	233	229	3
25	16	365	395	0.9247	0.0531	0.0009	0.2656	0.0051	0.0363	0.0003	239	333	230	2
26	9	171	226	0.7583	0.0512	0.0014	0.2501	0.0068	0.0354	0.0003	227	249	225	3
27	10	170	267	0.6365	0.0568	0.0014	0.2859	0.0085	0.0365	0.0004	255	486	231	5
28	12	212	310	0.6842	0.0524	0.0010	0.2650	0.0052	0.0367	0.0004	239	305	232	4
29	9	145	222	0.6545	0.0512	0.0012	0.2601	0.0062	0.0368	0.0004	235	252	233	4
30	9	140	249	0.5623	0.0517	0.0012	0.2601	0.0061	0.0365	0.0004	235	274	231	4
31	15	274	370	0.7400	0.0559	0.0010	0.2776	0.0060	0.0360	0.0005	249	449	228	6
32	11	179	284	0.6301	0.0547	0.0011	0.2791	0.0056	0.0370	0.0003	250	400	234	3
33	11	217	280	0.7737	0.0554	0.0011	0.2747	0.0057	0.0359	0.0003	246	430	228	4
34	13	268	316	0.8467	0.0555	0.0018	0.2783	0.0125	0.0364	0.0005	249	433	230	6
35	13	194	320	0.6054	0.0526	0.0014	0.2645	0.0078	0.0365	0.0003	238	311	231	3

表2 二长花岗岩和花岗闪长岩的常量元素(%)、稀土和微量元素数据($\times 10^{-6}$)Table 2 Major (%) and trace ($\times 10^{-6}$) element compositions of monzogranite and granodiorite

岩性	二长花岗岩				花岗闪长岩													
	样品号	YP5	YP10	YP28	YP37	YP6	YP8	YP15	YP16	YP19	YP21	YP22	YP23	YP24	YP25	YP32	YP34	
SiO ₂	70.28	75.94	73.70	71.94	70.52	66.64	68.14	61.26	63.40	68.74	69.40	68.22	71.26	72.74	64.66	71.28		
TiO ₂	0.22	0.15	0.20	0.30	0.30	0.40	0.45	0.75	0.62	0.30	0.35	0.35	0.28	0.25	0.55	0.35		
Al ₂ O ₃	14.24	12.36	13.00	11.83	13.72	14.66	14.77	16.55	17.20	15.00	14.70	15.20	14.40	13.90	16.45	13.98		
Fe ₂ O ₃	1.14	0.10	0.75	1.42	0.59	1.40	1.49	2.43	1.75	0.97	1.22	1.46	1.12	0.91	1.34	0.46		
FeO	1.68	1.35	1.40	2.32	2.98	3.42	2.35	4.03	2.75	1.65	1.78	1.93	1.33	1.25	3.52	2.68		
MnO	0.05	0.02	0.04	0.05	0.15	0.05	0.05	0.09	0.07	0.05	0.05	0.05	0.05	0.04	0.06	0.05		
MgO	0.61	0.40	0.44	1.21	0.91	2.02	1.11	2.73	1.23	1.10	1.21	1.31	0.88	0.77	1.41	0.81		
CaO	2.19	1.46	1.08	2.78	2.19	3.95	3.36	5.12	5.04	3.49	3.09	3.36	2.55	2.42	3.51	2.19		
Na ₂ O	4.22	3.39	3.99	3.18	4.09	3.43	3.82	4.02	4.00	3.54	3.62	3.73	3.77	3.81	4.15	3.38		
K ₂ O	3.66	4.74	3.97	3.62	3.22	3.08	3.33	2.20	2.55	3.38	2.99	3.07	3.15	2.80	2.94	3.73		
P ₂ O ₅	0.06	0.02	0.04	0.06	0.06	0.10	0.14	0.16	0.15	0.08	0.13	0.13	0.07	0.07	0.12	0.08		
LOI	1.47	0.73	0.96	1.31	1.08	0.82	1.07	1.06	1.10	1.28	1.09	1.01	0.79	0.59	1.28	1.03		
Total	99.82	100.66	99.57	99.98	99.81	99.97	100.08	100.40	99.71	99.58	99.63	99.82	99.65	99.55	99.99	99.99		
A/CNK	0.96	0.93	1.01	0.84	0.97	0.91	0.92	0.90	0.94	0.95	0.99	0.98	1.01	1.01	1.00	1.03		
A/NK	1.31	1.16	1.19	1.30	1.34	1.63	1.49	1.84	1.86	1.58	1.60	1.61	1.50	1.49	1.64	1.46		
Mg [#]	28.67	33.12	27.43	37.48	31.60	43.48	34.90	43.91	33.64	43.73	42.84	41.86	40.15	39.88	34.72	31.82		
K ₂ O/Na ₂ O	0.87	1.40	0.99	1.15	0.79	0.90	0.87	0.55	0.65	0.95	0.82	0.82	0.83	0.73	0.71	1.10		
σ	2.28	2.01	2.06	1.58	1.94	1.79	2.03	2.12	2.06	1.86	1.66	1.83	1.69	1.47	2.32	1.79		
La	52.10	39.90	48.70	29.30	39.70	45.30	35.00	34.90	35.00	19.50	29.00	34.70	45.50	36.40	51.20	35.00		
Ce	99.60	69.10	92.10	53.60	76.50	80.30	68.20	71.90	72.90	36.50	53.00	61.70	79.90	63.30	92.20	63.70		
Pr	10.75	6.22	10.15	5.61	8.39	7.54	7.54	8.24	8.64	3.90	5.36	6.21	7.32	6.07	10.00	6.46		
Nd	37.80	18.10	35.60	19.50	30.00	23.90	26.80	30.60	32.30	13.90	17.60	20.00	21.80	18.30	35.30	21.80		
Sm	7.97	2.63	6.51	3.58	6.34	3.75	4.69	5.89	6.85	2.64	2.89	3.16	2.84	2.64	5.64	3.52		
Eu	0.88	0.45	0.75	0.70	1.34	0.86	1.13	1.47	1.42	0.70	0.74	0.78	0.63	0.62	1.40	0.71		
Gd	8.15	2.76	6.18	3.36	6.64	3.73	4.24	5.52	6.59	2.30	2.64	2.89	2.72	2.45	5.02	3.12		
Tb	1.24	0.30	0.98	0.53	1.03	0.46	0.51	0.76	0.97	0.31	0.32	0.34	0.26	0.26	0.69	0.45		
Dy	6.78	1.39	5.93	3.26	5.93	2.26	2.17	4.06	5.16	1.50	1.58	1.61	1.09	1.15	3.60	2.59		
Ho	1.29	0.28	1.20	0.68	1.27	0.47	0.42	0.83	1.05	0.31	0.32	0.33	0.21	0.23	0.69	0.53		
Er	3.82	0.90	3.82	2.18	3.93	1.40	1.22	2.44	3.14	0.93	0.95	1.03	0.68	0.72	1.99	1.60		
Tm	0.51	0.14	0.55	0.32	0.63	0.21	0.17	0.35	0.43	0.14	0.14	0.09	0.10	0.27	0.24			
Yb	3.16	0.98	3.82	2.32	4.07	1.34	1.07	2.18	2.82	0.98	0.95	1.02	0.64	0.70	1.80	1.76		

续表 2

岩性	二长花岗岩				花岗闪长岩											
	YP5	YP10	YP28	YP37	YP6	YP8	YP15	YP16	YP19	YP21	YP22	YP23	YP24	YP25	YP32	YP34
Lu	0.45	0.15	0.57	0.36	0.63	0.21	0.16	0.35	0.40	0.15	0.50	0.15	0.11	0.12	0.26	0.26
Σ REE	234.50	143.30	216.86	125.30	186.49	171.43	153.32	169.49	177.67	83.76	115.64	134.06	163.79	133.06	210.06	141.74
LREE	209.10	136.40	193.81	112.29	162.27	161.65	143.36	153.00	157.11	77.14	108.59	126.55	157.99	127.33	195.74	131.19
HREE	25.40	6.90	23.05	13.01	24.12	10.08	9.96	16.49	20.56	6.62	7.05	7.51	5.80	5.73	14.32	10.55
LREE/HREE	8.23	19.77	8.41	8.63	6.73	16.04	14.39	9.28	7.64	11.65	15.40	16.85	27.24	22.22	13.67	12.44
δ Eu	0.33	0.51	0.36	0.61	0.63	0.70	0.76	0.78	0.64	0.85	0.80	0.77	0.68	0.73	0.79	0.64
Ba	880.00	488.00	549.00	545.00	860.00	549.00	629.00	658.00	714.00	759.00	728.00	782.00	681.00	519.00	971.00	613.00
Th	20.60	36.30	22.10	21.00	16.00	21.90	16.10	9.44	10.70	9.88	13.30	14.70	21.20	17.65	13.25	28.20
Nb	22.80	8.20	22.50	10.50	14.70	8.40	13.30	12.30	15.90	8.20	9.10	9.80	7.60	7.80	12.20	11.50
Sr	168.50	124.50	95.30	181.50	165.50	353.00	528.00	482.00	412.00	470.00	481.00	482.00	378.00	376.00	402.00	240.00
P	270.00	140.00	200.00	310.00	340.00	500.00	580.00	790.00	750.00	350.00	470.00	520.00	340.00	310.00	660.00	340.00
Zr	205.00	95.00	216.00	135.00	231.00	146.00	154.00	214.00	186.00	106.00	138.00	131.00	113.00	118.00	290.00	149.00
Ti	1300	800	1100	2300	1900	3500	2700	4600	3900	1900	2200	2400	1600	1400	3500	1800
Rb	174.50	185.00	162.50	136.00	124.00	127.50	138.00	89.40	100.50	113.50	96.20	103.50	108.50	103.00	112.00	154.00
K	30100	37200	34800	29100	26000	25000	27000	17800	21300	28100	25200	25100	26600	24200	24400	30200
Ta	1.10	0.80	1.70	1.00	1.00	0.70	1.10	0.80	1.30	1.00	0.80	0.90	0.50	0.70	0.70	1.20
Hf	5.60	2.90	6.50	4.10	5.60	3.70	3.90	5.10	4.80	3.00	3.60	3.40	3.10	3.20	7.50	4.40
U	2.43	3.14	2.30	2.53	2.18	1.92	2.58	1.15	2.03	1.60	1.41	1.56	1.55	1.35	1.70	4.63
Sc	7.00	2.00	6.00	7.00	11.00	10.00	4.00	15.00	10.00	5.00	5.00	6.00	4.00	3.00	10.00	5.00
Cs	6.97	5.01	3.33	4.37	5.96	0.04	2.88	3.87	2.44	3.89	2.71	2.91	2.13	2.02	8.34	6.38
V	12.00	10.00	10.00	35.00	14.00	76.00	45.00	113.00	56.00	32.00	36.00	39.00	21.00	19.00	35.00	27.00
Cr	<10.0	10.00	<10.0	10.00	<10.0	20.00	10.00	20.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	<10.0	
Co	2.50	1.70	1.50	4.30	3.00	10.30	6.50	16.40	7.40	5.00	8.40	6.60	3.80	3.50	6.30	4.50
Ni	<5.00	<5.00	<5.00	<5.00	5.00	10.00	<5.00	11.00	5.00	7.00	7.00	<5.00	<5.00	6.00	<5.00	
Y	36.90	8.80	33.70	20.20	38.00	13.30	12.50	23.70	30.20	9.30	9.40	10.10	6.40	7.00	18.30	15.20
Nb/Ta	20.73	10.25	13.24	10.50	14.70	12.00	12.09	15.38	12.23	8.20	11.38	10.89	15.20	11.14	17.43	9.58
Zr/Hf	36.61	32.76	33.23	32.93	41.25	39.46	39.49	41.96	38.75	35.33	38.33	38.53	36.45	36.88	38.67	33.86

注:Mg[#] = 100 * Mg/(Mg+Fe)图 5 二长花岗岩、花岗闪长岩的 K_2O - SiO_2 图解(a, 据 Rickwood, 1989) 和 Na_2O - K_2O 图解(b, 据 Collins et al., 1982)Fig. 5 K_2O - SiO_2 diagram (a, Rickwood, 1989) and Na_2O - K_2O diagram

(b, after Collins et al., 1982) of monzogranite and granodiorite

非常低,且随着 SiO_2 含量增加而减少,S型花岗岩与之相反(Chappell, 1999; Wu F Y et al., 2003a,b),本次研究的两种岩石样品中 P_2O_5 与 SiO_2 之间存在明显的负相关性(图略,见表 2)。在花岗岩成因系列 Na_2O - K_2O 图解(图 5b)中显示绝大多数落入 I

型花岗岩区,综上,岩矿特征和岩石地球化学特征共同指示了二长花岗岩和花岗闪长岩属于 I 型花岗岩。

花岗岩一般都是来自地壳的部分熔融,若壳源岩浆与幔源物质发生了混染,岩浆混合后的特征就会被保留,体现在侵位结晶的岩体中。二长花岗岩

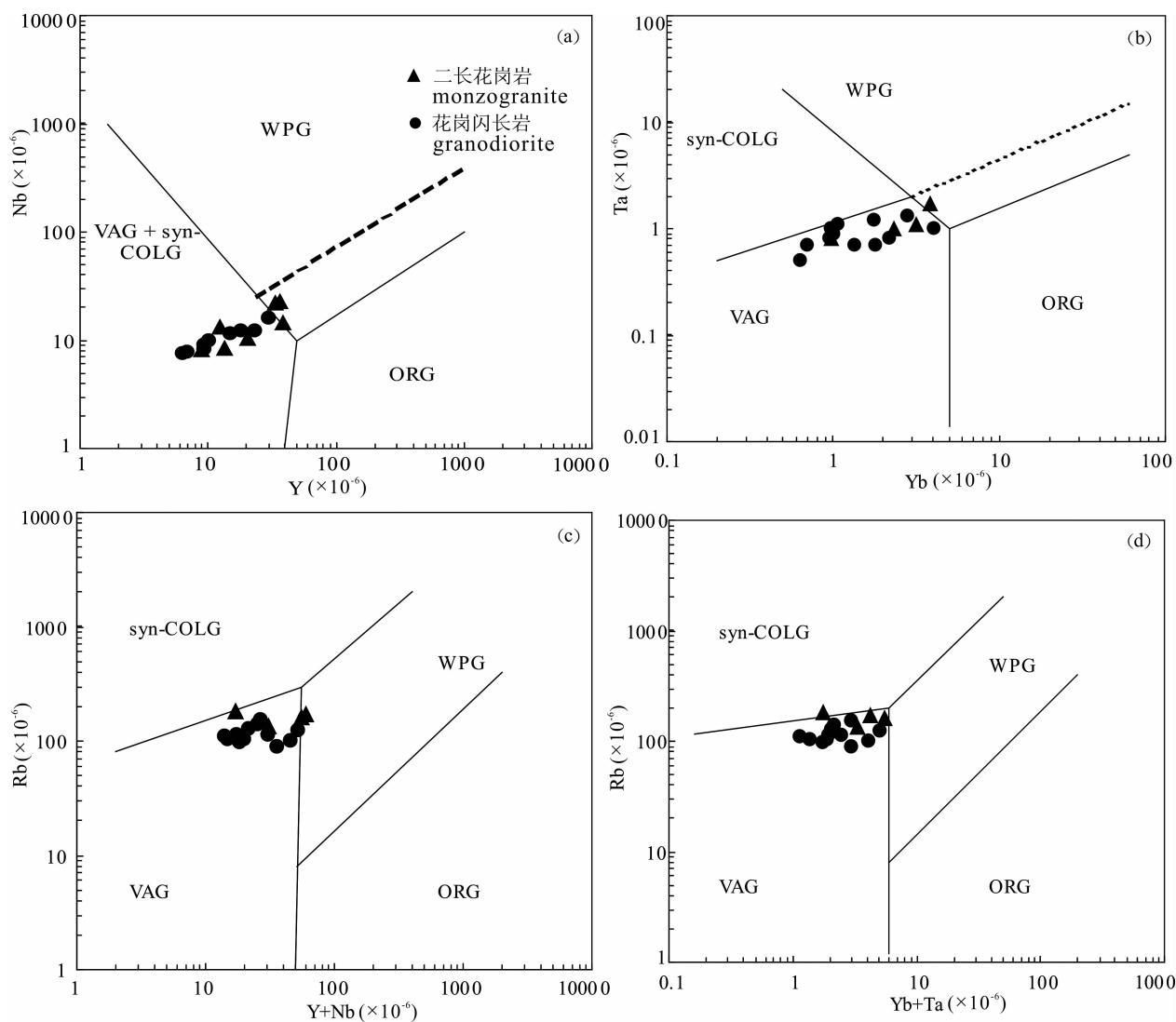


图6 二长花岗岩和花岗闪长岩构造环境判别图解(据 Pearce et al. , 1984)

Fig. 6 Diagrams of the tectonic setting for monzogranite and granodiorite(after Pearce et al. , 1984)

VAG—火山弧花岗岩;syn-COLG—同碰撞花岗岩;WPG—板内花岗岩;ORG—洋脊花岗岩

VAG—Volcanic arc granite;syn-COLG—syn-collisional granite;WPG—Within plate granite;ORG—Ocean ridge granite

和花岗闪长岩 $Mg^{\#}$ 值($17.43\sim43.91$)均小于45,富集K、Rb、La等大离子亲石元素(LILE),亏损Nb、Ta、Ti、P等高场强元素(HFSE),可以认为此类岩体很可能是下地壳岩石部分熔融形成的(Rapp et al. , 1995, 1999; Rudnick et al. , 2003)。但本次二长花岗岩和花岗闪长岩在野外多见椭圆状暗色闪长质包体,岩浆过程中很难分馏的Nb和Ta、Zr和Hf元素也有不同的源区指示,需进一步探讨。样品的Nb/Ta比值为 $8.2\sim20.73$ (表2),总体介于地壳平均值和原始地幔平均值之间,多数接近壳源岩石的Nb/Ta比值(比值为11,Green et al. , 1987; Green, 1995; Taylor et al. , 1985; Barbarin, 1999; Zhang Qi et al. , 2005);同时,Zr/Hf比值为 $32.76\sim41.96$,也

与地壳和幔源岩石之间 Zr/Hf 比值(比值为 $33\sim36.3$, Taylor et al. , 1985)接近,这些特征都不同程度的表明了幔源物质对花岗岩的起源与成因有所贡献,岩石起源并非全部来源于下地壳部分熔融,可能说明在熔浆运移过程中幔源物质一定程度上与地壳起源的岩浆发生岩浆混合作用(Liu Chengdong, 2008; Chen Guochao et al. , 2016)。另外,在东昆仑地区幔源玄武质岩浆底侵活动从251Ma开始持续到220Ma(Luo Zhaohua et al. , 2002; Xiong Fuhao et al. 2011),所以都兰热水地区的花岗岩也极有可能受到幔源岩浆的底侵影响。

原始地幔标准化微量元素蛛网图中 Ti、P 元素明显负异常,可能是发生钛铁矿、磷灰石分离结晶;

球粒陨石标准化稀土元素配分图中 Eu 的负异常很可能表明的是源区残留了部分斜长石, 或是岩浆演化过程中发生了斜长石的分离结晶作用, 但是 Sr 和 Ba 元素显示出一定负异常即可表明发生过斜长石分离结晶, 所以可以确定在岩浆演化过程中发生过分离结晶作用。

综上, 我们认为二长花岗岩和花岗闪长岩有相同的物质来源, 是受幔源岩浆的底侵作用导致下地壳部分熔融而形成, 幔源岩浆与壳源岩浆发生不同程度混合的结果, 在岩浆演化过程中发生了一定的分离结晶作用。

4.3 构造环境及意义

都兰热水地区二长花岗岩和花岗闪长岩地球化学特征显示主量元素呈高钾钙碱性准铝质岩石的特征(图 4b, 5a), 微量元素蛛网图(图 4d)显示富集大离子亲石元素(Rb, K)而亏损高场强元素(Ta, Nb, Ti), 具有与俯冲带相关的弧岩浆岩特征(Rogers et al., 1990; Sajona et al., 1996)。Nb 和 Y、Ta 和 Yb 元素在花岗岩的大地构造环境判别中是最为有效的(Pearce et al., 1984), 在 Nb-Yb 图解(图 6a)中样品绝大多数均落入火山弧花岗岩(VAG) + 同碰撞花岗岩(syn-COLG)区域中, Ta-Yb 图解(图 6b)中几乎全部落入火山弧花岗岩中; 在 Rb-(Y+Nb) 和 Rb-(Yb+Ta) 双变量图解(图 6c, d)中可以明确的把火山弧花岗岩(VAG) 和同碰撞花岗岩(syn-COLG)区分开来, 投图显示样品也落入火山弧花岗岩区。因此, 可以认为都兰热水地区二长花岗岩和花岗闪长岩形成于活动大陆边缘的火山弧环境。

东昆仑造山带自早古生代昆中洋盆闭合以后, 从晚古生代-早中生代是一个连续的构造演化过程(Pan Guitang et al., 1997; 姜春发等, 2000; Mo Xuanxue et al., 2007), 晚二叠世开始, 阿尼玛卿洋向北俯冲至东昆仑板块下, 由于俯冲而引发中生代花岗质侵入岩大面积发育, 火山弧岩浆作用主要发生于晚二叠世-早三叠世, 但是近年来的研究(Ma Changqian et al., 2015; Li Ruibao et al., 2018)均一致表明洋壳俯冲作用可以延续到中三叠世。本文的都兰热水地区二长花岗岩和花岗闪长岩形成于中三叠世, 表现为火山弧花岗岩特征, 是洋壳不断俯冲、大洋逐渐闭合阶段的产物, 综上, 笔者认为该套花岗岩岩石组合同属东昆仑地区中三叠世洋壳俯冲消减过程中形成的弧花岗岩。

5 结论

(1) 都兰热水地区二长花岗岩和花岗闪长岩进

行了锆石 U-Pb 年龄测试, 结果表明二长花岗岩和花岗闪长岩样品的²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄分别为 232.4±1.3 Ma 和 230.8±1.1 Ma。

(2) 二长花岗岩和花岗闪长岩的岩矿特征和岩石地球化学特征共同指示了岩石成因属于 I 型花岗岩。

(3) 二长花岗岩和花岗闪长岩有相同的物质来源, 来源于受幔源岩浆的底侵作用导致下地壳部分熔融, 幔源岩浆与壳源岩浆发生了不同程度混合, 并且在岩浆演化过程中发生了一定程度的分离结晶作用。

(4) 东昆仑东段都兰地区在中三叠世仍处于洋壳俯冲阶段, 期间诱发了大面积火山弧花岗质侵入岩。

致谢: 本文撰写过程中得到了很多同仁的帮助, 文章修改和数据处理过程中得到了合肥工业大学资源与环境工程学院李秀财博士的热心帮助, 文章审稿及修改过程得到了编辑部老师及资深的审稿专家提出了宝贵的修改意见, 在此一并表示衷心的感谢。

References

- Barbarin B. 1999. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments. *Lithos*, 46(3): 605~626.
- Boynton W V. 1984. Geochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies. *Developments in Geochemistry*, 2: 63~114.
- Castro A, Moreno-Ventas I, De La Rosa J D. 1991. H-type (Hybrid) granitoids: a proposed revision of the granite-type classification and nomenclature. *Earth-Science Reviews*, 31(3~4): 237~253.
- Chappell B W. 1999. Aluminium saturation in I- and S-type granites and the characterization of fractionated haplogranites. *Lithos*, 46(3): 535~551.
- Chen Guochao, Pei Xianzhi, Li Ruibao, Li Zuochen, Pei Lei, Liu Zhanqing, Chen Youxin, Liu Chengjun, Gao Jingming, Wei Fanghui. 2013. Geochronology and genesis of the Helegang Xilikete granitic plutons from the southern margin of the Eastern East Kunlun Orogenic belt and their tectonic Significance, *Acta Geologica Sinica*, 87(10): 1525~1541 (in Chinese with English abstract).
- Chen Guochao, Pei Xianzhi, Li Ruibao, Li Zuochen, Liu Chengjun, Chen Youxin, Xu Tong, Zhang Yongming. 2016. Genesis of magma mixing and mingling of Xiangjianshan granite batholith in the eastern section of East Kunlun Orogen: evidence from mafic microgranular Enclaves(MMEs). *Earth Science Frontiers*, 23(4): 226~240 (in Chinese with English abstract).
- Chen Guochao, Pei Xianzhi, Li Ruibao, Li Zuochen, Liu Chengjun, Chen Youxin, Pei Lei, Li Xiaobing. 2018. Age and lithogenesis of Keri syenogranite from eastern part of East Kunlun Orogenic belt: constraint on the Middle Triassic tectonic evolution of East Kunlun. *Acta Petrologica Sinica*, 34(3): 567~585 (in Chinese with English abstract).
- Collins W J, Beams S D, White A J R, Chappell B W. 1982. Nature and origin of A-type granites with particular reference to southeastern Australia. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 80: 189~200.
- Feng Chengyou, Zhao Yiming, Li Daxin, Liu Jiannan, Xiao Ye, Li Guocheng, Ma Shenchao. 2011. Skarn types and mineralogical characteristics of the Fe-Cu-polymetallic skarn deposits in the Qimantage Area, western Qinghai Province. *Acta Geologica Sinica*, 85(7): 1108~1115 (in Chinese with English abstract).
- Green T H, Pearson N J. 1987. An experimental study of Nb and Ta partitioning between Ti-rich minerals and silicate liquids at high

- pressure and temperature. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 51(1): 55~62.
- Green T H. 1995. Significance of Nb/Ta as an indicator of geochemical processes in the crust-mantle system. *Chemical Geology*, 120(3): 347~359.
- Jia X L, Zhu X Y, Zhai M G, Zhao Y, Zhang H, Wu J L, Liu T. 2016. Late Mesoarchean crust growth event: evidence from the ca. 2.8 Ga granodioritic gneisses of the Xiaoqinling area, southern North China Craton. *Science Bulletin*, 61(12): 974~990.
- Li Bile, Sun Fengyue, Yu Xiaofei, Qian Ye, Wang Guan, Yang Yanqian. 2012. U-Pb dating and geochemistry of diorite in the eastern section from eastern Kunlun middle uplifted basement and granitic belt. *Acta Petrologica Sinica*, 28(4): 1163~1172(in Chinese with English abstract).
- Li Ruibao, Pei Xianzhi, Li Zuochen, Liu Zhanqing, Chen Guochao, Chen Youxin, Wei Fanghui, Gao Jingming, Liu Chengjun, Pei Lei. 2012. Geological characteristics of Late Palaeozoic-Mesozoic unconformities and their response to some significant tectonic events in eastern part of Eastern Kunlun. *Earth Science Frontiers*, 19(5): 244~254(in Chinese with English abstract).
- Li Ruibao, Pei Xianzhi, Li Zuochen, Pei Lei, Chen Guochao, Chen Youxin, Liu Chengjun, Wang Shangming. 2018. Paleo-Tethys Ocean subduction in eastern section of East Kunlun Orogen: evidence from the geochronology and geochemistry of the Wutuo pluton. *Acta Petrologica Sinica*, 34(11): 3399~3421 (in Chinese with English abstract).
- Li Yundong, Liu Xiaoyu. 2014. Geochemistry and tectonic setting of Late Triassic volcanic rocks in Reshui Area, Qinghai. *Northwestern Geology*, 47(03): 14~25 (in Chinese with English abstract).
- Liu Bin, Ma Changqian, Zhang Jinyang, Xiong Fuhao, Huang Jian, Jiang Hongan. 2012. Petrogenesis of Early Devonian intrusive rocks in the east part of Eastern Kunlun Orogen and implication for Early Palaeozoic orogenic processes. *Acta Petrologica Sinica*, 28(6): 1785~1807 (in Chinese with English abstract).
- Liu Chengdong. 2008. Granitoid Magna Mixing in Eastern Part of The East Kunlun Orogenic Belt. Beijing: Geological Publishing House, 1~86 (in Chinese without English abstract).
- Liu Y S, Gao S, Hu Z C, Gao C H, Zong K Q, Wang D B. 2010. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen; U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths. *Journal of Petrology*, 51(1/2): 537~571.
- Ludwig K R. 2001. User's Manual for Isoplot/Ex (rev. 2.49): a Geochronological toolkit for Microsoft Excel. Berkely Geochronology Center, Special Publication, 1a; 1~55.
- Luo Mingfei, Mo Xuanxue, Yu Xuehui, Li Xiaowei, Huang Xiongfei, Yu Junchuan. 2014. Zircon LA-ICP-MS U-Pb age dating, petrogenesis and tectonic implications of the Late Triassic granites from the Xiangride area, East Kunlun. *Acta Petrologica Sinica*, 30(11): 3229~3241 (in Chinese with English abstract).
- Luo Zhaohua, Ke Shan, Cao Yongqing, Deng Jinfu, Chen Hongwei. 2002. Late indosian mantle-derived magmatism in the East Kunlun. *Geological Bulletin of China*, 21(6): 292~297 (in Chinese with English abstract).
- Ma Changqian, Xiong Fuhao, Yin Shuo, Wang Liangxun, Gao Ke. 2015. Intensity and cyclicity of orogenic magmatism: an example from a Paleo-Tethyan granitoid batholith, Eastern Kunlun, northern Qinghai-Tibetan Plateau. *Acta Petrologica Sinica*, 31(12): 3555~3568 (in Chinese with English abstract).
- Middlemost E A K. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system. *Earth-Science Review*, 37(3~4): 215~224.
- Mo Xuanxue, Luo Zhaohua, Deng Jinfu, Yu Xuehui, Liu Chengdong, Chen Hongwei, Yuan Wanming, Liu Yunhua. 2007. Granitoids and crustal growth in the East-Kunlun Orogenic Belt. *Geological Journal of China Universities*, 13(03): 403~414 (in Chinese with English abstract).
- Pan Guitang, Chen Zhiliang, Li Xingzhen, Yan Yangji, Xu Xiaosong, Xu Qiang, Jiang Xinsheng, Wu Yinglin, Luo Jianning, Zhu Tongxing, Peng Yongmin. 1997. Geological-Tectonic Evolution in the Eastern Tethys. Beijing: Geological Publishing House, 1~218 (in Chinese with English abstract).
- Pan Tong, Zhou Luwei, Liu Xiaozhong, Sun Fengyue. 2004. Application of geophysical prospecting for Dulenggou geochemical anomalies verification in Dulan County, Qinghai Province. *Geology and Prospecting*, 40(4): 55~59 (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: 956~983.
- Rapp R P, Watson E B. 1995. Dehydration melting of metabasalt at 8~32kbar: implications for continental growth and crust-mantle recycling. *Journal of Petrology*, 36(4): 891~931.
- Rapp R P, Shimizu N, Norman M D, Applegate G. S. 1999. Reaction between slab-derived melts and peridotite in the mantle wedge: experimental constraints at 3.8 GPa. *Chemical Geology*, 160(4): 335~356.
- Rickwood P C. 1989. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements. *Lithos*, 22(4): 247~263.
- Rogers G, Hawkesworth C J. 1990. Reply to comment of C. R. Sternon "A geochemical traverse across the North Chilean Andes: evidence for crust generation from the mantle wedge". *Earth and Planetary Science Letters*, 101(1): 134~137.
- Rubatto D, Gebauer D. 2000. Use of cathodoluminescence for U-Pb zircon dating by IOM Microprobe: some examples from the western Alps. *Cathodoluminescence in Geoscience*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany, 373~400.
- Rudnick R L, Gao S. 2003. Composition of the continental crust. In: Heinrich DH and Karl KT (eds.). *Treatise on Geochemistry*. Oxford: Pergamon, 1~64.
- Sajona F G, Maury R C, Bellon H, Cotten J, Defant M. 1996. High field strength element enrichment of Pliocene-Pleistocene island arc basalts, Zamboanga Peninsula, Western Mindanao (Philippines). *Journal of Petrology*, 37(3): 693~726.
- Shand S J. 1927. On the relations between silica, alumina, and the bases in eruptive rocks, considered as a means of classification. *Geological Magazine*, 64(10): 446~449.
- Song Biao, Zhang Yuhai, Wan Yusheng, Jian Ping. 2002. Mount making and procedure of the SHRIMP dating. *Geological Review*, 48(S1): 26~30 (in Chinese with English abstract).
- Song S G, Yang J S, Liou J G, Wu C L, Shi R D, Xu Z Q. 2003. Petrology, geochemistry and isotopic ages of eclogites from the Dulan UHPM terrane, the North Qaidam, NW China. *Lithos*, 70: 195~211.
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: Saunders A D, Norry M J, eds. *magmatism in the ocean basins*. Geological Society, London, Special Publications, 42: 313~345.
- Sylvester P J. 1998. Post-collisional strongly peraluminous granites. *Lithos*, 1998, 45(1~4): 29~44.
- Taylor S R, McLennan S M. 1985. The continental crust: Its composition and evolution. *Journal of Geology*, 94(4): 632~633.
- Wu Cailai, Gao Yuanhong, Li Zhaoli, Lei Min, Qin Haipeng, Li Mingze, Liu Chunhua, Ronald B FROST, Paul T ROBINSON, Joseph L WOODEN. 2014. Zircon SHRIMP U-Pb dating of granites from Dulan and the chronological framework of the North Qaidam UHP belt, NW China. *Science China: Earth Sciences*, 44(10): 2142~2165 (in Chinese without English abstract).
- Wu F Y, Jahn B M, Wilder S A, Lo C H, Yui T F, Lin Q, Ge W C, Sun D Y. 2003a. Highly fractionated I-type granites in NE China (I): Geochronology and petrogenesis. *Lithos*, 66(3~4): 241~273.
- Wu F Y, Jahn B M, Wilder S A, Lo C H, Yui T F, Lin Q, Ge W

- C, Sun D Y. 2003b. Highly fractionated I-type granites in NE China (II): Isotopic geochemistry and implications for crustal growth in the Phanerozoic. *Lithos*, 67(3~4):191~204.
- Wu Jianhui, Feng Chengyou, Zhang Dequan, Li Jingwen, She Hongquan. 2010. Geology of porphyry and skarn type copper polymetallic deposits in southern margin of Qaidam basin. *Mineral Deposits*, 29(5): 760 ~ 774 (in Chinese with English abstract).
- Wu Yuanbao, Zheng Yongfei. 2004. Study on the mineralogy of zircon and its constraints on the interpretation of U-Pb age. *Chinese Science Bulletin*, 49(16): 1589 ~ 1604 (in Chinese without English abstract).
- Xiao Qinghui, Xing Zuoyun, Zhang Yu, Wu Guangying, Tong Jinsong, 2003. The major frontiers of the recent studies of granite. *Earth Science Frontiers*, 10(3): 221 ~ 229 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Qinghui, Qiu Ruizhao, Xing Zuoyun, Zhang Yu, Wu Guangying, Tong Jinsong. 2007. Major frontiers on studies of granite formation. *Geological Review*, 53(S1): 17 ~ 27 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Qinghui, Deng Jinfu, Qiu Ruizhao, Liu Yong, Feng Yanfang. 2009. A preliminary study of the relationship between granitoids and the growth of continental crust: a case study of the formation of key orogen granitoids in China. *Geology in China*, 36(3): 594 ~ 622 (in Chinese with English abstract).
- Xiong Fuqiang, Ma Changqian, Zhang Jinyang, Liubin. 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).
- Xu Changkun, Liu Shibao, Zhao Ziji, Zhang Meifen, Zhang Kaicheng, Liu Jianhua, Zhan Fayu, Huang Chaohui, Zhang Zhongyue, Wang Hongying, Zhang Wenjun, Qiao Qiang. 2012. Metallogenetic law and prospect direction of iron deposits in the East Kunlun metallogenetic belt in Qinghai. *Acta Geologica Sinica*, 86(10): 1621 ~ 1678 (in Chinese with English abstract).
- Xu Zhiqin, Yang Jingsui, Li Wenchang, Li Qihua, Cai Zhihui, Yan Zhen, Ma Changqian. 2013. Paleo-Tethys system and accretionary orogen in the Tibet Plateau. *Acta Petrologica Sinica*, 29(6): 1847 ~ 1860 (in Chinese with English abstract).
- Yang J S, Xu Z Q, Zhang J X, Song S G, Wu C L, Shi R D, Li H B, Maurice B. 2002. Early Palaeozoic north Qaidam UHP metamorphic belt on the north-eastern Tibetan plateau and a paired subduction model. *Terra Nova*, 14(5): 397 ~ 404.
- Yang Jingsui, Song Shuguang, Xu Zhiqin, Wu Cailia, Shi Rending, Zhang Jianxin, Li Haibin, Wan Yusheng, Liu Yan, Qiu Haijun, Liu Fulai, Shigenori Maruyama. 2001. Discovery of coesite in the north Qaidam early Paleozoic ultrahigh-high pressure (UHP-HP) metamorphic belt, NW China. *Acta Geologica Sinica*, 75(2): 175 ~ 179 (in Chinese with English abstract).
- Yu Shengyao, Zhang Jianxin, Hou Kejun. 2011. Two contrasting magmatic events in the Dulan UHP metamorphic terrane: implication for collisional orogeny. *Acta Petrologica Sinica*, 27(11): 3335 ~ 3349 (in Chinese with English abstract).
- Zhang G B, Zhang L F, Song S G. 2009. UHP metamorphic evolution and SHRIMP geochronology of a meta-ophiolitic gabbro in the North Qaidam, NW China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 35: 310 ~ 322.
- Zhang J X, Mattinson C G, Yu S Y, Li J P, Meng F C. 2010. U-Pb zircon geochronology of coesite-bearing eclogites from the southern Dulan area of the North Qaidam UHP terrane, northwestern China: spatially and temporally extensive UHP metamorphism during continental subduction. *Journal of Metamorphic Geology*, 28: 955 ~ 978.
- Zhang Jianxin, Yu Shengyao, Meng Fancong, Li Jinping. 2009. Paired high-pressure granulite and eclogite in collision orogens and their geodynamic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 25(9): 2050 ~ 2066 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Li Chengdong, Wang Yan, Wang Yuanlong, Jin Weijun, Jia
- Xiuqin, Han Song. 2005. Mesozoic high-Sr and Low-Yb granitoids and low-Sr and high-Yb granitoids in eastern China: comparison and geological implications. *Acta Petrologica Sinica*, 21(6): 1527 ~ 1537 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhanhu, Zhang Yongsheng, Li Hua, Zhong Liyan, Yu Deli, Liu Guanglian, Shi Tiancheng. 2011. Geological characteristics and metallogenetic regularities of the skarn iron polymetallic deposits in the Dulan area, Qinghai Province. *Geology and Exploration*, 47(6): 994 ~ 1001 (in Chinese with English abstract).

参 考 文 献

- 吴健辉,丰成友,张德全,李进文,余宏全. 2010. 柴达木盆地南缘祁漫塔格——鄂拉山地区斑岩-矽卡岩矿床地质. 矿床地质, 29(5): 760~774.
- 吴元保, 郑永飞. 2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约. 科学通报, 49(16): 1589~1604.
- 肖庆辉,邢作云,张昱,伍光英,童劲松. 2003. 当代花岗岩研究的几个重要前沿. 地学前缘, 10(3): 221~229.
- 肖庆辉,邱瑞照,邢作云,张昱,伍光英,童劲松. 2007. 花岗岩成因研究前沿的认识. 地质论评, 53(增刊1): 17~27.
- 肖庆辉,邓晋福,邱瑞照,刘勇,冯艳芳. 2009. 花岗岩类与大陆地壳生长初探:以中国典型造山带花岗岩类岩石的形成为例. 中国地质, 36(3): 594~622.
- 熊富浩,马昌前,张金阳,刘彬. 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.
- 许长坤,刘世宝,赵子基,张梅芬,张开成,刘建华,詹发余,黄朝晖,张钟月,王红英,张文君,乔强. 2012. 青海省东昆仑成矿带铁矿成矿规律与找矿方向研究. 地质学报, 86(10): 1621~1678.
- 许志琴,杨经绥,李文昌,李化启,蔡志慧,闫臻,马昌前. 2013. 青藏

- 高原中的古特提斯体制与增生造山作用. 岩石学报, 29(6): 1847~1860.
- 杨经绥,宋述光,许志琴,吴才来,史仁灯,张建新,李海兵,万渝生,刘焰,邱海峻,刘福来, Shigenori Maruyama. 2001. 柴达木盆地北缘早古生代高压—超高压变质带中发现典型超高压矿物—柯石英. 地质学报, 75(2): 175~179.
- 于胜尧,张建新,侯可军. 2011. 柴北缘都兰 UHP 地体中两期不同性质的岩浆活动: 对碰撞造山作用的启示. 岩石学报, 27(11): 3335~3349.
- 张建新,于胜尧,孟繁聪,李金平. 2009. 造山带中成对出现的高压麻粒岩与榴辉岩及其地球动力学意义. 岩石学报, 25(09): 2050~2066.
- 张旗,李承东,王焰,王元龙,金惟俊,贾秀勤,韩松. 2005. 中国东部中生代高 Sr 低 Yb 和低 Sr 高 Yb 型花岗岩: 对比及其地质意义. 岩石学报, 21(6): 1527~1537.
- 张占玉,张永胜,李华,钟良燕,于德利,刘光莲,石天成. 2011. 青海省都兰地区矽卡岩型铁多金属矿地质特征及成矿规律. 地质与勘探, 47(06): 994~1001.

Zircon U-Pb dating and geochemistry of granite in the Reshui area of Dulan County, eastern section of east Kunlun orogen and its tectonic implications

HAN Jianjun¹⁾, LI Yundong^{*2)}, SONG Chuanzhong³⁾, HE Jun⁴⁾, HAN Xu³⁾, QI Changwei¹⁾, ZHAO Mingfu¹⁾, HE Xiaoliang²⁾

1) Qinghai Geological Survey, Xining, 810001; 2) Institute of Geological and Mineral resources Survey of Henan Geological Bureau, Zhengzhou, 450008; 3) School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, 230009; 4) School of earth and space sciences, University of Science and Technology of China, Hefei, 230026

* Corresponding author: 18426486lyd@163.com

Abstract

The Reshui area is located in Doulan county, eastern section of the East Kunlun orogenic belt. There are a large number of granitic rock combinations. The main rock types are monzogranite and granodiorite. This paper reports on the geochemical and LA-ICP-MS zircon U-Pb dating results of monzogranite and granitic in Reshui area, the results provide new informations for establish a complete chronological framework and tectonic evolution. The zircon U-Pb isotope dating study shows that the crystallization ages of the monzogranite and granodiorite are 232.4 ± 1.3 Ma and 230.8 ± 1.1 Ma, which is the product of granitic magmatism during Middle Triassic. The characteristics of rock and geochemistry indicate that the monzogranite and granodiorite are high-potassium-calcium-alkaline I-type granites, with high K₂O content (2.2%~4.74%); aluminum saturation index A/CNK values are both less than 1.1, showing quasi-aluminum characteristics; there is a significant negative correlation between P₂O₅ and SiO₂, and also exhibits enrichment of light rare earth elements and large ion lithophile elements (such as K, Rb, La), loss of heavy rare earth elements and high field strength elements (such as Nb, Ta, Ti, P), and Eu negative anomalies. Combined with the previous regional geological researches, we believe that the granitic rock combinations in Reshui area is formed the partial melting of the lower crust that effected by the underplating of mantle-derived magma, The mantle-derived magma and the crustal-derived magma are mixed in different proportions, and during the magma evolution occurred fractional crystallization. Animaqing ocean subducted to the east Kunlun plate in Late Permian, Reshui area was still in the volcanic arc environment produced by the subduction of the oceanic crust until to Middle Triassic, The monzogranite and granodiorite are typical products in this stage.

Key words: monzogranite; granodiorite; geochemistry; zircon U-Pb dating; tectonic setting; Reshui area in Doulan County