

# 祁连南缘柴达木山花岗岩的岩石学、 地球化学及锆石 U-Pb 年代学研究

贺小元<sup>1,2)</sup>, 杨兴科<sup>1,3)</sup>, 王永<sup>2)</sup>, 郭瑞华<sup>2)</sup>, 廖友运<sup>2)</sup>, 范玉海<sup>2)</sup>

1) 长安大学地球科学与资源学院, 西安, 710054; 2) 中国煤炭地质总局航测遥感局, 西安, 710199;  
3) 国土资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室, 西安, 710054

**内容提要:**祁连南缘柴达木山花岗岩岩体, 位于青海省大柴旦镇, 岩性主要为似斑状二长花岗岩、花岗斑岩、环斑花岗岩等。本文选择代表性岩石进行了主量元素、微量元素和 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学研究, 旨在说明其岩浆成因、构造环境及意义。结果表明, 柴达木山岩体  $K_2O/Na_2O$  比值变化为 1.11~4.41, 里特曼指数介于 1.31~2.20, A/CNK 介于 1.06~1.66, 地球化学特征显示, 柴达木山岩体具有高钾钙碱性、过铝质、高分异 I 型花岗岩特征。在原始地幔标准化的微量元素分布图中, 表现出不同程度的富集大离子亲石元素 (LILE) Cs、Pb、K 等和轻稀土元素 (LREE), 相对亏损高场强元素 (HFSE) Y、Yb, 具有明显的 Ba、Nb、Ta、Sr、P、Ti 负异常。稀土元素总量为  $207.94 \times 10^{-6} \sim 418.40 \times 10^{-6}$ , LREE/HREE 稀土元素之比为 5.67~10.29,  $(La/Yb)_N$  比值为 5.88~13.84,  $\delta Eu$  介于 0.09~0.50 显示负异常,  $\delta Ce$  介于 0.99~1.36, Sr/Y 介于 0.87~3.47, Rb/Sr 介于 1.22~15.45, Nb/Ta 介于 0.63~11.88, 稀土元素球粒陨石标准化分配型式表现为轻稀土相对富集, 重稀土相对亏损的右倾型且 Eu 负异常较明显。选取其中四个样品进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年, 结果表明花岗斑岩 (D3755-1)  $^{206}Pb/^{238}U$  年龄范围为 400Ma~407Ma, 其加权平均年龄为  $404.6 \pm 2.9$ Ma (MSWD=0.094); 花岗斑岩 (PM11-1)  $^{206}Pb/^{238}U$  年龄范围为 413~424Ma, 其加权平均年龄为  $418.4 \pm 3.0$ Ma (MSWD=0.30); 二长花岗岩 (D1028-1) 的  $^{206}Pb/^{238}U$  年龄范围为 426Ma~436Ma, 其加权平均年龄为  $434.3 \pm 2.0$ Ma (MSWD=0.21); 花岗闪长岩 (D1506-1) 的  $^{206}Pb/^{238}U$  年龄范围为 434Ma~439Ma, 其加权平均年龄为  $437.2 \pm 2.6$ Ma (MSWD=0.076), 暗示柴达木山岩体的结晶年龄至少为 404.6Ma~437.2Ma, 形成的地质时期为早志留世-早泥盆世。祁连南缘-柴北缘早古生代岩浆活动持续时间长达 (372Ma~473Ma), 具有多期次, 主要年龄段为 450~470Ma、430~450Ma、410~430Ma、400~410Ma、370~400Ma, 其中 430~450Ma、400~410Ma 分别代表了花岗岩类侵入的两个主峰期。早期 (430~470Ma) 反映了南祁连洋板块向北俯冲于祁连陆块之下, 柴达木陆块的继续俯冲, 祁连陆块由北向南逆冲到柴达木陆块之上形成了陆陆碰撞带等一系列持续的岩浆侵入活动; 晚期 (370~430Ma) 反映了柴达木陆块与中南祁连板块碰撞后深俯冲板块拆沉-折返及碰撞后造山带上不同块体之间的伸展、滑塌等一系列岩浆侵入活动。在空间分布上, 柴北缘赛什腾山-噶崂山代表了岩浆早期活动, 主要为 I 型花岗岩; 绿梁山-大柴旦地区-锡铁山-都兰一带, 代表了岩浆晚期活动, 具有 I 和 S 型花岗岩特征。柴达木山岩体代表了祁连南缘岩浆多期活动, 与柴北缘岩浆活动具有同时性。

**关键词:**柴达木山花岗岩; 锆石 U-Pb 定年; 祁连南缘; I 型; 多期次

柴北缘构造带毗邻祁连造山带和柴达木地块 (Lu Songnian et al., 2002), 柴北缘高压-超高压变质带继大别-苏鲁超高压变质带成为国内研究的热点, 2000~2010 年期间前人对超高压变质带内发育的榴辉岩、石榴橄榄岩、蛇绿岩、麻粒岩及相关片麻

岩等进行了大量的研究, 主要以杨经绥、宋述光、张建新、陈丹玲、刘良、Mattinson、张贵宾、孟繁聪、于胜尧等学者为代表。柴北缘与超高压变质带相伴的花岗岩也十分发育, 前人对超高压变质带上的花岗岩类进行了一些研究 (Wu Cailai et al., 2001,

注: 本文为中国地质调查局地质调查项目 (编号 1212011221148) 和 (编号 12120114018213) 资助成果。

收稿日期: 2019-03-29; 改回日期: 2019-10-22; 网络发表日期: 2020-03-14; 责任编辑: 吴才来; 责任编辑: 黄敏。

作者简介: 贺小元, 男, 1982 年生。博士生, 主要从事区域地质调查及矿产勘查。Email: 81556924@qq.com。通讯作者: 杨兴科, 男, 1961 年生。教授, 主要从事构造地质、矿产方面的研究。Email: xky6105@chd.edu.cn。

**引用本文:** 贺小元, 杨兴科, 王永, 郭瑞华, 廖友运, 范玉海. 2020. 祁连南缘柴达木山花岗岩的岩石学、地球化学及锆石 U-Pb 年代学研究. 地质学报, 94(4): 1248~1263, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2020053.  
He Xiaoyuan, Yang Xingke, Wang Yong, Guo Ruihua, Liao Youyun, Fan Yuhai. 2020. Petrology, geochemistry and zircon U-Pb geochronology of the Chaidamushan granite from the southern margin of Qilianshan. Acta Geologica Sinica, 94(4): 1248~1263.

2002, 2004a, 2004b, 2006, 2007, 2008, 2009, 2014, 2016; Lu Xinxiang et al., 2007; Meng Fancong et al., 2008, 2005, 2007; Yu Shengyao et al., 2011; Zhou Bin et al., 2014; Xin Cunlin et al., 2016; Wang Yusong et al., 2017; Wu Di et al., 2017; Niu Manlan et al., 2018), 但对柴北缘毗邻的祁连南缘花岗岩类的研究较少。祁连南缘花岗岩体与柴北缘构造带内花岗岩体存在着密切的联系, 查明超高压带上花岗质岩浆活动期次及其与超高压变质作用、造山带构造演化之间的关系, 对探讨中国西部大地构造演化具有十分重要的意义(Wu Cailai et al., 2007)。因此, 两者之间岩体的活动期次、年代是否具有-致性, 具有重要的构造意义。本文系统地祁连南缘柴达木山花岗岩岩体进行岩石学研究, 并对代表性岩石进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年研究, 并结合其他地球化学特征, 与前人研究成果进行对比, 探讨该岩体性质及形成的构造环境, 及其在柴北缘碰撞造山作用的构造意义。

## 1 地质背景

祁连山是阿拉善地块与柴达木地块之间的巨型

复合造山带, 由北向南划分为 5 个构造单元(图 1a): ①阿拉善地块; ②北祁连山环太平洋型俯冲带(缝合带); ③祁连地块; ④柴北缘超高压变质带; ⑤柴达木地块(Song Shuguang et al., 2004, 2009)。柴北缘是指中南祁连地块以南柴达木地块以北的区域, 其内主要岩体有赛什腾山、嗽崂山、绿梁山、锡铁山、都兰野马滩等, 岩体侵入到前寒武系达肯大坂群或沙柳河群一套中高级变质岩中(Wu Cailai et al., 2004)。柴达木山花岗岩岩体位于大柴旦镇北, 祁连地块南缘内靠近柴北缘超高压变质带一侧, 是组成南部祁连岩浆弧的主要岩体, 总面积约 2000km<sup>2</sup>, 长约 50km, 宽约 40km, 岩体大多被覆盖(Wu Cailai et al., 2004; Lu Xinxiang et al., 2007), 局部侵入到早古生代志留纪陆源碎屑岩及火山岩中。该岩体主要由似斑状二长花岗岩组成, 少量花岗斑岩、花岗闪长岩等组成, 呈岩基状, 长轴方向为近东西向, 与区域构造线北北西向呈一定的锐夹角。

## 2 岩体及样品描述

柴达木山岩体南部主要为一套浅灰白色-肉红色粗粒-巨粒环斑花岗岩, 周边为中粗粒正长花岗

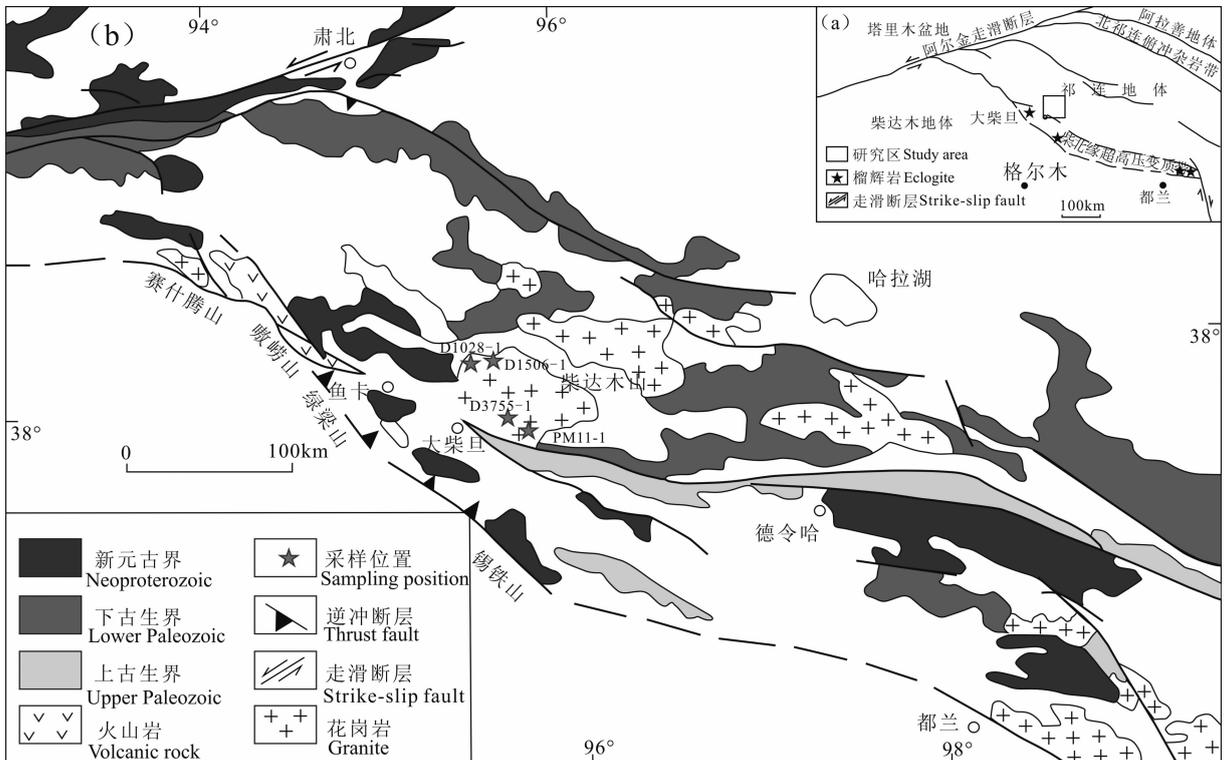


图 1 柴北缘区域地质简图

Fig. 1 Geological map of the Northern margin of Qaidam

(a)—据 Song Shuguang et al., 2003; (b)—据 Yang Jingsui et al., 2001

(a)—after Song et al., 2003; (b)—after Yang et al., 2001

岩、似斑状正长花岗岩和粗粒二长花岗岩等围绕；中部主要由中-细粒二长花岗岩、二长花岗斑岩、正长花岗斑岩等组成；北部则以中粗粒正长花岗岩、似斑状正长花岗岩和粗粒二长花岗岩为主(Lu Xinxiang et al., 2007; Hu Nenggao et al., 2008), 为复式岩体(Zhu Xiaohui et al., 2016)。本文主要对分布于柴达木山岩体南部的花岗斑岩、二长花岗岩、花岗闪长岩等进行地球化学研究, 在岩体不同位置采集蚀变弱、较新鲜且具代表性的样品 11 件, 其中样品 D3755-1、PM11-1、D1028-1 及 D1506 进行同位素年龄测试, 岩性特征如下:

**花岗斑岩(D3755-1、PM11-1):**斑晶约占岩石总量的 40%, 基质约占 60%, 斑状结构, 基质具显微晶质结构, 块状构造。斑晶主要为钾长石 10%、斜长石 13%、石英 6% 和暗色矿物 10%。钾长石呈半自形板状, 斜长石呈半自形板状, 石英呈半自形-他形粒状。少部分石英与长石相互交生, 形成文象结构。基质主要由长英质组成, 次为绢云母、绿泥石, 另见少量金属矿物。长英质呈显微粒状, 分布较均匀。PM5 26-1 中暗色矿物斑晶大部分为阳起石化角闪石(约 5%), 岩石更接近于角闪花岗斑岩。

**二长花岗岩(D1028-1):**岩石主要由钾长石、斜长石和石英组成, 次为黑云母和金属矿物。斜长石 35%~40%, 钾长石 30%~35%, 石英 20%~25%, 黑云母 5%~10%, 磁铁矿微量。具中粒伟晶结构, 块状构造。钾长石呈半自形板状, 多数颗粒具显微条纹特征, 为条纹长石, 个别颗粒见简单双晶, 颗粒较大; 斜长石呈半自形板状; 石英呈半自形-他形粒状, 部分颗粒具拉长特征, 少部分长石与石英相互交生, 形成文象结构。黑云母呈细小鳞片状, 不均匀分布于粒间空隙中。见个别锆石颗粒, 呈粒状, 星散分布。金属矿物呈粒状、长条状, 分散分布。

**花岗闪长岩(D1506-1):**具似斑状结构, 斑晶主要为碱性长石 8%、斜长石 10%, 次为石英 5%, 基质呈半自形-他形细粒粒状结构, 主要由碱性长石 26%、石英 27%、斜长石 9%、黑云母 15% 组成。斑晶中碱性长石呈半自形板状, 以条纹长石为主, 次为微斜长石等; 斜长石呈自形板状, 发生绢云母化、黝帘石化; 石英呈粒状。基质中碱性长石和石英均呈不规则粒状, 斜长石呈半自形板状, 碱性长石以条纹长石为主, 次为微斜长石; 斜长石发生轻微绢云母化; 黑云母呈片状。

### 3 分析方法

#### 3.1 岩石地球化学

主微量元素分析测试在中国地质调查局西安地质调查中心实验测试中心完成。主量元素采用 X-射线荧光光谱仪 XRF-1500 进行测试, 分析精度以及准确度优于 5%; FeO 采用氢氟酸、硫酸溶样、重铬酸钾滴定容量法, 分析误差优于 2%。微量及稀土元素是利用酸溶法进行样品制备, 再使用电感耦合等离子质谱仪 ICP-MS(Element II) 进行测试, 分析精度和准确度优于 5%, 详细操作步骤参照 Sun Xiaopan et al., 2013。

#### 3.2 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年

野外采集新鲜岩石样品室内经人工破碎按常规方法分选锆石, 锆石由河北省区域地质矿产调查研究所实验室挑选。再在双目镜下挑选出无包裹体、无裂纹、透明度好的单颗粒锆石作为测试样品。将测试样品置于环氧树脂中, 待同结后将锆石颗粒抛磨至其厚度的二分之一左右, 使锆石内部充分暴露。在开始锆石 U-Pb 分析之前, 先在显微镜下对其进行透射光、反射光照相和阴极发光(CL)照相, 锆石 CL 图像分析由西北大学大陆动力学教育部重点实验室完成, 结合透、反射光图像, 选择最佳测试所用的锆石。

LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄测定在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。该实验室的 ICP-MS 为 PerkinElmer/SCIEX 公司带有动态反应池(Dynamic reaction cell, 缩写为 DRC)的四极杆 ICP-MS Agilent 7500, 该仪器可在标准模式和 DRC 模式下运行; 激光剥蚀系统为德国 Lambda Physik 公司的 ComPex102ArF 准分子激光器(波长 193 nm)与 Detlef Gunther 教授为 MicroLas 公司设计的光学系统组成(Yuan Honglin et al., 2003)。激光束斑直径为 30 $\mu$ m, 激光剥蚀样品的深度为 20~40 $\mu$ m。实验室中采用 He 作为剥蚀物质的载气。用美国国家标准技术研究院研制的人工合成硅酸盐玻璃标准参考物质 NISTSRM 610 进行仪器最佳化, 使仪器达到最高的灵敏度, 最小的氧化物产率, 最低的背景值和稳定的信号, 采样方式为单点剥蚀, 数据采集选用一个质量峰一点的跳峰方式(peak jumping)。锆石 U-Pb 年龄测定选用国际标准锆石 91500 作为外标标准矿物(Wiedenbeck et al., 1995), 外标校正方法为每隔 4~5 个样品分析点测一次标样, 保证样品和标样的仪器条件完全一致。样品的

同位素比值采用 GLITTER (ver4.0, Macquarie University) 程序, 年龄计算及谐和图的绘制采用 Isoplot(ver2.0)(Ludwig,1993)。实验获得的数据采用 Andersen(2002)的方法进行同位素比值的校正, 以扣除普通铅的影响。所给定同位素的比值和年龄误差(标准偏差)在  $1\sigma$  水平。

## 4 分析结果

### 4.1 主量元素特征

11 个样品主量元素分析结果见表 1, 柴达木山花岗岩岩体  $\text{SiO}_2$  含量为 67.11%~78.17%, 变化范围较大, 且分异指数 DI 为 84.74~97.48, 具高分异花岗岩特征;  $\text{TiO}_2$  含量为 0.13%~0.80%;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量为 11.53%~14.57%;  $\text{Na}_2\text{O}$  含量为 1.16%~3.45%;  $\text{K}_2\text{O}$  含量为 3.84%~5.59%;  $\text{FeO}$  含量为 0.53%~3.02%;  $\text{P}_2\text{O}_5$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{MgO}$  含量较低, 且随着  $\text{SiO}_2$  的含量增加而呈减少趋势。岩体中钾含量较高, 全碱含量变化范围较小, 为 6.27~8.11,  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  比值变化为 1.11~4.41, 里特曼指数  $\sigma$  介于 1.31~2.20, 反映其为钙碱性系列。在  $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$  图解(图 2)中显示样品为高钾钙碱性系列。A/CNK 介于 1.06~1.66, 全部大于 1, 在 A/NK-A/CNK 图解(图 3)中属过铝质花岗岩。在全碱-硅(TAS)岩石分类判别图解上(图 4), 样品投图全为花岗岩, 其中 D3201-1 的  $\text{SiO}_2$  含量为 78.17% 投出右侧图外, 高硅可能与花岗岩经历了高分异结晶作用有关。地球化学结果显示, 柴达木山花岗岩为高钾钙碱性过铝质岩石。

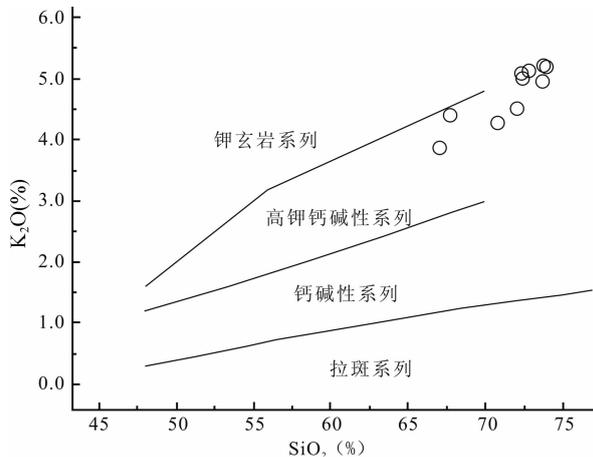


图 2 柴达木山花岗岩  $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$  图解  
(据 Peccerillo et al., 1976)

Fig. 2  $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$  diagram of Chaidamushan granite  
(after Peccerillo et al., 1976)

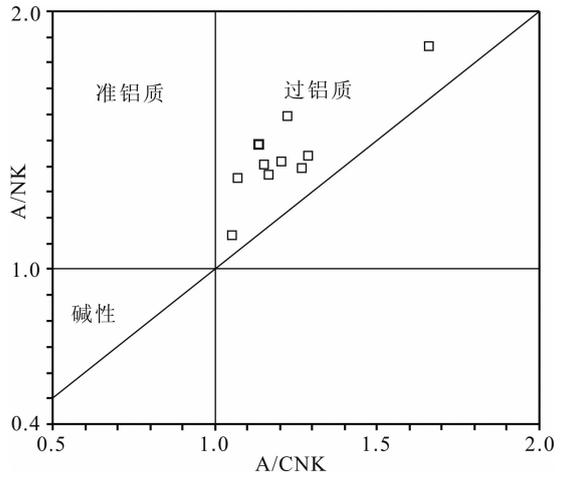


图 3 柴达木山花岗岩 A/NK-A/CNK 图解  
(据 Maniar et al., 1989)

Fig. 3 A/NK-A/CNK diagram of Chaidamushan granite  
(after Maniar et al., 1989)

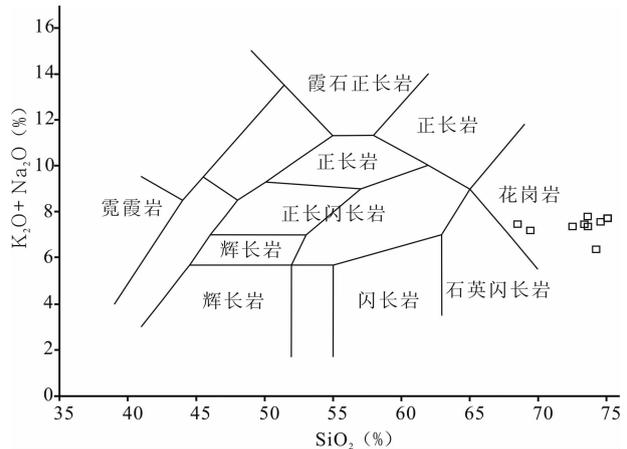


图 4 柴达木山花岗岩全碱-硅(TAS)岩石分类判别图解  
(据 Cox-Bell-Pank, 1979)

Fig. 4 TAS alkalis-silica discrimination diagram of Chaidamushan granite(after Cox-Bell-Pank, 1979)

### 4.2 微量和稀土元素特征

样品微量元素分析结果见表 1, 柴达木山花岗岩各微量元素含量变化较大,  $\text{Rb} = 200 \times 10^{-6} \sim 431 \times 10^{-6}$ ,  $\text{Sr} = 27.9 \times 10^{-6} \sim 176 \times 10^{-6}$ ,  $\text{Ba} = 115 \times 10^{-6} \sim 1374 \times 10^{-6}$ ,  $\text{Y} = 32.1 \times 10^{-6} \sim 62.3 \times 10^{-6}$ ,  $\text{Nb} = 9.62 \times 10^{-6} \sim 27.2 \times 10^{-6}$ ,  $\text{Ta} = 0.82 \times 10^{-6} \sim 43.3 \times 10^{-6}$ ,  $\text{Yb} = 2.87 \times 10^{-6} \sim 5.63 \times 10^{-6}$ 。在原始地幔标准化的微量元素蛛网图(图 5a)中, 表现出不同程度的富集大离子亲石元素(LILE)Cs、Pb、K 等和轻稀土元素(LREE), 相对亏损高场强元素(HFSE)Y、Yb, 具有明显的 Ba、Nb、Sr、Ti 负异常。

稀土元素总量为  $207.94 \times 10^{-6} \sim 418.40 \times 10^{-6}$ ,

表1 柴达木山花岗岩地球化学测试数据(主量元素:%;微量和稀土元素: $\times 10^{-6}$ )Table 1 Geochemical data of the Chaidamushan granite (major elements: %; trace elements:  $\times 10^{-6}$ )

样品号	D1030-1	D1028-1	D3201-1	D1506-1	PM6 0-1	D0311-1	PM5 26-1	D0507-1	D3755-1	PM11 -1	PM11 -2
岩性	二长花岗岩			花岗闪长岩	花岗斑岩						
SiO <sub>2</sub>	73.89	74.02	78.17	72.52	72.92	70.92	72.12	72.42	67.11	73.73	67.82
TiO <sub>2</sub>	0.27	0.26	0.13	0.42	0.30	0.35	0.35	0.29	0.80	0.29	0.63
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.93	13.24	11.53	13.48	13.90	13.41	13.04	13.54	14.57	13.62	14.45
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.97	0.49	0.84	0.78	1.81	0.94	1.17	2.14	2.29	0.81	1.42
FeO	0.97	1.42	0.53	1.73	0.98	3.02	2.46	1.22	2.53	1.70	3.22
MnO	0.05	0.06	0.04	0.04	0.05	0.05	0.06	0.02	0.08	0.05	0.08
MgO	0.26	0.32	0.08	0.65	1.29	0.72	0.65	0.43	1.58	0.43	1.29
CaO	1.38	1.08	0.39	1.50	0.50	0.90	0.90	0.50	1.60	0.60	1.50
Na <sub>2</sub> O	2.38	2.34	2.52	2.25	1.16	2.96	2.83	2.57	3.45	2.51	2.62
K <sub>2</sub> O	5.20	5.18	5.59	4.98	5.11	4.25	4.49	5.07	3.84	4.93	4.39
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.06	0.07	0.02	0.07	0.12	0.14	0.13	0.12	0.17	0.12	0.15
LOI	1.03	0.81	0.48	0.84	1.76	1.49	1.16	1.05	1.11	0.64	1.69
总量	99.39	99.29	100.32	99.26	99.90	99.15	99.36	99.37	99.12	99.43	99.26
K <sub>2</sub> O+Na <sub>2</sub> O	7.58	7.52	8.11	7.23	6.27	7.21	7.32	7.64	7.29	7.44	7.01
K <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	2.18	2.21	2.22	2.21	4.41	1.44	1.59	1.97	1.11	1.96	1.68
$\sigma$	1.86	1.82	1.87	1.77	1.31	1.86	1.84	1.98	2.20	1.80	1.98
A/NK	1.35	1.40	1.13	1.48	1.86	1.41	1.37	1.39	1.48	1.44	1.59
A/CNK	1.07	1.16	1.06	1.14	1.66	1.21	1.17	1.27	1.14	1.29	1.22
Q	36.6	37.1	41.02	36.32	42.99	32.74	35.82	36.55	26.17	38.61	30.94
Or	30.73	30.61	33.03	29.43	30.2	25.11	26.53	29.96	22.69	29.13	25.94
Ab	20.14	19.8	21.32	19.04	9.82	25.05	23.95	21.75	29.19	21.24	22.17
An	6.64	4.97	2.11	7.1	1.73	3.82	3.86	1.94	7.14	2.32	6.71
Ap	0.14	0.17	0.05	0.17	0.28	0.32	0.31	0.28	0.39	0.28	0.36
Ilm	0.51	0.49	0.25	0.8	0.57	0.66	0.66	0.55	1.52	0.55	1.2
Cor	0.95	1.96	0.56	1.79	5.83	2.54	2.11	3.12	2.12	3.3	2.93
Mag	1.41	0.71	1.22	1.42	1.42	1.37	2.94	3.1	3.32	1.93	3
Hy	1.27	2.68	0.34	1.62	5.32	6.07	1.62	1.1	5.51	1.07	3.21
DI	94.11	92.48	97.48	91.89	84.74	86.72	90.16	90.2	85.19	91.3	85.76
Sc	4.80	4.49	3.56	6.39	5.58	8.76	9.16	8.63	12.30	3.94	10.70
Ti	1125	1207	579	2578	1799	2098	2098	2098	4796	1739	3777
V	—	—	—	83.80	73.30	85.60	59.00	90.00	95.60	67.80	247.00
Cr	14.10	6.80	3.72	46.80	42.80	52.80	54.50	37.40	68.40	33.10	59.70
Mn	—	—	—	340.78	379.51	410.49	449.21	201.37	596.37	356.27	635.09
Co	—	—	—	9.83	7.46	7.58	8.79	5.54	19.50	6.08	16.00
Ni	—	—	—	10.10	14.00	8.49	11.20	9.11	20.30	9.90	16.20
Pb	—	—	50.00	54.40	—	52.20	64.80	56.80	40.90	119.00	65.40
Ga	—	—	—	18.50	18.10	20.20	20.90	22.10	22.10	19.80	26.70
Th	34.20	53.00	36.20	46.30	14.40	20.10	19.30	22.20	30.20	24.10	25.70
Zr	161	132	105	261	174	389	317	369	348	178	314
Nb	13.20	27.20	14.90	20.70	9.62	18.10	18.30	14.80	20.90	14.30	16.90
Hf	6.62	5.19	5.24	11.60	3.92	7.70	4.88	4.38	7.99	6.15	9.22
As	—	—	—	15.30	0.97	1.81	3.17	1.27	0.60	10.70	2.50
Sb	—	—	—	0.40	0.47	0.36	0.43	0.80	0.43	0.31	0.31
Ta	1.53	43.30	2.07	2.39	0.82	1.75	1.88	1.41	1.76	1.64	1.47
Li	—	—	—	42.10	42.80	61.00	31.30	22.60	62.40	24.60	50.50
Rb	305	375	431	323	210	200	227	240	214	315	273
Sr	81.20	48.20	27.90	66.80	77.40	106.00	109.00	78.30	176.00	72.50	102.00
Y	47.30	49.90	46.80	49.80	32.10	37.90	60.50	48.30	50.70	62.30	44.00
Cs	—	—	—	18.00	16.20	9.76	8.37	10.90	49.20	28.70	92.40
Ba	808	273	115	460	1374	1043	1051	1052	1114	515	1073
K	4.60	4.24	4.62	3.59	4.24	3.53	3.73	3.26	3.19	4.09	3.64
La	51.00	43.60	45.60	83.00	40.00	53.60	62.60	66.30	85.80	49.10	73.80
Ce	148.00	94.10	97.90	163.00	91.30	116.00	135.00	140.00	183.00	103.00	150.00

续表 1

样品号	D1030-1	D1028-1	D3201-1	D1506-1	PM6 0-1	D0311-1	PM5 26-1	D0507-1	D3755-1	PM11 -1	PM11 -2
岩性	二长花岗岩			花岗闪长岩	花岗斑岩						
Pr	12.70	10.80	11.30	17.20	10.00	13.40	15.90	16.50	20.60	11.70	16.30
Nd	44.60	37.60	39.10	58.90	36.60	51.10	59.80	62.20	76.60	42.10	59.10
Sm	8.53	7.83	8.30	10.40	7.10	10.10	11.60	11.80	13.40	8.98	10.60
Eu	0.84	0.50	0.24	1.00	1.03	1.56	1.59	1.71	1.95	0.93	1.55
Gd	7.71	7.28	7.38	9.54	6.08	8.43	10.30	10.20	11.70	8.27	9.43
Tb	1.35	1.36	1.38	1.59	1.06	1.38	1.86	1.73	1.89	1.68	1.55
Dy	8.22	8.71	8.40	9.44	6.32	7.86	11.50	9.86	10.20	11.50	8.46
Ho	1.63	1.67	1.63	1.79	1.18	1.43	2.23	1.83	1.93	2.32	1.63
Er	4.75	4.89	4.84	5.42	3.47	4.34	6.50	5.43	5.75	6.84	4.68
Tm	0.75	0.76	0.78	0.70	0.46	0.58	0.85	0.72	0.69	0.92	0.60
Yb	4.76	4.67	5.04	4.49	2.87	3.73	5.24	4.43	4.18	5.63	3.80
Lu	0.71	0.70	0.78	0.77	0.47	0.66	0.88	0.73	0.71	0.92	0.63
LREE	265.67	194.43	202.44	333.50	186.03	245.76	286.49	298.51	381.35	215.81	311.35
HREE	29.88	30.04	30.23	33.74	21.91	28.41	39.36	34.93	37.05	38.08	30.78
ΣREE	295.55	224.47	232.67	367.24	207.94	274.17	325.85	333.44	418.40	253.89	342.13
LREE/HREE	8.89	6.47	6.70	9.88	8.49	8.65	7.28	8.55	10.29	5.67	10.12
δEu	0.31	0.20	0.09	0.30	0.47	0.50	0.44	0.47	0.47	0.32	0.46
δCe	1.36	1.02	1.01	0.99	1.07	1.02	1.01	0.99	1.02	1.00	1.00
(La/Sm) <sub>N</sub>	3.76	3.50	3.46	5.02	3.54	3.34	3.39	3.53	4.03	3.44	4.38
(La/Yb) <sub>N</sub>	7.22	6.29	6.10	12.46	9.40	9.69	8.05	10.09	13.84	5.88	13.09
(Tb/Yb) <sub>N</sub>	1.25	1.28	1.21	1.56	1.63	1.63	1.57	1.72	1.99	1.32	1.80
Sr/Y	1.72	0.97	1.65	1.34	0.87	2.80	1.80	1.62	3.47	1.16	2.32
Rb/Sr	3.76	7.78	2.71	4.84	15.45	1.89	2.08	3.07	1.22	4.34	2.68
K/Rb	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01
Nb/Ta	8.63	0.63	11.73	8.66	7.20	10.34	9.73	10.50	11.88	8.72	11.50

注: A/CNK=Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/(CaO+Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O)(分子数比); A/NK=Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/(Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O)(分子数比); 里特曼指数 σ=(Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O)<sup>2</sup>/(SiO<sub>2</sub>-43); Q. 石英; Or. 正长石; Ab. 钠长石; An. 钙长石; Ap. 磷灰石; Ilm. 钛铁矿; Cor. 刚玉; Mag. 磁铁矿; Hy. 紫苏辉石; DI(分异指数)=Q+Or+Ab+Ne+Lc+Kp(CIPW 计算数据)。

其中轻稀土元素含量为  $186.03 \times 10^{-6} \sim 381.35 \times 10^{-6}$ , 重稀土元素含量为  $21.91 \times 10^{-6} \sim 39.36 \times 10^{-6}$ , LREE/HREE 稀土元素之比为 5.67~10.29, (La/Yb)<sub>N</sub> 比值为 5.88~13.84, (La/Sm)<sub>N</sub> 比值 3.34~5.02, (Tb/Yb)<sub>N</sub> 比值 1.21~1.99, δEu 介于 0.09~0.50, 平均为 0.37, 显示负异常, δCe 介于 0.99~1.36, Sr/Y 介于 0.87~3.47, Rb/Sr 介于 1.22~15.45, K/Rb 介于 0.01~0.02, Nb/Ta 介于 0.63~11.88。在球粒陨石标准化稀土元素配分图解(图 5b)中, 岩石表现出轻稀土 LREE 富集、HREE 亏损且明显 Eu 为负异常的右倾型配分模式特征。

#### 4.3 U-Pb 定年锆石特征及分析结果

样品中选取的测年锆石多为半透明-透明的不规则短柱状晶体, 呈半自形-自形柱状, 少部分为半截状, 粒度多为 70~180 μm, 大多数锆石长宽比介于 1.2 : 1 ~ 3.0 : 1 之间(图 6, a. D3755-1; b. PM11-1; c. D1028-1; d. D1506-1)。阴极发光图像表现出岩浆韵律环带和明暗相间的环带结构, 还可见清晰的核幔结构, 核部 CL 图像颜色较暗, 幔部有

清晰的震荡环带, 属于典型的岩浆锆石(Wu Yuanbao and Zheng Yongfei, 2004)。从 CL 图像上可以看出锆石测点多位于明显的岩浆环带上, 测年结果代表了岩浆锆石的年龄。

花岗斑岩(D3755-1)对样品中的 26 颗锆石进行测年, 其中 8 个测点(2、8、11、20、21、23、24、25)年龄数据偏大, 未参与平均年龄计算; 从测试得到的同位素比值和年龄数据(表 2)来看, 其余 18 个测点的 <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 表面年龄范围为 400~407Ma, 其加权平均年龄为  $404.6 \pm 2.9$ Ma (MSWD=0.094), 时代为早泥盆世。在锆石 U-Pb 谐和图上 <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 表明年龄比较稳定, 分布较密集, 具有较好的一致表面年龄, 并多聚集在谐和线上比较小的范围内, 说明普通 Pb 的丢失不大, 测年精度较高(图 7a)。

花岗斑岩(PM11-1)样品中共测试了 23 颗锆石(图 6b), 其中 5 个测点(3、14、15、19、26、36)年龄数据偏小, 未参与平均年龄计算; 从测试得到的同位素比值和年龄数据(表 2)来看, 其余 17 个测点的 <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 年龄范围为 413~424Ma, 其加权平均年

表2 柴达木山花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素分析结果

Table 2 LA-ICP-MS zircon U-Pb isotopic analysis of Caidamushan granite

分析编号	同位素比值				年龄(Ma)			
	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$
D3755-1-01	0.4881	0.0372	0.0643	0.0014	404	25	402	8
D3755-1-02	0.5677	0.0130	0.0702	0.0008	457	8	437	5
D3755-1-03	0.4886	0.0173	0.0646	0.0009	404	12	404	5
D3755-1-04	0.4873	0.0172	0.0650	0.0009	403	12	406	5
D3755-1-05	0.4890	0.0265	0.0647	0.0011	404	18	404	7
D3755-1-06	0.4889	0.0407	0.0645	0.0015	404	28	403	9
D3755-1-07	0.4909	0.0373	0.0648	0.0014	406	25	405	8
D3755-1-08	0.5591	0.0284	0.0723	0.0012	451	19	450	7
D3755-1-09	0.4930	0.0307	0.0650	0.0012	407	21	406	7
D3755-1-10	0.4859	0.0236	0.0648	0.0010	402	16	405	6
D3755-1-11	0.5591	0.0182	0.0723	0.0009	451	12	450	5
D3755-1-12	0.4912	0.0269	0.0643	0.0011	406	18	402	7
D3755-1-13	0.4886	0.0254	0.0651	0.0010	404	17	407	6
D3755-1-14	0.4877	0.0270	0.0645	0.0011	403	18	403	7
D3755-1-15	0.4966	0.0135	0.0650	0.0008	409	9	406	5
D3755-1-16	0.4930	0.0204	0.0652	0.0009	407	14	407	5
D3755-1-17	0.4942	0.0262	0.0651	0.0011	408	18	406	6
D3755-1-18	0.4895	0.0210	0.0641	0.0009	405	14	400	6
D3755-1-19	0.4917	0.0454	0.0649	0.0016	406	31	406	10
D3755-1-20	1.1184	0.0306	0.1256	0.0015	762	15	762	9
D3755-1-21	0.5578	0.0253	0.0722	0.0011	450	16	450	6
D3755-1-22	0.4915	0.0417	0.0649	0.0015	406	28	405	9
D3755-1-23	0.5721	0.0412	0.0740	0.0015	459	27	460	9
D3755-1-24	0.5573	0.0394	0.0725	0.0015	450	26	451	9
D3755-1-25	0.5137	0.0252	0.0671	0.0010	421	17	419	6
D3755-1-26	0.4966	0.0191	0.0647	0.0009	409	13	404	5
PM11-1-02	0.5123	0.0330	0.0676	0.0013	420	22	421	8
PM11-1-03	0.4631	0.0262	0.0617	0.0011	386	18	386	6
PM11-1-04	0.5147	0.0340	0.0664	0.0013	422	23	414	8
PM11-1-05	0.5176	0.0282	0.0665	0.0011	424	19	415	7
PM11-1-07	1.4660	0.0259	0.0673	0.0008	917	11	420	5
PM11-1-09	0.5177	0.0284	0.0663	0.0011	424	19	414	7
PM11-1-12	0.7076	0.0245	0.0679	0.0009	543	15	423	6
PM11-1-13	0.6480	0.0422	0.0670	0.0014	507	26	418	8
PM11-1-14	0.8145	0.0180	0.0584	0.0007	605	10	366	4
PM11-1-15	0.4547	0.0278	0.0599	0.0011	381	19	375	7
PM11-1-16	1.7436	0.1007	0.0676	0.0019	1025	37	422	12
PM11-1-19	0.4503	0.0132	0.0603	0.0007	378	9	377	4
PM11-1-21	0.5177	0.0282	0.0680	0.0011	424	19	424	7
PM11-1-22	0.5121	0.0235	0.0661	0.0010	420	16	413	6
PM11-1-23	0.6814	0.0149	0.0667	0.0008	528	9	416	5
PM11-1-24	0.5120	0.0247	0.0671	0.0010	420	17	418	6
PM11-1-25	0.5126	0.0156	0.0674	0.0008	420	10	420	5
PM11-1-26	0.4521	0.0269	0.0613	0.0011	379	19	383	6
PM11-1-31	0.5120	0.0166	0.0672	0.0008	420	11	419	5
PM11-1-32	0.5106	0.0213	0.0674	0.0010	419	14	421	6
PM11-1-34	0.5215	0.0366	0.0674	0.0014	426	24	421	8
PM11-1-35	0.5112	0.0332	0.0661	0.0013	419	22	413	8
PM11-1-36	0.5003	0.0323	0.0608	0.0012	412	22	381	7
D1028-1-01	0.5347	0.0130	0.0698	0.0008	435	9	435	5
D1028-1-02	0.5336	0.0106	0.0697	0.0008	434	7	434	5
D1028-1-03	0.5376	0.0145	0.0697	0.0008	437	10	434	5
D1028-1-04	0.5340	0.0128	0.0697	0.0008	434	8	434	5

续表 2

分析编号	同位素比值				年龄(Ma)			
	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	±1σ	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	±1σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	±1σ	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	±1σ
D1028-1-05	0.5338	0.0091	0.0698	0.0007	434	6	435	4
D1028-1-06	0.5323	0.0196	0.0695	0.0009	433	13	433	6
D1028-1-07	1.2352	0.0165	0.1347	0.0014	817	8	815	8
D1028-1-08	0.5333	0.0098	0.0699	0.0008	434	6	436	4
D1028-1-09	0.5337	0.0122	0.0698	0.0008	434	8	435	5
D1028-1-10	0.5470	0.0130	0.0699	0.0008	443	9	436	5
D1028-1-11	0.5343	0.0171	0.0696	0.0009	435	11	434	5
D1028-1-12	0.5324	0.0331	0.0696	0.0013	433	22	434	8
D1028-1-13	0.5337	0.0106	0.0700	0.0008	434	7	436	5
D1028-1-14	0.5462	0.0105	0.0700	0.0008	443	7	436	5
D1028-1-15	0.5341	0.0186	0.0698	0.0009	435	12	435	6
D1028-1-16	0.5557	0.0145	0.0699	0.0008	449	9	435	5
D1028-1-17	0.6938	0.0345	0.0758	0.0013	535	21	471	8
D1028-1-18	0.5727	0.0199	0.0666	0.0009	460	13	415	5
D1028-1-19	0.5620	0.0147	0.0737	0.0009	453	10	458	5
D1028-1-20	0.5339	0.0103	0.0698	0.0008	434	7	435	5
D1028-1-21	0.5480	0.0127	0.0697	0.0008	444	8	435	5
D1028-1-22	0.5353	0.0159	0.0696	0.0009	435	11	434	5
D1028-1-23	0.5685	0.0206	0.0735	0.0010	457	13	457	6
D1028-1-24	0.5627	0.0341	0.0695	0.0013	453	22	433	8
D1028-1-25	0.5365	0.0138	0.0699	0.0008	436	9	435	5
D1028-1-26	0.5392	0.0102	0.0698	0.0008	438	7	435	5
D1028-1-27	0.5698	0.0151	0.0683	0.0008	458	10	426	5
D1028-1-28	0.5355	0.0182	0.0700	0.0009	436	12	436	6
D1028-1-29	0.5338	0.0105	0.0698	0.0008	434	7	435	5
D1028-1-30	0.5585	0.0222	0.0686	0.0010	451	14	428	6
D1506-1-01	0.5447	0.0160	0.0705	0.0008	442	11	439	5
D1506-1-02	0.5424	0.0142	0.0705	0.0008	440	9	439	5
D1506-1-03	1.2068	0.0392	0.1283	0.0017	804	18	778	10
D1506-1-04	0.5434	0.0278	0.0704	0.0011	441	18	438	7
D1506-1-05	0.5433	0.0251	0.0702	0.0011	441	16	438	6
D1506-1-06	0.5322	0.0203	0.0697	0.0009	433	13	434	6
D1506-1-07	0.6167	0.0191	0.0780	0.0009	488	12	484	6
D1506-1-08	0.5512	0.0140	0.0700	0.0008	446	9	436	5
D1506-1-09	0.4884	0.0465	0.0642	0.0016	404	32	401	10
D1506-1-12	0.5339	0.0473	0.0701	0.0017	434	31	437	10
D1506-1-13	0.5396	0.0180	0.0702	0.0009	438	12	437	5
D1506-1-14	0.4903	0.0156	0.0636	0.0008	405	11	397	5
D1506-1-15	0.4924	0.0347	0.0643	0.0013	407	24	402	8
D1506-1-16	0.5400	0.0195	0.0702	0.0009	438	13	437	5
D1506-1-17	0.5394	0.0224	0.0702	0.0010	438	15	438	6
D1506-1-21	0.5483	0.0146	0.0699	0.0008	444	10	435	5
D1506-1-22	0.5685	0.0226	0.0734	0.0010	457	15	457	6
D1506-1-23	0.5486	0.0149	0.0698	0.0008	444	10	435	5
D1506-1-24	0.5420	0.0227	0.0705	0.0010	440	15	439	6
D1506-1-25	0.5419	0.0164	0.0704	0.0008	440	11	439	5
D1506-1-28	0.5384	0.0247	0.0703	0.0011	437	16	438	6
D1506-1-29	0.5390	0.0174	0.0702	0.0009	438	12	437	5
D1506-1-30	0.5396	0.0238	0.0702	0.0010	438	16	438	6

龄为  $418.4 \pm 3.0$  Ma (MSWD=0.30) (图 7b), 时代为早泥盆世, 代表了花岗斑岩的结晶年龄。

二长花岗岩(D1028-1)样品中共测试了 30 颗锆

石 (图 6c), 其中 5 个测点(7、17、18、19、23)年龄数据偏大或偏小, 未参与平均年龄计算; 从测试得到的同位素比值和年龄数据(表 2)来看, 其余 25 个测点

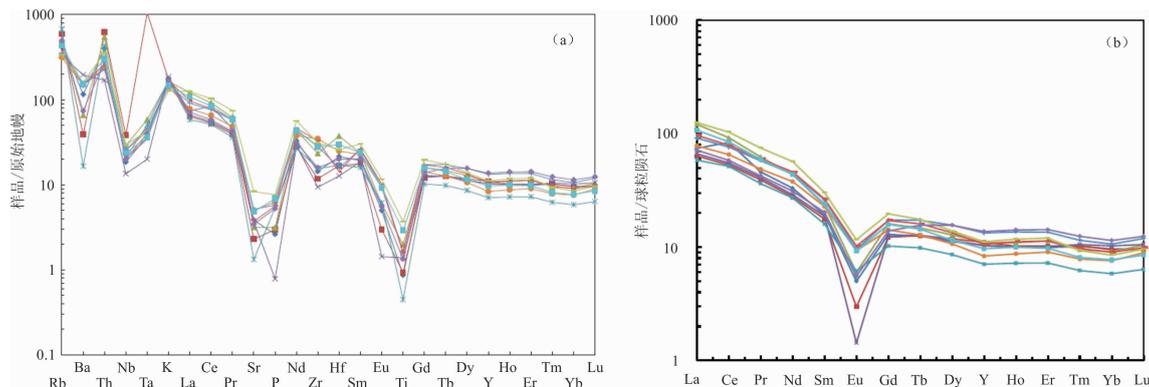


图5 柴达木山花岗岩微量元素原始地幔标准化(a)及稀土元素球粒陨石标准化图解(b)  
(原始地幔及球粒陨石标准化数值据 Sun et al., 1989)

Fig. 5 Primitive mantle-normalized trace element concentrations and rare earth element chondrite-normalized distribution pattern of Chaidamushan granite(primitive mantle and chondrite data from Sun et al., 1989)



图6 柴达木山花岗岩单颗粒锆石的阴极发光(CL)图像及其表面年龄(Ma)(a. D3755-1;b. PM11-1;c. D1028-1;d. D1506-1)  
Fig. 6 CL images and apparent ages (Ma) of single-grain zircon in Chaidamushan granite  
(a. D3755-1;b. PM11-1;c. D1028-1;d. D1506-1)

的<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 年龄范围为 426~436Ma,其加权平均年龄为 434.3±2.0Ma(MSWD=0.21)(图 7c),时代为早志留世,代表了二长花岗岩的结晶年龄。

花岗闪长岩(D1506-1)样品中共测试了 23 颗锆石(图 6d),其中 6 个测点(3,7,9,14,15,22)年龄数据偏大或偏小,未参与平均年龄计算;从测试得到的同位素比值和年龄数据(表 2)来看,其余 17 个测点的<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 年龄范围为 434~439Ma,其加权平均年龄为 437.2±2.6Ma(MSWD=0.076)(图 7d),时代

为早志留世,代表了花岗闪长岩的结晶年龄。

综上所述,柴达木山岩体花岗岩的形成具有多期性,地质时期为早志留世—早泥盆世。

## 5 讨论

### 5.1 岩石成因类型

I、S、A 及较为少见的 M 型是目前最常用的花岗岩成因分类方案,当它们经历高度分异结晶作用之后,其矿物组成和化学成分都趋近于低共结的花

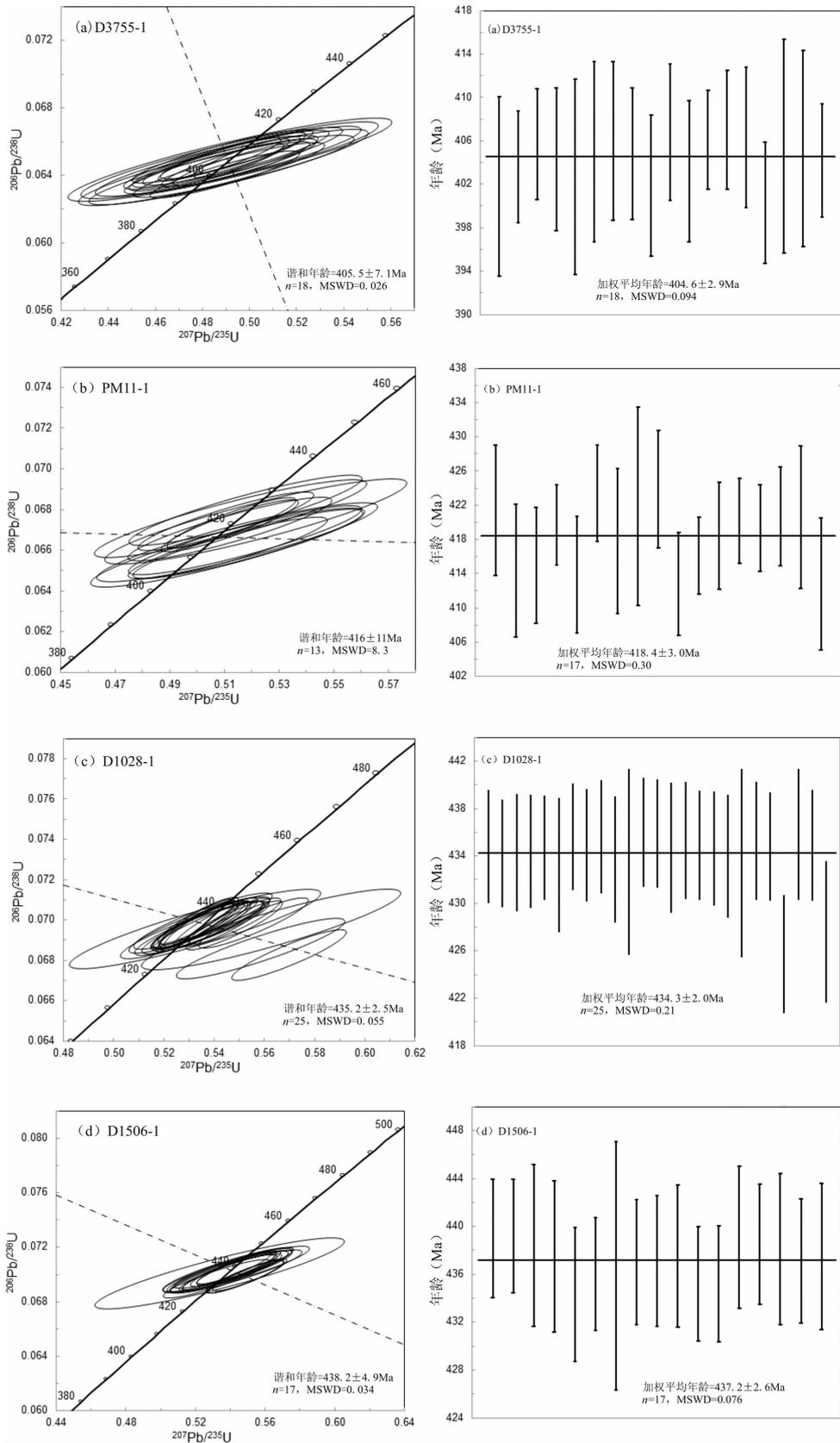


图 7 柴达木山花岗岩 U-Pb 年龄谐和图及  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄(a. D3755-1;b. PM11-1;c. D1028-1;d. D1506-1)  
 Fig. 7 Concordia diagram of U-Pb zircon dating result and  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  weighted mean ages of zircons for samples from Chaidamushan granite(a. D3755-1;b. PM11-1;c. D1028-1;d. D1506-1)

岗岩,从而使得上述三类型的鉴定出现困难,甚至不可能;强过铝质特征( $A/CNK$ 值 $>1.1$ )是S型花岗岩重要地球化学判断指标之一,但这一指标可能并不适用于高分异花岗岩(Wu Fuyuan et al., 2007)。Lu Xinxiang et al. (2007)及 Hu Nenggao et al. (2008)研究柴达木山岩体组成部分塔塔楞环斑花岗岩时认为该岩体为A型花岗岩,其依据 $10^4 \times Ga/Al$ 值大于2.6; Wu Cailai et al. (2001)、Zhu Xiaohui et al. (2016)及 Fu Yanwen et al. (2018)认为柴达木山花岗岩体具有S型花岗岩矿物组合及岩石地球化学特征; Wu Cailai et al. (2007)研究柴北缘大柴旦地区古生代花岗岩时,其中有2个样品来自柴达木山岩体,认为其属于I类具有S型花岗岩属性。本文地球化学数据显示柴达木山花岗岩具有:岩石的 $SiO_2$ 含量高, $K_2O/Na_2O > 1$ ,低 $MgO$ 和高 $K_2O$ 特征; $A/CNK > 1$ ,显示过铝质的特征;轻、重稀土分馏程度低, $(La/Yb)_N$ 比值为 $5.88 \sim 13.84$ ,具明显的Eu负异常( $\delta Eu = 0.09 \sim 0.50$ );其特征与柴达木山岩体中部、西南部似斑状二长花岗岩具有富钾弱过铝质S型花岗岩相一致(Fu Yanwen et al., 2018; Zhu Xiaohui et al., 2016; Wu Cailai et al., 2001a),也与东南部A型环斑花岗岩高钾、富LREE和Eu亏损特征相似(Hu Nenggao et al., 2008),而柴北缘超高压变质带内西北段的赛什腾山、噶崂山岩体具有I型花岗岩特征(Wu Cailai et al., 2001b, 2008, 2002, 2009; Xin Cunlin et al., 2016)。综合前人研究柴达木山岩体地球化学特征都显示具有高硅、高钾、准铝质-过铝质的特征,但未考虑高分异结晶作用的影响,因此柴达木山花岗岩体的岩石成因类型有待重新认识。

角闪石、堇青石和碱性暗色矿物是判断上述三大类型花岗岩的重要矿物学标志,而白云母和石榴石并不是鉴定S型花岗岩的有效标志(Miller, 1985)。本文所采集样品的矿物中没有典型的堇青石和碱性暗色矿物,但有少量的角闪石(约5%),支持其可能为I型花岗岩。岩石具有高 $SiO_2$ ( $67.11\% \sim 78.17\%$ ),分异指数DI为 $84.74\% \sim 97.48$ , $P_2O_5$ 、 $TiO_2$ 、 $MgO$ 含量较低,且随着 $SiO_2$ 的含量增加而呈减少趋势,具明显的Eu负异常,在微量元素原始地幔标准化蛛网图上Ba、Nb、Ta、Sr、P和Ti显示明显负异常,因此柴达木山花岗岩体具有高分异I型花岗岩特征。

## 5.2 构造意义

如前所述前人对柴北缘高压(HP)-超高压

(UHP)变质带进行了大量的研究,变质带主要由花岗质片麻岩和泥质片麻岩构成,片麻岩中常夹有数量不等的榴辉岩和超镁铁岩的岩块,这些岩石遭受早期( $476 \sim 445Ma$ )和晚期( $440 \sim 421Ma$ )高压-超高压变质作用(Xia Linqi et al., 2016)。同时前人对柴北缘高压变质带内及其周缘的古生代花岗岩类进行了部分研究,以吴才来等人的研究最为系统。吴才来等基于对柴北缘赛什腾山、团鱼山、噶崂山、大柴旦地区、都兰野马滩等花岗岩的研究,并结合整个柴北缘区域地质背景和超高压研究,认为柴北缘早古生代花岗质岩浆活动至少有4期:第1期以赛什腾山-噶崂山I型花岗岩为代表,岩浆活动时代为 $470Ma$ 左右,构造环境为岛弧环境(Wu Cailai et al., 2001a, 2008);第2期以柴达木山S型花岗岩为代表,岩浆活动时代为 $445Ma$ 左右,Hf同位素分析原岩来自柴达木板块基底下地壳(Zhou Bin et al., 2013),构造环境为陆陆碰撞阶段(Wu Cailai et al., 2001b, 2007; Zhou Bin et al., 2013);第3期以都兰野马滩花岗岩为代表,既具有I型花岗岩的部分特征,又具有S型花岗岩的部分特征,岩浆活动时代为 $400Ma$ 左右,构造环境是碰撞后板块折返阶段(Wu Cailai et al., 2004a, 2004b);第4期岩浆活动形成的花岗岩地球化学特点同第3期即具有S和I型两种属性,以噶崂河、大柴旦地区、都兰花岗岩为代表,说明在晚泥盆世( $372 \sim 375Ma$ ),造山带上不同地方不同的源岩部分熔融形成了不同类型的花岗质岩浆,其构造环境是继板块碰撞隆起后造山带块体之间的均衡调整(伸展、滑塌)阶段(Wu Cailai et al., 2006, 2007, 2008)。另外, Lu Xinxiang et al. (2007)对柴达木山岩体东南侧塔塔楞环斑花岗岩测得其年龄为 $440 \pm 14Ma$ ,认为其形成于造山运动由挤压造山向后碰撞拉张体制的转折构造环境,代表了加里东运动的终结。Meng Fancong et al. (2005, 2008)获得柴北缘锡铁山地区花岗岩年龄 $428 \pm 1Ma$ ,具有I型特征,是早古生代碰撞后伸展环境产物;获得绿梁山花岗岩的年龄为 $430 \pm 8Ma$ ,认为围岩片麻岩可能为花岗岩的主要源岩,花岗岩形成时代与片麻岩变质时代的一致性( $430Ma$ ),反映了它们为同一区域构造热事件的产物,是俯冲陆壳发生热松弛的记录。Yu Shengyao et al. (2011)研究得出柴北缘都兰地区早期英云闪长岩侵位时代为 $432Ma \sim 434Ma$ ,类似于埃达克质岩石;晚期花岗岩的结晶时代为 $382Ma \sim 391Ma$ ,显示出类似于S型花岗岩,推断可能形成于后碰撞造山伸展作用阶段,可能是由其围

表 3 柴北缘古生代花岗岩类年龄数据

Table 3 Compiled age data on Paleozoic granites in the North Qaidam

序号	岩石类型	位置	年龄/Ma	方法	资料来源
1	花岗岩	嗽崂山岩体,大柴旦	473±15	锆石 U-Pb SHRIMP	Wu Cailai et al., 2004
2	花岗岩	野马滩岩体,都兰县	397±4.2		
3	花岗岩	柴达木山岩体,大柴旦	446±10		
4	眼球状花岗岩	柴达木山岩体,大柴旦	436.9±2.8	锆石 U-Pb LA-ICP-MS	Zhou Bin et al., 2013
5	花岗闪长岩		440.8±7.3		
6	花岗闪长岩	铁石观岩体,大柴旦南东 40km	422.0±6.4	锆石 U-Pb LA-ICP-MS	Zhou Bin et al., 2014
7	花岗岩	柴达木山岩体,大柴旦	456.2±3	锆石 U-Pb LA-ICP-MS	Zhu Xiaohui et al., 2016
8	花岗岩		437.2±1.5		
9	花岗岩	柴达木山,大柴旦	446.3±3.9	锆石 U-Pb SHRIMP	Wu Cailai et al., 2007
10	花岗岩	绿梁山岩体(北部),大柴旦	408.6±4.4		
11	花岗闪长岩	绿梁山岩体(南部),大柴旦	403.3±3.8		
12	花岗闪长岩	依克达木湖,大柴旦	402±3		
13	花岗岩	巴嘎柴达木湖南,大柴旦	374.5±1.6		
14	花岗闪长岩	大头羊沟,大柴旦	372.0±2.7		
15	花岗岩	绿梁山岩体,大柴旦	431±8	锆石 U-Pb SHRIMP	Meng Fancong et al., 2008
16	花岗闪长岩	团鱼山,柴北缘西段	469.7±4.6	锆石 U-Pb SHRIMP	Wu Cailai et al., 2009
17	花岗岩	赛什腾山,柴北缘西段	465.4±3.5		
18	花岗岩	团鱼山,柴北缘西段	443.5±3.6		
19	石英闪长岩	嗽崂河,柴北缘西段	372.1±2.6		
20	花岗岩	锡铁山岩体	428±1	锆石 U-Pb TIMS	Meng Fancong et al., 2005
21	环斑花岗岩	塔塔楞河岩体,大柴旦	440±14	锆石 U-Pb SHRIMP	Lu Xinxiang et al., 2007
22	英云闪长岩	野马滩西,都兰县	432±1	锆石 U-Pb LA-ICP-MS	Yu Shengyao et al., 2011
23	英云闪长岩		434±1		
24	花岗岩		391±5		
25	花岗岩		382±2		
26	花岗岩	野马滩东,都兰县	406.6±3.5	锆石 U-Pb SHRIMP	Wu Cailai et al., 2014
27	花岗闪长岩	巴立给哈滩西,都兰县	407.3±8.3	锆石 U-Pb SHRIMP	
28	花岗岩		397.0±6.0		
29	花岗闪长岩	水文站北,都兰县	404.5±4.0	锆石 U-Pb SHRIMP	
30	花岗岩	水文站南,都兰县	397.0±3.7		
31	石英闪长岩	察察公麻西,都兰县	380.5±5.0	锆石 U-Pb SHRIMP	
32	花岗岩		382.5±3.6		
33	花岗闪长岩	372.5±2.8			
34	二长花岗岩	塔塔楞河中上游,大柴旦	440.4±1.4	锆石 U-Pb LA-ICP-MS	Fu Yanwen et al., 2018
35	花岗斑岩	柴旦木山岩体,大柴旦	404.6±2.9	锆石 U-Pb SHRIMP	本文
36	花岗斑岩		418.4±3.0		
37	二长花岗岩		434.3±2.0		
38	花岗闪长岩		437.2±2.6		

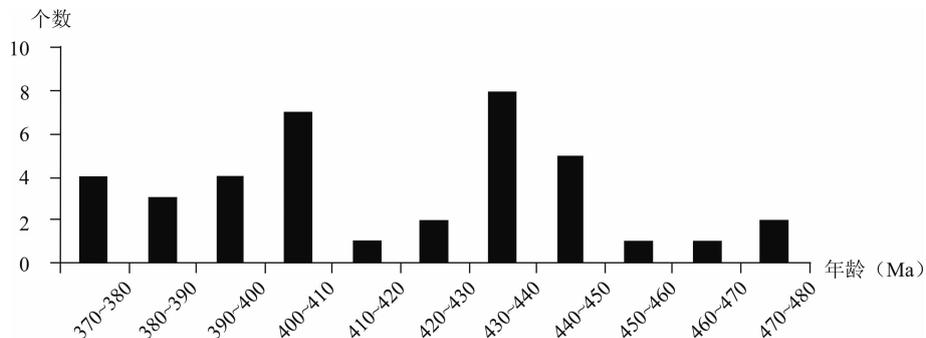


图 8 祁连南缘-柴北缘古生代花岗岩类年龄统计分析图

Fig. 8 Age statistical analysis of Paleozoic granitoids in the south margin of Qilianshan-North Qaidam

岩富铝质片麻岩部分熔融形成,并可能有少量地幔物质的添加。Zhou Bin et al. (2014)认为柴北缘中西段大柴旦镇东南铁石观岩体具I型及埃达克岩特点,形成时代为 $422.0 \pm 6.4$  Ma,形成于大陆后碰撞造山阶段,为加厚陆壳重熔形成。Zhu Xiaohui et al. (2016)获得柴达木山岩体似斑状二长花岗岩形成时代为 $456.2 \pm 3$  Ma,为同碰撞环境;二长花岗岩形成时代为 $437.2 \pm 1.5$  Ma,环境为伸展背景,认为该岩体是一个挤压到伸展等多种构造体制下形成的岩体。

综上所述,祁连南缘-柴北缘岩浆活动与高压-超高压变质作用密切相关,收集前人对柴北缘古生代花岗岩类研究位置及年龄测定结果,见表3。对38个年龄统计分析(图8),祁连南缘-柴北缘早古生代岩浆活动持续时间长(372~473 Ma),具有多期次,主要年龄段为5期:450~470 Ma、430~450 Ma、410~430 Ma、400~410 Ma、370~400 Ma,其中430~450 Ma、400~410 Ma分别代表了花岗岩类侵入的两个主峰期。岩浆侵入早期阶段(430~470 Ma)比早期高压-超高压变质作用(476~445 Ma)稍晚或近于同期,反映了早奥陶世南祁连洋板块向北俯冲于祁连陆块之下(约473 Ma),到柴达木陆块的继续俯冲,祁连陆块由北向南逆冲到柴达木陆块之上形成了陆陆碰撞带(约446 Ma)(Wu Cailai et al., 2004b),一系列持续的岩浆侵入活动;岩浆侵入晚期阶段(370~430 Ma)比晚期高压-超高压变质作用(440~421 Ma)晚10~50 Ma,反映了柴达木陆块与中南祁连板块碰撞后深俯冲板块拆沉-折返及碰撞后造山带上不同块体之间的伸展、滑塌等一系列岩浆侵入活动。在空间分布上,柴北缘赛什腾山-噶崂山代表了岩浆早期活动,主要为I型花岗岩;绿梁山-大柴旦-锡铁山-都兰一带,代表了岩浆晚期活动,具有I和S型花岗岩特征。柴达木山岩体代表了祁连南缘岩浆多期活动,具有I型花岗岩特征,与柴北缘岩浆活动具有同时性。

## 6 结论

(1)柴达木山花岗岩岩体 $\text{SiO}_2$ 含量为67.11%~78.17%,变化范围较大,且分异指数DI为84.74~97.48,具高分异花岗岩特征; $\text{P}_2\text{O}_5$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{MgO}$ 含量较低,且随着 $\text{SiO}_2$ 的含量增加而呈减少趋势。 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值变化为1.11~4.41,里特曼指数 $\sigma$ 介于1.31~2.20,反映其为钙碱性系列。地球化学结果显示,柴达木山花岗岩为高钾钙碱性过铝质高

分异I型花岗岩。在球粒陨石标准化稀土元素配分图解中,岩石表现出轻稀土LREE富集、HREE亏损且明显Eu为负异常的右倾型配分模式特征。

(2)柴达木山花岗岩4个样品的LA-ICP-MS锆石U-Pb测年,结果表明花岗岩的结晶年龄至少为404.6~437.2 Ma,柴达木山花岗岩侵入岩形成的地质时期为早志留世-早泥盆世。

(3)柴北缘岩浆活动与高压-超高压变质作用密切相关,结合前人研究成果,祁连南缘-柴北缘古生代岩浆活动持续时间长(372~473 Ma),具有多期次,主要年龄段为450~470 Ma、430~450 Ma、410~430 Ma、400~410 Ma、370~400 Ma,其中430~450 Ma、400~410 Ma分别代表了花岗岩类侵入的两个主峰期。岩浆侵入早期阶段(430~470 Ma)反映了早奥陶世南祁连洋板块向北俯冲于祁连陆块之下,到柴达木陆块的继续俯冲,祁连陆块由北向南逆冲到柴达木陆块之上形成了陆陆碰撞带一系列持续的岩浆侵入活动;岩浆侵入晚期阶段(370~430 Ma)反映了柴达木陆块与中南祁连板块碰撞后深俯冲板块拆沉-折返及碰撞后造山带上不同块体之间的伸展、滑塌等一系列岩浆侵入活动。

**致谢:**感谢编辑部老师的认真修改以及审稿人的宝贵意见,并对中国煤炭地质总局航测遥感局各位项目野外工作人员提供的地质信息及积极认真的探讨表示诚挚的感谢!

## References

- Fu Yanwen, Yu Fuchen, Lu Yongzhuo, Tian Yongge. 2018. Geochemical and Chronological Characteristics of Early Silurian Granitic Rocks from the Upper-middle Reaches of Tataleng River in Qinghai. *Northwestern Geology*, 51(2): 46~56 (in Chinese with English abstract).
- Peccerillo Angelo, Taylor S R. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey. *Contrib. Mineral. Petrol.* 58, 63~81.
- Hu Nenggao, Wang Xiaoxia, Sun Yangui, Lin Wei, Shen Wenhuan, Chen Yunjie. 2008. Petrography and geochemistry of the Tataleng rapakivi granite on the northern margin of the Qaidam basin, northwestern China. *Geological Bulletin of China*, 27(11): 1923~1932 (in Chinese with English abstract).
- Cox K C, Bell J D, Pankhurst R J. 1979. *The Interpretation of Igneous Rocks*. London; U. K.: Allen & Unwin.
- Lu Songnian, Wang Huichu, Li Huaikun, Yuan Guibang, Xin Houtian, Zheng Jiankang. 2002. Redefinition of the "Dakendaban Group" on the northern margin of the Qaidam basin. *Geological Bulletin of China*, 21(1): 19~23 (in Chinese with English abstract).
- Lu Xinxiang, Sun Yangui, Zhang Xueting, Xiao Qinghui, Wang Xiaoxia, Wei Xiangdong, Gu Demin. 2007. The SHRIMP age of Tatalin rapakivi granite at the north margin of Qaidam basin. *Acta Geologica Sinica*, 81(5): 626~634 (in Chinese with English abstract).
- Ludwig K R. 1993. PBDAT. A computer program for processing Pb-U-Th isotope data. Version 1. 24. United State Geological

- Survey Open File Report 88~542, USA, 34.
- Maniar P D, Piccoll P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids. *Geological Society of America Bulletin*, 101: 635~643.
- Niu Manlan, Zhao Qiqi, Wu Qi, Li Xiucui, Yan Zhen, Li Jiliang, Sun Yi, Yuan Xiaoyu. 2018. Magma mixing identified in the Guokeshan pluton, northern margin of the Qaidam basin; Evidences from petrography, mineral chemistry, and whole-rock geochemistry. *Acta Petrologica Sinica*, 34(7): 1991~2016 (in Chinese with English abstract).
- Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. 1984. Trace Element Discrimination Diagrams for the Tectonic Interpretation of Granitic Rocks. *Journal of Petrology*, 25(4): 956~983.
- Song Shuguang, Yang Jingsui, Liou J G, Wu Cailai, Shi Rendeng and Xu Zhiqin. 2003. Petrology, geochemistry and isotopic ages of eclogites from the Dulan UHPM terrane, the North Qaidam, NW China. *Lithos*, 70: 195~211.
- Song Shuguang, Zhang Lifei, Niu Y, Song Biao, Liu Dunyi. 2004. Early Paleozoic plate-tectonic evolution and deep continental subduction on the northern margin of the Qinghai-Tibet Plateau. *Geological Bulletin of China*, 23(9-10): 918~925 (in Chinese with English abstract).
- Song Shuguang, Niu Yaoling, Zhang Lifei, Zhang Guibing. 2009. Time constraints on orogenesis from oceanic subduction to continental subduction, collision, and exhumation; An example from North Qilian and North Qaidam HP-UHP belts. *Acta Petrologica Sinica*, 25(9): 2067~2077 (in Chinese with English abstract).
- Sun Xiaopan, Xu Xueyi, Chen Junlu, Gao Ting, Li Ting, Li Xianbin, Li Xiaoying. 2013. Geochemical Characteristics and Chronology of the Jiangligou Granitic Pluton in West Qinling and Their Geological Significance. *Acta Geologica Sinica*, 87(3): 330~342 (in Chinese with English abstract).
- Wiedenbeck M, Alle P, Corfu F, Griffin W L, Meier M, Oberli F, Von Quadt A, Roddick J C, Spiegel W. 1995. Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace element and REE analyses. *Geostandards Newsletter*, 19(1): 1~23.
- Wu Cailai, Yang Jingsui, Wooden J, Liou J G, Li Haibing, Meng Fancong, Persing H, Meibom A. 2001a. Zircon SHRIMP dating of Chaidamushan granite. *Chinese Sci Bull*, 46(20): 1743~1747 (in Chinese with English abstract).
- Wu Cailai, Yang Jingsui, Ireland T, Wooden J, Li Haibing, Wan Yusheng and Shi Rendeng. 2001b. Zircon SHRIMP ages of Aolaoshan granite from the south margin of Qilianshan and its geological significance. *Acta Petrologica Sinica*, 17(2): 215~221 (in Chinese with English abstract).
- Wu Cailai, Yang Jingsui, Wooden J L, Shi Rendeng, Chen Songyong, Meibom A, Mattinson C. 2004a. Zircon SHRIMP dating of Yematan granite in Dulan in the northern margin of Qaidam. *Chinese Sci Bull*, 49(16): 1667~1672 (in Chinese with English abstract).
- Wu Cailai, Yang Jingsui, Xu Zhiqin, Joseph L. Wooden J L, Ireland T, Li Haibing, Shi Rendeng, Meng Fancong, Chen Songyong, Persing H, Meibom A. 2004b. Granitic magmatism on the Early Paleozoic UHP belt of Northern Qaidam, NW China. *Acta Geologica Sinica*, 78(5): 658~674 (in Chinese with English abstract).
- Wu Cailai, Wooden J L, Yang Jingsui, Robinson P T, Zheng Lingsen, Shi Rendeng, Chen Songyong. 2006. Granitic magmatism in the North Qaidam Early Paleozoic ultrahigh-pressure metamorphic belt, Northwest China. *International Geology Review*, 48: 223~240.
- Wu Cailai, Gao Yuanhong, Wu Suoping, Wooden J L, Mazadab F K, Mattinson C. 2007. Zircon SHRIMP U-Pb dating of granites from the Daqaidam area in the north margin of Qaidam basin, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 23(8): 1861~1875 (in Chinese with English abstract).
- Wu Cailai, Gao Yuanhong, Wu Suoping, Chen Qilong, Wooden J L, Mazadab F K, Mattinson C. 2008. Geochemistry and zircon SHRIMP U-Pb dating of granitoids from the west segment in the North Qaidam. *Science China (Ser. D)*, 38(8): 930~949 (in Chinese with English abstract).
- Wu Cailai, Wooden J L, Robinson P T, Gao Yuanhong, Wu Suoping, Chen Qilong, Mazadab F K, Mattinson C. 2009. Geochemistry and zircon SHRIMP U-Pb dating of granitoids from the west segment in the North Qaidam. *Science China (Ser. D)*, 52: 1771~1790.
- Wu Cailai, Gao Yuanhong, Li Zhaoli, Lei Min, Qin Haipeng, Li Minze, Liu Chunhua, Frost R B, Robinson P T, Wooden J L. 2014. Zircon SHRIMP U-Pb dating of granites from Dulan and the chronological framework of the North Qaidam UHP belt, NW China. *Science China (Ser. D)*, 57(12): 2945~2965.
- Wu Cailai, Lei Min, Wu Di, Li Tianxiao. 2016. Zircon SHRIMP Dating and Genesis of Granites in Wulan Area of Northern Qaidam. *Acta Geoscientia Sinica*, 37(4): 493~516 (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 with English abstract).
- Xia Linqi, Li Xiangmin, Yu Jiyuan, Wang Guoqiang. 2016. Mid-Late Neoproterozoic to Early Paleozoic volcanism and tectonic evolution of the Qilian Mountain. *Geology in China*, 43(4): 1087~1138 (in Chinese with English abstract).
- Xin Cunlin, Xie Qinghao, Dong Kai, Liao Jiandong. 2016. Geochemical characteristics of early Paleozoic granites in the Saishiteng Mountain, Qinghai province and their significance. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 35(5): 908~916 (in Chinese with English abstract).
- Yang Jingsui, Song Shuguang, Xu Zhiqin, Wu Cailai, Shi Rendeng, Zhang Jianxin, Li Haibing, Wan Yusheng, Liu Yan, Qiu Haijun, Liu Fulai, Shigenori Maruyama. 2001. Discovery of coesite in the north Qaidam Early Paleozoic ultrahigh-pressure(UHP-HP) metamorphic belt, NW China. *Acta Geologica Sinica*, 75(2): 175~179 (in Chinese with English abstract).
- Yu Shengyao, Zhang Jianxin, Del Real P G. 2012. Geochemistry and zircon U - Pb ages of adakitic rocks from the Dulan area of the North Qaidam UHP terrane, north Tibet: Constraints on the timing and nature of regional tectonothermal events associated with collisional orogeny. *Gondwana Research*, 21(1): 167~179.
- Yuan Honglin, Wu Fuyuan, Gao Shan, Liu Xiaoming, Xu Ping, Sun Youde. LA-ICP-MS zircon U-Pb age and REE of Cenozoic pluton in NE China. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(14): 1511~1520 (in Chinese).
- Zhang Guibin, Zhang Lifei, Song Shuguang. 2012. An Overview of the Tectonic Evolution of North Qaidam UHPM Belt; from Oceanic Subduction to Continental Collision. *Geological Journal of China Universities*, 18(1): 28~40 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Bin, Zheng Youye, Xu Rongke, Wang Yongkai, Zhang Xiaopeng, Wu Liang. 2013. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating and Hf isotope geochemical characteristics of Qaidamshan intrusive body. *Geological Bulletin of China*, 32(7): 1027~1034 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Bin, Zheng Youye, Tong Haikui, Xu Rongke, Nie Xiaoliang, Ma Chao, Liu Qian. 2014. Zircon dating of early Paleozoic adakitic granite on the Northern margin of Qaidam basin and its geological significance. *Geoscience*, 28(5): 875~883 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Xiaohui, Wang Hongliang, Yang Meng. 2016. Zircon U-Pb age of the monzogranite from the middle segment of the Qaidam Mountain composite granite on the south margin of the Qilian Mountain. *Geology in China*, 43(3): 751~767 (in Chinese with English abstract).

## 参 考 文 献

付彦文, 余福承, 逯永卓, 田永革. 2018. 青海塔塔棱河中上游地区

- 花岗岩地球化学和年代学研究. 西北地质, 51(2):46~56.
- 胡能高, 王晓霞, 孙延贵, 林伟, 申文环, 陈云杰. 2008. 柴达木盆地北缘塔塔楞环斑花岗岩的岩相学和地球化学特征. 地质通报, 27(11):1923~1932.
- 陆松年, 王惠初, 李怀坤, 袁桂邦, 辛后田, 郑健康. 2002. 柴达木盆地北缘“达肯达坂群”的再厘定. 地质通报, 21(1):19~23.
- 卢欣祥, 孙延贵, 张雪亭, 肖庆辉, 王晓霞, 尉向东, 谷德敏. 2007. 柴达木盆地北缘塔塔楞环斑花岗岩的 SHRIMP 年龄. 地质学报, 81(5):626~634.
- 孟繁聪, 张建新, 杨经绥. 2005. 柴北缘锡铁山早古生代 HP/UHP 变质作用后的构造热事件: 花岗岩和片麻岩的同位素与岩石地球化学证据. 岩石学报, 21(1):45~56.
- 孟繁聪, 张建新. 柴北缘绿梁山早古生代花岗岩浆作用与高温变质作用的同时性. 2008. 岩石学报, 24(7):1585~1594.
- 牛漫兰, 赵齐齐, 吴齐, 李秀财, 闫臻, 李继亮, 孙毅, 苑蒲宇. 2018. 柴北缘果山岩体的岩浆混合作用: 来自岩相学、矿物学和地球化学证据. 岩石学报, 34(7):1991~2016.
- 宋述光, 张立飞, Y. Niu, 宋彪, 刘墩一. 2004. 青藏高原北缘早古生代板块构造演化和大陆深俯冲. 地质通报, 23(9~10):918~925.
- 宋述光, 牛耀龄, 张立飞, 张贵宾. 2009. 大陆造山运动: 从大洋俯冲到大陆俯冲、碰撞、折返的时限—以祁连山、柴北缘为例. 岩石学报, 25(9):2067~2077.
- 孙小攀, 徐学义, 陈隽璐, 高婷, 李婷, 李现冰, 李晓英. 2013. 西秦岭江里沟花岗岩体地球化学特征、年代学及地质意义. 地质学报, 87(3):330~342.
- 吴才来, 杨经绥, J. Wooden, J. G. Liou, 李海兵, 孟繁聪, H. Persing, A. Meibom. 2001a. 柴达木山花岗岩锆石 SHRIMP 定年. 科学通报, 46(20):1743~1747.
- 吴才来, 杨经绥, Trevor IRELAND, Joe WOODEN, 李海兵, 万渝生, 史仁灯. 2001b. 祁连南缘墩山花岗岩 SHRIMP 锆石年龄及其地质意义. 岩石学报, 17(2):215~221.
- 吴才来, 杨经绥, Wooden JL, Shi RD, Chen SY, Meibom A and Mattinson CG. 2004a. 柴达木北缘都兰野马滩花岗岩锆石 SHRIMP 定年. 科学通报, 49(16):1667~1672.
- 吴才来, 杨经绥, 许志琴, Joseph L. WOODEN, Trevor IRELAND, 李海兵, 史仁灯, 孟繁聪, 陈松永, Harold PERSING, Anders MEIBOM. 2004b. 柴达木盆地北缘古生代超高压带中花岗岩质岩浆作用. 地质学报, 78(5):658~674.
- 吴才来, 郝源红, 吴锁平, Joseph L. WOODEN, Frank K. MAZADAB, Chris MATTINSON. 2007. 柴达木盆地北缘大柴旦地区古生代花岗岩锆石 SHRIMP 定年. 岩石学报, 23(8):1861~1875.
- 吴才来, 郝源红, 吴锁平, 陈其龙, Joseph L. Wooden, Frank K. Mazadab, Chris Mattinson. 2008. 柴北缘西段花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其岩石地球化学特征. 中国科学 D 辑: 地球科学, 38(8):930~949.
- 吴才来, 雷敏, 吴迪, 李天啸. 2016. 柴北缘乌兰地区花岗岩锆石 SHRIMP 定年及其成因. 地球学报, 37(4):493~516.
- 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.
- 夏林圻, 李向民, 余吉远, 王国强. 2016. 祁连山新元古代中-晚期至早古生代火山作用与构造演化. 中国地质, 43(4):1087~1138.
- 辛存林, 谢庆蒙, 董凯, 廖建栋. 2016. 青海赛什腾山早古生代花岗岩地球化学特征及意义. 矿物岩石地球化学通报, 35(5):908~916.
- 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. 柴北缘早古生代高压-超高压变质带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. 2010. 柴北缘都兰地区片麻岩的起源及形成时代: 锆石 U-Pb 年代学、REE 和 Hf 同位素的证据. 岩石学报, 26(7):2083~2098.
- 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.
- 袁洪林, 吴福元, 高山, 柳小明, 徐平, 孙德有. 2003. 东北地区新生代侵入体的锆石激光探针 U-Pb 年龄测定与稀土元素成分分析. 科学通报, 48(14):1511~1520.
- 张贵宾, 张立飞, 宋述光. 2012. 柴北缘超高压变质带: 从大洋到大陆的深俯冲过程. 高校地质学报, 18(1):28~40.
- 周宾, 郑有业, 许荣科, 王永开, 张小鹏, 吴亮. 2013. 青海柴达木山岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及 Hf 同位素特征. 地质通报, 32(7):1027~1034.
- 周宾, 郑有业, 董海奎, 许荣科, 袁晓亮, 马超, 刘茜. 2014. 柴北缘早古生代埃达克质花岗岩锆石定年及其地质意义. 现代地质, 28(5):875~883.
- 朱小辉, 王洪亮, 杨猛. 2016. 祁连南缘柴达木山复式花岗岩体中部二长花岗岩锆石 U-Pb 定年及其地质意义. 中国地质, 43(3):751~767.

## Petrology, geochemistry and zircon U-Pb geochronology of the Chaidamushan granite from the southern margin of Qilianshan

HE Xiaoyuan<sup>1,2)</sup>, YANG Xingke<sup>\*1,3)</sup>, WANG Yong<sup>2)</sup>, GUO Ruihua<sup>2)</sup>, LIAO Youyun<sup>2)</sup>, FAN Yuhai<sup>2)</sup>

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

2) Aerial Photogrammetry and Remote Sensing Bureau of China National Administration of Coal Geology, Xi'an, 710199;

3) Key Laboratory for the Study of Focused Magmatism and Giant Ore Deposits, MLR, Xi'an, 710054

\* Corresponding author: xky6105@chd.edu.cn

### Abstract

The Chaidamushan granite rock mass, in the Dachaidan Town, Qinghai Province, is mainly composed of porphyritic monzonitic granite, granite porphyry and rapakivi granite. Representative rocks were selected for main and trace element study and LA-ICP-MS zircon U-Pb geochronology to explain the magma genesis, tectonic setting and their significance. The results show that in the Chaidamushan granite the  $K_2O/Na_2O$  ratio changed from 1.11 to 4.41, the Litman index ranged between 1.31 to 2.20, A/CNK between 1.06 and 1.66, indicating a high potassium calc-alkaline, peraluminous and highly fractionated I-

type granite. In the primitive mantle-normalized trace element distribution pattern, they show different degrees of enrichment of large ion lithophile elements (LILE) Cs, Pb, K, etc. and light rare earth elements (LREE), relative loss of high field strength elements (HFSE) Y, Yb, has obvious negative anomalies of Ba, Nb, Ta, Sr, P and Ti. The total amount of rare earth elements is  $207.94 \times 10^{-6} \sim 418.40 \times 10^{-6}$ , the ratio of LREE/HREE is  $5.67 \sim 10.29$ , the ratio of  $(La/Yb)_N$  is  $5.88 \sim 13.84$ ,  $\delta Eu$  is  $0.09 \sim 0.50$ ,  $\delta Ce$  is  $0.99 \sim 1.36$ ,  $Sr/Y$  is  $0.87 \sim 3.47$ ,  $Rb/Sr$  is  $1.22 \sim 15.45$ ,  $K/Rb$  is  $0.01 \sim 0.02$ , and  $Nb/Ta$  is  $0.63 \sim 11.88$ . Rare earth element chondrite-normalized distribution pattern is characterized by the relative enrichment of light rare earths, the right-dip type of heavy rare earth relative loss, and negative Eu anomaly. Four samples were selected for LA-ICP-MS zircon U-Pb dating; the results showed that the granite porphyry in D3755-1  $^{206}Pb/^{238}U$  age ranged from 400 Ma to 407 Ma, and the weighted average age was  $404.6 \pm 2.9$  Ma (MSWD=0.094); in PM11-1  $^{206}Pb/^{238}U$  age ranged from 413 Ma to 424 Ma, with a weighted mean age of  $418.4 \pm 3.0$  Ma (MSWD=0.30); in monzonitic granite D1028-1  $^{206}Pb/^{238}U$  age ranged from 426 Ma to 436 Ma, with a weighted mean age of  $434.3 \pm 2.0$  Ma (MSWD=0.21); in granodiorite D1506-1  $^{206}Pb/^{238}U$  age ranged from 434 Ma to 439 Ma, with a weighted mean age of  $437.2 \pm 2.6$  Ma (MSWD=0.076), suggesting that the crystallization age of the Chaidamushan granite is between 437.2 Ma to 404.6 Ma i.e. from the Early Silurian to the Early Devonian. The magmatism in the southern margin of the Qilianshan-North Chaidam lasted for a long time (372~473 Ma), with multiple stages dated to 450~470 Ma, 430~450 Ma, 410~430 Ma, 400~410 Ma, 370~400 Ma, amongst which 430~450 Ma and 400~410 Ma represent the two main peak periods of granite intrusion closely related to the high-pressure or ultra-high pressure metamorphism. The early period (430~470 Ma) is a response to the northward subduction of the south-Qilian ocean plate beneath the Qilian block; as the Qaidam block continued to subduct, the Qilian block from the north to the south thrust over the Qaidam block to form a series of continuous magmatic intrusion activities in continent-continent collision zones. The late period (370~430 Ma) is a response to the deep subduction plate after the Qaidam block and the Qilian plate collided, were dismantled, and re-entered a series of magmatic intrusion activities in the stretching and sliding between different blocks. Spatial distribution of the Saishitengshan and the Aolaoshan in the northern margin of Chaidam represents the early magmatic activity, mainly I-type granite. The Luliangshan-Dachaidan-Xitieshan-Dulan area represents the late magmatic activity and has the characteristics of I- and S-type granites. The Chaidamushan rock mass represents the multi-stage magmatic activity in the southern margin of the Qilian, and is simultaneous with the magmatic activity of the northern margin of the Qaidam Basin.

**Key words:** Chaidamushan granite; LA-ICP-MS zircon U-Pb dating; south margin of Qilianshan; I-type; multi-stage