

柴达木盆地西北缘石英闪长岩的形成时代、 岩石成因及地质意义

辜平阳^{1,2}, 陈锐明², 查显锋², 董增产², 庄玉军², 查方勇¹, 李培庆²

(1. 长安大学 地球科学与资源学院, 西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710054; 2. 中国地质调查局西安地质调查中心 国土资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室, 陕西 西安 710054)

摘要: 柴达木盆地西北缘石英闪长岩 Al_2O_3 含量较高, 全碱(Alk)含量较低, $\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$, 铝饱和指数 A/CNK 为 $0.87 \sim 0.91$, 属钙碱性准铝质岩石系列。球粒陨石标准化的稀土元素配分曲线表现为轻稀土元素富集型, 轻、重稀土元素分馏明显, Eu 弱负异常; 微量元素地球化学特征显示, 岩石富集 Rb、Th、U 等大离子亲石元素, 亏损 Nb、Ta、P、Ti 等高场强元素, Nb/La 和 Rb/Nb 比值较低, 具有 I 型花岗岩的特征。石英闪长岩 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值较高($2.32 \sim 2.64$), 结合源岩判别图解综合推断其源于变玄武岩的部分熔融。全岩 Zr 饱和温度计算结果显示初始岩浆温度 $> 768^\circ\text{C}$; 岩石地球化学特征表明岩浆源区压力 $> 1.5 \text{ Ga}$, 源岩部分熔融的残留相可能为石榴子石 + 角闪石 + 金红石。经过锆石阴极发光分析和 MC-LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年, 获得 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 $252 \pm 1 \text{ Ma}$, 代表了柴达木盆地西北缘石英闪长岩的成岩年龄。结合区域地质演化特征, 认为该岩体形成于与板块俯冲有关的火山弧构造环境, 是晚二叠世末期宗务隆洋壳向柴北缘欧龙布鲁克地块俯冲, 变玄武岩在相对较高的温压条件下发生部分熔融形成的。

关键词: 柴达木盆地西北缘; 石英闪长岩; 锆石 U-Pb 测年; 岩石成因; 地质意义

中图分类号: P588.12⁺2; P597⁺.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2018)01-0019-15

The age, petrogenesis and geological significance of quartz diorite on the northwestern margin of Qaidam basin

GU Ping-yang^{1,2}, CHEN Rui-ming², ZHA Xian-feng², DONG Zeng-chan², ZHUANG Yu-jun²,
CHA Fang-yong¹ and LI Pei-qing²

(1. Earth Science & Resources College of Chang'an University, Key Laboratory of Western China's Mineral Resources and Geological Engineering, Ministry of Education, Xi'an 710054, China; 2. Key Laboratory for the Study of Focused Magmatism and Giant Ore Deposits, MLR, Xi'an Geological Survey Center, Xi'an 710054, China)

Abstract: The quartz diorite on the northwestern margin of Qaidam basin is characterized by high Al_2O_3 , low Alk and $\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$, with alumina saturation index A/CNK being $0.87 \sim 0.91$. These features suggest that this quartz diorite belongs to calc-alkaline peraluminous and metaluminous rocks. The chondrite-normalized REE show right-inclined patterns with slightly negative Eu anomaly, and the primitive mantle normalized trace element spidergrams are characterized by enriched LILE (such as Rb, Th and U), depleted HFSE (such as Nb, Ta, P and Ti), low Nb/La and Rb/Nb ratios, which are comparable with the characteristics of I-type granites. High $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ ($2.32 \sim 2.64$) ratios and diagrams show that the pluton was derived from remelting of the meta-

收稿日期: 2017-05-31; 接受日期: 2017-12-06

基金项目: 陕西省自然科学基金项目(2017JM4001); 中国地质调查局地质调查项目(1212011121193, DD20160014); 国家自然科学基金项目(41002063)

作者简介: 辜平阳(1982-), 男, 博士研究生, 主要从事构造地质学、地球化学研究, E-mail: pingyang-322@163.com。

morphic basalt in the lower crust. The initial temperature of magma was $>768^{\circ}\text{C}$ by using whole rock Zr thermometer. Rock geochemical characteristics indicate that the pressure of the source region was probably >1.5 Ga, and the residual facies was correspondingly garnet + amphibole + rutil. Combined with the cathodoluminescence (CL) images and element features of zircon, this study yielded an age of 252 ± 1 Ma for pluton using LA-ICP-MS zircon U-Pb dating. On the basis of regional geological evolution, the authors hold that Zongwulong oceanic crust subducted toward Oulongbuluke block in Late Permian.

Key words: northwestern margin of Qaidam; quartz diorite; zircon U-Pb dating; petrogenesis; geological significance

Fund support: Natural Science Foundation of Shaanxi Province (2017JM4001); Project of China Geological Survey(1212011121193, DD20160014); National Natural Science Foundation(41002063)

柴达木盆地北缘(柴北缘)处于南祁连地块与柴达木地块的拼合部位(Wang and Mo, 1995; 王惠初等, 2005),研究表明其为一构造复杂、物质组成多样、时间跨度大的多单元复合构造带(郭安林等, 2009)。由南向北主要由鱼卡河-沙柳河高压-超高压变质带、滩间山群火山-沉积岩系、欧龙布鲁克地块等组成(陆松年等, 2002; 王惠初等, 2005; 郭安林等, 2009)。随着研究程度的提高,绿梁山地区发现早古生代弧后盆地型蛇绿混杂岩(王惠初等, 2005; 朱小辉等, 2014)及原岩为大洋蛇绿岩的榴辉岩(Song *et al.*, 2006, 2009; Zhang *et al.*, 2008, 2009, 2010, 2013; 宋述光等, 2013),说明早古生代蛇绿岩也是柴北缘构造带的重要组成部分。由于经历了复杂的构造演化,柴北缘岩浆活动频繁,古元古代早期花岗质片麻岩代表了本区早期地壳增生(Lu *et al.*, 2002);中新元古代受 Rodinia 超大陆汇聚与裂解作用的影响,分别形成 S 型花岗岩和基性熔岩(Lu *et al.*, 2002, 郝国杰等, 2004);早古生代柴北缘经历了洋壳俯冲、陆块碰撞及后造山伸展等演化阶段(吴才来等, 2004, 2008; Wu *et al.*, 2009; 高晓峰等, 2011; 邱士东等, 2015),从而保存了一个较为完整的构造岩浆旋回(董增产等, 2014, 2015a, 2015b; 邱士东等, 2015)。晚古生代-中生代柴北缘进入板内造山阶段,岩浆岩分布面积相对较小,且较分散(郝国杰等, 2004; 辛后田等, 2006; 刘永顺等, 2010)。吴才来等(2001)对柴北缘西端冷湖二叠纪花岗岩进行了地球化学研究,指出早期花岗闪长岩的形成与柴达木板块和南祁连板块碰撞有关;晚期二长花岗岩形成于板块碰撞隆起环境。然而,柴北缘西段三岔沟一带中二叠世花岗岩被认为是陆内俯冲作用的产物(吴才来等, 2008)。最近,董增产等(2014, 2015a, 2015b)对柴达木盆地西北缘二长花岗

岩、花岗闪长岩及埃达克质花岗岩进行了详细的年代学、岩石地球化学研究,认为岩体产于火山弧构造环境,是晚古生代末期宗务隆洋盆向柴北缘欧龙布鲁克地块俯冲过程中形成的。由此可见,柴北缘二叠纪岩体形成的构造环境、成因机制存在很大争议,柴北缘晚古生代末期构造岩浆作用及其是否具有活动大陆边缘性质等问题需要进一步研究。

值得一提的是,近年来作者等在柴达木盆地西北缘开展 1:5 万区域地质调查时,从欧龙布鲁克地块古元古代结晶基底(达肯大阪岩群)中解体出大量二叠纪中酸性侵入岩(辜平阳等, 2016),为研究岩体成因机制提供了载体。鉴于此,本文选择柴达木盆地西北缘出露面积较大、捕掳体较少且未见报道的石英闪长岩为研究对象,试图通过详细的年代学、岩石学、岩石地球化学研究,确定该岩体形成时代及成因,结合区域地质背景讨论石英闪长岩形成的构造背景,为研究柴北缘晚古生代构造演化过程提供新的依据。

1 区域地质背景和岩体地质

研究区位于柴达木盆地西北缘青海冷湖北山,北部为北阿尔金寒武纪-奥陶纪红柳沟-拉配泉蛇绿构造混杂岩,南部被第四系冲洪积物覆盖(图 1a)。区内出露欧龙布鲁克地块基底变质岩系(古元古代达肯大阪岩群),主要由混合片麻岩段(Pt_1Dk^1)、条带状片麻岩段(Pt_1Dk^2)、片麻岩夹片岩段(Pt_1Dk^3)、片岩段(Pt_1Dk^4)等组成(查显锋等, 2013; 辜平阳等, 2016)。其中,混合片麻岩变质程度较高,原岩绝大部分遭到破坏,成为可以流动的熔体,但尚未均匀化,露头呈现浅色体和深色体相混合且不均匀分布的特征。条带状片麻岩中普遍发育

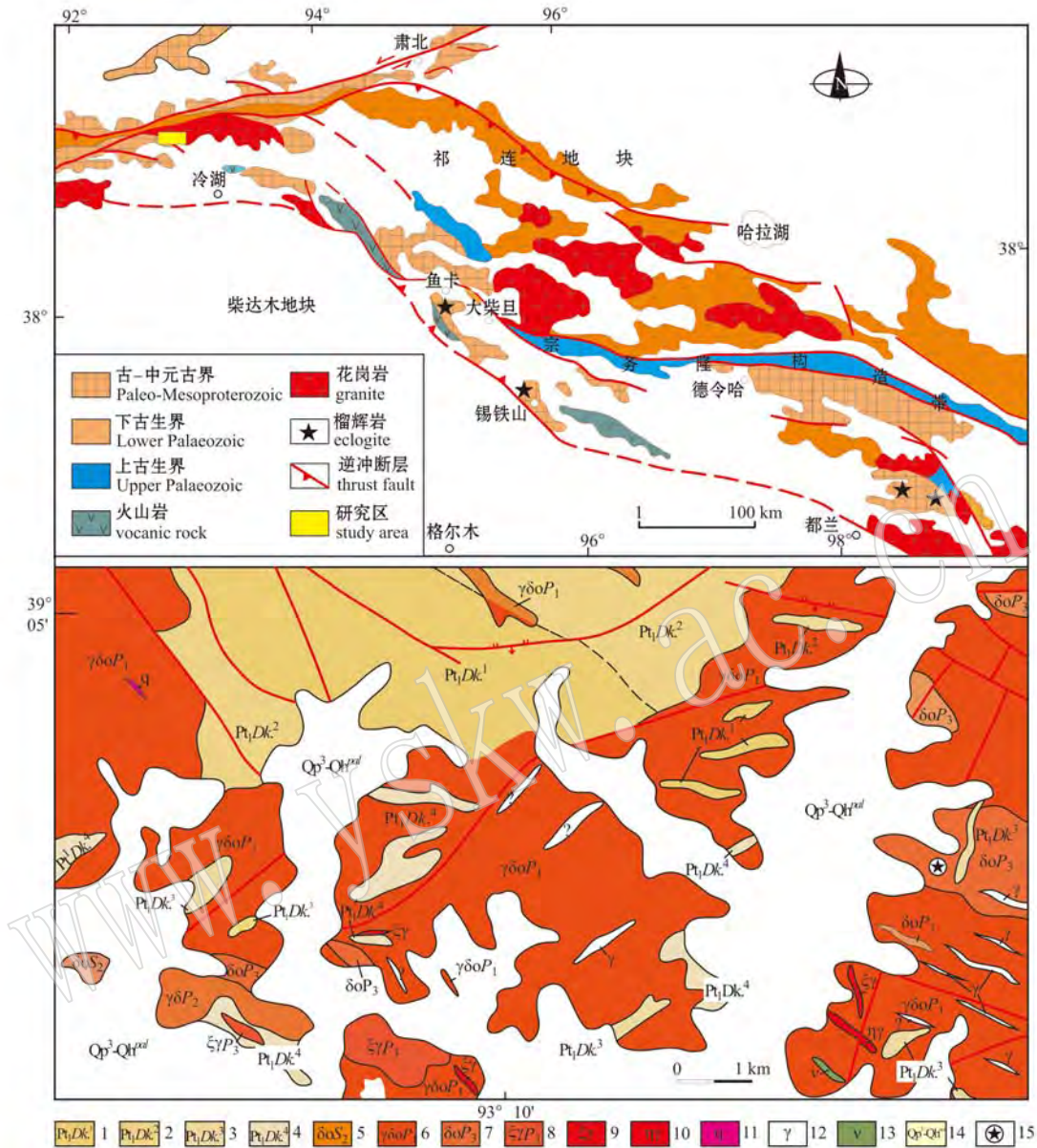


图 1 柴北缘地质简图(据杨经绥等,2004)及研究区地质图(辜平阳等,2016)

Fig. 1 Sketch map of tectonic location (modified after Yang Jingsui *et al.*, 2004) and geological map of the study area(after Gu Pingyang *et al.*, 2016)

- 1—达肯大阪岩群混合片麻岩段; 2—达肯大阪岩群条带状片麻岩段; 3—达肯大阪岩群片麻岩夹片岩段; 4—达肯大阪岩群片岩段; 5—中志留世片麻状石英闪长岩; 6—早二叠世英云闪长岩; 7—晚二叠世石英闪长岩; 8—晚二叠世正长花岗岩; 9—正长花岗岩脉; 10—二长花岗岩脉; 11—伟晶岩脉; 12—花岗岩脉; 13—辉长岩脉; 14—第四系冲洪积物; 15—采样地点
- 1—mixed gneiss member of Dakendaban Rock Group; 2—banded gneiss member of Dakendaban Rock Group; 3—gneiss and schist member of Dakendaban Rock Group; 4—schist member of Dakendaban Rock Group; 5—middle Silurian gneissic quartz diorite; 6—early Permian tonalite; 7—middle Permian quartz diorite; 8—late Triassic syenogranite; 9—syenogranite veins; 10—monzogranite veins; 11—pegmatite veins; 12—granite veins; 13—gabbro veins; 14—Quaternary; 15—sampling sites

长英质条带、不对称流动组构、揉流褶皱,前人对浅色长英质条带测年,获得 1939 ± 21 Ma 的锆石 U-Pb 年龄,代表了一次深熔事件(辛后田等,2006)。片麻

岩夹片岩段岩石中发育少量的长英质条带或条痕,宽窄不一(可达数厘米到数十厘米),条带总体产状与区域片麻理一致,变质变形程度明显低于条带状

片麻岩段。片岩构造变形较强,可见片理褶皱,偶保留原始层理 S_0 ,与岩体接触部位脉混合岩化现象明显,长英质条带发育,与片理面产状一致,部分地段脉体穿插片理。根据野外变形特征及各期变形的叠加改造关系,建立了达肯大坂岩群构造变形序列(查显峰等,2013)。后期,中志留世片麻状石英闪长岩($\delta\delta S_2$)、早二叠世英云闪长岩($\gamma\delta\delta P_1$)、中二叠世花岗闪长岩($\gamma\delta P_2$)、晚二叠世石英闪长岩($\delta\delta P_3$)、晚二叠世正长花岗岩($\xi\gamma P_3$)等岩体侵位(董增产等,2014,2015a,2015b; 辜平阳等,2016)。本文所研究的石英闪长岩由西向东呈带状产出(宽约 1 km,长约 10 km),与中志留世片麻状石英闪长岩、早二叠世英云闪长岩及中二叠世花岗闪长岩侵入接触关系明显,岩体中发育少量的达肯大坂岩群捕虏体及花岗质伟晶脉体,其中脉体呈北西-南东向展布。

2 岩石学特征

本文用于同位素年代学及地球化学研究的石英闪长岩(编号 D222)采自柴达木盆地西北缘青海冷湖北山(公里网坐标: $X = 16518750$; $Y = 4322860$,

$H = 3460$),岩体受构造作用,发育两期劈理(图 2a)。岩石具花岗结构,块状构造,岩石主要由斜长石($\sim 55\%$)、石英($\sim 18\%$)、角闪石($\sim 12\%$)、黑云母($\sim 8\%$)、磷灰石($\sim 5\%$)、榍石($\sim 2\%$)及少量磁铁矿等组成(图 2b)。斜长石矿物晶体多呈半自形板状或粒状,粒径大小一般为 1~2.5 mm,部分斜长石绢云母化。石英晶体为粒状或不规则粒状,粒径大小介于 0.5~2 mm。角闪石呈柱状,常与黑云母组成集合体,矿物种属为普通闪石。磷灰石为柱状,粒径为 0.2~0.5 mm。榍石呈板柱状、粒状,粒径达 0.8 mm。

3 分析方法

样品地球化学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 Panalytical 公司 PW4400 型 X 荧光光谱仪(XRF)测定,分析误差低于 5%。微量元素和稀土元素采用 Thermo Fisher 公司 X-series II 型电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)测定,相对标准偏差优于 5%。

锆石的挑选由中国地质调查局西安地质调查中

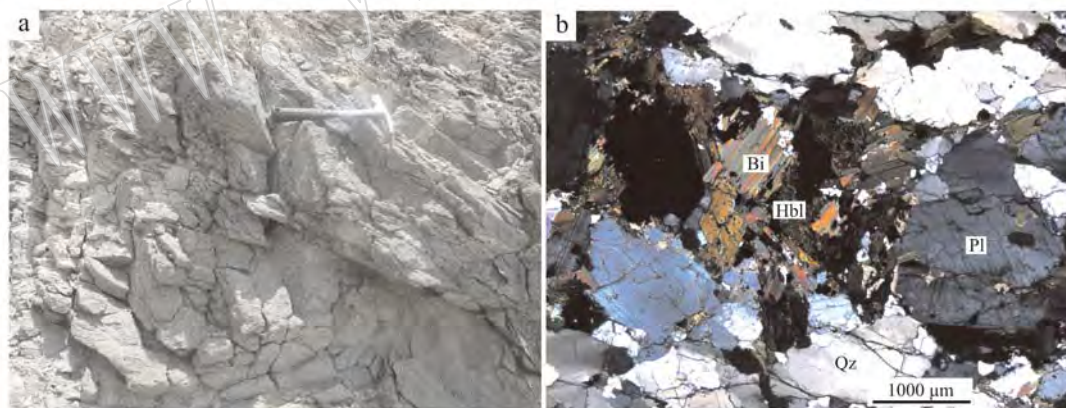


图 2 柴达木盆地西北缘石英闪长岩野外露头(a)及镜下矿物组合特征(b, +)

Fig. 2 The outcrop(a) and mineral assemblages of quartz diorite on the northwestern margin of Qaidam(b, +)

Qz—石英; Pl—斜长石; Hbl—角闪石; Bi—黑云母

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

心国土资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室完成。首先将样品破碎至约 100 μm ,采用磁法和重液分选,然后对分离出来的锆石在双目镜下挑选出结晶好、透明度好、无裂隙、无包体的颗粒,用环氧树脂固定并抛光。锆石阴极发光图像(CL)分析及 LA-ICP-MS 法锆石微区 U-Pb 年龄测定均在西北大学大陆动力学国家重点实验室进行。锆石阴极发光图

像在 FEI 公司生产的场发射扫描电镜附属的 Mono CL3+ 系统上进行。测试点的选取首先根据锆石反射光和透射光照片进行初选,再与 CL 图像反复对比,力求避开内部裂隙和包裹体,以获得较准确的年龄信息。LA-ICP-MS 锆石微区 U-Pb 年龄测定采用 Agilent7500 型 ICP-MS 和德国 Lambda Physik 公司的 ComPex102 ArF 准分子激光器(工作物质 ArF,波

长 193 nm)以及 MicroLas 公司的 GeoLas 200M 光学系统联机进行,激光束斑直径为 30 μm ,激光剥蚀深度为 20~40 μm 。实验中 He 作为剥蚀物质的载气,用 NIST SRM610 人工合成硅酸盐玻璃标准作为参考物质调试仪器。采样方式为单点剥蚀,每 5 个测试样品前后,测试 91500 标样一次,每 12 个测试点前后测试 1 次 NIST610 和 GJ-1。锆石年龄采用 91500 和 GJ-1 作为外部标准物质。由于 SiO_2 在锆石中的含量较恒定,选择 ^{29}Si 作为内标来消除激光能量在点分析过程中以及分析点之间的漂移,对于大多数元素单点分析的相对标准偏差为 5%~15%。详细分析步骤和数据处理方法参见相关文献(Gao *et al.*, 2002)。

采用 Glitter(ver4.0, Macquarie University)程序对锆石的同位素比值及元素含量进行计算,并按照 Andersen Tom 的方法(Andersen, 2002),用 LAM-ICPMS Common Lead Correction(ver3.15)对其进行了普通铅校正,年龄计算及谐和图采用 Isoplot(ver3.0)完成(Ludwig, 2003)。

4 锆石 CL 图像特征及 LA-ICP-MS U-Pb 定年结果

柴达木盆地西北缘石英闪长岩中绝大多数锆石为无色透明,自形程度较好,长柱状晶形明显(长 100~400 μm),长宽比为 2:1~4:1,阴极发光图像显示岩石中的锆石均发育岩浆振荡环带,具有岩浆锆石的特征(图 3)。选择具有代表性的 32 粒锆石进行了 LA-ICP-MS 测年分析(表 1),结果显示所有测点均位于谐和线上。 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄可分为 2 组:第 1 组介于 248 $\pm$ 2 Ma~260 $\pm$ 2 Ma, Th/U 比值较高(0.27~2.53)(6、19 号测点除外),结合阴极发光图像图像特征,均属于岩浆结晶锆石。28 个测点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 252 $\pm$ 1 Ma(图 4),代表了该石英闪长岩的形成年龄。第 2 组年龄为 271 $\pm$ 4 Ma~275 $\pm$ 3 Ma(4 个测点), Th/U 比值为 0.66~0.93,亦属于岩浆锆石,可能为捕获的较老的岩浆锆石。

5 岩石地球化学特征

5.1 主量元素

柴达木盆地西北缘石英闪长岩主量元素分析结果见表 2,岩体 SiO_2 含量为 56.98%~58.05%,平均

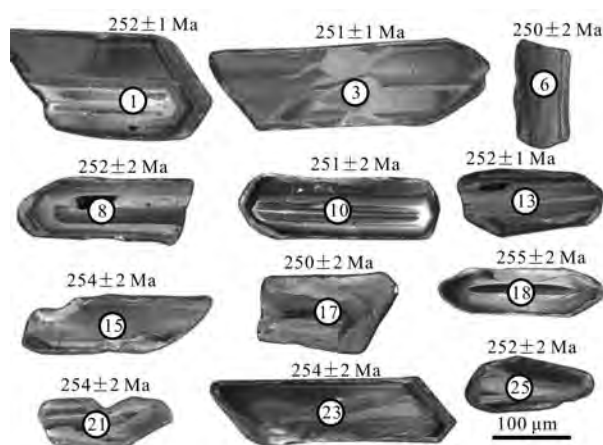


图 3 石英闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄谱和图
Fig. 3 LA-ICP-MS zircon U-Pb concordia diagrams of quartz diorite

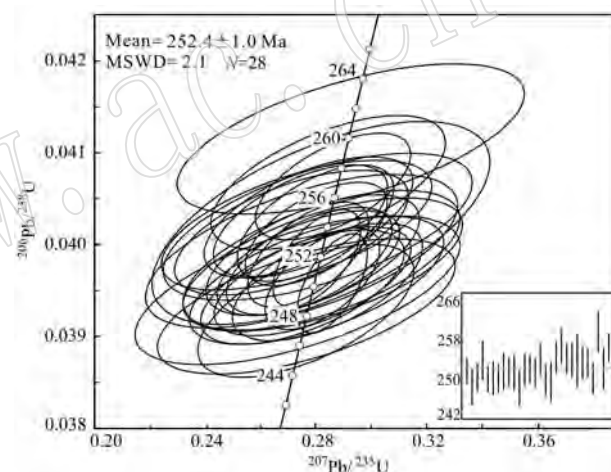


图 4 石英闪长岩加权平均年龄图
Fig. 4 The weighted average age diagram of quartz diorite

57.72%; Al_2O_3 含量相对较高,介于 16.40%~16.91%,平均 16.69%; CaO 、 MgO 、 TFeO 含量中等,分别为 6.64%~7.22%、4.13%~4.31%、6.76%~6.93%;全碱($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$)含量较低,介于 4.34%~4.59%,平均 4.43%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 0.54 \sim 0.69$,显示了岩体相对富钠; P_2O_5 含量为 0.17%~0.19%。里特曼指数(δ)为 1.25~1.44(均小于 3.3),属于钙碱性系列,与 $\text{SiO}_2 - \text{K}_2\text{O}$ 图解一致(图 5)。石英闪长岩样品 A/CNK 值为 0.87~0.91,在 A/NK - A/CNK 图解中落入准铝质区(图 6)。

5.2 微量、稀土元素

石英闪长岩微量元素分析数据见表 2,稀土元素总量较低($\Sigma\text{REE} = 119.24 \times 10^{-6} \sim 136.03 \times 10^{-6}$),LREE 明显富集(LREE = $104.80 \times 10^{-6} \sim 120.83 \times 10^{-6}$),HREE 含量低(HREE = $13.74 \times 10^{-6} \sim 15.41 \times 10^{-6}$),

表 1 柴达木盆地西北缘石英闪长岩(D222)LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素测试结果
Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb isotopic analyses of quartz diorite (D222) on the northwestern margin of Qaidam

测点	同位素比值					同位素年龄/Ma					$w_B/10^{-6}$			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	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	年龄	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	年龄	Th		U	Pb
D222-1	0.0510	0.0011	0.2803	0.0065	0.0399	0.0002	0.0105	0.0003	251	6	252	1	640	356	19	1.80
D222-2	0.0510	0.0041	0.2765	0.0220	0.0393	0.0003	0.0132	0.0007	248	20	249	2	26	73	3	0.35
D222-3	0.0517	0.0015	0.2824	0.0085	0.0396	0.0002	0.0110	0.0003	253	8	251	1	400	241	13	1.66
D222-4	0.0506	0.0041	0.2806	0.0228	0.0402	0.0003	0.0127	0.0004	251	20	254	2	73	81	4	0.91
D222-5	0.0524	0.0009	0.2858	0.0052	0.0396	0.0002	0.0114	0.0003	255	5	250	1	1283	507	31	2.53
D222-6	0.0513	0.0035	0.2802	0.0188	0.0396	0.0003	0.0231	0.0022	251	17	250	2	8	85	3	0.09
D222-7	0.0511	0.0026	0.2788	0.0145	0.0396	0.0002	0.0115	0.0003	250	13	250	2	182	139	7	1.31
D222-8	0.0514	0.0036	0.2820	0.0204	0.0398	0.0003	0.0256	0.0017	252	18	252	2	13	71	3	0.19
D222-9	0.0506	0.0022	0.2776	0.0122	0.0398	0.0002	0.0350	0.0141	249	11	252	2	262	167	14	1.57
D222-10	0.0515	0.0037	0.2825	0.0206	0.0398	0.0003	0.0679	0.0333	253	18	251	2	75	72	7	1.05
D222-11	0.0510	0.0029	0.2764	0.0160	0.0393	0.0003	0.0959	0.0509	248	14	248	2	35	85	6	0.41
D222-12	0.0507	0.0028	0.2789	0.0158	0.0399	0.0003	0.1152	0.0636	250	14	252	2	122	139	17	0.88
D222-13	0.0504	0.0016	0.2772	0.0089	0.0399	0.0002	0.1479	0.0837	248	8	252	1	198	211	33	0.94
D222-14	0.0505	0.0024	0.2773	0.0135	0.0398	0.0002	0.1507	0.0868	249	12	252	1	143	176	25	0.81
D222-15	0.0504	0.0021	0.2798	0.0115	0.0402	0.0003	0.2493	0.1454	251	10	254	2	45	114	14	0.39
D222-16	0.0505	0.0027	0.2752	0.0150	0.0395	0.0003	0.2869	0.1691	247	13	250	2	29	108	11	0.27
D222-17	0.0502	0.0044	0.2734	0.0240	0.0395	0.0003	0.2430	0.1433	245	22	250	2	29	69	9	0.42
D222-18	0.0499	0.0028	0.2773	0.0154	0.0403	0.0003	0.2304	0.1347	249	14	255	2	63	143	18	0.44
D222-19	0.0507	0.0031	0.2844	0.0173	0.0407	0.0003	0.1741	0.1006	254	15	257	2	11	170	8	0.06
D222-20	0.0494	0.0023	0.2744	0.0129	0.0403	0.0002	0.1396	0.0795	246	12	254	2	194	135	29	1.44
D222-21	0.0492	0.0035	0.2730	0.0200	0.0402	0.0003	0.1169	0.0652	245	18	254	2	144	119	19	1.20
D222-22	0.0508	0.0045	0.2818	0.0249	0.0402	0.0005	0.0909	0.0489	252	22	254	3	226	166	24	1.36
D222-23	0.0490	0.0031	0.2712	0.0173	0.0401	0.0003	0.0649	0.0327	244	16	254	2	103	97	9	1.06
D222-24	0.0506	0.0019	0.2801	0.0105	0.0401	0.0002	0.0361	0.0152	251	9	254	1	350	210	19	1.67
D222-25	0.0520	0.0026	0.2841	0.0140	0.0396	0.0003	0.0124	0.0004	254	13	250	2	125	106	5	1.17
D222-26	0.0516	0.0045	0.2926	0.0256	0.0412	0.0003	0.0140	0.0005	261	23	260	2	103	114	6	0.90
D222-27	0.0499	0.0042	0.2748	0.0231	0.0399	0.0003	0.0140	0.0006	247	21	252	2	31	58	3	0.53
D222-28	0.0511	0.0020	0.2862	0.0114	0.0406	0.0002	0.0137	0.0004	256	10	257	1	216	149	8	1.45
D222-29	0.0577	0.0043	0.3417	0.0286	0.0429	0.0006	0.0286	0.0017	298	25	271	4	32	49	3	0.66
D222-30	0.0560	0.0044	0.3372	0.0290	0.0436	0.0005	0.0274	0.0018	295	25	275	3	39	51	3	0.76
D222-31	0.0541	0.0051	0.3252	0.0301	0.0436	0.0004	0.0208	0.0010	286	26	275	3	65	64	4	1.02
D222-32	0.0538	0.0040	0.3217	0.0237	0.0433	0.0003	0.0203	0.0011	283	21	273	2	70	75	4	0.93

表 2 柴达木盆地西北缘石英闪长岩主量元素含量($w_B/\%$)、微量元素含量($w_B/10^{-6}$)分析结果Table 2 Major element compositions ($w_B/\%$) and trace element compositions ($w_B/10^{-6}$) for quartz diorite on the northwestern margin of Qaidam

元素	D222-1	D222-2	D222-3	D222-4	D222-5	D222-6
SiO ₂	58.02	57.67	58.02	56.98	57.63	58.05
TiO ₂	0.85	0.88	0.91	0.89	0.91	0.90
Al ₂ O ₃	16.69	16.74	16.40	16.91	16.86	16.57
Fe ₂ O ₃	1.30	1.61	1.34	1.53	0.75	1.36
FeO	5.70	5.48	5.72	5.38	6.20	5.58
MnO	0.12	0.11	0.12	0.12	0.11	0.12
MgO	4.13	4.16	4.31	4.20	4.25	4.17
CaO	6.85	6.81	6.64	7.22	6.70	6.84
Na ₂ O	2.81	2.93	2.68	2.74	2.82	2.62
K ₂ O	1.53	1.66	1.71	1.68	1.60	1.81
P ₂ O ₅	0.17	0.17	0.19	0.19	0.18	0.19
烧失量	1.82	1.75	1.96	2.14	1.97	1.75
总量	99.99	99.97	100.00	99.98	99.98	99.96
A/CNK	0.89	0.88	0.89	0.87	0.91	0.89
ANK	1.12	1.13	1.12	1.15	1.10	1.13
R ₁	2 294.51	2 195.88	2 295.54	2 217.25	2 247.01	2 299.12
R ₂	1 264.84	1 263.03	1 245.62	1 312.20	1 258.08	1 263.40
K ₂ O + Na ₂ O	4.34	4.59	4.39	4.42	4.42	4.43
AR	1.45	1.48	1.47	1.45	1.46	1.47
里特曼指数	1.25	1.44	1.28	1.40	1.34	1.30
K ₂ O/Na ₂ O	0.54	0.57	0.64	0.61	0.57	0.69
10 ⁻⁴ Ga/Al	2.44	2.18	2.53	2.47	2.42	2.47
TFeO/MgO	1.66	1.67	1.61	1.61	1.62	1.63
La	22.00	20.60	24.90	24.40	23.90	23.40
Ce	48.50	47.10	54.30	53.40	53.20	51.10
Pr	6.24	6.28	7.23	6.98	7.07	6.87
Nd	23.20	24.40	27.40	27.40	26.10	26.80
Sm	4.97	5.08	5.50	5.44	5.38	5.42
Eu	1.38	1.34	1.50	1.46	1.46	1.43
Gd	4.31	4.44	4.78	4.91	4.86	4.72
Tb	0.64	0.67	0.72	0.74	0.75	0.74
Dy	3.69	3.89	4.07	4.09	4.12	4.05
Ho	0.72	0.74	0.80	0.78	0.77	0.79
Er	1.94	2.06	2.14	2.19	2.18	2.19
Tm	0.30	0.32	0.32	0.32	0.33	0.32
Yb	1.85	2.01	2.05	2.02	2.08	2.01
Lu	0.29	0.31	0.32	0.30	0.32	0.31
ΣREE	120.03	119.24	136.03	134.43	132.52	130.15
LREE	106.29	104.80	120.83	119.08	117.11	115.02
HREE	13.74	14.44	15.20	15.35	15.41	15.13
LREE/HREE	7.74	7.26	7.95	7.76	7.60	7.60
δEu	0.89	0.84	0.87	0.85	0.86	0.85
(La/Yb) _N	8.02	6.91	8.19	8.14	7.75	7.85
(La/Sm) _N	2.78	2.55	2.85	2.82	2.79	2.72
(Gd/Yb) _N	1.88	1.78	1.88	1.96	1.89	1.89
Ba	582.00	570.00	633.00	612.00	574.00	625.00
Rb	66.60	68.00	72.30	70.20	66.20	75.50
Sr	449.00	424.00	427.00	446.00	448.00	420.00

续表 2

Continued Table 2

元素	D222-1	D222-2	D222-3	D222-4	D222-5	D222-6
Nb	13.40	13.90	15.70	14.40	15.50	15.40
Ta	1.05	0.87	1.12	0.99	0.93	0.93
Hf	4.00	4.16	4.79	4.74	4.89	5.02
Zr	137.00	141.00	163.00	165.00	168.00	172.00
Th	13.71	13.53	14.40	13.46	13.36	13.75
U	2.40	2.37	2.59	2.58	2.63	2.48
Cr	86.00	73.80	99.30	104.00	101.00	89.80
Y	19.80	21.00	21.80	21.00	21.80	21.70
Sc	20.90	15.40	22.50	20.00	19.80	19.20
Ga	21.60	19.30	22.00	22.10	21.60	21.70
Co	23.20	21.40	21.90	22.20	23.00	21.00
Li	20.90	21.30	24.40	21.00	21.70	20.70
Be	1.66	1.53	1.70	1.72	2.03	1.67
Cs	1.66	1.76	1.70	1.77	1.71	1.71
Zn	81.30	81.10	87.60	94.80	88.30	88.40
Ge	1.62	1.29	1.39	1.56	1.53	1.59
Pb	11.10	9.62	10.20	11.90	10.80	11.00

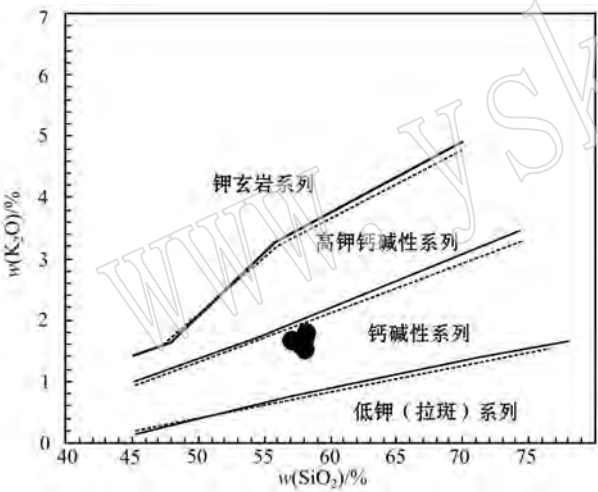


图 5 柴达木盆地西北缘石英闪长岩 K_2O-SiO_2 图解
Fig. 5 K_2O-SiO_2 diagram for quartz diorite on the northwestern margin of Qaidam

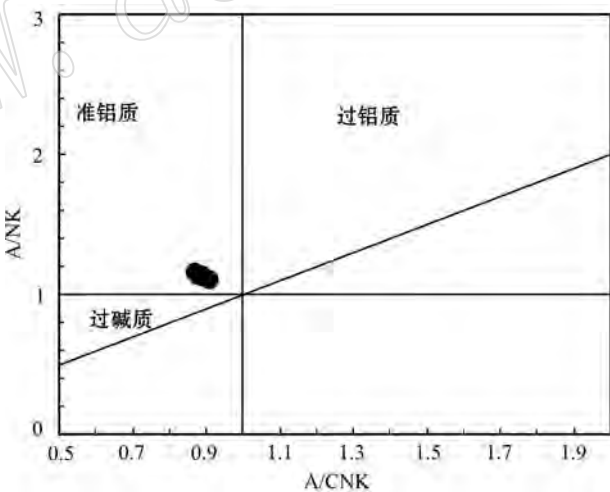


图 6 柴达木盆地西北缘石英闪长岩 $A/NK-A/CNK$ 图解
Fig. 6 $A/NK-A/CNK$ diagram for quartz diorite on the northwestern margin of Qaidam

10^{-6}), $LREE/HREE = 7.26 \sim 7.95$, $(La/Yb)_N = 6.91 \sim 8.19$, 轻重稀土分馏明显, 在稀土元素球粒陨石标准化图解中表现出十分一致的右倾特征(图 7a), 具有弱的 Eu 负异常($\delta Eu = 0.84 \sim 0.89$), 说明在岩浆演化过程中斜长石分离结晶作用不明显。微量元素原始地幔标准化蛛网图中(图 7b), 所有样品均具相似的分配型式, 富集大离子亲石元素 Rb、Th、U 和 LREE 等, 不同程度的亏损 Nb、Ta、P、Ti 和 HREE 等高场强元素, 以及较低的 Nb/La($0.59 \sim$

0.67)和 Rb/Nb($4.27 \sim 4.97$)比值。

6 讨论

6.1 岩体成因类型

花岗岩成因类型通常包括 I 型、S 型、M 型和 A 型(吴福元等, 2007; 邱检生等, 2008)。其中, M 型花岗岩主要是指由地幔起源岩浆形成的花岗岩类(Loiselle and Wones, 1979), 岩石地球化学特征显示

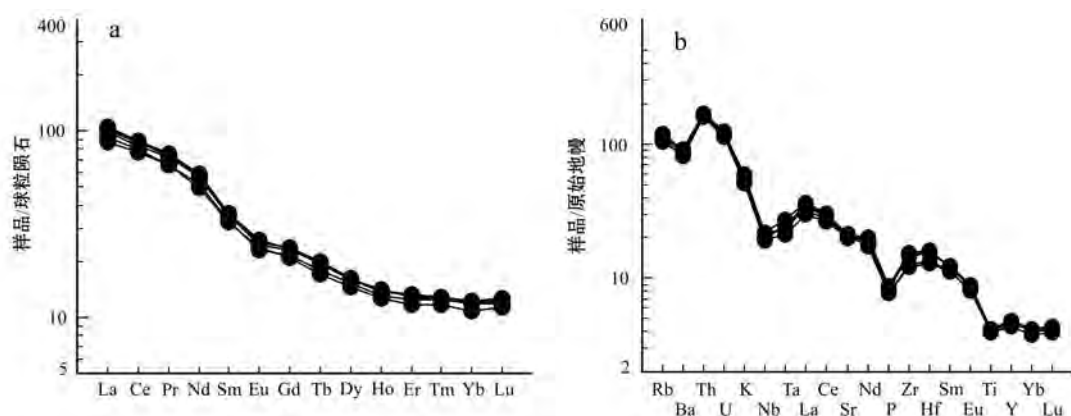


图7 柴达木盆地西北缘石英闪长岩稀土元素球粒陨石标准化图解(a)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b)
(标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns(a) and primitive-mantle normalized spidergram(b) for quartz diorite on the northwestern margin of Qaidam(norm values after Sun and McDonough, 1989)

柴达木盆地西北缘石英闪长岩富集 Rb、Th、U, 不同程度的亏损 Nb、Ta、Ti 等, $Mg^\#$ 值较小, Zr/Hf 值为 33.89~34.81, Nb/Ta 值介于 12.76~16.67, 分别接近地壳 Zr/Hf、Nb/Ta 平均值(Taylor and McLennan, 1985), 源岩应为地壳物质, 因此排除该岩体为 M 型花岗岩的可能。本文石英闪长岩主要由斜长石、石英、角闪石和黑云母等组成, 与 A 型花岗岩长石以钾长石为主, 仅有少量斜长石的矿物组成特征明显不同(Le, 2002), 且 $TFeO/MgO$ 较低(1.61~1.67), 有别于 A 型花岗岩显著富铁的特征($TFeO/MgO > 10$)(Whalen *et al.*, 1987); Ga 含量较低, $10000Ga/Al$ 比值变化于 2.18~2.53, 明显低于 A 型花岗岩的建议下限值(2.60)(Whalen *et al.*, 1987; 康磊等, 2012); Zr、Nb、Ce、Y 等元素的含量均低, $Zr + Nb + Ce + Y = 218.70 \times 10^{-6} \sim 260.20 \times 10^{-6}$, 低于 A 型花岗岩的下限值(350×10^{-6})(Whalen, 1987), 以上说明石英闪长岩不属于 A 型花岗岩, 可能为 S 型或者 I 型。但依据岩体的矿物组成及岩石地球化学特征(上文已论述)综合判断柴达木盆地西北缘石英闪长岩为 I 型花岗岩。

6.2 源岩特征

研究表明, 石英闪长岩可能来源于镁铁质下地壳熔融或富集俯冲带组分的上地幔熔融或受到陆壳混染的亏损地幔的部分熔融(Fliedert *et al.*, 2003), 下地壳变质玄武岩经脱水熔融可产生相当数量的石英闪长质岩浆(Rushmer, 1991; Wolf and Wyllie, 1994; Rapp and Watson, 1995)。CaO/Na₂O 的比值可以用来推断中酸性岩浆的源区特征, 源于变杂砂

岩或火成岩的熔融形成的花岗质岩石 CaO/Na₂O 比值介于 0.3~1.5, 角闪岩部分熔融而成的偏中性熔体(石英闪长岩等)CaO/Na₂O 比值相对较高(Jung and Pfander, 2007)。石英闪长岩 CaO/Na₂O 比值较高(2.32~2.64), 说明其源岩可能为角闪岩, 与 $(Na_2O + K_2O)/(FeO + MgO + TiO_2) - (Na_2O + K_2O + FeO + MgO + TiO_2)$ 图解一致(图 8)。在 $Al_2O_3/(TFeO + MgO) - CaO/(TFeO + MgO)$ 图解上显示其源岩为变玄武岩(图 9), 综合判断柴达木盆地西北缘

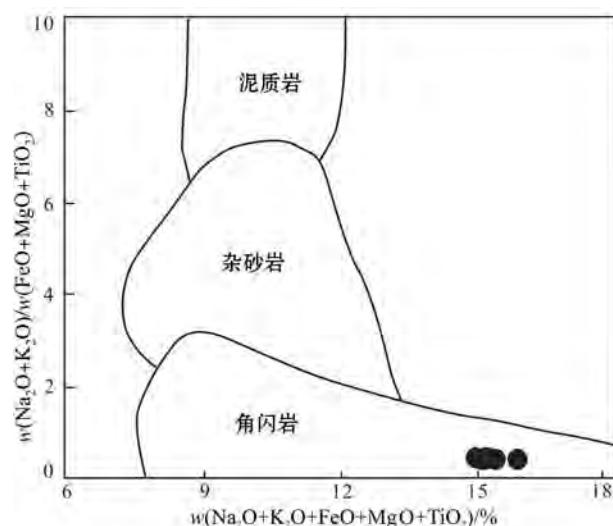


图8 柴达木盆地西北缘石英闪长岩 $(Na_2O + K_2O)/(FeO + MgO + TiO_2) - (Na_2O + K_2O + FeO + MgO + TiO_2)$ 图解
Fig. 8 Diagram of $(Na_2O + K_2O)/(FeO + MgO + TiO_2) - (Na_2O + K_2O + FeO + MgO + TiO_2)$ for quartz diorite on the northwestern margin of Qaidam

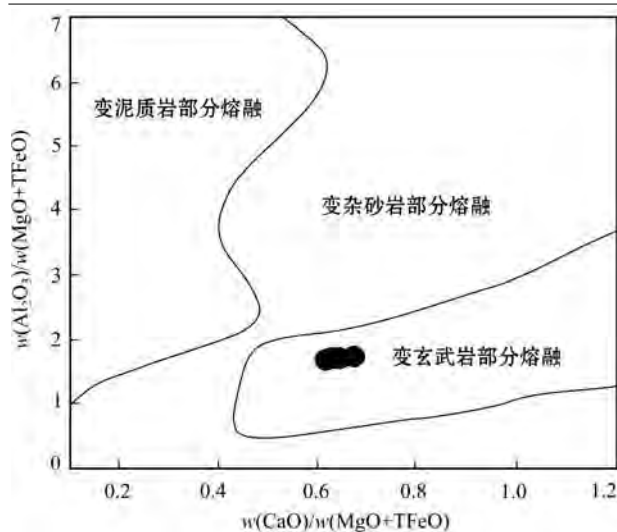


图 9 柴达木盆地西北缘石英闪长岩 $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{MgO} + \text{TFeO}) - \text{CaO}/(\text{MgO} + \text{TFeO})$

Fig. 9 Diagram of $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{MgO} + \text{TFeO}) - \text{CaO}/(\text{MgO} + \text{TFeO})$ for quartz diorite on the northwestern margin of Qaidam

石英闪长岩源于变玄武岩的部分熔融。

6.3 部分熔融温压条件

锆石是花岗质岩浆体系中较早结晶的副矿物, 锆石中 Zr 的分配系数对温度极度敏感, 其它因素对其没有明显影响, 因而锆石饱和温度计常用来估算岩浆形成的初始温度 (Miller *et al.*, 2003; 康磊等, 2012; 王立社等, 2015)。Watson 等 (1983) 通过高温实验 (700~1300℃) 得出的锆石熔解度的模拟公式: $t_{\text{Zr}}(^{\circ}\text{C}) = 12900[\ln D_{\text{Zr}}(496000/\text{熔体}) + 0.85M + 2195] - 273.15$, 式中 D_{Zr} 为 Zr 的分配系数, 令全岩岩石化学中 $\text{Si} + \text{Al} + \text{Fe} + \text{Mg} + \text{Ca} + \text{Na} + \text{K} + \text{P} = 1$ (原子分数), $M = (2\text{Ca} + \text{K} + \text{Na})/(\text{Si} \times \text{Al})$ 。不做 Zr、Hf 校正时纯锆石中 Zr 的含量为 496000×10^{-6} , 一般用全岩中的 Zr 含量近似代表熔体中 Zr 的含量。锆石饱和温度计计算结果显示石英闪长岩 M 值 (1.33~1.45) 在推荐值 0.9~1.7 范围内 (Watson and Harrison, 1983), 经计算锆石饱和温度为 759~768℃ (平均 764℃) (表 3), 样品中未见继承锆石, 表明母岩浆中锆石未达到饱和。因此, 764℃ 代表了锆石和石英闪长岩的结晶温度, 768℃ 代表了源区原始岩浆的最低温度 (Miller *et al.*, 2003; 赵振华, 2010; 康磊等, 2012), 表明初始岩浆温度较高, 这与岩体富集生热元素 Th、K 和不相容元素 Zr、Hf 相吻合。

研究认为 Al_2O_3 可以作为中酸性岩体压力大小的标志之一 (Rapp and Watson, 1995; Fliedert *et al.*,

2003)。当熔体中的 Al_2O_3 含量 < 15% 时, 其成岩压力 < 1.6 GPa, 源区残留相以角闪石、斜长石和斜方辉石为主; 当熔体中的 Al_2O_3 含量 > 15% 时, 其成岩压力 > 1.6 GPa, 源区残留相以单斜辉石、角闪石、斜长石和石榴子石为主 (Rapp and Watson, 1995)。柴达木盆地西北缘石英闪长岩 Al_2O_3 含量为 16.40%~16.91%, 高于 15%, 暗示其成岩压力 > 1.6 GPa, 源区残留相可能为单斜辉石、角闪石、斜长石和石榴子石。但含水拉斑玄武岩的实验表明, 在压力 > 1.5 GPa (温度为 750~950℃) 的条件下, 玄武岩熔融的残留相为石榴子石 + 角闪石 + 金红石 (金红石出现) (Xiong *et al.*, 2005)。本文样品微量元素地球化学特征显示其 HREE 和 Yb 含量较低, 暗示岩浆源区有石榴子石残留 (Ge *et al.*, 2002; 吴福元等, 2002), Ti 的亏损表明源区有金红石残留 (Ge *et al.*, 2002), Nb/Ta 值与 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 值呈正相关也指示了源区残留石榴子石的同时还应存在少量金红石, 且 Nb/La 与 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 呈曲线负相关性, 这与熔体随着残留石榴子石和金红石的增加元素变化的趋势一致 (熊小林等, 2011)。Sr、Ba 和 Eu 具有很弱的负异常说明源区基本无斜长石残留。因此, 综合判断柴达木盆地西北缘石英闪长岩体源岩部分熔融压力 > 1.5 GPa, 残留相矿物组合为石榴子石 + 角闪石 + 金红石。

表 3 柴达木盆地西北缘石英闪长岩锆石饱和温度计计算结果

Table 3 Results from saturated Zr thermometer of quartz diorite on the northwestern margin of Qaidam

样品号	$w(\text{Zr})/10^{-6}$	M	$t_{\text{Zr}}/^{\circ}\text{C}$
D222-1	137.00	1.37	763
D222-2	141.00	1.36	764
D222-3	163.00	1.35	766
D222-4	165.00	1.45	759
D222-5	168.00	1.33	768
D222-6	172.00	1.38	766

6.4 形成机制与地质意义

研究表明, 晚志留世末期与早泥盆世是柴北缘地质构造发展的重要转换期, 早泥盆世牦牛山组陆相磨拉石沉积组合及与前泥盆纪地层角度不整合接触 (张耀玲等, 2010; 夏文静等, 2014), 标志着柴达木盆地周缘早古生代造山作用的结束, 柴达木地块与欧龙布鲁克地块拼合成一个整体。早石炭世中期

至晚石炭世,柴达木盆地南北缘发育滨-浅海陆棚环境沉积的碳酸盐岩建造;晚石炭-中二叠世,受巴颜喀拉洋的扩张作用的影响,柴北缘构造应力由拉张转为收缩,发生陆内俯冲,中下地壳重熔,形成花岗质岩浆(郝国杰等, 2004; 吴才来等, 2008),但晚古生代-中生代柴北缘进入陆内演化阶段,构造岩浆作用较弱,总体上处于相对稳定状态(辛后田等, 2006; 刘永顺等, 2010),与近年来发现的大量与洋壳俯冲有关的中-晚二叠世中酸性岩体不协调(董增产等, 2014, 2015a, 2015b; 辜平阳等, 2016)。

柴北缘欧龙布鲁克地块与南祁连造山带间的宗务隆构造带是在柴北缘和南祁连造山带共同构建的加里东陆块上发育起来的、具有完整板块旋回的印支期造山带(郭安林等, 2009),经历了陆内裂陷(早泥盆世)、洋盆发育(晚石炭世)和俯冲-碰撞造山(晚二叠世和中三叠世)的演化过程(王毅智等, 2001; 孙延贵等, 2004; Bian *et al.*, 2004; 杨经绥等, 2004; 郭安林等, 2009; 彭渊等, 2016)。而宗务隆构造带内具代表性的晒勒克郭来花岗闪长岩(249.2 ± 2.6 Ma)、察汗诺花岗闪长岩(242.7 ± 1.9 Ma 和 243.5 ± 2.4 Ma)及天峻南山二长花岗岩(246 ± 3 Ma),具有活动大陆边缘岛弧型花岗岩的特征(彭渊等, 2016; 郭安林等, 2009),与柴达木盆地西北缘的花岗闪长岩(265 ± 2 Ma)及二长花岗岩(252 ± 3 Ma、 254 ± 4 Ma)具有类似的地球化学特征及形成环境(董增产等, 2014, 2015a),且花岗闪长岩形成时代也较为接近,可能为同期岩浆作用的产物。郭安林等(2009)在研究宗务隆构造带变形特征时指出该带内主构造期变形主要表现为由北向南俯冲碰撞

型的左行剪切构造,变形时代为华力西晚期-印支期,与岩浆作用时代基本吻合,可能均为宗务隆洋壳向柴北缘俯冲作用的地质记录。柴达木西北缘石英闪长岩富集大离子亲石元素 Rb、Th、U 和 LREE 等大离子亲石元素,不同程度的亏损 Nb、Ta、P、Ti 和 HREE 等高场强元素,以及较低的 Nb/La($0.59 \sim 0.67$)和 Rb/Nb($4.27 \sim 4.97$)比值,显示出与板块俯冲作用有关的造山带岩浆岩的特征(Alther *et al.*, 2008; Boari *et al.*, 2009)。石英闪长岩主要由斜长石+石英+角闪石+黑云母组成, SiO_2 含量 $> 56\%$, Al_2O_3 含量 $> 15\%$, $\text{K}_2\text{O} < \text{Na}_2\text{O}$, 高 Sr ($> 400 \times 10^{-6}$), 低 Yb ($< 2.08 \times 10^{-6}$, 一个样品 $\text{Yb} < 1.90 \times 10^{-6}$),与埃达克质花岗岩的地球化学特征类似,暗示岩体形成与板块俯冲消减有关。在 Rb-(Nb + Y)图解上样品落在火山弧花岗岩区(图 10a),在 Nb-Y 图解上样品投到火山弧花岗岩和同碰撞花岗岩区(图 10b),与上述结论一致。区域资料显示柴达木盆地西北缘晚二叠世二长花岗岩、花岗闪长岩及埃达克质花岗岩形成于火山弧构造环境,与晚古生代末期宗务隆洋盆向柴北缘欧龙布鲁克地块俯冲有关(董增产等, 2014, 2015a, 2015b; 辜平阳等, 2016),结合区域地质背景综合表明本文所研究的岩体形成于与板块俯冲作用有关的火山弧构造环境。柴达木西北缘石英闪长岩形成时代为 252 ± 1 Ma,可能为晚二叠世末期宗务隆洋壳向柴北缘欧龙布鲁克地块俯冲,陆壳变玄武岩在相对较高的温压条件下发生部分熔融形成。由上可知,柴达木盆地西北缘和宗务隆构造带内晚二叠世-早三叠世花岗岩均是在宗务隆洋壳俯冲这一动力学机制下形成,也说

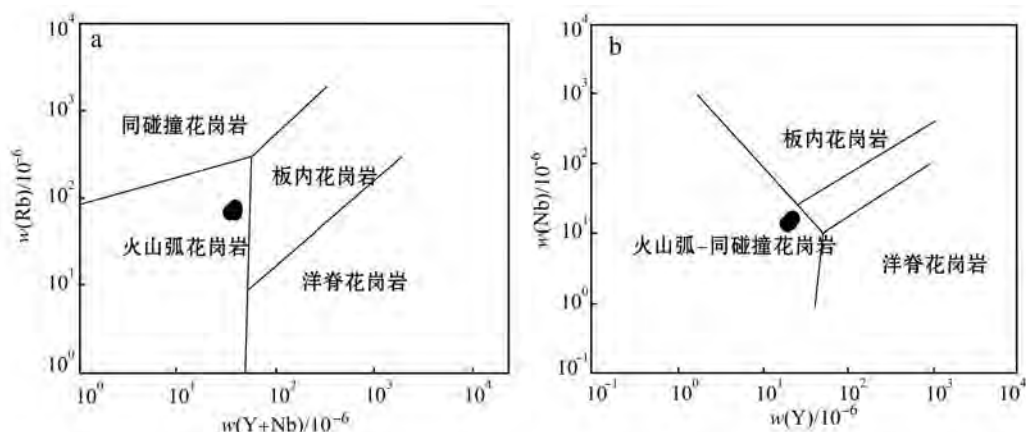


图 10 花岗岩 Rb-(Y+Nb)和 Nb-Y 构造环境判别图

Fig. 10 Rb-(Y+Nb) and Nb-Y tectonic discrimination diagrams

明晚古生代末期—中生代早期柴北缘具有活动大陆边缘的属性。

7 结论

(1) 柴达木盆地西北缘石英闪长岩形成时代为 252 ± 1 Ma, 为晚二叠世末期岩浆活动的产物。

(2) 岩体富 Al_2O_3 、 Na_2O , 贫 TiO_2 、 P_2O_5 , 属于钙碱性准铝质岩石。富集 Rb、Th、U 和 LREE 元素, 亏损 Nb、Ta、P、Ti 和 HREE 元素。柴达木盆地西北缘石英闪长岩源于变玄武岩的部分熔融, 初始岩浆温度 $> 768^\circ\text{C}$, 岩浆源区压力 > 1.5 Ga, 源岩部分熔融的残留相为石榴子石 + 角闪石 + 金红石。

(3) 柴达木盆地西北缘石英闪长岩形成于与板块俯冲有关的火山弧构造环境, 是晚二叠世末期宗务隆洋壳向柴北缘欧龙布鲁克地块俯冲的产物。

(4) 柴达木盆地西北缘和宗务隆构造带内晚二叠世—早三叠世花岗岩均是在宗务隆洋壳俯冲的动力机制下形成, 晚古生代末期—中生代早期柴北缘具有活动大陆边缘的属性。

致谢 在论文修改过程中匿名审稿人和何世平研究员对本文提出了许多建设性的修改意见, 在此一并表示诚挚的感谢!

References

- Altherr R, Topuz G, Siebel W, *et al.* 2008. Geochemical and Sr-Nd-Pb isotopic characteristics of Paleocene plagioclinites from the eastern Pontides (NE Turkey) [J]. *Lithos*, 105(1~2): 149~161.
- Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. *Chemical Geology*, 192: 59~79.
- Bian Q T, Li D H, Pospelow I, *et al.* 2004. Age, geochemistry and tectonic setting of Buqingshan ophiolite, North Qinghai-Tibet Plateau, China [J]. *Journal of Asian Earth Science*, 23: 577~596.
- Boari E, Avanzinelli R, Melluso L, *et al.* 2009. Isotope geochemistry (Sr-Nd-Pb) and petrogenesis of leucite-bearing volcanic rocks from "Colli Albani" volcano, Roman Magmatic Province, Central Italy: Inferences on volcano evolution and magma genesis [J]. *Bulletin of Volcanology*, 71(9): 977~1005.
- Dong Zengchan, Gu Pingyang, Chen Ruiming, *et al.* 2015. Geochronology, geochemistry, and Hf isotope of Yanchangbeishan adamellite of Lenghu Area in Qinghai [J]. *Earth Science*, 40(1): 130~144 (in Chinese).
- Dong Zengchan, Xiao Penxi, Gu Pingyang, *et al.* 2014. Geochronology, Geochemistry and Hf isotope characteristics of Yanchangbeishan granodiorite of Lenghu area in Qinghai [J]. *Northwestern Geology*, 47(4): 141~155 (in Chinese).
- Dong Zengchan, Yang Cheng, Gu Pingyang, *et al.* 2015. Geochronology and geochemistry of Yanchangbeishan biotite adamellite of Lenghu area in Qinghai and their geological significance [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 39(1): 167~178 (in Chinese).
- Fliedert T V D, Hoernes S, Jung S, *et al.* 2003. Lower crustal melting and the role of open-system processes in the genesis of synorogenic diorite-granite-leucogranite associations: constraints from Sr-Nd-O isotopes from the Banded complex, Namibia [J]. *Lithos*, 67: 205~226.
- Gao S, Liu Xiaoming, Yuan Honglin, *et al.* 2002. Analysis of forty-two major and trace elements of USGS and NIST SRM Glasses by LA-ICPMS [J]. *Geostand News*, 22: 181~195.
- Gao Xiaofeng, Xiao Penxi, Jia Qunzi, *et al.* 2011. Redetermination of the Tanjianshan Group: geochronological and geochemical evidence of basalts from the margin of the Qaidam Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 85(9): 1452~1463 (in Chinese).
- Ge Xiaoyue, Li Xianhua, Chen Zhigang, *et al.* 2002. Geochemistry and petrogenesis of Jurassic high Sr/low Y granitoids in eastern China: Constraints on crustal thickness [J]. *Chinese Science Bulletin*, 47: 474~480.
- Guo Anlin, Zhang Guowei, Qiang Juan, *et al.* 2009. Indosinian Zongwulong orogenic belt on the northeastern margin of the Qinghai-Tibet plateau [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(1): 1~12 (in Chinese).
- Hao Guojie, Lu Songnian, Wang Huichu, *et al.* 2004. The Pre-Devonian tectonic framework in the northern margin of Qaidam basin and geological evolution of Olongbuluk palaeo-block [J]. *Earth Science Frontiers*, 11(3): 115~122 (in Chinese).
- Jung S and Pänder J A. 2007. Source composition and melting temperatures of orogenic: constraints from $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ and accessory mineral saturation thermometry [J]. *European Journal of Mineralogy*, 19: 859~870.
- Kang Lei, Xiao Penxi, Gao Xiaofeng, *et al.* 2012. Geochemical characteristics and petrogenesis of Muztagata intrusion in Western Kunlun orogenic belt and their tectonic significance [J]. *Geological Bulletin of China*, 31(12): 2001~2014 (in Chinese).

- Le Maitre R W. 2002. International Union of Geological Sciences (IUGS). *Ignexus Rocks: A Classification and Glossary of Terms* [M]. UK: Cambridge University Press, 236.
- Liu Yongshun, Xin Houtian, Zhou Shijun, *et al.* 2010. Precambrian and Paleozoic Tectonic Evolution of the Lapeiquan Area in Eastern Sector of Altyn [M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Loiselle M C and Wones D S. 1979. Characteristics and origin of anorogenic granites [J]. *Geological Society of American Abstracts with Programs*, 11: 468.
- Lu Songnian, Wang Huichu, Li Huaishen, *et al.* 2002. Redefinition of the "Dakendaban Group" on the northern margin of the Qaidam basin [J]. *Geological Bulletin of China*, 21(1): 19~23 (in Chinese).
- Lu Songnian, Yang C L, Li H K, *et al.* 2002. A group of rifting events in the terminal Paleoproterozoic in the North China craton [J]. *Gondwana Research*, 5(1): 123~131.
- Ludwig K R. 2003. 3.0-A geochronological toolkit for Micro-soft Excel [J]. *Berkeley Geochronology Center, Special Publication*, (4): 1~70.
- Miller C F, McDowell S M and Mapes R W. 2003. Hot and cold granites Implications of zircon saturation temperatures and preservation of inheritance [J]. *Geology*, 31(6): 529~532.
- Peng Yuan, Ma Yansheng, Liu Chenglin, *et al.* 2016. Geological characteristics and tectonic significance of the Indosinian granodiorites from the Zongwulong tectonic belt in North Qaidam [J]. *Earth Science Frontiers*, 23(2): 206~221 (in Chinese).
- Qiu Jiansheng, Xiao E, Hu Jian, *et al.* 2008. Petrogenesis of highly fractionated I-type granites in the coastal area of northeastern Fujian Province: Constrains from zircon U-Pb geochronology, geochemistry and Nd-Hf isotopes [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(11): 2 468~2 684 (in Chinese).
- Qiu Shidong, Gu Pingyang, Pang Xinyu, *et al.* 2015. Zircon MC-LA-ICP-MS U-Pb dating, geochemistry and geological significance of gneissic quartz diorite in Northern Lenghu, Qinghai [J]. *Geological Review*, 61(4): 948~960 (in Chinese).
- Rapp R P and Watson E B. 1995. Dehydration melting of metabasalt at 8~32 kbar: implications for continental growth and crust-mantle recycling [J]. *J. Petrol.*, 36: 891~931.
- Rushmer T. 1991. Partial melting of two amphibolites: contrasting experimental results under fluid absent conditions [J]. *Contrib. Mineral Petrol.*, 107: 41~49.
- Song S G, Niu Y L, Zhang G B, *et al.* 2009. Two types of peridotite in North Qaidam UHPM belt and their tectonic implications for oceanic and continental subduction: A review [J]. *J. Asian Earth Sci.*, 35: 285~297.
- Song S G, Zhang L F, Niu Y L, *et al.* 2006. Evolution from oceanic subduction to continental collision: A case study of the northern Tibetan Plateau inferred from geochemical and geochronological data [J]. *J. Petrol.*, 47: 435~455.
- Song Shuguang, Zhang Gguibin, Zhang Cong, *et al.* 2013. Dynamic process of oceanic subduction and continental collision: petrological constraints of HP-UHP belts in Qilian-Qaidam, the northern Tibetan Plateau [J]. *China Sci. Bull.*, 58(23): 2 240~2 245 (in Chinese).
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and process [A]. Saunders A D and Norry M J. *Magmaism in the Ocean Basins*. Geological Society [C]. Special Publication, 42: 313~345.
- Sun Tingui, Zhang Guowei and Wang Jing. 2004. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age of the basic sillswarms of two periods in the junction area of Qinling and Kunlun and its tectonic significance [J]. *Acta Geological Sinica*, 78(1): 65~71 (in Chinese).
- Taylor S R and McLennan S M. 1985. *The continental crust, its composition and evolution* [J]. Oxford: Blackwell, 312.
- Wang H Z and Mo X X. 1995. An outline of the tectonic evolution of China [J]. *Episodes*, 18(1~2): 6~16.
- Wang Huichu, Lu Songnian, Mo Xuanxue, *et al.* 2005. An Early Paleozoic collisional orogen on the northern margin of the Qaidam basin, northwestern China [J]. *Geological Bulletin of China*, 24(7): 603~612 (in Chinese).
- Wang Lishe, Zhang Wei, Duan Xingxing, *et al.* 2015. Isotopic age and genesis of the monzogranitic gneiss at the Huanxingshan in middle Altyn Tagh [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(1): 119~132 (in Chinese).
- Wang Yizhi and Bai Yongshan. 2001. Geological characteristic of Tianjunnanshan ophiolite in Qinghai and its forming environment [J]. *Qinghai Geology*, 21(1): 29~35 (in Chinese).
- Watson E B and Harrison T M. 1983. Zircon saturation revisited: Temperature and composition effects in a variety of crustal magma types [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 64(2): 295~304.
- Whalen J B, Currie K L and Chappell B W. 1987. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis [J]. *Contrib. Miner. Petrol.*, 95: 407~419.
- Wolf M B and Wyllie P J. 1994. Dehydration-melting of amphibolite at

- 10 kbar: the effects of temperature and time[J]. *Contrib. Mineral Petrol.*, 115: 369~383.
- Wu Cailai, Gao Yuanhong, Wu Suoping, *et al.* 2008. Zircon SHRIMP U-Pb dating and geochemical characteristics of granites from the western of the north margin of Qaidam[J]. *Sci. China(Ser. D)*, 38(8): 930~949(in Chinese).
- Wu C L, Wooden J L, Robinson P T, *et al.* 2009. Geochemistry and zircon SHRIMP U-Pb dating of granitoids from the west segment of north Qaidam[J]. *Sci. China(Ser. D)*, 52(11): 1771~1790.
- Wu Cailai, Yang Jinsui, Wang Zhihong, *et al.* 2001. The Lenghu granitoids at the western end of the northern margin of the Qaidam basin, Qinghai[J]. *Regional Geology of China*, 20(1): 74~81(in Chinese).
- Wu Cailai, Yang Jinsui, Wooden J L, *et al.* 2004. SHRIMP zircon dating of Yematan granite of North margin of Qaidam[J]. *Chinese Science Bulletin*, 49(16): 1667~1672(in Chinese).
- Wu Fuyuan, Ge Wenchun and Sun Deyou. 2002. The definition, discrimination of adakites and their geological role[A]. Xiao Qinhuai, Deng Jifu, Ma Daqun, *et al.* The Ways of Investigation on Granitoids[C]. Beijing: Geological Publishing House, 172~191(in Chinese).
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Yang Jingsui, *et al.* 2007. Discussions on the petrogenesis of granites[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1217~1238(in Chinese).
- Xia Wenjing, Niu Manlan, Yan Zhen, *et al.* 2014. Sedimentary facies of the Maoniushan Formation in Maoniushan area along the northern margin of Qaidam terrane[J]. *Acta Geological Sinica*, 88(5): 943~954(in Chinese).
- Xin Houtian, Wang Huichu and Zhou Shijun. 2006. Geological events and tectonic evolution of the north margin of the Qaidam Basin[J]. *Geological Survey and Research*, 29(4): 311~320(in Chinese).
- Xiong X L, Adam J and Green T H. 2005. Rutile stability and rutile/melt HFSE partitioning during partial melting of hydrous basalt: implication for TTG genesis[J]. *Chemical Geology*, 218: 339~359.
- Xiong Xiaolin, Liu Xingcheng, Zhu Z M, *et al.* 2011. Adakitic rocks and destruction of the North China Craton: Evidence from experimental petrology and geochemistry[J]. *Science China(Earth Science)*, 54: 858~870(in Chinese).
- Yang Jingsui, Wang Xibin, Shi Rendeng, *et al.* 2004. The Deerni ophiolite in east Kunlun, northern Qinghai-Tibet Plateau: A fragment of paleo-Tethyan oceanic crust[J]. *Geology in China*, 31(3): 225~239(in Chinese).
- Zha Xianfeng, Gu Pingyang, Ji Wenhua, *et al.* 2013. The material composition and deformation characteristics of Dakendaban Rock-Group, in western Oulongbuluke micro-block, north to Lenghu in Qinghai Province[J]. *Chinese Journal of Geology*, 48(4): 1103~1114(in Chinese).
- Zhang G B, Ellis D J, Christy A G, *et al.* 2010. Zr-in-rutile thermometry in eclogites from western China[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 160: 427~439.
- Zhang G B, Song S G, Zhang L F, *et al.* 2008. The subducted oceanic crust within continental-type UHP metamorphic belt in the North Qaidam, NW China: Evidence from petrology, geochemistry and geochronology[J]. *Lithos*, 104: 99~118.
- Zhang G B, Zhang L F and Christy A G. 2013. From oceanic subduction to continental collision: An overview of HP-UHP metamorphic rocks in the North Qaidam UHP belt, NW China[J]. *J. Asian Earth Sci.*, 63: 98~111.
- Zhang G B, Zhang L F and Song S G. 2009. UHP metamorphic evolution and SHRIMP geochronology of a metaophiolitic gabbro in the North Qaidam, NW China[J]. *J. Asian Earth Sci.*, 35: 310~322.
- Zhang Yaolin, Hu Daogong, Shi Yuruo, *et al.* 2010. SHRIMP zircon U-Pb ages and tectonic significance of Maoniushan Formation volcanic rocks in East Kunlun orogenic belt, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 29(11): 1614~1618(in Chinese).
- Zhao Zhenhua. 2010. Trace element geochemistry of accessory minerals and its applications in petrogenesis and metallogenesis[J]. *Earth Science Frontiers*, 17(1): 267~286(in Chinese).
- Zhu Xiaohui, Chen Danlin, Liu Liang, *et al.* 2014. Geochronology, geochemistry and significance of the Early Paleozoic back-arc type ophiolite in Lvliangshan area, North Qaidam[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(3): 822~834(in Chinese).

附中文参考文献

- 查显锋, 辜平阳, 计文化, 等. 2013. 欧龙布鲁克地块西段达肯大坂岩群物质组成及变形特征研究[J]. *地质科学*, 48(4): 1103~1114.
- 董增产, 辜平阳, 陈锐明, 等. 2015. 柴北缘西端盐场北山二长花岗岩年代学、地球化学及其 Hf 同位素特征[J]. *地球科学*, 40(1): 130~144.
- 董增产, 校培喜, 辜平阳, 等. 2014. 青海冷湖盐场北山花岗岩闪长岩年代学、地球化学及其 Hf 同位素特征[J]. *西北地质*, 47(4): 141~155.

- 董增产, 杨成, 辜平阳, 等. 2015. 青海冷湖盐场北山黑云母二长花岗岩年代学、地球化学及其地质意义[J]. 大地构造与成矿学, 39(1): 167~178.
- 高晓峰, 校培喜, 贾群子. 2011. 滩间山群的重新厘定——来自柴达木盆地周缘玄武岩年代学和地球化学证据[J]. 地质学报, 85(9): 1452~1463.
- 辜平阳, 董增产, 陈锐明, 等. 2016. 青海阿尔金 1:5 万打柴沟等 6 幅区域地质调查报告[R].
- 郭安林, 张国伟, 强娟, 等. 2009. 青藏高原东北缘印支期宗务隆造山带[J]. 岩石学报, 25(1): 1~12.
- 郝国杰, 陆松年, 王惠初, 等. 2004. 柴达木盆地北缘前泥盆纪构造格架及欧龙布鲁克古陆块地质演化[J]. 地学前缘, 11(3): 115~122.
- 康磊, 校培喜, 高晓峰, 等. 2012. 西昆仑慕士塔格岩体的岩石地球化学特征、岩石成因及其构造意义[J]. 地质通报, 31(12): 2001~2014.
- 刘永顺, 辛后田, 周世军, 等. 2010. 阿尔金山东段拉配泉地区前寒武纪及古生代构造演化[M]. 北京: 地质出版社.
- 陆松年, 王惠初, 李怀坤, 等. 2002. 柴达木盆地北缘“达肯大坂群”的再厘定[J]. 地质通报, 21(1): 19~23.
- 彭渊, 马寅生, 刘成林, 等. 2016. 柴北缘宗务隆构造带印支期花岗岩闪长岩地质特征及其构造意义[J]. 地学前缘, 23(2): 206~221.
- 邱检生, 肖娥, 胡建, 等. 2008. 福建北东沿海高分异 I 型花岗岩的成因: 锆石 U-Pb 年代学、地球化学和 Nd-Hf 同位素制约[J]. 岩石学报, 24(11): 2468~2684.
- 邱士东, 辜平阳, 庞新愉, 等. 2015. 青海冷湖北片麻状石英闪长岩的 MC-LA-CP-MS 锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及地质意义[J]. 地质论评, 61(4): 948~960.
- 宋述光, 张贵宾, 张聪, 等. 2013. 大洋俯冲和大陆碰撞的动力学过程: 北祁连-柴北缘高压-超高压变质带的岩石学制约[J]. 科学通报, 58(23): 2240~2245.
- 孙延贵, 张国伟, 王谨, 等. 2004. 秦-昆结合区两期基性岩堵群 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年及其构造意义[J]. 地质学报, 78(1): 65~71.
- 王惠初, 陆松年, 莫宣学, 等. 2005. 柴达木盆地北缘早古生代碰撞造山系统[J]. 地质通报, 24(7): 603~612.
- 王立社, 张巍, 段星星, 等. 2015. 阿尔金环形山花岗片麻岩同位素年龄及成因研究[J]. 岩石学报, 31(1): 119~132.
- 王毅智, 拜永山. 2001. 青海天峻南山蛇绿岩的地质特征及其形成环境[J]. 青海地质, 21(1): 29~35.
- 吴才来, 郅源红, 吴锁平, 等. 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[J]. 中国科学(D 辑), 38(8): 930~949.
- 吴才来, 杨经绥, Wooden J L, 等. 2004. 柴达木北缘都兰野马滩花岗岩锆石 SHRIMP 定年[J]. 科学通报, 49(16): 1667~1672.
- 吴才来, 杨经绥, 王志红, 等. 2001. 柴达木盆地北缘西端冷湖花岗岩[J]. 中古区域地质, 20(1): 74~81.
- 吴福元, 葛文春, 孙德有. 2002. 埃达克岩的概念、识别标志及其地质意义[A]. 肖庆辉, 邓晋福, 马大铨, 等. 花岗岩研究思维与方法[C]. 北京: 地质出版社, 172~191.
- 吴福元, 李献华, 杨进辉, 等. 2007. 花岗岩成因研究的若干问题[J]. 岩石学报, 23(6): 1217~1238.
- 夏文静, 牛漫兰, 闫臻, 等. 2014. 柴北缘牦牛山地区牦牛山组沉积相组合特征[J]. 地质学报, 88(5): 943~955.
- 辛后田, 王惠初, 周世军. 2006. 柴北缘的大地构造演化及其地质事件群[J]. 地质调查与研究, 29(4): 311~320.
- 熊小林, 刘星成, 朱志敏, 等. 2011. 华北埃达克质岩与克拉通破坏: 实验岩石学和地球化学依据[J]. 中国科学(地球科学), 41(5): 654~667.
- 杨经绥, 王希斌, 史仁灯, 等. 2004. 青藏高原北部东昆仑南缘德尔尼蛇绿岩: 一个被肢解了的古特提斯洋壳[J]. 中国地质, 31(3): 225~239.
- 张耀玲, 胡道功, 石玉若, 等. 2010. 东昆仑造山带牦牛山组火山岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其构造意义[J]. 地质通报, 29(11): 1614~1618.
- 赵振华. 2010. 副矿物微量元素地球化学特征在成岩成矿作用研究中的应用[J]. 地学前缘, 17(1): 267~286.
- 朱小辉, 陈丹玲, 刘良, 等. 2014. 柴北缘绿梁山地区早古生代弧后盆地型蛇绿岩的年代学、地球化学及大地构造意义[J]. 岩石学报, 30(3): 822~834.