

·专题研究·

阿拉善雅布赖山二叠纪中酸性岩浆岩年代学、地球化学、锆石 Hf 同位素特征及构造意义

叶珂^{1,2}, 张磊², 王涛², 史兴俊^{2,3}, 张建军^{1,2}, 刘超^{1,2}

(1. 中国地质大学, 北京 100083; 2. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 3. 信阳师范学院城市与环境科学学院, 河南信阳 464000)

摘要: 雅布赖山位于内蒙古自治区阿拉善盟西部, 该地区广泛出露中酸性岩浆岩。锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测年显示, 雅布赖山花岗质岩石形成于早中二叠世, 其中花岗闪长岩年龄为 280 ± 1 Ma, 正长花岗岩年龄为 286 ± 1 Ma, 英安岩年龄为 275 ± 2 Ma, 英云闪长岩年龄为 272 ± 1 Ma。正长花岗岩个别锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为正值, 大多数低于 0 [$\epsilon_{\text{Hf}}(t) = -5.8 \sim +1.8$], 暗示其可能起源于新生地壳物质或形成过程中有亏损地幔物质的加入, 而花岗闪长岩 [$\epsilon_{\text{Hf}}(t) = -13.0 \sim -8.1$], 英云闪长岩 [$\epsilon_{\text{Hf}}(t) = -10.1 \sim -3.3$] 和英安岩 [$\epsilon_{\text{Hf}}(t) = -15.2 \sim -4.9$] 中锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值均低于 0, 表明这些岩浆岩的源区主要为古老的地壳物质, 这与典型的古老陆块上发育的酸性岩浆岩一致。地球化学分析结果表明, 该地区花岗闪长岩和正长花岗岩具有相似的微量和稀土元素组成, 都显示出轻稀土元素相对富集和重稀土元素相对亏损的特征, 并具有微弱-中等的 Eu 负异常; 而英云闪长岩则具有一定程度的 Eu 正异常, 且相比前两者具有较高的 Sr/Y 值 (>300)。排除岩浆在侵位过程中围岩同化混染作用的影响, 中上地壳酸性侵入岩的结晶分异作用难以形成如此高的 Sr/Y 值, 因而英云闪长岩高 Sr/Y 值特征可能是源区特征的反映。因斜长石、角闪石和黑云母均不能显著影响 Sr/Y 值, 所以造成英云闪长岩与花岗闪长岩和正长花岗岩地球化学差异的原因可能是其源区较深而存在石榴子石残留。结合前人研究, 雅布赖山地区及其以东的诺尔公-狼山一带以及华北克拉通北缘广泛分布的晚古生代岩浆岩形成了一条近东西向展布的岩浆岩带。其中, 雅布赖山二叠纪岩浆岩可能形成于宗乃山-沙拉扎山构造带和雅布赖-诺尔公-红古尔玉林构造带拼合的碰撞或碰撞后环境。

关键词: 岩浆岩; 锆石 U-Pb 年龄; Hf 同位素; 地球化学; 雅布赖山; 阿拉善

中图分类号: P588.12; P597

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2016)06-0901-28

Geochronology, geochemistry and zircon Hf isotope of the Permian intermediate-acid igneous rocks from the Yabulai Mountain in western Alxa, Inner Mongolia, and their tectonic implications

YE Ke^{1,2}, ZHANG Lei², WANG Tao², SHI Xing-jun^{2,3}, ZHANG Jian-jun^{1,2} and LIU Chao^{1,2}

(1. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3. Faculty of City and Environmental Science, Xinyang Normal University, Xinyang 464000, China)

Abstract: Located in the western part of Inner Mongolia, the Yabulai Mountain possesses extensively exposed intermediate-felsic plutons and some felsic volcanic rocks. Zircon U-Pb dating indicates that the granitic rocks from the Yabulai Mountain were formed in the Early to Middle Permian, as evidenced by the data from granodiorite (280 ± 1 Ma), K-feldspar granite (286 ± 1 Ma), tonalite (272 ± 1 Ma), and dacite (275 ± 2 Ma). In the

收稿日期: 2015-11-22; 接受日期: 2016-07-12

基金项目: 中国地质调查局资助项目(DD20160123, 12120113094000, 1212011120115)

作者简介: 叶珂(1990-), 岩石学、矿物学、矿床学专业, E-mail: diov87@outlook.com; 通讯作者: 张磊, 副研究员, 主要从事岩浆岩岩石学和大地构造研究, E-mail: leizhang@cags.ac.cn

K-feldspar granite, only a few zircon grains show positive $\epsilon\text{Hf}(t)$, and $\epsilon\text{Hf}(t)$ of most zircons is below 0 [$\epsilon\text{Hf}(t) = -5.8 \sim +1.8$], implying that some juvenile crustal materials or depleted mantle materials were involved in the generation of the rocks. In granodiorite [$\epsilon\text{Hf}(t) = -13.0 \sim -8.1$], tonalite [$\epsilon\text{Hf}(t) = -10.1 \sim -3.3$] and dacite [$\epsilon\text{Hf}(t) = -15.2 \sim -4.9$], zircons are all characterized by $\epsilon\text{Hf}(t)$ lower than 0. Zircon Hf isotope indicates that the sources of these igneous rocks were mainly old crustal materials, and this feature is similar to that of felsic igneous rocks from cratons. The Early Permian granodiorite and the Early Permian K-feldspar granite share similar major and trace element compositions, and REE patterns of granodiorite and K-feldspar granite are high in LREEs and low in HREEs, with weak to moderate Eu negative anomalies. The Middle Permian tonalite exhibits positive Eu anomaly and higher Sr/Y ratios (>300) than the granodiorite and the K-feldspar granite. The high Sr/Y ratio feature of the tonalite suggests that the tonalite might have been generated in the lower crust, with no assimilation/contamination of country rocks or fractionation of felsic magma in the upper crust. Because the presence of plagioclase, amphibole and biotite cannot significantly affect the Sr/Y ratio of the equilibrium melt, the differences of geochemistry between the granodiorite, K-feldspar granite and the tonalite may be attributed to the fact that the source of the tonalite was deeper and the garnet was present in the source. Combined with previous studies, the authors hold that the Permian magmatism probably formed a nearly EW-trending magmatic rock belt along the whole northern margin of North China Craton (NCC) and Alxa Block, and the Permian igneous rocks in the Yabulai Mountain might have been formed in a collision or post-collision setting during the convergence of the Zongnaishan-Shalazhashan and Yabulai-Nuoergong-Honggueryulin belts.

Key words: igneous rock; zircon U-Pb ages; Hf isotope; geochemistry; Yabulai Mountain; Alxa

Fund support: China Geological Survey Project (DD20160123, 12120113094000, 1212011120115)

中亚造山带位于西伯利亚克拉通以南、华北克拉通和塔里木克拉通以北,是全球最大的增生型造山带。中亚造山带的形成与古亚洲洋的闭合具有密切的联系(Sengör and Natal'in, 1996; Jahn *et al.*, 2000; Kovalenko *et al.*, 2004; Windley *et al.*, 2007)。目前古亚洲洋最终关闭事件的时限还存在争议(肖序常等, 1992; Wang *et al.*, 2007; Xiao *et al.*, 2008, 2013; Yang and Zhou, 2009; 韩宝福等, 2010; Han *et al.*, 2010, 2011; Feng *et al.*, 2013; Zheng *et al.*, 2014)。在中亚造山带南缘西段的北疆-北山及邻区,古亚洲洋最终关闭时限存在多种不同的观点,既有晚古生代(肖序常等, 1992; 何国琦等, 1994; Xiao *et al.*, 2004; Zhang *et al.*, 2009)、三叠纪(张立飞等, 2005)、晚石炭世—早二叠世(李锦轶等, 2004, 2006),也有石炭纪(韩宝福等, 2006),甚至部分学者认为北疆-北山地区在晚石炭世—二叠纪可能仍然为活动大陆边缘(肖文交等, 2006; Ao *et al.*, 2010; Mao *et al.*, 2010; Xiao *et al.*, 2010a)。在华北克拉通北缘,一些学者认为晚古生代时期古亚洲洋可能已经闭合,该地区可能处于后碰撞的伸展环境(Xia *et al.*, 2004; Wang *et*

al., 2007; Yang and Zhou, 2009; 韩宝福等, 2010a; Han *et al.*, 2010, 2011; Hegner *et al.*, 2010),而另一些学者提出这一时期华北克拉通北缘相当于安第斯型活动大陆边缘,依然存在古亚洲洋的俯冲作用(Li *et al.*, 2002; Xiao *et al.*, 2008, 2010b, 2013; 李曰俊等, 2009; 张拴宏等, 2010; Zheng *et al.*, 2014)。在中亚造山带南缘和相邻的地体边缘,强烈发育古生代和中生代岩浆岩(Jahn *et al.*, 2000, 2004)。一些学者认为其中一些晚古生代末期(~ 280 Ma)的侵入岩可能是由塔里木地幔柱活动所形成的(Dan *et al.*, 2014),但大多数学者认为这些岩浆岩的形成与中亚造山带的形成或演化具有密切的联系(韩宝福, 2006, 2010; 童英等, 2007; Wang *et al.*, 2009; 张拴宏, 2010)。在中亚造山带西段的北疆-北山及邻区和东段及邻区的华北克拉通北缘,古生代到早中生代岩浆岩的研究都非常深入(Han *et al.*, 1997, 2011; Xiao *et al.*, 2004, 2010b; Wang *et al.*, 2006, 2009; 童英等, 2007; Jian *et al.*, 2008, 2010)。然而,位于这两个区域之间的中亚造山带中段南缘及邻区的阿拉善北部地区,虽然古生代到早中生代岩浆岩极为发育,但针对

这些岩浆岩的研究一直相对薄弱,这极大地制约了对该地区岩浆演化及构造环境的认识。

阿拉善北部古生代-早中生代岩浆岩主要发育于北部宗乃山-沙拉扎山构造带和南部雅布赖-诺尔公-红古尔玉林构造带。针对雅布赖-诺尔公-红古尔玉林构造带中段和东段的诺尔公-红古尔玉林地区发育的侵入岩,近年来开展了很多研究(史兴俊等, 2012; 张建军等, 2012; 李杰, 2012; Wang *et al.*, 2014)。相对而言,该构造带西段的雅布赖-孟根地区岩浆岩一直缺乏可靠的年代学和同位素资料,其岩浆活动时空特征和成因并不清楚,这限制了对整个雅布赖-诺尔公-红古尔玉林构造带乃至整个阿拉善北部岩浆岩成因和构造演化的认识。雅布赖山地区侵入岩能否与诺尔公-红古尔玉林地区的岩浆岩进行对比还有待进一步确认。雅布赖山地区晚古生代侵入岩的研究对于认识雅布赖-诺尔公-红古尔玉林地区岩浆岩的形成时间、演化过程及构造背景具有重要意义。本文报道雅布赖山地区中酸性岩浆岩新的锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素和地球化学资

料,旨在深入分析该时期岩浆成因、演化及构造背景,为深入了解阿拉善地区北部晚古生代岩浆作用和构造演化提供新的资料。

1 地质背景

阿拉善盟北部的一部分是中亚造山带的组成部分,其南部的阿拉善地块是阿拉善盟的主体,以东为华北克拉通,向西与甘肃北山和塔里木克拉通相接(图 1a)。阿拉善北部地区存在两条蛇绿岩带(图 1b),北部为恩格尔乌苏蛇绿岩带,南部为查干础鲁蛇绿岩带(王廷印等, 1992, 1994, 1998; 吴泰然等, 1993; Zheng *et al.*, 2014)。多数学者认为恩格尔乌苏蛇绿混杂岩带是阿拉善地块与中亚造山带的界限,代表了古大洋闭合的位置(王廷印等, 1994, 1998; Wu *et al.*, 1998; Zheng *et al.*, 2014),而查干础鲁蛇绿岩带被认为代表了闭合的弧后洋盆(王廷印等, 1998; 李俊建, 2006; Zheng *et al.*, 2014)。最近研究认为阿拉善地块与北部中亚造山带的界限

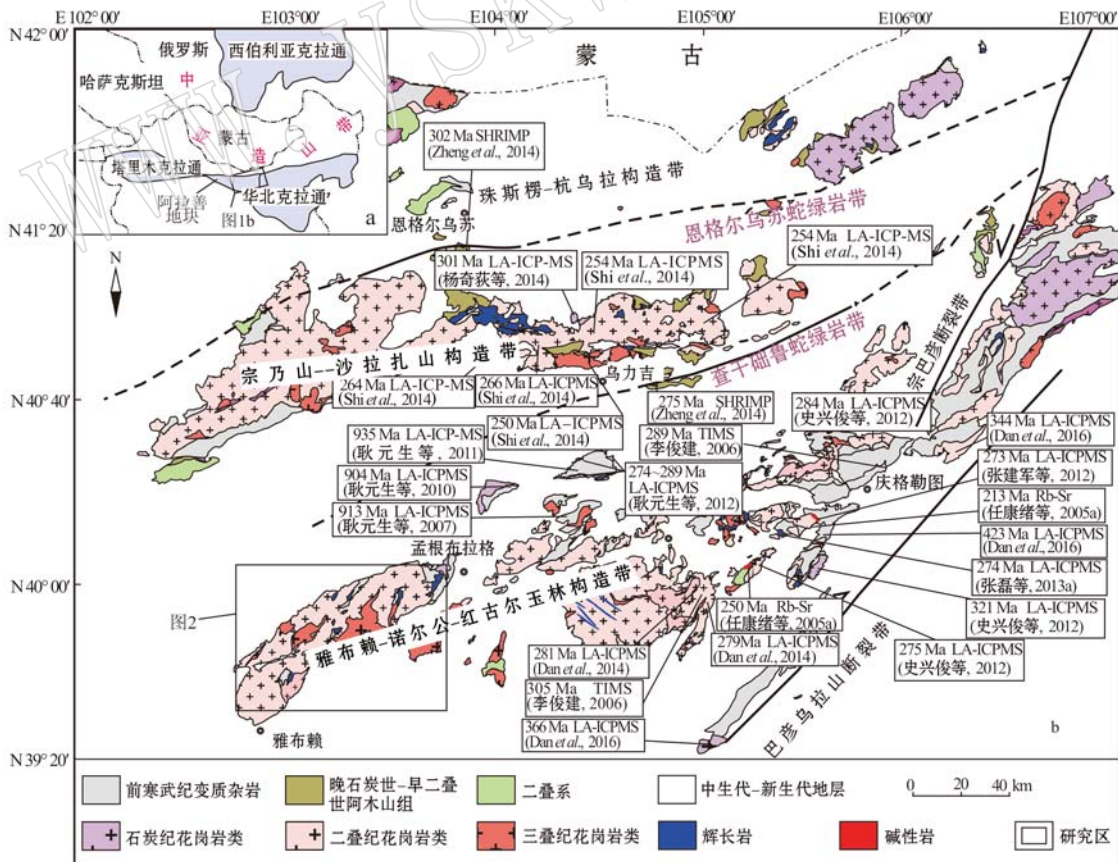


图 1 阿拉善地区大地构造位置(a)和阿拉善北部地质简图(b)(据史兴俊等, 2014)

Fig. 1 Tectonic location (a) and geological map (b) of northern Alxa (after Shi Xingjun *et al.*, 2014)

可能位于查干础鲁蛇绿岩带,而并非恩格尔乌苏蛇绿岩带(Shi *et al.*, 2014; 史兴俊等, 2014; Zhang *et al.*, 2015)。这两条蛇绿岩带将阿拉善北部自北向南划分为3个构造带: 珠斯楞-杭乌拉构造带、宗乃山-沙拉扎山构造带和雅布赖-诺尔公-红古尔玉林构造带(图1)。

珠斯楞-杭乌拉构造带呈东西向延伸,东延至蒙古国境内,西部被巴丹吉林沙漠覆盖。这一地区在古生代长期接受沉积,除晚古生代出现了一些沉积间断,古生代各个时期都发育了良好的沉积地层,从寒武系到志留系为连续沉积的深海-浅海相碎屑岩建造,而二叠纪发育复理石建造(吴泰然等, 1993; Feng *et al.*, 2013)。这些地层被花岗岩、辉长岩等岩体侵入,其中的花岗岩被认为是晚古生代和中生代两期岩浆活动的产物(内蒙古自治区地质矿产局, 1991)。根据前人研究成果,珠斯楞-杭乌拉构造带具有亲中亚造山带的特征,构造带内含有具有前寒武纪基底的微陆块(周印章等, 2013),在早古生代该构造带为被动大陆边缘,晚古生代转化为活动大陆边缘(吴泰然等, 1993)。宗乃山-沙拉扎山构造带位于恩格尔乌苏蛇绿岩带和查干础鲁蛇绿岩带之间,该区主要出露的地层为石炭系-二叠系阿木山组,该组地层下部以浅海相中酸性火山碎屑岩、砂岩和板岩为主,中部为浅海相碳酸盐岩建造,上部是以砾岩、长石石英砂岩为代表的粗碎屑岩建造(Zhang *et al.*, 2013)。该构造带西段还零星散布前寒武纪斜长片麻岩、变粒岩和角闪岩等,呈残留顶盖状产出(宁夏回族自治区矿产局, 1982)^①。这些前寒武纪岩石曾被认为是阿拉善群的组成部分,而最近一些研究却提出它们形成于~1.4 Ga,可能并不是阿拉善群(史兴俊, 2015)。宗乃山-沙拉扎山构造带内大面积展布晚古生代花岗岩类,包括花岗闪长岩、二长花岗岩、英云闪长岩等(Zhang *et al.*, 2013; Shi *et al.*, 2014; 杨奇荻, 2014; 史兴俊等, 2014; 刘治博等, 2014a, 2014b)。这些花岗岩都以具有正 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为特征,类似于中亚造山带花岗岩,不同于阿拉善地块内部的花岗岩(史兴俊等, 2014; Shi *et al.*, 2014)。

查干础鲁蛇绿岩带以南的雅布赖-诺尔公-红古尔玉林构造带出露大量的前寒武纪各类变质岩(图1),包括斜长角闪岩、花岗质片麻岩等,主要分布于

东段的诺尔公、巴彦乌拉山以及狼山南部地区,而在西段的雅布赖山地区出露较少。目前阿拉善地块是否存在太古宙基底还存在较大争议,带内这些前寒武纪变质岩的形成时代多为古元古代-新元古代(沈其韩等, 2005; Li *et al.*, 2005; 耿元生等, 2006, 2010; Dan *et al.*, 2012; Wan *et al.*, 2015)。这些前寒武纪变质岩一般曾被统称为“阿拉善群”,近年来,许多学者对其进行了重新划分(李俊建等, 2006; 耿元生等, 2006, 2007)。雅布赖-诺尔公-狼山构造带基本缺失古生界,仅零星出露石炭系-二叠系阿木山组下段的凝灰岩和砂岩、侏罗系碎屑岩和白垩系砾岩、砂岩、泥岩等。带上还零星展布一些火山岩,东段诺尔公一带出露石炭纪球粒流纹岩(包创等, 2012),西段孟根布拉格附近有少量二叠纪酸性火山岩出露。晚古生代的侵入岩在带内广泛发育,其东段诺尔公-红古尔玉林地区主要为晚石炭世-早二叠世花岗岩类(李俊健, 2006; 仵康林, 2011; 耿元生等, 2012; 史兴俊等, 2012; 张建军等, 2012; 张磊等, 2013a; Dan *et al.*, 2014),并出露少量印支期偏碱性岩石,如苏亥图(250 ± 18 Ma)、温都尔浩(213 ± 10 Ma)等以石英正长岩为主的富碱侵入岩(Rb-Sr等时线年龄, 任康绪, 2005a)。西段雅布赖山地区同样出露大面积花岗岩类岩石,早期区域地质调查认为其主要形成于海西期,少量侵入岩形成于印支期。最近,有报道雅布赖山主体花岗闪长岩的锆石 U-Pb 年龄为 273 ± 7 Ma(仵康林, 2011)。部分学者认为雅布赖山花岗闪长岩与其东部诺尔公地区花岗闪长岩是同期岩浆活动的产物,并根据诺尔公地区花岗闪长岩的锆石 U-Pb 年龄(265 ± 1 Ma),提出雅布赖山的主体应形成于中二叠世(李杰, 2012)。

2 岩体地质及岩相学特征

雅布赖山位于雅布赖盐场与孟根布拉格以北(图2),长约100 km,最宽处约17 km,面积约1500 km²,是一个以花岗闪长岩为主体同时含有正长花岗岩、花岗岩和英云闪长岩等酸性侵入岩的复合式岩体。在雅布赖山东北部,零星出露一些二叠纪英安质火山岩,这些火山岩与前寒武纪岩石为断层接触关系,并被第四系所覆盖。本文分别选取了雅布赖山地区3套具有代表性的侵入岩(花岗闪长岩、正长花

① 宁夏回族自治区矿产局. 1982. 中华人民共和国区域地质调查报告(沙拉套儿汉图幅, 1:20万)。

岗岩和英云闪长岩)和一套火山岩(英安岩)开展了研究。雅布赖山复合式岩体的主体为花岗闪长岩,多处可见其侵入于前寒武纪片麻岩和辉长岩中,并被侏罗系、白垩系不整合覆盖。野外观察到花岗闪长岩呈浅红色,中细粒花岗结构,块状构造,弱变形,可见暗色矿物的定向排列。样品(孟根布拉格西南约 20 km, GPS 坐标: N39°58′14.4″, E103°38′39.6″)显示该花岗闪长岩主要由斜长石(45%~50%)、石英(20%~25%)、钾长石(10%~15%)、黑云母(10%~15%)和少量角闪石(~5%)组成,副矿物有磷灰石、榍石。显微镜下可见石英呈他形粒状,有的石英在斜长石中呈蠕虫状生长构成蠕虫结构;斜长石发育聚片双晶;钾长石呈他形粒状,交代斜长石;黑云母呈片状,颗粒较小,解理发育,少数出现绿泥石化;角闪石呈半自形柱状(图 3a)。

在雅布赖盐场东北约 34 km 处,出露小规模北东向正长花岗岩侵入体。早期地质研究认为该侵入体可能与其西侧的花岗岩为同一岩体,是整个岩体的中心相,并认为这期岩浆活动形成于印支期(甘肃省地质调查局,1978)^①。在野外工作中,未观察到该正长花岗岩与西侧花岗岩体的接触关系。该正长花

岗岩呈肉红色,中粗粒结构,块状构造,风化强烈。样品(GPS 坐标: N39°38′22.5″, E103°3′59.4″)显示岩石主要由钾长石(40%~45%)、石英(25%~35%)、斜长石(15%~20%)和黑云母(3%~5%)组成。斜长石发育聚片双晶,多已绢云母化;钾长石以条纹长石为主,颗粒较大;黑云母多已绿泥石化(图 3b)。副矿物有锆石、磷灰石等。

英云闪长岩位于孟根布拉格西南约 15 km(GPS 坐标: N39°57′3.6″, E103°41′23.2″)。岩体面积较小,北部侵入到前寒武纪阿拉善群变质杂岩和元古宙辉长岩中,与围岩呈交代侵入接触关系。岩石为灰白色,中细粒花岗结构,片麻状构造,可见明显的矿物定向排列,主要由斜长石(60%~65%)、石英(25%~30%)和黑云母(3%~5%)组成,副矿物有磷灰石、磁铁矿等。镜下可见石英具有明显的亚颗粒化(图 3c),云母定向排列,斜长石颗粒较大,发育明显的聚片双晶;钾长石可见卡式双晶;黑云母呈片状,多色性明显,解理发育。

在孟根布拉格西南,出露一些二叠纪英安岩(图 2)。这些英安岩主要呈北东-南西向展布,与前寒武纪阿拉善群片麻岩呈断层接触关系,与花岗闪长岩

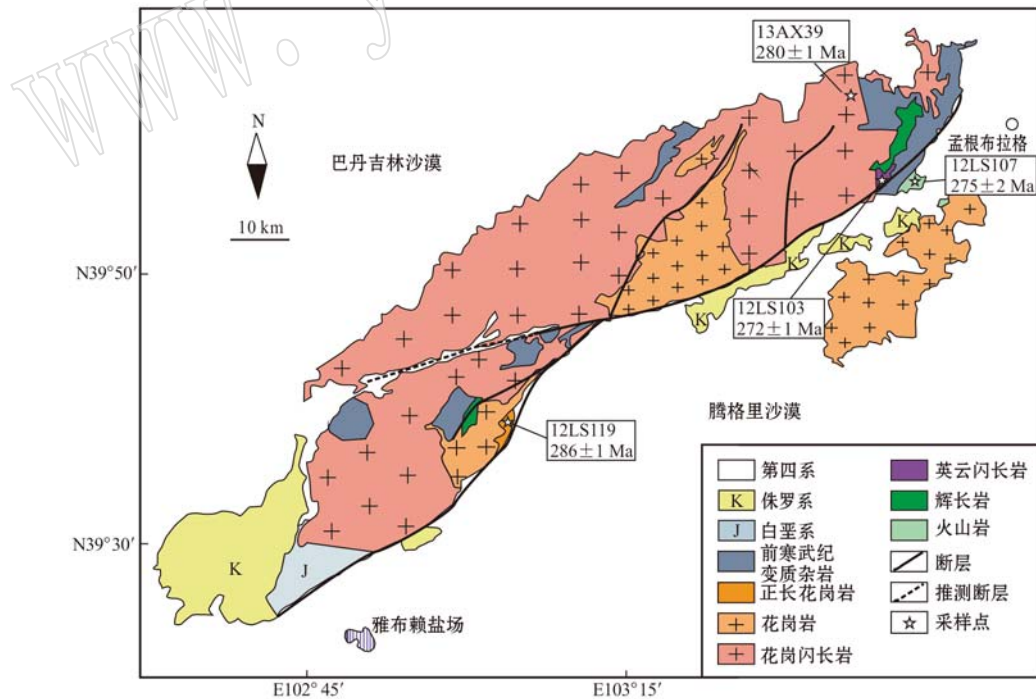


图 2 雅布赖山地区地质简图和锆石样品采样位置

Fig. 2 Geological map of the Yabulai area and sampling locations

① 甘肃省地质调查局, 1978. 中国人民共和国区域地质调查报告(阿贵庙幅, 1:200 000), 1~189.

及英云闪长岩无接触关系。本文所分析的英安岩样品采自孟根布拉格西南约 14 km (GPS 坐标: N39°55′56.9″, E103°41′14.3″), 岩石整体呈灰黑色, 块状构造。在显微镜下呈斑状结构, 斑晶含量约 20%, 粒

径为 0.5~1.0 cm, 斑晶主要为斜长石(约 20%), 石英较少(约 7%), 暗色矿物斑晶多已蚀变(约 3%) (图 3d)。基质主要由长石(约 40%)和石英(20%)组成。

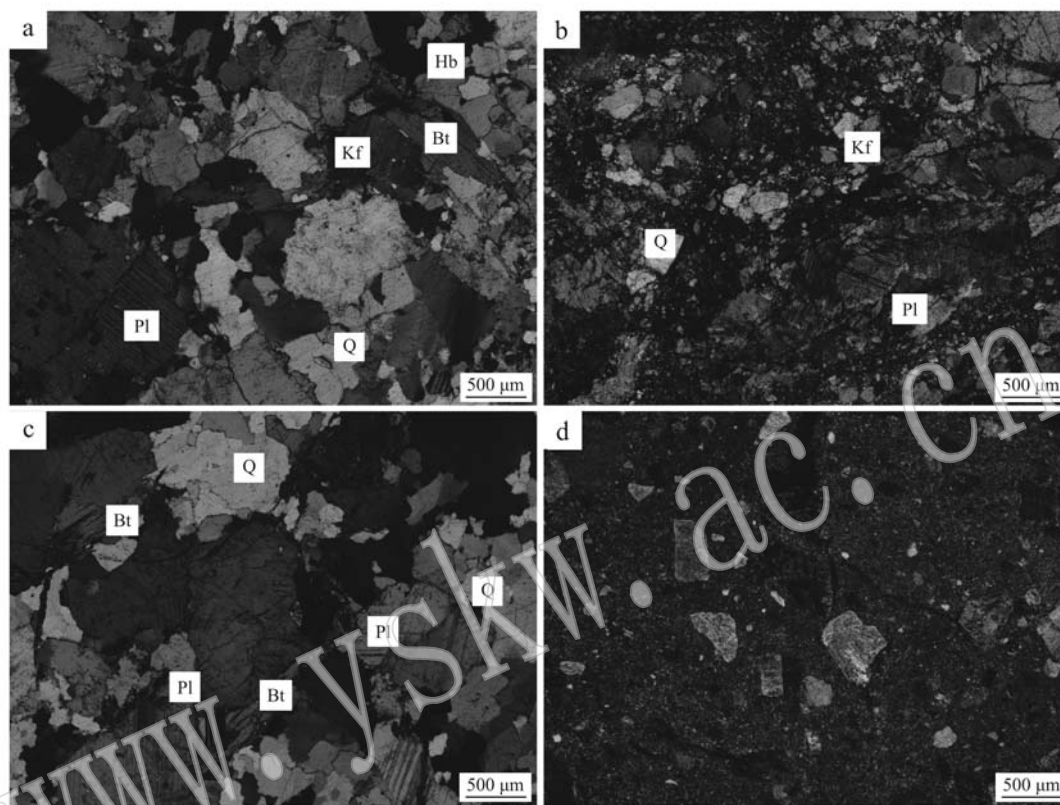


图 3 雅布赖山岩浆岩正交偏光镜显微照片

Fig. 3 Microphotographs of the magmatic rocks in the Yabulai Mountain (crossed nicols)

a—花岗闪长岩; b—正长花岗岩; c—英云闪长岩; d—英安岩; Q—石英; Pl—斜长石; Kf—钾长石; Bt—黑云母
a—granodiorite; b—K-feldspar granite; c—tonalite; d—dacite; Q—quartz; Pl—plagioclase; Kf—K-feldspar; Bt—biotite

3 分析方法

3.1 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素分析

锆石单矿物通过常规方法分选完成, 挑选晶形和透明度较好的锆石颗粒制备环氧树脂靶。对样品靶上的锆石进行了透射光、反射光和阴极发光(CL)拍照。其中, 阴极发光拍照在北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室 Quanta 200 FEG 扫描电镜下完成。选取透射光图像中无包裹体、反射光下无裂隙、阴极发光下成分均匀的锆石颗粒进行 U-Pb 定年。锆石 U-Pb 同位素分析在天津地质矿产研究所同位素实验室完成。分析采用配有 193 nm 激光取样系统的 Neptune 多接收电感耦合等离子质谱仪

(MC-ICP-MS)。激光剥蚀的束斑为 35 μm, 能量密度为 13~14 J/cm², 频率为 8~10 Hz。激光剥蚀物质以 He 为载气送入质谱仪中。采用 TEMORA 和 GJ-1 作为外部锆石年龄标准进行 U、Pb 同位素分馏校正, 具体实验流程可参见耿建珍等(2012)和李怀坤等(2009)。同位素数据处理和年龄计算、谐和图绘制分别采用 ICPMSDataCal (Liu *et al.*, 2008) 和 ISOPLLOT 软件 (Ludwig, 2008), 采用 ²⁰⁸Pb 对普通铅进行校正, 利用 NIST612 作为外标计算锆石样品的 Pb、U 和 Th 含量。

3.2 锆石 Hf 同位素分析

锆石 Hf 同位素测试在中国地质科学院矿产资源研究所国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室 Neptune 多接收等离子质谱上完成。实验过程

中,通过 Newwave UP213 紫外激光剥蚀系统对锆石进行剥蚀取样,激光束斑直径为 55 μm 。然后采用 He 作为载气将样品送进质谱仪进行测试。使用锆石国际标样 GJ1 作为参考物质对实验过程进行监测校正。相关仪器运行条件及详细分析流程见侯可军等(2007)。进行 Hf 同位素分析的锆石均已完成 U-Pb 年龄分析,在锆石上选取与 U-Pb 定年分析相同的位置或者结构相同的位置开展 Hf 同位素分析。分析过程中,锆石标准样品 GJ1 的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 测试值的加权平均值为 $0.282\ 015 \pm 0.000\ 028$ (2SD, $n = 10$),与文献报道值在误差范围内完全一致(侯可军等,2007)。锆石 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 的初始比值通过对应样品的锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄进行校正,并计算其 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值和 Hf 地壳模式年龄。

3.3 主要氧化物和微量元素含量分析

样品的全岩主量元素和微量元素地球化学分析在加拿大温哥华 ACME 实验室完成。详细的样品处理和分析方法为:准确称取 0.20 g 粉末样品,将其与 1.50 g LiBO_2 助熔剂放置于石墨坩埚内进行充分混合。将样品/助熔剂的混合物于马弗炉上在 1 050 $^{\circ}\text{C}$ 的温度下加热 15 min。提取熔融后的混合物,倒入 100 mL 由去离子水和 ACS 级纯度硝酸配置的 5% 浓度的 HNO_3 中。摇晃溶液 2 h 使其充分溶解,取其一部分置入聚丙烯分析管内。将标定标样、检验标样和本底空白样加入样品序列。通过电感耦合等离子光谱分析(ICP-AES)进行主要氧化物和 Ba、Sc、Cu、Zn 和 Ni 含量的分析。在 ICP-MS 上进行其它微量元素以及稀土元素含量的分析。对于贵金属的分析,另外单独选取 0.50 g 样品,置于 3 mL 高温的(95 $^{\circ}\text{C}$)王水中进行溶解,通过 ICP-MS 进行贵金属分析。详细的分析方法与 ACME 中的 4A4B 组的流程相同,所有的分析精度均优于 $\pm 3\%$ 。

4 测试结果

4.1 锆石 U-Pb 年龄

分别对雅布赖山花岗闪长岩、正长花岗岩和英云闪长岩等侵入岩以及英安质火山岩样品开展了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年,所分析锆石的阴极发光图像和分析位置见图 4,分析数据见表 1。

花岗闪长岩(13AX39)中的锆石在透射光下呈无色透明状,外形主要为长柱状或短柱状,颗粒较

小,粒径在 100~150 μm ,长宽比多为 3:1。在阴极发光图像(图 4a)上,多数锆石发育清晰的韵律环带结构,部分可见核-边结构。选取环带发育的 25 颗锆石在其环带边部共进行了 25 个点的分析,所有点的分析结果均位于锆石 U-Pb 谐和线附近(图 5a)。其中, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄分布在 282~277 Ma 之间,加权平均值为 280 ± 1 Ma (MSWD=0.52)。

正长花岗岩(12LS119)中的锆石呈无色透明状,个别有细小的包裹体。晶体颗粒较小,外形主要为长柱状或短柱状,长宽比为 2:1,颗粒长度为 80~150 μm 。在阴极发光图像上所有锆石均可见清晰的环带结构(图 4b)。选取 24 颗锆石共进行了 24 个分析点的测试,分析结果均位于锆石 U-Pb 谐和线上, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄集中在 291~282 Ma 之间,加权平均值为 286 ± 1 Ma (MSWD=1.9)(图 5b)。

英云闪长岩(12LS103)中挑选出的锆石在透射光下无色透明,均具有非常高的自形程度,多为长柱状,颗粒长度从 150 μm 到 400 μm 不等,长宽比约为 2:1~4:1。在阴极发光图像(图 4c)上,所有锆石均显示出清晰的震荡环带结构。选取 24 颗锆石共进行了 24 个点的分析,所有点的分析结果均位于锆石 U-Pb 谐和线上(图 5c),其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄集中在 278~269 Ma 之间,加权平均值为 272 ± 1 Ma (MSWD=1.6)。

英安岩(12LS107)中挑选出的锆石多数为呈无色透明状、半自形到自形的颗粒,一般为长柱状,长轴长度介于 150 μm 和 200 μm 之间。在阴极发光(CL)图像(图 4d)上,锆石可见清晰的韵律环带结构,无变质边或继承核。选取 16 颗锆石共进行了 16 个分析点的测试。在 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ — $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 谐和图上,除了第 5 个分析点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄为 407 Ma,偏离锆石 U-Pb 谐和曲线外,其余 15 个分析点的测试结果均落在谐和曲线上, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄加权平均值为 275 ± 2 Ma (MSWD=1.8)(图 5d)。

4.2 锆石 Hf 同位素

锆石样品的 Lu-Hf 同位素分析结果见表 2。分析结果表明,花岗闪长岩(280 ± 1 Ma)具有相对较低的初始 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值(0.282 232~0.282 370)、 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值(-13.0~-8.1)和相对较老的 Hf 二阶段模式年龄(2 120~1 812 Ma)。正长花岗岩(286 ± 1 Ma)具有相对较高的初始 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值(0.282 438~0.282 658)和 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值(-5.8~+1.8)以及相对

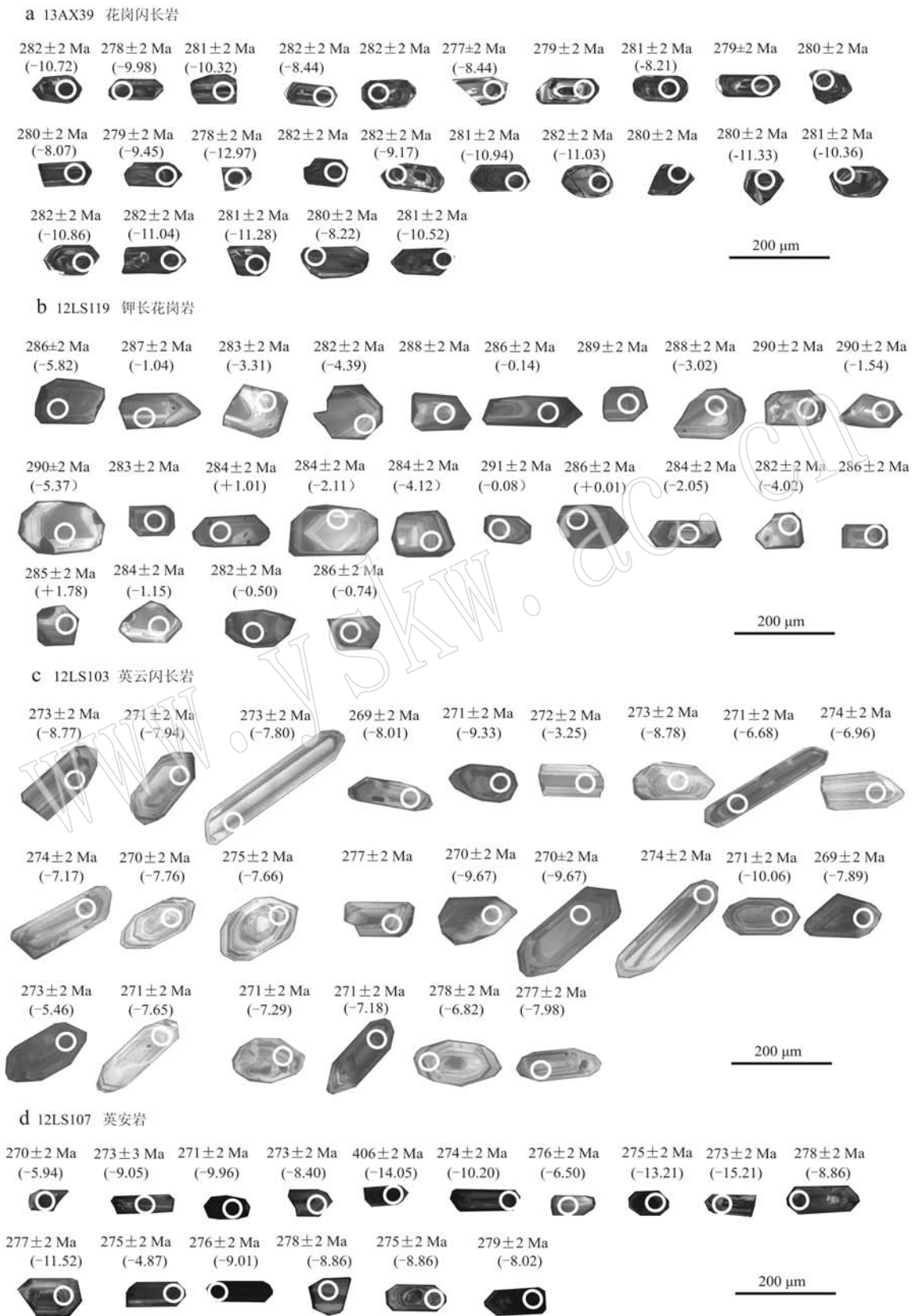


图 4 锆石阴极发光图像、分析位置及分析点的²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄和 εHf(*t*) 值

Fig. 4 Cathodoluminescence (CL) images, analytical locations, the ²⁰⁶Pb/²³⁸U ages and εHf(*t*) values of the analyzed zircons

表 1 雅布赖山地区岩浆岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 分析数据
Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb data for the igneous rocks in the Yabulai Mountain

点号	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$		Th/U	同位素比值				年龄/Ma									
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	1σ						
13AX39 花岗岩闪长岩																	
1	435	560	0.78	0.0538	0.0006	0.3315	0.0036	0.0447	0.0002	0.7824	0.0024	361	24	291	3	282	2
2	230	414	0.56	0.0530	0.0006	0.3223	0.0038	0.0441	0.0002	0.5604	0.0038	328	26	284	3	278	2
3	179	328	0.54	0.0533	0.0008	0.3272	0.0052	0.0445	0.0003	0.5486	0.0024	344	35	287	5	281	2
4	392	472	0.83	0.0521	0.0006	0.3209	0.0036	0.0446	0.0003	0.8374	0.0160	291	24	283	3	282	2
5	451	507	0.89	0.0529	0.0006	0.3259	0.0042	0.0447	0.0003	0.8966	0.0033	324	27	286	4	282	2
6	396	317	1.25	0.0526	0.0009	0.3183	0.0055	0.0439	0.0003	1.2575	0.0025	312	38	281	5	277	2
7	401	321	1.25	0.0525	0.0011	0.3197	0.0071	0.0442	0.0003	1.2591	0.0038	308	48	282	6	279	2
8	733	810	0.90	0.0516	0.0004	0.3169	0.0027	0.0445	0.0003	0.9114	0.0077	269	18	280	2	281	2
9	468	467	1.00	0.0520	0.0006	0.3165	0.0035	0.0442	0.0003	1.0088	0.0037	285	25	279	3	279	2
10	766	498	1.54	0.0531	0.0005	0.3253	0.0035	0.0444	0.0003	1.5487	0.0039	335	23	286	3	280	2
11	520	491	1.06	0.0524	0.0005	0.3203	0.0033	0.0444	0.0003	1.0648	0.0037	301	22	282	3	280	2
12	361	442	0.82	0.0531	0.0006	0.3236	0.0036	0.0442	0.0003	0.8220	0.0030	333	24	285	3	279	2
13	206	344	0.60	0.0530	0.0009	0.3220	0.0054	0.0440	0.0003	0.6046	0.0015	330	37	283	5	278	2
14	496	428	1.16	0.0529	0.0006	0.3269	0.0040	0.0448	0.0003	1.1666	0.0083	326	28	287	3	282	2
15	269	289	0.93	0.0535	0.0009	0.3292	0.0057	0.0446	0.0003	0.9380	0.0016	350	38	289	5	281	2
16	273	393	0.70	0.0521	0.0007	0.3206	0.0044	0.0446	0.0003	0.7014	0.0041	290	31	282	4	281	2
17	303	372	0.82	0.0525	0.0008	0.3231	0.0052	0.0447	0.0003	0.8210	0.0034	306	35	284	5	282	2
18	375	594	0.63	0.0518	0.0005	0.3163	0.0031	0.0443	0.0002	0.6354	0.0010	275	22	279	3	280	2
19	108	344	0.31	0.0533	0.0011	0.3257	0.0067	0.0443	0.0003	0.3169	0.0003	341	45	286	6	280	2
20	247	390	0.63	0.0518	0.0010	0.3178	0.0060	0.0445	0.0003	0.6360	0.0031	276	43	280	5	281	2
21	180	376	0.48	0.0521	0.0009	0.3215	0.0056	0.0448	0.0003	0.4808	0.0037	288	39	283	5	282	2
22	28	451	0.06	0.0521	0.0007	0.3209	0.0042	0.0446	0.0003	0.0628	0.0004	291	30	283	4	282	2
23	421	526	0.80	0.0527	0.0006	0.3237	0.0040	0.0446	0.0003	0.8064	0.0037	316	28	285	4	281	2
24	202	342	0.59	0.0517	0.0007	0.3165	0.0046	0.0444	0.0002	0.5950	0.0013	273	33	279	4	280	2
25	386	524	0.74	0.0530	0.0006	0.3256	0.0038	0.0445	0.0002	0.7404	0.0017	330	26	286	3	281	2
12LS119 正长花岗岩																	
1	169	368	0.46	0.0520	0.0033	0.3256	0.0225	0.0454	0.0003	0.0154	0.0009	285	147	286	20	286	2
2	157	266	0.59	0.0522	0.0037	0.3278	0.0237	0.0456	0.0003	0.0147	0.0009	293	161	288	21	287	2
3	76	170	0.44	0.0528	0.0023	0.3264	0.0153	0.0449	0.0003	0.0147	0.0007	319	101	287	13	283	2
4	118	269	0.44	0.0526	0.0031	0.3239	0.0199	0.0447	0.0003	0.0141	0.0006	312	135	285	17	282	2
5	106	177	0.60	0.0517	0.0025	0.3255	0.0161	0.0457	0.0003	0.0141	0.0007	271	111	286	14	288	2

续表 1-1
Continued Table 1-1

点号	$\alpha_{\text{Th}}/10^{-6}$		Th/U	同位素比值										年龄/Ma			
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
6	81	256	0.32	0.0525	0.0018	0.3287	0.0116	0.0454	0.0003	0.0148	0.0005	307	77	289	10	286	2
7	157	377	0.42	0.0523	0.0024	0.3310	0.0154	0.0459	0.0003	0.0143	0.0006	299	103	290	14	289	2
8	97	251	0.39	0.0518	0.0010	0.3263	0.0064	0.0457	0.0003	0.0138	0.0020	276	42	287	6	288	2
9	216	463	0.47	0.0521	0.0022	0.3304	0.0142	0.0460	0.0003	0.0140	0.0004	291	96	290	12	290	2
10	168	281	0.60	0.0519	0.0030	0.3319	0.0306	0.0460	0.0004	0.0129	0.0008	280	132	291	27	290	2
11	160	214	0.75	0.0527	0.0012	0.3322	0.0079	0.0461	0.0003	0.0126	0.0003	315	52	291	7	290	2
12	239	447	0.54	0.0525	0.0019	0.3251	0.0123	0.0449	0.0003	0.0112	0.0003	306	84	286	11	283	2
13	192	238	0.81	0.0522	0.0044	0.3240	0.0271	0.0450	0.0004	0.0110	0.0003	293	192	285	24	284	2
14	80	107	0.75	0.0532	0.0017	0.3299	0.0094	0.0450	0.0003	0.0107	0.0003	336	73	289	8	284	2
15	108	262	0.41	0.0524	0.0018	0.3256	0.0115	0.0451	0.0003	0.0108	0.0003	301	79	286	10	284	2
16	117	247	0.47	0.0525	0.0010	0.3357	0.0065	0.0461	0.0003	0.0129	0.0015	307	42	294	6	291	2
17	273	568	0.48	0.0526	0.0013	0.3290	0.0083	0.0454	0.0003	0.0122	0.0003	311	55	289	7	286	2
18	427	583	0.73	0.0525	0.0025	0.3258	0.0175	0.0450	0.0004	0.0097	0.0004	308	110	286	15	284	2
19	11	172	0.06	0.0527	0.0017	0.3248	0.0108	0.0447	0.0003	0.0112	0.0003	314	74	286	9	282	2
20	154	285	0.54	0.0523	0.0020	0.3272	0.0127	0.0454	0.0003	0.0096	0.0006	300	86	287	11	286	2
21	127	294	0.43	0.0527	0.0018	0.3279	0.0115	0.0451	0.0003	0.0121	0.0005	316	78	288	10	285	2
22	154	261	0.59	0.0521	0.0014	0.3239	0.0088	0.0450	0.0003	0.0103	0.0006	292	60	285	8	284	2
23	159	366	0.43	0.0527	0.0015	0.3247	0.0098	0.0447	0.0003	0.0101	0.0006	316	66	286	9	282	2
24	257	323	0.80	0.0525	0.0012	0.3261	0.0079	0.0454	0.0003	0.0080	0.0043	309	51	287	7	286	2
12LS103 英云闪长岩																	
1	220	310	0.71	0.0516	0.0027	0.3082	0.0165	0.0433	0.0003	0.0112	0.0005	267	121	273	15	273	2
2	144	186	0.78	0.0523	0.0030	0.3097	0.0182	0.0430	0.0003	0.0117	0.0004	297	133	274	16	271	2
3	151	145	1.04	0.0525	0.0042	0.3124	0.0257	0.0432	0.0004	0.0118	0.0004	305	183	276	23	273	2
4	132	154	0.86	0.0530	0.0021	0.3105	0.0123	0.0425	0.0003	0.0128	0.0004	327	89	275	11	269	2
5	393	433	0.91	0.0522	0.0015	0.3092	0.0087	0.0430	0.0003	0.0125	0.0004	293	64	274	8	271	2
6	413	344	1.20	0.0529	0.0021	0.3152	0.0127	0.0432	0.0003	0.0137	0.0004	326	89	278	11	272	2
7	158	217	0.73	0.0523	0.0018	0.3115	0.0107	0.0432	0.0003	0.0129	0.0004	297	78	275	9	273	2
8	247	254	0.97	0.0527	0.0008	0.3123	0.0047	0.0430	0.0003	0.0125	0.0015	316	33	276	4	271	2
9	227	241	0.94	0.0517	0.0017	0.3092	0.0103	0.0434	0.0003	0.0122	0.0003	271	76	274	9	274	2
10	187	241	0.78	0.0520	0.0031	0.3110	0.0187	0.0434	0.0003	0.0114	0.0003	285	135	275	17	274	2
11	154	147	1.05	0.0524	0.0015	0.3096	0.0091	0.0428	0.0003	0.0119	0.0003	303	66	274	8	270	2

续表 1-2
Continued Table 1-2

点号	$^{207}\text{Pb}/10^{-6}$		Th/U	同位素比值										年龄/Ma			
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
12	467	406	1.15	0.0524	0.0017	0.3147	0.0105	0.0436	0.0003	0.0128	0.0003	302	75	278	9	275	2
13	315	273	1.15	0.0511	0.0026	0.3095	0.0159	0.0439	0.0003	0.0127	0.0003	247	118	274	14	277	2
14	130	157	0.83	0.0524	0.0013	0.3088	0.0070	0.0427	0.0003	0.0124	0.0003	305	58	273	6	270	2
15	325	529	0.62	0.0534	0.0023	0.3148	0.0139	0.0427	0.0003	0.0116	0.0004	348	98	278	12	270	2
16	239	222	1.08	0.0530	0.0008	0.3173	0.0050	0.0434	0.0003	0.0127	0.0017	328	35	280	4	274	2
17	339	376	0.90	0.0529	0.0013	0.3132	0.0075	0.0429	0.0003	0.0121	0.0003	325	54	277	7	271	2
18	407	406	1.00	0.0518	0.0019	0.3048	0.0113	0.0427	0.0003	0.0114	0.0003	278	84	270	10	269	2
19	17	272	0.06	0.0514	0.0020	0.3064	0.0119	0.0432	0.0003	0.0117	0.0003	261	88	271	10	273	2
20	164	226	0.72	0.0522	0.0017	0.3091	0.0105	0.0430	0.0003	0.0117	0.0003	292	77	273	9	271	2
21	256	242	1.06	0.0528	0.0022	0.3126	0.0132	0.0430	0.0003	0.0122	0.0003	319	94	276	12	271	2
22	236	213	1.10	0.0507	0.0022	0.2996	0.0131	0.0429	0.0003	0.0127	0.0003	227	99	266	12	271	2
23	182	206	0.88	0.0520	0.0043	0.3155	0.0257	0.0440	0.0003	0.0130	0.0004	284	187	278	23	278	2
24	108	119	0.90	0.0512	0.0007	0.3097	0.0045	0.0439	0.0003	0.0124	0.0015	248	32	274	4	277	2
12LS107 英安岩																	
1	575	661	0.87	0.0530	0.0031	0.3124	0.0194	0.0427	0.0003	0.0118	0.0004	329	134	276	17	270	2
2	309	371	0.83	0.0529	0.0009	0.3153	0.0059	0.0432	0.0002	0.0098	0.0003	324	40	278	5	273	2
3	935	835	1.12	0.0526	0.0016	0.3110	0.0098	0.0429	0.0002	0.0105	0.0003	311	70	275	9	271	2
4	235	394	0.60	0.0518	0.0006	0.3084	0.0036	0.0432	0.0002	0.0102	0.0004	276	26	273	3	273	2
5	678	2513	0.27	0.0549	0.0011	0.4927	0.0103	0.0650	0.0004	0.0159	0.0004	410	45	407	9	406	2
6	367	429	0.85	0.0524	0.0020	0.3111	0.0123	0.0435	0.0003	0.0135	0.0003	301	89	275	11	274	2
7	149	251	0.59	0.0525	0.0008	0.3164	0.0050	0.0437	0.0003	0.0114	0.0004	306	34	279	4	276	2
8	1036	978	1.06	0.0512	0.0007	0.3115	0.0046	0.0441	0.0002	0.0123	0.0018	250	32	275	4	278	2
9	941	1114	0.84	0.0527	0.0009	0.3139	0.0058	0.0432	0.0002	0.0127	0.0004	315	41	277	5	273	2
10	527	648	0.81	0.0521	0.0012	0.3163	0.0071	0.0440	0.0003	0.0145	0.0003	292	51	279	6	278	2
11	333	583	0.57	0.0524	0.0011	0.3175	0.0071	0.0440	0.0003	0.0136	0.0003	302	47	280	6	277	2
12	552	777	0.71	0.0524	0.0012	0.3119	0.0072	0.0435	0.0002	0.0140	0.0003	304	52	276	6	275	2
13	253	451	0.56	0.0526	0.0026	0.3128	0.0154	0.0437	0.0003	0.0133	0.0003	312	113	276	14	276	2
14	113	206	0.55	0.0527	0.0012	0.3101	0.0068	0.0441	0.0003	0.0127	0.0007	316	54	274	6	278	2
15	94	220	0.43	0.0520	0.0010	0.3130	0.0064	0.0435	0.0003	0.0270	0.0003	285	46	277	6	275	2
16	462	649	0.71	0.0526	0.0008	0.3110	0.0046	0.0442	0.0002	0.0121	0.0014	311	33	275	4	279	2

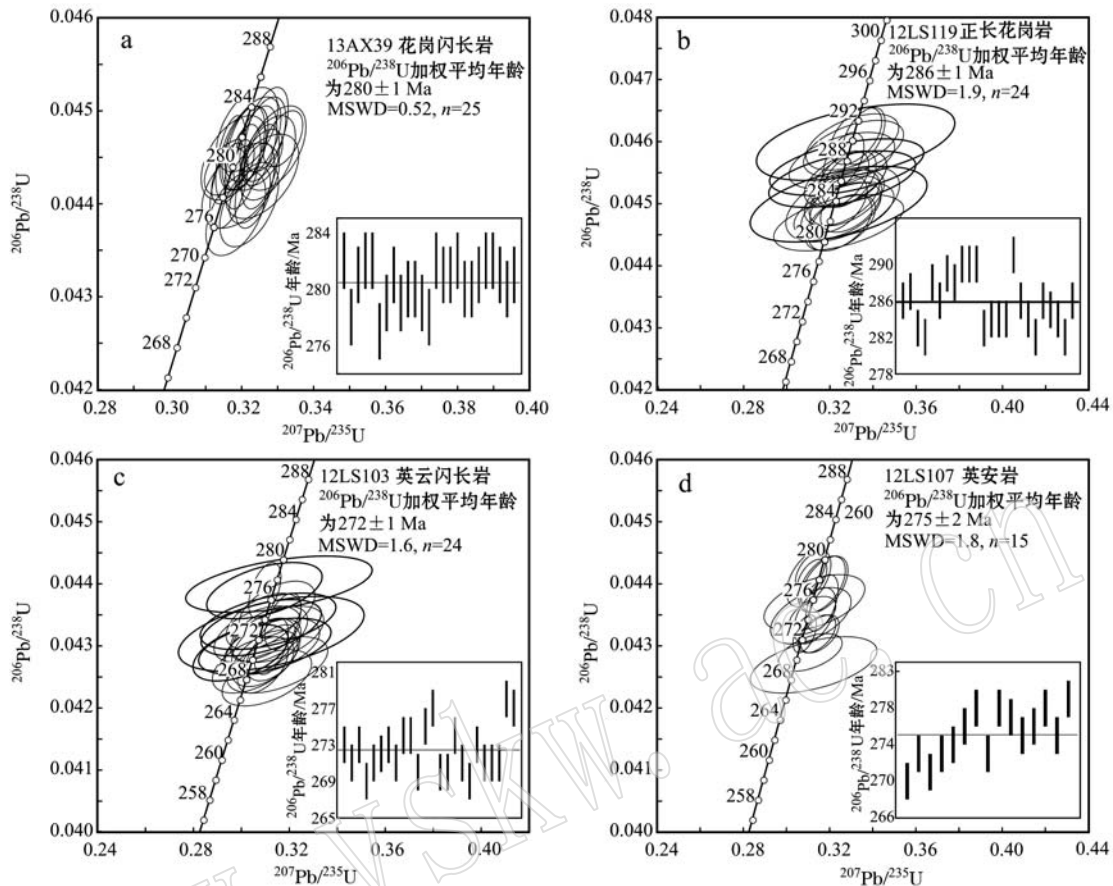


图5 雅布赖山岩浆岩锆石 U-Pb 年龄谱和图

Fig. 5 Zircon U-Pb concordia diagrams for the igneous rocks in the Yabulai Mountain

年轻的二阶段模式年龄 1674~1192 Ma。英云闪长岩初始 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为0.282325~0.282524,根据该岩体结晶年龄(272 ± 1 Ma)计算的 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值变化于-10.1~-3.3之间,两阶段模式年龄(t_{DM}^{C})为1933~1500 Ma。英安岩(275 ± 2 Ma)初始 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值的变化范围为0.282199~0.282478,其 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 为-15.2~-4.9,二阶段模式年龄为2255~1605 Ma。

4.3 主微量元素地球化学

花岗闪长岩、正长花岗岩和英云闪长岩的主、微量元素分析结果显示,不同岩体的地球化学成分差异较大(图6、表3)。

花岗闪长岩3个样品均具有相对偏低的 SiO_2 (68.96%~71.23%)、相对较高的 Na_2O (3.84%~4.26%)和低 K_2O (3.09%~3.23%)含量,全碱含量($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$)在6.95%~7.35%之间。在 $\text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$ 图解中,3个样品全部落入钙碱性-高钾钙碱性系列(图6a)。花岗闪长岩的A/CNK和A/NK变化范围分别为0.96~1.00和1.44~1.46,属于准铝质

岩石(图6b)。

正长花岗岩具有较高的 SiO_2 (70.62%~75.87%)和 K_2O (4.19%~5.77%)成分,低 Al_2O_3 (12.29~14.20)、 MgO (0.01%~0.02%)和 TiO_2 (0.10%~0.12%)。正长花岗岩 Na_2O 含量为2.57%~3.52%,全碱含量 $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 6.76\% \sim 8.97\%$ 。在 $\text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$ 图解中(图6a),4个分析样品中的3个落入高钾钙碱性系列范围内,显示出准铝质-弱过铝质特征,另外1个落入钾玄岩系列范围内,并具有过铝质的特征(图6b)。

英云闪长岩的 SiO_2 含量变化较大(67.39%~74.69%),其 Na_2O (3.18%~3.61%)、 Al_2O_3 (13.62%~16.16%)和 CaO (3.61%~4.65%)含量较高, Fe_2O_3 的含量为2.23%~3.90%,低 K_2O (0.67%~1.07%)、 TiO_2 (0.28%~0.50%)和 MnO (0.03%~0.04%)。全碱含量($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$)为4.08%~4.18%,为低钾(拉斑)系列(图6a)。铝饱和指数A/CNK集中在1.04~1.10之间,A/NK=2.10~2.46,为弱过铝质(图6b)。

表 2 雅布赖山地区岩浆岩锆石 Hf 同位素分析结果
Table 2 Zircon Hf isotopes for the igneous rocks in the Yabulai Mountain

点号	t/Ma	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} \pm 2\sigma$	$(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$	$\epsilon \text{Hf}(0)$	$\epsilon \text{Hf}(t)$	t_{DM}/Ma	$t_{\text{DM}}^c/\text{Ma}$	$f_{\text{Lu/Hf}}$
13AX39 花岗岩闪长岩 ($280 \pm 1 \text{ Ma}$)											
1	280	0.039 1	0.001 5	0.282 303	0.000 017	0.282 295	-16.59	-10.72	1 358	1 979	-0.95
2	280	0.019 9	0.000 8	0.282 320	0.000 014	0.282 316	-15.98	-9.98	1 308	1 933	-0.98
3	280	0.041 4	0.001 6	0.282 315	0.000 020	0.282 306	-16.16	-10.32	1 345	1 954	-0.95
4	280	0.043 4	0.001 7	0.282 368	0.000 022	0.282 360	-14.27	-8.44	1 271	1 835	-0.95
5	280	0.034 7	0.001 4	0.282 367	0.000 020	0.282 360	-14.33	-8.44	1 263	1 835	-0.96
6	280	0.031 2	0.001 2	0.282 372	0.000 017	0.282 366	-14.13	-8.21	1 250	1 821	-0.96
7	280	0.022 9	0.000 9	0.282 375	0.000 017	0.282 370	-14.05	-8.07	1 237	1 812	-0.97
8	280	0.042 3	0.001 6	0.282 340	0.000 023	0.282 331	-15.29	-9.45	1 309	1 899	-0.95
9	280	0.073 4	0.002 8	0.282 246	0.000 020	0.282 232	-18.59	-12.97	1 489	2 120	-0.92
10	280	0.037 9	0.001 5	0.282 347	0.000 016	0.282 339	-15.04	-9.17	1 296	1 881	-0.95
11	280	0.032 0	0.001 2	0.282 295	0.000 018	0.282 289	-16.86	-10.94	1 359	1 993	-0.96
12	280	0.076 2	0.002 8	0.282 301	0.000 024	0.282 286	-16.65	-11.03	1 410	1 998	-0.91
13	280	0.060 6	0.002 3	0.282 290	0.000 020	0.282 278	-17.04	-11.33	1 407	2 017	-0.93
14	280	0.048 0	0.001 9	0.282 315	0.000 024	0.282 305	-16.17	-10.36	1 353	1 956	-0.94
15	280	0.040 3	0.001 6	0.282 299	0.000 017	0.282 291	-16.71	-10.86	1 366	1 988	-0.95
16	280	0.045 9	0.001 8	0.282 296	0.000 021	0.282 286	-16.85	-11.04	1 380	1 999	-0.95
17	280	0.025 5	0.001 0	0.282 284	0.000 017	0.282 279	-17.24	-11.28	1 365	2 015	-0.97
18	280	0.032 6	0.001 3	0.282 372	0.000 017	0.282 366	-14.13	-8.22	1 252	1 821	-0.96
19	280	0.047 2	0.001 8	0.282 310	0.000 024	0.282 301	-16.33	-10.52	1 359	1 966	-0.95
12LS119 正长花岗岩 ($286 \pm 1 \text{ Ma}$)											
1	286	0.076 6	0.001 6	0.282 438	0.000 021	0.282 430	-11.81	-5.82	1 168	1 674	-0.95
2	286	0.077 4	0.001 6	0.282 574	0.000 023	0.282 565	-7.01	-1.04	977	1 371	-0.95
3	286	0.061 8	0.001 3	0.282 508	0.000 020	0.282 501	9.35	-3.31	1 061	1 515	-0.96
4	286	0.069 1	0.001 4	0.282 478	0.000 020	0.282 470	-10.40	-4.39	1 107	1 583	-0.96
5	286	0.121 1	0.002 2	0.282 602	0.000 022	0.282 590	-6.01	-0.14	950	1 314	-0.93
6	286	0.050 4	0.001 1	0.282 515	0.000 018	0.282 509	-9.09	-3.02	1 046	1 496	-0.97
7	286	0.064 1	0.001 5	0.282 559	0.000 018	0.282 551	-7.54	-1.54	995	1 403	-0.95
8	286	0.077 0	0.001 7	0.282 452	0.000 023	0.282 443	-11.33	-5.37	1 153	1 645	-0.95
9	286	0.094 1	0.002 1	0.282 634	0.000 022	0.282 623	-4.87	1.01	902	1 240	-0.94
10	286	0.059 7	0.001 4	0.282 542	0.000 022	0.282 535	-8.14	-2.11	1 015	1 439	-0.96
11	286	0.119 8	0.002 5	0.282 550	0.000 022	0.282 536	-7.86	-2.05	1 034	1 434	-0.93
12	286	0.060 1	0.001 4	0.282 486	0.000 021	0.282 478	-10.13	-4.12	1 097	1 566	-0.96
13	286	0.068 0	0.001 6	0.282 600	0.000 030	0.282 592	-6.07	-0.08	936	1 310	-0.95
14	286	0.033 5	0.000 9	0.282 485	0.000 019	0.282 481	-10.14	-4.02	1 080	1 560	-0.97
15	286	0.104 0	0.002 5	0.282 658	0.000 026	0.282 645	-4.04	1.78	876	1 192	-0.93
16	286	0.087 4	0.002 0	0.282 605	0.000 023	0.282 595	-5.89	0.01	941	1 304	-0.94
17	286	0.082 1	0.002 0	0.282 591	0.000 017	0.282 580	-6.41	-0.50	961	1 337	-0.94

续表 2
Continued Table 2

点号	t/Ma	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$+2\sigma$	$(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$	$\epsilon\text{Hf}(0)$	$\epsilon\text{Hf}(t)$	t_{DM}/Ma	$t_{\text{DM}}^c/\text{Ma}$	$f_{\text{Lu/Hf}}$
18	286	0.053 2	0.001 4	0.282 569	0.000 018	0.282 562	-7.18	-1.15	976	1 378	-0.96
19	286	0.070 5	0.001 7	0.282 583	0.000 019	0.282 573	-6.70	-0.74	966	1 352	-0.95
12LS103 英云闪长岩 ($272 \pm 1 \text{ Ma}$)											
1	272	0.116 0	0.002 6	0.282 368	0.000 025	0.282 355	-14.27	-8.77	1 303	1 849	-0.92
2	272	0.073 1	0.001 6	0.282 387	0.000 019	0.282 379	-13.62	-7.94	1 242	1 797	-0.95
3	272	0.049 1	0.001 1	0.282 388	0.000 016	0.282 383	-13.58	-7.80	1 223	1 789	-0.97
4	272	0.036 6	0.000 9	0.282 381	0.000 019	0.282 377	-13.83	-8.01	1 225	1 802	-0.97
5	272	0.059 2	0.001 3	0.282 346	0.000 020	0.282 339	-15.06	-9.33	1 290	1 885	-0.96
6	272	0.116 3	0.002 6	0.282 524	0.000 021	0.282 511	-8.76	-3.25	1 075	1 500	-0.92
7	272	0.048 3	0.001 1	0.282 361	0.000 020	0.282 355	-14.55	-8.78	1 263	1 850	-0.97
8	272	0.072 3	0.001 7	0.282 423	0.000 019	0.282 414	-12.36	-6.68	1 193	1 718	-0.95
9	272	0.084 2	0.002 0	0.282 417	0.000 022	0.282 406	-12.57	-6.96	1 213	1 735	-0.94
10	272	0.090 4	0.002 2	0.282 411	0.000 024	0.282 400	-12.75	-7.17	1 225	1 748	-0.94
11	272	0.055 5	0.001 4	0.282 391	0.000 019	0.282 384	-13.48	-7.76	1 229	1 786	-0.96
12	272	0.050 4	0.001 3	0.282 393	0.000 016	0.282 386	-13.40	-7.66	1 224	1 780	-0.96
13	272	0.041 2	0.001 0	0.282 335	0.000 019	0.282 330	-15.46	-9.67	1 296	1 907	-0.97
14	272	0.068 5	0.001 6	0.282 326	0.000 019	0.282 318	-15.76	-10.08	1 329	1 933	-0.95
15	272	0.055 7	0.001 4	0.282 325	0.000 017	0.282 319	-15.79	-10.06	1 320	1 932	-0.96
16	272	0.059 6	0.001 5	0.282 387	0.000 017	0.282 380	-13.60	-7.89	1 237	1 795	-0.96
17	272	0.060 3	0.001 4	0.282 456	0.000 019	0.282 449	-11.18	-5.46	1 138	1 640	-0.96
18	272	0.054 0	0.001 3	0.282 393	0.000 019	0.282 387	-13.39	-7.65	1 222	1 779	-0.96
19	272	0.061 3	0.001 4	0.282 404	0.000 017	0.282 397	-13.02	-7.29	1 210	1 757	-0.96
20	272	0.074 1	0.001 8	0.282 409	0.000 026	0.282 400	-12.82	-7.18	1 217	1 749	-0.94
21	272	0.044 4	0.001 0	0.282 415	0.000 019	0.282 410	-12.62	-6.82	1 182	1 727	-0.97
22	272	0.064 5	0.001 5	0.282 385	0.000 024	0.282 377	-13.68	-7.98	1 241	1 800	-0.95
12LS107 英安岩 ($275 \pm 2 \text{ Ma}$)											
1	275	0.158 6	0.004 0	0.282 453	0.000 031	0.282 433	-11.25	-5.94	1 225	1 672	-0.88
2	275	0.211 6	0.005 1	0.282 372	0.000 036	0.282 345	-14.16	-9.05	1 395	1 868	-0.85
3	275	0.174 6	0.004 0	0.282 340	0.000 030	0.282 320	-15.27	-9.96	1 398	1 926	-0.88
4	275	0.067 7	0.001 5	0.282 371	0.000 025	0.282 364	-14.17	-8.40	1 260	1 829	-0.96
5	406	0.068 7	0.001 7	0.282 213	0.000 028	0.282 200	-19.77	-11.30	1 492	2 110	-0.95
6	275	0.262 4	0.006 9	0.282 349	0.000 062	0.282 313	-14.97	-10.20	1 512	1 939	-0.79
7	275	0.142 8	0.003 8	0.282 437	0.000 045	0.282 417	-11.86	-6.50	1 243	1 708	-0.89
8	275	0.156 2	0.003 9	0.282 248	0.000 035	0.282 228	-18.54	-13.21	1 533	2 131	-0.88
9	275	0.211 2	0.005 4	0.282 199	0.000 042	0.282 171	-20.25	-15.21	1 681	2 255	-0.84
10	275	0.162 9	0.003 8	0.282 370	0.000 030	0.282 351	-14.21	-8.86	1 344	1 857	-0.89
11	275	0.054 0	0.001 2	0.282 282	0.000 020	0.282 276	-17.34	-11.52	1 377	2 026	-0.96
12	275	0.107 4	0.002 7	0.282 478	0.000 027	0.282 464	-10.41	-4.87	1 148	1 605	-0.92
13	275	0.115 8	0.003 2	0.282 467	0.000 023	0.282 450	-10.79	-5.33	1 179	1 634	-0.90
14	275	0.074 7	0.001 9	0.282 356	0.000 020	0.282 346	-14.70	-9.01	1 296	1 867	-0.94
15	275	0.059 1	0.001 3	0.282 358	0.000 017	0.282 351	-14.65	-8.86	1 274	1 858	-0.96
16	275	0.142 3	0.003 0	0.282 390	0.000 027	0.282 374	-13.51	-8.02	1 287	1 804	-0.91

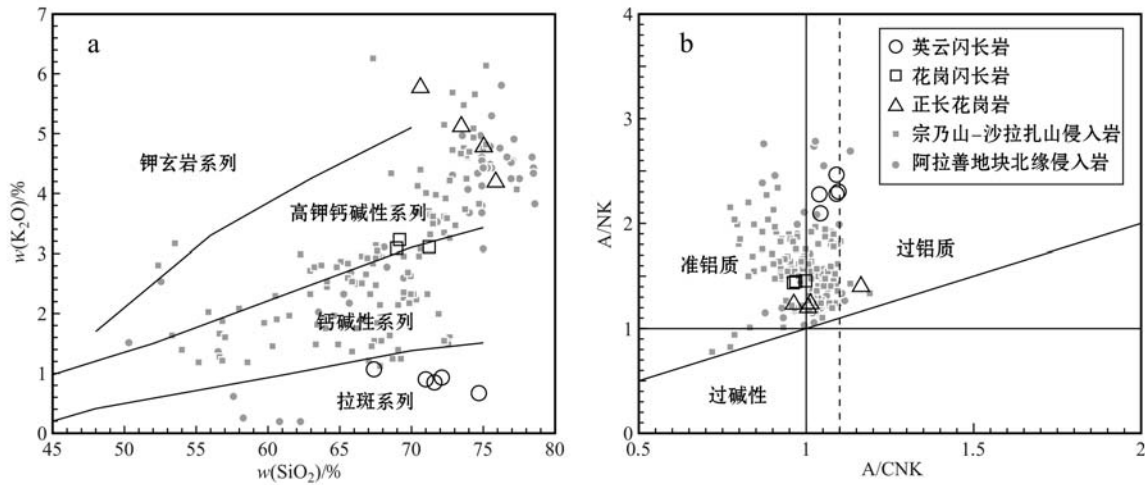


图 6 雅布赖山岩浆岩 K_2O-SiO_2 图解 (a, 据 Maniar 和 Piccoli, 1989) 和 $A/NK-A/CNK$ 图解 (b, 据 Peccerillo 和 Taylor, 1976)

Fig. 6 K_2O-SiO_2 diagram (a, after Maniar and Piccoli, 1989) and $A/NK-A/CNK$ diagram (b, after Peccerillo and Taylor, 1976) for the igneous rocks in the Yabulai Mountain

宗乃山-沙拉扎山侵入岩数据来自任康林(2011)、吕秉廷(2013)、史兴俊等(2014)、Shi 等 (2014), 阿拉善地块北缘数据来自任康绪等 (2005b)、李杰(2012)、史兴俊等(2012)、张建军等(2012)和 Dan 等 (2014)

geochemical data of igneous rocks in the Zongnaishan-Shalazhashan belt are from Wu Kanglin (2011), Lü Bingting (2013), Shi Xingjun *et al.* (2014), Shi *et al.* (2014); geochemical data of igneous rocks in the northern Alxa block are from Ren Kangxu *et al.* (2005b), Li Jie(2012), Shi Xingjun *et al.* (2012), Zhang Jianjun *et al.* (2012) and Dan *et al.* (2014)

花岗闪长岩和正长花岗岩稀土元素组成较为相似, 都显示出轻稀土元素相对富集、重稀土元素相对亏损的特征 ($LREE/HREE = 7.99 \sim 12.20$), 在球粒陨石标准化图解上表现为右倾型(图 7a)。这两种岩石均具有 Eu 负异常 ($\delta Eu = 0.46 \sim 0.90$), 正长花岗岩具有高的稀土元素总量 ($\sum REE = 202 \times 10^{-6} \sim 220 \times 10^{-6}$), 而花岗闪长岩稀土元素总量仅为 $119 \times 10^{-6} \sim 140 \times 10^{-6}$ 。花岗闪长岩和正长花岗岩在原始地幔标准化蛛网图(图 7b)中同样也显示出较一致的特征, 都富集大离子亲石元素 K, Rb 和 Ba 等, 并具有明显的 Nb, Ta 和 Ti 的负异常。不同的是, 花岗闪长岩具有微弱的 Sr 负异常, 而正长花岗岩具有明显的 Sr 负异常。

英云闪长岩的稀土元素与微量元素组成与花岗闪长岩和正长花岗岩明显不同。在稀土元素组成方面, 英云闪长岩具有非常低的重稀土元素含量, 轻重稀土元素分馏强烈 ($LREE/HREE = 25.0 \sim 103$), 并具有较高且变化范围大的 $La/Yb (40.9 \sim 314)$ 、 $Ce/Sm (21.9 \sim 40.4)$ 和 Sm/Dy 值 ($2.2 \sim 10.5$) 的特征。与此同时, 英云闪长岩还显示出一定程度的 Eu 正异常 ($\delta Eu = 1.33 \sim 3.84$) (图 7a)。在原始地幔标

准化蛛网图(图 7b)上, 英云闪长岩表现出 Ta, Nb 和 P 的负异常, 具有较低的高场强元素特征。英云闪长岩 Sr 含量较高 ($717 \times 10^{-6} \sim 854 \times 10^{-6}$), Y 含量 ($1.6 \times 10^{-6} \sim 2.8 \times 10^{-6}$) 偏低, 其 Sr/Y 值相应较高 ($Sr/Y = 305 \sim 448$)。

5 讨论

5.1 雅布赖山岩体的形成时代

早期研究通过侵入岩与地层的不整合接触关系以及邻区含捕虏体侵入岩的对比, 确定雅布赖山花岗闪长岩、英云闪长岩和英安岩均为海西期岩浆活动的产物^①。本文测年结果表明, 雅布赖山花岗闪长岩的形成时代为 280 ± 1 Ma, 相当于早二叠世。与花岗闪长岩位置相近的英云闪长岩的结晶年龄为 272 ± 2 Ma。在孟根附近出露的英安质火山岩, 其锆石年龄为 275 ± 2 Ma, 相当于中二叠世。此前研究认为雅布赖山正长花岗岩与其西侧的花岗岩可能是一期岩浆的产物, 正长花岗岩为这期侵入岩的中心相, 并通过与邻区相似侵入岩的对比初步确定这一期岩浆活动发生在印支期^①。然而该研究同时注意

① 甘肃省地质调查局, 1978. 中国人民共和国区域地质调查报告(阿贵庙幅, 1:200 000), 1~189.

表3 雅布赖山地区岩浆岩主要元素($w_B/\%$)和微量元素($w_B/10^{-6}$)分析结果
Table 3 Major ($w_B/\%$) and trace ($w_B/10^{-6}$) element compositions of igneous rocks in the Yabulai Mountain

岩性	花岗岩长岩					正长花岗岩					英云闪长岩													
	13AX39	13AX40	13AX41	12LS119	12LS120	12LS121	12LS122	12LS99	12LS100	12LS101	12LS102	12LS103	13AX39	13AX40	13AX41	12LS119	12LS120	12LS121	12LS122	12LS99	12LS100	12LS101	12LS102	12LS103
SiO ₂	71.23	69.17	68.96	75.87	70.62	75.04	73.47	67.39	70.98	71.60	72.12	74.69	71.23	69.17	68.96	75.87	70.62	75.04	73.47	67.39	70.98	71.60	72.12	74.69
TiO ₂	0.26	0.35	0.34	0.11	0.12	0.10	0.12	0.50	0.40	0.36	0.37	0.28	0.26	0.35	0.34	0.11	0.12	0.10	0.12	0.50	0.40	0.36	0.37	0.28
Al ₂ O ₃	14.10	14.73	14.89	12.29	14.20	12.47	13.61	16.16	15.30	14.88	14.83	13.62	14.10	14.73	14.89	12.29	14.20	12.47	13.61	16.16	15.30	14.88	14.83	13.62
Fe ₂ O ₃ T	3.13	3.69	3.45	1.67	1.42	1.11	1.08	3.90	3.02	3.10	2.71	2.23	3.13	3.69	3.45	1.67	1.42	1.11	1.08	3.90	3.02	3.10	2.71	2.23
MnO	0.05	0.07	0.06	0.02	0.04	0.03	0.03	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.05	0.07	0.06	0.02	0.04	0.03	0.03	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03
MgO	0.53	0.76	0.72	0.02	0.02	0.01	0.02	1.41	1.00	0.93	0.93	0.70	0.53	0.76	0.72	0.02	0.02	0.01	0.02	1.41	1.00	0.93	0.93	0.70
CaO	2.44	2.77	2.82	0.99	1.78	1.23	1.21	4.65	4.30	3.91	3.90	3.61	2.44	2.77	2.82	0.99	1.78	1.23	1.21	4.65	4.30	3.91	3.90	3.61
Na ₂ O	3.84	4.05	4.26	2.57	3.20	2.98	3.52	3.61	3.18	3.37	3.34	3.51	3.84	4.05	4.26	2.57	3.20	2.98	3.52	3.61	3.18	3.37	3.34	3.51
K ₂ O	3.11	3.23	3.09	4.19	5.77	4.78	5.12	1.07	0.90	0.85	0.93	0.67	3.11	3.23	3.09	4.19	5.77	4.78	5.12	1.07	0.90	0.85	0.93	0.67
P ₂ O ₅	0.10	0.09	0.09	0.04	0.02	0.02	0.02	0.18	0.12	0.12	0.13	0.07	0.10	0.09	0.09	0.04	0.02	0.02	0.02	0.18	0.12	0.12	0.13	0.07
Loss	0.90	0.90	1.10	2.10	2.70	2.10	1.70	0.90	0.40	0.60	0.50	0.40	0.90	0.90	1.10	2.10	2.70	2.10	1.70	0.90	0.40	0.60	0.50	0.40
Total	99.68	99.82	99.77	99.87	99.86	99.89	99.86	99.79	99.67	99.76	99.79	99.83	99.68	99.82	99.77	99.87	99.86	99.89	99.86	99.79	99.67	99.76	99.79	99.83
Na ₂ O/K ₂ O	1.23	1.25	1.38	0.61	0.55	0.62	0.69	3.37	3.53	3.96	3.59	5.24	1.23	1.25	1.38	0.61	0.55	0.62	0.69	3.37	3.53	3.96	3.59	5.24
A/CNK	1.00	0.97	0.96	1.16	0.96	1.01	1.01	1.04	1.09	1.10	1.09	1.04	1.00	0.97	0.96	1.16	0.96	1.01	1.01	1.04	1.09	1.10	1.09	1.04
La	31.2	25.9	25.5	48.0	43.9	44.9	45.3	14.7	13.5	80.8	51.0	65.9	31.2	25.9	25.5	48.0	43.9	44.9	45.3	14.7	13.5	80.8	51.0	65.9
Ce	59.0	48.2	50.5	99.2	91.6	89.0	95.4	26.3	21.7	137.0	87.1	109.0	59.0	48.2	50.5	99.2	91.6	89.0	95.4	26.3	21.7	137.0	87.1	109.0
Pr	6.45	6.09	5.58	11.10	10.20	9.83	10.30	2.86	2.06	13.70	8.14	9.65	6.45	6.09	5.58	11.10	10.20	9.83	10.30	2.86	2.06	13.70	8.14	9.65
Nd	24.4	23.7	19.5	36.8	39.9	35.7	37.6	10.7	5.70	44.2	28.7	32.1	24.4	23.7	19.5	36.8	39.9	35.7	37.6	10.7	5.70	44.2	28.7	32.1
Sm	4.37	3.96	3.90	7.30	6.81	6.30	6.82	1.20	0.91	4.10	2.86	2.70	4.37	3.96	3.90	7.30	6.81	6.30	6.82	1.20	0.91	4.10	2.86	2.70
Eu	1.30	0.84	1.00	1.00	0.96	0.89	0.95	0.73	0.85	1.37	0.94	1.04	1.30	0.84	1.00	1.00	0.96	0.89	0.95	0.73	0.85	1.37	0.94	1.04
Gd	4.33	3.82	3.81	5.71	5.60	4.89	5.47	0.88	0.34	1.57	1.14	1.18	4.33	3.82	3.81	5.71	5.60	4.89	5.47	0.88	0.34	1.57	1.14	1.18
Tb	0.66	0.63	0.59	0.78	0.83	0.73	0.79	0.10	0.05	0.14	0.08	0.09	0.66	0.63	0.59	0.78	0.83	0.73	0.79	0.10	0.05	0.14	0.08	0.09
Dy	3.65	3.39	3.45	4.23	4.60	3.91	4.47	0.54	0.16	0.39	0.49	0.43	3.65	3.39	3.45	4.23	4.60	3.91	4.47	0.54	0.16	0.39	0.49	0.43
Ho	0.74	0.72	0.70	0.84	0.93	0.82	0.87	0.10	0.05	0.05	0.07	0.05	0.74	0.72	0.70	0.84	0.93	0.82	0.87	0.10	0.05	0.05	0.07	0.05
Er	1.99	2.20	2.01	2.44	2.75	2.32	2.38	0.26	0.17	0.26	0.22	0.19	1.99	2.20	2.01	2.44	2.75	2.32	2.38	0.26	0.17	0.26	0.22	0.19
Tm	0.27	0.34	0.31	0.31	0.39	0.32	0.35	0.04	0.02	0.02	0.04	0.02	0.27	0.34	0.31	0.31	0.39	0.32	0.35	0.04	0.02	0.02	0.04	0.02
Yb	1.72	2.17	1.93	2.18	2.84	2.02	2.10	0.28	0.33	0.25	0.22	0.21	1.72	2.17	1.93	2.18	2.84	2.02	2.10	0.28	0.33	0.25	0.22	0.21
Lu	0.26	0.33	0.29	0.28	0.42	0.29	0.36	0.06	0.04	0.04	0.04	0.04	0.26	0.33	0.29	0.28	0.42	0.29	0.36	0.06	0.04	0.04	0.04	0.04
Y	17.1	19.5	18.9	22.7	25.5	22.0	23.4	2.80	2.10	2.30	1.90	1.60	17.1	19.5	18.9	22.7	25.5	22.0	23.4	2.80	2.10	2.30	1.90	1.60
ΣREE	140	122	119	220	212	201.9	213	58.8	45.9	284	181	223	140	122	119	220	212	201.9	213	58.8	45.9	284	181	223

续表 3
Continued Table 3

岩性	花岗岩类					英云闪长岩									
	13AX39	13AX40	13AX41	12LS119	12LS120	12LS121	12LS122	12LS99	12LS100	12LS101	12LS102	12LS103			
LREE/HREE	9.3	8.0	8.1	12.1	10.5	12.2	11.7	25.0	38.6	103.0	77.7	99.8			
δEu	0.90	0.65	0.78	0.46	0.46	0.47	0.46	2.07	3.84	1.37	1.33	1.53			
(La/Yb) _N	13.0	8.6	9.5	15.8	11.1	15.9	15.5	37.7	29.3	232.0	166.0	225.0			
Sc	10.00	8.00	7.00	3.00	4.00	3.00	3.00	2.00	1.00	3.00	3.00	2.00			
V	18.0	28.0	28.0	<8.0	<8.0	<8.0	<8.0	34.0	25.0	25.0	25.0	18.0			
Co	2.90	3.90	5.00	0.40	0.30	<0.2	0.30	6.20	3.80	2.90	2.80	2.70			
Ni	<0.50	<0.50	<0.50	1.60	1.50	2.10	1.40	4.60	8.40	4.10	4.30	3.10			
Cu	4.30	1.00	0.80	0.60	0.60	1.00	0.70	11.30	2.20	1.20	0.80	0.70			
Zn	54.0	52.0	47.0	18.0	17.0	11.0	16.0	47.0	38.0	44.0	41.0	35.0			
Ga	17.4	17.3	17.3	10.9	14.3	13.7	14.0	17.2	12.0	13.4	11.8	12.9			
Rb	74.1	82.4	92.8	83.9	124.5	102.0	110.0	27.5	18.5	16.7	19.3	14.1			
Sr	306.0	259.0	309.0	64.3	85.2	64.9	78.3	854.0	787.0	816.0	774.0	717.0			
Zr	174	172	159	160	179	127	193	202	172	160	164	138			
Nb	5.10	7.40	6.00	4.70	6.30	3.70	5.20	2.30	2.80	2.60	1.50	0.40			
Ta	0.20	0.10	0.40	0.30	0.40	0.20	0.30	0.10	0.20	0.20	0.20	<0.10			
Cs	1.40	1.70	1.90	1.00	0.70	0.70	1.00	0.90	0.60	0.60	0.50	0.40			
Ba	1 713	819	913	679	924	741	923	576	664	583	586	469			
Hf	5.00	4.70	4.30	4.90	5.30	3.80	5.60	4.40	3.50	3.60	4.20	3.20			
Pb	1.30	1.10	1.20	7.40	7.40	5.90	5.80	1.00	0.80	1.10	0.90	0.80			
Th	7.80	7.40	6.20	12.90	11.30	10.90	11.80	1.60	1.70	12.40	9.70	8.80			
U	0.80	0.70	0.60	2.50	2.30	1.40	1.80	0.40	0.40	0.30	0.50	0.30			

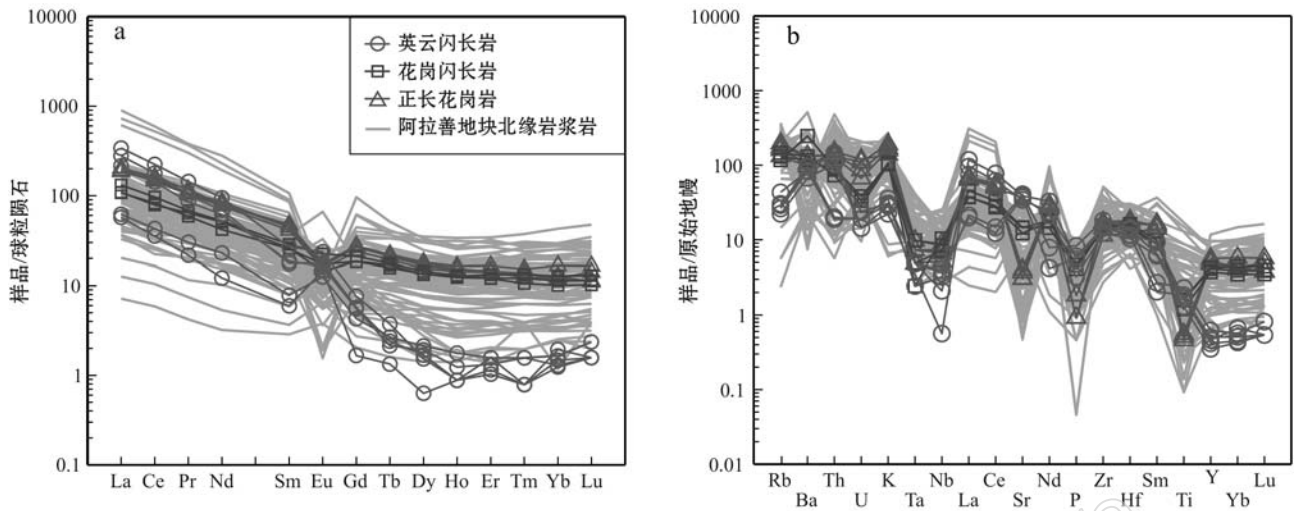


图7 雅布赖山侵入岩的稀土元素配分模式图(a)和微量元素蛛网图(b)(标准化数据来自 Sun 和 McDonough, 1989)
Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive-mantle normalized trace element patterns (b) for the Yabulai intrusive rocks (normalized values are from Sun and McDonough, 1989)

阿拉善地块北缘数据来自任康绪等(2005b)、李杰(2012)、史兴俊等(2012)、张建军等(2012)和 Dan 等(2014)
geochemical data of igneous rocks in the northern Alxa block are from Ren Kangxu *et al.* (2005b), Li Jie (2012), Shi Xingjun *et al.* (2012), Zhang Jianjun *et al.* (2012) and Dan *et al.* (2014)

到,正长花岗岩中后期侵入的岩脉“很少”,而其西侧花岗岩中岩脉“比较发育”。如果正长花岗岩和花岗岩为同期侵入岩,其中后期岩脉的分布应大致相当。因此,正长花岗岩与其西侧的花岗岩可能并非是一期岩浆活动的产物。本文 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果表明,正长花岗岩实际年龄为 286 ± 1 Ma, 相当于早二叠世。

一些研究表明,在雅布赖山以东的狼山西南缘可能存在一些印支期富碱性侵入岩(Rb-Sr 等时线年龄分别为 250 ± 18 Ma 和 213 ± 10 Ma, 任康绪等, 2005a),但迄今为止雅布赖山一带还没有三叠纪岩浆活动的报道。与此同时,本文分析的英安质火山岩中存在一颗年龄为 406 ± 2 Ma 的锆石(图 4d, 表 1),尽管它可能是岩浆形成或侵位过程中的继承锆石或捕获锆石,但相应的晚古生代早期岩浆侵入或变质事件还未有报道。由此可见,雅布赖山地区岩浆侵入活动主要发生在二叠纪。这一时期,雅布赖山地区不仅在地壳内部发育大规模岩浆侵入活动,还同时出现一些岩浆喷发活动。其中,岩浆侵入活动的产物构成了现今雅布赖山的主体。

5.2 岩石成因和源区特征

雅布赖山花岗闪长岩、英云闪长岩和正长花岗岩的主微量元素组成具有较大差异(图 6、图 7),但

其 A/CNK(0.96~1.16)和 A/NK(1.20~2.46)均位于准铝质到弱过铝质之间。此外,3 种侵入岩中镁铁质矿物均由黑云母或角闪石组成。这些特征表明,雅布赖山这 3 种侵入岩均类似 I 型花岗岩,可能其母岩浆均是由基底岩石中的岩浆岩部分熔融而形成的。

雅布赖山岩浆岩的锆石 Hf 同位素以具有低 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(-15.2~+1.8)和较老的模式年龄(2.2~1.2 Ga)为特征,与诺尔公-狼山一带同期岩浆岩相近(任康绪等, 2005a; 包创等, 2012; Dan *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2015),而与北部宗乃山-沙拉扎山构造带内发育的二叠纪侵入岩(Shi *et al.*, 2014; 史兴俊等, 2014)明显不同(图 8)。这些锆石 Hf 同位素特征表明雅布赖山岩浆岩与宗乃山-沙拉扎山构造带内发育的二叠纪侵入岩应当具有不同的源区组成,而可能与诺尔公-狼山一带同期岩浆岩具有相同或相似的源区组成。

长期以来,雅布赖-诺尔公-红古尔玉林构造带乃至整个阿拉善地块的基底被认为是由前寒武纪的“阿拉善群”变质岩组成(宁夏回族自治区地质局, 1982)^①。近年来的一些研究表明,这些早期被认为是一个整体的“阿拉善群”可能是由一套新太古代-古元古代变质岩和一套新元古代变质岩组成的(Li *et al.*,

① 宁夏回族自治区矿产局, 1982. 中华人民共和国区域地质调查报告(沙拉套儿汉图幅, 1:20 万)。

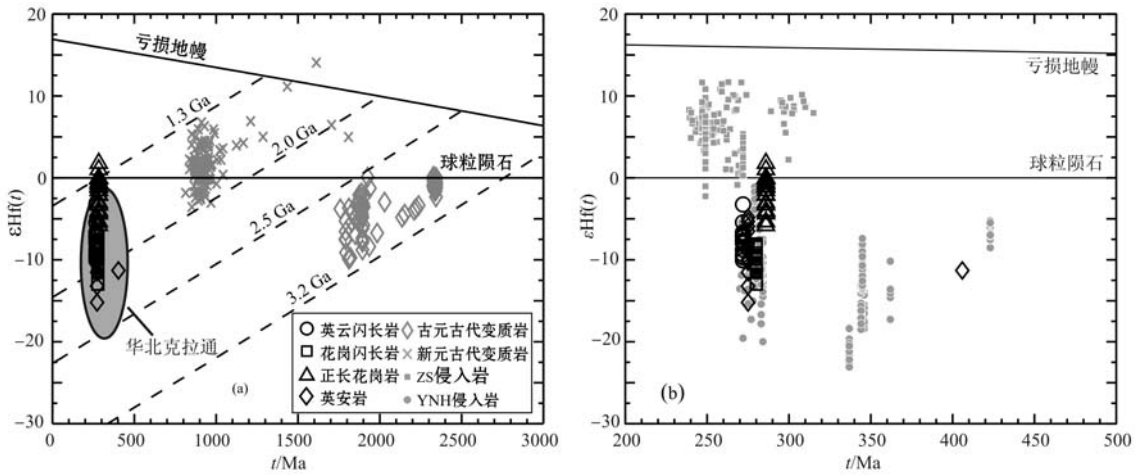


图 8 雅布赖山岩浆岩锆石 $\epsilon\text{Hf}(t)-t$ 图解

Fig. 8 $\epsilon\text{Hf}(t)-t$ plot for the zircons from the igneous rocks in the Yabulai Mountain

古元古代变质岩、新元古代变质岩、宗乃山-沙拉扎山(ZS)侵入岩和雅布赖-诺尔公-红古尔玉林(YNH)侵入岩数据引自耿元生等 (2006, 2011), Dan 等(2012, 2014, 2015)、史兴俊等(2014)、Shi 等 (2014)和 Zhang 等(2015)

zircon Hf isotope of Paleoproterozoic metamorphic rocks, Neoproterozoic metamorphic rocks, Zongnaishan-Shalazhashan (ZS) intrusive rocks and Yabulai-Nurgong-Honggueryulin (YNH) intrusive rocks are from Geng Yuansheng *et al.* (2006, 2011), Dan *et al.* (2012, 2014, 2015), Shi Xingjun *et al.* (2014), Shi *et al.* (2014) and Zhang *et al.* (2015)

2005; 耿元生等, 2010, 2011; Dan *et al.*, 2012)。锆石 Hf 同位素资料显示, 这些新元古代和古元古代变质岩具有完全不同的 Hf 同位素特征 (耿元生等, 2006, 2011; Dan *et al.*, 2012)。其中, 新元古代变质岩中锆石的 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值总体位于 2.0 Ga 和 1.3 Ga 地壳演化线之间, 而古元古代变质岩的锆石 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 均分布在 3.2 Ga 和 2.5 Ga 地壳演化线之间 (图 8a)。雅布赖山岩浆岩 (花岗闪长岩、英云闪长岩、英安岩和正长花岗岩) 的锆石 Hf 同位素总体上介于新元古代基底与古元古代基底之间 (图 8a), 这表明无论新元古代变质岩或古元古代变质岩均不能独立构成这些岩浆岩的源区, 暗示这些岩浆岩的形成过程中可能不但有古元古代变质岩的参与, 而且还有新元古代变质岩或者更年轻地壳物质的贡献。此外值得注意的是, 位于雅布赖山东北部且出露较近的 3 类岩浆岩 (花岗闪长岩、英云闪长岩和英安岩) 的锆石 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值变化范围较为接近 (分别为 $-13.0 \sim -8.1$ 、 $-10.1 \sim -3.3$ 和 $-15.2 \sim -4.9$), 而雅布赖山西南部正长花岗岩具有相对较高的 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值 ($-5.8 \sim +1.8$), 其中甚至存在极个别具有正 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值的锆石 (图 8)。这些同位素特征的异同表明雅布赖山东北部和西南部岩浆岩的源区可能略有差别。东北部 3 类岩浆岩的源区由相同或相似的物质组成, 而西南部正长花岗岩在岩浆形成和演化过程中可能更多受

到了新生地壳物质或亏损地幔物质的影响。

尽管在源区物质组成上, 雅布赖山花岗闪长岩和邻近的英云闪长岩具有相同或相似的源区, 但二者的微量元素特征存在较大差别。花岗闪长岩与和雅布赖-诺尔公-红古尔玉林构造带内发育的大多数同期侵入岩 (包括雅布赖山正长花岗岩) 的微量元素组成相似, 而英云闪长岩具有相对较高 Sr/Y 值 (305 ~ 448) 和非常强烈的轻重稀土元素分异 ($\text{La}/\text{Yb} = 40.9 \sim 314$) 等特征 (图 9a~9c)。这些地球化学特征的差别可能和岩浆侵位演化过程中与围岩不同程度的同化混染作用有关, 也可能是源区地球化学特征、部分熔融程度或源区残余矿物组成的不同所造成的。

雅布赖山英云闪长岩与花岗闪长岩具有相同或相似的源区, 并且二者出露相近, 因此它们在侵位过程中的围岩也应当相同或相似。然而, 英云闪长岩与花岗闪长岩具有强烈不同的地球化学特征 (图 7), 暗示围岩的同化混染作用对二者的作用程度不同, 或者围岩的同化混染作用并不是上述地球化学特征差异的原因。另一方面, 英云闪长岩的 Sr/Y 值 (305 ~ 448) 明显高于地壳的 Sr/Y 值 (15 ~ 80, Weaver and Tarney, 1984; Condie, 1993; Tylor and McLennan, 1995; Rudnick and Gao, 2003)。因此, 英云闪长岩与这一地区同期侵入岩地球化学特征的差异可能不是围岩同化混染的结果。

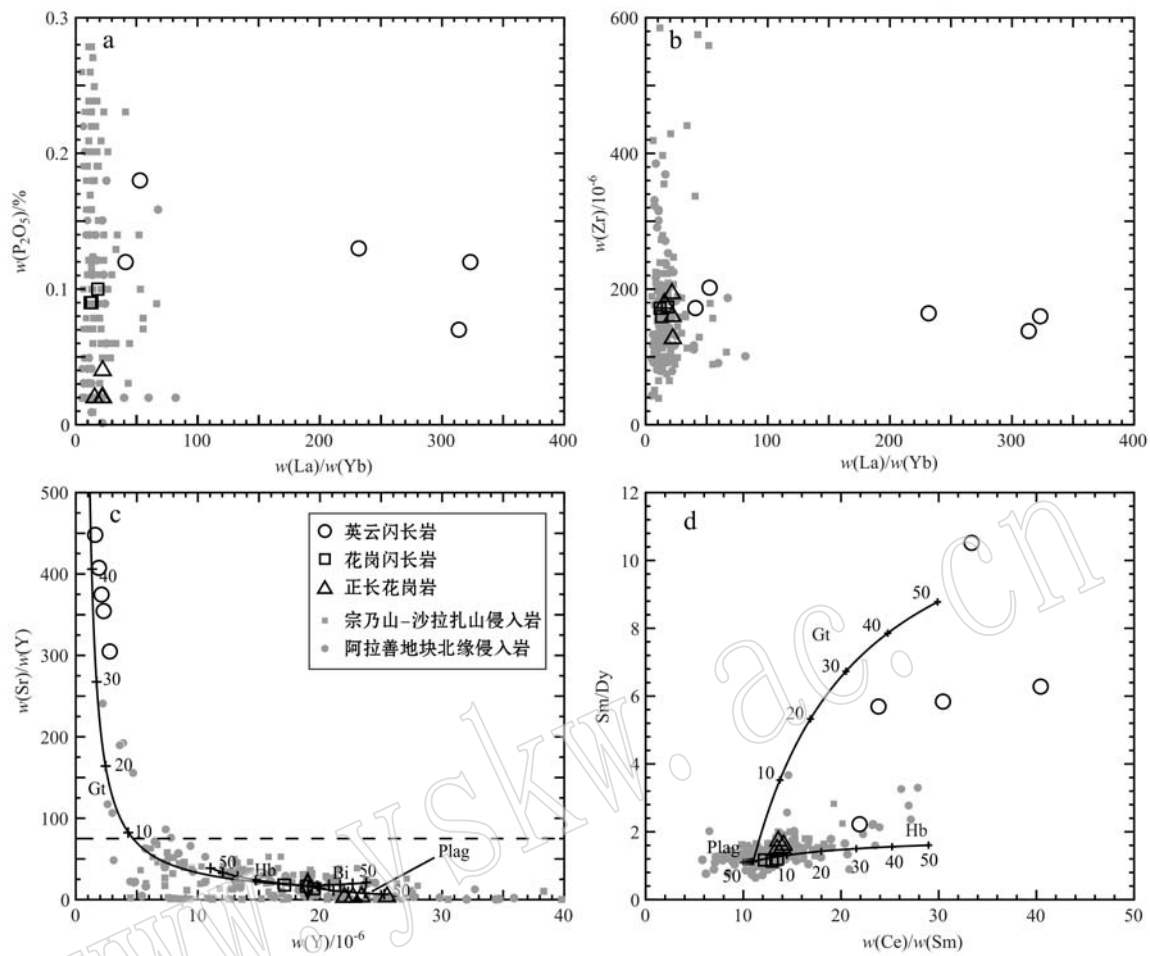


图9 雅布赖山岩浆岩 P_2O_5 -La/Yb (a)、Zr-La/Yb (b)、Sr/Y-Y (c)和 Sm/Dy-Ce/Sm (d)图解

Fig. 9 P_2O_5 -La/Yb (a), Zr-La/Yb (b), Sr/Y-Y (c), and Sm/Dy-Ce/Sm (d) diagrams of igneous rocks in the Yabulai Mountain

Sr/Y-Y 和 Sm/Dy-Ce/Sm 图解中矿物和熔体成分曲线根据张磊等(2013b), 曲线上数字代表矿物百分含量; Bi—黑云母; Gt—石榴子石; Plag—斜长石; Hb—角闪石; 宗乃山-沙拉扎山侵入岩数据来自康林(2011)、吕秉廷(2013)、Zhang 等(2013)、杨奇荻等(2014)、史兴俊等

(2014)和 Shi 等(2014), 阿拉善地块北缘数据来自任康绪等(2005b)、李杰(2012)、史兴俊等(2012)、张建军等(2012)和 Dan 等(2014) the curves of the equilibrium melt with minerals in the Sr/Y-Y and Sm/Dy-Ce/Sm diagrams are after Zhang Lei *et al.* (2013b), the cross-markers on the curves represent the mineral proportions; Bi—biotite, Gt—garnet, Plag—plagioclase, Hb—hornblende; geochemical data of intrusive rocks in the Zongnaishan-Shalazhashan belt are from Wu Kanglin (2011), Lü Bingting (2013), Zhang *et al.* (2013), Yang Qidi *et al.* (2014), Shi Xingjun *et al.* (2014) and Shi *et al.* (2014); geochemical data of igneous rocks in the northern Alxa block are from Ren Kangxu *et al.* (2005b), Li Jie (2012), Shi Xingjun *et al.* (2012), Zhang Jianjun *et al.* (2012) and Dan *et al.* (2014)

在花岗质岩浆的演化过程中, 主要造岩矿物如石英、钾长石、斜长石、黑云母和角闪石等的分离结晶均不会使得稀土元素分异程度大幅升高, 但磷灰石、锆石等副矿物可以造成稀土元素一定程度的分异。然而, 雅布赖山英云闪长岩的 P_2O_5 和 Zr 等含量与 La/Yb 值(图 9a, 9b)并无明显的相关性, 表明岩浆演化中副矿物的分离结晶并不是造成其具有高稀土元素分异的原因。

综上, 雅布赖山英云闪长岩与区域上同期侵入

岩地球化学特征的差异可能是源区矿物组成或部分熔融程度不同所造成的。根据不同矿物与熔体的分配系数, 斜长石、黑云母和角闪石对平衡熔体的 Sr/Y 值影响相对较小, 而石榴子石的存在能造成平衡熔体具有较高的 Sr/Y 值(图 9c)。另一方面, 尽管角闪石含量的增加可以明显提升平衡熔体中的 Ce/Sm 值, 但其对 Sm/Dy 值变化影响较微弱, 而石榴子石含量与其平衡熔体的 Ce/Sm 和 Sm/Dy 值均呈明显正相关(图 9d)。由此可见, 当源区中不存在石榴子

石时,即使是低程度的部分熔融(源区残余矿物含量之和较高)也难以形成高 Sr/Y 值和高程度稀土元素分馏特征的熔体。因此,雅布赖山英云闪长岩具有高 Sr/Y 值和高稀土元素分馏的特征表明其源区中应当存在石榴子石。根据前人研究结果,不同岩石类型中石榴子石稳定域的压力有所不同(张磊等, 2013b, 及其所引参考文献)。镁铁质组分越高时,出现时的压力越大,镁铁质组分越低时,出现的压力越低,如在安山质岩石中石榴子石可以在压力为 0.8 GPa 时出现(Müntener *et al.*, 2008; Alonso-Perez *et al.*, 2009)。如果英云闪长岩的源区组成类似于安山质或者镁铁质组分更高,其源区深度应当大于 25 km(约相当于 0.8 GPa 的压力)。而 Sr/Y 值和稀土元素分异程度较低的雅布赖山花岗闪长岩与正长花岗岩的源区应该相对较浅。

5.3 构造背景

阿拉善地区北部的宗乃山-沙拉扎山构造带和雅布赖-诺尔公-红古尔玉林构造带中均大量发育晚古生代岩浆岩,但两条构造带中的岩浆岩却具有截然不同的锆石 Hf 同位素特征(图 8b)。宗乃山-沙拉扎山构造带中的晚古生代岩浆岩大多具有正的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和相对年轻的地壳模式年龄(图 8b),暗示该区岩浆岩主要来自于新生物质(张文, 2013; Shi *et al.*, 2014; 史兴俊, 2014)。雅布赖山地区的岩浆岩和其东部的诺尔公-红古尔玉林地区的侵入岩相似,都具有负的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和相对古老的地壳模式年龄 [$\epsilon_{\text{Hf}}(t) = -15.2 \sim +1.8$, $t_{\text{DM}}^{\text{C}} = 2255 \sim 1192$ Ma](图 8b),表明源区主要来自古老地壳物质。锆石 Hf 同位素的差异表明,两个构造带的基底具有不同的性质,宗乃山-沙拉扎山构造带可能是中亚造山带的一部分(史兴俊等, 2014; Shi *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2015),而不是在早古生代由阿拉善地块裂解出去的。因而,雅布赖-诺尔公-红古尔玉林构造带应是阿拉善地块的北缘。

近年来的研究表明雅布赖-诺尔公-红古尔玉林构造带古生代岩浆活动极其发育(李俊建, 2006; 李俊建等, 2010a, 2010b; 张建军等, 2012; 史兴俊等, 2012; 李杰, 2012; 耿元生等, 2012; 冉焱等, 2012; 张磊等, 2013a; Dan *et al.*, 2014)。这一地区除东部存在少量早古生代晚期到晚古生代早期的侵入岩外(李俊建, 2006; Dan *et al.*, 2016),整个构造带内大量发育晚古生代侵入岩和喷出岩(史兴俊等, 2012; 包创等, 2012; 张磊等, 2013a; Dan *et al.*,

2014; Zhang *et al.*, 2015)。这些晚古生代岩浆活动从 ~321 Ma 一直持续到 ~262 Ma, 其中大多数发生在二叠纪,以 ~275 Ma 为主要活动峰期(图 10)。这些晚古生代侵入岩可能是同一期构造事件的产物。

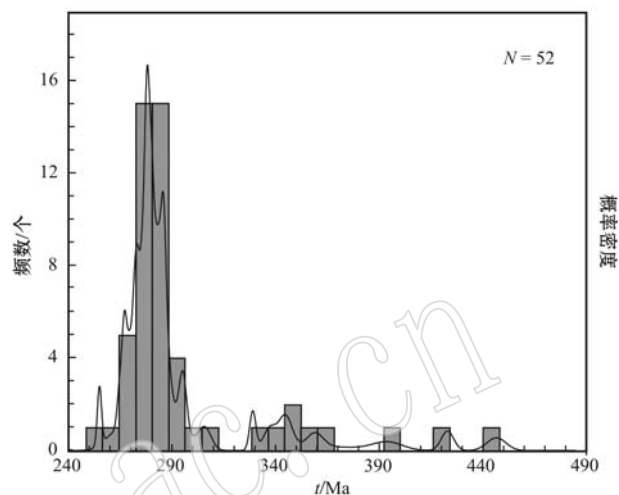


图 10 雅布赖-诺尔公-红古尔玉林构造带古生代岩浆岩年龄分布图

Fig. 10 Age distribution of igneous rocks in the Yabulai-Nuoergong-Honggueryulin belt

年龄数据来自: 李俊建(2006)、李俊建等(2010)、仵康林(2011)、耿元生等(2012)、李杰(2012)、史兴俊等(2012)、王行军(2012)、张建军等(2012)、Feng 等(2013)、张磊等(2013a)、Dan 等(2014, 2016)、Zhang 等(2015)

age data are from Li Junjian (2006), Li Junjian *et al.* (2010), Wu Kanglin (2011), Geng Yuansheng *et al.* (2012), Li Jie (2012), Shi Xingjun *et al.* (2012), Wang Xingjun (2012), Zhang Jianjun *et al.* (2012), Feng *et al.* (2013), Zhang Lei *et al.* (2013a), Dan *et al.* (2014, 2016) and Zhang *et al.* (2015)

前人研究认为雅布赖-诺尔公-红古尔玉林构造带和宗乃山-沙拉扎山构造带之间的查干础鲁蛇绿岩可能是古亚洲洋俯冲期间形成的弧后盆地的残余,并提出这一洋盆最终闭合于中二叠世(273 Ma)之后(吴泰然等, 1993; Zheng *et al.*, 2014)。如果宗乃山-沙拉扎山构造带并非阿拉善地块的一部分(史兴俊等, 2014; Shi *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2015),那么查干础鲁蛇绿岩可能并不是弧后盆地洋壳的残余。另一方面值得注意的是,在雅布赖-诺尔公-红古尔玉林构造带和宗乃山-沙拉扎山构造带内,均出露一些晚石炭世-早二叠世阿木山组下段沉积地层(陈登超, 2010; Feng *et al.*, 2013, 图 1)。根据早期地质调查成果,两个构造带内阿木山组下

段沉积地层的组成无明显差别,均为一套含凝灰岩、长石砂岩和细砂岩组合的岩石^{①②③}。这似乎表明在阿木山组地层形成的晚石炭世之前,查干础鲁蛇绿岩所代表的洋已经闭合,宗乃山-沙拉扎山构造带和雅布赖-诺尔公-狼山构造带成为了一个整体。因此在二叠纪时期,雅布赖-诺尔公-红古尔玉林构造带可能是碰撞或碰撞后伸展环境,在以查干础鲁蛇绿岩为代表的洋盆闭合陆块碰撞聚合过程中形成了加厚的地壳。这些加厚的地壳在进一步的碰撞或碰撞后伸展环境发生部分熔融,形成了雅布赖山地区英云闪长岩和诺尔公-红古尔玉林构造带一些具有高Sr/Y值特征的二叠纪侵入岩。

在阿拉善地块以东的华北克拉通北缘,同样存在大量形成时代与阿拉善地块北缘晚古生代侵入岩相近的侵入岩(Zhang *et al.*, 2007, 2009; 范宏瑞等, 2009; 罗红玲等, 2009; 张栓宏, 2010; 张维, 2012; Zhang *et al.*, 2012)。尽管目前关于阿拉善地块与华北克拉通的聚合时间还存在争议(Zhao *et al.*, 2005; 张进等, 2012; 李锦轶等, 2012; 杨振宇等, 2014; Yuan and Yang, 2015),但多数学者认为两者在晚古生代之前已经形成一个整体(葛肖虹等, 2009; 张进等, 2012; 李锦轶等, 2012; Zhang *et al.*, 2013; Dan *et al.*, 2014)。因而,阿拉善地块北缘和以东的华北克拉通北缘分布的这些晚古生代侵入岩可能是同一构造事件形成的一条近东西向展布的岩浆岩带。这条晚古生代岩浆岩带很可能与古亚洲洋俯冲结束后的碰撞或碰撞后伸展作用相关。

6 结论

(1) LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果表明,雅布赖山岩基中花岗闪长岩、正长花岗岩和英云闪长岩以及该地区出露的英安质火山岩的形成时代分别为 280 ± 1 、 286 ± 1 、 272 ± 1 和 275 ± 2 Ma。

(2) 雅布赖山花岗闪长岩、正长花岗岩、英云闪长岩和英安岩中锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化范围为 $-15.2 \sim +1.8$, 表明源区主要古老地壳物质。其中,英云闪长岩与邻近的花岗闪长岩具有非常接近的锆石

Hf 同位素特征,暗示其源区物质可能相同或相似,而二者地球化学特征差异可能由于英云闪长岩源区更深所致。

(3) 雅布赖山二叠纪岩浆岩可能形成于宗乃山-沙拉扎山构造带和雅布赖-诺尔公-红古尔玉林构造带拼合的碰撞或碰撞后环境。

致谢 锆石同位素测试得到了天津地质矿产研究所耿建珍和中国地质科学院矿产资源研究所实验测试中心郭春丽的帮助和支持,两位评审人对本文的初稿提出了宝贵的修改建议,在此表示衷心的感谢!

References

- Alonso-Perez R, Müntener O and Ulmer P. 2009. Igneous garnet and amphibole fractionation in the roots of island arcs: experimental constraints on andesitic liquids[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 157: 541~558.
- Ao S J, Xiao W J, Han C M, *et al.* 2010. Geochronology and geochemistry of Early Permian mafic-ultramafic complexes in the Beishan Area, Xinjiang, NW China: Implications for late Paleozoic tectonic evolution of the southern Altaids[J]. *Gond. Res.*, 18: 466~478.
- Bao Chuang, Chen Yuelong and Li Dapeng. 2012. Discovery of the Late Permian volcanics in the Zhulazhagamaodao, northern margin of the Alxa Block[J]. *Earth Sci. Front.*, 19: 156~163(in Chinese with English abstract).
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Nei Mongol Autonomous Region. 1991. Regional Geology of Nei Mongol (Inner Mongolia) Autonomous Region[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese with English abstract).
- Chen Dengchao, Zhao Xingmin and Deng Jian. 2010. Redefinition of Upper Triassic strata on the northern margin of Alxa block: constraints from Laser ICP-MS detrital zircon U-Pb ages[J]. *Acta Petrol. Mineral.*, 29: 258~270(in Chinese with English abstract).
- Condie K C. 1993. Chemical composition and evolution of the upper continental crust: contrasting results from surface sample and shales [J]. *Chem. Geol.*, 104: 1~37.

① 宁夏回族自治区地质调查局, 1980. 中华人民共和国区域地质调查报告(银根幅, 1:200 000), 1~83.

② 宁夏回族自治区地质调查局, 1980. 中华人民共和国区域地质调查报告(阿拉坦敖包幅, 1:200 000), 1~199.

③ 宁夏回族自治区地质调查局, 1980. 中华人民共和国区域地质调查报告(乌力吉幅, 1:200 000), 1~64.

- Dan W, Li X H, Guo J H, *et al.* 2012. Paleoproterozoic evolution of the eastern Alxa Block, westernmost North China: Evidence from in situ zircon U-Pb dating and Hf-O isotopes[J]. *Gond. Res.*, 21 (4): 838~864.
- Dan W, Li X H, Wang Q, *et al.* 2014. An Early Permian (ca. 280 Ma) silicicigneous province in the Alxa Block, NW China: a magmatic flare-up triggered by a mantle-plume? [J]. *Lithos*, 204: 144~158.
- Dan W, Li X H, Wang Q, *et al.* 2016. Phanerozoic amalgamation of the Alxa Block and North China Craton: Evidence from Paleozoic granitoids, U-Pb geochronology and Sr-Nd-Pb-Hf-O isotope geochemistry[J]. *Gond. Res.*, 32: 105~121.
- Fan Hongrui, Hu Fangfang, Yang Kuifeng, *et al.* 2009. Geochronology framework of late Paleozoic dioritic-granitic plutons in the Bayan Obo area, Inner Mongolia, and tectonic significance[J]. *Acta Petrol. Sin.*, 25: 2 933~2 938(in Chinese with English abstract).
- Feng J Y, Xiao W J, Windley B, *et al.* 2013. Field geology, geochronology and geochemistry of mafic-ultramafic rocks from Alxa, China: implications for Late Permian accretionary tectonics in the southern Altai[J]. *J. Asian Earth Sci.*, 78: 114~142.
- Ge Xiaohong, Ma Wenpu, Liu Junlai, *et al.* 2009. A discussion on the tectonic framework of Chinese mainland[J]. *Geol. China*, 36: 949~965(in Chinese with English abstract).
- Geng Jianzhen, Zhang Jian, Li Huaikun, *et al.* 2012. Ten-micron-sized zircon U-Pb dating using LA-MC-ICP-MS[J]. *Acta Petrol. Sin.*, 33: 877~884(in Chinese with English abstract).
- Geng Yuansheng, Wang Xinshe, Shen Qihan, *et al.* 2006. Redefinition of the Alxa Group-complex (Precambrian metamorphic basement) in the Alxa area, Inner Mongolia[J]. *Geol. China*, 33: 138~145(in Chinese with English abstract).
- Geng Yuansheng, Wang Xinshe, Shen Qihan, *et al.* 2007. Chronology of the Precambrian metamorphic series in the Alxa area, Inner Mongolia[J]. *Geol. China*, 34: 251~260(in Chinese with English abstract).
- Geng Yuansheng, Wang Xinshe, Wu Chunming, *et al.* 2010. Late-Paleoproterozoic tectonothermal events of the metamorphic basement in Alxa area: Evidence from geochronology[J]. *Acta Petrol. Sin.*, 26: 1 159~1 170(in Chinese with English abstract).
- Geng Yuansheng and Zhou Xiwen. 2011. Characteristics of geochemistry and zircon Hf isotope of the Early Neoproterozoic granite in Alax area, Inner Mongolia[J]. *Acta Petrol. Sin.*, 27: 897~908(in Chinese with English abstract).
- Geng Yuansheng and Zhou Xiwen. 2012. Early Permian magmatic events in the Alxa metamorphic basement: Evidence from geochronology [J]. *Acta Petrol. Sin.*, 28: 2 667~2 685(in Chinese with English abstract).
- Han Baofu, Guo Zhaojie and He Guoqi. 2010a. Timing of major suture zones in North Xinjiang, China: Constraints from stitching plutons [J]. *Acta Petrol. Sin.*, 26: 2 233~2 246(in Chinese with English abstract).
- Han B F, Guo Z J, Zhang Z C, *et al.* 2010b. Age, geochemistry, and tectonic implications of a late Paleozoic stitching pluton in the North Tian Shan suture zone, western China[J]. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 122: 627~640.
- Han B F, He G Q, Wang X C, *et al.* 2011. Late Carboniferous collision between the Tarim and Kazakhstan-Yiliteranes in the western segment of the South Tian Shan Orogen, Central Asia, and implications for the Northern Xinjiang, western China[J]. *Earth Sci. Rev.*, 109: 74~93.
- Han Baofu, Ji Jianqing, Song Biao, *et al.* 2006. Late Paleozoic vertical growth of continental crust around the Junggar Basin, Xinjiang, China (Part I): Timing of post-collisional plutonism[J]. *Acta Petrol. Sin.*, 22: 1 077~1 086(in Chinese with English abstract).
- Han B F, Wang S G, Jahn B M, *et al.* 1997. Depleted mantle source for the Ulungur River A-type granites from North Xinjiang, China: geochemistry and Nd-Sr isotopic evidence, and implications for Phanerozoic crustal growth [J]. *Chem. Geol.*, 138: 135~159.
- He Guoqi, Li Maosong and Liu Dequan. 1994. Paleozoic Crustal Evolution and Mineralization in Xinjiang of China[M]. Xinjiang: Urumqi People's Publishing House; Hongkong: Hongkong Culture and Education Press, 1~437 (in Chinese).
- Hegner E, Klemd R, Kröner A, *et al.* 2010. Mineralogy ages and *P-T* conditions of late Paleozoic high-pressure eclogite and provenance of mélange sediments in the South Tianshan Orogen of Kyrgyzstan[J]. *Am. J. Sci.*, 310: 916~950.
- Hou Kejun, Li Yanhe and Xie Guiqing. 2007. LA-MC-ICP-MS technique for Hf isotope microanalysis of zircon [J]. *J. Chinese Mass Spect. Soc.*, 28: 26~28 (in Chinese).
- Jahn B M, Windley B, Natal'in B, *et al.* 2004. Phanerozoic continental growth in Central Asia[J]. *J. Asian Earth Sci.*, 23: 599~603.
- Jahn B M, Wu F Y and Chen B. 2000. Massive granitoid generation in Central Asia: Nd isotope evidence and implication for continental growth in the Phanerozoic[J]. *Episodes*, 23: 82~92.
- Jian P, Liu D and Kröner A. 2010. Evolution of a Permian intraoceanic arc-trench system in the Solonker suture zone, Central Asian Orogenic Belt, China and Mongolia[J]. *Lithos*, 118: 169~190.
- Jian P, Liu D Y, Kröner A, *et al.* 2008. Time scale of an early to mid-Paleozoic orogenic cycle of the long-lived Central Asian Orogenic Belt, Inner Mongolia of China: implications for continental growth

- [J]. *Lithos*, 101: 233~259.
- Kovalenko V I, Yarmolyuk V V, Kovach V P, *et al.* 2004. Isotopic provinces, mechanism of generation and sources of the continental crust in the Central Asian mobile belt: Geological and isotopic evidence[J]. *J. Asian Earth Sci.*, 23: 605~627.
- Li Huaikun, Geng Jianzhen, Hao Shuang, *et al.* 2009. LA-MC-ICP-MS Technique for U-Pb Isotope of Zircon[J]. *Acta Mineral Sin.*, 29: 600~601(in Chinese with English abstract).
- Li Jie. 2012. Characteristics and Tectonic Significance of Late Paleozoic Intrusive Rocks along the Yabrai-Bayan Noel of Alxa, Inner Mongolia[D]. A Dissertation Submitted to China University of Geoscience for Master Degree(in Chinese with English abstract).
- Li Jinyi, He Guoqi, Xu Xin, *et al.* 2006. Crustal tectonic framework of northern Xinjiang and adjacent regions and its formation[J]. *Acta Geol. Sin.*, 80: 148~168(in Chinese with English abstract).
- Li Jinyi and Xu Xin. 2004. Major problems on geologic structures and yallogenesis of northern Xinjiang, northwest China[J]. *Xinjiang Geol.*, 22: 119~124(in Chinese with English abstract).
- Li Jinyi, Zhang Jin and Qu Junfeng. 2012. Amalgamation of North China Craton with Alxa Block in the Late of Early Paleozoic: Evidence from sedimentary sequences in the Niushou Mountain, Ningxia Hui Autonomous Region, NW China [J]. *Geological Rev.*, 58: 208~214(in Chinese with English abstract).
- Li Junjian. 2006. Regional Metallogenic System of Alashan Block in the Inner Mongolia Autonomous Region[D]. A Dissertation Submitted to China University of Geoscience for Doctoral Degree(in Chinese with English abstract).
- Li Junjian, Zhai Yusheng, Sang Haiqing, *et al.* 2010b. Metallogenic epoch of the Oubulage copper-gold deposit in the Alashan area, Inner Mongolia Autonomous Region[J]. *Bull. Min. Petrol. Geochem.*, 29: 323~327(in Chinese with English abstract).
- Li Junjian, Zhai Yusheng, Yang Yongqiang, *et al.* 2010a. Re-discussion on the metallogenic age of Zhulazaga gold deposit in Alashan area, Inner Mongolia: Evidence from zircon U-Pb SHRIMP age[J]. *Earth Sci. Front.*, 17: 178~184(in Chinese with English abstract).
- Li X H, Su L, Chung S L, *et al.* 2005. Formation of the Jinchuan ultramafic intrusion and the world's third largest Ni-Cu sulfide deposit: Associated with the ~825 Ma south China mantle plume? [J]. *Geochem. Geophys. Geosys.*, 6: 1~16.
- Li Y J, Wang Z M, Wu H R, *et al.* 2002. Discovery of radiolarian fossils from the Aiketik Group distributed at the western end of the South Tianshan Mountains of China and its implications[J]. *Acta Geol. Sin.*, 76: 146~154.
- Li Yuejun, Yang Haijun, Zhao Yan, *et al.* 2009. Tectonic framework and evolution of south Tianshan, NW China[J]. *Geotec. Metall.*, 33: 94~104(in Chinese with English abstract).
- Liu Y S, Hu Z C, Gao S, *et al.* 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. *Chem. Geol.*, 257: 34~43.
- Liu Zhibo and Zhang Weijie. 2014a. Geochemical characteristics and LA-ICP-MS zircon U-Pb Permian quartz diorite in Hanggale, Alax Right Banner, Inner Mongolia[J]. *Acta Geol Sin.*, 88: 198~207(in Chinese with English abstract).
- Liu Zhibo and Zhang Weijie. 2014b. Geochemical characteristics and LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of the Late Permian diorite in Hanggale, Alax Right Banner, Inner Mongolia[J]. *Northwestern Geol.*, 47: 84~95(in Chinese with English abstract).
- Ludwig K R. 2008. User's Manual for Isoplot 3.70. A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley: Berkeley Geochronology Centre Special Publications, 1~76.
- Lü Bingting. 2012. Characteristics and Tectonic Significance of Late Paleozoic Intrusive Rocks along the Tamusu-Wuliji Noel of Alxa, Inner Mongolia[D]. A Dissertation Submitted to China University of Geoscience for Master Degree(in Chinese with English abstract).
- Luo Hongling, Wu Tairan and Zhao Lei. 2009. Zircon SHRIMP U-Pb dating of Wuliangstai A-type granite on the northern margin of the North China Plate and tectonic significance[J]. *Acta Petrol. Sin.*, 25: 515~526(in Chinese with English abstract).
- Maniar P D and Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids [J]. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 101: 635~643.
- Mao Q G, Xiao W J, Windley B F, *et al.* 2010. The Liuyuan complex in the Beishan, NW China: a Carboniferous-Permian ophiolitic fore-arc slier in the southern Altaids[J]. *Geol. Mag.*, 149: 483~506.
- Müntener O, Ulmer P and Perez R A. 2008. Role of garnet and amphibole fractionation in the genesis of high Mg[#] granitoids [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 72: A665~A665.
- Peccerillo A and Taylor S R. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey[J]. *Contrib. Min. Petrol.*, 58: 63~81.
- Ran Hao, Zhang Weijie and Liu Zhibo. 2012. Geochemical characteristics and LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of the Late Permian monzogranite in Hanggale, Alax Right Banner, Inner Mongolia[J]. *Geol. Bull. China*, 31: 1565~1575(in Chinese with English abstract).
- Ren Kangxu, Yan Guohan, Mou Baolei, *et al.* 2005a. Rb-Sr age and geological implication of the Alxa alkaline-rich intrusive rocks, western Inner Mongolia[J]. *Acta Sci. Natur. Univ. Pek.*, 41: 204~

- 211(in Chinese with English abstract).
- Ren Kangxu, Yan Guohan, Mou Baolei, *et al.* 2005b. Geochemistry and Nd, Sr, Pb isotopic characteristics of the alkali rich intrusive rocks in Alxa Fault Block, western Inner Mongolia and their implications[J]. *Earth Sci. Front.*, 12: 292~301(in Chinese with English abstract).
- Rudnick R L and Gao S. 2003. Composition of the continental crust[A]. Rudnick R L. *The Crust*[C]. Oxford: Elsevier-Pergamon, 1~64.
- Sengör A C and Natal' in B A. 1996. Turkeic-type orogeny and its role in the making of continental crust[J]. *Annual Rev. Earth Planet. Sci.*, 24: 263~337.
- Shen Qihan, Geng Yuansheng, Wang Xinshe, *et al.* 2005. Petrology geochemistry, formation environment and ages of Precambrian amphibolites in Alxa region[J]. *Acta Petrol. Mineral.*, 24: 21~31(in Chinese with English abstract).
- Shi Xingjun. 2015. The Tectonic Affinity of the Zongnaishan-Shalazhashan Zone in Northern Alxa and Its Implications: Evidence from Intrusive and Metamorphic Rocks[D]. A Dissertation Submitted to Chinese Academy of Geological Sciences for Doctoral Degree(in Chinese with English abstract).
- Shi Xingjun, Tong Ying, Wang Tao, *et al.* 2012. LA-ICP-MS zircon U-Pb age and geochemistry of the Early Permian Halinudeng granite in northern Alxa area, western Inner Mongolia[J]. *Geol. Bull China*, 31: 662~670(in Chinese with English abstract).
- Shi X J, Wang T, Zhang L, *et al.* 2014. Timing, petrogenesis and tectonic setting of the Late Paleozoic gabbro-granodiorite-granite intrusions in the Shalazhashan of northern Alxa: Constraints on the southernmost boundary of the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Lithos*, 208~209: 158~177.
- Shi Xingjun, Zhang Lei, Wang Tao, *et al.* 2014. Geochronology and geochemistry of the intermediate-acid intrusive rocks from Zongnaishan area in northern Alxa, Inner Mongolia, and their tectonic implications[J]. *Acta Petrol. Mineral.*, 33: 989~1007(in Chinese with English abstract).
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes [A]. Saunders A D & Norry M J. *Magmatism in the Ocean Basins* [C]. *Geol. Soc. London, Special Publication*, 42: 313~345.
- Tong Ying, Wang Tao, Hong Dawei, *et al.* 2007. Ages and origin of the Early Devonian granites from the north part of Chinese Altai Mountains and its tectonic implications[J]. *Acta Petrol. Sin.*, 23: 1933~1944(in Chinese with English abstract).
- Wang B, Shu L S, Cluzel D, *et al.* 2007. Geochemical constraints on Carboniferous volcanic rocks of the Yili Block(Xinjiang, NW China): implication for the tectonic evolution of Western Tianshan[J]. *J. Asian Earth Sci.*, 29: 148~159.
- Wan B, Windley B F, Xiao W J, *et al.* 2015. Paleoproterozoic high-pressure metamorphism in the northern North China Craton and implications for the Nuna supercontinent[J]. *Nature Comm.*, 6: 8344.
- Wang T, Hong D W, Jahn B M, *et al.* 2006. Timing, petrogenesis, and setting of Paleozoic synorogenic intrusions from the Altai Mountains, Northwest China: implications for the tectonic evolution of an accretionary orogeny[J]. *J. Geol.*, 114: 735~751.
- Wang T, Jahn B M, Kovach V P, *et al.* 2009. Nd-Sr isotopic mapping of the Chinese Altai and implications for continental growth in the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Lithos*, 110: 359~372.
- Wang Tingyin, Wang Jinrong and Wang Shizheng. 1992. The identification of the Engerwusu mélange in northern Alxa area and its tectonic implications[J]. *J. Lanzhou Univ. (Natural Sciences)*, 28(2): 194~196(in Chinese).
- Wang Tingyin, Wang Shizheng and Wang Jinrong. 1994. Formation and Evolution of the Paleozoic Continental Crust in the Alxa Area[M]. Lanzhou: Lanzhou Univ. Press, 31~178(in Chinese).
- Wang Tingyin, Zhang Mingjie, Wang Jinrong, *et al.* 1998. The Characteristics and tectonic implications of the thrust belt in Eugerwusu, China[J]. *Sci. Geol. Sin.*, 33: 385~394(in Chinese with English abstract).
- Wang Xingjun. 2012. The Geochemical Characters and Its Tectonic Implications of Ophiolites in Alxa Area, Inner Mongolia[D]. PhD Dissertation, China University of Geosciences, Beijing, 1~205(in Chinese with English abstract).
- Wang Z Z, Han B F, Feng L X, *et al.* 2014. Geochronology, geochemistry and origins of the Paleozoic-Triassic plutons in the Langshan area, western Inner Mongolia, China[J]. *J. Asian Earth Sci.*, 97: 337~351.
- Weaver B L and Tarney J. 1984. Empirical approach to estimating the composition of the continental crust[J]. *Nature*, 310: 575~577.
- Windley B F, Alexeiev D, Xiao W J, *et al.* 2007. Tectonic models for accretion of the Central Asian Orogenic Belt [J]. *J. Geol. Soc.*, 164: 31~47.
- Wu Kanglin. 2011. Geochemical Characteristics and Tectonic Setting of Late Varisian Period in Alxa Block[D]. A Dissertation Submitted to Chang'an University for Master Degree(in Chinese with English abstract).
- Wu Tairan and He Guoqi. 1993. Tectonic units and their fundamental characteristics on the northern margin of the Alxa block [J]. *Acta Geol. Sin.*, 62: 97~108(in Chinese with English abstract).

- Wu T R, He G Q and Zhang C. 1998. On Paleozoic tectonics in the Alxa region[J]. *Acta Geol. Sin.*, 72(3): 256~263.
- Xia L Q, Xu X Y, Xia Z C, *et al.* 2004. Petrogenesis of Carboniferous rift-related volcanic rocks in the Tianshan, northwestern China[J]. *Geol. Am. Bull.*, 116: 419~433.
- Xiao W J, Han C M, Yuan C, *et al.* 2008. Middle Cambrian to Permian subduction-related accretionary orogenesis of Northern Xinjiang, NW China: implications for the tectonic evolution of Central Asia[J]. *J. Asian Earth Sci.*, 32: 102~117.
- Xiao W J, Huang B C, Han C M, *et al.* 2010b. A review of the western part of the Altaids: a key to understanding the architecture of accretionary orogens[J]. *Gond. Res.*, 18: 253~273.
- Xiao W J, Mao Q G, Windley B F, *et al.* 2010a. Paleozoic multiple accretionary and collisional processes of the Beishan orogenic collage [J]. *Am. J. Sci.*, 310: 1553~1594.
- Xiao W J, Windley B F, Allen M B, *et al.* 2013. Paleozoic multiple accretionary and collisional tectonics of the Chinese Tianshan orogenic collage[J]. *Gond. Res.*, 23: 1316~1341.
- Xiao W J, Windley B F, Badarch G, *et al.* 2004. Palaeozoic accretionary and convergent tectonics of the southern Altaids: implications for the growth of Central Asia[J]. *J. Geol. Soc.*, 161: 339~342.
- Xiao Weijiao, Windley B F, Yan Quanren, *et al.* 2006. Shrimp zircon age of the aermantai ophiolite in the north Xinjiang area, China and Its tectonic implications[J]. *Acta Geol. Sin.*, 80: 32~37(in Chinese with English abstract).
- Xiao Xuchang, Tang Yaoqing, Feng Yimin, *et al.* 1992. Tectonic Evolution of the Northern Xinjiang and Its Adjacent Regions[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~169(in Chinese).
- Yang Qidi, Zhang Lei, Wang Tao, *et al.* 2014. Geochemistry and LA-ICP-MS zircon U-Pb age of Late Carboniferous Shalazhashan pluton on the northern margin of the Alxa Block, Inner Mongolia and their implications[J]. *Geol. Bull. China*, 33: 776~787(in Chinese with English abstract).
- Yang S H and Zhou M F. 2009. Geochemistry of the 430 Ma Jingbulake mafic-ultramafic intrusion in western Xinjiang, NW China: implications for subduction related magmatism in the South Tianshan orogenic belt[J]. *Lithos*, 113: 259~273.
- Yang Zhenyu, Yuan Wei, Tong Yabo, *et al.* 2014. Tectonic affinity reconnaissance of the Alxa Block in the Pre-Mesozoic[J]. *Acta Geosci. Sin.*, 35: 673~681(in Chinese with English abstract).
- Yuan W and Yang Z Y. 2015. The Alashan terrane was not part of North China by the Late Devonian: Evidence from detrital zircon U-Pb geochronology and Hf isotopes[J]. *Gondwana Research*, 27: 1270~1282.
- Zhang J J, Wang T, Zhang L, *et al.* 2015. Tracking deep crust by zircon xenocrysts within igneous rocks from the northern Alxa region, China: Constraint on the southernmost boundary of the Central Asian Orogenic Belt[J]. *J. Asian Earth Sci.*, 108: 150~169.
- Zhang Jianjun, Wang Tao, Zhang Zhaocong, *et al.* 2012. Magma mixing origin of Yamatu granite in Nuogong-Langshan area, western part of the northern Margin of north China Craton: Petrological and geochemical evidences[J]. *Geol. Rev.*, 58: 53~66(in Chinese with English abstract).
- Zhang Jin, Li Jinyi, Liu Jianfeng, *et al.* 2012. The relationship between the Alxa block and the North China plate during the early Paleozoic: New information from the middle Ordovician detrital zircon ages in the eastern Alxa block[J]. *Acta Petrol. Sin.*, 28: 2912~2934(in Chinese with English abstract).
- Zhang Lei, Li Qiugen, Shi Xingjun, *et al.* 2013b. Zircon U-Pb age and geochemistry of the Permian Yongqing granodiorite intrusion in Jiayusi massif of northeast China and their implications[J]. *Acta Petrol. Mineral.*, 32: 1022~1036(in Chinese with English abstract).
- Zhang Lei, Shi Xingjun, Zhang Jianjun, *et al.* 2013a. LA-ICP-MS zircon U-Pb age and geochemical characteristics of the Taohaotuoxiquan gabbro in northern Alxa, Inner Mongolia[J]. *Geol. Bull. China*, 32: 1536~1547(in Chinese with English abstract).
- Zhang Lifei, Ai Yongliang, Li Qiang, *et al.* 2005. The formation and tectonic evolution of UHP metamorphic belt in southwestern Tianshan, Xinjiang[J]. *Acta Petrol. Sin.*, 21: 1029~1038(in Chinese with English abstract).
- Zhang S H, Zhao Y, Kroner A, *et al.* 2009. Early Permian plutons from the northern North China block: constraints on continental arc evolution and convergent margin magmatism related to the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Int. J. Earth Sci.*, 98: 1441~1467.
- Zhang Shuanhong, Zhao Yue, Liu Jianmin, *et al.* 2010. Geochronology geochemistry and tectonic setting of the Late Paleozoic-Early Mesozoic magmatism in the northern margin of the North China Block: A preliminary review[J]. *Acta Petrol. Mineral.*, 29: 824~842(in Chinese with English abstract).
- Zhang S H, Zhao Y, Song B, *et al.* 2007. Carboniferous granitic plutons from the northern margin of the North China block: implications for a late Paleozoic active continental margin[J]. *J. Geol. Soc.*, 164: 451~463.
- Zhang Wei and Jian Ping. 2012. Shrimp dating of the Permian guying diorite-quartz diorite-tonalite suite in the northern margin of the North China Craton[J]. *Geology in China*, 39: 1593~1603(in Chinese with English abstract).

- Zhang W, Wu T R, Feng J C, *et al.* 2013. Time constraints for the closing of the Paleo-Asian Ocean in the northern Alxa Region: Evidence from Wuliji granites[J]. *Sci. China(Earth Sciences)*, 56: 153~164.
- Zhang X H, Yuan L L, Xue F H, *et al.* 2012. Contrasting Triassic ferroan granitoids from northwestern Liaoning, North China: Magmatic monitor of Mesozoic decratonization and a craton-orogen boundary [J]. *Lithos*, 144~145: 12~23.
- Zhang Z C, Zhou G, Kusky T M, *et al.* 2009. Late Paleozoic volcanic record of the Northern Junggar Terrane, Xinjiang, northwestern China: Major and trace element characteristics, Sr-Nd isotopic systematics and implications for tectonic evolution[J]. *Gond. Res.*, 16: 201~215.
- Zhao G C, Sun M, Wilde S A, *et al.* 2005. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: key issue revisited[J]. *Precambrian Res.*, 136: 177~202.
- Zheng R G, Wu T R, Zhang W, *et al.* 2014. Late Paleozoic subduction system in the northern margin of the Alxa block, Altaids: Geochronological and geochemical evidences from ophiolites [J]. *Gond. Res.*, 25: 842~858.
- Zhou Yinzhong, Han Baofu, Xu Zhao, *et al.* 2013. The age of the Proterozoic rocks in Yingba area in western Inner Mongolia: Constraints on the distributions of the South Gobi micro-continent in the Central Asian orogenic belt[J]. *Geol. Bull. China*, 32: 318~326(in Chinese with English abstract).
- 包创, 陈岳龙, 李大鹏. 2012. 阿拉善地块北缘朱拉扎嘎毛道晚二叠世火山岩的发现 [J]. *地学前缘*, 19(5): 156~163.
- 陈登超, 赵省民, 邓坚. 2010. 阿拉善地块北缘乌兰敖包上三叠统地层的厘定——来自激光 ICP-MS 碎屑锆石 U-Pb 年龄的制约 [J]. *岩石矿物学杂志*, 29: 258~270.
- 范宏瑞, 胡芳芳, 杨奎锋, 等. 2009. 内蒙古白云鄂博地区晚古生代闪长质-花岗岩质岩石年代学框架及其地质意义 [J]. *岩石学报*, 11: 2 933~2 938.
- 葛肖虹, 马文璞, 刘俊来, 等. 2009. 对中国大陆构造格架的讨论 [J]. *中国地质*, 36(5): 949~965.
- 耿建珍, 张健, 李怀坤, 等. 2012. 10 μm 尺度锆石 U-Pb 年龄的 LA-MC-ICP-MS 测定 [J]. *地球学报*, 33(6): 877~884.
- 耿元生, 王新社, 沈其韩, 等. 2006. 内蒙古阿拉善地区前寒武纪变质基底阿拉善群的再厘定 [J]. *中国地质*, 33(1): 138~145.
- 耿元生, 王新社, 沈其韩, 等. 2007. 内蒙古阿拉善地区前寒武纪变质岩系形成时代的初步研究 [J]. *中国地质*, 34(2): 251~260.
- 耿元生, 王新社, 吴春明, 等. 2010. 阿拉善变质基底古元古代晚期的构造热事件 [J]. *岩石学报*, 26(4): 1 159~1 170.
- 耿元生, 周喜文. 2011. 阿拉善地区新元古代早期花岗岩的地球化学和锆石 Hf 同位素特征 [J]. *岩石学报*, 27(4): 897~908.
- 耿元生, 周喜文. 2012. 阿拉善变质基底中的早二叠世岩浆热事件——来自同位素年代学的证据 [J]. *岩石学报*, 28: 2 667~2 685.
- 韩宝福, 郭召杰, 何国琦. 2010. “缝合岩体”与新疆北部主要缝合带的形成时限 [J]. *岩石学报*, 26: 2 233~2 246.
- 韩宝福, 季建清, 宋彪, 等. 2006. 新疆准噶尔晚古生代陆壳垂向生长(1)——后碰撞深成岩浆活动的时限 [J]. *岩石学报*, 22(5): 1 077~1 086.
- 何国琦, 李茂松, 刘德全. 1994. 中国新疆古生代地壳演化及成矿 [M]. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社; 香港: 香港文化教育出版社, 1~437.
- 侯可军, 李延河, 谢桂青. 2007. 锆石 Hf 同位素 LA-MC-ICP-MS 分析方法 [J]. *质谱学报*, 28(增刊): 26~28.
- 李怀坤, 耿建珍, 郝爽, 等. 2009. 用激光烧蚀多接收器等离子体质谱仪(LA-MC-ICPMS)测定锆石 U-Pb 同位素年龄的研究 [J]. *矿物学报*, 29: 600~601.
- 李杰. 2012. 内蒙古阿拉善地区雅布赖-巴音诺尔公晚古生代侵入岩特征及其大地构造意义[D]. 中国地质大学(北京)硕士学位论文.
- 李锦轶, 何国琦, 徐新, 等. 2006. 新疆北部及邻区地壳构造格架及其形成过程的初步探讨 [J]. *地质学报*, 80(1): 148~168.
- 李锦轶, 徐新. 2004. 新疆北部地质构造和成矿作用的主要问题 [J]. *新疆地质*, 22(02): 119~124.
- 李锦轶, 张进, 曲军峰. 2012. 华北与阿拉善两个古陆在早古生代晚期拼合——来自宁夏牛首山沉积岩系的证据 [J]. *地质论评*, 58(02): 208~214.
- 李俊建. 2006. 内蒙古阿拉善地块区域成矿系统[D]. 中国地质大学(北京)博士学位论文.
- 李俊建, 翟裕生, 桑海清, 等. 2010b. 内蒙古阿拉善欧布拉格铜-金矿床的成矿时代 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 29: 323~327.
- 李俊建, 翟裕生, 杨永强, 等. 2010a. 再论内蒙古朱拉扎嘎金矿的成矿时代: 来自锆石 SHRIMP U-Pb 年龄的新证据 [J]. *地学前缘*, 17: 178~184.
- 李曰俊, 杨海军, 赵岩, 等. 2009. 南天山区域大地构造与演化 [J]. *大地构造与成矿学*, 33: 94~104.
- 刘治博, 张维杰. 2014a. 内蒙古阿拉善右旗杭嘎勒中二叠世石英闪长岩地球化学特征和 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年 [J]. *地质学报*, 88(2): 198~207.
- 刘治博, 张维杰. 2014b. 内蒙古阿拉善右旗杭嘎勒晚二叠世闪长岩地球化学特征和 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年 [J]. *西北地质*, 47

附中文参考文献

- (1): 84~95.
- 罗红玲, 吴泰然, 赵 磊. 2009. 华北板块北缘乌梁素太 A 型花岗岩体锆石 SHRIMP U-Pb 定年及构造意义[J]. 岩石学报, 3: 515~526.
- 吕秉廷. 2013. 内蒙古阿拉善地区塔木素-乌力吉一带晚古生代侵入岩地球化学特征及其大地构造意义(硕士学位论文)[D]. 中国地质大学(北京).
- 内蒙古自治区地质矿产局. 1991. 内蒙古自治区区域地质志[M]. 北京: 地质出版社.
- 冉 隰, 张维杰, 刘治博. 2012. 内蒙古阿拉善右旗杭嘎勒晚二叠世二长花岗岩地球化学特征和 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年[J]. 地质通报, 31: 1 565~1 575.
- 任康绪, 阎国翰, 牟保磊, 等. 2005a. 阿拉善断块富碱侵入岩 Rb-Sr 年龄及其地质意义[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 41(2): 204~211.
- 任康绪, 阎国翰, 牟保磊, 等. 2005b. 阿拉善断块富碱侵入岩岩石地球化学和 Nd、Sr、Pb 同位素特征及其意义[J]. 地学前缘, 12(2): 292~301.
- 沈其韩, 耿元生, 王新社, 等. 2005. 阿拉善地区前寒武纪斜长角闪岩的岩石学、地球化学、形成环境和年代学[J]. 岩石矿物学杂志, 24: 21~31.
- 史兴俊. 2015. 阿拉善北部宗乃山-沙拉扎山构造带构造属性及意义(博士学位论文)[D]. 北京: 中国地质科学院地质研究所.
- 史兴俊, 童 英, 王 涛, 等. 2012. 内蒙古西部阿拉善地区哈里努登花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄和地球化学特征[J]. 地质通报, 31: 16~24.
- 史兴俊, 张 磊, 王 涛, 等. 2014. 内蒙古阿拉善盟北部宗乃山中酸性侵入岩年代学、地球化学及构造意义[J]. 岩石矿物学杂志, 33: 989~1 007.
- 童 英, 王 涛, 洪大卫, 等. 2007. 中国阿尔泰北部山区早泥盆世花岗岩的年龄、成因及构造意义[J]. 岩石学报, 23: 1 933~1 944.
- 王廷印, 王金荣, 王士政. 1992. 阿拉善北部恩格尔乌苏蛇绿混杂岩带的发现及其构造意义[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 28(2): 194~196.
- 王廷印, 王士政, 王金荣. 1994. 阿拉善地区古生代陆壳的形成和演化[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 31~178.
- 王廷印, 张铭杰, 王金荣, 等. 1998. 恩格尔乌苏冲断带特征及大地构造意义[J]. 地质科学, 33(4): 385~394.
- 王行军. 2012. 内蒙古阿拉善地区蛇绿岩的地球化学特征及其构造意义(博士学位论文)[D]. 中国地质大学(北京), 1~205.
- 吴泰然, 何国琦. 1993. 内蒙古阿拉善地块北缘的构造单元划分及各单元的基本特征[J]. 地质学报, 62: 97~108.
- 作康林. 2011. 阿拉善地区华力西晚期花岗岩类岩石地球化学特征及其构造意义(硕士学位论文)[D]. 西安: 长安大学.
- 肖文交, Windley B F, 闫全人, 等. 2006. 北疆地区阿尔曼太蛇绿岩锆石 SHRIMP 年龄及其大地构造意义[J]. 地质学报, 80(1): 32~37.
- 肖序常, 汤耀庆, 冯益民, 等. 1992. 新疆北部及其邻区大地构造[M]. 北京: 地质出版社, 1~169.
- 杨奇荻, 张 磊, 王 涛, 等. 2014. 内蒙古阿拉善地块北缘沙拉扎山晚石炭世岩体地球化学特征与 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄[J]. 地质通报, 33: 776~787.
- 杨振宇, 袁 伟, 全亚博, 等. 2014. 阿拉善地块前中生代构造归属的新认识[J]. 地球学报, 6: 673~681.
- 张建军, 王 涛, 张招崇, 等. 2012. 华北地块北缘西段巴音诺尔公一狼山地区牙马图岩体的岩浆混合成因——岩相学和元素地球化学证据[J]. 地质论评, 58: 53~66.
- 张 进, 李锦轶, 刘建峰, 等. 2012. 早古生代阿拉善地块与华北地块之间的关系: 来自阿拉善东缘中奥陶统碎屑锆石的信息[J]. 岩石学报, 28: 2 912~2 934.
- 张 磊, 李秋根, 史兴俊, 等. 2013b. 佳木斯地块中部二叠纪永清花岗岩的锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 32: 1 022~1 036.
- 张 磊, 史兴俊, 张建军, 等. 2013a. 内蒙古阿拉善北部陶豪托西圈辉长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄和地球化学特征[J]. 地质通报, 32: 1 536~1 547.
- 张立飞, 艾永亮, 李 强, 等. 2005. 新疆西南天山超高压变质带的形成与演化[J]. 岩石学报, 21: 1 029~1 038.
- 张栓宏, 赵 越, 刘建民, 等. 2010. 华北地块北缘晚古生代-早中生代岩浆活动期次、特征及构造背景[J]. 岩石矿物学杂志, 29: 824~842.
- 张 维, 简 平. 2012. 华北北缘固阳二叠纪闪长岩-石英闪长岩-英云闪长岩套 SHRIMP 年代学[J]. 中国地质, 39: 1593~1603.
- 张 文, 吴泰然, 冯继承, 等. 2013. 阿拉善地块北缘古大洋闭合的时间制约: 来自乌力吉花岗岩体的证据[J]. 中国科学(地球科学), 43(8): 1 299~1 311.
- 周印章, 韩宝福, 徐 钊, 等. 2013. 中蒙边界英巴地区元古宙杂岩的时代及其对南戈壁微陆块分布范围的限定[J]. 地质通报, 32: 318~326.