

·专题研究·

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

史兴俊¹, 张磊¹, 王涛¹, 肖序常¹, 童英¹, 张建军², 耿建珍³, 叶珂²

(1. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 2. 中国地质大学, 北京 100083;

3. 天津地质矿产研究所, 天津 300170)

摘要: 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测年结果表明, 阿拉善盟北部宗乃山岩基包括中二叠世钾长花岗岩(272 ± 1 Ma)和早三叠世闪长岩(249 ± 1 Ma)、花岗闪长岩(247 ± 1 Ma)。中二叠世钾长花岗岩属于准铝质和钾玄质系列, 为高分异 I 型花岗岩。早三叠世闪长岩属钙碱性系列, 而花岗闪长岩为弱过铝质, 钙碱性系列, 属于 I 型花岗岩。宗乃山地区这些中酸性侵入岩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, 并且具有微弱-中等的 Eu 负异常。在原始地幔标准化图解中, 都相对富集大离子亲石元素(K、Rb、Ba 和 Sr 等), 亏损高场强元素(Ta、Nb、P 和 Ti 等)。宗乃山地区侵入岩的锆石绝大部分具有正的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值($+0.3 \sim +11.6$)和相对年轻的地壳模式年龄($t_{\text{DM}}^{\text{C}} = 1275 \sim 533$ Ma), 表明源区主要为新生地壳物质。这些特征与同一构造带上沙拉扎山地区的侵入岩十分类似, 而明显不同于具有古老基底的阿拉善地块内发育的侵入岩, 因此宗乃山-沙拉扎山构造带具有亲中亚造山带的特征, 中亚造山带与阿拉善地块的界线应位于宗乃山-沙拉扎山构造带以南。

关键词: 花岗岩类; 锆石 U-Pb 年龄; Hf 同位素; 阿拉善; 中亚造山带

中图分类号: P581; P597+.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2014)06-0989-19

Geochronology and geochemistry of the intermediate-acid intrusive rocks from Zongnaishan area in northern Alxa, Inner Mongolia, and their tectonic implications

SHI Xing-jun¹, ZHANG Lei¹, WANG Tao¹, XIAO Xu-chang¹, TONG Ying¹, ZHANG Jian-jun²,
GENG Jian-zhen³ and YE Ke²

(1. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3. Tianjin Institute of Geology and Mineral Resources, Tianjin 300170, China)

Abstract: This paper presents new geochronological, petrological, geochemical and Hf isotopic data of the intrusions from the Zongnaishan area in northern Alxa, Inner Mongolia, and discusses the tectonic settings and boundary of southernmost Central Asian Orogenic Belt (CAOB). Zircon U-Pb dating indicates that the Zongnaishan batholith includes the Middle Permian K-feldspar granite (272 ± 1 Ma), Early Triassic diorite (249 ± 1 Ma) and Early Triassic granodiorite (247 ± 1 Ma). According to their geochemistry, the Middle Permian K-feldspar granite is weakly peraluminous and shoshonitic, belonging to the highly fractionated I-type granites; the

收稿日期: 2014-08-14; 修订日期: 2014-10-05

基金项目: 国家 973 项目(2013CB429803); 中国地质调查局资助项目(1212010811033, 12120113096500, 12120113094000); 国家自然科学基金资助项目(41372077)

作者简介: 史兴俊(1987-), 男, 汉族, 博士研究生, 构造地质学, E-mail: shixingjun1@163.com; 通讯作者: 张磊(1983-), 男, 汉族, 博士, 主要从事岩浆岩岩石学和区域大地构造研究, E-mail: windprint@gmail.com。

Early Triassic diorite is calc-alkaline; and the Early Triassic granodiorite is metaluminous to slightly peraluminous and calc-alkaline. The REE patterns of all the three intrusions are high in LREEs and low in HREEs with weak to moderate Eu negative anomalies. The primitive mantle normalized trace element diagrams are characterized by the enrichment of the LILE (K, Rb, Ba and Sr) and depletion of HFSE (Ta, Nb, P and Ti). Based on the zircon Hf isotopes, the authors hold that the intrusive rocks were mainly derived from juvenile material with high $\epsilon\text{Hf}(t)$ values (+0.3 – +11.6) and young two-stage Hf model ages (1 275 ~ 533 Ma). The juvenile features of Zongnaishan-Shalazhashan terrane are similar to the most prominent features of the CAOB, but different from those of cratons or Precambrian blocks, such as the North China Craton and the Alxa Block, implying that the Zongnaishan-Shalazhashan terrane is part of the CAOB, and the southernmost boundary of CAOB here is to the south of the terrane. The recognition of Late Carboniferous typical adakite magmatism in this region provides evidence for the subduction of the oceanic crust of the CAOB. The Middle Permian magmatic activities (272 ~ 264 Ma) display a bimodal association with high-K calc-alkaline features and are interpreted as forming in a post-collision setting. These studies, in combination with regional geology, provide new constraints on the tectonic evolution of southern CAOB during the Late Paleozoic and the location of the southernmost margin of the CAOB.

Key words: granitoids; zircon U-Pb ages; Hf isotope; Alxa; CAOB (Central Asian Orogenic Belt)

中亚造山带(Jahn *et al.*, 2000; Yakubchuk *et al.*, 2002; Xiao *et al.*, 2003, 2004a, 2004b), 又称阿尔泰构造拼合体(Sengör *et al.*, 1993; Yakubchuk, 2004), 是位于西伯利亚克拉通和华北-塔里木克拉通之间的巨型增生造山带, 其形成和演化与古亚洲洋的闭合有密切的关系(Windley *et al.*, 2007; Xiao *et al.*, 2013)。中亚造山带的最重要特征是显生宙以来出现大规模地壳生长, 表现为发育大量具有正的 ϵNd 值和 ϵHf 值的花岗岩类和相关火山岩类(Wu *et al.*, 2000; Jahn *et al.*, 2000, 2004; Hong *et al.*, 2004; Windley *et al.*, 2007; Guo *et al.*, 2010)。然而由于构造的复杂性, 很多问题还存在争议, 比如古亚洲洋的最终闭合时间以及缝合带的具体位置(Xiao *et al.*, 2003; Feng *et al.*, 2013)。以往对于这些问题的研究工作, 多集中在中亚造山带西段的阿尔泰、北山、天山地区(如 Li *et al.*, 2003; Wang *et al.*, 2006, 2009a; 童英等, 2007; 韩宝福等, 2010a; 王涛等, 2010; Han *et al.*, 2011) 以及东段的内蒙古东部及东北地区(Jian *et al.*, 2008, 2010; Chen *et al.*, 2009; Xu *et al.*, 2013), 而中段的内蒙古阿拉善地区一直是研究的薄弱地带。

前人研究认为, 阿拉善地区北部存在两条近东西向的蛇绿岩带, 分别为北部的恩格尔乌苏蛇绿岩带和南部的查干础鲁蛇绿岩带(吴泰然等, 1993; 王廷印等, 1994, 1998)。其中恩格尔乌苏蛇绿岩带被认为是该地区重要的缝合带, 代表了古亚洲洋闭合

(Zheng *et al.*, 2014) 或者板块边界的位置(吴泰然等, 1993; 王廷印等, 1994, 1998), 也有学者认为其可以代表中亚造山带在阿拉善地区的南界(Feng *et al.*, 2013)。位于恩格尔乌苏蛇绿岩带和查干础鲁蛇绿岩带之间的宗乃山-沙拉扎山构造带被认为是早古生代从阿拉善地块上裂解出去的, 从 411 Ma 开始在古陆壳基底上开始俯冲造山作用, 最终发展成具有成熟岛弧和弧后盆地的建造组合(王廷印等, 1994)。然而, 位于该构造带东部沙拉扎山地区侵入岩的最新研究表明, 它们都形成于晚石炭世—晚二叠纪世, 目前还没有发现早古生代侵入岩(Zhang *et al.*, 2013; 刘治博等, 2014; Shi *et al.*, 2014)。另一方面, 这些中酸性侵入岩都具有正的 ϵHf 值、 ϵNd 值和年轻的模式年龄(Zhang *et al.*, 2013; Shi *et al.*, 2014), 明显区别于其南部诺尔公-红古尔玉林岩浆岩带中的同时期侵入岩。这些特征反映沙拉扎山地区可能并非早古生代发育在阿拉善地块上的岩浆弧, 而具有亲中亚造山带的特征, 这暗示该构造带可能并非传统意义上阿拉善地块的一部分, 阿拉善地块与中亚造山带的界线可能位于沙拉扎山以南(Shi *et al.*, 2014)。

与沙拉扎山处于同一构造带上的宗乃山地区, 由于沙漠覆盖严重, 交通极其不便, 因而长期以来缺乏侵入岩的高精度年龄和同位素数据。这限制了对整个宗乃山-沙拉扎山构造带的性质以及该区构造演化的认识。因此, 本文选择在宗乃山地区对相关

侵入岩开展年代学、地球化学和锆石 Lu-Hf 同位素研究,为探讨上述问题提供一些约束。

1 地质背景

阿拉善地区位于内蒙古自治区最西部,北邻兴蒙造山带,向西通过北山造山带与塔里木古陆相接(图 1a)。阿拉善地块作为阿拉善地区的主体,与华北克拉通的关系一直存在着争议(耿元生等,2010,2011)。传统认为阿拉善地块具有太古宙基底,是华北克拉通的西部组成部分(任纪舜等,1980;杨振德等,1988;Zhao *et al.*, 2005),也有学者提出塔里木、阿拉善、柴达木和祁连等地块具有亲缘性,认为其属于“西北地台”或“西域克拉通”(葛肖虹等,2000;陆松年等,2002;万天丰,2004)。近年来有学者通过对阿拉善地块基底岩石的研究,认为其与华

北克拉通有明显差别(耿元生等,2010,2011; Dan *et al.*, 2012),多数学者认为阿拉善地块和华北克拉通在晚古生代之前就已拼合(Zhang *et al.*, 2011; 张进等,2012),也有人认为二者在早中三叠世以后才开始拼合(Yuan and Yang, 2014)。前人根据阿拉善地区北部的恩格尔乌苏蛇绿岩带和查干础鲁蛇绿岩带(图 1b)将阿拉善北部地区自北向南划分为珠斯楞-杭乌拉构造带、宗乃山-沙拉扎山构造带和诺尔公-狼山构造带(吴泰然等,1993;王廷印等,1994;李俊健,2006)。

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,出露从新元古代以来的各时期地层(吴泰然等,1993;Feng *et al.*, 2013)。新元古代地层包括变流纹岩、硅质白云岩、硅质灰岩、板岩等,寒武系到志留系为连续沉积的浅海相碎屑岩建造,晚古生代地层面积分布最广,

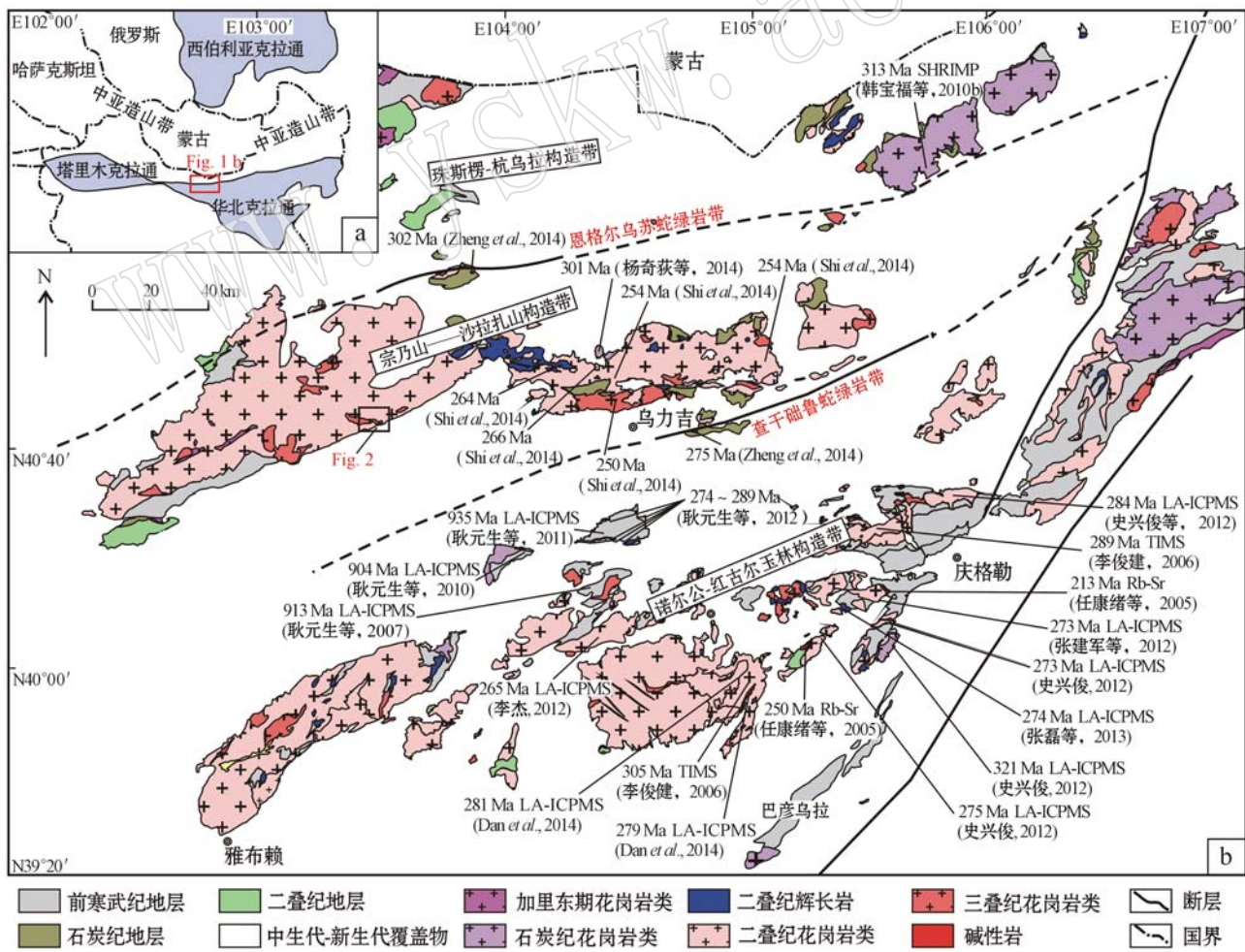


图 1 阿拉善地区大地构造位置(a)和阿拉善北部地质简图(b)

Fig. 1 Tectonic location (a) and geological sketch map (b) of northern Alxa

以石炭系—二叠系阿木山组碳酸盐岩、碎屑岩及火山岩为代表。三叠系为一套陆相碎屑岩沉积,不整合覆盖在二叠系之上。诺尔公—狼山构造带广泛分布前寒武纪各类变质岩,基本缺失古生界,仅有少量二叠纪酸性火山岩出露。而晚古生代的侵入岩广泛发育,主体为晚石炭世—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, 2013; Dan *et al.*, 2014)。

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,该区主要地层单元为石炭系—二叠系阿木山组(图 1b)。阿木山组下部是以浅海相酸性火山碎屑岩、砂岩、板岩为代表的火山岩—碎屑岩建造,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)。该带西段还零星散布前寒武系阿拉善群黑云斜长片麻岩、变粒岩和角闪岩等,呈残留顶盖状产出(宁夏回族自治区地质局, 1982)。该带大面积展布的是晚古生代花岗岩类,东西延伸近 200 km,面积大于 3 000 km²。东段沙拉扎山地区侵入岩包括花岗闪长岩、二长花岗岩、英云闪长岩和辉长岩,形成时代为 301~250 Ma,其中花岗岩类主要来自新生地壳物质的熔融(Zhang *et al.*, 2013; Shi *et al.*, 2014)。西段宗乃山地区也出露大面积的花岗岩类岩石,包括花岗闪长岩、二长花岗岩、钾长花岗岩和闪长岩等,但其形成时代和岩石成因等一直缺乏详细的研究。位于宗乃山南缘中段的塔木素地区(图 2)同时出露了钾长花岗岩、闪长岩和花岗闪长岩等多种侵入岩,因而本文选取该地区开展工作。

2 样品描述

塔木素目前沙漠覆盖严重,在野外难以确定钾长花岗岩、闪长岩和花岗闪长岩之间的接触关系。根据早期区域地质调查报告(宁夏回族自治区地质局, 1982)^①,钾长花岗岩体和闪长岩体呈长条状残留体形式,规模较小,而花岗闪长岩呈巨大岩基状产出,其中,钾长花岗岩形成于印支期,而闪长岩和花岗闪长岩分别形成于华力西中期和晚期。

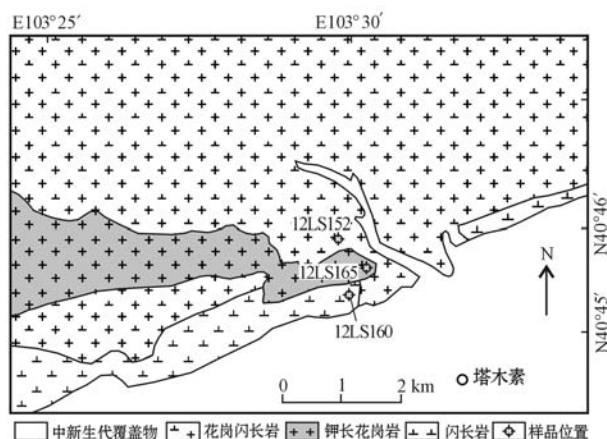


图 2 塔木素地区地质简图和锆石样品采样位置

Fig. 2 Geological sketch map of Tamusu area and sampling sites

钾长花岗岩呈肉红色,细粒结构,遭受一定程度的风化破碎作用。主要矿物为石英(30%)、钾长石(50%~60%)、斜长石(10%),石英、长石等矿物发生亚颗粒化(图 3a),有弱的定向。暗色矿物含量很少,主要为磁铁矿。

闪长岩为灰黑色,中粒结构,无变形(图 3b)。主要矿物为石英(5%)、斜长石(50%~60%)、角闪石(20~30%)、黑云母(10%)。有少量磁铁矿、榍石、磷灰石等副矿物。角闪石常构成柱状集合体形式,部分被黑云母所交代。

花岗闪长岩呈灰白色,中细粒花岗结构,块状构造,无变形。主要由石英(20%~25%)、斜长石(40%~50%)、钾长石(15%~20%)、角闪石(5%)、黑云母(5%)组成,有少量榍石、锆石、磁铁矿等副矿物。斜长石发育聚片双晶,部分发育环带结构(图 3c)。花岗闪长岩与闪长岩接触带发育大量的闪长质包体(图 3d),包体大小不等,多为椭圆状。

3 测试方法

样品破碎和锆石单矿物挑选在河北省廊坊市宇能岩石矿物分选技术服务有限公司完成。将原岩样品粉碎,经常规重选和电磁选后,在双目镜下挑选锆石。将完整的典型锆石颗粒置于环氧树脂中,待固结后抛磨,使锆石内部充分暴露,然后进行锆石显微

① 宁夏回族自治区地质局. 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).

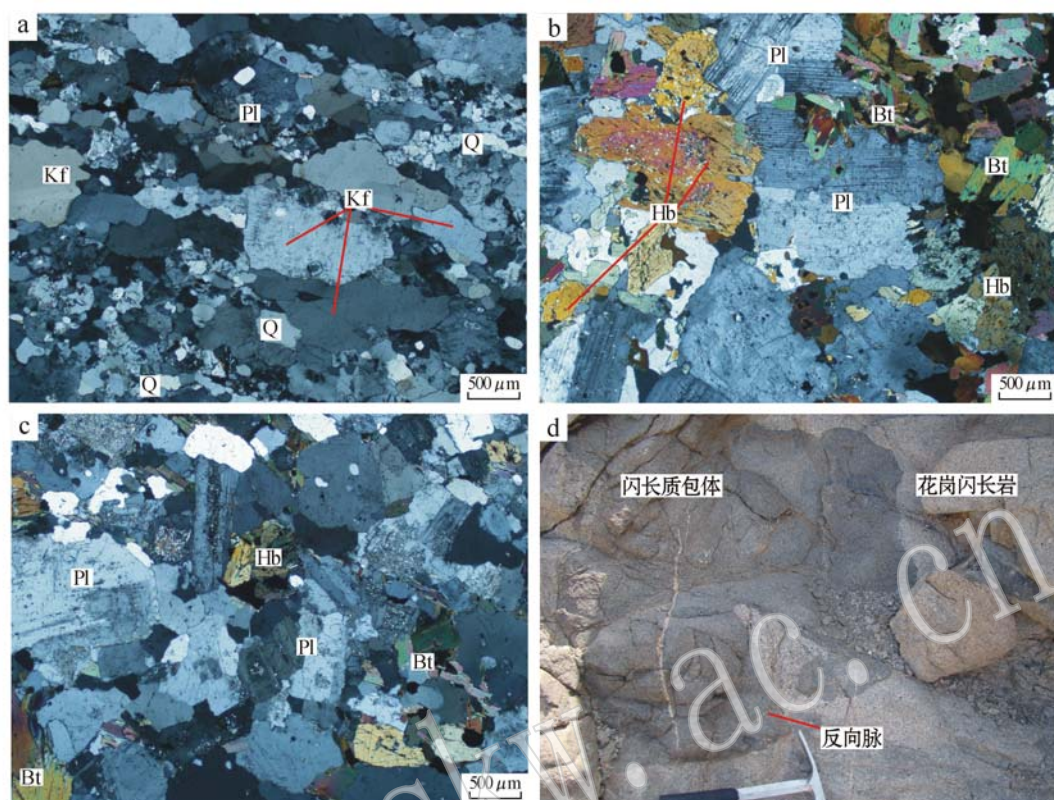


图3 塔木素地区侵入岩野外露头及正交偏光镜下显微照片

Fig. 3 Outcrop and microphotographs (crossed nicols) of the intrusive rocks in Tamusu area

a—钾长花岗岩矿物亚颗粒化; b—闪长岩矿物组成; c—花岗闪长岩矿物组成; d—花岗闪长岩中发育暗色包体; Q—石英; Pl—斜长石; Kf—钾长石; Hb—角闪石; Bt—黑云母

a—quartz of K-feldspar granite transformed into sub-grains; b—mineral assemblage of diorite; c—mineral assemblage of granodiorite; d—irregular enclaves in granodiorite; Q—quartz; Pl—plagioclase; Kf—K-feldspar; Hb—hornblende; Bt—biotite

(反射光和透射光)照相和阴极发光(CL)照相。锆石阴极发光照相在北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室完成。锆石 U-Pb 同位素年龄和 Lu-Hf 同位素分析在天津地质矿产研究所同位素实验室完成,使用仪器为 Neptune 多接收电感耦合等离子体质谱仪和 193 nm 激光取样系统(LA-MC-ICP-MS)。锆石 U-Pb 测年时激光剥蚀的斑束一般为 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 Neptune(MC-ICP-MS)。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李怀坤等(2009)和耿建珍等(2012)。数据处理采用中国地质大学刘勇胜编写的 ICPMSDataCal 程序(Liu *et al.*, 2008),采用 ²⁰⁸Pb 对普通铅进行校正(Ander-son, 2002),并用 NIST612 作为外标计算锆石样品的 Pb、U、Th 含量。统计处理采用 Isoplot 程序(Ludwig, 2003)。

样品主量、微量和稀土元素分析测试在加拿大

温哥华 Acme 实验室完成。主量元素和 Sc、Ba、Ni 含量利用等离子-原子电感耦合发射光谱法测定(ICP-AES),其余的微量和稀土元素利用 ICP-MS 分析。烧失量根据点火后在 1 000 $^{\circ}\text{C}$ 时的重量差别测定。主要氧化物、微量元素和稀土元素的检测限分别为 0.01%~0.1%、 0.1×10^{-6} ~ 10×10^{-6} 和 0.01×10^{-6} ~ 0.5×10^{-6} ,主量元素和微量元素的分析精度分别为 0.5% 和 2%~20%。

Lu-Hf 同位素分析分析时采用 8~10 Hz 的激光频率、100 mJ 的激光强度和 50 μm 的激光束斑直径。激光剥蚀物质以氦为载气送入 Nep-tune,采用 GJ-1 作为监控标样。为使 Hf 同位素分析与锆石 U-Pb 年龄分析相对应,锆石 Hf 同位素的分析点与锆石 U-Pb 年龄分析点位于同一颗锆石晶体的相同位置或者结构相同处。计算 ¹⁷⁶Lu 的衰变常数采用 $1.867 \times 10^{-11}/\text{a}$ 。球粒陨石的 ¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf 和 ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 的比值分别为 0.033 2 和 0.282 772,亏损地幔的 ¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf 和 ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 的比值分别为 0.038 4 和

0.283 25, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 平均地壳为 0.015, 具体测试过程见耿建珍等(2011)。

4 测试结果

4.1 锆石 U-Pb 年龄

钾长花岗岩(12LS165)锆石无色透明, 颗粒较小, 粒径小于 200 μm 。锆石半自形, 短柱状, 阴极发光图像(图 4)显示具有清晰的振荡环带结构, 不发育核-边结构。锆石测试结果见表 1。25 个分析点的结果都位于谐和线上, 且分布范围集中, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄集中在 276~269 Ma, 加权平均值为 272 ± 1 Ma (MSWD=2.2, $n=25$)(图 5a)。

闪长岩(12LS160)锆石颗粒在透射光下无色, 晶体较大, 粒径在 200~400 μm 。锆石多呈板柱状, 半自形, 具有较宽的振荡环带(图 4)。U-Pb 分析结果

显示, 所有 24 个分析点都位于谐和线上, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄集中在 253~244 Ma, 加权平均值为 249 ± 1 Ma (MSWD=2.2, $n=24$)(图 5b)。

花岗闪长岩(12LS152)锆石颗粒无色-浅黄色, 透明, 粒径大小在 100~400 μm , 长宽比为 4:1~1:1。晶体自形程度高, 多呈长柱状, 少量短柱状。锆石颗粒具有清晰的振荡环带结构, 无变质边及继承核。锆石测试结果见表 1, 24 个分析点都落在谐和线上, 具有较一致的年龄, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄集中在 251~243 Ma, 加权平均值为 247 ± 1 Ma (MSWD=3.2, $n=24$)(图 5c)。

4.2 地球化学特征

地球化学分析结果见表 2, 钾长花岗岩具有高的 SiO_2 (76.4%~76.8%) 和 K_2O (5.9%~6.5%) 成分, 低 Al_2O_3 (12.2%~12.4%)、 CaO (0.5%~0.7%)、



图 4 锆石阴极发光图像及测试点位置

Fig. 4 CL images of zircon grains from the granitoids in Tamusu area
红色圆圈代表锆石 U-Pb 测年分析点, 黄色圆圈代表锆石 Hf 同位素分析点

The red circles indicate the locations of analyzed sites for U-Pb dating, and yellow ones for Hf isotopic analysis, with numbers in the circles representing spot numbers

表 1 宗乃山塔木素地区侵入岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 分析数据
Table 1 LA-ICP-MS U-Pb isotopic analysis for zircons from the intrusive rocks in Tamusu area

点	$w_B/10^{-6}$		Th/U	同位素比值				年龄/Ma							
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ				
花岗岩冈长岩 12LS152(N40°46'31.4", E103°29'25.2")															
1	254	390	0.65	0.276 6	0.008 1	0.038 5	0.000 2	0.010 9	0.000 4	291	62	248	7	243	2
2	459	862	0.53	0.278 0	0.004 1	0.039 5	0.000 3	0.012 9	0.000 3	285	33	249	4	250	2
3	1 052	3 002	0.35	0.280 5	0.013 0	0.039 7	0.000 3	0.012 5	0.000 3	251	103	251	12	251	2
4	223	289	0.77	0.275 5	0.007 0	0.038 8	0.000 2	0.010 5	0.000 3	262	57	247	6	246	1
5	225	576	0.39	0.271 0	0.005 5	0.038 4	0.000 2	0.010 8	0.000 3	248	45	244	5	243	1
6	492	876	0.56	0.271 3	0.006 3	0.038 3	0.000 2	0.010 4	0.000 3	258	51	244	6	242	2
7	573	809	0.71	0.277 1	0.006 9	0.038 4	0.000 2	0.010 1	0.000 4	301	56	248	6	243	1
8	541	532	1.02	0.268 5	0.004 5	0.038 6	0.000 2	0.010 2	0.002 1	218	38	242	4	244	1
9	408	411	0.99	0.274 3	0.004 9	0.038 6	0.000 2	0.010 3	0.000 4	267	40	246	4	244	1
10	405	960	0.42	0.272 7	0.012 3	0.039 1	0.000 2	0.011 2	0.000 4	225	102	245	11	247	2
11	139	260	0.53	0.278 6	0.005 5	0.039 4	0.000 2	0.012 0	0.000 3	254	43	250	5	249	2
12	443	740	0.60	0.278 1	0.005 0	0.039 1	0.000 2	0.011 6	0.000 3	347	41	249	5	247	1
13	260	802	0.32	0.276 0	0.015 1	0.038 3	0.000 2	0.010 0	0.000 3	299	123	247	14	242	1
14	235	281	0.84	0.270 3	0.003 3	0.038 8	0.000 2	0.010 9	0.000 3	218	40	243	3	246	1
15	530	945	0.56	0.277 4	0.008 7	0.039 1	0.000 2	0.010 7	0.000 3	260	71	249	8	247	2
16	240	347	0.69	0.279 2	0.004 5	0.039 5	0.000 2	0.011 5	0.001 7	336	36	250	4	249	1
17	302	679	0.44	0.278 9	0.014 4	0.038 9	0.000 3	0.010 4	0.000 4	288	117	250	13	246	2
18	90	232	0.39	0.275 4	0.009 0	0.039 4	0.000 3	0.013 6	0.000 3	227	74	247	8	249	2
19	23	373	0.06	0.276 2	0.004 7	0.039 4	0.000 2	0.012 7	0.000 3	234	38	248	4	249	1
20	371	882	0.42	0.276 4	0.005 2	0.039 4	0.000 2	0.012 8	0.000 3	302	42	248	5	249	2
21	70	711	0.10	0.279 2	0.011 3	0.039 1	0.000 2	0.011 6	0.000 3	279	92	250	10	247	2
22	129	319	0.41	0.279 7	0.014 4	0.039 5	0.000 3	0.011 7	0.000 3	301	114	250	13	250	2
23	100	244	0.41	0.278 7	0.004 6	0.039 2	0.000 3	0.010 1	0.000 3	264	37	250	4	248	2
24	369	1 066	0.35	0.276 4	0.004 4	0.039 1	0.000 2	0.009 9	0.001 9	248	37	248	4	247	1
冈长岩 12LS160(N40°46'42.2", E103°29'35.6")															
1	367	1 285	0.29	0.282 9	0.026 2	0.039 5	0.000 3	0.013 8	0.000 5	283	203	253	23	250	2
2	656	575	1.14	0.274 8	0.024 2	0.038 9	0.000 3	0.012 3	0.000 6	252	192	247	22	246	2
3	263	478	0.55	0.279 9	0.019 9	0.039 1	0.000 3	0.012 2	0.000 5	280	146	251	18	247	2
4	389	516	0.75	0.280 9	0.006 6	0.039 4	0.000 3	0.011 5	0.000 4	274	49	251	6	249	2
5	1 362	1 052	1.30	0.280 4	0.006 7	0.039 1	0.000 3	0.010 5	0.000 5	283	50	251	6	248	2
6	399	973	0.41	0.277 3	0.008 4	0.039 4	0.000 2	0.010 9	0.000 5	242	63	248	7	249	2
7	540	577	0.94	0.277 3	0.010 9	0.039 3	0.000 3	0.009 0	0.000 6	249	70	249	10	248	2
8	200	629	0.32	0.280 2	0.006 4	0.039 6	0.000 3	0.008 4	0.004 6	258	41	251	6	250	2
9	321	1 374	0.23	0.277 5	0.005 5	0.039 5	0.000 3	0.008 9	0.000 5	236	39	249	5	250	2
10	546	1 154	0.47	0.282 1	0.007 7	0.040 0	0.000 2	0.009 2	0.000 4	250	89	252	7	253	1
11	440	421	1.05	0.278 2	0.004 8	0.038 9	0.000 2	0.009 2	0.000 4	281	34	249	4	246	1

续表 1
Continued Table 1

点	$\omega_B/10^{-6}$		Th/U	同位素比值				年龄/Ma			
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
12	205	1310	0.16	0.0008	0.0512	0.0008	0.0008	0.0008	0.0008	0.0008	1 σ
13	271	1422	0.19	0.0010	0.0513	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010	2
14	638	640	1.00	0.0008	0.0514	0.0008	0.0008	0.0008	0.0008	0.0008	2
15	513	1439	0.36	0.0013	0.0513	0.0013	0.0013	0.0013	0.0013	0.0013	2
16	200	621	0.32	0.0008	0.0516	0.0008	0.0008	0.0008	0.0008	0.0008	2
17	618	1338	0.46	0.0010	0.0511	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010	2
18	768	720	1.07	0.0016	0.0511	0.0016	0.0016	0.0016	0.0016	0.0016	2
19	42	668	0.06	0.0017	0.0521	0.0017	0.0017	0.0017	0.0017	0.0017	2
20	81	403	0.20	0.0013	0.0522	0.0013	0.0013	0.0013	0.0013	0.0013	2
21	118	385	0.31	0.0018	0.0516	0.0018	0.0018	0.0018	0.0018	0.0018	2
22	251	353	0.71	0.0013	0.0507	0.0013	0.0013	0.0013	0.0013	0.0013	2
23	295	358	0.82	0.0010	0.0519	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010	2
24	154	937	0.16	0.0009	0.0508	0.0009	0.0009	0.0009	0.0009	0.0009	2
钾长花岗岩 12LS165(N40°45'49.1", E103°31'1.4")											
1	250	892	0.28	0.0007	0.0522	0.0007	0.0007	0.0007	0.0007	0.0007	2
2	591	1268	0.47	0.0006	0.0501	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	2
3	716	1964	0.36	0.0014	0.0512	0.0014	0.0014	0.0014	0.0014	0.0014	2
4	162	408	0.40	0.0008	0.0522	0.0008	0.0008	0.0008	0.0008	0.0008	2
5	282	850	0.33	0.0007	0.0517	0.0007	0.0007	0.0007	0.0007	0.0007	2
6	539	1087	0.50	0.0006	0.0506	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	1
7	392	1024	0.38	0.0013	0.0519	0.0013	0.0013	0.0013	0.0013	0.0013	1
8	686	482	1.42	0.0007	0.0519	0.0007	0.0007	0.0007	0.0007	0.0007	1
9	319	880	0.36	0.0006	0.0523	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	1
10	441	1343	0.33	0.0012	0.0524	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012	1
11	146	410	0.36	0.0010	0.0530	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010	1
12	829	728	1.14	0.0002	0.0520	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	1
13	196	434	0.45	0.0006	0.0530	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	1
14	542	1339	0.40	0.0006	0.0532	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	1
15	722	1568	0.46	0.0006	0.0515	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	1
16	807	1734	0.47	0.0007	0.0518	0.0007	0.0007	0.0007	0.0007	0.0007	1
17	1443	2262	0.64	0.0007	0.0530	0.0007	0.0007	0.0007	0.0007	0.0007	1
18	581	1224	0.47	0.0010	0.0526	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010	1
19	37	589	0.06	0.0007	0.0521	0.0007	0.0007	0.0007	0.0007	0.0007	2
20	293	885	0.33	0.0006	0.0524	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	2
21	318	1352	0.24	0.0008	0.0525	0.0008	0.0008	0.0008	0.0008	0.0008	2
22	348	942	0.37	0.0006	0.0518	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	2
23	878	1852	0.47	0.0007	0.0520	0.0007	0.0007	0.0007	0.0007	0.0007	1
24	916	1183	0.77	0.0009	0.0526	0.0009	0.0009	0.0009	0.0009	0.0009	1
25	450	910	0.49	0.0007	0.0521	0.0007	0.0007	0.0007	0.0007	0.0007	1

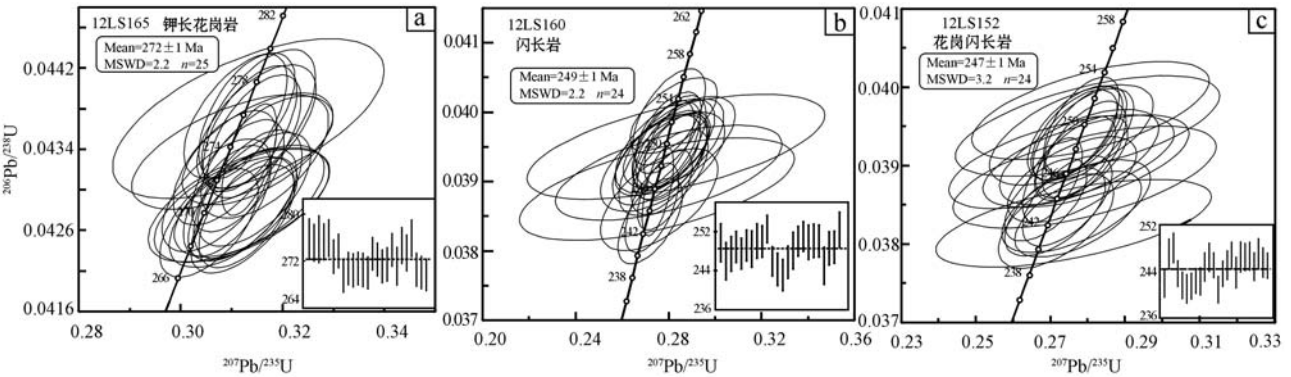


图 5 塔木素侵入岩锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 5 Zircon U-Pb concordia diagram for the granitoids in Tamusu area

表 2 塔木素地区侵入岩主量元素 ($w_B/\%$) 和微量元素 ($w_B/10^{-6}$) 分析结果

Table 2 Major ($w_B/\%$) and trace ($w_B/10^{-6}$) element composition of the intrusive rocks in Tamusu area												
岩性	花岗闪长岩(247±1 Ma)					闪长岩(249±1 Ma)			钾长花岗岩(272±1 Ma)			
样品	12LS152	12LS153	12LS154	12LS155	12LS156	12LS160	12LS161	12LS162	12LS165	12LS166	12LS167	12LS170
SiO ₂	67.16	67.27	66.57	66.79	65.54	56.77	55.88	55.19	76.85	76.44	76.40	76.72
TiO ₂	0.58	0.55	0.63	0.62	0.65	1.21	1.00	1.26	0.12	0.15	0.15	0.11
Al ₂ O ₃	15.68	15.75	16.19	16.10	16.65	16.71	17.33	17.61	12.22	12.35	2.40	12.27
Fe ₂ O ₃	3.39	3.12	3.61	3.34	3.71	7.05	6.39	6.90	1.17	0.97	.10	1.14
MnO	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06	0.11	0.10	0.11	0.01	0.03	0.01	0.03
MgO	1.45	1.47	1.69	1.50	1.77	4.56	4.82	4.83	0.09	0.13	0.09	0.07
CaO	3.25	3.35	3.69	3.59	3.46	5.87	6.09	7.31	0.56	0.65	0.57	0.51
Na ₂ O	4.16	4.03	4.22	4.20	4.44	3.77	3.61	4.05	2.54	2.37	2.45	2.36
K ₂ O	2.86	2.84	2.49	2.65	2.59	1.86	2.04	1.19	5.96	6.32	6.49	6.53
P ₂ O ₅	0.10	0.12	0.15	0.12	0.14	0.43	0.32	0.25	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Los	1.10	1.20	0.50	0.80	0.80	1.30	2.10	1.00	0.40	0.50	0.30	0.20
Total	99.79	99.80	99.79	99.79	99.77	99.66	99.66	99.71	99.91	9.91	99.94	99.90
Mg [#]	48	51	51	50	51	59	62	61	14	23	15	12
Na ₂ O/K ₂ O	1.45	1.42	1.69	1.58	1.71	2.03	1.77	3.40	0.43	0.38	0.38	0.36
A/CNK	0.99	1.00	0.99	0.99	1.02	0.88	0.90	0.83	1.05	1.04	1.03	1.03
La	35.90	26.30	29.10	33.80	29.40	37.60	29.90	24.40	40.50			40.20
Ce	70.50	53.20	57.20	66.40	57.00	85.00	68.70	53.80	70.30			72.20
Pr	8.05	6.31	6.64	7.34	6.39	9.99	8.48	6.55	6.94			7.43
Nd	27.50	23.50	23.90	28.00	23.00	40.50	34.50	27.00	23.20			25.00
Sm	4.88	4.10	4.58	4.72	4.12	7.46	6.22	5.11	2.83			3.28
Eu	1.09	1.01	1.02	1.06	0.99	1.90	1.67	1.56	0.39			0.44
Gd	4.20	3.81	3.93	3.97	3.38	6.48	5.41	4.46	1.92			2.19
Tb	0.53	0.46	0.51	0.50	0.44	0.87	0.73	0.62	0.15			0.21
Dy	3.22	2.85	2.99	3.06	2.66	5.51	4.42	3.74	0.90			1.26
Ho	0.54	0.52	0.49	0.54	0.50	0.95	0.74	0.57	0.10			0.19
Er	1.78	1.45	1.58	1.64	1.37	2.81	2.20	1.90	0.39			0.58
Tm	0.23	0.22	0.20	0.23	0.17	0.37	0.32	0.26	0.04			0.07
Yb	1.74	1.39	1.58	1.52	1.31	2.45	2.12	1.68	0.50			0.70
Lu	0.24	0.20	0.20	0.23	0.20	0.33	0.28	0.25	0.06			0.09
Y	17.50	15.80	15.70	17.10	13.90	27.10	21.60	19.20	4.40			6.20
ΣREE	160.40	125.32	133.92	153.01	130.93	202.22	165.69	131.90	148.22			153.84
LREE/HREE	11.85	10.50	10.67	12.09	12.05	9.23	9.22	8.78	35.51			28.08

续表 2

Continued Table 2

岩性	花岗闪长岩(247±1 Ma)					闪长岩(249±1 Ma)			钾长花岗岩(272±1 Ma)			
样品	12LSI52	12LSI53	12LSI54	12LSI55	12LSI56	12LSI60	12LSI61	12LSI62	12LSI65	12LSI66	12LSI67	12LSI70
δEu	0.72	0.77	0.71	0.73	0.78	0.81	0.86	0.97	0.48			0.47
(La/Yb) _N	14.80	13.57	13.21	15.95	16.10	11.01	10.12	10.42	58.10			41.19
Sc	7.00	6.00	8.00	7.00	7.00	14.00	14.00	16.00	<1			<1
V	67.00	65.00	65.00	63.00	66.00	117.00	94.00	131.00	8.00			8.00
Cr	13.68	13.68	27.37	20.53	13.68	82.11	88.95	102.63	13.68			13.68
Co	7.70	7.70	8.60	7.10	8.50	22.60	21.50	23.00	0.30			0.80
Ni	10.00	11.40	12.00	9.50	12.40	36.80	38.90	27.20	0.90			0.60
Cu	1.50	1.80	3.00	3.60	5.40	28.20	30.90	19.30	2.00			4.50
Zn	48.00	45.00	44.00	45.00	52.00	53.00	46.00	33.00	15.00			6.00
Ga	19.30	18.10	18.20	17.80	19.50	19.40	18.20	18.60	14.20			13.40
Rb	94.40	82.20	74.20	78.60	88.10	47.50	58.30	29.70	116.70			128.60
Sr	429.50	441.00	520.70	443.80	456.70	696.80	825.80	694.70	35.70			45.40
Zr	228.20	202.10	190.10	247.30	207.80	354.50	278.20	194.20	147.70			138.70
Nb	7.90	6.80	6.30	7.40	5.90	13.90	11.10	9.50	0.70			1.20
Ta	0.80	0.60	0.60	0.60	0.50	0.90	0.70	0.50	0.10			0.10
Cs	3.80	1.70	1.30	2.20	2.20	1.80	2.80	2.50	0.80			0.90
Ba	522.00	576.00	568.00	551.00	531.00	459.00	484.00	337.00	298.00			320.00
Hf	5.50	4.80	4.50	6.60	5.10	7.10	6.10	4.30	5.00			4.60
Pb	2.60	1.60	1.60	2.00	1.90	2.40	4.40	2.00	3.50			3.70
Th	11.50	9.60	9.30	9.90	8.60	5.10	4.50	3.60	22.30			21.30
U	2.90	1.60	1.40	2.20	1.80	1.20	1.10	0.90	1.30			1.00

MgO(0.07%~0.13%)、TiO₂(0.11%~0.15%)和 MnO (<0.03%)。Na₂O 含量为 2.4%~2.5%, Na₂O<K₂O, 全碱含量(Na₂O+K₂O)为 8.5%~8.9%, 为钾玄质系列(图 6a)。铝饱和指数 A/CNK 集中在 1.03~1.05, A/NK=1.1, 为弱过铝质(图 6b)。闪长岩具有相对低的 SiO₂(55.2%~56.8%)和 K₂O(1.2%~2.0%)含量, 而 Al₂O₃(16.7%~17.6%)、CaO (5.9%~7.3%)、MgO(4.6%~4.8%)成分较高, 属于准铝质(A/CNK=0.83~0.90)和钙碱性系列(图 6)。花岗闪长岩为弱过铝质(A/CNK=0.99~1.02), 钙碱性系列(SiO₂=65.5%~67.3%, K₂O=2.6%~2.9%), 具有高 Na₂O(4.0%~4.4%)和 Al₂O₃

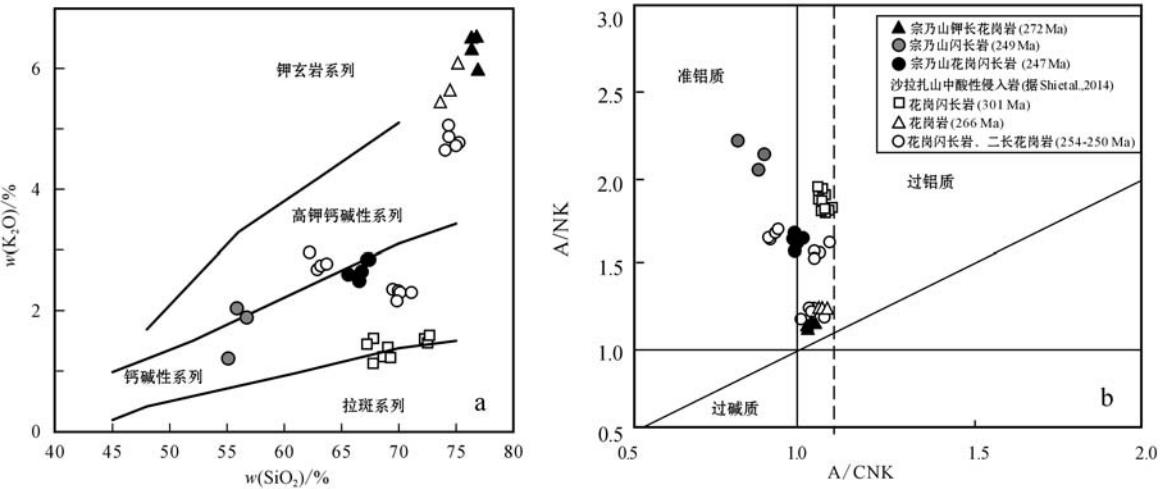


图 6 塔木素侵入岩 K₂O-SiO₂ 图解(a, 据 Maniar 和 Piccoli, 1989)和 A/NK-A/CNK 图解(b, 据 Peccerillo 和 Taylor, 1976)

Fig. 6 K₂O-SiO₂ diagram (a, after Maniar and Piccoli, 1989) and A/NK-A/CNK diagram(b, after Peccerillo and Taylor, 1976)

(15.7%~16.7%)含量。

塔木素地区钾长花岗岩的稀土元素和微量元素组成与区域上其它岩石不同,在球粒陨石 REE 标准化图解上更加亏损重稀土元素(LREE/HREE = 28.1~35.5),具有明显的铕负异常($\delta E_u = \sim 0.5$)。亏损高场强元素 Ta、Nb、P 和 Ti 的同时,具有强烈的 Sr 负异常。花岗闪长岩和闪长岩具有类似的稀土元素组成。闪长岩稀土元素总量稍高($\sum REE = 132 \times 10^{-6} \sim 202 \times 10^{-6}$),球粒陨石标准化图解中

呈现右倾型,铕异常不明显($\delta E_u = 0.8 \sim 1.0$)。花岗闪长岩稀土元素含量中等($\sum REE = 125 \times 10^{-6} \sim 160 \times 10^{-6}$),相对富集轻稀土(LREE/HREE = 10.5~12.1),在球粒陨石标准化图解上呈右倾型,具有弱的铕负异常($\delta E_u = 0.7 \sim 0.8$)(图 7a)。二者在原始地幔标准化蛛网图解中同样显示出较一致的特征(图 7b),都相对富集大离子亲石元素包括 K、Rb、Sr 和 Ba 等,亏损高场强元素如 Ta、Nb、P 和 Ti 等。

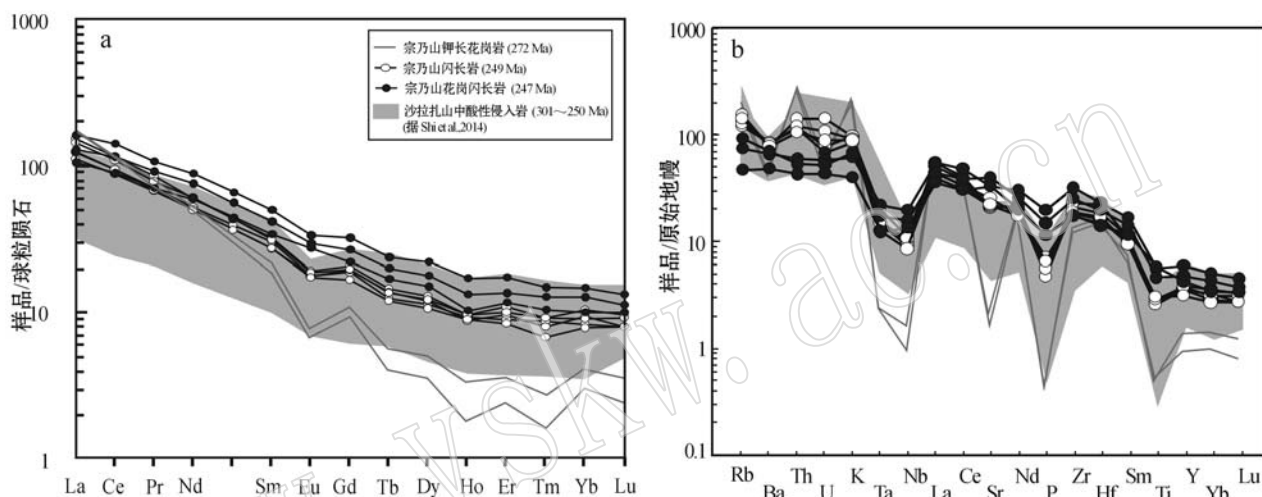


图 7 塔木素侵入岩的稀土元素配分模式图(a)和微量元素蛛网图(b)(标准化数据来自参考文献 Taylor and McLennan, 1985; Sun and McDonough, 1989)

Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive-mantle normalized trace element patterns (b) for the Tamusu intrusive rocks (normalized values after Taylor and McLennan, 1985; Sun and McDonough, 1989)

4.3 锆石 Hf 同位素

塔木素侵入岩的锆石 Lu-Hf 同位素分析结果见表 3。利用锆石结晶年龄对 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 进行校正,得出塔木素钾长花岗岩(272 ± 1 Ma)的初始 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 $0.282\,611 \sim 0.282\,754$, $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值为 $+0.3 \sim +5.4$ (图 8),Hf 地壳模式年龄为 $1\,275 \sim 951$ Ma。闪长岩(249 ± 1 Ma)锆石 Hf 同位素组成具有较大的变化范围,初始 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 $0.282\,571 \sim 0.282\,937$, $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值分布范围为 $-2.3 \sim +10.8$,二阶段模式年龄 $1\,420 \sim 585$ Ma。而花岗闪长岩(247 ± 1 Ma)具有较高的初始 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值($0.282\,751 \sim 0.282\,962$)和 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值($+4.6 \sim +11.6$)以及相对年轻的二阶段模式年龄 $986 \sim 533$ Ma。

5 讨论

5.1 宗乃山-沙拉扎山岩浆活动期次

宗乃山塔木素地区钾长花岗岩、闪长岩和花岗闪长岩的锆石都具有较清晰的振荡环带结构,无变质边及继承核(图 4),表明这些锆石都是由岩浆结晶而成。它们的分析结果都位于谐和线上,且分布范围相对集中,因此其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值可以代表岩体的形成时代。分析结果表明,塔木素钾长花岗岩形成于中二叠世(272 ± 1 Ma),构成宗乃山主体的花岗闪长岩(247 ± 1 Ma)形成于早三叠世,而原认为形成于华力西中期的闪长岩,实际年龄为 249 ± 1 Ma,属于早三叠世。结合沙拉扎山地区侵入岩的

表 3 塔木素地区侵入岩锆石 Hf 同位素分析结果

Table 3 Analytical results of zircon Hf isotopes for the intrusive rocks in Tamusu area

岩性	<i>t</i> /Ma	¹⁷⁶ Yb/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf	±2σ	(¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf) _i	εHf(0)	εHf(<i>t</i>)	<i>t</i> _{DM} /Ma	<i>t</i> _{DM} ^c /Ma	<i>f</i> _{La} /Hf
花岗岩类岩 (247 ± 1 Ma)											
12LSI52-1	243	0.038 757	0.000 901	0.282 784	0.000 016	0.282 780	0.43	5.63	661	913	−0.97
12LSI52-2	251	0.022 565	0.000 534	0.282 778	0.000 017	0.282 776	0.22	5.65	663	918	−0.98
12LSI52-3	246	0.040 464	0.000 878	0.282 848	0.000 015	0.282 844	2.69	7.95	571	767	−0.97
12LSI52-4	243	0.060 356	0.001 428	0.282 824	0.000 028	0.282 817	1.82	6.94	614	830	−0.96
12LSI52-5	242	0.050 317	0.001 183	0.282 830	0.000 024	0.282 824	2.04	7.18	601	814	−0.96
12LSI52-6	243	0.103 791	0.002 347	0.282 837	0.000 020	0.282 827	2.31	7.27	610	808	−0.93
12LSI52-7	244	0.144 653	0.003 216	0.282 962	0.000 033	0.282 948	6.73	11.58	436	533	−0.90
12LSI52-8	244	0.073 247	0.001 701	0.282 857	0.000 022	0.282 849	3.00	8.08	571	757	−0.95
12LSI52-9	247	0.053 420	0.001 284	0.282 858	0.000 015	0.282 853	3.05	8.27	562	747	−0.96
12LSI52-10	249	0.050 453	0.001 233	0.282 832	0.000 022	0.282 827	2.14	7.41	598	804	−0.96
12LSI52-11	247	0.086 708	0.002 075	0.282 795	0.000 023	0.282 785	0.80	5.90	667	899	−0.94
12LSI52-12	242	0.045 719	0.001 174	0.282 852	0.000 022	0.282 846	2.82	.96	570	764	−0.96
12LSI52-13	246	0.047 031	0.001 219	0.282 885	0.000 016	0.282 879	3.99	9.19	523	687	−0.96
12LSI52-14	246	0.063 954	0.001 504	0.282 841	0.000 020	0.282 834	2.44	7.60	590	789	−0.95
12LSI52-15	249	0.101 418	0.002 256	0.282 803	0.000 020	0.282 792	1.09	6.19	659	882	−0.93
12LSI52-16	249	0.042 313	0.001 004	0.282 751	0.000 018	0.282 746	−0.75	4.56	710	986	−0.97
12LSI52-17	249	0.087 704	0.002 065	0.282 815	0.000 023	0.282 805	1.51	6.65	638	852	−0.94
12LSI52-18	247	0.035 834	0.000 871	0.282 800	0.000 016	0.282 796	1.00	6.29	638	874	−0.97
12LSI52-19	250	0.028 044	0.000 679	0.282 791	0.000 019	0.282 788	0.68	6.06	647	891	−0.98
12LSI52-20	248	0.038 674	0.000 887	0.282 851	0.000 017	0.282 847	2.79	8.09	567	759	−0.97
12LSI52-21	247	0.038 249	0.000 860	0.282 831	0.000 016	0.282 827	2.09	7.39	594	804	−0.97
闪长岩 (249 ± 1 Ma)											
12LSI60-1	250	0.072 619	0.001 461	0.282 775	0.000 023	0.282 768	0.11	5.36	684	935	−0.96
12LSI60-2	246	0.202 775	0.003 744	0.282 571	0.000 032	0.282 554	−7.10	−2.30	1 039	1 420	−0.89
12LSI60-3	247	0.080 134	0.001 505	0.282 656	0.000 024	0.282 649	−4.09	1.10	855	1 205	−0.95
12LSI60-4	249	0.082 889	0.001 465	0.282 722	0.000 026	0.282 715	−1.79	3.44	761	1 057	−0.96
12LSI60-5	248	0.206 099	0.003 656	0.282 688	0.000 027	0.282 671	−2.98	1.86	860	1 157	−0.89
12LSI60-6	249	0.080 150	0.001 920	0.282 826	0.000 021	0.282 817	1.90	7.07	619	826	−0.94
12LSI60-7	248	0.120 704	0.002 275	0.282 683	0.000 029	0.282 672	−3.16	1.93	835	1 153	−0.93
12LSI60-8	250	0.098 178	0.002 111	0.282 798	0.000 024	0.282 788	0.90	6.05	664	891	−0.94
12LSI60-9	250	0.048 111	0.001 050	0.282 808	0.000 022	0.282 803	1.28	6.60	630	857	−0.97
12LSI60-10	253	0.124 556	0.002 681	0.282 796	0.000 021	0.282 783	0.84	5.94	677	901	−0.92
12LSI60-11	246	0.258 359	0.005 339	0.282 791	0.000 029	0.282 767	0.68	5.22	738	941	−0.84
12LSI60-12	244	0.049 718	0.001 178	0.282 821	0.000 023	0.282 816	1.75	6.93	613	831	−0.96
12LSI60-13	243	0.034 231	0.000 884	0.282 761	0.000 019	0.282 757	−0.39	4.81	694	965	−0.97
12LSI60-14	246	0.081 112	0.001 849	0.282 782	0.000 022	0.282 773	0.34	5.44	682	927	−0.94
12LSI60-15	248	0.061 591	0.001 443	0.282 775	0.000 017	0.282 768	0.11	5.32	684	937	−0.96
12LSI60-16	250	0.035 626	0.000 983	0.282 738	0.000 016	0.282 734	−1.20	4.14	728	1 014	−0.97
12LSI60-17	251	0.058 279	0.001 438	0.282 739	0.000 018	0.282 732	−1.17	4.10	736	1 017	−0.96
12LSI60-18	250	0.131 185	0.002 953	0.282 937	0.000 029	0.282 923	5.83	10.84	471	585	−0.91
12LSI60-19	250	0.262 422	0.005 531	0.282 614	0.000 026	0.282 588	−5.59	−1.01	1 026	1 341	−0.83
12LSI60-20	250	0.059 932	0.001 377	0.282 753	0.000 019	0.282 747	−0.66	4.61	714	983	−0.96
12LSI60-21	245	0.036 398	0.000 889	0.282 755	0.000 021	0.282 751	−0.60	4.64	702	978	−0.97
12LSI60-22	249	0.083 209	0.001 979	0.282 837	0.000 024	0.282 828	2.31	7.45	604	801	−0.94
12LSI60-23	249	0.131 675	0.002 800	0.282 715	0.000 025	0.282 702	−2.02	2.99	799	1 086	−0.92
12LSI60-24	252	0.055 378	0.001 276	0.282 815	0.000 022	0.282 808	1.50	6.84	625	843	−0.96
钾长花岗岩 (272 ± 1 Ma)											
12LSI65-1	276	0.066 013	0.001 441	0.282 678	0.000 016	0.282 671	−3.32	2.48	822	1 139	−0.96
12LSI65-2	275	0.077 144	0.001 790	0.282 620	0.000 017	0.282 611	−5.39	0.34	914	1 275	−0.95
12LSI65-3	276	0.066 233	0.001 446	0.282 724	0.000 015	0.282 717	−1.69	4.11	757	1 035	−0.96
12LSI65-4	275	0.059 372	0.001 252	0.282 761	0.000 016	0.282 754	−0.40	5.42	701	951	−0.96
12LSI65-5	276	0.046 156	0.001 000	0.282 709	0.000 014	0.282 704	−2.22	3.67	769	1 064	−0.97
12LSI65-6	273	0.042 908	0.000 927	0.282 741	0.000 014	0.282 737	−1.08	4.75	722	992	−0.97
12LSI65-7	274	0.056 302	0.001 186	0.282 696	0.000 014	0.282 690	−2.68	3.12	791	1 097	−0.96
12LSI65-8	269	0.069 811	0.001 456	0.282 674	0.000 017	0.282 667	−3.45	2.21	828	1 152	−0.96

续表 3

Continued Table 3

岩性	<i>t</i> /Ma	¹⁷⁶ Yb/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf	±2σ	(¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf) _i	εHf(0)	εHf(<i>t</i>)	<i>t</i> _{DM} /Ma	<i>t</i> _{DM} [*] /Ma	<i>f</i> _{La/Hf}
12LSI65-9	271	0.047 258	0.001 022	0.282 694	0.000 014	0.282 689	-2.77	3.00	791	1 102	-0.97
12LSI65-10	270	0.055 946	0.001 180	0.282 729	0.000 014	0.282 723	-1.52	4.21	745	1 025	-0.96
12LSI65-11	271	0.078 573	0.001 743	0.282 708	0.000 020	0.282 699	-2.25	3.39	786	1 078	-0.95
12LSI65-12	271	0.053 451	0.001 162	0.282 656	0.000 013	0.282 650	-4.09	1.64	847	1 188	-0.97
12LSI65-13	273	0.056 827	0.001 358	0.282 736	0.000 013	0.282 729	-1.27	4.49	738	1 009	-0.96
12LSI65-14	272	0.067 147	0.001 571	0.282 697	0.000 013	0.282 689	-2.64	3.06	798	1 100	-0.95
12LSI65-15	271	0.067 450	0.001 551	0.282 737	0.000 012	0.282 729	-1.24	4.44	741	1 011	-0.95
12LSI65-16	271	0.055 378	0.001 318	0.282 689	0.000 012	0.282 682	-2.95	2.78	805	1 117	-0.96
12LSI65-17	274	0.069 535	0.001 618	0.282 682	0.000 016	0.282 674	-3.17	2.55	820	1 133	-0.95
12LSI65-18	271	0.078 472	0.001 705	0.282 712	0.000 019	0.282 703	-2.13	3.52	780	1 069	-0.95
12LSI65-19	275	0.062 701	0.001 578	0.282 743	0.000 018	0.282 735	-1.04	4.71	733	996	-0.95
12LSI65-20	273	0.071 269	0.001 475	0.282 731	0.000 016	0.282 723	-1.47	4.28	748	1 023	-0.96
12LSI65-21	276	0.057 709	0.001 295	0.282 711	0.000 013	0.282 704	-2.16	3.67	773	1 063	-0.96
12LSI65-22	271	0.051 332	0.001 471	0.282 761	0.000 018	0.282 754	-0.37	5.31	704	954	-0.96
12LSI65-23	270	0.049 298	0.001 298	0.282 750	0.000 017	0.282 743	-0.78	4.93	717	979	-0.96
12LSI65-24	270	0.066 136	0.001 430	0.282 646	0.000 015	0.282 639	-4.46	1.21	868	1 216	-0.96

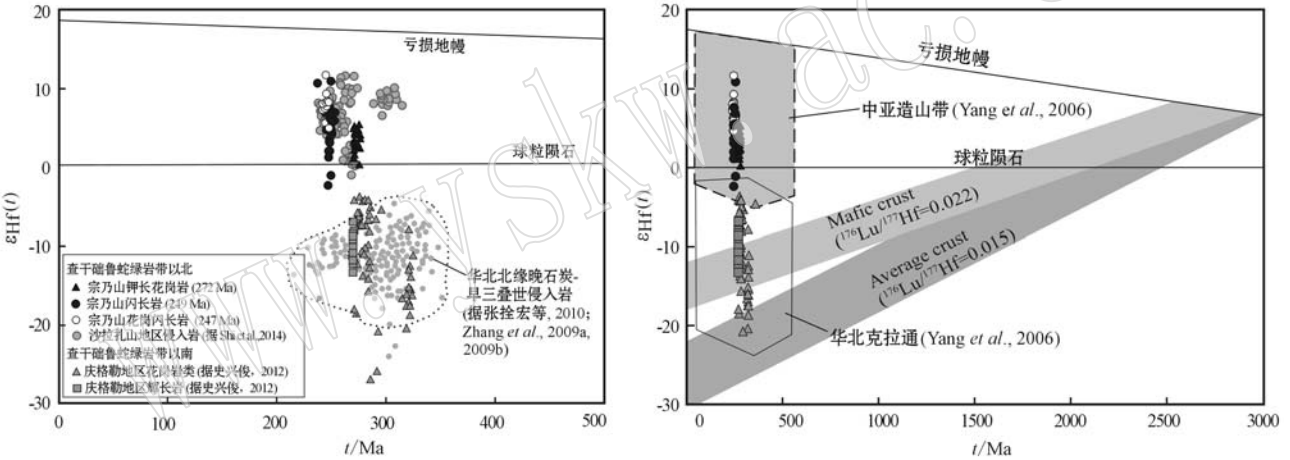


图 8 塔木素地区侵入岩锆石 εHf(*t*)-*t* 图

Fig. 8 Zircon εHf(*t*) versus *t* of the intrusive rocks from Tamusu area

研究,整个宗乃山-沙拉扎山构造带古生代岩浆活动可以分为 3 期:晚石炭世末(~301 Ma),以温都尔毛道埃达克质花岗闪长岩为代表(杨奇荻等,2014);中二叠世(272~264 Ma),包括宝各其辉长岩、呼仁陶勒盖花岗岩(Shi *et al.*, 2014)和塔木素钾长花岗岩;二叠纪末一早三叠世(257~247 Ma),包括塔木素花岗闪长岩及闪长岩、杭嘎勒花岗闪长岩及闪长岩(257 Ma,刘治博等,2014)、乌力吉花岗岩和沙日吉庙石英二长闪长岩(254~250 Ma, Zhang *et al.*, 2013; Shi *et al.*, 2014)。其中二叠纪末一早三叠世的岩浆活动规模最大,以中酸性侵入岩为主,并构成了宗乃山-沙拉扎山的主体。

5.2 岩石成因

塔木素钾长花岗岩(272 ± 1 Ma)的 A/CNK 在 1.03~1.05 之间,为弱过铝质(图 6),高钾钙碱性-钾玄质系列(图 6)。通常具有高 K₂O 含量的花岗岩可能是 A 型花岗岩,但由于该钾长花岗岩 10 000 Ga/Al、(Na₂O+K₂O)/CaO 和 Zr+Nb+Ce+Y 均较低,在相关图解中也落入 I 型花岗岩区(图 9),故其不是典型 A 型花岗岩,而应是 I 型花岗岩。该岩石强烈亏损重稀土元素,具有明显的 Nb 和 Ta 的负异常(图 7b),并具有低的 Fe₂O₃(0.97%~1.17%)、MgO(0.07%~0.13%)和 TiO₂(0.11%~0.15%)含量,暗示可能经历过钛铁矿、磁铁矿、角闪石、石榴

子石等暗色矿物分离结晶,而强烈的 Sr 和 Eu 负异常(图 7)和较低的 Na_2O (2.36%~2.54%) 表明发生了斜长石的分离结晶。这与其矿物组成中缺少斜长石和暗色矿物一致。此外,该钾长花岗岩在成因图解中落入高分异 I 型花岗岩区(图 9),进一步证实其

可能经历了较高分离结晶作用。塔木素钾长花岗岩(272 ± 1 Ma)具有正的锆石 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值(+0.3~+5.4),其地壳模式年龄为 1 275~951 Ma,表明该钾长花岗岩可能来自年轻物质和老地壳物质的混合源区。

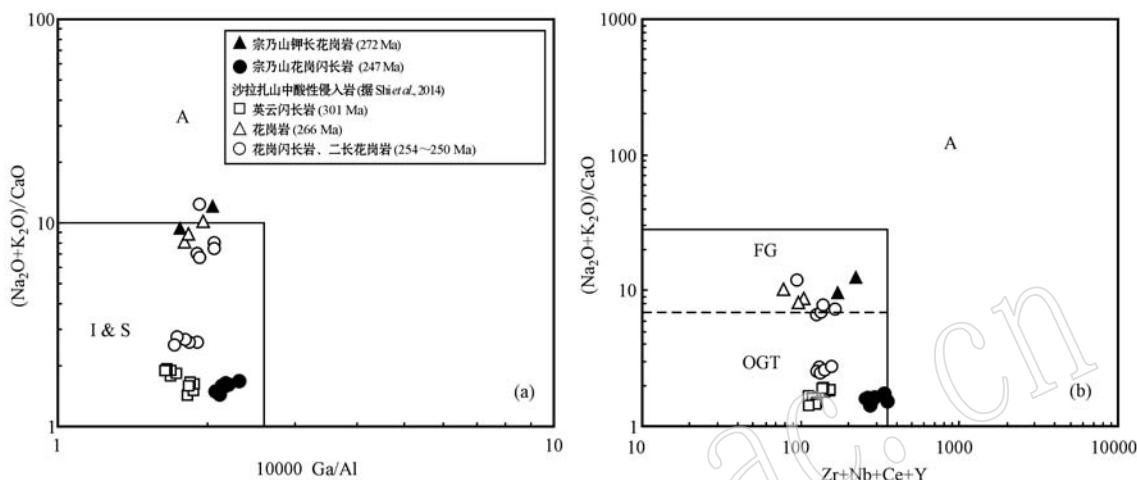


图 9 花岗岩成因类型判别图(据 Whalen 等, 1987)

Fig. 9 $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{CaO}$ versus $10000 \text{ Ga}/\text{Al}$ (a) and $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{CaO}$ versus $\text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y}$ (b) diagrams (Whalen *et al.*, 1987)

闪长岩为准铝质($\text{A}/\text{CNK} = 0.83 \sim 0.90$)和钙碱性系列,并具有高的 Cr ($82 \times 10^{-6} \sim 102 \times 10^{-6}$)、Ni ($27 \times 10^{-6} \sim 37 \times 10^{-6}$)和 MgO (4.6%~4.8%) 含量,同时富钠和高 Sr ($695 \times 10^{-6} \sim 826 \times 10^{-6}$), 这些元素含量明显高于大陆地壳平均值(Rudnick and Fountain, 1995)。而且高的 $\text{Mg}^\#$ (59~62)也排除了单一深部陆壳物质熔融形成的可能性(Rapp and Watson, 1995),因此该闪长岩的形成有地幔物质的贡献。考虑到其邻近的同时期辉长岩,具有高的正 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值(Shi *et al.*, 2014),说明该时期地幔可能是亏损地幔。值得注意的是,在 3 种岩性中,闪长岩的锆石 Hf 同位素组成变化范围最大, $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值为 $-2.3 \sim +10.8$,这说明源区可能也有地壳物质的加入。因此,塔木素闪长岩可能来自于亏损地幔和地壳物质的混合。

花岗闪长岩(247 ± 1 Ma)为弱过铝质($\text{A}/\text{CNK} = 0.99 \sim 1.02$)和钙碱性系列,同时角闪石的出现表明其应属于 I 型花岗岩。塔木素花岗闪长岩(247 ± 1 Ma)具有高的正 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值(+5.6~+11.6)和年轻的地壳模式年龄($t_{\text{DM}}^{\text{C}} = 913 \sim 533$ Ma),表明其源区中新生地壳物质的贡献相对钾长花岗岩更高。花岗闪长岩与闪长岩接触带附近,发育大量的塑性形

态的闪长质包体,二者形成时代在误差范围内一致,表明可能发生了岩浆混合。

5.3 构造环境探讨

长期以来,宗乃山-沙拉扎山构造带被认为是阿拉善地块的一部分,与诺尔公-红古尔玉林构造带均具有相同的前寒武纪基底,是早古生代期间从阿拉善地块上裂解出去的(吴泰然等, 1993; 王廷印等 1994)。然而上述认识还缺乏进一步的资料证实。首先,两个构造带是否具有相同的基底还需要进一步的证实。高精度的测年资料表明,诺尔公-红古尔玉林构造带出露大量的古元古代岩石(2.34 Ga, Dan *et al.*, 2012; 2.5 Ga, 宫江华等, 2012),并经历了新元古代格林威尔期(~ 900 Ma)造山作用的强烈改造(耿元生等, 2011)。而宗乃山-沙拉扎山构造带还没有可靠的证据表明存在如此古老的基底,即使在西段零星散布前寒武系阿拉善群黑云斜长片麻岩、变粒岩中,也未发现大于 15 亿年的锆石年龄(未发表数据),整个带内也没有发现 ~ 900 Ma 岩浆事件。其次,宗乃山-沙拉扎山构造带侵入岩的研究表明,该地区侵入岩主要形成于晚石炭世一早三叠世,目前还尚未发现早古生代岩浆活动形成的侵入岩,因而宗乃山-沙拉扎山构造带可能并不是早古生代

裂解并开始出现的岛弧。

宗乃山塔木素地区侵入岩的锆石绝大部分都具有正值的 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值, 尤其是面积分布最广的早三叠世花岗闪长岩具有高的正 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值 ($+5.6 \sim +11.6$) 和年轻的地壳模式年龄 ($t_{\text{DM}}^{\text{C}} = 913 \sim 533 \text{ Ma}$), 表明其源区中新生地壳物质的贡献很高。与宗乃山塔木素地区侵入岩类似, 东段的沙拉扎山地区同时期的花岗岩类和辉长岩也多具有正的 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值 ($+0.2 \sim +11.7$) 和相对年轻的地壳模式年龄 ($t_{\text{DM}}^{\text{C}} = 541 \sim 1268 \text{ Ma}$) (Shi *et al.*, 2014)。而位于宗乃山-沙拉扎山构造带以南诺尔公-红古尔玉林构造带上同时期侵入岩都具有负的 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值 (图 8) 和古老的地壳模式年龄, 主要来自古老地壳物质的熔融 (史兴俊, 2012), 类似于古老克拉通内部或边缘发育的侵入岩, 如华北北缘 (Zhang *et al.*, 2009a, 2009b, 2014; 张栓宏等, 2010)。侵入岩的锆石 Hf 同位素的巨大差异, 暗示宗乃山-沙拉扎山构造带和诺尔公-红古尔玉林构造带具有性质完全不同的基底。整个宗乃山-沙拉扎山地区侵入岩都主要来自新生物质, 具有亲中亚造山带的特征 (Wu *et al.*, 2000; Jahn *et al.*, 2000, 2004; Hong *et al.*, 2004; Windley *et al.*, 2007; Guo *et al.*, 2010)。因此, 该构造带可能是中亚造山带的一部分, 而不是早古生代从阿拉善地块裂解出去的, 而中亚造山带和阿拉善地块的界线应该位于宗乃山-沙拉扎山构造带和诺尔公-红古尔玉林两个构造带之间。

宗乃山-沙拉扎山地区侵入岩的研究表明, 该区存在以晚石炭世温都尔毛道花岗闪长岩 ($301 \pm 2 \text{ Ma}$) 为代表的高硅、钠质埃达克质侵入岩 (Shi *et al.*, 2014), 它代表了俯冲环境下大洋板片熔融的产物。而中二叠世宝格其辉长岩 (264 Ma) 和呼仁陶勒盖花岗岩 (266 Ma) 构成了双峰式侵入岩组合, 代表区域进入了后碰撞伸展环境 (Shi *et al.*, 2014)。从晚石炭世到中二叠世, 宗乃山-沙拉扎山地区花岗岩体现出从钙碱性向高钾钙碱性的转变, 可能暗示了构造环境的变化。这一观点也与地层资料相一致。本区出露的最主要地层单元为阿木山组, 它的中下段形成于石炭纪, 以火山岩、碎屑岩、碳酸盐岩为主, 代表了弧或者弧后的沉积环境, 而形成于早二叠世的上段是一套以砂岩、砾岩为主的磨拉石建造, 表明早二叠世洋盆已经闭合 (Zhang *et al.*, 2013)。综合分析, 早二叠世以后该区域可能进入了后碰撞伸展环境。

6 结论

(1) 锆石定年表明, 塔木素钾长花岗岩形成于 $272 \pm 1 \text{ Ma}$, 闪长岩形成于 $249 \pm 1 \text{ Ma}$, 花岗闪长岩形成于 $247 \pm 1 \text{ Ma}$ 。

(2) 塔木素钾长花岗岩、闪长岩和花岗闪长岩绝大多数锆石都具有正的 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值和相对年轻的模式年龄。闪长岩可能来自亏损地幔和地壳物质的混合源区, 而钾长花岗岩和花岗闪长岩主要来自年轻地壳物质。

(3) 宗乃山-沙拉扎山构造带花岗岩同位素特征与中亚造山带花岗岩相似, 而不同于阿拉善地块内部的花岗岩, 因此该构造带可能与阿拉善地块无亲缘关系, 是中亚造山带的组成部分。

致谢 王晓霞研究员在矿物薄片鉴定方面给予了大量指导, 锆石同位素测试得到天津地质矿产研究所实验测试中心技术人员帮助, 两位审稿人给予了大量宝贵意见, 在此一并表示衷心的感谢。

References

- Anderson T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. *Chemical Geology*, 192: 59~79.
- Chen B, Jahn B M and Tian W. 2009. Evolution of the Solonker suture zone: constraints from zircon U-Pb ages, Hf isotopic ratios and whole-rock Nd-Sr isotope compositions of subduction- and collision-related magmas and forearc sediments [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 34: 245~257.
- 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]. *Gondwana Research*, 21: 838~864.
- Dan W, Li X H, Wang Q, *et al.* 2014. An Early Permian (ca. 280 Ma) silicic igneous province in the Alxa Block, NW China: A magmatic flare-up triggered by a mantle-plume? [J]. *Lithos*, doi:10.1016/j.lithos.2014.01.018.
- 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 Altaids [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 78: 114~142.
- Ge Xiaohong and Liu Junlai. 2000. Broken "Western China Craton" [J].

- Acta Petrologica Sinica, 16(1): 59~66 (in Chinese with English abstract).
- Geng Jianzhen, Li Huaikun, Zhang Jian, *et al.* 2011. Zircon Hf isotope analysis by means of LA-MC-ICP-MS[J]. Geological Bulletin of China, 30(10): 1 508~1 513(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 Geoscientia Sinica, 33(6): 877~884(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]. Geology in China, 34(2): 251~261(in Chinese with English abstract).
- Geng Yuansheng and Zhou Xiwen. 2010. Early Neoproterozoic granite events in Alax area of Inner Mongolia and their geological significance: evidence from geochronology[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 29(6): 779~795(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 Petrologica Sinica, 27(4): 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 Petrologica Sinica, 28(9): 2 667~2 685 (in Chinese with English abstract).
- Gong Jianghua, Zhang Jianxin, Yu Shengyao, *et al.* 2012. Ca, 2.5 Ga TTG rocks in the western Alxa Block and their implications[J]. Chin. Sci. Bull., 57, doi:10.1007/s11434-012-5315-8.
- Guo F, Fan W M, Gao X F, *et al.* 2010. Sr-Nd-Pb isotope mapping of Mesozoic igneous rocks in NE China: Constraints on tectonic framework and Phanerozoic crustal growth[J]. Lithos, 120(3~4): 563~578.
- Han Baofu, Guo Zhaojie and He Guoqi. 2010a. Timing of major suture zones in North Xinjiang, China: Constrains from stitching plutons [J]. Acta Petrologica Sinica, 26(8): 2 233~2 246 (in Chinese with English abstract).
- Han B F, He G Q, Wang X C, *et al.* 2011. Late Carboniferous collision between the Tarim and Kazakhstan-Yili terranes in the western segment of the South Tianshan Orogen, Central Asia, and implications for the northern Xinjiang, western China[J]. Earth-Science Reviews, 109(3~4): 74~93.
- Han Baofu, Zhang Chen, Zhao Lei, *et al.* 2010b. A preliminary study of granitoids in western Inner Mongolia[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 29(6): 741~749 (in Chinese with English abstract).
- Hong D W, Wang S G, Xie X L, *et al.* 2004. Continental crustal growth and the supercontinental cycle: evidence from the Central Asian Orogenic Belt[J]. J. Asian Earth Sci., 23(5): 799~813.
- Jahn B M, Windley B, Natal'in B, *et al.* 2004. Phanerozoic continental growth in Central Asia[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 23: 599~603.
- Jahn B M, Wu F Y and Chen B. 2000. Massive granitoid generation in central Asia: Nd isotopic evidence and implication for continental growth in the Phanerozoic[J]. Episodes, 23: 82~92.
- Jian P, Liu D Y and Kröner A. 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.
- Jian P, Liu D Y 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.
- Li Huaikun, Lu Songnian, Li Huimin, *et al.* 2009. Zircon and bedded leucite U-Pb precision dating of basic rock sills intruding Xiamaling Formation, North China[J]. Geological Bulletin of China, 28(10): 1 396~1 404(in Chinese with English abstract).
- Li Jie. 2012. Characteristics and Tectonic Significance of Late Paleozoic Intrusive Rocks along the Yabrai-Bay An Noel of Alxa, Inner Mongolia[D]. Master Dissertation, Beijing, China University of Geosciences, 1~50(in Chinese with English abstract).
- Li Junjian. 2006. Regional Metallogenic System of Alashan Block in Inner Mongolia Autonomous Region[D]. PhD Dissertation, China University of Geosciences, Beijing, 1~165(in Chinese with English abstract).
- Li J Y, Xiao W J, Wang K Z, *et al.* 2003. Neoproterozoic-Paleozoic tectono stratigraphy, magmatic activities and tectonic evolution of eastern Xinjiang, NW China[A]. Mao J W, Goldfarb R J, Seltman R, *et al.* Tectonic Evolution and Metallogeny of the Chinese Altay and Tianshan[C]. London, CERCAM/NHM, IAGOD Guidebook Series 10, 31~74.
- Liu Yongsheng, Hu Zhaochu, Gao Shan, *et al.* 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. Chemical Geology, 257: 34~43.
- Liu Zhibo and Zhang Weijie. 2014. Geochemical characteristics and LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of the Late Permian granodiorite in Hanggale, Alax Right Banner, Inner Mongolia[J]. Geological Review, 60(2): 409~426 (in Chinese with English abstract).
- Lu Songnian, Yu Haifeng, Jin Wei, *et al.* 2002. Microcontinents on the eastern margin of Tarim paleocontinent[J]. Acta Petrologica et

- Mineralogica 21(4): 317~326 (in Chinese with English abstract).
- Ludwig K R. 2003. User's Manual for Isoplot 3.00. A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel [M]. Berkeley: Berkeley Geochronology Center Special Publication, 1~70.
- Maniar P D and Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids [J]. Geological Society of American Bulletin, 101(5): 635~643.
- Peccerillo A and Taylor S R. 1976. Geochemistry of eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey [J]. Contributions to Mineral and Petrology, 58: 63~81.
- 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]. Journal of Petrology, 4.
- Ren Jishun, Jiang Chunfa, Zhang Zhengkun, *et al.* 1987. Geotectonic Evolution of China [M]. Beijing: Science Press, 203 (in Chinese).
- Ren Kangxu, Yan Guohan, Mu Baolei, *et al.* 2005. Rb-Sr age and geological implication of the Alxa alkaline-rich intrusive rocks, western Inner Mongolia [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 41(2): 204~211 (in Chinese with English abstract).
- Rollinson H R. 1993. Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation [M]. Singapore: Longman Singapore Publishers (Pte) Ltd., 1~352.
- Rudnick R L and Fountain D M. 1995. Nature and composition of the continental crust: A lower crustal perspective [J]. Rev. Geophys., 33: 2637~309.
- Sengör A M C, Natal'in B A and Burtman V S. 1993. Evolution of the Altaid tectonic collage and Palaeozoic crustal growth in Eurasia [J]. Nature, 364: 299~307.
- Shi Xingjun. 2012. The Geochronology, Geochemistry and Petrogenesis of granitoid in Qinggele area, northern Alax [D]. Master Dissertation, Beijing, China University of Geosciences, 1~50 (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]. Geological Bulletin of China, 31(5): 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 Zone of Northern Alxa: Constraints on the southernmost boundary of the Central Asian Orogenic Belt [J]. Lithos, 208~209: 158~177.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes [A]. Saunders A D and Norry M J. Magmatism in the Ocean Basins [C]. Geological Society Special Publication, 42: 313~345.
- Taylor S R and McLennan S M. 1985. The Continental Crust: It's Composition and Evolution [J]. Oxford: Blackwell, 238.
- 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 Petrologica Sinica, 23(8): 1933~1944 (in Chinese with English abstract).
- Wan Tianfeng. 2004. Compendium of China Continental Tectonics [M]. Beijing: Geological Publishing House, 76~80 (in Chinese).
- 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 orogen [J]. The Journal of Geology, 114(6): 735~751, <http://dx.doi.org/10.1086/507617>.
- 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(1~4): 359~372, <http://dx.doi.org/10.1016/j.lithos.2009.06.001>.
- Wang Tao, Tong Ying, Li Shan, *et al.* 2010. Spatial and temporal variations of granitoids in the Altay orogen and their implications for tectonic setting and crustal growth: perspectives from Chinese Altay [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 29(6): 595~618 (in Chinese with English abstract).
- Wang Tingyin, Wang Shizheng and Wang Jinrong. 1994. The formation and evolution of Paleozoic continental crust in Alxa region [J]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 215 (in Chinese with English abstract).
- Wang Tingyin, Zhang Mingjie, Wang Jinrong, *et al.* 1998. The characteristics and tectonic implications of the thrust belt in Egerwusu, China [J]. Scientia Geologica Sinica, 33(4): 385~394 (in Chinese with English abstract).
- Whalen J B, Currie K L and Chappell B W. 1987. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and Petrogenesis [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 95: 407~419.
- Windley B F, Alexeev D, Xiao W J, *et al.* 2007. Tectonic models for accretion of the Central Asian Orogenic Belt [J]. Journal of the Geological Society, London 164, 31~47.
- Wu F Y, Jahn B M, Wilde S A, *et al.* 2000. Phanerozoic continental crustal growth: U-Pb and Sr-Nd isotopic evidence from the granites in northeastern China [J]. Tectonophysics, 328: 89~113.
- Wu Kanglin. 2011. Geochemical Characteristics and Tectonic Setting of late Variscan Period in Alashan Block [D]. Master Dissertation, Xi'an, Chang'an University, 1~68 (in Chinese with English ab-

- stract).
- Wu Tairan and He Guoqi. 1993. Tectonic units and their fundamental characteristics on the northern margin of the Alxa block[J]. *Acta Geologica Sinica*, 6: 373~385(in Chinese with English abstract).
- 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]. *Gondwana Research*, 23: 1 316~1 341.
- Xiao W J, Windley B F, Badarch G, *et al.* 2004a. Palaeozoic accretionary and convergent tectonics of the southern Altaids: implications for the growth of Central Asia[J]. *Journal of the Geological Society*, 161: 339~342.
- Xiao W J, Windley B F, Hao J, *et al.* 2003. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China[J]. *Tectonics*, 22: 1069. [http:// dx. doi. org/10. 1029/ 2002TC001484](http://dx.doi.org/10.1029/2002TC001484).
- Xiao W J, Zhang L C, Qin K Z, *et al.* 2004b. Paleozoic accretionary and collisional tectonics of the Eastern Tianshan (China): implications for the continental growth of Central Asia[J]. *American Journal of Science* 304: 370~395.
- Xu B, Charvet J, Chen Y, *et al.* 2013. Middle Paleozoic convergent orogenic belts in western Inner Mongolia (China): framework, kinematics, geochronology and implications for tectonic evolution of the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Gondwana Research*, 23: 1 342~1 364.
- Yakubchuk A, Cole A, Selunann R, *et al.* 2002. Tectonic setting, characteristics and regional exploration criteria for gold mineralization in Central Eurasia: the southern Tien Shan province as a key example[J]. *Society of Economic Geologists Special Publication*, 9: 177~200.
- Yakubchuk A. 2004. Architecture and mineral deposit settings of the Altai orogenic collage: a revised model[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23: 761~779.
- Yang J H, Wu F Y, Shao J A, *et al.* 2006. Constraints on the timing of uplift of the Yanshan fold and thrust belt, North China Craton [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 246: 336~352.
- 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]. *Geological Bulletin of China*, 33(6): 776~787 (in Chinese with English abstract).
- Yang Zhende, Pan Xingshi and Yang Yifu. 1988. Tectonic Characteristics and Deposits in Alxa and Adjacent Area[M]. Beijing: Science Press, 254(in Chinese).
- Yuan W and Yang Z Y. 2014. The Alashan Terrane did not amalgamate with North China block by the Late Permian: Evidence from Carboniferous and Permian paleomagnetic results[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, DOI: 10.1016/j.jseaes.2014.02.010.
- Zhang J, Li J Y and Liu J F. 2011. Detrital zircon U-Pb ages of Early Paleozoic flysch sandstones in the western Ordos margin: New constraints on their provenances and tectonic implications[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 42: 1 030~1 047.
- Zhang Jianjun, Wang Tao, Zhang Zhaochong, *et al.* 2012b. Magma Mixing Origin of Yamatu Granite in Nuorgong-Langshan Area, Western Part of the Northern Margin of North China Craton: Petrological and Geochemical Evidences[J]. *Geological Review*, 58 (1): 53~66(in Chinese with English abstract).
- Zhang Jin, Li Jinyi, Liu Jianfeng, *et al.* 2012a. 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 Petrologica Sinica*, 28 (9): 2 912~2 934(in Chinese with English abstract).
- Zhang Lei, Shi Xingjun, Zhang Jianjun, *et al.* 2013a. LA-ICP-MS zircon U-Pb age and geochemistry characteristics of the Taohaotuoxiquan gabbro in northern Alxa, Inner Mongolia[J]. *Geological Bulletin of China*, 32(10): 1 536~1 547(in Chinese with English abstract).
- Zhang Shuanhong, Zhao Yue, Alfred Kröner, *et al.* 2009b. 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]. *International Journal of Earth Sciences*, 98(6): 1 441~1 467.
- Zhang S H, Zhao Y, Davis G A, *et al.* 2014. Temporal and spatial variations of Mesozoic magmatism and deformation in the North China Craton: Implications for lithospheric thinning and decratonization[J]. *Earth Science Reviews*, doi: 10.1016/j.earscirev.2013.12.004.
- 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 Petrologica et Mineralogica*, 29: 824~842 (in Chinese with English abstract).
- Zhang S H, Zhao Y, Song B, *et al.* 2009a. Contrasting Late Carboniferous and Late Permian-Middle Triassic intrusive suites from the northern margin of the North China craton: geochronology, petrogenesis, and tectonic implications[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 121: 181~200.
- 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: Evi-

- dence from Wuliji granites[J]. Science China: Earth Sciences, 56: 153~164, doi: 10.1007/s11430-012-4435-y.
- Zhao G C, Sun M, Wilde S A, *et al.* 2005. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: key issues revisited[J]. Precambrian Research, 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]. Gondwana Research, 25: 842~858.
- ## 附中文参考文献
- 葛肖虹, 刘俊来. 2000. 被肢解的“西域克拉通”[J]. 岩石学报, 16(1): 59~66.
- 耿建珍, 李怀坤, 张 健, 等. 2011. 锆石 Hf 同位素组成的 LA-MC-ICP-MS 测定[J]. 地质通报, 30(10): 1 508~1 513.
- 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. 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): 251~261.
- 耿元生, 周喜文. 2010. 阿拉善地区新元古代岩浆事件及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 29(6): 779~795.
- 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(9): 2 667~2 685.
- 宫江华, 张建新, 于胜尧, 等. 2012. 西阿拉善地块~2.5 Ga TTG 岩石及地质意义[J]. 57(28~29): 2 715~2 728.
- 韩宝福, 郭召杰, 何国琦. 2010a. “钉合岩体”与新疆北部主要缝合带的形成时限[J]. 岩石学报, 26(8): 2 233~2 246.
- 韩宝福, 张 臣, 赵 磊, 等. 2010b. 蒙古西部呼伦陶勒盖地区花岗岩类的初步研究[J]. 岩石矿物学杂志, 29(6): 741~749.
- 李怀坤, 陆松年, 李惠民, 等. 2009. 侵入下马岭组的基性岩床的锆石和斜锆石 U-Pb 精确定年——对华北中元古界地层划分方案的制约[J]. 地质通报, 28(10): 1 396~1 404.
- 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]. 中国地质大学硕士学位论文.
- 李俊建. 2006. 内蒙古阿拉善地块区域成矿系统[D]. 中国地质大学博士学位论文.
- 刘治博, 张维杰. 2014. 内蒙古阿拉善右旗杭嘎勒晚二叠世花岗岩闪长岩地球化学特征和 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年[J]. 地质论评, 60(2): 409~426.
- 陆松年, 于海峰, 金 巍, 等. 2002. 塔里木古大陆东缘的微大陆块体群[J]. 岩石矿物学杂志, 21(4): 317~326.
- 任纪舜, 姜春发, 张正坤, 等. 1980. 中国大地构造及其演化[M]. 北京: 科学出版社.
- 任康绪, 阎国翰, 牟保磊, 等. 2005. 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.
- 史兴俊. 2012. 阿拉善北部庆格勒地区花岗岩年代学、地球化学及岩石成因[D]. 中国地质大学硕士学位论文.
- 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(5): 16~24.
- 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(8): 1 933~1 944.
- 万天丰. 2004. 中国大地构造学纲要[M]. 北京: 地质出版社, 76~80.
- 王 涛, 童 英, 李 舫, 等. 2010. 阿尔泰造山带花岗岩时空演变、构造环境及地壳生长意义——以中国阿尔泰为例[J]. 岩石矿物学杂志, 29(6): 595~618.
- 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.
- 仵康林. 2011. 阿拉善地区华力西晚期花岗岩类岩石地球化学特征及构造意义[D]. 硕士学位论文. 西安: 长安大学.
- 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(2): 97~108.
- 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(06): 776~787.
- 杨振德, 潘行适, 杨易福. 1988. 阿拉善断块及邻区地质构造特征与矿产[M]. 北京: 科学出版社, 46~75, 81~96.
- 张建军, 王 涛, 张招崇, 等. 2012. 华北地块北缘西段巴音诺尔公-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(1): 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(9): 2 912~2 934.
- 张 磊, 史兴俊, 张建军, 等. 2013. 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(10): 1 536~1 547.
- 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(6): 824~842.