

https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.365



北山北带新元古代岩浆记录:来自内蒙古哈珠地区片麻状花岗岩的证据

牛文超¹,任邦方^{1,2},任云伟¹,段霄龙¹,段连峰¹,孙立新¹,李敏¹,张家辉¹

1. 中国地质调查局天津地质调查中心,天津 300170

2. 中国地质调查局泥质海岸带地质环境重点实验室,天津 300170

摘要: 北山造山带位于中亚造山系中段,带内各古老陆块的前寒武纪演化历史是了解北山造山带形成和演化的关键问题.本文选取北山北带哈珠地区片麻状花岗岩进行了锆石 U-Pb 年代学和地球化学分析.结果显示哈珠地区片麻状花岗岩形成于 885 ± 4 Ma,首次揭示了北山北带存在新元古代岩浆活动.哈珠片麻状花岗岩主量元素具有高 SiO_2 、低 CaO、高 $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 的特征,铝饱和指数 $A/\text{CNK} > 1$,属过铝质高钾钙碱性花岗岩.稀土元素球粒陨石标准化曲线呈现出轻稀土富集,重稀土亏损,锕钷强烈负异常的右倾海燕型;微量元素显示岩石富集 Rb、K、Th、U 等大离子亲石元素,亏损 Nb、Sr、P、Ti 等高场强元素.岩石成因分析表明其为 S 型花岗岩,岩浆来源于变质杂砂岩部分熔融的源区,且初始熔融温度较高 ($777 \sim 798$ °C).构造环境判别图解显示其形成于碰撞后由挤压转向伸展的背景,为大陆碰撞的产物.通过与北山南带和东天山地块前寒武纪资料的对比,结果表明北山南带、北山北带和天山造山带中各古老陆块在前寒武纪可能具有一致的演化历史,其共同参与了新元古代 Rodinia 超大陆的聚合,构成了 Rodinia 超大陆的一部分.哈珠地区新元古代岩浆事件即为 Rodinia 超大陆聚合在北山地区的响应.

关键词: 新元古代;片麻状花岗岩;S 型花岗岩;Rodinia 超大陆;北山北带;地球化学.

中图分类号: P597; P581

文章编号: 1000-2383(2019)01-0284-14

收稿日期: 2018-08-31

Neoproterozoic Magmatic Records in the North Beishan Orogenic Belt: Evidence of the Gneissic Granites from the Hazhu Area, Inner Mongolia

Niu Wenchao¹, Ren Bangfang^{1,2}, Ren Yunwei¹, Duan Xiaolong¹, Duan Lianfeng¹, Sun Lixin¹, Li Min¹, Zhang Jiahui¹

1. Tianjin Center of China Geological Survey, Tianjin 300170, China

2. Key Laboratory of Muddy Coast Geo-Environment, China Geological Survey, Tianjin 300170, China

Abstract: The Beishan orogenic belt is located in the middle of the Central Asian orogenic belt (CAOB) and the tectonic history of its Precambrian basement rocks is the key to understand the formation and evolution of the Beishan orogenic belt. In this study, we select the gneissic granites in the North Beishan orogenic belt (NBOB) for zircon U-Pb chronology and geochemical analysis. The results show that the gneissic granites formed in the 885 ± 4 Ma, which reveals the Neoproterozoic magmatic events in the NBOB for the first time. The gneissic granites belong to the peraluminous, high-K, calc-alkaline series and are characterized by high SiO_2 and $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$, low CaO. The gneissic granites show an enrichment of light rare earth elements (LREE) with Europium negative anomaly and are characterized by enrichment of large ion lithophile elements (LILE) such as Rb, K, Th, U, but depletion in high field strength elements (HFSE) such as Nb, Sr, P, Ti. The petrography and geochemi-

基金项目: 中国地质调查局项目 (Nos. DD20160039, DD20160039-17, 12120114064601, DD20179382); 国家自然科学基金项目 (No. 41572172).

作者简介: 牛文超 (1986-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事区域地质调查和造山带构造研究工作. ORCID: 0000-0002-4799-7544. E-mail: billynu2003@163.com

引用格式: 牛文超, 任邦方, 任云伟, 等, 2019. 北山北带新元古代岩浆记录: 来自内蒙古哈珠地区片麻状花岗岩的证据. 地球科学, 44(1): 284-297.

cal signatures reveal a possible S-type granite affinity and are derived from the partial melting of metamorphic complex sandstone of source area with initial melt temperature (777–798 °C). The gneissic granites were likely generated in a continental collision tectonic setting. By comparing our new data with previous results from the Precambrian basement in the South Beishan orogenic belt and the Tianshan block (microcontinent in the Chinese Tianshan), we suggest that the Precambrian microcontinents in the northern Beishan have similar crustal evolutionary history to the South Beishan orogenic belt (SBOB) and Central Tianshan block. They participated in the Rodinia supercontinent aggregation together and formed a part of Rodinia during the Neoproterozoic period. The Neoproterozoic magmatic events in the Beishan area are the response of the Rodinia supercontinent aggregation.

Key words: Neoproterozoic; gneissic granites; S-type granite; Rodinia supercontinent; North Beishan orogenic belt; geochemistry.

0 引言

北山造山带位于中亚巨型复合型造山系中段,西部与天山造山带相连,东部与索伦造山带相连,其是由多个微陆块、岛弧、蛇绿混杂岩和增生杂岩经历长时间多期次俯冲、碰撞和拼贴作用而形成的增生型造山带(Windley *et al.*, 2007; Xiao *et al.*, 2010; Song *et al.*, 2015).研究表明北山造山带内部存在多个由前寒武纪变质结晶基底组成的古老陆块(左国朝等, 2003; 聂凤军等, 2004; 孙新春等, 2005).由于遭受了后期造山作用的强烈改造,目前,对于各古老陆块的归属和空间分布仍存在较大争议:(1)左国朝等(2003)认为北山造山带早古生代存在塔里木和旱山两个古老陆块(板块),南侧塔里木板块的结晶基底为敦煌岩群,北侧哈萨克斯坦板块的结晶基底相当于长城系星星峡群。(2)近年来随着研究的深入,越来越多的学者倾向于以红柳河—牛圈子—洗肠井蛇绿岩带作为南侧塔里木板块和北侧哈萨克斯坦板块的界线,塔里木板块在北山地区以敦煌陆块为主体,哈萨克斯坦板块在北山地区以明水—旱山微陆块为主体,两者结晶基底的物质组成分别为敦煌岩群和北山岩群(何世平等, 2002; 孙新春等, 2005; 杨合群等, 2012; 孙立新等, 2017; Wang *et al.*, 2018)。(3)Xiao *et al.*(2010)通过详细的岩石学和年代学分析,认为北山地区存在3个老的微陆块(地块),分别为石板山地块、双鹰山—花牛山地块和黑鹰山—旱山地块,并认为石板山地块和敦煌地块具有一致的结晶基底物质组成(敦煌岩群),而双鹰山—花牛山地块和黑鹰山—旱山地块具有一致的结晶基底物质组成(北山岩群)。

北山造山带的构造演化从古元古代一直持续到古生代晚期,经历了古元古代地壳形成、新元古代古陆块裂解、古生代大洋闭合和岛弧形成、弧—陆和弧—弧碰撞等多个阶段,最终陆块拼合,进入陆内演化阶段(左国朝等, 2003; 何世平等, 2002; Xiao *et*

al., 2010; Ao *et al.*, 2012; Song *et al.*, 2013, 2015; Yuan *et al.*, 2015).前人对北山造山带内各陆块的变质基底所做的 Sm-Nd 等时线和单颗粒锆石上交点年龄集中在 880~2 656 Ma(梅华林等, 1999; 聂凤军等, 2004; 孙新春等, 2005),但由于测试方法的限制,部分前寒武纪岩石又被后期新的年代学研究证实为形成于古生代,并非老地壳(He *et al.*, 2013; Song *et al.*, 2013).近年来,越来越多前寒武纪岩石精确的锆石 U-Pb 结果被报道(杨建国等, 2010; 叶晓峰等, 2013; 姜洪颖等, 2013; Yuan *et al.*, 2015; 贺振宇等, 2015),但这些年龄结果均集中于北山南带,对于北山北带前寒武纪岩石的年龄少有报道.同时,有学者认为北山北带的岩浆事件集中于古生代,地壳生长主要发生在奥陶纪、志留纪和二叠纪,该地区可能不存在前寒武纪的岩浆事件(Song *et al.*, 2013, 2015).最近,笔者在 1:5 万哈珠等四幅区调过程中,采集到一套片麻状花岗岩样品,初步的测年结果为 891.9 ± 6.5 Ma,显示其形成于新元古代(牛文超等, 2017).新元古代岩浆事件以往仅在北山南带的柳园地区和与之相邻的东天山星星峡和温泉地区有报道,并被认为可能是 Rodinia 超大陆在北山南带和东天山造山带的地质响应(梅华林等, 1999; 胡蔼琴等, 2006, 2010; 李秋根等, 2009; 叶晓峰等, 2013).本次北山北带新元古代片麻状花岗岩的发现,指示北山北带存在前寒武纪岩浆活动,表明北山北带不单是显生宙的一条造山带,其同时也经历了前寒武纪的洋陆转化和俯冲碰撞事件,造山作用从前寒武纪一直持续到晚古生代.由于牛文超等(2017)报道的测年结果仅有少部分测点的加权平均年龄,为进一步证实该岩体的形成时代,笔者重新对该岩体采集了同位素测年样品,并结合地球化学数据分析,探讨其形成时代和构造环境,以期能够对北山北带地壳生长、演化历史有一个新的认识。

1 地质概况

北山造山带位于甘新蒙3省交界处,向东于阿尔金走滑断裂被巴丹吉林沙漠掩盖,向西以星星峡断裂为界与天山造山带分隔,北侧延伸出国以 Zoolen 蛇绿混杂岩带与蒙古造山带相连,南侧以牛圈子-月牙山-洗肠井结合带为界,并与敦煌地块相邻,构造位置处于哈萨克斯坦板块、塔里木板块和西伯利亚板块的交汇部位 (Zonenshain *et al.*, 1978; 何世平等, 2002; 左国朝等, 2003; Xiao *et al.*, 2010) (图 1a). 研究区位于前人所划北山造山带北

带,明水-旱山地块的北缘(图 1b).区内出露地层主要有古元古界北山岩群(Pt_1B)、下石炭统绿条山组(C_1l)、石炭系白山组($C_{1-2}b$)和上白垩统赤金堡组(K_1c);其中,北山岩群仅在测区西南角少量分布,主要为一套浅海碳酸盐岩相岩石组合,发生了高绿片岩相-低角闪岩相的区域变质,岩性以大理岩、磁铁石英岩和石英片岩为主;下石炭统绿条山组为一套浅海-一半深海相的碎屑岩沉积,根据岩性组合分为下部细碎屑岩段和上部粗碎屑岩段,岩性主要为砾岩及含砾杂砂质长石砂岩,变质岩屑长石细砂岩、变质粉砂岩、粉砂质板岩、泥质板岩及粉砂质硅

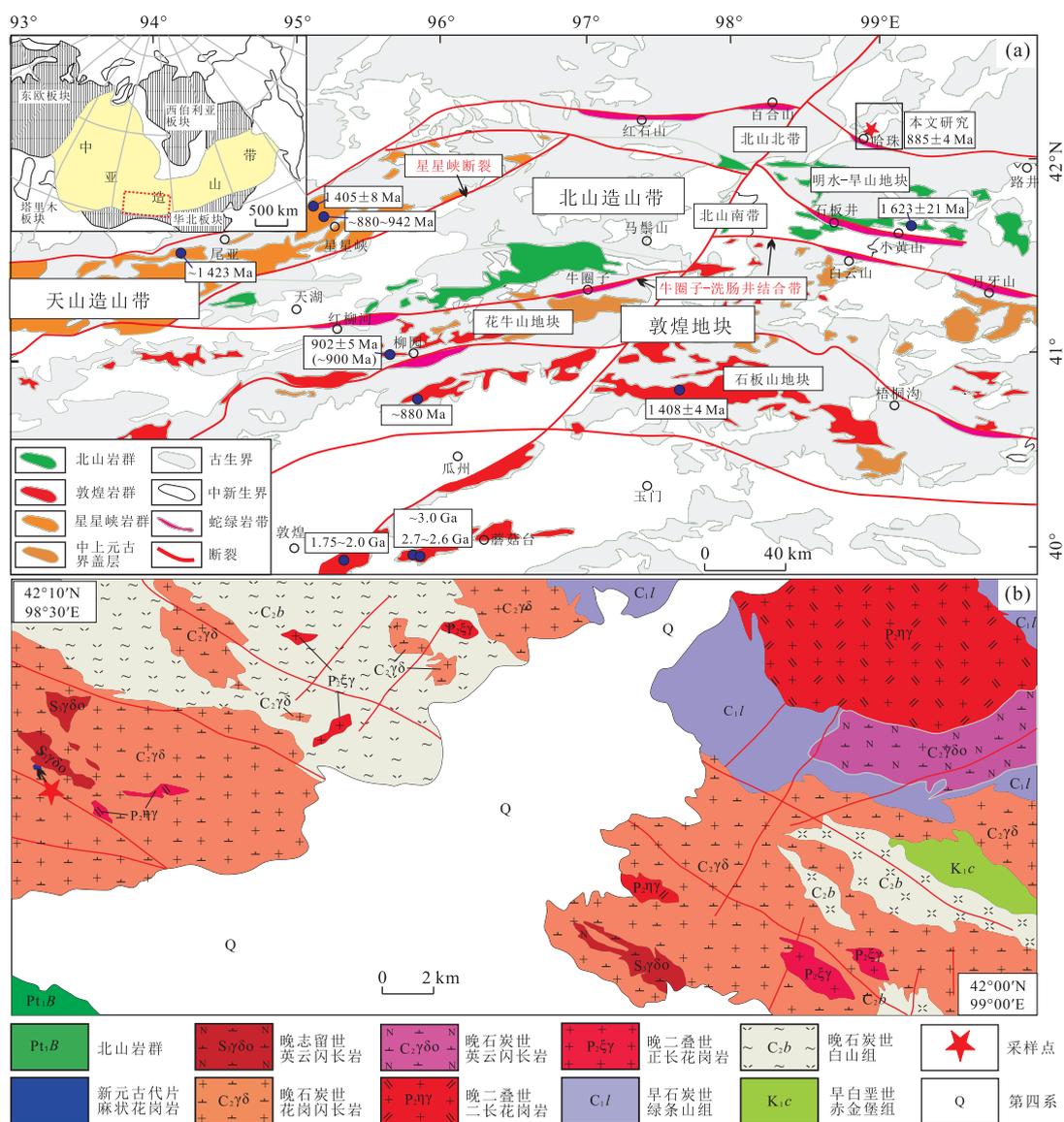


图 1 北山造山带(a)和哈珠地区地质简图(b)

Fig.1 Simplified geological maps of the Beishan orogenic belt (a) and Hazhu area (b)

图 a 为中亚造山带位置,据 Xiao *et al.* (2010) 及贺振宇等(2015) 修编;图 b 据中国地质调查局天津地质调查中心,2016,内蒙古 1:5 万哈珠等四幅区域地质矿产图修编

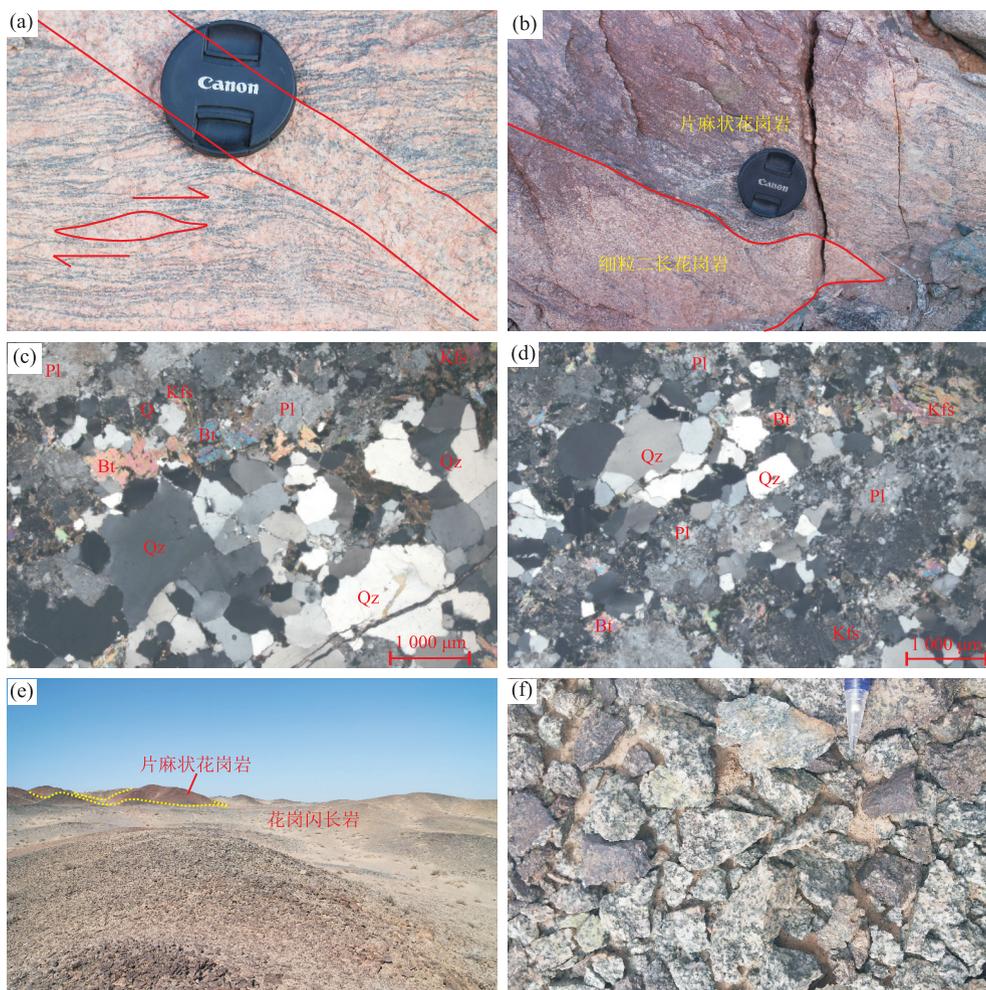


图2 哈珠片麻状花岗岩野外(a和b)及镜下照片(c和d);晚石炭世花岗闪长岩野外空间展布特征(e)及露头特征(f)

Fig.2 Field outcrop (a and b) and microphotographs (c and d) of the gneissic granites from Hazhu area; field outcrop (e) and distribution photos of the granodiorite (f)

Qz.石英;Bt.黑云母;Kfs.钾长石;Pl.斜长石

质岩;白山组整合于绿条山组之上,为一套中基性—酸性的火山熔岩、火山碎屑岩、沉火山碎屑岩(火山碎屑沉积岩)建造,根据岩性组合分为上部酸性火山岩段和下部中基性火山岩段;赤金堡组呈角度不整合覆盖于早期地质体之上,主要为一套浅水湖泊相碎屑岩组合。区内地层均呈北西—南东向带状展布,与主构造线方向一致。除上述地层之外,测区大面积分布晚古生代石炭纪—二叠纪侵入岩,主要为一套岛弧岩岩浆组合,岩性以英云闪长岩、花岗闪长岩、二长花岗岩和正长花岗岩为主。

片麻状花岗岩分布在哈珠南山西侧,呈捕虏体形式产出,出露面积仅 0.5 km²,呈残块状产于晚石炭世中细粒黑云花岗闪长岩之中(图 2e),北侧为早志留世细粒斑状英云闪长岩,距片麻状花岗岩南侧不远有北山岩群大理岩和绢云石英片岩出露。片麻

状花岗岩变形面理发育,暗色矿物黑云母等定向明显,呈条带状(图 2a);内部见“S”型拖尾和“σ”碎斑(图 2a),测得糜棱面理产状:15°∠67°、350°∠18°、225°∠48°。岩石内部见有肉红色细粒二长花岗岩侵入,其截切片麻状花岗岩中暗色条带,本身未见变形(图 2a,2b),表明其形成时代晚于该期变形。晚石炭世中细粒花岗闪长岩呈大的岩基产出,未见变形,暗色矿物含量较高,在野外多呈碎块分布于地表(图 2f)。本次对片麻状花岗岩和侵入其中的二长花岗岩均采集了同位素年龄样品,采样位置如图 1b 所示,采样点 GPS 坐标为 42°5′36″N,98°30′35″E。

2 岩相学特征

哈珠片麻状花岗岩呈小的捕虏体形式产出,两

侧均为晚石炭世中细粒黑云花岗闪长岩,内部见有细粒二长花岗岩脉体侵入(图 2a,2b).岩石新鲜面呈肉红色,主要由钾长石(40%)、斜长石(25%)、石英(25%)、黑云母(10%)组成(图 2c,2d).钾长石:主要为微斜条纹长石,半自形板状,大小不等,一般为 2~5 mm 的中粒,0.3~2.0 mm 的细粒及 5~8 mm 的粗粒次之,杂乱分布,轻高岭土化,钠质条纹主要呈树枝状、补片状分布,可能为交代成因,部分晶体内部包嵌少量斜长石晶体,局部交代斜长石,受轻微构造作用影响,粒内明显波状消光,部分晶内发育显微裂隙,晶体边缘少见细粒化现象.斜长石:呈半自形板状,粒径一般为 0.2~2.5 mm,杂乱分布,明显高岭土化、绢云母化,少白云母化,隐约可见聚片双晶,与钾长石接触部位常见交代蠕虫结构,受轻微构造作用影响,晶体边缘少见细粒化现象.石英:呈他形粒状,粒径一般为 0.2~1.3 mm,集合体状产出,颗粒表面干净,粒内明显波状消光,部分晶内发育亚颗粒.黑云母:褐绿色,鳞片状,片径一般为 0.1~0.3 mm,集合体状产出,相对多以似条纹状分布,少绿泥石化、褐铁矿化.岩石中副矿物主要为锆石和磷灰石.

侵入片麻状花岗岩中的二长花岗岩未见变形,呈细脉产出,侵入接触关系清晰(图 2a,2b).岩石呈浅肉红色,主要由斜长石(30%)、钾长石(40%~45%)、石英(20%~25%)、黑、白云母(约 5%)组成.斜长石:呈半自形板状,杂乱分布,粒径在 0.15~1.00 mm,核部多绢云母化、碳酸盐化、高岭土化,局部隐约可见环带构造.钾长石:为微斜长石组成,呈半自形—他形粒状,杂乱分布,轻高岭土化,粒度在 0.15~2.00 mm.个别为 2~3 mm,晶内嵌布少量板条状斜长石.石英:呈他形粒状,集合体状分布于长石粒间,彼此镶嵌,粒径在 0.15~0.70 mm,粒内轻波状消光.黑、白云母:呈鳞片—叶片状,粒径为 0.15~0.40 mm,星散分布,黑云母少见绿泥石化.

3 分析方法

本文共选取 5 件片麻状花岗岩样品进行全岩测试分析,2 件样品进行同位素年代学分析.样品碎样工作在河北省区域地质矿产调查研究所实验室完成,首先对新鲜样品去除风化壳,然后用破碎机粉碎,再用球磨机研磨至粉末状(>200 目),用于主量元素和微量元素分析.实验测试工作在中国地质调查局天津地质调查中心实验测试室完成,在测试之前,预先用酸溶液对样品进行处理,主量元素采用 X

射线荧光光谱法(XRF),仪器型号为 Axios 4.0kw 顺序式—X 射线荧光光谱仪,FeO 采用氢氟酸、硫酸溶样、重铬酸钾滴定容量法,分析精度优于 2%,微量元素使用 ICP-MS 测试,分析精度优于 5%.

片麻状花岗岩单矿物锆石分选工作由河北省区域地质矿产调查研究所实验室完成.样品按照常规粉碎淘洗后,经磁选和重液分离,然后在双目镜下人工挑选纯度在 99%以上的锆石.锆石的制靶和透射光、反射光、阴极发光照相在北京铅年领航科技有限公司完成.样品测年工作在中国地质调查局天津地质调查中心实验测试室完成,采用 LA-MC-ICP-MS 进行锆石 U-Pb 同位素定年,激光烧蚀多接收器等离子质谱仪由美国 ESI 公司 NEW WAVE 193 nm FX 激光器和美国赛默飞世尔公司 NEPTUNE 多接收等离子质谱组成,型号为 Agilent 7500a,分析中采用的激光束斑直径为 35 μm ,以氦气作为剥蚀物质的载气,分析流程见 Yuan *et al.*(2004);最终测试数据的离线处理采用软件 ICPMSDataCal(Liu *et al.*, 2010).U-Pb 年龄谐和图绘制和年龄权重平均计算均采用 ISOPLOT3.0 程序(Ludwig, 2003).

4 分析结果

4.1 锆石 U-Pb 年代学

本次对片麻状花岗岩(PM06TW43-1)和侵入其中的细粒二长花岗岩(PM06TW43-4)分别进行同位素锆石 U-Pb 测年.片麻状花岗岩锆石多数具自形—半自形的双锥柱状—半柱状,表面光滑、干净,长 100~200 μm ,长宽比为(1:1)~(3:1),部分锆石内部见少量裂隙,阴极发光图像可见清晰的振荡环带(图 3a),指示其为岩浆成因锆石(吴元保和郑永飞,2004).锆石 Th 含量在 $53 \times 10^{-6} \sim 598 \times 10^{-6}$ 之间,U 含量在 $371 \times 10^{-6} \sim 2\,028 \times 10^{-6}$ 之间,Th/U 比值在 0.08~0.53 之间.通常,变质成因的锆石 Th/U 多小于 0.07(Hoskin, 2003).本区片麻状花岗岩的锆石 Th/U 含量均大于 0.07,具有岩浆锆石的特征.

对片麻状花岗岩共选取 24 个测点,锆石 U-Th-Pb 数据结果见附表 1.24 个测点中,除 5 个测点由于 Pb 丢失偏离谐和线外,其余测点均落在谐和线上,其中 18 个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 885 ± 4 Ma(图 3b),应代表了片麻状花岗岩的原岩成岩年龄.值得注意的是,在 24 个测点中,有一个测点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 1 465 Ma,测点位于靠近核

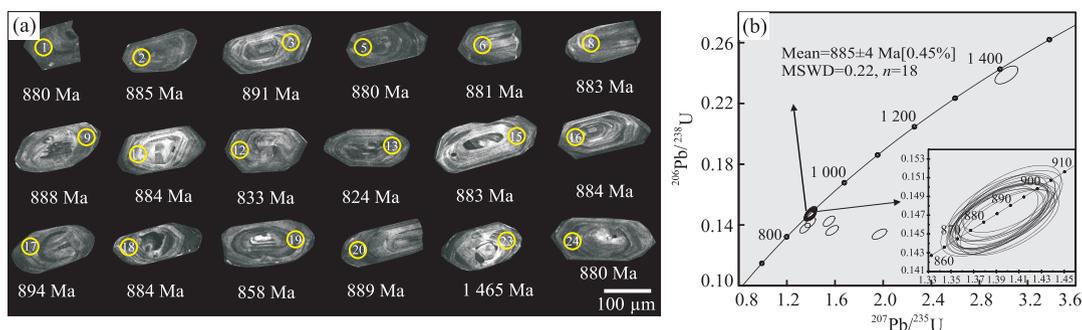


图 3 哈珠片麻状花岗岩锆石阴极发光图像及年龄谱和曲线

Fig.3 CL images of the zircons of the gneissic granites from Hazhu area, showing the analyzed spots and their ages

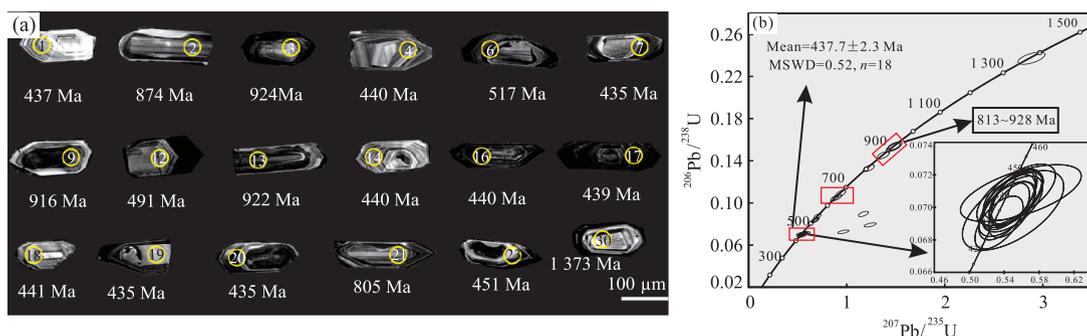


图 4 侵入哈珠片麻状花岗岩中细粒二长花岗岩阴极发光图像及年龄谱和曲线

Fig.4 CL images of the zircons of the monzonitic granites, showing the analyzed spots and their ages

部的位 置, 应为继承锆石的年龄, 可能代表了明水—旱山地块的老基底年龄。

侵入片麻状花岗岩中的细粒二长花岗岩锆石呈粉色, 自形一半自形双锥柱状, 部分为次圆状, 晶面光滑, 部分内部可见黑色固相包体, 长 $102 \sim 230 \mu\text{m}$, 长宽比在 $(1:1) \sim (2:1)$ 之间(图 4a), 阴极发光图像可见清晰振荡环带, 指示其为岩浆成因锆石(吴元保等, 2004)。锆石 U、Th 含量分别为 $104 \times 10^{-6} \sim 561 \times 10^{-6}$ 和 $40 \times 10^{-6} \sim 247 \times 10^{-6}$, Th/U 比值为 $0.12 \sim 1.05$, 高于变质成因锆石(Hoskin, 2003), 具岩浆锆石的特征。

对细粒二长花岗岩共选取 30 个测点, 锆石 U-Th-Pb 数据结果见附表 2。30 个测点中, 除 3 个测点由于 Pb 丢失偏离谱和线外, 其余测点均落在谱和线上。从谱和曲线中可以看出, 锆石年龄具有明显的 3 个密集分布区(图 4b), 其中有 5 个测点的年龄集中在 $813 \sim 928 \text{ Ma}$ 之间, 与片麻状花岗岩的测年结果基本一致, 指示了早期的岩浆事件。同时, 有 4 个测点的年龄集中在 $516 \sim 553 \text{ Ma}$ 之间, 该组年龄的地质意义尚不明确, 可能为后期的构造热事件。剩余 18 个测点的年龄集中在 $431 \sim 491 \text{ Ma}$ 之间, 获得其中 14 个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $437.7 \pm$

2.3 Ma (图 4b), 应为细粒二长花岗岩的成岩年龄。

4.2 地球化学特征

哈珠片麻状花岗岩主量、微量元素分析结果见附表 3。从表中可以看出, 片麻状花岗岩 SiO_2 含量在 $71.6\% \sim 72.6\%$ 之间; Al_2O_3 含量在 $13.5\% \sim 13.7\%$ 之间; K_2O 含量在 $5.60\% \sim 6.76\%$ 之间, Na_2O 介于 $2.29\% \sim 2.78\%$, MgO 含量在 $0.70\% \sim 0.96\%$ 之间, FeO^{T} 含量为 $2.06\% \sim 2.40\%$, CaO 含量平均为 0.91% ; 整体上具有高 SiO_2 、低 CaO 、高 $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ ($8.13\% \sim 9.05\%$) 且 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} > 1$ 的特征。岩石铝饱和指数 A/CNK 为 $1.09 \sim 1.12$, CIPW 标准矿物计算中出现刚玉分子, 且含量在 $1.65\% \sim 2.29\%$ 之间, 具过铝质花岗岩的特征。在图 5a 中, 样品点均落在亚碱性花岗岩区域内。在图 5b 中, 岩石落入过铝质花岗岩区域。里特曼指数 $\sigma = 2.29 \sim 2.85$, 小于 3.3, K_2O 含量较高, 在图 5c 和 5d 中, 样品点均落在高钾钙碱性系列靠近钾玄岩一侧, 整体表现出高钾钙碱性花岗岩和镁质花岗岩的特征。

哈珠片麻状花岗岩稀土总量相对较高($\sum\text{REE} = 281 \times 10^{-6} \sim 337 \times 10^{-6}$), 平均为 302×10^{-6} , 轻重稀土分异明显, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 7.11 \sim 9.06$; 样品 δEu 在 $0.26 \sim 0.34$ 之间, 具强烈负铕异常, 表明源区可能存

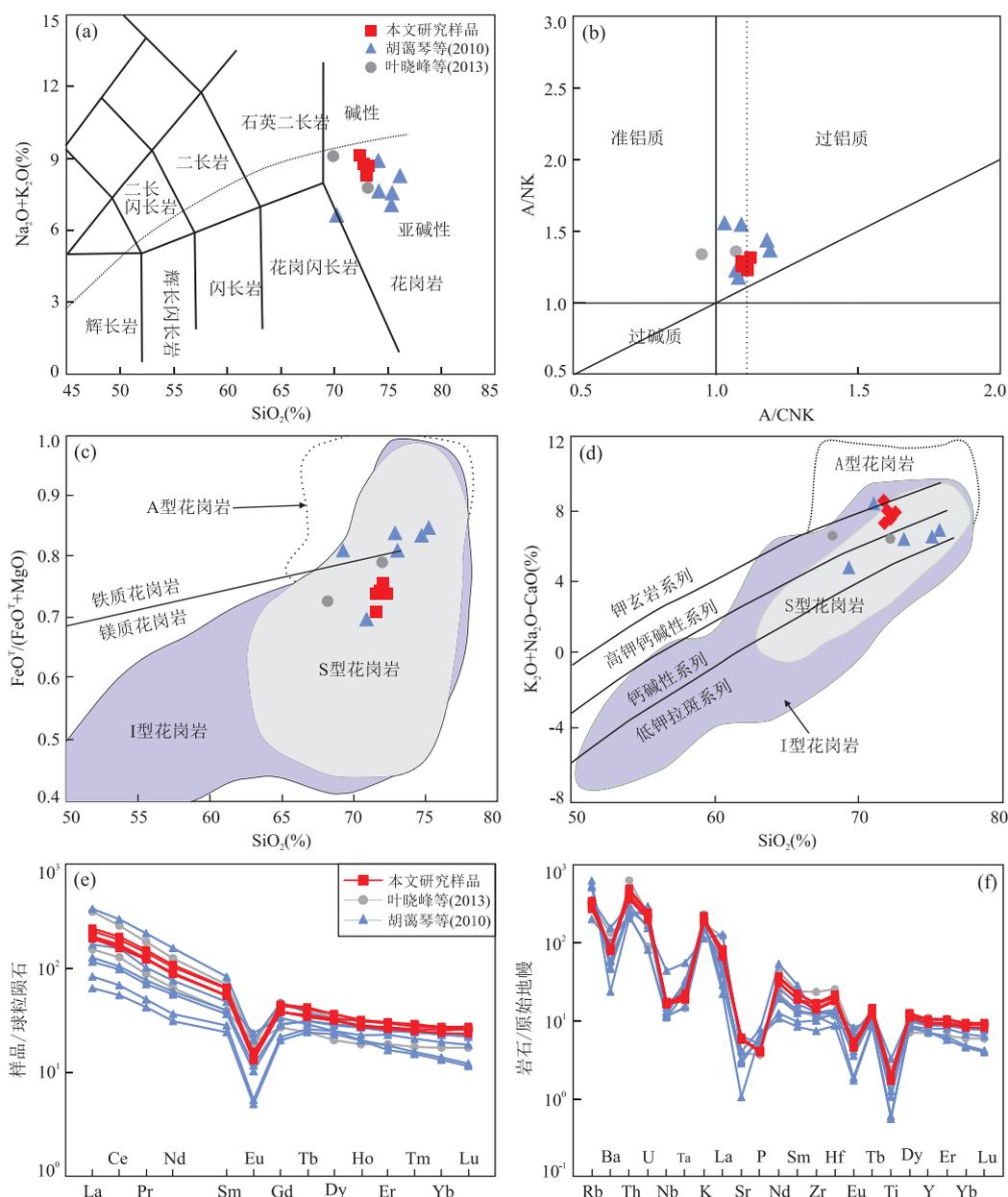


图 5 哈珠片麻状花岗岩 TAS 图解(a)、A/NK-A/CNK 图解(b)、 SiO_2 - $\text{FeO}^T/(\text{FeO}^T+\text{MgO})$ 图解(c)、 SiO_2 - $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}-\text{CaO})$ 图解(d)、稀土元素球粒陨石标准化图解(e)和微量元素原始地幔标准化图解(f)

Fig.5 TAS (a), A/NK-A/CNK (b), SiO_2 - $\text{FeO}^T/(\text{FeO}^T+\text{MgO})$ (c), SiO_2 - $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}-\text{CaO})$ (d), chondrite-normalized REE distribution patterns (e) and primitive mantle-normalized trace element patterns (f) of the gneissic granites from Hazhu area

图 a 据 Middlemost(1994); 图 b 据 Maniar and Piccoli(1989); 图 c, d 据 Frost *et al.*(2001)

在斜长石的分离结晶, 稀土元素球粒陨石标准化配分曲线呈现出轻稀土富集, 重稀土亏损, 铈强烈负异常的右倾海燕型(图 5e)。在微量元素原始地幔标准化比值蛛网图中, 所有样品均表现出富集大离子亲石元素 Rb、K、Th、U, 亏损高场强元素 Nb、Sr、P、Ti, 相对 Rb 和 Th 亏损 Ba 的特征(图 5f)。

5 讨论

5.1 岩石成因和构造环境

目前, 花岗岩成因分类主要是根据其源区和地球化学成分的不同将其分为 S 型、I 型、M 型和 A 型(Chappell, 1999; Bonin, 2007)。通常情况下, S 型、A 型和高分异 I 型花岗岩具有十分相似的地球化学及矿物学特征。因此若要准确识别花岗岩的成因类

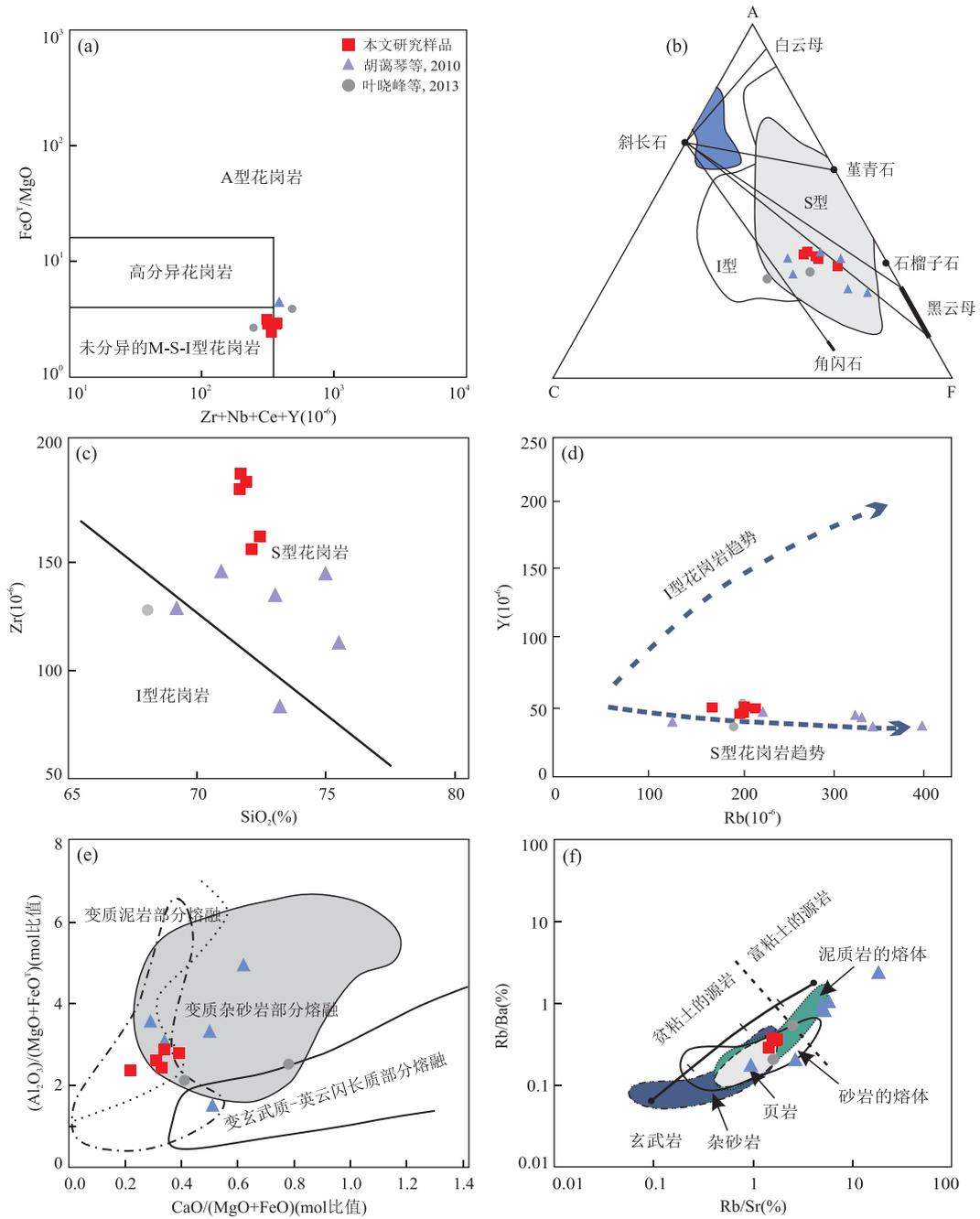


图 6 Zr+Nb+Ce+Y-FeO^T/MgO 图解(a), A-C-F 图解(b), SiO₂-Zr 图解(c), Rb-Y 图解(d), Al₂O₃/(MgO+FeO^T)-CaO/(MgO+FeO^T)图解(e), Rb/Ba-Rb/Sr 图解(f)

Fig.6 Zr+Nb+Ce+Y-FeO^T/MgO (a), A-C-F (b), SiO₂-Zr (c), Rb-Y (d), Al₂O₃/(MgO+FeO^T)-CaO/(MgO+FeO^T) (e) and Rb/Ba-Rb/Sr diagrams (f) for the gneissic granites from Hazhu area

图 a 据 Whalen *et al.*(1987);图 b 据 Alther *et al.*(2001);图 d 底图据 Chappell(1999);图 e 据 Gerdes *et al.*(2000);图 f 据 Patiño Douce(1999)

型,需要首先判断花岗岩是否经历了高程度结晶分异作用(Whalen *et al.*, 1987).一般来讲,暗色矿物含量高的花岗岩所经历的岩浆结晶分异程度有限(吴福元等,2017),因此 FeO^T 和 MgO 的含量对于岩石的结晶分异具有很好的指示意义.在图 6a 中,研究区花岗岩主要落在未分异的 M、S、I 型花岗岩

且远离高分异花岗岩的区域,整体属于一套未分异或分异程度很低的花岗岩.

哈珠地区片麻状花岗岩铝饱和指数 A/CNK 在 1.09~1.12 之间,平均为 1.106,属过铝质或强过铝质岩石,且岩石具有低 P₂O₅(含量均小于 0.1%)、低 FeO^T/MgO(小于 3)和高 K₂O(含量为 5.60%~

6.76%)等地球化学特征,显示出S型花岗岩的特点.已有研究表明,Th和Y在过铝质岩浆演化的早期优先进入富Th和Y的矿物,而较低的Th和Y含量以及与Rb之间的相关性被认为可以有效地区分S型花岗岩和I型花岗岩.通常,S型花岗岩的Th、Y与Rb呈负相关,而I型花岗岩的Th、Y与Rb呈正相关(Chappell, 1999).哈珠片麻状花岗岩Y与Rb呈明显的负相关关系,并表现出一种S型花岗岩的演化趋势(图6d).同时,在图6b($A = Al + Na + K$; $C = Ca$; $F = Fe^{2+} + Mg$;以上均为摩尔数)和图6c中,本区花岗岩均落在S型花岗岩区域内.一般认为,过铝质花岗岩(S型花岗岩)可以细分为含白云母花岗岩(MPG)和含堇青石富黑云母花岗岩(CPG)2种类型(Barbarin, 1999).MPG富含大量的原生白云母,贫黑云母;而CPG可含有堇青石,富含黑云母.研究区片麻状花岗岩富含黑云母而无白云母,显示出典型CPG的特征.岩石中未发现堇青石,这可能是由于岩体形成的深度较深(≥ 25 km, Barbarin, 1999).综合以上分析,哈珠地区片麻状花岗岩应属于富含黑云母的S型花岗岩.

实验岩石学研究已经证实,花岗岩主要是地壳来源的,而S型花岗岩多是源自于经历一定程度风化的表壳岩石的部分熔融(Chappell, 1999).一般认为, Al_2O_3/TiO_2 小于100且 CaO/Na_2O 大于0.3时表明花岗岩源区为杂砂岩,并且形成的初始熔融温度较高(肖庆辉等,2002).本区片麻状花岗岩的 Al_2O_3/TiO_2 在31.37~36.97之间,远小于100, CaO/Na_2O 为0.31~0.40,大于0.3,表明片麻状花岗岩源于杂砂岩的部分熔融且初始熔融温度较高.

利用锆石饱和和温度计计算的初始熔融温度在777~798 °C.在图6e中,本区花岗岩除一个样品点落入变质泥岩部分熔融区域内,其余样品点均落入变质杂砂岩部分熔融区域内,与上述分析结果一致.更进一步的,在泥质岩熔体与玄武岩的混合模拟结果中,研究区片麻状花岗岩落在更靠近泥质岩的端元,并表现出杂砂岩熔融熔体的特征(图6f).综上所述,哈珠片麻状花岗岩应来源于变质杂砂岩部分熔融的源区,且初始熔融温度较高(777~798 °C).

以往的研究表明与碰撞有关的过铝质花岗岩(SP)是在同碰撞早期的地壳收缩与堆叠阶段形成的(Pearce *et al.*, 1984).但是,近年来大量的研究显示,原先认为与同碰撞有关的过铝质花岗岩也可以出现在后碰撞的伸展和垮塌阶段(肖庆辉等,2002),可以作为造山作用由汇聚向伸展过渡的标志(邓晋福等,2004).本区片麻状花岗岩主量和微量元素均显示出明显的S型花岗岩的特征,在图7a中,样品点均落在同碰撞花岗岩区;在图7b中,样品点落在同碰撞、板内和火山弧花岗岩的交汇部位,属后碰撞花岗岩.区域上,北山造山带柳园地区出露有俯冲碰撞形成的高压—超高压榴辉岩,杨经绥等(2006)对榴辉岩所做的SHRIMP U-Pb 锆石年龄显示其原岩形成时代为 $1\ 007 \pm 20$ Ma,变质年龄为 819 ± 21 Ma,指示北山地区在1 000 Ma左右的格林威尔造山作用期间曾拼合成Rodinia超大陆的一部分,表明北山地区存在新元古代早期造山作用.同时,胡嵩琴等(2010)在研究了天山东段星星峡新元古代片麻状花岗岩后认为其形成的构造环境与大陆边缘岩浆活动有关.本区片麻状花岗岩具有与星星峡片麻

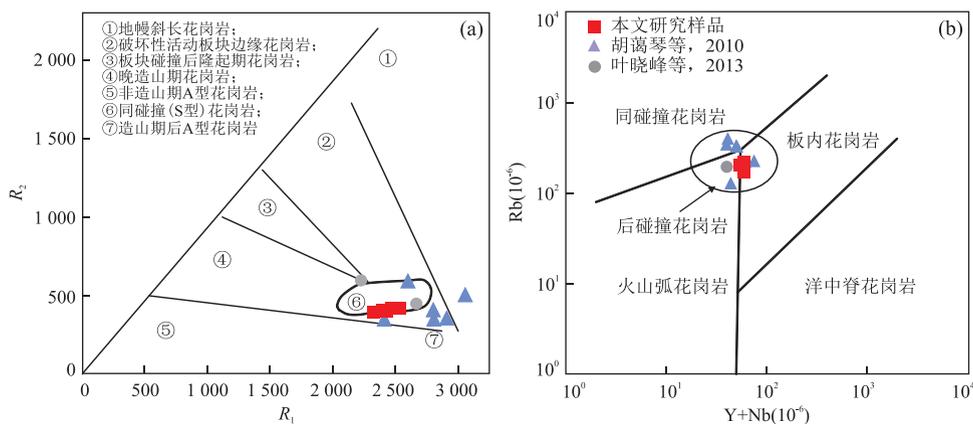


图 7 R_2-R_1 图解(a)和 $Rb-(Y+Nb)$ 图解(b)

Fig.7 R_2-R_1 (a) and $Rb-(Y+Nb)$ (b) diagrams for the gneissic granites from Hazhu area

图 a 据 Batchelor and Bowden(1985),其中 $R_1 = 4Si - 11(Na + K) - 2(Fe + Ti)$, $R_2 = 6Ca + 2Mg + Al$; 图 b 据 Pearce *et al.*(1984)

状花岗岩相似的稀土和微量元素特征(图 5e, 5f), 结合其构造环境判别图解和区域地质资料, 笔者认为本区片麻状花岗岩应形成于碰撞后由挤压转向伸展的构造环境, 与大陆边缘的岩浆活动有关, 为大陆碰撞的产物。

5.2 形成时代和地质意义

北山造山带内包含了多个古老的微陆块, 对于各微陆块的性质和起源, 特别是前寒武纪的演化一直存在着较大的争议(何世平等, 2002; 杨合群等, 2012; 贺振宇等, 2015)。以往的研究表明, 北山南带记录了多个古老微陆块的俯冲和碰撞过程, 而北山北带则是由多条晚古生代岛弧组成的复杂的俯冲拼贴增生系统(Windley *et al.*, 2007; Xiao *et al.*, 2010; Ao *et al.*, 2012; Song *et al.*, 2013)。梅华林等(1999)在柳园和白湖地区的花岗质岩石分别获得了 880 Ma 和 1 660~2 000 Ma 的单颗粒锆石 U-Pb 谐和年龄, 证实了北山地区存在新元古代和古元古代的岩浆热-构造事件。此后, 北山地区前寒武纪基底形成时代以及地质演化过程被越来越多的地质学家所关注, 并取得了一些新的认识。孙新春等(2005)通过对甘肃小红山地区黑云斜长片麻岩的时代研究(2 656±146 Ma), 认为北山地区古元古代一中元古代早期存在板块俯冲碰撞作用。聂凤军等(2004)依据交叉沟斜长角闪岩的 Sm-Nd 等时线年龄(1 264±11 Ma)判断北山地区存在前寒武纪结晶基底且形成时代在中元古代, 其古陆壳物质组成主要为斜长角闪岩、花岗质片麻岩、绢云石英片岩和石英岩等中-高级变质岩。最近, 贺振宇等(2015)在甘肃玉门旧井地区的黑云斜长片麻岩中获得了 1 408±4 Ma 的原岩成岩年龄, 证实了北山南带花牛山地块存在中元古代的古老地壳, 并认为其与中天山地块可能具有相同的物质来源。同时, 杨建国等(2010)在花牛山银铅锌矿的围岩玄武岩中获得了 1 071±5 Ma 的锆石 U-Pb 年龄, 表明北山地区存在中元古代晚期的火山-岩浆事件。新元古代时期, 北山地区受格林威尔造山运动影响, 整体以岩浆-构造活动为主。叶晓峰等(2013)在柳园地区花岗质片麻岩中获得了 902±5 Ma 的锆石 U-Pb 年龄, 姜洪颖等(2013)在石板墩地区的斜长角闪岩中获得了 880 Ma 的锆石 U-Pb 年龄, 两者均指示北山南带存在新元古代的构造热事件, 并被认为是 Rodinia 超大陆汇聚的响应。最近, Yuan *et al.* (2015)在公婆泉和雅丹地区的花岗片麻岩中分别获得了 ~900 Ma 和 933±2 Ma 的锆石 U-Pb 年龄, 进一步证实了北

山南带广泛分布新元古代的岩浆活动。

以上研究表明, 北山南带存在前寒武纪结晶基底(~1.4 Ga)且经历了新元古代(880~933 Ma)的岩浆事件。由于以往所有的前寒武纪年龄均集中报道于北山南带, 因此有学者认为北山北带可能不存在前寒武纪的岩浆事件(Song *et al.*, 2013, 2015)。此次北山北带哈珠地区的片麻状花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 885±4 Ma, 与笔者此前报道的年龄结果一致(891.9±6.5 Ma)(牛文超等, 2017), 显示其形成时代为新元古代, 表明北山北带存在新元古代的岩浆活动, 这是北山北带首次发现的新元古代岩浆事件的记录。范志伟等(2015)对北山北带东七一山一带北山岩群中石英岩所做碎屑锆石最小年龄为 ~1 301 Ma; 杨富林等(2015)在额济纳旗西部北山岩群石英岩中获得了 ~1 329 Ma 碎屑锆石峰值年龄。最近, 张正平等(2017)对北山北带石板井一带的北山岩群斜长角闪岩进行了详细的 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年, 结果显示其谐和年龄为 1 623±21 Ma, 代表了原岩的侵位年龄, 表明北山北带存在中元古代的结晶基底。综合以上, 笔者认为, 北山北带可能存在着两期前寒武纪的构造热事件, 即中元古代(~1.6 Ga)和新元古代(~0.9 Ga), 而中元古代应是北山北带古老地块基底的形成时间, 新元古代应为古老地壳的再造时间。

从目前的研究结果来看, 北山北带和北山南带相同的前寒武纪年龄信息可能暗示了两者具有一致的前寒武纪地壳演化历史, 而东天山造山带 ~0.9 Ga 的前寒武纪岩浆岩年龄, 又预示了三者具有一定的相似性。胡霁琴等(2006)曾在天山造山带东段星星峡和温泉地区发现 1 405.2±7.8 Ma 的花岗质片麻岩; 施文翔等(2010)在天山东段路白山一带识别出一套片麻状的花岗岩, 锆石 SHRIMP U-Pb 测年显示其结晶年龄为 1 453±15 Ma; 两者均指示天山造山带存在太古宙的结晶基底。随后大量的新元古代(880~945 Ma)花岗质岩石在东天山星星峡地区被报道(李秋根等, 2009; 胡霁琴等, 2010; 贺振宇等, 2015)。哈珠地区片麻状花岗岩, 具有高 SiO₂、低 CaO、高 K₂O+Na₂O 等过铝质 S 型花岗岩的特征, 表明其可能形成于碰撞造山环境, 构造环境判别图解也显示其形成于碰撞后由挤压转入伸展的背景之下, 结合其新元古代(885±4 Ma)的形成时代, 暗示其与新元古代造山事件有一定的关联。

Rodinia 超大陆的汇聚和相应的造山作用在全球范围内开始于约 1 300 Ma, 最终在 900 Ma 左右

结束(Li *et al.*, 2008)。该期构造事件在华夏、扬子、华北和塔里木地块均广泛存在(李献华等, 2012; 耿元生和周喜文, 2011; 曹正琦等, 2017), 而天山和北山地区广泛分布的 ~ 0.9 Ga 的岩浆热事件也可能记录了 Rodinia 超大陆在中亚造山带各微陆块的汇聚事件(梅华林等, 1999; 胡嵩琴等, 2010; 叶晓峰等, 2013)。北山北带哈珠地区片麻状花岗岩与北山南带柳园新元古代花岗质片麻岩(叶晓峰等, 2013)和东天山星星峡片麻状花岗岩(胡嵩琴等, 2010)具有相似的地球化学特征和构造背景, 暗示北山造山带与天山造山带在新元古代时期经历了近似一致的构造演化。因此笔者推测, 北山北带的明水—早山地块、北山南带的花牛山地块和东天山的星星峡地块, 它们可能具有相似的前寒武纪演化历史, 并且都在新元古代参与了 Rodinia 超大陆的聚合, 构成了 Rodinia 超大陆的一部分, 而后随着超大陆的裂解, 其又各自经历了显生宙的不同演化阶段, 形成了如今的造山带格局。

6 结论

(1) 哈珠地区片麻状花岗岩 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 885 ± 4 Ma, 显示其形成于新元古代。

(2) 哈珠地区片麻状花岗岩具有 S 型花岗岩的特征; 岩石来源于变质杂砂岩部分熔融的源区, 且初始熔融温度较高($777 \sim 798$ °C); 构造环境判别图解显示其形成于碰撞后由挤压转向伸展的构造环境, 与大陆边缘的岩浆活动有关, 为大陆碰撞的产物。

(3) 哈珠地区新元古代的岩浆作用, 表明北山北带的明水—早山地块经历了新元古代岩浆事件的改造, 其可能与北山南带的花牛山地块、东天山的星星峡地块共同参与了新元古代时期 Rodinia 超大陆的聚合, 构成了 Rodinia 超大陆的一部分, 哈珠地区新元古代岩浆事件即为 Rodinia 超大陆聚合在北山地区的响应。

致谢: 感谢两位匿名评审专家提出的建设性意见, 让本文得到了很大的提升。中国地质调查局天津地质调查中心李承东研究员对本文的初稿提出了宝贵的修改意见, 在此致以诚挚的感谢。张阔、许腾、钟焱参加了部分野外工作, 在此一并致以谢意!

附补充信息表见: <http://www.earth-science.net/WebPage/view.aspx?id=20190117073022.pdf>

References

- Altherr, R., Holl, A., Hegner, E., et al., 2001. High-Potassium, Calc-Alkaline I-Type Plutonism in the European Variscides: Northern Vosges (France) and Northern Schwarzwald (Germany). *Lithos*, 50(1-3): 51-73. [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(99\)00052-3](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(99)00052-3)
- Ao, S. J., Xiao, W. J., Han, C. M., et al., 2012. Cambrian to Early Silurian Ophiolite and Accretionary Processes in the Beishan Collage, NW China: Implications for the Architecture of the Southern Altaids. *Geological Magazine*, 149(4): 606-625. <https://doi.org/10.1017/S0016756811000884>
- Barbarin, B., 1999. A Review of the Relationships between Granitoid Types, Their Origins and Their Geodynamic Environments. *Lithos*, 46(3): 605-626. [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(98\)00085-1](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(98)00085-1)
- Batchelor, R. A., Bowden, P., 1985. Petrogenetic Interpretation of Granitoid Rock Series Using Multicationic Parameters. *Chemical Geology*, 48(1-4): 43-55. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(85\)90034-8](https://doi.org/10.1016/0009-2541(85)90034-8)
- Bonin, B., 2007. A-Type Granites and Related Rocks: Evolution of a Concept, Problems and Prospects. *Lithos*, 97(1-2): 1-29. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2006.12.007>
- Cao, Z. Q., Cai, Y. T., Zeng, Z. X., et al., 2017. Discovery of Neoproterozoic A-Type Granite in Northern Yangtze Craton and Its Tectonic Significance. *Earth Science*, 42(6): 957-973 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.80>
- Chappell, B. W., 1999. Aluminium Saturation in I- and S-Type Granites and the Characterization of Fractionated Haplogranites. *Lithos*, 46(3): 535-551. [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(98\)00086-3](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(98)00086-3)
- Deng, J. F., Luo, Z. H., Su, S. G., et al., 2004. Petrogenesis Tectonic Environment and Mineralization. Beijing: Geological Publishing House, 85-122 (in Chinese).
- Fan, Z. W., 2015. Formation Period of Quartzite of Beishan Group in Ejina Banner, Inner Mongolia—LA-ICP-MS Zircon U-Pb Dating Evidence. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 30(4): 575-581 (in Chinese with English abstract).
- Frost, B. R., Barnes, C. G., Collins, W. J., et al., 2001. A Geochemical Classification for Granitic Rocks. *Journal of Petrology*, 42(11): 2033-2048. <https://doi.org/10.1093/ptrology/42.11.2033>
- Geng, Y. S., Zhou, X. W., 2011. Characteristics of Geochemistry and Zircon Hf Isotope of the Early Neoproterozoic Granite in Alax Area, Inner Mongolia. *Acta Petrologica Sinica*, 27(4): 897-908 (in Chinese with English abstract).

- Gerdes, A., Wörner, G., Henk, A., 2000. Post-Collisional Granite Generation and HT-LP Metamorphism by Radiogenic Heating: The Variscan South Bohemian Batholith. *Journal of the Geological Society*, 157(3): 577—587. <https://doi.org/10.1144/jgs.157.3.577>
- He, S. P., Ren, B. C., Yao, W. G., et al., 2002. The Division of Tectonic Units of Beishan Area, Gansu-Inner Mongolia. *Northwestern Geology*, 35(4): 30—40 (in Chinese with English abstract).
- He, Z. Y., Sun, L. X., Mao, L. J., et al., 2015. Zircon U-Pb and Hf Isotopic Study of Gneiss and Granodiorite from the Southern Beishan Orogenic Collage: Mesoproterozoic Magmatism and Crustal Growth. *Chinese Science Bulletin*, 60(4): 389—399 (in Chinese).
- He, Z. Y., Zhang, Z. M., Zong, K. Q., et al., 2013. Paleoproterozoic Crustal Evolution of the Tarim Craton: Constrained by Zircon U-Pb and Hf Isotopes of Meta-Igneous Rocks from Korla and Dunhuang. *Journal of Asian Earth Sciences*, 78: 54—70. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2013.07.022>
- Hoskin, P. W. O., 2003. The Composition of Zircon and Igneous and Metamorphic Petrogenesis. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1): 27—62. <https://doi.org/10.2113/0530027>
- Hu, A. Q., Wei, G. J., Deng, W. F., et al., 2006. 1.4 Ga SHRIMP U-Pb Age for Zircons of Granodiorite and Its Geological Significance from the Eastern Segment of the Tianshan Mountains, Xinjiang, China. *Geochimica*, 35(4): 333—345 (in Chinese with English abstract).
- Hu, A. Q., Wei, G. J., Jiang, B. M., et al., 2010. Formation of the 0.9 Ga Neoproterozoic Granitoids in the Tianshan Orogen, NW China: Constraints from the SHRIMP Zircon Age Determination and Its Tectonic Significance. *Geochemica*, 39(3): 197—212 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, H. Y., He, Z. Y., Zong, K. Q., et al., 2013. Zircon U-Pb Dating and Hf Isotopic Studies on the Beishan Complex in the Southern Beishan Orogenic Belt. *Acta Petrologica Sinica*, 29(11): 3949—3967 (in Chinese with English abstract).
- Li, Q. G., Liu, S. W., Song, B., et al., 2009. Late Mesoproterozoic to Paleozoic Tectonothermal Events in the Eastern Segment of the Central Tianshan Tectonic Zone of Northwestern China: Constraints from SHRIMP Zircon Geochronology. *Earth Science Frontiers*, 16(2): 175—184 (in Chinese with English abstract).
- Li, X. H., Li, W. X., He, B., 2012. Building of the South China Block and Its Relevance to Assembly and Breakup of Rodinia Supercontinent: Observations, Interpretations and Tests. *Bulletin of Mineralogy Petrology & Geochemistry*, 31(6): 543—559 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z. X., Bogdanova, S. V., Collins, A. S., et al., 2008. Assembly, Configuration, and Break-Up History of Rodinia: A Synthesis. *Precambrian Research*, 160(1—2): 179—210. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2007.04.021>
- Liu, Y. S., Gao, S., Hu, Z. C., et al., 2010. Continental and Oceanic Crust Recycling-Induced Melt-Peridotite Interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb Dating, Hf Isotopes and Trace Elements in Zircons from Mantle Xenoliths. *Journal of Petrology*, 51(1—2): 537—571. <https://doi.org/10.1093/petrology/egp082>
- Ludwig, K. R., 2003. Isoplot/Ex, A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel, Version 3.00. Berkeley Geochronology Center, Berkeley.
- Maniar, P. D., Piccoli, P. M., 1989. Tectonic Discrimination of Granitoids. *Geological Society of America Bulletin*, 101(5): 635—643. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1989\)101<0635:tdog>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1989)101<0635:tdog>2.3.co;2)
- Mei, H. L., Yu, H. F., Li, Q., et al., 1999. The First Discovery of Eclogite and Palaeoproterozoic Granitoids in the Beishan Area, Northwestern Gansu Province, China. *Chinese Science Bulletin*, 43(19): 2105—2111 (in Chinese).
- Middlemost, E. A. K., 1994. Naming Materials in the Magma/Igneous Rock System. *Earth-Science Reviews*, 37(3—4): 215—224. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(94\)90029-9](https://doi.org/10.1016/0012-8252(94)90029-9)
- Nie, F. J., Jiang, S. H., Liu, Y., et al., 2004. Sm-Nd Isotope Study on Metamorphosed Volcano—Sedimentary Rocks of the Jiaochagou Metamorphic Complex, Beishan Mt., Inner Mongolia. *Acta Geologica Sinica*, 78(6): 807—812 (in Chinese with English abstract).
- Niu, W. C., Ren, B. F., Ren, Y. W., et al., 2017. Discovery of Neoproterozoic Gneissic Granite from the Beishan Area, Inner Mongolia: Zircon U-Pb Chronologic Evidence. *Geology in China*, 44(2): 409—410 (in Chinese with English abstract).
- Patino Douce, A. E., 1999. What Do Experiments Tell Us about the Relative Contributions of Crust and Mantle to the Origin of Granitic Magmas? *Geological Society, London, Special Publication*, 168(1): 55—75. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1999.168.01.05>
- Pearce, J. A., Harris, N. B. W., Tindle, A. G., 1984. Trace Element Discrimination Diagrams for the Tectonic Interpretation of Granitic Rocks. *Journal of Petrology*, 25(4): 956—983. <https://doi.org/10.1093/petrology/25.4.956>
- Shi, W. X., Liao, Q. A., Hu, Y. Q., et al., 2010. Characteristics of Mesoproterozoic Granites and Their Geological Significances from Middle Tianshan Block, East Tianshan District, NW China. *Geological Science and Technology Infor-*

- tion, 29(1): 29—37 (in Chinese with English abstract).
- Song, D. F., Xiao, W. J., Han, C. M., et al., 2013. Progressive Accretionary Tectonics of the Beishan Orogenic Collage, Southern Altaids: Insights from Zircon U-Pb and Hf Isotopic Data of High-Grade Complexes. *Precambrian Research*, 227: 368—388. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2012.06.011>
- Song, D. F., Xiao, W. J., Windley, B. F., et al., 2015. A Paleozoic Japan-Type Subduction-Acretion System in the Beishan Orogenic Collage, Southern Central Asian Orogenic Belt. *Lithos*, 224—225: 195—213. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.03.005>
- Sun, L. X., Zhang, J. H., Ren, B. F., et al., 2017. Geochemical Characteristics and U-Pb Age of Baiyunshan Ophiolite Mélange in the Beishan Orogenic Belt and Their Geological Implications. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 36(2): 131—147 (in Chinese with English abstract).
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313—345. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1989.042.01.19>
- Sun, X. C., Zhang, H. J., Wei, Z. J., et al., 2005. Time of Definition and Geological Meaning for Metamorphic Intrusive Rock Body in Xiaohongshan Region, Beishan Area of Gansu and Inner Mongolia. *Northwestern Geology*, 38(3): 61—67 (in Chinese with English abstract).
- Wang, S. D., Zhang, K. X., Song, B. W., et al., 2018. Detrital Zircon U-Pb Geochronology from Greywackes in the Niujuanzi Ophiolitic Mélange, Beishan Area, NW China: Provenance and Tectonic Implications. *Journal of Earth Science*, 29(1): 103—113. <https://doi.org/10.1007/s12583-018-0824-2>
- Whalen, J. B., Currie, K. L., Chappell, B. W., 1987. A-Type Granites: Geochemical Characteristics, Discrimination and Petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95(4): 407—419. <https://doi.org/10.1007/bf00402202>
- Windley, B. F., Alexeiev, D., Xiao, W. J., et al., 2007. Tectonic Models for Accretion of the Central Asian Orogenic Belt. *Journal of the Geological Society*, 164(1): 31—47. <https://doi.org/10.1144/0016-76492006-022>
- Wu, F. Y., Liu, X. C., Ji, W. Q., et al., 2017. Highly Fractionated Granites: Recognition and Research. *Science in China (Series D)*, 47(7): 745—765 (in Chinese).
- Wu, Y. B., Zheng, Y. F., 2004. Genesis of Zircon and Its Constraints on Interpretation of U-Pb Age. *Chinese Science Bulletin*, 49(16): 1589—1604 (in Chinese).
- Xiao, Q. H., Deng, J. F., Ma, D. S., et al., 2002. The Thought and Method in the Study of Granite. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Xiao, W. J., Mao, Q. G., Windley, B. F., et al., 2010. Paleozoic Multiple Accretionary and Collisional Processes of the Beishan Orogenic Collage. *American Journal of Science*, 310(10): 1553—1594. <https://doi.org/10.2475/10.2010.12>
- Yang, F. L., Zhao, Z. X., Jia, W. Y., et al., 2015. Discussion on the Forming Age of the Beishan Group in the Beishan Area, Inner Mongolia. *Geological Survey and Research*, 39(2): 89—94 (in Chinese with English abstract).
- Yang, H. Q., Zhao, G. B., Li, Y., et al., 2012. The Relationship between Paleozoic Tectonic Setting and Mineralization in Xinjiang-Gansu-Inner Mongolia Juncture Area. *Geological Bulletin of China*, 31(Z1): 413—421 (in Chinese with English abstract).
- Yang, J. G., Zhai, J. Y., Yang, H. W., et al., 2010. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Dating of Basalt and Its Geological Significance in Huaniushan Pb-Zn Deposit, Beishan Area, Gansu, China. *Geological Bulletin of China*, 29(7): 1017—1023 (in Chinese with English abstract).
- Yang, J. S., Wu, C. L., Chen, S. Y., et al., 2006. Neoproterozoic Eclogitic Metamorphic Age of the Beishan Eclogite of Gansu, China: Evidence from Shrimp U-Pb Isotope Dating. *Geology in China*, 33(2): 317—325 (in Chinese with English abstract).
- Ye, X. F., Zong, K. Q., Zhang, Z. M., et al., 2013. Geochemistry of Neoproterozoic Granite in Liuyuan Area of Southern Beishan Orogenic Belt and Its Geological Significance. *Geological Bulletin of China*, 32(Z1): 307—317 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, H. L., Gao, S., Liu, X. M., et al., 2004. Accurate U-Pb Age and Trace Element Determinations of Zircon by Laser Ablation-Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 28(3): 353—370. <https://doi.org/10.1111/j.1751-908x.2004.tb00755.x>
- Yuan, Y., Zong, K. Q., He, Z. Y., et al., 2015. Geochemical and Geochronological Evidence for a Former Early Neoproterozoic Microcontinent in the South Beishan Orogenic Belt, Southernmost Central Asian Orogenic Belt. *Precambrian Research*, 266: 409—424. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2015.05.034>
- Zhang, Z. P., Duan, B. X., Meng, Q. T., et al., 2017. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Dating of Amphibolites of the Beishan Group in the Beishan Area, Inner Mongolia and Its Geological Significance. *Geology and Exploration*, 53(6):

1129—1139 (in Chinese with English abstract).

Zonenshain, L. P., Kuzmin, M. I., 1978. The Khan-Taishir Ophiolitic Complex of Western Mongolia, Its Petrology, Origin and Comparison with Other Ophiolitic Complexes. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 67 (1): 95—109. <https://doi.org/10.1007/bf00371637>

Zuo, G. C., Liu, Y. K., Liu, C. Y., 2003. Framework and Evolution of the Tectonic Structure in Beishan Area Across Gansu Province, Xinjiang Autonomous Region and Inner Mongolia Autonomous Region. *Acta Geologica Gansu*, 12 (1): 1—15 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

曹正琦, 蔡逸涛, 曾作勋, 等, 2017. 扬子克拉通北缘新元古代 A 型花岗岩的发现及大地构造意义. *地球科学*, 42 (6): 957—973.

邓晋福, 罗照华, 苏尚国, 等, 2004. 岩石成因、构造环境与成矿作用. 北京: 地质出版社, 85—122.

范志伟, 2015. 内蒙古额济纳旗北山岩群中石英岩岩组形成时代——LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年的证据. *地质找矿论丛*, 30 (4): 575—581.

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. *岩石学报*, 27 (4): 897—908.

何世平, 任秉琛, 姚文光, 等, 2002. 甘肃内蒙古北山地区构造单元划分. *西北地质*, 35 (4): 30—40.

贺振宇, 孙立新, 毛玲娟, 等, 2015. 北山造山带南部片麻岩和花岗闪长岩的锆石 U-Pb 定年和 Hf 同位素: 中元古代的岩浆作用与地壳生长. *科学通报*, 60 (4): 389—399.

胡霭琴, 韦刚健, 邓文峰, 等, 2006. 天山东段 1.4 Ga 花岗闪长质片麻岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. *地球化学*, 35 (4): 333—345.

胡霭琴, 韦刚健, 江博明, 等, 2010. 天山 0.9 Ga 新元古代花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其构造意义. *地球化学*, 39 (3): 197—212.

姜洪颖, 贺振宇, 宗克清, 等, 2013. 北山造山带南缘北山杂岩的锆石 U-Pb 定年和 Hf 同位素研究. *岩石学报*, 29 (11): 3949—3967.

李秋根, 刘树文, 宋彪, 等, 2009. 中天山东段中元古代晚期—古生代构造—热事件: SHRIMP 锆石年代学证据. *地学前缘*, 16 (2): 175—184.

李献华, 李武显, 何斌, 2012. 华南陆块的形成与 Rodinia 超大陆聚合—裂解——观察、解释与检验. *矿物岩石地球*

化学通报, 31 (6): 543—559.

梅华林, 于海峰, 李铨, 等, 1999. 甘肃北山地区首次发现榴辉岩和古元古花花岗质岩石. *科学通报*, 43 (19): 2105—2111.

聂凤军, 江思宏, 刘妍, 等, 2004. 内蒙古北山交叉沟地区变质火山岩 Sm-Nd 同位素研究. *地质学报*, 78 (6): 807—812.

牛文超, 任邦方, 任云伟, 等, 2017. 内蒙古北山地区发现新元古代片麻状花岗岩: 锆石 U-Pb 定年证据. *中国地质*, 44 (2): 409—410.

施文翔, 廖群安, 胡远清, 等, 2010. 东天山地区中天山地块内中元古代花岗岩的特征及地质意义. *地质科技情报*, 29 (1): 29—37.

孙立新, 张家辉, 任邦方, 等, 2017. 北山造山带白云山蛇绿混杂岩的地球化学特征、时代及地质意义. *岩石矿物学杂志*, 36 (2): 131—147.

孙新春, 张红军, 魏志军, 等, 2005. 甘蒙北山地区小红山一带变质侵入岩体的时代厘定及其地质意义. *西北地质*, 38 (3): 61—67.

吴福元, 刘小驰, 纪伟强, 等, 2017. 高分异花岗岩的识别与研究. *中国科学(D辑)*, 47 (7): 745—765.

吴元保, 郑永飞, 2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约. *科学通报*, 49 (16): 1589—1604.

肖庆辉, 邓晋福, 马大铨, 等, 2002. 花岗岩研究思维与方法. 北京: 地质出版社.

杨富林, 赵志雄, 贾文艳, 等, 2015. 内蒙古北山地区北山岩群形成时代探讨. *地质调查与研究*, 39 (2): 89—94.

杨合群, 赵国斌, 李英, 等, 2012. 新疆—甘肃—内蒙古衔接区古生代构造背景与成矿的关系. *地质通报*, 31 (Z1): 413—421.

杨建国, 翟金元, 杨宏武, 等, 2010. 甘肃北山地区花牛山铅锌矿区玄武岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年及其地质意义. *地质通报*, 29 (7): 1017—1023.

杨经绥, 吴才来, 陈松永, 等, 2006. 甘肃北山地区榴辉岩的变质年龄: 来自锆石的 U-Pb 同位素定年证据. *中国地质*, 33 (2): 317—325.

叶晓峰, 宗克清, 张泽明, 等, 2013. 北山造山带南缘柳园地区新元古代花岗岩的地球化学特征及其地质意义. *地质通报*, 32 (Z1): 307—317.

张正平, 段炳鑫, 孟庆涛, 等, 2017. 内蒙古北山地区北山岩群斜长角闪岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及其地质意义. *地质与勘探*, 53 (6): 1129—1139.

左国朝, 刘义科, 刘春燕, 2003. 甘蒙北山地区构造格局及演化. *甘肃地质学报*, 12 (1): 1—15.