https://doi.org/10.3799/dqkx.2020.367



甘肃北山野马大泉志留纪花岗岩的成因和构造意义

黄博涛^{1,2},王国强¹,卜 涛¹,过 磊¹,董增产¹,王居里²,贺振宇³

1. 中国地质调查局造山带地质研究中心,西安地质调查中心,陕西西安 710054

2. 大陆动力学国家重点实验室,西北大学地质学系,陕西西安 710069

3. 自然资源部深地动力学重点实验室,中国地质科学院地质研究所,北京 100037

摘 要:马鬃山地体是北山造山带的主要构造单元之一,其广泛出露的花岗岩对于认识和完善北山古生代构造格架 具有重要意义.对野马大泉一带的花岗岩进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年,获得了早-中志留世(441±4 Ma 和 425± 2 Ma)的年龄.岩石地球化学显示它们均富钠、钙碱性和镁质花岗岩的特征,小于 A 型花岗岩的 Ga/Al×10⁴ 值和 Zr+Nb+Ce+Y 值,且含角闪石二长花岗岩出现标志性矿物角闪石,属于 I 型花岗岩.它们具有正的 ε_{Hf}(t)值 (-0.1~+7.6),两阶段 Hf模式年龄集中于 1.42~0.94 Ga,反映花岗质岩浆可能起源于中元古代(~1.4 Ga)地壳的部 分熔融,并伴有幔源岩浆的参与.马鬃山地体志留纪花岗岩的地球化学显示形成于大陆弧的构造环境,且结合区域 古生代花岗岩的时空分布指示相关的俯冲带在早石炭世发生北向后撤.

关键词:北山造山带;马鬃山地体;志留纪;I型花岗岩;大陆弧;构造地质.

中图分类号: P581 **文章编号:** 1000-2383(2021)11-3993-13 **收稿日期:** 2020-11-29

Petrogenesis and Tectonic Significance of Silurian Granites in Yemadaquan Area, Beishan, Gansu Province

Huang Botao^{1,2}, Wang Guoqiang¹, Bu Tao¹, Guo Lei¹, Dong Zengchan¹, Wang Juli², He Zhenyu³

1. Research Center of Orogenic Geology, Xi'an Center of Geological Survey, China Geological Survey, Xi'an 710054, China

2. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China

3. Key Laboratory of Deep-Earth Dynamics of Ministry of Natural Resources, Institute of Geology, Chinese Academy of

Geological Sciences, Beijing 100037, China

Abstract: The Mazongshan terrane is one of the main units of the Beishan orogenic collage. Among which there are abundant plutons, and they are of great significance for understanding and perfecting the Paleozoic tectonic framework of the Beishan orogenic collage. In this study, LA-ICP-MS zircon U-Pb dating yields the 206 Pb/ 238 U ages of 441±4 Ma and 425±2 Ma for the biotite monzogranite and hornblende monzogranite in Yemadaquan area respectively, which are the Early and Middle Silurian. The geochemical characteristics of the rocks show that they are sodium-rich, calc-alkalic, and magnesian. And their Ga/Al×10⁴ and Zr+Nb+Ce+Y values are less than those of the A-type granite. Especially diagnostic mineral amphibole appears in hornblende monzogranite, meaning they belong to I-type granite. The $\varepsilon_{Hf}(t)$ values of their zircons are positive, and the crustal Hf model ages are concentrated at 0.94–1.42 Ga, suggesting that the Early-Middle Silurian granitic magmas may be derived from the partial melting of the Mesoproterozoic (~1.4 Ga) crust, with the participation of mantle-derived magmas. The analyses from geochemistry and regional data show that the granites were formed in the tectonic setting of continental arc, and the spatial and

基金项目:国家自然科学基金项目(No.41703038);中国地质调查局项目(Nos.DD20190812,DD20190004).

作者简介:黄博涛(1990-),男,助理研究员,硕士,从事岩石地球化学及前寒武纪地质研究.ORCID:0000-0002-5671-0242.E-mail: huangbt1990@163.com

引用格式:黄博涛,王国强,卜涛,等,2021.甘肃北山野马大泉志留纪花岗岩的成因和构造意义.地球科学,46(11):3993-4005.

temporal distribution of Paleozoic granites suggests that slab roll-back might occur in the Early Carboniferous. **Key words:** Beishan orogenic collage; Mazongshan terrane; Silurian; I-type granite; continental arc; tectonics.

0 引言

中亚造山带位于东欧克拉通、西伯利亚克拉 通、华北克拉通和塔里木克拉通之间,其形成涉 及长期且多期次的俯冲,以及微陆块、岛弧、洋 岛、蛇绿岩和增生杂岩的拼贴,是世界上最大的 显生宙增生造山带和地壳生长区(Jahn et al., 2004; Xiao et al., 2018).北山造山带位于中亚造 山带的南缘,其中发育大量的俯冲-增生杂岩和 弧岩浆岩,对认识中亚造山带的构造演化历史和 俯冲增生过程具有重要的意义(Xiao et al., 2010; Song et al., 2015; He et al., 2018).

北山造山带发育大量的花岗岩类岩石,近些年 精确的年代学分析显示除零星分布的中-新元古代 花岗岩类外(Yuan et al., 2015; He et al., 2018),主 要以早-晚古生代的花岗岩为主(Zhang et al., 2017; Yuan et al., 2018; Zheng et al., 2018, 2020). 此外,北山造山带分布有大量的强变形深成岩,例 如1:25万马鬃山幅区域地质调查资料显示马鬃山 地体中发育强变形侵入岩岩体,由于其透入性的变 质和变形特征,以及早期Sm-Nd同位素和锆石上交 点年龄,多认为其形成于前寒武纪,然而Song et al. (2013a, 2013b)对马鬃山镇-梧桐井一带的花岗片 麻岩和糜棱岩化花岗岩研究,认为其形成于晚寒武 世-晚泥盆世.早期的全岩Nd同位素暗示中亚显著 的地壳生长(Jahn et al., 2004), Song et al. (2016) 也认为该地区不存在广泛的前寒武纪基底,但最近 的锆石Hf同位素分析认为该时期的花岗质岩浆主 要为元古代地壳的再造(Yuan et al., 2018),本文也 将进一步讨论该问题.同时对于该时期马鬃山地体 的构造岩浆过程的认识也存在争议:部分研究者认 为430~420 Ma为岩浆活动衰弱期,为同碰撞阶段 (李敏等,2020;辛后田等,2020);也有研究者认为 该时期一直处于俯冲消减的环境(Xiao et al., 2010;He et al., 2018),且该时期的岩浆作用也有相 关于牛圈子洋的北向俯冲、石板井洋的南向俯冲和 红石山洋的南向俯冲相争(Xiao et al., 2010; He et al., 2018;辛后田等, 2020).另外目前关于北山造山 带的构造演化也有多种模型提出,如:岛弧-裂解-拼贴模式(Xiao et al., 2010, 2018; Tian et al.,

2014)、统一陆块-俯冲-裂解模式(He et al., 2018)和两陆夹一洋模式等.北山造山带的中部地 区尤其是马鬃山地体是理解古生代早期构造演化 的重要地区,对认识或改进以上北山造山带构造 演化的不同理解能够提供重要的约束.

本文在详细的野外区域地质调查的基础上, 对野马大泉一带的原划分的长城纪黑云母二长花 岗岩和晚二叠世含角闪石二长花岗岩进行精确的 年代学分析,结果显示它们分别形成于早志留世 和中志留世,并对它们开展了岩石地球化学和锴 石Lu-Hf同位素分析,探讨它们的岩石成因、地壳 演化特征和构造背景,并结合区域上的资料,系统 阐述北山造山带古生代的构造演化过程.

1 地质概况和岩石特征

北山造山带位于甘新蒙交界位置,大地构造位 置上位于华北板块、塔里木板块和西伯利亚板块的 交汇部位,其西侧以星星峡左行走滑断裂与天山造 山带相连,东侧于弱水走滑断裂被巴丹吉林沙漠掩 盖,南北位于敦煌地块和蒙古增生造山带之间 (Xiao et al., 2010; Song et al., 2016; He et al., 2018).北山造山带由一系列的岛弧、蛇绿混杂岩和 微地块等构造单元组成,其从南至北通过柳园、红 柳河-洗肠井、石板井-小黄山和红石山蛇绿岩可 以划分为石板山、双鹰山、马鬃山、旱山和雀儿山 等地体(图1; Xiao et al., 2010; He et al., 2018).

其中位于北侧石板井-小黄山蛇绿岩和南侧红 柳河-洗肠井蛇绿岩之间的马鬃山地体为大陆边缘 弧.通过对芨芨台子和小黄山地区蛇绿岩的玄武岩 和辉长岩年代学分析认为石板井-小黄山蛇绿岩形 成于早石炭世(Zheng et al., 2013),通过对红柳河、 牛圈子和洗肠井地区蛇绿岩的辉长岩和斜长花岗 岩年代学分析认为红柳河-洗肠井蛇绿岩时代主要 为早寒武世-晚奥陶世,少数为早志留世(Tian et al., 2014;Shi et al., 2018).马鬃山地体中前寒武纪 单元主要分布有"北山杂岩"、"古硐井群"和"平头 山组"等,变质程度为绿片岩相-角闪岩相,岩性主 要包括石英岩、大理岩、云母片岩、片麻岩、斜长角 闪岩以及浅变质的石英砂岩和粉砂岩等.早古生代



Fig. 1 Geological sketch map of the Beishan orogenic collage

据 Xiao et al.(2010);He et al.(2018);辛后田等(2020).Ⅰ.石板山地体;Ⅱ.双鹰山地体;Ⅲ.马鬃山地体;Ⅳ.旱山地体;V.雀儿山地体;F₁.柳园 蛇绿岩带;F₂.红柳河-洗肠井蛇绿岩带;F₃.石板井-小黄山蛇绿岩带;F₄.红石山蛇绿岩带



Fig.2 Geological sketch map of the Silurian granite pluton in the Yemadaquan area

沉积地层主要包括寒武系双鹰山组和西双鹰山组, 岩性为含生物碎屑灰岩以及青灰色硅质岩夹薄层 状灰岩,反映水体变深的环境;奥陶系地层主要包 括罗雅楚山组、咸水湖组和白云山组,罗雅楚山组 岩性主要为长石石英砂岩、石英岩、硅质板岩夹少 量灰岩和砂砾岩,咸水湖组岩性主要为安山岩、火 山碎屑岩夹少量灰岩和碧玉岩,白云山组主要为浅 海相碳酸盐岩-碎屑岩沉积;志留系地层主要为公 婆泉群,为一套火山岩、火山碎屑岩、钙质砂砾岩及 生物碎屑灰岩岩石组合.晚古生代地层主要包括石 炭系白山组次深海相-浅海相-滨浅海相的中酸性 火山岩建造、火山碎屑岩-正常碎屑岩建造和复理 石建造,以及二叠纪含生物碎屑灰岩及碎屑岩等. 马鬃山地体中花岗岩浆活动非常发育,近些年锆石



图 3 黑云母二长花岗岩(a, c)与含角闪石二长花岗岩(b, d)的野外与显微照片 Fig.3 Field photos and photomicrographs (crossed nicols) of the biotite monzogranite (a, c) and hornblende monzogranite (b, d) 显微照片为正交偏光;Pl.斜长石;Q.石英;Bi.黑云母;Mus.白云母;Kfs.钾长石;Am.角闪石

年代学分析显示它们的时代主要为寒武纪-早 石炭世(Song et al., 2013a, 2013b, 2015; Zheng et al., 2018;李敏等, 2020).早古生代的岩体多 数已发生强烈的变形,除分布于勒巴泉和野马 泉韧性剪切带中的糜棱岩化中酸性侵入岩外 (Song et al., 2015),多报道见于马鬃山地体的 北缘,岩性主要为花岗片麻岩、糜棱岩化花岗岩 和眼球状片麻岩等(Song et al., 2013a).

本文研究的花岗岩岩体位于马鬃山镇以西 野马大泉附近,构造划分上位于马鬃山地体的北缘.其中黑云母二长花岗岩岩体在1:25万马鬃 山幅中被认为是长城纪片麻状花岗岩岩体,出露 面积约为3km²,侵入至围岩北山杂岩中,且其 片麻理方向为近东西向.含角闪石二长花岗岩 岩体规模较大,出露面积超过10km²,发育较弱 的定向构造,在1:25万马鬃山幅中被认为是二 叠纪,其东侧与三叠系地层呈断层接触(图2).

黑云母二长花岗岩呈淡肉红色,中细粒结构, 片麻状构造,主要矿物组成为钾长石(~30%)、斜 长石(~25%)、石英(~28%)、黑云母(~15%)、白 云母(~2%)和微量不透明矿物.钾长石为微斜长 石,粒径为0.2~1.5 mm,斜长石为钠长石-更长石,粒径为0.2~0.8 mm,云母围绕长石和石英弯曲变形较强,具有定向(图 3a 和 3c).

含角闪石二长花岗岩呈灰色-淡肉红色,中粒 结构,块状~弱片麻状构造,主要矿物组成为钾长石 (~44%)、斜长石(~27%)、石英(~25%)、黑云母 (~1%)和角闪石(~3%).钾长石部分颗粒碎裂状, 粒径为0.1~2.2 mm,部分可见与钠长石交生具条纹 或文象结构,斜长石粒径为0.1~2.2 mm,石英具波 状消光,粒径为0.2~2.4 mm,角闪石粒径为0.2~ 0.8 mm,局部可见绿泥石化,黑云母粒径为0.1~ 0.3 mm,显示经历过一定的变形(图 3b和 3d).

2 测试方法

样品的全岩主微量元素测试均在中国地质调查局西安地质调查中心实验测试中心完成.主量元素利用 Xios4.0kwX 型荧光光谱仪分析,分析误差低于 5%,其中 FeO 和烧失量(LOI)采用标准湿化学法分析.稀土和微量元素利用 Series II 型电感耦合等离子体质谱仪

(ICP-MS)分析,分析精度高于10%.

LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素定年和锆石 Lu-Hf同位素测试同样在西安地质调查中心实验测试 中心完成,激光剥蚀系统为Coherent Geolas Pro, 等离子质谱仪为Agilent 7700X. 锆石 U-Pb 同位素 定年剥蚀孔径为24 um,激光频率为7 Hz.数据处 理采用 Glitter 完成, 锆石 U-Pb 年龄计算采用标样 91500 为 外 标, 锆 石 微 量 元 素 含 量 测 定 采 用 NIST610作为外标,²⁹Si作为内标元素.绘制谐和 图和计算加权平均年龄采用 Isoplot 完成. 锆石 Lu-Hf同位素分析时激光束直径为44 um,激光脉冲频 率为8Hz.实验过程中用标样91500、GJ-1、MUN 和 PLV 作外标. 在计算初始 ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 比值时, Lu 的衰变常数采用 1.865×10⁻¹¹ a⁻¹, ε_H值的计算采 用的球粒陨石 Hf 同位素值为¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf= 0.033 6,¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf=0.282 785. 在 Hf 单阶段模式 年龄计算中,亏损地幔¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf现在值采用 0.283 25,¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf采用 0.038 4, 两阶段 Hf 模式 年龄计算时采用平均地壳的¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf=0.015.

3 分析结果

3.1 锆石 U-Pb 年代学

黑云母二长花岗岩(D1007-1-1,采样坐标为 96°30′43″N,41°50′42″E)的锆石多为无色或淡黄色, 半自形-自形长柱状,长度集中于120~200 µm.CL 图像显示大部分锆石发光较强,发育清晰的振荡环 带,明显为岩浆锆石成因(图4a).本文共进行30点 锆石U-Pb年代学分析,其中16个锆石分析点年龄 不谐和,2个分析点²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄分别为429± 7 Ma和414±6 Ma,应为锆石受后期热事件影响的 结果,12个锆石分析点谐和度较高且年龄较一致, ²⁰⁶Pb/²³⁸U加权平均年龄为441±4 Ma(图5a、5b),该 年龄代表该黑云母二长花岗岩的结晶年龄.

含角闪石二长花岗岩(PM011-1-1,采样坐标为96°31′22″N,41°57′25″E)的锆石大部分为半 自形-自形短柱状或长柱状,长度集中于100~ 150 μ m,CL图像显示锆石同样发育明显的岩浆成因的振荡环带(图4b).本文共进行30点 锆石U-Pb年代学分析,其中10个锆石分析点 年龄不谐和,1个分析点²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb年龄为 2461±25 Ma,应为捕获锆石的年龄,19个锆 石分析点谐和度较高且年龄较一致,其²⁰⁶Pb/ ²³⁸U加权平均年龄为425±2 Ma(图5c、5d),该 年龄代表该含角闪石二长花岗岩的结晶年龄.

3.2 锆石 Lu-Hf 同位素分析

本文对以上锆石 U-Pb 年代学分析点进行原 位锆石 Lu-Hf 同位素分析,其中黑云母二长花岗 岩分析点数 12个,初始¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 比值为 0.282 334~0.282 711,相应的 $\epsilon_{\rm Hf}(t)$ 值除一个点 为-5.9外,其余聚集于 0~+7.6,两阶段 Hf 模式 年龄($T_{\rm DM2}$)范围集中于 0.94~1.42 Ga(一个点为 1.79 Ga).含角闪石二长花岗岩锆石 Lu-Hf 同位素 分析点数 19个,初始¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 比值为 0.282 504~ 0.282 646,相应的 $\epsilon_{\rm Hf}(t)$ 值为-0.1~+4.8,两阶段 Hf 模式年龄($T_{\rm DM2}$)范围为 1.1~1.42 Ga.

3.3 全岩地球化学分析

本文对黑云母二长花岗岩和含角闪石二长花 岗岩进行全岩地球化学分析,相关数据分析均采用 扣除烧失量后的数据.其中黑云母二长花岗岩的 SiO₂含量为71.45%~72.09%,全碱含量为6.68%~ 7.14%,在TAS投图上落入亚碱性的花岗岩区域 (图 6a),其里特曼指数6=1.53~1.78,为钙碱性, K₂O/Na₂O比值为0.62~0.72,相对富钠.A/CNK比 值为1.06~1.14,为过铝质(图 6b).在SiO₂-(Na₂O+ K₂O-CaO)图解上,表现为钙性-钙碱性的特点(图 6c);



Fig.4 CL images of representative zircons from biotite monzogranite (a) and hornblende monzogranite (b)



图 5 黑云母二长花岗岩和含角闪石二长花岗岩的锆石 U-Pb 年龄谐和图和加权平均年龄

Fig.5 Zircon U-Pb concordia diagrams and weighted average ages of biotite monzogranite and hornblende monzogranite



 $\label{eq:Fig.6} Fig.6 \quad Classification diagrams of the biotite monzogranite and hornblende monzogranite a.TAS \ensuremath{\mathbb{B}}\xspace{\ensuremath{\mathbb{B}}\xspace{\ensuremath{\mathbb{C}}\xspace{\ensuremath{\mathbb{R}}\xspace{\ensuremath{\mathbb{C}}\xspace{\ensuremath{\mathbb{C}}\xspace{\ensuremath{\mathbb{C}}\xspace{\ensuremath{\mathbb{C}}\xspace{\ensuremath{\mathbb{C}}\xspace{\ensuremath{\mathbb{C}}\xspace{\ensuremath{\mathbb{C}}\xspace{\ensuremath{\mathbb{C}}\xspace{\ensuremath{\mathbb{C}}\xspace{\ensuremath{\mathbb{C}}\xspace{\ensuremath{\mathbb{C}}\xspace{\ensuremath{\mathbb{C}}\xspace{\ensuremath{\mathbb{C}}\xspace{\ensuremath{\mathbb{C}}\xspace{\ensurem$





球粒陨石标准值引自 Taylor and McLennan(1985);原始地幔标准值引自 Sun and McDonough(1989)

在 SiO₂-FeO^T/(FeO^T+MgO)图解上,其显示镁质 花岗岩的特征,且所有的点都落入科迪勒拉花岗 岩岩基的地球化学区域(图 6d).计算的锆石饱和 温度为 747~758 \mathbb{C} .总稀土含量较低(91.29× 10^{-6} ~104.74×10⁻⁶),其(La/Yb)_N=9.13~10.18, (La/Sm)_N=3.30~3.77,在球粒陨石标准化的 REE 分布模式图解上,显示明显的轻稀土富集的 右倾曲线型式和弱的 Eu负异常(Eu/Eu*=0.74~ 0.82;图 7a).在原始地幔标准化的微量元素蜘蛛 图解上,显示明显的 Ba、Nb、Ta、La、Ce、Sr、P和 Ti的负异常,Rb、Th和 Pb的正异常(图 7b).

含角闪石二长花岗岩SiO2含量为75.50%~ 76.21%, 全碱含量为8.16%~8.76%, 在TAS投 图上落入亚碱性的花岗岩区域(图 6a),其里特 曼指数 6=2.03~2.36,为钙碱性,K₂O/Na₂O比 值为 0.72~0.96, 相对 富钠 .A/CNK 比值为 0.86~ 0.97,为准铝质(图 6b).在 SiO₂-(Na₂O+K₂O-CaO)图解上,表现为钙碱性的特点(图 6c);在 SiO₂-FeO^T/(FeO^T+MgO)图解上,其显示镁质 花岗岩的特征,且所有的点都落入科迪勒拉花 岗岩岩基的地球化学区域(图 6d).计算的锆石 饱和温度是 731~744 ℃. 总稀土含量很低 $(21.15{\times}10^{-6}{\sim}53.48{\times}10^{-6})$, 其 (La/Yb) $_{\rm N}{=}$ 6.04~8.93, (La/Sm)_N=3.89~4.47, 在球粒陨石 标准化的 REE 分布模式图解上,显示明显的轻 稀土富集的右倾曲线型式和 Eu 的负异常(Eu/ Eu*=0.63~0.98;图7a).在原始地幔标准化的微 量元素蜘蛛图解上,显示明显的Nb、Ta、La、 Ce、Sr、P和Ti的负异常, Pb的正异常(图7b).

4 讨论

4.1 岩石成因与起源

花岗岩是大陆地壳的重要组成部分,其成因依 据岩浆源区的不同,一般分为I型、S型和A型.典型 的I型、S型和A型花岗岩,分别以含角闪石、革青石 (或白云母)和碱性暗色矿物为特征.本文的黑云母 二长花岗岩和含角闪石二长花岗岩的地球化学特 征显示 Ga/A1×10⁴ 值分别为 2.10~2.19 和 1.52~ 1.61,主体上小于A型花岗岩,在10⁴Ga/Al-Nb图上 都落入M型、I型、S型花岗岩的区域(图8a).它们的 Zr+Nb+Ce+Y 值分别为 163.2×10⁻⁶~176.3× 10^{-6} 和 $120.25 \times 10^{-6} \sim 146.97 \times 10^{-6}$,在 Zr+Nb+ Ce+Y-FeO^T/MgO图上也落入M型、I型、S型花 岗岩的区域(图 8b).含角闪石二长花岗岩样品的 A/CNK 比值为 0.86~0.97, 具有准铝质的特征; 其 Na₂O/K₂O 比 值 为 1.05~1.40, CaO/FeO^T 比 值 为 0.94~2.27, 且 在 K₂O-Na₂O 和 FeO^T-CaO 图 解 上均落入I型花岗岩的区域(图9),另外出现标志性 矿物角闪石,进一步确认其为I型花岗岩.黑云母二 长花岗岩样品 Na₂O/K₂O 比值为 1.40~1.62, CaO/ FeO^T比值为1.09~1.49,在K₂O-Na₂O和FeO^T-CaO 图解上也都落入I型花岗岩的区域(图9).因此,我 们认为本文研究的早-中志留世花岗岩均为I 型花岗岩,起源于火成岩源区的部分熔融.

本文的早-中志留世花岗岩 Nb/Ta 值为 8.03~ 12.75,平均值为 10.23,明显低于幔源岩石(~17.5) 而接近陆壳岩石(~11);Zr/Hf 值为 27~33,平均值 为 31,也同样低于幔源岩石(~36.27)而接近陆壳岩 石(~33)(Green, 1995).它们的锆石两阶段 Hf模式





Fig.8 10 000Ga/Al-Nb diagram (a) and Zr+Nb+Ce+Y-FeO^T/MgO diagram (b) of the biotite monzogranite and hornblende monzogranite



Fig.9 K_2O-Na_2O (a) and FeO^T-CaO (b) diagrams for genetic types of the biotite monzogranite and hornblende monzogranite

年龄(T_{DM2})集中于1.42~0.94 Ga,其最大模式年龄 1.42 Ga与北山造山带南部发育1450~1401 Ma的 花岗质岩浆活动年龄一致,且锆石Hf-O同位素研究 表明中元古代是北山陆块主要的新生地壳形成时 期(He et al., 2018; Yuan et al., 2019). 在北山造山 带中北部虽一直未发现中元古代的古侵入体,然而 在马鬃山地体的前寒武纪浅变质碎屑岩中均显示~ 1.4 Ga的锆石年龄峰值(Song et al., 2013c;余吉远 等,2018),且北部的旱山地体与南部的石板山和双 鹰山地体均发育~0.9 Ga的片麻状花岗岩(Yuan et al., 2015;牛文超等, 2019),作者也在马鬃山地 体的北缘识别出~780 Ma的片麻状花岗岩(作者 未发表数据).因此本文认为北山造山带具有统一 的前寒武纪基底,且早-中志留世花岗质岩浆可能 起源于中元古代(~1.4 Ga)地壳的部分熔融,锆石 Hf同位素组成较大的变化范围,以及具有高于北 山地壳基底演化区域的 $\epsilon_{\rm HI}(t)$ 值,说明有幔源物质 的参与(图10).另外结合马鬃山地体中已有的早



Fig.10 Zircon ε_{Hf}(t)-age evolution diagram
 北山南部中元古代侵入岩和北山地壳基底演化区域引自 He et al.
 (2018)

古生代花岗岩的 Hf 同位素研究(Song *et al.*, 2013a; Yuan *et al.*, 2018),反映了马鬃山地体早古 生代的岩浆活动以元古代地壳再循环为特征.

4.2 构造意义

北山造山带为典型的增生型造山带,其在古 生代经历了长期的俯冲增生过程和新生地壳生长 (Jahn et al., 2004; Xiao et al., 2010; Song et al., 2015).早期基于区调资料多认为马鬃山地体中的 强变形花岗岩为前寒武纪,近些年陆续的研究发 现一部分应形成于早古生代(Song et al., 2013a, 2013b),本文研究也获得了早一中志留世的花岗岩 年龄.该期岩浆活动在马鬃山地体中十分发育,如 牛圈子地区骆驼圈西429±4 Ma的英云闪长岩 (Yu et al., 2016);马鬃山镇附近白头山435± 2 Ma的石英闪长岩和421±2 Ma的石英二长岩, 野马街附近434±6 Ma的花岗闪长岩(Zheng et al., 2018);勒巴泉一带442±2 Ma的闪长岩和 433±2 Ma的斑状花岗岩,草呼勒哈德420± 3 Ma的片麻状闪长岩(Song et al., 2015)等.

早-中志留世花岗岩的地球化学特征显示,它 们具有相似的锆石饱和温度(分别为747~758℃ 和 731~744 ℃) 以及熔融压力((Ho/Yb) 分别为 1.01~1.12 和 0.93~1.03) (Martin et al., 2005),显 示它们可能具有相似的形成环境,且它们有类似 于科迪勒拉弧花岗岩岩基的主量元素组成(图 6c, 6d),在原始地幔标准化的微量元素蜘蛛图解 上,显示大离子亲石元素富集,高场强元素(Nb、 Ta)亏损的弧花岗岩的特征(图7b),在Y+Nb-Rb 构造环境判别图解上马鬃山地体的志留纪花岗 岩也都落入火山弧花岗岩的区域(图11),该时 期的中酸性侵入岩也多具有埃达克岩的特征 (Yu et al., 2016;余吉远等, 2017; Zheng et al., 2018),结合本研究花岗岩的中元古代源区特 征,以及马鬃山地块存在中-新元古代浅变质碎 屑岩和新元古代侵入岩,因此认为本研究的早-中志留世花岗岩形成于大陆弧的构造环境.

马鬃山地体早古生代俯冲相关的岩浆作用一 直有关于牛圈子洋的北向俯冲、石板井洋的南向俯 冲和红石山洋的南向俯冲的争议(Xiao et al., 2010;He et al., 2018;辛后田等,2020).然而红柳河 -牛圈子-洗肠井蛇绿岩两侧寒武系双鹰山组(南侧 大豁落山和北侧破城山地区)具有相同的三叶虫化 石组合及沉积建造特征,奥陶系地层结构和物质组 成也具有可比性,因此其应代表寒武纪-奥陶纪的 弧后盆地.而柳园地区的古堡泉榴辉岩(~466 Ma) 以及敦煌地块中的蘑菇台麻粒岩(440~430 Ma)指





示了古亚洲洋南侧分支的关闭(Zong et al., 2012; Saktura et al., 2017).北侧的石板井-小黄山蛇绿岩 多认为形成于裂谷拉伸的环境(辛后田等, 2020), 红石山蛇绿岩代表有限洋盆还是主洋盆尚存在较 大争议(He et al., 2018;辛后田等, 2020),但是北山 造山带中部地区构造变形特征(包括断层面、褶皱 轴面和褶劈理等)指示主要受南向倾向的俯冲带的 影响(Tian et al., 2014),因此仍能够指示本文的 早-中志留世花岗岩相关于北山造山带北侧主大洋 (红石山洋或更北侧的大洋)的南向俯冲.

马鬃山地体不仅志留纪岩浆活动比较活跃, 早古生代其他时期及晚古生代泥盆纪-早石炭世 的花岗质岩浆活动也同样发育(Song et al., 2013a, 2013b, 2015; Yuan et al., 2018; Zheng et al., 2018;李敏等, 2020), 总体上俯冲相关的花 岗岩的时代介于~526 Ma 和~349 Ma 之间(表 1).其北侧旱山地体发育的俯冲相关的花岗质岩 浆活动时代主要分布于约464~281 Ma之间(表 1),整体上相对于马鬃山地体的花岗质岩浆活动 年轻,且石炭纪-早二叠世岩浆活动相对变得更 活跃(图12).可见侵入岩时空分布上自马鬃山地 体至北,侵入岩有逐渐变年轻的趋势,反映随时 间向北山造山带北侧(旱山地体)迁移的岩浆记 录,因此北山造山带北侧洋盆向南俯冲过程中 俯冲板片发生过向北后撤.根据马鬃山和旱山 地体花岗岩时空分布特征推测板片后撤时限可 能为早石炭世,而且它们之间的石板井-小黄 山蛇绿岩形成于早石炭世(Zheng et al., 2013), 可能代表大陆弧内伸展裂解的产物(图13).

表1 北山造山带中北部花岗岩类锆石 U-Pb 年龄统计

 Table 1
 Zircon U-Pb ages of the granitoids in northern and central Beishan orogenic collage

序号	岩性	年龄(Ma)	位置	引用文献
马鬃山地体				
1	黑云母二长花岗岩	372 ± 3	牛圈子	计波等(2017)
2	石英闪长岩	435.8 ± 5	白圪塔北山	李小菲(2013)
3	二长花岗岩	435 ± 2.8	白圪塔北山	李小菲(2013)
4	花岗闪长岩	430.5 ± 2.9	白圪塔北山	李小菲(2013)
5	石英闪长岩	363.7 ± 3.7	马鬃山	李小菲(2013)
6	花岗闪长岩	365.6 ± 6.6	马鬃山	李小菲(2013)
7	花岗片麻岩	471.1 ± 7.7	马鬃山	Song et al.(2013a)
8	糜棱岩化花岗岩	447.6 ± 4.4	马鬃山	Song et al.(2013a)
9	眼球状花岗片麻岩	498.7 ± 6.1	马鬃山	Song et al.(2013a)
10	糜棱岩化花岗岩	473.7 ± 9.5	马鬃山	Song et al.(2013a)
11	花岗片麻岩	525.7 ± 6.1	草呼勒哈德	Song et al.(2013b)
12	糜棱岩化花岗岩	409.5 ± 5.2	草呼勒哈德	Song et al.(2013b)
13	花岗岩	348.5 ± 4.6	石板井南	Song et al.(2013b)
14	正片麻岩	397 ± 3	双井子	Song et al.(2015)
15	辉石闪长岩	442 ± 2	勒巴泉	Song et al.(2015)
16	斑状花岗岩	433 ± 2	勒巴泉	Song et al.(2015)
17	糜棱岩化花岗岩	398 ± 3	勒巴泉	Song et al.(2015)
18	花岗片麻岩	464 ± 2	勒巴泉	Song et al.(2015)
19	糜棱岩化花岗岩	401 ± 4	勒巴泉	Song et al.(2015)
20	片麻状闪长岩	420 ± 3	草呼勒哈德	Song et al.(2015)
21	花岗闪长岩	363.4 ± 2.9	尖山	王鑫玉等(2018)
22	花岗岩	362.6 ± 3	石板井南	王鑫玉等(2018)
23	白云母花岗岩	409.4 ± 2.7	白头山	Wang et al.(2018)
24	白云母花岗岩	395 ± 4.2	白头山	Wang et al.(2018)
25	二云母花岗岩	408.5 ± 3.1	哈尔根	Wang et al.(2018)
26	石英闪长岩	464 ± 2	石板井南	修迪等(2018)
27	糜棱岩化花岗岩	446 ± 3	红柳峡南	Yuan <i>et al.</i> (2018)
28	糜棱岩化花岗岩	444 ± 3	红柳峡南	Yuan <i>et al.</i> (2018)
29	糜棱岩化花岗岩	443 ± 2	红柳峡南	Yuan et al.(2018)
30	糜棱岩化花岗岩	434 ± 3	红柳峡南	Yuan et al.(2018)
31	糜棱岩化花岗岩	430 ± 2	红柳峡南	Yuan et al.(2018)
32	二长花岗岩	402.2 ± 3	公婆泉	郑荣国等(2012)
33	石英闪长岩	435 ± 1	白头山	Zheng et al.(2018)
34	石英二长岩	421 ± 2	白头山	Zheng et al.(2018)
35	花岗岩	401 ± 2	白头山	Zheng et al.(2018)
36	淡色花岗岩	402 ± 1	公婆泉	Zheng et al.(2018)
37	花岗闪长岩	$434\!\pm\!6$	巴勒根台	Zheng et al.(2018)
早山地体				
1	花岗片麻岩	$423\!\pm\!4$	梧桐井	刘雪敏等(2010)
2	花岗片麻岩	300 ± 6	红石山南	Song et al.(2013a)
3	花岗岩	450.4 ± 3.5	石板井北	Song et al.(2013b)
4	糜棱岩化正片麻岩	456.8 ± 5.3	石板井北	Song et al.(2013b)
5	混合岩化片麻岩	$452\!\pm\!11$	石板井北	Song et al.(2013b)
6	糜棱岩化花岗岩	$445\!\pm\!2$	石板井北	Yuan et al.(2018)
7	糜棱岩化花岗岩	$464\!\pm\!1$	石板井北	Yuan et al.(2018)
8	糜棱岩化花岗岩	$455\!\pm\!2$	石板井北	Yuan et al.(2018)
9	糜棱岩化花岗岩	$433\!\pm\!2$	石板井北	Yuan et al.(2018)
10	闪长岩	450 ± 2	石板井北	Yuan et al.(2018)
11	糜棱岩化花岗岩	$439\!\pm\!17$	石板井北	Yuan et al.(2018)
12	石英二长岩	$428\!\pm\!2$	石板井北	Yuan et al.(2018)
13	花岗闪长岩	330 ± 2	双井子	Yuan <i>et al.</i> (2018)
14	闪长玢岩	325 ± 1	双井子	Yuan et al.(2018)
15	石英闪长岩	$281\!\pm\!1$	双井子	Yuan et al.(2018)
16	石英闪长岩	$287\pm\!1$	双井子	Yuan et al.(2018)
17	埃达克质花岗岩	356 ± 2	东七一山	Zhang et al.(2012)
18	花岗闪长岩	284.9 ± 1.5	双井子	郑荣国等(2016)
19	花岗岩	327.6 ± 1.6	双井子	郑荣国等(2016)
20	石英闪长岩	328 ± 2	明水	Zhang et al.(2017)
21	花岗岩	359 ± 4	东七一山	杨岳清等(2013)







图 13 北山造山带北缘古生代构造演化模式简图 Fig.13 Schematic model illustrating the Paleozoic tectonic evolution of the northern Beishan orogenic collage 据 He *et al.*(2018)修改

5 结论

(1)本文对北山造山带马鬃山地体野马大 泉地区具变形特征的黑云母二长花岗岩和含 角闪石二长花岗岩进行LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学分析,分别获得了441±4 Ma和425± 2 Ma的结晶年龄,为早-中志留世.

(2)野马大泉地区早中志留世花岗岩具有 I型 花岗岩的特征,可能起源于中元古代(~1.4 Ga)地

壳的部分熔融,并伴有幔源岩浆的参与.

(3)野马大泉地区的早中志留世花岗岩形 成于大陆弧的构造环境,马鬃山地体和旱山地 体古生代花岗岩的时空分布规律暗示了俯冲 带在早石炭世发生了北向后撤.

致谢:感谢两位审稿人提出的宝贵意见!

References

- Green, T.H., 1995. Significance of Nb/Ta as an Indicator of Geochemical Processes in the Crust Mantle System. *Chemical Geology*, 120: 347-359. https://doi.org/ 10.1016/0009-2541(94)00145-X
- He, Z.Y., Klemd, R., Yan, L.L., et al., 2018. The Origin and Crustal Evolution of Microcontinents in the Beishan Orogen of the Southern Central Asian Orogenic Belt. *Earth - Science Reviews*, 185: 1–14. https://doi.org/ 10.1016/j.earscirev.2018.05.012
- Jahn, B.M., Windley, B., Natal'in, B., et al., 2004. Phanerozoic Continental Growth in Central Asia. *Journal of* Asian Earth Sciences, 23: 599-603. https://doi.org/ 10.1016/S1367-9120(03)00124-X
- Ji, B., Yu, J.Y., Guo, L., et al., 2017. Geochemistry Characteristics and Tectonic Significance of the Haerteerdele Granite Mass in Middle Devonian in Beishan, Gansu. *Journal of Geomechanics*, 23(3): 358-368 (in Chinese with English abstract).
- Li, M., Xin, H. T., Tian, J., et al., 2020. Composition, Age and Polarity of Gongpoquan Arc and Its Tectonic Significance in Beishan Orogen. *Earth Science*, 45(7): 2393-2412 (in Chinese with English abstract).
- Li, X.F., 2013. Formation Age, Geochemical Characteristics of the Paleozoic Granites in the Mazongshan Area of Beishan and Its Geological Significance (Dissertation). Northwest University, Xi' an (in Chinese with English abstract).
- Liu, X.M., Chen, Y.L., Li, D.P., et al., 2010. The U-Pb Ages and Hf Isotopes of Zircons in the Metadiabase and Gneissic Granite, Beishan Orogenic Belt, Inner Mongolia, China and Its Significance. *Geological Bulletin of China*, 29(4): 518-529 (in Chinese with English abstract).
- Martin, H.R.H., Smithies, R., Rapp, J.F., et al., 2005. An Overview of Adakite, Tonalite-Trondhjemite-Granodiorite (TTG), and Sanukitoid: Relationships and Some Implications for Crustal Evolution. *Lithos*, 79: 1–24. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2004.04.048
- Niu, W.C., Ren, B.F., Ren, Y.W., et al., 2019. Neopro-

terozoic Magmatic Records in the North Beishan Orogenic Belt: Evidence of the Gneissic Granites from the Hazhu Area, Inner Mongolia. *Earth Science*, 44(1): 284-297 (in Chinese with English abstract).

- Saktura, W.M., Buckman, S., Nutman, A.P., et al., 2017. Continental Origin of the Gubaoquan Eclogite and Implications for Evolution of the Beishan Orogen, Central Asian Orogenic Belt, NW China. *Lithos*, 294–295: 20–38. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2017.10.004
- Shi, Y.R., Zhang, W., Kröner, A., et al., 2018. Cambrian Ophiolite Complexes in the Beishan Area, China, Southern Margin of the Central Asian Orogenic Belt. *Journal of Asian Earth Sciences*, 153: 193-205. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2017.05.021
- Song, D.F., Xiao, W.J., Han, C.M., et al., 2013a. Geochronological and Geochemical Study of Gneiss-Schist Complexes and Associated Granitoids, Beishan Orogen, Southern Altaids. *International Geology Review*, 55(14): 1705-1727. https://doi. org/10.1080/ 00206814.2013.792515
- Song, D.F., Xiao, W.J., Han, C.M., et al., 2013b. 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., Han, C.M., et al., 2013c. Provenance of Metasedimentary Rocks from the Beishan Orogenic Collage, Southern Altaids: Constraints from Detrital Zircon U-Pb and Hf Isotopic Data. *Gondwana Research*, 24: 1127-1151. https://doi. org/10.1016/j. gr.2013.02.002
- Song, D.F., Xiao, W.J., Windley, B.F., et al., 2015. A Paleozoic Japan-Type Subduction-Accretion 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
- Song, D.F., Xiao, W.J., Windley, B.F., et al. 2016. Metamorphic Complexes in Accretionary Orogens: Insights from the Beishan Collage, Southern Central Asian Orogenic Belt. *Tectonophysics*, 688: 135–147. https://doi. org/10.1016/j.tecto.2016.09.012
- Sun, S.S., McDonough, W.F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Source Processes. *Geological Society*, *London, Special Publications*, 42: 313-345. https:// doi.org/10.1144/gsl.sp.1989.042.01.19

Taylor, S. R., McLennan, S. M., 1985. The Continental

Crust: Its Composition and Evolution. Blackwell, London.

- Tian, Z.H., Xiao, W.J., Windley, B.F., et al., 2014. Structure, Age, and Tectonic Development of the Huoshishan - Niujuanzi Ophiolitic Mélange, Beishan, Southernmost Altaids. *Gondwana Research*, 25: 820– 841. https://doi.org/10.1016/j.gr.2013.05.006
- Wang, X.Y., Yuan, C., Long, X.P., et al., 2018. Geochronological, Geochemical, and Geological Significance of Jianshan and Shibanjing Granites in the Gongpoquan Arc, Beishan Orogenic Belt. *Geochimica*, 47(1): 63-78 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X.Y., Yuan, C., Zhang, Y.Y., et al., 2018. S-Type Granite from the Gongpoquan Arc in the Beishan Orogenic Collage, Southern Altaids: Implications for the Tectonic Transition. *Journal of Asian Earth Sciences*, 153: 206-222. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2017.07.037
- 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: 1553-1594. https://doi.org/10.2475/10.2010.12
- Xiao, W.J., Windley, B.F., Han, C.M., et al., 2018. Late Paleozoic to Early Triassic Multiple Roll-back and Oroclinal Bending of the Mongolia Collage in Central Asia. *Earth-Science Reviews*, 186: 94–128. https://doi.org/ 10.1016/j.earscirev.2017.09.020
- Xin, H. T., Niu, W. C., Tian, J., et al., 2020. Spatio Temporal Structure of Beishan Orogenic Belt and Evolution of Paleo-Asian Ocean, Inner Mongolia. *Geological Bulletin of China*, 39(9): 1297–1316 (in Chinese with English abstract).
- Xiu, D., Chen, C., Zhuan, S.P., et al., 2018. Zircon U-Pb Age and Petrogenesis of Tonalite-Quartz Diorite in the Shibanjing Area, Central Beishan Orogenic Belt, and Its Constraint on Subduction of the Ancient Oceanic Basin. *Geological Bulletin of China*, 37(6): 975-986 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Y.Q., Lü, B., Meng, G.X., et al., 2013. Geochemistry, SHRIMP Zircon U-Pb Dating and Formation Environment of Dongqiyishan Granite, Inner Mongolia. *Acta Geoscientica Sinica*, 34(2): 163-175 (in Chinese with English abstract).
- Yu, J.Y., Guo, L., Li, J.X., et al., 2016. The Petrogenesis of Sodic Granites in the Niujuanzi Area and Constraints on the Paleozoic Tectonic Evolution of the Beishan Region, NW China. *Lithos*, 256-257: 250-268. https:// doi.org/10.1016/j.lithos.2016.04.003
- Yu, J.Y., Ji, B., Guo, L., 2017. The Petrogenesis and Tectonic Significances of Silurian West-Luotuojuan Rocks

from Beishan Niujuanzi Area in Gansu Province, NW China. *Journal of Geomechanics*, 23(2): 253-263 (in Chinese with English abstract).

- Yu, J.Y., Ji, B., Guo, L., et al., 2018. Geological Characteristics and Age Determination of the Palaeoproterozoic Gudongjing Group Complex in the Beishan Mountain, Gansu Province. *Geological Bulletin of China*, 37(4): 704-715 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, Y., Zong, K.Q., Cawood, P.A., et al., 2019. Implication of Mesoproterozoic (~1.4 Ga) Magmatism within Microcontinents along the Southern Central Asian Orogenic Belt. *Precambrian Research*, 327: 314-326. https://doi.org/10.1016/j.precamres.2019.03.014
- 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
- Yuan, Y., Zong, K.Q., He, Z.Y., et al., 2018. Geochemical Evidence for Paleozoic Crustal Growth and Tectonic Conversion in the Northern Beishan Orogenic Belt, Southern Central Asian Orogenic Belt. *Lithos*, 302– 303: 189–202. doi: 10.1016/j.lithos.2017.12.026
- Zhang, W., Pease, V., Meng, Q. P., et al., 2017. Age and Petrogenesis of Mingshui - Shuangjingzi Granites from the Northern Beishan Area, Northwest China, and Their Implications for Tectonic Evolution. *Geosciences Journal*, 21(5): 667-682. https://doi. org/10.1007/ s12303-017-0017-5
- Zhang, W., Pease, V., Wu, T.R., et al., 2012. Discovery of an Adakite-Like Pluton near Dongqiyishan (Beishan, NW China)—Its Age and Tectonic Significance. *Lithos*, 142—143: 148—160. https://doi. org/10.1016/j. lithos.2012.02.021
- Zheng, R.G., Li, J.Y., Zhang, J., et al., 2020. Permian Oceanic Slab Subduction in the Southmost of Central Asian Orogenic Belt: Evidence from Adakite and High-Mg Diorite in the Southern Beishan. *Lithos*, 358–359: 1–17. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2020.105406
- Zheng, R.G., Wu, T.R., Xiao, W.J., et al., 2016. Geochronology, Geochemistry and Tectonic Implications of the Shuangjizi Composite Pluton in the Northern Beishan. *Acta Geologica Sinica*, 90(11): 3153-3172 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, R.G., Wu, T.R., Zhang, W., et al., 2012. Early Devonian Tectono - Magmatic Events in the Middle Beishan, Gansu Province: Evidence from Chronology

and Geochemistry of Gongpoquan Granite. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 48(4): 603-616 (in Chinese with English abstract).

- Zheng, R.G., Wu, T.R., Zhang, W., et al., 2013. Late Paleozoic Subduction System in the Southern Central Asian Orogenic Belt: Evidences from Geochronology and Geochemistry of the Xiaohuangshan Ophiolite in the Beishan Orogenic Belt. Journal of Asian Earth Sciences, 62: 463-475. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2012.10.033
- Zheng, R.G., Xiao, W.J., Li, J.Y., et al., 2018. A Silurian-Early Devonian Slab Window in the Southern Central Asian Orogenic Belt: Evidence from High-Mg Diorites, Adakites and Granitoids in the Western Central Beishan Region, NW China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 153: 75-99. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2016.12.008
- Zong, K.Q., Zhang, Z.M., He, Z.Y., et al., 2012. Early Palaeozoic High - Pressure Granulites from the Dunhuang Block, Northeastern Tarim Craton: Constraints on Continental Collision in the Southern Central Asian Orogenic Belt. *Journal of Metamorphic Geology*, 30: 753– 768. https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.2012.00997.x

附中文参考文献

- 计波,余吉远,郭琳,等,2017.甘肃北山中泥盆世哈尔特尔 德勒花岗岩体的地球化学特征及其构造意义.地质力 学学报,23(3):358-368.
- 李敏,辛后田,田健,等,2020.北山造山带公婆泉岩浆弧的 组成、时代及其大地构造意义.地球科学,45(7): 2393-2412.
- 李小菲, 2013. 北山马鬃山地区古生代花岗岩形成年龄、

地球化学特征及其地质意义(硕士学位论文).西安: 西北大学.

- 刘雪敏,陈岳龙,李大鹏,等,2010.内蒙古北山造山带变辉 绿岩和片麻状花岗岩锆石 U-Pb 年龄、Hf同位素组成及 地质意义.地质通报,29(4):518-529.
- 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.
- 王鑫玉,袁超,龙晓平,等,2018.北山造山带尖山和石板井 花岗岩年代学、地球化学研究及其地质意义.地球化 学,47(1):63-78.
- 辛后田,牛文超,田健,等,2020.内蒙古北山造山带时空结 构与古亚洲洋演化.地质通报,39(9):1297-1316.
- 修迪, 陈超, 专少鹏, 等. 2018. 北山石板井地区英云闪长 岩-石英闪长岩体锆石 U-Pb 年龄、成因及对古洋盆俯 冲作用时限的制约. 地质通报, 37(6): 975-986.
- 杨岳清,吕博,孟贵祥,等,2013.内蒙古东七一山花岗岩地 球化学、锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及岩体形成环境探 讨.地球学报,34(2):163-175.
- 余吉远, 计波, 郭琳, 2017. 甘肃北山牛圈子地区志留纪骆 驼圈西岩体的岩石成因及构造意义. 地质力学学报, 23(2): 253-263.
- 余吉远, 计波, 过磊, 等, 2018. 甘肃北山地区古硐井群地质 特征与时代厘定. 地质通报, 37(4): 704-715.
- 郑荣国,吴泰然,肖文交,等,2016.北山北部双井子复式岩体年代学、地球化学及其大地构造意义.地质学报,90 (11):3153-3172.
- 郑荣国,吴泰然,张文,等,2012.甘肃北山中带早泥盆世的 构造-岩浆作用:来自公婆泉花岗岩体年代学和地球化 学证据.北京大学学报(自然科学版),48(4):603-616.