第 30 卷第 2 期	地 质 与 资 源		Vol. 30 No. 2
2021年4月	GEOLOGY AND RESOURCES		Apr. 2021
	中图分类号:P597;P542	开放科学标志码(OSID):	
DOI: 10.13686/j.cnki.dzyzy.2021.02.001	文献标志码:A		2000

内蒙古北山地区哈日阿玛岛弧花岗岩地球化学、年代学特征及其地质意义

王 慧,张 欢,潘志龙,王 硕,何娇月,张金龙,侯德华,马梦玲,刘亚芳

河北省区域地质调查院,河北廊坊 065000

摘 要:哈日阿玛岛弧花岗岩出露于北山造山带公婆泉岛弧带内,与奥陶纪一志留纪公婆泉组弧火山岩伴生,包含闪长岩、石英闪 长岩、斜长花岗岩、英云闪长岩等.LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年表明闪长岩、英云闪长岩分别就位于 430.9±4.7 Ma 和 452.5± 3.2 Ma,为晚奥陶世一早志留世.岩石地球化学分析结果显示,这些花岗岩属钙碱性、准铝质-弱过铝质 I 型花岗岩.岩石样品 Mg* 值界于 44.58~51.85,Rb/Sr 比值 0.025~0.282,Nb/Ta 比值 0.068~14.01,Zr/Hf 比值 13.05~34.00.稀土元素总量(包含 Y 元素)为 59.87×10⁻⁶~118.56×10⁻⁶,球粒陨石标准化稀土配分曲线均呈现明显的右倾型,轻稀土富集,(La/Yb)_N为 3.11~23.86,Eu 异常不明显. 在微量元素原始地幔标准化图中,富集大离子亲石元素 Rb、Ba、Th、U、K 以及中等不相容元素 Ce、La、Hf,亏损高场强元素 Nb、Ta、 P、Ti,具岛弧花岗岩特征,显示来自地壳的岩浆与来自深部的亏损地幔岩浆混溶.结合其他地质、地球化学证据,认为哈日阿玛花 岗岩形成于岛弧环境,为红柳河-牛圈子-洗肠井古洋盆向北俯冲的结果,并最晚在晚奥陶世晚期已经开始俯冲,该洋盆闭合时限 应晚于早志留世.

关键词:公婆泉岛弧;北山造山带;I型花岗岩;锆石 U-Pb 年龄;地球化学;内蒙古

GEOCHEMISTRY AND GEOCHRONOLOGY OF HARIAMA ISLAND ARC GRANITOIDS IN BEISHAN AREA OF INNER MONGOLIA: Geological Implication

WANG Hui, ZHANG Huan, PAN Zhi-long, WANG Shuo, HE Jiao-yue, ZHANG Jin-long, HOU De-hua, MA Meng-ling, LIU Ya-fang Hebei Institute of Regional Geological Survey, Langfang 065000, Hebei Province, China

Abstract: The Hariama island arc granitoids are outcropped in Gongpoquan island arc belt of Beishan orogenic belt, including diorite, quartz diorite, plagiogranite, tonalite and so on, associated with the arc volcanic rocks of Ordovician-Silurian Gongpoquan Formation. The LA-ICP-MS zircon U-Pb dating results indicate that the diorite $(430.9\pm4.7 \text{ Ma})$ and tonalite $(452.5\pm3.2 \text{ Ma})$ were formed in the Late Ordovician-Early Silurian. The petrogeochemical analysis results show that the granitoids belong to calc-alkaline, quasialuminous-weakly peraluminous I-type, with the Mg[#] value of 44.58-51.85, Rb/Sr ratio of 0.025-0.282, Nb/Ta ratio of 0.068-14.01 and Zr/Hf ratio of 13.05-34.00. The Σ REE+Y is $59.87\times10^{-6}-118.56\times10^{-6}$. The right-dipping chondrite-normalized REE distribution curves reflect the LREE is enriched, with $(La/Yb)_N$ of 3.11-23.86 and unobvious Eu anomaly. The primitive mantle-normalized trace element spidergram reveals the enrichment of LILEs (Rb, Ba, Th, U and K) and medium incompatible elements (Ce, La and Hf), and depletion of HFSEs (Nb, Ta, P and Ti), with the characteristics of island arc granite, indicating the crust magma is

收稿日期:2020-08-13;修回日期:2020-11-18.编辑:张哲.

基金项目:中国地质调查局项目"内蒙古1:5万基东、尖山、蒜井子、三道明水等四幅区域地质矿产调查"(编号12120113056500);"内蒙古1:5万西林 陶勒、梧桐井、石桩子井、石板井幅区域地质矿产调查"(编号12120114064101).

作者简介:王慧(1987一),女,硕士,工程师,从事岩矿鉴定、地球化学测试与分析工作,通信地址河北省廊坊市曙光道 32 号,E-mail//420015843@qq.com 通信作者:张欢(1987一),男,硕士,工程师,从事区域地质矿产调查工作,通信地址河北省廊坊市曙光道 32 号,E-mail//13731610167@139.com

mixed with magma from deep depleted mantle. Combined with other geological and geochemical evidences, it is considered that Hariama granitoids were formed in island arc setting, which is the result of northward subduction of Hongliuhe-Niujuanzi-Xichangjing paleo-ocean basin. The subduction began in the late Late Ordovician at the latest, and the ocean basin should be closed later than the Early Silurian.

Key words: Gongpoquan island arc; Beishan orogenic belt; I-type granite; zircon U-Pb age; geochemistry; Inner Mongolia

0 序言

北山造山带位于甘肃、新疆和内蒙古三省(区)交 界地带,大地构造位处塔里木-华北古板块和西伯利 亚古板块的交汇部位,隶属于中亚造山带南缘,属于 多岛弧、多岛洋的构造体系,自北向南发育有红石山-蓬勃山蛇绿岩带、石板井-小黄山蛇绿岩带、红柳河-牛圈子-白云山-洗肠井蛇绿岩带、辉铜山-帐房山蛇 绿岩带以及一条规模巨大的公婆泉岛弧岛(也称"公 婆泉-东七一山岛弧")[1-7]. 但这些蛇绿岩带的构造属 性一直存在较大的争议,部分学者认为石板井-小黄 山构造带是塔里木板块和哈萨克斯坦板块的分界断 裂[1-3]. 然而近些年来的研究结果显示牛圈子-白云 山-洗肠井蛇绿混杂岩带为塔里木板块和哈萨克斯坦 板块的分界断裂[5-12],并先后阐明其洋壳形成年龄为 527~530 Ma^[10-11],洋壳俯冲则发生于 431~461 Ma^[9-16]. 就公婆泉岛弧而言,已有的资料显示其主要由晚泥盆 世弧花岗岩组成,同时在内部也发现了大量的中奥陶 世一早志留世的弧花岗岩和岛弧火山岩,其构造属性 和形成背景具有较大的争议[14-20]. 有学者认为公婆泉 岛弧是石板井-小黄山蛇绿岩带向南俯冲的结果[18-19], 也有学者认为公婆泉岛弧是牛圈子-白云山-洗肠井 蛇绿混杂岩带向北俯冲的结果[14-17]. 本文依托"内蒙 古1:5万基东、尖山、蒜井子、三道明水等四幅区域地 质矿产调查"以及"内蒙古1:5万西林陶勒、梧桐井、 石桩子井、石板井幅区域地质矿产调查"项目,通过对 哈日阿玛花岗岩开展详细的岩相学、地球化学、锆石 U-Pb 测年研究,结合区域地质资料,探讨其形成时 代、源区特征和构造背景,以期为今后进一步研究公 婆泉岛弧岛的形成与演化提供依据.

1 地质背景

研究区位于内蒙古自治区额济纳旗与甘肃省肃 北县交界地区,石板井-小黄山构造带从研究区北侧

通过,牛圈子-白云山-洗肠井蛇绿混杂岩带位于研究 区东南侧呈"S"型展布. 以石板井-小黄山构造带为 界,北侧隶属于旱山前寒武纪陆块,南侧至牛圈子-白 云山-洗肠井蛇绿混杂岩带之间为公婆泉岩浆弧,主 要由晚奥陶世—早志留世公婆泉组变质火山岩及侵 位于晚奥陶世至晚泥盆世的基性-中性-酸性侵入体 构成. 牛圈子-白云山-洗肠井蛇绿混杂岩带以南为塔 里木板块。5-6],以发育寒武纪—奥陶纪海进序列沉积 地层为特征[21],基底主要由中新元古界稳定浅海沉积 地层构成^[22](图1). 哈日阿玛岛弧花岗岩出露于公婆 泉岩浆弧内,包括闪长岩(以糜棱岩为主)、石英闪长 岩、斜长花岗岩、英云闪长岩,与奥陶纪-志留纪公婆 泉组弧火山岩伴生.其中闪长岩、石英闪长岩和斜长 花岗岩彼此侵入边界多为渐变过渡,英云闪长岩侵位 时代略早,其与斜长花岗岩之间可见略微清晰但并不 截然的边界,总出露面积约14 km².其西北部被下白垩 统赤金堡组陆相沉积覆盖[23],东北部与公婆泉组呈侵 入接触,北部、东部以及南北均被晚泥盆世花岗闪长 岩、英云闪长岩侵入,另外在哈日阿玛岛弧花岗岩内 零星侵入有呈岩株或岩脉状产出的早泥盆世正长花 岗岩.此外,尖山韧性剪切带呈北东向穿过研究区,致 使哈日阿玛岛弧花岗岩以及早泥盆世正长花岗岩发 生不同程度的韧性剪切变形(图 2).

2 岩石学特征

闪长岩(糜棱岩)呈深灰色,岩石具糜棱结构,条 带状构造.岩石内可见多期花岗质细脉,其中浅红色 正长花岗岩脉也发生了韧性剪切变形,局部与闪长岩 发生强烈的构造混染作用(图 3a).闪长质糜棱岩与公 婆泉组接触部位可见大量透镜状、条带状产出的斜长 角闪岩(变质中基性火山岩)捕虏体,与晚泥盆世花岗 闪长岩之间可见清晰且截然的侵入界面(图 3b).偏光 显微镜下,糜棱岩残斑由斜长石和角闪石组成,含量



(据文献[24])

Fig. 1 Geological sketch map of Gongpoquan-Shibanjing in Beishan area

(From Reference [24])

1—中-新生界(Mesozoic-Cenozoic); 2—石炭系(Carboniferous); 3—奥陶系-志留系弧火山岩(Ordovician-Silurian arc volcanic rock); 4—下古生界(Lower Paleozoic); 5—中-新元古界(Meso-Neoproterozoic); 6—古元古界(Paleoproterozoic); 7—三叠纪花岗岩(Triassic granite); 8—晚泥盆世花岗岩(Late Devonian granite); 9—早泥盆世花岗岩(Early Devonian granite); 10—奥陶纪—志留纪花岗岩(Ordovician-Silurian granite); 11—蛇绿岩(ophiolite); 12—脉岩(dike rock); 13—牛圈子-洗肠井蛇绿岩带(Niujuanzi-Xichangjing ophiolite belt); 14—石板井-小黄山构造带(Shibanjing-Xiaohuangshan tectonic belt); 15—断裂(fault); 16—研究区位置(study area)

40%~45%. 斜长石呈近半自形板状、似眼球状等,定向 分布,直径一般 0.3~2 mm,具绢云母化、黝帘石化,少 见聚片双晶;角闪石呈近半自形粒状、似眼球状,定向 排列. 糜棱物包括长石、角闪石、黑云母. 长石主要为 斜长石,已重结晶成微粒状,部分集合体以似条纹状绕 残斑定向分布;角闪石呈半自形柱粒状,集合体以似断 续线痕状、条痕状定向分布,多色性同斑晶;黑云母呈 鳞片状,定向分布,多被绿泥石交代呈假像(图 3d). 副 矿物见不透明矿物、磷灰石、榍石、锆石.

石英闪长岩为灰色一深灰色,细粒花岗结构,局部 似斑状结构,定向构造,有不同程度的糜棱岩化特征. 岩体内见大量正长花岗岩脉侵入,受韧性变形影响石 英闪长岩与闪长岩(糜棱岩)之间界限较为模糊,推测 为渐变接触.偏光显微镜下,岩石由斑晶和基质组成. 斑晶主要由斜长石组成,含量约10%,粒度一般为 1.8~3.1 mm,星散分布.斜长石呈半自形板状,黏土化、 绢云母化,局部可见绿帘石化、绿泥石化,聚片双晶发 育.基质主要由斜长石、石英、黑云母、角闪石组成,粒 度一般为0.1~1.2 mm.斜长石呈半自形板状,蚀变特 征同斑晶,聚片双晶、环带结构发育,杂乱分布;石英呈 他形粒状,粒内具不同程度波状、带状消光,杂乱或填 隙状分布;黑云母呈鳞片-叶片状,多色性明显,局部 可见绿帘石化、绿泥石化、碳酸盐化,部分交代角闪石; 角闪石呈半自形柱状,多色性明显,零星可见绿帘石 化,多见黑云母反应边.副矿物见不透明矿物、磷灰 石、榍石、锆石.

斜长花岗岩呈浅灰色--灰色,花岗结构,定向构 造,局部有不同程度糜棱岩化,见大量正长花岗岩脉



图 2 哈日阿玛花岗岩地质简图



1一下白垩统赤金堡组(Lower Cretaceous Chijinbao fm.); 2—奥陶系-志留系公婆泉组(Ordovician-Silurian Gongpoquan fm.); 3—晚泥盆世英云闪长岩 (Late Devonian tonalite); 4—晚泥盆世花岗闪长岩(Late Devonian granodiorite); 5—早泥盆世花岗岩(Early Devonian granite); 6—早志留世斜长花岗岩(Early Silurian plagiogranite); 7—早志留世石英闪长岩(Early Silurian quartz diorite); 8—早志留世闪长岩((Early Silurian diorite); 9—晚奥陶世英云闪长岩(Late Ordovician tonalite); 10—闪长岩脉(diorite dike); 11—花岗岩脉(granite dike); 12—逆断层(reverse fault); 13—走滑断层(strike-slip fault); 14—韧性剪切带(ductile shear zone); 15—测年样品位置(location of dating sample)

石.斜长花岗岩与石英闪长岩之间为渐变接触. 偏光 显微镜下,岩石由斜长石、石英和黑云母组成. 斜长石 主要呈近半自形板状,少部分呈他形粒状、似眼球状, 粒度 2~3.2 mm,少部分为 0.2~2 mm,杂乱分布,略显 方向性排列,不同程度绢云母化、黝帘石化,有时粒内 嵌布少量石英,少部分可见环带构造,少量可见双晶弯 曲、波状消光现象,少部分可见聚片双晶,双晶纹较细, 主要为更长石;石英呈他形粒状,粒度一般小于 0.1 mm, 少部分 0.1~1.2 mm,集合体以似条纹状、似丝带状绕 长石定向分布,粒间缝合线状、齿状接触,见波状、带状 消光,少部分可见亚颗粒现象;黑云母呈鳞片-叶片 状,片径一般小于 0.8 mm,集合体以似断续线痕状定 向分布,被绿泥石、绿帘石和少量白云母交代呈假像 (图 3e). 副矿物见不透明矿物、磷灰石. 英云闪长岩呈灰色,花岗结构,定向构造,局部有 糜棱岩化特征(图 3c).岩石由斜长石、石英和黑云母 组成.斜长石呈近半自形一半自形板状,粒度一般为 0.05~2.0 mm,少部分为 2.0~3.9 mm,杂乱分布,轻黏土 化,零星可见绢云母化、绿帘石化,多见晶内裂隙,环带 结构、聚片双晶发育,少部分粒内具波状消光;石英呈 他形粒状,粒度一般为 0.2~2.0 mm,少部分为 2.0~ 3.4 mm,部分集合体略显条带状定向分布,部分颗粒 略显定向拉长,亚颗粒发育,动态重结晶较明显,粒内 具不同程度波状、带状消光;黑云母呈鳞片-叶片状, 片径大小一般 0.05~6.3 mm,多色性明显,局部绿泥石 化,零星可见绿帘石化,部分晶体受力弯曲,粒内多具 波状、带状消光,略显定向分布(图 3f).副矿物见不透 明矿物、磷灰石、榍石、锆石.



图 3 哈日阿玛花岗岩野外露头及显微照片

Fig. 3 Field outcrops and microphotographs of Hariama granite

a—闪长质糜棱岩野外特征(dioritic mylonite); b—闪长质糜棱岩与早泥盆世花岗闪长岩接触关系(contact between dioritic mylonite and Early Devonian granodiorite); c—糜棱岩化英云闪长岩野外特征(mylonitized tonalite); d—闪长质糜棱岩镜下特征(dioritic mylonite under microscope); e—糜棱岩化 斜长花岗岩镜下特征(mylonitized plagiogranite under microscope); f—糜棱岩化英云闪长岩镜下特征(mylonitized tonalite under microscope); Q—石英 (quartz); Pl—斜长石(plagioclase); Bi—黑云母(biotite); Hb—角闪石(hornblende)

3 测试方法及测试结果

本次工作共采集了6件新鲜且无明显蚀变的岩石 进行岩石化学分析,包括1件闪长岩、3件斜长花岗 岩、1件石英闪长岩和1件英云闪长岩,其中闪长岩和 英云闪长岩样品同时进行了锆石 U-Pb 测年工作.

全岩的主量元素和微量元素分析在河北省区域地

质调查院实验室完成. 主量元素 SiO₂、TiO₂、Al₂O₃、 Fe₂O₃、MgO、MnO、Na₂O、K₂O、CaO、P₂O₅等采用 X 射线 荧光熔片法完成,分析精度为 0.05%; FeO 采用滴定分 析完成;灼烧减量、H₂O⁺和 H₂O⁻用重量法完成. 微量元 素分析采用 HF+HClO₃+HNO₃溶解样品,王水复溶,在 线加入 Rh 内标溶液,用 Thermofisher X Series II 型 ICP-MS 完成测定. 稀土元素分析精度为 0.1×10⁻⁶,微量元素为 5×10⁻⁶,测试方法详见文献[25].

锆石 U-Pb 测年样品单件重量均大于 10 kg. 锆石 分选和制靶在河北省区域地质调查院实验室完成,采 用常规方法碎样,通过浮选和电磁方法进行分选,在双 目镜下挑选晶型完整、无裂隙和包裹体的锆石颗粒进 行制靶. 对锆石靶打磨抛光后,进行反射光、透射光和 阴极发光显微照相. 根据锆石外观及形态, 挑选测试 靶位.

LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年在中国地质调查局 天津地质调查中心完成.激光剥蚀采样采用单点剥蚀 的方式,数据分析之前用美国国家标准研究院研制的 人工合成硅酸盐玻璃标准参考物质 NIST SRM 610 进 行仪器最佳化.采样方式为单点剥蚀,数据采集选用 1 个质量峰 1 个点的跳峰方式,每完成 8 个测点的样品 测定,加测标样 1 次,观察仪器的状态以保证测试的精 度.详细的实验测试过程可参见文献[26]. 锆石年龄采 用 91500 作为外标标准物质,元素含量采用 NIST SRM 610 作为外标,29Si 作为内标.测试结果应用 GLITTER (ver4.2)软件计算得出,并按照 Andersen 的 方法用 LA-ICP-MS Common Lead Correction (ver3.15) 对其进行了普通铅校正,年龄计算谐和图绘制采用 Isoplot (ver3.0)完成.

3.1 地球化学分析结果

哈日阿玛花岗岩的全岩主量、微量元素分析结果 见表 1、2. 花岗岩 SiO2 含量为 57.52%~69.22%,为中性 岩至酸性岩. 里特曼指数 0.45~0.75, 均值 0.55. TiO2 含 量为 0.34%~0.78%, Al₂O₃ 含量 14.66%~16.90%, Na₂O 含量 2.44%~4.68%. 除去 PM10YQ1 样品(闪长岩)外, 其余5件样品 K20含量为1.24%~1.99%, K20/Na20 值 在 0.26~0.52 之间,平均为 0.43,具富钠、贫钾的特点. 在 TAS 图解(图 4)中,样品位于闪长岩和花岗闪长岩 区,属亚碱性岩系.将其进一步投入SiO₂-K₂O图解(图 5)中,除闪长岩样品(PM10YQ1)位于高钾钙碱性系 列,其余样品均位于钙碱性岩区.另外,6件样品中 A/ NK 值在 1.75~2.18 之间, A/CNK 值在 0.84~1.08 之间, 均值 0.96, 具准铝质-弱过铝质特征 (图 6). 在 K₂O-Na20图解中,斜长花岗岩、石英闪长岩及英云闪长岩 均属于钠质花岗岩,而闪长岩样品(PM10YQ1)则属于 钾质花岗岩(图 7).





图 5 哈日阿玛花岗岩 SiO₂-K₂O 关系图解 (据文献[28]) Fig. 5 The SiO₂-K₂O diagram of Hariama granite

(After Reference [28])

6件样品的稀土配分形式呈现明显的右倾型,稀 土元素总量 ΣREE (包含 Y 元素)为 59.87×10⁻⁶~ 118.56×10⁻⁶; (La/Yb)_N为 3.11~23.86,为轻稀土富集; δEu 变化于 0.88~1.08,均值 0.97,Eu 异常不明显(图 8). 在微量元素原始地幔标准化图中,富集大离子亲 石元素 Rb、Ba、Th、U、K 以及中等不相容元素 Ce、La、 Hf,亏损高场强元素 Nb、Ta、P、Ti(图 9). 需要说明的 是,根据野外观察结果判断,在 SiO₂-K₂O 图解和 K₂O-Na₂O 图解中,闪长岩样品的特殊性可能是韧性剪切变 形过程中混入了早泥盆世正长花岗岩脉成分造成的.











3.2 锆石 U-Pb 年龄

闪长质糜棱岩(样品号 PM10TW1,采样位置 41° 33'26"N,97°45'22"E):锆石多数呈等轴状或短柱状,少 量呈长柱状,半自形—自形,震荡环带发育,边部具轻 微熔蚀特征(图 10a),为岩浆锆石.对晶型较好无裂纹 和包裹体的 23 颗锆石分析了 23 个测点(表 3).Th/U 值在 0.47~1.14 之间,显示岩浆锆石特征.²⁰⁶Pb/²³⁸U 年 龄在 298~510 Ma 之间,其中 4 个偏老的年龄沿谐和 线附近分散分布,可能为继承或捕获锆石年龄.11 个



Fig. 8 Chondrite-normalized REE patterns of Hariama granite (After Reference [31])





Fig. 9 Primitive mantle-normalized trace element spidergram of

Hariama granite (After Reference [32])

年龄值偏小且年龄谐和性差,可能与其放射性铅的丢 失有关.8个谐和性较好的年龄分布于两个相对较为 集中的区间.其中A区间5个数据的加权平均年龄为 430.9±4.7 Ma(*n*=5,MSWD=0.17),可解释为该岩体的 形成年龄;B区间3个数据的加权平均年龄为404.5± 5.3 Ma(*n*=8,MSWD=0.047),可解释为闪长质糜棱岩中 混入的早泥盆世正长花岗岩脉的年龄(图11),该样品 具有较高的 K₂O含量也说明了这一点.

细粒英云闪长岩(样品号 JDTW12,采样位置 41° 35′58″N,97°47′36″E):锆石多数呈等轴状或短柱状,半 自形一自形,震荡环带发育,边部具轻微熔蚀特征(图

Table 1 Contents of major elements in Hariama granite												
	样品 编号	PM10YQ1	PM10YQ2	PM10YQ3	PM10YQ4	PM10YQ5	JDYQ12					
	岩石	闪长质	斜长	斜长	石英	斜长	英云					
	名称	糜棱岩	花岗岩	花岗岩	闪长岩	花岗岩	闪长岩					
	SiO ₂	57.52	69.22	68.35	60.55	69.08	61.99					
	AI_2O_3	14.66	15.87	15.35	16.90	15.53	16.35					
	TiO ₂	0.52	0.34	0.49	0.78	0.40	0.63					
	Fe_2O_3	3.09	0.99	1.37	2.06	1.12	1.83					
	FeO	5.15	1.22	1.75	3.26	1.60	3.31					
	CaO	5.57	3.13	3.51	5.48	3.77	6.00					
	MgO	4.37	0.95	1.45	2.96	1.31	2.98					
	K_2O	3.05	1.24	1.99	1.90	1.57	1.77					
	Na ₂ O	2.44	4.68	4.02	3.80	4.32	3.39					
	MnO	0.14	0.04	0.06	0.10	0.06	0.11					
	P_2O_5	0.11	0.08	0.11	0.16	0.11	0.16					
	$H_2O^{\scriptscriptstyle +}$	2.27	1.27	0.84	1.16	0.45	0.82					
	H_2O^-	0.29	0.25	0.15	0.23	0.18	0.14					
	LOI	3.12	2.13	1.39	1.90	1.00	1.28					
	总和	99.76	99.88	99.86	99.85	99.88	99.80					

表 1 哈日阿玛花岗岩主量元素分析结果 Table 1 Contents of major elements in Hariama granit

测试单位:河北省区域地质调查院实验室.含量单位:%.

10b),为岩浆锆石.对晶形较好的 21 颗锆石分析了 21 个测点(表 4). Th/U 值除 9 号点偏小(0.24),其余在 0.38~0.65 之间,显示岩浆锆石特征.²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄在 353~524 Ma 之间,其中 8 个偏老的年龄沿谐和线分散 分布,可能为继承或捕获锆石年龄;4 个年龄谐和性 差,可能与其放射性铅的丢失有关;比较集中的 8 个数 据的加权平均年龄为 452.5±3.2 Ma (*n*=8,MSWD= 0.41)(图 11b),可解释为该英云闪长岩的形成年龄.

4 讨论

4.1 岩石成因及构造环境

哈日阿玛英云闪长岩的 Mg[#] 值为 51.85,而玄武质 下地壳部分熔融产生的熔体 Mg[#] 不会高于 40,表明有 幔源物质加入^[33-34]; Rb/Sr 比值为 0.039,低于大陆地 壳平均值(0.24),高于上地幔平均值(0.025)^[33-34]; Nb/ Ta 比值为 0.068,低于幔源岩石(17.5±2)^[35-36]; Zr/Hf 比值 16.87,低于大陆地壳值(35.68)和原始地幔值 (37.50)^[35-36],表明很可能受到具有更低 Zr/Hf 值的亏 损地幔楔部分熔融岩浆的影响.以上特征总体指示了 岩浆源区存在幔源成分.

表 2 哈日阿玛花岗岩微量、稀土元素分析结果

Table 2 Contents of trace elements and REEs in

Hariama granite

样品 编号	PM10YQ1	PM10YQ2	PM10YQ3	PM10YQ4	PM10YQ5	JDYQ12
岩石 名称	闪长质 糜棱岩	斜长 花岗岩	斜长 花岗岩	石英 闪长岩	斜长 花岗岩	英云 闪长岩
V	228	31.0	44.3	109	28.3	102
Cr	44.2	7.07	12.4	7.27	7.94	18.2
Co	25.4	4.89	7.42	16.0	5.68	26.2
Ni	11.3	4.17	5.44	1.96	3.89	21.0
Rb	81.3	9.4	20.4	59.6	10.6	18.1
Sr	289	383	409	677	320	462
Zr	55.7	96.4	115	97.9	106	164
Nb	2.48	4.35	6.80	8.65	4.72	0.35
Cs	1.19	0.47	0.66	2.08	0.93	2.05
Ва	1020	282	424	321	204	685
Hf	1.64	3.81	8.83	2.94	6.19	9.73
Та	0.27	0.37	0.72	0.62	0.44	5.15
Pb	7.58	17.6	10.0	14.5	9.07	10.1
Th	4.49	5.83	2.84	4.13	3.42	6.99
U	1.12	0.63	0.70	1.87	0.61	1.84
Y	14.24	5.22	11.97	12.20	9.38	16.66
La	10.10	21.85	6.40	9.89	23.69	18.98
Ce	21.81	37.99	15.01	20.69	42.47	39.18
Pr	2.83	4.21	2.40	2.98	4.90	5.02
Nd	12.48	14.27	11.34	12.74	17.53	20.71
Sm	2.88	2.16	2.94	2.74	2.95	4.47
Eu	0.93	0.76	0.95	1.03	0.95	1.25
Gd	2.83	1.97	2.64	2.72	2.84	3.52
Tb	0.46	0.23	0.42	0.42	0.37	0.55
Dy	2.72	1.11	2.32	2.39	1.78	3.35
Ho	0.55	0.20	0.43	0.45	0.32	0.68
Er	1.75	0.64	1.32	1.38	1.03	1.65
Tm	0.29	0.09	0.21	0.22	0.16	0.33
Yb	1.94	0.60	1.36	1.40	1.16	1.93
Lu	0.24	0.09	0.16	0.19	0.14	0.26
δEu	0.93	1.04	0.97	1.08	0.93	0.88
Sr/Y	20.29	73.29	34.17	55.46	34.11	27.72
(La/Yb)⊾	3.44	23.86	3.11	4.65	13.48	6.49
∑REE+Y	76.04	91.39	59.87	71.46	109.67	118.56
L/H	4.74	16.49	4.41	5.45	11.87	7.30

测试单位:河北省区域地质调查院实验室.单位:10%.







哈日阿玛闪长岩、石英闪长岩及斜长花岗岩的 Mg[#]值介于44.58~50.88,高于玄武质下地壳,显示岩 浆源区具有岩石圈地幔的属性^[33-34]; Rb/Sr 比值0.025~ 0.282,平均0.096,低于大陆地壳平均值(0.24)^[33-34]; Nb/Ta 比值9.06~14.01,平均11.03,接近陆壳岩石(约 11). 同英云闪长岩一样,早志留世闪长岩、石英闪长 岩及斜长花岗岩的Zr/Hf 比值在13.05~34.00之间,平 均24.54,低于大陆地壳值(35.68)和原始地幔值 (37.50)^[35-36],表明很可能受到具有更低Zr/Hf 值的亏 损地幔楔部分熔融岩浆的影响.

因此,笔者认为,哈日阿玛花岗岩是起源较深的亏 损地幔楔部分熔融形成的岩浆与来自地壳的岩浆混合 作用的结果.

哈日阿玛闪长岩-石英闪长岩-英云闪长岩均含 有不等量的角闪石和榍石,与 Barbarin^[37]划分的岛弧 富含角闪石钙碱性花岗岩的矿物组合一致.全岩地球 化学主微量元素分析结果表明哈日阿玛岛弧花岗岩属 于钙碱性 I 型花岗岩,其富集大离子亲石元素 Rb、Ba、 Th、U、K 以及中等不相容元素 Ce、La、Hf,亏损高场强 元素 Nb、Ta、P、Ti,符合岛弧岩浆的基本特征^[38-40].在 Ta-Yb 构造环境判别图解^[41]中,花岗岩样品除 JDQ12 样品落入板内花岗岩区外,其余样品均落入岛弧花岗 岩区(图 12),在 Rb-(Y+Nb)构造环境图解^[42]中,均落 入岛弧花岗岩区(图 13).综上所述,哈日阿玛花岗岩 具有岛弧岩浆岩的特点,形成于板块俯冲的构造环境.

4.2 形成时代与地质意义

LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年表明,闪长岩(糜棱 岩)锆石 U-Pb 年龄为 430.9±4.7 Ma,英云闪长岩的锆 石 U-Pb 年龄为 452.5±3.2 Ma. 野外地质关系显示,石 英闪长岩、斜长花岗岩、闪长岩之间具有渐变的接触关 系,三者的侵位时间应该大致相同,略晚于英云闪长 岩. 总体来说,哈日阿玛岛弧花岗岩形成时代为晚奥 陶世至早志留世.



图 11 哈日阿玛闪长质糜棱岩、英云闪长岩锆石 U-Pb 年龄谐和图 Fig. 11 Zircon U-Pb concordia diagrams of Hariama dioritic mylonite and tonalite

表 3 哈日阿玛闪长质糜棱岩 PM10TW1 样品 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年结果

Table 3 LA-ICP-MS zircon U-Pb data of Hariama dioritic mylonite sample PM10TW1

आग ह	含量	/10-6	同位素比值										年龄/	年龄/Ma		
- 冽点 -	Pb	U	²³² Th/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	206Pb/238U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ
1	10.9	140.9	1.1289	0.0041	0.0601	0.0007	0.5998	0.0161	0.0724	0.0018	376	4	477	13	998	52
2	45.8	502.5	0.5956	0.0061	0.0823	0.0011	0.7188	0.0130	0.0633	0.0008	510	7	550	10	719	27
3	11.5	156.8	0.4623	0.0032	0.0694	0.0010	0.5330	0.0140	0.0557	0.0014	433	6	434	11	440	56
4	43.5	525.8	0.5102	0.0084	0.0780	0.0009	0.6838	0.0104	0.0636	0.0008	484	6	529	8	729	27
5	6.3	81.0	0.7370	0.0152	0.0691	0.0009	0.5309	0.0314	0.0557	0.0031	431	5	432	26	441	124
6	7.9	121.1	0.4781	0.0029	0.0591	0.0007	0.5966	0.0167	0.0732	0.0021	370	4	475	13	1019	57
7	15.5	191.9	0.8700	0.0173	0.0715	0.0009	0.5563	0.0117	0.0565	0.0011	445	6	449	9	471	42
8	42.0	820.0	0.7329	0.0041	0.0473	0.0006	0.3691	0.0057	0.0566	0.0007	298	4	319	5	477	29
9	37.1	519.0	0.5392	0.0024	0.0686	0.0008	0.5326	0.0082	0.0563	0.0008	428	5	434	7	466	30
10	14.1	215.0	0.4646	0.0025	0.0649	0.0008	0.4974	0.0118	0.0556	0.0013	405	5	410	10	436	50
11	47.6	546.0	0.9004	0.0380	0.0803	0.0009	0.6787	0.0102	0.0613	0.0008	498	6	526	8	651	27
12	6.6	108.8	0.7143	0.0006	0.0555	0.0007	0.5838	0.0172	0.0763	0.0022	348	4	467	14	1103	59
13	9.9	144.7	1.0556	0.0033	0.0596	0.0007	0.5901	0.0169	0.0719	0.0018	373	5	471	13	982	50
14	29.6	378.4	1.1382	0.0075	0.0693	0.0008	0.5316	0.0097	0.0556	0.0008	432	5	433	8	438	34
15	24.3	362.2	0.7382	0.0014	0.0518	0.0006	1.1762	0.0245	0.1647	0.0031	326	4	790	16	2505	32
16	37.3	602.7	0.6108	0.0011	0.0607	0.0007	0.4721	0.0083	0.0564	0.0008	380	4	393	7	470	32
17	4.3	72.6	0.5458	0.0021	0.0566	0.0006	0.5391	0.0245	0.0690	0.0030	355	4	438	20	899	91
18	18.6	261.8	0.6568	0.0022	0.0694	0.0009	0.5362	0.0106	0.0560	0.0009	433	5	436	9	453	37
19	52.1	742.1	1.0640	0.0028	0.0646	0.0008	0.4924	0.0079	0.0553	0.0007	403	5	407	6	425	29
20	22.1	330.4	0.5824	0.0051	0.0648	0.0007	0.4938	0.0089	0.0552	0.0009	405	5	407	7	422	36
21	11.9	202.7	0.6046	0.0013	0.0551	0.0006	0.5553	0.0127	0.0730	0.0014	346	4	448	10	1015	40
22	9.0	137.1	0.6247	0.0044	0.0582	0.0006	0.7276	0.0152	0.0907	0.0018	365	4	555	12	1440	37
23	13.6	210.5	0.6269	0.0064	0.0596	0.0007	0.7028	0.0124	0.0855	0.0014	373	4	540	10	1328	32

测试单位:中国地质调查局天津地质调查中心.

前人研究表明,北山造山带经历了多期次、多阶段的板块裂解-俯冲-碰撞-拼合的复杂地质演化过程. 寒武纪初期,北山地区古大陆沿红柳河-牛圈子-洗肠井一带发生裂解,之后演化成为北山早古生代洋盆^[6],白云山、月牙山等地蛇绿混杂岩所代表的洋壳年龄为536~496 Ma^[18-11,43-45].奥陶纪一志留纪,红柳河-牛圈子-洗肠井蛇绿混杂岩带开始大规模自南向北俯冲,并沿公婆泉-白云山-斜山-东七一山一线 形成公婆泉-东七一山岛弧带^[7],石板井、标山、东七一 山等地出露的岛弧花岗岩年龄在464.4~421 Ma之 间^[14-17,46-47].早泥盆世,公婆泉、辉铜山、双鹰山以及基 东地区发育了大规模的A型花岗岩侵入事件,其年龄 在415~397 Ma之间,代表着此时红柳河-牛圈子-洗肠井古洋已经完全闭合且进入后造山阶段^[24,48-50]. 此外,根据前人对分布于勒巴泉-公婆泉、牛圈子-通 畅口一带的公婆泉组研究结果,公婆泉组由玄武岩-

表 4 哈日阿玛英云闪长岩 JDTW12 样品 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年结果 Table 4 LA-ICP-MS zircon U-Pb data of Hariama dioritic mylonite sample JDTW12

	含量	<u></u> t/10⁻⁰	同位素比值									年龄/	年龄/Ma			
测点	Pb	U	²³² Th/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ
1	17.6	225.4	0.4326	0.0013	0.0755	0.0008	0.5902	0.0114	0.0567	0.0010	469	5	471	9	481	38
2	48.4	612.7	0.5077	0.0031	0.0751	0.0007	0.5893	0.0081	0.0569	0.0007	467	4	470	6	487	27
3	11.9	151.2	0.6354	0.0009	0.0726	0.0007	0.5619	0.0114	0.0561	0.0011	452	5	453	9	456	43
4	11.4	150.1	0.5806	0.0038	0.0706	0.0007	0.5856	0.0120	0.0601	0.0011	440	4	468	10	608	41
5	11.6	152.6	0.5293	0.0013	0.0723	0.0007	0.5602	0.0125	0.0562	0.0012	450	4	452	10	459	47
6	8.4	114.3	0.5706	0.0014	0.0683	0.0007	0.5532	0.0142	0.0587	0.0015	426	4	447	12	556	55
7	14.8	191.8	0.4917	0.0014	0.0724	0.0007	0.5640	0.0104	0.0565	0.0010	451	5	454	8	472	38
8	12.3	159.2	0.5320	0.0038	0.0722	0.0008	0.5608	0.0129	0.0563	0.0012	449	5	452	10	466	47
9	67.3	1193.2	0.2348	0.0004	0.0562	0.0006	0.4734	0.0065	0.0611	0.0007	353	4	394	5	642	25
10	11.1	140.9	0.5139	0.0033	0.0733	0.0007	0.5428	0.0139	0.0537	0.0014	456	4	440	11	360	59
11	19.6	255.0	0.3821	0.0005	0.0747	0.0007	0.5838	0.0112	0.0567	0.0009	464	5	467	9	480	36
12	11.1	140.4	0.6237	0.0011	0.0708	0.0007	0.5559	0.0135	0.0569	0.0014	441	4	449	11	488	52
13	22.4	263.7	0.5332	0.0021	0.0790	0.0009	0.6235	0.0103	0.0573	0.0008	490	6	492	8	502	31
14	30.3	379.1	0.4159	0.0009	0.0763	0.0008	0.6050	0.0089	0.0575	0.0008	474	5	480	7	511	29
15	16.6	215.5	0.5305	0.0022	0.0725	0.0007	0.5602	0.0103	0.0560	0.0010	451	4	452	8	453	38
16	9.7	122.7	0.5531	0.0023	0.0735	0.0007	0.5701	0.0142	0.0563	0.0014	457	5	458	11	463	54
17	22.9	258.8	0.4300	0.0013	0.0847	0.0009	0.6842	0.0113	0.0586	0.0008	524	5	529	9	551	31
18	12.3	155.1	0.5538	0.0041	0.0735	0.0008	0.5678	0.0115	0.0561	0.0011	457	5	457	9	455	43
19	24.3	296.9	0.4097	0.0021	0.0785	0.0008	0.6183	0.0100	0.0571	0.0008	487	5	489	8	495	32
20	10.5	133.4	0.4644	0.0029	0.0747	0.0008	0.5845	0.0166	0.0568	0.0014	464	5	467	13	483	54
21	12.6	158.8	0.5891	0.0014	0.0726	0.0007	0.5665	0.0123	0.0566	0.0011	452	5	456	10	475	45

测试单位:中国地质调查局天津地质调查中心.

安山岩-流纹岩-粗面岩及火山碎屑岩组成,化石、地 球化学及同位素年代学证据指示其为晚奥陶世至早志 留世的弧火山岩,形成于红柳河-牛圈子-洗肠井古洋 向北俯冲的环境^[51-56].通过对比哈日阿玛岛弧花岗岩 大地构造位置,综合地质年代学、地球化学分析,以及 与之伴生的公婆泉组岩石化学、地质年代学资料,本文 认为哈日阿玛岛弧花岗岩为红柳河-牛圈子-洗肠井 古洋盆向北俯冲的结果,其地质年代学数据暗示着大 洋俯冲最晚在晚奥陶世晚期已经开始,且洋盆闭合时 限应晚于早志留世.

5 结论

(1)LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年结果表明哈日阿 玛闪长岩形成于 430.9±4.7 Ma,即早志留世;英云闪长 岩形成于 452.5±3.2 Ma,为晚奥陶世.

(2)哈日阿玛花岗岩属于钙碱性 I 型花岗岩,为来 自地壳的岩浆与来自深部的亏损地幔岩浆混合成因.

(3)岩石学、岩石地球化学和地质学特征指示,哈 日阿玛花岗岩体形成于岛弧环境,表明红柳河-牛圈 子-洗肠井古洋盆至少在晚奥陶世晚期已经向北俯 冲,该洋盆闭合时限应晚于早志留世.







Hariama granite

(After Reference [41])

A-ORG—异常洋中脊花岗岩 (anomalous ocean ridge granite); syn+ COLG—同碰撞花岗岩 (syn-collisional granite); WPG—板内花岗岩 (within-plate granite); ORG—洋中脊花岗岩(ocean ridge granite); VAG—岛弧花岗岩(volcanic arc granite)



(据文献[42])



Hariama granite

(After Reference [42])

syn+COLG—同碰撞花岗岩(syn-collisional granite); WPG—板内花岗岩 (within-plate granite); ORG—洋中脊花岗岩(ocean ridge granite); VAG—岛弧花岗岩(volcanic arc granite) 致谢:中国地质调查局天津地质调查中心同位素 实验室袁海帆工程师对本文实验数据处理以及结果进 行了指导,并提出了宝贵建议;"内蒙古1:5万基东、尖 山、蒜井子、三道明水区域地质矿产调查"项目组为本 论文提供了详实的野外资料.在此一并表示诚挚的谢 意.

参考文献(Resferences):

[1] 左国朝,何国琦.北山板块构造及成矿规律[M].北京:北京大学 出版社,1990:1-209.

Zuo G C, He G Q. Plate tectonics and metallogenic regularities in Beishan region[M]. Beijing: Peking University Press, 1990: 1-209.

[2]左国朝,刘义科,刘春燕.甘新蒙北山地区构造格局及演化[J].甘 肃地质学报,2003,12(1):1-15.

Zuo G C, Liu Y K, Liu C Y. Framework and evolution of the tectonic structure in Beishan area across Gansu Province, Xinjiang autonomous region and Inner Mongolia Autonomous Region [J]. Acta Geologica Gansu, 2003, 12(1): 1–15.

[3] 左国朝,李茂松.甘蒙北山地区早古生代岩石圈形成与演化[M]. 兰州:甘肃科学技术出版社,1996:1-120.

Zuo G C, Li M S. Formation and evolution of the early Paleozoic lithosphere in the Beishan area, Gansu-Inner Mongolia, China[M]. Lanzhou: Gansu Science and Technology Press, 1996: 1–120.

[4]李锦轶,张进,杨天南,等.北亚造山区南部及其毗邻地区地壳构 造分区与构造演化[J].吉林大学学报(地球科学版),2009,39(4): 584-605.

Li J Y, Zhang J, Yang T N, et al. Crustal tectonic division and evolution of the southern part of the North Asian Orogenic Region and its adjacent areas [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2009, 39(4): 584–605.

[5]徐学义,何世平,王洪亮,等.中国西北部地质概论——秦岭、祁 连、天山地区[M].北京:科学出版社,2008:1-347.

Xu X Y, He S P, Wang H L, et al. An introduction to geology in Qinling, Qilian and Tianshan, Northwest China[M]. Beijing: Science Press, 2008: 1-347. (in Chinese)

[6]杨合群,李英,赵国斌,等.北山蛇绿岩特征及构造属性[J].西北 地质,2010,43(1):26-36.

Yang H Q, Li Y, Zhao G B, et al. Character and structural attribute of the Beishan ophiolite[J]. Northwestern Geology, 2010, 43(1): 26– 36.

[7]何世平,周会武,任秉琛,等.甘肃内蒙古北山地区古生代地壳演 化[J].西北地质,2005,38(3):6-15.

He S P, Zhou H W, Ren B C, et al. Crustal evolution of Palaeozoic in Beishan area, Gansu and Inner Mongolia, China[J]. Northwestern Geology, 2005, 38(3): 6–15.

- [8]廖云峰,胡新茁,程海峰,等.内蒙古月牙山蛇绿岩的岩石学、地球 化学特征及其地质意义[J].地质通报,2016,35(8):1243-1254.
 Liao Y F, Hu X Z, Cheng H F, et al. Petrological and petrochemical characteristics and geological significance of Yueyashan ophiolite[J].
 Geological Bulletin of China, 2016, 35(8): 1243-1254.
- [9]王国强. 北山古生代蛇绿岩、火山岩研究与构造演化[D]. 西安:长安大学, 2015.

Wang G Q. The research of the Paleozoic ophiolites and volcanic rocks and the tectonic evolution in the Beishan area (Northwest China)[D]. Xi'an: Chang'an University, 2015.

[10]胡新茁,赵国春,胡新悦,等.内蒙古北山地区月牙山蛇绿质构造 混杂岩带地质特征、形成时代及大地构造意义[J].地质通报, 2015,34(2/3):425-436.

Hu X Z, Zhao G C, Hu X Y, et al. Geological characteristics, formation epoch and geotectonic significance of the Yueyashan ophiolitic tectonic mélange in Beishan area, Inner Mongolia [J]. Geological Bulletin of China, 2015, 34(2/3): 425-436.

- [11] 胡醒民,廖云峰,程海峰,等.内蒙古月牙山一带基性火山岩的地质特征、形成时代及归属[J].地质通报,2016,35(8):1234-1242.
 Hu X M, Liao Y F, Cheng H F, et al. A discussion on the geological characteristics, formation age and attribution of basic volcanic rocks in Yueyashan area, Inner Mongolia[J]. Geological Bulletin of China, 2016, 35(8): 1234-1242.
- [12]杨鑫朋,田粉英,王硕,等.内蒙古横峦山组类高镁安山岩年代学及地球化学特征[J].中国地质调查,2018,5(5):58-65.
 Yang X P, Tian F Y, Wang S, et al. Geochronological and geochemical characteristics of analogy high-magnesium andesite in Henluanshan Formation of Inner Mongolia[J]. Geological Survey of China, 2018, 5(5): 58-65.
- [13]赵志雄, 贾元琴, 王金荣, 等. 内蒙古小黑山地区二长花岗岩和石 英闪长岩的锆石 U-Pb 年代学、元素地球化学及其地质意义[J]. 地 球科学, 2018, 34(S2): 49-59.

Zhao Z X, Jia Y Q, Wang J R, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb age and geochemistry of Monzonite granite-quartz diorite pluton in Xiaoheishan area of Beishan Orogenic Belt and its geological significance, Inner Mongolia[J]. Earth Science, 2018, 34(S2): 49–59.

 [14]修迪,陈超,专少鹏,等.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[J].地 质通报,2018,37(6):975-986.
 Xiu D, Chen C, Zhuan S P, et al. 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[J]. Geological Bulletin of China, 2018, 37(6): 975–986.

 [15]专少鹏,陈超,申宗义,等.北山地区早古生代洋盆俯冲记录一来 自石板井高镁闪长岩的年代学、地球化学证据[J]. 岩石矿物学杂志,2018,37(4):533-546.
 Zhuan S P, Chen C, Shen Z Y, et al. Early Paleozoic subduction of the ocean in Beishan region: zircon U-Pb geochronological and geochemical evidence from the high-Mg diorite in the Shibanjing area [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2018, 37(4): 533-546.

[16] 董洪凯, 孟庆涛, 刘广, 等. 内蒙古北山地区标山一带早志留世花 岗岩地球化学特征及构造意义[J]. 西北地质, 2018, 51(1): 159-174.

Dong H K, Meng Q T, Liu G, et al. Geochemical characteristics of early Silurian granite from Biaoshan area in Beishan, Inner Mongolia and their tectonic implications[J]. Northwestern Geology, 2018, 51 (1): 159–174.

- [17]王怀涛. 中亚造山带南段北山构造-岩浆作用及其地质意义的研究
 [D]. 兰州: 兰州大学, 2019.
 Wang H T. Tectono-magmatism and its geological significance in the Beishan area of the southern part of the Central Asian Orogenic Belt
 [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2019.
- [18]王鑫玉,袁超,龙晓平,等.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[J].地球化学,2018,47(1):63-78.
 Wang X Y, Yuan C, Long X P, et al. Geochronological, geochemical, and geological significance of Jianshan and Shibanjing granites in the Gongpoquan Arc, Beishan Orogenic Belt [J]. Geochimica, 2018, 47(1): 63-78.
- [19]王鑫玉.北山公婆泉岛弧岩石组合、岩浆时空演变及其构造意义
 [D].广州:中国科学院大学(中国科学院广州地球化学研究所),
 2017.

Wang X Y. The rock assemblages, spatial and temporal variations in the Gongpoquan arc, Beishan and their implications for tectonic setting [D]. Guangzhou: University of Chinese Academy of Sciences (Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences), 2017.

[20]李小菲.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[D].西安:西北大学,2013.

Li X F. Formation age, geochemical characteristics and geological significance of Paleozoic granites in Mazongshan, Beishan[D]. Xi' an: Northwest University, 2013. (in Chinese)

[21]张太荣. 甘肃北山寒武纪地层的划分意见[J]. 新疆地质, 1983, 1 (2): 42-47.

Zhang T R. On division of the Cambrian Stratuml Beishan of Gansu Province, China[J]. Xinjiang Geology, 1983, 1(2): 42-47.

- [22]余吉远, 计波, 过磊, 等. 甘肃北山地区古硐井群地质特征与时代 厘定[J]. 地质通报, 2018, 37(4): 704-715.
 Yu J Y, Ji B, Guo L, et al. Geological characteristics and age determination of the Palaeoproterozoic Gudongjing Group complex in the Beishan Mountain, Gansu Province [J]. Geological Bulletin of China, 2018, 37(4): 704-715.
- [23]张金龙,潘志龙,陈超,等.内蒙古北山地区三道明水一带早白垩世赤金堡组沉积特征及时代厘定[J].地质调查与研究,2017,40
 (1):29-34,80.

Zhang J L, Pan Z L, Chen C, et al. Sedimentary characteristics and age of the Early Cretaceous Chijinbao formation in the Sandaomingshui of Beishan area, Inner Mongolia[J]. Geological Survey and Research, 2017, 40(1): 29–34, 80.

[24]潘志龙,张欢,陈超,等.内蒙古北山敖包呼图仁斑状正长花岗岩
 锆石 U-Pb 年龄、Lu-Hf 同位素组成及其地质意义[J].地质科学,
 2017,52(1):301-316.

Pan Z L, Zhang H, Chen C, et al. Zircon U-Pb geochronology and Lu-Hf isotope compositions of porphyritic syenite granite from Aobaohuturen in Beishan, Inner Mongolia and its tectonic implication [J]. Chinese Journal of Geology, 2017, 52(1): 301–316.

[25]高剑峰,陆建军,赖鸣远,等.岩石样品中微量元素的高分辨率等 离子质谱分析[J].南京大学学报(自然科学),2003,39(6):844-850.

Gao J F, Lu J J, Lai M Y, et al. Analysis of trace elements in rock samples using HR-ICPMS[J]. Journal of Nanjing University (Natural Science), 2003, 39(6): 844–850.

[26]袁洪林,吴福元,高山,等.东北地区新生代侵入体的锆石激光探
 针 U-Pb 年龄测定与稀土元素成分分析[J].科学通报,2003,48
 (14):1511-1520.

Yuan H L, Wu F Y, Gao S, et al. Determination of U-Pb age and rare earth element concentrations of zircons from Cenozoic intrusions in northeastern China by laser ablation ICP-MS[J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(14): 1511–1520. (in Chinese)

- [27]Le Maitre R W. Igneous rocks: A classification and glossary of terms [M]. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2002: 33–39.
- [28]Rollinson H R. Using geochemical data: Evaluation, presentation, interpretation [M]. New York: Longman Scientific & Technical, 1993: 1-352.
- [29]Kemp A I S, Hawkesworth C J. Granitic perspectives on the generation and secular evolution of the continental crust[J]. Treatise on Geochemistry, 2003, 3: 349–410.
- [30]Turner S, Arnaud N, Liu J, et al. 1996. Post-collision, shoshonitic volcanism on the Tibetan Plateau: Implications for convective thinning of the lithosphere and the source of ocean island basalts[J]. Journal of Petrology, 1996, 37(1): 45–71.
- [31]Boynton W V. Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies [M]//Henderson P. Rare Earth Element Geochemistry. Amsterdam: Elsevier, 1984: 63-114.
- [32]McDonough W F, Sun S S, Ringwood A E, et al. Potassium, rubidium, and cesium in the Earth and Moon and the evolution of the mantle of the Earth[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1992, 56 (3): 1001-1012.
- [33]Rapp R P, Shimizu N, Norman M D, et al. Reaction between slabderived melts and peridotite in the mantle wedge: Experimental constraints at 3.8 GPa[J]. Chemical Geology, 1999, 160(4): 335– 356.

- [34]Smithies R H. The Archaean tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG) series is not an analogue of Cenozoic adakite[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2000, 182(1): 115–125.
- [35]Green T H. Significance of Nb/Ta as an indicator of geochemical processes in the crust-mantle system [J]. Chemical Geology, 1995, 120(3/4): 347-359.
- [36]Hofmann A W. Chemical differentiation of the Earth: The relationship between mantle, continental crust, and oceanic crust[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1998, 90(3): 297–314.
- [37]Barbarin B. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments[J]. Lithos, 1999, 46 (3): 605-626.
- [38]Wyllie P J, Ryabchikov I D. Volatile components, magmas, and critical fluids in upwelling mantle[J]. Journal of Petrology, 2000, 41 (7): 1195–1206.
- [39]Condie K C. Geochemistry and tectonic setting of early Proterozoic supracrustal rocks in the southwestern United States[J]. The Journal of Geology, 1986, 94(6): 845–864.
- [40]Wood D A. The application of a Th-Hf-Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary Volcanic Province[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1980, 50(1): 11– 30.
- [41]Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. Journal of Petrology, 1984, 25(4): 956–983.
- [42]Pearce J. Sources and settings of granitic rocks[J]. Episodes, 1996, 19(4): 120–125.
- [43]孙立新,张家辉,任邦方,等.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[J]. 岩石矿物学杂志,2017,36(2): 131-147.

Sun L X, Zhang J H, Ren B F, et al. Geochemical characteristics and U-Pb age of Baiyunshan ophiolite mélange in the Beishan orogenic belt and their geological implications[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2017, 36(2): 131-147.

- [44]侯青叶,王忠,刘金宝,等.北山月牙山蛇绿岩地球化学特征及SHRIMP 定年[J].现代地质,2012,26(5):1008-1018.
 Hou Q Y, Wang Z, Liu J B, et al. Geochemistry characteristics and SHRIMP dating of Yueyashan Ophiolite in Beishan Orogen [J]. Geoscience, 2012, 26(5): 1008-1018.
- [45]郑荣国,吴泰然,张文,等.北山地区月牙山-洗肠井蛇绿岩的地球化学特征及形成环境[J].地质学报,2012,86(6):961-971. Zheng R G, Wu T R, Zhang W, et al. Geochemical characteristics and tectonic setting and of the Yueyashan-Xichangjing Ophiolite in the Beishan area[J]. Acta Geologica Sinica, 2012, 86(6):961-971.
- [46] 董洪凯, 孟庆涛, 张正平, 等. 内蒙古标山一带石英闪长岩地质特 征及构造意义[J]. 新疆地质, 2018, 36(4): 518-525.

Dong H K, Meng Q T, Zhang Z P, et al. A discussion on the geological characteristics and tectonic significance of Quartz-tonalite in Biaoshan area, Inner Mongolia[J]. Xinjiang Geology, 2018, 36 (4): 518-525.

[47]杨岳清,吕博,孟贵祥,等.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[J].地球学报,2013,34(2):163-175.

Yang Y Q, Lv B, Meng X G, et al. Geochemistry, SHRIMP zircon U-Pb dating and formation environment of Dongqiyishan granite, Inner Mongolia[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2013, 34(2): 163–175.

- [48]王怀涛,任文秀,赵淇馨,等.北山地区照壁山南A型花岗岩地球 化学特征及构造意[J].西北地质,2016,49(1):39-49.
 Wang H T, Ren W X, Zhao Q X, et al. Geochemical characteristics and tectonic significance of A-type granite in the South Margin of Zhaobishan, Beishan area[J]. Northwestern Geology, 2016, 49(1): 39-49.
- [49]李舢,王涛,童英,等.北山辉铜山泥盆纪钾长花岗岩锆石 U-Pb 年龄、成因及构造意义[J]. 岩石学报, 2011, 27(10): 3055-3070.
 Li S, Wang T, Tong Y, et al. Zircon U-Pb age, origin and its tectonic significances of Huitongshan Devonian K-feldspar granites from Beishan orogeny, NW China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(10): 3055-3070.
- [50]李舢,王涛,童英,等.北山柳园地区双峰山早泥盆世A型花岗岩的确定及其构造演化意义[J].岩石矿物学杂志,2009,28(5): 407-422.

Li S, Wang T, Tong Y, et al. Identification of the Early Devonian Shuangfengshan A-type granites in Liuyuan area of Beishan and its implications to tectonic evolution[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2009, 28(5): 407–422.

 [51]王国强,李向民,徐学义,等.甘蒙北山志留纪公婆泉群火山岩的 地球化学及其对岩石成因和构造环境的制约[J].地质学报,2016, 90(10):2603-2619.

Wang G Q, Li X M, Xu X Y, et al. Geochemistry of Gongpoquan

Group in the Beishan area, Gansu Province: Constraints on petrogenesis and tectonic setting[J]. Acta Geologica Sinica, 2016, 90 (10): 2603–2619.

[52]戴霜,方小敏,张翔,等.塔里木一中朝板块北缘的志留纪岛弧公婆泉群火山岩地质地球化学及构造意义[J].兰州大学学报(自然科学版),2003,39(4):80-87.

Dai S, Fang X M, Zhang X, et al. Island arc north of the Tarim-SK plate: the geology and geochemistry of Gongpoquan Group[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2003, 39(4): 80–87.

[53]郭小宝.甘肃北山公婆泉斑岩型铜矿地质地球化学特征及成因分析[D].北京:中国地质大学(北京), 2015.

Guo X B. Characteristics of geology and geochemistry of Gongpoquan porphyry copper deposit, Beishan, Gansu Province, and its mineralization [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2015.

- [54]王伏泉. 公婆泉铜矿二矿区火山岩的全岩 Rb-Sr 等时线年龄及其构造-成矿意义[J]. 大地构造与成矿学, 1998, 22(S1): 23-27.
 Wang F Q. The Rb-Sr isochron ages of whole rock and its tectonometallogenetic meaning of the volcanic rocks in the Second Mining area of the Gongpoquan copper deposit [J]. Geotectonica et Metallogenia, 1998, 22(S1): 23-27.
- [55]刘威,魏启荣,车越新.内蒙古石板井公婆泉组火山岩地球化学特征及构造意义[J].科学技术与工程,2015,15(17):18-22.
 Liu W, Wei Q R, Che Y X. Geochemistry characteristics and tectonic significance of the volcanic rocks of Gongpoquan formation on Shibanjing, Inner-Mongolia[J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(17): 18-22.
- [56]左国朝,金松桥,冯铁全.甘肃省公婆泉群发现牙形石[J].中国区域地质,1994(2):185.
 Zuo G C, Jin S Q, Feng T Q. Conodonts were found in Gongpoquan

group, Gansu Province[J]. Geological Bulletin of China, 1994(2): 185. (in Chinese)