

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.305>



内蒙古狼山北部早古生代岩浆岩年代学、 地球化学特征及构造意义

张云¹, 孙立新^{1*}, 张天福¹, 滕飞¹, 张永¹, 孙义伟¹, 杨泽黎¹, 许凡²

1. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170

2. 河北省区域地质矿产调查研究所, 河北廊坊 065000

摘要: 内蒙古狼山北部地区位于华北克拉通与兴蒙造山带交接部位, 构造上隶属于华北克拉通北缘早古生代陆缘增生带。狼山北部巴音杭盖一带出露的早古生代岩浆岩, 对确定华北北缘西段早古生代构造格局和造山带演化具有重要意义。本次研究采用LA-MC-ICP-MS锆石U-Pb测年法, 获得了闪长岩、石英闪长岩²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄为435.8±2.2 Ma~437.7±2.2 Ma, 时代为早志留世。岩石为钙碱性系列, 富集轻稀土元素, (La/Yb)_N=4.30~11.59, 表现出不同程度地富集大离子亲石元素(LILE)Rb、Th、U、K、Ba、Sr等, 亏损高场强元素(HFSE), 具有明显的Nb、Ta、Ti负异常, 具有弱的负Eu异常($\delta\text{Eu}=0.80\sim0.96$), 具有俯冲带岩石的特征。在同位素组成上, 早志留世闪长岩体具有明显亏损的特点, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)=+5.2\sim+12.6$, (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i=0.704 665~0.706 174, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)=+1.84\sim+2.00$ 。上述年代学、岩石地球化学、Sr-Nd-Hf同位素数据结合区域地质资料分析表明, 狼山北部早志留世闪长质岩体形成于早古生代温都尔庙洋沿温都尔庙—乌德—索伦山南一线南向俯冲背景下, 为经历了俯冲洋板片析出流体交代作用的新生下地壳部分熔融的产物。志留纪岛弧岩浆岩的确定, 明确了狼山北部地区属于华北克拉通北缘早古生代活动大陆边缘, 为白乃庙岛弧带向西延展的部分, 同时为华北北缘西段早古生代“沟—弧—盆”体系的确定提供了重要素材。

关键词: 早古生代; 锆石U-Pb年代学; 地球化学; Sr-Nd-Hf同位素; 岛弧岩浆岩; 内蒙古狼山北部。

中图分类号: P548

文章编号: 1000-2383(2019)01-179-14

收稿日期: 2018-05-18

Geochronology, Geochemistry and its Tectonic Significance of the Early Paleozoic Magmatic Rocks in Northern Langshan, Inner Mongolia

Zhang Yun¹, Sun Lixin^{1*}, Zhang Tianfu¹, Teng Fei¹, Zhang Yong¹, Sun Yiwei¹, Yang Zeli¹, Xu Fan²

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

2. Hebei Institute of Regional Geological and Mineral Resource Survey, Langfang 065000, China

Abstract: The Langshan area in Inner Mongolia is a paramount transitional zone located between the North China Craton (NCC) and the Xingmeng orogenic belt (XOB), and structurally belongs to the Early Paleozoic marginal accretionary belt in the northern margin of the NCC. The Early Paleozoic magmatic rocks distributed in the Bayinhanggai area, the northern Langshan, have important implications for the reconstruction of regional Paleozoic tectonic setting and orogenic evolution. The dioritic batholith consists mainly of diorite and quartz-diorite, with the zircon ²⁰⁶Pb/²³⁸U ages of 435.8±2.2 Ma~437.7±2.2 Ma, which represent the crystallization age of the Early Silurian. The rocks are calc-alkaline series, enriched in LREE with the (La/Yb)_N ratios 4.30~11.59, depleted in HFSE (especially Nb, Ta and Ti) and enriched in LILE (like Rb, Th, K, Ba and Sr), and weakly negative Eu anomalies ($\delta\text{Eu}=0.80\sim0.96$), indicating that they are formed in island arcs or in active continental margins.

基金项目: 国家自然科学基金项目(No.41572172); 中国地质调查局项目(Nos.DD20189615, DD20160041)。

作者简介: 张云(1991—), 男, 助理研究员, 硕士, 从事构造地质学和区域地质研究。ORCID: 0000-0002-1948-1284. E-mail: 571938243@qq.com

* 通讯作者: 孙立新, ORCID: 0000-0002-7969-5460. E-mail: tjslixin@126.com

引用格式: 张云, 孙立新, 张天福, 等, 2019. 内蒙古狼山北部早古生代岩浆岩年代学、地球化学特征及构造意义. 地球科学, 44(1): 179~192.

nents margin setting. The Early Silurian diorite batholith shows depleted isotopic compositions, $\epsilon_{\text{Hf}}(t) = +5.2 - +12.6$, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.704\,665 - 0.706\,174$, $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = +1.84 - +2.00$. Integrated geochronology, geochemical, Sr-Nd-Hf isotopic data and regional geological data suggest that the Early Silurian diorite batholith in northern Langshan was generated in Early Paleozoic and resulted from the southward subduction of Wenduermiao ocean along Wenduermiao-Wude-northern Suolun. The diorites were formed by partial melting of juvenile crust which was modified by subduction slab fluids. The determination of the Silurian arc magmatic rocks makes it clear that the northern Langshan area belongs to the Early Paleozoic active continental margin of the northern NCC, and it is the westward extended part of the Bainaimiao island arc belt. At the same time, it also provides important materials for the Early Paleozoic “trench-arc-basin” system in the west section of the northern NCC.

Key words: Early Paleozoic; zircon U-Pb geochronology; geochemistry; Sr-Nd-Hf isotopic compositions; arc magmatic rocks; northern Langshan, Inner Mongolia.

0 引言

内蒙古狼山北部地区位于华北克拉通与中亚造山带东段(兴蒙造山带)相邻部位,构造上隶属于华北克拉通北缘早古生代陆缘增生带,是研究古亚洲洋与华北板块相互作用过程的重要区域。长期以来,兴蒙造山带古生代岩浆—构造演化与成矿过程一直是地质界关注的焦点,但由于后期强烈的构造岩浆作用改造,现存的早古生代岩浆记录较为有限,主要沿南北两条近东西向的岩浆岩带分布(Jian *et al.*, 2008; Xu *et al.*, 2013)。目前针对兴蒙造山带早古生代岩浆作用的研究主要集中在南带内蒙古达茂旗—白乃庙一线(许立权等, 2003; 李建峰等, 2010; Zhang *et al.*, 2013; 冯丽霞等, 2013; Wang *et al.*, 2015; 钱筱嫣等, 2017)、冀北三面井地区(彭树华等, 2013),北带白音宝力道—锡林浩特一线(陈斌, 2002; 刘敦一等, 2003; 石玉若等, 2004; 徐备等, 2016; 王树庆等, 2016);而对狼山北部早古生代构造岩浆事件的资料报道较少(Xu *et al.*, 2013)。狼山北部巴音杭盖一带的志留纪闪长岩、石英闪长岩发育,前人将其作为海西期(内蒙古自治区地质矿产局, 1991)或中元古代侵入体(河北区调局, 2012, 内蒙古 1:25 万巴音查干、乌拉特后旗幅区调修测),但缺少年代学证据。本次研究在狼山北部巴音杭盖地区闪长质岩体中获得了早志留世的锆石 U-Pb 年龄,结合岩石学、元素地球化学及 Sr-Nd-Hf 同位素特征对其开展研究,系统分析了岩石成因及其构造背景,为兴蒙造山带西段早古生代构造演化提供了新的约束。

1 区域地质概况及岩体特征

研究区位于内蒙古狼山北部巴音杭盖一带,地

处兴蒙造山带西段中蒙边境地带,大地构造位置上处于华北克拉通北缘断裂和索伦山构造蛇绿混杂带之间(图 1)。研究区出露前寒武纪变质岩系古元古界宝音图岩群(Pt_1By)和中元古代变质侵入体(γPt_2)。宝音图岩群(Pt_1By)主要岩性为石英岩、石榴云母片岩、十字石片岩、二云母片岩、斜长角闪岩、透闪石大理岩等,普遍遭受高绿片岩相至低角闪岩相的区域变质作用,变质侵入体(γPt_2)主要由条带状花岗片麻岩、片麻状二长花岗岩等组成,时代为 1 672 ± 10 Ma(孙立新等, 2013),与围岩宝音图岩群呈侵入接触关系。古生界早—中志留统徐尼乌苏组($S_{1-2}xn$)分布于研究区北部,岩性为变质长石石英砂岩、粉砂岩、变质砂砾岩、结晶灰岩,夹有少量安山岩、凝灰岩,为一套具有复理石建造特征的弧前盆地沉积(Xu *et al.*, 2013)。区内发育大规模古生代中—酸性侵入岩体。在构造上,区内北东向和近东西向断裂十分发育,被后期北西向断裂切割,北东向断裂主要为狼山走滑断裂系,研究区南部发育华北克拉通北缘断裂。在研究区北部,前人在 1:25 万巴音查干幅区调工作中识别出一套以基性—超基性岩为主的奥陶纪蛇绿构造混杂岩,大致沿索伦山南部近东西向展布,呈断块状构造就位于宝音图岩群中,向东与达茂旗乌德蛇绿混杂岩带相连,构成温都尔庙—车根达来—乌德—索伦山南的早古生代蛇绿混杂岩带。

华北克拉通北缘断裂通常被认为是华北克拉通与兴蒙造山带的边界断裂(内蒙古自治区地质矿产局, 1991),索伦山构造蛇绿混杂岩带代表了西伯利亚板块和华北板块的缝合带(Li *et al.*, 2006; 李锦轶等, 2009),两者之间的南部造山带(Xu *et al.*, 2013)发育一系列早古生代钙碱性岩浆活动,呈近东西向带状分布,前人曾将其划分为白乃庙岛弧带或温都尔庙—翁牛特增生地体。作为古亚洲洋的一部分,早古生代温都尔庙洋的关闭,以区域上上志留

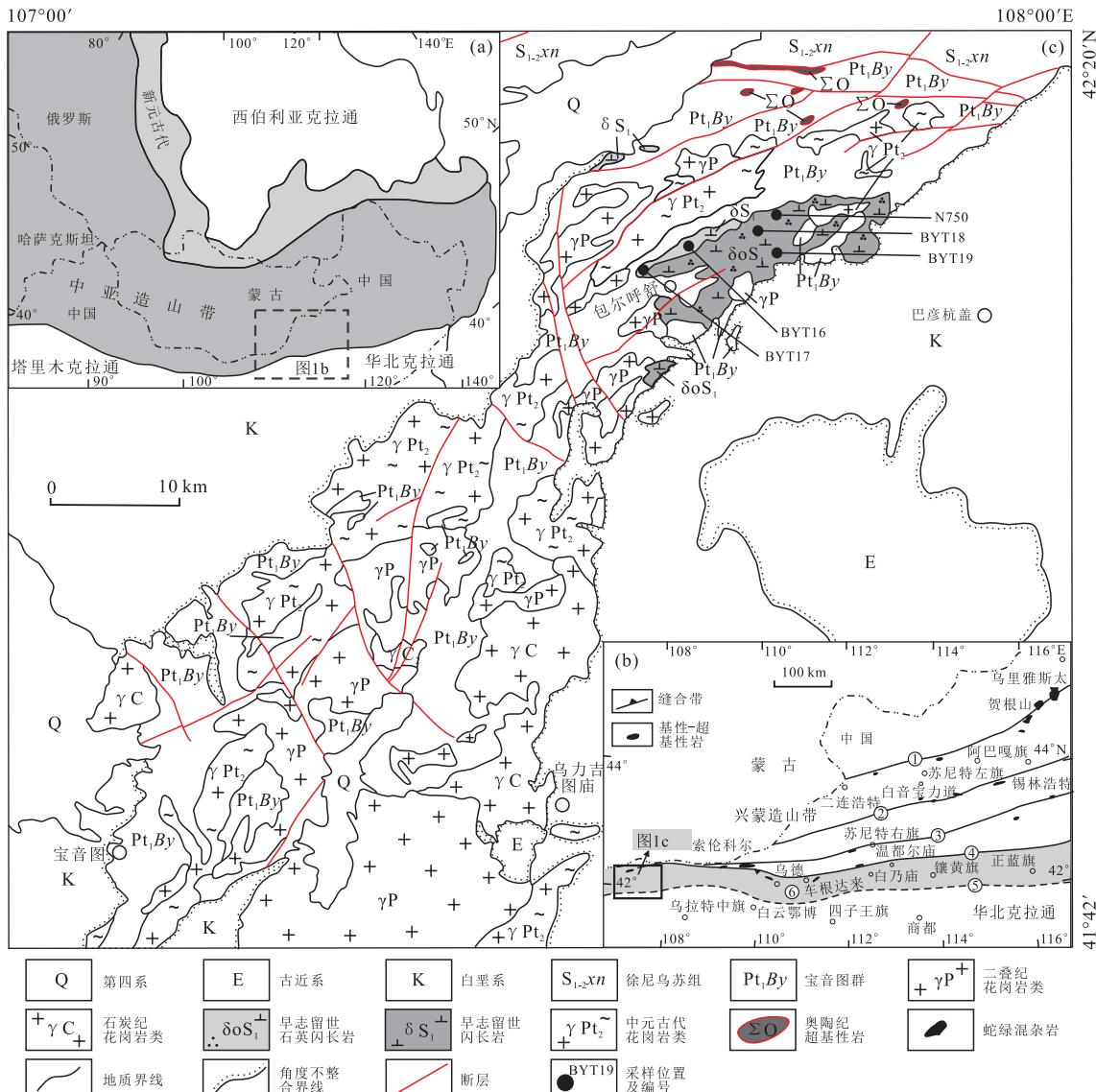


图1 中亚造山带构造简图(a)、研究区大地构造位置(b)以及内蒙古狼山北部地质简图及取样位置(c)

Fig.1 Simplified sketch map of the Central Asia orogenic belts (a), tectonic location (b) and simplified geological map and sample location from northern Langshan of Inner Mongolia (c)

图a据Jahn *et al.*(2000);图b据Xu *et al.*(2013)、孙立新等(2017);图c修改自河北区调局,2012,内蒙古1:25万巴音查干、乌拉特后旗幅区调修测;①二连—贺根山蛇绿混杂岩带;②二道井—迪彦庙蛇绿混杂岩带;③索伦—西拉木伦蛇绿混杂岩带;④温都尔庙—车根达来—乌德—索伦山南蛇绿混杂岩带;⑤华北北缘断裂;⑥华北克拉通北缘早古生代陆缘增生带

统一下泥盆统西别河组(S_3-D_1x)与下伏奥陶纪—志留纪岛弧火山沉积岩系之间为角度不整合为标志(内蒙古地质矿产局,1991;许立权等,2003),指示了华北板块北缘在奥陶纪—早志留世期间一次重要的俯冲增生事件,并将其划分为华北北缘早古生代陆缘增生带(李锦轶等,2009),以碱性岩、基性岩墙群和双峰式火山岩等为代表的泥盆纪岩浆活动(Liu *et al.*, 2010; 张拴宏等, 2010; 孙立新等, 2017),标志着泥盆纪期间华北板块北缘进入到弧—陆碰撞后的伸展阶段。早石炭世晚期—中二叠世,华北北缘构

造背景开始转化成为安第斯型活动大陆边缘环境,表现为钙碱性岩浆活动的强烈发育(王惠初等,2007; Zhang *et al.*, 2009; 张拴宏等, 2010)。

狼山北部志留纪岩浆岩分布于巴音杭盖以西至包尔呼舒一带,岩体呈近北东东走向,大小约75 km²,呈岩株产出,侵入于中元古代宝音图群中,被二叠纪花岗岩侵入。岩体主要岩性由闪长岩、石英闪长岩组成,二者呈渐变过渡接触,岩体受后期变形改造,具有分布不均的弱片麻状一条纹构造。本文测试样品采集自巴音杭盖以西,地理坐标:闪长岩

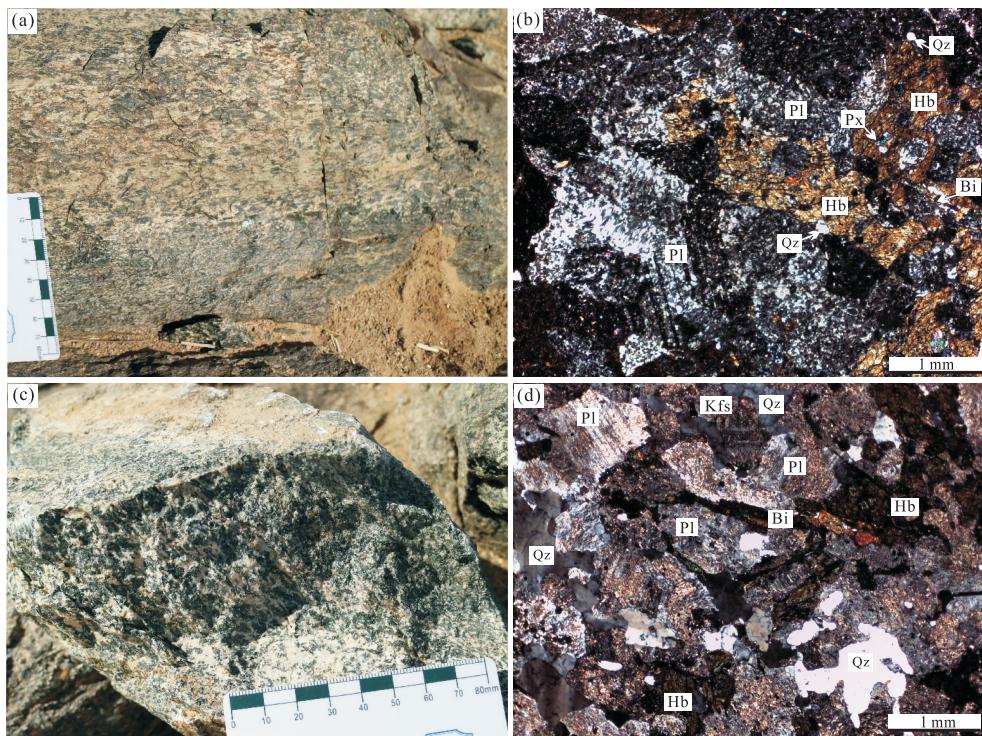


图 2 志留纪岩体野外及显微照片(正交偏光)

Fig.2 Field and microphotographs in Silurian batholith (crossed nicols)

a.闪长岩野外露头;b.闪长岩显微照片;c.石英闪长岩野外露头;d.石英闪长岩显微照片;Bi.黑云母;Kfs.钾长石;Hb.角闪石;Pl.斜长石;Px.辉石;Qz.石英

(BYT16:42°10'51.57"N, 107°39'07.72"E; BYT17:42°10'03.70"N, 107°34'54.72"E); 石英闪长岩(BYT18:42°11'09.88"N, 107°41'51.51"E; BYT19:42°10'29.10"N, 107°42'30.31"E; N750:42°11'31.10"N, 107°42'21.35"E)。

闪长岩:分布于岩体西北部、北部,出露面积约5 km²,新鲜面呈灰黑色,中细粒结构,弱片麻状构造。镜下具半自形粒状结构,岩石主要由斜长石(45%~50%)、角闪石(20%~25%)、石英(10%±)、辉石(5%)、黑云母(5%)及副矿物(<1%)组成。斜长石半自形板状,发育聚片双晶,部分发生绢云母化,粒径0.5~2.0 mm;角闪石呈半自形长柱状,多色性明显,具菱形节理,多发生绿泥石化,粒径0.5~2.0 mm;石英呈他形粒状,粒径0.1~0.3 mm;辉石,粒状,粒径0.2~0.4 mm,裂理发育,正高突起;黑云母呈页片状断续分布(图2a,2b)。

石英闪长岩:分布于岩体南部,为岩体主体,面积约70 km²。岩体新鲜面呈灰黑色,中粗粒结构,弱片麻状构造,岩体相对均一,可见少量暗色包体。岩石由斜长石(50%~55%)、钾长石(5%~10%±)、石英(10%~15%±)、角闪石(10%~15%)、黑云母(5%)及副矿物(<1%)组成,粒径0.2~4.0 mm。斜

长石:近半自形板状,粒径0.2~3.0 mm,发育聚片双晶。钾长石:为微斜长石,他形粒状,粒径0.2~1.5 mm,发育格子双晶。石英:他形粒状,粒径2.0~3.5 mm。黑云母:页片状,呈断续条纹状分布,片径一般0.2~2.0 mm,局部被绿泥石交代。角闪石:半自形—他形柱状,粒径以0.2~1.5 mm为主(图2c,2d)。

2 分析方法

2.1 锆石 U-Pb 测年

本文挑选3件样品(BYT16,BYT18,BYT19)进行锆石U-Pb测年。锆石挑选工作在河北省区域地质矿产调查研究所实验室完成,将样品粉碎至80目并淘洗后,采用重液和电磁分选,在实体显微镜下选出晶形、透明度较好的锆石,用环氧树脂固定,打磨至露出新鲜截面并抛光,制成样靶,测试样靶的透、反射光和阴极发光(CL)照相在北京锆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同位素实验室完成,采用LA-MC-ICP-MS仪器对锆石进行U-Pb同位素测年分析,激光剥蚀的束斑直径为35 μm,以氦气作为剥蚀物质的载气,详细的仪器配置和流程参见李怀坤等

(2010).采用ICP-MS DataCal程序(Liu *et al.*, 2010)和Isoplot(ver3.0)程序(Ludwig, 2003)进行数据处理和图件绘制.

2.2 地球化学分析

选择新鲜样品去除表面风化壳,机械破碎至200目送实验室分析.全岩样品的主量元素、微量和稀土元素分析测试在中国地质调查局天津地质调查中心实验室完成,主量元素采用X射线荧光光谱法测试,FeO/Fe₂O₃采用氢氟酸—硫酸溶样、重铬酸钾滴定容量法测定,分析精度优于2%,微量元素使用等离子体质谱仪(ICP-MS)测试,分析精度优于5%.

2.3 锆石Hf同位素测定

选取BYT16、BYT18和BYT19三件样品进行锆石原位Lu-Hf同位素测定,分析测试工作在中国地质调查局天津地质调查中心同位素实验室激光剥蚀多接收器等离子体质谱仪(LA-MC-ICP-MS)上进行,激光剥蚀的束斑直径为50 μm,采用GJ-1作为外标,详细的实验原理、测试流程和数据处理方法详见耿建珍等(2011),锆石Hf同位素的分析点与锆石U-Pb年龄分析点位于同一环带上.

2.4 Sr-Nd同位素分析

取200目全岩样品粉末,用HF+HClO₄+HNO₃溶解,用AG50W×12强酸性阳离子交换树脂分离Rb、Sr,然后用HEHEHP树脂(P507)技术分离纯化Nd,分离本底在同位素测量误差范围之内.Sr-Nd同位素分析在中国地质调查局天津地质调查中心实验室完成,采用Triton热电离质谱仪进行测定,分析精度优于0.002%.国际标样BCR-2的测定结果分别为¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd=0.512 630±0.000 004(2σ),⁸⁷Sr/⁸⁶Sr=0.704 985±0.000 007(2σ).

3 分析结果

3.1 锆石U-Pb年代学

巴音杭盖一带志留纪岩体的闪长岩、石英闪长岩锆石U-Pb定年结果如附表1~附表3所示.

锆石阴极发光(CL)图像(图3b,3d,3f)显示,闪长岩样品(BYT16)和石英闪长岩样品(BYT18、BYT19)锆石形态相似,呈自形棱柱状—短柱状,晶形完好,长轴直径变化于100~150 μm之间,长宽比介于1.2~2.5.锆石多发育较宽的震荡环带,部分发育板状结构,Th/U均大于0.4,属于岩浆结晶成因的锆石.锆石颗粒边部发育窄的变质增生边,可能是受到了后期构造热事件的影响.

在样品BYT16的24个测点中(附表1和图3a),除两个点谐和性差外,其余22颗锆石的²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄均较为一致,集中于434~448 Ma之间,年龄加权平均值为436±2 Ma(n=22,MSWD=0.17).在样品BYT18的24个测点(附表1和图3c)中,除7个样品点不谐和外,其余17颗锆石的²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄较为一致,集中于429~440 Ma之间,加权平均年龄为435.8±2.2 Ma(n=17,MSWD=0.29).在样品BYT19的24个测点中(附表1和图3e),23颗锆石微区记录的²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄较为一致,集中变化于433~470 Ma之间,年龄加权平均值为437.7±2.2 Ma(n=23,MSWD=0.24).因此,获得的样品加权平均年龄435.8±2.2~437.7±2.2 Ma可以代表岩体的侵位结晶年龄,属于早志留世产物.

3.2 地球化学特征

3.2.1 主量元素 本文测试了5件岩石样品,其地球化学分析结果见附表3.样品SiO₂含量为54.58%~62%,属于中性岩类;TiO₂变化于0.54%~0.77%;具有较高的Al₂O₃(16.12%~17.8%)、CaO(4.40%~7.72%)、Na₂O(3.66%~4.50%)含量,较低的K₂O(1.02%~3.08%)、FeO^T(4.0%~7.34%)含量;MgO变化于2.35%~3.81%,Mg[#]为42.36~52.90.在图4上,各氧化物含量与SiO₂含量之间表现出明显的相关性,主要表现为K₂O、Na₂O含量与SiO₂含量呈正相关,TiO₂、MgO、CaO、Al₂O₃、FeO^T则与SiO₂含量呈负相关,表明岩体在成岩过程中经历了岩浆分离结晶作用.

样品K₂O/Na₂O比值为0.24~0.84;A/CNK均小于1(0.80~0.94),显示铝不饱和;在图5a上,4个样品均落入亚碱性闪长岩区域,1个样品落入辉长闪长岩/二长闪长岩区域,碱度率AR值为1.07~1.29,里特曼指数δ为2.00~2.45,属钙碱性系列;在K₂O-SiO₂图解(图略)中,样品落于中—高钾钙碱性系列岩石之中;固结指数SI=16.54~22.72(介于30~10),与安山岩、玄武安山岩相近,反映岩浆的分异程度较高;在图5b中样品具偏(准)铝质特征.

3.2.2 微量及稀土元素 附表2列出了测试样品微量元素及稀土元素分析结果.在图6b中,样品微量元素特征基本一致,表现为富集Rb、Th、U、K、Ba、Sr等大离子亲石元素(LILE),相对亏损Nb、Ta、P、Ti等高场强元素(HFSE),具有明显的Nb、Ta、Ti负异常,具有俯冲带岩石的特征.

在稀土元素组成上,样品稀土总量变化于84.45×10⁻⁶~170.3×10⁻⁶,在图6a中,样品具有一

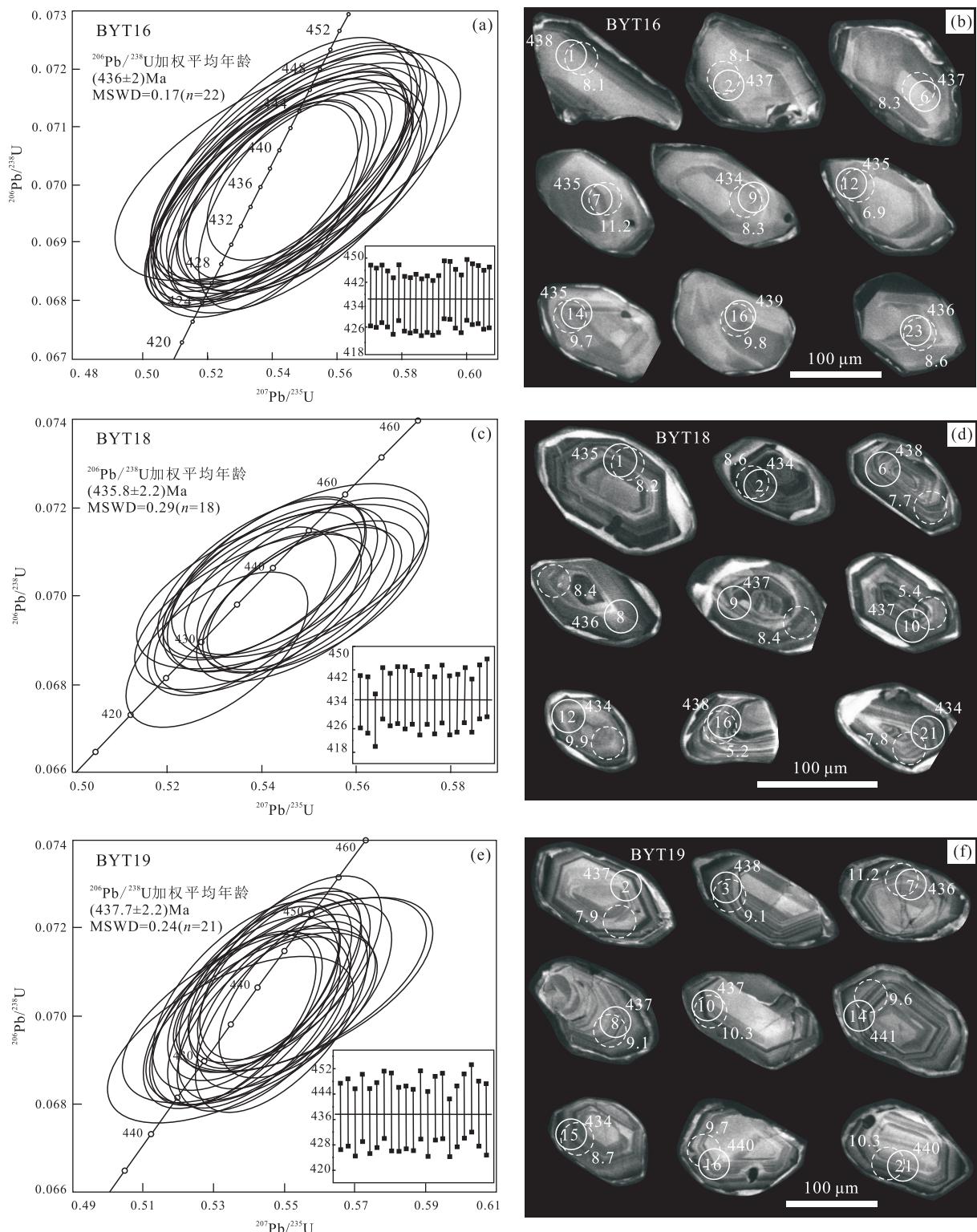


图 3 狼山北部闪长岩体锆石 U-Pb 年龄谐和图及阴极发光图像

Fig.3 Zircon U-Pb concordia diagram and CL images for diorite of northern Langshan
实心圆圈为 U-Pb 的年点;虚线圆圈为 Hf 同位素分析点

致的配分模式,显示为轻稀土(LREE)富集的右缓倾型配分曲线,LREE/HREE 比值在 5.86~10.45,(La/Sm)_N 介于 2.59~3.74,(La/Yb)_N 变化于

4.30~11.59 之间,反映轻稀土的分馏程度高于重稀土的分馏程度. δ Eu 变化于 0.80~0.96 间,具弱负 Eu 异常,表明岩浆源区斜长石的分离结晶作用不明显.

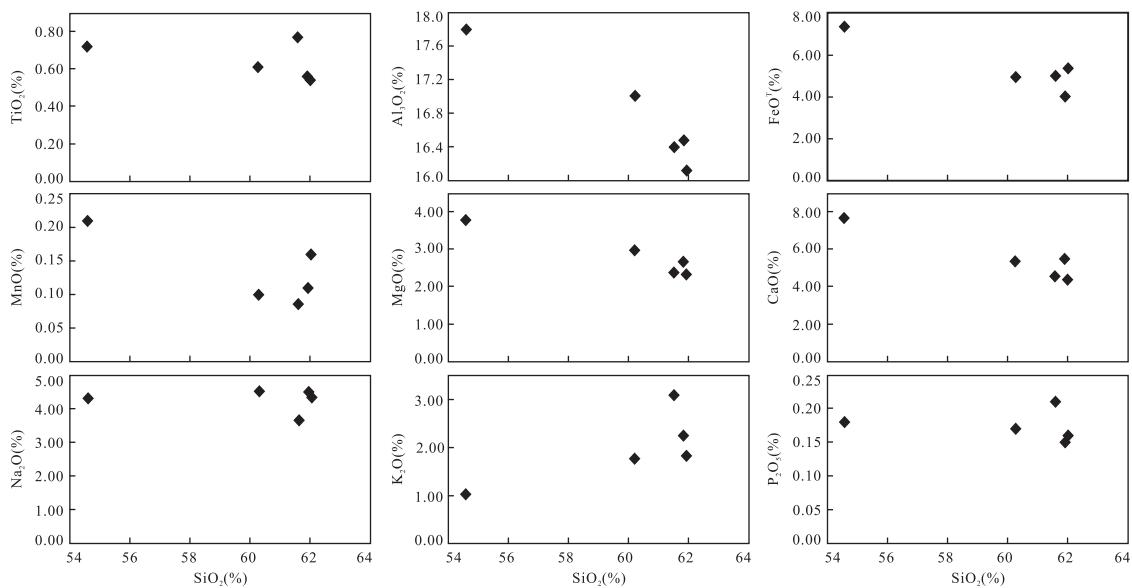


图 4 狼山北部早志留世岩体 Harker 图解

Fig.4 Harker diagrams of the Early Silurian batholith in northern Langshan

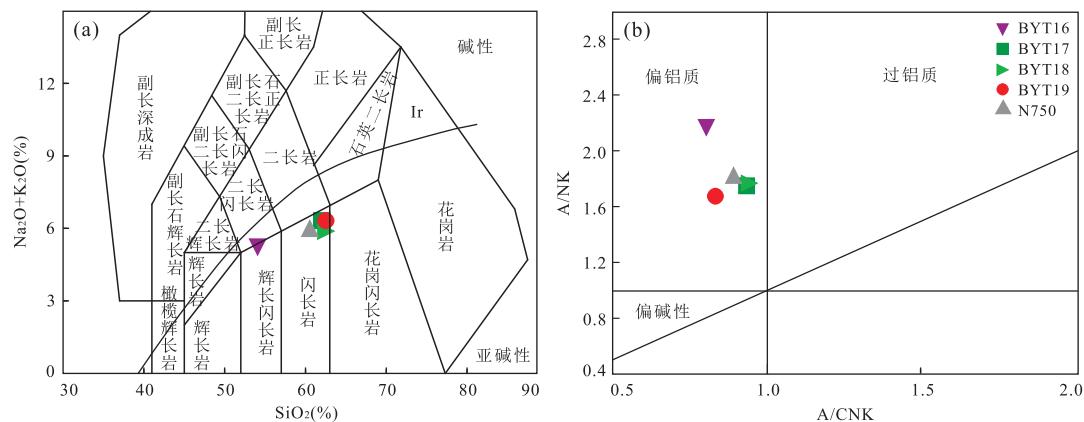


图 5 狼山北部早志留世岩体的 K_2O - SiO_2 图(a)与 A/NK-A/CNK 图(b)

Fig.5 K₂O-SiO₂ (a) and A/NK-A/CNK (b) discrimination diagrams of the Early Silurian batholith in northern Langshan

图 a 据 Wilson(1989);图 b 据 Maniar and Piccoli(1989)

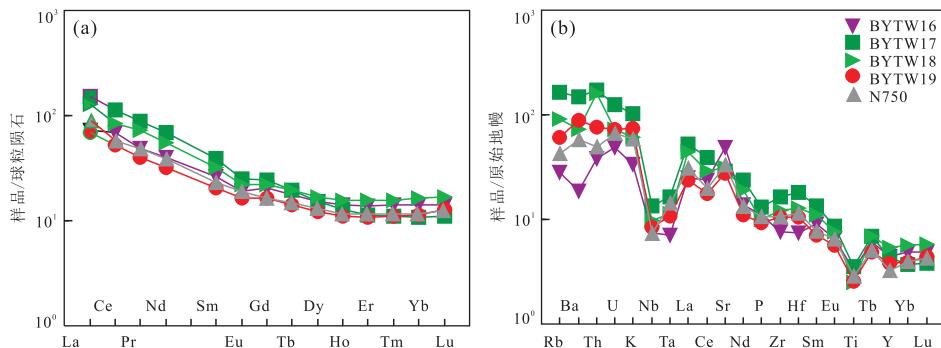


图 6 狼山北部旱志留世闪长岩体的稀土元素球粒陨石标准化图解(a)和微量元素原始地幔标准化图解(b)

Fig.6 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized trace elements spider diagrams (b) of the Early Silurian batholith in northern Langshan

标准化值据 Sun and McDonough(1989)

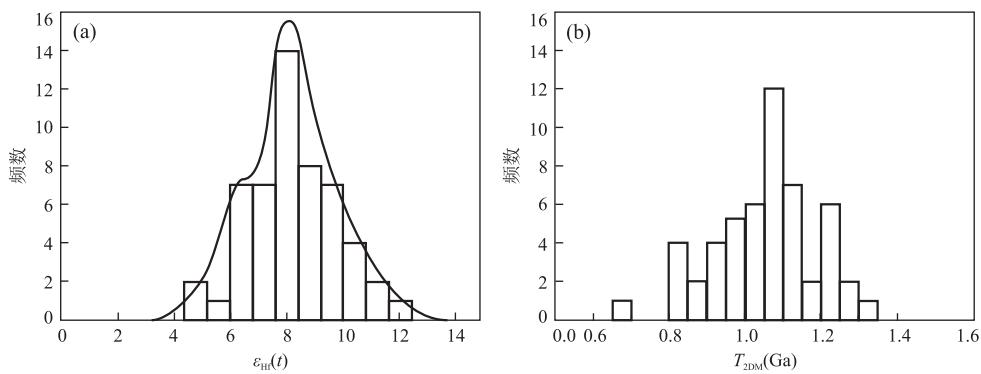


图 7 狼山北部早志留世闪长岩体锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(a)和二阶段 Hf 模式年龄($T_{2\text{DM}}$)(b)频数分布直方图

Fig.7 Histograms of zircon $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values (a) and two-stages Hf model ages ($T_{2\text{DM}}$) (b) of the Early Silurian batholith in northern Langshan

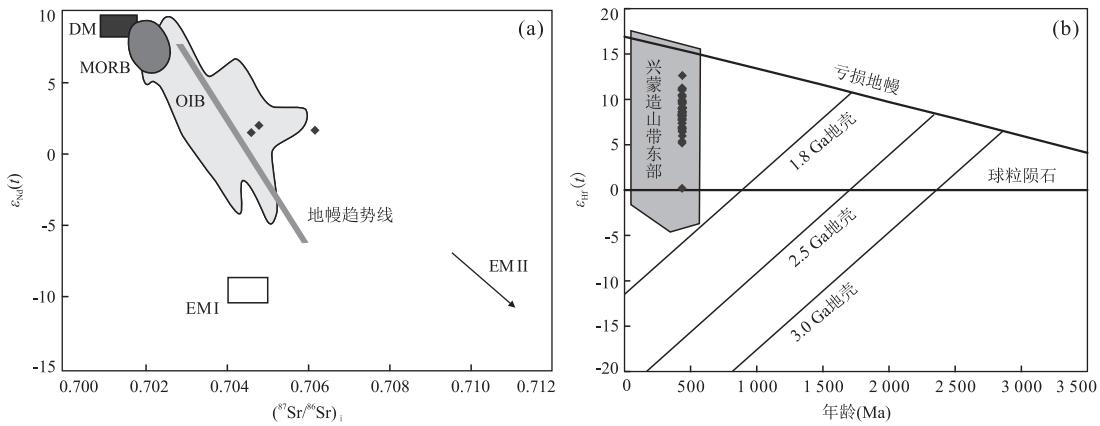


图 8 狼山北部早志留世闪长岩体 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i - \epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 关系(a)和 $t - \epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 关系(b)

Fig.8 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i - \epsilon_{\text{Nd}}(t)$ diagram (a) and $t - \epsilon_{\text{Hf}}(t)$ diagram (b) of the Early Silurian batholith in northern Langshan
DM. 亏损地幔; MORB. 洋中脊玄武岩; OIB. 洋岛玄武岩; EM I. I型富集地幔; EM II. II型富集地幔; 兴蒙造山带东部 Hf 同位素数据引自 Yang et al. (2006)

3.3 锆石 Hf 同位素

在锆石 U-Pb 定年的基础上,对样品进行了微量元素原位 Lu-Hf 同位素分析, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值及二阶段模式年龄使用锆石加权平均年龄进行计算,分析结果见附表 3。

锆石 Lu-Hf 同位素分析结果显示,早志留世闪长质侵入岩样品(BYT16、BYT18、BYT19)具有类似且较集中的初始 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值,主要介于 0.282 648~0.282 856, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化较小,主要介于 +5.2~+12.6(图 7a),具有亏损的同位素组成,对应二阶段模式年龄集中于 690~1 361 Ma(中—新元古代,图 7b),仅有 1 颗锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值偏小,为 0.2,对应的二阶段模式年龄 $T_{2\text{DM}}$ 为 1 811 Ma。在图 8b 中,样品点均落于球粒陨石演化线和亏损地幔演化线之间,指示有幔源或新生地壳组分参与成岩。

3.4 全岩 Sr-Nd 同位素分析

本次共对 3 件样品进行了 Sr-Nd 同位素分析,

数据列于附表 4。分析结果显示, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 介于 0.705 093~0.707 732, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 介于 0.512 523~0.512 564。对测定的锆石 U-Pb 加权年龄进行计算后得出,岩体整体具有较为均一的 Sr-Nd 同位素组成, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 比值介于 0.704 665~0.706 174, 具有亏损的 Nd 同位素组成, $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$ 范围为 0.512 168~0.512 179, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值均为正值(+1.84~+2.00), 相应的二阶段 Nd 模式年龄 $T_{2\text{DM}}$ 为 1.01~1.03 Ga, $f_{\text{Sm/Nd}}$ 介于 -0.31~-0.38。

4 讨论

4.1 岩石成因

地球化学数据显示,狼山北部早志留世岩体闪长岩和石英闪长岩均属于中—高钾钙碱性系列,微量元素显示 Rb、Th、U、K、Ba、Sr 等 LILE 富集, Nb、Ta、Ti 等 HFSE 显著亏损,以及富集 LREE 的

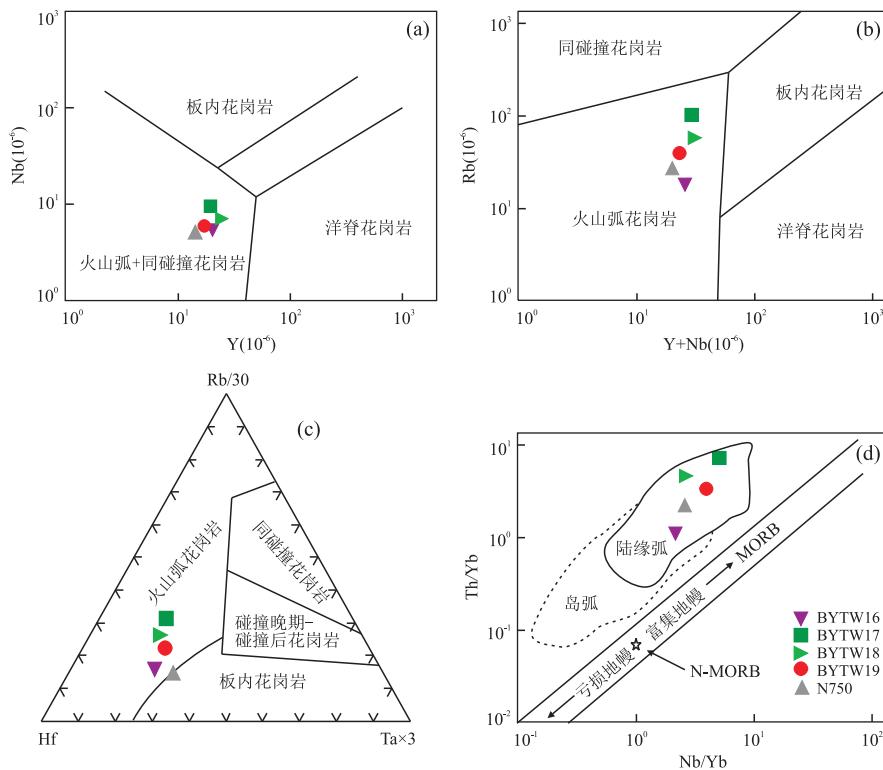


图9 狼山北部早志留世闪长岩体形成构造环境判别图解

Fig.9 Geochemical diagrams of tectonic environment discrimination for batholith of Early Silurian from northern Langshan
图a,b据Pearce *et al.*(1984);图c据Harris *et al.*(1986);图d据Defant and Drummond(1993)

稀土配分模式,具有俯冲带岩石的特征。

在Pearce花岗岩类Nb-Y和Rb-(Y+Nb)构造判别图解,以及Rb-Hf-Ta判别图解中,样品点均落入位于火山弧花岗岩区(图9a~9c);在图9d中,样品也具有陆缘弧的特点。以上特征表明,狼山北部早志留世岩体与周边早古生代岩浆岩类似,为俯冲环境下活动大陆边缘弧岩浆作用的产物。

张旗等(2004)、邓晋福等(2015)研究认为,俯冲弧岩浆岩来源于(1)地幔楔的部分熔融;(2)俯冲洋壳的部分熔融;(3)地幔楔上部的地壳的部分熔融。地幔楔的熔融通常产生玄武岩或高镁安山岩,样品SiO₂含量(54.6%~62.0%)较高,加之较低的MgO(2.35%~3.81%)、Cr(3.96×10^{-6} ~ 41.30×10^{-6})、Ni(3.71×10^{-6} ~ 12.5×10^{-6})含量,说明早志留世闪长岩体直接来源于地幔楔部分熔融的可能性不大。一般而言,俯冲洋壳的部分熔融物质常具有埃达克岩的特征,而样品Yb(1.85×10^{-6} ~ 2.77×10^{-6} ,平均值 2.18×10^{-6})和Y(14.6×10^{-6} ~ 24.4×10^{-6} ,平均值 19.2×10^{-6})含量较高,轻、重稀土分异程度不强($(La/Yb)_N = 4.3 \sim 11.6$),在图10中,样品点均落在典型岛弧岩浆岩区域,此外,埃达克岩通常具有类似于MORB的同位素亏损特征,其 $\epsilon_{Nd}(t) >$

+5, ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i<0.705(Martin, 1999),而早志留世闪长岩体样品的 $\epsilon_{Nd}(t) = +1.84 \sim +2.00$, ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i=0.704 665~0.706 174(平均值0.705 206),与埃达克岩有明显差别,表明早志留世闪长岩体并非俯冲洋壳熔融的产物。

此外,早志留世闪长岩体样品的Mg[#]范围为42.4~52.9,平均值为47.6,大于同等硅含量条件下玄武岩实验熔体的Mg[#](<40,Rapp and Waston, 1995),说明样品不是完全的壳源熔体,较高的Mg[#]值指示了幔源组分的加入,这也得到了岩相学特征的支持(发育少量暗色包体),但较低的MgO、Cr、Ni含量也说明幔源组分的加入较为有限,同时样品表现出强烈的Nb、Ta负异常也反映了其形成过程中再循环地壳物质的贡献较大。在球粒陨石标准化图解中,所有的样品均显示LREE富集,LREE的分馏程度高于HREE的分馏程度,HREE具平坦型的分布,结合样品较高的Yb(1.85×10^{-6} ~ 2.77×10^{-6} ,平均值 2.18×10^{-6})和Y(14.6×10^{-6} ~ 24.4×10^{-6} ,平均值 19.2×10^{-6})暗示源区缺少石榴石,结合弱的负Eu异常($\delta\text{Eu}=0.82 \sim 0.96$,平均值0.86),表明岩浆源区应处于相对低压位置(张旗等,2006)。

另外值得注意的是样品的Nb/U值为3.62~

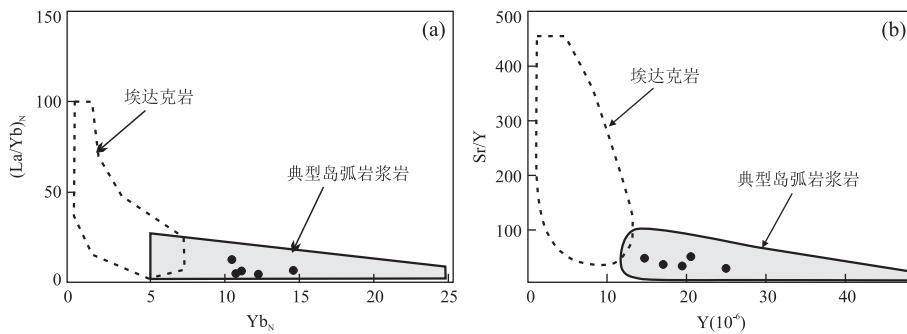
图 10 狼山北部早志留世闪长岩体的 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ - Yb_{N} 图(a)和 Sr/Y - Y 图(b)

Fig.10 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ - Yb_{N} (a) and Sr/Y - Y (b) plots for batholith of Early Silurian from northern Langshan
图 a 和图 b 中埃达克岩和典型岛弧岩浆岩区域引自 Martin(1999)

5.24, 明显低于下地壳的估算值($\text{Nb}/\text{U} \approx 25$, Rudnick and Gao, 2003), 而 Nb/U 值一般很难因岩浆分离结晶作用或部分熔融的程度而改变, 考虑到俯冲板片脱水过程大离子亲石元素(LILE)富集于流体、而高场强元素(HFSE, 特别是 Nb、Ta、Ti)更多地保留于残留矿物中(金红石、钛铁矿等, Brenan *et al.*, 1994), 导致流体具有极低的 Nb/U 值(约 0.22, Ayers, 1998), 因此, 样品中偏低的 Nb/U 值指示了其源区遭受了俯冲板片脱水形成的流体交代作用的影响(杨泽黎等, 2017).

在同位素组成上, 早志留世闪长岩体具有明显亏损的特点, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 和 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 均为较高的正值. $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值介于 1.84~2.00, 对应的较年轻且集中的 $T_{2\text{DM}}$ 年龄(1.01~1.03 Ga); $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值主要介于 5.2~12.6, 对应二阶段模式年龄为 0.690~0.136 Ga, 在 $t_{\text{Hf}}(t)$ 图解中位于球粒陨石和亏损地幔之间, 并靠近亏损地幔, 与前人总结的兴蒙造山带东段显生宙岩浆岩 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值区域(图 7b, Yang *et al.*, 2006)一致; Hf 对应二阶段模式年龄和 Nd 二阶段模式年龄均为中—新元古代且变化范围较小(主要集中于 0.9~1.2 Ga 之间, 图 8b), 说明岩体主要起源于从地幔分离出来的新生下地壳的部分熔融, 同时也反映了中—新元古代的地壳增生事件(Wu *et al.*, 2000; Jahn *et al.*, 2000; Jahn, 2004). 结合前述分析, 研究区早志留世闪长质岩体为俯冲背景下活动大陆边缘弧岩浆作用的产物, 可能的形成过程是受俯冲板片析出流体交代的地幔楔发生部分熔融, 上升的幔源岩浆在下地壳处发生底侵, 诱发新生下地壳的熔融, 并遭受了俯冲带流体的交代作用, 侵位形成闪长质岩体.

4.2 岩体时代及其大地构造意义

本次研究对狼山北部巴音杭盖地区闪长岩和石

英闪长岩进行了锆石 LA-MC-ICPMS U-Pb 测年, 获得了 $435.8 \pm 2.2 \text{ Ma} \sim 437.7 \pm 2.2 \text{ Ma}$ 的年龄, 表明这套闪长质侵入岩的侵位时代为早志留世晚期, 代表了早古生代的一期构造热事件. 区域地质资料表明, 早古生代是内蒙古中西部地区构造—岩浆活动的频发期, 以温都尔庙蛇绿岩为代表的早古生代温都尔庙洋的消减闭合, 形成了南部包尔汉图—白乃庙岛弧岩浆岩带(许立权等, 2003; 李建峰等, 2010; Zhang *et al.*, 2013; 冯丽霞等, 2013; Wang *et al.*, 2015)和北部白音宝力道岛弧岩浆岩带(陈斌, 2002; 刘敦一等, 2003; 石玉若等, 2004), 揭示出早古生代洋壳双向俯冲消减的特点(Jian *et al.*, 2008; 徐备等, 2016). 区域上达茂旗北部西别河组(S_3 - D_1x)角度不整合覆盖在下伏包尔汉图群($O_{1-2}B$)岛弧火山沉积岩系之上(内蒙古地质矿产局, 1991), 指示华北克拉通北缘在晚志留世之前发生了一次重要的弧—陆碰撞事件. 锆石 U-Pb 年代学研究表明, 白乃庙岛弧岩浆岩带中弧火山岩与侵入岩年龄主要集中于 474~436 Ma(许立权等, 2003; 李建峰等, 2010; Zhang *et al.*, 2013; 冯丽霞等, 2013; Wang *et al.*, 2015), 结合 de Jong *et al.* (2006) 对温都尔庙俯冲增生杂岩中石英糜棱岩的蓝闪石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 测年获得的 449~453 Ma 年龄, 将白乃庙岛弧的活动时间约束在奥陶纪—早志留世之间.

狼山北部巴音杭盖早志留世岩体与白乃庙岛弧岩浆岩带在构造位置上均位于华北克拉通北缘陆缘增生带, 且位于温都尔庙—桑根达来—乌德—索伦山南构造蛇绿岩带的南侧. 地球化学研究表明狼山北部早志留世岩体为活动大陆边缘弧岩浆岩, 与白乃庙岛弧岩浆岩带形成时代基本相同, 构成一条近东西向的弧岩浆岩带, 该弧岩浆岩带位于蛇绿岩带

南侧,指示了温都尔庙洋壳向南俯冲的极性。

前人关于狼山地区构造单元的划分存在不同的意见,一是将狼山北部地区置于兴蒙造山带中,其与华北克拉通的构造边界位于乌拉特中旗北缘断裂(内蒙古自治区地质矿产局,1991),其二是将狼山北部宝音图一带划为华北克拉通(沈存利等,2004)。狼山北部早古生代奥陶纪蛇绿岩带代表的早古生代洋壳组合位于志留纪岛弧岩浆岩带北侧,大致沿索伦山南部近东西向展布,向东与达茂旗乌德蛇绿混杂岩带相连,构成温都尔庙—车根达来—乌德—索伦山南的早古生代蛇绿混杂岩带。志留纪岛弧岩浆岩的确定,明确了狼山北部地区属于华北克拉通北缘早古生代活动大陆边缘,为白乃庙岛弧带向西延展的部分,对确定华北北缘西段早古生代“沟—弧—盆”体系(刘金龙等,2016; Xu et al., 2013)具有重要的意义。

5 结论

(1) 锆石 U-Pb 测年结果表明,狼山北部闪长质岩体形成时代为 $(435.8 \pm 2) \text{ Ma} \sim (437.7 \pm 2.2) \text{ Ma}$,为一套形成于早志留世的中—高钾钙碱性岛弧型岩浆岩。

(2) 年代学、岩石地球化学、Sr-Nd-Hf 同位素结合区域地质资料分析表明,狼山北部早志留世闪长质岩体形成于早古生代温都尔庙洋沿温都尔庙—乌德—索伦山一线南向俯冲背景下,遭受了俯冲板片析出流体交代作用的新生下地壳部分熔融的产物。

(3) 狼山北部志留纪岛弧岩浆岩带的确定,为兴蒙造山带白乃庙岛弧带向西延展提供了依据,同时为华北北缘西段早古生代“沟—弧—盆”体系的确定提供了重要素材。

致谢:实验测试中得到中国地质调查局天津地质调查中心李国占、崔玉荣、刘文刚工程师的帮助和支持,论文写作得到中国地质调查局天津地质调查中心王惠初研究员的指导,在此表示由衷感谢!

附补充信息表见:<http://www.earth-science.net/WebPage/view.aspx? id=20190117065749.pdf>

References

Ayers, J., 1998. Trace Element Modeling of Aqueous Fluid-Peridotite Interaction in the Mantle Wedge of Subduction Zones. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 132 (4): 390 — 404. <https://doi.org/10.1007/s00410-000-0504-3>

s004100050431

Brenan, J. M., Shaw, H. F., Phinney, D. L., et al., 1994. Rutile-Aqueous Fluid Partitioning of Nb, Ta, Hf, Zr, U and Th: Implications for High Field Strength Element Depletions in Island-Arc Basalts. *Earth and Planetary Science Letters*, 128 (3/4): 327 — 339. [https://doi.org/10.1016/0012-821x\(94\)90154-6](https://doi.org/10.1016/0012-821x(94)90154-6)

Bureau of Geology and Mineral Resources of Nei Mongol Autonomous Region, 1991. *Regional Geology of Nei Mongol (Inner Mongolia) Autonomous Region*. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).

Chen, B., 2002. Characteristics and Genesis of the Bayan Bold Pluton in Southern Sonid Zuqi, Inner Mongolia—Typical Island Arc Magmatic Rocks Instead of Adakitic Rocks. *Geological Review*, 48(3): 261—266 (in Chinese with English abstract).

Defant, M. J., Drummond, M. S., 1993. Mount St. Helens: Potential Example of the Partial Melting of the Subducted Lithosphere in a Volcanic Arc. *Geology*, 21 (6): 547. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1993\)021<0547:mshpeo>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1993)021<0547:mshpeo>2.3.co;2)

Deng, J. F., Feng, Y. F., Di, Y. J., et al., 2015. Magmatic Arc and Ocean-Continent Transition: Discussion. *Geological Review*, 61(3): 473—484 (in Chinese with English abstract).

Feng, L. X., Zhang, Z. C., Han, B. F., et al., 2013. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Ages of Granitoids in Darhan Mumenggan Joint Banner, Inner Mongolia, and Their Geological Significance. *Geological Bulletin of China*, 32(11): 1737—1748 (in Chinese with English abstract).

Geng, J. Z., Li, H. K., Zhang, J., et al., 2011. Zircon Hf Isotope Analysis by Means of LA-MC-ICP-MS. *Geological Bulletin of China*, 30(10): 1508 — 1513 (in Chinese with English abstract).

Harris, N. B. W., Pearce, J. A., Tindle, A. G., 1986. Geochemical Characteristics of Collision-Zone Magmatism. *Geological Society, London, Special Publications*, 19 (1): 67 — 81. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1986.019.01.04>

Jahn, B. M., Wu, F. Y., Hong, D. W., 2000. Important Crustal Growth in the Phanerozoic: Isotopic Evidence of Granitoids from East-Central Asia. *Journal of Earth System Science*, 109 (1): 5 — 20. <https://doi.org/10.1007/bf02719146>

Jahn, B. M., 2004. The Central Asian Orogenic Belt and Growth of the Continental Crust in the Phanerozoic. *Geological Society, London, Special Publications*, 226 (1): 73 — 100. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.2004.226.01.05>

Jian, P., Liu, D. Y., Kröner, A., et al., 2008. Time Scale of an Early to Mid-Paleozoic Orogenic Cycle of the Long-Lived Cen-

- tral Asian Orogenic Belt, Inner Mongolia of China; Implications for Continental Growth. *Lithos*, 101(3/4):233—259. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2007.07.005>
- de Jong, K., Xiao, W., Windley, B.F., et al., 2006. Ordovician $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Phengite Ages from the Blueschist-Facies Ondor Sum Subduction-Accretion Complex (Inner Mongolia) and Implications for the Early Paleozoic History of Continental Blocks in China and Adjacent Areas. *American Journal of Science*, 306 (10): 799 — 845. <https://doi.org/10.2475/10.2006.02>
- Li, H.K., Zhu, S.X., Xiang, Z.Q., et al., 2010. Zircon U-Pb Dating on Tuff Bed from Gaoyuzhuang Formation in Yanqing, Beijing: Further Constraints on the New Subdivision of the Mesoproterozoic Stratigraphy in the Northern North China. *Acta Petrologica Sinica*, 26(7): 2131—2140 (in Chinese with English abstract).
- Li, J.F., Zhang, Z.C., Han, B.F., et al., 2010. Ar-Ar and Zircon SHRIMP Geochronology of Hornblendite and Diorite in Northern Darhan Muminggan Joint Banner, Inner Mongolia, and Its Geological Significance. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 29 (6): 732 — 740 (in Chinese with English abstract).
- Li, J.Y., 2006. Permian Geodynamic Setting of Northeast China and Adjacent Regions: Closure of the Paleo-Asian Ocean and Subduction of the Paleo-Pacific Plate. *Journal of Asian Earth Sciences*, 26 (3—4): 207 — 224. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2005.09.001>
- Li, J.Y., Zhang, J., Yang, T.N., et al., 2009. Crustal Tectonic Division and Evolution of the Southern Part of the North Asian Orogenic Region and Its Adjacent Areas. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 39(4):584—605 (in Chinese with English abstract).
- Liu, D.Y., Jian, P., Zhag, Q., et al., 2003. SHRIMP Dating of Adakites in the Tulingkai Ophiolite, Inner Mongolia: Evidence for the Early Paleozoic Subduction. *Acta Petrologica Sinica*, 77 (3): 317 — 327 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J.L., Sun, F.Y., Wang, Y.D., et al., 2016. Tectonic Setting of Hadahushu Mafic Intrusion in Urad Zhongqi Area, Inner Mongolia: Implications for Early Subduction History of Paleo-Asian Ocean Plate. *Earth Science*, 41 (12):2019—2030 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2016.141>
- Liu, Y.S., Hu, Z.C., Zong, K.Q., et al., 2010. Reappraisal and Refinement of Zircon U-Pb Isotope and Trace Element Analyses by LA-ICP-MS. *Chinese Science Bulletin*, 55 (15): 1535 — 1546. <https://doi.org/10.1007/s11434-010-3052-4>
- Ludwig, K. R., 2003. User's Manual for Isoplot/ EX (rsv. 3.0): A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. 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)
- Martin, H., 1999. Adakitic Magmas: Modern Analogues of Archaean Granitoids. *Lithos*, 46 (3): 411 — 429. [https://doi.org/10.1016/s0024-4937\(98\)00076-0](https://doi.org/10.1016/s0024-4937(98)00076-0)
- 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>
- Peng, S.H., Sun, L.X., Shi, X.Z., et al., 2013. Age and Geochemistry of Sanmianjing Pluton in Northern Hebei and Its Geological Implication. *Global Geology*, 32 (4): 694 — 706 (in Chinese with English abstract).
- Qian, X.Y., Zhang, Z.C., Chen, Y., et al., 2017. Geochronology and Geochemistry of Early Paleozoic Igneous Rocks in Zhurihe Area, Inner Mongolia and Their Tectonic Significance. *Earth Science*, 42 (9): 1472 — 1494 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.545>
- Rudnick, R.L., Gao, S., 2003. Composition of the Continental Crust. In: Holland, H. D., Turekian, K. K., eds., *The Crust. Treatise on Geochemistry 3*. Elsevier-Pergamon, Oxford.
- Rapp, R.P., Watson, E.B., 1995. Dehydration Melting of Metabasalt at 8 — 32 kbar: Implications for Continental Growth and Crust-Mantle Recycling. *Journal of Petrology*, 36(4):891 — 931. <https://doi.org/10.1093/petrology/36.4.891>
- Shen, C.L., Chen, Z.Y., Chang, Z.Y., 2004. The Caledonian Foldbelt or the North China Platform Does the Buyant Uplift in Inner Mongolia Belong to? *Geological Survey and Research*, 27(1):18—23 (in Chinese with English abstract).
- Shi, Y.R., Liu, D.Y., Zhang, Q., et al., 2004. SHRIMP Dating of Diorites and Granites in Southern Suzuoqi, Inner Mongolia. *Acta Geologica Sinica*, 78 (6): 789 — 799 (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, L.X., Zhao, F.Q., Wang, H.C., et al., 2013. Zircon U-Pb Geochronology of Metabase Rocks from the Baoyintu

- Block in the Langshan Area, Inner Mongolia, and Its Tectonic Significance. *Acta Geologica Sinica*, 87(2): 197—207 (in Chinese with English abstract).
- Sun, L.X., Zhang, Y., Li, Y., et al., 2017. Geochemical Characteristics and Intraplate Extension of Late Devonian Bimodal Volcanic Rocks in Chifeng Area of Inner Mongolia. *Geology in China*, 44(2): 371—388 (in Chinese with English abstract).
- Wang, H.C., Zhao, F.Q., Li, H.M., et al., 2007. Zircon SHRIMP U-Pb Age of the Dioritic Rocks from Northern Hebei: The Geological Records of Late Paleozoic Magmatic Arc. *Acta Petrologica Sinica*, 23(3): 597—604 (in Chinese with English abstract).
- Wang, S.Q., Xin, H.T., Hu, X.J., et al., 2016. Geochronology, Geochemistry and Geological Significance of Early Paleozoic Wulanaobaotu Intrusive Rocks, Inner Mongolia. *Earth Science*, 41(4): 555—569 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2016.046>
- Wang, Z.Z., Han, B.F., Feng, L.X., et al., 2015. Geochronology, Geochemistry and Origins of the Paleozoic-Triassic Plutons in the Langshan Area, Western Inner Mongolia, China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 97: 337—351. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2014.08.005>
- Wilson, M., 1989. Igneous Petrogenesis. Unwin Hyman, London.
- Wu, F.Y., Jahn, B.M., Wilde, S., et al., 2000. Phanerozoic Crustal Growth: U-Pb and Sr-Nd Isotopic Evidence from the Granites in Northeastern China. *Tectonophysics*, 328(1—2): 89—113. [https://doi.org/10.1016/s0040-1951\(00\)00179-7](https://doi.org/10.1016/s0040-1951(00)00179-7)
- Xu, B., Charvet, J., Chen, Y., et al., 2013. Middle Paleozoic Convergent Orogenic Belts in Western Inner Mongolia (China): Framework, Kinematics, Geochronology and Implications for Tectonic Evolution of the Central Asian Orogenic Belt. *Gondwana Research*, 23(4): 1342—1364. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2012.05.015>
- Xu, B., Xu, Y., Li, J., et al., 2016. Age of the Ondor Sum Group in Western Inner Mongolia and Its Position in the Central Asia Orogenic Belt. *Earth Science Frontiers*, 23(6): 120—127 (in Chinese with English abstract).
- Xu, L.Q., Deng, J.F., Chen, Z.Y., et al., 2003. The Identification of Ordovician Adakites and Its Signification in Northern Damiao, Inner Mongolia. *Geoscience*, 17(4): 428—434 (in Chinese with English abstract).
- Yang, J., Wu, F., Shao, J., et al., 2006. Constraints on the Timing of Uplift of the Yanshan Fold and Thrust Belt, North China. *Earth and Planetary Science Letters*, 246(3—4): 336—352. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.04.029>
- Yang, Z.L., Wang, S.Q., Hu, X.J., et al., 2017. Petrogenesis of the Early Paleozoic Jiergalangtu Pluton in Inner Mongolia: Constraints from Geochronology, Geochemistry and Nd-Hf Isotopes. *Geological Bulletin of China*, 36(8): 1369—1384 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Q., Xu, J.F., Wang, Y., et al., 2004. Diversity of Adakite. *Geological Bulletin of China*, 23(Z2): 959—965 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Q., Wang, Y., Li, C.D., et al., 2006. Granite Classification on the Basis of Sr and Yb Contents and Its Implications. *Acta Petrologica Sinica*, 22(9): 2249—2269 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, S.H., Zhao, Y., Song, B., et al., 2009. Contrasting Late Carboniferous and Late Permian-Middle Triassic Intrusive Suites from the Northern Margin of the North China Craton: Geochronology, Petrogenesis, and Tectonic Implications. *Geological Society of America Bulletin*, 121(1—2): 181—200. <https://doi.org/10.1130/b26157.1>
- Zhang, S.H., Zhao, Y., Liu, J.M., et al., 2010. Geochronology, Geochemistry and Tectonic Setting of the Late Paleozoic-Early Mesozoic Magmatism in the Northern Margin of the North China Block: A Preliminary Review. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 29(6): 824—842 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, W., Jian, P., Kröner, A., et al., 2013. Magmatic and Metamorphic Development of an Early to Mid-Paleozoic Continental Margin Arc in the Southernmost Central Asian Orogenic Belt, Inner Mongolia, China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 72: 63—74. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2012.05.025>

附中文参考文献

- 内蒙古自治区地质矿产局,1991.内蒙古自治区区域地质志.北京:地质出版社.
- 陈斌,2002.内蒙古苏尼特左旗南白音宝力道岩体特征与成因——是岛弧岩浆岩而不是埃达克岩.地质论评,48(3): 261—266.
- 邓晋福,冯艳芳,狄永军,等,2015.岩浆弧火成岩构造组合与洋陆转换.地质论评,61(3): 473—484.
- 冯丽霞,张志诚,韩宝福,等,2013.内蒙古达茂旗花岗岩类LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义.地质通报,32(11): 1737—1748.
- 耿建珍,李怀坤,张健,等,2011.锆石 Hf 同位素组成的 LA-MC-ICP-MS 测定.地质通报,30(10): 1508—1513.
- 李怀坤,朱士兴,相振群,等,2010.北京延庆高于庄组凝灰岩的锆石 U-Pb 定年研究及其对华北北部中元古界划分新方案的进一步约束.岩石学报,26(7): 2131—2140.
- 李建峰,张志诚,韩宝福,2010.内蒙古达茂旗北部闪长岩锆石 SHRIMP U-Pb、角闪石⁴⁰Ar/³⁹Ar 年代学及其地质

- 意义.岩石矿物学杂志,29(6): 732—740.
- 李锦轶,张进,杨天南,等,2009.北亚造山区南部及其毗邻地区地壳构造分区与构造演化.吉林大学学报:地球科学版,39(4): 584—605.
- 刘敦一,简平,张旗,等,2003.内蒙古图林凯蛇绿岩埃达克岩 SHRIMP 测年:早古生代洋壳消减的证据.地质学报,77(3): 317—327.
- 刘金龙,孙丰月,王英德,等,2016.内蒙古乌拉特中旗哈达呼舒基性岩体形成的构造背景与古亚洲洋的早期俯冲历史.地球科学,41(12): 2019—2030.
- 彭树华,孙立新,时学忠,等,2013.冀北三面井岩体时代、地球化学特征及其地质意义.世界地质,32(4): 694—706.
- 钱筱嫣,张志诚,陈彦,等,2017.内蒙古朱日和地区早古生代岩浆岩年代学、地球化学特征及其构造意义.地球科学,42(9): 1472—1494.
- 沈存利,陈志勇,常忠耀,2004.内蒙古“宝音图隆起”的归属讨论.地质调查与研究,27(1): 18—23.
- 石玉若,刘敦一,张旗,等,2004.内蒙古苏左旗地区闪长花岗岩类 SHRIMP 年代学.地质学报,78(6): 789—799.
- 孙立新,赵凤清,王惠初,等,2013.内蒙古狼山地区宝音图地块变质基底的锆石 U-Pb 年龄及构造意义.地质学报,87(2): 197—207.
- 孙立新,张云,李影,等,2017.内蒙古赤峰地区晚泥盆世双峰式火山岩地球化学特征与板内伸展事件.中国地质,44(2): 371—388.
- 王惠初,赵凤清,李惠民,等,2007.冀北闪长质岩石的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄:晚古生代岩浆弧的地质记录.岩石学报,23(3): 597—604.
- 王树庆,辛后田,胡晓佳,等,2016.内蒙古乌兰敖包图早古生代侵入岩年代学、地球化学特征及地质意义.地球科学,41(4): 555—569.
- 徐备,徐严,栗进,等,2016.内蒙古西部温都尔庙群的时代及其在中亚造山带中的位置.地学前缘,23(6): 120—127.
- 许立权,邓晋福,陈志勇,等,2003.内蒙古达茂旗北部奥陶纪埃达克岩类的识别及其意义.现代地质,17(4): 428—434.
- 杨泽黎,王树庆,胡晓佳,等,2017.内蒙古吉尔嘎郎图早古生代岩体成因——年代学、地球化学及 Nd-Hf 同位素制约.地质通报,36(8): 1370—1384.
- 张旗,许继峰,王焰,等,2004.埃达克岩的多样性.地质通报,23(Z2): 959—965.
- 张旗,王焰,李承东,等,2006.花岗岩的 Sr-Yb 分类及其地质意义.岩石学报,22(9): 2249—2269.
- 张拴宏,赵越,刘建民,等,2010.华北地块北缘晚古生代—早中生代岩浆活动期次、特征及构造背景.岩石矿物学杂志,29(6): 824—842.