https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.381



# 内蒙古阿巴嘎旗地区宝力高庙组火山岩 特征及对古亚洲洋东段演化的制约

刘 博1, 靳胜凯1,2\*,马 明1, 李利阳1, 谢志远1, 王建民1

中国地质调查局廊坊自然资源综合调查中心,河北廊坊 065000
 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室,北京 100083

摘 要:为了精细刻画古亚洲洋在内蒙古阿巴嘎旗地区的构造演化,选取宝力高庙组火山岩为研究对象,开展了详细的野外调查及锆石U-Pb年代学、岩石学、全岩地球化学研究.将宝力高庙组重新厘定为4个段,其中二段角闪安山岩、三段流纹岩和四段流纹质晶屑凝灰岩的锆石U-Pb年龄分别为320.1±5.7 Ma、315.1±4.1 Ma和304.8±2.3 Ma.宝力高庙组火山岩整体为亚碱性系列,属于高钾,弱过铝质岩石,是经过幔源岩浆底侵形成的加厚下地壳部分熔融的产物.研究区从宝力高庙组二段的大陆边缘弧构造环境演变为三段、四段火山岩的碰撞-后碰撞环境.结合前人对研究区早二叠世岩浆活动研究成果(碰撞后伸展阶产物),古亚洲洋二连-贺根山洋盆在晚石炭世经历了以洋内俯冲作用为特征的大洋俯冲消亡过程,在晚石炭世晚期本区构造演化进入到兴蒙造山带中部微陆块拼贴阶段.
关键词:古亚洲洋;兴蒙造山带;二连-贺根山洋盆;宝力高庙组;火山岩;岩石学;地球化学.
中图分类号: P588.1;P597.3

## Petrogenesis of the Baoligaomiao Volcanic Rocks in the Abaga Banner, Inner Mongolia: Implications for Evolution of the Eastern Paleo Asian Ocean

Liu Bo<sup>1</sup>, Jin Shengkai<sup>1,2\*</sup>, Ma Ming<sup>1</sup>, Li Liyang<sup>1</sup>, Xie Zhiyuan<sup>1</sup>, Wang Jianmin<sup>1</sup>

1. Langfang Comprehensive Natural Resources Survey Center, China Geological Survey, Langfang 065000, China

2. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences,

Beijing 100083, China

**Abstract:** To investigate the tectonic evolution process of the Paleo-Asian Ocean in the Abaga Banner, Inner Mongolia, this paper presents detailed petrological, zircon U - Pb chronological, and whole-rock geochemical studies of the volcanic rocks of the Baoligaomiao Formation. We redefine the Baoligaomiao Formation into four members. Zircon U-Pb ages of the second member amphibole andesite, the third member rhyolite and the fourth member rhyolitic crystal tuff yield a U-Pb age of  $320.1\pm5.7$  Ma,  $315.1\pm4.1$  Ma and  $304.8\pm2.3$  Ma, respectively. The Baoligaomiao volcanic rocks are characterized by high-K and weak peraluminous rocks affinities, belonging to sub-alkaline series, and they are interpreted to be formed by the product of partial melting of the thickened lower crust formed by mantle-derived magma underplating. The study area evolved from the

基金项目:内蒙古锡林郭勒盟阿巴嘎旗白音吉日嘎拉大队等四幅1:5万区域地质调查项目(No. 12120114062101);内蒙古化德-河北康保县德 包图等4幅1:5万区域地质调查项目(No. DD20208003).

作者简介:刘博(1986-),男,硕士研究生,工程师,主要从事基础地质学研究.ORCID:0000-0001-5828-9167.E-mail:liubo33564@163.com \* 通讯作者:靳胜凯,E-mail:jinsk01@qq.com

**引用格式:**刘博,靳胜凯,马明,李利阳,谢志远,王建民,2023.内蒙古阿巴嘎旗地区宝力高庙组火山岩特征及对古亚洲洋东段演化的制约.地 球科学,48(9):3312-3326.

**Citation**: Liu Bo, Jin Shengkai, Ma Ming, Li Liyang, Xie Zhiyuan, Wang Jianmin, 2023. Petrogenesis of the Baoligaomiao Volcanic Rocks in the Abaga Banner, Inner Mongolia: Implications for Evolution of the Eastern Paleo Asian Ocean. *Earth Science*, 48(9):3312–3326.

continental margin arc tectonic environment recorded by the second member of the Baoligaomiao Formation to the collision by the third member of the volcanic rocks, until to post-collision environment by the fourth member of the volcanic rocks. Combined with the previous research results of the Early Permian magmatic activity in this area (product of the post-collision extensional stage), it is suggested that the Erenhot-Hegenshan oceanic basin of the Paleo Asian Ocean was in the process of oceanic slab destruction characterized by intra-oceanic subduction during the Late Carboniferous. A synthetic study of the geochemical characteristics of the Baoligaomiao volcanic rocks and the regional geological data reveals that the study area was in the setting of micro-continents collision during the late Late Carboniferous.

Key words: Paleo-Asian Ocean; Xingmeng orogenic belt; Erenhot-Hegenshan oceanic; Baoligaomiao Formation; volcanic rocks; petrology; geochemistry.

## 0 引言

中亚造山带是指夹持于西伯利亚和中朝-塔 里木地块之间的一个构造带,西起乌拉尔,向东 经哈萨克斯坦、中国西北、蒙古、中国东北,延至 俄罗斯远东地区鄂霍茨克,是全球规模最大的 增生型造山带,记录着显生宙以来陆壳生长的 完整过程.兴蒙造山带作为中亚造山带的重要 组成部分,位于中亚造山带的中东端,在古生代 属于古亚洲洋构造域,中生代以来受蒙古-鄂霍 茨克构造域和滨西太平洋构造域的叠加改造影 响 (Jahn et al., 2004; Xiao et al., 2015), 其形成 与古亚洲洋俯冲和两大陆块碰撞密切相关(李 锦轶等,2009;金松等,2022).兴蒙造山带发展 历史长、构造岩浆活动复杂,由弧岩浆岩、增生 带、蛇绿岩和微陆块组成,是人们研究的热点区 域 (Xiao et al., 2003; Xu et al., 2013; 刘基等, 2020). 地质学家们在对兴蒙造山带长期以来的 研究中取得了大量的研究成果,但是关于西伯 利亚陆块和华北陆块碰撞的时间及位置还存在 较大的分歧.虽然目前许多学者倾向于支持古 亚洲洋沿索伦-西拉木伦-长春构造带双向俯冲 并最终闭合的观点(Song et al., 2015),但对于 古亚洲洋的最终闭合时限还存在较大争议,概 括起来主要有中晚泥盆世(吴子杰等,2020)、 早-中二叠世(李英杰等, 2016)、晚二叠-早三叠 世(李锦轶等,2009;李朋武等,2009;杜继宇 等,2019)、中三叠世,并且表现为自西向东逐 渐闭合的剪刀式闭合方式(许文良等,2019).

众所周知,火山岩是岩浆喷至地表的直接 产物,记载了大量的地球深部信息,其矿物组成、岩石结构及其地球化学特征能够反映岩浆 事件发生时岩石圈的结构和物质组成,也是探 索岩石圈深部作用过程及其演化的重要依据. 内蒙古阿巴嘎旗位于兴蒙造山带中段,是研究 兴蒙造山带构造演化过程的重要地区之一.在 内蒙古中东部宝力高庙组火山岩大面积出露, 是兴蒙造山带分布最广泛的古生代火山岩地层 之一.但前人对研究区宝力高庙组火山岩缺少 系统研究,制约了对其岩浆源区和形成构造环 境背景的深入探讨.因此,系统研究其时空分 布及岩石成因,可对古亚洲洋东段晚古生代 洋内俯冲与洋陆转换提供重要岩石学证据. 笔者在详细野外地质调查的基础上,对阿巴 嘎旗地区宝力高庙组进行了精细研究,并进 行了分段讨论.通过对宝力高庙组火山岩岩 石学、锆石 U-Pb 年代学、全岩地球化学特征 研究,系统地探讨了其岩石成因、岩浆演化 和源区性质,为研究兴蒙造山带中段在晚古 生代的构造演化提供了新的地质资料.

## 1 地质背景

兴蒙造山带属于中亚造山带东段,以索伦-西拉木伦缝合带为界可以划分为南造山带、北 造山带及索伦-西拉木伦缝合带(Xiao et al., 2003;图1).研究区地处内蒙古自治区阿巴嘎旗 中北部,位于华北板块与西伯利亚板块结合部 位中段;大地构造位置属于阿尔泰-兴蒙造山系 (I级)、大兴安岭弧盆系(II级)、东乌珠穆沁 旗-多宝山岛弧(II级;潘桂棠等,2016),横跨南 蒙古陆块与二连-贺根山蛇绿-增生杂岩带.区 内大面积被古近系、新近系和第四系覆盖,小 面积出露中下泥盆统泥鳅河组;宝力高庙组主 要出露于研究区北侧,与下覆泥鳅河组为角度 不整合接触,其上被第四系覆盖.区内侵入岩 主要有晚石炭世黑云母二长花岗岩和早二叠 世中细粒碱性花岗岩、石英正长斑岩(图2).





图 1 兴蒙造山带大地构造简图(据 Xiao et al., 2003修改) Fig.1 Sketch tectonic geological map of Xingmeng orogenic belt (modified after Xiao et al., 2003)

2 宝力高庙组地质特征及岩相学 特征

#### 2.1 宝力高庙组地质特征

宝力高庙组在内蒙古东乌旗-阿巴嘎旗一 带广泛分布,总体呈北东向展布,岩性复杂,地 层产状受后期构造影响较大(图2).

依据岩性和岩石组合特征本次工作将其划分 为四个段,其中一段为沉积岩段,二段、三段、四段 为火山岩段.宝力高庙组一段岩性为一套浅变质 岩屑长石砂岩、复成分砾岩、长石粉砂岩、粉砂质 页岩、泥岩、粉砂质泥岩组合,含Noeggerathiopsis cf. theodori Tsohirkova et Zalessky、Angaropteridium cardiopteroides Zalessky 植物化石(附图1).宝 力高庙组二段岩性以中性火山岩-火山碎屑岩 为主,颜色呈灰绿-灰黑色色调(附图2).宝力高 庙组三段岩性为中酸性火山岩、火山碎屑岩,夹 少量沉凝灰岩、凝灰质砂岩;总体以火山碎屑岩 为主,熔岩次之(附图3).宝力高庙组四段岩性 为酸性火山岩、火山碎屑岩夹凝灰质砂岩薄层; 总体以火山碎屑岩为主,少量熔岩(附图4).

#### 2.2 宝力高庙组典型火山岩岩相学特征

玄武安山岩:为宝力高庙组二段岩石,风化面 深灰色,新鲜面灰黑色.岩石由斑晶和基质组成.斑 晶由斜长石组成,粒度一般在0.4~2.0 mm,杂乱分 布,少数呈聚斑状产出,斜长石主呈半自形板状,少 数呈半自形板条状,具轻微绢云母化、高岭土化、碳 酸盐化,局部绿帘石化.基质由斜长石和暗色矿物 假象组成,斜长石主呈半自形板条状、细长板条状,粒度一般在0.02~0.20 mm,少部分0.2~0.4 mm,杂乱分布,少部分似格架状,蚀变同斑晶,暗色矿物已变为绿泥石,粒度一般<0.2 mm,杂乱或填隙状分布于斜长石粒间,可能为辉石蚀变的产物.岩内见少量气孔-杏仁体,呈不规则状,大小一般在0.4~1.0 mm,星散分布,部分充填硅质、碳酸盐,为杏仁体.可见后期碳酸盐、石英、绿帘石等似堆状、似脉状分布,交代岩石.

安山岩:为宝力高庙组二段岩石,风化面紫红 色、灰紫色,新鲜面青灰色.岩石主要由斑晶、基质 组成,具斑状结构,基质玻晶交织结构,气孔-杏仁 状构造.斑晶:由斜长石、钾长石假象、暗色矿物假 象组成,粒径一般在0.2~4.5 mm不等,零散状分 布,斜长石呈半自形板状,聚片双晶多较模糊不适 合测得其牌号,具碳酸盐化、绢云母化、帘石化.钾 长石具高岭土化、绢云母化呈假象,半自形短板状, 零星分布.暗色矿物常具熔蚀和暗化现象,多被硅 质、褐铁矿、碳酸盐、绿帘石等交代,呈假象,推测部 分可能为黑云母.基质:由斜长石、火山玻璃构成. 粒径一般<0.5 mm,斜长石呈微晶板条状,呈定向 排列,构成交织结构,蚀变特征同斑晶.玻璃质呈褐 色,填隙状充填于斜长石间,部分可见脱玻呈羽状 雏晶.岩内可见不规则状、近圆状的气孔及杏仁体, 杏仁体由硅质、绿泥石、碳酸盐等充填,杂乱分 布,大小一般为0.1~2.5 mm不等,部分>4 mm.

流纹岩:为宝力高庙组四段岩石,风化面灰黄 色、黄褐色,新鲜面灰白色、灰黄色,斑状结构,流纹



图 2 研究区地质简图 Fig.2 Geological map of the study area

构造.斑晶由斜长石、钾长石、暗色矿物构成,大小 一般0.3~5.0 mm不等,星散分布,部分呈聚斑、联 斑状产出.斜长石呈半自形板状,具高岭土化、绢云 母化、局部绿泥石化等,可见轻微熔蚀现象;钾长石 主为正长石,半自形板状为主,表面较干净,有时可 见熔蚀现象,偶见卡斯巴双晶.暗色矿物呈他形粒状,多被褐铁矿、绿泥石-黑云母、绿帘石等交代,呈 假象.基质由长英质、暗色矿物构成.长英质主见浑 圆状石英作基底,内嵌布尘点状、微晶板条状、树枝 状长石,部分似球粒状分布,构成显微嵌晶结构.另



图 3 宝力高庙组典型火山岩手标本及镜下照片

Fig.3 Microphotographs of samples from the Baoligaomiao Formation in Abaga area, central Inner Mongolia
 a. 玄武安山岩气孔-杏仁构造; b. 安山岩野外颜色特征; c. 流纹岩野外流纹构造; d. 蚀变气孔-杏仁状玄武安山岩镜下杏仁特征(正交偏光);
 e. 气孔-杏仁状安山岩镜下斑状结构(正交偏光); f. 流纹岩斑状结构、球粒结构,含斜长石、石英斑晶(正交偏光)

见少量微晶板条状长石,零星分布,蚀变特征同斑 晶.部分长英质呈纤状放射状排列,构成球粒,部分 球粒内可见长英质构成文象交生体.暗色矿物成分 及蚀变特征同斑晶,零星分布.基质可见被绿泥 石-黑云母均匀交代,可见铁质等充填的裂隙.

该岩类因出露区域不同局部发生碎裂岩 化、硅化、泥化、绢云母化、长英质化或绿帘石 化,少部分岩石具有球粒结构,球粒由放射纤 维状长英质构成,放射状长英质纤维呈束状、 扇状、球状排布,构成多层次生长的球粒结构, 具十字消光,粒径0.2~0.6 mm.少部分具石泡 构造,长英质石泡由放射纤维状长英质组成, 空腔被斜长石、钾长石充填,粒径0.5~6.5 mm. 球体间充填斜长石、钾长石、隐晶质等(图3).

## 3 样品采集及分析测试方法

#### 3.1 全岩主、微量元素

本次工作共采取31件地球化学样品,其中宝力 高庙组二段样品9件,三段样品10件,四段样品12 件.经过详细的岩相学观察,挑选新鲜的样品进行 全岩的主微量元素测试.全岩主微量元素的测试在 中国地震局地壳动力学重点实验室完成.主量元素 采用PW4400型X射线荧光光谱仪(XRF),分析误 差小于1%,FeO的含量分析使用常规湿化法完成.

微量元素在中国地震局地壳动力学重点 实验室使用 PE300D 等离子质谱仪(ICP-MS) 完成测试,使用国际标样 GSR-2和 GSR-3来 监测实验室精度.

#### 3.2 锆石 U-Pb 测年

本次工作共采取锆石 U-Pb 测年样品 3件,其 中宝力高庙组二段年龄测试样品为角闪安山岩 (编号 U/Pb20150008;坐标 E113°46′48.5″; N44°48′44.6″),三段年龄测试样品为流纹岩(编号 U/Pb20150016;坐标 E113°53′05.8″;N44°23′51.1″), 四段年龄测试样品为流纹质晶屑凝灰岩(编号 U/ Pb20160001;坐标 E113°52′25.5″;N44°46′33.3″).

锆石挑选、制靶及阴极发光照相在北京锆年领 航科技有限公司完成,激光剥蚀电感耦合等离子体 质谱(LA-ICP-MS)锆石原位微区U-Pb分析在中国 科学院兰州地质所与原武警黄金部队研究所完成. ICP-MS仪器型号为美国Agilent公司生产的Agilent 7500等离子质谱仪,激光剥蚀系统为GeoLas 2005准分子激光发生器.采用标准锆石91500内部 校正法进行锆石分析,NIST610为外标,<sup>29</sup>Si为内 标,每分析6个数据点,补充分析1次91500.激光剥 蚀的斑束直径为35 μm.采用 ICPMS DataCal 软件

3317

对同位素比值及 U-Pb 年龄进行计算(Liu et al., 2010). 锆石 U-Pb 年龄、MSWD 计算及谐和图制作采用 Isoplot 程序.

## 4 分析结果

#### 4.1 岩石地球化学

通过对结果的处理分析,系统地研究了宝力高 庙组火山岩岩石地球化学特征.除个别样品烧失量 较大外,总体<2.0%,能够较好地反映岩石地球化 学特征.详细火山岩主量和微量地球化学分析结果 见附表1~3. 宝力高庙组火山岩主量元素特征区别 较明显. 宝力高庙组二段火山岩 SiO<sub>2</sub>=58.40%~ 65.35%, TiO<sub>2</sub>=0.47%~1.11%, MgO=0.65%~ 3.21%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>=13.68%~16.07\%, Na<sub>2</sub>O=3.14%~ 6.02%, K<sub>2</sub>O=1.51%~3.89%, 全碱含量(Na<sub>2</sub>O+  $K_{2}O$ )=5.53%~8.36%,  $K_{2}O$ /Na<sub>2</sub>O比为0.25~0.87, 整体表现出高钠低钾的特点.宝力高庙组三段火 山 岩 SiO<sub>2</sub>=65.79%~77.40%, TiO<sub>2</sub>=0.15%~ 0.59%, MgO= $0.15\% \sim 0.77\%$ , Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>= $12.14\% \sim$ 15.46%, Na<sub>2</sub>O= $2.43\% \sim 4.87\%$ , K<sub>2</sub>O= $2.75\% \sim$ 5.21%, 全碱含量(Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O)=7.45%~8.48%, K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O 比为 0.58~2.11. 宝力高庙组四段火山 岩  $SiO_2 = 72.86\% \sim 78.22\%$ ,  $TiO_2 = 0.14\% \sim$ 0.22%, MgO= $0.01\% \sim 0.30\%$ , Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>= $11.19\% \sim$ 

12.99%, Na<sub>2</sub>O=2.80%~4.28%, K<sub>2</sub>O=2.61%~ 6.27%, Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O=6.90%~9.06%, K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O 比为 0.61~2.24. 宝力高庙组火山岩呈现富硅、 碱,贫钙、镁的特征, MgO、CaO含量稍低于天山-兴安造山系构造单元花岗岩类元素丰度(史长义 等,2007),其余氧化物含量均不同程度偏高.

结合火山岩 TAS 图解(图 4a)与微量元素岩石 定名图解(图 4b),二段多为安山岩、英安岩、粗面安 山岩和粗面英安岩;三段岩性多为流纹岩,一个样 品位于流纹岩与英安岩交界处;四段全部为流纹 岩;与镜下岩石定名基本吻合.二段火山岩样品里 特曼指数 $\sigma$ 为 1.74~3.73,碱度率(AR)为 1.70~ 3.26,表明火山岩主体为钙碱性岩石.A/CNK= 0.79~1.06,整体属准铝质岩石-弱过铝质岩石. 三段火山岩样品里特曼指数 $\sigma$ 为 1.79~2.61,表明 火山岩为碱性岩石.A/CNK=0.97~1.38,整体属 于弱过铝质岩石.四段火山岩样品里特曼指数  $\sigma$ 为 1.35~2.74,表明火山岩总体为钙碱性岩石. A/CNK=1.07~1.21,整体属于弱过铝质岩石.

宝力高庙组二段、三段、四段火山岩稀土元素 变化明显,四段稀土总量高于三段、三段稀土总量 高于二段.二段稀土元素总量 $\Sigma$ REE=97.96×  $10^{-6}\sim 207.04\times 10^{-6}$ ;轻重稀土比值为4.51~8.79, (La/Yb)<sub>N</sub>为3.69~9.22,(Ce/Yb)<sub>N</sub>为3.27~8.77, (La/Sm)<sub>N</sub>为2.02~3.32,(Gd/Yb)<sub>N</sub>为1.43~2.55.



图4 宝力高庙组火山岩 TAS 分类图(a)及 Nb/Y-SiO<sub>2</sub>图(b;据 Winchester and Floyd, 1977)

Fig.4 TAS classification diagram (a) and Nb/Y-SiO<sub>2</sub> diagram for the volcanic rocks of the Baoligaomao Formation (b; after Winchester and Floyd, 1977).

Pc. 苦橄玄武岩; B. 玄武岩; O1. 玄武安山岩; O2. 安山岩; O3. 英安岩; R. 流纹岩; S1. 粗面玄武岩; S2. 玄武质粗面安山岩; S3. 粗面安山岩; T. 粗面岩、粗面英安岩; F. 副长石岩; U1. 碱玄岩、碧玄岩; U2. 响岩质碱玄岩; U3. 碱玄质响岩; Ph. 响岩; Ir. Irvine分界线, 上方为碱性, 下方为亚碱性



Fig.5 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized trace element patterns of the Baoligaomiao Formation (b)

标准化数据引自 McDonough and Sun (1989)

三 段 稀 土 元 素 总 量  $\Sigma$  REE=125.93×10<sup>-6</sup>~ 252.46×10<sup>-6</sup>; 轻 重 稀 土 比 值 为 3.35~6.86,(La/ Yb)<sub>N</sub>为 2.17~6.99,(Ce/Yb)<sub>N</sub>为 1.84~5.80,(La/ Sm)<sub>N</sub>为 1.70~3.50,(Gd/Yb)<sub>N</sub>为 0.94~1.77.四段 稀 土 元 素 总 量  $\Sigma$  REE=195.42×10<sup>-6</sup>~253.82× 10<sup>-6</sup>. 轻 重 稀 土 比 值 为 4.51~7.55,(La/Yb)<sub>N</sub>为 3.88~8.22,(Ce/Yb)<sub>N</sub>为 3.63~6.64,(La/Sm)<sub>N</sub> 为 2.01~3.44,(Gd/Yb)<sub>N</sub>为 1.49~1.93.

在球粒陨石标准化稀土元素配分图(Mc-Donough and Sun, 1989)(图 5a)中,宝力高庙 组火山岩稀土配分表现为右倾特征,δEu为 0.15~0.86,各段火山岩均具有轻稀土元素富集 和 Eu负异常的特征.微量元素蜘蛛网图(Mc-Donough and Sun, 1989;图 5b)显示,宝力高庙 组火山岩均显示大离子亲石元素 Rb、Th、U等 富集,亏损高场强元素 Nb、Ta、Ti. 二段火山岩 未见明显的 Sr 异常,而三段、四段火山岩显示 了 Sr 的强烈亏损,暗示三段、四段火山岩在岩 浆演化过程中可能发生了斜长石的分离结晶.

#### 4.2 锆石 U-Pb 年代学

宝力高庙组火山岩锆石自形程度较好,锆石在 形态、大小上有所差异.宝力高庙组二段锆石呈颗 粒状或半自形-自形长柱状,粒径变化范围约为  $(70 \times 70) \mu m^2 \sim (120 \times 400) \mu m^2$ ,较少发育包裹体 和裂隙;宝力高庙组三段锆石呈半自形-自形短柱 状到长柱状,粒径变化范围约为 $(50 \times 50) \mu m^2 \sim$  $(100 \times 200) \mu m^2$ ;宝力高庙组四段锆石自形程度 较好,呈半自形-自形短柱状、椭球状,颗粒大小 变化范围较小,变化范围约为 $(120 \times 100) \mu m^2 \sim$  $(120 \times 200) \mu m^2$ ,部分锆石发育包裹体和裂隙.

锆石阴极发光(CL)图中(图6~8),锆石样品显

示出岩浆型锆石的振荡/韵律环带结构或明暗相间 的条带结构,指示其岩浆成因的特点(吴元保和郑 永飞,2004).二、三、四段火山岩锆石的U、Th含量 分别介于 61.51×10<sup>-6</sup>~1 348.52×10<sup>-6</sup> 和 33.53× 10<sup>-6</sup>~904.76×10<sup>-6</sup>, Th/U 比值介于 0.19~2.02, 总 体均大于0.1,远高于变质成因锆石,而与典型的岩 浆成因锆石一致(Hoskin and Schaltegger, 2003).由 宝力高庙组火山岩分LAICP-MS 锆石 U-Pb 定年测 试结果(附表4)和锆石U-Pb年龄协和图(图9)可 知:二段火山岩18个分析点年龄分布较集中,范围 在 308±7 Ma~349±6 Ma. 其加权平均年龄为 320.5±5.7 Ma(n=20, MSWD=4.20); 三段火山岩 14个分析点年龄分布较集中,范围在309±9 Ma~ 317±9 Ma,其加权平均年龄为315.1±4.1 Ma(n= 14,MSWD=0.11);四段火山岩18个分析点年龄分 布较集中,范围在300±4 Ma~309±4 Ma,其加权 平均年龄为304.8±2.3 Ma(n=18, MSWD=0.31).

#### 5 讨论

#### 5.1 宝力高庙组火山岩形成时代

宝力高庙组在内蒙古中部广泛出露,由于缺乏 精确的定年数据,其时代至今仍存在争议.宝力高 庙组是1960年由呼和浩特幅地质队创名,命名地点 为东乌珠穆沁旗宝力高庙白云敖包,其时代为早二 叠世.1963年谢同伦在《内蒙古东乌珠穆沁地区古 生代地层研究报告》(内部报告)中,将原宝力高庙 组中只含植物化石的陆相火山岩、火山碎屑岩和碎 屑岩部分保留为宝力高庙组,时代改为晚石炭世-早二叠世,将含腕足动物和少量植物化石的海相火 山岩及碎屑岩创名为格根敖包组,时代属晚石炭 世.1980年内蒙古自治区第一区域地质调查队在



图 6 宝力高庙组二段角闪安山岩(U/Pb20150008)代表性锆石形态

Fig.6 Cathodoluminescence images of representative zircons of hornblende andesite from the second member of Baoligaomiao Formation



图 7 宝力高庙组三段流纹岩(U/Pb20150016)代表性锆石形态

Fig.7 Cathodoluminescence images of representative zircons of rhyolitic crystal tuff from the third member of the Baoligaomiao Formation



图8 宝力高庙组四段流纹质晶屑凝灰岩(U/Pb20160001)代表性锆石形态

Fig.8 Cathodoluminescence images of representative zircons of rhyolite from the fourth member of the Baoligaomiao Formation

1:20万区域地质调查中将该套地层定为下二 叠统宝力格组(P<sub>1</sub>b<sup>2</sup>),划分为两个段,时代归 属为早二叠世.《内蒙古自治区岩石地层》将其 时代改为晚石炭世至早二叠世.

1976至1979年,内蒙区调一队开展1:20万白 音乌拉(L-49-XXXVI)幅区域地质调查时,于布日 罕北黄绿色薄层状细粒凝灰质长石砂岩中采集了 Noeggerathiopsis sp. 等植物化石;另在乌兰敖包灰 黑色含粉砂质板岩夹薄层沉凝灰岩中发现Paracalamites sp.;Noeggerathiopsis derzavinii;N. angustifolia,N. latifolia等植物化石,均系安格拉植物群的重 要分子,其代表的地质年代为晚石炭世-早二叠世. 本次工作在研究区内宝力高庙组一段采到特氏匙 叶 Noeggerathiopsis cf. theodori Tsohirkova et



Fig.9 LA-ICP-MS zircon U-Pb concordia diagrams of the volcanic rocks from the Baoligaomiao Formation in Abaga Banner, Inner Mongolia

Zalessky(相似种)、心形安加拉羊齿 Angaropteridium cardiopteroides Zalessky、匙叶 Noeggerathiopsis sp.(未定种)等植物化石,均为晚石炭 世-早二叠世典型分子.这与其他地区该地 层获取的化石特征基本一致.

许多专家学者在内蒙古东乌旗-阿巴嘎旗一带的宝力高庙组火山岩中获取了大量的锆石U-Pb定年结果,包括辛后田等(2011)在东乌旗高庙敖包附近测得的宝力高庙组火山岩 SHRIMP U-Pb定年结果为303.4±6.7 Ma、304.9±3.1 Ma和320.1±7.2 Ma;何付兵等(2017)在东乌旗巴彦敖包地区测得的宝力高庙组火山岩 SHRIMP U-Pb定年结果为315.2±4.6 Ma;李朋武等(2012)在苏尼特左旗白音乌拉地区测得的宝力高庙组火山岩LA-ICP-MS 锆石 U-Pb定年结果为300.0±2.9 Ma、299.5±1.6 Ma和299.9±1.2 Ma;武跃勇等(2015)在查干敖包地区测得的宝力高庙组火山岩LA-ICP-MS 锆石 U-Pb定年结果为297±1.2 Ma.

本次工作对宝力高庙组火山岩进行了精细的 年代测定,测得其年龄范围为320.5±5.7 Ma~ 304.8±2.3 Ma,年代学特征与宝力高庙组各段地质 关系相吻合,并与同在宝力高庙组一段中植物化石所 反映的时代完全一致,表明其形成时代为晚石炭世.

需要说明的是,宝力高庙组岩石地层在东 乌旗、苏尼特左旗、阿巴嘎旗等地虽然可以进 行岩性对比,但对火山岩的分段划分均有差 异,部分地区缺失火山岩下部的沉积岩段.

#### 5.2 岩性特点与成因

宝力高庙组火山岩岩石类型以火山碎屑岩为 主,熔岩次之;岩性为一套安山质、英安质、流纹质 火山岩组合夹沉凝灰岩薄层.在火山岩的主量元素 特征中,宝力高庙组二段火山岩随着SiO<sub>2</sub>含量的增 加,TiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、TFeO、MgO、CaO、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>等呈负 相关,而K<sub>2</sub>O含量随之增加,为正相关,反映出岩 浆向碱性方向演化的特征;宝力高庙组三段、四 段火山岩全部落入亚碱性系列,整体上集中分布 在流纹岩范围内,总体偏酸性,与二段差别较明 显,样品固结指数(SI)为0.04~4.09,小于40,变 化范围较小,指数值极低,表明火山岩样品经历 了明显的结晶分异作用.样品分异指数(DI)为 63.72~94.45,变化范围较大,表明本组火山岩分 异程度较高.总的来看,宝力高庙组火山岩存在 岩浆演化过程,总体较高的K<sub>2</sub>O含量表明有陆壳 物质发生部分熔融,为壳熔型亚碱性火山岩.

根据宝力高庙组火山岩地球化学特征,可知宝 力高庙组火山岩为亚碱性系列,属于高钾、弱过铝 质岩石.微量元素原始地幔标准化蛛网图显示宝力 高庙组火山岩 Ti明显亏损, Ta、Nb相对于相邻元素 呈现亏损,Zr、Hf相对于相邻元素较富集,Rb、Th、 U、La、Ce等相对富集,符合A型花岗岩性质岩浆的 特点.A型花岗岩的成因主要有幔源玄武岩浆的分 异作用、壳源物质的部分熔融、幔源岩浆与地壳岩 浆的混合或混染作用或幔源岩浆底侵形成的下地 壳部分熔融有关等(谷凤羽,2014).在花岗岩形成的 构造环境上, Eby(1992)提出了A<sub>1</sub>型和A<sub>2</sub>型, A<sub>1</sub>型 形成于裂谷、热点、地幔柱等非造山环境,而A2型则 属于造山后的伸展环境.在Ce/Nb-Y/Nb图解和 Nb-Y-Ce图解中(图10), 宝力高庙组火山岩样品均 位于A2花岗岩类区.目前区域上未发现发育有同时 期的玄武质火山岩或基性侵入岩,排除了幔源玄武 岩浆分异作用的成因.宝力高庙组火山岩弱的Eu 负异常暗示在岩浆的演化过程中存在斜长石的分 离结晶作用,Ce值显示弱负异常,表明有陆源物质 混染.此外,地幔和地壳的Nb/Ta标准值分别为



图 10 内蒙古阿巴嘎旗宝力高庙组火山岩 Ce/Nb-Y/Nb 图(a)和 Nb-Y-Ce 图解(b)(底图据 Eby, 1992) Fig.10 Ce/Nb-Y/Nb diagram (a) and Nb-Y-Ce diagram (b) of the volcanic rocks from the Baoligaomiao Formation in Abaga Banner, Inner Mongolia (after Eby, 1992)

17.5 和 11~12之间, 二段火山岩 Nb/Ta 为 9.64~ 13.36, 三段、四段 Nb/Ta 为 11.64~18.13, 表明宝力 高庙组火山岩物源具有壳幔源混合的特点, 而非单 纯壳源物质部分熔融的成因.结合本区在晚石炭 世经历了由俯冲到碰撞造山的演化过程, 火山岩 处在弧火山岩带上, 弧火山岩带易发生岩浆底 侵, 形成加厚的下地壳; 且前人通过对本区广泛 分布的石炭纪侵入岩的研究认为晚石炭世早期 侵入岩为类似喜马拉雅花岗岩高 Sr 低 Yb 的 I 型 花岗岩, 区域上存在加厚地壳构造演化特征(何 付兵等, 2013). 笔者认为宝力高庙组火山岩是幔 源岩浆底侵形成的加厚下地壳部分熔融的产物.

#### 5.3 构造环境分析及其意义

中亚造山带是全球最大的增生型造山带,它 的形成与演化一直是地学领域研究的热点问题 之一.兴蒙造山带地处中亚造山带东段,区内研 究历史悠久,是西伯利亚板块和华北板块拼贴 过程的产物,不仅经历了古生代古亚洲洋构造 域的作用,而且之后遭受了蒙古鄂霍茨克构造 域和/或太平洋构造域的叠加与改造.研究区大 地构造位置横跨南蒙古陆块与二连-贺根山蛇 绿-增生杂岩带,晚石炭世宝力高庙组火山岩的 形成与二连-贺根山洋盆的洋内俯冲密切相关.

二连-贺根山缝合带作为兴蒙造山带的重要组 成部分之一,记录着二连-贺根山洋盆的俯冲消亡 信息.关于古亚洲洋二连-贺根山洋盆的闭合过程 前人做了大量卓有成效的工作.首先是对贺根山蛇 绿岩的识别及蛇绿岩形成时代的约束. Jian et al. (2012)获得贺根山蛇绿岩辉长岩墙及斜长花岗岩 脉的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 354 Ma 和 333 Ma; 李英杰等(2015,2016)在迪彦庙孬来可吐和梅劳特 乌拉两处 SSZ 型蛇绿岩中获得辉长岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 308.5 Ma、354 Ma. 二连-贺根 山蛇绿岩自早石炭世-晚石炭世均有发育,表明古 亚洲洋二连-贺根山洋盆在石炭纪仍然存在.同时, 石炭纪岩浆活动也记录了二连-贺根山洋盆的演化 过程,不同学者在二连-贺根山一带周缘发现了大 量的岛弧型岩浆活动证据,表明古亚洲洋在晚石炭 世处于洋壳俯冲时期.王金芳等(2020,2021)在额 很傲包图识别出晚石炭世(305.6±1.5 Ma)岛弧型 高Si埃达克岩,在梅劳特乌拉蛇绿岩中识别出晚石 炭世(315.0±2.3 Ma)高镁安山岩,并提出二连-贺 根山洋盆在晚石炭世处于洋壳俯冲时期.Liu et al. (2013)在西乌旗青牧场识别出 315~318 Ma 具岛弧 特征的玄武岩,认为其为古亚洲洋俯冲作用的产 物.刘建峰等(2009)在西乌旗南部获得了岛弧型 石英闪长岩 322 Ma的形成年龄,并认为其形成 于古亚洲洋俯冲阶段.此外,李英杰等(2018)、Li et al. (2020) 在二连-贺根山蛇绿岩中识别出代 表洋内初始俯冲作用的前弧玄武岩,LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 333.4±8.5 Ma、335.6±2.6 Ma, 暗示古亚洲洋二连-贺根山洋盆在早石炭世处于 洋内俯冲阶段.以上证据均表明二连-贺根山洋 盆在早石炭世发生了洋内初始俯冲,且整个晚石



图 11 内蒙古阿巴嘎旗宝力高庙组二段火山岩 Th-La/Yb图(a)(据 Bailey, 1981)和 Ta/Yb-Th/Yb图(据 Pearce, 1984) Fig.11 Th-(La/Yb) diagram (after Bailey, 1981) and Ta/Yb-Th/Yb diagram of the volcanic rocks from the second member of

the Baoligaomiao Formation in Abaga Banner, Inner Mongolia (after Pearce, 1984) IAB.岛弧玄武岩;IAT.岛弧拉斑系列;ICA.岛弧钙碱系列;SHO.岛弧橄榄玄粗岩系列;WPB.板内玄武岩;MORB.洋中脊玄武岩;TH.拉斑 玄武岩;TR.过渡玄武岩;ALK.碱性玄武岩

炭世都处于以洋内俯冲作用为特征的大洋俯 冲消亡过程,但至于大洋的最终闭合时间则 存在二叠纪末期、早三叠世等不同说法.

内蒙古阿巴嘎旗地区晚石炭世-早二叠世岩浆 活动为古亚洲洋二连-贺根山洋盆的闭合提供了重 要约束.宝力高庙组火山岩在兴蒙造山带中广泛分 布,且岩性组合完全可以对比(辛后田等,2011;武 跃勇等,2015),为一套中酸性火山熔岩、火山碎屑 岩夹正常沉积的碎屑岩.本次研究结果表明,宝力 高庙组二段火山岩轻稀土相对重稀土轻度富集,且 有弱的Eu负异常,稀土元素分配模式与活动大陆边 缘俯冲带岩浆地球化学特征类似;二段火山岩样品 在Th-La/Yb和Ta/Yb-Th/Yb判别图解中位于大 陆边缘弧范围内(图11),表明古亚洲洋二连-贺根 山洋盆在晚石炭世早期正处于大洋俯冲消减阶段. 宝力高庙组三段、四段火山岩样品在主量元素 SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>图解(图 12a)中落入造山期后花岗岩类 (POG)区域内及附近,倾向于造山后的构造环境. 而在SiO<sub>2</sub>-TFeO/(TFeO+MgO)构造判别图解中 (图 12b)三段岩石样品多位于与裂谷有关的花岗 岩类及大陆造陆抬升花岗岩类(RRG+CEUG)区 域,表明此时期处于碰撞构造阶段但并未趋于稳 定;四段岩石样品多位于造山期后花岗岩类 (POG)区域,暗示此时构造环境处于碰撞阶段末 期,趋于后碰撞构造背景环境;表明古亚洲洋二连-贺根山洋盆在晚石炭世早期一直处于大洋俯冲消 减阶段,在晚石炭世晚期趋于后碰撞构造阶段.

目前,区域上发现的晚古生代A型花岗岩主要 集中在早二叠世(301~280 Ma;张玉清等,2009; Zhang et al., 2015;王树庆等,2017),而在本区发现 的早二叠世侵入岩(年龄范围为278.1±4.8 Ma~ 292.2±5.3 Ma)属于典型A<sub>2</sub>型花岗岩的特征,也证 实了本区在早二叠世已处于碰撞后伸展环境.由于 兴蒙造山带主要由多个微陆块和其间的造山带组 成(许文良等,2019),本文认为宝力高庙组二段火 山岩代表大陆边缘弧构造环境,表明了兴蒙造山带 中微陆块尚未完全拼合;宝力高庙组三段、四段火 山岩为兴蒙造山带中微陆块拼合阶段的产物; 早二叠世A<sub>2</sub>型花岗岩形成于伸展环境,说明早 二叠世之前兴蒙造山带中微陆块已完成拼贴.

综上所述,晚石炭世-早二叠世是内蒙古阿巴 嘎旗地区区域构造格架的重大转折期,构造演化经 历了由俯冲、碰撞造山的挤压转向拉张伸展阶段. 晚石炭世开始,本区以陆地为主,并伴有弱的火山 活动,形成的宝力高庙组一段地层为陆相沉积夹火 山碎屑岩的沉积建造.在320.5 Ma,二连-贺根山缝 合带以北为大陆弧环境,发育宝力高庙组二段中性 火山岩和大规模S型花岗岩;在315.1~304.8 Ma之 间,宝力高庙组三段、四段火山岩和同期的二长花 岗岩均属于亚碱性系列,多为高钾钙碱性系列的酸 性岩石,地球化学特征指示本区由岛弧构造环境演 化为碰撞阶段末期构造环境;早二叠世开始,区内



图 12 内蒙古阿巴嘎旗宝力高庙组三段、四段火山岩 SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>图解和 SiO<sub>2</sub> - TFeO/(TFeO+MgO)图解(据 Maniar and Piccoli, 1989)

Fig.12 Diagrams of SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and SiO<sub>2</sub> - TFeO/(TFeO+MgO) of the volcanic rocks from the third and fourth member of the Baoligaomiao Formation in Abaga Banner, Inner Mongolia (after Maniar and Piccoli, 1989)

CCG.大陆碰撞花岗岩类;POG.后造山期花岗岩类;RRG.与裂谷有关的花岗岩类;CEUG.大陆造陆抬升花岗岩类;IAG.岛弧花岗岩类; CAG.大陆弧花岗岩类

开始出现大规模碱性岩浆活动,岩性主要有碱性花 岗岩、细粒文象碱性花岗岩-中细粒文象碱性花岗 岩-中粒文象碱性花岗岩、石英正长斑岩.早二叠世 岩浆岩由晚石炭世花岗岩分异演化形成,地球化学 特征为A型花岗岩,并可进一步划为A2型,形成于 后造山伸展环境.因此,本文认为晚石炭世晚期古 亚洲洋二连-贺根山洋盆已经闭合,本区构造 演化进入到兴蒙造山带中部微陆块拼贴阶段.

### 6 结论

(1)內蒙古阿巴嘎旗地区宝力高庙组可划 分为四个段;其中一段为沉积岩段,二段、三段、四段为火山岩段,岩石类型以火山碎屑岩 为主,熔岩次之;岩性为一套安山质、英安质、 流纹质火山岩组合夹沉凝灰岩薄层.

(2) 宝力高庙组火山岩整体为亚碱性系列,属于高钾,弱过铝质岩石;是幔源岩浆底侵形成的加厚下地壳部分熔融的产物.

(3) 宝力高庙组二段火山岩形成时代为 320.5±5.7 Ma, 三段火山岩形成时代为 315.1± 4.1 Ma, 四段火山岩形成时代为 304.8±2.3 Ma. 结合宝力高庙组一段中的植物化石特征, 内蒙古 阿巴嘎旗地区宝力高庙组形成时代为晚石炭世.

(4)内蒙古阿巴嘎旗地区在晚石炭世经历了重

要的构造演化阶段,从宝力高庙组二段的大陆边缘 弧构造环境演变为宝力高庙组三段、四段火山岩 的碰撞--后碰撞环境;揭示了古亚洲洋二连-贺根 山洋盆在晚石炭世经历了以洋内俯冲作用为特 征的大洋俯冲消亡过程,在晚石炭世晚期本区构 造演化进入到兴蒙造山带中部微陆块拼贴阶段.

致谢:审稿专家和编辑对稿件提出了建设性的 修改意见,在此表示衷心的感谢!

附图和附表见本刊官网(http://www.earth-science.net).

#### References

- Bailey, J. C., 1981. Geochemical Criteria for a Refined Tectonic Discrimination of Orogenic Andesites. *Chemical Geology*, 32(1-4): 139-154. https://doi.org/10.1016/ 0009-2541(81)90135-2
- Du, J. Y., Tao, N., Guo, J. C., et al., 2019. Geochronology and Geochemistry of Bayanchagan Pluton in Balinyouqi, Inner Mongolia: Implication for Timing of Closure of Paleo-Asian Ocean. *Earth Science*, 44(10): 3361-3377 (in Chinese with English abstract).
- Eby, G. N., 1992. Chemical Subdivision of the A-Type Granitoids: Petro-Genetic and Tectoni Implications. Geology, 20(7): 641-644. https://doi. org/10.1130/ 0091-7613(1992)020<0641:CSOTAT>2.3.CO;2
- Gu, F. Y., 2014. Origin of Volcanic Rocks in the Upper

Section of Baoligaomiao Formation in Sunitezuoqi Area, Inner Mongolia (Dissertation). Shijiazhuang University of Economics, Shijiazhuang, 39-41 (in Chinese with English abstract).

- He, F. B., Wei, B., Xu, J. X., et al., 2017. Ages, Origin and Geological Implications of the Volcanic Rocks in the Baoligaomiao Formation of East Ujimqin Banner, Inner Mongolia. *Geology in China*, 44(6): 1159-1174 (in Chinese with English abstract).
- He, F. B., Xu, J. X., Gu, X. D., et al., 2013. Age, Genesis and Geological Significance of Amuguleng Composite Granite Body in East Wuzhumuqin Banner, Inner Mongolia. *Geological Review*, 59(6): 1150-1164 (in Chinese with English abstract).
- Hoskin, P., Schaltegger, U., 2003. The Composition of Zircon and Igneous and Metamorphic Petrogenesis. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1): 27-62. https://doi.org/10.2113/0530027
- Jahn, B. M., Windley, B. F., Natal'in, B., et al., 2004. Phanerozoic Continental Growth in Central Asia. Journal of Asian Earth Sciences, 23(5): 599-603. https:// doi.org/10.1016/S1367-9120(03)00124-X
- Jian, P., Kröner, A., Windley, B. F., et al., 2012. Carboniferous and Cretaceous Mafic-Ultramafic Massifs in Inner Mongolia (China): A SHRIMP Zircon and Geochemical Study of the Previously Presumed Integral "Hegenshan Ophiolite". *Lithos*, 142–143: 48–66. https://doi. org/10.1016/j.lithos.2012.03.007
- Jin, S., Li, Y. J., Qian, C., et al., 2022. Geochronology and Geochemistry of Two Types of Basic Rocks in Horqin Right Middle Banner, Inner Mongolia and Their Tectonic Significances. *Earth Science*, 47(1): 342-356 (in Chinese with English abstract).
- 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).
- Li, P. W., Gao, R., Guan, Y., et al., 2009. The Closure Time of the Paleo-Asian Ocean and the Paleo-Tethys Ocean: Implication for the Tectonic Cause of the End-Permian Mass Extinction. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 39(3): 521-527 (in Chinese with English abstract).
- Li, P. W., Zhang, S. H., Gao, R., et al., 2012. New Paleomagnetic Data of Late Carboniferous-Early Permian in Central Inner Mongolia and Its Geological Significance.

Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 42 (S1): 423-434, 440 (in Chinese with English abstract).

- Li, Y. J., Wang, G. H., Santosh, M., et al., 2020. Subduction Initiation of the SE Paleo-Asian Ocean: Evidence from a Well Preserved Intra-Oceanic Forearc Ophiolite Fragment in Central Inner Mongolia, North China. *Earth and Planetary Science Letters*, 535: 116087. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2020.116087
- Li, Y. J., Wang, J. F., Li, H. Y., et al., 2015. Recognition of Meilaotewula Ophiolite in Xi U Jimqin Banner, Inner Mongolia. Acta Petrologica Sinica, 31(5): 1461-1470 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y. J., Wang, J. F., Li, H. Y., et al., 2016. Geology in Diyanmiao Inner Mongolia. Geological Publishing House, Beijing, 133-157 (in Chinese).
- Li, Y. J., Wang, J. F., Wang, G. H., et al., 2018. Discovery and Significance of the Dahate Fore - Arc Basalts from the Diyanmiao Ophiolite in Inner Mongolia. Acta Petrologica Sinica, 34(2): 469-482 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J., Wang, P. J., Bo, H. J., 2020. Characteristics and Implication of Zircon in Qiaolun'en'geci Biotite Monzogranite Porphyry in Ejina County, Inner Mongolia. *Northwestern Geology*, 53(3): 41-55 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J. F., Chi, X. G., Zhang, X. Z., 2009. Geochemical Characteristic of Carboniferous Quartz-Diorite in the Southern Xiwuqi Area, Inner Monggolia and Its Tectonic Significance. Acta Geologica Sinica, 83(3): 365-376 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J. F., Li, J. Y., Chi, X. G., et al., 2013. A Late-Carboniferous to Early Early-Permian Subduction-Accretion Complex in Daqing Pasture, Southeastern Inner Mongolia: Evidence of Northward Subduction beneath the Siberian Paleoplate Southern Margin. *Lithos*, 177: 285-296. https://doi. org/10.1016/j. lithos.2013.07.008
- Liu, Y. S., Hu, Z. C., Zong, K. Q., et al., 2010. Reappraisement 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
- Maniar, P. D., Piccoli, P. M., 1989. Tectonics Discrimination of Granitoids. *GSA Bulletin*, 101(5): 635-643. https://doi. org/10.1130/0016-7606(1989)101<0635: TDOG>2.3.CO;2

McDonough, W. F., Sun, S. S., 1989. Chemical and Isoto-

pic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42: 313-345. https:// doi.org/10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19

- Pan, G. T., Lu, S. N., Xiao, Q. H., et al., 2016. Division and Evolution of Tectonic Stages in China. *Earth Science Frontiers*, 23(6): 1-23 (in Chinese with English abstract).
- Pearce, J. A., Harris, N. B. W., Tindle, A. G., 1984. Trace Element Discrimination Diagrams for the Tectonic Interpretation of Granitic Rocks. *Journal of Petrolo*gy, 25(4): 956-983. https://doi.org/10.1093/petrology/25.4.956
- Shi, C. Y., Yan, M. C., Chi, Q. H., et al., 2007. Abundances of Chemical Elements of Granitoids in Different Geotectonic Units of China and Their Characteristics. *Acta Geologica Sinica*, 81(1): 47-59 (in Chinese with English abstract).
- Song, S. G., Wang, M. M., Xu, X., et al., 2015. Ophiolites in the Xing' an-Inner Mongolia Accretionary Belt of the CAOB: Implications for Two Cycles of Seafloor Spreading and Accretionary Orogenic Events. *Tectonics*, 34(10): 2221-2248. https://doi. org/10.1002/ 2015TC003948
- Wang, J. F., Li, Y. J., Li, H. Y., et al., 2020. Paleo-Asian Ocean Subducted Slab Breakoff and Post Orogenic Extension: Evidence from Geochronology and Geochemistry of Volcanic Rocks in the Hegenshan Suture Zone. Acta Geologica Sinica, 94(12): 3561-3580 (in Chinese with English abstract).
- Wang, J. F., Li, Y. J., Li, H. Y., et al., 2021. Discovery of the Late Carboniferous Adakite in the Erenhot - Hegenshan Suture Zone and Intra-Oceanic Subduction of the Paleo-Asian Ocean. *Geology in China*, 48(2): 520-535 (in Chinese with English abstract).
- Wang, S. Q., Hu, X. J., Zhao, H. L., et al., 2017. Geochronology and Geochemistry of Late carboniferous Jinggesitai Alkaline Granites, Inner Monglia: Petrogenesisand Implications for Tectonic Evolution. Acta Geologica Sinica, 91(7): 1467-1482 (in Chinese with English abstract).
- Winchester, J. A., Floyd, P. A., 1977.Geochemical Discrimination of Different Magma Series and Their Differentiation Products Using Immobile Elements. *Chemical Geol*ogy, 20(4): 325-343. https://doi. org/10.1016/ 0009-2541(77)90057-2
- Wu, Y. B., Zhen, Y. F., 2004. Origin Mineralogy of Zircon

and Its Constraints on U-Pb Age Interpretation. *Chinese Sciences Bulletin*, 49(16): 1589-1604 (in Chinese with English abstract).

- Wu, Z. J., Wang, Y., Cui, P. L., et al., 2020. The Early Carboniferous A<sup>-</sup>Type Granite in Nuominhe Area, Northern Da Hing' an Mountains: Geochronology, Geochemistry and Hf Isotope Studies. Acta Geologica Sinica, 94(8): 2200-2211 (in Chinese with English abstract).
- Wu, Y. Y., Ju, W. X., Shao, Y. X., 2015. Characteristics and Age of Baoligaomiao Formation of Upper Carboniferous-Lower Permian in Chagan Aobao Area, Inner Mongolia. *Chinese Geology*, 42(4): 937-947. (in Chinese with English abstract).
- Xiao, W. J., Windley, B. F., Hao, J., 2003. Accretion Leading to Collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China: Termination of the Central Asian Orogenic Belt. *Tectonics*, 22(6): 1069-1089. https://doi.org/10.1029/2002TC001484
- Xiao, W. J., Windley, B. F., Sun, S., et al., 2015. A Tale of Amalgamation of Three Permo<sup>-</sup>Triassic Collage Systems in Central Asia: Oroclines, Sutures, and Terminal Accretion. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 43: 477-507. https://doi. org/10.1146/ annurev=earth=060614=105254
- Xin, H. T., Teng, X. J., Cheng, Y. H., 2011. Stratigraphic Division and Isotopic Chronology of the Gaomiao Formation in Baoli, East Ujimqin Banner, Inner Mongolia. *Geological Survey and Research*, 34(1): 1-9 (in Chinese with English abstract)
- 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, W. L., Sun, C. Y., Tang, J., et al., 2019. Basement Properties and Tectonic Evolution of the Xingmeng Orogenic Belt. *Earth Science*, 44(5): 1622-1634 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, X. H., Yuan, L. L., Xue, F. H., et al., 2015. Early Permian A-Type Granites from Central Inner Mongolia, North China: Magmatic Tracer of Post-Collisional Tectonics and Oceanic Crustal Recycling. Gondwana Research, 28(1): 311-327. https://doi. org/10.1016/j. gr.2014.02.011
- Zhang, Y. Q., Xu, L. Q., Kang, X. L., et al., 2009. Age

Dating of Alkali Granite in Jingesitai Area of Dong Ujimqin Banner, Inner Mongolia, and Its Significance. *Geology in China*, 36(5): 988-995 (in Chinese with English abstract).

#### 附中文参考文献

- 杜继宇,陶楠,郭建超,等,2019.内蒙古巴林右旗巴彦查干 岩体年代学与地球化学:对古亚洲洋闭合时间的限定. 地球科学,44(10):3361-3377.
- 谷凤羽,2014.内蒙古苏尼特左旗地区宝力高庙组上段火山 岩的成因(硕士学位论文).石家庄:石家庄经济学院, 39-41.
- 何付兵,魏波,徐吉祥,等,2017.内蒙古巴彦敖包地区宝力 高庙组火山岩地球化学特征、锆石U-Pb年龄及地质意 义.中国地质,44(6):1159-1174.
- 何付兵,徐吉祥,谷晓丹,等,2013.内蒙古东乌珠穆沁旗阿 木古楞复式花岗岩体时代、成因及地质意义.地质论 评,59(6):1150-1164.
- 金松,李英杰,钱程,等,2022.内蒙古科右中旗两类基性岩 的年代学、地球化学及其构造意义.地球科学,47(1): 342-356.
- 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.
- 李朋武,高锐,管烨,等,2009.古亚洲洋和古特提斯洋的闭 合时代:论二叠纪末生物灭绝事件的构造起因.吉林大 学学报(地球科学版),39(3):521-527.
- 李朋武,张世红,高锐,等,2012.内蒙古中部晚石炭世-早 二叠世古地磁新数据及其地质意义.吉林大学学报(地 球科学版),42(S1):423-434,440.
- 李英杰,王金芳,李红阳,等,2015.内蒙古西乌旗梅劳特乌 拉蛇绿岩的识别.岩石学报,31(5):1461-1470.
- 李英杰,王金芳,李红阳,等,2016.内蒙古迪彦庙地质.北京: 地质出版社,133-157.
- 李英杰,王金芳,王根厚,等,2018.内蒙古迪彦庙蛇绿岩带 达哈特前弧玄武岩的发现及其地质意义.岩石学报,

34(2): 469-482.

- 刘基, 王丕军, 薄海军, 2020. 内蒙古额济纳旗内乔仑恩格 次黑云母二长花岗斑岩中锆石的特征及其指示意义. 西北地质, 53(3):41-55.
- 刘建峰,迟效国,张兴洲,等,2009.内蒙古西乌旗南部石炭 纪石英闪长岩地球化学特征及其构造意义.地质学报, 83(3):365-376.
- 潘桂棠, 陆松年, 肖庆辉, 等, 2016. 中国大地构造阶段划分 和演化. 地学前缘, 23(6): 1-23.
- 史长义, 鄢明才, 迟清华, 等, 2007. 中国不同构造单元花岗 岩类元素丰度及特征. 地质学报, 81(1):47-59.
- 王金芳,李英杰,李红阳,等,2020.古亚洲洋俯冲板片断离 与后造山伸展:贺根山缝合带火山岩年代学和地球化 学证据.地质学报,94(12):3561-3580.
- 王金芳,李英杰,李红阳,等,2021.二连-贺根山缝合带晚 石炭世埃达克岩的发现及古亚洲洋洋内俯冲作用.中 国地质,48(2):520-535.
- 王树庆, 胡晓佳, 赵华雷, 等, 2017. 内蒙古京格斯台晚石炭 世碱性花岗岩年代学及地球化学特征——岩石成因及 对构造演化的约束. 地质学报, 91(7):1467-1482.
- 吴元保,郑永飞,2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb年 龄解释的制约. 科学通报,49(16):1589-1604.
- 吴子杰,汪洋,崔培龙,等,2020.大兴安岭北部诺敏河地区 早石炭世A型花岗岩的年代学、地球化学及Hf同位素 研究.地质学报,94(8):2200-2211.
- 武跃勇, 鞠文信, 邵永旭, 等, 2015. 内蒙古查干敖包地区上 石炭-下二叠统宝力高庙组特征及时代.中国地质, 42 (4): 937-947.
- 辛后田,滕学建,程银行,2011.内蒙古东乌旗宝力高庙组 地层划分及其同位素年代学研究.地质调查与研究,34 (1):1-9.
- 许文良,孙晨阳,唐杰,等,2019. 兴蒙造山带的基底属性与构 造演化过程. 地球科学,44(5):1622-1634.
- 张玉清,许立权,康小龙,等,2009.内蒙古东乌珠穆沁旗京格 斯台碱性花岗岩年龄及意义.中国地质,36(5): 988-995.