

内蒙古高尧乌拉白音高老组地质及年代学特征

董培培¹, 李英杰¹, 王根厚², 辛后田³, 王金芳¹, 李红阳¹
DONG Peipei¹, LI Yingjie¹, WANG Genhou², XIN Houtian³, WANG Jinfang¹, LI Hongyang¹

1. 河北地质大学, 河北 石家庄 050031;
2. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083;
3. 天津地质矿产研究所, 天津 300170
1. Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, Hebei, China;
2. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;
3. Tianjin Institute of Geology and Mineral Resources, Tianjin 300170, China

DONG P P, LI Y J, WANG G H, et al., 2021. Geological and chronological characteristics of the Baiyin’gaolao Formation in Gaoyaowula, Inner Mongolia [J]. Journal of Geomechanics, 27 (1): 135–152. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021.27.01.014

Abstract: Based on a regional geological survey at a scale of 1 : 50000, it reveals that the volcanic rocks from the Baiyin’gaolao Formation of Gaoyaowula in Inner Mongolia could be divided into three lithologic segments by the triple mapping method of “volcanic structure-lithology and lithofacies-volcanic formation”. The first lithologic segment is composed of pyroclastic sedimentary rocks, the second intermediate volcanic rocks and the third acidic volcanic rocks. The three lithologic segments constitute a complete depositional-eruptive cycle, and the early to late magma is characterized by a transition from neutral to acid. The Baiyin’gaolao Formation can be classified into eruptive facies, intrusive facies, overflow facies, volcanic vent facies, eruption-deposition facies and subvolcanic facies, etc. Twelve V-grade volcanic apparatuses are delineated. The Zircon U-Pb LA-ICP-MS dating of the trachyandesite from the second lithologic segment of the Baiyin’gaolao Formation of Gaoyaowula and the rhyolite from the third are 128.2±0.9 Ma and 125.5±0.5 Ma respectively, indicating that the formation age is early-Cretaceous.

Key words: Baiyin’gaolao Formation; volcanism; LA-ICP-MS zircon U-Pb dating; Gaoyaowula; Inner Mongolia

摘 要: 通过 1 : 50000 区域地质调查, 运用“火山构造-岩性岩相-火山地层”三重填图方法, 将内蒙古东乌旗高尧乌拉白音高老组划分为 3 个岩性段, 一段为火山碎屑沉积岩, 二段为中性火山岩, 三段为酸性火山岩, 构成一个完整的沉积-喷发旋回。早期至晚期岩浆具有由中性向酸性演化的特征。划分出爆发相、侵出相、溢流相、火山通道相、喷发-沉积相及潜火山相等火山岩相; 圈出 12 个 V 级火山机构。获得高尧乌拉白音高老组二段粗安岩和三段流纹岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分别为 128.2±0.9 Ma 和 125.5±0.5 Ma, 表明其形成时代为早白垩世。

关键词: 白音高老组; 火山作用; LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年; 高尧乌拉; 内蒙古

中图分类号: P597 **文献标识码:** A

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41502211, 41972061); 中国地质调查局地质调查项目 (1212011120711, 12120114064201, DD20190004, DD20160039, DD20160041)

第一作者简介: 董培培 (1985-), 女, 硕士, 讲师, 从事岩石学和地球化学研究。E-mail: 120650334@qq.com

通讯作者: 李英杰 (1976-), 女, 博士, 教授, 主要从事岩浆岩与大地构造研究。E-mail: liyingjie820@126.com

收稿日期: 2019-10-15; **修回日期:** 2020-03-25; **责任编辑:** 范二平

引用格式: 董培培, 李英杰, 王根厚, 等, 2021. 内蒙古高尧乌拉白音高老组地质及年代学特征 [J]. 地质力学学报, 27 (1): 135–152. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021.27.01.014

0 引言

大兴安岭处于中亚造山带的东段, 在古生代时期经历了古亚洲洋构造体系的演化, 中生代期间经历了环太平洋构造体系和蒙古-鄂霍茨克构造体系的叠加与改造(许文良等, 2013)。从晚侏罗世开始构造岩浆活动强烈, 除形成大量的中生代花岗岩以外, 也形成了大兴安岭3套标志性的陆相中—酸性火山岩: 满克头鄂博组、玛尼吐组和白音高老组, 构成了大兴安岭火山岩带, 成为大兴安岭地区中生代主要地质单元。近年来, 有关学者对大兴安岭地区中生代火山岩开展了大量的研究工作(邵济安等, 1999a, 1999b, 2001; Wang et al., 2006; Zhang et al., 2008a; 张吉衡, 2009; 刘昊等, 2011; 郝彬等, 2011; 程天赦等, 2012), 但是大多注重通过火山岩岩石地球化学特征研究来判断岩石成因和大地构造环境, 对火山岩地层层序的详细研究较少(陈英富等, 2012)。特别是对于大兴安岭广泛分布的白音高老组, 其火山岩地层特征、岩石组合和形成年代仍存在较大争议。白音高老组为辽宁省区测二队(1974)创名于赤峰市巴林左旗哈达英格乡白音高老地区。《内蒙古自治区岩石地层》(李文国, 1996)将其定义为“一套杂色酸性火山碎屑岩、酸性熔岩、酸性熔结凝灰岩夹中酸性火山碎屑岩、火山碎屑沉积岩、沉积岩。其整合在玛尼吐组之上, 时代为晚侏罗世。”多数学者认为大兴安岭中南部白音高老组主要是由流纹岩和流纹质凝灰岩组成的一套酸性岩(苟军, 2010; 苟军等, 2010; 张乐彤等, 2015; 陈金勇等, 2019)。林敏(2018)通过区域地质调查将内蒙古乌力牙斯台一带的白音高老组划分为下部酸性火山岩和上部偏碱性火山岩, 并进行了火山机构的圈定。在形成时代上, 早期学者根据沉积岩夹层中的化石碎片将其置为晚侏罗世, 近期大量的锆石 U-Pb 年代学研究将其划为早白垩世(苟军等, 2010; 王建国等, 2013; 张乐彤等, 2015; Wang et al., 2018)。

内蒙古高尧乌拉位于大兴安岭中南段, 中生代火山岩出露齐全, 但火山岩地层层序、岩性、岩相、火山机构和系统性的年代学研究薄弱。已有 1:200000 哈拉盖图农场幅将区内大面积出露的火山岩划分为上侏罗统道特诺尔组和查干诺尔组,

1:250000 将其重新划分为中侏罗统玛尼吐组和上侏罗统白音高老组, 均无年代学依据。笔者等在开展 1:50000 哈腊特等四幅区域地质矿产调查项目时, 运用“火山构造-岩性岩相-火山地层”三重填图方法(卢清地, 2004), 结合系统的锆石 U-Pb 年代学研究, 在高尧乌拉一带新发现一套早白垩世中性火山岩和酸性火山岩, 其整合在上侏罗统玛尼吐组之上, 将其重新厘定为下白垩统白音高老组, 并将该区白音高老组进一步划分为3个岩性段, 首次在白音高老组底部划分出中性火山岩段, 新建立了白音高老组下部中性火山岩段和上部酸性火山岩段的岩性组合, 根据同位素测年资料, 将其归属于早白垩世, 并在该火山盆地中划分出6种岩相类型, 圈定了12个V级火山机构。

1 地质背景

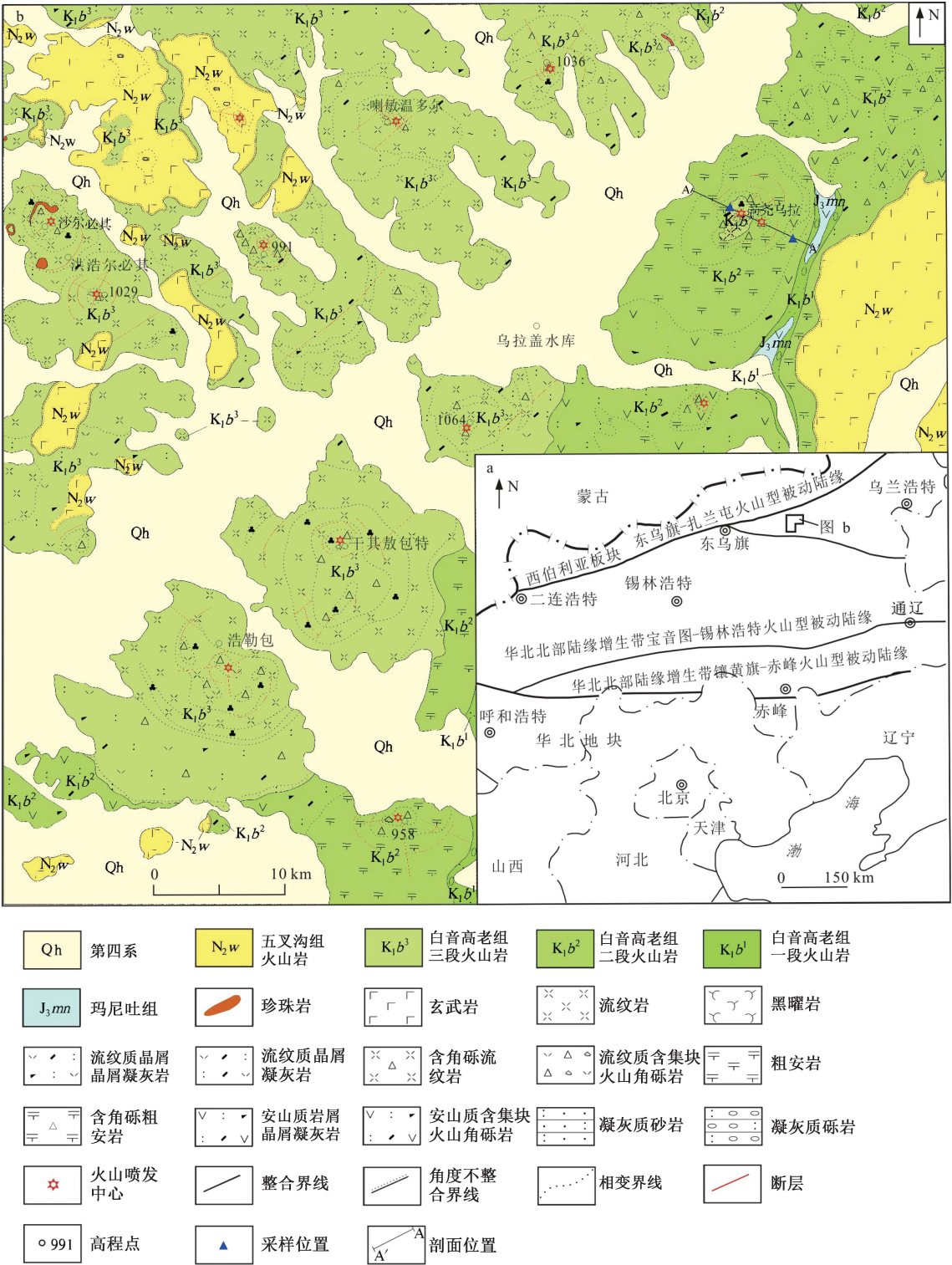
内蒙古东乌旗高尧乌拉位于大兴安岭中南部, 地处古亚洲洋构造域与环太平洋构造域交汇处, 同时受两大构造域影响。晚古生代位于华北陆块与西伯利亚陆块之间的兴蒙造山带(I级)、二连-贺根山缝合带(II级)东部(Xiao et al., 2003, 2015a)。中生代处于滨太平洋构造域(I级)大兴安岭构造-岩浆带(II级), 扎兰屯-赤峰火山-岩浆岩带(III级)(Whalen et al., 1987; 图1a)。

工作区主要出露中生界玛尼吐组、白音高老组、新生界五叉沟组和第四系, 其中, 白音高老组分布最广, 平行不整合于玛尼吐组之上, 局部被五叉沟组和第四系角度不整合接触覆盖(图1b)。

2 地层特征

高尧乌拉白音高老组位于高尧乌拉早白垩世火山喷发盆地的东部, 东乌珠穆沁旗高尧乌拉一带(图1b), 呈北东向展布, 平行不整合覆盖于上侏罗统玛尼吐组之上, 局部被新近系五岔沟组不整合覆盖, 部分地区被第四系掩盖。实测剖面位于研究区东北部高尧乌拉一带(45°55'N; 119°39'E)。剖面露头较好, 地层层序连续, 岩石组合较齐全, 地层层序及韵律特征见图2和表1。

基于路线地质调查和实测剖面, 根据接触关系、地层层序和岩石组合等特征, 高尧乌拉白音高老组划分为3个岩性段: 一段、二段和三段。实



a—研究区大地构造位置示意图 (据 Jahn et al. , 2004 修改); b—内蒙古东乌旗高尧乌拉地质图 (李英杰等, 2017)

图 1 研究区地质图

Fig. 1 Geological map of the research area

测剖面总厚度为 394.8 m, 一段、二段和三段厚度分别为 30.1 m、207 m 和 157.7 m。白音高老组一段分布于洪浩尔必其早白垩世火山喷发盆地的边部及研究区东部和南部, 为火山碎屑沉积岩组合, 岩性主要有浅灰色、浅灰绿色、紫红色凝灰质砂岩、凝灰质含砾砂岩和凝灰质砂砾岩。白音高老

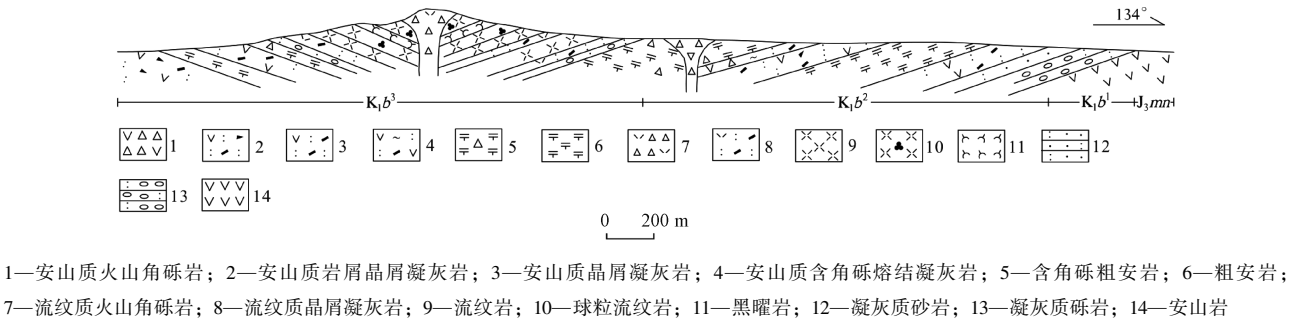


图 2 高尧乌拉白音高老组火山岩剖面图

Fig. 2 Profile of volcanic rocks from the Baiyin'gaolao Formation, Gaoyaowula

表 1 内蒙古高尧乌拉白音高老组火山岩实测剖面地层层序及韵律划分

Table 1 Stratigraphic sequence and rhythm classification of the measured section of the volcanic rocks from the Baiyin'gaolao Formation, Gaoyaowula

岩石地层单位		层号	岩性	分层厚度/	组段厚度/	形成方式	韵律划分
组	段			m	m		
白音高老组	三段	17	紫色流纹质火山角砾岩	26.3	157.7	火山通道相	⑥
		16	灰紫色条带状球粒流纹岩	21.5		溢流相	
		15	黑色黑曜岩	20.8		溢流相	
		14	灰紫色条带状球粒流纹岩	18.6		溢流相	
		13	灰紫色流纹岩	17.2		溢流相	⑤
		12	灰紫色流纹质晶屑凝灰岩	11.6		空落堆积相	
		11	灰紫色流纹岩	21.7		溢流相	
		10	紫红色流纹质晶屑凝灰岩	10.3		空落堆积相	
	9	凝灰质砾岩	9.7	喷发-沉积相	④		
	二段	8	灰紫色安山质火山角砾岩	23.6	207	火山通道相	③
		7	浅灰色含角砾粗安岩	57.4		溢流相	
		6	浅灰色安山质含角砾熔结凝灰岩	14.3		碎屑流堆积相	
		5	浅灰色安山质岩屑晶屑凝灰岩	32.9		空落堆积相	②
		4	灰紫色粗安岩	52.1		溢流相	
3		浅灰色安山质晶屑凝灰岩	26.7	空落堆积相			
一段	2	灰绿色凝灰质砂岩	11.9	30.1	火山沉积相	①	
	1	浅灰色凝灰质砾岩	18.2				
玛尼吐组		0	安山岩			溢流相	

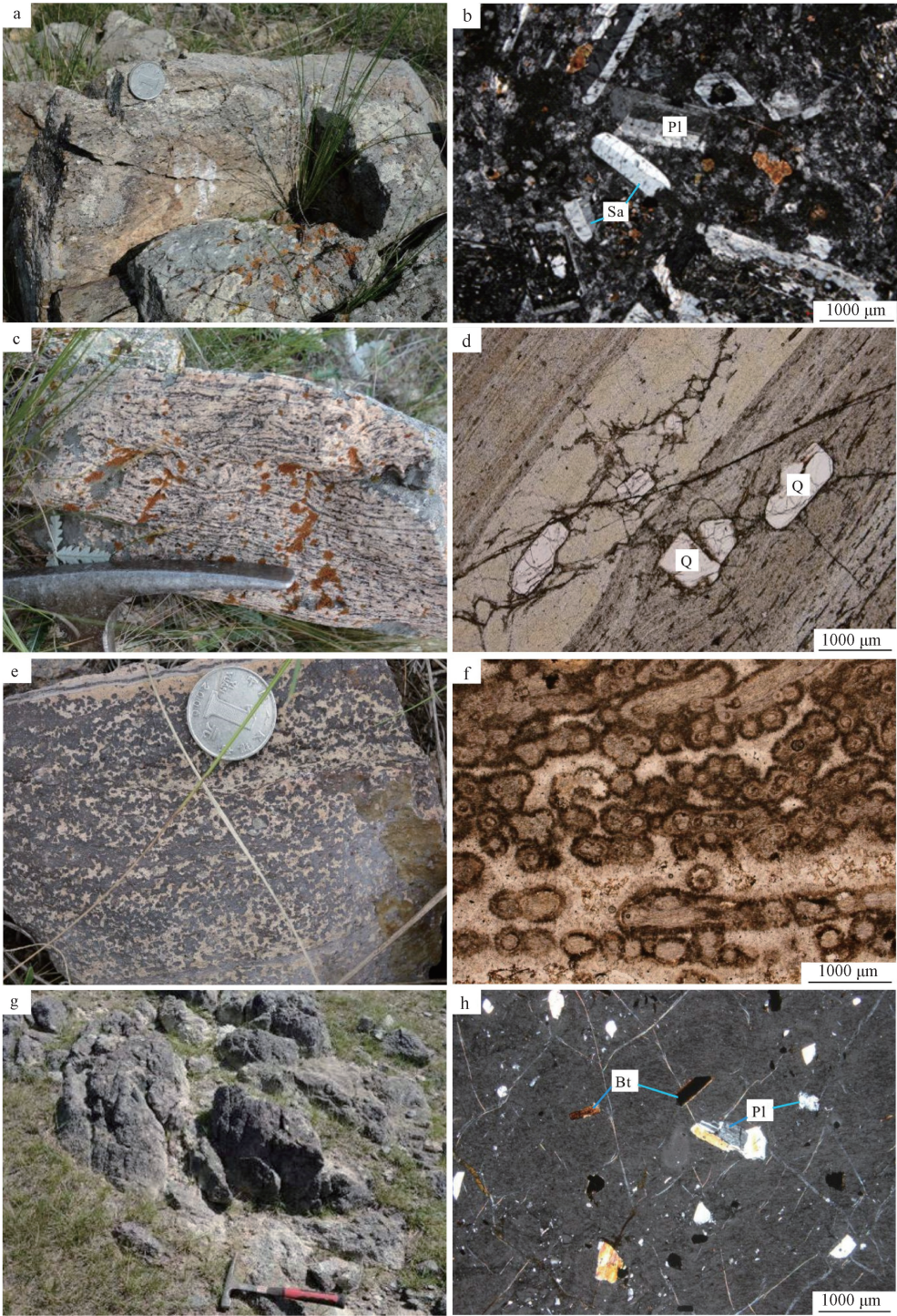
组二段出露广泛，主要位于研究区东部和南部，为一套中性火山熔岩夹火山碎屑岩组合，岩性主要为深灰、灰紫色安山岩、角砾安山岩、粗安岩、粗面岩、安山质晶屑凝灰岩、安山质晶屑熔结凝灰岩、安山质火山角砾岩和安山质集块火山角砾岩等。白音高老组三段分布在洪浩尔必其早白垩世火山喷发盆地中部，最为发育（图 1b），岩性主要为酸性熔岩和火山碎屑岩组合，下部为浅灰、浅灰绿色凝灰质砂砾岩、凝灰质含砾砂岩和凝灰质砂岩等。上部为灰白色、灰紫色流纹岩、球粒流纹岩、珍珠岩、黑曜岩、松脂岩、流纹质岩屑晶屑凝灰岩、流纹质晶屑熔结凝灰岩、流纹质含角砾凝灰熔岩、流纹质火山角砾岩和流纹质火山集块岩等。以夹石泡流纹岩、球粒流纹岩、珍珠岩、黑曜岩、松脂岩为明显特征，与底部一段呈

整合接触。白音高老组一段、二段和三段构成一个完整的沉积-火山喷发旋回。

3 岩石学特征

研究区白音高老组主要岩性特征如下：
粗安岩，发育杏仁构造和气孔状构造（图 3a），斑状结构（图 3b），斑晶 13%~22%，主要由钾长石（6%~10%）、斜长石（3%~8%）和角闪石（4%±）组成，粒度 0.5~6.0 mm，大者达 10 mm。钾长石主要呈半自形板状，为透长石，表面较干净；斜长石呈半自形板条状，杂乱或似交织状分布，有时可见环带结构，聚片双晶发育；暗色矿物呈半自形—它形粒状，填隙状分布于斜长石粒间。基质 78%~87%，主要由碱性长石（70%~75%）微晶组成，呈

半自形板条状, 近于平行排列, 少量斜长石和暗色矿物假象, 粒径一般<0.2 mm。



Pl—斜长石; Sa—透长石; Bt—黑云母; Q—石英
a—气孔状粗安岩野外露头; b—斑状结构粗安岩显微镜下照片 (正交偏光下); c—发育流动构造的纹岩野外照片; d—发育流动构造的斑状结构流纹岩显微镜下照片 (单偏光下); e—发育球粒结构的球粒纹岩野外露头; f—发育球粒结构的球粒纹岩显微镜下照片 (单偏光下); g—少斑结构黑曜岩野外露头; h—少斑结构黑曜岩显微镜下照片 (正交偏光)

图 3 高尧乌拉白音高老组火山岩野外及显微镜下照片

Fig. 3 Outcrop photographs (left) and micrographs (right) of the volcanic rocks from the Baiyin'gaolao Formation, Gaoyaowula

安山质熔结凝灰岩, 发育熔结凝灰结构, 假流纹构造, 岩石由晶屑 (10%)、岩屑 (10% ~ 15%)、玻屑 (10%) 及火山尘 (65% ~ 70%) 组成。晶屑由斜长石和少量石英组成, 呈棱角状,

略显方向性排列。岩屑以刚性为主、塑性次之,大小一般以 2~12 mm 为主。其成分主要为流纹岩、安山岩、凝灰岩等。塑性晶屑呈细长带状。玻屑多已压扁拉长,呈蚯蚓状、肠状、线纹状等,局部仍可见弧面多角状、鸡骨状、弓状等。

流纹岩,灰白色、浅紫色,具有典型的流纹构造(图 3c、3d),少斑结构,基质霏细结构、微晶结构。斑晶由石英组成,呈它形粒状,粒度一般为 0.5~1.0 mm,零星分布,具熔蚀状外貌。基质由长英质组成,高岭土化、褐铁矿化明显。长英质呈条带状定向排列,少数长英质呈微晶状,二者各自组成条带,相间排列构成流纹构造和纹层状构造,遇斑晶则绕过。

球粒流纹岩,灰白色,局部显紫色色调,少斑结构—基质球粒结构,具流纹构造(图 3e)。镜下特征:岩石由斑晶(2%~3%)、基质(>95%)组成。斑晶由斜长石假像组成,半自形板状,粒径一般 0.3~1.3 mm,零星分布,强粘土化,局部硅化,呈假象产出。基质由长英质组成,多指纹状交生,球粒状产出,圆球状外形,大小一般 0.1~0.8 mm,相对富集呈条纹条带状产出(图 3f),少部分呈柱状、扇状、集合体条纹状产出,少数长英质呈纤维状,集合体放射球粒状产出,圆球状外形,集合体一般<0.4 mm,不同结构长英质各自相对富集呈条纹条带状相间分布,形成流纹构造,另见少数微粒状石英填隙状分布于文象交生体、球粒间,长英质不均匀粘土化,局部硅化、褐铁矿化。

黑曜岩,灰黑色,少斑—基质玻璃质结构,块状构造(图 3g)。薄片镜下特征:岩石由 5%~10%的斑晶、90%~95%的基质组成。斑晶由 3%~8%斜长石、2%左右的黑云母构成,杂乱分布,斑晶粒度一般在 0.5~1.5 mm 之间;斜长石呈板状,自形程度为半自形,具聚片双晶、较少部分可见环带构造;黑云母呈叶片状,呈棕色,少部分暗化。基质由玻璃质构成,无色,大部分可见裂理,少量铁质沿其裂理分布(图 3h)。

流纹质晶屑凝灰岩,呈灰紫色,凝灰结构,块状构造,岩石由晶屑(25%)、岩屑(10%)、玻屑和火山灰(65%)组成。晶屑由石英、斜长石、钾长石等组成,大小一般为 0.1~2.0 mm,少数粒度为 2~3 mm,杂乱分布,呈棱角状—次棱角状。岩屑以刚性为主,大小以 0.5~2.0 mm 的凝灰

物为主,少数为 2~4 mm 的火山角砾。刚性岩屑呈次棱角状,成分为流纹岩、安山岩等。玻屑外形已基本消失,部分隐约可见弧面多角状外形,现已脱玻为隐晶状、霏细状长英质,粘土化明显。

4 火山作用特征

路线调查和剖面测制(图 2,表 1)显示,研究区火山岩相主要为爆发相、侵出相、溢流相、火山通道相、潜火山相及喷发—沉积相,其中爆发相进一步划分为空落堆积相、碎屑流堆积相和崩落堆积相,在白音高老组二段和三段中均有发育。崩落堆积相出露较少,主要分布于火山口附近,碎屑流堆积相、空落堆积相和喷溢相自火山口向外呈环状、弧状分布;侵出相主要分布于火山口附近,潜火山相主要呈岩瘤和岩脉分布于火山机构的中心部位和外围,多呈环状、放射状、带状岩脉(体)分布。其空间展布明显受火山构造及环状、辐射状断裂控制,与围岩呈侵入接触。喷发—沉积相广泛分布于火山盆地的边部。

据《火山岩地区区域地质调查方法指南》(区域地质矿产地质司,1987)和《“火山构造—岩性岩相—火山地层”填图方法研究报告》(卢清地,2004)中火山构造的划分原则,结合测区地质构造、地层、岩性岩相及火山构造空间分布特征,将测区火山构造划分出 1 个Ⅳ级火山构造——洪浩尔必其早白垩世火山喷发盆地,12 个Ⅴ级火山机构(层状火山、破火山、火山喷发中心)(图 1b)。其中,白音高老组二段出露的Ⅴ级火山机构主要分布在火山喷发盆地的外围,研究区的东部和东南部,自北向南分别为:高尧乌拉东破火山、乌拉盖水库东层状火山和 958 高地层状火山;白音高老组三段出露的Ⅴ级火山机构在研究区分布较广泛,自北向南分别为:1036 高地破火山、喇敏温多尔破火山、高尧乌拉破火山、沙尔必其破火山、991 高地破火山、1029 高地破火山、1064 高地破火山、干其敖包特破火山和浩勒包破火山。火山构造空间组合方式为串珠状和叠置式。

5 分析方法

高尧乌拉白音高老组二段粗安岩和三段流纹岩的主量、微量元素分析测试均在河北省区域地

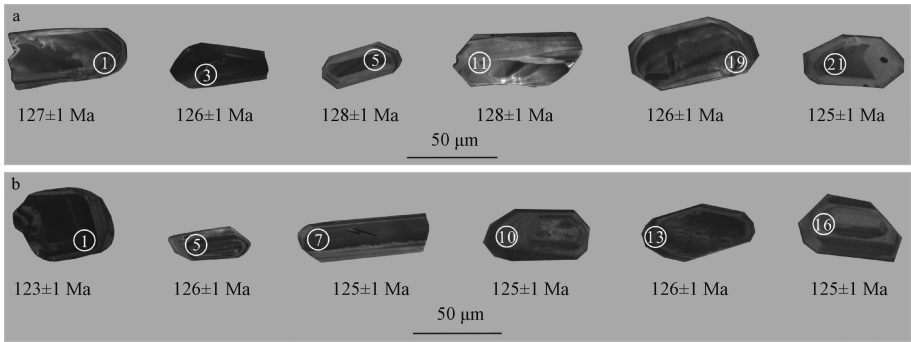
质矿产调查研究所实验室完成。主量元素分析采用 Panalytical 公司 PW440 型 X 荧光光谱仪 (XRF) 测定, 分析误差低于 5%; 微量和稀土元素采用 Thermo Fisher 公司 X-Se-risep 型电感耦合等离子质谱仪 (ICP-MS) 测定, 分析精度和准确度一般优于 5%。锆石分选在河北省区域地质矿产调查研究所实验室完成, 采用重液浮选和电磁分离方法进行挑选, 在双目镜下对分选出的锆石进行人工挑选, 尽量挑选无包裹体、无裂纹和透明度高、晶形完好的锆石颗粒作为测定对象。锆石阴极发光 (CL) 图像分析由北京锆年领航科技有限公司的高分辨热场发射能谱阴极发光室 (SEM-EDS-CL) 完成。锆石原位 U-Pb 同位素年龄分析在中国地质调查局天津地质调查中心实验测试室完成, 锆石定年所用仪器为 Thermo Fisher 公司 Neptune 型 MC-ICP-MS 及与之配套的 New Wave UP 193 激光剥蚀系统。激光剥蚀斑束直径为 32 μm , 激光剥蚀样品的深度为 20~40 μm , 锆石年龄计算采用国际上通用的标准锆石 GJ-1 作为外标, 元素含量采用美国国家标准物质局人工合成硅酸盐玻璃 NIST SRM610 作为外标,²⁹Si 作为内标元素进行校正。数据处理采用 ICPMSDataCal 8.4 程序 (Liu et al., 2008), 并采用 Andersen (2002) 方法对测试数据进行普通铅校正, 年龄计算及谐和图绘制采用 ISOPLLOT (3.0 版) (Ludwig, 1991, 2003; Yuan et al., 2004)

完成。

6 分析结果

6.1 锆石 U-Pb 同位素

对高尧乌拉白音高老组二段的 1 件粗安岩样品 (TW9846) 和三段的 1 件流纹岩样品 (TW9850) 进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素分析。粗安岩 (TW9846) 样品共选取 21 粒锆石进行测定, CL 图像 (图 4a) 显示粗安岩样品的锆石多呈透明, 半自形—自形长柱状, 长宽比 1:1~2:1, 锆石粒度较小, 粒径多在 40~80 μm 之间, 阴极发光图像 (CL) 显示部分锆石环带发育欠佳, 内部无残留核, 外部无变质边, 具有中性岩浆锆石特征 (Su et al., 2008; 李长民, 2009; 刘建辉等, 2011)。从表 2 中可以看出, 21 个测点 Th 和 U 的含量分别为 78×10^{-6} ~ 270×10^{-6} 和 337×10^{-6} ~ 864×10^{-6} , Th/U 比值变化较小 (Th/U=0.21~0.36), 比值均大于 0.2, Th 和 U 具有良好的正相关关系, 属于岩浆锆石特征 (Claesson et al., 2000; Belousova et al., 2002)。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果显示 (表 2), 21 个测点的谐和度均较高, ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄值为 $125\pm1\sim134\pm2$ Ma, 21 个数据点均落在谐和线上或其附近 (图 5a), 加权平均年龄为 128.2 ± 0.9 Ma (MSWD=4.1; 图 5b), 认为可以代表粗安岩的结晶年龄。



a—二段粗安岩; b—三段流纹岩

图 4 内蒙古东乌旗高尧乌拉白音高老组二段粗安岩和三段流纹岩锆石阴极发光代表图像

Fig. 4 Representative cathodoluminescent (CL) images of zircons for the trachyandesites and rhyolites from the Baiyin'gaolao Formation, Gaoyaowula

流纹岩 (TW9850) 样品的锆石多呈透明, 半自形—自形长柱状, 长宽比 1:1~3:1, 锆石粒径多在 40~80 μm 之间, 锆石阴极发光图像 (CL) 显示大部分锆石粒度较小且振荡环带欠发育, 内部无残留核, 外部无变质边 (图 4b), 具酸性岩浆

岩锆石的特征 (Su et al., 2008; 李长民, 2009; 刘建辉等, 2011)。从表 2 中可以看出, 17 个测点 Th 和 U 含量变化范围分别为 99×10^{-6} ~ 281×10^{-6} 和 343×10^{-6} ~ 854×10^{-6} , 17 个测点 Th/U 比值变化较小 (Th/U=0.22~0.43), 均大于 0.2, 属于岩浆锆石

表 2 高尧乌拉白音高老组二段粗安岩和三段流纹岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素分析结果

Table 2 LA-ICP-MS zircon U-Pb isotopic analysis of the trachyandesites and rhyolites from the Baiyin'gaolao Formation, Gaoyao wula

点号	元素含量/ $\times 10^{-6}$		Th/U	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	
	Th	U		比值	1 σ	比值	1 σ	比值	1 σ	比值	1 σ	年龄/Ma	$\pm 1\sigma$	年龄/Ma	$\pm 1\sigma$
粗安岩 (TW9846)															
1	117	438	0.27	0.0200	0.0002	0.1339	0.0056	0.0486	0.0019	0.0080	0.0004	127	1	128	5
2	168	677	0.25	0.0201	0.0002	0.1354	0.0049	0.0489	0.0018	0.0094	0.0003	128	1	129	5
3	143	522	0.27	0.0197	0.0002	0.1472	0.0051	0.0542	0.0018	0.0070	0.0002	126	1	139	5
4	78	337	0.23	0.0197	0.0002	0.1288	0.0072	0.0473	0.0026	0.0088	0.0003	126	1	123	7
5	91	446	0.21	0.0200	0.0002	0.1436	0.0052	0.0521	0.0019	0.0080	0.0003	128	1	136	5
6	204	769	0.27	0.0201	0.0002	0.1382	0.0040	0.0498	0.0014	0.0077	0.0002	128	1	131	4
7	130	529	0.25	0.0199	0.0002	0.1472	0.0056	0.0535	0.0019	0.0075	0.0003	127	1	139	5
8	155	545	0.29	0.0199	0.0002	0.1279	0.0053	0.0466	0.0019	0.0078	0.0003	127	1	122	5
9	144	576	0.25	0.0202	0.0002	0.1471	0.0052	0.0528	0.0018	0.0088	0.0003	129	1	139	5
10	119	495	0.24	0.0206	0.0002	0.1528	0.0072	0.0539	0.0024	0.0100	0.0004	131	1	144	7
11	270	864	0.31	0.0200	0.0002	0.1395	0.0035	0.0505	0.0012	0.0081	0.0002	128	1	133	3
12	142	613	0.23	0.0206	0.0002	0.1561	0.0053	0.0549	0.0018	0.0098	0.0003	132	1	147	5
13	147	520	0.28	0.0203	0.0002	0.1361	0.0053	0.0486	0.0018	0.0078	0.0002	130	1	130	5
14	93	386	0.24	0.0204	0.0002	0.1461	0.0070	0.0520	0.0024	0.0090	0.0004	130	1	138	7
15	218	699	0.31	0.0203	0.0002	0.1432	0.0078	0.0512	0.0024	0.0085	0.0004	129	1	136	7
16	139	487	0.29	0.0205	0.0002	0.1521	0.0056	0.0539	0.0019	0.0090	0.0003	131	1	144	5
17	261	808	0.32	0.0202	0.0002	0.1465	0.0039	0.0525	0.0013	0.0082	0.0003	129	1	139	4
18	122	416	0.29	0.0210	0.0002	0.1517	0.0070	0.0524	0.0024	0.0095	0.0003	134	2	143	7
19	135	418	0.32	0.0198	0.0002	0.1329	0.0067	0.0487	0.0024	0.0074	0.0002	126	1	127	6
20	146	578	0.25	0.0198	0.0002	0.1350	0.0053	0.0495	0.0019	0.0072	0.0002	126	1	129	5
21	163	452	0.36	0.0197	0.0002	0.1389	0.0061	0.0512	0.0022	0.0065	0.0002	125	1	132	6
流纹岩 (TW9850)															
1	281	646	0.43	0.0193	0.0002	0.1325	0.0045	0.0499	0.0016	0.0050	0.0001	123	1	126	4
2	99	343	0.29	0.0197	0.0002	0.1452	0.0098	0.0533	0.0034	0.0070	0.0003	126	1	138	9
3	162	422	0.38	0.0196	0.0002	0.1435	0.0054	0.0530	0.0019	0.0040	0.0002	125	1	136	5
4	141	422	0.33	0.0195	0.0002	0.1314	0.0071	0.0488	0.0026	0.0067	0.0003	125	1	125	7
5	182	508	0.36	0.0198	0.0002	0.1520	0.0055	0.0557	0.0020	0.0070	0.0003	126	1	144	5
6	203	646	0.31	0.0197	0.0002	0.1617	0.0051	0.0595	0.0018	0.0080	0.0003	126	1	152	5
7	140	564	0.25	0.0196	0.0002	0.1343	0.0054	0.0497	0.0019	0.0073	0.0003	125	1	128	5
8	137	500	0.27	0.0197	0.0002	0.1357	0.0052	0.0500	0.0019	0.0075	0.0003	126	1	129	5
9	100	461	0.22	0.0197	0.0002	0.1347	0.0061	0.0495	0.0022	0.0076	0.0004	126	1	128	6
10	193	750	0.26	0.0195	0.0002	0.1395	0.0038	0.0518	0.0014	0.0082	0.0003	125	1	133	4
11	112	450	0.25	0.0200	0.0002	0.1463	0.0065	0.0531	0.0024	0.0090	0.0004	128	1	139	6
12	219	776	0.28	0.0196	0.0002	0.1316	0.0041	0.0486	0.0015	0.0088	0.0004	125	1	126	4
13	193	679	0.28	0.0197	0.0002	0.1521	0.0042	0.0560	0.0015	0.0090	0.0004	126	1	144	4
14	142	585	0.24	0.0195	0.0002	0.1371	0.0044	0.0510	0.0016	0.0084	0.0003	125	1	130	4
15	242	854	0.28	0.0198	0.0002	0.1339	0.0035	0.0491	0.0012	0.0077	0.0002	126	1	128	3
16	192	598	0.32	0.0195	0.0002	0.1323	0.0047	0.0491	0.0017	0.0078	0.0002	125	1	126	5
17	208	675	0.31	0.0196	0.0002	0.1364	0.0040	0.0504	0.0015	0.0079	0.0003	125	1	130	4

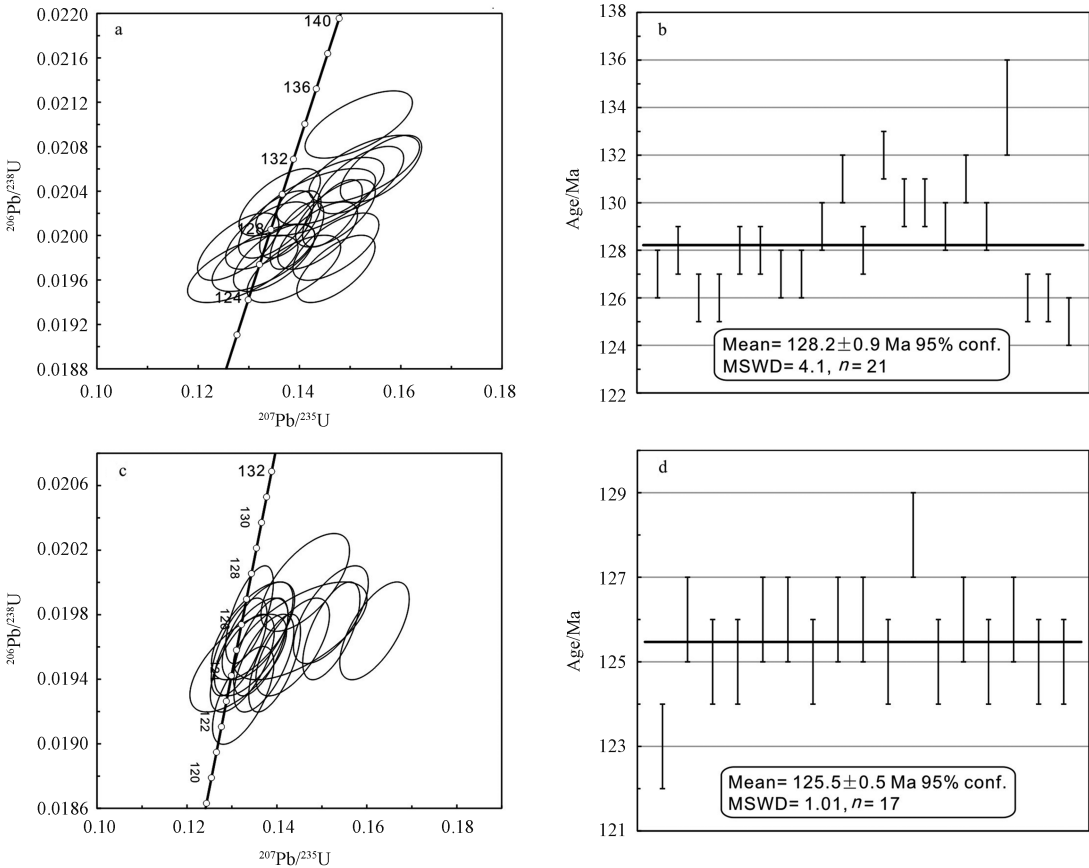
特征 (Claesson et al. , 2000)。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果 (表 2) 显示, 17 个测点的谐和度均较高, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 $123\pm 1\sim 128\pm 1$ Ma, 大多数测点落在谐和线及其附近 (图 5c), 加权平均年龄为 125.5 ± 0.5 Ma (MSWD=1.01; 图 5d), 认为可以代表流纹岩的结晶年龄。

6.2 地球化学特征

此次分别选取了高尧乌拉白音高老组二段 5 件粗安岩和三段 5 件流纹岩样品, 进行了主量元素、微量元素和稀土元素的分析, 分析结果见表 3。

从表 3 中可以看出, 白音高老组二段粗安岩样品 SiO_2 含量为 $57.45\%\sim 64.11\%$, 平均值为 61.37% ;

CaO 含量为 $1.15\%\sim 4.53\%$, 平均 2.32% ; Ti_2O 含量较低, 为 $0.48\%\sim 1.63\%$, 平均 1.00% ; MgO 含量为 $0.68\%\sim 1.03\%$; $\text{Mg}^\#$ 中等, 在 $21.94\sim 32.43$ 之间; Al_2O_3 含量高, 为 $15.80\%\sim 24.32\%$, 平均 19.38% ; 全碱 ($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$) 含量为 $7.47\%\sim 8.82\%$, 平均 8.07% 。 Al_2O_3 的摩尔数与 CaO , Na_2O 和 K_2O 的摩尔数之和的比值 (A/CNK) 在 $0.93\sim 2.01$ 之间, 平均为 1.36 , 属于准铝质—弱过铝质岩石。在 TAS 火山岩分类图解 (图 6) 中, 样品点落在粗面岩和粗面安山岩区; 在 SiO_2 - K_2O 图 (图 7) 中, 样品点落入高钾钙碱性系列和钾玄岩系列; 在 A/CNK - A/NK 图解 (图 8) 中, 样品点



a—粗安岩锆石 U-Pb 年龄谐和图；b—粗安岩锆石 U-Pb 年龄直方图；c—流纹岩锆石 U-Pb 年龄谐和图；d—流纹岩锆石 U-Pb 年龄直方图

图 5 锆石 U-Pb 年龄谐和图和直方图

Fig. 5 Zircon U-Pb concordia diagrams and histograms

落在准铝质—过铝质岩石系列。三段流纹岩样品，富硅（ SiO_2 含量 76.02% ~ 77.87%，平均值 76.67%），富钾（4.46%~4.81%，平均值 4.65%），富碱（ $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ 含量为 8.02%~8.46%，平均值 8.29%），贫 CaO （0.43%~0.96%，平均值 0.56%），贫 MgO （0.07%~0.15%，平均值 0.1%），贫 P_2O_5 （0.02%~0.03%，平均值 0.02%）和 TiO_2 （0.05%~0.06%，平均值 0.06%）； Al_2O_3 含量较低，为 11.55%~12.71%，平均 12.34%； A/CNK 在 0.96~1.06 之间，平均为 1.02，属于准铝质—弱过铝质岩石。在 TAS 火山岩分类图解（图 6）中，样品点落在流纹岩区；在 SiO_2 - K_2O 图（图 7）中，样品点落入高钾钙碱性系列；在 A/CNK - A/NK 图解（图 8）中，样品点落在准铝质—过铝质岩石系列。

白音高老组三段流纹岩表现出较高的 $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})/\text{CaO}$ （8.81~19.63，平均值 16.16）， $\text{K}_2\text{O}/\text{MgO}$ （31.67~63.71，平均值 49.69）， $^{\text{T}}\text{FeO}/\text{MgO}$ （3.60~14.51，平均值 9.43）以及较高的微量元

素 Rb/Nb 和 Y/Nb 值。

从表 3 中可以看出：二段粗安岩稀土元素丰度较高，稀土总量 ΣREE 为 $126.55 \times 10^{-6} \sim 164.38 \times 10^{-6}$ 平均值为 145.33×10^{-6} ； LREE/HREE 比值为 5.87~7.88，轻重稀土分异明显； $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 5.20 \sim 7.89$ ，平均值为 6.54，球粒陨石标准化稀土配分曲线（图 9a）呈轻稀土富集、重稀土轻度亏损的缓慢右倾形式，Eu 负异常不明显（ $\delta\text{Eu} = 0.63 \sim 0.93$ ）；原始地幔标准化蜘蛛图显示大离子亲石元素（LILE） Rb ， K 及高场强元素（HFSE） Th ， U 富集，高场强元素（HFSE） Nb ， Ta ， Ti 和 P 相对亏损的特征（图 9b）。三段流纹岩稀土元素丰度较高，稀土总量 ΣREE 为 $100.45 \times 10^{-6} \sim 170.04 \times 10^{-6}$ ，平均值为 133.66×10^{-6} ； LREE/HREE 比值为 6.52~9.51，平均值为 7.8；球粒陨石标准化稀土配分曲线（图 9c）呈海鸥式分布，轻稀土富集右倾，轻重稀土分馏较明显， $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 6.10 \sim 9.15$ ，平均值为 7.66，Eu 负异常明显， δEu 为 0.20~0.29，说明源区岩浆分离结晶过程中斜长石

表 3 高尧乌拉白音高老组二段粗安岩和三段流纹岩主量元素 (%) 和微量元素 ($\times 10^{-6}$) 分析结果

Table 3 Major (wt%) and trace ($\times 10^{-6}$) element analysis results of the trachyandesites and rhyolites from the Baiyin'gaolao Formation, Gaoyaowula

主量及 微量元素	XT109 粗安岩	XT109-2 粗安岩	XT4524 粗安岩	XT4525-2 粗安岩	XT4503-1 粗安岩	P35XT32 流纹岩	P34XT09 流纹岩	P43XT03 流纹岩	XT4404 流纹岩	P21XT17 流纹岩
SiO ₂	57.45	59.02	62.40	64.11	63.89	76.02	76.60	76.37	77.87	76.51
TiO ₂	1.63	1.54	0.80	0.55	0.48	0.06	0.06	0.05	0.06	0.06
Al ₂ O ₃	24.32	22.86	17.31	15.80	16.61	12.59	12.71	12.40	11.55	12.43
Fe ₂ O ₃	1.43	0.80	4.37	4.46	3.48	0.79	0.76	0.32	1.04	0.93
FeO	1.81	2.52	0.55	0.52	0.62	0.25	0.07	0.18	0.08	0.22
MnO	0.130	0.130	0.160	0.089	0.095	0.04	0.04	0.02	0.02	0.02
MgO	0.75	0.71	0.68	1.03	0.99	0.15	0.08	0.13	0.07	0.08
CaO	1.15	1.60	4.53	2.85	1.45	0.50	0.43	0.96	0.47	0.44
Na ₂ O	2.57	3.21	3.97	3.97	3.41	3.57	3.63	3.85	3.56	3.60
K ₂ O	5.35	4.51	3.50	4.47	5.41	4.75	4.81	4.61	4.46	4.60
P ₂ O ₅	0.28	0.35	0.29	0.19	0.20	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02
LOI	2.90	2.61	1.29	1.82	3.21	1.22	0.74	1.05	0.76	1.01
TOTAL	99.80	99.85	99.84	99.84	99.82	99.96	99.95	99.95	99.97	99.93
Na ₂ O+K ₂ O	7.92	7.72	7.47	8.44	8.82	8.32	8.44	8.46	8.02	8.20
Mg [#]	30.67	28.66	21.94	29.58	32.43	22.33	16.68	32.29	10.31	12.55
La	31.9	39.3	18.4	21.1	20.7	25.21	31.53	20.41	29.87	36.63
Ce	34.1	29.9	27.1	30.6	26.1	45.68	57.33	36.71	51.33	62.91
Pr	58.6	57.1	53.5	54.3	57.2	5.99	7.71	5.28	6.82	9.48
Nd	9.07	8.90	6.77	7.10	6.06	22.14	28.63	20.36	25.77	35.90
Sm	7.72	7.88	5.14	5.09	4.34	3.82	5.50	4.07	4.87	6.85
Eu	1.49	1.65	1.39	1.38	1.27	0.28	0.36	0.27	0.44	0.41
Gd	6.27	6.77	4.37	4.35	3.88	3.04	4.39	3.48	4.26	5.34
Tb	1.03	1.14	0.69	0.71	0.65	0.47	0.74	0.60	0.73	0.85
Dy	6.03	6.82	3.6	3.97	3.57	2.50	4.10	3.34	4.17	4.42
Ho	1.14	1.30	0.70	0.77	0.72	0.49	0.81	0.66	0.86	0.83
Er	3.22	3.73	2.01	2.36	2.23	1.57	2.48	1.99	2.65	2.49
Tm	0.48	0.59	0.35	0.46	0.44	0.31	0.49	0.38	0.50	0.46
Yb	2.90	3.71	2.03	2.91	2.70	2.02	3.07	2.40	3.19	2.87
Lu	0.43	0.58	0.5	0.71	0.67	0.44	0.62	0.50	0.63	0.60
Y	31.9	39.3	18.4	21.1	20.7	14.21	23.55	18.61	27.19	23.49
Sc	16.7	18.2	13.0	9.9	5.5	2.80	2.62	2.15	2.72	2.14
Ni	9.10	10.4	3.08	2.03	2.35	1.99	0.30	0.91	0.41	1.52
Rb	78.0	79.8	96.1	146.0	187.0	160.66	151.57	139.15	155.83	132.60
Cr	12.5	19.1	25.8	19.3	7.2	2.83	1.23	2.84	3.27	4.30
Co	17.60	21.80	10.40	7.86	4.66	0.61	0.08	0.42	0.32	0.47
V	212.0	206.0	112.0	62.3	46.3	5.27	2.34	4.90	6.17	4.94
Zr	294	295	151	179	182	86.36	77.91	78.18	67.82	83.68
Hf	8.69	8.64	3.91	4.42	4.21	3.87	3.65	3.40	2.74	3.59
Ta	0.71	0.69	0.67	0.51	0.41	0.87	0.67	1.00	1.24	1.05
Sr	178	213	590	394	331	18.89	9.48	21.82	24.85	15.70
Ba	682	494	624	885	721	280.84	242.34	135.80	273	205.24
Nb	11.60	11.00	8.44	7.96	6.14	10.94	10.32	10.46	11.17	9.90
Cs	11.30	17.50	4.84	5.11	7.81	5.02	4.61	4.89	6.44	5.51
Ga	29.9	29.7	22.0	19.6	17.1	16.51	15.55	14.76	16.29	14.95
Pb	4.2	5.7	14.4	18.2	14.7	22.67	20.60	23.23	25.47	20.50
Th	8.87	8.41	7.35	8.61	6.96	11.69	9.95	13.16	15.00	12.87
U	2.17	2.35	1.92	2.19	2.78	4.58	3.16	3.00	3.28	3.06
ΣREE	164.38	169.37	126.55	135.81	130.53	113.96	147.76	100.45	136.09	170.04
LREE/HREE	6.65	5.87	7.88	7.36	7.78	9.51	7.85	6.52	7.01	8.52
(La/Yb) _N	7.89	7.60	6.50	5.20	5.50	8.95	7.37	6.10	6.72	9.15
δEu	0.63	0.67	0.87	0.87	0.93	0.24	0.22	0.21	0.29	0.20

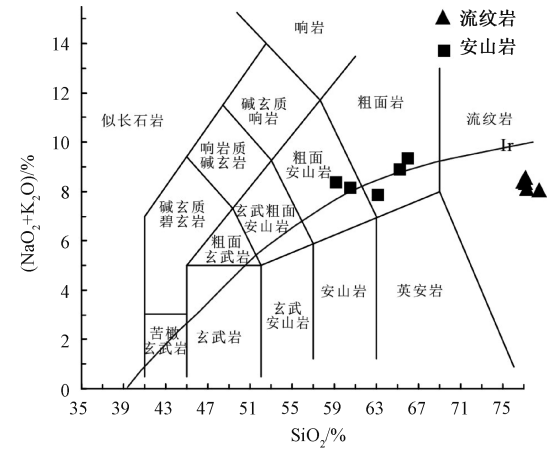


图 6 高尧乌拉白音高老组火山岩 TAS 分类图
Fig. 6 TAS diagram of the volcanic rocks from the Baiyin'gaolao Formation, Gaoyaowula

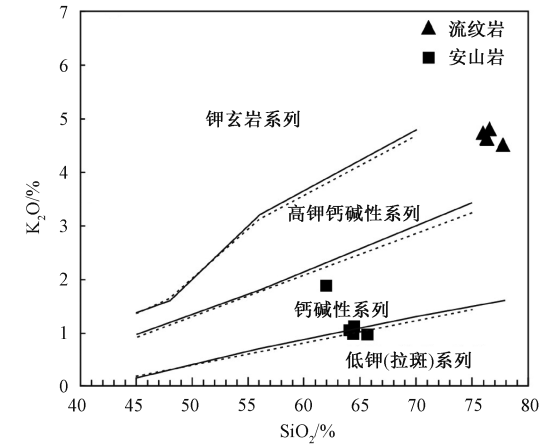


图 7 高尧乌拉白音高老组火山岩 SiO₂-K₂O 分类图解
Fig. 7 SiO₂ vs K₂O classification diagram of the volcanic rocks from the Baiyin'gaolao Formation, Gaoyaowula

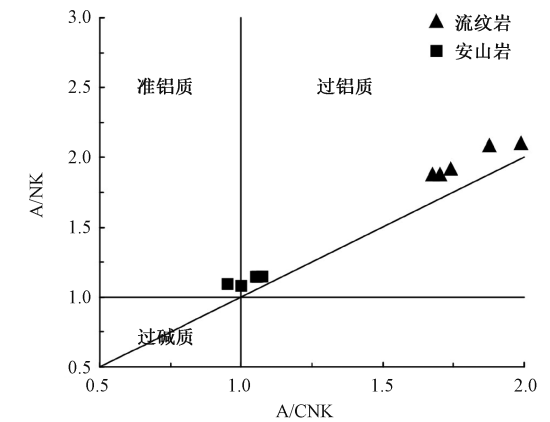


图 8 高尧乌拉白音高老组火山岩 A/CNK-A/NK 图
Fig. 8 A/CNK-A/NK diagram of the volcanic rocks from the Baiyin'gaolao Formation, Gaoyaowula

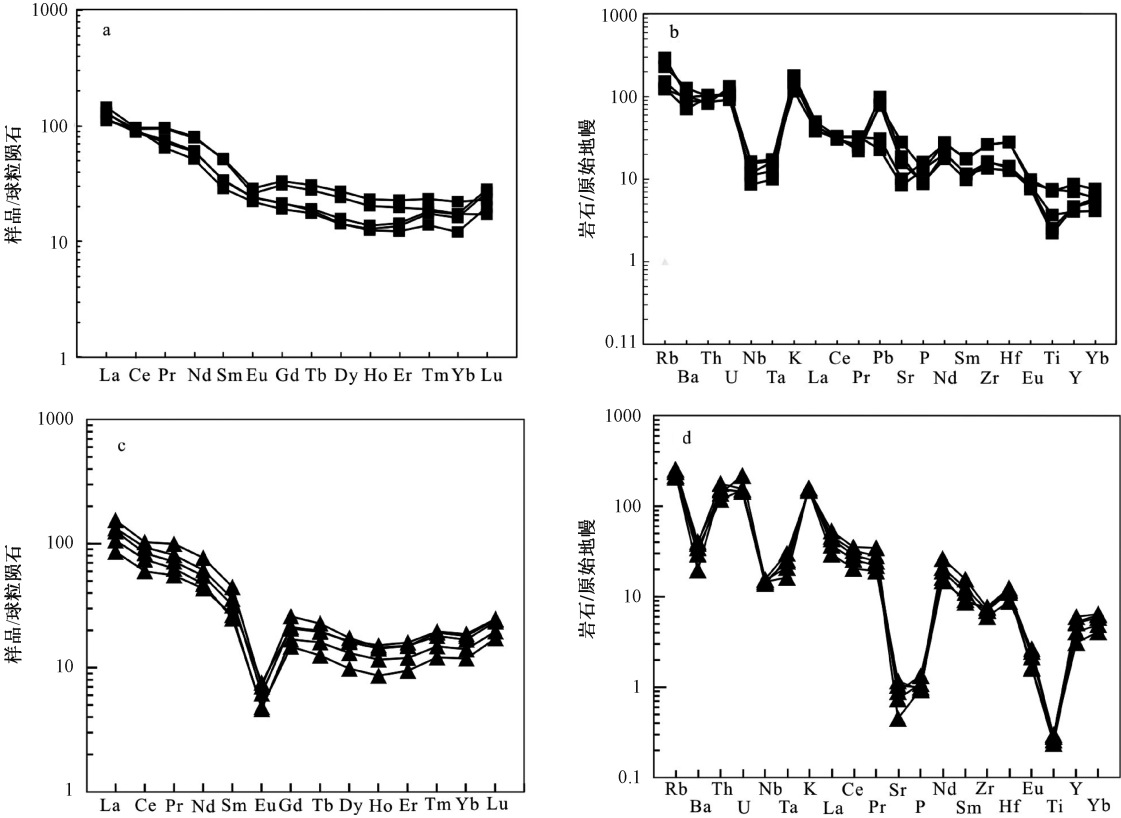
大量晶出或存在斜长石结晶作用残留; 原始地幔标准化蜘蛛图 (图 9d) 显示了大离子亲石元素 (LILE) Rb, K 和 Th, U 富集明显; 并具有明显的高场强元素 (HFSE) Ti, Nb, Ta 和 Sr, P 亏损的特征。

7 讨论

7.1 形成时代及岩浆序列

新划分的高尧乌拉白音高老组二段粗安岩和三段流纹岩中 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分为 128.22 ± 0.93 Ma 和 125.47 ± 0.48 Ma。CL 图像 (图 4) 显示锆石均具有典型岩浆成因特征, 因此该组年龄分别代表了白音高老组二段和三段的形成时代, 指示高尧乌拉白音高老组形成于早白垩世。

受测试手段限制, 早期研究者对白音高老组火山岩形成时代的认识与近年来的研究成果有较大差异, 如《内蒙古地质志》(1991) 将白音高老组置于晚侏罗世; 李文国 (1996) 在对大兴安岭晚中生代火山岩地层进行厘定的过程中, 利用地层学的理论与方法将白音高老组划入晚侏罗世。而近年来发表的大兴安岭地区白音高老组火山岩锆石 U-Pb 年龄主要集中在 134~122 Ma, 显示其形成时代为早白垩世, 如林敏 (2018) 获得内蒙古德莫哈达盆地白音高老组火山岩锆石 U-Pb 年龄为 128~125 Ma, 司秋亮等 (2016) 获得大兴安岭柴河白音高老组流纹岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 129~137 Ma, 张乐彤等 (2015) 获得大兴安岭中段白音高老组火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 131 Ma。白音高老组火山岩形成时代认识上存在分歧的主要原因是前期部分学者地层划分主要依据区域地层对比、岩石组合特征和化石资料, 但是火山岩沉积夹层中的植物化石碎片往往不具备确切的定年依据, 缺乏高精度的年代学约束。文章通过详细系统的野外调查、火山岩地层学和高精度年代学研究, 新获得的二段粗安岩和三段流纹岩的锆石 U-Pb 年龄 (128.2 ± 0.9 Ma, 125.5 ± 0.5 Ma), 与近年来发表的大兴安岭地区白音高老组火山岩锆石 U-Pb 年龄 (134~122 Ma) 相一致, 进一步限定了白音高老组火山岩形成于早白垩世。二段粗安岩和三段流纹岩的锆石 U-Pb 年龄分别为 128.2 ± 0.9 Ma 和 125.5 ± 0.5 Ma, 也进一步显示了早白垩世岩浆序列具有从中性到酸性演化的特点。



a—二段粗安岩稀土元素球粒陨石标准化配分曲线图（球粒陨石数据自 Boynton, 1984）；b—二段粗安岩微量元素原始地幔标准化配分曲线图（原始地幔数据自 Sun and McDonough, 1989）；c—三段流纹岩稀土元素球粒陨石标准化配分曲线图（球粒陨石数据自 Boynton, 1984）；d—三段流纹岩微量元素原始地幔标准化配分曲线图（原始地幔数据自 Sun and McDonough, 1989）

图 9 高尧乌拉白音高老组火山岩稀土元素及微量元素特征

Fig. 9 Distribution pattern of rare earth elements and trace elements of the volcanic rocks from the Baiyin'gaolao Formation, Gaoyaowula

7.2 构造背景

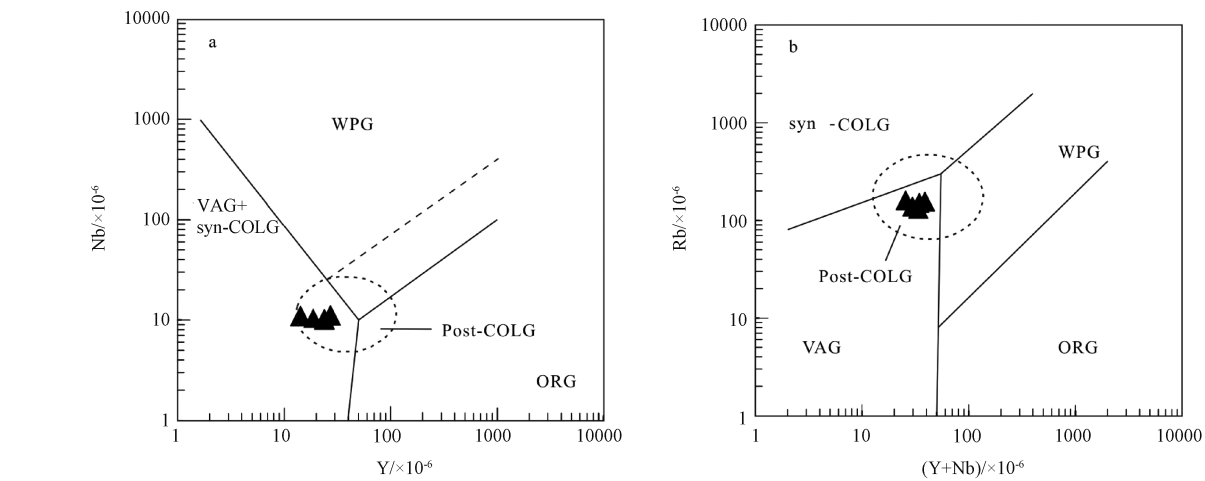
高尧乌拉白音高老组二段发育粗安岩和粗面岩。关于粗面岩和粗安岩的成因，目前主要有两种观点：①下地壳或富集地幔的部分熔融（李晓勇等，2004；章邦桐等，2011），热源可能为伸展条件下的岩浆底侵作用；②玄武质岩浆的贡献，加上中地壳混染（汪洋等，2009）。如上所述，白音高老组二段粗安岩富碱、高 K_2O/Na_2O 比值、 TiO_2 含量低、 Al_2O_3 含量高，强烈富集大离子亲石元素（LILE；如 Rb, Ba, Th, U 等）和轻稀土元素（LREE），相对亏损 Nb, Ta 和 Ti 等高场强元素（HFSE），表明白音高老组二段粗安岩来源于俯冲板片释放的流体交代的岩石圈地幔（章邦桐等，2011；张祥信等，2016），而不是由板内洋岛玄武岩（OIB）或大洋中脊玄武岩（MORB）成分的岩浆经历陆壳混染的结果。区域上 SSZ 型蛇绿岩的分布表明兴蒙造山带在晚古生代发生了多期洋壳俯冲事件（李英杰等，2012；Li et al., 2018，

2020），交代组分主要来源于古亚洲洋闭合期间俯冲板片释放的流体。关于其形成的大地构造环境，如上所述，白音高老组二段粗安岩显示 Ta-Nb-Ti 负异常、Sr 和 P 负异常，具显著的 Pb 峰和 Zr, Hf 正异常。Eu 轻微负异常（ $\delta Eu = 0.63 \sim 0.93$ ）、富集 LILE 和 LREE，微量元素分布形式与板内玄武岩较一致，与美国西部盆岭区新生代火山岩地球化学特征相似，是在岩石圈伸展和减薄过程中为俯冲板片流体交代的岩石圈地幔减压部分熔融形成的（Zhang et al., 2008b；Ying et al., 2010）。区域古地磁和地质资料指示，早白垩世区域构造环境为拉张环境（Metelkin et al., 2010；Cocks and Torsvik, 2013）。因此，伸展作用触发先前俯冲板片释放流体交代的富集岩石圈地幔发生减压部分熔融，应是本区白音高老组二段粗安岩的成因。

高尧乌拉白音高老组三段流纹岩富硅、钾、碱，贫 Al_2O_3 , MgO , CaO , P_2O_5 , TiO_2 , Sr, Ba, Eu, Ti 和 P，具有较高的 $(Na_2O + K_2O)/CaO$, $^{7}FeO/$

MgO 和 K_2O/MgO 值, 相对富集 Rb, Th, K, Ta, Hf 和 Y, 稀土元素配分曲线为“海鸥式”, 具明显负 Eu 异常, 其地球化学属性符合“A 型”花岗岩的地球化学特征 (孙德有等, 2005; 张旗等, 2012; 张旗, 2013)。在 (Y+Nb) -Rb, Y-Nb 图解

(图 10) 中, 流纹岩样品点都落入后碰撞花岗岩的范围内。在 A 型花岗岩三角形判别图 (图 11) 中, 岩石样品点均落入 A_2 型花岗岩区域, 指示造山后的伸展拉张构造环境。



VAG—火山弧花岗岩; WPG—板内花岗岩; syn-COLG—同碰撞花岗岩; post-COLG—后碰撞花岗岩; ORG—大洋脊花岗岩;
VAG+Syn-COLG—火山弧+同碰撞花岗岩
a—花岗岩类 Y-Nb 判别图; b— (Y+Nb) -Rb 判别图 (据 Pearce et al. , 1984 修改)

图 10 高尧乌拉白音高老组流纹岩构造环境判别图解

Fig. 10 Discrimination diagrams showing the tectonic environment of the rhyolites from the Baiyin'gaolao Formation, Gaoyaowula

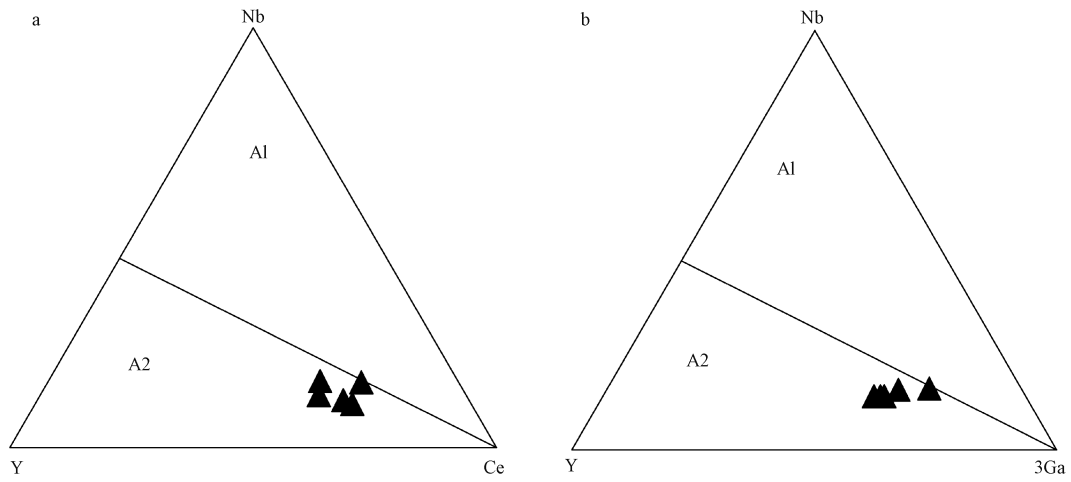


图 11 A_1 和 A_2 型花岗岩类三角形判别图解 (Eby, 1992)

Fig. 11 Triangular discriminant diagrams for the A_1 - and A_2 -type granitoids (Eby, 1992)

随着对中亚造山带东段内蒙中部地区俯冲增生杂岩、岛弧岩浆岩、后造山型花岗岩类等岩石学、地球化学、年代学、古生物学等研究的不断深入, 越来越多的地质资料揭示, 华北板块与西伯利亚板块最终碰撞造山缝合的时间为二叠纪末至中三叠世 (Xiao et al. , 2009, 2015b, 2018;

Pei et al. , 2018)。对于中亚造山带东段进入后造山伸展拉张阶段的时限和大兴安岭中生代火山岩形成的构造环境的研究存在争论。Miao et al. (2008) 和孙德有等 (2004) 认为, 中亚造山带东段后造山岩浆作用起始于中晚三叠世; 刘红涛等 (2002) 系统地研究了华北北缘的中生代花岗岩

类,认为 160 Ma 以前的中生代早中期,区域岩石圈仍处于碰撞后前期的强烈加厚的过程之中,150~110 Ma 为后造山伸展拉张阶段的晚期岩石圈强烈伸展拉张时期,之后在 110 Ma 左右演化为板内非造山阶段;滕超等 (2019) 认为,小乌兰沟早白垩世 A_2 型花岗岩形成于蒙古-鄂霍茨克洋闭合造山后的岩石圈伸展构造环境。

已有研究对大兴安岭中生代火山岩形成的构造环境分歧较大,目前主要有以下几种观点:①葛文春等 (2000) 认为其形成与地幔柱上涌导致上覆岩石圈伸展作用有关;②李可等 (2012)、张祥信等 (2016) 认为与蒙古-鄂霍茨克洋闭合造山后的伸展构造背景有关;③谭皓元等 (2017) 认为其形成与古太平洋板块俯冲于欧亚大陆之下的弧后伸展环境有关。地幔热柱模式具有火山岩呈环状分布的特征,但经已有研究发现大兴安岭地区并不存在环状火山岩带。而且,与地幔热柱作用有关的岩浆作用持续时间比较短 (莫宣学等, 2003; 程天赦等, 2012); 然而实际上从侏罗纪到白垩纪都有火山岩的形成,跨越了较长的时间,所以不能用地幔热柱的模式来解释。中国东部大规模岩浆活动主要在早侏罗—早白垩世 (188~125 Ma), 而古太平洋板块从三叠纪—早白垩世 (125 Ma 以前) 大体是南北向扩张的,只有在 125~100 Ma 和 43 Ma 至今的两段时间内是向西俯冲的,因此,早白垩世 (125 Ma) 以前在大兴安岭发生的岩浆活动均与古太平洋板块的俯冲无关 (张旗, 2018)。研究表明,华北板块与西伯利亚板块在二叠纪末至中三叠世最终碰撞缝合 (Xiao et al., 2009, 2015b, 2018; Pei et al., 2018), 中亚造山带东段在中新生代主要受蒙古-鄂霍茨克洋及古太平洋板块俯冲过程的叠加 (Zuza and Yin, 2017; 张岳桥和董树文, 2019)。三叠世至早侏罗世,蒙古-鄂霍茨克洋处于陆陆碰撞造山阶段,中晚侏罗世至早白垩世处于碰撞造山后伸展垮塌阶段 (余宏全等, 2012), 产生了大量侏罗—白垩纪岩浆岩。因此,大兴安岭大面积分布的晚中生代火山岩的形成可能与蒙古-鄂霍茨克洋的闭合及闭合后的伸展构造环境有关。

由此推测,内蒙古高尧乌拉在 128~125 Ma 处于造山后岩石圈伸展作用阶段,白音高老组火山岩可能形成于蒙古-鄂霍茨克洋闭合造山后的伸展构造环境中。

8 结论

(1) 1:50000 区域地质调查系统的路线调查、实测剖面 and 岩石学研究显示,高尧乌拉白音高老组划分为 3 个岩性段,一段为火山碎屑沉积岩,二段为中性熔岩夹火山碎屑岩,三段为酸性熔岩和酸性火山碎屑岩组合,构成一个完整的沉积-喷发旋回。早期至晚期岩浆具有由中性向酸性演化的特征。

(2) 新获得高尧乌拉白音高老组二段粗安岩和三段流纹岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分别为 128.2 ± 0.9 Ma 和 125.5 ± 0.5 Ma, 表明其形成时代为早白垩世。

(3) 高尧乌拉白音高老组划分出爆发相、侵入相、溢流相、火山通道相、喷发-沉积相及潜火山相,其中爆发相进一步划分为空落堆积相、碎屑流堆积相和崩落堆积相;根据火山岩岩性-岩相-火山机构的研究,将研究区火山构造划分出 1 个 IV 级火山喷发盆地和 12 个 V 级火山机构。

(4) 高尧乌拉白音高老组三段流纹岩具有 A_2 型花岗岩的特征,指示该区早白垩世火山岩形成于伸展构造环境。

致谢: 本文在野外调查和写作过程中得到中国地质调查局天津地质调查中心谷永昌、刘永顺的指导和帮助;审稿专家提出了建设性的修改意见,在此一并表示衷心的感谢!

References

- ANDERSEN T, 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. *Chemical Geology*, 192 (1-2): 59-79.
- BELOUSOVA E, GRIFFIN W, O'REILLY S Y, et al., 2002. Igneous zircon: trace element composition as an indicator of source rock type [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 143 (5): 602-622.
- BOYNTON W V, 1984. Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies [J]. *Developments in Geochemistry*, 2: 63-114.
- CHEN J Y, FAN H H, WANG S Y, et al., 2019. Ore-controlling factors of the Baerzhe super-large deposit in Jarud Banner, Inner Mongolia [J]. *Journal of Geomechanics*, 25 (1): 27-35. (in Chinese with English abstract)
- CHEN Y F, WANG G H, DUAN B X, 2012. Zircon SHRIMP geochronology and geochemistry of Late Jurassic volcanic rocks in Huiyin Obo area of Dong Ujimqin Banner, Inner Mongolia [J]. *Geology in China*, 39 (6): 1690-1699. (in Chinese with English abstract)
- CHENG T S, YANG W J, WANG D H, et al., 2012. Geological

- significance and geochemical characteristics of rhyolites in Baiyingaolao Formation at Halegaitu of Xiwuqi, Inner-Mongolia [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 31 (4): 489-493. (in Chinese with English abstract).
- CLAESSON S, VETRIN V, BAYANOVA T, et al., 2000. U-Pb zircon ages from a Devonian carbonatite dyke, Kola peninsula, Russia: a record of geological evolution from the Archaean to the Palaeozoic [J]. Lithos, 51 (1-2): 95-108.
- COCKS L R M, TORSVIK T H, 2013. The dynamic evolution of the Palaeozoic geography of eastern Asia [J]. Earth-Science Reviews, 117: 40-79.
- EBY G N, 1992. Chemical subdivision of the a-type granitoids: petrogenetic and tectonic implications [J]. Geology, 20 (7): 641-644.
- GE W C, LIN Q, SUN D Y, et al., 2000. Geochemical research into origins of two types of Mesozoic rhyolites in Daxing'anling [J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 25 (2): 172-178. (in Chinese with English abstract)
- Geological Department of Regional Geological and Mineral, 1987. Method guide of regional geological survey in volcanic rock area [M]. Beijing: Geological Publishing House. (in Chinese)
- GOU J, 2010. The geochronology and petrogenesis of volcanic rocks in Baiyingaolao Formation from the southern Manzhouli, Inner-Mongolia [D]. Changchun: Jilin University. (in Chinese with English abstract)
- GOU J, SUN D Y, ZHAO Z H, et al., 2010. Zircon LA-ICPMS U-Pb dating and petrogenesis of rhyolites in Baiyingaolao Formation from the southern Manzhouli, Inner-Mongolia [J]. Acta Petrologica Sinica, 26 (1): 333-344. (in Chinese with English abstract)
- HAO B, YANG X D, ZHANG M Y, et al., 2011. Geochemical characteristics of upper Jurassic intermediate-granitic volcanic rocks from northern Chifeng, Inner Mongolia [J]. Journal of Geomechanics, 17 (3): 274-285. (in Chinese with English abstract)
- JAHN B M, WINDLEY B, NATAL'IN B, et al., 2004. Phanerozoic continental growth in Central Asia [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 23 (5): 599-603.
- LI C M, 2009. A review on the minerageny and situ microanalytical dating techniques of zircons [J]. Geological Survey and Research, 32 (3): 161-174. (in Chinese with English abstract)
- LI K, ZHANG Z C, LI J F, et al., 2012. Zircon SHRIMP U-Pb age and geochemical characteristics of the Mesozoic volcanic rocks in Xi Ujimqin Banner, Inner Mongolia [J]. Geological Bulletin of China, 31 (5): 671-685. (in Chinese with English abstract)
- LI W G, 1996. Stratigraphy (Lithostratic) of Nei Mongol autonomous region [M]. Beijing: China University of Geosciences Press.
- LI X Y, GUO F, FAN W M, et al., 2004. Early Cretaceous trachytes of Donglingtai Formation from the Xishan area in the northern North China block: constraints on melting of lower mafic crust [J]. Geotectonica et Metallogenia, 28 (2): 155-164. (in Chinese with English abstract)
- LI Y J, WANG G H, SANTOSH M, et al., 2018. Supra-subduction zone ophiolites from Inner Mongolia, North China: implications for the tectonic history of the southeastern Central Asian orogenic belt [J]. Gondwana Research, 59: 126-143.
- 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 [J]. Earth and Planetary Science Letters, 535: 116087.
- LI Y J, WANG J F, LI H Y, et al., 2012. Recognition of Diyanmiao ophiolite in Xi Ujimqin Banner, Inner Mongolia [J]. Acta Petrologica Sinica, 28 (4): 1282-1290.
- LI Y J, WANG J F, LI H Y, et al., 2017. Regional geological survey report of 1: 50000 Gaoyawula in Inner Mongolia [R]. Hebei GEO University. (in Chinese)
- LIN M, 2018. New progress in the study of stratigraphic sequence and epoch of Baiyin'gaolao Formation in Demohada basin, Inner Mongolia [J]. Geological Bulletin of China, 37 (9): 1588-1598. (in Chinese with English abstract)
- LIU H T, ZHAI M G, LIU J M, et al., 2002. The Mesozoic granitoids in the northern marginal region of North China Craton: evolution from post-collisional to anorogenic settings [J]. Acta Petrologica Sinica, 18 (4): 433-448. (in Chinese with English abstract)
- LIU H, YANG X D, HAO B, et al., 2011. Geochemical characteristics and Tectonic setting of upper Jurassic Jurassic granite from northern Chifeng, Inner Mongolia [J]. Journal of Geomechanics, 17 (3): 286-294. (in Chinese with English abstract)
- LIU J H, LIU D Y, ZHANG Y H, et al., 2011. Techniques for choosing target points during SHRIMP dating of zircon U-Pb ages [J]. Rock and Mineral Analysis, 30 (3): 265-268. (in Chinese with English abstract)
- LIU Y S, HU Z C, GAO S, et al., 2008. *In situ* analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard [J]. Chemical Geology, 257 (1-2): 34-43.
- LU Q D, 2004. Research report on mapping method of "volcanic structure-Lithology and lithofacies-volcanic sequence" [M]. Fuzhou: Fujian Provincial Map Publishing House. (in Chinese)
- LUDWIG K R, 1991. ISOPLOT: a plotting and regression program for radiogenic-isotope data [R]. Commonwealth of Virginia: US Geological Survey Open-File Report, 91-445.
- LUDWIG K R, 2003. User's manual for Isoplot 3.00: a geochronological toolkit for Microsoft Excel [R]. Berkeley: Berkeley Geochronological Center, Special Publication, 4: 71.
- METELKIN D V, VERNIKOVSKY V A, KAZANSKY A Y, et al., 2010. Late Mesozoic tectonics of Central Asia based on paleomagnetic evidence [J]. Gondwana Research, 18 (2-3): 400-419.
- MIAO L C, FAN W M, LIU D Y, et al., 2008. Geochronology and geochemistry of the Hegenshan ophiolitic complex: implications for late-stage tectonic evolution of the Inner Mongolia-Daxinganling Orogenic Belt, China [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2008, 32 (5-6): 348-370.
- MO X X, ZHAO Z D, DENG J F, et al., 2003. Response of volcanism to the India-Asia collision [J]. Earth Science Frontiers, 10 (3): 135-148. (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 [J]. *Journal of Petrology*, 25 (4): 956-983.
- PEI Q M, ZHANG S T, Hayashi K I, et al., 2018. Permo-Triassic granitoids of the Xing'an-Mongolia segment of the Central Asian orogenic belt, Northeast China: age, composition, and tectonic implications [J]. *International Geology Review*, 60 (9): 1172-1194.
- SHAO J A, LIU F T, CHEN H, et al., 2001. Relationship between Mesozoic Magmatism and Subduction in Da Hinggan-Yanshan area [J]. *Acta Geologica Sinica*, 75 (1): 56-63. (in Chinese with English abstract)
- SHAO J A, ZHANG L Q, MU B L, 1999a. Magmatism in the Mesozoic extending orogenic process of Da Hinggan MTS [J]. *Earth Science Frontiers*, 6 (4): 339-346. (in Chinese with English abstract)
- SHAO J A, ZHAO G L, WANG Z, et al., 1999b. Tectonic setting of Mesozoic volcanism in Da Hinggan Mountains, northeastern China [J]. *Geological Review*, 45 (S1): 422-430. (in Chinese with English abstract)
- SHE H Q, LI J W, XIANG A P, et al., 2012. U-Pb ages of the zircons from primary rocks in middle-northern Daxinganling and its implications to geotectonic evolution [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28 (2): 571-594. (in Chinese with English abstract)
- SI Q L, CUI T R, WANG D A, et al., 2016. Zircon U-Pb dating and petrogenesis of the Baiyingaolao Formation rhyolites in Chaihe Area, great Xing'an range [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 37 (3): 412-415. (in Chinese with English abstract)
- SU W B, ZHANG S H, WARREN D, et al., 2008. SHRIMP U-Pb ages of K-bentonite beds in the Xiamaling Formation: Implications for revised subdivision of the Meso-to Neoproterozoic history of the North China Craton [J]. *Gondwana Research*, 14 (3): 543-553.
- SUN D Y, WU F Y, GAO S, et al., 2005. Confirmation of two episodes of A-type granite emplacement during Late Triassic and Early Jurassic in the central Jilin Province, and their constraints on the structural pattern of Eastern Jilin-Heilongjiang Area, China [J]. *Earth Science Frontiers*, 12 (2): 263-275. (in Chinese with English abstract)
- SUN D Y, WU F Y, ZHANG Y B, et al., 2004. The final closing time of the west Lamulun River-Changchun-Yanji plate suture zone-evidence from the Dayushan granitic pluton, Jilin Province [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 34 (2): 174-181. (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 [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 42 (1): 313-345.
- TAN H Y, HE Z H, CHEN F, et al., 2017. Zircon U-Pb ages and geochemical characteristics of volcanic rocks in Baiyingaolao Formation of Suolun area within central Da Hinggan Mountains and their tectonic implications [J]. *Geological Bulletin of China*, 36 (5): 893-908. (in Chinese with English abstract)
- TENG C, ZHANG X F, ZHOU Y, et al., 2019. LA-ICP-MS zircon U-Pb age and geological significance of the Early Cretaceous Monzogranite in Xiaowulangou, Xilinhot, Inner Mongolia [J]. *Geoscience*, 33 (5): 1003-1014. (in Chinese with English abstract)
- WANG C Y, SUN D Y, TIAN L H, et al., 2018. Latest zircon U-Pb age of the Baiyingaolao Formation volcanic rocks in the Keyihe area of North-Central Da Hinggan Mountains [J]. *ACTA Geologica Sinica*, 92 (5): 2034-2035.
- WANG F, ZHOU X H, Zhang L C, et al., 2006. Late Mesozoic volcanism in the Great Xing'an Range (NE China): timing and implications for the dynamic setting of NE Asia [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 251 (1-2): 179-198.
- WANG J G, HE Z H, XU W L, 2013. Petrogenesis of riebeckite rhyolites in the southern Da Hinggan Mts.: geochronological and geochemical evidence [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29 (3): 853-863. (in Chinese with English abstract)
- WANG Y, JI G Y, SUN S P, et al., 2009. Origin of the volcanic rocks in the Donglingtai Formation from Yanhecheng area, western hills of Beijing and its geological implications [J]. *Geological Review*, 55 (2): 191-214.
- WHALEN J B, CURRIE K L, CHAPPELL B W, 1987. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology* volume, 95 (4): 407-419.
- XIAO W J, SUN M, SANTOSH M, 2015a. Continental reconstruction and metallogeny of the Circum-Junggar areas and termination of the southern Central Asian orogenic belt [J]. *Geoscience Frontiers*, 6 (2): 137-140.
- XIAO W J, WINDLEY B F, HAN C M, et al., 2018. Late Paleozoic to Early Triassic multiple roll-back and oroclinal bending of the Mongolia collage in Central Asia [J]. *Earth-Science Reviews*, 186: 94-128.
- XIAO W J, WINDLEY B F, HAO J, et al., 2003. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China: termination of the central Asian orogenic belt [J]. *Tectonics*, 22 (6): 1069.
- XIAO W J, WINDLEY B F, HUANG B C, et al., 2009. End-Permian to mid-Triassic termination of the accretionary processes of the southern Altaids: implications for the geodynamic evolution, Phanerozoic continental growth, and metallogeny of Central Asia [J]. *International Journal of Earth Sciences*, 98 (6): 1189-1217.
- XIAO W J, WINDLEY B F, SUN S, et al., 2015b. A tale of amalgamation of three Permo-Triassic collage systems in Central Asia: oroclines, sutures, and terminal accretion [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 43: 477-507.
- XU W L, WANG F, PEI F P, et al., 2013. Mesozoic tectonic regimes and regional ore-forming background in NE China: constraints from spatial and temporal variations of Mesozoic volcanic rock associations [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29 (2): 339-353. (in Chinese with English abstract)
- YING J F, ZHOU X H, ZHANG L C, et al., 2010. Geochronological and geochemical investigation of the late Mesozoic volcanic rocks from the Northern Great Xing'an Range and their tectonic implications

[J]. International Journal of Earth Sciences, 99 (2): 357-378.

YUAN H L, GAO S, LIU X M, et al., 2004. Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry [J]. Geostandards and Geoanalytical Research, 28 (3): 353-370.

ZHANG B T, WU J Q, LING H F, et al., 2011. Elemental geochemical evidence for genesis of intraplate shoshonite and mantle-derived fluid metasomatism; Shoshonite from Huichang, Southern Jiangxi Province as an example [J]. Geochimica, 40 (5): 443-453.

ZHANG J H, 2009. Chronology and geochemistry of the Mesozoic volcanic rocks in the Great Xing'an Range, northeastern China [D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan). (in Chinese with English abstract)

ZHANG J H, GE W C, WU F Y, et al., 2008a. Large-scale Early Cretaceous volcanic events in the northern Great Xing'an Range, northeastern China [J]. Lithos, 102 (1-2): 138-157.

ZHANG L C, ZHOU X H, YING J F, et al., 2008b. Geochemistry and Sr-Nd-Pb-Hf isotopes of Early Cretaceous basalts from the Great Xinggan Range, NE China: implications for their origin and mantle source characteristics [J]. Chemical Geology, 256 (1-2): 12-23.

ZHANG L T, LI S C, ZHAO Q Y, et al., 2015. Formation age and geochemical characteristics of volcanic rocks from Baiyingaolao Formation of middle Da Hinggan Mountains [J]. Global Geology, 34 (1): 44-54. (in Chinese with English abstract)

ZHANG Q, 2013. The criteria and discrimination for A-type granites: a reply to the question put forward by Wang Yang and some other persons for "A-type granite: what is the essence?" [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 32 (2): 267-274. (in Chinese with English abstract)

ZHANG Q, 2018. Is the Mesozoic magmatism in eastern China related to the westward subduction of the Pacific plate? [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 32 (1): 113-128. (in Chinese with English abstract)

ZHANG Q, RAN H, LI C D, 2012. A-type granite: what is the essence? [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 31 (4): 621-626. (in Chinese with English abstract)

ZHANG X X, GAO Y F, LEI S H, 2016. Zircon U-Pb age and geochemistry of shoshonitic rocks from the Manitu Formation in the Honggeer area, central Inner Mongolia and their geological significance [J]. Geochimica, 45 (4): 356-373. (in Chinese with English abstract)

ZHANG Y Q, DONG S W, 2019. East Asia multi-plate convergence in Late Mesozoic and the development of continental tectonic systems [J]. Journal of Geomechanics, 25 (5): 613-641. (in Chinese with English abstract)

ZUZA A V, YIN A, 2017. Balkatach hypothesis: a new model for the evolution of the Pacific, Tethyan, and Paleo-Asian oceanic domains [J]. Geosphere, 13 (5): 1664-1712.

附中文参考文献

陈金勇, 范洪海, 王生云, 等, 2019. 内蒙古扎鲁特旗巴尔哲超大型矿床控矿因素分析 [J]. 地质力学学报, 25 (1): 27-35.

陈英富, 王根厚, 段炳鑫, 2012. 内蒙古东乌珠穆沁旗辉音敖包一带晚侏罗世火山岩特征及时代 [J]. 中国地质, 39 (6): 1690-1699.

程天赦, 杨文静, 王登红, 等, 2012. 哈勒盖图地区白音高老组流纹岩岩石地球化学特征及其地质意义 [J]. 辽宁工程技术大学学报 (自然科学版), 31 (4): 489-493.

葛文春, 林强, 孙德有, 等, 2000. 大兴安岭中生代两类流纹岩成因的地球化学研究 [J]. 地球科学—中国地质大学学报, 25 (2): 172-178.

苟军, 2010. 满洲里南部白音高老组火山岩的形成时代与岩石成因 [D]. 长春: 吉林大学.

苟军, 孙德有, 赵忠华, 等, 2010. 满洲里南部白音高老组流纹岩锆石 U-Pb 定年及岩石成因 [J]. 岩石学报, 26 (1): 333-344.

郝彬, 杨欣德, 张明洋, 等, 2011. 内蒙古赤峰北部晚侏罗世中酸性火山岩地球化学特征 [J]. 地质力学学报, 17 (3): 274-285.

李长民, 2009. 锆石成因矿物学与锆石微区定年综述 [J]. 地质调查与研究, 32 (3): 161-174.

李可, 张志诚, 李建锋, 等, 2012. 内蒙古西乌珠穆沁旗地区中生代中酸性火山岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄和地球化学特征 [J]. 地质通报, 31 (5): 671-685.

李文国, 1996. 内蒙古自治区岩石地层 [M]. 北京: 中国地质大学出版社.

李晓勇, 郭锋, 范蔚茗, 等, 2004. 北京西山东岭台组粗面质火山岩地球化学: 下地壳熔融成因 [J]. 大地构造与成矿学, 28 (2): 155-164.

李英杰, 王金芳, 李红阳, 等, 2012. 内蒙古西乌珠穆沁旗迪彦庙蛇绿岩的识别 [J]. 岩石学报, 28 (4): 1282-1290.

李英杰, 王金芳, 李红阳, 等, 2017. 内蒙古 1: 50000 高尧乌拉幅区域地质调查报告 [R]. 河北地质大学.

林敏, 2018. 内蒙古德莫哈达盆地白音高老组地层层序及时代研究新进展 [J]. 地质通报, 37 (9): 1588-1598.

刘昊, 杨欣德, 郝彬, 等, 2011. 内蒙古赤峰北部晚侏罗世花岗岩地球化学特征及构造背景 [J]. 地质力学学报, 17 (3): 286-294.

刘红涛, 翟明国, 刘建明, 等, 2002. 华北克拉通北缘中生代花岗岩: 从碰撞后到非造山 [J]. 岩石学报, 18 (4): 433-448.

刘建辉, 刘敦一, 张玉海, 等, 2011. 使用 SHRIMP 测定锆石铀-铅年龄的选点技巧 [J]. 岩矿测试, 30 (3): 265-268.

卢清地, 2004. “火山构造-岩性相-火山地层”填图方法研究报告 [M]. 福州: 福建省地图出版社.

莫宣学, 赵志丹, 邓晋福, 等, 2003. 印度-亚洲大陆主碰撞过程的火山作用响应 [J]. 地学前缘, 10 (3): 135-148.

区域地质矿产地质司, 1987. 火山岩地区区域地质调查方法指南 [M]. 北京: 地质出版社.

邵济安, 张履桥, 牟保磊, 1999a. 大兴安岭中生代伸展造山过程中的岩浆作用 [J]. 地学前缘, 6 (4): 339-346.

邵济安, 赵国龙, 王忠, 等, 1999b. 大兴安岭中生代火山活动构造背景 [J]. 地质论评, 45 (S1): 422-430.

邵济安, 刘福田, 陈辉, 等, 2001. 大兴安岭-燕山晚中生代岩浆活动与俯冲作用关系 [J]. 地质学报, 75 (1): 56-63.

余宏全, 李进文, 向安平, 等, 2012. 大兴安岭中北段原岩锆石 U-Pb 测年及其与区域构造演化关系 [J]. 岩石学报, 28 (2): 71-594.

司秋亮, 崔天日, 王恩德, 等, 2016. 大兴安岭柴河白音高老组流纹

岩锆石 U-Pb 定年及成因探讨 [J]. 东北大学学报 (自然科学版), 37 (3): 412-415.

孙德有, 吴福元, 张艳斌, 等, 2004. 西拉木伦河-长春-延吉板块缝合带的最后闭合时间: 来自吉林大玉山花岗岩体的证据 [J]. 吉林大学学报 (地球科学版), 34 (2): 174-181.

孙德有, 吴福元, 高山, 等, 2005. 吉林中部晚三叠世和早侏罗世两期铝质 A 型花岗岩的厘定及对吉黑东部构造格局的制约 [J]. 地质前缘, 12 (2): 263-275.

谭皓元, 和钟铎, 陈飞, 等, 2017. 大兴安岭中段索伦地区白音高老组火山岩锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及构造意义 [J]. 地质通报, 36 (5): 893-908.

滕超, 张晓飞, 周毅, 等, 2019. 内蒙古锡林浩特小乌兰沟早白垩世二长花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义 [J]. 现代地质, 33 (5): 1003-1014.

王建国, 和钟铎, 许文良, 2013. 大兴安岭南段钠闪石流纹岩的岩石成因: 年代学和地球化学证据 [J]. 岩石学报, 29 (3): 853-863.

汪洋, 姬广义, 孙善平, 等, 2009. 北京西山沿河城东岭台组火山岩成因及其地质意义 [J]. 地质论评, 55 (2): 191-214.

许文良, 王枫, 裴福萍, 等, 2013. 中国东北中生代构造体制与区域成矿背景: 来自中生代火山岩组合时空变化的制约 [J]. 岩石学

报, 29 (2): 339-353.

章邦桐, 吴俊奇, 凌洪飞, 等, 2011. 板内橄榄玄粗岩 (shoshonite) 地幔流体交代作用及成因的元素地球化学证据: 以赣南会昌橄榄玄粗岩为例 [J]. 地球化学, 40 (5): 443-453.

张吉衡, 2009. 大兴安岭中生代火山岩年代学及地球化学研究 [D]. 武汉: 中国地质大学 (武汉).

张乐彤, 李世超, 赵庆英, 等, 2015. 大兴安岭中段白音高老组火山岩的形成时代及地球化学特征 [J]. 世界地质, 34 (1): 44-54.

张旗, 冉焱, 李承东, 2012. A 型花岗岩的实质是什么? [J]. 岩石矿物学杂志, 31 (4): 621-626.

张旗, 2013. A 型花岗岩的标志和判别: 兼答汪洋等对“A 型花岗岩的实质是什么”的质疑 [J]. 岩石矿物学杂志, 32 (2): 267-274.

张旗, 2018. 中国东部中生代岩浆活动与太平洋板块向西俯冲有关吗? [J]. 岩石矿物学杂志, 32 (1): 113-128.

张祥信, 高永丰, 雷世和, 2016. 内蒙古中部红格尔地区玛尼吐组钾玄质火山岩锆石 U-Pb 年龄、地球化学及其地质意义 [J]. 地球化学, 45 (4): 356-373.

张岳桥, 董树文, 2019. 晚中生代东亚多板块汇聚与大陆构造体系的发展 [J]. 地质力学学报, 25 (5): 613-641.

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):

可扫码直接下载文章电子版, 也有可能听到作者的语音介绍及更多文章相关资讯

