

doi: 10.12029/gc20210118

李玉娟. 2021. 内蒙古扎木廷火山岩年代学、地球化学与中生代构造体制转换[J]. 中国地质, 48(1): 264–283.

Li Yujuan. 2021. Geochronology and geochemistry of the volcanics in the Zamuting, Inner Mongolia and its transformation of Mesozoic tectonic system[J]. Geology in China, 48(1): 264–283(in Chinese with English abstract).

## 内蒙古扎木廷火山岩年代学、地球化学 与中生代构造体制转换

李玉娟

(福建省地质调查研究院, 福建 福州 350013)

**摘要:**大兴安岭火山带晚中生代火山岩的起源、演化及形成的构造背景一直存在争议。文章对出露于扎木廷地区白音高老组火山岩进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年, 结果显示流纹岩及粗面岩分别形成于  $(131.6 \pm 1.2)$  Ma 和  $(126.9 \pm 1.5)$  Ma, 与白音高老组第二段火山沉积夹层中动植物化石鉴定结果一致, 表明形成于早白垩世早期。流纹岩及粗面岩属碱性系列火山岩, 具有高硅、富碱、低铝、贫镁、钙和高  $\text{FeO}^{\text{T}}/(\text{FeO}^{\text{T}}+\text{MgO})$  比值特征; 相对富集大离子亲石元素 Rb、Th、U、Pb, 强烈亏损高场强元素 Nb、Ta、Ti、P 和 Ba、Sr, 流纹岩具 A 型花岗岩特征。微量元素与稀土元素特征表明流纹岩及粗面岩均来自于地壳的熔融, 二者具有相同的岩浆来源。白音高老组火山岩形成于造山后的伸展构造背景, 反映了蒙古鄂霍茨克洋向南俯冲与额尔古纳—兴安陆块碰撞拼合后, 大兴安岭地区开始由挤压向伸展构造体制转换, 软流圈地幔上涌底侵使下地壳发生了部分熔融, 导致流纹岩喷发, 残留相进一步熔融继而导致大规模粗面岩喷发。

**关键词:**白音高老组; A 型花岗岩; 伸展构造; 早白垩世; 扎木廷高吉高尔火山盆地; 地质调查工程  
中图分类号: P588.14; P597; P595 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2021)01-0264-20

## Geochronology and geochemistry of the volcanics in the Zamuting, Inner Mongolia and its transformation of Mesozoic tectonic system

LI Yujuan

(Fujian Institute of Geological Survey, Fuzhou 350013, Fujian, China)

**Abstract:** As the origin, evolution and tectonic setting of late Mesozoic volcanic rocks in the Great Hinggan Range volcanic belt have always been controversial, our project carried out geochronology and geochemistry studies of the volcanics in the Zamuting area. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of the he Baiyingaolao Formation volcanic rocks in the Zhamuting area reveals that rhyolite and trachoma were formed at  $131.6 \pm 1.2$  Ma and  $126.9 \pm 1.5$  Ma respectively, which are consistent with the identification results of the animal and plant fossil in the Second Member volcanics of the Baiyingaolao Formation, indicating that the volcanic rocks were formed in the early Cretaceous. The rhyolites and trachyandesites of this region belong to alkali series volcanic rocks, with characteristics of high silicon, rich in alkali, low aluminum, low magnesium and calcium, as well as high  $\text{FeO}^{\text{T}}/(\text{FeO}^{\text{T}}+\text{MgO})$  ratio;

收稿日期: 2018-04-27; 改回日期: 2018-08-20

基金项目: 中国地质调查局“内蒙古 1:50 000 扎木廷高吉高尔、军马场、军马场一队、综合服务站等 4 幅区域地质矿产调查”项目 (DD20160048-06) 资助。

作者简介: 李玉娟, 女, 1981 年生, 地质矿产高级工程师, 主要从事区域地质矿产调查工作和岩石地球化学研究工作;  
E-mail: 976110332@qq.com。

the rocks are relatively enriched in the large ion lithophile elements Rb, Th, U and Pb, and have a strong deficit in the high-field strong elements such as Nb, Ta, Ti, P, Ba and Sr; the rhyolitic rocks have the characteristics of A-type granite. The studies on trace elements and rare earth elements indicate that both rhyolite and trachyandesites are derived from the melting of the crust and have the same magmatic source. The Baiyingaolao volcanic rocks were formed in the post-orogenic extensional tectonic environment, which reflects that after the southward subduction of the Mongolia Okhotsk Ocean and the collision and integration of the Eerguna-Xingan landmass, the Da Hinggan Mountains volcanic region began to transform from compression to extensional tectonic system. The upwelling and underplating of asthenosphere mantle caused the partial melting of the lower crust, which led to the eruption of rhyolite. The further melting of residual phases led to large-scale eruption of trachyte.

**Key words:** Early Cretaceous; A type rhyolite; extensional structure; Baiyingaolao Formation; Zamuting Gaojigaoer; Inner Mongolia; geological survey engineering

**About the first author:** LI Yujuan, female, born in 1981, senior engineer, engaged in the study of geochemistry and regional geological survey; E-mail:976110332@qq.com.

**Fund support:** Supported by the project of China Geological Survey(No.DD20160048-06).

## 1 引言

大兴安岭中生代火山岩的起源、演化及形成的构造环境一直存在争议。其形成的动力学背景有多种不同的认识,归纳起来主要有3种观点,多数学者认为是古太平洋板块俯冲的结果(吴福元,1999; Zhang et al., 2008, 2010; 杨扬等, 2012; 赵磊等, 2013; Dong et al., 2014; 聂立军等, 2015; 谭皓元等, 2017);或是与蒙古-鄂霍次克洋向南俯冲、闭合及碰撞造山有关(Zori, 1999; 郭锋, 2001; Fan et al., 2003; 张连昌等, 2007; 张亚明等, 2014; 王雄等, 2015; 张学斌等, 2015; 张乐彤等, 2015; 张祥信等, 2016);还有部分学者认为是地幔柱成因,或是软流圈上涌与岩石圈伸展的结果(邵济安等, 1998; 林强等, 1998; 葛文春等, 2000)。但大多数研究工作主要集中在大兴安岭火山岩带的北部和南部地区。位于中部扎木廷高吉高尔火山盆地处于大兴安岭火山岩带南、北段的过渡部位,该区地质调查及研究程度相对薄弱,以1:20万<sup>①②</sup>、1:25万区域地质调查<sup>③④</sup>等中小比例尺的区域地质调查工作为主,由于缺少高精度同位素地质年代学及岩石化学研究,制约了本区晚中生代火山作用的深入认识。

扎木廷高吉高尔中生代火山喷发盆地火山作用时间长,自中侏罗统塔木兰沟组( $J_2tm$ )至下白垩统梅勒图组( $K_1m$ )均有出露,火山岩分布范围广,分布面积和厚度均较大、各组段火山岩石类型多样,是研究大兴安岭火山岩带中段晚中生代构造-岩浆作用的理想地区。其中,扎木廷高吉高尔火山喷发盆地下白垩统白音高老组火山岩组合极具特色又有

代表性,白音高老组第二段为流纹岩或流纹质火山碎屑岩,第三段以粗面岩或粗面质火山碎屑岩为主,无论是分布范围还是产出厚度二者大体相似,具有明显的流纹岩(下部)-粗面岩(上部)组合特征。笔者在1:5万区域地质调查的基础上,通过开展系统的岩石地球化学和锆石U-Pb同位素年代学研究,结合前人及区域研究成果,探讨其岩浆成因及形成的构造背景,为深入揭示扎木廷地区及大兴安岭中段晚中生代火山作用及动力学背景提供新的证据。

## 2 区域地质概况

扎木廷高吉高尔早白垩世火山喷发盆地位于内蒙古自治区东乌珠穆沁旗和科尔沁右翼中旗扎木廷高吉高尔、乌兰楚鲁、沙尔格仁乌拉一带(图1)。大地构造位置位于大兴安岭火山岩带中段,该区构造演化复杂,古生代经历了古亚洲洋及华北板块与西伯利亚板块的最终拼贴等过程,中-新生代以后转变为环太平洋构造域。研究区及周边出露的地层主要为中-新生代火山地层,从老到新主要有中侏罗统塔木兰沟组( $J_2tm$ ),上侏罗统满克头鄂博组( $J_3m$ )、玛尼吐组( $J_3mn$ ),下白垩统白音高老组( $K_1b$ )、梅勒图组( $K_1m$ )及新近系五岔沟组( $N_2w$ )。塔木兰沟组以中性、中基性安山岩、玄武安山岩为主;满克头鄂博组以酸性、中酸性的流纹岩、英安岩为主;玛尼吐组以中性的安山岩为主,夹少量粗面岩、粗安岩等;白音高老组以酸-酸偏碱性的流纹岩-粗面岩为主;梅勒图组以中基岩的玄武岩-玄武安山岩为主;五岔沟组则以基性的玄武岩为主。区域上断裂构造发育,以NE、NEE和NW向构造为主,其次是S-N向断裂。

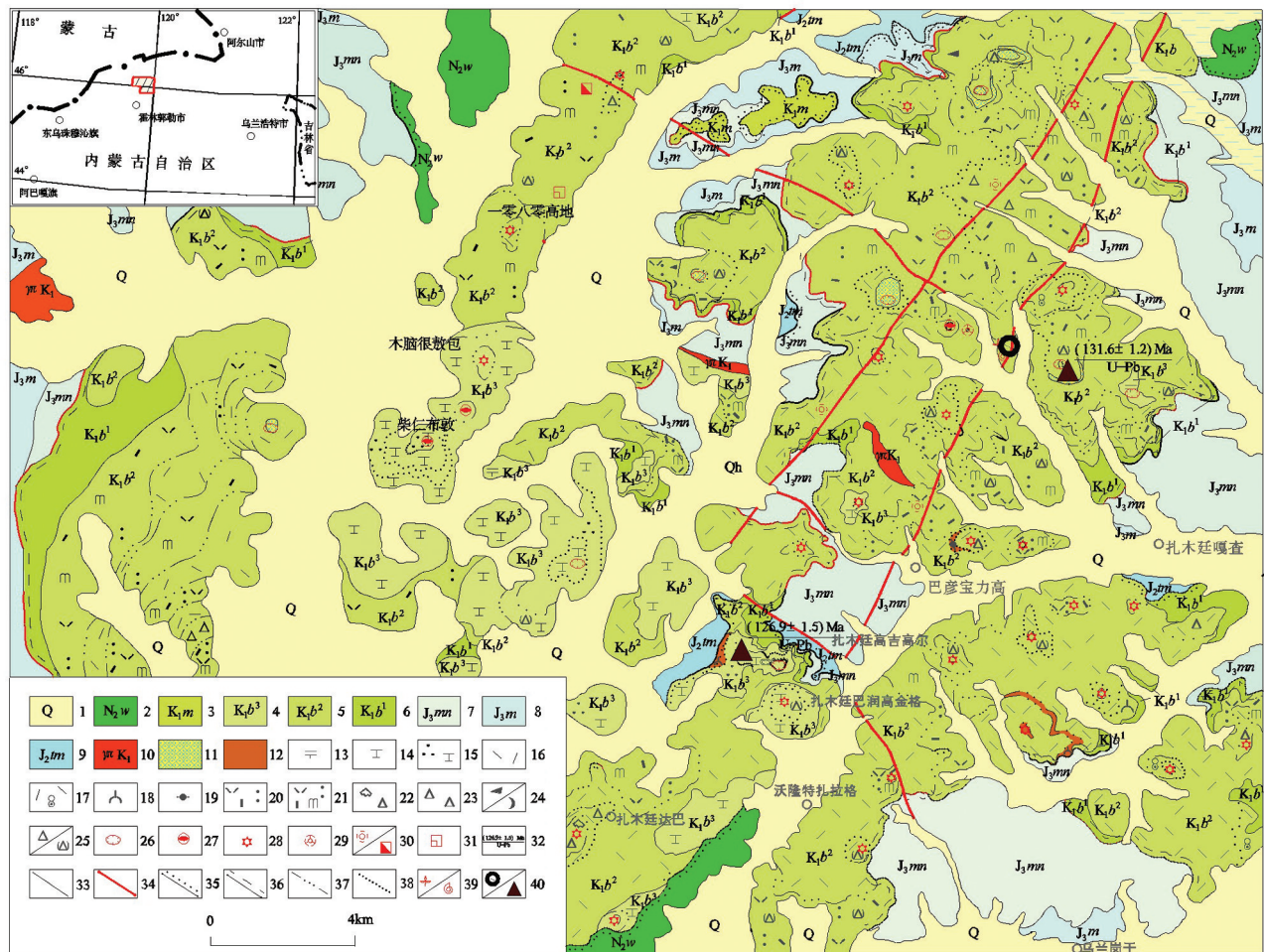


图1 扎木廷高吉高尔火山喷发盆地地质图

1—第四系;2—新近系五岔沟组;3—下白垩统梅勒图组;4—下白垩统白音高老组第三段;5—下白垩统白音高老组第二段;6—下白垩统白音高老组第一段;7—上侏罗统玛尼吐组;8—上侏罗统满克头鄂博组;9—中侏罗统塔木兰沟组;10—早白垩世花岗斑岩;11—早白垩世潜火山岩;12—特殊地质体(松脂岩、黑曜岩);13—粗安岩;14—粗面岩;15—石英粗面岩;16—流纹岩;17—石泡流纹岩;18—黑曜岩;19—松脂岩;20—流纹质晶屑凝灰岩;21—流纹质晶屑熔结凝灰岩;22—集块火山角砾岩;23—火山角砾岩;24—岩屑、玻屑;25—角砾、含角砾;26—破火山;27—穹状火山;28—火山喷发中心;29—寄生火山口;30—硅化;31—褐铁矿化;32—萤石矿化;33—地质界线;34—断层;35—角度不整合;36—平行不整合;37—岩相界线;38—岩性界线;39—植物化石、动物化石;40—化石采样点、锆石U-Pb同位素年龄采样点

Fig.1 The geological map of the Zamuting-Gaojigaocer Volcanics Basin

1- Quaternary; 2- Neogene Wuchagou Formation;3- the lower Cretaceous Meletu Formation;4- the third member of Lower Cretaceous Baiyinggaolao Formation;5- the second member of lower Cretaceous Baiyinggaolao Formation;6- the first member of Lower Cretaceous Baiyinggaolao Formation;7- The upper Jurassic Manitu Formation; 8- The upper Jurassic Manketou OBO Formation;9- The middle Jurassic Tamulan Valley Formation;10- the Early Cretaceous Baiyinggaolao granite porphyry;11- the Early Cretaceous subvolcanic rocks;12- Special geological body(Turquoise, obsidian);13- Trachyandesite;14- Trachyte; 15- Quartz trachyte;16- rhyolite; 17- Lithophysa rhyolite;18- Obsidian; 19- Turquoise;20- Rhyolitic crystal tuff;21- Rhyolitic crystal tuff with welded texture;22- Volcanic breccias agglomeration;24- Volcanic breccias; 24-Debris and Vitroclastic;25- Breccia and Breccia-bearing; 26-caldera;27-dome shaped volcano;28-the center of volcanic eruption;29-Parasitic crater;30- silicification;31- Limonitization;32- Fluorite mineralization;33- Geological boundary; 34- Fault; 35- Angle degree unconformity boundary; 36- Parallel unconformity boundary; 37- Lithofacies boundary;38- lithology boundary;39- Plant fossils and animal fossils; 40- fossil sampling sites, zircon U-Pb isotopic age sampling sites

通过对扎木廷高吉高尔火山喷发盆地系统的路线调查及剖面研究,查明扎木廷高吉高尔火山喷发盆地主要由白音高老组火山岩组成,其平行不整合于玛尼吐组火山岩之上,代表大兴安岭地区一套

早白垩世早期陆相沉积-火山喷发岩系。根据盆地白音高老组地层层序、接触关系、岩石组合特征、火山活动旋回及岩浆演化规律等,将白音高老组进一步划分为3个岩性段(图1):第一段为灰、灰紫色火

山碎屑沉积岩,岩性组合为灰色、浅灰色、灰白色、灰绿、灰紫色凝灰质粉砂岩、凝灰质砂岩、凝灰质含砾砂岩、凝灰质砂砾岩、凝灰质砾岩、沉(角砾)凝灰岩等,厚度 90.9~151.9 m;第二段为紫灰、紫红色酸性火山岩,岩性组合为紫红色、紫灰色、浅灰、灰白色(角砾)流纹岩、钾长流纹岩、石泡流纹岩、黑曜岩、松脂岩、流纹质(含角砾)晶屑(岩屑)(玻屑)凝灰岩、流纹质(含角砾)晶屑(岩屑)(玻屑)熔结凝灰岩、火山角砾岩、集块火山角砾岩夹沉凝灰岩、凝灰质砂岩等,厚度 361.7~399.9 m;第三段为紫红、紫灰色偏碱性火山岩,岩性为紫红色、灰紫、紫灰色(角砾)粗面岩、(气孔)(角砾)石英粗面岩、松脂岩、黑曜岩、粗面质(含角砾、角砾)晶屑熔结凝灰岩、粗面质晶屑凝灰岩等,厚度 114.1~712.4 m。总的来看,白音高老组第一段与第二、三段构成一个完整的沉积-喷发旋回(图2,表1),白音高老组第二段以流纹岩或流纹质火山碎屑岩为主,第三段以粗面岩或粗面质火山碎屑岩为特征,无论是火山岩的分布范围还是产出厚度二者大体相似。

扎木廷高吉高尔火山喷发盆地白音高老组与区域上白音高老组总体可以对比(图3),但又有所区别,区域上白音高老组分上、下两段 $\text{K}_1b^1$ 、 $\text{K}_1b^2$ ,下段主要为火山碎屑沉积岩夹酸性火山岩,上段主要为流纹岩或流纹质火山碎屑岩为主,扎木廷高吉高尔火山喷发盆地白音高老组分三段,除第二段为流纹

岩或流纹质火山碎屑岩外,其上(第三段)大规模喷发粗面岩或粗面质火山碎屑岩。

扎木廷高吉高尔火山喷发盆地火山岩相较发育,有喷发-沉积相、喷溢相、碎屑流堆积相、空落堆积相、崩落堆积相、潜火山相、火山通道相;火山活动表现为强烈喷气式爆发与火山宁静式喷溢交替频繁的特征,从综合剖面上看可以划分为9个火山作用韵律。盆地发育39个V级火山机构,分别为沙尔格仁乌拉复活式、查干敖包、扎木廷高吉高尔、乌兰楚鲁等4个破火山,柴仁布敦等2个穹状火山,扎木廷巴润高金格等33个火山喷发中心。

盆地构造以北北东向和北西向构造为主,构成盆地的主体构造格架,褶皱构造不发育。受北北东向构造控制,火山喷发中心呈北北东向串珠状排列。

### 3 样品特征及分析方法

本文主要对盆地中白音高老组第二、三段火山岩开展研究,其中白音高老组第二段( $\text{K}_1b^2$ )主要岩性为流纹岩-流纹质晶屑熔结凝灰岩,第三段( $\text{K}_1b^3$ )主要岩性为粗面岩;并选取第二段流纹岩和第三段粗面岩各采取样品进行锆石U-Pb LA-ICP-MS同位素定年测试(采样位置见图1)。

#### 3.1 分析方法

样品的主微量地球化学测试工作在福建省地质测试中心完成,主量元素测试项目中烧失量与

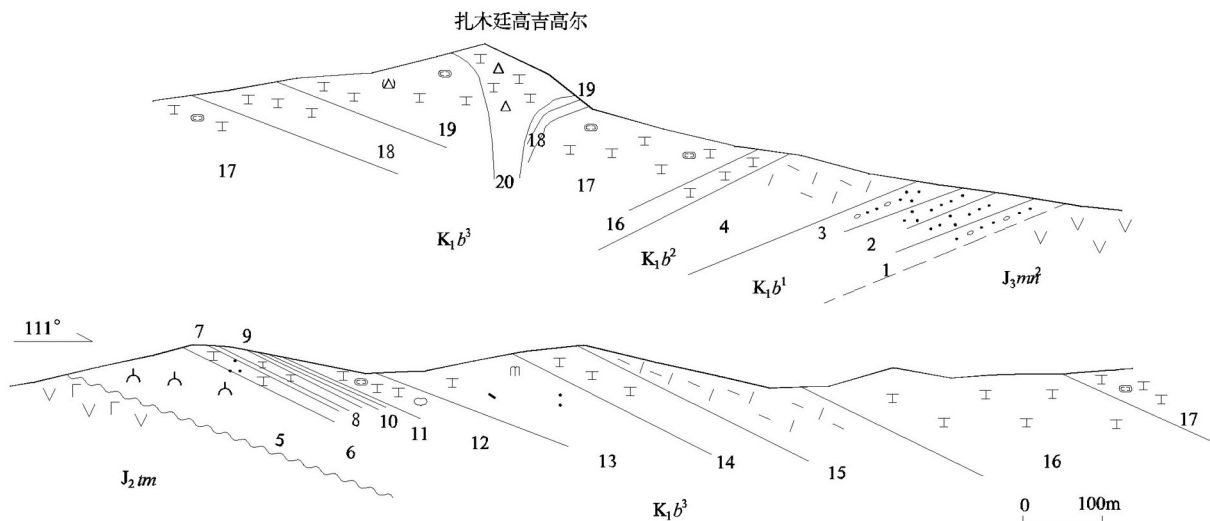


图2 扎木廷高吉高尔白音高老组( $\text{K}_1b$ )实测剖面图(图例同图1)  
 Fig.2 The measured section map of the Zamuting-Gaojigaoer Volcanics Basin  
 (The legend is the same as Fig.1)

表1 扎木廷高吉高尔白音高老组综合地层层序及韵律划分简表

Table 1 Stratigraphic sequence of measured section of the Baiyingaolao Formation in the Zamuting-Gaojigaocer District, Inner Mongolia

岩石地层单位		层号	岩性	分层厚度/m	组段厚度/m	岩相组合	韵律划分
组	段						
白 音 高 老 组	第三段	29	灰紫色角砾粗面岩	25.0	712.4	火山通道相	⑨
		28	灰紫色含角砾气孔状粗面岩	101.7			
		27	灰紫、浅灰色粗面岩	49.6		碎屑流-喷溢相	⑧
		26	灰紫色气孔状粗面岩	66.3			
		25	灰紫、浅灰色粗面岩	138.0			
		24	灰紫色流纹岩	56.5			
		23	紫红色粗面岩	48.3			
		22	紫红色粗面质晶屑熔结凝灰岩	89.7			
		21	紫红色气孔-杏仁状粗面岩	20.3			
		20	灰黑色角砾黑曜岩	4.8			
		19	紫红色气孔-杏仁状粗面岩	3.5			
		18	灰黑色含角砾黑曜岩	2.8			
		17	灰黄、深灰色粗面岩	9.3			
	16	紫红色粗安质含角砾晶屑熔结凝灰岩	4.6	喷发沉积-喷溢相	⑥		
	15	紫红色粗面岩	15.5				
	14	灰黑色黑曜岩	76.5				
	13	灰绿色凝灰质粗中粒长石岩屑砂岩	24.5				
	第二段	12	浅灰紫色流纹质岩屑晶屑玻屑凝灰岩	20.7	357.6	喷发沉积-喷溢-空落相	⑤
		11	灰紫色流纹岩	47.1			
		10	灰色凝灰质含砾粗粒长石岩屑砂岩	3.3		喷溢-碎屑流相	④
9		紫红色含角砾流纹岩	21.7				
8		灰紫色流纹质含角砾晶屑熔结凝灰岩	19.7	喷发沉积-喷溢相		③	
7		(棕)褐色流纹岩	20.2				
6		灰色凝灰质含砾中粗粒长石岩屑砂岩	25.4	喷溢-碎屑流相		②	
5		浅灰绿色流纹质含角砾晶屑熔结凝灰岩	150.3				
4	紫红色流纹岩	49.2					
第一段	3	浅灰、浅灰绿色凝灰质含砾砂岩	28.1	90.9	喷发-沉积相	①	
	2	灰、浅灰绿色凝灰质细砂岩	43.1				
	1	灰黄色凝灰质含砾砂岩	19.7				
玛尼吐组	第二段	0	灰色安山岩			喷溢	

FeO使用“瑞士Mettler-200天平”测试,其他项目使用“菲利普PW2440”测试,主量元素采用XRF荧光测试法完成,测试误差小于2%;稀土和微量元素测试采用等离子体质谱(ICP-MS)法,测定精度优于5%。锆石挑选由河北省区域地质矿产研究所完成,用常规方法将样品粉碎至80~100目,经过淘洗和电磁方法进行分离后,在双目镜下将具有较好晶形的并且无明显裂痕和包裹体的锆石挑选出来。锆石的制靶和阴极发光照相在西安瑞石地质科技有限公司完成。锆石U-Pb测年工作由西北大学大陆动力国家重点实验室完成,采用LA-ICP-MS进行锆

石U-Pb同位素定年测试。激光剥蚀系统为德国MicroLas公司生产的GeoLas200M,ICP-MS为美国Agilent公司生产的Agilent7500a,采用的激光束斑直径为35 μm,以氦气作为剥蚀物质的载气,使用国际标准锆石91500作为标准样进行校正,扣除Pb的影响。所测单点的同位素比值及元素含量采用GLITTER(Jackson et al., 2004)软件进行处理,实验获得数据采用文献(Andersen, 2002)的方法进行同位素比值的校正,测试数据的最后计算处理采用Isoplot3.0程序(Liu et al., 2007)。详细的实验分析步骤和处理方法见文献(Ludwing, 2011)。

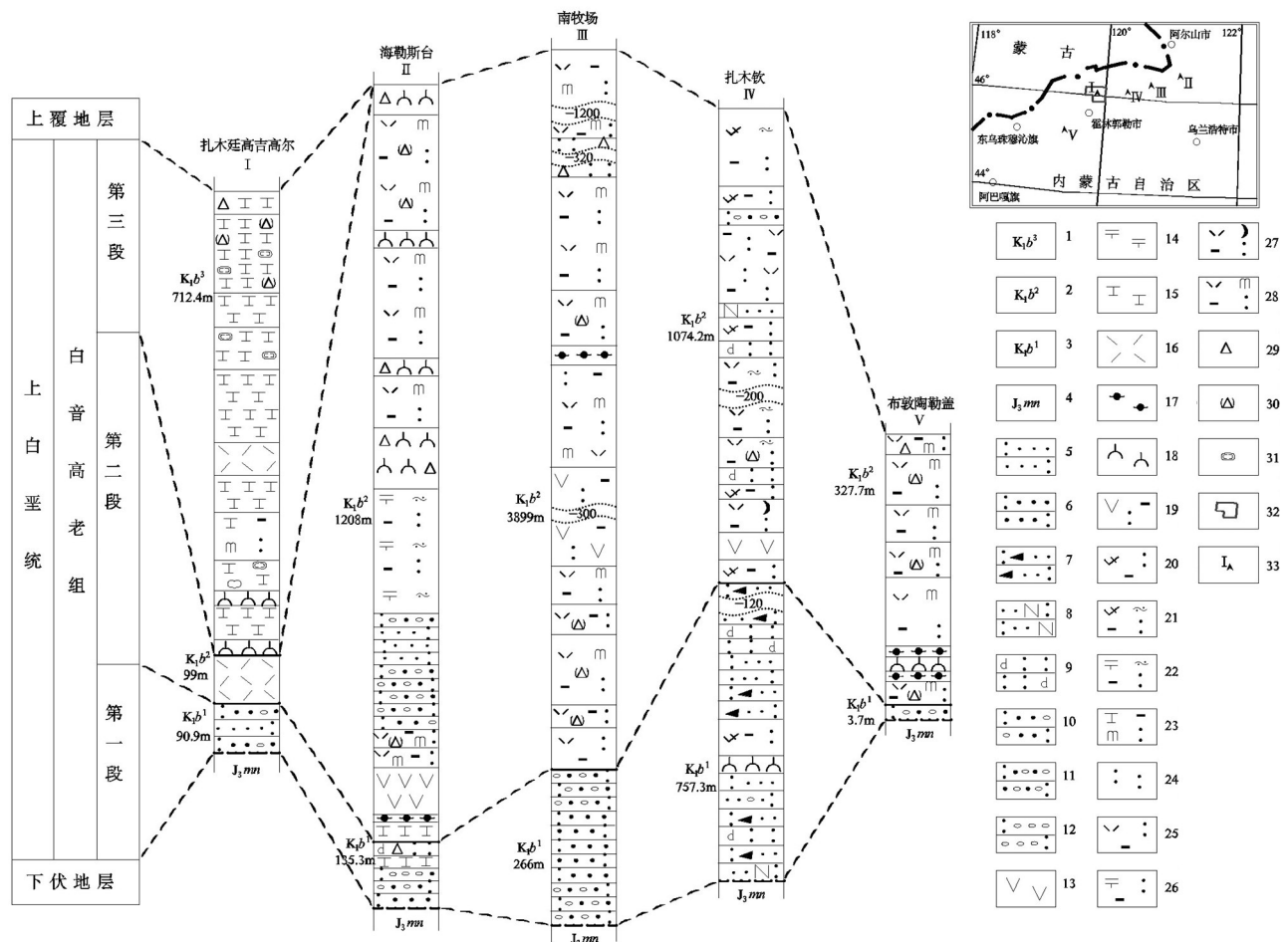


图3 扎木廷高吉高尔白音高老组与区域白音高老组柱状对比图

1—下白垩统白音高老组第三段;2—下白垩统白音高老组第二段;3—下白垩统白音高老组第一段;4—上侏罗统玛尼吐;5—凝灰质细砂岩;6—凝灰质砂岩;7—凝灰质岩屑砂岩;8—凝灰质长石砂岩;9—沉凝灰岩;10—凝灰质含砾砂岩;11—凝灰质砂砾岩;12—凝灰质砾岩;13—安山岩;14—粗安岩;15—粗面岩;16—流纹岩;17—松脂岩;18—黑曜岩;19—安山质晶屑凝灰岩;20—英安质晶屑凝灰岩;21—英安质晶屑弱熔结凝灰岩;22—粗安质晶屑弱熔结凝灰岩;23—粗面质晶屑弱熔结凝灰岩;24—凝灰岩;25—流纹质晶屑凝灰岩;26—粗安质晶屑凝灰岩;27—流纹质晶屑玻屑凝灰岩;28—流纹质晶屑熔结凝灰岩;29—角砾;30—含角砾;31—气孔;32—研究区;33—剖面位置及编号

Fig.3 The stratigraphic correlation between the Baiyingaolao Formation volcanics in the Zamuting-Gaojigaoer District and other districts in the Great Hinggan Volcanic Belt

1-The third member of the lower Cretaceous Baiyingaolao Formation; 2-The second member of the lower Cretaceous Baiyingaolao Formation; 3-The first member of the lower Cretaceous Baiyingaolao Formation; 4-the upper Jurassic Manitu Formation; 5-Tuffaceous fine sandstone; 6-Tuffaceous sandstone; 7-Tuffaceous lithic sandstone; 8-Tuffaceous arkose; 9-Sedimentary limestone; 10-Tuffaceous sandstone; 11-Tuffaceous sandstone; 12-Tuffaceous conglomerate; 13 Andesite; 14-Trachyandesite; 15-Trachyte; 16-Rhyolite; 17-Turpentine; 18-Obsidian; 19-Andesitic crystalline tuff; 20-Dacitic clastic tuff; 21-Dacitic weakly fused tuff; 22-Coarse andesitic weak melting tuff; 23-Trachytic clastic fusion tuff; 24-Tuff; 25-Rhyolitic crystalline tuff; 26-Coarse andesitic crystalline tuff; 27-Rhyolitic crystalline vitrinite tuff; 28-Rhyolitic clastic fused tuff; 29-Breccia; 30-Breccia; 31-Porosity; 32-The study area; 33-The section position and number

### 3.2 样品特征

扎木廷地区火山岩的岩性主要为第三段的粗面岩和第二段的流纹岩、流纹质(含角砾)晶屑(岩屑)熔结凝灰岩、流纹质(含角砾)晶屑(玻屑)凝灰岩等。

粗面岩:灰紫、紫红色,斑状结构(图4a),块状

构造,斑晶占30%~45%,成分为透长石(5%~15%)、斜长石(5%~25%),矿物粒径0.2~3.5 mm。斜长石呈半自形板状,部分可见环带,部分粒内聚片双晶发育,  $Np^{\wedge}(101)=23$ ,斜长石排号为  $An=33$  的中长石。透长石呈半自形板状,表面干净。黑云母呈片状,多色性明显:  $Ng'$ =深褐色,  $Np'$ =淡黄棕色。基质

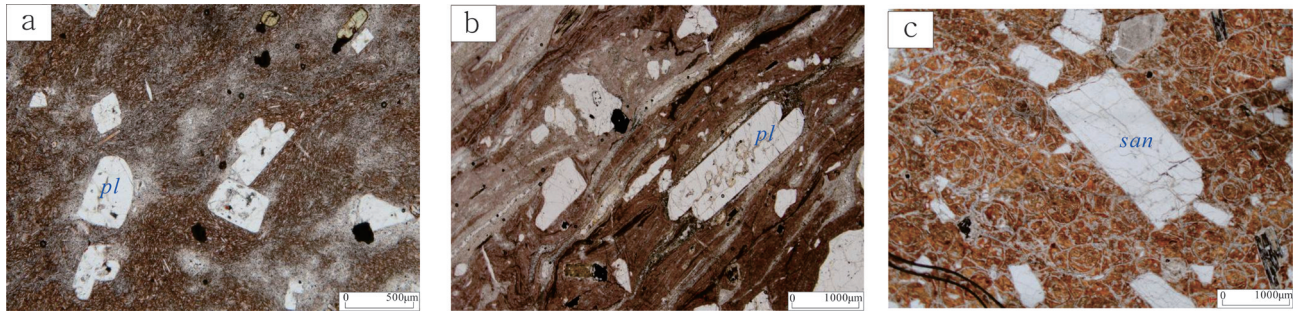


图4 扎木廷地区白音高老组火山岩显微照片

a—粗面岩,斑状结构,基质似交织状结构(-);b—流纹岩,斑状结构—基质霏细结构(-);  
c—流纹岩,珍珠构造(+);kfs—钾长石;pl—斜长石;san—透长石

Fig.4 Photomicrographs of volcanic rocks of the Baiyingaolao Formation in the Zamuting district

a—Trachyte, porphyritic texture, matrix like interweaved structure (-); b—Rhyolite, porphyritic texture, matrix like felsic texture (-);  
c—Rhyolite, pearl structure (+); kfs—Potash feldspar; pl—Plagioclase; san—Sansandiorite

由长英质组成,呈隐晶状,为隐微晶状结构,微晶状长石均匀定向分布。部分粗面岩中的斑晶见有少量的石英,为石英粗面岩。

流纹岩:浅灰、浅灰白色、浅灰紫色、紫红色,斑状结构(图4b),普遍发育流纹构造,部分岩石见有珍珠构造(图4c),岩石由斑晶和基质组成,斑晶占5%~30%,成分主要为钾长石、斜长石,石英少量,斑径一般在0.5~3 mm,晶形较好,基质为隐晶质长英质,常见皱纹状、涡流状流纹构造及流纹构造绕角砾流动。其中流纹岩按斑晶含量多少可分为流纹岩、流纹斑岩,按基质结构不同亦可分为球粒流纹岩、石泡流纹岩及球泡流纹岩,据岩石中角砾、集块含量不同,也可分为含角砾流纹岩、角砾流纹岩、集块角砾流纹岩等。

## 4 测试结果

### 4.1 同位素地质年代学

样品 PM210-13 岩性 (46°00'52"N, 119°48'31"

E)为粗面岩,采集于扎木廷高吉高尔火山喷发盆地扎木廷高吉高尔白音高老组第三段。锆石阴极发光图像(图5)显示,锆石具有明显岩浆成因的震荡生长环带,本研究对18个锆石进行了测试工作。18个测点的Th/U比值平均值为0.50(0.44~0.76),为典型的岩浆成因锆石(吴元保等,2004)。所有测点均位于U-Pb谐和线附近, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄介于121~134 Ma,其加权平均值为(126.9±1.5) Ma (MSWD=0.47, n=18)(图7,表2),可以代表粗面岩的结晶年龄。

样品 PM330-55 岩性 (46°04'38"N, 119°55'34"E)为流纹岩,采集于扎木廷高吉高尔火山喷发盆地乌兰楚鲁白音高老组第二段。锆石阴极发光图像显示(图6),锆石具有明显岩浆成因的震荡生长环带,本研究对19个锆石进行了测试工作。19个测点的锆石Th/U比值平均值为0.59(0.42~0.71),为典型的岩浆成因锆石(吴元保等,2004)。所有测点均位于U-Pb谐和线附近, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄介于126~

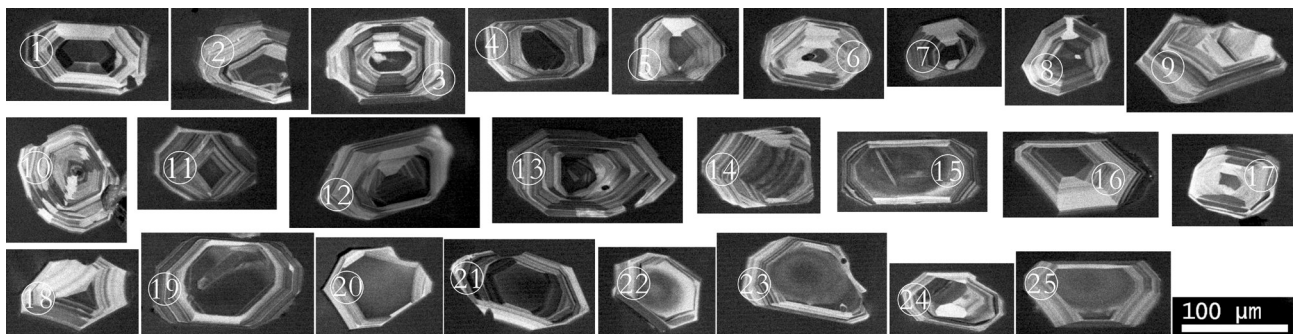


图5 扎木廷地区白音高老组粗面岩(PM210-13)锆石阴极发光(CL)图像

Fig.5 Zircons CL images of trachyte in the Baiyingaolao Formation from Zamuting district

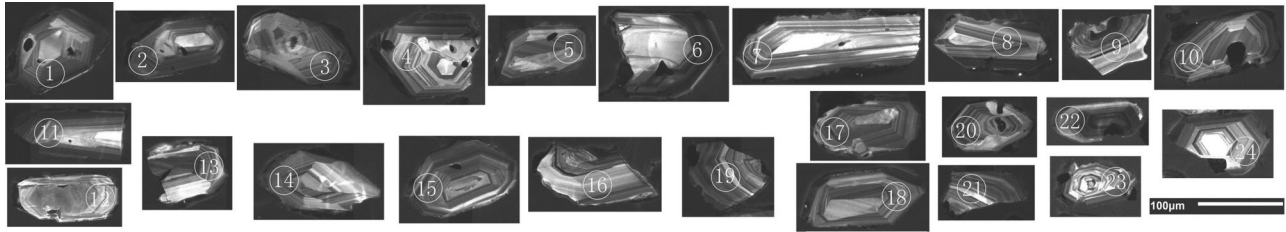


图6 扎木廷地区白音高老组流纹质晶屑熔结凝灰岩(PM330-55)锆石阴极发光(CL)图像  
Fig.6 Zircons CL images of crystal welded rhyolitic tuff in the Baiyingaolao Formation from the Zamuting district

135 Ma,其加权平均值为(131.6±1.2) Ma (MSWD=2.0, n = 19)(图7,表2),代表流纹岩的结晶年龄。

4.2 地球化学特征

4.2.1 主量元素特征

扎木廷地区白音高老组火山岩代表性样品的主量元素分析结果列于表3。在火山岩全碱-二氧化硅(TAS)图解分类和命名图上(图8a),第三段火山岩落入粗面岩区中,第二段火山岩落入流纹岩中。第三段粗面岩 SiO<sub>2</sub> 含量相对较低为 63.25%~68.55%, K<sub>2</sub>O 为 4.33%~5.72%、Na<sub>2</sub>O 为 3.63%~4.08%, (Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O) 为 8.16%~9.64%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为 15.75%~17.18%、CaO 为 1.64%~3.50%, MgO 为 0.27%~1.24%; TiO<sub>2</sub> 含量为 0.45%~0.66%, 平均值为 0.55%; A/CNK 值为 0.99~1.07, 为准铝质。第二段流纹岩 SiO<sub>2</sub> 为 72.35%~81.81%, K<sub>2</sub>O 为 3.40%~6.82%, Na<sub>2</sub>O 为 0.55%~4.04%, (Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O) 为 5.97%~8.64%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为 11.22%~14.95%, CaO 为 0.12%~0.44%, MgO 为 0.05%~0.41%; TiO<sub>2</sub> 的含量为 0.08%~

0.48%, 平均值为 0.23%, A/CNK 值在 1.12~1.75, 为过铝质火山岩(表3)。

第三段粗面岩与第二段流纹岩相比: SiO<sub>2</sub> 含量降低, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaO 含量则明显增加, K<sub>2</sub>O、Na<sub>2</sub>O、MgO 和 TiO<sub>2</sub> 略有增加。在 A.R.-SiO<sub>2</sub> 与碱度关系图上见(图8b), 白音高老组火山岩大部分落入碱性系列, 仅 1 个样品落在钙碱性系列与碱性系列边界。上述特征表明, 扎木廷地区早白垩世白音高老期火山岩主要为流纹岩-粗面岩组合, 属碱性系列火山岩。

4.2.2 微量元素和稀土元素特征

扎木廷高吉高尔火山喷发盆地白音高老组第三段粗面岩微量元素蛛网图(图9a)显示大离子亲石元素(LILE) Rb、Th、U、Pb 富集, 高场强元素(HFSE) Nb、Ta、Ti、P 和 Sr、Ba 具有明显的亏损。基性相容元素 Cr、Co、Ni 均较低, Cr 值为 4.21~18.40 μg/g, 平均值为 8.11 μg/g; Co 值为 1.70~10.18 μg/g, 平均值为 4.82 μg/g; Ni 值为 1.01~4.39 μg/g, 平均值为 2.26 μg/g。第二段流纹岩微量元素蛛网图特征

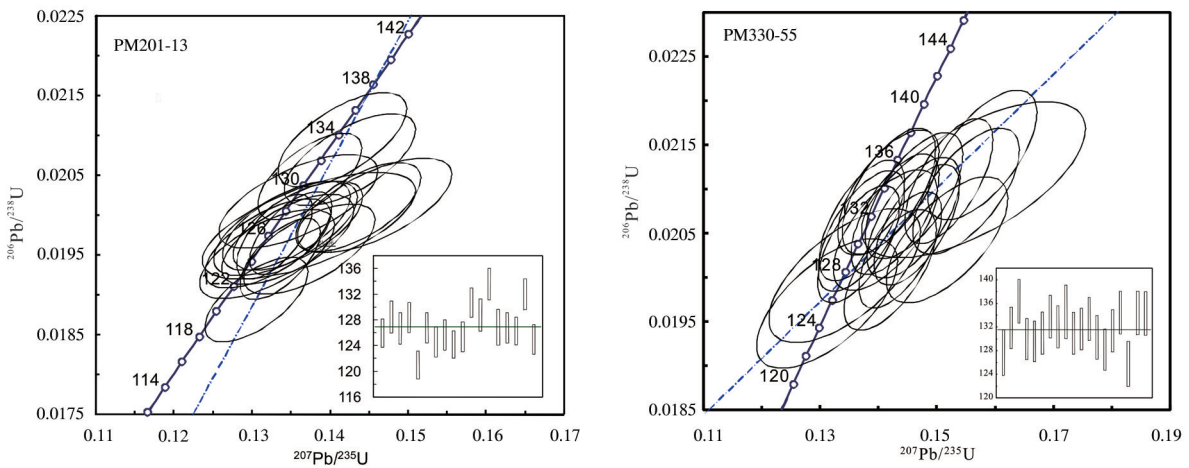


图7 扎木廷地区白音高老组粗面岩(PM201-13)和流纹岩(PM330-55)锆石U-Pb年龄谱和图  
Fig.7 Zircons U-Pb concordian diagrams trachyte)(PM201-13) and crystal welded rhyolitic tuff (PM330-55) in the Baiyingaolao Formation from the Zamuting district



表2 扎木廷地区白音高老组火山岩锆石U-Pb同位素分析结果  
 Table 2 Zircon U-Pb dating data of volcanic rocks in the Baiyingaolao Formation from the Zamuting district

测点号	含量/ $10^{-6}$		Th/U	同位素比值				表面年龄/Ma			
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$
第三段粗面岩(PM210-13)											
1	348.06	458.81	0.76	0.13288	0.00318	0.01974	0.00035	127	3	126	2
2	112.07	211.02	0.53	0.14572	0.00651	0.02013	0.00039	138	6	129	2
3	63.26	145.39	0.44	0.13428	0.00604	0.01984	0.00039	128	5	127	2
4	59.56	134.32	0.44	0.14357	0.00532	0.02011	0.00037	136	5	128	2
5	161.95	252.94	0.64	0.13055	0.00434	0.01895	0.00035	125	4	121	2
6	97.78	185.62	0.53	0.13438	0.00543	0.01987	0.00037	128	5	127	2
7	73.2	159.73	0.46	0.13191	0.00567	0.01952	0.00037	126	5	125	2
8	73.37	148.75	0.49	0.13454	0.00561	0.0197	0.00037	128	5	126	2
9	86	182.41	0.47	0.13357	0.00341	0.01946	0.00034	127	3	124	2
10	71.98	158.45	0.45	0.13199	0.00532	0.01965	0.00037	126	5	125	2
11	61.64	137.92	0.45	0.13735	0.0044	0.02049	0.00036	131	4	131	2
12	63.06	128.66	0.49	0.1359	0.00674	0.02018	0.00039	129	6	129	2
13	69.06	154.98	0.45	0.1415	0.00544	0.02095	0.00039	134	5	134	2
14	95.17	183.12	0.52	0.13724	0.00899	0.01988	0.00044	131	8	127	3
15	90.6	196.41	0.46	0.13583	0.00544	0.01987	0.00037	129	5	127	2
16	98.71	178.2	0.55	0.13494	0.00347	0.01978	0.00034	129	3	126	2
17	68.59	144.14	0.48	0.14255	0.00556	0.0207	0.00038	135	5	132	2
18	74.85	169.65	0.44	0.13731	0.00554	0.01958	0.00037	131	5	125	2
第二段流纹岩(PM330-55)											
1	211.62	447.75	0.47	0.13426	0.00531	0.02001	0.00031	128	5	128	2
2	239.72	399.44	0.60	0.14603	0.00328	0.02067	0.00028	138	3	132	2
3	179.89	265.45	0.68	0.15785	0.00384	0.02138	0.0003	149	3	136	2
4	284.24	483.47	0.59	0.1366	0.00286	0.02037	0.00027	130	3	130	2
5	443.33	875.19	0.51	0.14376	0.0029	0.02031	0.00027	136	3	130	2
6	159.36	295.65	0.54	0.14119	0.00364	0.02053	0.00028	134	3	131	2
7	216.26	352.1	0.61	0.14185	0.00327	0.02097	0.00029	135	3	134	2
8	303.58	441.71	0.69	0.14288	0.00308	0.02071	0.00028	136	3	132	2
9	124.33	178.92	0.69	0.15634	0.00785	0.0211	0.00036	148	7	135	2
10	342.3	483.59	0.71	0.13708	0.00305	0.02052	0.00028	130	3	131	2
11	276.21	444.21	0.62	0.1372	0.00301	0.02064	0.00028	131	3	132	2
12	196.29	363.83	0.54	0.14608	0.00341	0.02092	0.00029	138	3	133	2
13	303.26	501.49	0.60	0.15181	0.00425	0.02042	0.00029	144	4	130	2
14	233.19	412.83	0.56	0.14203	0.00322	0.02008	0.00028	135	3	128	2
15	311.62	532.03	0.59	0.14665	0.00301	0.02059	0.00028	139	3	131	2
16	359.13	553.56	0.65	0.15207	0.0031	0.02109	0.00029	144	3	135	2
17	195.4	460.18	0.42	0.13129	0.00494	0.0197	0.0003	125	4	126	2
18	237.5	434.49	0.55	0.15499	0.00372	0.02097	0.00029	146	3	134	2
19	209.04	341.46	0.61	0.14174	0.00351	0.02096	0.00029	135	3	134	2

表3 白音高老组火山岩主量(%)、微量和稀土(10<sup>-6</sup>)元素的数据  
Table 3 Major (%) and trace elements (10<sup>-6</sup>) compositions of volcanic rocks from the Baiyingaolao Formation

样号	粗面岩石英粗面岩										流纹岩									
	PM325	PM210	PM325	PM325	PM325	PM330	PM330	PM330	PM520	PM411	PM411	D9680	D5671	3180	PM411	PM411	PM411	D8700		
时代	K <sub>2</sub> O										K <sub>2</sub> O									
岩石类型	粗面岩石英粗面岩										流纹岩									
SiO <sub>2</sub>	67.24	68.55	66.79	67.20	63.25	77.03	76.67	79.18	78.00	71.03	72.20	74.15	81.81	72.35	75.64	77.81	77.39	76.07	79.68	77.73
TiO <sub>2</sub>	0.55	0.54	0.45	0.56	0.66	0.24	0.18	0.08	0.09	0.39	0.40	0.29	0.12	0.48	0.36	0.29	0.09	0.22	0.10	0.08
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.75	15.94	15.86	16.06	17.18	12.36	13.04	11.22	11.76	14.95	14.85	13.63	9.64	14.59	13.31	12.39	12.73	12.54	11.46	12.10
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.20	2.09	3.81	3.28	4.16	0.85	0.66	0.47	0.72	2.28	1.49	1.31	0.76	1.83	1.37	1.08	0.91	0.95	0.80	0.76
FeO	0.28	0.27	0.28	0.24	0.32	0.18	0.29	0.12	0.22	0.36	0.23	0.37	0.08	0.22	0.23	0.12	0.15	0.10	0.22	0.12
MnO	0.04	0.02	0.04	0.03	0.05	0.01	0.02	0.08	0.02	0.08	0.06	0.06	0.04	0.02	0.01	0.01	0.11	0.02	0.02	0.05
MgO	0.47	0.27	0.55	0.25	1.24	0.05	0.25	0.09	0.13	0.65	0.41	0.23	0.08	0.31	0.41	0.26	0.13	0.08	0.09	0.19
CaO	1.64	1.54	2.55	1.73	3.50	0.22	0.12	0.30	0.25	0.43	0.42	0.21	0.21	0.33	0.26	0.19	0.19	0.13	0.15	0.36
Na <sub>2</sub> O	3.92	3.79	3.83	4.08	3.63	2.27	0.72	1.08	0.59	3.17	3.52	2.69	2.28	4.04	1.30	2.58	0.32	2.09	0.55	3.16
K <sub>2</sub> O	5.72	5.41	4.33	5.35	4.58	5.33	6.32	5.84	6.46	4.45	4.72	5.43	4.10	4.60	4.95	3.40	5.93	6.82	5.41	4.54
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.11	0.12	0.17	0.13	0.19	0.05	0.02	0.02	0.02	0.10	0.11	0.07	0.03	0.09	0.06	0.03	0.04	0.03	0.02	0.01
FeO <sup>+</sup>	3.17	2.15	3.71	3.19	4.06	0.94	0.88	0.54	0.87	2.41	1.57	1.55	0.77	1.86	1.46	1.10	0.97	0.96	0.94	0.80
化合水	0.78	1.07	0.92	0.78	0.98	1.05	1.35	1.08	1.44	1.85	1.27	1.13	0.55	0.82	1.69	1.46	1.77	0.61	1.28	0.83
烧失量	0.79	1.18	1.06	0.90	0.97	1.31	1.65	1.43	1.66	1.89	1.41	1.45	0.72	0.87	1.94	1.70	1.91	0.82	1.45	0.83
Total	99.72	99.71	99.73	99.82	99.72	99.90	99.94	99.91	99.91	99.78	99.83	99.87	99.88	99.72	99.82	99.85	99.87	99.87	99.96	99.94
Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O	9.64	9.20	8.16	9.43	8.21	7.60	7.04	6.91	7.05	7.62	8.24	8.11	6.38	8.64	6.25	5.97	6.25	8.91	5.97	7.70
A/CNK	1.01	1.07	1.02	1.03	0.99	1.25	1.58	1.30	1.40	1.38	1.27	1.28	1.12	1.19	1.67	1.50	1.75	1.13	1.63	1.12
A.R.	3.49	3.23	2.59	3.26	2.32	4.05	3.30	4.00	3.85	2.96	3.34	3.83	4.68	3.75	2.71	2.81	2.87	5.74	3.12	4.24
里特曼	3.83	3.32	2.80	3.67	3.33	1.70	1.47	1.32	1.42	2.07	2.33	2.11	1.05	2.54	1.20	1.03	1.14	2.40	0.97	1.71
指数( $\sigma$ )																				
Cs	8.01	4.11	3.16	7.97	7.07	7.14	12.92	8.63	8.54	10.48	8.71	13.47	5.03	12.28	12.38	12.78	20.97	4.42	14.00	4.62
Rb	180.84	166.20	114.08	172.08	96.05	171.36	265.08	174.72	192.24	127.68	148.32	176.40	118.44	178.19	213.68	155.82	180.84	203.04	262.56	141.86
Sr	245.08	227.59	434.83	282.92	482.90	74.83	40.51	38.94	33.04	184.47	247.28	79.18	72.00	308.85	82.10	55.53	24.88	23.21	15.50	44.92
Ba	1159.25	1157.25	1009.00	1193.88	1020.00	351.63	202.75	428.50	437.25	844.25	581.25	508.00	535.50	1354.70	1031.70	768.93	392.25	520.63	152.50	402.14
Ga	18.67	17.77	17.93	20.49	19.44	17.66	24.41	13.36	15.10	17.45	17.04	21.76	8.53	19.17	20.32	22.48	17.39	17.35	17.47	14.92
Nb	10.26	10.26	7.92	10.93	8.96	15.55	16.07	8.23	8.32	8.54	8.32	17.13	12.54	12.96	12.74	16.04	8.54	16.55	12.91	7.98
Ta	0.83	0.93	0.80	0.86	0.73	1.15	1.38	0.81	0.81	1.00	0.84	1.30	1.16	0.88	1.18	1.09	0.86	1.23	1.62	0.75
Zr	253.16	267.49	196.51	272.93	226.97	192.28	143.78	73.28	74.14	140.41	139.80	218.27	76.68	260.12	240.09	279.43	93.30	160.25	85.85	82.76
Hf	6.24	6.85	4.99	6.89	6.07	6.53	5.80	3.09	3.00	5.64	5.93	7.02	3.43	7.06	7.34	9.62	3.91	5.83	3.61	3.35
Th	12.02	9.82	9.23	12.19	7.76	13.14	10.32	11.70	15.85	12.82	13.37	15.31	17.99	14.10	17.43	14.28	12.88	15.71	24.29	11.50
V	23.56	23.43	35.48	30.46	61.48	24.00	23.01	15.35	14.84	43.22	42.84	19.81	18.02	29.21	28.71	24.66	9.98	17.90	10.01	20.40
Cr	4.27	4.21	4.86	4.46	11.21	5.09	4.22	3.74	3.58	4.49	4.85	4.46	3.89	4.21	3.16	4.24	3.80	4.16	4.44	4.67
Co	3.49	2.04	3.91	3.42	7.50	0.73	0.27	0.24	0.43	4.69	4.81	1.23	0.58	0.68	1.62	0.25	0.38	0.18	0.37	0.16
Ni	1.14	1.03	2.61	1.34	3.15	3.00	0.62	4.24	1.29	4.58	3.56	1.12	1.41	0.56	1.28	0.47	0.42	0.71	0.30	0.55
Ta	0.83	0.93	0.80	0.86	0.73	1.15	1.38	0.81	0.81	1.00	0.84	1.30	1.16	0.88	1.18	1.09	0.86	1.23	1.62	0.75
Li	19.67	22.49	10.44	15.49	12.70	7.26	12.90	25.22	9.07	17.39	12.07	12.27	14.36	20.31	22.29	65.16	22.37	7.66	25.43	22.76
Sc	6.52	6.20	4.19	6.65	7.28	3.20	2.21	2.29	2.11	4.23	4.05	3.72	1.82	8.04	7.22	9.38	2.63	2.38	1.77	3.21
Pb	21.34	20.14	18.20	22.70	19.84	43.39	14.84	19.31	11.53	18.07	17.21	17.36	13.07	21.67	9.92	64.56	29.03	17.11	12.53	24.96
U	2.08	2.48	2.23	1.75	2.72	5.47	5.76	3.15	3.23	3.09	4.57	3.15	2.76	4.32	5.32	5.70	2.83	4.62	4.31	3.46

续表3

样号	K <sub>2</sub> O															
	PM3325	PM210	PM325	PM325	PM325	PM330	PM330	PM330	PM330	PM330	PM330	PM330	PM330	PM330	PM330	PM330
Bi	0.03	0.12	0.06	0.05	0.09	0.07	0.14	0.14	0.20	0.23	0.14	0.10	0.21	0.32	0.51	0.15
Sn	1.26	1.63	1.35	1.17	1.44	2.67	1.00	0.92	2.24	2.23	1.06	1.91	0.91	1.73	1.20	1.38
Cu	8.02	8.60	7.36	9.29	10.60	3.86	1.43	1.84	6.66	6.73	4.14	2.09	9.79	7.36	5.72	1.38
Zn	53.01	57.02	58.98	53.50	64.88	26.03	20.19	26.69	40.37	33.52	57.49	11.25	73.35	46.31	55.41	30.00
Be	2.67	1.95	2.10	3.03	2.25	3.36	3.47	3.85	2.14	2.86	3.04	1.70	2.43	2.40	2.64	2.49
Cd	0.19	0.17	0.07	0.14	0.10	0.14	0.03	0.05	0.07	0.04	0.00	0.10	0.03	0.02	0.01	0.06
Sb	0.43	0.86	0.27	0.34	0.22	1.05	0.76	3.57	1.54	0.77	0.96	0.78	1.91	1.62	8.78	2.83
La	21.15	22.83	25.32	29.81	22.52	36.00	31.89	39.26	27.96	22.19	25.08	33.88	21.88	32.59	36.05	48.71
Ce	41.19	48.99	50.22	62.59	48.94	76.84	65.34	62.10	52.00	51.26	48.20	77.33	43.14	66.39	72.63	91.90
Pr	6.21	6.79	6.69	8.67	6.05	9.74	8.40	9.28	6.29	6.19	6.58	9.71	4.78	8.57	10.98	7.11
Nd	23.38	25.87	24.65	32.62	22.31	35.85	29.84	30.43	21.30	21.95	22.70	35.06	15.72	34.92	42.24	24.26
Sm	4.46	4.86	4.22	6.02	4.26	6.96	6.24	5.15	3.50	3.80	3.65	6.44	2.72	6.63	7.59	3.96
Eu	1.04	1.12	1.11	1.30	1.28	0.93	0.49	0.65	0.27	0.62	0.66	0.77	0.30	1.51	1.16	1.35
Gd	3.48	4.11	3.68	5.09	3.57	6.78	5.17	4.61	3.24	3.27	3.51	5.62	2.54	5.72	5.39	6.54
Tb	0.63	0.74	0.59	0.89	0.62	1.38	0.98	0.71	0.48	0.51	0.50	0.93	0.38	0.96	0.88	1.07
Dy	3.12	3.99	2.93	4.71	3.26	8.14	5.69	3.69	2.29	2.50	2.41	5.04	1.99	5.27	5.16	6.31
Ho	0.62	0.84	0.59	0.94	0.64	1.62	1.12	0.75	0.48	0.48	0.49	1.02	0.38	1.08	1.01	1.31
Er	1.69	2.24	1.64	2.59	1.72	3.98	3.02	2.04	1.34	1.38	1.36	2.69	1.07	3.00	2.99	3.80
Tm	0.31	0.40	0.28	0.44	0.29	0.67	0.51	0.37	0.24	0.25	0.25	0.44	0.19	0.49	0.47	0.63
Yb	2.19	2.77	1.94	3.15	1.98	4.33	3.46	2.56	1.69	1.78	1.72	2.94	1.32	3.18	3.12	4.13
Lu	0.56	0.65	0.44	0.78	0.49	0.82	0.70	0.49	0.35	0.33	0.31	0.61	0.28	0.70	0.68	0.75
Y	16.69	24.08	15.94	27.00	17.48	48.74	33.33	18.04	14.05	12.11	13.52	28.27	11.13	29.67	29.26	38.48
Ti/Y	163.97	112.93	141.86	103.54	187.58	24.79	26.55	22.86	31.55	162.76	147.36	50.56	56.10	81.42	61.04	37.78
Ti/Zr	10.81	10.17	11.51	10.24	14.45	6.28	6.15	5.63	5.98	14.04	14.25	6.55	8.14	9.29	7.44	5.20
Rb/Sr	0.74	0.73	0.26	0.61	0.20	2.29	6.54	4.49	5.82	0.69	0.60	2.23	1.65	0.58	2.60	2.81
10000×Ga/Al	2.28	2.14	2.17	2.45	2.18	2.75	3.60	2.29	2.47	2.24	2.21	3.07	1.70	2.53	2.94	3.49
FeO/FeO <sup>+</sup>	0.87	0.89	0.87	0.93	0.77	0.95	0.78	0.85	0.87	0.79	0.79	0.87	0.90	0.86	0.78	0.81
MgO	321.30	350.83	270.59	373.45	302.35	333.41	258.52	161.65	148.51	212.32	209.83	341.00	143.50	369.14	354.72	425.85
Zr+Nb+Ce+Y	23.7	20.7	23.5	14.2	39.1	9.18	37.1	26.6	23.3	36.2	35.3	23.7	18.6	25.6	36.8	32.8
Mg <sup>#</sup>	0.81	0.76	0.86	0.72	1.00	0.41	0.26	0.41	0.25	0.54	0.57	0.39	0.35	0.75	0.61	0.59
Eu*	0.88	0.96	0.95	0.95	1.03	1.01	0.98	0.80	0.96	1.07	0.92	1.05	1.03	0.97	0.99	0.97
Ce*	126.71	150.27	140.23	186.60	135.42	242.77	196.18	180.11	135.46	128.61	130.94	210.73	107.83	200.66	208.57	265.80
ΣREE	97.42	110.47	112.21	141.01	105.36	166.31	142.20	146.86	111.31	106.01	106.88	163.19	88.55	150.61	159.62	202.78
ΣLREE	29.29	39.81	28.02	45.59	30.06	76.46	53.98	33.25	24.15	22.61	24.06	47.54	19.28	50.05	48.96	63.02
ΣHREE	3.33	2.78	4.01	3.09	3.51	2.18	2.63	4.42	4.61	4.69	4.44	3.43	4.59	3.01	3.26	3.22
LREE/HREE	3.06	3.03	3.87	3.19	3.41	3.34	3.30	4.92	5.16	3.77	4.43	3.40	5.19	3.17	3.68	4.14
(La/Sm) <sub>N</sub>	1.31	1.22	1.57	1.33	1.49	1.30	1.24	1.49	1.58	1.52	1.69	1.58	1.59	1.49	1.43	1.31
(Gd/Yb) <sub>N</sub>	14.68	9.45	27.28	10.48	27.63	1.54	1.22	2.16	2.35	15.23	18.29	2.80	6.47	10.41	2.81	1.44
Sr/Y	9.66	8.24	13.05	9.46	11.37	8.31	9.22	15.34	16.54	12.47	14.58	11.52	16.58	10.25	11.55	11.79
La/Yb																

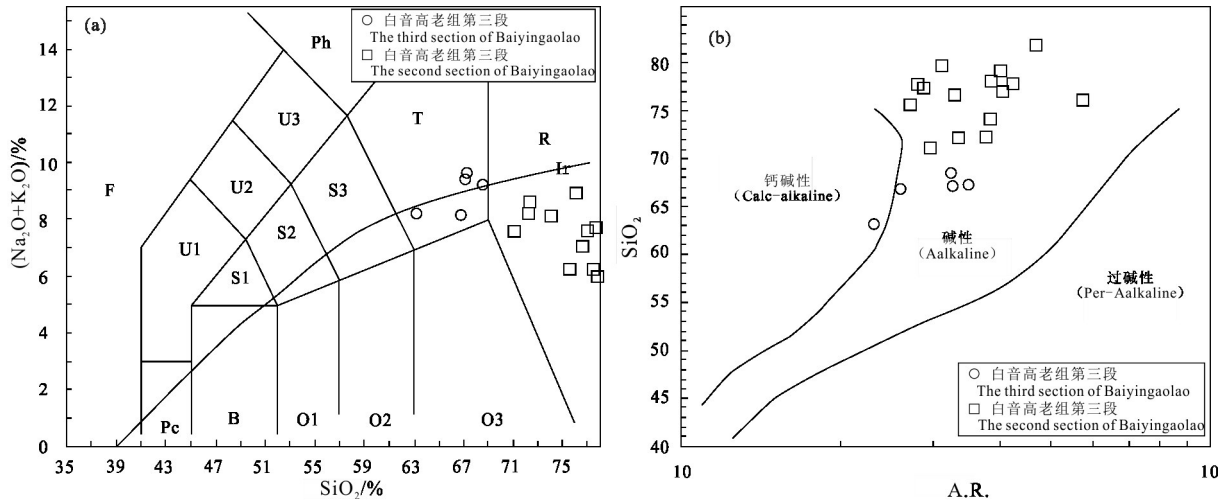


图8 扎木廷地区白音高老组火山岩样品 TAS分类图(a)(Le Maitre, 1989)和 A.R.-SiO<sub>2</sub>图解(b)(Wright, 1969)  
 Fig.8 TAS diagram(a)(Le Maitre, 1989)and A.R.-SiO<sub>2</sub> diagram(b)(Wright, 1969)of volcanic rocks in the Baiyingaolao Formation from the Zamuting district

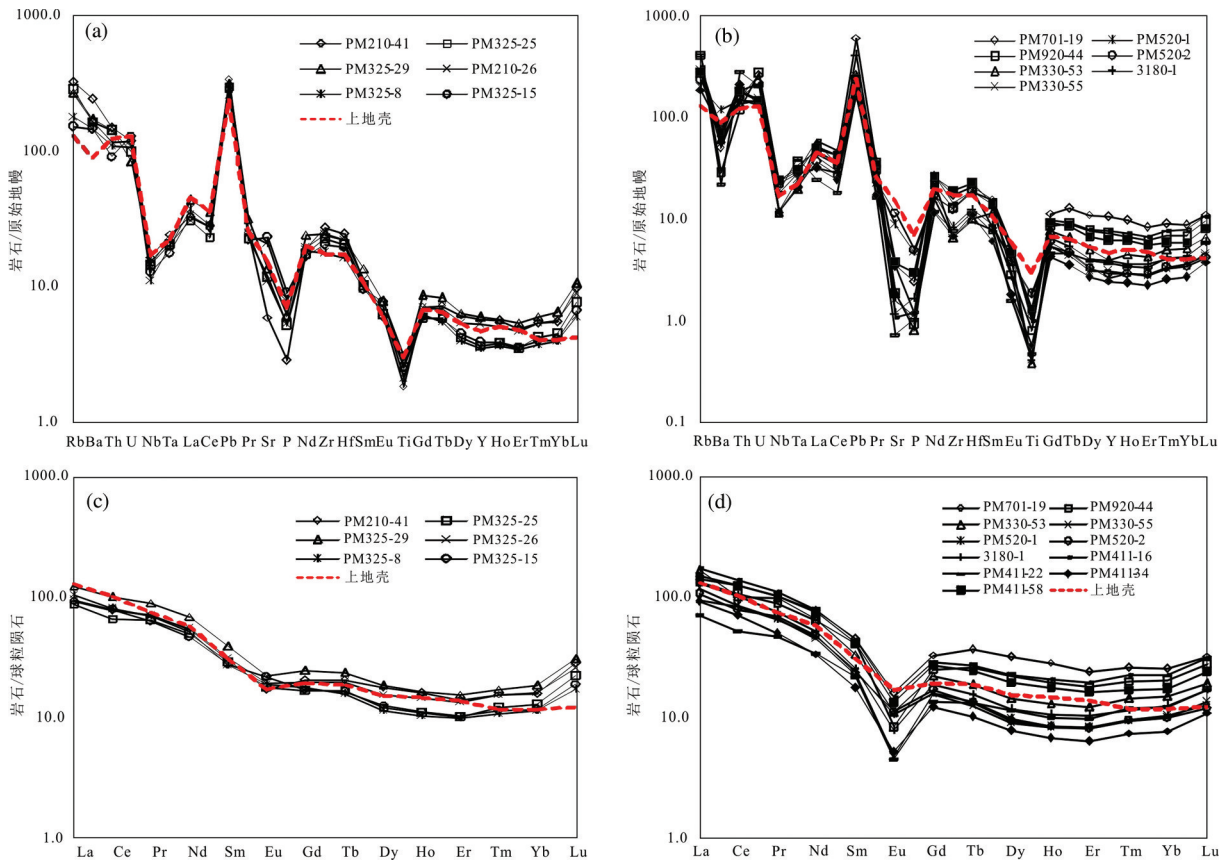


图9 扎木廷高吉高尔火山喷发盆地白音高老组火山岩微量元素蛛网图(a为粗面岩,b为流纹岩)和稀土元素配分图(c为粗面岩,d为流纹岩)(原始地幔和球粒陨石标准化引用Sun & McDonough,1989)  
 Fig.9 Spidergrams (a for trachyte, b for crystal welded rhyolitic tuff) and REE pattern (c for trachyte, d for crystal welded rhyolitic tuff) of volcanic rocks in the Baiyingaolao Formation from the Zamuting district (Sun & McDonough,1989)



图10 白音高老组第二段凝灰质细粒岩屑砂岩夹层中动植物化石照片

a—皱背角背叶肢介化石;b—大角背叶肢介化石;c—石籽化石

Fig.10 Animal and plant fossils within the Second Member tuffaceous fine-grained detrital sandstone of the Baiyingaolao Formation  
a—*Keratetheria rugosa* Chernyshev; b— *Keratetheria magna* Chernyshev; c— *Carpolithus* sp.

与第三段粗面岩相似(图9b),整体显示大离子亲石元素(LILE)Rb、Th、U、Pb的富集,并具有明显的高场强元素(HFSE)Nb、Ta、Ti、P和Sr、Ba亏损;基性相容元素Cr、Co、Ni均较低,Cr值为3.5~16.5  $\mu\text{g/g}$ ,平均值为7.5  $\mu\text{g/g}$ ;Co值为0.2~20.7  $\mu\text{g/g}$ ,平均值为2.42  $\mu\text{g/g}$ ;Ni值为0.3~16.5  $\mu\text{g/g}$ ,平均值为2.50  $\mu\text{g/g}$ 。

粗面岩稀土配分曲线呈左高右低(图9c),轻稀土部分陡倾,重稀土部分平缓,与地壳稀土元素配分模式近于一致。粗面岩稀土总量 $\Sigma\text{REE}$ 为126.71~186.60  $\mu\text{g/g}$ ,平均值为147.85  $\mu\text{g/g}$ ;LREE变化于 $97.42 \times 10^{-6}$ ~ $141.01 \times 10^{-6}$ ,平均值为 $113.29 \times 10^{-6}$ ;HREE变化于 $28.02 \times 10^{-6}$ ~ $45.59 \times 10^{-6}$ ,平均值为 $34.55 \times 10^{-6}$ ;LREE/HREE比值变化于2.78~4.01,平均为3.34,轻、重稀土明显分馏。 $\delta\text{Eu}$ 变化于0.72~1.00,均值为0.83,有弱的负异常; $\delta\text{Ce}$ 值变化于0.88~1.03,均值为0.95,基本无异常(表3)。流纹岩稀土配分曲线呈左高右低(图9d),轻稀土部分陡倾,重稀土部分平缓,Eu负异常明显,与地壳稀土元素配分模式近于一致。稀土总量 $\Sigma\text{REE}$ 为101.55~265.80  $\mu\text{g/g}$ ,平均值为178.10  $\mu\text{g/g}$ ;LREE变化于 $88.55 \times 10^{-6}$ ~ $202.78 \times 10^{-6}$ ,平均值为 $137.67 \times 10^{-6}$ ;HREE变化于 $19.28 \times 10^{-6}$ ~ $76.46 \times 10^{-6}$ ,平均值为 $40.43 \times 10^{-6}$ ;LREE/HREE比值变化于2.18~5.15,平均为3.70。 $\delta\text{Eu}$ 变化于0.25~0.75,均值为0.43,有明显的负异常; $\delta\text{Ce}$ 值变化于0.80~1.05,均值为0.98,基本无异常。

## 5 讨论

### 5.1 年代学意义

大兴安岭中段的扎木廷火山盆地白音高老组由于缺少精确的年代学资料,前人认为火山作用时

代为晚侏罗世。此次采集到流纹岩及粗面岩采用LA-ICP-MS锆石U-Pb同位素测年,分别为 $(131.6 \pm 1.2)$  Ma和 $(126.9 \pm 1.5)$  Ma,粗面岩稍晚于流纹岩形成,与野外产出的实际状态相吻合。此外,笔者还在扎木廷高吉高尔幅中部967高地北侧( $46^{\circ}04'58''\text{N}$ ,  $119^{\circ}54'23''\text{E}$ )白音高老组第二段凝灰质细粒岩屑砂岩夹层中采集到动植物化石,经中国科学院南京地质古生物研究所鉴定为皱背角背叶肢介*Keratetheria rugosa* Chernyshev(图10a)、大角背叶肢介*Keratetheria magna* Chernyshev(图10b),石籽(未定种)*Carpolithus* sp.(图10c)。与冀北早白垩世大北沟组以尼斯脱叶肢介(*Nestoria*)-角背叶肢介(*Keratetheria*)组合可以进行对比,本区所产的叶肢介层位应与之相当。同位素地质年龄与火山岩中的沉积夹层动植物化石鉴定结果一致,表明扎木廷地区白音高老组火山岩为早白垩世岩浆活动的产物。

近年来,大兴安岭火山岩带白音高老组火山岩进行过许多的年代学研究,如对大兴安岭中北段的满洲里地区、柴河地区、扎兰屯地区及呼伦湖东岸,以及大兴安岭中南段的赤峰地区、锡林浩特等地区的火山岩进行年代学及地球化学研究,取得锆石定年结果为123~144 Ma。大兴安岭南北两区,大致以北纬 $47^{\circ}20'$ 划分为南北两段(邵济安,1999),Wang et al.(2006)认为大兴安岭的白音高老组火山岩主要为白垩纪,且向东有时代变新的趋势。苟军(2010)将满洲里南部地区早白垩世酸性火山岩划分为两期:早白垩早期(141~139 Ma)和早白垩晚期(123~127 Ma),认为满洲里地区的白音高老组酸性火山岩应形成于140 Ma和125 Ma两个时期,并非一次形成,主体形成于140 Ma左右的早白垩早期。现有的数据表明:大兴安岭南段的年龄分布在

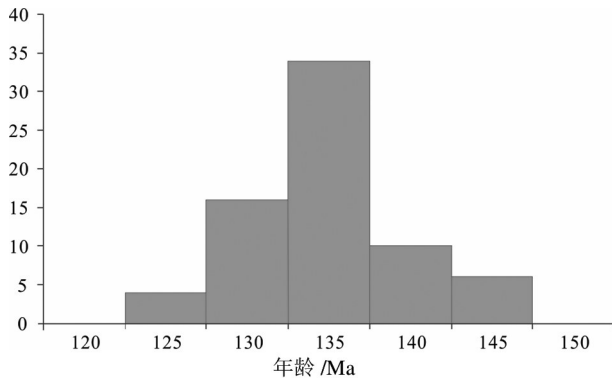


图11 大兴安岭地区白音高老组火山岩年龄分布直方图 (数据引用陈志广, 2006; Guo et al., 2009; Zhang et al., 2010; 苟军等, 2010; 杨扬等, 2012; Dong et al., 2014; 秦涛等, 2014; 聂立军等, 2015; 张乐彤等, 2015; 张学斌等, 2015; 司秋亮等, 2016; 黄明达等, 2016; 谭浩元等, 2017; 王阳等, 2017; 1:50 000 布敦陶勒盖、布尔丁花、花敖包特、沙尔哈达幅区域地质调查报告<sup>①</sup>; 1:50 000 乌力牙斯台、南斯纳根达巴、霍布仁布敦、查干敖包幅区域地质调查报告<sup>②</sup>; 1:50 000 扎木廷高吉高尔、军马场、军马场一队、综合服务站幅区域地质调查报告<sup>③</sup>; 内蒙古1:5万准和热木音苏木、塔拉拜农场、扎尔嘎郎特敖包、登金查干陶勒盖、乌兰呼都格、哈珠苏木幅区域地质矿产调查野外验收工作报告<sup>④</sup>)

Fig.11 Age histogram of volcanic rocks of the Baiyingaolao Formation in the Great Xing'an Range

(Data from Chen, 2006; Guo et al., 2009; Zhang et al., 2010; Gou et al., 2010; Yang Yang et al., 2012; Dong et al., 2014; Qin Tao et al., 2014; Nie Lijun et al., 2015; Zhang Letong et al., 2015; Zhang Xuebin et al., 2015; Si Qiuliang et al., 2016; Huang Mingda et al., 2016; Tan Haoyuan et al., 2017; Wang Yang et al., 2017; 1:50 000 regional geological survey report of Buton Tolgoi and adjacent region; 1:50 000 regional geological survey report of Uligastei and adjacent region; 1:50 000 regional geological survey report of Zamutin Gaojigaer and adjacent region; 1:50 000 regional geological and mineral survey report on field acceptance of Zhunheremuyin county and adjacent region)

123~139 Ma; 而大兴安岭北段则集中分布在 125~131 Ma 和 136~144 Ma 两个区间(图 11)。扎木廷火山盆地活动集中在 126~131 Ma, 表明大兴安岭中段白音高老组的主体火山活动时间可能比北段稍晚, 与南段的火山作用较一致。

扎木廷高吉高尔火山喷发盆地除广泛出露白音高老组火山岩外, 研究区及周边出露中生代火山地层, 从老到新主要有中侏罗统塔木兰沟组( $J_2tm$ )玄武安山岩为  $(167 \pm 0.5) Ma$ , 上侏罗统满克头鄂博组( $J_3m$ )、玛尼吐组( $J_3mn$ ), 下白垩统白音高老组( $K_1b$ )、梅勒图组( $K_1m$ )。本次 1:5 万区调在各组火山岩中均取得了一批锆石 U-Pb 年龄: 在中侏罗统塔木兰沟组( $J_2tm$ )玄武安山岩获锆石 U-Pb 年龄  $(167 \pm 0.5) Ma$ ; 上侏罗统满克头鄂博组( $J_3m$ )流纹岩中获

石 U-Pb 年龄有  $(148.1 \pm 1.7) Ma$ 、 $(153 \pm 2) Ma$ 、 $(155 \pm 0.4) Ma$ 、 $(159.8 \pm 1.1) Ma$ 、 $(161 \pm 2) Ma$ ; 在玛尼吐组( $J_3mn$ )下部安山岩中获锆石 U-Pb 年龄  $(144 \pm 1) Ma$ ; 上部粗安中获锆石 U-Pb 年龄  $(140.8 \pm 1.3) Ma$ 、 $(143.6 \pm 1) Ma$ ; 在梅勒图组( $K_1m$ )灰黑色玄武安山岩获锆石 U-Pb 同位素年龄  $(123.5 \pm 1.1) Ma$ 。依据接触关系和产出状态, 扎木廷高吉高尔火山喷发盆地火山作用总体上可以划分为 5 个时期, 对应的同位素年龄大致可分为 ~167 Ma、160~148 Ma、140~145 Ma、126~135 Ma、~123 Ma 等, 与区域上一些学者 (Zhang et al., 2010; 苟军等, 2010; Dong et al., 2014; 孟凡超等, 2014) 认为大兴安岭中生代火山岩作用期次及演化基本一致。但总体来看, 大兴安岭中生代火山岩带无论是北段、南段还是中段的火山作用时间并无非常明显的差异。结合区域资料(图 11), 作者认为白音高老组火山岩峰期喷发作用时间在 130 Ma 左右, 持续的时间范围在 125~140 Ma。

## 5.2 岩浆来源与成因

扎木廷高吉高尔火山喷发盆地白音高老组第二段流纹岩原始地幔标准化蛛网图(图 9b)显示了大离子亲石元素 Rb、Th、U、Pb 的富集, 高场强元素 Sr、Ba、Nb、Ta、Ti 和 P 的明显亏损, 表明岩浆物质来源于地壳。微量元素对比值对示踪岩浆物质来源具有重要意义, Rb/Sr 比值为 0.04~16.94, 平均值为 2.53, 显示壳源岩浆的特征 (Rb/Sr 大于 0.5) (Tishchendorf & Paelchen, 1985); Ti/Zr 比值为 4.28~43.66, 平均值为 10.28 ( $< 20$ ), 也具有壳源特征 (Pearce et al., 1983; Tishchendorf & Paelchen, 1985; Wilson, 1989)。Y 是在各类岩石中的丰度值较高, 而变化范围较小的高场强(HFS)元素, 因而可以利用 Nb/Y 比值来判明岩浆物质来源或受污染的程度; Nb/Y 比值为 0.22~1.13, 平均值为 0.53, 与下地壳比值较为接近(上地壳 0.57, 下地壳 0.5)。

白音高老组第三段粗面岩原始地幔标准化蛛网图(图 9a)显示大离子亲石元素(LILE)Rb、Th、U、Pb、Ba 的富集, 明显的高场强元素(HFSE)Nb、Ta、Ti 和 P 的亏损, Sr 负异常较明显, Rb/Sr 比值为 0.10~0.65, 平均值为 0.55, 明显大于原始地幔(0.03)Rb/Sr 值, 与壳源岩浆的比值(Rb/Sr 大于 0.5)较相符; Nb/Y 比值较低, 为 0.32~0.62, 平均值为 0.47, 与下地壳较接近。第二段与第三段组成的流纹岩-粗面岩组

合,在主要元素组成方面有明显的差异,但二者均属碱性岩系列,在微量元素与稀土元素组成方面完全相同或相似,微量元素和稀土元素特征显示火山岩岩浆应来源于地壳。

葛文春等(2000)根据岩石学和地球化学特征将大兴安岭的流纹岩分为两类流纹岩,高Sr流纹岩(I型)和低Sr流纹岩(II型),II型流纹岩以低Sr、Ba丰度和高 $w(\text{Rb})/w(\text{Sr})$ 比值为特征,并认为II型流纹岩为下地壳斜长角闪岩非理想熔融的结果。对比本区白音高老组流纹岩,发现其与II型流纹岩特征相近。部分学者开展了大兴安岭白音高老组流纹岩Sr-Nd或锆石Hf同位素研究(邵济安等,1998;

苟军等,2010; Dong et al., 2014; 张祥信等,2016; 王阳等,2017),认为其源区由玄武质下地壳部分熔融形成,或认为岩浆源区为下地壳,在演化过程中受到上地壳的同化混染作用。

扎木廷高吉高尔火山喷发盆地白音高老组第二段流纹岩具有高硅( $\text{SiO}_2 = 72.35\% \sim 81.81\%$ )、富碱( $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} = 5.97\% \sim 8.91\%$ )、低铝( $\text{Al}_2\text{O}_3 = 9.64\% \sim 14.95\%$ )、极低镁钙的特点( $\text{MgO} (0.05\% \sim 0.65\%)$ )、 $\text{CaO} (0.12\% \sim 0.44\%)$ );  $\text{FeO}^{\text{T}}/\text{MgO}$  比值平均值为7.25 ( $\text{FeO}^{\text{T}}/\text{MgO} = 3.55 \sim 20.74$ ),同时Ga/Al比值平均值为2.66 ( $10000 \times \text{Ga}/\text{Al} = 1.70 \sim 3.60$ ),大于2.60;  $\text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y}$  总量为143.5~425.85相对较高。同时,流纹岩

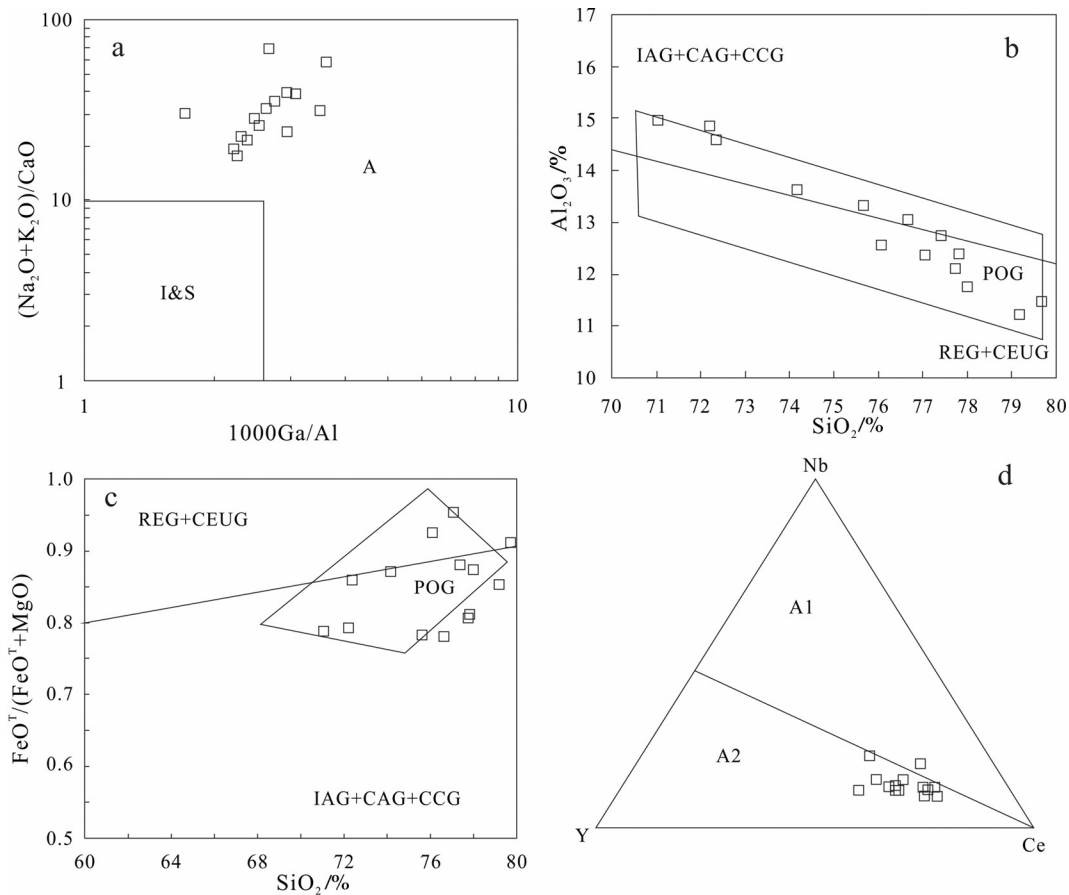


图12 扎木廷地区白音高老组流纹岩:a- $10000\text{Ga}/\text{Al}-(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})/\text{CaO}$ 图解(Whalen, 1987);b- $\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$ 图解(Eby,1992);c- $\text{SiO}_2-\text{FeO}^{\text{T}}/(\text{FeO}^{\text{T}}+\text{MgO})$ 判别图(Eby,1992)  
(IAG—岛弧花岗岩类;CAG—大陆弧花岗岩类;CCG—大陆碰撞花岗岩类;POG—后造山花岗岩类;RRG—与裂谷有关的花岗岩类;CEUG—与大陆的造陆抬升有关的花岗岩类);d-Nb-Y-Ce判别图(Eby,1992)(A1—非造山;A2—造山后)

Fig.12 Discriminant diagrams for tectonic settings of the Baiyingaolao Formation volcanic rocks from the Zamuting district (a)  $(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})/\text{CaO}$  vs.  $10000\text{Ga}/\text{Al}$  diagram (Whalen, 1987); (b)  $\text{SiO}_2$  vs.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  diagram (Eby,1992); (c)  $\text{SiO}_2$  vs.  $\text{FeO}^{\text{T}}/(\text{FeO}^{\text{T}}+\text{MgO})$  diagram (Eby, 1992); (d) Nb-Y-Ce diagram (Eby,1992).

(IAG— island arc granitoids; CAG— continental arc granitoids; CCG— continental collision granitoids; POG— post-orogenic granitoids; RRG— rift related granitoids; CEUG— granitoids related to continental orogeny; A1— Anorogenic; A2— Post-orogenic)

样品均具有较低的 Sr 和 Ba 含量及较高的 Rb/Sr 值。在  $10000 \times \text{Ga}/\text{Al} - (\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})/\text{CaO}$  图解(图 12a)中流纹岩全落入 A 型花岗岩区域。通常认为 A 型花岗岩形成伸展减压环境,其原因可能是由于地壳减薄导致的地幔上涌带来的热使下地壳发生了部分熔融。

综上所述,本区白音高老组第二段与第三段的流纹岩-粗面岩组合具有相同的岩浆来源,微量元素与稀土元素特征表明均来自于地壳的熔融。可能形成于地壳减薄导致的软流圈地幔上涌带来的热使下地壳发生了部分熔融,首先喷发出来的是流纹岩,熔融残留相在热作用下进一步熔融,导致较大规模粗面岩喷发。

### 5.3 构造意义

本区白音高老组火山岩在主量元素  $\text{SiO}_2 - \text{FeO}^{\text{T}}/(\text{FeO}^{\text{T}} + \text{MgO})$  图解及  $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$  图解上(图 12b、c、d),流纹岩大部分落入 POG-后造山花岗岩类及附近;在微量元素 Nb-Y-Ce 构造判别图解(图 12d)上,流纹岩大部分投影于 A2 区域,可能形成于造山期后的张性构造环境。大量的研究(邵济安等,1998;林强等,1998;葛文春等,2000,2001)表明,包括扎木廷在内的整个大兴安岭地区在早白垩世已处于伸展构造的背景下。本区流纹岩形成于造山期后的张性构造环境(A2),与大兴安岭中南段的红格尔地区(张祥信等,2016;本区的更南段)的流纹岩形成于张性构造环境(A2)相同。

大兴安岭中生代火山岩形成的构造环境一直存在争议。多数学者认为与古太平洋板块俯冲,或是与蒙古-鄂霍次克洋向南俯冲有关,亦有认为是地幔柱成因,或是软流圈上涌与岩石圈伸展的结果。笔者长期在中国东部浙闽地区从事中生代火山岩调查研究工作,相信绝大多数学者认为这一地区中生代大规模的岩浆作用与古太平洋板块向西或北西俯冲有关。大兴安岭地区与浙闽地区中生代火山岩尽管在火山作用的时间上一致,但从岩石组合特征上看,二者有明显的不同:浙闽地区火山岩组成以英安岩-流纹岩组合为主,成分相对单一(薛怀民等,1993;陶奎元等,1999);而大兴安岭地区除英安岩-流纹岩组合外,出现了大量玄武岩、安山岩、粗面岩及粗安岩等,岩石组成非常复杂,说明二者的作用机制或形成环境有极大的差异。另外,

部分学者质疑古太平洋与大兴安岭地区相距 1500 km,距离太远,古太平洋板块是否能俯冲到其下是问题的关键。笔者相信,大兴安岭中生代火山岩形成的构造环境与蒙古-鄂霍次克洋南向俯冲更有关联。部分学者(莫申国等,2005;孙德有等,2011;黄始琪等,2014)认为,在早侏罗世蒙古-鄂霍茨克海湾自西向东呈剪刀状关闭,并挤压碰撞造山,一直持续到中侏罗世,而最终闭合时间一直持续到晚侏罗世-白垩纪。蒙古-鄂霍茨克洋碰撞后伸展构造环境可能是大范围晚中生代火山岩形成的主要,构造环境由挤压到伸展。

扎木廷高吉高尔火山喷发盆地除广泛出露白音高老组火山岩外,研究区及周边出露中生代火山岩地层,从老到新主要有中侏罗统塔木兰沟组( $J_2tm$ ),上侏罗统满克头鄂博组( $J_3m$ )、玛尼吐组( $J_3mn$ ),下白垩统白音高老组( $K_1b$ )、梅勒图组( $K_1m$ ),火山作用可能较好地反映了蒙古鄂霍茨克洋向南俯冲至额尔古纳-兴安陆块之下造山作用旋回。中侏罗世是火山活动的初始时期,火山活动较弱,以宁静式喷溢为主,形成一套深灰、灰色玄武岩-玄武安山岩-安山岩的钙碱性火山岩组合,该套火山岩组合反映了活动陆缘的特征或陆缘弧的环境,代表蒙古鄂霍茨克洋开始向南俯冲至额尔古纳-兴安陆块之下;晚侏罗世满克头鄂博期是本区火山活动的最强盛时期,火山活动波及全区,火山喷发强烈而频繁,规模宏大,形成的火山岩属高钾钙碱性系列英安质-流纹质岩石组合,形成于碰撞造山的挤压环境,造山期地壳加厚,中上地壳的熔融而发生大规模的酸性岩浆作用;晚侏罗世玛尼吐期以钙碱性系列安山岩或安山质碎凝屑岩为主,岩石地球化学表明,它们源于被俯冲流体交代富集的岩石圈地幔,代表了俯冲洋壳脱水熔融产物,表明西伯利亚板块与额尔古纳陆块-兴安陆块碰撞拼合,蒙古鄂霍茨克洋完成闭合。白音高老组经历了一个酸性-偏碱性岩浆演化系列,是造山后垮塌、加厚的地壳折沉、岩石圈伸展,软流圈上涌及玄武岩的底侵作用导致地壳物质加热熔融作用的产物。早白垩世中期梅勒图期以较大规模的中基性岩浆宁静式的喷溢,形成单一的玄武岩-安山玄武质岩石组合,表明岩石圈进一步强烈伸展,上涌的玄武质岩浆沿断裂呈北东向较大规模的喷溢。



白音高老组火山岩峰期作用时间在约 130 Ma, 持续的时间范围在 125~140 Ma, 可能反映了蒙古鄂霍茨克洋向南俯冲与额尔古纳—兴安陆块碰撞拼合后, 大兴安岭地区由挤压向伸展构造环境转换。

## 6 结 论

(1) 对扎木廷高吉高尔火山盆地白音高老组为流纹岩—粗面岩组合, 分别进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年结果为  $(131.6 \pm 1.2)$  Ma 和  $(126.9 \pm 1.5)$  Ma, 二者形成时代相近, 与第二段火山沉积夹层中动植物化石鉴定结果一致, 表明形成于早白垩世中期。

(2) 白音高老组火山岩为碱性系列, 相对富集大离子亲石元素 Rb、Th、U、Pb, 强烈亏损高场强元素 Nb、Ta、Ti、P 和 Ba、Sr, 流纹岩具 A 型花岗岩的特征。微量元素与稀土元素表明二者均来自于地壳的熔融, 可能形成于地壳减薄软流圈地幔上涌底侵下地壳发生部分熔融, 首先喷发出来的是流纹岩, 熔融残留相进一步熔融继而导致粗面岩大规模喷发。

(3) 白音高老组火山岩形成于造山后的张性构造环境, 与蒙古—鄂霍茨克洋闭合碰撞有关。反映了蒙古鄂霍茨克洋向南俯冲与额尔古纳—兴安陆块碰撞拼合后, 大兴安岭地区开始由挤压向伸展构造环境转换。

**致谢:** 本文是内蒙古 1:50000 扎木廷高吉高尔等 4 幅区调项目组集体劳动的成果。两位匿名评审专家提出了建设性修改意见, 陈润生教授高级工程师和赵希林副研究员给予了具体指导, 林敏高级工程师, 杨仲工程师及汤建荣工程师给予的帮助, 在此一并表示感谢!

## 注释

① 内蒙古区域地质测量队. 1976. 1:20 万贺斯格乌拉幅区调报告[R].

② 内蒙古区域地质测量队. 1977. 1:20 万哈拉盖图幅区调报告[R].

③ 内蒙古自治区地质调查院. 2012. 1:25 万宝格达山林场幅区域地质调查报告[R].

④ 中国地质大学(北京). 2013. 1:25 万索伦幅区调报告[R].

⑤ 内蒙古自治区地质调查院. 2012. 1:250 000 宝格达山林场幅区域地质调查报告[R].

⑥ 内蒙古自治区地质调查院. 2012. 1:50 000 郭饶境特乌拉、巴尔陶勒盖、索金达坂、乌苏伊和牧场幅区域地质调查报告[R].

⑦ 福建省地质调查研究院. 2013. 1:50 000 布敦陶勒盖、布尔

丁花、花敖包特、沙尔哈达幅区域地质调查报告[R].

⑧ 福建省地质调查研究院. 2015. 1:50 000 乌力牙斯台、南新纳根达巴、霍布仁布敦、查干敖包幅区域地质调查报告[R].

⑨ 福建省地质调查研究院. 2016. 1:50 000 扎木廷高吉高尔、军马场、军马场一队、综合服务站幅区域地质调查报告[R].

⑩ 石家庄经济学院地质调查研究院. 2014. 内蒙古 1:5 万准和热木音苏木、塔拉拜农场、扎尔嘎郎特敖包、登金查干陶勒盖、乌兰呼都格、哈珠苏木幅区域地质矿产调查野外验收工作报告[R].

## References

- Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report  $^{204}\text{Pb}$  [J]. *Chemical Geology*, 192(1):59-79.
- Chen Z G, Zhang L C, Zhou X H, Wan B, Ying J F, Wang F. 2006. Geochronology and geochemical characteristics of Mesozoic volcanic rocks section in Manzhouli Xinyouqi, Inner-Mongolia[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(12):2971-2986(in Chinese with English abstract).
- Dong Y, Ge W C, Yang H, Zhao G C, Wang Q H, Zhang Y L, Su L. 2014. Geochronology and geochemistry of Early Cretaceous volcanic rocks from the Baiyingaolao Formation in the central Great Xing'an Range, NE China, and its tectonic implications[J]. *Lithos*, 205: 168-184.
- Eby G N. 1990. The A-type granitoids: A review of their occurrence and chemical characteristics and speculations on their petrogenesis[J]. *Lithos*, 26:115-134.
- Eby G N. 1992. Chemical subdivision of the A-type granitoids: Petrogenetic and tectonic implications[J]. *Geology*, 20:641-644.
- Fan W M, Guo F, Wang Y J, Lin G. 2003. Late Mesozoic calc alkaline volcanism of post orogenic extension in the northern Da Hinggan mountains, northeastern China[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 121:115-135.
- Ge Wenchun, Lin Qiang, Sun Deyou, Wu Fuyuan, Li Xianhua. 2000. Geochemical research into origins of two types of Mesozoic rhyolites in Daxinganling[J]. *Earth Science*. 25(2) : 172-178 (in Chinese with English abstract).
- Ge WenChun, Li Xianhua, Lin Qiang, Sun Deyou, Wu Fuyuan, Yun Sunghyo. 2001. Geochemistry of Early cretaceous alkaline rhyolites from Hulun Lake, Daxinganling and its tectonic implications[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 36(2): 176-183(in Chinese with English abstract).
- Guo Feng, Fan Weiming, Li Chaowen, Gao Xiaofen, Miao Laicheng. 2009. Early Cretaceous highly positive  $\epsilon_{\text{Nd}}$  felsic volcanic rocks from the Hinggan Mountains, NE China: Origin and implications for Phanerozoic crustal growth[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 98: 1395-1411.
- Guo Feng, Fan Weiming, Wang Yuejun, Lin Ge. 2001. Petrogenesis of the late Mesozoic bimodal volcanic rocks in the southern Da Hinggan Mts., China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 17(1):161-168(in Chinese with English abstract).

- Gou J, Sun D Y, Zhao Z H, Ren Y S, Zhang X Y, Fu C L, Wang X, Wei H Y. 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).
- Hidreth W, Halliday A N, Christiansen R L. 1991. Isotopic and chemical evidence concerning the genesis and contamination of basaltic and rhyolitic magmas beneath the Yellowstone Plateau Volcanic Field[J]. *Journal of Petrology*, 32: 63-138.
- Huang Mingda, Cui Xiaozhuang, Pei Shengliang, Zhang Hengli, Zhang Jiangqiang. 2016. Rhyolite zircon U-Pb dating and tectonic significance in Bayan Gol Formation, Hinggan massif[J]. *Coal Geology of China*, 28(11):30-37(in Chinese with English abstract).
- Huang Shiqi, Dong Shuwen, Zhang Fuqin, Miao Laicheng, Zhu Mingshui. 2014. Tectonic deformation and dynamic characteristics of the middle part of the Mongolia-Okhotsk collisional belt, Mongolia[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 35(4):415-424(in Chinese with English abstract).
- Jackson S E, Pearson N J, Griffin W L, Belousova E A. 2004. The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry (LA-ICP-MS) to in situ U-Pb zircon geochronology[J]. *Chemical Geology*, 211(1/2):47-69.
- Jahn B M, Wu F Y, Capdevila R, Martineau F, Zhao Z H, Wang Y X. 2001. Highly evolved juvenile granites with tetrad REE patterns: The Woduhe and Baerzhe granites from the Great Xing'an Mountains in NE China[J]. *Lithos*, 59(4):171-198.
- Le Maitre R W. 1989. *A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms*[M]. Blackwell, Oxford, 193.
- Li Peizhong, Yu Jinsheng. 1993. Nianzishan miarolitic alkaline granite stock, Heilongjiang—its ages and geological implications[J]. *Geochimica*, 4: 389-398 (in Chinese with English abstract).
- Lin Qiang, Ge Wenchun, Sun Deyou, Wu Fuyuan, Chong Kwanwon, Kyuan Duckmin, Myuan Shijin, Moon wonlee, Chi Soonkwon, Sun Hyoyun. 1998. Tectonic significance of Mesozoic volcanic rocks in northeastern China[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 33(3): 129-139(in Chinese with English abstract).
- Liu X M, Gao S, Diwu C R, Yuan H L, Hu Z C. 2007. Simultaneous in-situ determination of U-Pb age and trace elements in zircon by LA-ICP-MS in 20  $\mu\text{m}$  spot size[J]. *Chinese Science Bulletin*, 52: 1257-1264.
- Liu W, Siebel W, Li X J, Pan X F. 2005. Petrogenesis of the Linxi granitoids, northern Inner Mongolia of China: Constraints on basaltic underplating[J]. *Chemical Geology*, 219:5-35.
- Ludwig K R. 2011. *Users Manual for Isoplot/EX (Rev. 2.49): A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel*[M]. Berkeley: Geochronology Center Special Publication, 1-55.
- Meng Fanchao, Liu Jiaqi, Cui Yan, Gao Jinliang, Liu Xiang, Tong Yin. 2014. Mesozoic tectonic regimes transition in the Northeast China: Constraints from temporal-spatial distribution and associations of volcanic rocks[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(12): 3569-3586(in Chinese with English abstract).
- Mo Shengguo, Han Meilian, Li Jinyi. 2005. Compositions and orogenic processes of Mongolia-Okhotsk orogen[J]. *Journal of Shangdong University of Science and Technology (Natural Science)*, 24(3):50-64(in Chinese with English abstract).
- Nie Lijun, Jia Haiming, Wang Cong, Lu Xingbo. 2015. Chronology, geochemistry of rhyolites from Baiyingaolao Formation in the middle part of Da Hinggan Mountains and its tectonic implications[J]. *Global Geology*, 34(2): 296-304(in Chinese with English abstract).
- Qin Tao, Zheng Changqing, Cui Tianri, Li Linchuan, Qian Cheng, Cheng Huijun. 2014. Volcanic rocks of the Baiyingaolao Formation in the southwest of Zhalantun, Inner Mongolia[J]. *Geology and Resource*, 23(2):146-153(in Chinese with English abstract).
- Shao Jian, Han Qingjun, Zhang Lvqiao, Mu Baolei, Qiao Guangsheng. 1999. Mu Baolei and Qiao Guangsheng. Two kinds of vertical accretion of the continental crust: an example of the Da Hinggan Mts[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 15(4): 600-606(in Chinese with English abstract).
- Shao Ji'an, Zhang Lūqiao, Mou Baolei. 1998. Tectono-thermal evolution of the central and southern Da Hinggan Mountains[J]. *Science in China*, 28(3): 193-200(in Chinese with English abstract).
- Si Qiuliang, Cui Tianri, Wang Ende, Ding Shu. 2015. Chronology, geochemistry and petrogenesis of the volcanic rocks in Manitou Formation in Chaihe area, Central Great Xing'an Range[J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 45(2): 389-403(in Chinese with English abstract).
- Sun Deyou, Gou Jun, Ren Yunsheng, Fu Changliang, Wang Xi, Liu Xiaomin. 2011. Zircon U-Pb dating and study on geochemistry of volcanic rocks in Manitou Formation from southern Manchuria, Inner Mongolia[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(10): 3083-3094(in Chinese with English abstract).
- Tan Haoyuan, He Zhonghua, Chen Fei, Du Yuedan, Ren Zihui. 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).
- Tao Kuiyuan, Mao Jianren, Xing Guangfu, Yang Zhuliang, Zhao Yu. 1999. Strong Yanshanian volcanic-magmatic explosion in East China[J]. *Mineral Deposits*, 18(4):316-321(in Chinese with English abstract).
- Wang F, Zhou X H, Zhang L C, Zhang L C, Ying J F, Zhang Y T, Wu F Y, Zhu R X. 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 Letter*, 251:179-198.

- Wang Xiong, Chen Yuejun, Li Yong, LiSenlin, Wang Changbing, Liu Yongjun, Zhu Huailiang, Wu Guoxue. 2015. Geochemical characteristics and geological implication of volcanic rocks in Early Cretaceous Baiyingaolao Formation from Taerqi area' middle-north part of Da Hinggan mountains[J]. *Global Geology*, 34(1): 25-33 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yang, Xu Zhongyuan, Liu Zhenghong, Li Shichao, Wang Shijie, Du Yang. 2017. Formation mechanism of Baiyingaolao volcanic rocks in Wenbuqi area of Da Hinggan mountains[J]. *Global Geology*, 36(2):1-11(in Chinese with English abstract).
- Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. 1987. A- type granites geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. *Contribution to Mineralogy Petrology*, 95:407-419.
- Wright J B. 1969. A simple alkalinity ratio and its application to questions of non-orogenic granite gneiss[J]. *Geological Magazine*, 106(4):370-384.
- Wu Fuyuan, Caolin. 1999. Some important problems of geology in Northeastern Aisa[J]. *Global Geology*, 18(2): 1-13(in Chinese with English abstract).
- Wu Yuanbao, Zheng Yongfei. 2004. Zircon genetic mineralogy and constraint on its U-Pb age[J]. *Chinese Science Bulletin*, 49(16): 1589-1604 (in Chinese).
- Xue Huaimin, Tao Kuiyuan, Xie Jiayin. 1993. Approach to parent magma qualities and differentiation for Mesozoic volcanic rocks in Zhejiang and Fujian Provinces[J]. *Volcanology & Mineral Resources*, 10(1):1-8(in Chinese with English abstract).
- Yang Yang, Gao Fuhong, Chen Jingsheng, Zhou Yi, Zhang Jian, Jin Xin, Zhang Yanlong. 2012. Zircon U-Pb ages of Mesozoic volcanic rocks in Chifeng Area[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 42(Supp.2): 258-267(in Chinese with English abstract).
- Zhang J H, Ge W C, Wu F Y, Wilde S A, Yang J H, Liu X M. 2008. Large-scale Early Cretaceous volcanic events in the northern Great Xing'an Range, Northeastern China[J]. *Lithos*, 102: 138-157.
- Zhang J H, Gao S, Ge W C, Wu F Y, Yang J H, Wilde S A, Li M. 2010. Geochronology of the Mesozoic volcanic rocks in the Great Xing'an Range, northeastern China: Implications for subduction-induced delamination[J]. *Chemical Geology*, 276: 144-165.
- Zhang Letong, Li Shichao, Zhao Qingying, Li Xuefei, Wang Lu, Li Zihao. 2015. Formation age and geochemical characteristics of volcanic rocks from Baiyingaolao Formation of middle Da Hinggan mountain[J]. *Global Geology*, 34(1):44-54(in Chinese with English abstract).
- Zhang Lianchang, Chen Zhiguang, Zhou Xinhua, Ying Jifeng, Wang Fei, Zhang Yutao. 2007. Characteristics of deep sources and tectonic-magmatic evolution of the Early Cretaceous volcanic in Genhe area, Da-Hinggan Mountains: Constraints of Sr-Nd-Pb-Hf isotopic geochemistries[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(11): 2823-2835(in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Ranghao, Li Chengdong. 2012. A-type granite: What is the essence? [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 34(4): 621-626(in Chinese).
- Zhang Xiangxin, Gao Yongfeng, Lei Shihe. 2016. Geochemistry and petrogenesis of the rhyolites from the Baiyingaolao Formation in the Hongeer area' central Inner Mongolia[J]. *Geoscience*, 36(5): 950-960(in Chinese with English abstract).
- Zhang Xuebin, Zhou Changhong, Lai Lin, Xu Cui, Tian Ying, Chen Lizhen, Wei Min. 2015. Geochemistry and zircon U-Pb dating of volcanic rocks in Eastern Xilin Hot' Inner Mongolia and their geological implications[J]. *Geology and Exploration*, 51(2):209-302 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yaming, Du Yuchun, Cui Tianri, Li Linchuang, Qin Tao. 2014. Baiyingaolao group volcanic rock characteristics and genesis in Zhalantun region[J]. *Metal Mine*, 456(6): 101-104(in Chinese with English abstract).
- Zhao Lei, Gao Fuhong, Zhang Yanlong, Xu Huaimin, Zhang Liyuan. 2013. Zircon U-Pb chronology and its geological implications of Mesozoic volcanic rocks from the Hailaer basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(3): 864-874(in Chinese with English abstract).
- Zori Y A. 1999. Geodynamics of the western part of the Mongolia-Okhotsk collisional belt, Trans-Baikal region (Russia) and Mongolia[J]. *Tectonophysics*, 306:33-56.

## 附中文参考文献

- 陈志广, 张连昌, 周新华, 万博, 英基丰, 王非. 2006. 满洲里新右旗火山岩剖面年代学和地球化学特征[J]. *岩石学报*, 22(12):2971-2986.
- 葛文春, 李献华, 林强, 孙德有, 吴福元, 尹成孝. 2001. 呼伦湖早白垩世碱性流纹岩的地球化学特征及其意义[J]. *地质科学*, 36(2):176-183.
- 葛文春, 林强, 孙德有, 吴福元, 李献华. 2000. 大兴安岭中生代两类流纹岩成因的地球化学特征研究[J]. *地球科学*, 25(2):172-478.
- 郭锋, 范蔚茗, 王岳军, 林舸. 2001. 大兴安岭南段晚中生代双峰式火山作用[J]. *岩石学报*, 17(1):161-168.
- 苟军, 孙德有, 赵忠华, 任云生, 张学元, 付长亮, 王晰, 魏红艳. 2010. 满洲里南部白音高老组的形成时代与岩石成因[J]. *岩石学报*, 26(1): 333-344.
- 黄明达, 崔晓庄, 裴圣良, 张恒利, 张建强. 2016. 兴安地块白音高老组流纹岩锆石U-Pb年龄及其构造意义[J]. *中国煤炭地质*, 28(11):30-37.
- 黄始琪, 董树文, 张福勤, 苗来成, 朱明帅. 2014. 蒙古-鄂霍茨克构造带中段构造变形及动力学特征[J]. *地球学报*, 35(4):415-424.
- 李培忠, 于津生. 1993. 黑龙江碾子山晶洞碱性花岗岩岩体年龄及其意义[J]. *地球化学*, 4: 389-398.
- 林强, 葛文春, 孙德有, 吴福元, 元钟宽, 闵庚德, 陈明植, 李文远, 权致纯, 尹成孝. 1998. 中国东北地区中生代火山岩大地构造意义[J]. *地质科学*, 33(3):129-139.

- 孟凡超, 刘嘉麒, 崔岩, 高金亮, 刘祥, 童英. 2014. 中国东北地区中生代构造体制的转变: 来自火山岩时空分布与岩石组合的制约[J]. 岩石学报, 30(12):3569-3586.
- 莫申国, 韩美莲, 李锦轶. 2005. 蒙古-鄂霍茨克造山带的组成及造山过程[J]. 山东科技大学学报: 自然科学版, 24(3):50-64.
- 聂立军, 贾海明, 王聪, 卢兴波. 2015. 大兴安岭中段白音高老组流纹岩年代学、地球化学及其地质意义[J]. 世界地质, 34(2): 296-304.
- 秦涛, 郑常青, 崔天日, 李林川, 钱程, 陈会军. 2014. 内蒙古扎兰屯地区白音高老组火山岩地球化学、年代学及其地质意义[J]. 地质与资源, 23(2):146-153.
- 邵济安, 张履桥, 牟保磊. 1998. 大兴安岭中南段中生代的构造热演化[J]. 中国科学(D辑), 28(3): 193-200.
- 邵济安, 韩庆军, 张履桥, 牟保磊, 乔广生. 1999. 陆壳垂向增生的两种方式: 以大兴安岭为例[J]. 岩石学报, 15(4): 600-606.
- 司秋亮, 崔天日, 王恩德, 丁姝. 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, 苟军, 任云生, 付长亮, 王晰, 柳小明. 2011. 满洲里南部玛尼吐组火山岩锆石U-Pb年龄与地球化学研究[J]. 岩石学报, 27(10): 3083-3094.
- 谭皓元, 和钟铎, 陈飞, 杜岳丹, 任子慧. 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.
- 陶奎元, 毛建仁, 邢光福, 杨祝良, 赵宇. 1999. 中国东部燕山期火山-岩浆大爆发[J]. 矿床地质, 18(4):316-321.
- 王阳, 徐仲元, 刘正宏, 李世超, 王师捷, 杜洋. 2017. 大兴安岭温布其地区白音高老组火山岩的形成机制[J]. 世界地质, 36(2):1-11.
- 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[J]. 科学通报, 49(16): 1589-1604.
- 王雄, 陈跃军, 李勇, 李森林, 王长兵, 刘永俊, 朱怀亮, 吴国学. 2015. 大兴安岭中北段塔尔气地区早白垩世白音高老组火山岩地球化学特征及意义[J]. 世界地质, 34(1): 25-33.
- 吴福元, 曹林. 1999. 东北亚地区的若干重要基础地质问题[J]. 世界地质, 18(2): 1-13.
- 薛怀民, 陶奎元, 谢家莹. 1993. 浙闽中生代火山岩母岩浆性质及其分异机制探讨[J]. 火山地质与矿产, 10(1):1-8.
- 杨扬, 高福红, 陈井胜, 周漪, 张健, 金鑫, 张彦龙. 2012. 赤峰地区中生代火山岩锆石U-Pb年代学证据[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 42(增刊2):257-268.
- 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, 34(4): 621-626.
- 张乐彤, 李世超, 赵庆英, 李雪菲, 王璐, 李子昊. 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.
- 张连昌, 陈志广, 周新华, 英基丰, 王非, 张玉涛. 2007. 大兴安岭根河地区早白垩世火山岩深部源区与构造-岩浆演化: Sr-Nd-Pb-Hf同位素地球化学制约[J]. 岩石学报, 23(11): 2823-2835.
- 张祥信, 高永丰, 雷世和. 2016. 内蒙古中部红格尔地区白音高老组流纹岩地球化学特征及成因[J]. 现代地质, 36(5): 950-960.
- 张学斌, 周长红, 来林, 徐翠, 田颖, 陈丽贞, 魏民. 2015. 锡林浩特东部早白垩世白音高老组岩石地球化学特征、LA-MC-ICP-MS锆石U-Pb年龄及地质意义[J]. 地质与勘探, 51(2):209-302.
- 张亚明, 杜玉春, 崔天日, 李林川, 秦涛. 2014. 扎兰屯地区白音高老组火山岩特征及成因[J]. 金属矿山, 456(6): 101-104.
- 赵磊, 高福红, 张彦龙, 徐怀民, 张丽媛. 2013. 海拉尔盆地中生代火山岩锆石U-Pb年代学及其地质意义[J]. 岩石学报, 29(3): 864-874.