

doi: 10.12029/gc20220217

何鹏, 郭硕, 张天福, 张跃龙, 苏航, 付启龙. 2022. 大兴安岭南部乌拉盖地区满克头鄂博组火山岩年代学、地球化学研究及构造环境分析[J]. 中国地质, 49(2): 601-619.

He Peng, Guo Shuo, Zhang Tianfu, Zhang Yuelong, Su Hang, Fu Qilong. 2022. Geochronology, geochemistry and tectonic setting of volcanic rocks from Manketouebo Formation in Wulagai area, southern Da Hinggan Mountains[J]. Geology in China, 49(2): 601-619(in Chinese with English abstract).

大兴安岭南部乌拉盖地区满克头鄂博组火山岩年代学、地球化学研究及构造环境分析

何鹏^{1,2}, 郭硕^{1,2}, 张天福^{1,2}, 张跃龙³, 苏航³, 付启龙⁴

(1. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170; 2. 华北地质科技创新中心, 天津 300170; 3. 黑龙江省地质调查研究院, 黑龙江哈尔滨 150036; 4. 内蒙古自治区地质调查院, 内蒙古呼和浩特 010020)

摘要:【研究目的】通过查明大兴安岭乌拉盖地区火山岩的年龄、地球化学特征, 探讨火山岩形成的时代、成因及构造背景, 为研究大兴安岭南部地区的岩浆活动和构造演化过程提供依据。【研究方法】选取大兴安岭乌拉盖地区满克头鄂博组火山岩, 系统开展 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学和岩石地球化学研究。【研究结果】研究区满克头鄂博组火山岩形成于中一晚侏罗世((154.8±1.2)~(164.96±0.71)Ma), 火山岩具有高硅、富碱、富钾、贫镁、贫钙的特征, 属于高钾钙碱性系列岩石。所有样品的稀土配分曲线具有相似特征, 稀土总量中等, 轻重稀土分馏明显, 属轻稀土富集型, Eu 负异常显著。微量元素特征表现为富集大离子亲石元素(LILE)Rb、K、Th、U, 亏损高场强元素(HFSE)Nb、Ta、Ti、P, 岩石具有低 Sr 和较高的 Yb 含量, 表现出与 A 型花岗岩相似的地球化学特征。【结论】结合区域地质资料及本文研究成果, 认为研究区满克头鄂博组火山岩岩浆来源于地壳岩石的部分熔融, 产生于造山后伸展构造背景, 其形成可能与蒙古-鄂霍茨克洋闭合后的岩石圈伸展作用有关。

关键词: 锆石 U-Pb 年代学; 地球化学; 构造背景; 满克头鄂博组; 乌拉盖; 大兴安岭南部; 地质调查工程

创新点: 研究区满克头鄂博组火山岩形成于中一晚侏罗世, 属于高钾钙碱性系列岩石, 具有 A 型花岗岩地球化学特征, 形成于蒙古-鄂霍茨克洋闭合导致的伸展构造环境。

中图分类号: P581; P597 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2022)02-0601-19

Geochronology, geochemistry and tectonic setting of volcanic rocks from Manketouebo Formation in Wulagai area, southern Da Hinggan Mountains

HE Peng^{1,2}, GUO Shuo^{1,2}, ZHANG Tianfu^{1,2}, ZHANG Yuelong³, SU Hang³, FU Qilong⁴

(1. China Geological Survey Tianjin Geological Survey Center, Tianjin 300170, China; 2. North China Center for Geoscience Innovation, Tianjin 300170, China; 3. Heilongjiang Institute of Geological Survey, Haerbin 150036, Heilongjiang, China; 4. Institute of Geological Survey of Inner Mongolia Autonomous Region, Huhhot 010020, Inner Mongolia, China)

Abstract: This paper is the result of geological survey engineering.

收稿日期: 2019-06-06; 改回日期: 2019-09-26

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20190038, DD20221668)资助。

作者简介: 何鹏, 男, 1987 年生, 高级工程师, 从事区域地质矿产调查研究工作; E-mail: hepeng198761@163.com。

[Objective]: By finding out the age and geochemical characteristics of volcanic rocks in Wulagai area of Da Hinggan Mountains, this paper discusses the age, genesis and tectonic background of volcanic rocks, so as to provide a basis for the study of magmatic activity and tectonic evolution in the south of Da Hinggan Mountains. **[Methods]** Our project carried out systematically study the LA-MC-ICP-MS zircon U-Pb chronology and rock geochemistry from the volcanic rocks of Manketouebo Formation in Wulagai area of Da Hinggan Mountains. **[Results]** The volcanic rocks of Manketouebo Formation in the study area were formed in the middle Late Jurassic ((154.8±1.2)-(164.96±0.71)Ma). The volcanic rocks of this region belong to alkali series rocks, with characteristics of high silicon, rich in alkali and potassium, low magnesium and calcium. The rare earth distribution curves of all samples have similar characteristics. The total amount of rare earth is medium, the fractionation of light and light rare earth is obvious, which belongs to light rare earth enrichment type, and the negative Eu anomaly is significant. The rocks are relatively enriched in the large ion lithophile elements Rb, K, Th and U, and have a strong deficit in the high-field strong elements such as Nb, Ta, Ti, P; the volcanic rocks have the characteristics of low Sr, high Yb and A-type granite. **[Conclusions]** The studies on trace elements and rare earth elements indicate that the volcanic magma are derived from the melting of the crust and have the same magmatic source. The volcanic rocks of Manketouebo Formation originated in the post orogenic extensional tectonic background, which was possibly related to the lithosphere extension after the closure of the Mongol-Okhotsk Ocean.

Key words: zircon U-Pb chronology; geochemistry; tectonic background; Manketouebo Formation; Wulagai; southern Da Hinggan Mountains; geological survey engineering

Highlights: The volcanic rocks of Manketouebo Formation were formed in the Middle Late Jurassic. The rocks belong to the high-k calc alkaline series with A-type granite geochemical characteristics. They were formed in the extensional tectonic environment caused by the closure of the Mongol-Okhotsk Ocean.

About the first author: HE Peng, male, born in 1987, senior engineer, engaged in regional geology and mineral resources; E-mail: hepeng198761@163.com.

Fund support: Supported by the project of China Geological Survey (No. DD20190038, No. DD20221668).

1 引 言

大兴安岭火山岩带是中国东部中生代巨型火山岩带的重要组成部分,呈北北东向展布于西伯利亚板块和华北板块及其缝合带之上。古生代末期至中生代地质演化历程中,大兴安岭地区先后经历了碰撞造山过程、碰撞后伸展作用过程及其间的构造大转换阶段(Jahn et al., 2000; Meng, 2003; Xiao et al., 2003),中生代发生剧烈的火山活动,形成规模宏大的火山岩带。关于中生代火山岩的形成时代、岩石成因、地球动力学背景一直是地学研究的热点问题之一,至今仍然存在争论。近些年众多专家学者对大兴安岭地区火山岩开展了大量同位素年代学研究,获得火山岩年龄分布在170~150 Ma以及140~125 Ma两个时间段(陈志广等, 2006; Wang et al., 2006a; 张连昌等, 2007; 张玉涛等, 2007; 苟军等, 2010; 孙德有等, 2011; 程银行等, 2013, 2014; 武跃勇等, 2016; 仲米山等, 2017),但研究区域主要集中在大兴安岭北部,对于大兴安岭南部火山岩,尤其其中一晚侏罗世火山岩的形成时代研究报道较少,

缺少可靠的年代学地质证据。大兴安岭地区处于古生代古亚洲构造域与中生代环太平洋构造域以及蒙古-鄂霍茨克构造域的强烈叠加区域(许文良等, 2009; 曾庆栋等, 2011; 孟恩等, 2011; 吴福元等, 2011; Ma et al., 2022),中生代火山岩构造演化背景复杂,早白垩世处于伸展构造环境已被认可(林强等, 2003; 高晓峰等, 2005; 吴福元等, 2005; Zhang et al., 2008; 孟恩等, 2011),但对于中一晚侏罗世构造环境还存在不同认识,主要观点包括挤压构造背景(赵书跃等, 2004; 刘俊杰等, 2006)以及造山后伸展背景(陈志广等, 2006; 孟恩等, 2011; 程银行等, 2013, 2014; 李鹏川等, 2016)。近些年大兴安岭南白垩纪火山岩的研究程度越来越高(张乐彤等, 2015; 张学斌等, 2015; 司秋亮等, 2016; 谭皓元等, 2017),但对中一晚侏罗世火山岩的年代学、构造环境等方面仍然关注较少。内蒙古乌拉盖地区处于大兴安岭火山岩带南部区域,其所处构造位置、岩石学组合特征具有代表性及可对比性,因此,本文选取乌拉盖地区满克头鄂博组火山岩开展系统的岩石学、年代学和地球化学研究,以期约束火山岩

的形成时代、成因及构造环境,为深入认识大兴安岭南部地区侏罗世火山岩浆活动规律及其形成构造背景提供科学依据。

2 区域地质背景

研究区位于中亚造山带的东部(Jahn et al., 2000),西伯利亚板块和华北板块的结合部位,在大地构造位置上处于兴蒙造山带东段,二连—贺根山断裂以北,喜桂图—塔源断裂以南(图1)。该区经历了古亚洲洋构造体系的演化与多个微陆块的拼合(Sengör et al., 1993),而在中、新生代又经历了蒙古—鄂霍茨克构造体系与环太平洋构造体系的叠加与改造(许文良等, 2009; 吴福元等, 2011; 孟恩等, 2011; 徐美君等, 2011),使得研究区内构造岩浆活动强烈,中生代火山岩呈北东向大规模展布。中—晚侏罗世—早白垩世为研究区火山活动的鼎盛时期,广泛发育以酸(中)性岩石组合为主的陆相火山岩,由老到新可以划分为晚侏罗世满克头鄂博

组、玛尼吐组,早白垩世白音高老组和梅勒图组。满克头鄂博组火山岩以流纹岩和流纹质火山碎屑岩为主,玛尼吐组火山岩以安山岩、英安岩为主,白音高老组火山岩主要为流纹岩和流纹质凝灰岩,梅勒图组火山岩主要为安山质—玄武质火山熔岩。因多个时期不同构造体系的相互叠加作用,导致区域内断裂构造极为发育,形成了以北东向深大断裂为主、北西向次级断裂为辅的构造格架。侵入体相对不发育,局部出露呈串珠状北东向分布的燕山期中酸性侵入岩,与同时代火山岩系组成同时、同源、异相的火山—侵入杂岩(刘建明等, 2004; Zhang et al., 2008)。

3 火山岩岩石学特征

本次研究所采集的样品均来自满克头鄂博组火山岩,该组火山岩主要分布于研究区的西北部及南部(图2),总体呈北东向展布,其上被玛尼吐组火山岩整合覆盖。满克头鄂博组火山岩颜色为灰褐色、灰色、灰白色、黄褐色,以块状构造、假流动构造为主,包括熔结凝灰结构、凝灰结构、斑状结构等,岩性主要为流纹岩、流纹质晶屑玻屑凝灰岩、流纹质晶屑熔结凝灰岩等,火山岩具体特征如下:

流纹岩(图3a、c):斑状结构,块状构造。岩石主要由斑晶和基质组成,斑晶主要包括钾长石、斜长石及石英,粒度0.2~3 mm,含量约占15%。钾长石:多呈他形板状,为条纹长石;斜长石:半自形板状,聚片双晶较宽,具卡纳复合双晶,环带发育,为更长石,部分边缘被钾长石交代;石英:为半自形粒状,无色透明,可见熔蚀现象。基质主要由长英质、暗色矿物和不透明矿物组成,霏细结构,粒度<0.02 mm。岩石具硅化,多为隐晶质玉髓。

流纹质晶屑熔结凝灰岩(图3b、d):熔结凝灰结构,假流动构造。岩石由晶屑、岩屑、玻屑及火山灰组成。晶屑:成分为斜长石、钾长石、石英及黑云母,约占40%。岩屑:成分为流纹岩及英安岩,次棱角状、次圆状,大小0.02~2.0 mm,约占10%。玻屑:呈流动状压扁拉长,脱玻为长英质,大小<2 mm,含量约占20%。火山灰:细小的火山灰尘,常脱玻为隐晶质,约占30%。

流纹质晶屑玻屑凝灰岩(图3c、f):晶屑玻屑凝灰结构,块状构造。岩石由晶屑、岩屑、玻屑组成。晶屑:成分为钾长石、石英、斜长石等,长石晶面脏,具黏

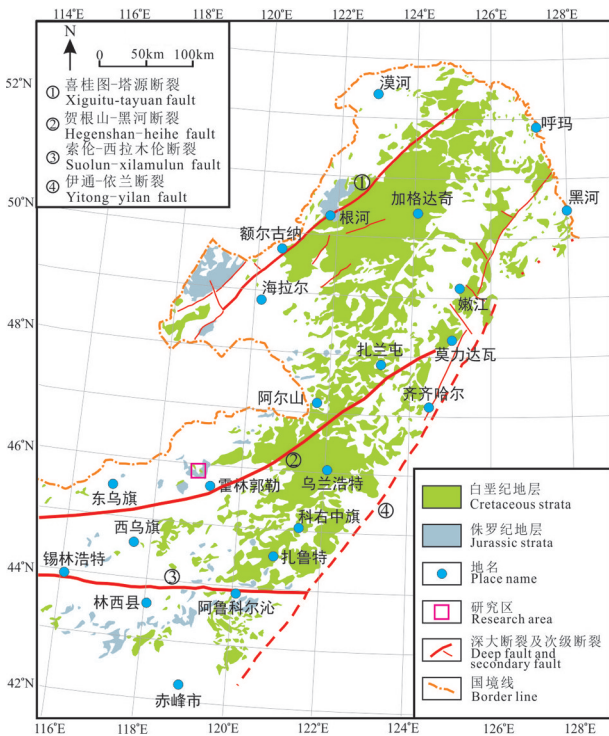


图1 大兴安岭地区中生代火山岩分布图(据许文良等, 2013; 金若时等, 2017修改)

Fig.1 Distribution map of Mesozoic volcanic rocks in the Da Hinggan Mountains (modified from Xu Wenliang et al., 2013; Jin Ruoshi et al., 2017)

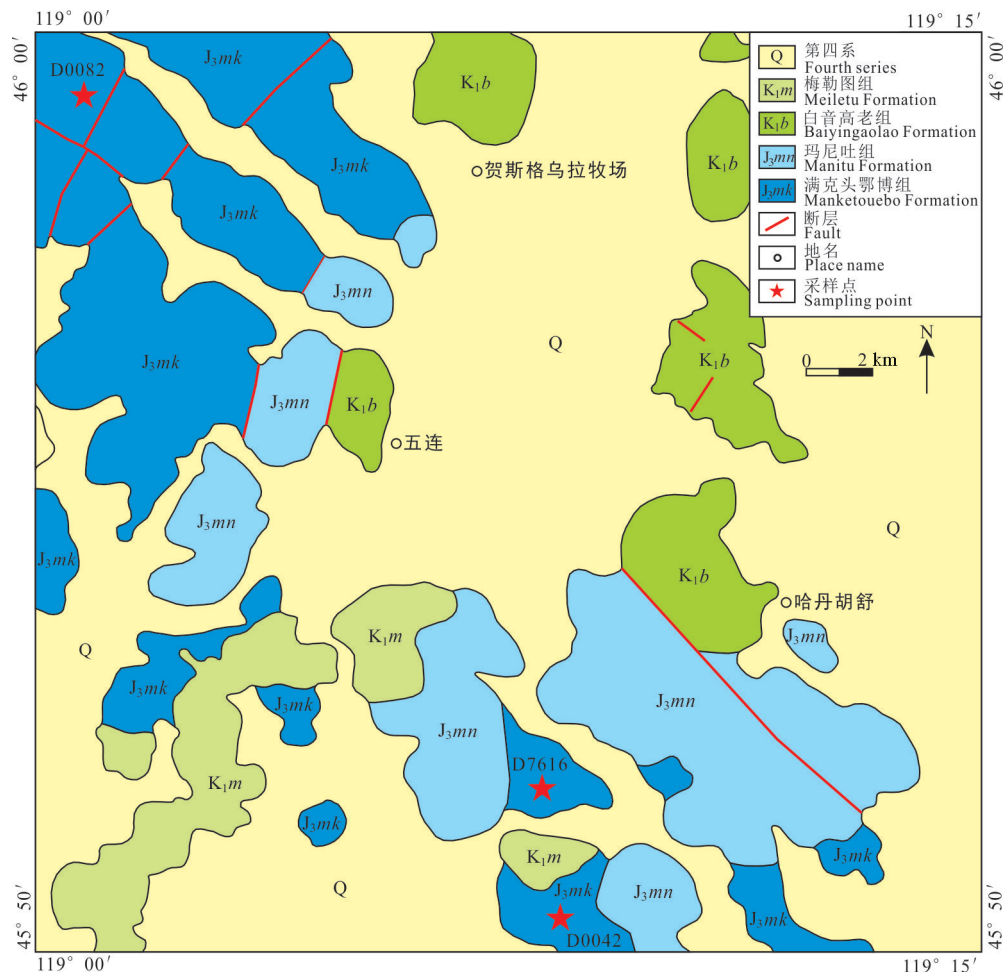


图2 乌拉盖地区地质图

Fig.2 Geological map of Wulagai area

土化、少量绢云母化,棱角状、次棱角状,大小0.1~1.2 mm,含量约30%。岩屑:成分为流纹岩、英安岩、粉砂岩等,次棱角状、次圆状,大小0.2~2.0 mm,约占10%。玻屑:鸡骨状、弓形、镰刀状、弧面多边形、楔形等,部分脱玻为长英质、霏细质、隐晶质等,大小<0.4 mm,含量约占50%。角砾:成分为流纹岩、英安岩等,次棱角状、次圆状,大小2~6 mm,约占10%。

4 样品分析方法

4.1 锆石挑选及锆石 LA-MC-ICP-MS 年龄测定

锆石分选在河北区域调查所实验室进行,采用常规选法挑选锆石,颗粒粉碎至0.1 mm,手工淘洗后在双目镜下挑纯,锆石透明度高、无包裹体,主要为长柱状和短柱状。锆石制靶、透反射显微照相和阴极发光照相均在北京锆年领航科技有限公司完成。

在中国地质调查局天津地质调查中心同位素

地质年代学实验室完成 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素测年分析。利用激光剥蚀多接收器电感耦合等离子体质谱(LA-MC-ICP-MS),将 NEW WAVE 193-FXArF 准分子激光器与 Thermo Fisher 公司的 Neptune 型 MC-ICPMS 联接,采用 He 气作为剥蚀物质的载气,锆石 U-Pb 年龄测定采用的激光束斑直径为 30 μm ,剥蚀时间为 30 s,利用美国国家标准技术研究院研制的人工合成硅酸盐标准参考物质 NIST610 作外标来校正锆石的 U、Th、Pb 含量,锆石年龄计算采用标 GJ-1。具体仪器配置和实验流程参见李怀坤等(2010)。

4.2 岩石地球化学

主量、微量及稀土元素分析测试均在中国地质调查局天津地质调查中心实验室完成。主量元素用 X 射线荧光光谱法(XRF)测试,经 GB/T14506-2010、GHJZ 003-2009 标准监控,FeO 采用氢氟酸-

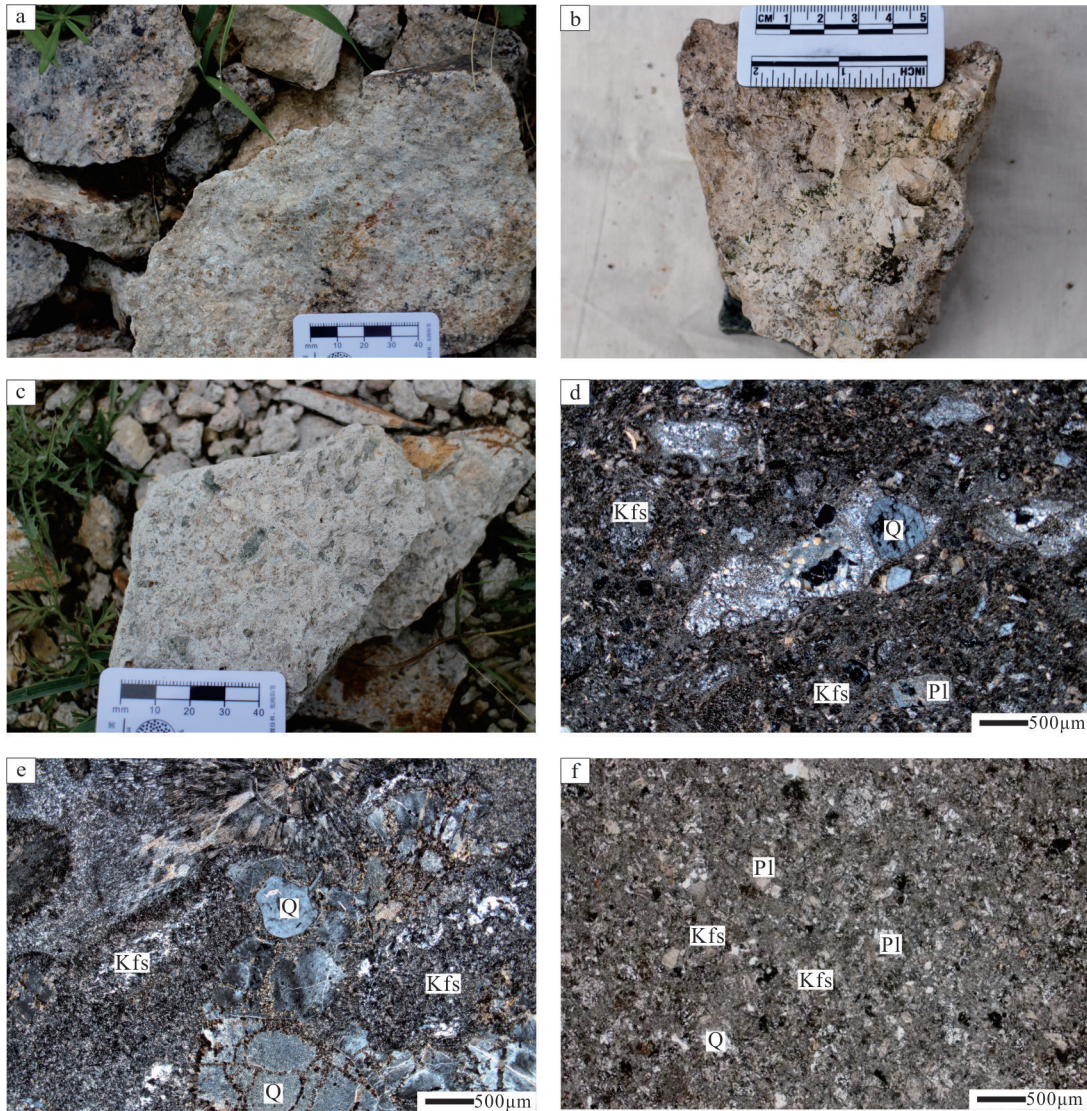


图3 乌拉盖地区火山岩野外及镜下照片

a—流纹岩野外照片;b—流纹质晶屑熔结凝灰岩野外照片;c—流纹质晶屑熔结凝灰岩野外照片;d—流纹岩镜下照片;e—流纹质晶屑熔结凝灰岩镜下照片;f—流纹质晶屑熔结凝灰岩镜下照片
Q—石英;Pl—斜长石;Kfs—钾长石

Fig.3 Field and microscope photographs of volcanic rocks from Wulagai area

a—Field photographs of rhyolite; b—Field photographs of rhyolite crystallized fume; c—Field photographs of rhyolitic crystal debris vitreoclastic tuff; d—Microscope photographs of rhyolite; e—Microscope photographs of rhyolite crystallized fume; f—Microscope photographs of rhyolitic crystal debris vitreoclastic tuff

Q—Quartz; Pl—Plagioclase; Kfs—Potash feldspar

硫酸溶样、重铬酸钾滴定的容量法,分析偏差优于2%;微量、稀土元素使用X Se-ries II 电感耦合等离子质谱仪分析测试,测试精度优于5%。

5 分析结果

5.1 锆石U-Pb分析结果

选择乌拉盖地区满克头鄂博组火山岩不同位

置的3个样品(D0082、D7616、D0042)开展LA-MC-ICP-MS 锆石U-Pb同位素分析,测年数据见表1,CL图像和U-Pb谐和图见图4。CL图像显示,本文3件样品的锆石颗粒晶型较好,多呈长柱状或短柱状,颗粒粒径范围为100~200 µm,几乎所有的锆石都具有明显的岩浆成因韵律振荡环带。一般不同成因锆石有不同的Th、U含量与Th/U值

表1 乌拉盖地区火山岩锆石LA-MC-ICP-MS U-Pb同位素分析结果
Table 1 Zircon LA-MC-ICP-MS U-Pb dating results of volcanic rocks in Wulagai area

样品测点	含量/ 10^6			Th/U	同位素比值						年龄/Ma	
	Pb	U	Th		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$
D0082-1	10	317	242	0.76	0.0259	0.0003	0.1765	0.0053	0.0493	0.0014	165	2
D0082-2	11	324	339	1.05	0.0263	0.0003	0.1777	0.0046	0.0490	0.0012	167	2
D0082-3	14	347	356	1.03	0.0294	0.0003	0.4705	0.0099	0.1160	0.0021	187	2
D0082-4	11	350	331	0.95	0.0260	0.0003	0.1786	0.0045	0.0498	0.0012	165	2
D0082-5	13	413	437	1.06	0.0264	0.0003	0.1776	0.0041	0.0488	0.0011	168	2
D0082-6	6	231	109	0.47	0.0258	0.0003	0.1769	0.0067	0.0498	0.0018	164	2
D0082-7	10	323	327	1.01	0.0261	0.0003	0.1778	0.0036	0.0495	0.0009	166	2
D0082-8	7	258	183	0.71	0.0260	0.0003	0.1768	0.0056	0.0494	0.0015	165	2
D0082-9	17	555	479	0.86	0.0258	0.0003	0.1749	0.0029	0.0492	0.0008	164	2
D0082-10	13	443	398	0.90	0.0262	0.0003	0.1782	0.0040	0.0494	0.0011	166	2
D0082-11	10	262	362	1.38	0.0257	0.0003	0.1758	0.0055	0.0496	0.0016	163	2
D0082-12	9	288	244	0.85	0.0259	0.0003	0.1782	0.0051	0.0498	0.0014	165	2
D0082-13	10	333	269	0.81	0.0261	0.0003	0.1788	0.0047	0.0497	0.0013	166	2
D0082-14	8	268	157	0.58	0.0261	0.0003	0.1790	0.0053	0.0498	0.0014	166	2
D0082-15	8	279	177	0.63	0.0258	0.0003	0.1761	0.0045	0.0495	0.0012	164	2
D0082-16	13	441	425	0.96	0.0255	0.0003	0.1751	0.0041	0.0498	0.0011	162	2
D0082-17	16	500	603	1.21	0.0256	0.0003	0.1736	0.0043	0.0492	0.0011	163	2
D0082-18	9	311	211	0.68	0.0258	0.0003	0.1748	0.0045	0.0491	0.0012	164	2
D0082-19	14	347	356	1.03	0.0294	0.0003	0.4705	0.0099	0.1160	0.0021	187	2
D0082-20	15	303	202	0.67	0.0431	0.0004	0.4102	0.0084	0.0690	0.0013	272	3
D0082-21	10	341	275	0.81	0.0260	0.0003	0.1766	0.0043	0.0493	0.0012	165	2
D0082-22	6	224	128	0.57	0.0258	0.0003	0.1763	0.0062	0.0496	0.0018	164	2
D0082-23	13	444	319	0.72	0.0257	0.0003	0.1743	0.0039	0.0491	0.0011	164	2
D0082-24	11	362	392	1.08	0.0259	0.0003	0.1751	0.0045	0.0491	0.0012	165	2
D7616-1	15	316	160	0.51	0.0260	0.0003	0.1878	0.0045	0.0523	0.0012	166	2
D7616-2	17	354	205	0.58	0.0257	0.0003	0.1942	0.0040	0.0548	0.0011	163	2
D7616-3	18	514	158	0.31	0.0257	0.0004	0.1867	0.0097	0.0527	0.0027	164	2
D7616-4	14	518	207	0.40	0.0263	0.0003	0.1904	0.0057	0.0525	0.0015	167	2
D7616-5	10	312	118	0.38	0.0259	0.0003	0.1634	0.0048	0.0457	0.0013	165	2
D7616-6	11	315	161	0.51	0.0258	0.0003	0.1747	0.0050	0.0490	0.0013	164	2
D7616-7	14	435	222	0.51	0.0261	0.0003	0.1879	0.0130	0.0522	0.0038	166	2
D7616-8	5	155	61	0.40	0.0263	0.0003	0.1866	0.0027	0.0514	0.0007	167	2
D7616-9	17	640	234	0.37	0.0259	0.0003	0.1782	0.0045	0.0499	0.0013	165	2
D7616-10	14	535	234	0.44	0.0258	0.0003	0.1771	0.0039	0.0498	0.0011	164	2
D7616-11	14	564	201	0.36	0.0255	0.0003	0.1813	0.0056	0.0516	0.0016	162	2
D7616-12	10	371	168	0.45	0.0267	0.0003	0.1795	0.0045	0.0489	0.0012	170	2
D7616-13	10	410	154	0.38	0.0256	0.0003	0.1754	0.0043	0.0498	0.0012	163	2
D7616-14	11	428	156	0.36	0.0255	0.0003	0.1720	0.0033	0.0489	0.0009	162	2
D7616-15	16	641	257	0.40	0.0253	0.0003	0.1802	0.0054	0.0516	0.0015	161	2
D7616-16	9	315	223	0.71	0.0261	0.0003	0.1733	0.0025	0.0482	0.0006	166	2
D7616-17	14	542	199	0.37	0.0256	0.0003	0.1748	0.0034	0.0495	0.0009	163	2
D7616-18	15	557	305	0.55	0.0259	0.0003	0.1752	0.0031	0.0490	0.0008	165	2

附表1

样品测点	含量/10 ⁶			Th/U	同位素比值						年龄/Ma	
	Pb	U	Th		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	±1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	±1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	±1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	±1σ
D7616-19	14	598	38	0.06	0.0256	0.0003	0.1784	0.0057	0.0505	0.0016	163	2
D7616-20	8	277	138	0.50	0.0261	0.0003	0.1810	0.0037	0.0502	0.0010	166	2
D7616-21	15	564	192	0.34	0.0262	0.0003	0.1763	0.0031	0.0489	0.0008	167	2
D7616-22	17	618	261	0.42	0.0263	0.0003	0.1795	0.0068	0.0494	0.0019	168	2
D7616-23	6	239	143	0.60	0.0255	0.0003	0.1802	0.0035	0.0512	0.0009	163	2
D7616-24	11	403	145	0.36	0.0262	0.0003	0.1785	0.0025	0.0494	0.0006	167	2
D0042-1	6	251	129	0.51	0.0238	0.0005	0.1611	0.0069	0.0491	0.0014	151	3
D0042-2	10	124	87	0.70	0.0404	0.0006	2.1827	0.1255	0.3918	0.0216	255	3
D0042-3	3	85	67	0.79	0.0243	0.0003	0.4956	0.0289	0.1478	0.0085	155	2
D0042-4	4	135	95	0.71	0.0244	0.0003	0.1653	0.0123	0.0492	0.0036	155	2
D0042-5	7	241	203	0.84	0.0253	0.0003	0.1862	0.0099	0.0534	0.0028	162	2
D0042-6	4	152	102	0.67	0.0240	0.0003	0.1652	0.0056	0.0499	0.0017	153	2
D0042-7	9	236	200	0.85	0.0281	0.0003	0.4554	0.0350	0.1174	0.0091	179	2
D0042-8	3	114	81	0.71	0.0238	0.0002	0.2170	0.0031	0.0661	0.0008	152	2
D0042-9	4	145	95	0.66	0.0244	0.0003	0.1666	0.0101	0.0495	0.0030	156	2
D0042-10	6	196	203	1.04	0.0247	0.0003	0.1678	0.0090	0.0492	0.0026	157	2
D0042-11	5	184	132	0.71	0.0242	0.0003	0.1613	0.0051	0.0484	0.0014	154	2
D0042-12	5	121	92	0.76	0.0286	0.0003	0.7318	0.0292	0.1857	0.0072	182	2
D0042-13	5	178	99	0.55	0.0250	0.0003	0.3635	0.0095	0.1056	0.0027	159	2
D0042-14	8	237	203	0.86	0.0261	0.0003	0.3871	0.0074	0.1074	0.0019	166	2
D0042-15	4	101	113	1.12	0.0276	0.0003	0.5759	0.0082	0.1511	0.0019	176	2
D0042-16	7	168	176	1.05	0.0282	0.0003	0.6068	0.0424	0.1560	0.0108	179	2
D0042-17	5	149	156	1.04	0.0256	0.0003	0.1769	0.0076	0.0501	0.0022	163	2
D0042-18	5	180	132	0.73	0.0247	0.0003	0.3601	0.0176	0.1055	0.0051	158	2
D0042-19	8	272	216	0.79	0.0242	0.0003	0.2283	0.0091	0.0684	0.0027	154	2
D0042-20	6	213	147	0.69	0.0245	0.0003	0.1770	0.0101	0.0523	0.0029	156	2
D0042-21	4	134	108	0.81	0.0242	0.0003	0.2158	0.0133	0.0646	0.0040	154	2
D0042-22	4	148	95	0.64	0.0240	0.0002	0.1636	0.0023	0.0494	0.0006	153	2

(Belousova et al., 2002), 岩浆锆石的 Th、U 含量高, Th/U 值较大(一般大于 0.4)。本文 3 件锆石样品的 Th/U 比值分别为 0.47~1.38、0.31~0.71、0.51~1.04, 大部分大于 0.4, 具有典型岩浆锆石的 Th/U 比值特征, 结合锆石的韵律环带特征, 进一步明确为岩浆成因锆石。

流纹岩样品(D0082)采自研究区西北部, 采样坐标位置为 119°01'12"E、45°59'26"N。对锆石样品进行了 24 个测点分析, 其中 22 个分析点落在 U-Pb 谐和线上, ²⁰⁶Pb/²³⁸U 表面年龄分布于 162~168 Ma, 加权平均年龄为 (164.96±0.71) Ma (MSWD=0.64), 显示具有良好的谐和性, 其年龄代表了流纹岩的岩浆结晶年龄。

流纹质含角砾晶屑熔结凝灰岩样品(D7616)采

自研究区中南部, 采样坐标位置为 119°09'36"N、45°49'03"E。在 U-Pb 年龄谐和图上, 样品中 24 个锆石分析点均分布在谐和线上并且沿线分布, 显示一致的年龄结果, 样品的锆石 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄为 (164.82±0.90) Ma (MSWD=1.5), 代表了流纹质含角砾晶屑凝灰熔岩的形成时代。

流纹质晶屑熔结凝灰岩样品(D0042)采自研究区南部, 采样坐标位置位于 119°08'53"E、45°50'11"N。对样品锆石进行了 22 个测点分析, 其中 14 个测点分析数据位于谐和线上, 其 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 表面年龄介于 151~159 Ma, 加权平均年龄为 (154.8 ± 1.2) Ma (MSWD=1.24), 8 个锆石分析数据偏离谐和线, 其中 7 个锆石分析点的 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 表面年龄介于 161~182 Ma, 可能是捕获的侏罗世早期岩浆活动中的锆

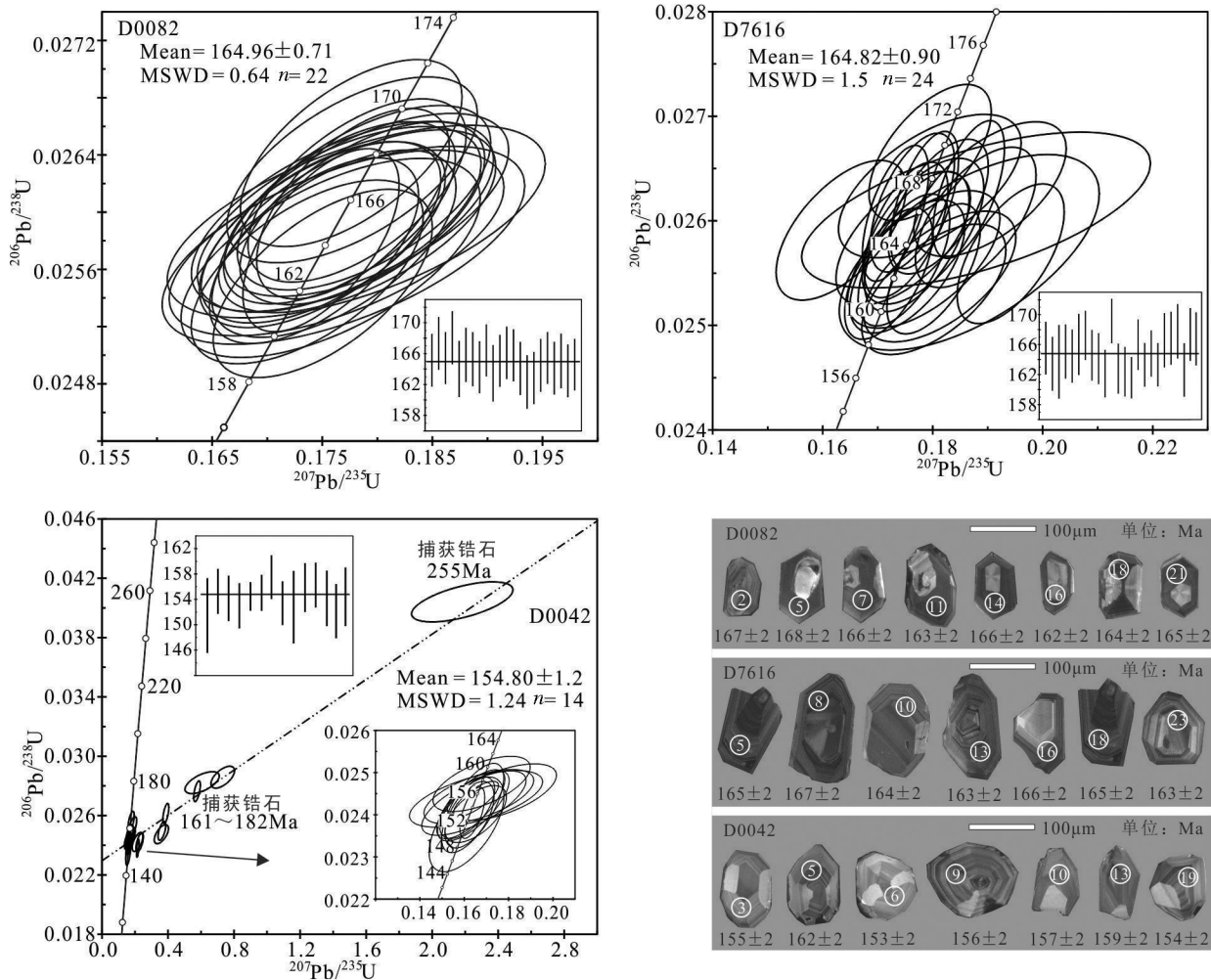


图4 乌拉盖地区火山岩锆石U-Pb年龄谐和图及部分锆石阴极发光图像
Fig.4 Zircon U-Pb concordia diagrams and CL images of selected zircons from volcanic rocks in Wulagai area

石, 1个锆石分析点的 $^{206}\text{Pb}/\text{U}^{238}$ 表面年龄为255 Ma, 因区域上存在二叠纪岩浆活动, 可能为岩浆上升过程中捕获的围岩锆石。

5.2 火山岩地球化学特征

乌拉盖地区满克头鄂博组火山岩代表性样品的主量、稀土、微量元素分析结果(表2)显示: 火山岩的 SiO_2 含量较高, 介于72.02%~77.30%, 为酸性岩, 属于 SiO_2 过饱和类型; Al_2O_3 含量为11.30~13.73, 全碱含量较高(AIK值为5.81~9.01), 属钾质火山岩($\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 多大于1.0), 表明岩石具有高硅偏碱富钾的特征。A/CNK比值在0.93~1.37, 除1个样品外, 其他值均大于1, 为过铝质岩石, 过碱指数NK/A比值在0.46~0.77。岩石贫镁($\text{MgO} = 0.40\% \sim 0.71\%$)、贫钙($\text{Ca} = 0.44\% \sim 0.93\%$), FeO^T/MgO 比值较高(1.44~4.65)。以上数据显示研究区满克头鄂博

组火山岩与大兴安岭北部地区满克头鄂博组火山岩(李鹏川等, 2016; 杜洋等, 2017)以及A型花岗岩(孙德有等, 2005; 张旗等, 2012)具有相似的主量元素特征。在火山岩TAS分类命名图解中(图5), 样品均落在亚碱性系列的流纹岩范围内, 在 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图解中(图6), 多数样品落在高钾钙碱性区域, 少量样品落在钙碱性和钾玄岩系列。

研究区满克头鄂博组火山岩稀土总量 $\Sigma\text{REE} = 107.48 \times 10^{-6} \sim 176.99 \times 10^{-6}$, 轻重稀土比值(LREE/HREE)为6.41~12.31, $(\text{La}/\text{Yb})_n$ 比值为5.32~14.31, 表明轻稀土(LREE)相对富集, 重稀土(HREE)相对亏损, 轻重稀土分馏明显。在稀土元素球粒陨石标准化配分模式图中(图7), 稀土配分曲线向右倾斜, 重稀土部分相对轻稀土部分曲线较平缓, 属轻稀土富集型。Eu负异常显著, $\delta\text{Eu} = 0.19 \sim 0.84$, 指示岩浆

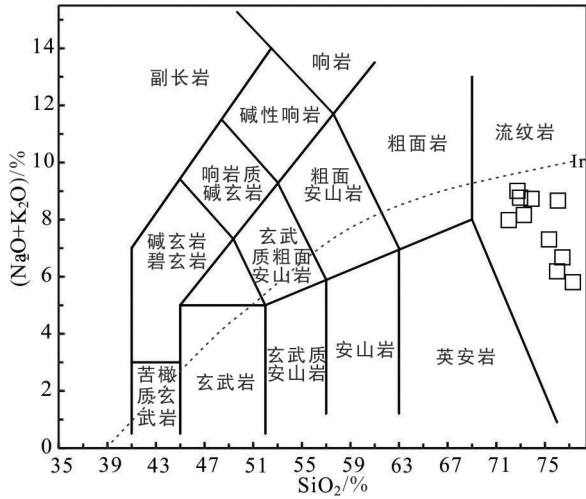


图5 乌拉盖地区火山岩样品 TAS分类图(岩石分类据 Middlemost, 1994; 系列界线据 Irvine and Baragar, 1971)
Fig.5 TAS diagram of volcanic rocks from Wulagai area (classification after Middlemost,1994; separating line between alkaline and sub-alkaline series after Irvine and Baragar, 1971)

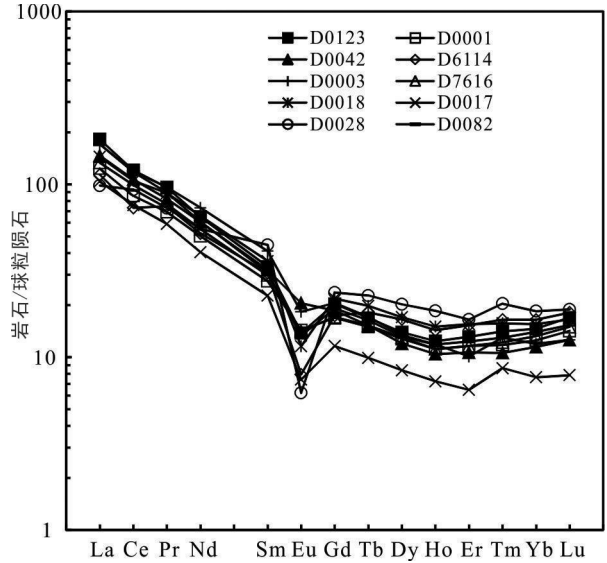


图7 乌拉盖地区火山岩稀土元素球粒陨石标准化配分模式图(球粒陨石标准化数据引自 Sun and McDonough, 1989)
Fig.7 Chondrite-normalized REE patterns for volcanic rocks in Wulagai area(chondrite value after Sun and McDonough, 1989)

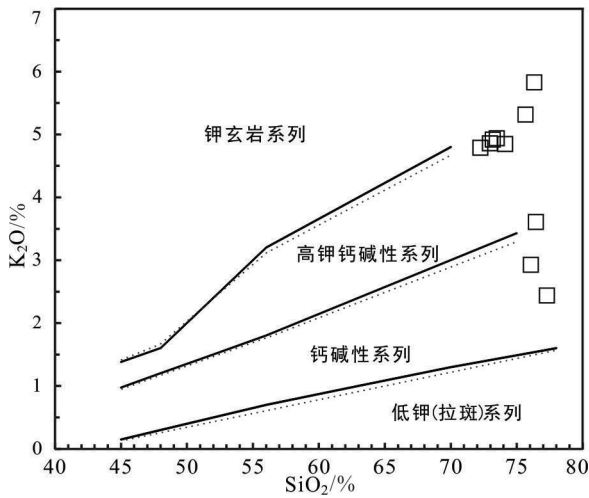


图6 乌拉盖地区火山岩 K₂O-SiO₂图解(实线据 Peccerillo and Taylor, 1976; 虚线据 Middlemost, 1985)
Fig.6 K₂O-SiO₂ diagram of volcanic rocks from Wulagai area (solid lines after Peccerillo and Taylor,1976; dashed lines after Middlemost, 1985)

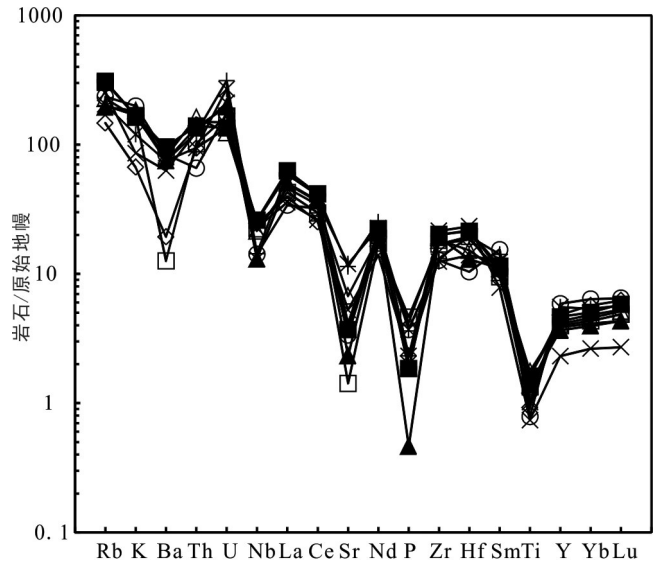


图8 乌拉盖地区火山岩原始地幔标准化微量元素蛛网图(标准化数据引自 McDonough and Sun,1995)
Fig.8 Primitive mantle-normalized patterns of trace elements for volcanic rocks in Wulagai area (after McDonough and Sun,1995)

经历了斜长石的分离结晶作用或者岩浆源区有斜长石的残留。

研究区满克头鄂博组火山岩微量元素原始地幔标准化蛛网图(图8)显示样品的分布形式相近,大离子亲石元素(LILE)富集 Rb、K、Th、U,亏损 Ba、

Sr, 高场强元素(HFSE)富集 Zr、Hf, 亏损 Nb、P、Ti, 说明火山岩来源于壳源岩浆或岩浆被地壳物质混染。Nb、Ti的亏损反映岩浆演化过程中可能有壳源物质的加入,Sr、P的亏损暗示斜长石和磷灰石可能因分离结晶作用在源区大量残留。微量元素 Sr 变

表2 乌拉盖地区满克头鄂博组火山岩地球化学分析结果(主量元素:%;稀土、微量元素: 10^{-6})
 Table 2 Geochemical data of volcanic rocks from Manketoubo Formation in Wulagai area (Major elements:%; Trace elements: 10^{-6})

样品号	D0001	D0003	D0017	D0018	D0028	D0042	D0082	D0123	D6114	D7616
SiO ₂	72.74	73.26	76.00	76.44	76.08	75.34	73.90	72.96	77.30	72.02
TiO ₂	0.29	0.29	0.16	0.22	0.17	0.30	0.35	0.35	0.20	0.38
Al ₂ O ₃	13.52	13.52	12.62	12.42	11.30	13.55	12.93	13.32	12.75	13.73
Fe ₂ O ₃	1.43	1.62	0.76	1.01	0.82	0.51	1.03	1.62	0.86	1.74
FeO	0.78	0.54	0.60	0.52	1.04	0.40	0.80	0.52	0.38	0.52
MnO	0.02	0.02	0.03	0.03	0.05	0.01	0.03	0.03	0.07	0.02
MgO	0.49	0.57	0.58	0.48	0.40	0.63	0.58	0.71	0.68	0.66
CaO	0.70	0.65	0.79	0.44	0.68	0.52	0.91	0.88	0.60	0.93
Na ₂ O	4.03	3.10	3.61	3.07	2.69	1.80	3.76	3.73	3.80	3.07
K ₂ O	4.98	5.06	2.58	3.61	5.98	5.51	4.97	5.04	2.01	4.91
P ₂ O ₅	0.10	0.05	0.05	0.08	0.08	0.01	0.04	0.04	0.05	0.09
LOI	0.52	0.98	1.52	1.42	0.54	1.25	0.42	0.69	1.28	1.40
总量	99.6	99.66	99.3	99.74	99.83	99.83	99.6	99.89	99.98	99.47
K ₂ O/Na ₂ O	1.24	1.63	0.71	1.18	2.22	3.06	1.32	1.35	0.53	1.60
FeO ^T /MgO	4.51	3.79	2.34	3.19	4.65	1.44	3.16	3.01	1.82	3.42
A/CNK	1.02	1.15	1.24	1.27	0.93	1.37	0.98	1.01	1.34	1.14
NK/A	0.67	0.60	0.49	0.54	0.77	0.54	0.68	0.66	0.46	0.58
La	29.27	40.5	24.6	34.11	23.3	34.69	40.31	43.11	26.88	31.58
Ce	52.47	72.6	46.4	64.05	57	65.27	72.08	73.78	44.71	60.54
Pr	6.57	9.15	5.60	8.44	6.92	7.82	8.50	9.12	7.09	7.30
Nd	23.41	34.10	18.90	30.57	25.80	28.23	28.43	30.26	24.28	25.65
Sm	4.21	6.28	3.47	5.50	6.82	4.89	4.74	5.10	4.69	4.55
Eu	0.83	1.06	0.43	0.67	0.36	1.19	0.77	0.80	0.46	0.82
Gd	3.46	4.23	2.38	4.49	4.86	3.82	3.93	4.17	3.57	3.50
Tb	0.56	0.64	0.37	0.74	0.85	0.57	0.61	0.63	0.68	0.57
Dy	3.24	3.41	2.13	4.32	5.13	3.04	3.34	3.54	4.20	3.30
Ho	0.63	0.67	0.41	0.85	1.05	0.59	0.67	0.70	0.81	0.63
Er	1.92	1.67	1.07	2.57	2.73	1.76	2.04	2.17	2.53	1.92
Tm	0.30	0.33	0.22	0.40	0.52	0.27	0.33	0.36	0.42	0.31
Yb	2.13	2.03	1.30	2.64	3.14	1.95	2.38	2.48	2.80	2.25
Lu	0.36	0.32	0.20	0.42	0.48	0.32	0.39	0.43	0.46	0.38
Y	18.11	17.60	10.50	25.19	26.70	16.64	19.54	21.17	21.83	18.64
Rb	192	127	159	130	149	124	196	196	93	144
K	41334	41998	21414	29963	49634	45733	41251	41832	16683	40753
Ba	88	524	439	522	584	526	617	670	135	562
Th	8.63	10.51	10.60	7.99	5.59	11.51	12.75	11.85	7.97	13.75
U	3.49	6.54	4.43	5.64	3.66	4.11	3.12	2.82	2.83	2.60
Nb	15.90	10.20	16.10	9.30	10.10	9.30	18.20	18.60	17.50	15.30
Sr	122	240	111	252	80	254	87	78	81	142
P	440	220	220	352	352	44	176	176	220	396
Zr	190	147	241	139	142	214	224	226	190	204
Hf	6.0	6.0	7.2	4.3	3.2	4.0	6.7	6.6	5.7	4.7
Ti	1740	1740	960	1320	1020	1800	2100	2100	1200	2280
ΣREE	129.36	176.99	107.48	159.77	138.96	154.41	168.52	176.65	123.58	143.3
LREE/HREE	9.27	12.31	12.30	8.72	6.41	11.53	11.31	11.20	6.99	10.14
δEu	0.66	0.63	0.46	0.41	0.19	0.84	0.55	0.53	0.34	0.63
(La/Yb) _N	9.86	14.31	13.57	9.27	5.32	12.76	12.15	12.47	6.89	10.07
Rb/Sr	1.57	0.53	1.43	0.52	1.86	0.49	2.25	2.51	1.15	1.01
Nd/Th	2.71	3.24	1.78	3.83	4.62	2.45	2.23	2.55	3.05	1.87
Ti/Zr	9.16	11.84	3.98	9.50	7.18	8.41	9.38	9.29	6.32	11.18
Ti/Y	96.08	98.86	91.43	52.40	38.20	108.17	107.47	99.20	54.97	122.32

化不大($78 \times 10^{-6} \sim 254 \times 10^{-6}$),具有相对较高的Y($10.5 \times 10^{-6} \sim 26.7 \times 10^{-6}$)和Yb($1.3 \times 10^{-6} \sim 3.14 \times 10^{-6}$),不具有埃达克岩特征。

6 讨论

6.1 火山岩时代

研究区所属的大兴安岭南部地区中生代火山岩自下而上可以划分为满克头鄂博组、玛尼吐组、白音高老组和梅勒图组,其形成时代一直是该区域火山岩研究中的焦点,随着锆石U-Pb定年方法的广泛应用,专家学者对大兴安岭不同地区的火山岩开展了同位素年代学研究,获得大量锆石U-Pb同位素年龄集中在170~150 Ma和140~125 Ma(陈志广等,2006;Wang et al.,2006b;张连昌等,2007;张玉涛等,2007;苟军等,2010;孙德有等,2011;程银行等,2013,2014),表明大兴安岭中生代火山岩主要形成于中一晚侏罗世和早白垩世两个时期。近年来,针对大兴安岭南部不同地区火山岩研究中获得中生代火山岩的年龄分布于165~123 Ma,集中在中一晚侏罗世—早白垩世(杨扬等,2012;司秋亮等,2015;张乐彤等,2015;张学斌等,2015;李鹏川等,2016;李英雷等,2017;谭皓元等,2017)。本文通过对满克头鄂博组火山岩开展年代学分析,获得3个锆石U-Pb同位素年龄分别为:(164.96 ± 0.71)Ma、(164.82 ± 0.90)Ma、(154.8 ± 1.2)Ma,集中于中一晚侏罗世,表明研究区存在中一晚侏罗世火山活动。

通过总结分析大兴安岭地区满克头鄂博组测年结果可以发现,其火山岩年龄位于174~124 Ma(Zhang et al.,2008;陈英富等,2012;杨扬等,2012;张超等,2014;刘凯等,2018),时间跨度较大,统计得出年龄峰值集中在150~165 Ma(图9),说明这一时间段是中一晚侏罗世火山活动的高峰期,本文获得的满克头鄂博组火山岩年龄与这一时间段是一致的。另外,近年来在大兴安岭南部地区也获得了满克头鄂博组火山岩年龄,李鹏川等(2016)在林西地区获得满克头鄂博组流纹岩锆石U-Pb年龄为(151.4 ± 1.4)Ma;杨扬等(2012)在赤峰地区获得满克头鄂博组流纹岩锆石U-Pb年龄为(156 ± 2)Ma、(157 ± 3)Ma;其中,程银行等(2014)在海莫赛格地区获得满克头鄂博组流纹岩、粗面岩锆石U-Pb年龄为(164.0 ± 1.0)Ma、(155.5 ± 0.9)Ma,与本文测定年

龄((164.96 ± 0.71)Ma、(164.82 ± 0.90)Ma、(154.8 ± 1.2)Ma)十分接近,证明区域上确实存在165 Ma±、155 Ma±两个中一晚侏罗世火山活动高峰时期,两期间隔为9~10 Ma。通过本文获得的满克头鄂博组火山岩时代与以上年龄数据相对比可以发现,大兴安岭南部地区满克头鄂博组火山岩年龄分布于151~165 Ma,这与整个大兴安岭地区满克头鄂博组火山岩集中峰值年龄(150~165 Ma)一致,进一步表明在乌拉盖地区获得的165±Ma、155±Ma两期火山岩年龄较为可靠,可以代表满克头鄂博组火山岩两个主要活动期的时代。

6.2 岩浆源区及火山岩成因

大兴安岭地区中生代酸性火山岩的成因主要有3种观点:(1)由钙碱性系列玄武质岩浆分离结晶形成(林强等,2003;刘俊杰等,2006;张连昌等,2007);(2)与玄武岩构成双峰式火山岩组合(林强等,2003);(3)地壳岩石部分熔融的产物(赵书跃等,2004;高晓峰等,2005)。

乌拉盖地区满克头鄂博组火山岩以流纹质火山熔岩、流纹质火山碎屑岩为主($\text{SiO}_2 = 72.02\% \sim 77.30\%$),未见有同期中基性火山岩发育,属于准铝质—过铝制特征($A/CNK = 0.93 \sim 1.37$),为酸性岩浆结晶的产物,说明壳源对岩浆的形成起绝对作用。火山岩样品富集大离子亲石元素(Rb、K、Th、U),亏损高场强元素(Nb、Ti、P),具该特点的火山岩岩浆

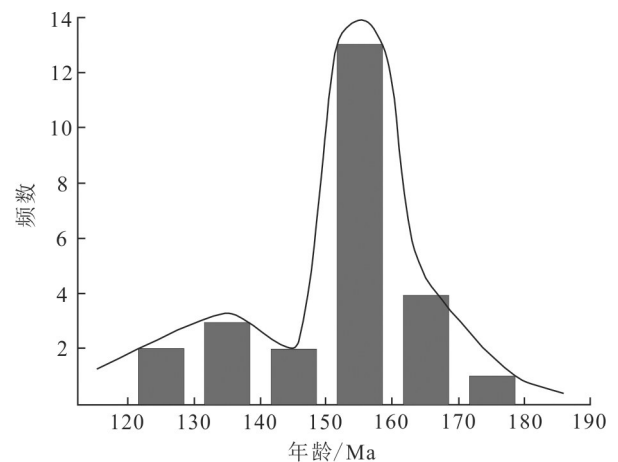


图9 大兴安岭地区满克头鄂博组年龄分布图(据李鹏川等,2016修改)

Fig.9 Distribution diagram of Manketouebo Formation ages in Da Hinggan Mountains area (after Li Pengchuan et al., 2016)

源区可能为俯冲流体交代的岩石圈地幔或是陆壳物质。研究表明,地幔橄榄岩在俯冲板块 H_2O 的作用下部分熔融只形成安山质岩浆,而 SiO_2 含量较高的酸性岩浆不能由其直接熔融产生(Hirose, 1997),大规模的酸性岩浆主要由下地壳深熔作用形成。本文火山岩样品的形成时代在 $(164.82 \pm 0.90) \sim (154.8 \pm 1.2) Ma$,未见该时期大规模中基性岩浆岩,研究区范围内玛尼吐组安山岩的年龄(最大154.3 Ma,未发表数据)也均小于本文样品年龄,另外区内出露的基性火山岩为梅勒图组玄武岩,其形成时代远小于满克头鄂博组火山岩,以上证据进一步指示研究区大规模酸性火山岩不可能由基性岩浆分离结晶形成,并且也无法与玄武岩构成双峰式火山岩组合。火山岩的Rb/Sr比值变化于0.49~2.51(平均为1.33),明显高于原始地幔(0.03)、E-MORB(0.033)和OIB(0.047)的Rb/Sr值(Sun and McDonough, 1989),与壳源岩浆的范围(> 0.5)一致(Tischendorf and Paelchen, 1985),Nd/Th比值为1.78~4.62,平均值为2.83,接近壳源岩石的比值(≈ 3)(Bea et al., 2001; Rudnick and Gao, 2003),Ti/Zr = 3.98~11.84,平均值8.62, Ti/Y = 38.20~122.32,平均值86.91,也均分布在壳源岩浆的范围内(Ti/Zr < 20 , Ti/Y < 100)(Wilson, 1989),火山岩较高的Pb含量也指示其母源岩浆可能来自于大陆地壳的部分熔融(单强等, 2011)。此外, A/CNK值(0.93~1.37)变化范围相对较大,指示地壳岩石熔融的源岩并非单一的火成岩,还可能具有沉积岩来源,研究区北部、南部广泛分布古生代沉积地层,并且测年样品中有不同时代的继承锆石,表明岩浆在上升过程中受到古生代地层的混染等证据均支持这一认识。以上地球化学数据表明研究区满克头鄂博组火山岩应为壳源物质部分熔融的产物。依据张超等(2014)对大兴安岭南部满克头鄂博组流纹岩开展Hf同位素测试的分析结果,火山岩 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值位于+4.6~+10.9,加权平均值为 7.15 ± 0.69 ,二阶段模式年龄为501~905 Ma,认为岩浆来源于早古生代—新元古代时期增生的年轻地壳,进一步佐证研究区火山岩来源于地壳物质的熔融。

研究区满克头鄂博组火山岩具有明显的负Eu异常,并且Ba、Sr强烈亏损,表明源区斜长石相对稳定,为部分熔融的残留物。由于石榴子石强烈富集

HREE,角闪石相对富集MREE(Green, 1994),火山岩样品的HREE分布相对平缓,而MREE相对HREE略微亏损,指示部分熔融后的残留相可能含有少量的角闪石,不含石榴子石。另外,张旗等(2008)的研究认为,具有低Sr、高Yb的花岗岩(Sr为 $40 \times 10^{-6} \sim 400 \times 10^{-6}$ 、Yb $> 1.5 \times 10^{-6}$)源区残留相主要为斜长石和角闪石,研究区火山岩也具有低Sr、高Yb(Sr平均值 114.10×10^{-6} 、Yb平均值 2.31×10^{-6})的特征,也暗示源区在部分熔融过程中有斜长石、角闪石的残留。

综上所述,乌拉盖地区满克头鄂博组火山岩与壳源岩石的地球化学特征基本一致,由地壳物质部分熔融而形成,源区残留物可能以斜长石为主,含少量角闪石。

6.3 构造环境

大兴安岭地区早白垩世处于伸展环境已被认可(林强等, 2003;高晓峰等, 2005;吴福元等, 2005; Zhang Jiheng et al., 2008;孟恩等, 2011;刘哲等, 2017;王金芳等, 2018),但对于中—晚侏罗世构造背景主要有两类不同认识,一类观点认为形成于挤压构造环境:张宏等(1999)认为180~150 Ma中国东北地区乃至欧亚大陆东缘均受到北西西向挤压作用;赵书跃等(2004)在大兴安岭塔源地区发现晚侏罗世高Sr、低Y型火山岩;张永北等(2006)在大兴安岭南段巴林右旗发现晚侏罗世O型埃达克质火山岩;刘俊杰等(2006)认为大兴安岭北段根河地区晚侏罗世火山岩为挤压背景下的弧火山岩。另一类观点认为形成于伸展构造背景:陈志广等(2006)发现满洲里一带晚侏罗世火山岩为造山后伸展背景下部分熔融形成的高钾钙碱性火山岩;孟恩等(2011)认为满洲里地区中侏罗世火山岩形成于岩石圈伸展环境;杨扬等(2012)发现赤峰地区晚侏罗世处于伸展背景;程银行等(2013)认为莫合尔图地区中—晚侏罗世火山岩形成于造山后伸展环境。

研究区满克头鄂博组火山岩以灰褐色、灰白色、灰色流纹岩和流纹质凝灰岩为主,因未见同期中基性火山岩而有别于典型岛弧火山岩。研究区火山岩强烈富硅富碱,属高钾钙碱性岩石系列,与造山后花岗岩主量元素具有相同特征(韩宝福, 2007)。富集大离子亲石元素(LILE)Rb、Th、U、K,亏损Nb、Sr、Ba、Eu、Ti、P,表明其可能形成于伸展构

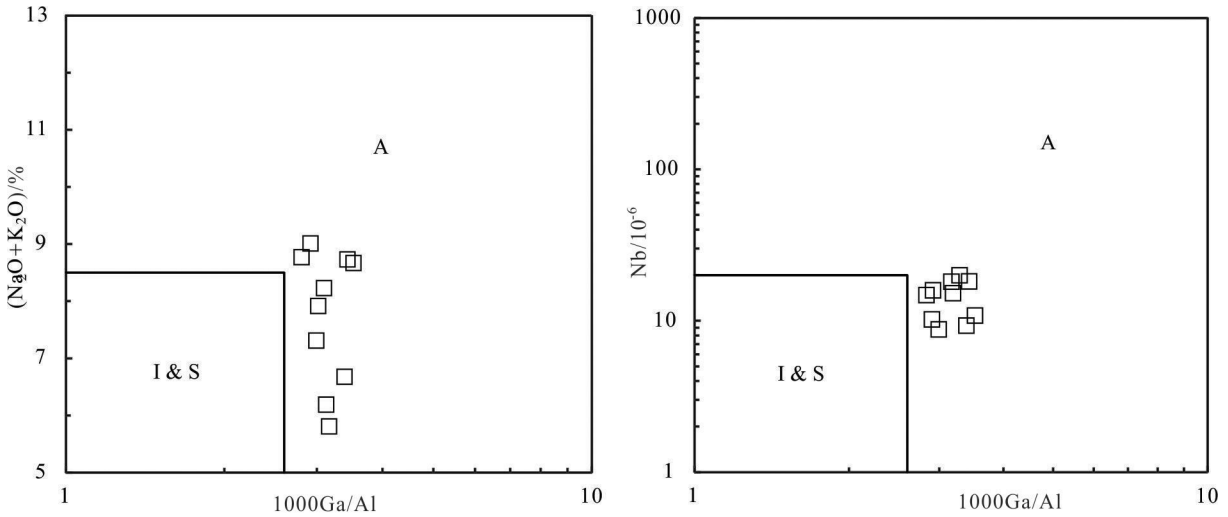


图10 乌拉盖地区火山岩($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$)和Nb对1000Ga/Al图解(底图据 Whalen et al., 1987)

A—A型花岗岩类;I & S—I,S型花岗岩类

Fig.10 ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$) and Nb versus 1000Ga/Al diagrams for volcanic rocks in Wulagai area (after Whalen et al., 1987)

A—A-type granitoids;I & S—I & S type granitoids

造环境中,可能是壳源物质部分熔融的产物。与岛弧型、陆缘弧型火山岩相比,明显富 K_2O 、 $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ 、 TiO_2 ,结合其源区和酸性火山岩组合特征认为与壳源物质的部分熔融有关。在 Whalen(1987)的分类图解上(图10),样品落入A型花岗岩区域,一般认为A型花岗岩形成于张性构造环境(Eby, 1990)。在A型花岗岩三角形微量元素构造判别图解上(图11),样品均落入A2造山后环境区域。对

于中酸性火山岩, Sr 、 Yb 的丰度被认为是识别与判别岩浆源区成因、性质的有效指标(张旗等,2006),前文已述,火山岩样品为低Sr高Yb型,在Sr-Yb判别图解上(图12),火山岩样品落在对应于闽浙型和南岭型花岗岩区域中,其形成环境与张旗等(2008)研究的造山后伸展环境中形成的花岗岩特征相似。综上所述,乌拉盖地区满克头鄂博组火山岩是在造山后伸展构造背景中形成的。

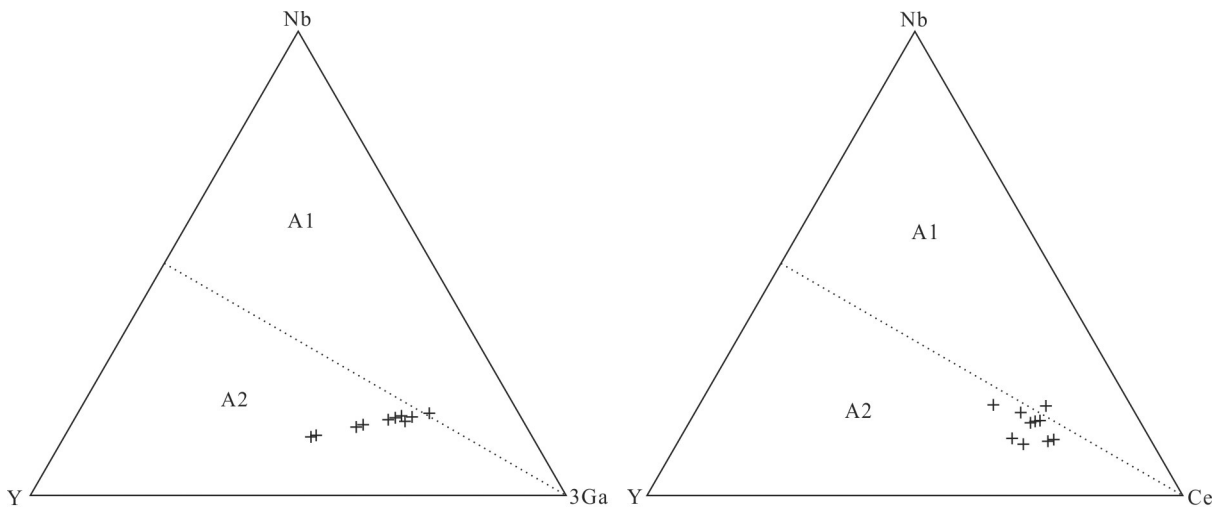


图11 乌拉盖地区火山岩Nb-Y-3Ga和Nb-Y-Ce三角图解(底图据Eby, 1992)

A1—非造山环境;A2—造山后环境

Fig.11 Nb-Y-3Ga and Nb-Y-Ce triangle diagrams of volcanic rocks in Wulagai area (after Eby, 1992)

A1—Non-orogenic environment; A2—Post-orogenic environment

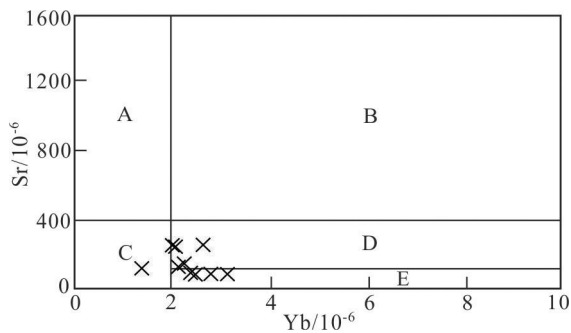


图12 乌拉盖地区火山岩Sr-Yb分类图解(据张旗等,2008)
A—高Sr低Yb型花岗岩;B—高Sr高Yb型花岗岩;C—低Sr低Yb型花岗岩;D—低Sr高Yb型花岗岩;E—非常低Sr高Yb型花岗岩

Fig.12 Sr vs. Yb diagram for volcanic rocks in Wulagai area (after Zhang Qi et al.,2008)

A—High Sr and low Yb granites; B—High Sr and Yb granites; C—Low Sr and Yb granites; D—Low Sr and high Yb granites; E—Lowest Sr and high Yb granites

以上地球化学资料表明研究区中一晚侏罗世处于伸展构造环境,其形成原因主要有两种观点,一种认为是由古太平洋板块俯冲造成(吴福元等,2000; Zhang et al., 2008; Zhang et al., 2011),另一种认为是因蒙古—鄂霍茨克洋演化导致(Meng, 2003; 陈志广等, 2006; Wang et al., 2006a; Wang et al., 2006b; 张玉涛等, 2007; 张连昌等, 2007; 周新华等, 2009; Ying et al., 2010)。大兴安岭地区远离古太平洋俯冲带(>1500 km),并且距离太平洋板块遥远的蒙古国中东部也存在大量与大兴安岭地区相似的火山岩,如此大规模火山岩的形成难以是古太平洋板块俯冲导致的结果(Fan et al., 2003);研究表明与古太平洋板块俯冲作用密切相关的大陆岩石圈于白垩纪中晚期—古近纪早期才开始减薄(李锦轶等, 2004);许文良等(2013)认为太平洋俯冲作用影响的空间范围主要在松辽盆地及其以东地区。因此,中一晚侏罗世伸展构造背景的形成与古太平洋的俯冲作用无关,推断导致该时期岩浆活动的区域动力应来自于蒙古—鄂霍茨克洋的构造演化。

晚古生代末蒙古—鄂霍茨克洋局部发生俯冲,晚三叠世开始形成自西向东的剪刀式闭合(Metelkin et al., 2010),早侏罗世之前,处于陆内俯冲、陆陆碰撞阶段;多数学者认为蒙古—鄂霍茨克洋东部最终关闭时间在早—中侏罗世(Tomurtogoo et al., 2005; Kelty et al., 2008),并且在侏罗世期

间,大兴安岭西坡—冀北—辽西地区存在一次重要的陆壳加厚过程,这一过程恰好可以与蒙古—鄂霍茨克缝合带的闭合时间相对应(许文良等, 2013),指示这一时期蒙古—鄂霍茨克洋处于碰撞造山阶段;在晚侏罗世—早白垩世,蒙古—鄂霍茨克洋进入造山后伸展阶段,而研究区中一晚侏罗世处于岩石圈伸展背景在时间与空间上与这一演化历程相一致。乌拉盖地区中一晚侏罗世火山岩(165~155 Ma)以具有A型花岗岩特征的酸性火山岩为主,表明研究区岩石圈的伸展减薄可能从中侏罗世晚期开始一直持续至155 Ma。综上所述,大兴安岭南部乌拉盖地区满克头鄂博组火山岩具有A型花岗岩的典型地球化学特征,形成于蒙古—鄂霍茨克洋闭合造山后岩石圈伸展环境。

7 结 论

(1) 乌拉盖地区满克头鄂博组火山岩年龄为(164.82 ± 0.90)~(154.8 ± 1.2)Ma,集中于165 Ma±、155 Ma±两个主要时期,属于中一晚侏罗世。

(2) 乌拉盖地区满克头鄂博组火山岩岩石组合主要为流纹岩—流纹质火山碎屑岩,属于高硅、富钾、贫镁钙系列,富集大离子亲石元素Rb、K、Th、U以及轻稀土元素,亏损高场强元素Nb、Ti、P,具有低Sr、高Yb以及壳源岩浆特征,火山岩岩浆来源于地壳岩石的部分熔融,源区残留物可能以斜长石为主,含少量角闪石。

(3) 乌拉盖地区满克头鄂博组火山岩产生于造山后伸展构造环境,其形成可能与蒙古—鄂霍茨克洋闭合后的岩石圈伸展活动有关。

References

- Bea F, Arzamastsev A, Montero P, Arzamastsev L. 2001. Anomalous alkaline rocks of Soustov, Kola: Evidence of mantle-derived metasomatic fluids affecting crustal materials[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 140(5): 554–556.
- Belousova E A, Griffin W L, O'Reilly S Y, Fisher N I. 2002. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 143: 602–622.
- Chen Yingfu, Wang Genhou, Duan Bingxin. 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).

- Chen Zhiguang, Zhang Lianchang, Zhou Xinhua, Wan Bo, Ying Jifeng, Wang Fei. 2006. Geochronology and geochemical characteristics of Mesozoic volcanic rocks section in Manzhouli Xinyouqi, Inner-Mongolia[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(12) : 2972-2986(in Chinese with English abstract).
- Cheng Yinhang, Liu Yongshun, Teng Xuejian, Yang Junquan, Li Yanfeng, Peng Lina. 2013. Geochronology, geochemistry and geological significance of Medial-Late Jurassic volcanic rocks in Mohe' ertu area, Inner Mongolia[J]. *Acta Geologica Sinica*, 87(7) : 943-956(in Chinese with English abstract).
- Cheng Yinhang, Teng Xuejian, Li Yanfeng, Yang Junquan, Peng Lina, Li Ying. 2014. Geochronology, geochemistry and geological significance of felsic volcanic rocks in Haimosaige area, Inner Mongolia[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 33(2) : 211-225(in Chinese with English abstract).
- Du Yang, Liu Zhenghong, Cui Weilong, Wang Shijie, Wang Yang, Du Chuanye. 2017. Formation age and geochemical characteristics of volcanic rocks from Manketouebo Formation in Keyihe area, Da Hingan Mountains and its tectonic implications[J]. *Global Geology*, 36(1) : 54-65(in Chinese with English abstract).
- 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.
- Fan Weiming, Guo Feng, Wang Yuejun, Lin Ge. 2003. Late Mesozoic calcalkaline volcanism of post-orogenic extension in the northern Da Hingan Mountains, northeastern China[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 121(1-2) : 115-135.
- Gao Xiaofeng, Guo Feng, Fan Weiming, Li Chaowen, Li Xiaoyong. 2005. Origin of late Mesozoic intermediate-felsic volcanic rocks from the northern Da Hingan Mountain, NE China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3) : 737-748(in Chinese with English abstract).
- Gou Jun, Sun Deyou, Zhao Zhonghua, Ren Yunsheng, Zhang Xunyuan, Fu Changliang, Wang Xi, Wei Hongyan. 2010. Zircon LA-ICP-MS 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).
- Green T H. 1994. Experimental studies of trace-element partitioning applicable to igneous petrogenesis-Sedona 16 years later[J]. *Chemical Geology*, 117(1-4) : 1-36.
- Han Baofu. 2007. Diverse post-collisional granitoids and their tectonic setting discrimination[J]. *Earth Science Frontiers*, 14(3) : 64-72(in Chinese with English abstract).
- Hirose K. 1997. Melting experiments on lherzolite KLB-1 under hydrous conditions and generation of high-magnesian andesitic melts[M]. *Geology*, 25(1): 42-44.
- Jahn B M, Wu F Y, Chen B. 2000. Granitoids of the central Asian orogenic belt and continental growth in the Phanerozoic. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh[J]. Earth Sciences*, 91(1/2): 181-193.
- Jiang Sihong, Zhang Lili, Liu Yifei, Liu Chunhua, Kang Huan, Wang Fengxiang. 2018. Metallogeny of Xing-Meng Orogenic Belt and some related problems[J]. *Mineral Deposits*, 37(4): 671-711(in Chinese with English abstract).
- Jin Ruoshi, Liu Yongshun, Zhang Yuelong, Zhang Kuo, He Peng, Chen Xingshi, Zhang Feng. 2017. The discovery of the Changtuxili Mn-Ag-Pb-Zn polymetallic deposit in the Middle-southern Segment of Da Hingan Mountains and its significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 36(7) : 1268-1275(in Chinese with English abstract).
- Kelty T, Yin A, Dash B, Gehrels G E, Ribeiro A E. 2008. Detrital zircon geochronology of Paleozoic sedimentary rocks in the Hangay-Hentey basin, north-central Mongolia: Implications for the tectonic evolution of the Mongol-Okhotsk Ocean in central Asia[J]. *Tectonophysics*, 451(1/4) : 290-311.
- Kimura G, Takahashi M, Kono M. 1990. Mesozoic collision-extrusion tectonics in eastern Asia[J]. *Tectonophysics*, 181(1/4): 15-23.
- Li Huaikun, Zhu Shixing, Xiang Zhenqun, Su Wenbo, Lu Songnian, Zhou Hongying, Geng Jianzhen, Li Sheng, Yang Fengjie. 2010. Zircon U-Pb dating on tuff bed from Gaoyuzhuang Formation in Yanqing, Beijing: Further constraints on the new subdivision of the Mesoproterozoic stratigraphy in the Northern North China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(7): 2131-2140(in Chinese with English abstract).
- Li Jinyi, Mo Shenguo, He Zhengjun, Sun Guihua, Chen Wen. 2004. The timing of crustal sinistral strike-slip movement in the northern Great Khing'an ranges and its constraint on reconstruction of the crustal tectonic evolution of NE China and adjacent areas since the Mesozoic[J]. *Earth Science Frontiers*, 11(3) : 157-168(in Chinese with English abstract).
- Li Pengchuan, Li Shichao, Liu Zhenghong, Li Gang, Bai Xinhui, Wan Le. 2016. Formation age and environment of the volcanic rocks from the Manketouebo Formation in Linxi area, Inner Mongolia[J]. *Global Geology*, 35(1) : 77-88(in Chinese with English abstract).
- Li Yinglei, Xu Guo, Liu Huichuan, Bai Lingqi, Su Yinchun, Liu Xiaonv. 2017. Petrogenesis and tectonic implication of volcanic rocks from Manitu Formation in the western great Xing'an Range[J]. *Geoscience*, 31(4): 683-696(in Chinese with English abstract).
- Lin Qiang, Ge Wenchun, Cao Lin, Sun Deyou, Lin Jingguo. 2003. Geochemistry of Mesozoic volcanic rocks in Da Hingan Ling: the bimodal volcanic rocks[J]. *Geochimica*, 32(3): 208-222(in Chinese with English abstract).
- Liu Kai, Wu Taotao, Liu Jinlong, Bao Qingzhong, Du Shouying. 2018. Geochronology and geochemistry of volcanic rocks in Manketouebo Formation of Tulihe area, northern Da Hingan

- Mountains[J]. *Geology in China*, 45(2): 367–376(in Chinese with English abstract).
- Liu Jianming, Zhang Rui, Zhang Qingzhou. 2004. The regional metallogeny of Dahingganling, China[J]. *Earth Science Frontiers*, 11(1): 269–277(in Chinese with English abstract).
- Liu Junjie, Ju Wenxin, Zhao Jiufeng, Zhang Haiping, Liu Yongzheng, Yin Jiancheng. 2006. Discussion on the characteristic and structural environmental of the Late Jurassic volcanic rock in Genhe terrain, Daxinganling[J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 1: 38–46(in Chinese with English abstract).
- Liu Zhe, Xue Huaimin, Cao Guangyue. 2017. Zircon U – Pb geochronology, intraplate extensional environment and genesis of Mesozoic volcanic rocks in Zhenglan Banner area, Inner Mongolia, china[J]. *Geology in China*, 44(1): 151–176(in Chinese with English abstract).
- Ma Yongfei, Liu Yongjiang, A.Yu. Peskov, Wang Yan, Song Weimin, Zhang Yujin, Qian Cheng, Liu Tongjun. 2022. Paleozoic tectonic evolution of the eastern Central Asian Orogenic Belt in NE China[J]. *China Geology*. doi: 10.31035/cg2021079.
- Maruyama S, Send T. 1986. Orogeny and relative plate motions: Example of the Japanese Islands[J]. *Tectonophysics*, 127(3–4): 305–329.
- Meng En, Xu Wenliang, Yang Debin, Qiu Kunfeng, Li Changhua, Zhu Hongtao. 2011. Zircon U – Pb chronology, geochemistry of Mesozoic volcanic rocks from the Lingquan basin in Manzhouli area, and its tectonic implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(4): 1209–1226(in Chinese with English abstract).
- Meng Qingren. 2003. What drove late Mesozoic extension of the northern China–Mongolia tract[J]. *Tectonophysics*, 369: 155–174.
- Metelkin D V, Vernikovskiy V A, Kazansky A Y, Wingate T D. 2010. Late Mesozoic tectonics of Central Asia based on paleomagnetic evidence[J]. *Gondwana Research*, 18(2/3): 400–419.
- Ouyang Hegen, Wu Xinli, Mao Jingwen, Su Huiming, Santosh M, Zhou Zhenhua, Chao Li. 2014. The nature and timing of ore formation in the Budunhua copper deposit, southern Great Xing'an Range: Evidence from geology, fluid inclusions, and U–Pb and Re–Os geochronology[J]. *Ore Geology Reviews*, 63(s2): 238–251.
- Rudnick R L, Gao S. 2003. Composition of the Continental Crust[M]// Rudnick R L(ed.). *The Crust*, Elsevier–Pergamon, Oxford, 1–64.
- Sengör AMC, Natal'in B A, Burtman V S. 1993. Evolution of the Altaid tectonic collage and Paleozoic crustal growth in Eurasia[J]. *Nature*, 364(6435): 299–307.
- Shan Qiang, Zeng Qiaosong, Luo Yong, Yang Wubin, Zhang Hong, Qiu Yuzhuo, Yu Xueyuan. 2011. SHRIMP U–Pb ages and petrology studies on the potassic and podic rhyolites in Altai, North Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(12):3653–3665.
- She Hongquan, Li Jinwen, Xiang Anping, Guan Jidong, Yang Xuncheng, Zhang Dequan, Tan Gang, Zhang Bin. 2013. 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 Qiuliang, Cui Tianri, Tang Zheng, Li Wei, Wu Xinwei, Jiang Bin. 2015. Chronology, geochemistry and petrogenesis of the volcanic rocks in Manitu 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 Xiaoming. 2001. Zircon U – Pb dating and study on geochemistry of volcanic rocks in Manitu Formation from southern Manchuria, Inner Mongolia[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(10): 3083–3094(in Chinese with English abstract).
- Sun Deyou, Wu Fuyuan, Gao Shan, Lu Xiaoping. 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 S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and process[C]//Sauders A D, Norry M J. *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society Special Publication, 42(1): 313–345.
- Tan Haoyuan, He Zhonghua, Chen Fei, Du Yuedan, Ren Zihui. 2007. 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).
- Tischendorf, Paelchen W. 1985. Zur Klassifikation von Granitoiden. Classification of granitoids[J]. *Zeitschrift fuer Geologische Wissenschaften*, 13(5): 615–627.
- Tomurtogoo O, Windley B F, Kroner A, Badarch G, Liu D Y. 2005. Zircon age and occurrence of the adaatsag ophiolite and muron shear zone, central mongolia: Constraints on the evolution of the mongol–okhotsk ocean, suture and orogen[J]. *Journal of the Geological Society*, 162(1), 197–229.
- Wang Fei, Zhou Xinhua, Zhang Lianchang, Ying Jifeng, Zhang Yutao, Wu Fuyuan. 2006a. 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 Jinfang, Li Yingjie, Li Hongyang, Dong Peipei. 2018. Formation age of the Delehada Early Cretaceous A–type granite in Xiwu Banner, Inner Mongolia: Evidence from zircon U–Pb chronology[J]. *Geology in China*, 45(1): 197–198(in Chinese with English abstract).
- Wang Pujun, Chen Fukun, Chen Shuming. 2006b. Geochemical and Nd–Sr–Pb isotopic composition of Mesozoic volcanic rocks in the

- Songliao basin, NE China[J]. *Geochemical Journal*, 40: 149–159.
- Wang Tao, Guo Lei, Zhang Lei, Yang Qidi, Zhang Jianjun, Tong Ying, Ye Ke. 2015. Timing and evolution of Jurassic–Cretaceous granitoid magmatism in the Mongol–Okhotsk belt and adjacent areas, NE Asia: Implications for transition from contractional crustal thickening to extensional thinning and geodynamic settings[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 97(Part B,1): 365–392.
- Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. 1987. A–type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 95(4): 407–419.
- Wilson M. 1989. *Igneous Petrogenesis*[M]. London: Unwin Hyman Press, 295–323.
- Wu Fuyuan, Lin Jingqian, Wilde S A, Zhang Xiaou and Yang Jinhui. 2005. Nature and significance of the Early Cretaceous giant igneous event in Eastern China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 233(1/2): 103–119.
- Wu Fuyuan, Sun Deyou, Ge Wenchun, Zhang Yanbin, Grant M L, Wilde S A, Jahn B M. 2011. Geochronology of the Phanerozoic granitoids in northeastern China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 41(1): 1–30.
- Wu Fuyuan, Sun Deyou, Zhang Guangliang. 2000. Deep Geodynamics of Yanshan Movement. *Geological Journal of China Universities*, 6(3): 379–388(in Chinese with English abstract).
- Wu Yueyong, Jiang Haijiao, Kou Shuai. 2016. Geochemical characteristics of Early Cretaceous volcanic rocks in Qagan Obo area, SonidLeft Banner, Inner Mongolia[J]. *Geological Survey and Research*, 39(1): 1–14,23(in Chinese with English abstract).
- Xiao Wenjiao, Windley B F, Hao Jie, Zhai Mingguo. 2003. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China: Termination of the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Tectonic*, 22: 1484–1505.
- Xu Meijun, Xu Wenliang, Meng En, Wang Feng. 2011. LA–ICP–MS zircon U–Pb chronology and geochemistry of Mesozoic volcanic rocks from the Shanghulin–Xiangyang Basin in Erguna area, northeastern Inner Mongolia[J]. *Geological Bulletin of China*, 30(9): 1321–1338(in Chinese with English abstract).
- Xu Wenliang, Ji Weiqiang, Pei Fuping, Meng En, Yu Yang, Yang Debin, Zhang Xingzhou. 2009. Triassic volcanism in eastern Heilongjiang and Jilin provinces, NE China: Chronology, geochemistry, and tectonic implications[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 34(3): 392–402.
- Xu Wenliang, Ge Wenchun, Pei Fuping, Meng En, Yu Yang, Yang Debin. 2008. Geochronological framework and tectonic significance of Mesozoic volcanism in northeastern China[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 27(3): 286–287(in Chinese with English abstract).
- Xu Wenliang, Wang Feng, Pei Fuping, Meng En, Tang Jie, Xu Meijun. 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).
- Yang Yang, Gao Fuhong, Chen Jingsheng, Zhou Yi, Zhang Jian, Jin Xin. 2012. Zircon U–Pb ages of Mesozoic volcanic rocks in Chifeng area[J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 42(2): 257–268(in Chinese with English abstract).
- Ying Jifeng, Zhou Xinhua, Zhang Lianchang, Wang Fei. 2010. Geochronological framework of Mesozoic volcanic rocks in the Great Xing’an Range, NE China, and their geodynamic implications[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 39(6): 786–793.
- Zeng Qingdong, Liu Jianming, Yu Cchangming, Ye Jie, Liu Hongtao. 2011. Metal deposits in the Da Hinggan Mountains, NE China: Styles, characteristics and exploration potential[J]. *International Geology Review*, 53(7): 846–878.
- Zhai Degao, Liu Jiajun, Wang Jianping, Yang Yongqiang, Zhang Hongyu, Wang Xxulong, Zhang Qibin, Wang Gongwen, Liu Zhenjiang. 2014. Zircon U–Pb and molybdenite Re–Os geochronology, and whole–rock geochemistry of the Hashitu molybdenum deposit and host granitoids, Inner Mongolia, NE China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 79(2): 144–160.
- Zhang Chao, Yang Weihong, He Zhonghua, Wu Hao, Wu Qing. 2014. Chronology and geochemistry of rhyolites in Manketouebo Formation from Taerqi area, southern–central Greater Xing’an Range[J]. *Global Geology*, 33(2): 255–265(in Chinese with English abstract).
- Zhang F Q, Chen H L, Yu X, Dong C W, Yang S F, Pang Y M, Batt G E. 2011. Early Cretaceous volcanism in the northern Songliao Basin, NE China, and its geodynamic implication[J]. *Gondwana Research*, 19(1): 163–176.
- Zhang Jiheng, Ge Wenchun, Wu Fuyuan, Wilde S. A, Yang Jinhui, Liu Xiaoming. 2008. Large–scale Early Cretaceous volcanic events in the northern Great Xing’an Range, Northeastern China[J]. *Lithos*, 102(1–2): 138–157.
- Zhang Jiheng. 2009. Geochronology and geochemistry of the Mesozoic volcanic rocks in the Great Xing’an Range, northeastern China: Ph. D dissertation. Beijing: China University of Geosciences (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jiongfei, Pang Qingbang, Zhu Qun, Jin Chengzhu. 2003. Mengentaolegai Ag–Pb–Zn deposit in Inner Mongolia: Ar–Ar age of muscovite and its significance[J]. *Mineral Deposits*, 22(3): 253–256(in Chinese with English abstract).
- Zhang Lianchang, Zhou Xinhua, Ying Jifeng, Wang Fei, Guo Feng, Wan Bo, Chen Zhiguang. 2008. Geochemistry and Sr–Nd–Pb–Hf isotopes of Early Cretaceous basalts from the Great Xing’an Range, NE China: Implications for their origin and mantle source characteristics[J]. *Chemical Geology*, 256(1–2): 12–23.
- 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 Mountains[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 volcanics 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, Wang Yuanlong, Jin Weijun, Jia Xiuqin, Li Chengdong. 2008. Pre-, syn-, and post orogenic granitic rocks recognition[J]. *Geological Bulletin of China*, 27(1) :1–18(in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Ran gao, Li Chengdong. 2012. A–type granite: What is the essence? [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 31(4): 621–626(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) : 290–302(in Chinese with English abstract).
- Zhang Yutao, Zhang Lianchang, Zhou Xinhua, Wang Fei, Hou Quanlin, Liu Qing. 2007. Geochemical of basaltic rocks from Yakeshi, northern Da Hinggan Moutain and its tectonic implications[J]. *Geological Bulletin of China*, 27(1): 112–120(in Chinese with English abstract).
- Zhao Shuyue, Han Yandong, Zhu Chunyan, Guo Kuicheng, Wang Jianmin, Liu Baoshan. 2004. Geochemical characteristics and geological significance of intermediate and intermediate– acid volcanic rocks in the northern sector of the Da Hinggan volcanic eruption zone[J]. *Journal of Geomechanics*, 10(3): 276–287(in Chinese with English abstract).
- Zhao Zhonghua, Sun Deyou, Gou Jun, Ren Yunsheng, Fu Changliang, Zhang Xueyuan. 2011. Chronology and geochemistry of volcanic rocks in Tamulangou Formation from southern Manchuria, Inner Mongolia[J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 41(6) : 1865–1880(in Chinese with English abstract).
- Zhou Xinhua, Ying Jifeng, Zhang Lianchang, Zhang Yutao. 2009. The petrogenesis of Late Mesozoic volcanic rock and the contributions from ancient micro–continents: constraints from the zircon U–Pb dating and Sr–Nd–Pb–Hf isotopic systematics[J]. *Earth Science (Journal of China University of Geosciences)*, 34(1): 1–10(in Chinese with English abstract).
- Zhong Mishan, Wang Zhongjiang, Ao Guang, Zhai Furong, Wang Fenli, Wang Qi, Tan Chao, Yang Yunlai. 2017. Zircon U–Pb chronology and geochemical characteristics of the volcanic rocks of Erlanghe formation in Zhanguangcai range[J]. *Geological Survey and Research*, 40(3):161–168,177(in Chinese with English abstract).
- 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.
- 陈志广, 张连昌, 周新华, 万博, 英基丰, 王菲. 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.
- 程银行, 刘永顺, 滕学建, 杨俊泉, 李艳锋, 彭丽娜. 2013. 内蒙古莫合尔图中一晚侏罗世火山岩年代学、地球化学研究及其意义[J]. *地质学报*, 87(7): 943–956.
- 程银行, 滕学建, 李艳锋, 杨俊泉, 彭丽娜, 李影. 2014. 内蒙古海莫赛格酸性火山岩锆石 U–Pb 年龄、地球化学特征及其意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 33(2): 211–225.
- 杜洋, 刘正宏, 崔维龙, 王师捷, 王阳, 杜传业. 2017. 大兴安岭克一河地区满克头鄂博组火山岩形成时代、地球化学特征及地质意义[J]. *世界地质*, 36(1): 54–65.
- 高晓峰, 郭锋, 范蔚茗, 李超文, 李晓勇. 2005. 南兴安岭晚中生代中酸性火山岩的岩石成因[J]. *岩石学报*, 21(3): 737–748.
- 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流纹岩锆石 U–Pb 定年及岩石成因[J]. *岩石学报*, 26(1): 333–344.
- 韩宝福. 2007. 后碰撞花岗岩类的多样性及其构造环境判别的复杂性[J]. *地学前缘*, 14(3): 64–72.
- 江思宏, 张莉莉, 刘翼飞, 刘春花, 康欢, 王丰翔. 2018. 兴蒙造山带成矿规律及若干科学问题[J]. *矿床地质*, 37(4): 671–711.
- 金若时, 刘永顺, 张跃龙, 张阔, 何鹏, 陈行时, 张峰. 2017. 大兴安岭中南段昌图锡力锰、银、铅、锌多金属矿床的发现及其意义[J]. *地质通报*, 36(7): 1268–1275.
- 李怀坤, 朱士兴, 相振群, 苏文博, 陆松年, 周红英, 耿建珍, 李生, 杨锋杰. 2010. 北京延庆高于庄组凝灰岩的锆石 U–Pb 定年研究及其对华北北部中元古界划分新方案的进一步约束[J]. *岩石学报*, 26(7): 2131–2140.
- 李锦轶, 莫申国, 和政军, 孙桂华, 陈文. 2004. 大兴安岭北段地壳左行走滑运动的时代及其对中国东北及邻区中生代以来地壳构造演化重建的制约[J]. *地学前缘*, 11(3): 157–168.
- 李鹏川, 李世超, 刘正宏, 李刚, 白新会, 万乐. 2016. 内蒙古林西地区满克头鄂博组火山岩形成时代及构造环境[J]. *世界地质*, 35(1): 77–88.
- 李英雷, 徐国, 刘汇川, 白灵麒, 苏银春, 刘小女. 2017. 大兴安岭西缘玛尼吐组火山岩成因及构造指示[J]. *现代地质*, 31(4) : 683–696.
- 林强, 葛文春, 曹林, 孙德有, 林经国. 2003. 大兴安岭中生代双峰式火山岩的地球化学特征[J]. *地球化学*, 32(3): 208–222.
- 刘建明, 张锐, 张庆洲. 2004. 大兴安岭地区的区域成矿特征[J]. *地学前缘*, 11(1): 269–277.
- 刘俊杰, 鞠文信, 赵九峰, 张海平, 柳永正, 殷建成. 2006. 大兴安岭根河岩区晚侏罗世火山岩特征及构造环境探讨[J]. *华南地质与矿产*, 1: 38–46.
- 刘凯, 吴涛涛, 刘金龙, 鲍庆中, 杜守营. 2018. 大兴安岭北段图里河

- 地区满克头鄂博组火山岩年代学及地球化学[J]. 中国地质, 45(2): 367-376.
- 刘哲, 薛怀民, 曹光跃. 2017. 内蒙古正蓝旗地区中生代火山岩锆石U-Pb年龄与板内伸展环境成因讨论[J]. 中国地质, 44(1): 151-176.
- 孟恩, 许文良, 杨德彬, 邱昆峰, 李长华, 祝洪涛. 2011. 满洲里地区灵泉盆地中生代火山岩的锆石U-Pb年代学、地球化学及其地质意义[J]. 岩石学报, 27(4): 1209-1226.
- 欧阳荷根, 李睿华, 周振华. 2016. 内蒙古双尖子山银多金属矿床侏罗纪成矿的年代学证据及其找矿意义[J]. 地质学报, 90(8): 1835-1845.
- 单强, 曾乔松, 罗勇, 杨武斌, 张红, 裘瑜卓, 于学元. 2011. 新疆阿尔泰康布铁堡组钾质和钠质流纹岩的成因及同位素年代学研究[J]. 岩石学报, 27(12): 3653-3665.
- 余宏全, 李进文, 向安平, 关继东, 杨郟城, 张德全, 谭刚, 张斌. 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): 571-594.
- 司秋亮, 崔天日, 唐振, 李伟, 吴新伟, 江斌. 2015. 大兴安岭中段柴河地区玛尼吐组火山岩年代学、地球化学及岩石成因[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 45(2): 389-403.
- 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.
- 孙德有, 吴福元, 高山, 路孝平. 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]. 地学前缘, 12(2): 263-275.
- 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.
- 王金芳, 李英杰, 李红阳, 董培培. 2018. 内蒙古西乌旗德勒哈达早白垩世A型花岗岩形成时代: 锆石U-Pb定年证据[J]. 中国地质, 45(1): 197-198.
- 吴福元, 孙德有, 张广良. 2000. 论燕山运动的深部地球动力学本质[J]. 高校地质学报, 6(3): 379-388.
- 武跃勇, 姜海蛟, 寇帅. 2016. 内蒙古苏尼特左旗查干敖包地区早白垩世火山岩地质及地球化学特征[J]. 地质调查与研究, 39(1): 1-14, 23.
- 徐美君, 许文良, 孟恩, 王枫. 2011. 内蒙古东北部额尔古纳地区上护林向阳盆地中生代火山岩LA-MC-ICP-MS锆石U-Pb年龄和地球化学特征[J]. 地质通报, 30(9): 1321-1338.
- 许文良, 葛文春, 裴福萍, 孟恩, 于洋, 杨德彬. 2008. 东北地区中生代火山作用的年代学格架及其构造意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 27(3): 286-287.
- 许文良, 王枫, 裴福萍, 孟恩, 唐杰, 徐美君. 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.
- 杨扬, 高福红, 陈井胜, 周漪, 张健, 金鑫. 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)(s2), 257-268.
- 张超, 杨伟红, 和钟铎, 吴浩, 吴庆. 2014. 大兴安岭中南段塔尔气地区满克头鄂博组流纹岩年代学和地球化学研究[J]. 世界地质, 33(2): 255-265.
- 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]. 北京: 中国地质大学.
- 张炯飞, 庞庆邦, 朱群, 金成洙. 2003. 内蒙古孟恩陶勒盖银铅锌矿床白云母Ar-Ar年龄及其意义[J]. 矿床地质, 22(3): 253-256.
- 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.
- 张旗, 王元龙, 金惟俊, 贾秀勤, 李承东. 2008. 造山前、造山和造山后花岗岩的识别[J]. 地质通报, 27(1): 1-18.
- 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.
- 张学斌, 周长红, 来林, 徐翠, 田颖, 陈丽贞. 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): 290-302.
- 张玉涛, 张连昌, 英基丰, 周新华, 王非, 侯泉林, 刘庆. 2007. 大兴安岭北段塔河地区早白垩世火山岩地球化学及源区特征[J]. 岩石学报, 23(11): 2811-2822.
- 赵书跃, 韩彦东, 朱春燕, 郭奎城, 王建民, 刘宝山. 2004. 大兴安岭火山喷发带北段中性、中酸性火山岩地球化学特征及其地质意义[J]. 地质力学学报, 10(3): 276-287.
- 赵忠华, 孙德有, 苟军, 任云生, 付长亮, 张学元. 2011. 满洲里南部塔木兰沟组火山岩年代学与地球化学[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 41(6): 1865-1880.
- 周新华, 英基丰, 张连昌, 张玉涛. 2009. 大兴安岭晚中生代火山岩成因与古老地块物质贡献: 锆石U-Pb年龄及多元同位素制约[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 34(1): 1-10.
- 仲米山, 王忠江, 敖光, 翟富荣, 王粉丽, 王岐, 谭超, 杨运来. 2017. 张广才岭二浪河组火山岩的锆石U-Pb年代学及地球化学特征[J]. 地质调查与研究, 40(3): 161-168, 177.