

内蒙古东乌旗地区满克头鄂博组流纹岩年代学、地球化学特征及其地质意义

尹志刚¹, 郝科¹, 刘成龙², 王阳¹, 李海娜¹, 李敏¹, 官兆民¹, 张圣听¹
YIN Zhigang¹, HAO Ke¹, LIU Chenglong², WANG Yang¹, LI Haina¹, LI Min¹, GONG Zhaomin¹, ZHANG Shengting¹

1. 辽宁工程技术大学矿业学院, 辽宁阜新 123000;

2. 黑龙江省第四地质勘察院, 黑龙江哈尔滨 150036

1. Mining Institute of Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, China;

2. Fourth Geological Exploration Institute of Heilongjiang Province, Harbin 150036, Heilongjiang, China

摘要:为确定内蒙古东乌旗地区满克头鄂博组火山岩地层的时代归属和形成构造背景,对满克头鄂博组流纹岩进行了年代学、地球化学特征等研究。流纹岩的LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄为 150.9 ± 4.2 Ma,时代归属晚侏罗世。满克头鄂博组流纹岩属于高钾钙碱性系列岩石,且具有高硅、富碱、高铝、贫钙贫镁的特征。稀土元素总量变化较大,配分曲线右倾,具有负Eu异常;富集大离子亲石元素(LILE)Rb、K、Th和轻稀土元素,亏损Sr和Nb、Ti、P;基性相容元素Cr、Co、Ni和Mg[#]值较低,岩浆来源于下地壳岩石的部分熔融。根据元素地球化学特征,流纹岩具有A型花岗岩特征,结合相关构造判别图解,表明东乌旗地区在晚侏罗世处于伸展构造环境,可能与蒙古-鄂霍茨克洋闭合造山后伸展作用体制有关。

关键词:东乌旗地区;满克头鄂博组;锆石U-Pb年龄;伸展环境;蒙古-鄂霍茨克洋

中图分类号:P597+.3;P588.14+1 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2019)11-1825-11

Yin Z G, Hao K, Liu C H, Wang Y, Li H N, Li M, Gong Z M, Zhang S T. Geochronological and geochemical characteristics of rhyolite in the Manketou'ebo Formation of Dong Ujimqin Banner, Inner Mongolia, and its geological implications. Geological Bulletin of China, 2019, 38(11):1825-1835

Abstract: In order to determine the age attribution and tectonic setting of the volcanic strata of the Manketou'ebo Formation in Dong Ujimqin Banner of Inner Mongolia, the authors studied the geochronological and geochemical characteristics of the rhyolite from the Manketou'ebo Formation. The weighted age of rhyolite by LA-ICP-MS zircon U-Pb dating is 150.9 ± 4.2 Ma, suggesting Late Jurassic. The rhyolite in the Manketou'ebo Formation belongs to the high-potassic calc-alkaline series of rocks and is characterized by high silicon, rich alkali, high aluminum, low calcium and depleted magnesium. The total amount of rare earth elements changes greatly, the distribution curve is right-inclined, and there is negative anomaly of Eu. The rocks are enriched in large ion lithophile elements of Rb, K, Th, and LREE, and simultaneously depleted in elements of Sr, Nb, Ti and P. The basic compatible elements Cr, Co, Ni and Mg[#] are relatively low, and the magma was derived from the partial melting of the lower crust rocks. According to element geochemical characteristics, rhyolite has A-type granite characteristics. Combined with the related structural discriminant diagrams, the authors hold that the Dong Ujimqin Banner area was in an extensional tectonic setting in the Late Jurassic, and may be related to the extensional system of the Mongolian-Okhotsk Ocean after the closure of the ocean.

Key words: Dong Ujimqin Banner area; Manketou'ebo Formation; zircon U-Pb age; extensional environment; Mongol-Okhotsk Ocean

收稿日期:2018-07-25;修订日期:2018-09-15

资助项目:内蒙古自治区地质勘查基金项目《内蒙古自治区锡林郭勒盟达布希拉吐大队等四幅1:5万区域矿产地质调查》

(编号:NMKD2013-04)

作者简介:尹志刚(1962-),男,博士,教授,从事区域矿产资源的研究。E-mail:yzg63@163.com

大兴安岭地区位于中亚造山带东部,从北向南依次横跨额尔古纳地块和兴安地块,甚至延伸到华北克拉通北缘,是多块体拼合的构造叠加区^[1]。该地区大面积分布的火山岩是中生代岩浆构造演化的有力证据。近年来,中国许多学者对大兴安岭中段与南段的中生代火山岩进行了详细的年代学和地球化学研究,并对该时期的岩浆活动有了一定的认识,也为其地球动力学背景提供了相关依据^[2-3]。东乌珠穆沁旗(以下简称东乌旗)地区位于大兴安岭南段,出露大面积的中性-酸性火山岩,是大兴安岭中生代巨型火山岩带的重要组成部分,已有的研究主要集中在岩石学的特征描述,缺乏高精度的年代学和地球化学研究。对该区域岩石年代学、岩石地球化学特征及大地构造背景的研究,有助于火山岩浆作用及成矿作用的探讨,亦对该地区中生代构造演化的研究具有重要意义。

笔者在内蒙古自治区1:5万区域矿产地质调查项目的基础上,对东乌旗地区分布的满克头鄂博组流纹岩进行了岩石学、年代学、地球化学研究,对研究区满克头鄂博组流纹岩形成时代、岩石成因、构造环境进行分析,为进一步研究内蒙古北部满克头鄂博组火山岩的岩石成因及形成构造环境提供新的依据,为该地区进一步开展矿产调查和基础地质等工作提供基础性资料。

1 地质概况及岩石学特征

大兴安岭中生代火山岩大致以霍林河—乌兰浩特一线分为界为南北两区^[2],也有学者认为以北纬47°20'为界线分区^[3-4]。大兴安岭南、北两区在岩石类型、岩石组合、化学成分及Nd同位素特征上存在明显的差异,暗示南、北两区的火山岩成因及形成构造背景不同。研究区位于内蒙古东北部的锡林郭勒盟东乌珠穆沁旗,属于大兴安岭火山岩带南区,隶属于二连—东乌旗晚华力西期巨型岩浆岩带,燕山期被NNE向大兴安岭岩浆岩带叠加(图1)。区内侵入岩分布范围较广,主要为中石炭世二长花岗岩、石英闪长岩、花岗闪长岩,早二叠世正长花岗岩、二长花岗岩,以及晚侏罗世花岗斑岩、碱长花岗岩等,呈岩脉、岩株及岩枝产出,长轴方向主要为NEE向,与区域主构造线方向吻合。

中生代火山岩主要受NE向断裂控制,呈条带状展布^[5-6]。依据岩石组合特征、区域对比及年代学

数据,区内中生代火山岩地层由老到新划分为满克头鄂博组、玛尼吐组和白音高老组^[7]。玛尼吐组以安山岩等中酸性岩为主,白音高老组以流纹岩等酸性岩为主体。满克头鄂博组主要分布于研究区西南部。岩性有流纹岩、流纹质(角砾)晶屑(玻屑、岩屑)凝灰岩、流纹质(角砾、晶屑)熔结凝灰岩等。岩石以灰色、灰黑色流纹岩为主,斑状结构,基质隐晶-嵌晶结构,流纹构造。斑晶为斜长石,约占6%,半自形板状、粒状,聚片双晶宽窄不一,更长石(牌号为14),大小0.15~1.9mm;黑云母:片状,黄褐色,平行消光,0.3~1mm,含量1%~2%。基质为隐晶质结构,流纹构造,沿流纹长英质球粒嵌晶和长英质隐晶集合体及少量褐色火山玻璃相间分布。部分岩石可见长石石英微晶与褐色火山玻璃呈宽窄不一的条带,相间分布在隐晶质中形成流纹构造。

2 锆石U-Pb定年

2.1 样品制备与测试方法

用于锆石U-Pb测年的样品采自东乌旗东部地区满克头鄂博组流纹岩,测年样品的采样位置为北纬45°34'21"、东经117°04'54",用于岩石地球化学分析的样品采自东乌旗地区满克头鄂博组地层剖面,均为新鲜的流纹岩。

采用重力和磁选方法从流纹岩样品中挑选出锆石后,在镜下挑选出颗粒较大、晶形较好、透明、无明显包裹体且无裂隙的锆石颗粒,将锆石颗粒粘贴在环氧树脂表面并打磨抛光,使其内部结构剖面充分暴露,以此制成样品靶,然后进行光学显微镜照相及阴极发光(CL)图像分析。锆石挑选、制靶及照相由河北省区域地质矿产调查研究所实验室完成,锆石U-Pb年龄在天津地质调查中心同位素实验室LA-ICP-MS仪器上测定。采用ICPMS-DataCal软件计算所测锆石的元素含量和U-Pb同位素比值^[8],参照Anderson^[9]提出的方法对所测普通Pb数据进行校正。最后通过Isoplot程序进行锆石年龄的计算和谐和图的绘制。具体的数据处理方法及仪器的操作规程见参考文献[10]。

2.2 定年结果

本文所选的大兴安岭南段东乌旗地区满克头鄂博组流纹岩样品的锆石阴极发光图像见图2,LA-ICP-MS锆石U-Pb定年结果列于表1,由测年数据绘制的锆石U-Pb谐和图见图3。

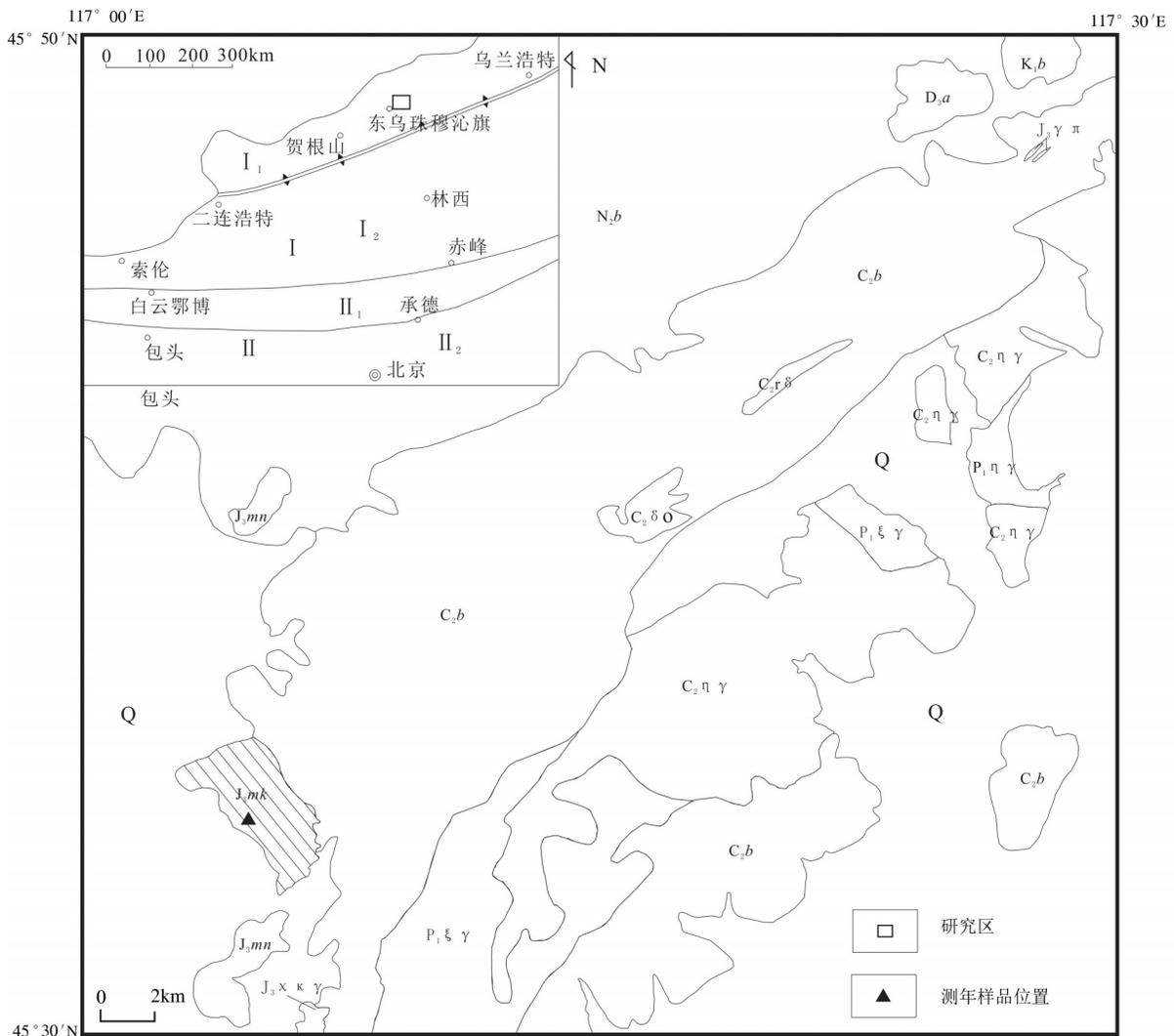


图1 东乌旗地区地质简图

Fig. 1 Simplified geological map of Dong Ujimqin Banner area

Q—第四系;N₂b—上新统宝格达乌拉组;K₂b—下白垩统白音高老组;J₃mn—上侏罗统玛尼吐组;J₃mk—上侏罗统满克头鄂博组;
 D₂a—上泥盆统宝格达乌拉组;J₃γπ—晚侏罗世花岗斑岩;J₃κγ—晚侏罗世碱长花岗岩;P₁ξγ—早二叠世正长花岗岩;
 P₁ηγ—早二叠世二长花岗岩;C₂ηγ—中石炭世二长花岗岩;C₂γδ—中石炭世花岗闪长岩;C₂δo—中石炭世石英闪长岩;
 C₂b—中石炭统宝力高庙组;I—天山—兴蒙造山带中段(内蒙古造山带);I₁—西伯利亚板块南缘;
 I₂—华北板块北缘;II—华北板块;II₁—华北板块逆冲褶皱隆升带;II₂—华北板块

对满克头鄂博组流纹岩(TW3616-1)进行了LA-ICP-MS锆石U-Pb同位素测年分析,共计测定13点单颗锆石。锆石阴极发光图像(图2)显示,锆石可以划分成不同特征的2组:一组呈长柱状,自形,具有明显的环带构造,显示岩浆成因锆石的特征;另一组呈浑圆状,细密环带,可能为残留锆石。2组锆石的Th/U值均在0.4~0.7之间,表明为岩浆成因锆石。对上述2组锆石测得的²⁰⁶Pb/²³⁸U表面年

龄校准后,其中9个锆石年龄谱和性较好(图3),²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄加权平均值为150.9±4.2Ma,代表了岩浆结晶的年龄,即形成时代为晚侏罗世;另外4个残留锆石的表面年龄为284.9±6.0~336.2±2.7Ma。由于研究区大面积发育中石炭世宝力高庙组火山岩和二长花岗岩、花岗闪长岩、石英闪长岩,该年龄应该是捕获了中石炭世火山岩或侵入岩的锆石年龄,代表了中石炭世的火山岩岩浆事件。

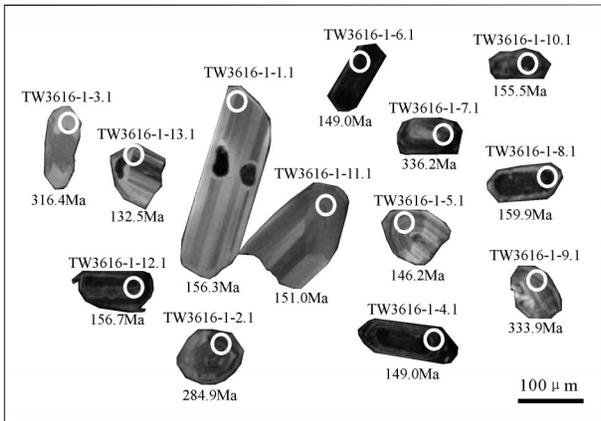


图2 满克头鄂博组流纹岩锆石阴极发光(CL)图像

Fig. 2 CL images of zircons for rhyolites in Manketou'ebo Formation

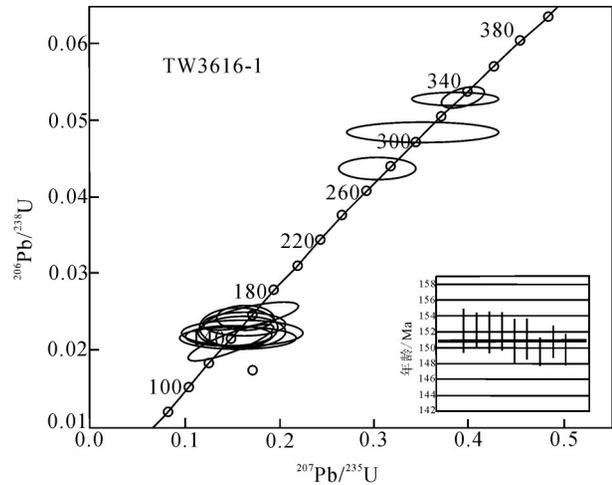


图3 满克头鄂博组流纹岩锆石U-Pb谐和图

Fig. 3 Zircon U-Pb concordia diagram of rhyolites in Manketou'ebo Formation

3 流纹岩地球化学特征

3.1 分析方法

对野外采集的满克头鄂博组流纹岩样品进行详细的岩相学研究,挑选出新鲜无蚀变的代表性样品测定全岩主量、微量元素含量。首先去除样品的风化表面,再用蒸馏水清洗干净,然后置于120℃的烘干箱中烘烤,待样品干燥后使用无污染的鄂式碎样机将其粉碎,再通过多头玛瑙球磨机将粗碎样品磨至200目以下。粗碎和磨制工作在黑龙江省第四地质勘察院实验室进行。主量元素由天津地质矿产研究所实验室测定,采用XRF法分析;微量及稀土元素测试由中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所实验室完成,采用ICP-MS法分析。具体样品处理过程、分析准确度、精确度与分析过程见参考文献[11-12]。

3.2 主量元素

研究区中生代火山岩主量元素分析结果见表2,满克头鄂博组流纹岩具有高硅、富碱、高钾、高铝,以及贫钙、镁等特点。其中SiO₂含量为73.36%~76.71%,平均值为75.37%,属于酸性火山岩;全碱含量K₂O+Na₂O为7.97%~9.08%,平均值为8.64%;Al₂O₃含量为11.86%~13.51%,平均值为12.39%;K₂O/Na₂O值为1.25~1.52,平均值为1.40;CaO为0.32%~0.82%,MgO为0.2%~0.46%,含镁系数(Mg[#])为0.13~0.53,平均值为0.29。

从火山岩TAS图解(图4-a)可以看出,样品点均落入流纹岩区,属亚碱性系列;通过AFM图解(图4-b)进一步投图,样品点均落入钙碱性系列;岩石里特曼指数(σ)为2.09%~2.53%,均小于3%,属于钙碱性系列岩石;岩石分异指数(DI)为93.15~96.26;在SiO₂-K₂O图解(图5-a)中,样品点均落入高钾钙碱性系列区域;岩石铝饱和指数A/CNK为0.94~1.10,在A/CNK-A/NK铝质-准铝质判别图解(图5-b)中,样品点均落入准铝质-弱过铝质区。以上特征显示,研究区满克头鄂博组流纹岩为高钾钙碱性系列的准铝质-弱过铝质岩石。

3.3 稀土和微量元素

满克头鄂博组流纹岩的稀土元素总量(Σ REE)在 95.51×10^{-6} ~ 311.81×10^{-6} 之间,平均值为 179.59×10^{-6} ;轻稀土元素总量(Σ LREE)质量分数为 93.33×10^{-6} ~ 280.78×10^{-6} ,重稀土元素总量(Σ HREE)为 9.13×10^{-6} ~ 31.03×10^{-6} ,轻、重稀土元素比值(LREE/HREE)为7.69~10.22。该组岩石在球粒陨石标准化^[13]稀土元素配分图中呈右倾型配分模式(图6-a),轻稀土元素(LREE)相对富集、重稀土元素(HREE)相对亏损;该组岩石轻、重稀土元素分馏系数(La/Yb)_N=7.36~11.19,(Ce/Yb)_N=4.29~6.90,(La/Sm)_N=2.26~5.09,轻、重稀土元素分馏明显,且轻稀土元素分馏程度稍强于重稀土元素。所有样品均具有明显的负Eu异常, δ Eu值在0.08~0.76之间,平

表 1 满克头鄂博组流纹岩(TW3616-1)LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 测年结果

Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Th-Pb analyses of rhyolite (TW3616-1) in the Manketou'ebo Formation

点号	²⁰⁶ Pb _i /%	含量/10 ⁻⁶			²³² Th/ ²³⁸ U	²⁰⁷ Pb*/ ²⁰⁶ Pb*		²⁰⁷ Pb*/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb*/ ²³⁸ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb
		U	Th	²⁰⁶ Pb*		比值	±%	比值	±%	比值	±%		
1.1	8.01	77	54	1.75	0.73	0.078	24	0.262	24	0.02454	2.9	156.3±4.4	1,136±480
2.1	2.96	291	110	11.6	0.39	0.054	19	0.336	19	0.04518	2.1	284.9±6.0	369±420
3.1	6.05	53	33	2.46	0.63	0.073	27	0.50	27	0.0503	2.9	316.4±9.0	1,006±540
4.1	0.89	2658	1606	53.9	0.62	0.0473	3.6	0.153	3.6	0.02339	0.46	149.01±0.7	64±86
5.1	2.30	526	261	10.6	0.51	0.0489	11	0.155	11	0.02294	1.1	146.2±1.5	143±270
6.1	1.22	1697	688	34.5	0.42	0.0467	5.8	0.151	5.8	0.02339	0.73	149.0±1.1	34±140
7.1	1.20	490	342	22.8	0.72	0.0546	9.6	0.403	9.7	0.05353	0.83	336.2±2.7	397±220
8.1	0.57	2349	1010	51.0	0.44	0.0498	2.6	0.173	3.1	0.02512	1.6	159.9±2.5	187±61
9.1	1.23	771	358	35.6	0.48	0.0515	4.8	0.378	4.8	0.05316	0.72	333.9±2.3	264±110
10.1	1.86	1122	409	24.0	0.38	0.0491	11	0.165	11	0.02442	1.1	155.5±1.7	153±260
11.1	9.95	90	51	2.03	0.59	0.129	19	0.420	19	0.02370	3.4	151.0±5.1	2,078±340
12.1	0.20	1538	589	32.6	0.40	0.0583	2.6	0.198	2.6	0.02461	0.57	156.75±0.9	542±56
13.1	3.15	212	97	3.91	0.47	0.0596	15	0.171	15	0.02077	1.9	132.5±2.4	589±320

注:²⁰⁶Pb_i和²⁰⁶Pb*分别表示普通 Pb 和放射性成因 Pb;普通 Pb 根据实测²⁰⁴Pb 进行矫正,误差为 1σ

均值为 0.38,表明岩浆源区的残留矿物中有斜长石存在或在岩浆演化过程中发生过斜长石的分离结晶作用。

满克头鄂博组流纹岩在原始地幔标准化^[13]微量元素蛛网图(图 6-b)上整体呈右倾特征,相对富集 Rb、Th、K 等大离子亲石元素(LILE),Zr、Sm 元素适度富集,富集程度相对原始地幔高达 12~657 倍;Zr 富集说明成岩过程中有地壳的物质参与,相对亏损 Ba、Nb 元素,Sr、P、Ti 元素亏损强烈。

4 讨论

4.1 岩石成因

火成岩可以参照花岗岩类岩石,根据不同的物源特征划分为 4 种成因类型^[14-18]:M 型(幔源岩浆)、S 型(沉积岩源岩浆)、A 型(非造山或伸展背景下产生的,一般对源区没有特殊表征)及 I 型(火成岩源岩浆)。

大兴安岭南段东乌旗地区满克头鄂博组火山

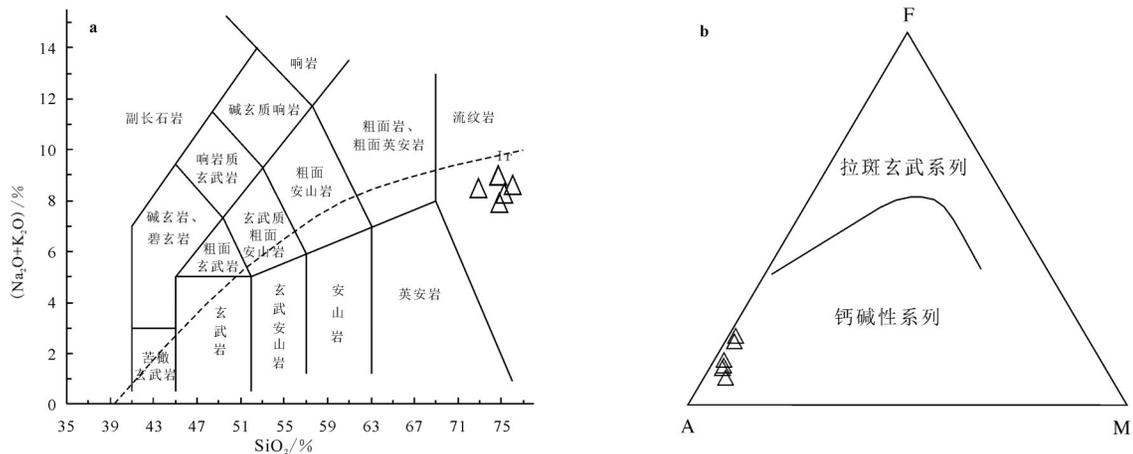


图 4 满克头鄂博组流纹岩 TAS(a)和 AFM(b)图解

Fig. 4 TAS (a) and AFM (b) diagrams of rhyolites in the Manketou'ebo Formation

表2 满克头鄂博组流纹岩主量、微量和稀土元素组成及化学参数

Table 2 Major elements, trace elements and REE composition and chemical parameters of rhyolites in the Manketou'obo Formation

样号	GS780#	GS781#	GS782#	GS3616	GS3183	PM6XT9
SiO ₂	75.4	75.92	73.36	76.71	75.34	75.51
TiO ₂	0.23	0.25	0.3	0.11	0.04	0.17
Al ₂ O ₃	11.82	12.12	13.44	12.18	12.74	12.01
Fe ₂ O ₃	0.98	0.68	2.01	0.63	0.88	1.64
FeO	0.31	0.12	0.19	0.65	0.23	0.22
MnO	0.016	0.012	0.022	0.04	0.04	0.02
MgO	0.34	0.46	0.17	0.21	0.27	0.2
CaO	0.32	0.32	0.48	0.36	0.46	0.82
Na ₂ O	3.88	3.52	3.79	3.66	3.6	3.16
K ₂ O	5.2	4.83	4.75	5.04	5.47	4.81
P ₂ O ₅	0.05	0.03	0.07	0.03	0.04	0.04
烧失量	1.12	1.12	0.88	1.28	1.04	0.57
总计	99.67	99.38	99.46	100.9	100.15	99.17
K ₂ O/Na ₂ O	1.34	1.37	1.25	1.38	1.52	1.52
TFeO/MgO	3.51	1.59	11.76	5.79	3.78	8.48
A/CNK	0.94	1.04	1.1	0.99	1	1.01
Mg [#]	0.34	0.53	0.13	0.24	0.32	0.17
σ	2.53	2.11	2.39	2.09	2.21	1.95
DI	96.26	95.69	93.49	96	95.71	93.15
La	42.9	37.5	36.5	24.9	19.7	60.3
Ce	88.5	79.1	66.2	40	38	131.4
Pr	11.3	9.05	7.73	5.86	5.02	17.1
Nd	44.2	33.7	27.1	19	18.4	60.4
Sm	9.23	6.57	4.78	3.08	3.63	11.3
Eu	0.54	0.56	1.15	0.49	0.5	0.28
Gd	7.61	5.45	4.28	2.63	3.2	9.4
Tb	1.2	0.84	0.71	0.41	0.5	1.58
Dy	6.52	4.76	4.13	2.34	2.7	8.4
Ho	1.24	0.94	0.85	0.45	0.49	1.51
Er	3.8	2.69	2.63	1.33	1.45	4.45
Tm	0.62	0.48	0.48	0.23	0.23	0.69
Yb	3.93	3.08	3.17	1.5	1.46	4.4
Lu	0.67	0.53	0.56	0.24	0.23	0.6
Y	34.5	26.1	24.6	14.4	14.3	43.4
Cr	6.13	5.94	4.35	2.4	7	7.4
Ba	85	87	916	512	542.9	147
Nb	18.4	19	15.5	8.5	11	21.4
Rb	199	192	127	112	131.7	230.1
Sr	29	28	120	86	100.3	30.7
Co	5.2	4.4	5.3	0.8	4.3	6
Th	15.88	16.14	13.04	7.9	12.8	26.7
Zr	177	194	232	89	83.1	255
Ni	5.6	4.6	3.9	2	7.1	3.4
Ti	1380	1500	1800	660	240	1020
Σ REE	222.26	185.25	160.27	102.46	95.51	311.81
LREE	196.67	166.48	143.46	93.33	85.25	280.78
HREE	25.59	18.77	16.81	9.13	10.26	31.03
LR/HR	7.69	8.87	8.53	10.22	8.31	9.05
δ Eu	0.19	0.28	0.76	0.51	0.44	0.08
(La/Sm) _N	2.26	2.92	3.59	4.8	5.09	3.41
(La/Yb) _N	7.36	8.21	7.76	11.19	9.1	9.24
(Ce/Yb) _N	4.29	5.82	6.64	5.4	6.9	6.73

注: 主量元素测试单位为天津地质矿产研究所, 微量和稀土元素测试单位为中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所。主量元素含量单位为%, 微量和稀土元素含量单位为 10^{-6}

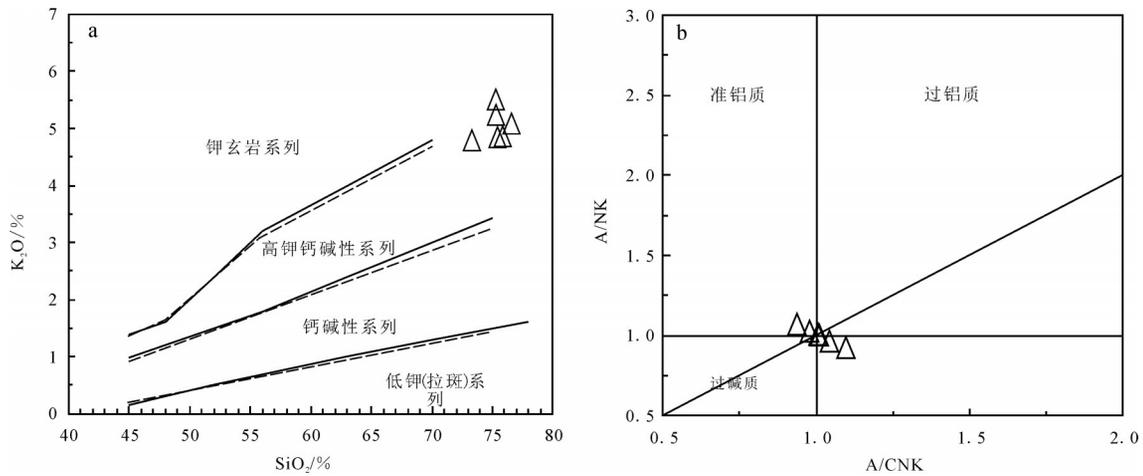


图 5 满克头鄂博组流纹岩 SiO₂-K₂O(a)和 A/CNK-A/NK(b)图解

Fig. 5 SiO₂-K₂O (a) and A/CNK-A/NK (b) diagrams of rhyolites in the Manketou'ebo Formation

岩普遍富硅、富碱, 贫钙、镁, 具有较低的 Mg[#] 值 (0.13~0.53), 相容元素 Co 和 Ni 含量分别为 2%~7.15%和 0.8%~6%, 明显区别于原生幔源岩浆的重要识别标志 (Mg[#]=0.65~0.75 及相容元素 Co、Ni 分别介于 27×10⁻⁶~80×10⁻⁶, 9×10⁻⁶~670×10⁻⁶ 之间)。可以确定该组火山岩不具有与 M 型花岗岩相似的特征。研究区流纹岩样品的稀土元素总量较高, 相对富集 Rb、Th、K 大离子亲石元素, Nd、Zr、Sm 元素适度富集, 相对亏损 Ba、Nb, 强烈亏损 Sr、Ba、P、Ti, 具有 A 型花岗岩的特征。虽然 A 型花岗岩具有相对特殊的地球化学特征, 但与高分异 I、S 型花岗岩依然难以区分。它与高分异 I、S 型花岗岩的主要区别在于: ①满克头鄂博组流纹岩 P₂O₅ 含量 (0.03%~0.07%) 较低, Na₂O 含量 (3.16%~4.88%) 较高, 与 S 型花岗岩明显不同。火山岩样品的 A/CNK 值为 0.94~1.10,

属于准铝质-弱过铝质系列, 准铝质-弱过铝质花岗岩质岩浆中磷灰石溶解度很低, 演化过程中优先结晶, 从而使残余岩浆中 P₂O₅ 含量越来越低。S 型花岗岩中磷灰石呈饱和状态而不会优先结晶, 其岩浆中 P₂O₅ 含量不会随 SiO₂ 的增加而减少。因此, 满克头鄂博组流纹岩不是 S 型火山岩。②岩石的 TFeO/MgO 值在 1.59~11.76 之间, 平均值为 5.82, 明显高于一般 I 型花岗岩 (平均值为 2.27)、S 型花岗岩 (平均值 2.38) 和 M 型花岗岩 (平均值 2.37)。③在 A 型花岗岩主微量元素判别图 (图 7、图 8) 中, 样品点几乎全部落在 A 型花岗岩区域。

综合以上证据, 笔者认为研究区出露的满克头鄂博组火山岩具有与 A 型花岗岩相似的特征, 应归属于 A 型火山岩。

葛文春等^[19-20]将大兴安岭流纹岩类归为 I 型流

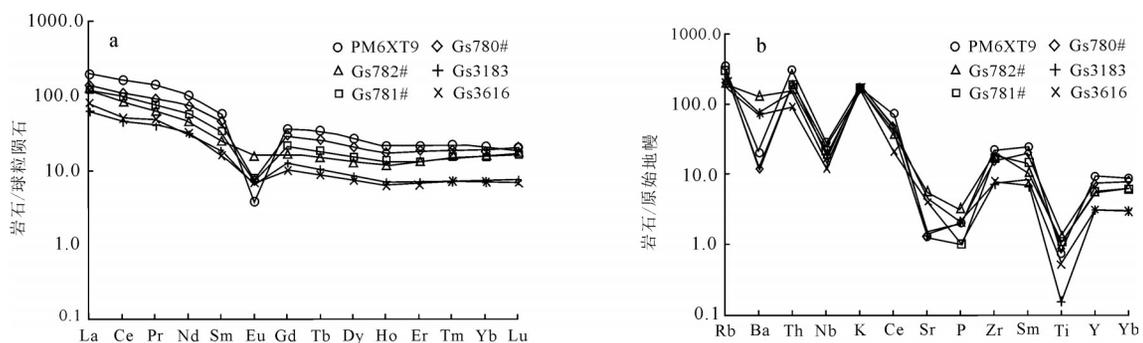


图 6 满克头鄂博组流纹岩稀土元素配分图(a)和微量元素蛛网图(b)

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized spidergrams (b) for rhyolites in the Manketou'ebo Formation

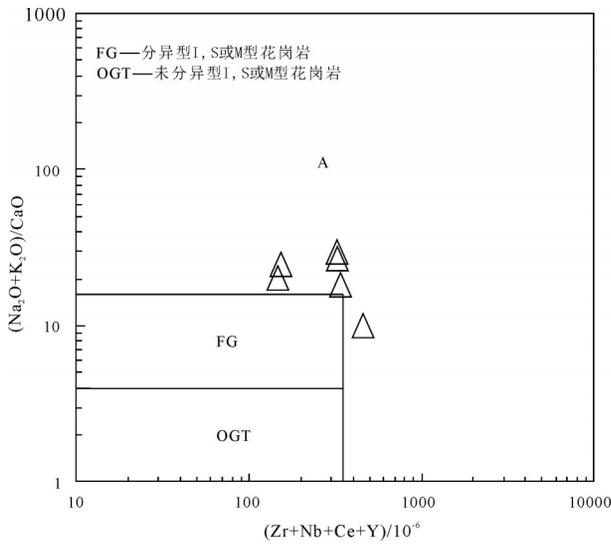


图7 满克头鄂博组流纹岩 $(Zr+Nb+Ce+Y)-(Na_2O+K_2O)/CaO$ 图解

Fig. 7 $(Zr+Nb+Ce+Y)-(Na_2O+K_2O)/CaO$ diagram of rhyolites in the Manketou'ebo Formation

纹岩、II型流纹岩。I型流纹岩稀土元素配分曲线整体右倾,其中不相容元素以强烈富集Rb、T、Ba、K,同时亏损Sr、P、Ti、Nb为特征,与钙碱性系列岩石在主量、微量元素及矿物组成特征方面具有连续演化的趋势,说明I型流纹岩的形成与钙碱性系列玄武岩浆的结晶分异作用有关;II型流纹岩具有与大陆裂谷流纹岩一致的不相容和稀土元素配分模式,以及Ba、Sr强烈亏损的特征,与I型流纹岩有明显区别。II型流纹岩为来源于富集地幔型的碱性系列母岩岩浆底侵莫霍面,使地壳物质发生部分熔融形成。

满克头鄂博组流纹岩具有明显的负Eu异常($\delta Eu=0.08\sim 0.76$),强烈亏损Ba、Sr、Nb、P、Ti,与葛文春等划分的II型流纹岩特征^[19-20]一致。满克头鄂博组流纹岩的Rb/Sr值变化于1.06~6.86之间(平均为4.15),远高于原始地幔(0.03)、富集型洋中脊E-MORB(0.033)和洋岛玄武岩OIB(0.047)的Rb/Sr值,与壳源岩浆的范围(大于0.5)一致^[21]。Nd/Th值为1.44~2.78,平均值为2.18,接近壳源岩石的比值(≈ 3),表明其具备下地壳火成岩部分熔融产物的特征。岩石基性相容组分Cr、Co、Ni含量较低,以及较低的 $Mg^\#$ 值(0.13~0.53,平均值为0.29),反映区内火山岩不具有明显地幔成因特征。Nb、Ti的强烈

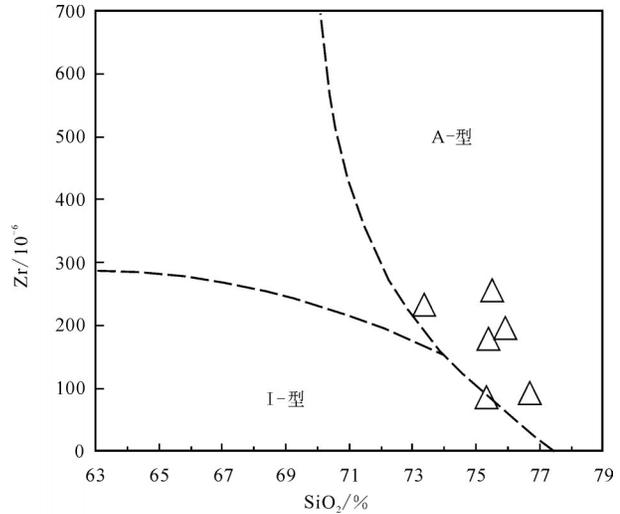


图8 满克头鄂博组流纹岩 SiO_2-Zr 图解

Fig. 8 SiO_2-Zr diagrams of rhyolites in the Manketou'ebo Formation

亏损说明岩浆演化过程中有地壳物质参与,Ti/Zr、Ti/Y值分别为2.41~7.91和13.99~73.17,均在壳源岩浆范围内($Ti/Zr < 20, Ti/Y < 100$)。从 $\delta Eu-(La-Yb)_N$ 图解(图9-a)和Ca-Fe-Mg图解(图9-b)可以看出,满克头鄂博组流纹岩样品均落入壳源区。富集大离子亲石元素、亏损高场强元素等也可以推断岩浆来源于下地壳。

东乌旗地区满克头鄂博组流纹岩属于高钾钙碱性系列的准铝质-过铝质岩石,一般酸性岩浆不能直接来源于地幔,即地幔橄榄岩的部分熔融不能直接形成流纹岩已被地质学家所公认,其主要来源于下地壳物质的部分熔融或玄武质岩浆的分离结晶。包括研究内的大兴安岭地区广泛分布晚侏罗世酸性火山岩,大面积、大规模的酸性岩浆不可能来自于中、基性岩浆的分异,应为下地壳物质的部分熔融作用形成。这与邵济安等^[22]认为大兴安岭中南部火山岩的中酸性岩浆可能起源于下地壳部分熔融的观点吻合。张超等^[23]通过Hf同位素对大兴安岭中南段满克头鄂博组流纹岩的物质来源进行了研究,测得 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值在+4.6~+10.9之间,二阶段模式年龄为501~905Ma,认为岩浆源区来源于早古生代-新元古生代增生的年轻地壳。

研究区满克头鄂博组流纹岩样品均显示出负Eu异常特征,反映岩浆源区可能有斜长石残留或者斜长石的分离结晶作用;Sr、P的负异常表明可能有

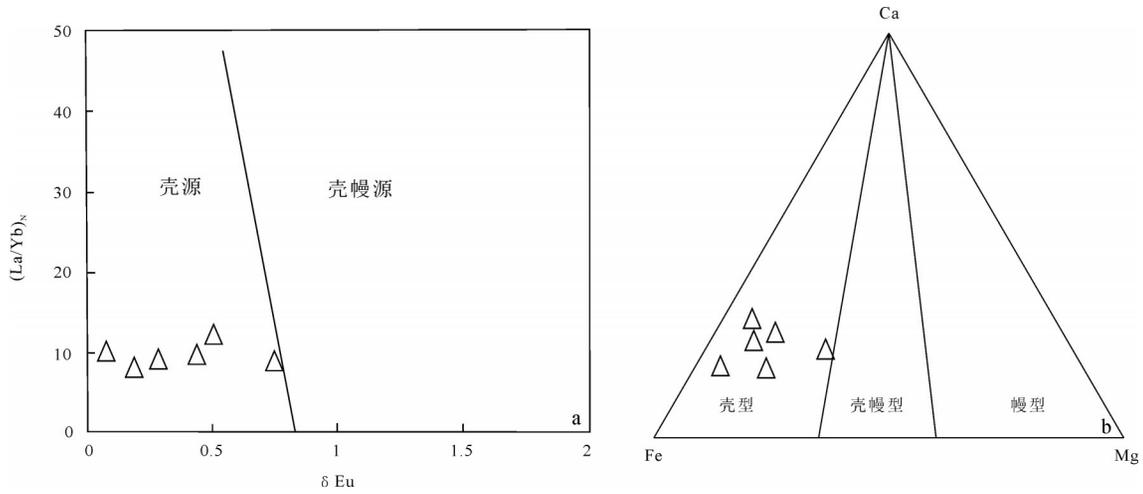


图 9 满克头鄂博组流纹岩 $\delta\text{Eu}-(\text{La}-\text{Yb})_N$ (a)和 $\text{Ca}-\text{Fe}-\text{Mg}$ (b)图解

Fig. 9 $\delta\text{Eu}-(\text{La}-\text{Yb})_N$ (a) and $\text{Ca}-\text{Fe}-\text{Mg}$ (b) diagrams of rhyolites in the Manketou'ebo Formation

斜长石和磷灰石的结晶分异作用;Ti的负异常表明可能有钛铁矿的结晶分异作用。满克头鄂博组火山岩具有较高的 TFeO/MgO 值和分异指数,岩浆源区矿物的残留与后期广泛的分异作用共同造成了研究区酸性火山岩高场强元素的亏损。

综合以上研究,东乌旗地区满克头鄂博组流纹岩岩浆应来源于新生下地壳物质的部分熔融,且在岩浆形成后期可能经历了一次广泛的结晶分异作用。

4.2 构造背景

东乌旗地区满克头鄂博组流纹岩 SiO_2 含量为73.36%~76.71%, Al_2O_3 为11.82%~13.44%,富碱、贫镁钙($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 含量为7.97%~9.08%); MgO 含量为

0.17%~0.46%, CaO 含量为0.32%~1.06%,具有造山后花岗岩主量元素特征^[24]。满克头鄂博组流纹岩为高钾钙碱性系列, Ba 、 Sr 、 P 、 Ti 亏损,具有较高的 Th 含量和高 Rb/Ba 、 Rb/Sr 和 Zr/Ba 值,类似于大陆裂谷玄武岩,可能形成于与裂谷相似的拉张性构造环境,在 $\text{Y}-\text{Nb}$ 构造判别图解(图10-a)中,样品点多数落在火山弧+同碰撞花岗岩区,1个样品落入板内花岗岩区; $(\text{Y}+\text{Nb})-\text{Rb}$ 构造图解(图10-b)显示,多数样品点落入火山弧区,1个样品落入板内花岗岩区,且均为后碰撞花岗岩区;在 R_1-R_2 图解(图11)中,样品点均落在造山后期花岗岩区域;在 $\text{SiO}_2-\lg\text{CaO}/(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ 图解(图12)中,样品点均

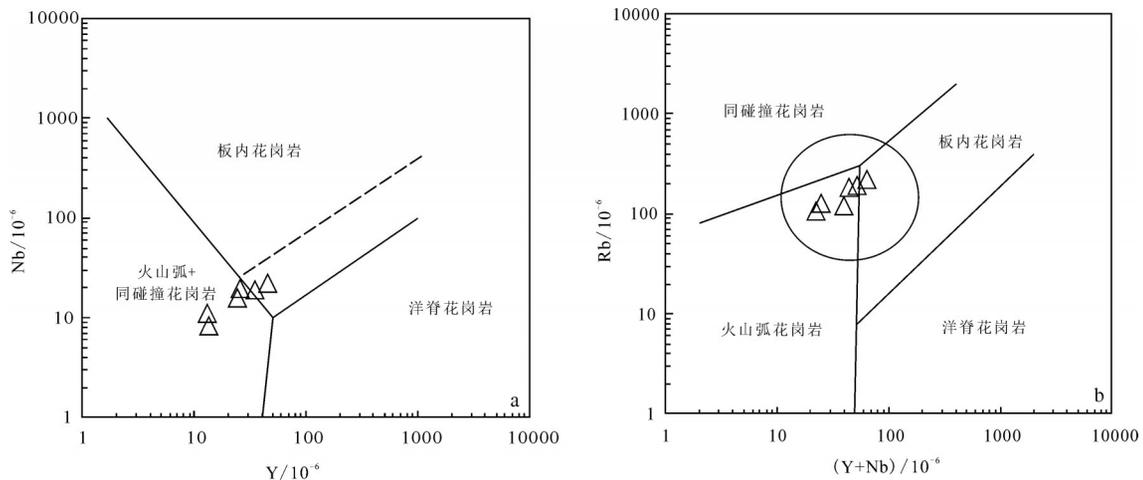


图 10 满克头鄂博组流纹岩 $\text{Y}-\text{Nb}$ (a)和 $(\text{Y}+\text{Nb})-\text{Rb}$ (b)图解

Fig. 10 $\text{Y}-\text{Nb}$ (a) and $(\text{Y}+\text{Nb})-\text{Rb}$ (b) diagrams of rhyolites in the Manketou'ebo Formation

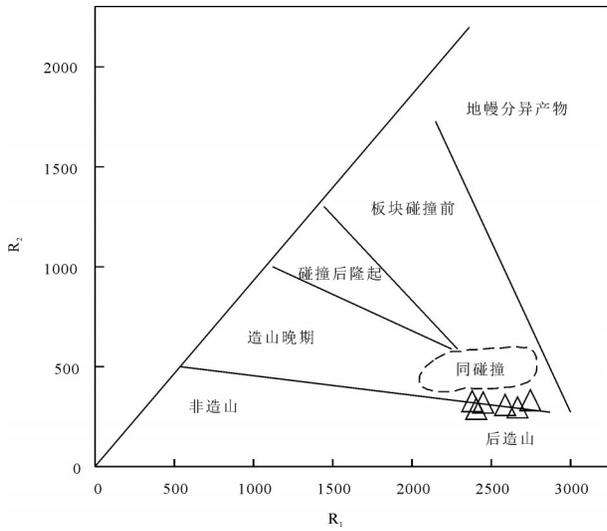


图 11 满克头鄂博组流纹岩 R_1 - R_2 图解
Fig. 11 R_1 - R_2 diagram of rhyolites in the Manketou'ebo Formation

落入扩张伸展环境区域。满克头鄂博组流纹岩为 A 型火山岩,与张性构造环境密切相关,是伸展构造背景下的产物^[25]。综上所述,满克头鄂博组流纹岩应形成于晚侏罗世的造山后伸展构造环境。

大兴安岭地区在中生代晚期处于大规模的伸展环境已是不争的事实,但对于该伸展环境形成机制存在不同的观点,主要有 3 种观点:①与古太平洋板块的俯冲作用有关^[26-27];②与地幔柱活动或相关板内作用有关^[4,19];③与蒙古-鄂霍茨克洋闭合碰撞造山后的伸展作用有关^[28-29]。地幔柱模式是基于大兴安岭及邻区晚古生代—晚中生代火山岩呈现环状分布的特征提出的^[30]。大兴安岭火山岩带呈 NE 向带状分布,不具环状分布特征,并且大兴安岭北段和南段的火山岩形成时间不同,具有较大的时代范围,所以古太平洋板块的俯冲对本区岩浆活动影响有限。

蒙古-鄂霍茨克构造带主要分布在北纬 46° ~ 58° 、东经 96° ~ 130° 之间,总体呈 NE—SW 走向,造成东亚地区强烈构造变形网,研究区位于蒙古-鄂霍茨克构造带作用范围。近年来对蒙古-鄂霍茨克洋的研究不断深入,对其演化过程及其对中国东北地区中生代的影响研究取得了很大的进展。晚古生代末蒙古-鄂霍茨克洋局部发生俯冲,晚三叠世开始自西向东呈剪刀式闭合^[31-32]。许文良等^[33-34]通过系统的理论研究,将蒙古-鄂霍茨克洋在额尔古纳

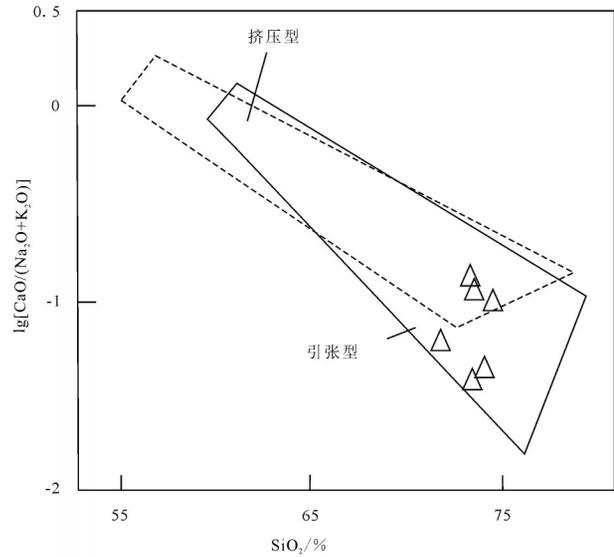


图 12 满克头鄂博组流纹岩 SiO_2 - $\lg(\text{CaO}/(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}))$ 图解
Fig. 12 SiO_2 - $\lg(\text{CaO}/(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}))$ diagram of rhyolites in the Manketou'ebo Formation

地块西部闭合时间限定为 168Ma,而研究区满克头鄂博组流纹岩形成时间为 $150.9 \pm 4.2\text{Ma}$ 。大兴安岭地区中生代火山岩自西向东显示逐渐变新的趋势,与蒙古-鄂霍茨克洋闭合特征相符;同时研究区位于额尔古纳板块西南部西伯利亚板块南缘,在时间与空间上均支持满克头鄂博组流纹岩与蒙古-鄂霍茨克洋造山后作用有关。同时,东乌旗的阿尔哈达地区发育的 A 型花岗岩^[35]及研究区碱长花岗岩^[36]也证实本区为造山后的伸展环境。由此认为,满克头鄂博组流纹岩主要形成于蒙古-鄂霍茨克洋闭合碰撞造山后的伸展环境。

5 结论

(1)大兴安岭南段东乌旗地区满克头鄂博组流纹岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 $150.9 \pm 4.2\text{Ma}$,形成时代为晚侏罗世。

(2)东乌旗地区满克头鄂博组流纹岩属于高钾钙碱性岩石系列,轻、重稀土元素分馏明显,具有明显的负 Eu 异常。富集大离子亲石元素 Rb、U、Th,亏损 Sr、Nb、Ti、P;基性相容元素 Cr、Co、Ni 含量和 $\text{Mg}^\#$ 值较低,表明岩浆可能来源于下地壳岩石的部分熔融。

(3)满克头鄂博组流纹岩具有与 A 型花岗岩相似的地球化学特征,应形成于晚侏罗世的造山后伸

展构造环境,其形成的动力学机制为蒙古-鄂霍茨克洋闭合造山后岩石圈伸展作用。

致谢:感谢项目组全体成员的辛勤付出,感谢审稿专家对本文提出的宝贵意见。

参考文献

- [1]尹志刚,王文材,张跃龙,等. 伊勒呼里山中生代火山岩锆石 U-Pb 年代学及其对岩浆事件的制约[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2016,46(3):766-780.
- [2]范蔚茗,郭锋,高晓峰,等. 东北地区中生代火成岩 Sr-Nd 同位素区划及其大地构造意义[J]. 地球化学,2008,37(4):361-372.
- [3]林强,葛文春,孙德有,等. 中国东北地区中生代火山岩的大地构造意义[J]. 地质科学,1998,33(2):129-139.
- [4]葛文春,林强,孙德有,等. 大兴安岭中生代玄武岩的地球化学特征:壳-幔相互作用[J]. 岩石学报,1999,15(3):397-407.
- [5]聂立军,贾海明,王聪,等. 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,2015,34(2):297-304.
- [6]王杰,姚玉米,丁秋红,等. 内蒙古扎鲁特旗地区晚侏罗世火山岩岩石学及地球化学特征[J]. 地质科技情报,2014,33(6):18-27.
- [7]张晓晖,张宏福,汤艳杰,等. 内蒙古中部锡林浩特-西乌旗早三叠世 A 型酸性火山岩的地球化学特征及地质意义[J]. 岩石学报,2006,22(11):2770-2779.
- [8]Liu Y S, Gao S, Hu Z C, et al. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons of mantle xenoliths[J]. Journal of Petrology, 2010, 51(1/2): 537-571.
- [9]Anderson T. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. Chemical Geology,2002,192(1/2):59-79.
- [10]孙德有,苟军,任云生,等. 满洲里南部玛尼叶组火山岩锆石 U-Pb 年龄与地球化学研究[J]. 岩石学报,2011,27(10):3083-3094.
- [11]Liu Y S, Hu Z C, Gao S, et al. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. Chemical Geology, 2008, 257(1/2): 34-43.
- [12]Liu Y S, Hu Z C, Zong K Q, et al. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS[J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(15): 1535-1546.
- [13]Taylor S R, McLennan S M. The Continental Crust: its Composition and Evolution[M]. Oxford: Blackwell, 1985.
- [14]Whalen J B. Geochemistry of an island-arc plutonic suite: the Uasilau-Yau Yau intrusive complex, New Britain, P.N.G. [J]. J. Petrol., 1985, 26:603-632.
- [15]Chappell B W, White A J R. Two contrasting granite types[J]. Pacific Geology, 1974, 8:173-174.
- [16]Collins W J, Beams S D, White A J R, et al. Nature and origin of A-type granites with particular reference to southeastern Australia[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1982, 80:189-200.
- [17]Loiselle M, Wones D. Characteristics and origin of anorogenic[J]. Geological Society of American Abstracts & Programs 1979,11:468.
- [18]White W M, Tapia M D M, Schilling J G. The petrology and geochemistry of the Azores Islands[J]. Contributions to Mineralogy & Petrology, 1979, 69(3):201-213.
- [19]葛文春,林强,孙德有,等. 大兴安岭中生代两类流纹岩成因的地球化学研究[J]. 地球科学,2000,25(2):172-178.
- [20]葛文春,李献华,林强,等. 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,2001,36(2):176-183.
- [21]Tischendorf G, Paelchen W. Zur Klassifikation von Granitoiden. gische Classification of granitoids[J]. Zeitschrift fuer Geolo Wissenschaften,1985, 13(5):615-627.
- [22]邵济安,赵国龙,王忠,等. 大兴安岭中生代火山活动构造背景[J]. 地质论评,1999,45(S1):422-430.
- [23]张超,杨伟红,和钟铎,等. 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,2014,33(2): 256-265.
- [24]韩宝福. 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,2007,14(3): 64-72.
- [25]Bernard B. A-type granites and related rocks: Evolution of a concept, problems and prospects[J]. Lithos, 2007,97(1/2): 1-29.
- [26]徐美君,许文良,孟恩,等. 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-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄和地球化学特征[J]. 地质通报,2011,30(9):1321-1338.
- [27]高龙飞,和钟铎,隋振民,等. 大兴安岭中段索伦地区满克头鄂博组火山岩年龄、地球化学特征及其构造环境[J]. 地质通报,2018, 37(5):881-894.
- [28]樊航宇,李明辰,张全,等. 内蒙古西乌旗地区大石寨组火山岩时代及地球化学特征[J]. 地质通报,2014,33(9): 1285-1292.
- [29]李鹏川,李世超,刘正宏,等. 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,2016,35(1):78-88.
- [30]张旗. 中国东部中生代岩浆活动与太平洋板块向西俯冲有关吗?[J]. 岩石矿物学杂志, 2013,32(1): 113-128.
- [31]黄始琪,董树文,张福勤,等. 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,2014,35(4):415-424.
- [32]莫中图,韩美莲,李锦轶,等. 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),2006,24(3):50-52.
- [33]许文良,王枫,裴福萍,等. 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制约[J]. 岩石学报,2013,29(2):340-353.
- [34]李宇,丁磊磊,许文良,等. 孙吴地区中侏罗世白云母花岗岩的年代学与地球化学:对蒙古-鄂霍茨克洋闭合时间的限定[J]. 岩石学报,2015,31(1):56-66.
- [35]张万益. 内蒙古东乌珠穆沁旗岩浆活动与金属成矿作用[D]. 中国地质科学院博士学位论文,2007.
- [36]程银行,李艳锋,李敏,等. 内蒙古东乌旗碱性侵入岩的时代、成因及地质意义[J]. 地质学报,2014,88(11):2086-2096.