



大兴安岭鄂伦春地区满克头鄂博组火山岩形成年代及地球化学

王大可, 刘军帅, 孙靖尧

中国地质调查局 哈尔滨自然资源综合调查中心, 黑龙江 哈尔滨 150086

摘 要: 对大兴安岭鄂伦春地区满克头鄂博组火山岩年代学与岩石地球化学特征进行分析, 锆石 U-Pb 测年结果表明火山岩形成时代为晚侏罗世(152.9 ± 1.7 Ma)。地球化学特征表明该组火山岩具有富硅、碱, 贫钙、镁特征, 且具较低 $Mg^\#$ 值及极低的 Cr、Co、Ni 值的特点。微量元素相对富集大离子亲石元素(LILE) K、Rb、Ba 和 LREE, 亏损高场强元素 Nb、Ta、Ti。火山岩具有地壳源区特征, Rb/Sr 值平均为 0.66, 远高于 N-MORB(0.03)、OIB(0.047)和 E-MORB(0.033), Ti/Zr 值平均为 13.94, 与壳源岩浆的范围(<20)一致, 表明该类岩石的原始岩浆起源于地壳岩石的部分熔融。根据岩石地球化学特征, 结合区域已有研究资料, 本区满克头鄂博组火山岩的形成应与蒙古-鄂霍次克洋向南东方向俯冲作用有关。

关键词: 满克头鄂博组; 锆石 U-Pb 测年; 地球化学; 鄂伦春地区; 大兴安岭

FORMING AGE AND GEOCHEMISTRY OF THE VOLCANIC ROCKS FROM MANKETOUEBO FORMATION IN OROQEN QI, DAXINGANLING MOUNTAINS

WANG Da-ke, LIU Jun-shuai, SUN Jing-yao

Harbin Natural Resources Comprehensive Survey Center, CGS, Harbin 150086, China

Abstract: The zircon U-Pb dating result indicates that the volcanic rocks from Manketouebo Formation in Oroqen area of Daxinganling Mountains were formed in the Late Jurassic (152.9 ± 1.7 Ma) based on the analysis of chronology and geochemical characteristics of the rocks. The volcanic rocks are characterized by rich Si and alkali, poor Ca and Mg, low $Mg^\#$ and very low Cr, Co and Ni contents, with enrichment of LILEs (K, Rb and Ba) and LREE, and depletion of HFSEs (Nb, Ta and Ti) in trace elements. The volcanic rocks have the characteristics of crust source, with Rb/Sr value of 0.66 averagely, much higher than N-MORB (0.03), OIB (0.047) and E-MORB (0.033). The average Ti/Zr value of 13.94 is consistent with the range of crust-derived magma (<20), indicating that the primary magma of volcanic rocks originated from partial melting of crustal rocks. According to the rock geochemical characteristics and regional existing research data, it is considered that the formation of volcanic rocks in the study area is related to the southeastward subduction of Mongolian-Okhotsk Ocean.

Key words: Manketouebo Formation; zircon U-Pb dating; geochemistry; Oroqen area; Daxinganling Mountains

0 引言

作为中国北方最大的中生代火山岩带, 大兴安岭

中生代火山岩面积大、岩石类型多、地球化学特征及形成构造背景复杂, 一直备受国内外地质工作者关注^[1]。

收稿日期: 2021-07-07; 修回日期: 2021-08-27. 编辑: 李兰英.

基金项目: 中国地质调查局项目“黑龙江省大兴安岭鄂伦春自治旗、齐奇岭幅 1/5 万区域地质矿产调查”(DD2016007807).

作者简介: 王大可(1991—), 男, 主要从事区域地质矿产、生态地质工作, 通信地址 黑龙江省哈尔滨市南岗区保健副路 1 号, E-mail//592049257@qq.com

随着区域地质调查工作的不断开展,确定了大兴安岭北部火山岩的划分主要为中—晚侏罗世塔木兰沟组、晚侏罗世—早白垩世满克头鄂博组、玛尼吐组、白音高老组和梅勒图组^[2-6]。同时积累了大量关于大兴安岭地区火山岩的锆石 U-Pb 同位素年龄:唐杰等^[7]对张广才岭地区帽儿山组双峰式火山岩进行了研究,获取锆石 U-Pb 年龄为 179~184 Ma;郑吉林等^[8]在大兴安岭新林区开展 1:5 万区域地质矿产调查过程中发现一套早侏罗世火山岩,锆石 U-Pb 年龄为 178~192 Ma;李中会等^[9]在三根河林场幅区域地质调查中对新民组火山岩进行研究,获取锆石 U-Pb 年龄为 165.71±0.83 Ma。

关于大兴安岭中生代火山岩成因及形成构造环境的观点主要有:1)地幔柱成因^[10-11];2)古太平洋板块俯冲环境^[12];3)与北部蒙古—鄂霍次克洋闭合后伸展环境有关^[13-18]。笔者在大兴安岭鄂伦春自治旗地区对满克头鄂博组进行了系统的岩石组合、地层接触、锆石测年、地球化学特征等研究,确定了满克头鄂博组火山岩形成时代及其构造背景等。

1 区域地质概况

研究区位于内蒙古自治区东北部,地理上属于大兴安岭中北段南麓,前中生代地层区划属天山—兴安地层大区(I级),大兴安岭地层区(II级),达来—兴隆地层分区(III级);中生代地层属滨太平洋地层区(II级),大兴安岭—燕山地层分区(III级),博克图—二连浩特地层小区(IV级)。研究区内地层主要有奥陶—志留

系大乌苏岩组(OSD)和中生界上侏罗统满克头鄂博组(J_3mk)。

满克头鄂博组火山岩在研究区西北角出露,岩石类型主要由流纹质火山碎屑岩及火山熔岩组成,火山碎屑岩类主要为流纹质含角砾晶屑熔结凝灰岩、流纹质晶屑凝灰岩、凝灰质复成分砾岩、少量安山质含角砾晶屑凝灰岩,熔岩类主要为流纹岩、英安岩及流纹质凝灰熔岩。

2 样品描述

用于 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年法的样品 WJE029 采自于研究区西北角,岩性为流纹质岩屑晶屑弱熔结凝灰岩(图1),地理坐标为 124°02′50″E, 51°52′44″N。样品风化面呈灰褐色,新鲜面呈浅灰色,弱熔结凝灰结构,致密块状;岩屑成分为流纹质晶屑玻屑凝灰岩、流纹岩、板岩等,含量为 0~15%;晶屑为钾长石、斜长石和少量石英,含量为 10%~40%;火山灰均为粒度小于 0.05 mm 的火山碎屑物和火山尘,脱玻化为隐晶质,与塑性岩屑、塑性玻屑相互熔结,形成弱假流纹构造,含量为 45%~55%。

3 分析方法

3.1 岩石地球化学

样品的主量元素和微量元素的测定分析在河北省区域矿产地质调查研究所实验室完成。主、微量元素用 X 射线荧光光谱法,主要分析检测仪器为 AXiosmax

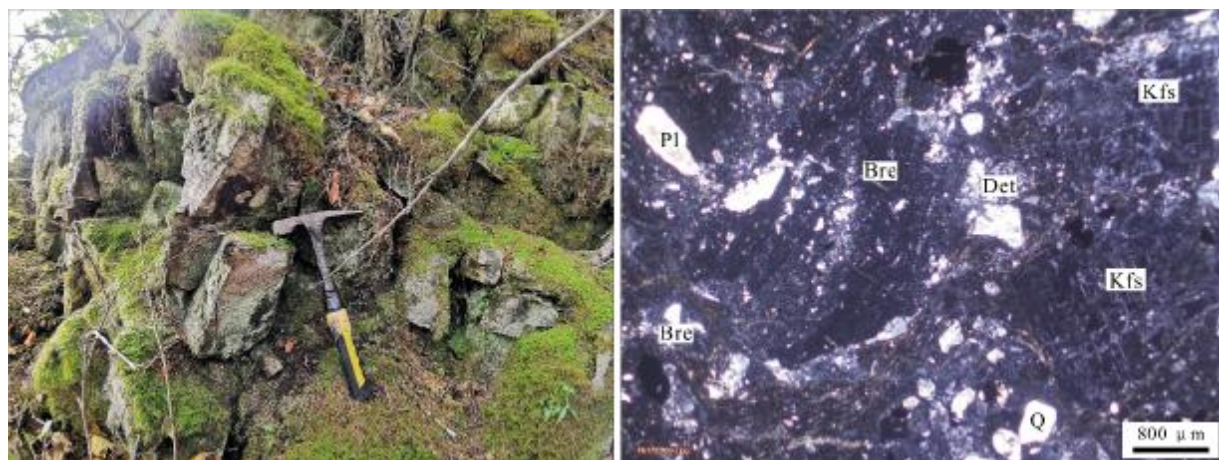


图1 流纹质岩屑晶屑弱熔结凝灰岩野外照片及显微图像

Fig. 1 Field photo and micrograph of rhyolitic lithic crystal weakly welded tuff

Q—石英(quartz); Kfs—钾长石(K-feldspar); Pl—斜长石(plagioclase); Det—岩屑(detritus); Bre—角砾岩(breccia)

X 射线荧光光谱仪;Y-U 稀土微量 40 元素用封闭酸溶-电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)测点方法,测定仪器为 XSeries2 电感耦合等离子体质谱仪,最小分辨率为在 5%峰高处 1 μ 峰宽.

3.2 锆石 LA-ICP-MS 定年

锆石分选、制靶、CL 图像采集工作在河北省廊坊区域矿产地质调查研究所实验完成. 锆石 U-Pb 定年分析测试工作在中国地质调查局天津地质调查中心完成. 测试仪器为激光烧蚀多接收器等离子质谱(LA-MC-ICP-MS),仪器整体由美国 ESI 公司 New Wave 193 nm FX 激光器和美国赛默飞世尔公司 Neptune 多接收等离子质谱组成,质量数范围: 4~310 amu,分辨率: >450 (平顶峰, 10%峰谷定义), 丰度灵敏度: <5 $\times 10^{-6}$ (无 RPQ); <0.5 $\times 10^{-6}$ (有 RPQ),仪器稳定性:所有稳定性

以测定峰稳定性包括磁场和电场漂移: <50 $\times 10^{-6}$ /h.

4 分析结果

4.1 锆石 LA-ICP-MS 定年

对大兴安岭鄂伦春自治旗地区满克头鄂博组火山岩样品(WJE029)进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素分析. 从样品的阴极发光照片(图 2)可以看出,锆石多呈短柱状,少数呈长柱状,长 100~120 μ m,长宽比为 2:1~1:1,锆石发育震荡环带,显示出典型岩浆锆石的特点. 该样品共测试了 32 个测点,测点主要选择在震荡环带区域,测试结果(表 1,扫描首页 OSID 二维码可见)表明,锆石 Th/U 比值大于 0.3,谐和线上 21 个测点集中分布,加权平均年龄为 152.9 $\pm$ 1.7 Ma,MSWD=5.6 (图 3),代表岩浆结晶年龄,时代为晚侏罗世.



图 2 流纹质岩屑晶屑弱熔结凝灰岩部分锆石阴极发光图像
Fig. 2 CL images of zircons in rhyolitic lithic crystal weakly welded tuff

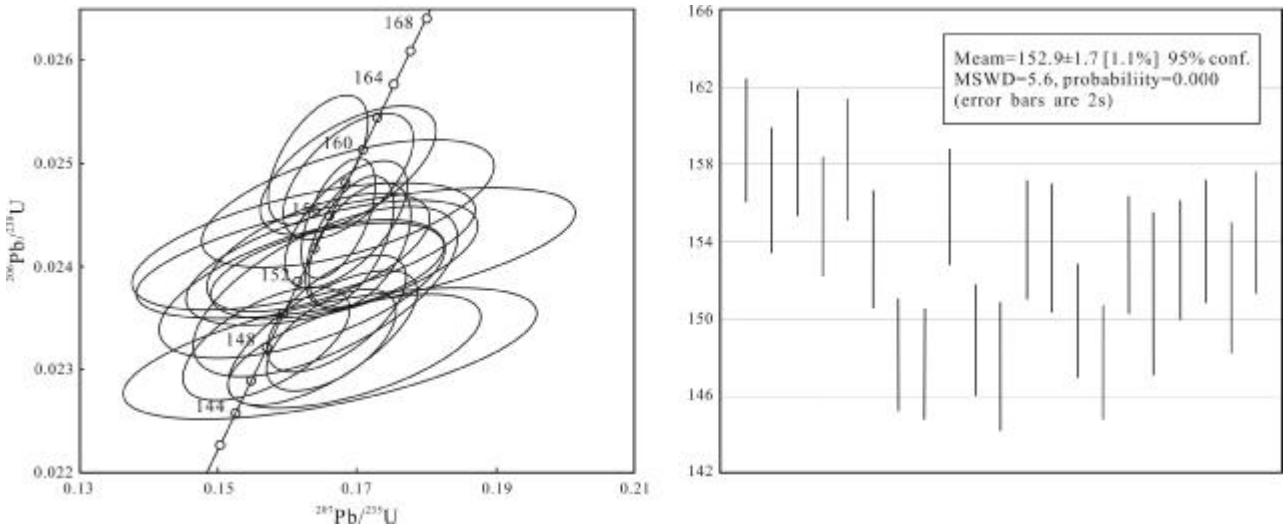


图 3 流纹质岩屑晶屑弱熔结凝灰岩 U-Pb 年龄谐和图
Fig. 3 U-Pb concordia diagram of rhyolitic lithic crystal weakly welded tuff

4.2 地球化学特征

满克头鄂博期火山岩主量元素、稀土元素及微量元素分析结果如表 2(扫描首页 OSID 二维码可见), 本文选取该组具有代表性的火山岩中、酸性样品共 7 件, 样品特征如下。

主量元素: 1) 满克头鄂博期酸性火山岩主要表现为高硅富碱、贫钙铁镁。SiO₂ 含量为 70.19%~80.10%, Al₂O₃ 含量为 10.80%~15.22%, 富碱 (K₂O+Na₂O 为 6.12%~9.21%), K₂O 为 1.47%~5.22%, CaO 为 0.08%~1.35%, FeOT 为 0.93%~2.26%, MgO 为 0.22%~1.12%, TiO₂ 为 0.17%~0.47%, Mg[#] 值介于 32.8~51.0。在 Na₂O-K₂O 图中落入钠质-钾质区(图 4); 在 TAS 分类命名图解(图 5)中为流纹岩区域; 在 K₂O-SiO₂ 图解(图 6)中样品主要落于高钾钙碱性系列。2) 满克头鄂博期中性火山岩主要表现为富碱高钾, 镁指数较大。SiO₂ 含量为 59.64%~59.84%, Al₂O₃ 含量为 17.63%~17.75%, 富碱 (K₂O+Na₂O 为 6.77%~7.02%), K₂O 为 2.07%~2.25%, CaO 为 3.12%~3.24%, FeO^T 为 5.51%~5.75%, MgO 为 2.44%~2.51%, TiO₂ 为 0.93%~0.94%, Mg[#] 值介于 47.8~48.2。在 Na₂O-K₂O 图中落入钠质区(图 4); 在 TAS 分类命名图解(图 5)中, 样品主要落于玄武质粗面安山岩区域; 在 K₂O-SiO₂ 图解(图 6)中落于高钾钙碱性系列。

稀土元素: 样品稀土总量较高, ΣREE 为 135.13×10⁻⁶~207.65×10⁻⁶, 轻重稀土分馏明显, (La/Yb)_N 为 7.52~14.88, 平均值为 11.19, 轻稀土分馏系数(La/Sm)_N

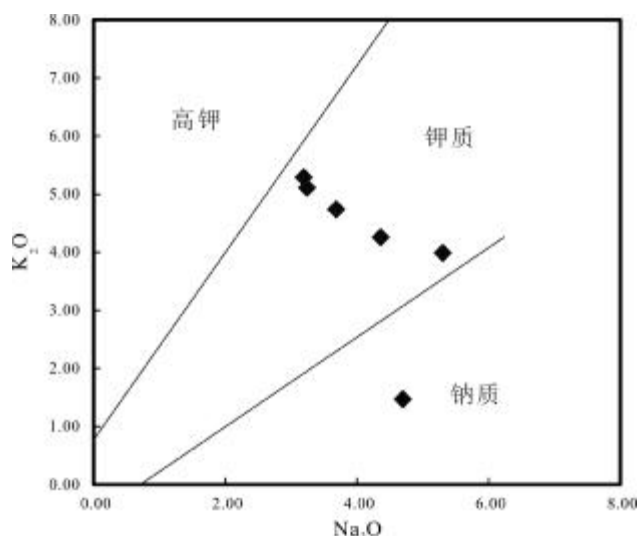


图 4 满克头鄂博期火山岩 Na₂O-K₂O 图解

Fig. 4 The Na₂O-K₂O diagram of Manketouebo volcanic rocks

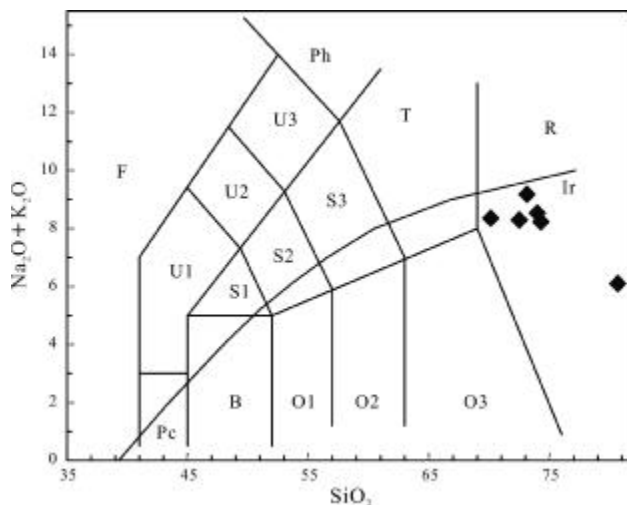


图 5 满克头鄂博期火山岩 TAS 分类图解

Fig. 5 The TAS classification diagram of Manketouebo volcanic rocks

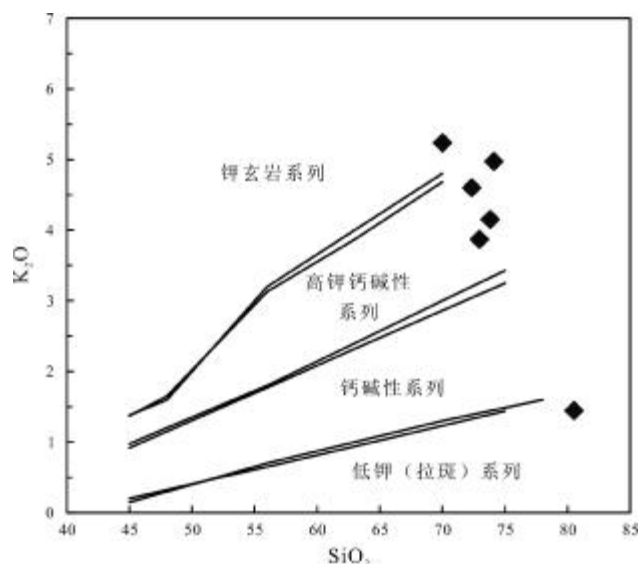


图 6 满克头鄂博期火山岩 K₂O-SiO₂ 图解

Fig. 6 The K₂O-SiO₂ diagram of Manketouebo volcanic rocks

为 3.20~4.79, 平均值为 4.15, 重稀土分馏系数(Gd/Yb)_N 为 1.26~1.97, 平均值为 1.61。稀土元素配分模式图(图 7)均具有轻稀土元素富集、重稀土较平缓的右倾特征。铈为弱—中等负异常, δEu 值为 0.35~1.07, 表明源区有斜长石残留或分异结晶作用。

微量元素: 微量元素原始地幔标准化配分图(图 8)上显示, 岩石相对富集大离子亲石元素(LILE) Rb、K、Th、U 和 LREE, 亏损高场强元素(HFSE) Nb、Ta, 强烈亏损 Sr、P 和 Ti。

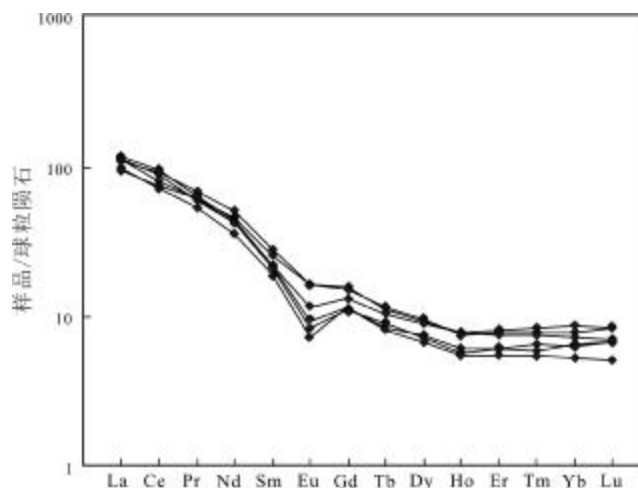


图7 满克头鄂博期火山岩稀土元素配分模式图

Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns of Manketouebo volcanic rocks

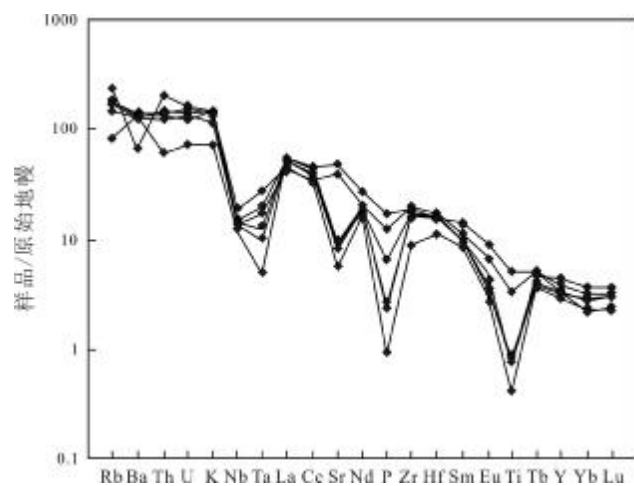


图8 满克头鄂博期火山岩微量元素蛛网图

Fig. 8 Primitive mantle-normalized trace element spidergram of Manketouebo volcanic rocks

5 讨论

5.1 满克头鄂博组时代

近年来随着对满克头鄂博组研究的深入,获取了大量的同位素测年数据,测试方法主要有锆石 U-Pb 和 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 。陈志广等^[15]在新巴尔虎右旗测得的年龄为 162~150 Ma,吴涛涛等^[19]在得耳布尔测得的年龄为 159 Ma,刘凯等^[4]在图里河测得的年龄为 157 Ma,总体来看测年结果集中在 150~160 Ma。结合本研究测年结果,表明满克头鄂博组火山岩形成于晚侏罗世。

5.2 岩浆源区

研究区满克头鄂博期火山岩多为流纹质的酸性火

山碎屑岩。主量元素具有富硅、碱,贫钙、镁特征,且具较低 $\text{Mg}^\#$ 值及极低的 Cr、Co、Ni 值(均小于 6×10^{-6})的特点。微量元素以相对富集大离子亲石元素(LILE) K、Rb、Ba 和 LREE,亏损高场强元素 Nb、Ta、Ti 为特征。指向了本组火山岩来自地壳源区的特征,表明该类岩石的原始岩浆起源于地壳岩石的部分熔融。火山岩的 Rb/Sr 值平均为 0.66,远高于原始地幔(0.03)、OIB(0.047)和 E-MORB(0.033)(Sun and McDonough, 1989), Ti/Zr 值平均为 13.94,与壳源岩浆的范围(<20)一致,同样说明了火山岩浆源区应为地壳物质。

5.3 构造背景

研究显示,早白垩世晚期为蒙古-鄂霍次克洋构造域和古太平洋构造域的转换时间。蒙古-鄂霍次克洋从西向东呈剪刀式闭合,东部最终碰撞时间为晚侏罗世—早白垩世。在微量元素 Rb-(Y+Nb)构造判别图解上(图 9),样品落入后造山期花岗岩环境区;在 R_1 - R_2 成因分类图解(图 10)中,样品点全部落在晚造山和同碰撞区域内。结合构造判别图解、同时代大兴安岭地区火山岩特征及区域构造背景,研究区满克头鄂博组火山岩的形成应与蒙古-鄂霍次克洋向南东方向俯冲作用有关。

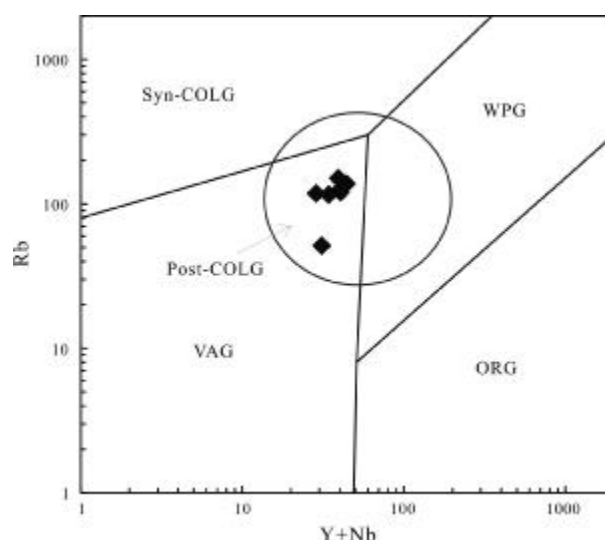


图9 满克头鄂博期火山岩 Pb-(Y+Nb)判别图

Fig. 9 The Pb-(Y+Nb) discrimination diagram of Manketouebo volcanic rocks

6 结论

(1)满克头鄂博组火山岩具有高硅、富碱,贫钙、

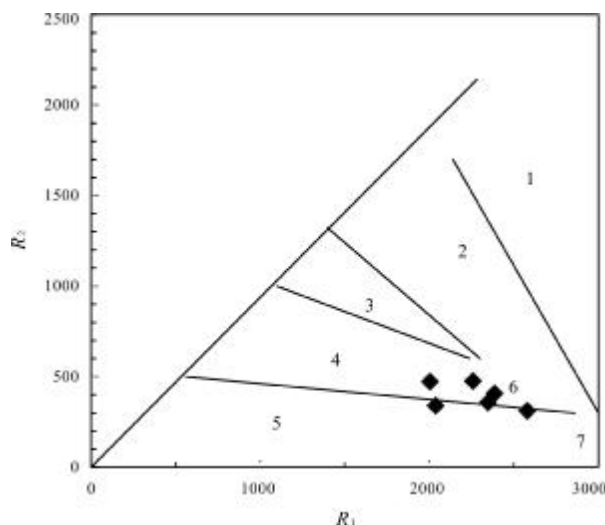


图 10 满克头鄂博期火山岩 R_1 - R_2 成因分类图解

Fig. 10 The R_1 - R_2 genetic classification diagram of Manketouebo volcanic rocks

铁、镁的特点,属高钾钙碱性系列火山岩,锆石 U-Pb 年龄为 152.9 ± 1.7 Ma,形成时代为晚侏罗世。

(2)满克头鄂博组火山岩相对富集大离子亲石元素 (LILE) Rb、K、Th、U 和 LREE, 亏损高场强元素 (HFSE) Nb、Ta, 强烈亏损 Sr、P 和 Ti, 岩浆起源于地壳岩石的部分熔融。

(3)满克头鄂博组火山岩的形成应与蒙古-鄂霍次克洋向南东方向俯冲作用有关。

参考文献 (References):

- [1]孙德有, 苟军, 任云生, 等. 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, 2011, 27(10): 3083-3094.
Sun D Y, Gou J, Ren Y S, et al. Zircon U-Pb dating and study on geochemistry of volcanic rocks in Manitu Formation from southern Manchuria, Inner Mongolia[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(10): 3083-3094.
- [2]内蒙古自治区地质矿产局. 内蒙古自治区岩石地层[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1996: 10-11.
Bureau of Inner Mongolia Geology and Mineral Resources. Lithology and stratigraphy of Inner Mongolia Autonomous Region[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1996: 10-11. (in Chinese)
- [3]黑龙江省地质矿产局. 黑龙江省岩石地层[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1997: 142-149.
Heilongjiang Bureau of Geology and Mineral Resources. Lithology and stratigraphy of Heilongjiang Province[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1997: 142-149. (in Chinese)
- [4]刘凯, 吴涛涛, 刘金龙, 等. 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, 2018, 45(2): 367-376.
Liu K, Wu T T, Liu J L, et al. Geochronology and geochemistry of volcanic rocks in Manketou'ebo Formation of Tulihe area, northern Da Hinggan Mountains[J]. Geology in China, 2018, 45(2): 367-376.
- [5]杨海星, 高利东, 高玉石, 等. 内蒙古霍林河地区晚石炭世本巴图组火山岩年代学、地球化学特征及构造背景[J]. 中国地质, 2020, 47(4): 1173-1185.
Yang H X, Gao L D, Gao Y S, et al. The chronology, geochemical characteristics and tectonic setting of the volcanic rocks in the Benbatu Formation of Huolinhe area, Inner Mongolia[J]. Geology in China, 2020, 47(4): 1173-1185.
- [6]秦涛, 崔天日, 李林川, 等. 大兴安岭北段扎兰屯地区林西组碎屑锆石 U-Pb 年代学特征及其地质意义[J]. 地质与资源, 2018, 27(4): 337-348, 359.
Qin T, Cui T R, Li L C, et al. Detrital zircon U-Pb chronology of the Linxi Formation in Zhalantun area, northern Daxinganling Mountains: Geological implications[J]. Geology and Resources, 2018, 27(4): 337-348, 359.
- [7]唐杰, 许文良, 王枫, 等. 张广才岭帽儿山组双峰式火山岩成因: 年代学与地球化学证据[J]. 世界地质, 2011, 30(4): 508-520.
Tang J, Xu W L, Wang F, et al. Petrogenesis of bimodal volcanic rocks from Maoershan Formation in Zhangguangcai Range: Evidence from geochronology and geochemistry[J]. Global Geology, 2011, 30(4): 508-520.
- [8]郑吉林, 王文东, 杨华本, 等. 大兴安岭北部下侏罗统战备村组的建立及其地质意义[J]. 地质通报, 2016, 35(7): 1106-1114.
Zheng J L, Wang W D, Yang H B, et al. The establishment of the Lower Jurassic Zhanbeicun Formation in northern Da Hinggan Mountains and its geological significance[J]. Geological Bulletin of China, 2016, 35(7): 1106-1114.
- [9]李中会, 李阳, 李睿杰, 等. 大兴安岭北段三根河林场新民组流纹岩锆石 U-Pb 定年及地球化学特征[J]. 地质与资源, 2020, 29(4): 310-318.
Li Z H, Li Y, Li R J, et al. Zircon U-Pb dating and geochemistry of the rhyolites from Xinmin Formation in Sangenhe forest farm, Northern Daxinganling Mountains[J]. Geology and Resources, 2020, 29(4): 310-318.
- [10]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.
Lin Q, Ge W C, Sun D Y, et al. Tectonic significance of Mesozoic volcanic rocks in northeastern China[J]. Scientia Geologica Sinica, 1998, 33(2): 129-139.

- [3] 王晓刚, 黎荣, 蔡俐鹏, 等. 川滇黔峨眉山玄武岩铜矿成矿地质特征、成矿条件及找矿远景[J]. 四川地质学报, 2010, 30(2): 174-182.

Wang X G, Li R, Cai L P, et al. Geological features, ore-forming conditions and prospecting potential of the Emeishan basalt-hosted Cu deposits in the Sichuan-Yunnan-Guizhou border region [J]. Acta

Geologica Sichuan, 2010, 30(2): 174-182.

- [4] 张洪超, 惠陶, 陈浩如. 川西沐川地区玄武岩型铜矿找矿前景[J]. 铜业工程, 2010(4): 17-20.

Zhang H C, Hui T, Chen H R. Exploration prospecting of basalts copper ore in Muchuan district of western Sichuan [J]. Copper Engineering, 2010(4): 17-20.

(上接第 464 页/Continued from Page 464)

- [11] 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: 壳幔相互作用的证据[J]. 岩石学报, 1999, 15(3): 396-407.

Ge W C, Lin Q, Sun D Y, et al. Geochemical characteristics of the Mesozoic basalts in Da Hinggan Ling: Evidence of the mantle-crust interaction[J]. Acta Petrologica Sinica, 1999, 15(3): 396-407.

- [12] 张宏, 马俊孝, 权恒, 等. 大兴安岭北段中生代火山岩形成的动力学环境[J]. 贵金属地质, 1999, 8(1): 56-64.

Zhang H, Ma J X, Quan H, et al. The dynamic background of Mesozoic volcanic activity in northern part of Daxing'anling Mountains [J]. Journal of Precious Metallic Geology, 1999, 8(1): 56-64.

- [13] Meng Q R. What drove Late Mesozoic extension of the Northern China-Mongolia tract? [J]. Tectonophysics, 2003, 369(3/4): 155-174.

- [14] Wang P J, Chen F K, Shen S M, et al. Geochemical and Nd-Sr-Pb isotopic composition of Mesozoic volcanic rocks in the Songliao Basin, NE China[J]. Geochemical Journal, 2006, 40(2): 149-159.

- [15] 陈志广, 张连昌, 周新华, 等. 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, 2006, 22(12): 2971-2986.

Chen Z G, Zhang L C, Zhou X H, et al. Geochronology and geochemical characteristics of volcanic rocks section in Manzhouli Xinyouqi, Inner-Mongolia [J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(12): 2971-2986.

- [16] 张玉涛, 张连昌, 英基丰, 等. 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, 2007, 23(11): 2811-2822.

Zhang Y T, Zhang L C, Ying J F, et al. Geochemistry and source characteristics of Early Cretaceous volcanic rocks in Tahe, north Da Hinggan Mountain [J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(11): 2811-2822.

- [17] Ying J F, Zhou X H, Zhang L C, et al. Geochronological framework of Mesozoic volcanic rocks in the Great Xing'an Range, NE China, and their geodynamic implications [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2010, 39(6): 786-793.

- [18] 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.

Xu M J, Xu W L, Meng E, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb chronology and geochemistry of Mesozoic volcanic rocks from the Shanghulin-Xiangyang basin in Ergun area, northeastern Inner Mongolia [J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(9): 1321-1338.

- [19] 吴涛涛, 赵东芳, 邵军, 等. 内蒙古比利河谷铅锌银矿床地质地球化学特征及成因[J]. 中国地质, 2014, 41(4): 1242-1252.

Wu T T, Zhang D F, Shao J, et al. Geological and geochemical characteristics and genesis of the Biliyagu lead-zinc-silver deposit, Inner Mongolia [J]. Geology in China, 2014, 41(4): 1242-1252.

(上接第 546 页/Continued from Page 546)

- [17] 隋少强, 汪新伟, 周总瑛, 等. 天津岩溶地热田热储特征研究[J]. 地质与资源, 2019, 28(6): 590-594, 569.

Sui S Q, Wang X W, Zhou Z Y, et al. Study on the thermal reservoir characteristics of karst geothermal fields in Tianjin City [J]. Geology and Resources, 2019, 28(6): 590-594, 569.

- [18] 邓启军, 李伟, 朱庆俊, 等. 河北坝上张北县玄武岩区蓄水构造特征与找水实践[J]. 地质通报, 2020, 39(12): 1899-1907.

Deng Q J, Li W, Zhu Q J, et al. An analysis of the characteristics of water storage structure and the practice of groundwater exploration in the basalt area of Zhangbei County, Bashang, Hebei Province [J]. Geological Bulletin of China, 2020, 39(12): 1899-1907.

- [19] 李涛, 邓铭江, 王于宝, 等. 台兰河山前地下储水构造及地下水库可行性研究[J]. 水文地质工程地质, 2011, 38(1): 30-34.

Li T, Deng M J, Wang Y B, et al. A study of the feasibility of the groundwater storage structure and groundwater reservoir in the

piedmont of the Tailan River [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2011, 38(1): 30-34.

- [20] 刘声凯, 刘海飞, 黄超, 等. 水文地质调查与综合物探在赣南花岗岩地区找水中的应用[J]. 地质与勘探, 2021, 57(3): 584-592.

Liu S K, Liu H F, Huang C, et al. Groundwater prospecting by combined hydrogeological and integrated geophysical surveys in granite areas, southern Jiangxi Province [J]. Geology and Exploration, 2021, 57(3): 584-592.

- [21] 马超, 孙箐彬, 邵光宇, 等. 淄河源区含水层介质特征及富水规律研究[J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34(12): 173-180.

Ma C, Sun Q B, Shao G Y, et al. Study on the characteristics of aquifers medium and the law of water abundance in Zihe River source area [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2020, 34(12): 173-180.