

大兴安岭呼中地区满克头鄂博组火山岩地球化学特征、锆石 U-Pb 年龄及构造环境

于跃江¹, 李慧², 李新鹏¹, 江峰², 梁景龙¹, 李金明¹, 卜程丹³

(1. 黑龙江省自然资源调查院, 黑龙江 哈尔滨 150036; 2. 黑龙江省第三地质勘查院, 黑龙江 哈尔滨 150300; 3. 黑龙江省地质测绘地理信息院, 黑龙江 哈尔滨 150030)

摘要:以大兴安岭呼中地区满克头鄂博组火山岩为研究对象,采用地质勘查、岩石地球化学和 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学方法,分析火山岩的岩石学、主量元素、微量元素和年代学特征,探讨火山岩岩浆来源、岩石成因及构造环境。结果表明:满克头鄂博组火山岩 SiO₂ 的质量分数为 76.82%~77.82%, Al₂O₃ 质量分数为 11.83%~12.55%, K₂O 的质量分数为 1.50%~4.72%, Na₂O 的质量分数为 3.10%~5.24%, 属于铝质高钾钙碱性岩系;稀土元素总量的质量分数为 (102.54~141.50)×10⁻⁶, 轻稀土元素富集,质量分数为 (95.75~132.66)×10⁻⁶, 重稀土元素亏损,质量分数为 (6.79~9.87)×10⁻⁶, 其中, Rb、K、Th、La、Ce、Nd、Hf 等元素富集, Ba、Sr、Nb、P、Ti 等元素亏损, Eu 元素具有明显的负异常特征。火山岩岩浆来源于沉积物熔体加入的地壳物质部分熔融, 满克头鄂博组酸性火山岩获得锆石 U-Pb 年龄为 (164.6±1.8)Ma, 形成时代为晚侏罗世。研究区满克头鄂博组的构造环境为与古太平洋板块俯冲作用相关的活动陆缘环境。该结果为研究大兴安岭火山岩带年代学和构造背景提供依据。

关键词:火山岩; 锆石 U-Pb 年龄; 地球化学特征; 构造环境; 晚侏罗世; 满克头鄂博组; 呼中地区; 大兴安岭
中图分类号: P588.5; P597.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-4107(2025)03-0029-12

0 引言

大兴安岭地区位于兴蒙造山带东段, 额尔古纳地块南段呼中地区处于内蒙古自治区新巴尔虎右旗—根河(拉张区)铜—铅—银—金—萤石—煤(铀)成矿带, 为黑龙江省金属和非金属重要成矿带。中—新元古代古弧盆系演化期间, 形成结晶基底; 古生代, 古亚洲洋构造域发展演化的漫长历程开始; 晚古生代末—早中生代初, 古亚洲洋演化结束; 中生代, 受蒙古—鄂霍茨克洋和古太平洋的俯冲影响^[1-5], 岩浆活动频繁, 火山喷发活动强烈, 地质构造复杂, 额尔古纳地块为成矿的重要区域^[1,6-9]。中—新元古代, 变质杂岩与陆缘弧型侵入岩相伴产出, 成为额尔古纳地块的主体, 为活动陆缘环境, 发现石墨和金等矿床; 古生代早奥陶世, 进入古亚洲洋构造域演化阶段, 弧盆系演化时间自早奥陶世开始一直持续到早三叠世, 经历火山岛弧形成、弧间盆地充填、弧背盆地堆积等构造演化, 发现金、银等金属矿床; 晚三叠世—早白垩世, 大兴安岭地区进入强烈构造活动期, 受强烈的构造运动影响, 形成北东向大兴安岭主脊火山岩带, 为额尔古纳地块主要成矿期^[10-14], 发现金、有色金属及煤等矿床。

大兴安岭地区火山岩获得同位素年龄集中于中—晚侏罗世(170~150 Ma)和早白垩世(140~125 Ma)^[15-19]。于跃江等^[20]认为, 大兴安岭地区存在早侏罗世火山岩(196~185 Ma)。大兴安岭地区满克头鄂博组火山岩形成于晚侏罗世—早白垩世(164~132 Ma)^[21], 时间跨度大, 形成的构造环境存在争议^[16-19,22-34], 陈志广等^[16]认为形成于晚侏罗世(162 Ma), 形成的构造环境与蒙古—鄂霍茨克洋闭合—造山后伸展作用有关; 贾彬等^[21]认为形成于晚侏罗世(146~145 Ma), 形成的构造环境与蒙古—鄂霍茨克洋闭合—造山后伸展作用有关; 陈超等^[26]认为形成于晚侏罗世(154 Ma), 形成的构造环境与蒙古—鄂霍茨克洋伸展作用有关; 司秋亮^[29]认为形成于晚侏罗世—早白垩世(152~135 Ma), 形成的环境为蒙古—鄂霍茨克洋闭合后的伸展环境, 早白垩世中期的火山岩形成于伸展环境, 受蒙古—鄂霍茨克洋闭合和古太平洋

收稿日期: 2024-09-13; 编辑: 朱秀杰

基金项目: 黑龙江省 1:5 万区域地质矿产调查项目(HLJKD2015-07)

作者简介: 于跃江(1969—), 男, 高级工程师, 主要从事基础地质及矿产勘查等方面的研究。

通信作者: 李新鹏, E-mail: 48058656@qq.com

俯冲的双重影响;张吉恒^[30]认为形成于晚侏罗世—早白垩世(160~122 Ma),受古太平洋板块低角度俯冲作用的影响,构造环境为活动大陆边缘环境。

以大兴安岭呼中地区满克头鄂博组火山岩为研究对象^①,采用地质勘查、岩石地球化学和 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学方法,分析火山岩的岩石学、主量元素、微量元素和年代学特征,探讨火山岩岩浆来源、岩石成因及构造环境,为大兴安岭主脊火山岩带构造演化的研究提供依据。

1 区域地质概况

研究区位于大兴安岭地区额尔古纳地块南段的呼中地区,大地构造属于额尔古纳地块。古生代地层不发育,出露上石炭统洪水泉组,为一套浅海相细碎屑岩沉积建造,主要由变细粒长石砂岩、变细粒长石石英砂岩、变细粒石英砂岩、石英岩、变粉砂岩、粉砂质板岩、斑点板岩、变泥岩,以及夹变中酸性火山岩组成;中生代火山岩发育,上侏罗统满克头鄂博组在研究区大面积出露,为一套酸性火山沉积建造,岩石类型为流纹岩和流纹质火山碎屑岩,整合于玛尼吐组之下;上侏罗统玛尼吐组为一套中性—中酸性火山岩及碎屑岩建造,大面积出露于研究区北部及中南部,岩石类型为粗安岩、安山岩及火山碎屑岩、英安岩及火山碎屑岩,被白音高老组喷发不整合覆盖;下白垩统白音高老组为酸性火山沉积建造,岩石类型为流纹岩及火山碎屑岩、英安岩及火山碎屑岩。侵入岩零星出露中侏罗世二长花岗岩、早白垩世正长花岗岩和碱长花岗岩,呈岩珠状产出(见图 1)。

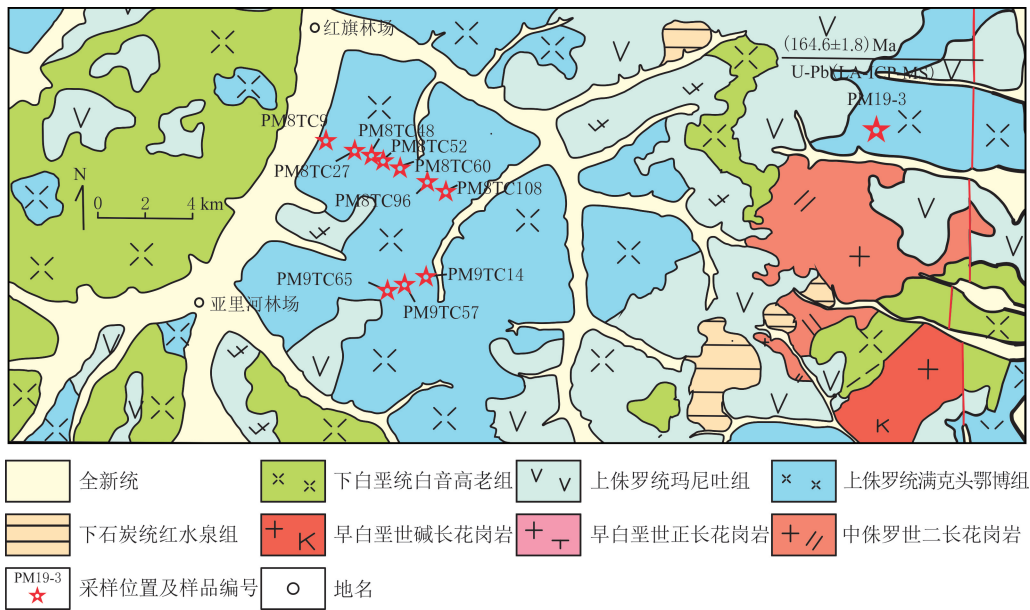


图 1 研究区地质简图

Fig. 1 Geological sketch map of the study area

亚里河林场北东满克头鄂博组剖面(PM8)以流纹质晶屑凝灰岩和流纹岩为主,共划分 9 层,由流纹质晶屑凝灰岩与流纹岩组成多个互层(见图 2)。

2 样品采集与测试分析

2.1 样品采集

在新鲜无矿化蚀变的野外露头采集满克头鄂博组酸性火山岩样品。其中,流纹质熔结凝灰岩样品编号分别为 PM9TC57(采样位置为 E123°28'50"、N51°25'14")、PM8TC96(采样位置为 E123°29'06"、N51°25'

① 黑龙江省第三地质勘查院。黑龙江省 1:5 万得特亚粗坡库第河、博乌拉山、1147 高地、工队幅区域地质矿产调查报告[R]. 哈尔滨:黑龙江省地质资料档案馆,2019:10.

36''), PM19-3(采样位置为 E123°28'19''), N51°24'59''), PM9TC14(采样位置为 E123°58'23''), N51°27'07''), PM16LT186(采样位置为 E123°46'48''), N51°28'21''); 流纹岩样品编号分别为 PM8TC52(采样位置为 E123°27'32''), N51°27'32''), PM8TC27(采样位置为 E123°26'27''), N51°26'34''), PM8TC48(采样位置为 E123°27'05''), N51°26'18''), PM10TC40(采样位置为 E123°39'45''), N51°22'54''); 流纹质岩屑晶屑凝灰岩样品编号分别为 PM8TC60(采样位置为 E123°28'12''), N51°25'56''), PM9TC65(采样位置为 E123°39'40''), N51°25'39''), PM8TC9(采样位置为 E123°26'19''), N51°26'41''), PM8TC108(采样位置为 E123°29'51''), N51°25'04''); 流纹质晶屑凝灰岩样品编号分别为 PM4LT87(采样位置为 E123°28'55''), N51°34'02''), PM4-1(采样位置为 E123°38'27''), N51°33'47''), PM4TC30(采样位置为 E123°28'49''), N51°33'38''); 流纹质含角砾凝灰岩样品编号为 PM16LT131(采样位置为 E123°47'34''), N51°28'17'')。

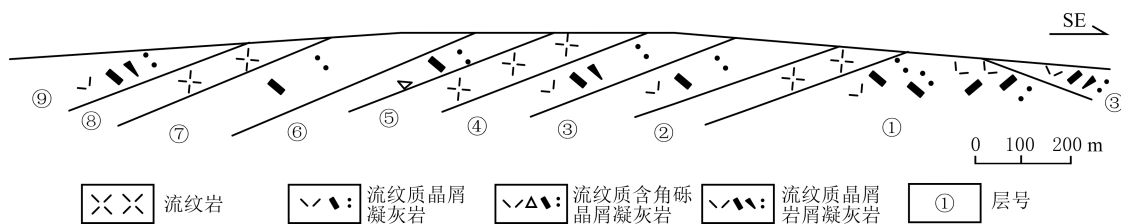


图2 亚里河林场东北满克头鄂博组野外地质剖面

Fig. 2 Field geological profile of Manketouebo Formation, northeast of Yalihe Forest Farm

2.2 测试分析

全岩主量元素和微量元素分析在黑龙江省地质矿产测试应用研究所实验室完成,主检设备为安捷伦 Agilent7900 型电感耦合等离子体质谱仪。利用熔片 X 线荧光光谱(XRF)法测试样品的主量元素,测试温度为 25 ℃、湿度为 65%,测试分析精密度优于 5%,测试流程参考文献[35]。利用电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)测试微量和稀土元素,测试分析精密度优于 5%,测试温度为 25 ℃、湿度为 65%,测试流程参考文献[36]。

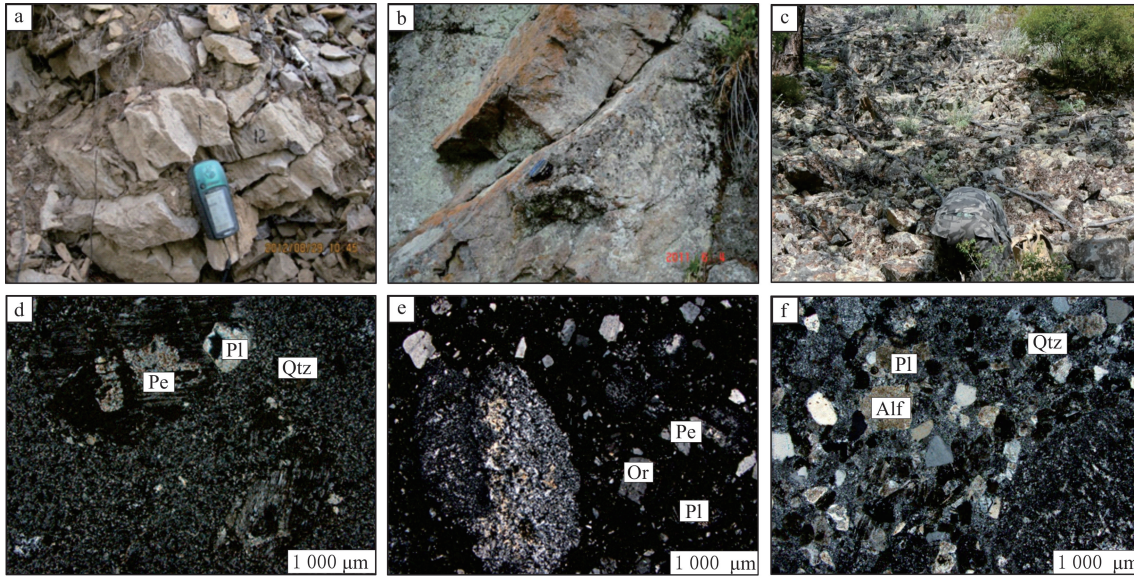
锆石的筛选在河北省廊坊市拓轩岩矿检测服务有限公司完成。首先将样品粉碎,采用重矿物分离法进行分选;然后用环氧树脂将锆石固定,将表面制成标靶,选择无裂痕、高透明、晶形好且无包裹体的锆石制靶,通过透射光、反射光及阴极发光(CL)拍摄图像,筛选方法参考文献[2]。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年分析在吉林大学自然资源部东北亚矿产资源评价重点实验室完成,测试分析仪器为德国 Compex 公司激光剥蚀系统 GeoLasPro 型 193 nm ArF 准分子激光器,与激光器联用的是安捷伦 Agilent7900 ICP-MS 单四极杆电感耦合等离子体质谱仪。选择激光束斑直径为 32 μm,采用国际标准锆石 91500 作为外标进行同位素分馏校正,每测试 5 个样品点进行一次标准锆石 91500 测试,测试方法及流程参考文献[37]。采用 Glitter4.0 软件进行数据处理,采用 Anderson 软件进行普通铅校正,采用 Isoplo3.0 软件进行同位素年龄计算并绘制谐和图。

3 岩石地球化学与年代学特征

3.1 岩相学特征

研究区满克头鄂博组为一套酸性熔岩及其火山碎屑岩。流纹质火山碎屑岩野外露头镜下照片见图 3(a-c)。流纹岩呈土黄色斑状结构,为块状构造。斑晶的体积分数为 17%,由钾长石(体积分数为 10%)、石英(体积分数为 5%)和少量斜长石(体积分数为 2%)组成。钾长石呈板柱状,为条纹结构,粒径为 0.2~2.0 mm,高岭土化蚀变;石英呈他形粒状,最高一级黄干涉色,偏光镜下见波状消光,粒径为 0.2~2.5 mm;斜长石呈板柱状,绢云母化蚀变,聚片双晶发育,粒径为 0.2~1.0 mm。基质为长英质微晶,多数具有光性特征,体积分数为 83%,由火山灰组成(见图 3(d))。流纹质晶屑凝灰岩呈黄褐色凝灰结构,为块状构造。火山碎屑体积分数为 35%,以晶屑为主,其中,石英(体积分数为 18%)呈他形粒状,粒径为 0.2~2.5 mm,部分溶蚀,波状消光;斜长石(体积分数为 9%)呈半自形板柱状,粒径为 0.5~2.0 mm,绢云母化蚀变;碱性长石(体积分数为 8%)呈板柱状,为条纹结构,卡式双晶发育,粒径为 0.2~1.5 mm,高岭土

化蚀变(见图 3(b、e-f))。



(a) 流纹质熔结凝灰岩, PM16LT186样品; (b) 流纹质晶屑凝灰岩, PM4LT87样品; (c) 流纹质含角砾凝灰岩, PM16LT131样品; (d) 流纹岩, PM10TC40样品; (e) 流纹质晶屑凝灰岩, PM4TC30样品; (f) 流纹质晶屑凝灰岩, PM4-1样品; Pl. 斜长石; Or. 正长石; Qtz. 石英; Pe. 微斜长石; Alf. 碱性长石

图 3 研究区满克头鄂博组火山岩野外露头镜下照片

Fig. 3 Volcanic rock specimens and microscopic photos of Manketouebo Formation in the study Area

3.2 地球化学特征

3.2.1 主量元素

满克头鄂博组火山岩样品主量元素分析结果见表 1。其中, SiO_2 质量分数为 74.61%~77.82%, 平均为 77.10%, 为酸性火山岩; 全碱($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$)质量分数为 6.74%~8.57%, 平均为 8.14%, 相对富钾。岩浆分异指数(DI)为 94~97, 表明岩浆具有强烈的分离结晶作用, 岩性以酸性为主; 固结指数(SI)为 0.76~1.66, 表明分异程度高。火山岩分类命名图解(见图 4(a))显示, 样品投点落在流纹岩区域, 符合岩相学特征; 由 $w(\text{SiO}_2) - w(\text{K}_2\text{O})$ 图解(见图 4(b))可知, 样品投点落在高钾钙碱性系列区域; 由 $A/\text{CNK} - A/\text{NK}$ 图解(见图 4(c))可知, 样品投点落在铝质区; 由 $w(\text{Na}_2\text{O}) - w(\text{K}_2\text{O})$ 图解(见图 4(d))可知, 样品多为钾质, 个别为钠质。满克头鄂博组火山岩属于铝质高钾钙碱性岩石。

表 1 满克头鄂博组火山岩样品主量、稀土和微量元素分析结果

Table 1 Analysis results of main, rare earth and trace elements in volcanic rocks of the Manketouebo Formation

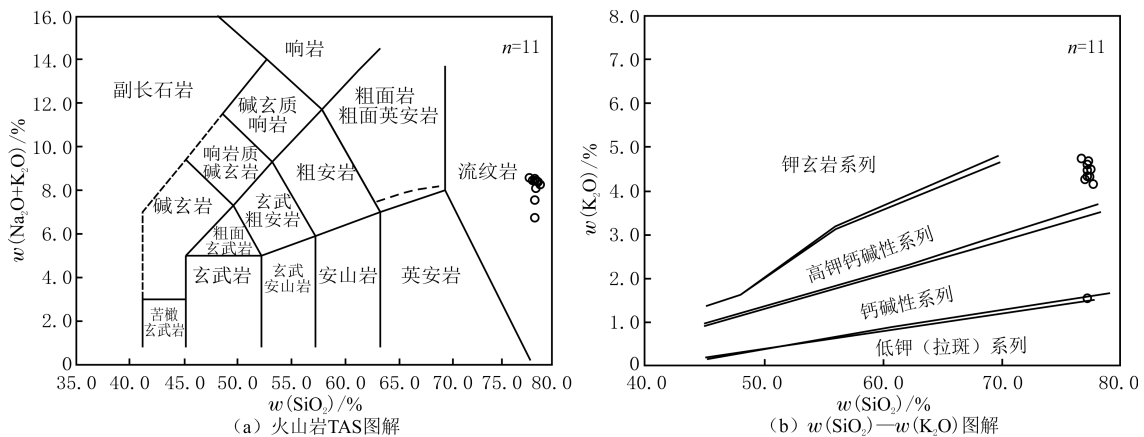
样品编号	$w(\text{SiO}_2)/\%$	$w(\text{TiO}_2)/\%$	$w(\text{Al}_2\text{O}_3)/\%$	$w(\text{Fe}_2\text{O}_3)/\%$	$w(\text{FeO})/\%$	$w(\text{MnO})/\%$	$w(\text{MgO})/\%$	$w(\text{CaO})/\%$	$w(\text{Na}_2\text{O})/\%$	$w(\text{K}_2\text{O})/\%$	$w(\text{P}_2\text{O}_5)/\%$	$w(\text{烧减量})/\%$
PM9TC57	76.82	0.13	12.29	0.76	0.38	0.01	0.10	0.09	3.85	4.72	0.02	0.70
PM8TC52	77.27	0.13	12.12	0.52	0.45	0.01	0.10	0.09	4.22	4.31	0.02	0.68
PM8TC96	77.33	0.14	12.48	0.67	0.55	0.08	0.12	0.14	3.86	4.58	0.01	0.03
PM8TC60	77.05	0.14	12.36	0.76	0.51	0.09	0.07	0.12	4.21	4.24	0.02	0.41
PM9TC65	77.33	0.14	11.83	0.58	0.51	0.02	0.11	0.10	5.24	1.50	0.02	2.50
PM8TC9	77.34	0.14	12.27	0.86	0.76	0.04	0.16	0.13	3.10	4.45	0.02	0.70
PM8TC108	77.57	0.13	12.38	0.68	0.57	0.02	0.08	0.07	3.91	4.47	0.02	0.09
PM8TC27	77.82	0.13	12.35	0.66	0.54	0.06	0.08	0.06	4.13	4.13	0.02	0.01
PM8TC48	77.43	0.13	12.52	0.66	0.46	0.01	0.10	0.06	3.43	4.66	0.01	0.51
PM9TC14	77.50	0.14	12.55	0.67	0.46	0.02	0.08	0.09	4.12	4.30	0.02	0.03
PM19-3	74.61	0.43	12.99	2.22	0.69	0.04	0.49	0.18	3.17	4.06	0.10	0.98
样品编号	$w(\text{总量})/\%$	DI	A/NK	A/CNK	SI	$w(\text{La})/10^{-6}$	$w(\text{Ce})/10^{-6}$	$w(\text{Pr})/10^{-6}$	$w(\text{Nd})/10^{-6}$	$w(\text{Sm})/10^{-6}$	$w(\text{Eu})/10^{-6}$	$w(\text{Gd})/10^{-6}$
PM9TC57	99.17	97.29	1.07	1.06	0.98	27.50	49.00	5.42	17.50	2.83	0.26	2.37
PM8TC52	99.92	97.74	1.04	1.03	1.05	31.30	56.10	6.00	19.80	3.25	0.28	2.70
PM8TC96	99.99	96.48	1.10	1.08	1.27	24.40	51.70	4.43	15.10	2.66	0.26	2.39

续表 1

样品编号	$w(\text{总量})/\%$	DI	A/NK	A/CNK	SI	$w(\text{La})/10^{-6}$	$w(\text{Ce})/10^{-6}$	$w(\text{Pr})/10^{-6}$	$w(\text{Nd})/10^{-6}$	$w(\text{Sm})/10^{-6}$	$w(\text{Eu})/10^{-6}$	$w(\text{Gd})/10^{-6}$
PM8TC60	99.98	96.95	1.07	1.05	0.76	31.00	71.70	6.08	19.80	3.36	0.32	2.90
PM9TC65	98.88	96.32	1.16	1.13	1.43	36.00	63.60	6.53	21.20	3.08	0.33	3.02
PM8TC9	99.97	94.76	1.24	1.21	1.66	34.50	58.90	6.70	22.20	3.73	0.34	3.13
PM8TC108	99.99	96.91	1.10	1.09	0.79	32.20	57.70	6.16	20.20	3.31	0.31	2.88
PM8TC27	99.99	97.01	1.10	1.09	0.80	30.10	54.20	5.82	19.50	3.17	0.29	2.74
PM8TC48	99.98	96.36	1.17	1.16	1.08	31.20	55.70	5.96	19.70	3.18	0.29	2.81
PM9TC14	99.98	97.07	1.10	1.08	0.81	22.60	52.20	4.46	14.10	2.18	0.21	1.76
PM19-3	99.98	91.09	1.37	1.33	4.64	22.50	46.50	4.51	15.50	2.96	0.62	2.53
样品编号	$w(\text{Tb})/10^{-6}$	$w(\text{Dy})/10^{-6}$	$w(\text{Ho})/10^{-6}$	$w(\text{Er})/10^{-6}$	$w(\text{Tm})/10^{-6}$	$w(\text{Yb})/10^{-6}$	$w(\text{Lu})/10^{-6}$	$w(\text{Y})/10^{-6}$	$w(\Sigma\text{REE})/10^{-6}$	$w(\text{LREE})/10^{-6}$	$w(\text{HREE})/10^{-6}$	δEu
PM9TC57	0.34	2.10	0.33	0.96	0.20	1.34	0.20	10.20	110.35	102.51	7.85	0.30
PM8TC52	0.40	2.16	0.41	1.18	0.23	1.50	0.23	12.40	125.54	116.73	8.81	0.29
PM8TC96	0.40	2.15	0.44	1.27	0.26	1.70	0.25	13.00	107.41	98.55	8.86	0.31
PM8TC60	0.43	2.29	0.42	1.19	0.23	1.55	0.23	12.50	141.50	132.26	9.24	0.31
PM9TC65	0.42	2.10	0.40	1.17	0.23	1.51	0.23	11.50	139.83	130.74	9.08	0.33
PM8TC9	0.49	2.48	0.44	1.25	0.24	1.59	0.24	13.00	136.24	126.37	9.87	0.31
PM8TC108	0.42	2.14	0.40	1.14	0.23	1.53	0.23	12.50	128.86	119.88	8.98	0.31
PM8TC27	0.42	2.09	0.41	1.23	0.25	1.65	0.26	12.40	122.12	113.08	9.04	0.30
PM8TC48	0.40	2.12	0.40	1.22	0.25	1.56	0.24	12.10	125.02	116.03	8.99	0.30
PM9TC14	0.30	1.64	0.31	1.01	0.20	1.37	0.21	9.90	102.54	95.75	6.79	0.33
PM19-3	0.43	2.57	0.47	1.42	0.22	1.46	0.23	13.00	100.76	92.59	8.17	0.69
样品编号	δCe	$w(\text{Rb})/10^{-6}$	$w(\text{K})/10^{-6}$	$w(\text{Ba})/10^{-6}$	$w(\text{Th})/10^{-6}$	$w(\text{U})/10^{-6}$	$w(\text{Nb})/10^{-6}$	$w(\text{Sr})/10^{-6}$	$w(\text{P})/10^{-6}$	$w(\text{Zr})/10^{-6}$	$w(\text{Hf})/10^{-6}$	$w(\text{Ti})/10^{-6}$
PM9TC57	0.98	144.00	4.72	190.00	18.50	2.48	17.50	23.10	0.02	102.00	3.45	0.13
PM8TC52	1.00	134.00	4.31	155.00	18.10	2.76	19.80	16.80	0.02	96.80	3.74	0.13
PM8TC96	1.22	140.00	4.58	184.00	19.30	2.95	15.10	13.50	0.01	95.00	3.44	0.14
PM8TC60	1.28	130.00	4.24	197.00	18.80	3.33	19.80	15.90	0.02	100.00	3.87	0.14
PM9TC65	1.02	46.40	1.50	178.00	16.40	5.03	21.20	69.90	0.02	102.00	3.33	0.14
PM8TC9	0.95	127.00	4.45	208.00	18.40	1.93	22.20	33.70	0.02	99.00	3.48	0.14
PM8TC108	1.00	139.00	4.47	192.00	18.90	2.52	20.20	31.80	0.02	105.00	3.99	0.13
PM8TC27	1.00	121.00	4.13	165.00	18.90	2.28	19.50	16.20	0.02	90.90	3.79	0.13
PM8TC48	1.00	148.00	4.66	185.00	18.30	2.29	19.70	20.10	0.01	104.00	3.84	0.13
PM9TC14	1.27	129.00	4.30	170.00	18.30	2.47	14.10	15.50	0.02	77.90	3.36	0.14
PM19-3	1.13	46.50	4.06	187.00	10.60	3.09	11.40	147.00	0.10	174.00	4.89	0.43

3.2.2 稀土和微量元素

满克头鄂博组火山岩样品稀土和微量元素分析结果见表 1。其中,火山岩稀土总量 $w(\Sigma\text{REE})$ 为 $(102.54\sim 141.50)\times 10^{-6}$,轻稀土元素 $w(\text{LREE})$ 为 $(95.75\sim 132.66)\times 10^{-6}$,重稀土元素 $w(\text{HREE})$ 为 $(6.79\sim 9.87)\times 10^{-6}$, $w(\text{LREE})/w(\text{HREE})$ 为 11.12~14.11,轻稀土元素较为富集,重稀土较为贫化;球粒陨石稀土元素标准化图解(见图 5(a))显示,曲线为“V”型右倾模式,表明轻稀土元素相对富集,重稀土元素相对亏损, δEu 为 0.29~0.33,具有明显的负异常。原始地幔标准化微量元素蛛网图(见图 5(b))显示,Rb、K、Th、La、Ce、Nd、Hf 等元素富集,Ba、Sr、Nb、P、Ti 等元素亏损。



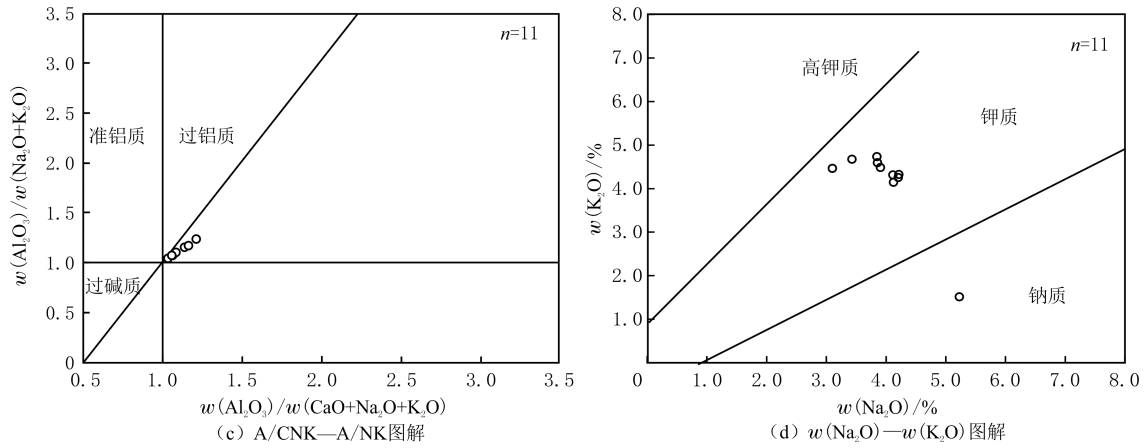


图 4 满克头鄂博组样品岩石分类图解(据文献[38-40]修改)

Fig. 4 Rock classification diagram of the Manketouebo Formation(modified by references[38-40])

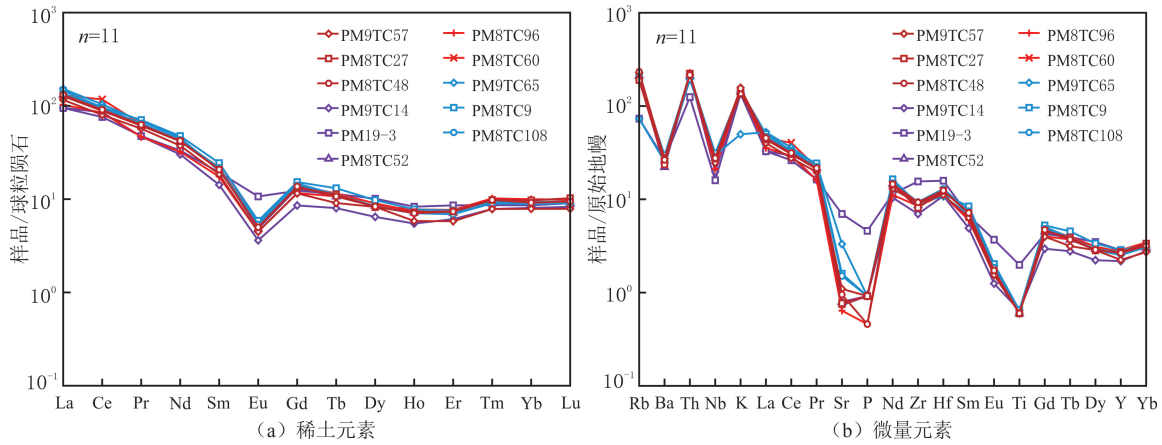


图 5 满克头鄂博组样品稀土元素配分和微量元素蛛网图(据文献[41]修改)

Fig. 5 Partition diagram of rare earth elements and spider diagram of trace elements in Manketouebo Formation (modified by reference[41])

3.3 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学特征

流纹质熔结凝灰岩 PM19-3 样品 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年分析结果见表 2。测试 25 个点(见图 6),其中 15、22、23 号锆石年龄分别为(260±7)、(192±5)和(190±5)Ma,为捕获锆石年龄;其余 22 个点以短柱状为主,少数为长柱状,粒径一般在 80~110 μm 之间,个别为 140 μm,锆石晶形完整,自形程度较高,多数为棱角状,具有明显的岩浆震荡生长环带结构和典型岩浆成因特征。w(Th)/w(U)为 0.55~1.85,大于 0.40^[3],属于典型岩浆成因锆石。22 个锆石点分布在谐和线附近,谐和度较好(见图 7),加权平均年龄为(164.6±1.8)Ma,岩石成岩年龄为晚侏罗世。

表 2 满克头鄂博组流纹质熔结凝灰岩 PM19-3 样品 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 分析结果

Table 2 LA-ICP-MS zircon U-Pb analysis of sample PM19-3 of rhyolite fused tuff from Manketouebo Formation

序号	元素				同位素比					年龄/Ma						
	w(Pb)/10 ⁻⁶	w(Th)/10 ⁻⁶	w(U)/10 ⁻⁶	w(Th)/w(U)	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ
1	19.46	859.96	463.37	1.86	0.05	0	0.18	0.01	0.03	0	207	45	169	6	166	4
2	50.03	1 524.32	1 415.79	1.08	0.05	0	0.18	0.01	0.03	0	257	31	171	5	165	4
3	6.86	166.26	212.20	0.78	0.05	0	0.19	0.01	0.03	0	393	66	178	8	162	4
4	7.54	204.89	213.39	0.96	0.06	0	0.23	0.01	0.03	0	708	70	208	10	166	5
5	2.14	47.55	65.08	0.73	0.05	0	0.19	0.02	0.03	0	285	143	175	14	167	5

续表 2

序号	元素				同位素比						年龄/Ma					
	$w(\text{Pb})/10^{-6}$	$w(\text{Th})/10^{-6}$	$w(\text{U})/10^{-6}$	$w(\text{Th})/w(\text{U})$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
6	15.68	405.25	460.67	0.88	0.05	0	0.18	0.01	0.03	0	139	44	166	6	168	4
7	5.34	115.00	167.54	0.69	0.06	0.01	0.20	0.02	0.02	0	539	253	182	18	155	5
8	9.39	333.01	248.19	1.34	0.05	0	0.18	0.01	0.03	0	188	65	169	8	167	4
9	5.42	129.43	161.37	0.80	0.05	0	0.19	0.01	0.03	0	312	88	176	10	166	5
10	4.39	139.19	112.36	1.24	0.05	0	0.19	0.01	0.03	0	248	104	173	11	167	5
11	4.97	221.76	124.87	1.78	0.07	0	0.25	0.01	0.02	0	1 044	67	226	11	155	4
12	5.87	204.44	162.41	1.26	0.05	0	0.17	0.01	0.03	0	183	88	162	9	161	4
13	12.71	473.80	316.87	1.50	0.05	0	0.19	0.01	0.03	0	271	55	176	7	169	4
14	6.01	257.67	155.24	1.66	0.05	0	0.16	0.01	0.03	0	66	93	155	9	161	4
15	23.33	341.57	455.43	0.75	0.05	0	0.30	0.01	0.04	0	348	36	269	8	260	7
16	4.38	163.44	112.05	1.46	0.05	0	0.18	0.01	0.03	0	182	94	168	10	167	5
17	4.96	151.59	137.30	1.10	0.05	0	0.19	0.01	0.03	0	311	82	174	9	164	4
18	1.77	52.22	47.43	1.10	0.05	0.01	0.18	0.02	0.03	0	148	166	166	15	168	5
19	9.86	310.74	275.06	1.13	0.05	0	0.18	0.01	0.03	0	225	55	170	7	166	4
20	6.53	150.61	193.28	0.78	0.06	0	0.21	0.01	0.03	0	489	57	190	8	167	4
21	1.05	26.49	32.27	0.82	0.04	0.01	0.14	0.02	0.03	0	402	254	129	20	164	6
22	21.63	459.47	559.47	0.82	0.05	0	0.21	0.01	0.03	0	219	38	194	6	192	5
23	8.82	138.28	247.32	0.56	0.05	0	0.20	0.01	0.03	0	161	56	188	8	190	5
24	1.99	42.21	61.53	0.69	0.05	0	0.18	0.01	0.03	0	165	132	165	13	165	5
25	5.52	112.23	171.29	0.66	0.05	0	0.17	0.01	0.03	0	106	78	162	8	166	4

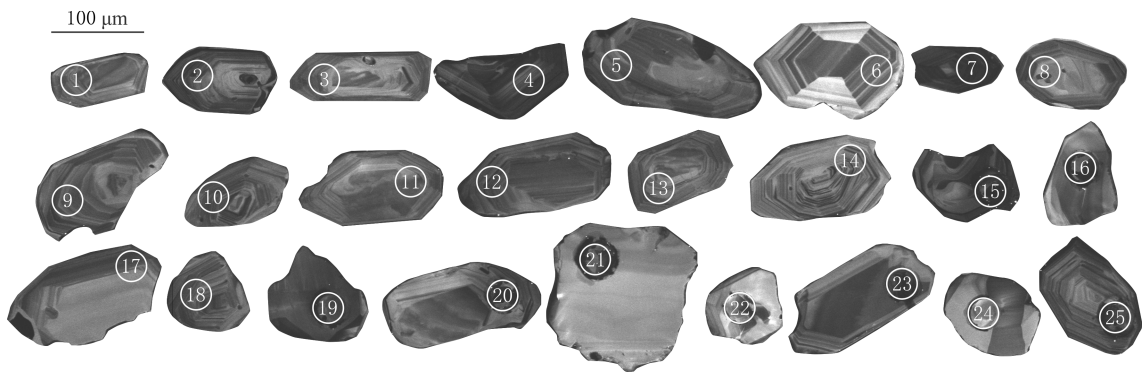


图 6 满克头鄂博组流纹质熔结凝灰岩 PM19-3 样品锆石阴极发光图像

Fig. 6 Cathode luminescence image of zircon from sample PM19-3 of rhyolite fused tuff from Manketou'ebo Formation

4 岩石成因及构造环境

4.1 岩石成因和岩浆来源

满克头鄂博组火山岩 $w(\text{SiO}_2)$ 为 76.82%~77.82%, 为酸性火山岩, 岩浆分异程度高。稀土元素配分模式为“V”型右倾的曲线模式, 轻稀土元素相对富集, 重稀土元素相对亏损; Rb、K、Th、La、Ce、Nd、Hf 等元素富集, Ba、Sr、Nb、P、Ti 等元素亏损, 与岛弧火山岩的地球化学特征相似。由火山岩 $w(\text{La})-w(\text{La}/\text{Sm})$ 图解(见图 8(a))可知, 具有部分熔融和分离结晶特征; 由 $w(\text{La})/w(\text{La}/\text{Yb})$ 图解(见图 8(b))可知, 为部分熔融特征; 由 $w(\text{Th}/\text{Yb})-w(\text{Sr}/\text{Nd})$ 图解(见图 9(b))可知, 有沉积物熔体加入。岩石中 $w(\text{Th})/w(\text{U})$ 为 3.26~9.53(平均为 7.02), 与下地壳的 $w(\text{Th})/w(\text{U})$ 为 6.00 相近, 且 Nb、Ti、P 元素显

著亏损,磷灰石和钛铁矿发生分离结晶作用,说明岩浆来源于部分熔融的地壳物质。 $w(\text{Th})/w(\text{La})$ 为 $0.45\sim 0.80$ (平均为 0.62), $w(\text{Th})/w(\text{Nb})$ 为 $0.77\sim 1.29$ (平均为 0.99),二者高于地幔平均值(0.12),说明以壳源为主^[2]。研究区满克头鄂博组火山岩岩浆来源于沉积物熔体加入的地壳物质部分熔融。

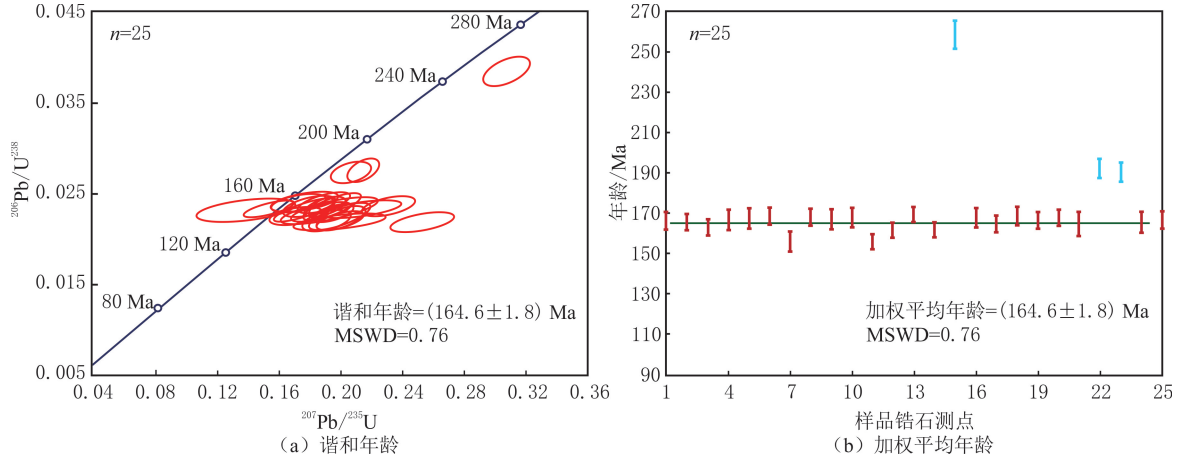


图 7 满克头鄂博组流纹质熔结凝灰岩样品锆石 U-Pb 年龄谐和图
Fig. 7 U-Pb age harmonic diagram of rhyolitic fused tuff zircon from Manketou'ebó Formation

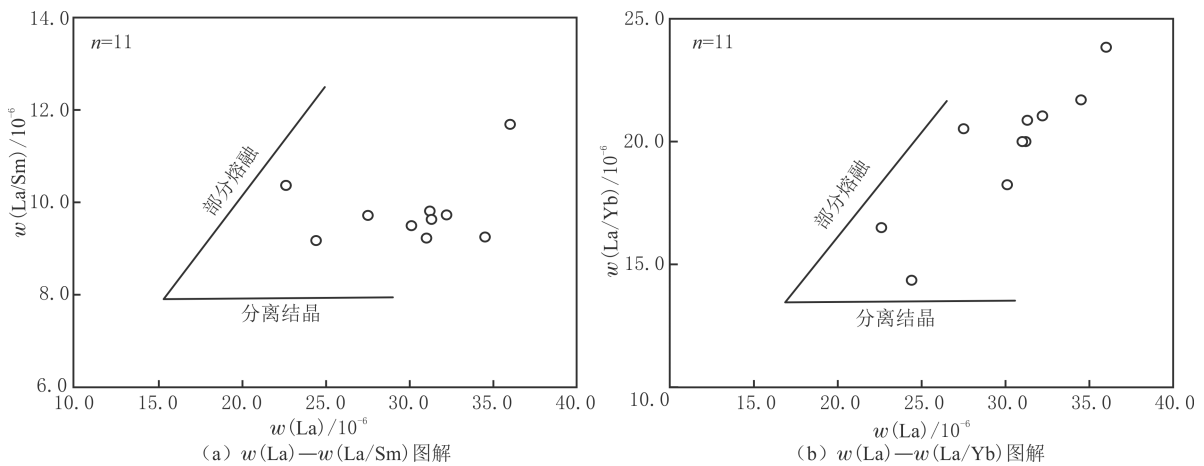


图 8 满克头鄂博组火山岩样品岩浆来源(据文献[42]修改)
Fig. 8 Magmatic source of the volcanic rocks from Manketou'ebó Formation(modified by reference[42])

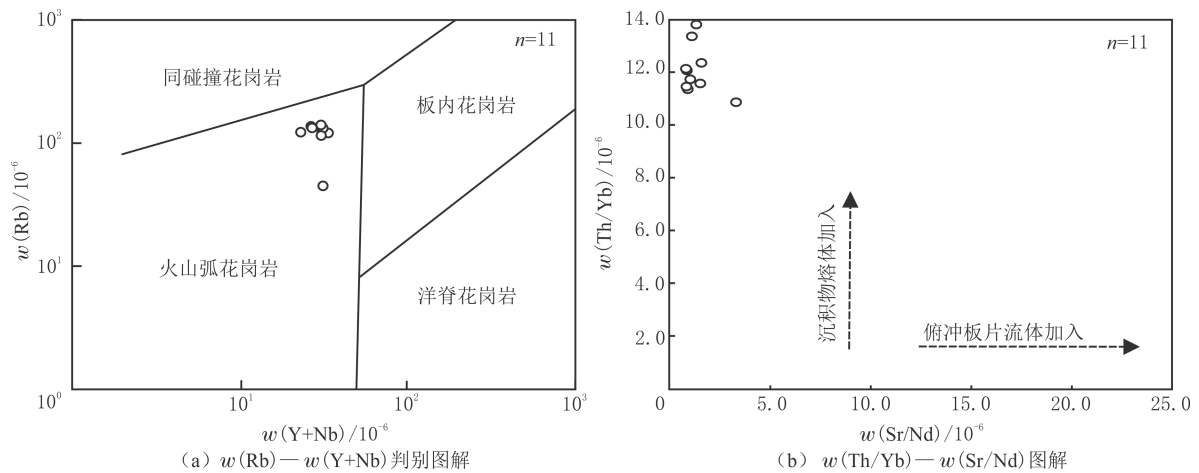


图 9 满克头鄂博组火山岩构造环境及演化过程图解(据文献[4]修改)
Fig. 9 Diagram of tectonic environment and evolutionary process of the volcanic rocks from Manketou'ebó Formation(modified by reference[4])

4.2 构造环境

研究区大地构造属于兴蒙造山系额尔古纳地块。受古生代古亚洲洋发展演化影响,额尔古纳地块进入活动陆缘演化环境,地块中部与地块东缘的环宇—新林一带发生强烈的沉降,裂隙扩张成弧后洋盆。额尔古纳地块与相邻的大兴安岭弧盆系沿环宇—新林一带发生弧—陆对接,使早奥陶世—早志留世火山弧建造遭受强烈的构造挤压破碎而形成蛇绿混杂岩带。中生代,额尔古纳地块转为古太平洋活动陆缘演化阶段。晚三叠世—早侏罗世,研究区发生最广泛的一次岩浆侵入活动,形成规模大、分布面积广的岩浆岩,以岩基为主,少数呈岩珠状产出,表明太平洋板块强烈俯冲阶段在研究区形成陆缘弧型岩浆岩建造的早期组合。中侏罗世,蒙古—鄂霍茨克洋封闭产生由北向南强烈挤压推覆作用,额尔古纳地块北缘处于前陆构造环境,形成近东西向展布的漠河周缘前陆盆地。中侏罗世—早白垩世,构造活动主要表现为强烈的火山喷发活动,形成4个较大规模北东向的火山沉积断陷盆地构造,经过强烈的构造运动,形成著名的北东向大兴安岭主脊火山岩带。

大兴安岭早—中侏罗世火山岩构造背景是由蒙古—鄂霍茨克洋板块由北向南俯冲作用形成的^[1-2,15-16,43-44]。于跃江等^[20]认为,晚侏罗世火山岩构造背景为古太平洋板块俯冲形成的活动陆缘环境;杨海星等^[45]认为,研究区火山岩形成于后碰撞环境,与蒙古—鄂霍茨克洋闭合造山后伸展作用有关。大兴安岭地区满克头鄂博组火山岩火山喷发活动由晚侏罗世持续到早白垩世。大兴安岭火山岩呈北东向展布,与蒙古—鄂霍茨克洋由北向南俯冲构造方向不同,与古太平洋板块向欧亚大陆俯冲方向一致,且与早侏罗世—早白垩世俯冲时间吻合,晚侏罗世满克头鄂博组火山岩形成与古太平洋板块俯冲作用有关。由 $w(\text{Rb})-w(\text{Y}+\text{Nb})$ 图解(见图9(a))可知,样品落入火山弧花岗岩区域; $w(\text{Th}/\text{Yb})-w(\text{Sr}/\text{Nd})$ 图解(见图9(b))显示,沉积物熔体加入。满克头鄂博组火山岩岩浆来源于沉积物溶体加入的地壳物质部分熔融,构造环境为活动陆缘环境,与古太平洋板块向额尔古纳地块的俯冲作用有关。

5 结论

(1)大兴安岭地区满克头鄂博组火山岩同位素年龄为162~122 Ma,形成于晚侏罗世—早白垩世;呼中地区满克头鄂博组火山岩 U-Pb 锆石 LA-ICP-MS 年龄为 $(164.6 \pm 1.8)\text{Ma}$,形成于晚侏罗世。

(2)满克头鄂博组火山岩轻稀土元素较为富集,重稀土元素较为贫化;Rb、K、Th、La、Ce、Nd、Hf 等元素富集,Ba、Sr 大、Nb、P、Ti 等元素亏损。岩浆具有强烈的分离结晶作用,分异程度高,为酸性火山岩,属于铝质高钾钙碱性岩系,具有陆缘弧岩浆岩的岩石地球化学特征。

(3)满克头鄂博组火山岩岩浆来源于沉积物溶体加入的地壳物质部分熔融,构造环境为古太平洋板块向额尔古纳地块的俯冲作用而形成的活动陆缘环境。

参考文献(References):

- [1] 于喜涇,崔锡彪,陆胜,等. 早侏罗世粗中粒黑云母二长花岗岩岩石地球化学、LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学特征及成因:以大兴安岭北段潮满林场地区为例[J]. 东北石油大学学报,2024,48(2):27-41.
YU Xihuan, CUI Xibiao, LU Sheng, et al. Geochemistry and LA-ICP-MS zircon U-Pb chronology and genetic mechanism of the Early Jurassic coarse to medium grained biotite monzogranite: a case study of the Chaoman Forest Farm area in the Northern Great Xingan Range[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2024,48(2):27-41.
- [2] 于跃江,李慧,李新鹏,等. 大兴安岭呼中地区玛尼吐组火山岩锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及地质意义[J]. 地质论评,2024,70(4):1483-1496.
YU Yuejiang, LI Hui, LI Xinpeng, et al. Zircon U-Pb age, geochemical characteristics of volcanic rocks in the Manitu Formation in Huzhong Area, Great Hinggan Mountains and geological significances[J]. Geological Review, 2024,70(4):1483-1496.
- [3] 于跃江,赵忠海,李新鹏,等. 张广才岭北部早侏罗世花岗岩年代学、地球化学特征及其地质意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2024,54(4):1224-1247.
YU Yuejiang, ZHAO Zhonghai, LI Xinpeng, et al. Geochronology, geochemistry and geological significance of Early Jurassic granites in Northern Zhangguangcai Mountains[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2024,54(4):1224-1247.
- [4] REN Qiang, ZHANG Shihong, WU Yuqi, et al. New Late Jurassic to Early Cretaceous paleomagnetic results from North China and

- Southern Mongolia and their implications for the evolution of the Mongol-Okhotsk Suture[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2018,123(12):10370-10398.
- [5] 许文良,孙晨阳,唐杰,等.兴蒙造山带的基底属性与构造演化过程[J].*地球科学*,2019,44(5):1620-1646.
XU Wenliang, SUN Chenyang, TANG Jie, et al. Basement nature and tectonic evolution of the Xing'an-Mongolian Orogenic Belt[J]. *Earth Science*, 2019,44(5):1620-1646.
- [6] 李琳静,胡明毅,吕奇奇,等.银川拜寺口剖面黄旗口组 LA-ICP-MS 碎屑锆石 U-Pb 年代学特征及其地质意义[J].*东北石油大学学报*, 2022,46(4):24-36.
LI Linjing, HU Mingyi, LYU Qiqi, et al. Chronology characteristics of detrital zircons U-Pb dating with LA-ICP-MS from Huangqikou Formation of Baisikou Section, Yinchuan and its geological significance[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2022,46(4):24-36.
- [7] 赵佳楠,邱际玮,崔永春,等.二长花岗岩与辉绿岩岩石地球化学、LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学特征及构造意义:以粤北南雄盆地北缘南雄断裂带中部为例[J].*东北石油大学学报*,2022,46(6):1-13.
ZHAO Jianan, QIU Jiwei, CUI Yongchun, et al. Petro-geochemistry, LA-ICP-MS zircon U-Pb chronology and tectonic implications of monzonitic granite and diabase: taking the middle of Nanxiong Fault Belt in the Nanxiong Basin within the Northern Guangdong as an example[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2022,46(6):1-13.
- [8] 耿军阳,刘丽萍,罗顺社,等.熊耳裂陷槽云梦山组 LA-ICP-MS 碎屑岩锆石 U-Pb 年代学特征及其地质意义[J].*东北石油大学学报*, 2021,45(5):63-71.
GENG Junyang, LIU Liping, LUO Shunshu, et al. Chronology characteristics of detrital zircon U-Pb with LA-ICP-MS of Yunmengshan Formation in Xionger Aulacogen and its geological significance[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2021,45(5):63-71.
- [9] 吴福元,李献华,杨进辉,等.花岗岩成因研究的若干问题[J].*岩石学报*,2007,23(6):1217-1238.
WU Fuyuan, LI Xianhua, YANG Jinhui, et al. Discussions on the petrogenesis of granites[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007,23(6):1217-1238.
- [10] 张新新.鄂托克旗地区上古生界优质储层控制因素分析[J].*石油化工高等学校学报*,2020,33(2):53-60.
ZHANG Xinxin. Analysis of factors controlling reservoir with high quality in Etokeqi Area[J]. *Journal of Petrochemical Universities*, 2020,33(2):53-60.
- [11] 孙同文,王芳,王有功,等.海拉尔盆地贝西南地区南屯组油气侧向运移路径综合确定及运移模式探讨[J].*特种油气藏*,2022,29(4):38-46.
SUN Tongwen, WANG Fang, WANG Yougong, et al. Comprehensive determination of lateral migration routes and exploration of migration patterns of hydrocarbons in Nantun Formation, SW Beier Sag, Hailar Basin[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2022,29(4):38-46.
- [12] 宋昊,蒋有录,侯帅,等.长岭断陷龙凤山地区下白垩统地层压力特征及其对油气成藏的影响[J].*特种油气藏*,2022,29(2):42-50.
SONG Hao, JIANG Youlu, HOU Shuai, et al. Pressure characteristics and its influence on hydrocarbon accumulation of Lower Cretaceous formation in Longfengshan Area, Changling Faulted Depression[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2022,29(2):42-50.
- [13] 张懿,朱光辉,郑求根,等.中国煤层气资源分布特征及勘探研究建议[J].*非常规油气*,2022,9(4):1-8.
ZHANG Yi, ZHU Guanghui, ZHENG Qiugen, et al. Distribution characteristics of coalbed methane resources in China and recommendations for exploration research[J]. *Unconventional Oil & Gas*, 2022,9(4):1-8.
- [14] 杨元江,邓昌州,李成禄,等.大兴安岭大洋山钼矿区侵入岩年代学、岩石地球化学特征及岩石成因[J].*吉林大学学报(地球科学版)*, 2021,51(4):1064-1081.
YANG Yuanjiang, DENG Changzhou, LI Chenglu, et al. Geochronology, geochemistry and genesis of igneous rocks associated with Dayangshan Mo deposit in Great Xing'an Range[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 2021,51(4):1064-1081.
- [15] 张连昌,陈志广,周新华,等.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*,2007,23(11):2823-2835.
ZHANG Lianchang, CHEN Zhiguang, ZHOU Xinhua, et al. 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*, 2007,23(11):2823-2835.
- [16] 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 Zhiguang, ZHANG Lianchang, ZHOU Xinhua, et al. Geochronology and geochemical characteristics of volcanic rocks section in Manzhouli Xinyouqi, Inner-Mongolia[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006,22(12):2971-2986.
- [17] 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 Yutao, ZHANG Lianchang, YING Jifeng, 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.
- [18] 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 Deyou, GOU Jun, REN Yunsheng, 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.
- [19] 程银行, 刘永顺, 滕学建, 等. 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*, 2013, 87(7):943-956.
CHENG Yinhang, LIU Yongshun, TENG Xuejian, et al. Geochronology and Geochemistry of Middle-Late Jurassic volcanic rocks in the Mohe'ertu Area, Inner Mongolia and their geological significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2013, 87(7):943-956.
- [20] 于跃江, 赵忠海, 杨欣欣, 等. 大兴安岭北段漠河前陆盆地早侏罗世火山岩时代的厘定[J]. *中国地质*, 2021, 48(2):580-592.
YU Yuejiang, ZHAO Zhonghai, YANG Xinxin, et al. Dating of Early Jurassic volcanic rocks in the Mohe Foreland Basin of Northern Greater Khingan Mountains, Northeast China[J]. *Geology in China*, 2021, 48(2):580-592.
- [21] 贾彬, 魏立勇, 吴欢欢, 等. 内蒙古科尔沁右翼前旗地区满克头鄂博组火山岩年代学、地球化学特征及其地质意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 2021, 40(5):859-873.
JIA Bin, WEI Liyong, WU Huanhuan, et al. Chronology, geochemistry and geological significance of volcanic rocks of the Manke-toubo Formation in Horqin Right-Front Banner Area, Inner Mongolia[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2021, 40(5):859-873.
- [22] FAN Weiming, GUO Feng, WANG Yuejun, et al. Late Mesozoic calc-alkaline volcanism of post-orogenic extension in the Northern Da Hinggan Mountains, Northeastern China[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2003, 121(1/2):115-135.
- [23] 陶楠, 宋维民, 杨佳林, 等. 大兴安岭中段突泉盆地玛尼吐组火山岩地球化学特征及成因[J]. *地质与资源*, 2016, 25(6):520-524.
TAO Nan, SONG Weimin, YANG Jialin, et al. Petrogeochemistry and genesis of the volcanic rocks of Manitu Formation in Tuquan Basin, Middle Daxinganling Mountains[J]. *Geology and Resources*, 2016, 25(6):520-524.
- [24] YING Jiheng, ZHOU Xinhua, ZHANG Lianchang, 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.
- [25] 张祥信, 高永丰, 雷世和. 内蒙古中部红格尔地区玛尼吐组钾玄质火山岩锆石 U-Pb 年龄、地球化学及其地质意义[J]. *地球化学*, 2016, 45(4):356-373.
ZHANG Xiangxin, GAO Yongfeng, LEI Shihe. Zircon U-Pb age and geochemistry of shoshonitic rocks from the Manitu Formation in the Hongger Area, Central Inner Mongolia and their geological significance[J]. *Geochimica*, 2016, 45(4):356-37.
- [26] 陈超, 吕新彪, 李杰, 等. 大兴安岭中段塔尔气地区中酸性火山岩成因及构造背景[J]. *地球科学*, 2020, 45(12):4446-4462.
CHEN Chao, LYU Xinbiao, LI Jie, et al. Petrogenesis and tectonic setting of intermediate-felsic volcanics in Ta'erqi Area, Central Great Xing'an Range[J]. *Earth Science*, 2020, 45(12):4446-4462.
- [27] 计向臣, 陆胜. 根河地区玛尼吐组火山岩的年代学与地球化学特征[J]. *黑龙江科技大学学报*, 2020, 30(4):374-378.
JI Xiangchen, LU Sheng. Chronological and geochemistry characteristics of Manitu Formation volcanic rocks in Genhe Area[J]. *Journal of Heilongjiang University of Science and Technology*, 2020, 30(4):374-378.
- [28] 崔玉斌, 王凯, 何付兵, 等. 大兴安岭北段奇力滨地区玛尼吐组火山岩年代学、地球化学特征及构造意义[J]. *地质学报*, 2021, 95(11):3301-3316.
CUI Yubin, WANG Kai, HE Fubing, et al. Geochronology and geochemical characteristics of volcanic rocks from the Manitu Formation in the Qilibin Area, Northern Great Xing'an Range and its geological significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2021, 95(11):3301-3316.
- [29] 司秋亮. 大兴安岭中段扎兰屯地区晚中生代火山岩年代学及地球化学研究[D]. 沈阳:东北大学, 2018:99-103.
SI Qiuliang. Study on the chronology and geochemistry of Late Mesozoic volcanic rocks in Zhalantun Area, middle of the Great Xing'an Range[D]. Shenyang: Northeastern University, 2018:99-103.
- [30] 张吉恒. 大兴安岭中生代火山岩年代学及地球化学研究[D]. 武汉:中国地质大学(武汉), 2009:1-2.
ZHANG Jiheng. Study on the chronology and geochemistry of Mesozoic volcanic rocks in the Great Xing'an Range[D]. Wuhan: China University of Geosciences(Wuhan), 2009:1-2.
- [31] 杜岳丹, 和钟铎, 隋振民, 等. 大兴安岭中段索伦地区玛尼吐组火山岩年代学、地球化学及其构造背景[J]. *世界地质*, 2017, 36(2):346-360.
DU Yuedan, HE Zhonghua, SUI Zhenmin, et al. Zircon U-Pb ages, geochemical characteristics and tectonic implications of volcanic rocks from Manitu Formation of Suolun Area in Central Great Xing'an Range[J]. *Global Geology*, 2017, 36(2):346-360.
- [32] 刘晨, 孙景贵, 邱殿明, 等. 大兴安岭北段东坡小莫尔可地区中生代火山岩成因及其地质意义:元素、Hf 同位素地球化学与锆石 U-Pb 同位素定年[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2017, 47(4):1138-1158.
LIU Chen, SUN Jinggui, QIU Dianming, et al. Genesis and geological significance of Mesozoic volcanic rocks in Xiaomoerke, northern slope of Greater Khingan Range: Hf isotopic geochemistry and zircon U-Pb chronology[J]. *Journal of Jilin University(Earth Sci-*

- ence Edition), 2017, 47(4): 1138-1158.
- [33] 杨海星, 高利东, 高玉石, 等. 大兴安岭中南段罕山林场地区玛尼吐组安山岩年代学、地球化学特征及其地质意义[J]. 地质与勘探, 2019, 55(5): 1223-1240.
YANG Haixing, GAO Lidong, GAO Yushi, et al. Geochronology and geochemistry of the andesites from the Manitu Formation in the Hanshanlinchang Area, Central-Southern Daxing'anling Mountains and their geological implications[J]. Geology and Exploration, 2019, 55(5): 1223-1240.
- [34] 邵永旭, 李钢柱, 姜海蛟, 等. 大兴安岭西缘罕布庙地区玛尼吐组火山岩锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及构造意义[J]. 地质学报, 2020, 94(12): 3590-3606.
SHAO Yongxu, LI Gangzhu, JIANG Haijiao, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb age and geochemistry of volcanic rocks from Manitu Formation in Hanbumiao Area, the Western Great Xing'an Range and their tectonic significance[J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(12): 3590-3606.
- [35] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 硅酸盐岩石化学分析方法第 28 部分: 16 个主次成分量测定: GB/T 14506. 28—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010: 1-7.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. Methods for chemical analysis of silicate rocks: part 28: determination of 16 major and minor elements content; GB/T 14506. 28—2010[S]. Beijing: Standards Press of China, 2010: 1-7.
- [36] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 硅酸盐岩石化学分析方法第 30 部分: 44 个元素量测定: GB/T 14506. 30—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010: 1-8.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. Methods for chemical analysis of silicate rocks: part 30: determination of 44 elements; GB/T 14506. 30—2010 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2010: 1-8.
- [37] SALLRRS V J M, HART S H. The mantle sources of ocean ridges, islands and arcs: the Hf-isotope connection[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1991, 104(2/3/4): 364-380.
- [38] MIDDLEMOST E. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. Earth-Science Reviews, 1994, 37(3/4): 215-224.
- [39] PECCERILLO A, TAYLOR S R. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu Area, Northern Turkey [J]. Contributions to Mineralogy & Petrology, 1976, 58(1): 63-81.
- [40] MANIAR P D, PICCOLI P M. Tectonic discrimination of granitoids[J]. Geological Society of America Bulletin, 1989, 101(5): 635-643.
- [41] SUN S S, MCDONOUGH W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[J]. Geological Society Special Publication, 1989, 42(1): 313-345.
- [42] PEARCE J A, HARRIS N B W, TINDLE A G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. Journal of Petrology, 1984, 25(4): 956-983.
- [43] 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的制约[J]. 岩石学报, 2013, 29(2): 339-353.
XU Wenliang, WANG Feng, PEI Fuping, et al. Mesozoic tectonic system and regional ore-forming background in NE China: constraints from spatial and temporal variations of Mesozoic volcanic rock assemblages[J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 29(2): 339-353.
- [44] SUN D Y, GOU J, WANG T H, et al. Geochronological and geochemical constraints on the Erguna massif basement, NE China: subduction history of the Mongol-Okhotsk oceanic crust[J]. International Geology Review, 2013, 55(14): 1801-1816.
- [45] 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 Haixing, GAO Lidong, GAO Yushi, 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.