

张坤,史冬岩,常翔鲲,等. 伸展背景下的埃达克质岩:黑龙江呼玛地区早白垩世侵入岩的年代学和地球化学特征. 吉林大学学报(地球科学版), 2024, 54(4): 1248–1263. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230059.

Zhang Kun, Shi Dongyan, Chang Xiangkun, et al. Adakitic-Like Rocks in Extensional Setting: Chronological and Geochemical Characteristics of Early Cretaceous Intrusive Rocks in Huma Area, Heilongjiang Province. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54(4): 1248–1263. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230059.

伸展背景下的埃达克质岩: 黑龙江呼玛地区早白垩世 侵入岩的年代学和地球化学特征

张 坤^{1,2}, 史冬岩^{1,3,4}, 常翔鲲¹, 朴星海¹, 王伟东⁵

1. 黑龙江省矿业集团有限责任公司, 哈尔滨 150000

2. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083

3. 吉林大学地球科学学院, 长春 130061

4. 中国科学院地球化学研究所, 贵阳 550081

5. 黑龙江省第五地质勘查院, 哈尔滨 150036

摘要:为理清大兴安岭兴安地块中生代岩体的岩石成因及构造背景, 本文通过岩石学、年代学、全岩地球化学等方法, 对大兴安岭东北部的黑龙江省呼玛地区早白垩世侵入岩进行了研究。结果显示: 研究区早白垩世中性侵入岩为钙碱性—高钾钙碱性系列准铝质—弱过铝质岩石, 成岩时间在 $(121.3 \pm 1.2) \sim (118.7 \pm 0.9)$ Ma 之间, 稀土元素配分曲线显示为右倾模式, Eu 微弱正异常 $(0.98 \sim 1.11)$, 富集 K、Sr、Ba 等大离子亲石元素, 亏损 Nb、Ta、Ti、P 等高场强元素。岩石同时具有高的 Sr/Y $(57.66 \sim 145.76)$ 、 La_N/Yb_N $(11.66 \sim 29.52)$ 和较高的 $Mg^\#$ $(50.93 \sim 57.63)$ 、 $w(Cr)$ $(77.00 \times 10^{-6} \sim 92.60 \times 10^{-6})$ 、 $w(Ni)$ $(23.20 \times 10^{-6} \sim 32.60 \times 10^{-6})$ 值, 显示出埃达克质岩特征。综合本次研究认为该期侵入岩主要形成于蒙古—鄂霍茨克洋闭合后的伸展环境, 由加厚下地壳导致的岩石圈拆沉, 软流圈幔源岩浆上涌形成埃达克质岩石。

关键词: 呼玛地区; 花岗岩; 锆石 U–Pb 测年; 地球化学; 埃达克质岩

doi: 10.13278/j.cnki.jjuese.20230059

中图分类号: P59

文献标志码: A

Adakitic-Like Rocks in Extensional Setting: Chronological and Geochemical Characteristics of Early Cretaceous Intrusive Rocks in Huma Area, Heilongjiang Province

Zhang Kun^{1,2}, Shi Dongyan^{1,3,4}, Chang Xiangkun¹, Piao Xinghai¹, Wang Weidong⁵

收稿日期: 2023–03–15

作者简介: 张坤(1988–), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事矿床学与矿床地球化学方面的研究, E-mail: wszk12@126.com

通信作者: 史冬岩(1983–), 男, 博士研究生, 正高级工程师, 硕士生导师, 主要从事地质矿产勘查方面的研究, E-mail: shidongyan77@163.com

基金项目: 中国地质调查局项目(12120114028101); 黑龙江省 1:5 万区域地质矿产调查项目(HLJKD2015–06)

Supported by the Project of China Geological Survey (12120114028101) and the 1:50 000 Regional Geological and Mineral Survey Project in Heilongjiang Province (HLJKD2015–06)

1. Heilongjiang Mining Group Co.,Ltd.,Harbin 150000,China
2. Institute of Geosciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China
3. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China
4. Institute of Geochemistry Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China
5. The Fifth Geological Survey Institute of Heilongjiang Province, Harbin 150036, China

Abstract: To elucidate the petrogenesis and tectonic settings of the Mesozoic rock formations in the Xing'an region of the Greater Khingan Range, this study employs petrology, chronology, and whole-rock geochemistry methods to investigate the Early Cretaceous intrusive rocks in the Huma area of Heilongjiang Province. The results reveal that the intrusive rocks are calc-alkaline to high-potassium calc-alkaline, quasi-aluminous to weakly peraluminous, crystallizing between (121.3 ± 1.2) and (118.7 ± 0.9) Ma. The rare earth element distribution patterns display a rightward trend with a weak positive Eu anomaly ($0.98 - 1.11$), enriched in large ion lithophile elements like K, Sr, Ba, and depleted in high field strength elements such as Nb, Ta, Ti, and P. The rocks show elevated ratios of Sr/Y ($57.66 - 145.76$), La_N/Yb_N ($11.66 - 29.52$), high $Mg^\#$ ($50.93 - 57.63$), $w(Cr)$ ($77.00 \times 10^{-6} - 92.60 \times 10^{-6}$), and $w(Ni)$ ($23.20 \times 10^{-6} - 32.60 \times 10^{-6}$), indicating adakitic-like characteristics. Based on the comprehensive research, it is believed that the intrusive rocks primarily crystallized in an extensional environment following the closure of the Mongolian-Okhotsk Ocean, likely caused by lithospheric delamination thickening the lower crust and resulting in the upwelling of mantle-derived magma, forming adakitic-like rocks.

Key words: Huma area; granites; zircon U - Pb dating; geochemistry; adakitic-like rocks

0 引言

埃达克岩 (Adakites) 最初被 Defant 等^[1]发现于太平洋东岸埃达克岛,因其特殊的岩石地球化学特征及与成矿的紧密联系而受到学者的广泛关注。它具有高 Sr、低 Y,低 HREE,正 Sr、Eu 异常,亏损 Nb、Ta 值,并具有与 MORB(洋中脊玄武岩)相似的 Sr、Nd 同位素特征等。且 Defant 等^[1]认为埃达克岩形成于年轻(≤ 25 Ma)洋片的俯冲环境,有足够的热量来驱动部分熔融发生。该概念提出后,世界各地学者相继发现具有相似岩石地球化学特征的岩石^[2-5]。

随着对该类岩石不断地深入认识,有学者提出了继年轻的洋片俯冲之外的岩石学成因:1)加厚玄武质下地壳的部分熔融^[6-10];2)岩石圈拆沉引起的部分熔融^[2-4,11-12];3)基性岩浆的高压分异^[4,13-14];4)基性与酸性岩浆的混合成因^[15-18];5)平板俯冲或地幔中停滞板块的部分熔融^[4,11,19];6)初始俯冲^[5,11,20-21];7)俯冲的板片窗或板片撕裂、洋脊俯冲^[11,22-24]。为区别于埃达克岩的原始定义,统一将该类岩石称之为埃达克质岩^[17,25],严格地讲,该埃

达克质岩并非真正的埃达克岩,只是具有类似的岩石地球化学特征。赵振华^[26]将年轻俯冲洋片熔融形成的岩浆岩归为埃达克岩,将加厚/拆沉下地壳熔融形成的岩浆岩归为埃达克质岩,而将分离结晶、岩浆混合、高 Sr/Y 源区熔融、富集地幔熔融等其他过程形成的具有高 Sr/Y 和 La_N/Yb_N 值的岩石全部归为假埃达克岩,更加严格地规范了“埃达克”概念的使用。

对于大兴安岭地区的埃达克质岩类,前人取得了一定的认识发现。刘佳宜^[27]在大兴安岭东北部的晚泥盆世花岗岩中发现 2 件埃达克岩,认为其来源于兴安地块南部年轻的加厚岛弧地壳岩石。赵院冬等^[28-29]在兴安地块东北部的研究显示:早—中侏罗世的 TTG 花岗岩具有埃达克质岩石特征,形成于受洋壳俯冲作用影响的陆缘弧环境,反映蒙古—鄂霍茨克洋的俯冲作用;晚侏罗世发育陆壳加厚型的埃达克质岩,形成于板块闭合后的造山环境。尹志刚等^[30]的研究则显示,在早侏罗世大兴安岭存在埃达克质花岗岩,具有陆壳加厚特征。王苏珊^[31]、邵帅等^[32]在黑河地区的研究中发现,大部分形成于早白垩世的火山岩具有高 Sr、低 Y 的特征,并认为

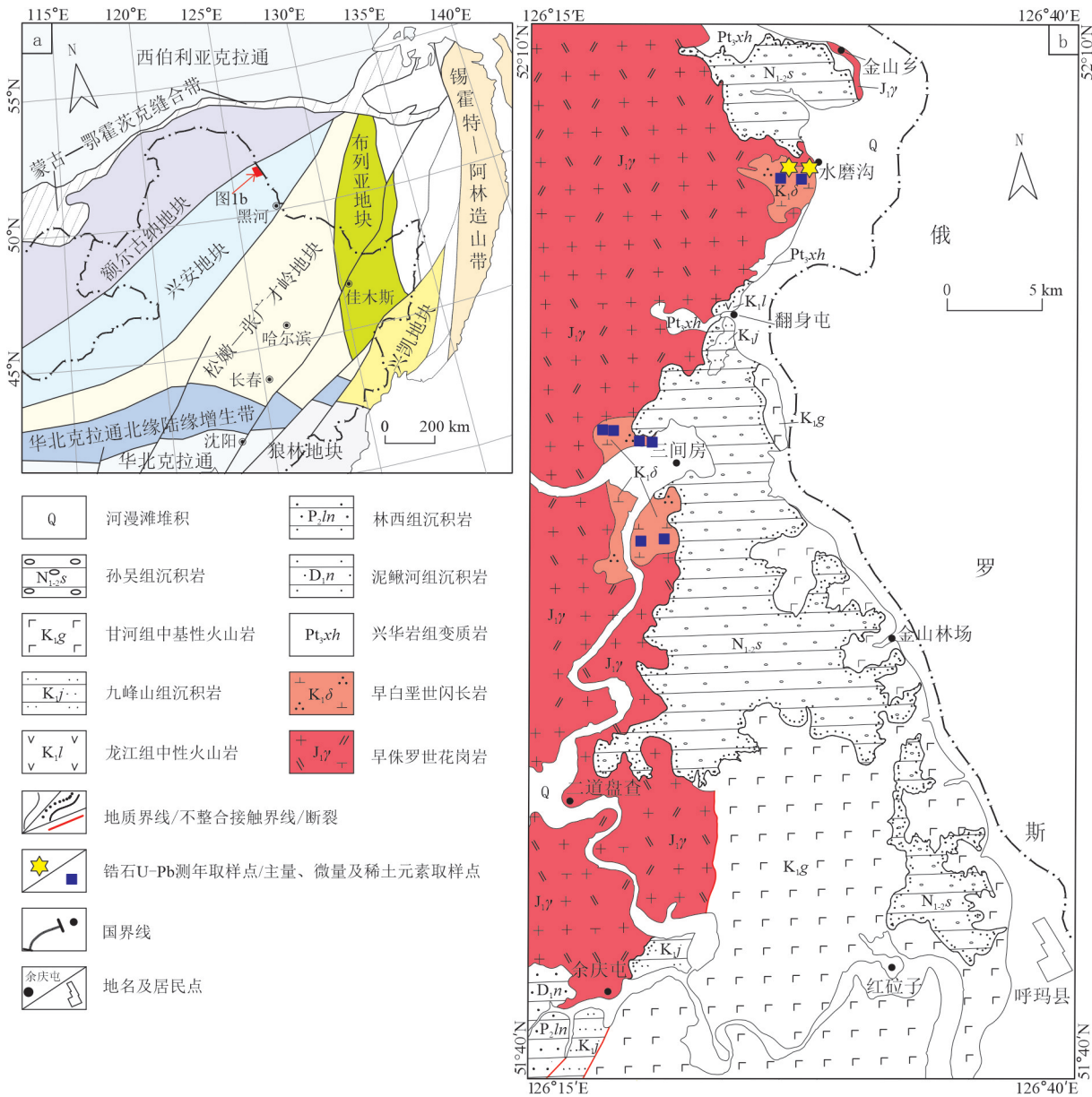
其形成于俯冲的岛弧环境。孔金贵等^[33]对呼玛地区晚侏罗世花岗闪长岩进行了研究,将其划归“C”型埃达克岩。

本文拟借助于岩石学、年代学、全岩地球化学等方法手段,对研究区内早白垩世侵入岩的埃达克岩类进行界定,为大兴安岭兴安地块中生代岩体的岩石成因及构造背景提供更多证据。

1 地质概况与岩相学特征

研究区内地层主要由新元古代结晶基底、古生代海相沉积^[34]、中生代火山喷发沉积和新生代河湖相砂砾沉积等构成(图 1)。其中中生代火山喷发沉积见于研究区中部和南部,大面积出露。

研究区内侵入岩较发育,约占总面积的一半,主



a 据文献[35]修编。

图 1 研究区大地构造位置图(a)和区域地质图(b)

Fig.1 Geotectonic location map (a) and regional geological map (b) of the study area

要见于西部、北部。近年来有学者在研究区内通过花岗岩锆石 U-Pb 定年,将该大面积分布的侵入岩侵入时间限定在早侏罗世(181~176 Ma),全岩地球化学显示其为高钾钙碱性系列、准铝质-弱过铝质的 I 型花岗岩,具有高 Sr、低 Y 的特征^[36-37];并通过锆石 Hf 同位素、Sr-Nd 同位素研究发现,其源区物质主要来自新元古代以来增生的地壳物质^[37-38]。但对于研究区内小岩株状产出的中性侵入岩则缺少相关的研究探讨。

本文综合研究区内地质构造、围岩的接触关系、岩石矿物特征、岩体的锆石 U-Pb 测年、岩石地球化学特征等,将区内侵入岩划分出一个新的岩浆活动期次:形成于早白垩世(121.3~118.7 Ma)的水磨沟-三间房一带中性侵入岩,详见图 1b。其岩体呈岩株状出露于研究区中部与北部地区,主要由中细粒石英闪长岩、(中)细粒闪长岩和细中粒石英二长闪长岩组成(图 2a-e)。露头中可看到本期侵入岩侵入新元古界兴华岩组变质岩中(图 2a)。部分岩石具碎裂结构,发生脆性变形,裂隙发育,碎粒、碎粉及石英细脉、绿帘石微细粒沿裂隙岩石充填交代。副矿物主要有锆石、磷灰石、磁铁矿、钛铁矿、榍石等产出。

中细粒石英闪长岩(图 2a-b、f-g):岩石具中粒花岗结构、碎裂结构,块状构造,矿物成分及体积分数:石英 5%~10%,钾长石<5%,斜长石 60%~85%,黑云母 5%~10%,角闪石 3%~30%。石英,他形粒状,粒径为 0.2~0.5 mm;钾长石,他形粒状,粒径为 0.2~1.0 mm,条纹呈斑点、斑块状,具高岭土化蚀变;斜长石,半自形板状,粒径为 0.6~4.5 mm,聚片双晶宽窄不一,局部表面绢云母化或有零星绿帘石交代;黑云母,片状,褐色,吸收性明显,具平行消光;角闪石,长柱状,粒径为 0.5~1.5 mm,浅褐色。

(中)细粒闪长岩(图 2c-d、h-i):岩石呈半自形粒状结构,块状构造。矿物成分及体积分数:石英<3%,斜长石 65%~70%,黑云母 5%~22%,角闪石 10%~30%。石英,呈他形分布于长石粒间,无色透明,粒径为 0.2~0.5 mm;斜长石,长条状,粒径为 0.2~3.5 mm,无色,聚片双晶,表面见星点状绢云母化;黑云母,片状,褐色,吸收性明显,平行消光;角闪石,柱状,粒径为 0.2~1.0 mm,正中突起,多被绿帘石交代呈假象。

细中粒石英二长闪长岩(图 2e、j-k):岩石具细中粒花岗结构,块状构造。矿物成分及体积分数:石

英 5%~10%,钾长石 10%~15%,斜长石 55%~75%,黑云母 5%~10%,角闪石 5%~15%。石英,他形粒状,波状消光,粒径为 0.5~3.0 mm;钾长石,他形粒状,卡式双晶少量发育,条纹呈脉状、泥化,部分具格子双晶,粒径为 1.0~5.0 mm;斜长石,半自形板状,聚片双晶细密或具环带结构,绢云母星散交代,粒径为 1.0~5.0 mm;黑云母,不规则片状,多被绿帘石交代,粒径为 0.7 mm;角闪石,长条状,多被绿帘石交代,长轴定向,局部首尾相连条带状围绕碎斑分布。

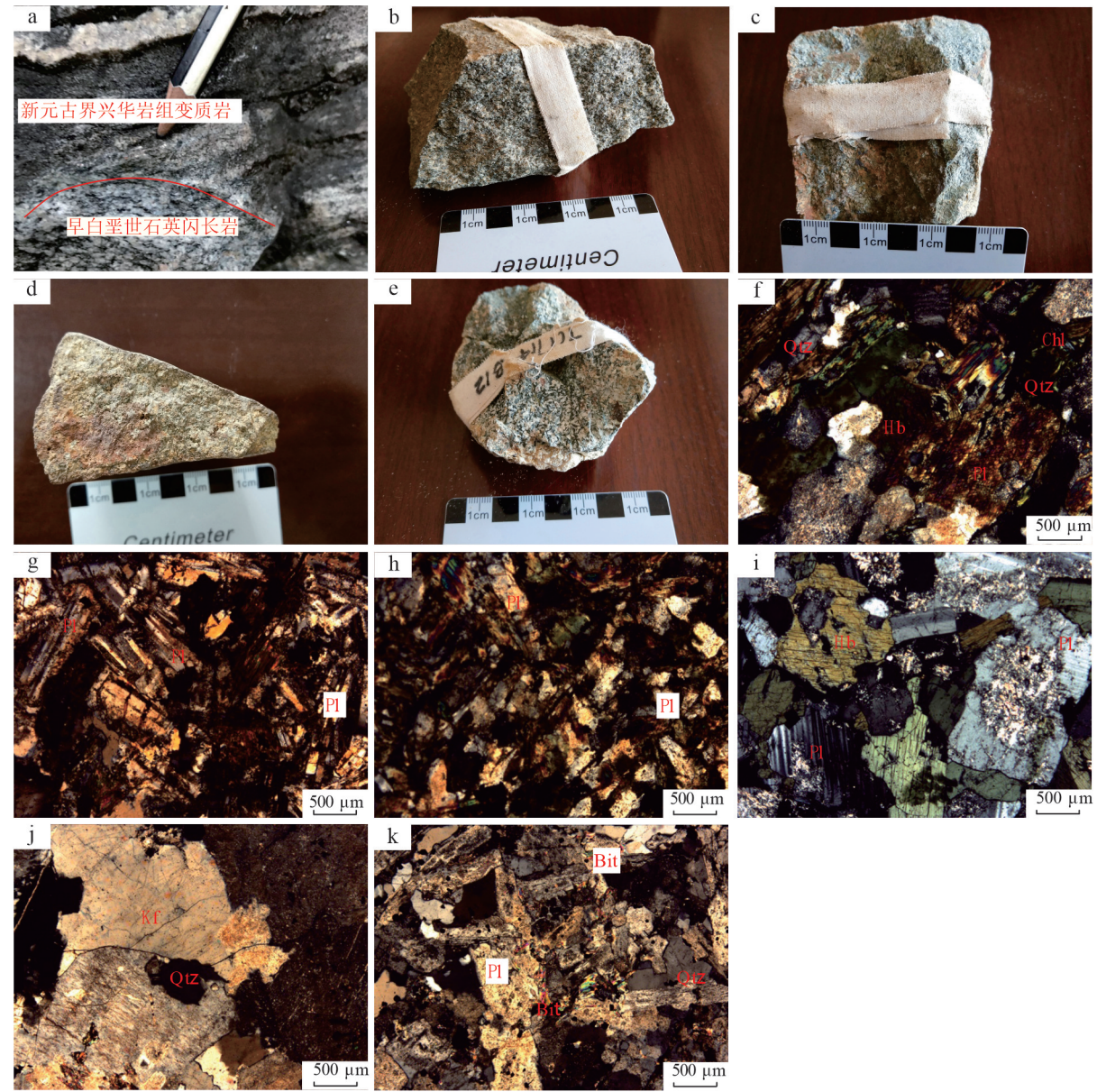
2 样品采集与分析方法

研究区内选取 2 件年龄样品进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素测年,取样位置在研究区的北部,分别采集一件闪长岩(LT4:126°28′01.14″E, 52°05′58.87″N)与一件石英闪长岩(LT11:126°27′08.54″E, 52°05′56.05″N),具有较好的代表性。

样品分析由自然资源部华北矿产资源监督检测中心完成。首先将新鲜的岩石样品粉碎至 100 目,使用重力分选及标准磁分离技术挑选出单个锆石;然后对分离出的锆石利用阴极发光图像筛选出没有裂隙和包裹体杂物的锆石样品,进行样品测试。激光烧蚀多接收器等离子质谱设备为美国 ESI 公司 NEW WAVE 193 nm FX 激光器和美国赛默飞世尔公司 NEPTUNE 多接收等离子质谱仪,锆石的 U-Pb 年龄谐和图与加权平均年龄,使用 Isoplot/Ex_ver3 进行绘制计算。

研究区内共选取 8 件新鲜的闪长岩与石英闪长岩岩石样品进行了主量和微量及稀土元素的分析,其中在研究区北部水磨沟附近取样 2 件(LT4、LT11),在研究区中部三间房附近取样 6 件(LT32、LT33、LT34、LT35、LT37、LT38)。

全岩主量和微量及稀土元素的测试单位分别为黑龙江省第五地质勘查院和黑龙江省地质矿产实验测试研究中心。将新鲜未风化的地表露头样品加工碎至 200 目,混匀,按照乔特公式 $Q=0.8d^2$ (Q 为样品最低可靠质量,kg; d 为样品中最大颗粒直径,mm)进行缩分。主量元素分别采用重量法(SiO_2 、烧失量)、滴定法(Al_2O_3 、 CaO 、 MgO 、 FeO)、原子吸收法(K_2O 、 Na_2O)、比色法(Fe_2O_3 、 TiO_2 、 P_2O_5)进行测定,精度误差优于 5%,使用的仪器设备为北京普析通用仪器有限责任公司的 GGX-610 型火焰原子吸收分光光度计和上海菁华科技仪器有



a. 早白垩世石英闪长岩侵入新元古界兴华岩组变质岩;b. 中细粒石英闪长岩;c-d. 细粒闪长岩;e. 细中粒石英二长闪长岩;f-g. 石英闪长岩;h-i. 闪长岩;j-k. 石英二长闪长岩。Pl. 斜长石;Qtz. 石英;Hb. 角闪石;Chl. 绿泥石;Kf. 钾长石;Bit. 黑云母。

图 2 水磨沟-三间房岩体露头(a)及手标本(b-e)和镜下正交偏光(f-k)照片

Fig.2 Photos of outcrops (a) and hand specimens (b - e) of Shuimogou-Sanjianfang rock mass and orthogonally polarized photos under microscope (f - k)

限公司的 722 型可见光光度计、赛多利斯科学仪器(北京)有限公司的 BS124S 型电子天平。微量元素分别采用离子选择电极法(F)、原子荧光法(Hg、As、Sb、Se)、发射光谱法(Ag、B、Sn)、X 射线荧光光谱法(其他微量元素)进行测定,精度误差优于 10%,使用的仪器设备主要为日本理学 ZSX Primus II 型全自动顺序扫描 X 射线荧光光谱仪。稀土元素采用 X 射线荧光光谱法进行测定,精度误差优于

10%,使用的仪器设备为日本理学 ZSX Primus II 型全自动顺序扫描 X 射线荧光光谱仪。

3 锆石 U - Pb 定年结果

阴极发光图像显示大部分锆石颗粒完整,自形程度较高,环带清晰,内部无残核,外部无变质边,具有岩浆成因锆石的特征。样品的部分锆石 CL 图像见图 3,锆石 U - Pb 年龄见表 1。

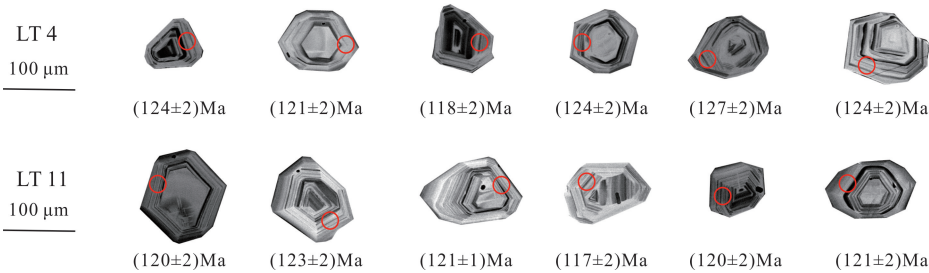


图 3 呼玛地区水磨沟—三间房岩体部分锆石 CL 图像

Fig.3 Partial zircon CL image of Shuimogou-Sanjianfang rock mass in Huma area

表 1 呼玛地区早白垩世侵入岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果

Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb dating results of Early Cretaceous intrusive rocks in Huma area

测点号	$\omega_{\text{B}}/10^{-6}$		Th/U	同位素比值						年龄/Ma					
	U	Th		$^{206}\text{Pb}/$	1σ	$^{207}\text{Pb}/$	1σ	$^{207}\text{Pb}/$	1σ	$^{206}\text{Pb}/$	1σ	$^{207}\text{Pb}/$	1σ	$^{207}\text{Pb}/$	1σ
				^{238}U		^{235}U		^{206}Pb		^{238}U		^{235}U		^{206}Pb	
LT4-1	75	96	1.28	0.019 4	0.000 3	0.136 8	0.025 6	0.051 3	0.009 4	124	2	130	24	252	424
LT4-2	146	96	0.66	0.018 9	0.000 2	0.130 4	0.008 7	0.050 0	0.003 3	121	1	124	8	197	155
LT4-3	92	133	1.45	0.018 4	0.000 2	0.134 5	0.013 0	0.053 0	0.005 2	118	1	128	12	330	223
LT4-4	61	56	0.92	0.019 4	0.000 3	0.130 9	0.020 3	0.048 9	0.007 7	124	2	125	19	143	369
LT4-5	69	85	1.23	0.019 8	0.000 3	0.139 9	0.026 8	0.051 2	0.010 1	127	2	133	25	248	456
LT4-6	108	105	0.97	0.019 4	0.000 2	0.127 6	0.011 0	0.047 8	0.004 2	124	1	122	11	89	206
LT4-7	75	117	1.55	0.018 3	0.000 2	0.124 2	0.016 8	0.049 1	0.006 7	117	1	119	16	152	321
LT4-8	68	112	1.65	0.018 6	0.000 2	0.124 0	0.015 4	0.048 3	0.006 1	119	2	119	15	115	297
LT4-9	86	57	0.66	0.019 1	0.000 2	0.124 3	0.012 5	0.047 2	0.004 8	122	2	119	12	61	242
LT4-10	56	27	0.48	0.018 3	0.000 4	0.135 7	0.032 9	0.053 9	0.014 0	117	3	129	31	366	584
LT4-11	75	123	1.64	0.018 6	0.000 2	0.123 1	0.015 5	0.047 9	0.006 3	119	1	118	15	93	313
LT4-12	45	54	1.20	0.018 7	0.000 4	0.125 0	0.042 6	0.048 4	0.017 2	120	3	120	41	120	837
LT4-13	70	85	1.21	0.018 9	0.000 2	0.130 2	0.016 9	0.050 0	0.006 6	121	2	124	16	197	308
LT4-14	93	123	1.32	0.019 1	0.000 2	0.128 0	0.014 7	0.048 6	0.005 6	122	1	122	14	129	273
LT4-15	67	67	1.00	0.019 2	0.000 2	0.129 5	0.014 9	0.049 0	0.005 8	122	2	124	14	146	279
LT4-16	33	34	1.02	0.018 9	0.000 4	0.134 0	0.033 1	0.051 4	0.015 3	121	3	128	32	258	686
LT4-17	55	54	0.97	0.018 4	0.000 3	0.133 1	0.021 6	0.052 4	0.008 9	118	2	127	21	305	388
LT4-18	52	76	1.46	0.019 6	0.000 3	0.129 2	0.021 5	0.047 9	0.008 2	125	2	123	21	92	404
LT4-19	54	58	1.09	0.019 6	0.000 3	0.134 1	0.020 8	0.049 6	0.008 0	125	2	128	20	178	377
LT4-20	55	53	0.96	0.019 8	0.000 3	0.138 9	0.021 4	0.050 9	0.008 1	126	2	132	20	238	368
LT4-21	84	76	0.91	0.019 3	0.000 2	0.128 0	0.015 2	0.048 2	0.006 0	123	1	122	15	108	293
LT4-22	46	45	0.96	0.019 1	0.000 3	0.129 8	0.024 1	0.049 4	0.009 6	122	2	124	23	167	455
LT4-23	49	51	1.04	0.018 6	0.000 3	0.125 3	0.021 8	0.048 8	0.008 8	119	2	120	21	140	421
LT11-1	109	91	0.83	0.018 8	0.000 2	0.128 8	0.011 3	0.049 6	0.004 4	120	1	123	11	176	205
LT11-2	127	229	1.80	0.019 2	0.000 3	0.131 8	0.018 0	0.049 8	0.006 7	123	2	126	17	184	315
LT11-3	88	65	0.73	0.018 9	0.000 2	0.136 3	0.016 3	0.052 3	0.006 2	121	1	130	16	300	272
LT11-4	67	42	0.63	0.018 3	0.000 2	0.127 2	0.016 7	0.050 4	0.006 6	117	2	122	16	214	302
LT11-5	47	43	0.90	0.018 9	0.000 3	0.136 2	0.023 1	0.052 2	0.011 8	121	2	130	22	296	515

续表 1

测点号	$w_{\text{B}}/10^{-6}$		Th/U	同位素比值						年龄/Ma					
	U	Th		$^{206}\text{Pb}/$	1σ	$^{207}\text{Pb}/$	1σ	$^{207}\text{Pb}/$	1σ	$^{206}\text{Pb}/$	1σ	$^{207}\text{Pb}/$	1σ	$^{207}\text{Pb}/$	1σ
				^{238}U		^{235}U		^{206}Pb		^{238}U		^{235}U		^{206}Pb	
LT11-6	55	36	0.66	0.018 3	0.000 3	0.131 9	0.023 9	0.052 3	0.009 5	117	2	126	23	297	415
LT11-7	47	39	0.84	0.018 8	0.000 3	0.139 4	0.023 7	0.053 6	0.009 9	120	2	133	22	356	418
LT11-8	80	57	0.71	0.019 0	0.000 2	0.128 1	0.015 6	0.049 0	0.005 9	121	2	122	15	149	283
LT11-9	123	108	0.88	0.018 8	0.000 2	0.137 1	0.008 6	0.052 9	0.003 3	120	1	130	8	324	140
LT11-10	121	82	0.68	0.018 6	0.000 2	0.122 9	0.013 3	0.047 9	0.005 2	119	1	118	13	97	255
LT11-11	86	57	0.66	0.018 9	0.000 2	0.137 1	0.012 1	0.052 5	0.004 7	121	1	130	12	309	203
LT11-12	43	31	0.71	0.019 0	0.000 3	0.132 6	0.028 6	0.050 6	0.012 1	121	2	126	27	223	553
LT11-13	81	69	0.84	0.019 1	0.000 2	0.132 4	0.012 1	0.050 2	0.004 6	122	1	126	12	204	214
LT11-14	160	103	0.64	0.018 2	0.000 2	0.125 7	0.007 2	0.050 0	0.002 8	116	1	120	7	197	132
LT11-15	95	50	0.52	0.018 4	0.000 2	0.138 0	0.010 4	0.054 4	0.004 2	118	1	131	10	387	172
LT11-16	109	98	0.90	0.018 4	0.000 2	0.128 5	0.017 2	0.050 8	0.006 8	117	1	123	16	231	310
LT11-17	86	37	0.43	0.018 4	0.000 2	0.132 5	0.013 8	0.052 1	0.005 4	118	1	126	13	291	238
LT11-18	79	32	0.40	0.018 3	0.000 2	0.130 7	0.013 7	0.051 9	0.005 4	117	1	125	13	281	239
LT11-19	160	77	0.48	0.018 4	0.000 2	0.133 0	0.007 5	0.052 4	0.002 9	118	1	127	7	303	127
LT11-20	87	31	0.35	0.018 2	0.000 2	0.121 4	0.013 9	0.048 3	0.005 5	117	1	116	13	114	270
LT11-21	112	42	0.37	0.018 1	0.000 2	0.128 7	0.018 4	0.051 6	0.007 3	116	1	123	18	267	326
LT11-22	95	35	0.37	0.018 4	0.000 2	0.129 0	0.011 3	0.050 9	0.004 5	117	1	123	11	238	203
LT11-23	100	48	0.48	0.018 8	0.000 2	0.130 9	0.010 5	0.050 6	0.004 1	120	1	125	10	223	187
LT11-24	47	41	0.88	0.022 3	0.000 4	0.366 5	0.043 6	0.119 1	0.014 0	142	2	317	38	1943	210

样品 LT4,23 个测点 Th 的质量分数介于 $27 \times 10^{-6} \sim 133 \times 10^{-6}$ 之间,U 的质量分数介于 $33 \times 10^{-6} \sim 146 \times 10^{-6}$ 之间,Th/U 值为 0.48~1.65。样品的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 介于 127~117 Ma 之间,它们均落入谐和曲线上及其附近(图 4a),其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $(121.3 \pm 1.2)\text{Ma}$ (MSWD=3.0, $n=23$),代表其岩体的形成时代为早白垩世。

样品 LT11,全部 24 个测点中,有 23 个测点 Th 的质量分数介于 $31 \times 10^{-6} \sim 229 \times 10^{-6}$ 之间,U 的质量分数介于 $43 \times 10^{-6} \sim 160 \times 10^{-6}$ 之间,Th/U 值为 0.35~1.80,其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 介于 123~116 Ma 之间,它们均落入谐和曲线上及其附近(图4b), $^{206}\text{Pb}/$

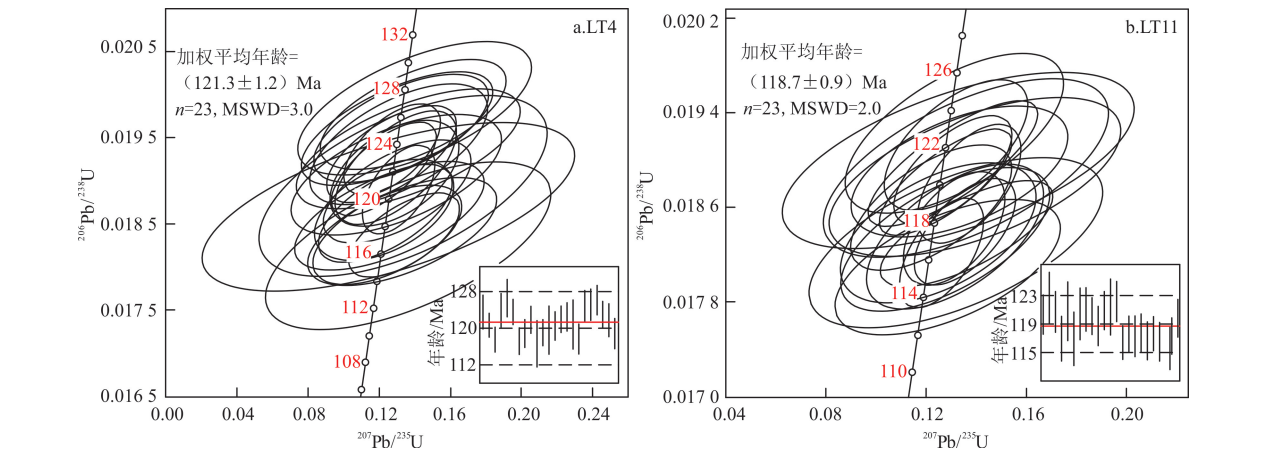


图 4 呼玛地区水磨沟—三间房岩体锆石 U-Pb 年龄谐和图(a)与加权平均年龄图(b)

Fig.4 Zircon U-Pb age harmony diagram (a) and weighted age diagram (b) of Shuimogou-Sanjianfang rock mass in Huma area

^{238}U 加权平均年龄为 $(118.7 \pm 0.9)\text{Ma}$ ($\text{MSWD} = 2.0, n = 23$), 代表其岩体的形成时代为早白垩世。另外一个测点 (142 Ma) 偏离谐和曲线, 可能是捕获锆石并有铅丢失所致, 暗示了早白垩世早期岩浆活动的存在。

区内新发现早白垩世侵入岩锆石, 与兴隆地区龙江组、光华组和甘河组等火山岩年龄相近^[39], 指示区域内存在较大规模的早白垩世岩浆活动。

4 岩石地球化学特征

4.1 主量元素

由表 2 可见, 去掉烧失量转换为干体系后, 该岩体的样品主量组分如下: $w(\text{SiO}_2)$ 为 $56.47\% \sim 64.95\%$, $w(\text{TiO}_2)$ 为 $0.62\% \sim 0.89\%$, $w(\text{TFe}_2\text{O}_3)$ 为 $5.15\% \sim 8.46\%$, $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为 $17.22\% \sim$

18.89% , $w(\text{CaO})$ 为 $2.22\% \sim 5.52\%$, $w(\text{MgO})$ 为 $2.80\% \sim 4.71\%$, $w(\text{Na}_2\text{O})$ 为 $3.73\% \sim 4.82\%$, $w(\text{K}_2\text{O})$ 为 $2.00\% \sim 2.90\%$, $w(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ 为 $5.91\% \sim 7.36\%$, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 为 $1.40 \sim 2.16$, 均值为 1.78 。样品具有较高的 $\text{Mg}^\#$ 值 ($50.93 \sim 57.63$)。岩石分异指数 (I_D) 介于 $49.57 \sim 69.77$ 之间, 分异指数较低, 表明岩浆经历了较低程度的分异, 结晶程度较差, 酸性程度较低。

岩石里特曼指数 (σ) 为 $1.82 \sim 3.50$, 均值为 2.55 , 整体表现为钙碱性岩系, 在 $w(\text{K}_2\text{O}) - w(\text{SiO}_2)$ 图解 (图 5a) 中, 小部分样品落入钙碱性系列, 大部分样品落入高钾钙碱性系列内; 侵入岩 A/CNK 为 $0.92 \sim 1.31$ (平均值为 1.04), 在 $\text{A}/\text{NK} - \text{A}/\text{CNK}$ 图解 (图 5b) 中, 多数样品落入准铝质—弱过铝质范围内。综合可知, 该期次侵入岩为钙碱性—高钾钙碱性系列, 具准铝质—弱过铝质特征。

表 2 呼玛地区早白垩世侵入岩主量元素、微量和稀土元素组成

Table 2 Composition of major elements, trace elements and REE of Early Cretaceous intrusive rocks in Huma area														
采样点号	岩性	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	TFe ₂ O ₃	Mg [#]
LT4	闪长岩	56.92	0.89	17.77	1.97	5.48	0.12	4.71	4.77	4.07	2.90	0.39	8.06	57.63
LT11	石英闪长岩	64.95	0.66	17.40	1.16	4.00	0.09	2.92	2.22	4.32	2.00	0.29	5.60	54.83
LT32	闪长岩	56.47	0.79	18.89	1.51	6.26	0.14	4.18	5.52	3.81	2.10	0.32	8.46	53.51
LT33	闪长岩	61.56	0.64	17.22	1.03	5.16	0.10	3.01	4.35	4.09	2.60	0.24	6.76	50.93
LT34	闪长岩	60.15	0.72	17.48	1.56	5.79	0.09	3.80	3.50	4.30	2.35	0.27	7.99	52.54
LT35	石英闪长岩	62.05	0.71	18.09	2.00	3.23	0.12	3.08	4.50	3.73	2.25	0.24	5.59	56.26
LT37	石英闪长岩	61.30	0.62	17.27	1.27	4.47	0.09	3.01	4.55	4.67	2.52	0.24	6.23	52.95
LT38	石英闪长岩	62.15	0.63	17.39	1.70	3.11	0.08	2.80	4.56	4.82	2.54	0.23	5.15	55.92
采样点号	岩性	Na ₂ O + K ₂ O	Na ₂ O / K ₂ O	I _D	A/NK	A/CNK	σ	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd
LT4	闪长岩	6.97	1.40	54.32	1.81	0.96	3.50	23.90	52.50	6.90	26.30	4.95	1.49	4.07
LT11	石英闪长岩	6.32	2.16	69.77	1.88	1.31	1.82	32.30	63.90	6.99	22.60	3.40	1.02	2.99
LT32	闪长岩	5.91	1.82	49.57	2.21	1.02	2.59	29.00	59.80	6.80	25.10	3.88	1.15	3.09
LT33	闪长岩	6.69	1.57	61.14	1.80	0.99	2.41	39.10	74.60	5.15	28.40	4.40	1.32	3.63
LT34	闪长岩	6.65	1.83	60.23	1.82	1.09	2.58	25.80	55.70	5.11	26.30	4.58	1.36	3.55
LT35	石英闪长岩	5.98	1.66	61.51	2.11	1.08	1.87	30.30	62.70	4.62	26.70	4.39	1.29	3.46
LT37	石英闪长岩	7.19	1.85	62.98	1.66	0.92	2.83	28.60	57.90	4.08	24.70	4.12	1.32	3.22
LT38	石英闪长岩	7.36	1.90	65.93	1.63	0.92	2.83	26.50	54.60	5.83	22.90	3.79	1.18	2.98
采样点号	岩性	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	ΣREE	LREE	HREE	LREE / HREE	La _N / Yb _N
LT4	闪长岩	0.59	3.13	0.57	1.28	0.21	1.47	0.25	12.40	127.61	116.04	11.57	10.03	11.66
LT11	石英闪长岩	0.35	1.66	0.29	0.71	0.11	0.82	0.14	6.25	137.28	130.21	7.07	18.42	28.25
LT32	闪长岩	0.38	1.90	0.34	1.03	0.14	0.87	0.14	9.18	133.62	125.73	7.89	15.94	23.91
LT33	闪长岩	0.42	2.09	0.37	1.12	0.15	0.95	0.15	9.51	161.85	152.97	8.88	17.23	29.52

续表 2

采样点号	岩性	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	ΣREE	LREE	HREE	LREE/ HREE	La _N /Yb _N
LT34	闪长岩	0.46	2.35	0.43	1.25	0.17	1.03	0.16	11.10	128.25	118.85	9.40	12.64	17.97
LT35	石英闪长岩	0.43	2.15	0.39	1.16	0.15	0.98	0.15	9.95	138.87	130.00	8.87	14.66	22.18
LT37	石英闪长岩	0.40	2.03	0.36	1.08	0.15	0.92	0.14	9.01	129.02	120.72	8.30	14.54	22.30
LT38	石英闪长岩	0.36	1.86	0.33	0.99	0.13	0.84	0.13	8.38	122.42	114.80	7.62	15.07	22.63
采样点号	岩性	Yb _N	δEu	δCe	Cr	Ni	Co	Rb	Pb	Th	U	Sr	Ba	V
LT4	闪长岩	8.65	1.01	1.00	92.60	32.60	20.50	94.00	6.90	3.28	0.36	715.00	1 128.00	101.00
LT11	石英闪长岩	4.82	0.98	1.04	77.00	28.50	17.30	36.00	6.99	6.33	1.34	911.00	767.00	86.30
LT32	闪长岩	5.12	1.02	1.04	83.50	23.20	19.80	53.00	14.80	1.73	0.38	1 079.00	1 086.00	101.00
LT33	闪长岩	5.59	1.01	1.29	81.80	30.90	17.40	54.00	17.80	8.12	1.12	959.00	1 102.00	89.30
LT34	闪长岩	6.06	1.03	1.19	88.20	29.10	17.40	42.00	14.80	4.21	0.66	1 011.00	937.00	93.00
LT35	石英闪长岩	5.76	1.01	1.30	83.50	31.50	19.00	49.00	19.20	4.75	1.12	1 011.00	1 027.00	88.10
LT37	石英闪长岩	5.41	1.11	1.31	83.10	30.70	17.40	52.00	4.08	2.45	0.29	913.00	1 040.00	83.00
LT38	石英闪长岩	4.94	1.07	1.08	77.00	26.20	16.00	48.00	5.83	4.26	0.80	972.00	1 015.00	81.70
采样点号	岩性	Sc	Nb	Ta	Zr	Hf	B	Li	Ga	Sn	F	W	Mo	Bi
LT4	闪长岩	9.99	7.30	0.44	137.00	3.80	0.99	16.60	20.40	1.25	564.00	0.87	0.29	0.02
LT11	石英闪长岩	9.26	7.90	0.57	157.00	4.20	2.52	12.40	21.60	1.31	541.00	0.36	0.46	0.03
LT32	闪长岩	12.60	8.20	0.44	193.00	6.40	3.63	10.10	25.30	1.66	608.00	0.16	0.30	0.02
LT33	闪长岩	11.20	7.40	0.70	166.00	6.40	4.35	12.10	25.50	1.63	599.00	0.21	0.69	0.03
LT34	闪长岩	11.00	7.60	0.48	168.00	5.50	3.73	10.60	23.40	1.67	662.00	0.24	0.44	0.03
LT35	适应闪长岩	12.10	7.50	0.67	160.00	6.80	5.51	12.50	27.20	1.88	622.00	4.51	0.64	0.05
LT37	石英闪长岩	8.53	7.80	0.61	158.00	6.80	3.12	12.10	24.20	1.49	544.00	0.67	0.46	0.03
LT38	石英闪长岩	10.70	6.80	0.55	147.00	5.90	5.78	8.44	23.90	1.49	566.00	0.17	0.36	0.05
采样点号	岩性	Cu	Zn	Ag	As	Be	Cl	Hg	P	Sb	Te	Sr/Y		
LT4	闪长岩	6.00	86.90	0.03	0.80	1.33	33.00	0.01	1 094.00	0.14	0.02	57.66		
LT11	石英闪长岩	11.80	84.40	0.04	1.00	1.71	35.00	0.01	1 014.00	0.14	0.02	145.76		
LT32	闪长岩	10.00	105.00	0.03	0.60	1.63	137.00	0.00	1 206.00	0.13	0.02	117.54		
LT33	闪长岩	19.80	77.20	0.05	0.40	1.86	72.00	0.01	951.00	0.13	0.02	100.84		
LT34	闪长岩	19.80	80.70	0.03	0.40	1.72	73.00	0.01	981.00	0.15	0.02	91.08		
LT35	石英闪长岩	16.00	79.40	0.03	0.70	2.15	84.00	0.01	1 041.00	0.13	0.02	101.61		
LT37	石英闪长岩	9.50	79.40	0.02	0.80	1.86	26.00	0.01	1 071.00	0.13	0.02	101.33		
LT38	石英闪长岩	14.70	76.40	0.02	0.40	1.96	84.00	0.01	1 013.00	0.12	0.02	115.99		

注:主量元素质量分数单位为%;微量和稀土元素质量分数单位为10⁻⁶。

4.2 微量及稀土元素

从微量及稀土元素分析结果(表 2)中可知,稀土总量(ΣREE)在122.42×10⁻⁶~161.85×10⁻⁶(平均值为134.87×10⁻⁶)之间,明显低于内蒙兴安—吉黑造山带地区闪长岩平均值(179.36×10⁻⁶)^[42];轻重稀土元素比(LREE/HREE)为10.03~18.42,La_N/Yb_N为11.66~29.52,显示了轻重稀土元素分异程度较高的特征;δEu 值在 0.98~

1.11 之间,显示弱的正异常,暗示源区为榴辉岩相,残留矿物很少或没有斜长石;δCe 值在 1.00~1.31 之间,具正异常特征。从球粒陨石标准化稀土元素配分图(图 6a)中可以看出,各样品的稀土配分模式曲线大致平行,显示同源演化的特征,呈轻稀土富集的右倾模式,轻稀土元素分馏较强烈,重稀土元素分馏较微弱。

从原始地幔标准化微量元素蛛网图(图6b)中

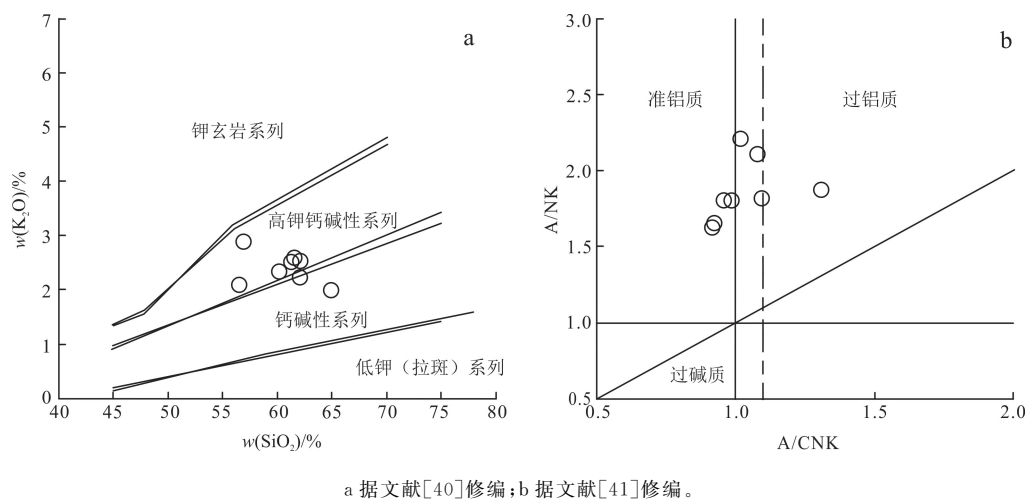


图 5 呼玛地区早白垩世侵入岩的 $w(K_2O)-w(SiO_2)$ (a)和 $A/NK-A/CNK$ (b)图解

Fig.5 $w(K_2O)-w(SiO_2)$ (a) and $A/NK-A/CNK$ (b) diagrams of Early Cretaceous intrusive rocks in Huma area

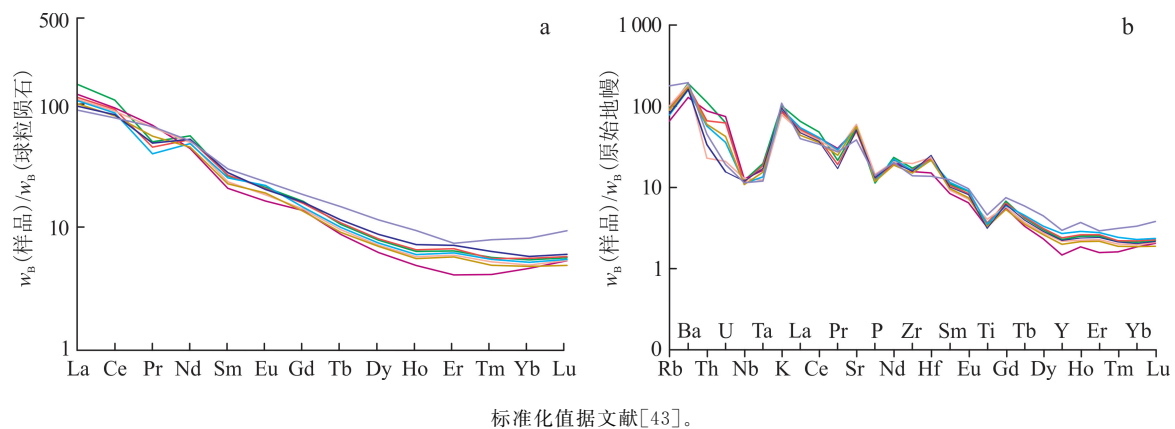


图 6 呼玛地区早白垩世侵入岩球粒陨石标准化稀土元素配分图(a)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b)

Fig.6 Chondrite normalized REE distribution map (a) and primitive mantle normalized trace element spider diagram (b) of Early Cretaceous intrusive rocks in Huma area

可以看出,该期次侵入岩的 K、Sr、Ba 等大离子亲石元素及轻稀土元素相对富集,Nb、Ta、Ti、P 等高场强元素及重稀土元素亏损明显,暗示岩浆作用与板块的俯冲环境相关。样品具有较高的 Sr 质量分数 ($715.00 \times 10^{-6} \sim 1\,079.00 \times 10^{-6}$),以及较高的 Sr/Y 值 ($57.66 \sim 145.76$,平均值为 103.98)。

5 讨论

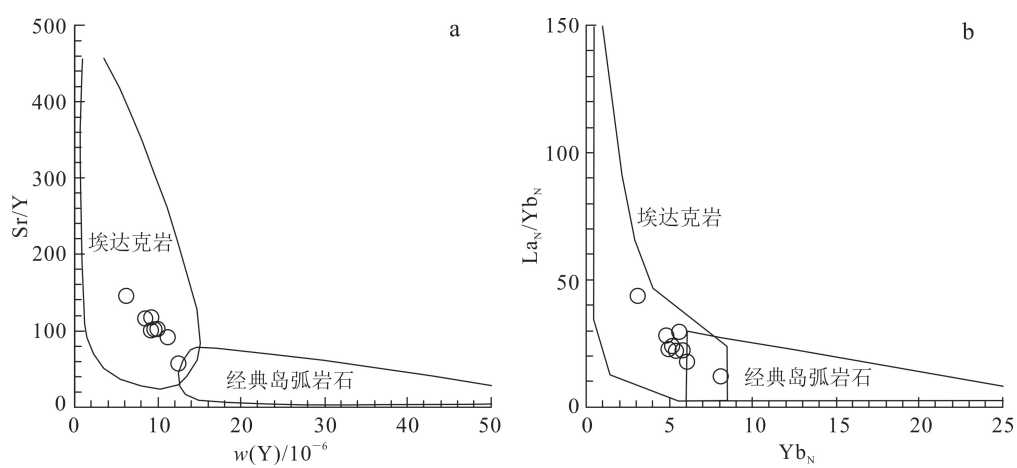
研究区内早白垩世侵入岩显示出埃达克岩石的地球化学特征, $w(SiO_2) \geq 56.47\%$, $w(Al_2O_3) \geq 17.22\%$, $w(Na_2O) \geq 3.73\%$, Na_2O/K_2O 为 1.40~2.16,明显富 $w(Sr)$ ($715.00 \times 10^{-6} \sim 1\,079.00 \times 10^{-6}$),强烈亏损重稀土元素 $w(Y)$ ($6.25 \times 10^{-6} \sim 12.40 \times 10^{-6}$) 及 $w(Yb)$ ($0.82 \times 10^{-6} \sim 1.47 \times$

10^{-6}),具有高的 Sr/Y 值 ($57.66 \sim 145.76$) 和 La_N/Yb_N 值 ($11.66 \sim 29.52$),相对富集 Eu(δEu 为 0.98~1.11),具有相对较高的 $w(Cr)$ ($77.00 \times 10^{-6} \sim 92.60 \times 10^{-6}$), $w(Ni)$ ($23.20 \times 10^{-6} \sim 32.60 \times 10^{-6}$) 值。在 Sr/Y- $w(Y)$ 和 La_N/Yb_N-Yb_N 图解(图 7) 中,均落入埃达克岩区域内。

值得注意的是,洋壳部分熔融形成的埃达克岩形成于年轻($\leq 25\text{ Ma}$)、热的洋片俯冲环境。在早白垩世晚期,西北部的蒙古—鄂霍茨克洋已闭合并完成了碰撞后造山过程,去除日本海扩张的影响(约 15 Ma)^[44],东部的古太平洋俯冲带距离研究区远达约 1 300 km,其下方不可能有年轻的洋片存在。由此可以排除研究区早白垩世侵入岩是埃达克岩的可能,那么应将其归为埃达克质岩,并对于其可能的岩

石成因作以下分析:Schiano 等^[45]认为,不相容微量元素固体/熔体配分系数可以用于区分部分熔融与分离结晶,其中部分熔融的轨迹是斜线,而分离结晶轨迹为水平线。从图 8 可知,研究区早白垩世侵入岩均展示出具有斜率的斜线轨迹而非水平线,说明该期岩浆活动主要经历了部分熔融过程,暗示了其不可能由基性岩浆高压分异形成;而混合成因的埃达克岩指基性与酸性岩浆在地壳深处混合并结晶形成,该部分熔融证据同样否定了研究区早白垩世侵入岩的混合成因。加厚玄武质地壳的部分熔融,主要物源来自地壳,具有相对低的 $w(\text{MgO})$ 和 $\text{Mg}^\#$ 值,这与该期岩浆具有高 $\text{Mg}^\#$ 值的特征不符,

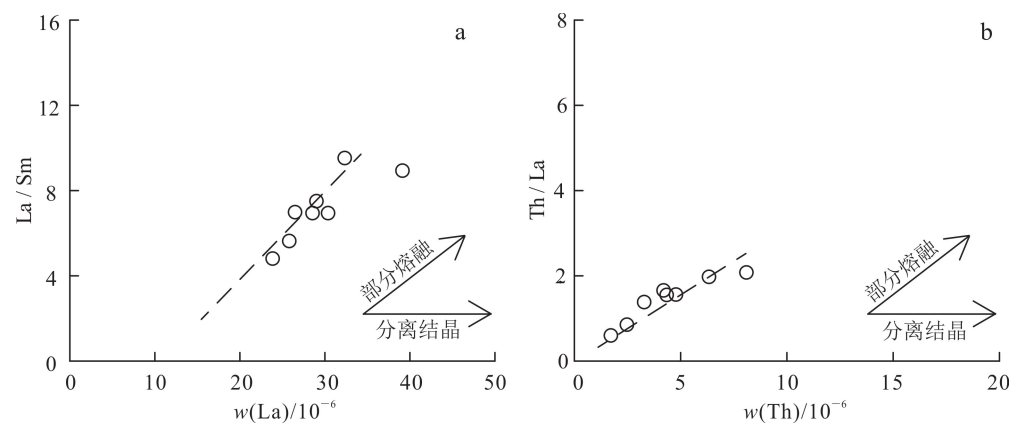
也排除加厚玄武质地壳部分熔融的成因。初始俯冲是指冷的板片在陡倾俯冲进入到热的地幔中时,由于温度的增加使俯冲板片产生部分熔融,而研究区远离俯冲带,不可能发生初始俯冲过程,遂也被排除。Sun 等^[24]认为靠近洋脊的洋壳是热的,在洋脊俯冲时易被部分熔融形成埃达克岩,Nb 的富集是洋脊俯冲的典型地球化学特征。研究区距西北部的蒙古—鄂霍茨克洋缝合带及东南部的日本海沟均有数百甚至上千千米之遥,洋脊俯冲到研究区的可能性并不大,且微量元素显示 Nb、Ta、Ti 等亏损,与 Nb 的富集特征不符,因此将其排除。剩余平板俯冲/地幔停滞板块的部分熔融和岩石圈拆沉引起的



底图据文献[1]。

图 7 呼玛地区早白垩世侵入岩的岩石成因判别图

Fig.7 Petrogenetic discrimination of Early Cretaceous intrusive rocks in Huma area



底图据文献[45-46]。

图 8 呼玛地区早白垩世侵入岩的 $\text{La}/\text{Sm} - w(\text{La})$ (a) 和 $\text{Th}/\text{La} - w(\text{Th})$ (b) 判别图解

Fig.8 Discrimination diagram of $\text{La}/\text{Sm} - w(\text{La})$ (a) and $\text{Th}/\text{La} - w(\text{Th})$ (b) of Early Cretaceous intrusive rocks in Huma area

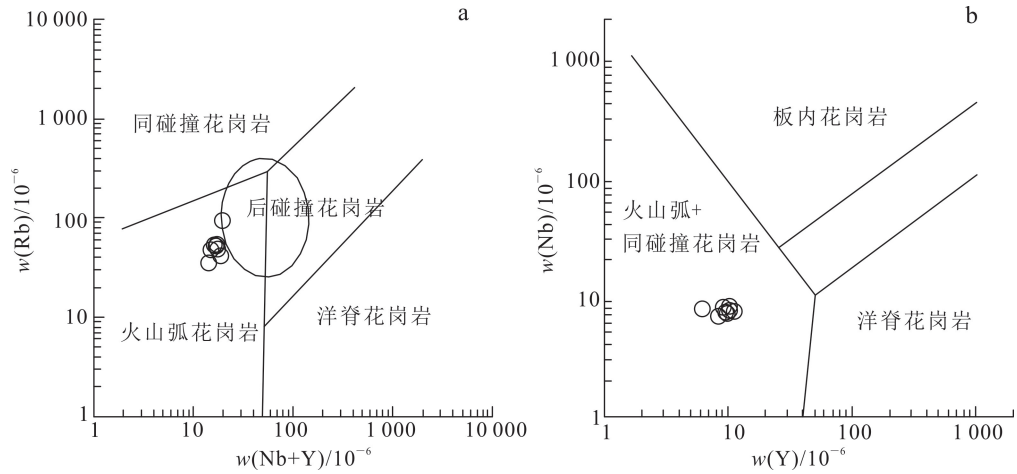
部分熔融两种可能的模式下面分别进行讨论。

关于平板俯冲的认识,现在仍不够统一。Mungall^[47]及 Sun 等^[19]认为,平板俯冲会消除地幔楔的影响,从而形成板块熔融的低 Mg 埃达克质岩石;而下地壳的熔体与软流圈等上升的地幔物质交代,可以演化出具有高 Mg 特点的埃达克质岩石。Li 等^[48]对长江中下游埃达克质岩的成因研究中则认为,平板俯冲引起的板片拆离并脱水交代,在富集地幔熔融,是源区的混合作用占主导,地壳的混染作用相对较小,这本质上仍是一种拆沉熔融。况且平板俯冲若存在,其板片来自哪里?邵济安等^[49]通过地震层析影像等地球物理方法,得出东部的古太平洋板块俯冲在珲春一带的 1 000 km 以下发生裂离,而不可能继续向西驱动的结论。近年来有学者^[50]提出来自研究区西北部蒙古—鄂霍茨克洋平板俯冲的认识,但不可忽视的是,在该过程中大兴安岭地区仍发育大量碰撞造山后的伸展环境下形成的大量 A 型花岗岩及碱性流纹岩,有证据显示其物源以富集地幔为主^[51-52],这与靠近下地壳的平板俯冲隔绝了壳幔交互作用相悖。综合分析认为,研究区内早白垩世的埃达克质岩亦不可能是平板俯冲成因。

研究区内早白垩世侵入岩具有较高的 $Mg^\#$ 值(50.93~57.63),接近于亏损地幔部分熔融形成的岩浆($Mg^\# > 60$),区别于下地壳部分熔融成因($Mg^\# < 40$ ^[53])。且岩石中高 Cr、Ni 值,暗示成岩母

岩有地幔橄榄岩的参与。而角闪榴辉岩相下地壳拆沉到伏地幔中,经历部分熔融和与地幔橄榄岩的反应,可以形成具有高 $Mg^\#$ 、Cr、Ni 特征的埃达克质岩^[2,17]。Gao 等^[3]在华北克拉通东北缘的研究中也发现,岩石圈拆沉后,引起软流圈物质上涌,并与橄榄岩交代,形成兴隆沟埃达克质岩浆,在岩浆上升过程携带了幔源丰富的 Cu、Au 及 REE 等成矿物质,随后伴随张性环境下盆地的生成与软流圈碱性玄武岩的喷发。该过程可以与研究区内早白垩世龙江期安山岩→九峰山期煤盆地→甘河期玄武岩浆喷发的演化过程相类比,其中龙江期火山喷发活动与本文侵入岩形成时间相近。近年来的地球物理研究中也发现大兴安岭下方的莫霍面平坦及地震层析成像剖面中可以看到高密度的残留体存在^[54-56],或许可以将此与岩石圈的拆沉作用相联系。

对样品进行的构造判别投图中(图 9)显示,大部分样品落在火山弧环境背景中,暗示花岗岩的源区比较接近亏损地幔,且岩浆演化程度较低。而区域上早白垩世侵入岩具有高 $Mg^\#$ 值等特征,也显示出有较多的幔源组分参与,暗示其岩石成因并非来自俯冲洋板块的部分熔融,而更可能是来自伸展构造背景下岩石圈的拆沉引起软流圈幔源成分的上涌。由此,本文认为研究区内早白垩世具有埃达克岩石地球化学特征的侵入岩是在伸展环境下幔源物质上涌形成的。



a、b 图解据文献[57-58]修编。

图 9 呼玛地区早白垩世侵入岩的 $w(Rb)-w(Nb+Y)$ (a) 和 $w(Nb)-w(Y)$ (b) 构造环境图解

Fig.9 $w(Rb)-w(Nb+Y)$ (a) and $w(Nb)-w(Y)$ (b) diagram of Early Cretaceous intrusive rocks in Huma area

6 结论

1)通过 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年,限定研究区内早白垩世侵入岩的成岩时间在 $(121.3 \pm 1.2) \sim (118.7 \pm 0.9)$ Ma 之间。

2)研究区内早白垩世侵入岩具有中硅、低钾、高镁铁、富钙的特征,为钙碱性—高钾钙碱性系列、准铝质—弱过铝质岩石,稀土元素曲线显示轻稀土元素富集、重稀土元素亏损的右倾模式, Eu 微弱正异常,微量元素显示大离子亲石元素富集,高场强元素亏损。

3)研究区内早白垩世侵入岩具有高的 Sr/Y 和 La_N/Yb_N 值,以及含较高的 Mg、Cr、Ni 质量分数,显示出埃达克质岩石特征。构造判别图中样品落入火山弧环境下,结合其形成于蒙古—鄂霍茨克洋闭合后的伸展环境,暗示岩石圈拆沉引起的幔源物质上涌,占据主导形成了该期次岩浆活动。

参考文献(References):

- [1] Defant M J, Drummond M S. Derivation of Some Morden Arc Magmas by of Young Subducted Lithosphere[J]. Nature, 1990, 347: 662-665.
- [2] Xu J F, Shinio R, Defant M J, et al. Origin of Mesozoic Adakitic Intrusive Rocks in the Ningzhen Area of East China: Partial Melting of Delaminated Lower Continental Crust? [J]. Geology, 2002, 30: 1111-1114.
- [3] Gao S, Rudnick R, Yuan H L, et al. Recycling Lower Continental Crust in the North China Craton [J]. Nature, 2004, 432: 892-897.
- [4] Wang Q, Xu J F, Jian P, et al. Petrogenesis of Adakitic Porphyries in an Extensional Tectonic Setting, Dexing, South China: Implications for the Genesis of Porphyry Copper Mineralization[J]. Journal of Petrology, 2006, 47(1): 119-144.
- [5] Martin H, Sminthies R H, Rapp R, et al. An Overview of Adakite, Tonalite-Trondjemite-Granodiorite (TTG), and Sanukitoid: Relationships and Some Implications for Crustal Evolution [J]. Lithos, 2005, 79: 1-24.
- [6] Chung S L, Liu D, Ji J Q, et al. Adakites from Continental Collision Zones: Melting of Thickened Lower Crust Beneath Southern Tibet [J]. Geology, 2003, 31(11): 1021-1024.
- [7] Hou Z Q, Gao Y F, Qu X M, et al. Origin of Adakitic Intrusives Generated During Mid-Miocene East-West Extension in Southern Tibet [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2004, 220: 139-155.
- [8] Guan Q, Zhu D C, Zhao Z D, et al. Crustal Thickening Prior to 38 Ma in Southern Tibet: Evidence from Lower Crust-Derived Adakitic Magmatism in the Gangdese Batholith [J]. Gondwana Research, 2012, 21: 88-99.
- [9] Ji W Q, Wu F Y, Liu C Z, et al. Early Eocene Crustal Thickening in Southern Tibet: New Age and Geochemical Constraints from the Gangdese Batholith [J]. Journal of Asian Earth Science, 2012, 53: 82-95.
- [10] Pan F B, Zhang H F, Harris N, et al. Oligocene Magmatism in the Eastern Margin of the East Himalayan Orogen and Its Implication for the India-Asia Post-Collisional Process [J]. Lithos, 2012, 154: 181-192.
- [11] Defant M J, 许继峰, Kepezhinskas P, 等. 埃达克岩: 关于其成因的一些不同观点 [J]. 岩石学报, 2002, 18(2): 129-142.
- [12] Defant M J, Xu Jifeng, Kepezhinskas P, et al. Adakites: Some Variations on a Theme [J]. Acta Petrologica Sinica, 2002, 18(2): 129-142.
- [12] Castillo P R. 埃达克岩成因回顾 [J]. 科学通报, 2006, 51(6): 617-627.
- [13] Castillo P R. A Review of the Origin of Adakite [J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(6): 617-627.
- [13] Macpherson C G, Dreher S T, Thirlwall M F, et al. Adakites Without Slab Melting: High Pressure Differentiation of Island Arc Magma, Miadanao, the Philippines [J]. Earth Planet Science Letters, 2006, 243: 581-593.
- [14] Richards J P, Kerrich R. Special Paper: Adakite-Like Rocks: Their Diverse Origins and Questionable Role in Metallogenesis [J]. Economic Geology, 2007, 102(4): 537-576.
- [15] Chen B, Jahn B M, Arakawa Y, et al. Petrogenesis of the Mesozoic Intrusive Complexes from the Southern Taihang Orogen, North China Craton: Elemental and Sr-Nd-Pb Isotopic Constraints [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2004, 148(4): 489-501.
- [16] Guo F, Nakamura E, Fan W M, et al. Generation of Palaeocene Adakitic Andesites by Magma Mixing: Yanji Area, NE China [J]. Journal of Petrology, 2007, 48(4): 661-692.
- [17] 许继峰, 邹建斌, 王强, 等. 埃达克岩与埃达克质岩在

- 中国的研究进展[J].矿物岩石地球化学通报,2014,33(1):6-13.
- Xu Jifeng, Wu Jianbin, Wang Qiang, et al. Research Advances of Adakites and Adakitic Rocks in China [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2014, 33(1): 6-13.
- [18] 王强,郝露露,张修政,等.汇聚板块边缘的埃达克质岩:成分和成因[J].中国科学:地球科学,2020,50(12):1845-1873.
- Wang Qiang, Hao Lulu, Zhang Xiuzheng, et al. Adakitic Rocks at Convergent Plate Boundaries: Compositions and Petrogenesis[J]. Scientia Sinica: Earth Sciences, 2020, 50(12): 1845-1873.
- [19] Sun W D, Zhang H, Ling M X, et al. The Genetic Association of Adakites and Cu-Au Ore Deposits[J]. International Geology Review, 2011, 53(5/6): 691-703.
- [20] Martin H. Adakitic Magmas: Modern Analogues of Archaean Granitoids[J]. Lithos, 1999, 46(3): 411-429.
- [21] Condie K C. TTGs and Adakites: Are They Both Slab Melts? [J]. Lithos, 2005, 80(1/2/3/4): 33-44.
- [22] Ling M X, Wang F Y, Ding X, et al. Different Origins of Adakites from the Dabie Mountains and the Lower Yangtze River Belt, Eastern China: Geochemical Constraints [J]. International Geology Review, 2011, 53: 727-740.
- [23] Sun W D, Ling M X, Chung S L, et al. Geochemical Constraints on Adakites of Different Origins and Copper Mineralization[J]. The Journal of Geology, 2012, 120(1): 105-120.
- [24] Sun W D, Ling M X, Yang X Y, et al. Ridge Subduction and Porphyry Copper-Gold Mineralization: An Overview [J]. Science China: Earth Sciences, 2010, 53: 475-484.
- [25] 王强,唐功建,贾小辉,等.埃达克质岩的金属成矿作用[J].高校地质学报,2008,14(3):350-364.
- Wang Qiang, Tang Gongjian, Jia Xiaohui, et al. The Metalliferous Mineralization Associated with Adakitic Rocks [J]. Geological Journal of China Universities, 2008, 14(3): 350-364.
- [26] 赵振华.微量元素地球化学原理[M].2版.北京:科学出版社,2016:1-534.
- Zhao Zhenhua. Principles of Trace Element Geochemistry [M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2016: 1-534.
- [27] 刘佳宜.黑龙江省三道湾子地区花岗岩年代学和地球化学研究[D].北京:中国地质大学(北京),2016.
- Liu Jiayi. The Geochronological and Geochemical Research of Granites in Sandaowanzi, Heilongjiang Province[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2016.
- [28] 赵院冬,车继英,吴大天,等.小兴安岭西北部早一中侏罗世 TTG 花岗岩年代学、地球化学特征及构造意义[J].吉林大学学报(地球科学版),2017,47(4): 1119-1137.
- Zhao Yuandong, Che Jiying, Wu Datian, et al. Early-Middle Jurassic TTG Granites in Northwest of Lesser Xing'an Range: Its Geochronology, Geochemical Characteristics and Tectonic Significance[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2017, 47(4): 1119-1137.
- [29] 赵院冬,车继英,许逢明,等.兴安地块东北部晚侏罗世C型埃达克质花岗岩年代学、地球化学特征及构造环境意义[J].地学前缘,2018,25(6):240-253.
- Zhao Yuandong, Che Jiying, Xu Fengming, et al. Late Jurassic Adakitic Granites in Northeastern Xing'an Block: Geochronology and Geochemical Characteristics and Tectonic Significance [J]. Earth Science Frontiers, 2018, 25(6): 240-253.
- [30] 尹志刚,李敏,李文龙,等.大兴安岭中北段大金山地区早侏罗世埃达克质花岗岩闪长岩的成因及构造环境[J].矿物岩石地球化学通报,2019,38(1):69-79.
- Yin Zhigang, Li Min, Li Wenlong, et al. The Origin and Tectonic Environment of the Early Jurassic Adakitic Granodiorite in the Dajinshan Area of the Central and Northern Da Hinggan Range[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2019, 38(1): 69-79.
- [31] 王苏珊.黑龙江省三道湾子地区岩浆岩的年代学与地球化学[D].北京:中国地质大学(北京),2017.
- Wang Sushan. Geochronology and Geochemistry of Magmatic Rock in Sandaowanzi, Heilongjiang Province[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2017.
- [32] 邵帅,邓晋福,刘翠,等.黑龙江黑河地区早白垩世火山岩岩石地球化学特征及其构造环境意义[J].地学前缘,2018,25(3):215-229.
- Shao Shuai, Deng Jinfu, Liu Cui, et al. Geochemical Characteristics and Tectonic Setting of Early Cretaceous Volcanic Rocks in the Heihe Area, Heilongjiang Province, China [J]. Earth Science Frontiers, 2018, 25(3): 215-229.
- [33] 孔金贵,张国宾,张文东,等.大兴安岭北段呼玛地区

- 晚侏罗世花岗闪长岩年代学和地球化学特征:对蒙古—鄂霍茨克洋构造演化的制约[J].世界地质, 2024,43(2):171-192.
- Kong Jingui, Zhang Guobin, Zhang Wendong, et al. Geochronology and Geochemistry of Late Jurassic Granodiorte in Huma Area of Northern Segment of Da Hinggan Ling (Mts.): Constraints on Tectonic Evolution of Mongolia-Okhotsk Ocean [J]. World Geology, 2024, 43 (2) :171-192.
- [34] 梁天意,刘敬党,李猛猛,等.大兴安岭中段林西组砂岩 LA-ICP-MS 碎屑锆石 U-Pb 年代学及其地质意义[J].吉林大学学报(地球科学版),2022,52(2): 442-462.
- Liang Tianyi, Liu Jingdang, Li Mengmeng, et al. LA-ICP-MS U-Pb Dating of Detrital Zircons from Linxi Formation in Jalaid Banner Region, Middle Part of the Greater Khingan Mountains and Its Geological Implications[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2022,52(2):442-462.
- [35] 唐杰,许文良,王枫,等.古太平洋板块在欧亚大陆下的俯冲历史:东北亚陆缘中生代—古近纪岩浆记录[J].中国科学:地球科学,2018,48(5):549-583.
- Tang Jie, Xu Wenliang, Wang Feng, et al. Subduction History of the Paleo-Pacific Slab Beneath Eurasian Continent: Mesozoic-Paleogene Magmatic Records in Northeast Asia[J]. Scientia Sinica: Earth Sciences,2018,48(5):549-583.
- [36] 张坤.黑龙江呼玛地区中生代侵入岩地球化学与年代学[D]. 北京:中国地质大学(北京),2021.
- Zhang Kun.Geochemistry and Ore Bearing Evaluation of Mesozoic Intrusive Rocks in Huma Area, Heilongjiang Province[D].Beijing: China University of Geosciences (Beijing),2021.
- [37] 隋振民,葛文春,吴福元,等.大兴安岭东北部侏罗纪花岗质岩石的锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及成因[J].岩石学报,2007,23(2):461-480.
- Sui Zhenmin, Ge Wenchun,Wu Fuyuan,et al. Zircon U-Pb Ages, Geochemistry and Its Petrogenesis of Jurassic Granites in Northeastern Part of the Da Hinggan Mts [J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23 (2):461-480.
- [38] 隋振民,徐学纯.大兴安岭东北部侏罗纪花岗岩类 Sr-Nd同位素特征及其地质意义[J].中国地质, 2010,37(1):48-55.
- Sui Zhenmin, Xu Xuechun. Sr - Nd Isotopic Characteristics of Jurassic Granites in Northeastern Da Hinggan Mountains and Their Geological Implications[J].Geology in China,2010,37(1):48-55.
- [39] Deng C Z, Sun D Y, Han J S, et al. Ages and Petrogenesis of the Late Mesozoic Igneous Rocks Associated with the Xiaokele Porphyry Cu - Mo Deposit, NE China and Their Geodynamic Implications[J]. Ore Geology Reviews, 2019, 107: 417-433.
- [40] Peccerillo R, Taylor S R. Geochemistry of Eocene Calc-Alkaline Volcanic Rocks from the Kastamonu Area, Northern Turkey [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology,1976, 58:63-81.
- [41] Maniar P D, Piccoli P M. Tectonic Discrimination of Granitoids [J]. Geological Society of America Bulletin,1989, 101(5): 635-643.
- [42] 迟清华,鄯明才.应用地球化学元素丰度数据手册[M].北京:地质出版社,2007:1-136.
- Chi Qinghua, Yan Mingcai. Handbook of Elemental Abundance for Applied Geochemistry [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2007: 1-136.
- [43] Sun S S, McDonough W F. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes [J]. Geological Society Special Publication,1989,42:313-345.
- [44] Mizutani S, Shao J A, Zhang Q L. The Nanhada Terrane in Relation to Mesozoic Tectonics on Continretal Margins of East Asia[J]. Acta Geologica Sinica,1990,64(1):15-29.
- [45] Schiano P, Monzier M, Eissen J P, et al. Simple Mixing as the Major Control of the Evolution of Volcanic Suites in the Ecuadorian Andes [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2010, 160:297-312.
- [46] Allegre C J, Minster J F. Quantitative Models of Trace Element Behavior in Magmatic Processe[J]. Earth Planet Science Letter,1978,38:1-25.
- [47] Mungall J E. Rosting the Mantle: Slab Melting and the Genesis of Major Au and Au-Rich Cu Deposits [J]. Geology,2002, 30:915-918.
- [48] Li S, Wang T, Simon A, et al. Evolution, Source and Tectonic Significance of Early Mesozoic Granitoid Magmatism in the Central Asian Orogenic Belt (Central Segment) [J]. Earth-Science Reviews,2013, 126:206-234.
- [49] 邵济安,刘福田,陈辉.西北太平洋地震层析剖面及地球动力学启示[J].自然科学进展,2000,10(8):757-760.

- Shao Ji'an, Liu Futian, Chen Hui. Seismic Tomography of the Northwest Pacific and Its Geodynamic Implications [J]. *Progress in Natural Science*, 2000, 10(8): 757 - 760.
- [50] Deng C Z, Sun D Y, Han J S, et al. Late-Stage Southwards Subduction of the Mongol-Okhotsk Oceanic Slab and Implications for Porphyry Cu/Mo Mineralization: Constraints from Igneous Rocks Associated with the Fakeshan Deposit, NE China[J]. *Lithos*, 2019, 326/327: 341 - 357.
- [51] 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.
- Ge Wenchun, Li Xianhua, Lin Qiang, et al. Geochemistry of Early Cretaceous Alkaline Rhyolites from Hulun Lake, Daxing'anling and Its Tectonic Implications[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2001, 36(2): 176 - 183.
- [52] 林强, 葛文春, 曹林, 等. 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*, 2003, 32(3): 208 - 222.
- Lin Qiang, Ge Wenchun, Cao Lin, et al. Geochemistry of Mesozoic Volcanic Rocks in Da Hinggan Ling: The Bimodal Volcanic Rocks [J]. *Geochimica*, 2003, 32(3): 208 - 222.
- [53] Atheron M P, Petford N. Generation of Sodium-Rich Magmas from Newly Underplated Basaltic Crust[J]. *Nature*, 1993, 362: 144 - 146.
- [54] 邵济安, 张履桥, 肖庆辉, 等. 中生代大兴安岭的隆起: 一种可能的陆内造山机制[J]. *岩石学报*, 2005, 21(3): 789 - 794.
- Shao Ji'an, Zhang Lüqiao, Xiao Qinghui, et al. Rising of Da Hinggan Mts in Mesozoic: A Possible Mechanism of Intracontinental Orogeny [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2005, 21(3): 789 - 794.
- [55] 李猛兴, 王丽娟, 张利明, 等. 兴安地块南段霍布林岩体成因及其对蒙古—鄂霍茨克洋演化的启示[J]. *地质通报*, 2023, 42(9): 1541 - 1555.
- Li Mengxing, Wang Lijuan, Zhang Liming, et al. Petrogenesis of the Huobulin Granite in the Southern Part of the Xing'an Block and Its Insight into the Evolution of the Mongol-Okhotsk Ocean [J]. *Geological Bulletin of China*, 2023, 42(9): 1541 - 1555.
- [56] 宋维民, 王建恒, 杨佳林, 等. 蒙古—鄂霍茨克洋闭合时限: 来自大兴安岭突泉地区下白垩统与下伏地质体之间角度不整合关系的约束[J]. *地质通报*, 2022, 41(7): 1202 - 1213.
- Song Weimin, Wang Jianheng, Yang Jialin, et al. Closure Time of the Mongolia-Okhotsk Ocean: Constraint of Angular Unconformity Between the Lower Cretaceous and the Lower Geological Body in the Tuquan Area of the Greater Hinggan Mountains [J]. *Geological Bulletin of China*, 2022, 41(7): 1202 - 1213.
- [57] Pearce J A. A User's Guide to Basalt Discrimination Diagrams[J]. *Geological Society Special Publication*, 1996, 12: 79 - 133.
- [58] 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: 956 - 983.