

DOI: 10.19657/j.geoscience.1000-8527.2021.066

大兴安岭中段碾子山地区晚三叠世埃达克质侵入岩的发现及其地质意义

符安宗¹, 杨文鹏¹, 刘渊¹, 赵寒冬¹, 王贵鹏¹,
石国明¹, 李金明¹, 邓昌州²

(1. 黑龙江省自然资源调查院, 黑龙江 哈尔滨 150036;

2. 中国科学院地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550081)

摘要: 为加深对大兴安岭中段早中生代构造背景的认识, 选取碾子山地区早中生代花岗岩开展岩石学、年代学和元素地球化学研究。结果表明, 该地区早中生代花岗岩岩石组合为正长花岗岩和石英二长岩, 其 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 225.6~228.9 Ma, 形成于晚三叠世。二者的地球化学特征与埃达克岩的地球化学特征非常类似, 如高 Al₂O₃、Sr 含量和 Sr/Y、La/Yb 比值, 低 Y、Yb 含量, 亏损重稀土, 弱负铕异常等。但是二者也存在明显的差别: 石英二长岩比正长花岗岩具有更高的 MgO、LREE、Cr、V、Sr 含量和 Sr/Y、K/Rb 比值。这种差别可能反映二者成因上的不同: 正长花岗岩可能由增厚下地壳的部分熔融形成, 而石英二长岩可能由拆沉下地壳部分熔融形成。结合前人发表的相关资料, 认为碾子山地区晚三叠世埃达克质侵入岩是在兴安地块与松嫩地块碰撞造山的挤压背景下形成的, 其形成受蒙古-鄂霍茨克洋板块南向俯冲的影响。拆沉下地壳部分熔融形成的埃达克质侵入岩的发现, 显示碾子山及其周边地区具有寻找斑岩型铜钼矿的潜力。

关键词: 埃达克岩; 锆石 U-Pb 年龄; 地球化学; 蒙古-鄂霍茨克洋; 碾子山地区

中图分类号: P588.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8527(2022)01-0266-16

Discovery of Late Triassic Adakitic Rocks at Nianzishan in the Central Great Xing'an Range and Its Geological Significance

FU Anzong¹, YANG Wenpeng¹, LIU Yuan¹, ZHAO Handong¹, WANG Guipeng¹,
SHI Guoming¹, LI Jinming¹, DENG Changzhou²

(1. Heilongjiang Institute of Natural Resources Survey, Harbin, Heilongjiang 150036, China;

2. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang, Guizhou 550081, China)

Abstract: Geochronology and geochemistry of the Early Mesozoic Nianzishan granites were studied to constrain the tectonic evolution in the Central Great Xing'an Range. The studied syenogranite and quartz monzonite samples show LA-ICP-MS zircon U-Pb ages of 225.6–228.9 Ma, indicating that they were both emplaced in the Late Triassic. Both rock types have similar adakitic geochemical, including high Al₂O₃ and Sr contents and Sr/Y and La/Yb ratios, low Y and Yb contents, HREE depletions and slightly negative Eu anomalies. However, the syenogranite has higher MgO, LREE, Cr, V, and Sr contents, and higher Sr/Y and K/Rb ratios than the

收稿日期: 2020-09-29; 改回日期: 2021-04-22; 责任编辑: 潘令枝。

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20190039-02); 黑龙江省自然资源厅公益类资助项目(DZKC-GY-2018001)。

作者简介: 符安宗, 男, 工程师, 硕士, 1986年出生, 地质工程专业, 从事区域地质矿产调查与研究工作。

Email: 116861157@qq.com。

引用格式: 符安宗, 杨文鹏, 刘渊, 等. 大兴安岭中段碾子山地区晚三叠世埃达克质侵入岩的发现及其地质意义 [J]. 现代地质, 2022, 36(1): 266–281. DOI: 10.19657/j.geoscience.1000-8527.2021.066.

FU Anzong, YANG Wenpeng, LIU Yuan, et al. Discovery of Late Triassic Adakitic Rocks at Nianzishan in the Central Great Xing'an Range and its Geological Significance [J]. Geoscience, 2022, 36(1): 266–281. DOI: 10.19657/j.geoscience.1000-8527.2021.066.

quartz monzonite. Such differences are likely caused by their different petrogenesis: partial melting of thickened lower crust for the syenogranite and partial melting of a delaminated lower crust for the quartz monzonite. Combined with previous studies, we conclude that the Late Triassic Adakitic rocks at Nianzishan were formed in a compressional orogenic setting related to the collision of the Xing'an and Songnen blocks, which was overprinted by the south-dipping subduction of the Mongol-Okhotsk Ocean. The discovery of adakitic rocks by melting of delaminated lower crust indicates the potential for exploration of porphyry Cu-Mo deposits in the Nianzishan and adjacent area.

Key words: Adakite; zircon U-Pb age; geochemistry; Mongol-Okhotsk Ocean; Nianzishan area

0 引言

大兴安岭位于中亚造山带东段,为古亚洲洋、环太平洋、蒙古-鄂霍茨克洋三大构造域的复合部位,经历了复杂的地质构造演化。大兴安岭地区古亚洲洋于早-中三叠世最终闭合^[1-4],并在中三叠世之后进入环太平洋构造体系、蒙古-鄂霍茨克洋构造体系的演化阶段^[5]。受此影响,早三叠世以来大兴安岭地区形成了大规模的构造-岩浆活动。大兴安岭三叠纪岩浆活动记录了古亚洲洋碰撞闭合和蒙古-鄂霍茨克洋板块俯冲事件,近年来受到研究人员的广泛关注,并逐渐成为研究热点。大兴安岭地区三叠纪火山岩较少,而三叠纪花岗岩分布广泛,因此多数学者以花岗岩为研究对象重建三叠纪的构造演化^[6-19]。然而,在晚三叠世花岗岩所形成的大陆动力学背景方面仍然存在争议。一些学者认为晚三叠世侵入岩组合为 I 型花岗岩和 A 型花岗岩,是古亚洲洋闭合后岩石圈伸展作用的产物^[8-14]。而部分研究人员认为晚三叠世侵入岩为 I 型花岗岩和双峰式侵入岩,形成于活动大陆边缘环境,是蒙古-鄂霍茨克洋板块俯冲作用的产物^[15-19]。可见,大兴安岭地区早中生代的构造演化还有待深入研究。

鉴于此,本文在 1:5 万碾子山幅区域地质调查工作的基础上,对碾子山地区早中生代花岗岩开展岩石学、年代学和元素地球化学研究,探讨其形成时代、岩石成因和地质意义,为大兴安岭地区早中生代的构造演化研究提供依据。

1 区域地质概况及岩相学特征

碾子山地区位于大兴安岭中段,大地构造单元在古生代属中亚造山带东侧兴蒙造山带、贺根山-黑河构造带,毗邻兴安岛弧(图 1(a)),在中生代属滨太平洋构造域的大兴安岭 NNE 向中央隆

起带与松辽盆地的过渡区^[20-21]。研究区夹于额尔古纳-兴安地块和松嫩地块之间,受贺根山-黑河构造带形成演化控制,中生代岩浆作用强烈。

碾子山地区出露的地层主要为中生代白垩纪火山-沉积地层,零星出露少量的晚古生代二叠纪地层(图 1(b))。其中白垩纪火山-沉积地层包括下白垩统龙江组中酸性-中性火山岩-沉积碎屑岩组合、光华组酸性火山岩夹沉积碎屑岩组合、甘河组中基性-基性火山岩组合;晚古生代二叠纪地层为中二叠统哲斯组半深海-浅海相砂板岩组合。区内侵入岩以中生代侵入岩为主,古生代侵入岩零星出露,大体可划分为早石炭世、晚三叠世和早白垩世三期(图 1(b))。其中以晚三叠世侵入岩分布最广、面积最大,呈近北东向展布,其岩石组合包括正长花岗岩、石英二长岩,侵入中二叠统哲斯组和早石炭世花岗岩中,被下白垩统火山沉积地层不整合覆盖并有早白垩世碱性岩体侵入。

正长花岗岩(图 2(a)-(c)),呈浅肉红色-肉红色,以中细粒为主,具半自形粒状结构,块状构造。矿物成分由钾长石(约 50%)、斜长石(约 20%)、石英(约 28%)和少量黑云母(约 2%)组成,粒径 0.2~5.0 mm。钾长石呈半自形板状,少数呈它形粒状,负低突起,卡斯巴双晶、简单双晶,条纹构造发育,晶面裂纹可见,具轻微高岭土化;斜长石呈半自形板状,聚片双晶,弱绢云母化;石英呈它形粒状、微碎裂,波状消光;黑云母呈褐色片状、黏土化。副矿物为磁铁矿、磷灰石、榍石。

石英二长岩(图 2(d)-(f)),呈灰白色,以中细粒为主,具半自形粒状结构,块状构造,手标本上可见暗色矿物呈定向排列。矿物成分由斜长石(约 43%)、钾长石(约 35%)、石英(约 15%)、少量角闪石(约 5%)和黑云母(约 2%)组

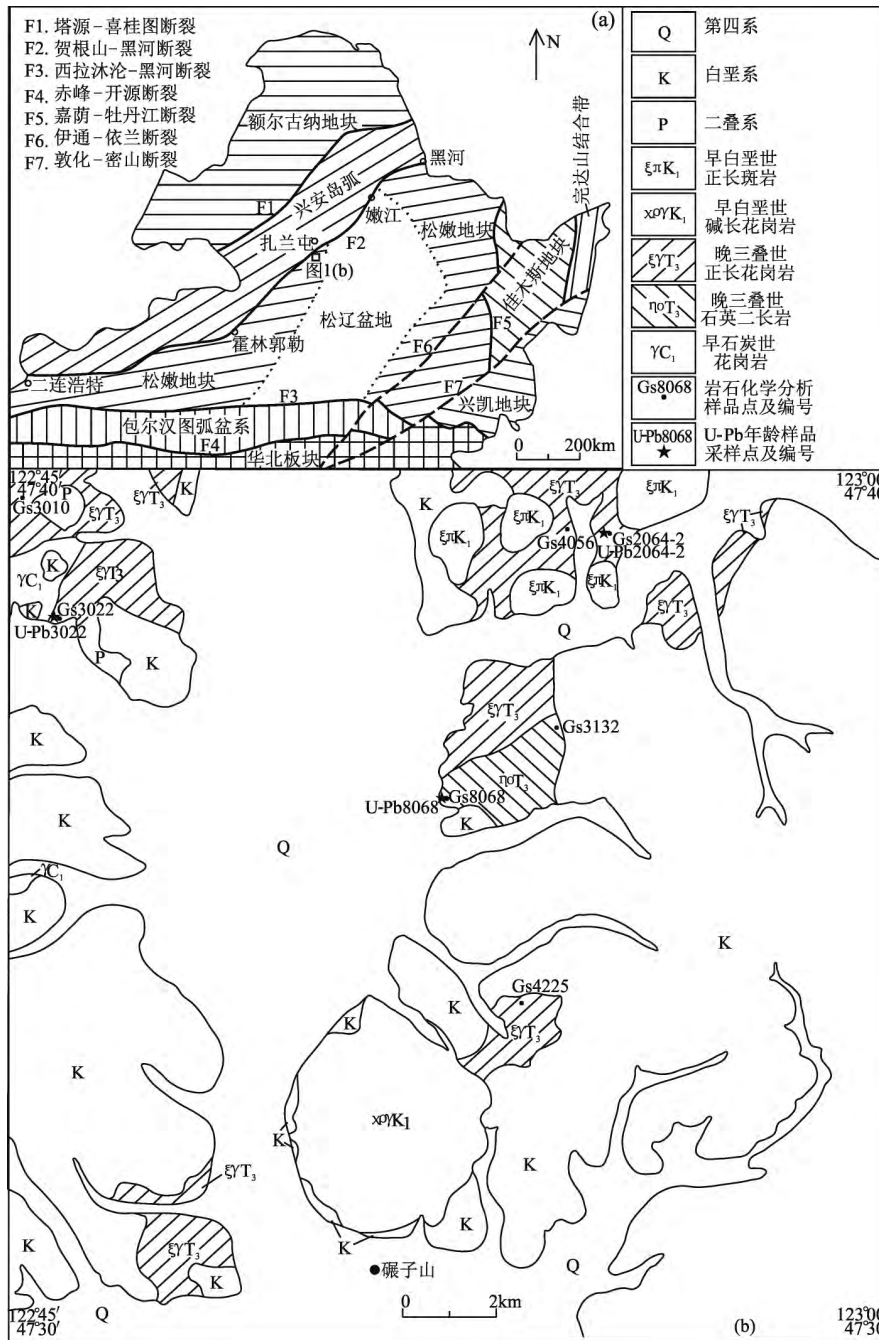


图1 大兴安岭中段大地构造简图((a), 据文献 [22 - 23] 修改)和碾子山地区地质简图(b)

Fig. 1 Tectonic map of the central Great Xing'an Range ((a), modified after refs. [22 - 23]) and geological map of the Nianzishan area (b)

成, 粒径 0.2 ~ 5.0 mm。斜长石呈半自形板状、它形粒状, 聚片双晶, 弱绢云母化; 钾长石呈半自形板状、它形粒状, 负低突起, 干涉色一级灰白, 卡斯巴双晶、简单双晶, 条纹构造发育, 具轻微高岭土化; 石英呈它形粒状, 表面光滑, 波状消光; 角闪石呈不规则柱状, 略呈定向分布; 黑云母呈片状; 副矿物为磷灰石、磁铁矿、榍石。

正长花岗岩中可见钾长石晶面裂纹, 石英微

碎裂, 而石英二长岩中矿物晶面未见明显裂纹, 反映前者成岩后受应力作用, 后者未受该应力影响, 说明正长花岗岩应在石英二长岩之前结晶成岩。石英二长岩中深色矿物呈定向排列, 可能为原生片麻理构造, 是流动的岩浆对围岩强烈挤压而产生的, 反映正长花岗岩为石英二长岩的围岩。这与正常的岩浆岩侵位系列相反, 说明正长花岗岩和石英二长岩可能是源于不同岩浆源。

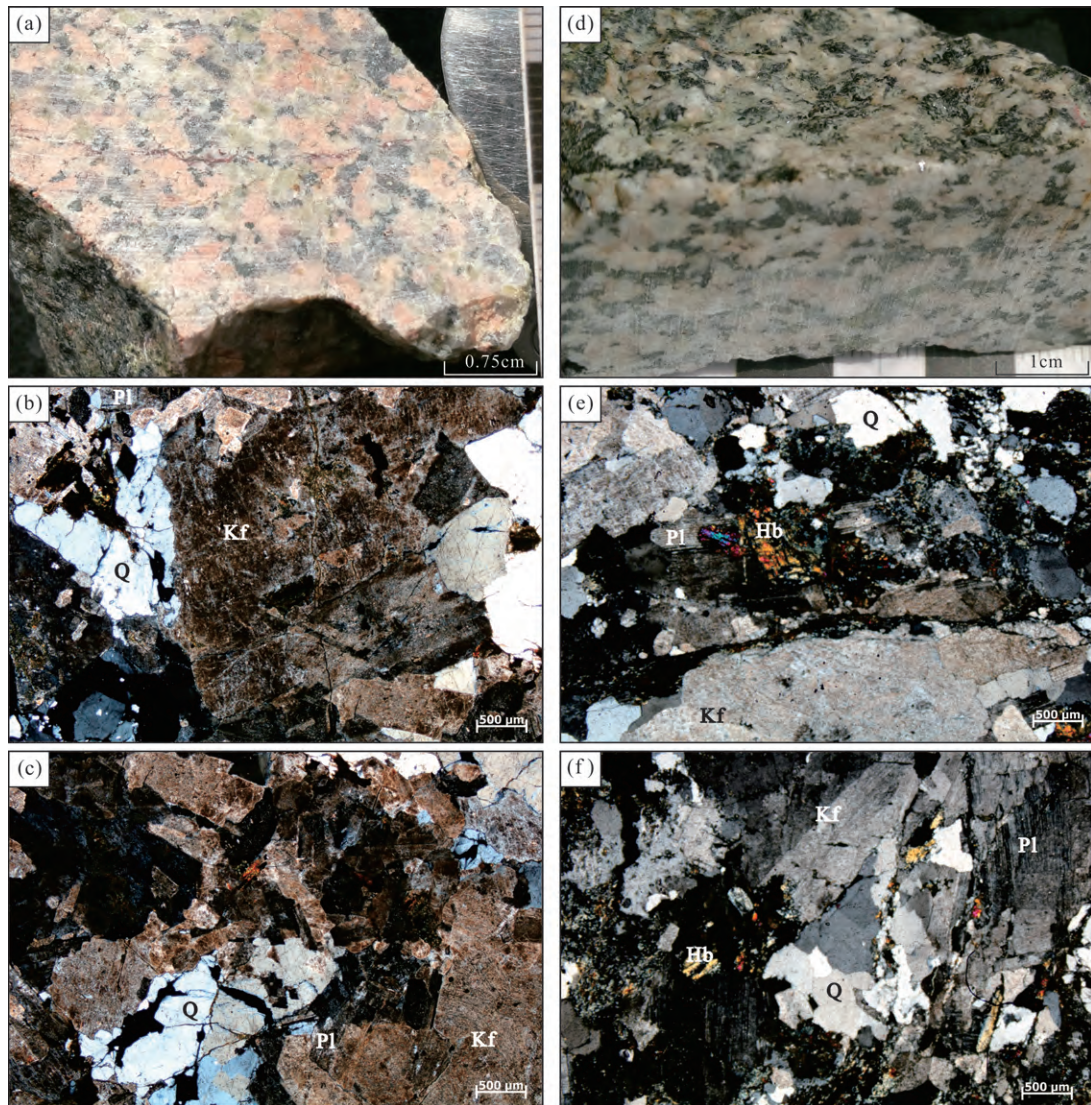


图 2 碾子山地区晚三叠世花岗岩类的标本及显微照片

Fig. 2 Specimen and thin-section micrographs of the Late Triassic Nianzishan granites

(a) — (c) 中细粒正长花岗岩标本照片及显微照片 (正交偏光); (d) — (f) 中细粒石英二长岩标本照片及显微照片 (正交偏光)。Pl. 斜长石; Kf. 钾长石; Q. 石英; Hb. 角闪石

2 样品采集及测试方法

本次工作在研究区内不同出露地段选择代表性岩石进行样品采集, 其中全岩地球化学样品包括 5 件正长花岗岩和 2 件石英二长岩, 锆石 U-Pb 同位素样品包括 2 件正长花岗岩和 1 件石英二长岩。样品较为新鲜, 采样位置见图 1(b) 和表 1。

LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄样品的锆石分选及制靶工作由河北省区域地质矿产调查研究所实验室完成。以常规方法将样品粉碎, 并用浮选、电磁选等方法进行分选, 在双目镜下挑选裂纹较少、晶形较好的锆石, 然后将锆石粘贴在环氧树脂表面, 打磨抛光后制成样靶。锆石的透射光、

反射光、阴极发光 (CL) 图像采集及 U-Pb 同位素分析在北京科融恩科技有限责任公司完成。锆石 U-Pb 分析在北京科融恩科技有限责任公司 LA-MC-ICP-MS 仪器上完成。利用 193 nm 激光器对锆石进行剥蚀, 激光剥蚀束斑直径为 35 μm, 能量密度为 13~14 J/cm², 频率为 8~10 Hz。实验原理和测试方法详见参考文献 [24]。锆石定年外标采用 91500 标准锆石。采用中国地质大学刘勇胜等研发的 ICPMSDataCal 程序和 Ludwig 的 Iso-plot 程序进行数据处理、年龄计算和谐和图的绘制。采用 ²⁰⁸Pb 校正法对普通铅进行校正, 利用 NIST612 玻璃标样作为外标计算锆石样品的 Pb、U、Th 含量。

表1 碾子山地区晚三叠世侵入岩样品信息

Table 1 Sample information of Late Triassic intrusive rocks at Nianzishan

序号	样品编号	岩性	取样坐标	主要矿物组合
1	U-Pb3022	中细粒正长花岗岩	N47°38'17.2", E122°45'46.1"	
2	Gs3022			
3	U-Pb2064-2	中细粒正长花岗岩	N47°39'16.5", E122°55'07.7"	石英+钾长石+斜长石+黑云母
4	Gs2064-2			
5	Gs3010		N47°39'41.4", E122°45'14.5"	
6	Gs4056	中细粒正长花岗岩	N47°39'22.2", E122°54'29.4"	
7	Gs4225			
8	U-Pb8068	中细粒石英二长岩	N47°36'12.9", E122°52'22.4"	斜长石+钾长石+石英+角闪石+黑云母
9	Gs8068			
10	Gs3132	中细粒石英二长岩	N47°36'58.6", E122°54'22.8"	

注: U-Pb3022、U-Pb2064-2和U-Pb8068为U-Pb同位素样品,其余为全岩地球化学样品。

样品的岩石地球化学分析在黑龙江省地质矿产测试研究所完成。主量元素采用X射线荧光光谱仪(XRF)完成,分析精度优于5%。微量元素和稀土元素采用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)测定,分析精度优于10%。分析流程详见参考文献[25]。

3 测试结果

3.1 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄

本文锆石U-Pb测定结果列于表2。

样品U-Pb3022、U-Pb2064-2为正长花岗岩,阴极发光图像(图3)显示锆石均为自形晶,以柱状为主,大小多在70~150 μm之间,长宽比在4:1~2:1之间,内部结构特征清晰,发育明显的岩浆韵律环带结构;且锆石Th/U比值介于0.43~1.71之间,均大于0.4,表现为典型岩浆成因锆石特征^[26]。样品U-Pb3022一共分析20个锆石颗粒,其中有19颗锆石的分析结果位于U-Pb谐和线上及其附近(图4(a)),²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄为222.2~248.8 Ma,²⁰⁶Pb/²³⁸U加权平均年龄为(228.9±3.3) Ma(*n*=19, MSWD=0.59)。样品U-Pb2064-2一共分析20个锆石颗粒,其中有15颗锆石的分析结果位于U-Pb谐和线上及其附近(图4(b)),²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄为216.6~249.1 Ma,²⁰⁶Pb/²³⁸U加权平均年龄为(225.6±2.8) Ma(*n*=15, MSWD=1.3)。两个年龄在误差范围内一致,反映了这两个正长花岗岩的形成时代相近,皆为晚三叠世。

样品U-Pb8068为石英二长岩,阴极发光图像(图3)显示锆石均为自形晶,为短柱状、等轴状,大小多在70~120 μm之间,长宽比在2:1

~1:1之间,内部结构特征清晰,发育明显的生长振荡环带,且锆石Th/U比值介于0.60~1.89之间,均大于0.4,具有典型的岩浆成因锆石特征^[26]。该样品一共分析20个锆石颗粒,其中有19颗锆石的分析结果位于U-Pb谐和线上及其附近(图5),²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄为225.4~231.9 Ma,²⁰⁶Pb/²³⁸U加权平均年龄为(228.2±2.1) Ma(*n*=19, MSWD=0.15),反映该石英二长岩的形成时代为晚三叠世。

3.2 全岩地球化学特征

研究样品全岩地球化学分析结果列于表3。

3.2.1 主量元素特征

正长花岗岩样品的SiO₂含量为70.78%~72.24%,TiO₂含量为0.26%~0.31%,Al₂O₃含量为13.14%~15.11%,MgO含量为0.35%~0.60%,Mg[#]为26.18~36.53,Na₂O含量为3.84%~4.48%,K₂O含量为3.91%~4.06%,Na₂O/K₂O=0.98~1.13,A/CNK=0.94~1.28,在TAS图解上落入亚碱性花岗岩区域(图6(a));石英二长岩样品的SiO₂含量为62.68%~64.84%,TiO₂含量为0.60%~0.66%,Al₂O₃含量为15.54%~15.65%,MgO含量为1.77%~2.72%,Mg[#]=50.89~56.81,Na₂O含量为4.51%~4.71%,K₂O含量为3.09%~3.15%,Na₂O/K₂O=1.46~1.5,A/CNK=0.93~1.28,在TAS图解上落入亚碱性石英二长岩区域(图6(a))。正长花岗岩和石英二长岩在SiO₂-K₂O图解(图6(b))上均落在高钾钙碱性系列区。

3.2.2 微量元素特征

正长花岗岩样品的稀土元素总量REE=104.93

表 2 碾子山地区晚三叠世侵入岩锆石 U-Pb 年龄测试结果
Table 2 Zircon U-Pb dating results of the Late Triassic Nianzishan intrusive rocks

编号	点号	含量/ 10^{-6}			Th/U	同位素比值						同位素年龄/Ma						
		Pb	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	
I	1	14.0	139.6	187.1	0.75	0.050 9	0.001 4	0.252 4	0.009 2	0.036 0	0.001 2	234.4	62.0	228.5	7.5	227.9	7.3	
	2	23.8	226.3	336.1	0.67	0.049 9	0.001 2	0.245 8	0.008 5	0.035 8	0.001 2	187.8	56.3	223.2	6.9	226.5	7.2	
	3	42.7	400.3	600.7	0.67	0.049 5	0.001 1	0.246 5	0.008 2	0.036 1	0.001 2	172.8	50.9	223.8	6.6	228.6	7.3	
	4	58.5	466.5	868.4	0.54	0.052 3	0.001 1	0.266 1	0.008 7	0.036 9	0.001 2	296.3	47.8	239.6	6.9	233.8	7.4	
	5	111.5	1053.1	1086.0	0.97	0.049 0	0.001 0	0.266 1	0.008 6	0.039 4	0.001 3	149.9	48.3	239.6	6.9	248.8	7.9	
	6	48.4	498.4	517.6	0.96	0.049 9	0.001 1	0.247 0	0.008 2	0.035 9	0.001 2	191.9	51.7	224.1	6.7	227.2	7.2	
	7	43.7	399.6	609.1	0.66	0.049 9	0.001 1	0.250 3	0.008 3	0.036 4	0.001 2	188.2	50.7	226.8	6.7	230.6	7.3	
	8	50.8	478.4	749.2	0.64	0.048 9	0.001 2	0.243 4	0.008 6	0.036 1	0.001 2	143.6	58.3	221.2	7.0	228.6	7.3	
	9	28.1	246.8	449.4	0.55	0.048 7	0.001 2	0.242 1	0.008 2	0.036 0	0.001 2	135.5	54.3	220.1	6.7	228.1	7.2	
	10	23.5	216.1	323.8	0.67	0.050 7	0.001 3	0.249 7	0.008 9	0.035 7	0.001 2	228.5	60.0	226.4	7.3	226.1	7.2	
	11	25.0	337.0	304.8	1.11	0.050 6	0.001 2	0.248 0	0.008 5	0.035 5	0.001 1	224.6	54.5	225.0	6.9	225.0	7.1	
	12	9.4	129.2	160.2	0.81	0.051 8	0.001 4	0.251 8	0.009 2	0.035 3	0.001 1	275.3	61.4	228.0	7.4	223.5	7.1	
	13	29.7	381.0	345.9	1.10	0.049 7	0.001 2	0.255 2	0.008 6	0.037 2	0.001 2	182.8	53.5	230.8	7.0	235.6	7.4	
	15	14.8	166.6	254.5	0.65	0.051 5	0.001 3	0.256 6	0.008 8	0.036 1	0.001 2	263.7	55.4	231.9	7.1	228.8	7.2	
	16	11.2	144.5	174.5	0.83	0.052 2	0.001 8	0.252 6	0.010 6	0.035 1	0.001 2	295.8	77.8	228.7	8.6	222.2	7.2	
	17	26.7	250.3	575.4	0.43	0.050 8	0.001 1	0.255 1	0.008 4	0.036 4	0.001 2	231.5	50.7	230.7	6.8	230.6	7.2	
	18	16.1	167.1	338.5	0.49	0.052 2	0.001 2	0.254 7	0.008 6	0.035 4	0.001 1	293.3	52.6	230.4	6.9	224.3	7.1	
	19	14.1	166.2	213.7	0.78	0.052 2	0.001 4	0.256 4	0.009 2	0.035 6	0.001 2	293.5	59.6	231.8	7.4	225.8	7.2	
	20	40.3	484.5	542.7	0.89	0.049 9	0.001 2	0.250 3	0.008 4	0.036 4	0.001 2	190.0	52.9	226.8	6.8	230.5	7.2	
	II	3	13.9	247.2	261.9	0.94	0.049 9	0.002 1	0.244 4	0.010 1	0.035 5	0.000 8	191.6	94.8	222.0	8.2	224.9	4.7
4		19.3	255.2	308.8	0.83	0.053 5	0.001 5	0.261 3	0.007 2	0.035 4	0.000 7	350.5	62.0	235.7	5.8	224.4	4.4	
5		8.2	108.8	145.1	0.75	0.051 8	0.001 7	0.251 9	0.008 1	0.035 3	0.000 7	277.0	73.5	228.1	6.6	223.4	4.5	
6		20.6	299.9	435.2	0.69	0.050 9	0.001 2	0.247 7	0.005 9	0.035 3	0.000 7	234.6	54.8	224.7	4.8	223.7	4.4	
7		33.7	564.1	714.2	0.79	0.051 6	0.001 2	0.251 6	0.005 8	0.035 3	0.000 7	269.2	53.2	227.9	4.7	223.9	4.4	
8		18.8	316.8	346.4	0.91	0.054 5	0.001 5	0.264 2	0.007 2	0.035 2	0.000 7	390.4	61.2	238.0	5.8	222.9	4.4	
9		10.6	178.6	201.7	0.89	0.051 0	0.001 8	0.261 3	0.009 1	0.037 2	0.000 8	239.7	79.8	235.7	7.3	235.3	4.8	
10		40.4	818.4	757.0	1.08	0.051 6	0.001 7	0.243 2	0.007 7	0.034 2	0.000 7	268.3	72.7	221.0	6.3	216.6	4.4	
13		48.3	1341.9	783.5	1.71	0.052 3	0.001 9	0.257 4	0.009 3	0.035 7	0.000 7	298.1	81.6	232.6	7.5	226.2	4.6	
14		9.2	128.2	195.9	0.65	0.051 6	0.001 5	0.251 7	0.007 3	0.035 4	0.000 7	265.5	66.5	228.0	5.9	224.3	4.5	
15		10.6	164.7	149.6	1.10	0.054 1	0.002 3	0.264 3	0.011 0	0.035 5	0.000 8	372.9	92.0	238.1	8.8	224.7	4.8	
16		7.8	149.8	157.7	0.95	0.052 6	0.001 6	0.256 2	0.007 8	0.035 4	0.000 7	309.7	68.9	231.6	6.3	224.0	4.5	
17		12.2	155.7	232.7	0.67	0.049 7	0.001 5	0.245 9	0.007 4	0.035 9	0.000 7	181.4	69.9	223.2	6.0	227.2	4.6	
18		8.2	136.0	156.5	0.87	0.049 7	0.001 6	0.258 5	0.008 0	0.037 7	0.000 8	180.5	71.4	233.5	6.4	238.8	4.8	
20		7.3	113.1	154.5	0.73	0.052 4	0.001 9	0.259 8	0.009 0	0.036 0	0.000 8	301.7	78.6	234.5	7.3	227.8	4.7	
III		1	4.3	74.6	86.0	0.87	0.049 9	0.002 0	0.247 8	0.009 5	0.036 0	0.000 7	189.0	88.9	224.8	7.7	228.2	4.6
		2	8.9	115.2	184.5	0.62	0.048 2	0.001 6	0.243 2	0.007 6	0.036 6	0.000 7	107.1	74.2	221.1	6.2	231.9	4.6
		3	3.7	52.9	75.0	0.71	0.050 0	0.002 1	0.250 5	0.010 4	0.036 3	0.000 8	195.6	95.7	227.0	8.4	230.0	4.7
		4	3.5	56.5	70.4	0.80	0.051 0	0.002 7	0.254 6	0.013 2	0.036 3	0.000 8	238.4	117.6	230.3	10.7	229.5	4.9
		5	4.4	75.9	85.4	0.89	0.052 6	0.002 1	0.262 1	0.010 3	0.036 1	0.000 8	312.7	89.4	236.3	8.3	228.7	4.7
	6	4.2	67.9	84.3	0.81	0.049 5	0.002 1	0.242 6	0.009 9	0.035 6	0.000 7	169.6	94.6	220.6	8.1	225.4	4.6	
	7	4.0	59.9	80.4	0.75	0.053 6	0.004 7	0.265 4	0.022 7	0.035 9	0.001 0	352.8	186.1	239.0	18.2	227.6	6.1	

注: 编号 I 为样品 U-Pb3022, 正长花岗岩; 编号 II 为样品 U-Pb2064-2, 正长花岗岩; 编号 III 为样品 U-Pb8068, 石英二长岩。

(续)表2 碾子山地区晚三叠世侵入岩锆石U-Pb年龄测试结果
(Continued) Table 2 Zircon U-Pb dating results of the Late Triassic Nianzishan intrusive rocks

编号	点号	含量/ 10^{-6}			Th/U	同位素比值						同位素年龄/Ma					
		Pb	Th	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
III	9	3.5	49.2	72.5	0.68	0.049 7	0.002 1	0.244 3	0.010 0	0.035 7	0.000 7	180.1	94.4	221.9	8.1	225.9	4.6
	10	4.4	73.8	85.8	0.86	0.050 4	0.001 9	0.250 9	0.009 4	0.036 1	0.000 7	215.3	86.7	227.3	7.6	228.5	4.6
	11	4.0	57.6	83.8	0.69	0.051 3	0.002 2	0.252 2	0.010 4	0.035 7	0.000 7	252.3	94.4	228.3	8.5	226.0	4.6
	12	4.1	66.5	81.3	0.82	0.053 7	0.002 1	0.265 4	0.010 3	0.035 8	0.000 7	359.4	86.9	239.0	8.2	227.0	4.6
	13	3.0	47.1	58.5	0.80	0.052 8	0.002 5	0.260 8	0.012 0	0.035 8	0.000 8	319.3	103.2	235.3	9.6	227.0	4.8
	14	4.2	65.0	86.4	0.75	0.052 3	0.002 2	0.257 1	0.010 3	0.035 7	0.000 7	297.1	91.2	232.3	8.3	226.0	4.6
	15	3.4	49.5	68.7	0.72	0.050 3	0.002 1	0.252 0	0.010 4	0.036 4	0.000 8	206.7	95.0	228.2	8.4	230.3	4.7
	16	4.0	61.3	81.1	0.76	0.049 2	0.002 1	0.243 5	0.009 9	0.035 9	0.000 7	157.1	94.6	221.3	8.1	227.3	4.6
	17	3.2	50.5	64.0	0.79	0.052 5	0.002 3	0.262 1	0.011 2	0.036 2	0.000 8	305.9	96.4	236.4	9.0	229.4	4.7
	18	4.0	51.3	83.8	0.61	0.050 1	0.002 0	0.250 0	0.009 6	0.036 2	0.000 8	198.3	88.9	226.5	7.8	229.3	4.6
	19	3.0	37.6	62.3	0.60	0.052 4	0.004 1	0.258 3	0.019 6	0.035 7	0.000 9	303.6	167.3	233.3	15.8	226.3	5.6
20	4.7	72.6	94.0	0.77	0.051 0	0.001 9	0.251 8	0.009 2	0.035 8	0.000 7	240.0	84.0	228.0	7.5	226.8	4.6	

注: 编号 I 为样品 U-Pb3022, 正长花岗岩; 编号 II 为样品 U-Pb2064-2, 正长花岗岩; 编号 III 为样品 U-Pb8068, 石英二长岩。

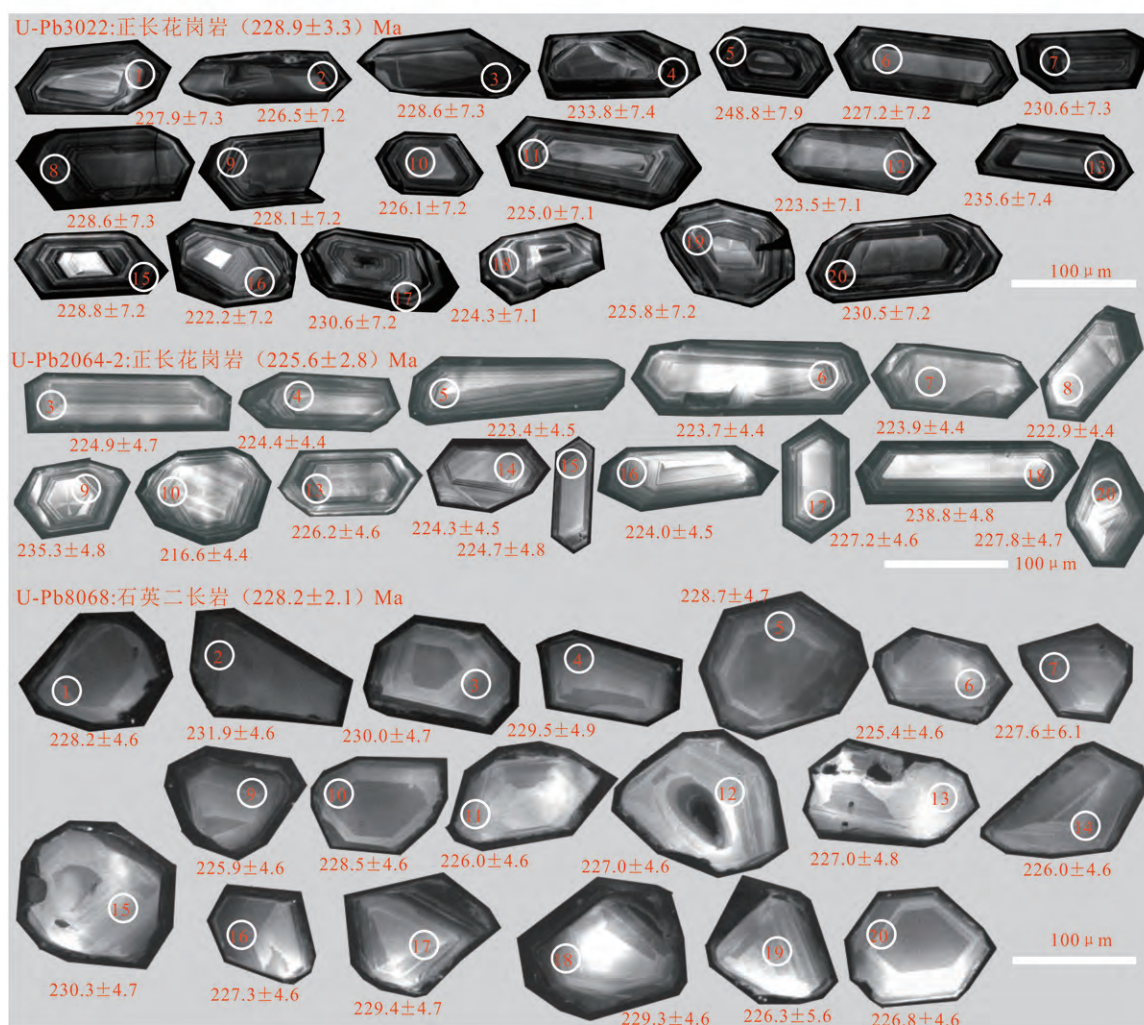


图3 碾子山地区晚三叠世侵入岩锆石阴极发光图像和年龄(Ma)

Fig. 3 Zircon CL images and ages (Ma) of the Late Triassic Nianzishan intrusive rocks

表 3 碾子山地区晚三叠世侵入岩主量元素(%)、微量元素和稀土元素(10^{-6})分析结果Table 3 Compositions of major elements (%), trace elements and REEs (10^{-6}) of the Late Triassic Nianzishan intrusive rocks

样品编号	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	烧失量	总量	A/CNK
Gs3022	正长花岗岩	71.12	0.28	14.69	1.72	0.53	0.04	0.41	0.89	4.48	3.98	0.09	1.18	99.41	1.10
Gs3010	正长花岗岩	71.34	0.26	15.11	1.82	0.43	0.04	0.35	0.47	4.05	4.00	0.09	1.48	99.44	1.28
Gs2064-2	正长花岗岩	70.78	0.29	14.42	1.37	0.95	0.04	0.60	1.16	3.84	3.91	0.08	1.76	99.20	1.14
Gs4056	正长花岗岩	71.76	0.30	14.33	1.71	0.71	0.05	0.60	0.67	4.25	4.06	0.09	1.12	99.65	1.14
Gs4225	正长花岗岩	72.24	0.31	13.14	1.67	0.72	0.07	0.43	1.86	3.86	3.93	0.09	1.42	99.74	0.94
Gs3132	石英二长岩	64.84	0.60	15.54	3.38	0.53	0.06	1.77	2.43	4.71	3.15	0.18	2.46	99.65	1.00
Gs8068	石英二长岩	62.68	0.66	15.65	1.54	2.95	0.07	2.72	3.33	4.51	3.09	0.2	2.22	99.62	0.93
样品编号	岩性	Na ₂ O/K ₂ O	Mg [#]	Sc	V	Cr	Ga	Rb	Sr	Y	Nb	Cs	Ba	La	Ce
Gs3022	正长花岗岩	1.13	29.26	4.28	28.6	4.50	16.50	111	410.0	9.6	8.9	1.87	857	23.20	43.50
Gs3010	正长花岗岩	1.01	26.18	4.47	28.5	6.80	18.60	130	239.0	11.3	10.3	5.25	729	23.10	46.30
Gs2064-2	正长花岗岩	0.98	36.53	4.24	25.9	6.90	17.30	132	269.0	10.7	10.5	5.39	687	29.40	54.80
Gs4056	正长花岗岩	1.05	35.96	3.77	33.5	7.46	16.84	121	426.2	13.0	9.7	1.87	916	18.75	47.08
Gs4225	正长花岗岩	0.98	28.86	3.47	28.3	7.36	15.59	67	248.6	14.4	12.8	0.80	764	14.91	38.39
Gs3132	石英二长岩	1.50	50.89	9.52	87.0	70.38	20.09	74	827.9	14.20	7.9	2.26	908	26.54	62.67
Gs8068	石英二长岩	1.46	56.81	9.48	96.2	79.84	18.98	59	823.0	15.3	8.2	1.68	888	24.62	57.62
样品编号	岩性	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Zr	Hf
Gs3022	正长花岗岩	4.75	17.60	3.12	0.74	2.27	0.37	1.82	0.36	0.92	0.17	0.94	0.18	122	5.7
Gs3010	正长花岗岩	5.04	18.70	3.21	0.70	2.39	0.35	1.98	0.40	1.18	0.19	1.25	0.21	153	6.0
Gs2064-2	正长花岗岩	5.62	20.50	3.47	0.76	2.50	0.37	2.04	0.38	1.04	0.17	1.08	0.17	130	5.1
Gs4056	正长花岗岩	4.76	17.79	2.98	0.64	2.44	0.35	1.90	0.39	0.97	0.14	1.03	0.15	150	5.2
Gs4225	正长花岗岩	4.93	18.96	3.37	0.70	2.77	0.42	2.41	0.50	1.30	0.20	1.46	0.21	168	4.1
Gs3132	石英二长岩	7.48	29.71	5.06	1.19	3.96	0.51	2.65	0.53	1.31	0.19	1.36	0.20	179	5.2
Gs8068	石英二长岩	6.86	27.98	4.87	1.17	3.90	0.52	2.75	0.56	1.41	0.21	1.49	0.22	184	5.5
样品编号	岩性	Ta	Th	U	δ Eu	LREE	HREE	LREE/HREE	REE	Sr/Y	La/Yb	K/Rb	(La/Yb) _N		
Gs3022	正长花岗岩	0.87	14.19	1.24	0.81	92.9	7.03	13.21	109.49	42.93	24.68	297.66	16.63		
Gs3010	正长花岗岩	0.94	15.37	1.56	0.74	97.1	7.95	12.21	116.30	21.15	18.48	255.43	12.46		
Gs2064-2	正长花岗岩	0.90	16.32	1.65	0.75	115.0	7.75	14.84	133.00	25.14	27.22	245.90	18.34		
Gs4056	正长花岗岩	1.36	14.77	2.08	0.70	92.0	7.37	12.48	112.37	32.78	18.20	278.55	12.27		
Gs4225	正长花岗岩	1.04	7.05	2.41	0.68	81.3	9.27	8.77	104.93	17.26	10.21	486.94	6.88		
Gs3132	石英二长岩	0.49	11.90	3.01	0.79	133.0	10.70	12.43	157.56	58.30	19.51	353.38	13.15		
Gs8068	石英二长岩	0.59	8.12	2.55	0.80	123.0	11.10	11.08	149.48	53.79	16.52	434.78	11.14		

注: $Mg^{\#} = 100 \times Mg^{2+} / (Mg^{2+} + Fe^{2+}(\text{全铁}))$ 。

$\times 10^{-6} \sim 133.00 \times 10^{-6}$, $LREE = 81.3 \times 10^{-6} \sim 115.0 \times 10^{-6}$, $HREE = 7.03 \times 10^{-6} \sim 9.27 \times 10^{-6}$, $LREE/HREE = 8.77 \sim 14.84$, $(La/Yb)_N = 6.88 \sim 18.34$, $\delta Eu = 0.68 \sim 0.81$, 负锕异常不明显。稀土元素球粒陨石标准化配分图(图 7(a))整体表现为轻稀土富集的右倾型曲线特点。微量元素原始地幔标准化蛛网图(图 7(b))显示, 大离子亲石元素 Rb、Ba、U、K、Sr 相对富集, 高场强元素 Nb、Ta、P、Ti 明显亏损; 同时样品具有较高的 Ba、Sr 和较低的 Y、Yb 含量($Ba = 687 \times 10^{-6} \sim 916 \times 10^{-6}$, $Sr = 239.0 \times 10^{-6} \sim 426.2 \times 10^{-6}$,

$Y = 9.55 \times 10^{-6} \sim 14.40 \times 10^{-6}$, $Yb = 0.94 \times 10^{-6} \sim 1.46 \times 10^{-6}$), $Sr/Y = 17.26 \sim 42.93$, 表现出与埃达克岩相似的微量元素地球化学特征。

石英二长岩稀土元素总量较正长花岗岩稍高, $REE = 149.48 \times 10^{-6} \sim 157.56 \times 10^{-6}$, $LREE = 123 \times 10^{-6} \sim 133 \times 10^{-6}$, $HREE = 10.7 \times 10^{-6} \sim 11.1 \times 10^{-6}$, $LREE/HREE = 11.08 \sim 12.43$, $(La/Yb)_N = 11.14 \sim 13.15$, $\delta Eu = 0.79 \sim 0.80$, 负锕异常不明显。稀土元素球粒陨石标准化配分图(图 7(a))岩石整体表现出轻稀土富集、重稀土较平坦的右倾型曲线特点。微量元素原始地幔

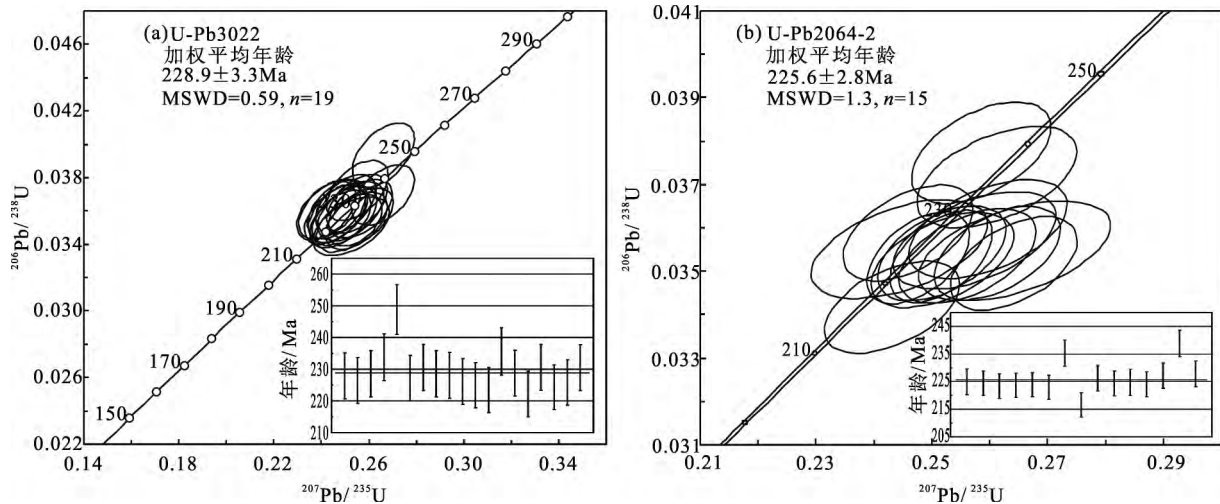
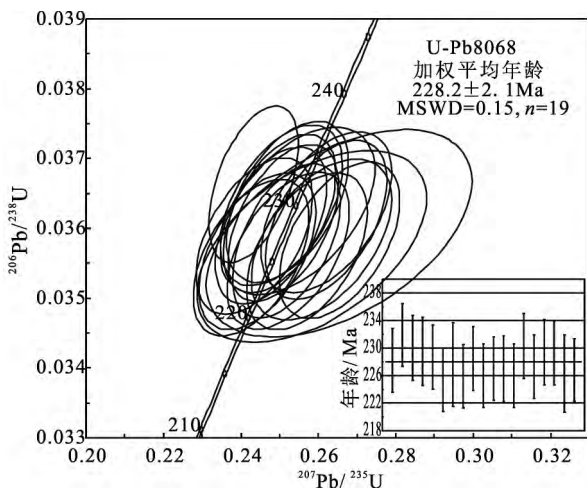


图4 碾子山地区晚三叠世正长花岗岩 U - Pb 年龄谐和图

Fig. 4 Zircon U-Pb concordia diagrams for the Late Triassic Nianzishan syenogranite

图5 碾子山地区晚三叠世石英二长岩 U - Pb 年龄谐和图
Fig. 5 Zircon U-Pb concordia diagram for the Late Triassic Nianzishan quartz monzonite

标准化蛛网图(图7(b))显示,岩石相对富集大离子亲石元素 Rb、Ba、U、K、Sr,明显亏损高场强元素 Nb、Ta、P、Ti;同时样品具有极高的 Ba、Sr 含量和较低的 Y、Yb 含量($Ba = 888 \times 10^{-6} \sim 908 \times 10^{-6}$, $Sr = 823.0 \times 10^{-6} \sim 827.9 \times 10^{-6}$, $Y = 14.2 \times 10^{-6} \sim 15.3 \times 10^{-6}$, $Yb = 1.36 \times 10^{-6} \sim 1.49 \times 10^{-6}$), $Sr/Y = 53.79 \sim 58.30$,表现出与埃达克岩相似的微量元素地球化学特征。

4 讨论

4.1 岩浆岩成岩时代

在前人的研究中,碾子山地区出露的正长花

岗岩、石英二长岩没有可靠的高精度同位素年龄。本文选取区内不同地段出露的正长花岗岩、石英二长岩进行锆石 LA - ICP - MS 定年,获得正长花岗岩加权平均年龄为 $(228.9 \pm 3.3) \text{ Ma}$ ($n = 19$, $MSWD = 0.59$)、 $(225.6 \pm 2.8) \text{ Ma}$ ($n = 15$, $MSWD = 1.3$),石英二长岩加权平均年龄为 $(228.2 \pm 2.1) \text{ Ma}$ ($n = 19$, $MSWD = 0.15$),分别代表正长花岗岩、石英二长岩的侵位时间。近年来有学者报道了研究区附近扎兰屯地区、蘑菇气地区、雅尔根楚地区存在晚三叠世酸性岩浆活动 $(220.0 \sim 233.6 \text{ Ma})$ [6,9-10,18]; 巫建华等 [31] 2017 年对中国东部中生代岩浆岩的时空分布进行了研究,发现大兴安岭火山 - 侵入岩带晚三叠世花岗岩同位素年龄范围为 $224 \sim 220 \text{ Ma}$,与上述年龄相近,进一步反映了碾子山地区存在晚三叠世岩浆活动。

4.2 岩石成因

碾子山地区晚三叠世侵入体(正长花岗岩和石英二长岩)整体上具有高含量的 SiO_2 ($62.68\% \sim 72.24\%$)、 Al_2O_3 ($13.14\% \sim 15.65\%$)、Sr ($239.0 \times 10^{-6} \sim 827.9 \times 10^{-6}$) 和高的 Sr/Y 比值 ($17.26 \sim 58.30$)、La/Yb 比值 ($10.21 \sim 27.22$),低含量的 MgO ($0.35\% \sim 2.72\%$)、Y ($14.2 \times 10^{-6} \sim 15.3 \times 10^{-6}$) 和 Yb ($1.36 \times 10^{-6} \sim 1.49 \times 10^{-6}$),地球化学组成上与埃达克质岩石相一致。另外,在 Y - Sr/Y 图解(图8(a))和 $Yb_N - (La/Yb)_N$ 图解(图8(b))中所有样品均落入埃达克岩的区域。以上特征表明碾子山地区晚三叠世正长花岗岩和石英二长岩属于埃达克质侵入岩。

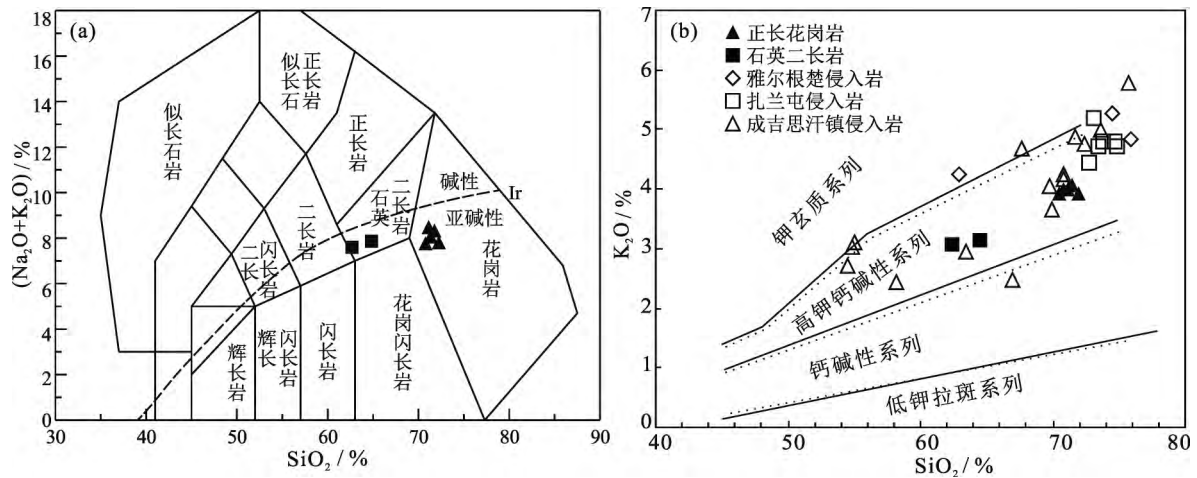


图 6 碾子山地区晚三叠世侵入岩 TAS 图解 (a) 和 $\text{SiO}_2 - \text{K}_2\text{O}$ 图解 (b) (底图分别据文献 [27] 和 [28])

Fig. 6 TAS (a) and SiO_2 vs. K_2O (b) diagrams for the Late Triassic Nianzishan intrusive rocks (base map after refs. [27] and [28], respectively)

Ir. Irvine 分界线, 上方为碱性, 下方为亚碱性^[29]; 雅尔根楚侵入岩数据引自文献 [10], 扎兰屯侵入岩数据引自文献 [6, 18], 成吉思汗镇侵入岩数据据沈阳地质调查中心^①

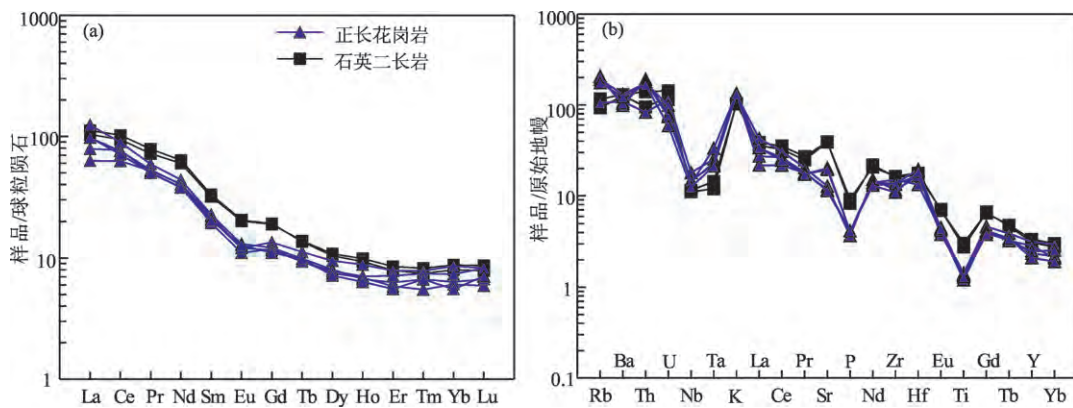


图 7 碾子山地区晚三叠世侵入岩稀土元素球粒陨石标准化配分图 (a) 和微量元素原始地幔标准化蛛网图 (b) (球粒陨石标准化值和原始地幔标准化值据文献 [30])

Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized multi-element patterns (b) for the Late Triassic Nianzishan intrusive rocks (normalized data after ref. [30])

前人的研究表明, 埃达克质岩的成因模式主要有: (1) 俯冲洋壳的部分熔融^[32-34]; (2) 酸性与基性岩浆的混合作用^[35-36]; (3) 原始玄武质岩浆的分离结晶和同化混染^[32, 37-38]; (4) 增厚下地壳的部分熔融^[39-41]; (5) 拆沉下地壳的部分熔融^[42]。

碾子山地区晚三叠世埃达克质侵入岩 Na_2O 值为 3.84% ~ 4.71%, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 值为 0.98 ~ 1.5, 均低于俯冲板片熔融形成的埃达克岩的 Na_2O 值

(4.88%) 和 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 值 (2.5 ~ 6.5)^[44], 因此推测其不是俯冲洋壳部分熔融的产物。碾子山地区晚三叠世埃达克质侵入岩具有高的 SiO_2 含量, 岩石中没有基性岩捕虏体, 区域上基性岩浆出露匮乏, 表明其并非酸性岩浆与基性岩浆混合作用形成的产物。碾子山地区晚三叠世埃达克质侵入岩高的 SiO_2 含量和不明显的负钨异常, 表明其不是原始玄武质岩浆的分离结晶和同化混染的产物; 另外, 在 $\text{La} - \text{La}/\text{Sm}$ 、 $\text{Rb} - \text{Rb}/\text{Nd}$ 图解 (图 9) 中,

① 沈阳地质调查中心. 内蒙古 1:5 万徐地营子幅 (L51E001012)、朱林村幅 (L51E001013)、成吉思汗幅 (L51E002012)、于家窝堡幅 (L51E002013) 区域地质矿产调查. 沈阳: 沈阳地质调查中心, 2017.

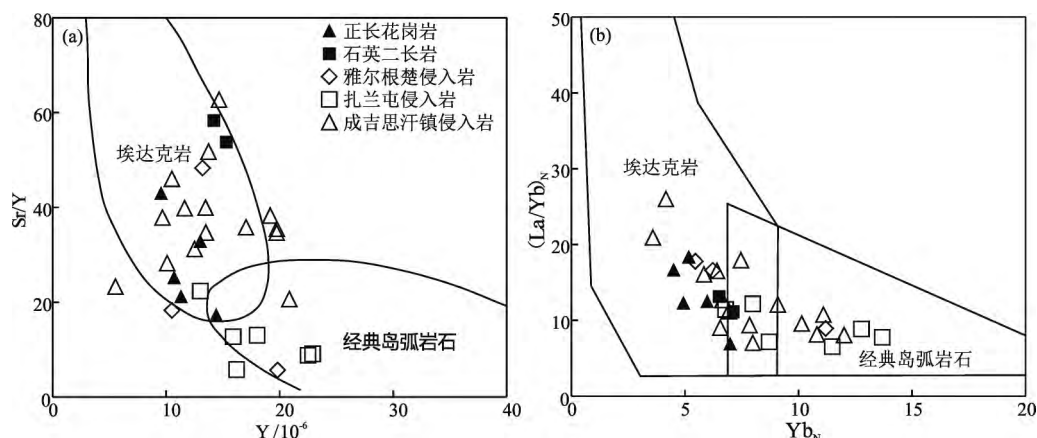


图8 碾子山地区晚三叠世侵入岩 Y - Sr/Y (a) 及 $Yb_N - (La/Yb)_N$ 图解 (b) (底图分别据文献 [32] 和 [43])

Fig. 8 Y vs. Sr/Y (a) and Yb_N vs. $(La/Yb)_N$ (b) diagrams for the Late Triassic Nianzishan intrusive rocks (base map after refs. [32] and [43], respectively)

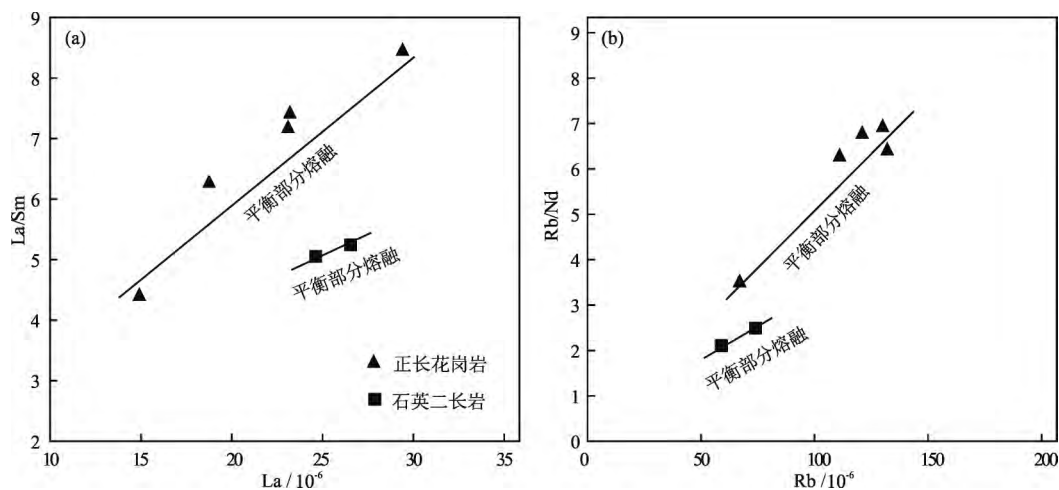


图9 碾子山地区晚三叠世侵入岩 La - La/Sm (a) 及 Rb - Rb/Nd 图解 (b)

Fig. 9 La vs. La/Sm (a) and Rb vs. Rb/Nd (b) diagrams for the Late Triassic Nianzishan intrusive rocks

正长花岗岩和石英二长岩投点均为一斜直线, 显示平衡部分熔融的成因特征^[45], 缺乏分离结晶的演化趋势, 也表明其并不是原始玄武岩浆分离结晶的产物。综上所述, 碾子山地区晚三叠世埃达克质侵入岩可能是由增厚下地壳或拆沉下地壳的部分熔融形成的。

碾子山地区晚三叠世埃达克质侵入岩富集 Sr 且强烈亏损 HREE 和 Y, 指示其源区残留有石榴子石, 而没有 (或很少) 斜长石^[32-39]。然而, 正长花岗岩和石英二长岩在稀土元素和 Sr 含量上存在明显差别: 石英二长岩比正长花岗岩有明显高的 LREE (图 7 (a))、Sr 含量 (表 3) 和 Sr/Y 值 (图 8 (a)), 指示石英二长岩的源区中残留相以石榴子石为主, 可能不含斜长石; 而正长花岗岩的源区中残留相除石榴子石外, 还可能含少量斜长石。

另外, 石英二长岩的 $K/Rb > 350$, 正长花岗岩的 K/Rb 值除一个样品大于 350 外, 其余都小于 300 (表 3)。岩浆岩的 K/Rb 值越高, 源区中残留相的角闪石可能越少^[32], 因此石英二长岩源区中残留相的角闪石可能少于正长花岗岩源区中残留相的角闪石。岩浆源区残留相的斜长石和角闪石越少, 岩浆源区越深; 反之, 岩浆源区越浅^[47-48]。所以, 根据岩浆源区残留相的特征, 推测正长花岗岩岩浆源区深度应小于石英二长岩岩浆源区的深度。

正长花岗岩和石英二长岩在 MgO、Cr 和 V 含量上也存在明显的差异 (表 3): 石英二长岩的 MgO 和相容元素 (Cr、V) 含量明显高于正长花岗岩中的含量, 反映石英二长岩比正长花岗岩含有的地幔成分较多或石英二长岩可能有新的地幔物

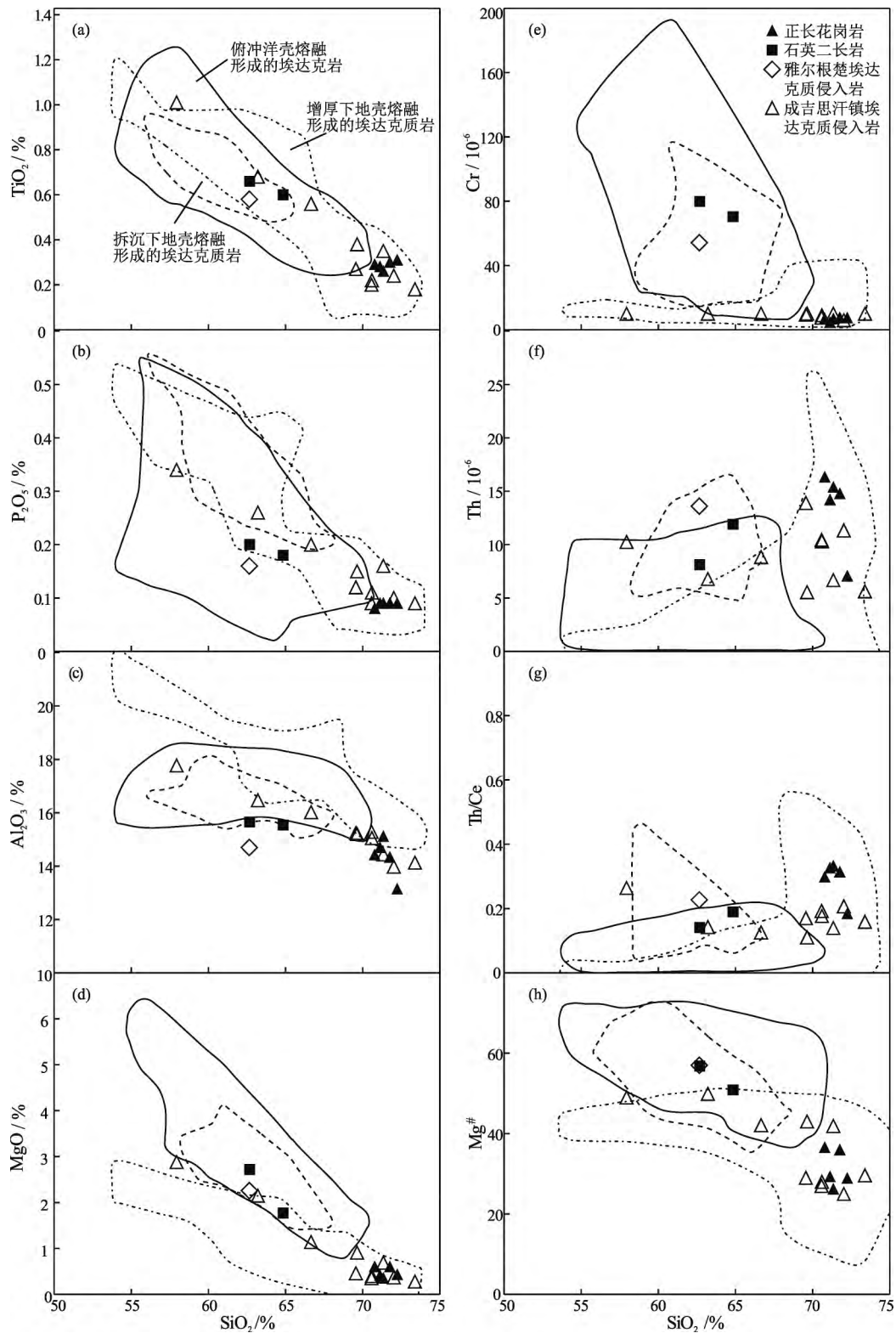


图 10 碾子山地区晚三叠世侵入岩哈克图解(不同埃达克岩不同成因区域划分据文献 [46], 雅尔根楚埃达克质侵入岩数据引自文献 [10], 成吉思汗镇埃达克质侵入岩数据据沈阳地质调查中心^①)

Fig. 10 Harker diagrams for the Late Triassic Nianzishan intrusive rocks

质加入。在哈克图解(图 10)中, 正长花岗岩的成分点大部分落入增厚下地壳熔融形成的埃达克岩区域, 而石英二长岩的成分点则落入俯冲洋壳形

成的埃达克岩、拆沉下地壳形成的埃达克岩区域。从前面的讨论已知, 石英二长岩不是俯冲洋壳部分熔融形成的; 因此, 石英二长岩很可能是由拆

沉下地壳部分熔融所形成,其较高的 MgO 、 Cr 、 V 含量很可能与拆沉下地壳产生的熔体受地幔橄榄岩的混染有关。正长花岗岩与增厚下地壳熔融形成的埃达克岩具有一致的 TiO_2 、 P_2O_5 和 MgO 含量(图 10(a)、(b)和(d)),且具有较低的 Cr 、 V 含量,指示其可能由增厚下地壳的部分熔融形成。正长花岗岩岩浆源区深度小于石英二长岩岩浆源区的深度,也进一步佐证前者可能为增厚下地壳的部分熔融形成,而后者可能为拆沉下地壳的部分熔融形成。

4.3 构造背景及地质意义

碾子山地区位于大兴安岭中段,经历了古亚洲洋、环太平洋、蒙古—鄂霍茨克洋三大构造域的构造演化,尚不清楚该地区晚三叠世埃达克质侵入岩的形成是否与三大构造域有关。近年来的研究表明,古亚洲洋在中三叠世之前已经沿着东西走向的西拉木伦河—长春—延吉缝合带闭合^[1-5 49-52]。与古亚洲洋沿东西走向闭合有关的早中生代岩浆作用在华北克拉通北缘形成了呈东西向带状展布的碱性火成岩带^[53-54]。本区晚三叠世正长花岗岩和石英二长岩与同时代火成岩沿贺根山—黑河构造带呈 NE—SW 向展布,表明本区晚三叠世岩浆活动与古亚洲洋没有直接关系。环太平洋构造体系的俯冲作用始于早侏罗世^[5 16 52 55-56],表明晚三叠世的岩浆活动与环太平洋构造域无关。近年来有学者研究发现,大兴安岭中段晚三叠世时期的构造背景主要受蒙古—鄂霍茨克洋构造域的影响,晚三叠世火成岩的形成成为蒙古—鄂霍茨克洋大洋板片南向俯冲的产物^[15-19 57]。许文良等^[5]2013 年对中国东部中生代构造体制与区域成矿背景进行了系统研究,指出蒙古—鄂霍茨克洋构造体系经历了中生代早期(245~180 Ma)的俯冲作用,对我国的影响主要在松辽盆地以西地区。研究区及其附近雅尔根楚地区、扎兰屯地区和成吉思汗镇地区晚三叠世侵入岩为高钾钙碱性系列埃达克质侵入岩、经典岛弧花岗岩组合(图 6(b)、图 8)。在哈克图解(图 10)中,成吉思汗镇地区埃达克质侵入岩与本区正长花岗岩一致,落入增厚下地壳熔融形成的埃达克岩区域;雅尔根楚地区埃达克质侵入岩与本区石英二长岩一致,落入拆沉下地壳形成的埃达克岩区域。上述结果表明,碾子山地区晚三叠世埃达克质侵入岩最有可能与蒙古—鄂霍茨克洋板块的南向俯冲有关。另外,有研究表明研究区附近扎

兰屯地区、蘑菇气地区晚三叠世火山岩的形成也与蒙古—鄂霍茨克大洋板片的南向俯冲有关^[58-59],进一步佐证研究区晚三叠世埃达克质侵入岩与蒙古—鄂霍茨克洋板块南向俯冲有关。

实验岩石学的研究指示,埃达克质熔体的形成深度 ≥ 40 km^[48 60-61]。受蒙古—鄂霍茨克洋板块南向俯冲的影响,兴安地块与松嫩地块沿古缝合带发生碰撞,导致古缝合带两侧及周边地区地壳增厚。当地壳厚度大于 40 km 时,下地壳可能转变为含角闪石榴辉岩。由于密度较大,含角闪石榴辉岩拆沉进入地幔中,然后发生熔融形成埃达克质岩浆,留下含石榴子石的残留体,岩浆则上升并与地幔橄榄岩发生交换反应,继续上升至适当位置形成石英二长岩。而增厚的下地壳也可能发生熔融,形成埃达克质岩浆,留下含石榴子石±斜长石±角闪石的残留体,岩浆上升形成正长花岗岩。区域地层方面,研究区及外围中—晚三叠世沉积地层匮乏,说明当时本区处于挤压隆升剥蚀阶段。因此,笔者认为研究区晚三叠世埃达克质侵入岩是在兴安地块与松嫩地块沿古缝合带碰撞造山的挤压背景中形成的,其形成受蒙古—鄂霍茨克洋板块南向俯冲的影响。

近年来的研究表明,增厚下地壳部分熔融形成的埃达克质岩浆一般不利于成矿,而拆沉下地壳部分熔融形成的埃达克质岩浆则有利于形成斑岩型铜钼矿床^[62-63]。碾子山地区晚三叠世埃达克质侵入岩(正长花岗岩和石英二长岩)的发现,表明晚三叠世时期蒙古—鄂霍茨克洋已影响到碾子山地区,同时也显示碾子山及其周边地区具有寻找斑岩型铜钼矿的潜力。

5 结论

(1) 锆石 LA-ICP-MS 定年显示,碾子山地区正长花岗岩的锆石年龄为(228.9±3.3) Ma 和(225.6±2.8) Ma,石英二长岩的年龄为(228.2±2.1) Ma,表明正长花岗岩和石英二长岩的侵位时代为晚三叠世。

(2) 碾子山地区晚三叠世正长花岗岩和石英二长岩的地球化学特征与埃达克岩的地球化学特征非常相似,但二者之间也存在着明显的差别,这种差别可能反映了二者成因上的不同:前者可能由增厚下地壳的部分熔融形成,而后者可能由拆沉下地壳的部分熔融形成。

(3) 碾子山地区晚三叠世埃达克质侵入岩是在

兴安地块与松嫩地块碰撞造山的挤压背景下形成的, 其形成受蒙古—鄂霍次克洋板块南向俯冲的影响。

(4) 碾子山拆沉下地壳部分熔融形成的埃达克质岩的发现, 显示碾子山及其周边地区具有寻找斑岩型铜钼矿的潜力。

参考文献:

- [1] 孙德有, 吴福元, 张艳斌, 等. 西拉木伦河—长春—延吉板块缝合带的最后闭合时间——来自吉林大玉山花岗岩体的证据 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2004, 34(2): 174–181.
- [2] ZHANG Yanbin, WU Fuyuan, WILDE S A, et al. Zircon U-Pb ages and tectonic implications of ‘Early Paleozoic’ granitoids at Yanbian, Jilin Province, northeast China [J]. *Island Arc*, 2004, 13(4): 484–505.
- [3] 李锦轶, 高立明, 孙桂华, 等. 内蒙古东部双井子中三叠世同碰撞壳源花岗岩的确定及其对西伯利亚与中朝古板块碰撞时限的约束 [J]. 岩石学报, 2007, 23(3): 565–582.
- [4] CAO Huahua, XU Wenliang, PEI Fuping, et al. Zircon U-Pb geochronology and petrogenesis of the Late Paleozoic–Early Mesozoic intrusive rocks in the eastern segment of the northern margin of the North China Block [J]. *Lithos*, 2013, 170/171: 191–207.
- [5] 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.
- [6] YANG Hao, GE Wenchun, YU Qian, et al. Zircon U-Pb-Hf isotopes, bulk-rock geochemistry and petrogenesis of Middle to Late Triassic I-type granitoids in the Xing’an Block, northeast China: Implications for early Mesozoic tectonic evolution of the central Great Xing’an Range [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2016, 119: 30–48.
- [7] LIU Jianfeng, LI Jinyi, CHI Xiaoguo, et al. Petrogenesis of middle Triassic post-collisional granite from Jiefangyingzi area, south-east Inner Mongolia: Constraint on the Triassic tectonic evolution of the north margin of the Sino-Korean paleoplate [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 60: 147–159.
- [8] 葛文春, 吴福元, 周长勇, 等. 大兴安岭中部乌兰浩特地区中生代花岗岩的锆石 U–Pb 年龄及地质意义 [J]. 岩石学报, 2005, 21(3): 749–762.
- [9] 李世超. 大兴安岭中段三叠—侏罗纪构造演化研究 [D]. 北京: 中国地质科学院, 2012.
- [10] 徐久磊, 郑常青, 施璐, 等. 大兴安岭北段雅尔根楚 I 型花岗岩年代学、岩石地球化学及其地球动力学意义 [J]. 地质学报, 2013, 87(9): 1311–1323.
- [11] SHI Lu, ZHENG Changqing, YAO Wengui, et al. Geochronological framework and tectonic setting of the granitic magmatism in the Chaihe-Moguqi region, central Great Xing’an Range, China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 113(1): 443–453.
- [12] 刘希雯. 大兴安岭明水地区三叠纪花岗岩的成因及其构造意义 [D]. 长春: 吉林大学, 2016.
- [13] 李世超, 李永飞, 王兴安, 等. 大兴安岭中段晚三叠世四分组效应花岗岩的厘定及其地质意义 [J]. 岩石学报, 2016, 32(9): 2793–2806.
- [14] 张海华, 李永飞, 张健, 等. 大兴安岭中部乌兰浩特地区花岗岩锆石 U–Pb 年龄、地球化学特征及构造意义 [J]. 现代地质, 2020, 34(3): 483–493.
- [15] 郝宇杰. 黑龙江省多宝山矿集区成矿作用与成矿规律研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2015.
- [16] 唐杰, 许文良, 王枫. 东北亚早中生代火成岩组合的时空变异: 对古太平洋板块俯冲开始时间的制约 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2016, 35(6): 1181–1194.
- [17] TANG Jie, XU Wenliang, WANG Feng, et al. Early Mesozoic southward subduction history of the Mongol-Okhotsk oceanic plate: Evidence from geochronology and geochemistry of Early Mesozoic intrusive rocks in the Erguna Massif, NE China [J]. *Gondwana Research*, 2016, 31: 218–240.
- [18] 李宇. 兴安地块中生代火成岩的年代学与地球化学: 对蒙古—鄂霍茨克构造体系演化的制约 [D]. 长春: 吉林大学, 2018.
- [19] 刘宝山, 程招勋, 钱程, 等. 大兴安岭多宝山晚三叠世双峰式侵入岩年代学及地球动力学背景 [J]. 地球科学, 2021, 46(7): 2311–2328.
- [20] 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.
- [21] 李英康, 高锐, 姚聿涛, 等. 大兴安岭造山带及两侧盆地的地壳速度结构 [J]. 地球物理学进展, 2014, 29(1): 73–83.
- [22] 潘桂棠, 肖庆辉, 陆松年, 等. 中国大地构造单元划分 [J]. 中国地质, 2009, 36(1): 1–28.
- [23] 钱程, 陆露, 秦涛, 等. 大兴安岭北段扎兰屯地区晚古生代早期花岗岩岩浆作用——对额尔古纳—兴安地块和松嫩地块拼合时限的制约 [J]. 地质学报, 2018, 92(11): 2190–2214.
- [24] JACKSON S E, PEARSON N J, GRIFFIN W L, et al. The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to in situ U-Pb zircon geochronology [J]. *Chemical Geology*, 2004, 211(1/2): 47–69.
- [25] QI Liang, HU Jing, GREGOIRE D C. Determination of trace elements in granites by inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. *Talanta*, 2000, 51(3): 507–513.
- [26] HOSKIN P W O, BLACK L P. Metamorphic zircon formation by solid-state recrystallization of protolith igneous zircon [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2000, 18(4): 423–439.
- [27] MIDDLEMOST E A K. Naming materials in the magma/igneous rock system [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1994, 37(3/4): 215–224.
- [28] PECCERILLO A, TAYLOR S R. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey

- [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1976, 58(1): 63–81.
- [29] IRVINE T N, BARAGAR W R A. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks [J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1971, 8(5): 523–548.
- [30] SUN S S, MCDONOUGH W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1989, 42(1): 313–345.
- [31] 巫建华, 郭国林, 郭佳磊, 等. 中国东部中生代岩浆岩的时空分布及其与热液型铀矿的关系 [J]. *岩石学报*, 2017, 33(5): 1591–1614.
- [32] DEFANT M J, DRUMMOND M S. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere [J]. *Nature*, 1990, 347: 662–665.
- [33] MARTIN H, SMITHIES R H, RAPP R, et al. An overview of adakite, tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG), and sanukitoid: relationships and some implications for crustal evolution [J]. *Lithos*, 2005, 79(1/2): 1–24.
- [34] ZHANG Zeming, ZHAO Guochun, SANTOSH M, et al. Late Cretaceous charnockite with adakitic affinities from the Gangdese batholith, southeastern Tibet: Evidence for Neo-Tethyan mid-ocean ridge subduction? [J]. *Gondwana Research*, 2010, 17(4): 615–631.
- [35] GUO Feng, NAKAMURU E, FAN Weiming, et al. Generation of Palaeocene Adakitic andesites by magma mixing, Yanji Area, NE China [J]. *Journal of Petrology*, 2007, 48(4): 661–692.
- [36] STRECK M J, LEEMAN W P, CHESLEY J T. High-magnesian andesite from Mount Shasta: A product of magma mixing and contamination, not a primitive mantle melt [J]. *Geology*, 2007, 35(1): 351–354.
- [37] CASTILLO P R, JANNEY P E, SOLIDUM R U. Petrology and geochemistry of Camiguin Island, southern Philippines: insights to the source of Adakites and other lavas in a complex arc setting [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1999, 134(1): 33–51.
- [38] 康志强, 许继峰, 王保弟, 等. 拉萨地块北部白垩纪多尼组火山岩的地球化学: 形成的构造环境 [J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2009, 34(1): 89–104.
- [39] ATHERTON M P, PETFORD N. Generation of sodium-rich magmas from newly underplated basaltic crust [J]. *Nature*, 1993, 362: 144–146.
- [40] 张旗, 王焰, 钱青, 等. 中国东部燕山期埃达克岩的特征及其构造-成矿意义 [J]. *岩石学报*, 2001, 17(2): 236–244.
- [41] 张旗, 钱青, 王二七, 等. 燕山中晚期的中国东部高原: 埃达克岩的启示 [J]. *地质科学*, 2001, 36(2): 248–255.
- [42] XU Jifeng, SHINJO 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(12): 1111–1114.
- [43] DRUMMOND M S, DEFANT M J. A model for trondhjemite-tonalite-dacite genesis and crustal growth via slab melting: Archean to modern comparisons [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1990, 95(13): 503–521.
- [44] SAJONA F G, MAURY R C, PUBELLIER M, et al. Magmatic source enrichment by slab-derived melts in a young post-collision setting, central Mindanao (Philippines) [J]. *Lithos*, 2000, 54(3/4): 173–206.
- [45] TREUIL M, JORON J M. Utilisation des éléments hygromagmatophiles pour la simplification de la modélisation quantitative des processus magmatiques [J]. *Society of Italia Mineralogy and Petrology*, 1975, 31: 125–174.
- [46] WANG Qiang, XU Jifeng, JIAN Ping, 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.
- [47] PEACOCK S M, RUSHMER T, THOMPSON A B. Partial melting of subducting oceanic crust [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1994, 121(1/2): 227–244.
- [48] RAPP R P, WATSON E B. Dehydration Melting of Metabasalt at 8–32 kbar: Implications for Continental Growth and Crust-Mantle Recycling [J]. *Journal of Petrology*, 1995, 36(4): 891–931.
- [49] 刘永江, 张兴洲, 金巍, 等. 东北地区晚古生代区域构造演化 [J]. *中国地质*, 2010, 37(4): 943–951.
- [50] 张连昌, 吴华英, 相鹏, 等. 中生代复杂构造体系的成矿过程与成矿作用——以华北大陆北缘西拉木伦铅铜多金属成矿带为例 [J]. *岩石学报*, 2010, 26(5): 1351–1362.
- [51] WANG Zijin, XU Wenliang, PEI Fuping, et al. Geochronology and geochemistry of Middle Permian–Middle Triassic intrusive rocks from central-eastern Jilin Province, NE China: Constraints on the tectonic evolution of the eastern segment of the Paleo-Asian Ocean [J]. *Lithos*, 2015, 238: 13–25.
- [52] 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.
- [53] WU Fuyuan, SUN Deyou, GE Wenchun, et al. Geochronology of the Phanerozoic granitoids in northeastern China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 41(1): 1–30.
- [54] LI J Y. Permian geodynamic setting of Northeast China and adjacent regions: closure of the Paleo-Asian Ocean and subduction of the Paleo-Pacific Plate [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2006, 26(3): 207–224.
- [55] GUO Feng, LI Hongxia, FAN Weiming, et al. Early Jurassic subduction of the Paleo-Pacific Ocean in NE China: Petrologic and geochemical evidence from the Tumen mafic intrusive complex [J]. *Lithos*, 2015, 224/225: 46–60.
- [56] WANG Zhihui, GE Wenchun, YANG Hao, et al. Petrogenesis and tectonic implications of Early Jurassic volcanic rocks of the Raohe accretionary complex, NE China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2016, 134: 262–280.
- [57] 纪政, 葛文春, 杨浩, 等. 大兴安岭中段晚三叠世安第斯型安山岩: 蒙古—鄂霍茨克大洋板片南向俯冲作用的产物

- [J]. 岩石学报, 2018, 34(10): 2917–2930.
- [58] LI Yu, XU Wenliang, WANG Feng et al. Triassic volcanism along the eastern margin of the Xing'an Massif, NE China: Constraints on the spatial-temporal extent of the Mongol-Okhotsk tectonic regime [J]. *Gondwana Research*, 2017, 48: 205–223.
- [59] XU Jiulei, ZHENG Changqing, SHI Lu, et al. Late Triassic adakite-like volcanic rocks in Moguqi area in the central Great Xing'an Range, NE China: Implications for partial melting of delaminated thickened crust [J]. *Geological Journal*, 2018, 53(3): 820–834.
- [60] RAPP R P, SHIMIZU N, NORMAN M D, et al. Reaction between slab-derived melts and peridotite in the mantle wedge: experimental constraints at 3.8 GPa [J]. *Chemical Geology*, 1999, 160(4): 335–356.
- [61] SEN C, DUNN T. Dehydration melting of a basaltic composition amphibolite at 1.5 and 2.0 GPa: implications for the origin of adakites [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1994, 117(4): 394–409.
- [62] 王强, 赵振华, 许继峰, 等. 鄂东南铜山口、殷祖埃达克质(adakitic)侵入岩的地球化学特征对比: (拆沉)下地壳熔融与斑岩铜矿的成因 [J]. 岩石学报, 2004, 20(2): 351–360.
- [63] 王强, 许继峰, 赵振华, 等. 中国埃达克岩或埃达克质岩及相关金属成矿作用 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2007, 26(4): 336–349.