



辽东岫岩-凤城地区早白垩世侵入岩的年代学、地球化学特征及地质意义

李海洋¹, 闫伟¹, 吴文彬¹, 王晓亮¹, 王玉平¹, 李超^{1,2}, 徐杨¹

1. 辽宁省地质矿产研究院有限责任公司, 辽宁 沈阳 110032;
2. 辽宁省地矿集团生态修复有限责任公司, 辽宁 沈阳 110032

摘要: 对辽东岫岩-凤城地区秦家岭花岗闪长岩和红旗岭石英闪长岩进行了年代学和地球化学研究。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年获得秦家岭花岗闪长岩年龄加权平均值为 127.5 ± 0.9 Ma, 红旗岭石英闪长岩年龄加权平均值为 126.5 ± 0.8 Ma, 均形成于早白垩世。岩石地球化学分析结果表明, 秦家岭花岗闪长岩 SiO_2 含量 70.40%~72.28%, A/CNK 和 A/NK 值分别为 0.99~1.06 和 1.44~1.61, 轻稀土相对富集, 亏损 Ba、Sr 等大离子亲石元素和 Nb、P、Ti 等高场强元素, 相对富集 Rb、Th、La、Nd、Hf 等元素, 锆石饱和温度变化区间为 755~816 °C, 属于过铝质 I 型花岗岩, 为下地壳部分熔融形成; 红旗岭石英闪长岩 SiO_2 含量 56.42%~57.22%, A/CNK 和 A/NK 值分别为 1.04~1.09 和 1.70~1.83, Eu 负异常明显, 亏损 Sr、Nb、Ta、Ti、P, 富集 Ba、Rb、K、Zr、Hf、Th 等元素, 物质来源为壳源并有少量幔源成分加入。秦家岭花岗闪长岩和红旗岭石英闪长岩形成于辽东地区早白垩世伸展拉张环境, 与华北克拉通遭受破坏、岩石圈减薄密切相关。

关键词: 花岗闪长岩; 石英闪长岩; 锆石 U-Pb 测年; 地球化学; 早白垩世; 辽东地区

EARLY CRETACEOUS INTRUSIVE ROCKS IN XIUYAN-FENGCHENG AREA, EASTERN LIAONING: Geochronology, Geochemistry and Geological Implication

LI Hai-yang¹, YAN Wei¹, WU Wen-bin¹, WANG Xiao-liang¹, WANG Yu-ping¹, LI Chao^{1,2}, XU Yang¹

1. Liaoning Geology and Mineral Research Institute Co., Ltd., Shenyang 110032, China;

2. Liaoning Geology and Mineral Resources Group Ecological Restoration Co., Ltd., Shenyang 110032, China

Abstract: The paper studies the geochronology and geochemistry of Qinjialing granodiorite and Hongqiling quartz diorite in Xiuyan-Fengcheng area, eastern Liaoning Province. The LA-ICP-MS zircon U-Pb dating yields the weighted average ages of 127.5 ± 0.9 Ma for Qinjialing granodiorite and 126.5 ± 0.8 Ma for Hongqiling quartz diorite, both of which were formed in the Early Cretaceous. The litho-geochemical analysis results show that the content of SiO_2 in Qinjialing granodiorite is 70.40%–72.28%, with the A/CNK and A/NK values of 0.99–1.06 and 1.44–1.61, respectively. The granodiorite is characterized by relatively enriched LREEs, depleted LILEs (Ba and Sr) and HFSEs (Nb, P and Ti), and enriched Rb, Th, La, Nd, and Hf, with the zircon saturation temperature ranging from 755 °C to 816 °C, belonging to peraluminous I-type granite, formed by the partial melting of lower crust. The content of SiO_2 in Hongqiling quartz diorite is 56.42%–57.22%, with the A/CNK and A/NK values of 1.04–1.09 and 1.70–1.83, respectively. The quartz diorite is characterized by obvious negative Eu anomaly, depleted Sr, Nb, Ta, Ti and P, and enriched Ba, Rb,

收稿日期: 2023-04-20; 修回日期: 2023-07-03. 编辑: 张哲.

基金项目: 中国地质调查局项目“辽东吉南成矿带永吉-凤城地区地质矿产调查”(DD20160049).

作者简介: 李海洋(1987—), 男, 高级工程师, 主要从事基础地质和矿产勘查研究, 通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区北陵大街 31 号, E-mail//443769835@qq.com

K, Zr, Hf and Th. The source material is derived from the crust with minors of mantle-derived component. The Qinjialing granodiorite and Hongqiling quartz diorite were formed in the Early Cretaceous extensional environment of eastern Liaoning, which are closely related to the destruction of North China Craton and lithospheric thinning.

Key words: granodiorite; quartz diorite; zircon U-Pb dating; geochemistry; Early Cretaceous; eastern Liaoning Province

0 引言

华北克拉通在晚中生代时期发生了大规模的破坏和强烈的岩石圈减薄,辽东半岛作为这一现象最强烈和典型的地区,一直以来备受关注^[1-10].区内中生代花岗质岩石发育,可分为3期,其中最晚一期为早白垩世(131~117 Ma)^[11].由于辽东半岛中生代形成的侵入岩分布面积广泛、岩石类型较多,受以往工作程度限制,部分岩体未被发现.笔者在凤城-岫岩一带开展区域地质调查工作时,在以往资料^①圈定的晚三叠世似斑状二长花岗岩中新发现了秦家岭花岗闪长岩和红旗岭石英闪长岩.两者与晚三叠世似斑状二长花岗岩野外地质特征明显不同,呈侵入接触关系.以往资料未对其进行过研究和报道,使得区内与之相关的局部岩浆-构造活动事件被忽略,从而制约了辽东地区中生代岩浆构造活动的全面、深入研究.

笔者通过野外地质调查、显微岩石学研究、地球化学全分析、LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年等方法,对秦家岭花岗闪长岩和红旗岭石英闪长岩的野外产状及岩石学、地球化学、年代学特征进行研究,确定各侵入岩体的形成时代,探讨岩石成因及构造环境,为岫岩-凤城地区早白垩世岩体的研究提供岩石学和地球化学资料,以期为研究辽东地区晚中生代岩石的构造演化提供新的证据.

1 区域构造背景及岩体特征

研究区位于辽东岫岩-凤城地区,地处华北克拉通北东段,其北部依次为古亚洲洋构造域、中亚造山带、蒙古-鄂霍次克洋构造域及西伯利亚板块,南部依次为大别-苏鲁造山带及扬子克拉通(图1a)^[12].

区内构造以中生代平移、走滑和性质不明断层为主,主要包括陡岭堡子-鸡冠山-二道河子左行平移断层、鸡冠山-宝山公社左行走滑断层、厉家岭断裂和苟

药沟断裂.出露地层为古元古界辽河岩群及三叠系.其中辽河岩群包括大石桥岩组(Pt_{1d},岩性主要为大理岩、片岩等)、高家峪岩组(Pt_{1g},岩性主要为变粒岩、片岩等)和里尔峪岩组(Pt_{1lr},浅粒岩为主),大面积出露于研究区中部及北东部;三叠系地层包括草沟组(T_{3c},板岩、千枚岩等)和温家沟组(T_{3w},主要为复成分砾岩),分布在研究区南部.区内岩浆岩主要分布在北部及南东部,其形成时代包括古元古代、晚三叠世、晚侏罗世和早白垩世,岩性以二长花岗岩为主,其次为本次新发现的花岗闪长岩和石英闪长岩(图1b).

秦家岭花岗闪长岩体位于岫岩县大岭村西北5 km处,出露面积约4 km²,呈北东向展布,与晚三叠世似斑状二长花岗岩呈侵入接触关系,在研究区中部及南东部亦有少量出露.岩石新鲜面呈灰白色,半自形粒状结构,块状构造(图2a).岩石主要由斜长石(65%)、石英(20%)、条纹长石(10%)、黑云母(3%)、角闪石(2%)组成.黑云母为片状,单偏光下黄褐色,发育有一组极完全解理,多色性明显,正中突起,平行消光,二轴晶负光性,片径为1~2 mm;角闪石为柱状,多色性较强,正中突起,正交偏光下干涉色二级中部,粒径为0.5~1 mm;石英为他形晶,粒状,单偏光下无色透明,正低突起,正交偏光下干涉色一级黄白,一轴晶正光性,粒径为0.5~3 mm;斜长石为半自形晶,板状,单偏光下无色透明,正交偏光下干涉色一级灰白,发育有聚片双晶,粒径为1~6 mm;条纹长石为半自形晶,板状,单偏光下无色透明,正交偏光下干涉色一级灰白,发育有条纹双晶,粒径为0.5~3 mm(图2b).

红旗岭石英闪长岩体位于凤城市宝山镇北西2 km处,出露面积约6 km²,呈北东向展布,与晚三叠世似斑状二长花岗岩呈侵入接触关系.岩石新鲜面呈灰黑色,半自形粒状结构,块状构造(图2c).岩石主要由斜长石(70%)、黑云母(12%)、石英(10%)、条纹长石

①辽宁省地质矿产调查院. K51C004003(丹东市)、J51C001003(东港市)1:25万区域地质调查成果报告. 2003.

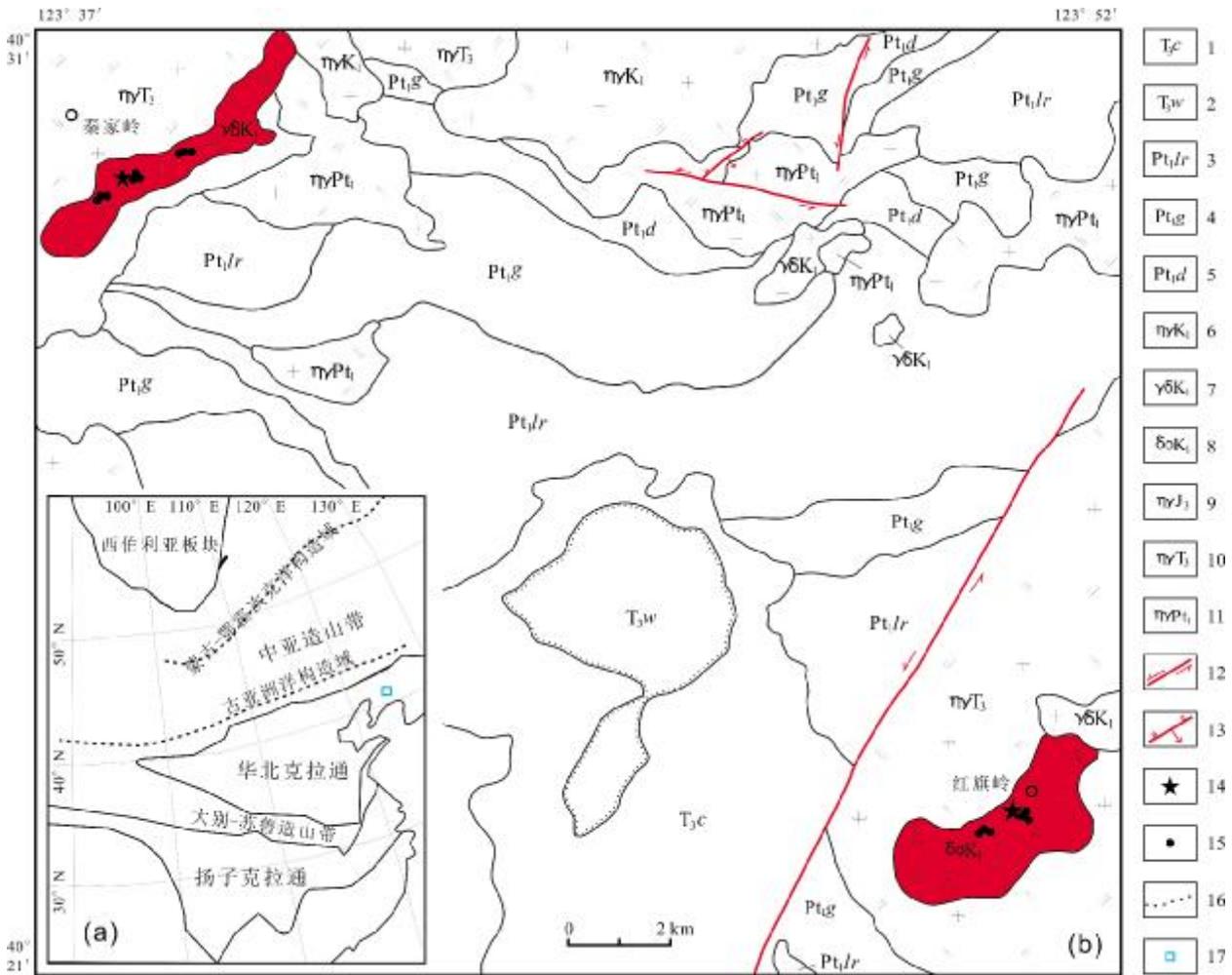


图1 研究区大地构造位置及地质简图

Fig. 1 Tectonic location and geologic sketch maps of the study area

1—三叠系孽草沟组 (Triassic Cuocaogou fm.); 2—三叠系温家沟组 (Triassic Wenjiagou fm.); 3—古元古界里尔峪岩组 (Paleoproterozoic Lieryu rock fm.); 4—古元古界高家峪岩组 (Paleoproterozoic Gaojiayu rock fm.); 5—古元古界大石桥岩组 (Paleoproterozoic Dashiqiao rock fm.); 6—白垩纪二长花岗岩 (Cretaceous monzogranite); 7—白垩纪花岗闪长岩 (Cretaceous granodiorite); 8—白垩纪石英闪长岩 (Cretaceous quartz diorite); 9—侏罗纪二长花岗岩 (Jurassic monzogranite); 10—三叠纪似斑状二长花岗岩 (Triassic porphyritic monzogranite); 11—古元古代二长花岗岩 (Paleoproterozoic monzogranite); 12—平移断层 (strike-slip fault); 13—逆断层 (reverse fault); 14—年龄样品采集点 (collection point of age sample); 15—岩石地球化学样品采集点 (collection point of rock geochemical sample); 16—构造缝合带 (tectonic suture zone); 17—研究区 (study area)

(5%)、角闪石(3%)组成. 黑云母为片状,单偏光下黄褐色,发育有一组极完全解理,多色性明显,正中突起,平行消光,二轴晶负光性,片径为 0.5~1 mm;角闪石为柱状,多色性较强,正中突起,正交偏光下干涉色二级中部,粒径为 1~2.5 mm;石英为他形晶,粒状,单偏光下无色透明,正低突起,正交偏光下干涉色一级黄白,一轴晶正光性,粒径为 0.5 mm;斜长石为更-中长石,半自形晶,板状,单偏光下无色透明,正交偏光下干涉色一级灰白,发育有聚片双晶及环带结构,具黝帘石

化,粒径为 1~2 mm;条纹长石为半自形晶,板状,单偏光下无色透明,正交偏光下干涉色一级灰白,发育有条纹双晶,粒径为 1~2 mm (图 2d).

2 样品采集与分析

在秦家岭花岗闪长岩体中采集 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年样品 1 件(D203Zr1,坐标为:123°38'15"E, 40°29'26"N), 采集岩石地球化学样品 9 件(D203S1—D203S3、D203XT1—D203XT3、D203WL1—D203WL3);

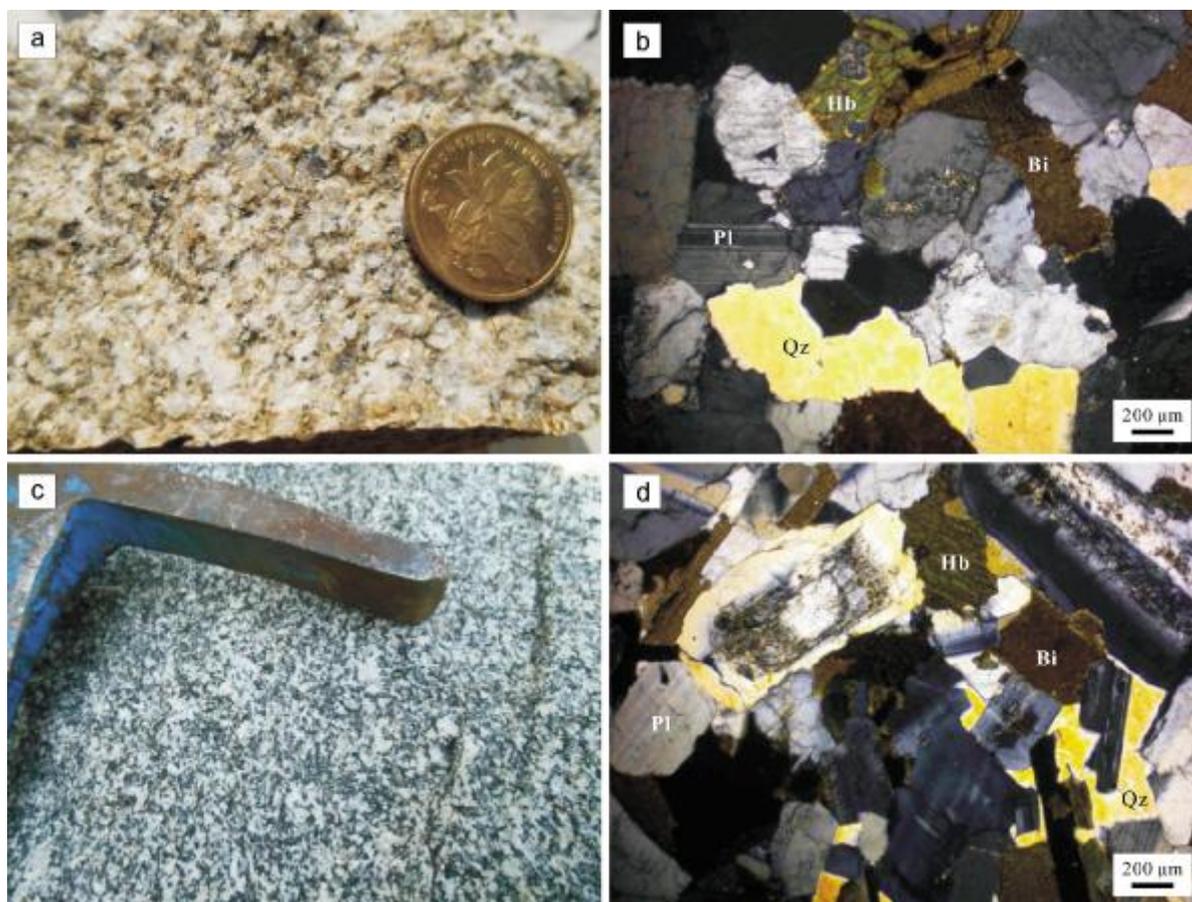


图 2 研究区早白垩世侵入岩的宏观和显微特征

Fig. 2 Macroscopic and microscopic characteristics of Early Cretaceous intrusive rocks in the study area

a、b—秦家岭花岗闪长岩(Qinjialing granodiorite); c、d—红旗岭石英闪长岩(Hongqiling quartz diorite); Qz—石英(quartz); Pl—斜长石(plagioclase); Bi—黑云母(biotite); Hb—普通角闪石(hornblende)

在红旗岭石英闪长岩体中采集 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年样品 1 件 (P35Zr1, 坐标为:123°50′34″E, 40°22′50″N), 采集岩石地球化学样品 6 件(P35S1、P35S2、P35XT1、P35XT2、P35WL1、P35WL2)。以上样品均采自新鲜岩石,其中测年样品重量约 15 kg。

锆石挑选由河北省区域地质矿产调查研究所完成。先利用常规方法将样品粉碎至 80~100 目,再通过淘选和电磁选方法进行分离,最后在双目镜下挑选出表面洁净、晶型好、透明度好、裂隙少、包裹体少的锆石颗粒备用。制靶工作和阴极发光(CL)图像采集由北京铀年领航科技有限公司完成。把挑选好的锆石固定在树脂上,打磨至锆石内部结构充分暴露,拍摄阴极发光图像。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年工作在中国地质科学院矿产资源研究所自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室完成,采用的仪器为 Finnigan Neptune 型

MC-ICP-MS 和 NewwaveUP 213 激光剥蚀系统,激光束直径为 40 μm 。数据采集前,先利用国际标准锆石 GJ-1 调试仪器,采集过程中用 GJ-1 和 Plesovice 作为外标样^[13]。数据处理采用 ICPMSDataCal 软件^[14],通过铅校正去除普通铅影响,用 Isoplot 3.0 软件完成年龄计算和谐和图的绘制。

主量、微量、稀土元素的分析测试由国土资源部沈阳矿产资源监督检测中心完成。主量元素分析采用 X 射线荧光光谱仪进行分析,相对标准偏差 2%~5%;微量、稀土元素分析采用电感耦合等离子质谱仪,相对标准偏差小于 10%。

3 分析结果

3.1 锆石 U-Pb 年代学

对秦家岭花岗闪长岩体选取了 20 颗锆石,对红旗

岭石英闪长岩体选取了 26 颗锆石, 分别对其进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年. 分析结果如表 1 (扫描首页 OSID 二维码可见). 两件样品的锆石阴极发光 CL 图像(图 3)显示, 锆石的晶型均发育较好, 形态以长柱状为主, 长轴介于 120~210 μm , 短轴介于 60~120 μm , 锆石生长环带发育明显, 裂隙、包裹体较少.

样品 D203Zr1 的 Th 值为 $94 \times 10^{-6} \sim 1309 \times 10^{-6}$, U 值为 $153 \times 10^{-6} \sim 1883 \times 10^{-6}$, Th/U 为 0.35~1.36, 为典型的岩浆锆石^[15]. 20 个测年点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄值为 $123.9 \pm 2.2 \sim 132.1 \pm 2.5$ Ma, 加权平均年龄值为 127.5 ± 0.9 Ma (MSWD=0.8)(图 4a).

样品 P35Zr1 的 Th 值为 $117 \times 10^{-6} \sim 2085 \times 10^{-6}$, U 值为 $110 \times 10^{-6} \sim 878 \times 10^{-6}$, Th/U 为 0.73~2.37, 反映其为岩

浆成因^[15]. 26 个测年点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄值为 $122.6 \pm 1.9 \sim 130.3 \pm 1.5$ Ma, 加权平均年龄值为 126.5 ± 0.8 Ma (MSWD=1.7)(图 4b).

3.2 地球化学特征

秦家岭花岗闪长岩、红旗岭石英闪长岩的主量元素、稀土元素和微量元素分析结果及相关参数如表 2 (扫描首页 OSID 二维码可见).

3.2.1 主量元素

秦家岭花岗闪长岩的 9 件样品中, SiO_2 含量为 70.40%~72.28%, Al_2O_3 为 13.84%~14.36%, TiO_2 为 0.30%~0.41%, FeO^T 为 2.32%~3.57%, MgO 为 0.79%~1.18%, CaO 为 1.99%~2.69%, K_2O 为 3.02%~3.64%, $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ 为 6.32%~7.08%. $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值为 0.89~1.06, 在 SiO_2-

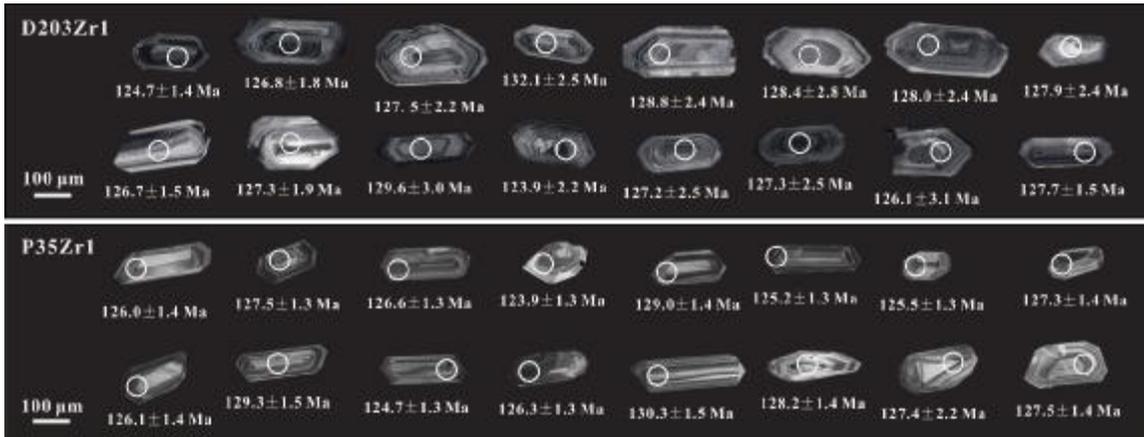


图 3 秦家岭花岗闪长岩及红旗岭石英闪长岩的锆石阴极发光图像

Fig. 3 CL images of selected zircons from Qinjialing granodiorite and Hongqiling quartz diorite

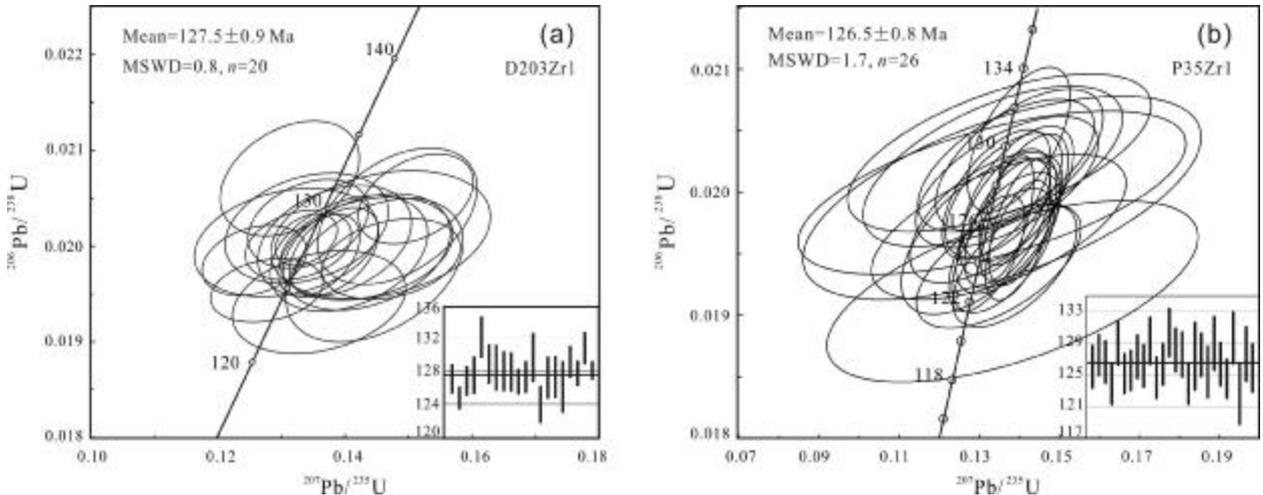


图 4 秦家岭花岗闪长岩和红旗岭石英闪长岩锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 4 Zircon U-Pb concordia diagram of Qinjialing granodiorite and Hongqiling quartz diorite

K₂O 岩石系列判别图解(图 5a)中,为高钾(钙碱性)系列. 含铝指数 A/CNK 为 0.99~1.06, A/NK 为 1.44~1.61, 均为过铝质系列岩石(图 5b).

红旗岭石英闪长岩的 6 件样品中, SiO₂ 含量为 56.42%~57.22%, Al₂O₃ 为 19.30%~19.97%, TiO₂ 为 0.76%~0.95%, FeO^T 为 5.77%~6.58%, MgO 为 1.82%~2.01%, CaO 为 3.57%~4.27%, K₂O 为 2.67%~3.04%, K₂O+Na₂O 为 7.39%~8.14%. K₂O/Na₂O 值为 0.57~0.62, 在 SiO₂-K₂O 岩石系列判别图解(图 5a)中, 样品均落在了高钾(钙碱性)系列区域内. 含铝指数 A/CNK 为 1.04~1.09, A/NK 为 1.70~1.83, 为过铝质岩石(图 5b).

3.2.2 稀土元素和微量元素

秦家岭花岗闪长岩的稀土元素总量 (ΣREE) 为 113.59×10⁻⁶~216.34×10⁻⁶, 轻重稀土元素比值(LREE/HREE)为 12.83~20.04, δEu 值为 0.55~1.19(表 2, 扫描首页 OSID 二维码可见). 稀土元素球粒陨石标准化配分曲线(图 6a)显示, 秦家岭花岗闪长岩为轻稀土元素富集的右倾“海鸥型”, 轻稀土曲线相对较陡, 分馏明显, 重稀土曲线平滑, 分馏不明显, 8 件样品呈 Eu 负异常, 1 件样品呈 Eu 正异常. 根据原始地幔标准化微量元素蛛网图(图 6b), 大离子亲石元素 Ba、Sr 相对亏损, Rb、K 相对富集; 高场强元素 Nb、Ta、Ti、P 相对亏

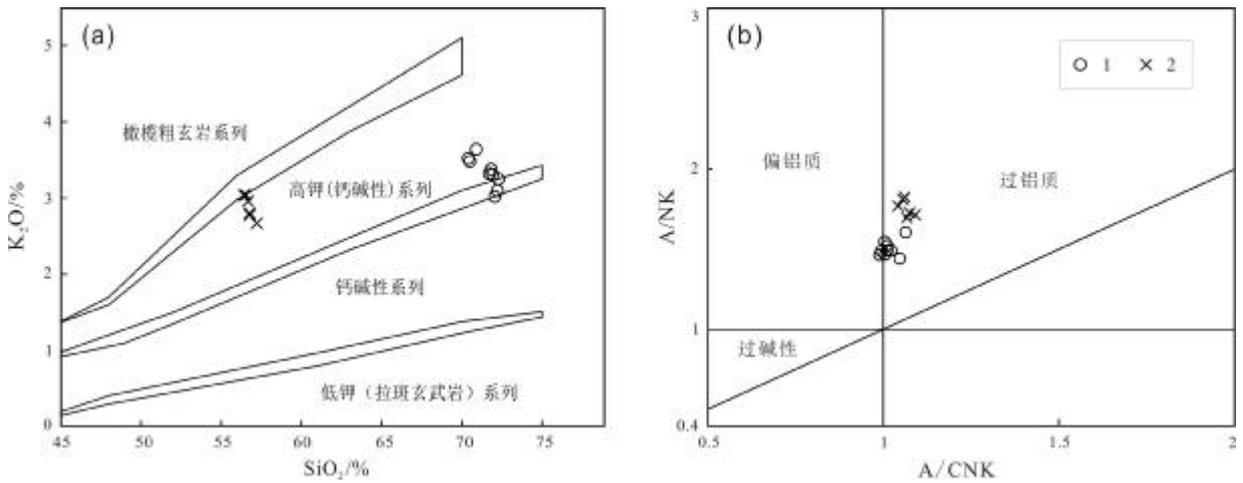


图 5 研究区侵入岩 SiO₂-K₂O 图解和 A/CNK-A/NK 图解

Fig. 5 The SiO₂-K₂O and A/CNK-A/NK diagrams of intrusive rocks in the study area

1—花岗闪长岩(granodiorite); 2—石英闪长岩(quartz diorite)

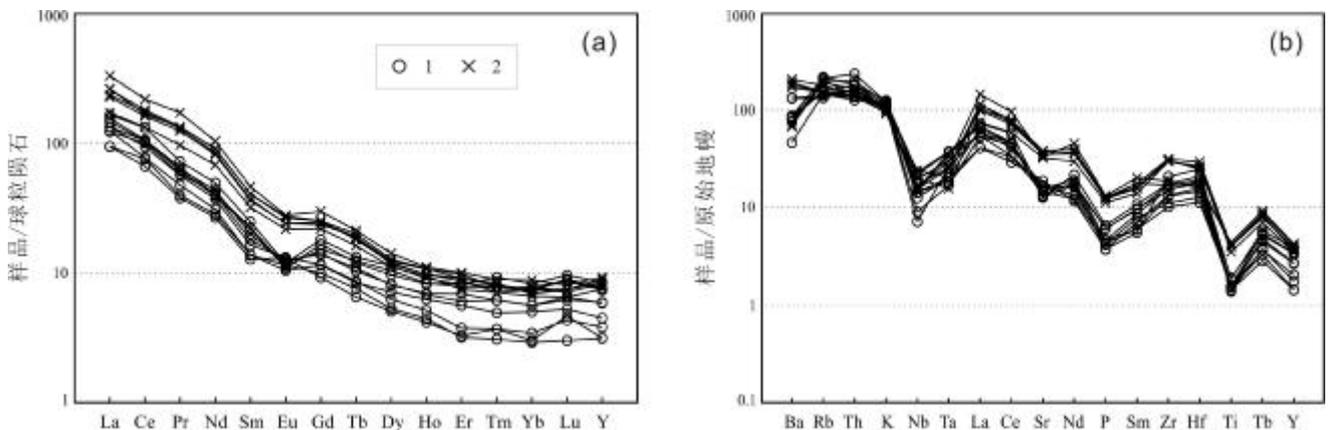


图 6 研究区侵入岩稀土元素配分曲线图和微量元素蛛网图

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns and primitive mantle-normalized trace element spidergrams of intrusive rocks in the study area

1—花岗闪长岩(granodiorite); 2—石英闪长岩(quartz diorite)

损,Zr、Hf、Th 相对富集.

红旗岭石英闪长岩的稀土元素总量为 $236.16 \times 10^{-6} \sim 393.12 \times 10^{-6}$, 轻重稀土元素比值(LREE/HREE)为 15.74~20.12, δEu 值为 0.73~0.83 (表 2, 扫描首页 OSID 二维码可见). 稀土元素球粒陨石标准化配分曲线(图 6a)显示, 红旗岭石英闪长岩为轻稀土元素富集的右倾“海鸥型”, 轻稀土曲线相对较陡, 分馏明显, 重稀土曲线平滑, 分馏不明显, 6 件样品均呈 Eu 负异常. 根据原始地幔标准化微量元素蛛网图(图 6b), 大离子亲石元素 Sr 相对亏损, Ba、Rb、K 相对富集; 高场强元素 Nb、Ta、Ti、P 相对亏损, Zr、Hf、Th 相对富集.

4 讨论

4.1 成岩时代

根据 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年结果, 秦家岭花岗闪长岩的年龄加权平均值为 127.5 ± 0.9 Ma,

红旗岭石英闪长岩的年龄加权平均值为 126.5 ± 0.8 Ma. 两者形成时代均为早白垩世, 与吴福元等^[11]和刘杰勋等^[1]对辽东地区早白垩世侵入岩的研究结果一致.

4.2 岩石成因及岩浆源区

东北地区中生代花岗岩以 I 型为主, 有少量 A 型花岗岩, S 型花岗岩基本不存在^[16]. 辽东半岛早白垩世花岗岩主要发育 I 型花岗岩、花岗闪长岩、二长花岗岩、钾长花岗岩以及 A 型碱长花岗岩、过碱性花岗岩^[16]. 角闪石是判断 I 型花岗岩的重要矿物学标志^[16]. 秦家岭花岗闪长岩主要矿物成分中出现了黑云母、角闪石

等暗色矿物, 而未出现霓石-霓辉石、钠闪石-钠铁闪石、橄榄石等 A 型花岗岩的标志性暗色矿物和电气石、刚玉、堇青石、石榴石等典型的 S 型花岗岩富铝矿物^[17], 稀土配分曲线图中 Ho—Lu 部分表现为相对平坦的特征, 可能与角闪石的残留或结晶分异有关^[18]. A/CNK 为 0.99~1.06, P_2O_5 含量较低(0.08%~0.14%)且与 SiO_2 含量呈负相关关系, 阳离子比率为 1.37~1.49, 均表现出了 I 型花岗岩的特征^[1, 3-4, 19]. 依据 Zr 元素和主量元素的含量计算, 秦家岭花岗闪长岩的锆石饱和温度变化区间为 755~816 °C, 与 I 型花岗岩的温度区间接近^[20], 均明显低于区域内白垩纪 A 型花岗岩的锆石饱和温度变化区间(868~928 °C)^[3-4], 在 K_2O-Na_2O 判别图解(图 7a)和 SiO_2-Nb 判别图解(图 7b)中, 秦家岭花岗闪长岩样品均落在了 I 型花岗岩区域, 表明秦家岭花岗闪长岩成因类型属于 I 型花岗岩. 秦家岭花岗闪长岩为高钾(钙碱性)系列侵入岩, 李三忠等^[21]认为该类型的 I 型花岗岩浆只能由地壳中含水钙碱性-高钾钙碱性的镁铁质-中性变质岩部分熔融产生. Nd/Th 值为 1.42~1.72, 平均为 1.56, 接近于壳源岩石值(≈ 3), 明显低于幔源值(>15)^[12, 22], 富集 Rb、K 等大离子亲石元素, 亏损 Nb、Ta、Ti 等高场强元素, 表明其与大陆地壳物质亲缘性较强. 而明显的 Eu 负异常、Sr 含量相对较低、Nb 和 Zr 相对富集等特征表明岩浆源区可能有斜长石残留, 说明岩浆来源于下地壳的部分熔融^[17, 23-26].

红旗岭石英闪长岩为高钾(钙碱性)系列侵入岩, 具有较高的 MgO 、 Fe_2O_3 和总碱(K_2O+Na_2O)含量; Nb/U

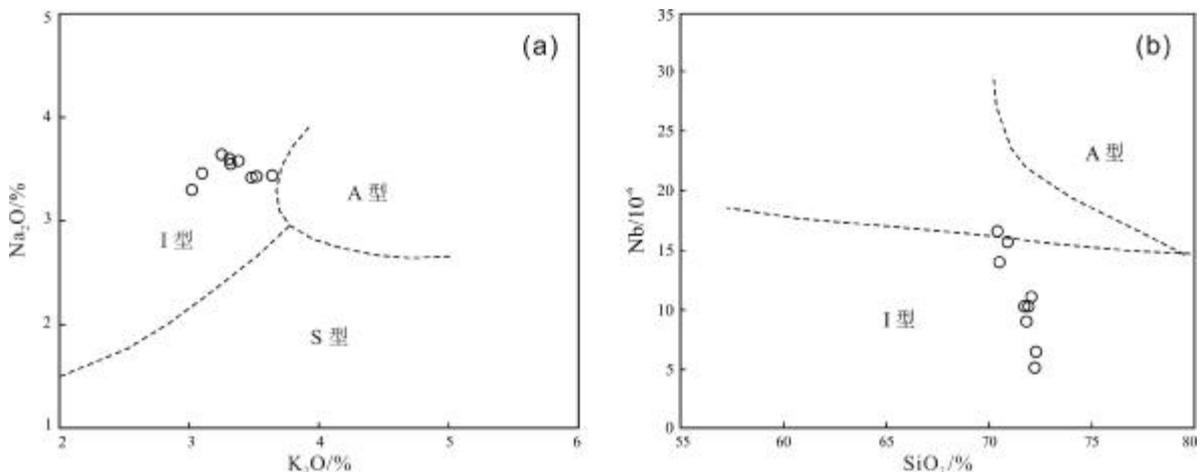


图 7 秦家岭花岗闪长岩 K_2O-Na_2O 图解和 SiO_2-Nb 图解

Fig. 7 The K_2O-Na_2O and SiO_2-Nb diagrams of Qinjialing granodiorite

值为 4.10~11.86, 平均为 8.82, 与中国东部地壳值(9.6)接近^[22]; Nd/Th 值为 3.57~4.53, 平均为 4.09, 与壳源岩石值(≈ 3)接近, 明显低于幔源值(>15)^[12, 22]; Rb/Sr 值为 0.13~0.17, 平均为 0.15, 低于地壳值(0.40), 但高于上地幔值(0.03)^[12, 22], 表明其物质来源为壳源且有少量幔源物质的混入^[12]。

4.3 构造背景

中生代华北岩石圈减薄事件研究资料丰富^[1-13, 24-29]。关于减薄机制的研究, 主流观点包括拆沉和热侵蚀, 吴福元等^[16]通过对辽东半岛侏罗纪(180~156 Ma)和早白垩世(131~117 Ma)花岗岩的研究, 认为早白垩世花岗岩形成温度较高, 推测岩石圈减薄导致的软流圈上涌是热能来源。前人研究表明, 花岗岩主要是在拉张环境中形成, 挤压环境下形成的花岗岩可能非常有限, 伸展环境会产生大量花岗岩^[16]。大多学者认为 A 型花岗岩是判定伸展构造背景的重要岩石学标志^[1-13, 16, 24-27]。吴福元等^[16]通过对辽东半岛早白垩世花岗岩的研究, 发现伸展背景下也可以形成 I 型花岗岩。

研究区内大面积发育花岗岩, 秦家岭花岗闪长岩和红旗岭石英闪长岩在空间位置上与区域内同时期的朝阳苏长辉长岩^[1]、蛟羊峪花岗闪长岩^[3]、大兴岩体^[4]等紧邻, 正是伸展环境的印证。晚中生代时期, 华北克拉通受到破坏, 岩石圈在拉伸背景下发生了强烈的减薄作用, 软流圈地幔物质上涌, 通过底侵作用使下地壳部分熔融, 产生的花岗质岩浆沿构造裂隙上升侵位^[1-13, 24-29], 从而形成了广泛分布的侵入岩。秦家岭花岗闪长岩和红旗岭石英闪长岩正是该构造背景下形成的岩株。

5 结论

(1) LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年结果表明, 秦家岭花岗闪长岩的平均加权年龄为 127.5 ± 0.9 Ma (MSWD=0.8), 红旗岭石英闪长岩的平均加权年龄为 126.5 ± 0.8 Ma (MSWD=1.7), 均形成于早白垩世。

(2) 秦家岭花岗闪长岩为高钾(钙碱性)系列过铝质岩石, 锆石饱和温度变化区间为 755~816 °C, 岩石成因类型为下地壳部分熔融形成的 I 型花岗岩; 红旗岭石英闪长岩为高钾(钙碱性)系列过铝质岩石, Eu 负异常明显, 主要由壳源物质组成, 有少量幔源物质加入。

(3) 秦家岭花岗闪长岩和红旗岭石英闪长岩形成

于辽东地区早白垩世伸展拉张的环境中, 是华北克拉通遭受破坏、岩石圈减薄的产物。

参考文献(References):

- [1] 刘杰勋, 郭巍, 朱凯. 辽东岫岩地区早白垩世侵入岩的年代学、地球化学及地质意义[J]. 岩石学报, 2016, 32(9): 2889-2990.
Liu J X, Guo W, Zhu K. Geochronology, geochemistry and geological significance of the Early Cretaceous intrusive rocks from Xiuyan area, eastern Liaoning Province[J]. Acta Petrologica Sinica, 2016, 32(9): 2889-2900.
- [2] 申亮, 刘俊来, 胡玲, 等. 辽东半岛大营子拆离断层系及其区域构造意义[J]. 中国科学: 地球科学, 2011, 41(4): 437-451.
Shen L, Liu J L, Hu L, et al. The Dayingzi detachment fault system in Liaodong Peninsula and its regional tectonic significance [J]. Science China Earth Sciences, 2011, 54(10): 1469-1483.
- [3] 刘永俊, 韩晓涛, 刘正宏, 等. 辽东风城地区早白垩世花岗岩的锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及地质意义[J]. 地球科学, 2020, 45(1): 145-155.
Liu Y J, Han X T, Liu Z H, et al. Zircon U-Pb ages, geochemical characteristics and geological significance of Early Cretaceous granites in Fengcheng area, eastern Liaoning Province [J]. Earth Science, 2020, 45(1): 145-155.
- [4] 崔维龙, 刘正宏, 杜洋, 等. 辽东地区大兴岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年、地球化学特征及地质意义[J]. 地球科学与环境学报, 2016, 38(5): 623-637.
Cui W L, Liu Z H, Du Y, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating, geochemical characteristics and geological significance of Daxing pluton in Liaodong area[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2016, 38(5): 623-637.
- [5] 张朋, 陈冬, 寇林林, 等. 辽东卧龙泉岩体锆石 U-Pb 年龄、地球化学、Sr-Nd-Pb 同位素特征及其构造意义[J]. 地质学报, 2015, 89(10): 1762-1772.
Zhang P, Chen D, Kou L L, et al. Geochronology, geochemistry and Sr-Nd-Pb isotopes of the Wolongquan intrusion in Liaodong and its tectonic significance [J]. Acta Geologica Sinica, 2015, 89(10): 1762-1772.
- [6] 杨佳林, 顾玉超, 杨凤超, 等. 辽东半岛大金山花岗岩体 SHRIMP U-Pb 年龄、元素地球化学和 Hf 同位素特征及地质意义[J]. 地质论评, 2018, 64(6): 1541-1556.
Yang J L, Gu Y C, Yang F C, et al. SHRIMP U-Pb ages, elements geochemistry and Hf isotopic characteristics of the Dajinshan granite in Liaodong Peninsula and geological significance[J]. Geological Review, 2018, 64(6): 1541-1556.
- [7] 徐义刚. 华北岩石圈减薄的时空不均一特征[J]. 高校地质学报, 2004, 10(3): 324-331.
Xu Y G. Lithospheric thinning beneath North China: A temporal and

- spatial perspective [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2004, 10(3): 324–331.
- [8] 刘福来, 刘平华, 王舫, 等. 胶-辽-吉古元古代造山/活动带巨量变沉积岩系的研究进展[J]. *岩石学报*, 2015, 31(10): 2816–2846.
- Liu F L, Liu P H, Wang F, et al. Progresses and overviews of voluminous meta-sedimentary series within the Paleoproterozoic Jiao-Liao-Ji orogenic/mobile belt, North China Craton[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2015, 31(10): 2816–2846.
- [9] 张拴宏, 赵越, 刘建民, 等. 华北地块北缘晚古生代-早中生代岩浆活动期次、特征及构造背景[J]. *岩石矿物学杂志*, 2010, 29(6): 824–842.
- Zhang S H, Zhao Y, Liu J M, et al. Geochronology, geochemistry and tectonic setting of the Late Paleozoic-Early Mesozoic magmatism in the northern margin of the North China Block: A preliminary review [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2010, 29(6): 824–842.
- [10] 王玉平, 吴文彬, 刘永俊, 等. 辽东岫岩地区晚侏罗世侵入岩的年代学、地球化学特征及地质意义[J]. *现代地质*, 2021, 35(4): 955–967.
- Wang Y P, Wu W B, Liu Y J, et al. Geochronology, geochemistry, and geological significance of Late Jurassic intrusions at Xiuyan, eastern Liaoning Province[J]. *Geoscience*, 2021, 35(4): 955–967.
- [11] 吴福元, 杨进辉, 柳小明. 辽东半岛中生代花岗岩岩浆作用的年代学格架[J]. *高校地质学报*, 2005, 11(3): 305–317.
- Wu F Y, Yang J H, Liu X M. Geochronological framework of the Mesozoic granitic magmatism in the Liaodong Peninsula, Northeast China [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2005, 11(3): 305–317.
- [12] 吴文彬, 申亮, 李海洋, 等. 辽东清河地区晚三叠世侵入岩锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其对华北克拉通东部构造演化的指示 [J]. *地质通报*, 2023, 42(7): 1118–1131.
- Wu W B, Shen L, Li H Y, et al. Zircon U-Pb age and geochemistry of Late Triassic intrusive rocks in Qinghe area, eastern Liaoning Province and its indication to the tectonic evolution of the eastern North China Craton [J]. *Geological Bulletin of China*, 2023, 42(7): 1118–1131.
- [13] 王晓亮, 吕行, 刘永俊, 等. 辽东岫岩地区晚三叠世侵入岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及地质意义[J]. *地质论评*, 2019, 65(2): 401–416.
- Wang X L, Lü X, Liu Y J, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb ages, geochemical characteristics of Late Triassic intrusives in Xiuyan area, eastern Liaoning and their geological significances [J]. *Geological Review*, 2019, 65(2): 401–416.
- [14] Liu Y S, Hu Z C, Zong K Q, et al. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(15): 1535–1546.
- [15] 吴元保, 郑永飞. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约 [J]. *科学通报*, 2004, 49(16): 1589–1604.
- Wu Y B, Zheng Y F. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U-Pb age [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(15): 1554–1569.
- [16] 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 F Y, Li X H, Yang J H, et al. Discussions on the petrogenesis of granites [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(6): 1217–1238.
- [17] 王珍珍, 刘栋, 赵志丹, 等. 冈底斯带南部桑日高分异 I 型花岗岩的岩石成因及其动力学意义 [J]. *岩石学报*, 2017, 33(8): 2479–2493.
- Wang Z Z, Liu D, Zhao Z D, et al. The Sangri highly fractionated I-type granites in southern Gangdese: Petrogenesis and dynamic implication [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2017, 33(8): 2479–2493.
- [18] 陈岩滨, 夏立元, 王翔, 等. 内蒙古中部察哈尔右翼后旗中二叠世石英二长岩锆石 U-Pb 定年及地球化学特征 [J]. *世界地质*, 2022, 41(4): 689–702.
- Chen Y B, Xia L Y, Wang X, et al. Zircon U-Pb dating and geochemical characteristics of Middle Permian quartz monzonite in Chahar Right Back Banner, central Inner Mongolia [J]. *World Geology*, 2022, 41(4): 689–702.
- [19] 马国祥, 王之晟, 郝晓飞, 等. 阿尔山地区金江沟高分异 I 型花岗岩锆石 U-Pb 年龄、岩石地球化学及构造意义 [J]. *世界地质*, 2016, 35(1): 89–99.
- Ma G X, Wang Z S, Hao X F, et al. U-Pb dating, geochemistry and geological setting of I-type granite in Jinjianggou, Arshan area [J]. *Global Geology*, 2016, 35(1): 89–99.
- [20] 刘宇轩, 杨言辰, 韩世炯, 等. 大兴安岭北段塔源二支线铅锌铜矿区岩浆岩岩石成因及其地质意义 [J]. *世界地质*, 2022, 41(1): 38–55.
- Liu Y X, Yang Y C, Han S J, et al. Petrogenesis of magmatic rocks from Tayuanerzhixian Pb-Zn-Cu mining area in northern segment of Great Xing'an Range and its geological significance [J]. *World Geology*, 2022, 41(1): 38–55.
- [21] 李三忠, 郝德峰, 赵国春, 等. 丹东花岗岩的地球化学特征及其成因 [J]. *岩石学报*, 2004, 20(6): 1417–1423.
- Li S Z, Hao D F, Zhao G C, et al. Geochemical features and origin of Dandong granite [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2004, 20(6): 1417–1423.
- [22] Bea F, Arzamastsev A, Montero P, et al. Anomalous alkaline rocks of Soustov, Kola: Evidence of mantle-derived metasomatic fluids affecting crustal materials [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2001, 140(5): 554–566.
- [23] 任廷仙, 李小伟, 王可, 等. 西秦岭碌碡坝石英闪长岩-花岗闪长岩的地球化学、矿物学研究及其地质意义 [J]. *现代地质*, 2021, 35(6): 1651–1676.
- Ren T X, Li X W, Wang K, et al. Geochemistry, mineralogy, and geological significance of the Luchuba quartz diorite-granodiorite in

- the West Qinling Orogen[J]. *Geoscience*, 2021, 35(6): 1651-1676.
- [24]王晓亮, 陈军典, 程识, 等. 辽东半岛金家岭花岗岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学、地球化学特征及地质意义[J]. *世界地质*, 2023, 42(1): 11-25.
- Wang X L, Chen J D, Cheng S, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb chronology, geochemical characteristics and geological significances of Jinjialing granite in Liaodong Peninsula[J]. *World Geology*, 2023, 42(1): 11-25.
- [25]李海洋, 王玉平, 吴文彬, 等. 辽东袁家堡石英二长斑岩的锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及地质意义[J]. *桂林理工大学学报*, 2019, 39(3): 551-557.
- Li H Y, Wang Y P, Wu W B, et al. Zircon U-Pb dating, geochemical characteristics and geological significance of beshtaute in Yuanjiapu, eastern Liaoning [J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 2019, 39(3): 551-557.
- [26]张旗, 潘国强, 李承东, 等. 花岗岩构造环境问题: 关于花岗岩研究的思考之三[J]. *岩石学报*, 2007, 23(11): 2683-2698.
- Zhang Q, Pan G Q, Li C D, et al. Are discrimination diagrams always indicative of correct tectonic settings of granites? Some crucial questions on granite study(3)[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(11): 2683-2698.
- [27]宋运红, 杨凤超, 郝立波, 等. 辽东凤凰山正长花岗岩 SHRIMP U-Pb 年龄、地球化学特征与陆内伸展作用[J]. *中国地质*, 2022, 49(5): 1687-1698.
- Song Y H, Yang F C, Hao L B, et al. SHRIMP U-Pb age, geochemical characteristics and its intracontinental extension of Fenghuangshan syenogranite in the East Liaoning[J]. *Geology in China*, 2022, 49(5): 1687-1698.
- [28]郭春丽, 吴福元, 杨进辉, 等. 中国东部早白垩世岩浆作用的伸展构造性质——以辽东半岛南部饮马湾山岩体为例[J]. *岩石学报*, 2004, 20(5): 1193-1204.
- Guo C L, Wu F Y, Yang J H, et al. The extensional setting of the Early Cretaceous magmatism in eastern China: Example from the Yinmawanshan pluton in southern Liaodong Peninsula [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2004, 20(5): 1193-1204.
- [29]李三忠, 刘建忠, 赵国春, 等. 华北克拉通东部地块中生代变形的关键时限及其对构造的制约——以胶辽地区为例[J]. *岩石学报*, 2004, 20(3): 633-646.
- Li S Z, Liu J Z, Zhao G C, et al. Key geochronology of Mesozoic deformation in the eastern block of the North China Craton and its constraints on regional tectonics: A case of Jiaodong and Liaodong Peninsula[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2004, 20(3): 633-646.
-
- (上接第 338 页/Continued from Page 338)
- [17]赵红格, 刘池洋. 物源分析方法及研究进展[J]. *沉积学报*, 2003, 21(3): 409-415.
- Zhao H G, Liu C Y. Approaches and prospects of provenance analysis [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2003, 21(3): 409-415.
- [18]蔺宏斌, 姚泾利. 鄂尔多斯盆地南部延长组沉积特性与物源探讨[J]. *西安石油学院学报(自然科学版)*, 2000, 15(5): 7-9.
- Lin H B, Yao J L. Depositional feature and material source analysis of Yanchang Group in Eerduosi Basin[J]. *Journal of Xi'an Petroleum Institute (Natural Science Edition)*, 2000, 15(5): 7-9.
- [19]宋凯, 吕剑文, 杜金良, 等. 鄂尔多斯盆地中部上三叠统延长组物源方向分析与三角洲沉积体系[J]. *古地学报*, 2002, 4(3): 59-66.
- Song K, Lü J W, Du J L, et al. Source direction analysis and delta depositional systems of Yanchang Formation of the Upper Triassic in the central Ordos Basin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2002, 4(3): 59-66.
- [20]魏斌, 魏红红, 陈全红, 等. 鄂尔多斯盆地上三叠统延长组物源分析[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 2003, 33(4): 447-450.
- Wei B, Wei H H, Chen Q H, et al. Sediment provenance analysis of Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 2003, 33(4): 447-450.
- [21]李文厚, 刘溪, 张倩, 等. 鄂尔多斯盆地中晚三叠世延长组沉积演化[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 2019, 49(4): 605-621.
- Li W H, Liu X, Zhang Q, et al. Deposition evolution of Middle-Late Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 2019, 49(4): 605-621.