

# 辽北新宾-苇子峪地区太古宙花岗质岩石的形成年代、成因及其地质意义

王康<sup>1</sup> 刘树文<sup>1,†</sup> 王茂江<sup>1</sup> 王伟<sup>2</sup> 阎明<sup>3</sup>

1. 造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871; 2. 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083; 3. 中国石油天然气股份有限公司辽河油田分公司勘探开发研究院, 盘锦 124000; † 通信作者, E-mail: swliu@pku.edu.cn

**摘要** 辽北新宾-苇子峪地区的花岗质岩石主要由英云闪长质-奥长花岗质片麻岩和二长花岗岩-正长花岗岩岩体等组成。为确定其形成年代及成因, 对这些花岗质岩石进行锆石 U-Pb-Hf 同位素和全岩地球化学分析。锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素定年结果表明这些花岗质岩石均形成于新太古代, 英云闪长质和奥长花岗质片麻岩的岩浆结晶年龄分别为  $2588 \pm 4$  Ma (MSWD=1.3) 和  $2587 \pm 6$  Ma (MSWD=1.8), 二长花岗岩-正长花岗岩则侵位于  $2555 \pm 4$  Ma (MSWD=0.51)。全岩地球化学和锆石 Lu-Hf 同位素研究表明, 英云闪长质-奥长花岗质片麻岩形成于俯冲板片的部分熔融, 其原始岩浆在上升过程中受到地幔楔岩石的交代; 而二长花岗岩-正长花岗岩中一部分岩浆起源于变质杂砂岩的部分熔融, 其余形成于以变质玄武岩与变质沉积岩为主要成分的混合源区的部分熔融。结合近年的研究成果, 认为新宾-苇子峪地区的新太古代花岗质岩石可能形成于活动大陆边缘的动力学背景。

**关键词** 新宾-苇子峪地区; 新太古代; 花岗质岩石; 锆石 U-Pb 年龄; 岩石成因; 活动大陆边缘

**中图分类号** P541; P581; P597

## Formation Ages, Petrogenesis and Geological Implications of the Archean Granitoid Rocks in the Xinbin-Weiziyou Area, Northern Liaoning Province

WANG Kang<sup>1</sup>, LIU Shuwen<sup>1,†</sup>, WANG Maojiang<sup>1</sup>, WANG Wei<sup>2</sup>, YAN Ming<sup>3</sup>

1. The Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution (MOE), School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871; 2. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083; 3. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Liaohe Oilfield Company, PetroChina, Panjin 124000; † Corresponding author, E-mail: swliu@pku.edu.cn

**Abstract** The granitoid rocks in the Xinbin-Weiziyou area, northern Liaoning Province, comprise tonalitic-trondhjemitic gneisses and monzogranite-syenogranite plutons. To determine their formation ages and petrogenesis, zircon U-Pb-Hf isotopic analyses and whole-rock geochemical analyses are conducted on these granitoid rocks. LA-ICP-MS zircon U-Pb isotopic dating data reveal that the tonalitic and trondhjemitic gneisses emplaced at  $2588 \pm 4$  Ma (MSWD=1.3) and  $2587 \pm 6$  Ma (MSWD=1.8), respectively, and the monzogranite-syenogranite intrusions formed at  $2555 \pm 4$  Ma (MSWD=0.51). Whole-rock geochemistry and zircon Lu-Hf isotopes suggest that magmatic precursors of the tonalitic-trondhjemitic gneisses were derived from partial melting of subducted slabs and the magmas were contaminated by the mantle wedge materials during their ascent. Some of the monzogranite-syenogranite plutons were produced by partial melting of metagreywackes, whereas the others were generated by partial melting of a mixed source composed of metabasalts and metasedimentary rocks. Integrated with recent studies, the Neoarchean granitoid rocks in the Xinbin-Weiziyou area may have been generated under an active continental margin.

国家自然科学基金(41472165, 41530207, 41772188, 41502179)资助

收稿日期: 2016-10-18; 修回日期: 2016-12-02; 网络出版日期: 2017-03-03

**Key words** Xinbin-Weizi area; Neoproterozoic; granitoid rocks; zircon U-Pb isotopic ages; petrogenesis; active continental margin

大量研究表明华北克拉通东部陆块存在丰富的新太古代晚期(2.6~2.5 Ga)岩浆活动记录<sup>[1-5]</sup>。鉴于基性麻粒岩中记录的变质作用逆时针  $P$ - $T$ - $t$  轨迹、鲁西地区保存的约 2.7 Ga 的科马提岩以及东部陆块广泛分布的花岗质片麻岩,一些学者提出地幔柱模式,并认为 2.7 Ga 是东部陆块主要的大陆生长阶段,2.6~2.5 Ga 主要是地壳再循环<sup>[4,6-7]</sup>。另一些学者认为该时期以微陆块拼合作用为主,胶辽、迁怀、阜平、集宁、许昌和阿拉善 6 个微陆块陆续拼合形成统一的克拉通基底<sup>[5,8]</sup>。本研究组在东部陆块北缘识别出与板块俯冲作用相关的变质火山岩组合和深成 TTG (tonalite-trondhjemite-granodiorite) 片麻岩组合,提出新太古代晚期存在与洋壳板片俯冲相关的岛弧带,认为 2.6~2.5 Ga 同样是华北克拉通重要的大陆生长阶段,侧向增生为主要的生长方式<sup>[9-10]</sup>。

新宾-苇子峪地区所在的辽北变质地块位于华北克拉通东部陆块北缘东段,其东部和西部分别与吉南变质地块和辽西变质地块相邻,南部与保存有约 3.8~2.9 Ga 岩石记录的鞍山变质地块相接<sup>[11-13]</sup>。近年来,辽北变质地块的研究集中在研究区以北的抚顺-清原地区和以南的鞍山地区,对地处两者之间的新宾-苇子峪地区缺乏系统的地球化学和年代学研究<sup>[9,14-19]</sup>。新宾-苇子峪地区位于北部的新太古代抚顺-清原变质地体与南部的早中太古代鞍山变质地块之间的衔接部位,对其开展早前寒武纪地质演化的研究,将为华北克拉通东部早期地壳演化提供新的证据。

本文报道辽北新宾-苇子峪地区新太古代花岗质岩石的岩石学和地球化学特征、锆石 U-Pb 同位素年龄和锆石 Lu-Hf 同位素特征,旨在确定这些花岗质岩石的形成年代、成因及其在华北克拉通东部陆块新太古代晚期大陆地壳生长和演化过程中的意义。

## 1 地质背景

辽北地区是华北克拉通北缘东段早前寒武纪变质基底的主要出露区之一,由花岗岩-绿岩带和高级变质区组成<sup>[20]</sup>。前人认为花岗岩-绿岩带主要分布在浑河断裂以北的清原-抚顺地区,主要由 TTG 片麻岩和代表变质火山岩-沉积序列的表壳岩系组

成。表壳岩主要包括角闪二辉石岩、斜长角闪岩、角闪石岩、黑云/角闪斜长片麻岩、磁铁石英岩和大理岩等,变质程度主要为角闪岩相。该表壳岩系中有块状 Cu-Zn 硫化物矿床产出。高级变质区主要由 TTG 片麻岩和高角闪岩相-麻粒岩相变质的表壳岩系以及花岗闪长岩-二长花岗岩-正长花岗岩岩体组成,并发育少量紫苏花岗岩,主要分布在浑河断裂以南的永陵-小莱河穹窿区以及花岗岩-绿岩带北部的线金厂-五凤岭穹窿区<sup>[17-22]</sup>(图 1)。

新宾-苇子峪地区位于前人划分的高级变质区南部,西连汤图-马圈子杂岩区,北接小莱河-永陵-湾甸子卵形隆起区,西部和南部均与元古代至中生代的火山岩-沉积岩盖层不整合接触或断层接触<sup>[17,20]</sup>(图 1 和 2)。研究区的主要岩石类型为 TTG 片麻岩、二长花岗岩-正长花岗岩以及少量石英闪长岩,很少有表壳岩出露(图 2)。TTG 片麻岩和二长花岗岩-正长花岗岩之间呈明显的侵入接触关系,常见二长花岗岩-正长花岗岩脉体侵入 TTG 片麻岩中,说明其形成年代晚于 TTG 片麻岩(图 3(a)和(b))。其中,TTG 片麻岩在研究区广泛分布,以英云闪长质和奥长花岗质片麻岩为主,两者之间界线不清晰。英云闪长质片麻岩呈灰至暗灰色,强烈片麻理化,通常为片麻状、条带状构造,暗色矿物主要为角闪石和黑云母,并聚集成条带定向分布(图 3(c))。奥长花岗质片麻岩呈灰白色,暗色矿物较少,多为黑云母(图 3(d))。二长花岗岩-正长花岗岩岩体多以侵入体的形式出露于新宾南部、苇子峪南部和永陵西部(图 2),通常呈灰白至肉红色,似斑状或中粗粒结构,弱片麻状至块状构造,局部有黑云母或角闪石包体(图 3(e)和(f))。

对辽北地区的地质年代学研究集中在研究区以北和以西地区。前人通过角闪石  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  和全岩 Sm-Nd 同位素等方法,得到清原地区表壳岩的年龄为 3.0~2.8 Ga,是辽北地区存在中太古代岩石记录的主要依据<sup>[20,22-23]</sup>。然而,近年来的研究表明,辽北地区浑河断裂两侧都由以 TTG 为主的花岗质岩石和表壳岩系组成,一系列高精度的锆石 U-Pb 定年数据显示这些岩石均形成于 2.6~2.5 Ga 之间,不支持以往认为的辽北地区存在大范围中太古代岩石的观点<sup>[9,14-17,19]</sup>。



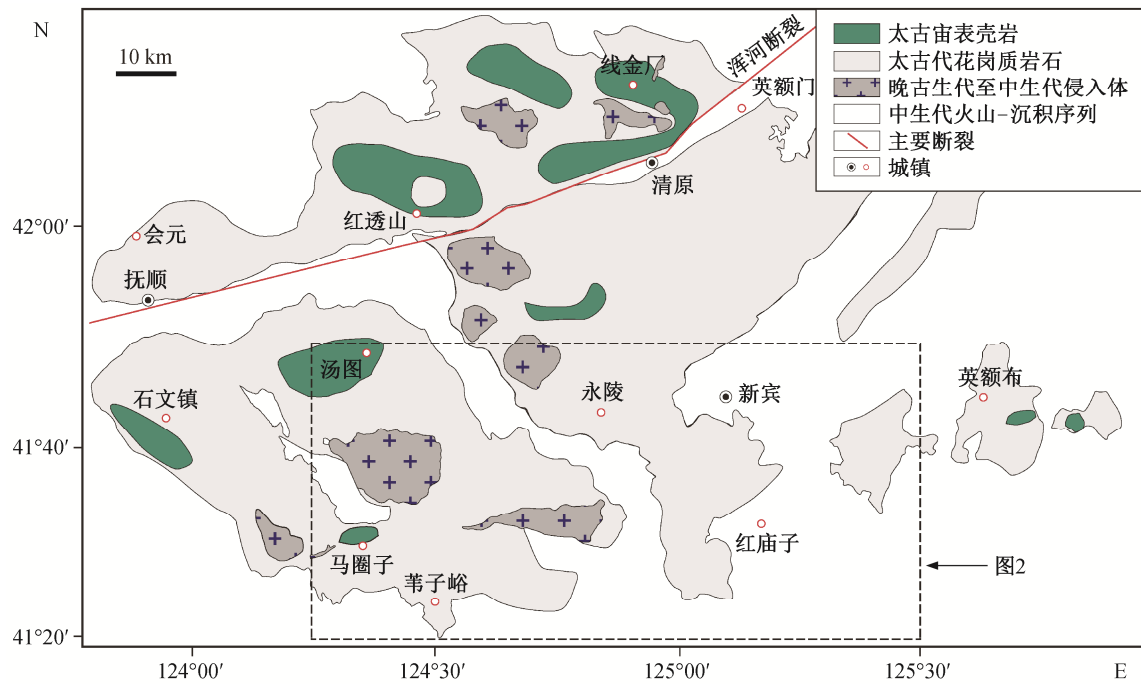


图 1 辽北地区前寒武纪变质基底地质简图(修改自文献[9])

Fig. 1 Simplified geological map of the northern Liaoning Province showing the Precambrian metamorphic basement (modified from Ref. [9])

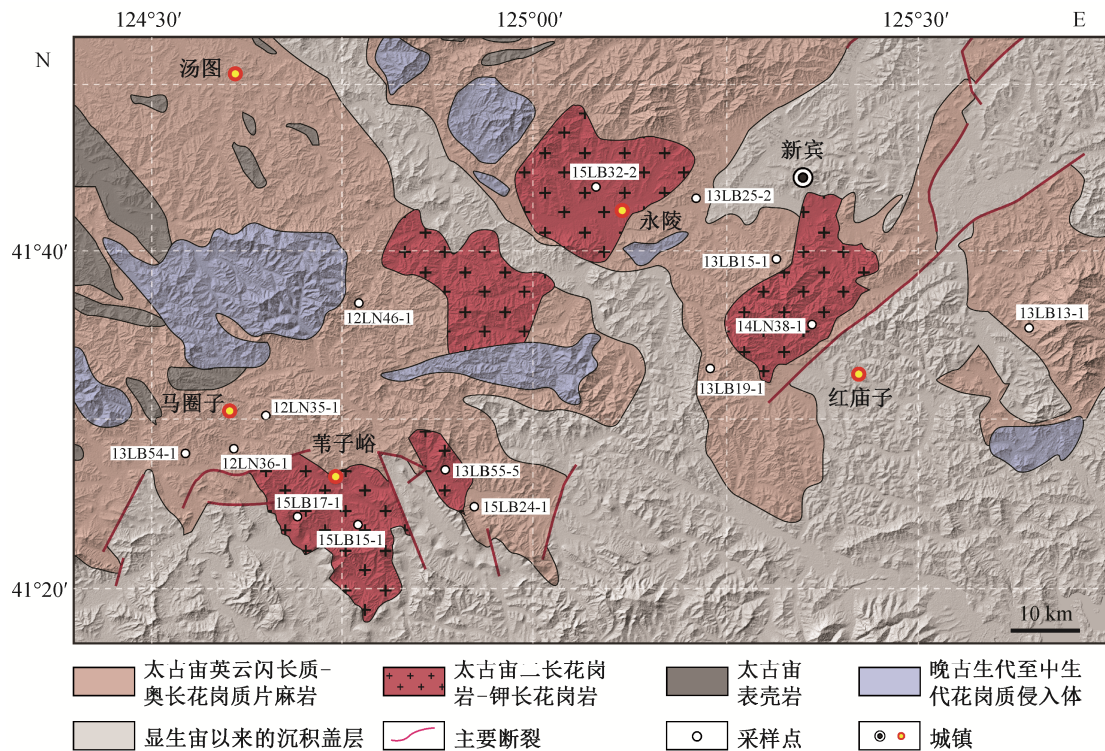


图 2 新宾-苇子峪地区地质图

Fig. 2 Detailed geological map of the Xinbin-Weiziyu area

地质资料修改自辽宁省区域地质调查队编绘的宽甸幅(1967年)、桓仁幅(1975年)和营盘幅(1975年) 1:20 万地质图以及吉林省区域地质调查队编绘的通化幅(1976年) 1:20 万地质图, 数字高程模型(DEM)资料来自美国地质调查局(USGS)开放数据



## 2 岩石学特征

本研究采自新宾-苇子峪地区的花岗质岩石样品共 14 个, 包括 9 个英云闪长质-奥长花岗质片麻岩样品和 5 个二长花岗岩-正长花岗岩样品。采样点位置如图 2 所示。代表性岩石样品的岩相学特征描述如下。

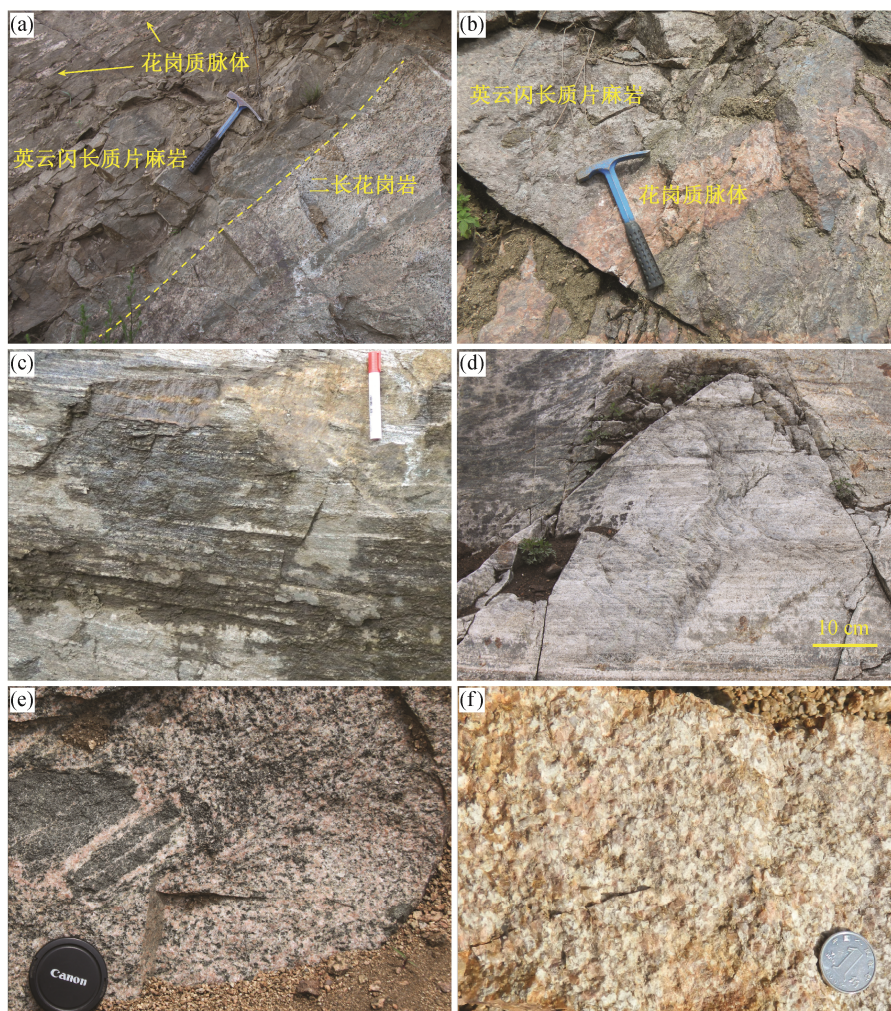
样品 13LB13-1 为奥长花岗质片麻岩, 灰白色, 中细粒的粒状变晶结构, 片麻状构造。主要矿物为斜长石(65%)、石英(32%)、黑云母(2%)和少量角闪石(图 4(a)), 副矿物有锆石、磷灰石等。

样品 13LB54-1 为英云闪长质片麻岩, 暗灰色, 角闪石等矿物集合体呈条带状定向分布。主要矿物

为斜长石(60%)、石英(30%)、角闪石(8%)和黑云母(2%), 显微镜下可见部分斜长石颗粒的绢云母化(图 4(b)), 副矿物有锆石、榍石、磷灰石和磁铁矿等。

样品 13LB55-1 为二长花岗岩, 新鲜面为灰白至肉红色, 花岗变晶结构, 块状构造。主要矿物为斜长石(37%)、微斜长石(35%)、石英(22%)和黑云母(6%), 斜长石普遍发生蚀变作用(图 4(c)), 副矿物为锆石、磷灰石、独居石等。

样品 15LB17-1 为正长花岗岩, 肉红色, 花岗变晶结构, 块状构造。主要矿物为微斜长石(42%)、石英(40%)和斜长石(18%), 暗色矿物含量较低, 主要为黑云母(图 4(d)), 斜长石蚀变严重, 副矿物为锆石、磷灰石等。

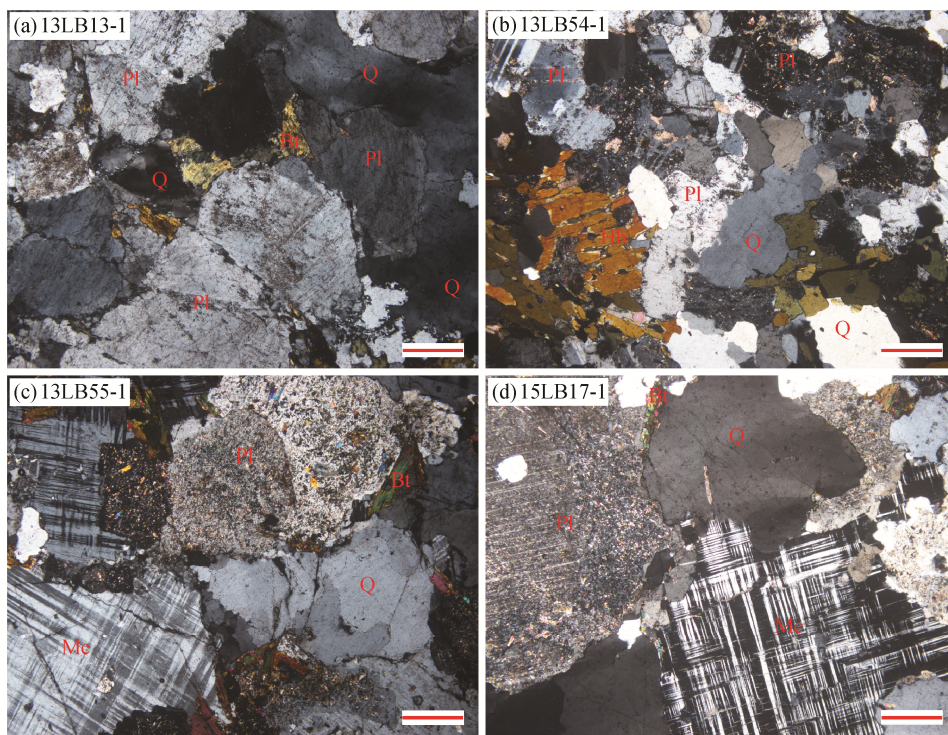


(a) 二长花岗岩侵入英云闪长质片麻岩中; (b) 英云闪长质片麻岩中贯穿的花岗质脉体; (c) 英云闪长质片麻岩, 强烈片麻理化; (d) 奥长花岗质片麻岩, 暗色矿物含量比英云闪长质片麻岩少; (e) 二长花岗岩, 含表壳岩捕掳体; (f) 正长花岗岩

图 3 新宾-苇子峪地区花岗质岩石的野外露头照片

Fig. 3 Field photographs for the granitoid rocks in the Xinbin-Weizi area





(a) 奥长花岗质片麻岩; (b) 英云闪长质片麻岩; (c) 二长花岗岩; (d) 正长花岗岩。Pl: 斜长石; Mc: 微斜长石; Q: 石英; Bt: 黑云母; Hb: 角闪石。比例尺表示 0.5 mm

图 4 新宾-苇子峪地区花岗岩质岩石的显微照片

Fig. 4 Photomicrographs for representative granitoid rocks in the Xinbin-Weizi area

### 3 测试方法

在去除岩石样品的风化表面后,将新鲜的部分粉碎至 200 目。全岩常量元素分析在北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室完成。称取约 1 g 岩石粉末于坩埚中,950℃ 加热半小时,通过称重法测量烧失量。常量元素用 X 荧光光谱法(XRF)测定,分析精度为 0.5%。具体方法参见文献[24]。

微量元素分析在北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室完成。精确称量 25 mg 岩石粉末至 Teflon 罐中,加入 1.5 mL 浓硝酸和 1.5 mL 浓氢氟酸,加盖后于 80℃ 加热 24 小时,开盖蒸发至湿盐状。向罐中加入 1.5 mL 浓硝酸、1.5 mL 浓氢氟酸和 0.5 mL 高氯酸,加盖置于密闭钢瓶中,180℃ 加热至少 48 小时,使样品粉末完全溶解。再次将其蒸发至湿盐状,用 1% 硝酸溶液定容至 50 mL 待测。微量元素用 ELEMENT-I 型等离子质谱仪测量,标样选用 GSR-1, GSR-9 和 GSR-14。

将岩石样品粉碎至 80~100 目,用常规的浮选和磁选方法分选出单矿物后,在双目显微镜下手动

挑选锆石颗粒。将挑选出的锆石颗粒置于环氧树脂中固定,待树脂充分固结后,抛磨至锆石粒径的大约 1/2,使其内部充分暴露,然后对锆石进行显微照相。锆石的阴极发光(CL)图像在北京大学电镜室扫描电子显微镜下完成。

LA-ICP-MS 锆石微区 U-Pb 同位素测定在北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室 Agilent 7500 型 ICP-MS 和 COMPex Pro102 型准分子激光器(波长 193 nm)的联机上进行。激光束斑直径为 32  $\mu\text{m}$ ,激光剥蚀深度 20~40  $\mu\text{m}$ 。锆石年龄使用 91500 锆石作为外标,元素含量使用 NIST610 作为外标。具体方法见文献[17]。普通铅校正采用 Andersen<sup>[25]</sup>的方法,用 Isoplot 程序<sup>[25-26]</sup>进行年龄计算。

锆石原位 Lu-Hf 同位素测试在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室 Neptune Plus MC-ICP-MS 和 Geolas 2005 型准分子激光器(波长 193 nm)的联机上完成。激光束斑直径为 44  $\mu\text{m}$ ,激光剥蚀频率为 8 Hz,激光能量密度为 5.3 J/cm<sup>2</sup>。用 91500 和 GJ-1 锆石作为外标。具体方法见文献[27]。

## 4 分析结果

### 4.1 岩石化学

对辽北新宾-苇子峪地区的 14 个代表性样品进行全岩地球化学分析, 包括 9 个英云闪长质-奥长花岗质片麻岩样品和 5 个二长花岗岩-正长花岗岩样品。分析结果见表 1。

#### 4.1.1 英云闪长质-奥长花岗质片麻岩

在 Ab-An-Or 分类图上, 2 个样品(12LN36-1, 13LB54-1)落入英云闪长岩区, 7 个样品(12LN35-1, 12LN46-1, 13LB13-1, 13LB15-1, 13LB19-1, 13LB25-2, 15LB24-1)落入奥长花岗岩区(图 5(a))。这些样品的  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$  和  $\text{TFe}_2\text{O}_3$  (全铁)含量分别为 62.67%~72.02%, 0.38%~4.79%, 0.60%~3.53% 和 1.48%~6.55%, 对应的  $\text{Mg\#}$  ( $100 \times \text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}_{\text{total}})$  原子数之比)为 36~62。除英云闪长岩样品 13LB13-1 具有极低的  $\text{K}_2\text{O}$  含量(0.08%)外, 其余样品  $\text{K}_2\text{O}$  和  $\text{Na}_2\text{O}$  含量的范围分别为 1.21%~2.09% 和 3.25%~6.51%,  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  比值范围为 0.23~0.44。在  $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}-\text{CaO}$  三元图上, 多数样品落在 TTG 区域(图 5(b))<sup>[28]</sup>。在  $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$  分类图上, 除样品 13LB13-1 落在低钾拉斑系列的区域外, 其余样品都落入中钾钙碱性系列区域(图 5(c))。在  $\text{MgO}-\text{SiO}_2$  图上, 部分样品呈现高  $\text{MgO}$  的特点, 落在高硅埃达克岩区, 其余样品落在玄武岩熔融区和高硅埃达克岩区的重叠部分区域(图 5(d))<sup>[29]</sup>。除少数样品(13LB15-1 和 13LB19-1)为强过铝质外, 多数样品为偏铝质和过铝质岩石,  $\text{A}/\text{CNK}$  值的范围为 0.84~1.07。

英云闪长质-奥长花岗质片麻岩样品的稀土总量(TREE)变化范围较大, 介于 21~147  $\mu\text{g/g}$  之间。在球粒陨石标准化的稀土图谱上, 所有样品都显示中等到强烈的轻重稀土分异,  $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$  和  $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$  分别为 2.59~45.2 和 0.58~3.99, 并伴随微弱的 Eu 负异常到 Eu 正异常( $\text{Eu}_{\text{N}}/\text{Eu}_{\text{N}}^*$  为 0.92~1.76, 图 6(a))<sup>[30]</sup>。在原始地幔标准化的元素蛛网图上, 这些样品表现出明显的 Rb, Ba 等大离子亲石元素的富集和不同程度的 Nb, Ta, P 和 Ti 亏损(图 6(b))<sup>[30]</sup>。此外, 这些样品的 Y 和 Yb 的含量都较低, 分别为 2.21~10.9  $\mu\text{g/g}$  和 0.20~1.13  $\mu\text{g/g}$ ,  $\text{Sr}/\text{Y}$  在 43.3~118 之间。

#### 4.1.2 二长花岗岩-正长花岗岩

5 个二长花岗岩-正长花岗岩样品中, 1 个样品(15LB32-2)落入 Ab-An-Or 分类图的花岗闪长岩区域, 4 个样品(13LB55-5, 14LN38-1, 15LB15-1 和 15LB17-1)落入花岗岩区域(图 5(a))。样品的  $\text{SiO}_2$ ,

$\text{TFe}_2\text{O}_3$  和  $\text{MgO}$  含量分别为 63.70%~75.07%, 1.37%~6.59% 和 0.20%~3.04%,  $\text{Mg\#}$  为 21~49 (低于英云闪长质-奥长花岗质片麻岩)。在  $\text{MgO}-\text{SiO}_2$  图上, 多数样品落在玄武岩部分熔融区域(图 5(d))。 $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  含量和  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  比值分别为 3.34%~5.56%, 2.61%~4.22% 和 1.06~1.88, 在  $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$  图上落在高钾钙碱性系列和钾玄岩系列区域(图 5(c))。 $\text{CaO}$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量的变化范围分别是 1.35%~3.24% 和 13.54%~15.47%。多数样品属于偏铝质到过铝质岩石, 二长花岗岩样品 15LB17-1 为强过铝质岩石, 它们的  $\text{A}/\text{CNK}$  变化范围为 0.98~1.12。在  $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}-\text{CaO}$  图上, 这些样品集中在黑云母花岗岩区域(图 5(b))。

二长花岗岩-正长花岗岩样品的稀土元素总量(125~334  $\mu\text{g/g}$ )略高于英云闪长质-奥长花岗质片麻岩, 在球粒陨石标准化的稀土图谱上均呈右斜式的稀土配分模式,  $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$  和  $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$  分别为 13.7~79.2 和 2.02~4.98 (图 6(c))。 $\text{Eu}_{\text{N}}/\text{Eu}_{\text{N}}^*$  值变化范围为 0.77~1.05, 显示 Eu 负异常到微弱的正异常(图 6(c))。在原始地幔标准化的微量元素蛛网图上表现出显著的 Nb, Ta 和 Ti 亏损, 并富集大离子亲石元素(如 Rb, Ba 等)(图 6(d))。Y 和 Yb 的含量分别为 3.39~18.1 和 0.38~1.76  $\mu\text{g/g}$ ,  $\text{Sr}/\text{Y}$  为 24.4~97.7。

### 4.2 锆石 U-Pb 同位素年代学和 Lu-Hf 同位素体系

近年来的研究表明, 研究区以北抚顺-清原一带的花岗质岩石主要形成于 2.56~2.50 Ma。其中, 英云闪长质片麻岩和奥长花岗质片麻岩主要有 3 期, 分别是约 2.56 Ma, 约 2.53 Ma 和 2.50 Ma; 二长花岗岩主要形成于约 2.53~2.52 Ma<sup>[9,17]</sup>。研究区西北汤图-马圈子地区的英云闪长质-奥长花岗质片麻岩主要形成于两个时期, 分别是 2.60~2.58 Ma 和 2.55~2.53 Ma<sup>[15]</sup>。研究区新宾-苇子峪地区则缺少年代学资料。

为了进一步理清辽北地区不同花岗质岩石的侵位年代和它们之间的关系, 本文对新宾-苇子峪地区 3 个代表性样品进行锆石 U-Pb 和 Lu-Hf 同位素分析, 包括一个奥长花岗质片麻岩样品(13LB13-1)、一个英云闪长质片麻岩样品(13LB54-1)和一个二长花岗岩样品(13LB55-5)。分析结果见表 2 和 3。

#### 4.2.1 奥长花岗质片麻岩(13LB13-1)

样品采自研究区东部旺清门地区(图 2), 共选择 24 颗锆石的 24 个点进行锆石 U-Pb 同位素测试

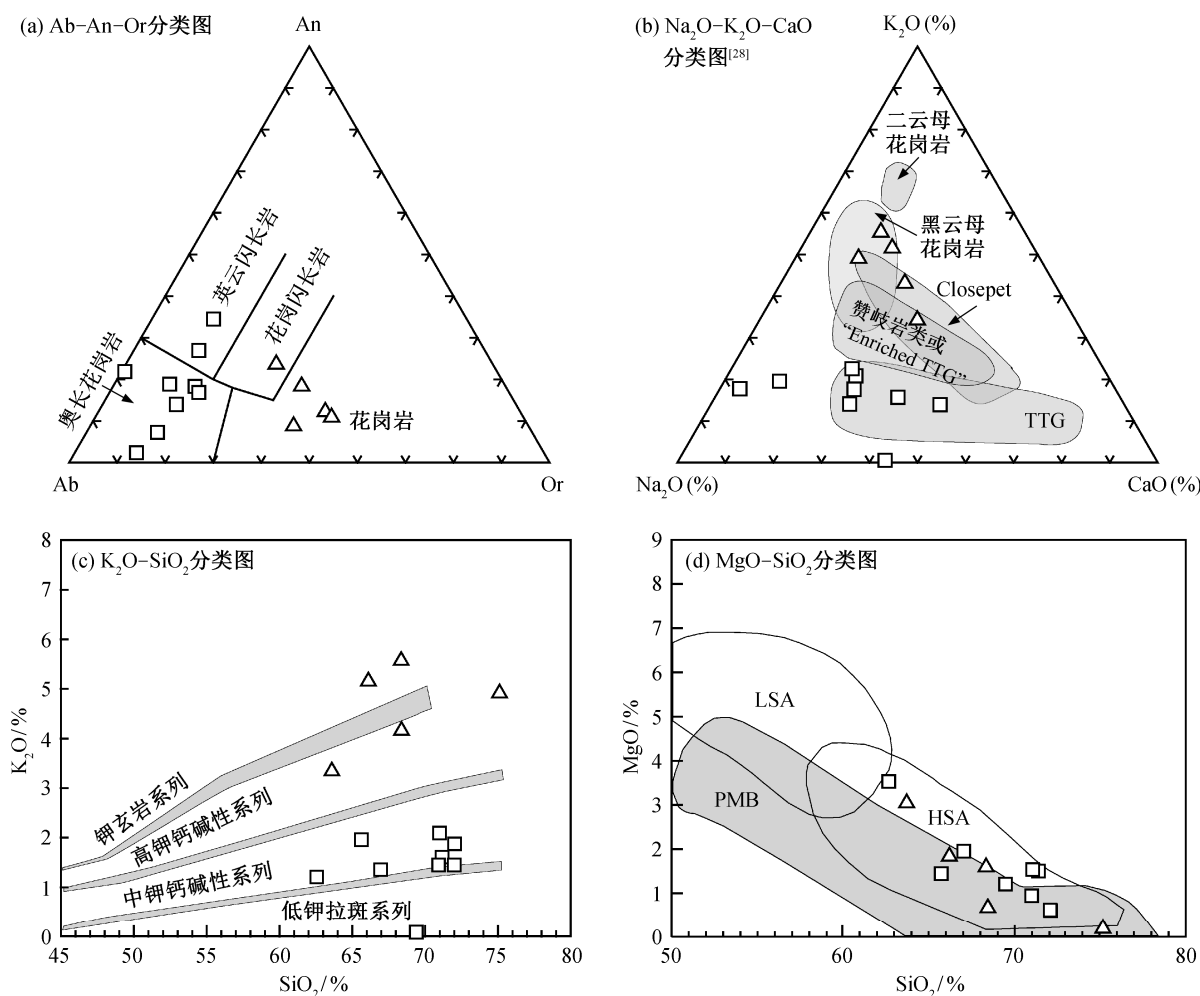
表 1 新宾-苇子峪地区花岗岩岩石典型样品的全岩常量元素和微量元素分析结果  
Table 1 Analytical data of whole-rock major and trace elements and related parameters of representative samples from the Xinbin-Weiziyu area

分析项	英云闪长质-奥长花岗岩片麻岩										二长花岗岩-正长花岗岩					
	12LN46-1	13LB15-1	13LB19-1	13LB25-2	13LB54-1	15LB24-1	12LN35-1	13LB13-1	12LN36-1	13LB55-5	14LN38-1	15LB15-1	15LB17-1	15LB32-2		
SiO <sub>2</sub>	72.02	71.34	72.00	65.70	62.67	71.00	67.00	69.42	70.94	68.40	66.17	68.42	75.07	63.70		
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.11	13.79	15.38	15.75	15.22	14.79	15.86	15.95	15.05	15.47	14.68	14.44	13.54	14.40		
TF <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.50	3.53	2.21	4.17	6.55	2.22	3.64	1.48	2.79	2.60	4.78	3.58	1.37	6.59		
CaO	1.15	2.14	0.38	3.14	4.13	2.36	2.79	4.79	3.53	1.56	1.95	2.54	1.35	3.24		
MgO	0.60	1.50	0.62	1.45	3.53	1.54	1.95	1.21	0.94	0.66	1.83	1.78	0.19	3.04		
K <sub>2</sub> O	1.87	1.65	1.45	1.96	1.21	2.09	1.35	0.08	1.45	5.56	5.15	4.15	4.91	3.34		
Na <sub>2</sub> O	6.51	4.09	6.28	5.95	3.25	4.77	5.38	6.17	4.19	4.22	2.90	2.95	2.61	3.16		
MnO	0.02	0.04	0.04	0.06	0.08	0.03	0.05	0.01	0.03	0.03	0.05	0.05	0.01	0.08		
TiO <sub>2</sub>	0.17	0.29	0.22	0.55	0.52	0.26	0.44	0.28	0.35	0.26	0.38	0.41	0.13	0.56		
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.04	0.04	0.06	0.17	0.22	0.09	0.12	0.07	0.07	0.13	0.27	0.16	0.04	0.17		
LOI	0.90	1.45	1.27	0.89	2.46	0.70	1.24	0.38	0.60	0.87	1.56	1.28	0.61	1.49		
总和	99.88	99.86	99.92	99.79	99.83	99.85	99.83	99.83	99.93	99.75	99.73	99.76	99.83	99.77		
K <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	0.29	0.40	0.23	0.33	0.37	0.44	0.25	0.01	0.35	1.32	1.77	1.41	1.88	1.06		
Mg#	44	46	36	41	52	58	52	62	40	34	43	49	22	48		
A/CNK	1.02	1.11	1.22	0.89	1.07	1.03	1.03	0.84	1.01	0.98	1.06	1.03	1.12	0.98		
Sc	1.53	4.10	1.76	6.86	10.9	2.92	6.06	7.10	2.15	1.54	23	6.13	0.49	11.2		
V	16.5	42	26	57	101	34	63	43	51	55	79	59	22	112		
Cr	8.78					14.1	63		10.1		77	66	7.17	153		
Co	1.80	11.9	5.03	8.28	19.6	5.10	10.1	4.01	7.11	6.89	9.08	10.6	2.37	22		
Ni	6.12	12.0	7.18	9.46	62	11.4	37	12.7	10.6		283	22	3.68	52		
Ga	30	17.1	15.5	19.1	18.4	19.9	55	17.8	28	24	18.7	16.2	13.9	19.7		
Rb	95	54	68	99	35	85	42	1.97	94	196	173	162	129	148		
Sr	520	431	223	473	529	590	787	1071	255	639	362	450	331	441		
Y	6.44	5.97	2.99	10.9	8.67	5.43	6.68	9.68	2.21	7.92	5.76	9.48	3.39	18.1		
Zr	31	195	110	186	107	109	116	132	46	415	113	164	171	169		
Nb	2.29	5.60	2.69	7.80	5.51	6.70	6.11	6.04	4.09	4.74	7.96	6.07	2.31	9.31		
Cs	1.60	0.88	1.72	1.40	0.21	1.53	0.99	0.15	2.71	1.91	5.59	9.61	0.75	5.46		

续表

分析项	英云闪长质-奥长花岗质片麻岩										二长花岗岩-正长花岗岩									
	12LN46-1	13LB15-1	13LB19-1	13LB25-2	13LB54-1	15LB24-1	12LN35-1	13LB13-1	12LN36-1	13LB55-5	14LN38-1	15LB15-1	15LB17-1	15LB32-2						
Ba	371	473	288	725	575	618	794	130	213	1824	1520	1179	1043	693						
La	4.07	21	9.66	29	36	18.7	26	27	12.6	93	27	49	37	34						
Ce	7.24	50	23	59	68	39	50	52	24	171	56	89	67	64						
Pr	0.86	3.80	1.76	6.07	7.08	4.19	5.29	5.38	2.32	14.2	6.27	8.60	6.68	7.05						
Nd	3.33	11.9	5.70	22	25	16.1	19.7	18.7	7.36	41	24	28	21	26						
Sm	0.68	1.75	0.86	3.61	3.45	2.56	3.05	2.78	0.97	4.59	3.90	3.62	2.48	4.58						
Eu	0.41	0.63	0.33	1.14	1.12	0.77	1.27	0.89	0.55	1.28	1.30	1.13	0.75	1.12						
Gd	0.79	1.75	0.87	3.48	3.19	2.01	2.74	3.13	0.95	3.85	3.66	3.30	1.93	4.30						
Tb	0.12	0.21	0.11	0.43	0.36	0.24	0.28	0.33	0.09	0.35	0.33	0.38	0.17	0.60						
Dy	0.79	1.04	0.57	2.12	1.67	1.10	1.29	1.74	0.41	1.47	1.44	1.80	0.64	3.19						
Ho	0.19	0.21	0.12	0.43	0.34	0.20	0.23	0.32	0.07	0.28	0.24	0.35	0.12	0.65						
Er	0.75	0.60	0.31	1.04	0.87	0.54	0.79	1.10	0.27	0.85	0.73	0.99	0.37	1.89						
Tm	0.14	0.09	0.05	0.14	0.13	0.08	0.09	0.14	0.03	0.12	0.09	0.15	0.05	0.28						
Yb	1.13	0.64	0.35	0.85	0.83	0.55	0.57	1.00	0.20	0.85	0.61	0.94	0.38	1.76						
Lu	0.18	0.11	0.06	0.14	0.13	0.09	0.08	0.15	0.03	0.14	0.09	0.15	0.07	0.27						
Hf	0.73	5.45	3.05	5.00	2.75	3.09	3.29	3.41	1.05	9.80	2.99	4.41	5.12	4.69						
Ta	0.28	1.52	1.27	1.63	1.34	0.71	0.19	0.57	0.66	0.58	0.45	0.30	0.15	0.56						
Pb	8.82	8.93	8.10	10.3	7.52	14.2	11.3	4.47	10.4	31	7.82	19.3	21	13.8						
Th	1.05	7.92	4.33	3.03	4.92	14.5	1.56	8.99	6.86	33	10.9	14.2	16.2	12.2						
U	2.26	0.91	0.97	0.58	0.18	1.14	0.14	0.47	0.33	1.82	0.52	0.74	1.18	0.66						
TREE	21	94	44	130	147	86	111	114	50	334	125	187	139	149						
Eu <sub>N</sub> /Eu* <sub>N</sub>	1.70	1.11	1.16	0.98	1.04	1.04	1.35	0.92	1.76	0.93	1.06	1.00	1.05	0.77						
(La/Yb) <sub>N</sub>	2.59	23	20.0	25	31	24	33	19.4	45	79	31	37	69	13.7						
Yb <sub>N</sub>	6.64	3.77	2.04	4.98	4.86	3.25	3.34	5.88	1.18	4.97	3.58	5.55	2.25	10.4						
(Gd/Yb) <sub>N</sub>	0.58	2.26	2.09	3.40	3.19	3.02	3.99	2.59	3.92	3.76	4.98	2.89	4.19	2.02						
Sr/Y	81	72	74	43	61	109	118	111	115	81	63	47	98	24						

说明: Mg# 为  $100 \times \text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}_{\text{total}})$  原子数之比, A/CNK 为  $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$  分子数之比, (La/Yb)<sub>N</sub> 和 (Gd/Yb)<sub>N</sub> 为球粒陨石标准化后的比值, TREE 为稀土元素总量, LOI 为烧失量, 常量元素和微量元素含量的单位分别为 % 和  $\mu\text{g/g}$ 。



PMB: 玄武岩部分熔融区; LSA: 低硅埃达克岩; HSA: 高硅埃达克岩<sup>[29]</sup>。正方形代表英云闪长质-奥长花岗质片麻岩, 三角形代表二长花岗岩-正长花岗岩

图 5 岩石地球化学分类图

Fig. 5 Geochemical classification diagrams

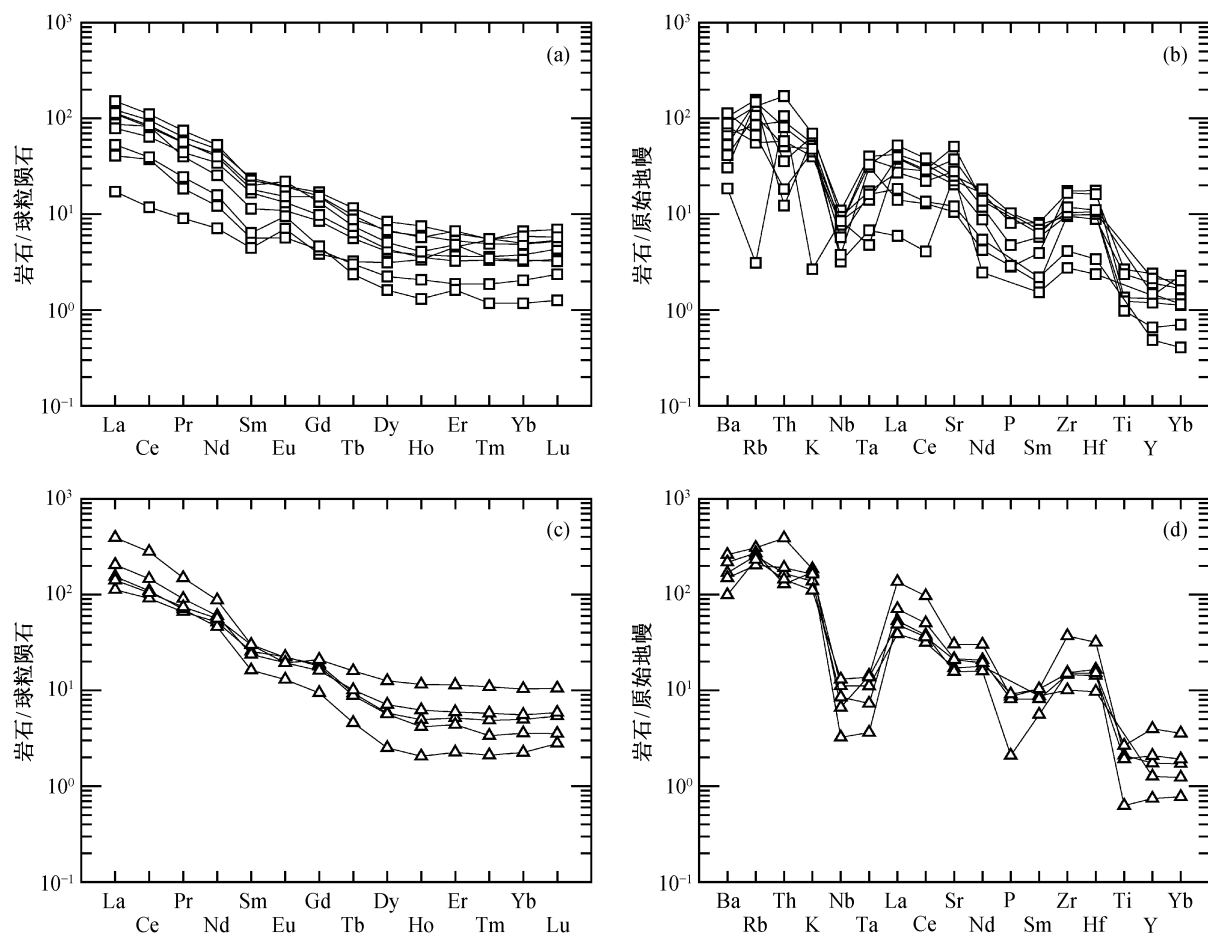
(表 2)。锆石粒度较大, 长柱状, 晶棱、晶面清楚 (图 7(a))。CL 图像显示, 部分锆石具有核边结构 (测试点 8), 多数锆石颗粒显示模糊的环带或无复杂内部结构, 可能代表锆石受到强烈的后期改造 (图 7(a))。6 个继承锆石内核的  $\text{Th}/\text{U}$  为 0.25~1.76, 均存在不同程度的铅丢失, 但显示一致的  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  表观年龄, 得到的上交点年龄为  $2635 \pm 6$  Ma (MSWD = 0.37)。另外 15 个测试点位于具有模糊环带和具有核边结构的锆石颗粒边部,  $\text{Th}/\text{U}$  为 0.21~1.38, 符合岩浆成因锆石特征, 得到的上交点年龄为  $2587 \pm 6$  Ma (MSWD = 1.8)。谐和度在 95%~105% 之间测点的  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  加权平均年龄为  $2585 \pm 14$  Ma (MSWD = 0.19), 与上交点年龄一致 (图 8(a))。我们选择上交

点年龄  $2587 \pm 6$  Ma 作为该样品的岩石结晶年龄。其余 3 个测试点均不谐和, 具有 2532~2463 Ma 的  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  表观年龄 (图 8(a)), 可能是因为后期热事件的影响而发生铅丢失。

该样品共选择 14 个已定年的锆石点位进行 Lu-Hf 同位素分析。 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}(t_1)$  在 0.281318~0.281346 之间, 显示非常一致的 Hf 同位素组成, 暗示样品来自单一源区<sup>[31]</sup>。根据岩石结晶年龄 ( $t_2 = 2587$  Ma) 计算,  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t_2)$  的变化范围为 6.7~7.7,  $t_{\text{DM}}$  为 2.59~2.63 Ga (图 8(d), 表 3)。

#### 4.2.2 英云闪长质片麻岩 (13LB54-1)

样品采自马圈子镇西南方 (图 2), 共选择 25 颗锆石的 25 个点进行锆石 U-Pb 同位素测试 (表 2)。



标准化数据来自文献[30]; 正方形代表英云闪长质-奥长花岗质片麻岩, 三角形代表二长花岗岩-正长花岗岩

图6 球粒陨石标准化的稀土图谱((a)和(c))和原始地幔标准化的微量元素蛛网图((b)和(d))

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns ((a) and (c)) and primitive mantle-normalized multi-element patterns ((b) and (d))

锆石颗粒多呈短柱状至卵圆状。在 CL 图像上, 这些锆石没有复杂的内部结构, 部分有很窄的亮边(图 7(b))。15 个测试点具有一致的  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  表观年龄, Th/U 的变化范围为 0.19~0.64, 显示岩浆成因锆石特征, 得到的上交点年龄为  $2588 \pm 4$  Ma (MSWD = 1.3)。谐和度在 95%~105% 之间测试点的  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  加权平均年龄为  $2588 \pm 12$  Ma (MSWD = 0.21), 与上交点年龄一致(图 8(b))。我们选择上交点年龄  $2588 \pm 4$  Ma 作为该样品的岩石结晶年龄。其余 10 个测试点显示 2362~2569 Ma 的  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  表观年龄(图 8(b)), 可能是后期热事件改造的结果。

该样品选择 15 个已定年的锆石点位进行 Lu-Hf 同位素分析。 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}(t_1)$  介于 0.281292~0.281346 之间, 与样品 13LB13-1 相似, 同样显示非常一致的 Hf 同位素组成, 暗示样品来自单一源区。根据岩石

结晶年龄( $t_2=2588$  Ma)计算,  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t_2)$  的变化范围为 5.8~7.7,  $t_{\text{DM}}$  为 2.59~2.67 Ga (图 8(d), 表 3)。

#### 4.2.3 二长花岗岩(13LB55-5)

样品采自苇子峪镇东部(图 2), 共选择 25 颗锆石的 25 个点进行锆石 U-Pb 同位素测试(表 2)。CL 图像显示, 锆石颗粒较大, 长柱状, 具有模糊的环带(图 7(c))。19 个测试点中除点 17 落在谐和线上外, 其余均落在谐和线下方(图 8(c)), 但 19 个测试点具有一致的  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  表观年龄(2544~2563 Ma), Th/U 为 0.11~1.68, 显示出岩浆锆石的特征。19 个测试点给出上交点年龄  $2555 \pm 4$  Ma (MSWD=0.51), 为该样品的岩石结晶年龄。其余 6 个测试点均严重不谐和,  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  表观年龄在 2342~2508 Ma 之间, 可能是因为受到后期热事件的影响而发生铅的丢失(图 8(c))。



表 2 新宾-苇子峪地区花岗岩岩石的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素分析结果  
Table 2 LA-ICP-MS zircon U-Pb analytical data of the granitoid rocks in the Xinbin-Weiziyou area

点号	Th/(μg·g <sup>-1</sup> )	U/(μg·g <sup>-1</sup> )	Th/U	同位素比值和误差						表观年龄和误差/Ma						Con/%
				<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb		<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U		<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U		<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb		<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U		<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U		
				比值	±2σ	比值	±2σ	比值	±2σ	比值	±2σ	比值	±2σ	比值	±2σ	
13LB13-1-01	303	219	1.38	0.17162	0.00340	11.61611	0.14787	0.49089	0.00623	2574	33	2574	12	2575	27	100
13LB13-1-02	258	211	1.22	0.17245	0.00343	10.75878	0.13771	0.45247	0.00575	2582	33	2503	12	2406	26	93
13LB13-1-03	189	165	1.15	0.17142	0.00342	10.65556	0.13759	0.45082	0.00575	2572	33	2494	12	2399	26	93
13LB13-1-04	362	307	1.18	0.17376	0.00356	11.86577	0.16499	0.49527	0.00654	2594	34	2594	13	2593	28	100
13LB13-1-05	58	87	0.66	0.17179	0.00342	10.12336	0.12914	0.42738	0.00542	2575	33	2446	12	2294	25	89
13LB13-1-06	117	392	0.30	0.16743	0.00333	8.94725	0.11349	0.38757	0.00491	2532	33	2333	12	2112	23	83
13LB13-1-07	194	232	0.83	0.17081	0.00343	10.50551	0.13745	0.44605	0.00571	2566	33	2480	12	2378	25	93
13LB13-1-08	36	20	1.76	0.17810	0.00410	9.05626	0.15746	0.36898	0.00530	2634	38	2344	16	2025	25	77
13LB13-1-09	85	145	0.59	0.17342	0.00355	11.82447	0.16218	0.49448	0.00646	2591	34	2591	13	2590	28	100
13LB13-1-10	39	77	0.50	0.16066	0.00321	8.12102	0.10390	0.36658	0.00466	2463	33	2245	12	2013	22	82
13LB13-1-11	93	452	0.21	0.17305	0.00371	11.48349	0.17542	0.48124	0.00660	2587	35	2563	14	2533	29	98
13LB13-1-12	106	206	0.52	0.17309	0.00351	10.78095	0.14316	0.45168	0.00582	2588	33	2504	12	2403	26	93
13LB13-1-13	169	179	0.94	0.17231	0.00349	10.94143	0.14456	0.46049	0.00593	2580	33	2518	12	2442	26	95
13LB13-1-14	146	129	1.13	0.17785	0.00359	11.99635	0.15778	0.48914	0.00629	2633	33	2604	12	2567	27	97
13LB13-1-15	104	184	0.56	0.17254	0.00377	11.10593	0.17719	0.46677	0.00656	2582	36	2532	15	2469	29	96
13LB13-1-16	50	118	0.42	0.17250	0.00349	10.94103	0.14403	0.45994	0.00592	2582	33	2518	12	2439	26	94
13LB13-1-17	124	186	0.67	0.17261	0.00359	11.28315	0.15843	0.47401	0.00625	2583	34	2547	13	2501	27	97
13LB13-1-18	58	144	0.40	0.17152	0.00347	9.49540	0.12493	0.40141	0.00516	2573	33	2387	12	2176	24	85
13LB13-1-19	136	209	0.65	0.16718	0.00337	10.14759	0.13193	0.44013	0.00564	2530	33	2448	12	2351	25	93
13LB13-1-20	158	634	0.25	0.17745	0.00374	11.43162	0.16501	0.46707	0.00623	2629	35	2559	13	2471	27	94
13LB13-1-21	60	94	0.64	0.17279	0.00350	10.76683	0.14164	0.45176	0.00581	2585	33	2503	12	2403	26	93
13LB13-1-22	76	238	0.32	0.17820	0.00378	11.50669	0.16886	0.46815	0.00629	2636	35	2565	14	2476	28	94
13LB13-1-23	23	39	0.57	0.17822	0.00368	11.26998	0.15492	0.45846	0.00600	2636	34	2546	13	2433	27	92
13LB13-1-24	56	122	0.46	0.17818	0.00382	11.98762	0.18040	0.48774	0.00663	2636	35	2603	14	2561	29	97
13LB54-1-01	28	61	0.46	0.17225	0.00471	11.68158	0.26374	0.49160	0.00807	2580	45	2579	21	2578	35	100
13LB54-1-02	23	121	0.19	0.17384	0.00416	11.85849	0.21210	0.49450	0.00711	2595	39	2593	17	2590	31	100
13LB54-1-03	30	48	0.62	0.17281	0.00546	11.75469	0.32370	0.49312	0.00807	2585	52	2585	26	2584	35	100
13LB54-1-04	181	404	0.45	0.17240	0.00376	10.58935	0.15621	0.44531	0.00584	2581	36	2488	14	2374	26	92
13LB54-1-05	43	84	0.51	0.17231	0.00419	11.68745	0.21593	0.49176	0.00714	2580	40	2580	17	2578	31	100
13LB54-1-06	50	78	0.64	0.17523	0.00453	12.05272	0.24932	0.49871	0.00774	2608	42	2609	19	2608	33	100
13LB54-1-07	50	138	0.36	0.17162	0.00427	11.62676	0.22535	0.49123	0.00740	2574	41	2575	18	2576	32	100

续表

点号	Th(μg·g <sup>-1</sup> )	U(μg·g <sup>-1</sup> )	Th/U	同位素比值和误差				表观年龄和误差/Ma				Con/%				
				<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb		<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U		<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U		<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb			<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U		<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	
				比值	±2σ	比值	±2σ	比值	±2σ	比值	±2σ		比值	±2σ	比值	±2σ
13LB54-1-08	69	176	0.39	0.17320	0.00389	11.79486	0.18801	0.49382	0.00673	2589	37	2588	15	2587	29	100
13LB54-1-09	79	204	0.39	0.17275	0.00382	11.75410	0.18060	0.49342	0.00662	2585	36	2585	14	2585	29	100
13LB54-1-10	32	58	0.55	0.17387	0.00548	11.89517	0.33078	0.49614	0.00898	2595	52	2596	26	2597	39	100
13LB54-1-11	40	74	0.53	0.17429	0.00539	11.92746	0.32503	0.49639	0.00909	2599	51	2599	26	2598	39	100
13LB54-1-12	96	224	0.43	0.17107	0.00407	11.55734	0.20798	0.49007	0.00712	2568	39	2569	17	2571	31	100
13LB54-1-13	35	70	0.50	0.17072	0.00481	11.50874	0.27539	0.48905	0.00840	2565	46	2565	22	2567	36	100
13LB54-1-14	92	846	0.11	0.15140	0.00359	3.48434	0.06069	0.16696	0.00228	2362	40	1524	14	995	13	42
13LB54-1-15	73	354	0.21	0.16928	0.00363	9.29489	0.13493	0.39836	0.00523	2551	35	2368	13	2162	24	85
13LB54-1-16	76	189	0.40	0.17076	0.00428	11.48681	0.22812	0.48809	0.00732	2565	41	2564	19	2562	32	100
13LB54-1-17	45	110	0.41	0.17091	0.00417	10.48721	0.19883	0.44527	0.00663	2567	40	2479	18	2374	30	93
13LB54-1-18	35	60	0.58	0.17346	0.00466	11.82643	0.26413	0.49477	0.00818	2591	44	2591	21	2591	35	100
13LB54-1-19	27	75	0.36	0.17112	0.00419	9.54479	0.18132	0.40481	0.00601	2569	40	2392	17	2191	28	85
13LB54-1-20	23	44	0.52	0.16225	0.00458	10.47741	0.25194	0.46869	0.00796	2479	47	2478	22	2478	35	100
13LB54-1-21	21	47	0.44	0.17240	0.00442	10.75561	0.22375	0.45293	0.00715	2581	42	2502	19	2408	32	93
13LB54-1-22	72	173	0.41	0.17217	0.00455	11.67869	0.26392	0.49249	0.00867	2579	43	2579	21	2582	37	100
13LB54-1-23	78	175	0.44	0.17026	0.00363	11.45062	0.16908	0.48831	0.00652	2560	35	2561	14	2563	28	100
13LB54-1-24	67	211	0.32	0.17380	0.00410	11.86864	0.21540	0.49586	0.00731	2595	39	2594	17	2596	32	100
13LB54-1-25	61	118	0.52	0.16827	0.00396	11.23947	0.20321	0.48504	0.00712	2541	39	2543	17	2549	31	100
13LB55-5-01	446	805	0.55	0.16986	0.00398	9.64054	0.17236	0.41170	0.00602	2556	39	2401	16	2223	27	87
13LB55-5-02	733	1200	0.61	0.16507	0.00382	3.05534	0.05205	0.13427	0.00186	2508	38	1422	13	812	11	32
13LB55-5-03	88	978	0.09	0.16451	0.00423	2.34369	0.04704	0.10334	0.00151	2503	43	1226	14	634	9	25
13LB55-5-04	85	295	0.29	0.17051	0.00372	6.73844	0.10468	0.28666	0.00391	2563	36	2078	14	1625	20	63
13LB55-5-05	113	2360	0.05	0.14965	0.00306	2.80696	0.03797	0.13605	0.00176	2342	35	1357	10	822	10	35
13LB55-5-06	72	222	0.32	0.16961	0.00387	10.06054	0.17198	0.43023	0.00616	2554	38	2440	16	2307	28	90
13LB55-5-07	248	852	0.29	0.16457	0.00346	3.03500	0.04342	0.13376	0.00176	2503	35	1417	11	809	10	32
13LB55-5-08	135	480	0.28	0.16944	0.00356	5.46501	0.07864	0.23392	0.00309	2552	35	1895	12	1355	16	53
13LB55-5-09	90	264	0.34	0.16960	0.00368	9.36165	0.14491	0.40032	0.00548	2554	36	2374	14	2171	25	85
13LB55-5-10	121	219	0.55	0.17012	0.00436	7.34438	0.15090	0.31311	0.00483	2559	42	2154	18	1756	24	69
13LB55-5-11	153	469	0.33	0.16890	0.00393	6.61647	0.11547	0.28409	0.00403	2547	38	2062	15	1612	20	63
13LB55-5-12	383	228	1.68	0.16985	0.00392	7.81012	0.13529	0.33347	0.00475	2556	38	2209	16	1855	23	73
13LB55-5-13	136	302	0.45	0.16857	0.00377	8.54153	0.14031	0.36746	0.00513	2544	37	2290	15	2017	24	79
13LB55-5-14	205	361	0.57	0.17010	0.00434	8.32295	0.17084	0.35483	0.00551	2559	42	2267	19	1958	26	77

续表

点号	Th/( $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ )	U/( $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ )	Th/U	同位素比值和误差						表观年龄和误差/Ma						Con/%
				$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		
				比值	$\pm 2\sigma$	比值	$\pm 2\sigma$	比值	$\pm 2\sigma$	比值	$\pm 2\sigma$	比值	$\pm 2\sigma$	比值	$\pm 2\sigma$	
13LB55-5-15	149	176	0.85	0.16952	0.00508	9.21307	0.24101	0.39411	0.00682	2553	49	2359	24	2142	32	84
13LB55-5-16	184	345	0.53	0.16992	0.00358	8.75118	0.12744	0.37341	0.00497	2557	35	2312	13	2045	23	80
13LB55-5-17	85	172	0.49	0.17023	0.00455	11.43035	0.25728	0.48685	0.00815	2560	44	2559	21	2557	35	100
13LB55-5-18	151	329	0.46	0.16956	0.00384	7.39853	0.12363	0.31635	0.00442	2553	37	2161	15	1772	22	69
13LB55-5-19	205	552	0.37	0.16962	0.00364	8.46246	0.12828	0.36171	0.00487	2554	36	2282	14	1990	23	78
13LB55-5-20	161	268	0.60	0.16971	0.00354	9.48570	0.13604	0.40521	0.00535	2555	35	2386	13	2193	25	86
13LB55-5-21	100	320	0.31	0.16426	0.00363	6.68258	0.10682	0.29493	0.00402	2500	37	2070	14	1666	20	67
13LB55-5-22	179	188	0.95	0.16965	0.00373	5.83419	0.09193	0.24929	0.00337	2554	36	1952	14	1435	17	56
13LB55-5-23	137	1213	0.11	0.16913	0.00365	2.40492	0.03614	0.10307	0.00136	2549	36	1244	11	632	8	25
13LB55-5-24	513	939	0.55	0.16971	0.00359	2.92976	0.04257	0.12514	0.00163	2555	35	1390	11	760	9	30
13LB55-5-25	42	381	0.11	0.16447	0.00395	8.39149	0.15683	0.36983	0.00544	2502	40	2274	17	2029	26	81

说明: Con= $(^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$  年龄 $\times 100/^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄), 表示谐和度。

表 3 新宾-苇子峪地区花岗岩岩石的锆石 Lu-Hf 同位素分析数据

Table 3 Zircon Lu-Hf isotopic data of the granitoid rocks in the Xinbin-Weiziyou area

点号	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表观年龄 $t_1/\text{Ma}$	岩浆结晶年龄 $t_2/\text{Ma}$	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$\pm 2\sigma$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}(t_1)$	$\varepsilon\text{Hf}(0)$	$\varepsilon\text{Hf}(t_2)$	$t_{\text{DM}}/\text{Ga}$	$f_{\text{Lu/Hf}}$
13LB13-1-01	2574	2587	0.019407	0.000623	0.281348	0.000022	0.281318	-50.4	6.7	2.63	-0.98
13LB13-1-02	2582	2587	0.012956	0.000342	0.281340	0.000021	0.281323	-50.6	6.9	2.62	-0.99
13LB13-1-03	2572	2587	0.030473	0.000921	0.281391	0.000023	0.281346	-48.8	7.7	2.59	-0.97
13LB13-1-04	2594	2587	0.050409	0.001638	0.281413	0.000031	0.281332	-48.1	7.2	2.61	-0.95
13LB13-1-05	2575	2587	0.009425	0.000319	0.281346	0.000019	0.281330	-50.4	7.1	2.61	-0.99
13LB13-1-06	2566	2587	0.028115	0.000903	0.281374	0.000025	0.281330	-49.4	7.1	2.62	-0.97
13LB13-1-07	2591	2587	0.021004	0.000619	0.281362	0.000025	0.281331	-49.9	7.2	2.61	-0.98
13LB13-1-08	2587	2587	0.026993	0.000856	0.281362	0.000022	0.281319	-49.9	6.8	2.63	-0.97
13LB13-1-09	2588	2587	0.017541	0.000538	0.281362	0.000023	0.281336	-49.9	7.3	2.61	-0.98
13LB13-1-10	2580	2587	0.011883	0.000350	0.281348	0.000019	0.281330	-50.4	7.2	2.61	-0.99
13LB13-1-11	2582	2587	0.015057	0.000513	0.281352	0.000025	0.281327	-50.2	7.0	2.62	-0.98
13LB13-1-12	2582	2587	0.022769	0.000702	0.281361	0.000025	0.281326	-49.9	7.0	2.62	-0.98
13LB13-1-13	2583	2587	0.032883	0.000967	0.281379	0.000029	0.281331	-49.3	7.2	2.61	-0.97

续表

点号	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表 观年龄 $t_1/\text{Ma}$	岩浆结晶 年龄 $t_2/\text{Ma}$	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$\pm 2\sigma$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}(t_1)$	$\varepsilon\text{Hf}(0)$	$\varepsilon\text{Hf}(t_2)$	$t_{\text{DM}}/\text{Ga}$	$f_{\text{DMHf}}$
13LB13-1-14	2573	2587	0.020954	0.000589	0.281365	0.000024	0.281336	-49.8	7.3	2.61	-0.98
13LB54-1-01	2580	2588	0.041158	0.001045	0.281398	0.000030	0.281346	-48.6	7.7	2.59	-0.97
13LB54-1-02	2595	2588	0.029546	0.000748	0.281373	0.000029	0.281336	-49.5	7.4	2.61	-0.98
13LB54-1-03	2585	2588	0.055910	0.001539	0.281418	0.000030	0.281342	-47.9	7.6	2.60	-0.95
13LB54-1-04	2581	2588	0.016464	0.000423	0.281331	0.000024	0.281311	-50.9	6.5	2.64	-0.99
13LB54-1-05	2580	2588	0.020010	0.000513	0.281320	0.000026	0.281294	-51.4	5.9	2.66	-0.98
13LB54-1-06	2608	2588	0.032678	0.000862	0.281374	0.000029	0.281331	-49.4	7.2	2.61	-0.97
13LB54-1-07	2574	2588	0.020234	0.000524	0.281335	0.000027	0.281309	-50.8	6.4	2.64	-0.98
13LB54-1-08	2589	2588	0.022242	0.000561	0.281348	0.000026	0.281320	-50.4	6.8	2.63	-0.98
13LB54-1-09	2585	2588	0.020191	0.000535	0.281347	0.000024	0.281320	-50.4	6.8	2.63	-0.98
13LB54-1-10	2595	2588	0.021745	0.000550	0.281330	0.000023	0.281302	-51.0	6.2	2.65	-0.98
13LB54-1-11	2599	2588	0.021733	0.000551	0.281336	0.000026	0.281308	-50.8	6.4	2.64	-0.98
13LB54-1-12	2591	2588	0.030689	0.000798	0.281364	0.000024	0.281324	-49.8	7.0	2.62	-0.98
13LB54-1-13	2581	2588	0.028037	0.000741	0.281341	0.000028	0.281305	-50.6	6.3	2.65	-0.98
13LB54-1-14	2579	2588	0.024359	0.000638	0.281341	0.000025	0.281310	-50.6	6.4	2.64	-0.98
13LB54-1-15	2595	2588	0.022304	0.000576	0.281321	0.000025	0.281292	-51.3	5.8	2.66	-0.98
13LB55-5-01	2552	2555	0.084566	0.002685	0.281364	0.000031	0.281233	-49.8	3.0	2.76	-0.92
13LB55-5-02	2554	2555	0.036151	0.001163	0.281292	0.000029	0.281235	-52.3	3.0	2.74	-0.96
13LB55-5-04	2547	2555	0.168962	0.004144	0.281382	0.000037	0.281181	-49.1	1.1	2.84	-0.88
13LB55-5-05	2556	2555	0.032010	0.001067	0.281276	0.000026	0.281224	-52.9	2.6	2.76	-0.97
13LB55-5-06	2544	2555	0.046574	0.001346	0.281330	0.000035	0.281265	-51.0	4.1	2.71	-0.96
13LB55-5-07	2559	2555	0.035869	0.001120	0.281385	0.000032	0.281331	-49.0	6.4	2.61	-0.97
13LB55-5-08	2553	2555	0.078467	0.001786	0.281303	0.000044	0.281215	-52.0	2.3	2.78	-0.95
13LB55-5-09	2557	2555	0.074322	0.002204	0.281410	0.000048	0.281302	-48.2	5.4	2.66	-0.93
13LB55-5-10	2560	2555	0.014578	0.000410	0.281260	0.000030	0.281240	-53.5	3.2	2.73	-0.99
13LB55-5-11	2553	2555	0.024138	0.000714	0.281294	0.000022	0.281259	-52.3	3.9	2.71	-0.98
13LB55-5-12	2554	2555	0.029060	0.000849	0.281288	0.000030	0.281247	-52.5	3.4	2.73	-0.97
13LB55-5-13	2555	2555	0.040078	0.001124	0.281331	0.000032	0.281276	-51.0	4.5	2.69	-0.97
13LB55-5-14	2549	2555	0.012764	0.000335	0.281247	0.000021	0.281231	-53.9	2.9	2.75	-0.99
13LB55-5-15	2554	2555	0.052369	0.001309	0.281363	0.000030	0.281299	-49.8	5.3	2.66	-0.96
13LB55-5-16	2555	2555	0.022570	0.000638	0.281271	0.000025	0.281239	-53.1	3.2	2.74	-0.98

说明:  $t_{\text{DM}}$  为亏损地幔模式年龄。

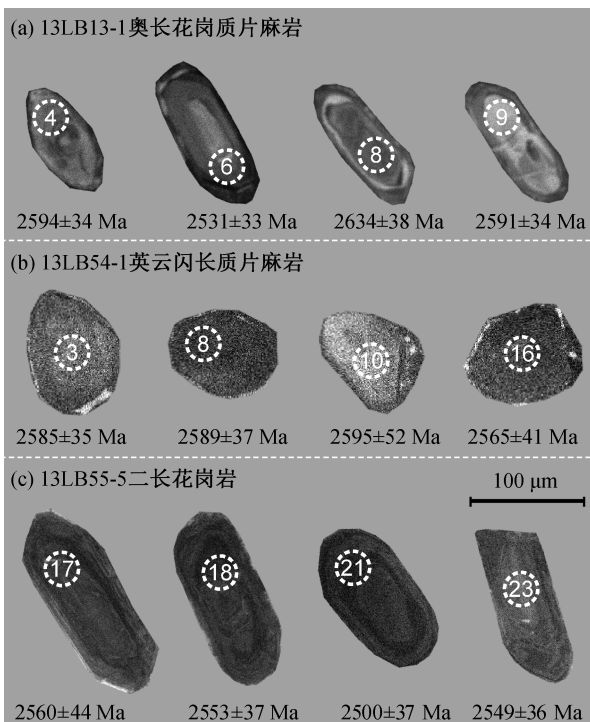


图7 锆石阴极发光图像(CL)、测试点位及对应的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表观年龄

Fig. 7 Cathodoluminescence images of zircon grains, analytical zircon domains and the corresponding apparent  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  ages

该样品选择 15 个已定年的锆石点进行 Lu-Hf 同位素分析。 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}(t_1)$  介于 0.281181~0.281331 之间。根据岩石结晶年龄( $t_2=2555$  Ma) 计算,  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t_2)$  的变化范围为 1.1~6.4, 表明少量古老地壳物质卷入岩浆作用(图 8(d))。样品的  $t_{\text{DM}}$  为 2.61~2.84 Ga (表 3)。

## 5 讨论与结论

### 5.1 岩石成因

#### 5.1.1 英云闪长质-奥长花岗质片麻岩

新宾-苇子峪地区的英云闪长质-奥长花岗质片麻岩具有高  $\text{Na}_2\text{O}$  含量和低  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  值的特征(表 1, 图 5(c)); 样品具有较高的  $\text{MgO}$  含量, 落在玄武岩熔融区及其上方的高硅埃达克岩区域(图 5(d));  $\text{Mg\#}$  也较高(36~62), 许多样品在  $\text{Mg\#}-\text{SiO}_2$  图中位于埃达克岩区域(图 9(a))。这些特征反映地幔物质的加入<sup>[32-33]</sup>。样品呈现中等到强烈分异的轻重稀土配分模式, 类似显生宙以来的高硅埃达克岩(图 6(a)), 且在  $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}-\text{Yb}_{\text{N}}$  图上落在埃达克岩的区域(图 9(b))<sup>[34]</sup>。在原始地幔标准化的蛛网图上, 表现出富集大离子亲石元素和亏损 Nb, Ta, Ti 的特

征(图 6(b))。此外, 两个定年的样品具有正的并且一致的  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t_2)$  值, 其源岩应为初生地壳物质(图 8(d))。考虑到以上特征, 该类岩石最有可能起源于俯冲板片的部分熔融。样品具有较高的  $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$  (大多数在 19.4~45.2 之间) 和低的  $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$  (大多数在 2.08~3.99 之间) 以及低的 Yb 和 Y 含量。部分样品具有 Eu 和 Sr 的正异常以及高 Sr/Y 值, 可能反映源区与熔体平衡的残留体中斜长石含量较低( $<20\%$ )<sup>[37]</sup>。此外, 大多数样品具有低于球粒陨石(17.6)的 Nb/Ta 值(绝大多数样品在 2.1~10.5 之间), 反映角闪石可能是重要的残留相矿物之一<sup>[38]</sup>。因此, 残留相矿物可能主要由石榴石、辉石、角闪石等。而岩浆在上升途中受到地幔楔岩石的交代, 使  $\text{MgO}$  含量和  $\text{Mg\#}$  值等指标升高。

#### 5.1.2 二长花岗岩-正长花岗岩

太古宙花岗岩的成因归纳起来有以下几种: 交代岩石圈地幔的部分熔融、初生地壳岩石的部分熔融以及大陆地壳物质的再循环<sup>[9,39-40]</sup>。新宾-苇子峪地区的二长花岗岩-正长花岗岩岩石与英云闪长质-奥长花岗质片麻岩相比, 具有较高的  $\text{K}_2\text{O}$  含量和  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  (1.06~1.88), 以及较低的  $\text{MgO}$  含量和  $\text{Mg\#}$  (21~49), 在  $\text{MgO}-\text{SiO}_2$  图上落在变质玄武岩部分熔融区, 说明这类岩石可能形成于地壳物质的部分熔融, 并且成岩过程中没有显著的地幔物质加入(图 5(d))<sup>[29]</sup>。在 AMF-CMF 图(AMF 为  $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{MgO} + \text{FeO}_{\text{total}})$  分子数之比, CMF 为  $\text{CaO}/(\text{MgO} + \text{FeO}_{\text{total}})$  分子数之比)中, 两个样品(13LB55-5 和 15LB17-1)落在杂砂岩部分熔融区, 其余 3 个样品落在玄武岩/英云闪长岩部分熔融区与泥质岩/杂砂岩部分熔融区之间<sup>[35]</sup>。同样, 在  $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{FeO}_{\text{total}} + \text{MgO})-3\text{CaO}-5\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  图中, 除样品 15LB32-2 落在高钾玄武质岩石的部分熔融区外, 其余样品均落在沉积物熔融区的边缘, 靠近高钾玄武岩和英云闪长岩区(图 9(d))<sup>[36]</sup>。此外, 二长花岗岩样品 13LB55-5 具有正的  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t_2)$  值(1.1~6.4), 可能反映其源区为初生地壳物质与古老地壳物质组成的混合源区(图 8(d))。可见, 二长花岗岩-正长花岗岩的来源较复杂, 一部分可能来自变质杂砂岩的部分熔融, 其余为变质玄武岩与变质沉积岩混合源区的部分熔融。一部分样品显示弱的 Eu 负异常和 Sr 负异常, 反映源区可能残留一定量的斜长石。与英云闪长质-奥长花岗质片麻岩相似, 二长花岗岩-正长花岗岩同样表现出中等到强烈的轻重稀土分异, 反映源区残留相矿物主要为

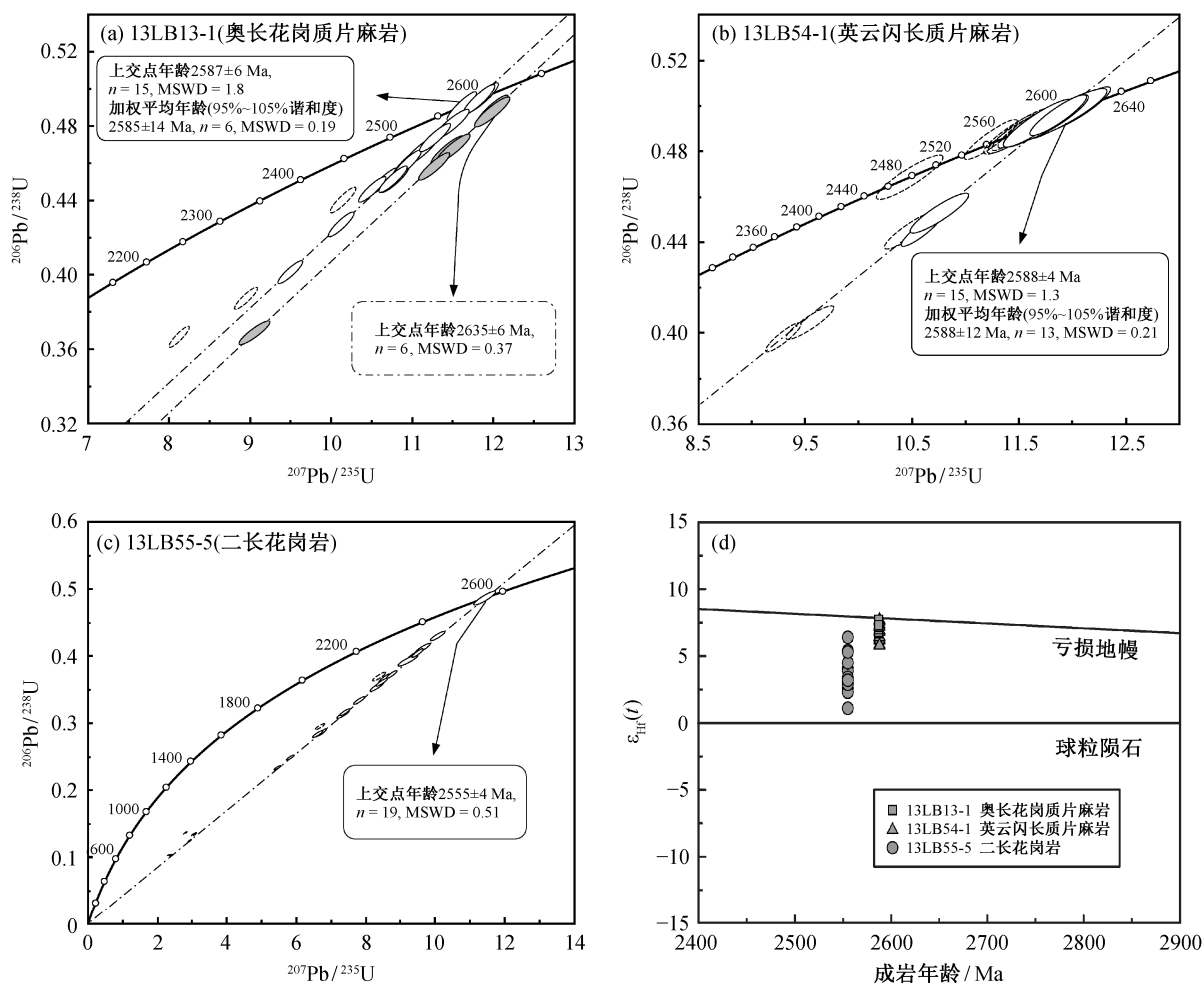


图 8 新宾-苇子峪地区花岗质岩石的锆石 U-Pb 年龄谐和图((a)~(c))和 Lu-Hf 同位素特征(d)

Fig. 8 Concordia diagrams of the granitoid rocks in the Xinbin-Weizi area ((a)~(c)) and zircon Lu-Hf isotopes (d)

辉石或角闪石以及少量石榴石<sup>[37-38]</sup>。因此, 这些二长花岗岩-正长花岗岩可能起源于中下地壳岩石的部分熔融<sup>[34]</sup>。

## 5.2 辽北地区的构造环境

辽北地区包括本文研究区北部的抚顺-清原地区、西部的汤图-马圈子地区以及南部的新宾-苇子峪地区。抚顺-清原地区出露的变质火山岩组合形成于 2.57~2.50 Ga, 并可以从中识别出岛弧拉斑变质玄武岩以及钙碱性变质玄武岩-安山岩-英安岩-流纹岩组合<sup>[9,14,18]</sup>。地球化学研究表明, 这些火山岩石组合形成于岛弧体系的构造背景<sup>[9]</sup>。此外, 2.56~2.52 Ga 期间的石英闪长岩形成于俯冲洋壳的部分熔融, 英云闪长岩-奥长花岗岩形成于地幔上涌引发的下地壳部分熔融, 二长花岗岩则形成于 2.51~2.50 Ga 弧-陆拼贴作用导致的古老陆壳物质

和初生岛弧物质熔融<sup>[9]</sup>。汤图-马圈子地区的英云闪长质-奥长花岗质片麻岩与抚顺-清原地区的英云闪长质-奥长花岗质片麻岩具有相似的成因和构造背景, 2.60~2.58 Ga 的岩浆作用具有低 MgO 的特征, 形成于下地壳物质的部分熔融, 2.55~2.53 Ga 的岩浆作用则起源于俯冲板片的部分熔融, 并受到地幔楔岩石混染, MgO 含量较高<sup>[15]</sup>。

根据前面的分析可知, 新宾-苇子峪地区的英云闪长质-奥长花岗质片麻岩形成于约 2.59 Ga 俯冲板片的部分熔融, 约 2.56 Ga 的二长花岗岩-正长花岗岩则形成于中下地壳变质玄武岩和变质沉积岩的部分熔融。以上这些证据都显示, 辽北地区在新太古代晚期为俯冲作用相关的构造背景。

新宾-苇子峪地区以南的鞍山-本溪地区是华北克拉通的古老陆核之一, 保存有 3.8~3.6 Ga, 3.4~

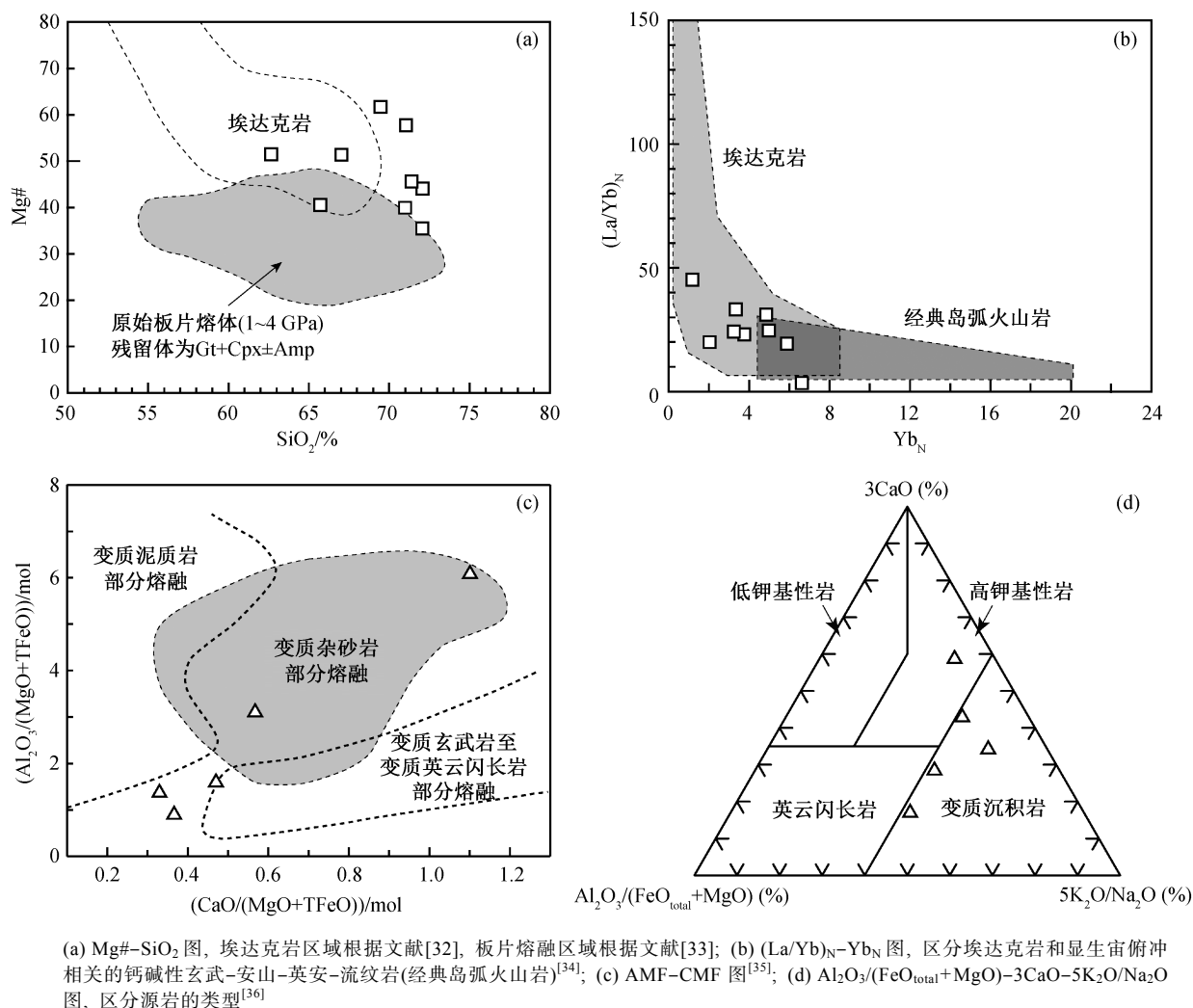


图 9 新宾-苇子峪地区花岗质岩石的成因判别图

Fig. 9 Petrogenetic diagrams for the granitoid rocks in the Xinbin-Weiziyou area

3.0 Ga 和 2.7~2.5 Ga 的花岗质岩石记录, 向北逐渐变年轻<sup>[9-10,40-41]</sup>。

综上所述, 辽北地区的早前寒武纪基底形成于俯冲相关的构造环境, 与其南部的古老大陆组成新太古代晚期的弧-陆增生体系, 为活动大陆边缘的构造环境。

### 参考文献

- [1] Liu S W, Pan Y M, Li J H, et al. Geological and isotopic geochemical constraints on the evolution of the Fuping Complex, North China Craton. *Precambrian Research*, 2002, 117: 41-56
- [2] Liu S W, Pan Y M, Xie Q L, et al. Archean geodynamics in the central zone, North China Craton: constraints from geochemistry of two contrasting

series of granitoids in the Fuping and Wutai complexes. *Precambrian Research*, 2004, 130: 229-249

- [3] Liu S W, Santosh M, Wang W, et al. Zircon U-Pb chronology of the Jianping Complex: implications for the Precambrian crustal evolution history of the northern margin of North China Craton. *Gondwana Research*, 2011, 20(1): 48-63
- [4] Zhao G C, Sun M, Wilde S A, et al. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: key issues revisited. *Precambrian Research*, 2005, 136(2): 177-202
- [5] Zhai M G, Santosh M. The early Precambrian odyssey of the North China Craton: a synoptic overview. *Gondwana Research*, 2011, 20(1): 6-25
- [6] Wu M L, Zhao G C, Sun M, et al. Zircon U-Pb

- geochronology and Hf isotopes of major lithologies from the Jiaodong Terrane: implications for the crustal evolution of the eastern block of the North China Craton. *Lithos*, 2014, 190/191: 71–84
- [7] Zhao G C, Cawood P A. Precambrian geology of China. *Precambrian Research*, 2012, 222/223: 13–54
- [8] Zhai M G, Santosh M. Metallogeny of the North China Craton: link with secular changes in the evolving earth. *Gondwana Research*, 2013, 24(1): 275–297
- [9] Wang W, Liu S W, Cawood P A, et al. Late Neoarchean subduction-related crustal growth in the northern Liaoning region of the North China Craton: evidence from ~2.55 to 2.50 Ga granitoid gneisses. *Precambrian Research*, 2016, 281: 200–223
- [10] Wang W, Liu S W, Santosh M, et al. Neoarchean intra-oceanic arc system in the western Liaoning Province: implications for Early Precambrian crustal evolution in the eastern block of the North China Craton. *Earth-Science Reviews*, 2015, 150: 329–364
- [11] Liu D Y, Wilde S A, Wan Y S, et al. New U-Pb and Hf isotopic data confirm Anshan as the oldest preserved segment of the North China Craton. *American Journal of Science*, 2008, 308(3): 200–231
- [12] 刘树文, 王伟, 白翔, 等. 前寒武纪地球动力学(VII): 早期大陆地壳的形成与演化. *地学前缘*, 2015, 22(6): 97–108
- [13] 王伟, 刘树文, 白翔, 等. 前寒武纪地球动力学(VIII): 华北克拉通太古宙末期地壳生长方式. *地学前缘*, 2015, 22(6): 109–124
- [14] Peng P, Wang C, Wang X P, et al. Qingyuan high-grade granite-greenstone terrain in the Eastern North China Craton: root of a Neoarchean arc. *Tectonophysics*, 2015, 662: 7–21
- [15] Wang M J, Liu S W, Wang W, et al. Petrogenesis and tectonic implications of the Neoarchean North Liaoning tonalitic-trondhjemitic gneisses of the North China Craton, North China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2016, 131: 12–39
- [16] Wu M L, Lin S F, Wan Y S, et al. Crustal evolution of the eastern block in the North China Craton: constraints from zircon U-Pb geochronology and Lu-Hf isotopes of the Northern Liaoning Complex. *Precambrian Research*, 2016, 275: 35–47
- [17] 白翔, 刘树文, 阎明, 等. 抚顺南部早前寒武纪变质杂岩的地质事件序列. *岩石学报*, 2014, 30(10): 2905–2924
- [18] 万渝生, 宋彪, 耿元生, 等. 辽北抚顺–清原地区太古宙基底地球化学组成特征及其地质意义. *地质论评*, 2005, 51(2): 128–137
- [19] 万渝生, 宋彪, 杨淳, 等. 辽宁抚顺–清原地区太古宙岩石 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学及其地质意义. *地质学报*, 2005, 79(1): 78–87
- [20] 沈保丰, 骆辉, 韩国刚, 等. 辽北–吉南太古宙地质及成矿. 北京: 地质出版社, 1994
- [21] Zhu M T, Zhang L C, Dai Y P, et al. *In situ* zircon U-Pb dating and O isotopes of the Neoarchean Hongtoushan VMS Cu-Zn deposit in the North China Craton: implication for the ore genesis. *Ore Geology Reviews*, 2015, 67: 354–367
- [22] 李俊建, 沈保丰. 辽吉地区早前寒武纪大陆壳的地质年代学. *前寒武纪研究进展*, 2000, 23(4): 244–249
- [23] 王松山, 胡世玲, 翟明国, 等. 应用  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  定年技术研究清原花岗岩–绿岩地体的形成时代. *岩石学报*, 1987(4): 55–62
- [24] 刘树文, 吕勇军, 王伟, 等. 冀北太古代花岗质片麻岩的成因. *岩石学报*, 2011, 27(4): 909–921
- [25] Andersen T. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report Pb-204. *Chemical Geology*, 2002, 192: 59–79
- [26] Ludwig K R. User's manual for Isoplot 3.70: a geochronological toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center Special Publication No. 4 [EP/OL]. (2008) [2016–03–08]. [http://www.bgc.org/isoplot\\_etc/isoplot.html](http://www.bgc.org/isoplot_etc/isoplot.html)
- [27] Hu Z C, Liu Y S, Gao S, et al. Improved *in situ* Hf isotope ratio analysis of zircon using newly designed X skimmer cone and jet sample cone in combination with the addition of nitrogen by laser ablation multiple collector ICP-MS. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2012, 27(9): 1391–1399
- [28] Moyen J F, Martin H, Jayananda M, et al. Late Archaean granites: a typology based on the Dharwar Craton (India). *Precambrian Research*, 2003, 127: 103–123
- [29] Martin H, Smithies R H, Rapp R, et al. An overview of adakite, tonalite-trondhjemitic-granodiorite (TTG), and sanukitoid: relationships and some implications



- p>for crustal evolution.
- Lithos*
- , 2005, 79: 1–24
- [30] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. *Geological Society London Special Publications*, 1989, 42(1): 313–345
- [31] Zeh A, Gerdes A, Barton J M. Archean accretion and crustal evolution of the Kalahari Craton — the zircon age and Hf isotope record of granitic rocks from Barberton/Swaziland to the Francistown Arc. *Journal of Petrology*, 2009, 50(5): 933–966
- [32] Smithies R H. The Archaean tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG) series is not an analogue of Cenozoic adakite. *Earth and Planetary Science Letters*, 2000, 182(1): 115–125
- [33] 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. *Chemical Geology*, 1999, 160(4): 335–356
- [34] Moyen J F, Martin H. Forty years of TTG research. *Lithos*, 2012, 148: 312–336
- [35] Altherr R, Holl A, Hegner E, et al. High-potassium, calc-alkaline I-type plutonism in the European Variscides: northern Vosges (France) and northern Schwarzwald (Germany). *Lithos*, 2000, 50: 51–73
- [36] Laurent O, Martin H, Moyen J F, et al. The diversity and evolution of late-Archean granitoids: evidence for the onset of “modern-style” plate tectonics between 3.0 and 2.5 Ga. *Lithos*, 2014, 205: 208–235
- [37] Qian Q, Hermann J. Partial melting of lower crust at 10–15 kbar: constraints on adakite and TTG formation. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2013, 165(6): 1195–1224
- [38] Foley S, Tiepolo, M, Vannucci R. Growth of early continental crust controlled by melting of amphibolite in subduction zones. *Nature*, 2002, 417, 837–840
- [39] Martin H, Moyen J F, Rapp R. The sanukitoid series: magmatism at the Archaean-Proterozoic transition. *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 2010, 100: 15–33
- [40] Wan Y S, Dong C Y, Liu D Y, et al. Zircon ages and geochemistry of late Neoarchean syenogranites in the North China Craton: a review. *Precambrian Research*, 2012, 222: 265–289
- [41] Liu D Y, Nutman A P, Compston W, et al. Remnants of greater-than-or-equal-to 3800 Ma crust in the Chinese part of the Sino-Korean Craton. *Geology*, 1992, 20(4): 339–342