

# 辽宁鞍山弓长岭地区古太古代花岗岩研究进展

——来自野外地质和锆石 U-Th-Pb-Hf 同位素的证据

王 伟, 田忠华, 刘福来

(中国地质科学院 地质研究所, 北京 100037)

**摘要:** 在早期地球(>2.6 Ga)的大陆地壳中,富钾花岗岩系所占的比例十分有限,对古老花岗岩的研究可为揭示大陆地壳演化过程提供重要制约。本文对出露于鞍山弓长岭地区的古太古代富钾花岗岩进行了详细的野外地质和锆石 U-Th-Pb-Hf 同位素研究,它们的主要矿物组合为钾长石(40%~60%)、斜长石(10%~30%)、石英(约30%)和少量黑云母及白云母,以包体形式与大规模中太古代(2.9 Ga)花岗岩共生,具有与后者相同的构造和变形特征。古太古代花岗岩中绝大多数岩浆锆石的 Th、U 含量分别为  $100\times 10^{-6}$ ~ $600\times 10^{-6}$ 、 $400\times 10^{-6}$ ~ $1\ 500\times 10^{-6}$ ,且 Th/U 值较高(0.10~0.93),13个谐和数据点加权平均年龄为  $3\ 337\pm 24$  Ma(MSWD=1.5),代表其侵位时代。另有 3.76~3.60 Ga 的继承或残余锆石存在。锆石初始  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_i$  值为 0.280 391~0.280 857,一阶段亏损地幔模式年龄( $t_{\text{DMI}}$ )为 3 856~3 327 Ma。Hf 同位素组成的变化表明:① 鞍本地区在古太古代晚期之前已经形成了一个具有多期岩浆作用记录的古大陆核;② 太古宙大陆地壳的稳定化过程是不同步的,华北克拉通在 2.5 Ga 形成统一的大陆地壳之前,研究区很可能在古-中太古代就已经完成了区域陆壳的成分分异,并形成了稳定的陆壳结构。

**关键词:** 花岗岩; 古太古代; 弓长岭; 大陆地壳

中图分类号: P588.12<sup>+</sup>1; P595

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2022)02-0359-12

## The research progress of the Paleoproterozoic granite in the Gongchangling area: Evidence from geology and zircon U-Th-Pb-Hf isotopic composition

WANG Wei, TIAN Zhong-hua and LIU Fu-lai

(Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

**Abstract:** The K-rich granite took limited volumes of the continental crust in the early earth (>2.6 Ga). Studies on ancient granite will provide great evidence for revealing the geological history of the crust. In this paper, we carry detailed studies on the geology and zircon U-Th-Pb-Hf isotopic composition of the Paleoproterozoic granite, which is exposed in the Anshan Gongchangling area of the North China Craton (NCC). The studied Paleoproterozoic granite, which is occurring as an enclave in the regional large-scaled of Mesoproterozoic (2.9 Ga) granite with similar tectonic feature to the latter, is composed of K-feldspar (40%~60%), plagioclase (10%~30%), quartz (30%) and minor mica. Most magmatic zircons from the Paleoproterozoic granite have varying Th and U contents of  $100\times 10^{-6}$ ~ $600\times 10^{-6}$  and  $400\times 10^{-6}$ ~ $1\ 500\times 10^{-6}$ , respectively, with relatively high Th/U ratios (0.10~0.93). 13 concordant analysis yielded meaning weighted average age of  $3\ 337\pm 24$  Ma(MSWD=1.5), interpreted as the emplacement time of the granite. And the inherited zircons formed at 3.76~3.60 Ga. The analyzed zircon grains yielded initial  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_i$  ratios of 0.280 391~0.280 857 with Hf depleted mantle modal ages ( $t_{\text{DMI}}$ ) of 3 856~3 327 Ma. The

收稿日期: 2021-10-02; 接受日期: 2022-02-17; 编辑: 尹淑苹

基金项目: 国家自然科学基金项目(41772194, 42172222)

作者简介: 王 伟(1981-), 男, 副研究员, 主要从事前寒武纪地质研究, E-mail: wuchangyuww@sina.com。

differences of Hf isotopic compositions suggested that ① an ancient continent nucleus with multiple magmatic records had been formed before the end of the Paleoproterozoic in the Anshan area; ② the stabilization of the early crust should not be synchronous during the geological history. Crustal stabilization and differentiation had been carried out locally, early before the amalgamation of the continental basement of the NCC at ~2.5 Ga.

**Key words:** granite; Paleoproterozoic; Gongchangling area; continental crust

**Fund support:** National Natural Science Foundation of China(41772194, 42172222)

花岗岩是现代地球大陆上地壳的主要组成部分,也是地球区别于太阳系内其他类地行星的重要地质和岩石学标志,对花岗岩成因的研究,是探讨和揭示地球地质历史及其与其他类地行星差异演化过程的重要手段之一。克拉通是地球在早前寒武纪(主要为太古宙)形成的稳定块体中陆壳部分的统称(翟明国, 2011),对全球各古老克拉通的物质时空分布统计可知,从古老陆核开始形成(约 4.2~3.8 Ga)到新太古代早期(>2.7 Ga)之前,克拉通由巨量相对富钠的英云闪长岩-奥长花岗岩-花岗闪长岩(TTG 岩系)、一些中基性深成岩和以绿岩带为代表的表壳岩系构成(Bhattacharya *et al.*, 2014)。尽管在南非、南美和我国鞍山等地保留有一定体积的中太古代花岗岩(如: Kamo and Davis, 1994; Almeida *et al.*, 2013; Dong *et al.*, 2017),但就全球尺度而言,相对富钾的花岗岩系在新太古代之前所占的比例十分有限,直至新太古代晚期(2.6~2.5 Ga),较大规模的花岗岩在全球各古老克拉通内才普遍开始出现(Moyen *et al.*, 2003; Martin *et al.*, 2005; Condie *et al.*, 2009),此后逐渐取代钠质 TTG 岩系,成为壳内岩浆作用和物质再循环的主要产物,并在后太古宙地壳成分不断发生分异的化学地球动力学背景下,形成了当今以花岗岩为主要成分的大陆上地壳。从花岗岩形成的时间发展规律来看,花岗岩在地球形成早期(>2.6 Ga)的分布虽然并不广泛,但是对这类岩石的识别及其成因的研究,可为追溯大陆地壳的形成和演化过程提供重要的制约。

华北克拉通是全球最古老的克拉通之一,新太古代晚期(2.55~2.50 Ga)广泛的构造-热事件使早期的陆壳基底遭受了强烈的破坏和改造(Zhao *et al.*, 2005; Zhai and Santosh, 2011; Wan *et al.*, 2015b)。尽管如此,目前依然在华北克拉通内多地发现形成时代早于古太古代(>3.6 Ga)的 TTG 片麻岩、碎屑和残余锆石以及锆石 Lu-Hf 和全岩 Sm-Nd 同位素年代学记录(万渝生等, 2009; Wan *et al.*,

2019)。这些分散于华北各地的古老地质年龄信息表明,华北克拉通在形成初期可能存在多个古老陆核,新太古代强烈的构造-岩浆作用使它们完成了初步的拼接和稳定化,并形成统一的陆壳基底。位于华北克拉通东北部,龙岗地块中的鞍本花岗绿岩地体是这些古老陆核之中规模较大的一个,区域内不仅识别出形成于始太古代(>3.8 Ga)的 TTG 片麻岩(Liu *et al.*, 1992; Wan *et al.*, 2005; Wu *et al.*, 2008),还陆续识别出 3.45 Ga 的微陆块(Liu *et al.*, 2017)以及较大规模的中太古代(3.0~2.9 Ga)富钾花岗岩(Dong *et al.*, 2017)。通过区域地质填图,笔者在鞍山弓长岭至连山关一带发现了若干古太古代花岗岩露头,推测尺度在几米至几十米不等,与这些古老花岗岩共生的岩石均与之岩性一致,且界线不清楚。本文对出露于弓长岭铁矿西南约 10 km 的古太古代富钾花岗岩的野外地质、矿物组合以及锆石 U-Th-Pb-Hf 同位素特征进行了研究,这些地质信息对揭示鞍本古陆核以及华北克拉通的形成和稳定化过程具有参考意义。

## 1 地质背景

位于华北克拉通东北部的龙岗地块是华北典型的太古宙基底出露区之一(图 1a),自东向西可划分为朝鲜东北部冠帽地体、吉南太古宙地体、辽东清原绿岩和辽北鞍本花岗绿岩地体,这些地质单元虽然总体上都以新太古代晚期(2.6~2.5 Ga)的深成岩和表壳岩为最主要的组成部分,但它们各自的区域演化历史、岩石变质程度以及含矿性等地质特征存在着较大的差异。已有资料表明,冠帽地体和吉南地体内出露的太古宙基底岩石年龄结构和锆石 Hf 同位素组成具有类似之处,二者均保留新太古代 2.7~2.5 Ga 多期岩浆记录以及 2.9~2.6 Ga 亏损地幔 Hf 模式年龄(Guo *et al.*, 2016; Zhang *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2018),表壳岩具有绿岩带组合的

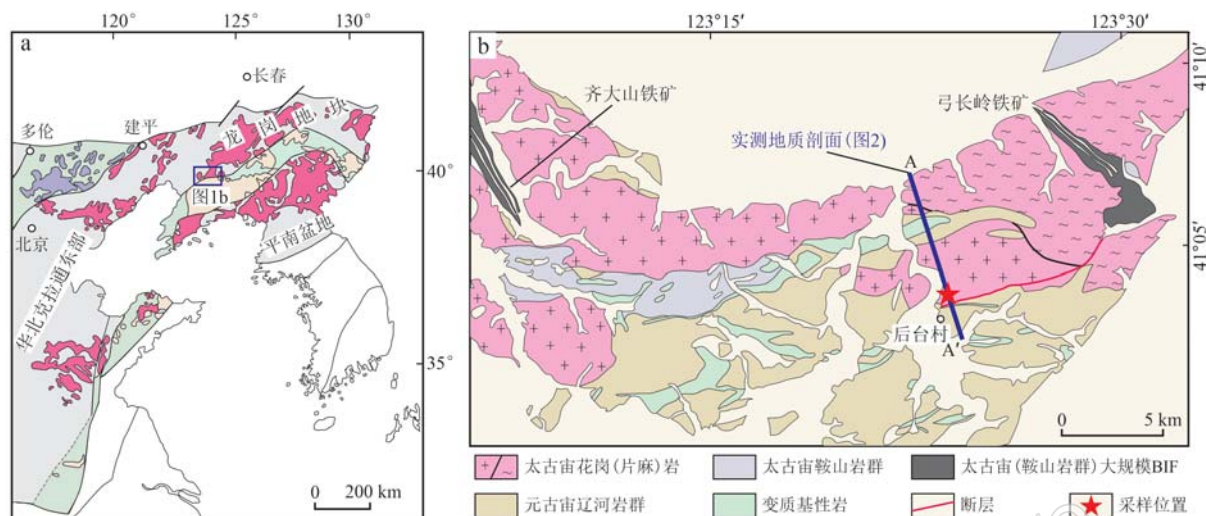


图1 鞍山弓长岭地区早前寒武纪地质简图(据课题组2016~2018弓长岭幅填图资料修改)

Fig. 1 The Early Precambrian geological sketch map of the Gongchangling area, Anshan(after geological mapping project, 2016~2018)

特征且含有条带状铁建造(BIF), 域内不同地区的变质程度不均匀, 高者可达麻粒岩相(翟明国, 2016), 而变质程度较低的地区仅为绿片岩相, 如吉南夹皮沟地区是华北克拉通少有的含金矿型太古宙花岗岩岩地体(沈保丰等, 1994; 李俊健等, 1996)。与冠帽和吉南太古宙地体不同, 在辽东清原绿岩带内目前还没有发现形成于新太古代早期(2.8~2.7 Ga)或更古老的岩石, 其变质程度总体较高, 为高角闪岩相(局部达麻粒岩相), 带内的变火山岩系中存在2.6~2.5 Ga超基性岩石以及类似科马提岩-玄武岩的组合, 在一些表壳岩中还含有大规模铅-锌矿(Zhai *et al.*, 1985)。而鞍本花岗绿岩地体总体的变质程度较低, 为绿片岩相至低角闪岩相, 区内保留了华北克拉通最古老的岩石, 其地质演化历史可以追溯至始太古代3.8 Ga之前(Liu *et al.*, 1992; Wan *et al.*, 2005; Wu *et al.*, 2008), 在鞍山陈台沟至铁架山一带广泛出露3.8~3.3 Ga的TTG、闪长质深成岩及3.3 Ga表壳岩, 弓长岭地区出露较大规模的中太古代(3.0~2.9 Ga)花岗岩, 同时绝大多数形成于新太古代晚期(2.55~2.50 Ga)的岩石都具有早于中太古代的锆石 Hf 和全岩 Nd 模式年龄(Wan *et al.*, 2015a)。另一方面, 鞍本花岗绿岩地体内一系列形成于新太古代晚期的火山-沉积岩系中伴生有大量BIF, 且部分层位的铁品位较高, 是我国最重要的BIF型铁矿产区(Zhai and Windley, 1990; Li *et al.*, 2014, 2015)。

## 2 野外地质特征

花岗岩是鞍山弓长岭地区太古宙基底岩石中最主要的组成部分, 大致沿东西向展布于齐大山铁矿以东至弓长岭铁矿的东西两侧(图1b)。前期野外地质和同位素年代学研究证实, 这些岩石主要类型为相对富钾的黑云母二长-钾长花岗岩、二云母钾长花岗岩和一些花岗伟晶岩, 主体形成时代为中太古代(3.0~2.9 Ga)(Dong *et al.*, 2017 及本文), 局部形成于新太古代晚期(~2.5 Ga)(Wan *et al.*, 2015a)。但由于不同时代富钾花岗岩的野外和构造特征极为相似, 基本无法识别它们的边界, 因此弓长岭地区不同时代的花岗岩之间的关系目前并不清楚。原1:5万地质图中, 根据变形程度的不同, 将区域内的花岗岩分为弓长岭花岗岩和瓦子沟花岗岩, 其中前者的变形较强, 分布于弓长岭铁矿及其共生表壳岩系的東西两侧; 后者变形较弱或没有变形, 分布于齐大山铁矿的东侧向南偏东方向延伸, 且变形较弱的瓦子沟花岗岩侵入强变形的弓长岭花岗岩(图1b)。

本文报道的古太古代花岗岩出露于弓长岭铁矿西南约10 km的河栏镇后台村附近(图1b), 实测地质剖面AA'穿越了变形较强的弓长岭花岗岩和弱变形的瓦子沟花岗岩两个区域, 总长度约8 km, 除太古宙花岗岩(出露宽度>5 km), 剖面上还可见辽河岩



群表壳岩系及侵入其中的辉长岩(图2)。空间上剖面 AA' 范围内的太古宙花岗岩被辽河岩群的片岩、石英岩及侵入片岩的辉长岩分为南北两个部分,且分别被划归为瓦子沟和弓长岭花岗岩,然而详细的野外地质填图和室内研究显示它们记录的面理产状和矿物组合并没有差别。手标本尺度下可见这些花岗岩均由钾长石(40%~60%)、斜长石(10%~30%)、石英(约30%)和少量黑云母组成,局部出现白云母,两类长石和石英均为半自形或它形的粒状变晶结构,钾长石与斜长石相对含量的差异并没有明显的空间变化趋势,暗色矿物黑云母的含量较低,但在不同地区的花岗岩露头上均有分布。与黑云母少量均匀的趋势不同,白云母在不同露头上或同一花岗岩露头的不同部位中含量变化较大,且没有明显的变化规律,这表明白云母的出现很可能与

岩体就位以后,局部受流体或热液的蚀变作用的影响有关,它们不是岩浆结晶的矿物。Dong等(2017)对剖面北段的花岗岩进行了锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素组成研究,结果显示其形成时代为 2.9 Ga, 锆石亏损地幔 Hf 模式年龄峰值为 3.9~3.8 Ga。本文报道的古太古代花岗岩出露于剖面 AA' 南段(图2),它与相邻中太古代花岗岩具有相同的野外地质特征、面理产状及矿物组合,因此无法通过野外观察对二者进行有效的区分,后台村附近古太古代花岗岩的分布面积有待进一步研究。在古太古代花岗岩南侧出露宽度为 0.5~1.5 m 的花岗伟晶岩脉,其中的锆石遭受非常强烈的 Pb 丢失,无法对其进行准确的锆石 U-Pb 定年。在伟晶岩南侧与之直接接触的岩石为古元古代辽河岩群表壳岩系,岩石组合为(石榴子石)片岩、石英岩、千枚岩和火山碎屑岩。

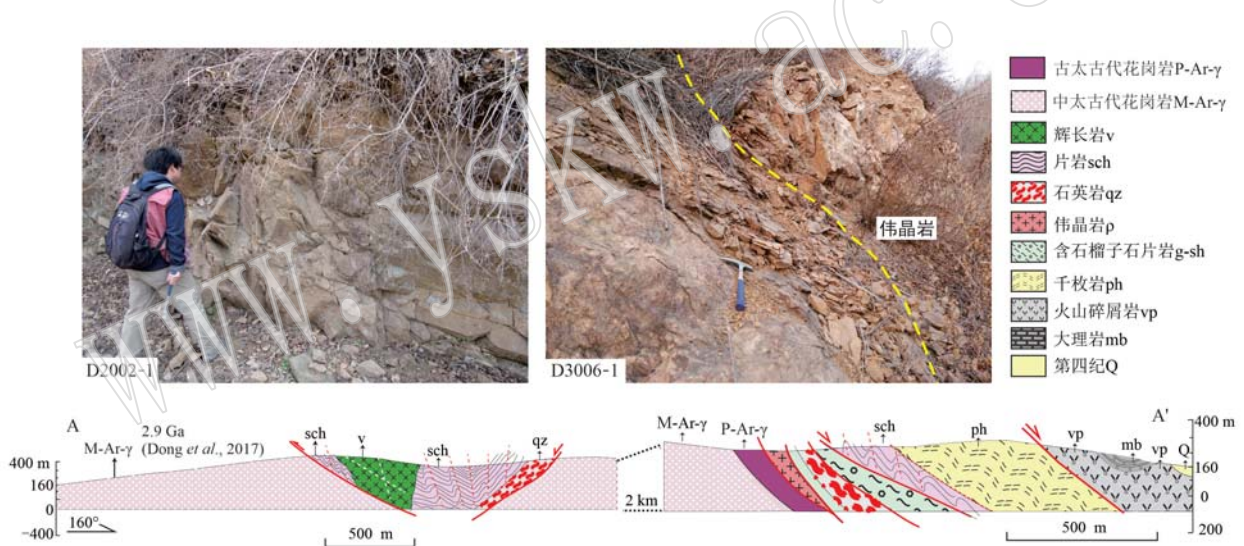


图2 鞍山弓长岭地区地质剖面图

Fig. 2 The geological section map of the Gongchangling area, Anshan

### 3 样品及测试

两件花岗岩样品(D2002-1和D3006-1)均采自实测地质剖面AA'南段, GPS定位分别为123°22'56"E、41°04'02"N和123°23'44"E、41°03'24"N。样品D2002-1具有中粗粒弱片麻状构造,镜下可见半自形的钾长石,局部保留变余花岗结构,矿物组合为钾长石(50%)、斜长石(25%)、石英(25%)和少量黑云母(图3a)。样品D3006-1的蚀变较强,其中斜长石遭受不同程度绢云母化,矿物组合为钾长石(35%)、斜长石(35%)、石英(25%)和一些绢云母及

黑云母(图3b)。

锆石 U-Th-Pb 和 Lu-Hf 同位素成分测试均在武汉上谱实验室完成,先利用 LA-ICP-MS 对锆石单矿物进行 U-Pb 定年,之后通过多接收等离子质谱对样品 D3006-1 中已完成年龄分析的锆石进行 Lu-Hf 同位素分析。锆石 U-Pb 年代学分析过程中激光束斑直径和剥蚀频率分别为 32  $\mu\text{m}$  和 5 Hz,采用标准锆石 91500 作外标进行同位素分馏校正,具体实验方法和测试流程见 Zong 等(2017)。原位 Lu-Hf 同位素分析的激光束斑直径和剥蚀频率分别为 44  $\mu\text{m}$  和 8 Hz,标准锆石为 GJ-1,其他仪器参数和实验流程与 Cao 等(2016)的描述一致。样品测试过程中获



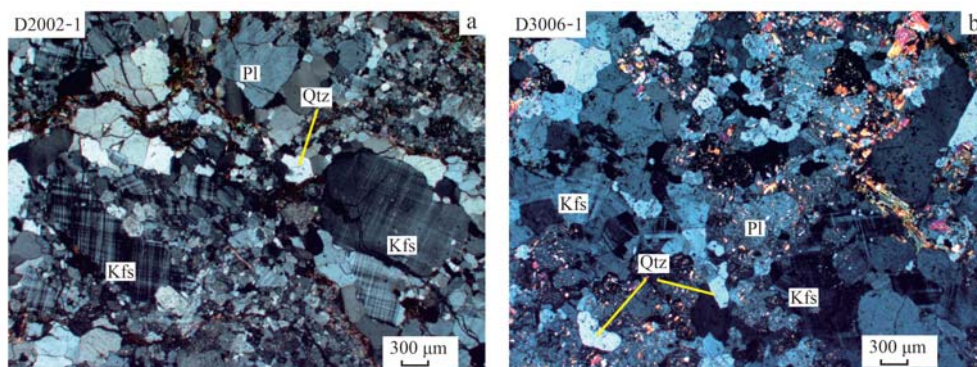


图 3 弓长岭地区中太古代花岗岩和古太古代花岗岩显微镜正交偏光照片

Fig. 3 Photomicrographs (crossed nicols) of the Mesoarchean and Paleoarchean granite of the Gongchangling area, Anshan

Pl—斜长石; Kfs—钾长石; Qtz—石英

Pl—plagioclase; Kfs—K-feldspar; Qtz—quartz

得标准锆石 91500 和 GJ-1 的数据均与推荐值在误差范围内一致, 具体分析结果见表 1 和表 2。

#### 4 锆石 U-Th-Pb-Hf 同位素组成

富钾花岗岩样品 D2002-1 中的锆石绝大多数为长柱状的自形或半自形晶体, 它们的粒径为 100~200  $\mu\text{m}$ , 虽然晶型相对完好, 但透射光下晶体内部混浊不透明, 阴极发光 (CL) 下可见它们的内部结构遭到不同程度的破坏, 应与锆石颗粒遭受了长时间较强的放射性损伤, 导致晶格结构被破坏引发的退晶质化有关。多数颗粒具有发光性极低的环状幔部, 核部区域残缺不全, 少数可识别出生长环带 (图 4a, 4b, 4c)。对 28 粒锆石中放射性损伤较弱的核部进行的原位 U-Th-Pb 成分分析显示, 该样品中锆石的 Th、U 含量和 Th/U 值变化较大, 分别为  $67 \times 10^{-6} \sim 1.319 \times 10^{-6}$ 、 $284 \times 10^{-6} \sim 2.368 \times 10^{-6}$  和 0.06~1.20 (表 1)。受 Pb 丢失的影响, 样品 D2002-1 中只有 3 个数据点 (11、12 和 24) 位于 U-Pb 谐和曲线上, 除 27 号数据点以外, 其他分析点在谐和曲线下方沿不一致线分布, 构成的上交点年龄为  $2.933 \pm 34$  Ma (图 5a)。结合锆石形态和多数分析点具有高 Th、U 含量及 Th/U 值的特点, 笔者认为  $2.933 \pm 34$  Ma 代表花岗岩样品 D2002-1 的侵位结晶年龄, 与 Dong 等 (2017) 在剖面 AA' 北段获得的花岗岩侵位年龄一致, 同时也进一步确认与古太古代花岗岩 (D3006-1) 共生的岩石形成于中太古代。

富钾花岗岩 D3006-1 中锆石的形态特征与中太古代花岗岩 D2002-1 类似, 但矿物粒度变化更大,

粒径为 50~200  $\mu\text{m}$ , 由于较强的放射性损伤, 绝大多数锆石颗粒的内部结构均被破坏, 在阴极发光下锆石内部较亮的区域呈斑杂或补丁状 (图 4d, 4e, 4f)。对 55 粒锆石进行的 U-Th-Pb 同位素分析, 获得的 54 个有效数据表明, 该样品绝大多数锆石的 Th、U 含量分别在  $100 \times 10^{-6} \sim 600 \times 10^{-6}$  和  $400 \times 10^{-6} \sim 1.500 \times 10^{-6}$  之间变化, Th/U 值介于 0.10~0.93 之间, 7 号数据点 Th 含量仅为  $77 \times 10^{-6}$ , 而 U 含量  $> 2.000 \times 10^{-6}$ , 导致其 Th/U 值偏低为 0.04 (表 1), 但该分析点处的内部结构与其他锆石类似, 无法对其是否为变质成因给出有效制约。由于该样品同样遭受了强烈的 Pb 丢失, 多数分析点位于 U-Pb 谐和曲线之下, 在 15 个谐和度  $> 95\%$  的有效数据点中, 除 32 号和 38 号两个分析点的  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  表面年龄明显偏大以外 (分别为 3 600 Ma 和 3 759 Ma), 其余 13 个谐和数据加权平均年龄为  $3.337 \pm 24$  Ma (MSWD = 1.5) (图 5b), 结合它们的形态和 Th-U 含量特征可知, 该年龄应代表花岗岩样品 D3006-1 的侵位结晶年龄,  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  表面年龄为 3 600 Ma 和 3 759 Ma 的颗粒为花岗岩中的继承或残余锆石。总体来看, 所有位于谐和曲线下方的数据点并没有沿一条不一致线分布, 由于样品中明确存在继承或残余锆石的年龄信息, 笔者认为有些数据点是早期锆石发生 Pb 丢失的结果。对以上 54 粒完成 U-Pb 年龄分析的锆石颗粒进行了 Lu-Hf 同位素组成分析, 共获得 46 个有效数据点, 以之前得到的  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  表面年龄为参数计算可知, 这些锆石的初始  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_i$  值在 0.280 391 和 0.280 857 之间变化, 一阶段 Hf 亏损地幔模式年龄  $t_{\text{DM1}}$  为 3 856~3 327 Ma, 没有明

表 1 鞍山弓长岭地区太古宙花岗岩锆石 U-Th-Pb 组成  
Table 1 The zircon U-Th-Pb composition of the Archean granite in the Gongchangling area, Anshan

样品号	$w_B/10^{-6}$			Th/U			同位素比值			年龄/Ma			谐和度/%		
	Pb	U	Th	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$			
D2002-1															
1	345	512	616	0.195 74	0.003 61	11.970 49	0.240 55	0.439 75	0.004 55	2 791	2 602	19	2 350	20	89
2	404	769	870	0.171 89	0.003 03	8.430 64	0.218 95	0.350 58	0.005 41	2 576	2 278	24	1 937	26	83
3	377	1 100	243	0.138 98	0.002 17	5.234 04	0.091 23	0.270 70	0.002 16	2 215	1 858	15	1 544	11	81
5	490	1 135	715	0.173 11	0.002 63	7.573 23	0.220 56	0.313 19	0.006 81	2 588	2 182	26	1 756	33	78
4	365	1 206	145	0.126 33	0.001 95	4.502 93	0.069 40	0.256 84	0.001 88	2 048	1 732	13	1 474	10	83
6	674	2 368	1 183	0.144 29	0.003 69	3.794 38	0.171 25	0.184 16	0.004 06	2 279	1 592	36	1 090	22	62
7	491	691	732	0.196 41	0.003 58	13.207 10	0.408 85	0.477 58	0.009 36	2 798	2 695	29	2 517	41	93
8	380	1 043	430	0.157 73	0.002 88	6.271 96	0.223 03	0.281 96	0.006 52	2 431	2 015	31	1 601	33	77
9	548	2 299	720	0.119 38	0.002 77	2.834 90	0.134 16	0.164 80	0.003 65	1 947	1 365	36	983	20	67
10	375	1 102	67	0.156 82	0.002 46	7.191 82	0.190 60	0.326 87	0.005 52	2 422	2 135	24	1 823	27	84
11	187	284	298	0.216 35	0.003 49	17.688 11	0.317 24	0.590 13	0.005 99	2 954	2 973	17	2 990	24	99
12	223	230	275	0.219 11	0.003 86	18.463 03	0.352 36	0.608 06	0.005 73	2 976	3 014	18	3 062	23	98
13	446	766	221	0.191 80	0.003 30	11.993 79	0.233 12	0.450 92	0.004 56	2 758	2 604	18	2 399	20	91
14	318	589	355	0.203 83	0.003 19	13.514 35	0.441 10	0.473 67	0.012 78	2 857	2 716	31	2 500	56	91
15	433	1 568	658	0.144 65	0.002 28	4.417 81	0.097 04	0.218 89	0.002 47	2 284	1 716	18	1 276	13	70
16	239	415	361	0.188 92	0.002 68	10.835 43	0.234 48	0.412 62	0.006 54	2 733	2 509	20	2 227	30	88
17	440	782	633	0.188 84	0.002 88	9.919 20	0.177 12	0.377 93	0.003 28	2 732	2 427	17	2 067	15	83
18	465	703	383	0.202 56	0.003 20	13.474 02	0.228 37	0.479 63	0.004 18	2 847	2 713	16	2 526	18	92
19	317	688	453	0.177 41	0.002 83	8.281 40	0.147 82	0.336 62	0.003 43	2 629	2 262	16	1 870	17	81
20	419	768	902	0.179 02	0.002 66	9.178 44	0.201 93	0.368 12	0.005 57	2 644	2 356	20	2 021	26	84
21	465	841	336	0.198 09	0.002 72	11.985 08	0.292 38	0.432 52	0.007 69	2 811	2 603	23	2 317	35	88
22	439	1 290	1 319	0.146 53	0.002 92	5.314 95	0.194 82	0.253 15	0.005 19	2 306	1 871	31	1 455	27	74
23	515	1 593	1 233	0.160 71	0.002 46	5.271 95	0.140 08	0.235 38	0.004 76	2 465	1 864	23	1 363	25	68
24	273	324	174	0.213 22	0.003 41	17.901 95	0.344 66	0.606 31	0.008 27	2 931	2 984	19	3 055	33	97
25	417	683	802	0.192 71	0.003 12	11.201 33	0.221 93	0.417 96	0.004 79	2 765	2 540	19	2 251	22	87
26	524	1 007	1 113	0.179 62	0.002 56	9.299 98	0.144 45	0.373 11	0.003 24	2 650	2 368	14	2 044	15	85
27	246	583	147	0.270 08	0.003 94	10.794 74	0.159 59	0.287 97	0.002 18	3 306	2 506	14	1 631	11	57
28	261	395	132	0.203 24	0.002 90	13.852 76	0.269 07	0.488 91	0.006 44	2 854	2 740	18	2 566	28	93
D3006-1															
1	445	443	238	0.306 47	0.006 49	31.474 69	0.675 45	0.736 43	0.006 86	3 503	3 534	21	3 557	26	99
2	803	1 024	243	0.344 13	0.006 27	27.601 46	0.494 33	0.574 76	0.004 32	3 681	3 405	18	2 927	18	84
3	298	397	40	0.324 37	0.006 36	29.178 23	0.726 38	0.638 65	0.008 39	3 591	3 460	25	3 184	33	91
4	576	705	329	0.296 89	0.005 69	23.870 27	0.474 17	0.575 09	0.006 07	3 454	3 263	19	2 929	25	89
5	599	845	289	0.304 36	0.006 47	22.576 64	0.576 43	0.681 78	0.008 40	3 493	3 209	25	2 929	35	84
6	394	448	70	0.300 57	0.006 60	28.703 36	0.641 27	0.681 92	0.007 51	3 473	3 443	22	3 352	29	97
7	508	2 138	77	0.144 50	0.002 94	4.245 08	0.090 40	0.209 53	0.002 03	2 283	1 683	18	1 226	11	68
8	620	1 072	237	0.277 34	0.005 36	17.907 23	0.483 08	0.457 44	0.007 69	3 348	2 985	26	2 428	34	79
9	450	569	422	0.281 25	0.004 99	22.114 09	0.492 84	0.563 21	0.009 35	3 370	3 189	22	2 880	39	89
10	315	338	291	0.272 79	0.004 89	25.277 41	0.456 21	0.663 18	0.005 70	3 322	3 319	18	3 279	22	98
11	589	1 064	433	0.283 19	0.005 40	16.432 11	0.414 16	0.414 16	0.005 45	3 381	2 902	22	2 234	25	73
12	604	954	333	0.279 58	0.006 00	18.355 45	0.420 50	0.469 90	0.005 47	3 361	3 009	22	2 483	24	80
13	222	580	219	0.230 16	0.004 97	9.766 83	0.293 19	0.303 82	0.006 84	3 053	2 413	28	1 710	34	65
14	595	798	153	0.319 89	0.006 82	24.527 32	0.576 68	0.547 18	0.006 24	3 569	3 290	23	2 813	26	84

续表 1  
Continued Table 1

样品号	$w_B/10^{-6}$		Th/U	同位素比值				年龄/Ma			谐和度/%			
	Pb	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$\pm 1\sigma$		
15	455	1 401	0.28	0.210 59	0.004 70	7.386 57	0.174 33	0.250 28	0.002 34	2 159	21	1 440	12	60
16	222	248	0.75	0.288 17	0.006 99	25.806 27	0.638 24	0.640 50	0.006 76	3 339	24	3 191	27	95
17	619	1 772	0.20	0.236 47	0.006 73	9.337 19	0.314 83	0.279 37	0.004 29	2 372	31	1 588	22	60
18	631	777	0.70	0.294 90	0.009 32	23.929 79	0.765 31	0.578 45	0.006 41	3 266	31	2 942	26	89
19	477	1 435	0.14	0.225 84	0.008 18	8.358 68	0.300 89	0.263 89	0.002 74	2 271	33	1 510	14	59
20	367	386	0.70	0.303 36	0.010 73	28.553 43	1.001 84	0.673 06	0.008 75	3 438	34	3 318	34	96
21	582	850	0.16	0.298 54	0.009 24	22.484 76	0.691 32	0.537 83	0.005 20	3 205	30	2 774	22	85
22	474	1 311	0.43	0.189 99	0.005 45	8.013 16	0.260 69	0.299 13	0.004 24	2 233	29	1 687	21	72
23	285	757	0.23	0.266 19	0.006 95	10.683 35	0.299 70	0.287 21	0.003 65	2 496	26	1 628	18	57
24	156	167	0.71	0.276 18	0.007 25	26.156 54	0.685 41	0.678 89	0.005 77	3 352	26	3 340	22	99
25	546	759	0.27	0.263 92	0.007 42	20.486 30	0.573 67	0.556 58	0.004 58	3 115	27	2 852	19	91
26	287	321	0.51	0.269 28	0.005 30	25.431 29	0.518 35	0.681 60	0.005 63	3 325	20	3 350	22	99
27	601	1 660	0.13	0.265 34	0.005 06	9.902 16	0.263 89	0.268 19	0.004 38	2 426	25	1 532	22	54
28	711	1 386	0.46	0.281 14	0.004 83	14.089 95	0.257 50	0.362 15	0.003 69	2 756	17	1 992	17	67
29	553	605	0.86	0.275 68	0.004 74	22.422 16	0.423 07	0.586 55	0.005 75	3 202	18	2 975	23	92
30	318	500	0.42	0.235 59	0.004 62	15.876 97	0.445 69	0.483 41	0.008 96	2 869	27	2 542	39	87
31	487	1 214	0.14	0.195 27	0.004 25	8.978 38	0.190 90	0.332 58	0.003 33	2 336	19	1 851	16	76
32	136	145	0.80	0.252 50	0.005 61	23.172 02	0.516 03	0.661 31	0.005 79	3 234	22	3 272	23	98
33	692	1 996	0.48	0.230 72	0.004 91	6.971 86	0.155 10	0.217 49	0.002 19	2 108	20	1 269	12	50
34	410	514	0.44	0.293 52	0.005 13	23.378 70	0.436 87	0.572 87	0.005 48	3 243	18	2 920	23	89
35	597	1 171	0.15	0.246 02	0.004 18	13.850 95	0.256 12	0.404 64	0.004 17	2 740	18	2 190	19	77
36	465	836	0.11	0.212 54	0.003 87	13.748 15	0.251 72	0.464 66	0.003 87	2 733	17	2 460	17	89
37	579	1 401	0.56	0.215 57	0.004 35	8.834 31	0.178 98	0.294 33	0.002 98	2 321	19	1 663	15	66
38	92	83	0.42	0.362 08	0.007 51	40.362 51	0.840 79	0.801 30	0.008 67	3 780	21	3 794	31	99
39	275	288	0.64	0.266 53	0.004 80	25.536 23	0.469 23	0.689 43	0.007 57	3 329	18	3 380	29	98
40	566	952	0.93	0.221 05	0.003 55	13.003 56	0.226 77	0.422 68	0.003 84	2 680	17	2 273	17	83
41	136	147	0.65	0.269 08	0.004 31	25.001 15	0.403 35	0.668 96	0.004 94	3 308	16	3 302	19	99
42	275	321	0.30	0.300 85	0.004 98	27.354 84	0.509 30	0.653 99	0.006 21	3 396	18	3 244	24	95
43	444	501	0.43	0.273 32	0.005 07	25.263 32	0.483 43	0.666 55	0.005 62	3 318	19	3 293	22	99
44	593	820	0.37	0.291 29	0.005 25	21.286 22	0.396 78	0.527 57	0.004 58	3 152	18	2 731	19	85
45	577	1 123	0.33	0.271 68	0.005 85	15.368 75	0.459 73	0.399 65	0.006 73	2 838	29	2 167	31	73
46	241	292	0.70	0.307 02	0.004 68	24.601 55	0.464 10	0.576 17	0.006 02	3 293	19	2 933	25	88
48	459	525	0.62	0.274 87	0.004 79	24.330 06	0.458 03	0.637 68	0.006 65	3 282	18	3 180	26	96
49	490	650	0.55	0.260 79	0.004 79	21.523 81	0.538 80	0.591 95	0.009 36	3 162	24	2 997	38	94
50	528	1 623	0.24	0.220 45	0.004 57	8.689 62	0.254 12	0.279 59	0.004 27	2 306	27	1 589	22	63
51	366	401	0.42	0.284 32	0.004 42	27.281 57	0.449 47	0.691 89	0.005 57	3 394	16	3 390	21	99
52	653	963	0.26	0.267 64	0.004 10	19.094 85	0.387 60	0.512 94	0.006 45	3 047	20	2 669	28	86
53	657	684	0.85	0.279 75	0.004 17	26.480 85	0.432 22	0.682 93	0.006 01	3 364	16	3 356	23	99
54	625	1 461	0.34	0.274 98	0.004 75	11.101 45	0.238 12	0.290 53	0.003 62	2 532	20	1 644	18	57
55	224	245	0.50	0.277 58	0.005 20	26.173 53	0.501 70	0.680 94	0.005 72	3 353	19	3 348	22	99



表2 鞍山弓长岭地区古太古代花岗岩锆石 Lu-Hf 同位素组成  
Table 2 The zircon Lu-Hf composition of the Archean granite in the Gongchangling area, Anshan

样品点号	年龄/Ma	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_{(e)}$	$2\sigma$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_i$	$\varepsilon\text{Hf}(0)$	$\varepsilon\text{Hf}(t)$	$\pm 2\sigma$	$t_{\text{DM1(Hf)}}$	$t_{\text{DM}}^C$
D3006-1-1	3 503	0.035 559	0.000 919	0.280 545	0.000 029	0.280 482	-78.8	-1.6	1.0	3 733	3 895
D3006-1-2	3 681	0.048 309	0.001 333	0.280 619	0.000 026	0.280 524	-76.1	4.1	0.9	3 673	3 667
D3006-1-3	3 591	0.053 471	0.001 280	0.280 479	0.000 024	0.280 391	-81.1	-2.8	0.9	3 856	4 039
D3006-1-4	3 454	0.035 443	0.001 047	0.280 563	0.000 022	0.280 494	-78.1	-2.4	0.8	3 720	3 906
D3006-1-5	3 493	0.060 588	0.001 483	0.280 626	0.000 024	0.280 527	-75.9	-0.3	0.9	3 677	3 803
D3006-1-7	2 283	0.125 200	0.003 343	0.281 003	0.000 026	0.280 857	-62.6	-16.7	0.9	3 327	3 907
D3006-1-8	3 348	0.062 041	0.001 452	0.280 676	0.000 026	0.280 582	-74.1	-1.7	0.9	3 608	3 784
D3006-1-9	3 370	0.082 110	0.002 423	0.280 815	0.000 024	0.280 657	-69.2	1.5	0.9	3 508	3 596
D3006-1-10	3 322	0.075 340	0.001 727	0.280 769	0.000 031	0.280 658	-70.8	0.4	1.1	3 507	3 630
D3006-1-11	3 381	0.062 247	0.001 569	0.280 568	0.000 027	0.280 466	-77.9	-5.1	1.0	3 765	4 023
D3006-1-12	3 361	0.034 746	0.000 879	0.280 593	0.000 024	0.280 536	-77.1	-3.1	0.9	3 665	3 878
D3006-1-13	3 053	0.065 021	0.002 055	0.280 838	0.000 020	0.280 718	-68.4	-3.8	0.7	3 441	3 690
D3006-1-14	3 569	0.034 883	0.000 943	0.280 581	0.000 025	0.280 516	-77.5	1.1	0.9	3 687	3 770
D3006-1-15	2 910	0.045 139	0.001 117	0.280 545	0.000 023	0.280 482	-78.8	-15.5	0.8	3 752	4 319
D3006-1-16	3 409	0.029 414	0.000 771	0.280 649	0.000 017	0.280 598	-75.1	0.3	0.6	3 580	3 702
D3006-1-17	3 098	0.046 287	0.001 418	0.280 610	0.000 021	0.280 525	-76.5	-9.6	0.7	3 694	4 092
D3006-1-21	3 463	0.049 791	0.001 350	0.280 588	0.000 021	0.280 498	-77.2	-2.0	0.7	3 717	3 891
D3006-1-22	2 742	0.133 115	0.003 590	0.280 956	0.000 029	0.280 767	-64.2	-9.3	1.0	3 419	3 797
D3006-1-23	3 284	0.033 590	0.000 886	0.280 647	0.000 022	0.280 591	-75.1	-2.9	0.8	3 593	3 810
D3006-1-24	3 342	0.065 101	0.001 449	0.280 711	0.000 023	0.280 617	-72.9	-0.6	0.8	3 560	3 708
D3006-1-25	3 270	0.041 902	0.001 186	0.280 611	0.000 022	0.280 537	-76.4	-5.2	0.8	3 669	3 943
D3006-1-26	3 302	0.053 095	0.001 445	0.280 810	0.000 020	0.280 718	-69.4	2.0	0.7	3 425	3 508
D3006-1-27	3 279	0.041 553	0.001 211	0.280 517	0.000 025	0.280 440	-79.8	-8.4	0.9	3 799	4 155
D3006-1-28	3 369	0.072 516	0.001 853	0.280 549	0.000 025	0.280 429	-78.6	-6.7	0.9	3 818	4 114
D3006-1-29	3 339	0.120 295	0.002 886	0.280 806	0.000 033	0.280 621	-69.5	-0.6	1.2	3 565	3 703
D3006-1-30	3 090	0.076 322	0.001 809	0.280 794	0.000 028	0.280 686	-70.0	-4.1	1.0	3 480	3 734
D3006-1-31	2 787	0.047 188	0.001 365	0.280 575	0.000 024	0.280 502	-77.7	-17.7	0.9	3 736	4 359
D3006-1-32	3 600	0.047 390	0.001 048	0.280 765	0.000 022	0.280 692	-71.0	8.1	0.8	3 450	3 344
D3006-1-33	3 057	0.069 632	0.001 888	0.280 674	0.000 025	0.280 563	-74.2	-9.2	0.9	3 652	4 036
D3006-1-34	3 436	0.082 464	0.001 951	0.280 632	0.000 026	0.280 503	-75.7	-2.5	0.9	3 715	3 898
D3006-1-35	3 161	0.057 133	0.001 279	0.280 721	0.000 020	0.280 643	-72.5	-3.9	0.7	3 530	3 781
D3006-1-36	2 925	0.062 405	0.001 517	0.280 653	0.000 025	0.280 567	-75.0	-12.1	0.9	3 645	4 118
D3006-1-37	2 948	0.032 177	0.000 846	0.280 584	0.000 020	0.280 536	-77.4	-12.7	0.7	3 674	4 173
D3006-1-38	3 759	0.090 854	0.001 959	0.280 755	0.000 022	0.280 612	-71.3	9.0	0.8	3 548	3 406
D3006-1-39	3 287	0.060 718	0.001 431	0.280 789	0.000 024	0.280 698	-70.1	1.0	0.9	3 452	3 564
D3006-1-40	2 989	0.043 468	0.000 989	0.280 721	0.000 022	0.280 664	-72.5	-7.2	0.8	3 504	3 857
D3006-1-41	3 301	0.035 829	0.000 773	0.280 464	0.000 022	0.280 415	-81.6	-8.8	0.8	3 826	4 196
D3006-1-42	3 475	0.041 693	0.000 947	0.280 619	0.000 020	0.280 555	-76.1	0.3	0.7	3 636	3 751
D3006-1-43	3 325	0.038 450	0.000 916	0.280 5 75	0.000 026	0.280 517	-77.7	-4.6	0.9	3 692	3 949
D3006-1-44	3 424	0.044 158	0.001 167	0.280 586	0.000 023	0.280 508	-77.3	-2.6	0.8	3 702	3 895
D3006-1-45	3 316	0.061 966	0.001 459	0.280 572	0.000 024	0.280 479	-77.8	-6.2	0.9	3 749	4 041
D3006-1-49	3 252	0.055 335	0.001 720	0.280 586	0.000 023	0.280 478	-77.3	-7.7	0.8	3 756	4 088
D3006-1-50	2 984	0.022 139	0.000 539	0.280 508	0.000 017	0.280 477	-80.1	-14.0	0.6	3 745	4 279
D3006-1-51	3 387	0.035 051	0.000 944	0.280 548	0.000 020	0.280 486	-78.7	-4.2	0.7	3 732	3 973
D3006-1-52	3 292	0.093 892	0.002 021	0.280 857	0.000 025	0.280 729	-67.7	2.2	0.9	3 412	3 489
D3006-1-53	3 361	0.093 401	0.002 253	0.280 675	0.000 029	0.280 529	-74.2	-3.3	1.0	3 686	3 895

显的峰值(表2,图6),其中代表花岗岩中继承或残余锆石的2个分析点(32和38)获得的Hf模式年龄小于锆石的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表面年龄,导致这一结果的原因目前还不清楚。

## 5 讨论

### 5.1 古太古代花岗岩的产状和源区特征

详细的区域野外地质和构造学研究表明,弓长

岭地区的太古宙花岗岩无论什么形成时代,都普遍保留倾向南西的构造面理,与华北克拉通东部其它地区的太古宙基底基本一致,而明显区别于古元古代辽河岩群的面理产状。另一方面,基底花岗岩与其南侧辽河岩群的接触带具有拆离断层的构造特征(Tian *et al.*, 2020),在后台村识别出的3.34 Ga花岗岩恰好位于拆离带边部的构造位置上。虽然古太古代花岗岩与北侧中太古代(2.9 Ga)花岗岩的界限尚不清楚,但基于构造特征和两类花岗岩在区域出

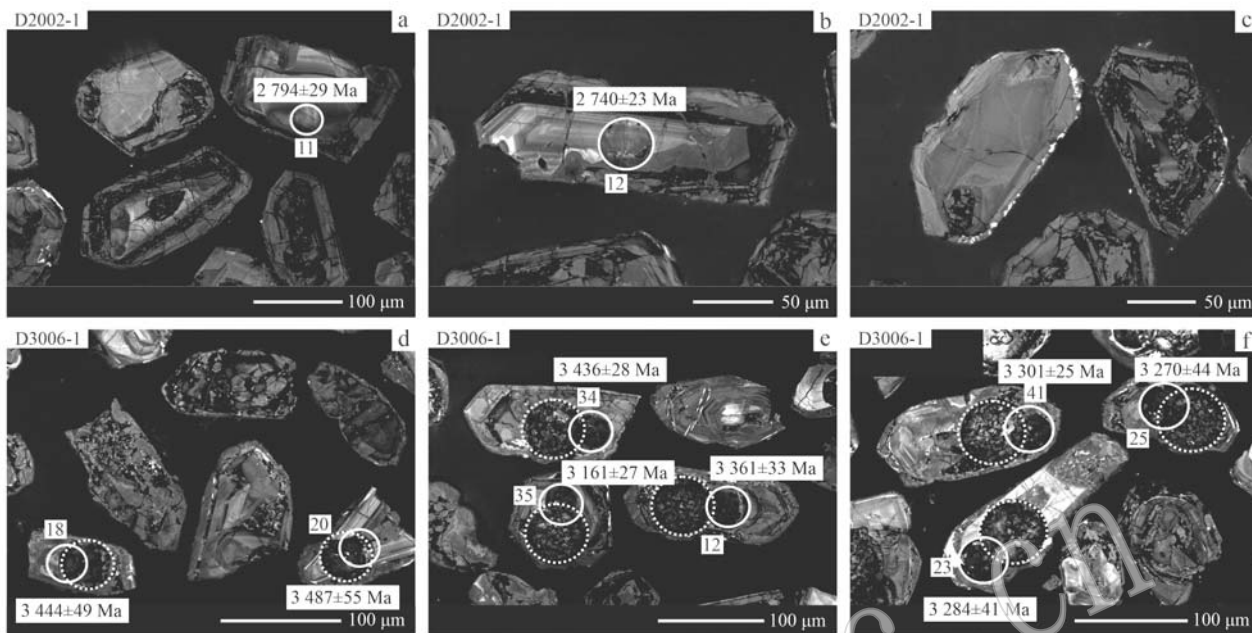


图 4 鞍山弓长岭地区太古宙花岗岩中锆石 CL 图像

Fig. 4 The zircon CL images of the Archean granite in the Gongchangling area, Anshan

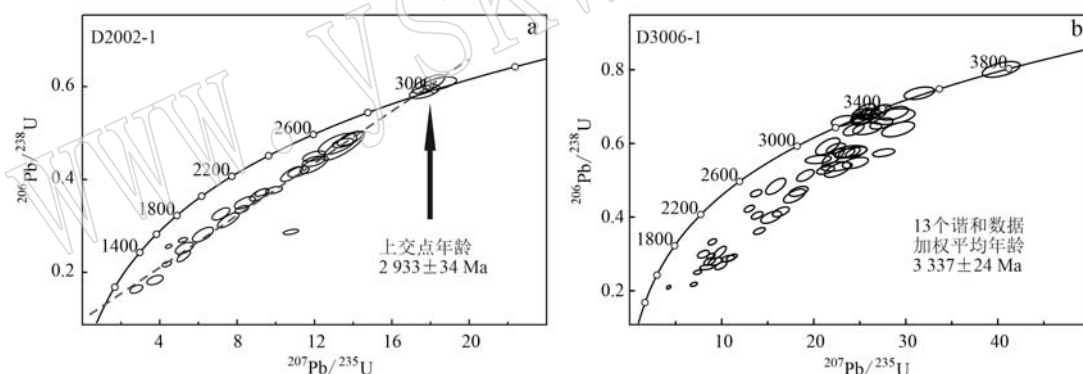


图 5 鞍山弓长岭地区太古宙花岗岩中锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 5 The zircon U-Pb age concordia diagrams of the Archean granite in the Gongchangling area, Anshan

露的相对面积大小, 笔者认为二者不是构造接触关系, 前者应以包体的形式分布于中太古代花岗岩中, 空间位置上与辽河岩群更接近的后台村古太古代花岗岩受后期拆离作用的影响而出露于地表。

对锆石 U-Pb 年龄和原位 Hf 同位素组成的研究已经证实, 弓长岭地区的中太古代花岗岩形成时代为 2.9 Ga, 绝大多数岩浆锆石的初始  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  值非常接近, 锆石的亏损地幔 Hf 模式年龄在 3.9~3.8 Ga 表现出明显的峰值 (Dong *et al.*, 2017)。与之相比, 本次研究获得的古太古代花岗岩初始  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  值的分布范围较大, 为 0.280 391 ~

0.280 857, 而锆石的亏损地幔 Hf 模式年龄为 3 856 ~3 327 Ma, 其中始太古代 3.9~3.8 Ga 的年龄峰值并不明显 (图 6)。由此可见, 与共生的中太古代花岗岩相比, 弓长岭地区的古太古代花岗岩具有更加复杂的源区组成, 除部分始太古代的地壳物质以外, 还有一些时代相对年轻的古太古代物质加入。这进一步说明鞍本地区在古太古代 3.34 Ga 之前已经形成了一个具有多期岩浆作用记录的复杂古陆核, 壳幔物质的分离可能从 3.9 Ga 持续发生至 3.5 Ga 前后。

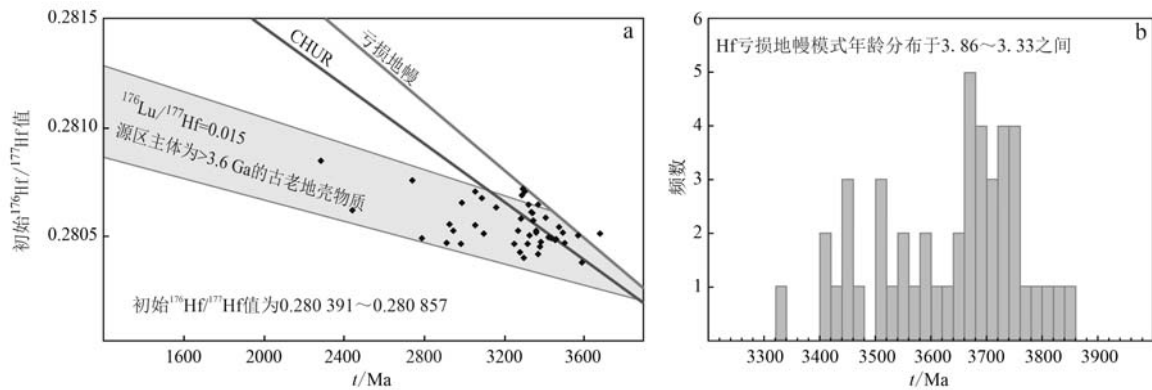


图 6 鞍山弓长岭地区古太古代花岗岩锆石 Lu-Hf 同位素组成图解

Fig. 6 The zircon Lu-Hf composition of the Archean granite in the Gongchangling area, Aanshan

## 5.2 鞍本地区古-中太古代陆壳演化

研究区西侧的鞍山东山和陈台沟一带保留有华北克拉通最古老的岩石, 形成年龄为 3.8 Ga (Wan *et al.*, 2005, 2019), 与弓长岭中太古代花岗岩中岩浆锆石 Hf 模式年龄峰值以及古太古代花岗岩中的部分岩浆锆石 Hf 模式年龄接近。结合详细的构造地质调查和其他区域地质资料可知, 弓长岭地区发育一系列左型走滑断层, 其中以汤河断裂的规模最大, 使研究区内汤河断裂南侧的前寒武纪地质体相对向东错开。区域构造解析结果显示, 这些走滑断层的启动时间可限定在显生宙, 错动的距离 > 20 km, 而齐大山铁矿南端到弓长岭铁矿北端的距离约为 20 km。地质特征方面, 齐大山和弓长岭铁矿的展布形态、构造变形特征、岩石组合和形成时代都没有明显的差别。从空间的相对位置来看, 齐大山 BIF 铁矿位于汤河断裂以北, 其西侧是鞍山始太古代 3.8 Ga 变质杂岩; 而弓长岭 BIF 铁矿位于汤河断裂以南, 其西侧是岩浆锆石 Hf 模式年龄主体为 3.9~3.8 Ga 的古-中太古代花岗岩组合。通过上述地质特征推测鞍山弓长岭太古宙地体在经历古-中太古代多期壳内岩浆作用之前, 在鞍山地区出现沿现今南东方向延伸的始太古代古老陆核, 其分布面积比目前在鞍山地区已发现的始太古代岩石出露面要大的多, 而后在古太古代 (3.6~3.4 Ga) 不断有新生陆壳物质形成并在 3.34 Ga 发生了壳内岩浆作用形成了区域上最古老的花岗岩。这种壳内循环作用于中太古代再次发生且规模更大, 使弓长岭地区形成了 2.9 花岗岩系并逐渐演化出更加稳定、成熟的大陆地壳。到新太古代晚期 (2.6~2.5 Ga) 之前, 齐大山和弓长岭两个 BIF 型铁矿形成于鞍山古陆核东侧

沿北西-南东方向延伸的稳定大陆边缘海, 从中太古代 2.9 Ga 出现稳定大陆地壳后, 在新太古代 2.8~2.6 Ga 一直长期接受古海洋的化学沉积, 最终在新太古代晚期 (2.60~2.52 Ga) 形成品位较高的 BIF 型铁矿。在太古宙地质演化结束后, 鞍山弓长岭太古宙地体受古元古代构造热事件的影响不大, 太古宙基底保存完好, 直至显生宙包括汤河断裂在内的一系列左型走滑断裂将区域内的早前寒武纪地体错开, 并形成现今各类地质体的空间展布格局。

从更大的区域上来看, 鞍本绿岩带内存在多条含铁表壳岩系, 如南芬和歪头山等地的 BIF 铁矿, 还有学者根据锆石 Hf 同位素的分布特征提出在鞍本绿岩带东部歪头山一带存在一个南北向延伸的 ~3.4 Ga 古陆块 (Liu *et al.*, 2017)。笔者认为微陆块的拼合模式是对鞍本绿岩带的构造沉积格局以及区域地壳演化过程较合理的解释, 具有不同模式年龄的花岗质深成岩区很可能代表了分布于不同地区的微小陆核, 而各条含铁表壳岩系的原岩都沉积在这些微陆块周围的古海洋之中, 其中鞍山弓长岭地体是最古老且最早出现花岗质成熟大陆上地壳的陆核, 长期稳定的大陆地壳和陆缘沉积环境为齐大山和弓长岭大型 BIF 铁矿的形成提供了重要的基础。

岩石圈内壳幔岩石的对偶、大面积壳熔花岗岩的形成、基性岩墙群和稳定沉积盖层的出现是大陆克拉通化的岩石学标志 (Zhai, 2011), 弓长岭地区的研究实例表明, 太古宙大陆地壳的稳定化过程是不同步的, 作为早期地球的古陆核之一, 鞍山弓长岭地区在华北克拉通 2.5 Ga 形成统一的大陆地壳之前的古-中太古代就已经完成了区域陆壳成分分异, 并形成了稳定的陆壳结构。



## 6 结论

(1) 鞍山弓长岭地区保留的古太古代花岗岩为中粒片麻状二云母二长花岗岩, 以包体的形式分布于中太古代(3.0~2.9 Ga)花岗岩中, 并具有与后者一致的野外和构造特征。

(2) 古太古代花岗岩中岩浆锆石的加权平均年龄为  $3\ 337 \pm 24$  Ma (MSWD=1.5,  $n=13$ ), 代表其侵位时代, 另有 3.76~3.60 Ga 继承或残余锆石存在。所有锆石初始  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  值为 0.280 391~0.280 857, 一阶段亏损地幔模式年龄( $t_{\text{DMI}}$ )为  $3\ 856 \sim 3\ 327$  Ma。

(3) 鞍本地区在古太古代晚期之前已形成具有多期岩浆作用记录的古老陆核。

**致谢** 感谢沈其韩先生对吾辈之谆谆教导, 祝先生福泽绵长, 身体安康!

## References

- Almeida J A C, Dall' Agnol R and Leita A A S. 2013. Geochemistry and zircon geochronology of the Archean granite suites of the Rio Maria granite-greenstone terrane, Carajás Province, Brazil[J]. *Journal of South American Earth Science*, 42: 103~126.
- Bhattacharya S, Santosh M, Zhang Z C, *et al.* 2014. Imprints of Archean to Neoproterozoic crustal processes in the Madurai Block, Southern India[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 88: 1~10.
- Cao H W, Zou H, Zhang Y H, *et al.* 2016. Late Cretaceous magmatism and related metallogeny in the Tengchong area: Evidence from geochronological, isotopic and geochemical data from the Xiaolonghe Sn deposit, western Yunnan, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 78: 196~212.
- Condie K C, Belousova E, Griffin W L, *et al.* 2009. Granitoid events in space and time: Constraints from igneous and detrital zircon age spectra[J]. *Gondwana Research*, 15(3-4): 228~242.
- Dong C Y, Wan Y S, Xie H Q, *et al.* 2017. The Mesarchean Tiejiaoshan-Gongchangling potassic granite in the Anshan-Benxi area, North China Craton: Origin by recycling of Paleo-to Eoarchean crust from U-Pb-Nd-Hf-O isotopic studies[J]. *Lithos*, 290~291: 116~135.
- Guo B R, Liu S W, Zhang J, *et al.* 2016. Neoproterozoic Andean-type active continental margin in the northeastern North China: Geochemical and geochronological evidence from metavolcanic rocks in the Jiapigou granite-greenstone belt, Southern Jilin Province[J]. *Precambrian Research*, 285: 147~169.
- Kamo S L and Davis D W. 1994. Reassessment of Archean crustal development in the Barberton Mountain Land South Africa, based on U-Pb dating[J]. *Tectonics*, 13: 167~192.
- Li H M, Yang X Q, Li L X, *et al.* 2015. Desilicification and iron activation-precipitation in the high-grade magnetite ores in BIFs of the Anshan-Benxi area, China: Evidence from geology, geochemistry and stable isotopic characteristics[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 113: 998~1 016.
- Li H M, Zhang Z J, Li L X, *et al.* 2014. Types and general characteristics of the BIF-related iron deposits in China [J]. *Ore Geology Reviews*, 57: 264~287.
- Li Junjian, Shen Baofeng, Li Shuangbao, *et al.* 1996. Geology and geochemistry of Archean granite-greenstone belts in Northern Liaoning Province and Southern Jilin Province[J]. *Geochimica*, 25(5): 485~467 (in Chinese with English abstract).
- Liu D Y, Nutman A P, Compston W, *et al.* 1992. Remnants of  $\geq 3\ 800$  Ma crust in the Chinese part of the Sino-Korea craton[J]. *Geology*, 20(4): 339~342.
- Liu S W, Wang M J, Wan Y S, *et al.* 2017. A reworked ~3.45 Ga continental microblock of the North China Craton: Constraints from zircon U-Pb-Lu-Hf isotopic systematics of the Archean Beitai-Waitoushan migmatite-syenogranite complex [J]. *Precambrian Research*, 303: 332~354.
- Martin H, Smithies R H, Rapp R, *et al.* 2005. An overview of adakite, tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG), and sanukitoid: Relationships and some implication for crustal evolution[J]. *Lithos*, 79(1~2): 1~24.
- Moyen J F, Martin H, Jayananda M, *et al.* 2003. Late Archean granites: Atypology based on the Dharwar Craton (India)[J]. *Precambrian Research*, 127(1~3): 103~123.
- Shen Baofeng, Luo Hui and Han Guogang. 1994. Archean Geology and Metallization in Northern Liaoning Province and Southern Jilin Province[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese with English abstract).
- Tian Z H, Liu F L, Liu P H, *et al.* 2020. A Paleoproterozoic nappe on Meso-Archean gneisses exhumed by a Cretaceous metamorphic core complex in northeastern North China Craton[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 109(4): 1 403~1 420.
- Wan Y S, Liu D Y, Song B, *et al.* 2005. Geochemical and Nd isotopic compositions of 3.8 Ga meta-quartz dioritic and trondhjemitic rocks

- from the Anshan area and their geological significance[J]. *Journal of Asian Earth Science*, 24(5): 563~575.
- Wan Yusheng, Liu Dunyi, Dong Chunyan, *et al.* 2009. The oldest rocks and zircons in China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(8): 1 793~1 807(in Chinese with English abstract).
- Wan Y S, Liu D Y, Dong C Y, *et al.* 2015b. Formation and evolution of Archean continental crust of the North China Craton[A]. Zhai M G. *Precambrian Geology of China*[C]. Springer, 59~136.
- Wan Y S, Ma M Z, Dong C Y, *et al.* 2015a. Widespread late Neoproterozoic reworking of Meso- to Paleoproterozoic continental crust in the Anshan-Benxi area, North China Craton, as documented by U-Pb-Nd-Hf-O isotopes[J]. *American Journal of Science*, 315(7): 620~670.
- Wan Y S, Xie H Q, Dong C Y, *et al.* 2019. Hadean to Paleoproterozoic rocks and zircons in China[A]. Van Kranendonk M J, Smithies R H and Bennett V. *Earth's Oldest Rocks (second edition)* [C]. Elsevier, 294~327.
- Wang C Y, Meng E, Li Y G, *et al.* 2018. A new discovery of ~2.7 Ga granitic magmatism in Southeastern Jilin Province, China[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 91(5): 1 919~1 923.
- Wu F Y, Zhang Y B, Yang J H, *et al.* 2008. Zircon U-Pb and Hf isotopic constraints on the Early Archean crustal evolution in Anshan of the North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 167(3): 339~362.
- Zhai M G. 2011. Cratonization and the Ancient North China Continent: A summary and review[J]. *Science China Earth Science*, 54(8): 1 110~1 120.
- Zhai Mingguo. 2016. Comparative study of geology in North China and Korean Peninsula; Research advances and key issues[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 32(10): 2 915~2 932(in Chinese with English abstract).
- Zhai M G and Santosh M. 2011. The early Precambrian odyssey of the North China Craton; A synoptic overview[J]. *Gondwana Research*, 20(1): 6~25.
- Zhai M G and Windley B F. 1990. The Archean Early Proterozoic banded iron formations of North China; Their characteristics, geotectonic relations, chemistry and implications for crustal growth[J]. *Precambrian Research*, 48(3): 267~286.
- Zhai M G, Yang R Y, Lu W J, *et al.* 1985. Geochemistry and evolution of the Qingyuan Archean granite-greenstone terrain, NE China[J]. *Precambrian Research*, 27(1~3): 37~62.
- Zhang X H, Zhang Y B, Zhai M G, *et al.* 2017. Decoding Neoproterozoic to Palaeoproterozoic tectonothermal events in the Rangnim Massif, North Korea; Regional correlation and broader implications[J]. *International Geology Review*, 59(1): 16~28.
- Zhao G C, Sun M, Wilde S A, *et al.* 2005. Late Archean to paleoproterozoic evolution of the North China Craton; Key issues revisited[J]. *Precambrian Research*, 136(2): 177~202.
- Zong K Q, Klemm R, Yuan Y, *et al.* 2017. The assembly of Rodinia: The correlation of early Neoproterozoic (ca. 900 Ma) high-grade metamorphism and continental arc formation in the southern Beishan Orogen, southern Central Asian Orogenic Belt (CAOB)[J]. *Precambrian Research*, 290: 32~48.

### 附中文参考文献

- 李俊健, 沈保丰, 李双保, 等. 1996. 辽北-吉南地区太古宙花岗岩-绿岩带地质地球化学[J]. *地球化学*, 25(5): 458~467.
- 沈保丰, 骆辉, 韩国刚. 1994. 辽北-吉南太古宙地质及成矿[M]. 北京: 地质出版社.
- 万渝生, 刘敦一, 董春艳, 等. 2009. 中国最古老的岩石和锆石[J]. *岩石学报*, 25(8): 1 793~1 807.
- 翟明国. 2011. 克拉通化与华北陆块的形成[J]. *中国科学: 地球科学*, 41(8): 1 037~1 046.
- 翟明国. 2016. 朝鲜半岛与华北地质之对比研究: 进展与问题[J]. *岩石学报*, 32(10): 2 915~2 932.