

doi:10.3799/dqkx.2016.140

# 辽东连山关地区新太古代花岗杂岩 SHRIMP U-Pb 年龄、Hf 同位素组成及地质意义

杨凤超<sup>1,2</sup>, 孙景贵<sup>1</sup>, 宋运红<sup>2</sup>, 张朋<sup>2</sup>, 毕中伟<sup>2</sup>

1. 吉林大学地球科学学院, 吉林长春 130061

2. 中国地质调查局沈阳地质调查中心, 辽宁沈阳 110034

**摘要:** 辽东本溪连山关花岗杂岩岩体的精细年代学和地球化学的研究匮乏, 区域上辽东地区新太古代岩浆活动较少, 研究也相对较弱。辽东本溪连山关地区处于铀矿集中区, 是内生铀矿床的有利成矿地区。区内铀矿主要赋存于连山关花岗杂岩体与辽河群浪子山组或鞍山群的接触带附近, 表明了岩体与铀矿化关系密切。连山关地区浅肉红色正长花岗岩 SHRIMP U-Pb 年龄为  $2512 \pm 14$  Ma, 灰白色条痕状二长花岗岩 SHRIMP U-Pb 年龄为  $2510 \pm 15$  Ma, 花岗杂岩侵位时代为新太古代。正长花岗岩  $\text{SiO}_2$  含量为 69.28%~72.70%,  $\text{K}_2\text{O}$  含量为 6.24%~7.12%,  $\text{Na}_2\text{O}$  含量为 2.77%~3.09%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量为 13.68%~15.92%; 二长花岗岩  $\text{SiO}_2$  含量为 65.53%~71.01%,  $\text{K}_2\text{O}$  含量为 2.95%~3.90%,  $\text{Na}_2\text{O}$  含量为 3.57%~4.23%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量为 14.13%~14.90%; 连山关花岗杂岩含白云母, A/CNK 为 1.09~1.16(平均 1.12), 刚玉(C)为 1.37~2.28,  $\text{P}_2\text{O}_5$  和  $\text{SiO}_2$  无负相关关系, 表现为高钾的 S 型花岗岩。稀土总量较高, 轻重稀土元素之间强烈分馏, 从正铷异常到负铷异常 ( $\delta\text{Eu}=3.55\sim 0.36$ ), 亏损 Nb、Ta、P、Ti 等高场强元素, 富集 Rb、Th、K 等大离子亲石元素。锆石  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值为  $-15.19\sim -0.47$ , 对应的单阶段 Hf 模式年龄  $T_{\text{DM}}^{\text{C}}$  为  $2826\sim 3400$  Ma, 两阶段 Hf 模式年龄  $T_{\text{DM}}^{\text{C}}$  为  $2931\sim 3650$  Ma。辽东连山关花岗杂岩可能是在高温中压条件下由中太古代和古太古代地壳物质(以变质泥岩和杂砂岩为主)发生深熔作用形成的, 可能发生在后碰撞环境, 指示华北克拉通各微陆块拼贴完成。

**关键词:** 辽东半岛; 花岗杂岩; 太古代; 地质年代学; S 型花岗岩; 岩石学。

中图分类号: P588.121; P597.3

文章编号: 1000-2383(2016)12-2008-11

收稿日期: 2016-02-26

## SHRIMP U-Pb Age, Hf Isotope Composition and Geochemical Characteristics of Neoproterozoic Granitic Complex in Liaodong Lianshanguan Area, NE China

Yang Fengchao<sup>1,2</sup>, Sun Jinggui<sup>1</sup>, Song Yunhong<sup>2</sup>, Zhang Peng<sup>2</sup>, Bi Zhongwei<sup>2</sup>

1. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China

2. Shenyang Institute of Geology and Mineral Resources, China Geological Survey, Shenyang 110034, China

**Abstract:** The fine chronology and geochemistry of the Lianshanguan granite complex in Benxi are scarce, and the Neoproterozoic magmatism in the Liaodong area is less and the study is relatively weak. The Lianshanguan area at Benxi in East Liaoning is the favorable metallogenic area for endogenous uranium deposits within uranium concentration area. Uranium deposits near the contact zone with the region mainly occur in Lianshanguan granitic complex and Langzishan Formation of Liaohe Group or Anshan Group, indicating close relationship between the rock and uranium mineralization. In Lianshanguan area, light flesh red syenogranite yields an SHRIMP U-Pb age of  $2512 \pm 14$  Ma, white streak-shape monzonitic granite yields an SHRIMP U-Pb age of  $2510 \pm 15$  Ma, and emplacement age of granitic complex is Neoproterozoic. Syenogranites show  $\text{SiO}_2$  of 69.28%–72.70%,  $\text{K}_2\text{O}$  of 6.24%–7.12%,  $\text{Na}_2\text{O}$  of 2.77%–3.09%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  of 13.68%–15.92%. Monzonitic granites show  $\text{SiO}_2$  of 65.53%–71.01%,  $\text{K}_2\text{O}$  of 2.95%–3.90%,  $\text{Na}_2\text{O}$  of 3.57%–4.23%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  of 14.13%–14.90%. Lianshanguan granitic complex contains muscovite and shows 1.09–1.16 (average 1.12) of A/CNK, 1.37–2.28 of corundum (C), no negative correlation between  $\text{P}_2\text{O}_5$  and  $\text{SiO}_2$ , so it is characterized by high potas-

**基金项目:** 中国地质调查局地质资源大调查项目(No. 12120113058800); 国家自然科学基金青年基金项目(No. 41501093).

**作者简介:** 杨凤超(1982-), 男, 博士研究生, 主要从事矿产地质调查及研究工作. E-mail: yangfc123@163.com

**引用格式:** 杨凤超, 孙景贵, 宋运红, 等, 2016. 辽东连山关地区新太古代花岗杂岩 SHRIMP U-Pb 年龄、Hf 同位素组成及地质意义. 地球科学, 41(12): 2008–2018.

sium S-type granite. rare earth elements show higher content, strong fractional distillation between light and heavy rare earth elements, from positive to negative Eu anomaly ( $\delta Eu = 3.55 - 0.36$ ), loss of Nb, Ta, P, Ti high field strength elements, enrichment of Rb, Th, K and other large-ion lithophile elements. The  $\epsilon_{Hf}(t)$  is  $-15.19$  to  $-0.47$ , single-stage Hf model ages  $T_{DM}$  are  $2\ 826 - 3\ 400$  Ma, and two-stage Hf model ages  $T_{DM}^C$  are  $2\ 931 - 3\ 650$  Ma. The Lianshanguan granitic complex in Liaodong area may be formed by deep-melting of Middle-Archean and Paleozoic crustal materials (mainly metamorphic mudstones and miscellaneous sandstones) under high-temperature and medium-pressure conditions, and may occur in the post-collision environment. It indicates that North China Craton micro-land collage was completed.

**Key words:** Liaodong peninsula; granitic complex; Archean; geochronology; S-type granite; petrology.

辽东本溪连山关地区处于铀矿集中区,分布有连山关铀矿床、悬岭后铀矿床及 256 矿点、206 矿点、180 矿点、417 矿点、34 号矿点等,是内生铀矿床的有利成矿地区.区内铀矿主要赋存于连山关花岗杂岩体与辽河群浪子山组或鞍山群的接触带附近,表明岩体与铀矿化关系密切(韩军和夏毓亮,2009;吴迪等,2013).前人对连山关地区花岗杂岩的研究认为,混合岩、混合花岗岩是属于混合岩化(或花岗岩化)成因(李巨初等,1986a;王雪等,2015),韩军和夏毓亮(2009)认为连山关—高家沟岩体为壳源岩浆多次重熔侵位的花岗杂岩体,吴迪等(2013)认为重熔混合岩的成因为韧性剪切作用中围岩的易熔组分经不完全、不均匀重熔作用后冷凝再固化形成.以上研究缺乏该岩体的精细年代学和地球化学的系统研究,区域上辽东地区新太古代岩浆活动相对较少,研究也相对较弱.辽宁省地调院在区域地质调查中测得连山关地区黑云斜长片麻岩 U-Pb 年龄为  $2\ 730 \pm 1$  Ma,片麻状黑云母二长花岗

岩 U-Pb 年龄为  $2\ 563 \pm 3$  Ma(辽宁省地质矿产调查院大连分院,2003,K51C004003(丹东市)、J51C001003(东港市)1:25 万区域地质调查成果报告),吴迪等(2013)测得肉红色钾长花岗岩 U-Pb 年龄为  $2\ 511 \pm 15$  Ma 和  $2\ 540 \pm 25$  Ma,灰白色重熔混合岩 U-Pb 年龄为  $2\ 533 \pm 42$  Ma.所以本文通过 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学、Hf 同位素、岩石地球化学研究,对该杂岩体的形成时代、源区性质和岩石成因及地质意义加以探讨.本研究有望为连山关地区铀成矿研究提供一定依据,为辽东半岛的构造演化提供一定的证据.

### 1 地质特征

连山关地区花岗杂岩体分布于辽宁本溪市连山关镇附近,位于华北地台东北部营口—宽甸台隆与太子河—浑江拗陷的过渡部位、辽东古裂谷的北部边缘,东西长约 40 km,南北宽 5~10 km(图 1),面

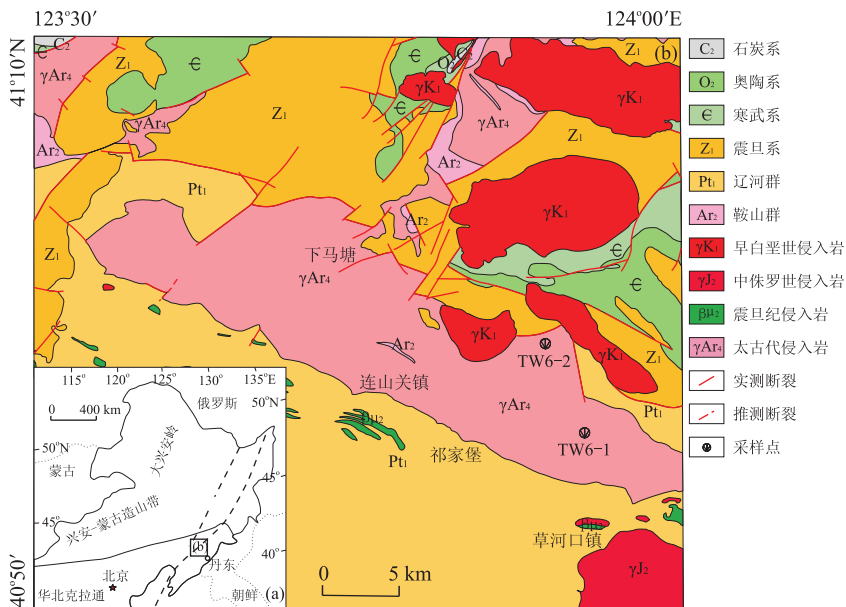


图 1 中国东北构造地质简图(a)和辽东连山关地区花岗杂岩地质简图(b)

Fig. 1 Geological sketch of eastern China, showing major tectonic units (a) and geological sketch of granitic complex in the Liaodong Lianshanguan area (b)

积 200 多平方千米, 岩基状产出, 近 EW 向展布, 并被古元古代辽河群浪子山组不整合覆盖。岩石类型为片麻状似斑状黑云母二长花岗岩、片麻状黑云母二长花岗岩、黑云二长片麻岩、黑云斜长片麻岩。本区出露地层主要有: 太古界鞍山群茨沟组和大峪沟组, 岩性为千枚岩、片岩、磁铁石英岩、绿片岩、黑云变粒岩和斜长角闪岩, 是本区最古老的结晶基底, 呈大小不等的残留体零星分布在混合花岗岩中; 古元古界辽河群的浪子山组、里尔峪组、高家峪组、大石桥组, 岩性主要为石英岩、片岩、千枚岩、大理岩、变质凝灰岩、浅粒岩、斜长角闪岩等, 它们沿岩体四周分布; 新元古界震旦系的石英岩; 古生界寒武系和奥陶系的灰岩, 分布在区内北部。区内断裂构造主要有两组: NWW 向压性断裂和 NE 向压扭性断裂, 前者被后者错断, 它们主要沿接触带附近分布。

## 2 样品特征及分析方法

### 2.1 岩相学特点

岩石样品为野外采集的新鲜浅肉红色中细粒正长花岗岩和灰白色中细粒条痕状花岗闪长岩。

中细粒正长花岗岩: 浅肉红色, 中细粒花岗结构, 块状构造。岩相学特征如下: 主要由钾长石、石英和少量斜长石及黑云母构成。其中钾长石主要为微斜长石、正长石次之, 不规则粒状、板柱状, 干涉色灰

白色, 前者发育格子双晶, 粒度  $\leq 1.6 \text{ mm} \times 2.6 \text{ mm}$ , 后者无双晶, 粒度较小、粒度  $\leq 0.6 \text{ mm} \times 1.0 \text{ mm}$ , 前者含量远高于后者, 分别为 40%、10%; 斜长石, 无色, 不规则板柱状, 发育绢云母化, 干涉色灰白色, 见模糊聚片双晶, 粒度  $\leq 0.5 \text{ mm} \times 0.8 \text{ mm}$ , 含量  $\pm 10\%$ ; 石英, 无色, 洁净, 拉长粒状及粒状, 干涉色灰白色, 显著波状消光, 粒度  $\leq 1.0 \text{ mm} \times 2.0 \text{ mm}$ , 含量 30% 以上; 暗色矿物黑云母, 绿褐色, 典型黑云母式吸收性, 粒度  $\leq 0.25 \text{ mm} \times 0.6 \text{ mm}$ , 含量不足 3%; 另见少许白云母。此外, 偶见黑色不透明铁矿物颗粒(图 2a~2c)。

中细粒条痕状二长花岗岩: 灰白色, 中细粒花岗结构, 暗色矿物黑云母具定向排列趋势, 显示条痕片麻状构造。岩相学特征如下: 主要由石英、钾长石及少量斜长石和暗色矿物黑云母构成。其中石英, 无色, 洁净, 拉长粒状及粒状, 干涉色灰白色, 显著波状消光, 粒度  $\leq 1.0 \text{ mm} \times 2.0 \text{ mm}$ , 含量 30% 以上; 钾长石主要为微斜长石、正长石次之, 不规则粒状、板柱状, 干涉色灰白色, 前者发育格子双晶, 后者无双晶, 粒度  $\leq 0.3 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ , 含量前者略高于后者, 分别为 15%、10%; 斜长石, 无色, 不规则板柱状, 发育绢云母化, 干涉色灰白色, 见模糊聚片双晶, 粒度  $\leq 0.5 \text{ mm} \times 0.8 \text{ mm}$ , 含量  $\pm 25\%$ ; 暗色矿物黑云母, 绿褐色, 典型黑云母式吸收性, 粒度  $\leq 0.2 \text{ mm} \times 1.2 \text{ mm}$ , 含量 10% 以上。此外, 偶见

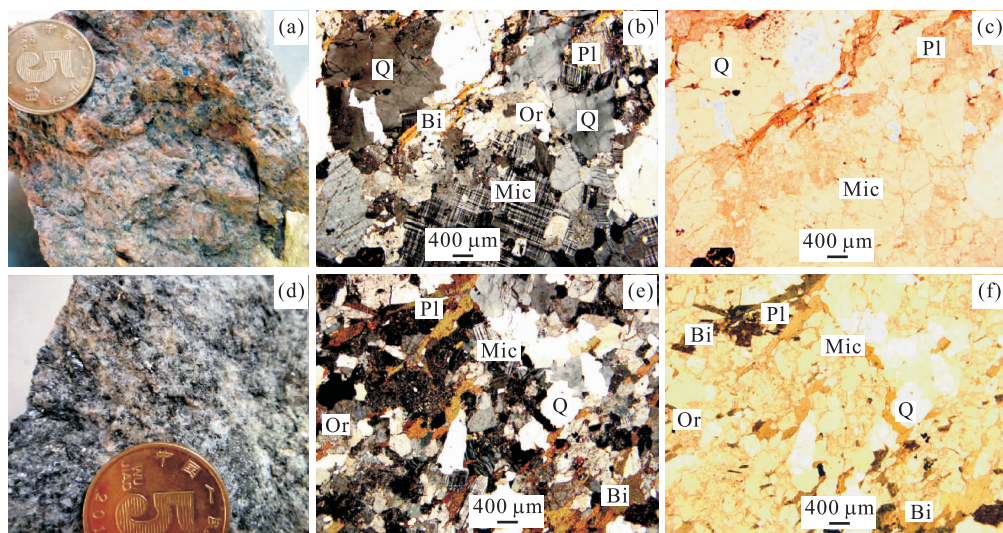


图 2 辽东连山关地区肉红色正长花岗岩(a、b、c)和灰白色条痕状二长花岗岩(d、e、f)照片

Fig. 2 Images of flesh red syenogranite (a, b, c) and white streaks shape monzonitic granite (d, e, f) from Lianshanguan area in Liaodong Peninsula

a. 岩石标本照片; b. 显微镜下正交偏光照片(25 $\times$ ); c. 显微镜下单偏光照片(25 $\times$ ); d. 岩石标本照片; e. 显微镜下正交偏光照片(25 $\times$ ); f. 显微镜下单偏光照片(25 $\times$ )

黑色不透明铁矿物颗粒. 显微镜下显示定向构造, 由片状矿物黑云母及拉长的石英定向排列显示; 另石英和黑云母分布不均匀, 多呈条带状集中, 手标本显示条痕状构造(图 2d~2f).

## 2.2 锆石 SHRIMP U-Pb 定年

SHRIMP U-Pb 定年样品取自连山关地区新鲜浅肉红色正长花岗岩(TW6-1)和灰白色条痕状二长花岗岩(TW6-2), 样品经重液分离和磁选后, 挑选代表性的锆石制作样品靶. 进行 SHRIMP U-Pb 分析前, 先进行了透、背散射电子像(BSE)及阴极发光(CL)分析, 以确定锆石颗粒的晶体形态、内部结构以及标定测年点. 岩体锆石多浅紫色, 金刚光泽, 透明一半透明, 个别半透明一不透明, 个别具浅色或暗色矿物包体, 表面多具裂纹或铁染斑点, 晶体多为不规则粒状, 阴极发光图像显示锆石具有较典型的岩浆振荡环带结构(生长环带), 应为岩浆成因, 为原岩结晶锆石.

锆石的 U、Th 和 Pb 同位素组成分析在中国地质科学院地质研究所北京离子探针中心的 SHRIMP II 上进行, 分析流程和原理参见宋彪等(2002)的相关描述. 应用澳大利亚地调局标准锆石 TEMORA(417 Ma)进行元素之间的分馏校正. 应用置于调试靶上的另一标准锆石 TEM(年龄为 417 Ma, U 含量为  $238 \times 10^{-6}$ )标定锆石的 U、Th 和 Pb 含量. 应用澳大利亚国立大学 PRAWN 程序进行数据处理. 普通铅根据实测 $^{204}\text{Pb}$ 校正, 数据点的误差为  $1\sigma$ . 采用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄, 其加权平均值的误差为  $2\sigma$ , 置信度为 95%.

## 2.3 主微量元素测试

对新鲜浅肉红色正长花岗岩和灰白色条痕状二长花岗岩样品进行了主、微量元素测试工作. 测试工作在国土资源部东北矿产资源监督检测中心完成. 主量元素测试方法为 X 射线荧光光谱法. 测试仪器为飞利浦 PW2404X 射线荧光光谱仪, 分析精度优于 5%. 微量元素利用酸溶法制备样品并在 HR-ICPMS(Element 1)电感耦合等离子体质谱测试. 分析精度为: 当元素含量大于  $10 \times 10^{-6}$ , 精度优于 5%; 当含量小于  $10 \times 10^{-6}$  时, 精度优于 10%.

## 2.4 锆石 Hf 同位素分析

锆石 Hf 同位素分析在南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室完成, 使用仪器为 ThermoFinnigan Neptune-plus 型(MC-ICP-MS). 分析方法见侯可军等(2007). 采用静态信号采集模式, 背景采集时间 30 s, 积分时间为 0.131 s, 采集

200 组数据, 总计约 30 s. 激光能量密度为  $15 \text{ J/cm}^2$ , 束斑直径为  $55 \mu\text{m}$ . 计算参数如下: $^{176}\text{Lu}$  衰变常数为  $1.865 \times 10^{-1} \text{ a}^{-1}$  (Scherer *et al.*, 2001), 球粒陨石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 和 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值分别为 0.033 2 和 0.282 772 (Blichert-Toft and Albarède, 1997), 现今亏损地幔的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 为 0.283 25.

## 3 分析结果

### 3.1 锆石 SHRIMP U-Pb 年龄

辽东连山关地区浅肉红色正长花岗岩(TW6-1)的锆石呈自形晶, 较大, 长约  $100 \sim 230 \mu\text{m}$ , 长短轴比  $1.2 : 1.0 \sim 3.0 : 1.0$ . 阴极发光(CL)图像显示锆石均发育振荡环带(图 3a). 锆石微量元素测试数据显示, 花岗岩锆石  $\text{U} = 272 \times 10^{-6} \sim 2.081 \times 10^{-6}$ ,  $\text{Th} = 70 \times 10^{-6} \sim 871 \times 10^{-6}$ ,  $\text{Th}/\text{U} = 0.05 \sim 1.03$ . 锆石 Th/U 均大于或接近 0.1, 表明其为岩浆成因锆石 (Belousova *et al.*, 2002), 并且笔者结合振荡环带和锆石的 U、Th 含量可判断锆石均为岩浆锆石. SHRIMP U-Pb 年龄分析结果见附表 1 ([www.earth-science.net/index.aspx](http://www.earth-science.net/index.aspx)), TW6-1 里面 Pb 丢失最强的 3 个点偏离不一致线, 导致不一致年龄的误差和 MSWD 值偏大, 舍去后, 得到不一致年龄偏好, 不一致线与谐和曲线的上交点年龄为  $2512 \pm 14 \text{ Ma}$  (图 4a), 代表了浅肉红色花岗岩的结晶年龄.

灰白色条痕状二长花岗岩(TW6-2)的锆石呈自形晶, 较大, 长约  $120 \sim 240 \mu\text{m}$ , 长短轴比  $1.2 : 1.0 \sim 3.0 : 1.0$ . 阴极发光(CL)图像显示锆石均发育振荡环带(图 3b). 锆石微量元素测试数据显示, 花岗岩锆石  $\text{U} = 149 \times 10^{-6} \sim 825 \times 10^{-6}$ ,  $\text{Th} = 60 \times 10^{-6} \sim 358 \times 10^{-6}$ ,  $\text{Th}/\text{U} = 0.09 \sim 1.71$ . 锆石 Th/U 均大于或接近 0.1, 表明其为岩浆成因锆石 (Belousova *et al.*, 2002), 并且结合振荡环带和锆石的 U、Th 含量可判断锆石均为岩浆锆石. SHRIMP U-Pb 年龄分析结果列于附表 1, 不一致线与谐和曲线的上交点年龄为  $2510 \pm 15 \text{ Ma}$  (图 4b), 代表了灰白色条痕状花岗闪长岩的结晶年龄.

### 3.2 地球化学特征

**3.2.1 主量元素特征** 辽东连山关地区花岗杂岩地球化学研究结果表明(附表 2, [www.earth-science.net/index.aspx](http://www.earth-science.net/index.aspx)), 浅肉红色正长花岗岩具有相对较高的  $\text{SiO}_2$  (69.28%~72.70%),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (13.68%~15.92%),  $\text{K}_2\text{O}$  (6.24%~7.12%) 和  $\text{MgO}$  (0.47%~0.58%), 同时具有相对较低的

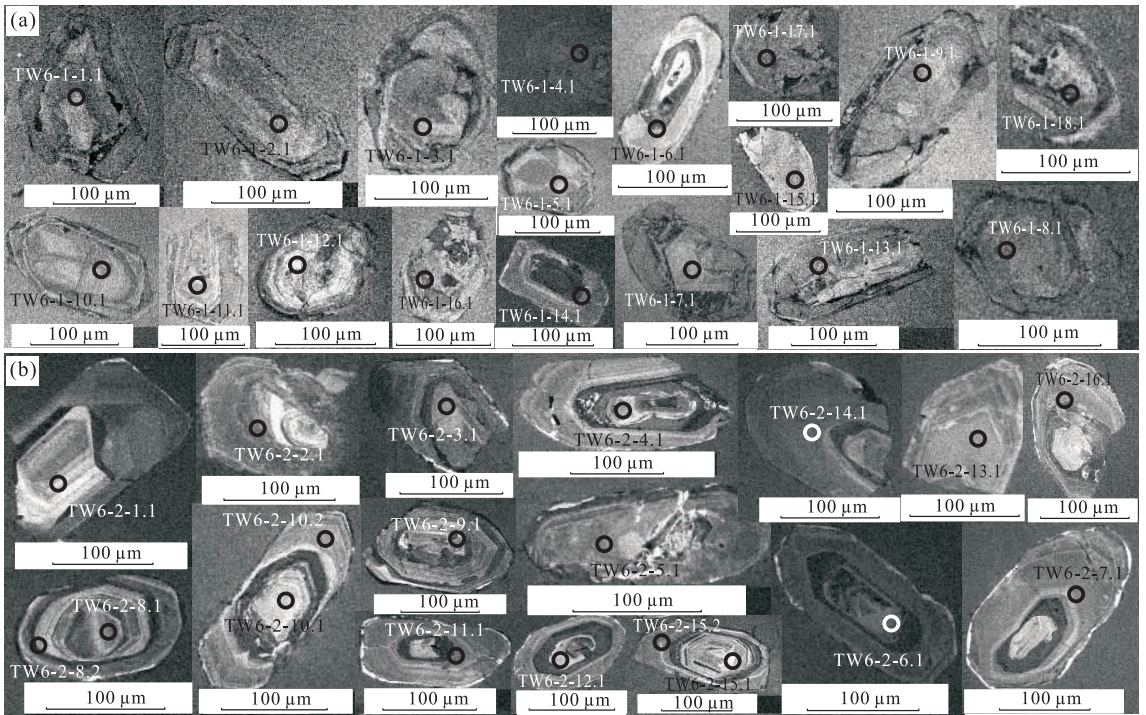


图 3 辽东连山关地区正长花岗岩(TW6-1)和条痕状二长花岗岩(TW6-2)的锆石阴极发光(CL)图像

Fig. 3 Zircon CL image of syenogranite (TW6-1) and streaks shape monzonitic granite from Lianshanguan area in Liaodong Peninsula

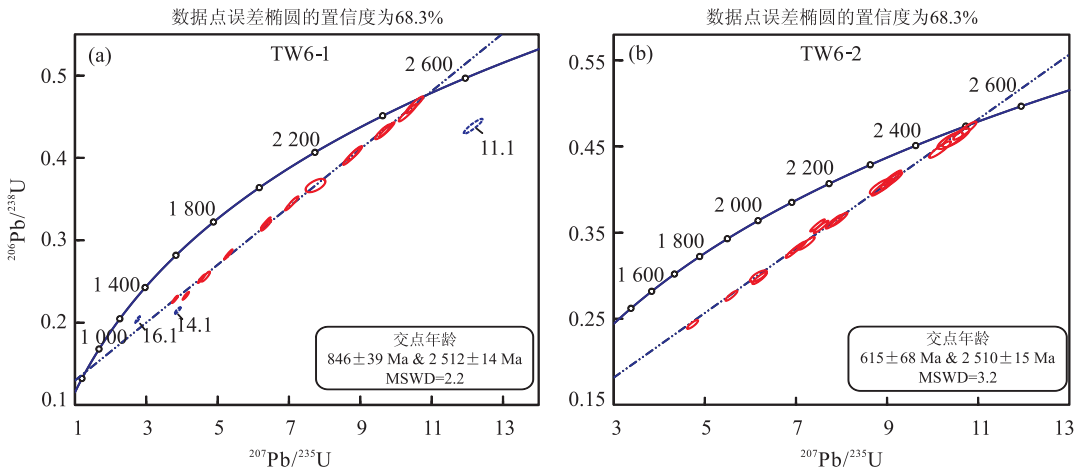


图 4 辽东连山关地区花岗岩杂岩 SHRIMP U-Pb 年龄

Fig. 4 SHRIMP zircon U-Pb concordia diagram and average age of the granitic complex from Lianshanguan area in Liaodong Peninsula

$\text{Na}_2\text{O}$  (2.77%~3.09%), 在  $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$  图解上投在钾玄岩系列(图 5a). 里特曼指数  $\sigma_{43}$  为 2.77~3.96,  $A/\text{CNK}$  为 1.085~1.158,  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$  为 0.43~0.47. 利用主量元素计算的 CIPW 标准矿物含量可知, 样品中 Q 大于 20%, 据 Q, An, Ab, Or 含量按三氏法经验公式计算碱性长石 A 和斜长石 P 含量并投影到 QAP 图解, 岩石全部落入正长花岗岩区域(图 5b).

灰白色条痕状二长花岗岩具有相对较高的  $\text{MgO}$  (1.26%~2.56%),  $\text{Na}_2\text{O}$  (3.57%~4.23%),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (14.13%~14.90%), 同时具有相对较低的  $\text{SiO}_2$  (65.53%~71.01%) 和  $\text{K}_2\text{O}$  (2.95%~3.90%) 的地球化学特征, 在  $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$  图解上投在高钾钙碱性系列(图 5a). 里特曼指数  $\sigma_{43}$  为 2.01~2.47, 小于 3.3, 指示其属于钙碱性岩石系列.  $A/\text{CNK}$  为 1.11~1.131,  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$  为 0.91~1.44.

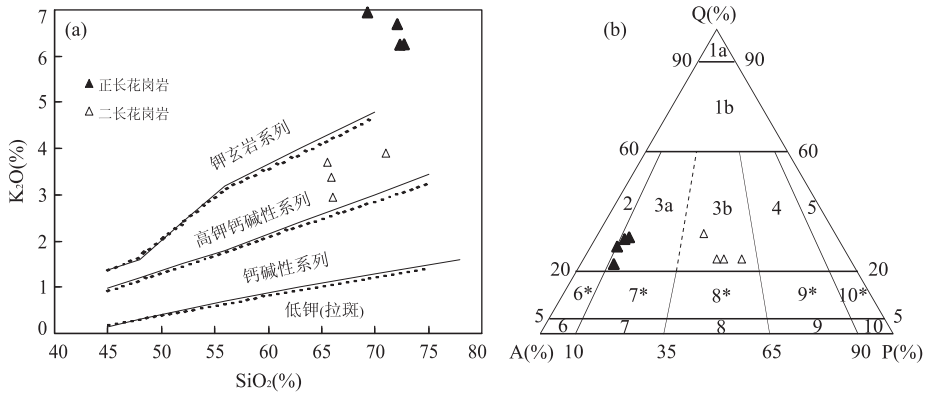


图 5 辽东连山关地区花岗岩杂岩的 SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O 相关图解和 QAP 图解

Fig. 5 SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O (a) and QAP (b) of the granitic complex from Lianshanguan area in Liaodong Peninsula

图 b 中: 1a. 硅英岩(石英岩); 1b. 富石英花岗岩类; 2. 碱长花岗岩; 3a. 花岗岩(正长花岗岩); 3b. 花岗岩(二长花岗岩); 4. 花岗闪长岩; 5. 英云闪长岩; 6\*. 石英碱长正长岩; 6. 碱长正长岩; 7\*. 石英正长岩; 7. 正长岩; 8\*. 石英二长岩; 8. 二长岩; 9\*. 石英二长闪长岩、石英二长辉长岩; 9. 二长闪长岩、二长辉长岩; 10\*. 石英闪长岩、石英辉长岩、石英斜长岩; 10. 闪长岩、辉长岩、斜长岩. 图 a 据 Rickwood(1989), 图 b 据 Streckeisen(1976) 和 Le Maitre *et al.* (1989)

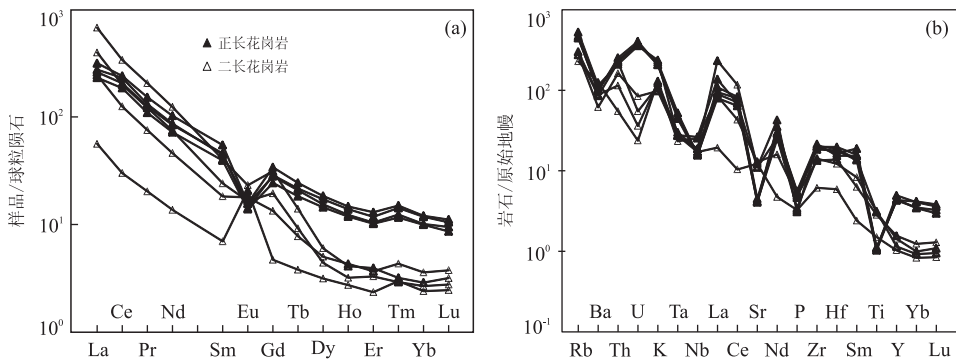


图 6 辽东连山关地区花岗岩杂岩的稀土配分曲线(a)和微量蛛网图(b)

Fig. 6 Rare earth element distribution curves (a) and trace element spider diagram (b) for granitic complex sampled from Lianshanguan area in Liaodong Peninsula

标准值据 Sun and McDonough(1989)

利用主量元素计算的 CIPW 标准矿物含量可知, 样品中 Q 大于 20%, 据 Q、An、Ab、Or 含量按三氏法经验公式计算碱性长石 A 和斜长石 P 含量并投影到 QAP 图解, 岩石全部落入二长花岗岩区域(图 5b).

张旗和翟明国(2012)收集了国内外部分太古宙花岗岩的资料, 太古宙高钾花岗岩的 Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O 比值大多为 1.0~0.5, 高钾花岗岩则落入高钾钙碱性系列和钾玄岩系列. 因而, 连山关花岗岩杂岩属于高钾花岗岩.

**3.2.2 微量元素特征** 微量元素结果表明(附表 3, www.earth-science.net/index.aspx), 浅肉红色正长花岗岩的  $\Sigma$ REE 为  $233.21 \times 10^{-6} \sim 311.84 \times 10^{-6}$ , 平均  $272.5 \times 10^{-6}$ , 其中  $(La/Yb)_N$  为 22.06~27.15, LREE/HREE 为 14.99~17.59, 平均 16.09,  $\delta Eu$  为 0.36~0.44, 平均 0.40. 稀土总量较高, 轻重稀

土之间的分馏很强烈, 轻稀土之间有一定分馏, 但是重稀土之间分馏较弱, Eu 负异常明显, 是大量斜长石作残留相的部分熔融产生的熔体, 其在球粒陨石标准化图解(图 6a)上表现为陡的右倾曲线. 在原始地幔标准化的微量元素蛛网图(图 6b)上, Nb、Ta、P、Ti 等高场强元素明显亏损, 而 Rb、Th、K 等大离子亲石元素富集. Rb/Sr 为 3.26~3.53, Nb/Ta 为 5.28~11.96, Zr/Hf 为 36.48~50.56, Rb/Nb 为 24.89~26.31.

灰白色条痕状二长花岗岩的  $\Sigma$ REE 为  $45.31 \times 10^{-6} \sim 461.66 \times 10^{-6}$ , 平均  $238.56 \times 10^{-6}$ , 其中  $(La/Yb)_N$  为 23.35~233.19, LREE/HREE 为 14.10~45.01, 平均 31.58,  $\delta Eu$  为 0.65~3.55, 平均 1.52. 稀土总量较高, 轻重稀土之间的分馏很强烈, 轻稀土之间有一定分馏, 但是重稀土之间分馏较弱, Eu 负到正异常. 在球粒陨石标准化图解(图 6a)

上表现为陡的右倾曲线. 在原始地幔标准化的微量元素蛛网图(图 6b)上, Nb、Ta、P、Ti 等高场强元素明显亏损, 而 Rb、Th、K 等大离子亲石元素富集. Rb/Sr 为 0.56~0.76, Nb/Ta 为 10.85~18.97, Zr/Hf 为 35.35~41.93, Rb/Nb 为 9.32~13.14.

连山关花岗杂岩体内部的正长花岗岩 U 含量为 7.47~8.49, 外部接触带的二长花岗岩 U 含量为 0.50~1.77, 可能是铀的富集成矿引起的.

### 3.3 锆石 Hf 同位素组成

岩体锆石 Hf 同位素分析点位置与 SHRIMP U-Pb 定年位置相同. Hf 同位素分析数据(附表 4, [www.earth-science.net/index.aspx](http://www.earth-science.net/index.aspx)). 浅肉红色正长花岗岩的不一致年龄较好, 只有 3 个 Pb 丢失最强的点偏离不一致线, 其<sup>176</sup>Hf/<sup>177</sup>Hf 比值分布于 0.280 833~0.281 229,  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值为 -24.54~-1.01, 单阶段 Hf 模式年龄  $T_{\text{DM}}$  为 2 826~3 400 Ma, 两阶段 Hf 模式年龄  $T_{\text{DM}}^{\text{C}}$  为 2 934~3 686 Ma.

灰白色条痕状二长花岗岩的不一致年龄较好, 其<sup>176</sup>Hf/<sup>177</sup>Hf 比值分布于 0.281 091~0.281 306,  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值为 -5.43~-0.39, 单阶段 Hf 模式年龄  $T_{\text{DM}}$  为 2 965~3 308 Ma, 两阶段 Hf 模式年龄  $T_{\text{DM}}^{\text{C}}$  为 2 858~3 153 Ma.

## 4 讨论

### 4.1 成岩时代

区域上, 辽东半岛的结晶基底由中一新太古代的铁架山杂岩、鞍山群、龙岗岩群以及古-中元古代的辽河群等组成(王荃, 2012). 近年较为精确的年代学研究表明, 铁架山杂岩和鞍山群的年龄为 2 500~

3 360 Ma, 其中尚含有年龄值为 3 800 Ma 的始太古代构造岩片, 龙岗岩群的年龄通常为 2 900~3 100 Ma, 其时代应属中太古代(伍家善等, 1998). 前人资料显示, 连山关地区黑云斜长片麻岩 U-Pb 年龄为 2 730±1 Ma, 片麻状黑云母二长花岗岩 U-Pb 年龄为 2 563±3 Ma(辽宁省地质矿产调查院大连分院, 2003, K51C004003(丹东市)、J51C001003(东港市) 1:25 万区域地质调查成果报告), 肉红色钾长花岗岩 U-Pb 年龄为 2 511±15 Ma 和 2 540±25 Ma, 灰白色重熔混合岩 U-Pb 年龄为 2 533±42 Ma(吴迪等, 2013). 浅肉红色正长花岗岩 SHRIMP U-Pb 年龄为 2 512±14 Ma 和灰白色条痕状二长花岗岩 SHRIMP U-Pb 年龄为 2 510±15 Ma, 应为辽东连山关花岗杂岩的侵位年龄, 为新太古代.

新太古代岩浆活动与铀成矿密切相关, 连山关花岗杂岩体具有较高的原始铀含量, 构成该区的第一代铀源(佟国元等, 2012), 岩体侵位引起的脆性断裂及脆性为主的脆-韧性断裂, 为含铀热液的迁移和沉淀提供了通道和场所.

### 4.2 源区性质和岩石成因

连山关花岗杂岩是一种过铝质的高硅碱性花岗岩, 配分模式呈右倾型, 轻重稀土分馏明显, 岩相学研究, 不含角闪石, 含有白云母, A/CNK 为 1.09~1.16, 标准刚玉(C)为 1.37~2.28, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 和 SiO<sub>2</sub> 无负相关关系. 因此, 连山关花岗杂岩为高钾的 S 型花岗岩(图 7a).

微量元素组成上, 稀土总量较高, 轻重稀土之间的分馏很强烈, 亏损 Nb、Ta、P、Ti 等高场强元素, 富集 Rb、Th、K 等大离子亲石元素. Nb/Ta 比 5.28~18.97, 低于原始地幔的 Nb/Ta 比值为

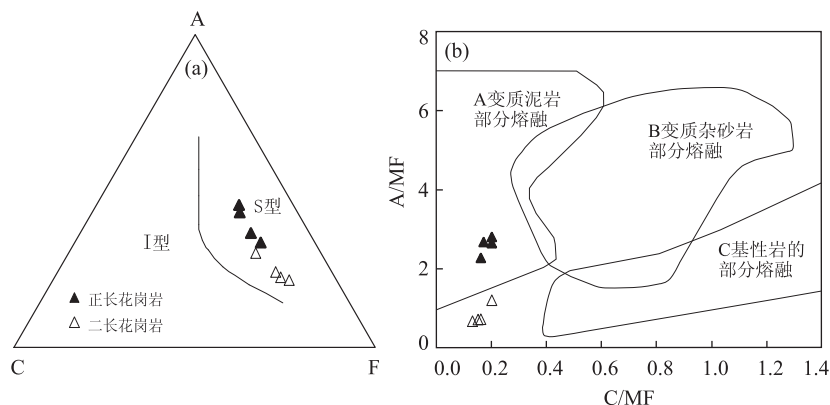


图 7 辽东连山关地区花岗杂岩的 ACF 图解(a)和 A/MF-C/MF 图解(b)

Fig. 7 ACF (a) and A/MF-C/MF (b) of the granitic complex from Lianshanguan area in Liaodong Peninsula

图 b 据 Altherr *et al.* (2000)

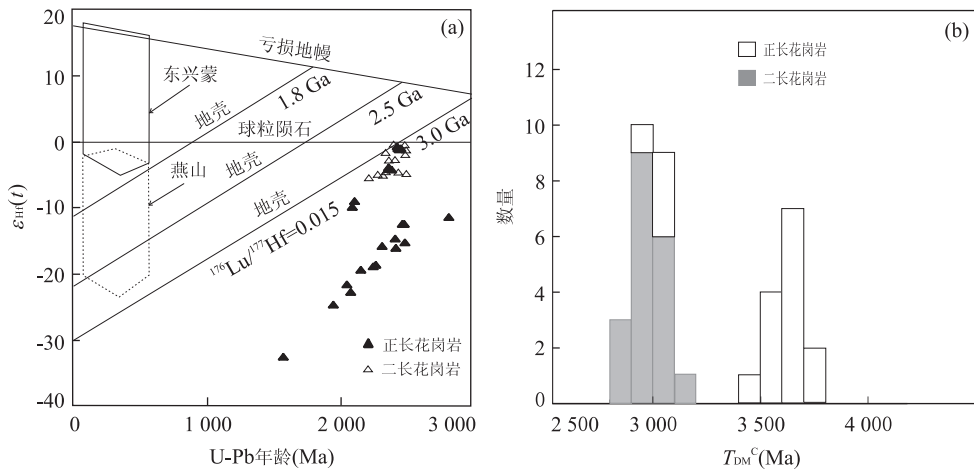


图 8 辽东连山关地区花岗杂岩的锆石 Lu-Hf 同位素特征图解

Fig. 8 Zircon Lu-Hf isotope characteristics diagram of the granitic complex from Lianshanguan area in Liaodong Peninsula

图 a 和 b 据 Yang *et al.* (2006)

17.5±2.0 (Green, 1995), 说明花岗杂岩源区受地壳组分的影响比较大, Nb、Ta 相对亏损, 可能与地壳物质混合有关 (Rollison, 1993). P、Ti 偏低可能与磷灰石、钛铁氧化物的结晶分异有关 (高永宝等, 2014). Sr 相对亏损指示岩浆发生了斜长石的分离结晶作用, 或岩浆源区残留有斜长石. 从正铕异常到负铕异常 ( $\delta Eu = 3.55 \sim 0.36$ ), 表明斜长石在早期岩浆演化过程中分离结晶作用不明显, 在岩浆演化后期开始分离结晶 (刘英俊等, 1984; 李昌年, 1992).

S 型花岗岩的源区一般被认为是变质沉积岩, 而泥质岩源区的强过铝质花岗岩的  $CaO/Na_2O$  比值小于 0.3 (连山关的正长花岗岩为 0.17~0.21), 砂屑岩源区的强过铝质花岗岩的  $CaO/Na_2O$  比值大于 0.3 (连山关的二长花岗岩为 0.37~0.49) (Sylvester, 1998; 施彬等, 2016). 综上所述, 连山关岩体的源岩为变质泥岩和杂砂岩 (图 7b).

过铝质花岗岩的  $Al_2O_3/TiO_2 < 100$  时, 源区部分熔融温度  $> 875^\circ C$  (Sylvester, 1998), 连山关岩体  $Al_2O_3/TiO_2$  为 21.55~65.63, 因此, 岩浆的形成温度相对较高. 连山关岩体低 Sr ( $Sr < 400$ ) 低 Yb ( $Yb < 2$ ) 的特点, 具中等的负铕异常, 可能是在中等压力下形成的 (压力大于 0.8 GPa). 连山关岩体的 Yb 含量低, 指示 S 型花岗岩形成的深度较大 (张旗等, 2006).

花岗杂岩体锆石 Hf 同位素组成方面, 具生长环带的锆石 U-Pb 同位素分析结果显示,  $^{207}Pb/^{206}Pb$  年龄为 2 834~1 586 Ma, 其年龄与之相应的 Th/U 比值 (0.05~1.71) 和  $\epsilon_{Hf}(t)$  值 (-40.68~-2.12) 呈正相关关系, 表明这些锆石曾发生过不同程度的

变质重结晶作用 (Pidgeon, 1992; Pidgeon *et al.*, 1998; 王森等, 2016; 李碧乐等, 2016). 其中 8 个锆石 (测点为 TW6-1-3.1, TW6-1-7.1, TW6-1-8.1, TW6-1-15.1, TW6-2-1.1, TW6-2-8.1, TW6-2-13.1, TW6-2-15.1) 的  $^{207}Pb/^{206}Pb$  年龄在 2 474~2 514 Ma, 与上交点年龄接近, 这些锆石受后期变质热事件改造程度较弱. 这 8 个锆石 Hf 同位素分析结果表明,  $\epsilon_{Hf}(t)$  值为 -15.19~-0.47, 均位于地壳范围内 (图 8a), 说明岩体形成时壳源物质成分占主导地位. 对应的单阶段 Hf 模式年龄  $T_{DM}$  为 2 826~3 400 Ma, 两阶段 Hf 模式年龄  $T_{DM}^C$  为 2 931~3 650 Ma (图 8b). 单阶段 Hf 模式年龄均比代表锆石结晶作用的上交点年龄大, 因此上述岩体不可能源自中太古代下地壳的重熔. 单阶段和两阶段 Hf 模式年龄差别不大, 表明连山关岩体来自中太古代和古太古代地壳物质的熔融.

#### 4.3 地质意义

研究区大地构造背景属于华北克拉通东部, 新太古代中期是全球大陆克拉通化最重要的时期之一, 包括大量灰色片麻岩类的形成和侵位, 构成大陆地壳最重要的物质成分. 新太古代 (2.7~2.5 Ga) 还广泛出现钾质花岗岩类, 标志着大陆克拉通化及其地壳分异的重要事件 (李江海, 1998). 新太古代末华北克拉通各微陆块共同经历了 25 亿年变质-构造-热事件 (翟明国和卞爱国, 2000; 万渝生等, 2015), 表现为华北板块北部麻粒岩相带的形成以及强烈的壳熔花岗岩活动 (翟明国等, 2001; 耿元生等, 1997).

连山关花岗杂岩具有 S 型花岗岩特征, 可能形成于高温中压的后碰撞环境, 标志着早华北克拉通



各微陆块拼贴完成。

## 5 结论

(1) 连山关地区浅肉红色正长花岗岩 SHRIMP U-Pb 年龄为  $2512 \pm 14$  Ma, 灰白色条痕状二长花岗岩 SHRIMP U-Pb 年龄为  $2510 \pm 15$  Ma. 辽东连山关地区花岗杂岩的侵位时代为新太古代。

(2) 连山关花岗杂岩含白云母, A/CNK 为 1.09~1.16(平均 1.12), 刚玉(C)为 1.37~2.28,  $P_2O_5$  和  $SiO_2$  无负相关关系, 表现为高钾的 S 型花岗岩。亏损高场强元素, 富集大离子亲石元素, 锆石  $\epsilon_{Hf}(t)$  值为  $-15.19 \sim -0.47$ , 对应的单阶段 Hf 模式年龄  $T_{DM}$  为  $2826 \sim 3400$  Ma, 两阶段 Hf 模式年龄  $T_{DM}^C$  为  $2931 \sim 3650$  Ma。

(3) 结合岩体地球化学特征和区域演化背景, 连山关花岗杂岩可能形成于高温中压的后碰撞环境, 指示华北克拉通各微陆块拼贴完成。

致谢: 本文锆石 U-Pb 实验测试和数据分析过程中得到北京离子探针中心杨淳和谢士稳老师的帮助, 锆石 Hf 同位素实验测试和数据分析过程中得到南京大学孙盼老师的帮助。两位审稿人对本文初稿提出宝贵的建议, 在此一并表示感谢!

## References

Altherr, R., Holl, A., Hegner, E., et al., 2000. High-Potassium, Calc-Alkaline I-Type Plutonism in the European Variscides: Northern Vosges (France) and Northern Schwarzwald (Germany). *Lithos*, 50(1-3): 51-73. doi:10.1016/s0024-4937(99)00052-3

Belousova, E., Griffin, W., O'Reilly, S. Y., et al., 2002. Igneous Zircon: Trace Element Composition as an Indicator of Source Rock Type. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 143(5): 602-622. doi:10.1007/s00410-002-0364-7

Blichert-Toft, J., Albarède, F., 1997. The Lu-Hf Isotope Geochemistry of Chondrites and the Evolution of the Mantle-Crust System. *Earth and Planetary Science Letters*, 148(1-2): 243-258. doi:10.1016/s0012-821x(97)00040-x

Gao, Y. B., Li, W. Y., Qian, B., et al., 2014. Geochronology, Geochemistry and Hf Isotopic Compositions of the Granitic Rocks Related with Iron Mineralization in Yemaquan Deposit, East Kunlun, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 30(6): 1647-1665 (in Chinese with

English abstract).

Geng, Y. S., Liu, D. Y., Song, B., 1997. Chronological Framework of the Early Precambrian Important Events of the Northwestern Hebei Granulite Terrain. *Acta Geologica Sinica*, 71(4): 316-327 (in Chinese with English abstract).

Green, T. H., 1995. Significance of Nb/Ta as an Indicator of Geochemical Processes in the Crust-Mantle System. *Chemical Geology*, 120(3-4): 347-359. doi:10.1016/0009-2541(94)00145-x

Han, J., Xia, Y. L., 2009. Discussion on Zircon LA-ICP-MS Ages of Lianshanguan-Gaojiagou Granites and Its Significance. *Uranium Geology*, 25(4): 214-221 (in Chinese with English abstract).

Hou, K. J., Li, Y. H., Zou, T. R., et al., 2007. Laser Ablation-MC-ICP-MS Technique for Hf Isotope Microanalysis of Zircon and Its Geological Applications. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2595-2604 (in Chinese with English abstract).

Le Maitre, R. W., Bateman, P., Dudek, A., et al., 1989. A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms. Blackwell, Oxford. 10:4-8.

Li, B. L., Sun, Y. G., Chen, G. J., et al., 2016. Zircon U-Pb Geochronology, Geochemistry and Hf Isotopic Composition and Its Geological Implication of the Fine-Grained Syenogranite in Dong'an Goldfield from the Lesser Xing'an Mountains. *Earth Science*, 41(1): 1-16 (in Chinese with English abstract).

Li, C. N., 1992. Trace Elements of Igneous Petrology. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).

Li, J. C., Luo, C. W., Tong, C. H., et al., 1986. Geochemistry of REE in Lianshanguan Uranium Deposit, Northern China. *Journal of Chengdu College of Geology*, 13(4): 1-10 (in Chinese with English abstract).

Li, J. H., 1998. Supercontinent Cycle in the Precambrian and Its Implication for the Plate Tectonics. *Earth Science Frontiers*, 5(Suppl. 1): 141-151 (in Chinese with English abstract).

Liu, Y. J., Cao, L. M., Li, Z. L., et al., 1984. Element Geochemistry. Science Press, Beijing (in Chinese).

Pidgeon, R. T., 1992. Recrystallisation of Oscillatory Zoned Zircon: Some Geochronological and Petrological Implications. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 110(4): 463-472. doi:10.1007/bf00344081

Pidgeon, R. T., Nemchin, A. A., Hitchen, G. J., 1998. Internal Structures of Zircons from Archaean Granites from the Darling Range Batholith: Implications for Zircon Stability and the Interpretation of Zircon U-Pb Ages.

- Contributions to Mineralogy and Petrology*, 132(3): 288—299. doi:10.1007/s004100050422
- Rickwood, P. C., 1989. Boundary Lines within Petrologic Diagrams which Use Oxides of Major and Minor Elements. *Lithos*, 22(4): 247—263. doi:10.1016/0024-4937(89)90028-5
- Rollison, H. R., 1993. Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation. Longman Group UK, London.
- Scherer, E., Munker, C., Mezger, K., 2001. Calibration of the Lutetium-Hafnium Clock. *Science*, 293: 683—687.
- Shi, B., Zhu, Y. H., Zhong, Z. Q., et al., 2016. Petrological, Geochemical Characteristics and Geological Significance of the Caledonian Peraluminous Granites in Heihai Region, Eastern Kunlun. *Earth Science*, 41(1): 35—54 (in Chinese with English abstract).
- Song, B., Zhang, Y. H., Wan, Y. S., et al., 2002. Mount Making and Procedure of the SHRIMP Dating. *Geological Review*, 48(Suppl.): 26—30 (in Chinese with English abstract).
- Streckeisen, A., 1976. To Each Plutonic Rock Its Proper Name. *Earth-Science Reviews*, 12(1): 1—33. doi:10.1016/0012-8252(76)90052-0
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts; Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313—345. doi:10.1144/gsl.sp.1989.042.01.19
- Sylvester, P. J., 1998. Post-Collisional Strongly Peraluminous Granites. *Lithos*, 45(1—4): 29—44. doi:10.1016/s0024-4937(98)00024-3
- Tong, G. Y., Liu, X. C., Shen, B. W., 2012. Uranium Mineralization Geological Conditions and Prospecting Direction of Liaoning Lianshanguan Area. *Science and Technology Innovation Herald*, 1: 11—13 (in Chinese).
- Wan, Y. S., Dong, C. Y., Xie, H. Q., et al., 2015. Some Progress in the Study of Archean Basement of the North China Craton. *Acta Geoscientica Sinica*, 36(6): 685—700 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Q., 2012. Breakup of China-Korea Platform and Establishment of North China and Huatai Cratons. *Acta Geologica Sinica*, 86(10): 1553—1568 (in Chinese with English abstract).
- Wang, S., Zhang, D., Zhao, H. S., et al., 2016. Geochemistry, Zircon U-Pb Dating and Hf Isotope Composition of Granite in Fanshan Area, Pinghe County, Fujian Province, and Its Geological Significance. *Earth Science*, 41(1): 67—83 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X., Huang, X. L., Ma, J. L., et al., 2015. Hf-Nd Isotopes of the Early Precambrian Metamorphic Complexes in the Southern Segment of the Trans-North China Orogen: Implications for Crustal Evolution. *Geotectonica et Metallogenia*, 39(6): 1108—1118 (in Chinese with English abstract).
- Wu, D., Zhuang, T. X., Liu, X. D., et al., 2013. Petrological and Geochemical Characteristics of Remelting Chorismitite in Lianshanguan Area of East Liaoning. *World Nuclear Geoscience*, 30(4): 210—216 (in Chinese with English abstract).
- Wu, J. S., Geng, Y. S., Shen, Q. H., et al., 1998. Archean Geological Characteristics and Tectonic Evolution of the Ancient Continent of China and the DPRK. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Yang, J., Wu, F., Shao, J., et al., 2006. Constraints on the Timing of Uplift of the Yanshan Fold and Thrust Belt, North China. *Earth and Planetary Science Letters*, 246(3—4): 336—352. doi:10.1016/j.epsl.2006.04.029
- Zhai, M. G., Bian, A. G., 2000. Late Neoproterozoic Supercontinent Assemblage and the Paleoproterozoic-Mesoproterozoic Cleavage of the North China Craton. *Science in China (Series D)*, 30(Suppl.): 129—137 (in Chinese).
- Zhai, M. G., Guo, J. H., Zhao, T. P., 2001. Study Advances of Neoproterozoic-Paleoproterozoic Tectonic Evolution in the North China Craton. *Progress in Precambrian Research*, 24(3): 17—27 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Q., Wang, Y., Li, C. D., et al., 2006. Granite Classification on the Basis of Sr and Yb Contents and Its Implications. *Acta Petrologica Sinica*, 22(9): 2249—2269 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Q., Zhai, M. G., 2012. What is the Archean TTG? *Acta Petrologica Sinica*, 28(11): 3446—3456 (in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 高永宝, 李文渊, 钱兵, 等, 2014. 东昆仑野马泉铁矿相关花岗岩体年代学、地球化学及 Hf 同位素特征. *岩石学报*, 30(6): 1647—1665.
- 耿元生, 刘敦一, 宋彪, 1997. 冀西北麻粒岩区早前寒武纪主要地质事件的年代格架. *地质学报*, 71(4): 316—327.
- 韩军, 夏毓亮, 2009. 连山关—高家沟花岗岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. *铀矿地质*, 25(4): 214—221.
- 侯可军, 李延河, 邹天人, 等, 2007. LA-MC-ICP-MS 锆石 Hf 同位素的分析方法及地质应用. *岩石学报*, 23(10): 2595—2604.
- 李碧乐, 孙永刚, 陈广俊, 等, 2016. 小兴安岭东安金矿区细粒

- 正长花岗岩 U-Pb 年龄、岩石地球化学、Hf 同位素组成及地质意义. 地球科学, 41(1): 1-16.
- 李昌年, 1992. 火成岩微量元素岩石学. 北京: 地质出版社, 97-123.
- 李巨初, 罗朝文, 童纯菡, 等, 1986. 连山关铀矿床稀土元素地球化学特征. 成都地质学院学报, 13(4): 1-10.
- 李江海, 1998. 前寒武纪的超大陆旋回及其板块构造演化意义. 地学前缘, 5(S1): 141-151.
- 刘英俊, 曹励明, 李兆麟, 等, 1984. 元素地球化学. 北京: 科学出版社, 6-40.
- 施彬, 朱云海, 钟增球, 等, 2016. 东昆仑黑海地区加里东期过铝质花岗岩岩石学、地球化学特征及地质意义. 地球科学, 41(1): 35-54.
- 宋彪, 张玉海, 万渝生, 等, 2002. 锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论. 地质论评, 48(增刊): 26-30.
- 佟国元, 刘宪春, 沈步威, 2012. 辽宁连山关地区铀成矿地质条件及找矿方向. 科技创新导报, 1: 11-13.
- 万渝生, 董春艳, 颜炳强, 等, 2015. 华北克拉通太古宙研究若干进展. 地球学报, 36(6): 685-700.
- 王荃, 2012. 中朝古陆的解体与华北、华泰二克拉通的确立. 地质学报, 86(10): 1553-1568.
- 王森, 张达, 赵红松, 等, 2016. 福建平和矾山地区花岗岩地球化学、年代学、Hf 同位素特征及地质意义. 地球科学, 41(1): 67-83.
- 王雪, 黄小龙, 马金龙, 等, 2015. 华北克拉通中部造山带南段早前寒武纪变质杂岩的 Hf-Nd 同位素特征及其地壳演化意义. 大地构造与成矿学, 39(6): 1108-1118.
- 吴迪, 庄廷新, 刘晓东, 等, 2013. 辽东连山关地区重熔混合岩岩石地球化学特征. 世界核地质科学, 30(4): 210-216.
- 伍家善, 耿元生, 沈其韩, 等, 1998. 中朝古大陆太古宙地质特征及构造演化. 北京: 地质出版社.
- 翟明国, 卞爱国, 2000. 华北克拉通新太古代末超大陆拼合及古元古代末—中元古代裂解. 中国科学(D 辑), 30(增刊): 129-137.
- 翟明国, 郭敬辉, 赵太平, 2001. 新太古—古元古代华北陆块构造演化的研究进展. 前寒武纪研究进展, 24(3): 17-27.
- 张旗, 王焰, 李承东, 等, 2006. 花岗岩的 Sr-Yb 分类及其地质意义. 岩石学报, 22(9): 2249-2269.
- 张旗, 翟明国, 2012. 太古宙 TTG 岩石是什么含义? 岩石学报, 28(11): 3446-3456.

\*\*\*\*\*

## 《地球科学》(中、英文版)评选出 2016 年度“高被引作者”

为了促进广大学者积极参与《地球科学》(中、英文版)的建设和发展,《地球科学》编委会评选出了《地球科学》(中、英文版)2016 年度“高被引作者”. 其中,英文版 2016 年度“高被引作者”是根据 Web of Science 中检索到的《Journal of Earth Science》2013—2015 年论文总被引频次由高至低排列评选,中文版 2016 年度“高被引作者”是根据中国知网中检索到的《地球科学》2013—2015 年论文总被引频次由高至低排列评选,结果如下:

英文版 2016 年度“高被引作者”: 郭彤楼、江海水、庞忠和、周家喜、邹才能、刘磊、宋广增、倪金龙、陈能松、赵硕

中文版 2016 年度“高被引作者”: 罗静兰、李松峰、李卓、曾蒙秀、曾键年、刘彬、张克信、李吉君、唐朝晖、徐先兵、何卫红、李德勇