

丹东地区古元古代晚期花岗岩对胶-辽-吉带 造山作用的制约

杨佳林^{1, 2, 3}, 刘福来^{1, 3}, 宋维民², 杨晓平², 王 舫¹, 王 丹¹

(1. 中国地质科学院 地质研究所, 北京 100037; 2. 中国地质调查局沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110034;
3. 自然资源部深地动力学重点实验室, 中国地质科学院 地质研究所, 北京 100037)

摘要: 华北克拉通古元古代胶-辽-吉带造山过程保存了丰富的变质-变形、岩浆-构造热事件与成矿作用记录, 带内广泛存在的高压麻粒岩变质作用演化 p - T - t 轨迹呈顺时针, 指示胶-辽-吉带经历了俯冲-碰撞-后碰撞折返伸展造山过程, 但这时期的俯冲碰撞或陆-陆碰撞与之后伸展造山作用的年代目前仍有争议。本文对丹东地区大楼房古元古代花岗岩进行了系统的岩相学、锆石 U-Pb 年代学、全岩主微量元素和 Lu-Hf 同位素测试分析。研究结果显示, 岩浆锆石加权平均年龄 $1\ 873 \sim 1\ 869\ \text{Ma}$, 获得岩体的侵位时限为古元古代。大楼房岩体以片麻状黑云母二长花岗岩为主, 具有高 SiO_2 (72.39%~74.20%)、中等 Al_2O_3 (14.66%~15.40%)、中等 CaO (1.35%~1.84%) 和低 MgO (0.07%~0.35%) 含量特征, 稀土配分曲线右倾型, 具强烈的 Eu 正异常; 微量元素富集 Rb、Th、U、K 等大离子亲石元素, 亏损 P、Ti 等高场强元素, 为准铝-弱过铝质高钾钙碱性系列, 具有与 I 型花岗岩类似的岩石地球化学特征。 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $-1.76 \sim +1.45$, 锆石 Hf 同位素二阶段模式年龄为 $2\ 607 \sim 2\ 425\ \text{Ma}$, 代表岩浆源区不仅来自地壳物质再循环, 还有新太古代-古元古代物质加入到地壳中或有新生地壳的生成。不同于碰撞后伸展造山作用的花岗质岩石, 丹东地区古元古代晚期片麻状二长花岗岩岩石地球化学特征与俯冲作用有关的活动大陆边缘弧花岗岩特征类似, 且与北邻的集安地区泥质麻粒岩变质年龄相近, 暗示胶-辽-吉带在古元古代晚期可能仍然存在俯冲碰撞作用, 这对探讨该造山带的造山作用及其后的碰撞后伸展作用的过程和时限提供了重要约束。

关键词: 华北克拉通; 胶-辽-吉带; 古元古代; 花岗质岩石; 地球化学; 锆石 SHRIMP U-Pb

中图分类号: P588.12⁺1; P595

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2022)02-0467-24

Constraints of late Paleoproterozoic granites in Dandong area on Jiao-Liao-Ji Belt orogenesis

YANG Jia-lin^{1, 2, 3}, LIU Fu-lai^{1, 3}, SONG Wei-min², YANG Xiao-ping², WANG Fang¹ and WANG Dan¹

(1. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. Shenyang Institute of Geology and Mineral Resources, CGS, Shenyang 110034, China; 3. Key Laboratory of Deep-Earth Dynamics of Ministry of Natural Resources, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: As a Paleoproterozoic orogenic in the North China Craton, the Jiao-Liao-Ji Belt preserves rich records of metamorphism magmatism, sedimentation and metallogeny. The p - T - t paths of the widespread high pressure granulites within this belt reveal the subduction-collision-exhumation geodynamic process. However, the timing of continental collision and subsequent extension is still controversial. In this paper, the petrography, zircon U-Pb

收稿日期: 2021-12-09; 接受日期: 2022-01-16; 编辑: 尹淑苹

基金项目: 国家自然科学基金项目(92062214); 自然资源部深地动力学重点实验室开放研究课题(J1901-16); 中国地质调查局项目(DD20190360, DD20190370, DD20190042, DD20211389)

作者简介: 杨佳林(1987-), 在读博士研究生, 研究方向为早前寒武纪地质、造山带变质演化, E-mail: syyangjialin@sina.com。

geochronology, major trace elements and Lu-Hf isotopes of the whole rocks of the Paleoproterozoic granites in Daloufang Dandong area are systematically analyzed. The results show that the weighted average age of the magmatic zircons is 1 873~1 869 Ma, and the emplacement time of the acquired granites is Paleoproterozoic. The Daloufang Pluton mainly consists of gneissic biotite monzogranite, with characteristics of high SiO_2 (72.39%~74.20%), medium Al_2O_3 (14.66%~15.40%), medium CaO (1.35%~1.84%) and low MgO (0.07%~0.35%). The REE distribution curve is right-leaning with strong Eu positive anomaly. Trace elements are enriched in large ion lithophile elements such as Rb, Th, U, K, and depleted in high field strength elements such as P, Ti, etc. It is characterized by high potassium calc-alkaline series of quasi-aluminum to weak peraluminous, and has similar petrogeochemical characteristics to I-type granites. The $\varepsilon\text{Hf}(t)$ values range from -1.76 to +1.45, and the two-stage model ages range from 2 607 to 2 425 Ma, indicating that the magmatic source area is not only from crustal material recycling, but also from neoproterozoic to Paleoproterozoic material added to the crust or the formation of new crust. The geochemical characteristics of late Paleoproterozoic gneissic monzogranite in Dandong area are similar to those of active continental margin arc granites related to subduction, and similar to the metamorphic age of argillaceous granulites in Ji'an area in the north. It is suggested that the Jiao-Liao-Ji Belt may have been experienced collision in the late Paleoproterozoic, which provides important constraints for the exploration of the orogeny of the Jiao-Liao-Ji Belt and the process and time limit of the post-collision extension.

Key words: North China Craton; Jiao-Liao-Ji Belt; Paleoproterozoic; granitoids; geochemistry; zircon SHRIMP U-Pb

Fund support: National Natural Science Foundation of China (92062214); The Key Laboratory of Deep-Earth Dynamics of Ministry of Natural Resource, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences (J1901-16); Project of China Geological Survey (DD20190360, DD20190370, DD20190042, DD20211389)

胶-辽-吉带是华北克拉通一条具有代表性的古元古代造山带(图 1a, 1b) (Zhai and Santosh, 2011), 呈北东-南西向展布, 从吉林南部开始, 经辽宁东南部和胶北地体, 延伸至安徽蚌埠地区(图 1a)。造山带内保存了古元古代花岗质岩石、镁铁质侵入体和绿片岩相至麻粒岩相变质的火山-沉积岩系, 主要岩浆活动峰期为古元古代早期(2.2~2.0 Ga)和古元古代晚期(2.0~1.8 Ga) (姜春潮, 1987; 张秋生等, 1988; 白瑾, 1993; Li and Zhao, 2007; Luo *et al.*, 2008; 王祥俭等, 2017; Wang C C *et al.*, 2017; Zhang *et al.*, 2018)。该带在古元古代晚期(1 930~1 840 Ma)广泛存在的高压麻粒岩顺时针 p - T - t 轨迹, 指示胶-辽-吉带经历了俯冲-碰撞-后碰撞折返伸展造山过程(刘福来等, 2015; 刘平华等, 2017; Cai *et al.*, 2017, 2019, 2020)。然而, 在古元古代晚期, 与辽吉地区俯冲碰撞造山过程多期次变质作用有着密切关联的花岗质岩浆作用及其岩石成因类型仍值得商榷。

辽宁丹东地区出露的古元古代花岗岩是胶-辽-吉造山带的重要组成部分, 对深入研究胶-辽-吉带

古元古代晚期构造岩浆热事件及造山带演化具有重要意义。但目前关于其具体的分布特征、岩石类型和地球化学特征的数据较少, 对其成因类型和地质意义的关注不够。本文在丹东地区详细的 1:5 万区域地质填图工作基础上, 系统总结已发表的胶-辽-吉带古元古代晚期花岗岩研究成果, 通过对胶-辽-吉带东缘丹东大楼房岩体片麻状黑云母二长花岗岩系统的岩石学、锆石 U-Pb 年代学研究, 并结合岩石地球化学特征来制约其形成时代、岩石学成因类型和构造环境, 为进一步理解胶-辽-吉带构造演化提供依据。

1 地质背景

胶-辽-吉带东北部的辽吉地区古元古代花岗岩传统上统称为“辽吉花岗岩”(张秋生等, 1988), 岩体呈面状分布于岫岩-盖县-大石桥-通远堡-丹东-宽甸-桓仁-通化一带(图 1b)。但由于辽吉花岗岩由多期次-多时代的不同成因类型花岗(质)岩石构成, 包括 A/I 型花岗质片麻岩、碱性花岗岩、钙碱性

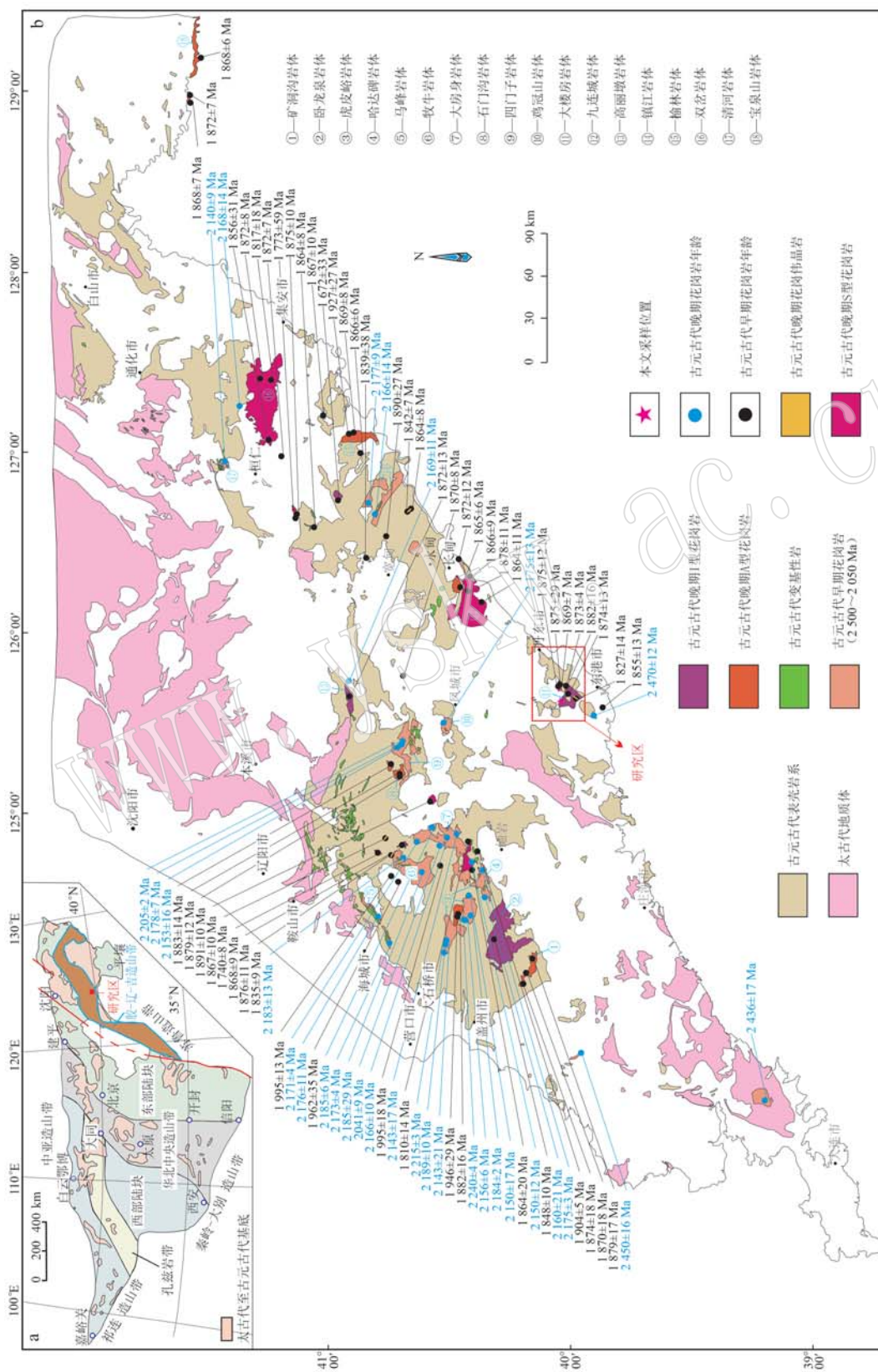


图1 辽-吉造山带地质图及研究区采样位置图(a 据 Zhao *et al.*, 2005; b 据沈阳地质调查中心, 2018^①; 年龄数据来源见表4)

Fig. 1 Tectonic geological map and sampling location of Liao-Ji Belt (a after Zhao *et al.*, 2005; b after Shenyang Geological Survey Center, 2018^①; sources of age data are shown in Table 4)

① 沈阳地质调查中心, 2018. 辽东吉南成矿带永吉凤城地区1:50万地质图.

花岗岩及环斑花岗岩等,众多学者对这些花岗质岩的年代学格架、成因机制及动力学背景的认识并未取得一致(Faure *et al.*, 2004; 于介江等, 2007; 马立杰等, 2007; Tam *et al.*, 2011, 2012; 董春艳等, 2012; Liu *et al.*, 2014; Yuan *et al.*, 2015; Wang X P *et al.*, 2016; Zou *et al.*, 2017, 2018)。

胶-辽-吉带东北部辽吉地区约 2.2~2.0 Ga 岩浆活动形成的辽吉花岗岩主要包括辽吉条痕状花岗岩、里尔峪岩组火山岩以及基性岩脉等(路孝平等, 2004b; Li and Zhao, 2007; Li and Chen, 2014; Meng *et al.*, 2014; Wang X P *et al.*, 2016, 2017, 2020; Liu *et al.*, 2018, 2020; Xu *et al.*, 2018; Kai *et al.*, 2019); 约 2.0~1.8 Ga 岩浆活动形成的辽吉花岗岩包括宽甸通化地区的球斑花岗岩、矿洞沟正长岩以及卧龙泉、石门沟、松树沟二长花岗岩等(杨进辉等, 2007; Liu F L *et al.*, 2017a; Wang *et al.*, 2020; Liu *et al.*, 2021)。辽吉花岗岩时代范围跨度大,需要进一步解体,古元古代早期和古元古代晚期花岗岩的地球化学属性及其成因机制和动力学背景仍需深入探讨。

古元古代晚期的辽吉花岗岩具有典型埃达克岩的地球化学特征(Sr 含量高, Y、Yb 含量低, Sr/Y 值和 La_N/Yb_N 值相对较高)(Liu *et al.*, 2021)。尽管前人对胶-辽-吉带的古元古代晚期的花岗岩做了大量的研究工作,但其岩石学成因、岩浆源区和构造环境等仍然存在很大的争议。目前大多数研究者认为它们形成于碰撞造山后的伸展环境(路孝平等, 2004a; 杨进辉等, 2007; 王惠初等, 2011; 杨明春等, 2015a; 杨红等, 2017; Liu F L *et al.*, 2017c)。根据 Whalen 等(1987)提出的一些特征性的元素和相关比值(例如 Zr/Nb、Ce/Y、Ga/Al), 这些花岗岩属于 I 型花岗岩或者 S 型花岗岩(Liu *et al.*, 2021)。Wang X P 等(2017)则认为辽东地区共存的 I 型和 S 型花岗岩是活动大陆边缘俯冲系统控制的岩浆-热事件和同期区域变质作用的产物, 石门沟等岩体~1 890 Ma 的 I 型花岗岩形成于俯冲洋壳的部分熔融作用和沉积物的加入。Xu 等(2018, 2019a, 2019b)在对已发表数据的综合研究后认为, 胶-辽-吉带内 2 000~1 895 Ma 埃达克质花岗岩是加厚下地壳部分熔融的产物, 并与区域峰期变质作用(约 1 960~1 900 Ma)一起代表了古元古代碰撞造山。

大楼房岩体位于丹东市西南 30 km, 分布在大楼房乡东部齐家堡-黑山一带, 呈近东西向展布, 出

露面积约 25 km²。在晚侏罗世(~160 Ma)遭受了岩浆-热事件原地重熔, 仅以大小不同的残留体形式保存下来。岩性为片麻状黑云母二长花岗岩(图 2a, 2c), 围岩为辽河岩群里尔峪岩组含石榴磁铁浅粒岩、盖县岩组二云片岩, 被北东和北西向断裂改造。

2 样品特征

丹东大楼房岩体样品 TW043 采自赵家堡南废弃采石场(地理坐标: 40°1'59.4" N; 124°4'23.5" E), 样品 D5276 采自于家堡南废弃采石场(地理坐标: 40°2'8.5" N; 124°8'56.2" E), 岩性为片麻状黑云母二长花岗岩(图 2a, 2c)。细粒花岗结构、糜棱结构, 局部见少量斜长石斑晶, 片麻状构造。主要由石英(35%)、斜长石(35%)、条纹长石(25%)、黑云母(5%)组成, 并含少量榍石、锆石、磷灰石等副矿物(<1%)。

3 分析方法

对丹东大楼房岩体片麻状黑云母二长花岗岩 TW043、D5276 样品分别进行了主微量元素、锆石 U-Pb SHRIMP 测试, 对 TW043 样品进行了锆石原位 Lu-Hf 同位素测试。

锆石分选在自然资源部东北矿产资源监督检测中心完成。样品经人工破碎后按常规重力和磁选方法分选出锆石, 并在双目镜下进一步挑选。锆石制靶、阴极发光(CL 图)照像和锆石 SHRIMP U-Pb 同位素定年在中国地质科学院北京离子探针中心完成, 所用仪器为 SHRIMPU II。测试点束斑直径 25 μm , 一次流 O^{-2} 强度为 3~5 nA。锆石 U 含量和年龄校准选用标样 M257($U=840\times10^{-6}$, Nasdala *et al.*, 2008)和 TEM(年龄为 417 Ma, Black *et al.*, 2003)进行校正, 数据处理采用 SQUID 和 ISOPLOT 程序(Ludwig, 2003)。根据实测²⁰⁴Pb 含量校正普通铅, 采用 $n(^{207}\text{Pb})/n(^{206}\text{Pb})$ 年龄为锆石年龄, 同位素比值和单点年龄误差均为 1 σ 。详细的测试方法、实验过程、相关参数和误差校正同 Williams(1998)。

样品的主量元素、微量元素分析在自然资源部东北矿产资源监督测试中心完成。主量元素在 X 射线荧光光谱仪(XRF)上进行, FeO 采用氢氟酸、硫酸溶样, 重铬酸钾滴定容量法, 分析精度和准确度优于 5%, 检测依据为 GB/T14506-2010; 微量元素利

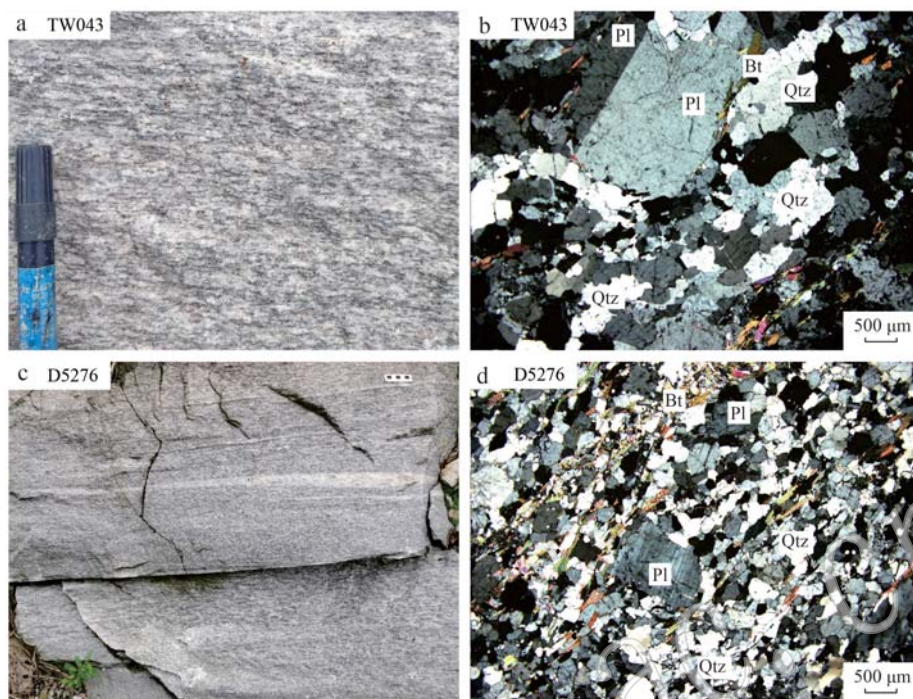


图2 丹东大楼房岩体黑云母二长花岗岩野外露头(a, c)及正交偏光镜下照片(b, d)

Fig. 2 Photograph (a, c) and microscope photograph (b, d) of the gneissic biotite monzonitic granites from Daloufang Pluton in Dandong area

Bt—黑云母; Pl—斜长石; Qtz—石英
Bt—biotite; Pl—plagioclase; Qtz—quartz

用酸溶法制备样品并采用电感耦合等离子质谱法(ICP-MS)测定, 分析精度和准确度优于10%, 检测依据为GB/T 17417-2010。

锆石原位 Lu-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。分析仪器为配备有 MERCHANTEK/New Wave Research 213 nm 激光熔蚀探针的 Nu Plasma MC-ICP-MS。实验以 He 作为载气, 激光束斑直径为 60 μm, 激光熔蚀时间为 60 s, 熔蚀深度约为 60 μm, 熔蚀频率为 5 Hz。本次测试采用 MT 作为外部标样, MT 的 $n(^{176}\text{Hf})/n(^{177}\text{Hf})$ 值为 $0.282\,530 \pm 30$ 。 ^{176}Lu 的衰变常数为 $1.867 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$ (Söderlund *et al.*, 2004), 球粒陨石 $n(^{176}\text{Hf})/n(^{177}\text{Hf}) = 0.282\,772$, $n(^{176}\text{Lu})/n(^{177}\text{Hf}) = 0.033\,2$ (Blichert-Toft and Albarède, 1997)。亏损地幔 Hf 模式年龄 (t_{DM1}) 采用 $n(^{176}\text{Hf})/n(^{177}\text{Hf}) = 0.283\,25$, $n(^{176}\text{Lu})/n(^{177}\text{Hf}) = 0.038\,42$ 计算, 二阶段 Hf 模式年龄 (t_{DM2}) 采用 $f_{\text{La/Hf(cc)}} = -0.548\,33$, $f_{\text{La/Hf(DM)}} = 0.156\,88$ 计算 (Griffin *et al.*, 2000, 2002)。

4 分析结果

4.1 锆石 U-Pb 定年

大楼房岩体片麻状黑云母二长花岗岩锆石形态特征较为接近, 呈半自形-自形短柱状, 表面平整干净, 长短比 2:1~1.5:1, 粒度 100~250 μm, 震荡环带结构特征明显, 为典型岩浆成因的原岩结晶锆石 (图 3a, 3b)。

从表1可见, 样品 TW043 的 Th/U 值在 0.14~0.25 之间, 15 个分析点均落在谐和线上 (图 4a), U-Pb 年龄变化于 1 890.7~1 850.3 Ma 之间, 加权平均年龄为 $1\,873.2 \pm 3.9 \text{ Ma}$ ($n=15$, MSWD=0.7)。样品 D5276 的 Th/U 值在 0.15~0.66 之间, 8 个分析点落在谐和线上 (图 4b), 加权平均年龄为 $1\,869.0 \pm 7.2 \text{ Ma}$ ($n=8$, MSWD=1.3)。结合锆石 CL 图像认为该年龄可以代表大楼房岩体黑云母二长花岗岩原岩结晶年龄, 大楼房黑云母二长花岗岩形成于古元古代。

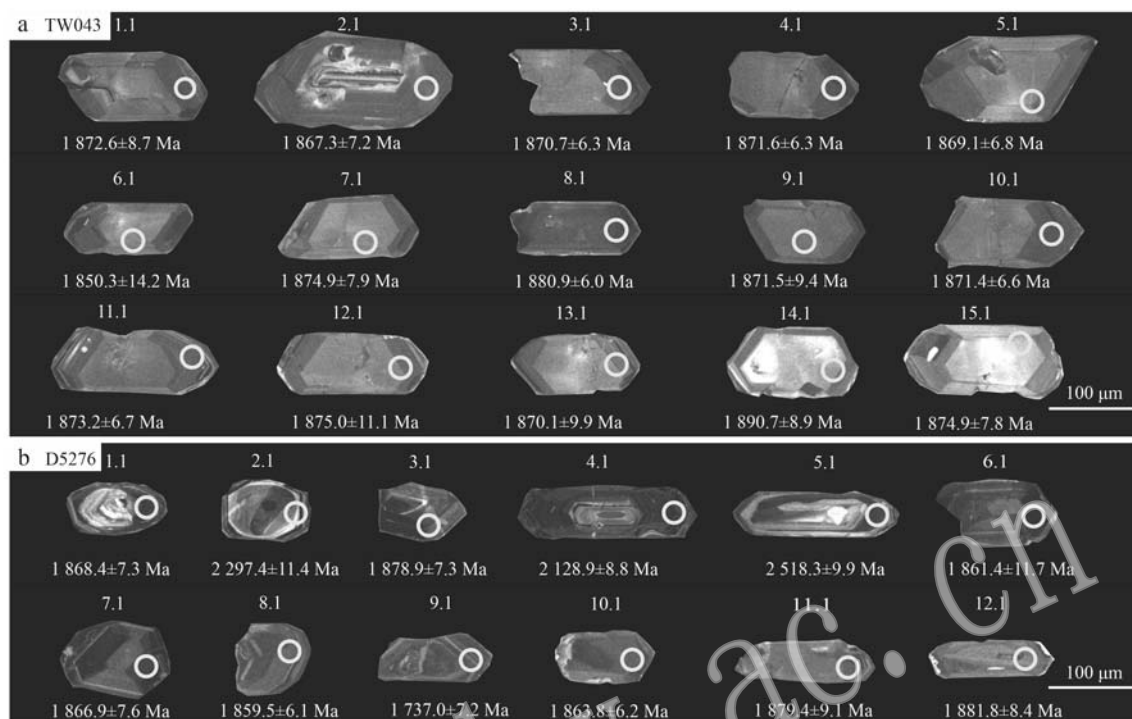


图3 丹东大楼房岩体片麻状黑云母二长花岗岩锆石 CL 图像及测试位置

Fig. 3 Cathodoluminescence (CL) images and test positions of representative zircons of the gneissic biotite monzonitic granites from Daloufang Pluton in Dandong area

4.2 岩石地球化学特征

从表2可见,大楼房岩体黑云母二长花岗岩 TW043、D5276 共10件样品具有高硅(SiO_2 含量为 72.39%~74.20%、平均 73.17%)、中等铝(Al_2O_3 含量为 14.66%~15.40%)、中等钙(CaO 含量为 1.35%~1.84%)、低镁(MgO 含量为 0.07%~0.35%,剔除1个异常值)的特征; $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 含量为 7.09%~9.51%,富碱(Na_2O 为 4.02%~5.45%, K_2O 为 3.07%~4.06%),低 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值(0.56~0.88); Fe_2O_3 含量 0.08%~0.35%, FeO 含量 0.54%~1.17%,具低 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 特征。岩石结晶分异指数 DI 为 87.10~90.25,具高分异特征;碱度率 AR 值为 2.51~3.41; A/CNK 比值在 1.44~1.70 之间,属于准铝-弱过铝质岩石(图 5a);岩石里特曼指数 σ 为 1.73~2.70,在 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图解(图 5b)上位于高钾钙碱性系列区,属高钾钙碱性岩石;根据锆石饱和温度计计算岩石阳离子比率(M 值)为 1.46~1.72,结晶温度约 675~710℃,平均 693℃,属中低温花岗岩浆系列。

在微量元素原始地幔标准化配分图解上显示典型花岗岩类分布趋势(图 6a),富集 Rb、Th、U、K 等

大离子亲石元素(LILE),亏损 P、Ti 等高场强元素(HFSE),可能与磷灰石、钛铁氧化物的结晶分异有关;高 Rb 低 Sr 的元素特征反映了钾长石和斜长石结晶在花岗岩中占据主导地位,这与其矿物组成特征相吻合。样品稀土 ΣREE 含量较低,为 $21.34 \times 10^{-6} \sim 41.69 \times 10^{-6}$,在球粒陨石标准化图解上呈显著右倾趋势(图 6b),轻稀土元素富集,重稀土元素含量与球粒陨石相当或低于球粒陨石,且含量差别较大, LREE/HREE 为 15.44~27.15, δEu 为 4.00~9.23,显示强烈 Eu 正异常特征,结合高 Sr、Sr/Y 值和中等 Ca 的元素特征,指示岩石有富 Ca 的斜长石大量析出结晶(杨明春等,2015a;郭峰等,2007;Foley *et al.*, 2002)(表 2)。

对 TW043 样品于锆石分析点原位进行了 Lu-Hf 同位素测试,结果见表 3。 $^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.012 373~0.029 871, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.000 391~0.000 995, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.281 576~0.281 646,误差均为 2σ 。样品所有测试点 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值均小于 0.002,显示锆石形成后放射性成因 ^{176}Lu 衰变生成的 ^{176}Hf 极少,因此 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值可以代表锆石形成时 Hf 同位素组成和岩石成因信息(Hoskin and Black, 2000; Knudsen *et*

表 1 丹东大楼房岩体片麻状黑云母二长花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 测年结果

Table 1 SHRIMP U-Pb data for zircon of the gneissic biotite monzonitic granites from Daloufang Pluton in Dandong area

点号	$w(^{206}\text{Pb}_e)$ /%	$w_B/10^{-6}$		$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	同位素比值				误差相		年龄/Ma		不谐和度/%		
		U	Th		$^{206}\text{Pb}^*$	$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$	$1\sigma(\%)$	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$	$1\sigma(\%)$	关系数	$^{206}\text{Pb}_t/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}_t/^{206}\text{Pb}_t$	
TW043-1.1	0.06	1 571	349	461	0.23	0.114 5	0.48	5.392 2	1.64	0.341 4	1.56	0.956	1 896.5±29.2	1 872.6±8.7	-1
TW043-2.1	0.02	1 119	196	330	0.18	0.114 2	0.40	5.399 8	1.59	0.342 9	1.54	0.968	1 905.3±29.0	1 867.3±7.2	-2
TW043-3.1	0.05	1 911	470	577	0.25	0.114 4	0.35	5.543 6	1.58	0.351 4	1.54	0.975	1 951.3±29.8	1 870.7±6.3	-4
TW043-4.1	0.03	1 741	421	518	0.25	0.114 5	0.35	5.461 1	1.56	0.346 0	1.53	0.975	1 921.6±29.0	1 871.6±6.3	-2
TW043-5.1	-	1 245	238	370	0.20	0.114 3	0.37	5.450 6	1.58	0.345 8	1.53	0.971	1 920.9±29.1	1 869.1±6.8	-2
TW043-6.1	0.03	598	82	172	0.14	0.113 1	0.79	5.215 3	2.83	0.334 3	2.72	0.961	1 860.6±49.7	1 850.3±14.2	0
TW043-7.1	0.02	753	109	219	0.15	0.114 7	0.44	5.356 7	1.58	0.338 8	1.52	0.961	1 881.5±28.2	1 874.9±7.9	0
TW043-8.1	0.01	1 787	422	537	0.24	0.115 1	0.33	5.548 7	1.55	0.349 7	1.52	0.977	1 940.8±29.1	1 880.9±6.0	-3
TW043-9.1	0.01	788	127	234	0.17	0.114 5	0.52	5.459 4	1.61	0.345 9	1.53	0.946	1 921.1±29.0	1 871.5±9.4	-2
TW043-10.1	0.03	1 375	287	395	0.22	0.114 5	0.37	5.272 6	1.57	0.334 1	1.52	0.972	1 856.5±27.8	1 871.4±6.6	1
TW043-11.1	0.00	1 208	207	357	0.18	0.114 6	0.37	5.427 3	1.56	0.343 6	1.52	0.972	1 907.9±28.6	1 873.2±6.7	-2
TW043-12.1	0.02	996	184	288	0.19	0.114 7	0.61	5.325 6	1.64	0.336 8	1.52	0.927	1 870.7±28.0	1 875.0±11.1	0
TW043-13.1	0.01	1 157	215	342	0.19	0.114 4	0.55	5.434 1	1.61	0.344 6	1.51	0.940	1 913.9±28.6	1 870.1±9.9	-2
TW043-14.1	0.11	711	102	215	0.15	0.115 7	0.49	5.618 3	1.60	0.352 2	1.52	0.951	1 952.9±29.5	1 890.7±8.9	-3
TW043-15.1	0.03	806	140	232	0.18	0.114 7	0.43	5.300 0	1.57	0.335 2	1.51	0.961	1 861.9±27.6	1 874.9±7.8	1
D5276-1.1	0.12	1 859	421	503	0.23	0.115 3	0.37	4.960 5	1.08	0.314 8	1.00	0.928	1 762.6±16.0	1 868.4±7.3	6
D5276-2.1	0.54	1 258	519	441	0.43	0.150 6	0.41	8.160 8	1.22	0.405 9	1.02	0.839	2 204.1±20.0	2 297.4±11.4	4
D5276-3.1	0.01	1 578	396	462	0.26	0.115 1	0.40	5.399 5	1.13	0.340 7	1.06	0.935	1 891.2±17.9	1 878.9±7.3	-1
D5276-4.1	0.09	706	349	234	0.51	0.133 1	0.47	7.036 1	1.17	0.385 7	1.05	0.901	2 101.1±20.3	2 128.9±8.8	1
D5276-5.1	0.04	272	136	118	0.52	0.166 4	0.58	11.569 3	1.30	0.505 3	1.16	0.891	2 634.9±27.0	2 518.3±9.9	-5
D5276-6.1	0.10	786	111	222	0.15	0.114 7	0.60	5.150 7	1.24	0.328 2	1.06	0.852	1 830.0±17.2	1 861.4±11.7	2
D5276-7.1	0.00	1 329	416	394	0.32	0.114 2	0.42	5.433 5	1.13	0.345 1	1.05	0.928	1 912.4±18.0	1 866.9±7.6	-2
D5276-8.1	0.01	2 841	1 191	831	0.43	0.113 8	0.34	5.337 9	1.10	0.340 5	1.05	0.951	1 891.7±18.1	1 859.5±6.1	-2
D5276-9.1	0.09	4 621	2 943	712	0.66	0.107 1	0.37	2.626 8	1.17	0.179 2	1.10	0.941	1 076.2±11.8	1 737.0±7.2	39
D5276-10.1	0.01	2 592	806	769	0.32	0.114 0	0.34	5.426 0	1.09	0.345 3	1.04	0.949	1 914.5±17.8	1 863.8±6.2	-3
D5276-11.1	0.00	775	115	221	0.15	0.115 0	0.50	5.268 3	1.16	0.332 3	1.04	0.899	1 850.3±17.0	1 879.4±9.1	2
D5276-12.1	-	928	245	266	0.27	0.115 1	0.47	5.305 5	1.14	0.334 2	1.04	0.911	1 858.7±17.3	1 881.8±8.4	1

表2 丹东大楼房岩体片麻状黑云母二长花岗岩主量($w_B/\%$)、微量和稀土元素($w_B/10^{-6}$)测试结果
Table 2 Major($w_B/\%$), rare earth and trace($w_B/10^{-6}$) elements compositions of the gneissic biotite
monzonitic granites from Daloufang Pluton in Dandong area

样品号	TW043-1	TW043-2	TW043-3	TW043-4	TW043-5	D5276-1	D5276-2	D5276-3	D5276-4	D5276-5
SiO ₂	72.53	72.39	73.00	73.07	72.60	73.06	73.50	73.65	73.71	74.20
TiO ₂	0.16	0.16	0.11	0.12	0.18	0.11	0.10	0.11	0.10	0.10
Al ₂ O ₃	15.09	14.96	15.02	14.93	14.77	14.66	14.80	15.04	14.87	15.40
Fe ₂ O ₃	0.23	0.11	0.08	0.00	0.32	0.35	0.22	0.21	0.16	0.17
FeO	1.03	1.17	1.03	0.89	1.17	0.58	0.54	0.67	0.63	0.63
MnO	0.03	0.03	0.03	0.02	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
MgO	0.29	0.32	0.18	0.26	0.35	0.86	0.15	0.15	0.14	0.07
CaO	1.72	1.35	1.57	1.37	1.39	1.75	1.78	1.84	1.76	1.69
Na ₂ O	5.45	4.85	5.32	4.81	4.80	4.26	4.30	4.45	4.49	4.02
K ₂ O	3.07	4.06	3.55	3.83	4.00	3.74	3.61	3.41	3.59	3.34
P ₂ O ₅	0.04	0.04	0.02	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03
LOI	0.34	0.35	0.13	0.52	0.28	0.21	0.50	0.20	0.11	0.09
Total	100.00	99.78	100.02	99.86	99.93	99.62	99.53	99.77	99.58	99.74
FeO ^T	1.24	1.27	1.10	0.89	1.46	0.90	0.74	0.86	0.78	0.79
Na ₂ O+K ₂ O	8.52	8.93	8.87	8.65	8.81	8.03	7.95	7.88	8.11	7.38
Mg [#]	29.47	31.01	22.55	34.24	29.97	63.14	26.60	23.74	24.38	13.75
K ₂ O/Na ₂ O	0.56	0.84	0.67	0.80	0.83	0.88	0.84	0.77	0.80	0.83
AR	3.06	3.41	3.30	3.26	3.39	2.90	2.82	2.74	2.89	2.51
σ	2.46	2.70	2.62	2.48	2.62	2.13	2.05	2.01	2.12	1.73
A/CNK	1.47	1.46	1.44	1.49	1.45	1.50	1.53	1.55	1.51	1.70
DI	88.92	89.79	90.25	90.17	89.55	87.10	88.66	88.09	88.89	87.74
La	8.45	7.24	7.08	8.14	9.72	9.26	5.16	5.07	5.63	5.59
Ce	14.81	12.91	12.68	14.31	17.67	15.72	7.96	8.54	9.14	9.49
Pr	1.66	1.42	1.38	1.59	1.91	1.88	0.95	1.07	1.08	1.12
Nd	5.95	5.31	4.97	5.94	7.46	6.89	3.85	3.96	3.48	3.84
Sm	1.07	1.03	0.89	1.14	1.44	1.05	0.65	0.73	0.77	0.63
Eu	1.26	1.28	1.02	1.41	1.46	1.85	1.69	1.68	1.96	1.80
Gd	0.69	0.65	0.50	0.74	0.65	0.69	0.51	0.52	0.47	0.57
Tb	0.19	0.20	0.17	0.19	0.22	0.06	0.06	0.05	0.05	0.06
Dy	0.38	0.45	0.33	0.39	0.56	0.34	0.25	0.24	0.18	0.25
Ho	0.06	0.07	0.06	0.07	0.09	0.05	0.04	0.03	0.03	0.03
Er	0.21	0.22	0.19	0.20	0.22	0.10	0.09	0.09	0.05	0.08
Tm	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01
Yb	0.15	0.24	0.17	0.16	0.23	0.08	0.10	0.05	0.05	0.04
Lu	0.02	0.03	0.03	0.02	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Y	1.74	2.14	1.71	1.82	2.57	1.23	0.99	0.97	0.96	0.96
ΣREE	34.93	31.08	29.50	34.33	41.69	38.00	21.34	22.05	22.91	23.52
LREE	33.20	29.19	28.02	32.53	39.66	36.65	20.26	21.05	22.06	22.47
HREE	1.73	1.89	1.48	1.8	2.03	1.35	1.08	1.00	0.85	1.05
LREE/HREE	19.19	15.44	18.93	18.07	19.54	27.15	18.76	21.05	25.95	21.40
La _N /Yb _N	40.41	21.64	29.87	36.49	30.31	83.03	37.01	72.73	80.77	100.24
δEu	4.20	4.46	4.26	4.40	4.00	6.24	8.66	7.93	9.23	9.01
δCe	0.91	0.93	0.93	0.92	0.94	0.87	0.82	0.85	0.85	0.88
Hf	3.15	2.44	2.69	2.19	2.51	0.30	0.27	0.31	0.25	0.23
Ta	0.16	0.28	0.34	0.21	0.34	0.76	0.81	2.13	0.63	0.38
Th	1.30	2.10	2.61	2.69	2.78	1.32	1.06	0.95	1.04	0.96
U	0.24	7.16	7.75	0.58	1.64	0.26	0.22	0.54	0.25	0.20
Li	29.73	33.79	24.83	22.25	37.39	38.25	38.28	42.60	40.45	40.27
Be	1.15	1.63	1.55	1.21	1.63	1.11	1.31	1.32	1.12	1.13
Sc	1.47	1.27	0.63	0.76	1.37	1.67	1.73	2.28	2.03	2.01
Co	5.47	4.39	5.58	5.2	5.54	3.48	4.79	4.56	5.00	5.70
Ni	5.58	3.75	3.93	3.84	5.48	3.71	3.86	3.53	5.76	5.49
Ba	987	1 200	941	1 200	1 100	1 300	1 200	1 200	1 300	1 200
Cr	23.32	23.66	17.29	15.46	15.56	7.39	4.94	3.98	4.39	2.97
Ga	16.83	16.99	17.59	15.58	17.71	15.01	15.24	15.08	15.69	15.45
Nb	2.06	3.04	1.92	1.62	3.68	1.41	1.36	0.93	1.55	1.99
Rb	68.1	105.6	87.4	99.8	105.5	81.0	80.4	76.4	78.3	80.7
Sr	809.5	736.8	736.5	802.7	718.6	874.7	882.2	864.5	871.9	866.1
V	11.99	15.82	8.42	9.56	14.42	9.57	8.24	9.05	8.54	9.04
Zr	80.5	59.0	50.5	58.7	76.3	58.5	59.8	63.7	51.5	55.7
Y	1.74	2.14	1.71	1.82	2.57	1.23	0.99	0.97	0.96	0.96

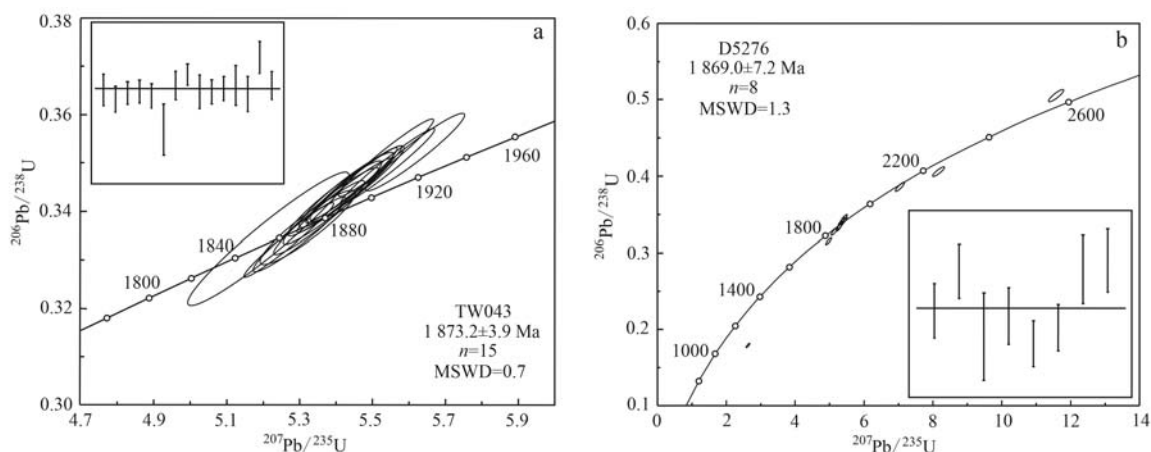
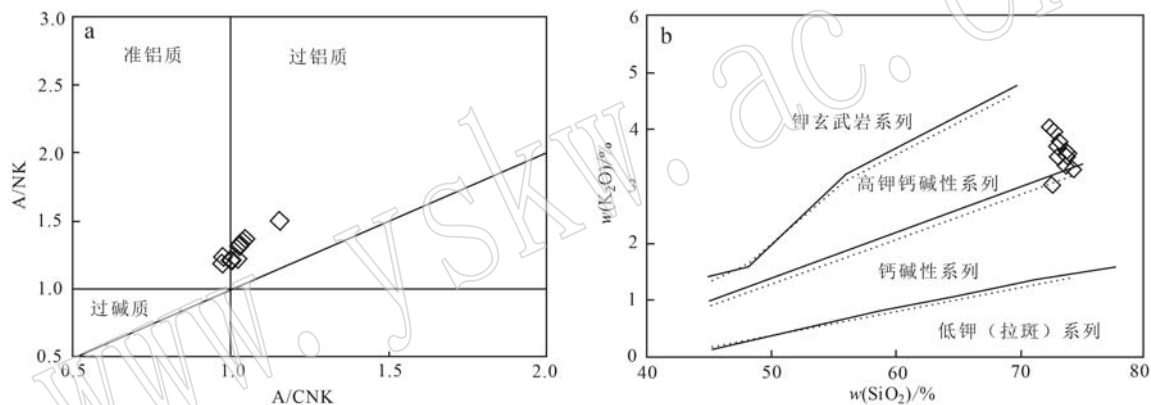


图4 丹东大楼房岩体片麻状黑云母二长花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄谱和图

Fig. 4 SHRIMP U-Pb concordia diagrams for zircons of the gneissic biotite monzonitic granites from Daloufang Pluton in Dandong area

图5 丹东大楼房岩体片麻状黑云母二长花岗岩 A/NK-A/CNK(a, 据 Maniar and Piccoli, 1989) 和 K_2O-SiO_2 图解 (b, 据 Peccerillo and Taylor, 1976)Fig. 5 A/NK-A/CNK diagram (a, after Maniar and Piccoli, 1989) and K_2O-SiO_2 diagram (b, after Peccerillo and Taylor, 1976) of the gneissic biotite monzonitic granites from Daloufang Pluton in Dandong area

al., 2001; Patchett *et al.*, 2004; 吴福元等, 2007)。在进行初始 $^{176}Hf/^{177}Hf$ 值和 $\varepsilon Hf(t)$ 计算时样品年龄 t 值取锆石原位微区分析年龄。15个测点初始比值 $(^{176}Hf/^{177}Hf)_i$ 为0.281 553~0.281 632, $\varepsilon Hf(0)$ 值为-42.28~-39.80, $\varepsilon Hf(t)$ 值为-1.76~+1.45, 二阶段Hf模式年龄 t_{DM2} 为2 607.7~2 425.4 Ma, $f_{Lu/Hf}$ 平均值为-0.980。

5 讨论

5.1 岩石类型及成因

辽东石门沟、松树沟、黄花店镇等岩体的花岗岩形成于1.95~1.88 Ga, 具有典型埃达克岩的地球化

学特征(Sr含量高, Y、Yb含量低, Sr/Y和 La_N/Yb_N 值相对较高)(王鹏森等, 2017; Wang X P *et al.*, 2017; 任云伟等, 2017; Liu *et al.*, 2021)。根据Whalen等(1987)提出的一些特征性的元素和相关比值(Zr、Nb、Ce、Y、Ga/Al等), 部分学者认为这些花岗岩属于I型花岗岩或者S型花岗岩(Liu *et al.*, 2021)。Wang X P等(2017)认为辽东地区这些共存的I型和S型花岗岩是活动大陆边缘俯冲系统控制的岩浆-热事件和同期区域变质作用的产物, 而俯冲洋壳的部分熔融作用以及沉积物的加入产生了~1 890 Ma的I型花岗岩。而辽东矿洞沟岩体正长岩(1 874±18 Ma)和闪长岩(1 870±18 Ma)中普遍具有较高的Hf同位素组成, 表明它们来源于太古代新生

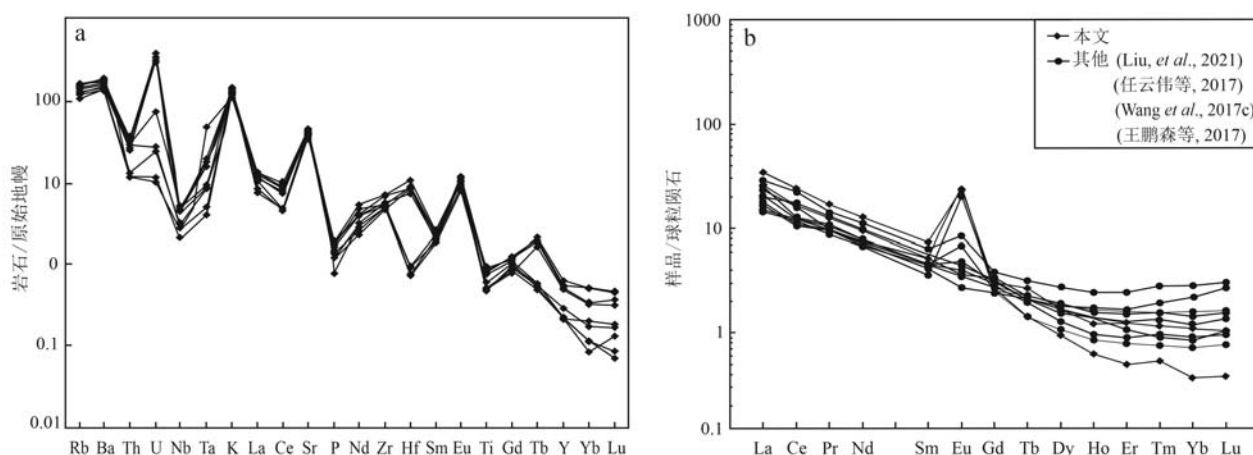


图6 大楼房岩体片麻状黑云母二长花岗岩微量元素原始地幔标准化图解(a)和稀土元素球粒陨石标准化图解(b)

(标准值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 6 Primitive mantlenormalized trace elements patterns (a) and chondrite-normalized REE patterns (b) of the gneissic biotite monzonitic granites from Daloufang Pluton in Dandong area (chondrite normalization data from Sun and McDonough, 1989)

地壳的部分熔融并有大量地幔物质的加入(杨进辉等, 2007)。还有学者则认为胶-辽-吉带内古元古代晚期普遍缺乏I型花岗岩, 区内的埃达克质花岗岩是加厚下地壳部分熔融的产物, 并与其后的区域峰期变质(约1 960~1 900 Ma)一起代表了古元古代的碰撞造山作用(Xu *et al.*, 2018; Xu and Liu, 2019)。

本次研究对胶-辽-吉带辽吉地区古元古代晚期各花岗岩体的数据进行了整理。这些花岗岩样品往往具有强烈的轻重稀土元素分异以及Eu正异常和负异常的地球化学特征, 显示出它们具有不同岩浆源区或成因(图6b)。各岩体花岗岩显著的稀土元素含量变化可能与斜长石、副矿物(例如磷灰石、褐帘石、锆石和独居石等)的结晶分异有关(图7a)。但富Hf/P的锆石是高分异花岗岩最重要的副矿物标志(Huang *et al.*, 2002; Chudik *et al.*, 2008; Wang *et al.*, 2010), 并具有较低的Zr/Hf值(Bau, 1996; Breiter *et al.*, 2014; Deering *et al.*, 2016)。Breiter等(2014)将Zr/Hf<25的花岗岩划分为高分异花岗岩。因而许多研究者将锆石的Zr/Hf值和Nb/Ta值也视为花岗岩浆结晶分异程度的标志(Bal-louard *et al.*, 2016)。各岩体中花岗岩的Nb/Ta>5、Zr/Hf>25, 不具有高分异花岗岩的特征。此外, 高分异花岗岩中富含稀土元素的锆石、独居石、褐帘石、磷钇矿和石榴石等及长石类矿物的分离还使其普遍具有稀土元素含量趋低、轻重稀土元素比值趋

小和Eu负异常加大的特征(Miller and Mittlefehldt, 1982, 1984; Gelman *et al.*, 2014), 这也与以上胶-辽-吉带古元古代晚期各花岗岩体的成分特征不同(图6a)。

根据A型花岗岩具有低Al高Ga/Zr值的特点, Whalen等(1987)提出将 $10\,000\text{ Ga/Al}=2.6$ 与 $\text{Zr}=250\times 10^{-6}$ 作为A型与其他类型花岗岩的分界。但很多情况下, 高分异花岗岩也因为具有较高的 $10\,000\text{ Ga/Al}$ 值而落入A型花岗岩区(Linnen and Cuney, 2004; Breiter *et al.*, 2013), 或A型花岗岩由于强烈的结晶分异作用而落入高分异花岗岩区(King *et al.*, 2001)。

A型花岗岩的最大特点是高温, 同时也存在分异作用, 它在 $10\,000\text{ Ga/Al-Zr}$ 图上的趋势是从A型花岗岩区向高分异花岗岩演化。其中宝泉山、双岔、九连城、振江-榆林等岩体的花岗岩明显不同于分异的I/S型花岗岩, 而具有A型花岗岩的分异趋势, 因为在A型花岗岩结晶分异过程中Zr含量伴随Ga/Al值增加而增加(吴福元等, 2017)(图7b)。这些岩体在花岗岩成因类型图 $\text{Nb}-10\,000\times\text{Ga/Al}$ 和 $(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})/\text{CaO}-(\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y})$ 判别图上均投点于分异的A型花岗岩区(图7c, 7d)。不同于以上岩体, 石门沟、松树沟、黄花店镇、南台子等岩体的具有明显的I/S型花岗岩分异趋势, 并在花岗岩成因类型 $(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})/\text{CaO}-(\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y})$ 和 $\text{Nb}-10\,000\times\text{Ga/Al}$ 判别图上均投点于分异的I型、S型花

表 3 丹东大楼房体片麻状黑云母二长花岗岩 (TW043) LA-MC-ICP-MS 锆石原位微区 Lu-Hf 同位素测试结果
Table 3 LA-MC-ICP-MS Lu-Hf isotopic compositions for in-situ zircons of the gneissic biotite monzonitic granite (TW043) from Daloufang Pluton in Dandong area

点号	t/Ma	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$\varepsilon\text{Hf}(0)$	$\varepsilon\text{Hf}(t)$	$(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$	t_{DM1}	t_{DM2}	$f_{\text{Lu/Hf}}$
TW043-1	1 872.6	0.020 667	0.000 308	0.000 663	0.000 009	0.281 576	0.000 015	-42.28	-1.33	0.281 553	2 323.0	2 598.8	-0.980
TW043-2	1 867.3	0.012 373	0.000 287	0.000 391	0.000 009	0.281 621	0.000 014	-40.71	0.46	0.281 607	2 246.9	2 483.8	-0.988
TW043-3	1 870.7	0.012 518	0.000 246	0.000 393	0.000 007	0.281 646	0.000 014	-39.80	1.45	0.281 632	2 212.3	2 425.4	-0.988
TW043-4	1 871.6	0.022 032	0.000 165	0.000 688	0.000 005	0.281 615	0.000 016	-40.92	-0.02	0.281 590	2 272.1	2 516.9	-0.979
TW043-5	1 869.1	0.022 362	0.000 224	0.000 724	0.000 006	0.281 585	0.000 016	-41.98	-1.18	0.281 559	2 315.0	2 586.8	-0.978
TW043-6	1 850.0	0.022 755	0.000 193	0.000 762	0.000 007	0.281 582	0.000 015	-42.08	-1.76	0.281 555	2 321.2	2 607.7	-0.977
TW043-7	1 874.9	0.022 382	0.000 275	0.000 734	0.000 008	0.281 584	0.000 018	-42.01	-1.10	0.281 558	2 316.8	2 586.0	-0.978
TW043-8	1 880.9	0.029 871	0.000 189	0.000 995	0.000 008	0.281 597	0.000 017	-41.54	-0.83	0.281 562	2 314.7	2 574.0	-0.970
TW043-9	1 871.5	0.023 531	0.000 358	0.000 774	0.000 012	0.281 632	0.000 016	-40.32	0.47	0.281 604	2 254.1	2 486.5	-0.977
TW043-10	1 871.4	0.013 411	0.000 398	0.000 409	0.000 012	0.281 618	0.000 015	-40.80	0.45	0.281 604	2 251.2	2 487.8	-0.988
TW043-11	1 873.2	0.022 346	0.000 438	0.000 707	0.000 014	0.281 604	0.000 020	-41.31	-0.40	0.281 579	2 288.5	2 541.9	-0.979
TW043-12	1 875.0	0.023 052	0.000 291	0.000 738	0.000 008	0.281 634	0.000 015	-40.25	0.66	0.281 608	2 249.4	2 477.4	-0.978
TW043-13	1 870.1	0.024 371	0.000 300	0.000 777	0.000 009	0.281 630	0.000 019	-40.39	0.36	0.281 602	2 257.2	2 492.2	-0.977
TW043-14	1 890.7	0.016 194	0.000 672	0.000 506	0.000 022	0.281 622	0.000 016	-40.69	0.87	0.281 603	2 252.6	2 476.5	-0.985
TW043-15	1 874.9	0.020 355	0.000 135	0.000 644	0.000 005	0.281 607	0.000 017	-41.20	-0.18	0.281 584	2 280.4	2 529.0	-0.981

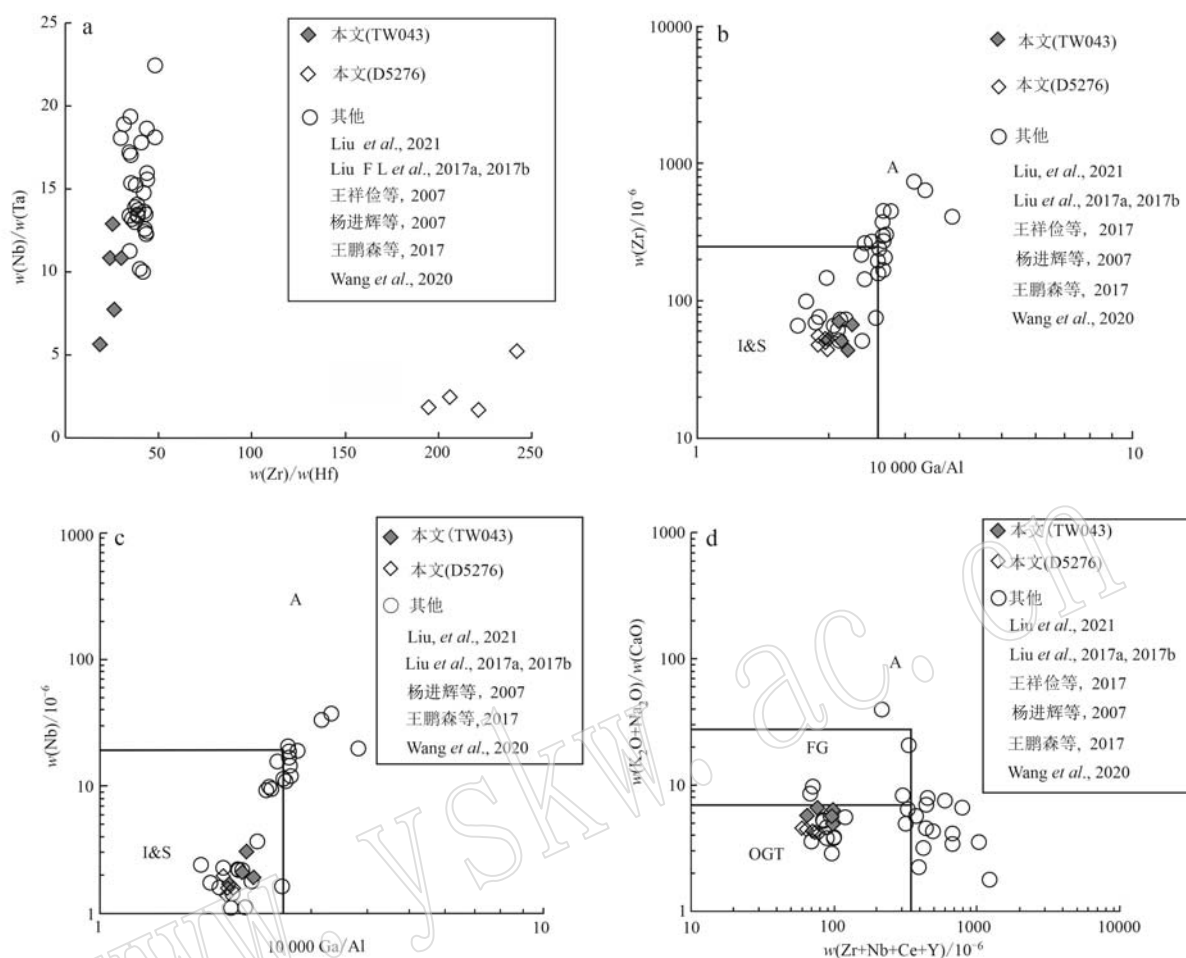


图7 花岗岩成因类型判别图(a、c据 Whalen *et al.*, 1987; b据吴福元等, 2017; d据 Chappell and White, 1992)

Fig. 7 Discriminant diagrams of the granite genetic type (a, c after Whalen *et al.*, 1987; b after Wu Fuyuan *et al.*, 2017; d after Chappell and White, 1992)

FG—分异的I型、S型花岗岩分布区; OGT—I型、S型、M型花岗岩分布区

FG—crystallization differentiation I-type and S-type granite area; OGT—I-type, S-type and M-type granite area

岗岩区(图7c, 7d)。

此外, 以上两类岩体的结晶温度也具有较为显著的差异。I或S型花岗岩往往具有比A型花岗岩要更低的结晶温度(Clemens *et al.*, 1986; King *et al.*, 1997, 2001)。辽东石门沟、松树沟、黄花店镇、南台子等岩体的结晶温度在710~730℃(王鹏森等, 2017; 任云伟等, 2017; Wang *et al.*, 2020; Liu *et al.*, 2021), 远低于A型花岗岩(~839℃), 甚至比未分异(781℃)和分异的(764℃)I型花岗岩还要低很多(King *et al.*, 1997), 这也与A型花岗岩的温度特征并不相符。而宝泉山、双岔、九连城、振江-榆林等岩体花岗岩的结晶温度则相对较高, 为750~800℃(Liu F L *et al.*, 2017a, 2017c), 与A型花岗岩的结晶温度(839℃)更接近。因此, 胶-辽-吉带古

元古代晚期形成的花岗岩具有不同的成因类型。

近年来越来越多的锆石 U-Pb 年龄资料显示, 岩浆岩中经常含有多组不同年龄的锆石, 不同来源的锆石或同一锆石不同微区的 Hf 同位素组成可能不同, 但仍会保存其原岩初生地壳的特点(Wu *et al.*, 2006)。在 $\varepsilon\text{Hf}(t)$ - t 图解和 $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$ - t 图解上, 大楼房黑云母二长花岗岩均投点于亏损地幔和陆壳范围内(图8a, 8b), 说明岩体形成时壳源物质成分占主导地位, 并有地幔物质混染(Che *et al.*, 2015; Guan *et al.*, 2016)。锆石 Hf 同位素二阶段模式年龄 t_{DM2} 为2 607.7~2 425.4 Ma, 较低的 $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$ 组成特征(0.281 553~0.281 632)和近于0的 $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 值特征(-1.76~1.45)表明岩浆不仅来自地壳物质再循环, 还有新太古代-古元古代

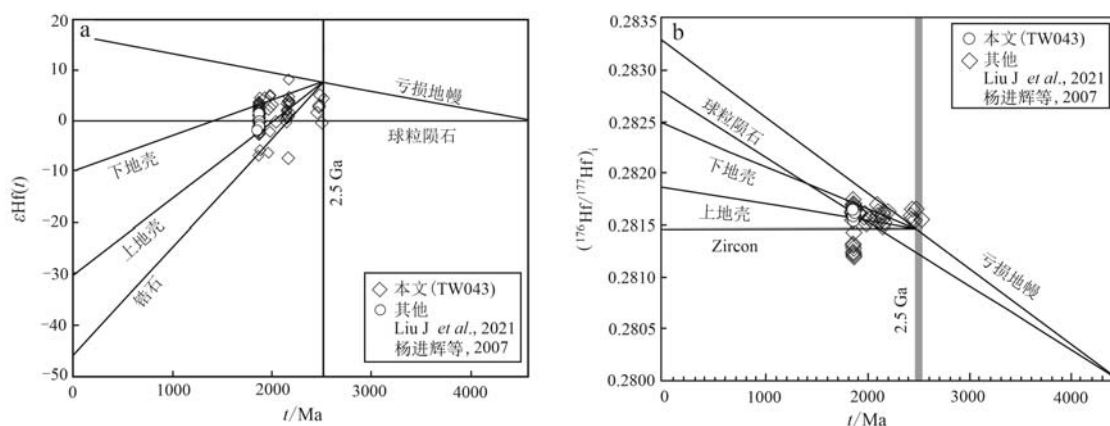


图8 锆石微区 $\varepsilon\text{Hf}(t)$ - t 相关图解(a)和 $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$ - t 相关图解(b) (底图据吴福元等, 2007)

Fig. 8 Relate dillustrations of $\varepsilon\text{Hf}(t)$ - t (a) and $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$ - t (b) for the different domains in zircons of the sample (after Wu Fuyuan *et al.*, 2007)

物质加入到地壳中或有新生地壳的生成。

5.2 构造意义

近年关于胶-辽-吉带古元古代岩浆活动的时限及期次研究众多, 普遍认为胶-辽-吉带内古元古代岩浆活动主要存在约 2.2~2.0 Ga 和约 2.0~1.8 Ga 两期, 前者包括辽吉条痕状花岗岩、里尔峪岩组火山岩以及基性岩脉等(路孝平等, 2004b; Li and Zhao, 2007; Li and Chen, 2014; Meng *et al.*, 2014; Wang X P *et al.*, 2016, 2017, 2020; Liu *et al.*, 2018, 2020; Xu *et al.*, 2018; Kai *et al.*, 2019), 后者包括宽甸通化地区的球斑花岗岩、矿洞沟正长岩以及卧龙泉、石门沟、松树沟二长花岗岩等(杨进辉等, 2007; Liu P H *et al.*, 2017; Liu *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2020)。麻粒岩相变质作用在整个胶-辽-吉带普遍存在(Zhao *et al.*, 2005, 2012)。在集安、辽河南部、胶北和蚌埠等地区分布的古元古代高压麻粒岩具有类似的变质年龄, 并以记录近等温减压(ITD)及随后近等压降温(IBC)的顺时针 p - T - t 轨迹为特征, 指示本区变质杂岩在古元古代晚期曾强烈参与华北克拉通北部龙岗地块和狼林地块之间的陆-陆俯冲和碰撞的构造过程(刘福来等, 2015; Cai *et al.*, 2017, 2019, 2020)。大楼房片麻状黑云母二长花岗岩具有明显的高 Sr 和低 Yb 特征, Sr 和 Yb 的行为与残留相有密切的关系, 高 Sr 低 Yb 的埃达克岩被认为形成于高压环境, 反映了地壳加厚事件(Defant and Drummond, 1990; Rapp *et al.*, 2003; 张旗等, 2005)。

深熔锆石 U-Pb 定年结果显示, 区域性的深熔作用或部分熔融时代为 1.86~1.84 Ga, 表明这期广

泛的深熔事件应发生于胶-辽-吉带整体构造折返的中低压麻粒岩相退变质阶段(刘福来等, 2015), 这与古元古代晚期代表着造山带碰撞后伸展作用的球斑状花岗岩、中-碱性侵入岩、淡色花岗岩和伟晶岩的构造背景耦合(Liu *et al.*, 2017c; 杨仲杰, 2021)。

大楼房花岗岩形成于 1 873~1 869 Ma, 属准铝质-弱过铝质、高钾钙碱性系列岩石, 其主量元素特征指示原岩具有弧岩浆作用特征。在 Rb-Y+Nb 图解(图 9a)上投点在火山弧花岗岩区域, 可能为大洋板块向大陆板块俯冲所形成的活动大陆边缘弧花岗岩; 在 R_2 - R_1 图解(图 9b)上投点在造山晚期和同碰撞区域, 也可能是地块拼合后区域由挤压转为伸展作用的产物。

此外, 通过辽-吉造山带古元古代花岗岩相关年龄信息(表 4), 在古元古代造山纪(Orosirian)开始, 自 2 050~1 900 Ma 发育的酸性岩浆活动比较少, 记录最多岩浆活动的峰值在 1 870 Ma。通过对古元古代胶-辽-吉带辽吉地区花岗质岩石类型和构造背景分类, 结合在集安地区出现的泥质麻粒岩变质时限 1 890~1 870 Ma 和其独居石 1 880~1 840 Ma 的变质时代(Cai *et al.*, 2019, 2020), 笔者认为胶-辽-吉带中丹东地区在古元古代晚期可能经历了俯冲-弧陆碰撞造山过程, 并持续到 1 870 Ma 左右。

6 结论

(1) 丹东大楼房片麻状黑云母二长花岗岩形成于 1 873~1 869 Ma, 属中低温花岗岩系列, 为准铝-

表4 胶-辽-吉带元古代花岗岩相关年龄信息
Table 4 Summary of geochronological data of Paleoproterozoic granitoids in Jiao-Liao-Ji Belt

序号	样品编号	岩性	矿物组合	分类	岩浆年龄/Ma	位置	分析方法	数据来源
1	16XY016	二长片麻岩	Qtz+Pl+Kfs+Amph	A/I型	2 167±26	-	LA-ICP-MS	Dong <i>et al.</i> , 2019
2	LJ056	含磁铁矿二长花岗岩	Qtz+Pl+Kfs+Mag	A型	2 176±11	马风岩体	SHRIMP	Li and Zhao, 2007
3	JN1	含石榴石斑状花岗岩	Qtz+Pl+Kfs+Grt+Bt+Sil±Crd+Ilm+Mag+Zr+Mnz	A型	1 868±9	宝泉山岩体	LA-ICP-MS	Liu <i>et al.</i> , 2017a, 2017b, 2017c
4	JN3	含石榴石斑状花岗岩	Qtz+Pl+Kfs+Grt+Bt+Sil±Crd+Ilm+Mag+Zr+Mnz	A型	1 872±6	宝泉山岩体	LA-ICP-MS	Liu <i>et al.</i> , 2017a, 2017b, 2017c
5	JN7	含石榴石斑状花岗岩	Qtz+Pl+Kfs+Grt+Bt+Sil±Crd+Ilm+Mag+Zr+Mnz	A型	1 871±7	双岔岩体	LA-ICP-MS	Liu <i>et al.</i> , 2017a, 2017b, 2017c
6	LN3	含石榴石斑状花岗岩	Qtz+Pl+Kfs+Grt+Bt+Sil±Crd+Ilm+Mag+Zr+Mnz	A型	1 872±8	九连城岩体	LA-ICP-MS	Liu <i>et al.</i> , 2017a, 2017b, 2017c
7	LN6	含石榴石斑状花岗岩	Qtz+Pl+Kfs+Grt+Bt+Sil±Crd+Ilm+Mag+Zr+Mnz	A型	1 870±7	鸡冠山岩体	LA-ICP-MS	Liu <i>et al.</i> , 2017a, 2017b, 2017c
8	JN2	含黑云母斑状花岗岩	Qtz+Pl+Kfs+Bt+Ilm+Mag+Zr+Mnz	A型	1 868±6	宝泉山岩体	LA-ICP-MS	Liu <i>et al.</i> , 2017a, 2017b, 2017c
9	JN4	含黑云母斑状花岗岩	Qtz+Pl+Kfs+Bt+Ilm+Mag+Zr+Mnz	A型	1 872±7	宝泉山岩体	LA-ICP-MS	Liu <i>et al.</i> , 2017a, 2017b, 2017c
10	JN6	含黑云母斑状花岗岩	Qtz+Pl+Kfs+Bt+Ilm+Mag+Zr+Mnz	A型	1 865±7	龙泉岩体	LA-ICP-MS	Liu <i>et al.</i> , 2017a, 2017b, 2017c
11	JN8	含黑云母斑状花岗岩	Qtz+Pl+Kfs+Bt+Ilm+Mag+Zr+Mnz	A型	1 872±7	双岔岩体	LA-ICP-MS	Liu <i>et al.</i> , 2017a, 2017b, 2017c
12	LN1	含黑云母斑状花岗岩	Qtz+Pl+Kfs+Bt+Ilm+Mag+Zr+Mnz	A型	1 867±10	振江-榆林岩体	LA-ICP-MS	Liu <i>et al.</i> , 2017a, 2017b, 2017c
13	LN4	含黑云母斑状花岗岩	Qtz+Pl+Kfs+Bt+Ilm+Mag+Zr+Mnz	A型	1 865±6	九连城岩体	LA-ICP-MS	Liu <i>et al.</i> , 2017a, 2017b, 2017c
14	LN5	含黑云母斑状花岗岩	Qtz+Pl+Kfs+Bt+Ilm+Mag+Zr+Mnz	A型	1 864±8	九连城岩体	LA-ICP-MS	Liu <i>et al.</i> , 2017a, 2017b, 2017c
15	JN5	斑状花岗岩	Qtz+Kfs±Pl+Bt+Grt+Ilm+Mag+Zr+Mnz	A型	1 868±7	宝泉山岩体	LA-ICP-MS	Liu <i>et al.</i> , 2017a, 2017b, 2017c
16	LN2	斑状花岗岩	Qtz+Kfs±Pl+Bt+Grt+Ilm+Mag+Zr+Mnz	A型	1 866±6	振江-榆林岩体	LA-ICP-MS	Liu <i>et al.</i> , 2017a, 2017b, 2017c
17	18DD30-1	黑云母二长花岗岩	Bt+Grt+Hbl+Kfs+Mag+Mic+Pl+Qtz	-	2 168±7	聂家崴子	LA-ICP-MS	Liu <i>et al.</i> , 2020
18	18XY13-1	含石榴石黑云母二长花岗岩	Bt+Grt+Hbl+Kfs+Mag+Mic+Pl+Qtz	-	2 175±7	黄花店镇	LA-ICP-MS	Liu <i>et al.</i> , 2020
19	LM1	浅色花岗岩	Qtz+Pl+Grt+Sil+Crd+Bt	-	1 869±8	南辽河群	LA-ICP-MS	Liu <i>et al.</i> , 2017c
20	LM2	浅色花岗岩	Qtz+Pl+Grt+Sil+Crd+Bt	-	1 866±9	南辽河群	LA-ICP-MS	Liu <i>et al.</i> , 2017c
21	LM3	浅色花岗岩	Qtz+Pl+Grt+Sil+Crd+Bt	-	1 870±8	南辽河群	LA-ICP-MS	Liu <i>et al.</i> , 2017c
22	LM4	浅色花岗岩	Qtz+Pl+Grt+Sil+Crd+Bt	-	1 863±9	南辽河群	LA-ICP-MS	Liu <i>et al.</i> , 2017c
23	JM1	浅色花岗岩	Qtz+Pl+Grt+Sil+Crd+Bt	-	1 865±9	集安群	LA-ICP-MS	Liu <i>et al.</i> , 2017c
24	JM2	浅色花岗岩	Qtz+Pl+Grt+Sil+Crd+Bt	-	1 870±7	集安群	LA-ICP-MS	Liu <i>et al.</i> , 2017c
25	JM3	浅色花岗岩	Qtz+Pl+Grt+Sil+Crd+Bt	-	1 867±7	集安群	LA-ICP-MS	Liu <i>et al.</i> , 2017c
26	JM4	浅色花岗岩	Qtz+Pl+Grt+Sil+Crd+Bt	-	1 870±8	集安群	LA-ICP-MS	Liu <i>et al.</i> , 2017c
27	XHG-N2	片麻状二长花岗岩	Kf+Pl+Bt+Qtz+Do	A型	2 171±4	大房身岩体	LA-ICP-MS	Liu <i>et al.</i> , 2018
28	DHL-N1	片麻状二长花岗岩	Kf+Pl+Bt+Qtz+Do	A型	2 185±6	大房身岩体	LA-ICP-MS	Liu <i>et al.</i> , 2018
29	18YK01-2	碱长石花岗岩	Hbl+Mag+Mic+Opx+Pl+Qtz	A型	2 165±17	虎皮峪岩体	LA-ICP-MS	Liu <i>et al.</i> , 2020
30	18XY11-1	黑云母角闪二长花岗岩	Hbl+Mag+Mic+Opx+Pl+Qtz	A型	2 168±30	牧牛岩体	LA-ICP-MS	Liu <i>et al.</i> , 2020
31	18DD25-1	碱长石花岗岩	Bt+Grt+Hbl+Kfs+Mag+Mic+Pl+Qtz	A型	2 163±8	西门子岩体	LA-ICP-MS	Liu <i>et al.</i> , 2020
32	18DD26-1	碱长石花岗岩	Bt+Grt+Hbl+Kfs+Mag+Mic+Pl+Qtz	A型	2 178±7	西门子岩体	LA-ICP-MS	Liu <i>et al.</i> , 2020
33	FW02-62	斑状花岗岩	Qtz+Pl+Kfs+Bt	-	1 848±10	卧龙泉岩体	LA-ICP-MS	路孝平等, 2004a, 2004b
34	12082	奥长花岗岩	Qtz+Plh+Bt+Grt+Ms±Sil±Crd	S型	1 817±18	双岔岩体	SHRIMP	路孝平等, 2004a, 2004b

续表 4-1
Continued Table 4-1

序号	样品编号	岩性	矿物组合	分类	岩浆年龄/Ma	位置	分析方法	数据来源
35	92015	斑状花岗岩	Qtz+Pl+Kfs+Bt+Gr+Ms+Sil+Crd	S型	1 861±9	双岔岩体	TIMS	路孝平等, 2004a, 2004b
36	92015	斑状花岗岩	Qtz+Pl+Kfs+Bt+Gr+Ms+Sil+Crd	S型	1 872±8	双岔岩体	SHRIMP	路孝平等, 2004a, 2004b
37	La010-1	斑状花岗岩	Qtz+Pl+Kfs+Bt+Gr+Ms+Sil+Crd	S型	1 773±59	陆家堡子岩体	TIMS	路孝平等, 2004a, 2004b
38	12072	石英闪长岩	Qtz+Amph+Pl+Bt+Cpx+Mag+Ap+Zr	I型	1 872±11	清河岩体	SHRIMP	路孝平等, 2004a, 2004b
39	131J11	花岗片麻岩	Pl+Mc+Qtz+Bt+Ms+Ap+Zr	-	1 892±16	松树沟	LA-ICP-MS	任云伟等, 2017
40	111J65	石英闪长岩	Pl+Kfs+Qtz+Bt+Ap+Zr	-	1 850±11	南台子岩体	LA-ICP-MS	任云伟等, 2017
41	TW13	二长花岗岩	Kfs+Pl+Qtz+Bt	S型	1 867±10	青城子岩体	SHRIMP	宋运红等, 2016
42	10JL13	伟晶花岗岩	Pl+Kfs+Qtz+Ms	-	1 870±8	红花沟门岩脉	LA-ICP-MS	王惠初等, 2011
43	16LN18-1	片麻状二长花岗岩	Kfs+Pl+Qtz+Hb+Mi	A型	1 890±27	-	LA-ICP-MS	Wang <i>et al.</i> , 2020
44	719FSG-1	黑云母斜长花岗岩	Kfs+Pl+Qtz+Hb+Mi	I型	1 891±10	青城子岩体	CAMECA	Wang <i>et al.</i> , 2020
45	188001	花岗岩	Qtz+Kfs+Pl+Hb+Mi	-	2 105±10	-	LA-ICP-MS	Wang <i>et al.</i> , 2020
46	188101	花岗岩	Qtz+Kfs+Pl+Hb+Mi	-	2 084±12	-	LA-ICP-MS	Wang <i>et al.</i> , 2020
47	03JH079	粗粒正长岩	Qtz+Kfs+Pl+Hb+Mi	-	1 879±17	矿洞沟岩体	LA-ICP-MS	杨进辉等, 2007
48	03JH080	细粒正长岩	Qtz+Kfs+Pl+Hb+Mi	-	1 874±18	矿洞沟岩体	LA-ICP-MS	杨进辉等, 2007
49	03JH082	细粒正长岩	Qtz+Kfs+Pl+Hb+Mi	-	1 870±18	矿洞沟岩体	LA-ICP-MS	杨进辉等, 2007
50	NHP-11	二长花岗岩	Amph+Pl+Kfs+Pz+Ap+Zr	-	2 180±14	虎皮峪岩体	LA-ICP-MS	Zhu <i>et al.</i> , 2019
51	SK15-1	石英闪长片麻岩	Kfs+Pl+Qtz+Bt	-	2 436±17	-	LA-ICP-MS	路孝平等, 2004a
52	FW01-19	花岗闪长片麻岩	-	-	2 450±16	-	LA-ICP-MS	路孝平等, 2004a
53	T02-1	正长花岗岩	Kfs+Pl+Qtz	I型	2 169±11	四门子岩体	SHRIMP	宋运红等, 2016
54	TW12	二长花岗岩	Kfs+Qtz+Bt	I型	2 153±16	四门子岩体	SHRIMP	宋运红等, 2016
55	TW11	斑状花岗岩	Pl+Kfs+Qtz	I型	1 835±9	牧牛岩体	SHRIMP	宋运红等, 2016
56	HPX1	黑云母二长花岗岩片麻岩	Mc+Pl+Pl+Qtz+Hb+Ep+Mag+Zr+Ttn	I型	2 215±3	虎皮峪岩体	LA-ICP-MS	陈斌等, 2016
57	HXY-5	条带状二长花岗岩	Kfs+Qtz+Pl+Amph+Bt	S型	2 160±21	后仙峪	LA-ICP-MS	Chen <i>et al.</i> , 2021
58	D058-4	电气石云母花岗岩	Kfs+Qtz+Pl+Amph+Bt	S型	2 150±12	岫岩韩家村	LA-ICP-MS	Chen <i>et al.</i> , 2021
59	TWD15023	条带状花岗岩	Kfs+Qtz+Pl+Amph+Bt	S型	2 041±9.1	红旗营子地区	LA-ICP-MS	Chen <i>et al.</i> , 2021
60	D1475-2	二长花岗岩片麻岩	Kfs+Qtz+Pl+Amph+Bt	S型	1 927±27	下露沟里地区	LA-ICP-MS	Chen <i>et al.</i> , 2021
61	HK-2	斑状花岗岩片麻岩	Pl+Kfs+Qtz+Bt	S型	1 878±11	丹东河口地区	LA-ICP-MS	Chen <i>et al.</i> , 2021
62	D017-2	巨斑状含黑云母二长花岗岩	Pl+Kfs+Qtz+Bt	S型	1 839±38	砬河镇	LA-ICP-MS	Chen <i>et al.</i> , 2021
63	HK-1	弱片麻状二长花岗岩	Qtz+Pl+Kfs+Per+Bt+Mus	S型	1 864±11	丹东河口地区	LA-ICP-MS	Chen <i>et al.</i> , 2021
64	TWD15016	中细粒花岗岩	Kfs+Amph+Qtz+Pl+Cpx+Bt	S型	1 962±35	岫岩三家子地区	LA-ICP-MS	Chen <i>et al.</i> , 2021
65	D1455-1	中粗粒花岗闪长质片麻岩	Qtz+Bt+Gar+And+Sil+Pl+Kfs	S型	1 672±33	宽甸太平哨	LA-ICP-MS	Chen <i>et al.</i> , 2021
66	TWD15018-2	花岗岩糜棱岩	Pl+Kfs+Qtz+Bt+Mu	S型	1 810±14	岫岩三家子地区	LA-ICP-MS	Chen <i>et al.</i> , 2021
67	LZ02-1	片麻状花岗岩	Kfs+Qtz+Tur+Bt	A型	2 189±10	虎皮峪岩体	LA-ICP-MS	Li and Chen, 2014
68	LZ19-1	片麻状花岗岩	Kfs+Qtz+Tur	-	2 158±23	虎皮峪岩体	LA-ICP-MS	Li and Chen, 2014

续表 4-2
Continued Table 4-2

序号	样品编号	岩性	矿物组合	分类	岩浆年龄/Ma	位置	分析方法	数据来源
69	LJ005	斑状二长花岗岩	Qtz+Pl+Kfs	S 型	1 856±31	双岔岩体	SHRIMP	Li and Zhao, 2007
70	LJ006	斑状二长花岗岩	Qtz+Pl+Kfs	S 型	1 875±10	八河川岩体	SHRIMP	Li and Zhao, 2007
71	LJ010	二长花岗岩片麻岩	Qtz+Pl+Kfs+Mag	A 型	2 166±14	永甸-步达远岩	SHRIMP	Li and Zhao, 2007
72	LJ035	二长花岗岩片麻岩	Qtz+Pl+Kfs+Mag	A 型	2 175±13	鸡冠山岩体	SHRIMP	Li and Zhao, 2007
73	LJ040	二长花岗岩片麻岩	Qtz+Pl+Kfs+ Amp	A 型	2 143±17	大房身岩体	SHRIMP	Li and Zhao, 2007
74	LJ044	二长花岗岩片麻岩	Qtz+Pl+Kfs+Bt	A 型	2 150±17	虎皮峪岩体	SHRIMP	Li and Zhao, 2007
75	JL11-1	花岗岩片麻岩	Hbl-Ep-Pl-Qtz-Mc- Bt	-	2 491±21	岩脉	LA-ICP-MS	Li <i>et al.</i> , 2019
76	JL12-1	花岗岩片麻岩	Hbl+Ep+Pl+Qtz+Mc+ Bt	-	2 330±35	岩脉	LA+ICP+MS	Li <i>et al.</i> , 2019
77	JL12-2	花岗岩片麻岩	Hbl+Ep+Pl+Qtz+Mc+ Bt	-	2 197±11	岩脉	LA+ICP+MS	Li <i>et al.</i> , 2019
78	18YK09-1	黑云母二长花岗岩	Bt+Mic+Mus+Pl+Qtz+Mus+Pl+Qtz	-	1 854±30	松树沟	LA+ICP+MS	Liu <i>et al.</i> , 2021
79	18YK09-1	黑云母二长花岗岩	Bt+Mic+Mus+Pl+Qtz+Mus+Pl+Qtz	-	1 946±29	松树沟	LA+ICP+MS	Liu <i>et al.</i> , 2021
80	18DD27-1	黑云母二长花岗岩	Bt+Mic+Mus+Pl+Qtz+Mus+Pl+Qtz	-	1 883±14	方家崴子	LA+ICP+MS	Liu <i>et al.</i> , 2021
81	18DD29-1	黑云母二长花岗岩	Bt+Mic+Mus+Pl+Qtz+Mus+Pl+Qtz	-	1 879±12	青城子岩体	LA+ICP+MS	Liu <i>et al.</i> , 2021
82	18DD05-1	二云母二长花岗岩	Bt+Mic+Mus+Pl+Qtz+Mus+Pl+Qtz	-	1 875±29	十字街	LA+ICP+MS	Liu <i>et al.</i> , 2021
83	FW10-327	含电气石白云母花岗岩	Qtz+Pl+Tou+Ms	-	2 161±12	虎皮峪岩体	LA+ICP+MS	路孝平等, 2004a
84	Y006-1	透辉石片麻岩	Qtz+Pl+Kfs+Di±Bt	-	2 103±18	集安群	SHRIMP	Lu <i>et al.</i> , 2006
85	Y009	石榴石片麻岩	Qtz+Pl+Kfs+Grt±Bt	-	1 981±13	集安群	SHRIMP	Lu <i>et al.</i> , 2006
86	LD9822	黑云母花岗岩	Pl+Kfs+Qtz+Bt	-	2 173±4	牌楼岩体	SHRIMP	Wan <i>et al.</i> , 2006
87	601SDG1	角闪二长花岗岩	Qtz+Kfs+Pl+ Amp+Mag	A 型	2 181±6	马凤+隆昌岩体	CAMECA	Wang X P <i>et al.</i> , 2017
88	719FSG1	黑云斜长花岗岩	Qtz+Pl+Kfs+Bt	I 型	1 891±10	石门子岩体	CAMECA	Wang X P <i>et al.</i> , 2017
89	HLH-2	条痕状二长花岗岩	Qtz + Pl + Me + Mils + Tr + Bt + Hbl	-	2 139.7±8.6	-	LA+ICP+MS	杨玉伟等, 2020
90	HXY-19	含电气石混合花岗岩	Qtz+Pl+Tou	-	2 156±6	后仙峪	LA+ICP+MS	付燕刚等, 2018
91	DSQ-08	条痕状混合花岗岩	Qtz+Pl+Kfs+Ms	-	2 240±4	后仙峪	LA+ICP+MS	付燕刚等, 2018
92	FW01-327	含电气石白云母花岗岩	Qtz+Kfs+Pl+Ms+Tur	A 型	2 143±21	虎皮峪岩体	LA+ICP+MS	路孝平等, 2004a
93	La0007	正长花岗岩	Qtz+Kfs+Pl+ Amp+Zr+Tn+Ap+Mag+Rt+Py	A 型	2 164±8	钱桌沟岩体	SHRIMP	路孝平等, 2004b
94	La1065	正长花岗岩	Qtz+Kfs+Pl+ Amp+Zr+Tn+Ap+Mag+Rt+Py	A 型	2 158±13	清河岩体	SHRIMP	路孝平等, 2004b
95	NMY03	二长花岗岩片麻岩	Qtz+Pl+Kfs+Bt + Zr+Ap+Mag	A 型	2 168±14	清河岩体	LA+ICP+MS	秦亚, 2013
96	NHP01	黑云二长花岗岩片麻岩	Qtz+Pl+Kfs+Bt+Mag +Tn+Zr+Ap+Hem	A 型	2 173±20	虎皮峪岩体	LA+ICP+MS	秦亚, 2013
97	NYD-3	花岗岩片麻岩	Qtz+Kfs+Bt+ Amp+Mag+Zr +Tn+Aln+Ap	A2 型	2 180±5	永甸+步达远岩体	LA+ICP+MS	滕大伟等, 2017
98	D1001-B1	黑云二长花岗岩	Qtz+Kfs+Pl+Bt± Amp+Mag+Zr	A 型	2 185±29	牧羊岩体	LA+ICP+MS	王鹏森等, 2017
99	D1032-B1	花岗岩闪长岩	Qtz+Kfs+Pl+Bt+Zr	-	1 995±18	黄花店镇	LA+ICP+MS	王鹏森等, 2017
100	D5002-B1	花岗岩闪长岩	Qtz+Kfs+Pl+Bt+Zr	-	1 995±13	黄花店镇	LA+ICP+MS	王鹏森等, 2017
101	D3208-B1	黑云二长花岗岩	Qtz+Kfs+Pl+Bt± Amp+Mag+Zr	A 型	2 183±13	大房身岩体	LA+ICP+MS	王鹏森等, 2017
102	D5132-B1	黑云二长花岗岩	Qtz+Kfs+Pl+Bt± Amp+Mag+Zr	A 型	2 166±10	大房身岩体	LA+ICP+MS	王鹏森等, 2017

续表 4-3
Continued Table 4-3

序号	样品编号	岩性	矿物组合	分类	岩龄年龄/Ma	位置	分析方法	数据来源
103	16LN13-1	二长花岗岩片麻岩	Qtz+Kfs+Pl+Amph+Bt+Zr	A 型	2 177±15	永甸+步达远岩体	LA+ICP+MS	王祥俭等, 2017
104	16LN23-1	二长花岗岩片麻岩	Qtz+Kfs+Pl+Amph+Bt+Zr	A 型	2 177±9	永甸+步达远岩体	LA+ICP+MS	王祥俭等, 2017
105	T05-1	花岗闪长岩	Pl+Kf+Qtz+Bt	I 型	1872±13	高丽墩台岩体	SHRIMP	杨凤超等, 2017
106	16KD05-4	含电气石伟晶岩	Qtz+Kfs+Tur+Pl	I/S 型	1 842±7	宽甸县	LA+ICP+MS	杨红等, 2017
107	16KD06-1	花岗伟晶岩	Qtz+Kfs+Pl±Tur±Ms	I/S 型	1 864±8	宽甸县	LA+ICP+MS	杨红等, 2017
108	16KD54-2	含电气石伟晶岩	Qtz+Kfs+Tur±Pl	I/S 型	1 876±11	三家子镇	LA+ICP+MS	杨红等, 2017
109	16KD66-1	含电气石伟晶岩	Qtz+Kfs+Tur±Pl	I/S 型	1 802±15	三家子镇	LA+ICP+MS	杨红等, 2017
110	16KD80-2	含电气石伟晶岩	Qtz+Kfs+Tur+Ms±Pl	I/S 型	1 740±8	三家子镇	LA+ICP+MS	杨红等, 2017
111	16SJZ07-8	花岗伟晶岩	Qtz+Kfs±Pl±Tur±Ms	I/S 型	1 871±7	三家子镇	LA+ICP+MS	杨红等, 2017
112	HD-2	花岗片麻岩	Qtz+Pl+Kfs+Bt+Amph+Ep+Mag+Zr+Ap+Ttn+Po	I 型	2 175±3	哈达碑岩体	LA+ICP+MS	杨明春等, 2015a
113	SM-1	角闪二长花岗岩片麻岩	Qtz+Kfs+Pl+Amph+Zr+Ttn+Ap	I 型	2 205±2	四门子岩体	LA+ICP+MS	杨明春等, 2015a
114	SC-1	斑状石榴黑云二长花岗岩	Qtz+Pl+Kfs+Bt+Grt+Ms+Sil	-	1 895±2	双岔岩体	LA+ICP+MS	杨明春等, 2015b
115	HP-1	片麻状花岗岩	Kfs+Pth+Pl+Qtz+Bt+Amph+Ep+Mag+Zr+Ap+Ttn	I 型	2 184±2	虎皮峪岩体	LA+ICP+MS	Yang <i>et al.</i> , 2016
116	DST-TW1	花岗伟晶岩	Qtz+Kfs±Pl±Tur±Ms	S 型	1 864±20	岫岩地区	LA+ICP+MS	杨仲杰, 2021
117	WJC-TW1	花岗伟晶岩	Qtz+Kfs±Pl±Tur±Ms	S 型	1 903.6±4.7	岫岩地区	LA+ICP+MS	杨仲杰, 2021
118	YL081	含电气石花岗质伟晶岩脉	Qtz+Pl+Tou	-	1 827±14	-	LA+ICP+MS	张帅等, 2017
119	YL075	含白云母花岗质伟晶岩脉	Qtz+Pl+Ms	-	1 855±13	-	LA+ICP+MS	张帅等, 2017
120	YL040	含黑云母花岗岩	Pl+Kf+Qtz+Bt	-	1 872±12	-	LA+ICP+MS	张帅等, 2017
121	YL177	二长花岗质片麻岩	Qtz+Kfs+Pl+Amph+Bt+Zr	-	1 874±13	-	LA+ICP+MS	张帅等, 2017
122	YL178	二长花岗质片麻岩	Qtz+Kfs+Pl+Amph+Bt+Zr	-	1 875±12	-	LA+ICP+MS	张帅等, 2017
123	YL287	二母花岗质片麻岩	Qtz+Kfs+Pl+Amph+Bt+Ms	-	1 882±16	-	LA+ICP+MS	张帅等, 2017
124	YL076	花岗质片麻岩	Qtz+Hbl+Ep+Pl+Mc+Bt	-	2 470±12	-	LA+ICP+MS	张帅等, 2017

缩写: Alm 褐帘石, Amph 角闪石, Ap 磷灰石, Bt 黑云母, Cpx 单斜辉石, Crd 蔷薇辉石, Ep 绿帘石, Grt 石榴子石, Hem 赤铁矿, Ilm 钛铁矿, Kfs 钾长石, Mc 微斜长石, Mnz 独居石, Ms 白云母, Opx 斜方辉石, Pl 斜长石, Po 雌黄铁矿, Pth 条纹长石, Px 辉石, Py 黄铁矿, Rt 金红石, Qtz 石英, Sil 夕线石, Ttn 榍石, Tur 电气石, Zr 锆石。

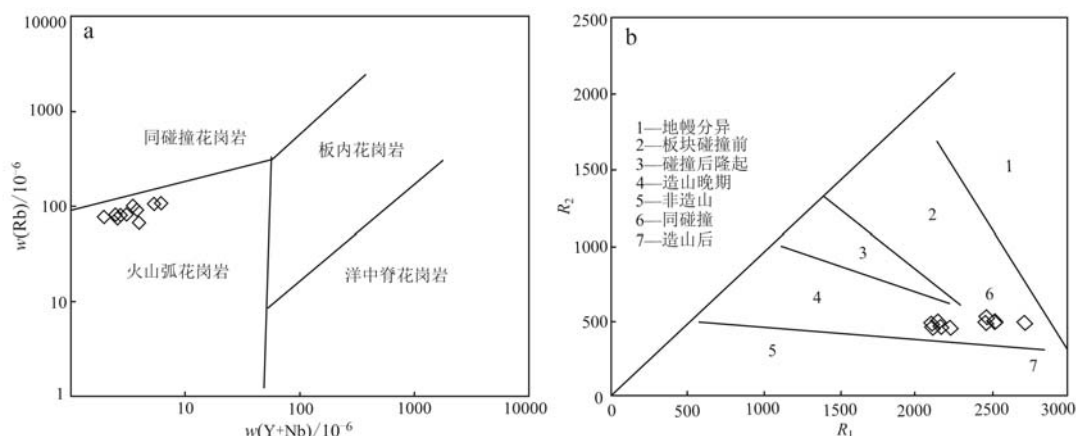


图9 丹东大楼房岩体片麻状黑云母二长花岗岩 Rb-Y+Nb 图解(a, 据 Pearce *et al.*, 1984)和 R_1 - R_2 图解(b, 据 Batchelor *et al.*, 1985)

Fig. 9 Construt discrimination diagrams of Rb- (Y+Nb) (a, after Pearce *et al.*, 1984) and R_1 - R_2 (b, after Batchelor *et al.*, 1985) of the gneissic biotite monzonitic granites from Daloufang Pluton in Dandong area

弱过铝质高钾钙碱性系列, 具有与 I 型花岗岩类似的岩石地球化学特征。丹东大楼房岩体具有相对富集的 Hf 同位素组成, 指示初始岩浆不仅来自地壳物质再循环, 还有新生地壳的加入。

(2) 胶-辽-吉带在古元古代晚期发育着不同成因类型的花岗岩, 且与该带的俯冲-弧陆碰撞造山过程耦合, 俯冲碰撞作用可能持续到 1 870 Ma。这对探讨该造山带的造山作用及其后的碰撞后伸展作用的过程和时限提供了重要约束。

(3) ~1 870 Ma 代表的俯冲碰撞事件与区域上的伸展作用具有同步性, 可能暗示着在总体俯冲碰撞背景下局部存在伸展作用, 表明胶-辽-吉带在古元古代晚期经历了不同时间和空间位置的俯冲碰撞、伸展作用的复合造山过程。

致谢 庆贺沈其韩院士 100 周岁寿辰, 寿逢盛世, 乐享天伦! 野外调查工作得到李东涛、邢德和教授级高级工程师和杨凤超、顾玉超博士的大力支持, 北京离子探针杨淳和刘建辉老师在锆石 U-Pb 实验测试和数据分析过程中给予了帮助, 南京大学孙盼老师在锆石 Hf 同位素实验测试和数据分析过程中给予了帮助, 审稿专家和编辑对本文提出了宝贵的意见, 在此一并表示感谢!

References

Bai Jin. 1993. The Precambrian Geology and Pb-Zn Mineralization in the Northern Margin of North China Platform [M]. Beijing: Geological

- Publishing House, 102~104 (in Chinese with English abstract).
- Ballouard C, Branquet Y, Tartese R, *et al.* 2016. Nb-Ta fractionation in peraluminous granites: A marker of the magmatic-hydrothermal transition-Reply[J]. *Geology*, 44(7): 231~234.
- Batchelor R A and Bowden P. 1985. Petrogenetic interrelation of granitoid rock series using muhication[J]. *Chemical Geology*, 48(1): 43~55.
- Bau M. 1996. Controls on the fractionation of isovalent trace elements in magmatic and aqueous systems: Evidence from Y/Ho, Zr/Hf, and lanthanide tetrad effect[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 123: 323~333.
- Black L P, Kamo S L, Allen C M, *et al.* 2003. TEMORA 1: A new zircon standard for Phanerozoic U-Pb geochronology[J]. *Chemical Geology*, 200(1~2): 155~170.
- Blichert-Toft J and Albaredè F. 1997. The Lu-Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 148(1~2): 243~258.
- Breiter K, Gardenová N, Kanický V, *et al.* 2013. Gallium and germanium geochemistry during magmatic fractionation and post-magmatic alteration in different types of granitoids: A case study from the Bohemian Massif (Czech Republic) [J]. *Geologica Carpathica*, 64: 171~180.
- Breiter K, Lamarão C N, Borges R M K, *et al.* 2014. Chemical characteristics of zircon from A-type granites and comparison to zircon of S-type granites[J]. *Lithos*, 192~195: 208~225.
- Cai J, Liu F L and Liu C. 2020. A unique Paleoproterozoic HP-UHT metamorphic event recorded by the Bengbu mafic granulites in the southwestern Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton [J]. *Gondwana*

- Research, 80: 244~274.
- Cai J, Liu F L, Liu P, *et al.* 2017. Discovery of granulite-facies metamorphic rocks in the Ji'an area, northeastern Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton: Metamorphic *P-T* evolution and geological implications [J]. *Precambrian Research*, 303: 626~640.
- Cai J, Liu F L, Liu P, *et al.* 2019. Metamorphic *P-T* evolution and tectonic implications of pelitic granulites in the Ji'an area, northeastern Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton-Science direct [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 191(2): 104197.
- Chappell B W and White A J R. 1992. I- and S-type granities in the Lachlan Fold Belt. *Transaction of the Royal Society of Edinburgh* [J]. *Earth Science*, 83(1~2): 1~26.
- Che H W, Zhou Z H, Ma X H, *et al.* 2015. Geochemical characteristics, zircons U-Pb ages and Hf isotopic composition of the dacite porphyry from Zhengguang Au deposit in northern Great Xing'an Range [J]. *Acta Geologica Sinica*, 89(8): 1 417~1 436.
- Chen J S, Yang Z Z, Tian D X, *et al.* 2021. Geochronological framework of Paleoproterozoic intrusive rocks and its constraints on tectonic evolution of the Liao-Ji Belt, Sino-Korean Craton [J]. *Journal of earth Science*, 32(1): 8~24.
- Chudik P, Uher P, Kohut M, *et al.* 2008. Accessory columbite to tantalite, tapiolite and zircon: Products of extreme fractionation in highly peraluminous pegmatitic granite from the Povazsky Inovec Mountains, Western Carpathians, Slovakia [J]. *Journal of Geosciences*, 53: 323~334.
- Clemens J D, John R, H and White A J R. 1986. Origin of an A-type granite: Experimental constraints [J]. *American Mineralogist*, 71(3~4): 317~324.
- Chen Bin, Li Zhuang, Wang Jialin, *et al.* 2016. Liaodong Peninsula ~2.2 Ga magmatic event and its geological significance [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 46(2): 303~320 (in Chinese with English abstract).
- Deering C D, Keller B, Schoene B, *et al.* 2016. Zircon record of the plutonic-volcanic connection and protracted rhyolite melt evolution [J]. *Geology*, 44: 267~270.
- Defant M J and Drummond M S. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere [J]. *Nature*, 347: 662~665.
- Dong Chunyan, Wan Yusheng, Xu Zhongyuan, *et al.* 2012. SHRIMP zircon U-Pb dating of late Paleoproterozoic kondalites in the Daqing Mountain area on North China Craton [J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 42(12): 1 851~1 862 (in Chinese with English abstract).
- Dong Y, Bi J H, Xing D H, *et al.* 2019. Geochronology and geochemistry of Liaohu Group and Liaoji granitoid in the Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton: Implications for petrogenesis and tectonic evolution [J]. *Precambrian Research*, 332: 105309.
- Faure M, Lin W, Monié P, *et al.* 2004. Palaeoproterozoic arc magmatism and collision in Liaodong Peninsula (north-east China) [J]. *Terra Nova*, 16(2): 75~80.
- Foley S, Tiepolo M and Vannucci R. 2002. Growth of early continental crust controlled by melting of amphibolite in subduction zones [J]. *Nature*, 417(6 891): 837~840.
- Fu Yangang, Hu Guyue, Li Yanhe, *et al.* 2018. LA-MC-ICP-MS U-Pb zircon ages of Paleoproterozoic migmatitized granites from the Houxianyu Borate Deposit, Eastern Liaoning constraints on the evolution of the Borate Deposits [J]. *Geological Review*, 64(2): 405~417 (in Chinese with English abstract).
- Gelman S E, Deering C D, Bachmann O, *et al.* 2014. Identifying the crystal graveyards remaining after large silicic eruptions [J]. *Earth Planet Science Letters*, 403: 299~306.
- Griffin W L, Pearson N J, Belousova E, *et al.* 2000. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LA-MC-ICP MS analysis of zircon megacrysts in kimberlites [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(1): 133~147.
- Guan J, Geng Q, Peng Z, *et al.* 2016. Petrology, petrochemistry and zircon U-Pb dating and Hf isotope features of Xiamari granites in Tanggula Magmatic Belt, Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Acta Geologica Sinica*, 90(2): 304~333.
- Guo Feng, Fan Weiming, Li Chaowen, *et al.* 2007. U-Pb ages, Hf isotope and trace element compositions of captured zircons of the Paleocene adakites in the Yanji area, NE China: Implications for magmatic evolution of intermediate-felsic magmas [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(23): 413~422 (in Chinese with English abstract).
- Griffin W L, Wang Xiang, Jackson S E, *et al.* 2002. Zircon chemistry and magma mixing, SE China: In-situ analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtan igneous complexes [J]. *Lithosphere*, 61(3): 237~269.
- Hoskin P W O and Black L P. 2000. Metamorphic zircon formation by solid-state recrystallization of protolith igneous zircon [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 18: 423~439.
- Huang X L, Wang R C, Chen X M, *et al.* 2002. Vertical variations in the mineralogy of the Yichun topaz-lepidolite granite, Jiangxi Province, southern China [J]. *The Canadian Mineralogist*, 40(4): 1 047~1 068.
- Jiang Chunchao. 1987. *Precambrian Geology of Eastern Part of Liaoning and Jilin* [M]. Shenyang: Liaoning Science and Technology Publishing House, 1~321 (in Chinese with English abstract).

- Kai Z L, Xu Z H, Wang Z Y, *et al.* 2019. Petrogenesis and tectonic implications of two types of Liaoji granitoid in the Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 331: 105369.
- King P L, Chappell B W, Allen C M, *et al.* 2001. Are A-type granites the high-temperature felsic granites? Evidence from fractionated granites of the Wangrah Suite[J]. *Australian Journal of Earth Science*, 48(4): 501~514.
- King P L, White A J R, Chappell B W, *et al.* 1997. Characterization and origin of aluminous A-type granites from the Lachlan Fold Belt, Southeastern Australia[J]. *Journal of Petrology*, 38(3): 371~391.
- Knudsen T L, Griffin W L, Hartz E H, *et al.* 2001. In-situ hafnium and lead isotope analyses of detrital zircons from the Devonian sedimentary basin of NE Greenland: A record of repeated crustal reworking[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 141(1): 83~94.
- Li S Z and Zhao G C. 2007. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of the Liaoji granitoids: Constraints on the evolution of the Paleoproterozoic Jiao-Liao-Ji belt in the Eastern Block of the North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 158: 1~16.
- Linnen R L and Cuney M. 2004. Granite-related rare-element deposits and experimental constraints on Ta-Nb-W-Sn-Zr-Hf mineralization [A]. Linnen R L and Samson I M. *Rare-Element Geochemistry and Mineral Deposits* [C]. *GAC Short Course Notes*, 17: 45~68.
- Li Z and Chen B. 2014. Geochronology and geochemistry of the Paleoproterozoic metabasalts from the Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton: Implications for petrogenesis and tectonic setting[J]. *Precambrian Research*, 255: 653~676.
- Li Z, Meng E, Wang C Y, *et al.* 2019. Early Precambrian tectono-thermal events in Southern Jilin Province, China: Implications for the evolution of neoproterozoic to Paleoproterozoic crust in the northeastern North China Craton[J]. *Mineralogy and Petrology*, 113(2): 185~205.
- Liu Fulai, Liu Pinghua, Wang Fang, *et al.* 2015. Progresses and overviews of voluminous meta-sedimentary series within the Paleoproterozoic Jiao-Liao-Ji orogenic/mobile belt, North China Craton[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(10): 2816~2846 (in Chinese with English abstract).
- Liu F L, Liu C H, Itano K, *et al.* 2017a. Geochemistry, U-Pb dating, and Lu-Hf isotopes of zircon and monazite of porphyritic granites within the Jiao-Liao-Ji orogenic belt: Implications for petrogenesis and tectonic setting[J]. *Precambrian Research*, 300: 78~106.
- Liu F L, Zhang J and Liu C H. 2017b. Archean to Paleoproterozoic Evolution of the North China Craton: Preface[J]. *Precambrian Research*, 303: 1~9.
- Liu F L, Liu L S, Cai J, *et al.* 2017c. A widespread Paleoproterozoic partial melting event within the Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton: Zircon U-Pb dating of granitic leucosomes within pelitic granulites and its tectonic implications[J]. *Precambrian Research*, 326: 155~173.
- Liu J, Zhang J, Liu Z H, *et al.* 2018. Geochemical and geochronological study on the Paleoproterozoic rock assemblage of the Xiuyan region: New constraints on an integrated rift-and-collision tectonic process involving the evolution of the Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 310: 179~197.
- Liu J, Zhang J, Liu Z H, *et al.* 2021. Late Paleoproterozoic crustal thickening of the Jiao-Liao-Ji belt, North China Craton: Insights from ca. 1.95 - 1.88Ga syn-collisional adakitic granites[J]. *Precambrian Research*, 355: 106120.
- Liu J, Zhang J, Yin C Q, *et al.* 2020. Synchronous A-type and adakitic granitic magmatism at ca. 2.2 Ga in the Jiao-Liao-Ji belt, North China Craton: Implications for rifting triggered by lithospheric delamination[J]. *Precambrian Research*, 342: 105629.
- Liu J H, Liu F L, Ding Z J, *et al.* 2014. Geochronology, petrogenesis and tectonic implications of Paleoproterozoic granitoid rocks in the Jiaobei Terrane, North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 255(2): 685~698.
- Liu Pinghua, Cai Jia and Zou Lei. 2017. Metamorphic *P-T-t* path and its geological implication of the Sanjiazhi garnet amphibolites from the northern Liaodong Peninsula, Jiao-Liao-Ji belt: Constraints on phase equilibria and Zircon U-Pb dating[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33(9): 2649~2674 (in Chinese with English abstract).
- Liu P H, Liu F L, Cai J, *et al.* 2017. Discovery and geological significance of high-pressure mafic granulites in the Pingdu-Anqiu area of the Jiaobei Terrane, the Jiao-Liao-Ji Belt, the North China Craton [J]. *Precambrian Research*, 303: 445~469.
- Lu Xiaoping, Wu Fuyuan, Zhang Yanbin, *et al.* 2004a. Emplacement age and tectonic setting of the Paleoproterozoic Liao-Ji granite in Tonghua area, southern Jilin Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20(3): 381~392 (in Chinese with English abstract).
- Lu Xiaoping, Wu Fuyuan, Lin Jingqian, *et al.* 2004b. Geochronological successions of the early Precambrian granitic magmatism in South Liaodong peninsula and its constraints on tectonic evolution of the North China Craton[J]. *Chinese Journal of Geology*, 39(1): 123~138 (in Chinese with English abstract).
- Lu X P, Wu F Y, Guo J H, *et al.* 2006. Zircon U-Pb geochronological constraints on the Paleoproterozoic crustal evolution of the Eastern block in the North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 146: 138~164.

- Ludwig K R. 2003. Mathematical-statistical treatment of data and errors for $^{230}\text{Th}/\text{U}$ geochronology[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 52(1): 631~656.
- Luo Y, Sun M, Zhao G C, *et al.* 2008. A comparison of U-Pb and Hf isotopic compositions of detrital zircons from the North and South Liaohe Groups: Constraints on the evolution of the Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 163(3-4): 279~306.
- Ma Lijie, Cui Yingchun, Liu Junlai, *et al.* 2007. Geochemical characteristics and the tectonic setting of amphibolites of the North Liaohe Group in Liaodong area[J]. *Journal of Shanxi University(Natural Science Edition)*, 30(4): 515~523(in Chinese with English abstract).
- Maniar P and Piccoli P. 1989. Tectonic discrimination of granitoids[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 101: 635~643.
- Meng E, Liu F L, Liu P H, *et al.* 2014. Petrogenesis and tectonic significance of Paleoproterozoic meta-mafic rocks from central Liaodong Peninsula, northeast China: Evidence from zircon U-Pb dating and in situ Lu-Hf isotopes, and whole-rock geochemistry[J]. *Precambrian Research*, 247: 92~109.
- Miller C F and Mittlefehldt D W. 1982. Depletion of light rare-earth elements in felsic magmas[J]. *Geology*, 10(3): 129~133.
- Miller C F and Mittlefehldt D W. 1984. Extreme fractionation in felsic magma chambers: A product of liquid-state diffusion or fractional crystallization? [J]. *Earth Planetary Science Letters*, 68(1): 151~158.
- Nasdala L, Hofmeister W, Norberg N, *et al.* 2008. Zircon M257: A homogeneous natural reference material for the ion microprobe U-Pb analysis of zircon[J]. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 32(3): 247~265.
- Patchett P J, Vervoort J D, Söderlund U, *et al.* 2004. Lu-Hf and Sm-Nd isotopic systematics in chondrites and their constraints on the Lu-Hf properties of the Earth[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 222: 29~41.
- Pearce J A, Harris N B W and Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 25: 956~983.
- Peccerillo R and Taylor S R. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 50: 63~81.
- Qin Ya. 2013. Geochronological Constraints in the Tectonic Evolution of the Liao-Ji Paleoproterozoic Rift Zone[D]. Changchun: Jilin University, 1~156(in Chinese with English abstract).
- Ren Yunwei, Wang Huichu, Kang Jianli, *et al.* 2017. Paleoproterozoic magmatic events in the Hupiyu Area in Yingkou, Liaoning Province and their geological significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 91(11): 2456~2472(in Chinese with English abstract).
- Rapp R P, Shimizu N and Norman M D. 2003. Growth of early continental crust by partial melting of eclogite[J]. *Nature*, 425: 605~609.
- Song Yunhong, Yang Fengchao, Yan Guolei, *et al.* 2016. SHRIMP U-Pb and Hf isotopic compositions of Paleoproterozoic granites from the Eastern part of Liaoning Province and their tectonic significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 90(10): 2620~2636(in Chinese with English abstract).
- Söderlund U, Patchett P J, Vervoort J D, *et al.* 2004. The ^{176}Lu decay constant determined by Lu-Hf and U-Pb isotope systematics of Precambrian mafic intrusions[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 219(3~4): 311~324.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [A]. Saunderson A D and Norry M J. *Magmatism in Oceanic Basins* [C]. *Geological Society Special Publication*, 42: 313~345.
- Tam P Y, Zhao G C, Liu F L, *et al.* 2011. Timing of metamorphism in the Paleoproterozoic Jiao-Liao-Ji Belt: New SHRIMP U-Pb zircon dating of granulites, gneisses and marbles of the Jiaobei massif in the North China Craton[J]. *Gondwana Research*, 19(1): 150~162.
- Tam P, Zhao G, Sun M, *et al.* 2012. Metamorphic P-T path and tectonic implications of medium-pressure pelitic granulites from the Jiaobei massif in the Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 220: 177~199.
- Teng Dawei, Wang Yukui, Hao Xinjian, *et al.* 2017. Petrogenesis of Liaoji granites in Yongdian area of Liaoning and their constraints on tectonic evolution of Liao-Ji mobile belt[J]. *Globe Geology*, 36(4): 1100~1115(in Chinese with English abstract).
- Wan Y S, Song B, Liu D Y, *et al.* 2006. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of Palaeoproterozoic metasedimentary rocks in the North China Craton: Evidence for a major Late Palaeoproterozoic tectonothermal event[J]. *Precambrian Research*, 149: 249~271.
- Wang C C, Liu Y C, Zhang P G, *et al.* 2017. Zircon U-Pb geochronology and geochemistry of two types of Paleoproterozoic granitoids from the southeastern margin of the North China Craton: Constraints on petrogenesis and tectonic significance[J]. *Precambrian Research*, 303: 268~290.
- Wang Huichu, Lu Songnian, Chu Hang, *et al.* 2011. Zircon U-Pb age and tectonic setting of meta-basalts of Liaohe Group in Helan Area, Liaoyang, Liaoning Province[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 41(5): 1322~1334(in Chinese with English abstract).

- Wang Pengsen, Dong Yongsheng, Li Fuqiang, *et al.* 2017. Paleoproterozoic granitic magmatism and geological significance in Huanghuadian area, eastern Liaoning Province [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33 (9): 2 708~2 724 (in Chinese with English abstract).
- Wang X, Griffin W L and Chen J. 2010. Hf contents and Zr/Hf ratios in granitic zircons [J]. *Geochemical Journal*, 44 (1): 65~72.
- Wang Xiangjian, Liu Jianhui and Ji Lei. 2017. Zircon U-Pb chronology, geochemistry and their petrogenesis of Paleoproterozoic monzogranitic gneisses in Kuandian area, eastern Liaoning Province, Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33 (9): 2 689~2 707 (in Chinese with English abstract).
- Wang X P, Chong W, Peng P, *et al.* 2016. Petrogenesis of the 2 115 Ma Haicheng mafic sills from the Eastern North China Craton: Implications for an intra-continental rifting [J]. *Gondwana Research: International Geoscience Journal*, 39: 347~364.
- Wang X P, Oh C W, Peng P, *et al.* 2020. Petrogenesis of ~2.1 gamafic and granitic magmatism and tectonic implication of Jiaobei Terrane in North China Craton [J]. *Lithos*, 378~379.
- Wang X P, Peng P, Wang C, *et al.* 2017. Nature of three episodes of Paleoproterozoic magmatism (2 180 Ma, 2 115 Ma and 1 890 Ma) in the Liaoji belt, North China with implications for tectonic evolution [J]. *Precambrian Research*, 298: 252~267.
- Whalen J B, Currie K L and Chappell B W. 1987. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95: 407~419.
- Williams I S. 1998. U-Th-Pb geochronology by ion microprobe [A]. McKibben M A, Shanks W C III and Ridley W I. *Applications of Microanalytical Techniques to Understanding Mineralizing Processes* [C]. *Reviews in Economic Geology*, 7: 1~35.
- Wu F Y, Walker R J, Yang Y H, *et al.* 2006. The chemical-temporal evolution of lithospheric mantle underlying the North China Craton [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70: 5 013~5 034.
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Zheng Yongfei, *et al.* 2007. Lu-Hf isotopic systematics and their applications in petrology [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23 (2): 185~220 (in Chinese with English abstract).
- Wu Fuyuan, Liu Xiaochi, Ji Weiqiang, *et al.* 2017. Highly fractionated granites: Recognition and research [J]. *Science China Earth Sciences*, 47 (7): 745~765 (in Chinese with English abstract).
- Xu W, Liu F L, Tian Z H, *et al.* 2018. Source and petrogenesis of Paleoproterozoic meta-mafic rocks intruding into the North Liaohe Group: Implications for back-arc extension prior to the formation of the Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton [J]. *Precambrian Research*, 307: 66~81.
- Xu W, Liu F L, Liu P H, *et al.* 2019a. Paleoproterozoic transition in tectonic regime recorded by the Eastern Block of the North China Craton: Evidence from detrital zircons of the Langzishan Formation, Jiao-Liao-Ji Belt [J]. *International Geology Review*, 62 (3): 1~18.
- Xu W and Liu F L. 2019. Geochronological and geochemical insights into the tectonic evolution of the Paleoproterozoic Jiao-Liao-Ji Belt, Sino-Korean Craton [J]. *Earth-Science Reviews*, 193: 162~198.
- Yang Fengchao, Song Yunhong and Zhao Yuyan. 2017. Zircon SHRIMP U-Pb age and isotope of Granite in Panling concentration area in Liaoning and its geological significance [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 47 (5): 1 429~1 441 (in Chinese with English abstract).
- Yang Hong, Wang Wei and Liu Jianhui. 2017. Zircon U-Pb dating and its geological significance of granitic pegmatites from the Kuandian and Sanjiazui area in eastern Liaoning Province [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33 (9): 2 675~2 688 (in Chinese with English abstract).
- Yang Jinhui, Wu Fuyuan, Xie Leiwen, *et al.* 2007. Petrogenesis and tectonic implications of Kuangdougou syenites in the Liaodong Peninsula, east North China Craton: Constraints from in-situ zircon U-Pb ages and Hf isotopes [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23 (2): 263~276 (in Chinese with English abstract).
- Yuan L L, Zhang X H and Xue F H. 2015. Two episodes of Paleoproterozoic mafic intrusions from Liaoning Province, North China Craton: Petrogenesis and tectonic implications [J]. *Precambrian Research*, 264: 119~139.
- Yang Mingchun, Chen Bin and Yan Cong. 2015a. Petrogenesis of paleoproterozoic granites from Jiao-Liao-Ji belt of North China Craton and their tectonic implications [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 37 (5): 31~51 (in Chinese with English abstract).
- Yang Mingchun, Chen Bin and Yan Cong. 2015b. Petrological, geochronological, geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic constraints on the petrogenesis of the Shuangcha Paleoproterozoic megaporphyritic granite in the Southern Jilin Province: Tectonic implications [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31 (6): 1 573~1 588 (in Chinese with English abstract).
- Yang Zhongjie. 2021. Zircon U-Pb ages and petrogeochemical characteristics of Paleoproterozoic granitic pegmatites in Xiuyan area, eastern Liaoning Province, and their geological significance [J]. *Geological Review*, 67 (2): 523~542 (in Chinese with English abstract).
- Yang Yuwei, Yu Chao, Su Te, *et al.* 2020. Petrogenesis of the Liaohe Group from the Heigou area in the eastern Liaoning Province: Constraints on tectonic evolution of the Liao-Ji orogenic belt [J]. *Acta Geologica Sinica*, 94 (5): 1 397~1 417 (in Chinese with English abstract).
- Yu Jiejiang, Yang Debin, Feng Hong, *et al.* 2007. Age of the plagioclase amphibolite protolith from Haicheng, Southern Liaoning: Evidence

- from zircon LA-ICP-MS U-Pb dating[J]. *Global Geology*, 26(4): 391~408(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: 6~25.
- Zhang Qi, Li Chengdong, Wang Yan, *et al.* 2005. Mesozoic high-Sr and Low-Yb granitoids and low-Sr and high-Yb granitoids in eastern China: Comparison and geological implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(6): 1 527~1 537(in Chinese with English abstract).
- Zhang Qiusheng, Yang Zhensheng and Liu Liandeng. 1988. Early Crust and Mineral Deposits of Liaodong Peninsula[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~332(in Chinese with English abstract).
- Zhang Shuai, Zhu Guang, Gu Chengchuan, *et al.* 2017. Discussion on the southeastern boundary location of the Liao-Ji orogenic belt[J]. *Chinese Science Bulletin*, 62(24): 2 814~2 828(in Chinese with English abstract).
- Zhang W, Liu F L, Cai J, *et al.* 2018. Geochemistry, zircon U-Pb dating and tectonic implications of the Palaeoproterozoic Ji'an and Laoling groups, northeastern Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton. [J]. *Precambrian Research*, 314: 264~287.
- 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: 177~202.
- Zhao G C, Cawood P A, Li S Z, *et al.* 2012. Amalgamation of the North China Craton: Key issues and discussion[J]. *Precambrian Research*, 222~223: 56~76.
- Zhu K, Liu Z H, Xu Z Y, *et al.* 2019. Petrogenesis and tectonic implications of two types of Liaoji granitoid in the Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 331: 105369.
- Zou Y, Zhai M G, Santosh M, *et al.* 2017. High-pressure pelitic granulites from the Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton: A complete *P-T* path and its tectonic implications[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 134: 103~121.
- Zou Y, Zhai M G, Santosh M, *et al.* 2018. Contrasting *p-T-t* paths from a Paleoproterozoic metamorphic orogen: Petrology, phase equilibria, zircon and monazite geochronology of metapelites from the Jiao-Liao-Ji belt, North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 311: 74~97.
- 陈 斌, 李 壮, 王家林, 等. 2016. 辽东半岛~2.2 Ga 岩浆事件及其地质意义[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 46(2): 303~320.
- 董春艳, 万渝生, 徐仲元, 等. 2012. 华北克拉通大青山地区古元古代晚期孔兹岩系: 锆石 SHRIMP U-Pb 定年[J]. *中国科学: 地球科学*, 42(12): 1 851~1 862.
- 付燕刚, 胡古月, 李延河, 等. 2018. 辽宁后仙峪硼矿区混合岩的 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄: 对硼矿成矿演化的制约[J]. *地质评论*, 64(2): 405~417.
- 姜春潮. 1987. 辽吉东部前寒武纪地质[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1~321.
- 郭 锋, 范蔚茗, 李超文, 等. 2007. 延吉地区古新世埃达克岩捕获锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素和微量元素地球化学对区域中酸性岩浆演化的指示[J]. *岩石学报*, 23(2): 413~422.
- 刘福来, 刘平华, 王 舫, 等. 2015. 胶-辽-吉古元古代造山/活动带巨量变沉积岩系的研究进展[J]. *岩石学报*, 31(10): 2 816~2 846.
- 路孝平, 吴福元, 张艳斌, 等. 2004a. 吉林南部通化地区古元古代辽吉花岗岩的侵位年代与形成构造背景[J]. *岩石学报*, 20(3): 381~392.
- 路孝平, 吴福元, 林景仟, 等. 2004b. 辽东半岛南部早前寒武纪花岗岩岩浆作用的年代学格架[J]. *地质科学*, 39(1): 123~138.
- 刘平华, 蔡 佳, 邹 雷. 2017. 辽东半岛北部三家子石榴斜长角闪岩变质演化 *P-T-t* 轨迹及其地质意义: 来自相平衡模拟与锆石 U-Pb 定年的约束[J]. *岩石学报*, 33(9): 2 649~2 674.
- 马立杰, 崔迎春, 刘俊来, 等. 2007. 辽东北辽河群斜长角闪岩的地球化学特征及构造背景[J]. *山西大学学报(自然科学版)*, 30(4): 515~523.
- 秦 亚. 2013. 辽吉古元古代裂谷带构造演化的年代学制约[D]. 长春: 吉林大学, 1~156.
- 任云伟, 王惠初, 康健丽, 等. 2017. 辽宁营口虎皮峪地区古元古代岩浆事件及地质意义[J]. *地质学报*, 91(11): 2 456~2 472.
- 滕大伟, 王玉奎, 郝鑫健, 等. 2017. 辽宁永甸地区辽吉花岗岩成因及对辽吉活动带构造演化的制约[J]. *世界地质*, 36(4): 1 100~1 115.
- 宋运红, 杨凤超, 闫国磊, 等. 2016. 辽东地区古元古代花岗岩 SHRIMP U-Pb 年龄、Hf 同位素组成及构造意义[J]. *地质学报*, 90(10): 2 620~2 636.
- 王鹏森, 董永胜, 李富强, 等. 2017. 辽东黄花园地区古元古代花岗岩岩浆作用及其地质意义[J]. *岩石学报*, 33(9): 2 708~2 724.
- 王祥俭, 刘建辉, 冀 磊. 2017. 胶-辽-吉带辽东宽甸地区古元古代二长(正长)花岗质片麻岩的锆石 U-Pb 年代学、地球化学及成因[J]. *岩石学报*, 33(9): 2 689~2 707.
- 王慧初, 陆松年, 初 杭, 等. 2011. 辽阳河栏镇地区辽河群中变质

附中文参考文献

白 瑾. 1993. 华北陆台北缘前寒武纪地质及铅锌矿成矿作用[M]. 北京:地质出版社, 102~104.

- 基性熔岩的锆石 U-Pb 年龄与形成构造背景[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 41(5): 1 322~1 334.
- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 等. 2007. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用[J]. 岩石学报, 23(2): 185~220.
- 吴福元, 刘小驰, 纪伟强, 等. 2017. 高分异花岗岩的识别与研究[J]. 中国科学: 地球科学, 47(7): 745~765.
- 杨凤超, 宋运红, 赵玉岩. 2017. 辽宁盘岭矿集区花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄、Hf 同位素组成及地质意义[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 47(5): 1 429~1 441.
- 杨红, 王伟, 刘建辉. 2017. 辽东宽甸和三家子地区花岗伟晶岩的锆石 U-Pb 年代学及其地质意义[J]. 岩石学报, 33(9): 2 675~2 688.
- 杨进辉, 吴福元, 谢烈文, 等. 2007. 辽东矿洞沟正长岩成因及其构造意义: 锆石原位微区 U-Pb 年龄和 Hf 同位素制约[J]. 岩石学报, 23(2): 263~276.
- 杨明春, 陈斌, 闫聪. 2015a. 华北克拉通胶-辽-吉带古元古代条痕状花岗岩成因及其构造意义[J]. 地球科学与环境学报, 37(5): 31~51.
- 杨明春, 陈斌, 闫聪. 2015b. 吉南地区古元古代双岔巨斑花岗岩成因及其构造意义: 岩石学、年代学、地球化学和 Sr-Nd-Hf 同位素证据[J]. 岩石学报, 31(6): 1 573~1 588.
- 杨仲杰. 2021. 辽东岫岩地区古元古代花岗伟晶岩锆石 U-Pb 年龄, 地球化学特征及地质意义[J]. 地质论评, 67(2): 523~542.
- 杨玉伟, 余超, 苏特, 等. 2020. 辽东黑沟地区辽河群成因及其对辽吉造山带构造演化的制约[J]. 地质学报, 94(5): 1 397~1 417.
- 于介江, 杨德彬, 冯虹, 等. 2007. 辽南海城斜长角闪岩原岩的形成时代: 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年证据[J]. 世界地质, 26(4): 391~408.
- 张秋生, 杨振升, 刘连登. 1988. 辽东半岛早期地壳与矿床[M]. 地质出版社, 1~332.
- 张帅, 朱光, 顾承串, 等. 2017. 辽-吉造山带东南边界位置探讨[J]. 科学通报, 62(24): 2 814~2 828.
- 张旗, 李承东, 王焰, 等. 2005. 中国东部中生代高 Sr 低 Yb 和低 Sr 高 Yb 型花岗岩: 对比及其地质意义[J]. 岩石学报, 1(6): 1 527~1 537.