

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2020.293>



辽东地区中生代花岗岩的侵位时代： 锆石和独居石 U-Pb 年代学

胡国辉^{1,2}, 张琪琪¹, 李建锋^{1,2}, 张拴宏^{1,2}

1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081

2. 自然资源部古地磁与古构造重建重点实验室, 北京 100081

摘要: 辽东地区中生代岩浆活动强烈, 伴随着大规模的金成矿作用. 五龙金矿是该地区规模最大的典型石英脉型金矿床, 金矿体主要赋存于侏罗纪片麻状花岗岩和早白垩世花岗闪长岩中. 因此, 该地区中生代岩浆活动对金成矿作用具有显著的制约. 选择辽东五龙金矿区片麻状花岗岩和三股流岩体进行岩相学、锆石和独居石 U-Pb 年代学研究. 3 个片麻状花岗岩的岩性均为黑云母二长花岗岩, 矿物发生强烈的韧性变形, 呈定向排列, 锆石 U-Pb 年龄分别为 159.2 ± 1.8 Ma、 160.2 ± 1.8 Ma 和 156.1 ± 1.2 Ma, 三股流黑云母二长花岗岩样品的锆石 U-Pb 年龄为 123.8 ± 1.2 Ma. 花岗岩样品中的独居石矿物学特征和化学组成显示均为岩浆成因, 3 个片麻状花岗岩的独居石年龄分别为 158.1 ± 1.9 Ma、 157.5 ± 1.4 Ma 和 153.5 ± 1.4 Ma, 三股流岩体的独居石 U-Pb 年龄为 123.4 ± 1.5 Ma. 晚侏罗世片麻状花岗岩的独居石年龄比锆石年龄略小 $1.1 \sim 2.7$ Ma, 其中 2 个样品的冷却速率分别为 55.56 °C/Ma 和 57.69 °C/Ma, 表明晚侏罗世岩浆在高温阶段为一快速冷却作用过程, 可能经历了快速的地壳抬升事件. 锆石和独居石的 U-Pb 年龄结果表明片麻状花岗岩和三股流岩体分别形成于侏罗纪晚期和白垩纪早期, 结合已有研究资料, 辽东五龙矿集区主要发生了晚侏罗世和早白垩世两期岩浆活动, 与古太平洋板块向欧亚大陆俯冲作用有关, 并伴随着早白垩世金矿的形成.

关键词: 辽东; 中生代花岗岩; 锆石和独居石 U-Pb 定年; 金矿; 地质年代学.

中图分类号: P597

文章编号: 1000-2383(2020)11-3962-20

收稿日期: 2020-05-31

Emplacement Ages of Mesozoic Granites in Liaodong Area: Constraints from Zircon and Monazite U-Pb Dating

Hu Guohui^{1,2}, Zhang Qiqi¹, Li Jianfeng^{1,2}, Zhang Shuanhong^{1,2}

1. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China

2. Key Laboratory of Paleomagnetism and Tectonic Reconstruction, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China

Abstract: The Mesozoic magmatic activities extensively developed in East Liaoning Province accompanied by large-scale gold mineralization. Wulong gold deposit is a representative largest quartz-vein type gold deposit, and the gold ore bodies mainly hosted in Jurassic gneiss biotite granite and Early Cretaceous granodiorite. Therefore, Mesozoic magmatism has a significant genetic relation with the gold mineralization. In this paper, it presents zircon and monazite U-Pb dating of gneiss granite and Sanguliu rock mass in Wulong gold ore-concentrated district to constrain their emplacement ages. The gneiss granite is dominated by biotite monzogranite, the minerals of which show strong ductile deformation and are oriented. Their zircon U-Pb ages are 159.2 ± 1.8 Ma, 160.2 ± 1.8 Ma, and 156.1 ± 1.2 Ma, respectively. Zircons from Sanguliu biotite monzogranite yield a U-Pb age of

基金项目: 国家重点研发计划(No.2018YFC0603802).

作者简介: 胡国辉(1984—), 男, 助理研究员, 博士, 从事岩石学、地球化学和年代学方面的研究工作. ORCID: 0000-0003-3505-102X. E-mail: huguohui321@126.com

引用格式: 胡国辉, 张琪琪, 李建锋, 等, 2020. 辽东地区中生代花岗岩的侵位时代: 锆石和独居石 U-Pb 年代学. 地球科学, 45(11): 3962-3981.

123.8±1.2 Ma. Mineralogical characteristics and chemical compositions of monazites from four granitic samples suggest a magmatic origin. New LA-ICP-MS dating of monazites from three gneiss granite samples yielded U-Pb ages of 158.1±1.9 Ma, 157.5±1.4 Ma, and 153.5±1.4 Ma, respectively, and 123.4±1.5 Ma for Sanguliu biotite monzogranite. Monazite ages of Late Jurassic gneiss granite are 1.1–2.7 Ma younger than their zircon ages, two of which have high cooling rate of 55.56 °C/Ma and 57.69°C/Ma, suggesting a rapid cooling process and crustal uplift. Both zircon and monazite U-Pb ages indicate that the gneiss granite and Sanguliu rock mass formed during Late Jurassic and Early Cretaceous, respectively. In combination with the available data, Wulong gold ore-concentrated district mainly developed Late Jurassic and Early Cretaceous magmatic activities, which were closely related to the subduction of Paleo-Pacific plate to Eurasia continent, accompanied by Early Cretaceous gold mineralization.

Key words: East Liaoning Province; Mesozoic granite; zircon and monazite U-Pb dating; gold deposit; geochronology.

0 引言

华北东部中生代构造体制的转变导致岩石圈快速减薄,岩浆活动活跃,并引发了爆发式成矿(翟明国等,2003).辽东半岛发育大规模的中生代岩浆活动,前人将其划分为晚三叠世(233~212 Ma)、侏罗世(190~156 Ma)和早白垩世(131~117 Ma)3期(Wu *et al.*, 2005; 张朋等, 2016),其中以早白垩世岩浆活动最为强烈.根据金矿床时空分布和成矿类型,辽东地区划分为青城子矿集区、五龙矿集区和猫岭矿集区,矿化类型以石英脉型(如:五龙金矿床)和蚀变岩型金矿床(如:白云金矿床、猫岭金矿床和小佟家堡子金矿床等)为主(Deng *et al.*, 2017, 2018; 曾庆栋等, 2019).其中五龙金矿床是辽东地区具有代表性的规模最大的石英脉型金矿床,金矿体呈脉状产于中生代黑云母花岗岩中,与中生代闪长岩伴生.因此,该地区中生代岩浆活动对金成矿作用具有显著的制约.

五龙矿集区出露广泛的片麻状花岗岩,为五龙金矿体的主要赋矿围岩,前人曾将其划为古元古代混合岩或混合花岗岩(辽宁省地质矿产局, 1989; 李三忠等, 1996; 辽宁有色丹东地质勘察院, 2004. 辽宁省丹东市五龙金矿田区域地质图(1:50 000)).近年来,大量年代学和同位素数据表明五龙矿集区片麻状花岗岩形成于中—晚侏罗世(180~156 Ma; Li *et al.*, 2004; Wu *et al.*, 2005; 张朋等, 2016; 杨凤超等, 2019),这期花岗质岩石的形成与古太平洋板块北西向俯冲有关(Wu *et al.*, 2005; 杨进辉等, 2007).翟明国等(2003)认为华北克拉通东部中生代构造体制从150~140 Ma开始发生了从挤压到伸展的转变,从而引发了大规模的岩浆作用和成矿.五龙矿集区中—晚侏罗世片麻状花岗岩侵位之后普遍经历了挤压和伸展两期变形改造作用,黑云母、白云母和钾长石⁴⁰Ar/³⁹Ar年代学结

果表明早期推覆挤压事件发生于~143 Ma,后期地壳伸展发生在121~113 Ma之间(杨进辉等, 2004).因此,精确的年代学研究有助于理解区域岩浆演化及其与成矿的关系.

锆石 U-Pb 定年是目前常用的同位素定年方法,常用来测定各类岩石的形成时代,其 U-Pb 同位素体系的封闭温度相对较高(>800 °C, Cherniak and Watson, 2001; Cherniak, 2010),难以获得中低温条件下的生长记录.而其他定年方法(如磷灰石、金红石、黑云母、白云母和钾长石等热年代学)的同位素体系封闭温度相对较低(<500 °C, Spear and Parrish, 1995; Ganguly and Tirone, 2009),不容易记录 800~500 °C 区间的年代学信息.独居石的 U-Pb 同位素体系的封闭温度(~700 °C, Foster *et al.*, 2002; Kohn and Malloy, 2004)恰好位于这一温度范围,能够较好地记录岩浆侵位过程和后期构造事件初始阶段矿物的生长信息,从而为岩浆高温阶段热演化和冷却速率提供制约(Gasser *et al.*, 2015; Shazia *et al.*, 2015).本文对辽东五龙金矿区片麻状花岗岩和三股流花岗岩体进行锆石和独居石 U-Pb 年代学分析,为探讨辽东地区中生代岩浆活动规律及其与金成矿关系提供制约.

1 地质背景

辽东半岛位于华北克拉通北缘东段,郯庐断裂带以东地区(图1),以发育中国最古老的岩石为特征(> 3.8 Ga, Liu *et al.*, 1992; Song *et al.*, 1996; Wan *et al.*, 2005),主要由北部辽吉地块、南部辽南地块和中部的古元古代辽吉造山带组成.该地区基底岩石以太古宙变质表壳岩和古元古代浅变质沉积岩和火山岩为主,其上被新元古代—震旦系沉积地层覆盖(辽宁省地质矿产局, 1989).太古宙岩石主要由~2.5 Ga 的 TTG 岩石(路孝平等, 2004)和新太

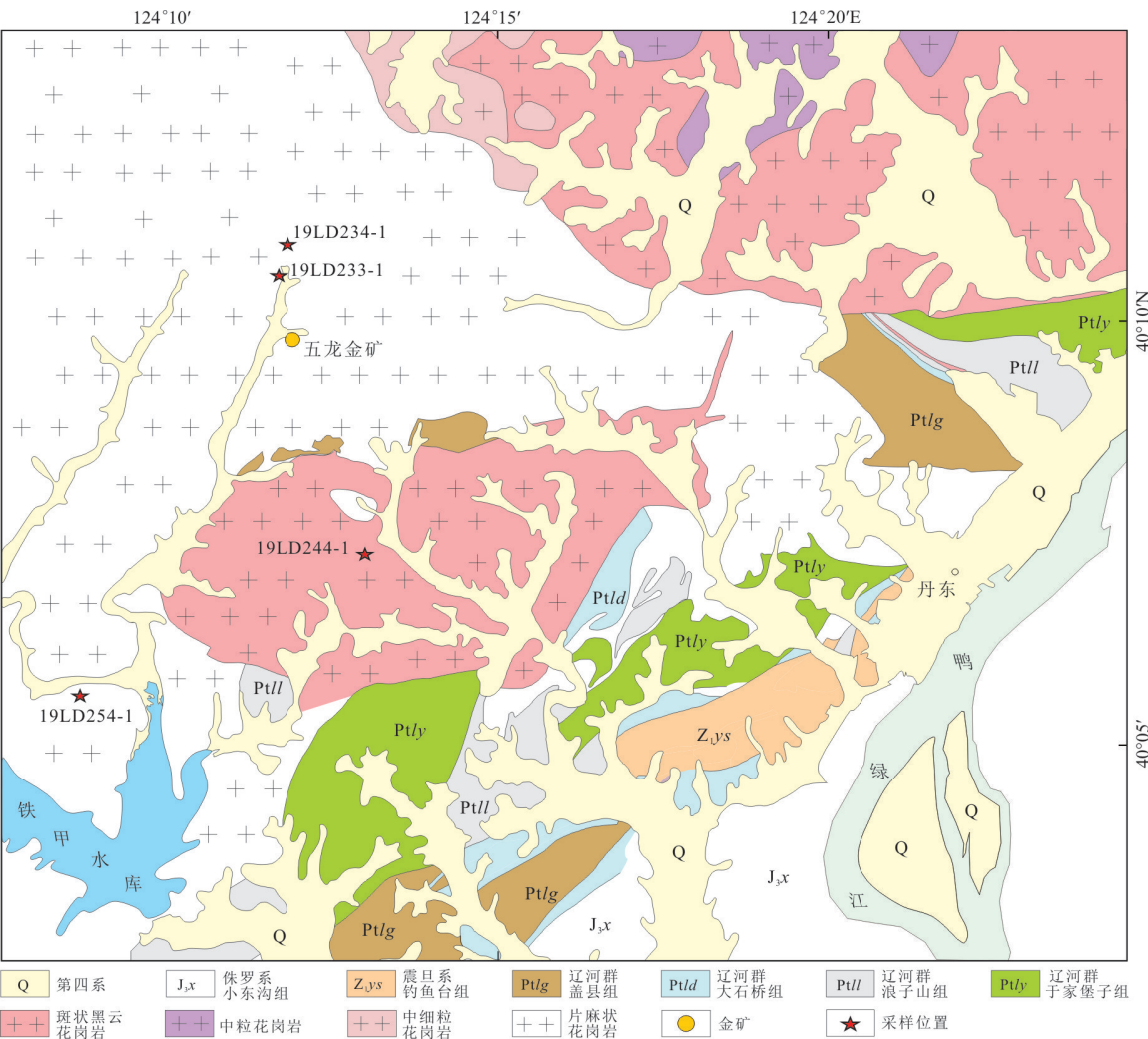


图1 辽东地区五龙金矿区地质简图

Fig.1 Simplified geological map of Wulong gold field, Liaodong area

据辽宁有色丹东地质勘察院,2004. 辽宁省丹东市五龙金矿田区域地质图(1:50 000)

古代鞍山群组成. 古元古代地层以辽河群为主,被大量的花岗质和镁铁质岩体(脉)侵入(路孝平等, 2004; Luo *et al.*, 2004, 2008; Lu *et al.*, 2006; 李壮等, 2015), 辽河群地层在辽东地区大面积出露,为一套中—低级变质的陆源碎屑岩—海相碳酸盐建造,包括片岩、片麻岩、大理岩和斜长角闪岩等,自下而上包括浪子山组、里尔峪组、高家峪组、大石桥组、盖县组. 辽东地区岩浆活动强烈,主要有阜平期(太古代)、吕梁期(古元古代)、印支期(三叠纪)和燕山期(侏罗纪和白垩纪)四期岩浆活动,少数岩体为印支期(杨进辉等, 2004),其中印支期和燕山期与成矿关系密切.

受古太平洋板块俯冲作用的影响(Wu *et al.*, 2005; 杨进辉等, 2007), 中生代岩浆活动在辽东地区广泛发育,以花岗质岩浆作用为主,同位素年

代学研究表明,这些花岗岩的侵位主要发生在中—晚侏罗世(190~153 Ma)和早白垩世(131~117 Ma). 中—晚侏罗世花岗岩主要为片麻状黑云母—二云母二长花岗岩、英云闪长岩和花岗闪长岩(Wu *et al.*, 2005), 岩石普遍遭受不同程度的塑性变形,早白垩世花岗岩主要由似斑状花岗岩、二长花岗岩、花岗闪长岩和闪长岩等组成(Wu *et al.*, 2005), 未遭受变形或变形很弱. 近年来大量同位素年代学研究结果表明,辽东地区存在大面积的晚三叠世岩浆活动(233~212 Ma), 包括碱性杂岩、闪长岩、辉长岩、辉绿岩和花岗岩等(Wu *et al.*, 2005; 段晓侠等, 2012; 张朋等, 2016, 2019), 其中花岗岩类是三叠纪主要的侵入岩, 岩性以二长花岗岩为主, 研究表明三叠纪岩浆活动受华北板块和扬子板块俯冲碰撞作用的影

响(杨进辉等, 2007; 段晓侠等, 2012)。

辽东地区中生代构造、岩浆活动强烈, 金矿发育, 可划分为猫岭金矿、五龙金矿和青城子金矿三个矿集区。猫岭金矿是产于变质碎屑岩中的蚀变岩型金矿床, 五龙金矿为充填在构造破碎带中的含金石英脉金矿床, 青城子金矿主要包括白云金矿、小佟家堡子金矿和林家三道沟金矿, 金矿化以蚀变岩型为主, 少量石英脉型和隐爆角砾岩型, 金矿体主要赋存在辽河群大石桥组和盖县组变质沉积岩中, 受层间破碎带控制。本文所研究的花岗岩体位于丹东市西北部五龙矿集区周围, 岩性为黑云母二长花岗岩, 糜棱变晶结构, (弱)片麻状构造, Wu *et al.* (2005) 通过对该地区片麻状花岗岩进行锆石 U-Pb 年代学研究表明其形成于中—晚侏罗世, 是该地区金矿床的主要围岩。此外, 研究区还有大量的早白垩世花岗岩体(株)侵入于侏罗纪花岗岩和元古宙地层中, 如三股流岩体(131~125 Ma, 魏俊浩等, 2003; Wu *et al.*, 2005) 和五龙背岩体(126~125 Ma; Wu *et al.*, 2005)。五龙地区仅在矿区南部出露少量的古元古代辽河群地层, 为一套中等程度变质的火山—沉积岩, 而辽河群地层在青城子矿集区分布很广泛, 并且是金矿体的主要赋矿地层。

2 样品及其岩相学特征

本次研究的 4 个花岗岩样品采样位置见图 1。花岗岩样品 19LD233-1 和 19LD234-1 采自五龙金矿北部约 3 km 处, 片麻理发育, 近东西向, 石英发生拉长定向。样品 19LD254-1 采自铁甲水库北边, 有片麻理, 表面有擦痕, 石英拉长呈丝带状。样品 19LD244-1 采自三股流岩体, 岩石风化严重, 部分花岗岩已经风化成土。

样品 19LD233-1 为糜棱岩化中细粒黑云母二长花岗岩, 片麻状构造, 主要成分为斜长石(40%)、钾长石(32%)和石英(20%), 次要成分为黑云母(5%)和白云母(1%), 副矿物为磁铁矿、磷灰石、锆石、独居石等, 蚀变矿物为绢云母和绿泥石。斜长石呈半自形、柱状, 轻微绢云母化; 钾长石呈半自形—自形、柱状, 粒径大多为 2~5 mm; 石英呈他形、粒状, 压扁、拉长定向, 局部呈塑性条带, 条带遇长石压扁, 粒径大小不一, 约 0.2~5 mm; 黑云母为自形、片状, 发生褶皱变形, 呈片麻状构造, 不同程度的绿泥石化。该样品在后期韧性剪切作用下, 岩石发生糜棱岩化, 矿

物韧性变形明显, 发生定向排列(图 2a)。

样品 19LD234-1 为糜棱岩化不等粒黑云母二长花岗岩, 片麻状构造, 主要由斜长石(30%)、钾长石(40%)和石英(22%)组成, 次要矿物为黑云母(5%)和少量白云母(1%), 副矿物有磁铁矿、磷灰石、锆石、独居石等, 蚀变矿物为绢云母、绿泥石。钾长石呈他形、粒状, 主要为正长石、条纹长石、微斜长石; 斜长石呈半自形、柱状, 轻微绢云母化; 石英为他形、粒状, 压扁、拉长定向, 挤压破碎, 局部呈塑性条带。该样品与 19LD233-1 一样, 在后期韧性剪切作用下, 发生糜棱岩化, 矿物韧性变形强烈, 定向排列(图 2b)。

样品 19LD244-1 为细粒黑云母二长花岗岩, 弱片麻状构造, 主要由钾长石(40%)、斜长石(30%)和石英(20%)组成, 次要矿物为黑云母(7%)和白云母(1%), 副矿物有磁铁矿、磷灰石、锆石、独居石等, 蚀变矿物为绢云母。钾长石呈半自形、柱状, 与斜长石呈二长结构, 主要为正长石, 粒径为 0.2~2.0 mm, 含量约为 40%。斜长石为半自形、柱状, 轻微绢云母化, 粒径为 0.2~2.0 mm, 含量约为 30%。石英呈他形、粒状, 粒径为 0.2~2.0 mm, 含量约为 20%。黑云母和白云母均为自形、片状, 弯曲变形, 定向排列(图 2c)。

样品 19LD254-1 为变粗中粒黑云母二长花岗岩, 变余二长结构, 片麻状构造。主要成分为钾长石(45%)、石英(20%)和斜长石(25%), 次要成分为黑云母(6%), 副矿物为磁铁矿、锆石、磷灰石、独居石等, 蚀变矿物为绢云母、绿泥石、金红石。钾长石为半自形、柱状, 与斜长石呈二长结构, 主要为正长石。斜长石呈半自形、柱状, 聚片双晶, 轻微绢云母化, 粒径为 2~10 mm。石英为他形、粒状, 压扁、拉长, 粒径为 2~5 mm。黑云母为自形、片状, 弯曲变形, 定向排列呈弱片麻状构造, 发生不同程度的绿泥石化(图 2d)。

3 分析方法

本次研究选取 4 个花岗岩样品进行锆石和独居石 U-Pb 定年分析。样品均采自辽宁省丹东市五龙地区, 采取新鲜的样品破碎到 40~60 目, 用常规方法分选锆石并挑纯。将锆石颗粒置于环氧树脂中, 抛光磨至约 1/3, 使其露出核部, 用于阴极发光照相及 LA-ICP-MS 分析测试。测试前用体积百分比

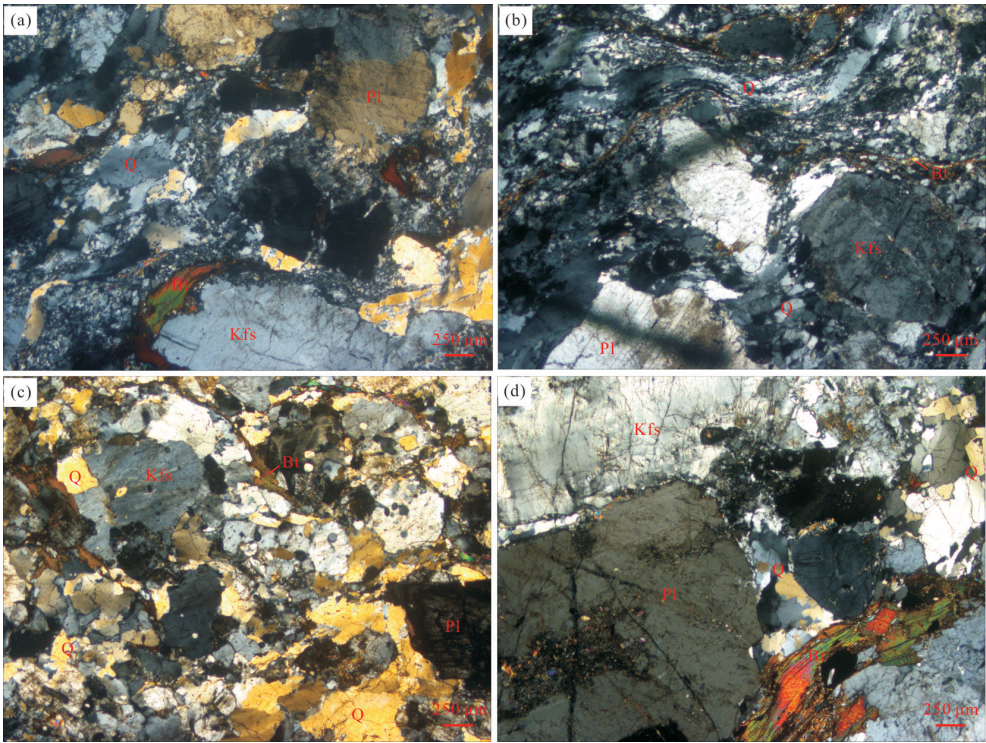


图 2 五龙金矿区中生代花岗岩的正交偏光显微照片

Fig.2 The cross-polarized light micrographs of the Mesozoic granites in Wulong gold field
a, b.晚侏罗世花岗岩,片麻状构造,石英压扁、拉长定向,局部呈塑性条带;c.早白垩世花岗岩,弱片麻状构造,石英压扁、破碎、粒状,黑云母弯曲变形;d.晚侏罗世花岗岩,片麻状构造,石英压扁、破碎,黑云母发生弯曲变形,定向排列. Q.石英;Kfs.钾长石;Pl.斜长石;Bt.黑云母

为 3% 的 HNO₃ 清洗样品表面. 锆石阴极发光和独居石背散射照相在北京铅年领航科技有限公司完成.

锆石的 U-Pb 同位素分析在中国地质科学院地质力学研究所古地磁与古构造重建重点实验室通过 Agilent 7900 型 ICP-MS 加载 COMPEXPro 102 ArF 193 nm 准分子激光器和 MicroLas 光学系统完成. 实验中采用的激光束斑直径和剥蚀频率分别为 32 μm 和 5 Hz, 能量密度为 6.0 J/cm², 每个样品的测试包括大约 20 s 的背景值和 50 s 的样品数据采集. 详细的仪器参数和分析流程见 Zong *et al.* (2017). U、Th、Pb 及其他微量元素以 ²⁹Si 作为内标, NIST610 作外标进行校正. 锆石 U-Pb 年龄采用国际标准锆石 91500 作为外标进行校正, 采用软件 ICPMSDataCal (Liu *et al.*, 2008, 2010) 对数据进行处理. 锆石年龄计算和成图使用 Isoplot 软件 (ver 3.0) 完成 (Ludwig, 2003).

独居石 U-Pb 同位素定年在武汉上谱分析科技有限责任公司利用 LA-ICP-MS 分析完成. Geolas-HD 激光剥蚀系统由 Coherent 193 nm 准分子激光器

和 MicroLas 光学系统组成, ICP-MS 型号为 Agilent 7900. 分析中使用的激光束斑和频率分别为 16 μm 和 2 Hz, 激光能量为 80 mJ. U-Pb 同位素定年处理中采用独居石标准物质 44069 和玻璃标准物质 NIST610 作外标分别进行同位素和微量元素分馏校正. 每个分析数据包括大约 20~30 s 空白信号和 50 s 样品信号. 数据处理采用软件 ICPMSDataCal (Liu *et al.*, 2008, 2010) 完成. 独居石样品的 U-Pb 年龄谐和图绘制和年龄加权平均计算采用 Isoplot 软件 (ver 3.0) (Ludwig, 2003) 完成.

4 分析结果

4.1 锆石 U-Pb 年龄

4 个花岗岩样品分选出的锆石多为无色透明一半透明, 自形程度好, 呈长柱状或棱角状, 粒径介于 60~200 μm. 阴极发光图像显示, 锆石具有明显的岩浆振荡环带 (图 3). 锆石的 Th/U 比值较高, 显示出岩浆结晶锆石的特点. 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄分析结果见表 1.

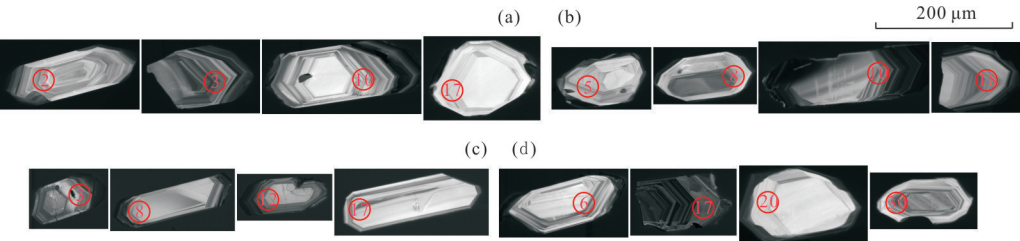


图 3 五龙金矿区中生代花岗岩锆石 CL 图像

Fig. 3 Representative CL images for zircons from the Mesozoic granites in Wulong gold field

红色数字为分析点号

表 1 五龙金矿区中生代花岗岩的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄分析结果															
Table 1 LA-ICP-MS U-Pb dating results for zircons from the Mesozoic granites in Wulong gold field															
分析 点号	^{232}Th	^{238}U	Th/ U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
	(10 ⁻⁶)	(10 ⁻⁶)		比值	$\pm 1\sigma$	比值	$\pm 1\sigma$	比值	$\pm 1\sigma$	(Ma)		(Ma)		(Ma)	
										年龄	$\pm 1\sigma$	年龄	$\pm 1\sigma$	年龄	$\pm 1\sigma$
19LD233-1															
1	142	144	0.98	0.050 0	0.004 2	0.165 8	0.012 0	0.024 6	0.000 4	195	194	156	10	157	3
2	143	146	0.97	0.054 1	0.004 3	0.191 0	0.013 9	0.026 0	0.000 6	372	178	178	12	166	4
3	129	669	0.19	0.048 7	0.001 9	0.166 3	0.006 4	0.024 6	0.000 3	200	89	156	6	157	2
4	97	85	1.14	0.053 1	0.005 5	0.185 6	0.017 5	0.025 6	0.000 6	332	237	173	15	163	4
5	599	234	2.54	0.053 7	0.003 5	0.174 8	0.010 6	0.023 9	0.000 4	367	144	164	9	153	2
6	48	94	0.51	0.057 3	0.005 4	0.198 4	0.015 5	0.026 6	0.000 6	502	209	184	13	169	4
7	157	819	0.19	0.049 3	0.001 8	0.166 7	0.006 0	0.024 6	0.000 3	161	92	157	5	156	2
8	189	202	0.93	0.051 2	0.003 2	0.175 3	0.010 6	0.025 2	0.000 5	250	144	164	9	160	3
9	50	189	0.26	0.050 3	0.002 8	0.167 9	0.009 0	0.024 5	0.000 4	206	127	158	8	156	3
10	188	237	0.79	0.046 8	0.003 0	0.160 3	0.009 3	0.025 3	0.000 5	39	148	151	8	161	3
11	100	110	0.90	0.050 4	0.004 1	0.177 9	0.012 5	0.025 5	0.000 6	213	191	166	11	162	4
12	112	677	0.16	0.046 8	0.001 6	0.164 6	0.005 7	0.025 4	0.000 3	39	81	155	5	162	2
13	308	784	0.39	0.047 2	0.001 6	0.160 6	0.005 4	0.024 6	0.000 3	58	143	151	5	156	2
14	26	38	0.69	0.052 2	0.005 6	0.324 2	0.027 9	0.045 2	0.001 4	300	244	285	21	285	9
15	82	97	0.84	0.051 3	0.005 2	0.171 9	0.014 9	0.025 2	0.000 7	257	36	161	13	160	4
16	211	150	1.40	0.081 6	0.006 4	0.274 9	0.021 3	0.024 6	0.000 5	1 236	155	247	17	157	3
17	113	86	1.30	0.051 5	0.004 6	0.169 3	0.013 1	0.025 1	0.000 6	261	206	159	11	160	4
18	171	249	0.68	0.052 7	0.003 1	0.185 9	0.009 5	0.026 5	0.000 5	322	142	173	8	168	3
19	81	75	1.07	0.048 9	0.004 6	0.175 2	0.016 1	0.026 0	0.000 6	143	207	164	14	165	4
20	130	101	1.27	0.050 4	0.003 9	0.169 5	0.011 3	0.024 9	0.000 5	213	175	159	10	158	3
21	428	1 715	0.25	0.050 3	0.001 4	0.179 2	0.005 1	0.025 8	0.000 4	209	63	167	4	164	2
22	282	221	1.27	0.049 4	0.003 0	0.165 3	0.009 8	0.024 3	0.000 4	165	144	155	9	155	3
23	116	128	0.90	0.051 7	0.004 8	0.172 3	0.014 0	0.025 1	0.000 5	333	211	161	12	160	3
24	60	80	0.75	0.053 8	0.006 2	0.176 4	0.016 8	0.025 1	0.000 7	361	266	165	14	160	4
25	219	1 286	0.17	0.108 7	0.002 4	1.306 0	0.056 0	0.084 8	0.002 6	1 777	40	848	25	524	16
19LD234-1															
1	164	1 232	0.13	0.049 9	0.001 4	0.188 9	0.005 7	0.027 5	0.000 4	191	67	176	5	175	3
2	107	91	1.16	0.055 8	0.005 5	0.189 4	0.016 6	0.025 6	0.000 6	443	220	176	14	163	4
3	133	152	0.87	0.113 4	0.002 3	4.993 3	0.102 8	0.318 8	0.003 1	1 855	37	1 818	17	1 784	15
4	86	829	0.10	0.112 5	0.001 9	3.503 5	0.059 2	0.225 2	0.001 9	1 840	30	1 528	13	1 309	10
5	85	96	0.87	0.051 9	0.005 3	0.171 2	0.014 0	0.025 2	0.000 5	280	232	160	12	160	3
6	267	656	0.40	0.150 4	0.002 4	7.388 6	0.129 1	0.354 5	0.003 2	2 350	27	2 160	16	1 956	15

分析 点号	²³² Th	²³⁸ U	Th/ U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	
	(10 ⁻⁶)	(10 ⁻⁶)		比值	±1σ	比值	±1σ	比值	±1σ	(Ma)		(Ma)		(Ma)	
										年龄	±1σ	年龄	±1σ	年龄	±1σ
7	56	49	1.14	0.075 9	0.009 1	0.349 6	0.036 8	0.034 9	0.001 1	1 092	243	304	28	221	7
8	64	574	0.11	0.050 4	0.001 9	0.175 8	0.006 2	0.025 4	0.000 3	213	87	164	5	162	2
9	244	1 079	0.22	0.049 1	0.001 7	0.168 9	0.005 8	0.025 0	0.000 4	150	77	158	5	159	3
10	197	1 574	0.12	0.050 3	0.001 4	0.180 0	0.005 6	0.025 9	0.000 4	209	67	168	5	165	3
11	91	163	0.56	0.050 8	0.003 2	0.206 0	0.011 6	0.030 1	0.000 6	235	144	190	10	191	4
12	222	275	0.80	0.050 8	0.002 8	0.180 4	0.009 8	0.026 2	0.000 5	232	128	168	8	167	3
13	39	520	0.07	0.050 3	0.002 1	0.168 3	0.006 3	0.024 6	0.000 3	209	96	158	5	156	2
14	56	419	0.13	0.052 4	0.002 1	0.176 5	0.006 8	0.024 5	0.000 3	302	91	165	6	156	2
15	297	1 843	0.16	0.049 0	0.001 2	0.168 7	0.004 0	0.024 8	0.000 3	150	56	158	3	158	2
16	211	250	0.84	0.050 7	0.002 8	0.174 2	0.009 7	0.024 8	0.000 4	228	125	163	8	158	2
17	74	1 736	0.04	0.052 8	0.001 1	0.223 9	0.004 6	0.030 6	0.000 3	320	48	205	4	194	2
18	134	244	0.54	0.052 5	0.002 7	0.187 3	0.009 7	0.025 9	0.000 4	306	119	174	8	165	3
19	91	82	1.10	0.047 3	0.004 4	0.161 4	0.013 4	0.024 9	0.000 6	61	211	152	12	159	4
20	119	225	0.53	0.145 3	0.003 3	3.932 5	0.120 8	0.194 1	0.004 2	2 292	40	1 620	25	1 144	23
21	84	1 250	0.07	0.049 8	0.001 5	0.177 0	0.005 9	0.025 7	0.000 4	183	66	165	5	163	3
22	168	777	0.22	0.049 1	0.001 6	0.170 5	0.006 0	0.025 1	0.000 4	154	78	160	5	160	2
23	54	596	0.09	0.050 7	0.001 8	0.239 4	0.008 3	0.034 2	0.000 4	228	83	218	7	216	2
24	123	329	0.37	0.110 2	0.001 9	3.456 3	0.067 7	0.226 0	0.002 7	1 802	31	1 517	15	1 313	14
25	52	611	0.09	0.050 7	0.001 9	0.177 6	0.006 9	0.025 3	0.000 4	228	61	166	6	161	2
19LD244-1															
1	1 225	4 036	0.30	0.046 8	0.001 0	0.124 1	0.002 8	0.019 1	0.000 2	39	48	119	3	122	1
2	1 334	3 931	0.34	0.049 7	0.001 2	0.130 8	0.003 0	0.019 1	0.000 3	189	56	125	3	122	2
3	1 499	1 104	1.35	0.058 3	0.001 8	0.162 6	0.005 0	0.020 2	0.000 3	543	67	153	4	129	2
4	836	2 310	0.36	0.064 0	0.002 4	0.181 4	0.008 3	0.020 0	0.000 3	743	80	169	7	127	2
5	1 316	3 226	0.40	0.049 8	0.001 2	0.135 2	0.003 5	0.019 5	0.000 2	187	57	129	3	124	1
6	111	56													

续表1

分析 点号	²³² Th (10 ⁻⁶)	²³⁸ U (10 ⁻⁶)	Th/ U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb (Ma)		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U (Ma)		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U (Ma)	
				比值	±1σ	比值	±1σ	比值	±1σ	年龄	±1σ	年龄	±1σ	年龄	±1σ
1	288	780	0.37	0.107 9	0.001 8	3.091 7	0.051 7	0.206 6	0.001 6	1 765	3	1 431	13	1 211	9
2	531	1 425	0.37	0.054 4	0.001 4	0.220 6	0.006 6	0.029 2	0.000 5	387	57	202	6	185	3
3	712	666	1.06	0.052 2	0.001 7	0.256 3	0.008 1	0.035 5	0.000 3	300	74	232	7	225	2
4	112	110	1.02	0.052 9	0.003 8	0.257 3	0.018 1	0.035 2	0.001 0	324	165	233	15	223	6
5	198	506	0.39	0.048 6	0.002 4	0.166 0	0.008 4	0.024 7	0.000 4	128	115	156	7	157	3
6	149	179	0.82	0.055 8	0.003 3	0.184 6	0.010 7	0.024 5	0.000 5	443	133	172	9	156	3
7	442	1 519	0.29	0.050 1	0.001 4	0.171 4	0.004 8	0.024 8	0.000 3	211	32	161	4	158	2
8	30	41	0.73	0.067 0	0.007 9	0.228 6	0.021 5	0.026 1	0.001 0	839	281	209	18	166	6
9	35	58	0.60	0.162 6	0.003 3	10.003 3	0.206 2	0.445 1	0.004 4	2 483	33	2 435	19	2 373	20
10	411	1 650	0.25	0.122 4	0.002 0	3.253 6	0.094 9	0.191 6	0.004 7	1 992	29	1 470	23	1 130	26
11	197	1 380	0.14	0.125 9	0.002 1	4.022 0	0.168 5	0.226 8	0.008 2	2 043	29	1 639	34	1 318	43
12	158	672	0.23	0.050 8	0.001 7	0.201 1	0.006 8	0.028 7	0.000 4	232	76	186	6	182	2
13	216	705	0.30	0.049 0	0.001 5	0.166 3	0.005 0	0.024 6	0.000 3	150	70	156	4	156	2
14	110	297	0.37	0.051 7	0.002 4	0.227 6	0.010 2	0.032 1	0.000 4	272	107	208	8	203	3
15	299	491	0.60	0.050 9	0.001 7	0.257 8	0.008 6	0.036 6	0.000 4	239	78	233	7	232	2
16	73	86	0.85	0.050 5	0.004 1	0.171 5	0.012 3	0.025 1	0.000 5	220	187	161	11	160	3
17	168	1 521	0.11	0.057 6	0.001 4	0.194 0	0.004 5	0.024 3	0.000 2	517	54	180	4	155	1
18	1 130	2 723	0.41	0.051 3	0.001 0	0.245 4	0.004 8	0.034 5	0.000 3	254	46	223	4	219	2
19	265	771	0.34	0.122 7	0.002 1	5.289 9	0.089 9	0.310 5	0.002 1	1 995	32	1 867	15	1 743	10
20	40	85	0.47	0.057 7	0.005 5	0.220 3	0.016 8	0.029 3	0.000 8	517	214	202	14	186	5
21	214	845	0.25	0.048 5	0.001 4	0.163 4	0.004 7	0.024 4	0.000 3	124	70	154	4	155	2
22	186	1 224	0.15	0.049 9	0.001 3	0.168 5	0.004 4	0.024 4	0.000 2	191	61	158	4	155	1
23	234	813	0.29	0.049 7	0.001 4	0.220 2	0.008 2	0.031 9	0.000 6	189	73	202	7	202	4
24	419	2 084	0.20	0.049 9	0.001 1	0.172 3	0.004 5	0.024 9	0.000 4	191	21	161	4	159	2
25	228	1 995	0.11	0.091 4	0.004 4	0.451 9	0.025 9	0.034 2	0.000 5	1 457	91	379	18	217	3

样品 19LD233-1 共测定了 25 个点,其中 2 个测点(14 和 25)为继承锆石,1 个测点(16)的谐和度较差(55%),其余 22 个点均得到了较为一致的谐和年龄,锆石 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄为 153~169 Ma,加权平均年龄为 159.2±1.8 Ma(MSWD=2.3)(图 4a).样品 19LD234-1 共分析了 25 个锆石颗粒,其中有 5 颗古元古代继承锆石(²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄大于 1 802 Ma,点 3、4、6、20 和 24)和 4 颗中生代继承锆石(²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄为 191~221 Ma,点 7、11、17 和 23),去除 1 个有效信号区间较窄的点(点 1),其余 15 个锆石颗粒的 U-Pb 年龄谐和度均在 92% 以上,锆石 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄范围为 156~167 Ma,加权平均年龄为 160.2±1.8 Ma(MSWD=1.7)(图 4b).花岗岩样品 19LD244-1 共测定了 25 个点,去除 1 个谐和度较差的点(点 21),其余 24 个点的 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄范围为 121~130 Ma,加权平均年龄为 123.8±1.2 Ma(MSWD=2.6)(图 4c).样品 19LD254-1 共测试了 25 颗锆石,其中有 5 个古元古代

继承锆石(²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄大于 1 765 Ma,点 1、9、10、11 和 19)和 9 颗中生代继承锆石(²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄为 182~232 Ma,点 2、3、4、12、14、15、18、20 和 23),去除 2 个谐和度较差的点(点 8 和 25),其余 9 个点的 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄较为集中(155~160 Ma),加权平均年龄为 156.1±1.2 Ma(MSWD=0.65)(图 4d).样品 19LD234-1 和 19LD254-1 均含有古元古代继承锆石,可能来自于岩浆源区或者岩浆上升过程中受地壳混染的影响,两个样品中的中生代继承锆石可能捕获自辽东地区三叠纪一早侏罗世侵入体,与 Li *et al.*(2004)和 Wu *et al.*(2005)的锆石年龄研究结果一致,均含有古元古代和早中生代的继承锆石,表明形成的岩浆温度可能较低.

4.2 独居石 U-Pb 年龄

表 2 和表 3 分别列出了 4 个花岗岩样品的独居石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄测试结果和原位稀土元素组成.

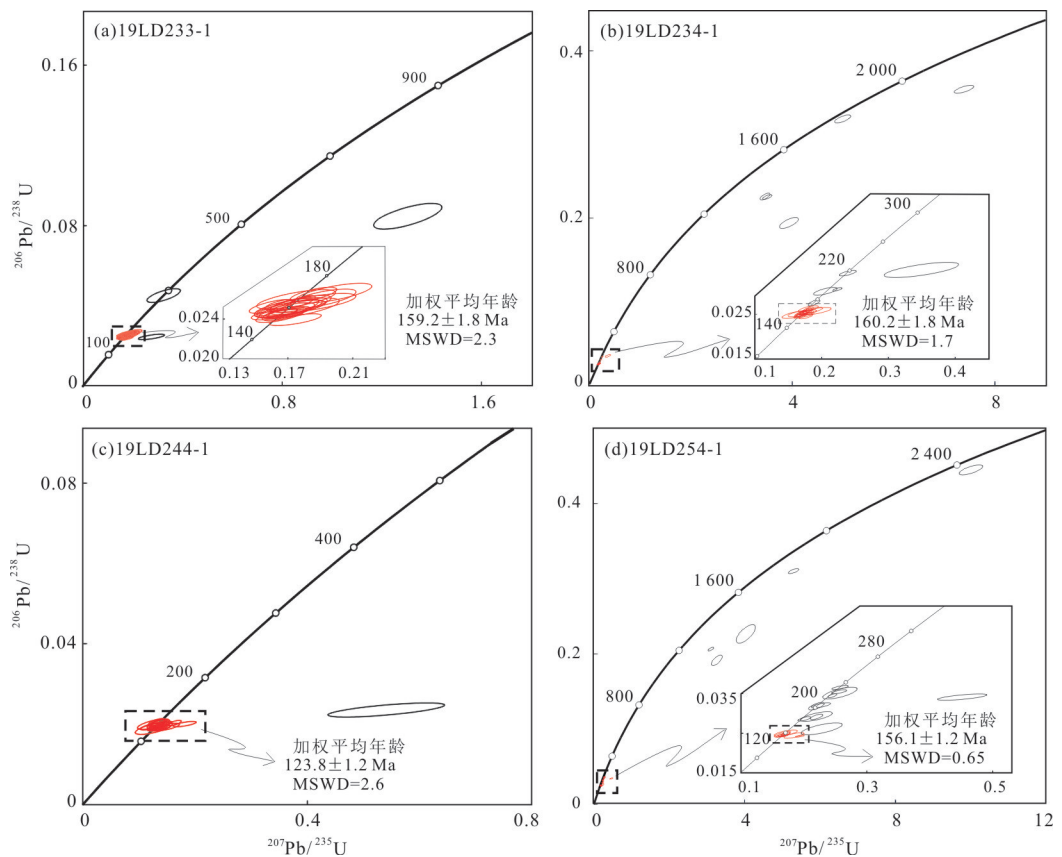


图 4 五龙金矿区中生代花岗岩锆石 U-Pb 年龄谱和图

Fig. 4 U-Pb Concordia diagrams for zircons from the Mesozoic granites in Wulong gold field

表 2 五龙金矿区中生代花岗岩的独居石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄分析结果

Table 2 LA-ICP-MS U-Pb dating results for monazites from the Mesozoic granites in Wulong gold field

分析 点号	²³² Th	²³⁸ U	Th/ U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb (Ma)		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U (Ma)		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U (Ma)	
	(10 ⁻⁶)	(10 ⁻⁶)		比值	±1σ	比值	±1σ	比值	±1σ	年龄	±1σ	年龄	±1σ	年龄	±1σ
19LD233-1															
1	30 646	811	37.5	0.051 0	0.004 5	0.171 0	0.014 6	0.024 5	0.000 4	243	199	160	13	156	3
2	40 448	620	64.8	0.051 6	0.004 1	0.163 0	0.011 5	0.023 8	0.000 4	333	183	153	10	151	3
3	37 087	542	67.9	0.047 4	0.003 4	0.155 0	0.009 5	0.024 2	0.000 5	78	154	146	8	154	3
4	61 796	888	69.1	0.047 3	0.003 5	0.159 1	0.011 3	0.024 9	0.000 4	61	170	150	10	158	3
5	39 115	565	68.8	0.049 1	0.004 0	0.171 3	0.012 8	0.025 6	0.000 5	154	191	161	11	163	3
6	34 301	435	78.3	0.046 5	0.004 8	0.158 6	0.016 5	0.025 6	0.000 6	33	224	149	14	163	4
7	20 837	435	47.5	0.054 5	0.005 5	0.178 8	0.015 7	0.024 5	0.000 6	391	231	167	13	156	4
8	34 500	486	70.5	0.052 6	0.004 4	0.175 1	0.013 4	0.024 4	0.000 5	322	193	164	12	156	3
9	31 123	78	398	0.104 4	0.031 3	0.261 9	0.039 4	0.027 6	0.001 3	1 703	578	236	32	176	8
10	30 310	582	51.7	0.070 9	0.005 1	0.240 9	0.015 5	0.024 9	0.000 5	955	53	219	13	158	3
11	38 067	848	44.6	0.048 1	0.003 5	0.157 5	0.010 0	0.024 3	0.000 4	102	231	149	9	155	2
12	50 446	411	122	0.055 5	0.004 9	0.177 0	0.013 2	0.024 0	0.000 5	432	200	165	11	153	3
13	49 745	854	57.8	0.046 3	0.003 0	0.162 0	0.009 1	0.025 3	0.000 4	13	152	152	8	161	2
14	31 008	370	83.3	0.053 0	0.004 6	0.176 6	0.013 5	0.025 0	0.000 6	328	203	165	12	159	4
15	58 855	1316	44.4	0.051 3	0.002 9	0.182 4	0.009 2	0.025 9	0.000 4	254	134	170	8	165	3
16	31 477	565	55.3	0.049 2	0.004 6	0.165 4	0.013 5	0.024 8	0.000 5	167	194	155	12	158	3
17	29 256	508	57.2	0.051 3	0.004 0	0.175 9	0.012 5	0.025 1	0.000 4	254	186	165	11	160	3

分析 点号	²³² Th	²³⁸ U	Th/ U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	
	(10 ⁻⁶)	(10 ⁻⁶)		比值	±1σ	比值	±1σ	比值	±1σ	(Ma)		(Ma)		(Ma)	
										年龄	±1σ	年龄	±1σ	年龄	±1σ
18	41 224	579	70.7	0.050 2	0.004 4	0.170 8	0.014 1	0.024 6	0.000 5	211	183	160	12	157	3
19	42 894	228	186	0.054 9	0.006 5	0.175 1	0.015 5	0.025 4	0.000 7	409	267	164	13	162	5
20	35 511	527	66.9	0.052 6	0.005 1	0.181 7	0.016 6	0.025 4	0.000 5	322	220	169	14	162	3
19LD234-1															
1	24 902	538	46.0	0.105 4	0.007 1	0.401 0	0.026 9	0.027 2	0.000 5	1 722	125	342	19	173	3
2	31 582	996	31.5	0.051 5	0.003 9	0.172 8	0.011 8	0.024 5	0.000 4	265	176	162	10	156	2
3	42 947	915	46.6	0.050 2	0.003 2	0.173 1	0.009 9	0.024 7	0.000 4	211	145	162	9	158	3
4	30 765	566	53.9	0.047 5	0.004 1	0.155 5	0.011 6	0.024 3	0.000 4	72	261	147	10	155	3
5	32 397	545	59.0	0.056 1	0.005 0	0.175 3	0.012 6	0.024 0	0.000 6	457	193	164	11	153	4
6	54 469	1 115	48.5	0.051 5	0.003 7	0.165 5	0.010 4	0.024 2	0.000 4	265	160	156	9	154	3
7	26 913	403	66.3	0.075 6	0.013 7	0.300 1	0.054 5	0.028 9	0.000 7	1 085	369	266	43	184	4
8	35 264	898	39.0	0.051 3	0.003 3	0.174 6	0.008 9	0.025 1	0.000 4	257	148	163	8	160	3
9	35 041	637	54.6	0.084 8	0.005 9	0.296 4	0.016 4	0.026 0	0.000 5	1 322	134	264	13	166	3
10	33 088	699	47.0	0.051 1	0.003 8	0.177 0	0.010 9	0.025 4	0.000 5	256	172	166	9	162	3
11	42 867	447	95.2	0.052 9	0.004 9	0.172 3	0.011 7	0.024 2	0.000 6	324	213	161	10	154	4
12	29 443	129	226	0.105 7	0.016 7	0.317 7	0.039 5	0.026 3	0.001 1	1 728	293	280	30	167	7
13	37 429	792	46.9	0.053 8	0.003 9	0.183 8	0.011 3	0.025 4	0.000 5	365	163	171	10	162	3
14	39 550	590	66.5	0.049 3	0.005 0	0.166 2	0.014 8	0.025 2	0.000 5	165	218	156	13	160	3
15	40 261	1 959	20.4	0.048 2	0.002 3	0.167 3	0.008 0	0.025 1	0.000 3	109	111	157	7	160	2
16	30 321	425	70.8	0.055 0	0.005 4	0.179 4	0.014 6	0.025 1	0.000 6	413	222	168	13	160	4
17	43 257	746	57.6	0.049 9	0.003 5	0.163 1	0.009 9	0.023 8	0.000 4	191	163	153	9	152	3
18	30 737	353	86.5	0.057 8	0.006 3	0.186 9	0.014 8	0.024 9	0.000 6	520	241	174	13	158	4
19	29 551	323	90.9	0.056 4	0.007 0	0.186 2	0.016 5	0.024 8	0.000 6	478	280	173	14	158	4
20	34 455	931	36.7	0.054 3	0.004 0	0.183 4	0.011 6	0.024 8	0.000 4	383	167	171	10	158	3
19LD244-1															
1	68 292	305	222	0.079 0	0.010 5	0.192 2	0.016								

续表2

分析 点号	²³² Th (10 ⁻⁶)	²³⁸ U (10 ⁻⁶)	Th/ U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb (Ma)		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U (Ma)		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U (Ma)	
				比值	±1σ	比值	±1σ	比值	±1σ	年龄	±1σ	年龄	±1σ	年龄	±1σ
1	27 181	2 104	12.8	0.050 9	0.002 4	0.170 0	0.008 1	0.024 2	0.000 3	235	109	159	7	154	2
2	45 424	2 074	21.7	0.048 2	0.002 2	0.160 3	0.007 0	0.024 2	0.000 3	109	104	151	6	154	2
3	35 996	2 105	17.0	0.050 0	0.002 8	0.188 7	0.010 7	0.029 2	0.001 2	195	131	176	9	186	8
4	31 446	2 076	15.0	0.047 8	0.002 2	0.163 9	0.007 5	0.024 8	0.000 3	100	94	154	7	158	2
5	32 327	1 678	19.1	0.052 8	0.002 8	0.175 0	0.008 7	0.024 4	0.000 4	320	120	164	8	156	2
6	34 893	1 817	19.1	0.052 6	0.002 7	0.173 0	0.007 7	0.024 2	0.000 3	322	119	162	7	154	2
7	27 563	1 303	21.0	0.051 1	0.003 5	0.167 7	0.011 3	0.024 0	0.000 4	256	156	157	10	153	2
8	37 835	1 987	18.9	0.050 5	0.002 5	0.166 9	0.008 2	0.024 0	0.000 3	220	113	157	7	153	2
9	34 547	2 170	15.8	0.051 7	0.002 9	0.166 4	0.008 9	0.023 5	0.000 3	272	128	156	8	150	2
10	36 333	2 326	15.5	0.050 0	0.002 3	0.164 1	0.007 4	0.023 8	0.000 3	198	109	154	6	152	2
11	40 357	1 924	20.8	0.051 8	0.002 8	0.171 2	0.009 2	0.024 0	0.000 3	276	126	160	8	153	2
12	22 899	1 936	11.7	0.048 4	0.002 3	0.157 2	0.007 5	0.023 4	0.000 3	117	83	148	7	149	2
13	36 822	1 894	19.3	0.053 1	0.003 0	0.172 4	0.009 2	0.024 0	0.000 3	332	130	162	8	153	2
14	26 758	1 804	14.7	0.051 3	0.002 5	0.168 9	0.008 3	0.024 1	0.000 3	254	82	158	7	153	2
15	34 610	1 871	18.4	0.053 5	0.002 7	0.173 0	0.008 3	0.023 5	0.000 3	350	113	162	7	150	2
16	30 515	1 450	20.9	0.050 9	0.003 7	0.169 1	0.011 8	0.024 5	0.000 4	235	168	159	10	156	2
17	29 835	1 772	16.7	0.052 3	0.002 9	0.173 9	0.009 6	0.024 2	0.000 3	298	128	163	8	154	2
18	42 534	1 682	25.1	0.050 3	0.002 7	0.173 7	0.009 0	0.025 2	0.000 4	209	126	163	8	160	2
19	27 140	2 450	11.0	0.049 8	0.002 1	0.167 4	0.007 1	0.024 4	0.000 3	187	100	157	6	156	2
20	36 421	1 707	21.2	0.086 8	0.003 6	0.299 8	0.012 2	0.025 1	0.000 3	1 355	79	266	10	160	2

表 3 五龙金矿區中生代花崗岩的獨居石原位 LA-ICP-MS 稀土元素含量(10⁻⁶)
Table 3 LA-ICP-MS in-situ REE contents for monazites from the Mesozoic granites in Wulong gold field(10⁻⁶)

分析点号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
19LD233-1														
1	150 739	259 057	26 460	91 031	13 138	269	6 344	609	2 230	276	410	27.8	88.5	6.17
2	166 033	259 533	24 763	83 050	9 539	156	4 435	365	1 300	155	236	17.3	59.1	5.74
3	154 825	259 861	26 167	89 473	11 811	240	5 476	494	1 759	207	299	20.5	64.5	5.16
4	133 913	235 975	25 756	95 357	17 688	321	10 842	993	3 580	429	583	38.9	115	8.96
5	148 015	250 014	25 949	93 646	14 546	243	7 885	700	2 447	289	392	26.7	89.1	8.00
6	153 044	258 901	26 556	93 192	13 211	143	7 168	590	1 952	220	309	21.8	76.8	5.95
7	170 227	275 443	25 627	85 062	8 865	94	3 438	258	829	97.8	137	10.7	38.4	3.11
8	143 869	257 273	26 562	95 193	15 183	242	8 407	738	2 566	295	394	25.3	74.3	5.88
9	181 797	268 203	24 521	81 872	7 073	239	2 579	159	456	51.2	65.9	4.40	16.5	1.46
10	159 686	267 274	26 656	91 491	11 496	249	5 254	478	1 758	214	307	19.7	59.7	5.00
11	154 859	261 309	26 119	88 355	11 684	246	5 609	512	1 832	230	335	25.0	81.6	5.98
12	155 140	246 763	25 154	90 903	12 164	272	6 214	494	1 656	188	245	16.7	46.4	3.67
13	142 049	240 630	25 626	93 590	15 860	288	9 303	849	3 021	367	515	38.2	143	16.3
14	159 211	265 673	26 507	91 839	12 143	269	6 268	536	1 872	212	285	17.5	53.3	4.03
15	131 170	231 227	24 830	91 518	18 580	367	12 876	1343	4 999	601	851	58.0	172	13.5
16	156 733	262 662	25 746	89 984	11 737	276	5 732	517	1 881	224	315	21.3	63.4	4.90
17	157 424	260 920	26 585	91 248	12 510	205	6 550	599	2 160	248	340	22.4	65.3	5.12
18	154 071	258 955	25 454	89 378	12 520	290	6 523	571	1 988	230	307	20.2	56.3	3.97
19	176 048	264 020	23 721	75 432	7 641	116	3 186	250	845	98.8	155	12.8	47.1	3.51
20	143 192	258 381	26 869	94 194	14 671	299	8 172	763	2 706	315	437	27.1	82.4	6.24

续表3

分析点号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
19LD234-1														
1	143 144	249 358	25 320	89 444	12 288	215	6 926	656	2 441	294	411	26.7	87.9	5.64
2	152 478	250 288	24 057	81 381	8 979	104	3 968	312	1 080	131	197	14.6	50.2	4.27
3	125 375	230 395	25 172	90 900	16 704	257	11 405	1 218	4 896	611	869	58.4	181	13.4
4	151 176	248 459	24 792	84 167	10 655	190	5 746	521	1 878	219	308	19.6	58.2	4.3
5	144 428	246 797	25 215	89 863	12 805	228	7 746	753	2 841	345	500	32.8	96.9	8.03
6	123 888	221 614	24 618	93 446	16 954	129	11 746	1 099	3 996	479	655	42.7	141	10.3
7	152 316	252 739	25 241	88 169	10 989	186	5 545	473	1 683	191	258	16.1	50.4	3.44
8	137 457	235 879	24 555	86 159	13 739	244	9 168	1 026	4 177	527	771	52.6	188	16.1
9	141 786	245 376	25 225	88 535	13 235	238	7 838	760	2 839	342	485	30.9	104	7.97
10	144 185	242 067	24 430	86 235	12 395	281	7 861	860	3 518	453	684	46.4	136	10.5
11	141 202	238 688	25 135	94 332	13 883	115	7 665	617	2 029	215	274	16.4	52.1	3.62
12	164 201	259 764	24 801	82 571	8 184	144	3 550	254	806	91.3	128	8.33	26.7	2.35
13	146 374	245 459	24 422	85 168	12 740	286	8 038	894	3 608	446	654	45.1	140	11.2
14	155 995	253 577	24 759	84 096	9 923	98.6	4 588	346	1 104	126	184	12.9	52.5	4.25
15	141 864	236 545	23 479	84 070	12 662	402	8 295	1 090	4 987	619	1039	83.9	300	22.4
16	155 022	254 117	24 635	85 461	10 869	214	5 625	495	1 831	213	289	19.2	59.7	4.09
17	158 705	250 774	23 569	81 434	8 878	203	4 212	351	1 215	142	206	13.9	47.5	3.88
18	160 696	257 712	25 146	86 977	10 111	167	4 880	393	1 291	148	188	12.3	37.5	2.65
19	158 994	257 310	25 038	84 865	9 569	102	4 354	337	1 032	110	151	10.5	33.0	2.26
20	137 654	242 386	25 357	88 630	15 009	213	10 346	1 162	4 838	588	844	57.4	196	14.0
19LD244-1														
1	177 077	273 910	25 972	88 755	10 999	254	5 200	391	1 162	121	150	9.24	27.6	2.48
2	173 866	278 901	26 917	90 849	11 595	248	5 919	494	1 599	182	254	19.0	72.7	5.63
3	173 990	268 371	25 953	86 899	11 495	363	6 013	516	1 736	206	279	19.2	66.7	5.13
4	173 070	267 398	25 923	87 623	11 279	241	6 340	530	1 834	208	287	19.4	62.2	4.52
5	154 886	254 406	25 954	94 314	13 998	228	7 709	593	1 806	188	237	16.2	50.2	4.29
6	172 542	270 896	25 670	85 082	11 629	223	6 418	534	1 649	166	194	12.1	33.9	2.36
7	170 921	270 455	26 339	89 742	12 029	261	6 679	576	1 835	196	255	16.7	52.8	4.62
8	170 218	273 571	26 420	90 085	11 264	355	5 880	484	1 601	180	235	15.7	58.4	5.71
9	161 340	257 495	25 370	90 241	11 808	267	6 034	436	1 262	128	147	9.42	28.2	1.96
10	168 898	274 592	26 891	93 549	13 021	306	7 061	588	1 747	177	218	13.2	37.6	2.57
11	179 257	272 556	25 426	83 050	9 868	325	4 959	422	1 342	147	192	12.2	39.6	2.95
12	179 534	273 974	26 058	85 455	9 538	216	4 674	355	1 126	128	173	12.5	35.4	2.94
13	153 293	247 139	24 502	85 933	12 025	216	6 438	504	1 515	155	190	11.4	35.2	2.70
14	175 536	281 891	26 195	86 976	11 084	247	5 618	452	1 397	147	186	11.7	32.2	2.80
15	165 365	265 707	25 870	89 077	11 182	223	5 815	456	1 496	175	253	16.8	52.7	3.78
16	162 567	268 167	26 862	91 940	12 983	312	6 686	540	1 644	173	217	13.9	42.8	3.28
17	160 939	258 226	26 157	93 059	13 106	195	7 257	562	1 652	168	198	13.0	39.5	2.57
18	150 240	241 158	24 269	86 952	12 636	190	6 888	547	1 667	174	211	14.2	43.0	3.17
19	145 992	236 519	23 240	83 699	11 600	263	6 057	455	1 366	147	187	12.2	38.8	2.67
20	156 186	262 069	26 447	90 518	12 519	243	6 602	548	1 818	208	293	20.3	77.1	7.24
19LD254-1														
1	155 377	263 176	25 971	94 708	13 220	355	7 821	890	3 757	508	801	58.4	193	15.95
2	154 614	261 193	25 955	93 947	12 868	350	7 363	814	3 325	449	678	48.1	161	12.35
3	153 399	254 728	25 539	95 321	14 617	374	9 508	930	3 576	441	667	45.1	153	11.76
4	156 031	263 452	26 254	95 049	13 194	360	7 885	904	3 733	503	768	55.7	187	15.07
5	161 148	262 087	25 992	92 828	12 362	335	7 070	763	3 052	401	593	40.8	136	10.03

续表3

分析点号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
6	158 892	263 157	25 723	92 813	12 304	337	7 196	778	3 125	406	600	42.3	139	11.11
7	164 204	269 436	26 515	95 871	12 491	337	7 114	734	2 913	372	565	37.7	126	9.07
8	155 403	259 641	25 683	93 533	12 868	361	7 705	864	3 549	469	711	49.8	167	12.01
9	153 620	264 025	25 880	94 206	12 680	354	7 320	804	3 294	438	659	49.8	163	12.41
10	154 854	259 448	25 841	93 978	13 109	361	8 094	914	3 880	521	825	60.4	205	16.57
11	154 666	258 910	25 961	94 566	13 569	357	8 514	864	3 344	423	650	44.9	147	10.98
12	158 572	274 201	26 770	93 898	12 708	357	7 169	784	3 291	432	677	47.7	164	13.39
13	159 256	261 311	25 567	92 939	12 713	361	7 451	805	3 251	434	648	46.8	148	11.46
14	167 748	271 315	25 913	89 247	11 397	311	6 330	703	2 910	382	609	44.1	145	12.27
15	161 934	262 808	25 984	92 202	12 233	325	6 980	772	3 214	421	637	45.9	153	11.35
16	162 930	268 207	26 350	95 514	12 436	331	6 999	747	2 927	374	565	39.3	124	9.58
17	162 167	268 168	26 164	93 283	12 139	323	6 721	740	3 024	402	613	46.4	142	12.13
18	158 809	258 091	25 494	94 071	14 385	351	9 184	888	3 284	410	598	41.2	125	10.88
19	157 234	270 014	26 197	92 172	12 345	352	6 964	798	3 344	454	705	51.6	183	14.41
20	157 096	260 682	25 721	92 611	12 287	339	7 063	732	2 943	380	565	39.7	129	9.76

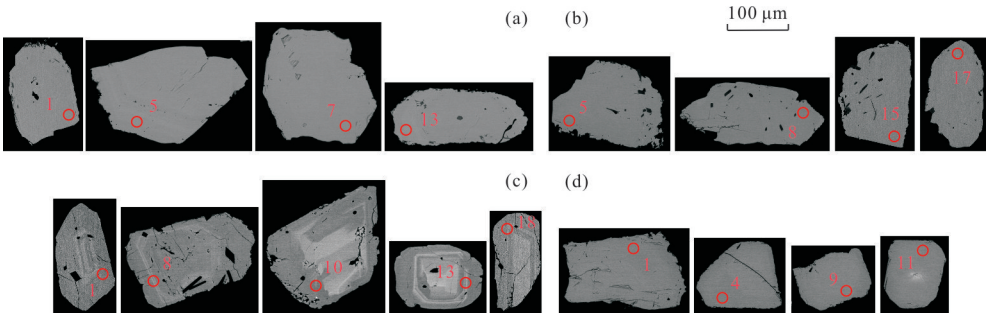


图5 五龙金矿区中生代花岗岩独居石BSE图像

Fig. 5 Representative BSE images for monazites from the Mesozoic granites in Wulong gold field
红色数字为分析点号

4 个花岗岩样品的独居石颗粒粒径约 80~220 μm ,BSE 图像显示样品 19LD244-1 的独居石呈自形一半自形,长柱状或棱角状,具有明显的震荡环带(图 5c),另外 3 个样品的独居石呈自形一半自形,结构均匀,没有分带现象,独居石颗粒边部出现晶棱圆化和港湾状结构(图 5a, 5b, 5d). 对每个样品选择 20 颗独居石进行 U-Pb 年龄测试,样品 19LD233-1 除了 2 个点(点 9 和 10)的谐和度较差(谐和度分别为 70% 和 67%),其余 18 个点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄分布于 151~165 Ma,加权平均年龄为 $158.1\pm 1.9\text{ Ma}$ ($\text{MSWD} = 1.7$)(图 6a). 样品 19LD234-1 除了 4 个继承性或者不谐和的点(点 1、7、9 和 12,谐和度低于 63%),其他 16 个点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄集中分布于 152~162 Ma,加权平均年龄为 $157.5\pm 1.4\text{ Ma}$ ($\text{MSWD} = 1.13$)(图 6b).

样品 19LD244-1 由于 12 个测点的普通 Pb ($1.52\times 10^{-6}\sim 28.5\times 10^{-6}$)较高,导致测试结果误差

较大,因此采用 Tera-Wasserburg 图解将所有测试结果不进行普通 Pb 的扣除而直接投图(Tera and Wasserburg, 1972; 孙金凤和杨进辉,2009),获得不一致线的下交点年龄为 $123.4\pm 1.5\text{ Ma}$ ($\text{MSWD} = 1.4$)(图 6c),其中 5 个谐和度较好的分析点(点 2、3、4、5 和 15)的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $123.8\pm 2.4\text{ Ma}$ ($\text{MSWD} = 0.91$),与下交点年龄($123.4\pm 1.5\text{ Ma}$)和锆石 U-Pb 年龄($123.8\pm 1.2\text{ Ma}$)一致. 样品 19LD254-1 除了 1 个误差较大的点(点 3)和 1 个谐和度较低的点(点 20 谐和度为 50%),其他 18 个点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄集中分布于 149~160 Ma,加权平均年龄为 $153.5\pm 1.4\text{ Ma}$ ($\text{MSWD} = 2.0$)(图 6d).

5 讨论

5.1 花岗岩的侵位时代

5.1.1 锆石 U-Pb 年龄 辽东五龙金矿区中生代岩

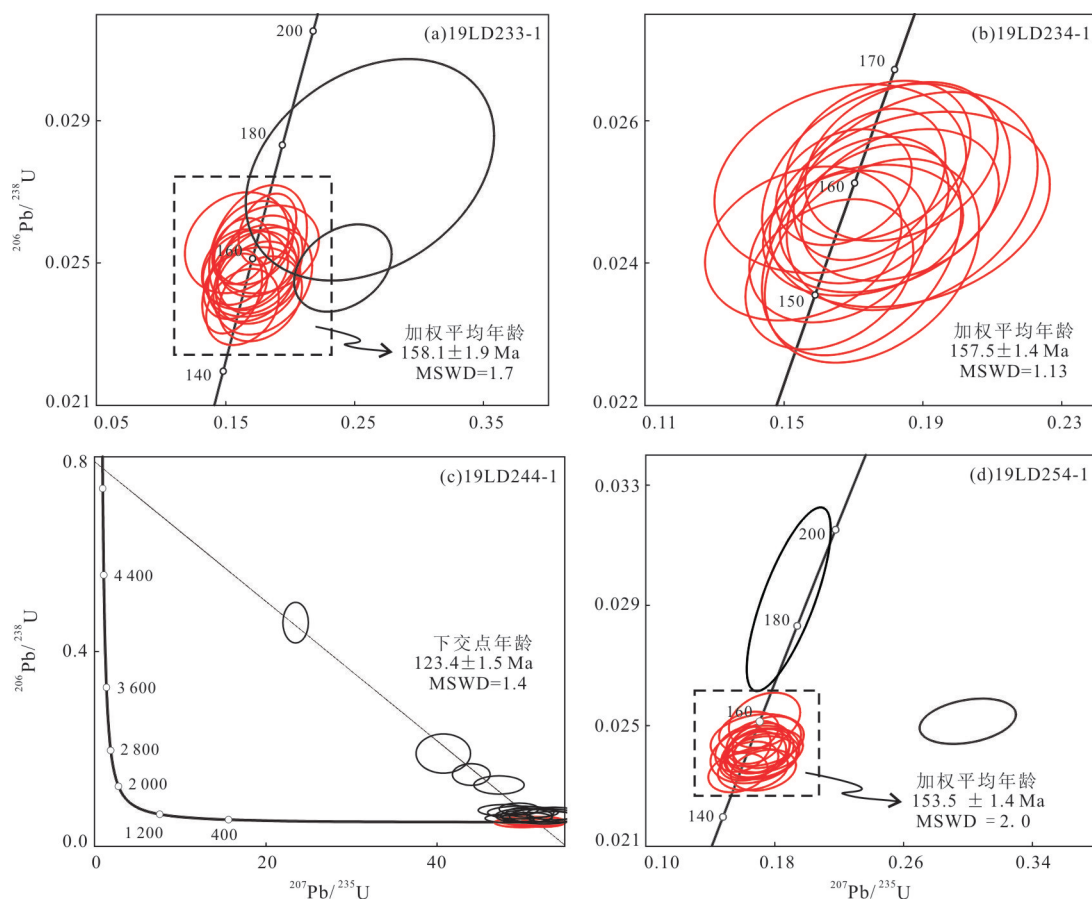


图 6 五龙金矿区中生代花岗岩独居石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 6 U-Pb concordia diagrams for monazites from the Mesozoic granites in Wulong gold field

浆岩发育,主要是花岗质侵入体,以五龙岩体、五龙背岩体和三股流岩体为主,五龙岩体具有明显的片麻状构造,前人曾将其归为太古宙 TTG 岩石(孙景贵等, 1992;韩小平, 1997)或古元古代混合岩或混合花岗岩(辽宁省地质矿产局, 1989;李三忠等, 1996;辽宁有色丹东地质勘察院, 2004. 辽宁省丹东市五龙金矿田区域地质图(1:50 000)). 本次研究对五龙金矿及周边的花岗岩样品进行了锆石 U-Pb 年龄分析,结果表明五龙金矿周边广泛出露的片麻状花岗岩形成于 156~160 Ma,为侏罗纪晚期侵入体,未变形的三股流岩体的锆石 U-Pb 年龄为 123.8 ± 1.2 Ma,表明其形成时代为早白垩世. 近年来,张朋等(2019)获得五龙背岩体的形成年龄为 146.8 ± 0.8 Ma,三股流岩体的成岩年龄为 123.2 ± 1.3 Ma. 杨凤超等(2019)通过锆石 SHRIMP U-Pb 定年认为五龙岩体侵位于 159.2 ± 1.9 Ma 和 160.0 ± 1.4 Ma,三股流岩体侵位于 122~124 Ma. 刘军等(2018)采用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年方法得到五龙金矿区黑云母花岗

岩、花岗斑岩、细粒闪长岩结晶年龄分别为 155.4 ± 0.9 Ma、 154.2 ± 1.2 Ma 和 123.1 ± 0.9 Ma,与前人在五龙金矿区得到的 180~156 Ma 以及 131~117 Ma 的锆石年龄一致(Li *et al.*, 2004; Wu *et al.*, 2005;杨进辉等, 2007),以上研究结果表明五龙金矿区主要存在侏罗纪和早白垩世两期岩浆活动,其中早白垩世岩浆活动较为发育.

5.1.2 独居石 U-Pb 年龄意义 独居石广泛形成于中酸性岩浆和变质岩中,沉积岩中也可形成自生独居石. 由于独居石具有较高的 Th、U 含量以及很低的普通 Pb 含量,可以作为理想的 U-Th-Pb 同位素年龄测定对象约束地质事件发生的年代. 无论岩浆成因、热液成因或者沉积岩中的自生独居石,鉴别其成因类型对于 U-Pb 年龄的合理解释至关重要. 独居石的晶体形态和内部结构以及微量元素地球化学特征可以用来识别其成因类型,其中,独居石稀土元素四分组效应是区别岩浆成因独居石与热液交代和沉积成因独

居石的重要指标之一,岩浆成因独居石稀土元素不具有四分组效应,表现为Eu强烈亏损的右倾斜稀土配分曲线(邱昆峰和杨立强,2011)。

本次研究中,未发生变质变形的三股流岩体中的独居石具有明显的环带,呈短柱状或棱角状,独居石的稀土元素配分曲线表现为Eu强烈亏损的右倾特征(图7c),不具有热液和沉积成因独居石的四分组效应,表明其为岩浆成因,独居石U-Pb年龄(123.4 ± 1.5 Ma)代表了花岗岩的形成时代,与获得的锆石U-Pb年龄结果(123.8 ± 1.2 Ma)一致,表明其为早白垩世侵入体。3个发生变形的片麻状花岗岩样品的独居石没有分带现象,边部具有类似热液成因的溶蚀结构,但独居石的Th、U含量以及Th/U比值较高,且稀土配分曲线没有四分组效应,具有岩浆独居石Eu强烈亏损的右倾斜分布模式(图7a, 7b, 7d),因此,后期的韧性变形对独居石的化学组成和成因没有造成影响,3个片麻状花岗岩样品的独居石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄(158.1 ± 1.9 Ma、 157.5 ± 1.4 Ma 和 153.5 ± 1.4 Ma)代表了花岗岩形成于侏罗纪晚期。

3个片麻状花岗岩样品的独居石U-Pb年龄比锆石U-Pb年龄略小1.1~2.7 Ma,可能与酸性岩浆降温过程中独居石稍低的结晶温度或后期

冷却作用有关。其中样品19LD234-1和19LD254-1的锆石和独居石年龄差分别为2.7 Ma和2.6 Ma,根据锆石和独居石的U-Pb同位素体系的封闭温度差($\sim 150^\circ\text{C}$),可以得出这两个花岗岩样品从锆石U-Pb同位素体系的封闭温度 850°C 到独居石U-Pb封闭温度 700°C 的冷却速率分别为 $55.56^\circ\text{C}/\text{Ma}$ 和 $57.69^\circ\text{C}/\text{Ma}$,表明晚侏罗世花岗岩在高温阶段为一快速冷却作用过程,可能经历了快速的地壳抬升事件。

5.2 岩浆活动与金成矿作用

前人对辽东地区岩浆作用和金成矿时代及其矿床成因进行了大量研究,根据矿化类型和产出位置把该地区金矿划分为青城子矿集区、五龙矿集区和猫岭矿集区(Deng *et al.*, 2017, 2018)。其中,青城子金矿主要产于辽河群盖县组中,为蚀变岩型金矿,其成矿时代主要在印支期(刘国平和艾永富, 2000; 薛春纪等, 2003; 段晓侠等, 2012; 张朋等, 2016; 张朋, 2018; Liu *et al.*, 2019),与该矿集区三叠纪似斑状花岗岩体(如双顶沟岩体和新岭岩体, Wu *et al.*, 2005)、花岗斑岩(221 Ma)以及煌斑岩脉(226~228 Ma)(张朋, 2018)等岩浆活动关系密切。五龙金矿是发育于华北克拉通东部的规模最大的石英脉型金矿,矿集区及其周围发育大量侵入岩,

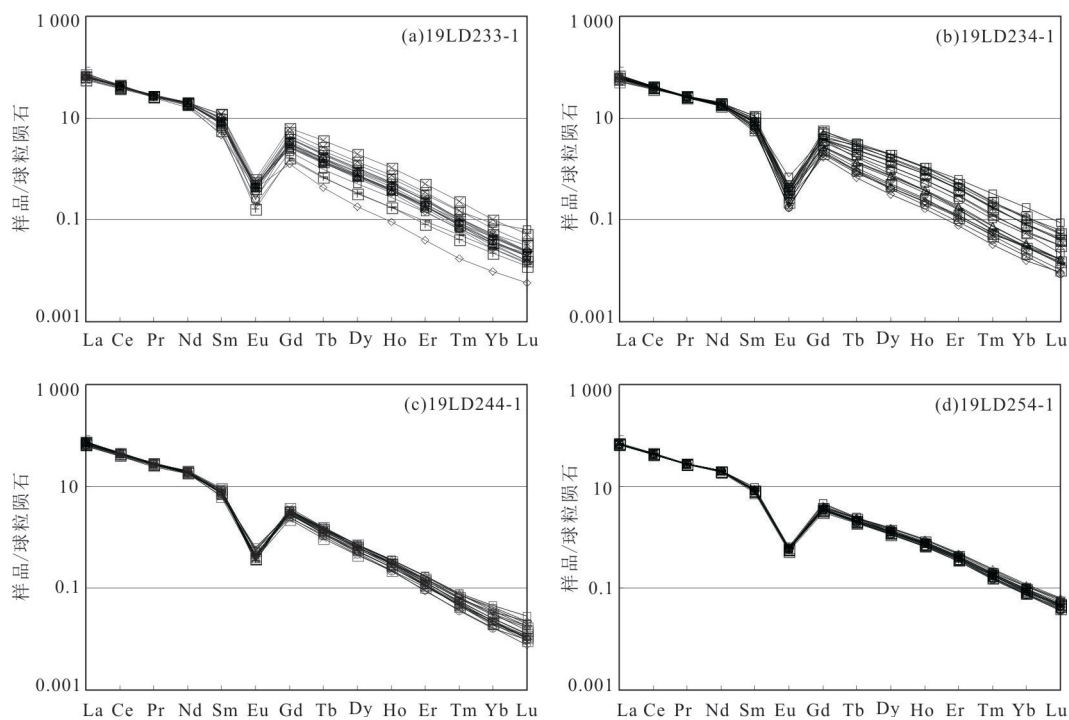


图7 五龙金矿区中生代花岗岩独居石的球粒陨石标准化稀土配分曲线
Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns of monazites from the Mesozoic granites in Wulong gold field
球粒陨石标准化值据Sun and McDonough(1989)

而辽河群地层出露较少.五龙金矿的成矿时代,前人作了大量研究,基本认为其形成于 127~119 Ma (魏俊浩等, 2001, 2003; 肖世椰等, 2018; 刘军等, 2018; 肖世椰, 2019; Yu *et al.*, 2020; 肖昌浩等, 2020), 与矿区三股流岩体、五龙背岩体以及大量早白垩世花岗闪长质岩脉的成岩时代一致, 并且大量含金石英脉与闪长岩脉和花岗斑岩伴生. 丹东地区五龙金矿体主要赋存在中—晚侏罗世片麻状花岗岩体中, 岩体普遍发育透入性片麻理构造, 经历了早期推覆和后期伸展的韧性改造(杨进辉等, 2004), 而早白垩世花岗岩体(如三股流岩体和五龙背岩体)以及中基性岩脉等没有明显的韧性变形, 其锆石 U-Pb 年龄主要集中于 131~117 Ma (Li *et al.*, 2004; Wu *et al.*, 2005; 杨进辉等, 2007; 刘军等, 2018; 张朋等, 2019; 杨凤超等, 2019), 与五龙金矿成矿时代基本一致. 魏俊浩等(2003)根据早白垩世岩体与矿石相似的 Pb 同位素组成, 认为三股流花岗岩体不是直接的金成矿物质来源, 两者可能来自同一岩浆源区, 是岩浆演化不同阶段的产物.

5.3 岩浆作用与构造背景

锆石和独居石 U-Pb 年龄结果表明片麻状花岗岩和三股流岩体的形成时代分别为晚侏罗世和早白垩世, 与前人的年代学研究结果一致, 表明辽东五龙矿集区岩浆活动主要发生在晚侏罗世和早白垩世. 晚侏罗世片麻状花岗岩在五龙地区广泛分布, 其侵位后发生了强烈的韧性变形, 主要表现为石英定向拉长呈丝带状, 长石则呈残斑状, 是五龙金矿床的主要围岩, 而早白垩世花岗岩脉/体侵入于片麻状花岗岩或元古宙地层中, 没有发生构造变形. 李三忠等(1996)把辽东半岛中生代构造变形过程分为 3 期, 第一幕变形界定在 195~193 Ma, 第二幕变形发生在 153~145 Ma, 第三幕变形为 NNE 向走滑作用, 约束在 135~95 Ma. 杨进辉等(2004)通过对丹东地区黑沟二云母二长花岗岩体中的黑云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年认为其经历的推覆、挤压事件发生在 ~143 Ma, 后期地壳伸展作用发生在 121~113 Ma. 华北克拉通东部强烈的花岗质岩浆作用 (Wu *et al.*, 2005)、辽南地区变质核杂岩 (Liu *et al.*, 2005; 刘俊来等, 2011)、辽南基性—超基性杂岩 (129~137 Ma, Pei *et al.*, 2011)、满洲里地区灵泉盆地的玄武岩—流纹岩双峰式火山岩 (~125 Ma, 孟恩等, 2011) 和华北克拉通东部大面积拉伸盆地

(Meng, 2003; Zhang *et al.*, 2003) 等表明辽东半岛以及华北克拉通东部在早白垩世期间经历了强烈的伸展和变形. 已有研究认为古太平洋板块从 180~170 Ma 开始向欧亚板块俯冲 (Isozaki, 1997; Maruyama *et al.*, 1997), 古地磁数据表明古太平洋板块在 145~135 Ma 期间向欧亚大陆的俯冲方向 (NW50°, Engebretson *et al.*, 1985; Isozaki, 1997) 与辽东地区发生的推覆、挤压事件相同 (杨进辉等, 2004), 因此, 辽东地区晚侏罗世—早白垩世的挤压、推覆作用可能与古太平洋板块向欧亚大陆俯冲作用关系密切 (杨进辉等, 2004), 而早白垩世岩浆活动则与古太平洋板块俯冲引起的华北克拉通破坏有关, 伴随着同期金成矿作用 (Zhu *et al.*, 2015; Li and Santosh, 2017).

6 结论

(1) 辽东五龙金矿区 3 个片麻状花岗岩样品的锆石 U-Pb 年龄分别为 159.2 ± 1.8 Ma、 160.2 ± 1.8 Ma 和 156.1 ± 1.2 Ma, 三股流黑云母二长花岗岩样品的锆石 U-Pb 年龄为 123.8 ± 1.2 Ma.

(2) 三股流花岗岩样品的独居石 U-Pb 年龄为 123.4 ± 1.5 Ma, 3 个片麻状花岗岩样品的独居石 U-Pb 年龄分别为 158.1 ± 1.9 Ma、 157.5 ± 1.4 Ma 和 153.5 ± 1.4 Ma, 比锆石 U-Pb 年龄略小, 其中 2 个晚侏罗世片麻状花岗岩样品的冷却速率分别为 $55.56^\circ\text{C}/\text{Ma}$ 和 $57.69^\circ\text{C}/\text{Ma}$, 表明岩浆在高温阶段为一快速冷却作用过程, 可能与快速的地壳抬升事件有关.

(3) 锆石和独居石的年龄结果表明片麻状花岗岩和三股流岩体分别形成于晚侏罗世和早白垩世, 结合已有的年代学数据, 五龙矿集区主要发生了晚侏罗世和早白垩世两期岩浆活动, 与古太平洋板块向欧亚大陆俯冲作用有关.

References

- Liaoning Bureau of Geology and Mineral Resources (BGM-RLP), 1989. Regional Geology of Liaoning Province. Geological Publishing House, Beijing, 1—856 (in Chinese with English abstract).
- Cherniak, D. J., 2010. Diffusion in Accessory Minerals: Zircon, Titanite, Apatite, Monazite and Xenotime. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 72(1): 827—869. <https://doi.org/10.2138/rmg.2010.72.18>
- Cherniak, D. J., Watson, E. B., 2007. Ti Diffusion in Zir-

- con.*Chemical Geology*, 242(3/4): 470–483.
- Deng, J., Wang, C. M., Bagas, L., et al., 2018. Crustal Architecture and Metallogenes in the South - Eastern North China Craton.*Earth-Science Reviews*, 182: 251–272. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.05.001>
- Deng, J., Wang, Q. F., Li, G. J., 2017. Tectonic Evolution, Superimposed Orogeny, and Composite Metallogenic System in China.*Gondwana Research*, 50: 216–266. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2017.02.005>
- Duan, X.X., Liu, J.M., Wang, Y.B., et al., 2012. Geochronology, Geochemistry and Geological Significance of Late Triassic Magmatism in Qingchengzi Orefield, Liaoning.*Acta Petrologica Sinica*, 28(2): 595–606 (in Chinese with English abstract)
- Engelbreton, D. C., Cox, A., Gordon, R. G., 1985. Relative Motions between Oceanic and Continental Plates in the Pacific Basin. In: Engelbreton, D. C., Cox, A., Gordon, R. G., eds., Geological Society of America Special Papers. *Geological Society of America*, 206: 1–60.
- Foster, G., Gibson, H. D., Parrish, R., et al., 2002. Textural, Chemical and Isotopic Insights into the Nature and Behaviour of Metamorphic Monazite. *Chemical Geology*, 191(1/2/3): 183–207. [https://doi.org/10.1016/s0009-2541\(02\)00156-0](https://doi.org/10.1016/s0009-2541(02)00156-0)
- Ganguly, J., Tirone, M., 2009. Closure Temperature, Cooling Age and High Temperature Thermochronology. *Physics and Chemistry of the Earth's Interior*, 89–99.
- Gasser, D., Jeřábek, P., Faber, C., et al., 2015. Behaviour of Geochronometers and Timing of Metamorphic Reactions during Deformation at Lower Crustal Conditions: Phase Equilibrium Modelling and U-Pb Dating of Zircon, Monazite, Rutile and Titanite from the Kalak Nappe Complex, Northern Norway. *Journal of Metamorphic Geology*, 33(5): 513–534. <https://doi.org/10.1111/jmg.12131>
- Han, X. P., 1997. Archean Intrusive Rocks in Jinzhou Area, South Liaoning. *Liaoning Geology*, 14(2): 81–90 (in Chinese with English abstract).
- Isozaki, Y., 1997. Jurassic Accretion Tectonics of Japan. *The Island Arc*, 6(1): 25–51. <https://doi.org/10.1111/j.1440-1738.1997.tb00039.x>
- Kohn, M. J., Malloy, M. A., 2004. Formation of Monazite via Prograde Metamorphic Reactions among Common Silicates: Implications for Age Determinations. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68(1): 101–113. [https://doi.org/10.1016/s0016-7037\(03\)00258-8](https://doi.org/10.1016/s0016-7037(03)00258-8)
- Li, S. R., Santosh, M., 2017. Geodynamics of Heterogeneous Gold Mineralization in the North China Craton and Its Relationship to Lithospheric Destruction. *Gondwana Research*, 50: 267–292. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2017.05.007>
- Li, S. Z., Yang, Z. S., Liu, Y. J., 1996. Preliminary Analysis on Uplift Bedding-Delamination Structure of the Paleoproterozoic Orogenic Belt in Liaodong Peninsula. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 26(3): 305–309 (in Chinese with English abstract).
- Li, S. Z., Zhao, G. C., Sun, M., et al., 2004. Mesozoic, not Paleoproterozoic SHRIMP U-Pb Zircon Ages of Two Liaoji Granites, Eastern Block, North China Craton. *International Geology Review*, 46(2): 162–176. <https://doi.org/10.2747/0020-6814.46.2.162>
- Li, Z., Chen, B., Liu, J.W., et al., 2015. Zircon U-Pb Ages and Their Implications for the South Liaohe Group in the Liaodong Peninsula, Northeast China. *Acta Petrologica Sinica*, 31(6): 1589–1605 (in Chinese with English abstract).
- Liu, D. Y., Nutman, A. P., Compston, W., et al., 1992. Remnants of ≥ 3 800 Ma Crust in the Chinese Part of the Sino-Korean Craton. *Geology*, 20(4): 339. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1992\)0200339:romcit>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1992)0200339:romcit>2.3.co;2)
- Liu, G.P., Ai, Y.F., 2000. Studies on the Mineralization Age of Baiyun Gold Deposit in Liaoning. *Acta Petrologica Sinica*, 16(4): 627–632 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J., Liu, F. X., Li, S. H., et al., 2019. Formation of the Baiyun Gold Deposit, Liaodong Gold Province, NE China: Constraints from Zircon U-Pb Age, Fluid Inclusion, and C-H-O-Pb-He Isotopes. *Ore Geology Reviews*, 104: 686–706. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.12.006>
- Liu, J., Wang, S.L., Li, T.G., et al., 2018. Geochronology and Isotopic Geochemical Characteristics of Wulong Gold Deposit in Liaoning Province. *Mineral Deposits*, 37(4): 712–728 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J. L., Davis, G. A., Lin, Z. Y., et al., 2005. The Liaonan Metamorphic Core Complex, Southeastern Liaoning Province, North China: A Likely Contributor to Cretaceous Rotation of Eastern Liaoning, Korea and Contiguous Areas. *Tectonophysics*, 407(1/2): 65–80. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2005.07.001>
- Liu, J. L., Ji, M., Shen, L., et al., 2011. Early Cretaceous Extensional Structures in the Liaodong Peninsula: Structural Associations, Geochronological Constraints and Regional Tectonic Implications. *Science in China (Series*

- D: Earth Sciences*), 41(5): 618—637 (in Chinese).
- 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. *Precambrian Research*, 146(3/4): 138—164.
- Lu, X.P., Wu, F.Y., Lin, J.Q., et al., 2004. Geochronological Successions of the Early Precambrian Granitic Magmatism in Southern Liaodong Peninsula and Its Constraints on Tectonic Evolution of the North China Craton. *Chinese Journal of Geology (Scientia Geologica Sinica)*, 39(1): 123—138 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y.S., Gao, S., Hu, Z.C., et al., 2010. Continental and Oceanic Crust Recycling-Induced Melt-Peridotite Interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb Dating, Hf Isotopes and Trace Elements in Zircons of Mantle Xenoliths. *Journal of Petrology*, 51: 537—571.
- Liu, Y.S., Hu, Z.C., Gao, S., et al., 2008. In Situ Analysis of Major and Trace Elements of Anhydrous Minerals by LA-ICP-MS without Applying an Internal Standard. *Chemical Geology*, 257: 34—43.
- Ludwig, K. R., 2003. ISOPLOT 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center, California, 1—70.
- Luo, Y., Sun, M., Zhao, G. C., et al., 2004. LA-ICP-MS U-Pb Zircon Ages of the Liaohe Group in the Eastern Block of the North China Craton: Constraints on the Evolution of the Jiao-Liao-Ji Belt. *Precambrian Research*, 134(3/4): 349—371. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2004.07.002>
- 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. *Precambrian Research*, 163(3/4): 279—306. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2008.01.002>
- Maruyama, S., Izozaki, Y., Kimura, G., et al., 1997. Paleogeographic Maps of the Japanese Islands: Plate Tectonic Synthesis from 750 Ma to the Present. *The Island Arc*, 6(1): 121—142. <https://doi.org/10.1111/j.1440-1738.1997.tb00043.x>
- Meng, E., Xu, W.L., Yang, D.B., et al., 2011. Zircon U-Pb Chronology, Geochemistry of Mesozoic Volcanic Rocks from the Lingquan Basin in Manzhouli Area, and Its Tectonic Implications. *Acta Petrologica Sinica*, 27(4): 1209—1226 (in Chinese with English abstract).
- Meng, Q. R., 2003. What Drove Late Mesozoic Extension of the Northern China-Mongolia Tract?. *Tectonophysics*, 369(3/4): 155—174. [https://doi.org/10.1016/s0040-1951\(03\)00195-1](https://doi.org/10.1016/s0040-1951(03)00195-1)
- Pei, F. P., Xu, W. L., Yang, D. B., et al., 2011. Geochronology and Geochemistry of Mesozoic Mafic-Ultramafic Complexes in the Southern Liaoning and Southern Jilin Provinces, NE China: Constraints on the Spatial Extent of Destruction of the North China Craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, 40(2): 636—650. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2010.10.015>
- Qiu, K.F., Yang, L.Q., 2011. Genetic Feature of Monazite and Its U-Th-Pb Dating: Critical Considerations on the Tectonic Evolution of Sanjiang Tethys. *Acta Petrologica Sinica*, 27(9): 2721—2732 (in Chinese with English abstract).
- Shazia, J. R., Harlov, D. E., Suzuki, K., et al., 2015. Linking Monazite Geochronology with Fluid Infiltration and Metamorphic Histories: Nature and Experiment. *Lithos*, 236/237: 1—15. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.08.008>
- Song, B., Nutman, A. P., Liu, D. Y., et al., 1996. 3 800 to 2 500 Ma Crustal Evolution in the Anshan Area of Liaoning Province, Northeastern China. *Precambrian Research*, 78(1/2/3): 79—94. [https://doi.org/10.1016/0301-9268\(95\)00070-4](https://doi.org/10.1016/0301-9268(95)00070-4)
- Spear, F. S., Parrish, R. R., 1996. Petrology and Cooling Rates of the Valhalla Complex, British Columbia, Canada. *Journal of Petrology*, 37(4): 733—765. <https://doi.org/10.1093/petrology/37.4.733>
- Sun, J.F., Yang, J.H., 2009. A Review of In-Situ U-Pb Dating Methods for the Accessory U-Bearing Minerals. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 39(4): 630—641, 649 (in Chinese with English abstract).
- Sun, J.G., Lin, Q., Ge, W. C., 1992. The Deformation of the Archean Tonalite Bodies in Jinzhou Area, Liaoning Province and the Tectonic Environment of Emplacement. *Jilin Geology*, 11(4): 28—35 (in Chinese with English abstract).
- 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. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1989.042.01.19>
- Tera, F., Wasserburg, G. J., 1972. U-Th-Pb Systematics in Three Apollo 14 Basalts and the Problem of Initial Pb in Lunar Rocks. *Earth and Planetary Science Letters*, 14(3): 281—304. [https://doi.org/10.1016/0012-821x\(72\)90128-8](https://doi.org/10.1016/0012-821x(72)90128-8)
- Wan, Y. S., Liu, D. Y., Song, B., et al., 2005. Geochemi-

- cal and Nd Isotopic Compositions of 3.8 Ga Meta-Quartz Dioritic and Trondhjemitic Rocks from the Anshan Area and Their Geological Significance. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24(5): 563–575. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2004.02.009>
- Wei, J.H., Liu, C.Q., Tang, H.F., 2003. Metallogeny of Gold Deposits and Evidence of Isotopes and Trace Elements for the Comagmatic Evolution of the Yanshanian Intrusive Rocks in the Wulong Area, Eastern Liaoning. *Geological Review*, 49(3): 265–271 (in Chinese with English abstract).
- Wei, J.H., Liu, C.Q., Zhao, Y.X., et al., 2001. Time Span of the Major Ore-Forming Stages of the Wulong Gold Deposit, Liaoning. *Geological Review*, 47(4): 433–437 (in Chinese with English abstract).
- Wu, F. Y., Yang, J. H., Wilde, S. A., et al., 2005. Geochronology, Petrogenesis and Tectonic Implications of Jurassic Granites in the Liaodong Peninsula, NE China. *Chemical Geology*, 221(1/2): 127–156. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2005.04.010>
- Xiao, C. H., Liu, X. C., Zhao, Y., et al., 2020. Structural Controls and Re-Os Dating of Molybdenite of the 31 Wulong Gold Deposit, NE China. *Earth Science*, 45(11): 3982–3997 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, S. Y., 2019. Structural Evolution and Dike Emplacement Mechanism during Gold Mineralization in the Wulong Gold Mine Field, Eastern Liaoning (Dissertation). Hefei University of Technology, Hefei, 1–74 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, S. Y., Zhu, G., Zhang, S., et al., 2018. Structural Processes and Dike Emplacement Mechanism in the Wulong Gold Field, Eastern Liaoning. *Chinese Science Bulletin*, 63(28): 3022–3036 (in Chinese).
- Xue, C.J., Chen, Y.C., Lu, Y.F., et al., 2003. Metallogenic Epochs of Au and Ag Deposits in Qingchengzi Ore-Clustered Area, Eastern Liaoning Province. *Mineral Deposits*, 22(2): 177–184 (in Chinese with English abstract).
- Yang, F. C., Yang, J. L., Gu, Y. C., et al., 2019. Emplacement and Deformation Age of Surrounding Gneissic Granite in Wulong Gold Deposit, Eastern Liaoning Province: SHRIMP U-Pb Age. *Journal of Geomechanics*, 25(Suppl.1): 44–48 (in Chinese with English abstract).
- Yang, J.H., Wu, F.Y., Liu, X.M., et al., 2007. Petrogenesis and Geological Significance of the Jurassic Xiaoheshan Pluton in the Liaodong Peninsula, East China: In-Situ Zircon U-Pb Dating and Hf Isotopic Analysis. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 26(1): 29–43 (in Chinese with English abstract).
- Yang, J. H., Wu, F. Y., Lo, C. H., et al., 2004. Deformation Age of Jurassic Granites in the Dandong Area, Eastern China: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Geochronological Constraints. *Acta Petrologica Sinica*, 20(5): 1205–1214 (in Chinese with English abstract).
- Yu, B., Zeng, Q. D., Frimmel, H. E., et al., 2020. The 127 Ma Gold Mineralization in the Wulong Deposit, Liaodong Peninsula, China: Constraints from Molybdenite Re-Os, Monazite U-Th-Pb, and Zircon U-Pb Geochronology. *Ore Geology Reviews*, 121: 103542. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103542>
- Zeng, Q. D., Chen, R. Y., Yang, J. H., et al., 2019. The Metallogenic Characteristics and Exploring Ore Potential of the Gold Deposits in Eastern Liaoning Province. *Acta Petrologica Sinica*, 35(7): 1939–1963 (in Chinese with English abstract).
- Zhai, M. G., Zhu, R. X., Liu, J. M., et al., 2003. Key Time Limits for the Transition of the Mesozoic Structural System in Eastern North China. *Science in China (Series D Earth Sciences)*, 33 (10): 913–920 (in Chinese).
- Zhang, L. C., Shen, Y. C., Liu, T. B., et al., 2003. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and Rb-Sr Isochron Dating of the Gold Deposits on Northern Margin of the Jiao-Lai Basin, Shandong, China. *Science China Earth Sciences*, 46(7): 708–718.
- Zhang, P., 2018. Metallogenic Characteristics, Ore Genesis, Diagenesis and Metallogenic Geodynamic Process of Precious and Nonferrous Metals Ore Deposits in Southeast Liaoning Province (Dissertation). Jilin University, Changchun, 1–229 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, P., Li, B., Li, J., et al., 2016. Re-Os Isotopic Dating and Its Geological Implications of Gold Bearing Pyrite from the Baiyun Gold Deposit in Liaodong Rift. *Geotectonica et Metallogenia*, 40(4): 731–738 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, P., Zhao, Y., Kou, L. L., et al., 2019. Zircon U-Pb Ages, Hf Isotopes and Geological Significance of Mesozoic Granites in Dandong Area, Liaodong Peninsula. *Earth Science*, 44(10): 3297–3313 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, R. X., Fan, H. R., Li, J. W., et al., 2015. De-cratonic Gold Deposits. *Science China Earth Sciences*, 58(9): 1523–1537. <https://doi.org/10.1007/s11430-015-5139-x>
- Zong, K.Q., Klemm, R., Yuan, Y., et al., 2017. The Assembly of Rodinia: The Correlation of Early Neoproterozoic

zoic (ca. 900 Ma) High-Grade Metamorphism and Continental Arc Formation in the Southern Beishan Orogen, Southern Central Asian Orogenic Belt (CAOB). *Precambrian Research*, 290: 32–48.

附中文参考文献

辽宁省地质矿产局, 1989. 辽宁省区域地质志. 北京: 地质出版社, 1–856.

段晓侠, 刘建明, 王永彬, 等, 2012. 辽宁青城子铅锌多金属矿田晚三叠世岩浆岩年代学、地球化学及地质意义. *岩石学报*, 28(2): 595–606.

韩小平, 1997. 辽南金州地区的太古宙侵入岩. *辽宁地质*, 14(2): 81–90.

李三忠, 杨振升, 刘永江, 1996. 辽东古元古造山带隆—滑构造初析. *吉林大学学报*, 26(3): 305–309.

李壮, 陈斌, 刘经纬, 等, 2015. 辽东半岛南辽河群锆石 U-Pb 年代学及其地质意义. *岩石学报*, 31(6): 1589–1605.

刘国平, 艾永富, 2000. 辽宁白云金矿床成矿时代探讨. *岩石学报*, 16(4): 627–632.

刘军, 王树岭, 李铁刚, 等, 2018. 辽宁省五龙金矿床成岩成矿年代学及同位素地球化学特征. *矿床地质*, 37(4): 712–728.

刘俊来, 纪沫, 申亮, 等, 2011. 辽东半岛早白垩世伸展构造组合、形成时代及区域构造内涵. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 41(5): 618–637.

路孝平, 吴福元, 林景仟, 等, 2004. 辽东半岛南部早前寒武纪花岗质岩浆作用的年代学格架. *地质科学*, 39(1): 123–138.

孟恩, 许文良, 杨德彬, 等, 2011. 满洲里地区灵泉盆地中生代火山岩的锆石 U-Pb 年代学、地球化学及其地质意义. *岩石学报*, 27(4): 1209–1226.

邱昆峰, 杨立强, 2011. 独居石成因特征与 U-Th-Pb 定年及三江特提斯构造演化研究例析. *岩石学报*, 27(9): 2721–2732.

孙金凤, 杨进辉, 2009. 含 U 副矿物的原位微区 U-Pb 定年方法. *吉林大学学报(地球科学版)*, 39(4): 630–641, 649.

孙景贵, 林强, 葛文春, 1992. 辽宁金州地区太古宙英云闪长岩体的变形与侵位的构造环境. *吉林地质*, 11(4):

28–35.

魏俊浩, 刘丛强, 唐红峰, 2003. 辽东五龙地区燕山期侵入岩类同源岩浆演化微量元素、同位素证据与金矿成矿. *地质论评*, 49(3): 265–271.

魏俊浩, 刘丛强, 赵永鑫, 等, 2001. 辽宁五龙金矿主成矿阶段成矿持续时限. *地质论评*, 47(4): 433–437.

肖昌浩, 刘向冲, 赵岩, 等, 2020. 辽东五龙金矿床构造控矿特征和辉钼矿 Re-Os 年龄. *地球科学*, 45(11): 3982–3997.

肖世椰, 2019. 辽东五龙金矿区构造演化及金矿期岩脉就位机制(硕士学位论文). 合肥: 合肥工业大学, 1–74.

肖世椰, 朱光, 张帅, 等, 2018. 辽东五龙金矿区成矿期构造过程与岩脉就位机制. *科学通报*, 63(28): 3022–3036.

薛春纪, 陈毓川, 路远发, 等, 2003. 辽东青城子矿集区金、银成矿时代及地质意义. *矿床地质*, 22(2): 177–184.

杨凤超, 杨佳林, 顾玉超, 等, 2019. 辽东五龙金矿围岩片麻状花岗岩的侵位和变形时代: SHRIMP U-Pb 年代学制约. *地质力学学报*, 25(S1): 44–48.

杨进辉, 吴福元, 柳小明, 等, 2007. 辽东半岛小黑山岩体成因及其地质意义: 锆石 U-Pb 年龄和铅同位素证据. *矿物岩石地球化学通报*, 26(1): 29–43.

杨进辉, 吴福元, 罗清华, 等, 2004. 辽宁丹东地区侏罗纪花岗岩的变形时代: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学制约. *岩石学报*, 20(5): 1205–1214.

曾庆栋, 陈仁义, 杨进辉, 等, 2019. 辽东地区金矿床类型、成矿特征及找矿潜力. *岩石学报*, 35(7): 1939–1963.

翟明国, 朱日祥, 刘建明, 等, 2003. 华北东部中生代构造体制转折的关键时限. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 33(10): 913–920.

张朋, 2018. 辽宁省东南部典型有色、贵金属矿床成矿特征、成因与成岩成矿地球动力学过程(博士学位论文). 长春: 吉林大学, 1–229.

张朋, 李斌, 李杰, 等, 2016. 辽东裂谷白云金矿载金黄铁矿 Re-Os 定年及其地质意义. *大地构造与成矿学*, 40(4): 731–738.

张朋, 赵岩, 寇林林, 等, 2019. 辽东半岛丹东地区中生代花岗岩锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素特征及其地质意义. *地球科学*, 44(10): 3297–3313.