

# 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\*

刘 军<sup>1</sup>, 王树岭<sup>2</sup>, 李铁刚<sup>1</sup>, 杨 艳<sup>3</sup>, 刘福兴<sup>4</sup>, 李生辉<sup>4</sup>, 段 超<sup>1</sup>

(1 中国地质科学院矿产资源研究所 自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037; 2 内蒙古自治区国土资源厅, 内蒙古 呼和浩特 10020; 3 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037; 4 辽宁省有色地质局一〇三队, 辽宁 丹东 118008)

**摘 要** 五龙矿床是中国辽东地区最大的石英脉型金矿床, 赋存于中生代黑云母花岗岩中。金矿体多呈脉状产出, 与中生代细粒闪长岩有成因联系。文章采用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年方法, 获得矿区内黑云母花岗岩、花岗斑岩、细粒闪长岩的结晶年龄分别为 (155.4±0.9) Ma、(154.2±1.2) Ma、(123.1±0.9) Ma。文章选取金矿石中绢云母样品开展了 Ar-Ar 定年, 获得 Ar-Ar 坪年龄为 (122.8±0.8) Ma (MSWD=0.09)。金属硫化物的  $\delta^{34}\text{S}$  值介于 +1.1‰~+2.4‰, 平均值为 +1.8‰, 表明硫主要来自深源岩浆。黄铁矿中流体包裹体  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比值为 0.36~0.65 Ra, 平均值为 0.50 Ra, 表明地幔流体参与成矿作用的比例为 3.9%~7.2%, 地壳流体占主导地位。五龙金矿的成矿时代为早白垩世, 形成于华北克拉通东部的构造体制转折和大规模岩石圈减薄背景。

**关键词** 地球化学; 锆石 U-Pb 定年; 绢云母 Ar-Ar 定年; 五龙金矿; 华北克拉通

中图分类号: P618.51

文献标志码: A

## Geochronology and isotopic geochemical characteristics of Wulong gold deposit in Liaoning Province

LIU Jun<sup>1</sup>, WANG ShuLing<sup>2</sup>, LI TieGang<sup>1</sup>, YANG Yan<sup>3</sup>, LIU FuXing<sup>4</sup>, LI ShengHui<sup>4</sup> and DUAN Chao<sup>1</sup>

(1 MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2 Department of Land and Resources of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 10020, Inner Mongolia, China; 3 Development Research Center of Chinese Geological Survey, Beijing 100037, China; 4 No. 103 Geological Party of Non-ferrous Geological Bureau of Liaoning Province, Dandong 118008, Liaoning, China)

### Abstract

The Wulong deposit is the largest quartz vein type gold deposit in eastern Liaoning Province. The orebodies are hosted in the Mesozoic biotite granite. The orebodies occur as veins, which have a genetic relation to the Mesozoic fine-grained diorite. The high precision LA-ICP-MS zircon U-Pb dating method was adopted to measure the ages of the biotite granite, granite porphyry and fine-grained diorite in the Wulong deposit, which yielded (155.4±0.9) Ma, (154.2±1.2) Ma and (123.1±0.9) Ma, respectively. A sericite sample in gold ore was selected for the Ar-Ar dating method to determine the mineralization age of the Wulong gold deposit. An Ar-Ar plateau age defined by a sericite sample yielded an age of (122.8±0.8) Ma (MSWD=0.09). The  $\delta^{34}\text{S}$  values of metallic sulfides range from +1.1‰ to +2.4‰, with an average of +1.8‰, suggesting that the sulfur came mainly from deep magma.  $^3\text{He}/^4\text{He}$  ratios of fluid inclusions in pyrite range from 0.36 to 0.65 Ra with an average of 0.50 Ra. The mantle

\* 本文得到国家重点研发计划项目(编号:2017YFC0601403)、国家自然科学基金项目(编号:41672066)和中国地质科学院基本科研业务费项目(编号:YYWF201512)联合资助

第一作者简介 刘 军, 男, 1983 年生, 博士, 副研究员, 矿床学专业。Email: junliu@yeah.net

收稿日期 2017-10-05; 改回日期 2018-05-03。秦思婷编辑。

helium involved in the ore-forming fluid is 3.9% to 7.2%, suggesting the dominance of the earth's crust fluid. The ore-forming age of the Wulong gold deposit is early Cretaceous. The Wulong deposit was formed in a tectonic regime transformation and lithosphere thinning setting in eastern part of the North China Craton.

**Key words:** geochemistry, zircon U-Pb dating, sericite Ar-Ar dating, Wulong gold deposit, North China Craton

辽东半岛是中国重要的菱镁矿、滑石、硼、铅锌、金、银和铜成矿区,尤以盛产菱镁矿、滑石、硼及铅锌著称。20世纪90年代以来,辽东地区相继发现了五龙、小佟家堡子、白云、猫岭、王家崴子、四道沟等多处大、中型金矿床,该区已成为中国重要的金矿集中区。中国学者曾认为辽东地区金矿床是产于古元古代辽东裂谷内部,受裂谷特定岩系控制的一系列金矿床(涂光炽,1984;方如恒,1999)。然而,随着近年来辽东地区金矿床勘查和研究工作的深入,发现众多金矿床同时受韧性剪切带及中生代岩浆活动复合控制(倪培等,1993;刘先利等,2000;刘如琦等,2006;Yu et al., 2009)。前人在辽东地区的铅锌、菱镁矿及硼矿的矿床地质及成矿理论研究方面已经积累了丰富的资料,而众多金矿床由于发现较晚,总体研究程度相对较低,主要存在2方面问题:①成矿时代不清,争论焦点是元古代、中生代,或多期成矿;②成矿流体和物质源区研究薄弱。由于这些关键地质问题长时间得不到有效解决,进而出现了层控型(涂光炽,1984)、变质热液型(倪培等,1993)、大气降水热液型(倪培等,1993)、韧性剪切带型(刘先利等,2000)及岩浆热液型(倪培等,1993;Yu et al., 2009)矿床等多种观点,这严重限制了辽东地区金矿床的理论研究水平及找矿勘查工作的部署。

五龙矿床是辽东地区代表性的石英脉型金矿床,累计产金量>40 t,达到大型规模(王可勇等,2010)。但随着生产年限和开采深度的增加,目前五龙金矿床面临保有储量不足,资源枯竭的局面,急需新的成矿作用认识引领新的找矿思路带动勘查突破(王明志等,2011)。近60年的研究探索与找矿实践表明,新的成矿认识与找矿思路是勘查突破的关键(杨利亚等,2013;Deng et al., 2014)。鉴于此,笔者选择五龙金矿开展典型矿床研究,以期为辽东地区金矿床成矿机制及找矿方向研究提供新鲜素材。五龙矿床作为辽东地区代表性的大型金矿床,前人开展了矿床地质特征、成矿流体性质、区域岩浆岩年代学及岩石成因等方面研究(李力等,1993;彭艳东,1994;赵玉山等,1994;杨春福等,1997;张国宪等,2001;魏俊浩等,2001;2003;王可勇等,2010;王明志

等,2011)。然而,五龙矿床的成岩成矿时代、物质源区及成矿构造背景研究仍较薄弱。本文选取五龙矿床内各期侵入岩开展LA-ICP-MS锆石U-Pb定年,对主成矿阶段绢云母开展Ar-Ar同位素测年,对矿石中金属硫化物开展S、He同位素分析,目的是精确测定五龙矿床成岩成矿时代,示踪成矿流体来源,探讨成矿动力学背景。

## 1 区域地质背景

辽东半岛位于华北克拉通东部、郯庐断裂以东(图1)。该区基底岩石主要由太古代TTG岩系和古元古代浅变质沉积岩、火山岩组成,之上出露新元古代—震旦纪沉积岩(辽宁省地质矿产局,1989)。太古代岩石主要分布于金州亮甲店一带,由强变形的英云闪长岩和花岗闪长岩组成,其LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄介于2547~2518 Ma(路孝平等,2004)。古元古代辽河群覆盖于太古代变质岩之上并与太古代TTG岩系共同组成辽东半岛的基底岩石。辽河群主要由中-低级变质岩组成,包括各类片岩、片麻岩、大理岩和斜长角闪岩。中元古代以后,辽东半岛经历了稳定的新元古代—古生代沉积作用,形成了一套巨厚的沉积地层(杨进辉等,2004)。

中生代期间,辽东半岛成为环太平洋构造-岩浆带的重要组成部分(Wu et al., 2005a; 2005b),发育大面积的花岗岩和火山岩(大约20000 km<sup>2</sup>),尤其是花岗岩广泛出露在辽东半岛(辽宁省地质矿产局,1989)。吴福元等(2005)将辽东半岛中生代岩浆活动划分为3期,即三叠纪(212~233 Ma)、侏罗纪(156~180 Ma)和白垩纪(117~131 Ma)。三叠纪侵入岩分布于岫岩地区西部和北部,主要包括碱性岩类和二长花岗岩(杨进辉等,2009)。侏罗纪—白垩纪是岩浆侵入活动最强烈的时期;侏罗纪侵入岩分布于本溪、岫岩、盖州东部、瓦房店东部等地,主要由二长花岗岩、花岗岩和花岗闪长岩构成(Wu et al., 2005a);白垩纪侵入岩分布于本溪、岫岩、丹东、盖州、庄河、金州和瓦房店一带,其岩石类型多样,从基性、中性到酸性岩石均有发育,主要为花岗岩类和花

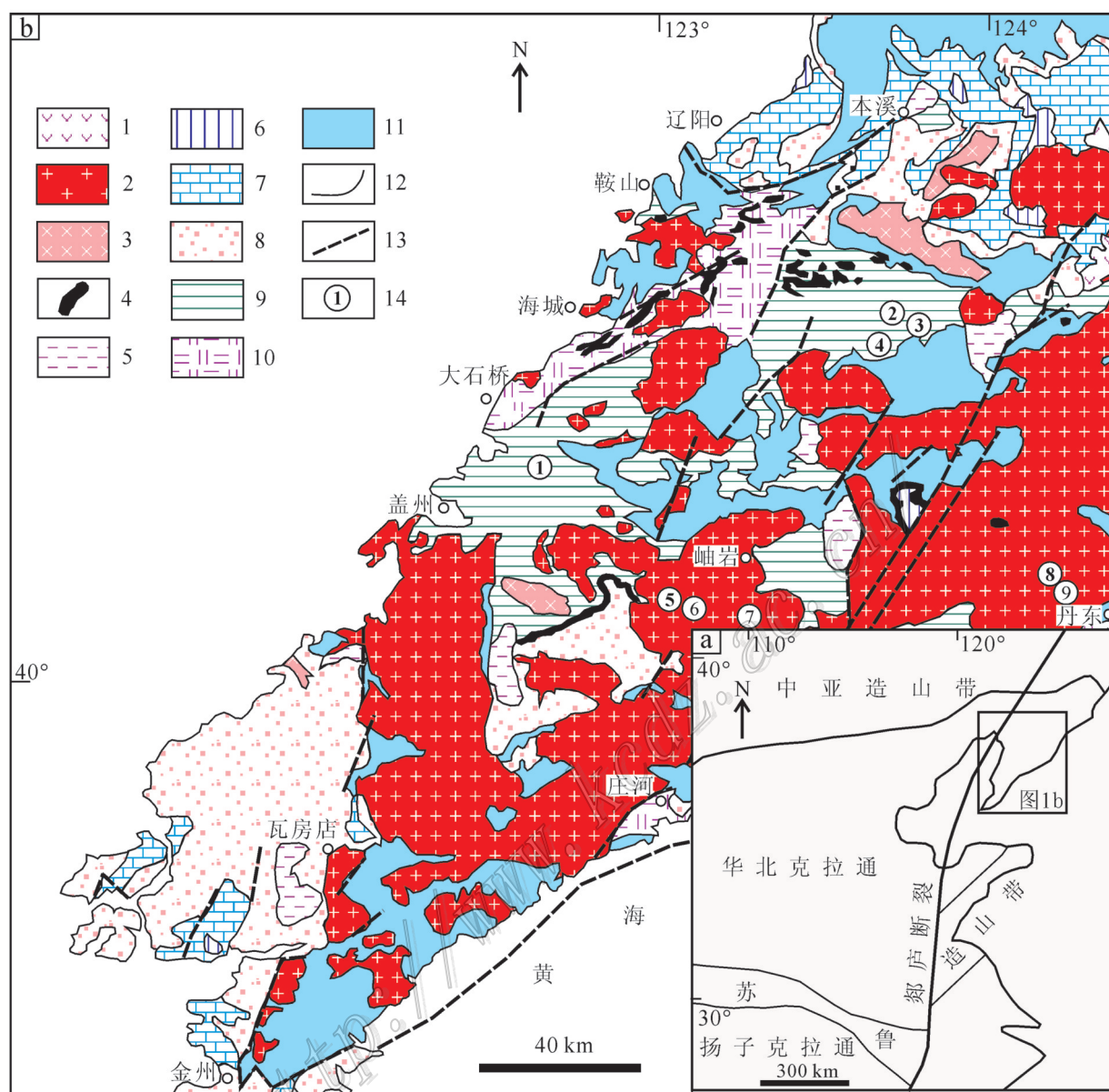


图1 辽东半岛区域地质和主要金矿床分布简图(据林伟等,2011修改)

1—中生代火山岩;2—中生代花岗岩;3—元古代花岗岩;4—元古代镁铁质-超镁铁质岩石;5—白垩系陆相沉积岩;6—石炭系—二叠系沉积岩;7—寒武系—奥陶系沉积岩;8—古元古界碳酸岩、砂岩、石英岩和板岩(辽河群);9—古元古界板岩、大理岩和变泥质岩;10—古元古代超镁铁质岩、镁铁质岩、片麻岩、硅质岩和变泥质岩;11—太古代片麻状混合岩和基底片麻岩;12—地质界线;13—断裂;14—金矿床  
金矿床:①—分水金矿;②—白云金矿;③—小佟家堡子金矿;④—石庙子金矿;⑤—王家崴子金矿;⑥—猫岭金矿;  
⑦—塔岭金矿;⑧—五龙金矿;⑨—四道沟金矿

Fig. 1 Sketch geological map of Liaodong peninsula, showing distribution of major gold deposits in Liaodong peninsula (modified after Lin et al., 2011)

1—Mesozoic volcanic rocks; 2—Mesozoic granite; 3—Proterozoic granite; 4—Proterozoic mafic-ultramafic rocks; 5—Cretaceous continental sedimentary rocks; 6—Carboniferous-Permian sedimentary rocks; 7—Cambrian-Ordovician sedimentary rocks; 8—Neoproterozoic carbonatite, sandstone, quartzite and slate (Liaohe Group); 9—Paleoproterozoic slate, marble and metapelite; 10—Paleoproterozoic ultramafic rocks, mafic rocks, gneiss, silica rocks and metapelite; 11—Archean gneissic migmatite and basement gneiss; 12—Geological boundary; 13—Fault; 14—Location of gold deposit

Gold deposits: ①—Fenshui gold deposit; ②—Baiyun gold deposit; ③—Xiaotongjiapuzi gold deposit; ④—Shimiaozi gold deposit; ⑤—Wangjia-weizi gold deposit; ⑥—Maoling gold deposit; ⑦—Taling gold deposit; ⑧—Wulong gold deposit; ⑨—Sidaogou gold deposit

岗闪长岩类(Wu et al., 2005b)。辽东半岛内中生代盆地发育较为局限,主要形成于晚侏罗世—早白垩世。其中,早-中侏罗世的沉积盆地分布十分有限,仅分布在瓦房店东部和本溪县东部和东南部等零星的小盆地中,盆地的充填物为泥岩、砂岩及砾岩。晚侏罗世—早白垩世沉积盆地经常与变质核杂岩及同构造花岗岩成对发育,表明这一时期广泛发育伸展构造(杨进辉等,2004;Liu et al., 2005;2008)。

## 2 矿床地质

五龙矿床位于辽宁省丹东市境内,是辽东半岛内规模最大的石英脉型金矿床。矿区内地层零星发育,仅在矿区南部出露部分古元古代辽河群,其呈不连续残留体状分布于黑云母花岗岩体中(图2)。辽河群主要由板岩、黑云母片岩、角闪片岩、黑云母变粒岩及大理岩等组成。矿区内中生代岩浆活动强烈,主要岩体有黑云母花岗岩体及三股流花岗闪长岩体。前者在呈岩基形式产出,是主要赋矿围岩;后者呈岩株状产出,出露于矿区南部。细粒闪长岩、闪长玢岩、花岗斑岩、煌斑岩及辉绿岩较发育,其中,细粒闪长岩、闪长玢岩和花岗斑岩为成矿前脉岩,其他为成矿后脉岩。矿区内断裂构造较发育,具有多期活动的特点。断裂构造按产状可分为近NNE向、NE向、近SN向、NW向和EW向5组。按断裂活动与金矿化作用的关系,断裂构造分为3类,即成矿前断裂,被不含金石英脉、细粒闪长岩、闪长玢岩及花岗斑岩所充填;成矿期断裂为早期断裂的复活和继承断裂,被多阶段矿化形成的含金石英脉充填;成矿后断裂,被煌斑岩和辉绿岩脉充填(王可勇等,2010)。

金矿化类型主要为石英脉型(图3a、b),少量为蚀变构造岩型,目前已发现含金石英脉460余条,其中具有工业价值的约占20%。含金石英脉与围岩界限分明,以脉状、透镜状为主,具有明显的分支复合、尖灭再现等特点。含金石英脉呈近SN向及NW向展布(局部NE向展布)。其中,近SN向含金石英脉走向10°,倾向西,倾角75°~85°;NW向含金石英脉走向320°,倾向南西,倾角40°~85°。含金石英脉长度一般为几十至千余米,宽0.1~30 m,延长与延深之比为1:1~1:1.5。矿石主要呈块状、细脉状、网脉状、细脉浸染状、浸染状及角砾状产出。矿石主要发育半自形粒状结构、他形粒状结构、充填结构、交代溶

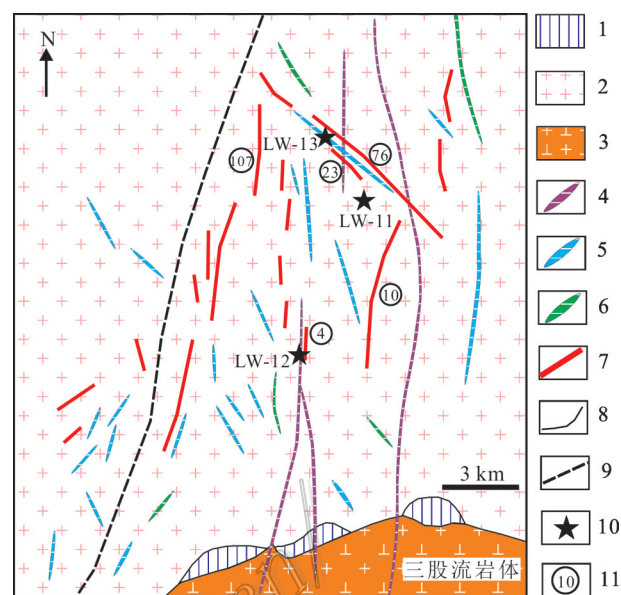


图2 五龙金矿床地质简图

(据彭艳东,1994;魏俊浩等,2001修改)

- 1—古元古界辽河群变质岩;2—中生代黑云母花岗岩;3—中生代花岗闪长岩;4—中生代花岗斑岩;5—中生代细粒闪长岩;6—中生代煌斑岩;7—含金石英脉;8—地质界线;9—断裂;  
10—采样位置;11—含金石英脉编号

Fig. 2 Simplified geological map of the Wulong gold deposit (modified after Peng, 1994; Wei et al., 2001)

- 1—Paleoproterozoic metamorphic rocks of Liaohe Group; 2—Mesozoic biotite granite; 3—Mesozoic granodiorite; 4—Mesozoic granite porphyry; 5—Mesozoic fine-grained diorite; 6—Mesozoic lamprophyre; 7—Au-bearing quartz vein; 8—Geological boundary; 9—Fault; 10—Sampling location; 11—Serial number of Au-bearing quartz vein

蚀结构和固溶体分离结构。金属矿物主要为黄铁矿,其次为黄铜矿、磁黄铁矿、辉铋矿、方铅矿、闪锌矿、毒砂、银金矿及自然金(图3c~i)。脉石矿物主要为石英、绢云母、长石、绿泥石、方解石及萤石等。围岩蚀变较发育,蚀变带宽度介于1~5 m,无明显的蚀变分带现象。蚀变类型主要有钾化、硅化、绢云母化、碳酸盐化和绿泥石化。根据矿物共生组合、矿石组构及脉体穿插关系等,将成矿过程初步划分早、中、晚3个阶段:①成矿早阶段,发育石英-黄铁矿±钾长石脉,见少量半自形-自形粒状黄铁矿,金矿化微弱(图3c、g);②成矿中阶段,发育石英-多金属硫化物脉,金属矿物主要为半自形-他形粒状黄铁矿,其次为黄铜矿、磁黄铁矿、方铅矿、闪锌矿、辉铋矿等,该阶段金矿化强烈,是主要的金矿化阶段(图3d、e、h、i);③成矿晚阶段,发育石英-碳酸盐脉(图3f),

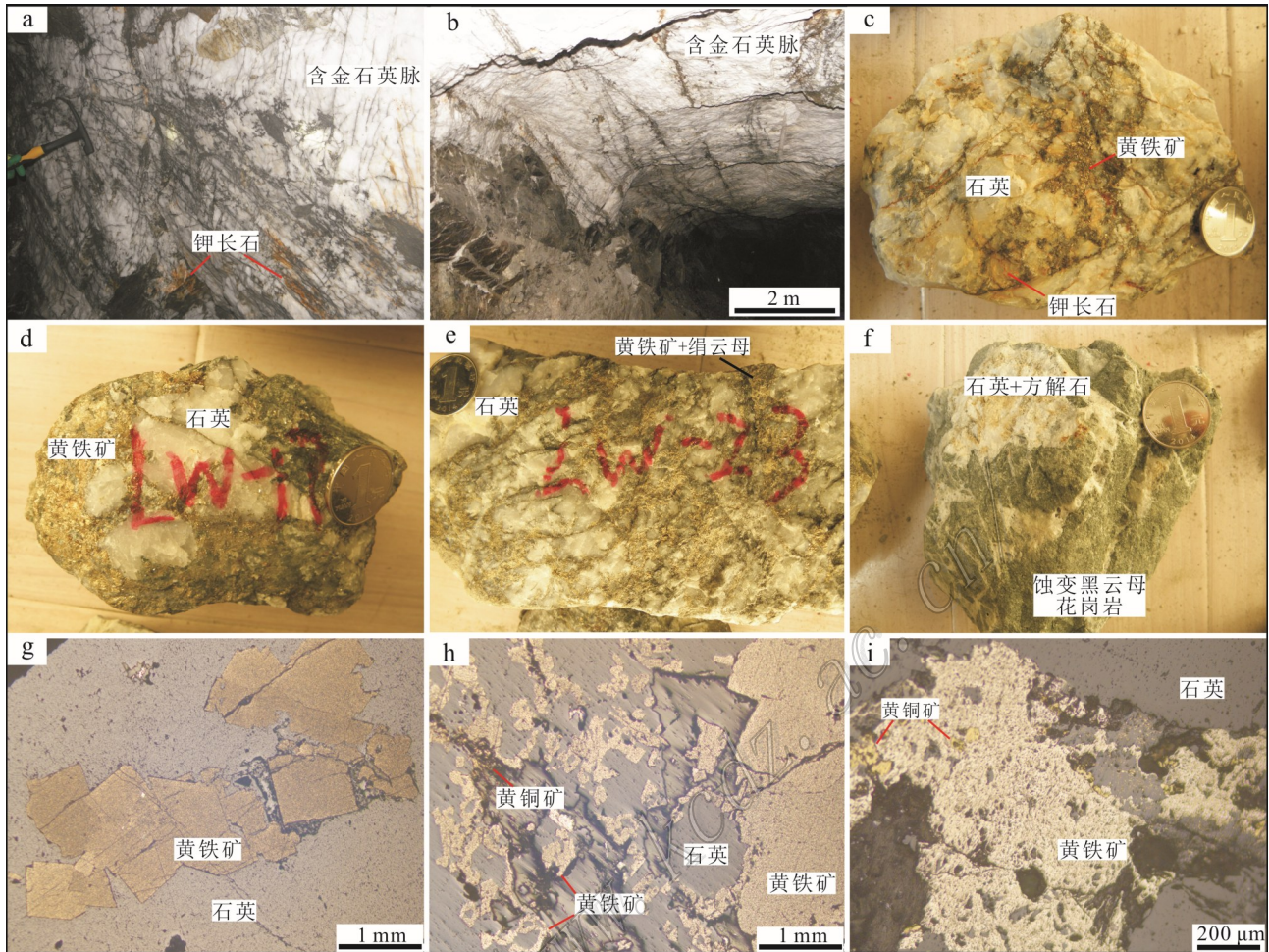


图3 五龙金矿床典型矿石照片

a、b. 含金石英脉; c. 石英-黄铁矿-钾长石脉; d. 石英-多金属硫化物脉; e. 石英-绢云母-多金属硫化物脉; f. 石英-方解石脉;  
g. 成矿早阶段, 半自形-自形粒状黄铁矿; h、i. 成矿中阶段, 半自形-他形粒状黄铁矿、他形粒状黄铜矿

Fig. 3 Microscope photographs of ores from the Wulong gold deposit

a, b. Gold-bearing quartz vein; c. Quartz-pyrite-K-feldspar vein; d. Quartz-polymetallic sulfide vein; e. Quartz-sericite-polymetallic sulfide vein;  
f. Quartz-calcite vein; g. Subhedral- and euhedral-granular pyrite of the early stage; h, i. Subhedral and anhedral-granular pyrite,  
and anhedral-granular chalcopyrite of the middle stage

可见石英、方解石及萤石等(彭艳东, 1994; 魏俊浩等, 2001; 王可勇等, 2010)。

### 3 样品特征及分析方法

#### 3.1 锆石 U-Pb 定年

用于锆石 U-Pb 定年的黑云母花岗岩、花岗斑岩、细粒闪长岩样品采自五龙金矿 4 号和 23 号矿体地下坑道中。采样时, 尽量采集无矿化且较新鲜的岩石。其中, 黑云母花岗岩(样品 LW-11)呈似斑状结构, 主要矿物为斜长石(45%)、钾长石(20%)、石英

(25%)及黑云母(10%)。斜长石呈半自形板状, 聚片双晶发育, 大小 0.5~4 mm, 见轻微绢云母化或绿泥石化。钾长石呈半自形板状或他形粒状, 大小 0.3~3 mm, 见网格状双晶, 部分晶体表面高岭石化。石英呈半自形-他形粒状, 波状消光, 大小 0.3~2 mm。黑云母呈片状, 大小 0.2~2 mm。副矿物见榍石、锆石和磁铁矿(图 4a); 花岗斑岩(样品 LW-12)呈斑状结构, 斑晶占 10% 左右, 主要矿物有斜长石(5%)、钾长石(3%)及石英(2%), 大小在 1~3 mm 左右。斜长石呈半自形板状, 聚片双晶发育, 绢云母化。钾长石为半自形板状或他形粒状, 具格子状双晶, 表面发育

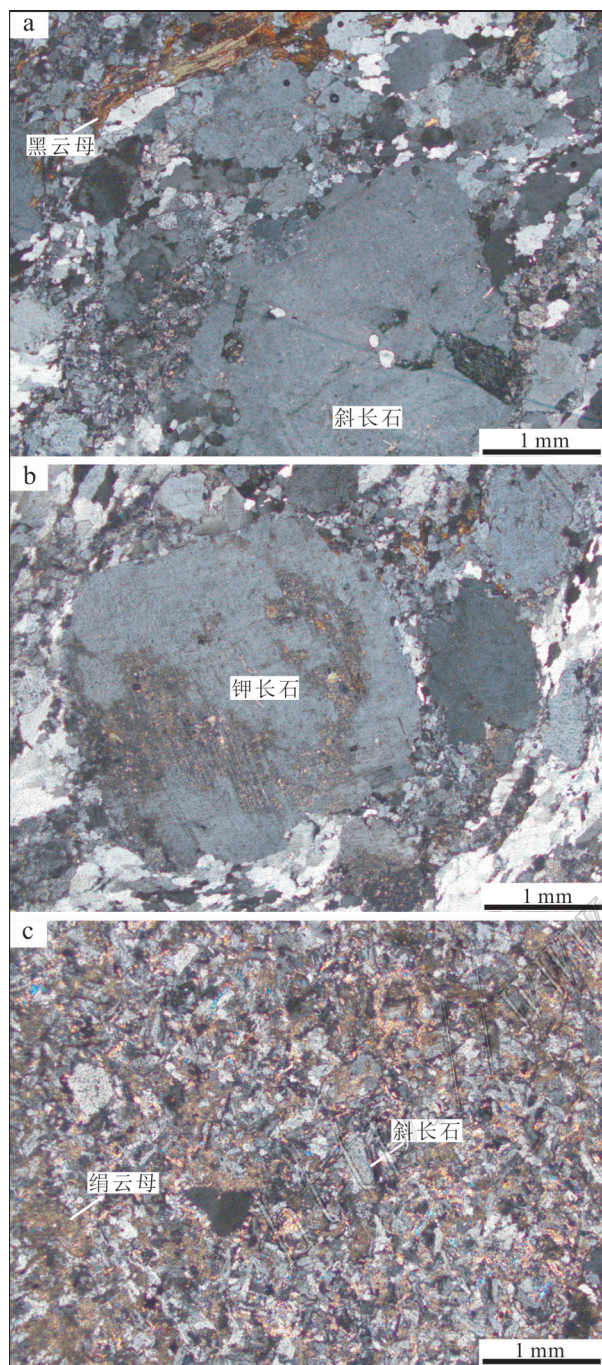


图4 五龙金矿床中酸性侵入岩显微照片

a. 黑云母花岗岩; b. 花岗斑岩; c. 细粒闪长岩

Fig. 4 Microscope photographs of intermediate-acidic intrusions from the Wulong gold deposit

a. Biotite granite; b. Granite porphyry; c. Fine-grained diorite

轻微高岭石化。石英呈他形粒状。基质占90%左右,显微花岗结构,由细粒状的钾长石、斜长石及石英等组成,粒径一般 $<0.5$  mm。副矿物见锆石、榍

石、磷灰石等(图4b);细粒闪长岩(样品LW-13)呈似斑状结构,主要矿物有斜长石(75%)、角闪石(15%)和黑云母(10%)。斜长石呈半自形-自形板状,大小 $0.2\sim0.6$  mm,见绢云母化现象。角闪石呈短柱状,大小 $0.2\sim0.4$  mm。黑云母呈半自形-他形片状,大小 $0.2\sim0.4$  mm。副矿物见锆石、榍石(图4c)。

将采集的岩石样品破碎,按重力和磁选方法分选,最后在双目镜下根据锆石颜色、自形程度、形态等特征初步分类,挑选出具有代表性的锆石。将分选好的锆石用环氧树脂制靶、打磨和抛光。锆石的阴极发光(CL)图像在北京锆年领航科技有限公司完成,仪器为日本JEOL公司生产的JSM6510型扫描电子显微镜。LA-MC-ICP-MS锆石U-Pb定年测试工作在自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室完成,锆石定年分析所用仪器为Finnigan Neptune型MC-ICP-MS及与之配套的Newwave UP 213激光剥蚀系统。激光剥蚀所用斑束直径为 $25\text{ }\mu\text{m}$ ,频率为10 Hz,能量密度约为 $2.5\text{ J}/\text{cm}^2$ ,以He为载气。信号较小的 $^{207}\text{Pb}$ 、 $^{206}\text{Pb}$ 、 $^{204}\text{Pb}$ (+ $^{204}\text{Hg}$ )、 $^{202}\text{Hg}$ 用离子计数器(multi-ion-counters)接收, $^{208}\text{Pb}$ 、 $^{232}\text{Th}$ 、 $^{238}\text{U}$ 信号用法拉第杯接收,实现了所有目标同位素信号的同时接收并且不同质量数的峰基本上都是平坦的,进而可以获得高精度的数据,均匀锆石颗粒 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 、 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 的测试精度均为2%左右,对锆石标准的定年精度和准确度在1%左右。测试过程中在每测定5~7个样品前后重复测定2个锆石GJ1对样品进行校正,并测量1个锆石Plesovice,观察仪器的状态以保证测试的精确度。详细实验测试过程见侯可军等(2009)。

### 3.2 绢云母Ar-Ar定年

本次用于Ar-Ar测年的样品采自五龙金矿23号矿体地下坑道中,为石英-绢云母-多金属硫化物脉。该样品主要包含石英和黄铁矿,其次为绢云母、黄铜矿和磁黄铁矿。

绢云母样品Ar-Ar测年工作在中国地质科学院地质研究所同位素热年代学实验室进行。被分析的样品首先通过“倒选法”提取适合 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 测年的绢云母,经超声波清洗后,将样品封入石英瓶中送核反应堆接受快中子照射。照射工作是在中国原子能科学院的“游泳池堆”中进行的。使用B4孔道,中子流密度约为 $2.65\times10^{13}\text{ n}\cdot\text{cm}^{-2}\text{ S}^{-1}$ 。照射总时间为1440 min,积分中子通量为 $2.30\times10^{18}\text{ n}\cdot\text{cm}^{-2}$ ;同期接受中子照射的还有用做监控样的标准样:ZBH-25黑云母

标样,其标准年龄为 $(132.7 \pm 1.2)$  Ma,  $w(K)$ 为7.6%。样品的阶段升温加热使用石墨炉,每一个阶段加热10 min,净化20 min。质谱分析是在多接收稀有气体质谱仪Helix MC上进行的,每个峰值均采集20组数据。所有的数据在回归到时间零点值后再进行质量歧视校正、大气氩校正、空白校正和干扰元素同位素校正。中子照射过程中所产生的干扰同位素校正系数通过分析照射过的 $K_2SO_4$ 和 $CaF_2$ 来获得,其值为: $(^{36}Ar/^{37}Ar)_o = 0.000\ 239\ 8$ ,  $(^{40}Ar/^{39}Ar)_K = 0.004\ 782$ ,  $(^{39}Ar/^{37}Ar)_o = 0.000\ 806$ 。 $^{37}Ar$ 经过放射性衰变校正; $^{40}K$ 衰变常数 $\lambda = 5.543 \times 10^{-10} a^{-1}$  (Steiger et al., 1977);用ISOPLOT程序计算坪年龄(Ludwig, 2001)。坪年龄误差以 $2\sigma$ 给出。详细实验流程见有关文章(陈文等,2006;张彦等,2006)。

### 3.3 S同位素研究方法

研究样品采自五龙金矿4号和23号矿体地下坑道中,包括石英-黄铁矿±钾长石脉和石英-多金属硫化物脉。其中,石英-黄铁矿±钾长石脉中金属矿物主要为黄铁矿,半自形-自形粒状结构;石英-多金属硫化物脉中金属矿物主要为黄铁矿,其次为黄铜矿和磁黄铁矿,半自形-他形粒状结构。

金属硫化物样品的S同位素分析在核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成。金属硫化物单矿物和氧化亚铜按一定比例研磨至200目左右,并混合均匀,在真空达 $2.0 \times 10^{-2}$  Pa状态下加热,进行氧化反应,反应温度为 $980^\circ C$ ,生成二氧化硫气体。在真空条件下,用冷冻法收集二氧化硫气体,并用MAT 253气体同位素质谱分析硫同位素组成。测量结果以CDT为标准,记为 $\delta^{34}S$ 。分析精度优于 $\pm 0.2\text{‰}$ 。硫化物参考标准为GBW-04414、GBW-04415硫化银标准,其 $\delta^{34}S$ 值分别为 $-0.07\text{‰} \pm 0.13\text{‰}$ 和 $22.15\text{‰} \pm 0.14\text{‰}$ 。

### 3.4 He-Ar同位素研究方法

研究样品采自五龙金矿23号矿体地下坑道中,包括石英-黄铁矿±钾长石脉和石英-多金属硫化物脉。测试对象为黄铁矿中的流体包裹体。黄铁矿是研究成矿流体稀有气体同位素组成的理想寄主矿物,黄铁矿中流体包裹体的He和Ar同位素组成基本可以代表其成矿流体的氦氩同位素体系(Hu et al., 1998;2004;2009)。

样品的制备和测试分析均在自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室完成,测试仪器为Helix SFT型稀有气体质谱仪,系统由压碎、纯化和质谱系统组成。测试在高真空下完成,压碎和纯化系

统真空 $n \times 10^2$  Pa,质谱系统真空在 $n \times 10$  Pa。具体步骤如下:①将高纯度40~60目样品清洗、烘干,取0.5~1.0 g装入不锈钢坩埚再移到压碎装置中,密封并去气、抽真空;②压碎样品,多级纯化包裹体气,分离出纯He和Ar;③He模式下, $^4He$ 信号用法拉第杯接收, $^3He$ 用离子倍增器接收,Ar模式下, $^{40}Ar$ 和 $^{36}Ar$ 信号用法拉第杯接收, $^{38}Ar$ 用倍增器接收;④同位素比值结果校正。利用当天空气标准的测试结果和空气标准值校正样品测试结果,空气的 $^3He/^4He$ 标准值采用 $1.4 \times 10^{-6}$ , $^{40}Ar/^{36}Ar$ 和 $^{36}Ar/^{38}Ar$ 标准值采用295.5和5.35;⑤ $^4He$ 和 $^{40}Ar$ 含量( $cm^3$  SPT/g)结果,利用0.1 ml标准气 $^4He$  ( $52.3 \times 10^{-8} cm^3$  SPT)和 $^{40}Ar$  ( $4.472 \times 10^{-8} cm^3$  SPT)含量、标准气和样品的同位素信号强度以及样品压碎后过筛100目以下的质量标定样品中 $^4He$ 和 $^{40}Ar$ 含量。

## 4 测试结果

### 4.1 锆石U-Pb年龄

黑云母花岗岩(样品LW-11)锆石主要呈长柱状,少量为短柱状,粒径集中在 $75 \sim 150 \mu m$ ,多数无色透明,部分锆石呈黄褐色。阴极发光图像显示,锆石具清楚的生长韵律环带(图5a)。17颗锆石的Th/U比值介于0.1~1.4,平均值0.4,大于0.1; $w(Th)$ 介于 $47.4 \times 10^{-6} \sim 1005.9 \times 10^{-6}$ ,平均值 $425.1 \times 10^{-6}$ ;  $w(U)$ 介于 $130.7 \times 10^{-6} \sim 4454.8 \times 10^{-6}$ ,平均值 $1310.4 \times 10^{-6}$ (表1),据此认为这些锆石为岩浆成因锆石。在 $^{206}Pb/^{238}U$ - $^{207}Pb/^{235}U$ 谐和图(图6a)中,17颗锆石的17个分析点中,15个分析点落在谐和线上及其附近,其 $^{206}Pb/^{238}U$ 加权平均年龄为 $(155.4 \pm 0.9)$  Ma (MSWD=0.9)。另有2颗锆石的谐和年龄分别为 $(173.1 \pm 2.8)$  Ma、 $(265.2 \pm 4.7)$  Ma(点LW-11.16和点LW-11.17),应为捕获的早期岩浆锆石。

花岗斑岩(样品LW-12)锆石大多呈长柱状,少量为短柱状,粒径集中在 $50 \sim 150 \mu m$ ,无色或黄褐色。阴极发光图像显示,锆石大多具清楚的生长韵律环带(图5b)。18颗锆石的Th/U比值介于0.1~1.7,平均值0.5,大于0.1; $w(Th)$ 介于 $32.1 \times 10^{-6} \sim 1109.6 \times 10^{-6}$ ,平均值 $205.2 \times 10^{-6}$ ;  $w(U)$ 介于 $52.6 \times 10^{-6} \sim 1412.6 \times 10^{-6}$ ,平均值 $435.1 \times 10^{-6}$ (表1),据此认为锆石为岩浆成因。其中,3颗锆石的谐和年龄分别为 $(166.7 \pm 1.6)$  Ma、 $(166.7 \pm 1.8)$  Ma和 $(1605.7 \pm 10.4)$  Ma(点LW-12.16、点LW-12.17、点LW-12.18),应为捕获的早期岩浆锆石。

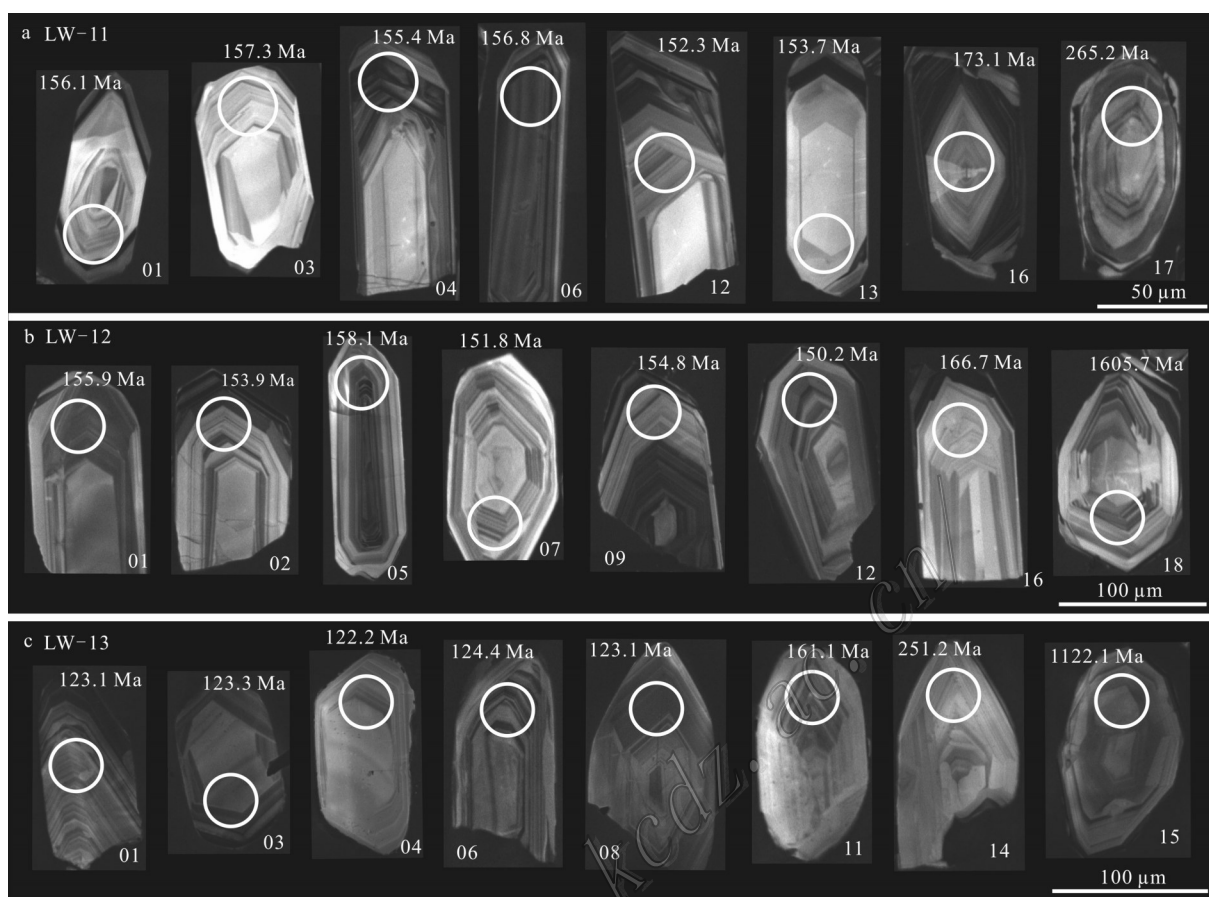


图5 五龙金矿床中酸性侵入岩锆石代表性CL图像

a. 黑云母花岗岩; b. 花岗斑岩; c. 细粒闪长岩

Fig. 5 Representative cathodoluminescence (CL) images of zircons from the intermediate-acidic intrusions with analytical numbers of the Wulong gold deposit

a. Biotite granite; b. Granite porphyry; c. Fine-grained diorite

在 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 谐和图(图6b)中,15个分析点落在谐和线上及其附近,其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $(154.2\pm 1.2)\text{ Ma}$ (MSWD=2.4)。

细粒闪长岩(样品 LW-13)锆石大多呈短柱状,次为长柱状,粒径集中在 $50\sim 120\text{ }\mu\text{m}$ ,大部分无色透明,少量黄褐色。阴极发光图像(图5c)显示,多数具清楚的生长韵律环带。15颗锆石的Th/U比值介于 $0.1\sim 1.1$ ,平均值 $0.6$ ,大于 $0.1$ ;  $w(\text{Th})$ 介于 $21.3\times 10^{-6}\sim 377.8\times 10^{-6}$ ,平均值 $130.5\times 10^{-6}$ ;  $w(\text{U})$ 介于 $26.6\times 10^{-6}\sim 1188.4\times 10^{-6}$ ,平均值 $316.1\times 10^{-6}$ (表1),属于典型的岩浆成因锆石。在 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 谐和图(图6c)中,10个点落在谐和线上及其附近,其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $(123.1\pm 0.9)\text{ Ma}$ (MSWD=0.2)。另有5颗锆石的谐和年龄分别为

$(161.1\pm 2.3)\text{ Ma}$ 、 $(161.0\pm 1.8)\text{ Ma}$ 、 $(160.2\pm 2.8)\text{ Ma}$ 、 $(251.2\pm 2.1)\text{ Ma}$ 、 $(1122.1\pm 18.7)\text{ Ma}$ (点 LW-13.11、点 LW-13.12、点 LW-13.13、点 LW-13.14、点 LW-13.15),应为捕获的早期岩浆锆石。

#### 4.2 云母 Ar-Ar 年龄

绢云母样品经过13个阶段的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 分步加热实验,结果见表2。加热区间为 $780\sim 1400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。其中, $870\sim 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度阶段组成了平坦的年龄坪,坪年龄 $T_p=(122.8\pm 0.8)\text{ Ma}$ (MSWD=0.09),对应的 $^{39}\text{Ar}$ 释放量为95.8%(图7)。

#### 4.3 S 同位素

6件金属硫化物的硫同位素组成见表3。成矿早阶段3件黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值介于 $+1.5\text{‰}\sim +2.4\text{‰}$ ;成矿中阶段3件黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值介于 $+1.1\text{‰}\sim +2.4\text{‰}$ 。

表1 五龙金矿床中酸性侵入岩LA-ICP MS锆石U-Pb分析结果

Table 1 LA-ICP MS zircon U-Pb data of the intermediate-acidic intrusions from the Wulong gold deposit

| 点号       | w(B)/10 <sup>-6</sup> |        |        | 比值                                      |         |                                        |         |                                        |         | Th/<br>U | t/Ma                                    |       |                                        |     |                                        |      |
|----------|-----------------------|--------|--------|-----------------------------------------|---------|----------------------------------------|---------|----------------------------------------|---------|----------|-----------------------------------------|-------|----------------------------------------|-----|----------------------------------------|------|
|          | Pb                    | Th     | U      | <sup>207</sup> Pb/<br><sup>206</sup> Pb | 1σ      | <sup>207</sup> Pb/<br><sup>235</sup> U | 1σ      | <sup>206</sup> Pb/<br><sup>238</sup> U | 1σ      |          | <sup>207</sup> Pb/<br><sup>206</sup> Pb | 1σ    | <sup>207</sup> Pb/<br><sup>235</sup> U | 1σ  | <sup>206</sup> Pb/<br><sup>238</sup> U | 1σ   |
| 黑云母花岗岩   |                       |        |        |                                         |         |                                        |         |                                        |         |          |                                         |       |                                        |     |                                        |      |
| LW-11.01 | 34.6                  | 122.8  | 1283.6 | 0.04961                                 | 0.00063 | 0.16734                                | 0.00234 | 0.02445                                | 0.00018 | 0.1      | 177.1                                   | 19.2  | 157.1                                  | 1.9 | 156.1                                  | 1.3  |
| LW-11.02 | 27.4                  | 340.0  | 967.5  | 0.04932                                 | 0.00069 | 0.16691                                | 0.00253 | 0.02447                                | 0.00017 | 0.4      | 163.6                                   | 23.3  | 156.9                                  | 2.1 | 155.8                                  | 1.2  |
| LW-11.03 | 15.3                  | 291.1  | 517.2  | 0.04888                                 | 0.00105 | 0.16575                                | 0.00369 | 0.02461                                | 0.00027 | 0.6      | 142.5                                   | 31.9  | 155.7                                  | 2.9 | 157.3                                  | 1.7  |
| LW-11.04 | 45.7                  | 1000.3 | 1473.3 | 0.04992                                 | 0.00062 | 0.16788                                | 0.00241 | 0.02434                                | 0.0002  | 0.7      | 191.3                                   | 18.6  | 158.3                                  | 1.9 | 155.4                                  | 1.1  |
| LW-11.05 | 18.7                  | 408.1  | 601.9  | 0.05011                                 | 0.00077 | 0.16951                                | 0.00277 | 0.0245                                 | 0.00019 | 0.7      | 200.4                                   | 22.9  | 158.7                                  | 2.2 | 156.1                                  | 1.4  |
| LW-11.06 | 42.9                  | 879.3  | 1416.9 | 0.04961                                 | 0.00065 | 0.16935                                | 0.0024  | 0.02469                                | 0.00021 | 0.6      | 177.1                                   | 18.2  | 159.1                                  | 1.8 | 156.8                                  | 1.1  |
| LW-11.07 | 58.9                  | 474.3  | 2197.2 | 0.04905                                 | 0.00099 | 0.16341                                | 0.00304 | 0.02416                                | 0.00018 | 0.2      | 150.3                                   | 47.9  | 154.2                                  | 3.4 | 153.7                                  | 1.3  |
| LW-11.08 | 125.3                 | 1005.9 | 4454.8 | 0.05036                                 | 0.00046 | 0.16908                                | 0.00192 | 0.02429                                | 0.00016 | 0.2      | 212.1                                   | 14.3  | 158.6                                  | 2.1 | 154.6                                  | 1.5  |
| LW-11.09 | 71.9                  | 616.2  | 2651.9 | 0.05032                                 | 0.0006  | 0.17125                                | 0.00248 | 0.02458                                | 0.00025 | 0.2      | 210.6                                   | 17.1  | 160.8                                  | 1.9 | 157.1                                  | 2.2  |
| LW-11.10 | 38.9                  | 375.5  | 1367.6 | 0.05068                                 | 0.00068 | 0.17393                                | 0.00246 | 0.02486                                | 0.0002  | 0.3      | 226.3                                   | 17.9  | 163.2                                  | 2.2 | 158.3                                  | 1.3  |
| LW-11.11 | 6.4                   | 238.9  | 177.4  | 0.05163                                 | 0.00143 | 0.17356                                | 0.00461 | 0.02472                                | 0.00026 | 1.4      | 268.9                                   | 41.3  | 162.8                                  | 3.6 | 157.1                                  | 2.1  |
| LW-11.12 | 21.1                  | 186.0  | 765.5  | 0.05143                                 | 0.00098 | 0.16974                                | 0.00338 | 0.02393                                | 0.00024 | 0.2      | 260.1                                   | 27.8  | 159.2                                  | 3.1 | 152.3                                  | 1.4  |
| LW-11.13 | 33.3                  | 207.5  | 1200.2 | 0.04914                                 | 0.00095 | 0.16359                                | 0.003   | 0.02415                                | 0.00015 | 0.2      | 154.4                                   | 47.1  | 154.2                                  | 3.1 | 153.7                                  | 1.1  |
| LW-11.14 | 3.9                   | 47.4   | 130.7  | 0.0489                                  | 0.00352 | 0.16404                                | 0.01143 | 0.02433                                | 0.00045 | 0.4      | 143.4                                   | 163.2 | 154.3                                  | 9.9 | 155.1                                  | 3.2  |
| LW-11.15 | 55.5                  | 380.3  | 1902.1 | 0.05121                                 | 0.00248 | 0.1754                                 | 0.00831 | 0.02484                                | 0.00026 | 0.2      | 250.1                                   | 114.4 | 164.2                                  | 7.0 | 158.3                                  | 2.1  |
| LW-11.16 | 6.6                   | 76.8   | 229.1  | 0.04858                                 | 0.0016  | 0.17916                                | 0.00587 | 0.02715                                | 0.00048 | 0.3      | 126.8                                   | 45.2  | 166.6                                  | 4.9 | 173.1                                  | 2.8  |
| LW-11.17 | 48.9                  | 577.1  | 939.3  | 0.08709                                 | 0.00102 | 0.51123                                | 0.0123  | 0.042                                  | 0.00073 | 0.6      | 1362.1                                  | 22.0  | 419.2                                  | 7.8 | 265.2                                  | 4.7  |
| 花岗斑岩     |                       |        |        |                                         |         |                                        |         |                                        |         |          |                                         |       |                                        |     |                                        |      |
| LW-12.01 | 17.1                  | 233.6  | 603.1  | 0.05024                                 | 0.00081 | 0.17000                                | 0.00293 | 0.02448                                | 0.00020 | 0.4      | 205.6                                   | 37.0  | 159.4                                  | 2.5 | 155.9                                  | 1.3  |
| LW-12.02 | 38.5                  | 301.4  | 1412.6 | 0.05044                                 | 0.00067 | 0.16827                                | 0.00241 | 0.02416                                | 0.00018 | 0.2      | 216.7                                   | 36.1  | 157.9                                  | 2.1 | 153.9                                  | 1.1  |
| LW-12.03 | 4.5                   | 53.5   | 156.5  | 0.04912                                 | 0.00164 | 0.16495                                | 0.00556 | 0.02442                                | 0.00025 | 0.3      | 153.8                                   | 79.6  | 155.0                                  | 4.8 | 155.6                                  | 1.6  |
| LW-12.04 | 12.8                  | 216.4  | 432.2  | 0.04837                                 | 0.00093 | 0.16235                                | 0.00312 | 0.02440                                | 0.00023 | 0.5      | 116.8                                   | 41.7  | 152.8                                  | 2.7 | 155.4                                  | 1.4  |
| LW-12.05 | 3.2                   | 38.2   | 110.4  | 0.04795                                 | 0.00160 | 0.16273                                | 0.00530 | 0.02483                                | 0.00028 | 0.4      | 98.2                                    | 77.8  | 153.1                                  | 4.6 | 158.1                                  | 1.8  |
| LW-12.06 | 2.8                   | 72.1   | 89.0   | 0.05007                                 | 0.00172 | 0.16773                                | 0.00600 | 0.02433                                | 0.00029 | 0.8      | 198.2                                   | 79.6  | 157.4                                  | 5.2 | 154.9                                  | 1.8  |
| LW-12.07 | 4.9                   | 49.7   | 183.1  | 0.04915                                 | 0.00178 | 0.15857                                | 0.00529 | 0.02382                                | 0.00030 | 0.3      | 153.8                                   | 80.5  | 149.4                                  | 4.6 | 151.8                                  | 1.9  |
| LW-12.08 | 40.7                  | 1109.6 | 1259.8 | 0.05046                                 | 0.00058 | 0.16859                                | 0.00205 | 0.02421                                | 0.00017 | 0.9      | 216.7                                   | 25.9  | 158.2                                  | 1.8 | 154.2                                  | 1.0  |
| LW-12.09 | 9.2                   | 114.0  | 324.4  | 0.04919                                 | 0.00106 | 0.16429                                | 0.00369 | 0.02430                                | 0.00025 | 0.4      | 166.8                                   | 50.0  | 154.5                                  | 3.2 | 154.8                                  | 1.6  |
| LW-12.10 | 15.5                  | 369.8  | 498.9  | 0.05013                                 | 0.00091 | 0.16315                                | 0.00293 | 0.02364                                | 0.00019 | 0.7      | 211.2                                   | 38.0  | 153.5                                  | 2.6 | 150.6                                  | 1.2  |
| LW-12.11 | 7.4                   | 193.7  | 236.4  | 0.05017                                 | 0.00124 | 0.16588                                | 0.00415 | 0.02410                                | 0.00024 | 0.8      | 211.2                                   | 57.4  | 155.8                                  | 3.6 | 153.5                                  | 1.5  |
| LW-12.12 | 9.7                   | 147.2  | 348.2  | 0.05129                                 | 0.00101 | 0.16560                                | 0.00317 | 0.02357                                | 0.00021 | 0.4      | 253.8                                   | 44.4  | 155.6                                  | 2.8 | 150.2                                  | 1.3  |
| LW-12.13 | 8.6                   | 63.6   | 317.0  | 0.04999                                 | 0.00121 | 0.16692                                | 0.00405 | 0.02430                                | 0.00023 | 0.2      | 194.5                                   | 25.0  | 156.7                                  | 3.5 | 154.8                                  | 1.5  |
| LW-12.14 | 25.6                  | 84.0   | 973.2  | 0.04921                                 | 0.00063 | 0.16736                                | 0.00248 | 0.02464                                | 0.00022 | 0.1      | 166.8                                   | 29.6  | 157.1                                  | 2.2 | 156.9                                  | 1.4  |
| LW-12.15 | 1.7                   | 44.7   | 52.6   | 0.05067                                 | 0.00226 | 0.16814                                | 0.00756 | 0.02461                                | 0.00035 | 0.9      | 233.4                                   | 101.8 | 157.8                                  | 6.6 | 156.7                                  | 2.2  |
| LW-12.16 | 11.4                  | 458.2  | 275.2  | 0.05048                                 | 0.00111 | 0.18124                                | 0.00398 | 0.02620                                | 0.00026 | 1.7      | 216.7                                   | 84.2  | 169.1                                  | 3.4 | 166.7                                  | 1.6  |
| LW-12.17 | 12.8                  | 112.0  | 451.2  | 0.04936                                 | 0.00095 | 0.17826                                | 0.00377 | 0.02620                                | 0.00029 | 0.3      | 164.9                                   | 44.4  | 166.6                                  | 3.2 | 166.7                                  | 1.8  |
| LW-12.18 | 36.4                  | 32.1   | 107.5  | 0.11479                                 | 0.00109 | 4.48740                                | 0.04892 | 0.28284                                | 0.00206 | 0.3      | 1876.9                                  | 16.7  | 1728.6                                 | 9.1 | 1605.7                                 | 10.4 |
| 细粒闪长岩    |                       |        |        |                                         |         |                                        |         |                                        |         |          |                                         |       |                                        |     |                                        |      |
| LW-13.01 | 3.5                   | 140.0  | 129.7  | 0.04895                                 | 0.00204 | 0.12873                                | 0.0054  | 0.01922                                | 0.00026 | 1.1      | 144.9                                   | 73.1  | 123.3                                  | 4.8 | 123.1                                  | 2.0  |
| LW-13.02 | 18.7                  | 334.7  | 834.9  | 0.04861                                 | 0.0008  | 0.12933                                | 0.00212 | 0.01932                                | 0.00018 | 0.4      | 128.8                                   | 22.1  | 123.2                                  | 2.0 | 122.7                                  | 1.3  |
| LW-13.03 | 13.6                  | 157.1  | 277.2  | 0.04953                                 | 0.00165 | 0.13099                                | 0.00433 | 0.01929                                | 0.00022 | 0.6      | 173.1                                   | 55.8  | 124.8                                  | 3.8 | 123.3                                  | 1.0  |

续表 1

Continued Table 1

| 点号       | $w(B)/10^{-6}$ |       |        | 比值          |           |             |           |             |           | Th/<br>U | $t/Ma$      |           |             |           |             |           |
|----------|----------------|-------|--------|-------------|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|----------|-------------|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|
|          | Pb             | Th    | U      | $^{207}Pb/$ | $1\sigma$ | $^{207}Pb/$ | $1\sigma$ | $^{206}Pb/$ | $1\sigma$ |          | $^{207}Pb/$ | $1\sigma$ | $^{207}Pb/$ | $1\sigma$ | $^{206}Pb/$ | $1\sigma$ |
|          |                |       |        | $^{206}Pb$  |           | $^{235}U$   |           | $^{238}U$   |           |          | $^{206}Pb$  |           | $^{235}U$   |           | $^{238}U$   |           |
| 细粒闪长岩    |                |       |        |             |           |             |           |             |           |          |             |           |             |           |             |           |
| LW-13.04 | 1.6            | 51.9  | 63.6   | 0.05161     | 0.00297   | 0.13058     | 0.0067    | 0.01903     | 0.00032   | 0.8      | 268.1       | 88.2      | 125.4       | 5.7       | 122.2       | 1.9       |
| LW-13.05 | 2.7            | 113.4 | 103.0  | 0.05028     | 0.00294   | 0.13197     | 0.00713   | 0.01928     | 0.00034   | 1.1      | 207.8       | 92.1      | 125.8       | 5.8       | 123.3       | 2.1       |
| LW-13.06 | 20.9           | 377.8 | 933.5  | 0.04987     | 0.00092   | 0.1335      | 0.00269   | 0.01937     | 0.00023   | 0.4      | 189.1       | 25.8      | 127.3       | 2.0       | 124.4       | 1.1       |
| LW-13.07 | 3.5            | 105.1 | 142.2  | 0.0518      | 0.00206   | 0.13878     | 0.00565   | 0.01939     | 0.00029   | 0.7      | 277.1       | 66.4      | 132.2       | 4.9       | 124.1       | 1.8       |
| LW-13.08 | 2.3            | 60.2  | 93.7   | 0.05338     | 0.00269   | 0.13982     | 0.0069    | 0.01933     | 0.00031   | 0.6      | 345.1       | 82.7      | 133.0       | 5.7       | 123.1       | 2.0       |
| LW-13.09 | 1.8            | 53.3  | 72.7   | 0.04605     | 0.00237   | 0.1212      | 0.00602   | 0.01909     | 0.00025   | 0.7      | 278.2       | 111.0     | 115.8       | 5.1       | 122.0       | 1.8       |
| LW-13.10 | 0.9            | 23.2  | 35.9   | 0.051       | 0.00583   | 0.13299     | 0.01494   | 0.01891     | 0.00041   | 0.7      | 240.8       | 258.1     | 127.4       | 13.2      | 121.3       | 3.1       |
| LW-13.11 | 7.8            | 69.3  | 275.3  | 0.05117     | 0.00129   | 0.17836     | 0.00462   | 0.02531     | 0.0003    | 0.3      | 247.8       | 37.8      | 167.1       | 3.8       | 161.1       | 2.3       |
| LW-13.12 | 8.5            | 171.2 | 275.5  | 0.04998     | 0.00115   | 0.17502     | 0.00431   | 0.02532     | 0.00024   | 0.6      | 194.1       | 39.0      | 163.9       | 4.1       | 161.0       | 1.8       |
| LW-13.13 | 0.9            | 21.3  | 26.6   | 0.0468      | 0.00534   | 0.16219     | 0.01829   | 0.02514     | 0.00045   | 0.8      | 38.9        | 231.1     | 153.1       | 16.2      | 160.2       | 2.8       |
| LW-13.14 | 51.1           | 158.9 | 1188.4 | 0.05216     | 0.00065   | 0.28625     | 0.00368   | 0.0397      | 0.00028   | 0.1      | 291.8       | 17.2      | 256.4       | 3.3       | 251.2       | 2.1       |
| LW-13.15 | 65.9           | 120.1 | 289.2  | 0.10927     | 0.00114   | 2.88128     | 0.06209   | 0.19016     | 0.00354   | 0.4      | 1787.3      | 18.4      | 1376.8      | 16.3      | 1122.1      | 18.7      |

#### 4.4 He-Ar 同位素

5 件黄铁矿样品的 He-Ar 同位素组成见表 4。成矿早阶段黄铁矿样品流体包裹体中  $^3\text{He}/^4\text{He}$  值为  $5.06 \times 10^{-7} \sim 9.16 \times 10^{-7}$ 。矿物流体包裹体中  $^3\text{He}/^4\text{He}$  值与空气中  $^3\text{He}/^4\text{He}$  值 ( $R_a = 1.40 \times 10^{-6}$ ) 相比,其比值为 0.36~0.65  $R_a$ ;成矿中阶段黄铁矿样品流体包裹体中  $^3\text{He}/^4\text{He}$  值为  $5.27 \times 10^{-7} \sim 8.62 \times 10^{-7}$ 。矿物流体包裹体中  $^3\text{He}/^4\text{He}$  值与空气中  $^3\text{He}/^4\text{He}$  值相比,其比值为 0.38~0.62  $R_a$ 。

## 5 讨 论

### 5.1 成岩成矿时代

关于五龙金矿床的成岩和成矿时代,前人曾对围岩和含金石英脉做过研究,获得三股流花岗闪长岩体的锆石 U-Pb 年龄为  $(129.0 \pm 2.9) \text{ Ma}$ , Rb-Sr 等时线年龄为  $(131.0 \pm 4.5) \text{ Ma}$  (魏俊浩等, 2003), 含金石

表 2 五龙金矿床绢云母  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  分步加热分析结果Table 2  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  step heating analysis data of sericite from the Wulong gold deposit

| $\theta/^\circ\text{C}$    | $(^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_m$ | $(^{36}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_m$ | $(^{37}\text{Ar}_0/^{39}\text{Ar})_m$ | $(^{38}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_m$ | $w(^{40}\text{Ar})/\%$ | $F$     | $^{39}\text{Ar}(\times 10^{-14} \text{ mol})$ | $w(^{39}\text{Ar})_{\text{Cum.}}/\%$ | $t/Ma$ | $1\sigma/Ma$ |
|----------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|------------------------|---------|-----------------------------------------------|--------------------------------------|--------|--------------|
| Step=13; 照射参数 $J=0.004836$ |                                     |                                     |                                       |                                     |                        |         |                                               |                                      |        |              |
| 700                        | 48.3313                             | 0.1138                              | 0                                     | 0.0360                              | 30.42                  | 14.7043 | 0.11                                          | 0.18                                 | 123.2  | 6.6          |
| 780                        | 35.9924                             | 0.0705                              | 0.0123                                | 0.0260                              | 42.08                  | 15.1458 | 1.08                                          | 2.01                                 | 126.8  | 1.3          |
| 830                        | 19.6137                             | 0.0153                              | 0.0128                                | 0.0154                              | 76.94                  | 15.0919 | 1.24                                          | 4.10                                 | 126.3  | 1.6          |
| 870                        | 16.6850                             | 0.0066                              | 0.0018                                | 0.0136                              | 88.31                  | 14.7353 | 4.47                                          | 11.63                                | 123.5  | 1.2          |
| 910                        | 15.1575                             | 0.0019                              | 0.0016                                | 0.0127                              | 96.24                  | 14.5884 | 9.78                                          | 28.12                                | 122.3  | 1.2          |
| 940                        | 14.8287                             | 0.0007                              | 0.0008                                | 0.0124                              | 98.62                  | 14.6248 | 8.51                                          | 42.47                                | 122.6  | 1.2          |
| 970                        | 14.8639                             | 0.0008                              | 0                                     | 0.0124                              | 97.48                  | 14.6374 | 8.10                                          | 56.12                                | 122.7  | 1.2          |
| 1000                       | 15.1124                             | 0.0014                              | 0                                     | 0.0125                              | 97.30                  | 14.7045 | 3.86                                          | 62.63                                | 123.2  | 1.2          |
| 1040                       | 15.2550                             | 0.0021                              | 0.0084                                | 0.0128                              | 95.89                  | 14.6283 | 3.42                                          | 68.39                                | 122.6  | 1.2          |
| 1080                       | 15.3265                             | 0.0023                              | 0.0044                                | 0.0128                              | 95.58                  | 14.6493 | 3.99                                          | 75.12                                | 122.8  | 1.2          |
| 1120                       | 15.2275                             | 0.0020                              | 0.0008                                | 0.0128                              | 96.06                  | 14.6272 | 7.19                                          | 87.24                                | 122.6  | 1.2          |
| 1200                       | 14.9252                             | 0.0008                              | 0                                     | 0.0125                              | 98.32                  | 14.6738 | 7.48                                          | 99.85                                | 123.0  | 1.2          |
| 1400                       | 40.9187                             | 0.0776                              | 0                                     | 0.0287                              | 43.95                  | 17.9852 | 0.09                                          | 100.00                               | 149.0  | 4.9          |

注:表中下标 m 代表样品中测定的同位素比值; $F=^{40}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar}$ ,是放射性成因  $^{40}\text{Ar}$  和  $^{39}\text{Ar}$  比值; $^{37}\text{Ar}_0$  为经过放射性衰变校正的  $^{37}\text{Ar}$ 。

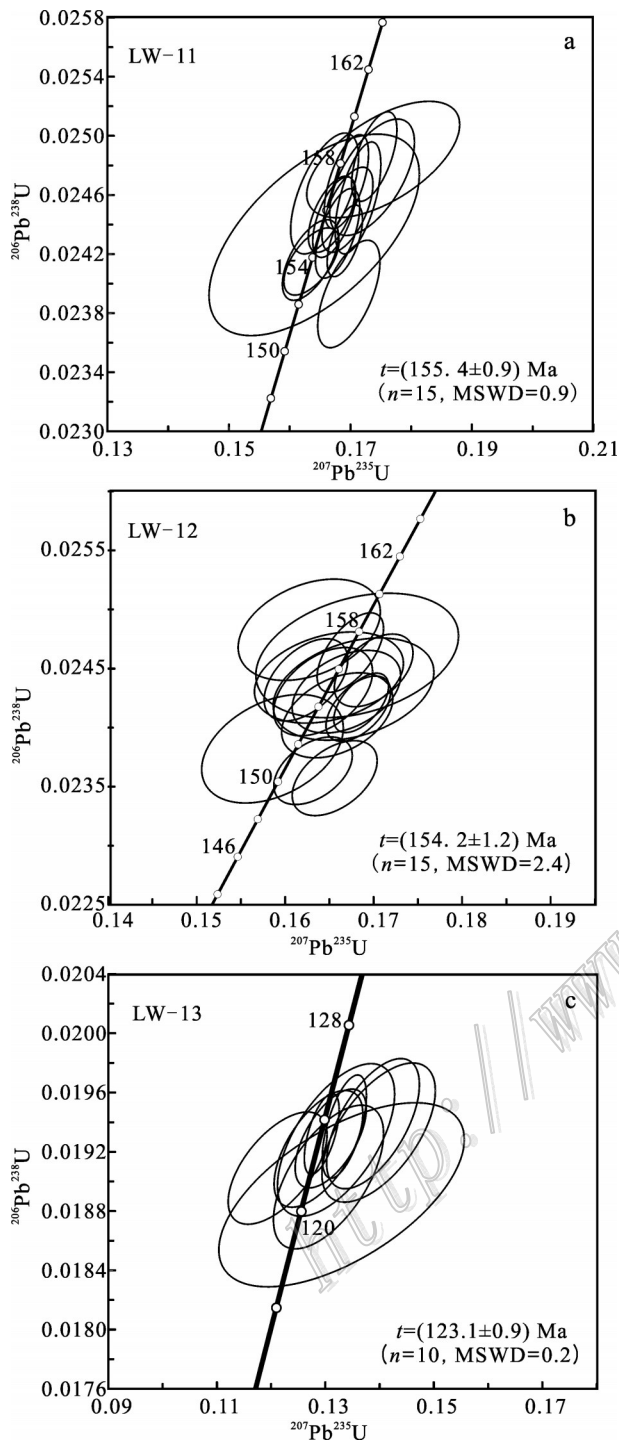


图6 五龙金矿床中酸性侵入岩锆石 U-Pb 协和图解

a. 黑云母花岗岩; b. 花岗斑岩; c. 细粒闪长岩

Fig. 6 Zircon U-Pb concordian diagrams of the intermediate-acidic intrusions from the Wulong gold deposit

a. Biotite granite; b. Granite porphyry; c. Fine-grained diorite

英脉的流体包裹体 Rb-Sr 等时线年龄介于  $(112 \pm 1)$  Ma ~  $(120 \pm 3)$  Ma (魏俊浩等, 2001)。本文测得五龙

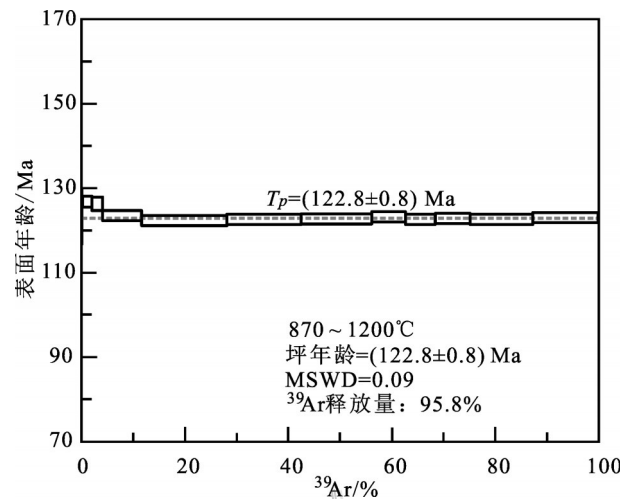


图7 五龙金矿床绢云母  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  分步加热年龄谱图

Fig.7  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  age spectrum of sericites from the Wulong gold deposit

矿区内黑云母花岗岩体的锆石 U-Pb 年龄为  $(155.4 \pm 0.9)$  Ma, 花岗斑岩脉的锆石 U-Pb 年龄为  $(154.2 \pm 1.2)$  Ma, 细粒闪长岩脉的锆石 U-Pb 年龄为  $(123.1 \pm 0.9)$  Ma。五龙矿区内黑云母花岗岩体呈岩基状产出, 为主要赋矿围岩, 花岗斑岩脉侵位于黑云母花岗岩体中, 二者均为晚侏罗世岩浆侵位产物。三股流花岗岩体和细粒闪长岩脉同样侵位于黑云母花岗岩体中, 属早白垩世侵入岩。Sr、Nd 同位素组成特征表明 (魏俊浩等, 2003), 五龙金矿区内三股流花岗闪长岩、细粒闪长岩及花岗斑岩为同一岩浆源区不同岩浆演化阶段的产物, 成岩物质主要来自下地壳。矿石中含钾蚀变矿物及成矿流体的 Ar-Ar 年龄是厘定矿床成矿时代的有效手段之一, 已经被广泛应用于各类热液矿床成矿年代学研究 (丰成友等, 2013; 武广等, 2013; 袁霞等, 2017)。本次工作获得金矿石中绢云母的 Ar-Ar 坪年龄为  $(122.8 \pm 0.8)$  Ma, 表明五龙金矿形成于早白垩世, 与细粒闪长岩的侵位时间接近。杨春福等 (1997) 通过对五龙矿区内 400 余条含金石英脉的观察和统计, 发现所有的含金石英脉均赋存在细粒闪长岩脉的构造空间内, 细粒闪长岩脉是含金石英脉存在的“必要条件”。综上所述, 五龙矿区内岩浆活动次序为晚侏罗世黑云母花岗岩、花岗斑岩 → 早白垩世三股流花岗闪长岩、细粒闪长岩, 其中 ~120 Ma 的岩浆-热液活动与区内大规模金矿化作用关系密切。

## 5.2 成矿流体来源

Ohmoto (1972) 指出, 热液矿床中硫化物的硫同

表 3 五龙金矿床硫同位素分析结果  
Table 3 Sulfur isotopic compositions of the  
Wulong gold deposit

| 样品号   | 样品描述        | 成矿阶段 | 测试矿物 | $\delta^{34}\text{S}/\text{‰}$ |
|-------|-------------|------|------|--------------------------------|
| LW-6  | 石英-黄铁矿±钾长石脉 | 早阶段  | 黄铁矿  | 2.4                            |
| LW-7  | 石英-黄铁矿±钾长石脉 | 早阶段  | 黄铁矿  | 1.7                            |
| LW-32 | 石英-黄铁矿±钾长石脉 | 早阶段  | 黄铁矿  | 1.5                            |
| LW-16 | 石英-多金属硫化物脉  | 中阶段  | 黄铁矿  | 2.4                            |
| LW-20 | 石英-多金属硫化物脉  | 中阶段  | 黄铁矿  | 1.1                            |
| LW-21 | 石英-多金属硫化物脉  | 中阶段  | 黄铁矿  | 1.8                            |

位素组成是成矿溶液中总硫同位素组成、氧逸度、pH 值、离子强度和温度的函数。因此,热液硫化物的硫同位素组成,不仅取决于其源区物质的  $\delta^{34}\text{S}$  值,而且与成矿流体演化的物理化学条件有关,当  $f(\text{O}_2)$  较低时,流体中硫主要以  $\text{HS}^-$ 、 $\text{S}^{2-}$  形式存在,所沉淀的硫化物  $\delta^{34}\text{S}$  与整个流体  $\delta^{34}\text{S}$  近似;当  $f(\text{O}_2)$  较高时,  $\text{SO}_4^{2-}$  大量存在并沉淀富集  $\delta^{34}\text{S}$  的硫酸盐,导致成矿流体  $\delta^{34}\text{S}$  亏损,所沉淀的黄铁矿等硫化物的  $\delta^{34}\text{S}$  值较低(常为负值),低于整个体系的  $\delta^{34}\text{S}$  值。硅化、绢云母化是五龙金矿主要的蚀变类型,硫化物主要为黄铁矿、黄铜矿、磁黄铁矿、方铅矿、闪锌矿等,未见硫酸盐矿物。因此,五龙金矿中金属硫化物的硫同位素组成可以近似地代表成矿溶液总硫同位素组成。目前,硫同位素主要有 3 个存储库:① 地幔硫或岩浆硫,其  $\delta^{34}\text{S}$  值介于  $-3\text{‰}$ ~ $+3\text{‰}$ ;② 海水硫,现代海水的  $\delta^{34}\text{S}$  值近似于  $20\text{‰}$ ;③ 沉积物中的还原硫,其  $\delta^{34}\text{S}$  值以极差大并具有较强的负值为特征 (Chaussidon et al., 1990; Rollinson, 1993)。五龙金矿的  $\delta^{34}\text{S}$  值介于  $+1.1\text{‰}$ ~ $+2.4\text{‰}$ , 平均值  $+1.8\text{‰}$ , 表明硫为深源岩浆硫。五龙金矿中不同成矿阶段硫化物的硫同位素组成基本一致,表明为同一硫源。

地壳流体中的稀有气体有 3 个明显不同的源区,即饱和空气雨水、地壳和地幔,其中饱和空气水中  $^3\text{He}/^4\text{He}=1 \text{ Ra}$ ,  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}=295.5$ ; 地壳中  $^3\text{He}/^4\text{He}=0.01\sim 0.05 \text{ Ra}$ ,  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}>295.5$ ; 地幔中  $^3\text{He}/^4\text{He}=6\sim 9 \text{ Ra}$ ,  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}>40\ 000$  (Burnard et al., 1999)。由于氦在大气中的含量极低,不足以对地壳流体中氦的丰度和同位素组成产生明显影响 (Marty et al., 1989; Stuart et al., 1995)。因此,五龙金矿成矿流体中的氦仅有地壳和地幔 2 个源区。五龙金矿黄铁矿中流体包裹体  $^3\text{He}/^4\text{He}$  值为  $0.36\sim 0.65 \text{ Ra}$ , 平均值  $0.50 \text{ Ra}$ , 明显高于地壳 He, 低于地幔 He。五龙金矿 He 同位素投点位于地幔 He 和地壳 He 之间 (图 8), 显示其成矿流体不是单一的地壳或地幔流体,而是二者的混合产物。假如成矿流体是简单的二员混合模式,可以利用  $^3\text{He}$  和  $^4\text{He}$  的比值推算流体中地幔流体和地壳流体的比例 (徐永昌等, 1996; 1998)。其中,幔源  $^4\text{He}$  的比例由下式计算: 地幔氦 (%) =  $[(R-R_c)/(R_m-R_c)] \times 100$ 。其中,  $R$  为样品  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比值;  $R_c$  为地壳  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比值;  $R_m$  为地幔  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比值。地壳中的  $^3\text{He}/^4\text{He}=0.01\sim 0.05 \text{ Ra}$ , 地幔中的  $^3\text{He}/^4\text{He}=6\sim 9 \text{ Ra}$  (Stuart et al., 1995)。五龙金矿成矿流体中地幔流体参与成矿作用的比例为  $3.9\%\sim 7.2\%$ , 表明成矿流体主要来源于地壳,且有少量幔源物质的加入。因此,五龙金矿的成矿流体具有地壳流体和地幔流体混合特征,主要来源于地壳,并有少量地幔流体混入。

### 5.3 岩浆-成矿作用的地球动力学背景

在中生代期间,华北克拉通东部经历了强烈的岩石圈减薄作用和构造格架的重大转折事件 (翟明国等, 2004; 毛景文等, 2005; 徐义刚等, 2009; 林伟等 2011; 2013)。在华北克拉通东部,挤压构造向伸展构造转折事件始于  $140\sim 150 \text{ Ma}$ , 终于  $100\sim 110 \text{ Ma}$

表 4 五龙金矿床黄铁矿中流体包裹体 He、Ar 同位素组成  
Table 4 Helium and argon isotopic components of the inclusion-trapped fluid in the pyrite  
minerals from the Wulong gold deposit

| 样品号   | 样品描述        | 成矿阶段 | $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ | $^{36}\text{Ar}/^{38}\text{Ar}$ | $^3\text{He}/^4\text{He} / 10^{-7}$ | $R/\text{Ra}$ | $^{40}\text{Ar}/(10^{-8}\text{cm}^3 \text{ STP/g})$ | $^4\text{He}/(10^{-8}\text{cm}^3 \text{ STP/g})$ | $w(\text{He}_{\text{mantle}})/\%$ |
|-------|-------------|------|---------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|---------------|-----------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-----------------------------------|
| LW-41 | 石英-黄铁矿±钾长石脉 | 早阶段  | 407.4±0.6                       | 5.33±0.02                       | 5.06±0.66                           | 0.36          | 13.28                                               | 21.90                                            | 3.9                               |
| LW-42 | 石英-黄铁矿±钾长石脉 | 早阶段  | 474.5±0.6                       | 5.29±0.01                       | 9.16±0.21                           | 0.65          | 71.77                                               | 194.69                                           | 7.2                               |
| LW-43 | 石英-多金属硫化物脉  | 中阶段  | 410.0±0.6                       | 5.35±0.01                       | 5.27±0.51                           | 0.38          | 10.27                                               | 20.05                                            | 4.1                               |
| LW-44 | 石英-多金属硫化物脉  | 中阶段  | 315.1±0.3                       | 5.30±0.01                       | 7.03±0.55                           | 0.50          | 19.49                                               | 63.06                                            | 5.5                               |
| LW-45 | 石英-多金属硫化物脉  | 中阶段  | 301.9±1.0                       | 5.48±0.03                       | 8.62±0.24                           | 0.62          | 49.38                                               | 40.87                                            | 6.7                               |

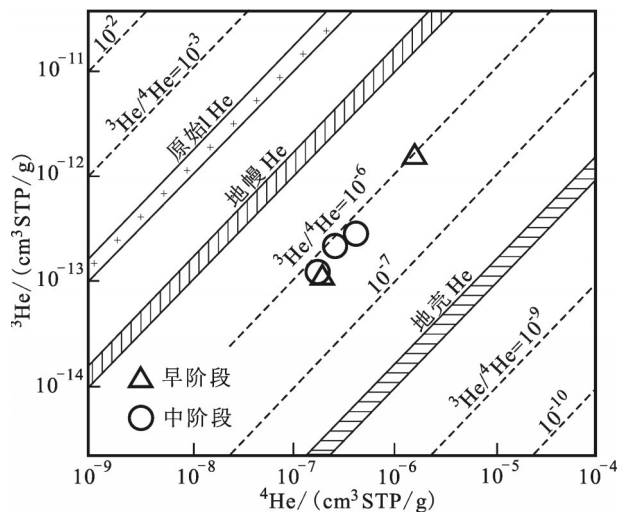


图8 五龙金矿床流体包裹体 $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$ 图  
(底图据 Mamyrin et al., 1984)

Fig.8  $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$  diagram of fluid inclusions from the Wulong gold deposit (base map after Mamyrin et al., 1984)

(翟明国等, 2004)。与此同时, 华北岩石圈减薄作用开始于克拉通边缘, 岩石圈减薄作用在晚侏罗世—白垩纪达到高峰, 并一直持续到白垩纪末期—新生代早期(徐义刚等, 2009)。毛景文等(2003)确认华北地区岩石圈在 110~130 Ma 进入到快速减薄时期。辽东半岛位于华北克拉通东部, 是华北克拉通晚中生代破坏与岩石圈减薄最为强烈的地区之一(吴福元等, 2005; 刘俊来等, 2008; 2011; 林伟等, 2011; 申亮等, 2011)。杨进辉等(2004)认为辽东半岛在~143 Ma 左右发生推覆挤压作用, 在~121 Ma 左右发生地壳伸展作用, 表明晚中生代期间辽东半岛发生了挤压作用到伸展作用的构造体制转变, 与华北克拉通东部的构造体制转折同期(翟明国等, 2004)。辽东半岛晚侏罗世—早白垩世的 NW 向推覆、挤压事件是古太平洋板块向欧亚大陆俯冲作用的结果, 而早白垩世地壳伸展事件是古太平洋板块俯冲作用的转向和变速、华东北部岩石圈减薄以及挤压后地壳松弛等综合作用的结果(杨进辉等, 2004; Wu et al., 2005a; 2005b; 陈广俊等, 2014; 刘杰勋等, 2016)。

五龙金矿位于辽东半岛东部, 成岩成矿年代为早白垩世, 形成于华北克拉通东部的构造体制转折和大规模岩石圈减薄背景。在俯冲作用造成的地壳伸展和岩石圈减薄作用下, 岩石圈地幔岩浆大量底侵, 巨量的热能促使下地壳物质部分熔融, 形成大规模中酸性岩浆。强烈的壳-幔物质交换作用和高热

流场的形成引发了巨量成矿流体的形成、迁移和富集, 而大规模的断裂构造为成矿流体的运移提供了通道, 大量次级断裂为矿体的定位提供了空间, 在有利的构造部位富集成矿。

## 6 结 论

(1) LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果表明, 五龙矿床内黑云母花岗岩、花岗斑岩、细粒闪长岩的结晶年龄分别为  $(155.4 \pm 0.9) \text{ Ma}$ 、 $(154.2 \pm 1.2) \text{ Ma}$  和  $(123.1 \pm 0.9) \text{ Ma}$ 。金矿石中绢云母的 Ar-Ar 坪年龄为  $(122.8 \pm 0.8) \text{ Ma}$ , 表明矿床形成于早白垩世, 金矿化与同期细粒闪长岩脉关系密切。

(2) 五龙矿床成矿流体以岩浆流体为主, 具有地壳流体和地幔流体混合特征, 主要来源于地壳, 并有少量地幔流体混入。

(3) 五龙矿床形成于华北克拉通东部的构造体制转折和大规模岩石圈减薄背景。

**志 谢** 野外工作期间得到了辽宁省五龙黄金矿业有限责任公司于宝申工程师的热情帮助。室内测试过程得到中国地质科学院矿产资源研究所侯可军副研究员、王倩助理研究员的热情帮助, 在此一并表示感谢。

## References

- BGMRLP. 1989. Regional Geology of Liaoning Province[M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-856(in Chinese with English abstract).
- Burnard P G, Hu R Z, Turner G and Bi X W. 1999. Mantle, crustal and atmospheric noble gases in Ailaoshan gold deposits, Yunnan Province, China[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63 (10): 1595-1604.
- Chaussidon M and Lorand J P. 1990. Sulphur isotope composition of orogenic spinel ilherzolite massifs from Ariege: An ion microprobe study[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54: 2835-2846.
- Chen G J, Sun F Y, Li Y C and Liu K. 2014. U-Pb dating, geochemical characteristics and geological significance of Guojialing graniorite in Jiaodong Peninsula[J]. *Global Geology*, 33(1): 39-47(in Chinese with English abstract).
- Chen W, Zhang Y, Zhang Y Q, Jin G S and Wang Q L. 2006. Late Cenozoic episodic uplifting in southeastern part of the Tibetan pla-

- teau-evidence from Ar-Ar thermochronology[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(4): 867-872(in Chinese with English abstract).
- Deng J, Wang Q F, Li G J, Li C S and Wang C M. 2014. Tethys tectonic evolution and its bearing on the distribution of important mineral deposits in the Sanjiang region, SW China[J]. *Gondwana Research*, 26: 419-437.
- Fang R H. 1999. Types and correlation of Sino-Korean Paleo-Proterozoic stratabound Pb-Zn deposits[J]. *Liaoning Geology*, 16(1): 43-56(in Chinese with English abstract).
- Feng C Y, Li G C, Li D X, Zhou A S and Li H M. 2013. Ore-controlling structure and  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  geochronology of ekekaerde tungsten-tin deposit in Qimantage area, Xinjiang[J]. *Mineral Deposits*, 32(1): 207-216(in Chinese with English abstract).
- Hou K J, Li Y H and Tian Y R. 2009. In situ U-Pb dating using laser ablation-multi ion counting-ICP-MS[J]. *Mineral Deposits* 28(4): 481-492(in Chinese with English abstract).
- Hu R Z, Turner G, Burnard P G, Zhong H, Ye Z J and Bi X W. 1998. Helium and argon isotopic geochemistry of Jinding superlarge Pb-Zn deposit[J]. *Science in China (Series D)*, 41(4): 442-448.
- Hu R Z, Burnard P G, Bi X W, Zhou M F, Pen J T, Su W C and Wu K X. 2004. Helium and argon isotope geochemistry of alkaline intrusion-associated gold and copper deposits along the Red River-Jinshajiang fault belt, SW China[J]. *Chemical Geology*, 203:305-317.
- Hu R Z, Burnard P G, Bi X W, Zhou M F, Peng J T, Su W C and Zhao J H. 2009. Mantle-derived gaseous components in ore-forming fluids of the Xiangshan uranium deposit, Jiangxi Province, China: Evidence from He, Ar and C isotopes[J]. *Chemical Geology*, 266: 86-95.
- Li L, Zheng C, Yu Z K and Mao D Q. 1993. Characteristics of minerogenic stage fluid inclusion in Wulong gold deposit[J]. *Journal of Shenyang Institute of Gold Technology*, 12(1): 1-8(in Chinese with English abstract).
- Lin W, Wang Q C, Wang J, Wang F, Chu Y and Chen K. 2011. Late Mesozoic extensional tectonics of the Liaodong Peninsula massif: Response of crust to continental Lithosphere destruction of the North China Craton[J]. *Science China (Earth Sciences)*, 54(6): 843-857.
- Lin W, Wang J, Liu F, Ji W B and Wang Q C. 2013. Late Mesozoic extension structures on the North China Craton and adjacent regions and its geodynamics[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(5): 1791-1810 (in Chinese with English abstract).
- Liu J L, Davis G A, Lin Z Y and Wu F Y. 2005. The Liaonan metamorphic core complex, southeastern Liaoning Province, North China: A likely contributor to Cretaceous rotation of eastern Liaoning, Korea and contiguous areas[J]. *Tectonophysics*, 407: 65-80.
- Liu J L, Davis G A, Ji M, Guan H M and Bai X D. 2008. Crustal detachment and destruction of the North China Craton: Constraints from Late Mesozoic extensional structures[J]. *Earth Science Frontiers*, 15(3): 72-81(in Chinese with English abstract).
- Liu J L, Ji M, Shen L, Guan H M and Davis G A. 2011. Early Cretaceous extensional structures in the Liaodong Peninsula: Structural associations, geochronological constraints and regional tectonic implications[J]. *Science China (Earth Sciences)*, 41(5): 618-637 (in Chinese).
- Liu J X, Guo W and Zhu K. 2016. Geochronology, geochemistry and geological significance of the Early Cretaceous intrusive rocks from Xiuyan area, eastern Liaoning Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 32(9): 2889-2900(in Chinese with English abstract).
- Liu R Q, Dai L J, Shang M Y, Wang T J, Wang Z B, Cui W J and Guan K. 2006. Main shear zones in eastern Liaoning Province and features of shear-hosted gold mineralization[J]. *Chinese Journal of Geology*, 41(2): 181-194(in Chinese with English abstract).
- Liu X L, Jiang Y and Liu Z Y. 2000. Geological characteristics and metallogenic mechanism of Gaojiapuzi large-scale Au-Ag deposits in Qingchengzi orefield[J]. *Liaoning Geology*, 17(2): 121-127(in Chinese with English abstract).
- Lu X P, Wu F Y, Lin J Q, Sun D Y, Zhang Y B and Guo C L. 2004. Geochronological successions of the Early Precambrian granitic magmatism in southern 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).
- Ludwig K R. 2001. ISOPLOT 3.00. A geochronological toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley: Berkeley Geochronology Center.
- Mamyrin B A and Tolstikbin I N. 1984. Helium isotope in nature[A]. In: Fyfe W S, ed. *Developments in geochemistry*[C]. Amsterdam: Elsevier.1-237.
- Mao J W, Zhang Z H, Yu J J, Wang Y T and Niu B G. 2003. Geodynamic setting of Mesozoic large-scale mineralization in the North China and adjacent areas: Implication from the highly precise and accurate ages of metal deposits[J]. *Sciences in China (D)*, 33: 289-299(in Chinese).
- Mao J W, Xie G Q, Zhang Z H, Li X F, Wang Y T, Zhang C Q and Li Y F. 2005. Mesozoic large-scale metallogenic pulses in North China and corresponding geodynamic settings[J]. *Acta Petrologica Sinica*

- ca, 21(1): 169-188(in Chinese with English abstract).
- Marty B, Jambon A and Sano Y. 1989. Helium isotopes and CO<sub>2</sub> in volcanic gases of Japan[J]. *Chemical Geology*, 76: 25-40.
- Ni P and Xu K Q. 1993. Geological evolution of Liaodong Peninsula and genesis of gold deposits[J]. *Mineral Deposits*, 12(3): 231-244 (in Chinese with English abstract).
- Ohmoto H. 1972. Systematics of sulfide and carbon isotopes in hydrothermal ore deposits[J]. *Econ. Geol.*, 67: 551-578.
- Peng Y D. 1994. Study on genesis of Wulong gold deposit in Liaoning Province[J]. *Journal of Precious Metallic Geology*, 3(1): 21-31(in Chinese with English abstract).
- Rollinson H R. 1993. Using geochemical data: Evaluation, presentation, interpretation[M]. Harlow: Longman Scientific and Technical Press.306-308.
- Shen L, Liu J L, Hu L, Ji M, Guan H M and Davis G A. 2011. The Dayingzi detachment fault system in Liaodong Peninsula and its regional tectonic significance[J]. *Science China (Earth Sciences)*, 41(4): 437-451(in Chinese).
- Steiger R H and Jager E. 1977. Subcommission on geochronology: Convention on the use of decay constants in geo- and cosmochronology[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 36: 359-362.
- Stuart F M, Burnard P G, Taylor R P and Turner G. 1995. Resolving mantle and crustal contributions to ancient hydrothermal fluids: He-Ar isotopes in fluid inclusions from Dae W-Mo mineralization, South Korea[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(22): 4663-4673.
- Tu G Z. 1984. Geochemistry of strata-bound ore deposits in China (Vol. 1)[M]. Beijing: Science Press. 137-138(in Chinese with English abstract).
- Wang K Y, Qing M, Bian H Y, Wan D, Sun F Y, Liu Z H and Ji Z J. 2010. The geological features and geochemistry of ore-forming fluids of Wulong gold deposit in Liaoning Province[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 40(3): 557-564(in Chinese with English abstract).
- Wang M Z, Ji Z J, Liang Q F, Jin P, Zhang H F and Yang Y J. 2011. Ore-controlling structure characteristics and ore prospecting in Wulong gold deposit, Liaoning Province[J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 27(3): 191-196(in Chinese with English abstract).
- Wei J H, Liu C Q, Zhao Y X and Li Z D. 2001. Time span of the major ore-forming stages of the Wulong gold deposit, Liaoning[J]. *Geological Review*, 47(4): 433-437(in Chinese with English abstract).
- Wei J H, Liu C Q and 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[J]. *Geological Review*, 49(3): 265-271(in Chinese with English abstract).
- Wu F Y, Yang J H and Liu X M. 2005. Geochronological framework of the Mesozoic granitic magmatism in the Liaodong Peninsula, northeast China[J]. *Geological Journal of China Universities*, 11: 305-317(in Chinese with English abstract).
- Wu F Y, Yang J H, Wilde S A and Zhang X O. 2005a. Geochronology, petrogenesis and tectonic implications of the Jurassic granites in the Liaodong Peninsula, NE China[J]. *Chemical Geology*, 221: 127-156.
- Wu F Y, Lin J Q, Wilde S A, Zhang X O and Yang J H. 2005b. Nature and significance of the Early Cretaceous giant igneous event in eastern China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 233: 103-119.
- Wu G, Chen Y C, Li Z Y, Yang X S, Liu J and Qiao C J. 2013. Molybdenite Re-Os and sericite <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar ages of Yinjiagou pyrite-polymetallic deposit in western Henan Province, and their geological significance[J]. *Mineral Deposits*, 32(4): 809-822(in Chinese with English abstract).
- Xu Y C, Shen P, Tao M X and Liu W H. 1996. Geochemistry of mantle-derived volatile in the natural gases of eastern petroleum and gas fields: I: New type of Helium resources: Industrial accumulation of mantle derived Helium in the sedimentary strata[J]. *Science in China (Series D)*, 26(1): 1-8(in Chinese).
- Xu Y C, Shen P and Liu W H. 1998. Geochemistry of rare gas in the natural gases[M]. Beijing: Science Press. 1-99(in Chinese).
- Xu Y G, Li H Y, Pang C J and He B. 2009. On the timing and duration of the destruction of the North China Craton[J]. *Chinese Science Bulletin*, 54(14): 1974-1989(in Chinese).
- Yang C F, Ji Z J, Zhang G X and Xu X N. 1997. Restraining mechanism of veins in Wulong gold deposit on Au orebodies[J]. *Geology and Prospecting*, 33(6): 7-11(in Chinese with English abstract).
- Yang J H and Wu F Y. 2009. Triassic magmatism and its relation to decratonization in the eastern North China Craton[J]. *Science in China (Series D)*, 39: 910-921(in Chinese).
- Yang J H, Wu F Y, Lo C H, Chung S L, Zhang Y B and Wilde S A. 2004. Deformation age of Jurassic granites in the Dandong area, eastern China: <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar geochronological constraints[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20(5): 1205-1214(in Chinese with English abstract).

stract).

- Yang L Y, Yang L Q, Yuan W M, Zhang C, Zhao K and Yu H J. 2013. Origin and evolution of ore fluid for orogenic gold traced by D-O isotopes: A case from the Jiapigou gold belt, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(11): 4025-4035(in Chinese with English abstract).
- Yu G, Chen J F, Xue C J, Chen Y C, Chen F K and Du X Y. 2009. Geochronological framework and Pb, Sr isotope geochemistry of the Qingchengzi Pb-Zn-Ag-Au orefield, northeastern China[J]. *Ore Geology Reviews*, 35: 367-382.
- Yuan X, Chen W, Zhang B, Sun J B, Yu S, Yin J Y, Zhang Y, Liu X Y, Yang L and Zhang Y. 2017.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  age of sericite and genetic study of Wangfeng gold deposit, West Tianshan Mountains[J]. *Mineral Deposits*, 36(1):57-67(in Chinese with English abstract).
- Zhai M G, Meng Q R, Liu J M, Hou Q L, Hu S B, Li Z, Zhang H F, Liu W, Shao J A and Zhu R X. 2004. Geological features of Mesozoic tectonic regime inversion in eastern North China and implication for geodynamics[J]. *Earth Science Frontiers (China University of Geosciences, Beijing)*, 11(3): 285-297(in Chinese with English abstract).
- Zhang G X, Yang C F and Wang L H. 2001. Study on relationship between lode rock and orebody prior to mineralization in Wulong gold deposit and the meaning of the study[J]. *Gold*, 22(10): 12-14(in Chinese with English abstract).
- Zhang Y, Chen W, Chen K L and Liu X Y. 2006. Study on the Ar-Ar age spectrum of diagenetic I/S and the mechanism of  $^{39}\text{Ar}$  recoil loss-examples from the clay minerals of  $P-T$  boundary in Changxing, Zhejiang Province[J]. *Geological Review*, 52(4): 556-561(in Chinese with English abstract).
- Zhao Y S, Jin C Z and Guan G Y. 1994. A study on the relationship between bismuth minerals and gold mineralization in the Wulong gold deposit, Liaoning Province[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 14(1): 88-91(in Chinese with English abstract).

#### 附中文参考文献

- 陈广俊,孙丰月,李玉春,刘凯. 2014. 胶东郭家岭花岗闪长岩 U-Pb 年代学、地球化学特征及地质意义[J]. *世界地质*, 33(1):39-47.
- 陈文,张彦,张岳桥,金贵善,王清利. 2006. 青藏高原东南缘晚新生代幕式抬升作用的 Ar-Ar 热年代学证据[J]. *岩石学报*, 22(4):867-872.
- 方如恒. 1999. 中朝古元古代层控铅锌矿床类型及其比较[J]. *辽*

宁地质, 16(1):43-56.

- 丰成友,李国臣,李大新,周安顺,李洪茂. 2013. 新疆祁漫塔格柯可卡尔德钨锡矿床控矿构造及  $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$  年代学研究[J]. *矿床地质*, 32(1):207-216.
- 侯可军,李延河,田有荣. 2009. LA-MC-ICP-MS 锆石微区原位 U-Pb 定年技术[J]. *矿床地质*, 28(4):481-492.
- 李力,郑超,于志凯,毛冬青. 1993. 五龙金矿成矿期流体包裹体特征[J]. *沈阳黄金学院院报*, 12(1):1-8.
- 辽宁省地质矿产局. 1989. 辽宁省区域地质志[M]. 北京:地质出版社. 1-856.
- 林伟,王清晨,王军,王非,褚杨,陈科. 2011. 辽东半岛晚中生代伸展构造-华北克拉通破坏的地壳响应[J]. *中国科学:地球科学*, 41(5):638-653.
- 林伟,王军,刘飞,冀文斌,王清晨. 2013. 华北克拉通及邻区晚中生代伸展构造及其动力学背景的讨论[J]. *岩石学报*, 29(5): 1791-1810.
- 刘杰勋,郭巍,朱凯. 2016. 辽东岫岩地区早白垩世侵入岩的年代学、地球化学及地质意义[J]. *岩石学报*, 32(9):2889-2900.
- 刘俊来, Davis G A, 纪沫,关会梅,白相东. 2008. 地壳的拆离作用与华北克拉通破坏:晚中生代伸展构造约束[J]. *地学前缘*, 15(3):72-81.
- 刘俊来,纪沫,申亮,关会梅, Davis G A. 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[J]. *中国科学(地球科学)*, 41(5):618-637.
- 刘如琦,戴立军,商木元,王铁军,汪振斌,崔武军,关康. 2006. 辽东的主要剪切带及其金矿化特征[J]. *地质科学*, 41(2):181-194.
- 刘先利,姜瑛,刘志远. 2000. 青城子矿田高家堡子大型金银矿床地质特征及成矿机制[J]. *辽宁地质*, 17(2):121-127.
- 路孝平,吴福元,林景仟,孙德有,张艳斌,郭春丽. 2004. 辽东半岛南部早前寒武纪花岗岩浆作用的年代学格架[J]. *地质科学*, 39(1):123-138.
- 毛景文,张作衡,余金杰,王义天,牛宝贵. 2003. 华北及邻区中生代大规模成矿的地球动力学背景:从金属矿床年龄精测得到启示[J]. *中国科学D辑*, 33(4):289-299.
- 毛景文,谢桂青,张作衡,李晓峰,王义天,张长青,李永峰. 2005. 中国北方中生代大规模成矿作用的期次及其地球动力学背景[J]. *岩石学报*, 21(1):169-188.
- 倪培,徐克勤. 1993. 辽东半岛地质演化及金矿床的成因[J]. *矿床地质*, 12(3):231-244.
- 彭艳东. 1994. 五龙金矿成因研究[J]. *贵金属地质*, 3(1):21-31.
- 申亮,刘俊来,胡玲,纪沫,关会梅, Davis G A. 2011. 辽东半岛大营子拆离断层系及其区域构造意义[J]. *中国科学(地球科学)*, 41

- (4):437-451.
- 涂光炽. 1984. 中国层控矿床地球化学(第一卷)[M]. 北京:科学出版社. 137-138.
- 王可勇,卿敏,边红业,万多,孙丰月,刘正宏,纪兆家. 2010. 辽宁五龙金矿床地质特征及成矿流体地球化学性质[J]. 吉林大学学报(地球科学版),40(3):557-564.
- 王明志,纪兆家,梁群峰,金平,张汉甫,杨运军. 2011. 辽宁五龙金矿控矿构造分析及找矿方向[J]. 华南地质与矿产,27(3):191-196.
- 魏俊浩,刘丛强,赵永鑫,李志德. 2001. 辽宁五龙金矿主成矿阶段成矿持续时限[J]. 地质论评,47(4):433-437.
- 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性岩浆演化微量元素、同位素证据与金矿成矿[J]. 地质论评,49(3):265-271.
- 吴福元,杨进辉,柳小明. 2005. 辽东半岛中生代花岗质岩浆作用的年代学格架[J]. 高校地质学报,11(3):305-317.
- 武广,陈毓川,李宗彦,杨鑫生,刘军,乔翠杰. 2013. 豫西银家沟硫铁多金属矿床 Re-Os 和  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  年龄及其地质意义[J]. 矿床地质,32(4):809-822.
- 徐义刚,李洪颜,庞崇进,何斌. 2009. 论华北克拉通破坏的时限[J]. 科学通报,54(14):1974-1989.
- 徐永昌,沈平,陶明信,刘文汇. 1996. 东部油气区天然气中幔源挥发分的地球化学:I:氦资源的新类型:沉积壳层幔源氦的工业储集[J]. 中国科学D辑,26(1):1-8.
- 徐永昌,沈平,刘文汇. 1998. 天然气中稀有气体地球化学[M]. 北京:科学出版社. 99页.
- 杨春福,纪兆家,张国宪,许相男. 1997. 五龙金矿脉岩对金矿体的制约机制[J]. 地质与勘探,33(6):7-11.
- 杨进辉,吴福元,罗清华,钟孙霖,张艳斌,Wilde S A. 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[J]. 岩石学报,20(5):1205-1214.
- 杨进辉,吴福元. 2009. 华北东部三叠纪岩浆作用与克拉通破坏[J]. 中国科学D辑:地球科学,39:910-921.
- 杨利亚,杨立强,袁万明,张闯,赵凯,于海军. 2013. 造山型金矿成矿流体来源与演化的氢-氧同位素示踪:夹皮沟金矿带例析[J]. 岩石学报,29(11):4025-4035.
- 袁霞,陈文,张斌,孙敬博,喻顺,尹继元,张彦,刘新宇,杨莉,张岩. 2017. 西天山望峰金矿床绢云母  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  年龄及矿床成因研究[J]. 矿床地质,36(1):57-67.
- 翟明国,孟庆任,刘建明,侯泉林,胡圣标,李忠,张宏福,刘伟,邵济安,朱日祥. 2004. 华北东部中生代构造体制转折峰期的主要地质效应和形成动力学探讨[J]. 地学前缘,11(3):285-297.
- 张国宪,杨春福,王丽华. 2001. 五龙金矿床成矿前脉岩与矿体关系研究及其意义[J]. 黄金,22(10):12-14.
- 张彦,陈文,陈克龙,刘新宇. 2006. 成岩混层(I/S)Ar-Ar年龄谱型及 $^{39}\text{Ar}$ 核反冲丢失机理研究——以浙江长兴地区P-T界线粘土岩为例[J]. 地质论评,52(4):556-561.
- 赵玉山,金成洙,关广岳. 1994. 辽宁五龙金矿铋矿物与金矿化关系研究[J]. 矿物学报,14(1):88-91.