



伊春火成岩带二股矽卡岩型铁多金属矿床⁴⁰Ar-³⁹Ar 年代学及其地质意义*

欧阳荷根¹, 车晓光², 周振华¹

(1 中国地质科学院矿产资源研究所 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037;

2 辽宁省有色地质局勘察研究院, 辽宁 沈阳 110013)

摘 要 文章在矿床地质特征研究基础上,首次确定了伊春火成岩带内的二股铁多金属矿床的成矿时代。结合前人研究成果,分析了伊春火成岩带早中生代金属矿床的成矿时限,成矿规律及找矿方向。金云母⁴⁰Ar-³⁹Ar 同位素测年结果表明,二股铁多金属矿床的成矿年龄为 $(181.0 \pm 4.2) \text{Ma}$ 。伊春火成岩带内早中生代金属成矿作用分为:早期(200~181 Ma)与二长花岗岩有关的矽卡岩型-热液脉型铁多金属矿床成矿作用,晚期(178~175 Ma)与花岗斑岩有关的斑岩型钼矿床成矿作用。晚三叠世—早侏罗世花岗岩类侵入岩(如二长花岗岩)与铅山组碳酸盐岩接触部位是伊春火成岩带内矽卡岩型-热液脉型铁多金属矿床成矿的有利部位。

关键词 地球化学; ⁴⁰Ar-³⁹Ar 定年; 火成岩带; 二股铁多金属矿床; 斑岩型矿床; 矽卡岩型矿床; 伊春

中图分类号: P618.31

文献标志码: A

⁴⁰Ar-³⁹Ar dating of Ergu Fe-polymetallic skarn deposit in Yichun igneous belt and its geological implications

OUYANG HeGen¹, CHE XiaoGuang² and ZHOU ZhenHua¹

(1 MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2 Nonferrous Geological Prospecting Institute of Liaoning Province, Shenyang 110013, Liaoning, China)

Abstract

In this study, ⁴⁰Ar-³⁹Ar dating of the Ergu Fe-polymetallic skarn deposit was conducted, and the time, metallogenic regularity, and prospecting direction of the Mesozoic mineralization in Yichun igneous belt were studied. The results show that phlogopite from the Ergu deposit yielded an ⁴⁰Ar-³⁹Ar isochron age of $(181.0 \pm 4.2) \text{Ma}$. The Mesozoic mineralization in Yichun igneous belt can be divided into two episodes, i. e., the 200~181 Ma skarn-vein Fe-polymetallic mineralization related to monzonitic granite and the 178~175 Ma porphyry Mo mineralization associated with granite porphyry. It is held that the contact zone between the Late Triassic-Early Jurassic granitoids and the carbonate rocks of Qianshan Formation is favorable for skarn-vein Fe-polymetallic mineralization.

Key words: geochemistry, ⁴⁰Ar-³⁹Ar dating, igneous rock belt, Ergu Fe-polymetallic deposit, porphyry deposit, skarn deposit, Yichun

* 本文得到国家自然科学基金项目(编号:41403042)和中央级科研院所基本科研业务费项目(编号:K1414)联合资助

第一作者简介 欧阳荷根,男,1984年生,助理研究员,主要从事固体矿产勘查和矿床学方面的研究。Email: oyhg1984@163.com

收稿日期 2015-05-29; 改回日期 2016-08-25。苏 杭编辑。

伊春火成岩带位于兴蒙造山带东段巨型中生代“花岗岩海”中,是小兴安岭-张广才岭多金属成矿带的重要组成部分(韩振哲等,2010),也是中国重要的中生代环太平洋西带斑岩型-矽卡岩型钼、铁、铜、金矿和浅成低温热液型铜、金矿成矿带的北延部分(Ge et al., 2007)。带内的矿产以钼、铁和金为主,其次为铅、锌、钨和铜。已发现鹿鸣和霍吉河大型斑岩型钼矿床,二股、西林和翠宏山矽卡岩型铁多金属矿床,高松山、团结沟和乌拉嘎大型浅成低温热液型金矿床,小西林、徐老九沟和前进东山矽卡岩型-脉型铅锌矿床,这充分显示了该区优越的成矿地质环境。

成矿年代一直是矿床学研究的热点问题。矿床形成时代的精确厘定对认识矿床成因、成矿事件与其他异常事件的耦合以及对找矿勘察均具有重要的理论和实际意义。前人研究表明,伊春火成岩带中斑岩型钼矿床的成矿作用(如鹿鸣钼矿、霍吉河钼矿)集中发生在早侏罗世晚期(约 175 Ma)(谭红艳, 2013; 刘翠等, 2014)。最近的研究认为,带内还存在一期晚二叠世—早三叠世的斑岩型钼矿成矿事件(Zhang et al., 2016)。对带内浅成低温热液型金矿床(如团结沟金矿床、高松山金矿床、乌拉嘎金矿床、东安金矿床)的成矿年代学研究表明,金的成矿作用集中发生在早白垩世晚期(110~100 Ma)(Zhang et al., 2010; Sun et al., 2013; Wang et al., 2014; 汪佳琳等, 2014)。相对而言,对带内的矽卡岩型铁多金属矿床和矽卡岩型-热液脉型铅锌矿床成矿时代的厘定迄今还尤为欠缺,很大程度上制约了对成矿规律的总结和认识。

本文在详细的矿床地质特征研究基础上,首次对二股矽卡岩型铁多金属矿床开展了金云母⁴⁰Ar-³⁹Ar同位素定年。结合前人研究成果,探讨了伊春火成岩带早中生代金属矿床的成矿时限、成矿规律及找矿方向。

1 区域地质背景

伊春火成岩带西邻松辽盆地,东以嘉荫-依兰-牡丹江断裂为界,与佳木斯地块相接,属兴蒙造山带东段佳木斯地块和松嫩-张广才岭地块结合部位的陆缘造山带(Wu et al., 2007, 2011)。研究区地质演化历史漫长,经历了多次拉张裂解和挤压闭合,具有多旋回发展特点,但主旋回是加里东中期形成的地槽褶皱系(Wu et al., 2003)。受印支晚期-燕山早期强

烈的构造-岩浆改造作用影响,褶皱系大部分被花岗岩类侵入岩所占据(图 1)(Wu et al., 2003; Ge et al., 2007; 张昱, 2008; Wu et al., 2011; 韩振哲, 2011; 孟恩, 2011)。

区内出露的基底岩系主要为古元古界东风山群和新元古界张广才岭群(张昱, 2008)。东风山群岩石组合较为复杂,包括大理岩类、片麻岩类、浅粒岩类和板岩类等,该群是小兴安岭-张广才岭褶皱系东缘最重要的铁-金成矿建造(王枫, 2013)。张广才岭群由一套变质杂岩构成,岩石普遍遭受糜棱岩化,该岩群属于一种构造作用下的混杂堆积岩石,在多次不同规模 and 不同方向的应力作用下形成(王枫, 2013)。古生代地层零星分布在研究区,岩石普遍遭受不同程度的区域变质和构造变形作用。西林群是研究区内仅出露的寒武纪地层,自上而下可划分为晨明组、老道沟组和铅山组(Wu et al., 2007; 张振庭, 2010; 孟恩, 2011)。铅山组变质岩系的岩石类型主要有碎屑岩类、碳酸盐岩类和板岩类,其中的碳酸盐岩类建造是区内矽卡岩型铁多金属矿床的主要赋矿围岩(黑龙江省松花江专署地质局第 4 地质队, 1960; 郝宇杰等, 2013; 李树才等, 2015)。奥陶系总体上呈南北向分布,其中宝泉组岩性以酸性熔岩及其凝灰熔岩为主,小金沟组为一套海进环境陆源碎屑岩-碳酸盐岩沉积建造,大青组主体岩性以中性熔岩、中酸性熔岩为主,局部夹有砂岩、粉砂岩和沙板岩。泥盆系自下而上分为黑龙宫组和宏川组,整体为一套浅海相细碎屑岩-碳酸盐岩沉积建造(胡新露, 2015)。二叠系自下而上可划分为土门岭组、五道岭组及红山组,其中土门岭组主要岩性为砂板岩夹灰岩,局部受后期花岗质岩浆侵入活动的影响,形成角闪岩化黑云石英片岩、透辉石石英岩,硅灰石透辉石矽卡岩,并可见多金属矿化。区内中生代地层仅见白垩系下统火山喷发-沉积岩系,岩石类型以中-酸性火山熔岩类为主,次为火山碎屑岩类和潜火山岩类,该地层是 NE-NNE 向中生代火山喷发-沉积盆地的主要组成部分(Hu et al., 2014)。

区内岩浆侵入活动频繁,侵入岩占据了总面积的 75%(图 1),岩浆岩成分和岩石类型均很复杂,从超基性—基性岩、中性岩、酸性岩均有出露,但以花岗岩类侵入岩为主(张昱, 2008; 韩振哲等, 2010; 韩振哲, 2011)。花岗岩类侵入岩大体可划分为中元古代、加里东期、华力西期、印支晚期-燕山早期和燕山晚期 5 期(张昱, 2008)。不同期次的花岗岩类侵

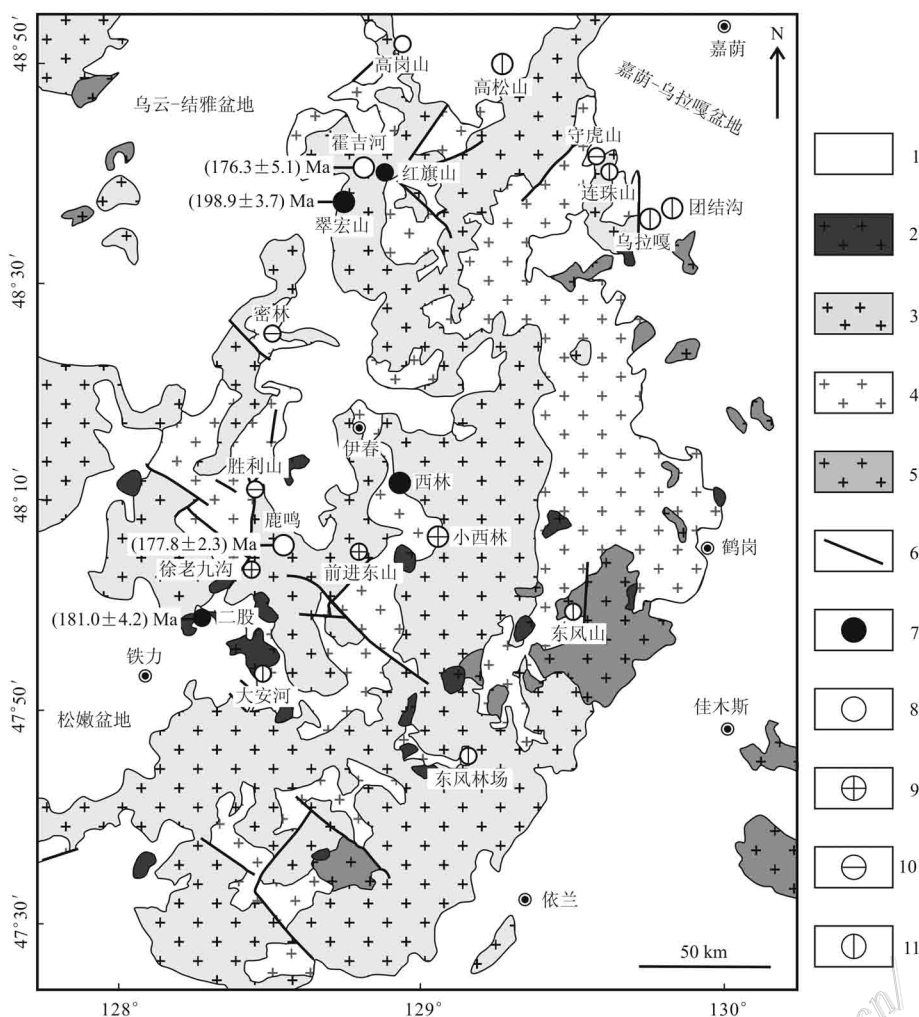


图 1 伊春火成岩带区域地质及矿产分布图(据韩振哲等, 2010 修改)

1—中生代—新生代火山喷发—沉积盆地; 2—白垩纪花岗岩类岩石; 3—三叠纪—侏罗纪花岗岩类岩石; 4—寒武纪—志留纪花岗岩类岩石; 5—新元古代花岗岩类岩石; 6—断裂; 7—矽卡岩型 Fe—多金属矿; 8—斑岩型 Mo 矿; 9—矽卡岩型—热液脉型 Pb—Zn 矿; 10—热液脉型 Cu 矿; 11—浅成低温热液型 Au 矿

Fig. 1 Regional geological map of Yichun igneous rocks belt, showing the location of Ergu and other deposits (modified from Han et al., 2010)

1—Mesozoic-Cenozoic volcanic-sedimentary basin; 2—Cretaceous granitoids; 3—Triassic-Jurassic granitoids; 4—Cambrian-Devonian granitoids; 5—Neo-proterozoic granitoids; 6—Faults; 7—Skarn Fe-polymetallic deposits; 8—Porphyry Mo deposits; 9—Skarn-veined Pb-Zn deposits; 10—Veined Cu deposits; 11—Epithermal Au deposits

入岩沿南北向呈带状分布,构成小兴安岭-张广才岭岩浆岩带。印支晚期-燕山早期的岩浆侵入活动最为强烈,形成了花岗岩带的主体部分。出露岩性以二长花岗岩为主,斑状二长花岗岩、正长-碱长花岗岩和花岗斑岩次之,碱性花岗岩零星分布(谭红艳, 2013)。该期花岗质岩浆活动形成了鹿鸣和霍吉河钼矿、翠宏山和二股铁多金属矿、西林铁矿、小西林和徐老九沟铅锌矿、胜利山和密林铜矿等矿床(图1)。燕山晚期岩浆活动以火山作用为主,形成一系列的NNE向—NE向的火山喷发-沉积盆地,并伴有

浅成-超浅成的岩浆侵入活动以及有关的浅成低温热液型金矿化,形成了高松山、团结沟、乌拉嘎、东安、大安河和东风林场等金矿床(图1)(谭红艳, 2013)。

2 二股铁多金属矿床地质特征

二股铁多金属矿床位于伊春市西南约 50 km 处,地理坐标为东经 $128^{\circ}20'15''\sim 128^{\circ}21'05''$,北纬 $47^{\circ}10'10''\sim 47^{\circ}10'41''$,是 20 世纪 60 年代通过航磁

异常地面检查发现的一个以铁、锌为主并伴生铅、铜的中型砂卡岩型矿床。矿床由西山、响水河、三林班和东山 4 个矿段组成,以西山矿段规模最大(图 2,图 3)。

矿区内出露的地层有:寒武系老道沟组粉砂质板岩、铅山组白云岩-灰岩和五星镇组大理岩夹碳质-粉砂质板岩、奥陶系宝泉组英安质凝灰熔岩和大青山组安山质凝灰熔岩、古近系—新近系砾岩以及第四系沉积物(黑龙江省松花江专署地质局第 4 地质

队,1960)。早古生代地层的完整性受后期岩浆活动的影响遭到严重破坏,呈残留体分布在岩体中,与成矿关系密切的是铅山组白云岩-灰岩。区内中酸性侵入岩分布广泛,呈岩株或岩基状产出。主要岩石类型为黑云母二长花岗岩和斑状花岗岩(图 4a、b),属同期不同相带产物。黑云母二长花岗岩具块状构造,中粗粒花岗结构,局部为中细粒花岗结构,主要由钾长石(30%~40%)、斜长石(20%~30%)、石英(15%~20%)和黑云母(5%~10%)组成,副矿

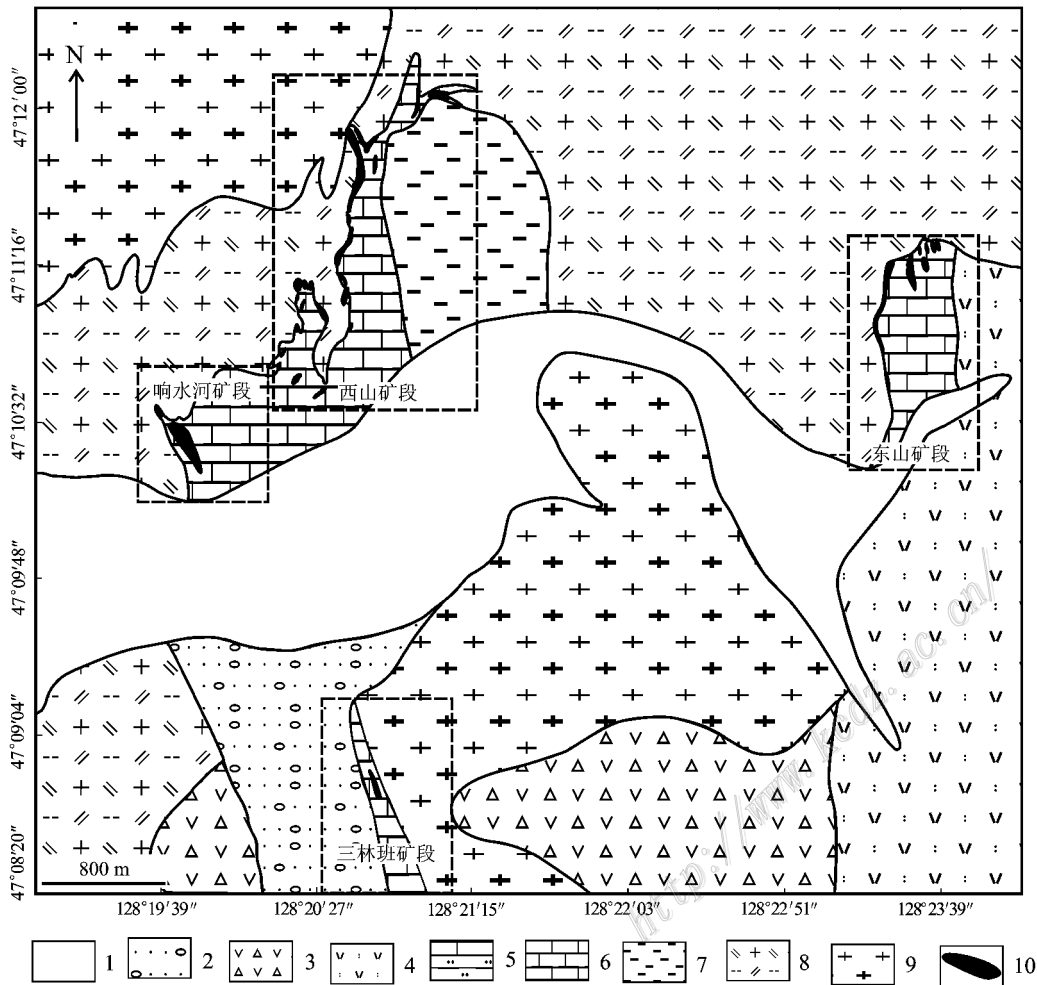


图 2 二股铁多金属矿床地质图(据黑龙江省松花江专署地质局第 4 地质队,1960 修改)

1—第四系;2—古近系—新近系砂砾岩;3—奥陶系大青山组安山质凝灰岩;4—奥陶系宝泉组安山质凝灰岩;5—寒武系五星镇组大理岩夹板岩;6—寒武系铅山组白云岩-灰岩;7—寒武系老道沟组板岩;8—侏罗纪黑云母二长花岗岩;9—侏罗纪斑状二长花岗岩;10—Fe-Zn-Cu-Pb-Mo 矿体

Fig. 2 Geological map of the Ergu Fe-polymetallic deposit (modified after No. 4 Geological Party of Heilongjiang Bureau of Geology and Mineral Resources, 1960)

1—Quaternary; 2—Paleogene—Neogene glutenite; 3—Ordovician Daqingshan Formation andesite-tuff; 4—Ordovician Baoquan Formation andesite-tuff; 5—Cambrian Wuxingzhen Formation marble interlayered with slate; 6—Cambrian Qianshan Formation dolomite to limestone; 7—Cambrian Laodaogoumaio Formation slate; 8—Jurassic biotite monzonitic granite; 9—Jurassic porphyritic monzonitic granite; 10—Fe-Zn-Cu-Pb-Mo orebodies

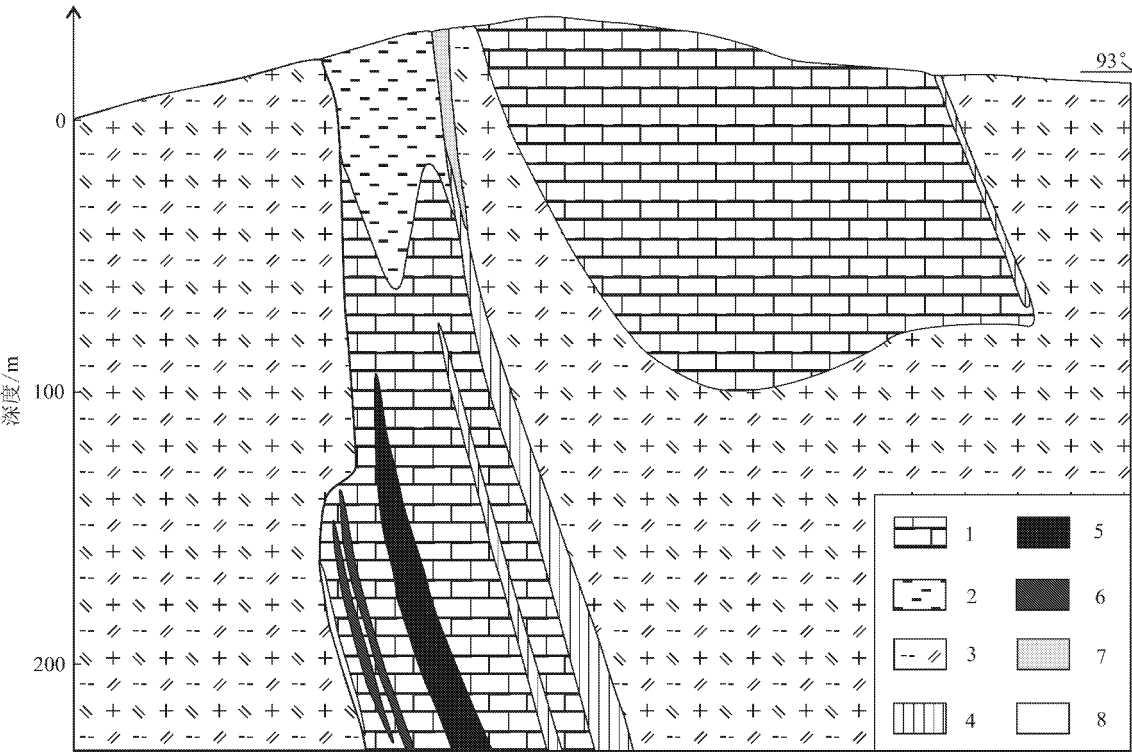


图 3 二股矿床西山矿段地质剖面图(据黑龙江省松花江专署地质局第 4 地质队, 1960 修改)

1—铅山组大理岩-灰岩; 2—角岩; 3—黑云母二长花岗岩; 4—矽卡岩; 5—Fe-Zn 矿体; 6—Fe 矿体; 7—Cu 铜矿体; 8—Pb 矿体

Fig. 3 Cross section of Xishan ore block in the Ergu deposit (modified after No. 4 Geological Party of Heilongjiang Bureau of Geology and Mineral Resources)

1—Qianshan Formation dolomite to limestone; 2—Hornstone; 3—Biotite monzonitic granite; 4—Skarn; 5—Fe-Zn orebodies; 6—Fe orebodies; 7—Cu orebodies; 8—Pb orebodies

物有锆石、磷灰石、榍石、褐帘石等。斑状花岗岩呈似斑状结构,块状构造,矿物组分主要有钾长石(35%~45%)、斜长石(20%~25%),石英(15%~25%)、少量黑云母(5%),副矿物有锆石、榍石、磷灰石。斑晶为钾长石,约占总体积的 15%。在黑云母二长花岗岩和斑状花岗岩与铅山组富镁碳酸盐岩接触带上普遍发生矽卡岩化及与之有关的铁多金属矿化。

矿区内各矿段的矿化特征基本相似,本文主要介绍西山矿段的矿床地质特征。西山矿段主要由 3 个矿体组成(黑龙江省松花江专署地质局第 4 地质队, 1960):Ⅰ号矿体最大,以铁锌矿为主;Ⅱ号矿体以铜矿为主伴有钨钼铁矿;Ⅲ号矿体主要为铅锌矿,伴有铁矿,沿黑云母二长花岗岩体呈弧形分布。矿段内的铁多金属矿体主要有 4 种产出状态:①产于矽卡岩带中的铁(锌)矿体。这种矿体占整个矿段铁矿总量的绝大多数;②产于大理岩层间的铁(锌)矿体和铅锌矿体。这种矿体通常不稳定,规模小,品位和厚度变化大;③产于角岩层间裂隙的铜矿体;④

产于临近接触构造带附近黑云母二长花岗岩中的铜矿体(图 4c)和铅锌矿体。

矿段内的矿体受构造和岩性控制明显,在平面上表现为波浪弧形构造。矿体倾角陡(图 3),有时近乎垂直,倾向和倾角变化随接触构造成矿带的产状变化而变化。矿体沿走向、倾向均有膨胀、变窄、分枝、复合等现象。当矿体倾角由陡变缓,在其转折处,矿体厚度常增大,矿体形状由条带状变为囊状;当接触构造带的产状由近直立转变为另一直立时,在其转折处常有膨胀的矿体出现;当矿体倾角由缓变陡或直立时,矿体宽度往往变窄或很快尖灭(黑龙江省松花江专署地质局第 4 地质队, 1960)。

矿段内主要的矿石建造有磁铁矿-透辉石-石榴子石建造、磁铁矿-闪锌矿-透辉石-石榴子石建造、黄铜矿-辉钼矿-透辉石-石榴子石建造以及方铅矿-闪锌矿-石榴子石-透辉石建造。矿石类型主要为磁铁矿矿石和磁铁矿-闪锌矿矿石,其次为黄铜矿矿石和方铅矿-闪锌矿±黄铜矿±辉钼矿±白钨矿矿石(黑

龙江省松花江专署地质局第4地质队, 1960)。磁铁矿和磁铁矿-闪锌矿矿石主要呈块状构造, 部分呈角砾状(图4d)或浸染状构造。黄铜矿和方铅矿-闪锌矿±黄铜矿±辉钼矿±白钨矿矿石呈浸染状、细脉-网脉状构造(图4c)。矿石以他形粒状结构、交代残余结构为主, 部分可见固溶体分离结构。常见的金属矿物为磁铁矿、闪锌矿、黄铜矿、方铅矿、磁黄铁矿。脉石矿物为透辉石、石榴子石、透闪石、绿帘石、绿泥石、石英、方解石和金云母(图4e~f)。

3 样品处理及分析方法

本次研究选取矽卡岩型矿化蚀变带中的金云母样品(样品编号: EG-04B, 采样位置: 128°20′56″E; 47°11′49″N)进行⁴⁰Ar-³⁹Ar 年龄测定。首先, 将样品磨制成光薄片, 在光学显微镜下对其进行详细的岩石学研究。如图4c~f所示, 样品中金云母粒度较大(约100 μm), 与矽卡岩的形成近于同期, 且早于磁铁矿、黄铜

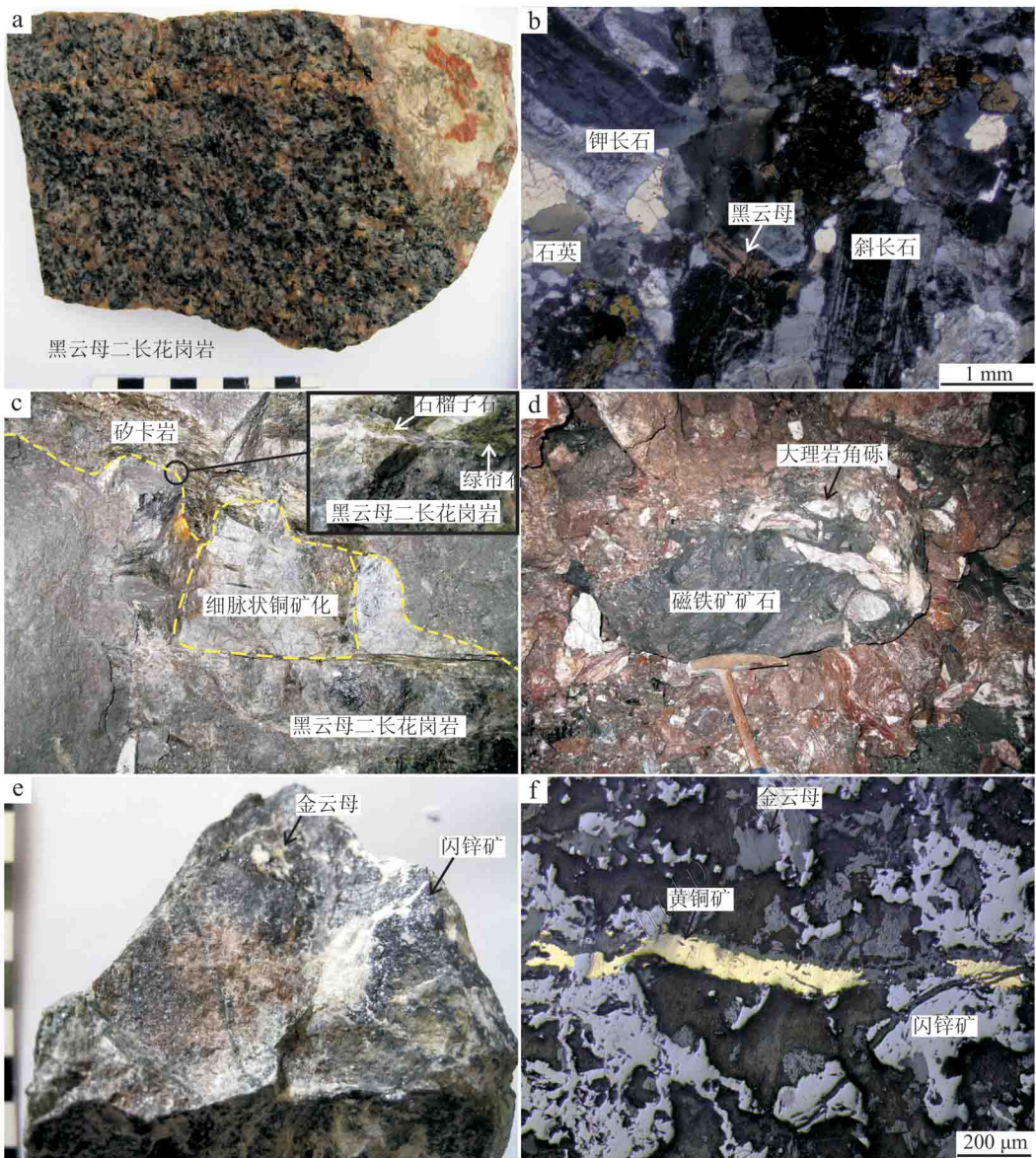


图4 二股矿床西山矿段主要地质体的特征

a. 未蚀变的黑云母二长花岗岩; b. 黑云母二长花岗岩的显微结构; c. 矽卡岩型矿体; d. 磁铁矿矿石中发育大理岩角砾; e. 矽卡岩中的硫化物脉及金云母; f. 显微结构特征显示金云母的形成最早, 其次为闪锌矿, 最后为黄铜矿

Fig. 4 Characteristics of the main geological bodies in Xishan block of the Ergu deposit

a. Biotite monzonitic granite; b. Microscope characteristics of biotite monzonitic granite; c. Skarn orebody; d. Marble breccias in magnetite ore; e. Sulfide vein and phlogopite in skarn; f. Microscope characteristics showing phlogopite formed earlier than sphalerite and chalcopyrite

矿和闪锌矿,表明所采集的样品适合于⁴⁰Ar-³⁹Ar 年代学研究,金云母的形成年龄可代表成矿年龄。样品破碎后,筛选大小适中的部分(0.2~3 mm)洗净烘干,在双目镜下挑选出金云母单矿物(纯度>99%)。金云母用超声波清洗后封进石英瓶中送核反应堆中接受中子照射。照射工作在中国原子能科学研究所的“游泳池堆”中进行,使用 B4 孔道,中子流密度约为 $2.65 \times 10^{13} \text{ n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 。照射总时间为 1444 min,积分中子通量为 $2.30 \times 10^{18} \text{ n}/\text{cm}^2$ 。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 $(132.7 \pm 1.2) \text{ Ma}$,钾含量为 7.6%。

照射后样品的⁴⁰Ar-³⁹Ar 同位素分析工作在中国地质科学院地质研究所国土资源部同位素重点实验室完成。照射后的样品冷却约 4 个月后装入析氦系统并进行加热,样品的阶段升温加热(700~1400℃)使用石墨炉,每一个阶段加热 30 min,净化 30 min,然后对释放出的 Ar 同位素进行质谱分析。质谱分析在多接收稀有气体质谱仪 Helix MC 上进行,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 K₂SO₄ 和 CaF₂ 来获得,其值为: $(^{36}\text{Ar}/^{37}\text{Ar})_{\text{Ca}} = 0.000\ 238\ 9$, $(^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_{\text{K}} = 0.004\ 782$, $(^{39}\text{Ar}/^{37}\text{Ar})_{\text{Ca}} = 0.000\ 806$ 。

³⁷Ar 经放射性衰变校正,⁴⁰K 衰变常数 $\lambda = 5.543 \times 10^{-10} \text{ yr}^{-1}$ (Steiger et al., 1977)。用 ISOPLOT 程序(Ludwig, 2003)计算坪年龄,坪年龄误差以 2σ 给出。详细实验流程见张彦等(2006)。

4 实验结果

样品的⁴⁰Ar/³⁹Ar 同位素分析结果列于表 1 中,相应的表观年龄谱如图 5 所示。由此可知,最初的两个加热阶段(700~760℃)的表观年龄较坪年龄偏低且误差很大,这两个阶段所释放的氩气中放射性成因氩的百分比也较低,说明金云母矿物表面遭受了很轻微的氩丢失,同时有少量大气氩吸附在矿物晶体表面或混入矿物外层晶格。810~930℃的 4 个加热阶段的表面年龄异常高($(227.4 \pm 2.2) \text{ Ma} \sim (190.9 \pm 1.8) \text{ Ma}$),³⁹Ar 的析出量大约占总量的 16.39%,表明样品中存在明显的过剩氩,过剩氩可能来自寄主矿物金云母中的流体包裹体(Harrison et al., 1993)。7 个连续加热阶段(960~1200℃)所产生的表观年龄在误差范围内一致,所释放的³⁹Ar 占³⁹Ar 总量的 80.1%,且给出了很好的坪年龄: $(184.0 \pm 1.3) \text{ Ma}$ 。高温阶段(1400℃),在³⁹Ar 几乎全部析出情况下(98.97%),表观年龄偏高($(189.6 \pm 2.5) \text{ Ma}$),这是核反冲所致,这部分大约占³⁹Ar 总析出量的 1.03%,可以不加考虑。

表 1 二股矿体金云母阶段升温⁴⁰Ar-³⁹Ar 测年数据
Table 1 ⁴⁰Ar-³⁹Ar stepwise heating analytical data for phlogopite from Ergu deposit

$t/^\circ\text{C}$	⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar	³⁶ Ar/ ³⁹ Ar	³⁷ Ar/ ³⁹ Ar	³⁸ Ar/ ³⁹ Ar	<i>F</i>	$n(^{39}\text{Ar})/\text{mol}$	³⁹ Ar 积累率/%	<i>t</i> /Ma	±1σ
样品号:EG-04B	<i>m</i> = 29.32 mg	<i>J</i> = 0.004214							
700	316.0166	1.0557	1.0841	0.2272	4.1321	0.02×10^{-14}	0.07	31.0	51.0
760	8.7046	0.0181	0.0384	0.0266	3.3476	0.53×10^{-14}	2.44	25.3	1.0
810	36.0593	0.0271	0.1493	0.0190	28.0739	0.23×10^{-14}	3.45	201.7	2.7
860	34.7384	0.0097	0.0416	0.0149	31.8754	0.62×10^{-14}	6.20	227.4	2.2
900	30.5662	0.0063	0.1958	0.0138	28.7300	0.84×10^{-14}	9.98	206.2	2.0
930	27.5533	0.0036	0.0048	0.0134	26.4921	1.97×10^{-14}	18.83	190.9	1.8
960	26.2992	0.0025	0.0074	0.0133	25.5537	3.22×10^{-14}	33.26	184.5	1.8
990	26.2369	0.0025	0.0108	0.0134	25.4850	2.33×10^{-14}	43.71	184.0	1.8
1020	26.6047	0.0027	0.0043	0.0132	25.8108	1.92×10^{-14}	52.31	186.3	1.8
1060	27.3735	0.0053	0.0372	0.0136	25.8019	1.63×10^{-14}	59.62	186.2	1.8
1120	26.5892	0.0038	0.0224	0.0136	25.4652	3.28×10^{-14}	74.34	183.9	1.8
1180	25.7779	0.0021	0.0123	0.0133	25.1465	3.91×10^{-14}	91.87	181.7	1.7
1200	25.5893	0.0014	0.0216	0.0135	25.1771	1.58×10^{-14}	98.97	181.9	1.7
1400	28.5154	0.0075	0.1332	0.0144	26.3032	0.23×10^{-14}	100.00	189.6	2.5

注：*F* 指放射性成因⁴⁰Ar 与 K 生成的³⁹Ar 的比值。

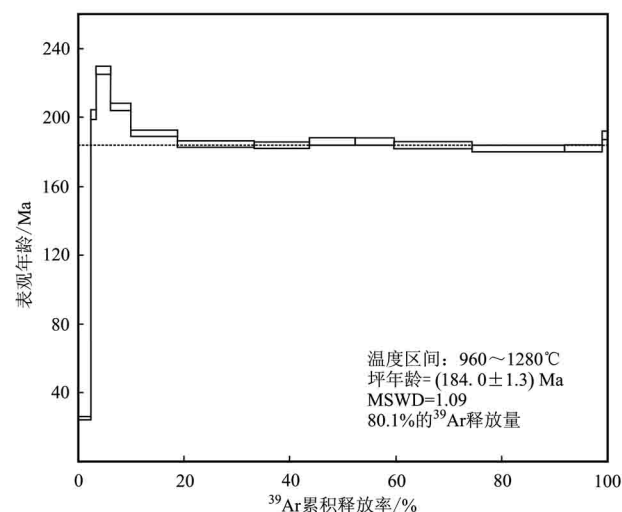


图 5 二股矿床金云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 表观年龄谱

Fig. 5 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age spectrum of phlogopite from the Ergu deposit

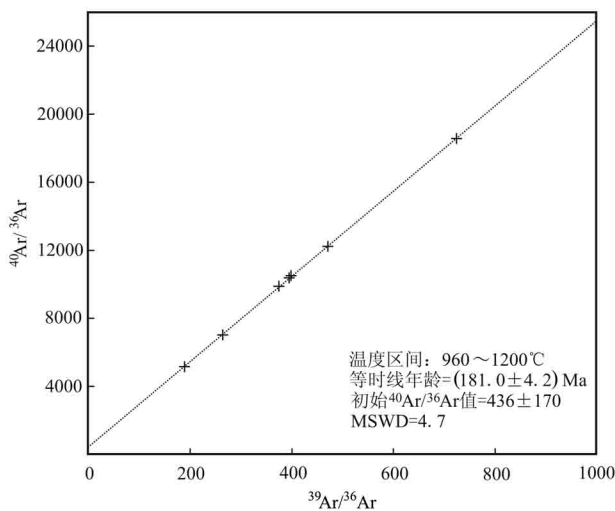


图 6 二股矿床金云母 $^{39}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ - $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 等时线年龄

Fig. 6 $^{39}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ - $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ isochron of phlogopite from the Ergu deposit

5 讨论

5.1 金云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄可靠性分析

与 U-Pb 法扣除普通铅类似,在 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学中, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法也需扣除初始 Ar。其比较独特的是初始氩可以分为 2 种(李志昌等, 2004):一种是只含大气 Ar 的初始值,其 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值为 295.5 ± 0.5 ;另一种是大气 Ar 和过剩 Ar 混合组成的初始值,其 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值大于 295.5。因此, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 表观年龄

谱给出的“坪年龄”是一种“模式年龄”,即“坪年龄”的获得需要假定矿物中 Ar 同位素初始值为大气值,即为 295.5 ± 0.5 ,数据处理时按此值扣除初始值。因此,如果样品中的初始值含有过剩 Ar,坪年龄就会给出错误的结果,因为它仍然按大气值来扣除而未扣除过剩 Ar。

$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学中的等时线或“反等时线”不需校正初始同位素比值(Kuiper, 2002),因此也不需要大气 Ar 同位素组成做任何假设,样品在丢失部分 Ar 或含过剩 Ar 时仍能求得真实年龄,其计算方程如下(李志昌等, 2004):

$$(^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_p = (^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar})_i + (^{39}\text{Ar}/^{36}\text{Ar})_p \cdot (e^{\lambda t} - 1) \cdot J^{-1}$$

在分析样品时,从低温段开始逐渐升温,让样品中氩分阶段析出。显然,不同阶段析出的 ^{36}Ar 、 ^{39}Ar 和 ^{40}Ar 量不同,因此 $(^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_p$ 和 $(^{39}\text{Ar}/^{36}\text{Ar})_p$ 值是变化的。另一方面,假定样品未受热扰动,各个加热阶段表面年龄相同,即 $(e^{\lambda t} - 1) \cdot J^{-1}$ 在各阶段是常数。此外,假定各阶段析出的初始氩 $(^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar})_i$ 比值也不变,这样上式为直线方程,各温阶的 $(^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_p$ 与 $(^{39}\text{Ar}/^{36}\text{Ar})_p$ 之间呈直线变化,通过该直线斜率求出年龄。直线的截距,指示初始 Ar 的 $(^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar})_i$ 比值。从拟合的金云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 等时线结果(图 6)可以看出, $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 初始值(436 ± 170)明显大于现代大气 Ar 比值(295.5),指示有显著的过剩 Ar 存在(李志昌等, 2004),这表明 (184.0 ± 1.3) Ma 的坪年龄不可靠, (181.0 ± 4.2) Ma 的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 等时线年龄更能代表金云母从其形成至 Ar 封闭时的年龄。

5.2 伊春火成岩带中生代铁钼成矿时限及意义

二股铁多金属矿床位于兴蒙造山带东部 NNE 向的伊春火成岩带内。该带内的侵入岩以 I 型和少量的 A 型花岗岩类侵入岩为主,岩性有花岗闪长岩、二长花岗岩、正长花岗岩和碱性长石花岗岩(张昱, 2008, Wu et al., 2011, 韩振哲, 2011, 胡新露, 2015)。近年来大量高精度锆石 U-Pb 测年数据表明,伊春火成岩带主体由早中生代(晚三叠世—中侏罗世:220~175 Ma)花岗岩类侵入岩组成,早古生代和白垩纪侵入岩仅在局部地区可见(Wu et al., 2011, 韩振哲, 2011)。多期次侵入的花岗岩类侵入体常组成规模较大的复式岩体,如东风、伊春、白桦、翠林、团结、柳树河子、上游新村、朗乡和小白等岩体(刘俊杰等, 1993)。已有研究表明,伊春火成岩带

表 2 伊春火成岩带主要金属矿床地质特征

Table 2 Geological characteristics of the deposits in the Yichun igneous rocks belt

矿床	矿种	矿床类型	矿体特征	与成矿有关侵入岩	侵入岩年龄	成矿年龄	参考文献
高岗山	Mo	斑岩型	石英-辉钼矿脉主要呈网脉状赋存于由花岗岩斑岩和花岗岩组成的小岩株中	花岗岩斑岩	(259.9±2.0) Ma	(250.2±1.4) Ma	Zhang et al., 2016
鹿鸣	Mo	斑岩型	石英-辉钼矿脉主要呈网脉状赋存于(黑云母)二长花岗岩中	花岗岩斑岩	—	(177.8±2.3) Ma	刘翠等, 2014
霍吉河	Mo	斑岩型	石英-辉钼矿脉主要呈网脉状赋存于(黑云母)二长花岗岩中	—	—	(176.3±5.1) Ma	谭红艳, 2013
翠宏山	Fe-Mo-W-Pb-Zn	矽卡岩型	矿体主要位于二长花岗岩和碱长花岗岩与下寒武统铅山组的接触带内	二长花岗岩	(199.0±3.1) Ma	(198.9±3.7) Ma	郝宇杰等, 2013; 邵军等, 2011
二股	Fe-Pb-Zn-Cu	矽卡岩型	矿体主要位于(黑云母)二长花岗岩与下寒武统铅山组的接触带内	(黑云母)二长花岗岩	—	(181.0±4.2) Ma	本文
西林	Fe	矽卡岩型	矿体主要位于二长花岗岩与下寒武统铅山组的接触带内	二长花岗岩	(200.0±1.0) Ma	—	李树才等, 2015
小西林	Pb-Zn	矽卡岩型	矿体主要位于二长花岗岩与下寒武统铅山组的接触带内	二长花岗岩	(196.6±0.7) Ma	—	李树才等, 2015
徐老九沟	Pb-Zn	矽卡岩型	矿体主要位于二长花岗岩与下寒武统铅山组的接触带内	二长花岗岩	(181.2±1.1) Ma	—	Hu et al., 2014
团结沟	Au	浅成低温热液型	矿体主要位于花岗岩斑岩与黑龙江群变质岩接触带	花岗岩斑岩	(103~102) Ma	—	Sun et al., 2013
高松山	Au	浅成低温热液型	矿体主要赋存于下白垩统板子房组火山岩中	—	—	—	王佳琳等, 2014
乌拉嘎	Au	浅成低温热液型	矿体赋存于晚白垩世花岗岩闪长斑岩和黑龙江群变质岩中	花岗岩闪长斑岩	—	(113.8±4.4) Ma	Wang et al., 2014
东安	Au	浅成低温热液型	矿体赋存于流纹质熔岩、流纹斑岩脉和碱性长石花岗岩中	流纹斑岩	(108.1±2.4) Ma	(107.2±0.6) Ma	Zhang et al., 2010

注释：“—”无资料。

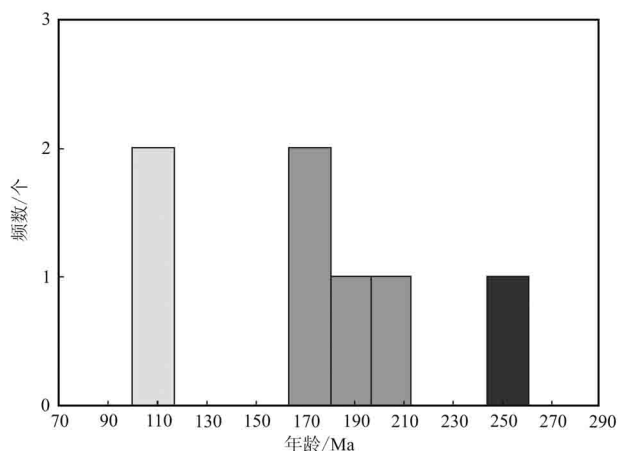


图 7 伊春火成岩带金属矿床成矿年龄直方图

Fig. 7 The histogram of the mineralization age of the deposits in the Yichun igneous rocks belt

内金属矿床的形成大都与早中生代花岗岩类侵入岩密切相关,但存在的问题是带内早中生代成矿作用是一期还是多期?成矿作用特点是怎样的?

近年来的研究揭示,伊春火成岩带内最典型的矿化特征为斑岩型钼矿化,典型矿床有鹿鸣钼矿和霍吉河钼矿等(表 2,图 7)。前人获得的鹿鸣钼矿辉钼矿 Re-Os 同位素等时线年龄为 (177.8 ± 2.3) Ma(刘翠等, 2014),霍吉河钼矿为 (176.3 ± 5.1) Ma(谭红艳, 2013)。矿床地质特征及锆石 U-Pb 年龄数据均表明斑岩型钼矿化常与复式岩体中最晚期的花岗斑岩有关(刘翠等, 2014)。区内钼金属的矿化在矽卡岩型矿床中也可见,典型矿床为翠宏山矽卡岩型铁多金属矿床。在该矿床中,钼的矿化发生在二长花岗岩与铅山组碳酸盐岩的内接触带上。郝宇杰等(2013)测得的该矿床辉钼矿 Re-Os 等时线年龄为 (198.9 ± 3.7) Ma,该年龄与二长花岗岩锆石 U-Pb 年龄 (199.0 ± 3.1) Ma(邵军等, 2011)在误差范围内一致,进一步证实二长花岗岩与钼矿化关系密切。本文获得的二股矽卡岩型铁多金属矿床金云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 等时线年龄为 (181.0 ± 4.2) Ma;李树才等(2015)测得的西林铁多金属矿和小西林矽卡岩型铅锌矿中与成矿有关的二长花岗岩的锆石 U-Pb 年龄分别为 (200.0 ± 1.0) Ma 和 (196.6 ± 0.7) Ma;Hu 等(2014)获得的徐老九沟矽卡岩型铅锌矿床与成矿关系密切的二长花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 (181.2 ± 1.1) Ma。上述成岩成矿年龄数据充分表明,伊春火成岩带内的晚三叠世—早侏罗世花岗岩类侵入岩均具有成矿的潜力,在矿化金属元素和成矿作用特征

上表现为:早期($-200 \sim 181$) Ma 为与二长花岗岩有关的矽卡岩型-热液脉型铁多金属矿床成矿作用;晚期($-178 \sim 175$) Ma 为与花岗斑岩有关的斑岩型钼矿床成矿作用。

伊春火成岩带内金属矿床的另一个特点为:矽卡岩型-热液脉型铁多金属矿床的成矿作用往往发生在二长花岗岩与铅山组碳酸盐岩的接触部位,如徐老九沟铅锌矿的矿体产于二长花岗岩((181.2 ± 1.1) Ma)与寒武系铅山组大理岩的接触带上(Hu et al., 2014, 纪睿, 2015);二股铁多金属矿床的矿体产于黑云母二长花岗岩或斑状花岗岩((183.2 ± 0.7) Ma, 未发表)与铅山组碳酸盐岩的接触带上;西林铁多金属矿田中的铅锌矿体和铁矿床产于二长花岗岩($-200.0 \sim 196.6$ Ma)与铅山组碳酸盐岩的接触带上(李树才等, 2015)。这表明,伊春火成岩带中矽卡岩型-热液脉型铁多金属矿床成矿的有利部位为晚三叠世—早侏罗世花岗岩类侵入岩与碳酸盐岩(特别是铅山组)的接触部位。

6 结 论

(1) 二股矽卡岩型铁多金属矿床的成矿年龄为 (181.0 ± 4.2) Ma;

(2) 伊春火成岩带内早中生代成矿作用可分为早期($200 \sim 181$ Ma)与二长花岗岩有关的矽卡岩型-热液脉型铁多金属矿床成矿作用及晚期($178 \sim 175$ Ma)与花岗斑岩有关的斑岩型钼矿床成矿作用。晚三叠世—早侏罗世花岗岩类侵入岩与碳酸盐岩(特别是铅山组)的接触部位是矽卡岩型-热液脉型铁多金属矿床成矿的有利部位。

References

- Ge W C, Wu F Y, Zhou C Y and Zhang J H. 2007. Porphyry Cu-Mo deposits in the eastern Xing'an-Mongolian orogenic belt: Mineralization ages and their geodynamic implications[J]. Chinese Science Bulletin, 52(24): 3416-3427.
- Han Z Z. 2011. Characteristics of temporal and spatial evolution and polymetallic mineralization of early Mesozoic granites in southeastern Xiaoxing'an mountains(dissertation for doctor degree) [D]. Supervisor: Zhao H L. Beijing: China University of Geosciences. 1-207 (in Chinese with English abstract).
- Han Z Z, Zhao H L, Li J J, Leng C E, Lü J and Li W L. 2010. Early Mesozoic granites and polymetallic mineralization in southeastern

- Yichun area, XiaoHinggan mountains[J]. *Geology in China*, 37 (1): 74-87 (in Chinese with English abstract).
- Hao Y J, Ren Y S, Zhao H L, Zou X T, Chen C, Hou Z S and Qu W J. 2013. Re-Os isotopic dating of the molybdenite from the Cuihongshan W-Mo polymetallic deposit in Heilongjiang Province and its geological significance[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 43(6): 1840-1850 (in Chinese with English abstract).
- Harrison T M, Heizler M T and Lovera O M. 1993. In vacuo crushing experiments and K-feldspar thermochronometry[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 117: 169-180.
- Hu X L, Ding Z J, He M C, Yao S Z, Zhu B P, Shen J and Chen B. 2014. A porphyry-skarn metallogenic system in the Lesser Xing'an range, NE China: Implications from U-Pb and Re-Os geochronology and Sr-Nd-Hf isotopes of the Luming Mo and Xulaojiugou Pb-Zn deposits[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 90: 88-100.
- Hu X L. 2015. Mineralization and magmatism of the porphyry Cu, Mo deposits in the northern Great Xing'an and Lesser Xing'an ranges (dissertation for doctor degree) [D]. Supervisor: Yao S Z. Wuhan: China University of Geosciences. 1-194 (in Chinese with English abstract).
- Ji R. 2015. Geological characteristics and genesis mechanism of the Xulaojiugou Pb-Zn deposit, Heilongjiang Province (dissertation for master degree) [D]. Supervisor: Yang Y C. Changchun: Jilin University. 1-60 (in Chinese with English abstract).
- Kuiper Y D. 2002. The interpretation of inverse isochron diagrams in ⁴⁰Ar/³⁹Ar geochronology[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 203: 499-506.
- Ludwig K R. 2003. User's manual for isoplot 3.00: A geochronological toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley: Berkeley Geochronology Center.
- Li S C, Han Z Z, Niu Y H, Zhang Y L, Wang X, Cheng S X and Zheng T. 2015. Determination of ages of metallogenic monzonitic intrusion and geological implication in the Xilin Pb-Zn-Fe ore deposit, Yichun, Heilongjiang Province[J]. *Mineral Exploration*, 6 (4): 356-363 (in Chinese with English abstract).
- Li Z C, Lu Y F and Huang G C. 2004. Methods and advances of radioactive isotopes geology[M]. Wuhan: China University of Geoscience Press. 1-276 (in Chinese with English abstract).
- Liu C, Deng J F, Luo Z H, Tian S P, Zhang Y, Zhong C D, Selby D and Zhao H D. 2014. Post-batholith metallogenesis: Evidence from Luming super large molybdenite deposit in Lesser Xing'an range[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(11): 3400-3418 (in Chinese with English abstract).
- Liu J J, Liu R Z and Lun Z Q. 1993. Regional geology of Heilongjiang Province[M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-734 (in Chinese with English abstract).
- Meng E. 2011. Late Paleozoic-early Mesozoic tectonic evolution in the eastern Heilongjiang Province, NE China: Constraints from detrital zircons and volcanical events (dissertation for doctor degree) [D]. Supervisor: Xu W L. Changchun: Jilin University. 1-161 (in Chinese with English abstract).
- Shao J, Li X R and Yang H Z. 2011. Zircon SHRIMP U-Pb dating of granite in the Cuihongshan polymetallic deposit and its geological implications[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 32(2): 163-170 (in Chinese with English abstract).
- Steiger R H and Jäger E. 1977. Subcommission on geochronology: Convention on the use of decay constants in geo- and cosmochemistry[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 36: 359-362.
- Sun J G, Han S J, Zhang Y, Xing S W and Bai L A. 2013. Diagenesis and metallogenetic mechanisms of the Tuanjiegou gold deposit from the Lesser Xing'an range, NE China: Zircon U-Pb geochronology and Lu-Hf isotopic constraints[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 62: 373-388.
- Tan H Y. 2013. Metallogenetic series and prospecting assessment in Lesser Xing'an range-Zhangguangcai range metallogenic belt of Heilongjiang Province (dissertation for doctor degree) [D]. Supervisor: Gu X X. Beijing: China University of Geosciences. 1-173 (in Chinese with English abstract).
- The 4th geological team of Heilongjiang geology and minerals bureau. 1960. Census report of Ergu Zn-Fe deposit in Qing'an county, Heilongjiang province[R]. 1-60 (in Chinese).
- Wang Y B, Zeng Q D and Liu J M. 2014. Rb-Sr dating of gold-bearing pyrites from Wulaga gold deposit and its geological significance[J]. *Resource Geology*, 64: 262-270.
- Wang F. 2013. Rock association and formation time of "Proterozoic strata" in the eastern margin of the Songnen-Zhuangguangcailing massif, NE China: Implications for regional tectonic evolution (dissertation for doctor degree) [D]. Supervisor: Xu W L. Changchun: Jilin University. 1-187 (in Chinese with English abstract).
- Wang J L, Gu X X, Zhang Y M, Liu R P and Zheng L. 2014. Petrogenesis and tectonic implications of volcanic rocks in the Gaosongshan gold deposit, Heilongjiang Province[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 33(5): 561-571 (in Chinese with English abstract).
- Wu F Y, Jahn B M, Wilde S A, Lo C H, Yui T F, Lin Q, Ge W C and Sun D Y. 2003. Highly fractionated I-type granites in NE China (I): Geochronology and petrogenesis[J]. *Lithos*, 66: 241-273.
- Wu F Y, Sun D Y, Ge W C, Zhang Y B, Grant M L, Wilde S A and Jahn B M. 2011. Geochronology of the Phanerozoic granitoids in northeastern China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 41: 1-30.
- Wu F Y, Yang J H, Lo C H, Wilde S A, Sun D Y and Jahn B M. 2007. The Heilongjiang group: A Jurassic accretionary complex in

the Jiamusi Massif at the western Pacific margin of northeastern China[J]. *Island Arc*, 16:156-172.

Zhang Y, Chen W, Chen K L and Liu X Y. 2006. Study on the Ar-Ar age spectrum of diagenetic $1/S$ and the mechanism of ^{39}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).

Zhang Y. 2008. Early Mesozoic igneous Petrotectonic assemblages and tectonic evolution of eastern Hailongjiang Provinces (dissertation for doctor degree) [D]. Supervisor: Xiao Q H. Beijing: China University of Geosciences. 1-126 (in Chinese with English abstract).

Zhang Y M, Gu X X, Liu R P, Sun X, Li X L and Zheng L. 2016. Geology, geochronology and geochemistry of the Gaogangshan Mo deposit: A newly discovered Permo-Triassic collision-type Mo mineralization in the Lesser Xing'an range, NE China[J]. *Ore Geology Reviews*, doi:10.1016/j.oregeorev.2016.03.009.

Zhang Z C, Mao J W, Wang Y B, Pirajno F, Liu J L and Zhao Z D. 2010. Geochemistry and geochronology of the volcanic rocks associated with the Dong'an adularia-sericite epithermal gold deposit, Lesser Hinggan range, Heilongjiang Province, NE China: Constraints on the metallogenesis[J]. *Ore Geology Reviews*, 37:158-174.

Zhang Z T. 2010. Forecast of Pb-Zn polymetallic ore in Yichun of Heilongjiang (dissertation for doctor degree) [D]. Supervisor: Fan J Z. Changchun: Jilin University. 1-165 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

韩振哲. 2011. 小兴安岭东南段早中生代花岗岩类时空演化特征与多金属成矿(博士论文)[D]. 导师:赵海玲. 北京:中国地质大学. 1-207.

韩振哲, 赵海玲, 李娟娟, 冷昌恩, 吕军, 李文龙. 2010. 小兴安岭东南伊春一带早中生代花岗岩与多金属成矿作用[J]. *中国地质*, 37(1):74-87.

郝宇杰, 任云生, 赵华雷, 邹欣桐, 陈聪, 侯召硕, 屈文俊. 2013. 黑龙江省翠宏山钨钼多金属矿床辉钼矿 Re-Os 同位素定年及其地质意义[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 43(6):1840-1850.

黑龙江省松花江专署地质局第4地质队. 1960. 黑龙江省庆安县铁

力二股锌铁矿床地质普查报告[R]. 1-50.

胡新露. 2015. 大兴安岭北段—小兴安岭地区斑岩型铜、钼矿床成矿作用与岩浆活动(博士论文)[D]. 导师:姚书振. 武汉:中国地质大学. 1-194.

纪睿. 2015. 黑龙江省徐老九沟铅锌矿床地质特征及成因研究(硕士论文)[D]导师:杨言辰. 长春:吉林大学. 1-60.

李树才, 韩振哲, 牛延宏, 张跃龙, 王兴, 程招勋, 郑涛. 2015. 黑龙江西林铅锌铁矿田二长花岗岩成矿岩体年龄的确定及其意义[J]. *矿产勘查*, 6(4):356-363.

李志昌, 路远发, 黄圭成. 2004. 放射性同位素地质学方法与进展[M]. 武汉:中国地质大学出版社. 1-276.

刘翠, 邓晋福, 罗照华, 田世攀, 张昱, 钟长汀, Selby D, 赵寒冬. 2014. 岩基后成矿作用:来自小兴安岭鹿鸣超大型钼矿的证据[J]. *岩石学报*, 30(11):3400-3418.

刘俊杰, 刘荣芝, 伦志强. 1993. 黑龙江省区域地质志[M]. 北京:地质出版社. 1-734.

孟恩. 2011. 黑龙江省东部晚古生代—早中生代构造演化:碎屑锆石与火山事件的制约(博士论文)[D]. 导师:许文良. 长春:吉林大学. 1-161.

邵军, 李秀荣, 杨宏智. 2011. 黑龙江翠宏山铅锌多金属矿区花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 测年及其地质意义[J]. *地球学报*, 32(2):163-170.

谭红艳. 2013. 黑龙江小兴安岭—张广才岭成矿带成矿系列及找矿远景评价(博士论文)[D]. 导师:顾雪祥. 北京:中国地质大学(北京). 1-173.

王枫. 2013. 松嫩张广才岭地块东缘“元古界”的岩石组合与形成时代对区域构造演化的意义(博士论文)[D]. 导师:许文良. 长春:吉林大学. 1-187.

王佳琳, 顾雪祥, 章永梅, 刘瑞萍, 郑碯. 2014. 黑龙江高松山金矿区赋矿火山岩成因及构造意义[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 33(5):561-571.

张彦, 陈文, 陈克龙, 刘新宇. 2006. 成岩混层($1/S$)Ar-Ar 年龄谱型及 ^{39}Ar 核反冲丢失机理研究——以浙江长兴地区P-T界线黏土岩为例[J]. *地质论评*, 52(4):556-561.

张昱. 2008. 黑龙江省东部早中生代火成岩构造组合及其大地构造演化(博士论文)[D]. 导师:肖庆辉. 北京:中国地质大学. 1-126.

张振庭. 2010. 黑龙江省伊春地区铅锌多金属矿产预测(博士论文)[D]. 导师:范继璋. 长春:吉林大学. 1-165.