

黑龙江三矿沟矽卡岩型 Cu-Fe-Mo 矿床矿石硫化物硫、铅同位素特征及锆石 U-Pb 定年

吕鹏瑞^{1,2} 李德荣³ 彭义伟¹ 张明洋¹

(1. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083; 2. 西安地质调查中心, 陕西 西安 710054; 3. 黑龙江省矿业集团有限责任公司, 黑龙江 哈尔滨 150036)

摘要:三矿沟 Cu-Fe-Mo 矿床是大兴安岭地区三矿沟—多宝山构造—成矿带中一个比较典型的矽卡岩型矿床, 矿体形成与三矿沟复式英云闪长岩体侵入关系密切。在分析该矿床成矿地质条件的基础上, 对矿石硫、铅同位素组成特征和锆石 U-Pb 测年数据进行了研究, 探讨了成矿物质来源和成矿成岩年代。研究表明, 硫同位素组成变化范围较大, 显示塔式分布效应, 估算得到成矿热液系统的总硫同位素值约为-1.5‰, 反映成矿过程中硫主要来源于深源岩浆, 极少量可能来自于地层; 矿石铅同位素具有壳幔混合铅的特征, 反映了该矿床成矿物质主要为壳幔混合来源, 与岩浆作用密切相关; 锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄范围为 $(168.18 \pm 0.96) \sim (200 \pm 1)\text{Ma}$, 代表了英云闪长岩的侵位时间, 表明三矿沟矽卡岩型 Cu-Fe-Mo 矿床的成岩成矿年代为早侏罗世。

关键词:三矿沟; 矽卡岩型; Cu-Fe-Mo 矿床; S、Pb 同位素; 锆石定年; 黑龙江

中图分类号: P618.41, P618.31, P618.65 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2012)03-0717-12

三矿沟 Cu-Fe-Mo 矿床是大兴安岭地区三矿沟—多宝山构造—成矿带中一个比较典型的矽卡岩型矿床。由于长期受传统找矿观念的影响, 认为三矿沟地区属多宝山成矿带的末端, 除可能找到矽卡岩型小规模矿床外, 并不具备找到大、中型矿床或其他类型矿床的条件, 因此 40 余年没有作为重要找矿远景区安排普查工作, 2006 年才在三矿沟铜铁矿床边部和外围开展了危机矿山接替资源找矿工作^[1]。前人对该成矿带的研究, 大多侧重于成矿带中多宝山和铜山斑岩矿床的地质特征^[2]、矿床成因模式^[3]、成矿作用^[4]、成矿流体^[5,6]、成矿年代学^[7]、同位素地球化学^[8,9]等方面。三矿沟 Cu-Fe-Mo 矿床自 20 世纪 50 年代被发现以来, 仅有李之彤等^[10]研究了该矿床的地质特征, 王洪瑜等^[11]研究了该矿床的地质特征及成因, 刘军等^[12,13]研究了该矿床的成矿流体特征与成矿机制。有关该矿床成矿物质来源的研究基本处于

空白, 在一定程度上影响了该区的找矿工作。本文是在大量野外地质调查的基础上, 依据硫、铅同位素和锆石 U-Pb 定年来探讨该矿床成矿物质的来源, 为三矿沟地区危机矿山接替资源找矿工作提供新的理论依据, 具有重要的意义。

1 地质背景

1.1 矿区地质概况

三矿沟 Cu-Fe-Mo 矿床的大地构造位置处于天山—兴蒙造山区大兴安岭岛弧系扎兰屯—多宝山岛弧上的三矿沟—多宝山北西向构造—成矿带的西北端(图 1)。该成矿带位于嫩江和新开岭北东向岩石圈断裂之间的多宝山火山弧附近。

区内出露地层较为复杂, 主要有奥陶系中统铜山组、下统裸河组, 泥盆系中统腰桑南组、第四系。铜山组主要有凝灰质砂砾岩、凝灰质粉砂岩、长石石英

收稿日期: 2011-09-13; 改回日期: 2012-01-06

基金项目: 全国危机矿山找矿项目(200623016)资助。

作者简介: 吕鹏瑞, 男, 1984 年生, 硕士生, 矿床学和矿床地球化学专业, E-mail: Lvpengrui0910@163.com。

通讯作者: 李德荣, 男, 1965 年生, 博士, 高级工程师, 主要从事矿产勘查工作; E-mail: Leederong@163.com。

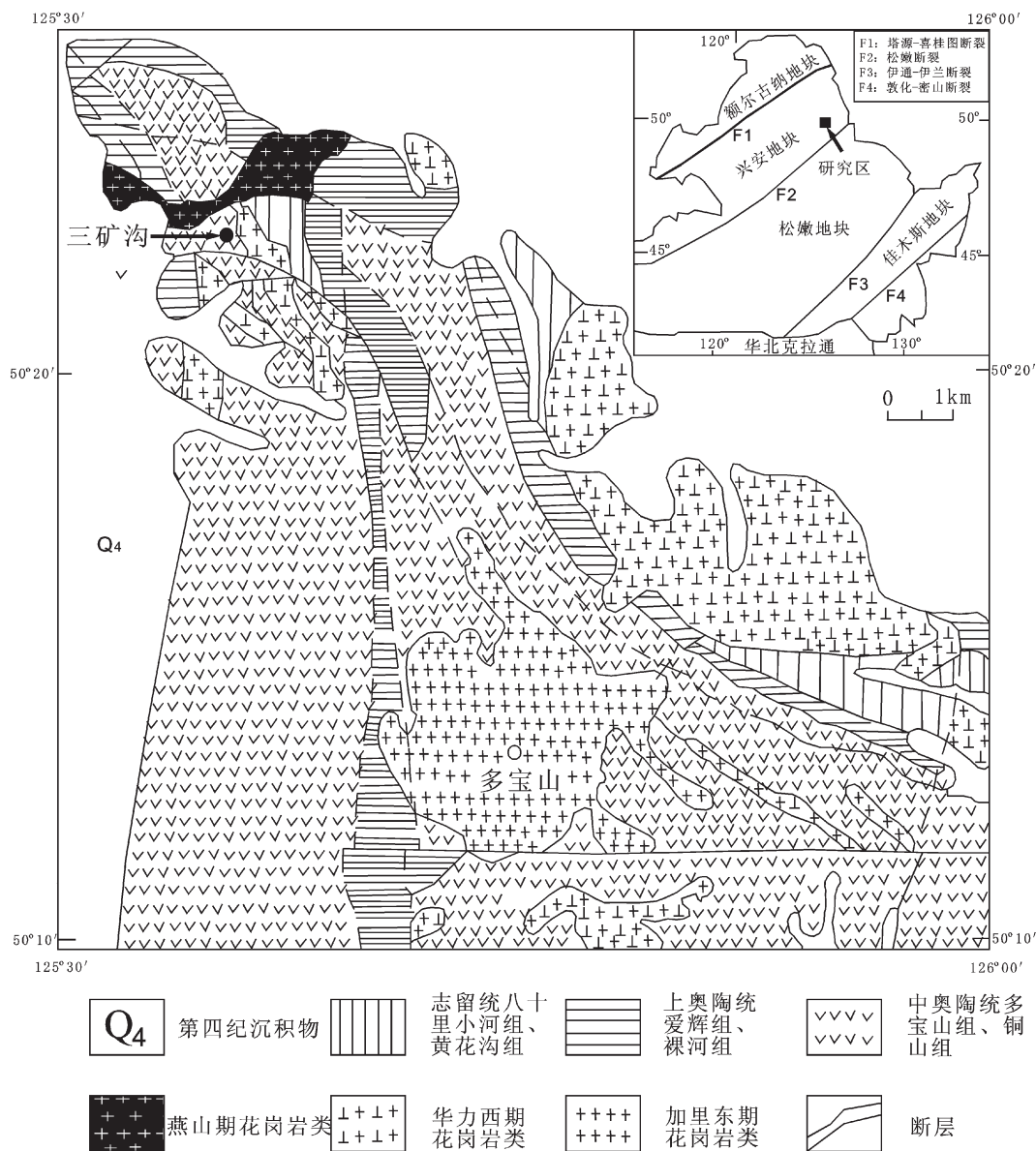


图 1 三矿沟—多宝山成矿带区域地质图(据刘军等^[12])

Fig.1 Regional geological map of the Sankuanggou-Duobaoshan metallogenic belt

砂岩、角岩化粉砂岩、角岩化云母长石砂岩,夹薄层板岩和大理岩;裸河组为角岩化粉砂岩,局部为云母石英角岩、夹大理岩透镜体;腰桑南组主要有砂岩、杂砂岩、泥质板岩,夹变质粉砂岩和凝灰岩。其中,奥陶纪地层是三矿沟 Cu-Fe-Mo 矿床的矿源岩和成矿围岩(图 2)。

经过加里东、华力西、印支、燕山及喜山等多期的构造运动以后,该矿区构造变形强烈、形式复杂多样,形成了各种背斜、向斜、断裂、环形构造以及岩浆侵入穹隆。其中,花朵山向斜和大孤山—育宝山背斜

是三矿沟矿床的主要赋矿构造,花朵山向斜中局部紧闭的直立地段是成矿的有利部位,为三矿沟矿床 2 号矿带提供了赋矿空间;大孤山—育宝山背斜局部地段形成紧闭背斜或倒转背斜,其鞍部及其两翼是三矿沟矿床 1 号矿带的有利赋矿空间;北西向窝理河断裂、北东向三矿沟断裂以及花朵山环形构造是三矿沟矿床的导矿构造。

三矿沟—多宝山成矿带岩浆活动强烈,具多旋回、多期、多阶段、继承演化的特点,先后经历了奥陶纪中加里东期岛弧型花岗闪长岩成矿作用、石炭纪

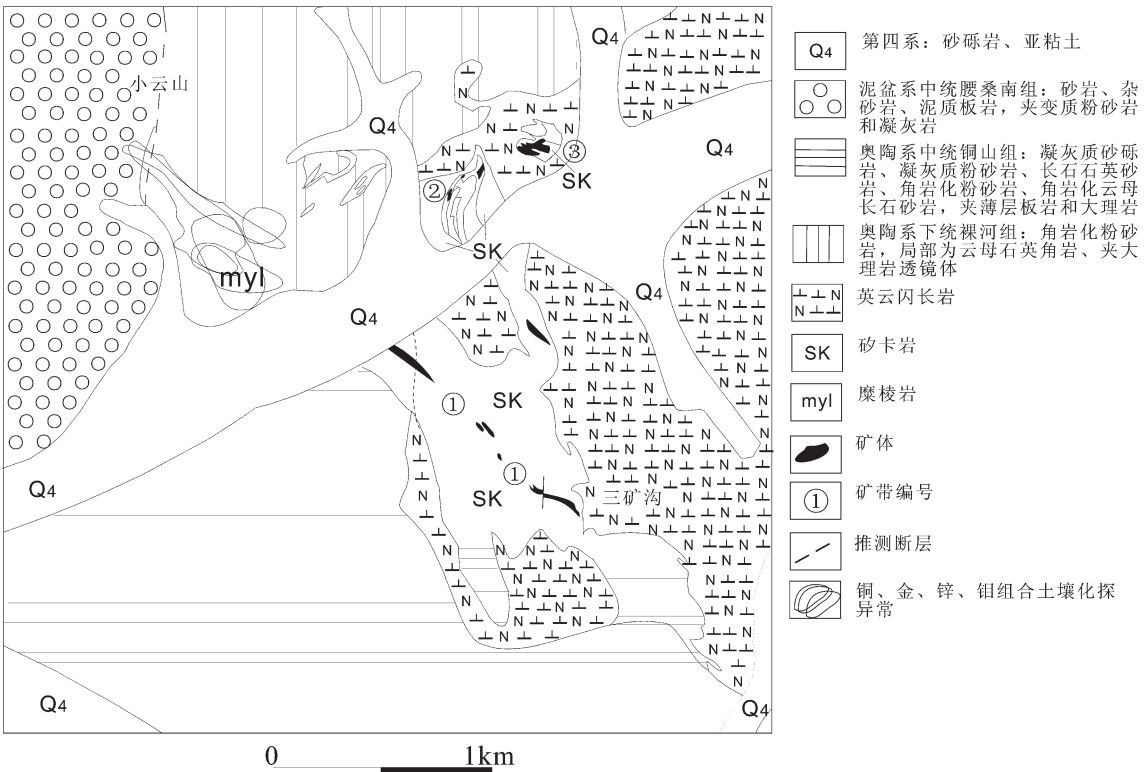


图 2 三矿沟 Cu-Fe-Mo 矿床地质简图(据吕鹏瑞等^[13])

Fig.2 Simplified geological map of the Sankuanggou Cu-Fe-Mo deposit

造山型花岗闪长斑岩成矿作用、早三叠世基性—中酸性小岩体的成矿作用、晚三叠世—中侏罗世中性—中酸性侵入岩体的成矿作用、晚侏罗世—早白垩世岩浆成矿作用^[4]。区内晚印支—燕山中期构造—岩浆—成矿作用最为强烈,侵入岩为印支晚期—燕山早期的三矿沟复式英云闪长岩体。

1.2 矿体特征

三矿沟 Cu-Fe-Mo 矿床位于花朵山环形构造的西部,北东向与北西向环状断裂的交汇处,该矿床在空间上可划分为 3 个矿带,包括 5 个主要矿体,80 个次要矿体(图 2)。矿体主要赋存于大理岩与角岩的接触界面以及大理岩底部的砂卡岩中,总体呈小的扁豆状、似层状,其中主矿体主要呈似层状产出,扁豆状矿体常成群断续分布,总体产状随地层产状的变化而变化,其厚度沿走向或倾向呈现突然收缩、

尖灭的现象。矿体产状主要有 $30^{\circ}\sim 50^{\circ}\angle 30^{\circ}\sim 86^{\circ}$ 、 $103^{\circ}\angle 35^{\circ}\sim 86^{\circ}$ 、 $212^{\circ}\sim 227^{\circ}\angle 53^{\circ}\sim 68^{\circ}$ 。主要矿体中,较大矿体长 254 m,最大厚度 13.6 m,平均厚度 4.53 m,最大延深 100 m;较小者长 25~80 m,平均厚度 1.02~4.15 m,延深小于 70 m。三个矿带中,铜的品位分别为 0.37%~10.79%、0.43~1.92%、1.64%^{①②③}。

1.3 矿石特征

矿石类型主要有铜矿石、铜铁矿石、铁矿石、铜钼矿石和钼矿石。不同类型的金属矿石有不同的矿物组合。铜矿石的矿石矿物主要为黄铜矿、斑铜矿、赤铜矿、辉铜矿、磁铁矿、黄铁矿、辉钼矿、孔雀石等,脉石矿物有石榴石、石英、硅灰石、透辉石、方解石等。铜铁矿石的矿石矿物主要有黄铜矿、磁铁矿、孔雀石、赤铜矿、褐铁矿等,脉石矿物有石榴石、石英、方解石等。铁矿石的矿石矿物主要有磁铁矿、赤铁

①黑龙江省矿业集团有限责任公司,黑龙江省嫩江县多宝山铜矿接替资源勘查报告,2010。
②黑龙江省地质局第二地质大队,黑龙江省嫩江县三矿沟铜矿床详细普查报告,1965。
③黑龙江省地质局第二地质大队,黑龙江省嫩江县三矿沟铜矿床地质勘探报告,1967。

矿、黄铜矿、黄铁矿、闪锌矿等,脉石矿物有石榴石、绿帘石、绿泥石、石英、方解石等。铜钼矿石的矿石矿物主要有黄铜矿、辉钼矿、黄铁矿、闪锌矿等,脉石矿物主要有石榴石、石英、绿泥石、方解石等。钼矿石的矿石矿物主要有辉钼矿、黄铜矿、黄铁矿等,脉石矿物有透辉石、石榴石、石英、绿泥石、方解石等。

矿石结构主要有他形粒状结构、半自形粒状结构、自形粒状结构、短柱状结构、针状结构、放射状结构、粒状连晶或固溶体分离结构、假像结构或填隙结构。矿石构造主要有团块状构造、胶状构造、浸染状构造、钟乳状或皮壳状构造、角砾状构造。其中,斑铜矿、黄铜矿、磁铁矿与钙铁石榴石密切共生;辉钼矿与透辉石、石英密切共生;镜铁矿与磁铁矿密切共生;银金矿与斑铜矿、黄铜矿密切共生;孔雀石与蓝铜矿密切共生;黄铜矿和磁铁矿共生,常呈浸染状分布于磁铁矿内或脉石矿物间;斑铜矿与黄铜矿呈粒状连晶或固溶体分离结构,或被黄铜矿包裹。

1.4 围岩蚀变及成矿阶段

矿体围岩主要有石榴石矽卡岩、透辉石矽卡岩、流纹斑岩、大理岩、黑云母石英角岩,其次为硅灰石矽卡岩、长石石英角岩、闪石角岩等。围岩蚀变以矽卡岩化为主,绿帘石化、绿泥石化、硅化、碳酸盐化、绢云母化、高岭土化、黄铁矿化等次之。矽卡岩化是在接触交待时期形成,与成矿作用关系密切,其中,铁铜矿体产于粒状钙铁石榴石矽卡岩中;钼矿体产于晶洞构造发育的钙铁石榴石矽卡岩或黑云母石英角岩中的透辉石矽卡岩中。绿泥石化、绿帘石化、硅化、碳酸盐化、绢云母化、高岭土化、黄铁矿化等是晚期岩浆热液充填交待的产物,多发育于矽卡岩、大理岩和角岩等岩石的空洞和裂隙中。

该矿床主要发育印支晚期—燕山早期的三矿沟复式英云闪长岩体,当英云闪长岩侵入大理岩时,在内、外接触带均可形成矽卡岩,并具有黄铜矿化及黄铁矿化;碱长花岗岩呈小岩株状或不规则岩枝状侵入于地层或英云闪长岩中,形成辉钼矿化。根据成矿过程中矿物生成的顺序可将该矿床的成矿作用过程分为矽卡岩阶段(Ⅰ,透辉石、石榴石、硅灰石)、湿矽卡岩—氧化物阶段(Ⅱ,绿帘石、磁铁矿、镜铁矿、石英)、早期硫化物阶段(Ⅲ,磁铁矿、黄铁矿、斑铜矿、

黄铜矿、辉钼矿、银金矿、绿泥石、石英)和晚期硫化物阶段(Ⅳ,黄铜矿、闪锌矿、方解石)^{①②③}。

2 样品采集及测试方法

2.1 硫同位素

本文用于硫同位素测试的硫化物样品分别为 8 件黄铜矿、1 件辉钼矿、1 件黄铁矿、1 件斑铜矿。在三矿沟矽卡型 Cu-Fe-Mo 矿床 I 号矿带新发现的 3 号矿体群,从钻孔 ZK101-1、ZK1020-4、ZK103、ZK104、ZK2-2 等采取有代表性的钻孔岩心。同时也在 V 区见矿孔 ZK0-1 采取钻孔岩心。

首先将黄铜矿、辉钼矿、黄铁矿和斑铜矿样品分别破碎至 40 目,然后在双目镜下挑纯(纯度大于 99%),将挑纯后的样品置于玛瑙研钵中研磨至 200 目(0.076 mm)以下。样品制备完成后送核工业北京地质研究院分析测试研究中心进行测试,硫化物中硫同位素组成通过测定 SO₂ 得到。在真空系统中,通过碳酸钠—氧化锌半熔法将待测样品转化为硫酸钡(BaSO₄),再用五氧化二钒(V₂O₅)法将 BaSO₄ 转化为 SO₂,纯化并收集 SO₂,然后用 MAT-251 气体稳定同位素质谱仪分析硫同位素成分。硫同位素测定结果以 V-CDT 为标准,分析精度优于±0.2‰,分析测试过程中执行《DZ/T0184.14-1997 硫化物中硫同位素组成的测定》。

2.2 锆石 U-Pb 同位素地质年龄测定

本次用于锆石 U-Pb 同位素地质年龄测定的样品为 1 件锆石,采自 3 号矿带下部采空区出露的英云闪长岩体内。

首先将锆石样品破碎至 60~150 目,在双目镜下从同一类型的锆石中挑选出不含或仅含少量包体,无裂隙的颗粒,放置于空气磨损器中磨损 1~4 h,磨损后的锆石硝酸溶液去除杂质,烘干备用。锆石 U-Pb 同位素地质年龄测定在核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成,待测样品在氢氟酸中封闭溶解后转化成盐酸体系,用阴离子交换法色谱分离铀和铅,用 ISOPROBE-T 热电离质谱测定铀、铅同位素比值,用同位素稀释方程计算样品中的铀、铅含量。根据一组样品中的铀、铅同位素比值计算其拟合的直线与和谐线的上、下交点年龄,该组样品的和谐

①黑龙江省矿业集团有限责任公司.黑龙江省嫩江县多宝山铜矿接替资源勘查报告,2010.

②黑龙江省地质局第二地质大队.黑龙江省嫩江县三矿沟铜矿床详细普查报告,1965.

③黑龙江省地质局第二地质大队.黑龙江省嫩江县三矿沟铜矿床地质勘探报告,1967.

年龄的统计加权平均值,或直接代入年龄方程计算单矿物样品的表面年龄。分析测试过程中执行《DZ/T 0184.3-1997 颗粒锆石 U-Pb 同位素地质年龄测定》。

3 测试结果

3.1 硫同位素组成

本次测试的所有硫化物的 S 同位素组成见表 1。总的来看,硫同位素组成大多数为负值, $\delta^{34}\text{S}$ 值变化范围较大,介于 $-5.3\text{‰}\sim 4.7\text{‰}$,极差为 10‰ ,平均值为 -1.5‰ 。根据矿物不同,S 同位素组成有着一定差异:8 件黄铜矿样品 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $-3.0\text{‰}\sim 4.7\text{‰}$ 、极差为 7.7‰ 、平均值为 -1.0‰ ,1 件辉钼矿样品 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 -0.6‰ ,1 件黄铁矿样品 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 -2.2‰ ,1 件斑铜矿样品 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 -5.3‰ 。

根据硫同位素分馏原理,通常认为硫同位素分馏达到平衡时,成矿流体中所沉淀的共生硫化物(包括硫酸盐) $\delta^{34}\text{S}$ 值的富集顺序为 $\delta^{34}\text{S}$ 硫酸盐 $> \delta^{34}\text{S}$ 辉钼矿 $> \delta^{34}\text{S}$ 黄铁矿 $> \delta^{34}\text{S}$ 黄铜矿 $> \delta^{34}\text{S}$ 斑铜矿^[14,15],除了个别黄铜矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值不符合以外,本矿床的矿石大部分硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 值大致符合分馏平衡条件下的富集顺序;同一样品内,辉钼矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值大于黄铜矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值,黄铜矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值大于斑铜矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值,表明该矿床不同硫化物的硫同位素分馏基本上达到了平衡。

3.2 铅同位素比值

李德荣等^[16]对三矿沟矽卡岩型 Cu-Fe-Mo 矿床的矿石硫化物进行了铅同位素测定,但是他们仅

仅对这些同位素数据进行了简单的描述,并认为成矿物质主要来源于上地幔的岩浆。H-H 单阶段铅演化模式不仅可以提供单阶段演化铅从源区析出的时间,而且可以求得源区内矿石硫化物铅同位素的各种相关参数^[17,18]。本文在李德荣等^[16]的研究基础上,通过 H-H 单阶段铅演化模式,计算得到三矿沟矽卡岩型 Cu-Fe-Mo 矿床矿石硫化物铅同位素的相关参数,计算结果见表 2。其中, μ 值变化范围为 $9.31\sim 9.50$,平均 9.40 ; ω 值变化范围为 $27.73\sim 37.04$,平均 34.64 ;Th/U 比值变化范围为 $2.88\sim 3.77$,平均 3.56 。H-H 模式年龄变化范围非常大,部分模式年龄甚至出现了负值(表 2),根据 Faure G^[18]给出的 Pb 同位素判别准则,这些样品中的 Pb 并非为正常 Pb,而是混入了放射性成因铅的混合 Pb。

3.3 锆石 U-Pb 测年

三矿沟矽卡岩型 Cu-Fe-Mo 矿床锆石 U-Pb 测年测试结果见表 3。锆石样品中,U 浓度变化非常大,介于 $252\sim 3264\text{ }\mu\text{g/g}$;Pb 浓度变化于 $11\sim 27\text{ }\mu\text{g/g}$;普通铅浓度变化范围为 $0.045\sim 0.098\text{ ng/g}$ 。锆石样品中, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄为 $185.7\sim 200.7\text{ Ma}$, $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 表面年龄为 $186.5\sim 201.5\text{ Ma}$, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表面年龄为 $193.4\sim 210.2\text{ Ma}$ 。利用 ISOPLOT 软件将锆石测年结果分别进行等时线加权拟合,得到了一条相关性较好的等时线(图 3)。样品 TBW-09-2 中,前 3 个数据点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $(200\pm 1)\text{Ma}$,最后一个点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 $(185.7\pm 3.2)\text{Ma}$ (图3)。

表 1 三矿沟矽卡岩型铜铁矿床矿石硫化物的硫同位素组成
Table 1 Sulfur isotopic composition of ore sulfides from the Sankuanggou skarn-type Cu-Fe-Mo polymetallic deposit

样品编号	产状	测试矿物	$\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}/\text{‰}$
ZK0-1-5	黄铜矿化、辉钼矿化细晶花岗闪长岩	黄铜矿	-1.3
ZK0-1-5	黄铜矿化、辉钼矿化细晶花岗闪长岩	辉钼矿	-0.6
ZK101-1-4	黄铜矿化、黄铁矿化矽卡岩	黄铜矿	-1.7
ZK101-1-4	黄铜矿化、黄铁矿化矽卡岩	黄铁矿	-2.2
ZK1020-4-5	黄铜矿化矽卡岩	黄铜矿	4.7
ZK1020-4-7	黄铜矿化矽卡岩	黄铜矿	-0.7
ZK103-6	黄铜矿化矽卡岩	黄铜矿	-0.7
ZK104-4	黄铜矿化矽卡岩	黄铜矿	-2.5
ZK2-2-7	黄铜矿化、斑铜矿化矽卡岩	黄铜矿	-3.0
ZK2-2-7	黄铜矿化、斑铜矿化矽卡岩	斑铜矿	-5.3
ZK2-2-8	黄铜矿化、斑铜矿化矽卡岩	黄铜矿	-2.8

表 2 三矿沟矽卡岩型 Cu-Fe-Mo 矿床矿石铅同位素组成的相关参数
Table 2 Lead isotopic characteristic parameters of ore sulfides from the Sankuanggou skarn-type Cu-Fe-Mo deposit

样品编号	测试矿物	H-H 模式年龄	μ	ω	Th/U	$\Delta\alpha$	$\Delta\beta$	$\Delta\gamma$
Ym II-1	黄铜矿 ⁺	189 Ma	9.47	36.26	3.71	71.12	17.95	29.94
ZK0-1-5	黄铜矿 ⁺	-935 Ma	9.33	27.73	2.88	153.18	16.58	14.68
ZK0-1-5	黄铜矿 ⁺	101 Ma	9.31	33.63	3.50	70.24	12.86	16.67
ZK101-1-4	黄铜矿 ⁺	202 Ma	9.47	36.63	3.74	70.54	18.21	31.82
ZK101-1-4	黄铜矿 ⁺	196 Ma	9.46	36.29	3.71	70.24	17.75	29.83
ZK1020-4-5	黄铜矿 ⁺	-461 Ma	9.35	30.46	3.15	118.33	16.12	18.09
ZK1020-4-7	黄铜矿 ⁺	288 Ma	9.49	36.16	3.69	63.83	18.41	24.51
ZK103-6	黄铜矿 ⁺	112 Ma	9.38	34.53	3.56	72.81	15.08	22.20
ZK104-4	黄铜矿 ⁺	193 Ma	9.35	34.74	3.6	66.92	13.91	21.21
ZK2-2-7	黄铜矿 ⁺	244 Ma	9.47	36.35	3.71	73.01	18.19	31.53
ZK2-2-7	黄铜矿 ⁺	222 Ma	9.33	34.5	3.58	65.28	13.00	19.51
ZK2-2-8	黄铜矿 ⁺	209 Ma	9.31	34.32	3.57	64.6	12.48	18.43
	磁铁矿 ⁺	379 Ma	9.50	37.04	3.77	72.99	19.00	35.2
	英云闪长岩	208 Ma	9.44	36.27	3.72	71.48	16.98	31.2

表 3 三矿沟矽卡岩型 Cu-Fe-Mo 矿床锆石 U-Pb 同位素测年结果
Table 3 U-Pb isotopic analytical results of zircons from the Sankuanggou skarn-type Cu-Fe-Mo deposit

锆石描述						U/ $\mu\text{g/g}$	Pb/ $\mu\text{g/g}$	普通铅/ ng/g
样品号(点号)	锆石类型及特征				锆石质量/ μg			
FBW-09-2 (1)	浅黄色透明短柱状中等偏小自形晶				10	492	26	0.098
FBW-09-2 (2)	浅黄色透明柱状中等偏小自形晶				10	252	15	0.086
FBW-09-2 (3)	黄色透明短柱状较自形小晶体				12	650	27	0.074
FBW-09-2 (4)	浅黄色透明它形中等大小碎块				10	3264	11	0.045
同位素原子比率						表面年龄 Ma		
^{204}Pb	$^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	Rho	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$
119	0.1409	0.03162<28>	0.2194<39>	0.05033<74>	0.5677	200.7	201.5	210.2
88	0.09925	0.03158<52>	0.2188<188>	0.05024<409>	0.3761	200.5	200.9	206.0
227	0.1299	0.03152<22>	0.2171<28>	0.04997<55>	0.5675	200.0	199.5	193.4
114	0.1121	0.02923<51>	0.2017<73>	0.5004<155>	0.5443	185.7	186.5	196.8

注： $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 已对实验空白(Pb=0.005 ng,U=0.002 ng)及稀释剂作了校正。其他比率中的铅同位素均为放射成因铅同位素，括号内的数字为(2 σ)绝对误差，例如：0.040 21 <59> 表示 0.040 21 $\pm$ 0.000 59(2 σ)。锆石质量系根据锆石的颗粒大小、粒数和比重估算的，由此导出的 U、Pb 浓度和普通铅量供参考。

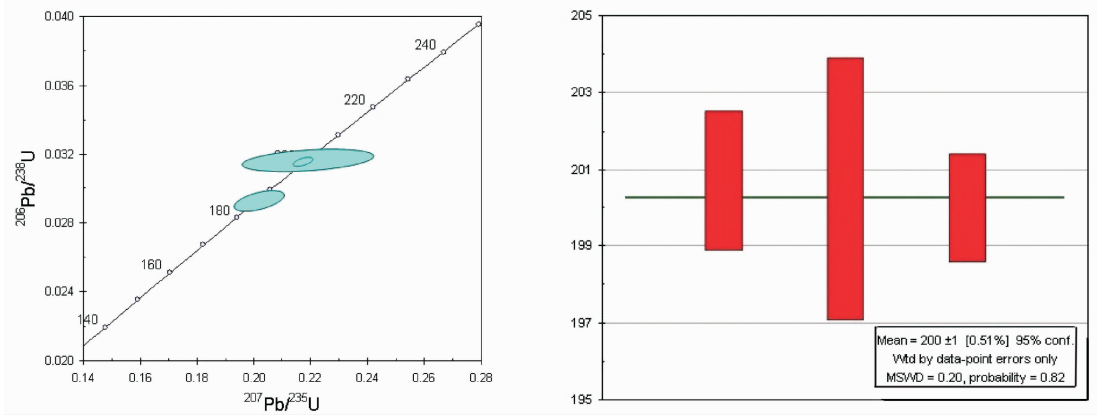


图 3 三矿沟矽卡岩型 Cu-Fe-Mo 矿床锆石 U-Pb 同位素等时线图 and $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值图
Fig.3 Diagram showing U-Pb isotopic isochron and $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ weighted mean values of zircons from the Sankuanggou skarn-type Cu-Fe-Mo deposit

4 讨论

4.1 硫的来源

硫是大多数矿床中最重要的成矿元素之一,矿床硫同位素组成特征研究,对成矿金属元素的来源具有十分重要的意义,通常认为硫同位素研究可以帮助判断成矿过程中硫的来源,为矿床的成因研究提供重要的依据。关于矿床中硫的来源的讨论,必须依据硫化物沉淀期间热液的总硫同位素组成加以分析^[19-21]。通常有 3 种方法可以确定成矿热液的总硫同位素组成:物理-化学平衡分析法、矿物共生组合比较法和平克尼-拉夫特法(高温平衡外推法)^[22,23]。研究表明^[24],热液平衡体系中结晶硫化物的硫同位素组成取决于下列因素:(1)热液总硫的浓度和总硫同位素组成($\delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{S}}$), (2)物理化学参数(温度、pH、氧逸度等), (3)结晶矿物的类型和相对数量。当氧逸度较低时,流体中硫主要以 HS^- 、 S^{2-} 形式存在,所沉淀的硫化物中 $\delta^{34}\text{S}$ 值与整个流体的 $\delta^{34}\text{S}$ 值近似;当氧逸度较高时, SO_4^{2-} 大量存在并沉淀富集 ^{34}S 的硫酸盐,导致成矿流体的 ^{34}S 亏损。三矿沟矽卡岩型 Cu-Fe-Mo 矿床主成矿阶段含硫矿物主要为黄铁矿、斑铜矿、黄铜矿、辉钼矿等硫化物,未见硫酸盐类,因此表明该矿床是在低氧逸度条件下成矿的,硫化物的平均 $\delta^{34}\text{S}$ 值可以近似地代表成矿热液的总硫同位素组成($\delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{S}}$)^[19-21]。

因此,三矿沟矽卡岩型 Cu-Fe-Mo 矿床的成矿热液中,总硫的 $\delta^{34}\text{S}$ 值大致相当于硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$

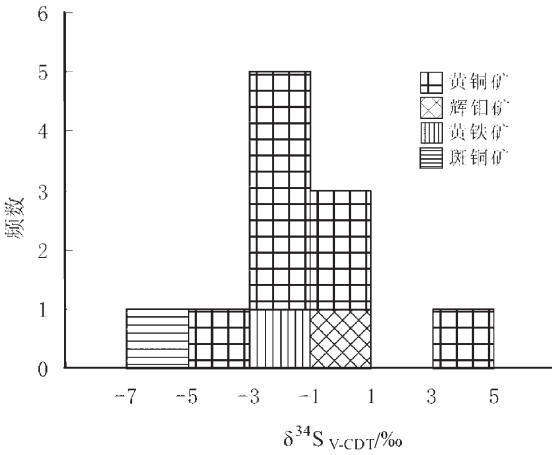


图 4 三矿沟矽卡岩型 Cu-Fe-Mo 矿床矿石硫化物硫同位素组成频率直方图
Fig.4 Frequency histogram of $\delta^{34}\text{S}$ for ore sulfides from the Sankuanggou skarn-type Cu-Fe-Mo deposit

平均值,即约为-1.5‰。在硫化物硫同位素组成频率直方图(图 4)中, $\delta^{34}\text{S}$ 峰值分布于-3‰~1‰,显示出塔式分布的特点,说明主成矿阶段硫化物是在稳定的物理-化学条件下形成的,并且硫的来源比较均一。^[25-28]

前人对热液矿床的硫同位素进行研究^[19,20,22,29-32],将天然成矿热液的总硫同位素组成大致分为 4 类:(1) $\delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{S}} \approx 0$,这类矿床在成因上与花岗岩侵入体有关,硫源为地幔硫,包括岩浆释放的硫和从火成岩硫化物中淋漓出来的硫;(2) $\delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{S}} \approx 20\text{‰}$,硫来源于大洋水和海水蒸发岩;(3) $\delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{S}} = 5\text{‰} \sim 15\text{‰}$,介于

前两种之间,硫来源则相对复杂,可能来自于围岩中浸染状硫化物(无机还原成因)或其他更老的矿床^[33];
(4) $\delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{S}}$ 为较大负值,矿床硫来源则是开放沉积条件下的有机(细菌)还原成因硫。三矿沟矽卡岩型 Cu-Fe-Mo 矿床中,成矿热液系统中的总硫同位素值 $\delta^{34}\text{S}$ 大致等于 -1.5‰ , 接近于地幔硫的 $\delta^{34}\text{S}$ 值 ($\delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{S}} \approx 0$), 但硫同位素组成大多数为负值,反映了矿石中的硫总体具有岩浆硫的特征,即硫主要来源于深源岩浆,极少量可能来自于地层。

4.2 铅的来源

铅同位素演化特征具有十分重要的示踪意义,通常认为,铅同位素源区特征值,尤其是 μ 值的变化能提供地质体经历地质作用的信息,反映成矿金属元素的来源。研究表明,具有高 μ 值(大于 9.58)的铅或者位于零等时线右侧的放射成因铅通常被认为是来自 U、Th 相对富集的上部地壳物质,低 μ 值的铅可能来自于下地壳或上地幔^[34],低 μ 高 ω 被认为是下地壳的特征^[35-37],地幔环境铅 μ 值为 8.92^[36-38]。三矿沟矽卡岩型 Cu-Fe-Mo 矿床矿石铅同位素 μ 值为 9.31~9.50(表 2),均高于地幔原始环境铅 μ 值,但又都低于 9.58; ω 的均值为 34.64,低于地壳平均 ω 值(36.84);Th/U 比值介于 2.88~3.77,平均 3.56,接近地幔值 3.45,表明矿石铅可能来源于地幔,且矿床在形成过程中有岩浆热液参与^[36-38]。

为了确定三矿沟矽卡岩型 Cu-Fe-Mo 矿床矿石硫化物的铅来源,将该矿床矿石硫化物的铅同位

素数据分别投影到 Zartman 等^[38]在 1981 年提出的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 构造环境演化图解上(图 5)。可以看出,在 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 构造环境演化图解上,8 个数据点位于造山带演化曲线和地幔演化曲线之间,1 个数据点位于造山带演化曲线之上,另外 6 个数据点位于上地壳演化曲线和造山带曲线之间接近造山带演化曲线的位置,反映了成矿物质具有造山带和地幔混合的特点;在 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 构造环境演化图解上,除了 2 个数据点投在上地壳演化曲线右侧比较远的区域,其他数据点都投在造山带和上地壳演化曲线之间,表明该矿床矿石铅主要为壳幔混合来源。

朱炳泉^[39]提出的通过 $\Delta\beta$ - $\Delta\gamma$ 成因分类图解来追踪矿石铅的源区的方法,该方法可以消除时间因素的影响,因此具有更好的示踪意义。为了进一步研究三矿沟矽卡岩型 Cu-Fe-Mo 矿床矿石硫化物的铅来源,将该矿床矿石硫化物的铅同位素参数投在 $\Delta\beta$ - $\Delta\gamma$ 成因分类图解上(图 6),可以看出,4 个数据点投到了地幔铅的范围内,其余 10 个数据点均投到了上地壳与地幔混合俯冲带铅的区域。这一特征与 Zartman 的铅构造模式中铅同位素数据的分布特征基本一致,反映成矿物质的来源与岩浆作用有关,表明该矿床矿石铅来源于壳幔混合物质。

4.3 成矿时代

三矿沟复式英云(花岗)闪长岩体主要由英云闪长岩、花岗闪长岩及碱长花岗岩组成,其中英云闪长

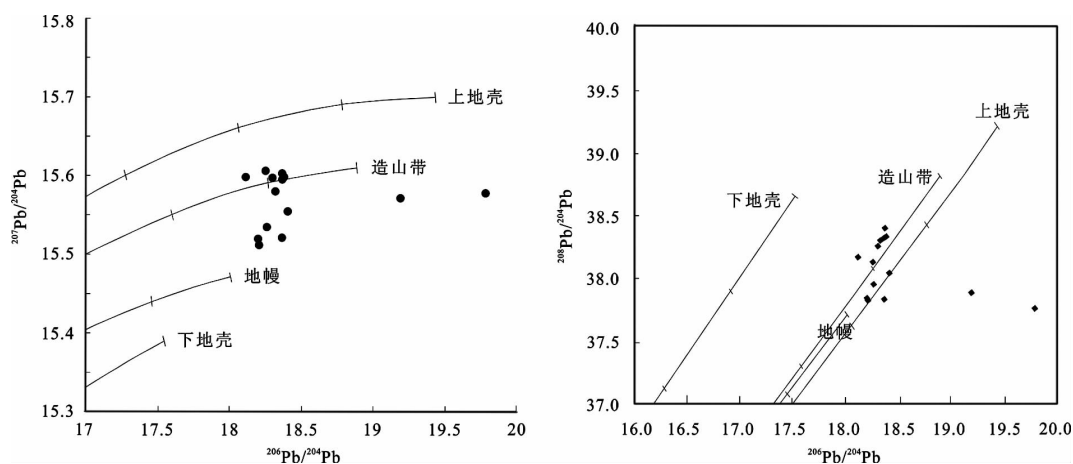
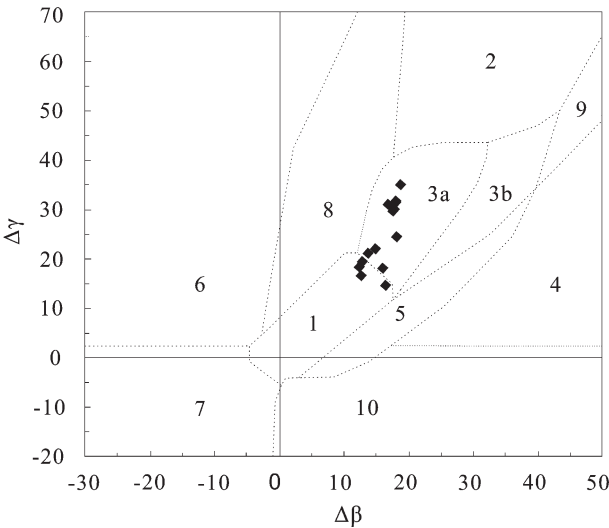


图 5 三矿沟矽卡岩型 Cu-Fe-Mo 矿床矿石硫化物 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 构造环境演化图解(铅同位素数据引自李德荣等^[16],底图据 Zartman 等^[38])

Fig.5 Diagram showing tectonic setting evolutions of $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ and $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ for ore sulfides from the Sankuanggou skarn-type Cu-Fe-Mo deposit



1—地幔源铅;2—上地壳源铅;3—上地壳与地幔混合的俯冲带铅(3a.岩浆作用 3b.沉积作用);4—化学沉积型铅;5—海底热水作用铅;6—中深变质作用铅;7—深变质下地壳铅;8—造山带铅;9—古老页岩上地壳铅;10—退变质

图 6 三矿沟矽卡岩型 Cu-Fe-Mo 矿床矿石铅同位素的 $\Delta\beta-\Delta\gamma$ 成因分类图解(铅同位素数据引自李德荣等^[6],底图据朱炳泉等^[9])

Fig.6 $\Delta\beta-\Delta\gamma$ diagram showing genetic classification of ore lead isotopes from the Sankuanggou skarn-type Cu-Fe-Mo deposit

岩与铜矿、铁矿成矿关系密切,碱长花岗岩与钼矿关系密切。前人研究表明,三矿沟矽卡岩型 Cu-Fe-Mo 矿床岩体侵入时代为晚三叠世—中侏罗世,岩浆脉动侵位持续时间约 35 Ma,花岗闪长岩锆石 U-Pb 年龄为 209 Ma,黑云母 K-Ar 年龄为 201~180.8 Ma,全岩 K-Ar 年龄为 184 Ma,英云闪长岩 K-Ar 等时年龄为 172 Ma^①。崔根等^[40]对花岗闪长岩进行了锆石 SHRIMP U-Pb 定年,得出的年龄范围为 172~183.5 Ma、加权平均年龄 177 Ma。由于该矿床铅同位素的 H-H 模式年龄变化范围非常大,且部分模式年龄甚至出现了负值(表 3),不能用 H-H 单阶段演化模式进行模式年龄计算,因此笔者对采自英云闪长岩体内的锆石样品进行了 U-Pb 同位素地质年龄测定。本文所测的锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄范围为 $(200\pm 1)\text{Ma}\sim(185.7\pm 3.2)\text{Ma}$,与前人取得的测年数据基本一致,表明三矿沟矽卡岩型 Cu-Fe-Mo 矿床的成岩成矿年代为早侏罗世。晚三叠

世—中侏罗世期间,三矿沟构造运动强烈,岩浆活动强烈,中酸性英云闪长岩侵入先前形成的大理岩,英云闪长岩总体环绕花朵山呈环形分布,局部相变为花岗岩、花岗闪长岩及斑状花岗岩,当英云闪长岩侵入大理岩时,在内、外接触带均可形成各种类型的矽卡岩和矽卡岩化角岩,同时伴随着磁铁矿的大量沉淀,以及少量黄铁矿和磁黄铁矿的生成。随后,碱长花岗岩侵入地层或英云闪长岩,发育大量矿化,导致各种金属硫化物、氧化物相继沉淀结晶,形成黄铜矿和辉钼矿矿体。

5 结 论

(1)三矿沟矽卡岩型 Cu-Fe-Mo 矿床矿石硫同位素组成变化范围较大($-5.3\text{‰}\sim 4.7\text{‰}$),显示出塔式分布的特点,说明主成矿阶段硫化物是在稳定的物理—化学条件下形成的,并且硫的来源比较均一。由于矿区内金属硫化物较单一,且不含硫酸盐矿物,硫同位素特征(-1.5‰)反映成矿过程中硫主要来源于深源岩浆,极少量可能来自于地层。

(2)矿石硫化物铅同位素的 H-H 单阶段模式年龄部分出现负值,表明铅为混入了放射性成因铅的混合铅。在 Zartman 构造环境演化图解和 $\Delta\gamma-\Delta\beta$ 成因分类图解投影点均显示了壳幔混合铅的特征,反映了该矿床成矿物质主要为壳幔混合来源,且与岩浆作用密切相关。

(3)锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄范围为 $(200\pm 1)\sim(185.7\pm 3.2)\text{Ma}$,代表了英云闪长岩的侵位时间,表明三矿沟矽卡岩型 Cu-Fe-Mo 矿的成岩成矿年代为早侏罗世。

致谢:本文在写作和修改过程中得到了程文斌博士和章永梅博士的指导和帮助;审稿过程中,相关专家提出了宝贵的意见和建议,在此一并致谢。

参考文献(References):

[1] 李德荣,朱朝利,吕军,等.黑龙江三矿沟—多宝山成矿带构造—岩浆成矿作用[J].中国矿业,2010,19(增刊):142-146.
Li Derong, Zhu Chaoli, Lv Jun, et al. Structural-magmatic mineralization of Sankuanggou-Duobaoshan metallogenic belt, Heilongjiang[J]. China Mining Magazine, 2010, 19(supp.):142-146 (in Chinese with English abstract).

①黑龙江省地质矿产局第三地质勘查所,地质矿产部矿床地质研究所,黑龙江省多宝山及其邻区寻找大型斑岩铜矿的研究."八五"国家科技攻关计划专题成果报告(85-901-01-01).哈尔滨:黑龙江省地质资料档案馆,1995.

- [2] 杜琦. 多宝山斑岩铜矿床蚀变与矿化特征[J]. 地质学报, 1980, 4: 310–323.
Du Qi. The alteration and mineralization features of the Duobaoshan porphyry copper deposit [J]. Acta Geologica Sinica, 1980, 4:310–323(in Chinese with English abstract).
- [3] 杜琦, 陈明秀. 多宝山斑岩铜矿床成因模式 [J]. 矿床地质, 1983, 2:42–48.
Du Qi, Chen Mingxiu. The genetic model of Duobaoshan porphyry copper deposit [J]. Mineral Deposits, 1983, 2:42–48 (in Chinese with English abstract).
- [4] 王喜臣, 王训练, 王琳, 等. 黑龙江多宝山超大型斑岩铜矿的成矿作用和后期改造[J]. 地质科学, 2007, 42(1):124–133.
Wang Xichen, Wang Xunlian, Wang Lin, et al. Metallogeny and reformation of the Duobaoshan superlarge porphyry copper deposit in Heilongjiang[J]. Scientia Geologica Sinica, 2007, 42(1):124–133 (in Chinese with English abstract).
- [5] 李克生. 多宝山斑岩铜(钼)矿床气液包裹体研究[J]. 地质与勘探, 1979, 3:22–23.
Li Kesheng. A study on gas–liquid inclusions of Duobaoshan porphyry–type copper (molybdenum) deposits [J]. Geology and Prospecting, 1979, 3:22–23(in Chinese with English abstract).
- [6] 武广, 刘军, 钟伟, 等. 黑龙江省铜山斑岩铜矿床流体包裹体研究 [J]. 岩石学报, 2009, 25(11):2996–3006.
Wu Guang, Liu Jun, Zhong Wei, et al. Fluid inclusion study of the Tongshan porphyry copper deposit, Heilongjiang Province, China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25 (11):2996–3006 (in Chinese with English abstract).
- [7] 葛文春, 吴福元, 周长勇, 等. 兴蒙造山带东段斑岩型 Cu–Mo 矿床成矿时代及其地球动力学意义 [J]. 科学通报, 2007, 52(20): 2407–2417.
Ge Wenchun, Wu Fuyuan, Zhou Changyong, et al. Mineralization time of porphyry–type Cu–Mo deposit in the eastern section of Xing'an Mongolian orogenic belt and its geodynamics significance [J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(20):2407–2417(in Chinese).
- [8] 刘驰. 多宝山斑岩铜矿区水热蚀变矿物的激光显微探针 $\text{Ar}^{40}/\text{Ar}^{39}$ 定年[J]. 地质科学, 1995, 30(4):329–337.
Liu Chi. $\text{Ar}^{40}/\text{Ar}^{39}$ laser microprobe dating on hydrothermal minerals from Duobaoshan porphyry copper mining district, Heilongjiang Province, China[J]. Scientia Geologica Sinica, 1995, 30(4):329–337 (in Chinese with English abstract).
- [9] 赵一鸣, 毕承思, 邹晓秋, 等. 黑龙江多宝山、铜山大型斑岩铜(钼)矿床中辉钼矿的铼–钼同位素年龄 [J]. 地球学报, 1997, 18(1): 61–67.
Zhao Yiming, Bi Chengsi, Zou Xiaoqiu, et al. The Re–Os isotopic age of molybdenite from Duobaoshan and Tongshan Porphyry Cu (Mo) Deposits [J]. Acta Geoscientia Sinica, 1997, 18 (1):61–67(in Chinese with English abstract).
- [10] 李之彤, 王希金, 王宏博, 等. 黑龙江省嫩江县三矿沟含金铁铜矿床地质特征[J]. 地质与资源, 2008, 17(3):170–174.
Li Zhitong, Wang Xijin, Wang Hongbo, et al. Geology of the Sankuanggou gold–bearing iron–copper deposit in Nenjiang County, Heilongjiang Province [J]. Geology and Resources, 2008, 17(3):170–174(in Chinese with English abstract).
- [11] 王洪瑜, 马丽玲, 王卓. 黑龙江省嫩江县三矿沟铜(铁)矿床地质特征及成因探讨 [J]. 吉林大学学报 (地球科学版), 2008, 38 (增刊):214–218.
Wang Hongyu, Ma Liling, Wang Zhuo. Geological character and genesis of Sankuanggou copper (iron) mineral deposit, Duobaoshan area, Heilongjiang Province [J]. Journal of Jinlin University (Earth Science Edition), 2008, 38 (supp.):214–218 (in Chinese with English abstract).
- [12] 刘军, 武广, 钟伟, 等. 黑龙江省三矿沟矽卡岩型铁铜矿床流体包裹体研究[J]. 岩石学报, 2009, 25(10):2631–2641.
Liu Jun, Wu Guang, Zhong Wei, et al. Fluid inclusions study of the Sankuanggou skarn Fe–Cu deposit, Heilongjiang Province, China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25 (10):2631–2641 (in Chinese with English abstract).
- [13] 吕鹏瑞, 顾雪祥, 李德荣, 等. 黑龙江嫩江地区三矿沟矽卡岩型 Cu–Fe–Mo 多金属矿床的成矿流体特征与成矿机制[J]. 地质通报, 2011, 30(10):1563–1574.
Lv Pengrui, Gu Xuexiang, Li Derong, et al. Ore–forming fluid characteristics and mineralization mechanisms of the Sankuanggou skarn–type Cu–Fe–Mo polymetallic deposit in Nenjiang area of Heilongjiang Province [J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30 (10):1563–1574(in Chinese with English abstract).
- [14] 张理刚. 稳定同位素在地质科学中的应用; 金属活化热液成矿作用及找矿[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1985:16–250.
Zhang Ligang. Stable Isotope Applications in Geological Sciences: Hydrothermal Mineralization of Metal Activation and Prospecting [M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1985:16–250 (in Chinese with English abstract).
- [15] 郑永飞, 陈江峰. 稳定同位素地球化学 [M]. 北京: 科学出版社, 2000:143–245.
Zheng Yongfei, Chen Jiangfeng. Stable Isotope Geochemistry [M]. Beijing: Science Press, 2000:143–245 (in Chinese with English abstract).
- [16] 李德荣, 吕福林, 刘素颖, 等. 黑龙江省嫩江县三矿沟矿区地质特征及找矿方向[J]. 中国地质, 2011, 38(2) :415–426.
Li Derong, Lv Fulin, Liu Suying, et al. Geological features and prospecting of Sankuanggou Cu–Mo–Au deposit of Nenjiang County, Heilongjiang Province[J]. Geology in China, 2011, 38(2): 415–426 (in Chinese with English abstract).
- [17] Hoefs J. Stable Isotope Geochemistry [M]. 4th ed. Berlin: Springer–Verlag, 1997:119–120.
- [18] Faure G, Mensing T M. Isotopes: Principles and Applications [M]. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, 2005:256–283.
- [19] Ohmoto H. Systematics of sulfur and carbon isotope in hydrothermal ore deposits[J]. Econ. Geol., 1972, 67:551–579.
- [20] Ohmoto H, Rye R O. Isotopes of sulfur and carbon [C]// Barnes H L, Second Geochemistry of hydrothermal ore deposits (ed.). New

- York: John Wiley and Sons, 1979:509-567.
- [21] 聂桂平, 刘良根, 徐兆文, 等. 安徽朝山金矿床矿石含金性和硫同位素研究[J]. 江苏地质, 2007, 31(3):200-205.
- Nie Guiping, Liu Lianggen, Xu Zhaowen, et al. Gold bearing property and sulfur isotopic compositions of ore rocks at Chaoshan gold deposit, Anhui [J]. Jiangsu Geology, 2007, 31 (3):200-205(in Chinese with English abstract).
- [22] 毛晓东, 黄思静. 长坑—富湾金、银矿床硫同位素组成特征及其意义[J]. 华南地质与矿产, 2002, (1):17-22.
- Mao Xiaodong, Huang Sijing. Sulfur isotopic compositions of Changkeng-Fuwan Au and Ag deposits and its significance [J]. Geology and Mineral Resources of South China, 2002, (1):17-22 (in Chinese with English abstract).
- [23] 王立强, 顾雪祥, 程文斌, 等. 西藏蒙亚啊铅锌矿床 S、Pb 同位素组成及对成矿物质来源的示踪[J]. 现代地质, 2010, 24(1):52-58.
- Wang Liqiang, Gu Xuexiang, Cheng Wenbin, et al. Sulfur and lead composition and tracing for the sources of ore-forming materials in the Mengya'a Pb-Zn deposit, Tibet [J]. Geoscience, 2010, 24(1):52-58(in Chinese with English abstract).
- [24] 魏菊英, 王玉关. 同位素地球化学[M]. 北京:地质出版社, 1988: 153-155.
- Wei Juying, Wang Yuguan. Isotope Geochemistry [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1988: 153-155 (in Chinese with English abstract).
- [25] 张理刚, 庄龙池, 钱雅倩, 等. 江西西华山—漂塘地区花岗岩及其钨锡矿床的稳定同位素地球化学 [C]//钨矿地质讨论会论文集. 北京:地质出版社, 1981:325-338.
- Zhang Ligang, Zhuang Longchi, Qian Yaqian, et al.. Stable isotope geochemistry of granite and its tungsten-tin deposit in Xihuashan-Piaotang area of Jiangxi Province [C]//Proceedings about Geology Symposium of Tungsten. Beijing:Geological Publishing House, 1981: 325-338(in Chinese with English abstract).
- [26] 张国新, 谢越宁, 虞福基, 等. 江西大吉山钨矿床不同成矿阶段稳定同位素地球化学[J]. 地球学报, 1997, 18(增刊):197-199.
- Zhang Guoxin, Xie Yuening, Yu Fuji, et al. Stable isotope geochemistry of Dajishan tungsten deposit in various mineralization stages, Jiangxi Province [J]. Acta Geoscientica Sinica, 1997, 18 (supp.):197-199(in Chinese with English abstract).
- [27] 潘家永, 张乾, 马东升, 等. 滇西羊拉铜矿床稳定同位素地球化学研究[J]. 矿物学报, 2000, 20(4):385-389.
- Pan Jiayong, Zhang Qian, Ma Dongsheng, et al. Stable isotope geochemical characteristics of the Yangla copper deposit in Western Yunnan Province[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2000, 20(4):385-389(in Chinese with English abstract).
- [28] 王守旭, 张兴春, 冷成彪, 等. 滇西北中甸普朗斑岩铜矿床地球化学与成矿机理初探[J]. 矿床地质, 2007, 26(3):277-288.
- Wang Shouxu, Zhang Xingchun, Leng Chengbiao, et al. Discussion on geochemistry and metallogenic mechanism of Zhongdianpulang porphyry copper deposit in Northwest Yunnan Province [J]. Mineral Deposits, 2007, 26 (3):277-288 (in Chinese with English abstract).
- [29] Rye R O, Ohmoto H. Sulfur and carbon isotopes and ore genesis: A review[J]. Econ. Geol., 1974, 69:826-842.
- [30] 张生, 李统锦, 王联魁. 广东长坑金银矿床的地球化学—硫同位素研究[J]. 地球化学, 1997, 26(4):78-85.
- Zhang Sheng, Li Tongjin, Wang Liankui. Geochemistry-sulfur isotope study of Changkeng Au-Ag deposit in Guangdong Province [J]. Geochemistry. 1997, 26 (4):78-85 (in Chinese with English abstract).
- [31] 李红梅, 魏俊浩, 黄祥芝. 河南栢洞县破山银矿和银洞坡金矿的铜同位素研究[J]. 现代地质, 2008, 22(1):18-23.
- Li Hongmei, Wei Junhao, Huang Xiangzhi. Copper isotope study of Poshan silver deposit and Yindongpo gold deposit in Baidong County, Henan[J]. Geoscience. 2008, 22(1):18-23(in Chinese with English abstract).
- [32] 宋生琼, 胡瑞忠, 必献武, 等. 赣南崇义淘锡坑钨矿床氢、氧、硫同位素地球化学研究[J]. 矿床地质, 2011, 30(1):1-10.
- Song Shengqiong, Hu Ruizhong, Bi Xianwu, et al. H-O-S isotope geochemistry study of Taosikeng tungsten deposit in Chongyi County, Southern Jiangxi [J]. Mineral Deposits. 2011, 30 (1):1-10(in Chinese with English abstract).
- [33] Hoefs J. Stable Isotope Geochemistry (Second ed)[M]. New York: Springer-Verlag. 1980.
- [34] Stacey J S, Kramers J D. Approximation of tectrestrial lead isotope evolution by a two-stage model [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1975, 26:207-221.
- [35] Kamona A F, Lévêque J, Friedrich G, et al.. Lead isotopes of the carbonate-hosted Kabwe, Tsumeb, and Kipushi Pb-Zn-Cu sulphide deposit in relation to Pan African orogenesis in the Damaran-Lufilian Fold Belt of Central Africa [J]. Mineralium Deposita, 1999, 34:273-283.
- [36] Doe B R, Zartman R E. Plumbotectonics 1. the Phanerozoic[C]//Barnes H L. Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits 2nd. Ed. Wiley Interscience, 1979, Chap 2:22-70.
- [37] 吴开兴, 胡瑞忠, 毕献武, 等. 矿石铅同位素示踪成矿物质来源综述[J]. 地质地球化学, 2002, 30(3):73-81.
- Wu Kaixing, Hu Ruizhong, Bi Xianwu, et al. Ore lead isotopes as a tracer for ore-bearing metarial sources;a review [J]. Geology Geochemistry, 2002, 30(3):73-81 (in Chinese with English abstract).
- [38] Zartman R E, Doe B R. Plumbotectonics—the model [J]. Tectonophysics, 1981, 75(1):135-162.
- [39] 朱炳泉. 地球科学中同位素体系理论与应用[M]. 北京:科学出版社, 1998:216-235.
- Zhu Bingquan. Theory of isotopic system and its application in earth sciences [M]. Beijing:Science Press, 1998:216-235 (in Chinese with English abstract).
- [40] 崔根, 王金益, 张景仙, 等. 黑龙江多宝山花岗闪长岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义 [J]. 世界地质, 2008, 27(4): 387-394.
- Cui Gen, Wang Jinyi, Zhang Jingxian, et al. U-Pb SHRIMP

dating of zircons from Duobaoshan granodiorite in Heilongjiang
and its geological significance [J]. Global Geology, 2008, 27(4):

387–394(in Chinese with English abstract).

S–Pb isotopic characteristics of ore sulfides and U–Pb dating of zircon from the Sankuanggou skarn–type Cu–Fe–Mo deposit in Heilongjiang Province

LV Peng–rui^{1,2}, LI De–rong³, PENG Yi–wei¹, ZHANG Ming–yang¹

(1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, Beijing;

2.Xi'an Center of Geological Survey Xi'an 710054, Shannxi, China; 3. Heilongjiang Mining Group Co., Ltd., Harbin 150036, Heilongjiang, China)

Abstract: The Sankuanggou skarn–type Cu–Fe–Mo deposit occurs in the Sankuanggou– Duobaoshan tectonic–metallogenic belt of the Da Hinggan Mountains, and there exists close relationship between the formation of ore bodies and the intrusion of Sankuanggou multiple tonalite. Based on an analysis of the ore–forming geological conditions, the authors studied sulfur and lead isotopic compositions and zircon U–Pb dating data of ores from this ore deposit and, on such a basis, discussed the sources of ore–forming materials and the rock–forming and ore –forming epochs. Studies have shown that the composition of sulfur isotope varies greatly and has a distributional effect of tower type, the $\delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{s}}$ of the ore –forming hydrothermal system is about -1.5% , suggesting that sulfur was mainly derived from deep magmatic source, with a very small amount probably derived from the strata. The lead isotopic composition of ore sulfides indicates the derivation of lead from the mixed crust–mantle materials, suggesting that the ore–forming materials came mainly from crust–mantle mixing sources and were closely related to magmatism. The $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ weighted mean ages of zircons range from $(200\pm 1)\text{Ma}$ to $(168.18\pm 0.96)\text{Ma}$, which represent the intrusive time of tonalite and suggest that the rock–forming and ore –forming epoch of the Sankuanggou Skarn–type Cu–Fe–Mo polymetallic deposit is Early Jurassic.

Key words: Sankuanggou; skarn–type; Cu–Fe–Mo deposit; S and Pb isotopes; zircon dating; Heilongjiang

About the first author: LV Peng–rui, male, born in 1984, master candidate, engages in the study of mineral deposits and geochemistry of mineral deposits; E–mail: Lvpengrui0910@163.com.

About the corresponding author: LI De–rong, male, born in 1965, doctor, senior engineer, mainly engages in mineral exploration; E–mail: Leederong@163.com.