

北山成矿带老硐沟金多金属矿床 S-Pb-C-O 同位素特征及其对矿床成因的约束^{*}

唐卫东¹, 魏立勇^{1**}, 高永宝¹, 刘天航¹, 吴欢欢^{1,2,3}, 葛战林^{1,2}, 何佳乐¹,
杨冰⁴, 孙强¹

(1 中国地质调查局金矿勘查技术创新中心, 中国地质调查局西安矿产资源调查中心, 陕西 西安 710000; 2 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083; 3 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 4 额济纳旗圆通矿业有限责任公司, 内蒙古 阿拉善盟 750300)

摘要 老硐沟金多金属矿床是北山成矿带内蒙古段最为典型的金矿床之一, 其矿床成因存在较多争议, 矿床成矿物质来源方面的研究几近空白。文章基于详细的野外实地调查, 选取不同成矿阶段的硫化物和方解石, 开展原位 S-Pb 同位素和 C-O 同位素测试。研究结果表明, 老硐沟金多金属矿床 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $-0.56\text{\textperthousand}$ ~ $5.54\text{\textperthousand}$, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为 $18.326\text{--}18.390$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为 $15.563\text{--}15.645$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为 $38.226\text{--}38.390$, 铅同位素 μ 值变化范围为 $9.40\text{--}9.55$, ω 值变化范围为 $35.77\text{--}36.85$, 方铅矿二阶段模式年龄为 $232\text{--}270\text{ Ma}$, $\delta^{13}\text{C}$ 值介于 $-0.04\text{\textperthousand}$ ~ $2.93\text{\textperthousand}$ 之间, 表明老硐沟金多金属矿床成矿物质具有岩浆和地层混合来源性质, 成矿流体以岩浆来源为主, 成矿作用晚期流体中混入了地层变质水。文章从矿床稳定同位素研究方面, 结合前人对北山造山带构造演化的认识, 提出老硐沟金多金属矿床成因为岩浆热液型。

关键词 原位 S-Pb 同位素; C-O 同位素; 成矿物质来源; 老硐沟金多金属矿床; 北山成矿带

中图分类号: P618.51

文献标志码: A

S-Pb-C-O isotope characteristics and constraints on genesis of Laodonggou gold polymetallic deposit of Beishan metallogenic belt

TANG WeiDong¹, WEI LiYong¹, GAO YongBao¹, LIU TianHang¹, WU HuanHuan^{1,2,3}, GE ZhanLin^{1,2}, HE JiaLe¹,
YANG Bing⁴ and SUN Qiang¹

(1 Technology Innovation Center for Gold Ore Exploration, Xi'an Center of Mineral Resources Survey, China Geological Survey, Xi'an 710000, Shaanxi, China; 2 School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 3 Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 4 Ejina Banner Yuantong Mining Company, Alashan 750300, Inner Mongolia, China)

Abstract

The Laodonggou gold polymetallic deposit is one of the most typical gold mineral of the Beishan metallogenic belt in Inner Mongolia. There are many disputes about its genesis, and the research on the source of ore-forming materials in the deposit is almost blank. Based on the on-situ investigation of the deposit, this work selected typical ore samples from different middle sections underground and conducted in-situ S-Pb and C-O isotope studies. The $\delta^{34}\text{S}$ of Laodonggou gold polymetallic deposit ranges from $-0.56\text{\textperthousand}$ to $5.54\text{\textperthousand}$, the $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$

* 本文得到中国地质调查局地质调查项目(编号:DD20243052、DD20230057、DD20211552)和陕西省自然科学基金项目(编号:2023-JC-QN-0362)共同资助

第一作者简介 唐卫东,男,1990年生,工程师,主要从事矿产资源调查评价工作。Email:tangweidong23@163.com

** 通讯作者 魏立勇,男,1981年生,正高级工程师,主要从事金矿勘查、调查评价、成矿规律研究等工作。Email:weiliyong23@126.com

收稿日期 2023-09-06; 改回日期 2024-06-04。赵海杰编辑。

ranges from 18.326 to 18.390, the $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ranges from 15.563 to 15.645, the $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ranges from 38.226 to 38.390, the μ of lead isotopes ranges from 9.40 to 9.55, the ω ranges from 35.77 to 36.85, the S-K II model age of galena is 232~270 Ma, and the $\delta^{13}\text{C}$ ranges from $-0.04\text{\textperthousand}$ to $2.93\text{\textperthousand}$. These show that the ore-forming materials of the Laodonggou gold polymetallic deposit have a mixed source of magma and strata, and the ore-forming fluid is mainly derived from magma. In the late stage of mineralization, metamorphic water from strata was mixed into the fluid. Based on the study of stable isotopes of ore deposits, combined with previous studies on the tectonic evolution of the Beishan orogenic belt, it is first proposed that the genesis of the Laodonggou gold polymetallic deposit is magmatic hydrothermal type.

Key words: In-situ sulfur-lead isotope, carbon oxygen isotope, source of ore-forming materials, Laodonggou gold polymetallic deposit, Beishan metallogenic belt

北山成矿带位于中亚造山带南缘,近年来随着矿产勘查力度的加大,北山成矿带新疆和甘肃段在金矿找矿方面均取得了较大突破,先后发现了南金山、马庄山、小西弓、金窝子、北山、前红泉等金矿床。相比而言,北山成矿带内蒙古段近年来并未取得较大的金找矿进展。老硐沟金多金属矿床作为北山成矿带内蒙古段最为典型的金矿床之一,累计探明金资源储量 6.76 t,平均品位 5.83 g/t,目前矿山在开采过程中遇到了较大的阻力。大量实践证明,老旧矿山的勘查突破必须依托对矿床成矿规律的综合认识,提出新的找矿思路。因此,针对老硐沟金多金属矿床开展成矿物质来源和成矿流体来源以及矿床成因等方面的研究,以总结北山成矿带内蒙古段金成矿作用规律,构建成矿和找矿模型,显得尤为重要。

关于老硐沟金多金属矿床的成因,目前尚未取得统一认识。黄典豪等(1997)通过研究老硐沟金多金属矿床次生矿物的形成过程、金在次生富集中的继承性特征,提出了氧化-淋滤型成因认识。杜泽忠等(2015)详细分析了老硐沟金多金属矿床的岩性界面、断裂及溶洞构造、岩浆岩等控矿因素,认为老硐沟金多金属矿床属于热液型金矿床。于文松等(2013)分析了老硐沟金多金属矿床控矿因素、“古溶洞”控矿、不同类型矿石中 As 元素的富集规律、围岩蚀变特征,认为老硐沟金多金属矿床成因为热液蚀变岩型。此外,已有对老硐沟金多金属矿床成因方面的研究,多是在总结矿床地质特征等工作的基础上,而基于其成矿物质来源方面的研究接近空白,直接制约了对老硐沟金多金属矿成因及北山成矿带内蒙古段找矿方向研究,亟须开展系统的矿床学研究。

本次工作在详细调查总结老硐沟金多金属矿床矿床地质特征的基础上,首次通过开展黄铁矿、方铅矿、毒砂、黄铜矿等硫化物原位 S、Pb 同位素和热液

方解石 C、O 同位素研究,系统分析其成矿物质来源,结合区域构造演化关系初步探讨其矿床成因,对老硐沟金多金属矿勘查突破具有重要的实际意义。

1 区域地质

北山成矿带横跨新疆、甘肃、内蒙古三省(区),位于中亚造山带中南缘,多个一级构造板块在此交汇,记录了不同地质时期的不同类型的地质建造和不同构造阶段的构造变形遗迹,大地构造位置极其特殊(左国朝等, 1990; 杨合群等, 2006; 李敏等, 2020; 辛后田等, 2020)。北山成矿带是中国西北地区重要的金属资源地之一(聂凤军等, 2002),岩浆-热事件在该区地壳演化过程中起到了非常重要的作用,受构造活动影响,区内岩浆岩主要呈北西向带状展布,与金属成矿关系密切相关(张善明等, 2022; Tian et al., 2023)。

北山成矿带内蒙古段位于北山成矿带东段,以洗肠井缝合带为界,北部在雀儿山-狐狸山和公婆泉-七一山活动陆缘带主要产出斑岩型铜矿;在红石山路井陆内裂谷带主要产出与基性-超基性侵入体有关的铁矿、铜镍矿;缝合带南侧在营毛沱-鹰嘴红山被动陆缘带产出沉积型磷钒铀锰矿;在东缘东七一山一带还发育有古陆壳重熔花岗岩有关的钨锡稀有萤石矿,区域成矿地质条件优越。

研究区位于北山成矿带内蒙古段中东部盘陀山-古硐井一带,位于洗肠井蛇绿混杂岩带南侧,方山口-营毛沱-鹰嘴红山早古生代被动陆缘带东段(图 1a)。区内主要出露地层为长城系古硐井群、蓟县系平头山组、青白口系大豁落山组、二叠系双堡堂组和白垩系赤金堡组,与金成矿密切相关的建造为长城系古硐井群细碎屑岩和蓟县系平头山组碳酸盐

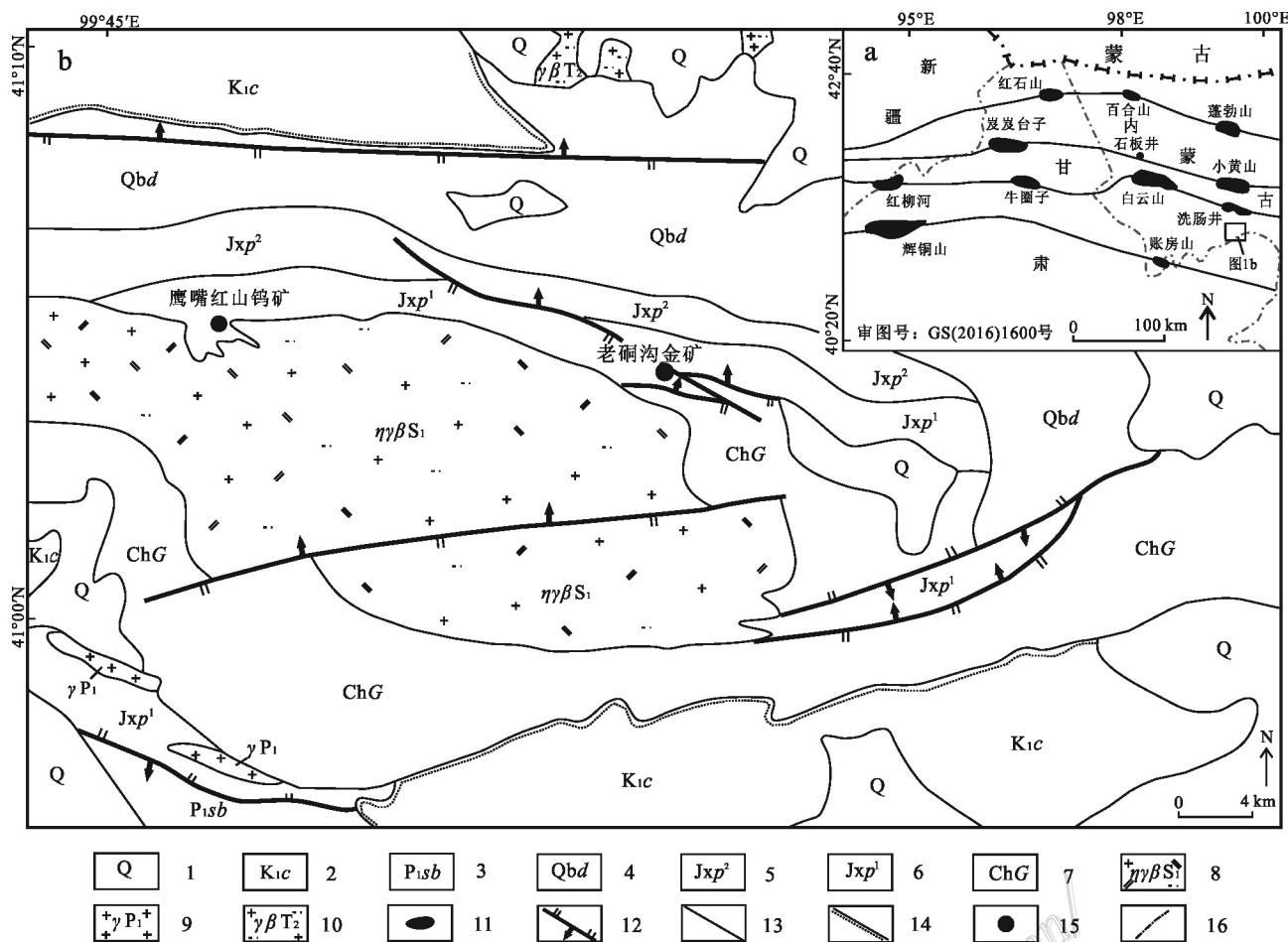


图1 北山成矿带地质简图(a)和老硐沟地区区域地质简图(b)(据张国震等,2021修改)

1—第四系;2—下白垩统赤金堡组;3—下二叠统双堡堂组;4—青白口系大豁落山组;5—蓟县系平头山组上岩段;6—蓟县系平头山组下岩段;7—长城系古硐井群;8—志留纪黑云母二长花岗岩;9—二叠纪花岗岩;10—三叠纪斑状黑云母花岗岩;11—蛇绿岩;12—逆断层;13—地质界线;14—角度不整合;15—矿床;16—省界

Fig. 1 Geological sketch of the Beishan metallogenic belt (a) and the Laodonggou area (b) (modified from Zhang et al., 2021)
 1—Quaternary; 2—Lower Cretaceous Chijipu Formation; 3—Lower Permian Shuangbaotang Formation; 4—Qingbaikou Dahuoluoshan Formation;
 5—Jixian Upper Pingtoushan Formation; 6—Jixian Lower Pingtoushan Formation; 7—Changcheng Gudongjing Group; 8—Silurian biotite monzonitic granite; 9—Permian granite; 10—Triassic porphyritic biotite granite; 11—Ophiolite; 12—Reverse fault; 13—Geological boundary;
 14—Angular unconformity; 15—Deposit; 16—Provincial boundary

岩(图1b)。区内发育鹰嘴红山加里东期黑云母二长花岗岩,主要呈岩基状产出,与区内钨矿化关系较为密切(杨合群等,2010;赵国斌等,2010; Tian et al., 2013; 丁嘉鑫等,2015; 赵鹏彬等,2019),与金矿化密切相关的岩浆活动时间主要发生在印支期(张国震等,2021; 唐卫东等,2023)。受早古生代活动陆缘带向南俯冲的影响,该区形成了一系列北西向、近东西向脆韧性剪切带和脆性断层带,控制了区内金矿床的产出。目前区内已发现有鹰嘴红山钨矿、国庆钨矿、老硐沟金多金属矿、古硐井金矿等矿床。

2 矿区地质

老硐沟金多金属矿床位于盘陀山-鹰嘴红山花岗岩带东段,区内的主要赋矿围岩为蓟县系平头山组海相碳酸盐岩。受北西向、近东西向脆韧性剪切带影响,矿区内的断裂构造较为发育,大致可分为近东西向、北西西向、北北西向和北东向4组(钱建平等,2018)。其中近东西向(F1、F2)、北西西向(F7)、北北西向(F14、F15、F17)断裂构造为最主要的控矿构造。

造(图2)。

矿区内地质构造主要为印支期侵入岩,南部出露斑状花岗闪长岩岩株,矿区中部广泛发育闪长玢岩脉和辉绿岩脉(图2),侵位时间为 (233.8 ± 0.9) Ma~ (243.0 ± 1.0) Ma(张国震等, 2021)。从野外实地调查结果及以往勘查经验判断,矿区内地质构造多产出于闪长玢岩脉附近(图3a、图4a),部分

闪长玢岩脉本身就具有很好的金矿化(图3b、图4b),指示闪长玢岩脉与区内金矿化关系极为密切。

老洞沟金多金属矿床分为5个矿体(图2),I、II、V号矿体为热液脉状矿体,近地表多形成“溶洞型”氧化矿体,矿体最大长度为400 m,厚0.65~15.54 m,Au品位0.38~31.40 g/t,赋矿标高996~1311 m。III、IV号矿体为矽卡岩型矿体,矿体长200~350 m,厚

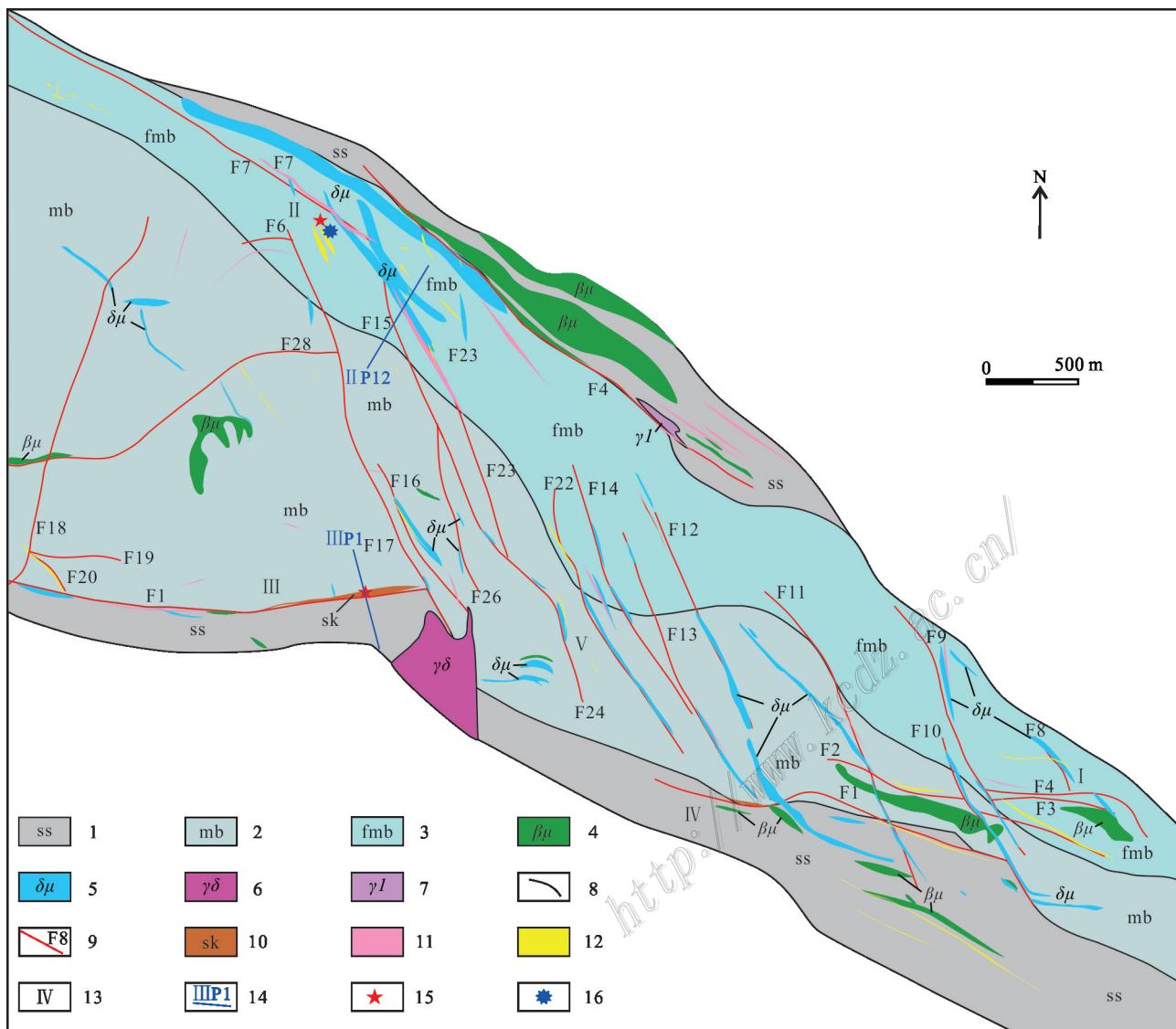


图2 老洞沟金多金属矿床矿区地质简图(据钱建平等, 2018修改)

1—变质砂岩、板岩;2—大理岩;3—碎裂大理岩;4—辉绿玢岩;5—闪长玢岩;6—花岗闪长岩;7—花岗细晶岩;8—地质界线;9—断层及编号;10—矽卡岩;11—矿化体;12—矿体;13—矿体编号;14—勘探线及编号;15—S-Pb同位素采样点;16—C-O同位素采样点

Fig. 2 Geological sketch of the Laodonggou gold polymetallic deposit (modified from Qian et al., 2018)

1—Metamorphic sandstone, slate; 2—Marble; 3—Fractured marble; 4—Diorite porphyrite; 5—Gabbro porphyrite; 6—Granodiorite; 7—Granophyre; 8—Geological boundary; 9—Faults and numbers; 10—Skarn; 11—Mineralized body; 12—Ore body; 13—Ore body number; 14—Exploration line; 15—Sulfur and lead isotope sampling points; 16—Carbon and oxygen isotope sampling points

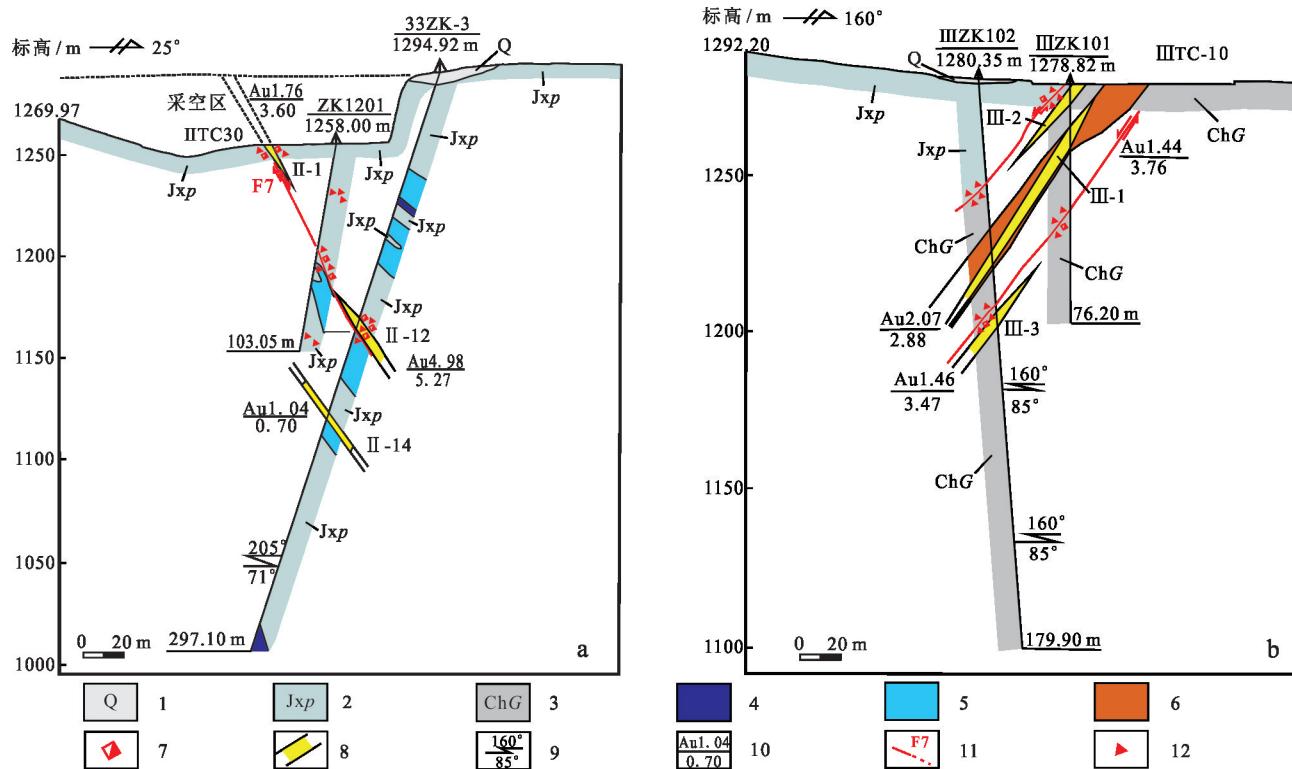


图3 老硐沟金多金属矿床P12(a)和P1(b)勘探线地质剖面图

1—第四系;2—蓟县系平头山组大理岩;3—长城系古砾并群砂岩、板岩;4—碳质板岩;5—闪长玢岩;6—矽卡岩;7—褐铁矿化;8—金矿体;
 9—产状;10—品位/g/t厚度/m;11—断层及编号;12—碎裂岩化

Fig. 3 Geological profile of P12 (a) and P1(b) exploration line of the Laodonggou gold polymetallic deposit

1—Quaternary; 2—Jixian Pingtoushan Formation marble; 3—Changcheng Gudongjing Group sandstone, slate; 4—Carbonaceous slate;
 5—Diorite porphyrite; 6—Skarn; 7—Limonitization; 8—Gold ore body; 9—Altitude; 10—Grade/g/t/thickness/m;
 11—Faults and numbers; 12—Cataclastic rock formation

0.1~10.0 m, Au品位 0.23~7.93 g/t, 矿体形态简单, 赋矿标高 1188~1282 m。根据共伴生组分, 矿体可分为

金、银、铅矿体, 如 I-1号矿体, Au品位 0.51~12.85 g/t, Ag品位 44.55~70.38 g/t, Pb品位 0.51%~4.89%; 金、

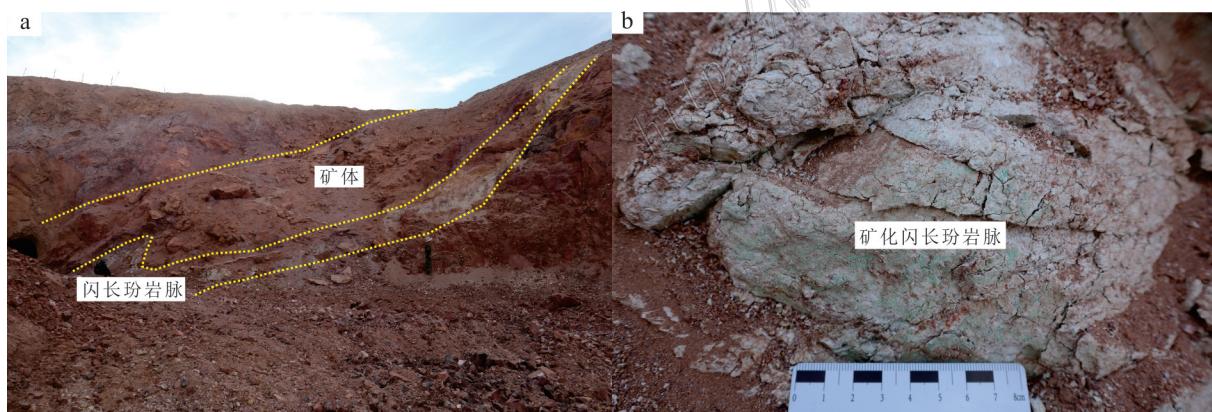


图4 老硐沟金多金属矿床Ⅱ号矿体闪长玢岩脉特征

a. 矿体产出在闪长玢岩脉上盘; b. 矿化闪长玢岩脉

Fig. 4 Characteristics of diorite porphyrite veins in ore body II of the Laodonggou gold polymetallic deposit

a. The ore body occurs above the diorite porphyrite vein; b. Mineralized diorite porphyrite vein

银、铜矿体,如Ⅲ-1号矿体,Au品位0.55~3.98 g/t,伴生Ag品位2.12~9.94 g/t,伴生Cu品位0.10%~0.47%;金、铅矿体,如Ⅳ-1号矿体,Au品位0.72~3.53 g/t,Pb品位0.61%~2.14%。

受多期次不同类型矿化作用影响(黄典豪等,1997;于文松等,2013),老硐沟金多金属矿床矿石类型主要有3种类型,分别为“溶洞型”氧化矿石(I、Ⅱ、Ⅴ号矿体)、原生脉状硫化物矿石(I、Ⅱ、Ⅴ号矿

体)和矽卡岩型矿石(Ⅲ、Ⅳ号矿体)(图5a,b)。原生矿石矿物组合主要有自然金、自然银、黄铁矿、方铅矿、黄铜矿、毒砂、闪锌矿、磁铁矿、石英、方解石、石榴子石等(图5d~i),自然金主要为包体金(图5d);氧化矿石矿物组合主要臭葱石、褐铁矿、针铁矿、砷菱铅矿、砷钙锌石、羟砷锌石等。围岩多发育热液蚀变,主要有矽卡岩化(图5c)、黄铁矿化、硅化、褐铁矿化、绿帘石化、碳酸盐化等。

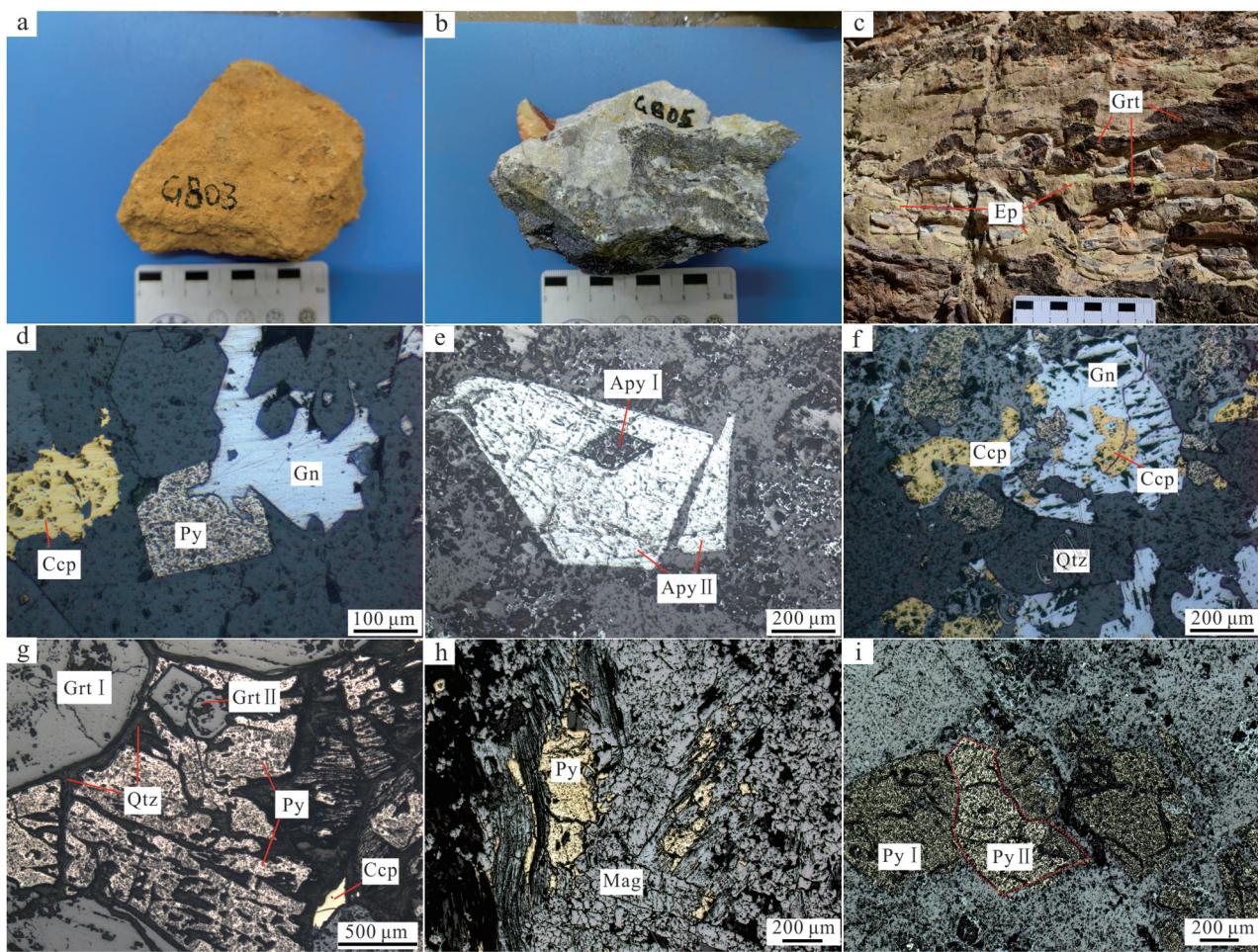


图5 老硐沟金多金属矿床不同类型矿石矿物特征图

a. Ⅱ号矿体氧化矿石;b. Ⅱ号矿体脉状硫化物矿石;c. Ⅲ号矿体矽卡岩带(条带状绿帘石、石榴子石);d. 晚期方铅矿交代早期黄铁矿;e. 晚期毒砂内的早期毒砂骸晶;f. 方铅矿被黄铜矿交代呈骸晶结构、后期石英脉穿插早期方铅矿;g. 晚期石榴子石与黄铁矿共生;h. 磁铁矿与黄铁矿同步褶曲;i. Ⅲ号矿体晚期黄铁矿穿插早期黄铁矿

Qtz—石英;Grt—石榴子石;Ep—绿帘石;Py—黄铁矿;Apy—毒砂;Ccp—黄铜矿;Gn—方铅矿;Mag—磁铁矿

Fig. 5 Mineral characteristics of different types of ores in the Laodonggou gold polymetallic deposit

a. Oxidized ore of ore body Ⅱ ; b. Vein sulfide ore of ore body Ⅱ ; c. Skarn zone of ore body Ⅲ (banded epidote, garnet); d. Overprinted early pyrite by late galena; e. Early arsenopyrite included within late arsenopyrite; f. Galena replaced by chalcopyrite, exhibiting a skeletal structure, with late quartz veins cutting through early galena; g. Coexistence of late garnet with pyrite; h. Synchronous folding of magnetite and pyrite; i. Late pyrite veins cutting through early pyrite of ore body Ⅲ

Qtz—Quartz; Grt—Garnet; Ep—Epidote; Py—Pyrite; Apy—Arsenopyrite; Ccp—Chalcopyrite; Gn—Galena; Mag—Magnetite

根据矿石矿物组合及相互穿插关系,老硐沟金多金属矿床成矿作用可划分为3期5个成矿阶段(图6):①早期矽卡岩阶段,主要有石榴子石、透辉石、透闪石等;②晚期矽卡岩阶段,生成的主要金属矿物为磁铁矿、黄铁矿、黄铜矿、辉铜矿等,脉石矿物为石榴子石、绿帘石、绿泥石、蛇纹石、石英、方解石等。围岩蚀变为矽卡岩化、绢云母化、蛇纹石化;③热液期石英-硫化物阶段,主要有黄铁矿、方铅矿、毒砂、闪锌矿、石英等;④热液期石英-硫化物-碳酸盐阶段,主要有黄铁矿、方铅矿、毒砂、黄铜矿、闪锌矿、石英、方解石等;⑤表生期氧化阶段,矿区自地表向下200~300 m范围内矿体均受到程度不同的氧化作用。金属矿物除金以稳定的状态存在外,其他多发生了一系列的次生蚀变,形成了赤铁矿、褐铁矿、黄钾铁钒、蓝铜矿、孔雀石和一系列砷酸盐矿物,如臭葱石、砷菱铅矾、菱砷铁矿、砷钙锌石、羟砷锌石(黄典豪等,1996)等。

金主要为微细粒自然金和含金自然银,自然金主要以包裹体形态产出于各矿物之间,其次为裂隙

金和晶隙金,矽卡岩型矿石和脉状硫化物矿石中主要的载金矿物为黄铁矿、毒砂等,氧化矿石中主要载金矿物为砷菱铅钒、菱砷铁矿、臭葱石等。

3 样品采集与测试

本次工作样品采集于老硐沟金多金属矿床井下不同中段代表性样品,硫、铅同位素样品选取了晚期矽卡岩成矿阶段和热液期石英-硫化物成矿阶段矿石样品。矽卡岩期样品采集于Ⅲ号矿体3中段的硫化物矿石,该期硫化物矿石中黄铁矿主要有2种产出形式:一种为与磁铁矿、晚期石榴子石共生的黄铁矿;另一种为后期热液期形成,可观察到穿插早期黄铁矿、交代早期磁铁矿、黝铜矿等现象(图5d~f)。本次实验选取的矽卡岩期黄铁矿为第一种与磁铁矿、晚期石榴子石共生的黄铁矿。热液期石英-硫化物阶段样品采集于Ⅱ号矿体7中段的硫化物矿石。碳、氧同位素样品选取的是热液期石英-硫化物-碳酸盐阶段Ⅱ号矿体7中段的热液方解石脉。

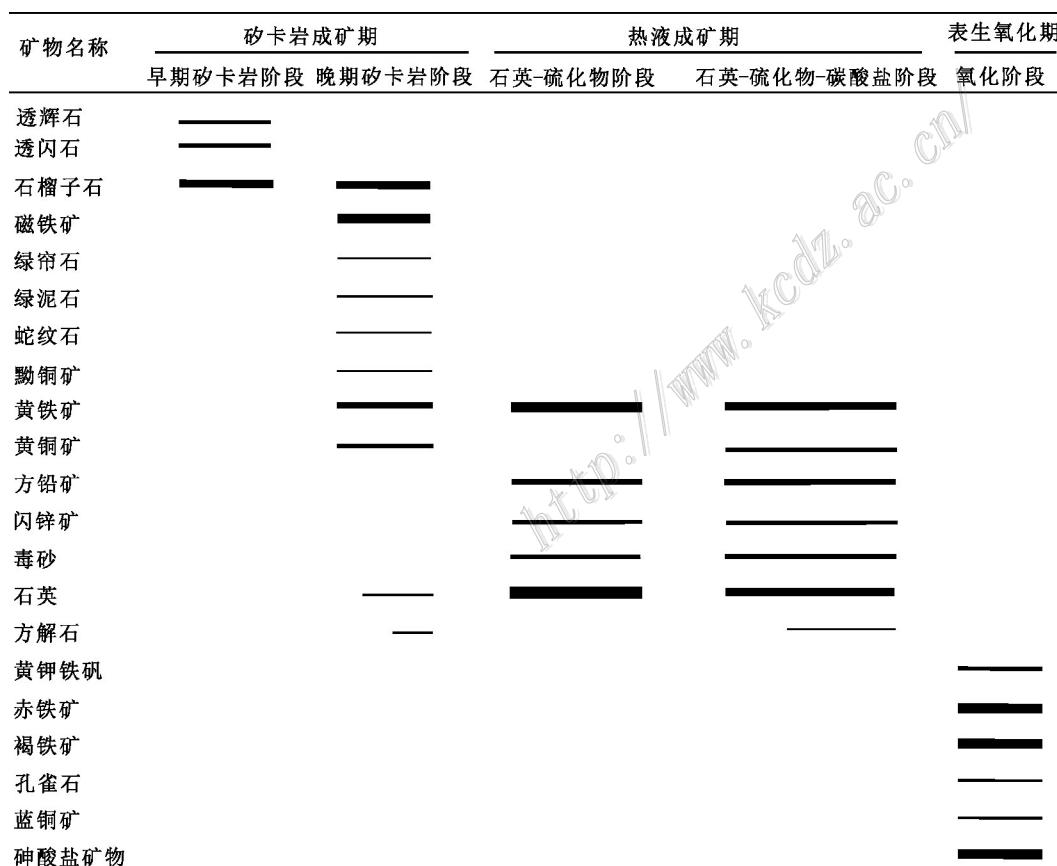


图6 老硐沟金多金属矿床矿物生成顺序图

Fig. 6 Mineral generation sequence of the Laodonggou gold polymetallic deposit

原位微区硫、铅同位素测试在西北大学大陆动力学国家重点实验室进行。测试采用激光剥蚀-多接收等离子体质谱(LA-MC-ICP-MS)分析方法,使用的质谱仪为英国Nu公司生产的Nu Plasma 1700高分辨率多接收等离子体质谱仪,激光剥蚀系统为澳大利亚ASI公司生产的Resonetics M50-LR准分子激光剥蚀系统,激光波长193 nm,脉宽20 ns。硫同位素样品剥蚀和数据采集时间为50 m,激光束斑为30~37 μm,剥蚀频率为3 Hz,激光能量密度为3.6 J/cm²。铅同位素质量分馏校正采用“标样-样品-标样”交叉法则(SSB)计算,同时测定²⁰²Hg及²⁰²Hg/²⁰⁴Hg=0.229883用于扣除²⁰⁴Hg对²⁰⁴Pb的干扰,获得准确的²⁰⁴Pb信号值,数据采集模式为TRA模式,激光束斑为30~37 μm,背景采集时间为30 s,样品积分时间为50 s。

碳、氧同位素挑选热液方解石单矿物,单矿物挑选在西安兆年矿物测试技术有限公司进行,分析测试在西北大学大陆动力学国家重点实验室进行。仪器设备为美国热电公司的Gas Bench,色谱柱规格为

25 m×0.32 mm,温度为70°C。称量约100 μg碳酸盐样品(200目)加入到12 ml反应瓶中,使用高纯氦气(99.999%,流速100 mL/min)进行600 s的排空处理。排空后加入5滴100%无水磷酸后置于72°C加热盘中反应并平衡。样品与磷酸反应且平衡后的CO₂气体经过70°C的色谱柱与其他杂质气体分离,进入到稳定气体同位素质谱仪进行测定。测试结果精度均高于0.1‰。

4 测试分析结果

4.1 S 同位素组成

老硐沟金多金属矿床4件样品15个测点进行了原位硫同位素分析,其中7个测点来自晚期矽卡岩成矿阶段,8个测点来自热液期石英-硫化物成矿阶段。从分析结果来看(表1),晚期矽卡岩成矿阶段黄铁矿δ³⁴S值为4.94‰~5.54‰,变化范围较小,平均5.23‰,极差0.19‰,暗示矽卡岩成矿阶段矿石硫同位素均一化程度较高。热液期石英-硫化物成矿阶

表1 老硐沟金多金属矿床和北山成矿带典型金矿硫同位素组成

Table 1 Sulfur isotope composition of Laodonggou gold polymetallic deposit and typical gold deposits in the Beishan metallogenic belt

矿床	样品号	测试矿物	δ ³⁴ S/‰	资料来源
老硐沟金多金属矿床矽卡岩成矿阶段	tz01-1	黄铁矿	5.54±0.21	本文
	tz01-2	黄铁矿	5.49±0.20	
	tz01-3	黄铁矿	5.47±0.21	
	tz01-4	黄铁矿	5.11±0.19	
	tz02-1	黄铁矿	4.94±0.21	
	tz02-2	黄铁矿	4.99±0.19	
	tz02-3	黄铁矿	5.04±0.16	
老硐沟金多金属矿床中低温热液成矿阶段	tz09-1	黄铜矿	2.80±0.36	本文
	tz09-1	黄铁矿	2.86±0.18	
	tz09-2	方铅矿	-0.56±0.43	
	tz09-3	毒砂	3.48±0.41	
	tz10-1	毒砂	3.97±0.37	
	tz10-1	黄铁矿	2.96±0.18	
	tz10-2	方铅矿	1.11±0.54	
	tz10-3	毒砂	4.21±0.20	
照壁山金矿		含金脉体黄铁矿	1.90~2.60	聂凤军等,2002
马庄山金矿		黄铁矿	4.50~6.30	李新俊等,2002
马庄山金矿		黄铁矿	5.50~7.20	江思宏等,2002
花生山金矿		黄铁矿、磁黄铁矿	-3.17~2.83	杜泽忠等,2021
小西弓金矿		毒砂、闪锌矿、方铅矿	3.34~8.39	李奋其等,2003
金窝子金矿		黄铁矿	6.00~7.50	张增杰等,2002

注:本文数据检测单位为西北大学大陆动力学国家重点实验室,测试方法为微区原位法。

表2 老硐沟金多金属矿床和北山成矿带典型金矿铅同位素组成

Table 2 Lead isotope composition of Laodonggou gold polymetallic deposit and typical gold deposits in the Beishan metallogenetic belt

矿床	样品号	测试矿物	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	μ	ω	Th/U	$\Delta\alpha$	$\Delta\beta$	$\Delta\gamma$	T_{SK}/Ma	资料来源
	TZ09-1	方铅矿	18.372	15.625	38.345	9.52	36.58	3.72	75.84	19.93	33.1	242	
	TZ09-2	方铅矿	18.367	15.622	38.340	9.51	36.56	3.72	75.55	19.73	32.96	240	
	TZ09-3	方铅矿	18.369	15.621	38.334	9.51	36.52	3.72	75.49	19.69	32.71	238	
	TZ09-4	方铅矿	18.369	15.624	38.331	9.51	36.53	3.72	75.75	19.86	32.76	242	
老硐	TZ09-5	方铅矿	18.368	15.622	38.325	9.51	36.49	3.71	75.55	19.73	32.53	239	
沟金	TZ09-6	方铅矿	18.369	15.624	38.331	9.52	36.53	3.71	75.75	19.87	32.76	243	
多金	TZ09-7	黄铁矿	18.326	15.563	38.226	9.4	35.77	3.68	69.82	15.71	28.03	147	本文
属矿	TZ10-1	方铅矿	18.373	15.621	38.347	9.51	36.55	3.72	75.43	19.64	32.9	233	
床	TZ10-2	方铅矿	18.373	15.620	38.348	9.51	36.54	3.72	75.44	19.61	32.92	232	
	TZ10-3	方铅矿	18.376	15.626	38.350	9.52	36.58	3.72	75.94	19.98	33.14	241	
	TZ10-4	方铅矿	18.373	15.629	38.350	9.53	36.64	3.72	76.31	20.24	33.46	251	
	TZ10-5	方铅矿	18.373	15.629	38.349	9.52	36.63	3.72	76.24	20.21	33.39	250	
	TZ10-6	方铅矿	18.390	15.645	38.390	9.55	36.85	3.73	77.83	21.28	34.84	270	
照壁山金矿		黄铁矿、黄铜矿	18.541~18.7647	15.574~15.657	38.241~38.805								聂凤军等,2002
马庄山金矿		黄铁矿、黄铜矿	17.896~18.449	15.256~15.760	37.076~38.711								李新俊等,2002
马庄山金矿		黄铁矿	18.301~18.465	15.546~15.620	38.128~39.031								江思宏等,2002
花生山金矿		黄铁矿	18.467~18.519	15.635~15.660	38.434~38.391								杜泽忠等,2021
金窝子金矿		黄铁矿、磁黄铁矿	17.778~18.688	15.488~15.731	38.156~38.971								张增杰等,2002

段样品中,除1件方铅矿样品 $\delta^{34}\text{S}$ 值为负值外,其余均为正值,其中毒砂 $\delta^{34}\text{S}$ 值为3.48‰~4.21‰,黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值为2.86‰~2.96‰,黄铜矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值为2.80‰,方铅矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值为-0.56‰~1.11‰;总体 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化范围为-0.56‰~4.21‰,平均2.60‰,极差0.33‰,变化范围不大,表明热液期石英-硫化物成矿阶段矿石硫同位素来源相对一致。

4.2 Pb同位素组成

对老硐沟金多金属矿床2件样品13个测点进行了原位铅同位素分析,测点选自热液期石英-硫化物成矿阶段方铅矿和黄铁矿。从表2中的分析结果来看,13件样品中 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为18.326~18.390,平均值为18.369; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为15.563~15.645,平均值为15.621; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为38.226~38.390,平均值为38.336。老硐沟金多金属矿床样品铅同位素 μ 值变化范围9.40~9.55,平均值9.51,其中方铅矿 μ 值集中在9.51~9.55; ω 值变化范围35.77~36.85,平均值36.52,其中方铅矿 ω 值集中在36.49~36.85;Th/U比值范围3.68~3.73,平均值3.72,其中方铅矿比值集中在3.71~3.73;方铅矿二阶段模式年龄232~270 Ma。

4.3 C,O同位素组成

老硐沟金多金属矿床5件热液方解石样品的

$\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 值变化范围为-0.04‰~2.93‰(表3),平均值为2.04‰,主要集中在2.10‰~2.93‰;热液方解石 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 值变化范围为11.27‰~19.01‰,平均值15.24‰。除样品C5-1外,老硐沟金多金属矿床热液方解石C、O同位素组成变化范围较窄,显示较为一致的物质来源。

5 讨论

5.1 硫的来源

研究与金成矿密切相关的金属硫化物的硫同位素,对于热液金矿床的成矿物质来源和成矿物质迁移具有良好的示踪效果(Ohmoto, 1986; Hoefs, 1997; 郑永飞, 2001; Yang et al., 2021)。热液中沉淀的硫化物硫同位素组成,受热液总硫同位素组成、氧逸度、pH、I、T等多种因素共同控制(Ohmoto, 1972; Rye et al., 1974)。黄铁矿、毒砂等金属硫化物作为老硐沟金多金属矿床的主要载金矿物,研究其硫源对于判断该矿床成矿物质来源至关重要。老硐沟金多金属矿床矿物组合中硫化物主要为黄铁矿、毒砂、方铅矿、黄铜矿、磁黄铁矿、闪锌矿等,尚未发现硫酸盐矿物。同一矿化阶段的硫化物中硫同位素组成具有 $\delta^{34}\text{S}_{\text{毒砂}}>\delta^{34}\text{S}_{\text{黄铁矿}}>\delta^{34}\text{S}_{\text{黄铜矿}}>\delta^{34}\text{S}_{\text{方铅矿}}$ 的特征,表明

表3 老硐沟金多金属矿床和金窝子金矿碳、氧同位素组成

Table 3 Carbon and oxygen isotope composition of Laodonggou gold polymetallic deposit and Jinwozi gold deposit

矿床	样品号	测试对象	$\delta^{13}\text{C}_{\text{V},\text{PDB}}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{V},\text{SMOW}}/\text{‰}$	资料来源
老硐沟金多金属矿床	C5-5	热液方解石	2.79	-12.35	18.18	
	C5-4	热液方解石	2.40	-14.13	16.34	
	C5-3	热液方解石	2.10	-18.03	12.32	本文
	C5-2	热液方解石	2.93	-11.55	19.01	
	C5-1	热液方解石	-0.04	-19.05	11.27	
金窝子金矿		石英流体包裹体	1.00~4.50		13.60~15.10	张增杰等, 2002

注:本文数据检测单位为西北大学大陆动力学国家重点实验室, 测试精度为 $\pm 0.2\text{‰}$ 。

该矿床硫同位素分馏达到平衡状态, 可以使用热液期的硫同位素组成代替成矿热液的硫同位素组成(Ohmoto, 1972)。

自然界矿床中硫的来源主要有幔源硫、地层硫和混合硫3类(Hoefs, 1997; 郑永飞, 2001):幔源硫主要为岩浆热液携带的硫和从岩浆岩中萃取的硫, 其 $\delta^{34}\text{S}$ 值一般为 $-5\text{‰} \sim +5\text{‰}$ (多数为 $-3\text{‰} \sim +3\text{‰}$), 并呈塔式分布于零值附近;地层硫的来源均来自于海水硫酸盐, 其 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化范围很大, 且多为负值;混合硫因混染物质不同, 表现出的硫同位素组成也会不同, 正负值变化范围较大。

老硐沟金多金属矿床晚期矽卡岩成矿阶段 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $4.94\text{‰} \sim 5.54\text{‰}$, 均一程度较高(图7);热液期石英-硫化物成矿阶段 $\delta^{34}\text{S}$ 值 $-0.56\text{‰} \sim 4.21\text{‰}$, 并呈现塔式分布的特征(图7), 暗示了老硐沟金多金属矿床中金属硫化物的硫主要来源于岩浆。对比北山成矿带内其他金矿硫同位素组成(图8), 照壁山金矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值

值 $1.90\text{‰} \sim 2.60\text{‰}$ 、马庄山金矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值 $4.50\text{‰} \sim 7.20\text{‰}$ 、花牛山金矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值 $-3.17\text{‰} \sim 2.83\text{‰}$ 、小西弓金矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值 $3.34\text{‰} \sim 8.39\text{‰}$ 、金窝子金矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值 $6.00\text{‰} \sim 7.50\text{‰}$, 显示北山成矿带中大部分金矿床中的硫均主要来自于岩浆, 区域岩浆活动与金及多金属成矿关系极为密切。

5.2 铅的来源

热液中沉淀的金属硫化物U、Th含量极低, 且在铅的萃取、运移过程中因物理、化学条件变化而引起的铅同位素组成变化极小, 因此矿石中的铅同位素常被用于示踪成矿物质来源(Macfarlane et al., 1990; Chiaradia et al., 2004)。依据Stacey等(1975)提出的两阶段演化模式计算的铅同位素特征参数值被认为可以有效指示热液矿床成矿物质来源, 其中高 μ 值(9.58)铅一般来自于上地壳, 低 μ 值(8.92)、低 ω 值(31.844)的铅来自于上地幔, 而低 μ 值、高 ω 值(41.860)的铅被认为是典型的下地壳来源(Doe et al., 1974; Stacey et al., 1975)。

老硐沟金多金属矿床方铅矿S-K两阶段演化模式计算的特征参数值表可以看出, μ 值 $9.40 \sim 9.55$, 比较集中, 且均小于9.58; ω 值 $35.77 \sim 36.85$, 介于上地壳与地幔之间。说明老硐沟金多金属矿床金属硫化物中铅的来源混合了地幔和上地壳的物质。

根据Zartman等(1981)提出的构造演化模式, 老硐沟金多金属矿床铅同位素投点均落在造山带附近, 并表现出上地壳和地幔混染的特点(图9a、b)。同时从图9中也可以看出老硐沟金多金属矿床铅同位素投点具有高斜率正相关线性分布的特征, 因 μ 值较为集中, 可以排除系统误差的影响, 因此该特征也暗示了老硐沟金多金属矿床铅来源的混染作用(Franklin et al., 1983; Andrew et al., 1984)。在构造环境判别图解(图10)中, 老硐沟金多金属矿床铅同位素(图11)投点均落在了造山带区域, 在朱炳泉

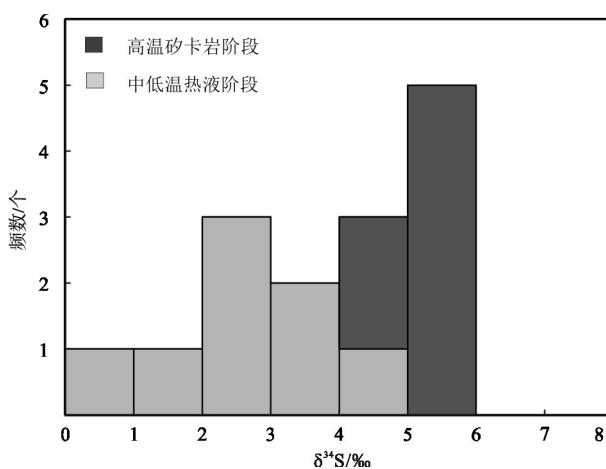


图7 老硐沟金多金属矿床硫同位素直方图

Figure 7 Sulfur isotope histogram of Laodonggou gold polymetallic deposit

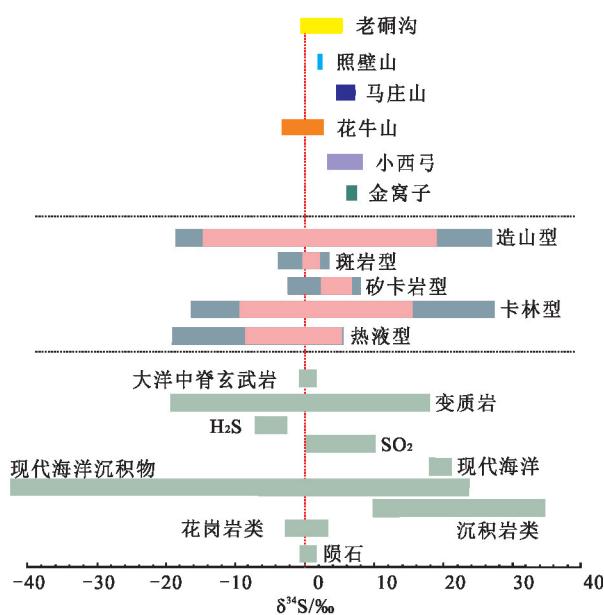


图8 北山成矿带典型金矿床硫同位素组成对比图(底图据 Deng et al., 2016修改)

Fig. 8 Comparison of sulfur isotope composition of typical gold deposits in the Beishan metallogenic belt (base map modified by Deng et al., 2016)

(1998)提出的 $\Delta\gamma-\Delta\beta$ 成因分类图解中,老硐沟金多金属矿床铅同位素投点均落在了上地壳与地幔混合

的俯冲带(岩浆作用)区域,从而也进一步证明了老硐沟金多金属矿床铅来源于与岩浆作用有关的壳幔混合作用。

5.3 碳的来源

热液方解石作为金矿床的重要脉石矿物,研究其C、O同位素组成对于示踪流体中CO₂的来源具有重要的指示意义,热液流体中碳的来源主要有以下3类:①岩浆来源或深源, $\delta^{13}\text{C}$ -9‰~+2‰(Taylor, 1986);②沉积有机质来源, $\delta^{13}\text{C}$ -30‰~-15‰(Ohmoto, 1972);③碳酸盐岩来源,海相碳酸盐岩-2‰~+4‰,陆相灰岩因有有机质的加入,通常低于海相碳酸盐岩,为 $\delta^{13}\text{C}$ -2‰~-10‰(Veizer et al., 1976; 1999)。

老硐沟金多金属矿床热液方解石 $\delta^{13}\text{C}$ 值介于-0.04‰~2.93‰,与海相碳酸盐岩来源碳同位素值一致(图12),区域上的金窝子金矿床含金石英脉中流体包裹体C-O同位素组成与老硐沟金多金属矿床具有较好的一致性(张增杰等,2002)。在 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}-\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 图解(图13)中,老硐沟金多金属矿床样品点落于碳酸盐溶解作用和沉积岩混染/高温效应区域,暗示了其晚阶段(石英-硫化物-碳酸盐阶段)成矿流体中的CO₂来源具有多源混染的特点,并非是单一方面的来源。结合S同位素特征,表明岩浆上侵过

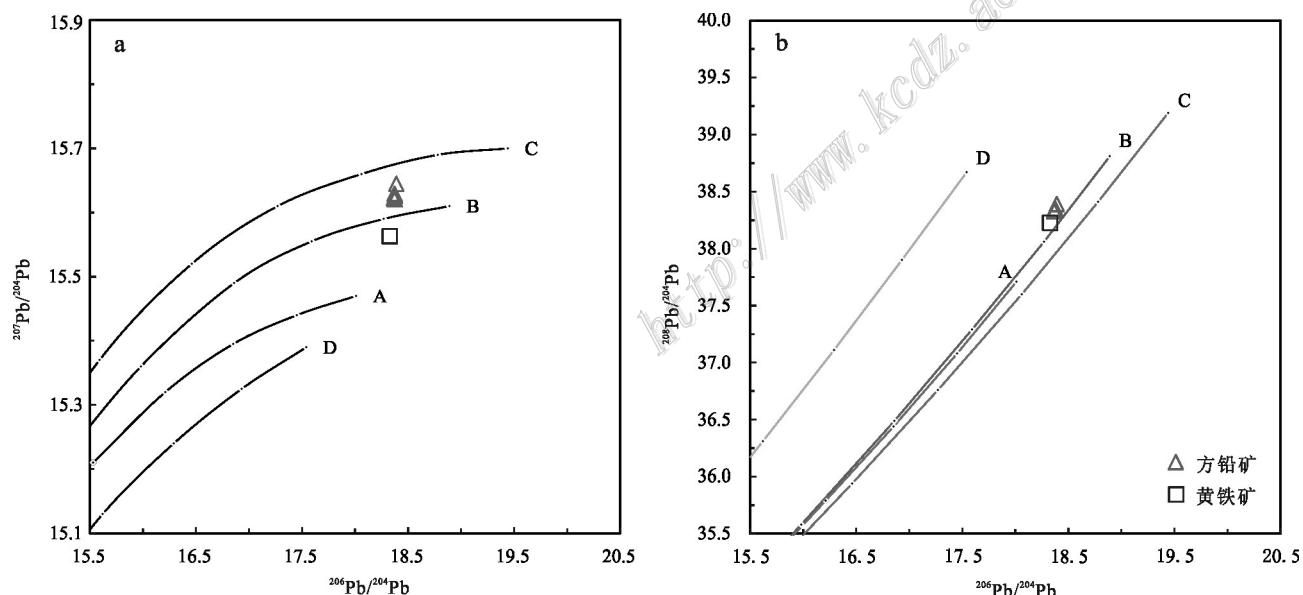


图9 老硐沟金多金属矿床铅同位素构造演化模式图(a,b,底图据 Zartman et al., 1981)

A—地幔;B—造山带;C—上地壳;D—下地壳

Fig. 9 Lead isotope tectonic evolution model of Laodonggou gold polymetallic deposit(a, b, base map modified by Zartman et al., 1981)
A—Mantle; B—Orogen; C—Upper crust; D—Lower crust

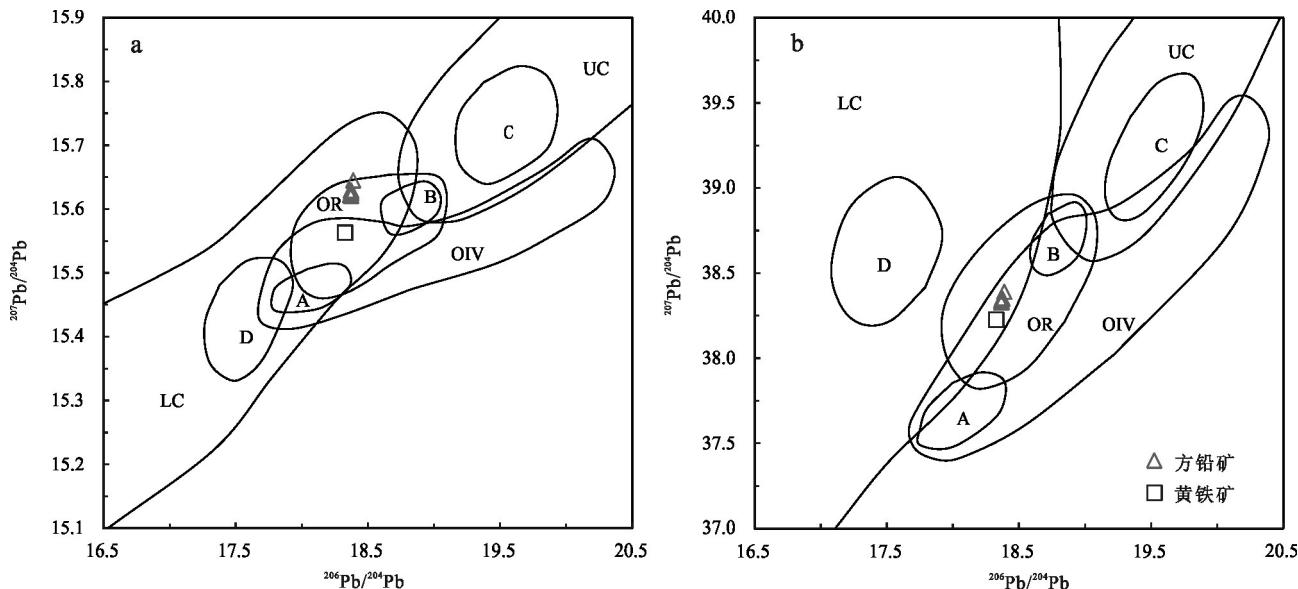


图10 老硐沟金多金属矿床铅同位素组成构造环境判别图解(底图据Zartman et al., 1981)

LC—下地壳;UC—上地壳;OIV—洋岛火山岩;OR—造山带;A、B、C、D各区域中样品相对集中区

Fig. 10 Discrimination diagram of lead isotope composition and tectonic environment in Laodonggou gold polymetallic deposit
(base map modified by Zartman et al., 1981)

LC—Lower crust; UC—Upper crust; OIV—Oceanic island volcanic rocks; OR—Orogenic belt; A, B, C, D are relative concentration areas of samples

程中因高温造成的赋矿围岩平头山组白云石大理岩的溶解和下伏古硐井群变质砂岩的高温对晚阶段流体中的CO₂产生混染。

5.4 成因机制浅析

老硐沟金多金属矿床成矿物质来源均表现出幔壳混合的多源性特征,硫同位素组成显示硫主要来源于岩浆,铅同位素构造演化模式图(图9a、b)、铅同位素构造环境判别图解(图10a、b)显示铅具有造山带和上地壳混合来源特征,铅同位素 $\Delta\gamma-\Delta\beta$ 图解(图11)显示,铅主要为上地壳与地幔混合的俯冲带内的岩浆作用产物,碳、氧同位素组成指示了赋矿围岩海相碳酸盐岩对于成矿物质的贡献。结合老硐沟金多金属矿床硫、铅、碳、氧同位素特征,笔者认为其成矿物质具有深部岩浆和地层围岩混合来源的性质,成矿流体以岩浆来源为主,成矿晚期流体中混入了变质水。

从野外调查和以往勘查工作经验判断,老硐沟金多金属矿床金成矿与矿区广泛发育的闪长玢岩脉关系较为密切:一方面矿体的产出空间位置与闪长玢岩脉密切相伴(图3,图4a、b),另一方面闪长玢岩脉内也发育有金、铜矿化(图4a、b);张国震等(2021)通过对矿区闪长玢岩开展锆石原位微区同

位素测年,限定老硐沟金多金属矿床成矿时代为243.0 Ma。本文获得的铅同位素二阶段模式年龄为232~270 Ma,同样指示了其成矿时代为三叠纪。辛厚田等(2020)研究提出北山造山带内蒙古段造山活动结束时间为中二叠世,表明老硐沟金多金属矿床成矿时代与北山造山活动结束时间不匹配,并非造山期产物。北山造山带在三叠纪进入了板内演化阶段,受三叠纪区域构造-岩浆活动影响,造山期间形成的月牙山-老硐沟脆-韧性剪切带进一步活化,造山带内物质被含矿热液萃取,并进一步迁移、沉淀成矿,从而造成了老硐沟金多金属矿床铅同位素组成具有造山带铅来源特征的现象。

在成矿作用早期,成矿作用以矽卡岩化为主,在岩体与白云石大理岩接触带内形成了矽卡岩型铁铜多金属矿体,后期由岩浆热液和变质热液混合的富含金、银、铅等成矿物质的成矿流体沿断裂构造运移,一方面对早期形成的矽卡岩型矿体进行改造、再富集,另一方面在断裂构造膨大、交汇部等有利空间沉淀成矿,形成热液脉型金铅银多金属矿体。

基于以上特点,结合前人对北山造山带的研究成果及本文S-Pb同位素、C-O同位素对成矿物质来源的指示,笔者认为老硐沟金多金属矿床成因为岩浆热液型。

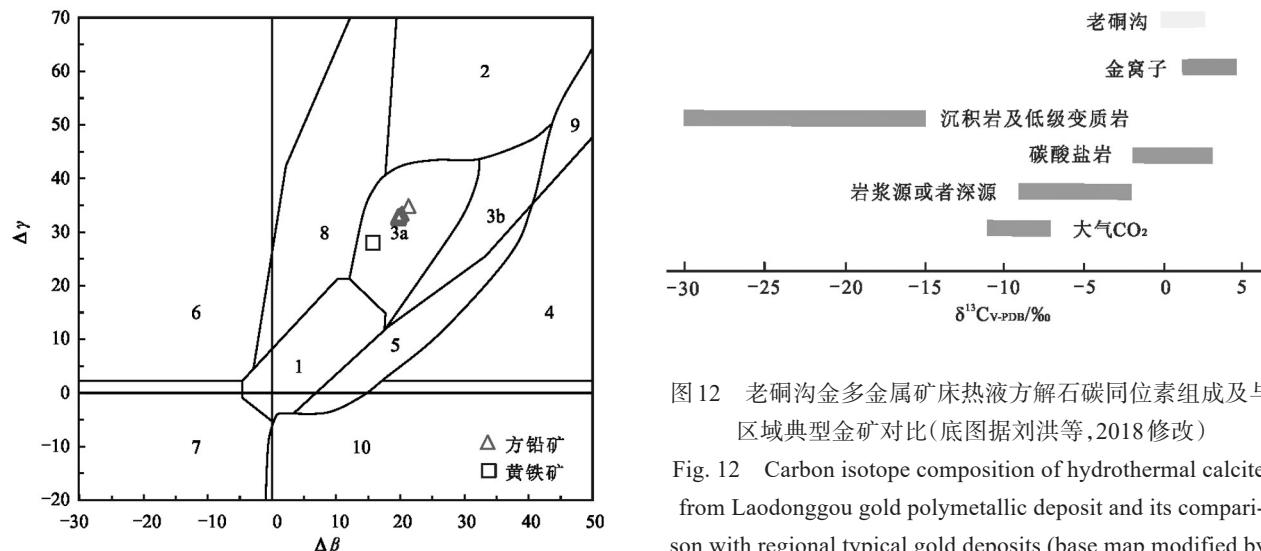


图11 老硐沟金多金属矿床铅同位素 $\Delta\gamma$ - $\Delta\beta$ 图解(底图据朱炳泉,1998)

1—地幔源铅;2—上地壳铅;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—退变质铅

Fig. 1 Lead isotope $\Delta\gamma$ - $\Delta\beta$ diagram of Laodonggou gold polymetallic deposit (base map modified by Zhu et al., 1998)
 1—Mantle-derived lead; 2—Upper crustal lead; 3—Upper crust-mantle mixed subduction zone lead (3a—Magmatic process; 3b—Sedimentary process); 4—Chemical sedimentary lead; 5—Hydrothermal lead from seafloor processes; 6—Lead from medium to deep metamorphic processes; 7—Lower crustal lead from deep metamorphic processes;
 8—Orogenic belt lead; 9—Ancient shale upper crustal lead;
 10—Retrograde metamorphic lead

图12 老硐沟金多金属矿床热液方解石碳同位素组成及与区域典型金矿对比(底图据刘洪等,2018修改)

Fig. 12 Carbon isotope composition of hydrothermal calcite from Laodonggou gold polymetallic deposit and its comparison with regional typical gold deposits (base map modified by Liu Hong et al., 2018)

6 结 论

(1) 老硐沟金多金属矿床矿石 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $-0.56\text{\textperthousand}$ ~ $5.54\text{\textperthousand}$, 均一定程度较高, 并呈塔式分布, 表明该矿床硫同位素主要来源于深部岩浆。

(2) 老硐沟金多金属矿床铅来源具有上地壳和地幔物质混染的现象, 构造环境判别图解投点均落入造山带区域, $\Delta\gamma$ - $\Delta\beta$ 成因分类图解中投点均落入上地壳与地幔混合的俯冲带(岩浆作用)区域, 说明老硐沟金多金属矿床铅来源于与岩浆作用有关的壳

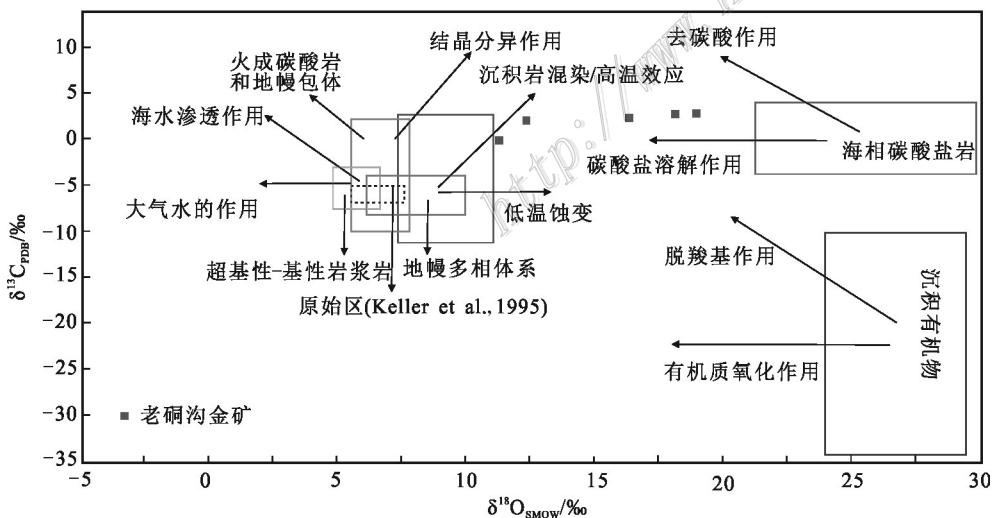


图13 老硐沟金多金属矿床热液方解石 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ - $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 图解(底图据刘家军等,2004修改)

Fig. 13 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ - $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ diagram of the hydrothermal calcite from Laodonggou gold polymetallic deposit(base map modified by Liu et al., 2018)

幔混合作用。

(3) 老硐沟金多金属矿床 $\delta^{13}\text{C}$ 值 $-0.04\text{\textperthousand}$ $~2.93\text{\textperthousand}$, 与赋矿围岩平头山组海相碳酸盐岩来源碳同位素特征一致, $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}-\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 图解显示, 老硐沟金多金属矿床晚期成矿流体中的 CO_2 并非单一来源, 得到了岩浆上侵过程中因高温造成的赋矿围岩平头山组白云石大理岩的溶解和下伏古硐井群变质砂岩的高温混染。

(4) 综合老硐沟金多金属矿床硫、铅、碳、氧同位素特征, 认为其成矿物质具有深部岩浆和地层围岩混合来源的性质, 成矿流体以岩浆来源为主, 成矿晚期流体中混入了地层变质水。结合前人对于北山造山带构造演化历史的研究、老硐沟金多金属矿成矿地质特征及矿床稳定同位素特征, 认为其成因类型为岩浆热液型。

致谢 感谢圆通矿业有限责任公司何毅总经理、杨冰、常成文等人在野外工作中给予的大力支持和帮助。感谢评审专家对本文提出的宝贵意见和建议。

References

- Andrew A, Godwin C I and Sinclair A J. 1984. Mixing line isochrons: A new interpretation of galena lead isotope data from southeastern British Columbia[J]. *Economic Geology*, 79(5): 919-932.
- Chiaradia M, Fontbote L and Paladines A. 2004. Metal sources in mineral deposits and crustal rocks of Ecuador: A lead isotope synthesis[J]. *Economic Geology*, 99(6): 1085-1106.
- Deng J and Wang Q F. 2016. Gold depositralization in China: Metallogenetic provinces, deposit types and tectonic framework[J]. *Gondwana Research*, 36: 219-274.
- Ding J X, Han C M, Xiao W J, Wang Z M and Yang X M. 2015. Geochemistry and U-Pb geochronology of tungsten deposit of Huaniushan island arc in the Beishan orogenic belt, and its geodynamic background[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(2): 594-616(in Chinese with English abstract).
- Doe B R and Stacey J S. 1974. The application of lead isotopes to the problems of ore genesis and ore prospect evaluation: A review[J]. *Economic Geology*, 69(6): 757-776.
- Du Z Z, Yu X F, Sun H R, Du Y L and Kang K. 2021. Genesis of the Huaniushan Pb-Zn-Ag deposit in Gansu: Constraints from in situ S, Pb isotopes and trace elements[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 37 (6): 1813-1829(in Chinese with English abstract).
- Franklin J M, Roscoe S M, Loveridge W D and Sangster D F. 1983. Lead isotope studies in superior and southern province[J]. *Geological Survey of Canada, Bulletin*, 351: 1-35.
- Hoefs J. 1997. *Stable isotope geochemistry*[M]. Berlin: Springer Verlag, 199-201.
- Huang D H, Wang B L, Wu C Y and Wang L B. 1996. Austinite and adamite discovered for the first time in China and their significance[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 15(3): 259-268(in Chinese with English abstract).
- Huang D H and Wang B L. 1997. Ore forming characteristics of Laodonggou oxidized leached type gold deposit in Ejinaqi[J]. *Geology and Resources*, 6(2): 93-100(in Chinese).
- Jiang S H, Ni F J and Liu Y. 2002. Sulfur and lead isotopic features of the Mazhuangshan gold deposit in Hami district, Xinjiang, China[J]. *Mineral Deposits*, 21(Supp.): 970-973(in Chinese with English abstract).
- Liu H, Li G M, Huang H X, Xiao W F, Yan G Q, Ma D F, Zhang H and Zhang H. 2018. Sources of ore-forming materials in the Shangxu orogenic gold deposit, northern Xizang (Tibet): Constraints from C, S, and Pb isotopes[J]. *Geological Review*, 64(5): 1285-1300(in Chinese with English abstract).
- Liu J J, He M Q and Li Z M. 2004. Oxygen and carbon isotopic geochemistry of Baiyangping silver-copper polymetallic ore concentration area in Lanping basin of Yunnan Province and its significance [J]. *Mineral Deposits*, 23(1): 1-10(in Chinese with English abstract).
- Li M, Xin H T, Tian J, Meng X F, Pang Z L, Chen C and Liang G Q. 2020. Composition, age and polarity of Gongpoquan arc and its tectonic significance in Beishan orogen[J]. *Earth Science*, 45(7): 2393-2412(in Chinese with English abstract).
- Li X J and Liu W. 2002. Fluid inclusion and stable isotope constraints on the genesis of the Mazhuangshan gold deposit, eastern Tianshan Mountains of China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 18(4): 551-558(in Chinese with English abstract).
- Li F Q and Wang C S. 2003. Geological-geochemical features and genesis of Xiaoxigong gold deposit in Gansu[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 23(1): 65-69(in Chinese with English abstract).
- Macfarlane A W, Marcket O, Lehurst A P and Petersen U. 1990. Lead isotope province of the Central Andes inferred from ores and crustal rocks[J]. *Economic Geology*, 85(8): 1857-1880.
- Nie F J, Jiang S H, Zhao S M, Bai D M, Li Q Z and Guo X D. 2002. Geological features and origin of the Zhaobishan gold deposits in Beishan region, Northwest China[J]. *Chinese Journal of Geology*, 37(2): 207-218(in Chinese with English abstract).
- Ohmoto H. 1972. Systematics of sulfur and carbon isotopes in hydrothermal deposits[J]. *Economic Geology*, 67: 551-578.
- Ohmoto H. 1986. Stable isotope geochemistry of ore deposits[J]. *Reviews in Depository*, 16(1): 491-559.
- Qian J P, Fu Y J, Zhou Y N, Li J Q, Chang D C, Li F H, Wei Z Y and Su T. 2018. Analysis of the metallogenetic structure system and the regularities of tectonic ore control of the Laodonggou gold polymetallic mining area, Ejinaqi, Inner Mongolia[J]. *Geotectonica et Metallogenesis*, 42(6): 1046-1063(in Chinese with English abstract).

- stract).
- Rye R O and Ohmoto H. 1974. Sulfur and carbon isotope and ore genesis: A review[J]. *Economic Geology*, 69: 826-842.
- Stacey J S and Kramers J D. 1975. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 26(2): 207-221.
- Tang W D, He J L, Liu T H, Wei L Y, Fan B C, Zhao F D, He Y, Guo Y C and Yang B. 2023. Geochemical characteristics of the garnets from the Laodonggou gold deposit, Beishan, Inner Mongolia[J]. *Journal of Geomechanics*, 29(1): 60-75(in Chinese with English abstract).
- Taylor. 1986. Magmatic volatiles: Isotope variation of C, H and S[J]. *Reviews in Depositzrology and Geochemistry*, 16: 185-225.
- Tian J, Xin H T, Teng X J, Li M, Liao Q A, Zhang Y and Ren B F. 2023. Petrogenesis and tectonic implications of the Late Silurian-early Devonian bimodal intrusive rocks in the central Beishan orogenic belt, NW China: Constraints by petrology, geochemistry and Hf isotope[J]. *Journal of Earth Science*, 34(2):431-443.
- Tian Z H, Xiao W J, Shan Y H, Windley B, Han C M, Zhang J E and Song D F. 2013. Mega-fold interference patterns in the Beishan orogen (NW China) created by change in plate configuration during Permo-Triassic termination of the Altaids[J]. *Journal of Structural Geology*, 52: 119-135.
- Veizer J, Ala D, Azmy K, Bruckschen P, Buhl D, Bruhn F, Carden G A F, Diener A, Ebneth S, Godderis Y, Jasper T, Korte C, Pawellek F, Podlaha O G and Strauss H. 1999. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $\Delta^{13}\text{C}$ and $\Delta^{18}\text{O}$ evolution of Phanerozoic seawater[J]. *Chemical Geology*, 161: 59-88.
- Veizer J and Hoefs J. 1976. Nature of $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ and $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ secular trends in sedimentary carbonate rocks[J]. *Geochemica et Cosmochimica Acta*, 40: 1387-1395.
- Xin H T, Niu W C, Tian J, Teng X J and Duan X L. 2020. Spatio-temporal structure of Beishan orogenic belt and evolution of Paleo-Asian Ocean, Inner Mongolia[J]. *Geological Bulletin of China*, 39 (9): 1297-1316(in Chinese with English abstract).
- Yang F, Pang X J, Li B, Chen J S, Han J L, Liu M, Yang Z Z, Wang Y and Shi Y. 2021. Geological, fluid inclusion, H-O-S-Pb isotope constraints on the genesis of the Erdaogou gold deposit, Liaoning Province[J]. *Journal of Earth Science*, 32(1): 103-115.
- Yang H Q, Li Y, Yang J G, Li W M, Yang L H, Zhao G B, Ye D J, Zhao Y Q, Zhao J G, Shen C L, Wang X L and Su M X. 2006. Main metallogenetic characteristics in the Beishan orogen[J]. *Northwestern Geology*, 39(2): 78-95(in Chinese with English abstract).
- Yang H Q, Zhao G B, Li W M, Yang J G, Li Y, Wang X H, Jiang H B and Tan W J. 2010. Formation age and source tracing of the tungsten-bearing granite belt in the Pantuoshan-Yingzuihongshan area, Inner Mongolia[J]. *Geology and Prospecting*. 46(3): 407-413(in Chinese with English abstract).
- Yu W S, Liao C X and Chen G. 2013. Analysis of the genetic types and prospect of Laodonggou gold deposit in Inner Mongolia[J]. *Gold Science and Technology*, 21(2): 24-27(in Chinese with English abstract).
- Zartman R E and Doe B R. 1981. Plumbotectonics—The model[J]. *Tectonophysics*, 75: 135-162.
- Zhang G Z, Zhang Y, Xin H T, Huang C, Niu W C, Duan L F, Zhao Z L and Ren B F. 2021. Geochronology and geochemistry of diorite porphyrite from Laodonggou gold-polymetallic deposit, Beishan, Inner Mongolia, and its metallogenetic significance[J]. *Mineral Deposits*, 40(3): 555-573(in Chinese with English abstract).
- Zhang S M, Wang G H, Zhao S B, Li H J, Liang X Q, Hu E H, Liu R Q, Zhang K and Wang Y F. 2022. The main magmatic-thermodynamic structures and their controls on ore formation in Beishan, Inner Mongolia[J]. *Geotectonica et Metallogenesis*, 46(4): 691-709 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Z J, Chen Y J, Chen H Y and Bao J X. 2002. Isotope geochemistry of the Jinwozi gold deposit, Hami, Xinjiang[J]. *Geological Review*, 48(Suppl):240-244(in Chinese with English abstract).
- Zhao G B, Li W M, Yang H Q, Tian Y T, Quan S C, Qiao G B, Lei Y X, Du T, Gao Y W, Yang T and Feng B. 2010. Discussion on metallogenetic characteristics and genesis of Guoqing tungsten deposit in Beishan, Inner Mongolia[J]. *Mineral Deposits*, 29(S1): 341-342(in Chinese).
- Zhao P B, Li W C, Luo Q Z, Peng H L, Li Y, Li W J and Zhang S H. 2019. Formation age and tectonic environment of Yingzuihongshan granite in Beishan, Inner Mongolia[J]. *Northwestern Geology*, 52(4): 1-13(in Chinese with English abstract).
- Zheng Y F. 2001. Theoretical modeling of stable isotope systems and its applications to geochemistry of hydrothermal ore deposits[J]. *Mineral Deposits*, 20(1): 57-85(in Chinese with English abstract).
- Zhu B Q. 1998. The theory and application of isotope system in geoscience: Concurrently on the evolution of crust and mantle in Chinese mainland[M]. Beijing: China Science Publishing. 216-230(in Chinese).
- Zuo G C, Zhang S L, He G Q and Zhang Y. 1990. Early Paleozoic plate tectonics in Beishan area[J]. *Chinese Journal of Geology*, 25 (4): 305-314(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 丁嘉鑫, 韩春明, 肖文交, 王忠梅, 杨晓梅. 2015. 北山造山带花牛山岛弧东段钨矿床成矿时代和成矿动力学过程[J]. *岩石学报*, 31 (2): 594-616.
- 杜泽忠, 于晓飞, 孙海瑞, 杜轶伦, 康凯. 2021. 甘肃花牛山铅锌银矿床成因: 来自原位 S、Pb 同位素及微量元素的约束[J]. *岩石学报*, 37(6):1813-1829.
- 黄典豪, 王宝林, 吴澄宇, 王立本. 1996. 我国首次发现的砷钙锌石和羟砷锌石的矿物学特征及其意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 15(3): 259-268.
- 黄典豪, 王宝林. 1997. 额济纳旗老硐沟氧化-淋滤型金矿床成矿特征[J]. *贵金属地质*, 6(2): 93-100.
- 江思宏, 聂凤军, 刘妍. 2002. 新疆哈密马庄山金矿床的硫和铅同位素特征[J]. *矿床地质*, 21(Suppl):970-973.

- 刘洪, 李光明, 黄瀚霄, 肖万峰, 闫国强, 马东方, 张海, 张红. 2018. 藏北商旭造山型金矿床成矿物质来源探讨: C、S、Pb 同位素证据[J]. 地质论评, 64(5): 1285-1300.
- 刘家军, 何明勤, 李志明. 2004. 云南白秋坪银铜多金属矿集区碳氧同位素组成及其意义[J]. 矿床地质, 23(1): 1-10.
- 李敏, 辛后田, 田健, 孟宪锋, 潘志龙, 陈超, 梁国庆. 2020. 北山造山带公婆泉岩浆弧的组成、时代及其大地构造意义[J]. 地球科学, 45(7): 2393-2412.
- 李新俊, 刘伟. 2002. 东天山马庄山金矿床流体包裹体和同位素地球化学研究及其对矿床成因的制约[J]. 岩石学报, 18(4): 551-558.
- 李奋其, 王成善. 2003. 甘肃小西弓金矿地质地球化学特征及成因探讨[J]. 矿物岩石, 23(1): 65-69.
- 聂凤军, 江思宏, 赵省民, 白大明, 李强之, 郭晓东. 2002. 北山地区照壁山金矿床地质特征及成因[J]. 地质科学, 37(2): 207-218.
- 钱建平, 符有江, 周永宁, 李佳奇, 常德才, 李风豪, 韦振兆, 苏特. 2018. 内蒙古额济纳旗老硐沟金多金属矿区成矿构造系统解析和构造控矿规律[J]. 大地构造与成矿学, 42(6): 1046-1063.
- 唐卫东, 何佳乐, 刘航, 魏立勇, 范堡程, 赵福东, 何毅, 郭永超, 杨冰. 2023. 内蒙古北山老硐沟金矿床石榴子石地球化学特征[J]. 地质力学学报, 29(1): 60-75.
- 辛后田, 牛文超, 田健, 滕学建, 段霄龙. 2020. 内蒙古北山造山带时空结构与古亚洲洋演化[J]. 地质通报, 39(9): 1297-1316.
- 杨合群, 李英, 杨建国, 李文明, 杨林海, 赵国斌, 叶得金, 赵彦青, 赵建国, 沈存利, 王新亮, 苏新旭. 2006. 北山造山带的基本成矿特征[J]. 西北地质, 39(2): 78-95.
- 杨合群, 赵国斌, 李文明, 杨建国, 李英, 王小红, 姜寒冰, 谭文娟. 2010. 内蒙古盘陀山—鹰嘴红山含钨花岗岩带形成时代及源区示踪[J]. 地质与勘探, 46(3): 407-413.
- 于文松, 廖昌溪, 陈果. 2013. 内蒙古老硐沟金矿床成因类型与找矿前景分析[J]. 黄金科学技术, 21(2): 24-27.
- 张国震, 张永, 辛后田, 黄成, 牛文超, 段连峰, 赵泽霖, 任邦方. 2021. 内蒙古北山老硐沟金多金属矿床闪长玢岩年代学、地球化学及其成矿意义[J]. 矿床地质, 40(3): 555-573.
- 张善明, 王根厚, 赵士宝, 李海军, 梁新强, 胡二红, 刘瑞钦, 张克俭, 王跃飞. 2022. 北山内蒙地区主要岩浆-热力构造类型及控矿作用分析[J]. 大地构造与成矿学, 46(4): 691-709.
- 张增杰, 陈衍景, 陈华勇, 鲍景新. 2002. 哈密金窝子金矿床同位素地球化学研究[J]. 地质评论, 48(增): 240-244.
- 赵国斌, 李文明, 杨合群, 田永堂, 全守村, 乔耿彪, 雷永孝, 杜涛, 高永伟, 杨涛, 冯斌. 2010. 内蒙北山国庆钨矿床成矿特征与成因探讨[J]. 矿床地质, 29(S1): 341-342.
- 赵鹏彬, 李维成, 罗乾周, 彭海练, 李毅, 李武杰, 张栓厚. 2019. 内蒙古北山鹰嘴红山花岗岩体形成时代及构造环境分析[J]. 西北地质, 52(4): 1-13.
- 郑永飞. 2001. 稳定同位素体系理论模式及其矿床地球化学应用[J]. 矿床地质, 20(1): 57-85.
- 朱炳泉. 1998. 地球科学中同位素体系理论与应用: 兼论中国大陆壳幔演化[M]. 北京: 科学出版社. 216-230.
- 左国朝, 张淑玲, 何国琦, 张扬. 1990. 北山地区早古生代板块构造特征[J]. 地质科学, 25(4): 305-314.