

文章编号:0258-7106 (2001) 02-0163-11

小秦岭地区文峪和东闯石英脉型 金矿床铅及硫同位素研究

聂凤军 江思宏

赵月明

(中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037)

(内蒙古地质调查院, 呼和浩特市 010020)

提 要 小秦岭地区文峪和东闯金矿床均是华北地台南缘的大型金矿床, 金和金(铅)矿化主要在太古宙太华群变质岩层内呈脉状产出, 并且同中生代燕山期花岗岩类具密切的时空分布关系。文章对文峪金矿床、东闯金(铅)矿床、花岗岩类侵入岩和变质岩地层的硫和铅同位素组成进行了系统研究, 对不同地质体的硫和铅同位素变化特征进行了详细讨论。研究结果表明: 中生代花岗岩体起源于太古宙变质岩的重熔和岩浆结晶分异作用。金的成矿作用发生在中生代燕山期, 成矿物质主要来自花岗岩类侵入岩, 岩浆热流体对太古宙变质岩地层的淋滤作用亦为金矿床的形成提供了部分物质来源。

主题词 小秦岭 文峪金矿床 东闯金(铅)矿床 硫和铅同位素 矿床成因

中图法分类号: P618.51; P597+.2 **文献标识码:** A

小秦岭金矿田位于豫陕交界处的灵宝和潼关一带, 是我国第二大岩金产地, 其年产量仅次于胶东金矿田。在平面上, 小秦岭金矿田呈东西向延长的眼球状, 东西长约 40~60 km, 南北宽约 6~8 km, 分布面积约 500 km² (图 1)。尽管本区黄金开采历史可追溯至 1451 年, 但是较系统的黄金地质科研和找矿勘查工作始于 20 世纪 50 年代初期。迄今为止, 已发现各种规模的含金石英脉约 1 000 余条, 探明金矿床 40 余处, 其中特大型金矿床 2 处(文峪和东闯), 大、中型矿床多处(如四范沟、金铜岔、东桐峪、大湖、竹峪、抢马峪、和尚峪、樊家岔和金渠沟等), 累计探明黄金储量约 500 t。

关于小秦岭地区金矿床的成因, 目前主要存在 2 种认识: 一, 石英脉型金矿床为中低温岩浆热液矿床(王享治, 1987; 栾世伟等, 1990; 周作侠等, 1993; 黎世美等, 1996); 二, 石英脉型金矿床是区域变质或变形作用的产物(沈阳地质矿产研究所, 1989; 胡正国等, 1994; 沈保丰等, 1994)。尽管众多学者在金矿床形成过程、物质来源和成矿时代上存在不同的看法, 但均认为深入细致的同位素地质研究将有助于揭开本区金矿床成因之谜。

为了深入探讨小秦岭地区金矿床的成因, 进而为该区隐伏金矿床找矿勘查提供理论依据, 本文在详细的矿床地质研究基础上, 对文峪金矿床和东闯金(铅)矿床含矿石英脉、斜长角闪岩、斜长片麻岩和花岗岩类进行了系统的硫、铅同位素测定, 结合岩(矿)石岩(矿)相学和地球化学证据, 详细讨论了文峪与东闯矿床的成矿物质来源和演化历史, 旨在建立小秦岭

地区金矿床成矿模式和确定隐伏金矿床找矿勘查方向。

1 地质背景

小秦岭金矿田位于华北克拉通南缘隆起区, 传统构造地质学将其划为“华北地台南缘豫西断隆华文台拱”, 习称“小秦岭复背斜”。区内出露的地层主要为太古宙太华群变质岩(河南省地质矿产局, 1989; 陕西省地质矿产局, 1989)。根据岩性组合和构造特征, 太华群自下而上大体可划分为 5 个岩组, 即蒲峪组、焕池峪组、闫家峪组、观音堂组和抢马峪组, 各组之间均为整合接触。

蒲峪组为本区出露的最古老的岩性单元, 主要由黑云斜长片麻岩组成, 厚度约为 375 m。该组之上为焕池峪组, 主要由金云母-透辉石大理岩、透闪石-透辉石大理岩和黑云斜长片麻岩组成, 厚约 700 m。闫家峪组是本区最重要的金矿床容矿围岩, 其内产出的含金石英脉多达 750 条。主要岩石类型为斜长角闪片麻岩、斜长角闪岩、黑云斜长片麻岩、条带状和均质混合岩, 局部地段见有麻粒岩和大理岩夹层, 厚约 1 700 m。闫家峪组之上为观音堂组, 其主要岩性为磁铁矿石岩、石英岩、砂线黑云斜长片麻岩、斜长角闪片麻岩和条痕状混合岩, 厚约 600 m。太华群最上部的岩层为抢马峪组, 主要由斜长角闪片麻岩、黑云斜长角闪片麻岩、黑云斜长片麻岩和条带状混合岩组成, 局部地段见有麻粒岩, 岩层总厚度约为 680 m。太华群变质岩全岩铷-锶和锆石铀-铅同位素年龄值

* 本文得到国家自然科学基金(编号:40073015)和国家重点基础研究项目之专题“小秦岭大型矿集区预测”(编号:G1999043207-4)的资助
第一作者简介 聂凤军, 男, 1956 年生, 研究员, 从事金属矿床地质和地球化学研究工作。

收稿日期 2000-10-15; 改回日期 2001-01-09。李 岩编辑。

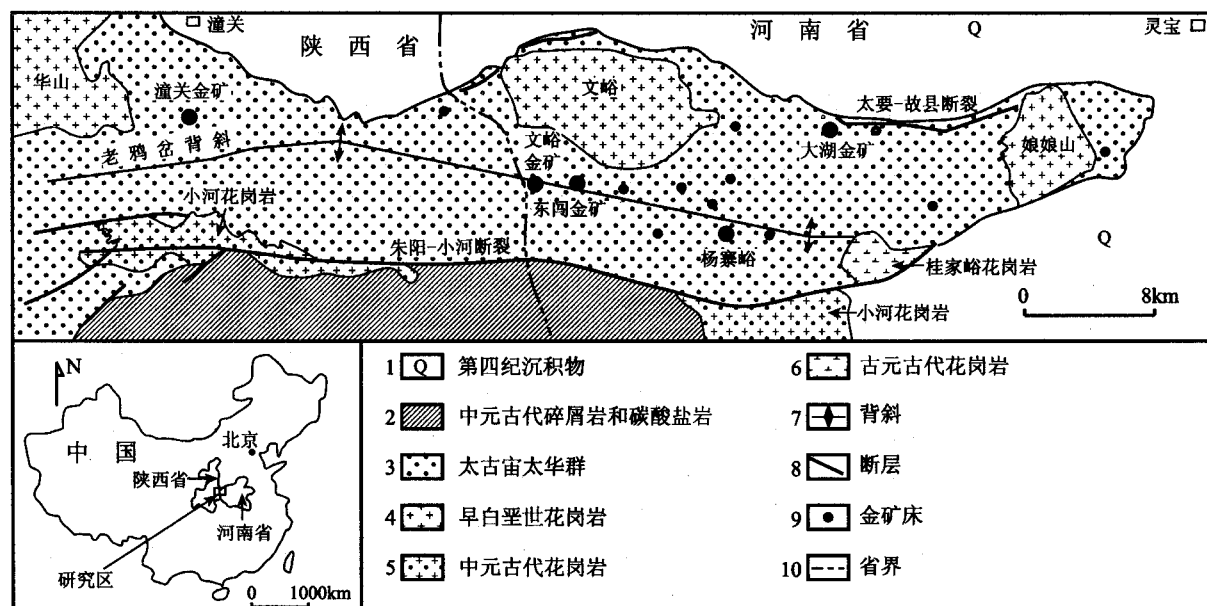


图 1 豫陕小秦岭金矿田金矿床分布略图

Fig. 1 Diagrammatic geological map showing the distribution of gold deposits in the Xiaolinling area, Shaanxi and Henan Provinces

1—Quaternary sediments; 2—Mesoproterozoic clastic and carbonate rocks; 3—Late Archean metamorphic rocks of Taihua Group; 4—Early Cretaceous granite; 5—Mesoproterozoic granite; 6—Early Proterozoic granite; 7—Anticlinorium; 8—Fault; 9—Gold deposit; 10—Provincial boundary

主要分布在 2 000~2 500 Ma (沈保丰等, 1994; 罗镇宽, 2000), 反映了其复杂的演化过程。

研究区内褶皱和断裂构造形迹复杂, 其中小秦岭复背斜和矿田南北侧断裂构造是金矿化带和金矿床的重要控矿构造(图 1)。小秦岭复背斜主要由 3 个近东西向的背、向斜所构成, 从南到北依次为: 老鸦岔背斜、七星坪-雷家坡向斜和理村背斜, 含金石英脉大多沿上述背、向斜的轴部产出, 其空间展布形态受轴部东西向断裂构造的控制。小秦岭金矿田南北两侧断裂构造发育, 并且以切割深和活动历史长为特点。北界断裂为太要-故县-阳平断裂, 东西长约 105 km, 其东侧为渭河地堑东延部分; 南界断裂为寻马道-小河-朱阳断裂, 东西长约 175 km, 其南侧为元古宙褶皱带, 出露有蓟县系和晚白垩世沉积岩(物) (王亨治, 1987; 罗镇宽, 2000)。

小秦岭金矿田范围内各种规模和不同类型的侵入岩分布广泛, 其中出露面积最大和常见的岩体主要为元古宙二长花岗岩和中生代燕山期花岗岩类。中元古代桂家峪角闪二长花岗岩、小河花岗岩和石母峪二长花岗岩主要出露于金矿田的南部地区, 呈岩基(或岩株)状产出, 其同位素年龄值分别为 $(1\ 642 \pm 30)$ Ma (全岩 Rb-Sr 等时线法)、 $(1\ 748 \pm 25)$ Ma (锆石 U-Pb 法) 和 $(1\ 563 \pm 15)$ Ma (锆石 U-Pb 法) (王亨治, 1987; 中国人民武装警察部队黄金指挥部, 1997; 罗镇宽, 2000)。小秦岭金矿田内最为发育的侵入岩是燕山期花岗岩类, 从东至西依次为娘娘山、文峪和华山黑云母二长花岗岩体, 其出露面积分别为 33 km²、65 km² 和 130 km², 并且具有极为相似的矿物组合和化学成分 (黎世美等, 1996; 河南省地质矿产局,

1989; 陕西省地质矿产局, 1989; 中国人民武装警察部队黄金指挥部, 1997)。娘娘山、文峪和华山三个岩体的全岩 Rb-Sr 同位素等时线年龄分别为 (135 ± 4) Ma, (179 ± 6) Ma 和 (166 ± 5) Ma。黑云母和正长石的 ⁴⁰Ar-³⁹Ar 或 K-Ar 年龄值分别为 102~104 Ma、165~172 Ma 和 85~124 Ma (中国人民武装警察部队黄金指挥部, 1997)。区域地球化学调查结果表明, 矿田范围内的金矿床(点)和异常区(或点)严格围绕文峪和娘娘山岩体分布, 并且具有一定的分带特征, 暗示了燕山期花岗岩类岩浆活动与金矿化的关系。

2 矿床地质特征

已在小秦岭金矿田发现了含金石英脉 1 200 余条, 其中长度大于 200 m 的脉体约占总数的 1/4, 长度大于 1 000 m 的脉体有 45 条, 最长者(如 505 号和 60 号脉)可达 4 200 m (王亨治, 1987; 黎世美等, 1996; 沈阳地质矿产研究所, 1989; 中国人民武装警察部队黄金指挥部, 1997)。脉体厚度变化较大, 一般 0.3~2 m, 最厚者达 7.7 m, 延深一般为 100~500 m, 最深可达 810 m。从空间分布上看, 含金石英脉多沿背斜轴部呈单脉产出, 容矿围岩为太古宙太华群闪长角闪岩和斜长片麻岩, 矿脉的展布形态和规模受局部韧性断裂构造控制。野外地质调查和找矿勘探结果表明, 具有工业价值的含金石英脉多集中分布在杨寨峪-文峪一带, 其次为大湖峪-灵湖地区, 少量在矿田中部的金渠地区产出。

根据硫化物的种类和含量,含金石英脉大体可划分为两类,即黄铁矿型和多金属硫化物型。尽管前者约占全部含金脉体数量的80%,但大型和特大型金矿床多由多金属硫化物型含金石英脉组成,文峪和东闯金矿床即是最典型的实例。

2.1 文峪金矿床

文峪金矿床地处小秦岭金矿田中部,文峪岩体南侧约5.5 km处,矿床由一系列含金石英脉组成,容矿围岩为太古宙太华群斜长角闪岩(Jiang, 2000)。

迄今为止,在文峪金矿区共发现和圈定含金石英脉40条,其中505、512和530号矿体规模最大,并且具重要工业意义。505号脉东西(局部地段为NW60°或NE)长约4 200 m(见图2A),南倾,倾角40~55°,矿脉厚约0.2~8 m,垂向延深400 m。512和530号脉东西延伸长度分别为4 000 m和1 600 m,厚度为0.1~4 m,其倾向和倾角与505号脉相类似。详细的钻探结果表明,文峪金矿床含金石英脉主要呈单脉产出,局部地段膨胀、收缩、分支和复合特征明显。富矿体多在走向或倾向发生变化的扩张处产出,矿体形态一般呈脉状、透镜状和豆荚状。

根据金矿石的结构构造、矿物组合和矿脉穿切关系,含金脉体大体可划分为3种类型(黎世美等, 1997; Jiang, 2000): ① 贫金石英-黄铁矿脉,主要由乳白色块状石英(94%)和粗粒自形黄铁矿(5%)组成,局部地段见有少量磁铁矿和黑钨矿; ② 富金多金属硫化物-石英脉,主要由烟灰色他形石英(40%~50%)、黄铁矿、黄铜矿、方铅矿和闪锌矿(50%

~60%)组成,金主要与黄铜矿和黄铁矿中的方铅矿包裹体伴生; ③ 贫金碳酸盐-石英脉,主要由方解石(或白云石)(80%~90%)、细粒石英(10%~20%)和细粒他形黄铁矿(1%)组成。一般来讲,多金属硫化物-石英脉是最重要的含金脉体,而①和③类脉体的金含量相对较低。

金大多呈自然金形式产出,少部分为银金矿,局部地段见有含金碲化物。一般来讲,自然金含有10%左右的银,银金矿含有70%的金,含金碲化物组分主要为30%的金、7%的银和63%的碲。详细的矿物学研究还揭示出金矿石中大约有90%的自然金和银金矿在黄铁矿中呈细微粒包体或裂隙充填物产出,少量分布在黄铜矿、方铅矿、闪锌矿和石英内,金品位与硫化物含量呈正相关关系。一般来讲,多金属硫化物-石英脉中黄铁矿的含量最高,达 76×10^{-6} ,石英-黄铁矿脉中的黄铁矿含金 13×10^{-6} ,而碳酸盐-石英脉中黄铁矿的金含量仅有 4×10^{-6} ,暗示了含金流体演化的阶段性。

含金脉体旁侧的热液蚀变主要有黄铁绢英岩化、碳酸盐化、黑云母化、钾长石化和绿泥石化,其中黄铁绢英岩化分布广泛,并且与金矿化关系最为密切(图2A)。

2.2 东闯金(铅)矿床

东闯金(铅)矿床位于文峪金矿床东侧2 km处,矿床由一系列含金(铅)的多金属硫化物-石英脉所组成,容矿围岩为太古宙太华群花岗质片麻岩(斜长片麻岩)(中国人民武装警察部队黄金指挥部, 1997)。

迄今为止,在东闯矿区共发现含金多金属硫化物-石英脉20余条,其中以507号、504号、503号、505号、501号、502号和540号脉体规模较大,并且具有重要的工业意义。目前,从这7条矿脉中共探明黄金储量75 t,铅31万吨和银376 t,矿石的平均品位分别为金4 g/t、铅4%和银70 g/t。

507号脉是东闯地区规模最大的含金(铅)矿脉,其金属含量约占该矿区总储量的72%。这条矿脉长约5 000 m,厚1~3 m,最厚约为13 m,矿脉走向265~285°,局部350°,总体为275°,大多数脉体南倾,倾角25~65°,最大斜深1 500 m。507、504、505和501号脉的长度大于2 000 m,540、502和503号脉体长度较小,但也都在1 000 m以上。所有这些矿脉的厚度变化范围为0.8~12 m,其走向、倾向和倾角与延深均与507号脉相似。需要提及的是,大多数矿脉严格受近东西向压扭性断裂构造控制,呈舒缓波状分布,局部地段膨胀、收缩、分枝和复合特点明显(图2B)。富矿体多呈似板状、透镜状或豆荚状在控矿构造转折部位或分支复合处产出,其中心地段金含量较高,并且相对稳定,相比之下,矿体边缘部位金含量较低,且呈跳跃式变化。

根据金矿石的结构、构造和矿物组合特征,该矿床金矿化类型大体可划分为: ① 石英脉型金矿石,主要由黄铁矿、自然金和石英以及少量黑钨矿和磁铁矿组成,偶见方铅矿和黄铜矿,此类矿石约占矿石总量的13%; ② 石英脉型铅矿石,主要由方铅矿、石英及少量黄铁矿和方解石组成,此类矿石约占矿石总量的8%; ③ 多金属硫化物石英脉型金(铅)矿石,

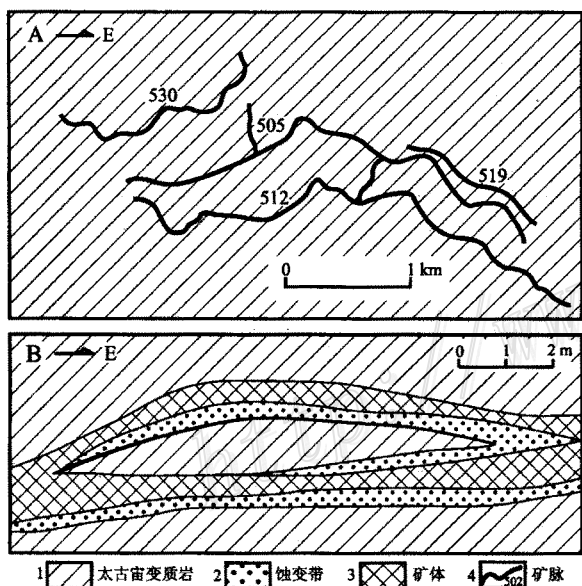


图2 文峪金矿(A)和东闯金(铅)矿(B)含矿脉地质简图

Fig. 2 Simplified geological map of the ore-bearing veins in the Wenyu gold deposit (A) and the Dongchuang gold (lead) deposit (B)

1—Archean metamorphic rocks of Taihua Group; 2—Alteration zone around the ore veins; 3—Orebody; 4—Ore vein

主要由黄铁矿、方铅矿、黄铜矿、自然金和石英以及少量白钨矿、闪锌矿和菱铁矿组成,此类矿石分布广泛,约占矿石总量的 45%;④ 蚀变岩型金(铅)矿石,主要产于含金(铅)石英脉顶、底板蚀变围岩中,矿物组合为黄铁矿、方铅矿、绢云母、黑云母、绿泥石和方解石,此类矿石约占矿石总量的 25%。

详细的矿物学研究结果表明,金大多呈自然金形式产出,约占金矿物总量的 90%,其次为银金矿和碲金矿,局部地段为碲金银矿,自然金大多在硫化物(黄铁矿、方铅矿、磁黄铁矿)和石英晶体的内部、裂隙之中或在矿物粒间呈粒状、片状、乳滴状、树枝状和细脉状产出,其中包体金约占所有金矿物的 15.2%,裂隙金为 31.7%,粒间金为 53.1%。自然金与银金矿的成色变化范围为 720~980。方铅矿是东闯金(铅)矿床中铅与银的重要载体矿物,其含量约占整个脉体矿物总量的 5%~20%。一般来讲,方铅矿产于多金属硫化物石英脉内,并且在脉体膨大部位构成方铅矿矿囊。此外,方铅矿中金的质量分数变化范围为 $0.1 \times 10^{-6} \sim 6.4 \times 10^{-6}$,明显低于黄铁矿($6 \times 10^{-6} \sim 52 \times 10^{-6}$)和黄铜矿($0.2 \times 10^{-6} \sim 24 \times 10^{-6}$)。

在含金(铅)脉体两侧可观察到两种类型的热液蚀变带,即近脉(黄铁)绢英岩化带和远脉绿泥石-绢云母化带。前者矿物组合为绢云母、石英、铁白云石、方解石、磁铁矿和黄铁矿,蚀变带宽度为 0.5~5 m,后者主要由绿泥石、绢云母、磁铁矿、石英、铁白云石、方解石、绿帘石和钠黝帘石组成,宽度变化范围为 1~10 m。

3 硫和铅同位素分析

3.1 样品及测试方法

本次研究过程中,对文峪和东闯两矿区范围内的含矿脉体、太古宙变质岩(斜长角闪岩和斜长片麻岩)和燕山期花岗岩类进行了系统的硫和铅同位素测定。同位素分析所用样品大多采自新鲜的钻孔岩心,部分为岩石露头,它们是通过显微镜薄片鉴定和微量元素分析数据对比选取的。硫化物和钾长石单矿物采用常规分离技术进行分选。

硫同位素 对硫化物(方铅矿、黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿)的硫同位素分析是在澳大利亚莫那什大学同位素实验室的 MAT230 质谱仪上完成的。使用的标准分别为 CDT 和 LTB,标准物质常规分析精度为 $\pm 0.2\%$ 。

铅同位素 硫化物(黄铁矿和方铅矿)利用 $c(\text{HCl}) = 2 \text{ mol/L}$ 的 HCl 溶解,而钾长石和斜长角闪岩全岩样品则采用浓 HF 和 HNO_3 溶解,铅的化学提取采用氢溴酸式阴离子交换法。全部化学处理均在加拿大阿尔伯塔大学超净同位素实验室进行,实验室实验流程本底对铅小于 10 ng,对铀小于 1 ng。质谱分析使用硼酸胶法,在 VGM30 质谱仪上进行。对 NBS981 国际标准 30 次测定结果表明:质谱分析精度对 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 分别为 0.07%、0.09% 和 0.10%,对 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 为 0.04%,各件样品测定内部精度均好于 0.001%。详细的铅同位素化学处理和质谱分析过程

可参阅 Birkeland (1990) 的文献,数据计算采用 Ludwige (1990)设计的计算机软件。

3.2 结果和讨论

硫同位素 文峪和东闯矿床含矿脉体、太古宙变质岩、燕山期文峪花岗岩体和花岗岩类脉岩等 81 件硫化物(黄铁矿、方铅矿、黄铜矿、闪锌矿)硫同位素分析结果列于表 1。

文峪矿床含金石英脉中 5 件黄铁矿样品的 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化范围为 $0.6\% \sim 4.5\%$,平均值 2.6% ;19 件方铅矿变化范围为 $-1.0\% \sim 3.8\%$,平均值 2.2% ;4 件闪锌矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化范围为 $-0.4\% \sim 2.0\%$,平均值 1.0% 。尽管 3 种硫化物的平均值略有不同,但是单个硫化物值的变化范围大体相似(图 3)。4 个黄铁矿与方铅矿矿物对($\Delta\delta^{34}\text{S}_{\text{Py-Gn}}$)的相对富集系数变化范围为 $-1.8\% \sim 2.0\%$,而 4 个闪锌矿与方铅矿矿物对($\Delta\delta^{34}\text{S}_{\text{Sph-Gn}}$)的相对富集系数则为 $-2.8\% \sim 2.1\%$,暗示了含矿热流体的复杂演化过程。东闯矿床各类硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值基本与文峪金矿床相似,12 件黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化范围为 $2.4\% \sim 6.9\%$,平均值 4.3% ;10 件方铅矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $1.4\% \sim 4.6\%$,平均值 3.4% 。2 件黄铜矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值分别为 2.3% 和 4.0% ,平均值为 3.1% 。4 个黄铁矿与方铅矿矿物对的相对富集系数($\delta^{34}\text{S}_{\text{Py-Gn}}$)变化范围为 $-1.7\% \sim 0.9\%$,同样反映了含矿流体的动态演化过程。

同前述含金或含金(铅)脉体硫化物相比,太古宙太华群斜长角闪岩(7 件样品)和斜长片麻岩(6 件样品)黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化范围较大,它们分别为 $-3.9\% \sim 3.6\%$ (平均值为 -1.2%)和 $-0.2\% \sim 2.7\%$ (平均值为 1.7%)。燕山期文峪花岗岩体(8 件样品)和花岗岩类脉岩(8 件样品)黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化范围分别为 $2.1\% \sim 4.3\%$ (平均 3.4%)和 $7.0\% \sim 11.5\%$ (平均值为 8.7%)。在所有分析的硫化物样品中,花岗岩类脉岩黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值最高,以富 ^{34}S 为特征(图 3)。

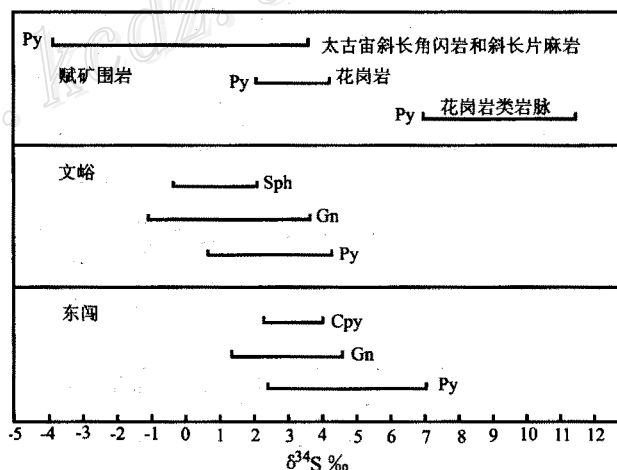


图 3 文峪与东闯地区含矿脉体、中生代花岗岩类和太古宙变质岩硫化物硫同位素数据对比图

Fig. 3 Comparison of sulfur isotopic data of sulfides for ore veins, Mesozoic Yanshanian granitoids and Archean metamorphic rocks from the Wenyu and Dongchuang area

表1 小秦岭文峪金矿床和东闯金(铅)矿床及有关岩石硫化物硫同位素成分

Table 1 Sulfur isotope compositions of sulfides from the Wenyu gold and Dongchuang gold (lead) deposits and related rocks occurring within the Xiaoqinling gold field, Shaanxi and Henan Provinces

样品编号	产 状	矿物	$\delta^{34}\text{S}$ ‰	$\Delta\delta^{34}\text{S}_{\text{Py-Gn}}$ 或 $\Delta\delta^{34}\text{S}_{\text{Sph-Gn}}$	资料来源	样品编号	产 状	矿物	$\delta^{34}\text{S}$ ‰	$\Delta\delta^{34}\text{S}_{\text{Py-Gn}}$ 或 $\Delta\delta^{34}\text{S}_{\text{Sph-Gn}}$	资料来源
文峪金矿床						东闯金(铅)矿床					
WY-1-1(e)	含金石英脉	Py	0.6	-1.8	本文	DC-15	含金(铅)石英脉	Gn	2.8		本文
WY-1-2(e)	含金石英脉	Gn	2.4		本文	DC-16	含金(铅)石英脉	Gn	4.6		本文
WY-2-1(e)	含金石英脉	Py	4.5	+2.0	本文	DC-17-1(e)	含金(铅)石英脉	Py	3.5	-0.6	本文
WY-2-2(e)	含金石英脉	Gn	2.5		本文	DC-17-2(e)	含金(铅)石英脉	Gn	4.1		本文
WY-3-1(e)	含金石英脉	Py	3.2	-0.6	本文	DC-18-1(e)	含金(铅)石英脉	Py	2.7	-0.5	本文
WY-3-2(e)	含金石英脉	Gn	3.8		本文	DC-18-2(e)	含金(铅)石英脉	Gnp	3.2		本文
WY-4-1(e)	含金石英脉	Py	2.3	-0.9	本文	DC-19-1(e)	含金(铅)石英脉	Py	3.6	+0.9	本文
WY-4-2(e)	含金石英脉	Gn	3.2		本文	DC-19-2(e)	含金(铅)石英脉	Gn	2.7		本文
WY-5	含金石英脉	Py	2.6		本文	DC-20-1(e)	含金(铅)石英脉	Py	2.5	-1.7	本文
WY-6	含金石英脉	Gn	2.4		本文	DC-20-2(e)	含金(铅)石英脉	Gn	4.2		本文
WY-7	含金石英脉	Gn	1.8		本文	太古宙太华群斜长角闪岩					
WY-8	含金石英脉	Gn	3.3		本文	AP-1	不规则透镜体	Py	-3.9		本文
WY-9	含金石英脉	Gn	3.8		本文	AP-2	不规则透镜体	Py	-3.0		本文
WY-10	含金石英脉	Gn	2.6		本文	AP-3	不规则透镜体	Py	-2.4		本文
WY-11	含金石英脉	Gn	2.6		本文	AP-4	不规则透镜体	Py	-1.0		本文
WY-12	含金石英脉	Gn	2.7		本文	AP-5	不规则透镜体	Py	3.6		本文
WY-13	含金石英脉	Gn	2.4		本文	AP-6	不规则透镜体	Py	-0.6		本文
WY-14	含金石英脉	Gn	1.9		本文	AP-7	不规则透镜体	Py	-0.8		本文
WY-15	含金石英脉	Gn	2.4		本文	太古宙太华群斜长片麻岩					
WY-16	含金石英脉	Gn	-1.0		本文	PG-1	中厚层状	Py	1.5		本文
WY-17-1(e)	含金石英脉	Sph	1.2	-0.3	本文	PG-2	中厚层状	Py	2.0		本文
WY-17-2(e)	含金石英脉	Gn	1.5		本文	PG-3	中厚层状	Py	2.1		本文
WY-18-1(e)	含金石英脉	Sph	1.3	+2.1	本文	PG-4	中厚层状	Py	-0.2		本文
WY-18-2(e)	含金石英脉	Gn	-0.8		本文	PG-5	中厚层状	Py	2.7		本文
WY-19-1(e)	含金石英脉	Sph	-0.4	-2.8	本文	PG-6	中厚层状	Py	2.0		本文
WY-19-2(e)	含金石英脉	Gn	2.4		本文	中生代燕山期文峪花岗岩					
WY-20-1(e)	含金石英脉	Sph	2.0	+0.2	本文	WG-1	黑云母花岗岩株	Py	2.1		本文
WY-20-2(e)	含金石英脉	Gn	1.8		本文	WG-2	黑云母花岗岩株	Py	2.6		本文
东闯金(铅)矿床						WG-3	黑云母花岗岩株	Py	4.3		本文
DC-1	含金(铅)石英脉	Cpy	2.3		①	WG-4	黑云母花岗岩株	Py	4.0		本文
DC-2	含金(铅)石英脉	Cpy	4.0		①	WG-5	黑云母花岗岩株	Py	3.9		本文
DC-3	含金(铅)石英脉	Py	5.2		①	WG-6	黑云母花岗岩株	Py	3.7		本文
DC-4	含金(铅)石英脉	Py	3.2		①	WG-7	黑云母花岗岩株	Py	3.5		本文
DC-5	含金(铅)石英脉	Py	6.3		①	WG-8	黑云母花岗岩株	Py	3.4		本文
DC-6	含金(铅)石英脉	Py	6.9		①	中生代燕山期花岗岩类岩脉					
DC-7	含金(铅)石英脉	Py	2.4		①	DB-1	花岗岩脉	Py	11.5		本文
DC-8	含金(铅)石英脉	Py	4.3		①	DB-2	花岗岩脉	Py	10.4		本文
DC-9	含金(铅)石英脉	Py	7.1		①	DB-3	花岗岩脉	Py	7.1		本文
DC-10	含金(铅)石英脉	Gn	3.5		①	DB-4	花岗岩脉	Py	7.0		本文
DC-11	含金(铅)石英脉	Gn	1.4		①	DB-5	花岗岩脉	Py	8.4		本文
DC-12	含金(铅)石英脉	Py	3.5		本文	DB-6	闪长岩脉	Py	8.6		本文
DC-13	含金(铅)石英脉	Gn	3.8		本文	DB-7	闪长岩脉	Py	7.9		本文
DC-14	含金(铅)石英脉	Gn	3.4		本文	DB-8	闪长岩脉	Py	9.0		本文

测试单位: 澳大利亚莫那什大学地球科学系同位素实验室。

矿物代号: Cpy—黄铜矿, Gn—方铅矿, Py—黄铁矿, Sph—闪锌矿; $\Delta\delta^{34}\text{S}_{\text{Py-Gn}}$ —黄铁矿与方铅矿 $\delta^{34}\text{S}$ (‰) 的差值; $\Delta\delta^{34}\text{S}_{\text{Sph-Gn}}$ —闪锌矿与方铅矿 $\delta^{34}\text{S}$ (‰) 的差值。

① 中国人民武装警察部队黄金指挥部, 1997。

表 2 小秦岭地区文峪金矿床和东沟金(铅)矿床及有关岩石铅同位素组成和特征比值
Table 2 Lead isotope compositions and characteristic ratios of sulfide minerals from the Wenyu gold deposit and Dongchuan gold (lead) deposit and related rocks in the Xiaoqinling area

样品编号	样品产状	矿物	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	模式年龄/Ma	μ	资料来源
文峪金矿床								
WY-1	含金石英脉	Gn	17.3050	15.7390	38.4500	1080	9.93	①
WY-2	含金石英脉	Gn	17.0900	15.5000	37.8300	986	9.46	①
WY-3	含金石英脉	Gn	17.2540	15.6040	38.1800	980	9.65	①
WY-4	含金石英脉	Gn	17.2200	15.6540	38.3080	1053	9.76	①
WY-5	含金石英脉	Gn	17.4100	15.4690	39.9190	728	9.33	②
WY-6	含金石英脉	Gn	17.1720	15.6250	38.3410	1057	9.71	②
WY-7	含金石英脉	Gn	16.6760	15.2120	36.5090	974	8.93	②
WY-8	含金石英脉	Gn	16.8770	15.3400	36.9540	967	9.16	②
WY-9	含金石英脉	Gn	17.1460	15.3790	37.4980	817	9.19	②
WY-10	含金石英脉	Gn	16.9830	15.3370	37.2610	888	9.13	②
WY-11	含金石英脉	Gn	17.0840	15.4390	37.6380	926	9.33	②
WY-12	含金石英脉	Gn	17.0190	15.3450	37.2810	871	9.14	②
WY-13	含金石英脉	Gn	17.1786	15.5871	38.0714	1014	9.63	本文
WY-14	含金石英脉	Gn	17.4643	15.5943	38.7429	826	9.58	本文
WY-15	含金石英脉	Gn	17.5179	15.5893	38.6010	784	9.56	本文
WY-16	含金石英脉	Gn	17.0786	15.5429	37.9821	1038	9.55	本文
WY-17	含金石英脉	Gn	16.9143	15.4192	37.1102	1025	9.32	本文
WY-18	含金石英脉	Gn	16.9821	15.4043	37.3643	961	9.28	本文
WY-19	含金石英脉	Gn	16.8643	15.3179	37.0250	926	9.07	本文
WY-20	含金石英脉	Gn	16.7857	15.3071	36.7429	998	9.11	本文
WY-21	含金石英脉	Gn	16.7946	15.2586	36.8751	938	9.01	本文
东沟金(铅)矿床								
DC-1	含金(铅)石英脉	Gn	17.1020	15.4480	37.6570	923	9.34	①
DC-2	含金(铅)石英脉	Gn	17.0640	15.4250	37.5570	925	9.30	①
DC-3	含金(铅)石英脉	Gn	17.0600	15.4450	37.6040	949	9.35	①
DC-4	含金(铅)石英脉	Gn	17.0500	15.3680	37.4040	874	9.18	①
DC-5	含金(铅)石英脉	Py	17.3630	15.4390	37.7280	728	9.27	①
DC-6	含金(铅)石英脉	Cpy	17.1690	15.4250	37.6310	851	9.28	①
DC-7	含金(铅)石英脉	Cpy	17.1130	15.3730	37.4360	833	9.18	①
DC-8	含金(铅)石英脉	Gn	17.0300	15.3700	37.3720	890	9.19	①
DC-9	含金(铅)石英脉	Py	18.0760	15.5236	37.9464	312	9.34	本文
DC-10	含金(铅)石英脉	Gn	17.6607	15.5285	37.8671	617	9.41	本文
DC-11	含金(铅)石英脉	Gn	17.7501	15.5001	37.7679	520	9.34	本文
DC-12	含金(铅)石英脉	Gn	17.5178	15.4836	37.7964	668	9.34	本文
DC-13	含金(铅)石英脉	Gn	17.4928	15.4586	37.7179	657	9.29	本文
DC-14	含金(铅)石英脉	Gn	17.2502	15.4206	37.6786	788	9.26	本文
DC-15	含金(铅)石英脉	Gn	17.0893	15.4000	37.5107	881	9.24	本文
DC-16	含金(铅)石英脉	Gn	16.8929	15.3586	37.5679	976	9.20	本文
太古代太华群斜长角闪岩								
TH-1	不规则透镜体	WR	17.6786	15.4907	37.8214	561	9.33	本文
TH-2	不规则透镜体	WR	17.5785	15.4750	37.9929	615	9.31	本文
TH-3	不规则透镜体	WR	17.3036	15.4357	37.5714	767	9.28	本文
TH-3(a)	第一阶段淋滤组份	LM	18.0787	15.5464	38.1025	338	9.39	本文
TH-3(b)	第二阶段淋滤组份	LM	16.9464	15.3750	37.2464	955	9.22	本文
TH-3(c)	第三阶段淋滤组份	LM	16.7286	15.3464	37.1786	1080	9.21	本文
太古代太华群斜长片麻岩								
TH-4	中厚层状	WR	18.0045	15.5086	38.3393	346	9.32	本文
TH-5	中厚层状	WR	17.8607	15.5057	38.1857	447	9.33	本文
TH-6	中厚层状	WR	17.8036	15.4729	38.0893	449	9.28	本文
TH-7	中厚层状	WR	17.4107	15.4193	37.9286	672	9.23	本文
中生代燕山期花岗岩类								
YG-1	文峪黑云母花岗岩株	Kfs	18.5357	15.5907	38.3286	59	9.43	本文
YG-2	文峪黑云母花岗岩株	Kfs	18.4001	15.5959	38.1071	165	9.45	本文
YG-3	文峪黑云母花岗岩株	Kfs	18.0893	15.5677	38.0020	356	9.43	本文
YG-4	文峪黑云母花岗岩株	Kfs	18.0002	15.5721	38.1607	425	9.45	本文
YG-5	花岗岩脉	Kfs	17.7321	15.5460	37.9357	586	9.44	本文
YG-6	花岗岩脉	Kfs	17.5225	15.5429	38.0714	730	9.46	本文
YG-7	花岗岩脉	Kfs	18.0030	15.5329	38.0535	377	9.37	本文

测试单位:加拿大阿尔伯塔大学地球科学系同位素实验室。

矿物代号: Cpy—黄铜矿; Gn—方铅矿; Kfs—钾长石; LM—淋滤组份; Py—黄铁矿; WR—全岩。

① 中国人民武装警察部队黄金指挥部, 1997; ② 黎世美等, 1996。

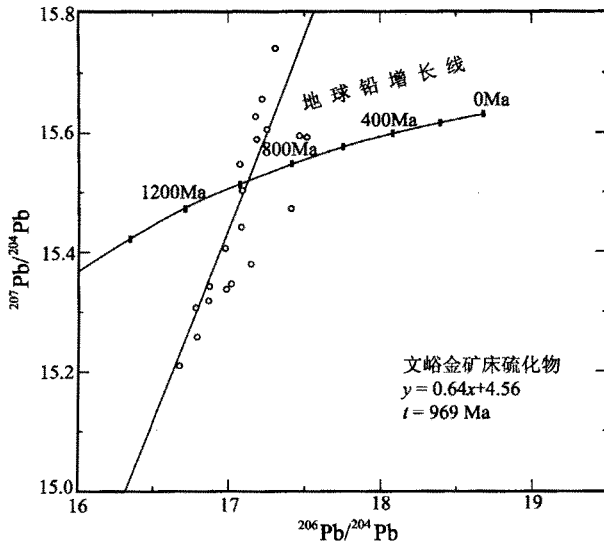


图4 小秦岭金矿田文峪金矿床含金石英脉硫化物

 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 对 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图

Fig. 4 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ versus $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ diagram of sulfides from auriferous quartz veins in the Wenyu gold deposit, Xiaolinling area

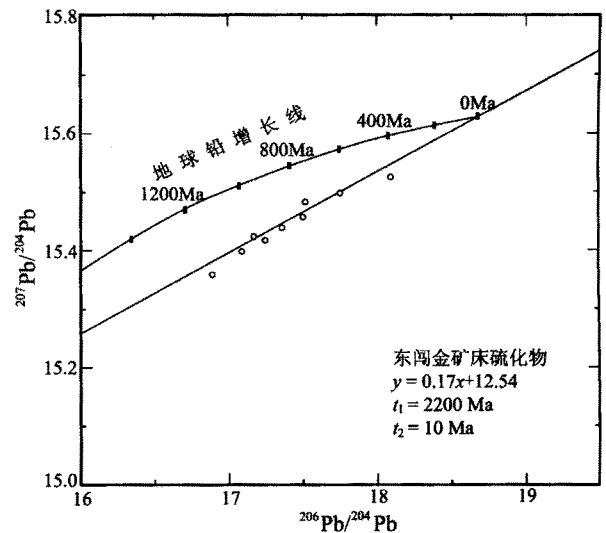


图5 小秦岭金矿田东闯金(铅)矿床含矿石英脉硫

 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 对 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图

Fig. 5 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ versus $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ diagram of sulfides from auriferous quartz veins of the ore-bearing quartz veins in the Dongchuang gold (lead) deposit, Xiaolinling area

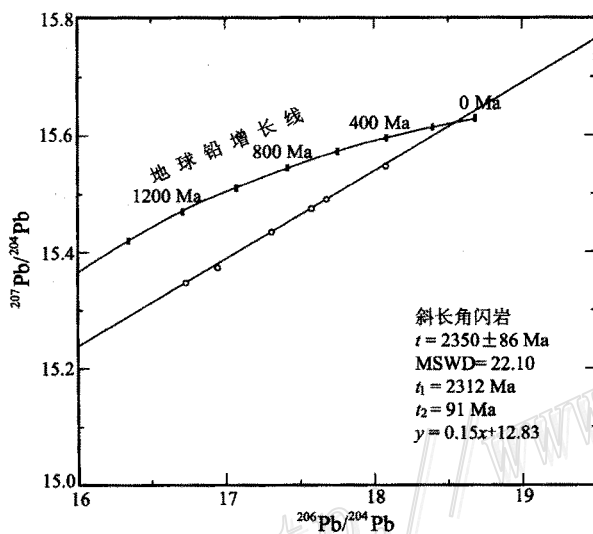
图6 小秦岭文峪和东闯金矿区斜长角闪岩 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 对 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图

Fig. 6 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ versus $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ diagram of sulfides from amphibolite from Wenyu and Dongchuang deposits, Xiaolinling area

铅同位素 文峪金矿床和东闯金(铅)矿床含矿脉体的37件硫化物(33件方铅矿、2件黄铁矿和2件黄铜矿)样品铅同位素成分和特征比值列于表2。文峪金矿床21件方铅矿的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值变化范围为16.6760~17.5179,平均值为17.0865; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值为15.2120~15.7390,平均值为

15.4602; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为36.5090~39.9190,平均值为37.7469。按照Doe和Stacey(1974)参数计算的单阶段模式年龄值为784~1080 Ma(平均值944 Ma), μ 值变化范围8.93~9.93。在 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 对 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图(图4)中,21件硫化物样品中的16件样品数据点构成一陡倾斜线,其最佳直线方程为 $y = 1.11x - 3.49$,它与地球铅增长线(Stacey and Kramers, 1975)在1028 Ma处相交。东闯金(铅)矿床12件方铅矿、2件黄铁矿和2件黄铜矿样品的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值变化范围为16.8929~17.7501,平均值17.2926; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为15.3586~15.5285,平均值为15.4354; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为37.5107~37.9464,平均值37.6401。按照Doe和Stacey(1974)参数计算所获的单阶段模式年龄值为312~976 Ma(平均值774 Ma), μ 值为9.18~9.41。在 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 对 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图(图5)中,16件硫化物样品中的11件样品数据点构成一缓倾斜线,其最佳直线方程为 $y = 0.19x + 12.01$,该直线与地球铅增长线分别相交于10 Ma和2200 Ma,Pb-Pb等时线年龄值为 2204 ± 580 Ma,这个年龄值明显大于东闯矿床的成矿年龄(145~120 Ma)(中国人民武装警察部队黄金指挥部,1997)。从文峪和东闯两个矿床的铅同位素组成来看,除部分样品数据发生重叠外,大部分投绘点呈现出分离趋势,分别构成斜率不同(0.11和0.19)的直线。与东闯矿床相比,文峪金矿床硫化物以高 ^{207}Pb 、 ^{208}Pb 和 ^{206}Pb 值为特征,反映了两矿成矿作用的差异。

3件斜长角闪岩样品分别采自含矿脉体两侧的太华群变质岩地层,为获取此类岩石铅同位素初始比值,对样品TH-3进行了三阶段淋滤实验,并且对各阶段淋滤组分进行了铅同

位素比值测定。所有同位素测试数据及特征比值均列于表2,并投绘在 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 对 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图中(图6),3件全岩样品和3件淋滤组分的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值变化范围为16.7286~18.0787,平均值为17.3857; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为15.3464~15.5464,平均值为15.4449; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为37.1786~38.1025,平均值为37.6522。按照Doe和Stacey(1974)参数计算所获单阶段模式年龄值为338~1080 Ma(平均值719 Ma), μ 值变化范围为9.21~9.39。在 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 对 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图(图6)中,3件样品(TH-1、TH-2和TH-3)及其不同阶段淋滤组分数据共同构成一条Pb-Pb线,其直线方程为 $y=0.15x+12.83$,相应的年龄值为 2350 ± 86 Ma,MSWD为22。该年龄值与太古宙太华群原始火山-沉积岩的变形变质年龄(2300~2400 Ma)(周作侠等,1994;中国人民武装警察部队黄金指挥部,1997)相近,代表了斜长角闪岩的形成时代。此外,斜长角闪岩Pb-Pb线与地球铅增长线分别在231 Ma和91 Ma处相交,后者小于本区燕山期花岗岩类的上限年龄值,反映了变质火山岩U-Th-Pb体系的复杂演化过程。4件斜长片麻岩全岩样品 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为17.4107~18.0045,平均值为17.7699; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为15.4193~15.5086,平均值15.4766; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为37.9286~38.3393,平均值38.1357;按照Doe和Stacey(1974)参数计算所获单阶段模式年龄为346~672 Ma(平均值,478 Ma), μ 值变化范围为9.23~9.33。

文峪花岗岩体和矿区范围内花岗岩类岩脉7件钾长石样品的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为17.5225~18.5357,平均值为18.0404; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为15.5329~15.5959,平均值为15.5640; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为37.9357~38.3286,平均值38.0940。按照Doe和Stacey(1974)参数计算所获单阶段模式年龄为59~730 Ma(平均值385 Ma), μ 值变化范围为9.37~9.46。同前述含矿脉体硫化物和斜长角闪岩全岩(第2和第3阶段淋滤组分)铅同位素组成相比,花岗岩类钾长石样品以富集 ^{206}Pb , ^{207}Pb 和 ^{208}Pb 为特征,与之相对应的铅模式年龄值明显变小,暗示矿床形成过程中放射性成因铅的逐步积累与演化。

4 矿床成因讨论

4.1 硫的来源

文峪矿床黄铁矿、方铅矿和闪锌矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 平均值分别为2.7‰,1.8‰和1.0‰,而东闯金(铅)矿床黄铁矿与方铅矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值分别为4.3‰和3.4‰。尽管这两个金矿床中各类硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值均有一定的变化范围,但是除东闯3件黄铁矿和1件方铅矿样品 $\delta^{34}\text{S}$ 值较高外,其余各类硫化物的平均值均低于中温热液金矿床(3.5‰)(Phillips et al., 1986; Bohlke et al., 1988; Goldfarb et al., 1991)和岩浆硫(4‰)(Taylor, 1987)的平均值,由此可以推断,文峪和东闯矿床成矿流体中的硫绝不是单纯的岩浆硫,它们很可能是一种多来源的混合硫。

矿区范围内太古宙太华群斜长角闪岩黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 的平均值为-1.2‰,以略富 ^{32}S 为特征;斜长片麻岩黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 的平均值为1.7‰,明显低于东闯矿床硫化物,而与文峪金矿床方铅矿值相同。文峪花岗岩体和花岗岩类脉岩黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 的平均值分别为3.4‰和8.7‰,其中前者与东闯矿床硫化物相似,而后者明显高于所有其他样品。由图3可见,含矿脉体硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值介于燕山期花岗岩类和太古宙变质岩硫化物值之间,其变化除了受热液流体与围岩反应过程中 f_{O_2} 的控制外,可能主要与其来源有关,它们很可能是含重硫岩浆流体与含轻硫变质岩地层相互作用的产物。

为探讨硫化物硫同位素的平衡分馏问题,本次研究过程中,分别对文峪金矿床4个闪锌矿-方铅矿和4个黄铁矿-方铅矿矿物对以及东闯矿床4个黄铁矿-方铅矿矿物对的硫同位素组成进行了测定(表1)。从表1可见,文峪金矿床中,有两个矿物对的 $\Delta\delta^{34}\text{S}_{\text{Sph-Gn}}$ 为正值(2.1‰和0.2‰),1个矿物对的 $\Delta\delta^{34}\text{S}_{\text{Py-Gn}}$ 为正值(2‰),其他5个矿物对为负值(-2.8‰~-0.1‰)。同样,东闯矿床有3个矿物对的 $\Delta\delta^{34}\text{S}_{\text{Sph-Gn}}$ 为负值(-1.7‰,-0.6‰和-0.5‰),1个矿物对为正值(0.9‰)。大量实验结果表明,在硫同位素达到平衡时,硫化物的 ^{34}S 相对含量应该按黄铁矿>闪锌矿>磁黄铁矿>方铅矿的顺序递减(Sakai, 1968; Kajiwarra and Krouse, 1971)。据此,可以推断文峪和东闯含矿脉体硫化物结晶时,硫同位素存在有平衡和不平衡分馏状态,也就是说在黄铁矿、闪锌矿和方铅矿形成过程中,硫同位素不平衡分馏占优势,平衡只是局部的;另外,从文峪矿床黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 平均值(2.7‰)>方铅矿(1.8‰)>闪锌矿(1.0‰)来看,也不符合硫同位素平衡分馏原则,之所以出现这种情况,主要与成矿热液系统中硫的多来源特性有关。

4.2 铅、金及其他金属元素来源

在 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 对 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图(图7)中,文峪金矿床和东闯金(铅)矿床硫化物,燕山期花岗岩类钾长石和太古宙变质岩样品数据点分别构成两条“混合铅”带(图7中A和B),它们大体在 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=17.0000$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.3500$ 处相交。由图7可见,16件文峪矿床硫化物、1件斜长角闪岩和5件东闯矿床硫化物样品数据点沿陡倾“混合铅”带分布,而11件东闯矿床硫化物、5件斜长角闪岩、4件斜长片麻岩样品和6件花岗岩类钾长石样品数据则投绘在缓倾斜“混合铅”带上。在这两种“混合铅”带中,主要由文峪矿床硫化物所构成的铅不一致带,分别与下地壳、地幔、造山带和上地壳铅演化线交切,它们暗示了矿石铅来源的复杂性。鉴于本区的主要地层单元为太古宙太华群变质岩,主要火成岩为燕山期花岗岩,以及铅数据点多投绘在地幔与造山带铅演化线之间,因此,我们有理由认为,本地区的铅是一种分别来自地幔和地壳的混合铅。同文峪金矿床相比,东闯金(铅)矿床数据点大多位于缓倾斜“混合铅”带上,介于燕山期花岗岩钾长石和斜长角闪岩淋滤物之间,并且与部分斜长角闪岩和斜长片麻岩相重叠,暗示了太古宙变质岩和燕山期花岗岩与含矿脉体硫化

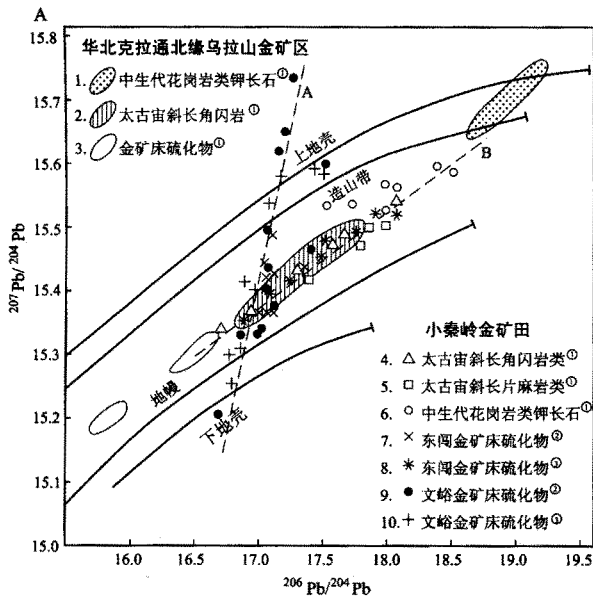


图7 文峪金矿床和东闯金(铅)矿床含金脉体硫化物、中生代燕山期花岗岩类钾长石和太古宙变质岩 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 对 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图

①—聂凤军等, 1994; ②—黎世美等, 1996; 中国人民武装警察部队黄金指挥部, 1997; ③—本文

Fig. 7 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ versus $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ diagram of sulfides from gold- and gold (lead)-bearing quartz veins, K-feldspar from Mesozoic Yanshanian granitoids and Archean metamorphic rocks in Wenyu and Dongchuang deposits, Xiaojinling area

The Wulashan gold district at northern margin of the North China craton: 1—K-feldspar of Mesozoic Yanshanian granitoids; 2—Archean amphibolite; 3—Sulfides of gold deposits in Xiaojinling gold orefield; 4—Archean amphibolite; 5—Archean plagioclase gneiss; 6—K-feldspar of Mesozoic Yanshanian granitoids; 7—Previously published sulfide data of the Dongchuang gold (lead) deposit; 8—Sulfide data of the Dongchuang deposit obtained in this study; 9—Previously published sulfide data of the Wenyu gold deposit; 10—Sulfide data of the Wenyu deposit obtained in this study

物具有相似的铅同位素初始比值和密切的成因联系。

斜长角闪岩的淋滤实验结果表明:同全岩样品相比,第1阶段易溶组分以富含放射性成因铅为特征,而第2和第3阶段淋滤物的 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值相对较低,其中第3阶段铅同位素比值代表了化学和同位素体系上均未发生分异的镁铁质火山岩。尽管目前人们对太古代地幔源铅同位素组成尚不了解,但笔者认为,斜长角闪岩可能起源于低铅含量的幔源岩浆,其形成时代为 $(2350 \pm 86)\text{Ma}$ 。同斜长角闪岩第2和第3阶段淋滤物相比,大多数斜长片麻岩和部分斜长角闪岩样品以高 ^{206}Pb 、 ^{207}Pb 和 ^{208}Pb 为特征,其放射性成因铅的产生过程可能是:① U-Th-Pb体系演化过程中, ^{206}Pb 、 ^{207}Pb 和 ^{208}Pb 逐步富集;② 成岩期后构造-岩浆热事件造成铅同位素丰度

发生变化,致使 ^{206}Pb 、 ^{207}Pb 和 ^{208}Pb 含量增加。尽管目前尚不能确定放射性成因铅的富集过程,但是根据小秦岭地区实际地质情况,笔者认为,上述第1种作用是导致部分斜长角闪岩放射性成因铅含量增高的原因,而第1种和第2种作用均对含矿脉体硫化物、斜长片麻岩和花岗岩类 U-Th-Pb 体系产生重要影响。

文峪和东闯矿床范围内及邻区燕山期花岗岩类中的钾长石是所有样品中放射性成因铅含量最高的样品,其铅同位素数据点均落在“混合铅带”(图7和8)中的放射性端员内。铅模式年龄值变化范围为59~730 Ma, μ 值为9.37~9.46,7件钾长石样品铅数据点所构成的铅混合线分别与地球铅平均演化线在996 Ma和-909 Ma处相切。上述特征表明,本区大部分花岗岩类是前中生代(主要为前寒武纪变质岩)陆壳岩层通过部分熔融和结晶分异形成的,岩体的侵位作用主要发生在中生代燕山期。

同华北克拉通北缘乌拉山大型金矿床相比(聂凤军等, 1994),尽管两者含矿脉体硫化物的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值相似,但是文峪和东闯矿床硫化物 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值明显高于乌拉山矿区。在 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值上,东闯矿床硫化物与乌拉山矿区相似,而文峪金矿床部分硫化物明显高于乌拉山矿区。另外,斜长角闪岩和燕山期花岗岩类的铅同位素比值分别高于和低于

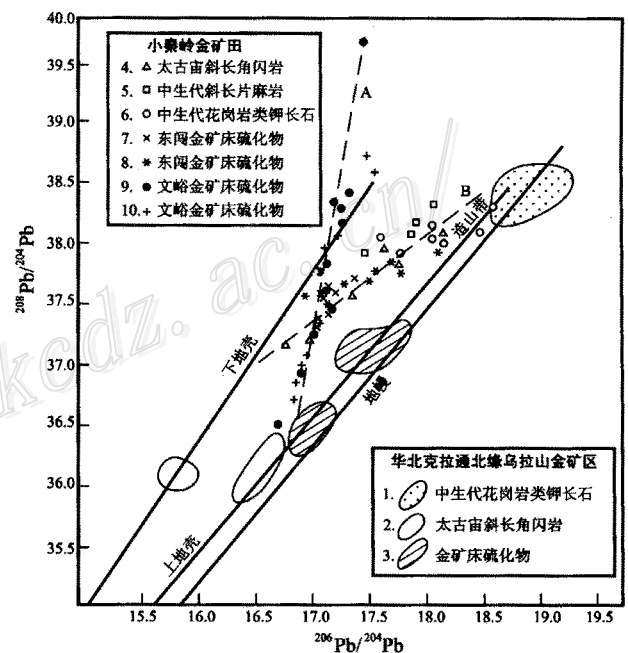


图8 文峪金矿床和东闯金(铅)矿床含金脉体硫化物、中生代燕山期花岗岩类钾长石和太古宙变质岩 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 对 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图(图例同图7)

Fig. 8 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ versus $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ diagram of sulfides from gold- and gold (lead)-bearing quartz veins, K-feldspar from Mesozoic Yanshanian granitoids and Archean metamorphic rocks in Wenyu and Dongchuang deposits, Xiaojinling area (Symbols as for Fig. 7)

乌拉山金矿区同类岩石的比值(图7和8),所有这些特征均暗示了它们在成矿物质来源和演化过程方面的差异。

4.3 成矿模式

为了详细阐述文峪和东闯矿床含矿脉体、燕山期花岗岩类和太古宙变质岩(斜长角闪岩和斜长片麻岩)的成岩(矿)物质来源及其相互间的成因联系,首先应该对本区的构造-岩浆演化历史有一个基本的了解。如前所述,小秦岭地区太古代变质镁铁质火山岩和沉积岩分布广泛,并且构成金矿床的容矿围岩,另外,各种规模的燕山期花岗岩类侵入岩遍布全区,与金矿床具密切的空间分布关系。大量地质和地球化学研究结果表明,本区太古宙变质岩地层在元古代和中生代分别发生过强烈的变质与变形作用,其中以中生代燕山期断裂构造活动最为明显。受此影响,部分岩层发生部分熔融,进而形成花岗质岩浆。这种岩浆继承了斜长角闪岩的铅同位素组成特征和金的丰度,另一方面,受矿物分解和再结晶作用影响,岩浆热液中放射性成因铅将会发生持续性积累。当上述热液流体进入围岩时,不同来源的硫、铅同位素即会发生交换反应,从而在特定的物理化学条件下沉淀形成具混合源硫和铅特点的硫化物,因此,文峪和东闯矿床含矿脉体是岩浆热液流体与围岩相互作用的产物。

5 结 论

(1) 文峪和东闯矿床含矿脉体中大多数硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化范围较小,并且略低于中温热液金矿床和岩浆硫值。同上述硫化物相比,燕山期花岗岩类侵入岩中的硫化物多以富 ^{32}S 为特点,而部分太古宙变质岩的 $\delta^{34}\text{S}$ 值可以低到 -7.1% ,含矿脉体中的硫是岩浆热液与变质岩地层相互作用的产物。

(2) 文峪矿床闪锌矿-方铅矿和黄铁矿-方铅矿矿物对以及东闯矿床黄铁矿-方铅矿矿物对硫同位素数据及计算结果表明,上述两个矿床的硫化物在结晶时,硫同位素处于严重的不平衡分馏状态,究其原因,主要与硫的多来源特征有关。

(3) 文峪和东闯矿床含矿脉体中的硫化物与太古宙变质岩地层及燕山期花岗岩类铅同位素数据分别构成两条斜率不等的“混合铅”带,同样暗示了铅、金和其他成矿组分的混源特征。铅同位素分析结果表明,燕山期岩浆热液对太古宙变质岩地层的淋滤作用是含矿脉体得以形成的重要控制因素,成矿热液主要来自燕山期花岗岩类侵入岩。

(4) 斜长角闪岩的淋滤实验表明,第3阶段淋滤组分代表了化学和同位素上未发生过分异的镁铁质火山岩,其铅同位素比值反映了岩体 U-Th-Pb 体系的初始同位素组成。斜长角闪岩全岩样品及其淋滤组分的 Pb-Pb 等时线年龄为 $2350 \pm 86 \text{ Ma}$,暗示了它们的形成时代,而燕山期花岗岩类侵入岩钾长石数据则大多分布在斜长角闪岩 Pb-Pb 线旁侧。结合岩体其他地质特征,可以推测,岩体起源于太古宙变质岩的重熔和岩浆结晶分异作用。

(5) 文峪和东闯矿床含矿脉体中同一硫化物的铅和硫同位素数据之间不存在任何相关关系,铅和硫同位素数据的这种非相关性同样反映了铅和硫及有关组分的多来源特征。

致 谢 室内外研究工作得到武警黄金地质研究所白万成和李强之高级工程师、天津冶金地质研究院罗镇宽教授和澳大利亚塔斯玛尼亚大学 David Cooke 博士帮助,文图由矿产资源研究所贾秀敏和樊莉女士清绘与打印。对此,笔者谨表衷心的感谢。

参考文献

- 河南省地质矿产局. 1989. 河南省区域地质志[M]. 北京:地质出版社. 1~345.
- 胡正国, 钱壮志, 闫广民, 等. 1994a. 小秦岭拆离-变质杂岩核构造与金矿[M]. 西安:陕西科学技术出版社. 1~140.
- 胡正国, 钱壮志. 1994b. 小秦岭地质构造新认识[J]. 地质论评, 40(3): 289~295.
- 黎世美, 黄建军, 王小生, 等. 1996. 小秦岭金矿地质和成矿预测[M]. 北京:地质出版社. 1~250.
- 栾世伟, 陈尚迪. 1990. 小秦岭金矿主要控矿因素及成矿模式[J]. 地质找矿论丛, 5(4): 1~14.
- 罗镇宽. 2000. 从矿床地质特征和成因探讨小秦岭金矿的找矿前景[J]. 长春科技大学学报, 30(增刊)(印刷中).
- 聂凤军, 裴荣富, 吴良士, 等. 1994. 内蒙古乌拉山石英-钾长石脉金矿床铅和硫同位素研究[J]. 矿床地质, 13(2): 106~117.
- 陕西省地质矿产局. 1989. 陕西省区域地质志[M]. 北京:地质出版社. 1~196.
- 沈保丰, 李俊健, 骆 辉, 等. 1994. 豫西小秦岭金矿的成矿地质特征[A]. 见:中国前寒武纪矿床和构造[C]. 张贻侠, 刘连登主编. 北京:地震出版社. 79~99.
- 沈阳地质矿产研究所编. 1989. 中国金矿主要类型区域成矿条件文集(3): 豫陕小秦岭地区[C]. 北京:地质出版社. 1~46.
- 王享治. 1987. 小秦岭金矿田地质特征及矿床成因[J]. 矿床地质, 6(1): 57~67.
- 中国人民武装警察部队黄金指挥部. 1997. 河南省东闯前寒武系中石英脉金矿地质[M]. 北京:地震出版社. 1~196.
- 周作侠, 李秉伦, 郭抗衡, 等. 1993. 华北地台南缘金(铅)矿床成因[M]. 北京:地震出版社. 1~126.
- Birkeland A. 1990. Pb-isotope analysis of sulfides and K-feldspars: a short introduction to analytical techniques, and evaluation of results [R]. Internal Bulletin Series, Department of Geology, University of Oslo, Norway, (15): 1~30.
- Bohlke J K, Coveney R M Jr, Rye R O, et al. 1988. Stable isotope investigations of gold quartz veins at the Oriental mine, Alleghang district, California[R]. U S. Geological Survey Open File Report, 88~279.
- Doe B R, Stacey J S. 1974. The application of lead isotopes to the problems of ore genesis and ore prospect evaluation: a review [J]. Econ. Geol., 67: 757~767.

- Goldfarb R J, Newberry R J, Pickthorn W J, et al. 1991. Oxygen, hydrogen and sulfur isotope studies in the Juneau gold belt, southeastern Alaska: constraints on the origin of hydrothermal fluids [J]. *Econ. Geol.*, 86(1): 66~80.
- Jiang N. 2000. Hydrothermal fluid evolution associated with gold mineralization at the Wenyu mine, Xiaoqinling district, China [J]. *Resource Geol.*, 50 (2): 103~112.
- Kajiwara Y, Krouse H R. 1971. Sulfur isotope partitioning in metallic sulfide system [J]. *Canadian J. of Earth Sci.*, 8: 1397~1408.
- Ludwig K R A. 1990. Plotting and regression programs for radiogenic isotope data for IBM-PC compatible computer. Version 2.11[R]. U. S. Geological Survey Open File Report, 85~557.
- Phillips G N, Groves D I, Nell F B, et al. 1986. Anomalous sulfur isotope composition in the Golden Mile, Kaloorlie [J]. *Econ. Geol.*, 81: 2008~2015.
- Sakai H. 1986. Isotopic properties of sulfur compounds in nature [J]. *Geochem. J.*, 22: 29~49.
- Stacey J S, Kramers J D. 1975. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model [J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 36:207~221.
- Taylor B E. 1987. Stable isotope geochemistry of the ore-forming fluid [C]. *Mineralogist Association of Canada: Short Course Handbook*, 13:337~445.

Lead and Sulfur Isotopic Studies of the Wenyu and the Dongchuang Quartz Vein Type Gold Deposits in Xiaoqinling Area, Henan and Shaanxi Provinces, Central China

Nie Fengjun, Jiang Shihong

(Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037)

Zhao Yueming

(Geological Survey of Inner Mongolia, Hohhot 110020)

Key words: Xiaoqinling, Wenyu gold deposit, Dongchuang gold (lead) deposit, sulfur and lead isotopes, ore genesis

Abstract

The Wenyu gold deposit and the Dongchuang gold (lead) deposit are located in the Yushan uplift at southern margin of the North China craton. Gold and gold (lead) mineralizations occur within the Archean metamorphosed volcano-sedimentary sequences of the Taihua Group, surrounded by a number of Mesozoic Yanshanian granitoid stocks and dykes. Sulfur isotopic analysis was made for eighty-one sulfide (pyrite, galena, chalcopyrite and sphalerite) samples from gold- and gold (lead)-bearing quartz veins, Archean amphibolite and plagioclase gneiss, Mesozoic Yanshanian granitoid stocks and dykes at Wenyu and Dongchuang as well as their neighboring areas, and the results reveal that sulfur of the ore fluids was mainly derived from a mixed source of Mesozoic Yanshanian igneous rocks and Archean metamorphosed volcano-sedimentary rocks. Lead isotope data of amphibolite define a correlation line with the slope corresponding to an age of $2\,350 \pm 86$ Ma. In contrast, K-feldspar of the Mesozoic Yanshanian granitoids is characterized by high content of radiogenic lead. On the plot, lead data points of twelve sulfide samples from the Wenyu gold deposit, five sulfide samples from the Dongchuang gold (lead) deposit and one amphibolite sample constitute a mixing line cutting the Pb-growth curves of the upper crust, the orogen, the lower crust and the mantle. Nine sulfide samples from the Wenyu deposit and eleven sulfide samples from the Dongchuang deposit fall between the region of amphibolite and that of the Mesozoic Yanshanian granitoids, and constitute another Pb-mixing line. Lead isotopic analyses indicate that Late Archean supracrustal rock was the initial lead source for the Mesozoic Yanshanian granitoid and the ore-bearing veins. Both sulfur and lead isotopic data show that lead, gold and other metallic elements of the ore-bearing vein system came from a mixed source of Archean metamorphosed volcano-sedimentary rocks and Mesozoic Yanshanian granitoids probably derived from the re-melting of previously-formed supracrustal rocks during the Mesozoic Yanshanian orogeny.