

山西省刁泉银铜矿床地质特征及成因机制*

李兆龙 张连营

(冶金部天津地质研究院, 天津)

提 要: 刁泉大型银铜矿床产于由黑云母石英二长岩、花岗斑岩、石英斑岩等组成的复式岩体的夕卡岩带中, 矿化呈环带状展布。矿体严格受火山口构造控制。由银铜矿的地质特征、矿物组成、微量元素、稳定同位素、包裹体地球化学特征等研究表明刁泉银铜矿是与次火山岩体有关的夕卡岩型银铜矿床。

关键词: 夕卡岩型银铜矿床 成矿特征 山西刁泉矿田

刁泉银铜金矿田地处于山西省灵丘县, 位于华北地台燕辽拗拉谷西段。刁泉银铜矿床是冶金部第三地质勘探局新近勘探的大型银(铜、金)矿床, 该矿床是在原来发现的夕卡岩铜矿基础上进一步寻找金银而确定的。经勘探, 该矿床成为一个大型富银矿、中型富铜矿、小型金矿的综合性银铜金矿床, 矿石品位高, 有用组分多, 易采选, 是晋东北地区的一个重要矿床类型。以刁泉银铜矿为中心, 南有支家地大型银矿^[1]、小青沟银锰矿^[2], 西有野窝窑银矿、小彦铅锌矿^[3], 东有王安镇铜矿、镰把岭铅锌银矿床等, 它们均受燕山期 NE 向断裂构造控制, 成矿与燕山期岩浆活动有关, 使晋东北成为我国银矿成矿极为有利地区和银矿山开发基地^[4,5]。本文试图通过矿床地质及地球化学特征研究, 以揭示刁泉银铜矿控制因素及矿床成因机制, 为找矿提供依据。

1 矿区地质

1.1 矿区地层

区内出露地层有青白口系景儿峪组紫红色燧石角砾岩和紫红色铁质石英砂岩, 夹铁矿透镜体, 分布在矿区南部。寒武系的含砾石英砂岩、紫色页岩、薄层粉砂质泥质白云岩、结晶灰岩厚层鲕状灰岩、竹叶状灰岩、中厚层泥晶灰岩等, 分布在矿区北部、东部。奥陶系由泥晶灰岩、竹叶状灰岩、含燧石结核灰岩、薄层泥质白云岩、白云质灰岩等组成, 主要分布在矿区西部。寒武系中、上统泥质白云岩、条带状灰岩和奥陶系下统冶里组、亮甲山组泥晶灰岩、细晶白云岩, 中统马家沟组角砾状灰岩, 是刁泉复式岩体的围岩, 亦是银铜矿体的直接围岩之一。在接触带附近, 岩石多大理岩化, 部分夕卡岩化。泥灰岩含 Ag 0.9×10^{-6} , Au 0.015×10^{-6} , 大理岩含 Ag 6.0×10^{-6} 、Au 0.042×10^{-6} , 并且二者相对富含 Pb、Zn。侏

* 该文系国家白银基金资助的“山西省刁泉银铜矿地质特征及找矿远景研究”项目的一部分

第一作者简介: 李兆龙, 男, 59 岁, 教授级高级工程师, 矿产地质所总工程师, 长期从事金属矿床地质研究工作。邮政编码: 300061

1998-07-08 收稿, 1998-09-08 修改回

罗系白旗组由流纹质角砾岩、凝灰质砂砾岩、泥质粉砂岩夹英安质熔结角砾凝灰岩组成,张家口组为一套酸性火山岩地层,有流纹质角砾熔岩、流纹岩、凝灰岩等,分布在矿区西部。

1.2 矿区构造

刁泉银铜矿位于华北地台燕辽拗拉谷与山西台背斜接壤地带。该区莫氏面等深线由南而北由 NE 急转至 NEE 向,亦是位于地壳向西部和北部增厚、向东部南部变薄的梯度带中。伴有较高的地温场和大地热流值。表示本区的地热活动、岩浆活动与深大断裂有关。

区内中生代以来,侏罗-白垩纪期间以断裂构造为主,主要有 NE 向和 NW 向两组。这两组断裂大体呈等间距分布,构成网格状构造轮廓。两组断裂构造交汇复合处是中生代陆相火山岩活动和夕卡岩矿床、银铜多金属矿化的密集区。刁泉复式岩体就受刁泉断裂和小彦-枪头岭断裂的控制。岩体接触带及周边的环状和放射状断裂控制了矿体和后期岩脉的分布(图 1)。即刁泉银铜矿床严格受火山口构造控制,矿化产在火山口边部,矿体主要赋存在接触带、破碎带、层间剥离构造等叠加或复合部位。

1.3 花岗斑岩和石英斑岩

区内岩浆活动强烈,形成了与中酸性岩浆活动有关的多金属成矿远景区。矿区内主要出露刁泉岩体、小彦-枪头岭岩体和凤凰山一带的喷出岩,并有酸性和中基性脉岩发育。刁泉岩体地表出露为圆形,面积约 0.7 km^2 ,主体岩相为花岗斑岩和石英斑岩,环绕花岗斑岩局部有辉长岩和黑云母石英二长岩分布。岩体与围岩接触带内发生强烈夕卡岩化,银铜金矿体即赋存于夕卡岩带内。花岗斑岩和石英斑岩全岩 Rb-Sr 同位素等时线年龄为 $(130.9 \pm 1.4) \times 10^6 \text{ a}$,属燕山期产物。黑云母石英二长岩的黑云母 K-Ar 同位素年龄为 $130.5 \times 10^6 \text{ a}$,与 Rb-Sr 同位素等时线年龄基本吻合。

岩体的边缘相及上部以花岗斑岩为主体,中间相以石英斑岩为主体,但分布不均匀,多以石英斑晶多少区分,二者基本特征是相似的。岩石呈浅红色,斑状结构,基质为细晶花岗结构、球粒结构。斑晶主要为石英(8%)、钠、更长石(2%)、正长石(6%)。基质为长英质矿物,偶见黑云母。石英斑晶较粗,熔蚀成浑圆状、港湾状等,长石斑晶多遭受绢云母化。副矿物有磁铁矿、磷钼矿、磷灰石、褐帘石等。

花岗斑岩 SiO_2 含量为 $72.42\% \sim 77.04\%$,主要岩石属铝过饱和型,部分为正常岩石类型,岩石的碱含量($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$)为 $8.45\% \sim 9.18\%$, $\text{K}_2\text{O} > \text{Na}_2\text{O}$, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值为 1.42,石英斑岩的 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值为 1.35,岩石的里特曼指数为 $2.24 \sim 2.64$,为钙碱性岩。刁泉岩体的碱度、 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值、酸度与我国东部铜金成矿有关的酸性侵入体特征相似。

花岗斑岩和石英斑岩的微量元素含量 $\text{Cu } 114 \times 10^{-6}$, $\text{Ag } 0.45 \times 10^{-6}$, $\text{Au } 11 \times 10^{-9}$, $\text{Pb } 20 \times 10^{-6}$, $\text{Zn } 55 \times 10^{-6}$, $\text{As } 3 \times 10^{-6}$, $\text{Mo } 5 \times 10^{-6}$,比酸性岩维氏值高 4~9 倍。在化探剖面上显示,Cu、Ag、Au、Pb 和 Zn 的含量为正相关关系。

刁泉岩体岩石的 ΣREE 在 $147.3 \times 10^{-6} \sim 394.5 \times 10^{-6}$ 之间,其中辉长岩为 394.5×10^{-6} ,黑云母石英二长岩平均为 249.7×10^{-6} ,花岗斑岩为 $180.0 \times 10^{-6} \sim 188.8 \times 10^{-6}$,平均 184.4×10^{-6} ,随岩石酸度的增加,稀土总量降低。花岗斑岩的 LREE/HREE 比值为 12.62,属轻稀土富集型,并有显著的负 Eu 异常,成岩过程中存在着结晶分异作用。

刁泉岩体的锶初始比值 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_0 = 0.7061$,属壳幔混源型(MC 型)。岩石铅同位素特征也表明了这一点,在铅构造图解中,投点均落在下地壳铅或上地幔铅演化曲线附近。

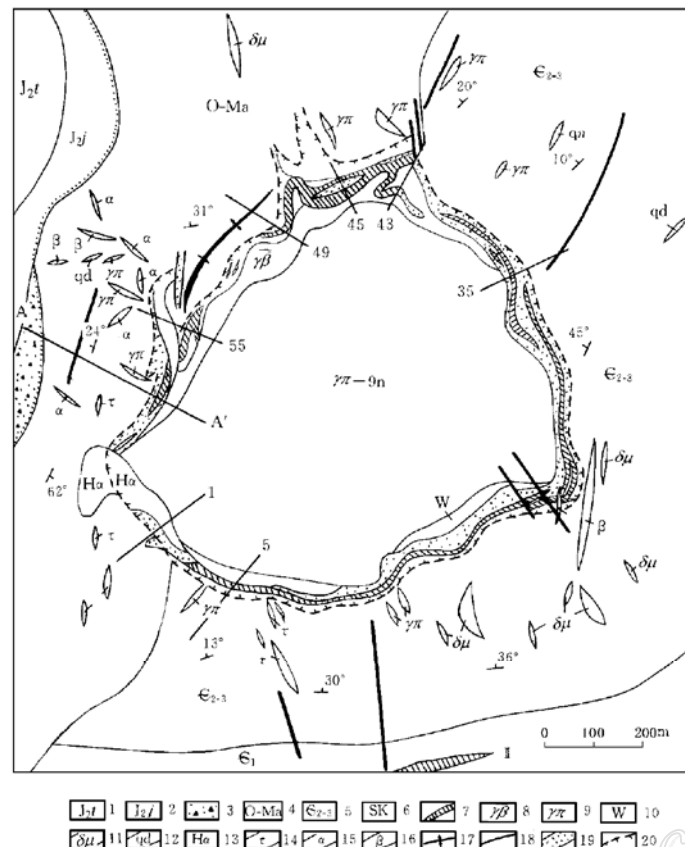


图 1 刁泉矿区地质略图

1—凝灰角砾岩夹流纹质熔岩；2—安山质角砾岩及凝灰岩；3—石灰岩质凝灰角砾岩；4—中、上奥陶统大理岩；5—中、上寒武统大理岩；6—夕卡岩；7—矿体及矿化带；8—黑云母石英二长岩；9—花岗斑岩；10—辉长岩；11—闪长玢岩脉；12—石英安山岩；13—角闪安山岩；14—细晶岩脉；15—煌斑岩脉；16—粗粒玄武岩；17—背斜轴；18—断裂；19—破碎带；20—推测岩层边界或环形断裂

Fig. 1. Geological sketch map of the Diaoquan ore district.

1—Tuffaceous breccia intercalated with rhyolitic lava; 2—Andesitic breccia and tuff; 3—Carbonaceous tuffaceous breccia; 4—Middle and Upper Ordovician marble; 5—Middle and Upper Cambrian marble; 6—Skarn; 7—Orebody and mineralized zone; 8—Biotite quartz monzonite; 9—Granite porphyry; 10—Gabbro; 11—Diorite porphyrite vein; 12—Quartz andesite; 13—Hungarite; 14—Aplite dike; 15—Lamprophyre dike; 16—Coarse-grained basalt; 17—Anticlinal axis; 18—Fault; 19—Shatter zone; 20—Inferred stratigraphic boundary or circular fault.

2 矿床地质特征

2.1 矿体特征

刁泉银铜矿床主要有 25 号、8 号、3 号 3 个矿体。25 号矿体 Ag 和 Cu 储量分别占矿床 Ag、Cu 总储量的 86.3% 和 86%。这几个矿体均产于刁泉岩体与寒武系中、上统碳酸盐地层、下奥

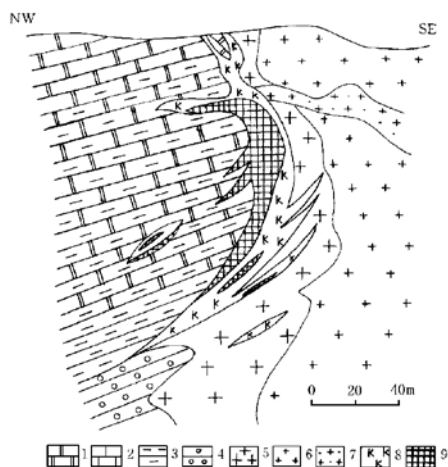


图 2 刁泉银铜矿 25 号矿体 45 线剖面图

1—下奥陶统大理岩；2—中、上寒武统大理岩；3—下寒武统角闪岩、页岩；4—景儿峪组石英砾岩；5—黑云母石英二长岩；6—花岗斑岩；7—石英斑岩；8—夕卡岩；9—矿体

Fig. 2. Geological section along No. 45 line of No. 25 orebody in the Diaquan silver-copper orebody.

1—Lower Ordovician marble; 2—Middle and Upper Cambrian marble; 3—Lower Cambrian hornfels and shale; 4—Quartz conglomerate of Jingeryu Formation; 5—Biotite quartz monzonite; 6—Granite porphyry; 7—Quartz porphyry; 8—Skarn; 9—Orebody.

其次有磁黄铁矿、毒砂、黝铜矿、块铅铋银矿、辉铋矿、辉钼矿、硫钴镍矿、硫铜银矿、含银辉铜矿、硫铋铜矿、硫银矿、碲银矿、针硫铋铅矿、银铜金矿、硒银矿、硫碲铜银矿、辉铜银矿、银黝铜矿、碲铋矿、钛铁矿、赤铁矿、白铁矿等。次生矿物有孔雀石、铜蓝、辉铜矿、斑铜矿、黑铜矿、赤铜矿、自然铜、蓝铜矿、胆矾、白铁矿、褐铁矿、针铁矿、赤铁矿、硬锰矿、软锰矿等。脉石矿物有钙铁榴石、钙铝榴石、透辉石、钙铁辉石、符山石、透闪石、阳起石、硅灰石、方解石、白云石、萤石、黑云母、长石、石英、绿帘石、绿泥石、蛇纹石、绢云母、电气石等。

矿石多呈自形一半自形晶粒状结构、他形粒状结构、交代残余结构、乳滴状及格状结构、共边结构、包含结构、放射状结构和假象等。矿石构造有条带状构造、块状构造、浸染状构造、角砾状构造、脉状、网脉状构造、晶洞构造、晶簇构造及蜂房状构造、皮壳状构造等。

2.3 成矿阶段及矿物生成顺序

该矿床矿物的形成分为内生成矿期和表生成矿期。内生期又分为三个成矿阶段：Ⅰ夕卡岩氧化物阶段；Ⅱ含 AuAg 多金属硫化物阶段；Ⅲ含 Ag 硫化物碳酸盐阶段。

第Ⅰ矿化阶段主要是夕卡岩矿物钙铝榴石、钙铁榴石、透辉石、硅灰石、符山石、透闪

石、陶统灰岩接触带形成的环状夕卡岩带内。矿体主要呈似层状、透镜状、月牙状、囊状及枝杈状（图 2）。25 号矿体沿环状接触带分布，长大于 200 m，延深最大达 350 m，厚度一般 1~15 m，最大厚度 43 m。接触带的形态、产状控制着矿体的形态和空间位置，岩体凹部及分枝、围岩层理、破碎带、捕虏体常是富矿体赋存部位。25 号矿体 Ag 品位在 50~900 g/t 间，Cu 品位以 0.3%~4.5% 分布较多。Ag、Cu 为正相关，相关系数 0.88。垂向上显示了上富 Ag 下富 Cu、Au 的矿化规律。

8 号矿体走向延长 45 m，延深 100 m，平均厚度 5.2 m，呈似层状、透镜状、扁豆状和不规则状产在夕卡岩内。3 号矿体位于 8 号矿体顶部。

2.2 矿石类型、矿物成分及结构构造

刁泉银铜矿床依据矿物组合将矿石分为磁铁矿矿石、黄铜矿-磁铁矿金矿石、方铅矿-闪锌矿-黄铜矿银金矿石、辉铜矿-斑铜矿-银矿石、黄铜矿-银金矿石、孔雀石银矿石。

矿床内矿物种类复杂繁多，主要矿石矿物有黄铜矿、黄铁矿、斑铜矿、闪锌矿、方铅矿、辉铜矿、辉银矿、自然银、银金矿，其

石等矿物的生成，形成环岩体周边的夕卡岩带，在石榴石透辉石带有磁铁矿的生成，形成磁铁矿体。第Ⅱ矿化阶段是 Cu、Ag、Au、Pb 和 Zn 的主要成矿阶段，当夕卡岩和磁铁矿形成之后，富含 Cu、Ag、Au 等多金属的成矿溶液，在接触带和有利矿化的夕卡岩内形成富铜矿体和银矿体、金矿体。黄铜矿、闪锌矿、黄铁矿等交代了第Ⅰ阶段的磁铁矿，这些硫化矿物又和辉银矿、银金矿、自然银、银黝铜矿等呈共生嵌布关系，但银矿物结晶较晚。并发育有蛇纹石化、绿泥石化、绿帘石化、碳酸岩化等。第Ⅲ成矿阶段是含银硫化物碳酸盐阶段，在夕卡岩外接触带及夕卡岩内裂隙中发育硅化和碳酸盐化，形成含立方体黄铁矿、方铅矿、闪锌矿、辉银矿、银铜金矿等的石英方解石脉，成矿温度较低。

表生期的表生成矿作用主要是原生硫化物矿石氧化、淋滤，形成了硫化物矿床氧化带的次生分带。自地表向下分为铁帽亚带、氧化矿石富集亚带、次生硫化物富集带，下面是原生硫化物矿石带。在铁帽亚带中主要有褐铁矿、针铁矿、赤铁矿、孔雀石、蓝铜矿等。氧化矿石富集亚带，主要发育在碳酸盐类岩石为围岩地段，见有黑铜矿、赤铜矿和自然铜，亦见孔雀石和自然银。次生硫化物富集亚带，该区发育较厚，厚者 20 m，生成次生硫化物斑铜矿、辉铜矿、铜蓝、烟灰状黄铁矿，矿石黑灰色，松散，局部见孔雀石、褐铁矿。在斑铜矿、辉铜矿中含有大量银金矿、辉银矿、银铜金矿等。下部接原生硫化物矿石带。

3 成矿物质来源

3.1 微量元素地球化学特征

研究区域和刁泉矿区微量元素地球化学特征及元素在成矿作用过程中的地球化学行为后认为，刁泉次生晕指示元素组合为 Ag、Au、Cu、Pb、Zn、As、F、Ni、Cr 和 Ba；原生晕指示元素组合为 Ag、Au、Cu、Zn、Cd、Pb、Mo、Cr、As 和 Bi。并提出了刁泉银铜矿床元素垂向上上为 Ag、Pb、Zn，下为 Au、Ag、Cu，水平方向上自矿体到围岩为 Cu、Au、Ag→Ag、Pb、Zn 变化。刁泉银矿微量元素相关性分析及因子分析显示主因子反映了矿床主成矿期。Cu、Zn、Cd 与 Ag 紧密相关，出现的 Co、Ni 及与之呈反消长对应的 W、Ba、Sr 等壳源元素表明了成矿流体具深源性，在上升过程中，壳源元素加入流体并参与成矿。其中含 Ag 较高的大理岩、花岗斑岩、黑云母石英二长岩可能提供了部分成矿物质。

3.2 硫的来源

矿床硫化物的硫同位素测定结果（图 3）表明：
①刁泉银铜矿床硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化范围窄，介于 0.5‰~5.7‰，平均值为 3.36‰，塔式分布明显，为岩浆热液矿床特征；
②不同矿化阶段的硫化物同位素组成基本相同，表明为统一硫源。

3.3 成矿金属的来源

对刁泉银铜矿床的 11 个矿石样品进行了铅同

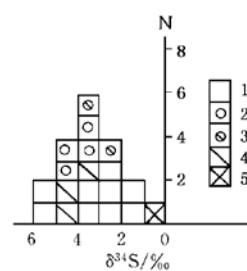


图 3 刁泉银铜矿硫同位素组成直方图

1—黄铁矿；2—黄铜矿；3—斑铜矿；
4—闪锌矿；5—方铅矿

Fig. 3. Histogram showing sulfur isotopic composition of the Diaquan silver-copper deposit.

1—Pyrite; 2—Chalcopyrite; 3—Bornite;
4—Sphalerite; 5—Galena.

位素分析, 为了对比同时测定了与矿床有关围岩的铅同位素数据, 一并列在表 1 中。矿石铅同位素组成相对稳定, 变化范围小, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为 16.692~17.068, 平均值为 16.843, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为 15.181~15.280, 平均值为 15.229, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为 36.785~37.394, 平均值为 36.968。按铅同位素组成计算的单阶段模式年龄, 矿石和黑云母石英二长岩模式年龄近似, 是它们同源的指示, 但与实际燕山期成岩成矿年龄不一致, 不具计时意义。刁泉矿石铅源区特征值 μ 、 ω 、Th/U 的平均值分别为 8.5、35.9 和 4.1, 与黑云母石英二长岩、花岗斑岩的近似。

表 1 山西刁泉银铜矿床及围岩铅同位素组成

Table 1. Lead is isotope composition of the Dioquan silver-copper deposit and its wall rocks

序号	样号	样品名称	采样位置	铅同位素组成			模式年龄 /(10 ⁶ a)	源区特征		
				$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$		μ	ω	Th/U
1	D-17	石英二长岩	对子峪西	16.988	15.256	34.827	788	8.6	35.2	4.0
2	D-22	辉石二长闪长岩	枪头岭村西 300 m	15.944	14.668	34.827	95	7.6	25.9	3.3
3	D-67	花岗斑岩	小彦山脊处	16.920	15.239	36.887	924	8.7	36.0	4.0
4	D-1	黑云母石英二长岩	刁泉 1770 坑口西	17.194	15.293	37.383	684	8.6	36.3	4.1
5	D-3	黑云母石英二长岩	刁泉 44 线北 60 m	16.901	15.218	37.113	815	8.5	36.1	4.1
6	D-4	花岗斑岩	刁泉矿区	17.408	15.328	37.584	567	8.7	36.2	4.0
7	D-14	厚层大理岩	刁泉 I 矿带下奥陶统	18.343	15.598	38.419	210	9.1	36.9	3.9
8	D-23	灰白色大理岩	刁泉 II 矿带上寒武统	18.184	15.672	38.299	412	9.3	38.1	4.0
9	D-69	凝灰岩	刁泉矿区西南部	17.709	15.497	37.956	546	9.0	37.7	4.1
10	D-89	黑云母石英二长岩	I 矿带 1770 中段 54 穿	16.938	15.242	37.136	815	8.6	36.2	4.1
11	D-50	辉长岩	II 矿带山脊公路弯处	17.179	15.321	37.373	728	8.7	36.6	4.1
12	D-36	黄铁矿 ^a	刁泉银铜矿床	16.917	15.264	37.057	855	8.6	36.2	4.1
13	D-96	黄铁矿 ^a	刁泉银铜矿床	16.967	15.255	37.012	807	8.6	35.6	4.0
14	B043	黄铁矿 ^a	刁泉银铜矿床	16.192	15.220	36.873	809	8.5	34.9	4.0
15	B026	黄铁矿 ^a	刁泉银铜矿床	17.068	15.251	37.394	729	8.7	36.7	4.1
16	B-011-4	黄铁矿 ^a	刁泉银铜矿床	16.692	15.181	36.785	928	8.3	35.6	4.2
17	B-46	黄铁矿 ^a	刁泉银铜矿床	16.902	15.212	36.855	807	8.5	34.8	4.0
18	D-019	黄铁矿 ^a	刁泉银铜矿床	16.899	15.226	36.956	827	8.5	35.5	4.0
19	D-95	闪锌矿 ^a	刁泉银铜矿床	16.709	15.207	36.871	944	8.5	36.1	4.1
20	B-011-2	闪锌矿 ^a	刁泉银铜矿床	16.712	15.216	36.853	952	8.6	36.1	4.1
21	D-017	闪锌矿 ^a	刁泉银铜矿床	16.780	15.280	37.106	972	8.7	37.5	4.2
22	B-011-1	方铅矿 ^a	刁泉银铜矿床	16.711	15.207	36.855	942	8.5	36.2	4.1
12~22 号样平均				16.843	15.229	36.968		8.5	35.9	4.1

注: 天津地质研究院同位素室测定

大理岩岩石铅同位素组成均明显高于矿石铅同位素组成, 二者演化继承关系不明显。

刁泉复式岩体由石英斑岩、花岗斑岩、黑云母石英二长岩、辉长岩等组成。其中辉长岩的铅同位素组成略高于矿石铅同位素组成, 在 B R Doe 等构造铅模式图上更靠近幔源铅演化线 (图 4)^[10,11]。花岗斑岩铅同位素组成落在下地壳铅演化线的右侧, 富²⁰⁶Pb, 可能有 U 的混染, 引起铅同位素异常。

黑云母石英二长岩铅同位素的三组数据与矿石铅最为相近, 在 B R Doe 等构造铅模式图上二者密集在下地壳铅同位素演化线之下或附近, 表明成矿物质和黑云母石英二长岩的下地壳来源 (图 4)。它们源区特征值的相近同样说明了刁泉银铜矿床成矿作用对黑云母石英二长岩的依存关系。

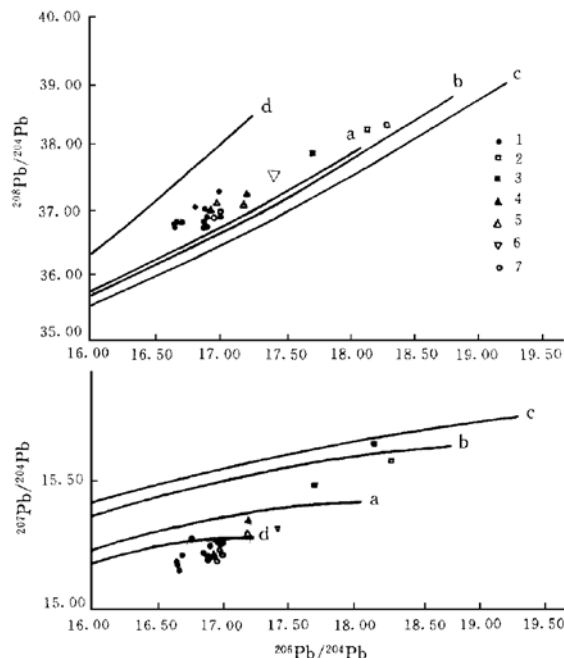


图4 山西刁泉银铜矿床铅同位素组成分布图

a—地幔铅同位素演化曲线；b—造山带铅同位素演化曲线；c—上地壳铅同位素演化曲线；d—下地壳铅同位素演化曲线；1—刁泉银铜矿床铅同位素组成；2—大理岩；3—凝灰岩；4—辉长岩；5—黑云母石英二长岩；6—花岗斑岩；7—小彦—枪头岭辉石二长闪长岩、花岗斑岩

Fig. 4. Lead isotopic composition of the Diaquan silver-copper deposit in Shanxi Province.

a—Lead isotope evolutionary curve of the mantle; b—Lead isotope evolutionary curve of the orogenic belt; c—Lead isotope evolutionary curve of the upper crust; d—Lead isotope evolutionary curve of the lower crust; 1—Lead isotope composition of the Diaquan silver-copper deposit; 2—Marble; 3—Tuff; 4—Gabbro; 5—Biotite quartz monzonite; 6—Granite

porphyry; 7—Xiaoyan-Qiangtoulings gabbro-monzonitic diorite and granite porphyry.

为了解区内酸性岩体的演化关系，测定了小彦—枪头岭杂岩体的铅同位素组成，小彦的花岗斑岩和对子峪西的石英二长岩与刁泉黑云母石英二长岩及矿石铅同位素组成极为相似。枪头岭近处的辉石二长闪长岩铅同位素明显偏低，更具下地壳源投点。

3.4 成矿流体来源

测定了刁泉银铜矿床中方解石、石英和围岩大理岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 和矿物包裹体中水的 δD 值（表2）。并利用矿物包裹体均一温度估算了保持平衡的介质水的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值。

矿床内与金属矿物共生的方解石的 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化在 3.3‰ ~ 9.6‰ 间，平均为 6.9‰ 。据测温数据，将矿物的 $\delta^{18}\text{O}$ 换算成流体的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值，范围在 -2.4‰ ~ 2.5‰ ，平均为 0.9‰ 。硫化物石英脉中石英的 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 9.4‰ ，流体的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值为 3.7‰ ，均高于成矿晚期方解石中水的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值。方解石中包裹体水的 $\delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值在 -72‰ ~ -76‰ ，石英包裹体水的 δD 值为 -91‰ ，较前者低。

上述数据在 $\delta D_{H_2O}-\delta^{18}O_{H_2O}$ 关系图上有下列分布特征, 石英硫化物成矿阶段, 介质水的 $\delta^{18}O_{H_2O}$ 为 3.7‰, δD_{H_2O} 为 -91‰, 投点靠近原始岩浆水, 并有最低的 δD 值。晚期硫化物方解石阶段介质水的 $\delta^{18}O$ 、 δD 则平均值分别为 0.9‰和 -74‰, 成矿流体向 $\delta^{18}O_{H_2O}$ 降低、 δD_{H_2O} 向升高方向演化。成矿晚期投点向大气降水线漂移。刁泉银铜矿床, 成矿早期的流体主要来自岩浆水, 中到晚期大气降水加入成矿作用明显。

表 2 刁泉银铜金矿床碳、氢、氧同位素组成

Table 2. Carbon, hydrogen and oxygen isotopic composition of the Diaquan silver-copper deposit

样号	样品名称	产状	$\delta^{13}C_{\text{矿物}}/\text{‰}$ (PDB)	$\delta^{18}O_{\text{矿物}}/\text{‰}$ (PDB)	$\delta^{18}O_{\text{矿物}}/\text{‰}$ (SMOW)	$\delta^{18}O_{H_2O}/\text{‰}$ (SMOW)	$\delta D_{H_2O}/\text{‰}$ (SMOW)
D-020	方解石	硫化物-方解石脉	-8.4	-21.3	8.9	2.5	-76
D-26	方解石	硫化物-方解石脉	-8.0	-20.7	9.5		
D-36	方解石	黄铁矿-方解石脉	-9.2	-20.6	9.6		
D-40	方解石	方解石脉	-3.9	-25.9	4.2		
D-44	方解石	硫化物方解石脉	-8.6	-20.5	9.3	2.4	-73
D-83	方解石	方解石脉	-4.0	-26.7	3.3		
D-87	方解石	硫化物方解石脉	-4.3	-26.5	3.5	-2.4	-72
D-39	石英	黄铁矿石英脉			9.4	3.7	-91
平均			-6.6		7.2	1.6	
D-14	大理岩		0.7	-10.8			
D-23	大理岩		-1.1	-13.4			
平均			-0.2	-12.1			

注: 中国地质科学院矿床所测定

矿石中脉石矿物方解石的 $\delta^{18}C$ 值在 -9.2‰~-3.9‰间, 基本在内生碳酸盐的 -10‰~-4‰区间内, 显示出典型内生热液成因。

刁泉银铜矿围岩大理岩的碳氧同位素组成 $\delta^{13}C$ 值为 -1.1‰~-0.7‰, 平均为 -0.2‰; $\delta^{18}O$ 值从 19.7‰~17.0‰, 平均值 18.4‰, 均在正常大理岩范围内, 原岩为海洋沉积碳酸盐。

4 成矿物理化学条件

4.1 成矿流体的化学成分

矿床内银多金属硫化物石英阶段含矿流体的阳离子 Na^+/K^+ 为 1.01, $Na^+/(Ca^{2+}+Mg^{2+})$ 为 50。稍晚的含 Ag 多金属硫化物方解石阶段则 Na^+/K^+ 为 0.41, $Na^+/(Ca^{2+}+Mg^{2+})$ 为 2.37。前者富 Na、K, 但更富 Na; 后者富 K, 并 Ca、Mg 在成矿流体中含量增高。

成矿流体中含有 F^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 等阴离子或阴离子团。据含量, 成矿早期、中期其顺序为 $Cl^- > SO_4^{2-} > HCO_3^- > F^-$; 晚期阶段为 $SO_4^{2-} > HCO_3^- > Cl^- > F^-$ 。其中 Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 HCO_3^- 离子起主导作用。随成矿作用的演化成矿溶液中由富 Cl^- 向富 SO_4^{2-} 和 HCO_3^- 转化。

微量气体分析表明, 成矿流体中含有 CH_4 、 CO_2 、 CO 、 N_2 、 H_2 和 H_2O 。包裹体显微镜下观察也同样证实 CH_4 、 CO_2 、 H_2O 和 $NaCl$ 的存在。

4.2 成矿温度、盐度

经研究有 3 种主要类型的包裹体, 即液相包裹体、含液态 CO_2 包裹体和含子矿物多相包

裹体。

包裹体均一温度测定表明,流体成矿温度在120~400℃间,其温度值明显分为4个阶段:120~155℃可能为次生包裹体水溶液的温度,盐度在3.5%~3.8%NaCl间;185~220℃可能与含Ag的铅锌硫化物成矿阶段相当;240~280℃为含Ag、Au的多金属硫化物碳酸盐成矿阶段,是主成矿阶段之一;290~400℃是金铜硫化物石英阶段的温度。测定了含子矿物多相包裹体,显微镜下观察子矿物为石盐(NaCl),子矿物消失温度在325~400℃间,以340~390℃为众值,含盐度40%~46%NaCl,是矿区内Au、Cu多金属硫化物主成矿期。180~280℃是银矿的主要成矿温度范围,属中低温热液范畴。

5 矿床成因及成矿模式

5.1 矿床成因

晋东北地区,地处燕辽拗拉谷的西端,在燕山期形成了刁泉中生代陆相火山岩断陷盆地,盆地主要受NE和NW向两组断裂控制。断陷盆地及火山口内发育了一套中酸性火山岩和次火山岩。矿化主要与火山口内的花岗斑岩、石英斑岩岩体有关。刁泉银铜矿床就产于刁泉复式岩体周边的环形夕卡岩带中,矿体主要赋存在接触带、断裂破碎带和层间剥离构造等叠加复合部位。产于岩体内凹部、分枝部和夕卡岩化的层状碳酸盐岩层理内和岩体中的碳酸盐类岩石捕虏体内。矿床是以银、铜为主,伴生有金、铁、钼、铅和锌等的大型综合性矿床。元素具明显的水平和垂直分带,自岩体—夕卡岩—围岩碳酸盐岩,相应水平分带为Mo、Fe-Cu、Au、Ag-Pb、Zn、Ag、Mn,自岩体向上垂直分带为Mo-Fe-(Cu、Ag、Au)、(Pb、Zn、Ag)。成矿温度区间180~400℃间、在185~220℃、240~280℃和290~400℃有三个峰值,为含银多金属硫化物石英阶段和含银多金属硫化物碳酸盐阶段主成矿阶段的温度。磁铁矿阶段成矿温度较高。溶液的含盐度为40%~46%NaCl,成矿流体中富含 Na^+ 、 K^+ 和 Cl^- 、 SO_4^{2-} ,并含有 CH_4 。随成矿作用的演化,成矿温度降低,成矿溶液中 Na^+ 、 K^+ 、 Cl^- 、 CO_2 、 H_2O 降低, Mg^{2+} 有所升高, SO_4^{2-} 含量变化不大。矿石矿物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值分布范围为+0.5‰~+5.7‰,为岩浆热液矿床特征。矿石内方解石的碳氧同位素组成亦显内生热液成因范围特点。

与矿化有关的次火山岩为花岗斑岩和石英斑岩,其含碱量较高,且 $\text{K}_2\text{O} > \text{Na}_2\text{O}$,为钙碱性,多属铝过饱和岩石类型,岩石化学具典型的铜金成矿专属性。刁泉岩体其初始Sr比值 $I_{\text{Sr}} = 0.7061$,为壳幔混源型。Rb-Sr全岩等时线年龄为 $130.9 \times 10^6 \text{ a}$,属燕山中期产物。成矿时代为燕山中晚期。矿石铅与刁泉复式岩体的黑云母石英二长岩岩石铅同位素组成极为相似,同样证明了成矿物质和岩体的同源性。

包裹体氢氧同位素研究表明,随成矿作用的演化,晚期大气水加入成矿明显。

综上所述,刁泉银铜矿床是与刁泉复式岩体有关的夕卡岩型银铜矿床。其铜金的成矿作用相对银的成矿较早,与黑云母石英二长岩亲缘信息明显。银的成矿作用除与铜金同时部分沉淀外,尚表现出与花岗斑岩的亲缘性。花岗斑岩后的银的成矿作用,叠加在前者之上,使Ag更加富集,规模更大。

5.2 成矿模式

据上述银铜矿床地质和地球化学特征,其形成主要经历两个阶段:①侏罗纪火山活动,刁

泉破火山口被辉长岩、黑云母石英二长岩、花岗斑岩、石英斑岩先后充填,形成火山颈相的刁泉复式岩体。岩体与中、上寒武统大理岩和下、中奥陶统大理岩接触,形成夕卡岩环带,并有磁铁矿堆积。②沿接触带的构造薄弱带和夕卡岩带,富含成矿物质的热液与晚期交代岩伴生叠加于夕卡岩之上成矿,形成铜、金、银矿床^[6,7]。当稍晚花岗斑岩侵入后,与其有关的银的成矿作用又叠加在早期矿体之上,使刁泉银矿更加富集,组成矿物更加复杂,规模更大。

在岩浆热驱动下,富含壳幔混源成矿物质的流体,向减温减压带迁移。在青白口系硅质角砾岩中形成了对子峪银矿,在火山岩、次火山岩破碎带中形成了支家地银矿、小青沟银锰矿,在碳酸盐类岩石中形成了洞沟银锰矿等(图5)^[8,9]。组成了区内浅成中低温热液成矿系列。

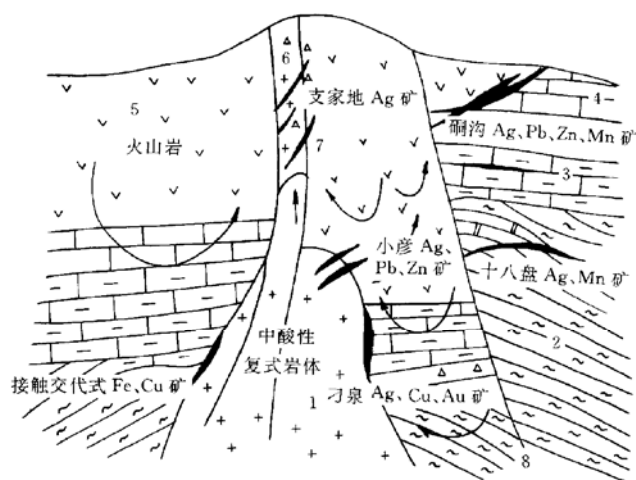


图 5 晋东北中低温热液成矿系列理想模式图

1—中酸性岩体; 2—五台群变质岩; 3—白云岩; 4—灰岩; 5—火山岩; 6—石英斑岩质爆破角砾岩;
7—矿体; 8—断层

Fig. 5. Ideal model for epithermal-mesothermal metallogenic series of northeastern Shanxi.

1—Intermediate-acid rock body; 2—Metamorphic rock of Wutai Group; 3—Dolomite; 4—Limestone; 5—Volcanic rock;
6—Explosion breccia of quartz porphyry; 7—Orebody; 8—Fault.

参 考 文 献

- 1 李兆龙等. 山西省支家地银矿地质特征及矿床成因. 矿床地质, 1992, 11 (4): 315~324.
- 2 余金杰, 孟瑞发, 李泽. 灵丘小青沟银、锰矿床地质地球化学研究. 矿床地质, 1996, 15 (4): 53~63.
- 3 王枝堂, 孙占亮. 灵丘小彦—枪头岭岩体的新认识. 山西地质, 1991, 6 (4): 425~436.
- 4 田永清. 五台山—恒山绿岩带地质及金的成矿作用. 太原: 山西科学技术出版社, 1991.
- 5 林建阳. 山西伯强金、银矿田同位素地质特征及其意义. 地质找矿论丛, 1992, 7 (2): 75~84.
- 6 赵一鸣, 林文蔚等. 中国夕卡岩矿床. 北京: 地质出版社, 1990.
- 7 赵一鸣, 林文蔚, 毕承思等. 中国含金夕卡岩矿床分布和主要地质特征. 矿床地质, 1997, 16 (3): 193~203.
- 8 张维根. 山西耿庄金银矿区隐爆角砾岩研究. 岩石学报, 1993 (3).
- 9 阎竹斌, 阎波, 党永顺等. 中国银矿地质及成矿预测. 西安: 陕西科学技术出版社, 1995.
- 10 Zartman R E, Doe B R. Plumbtectonics the Model. Tectonophysics, 1981, 75: 135~162.
- 11 Thiebnese, Sprey P G. The geology and geochemistry of Cretaceous—Tertiary alkaline igneous rock—related gold—

silver telluride deposits of Montana, U. S. A. Mineral Deposits, Balkema, Rotterdam, 1995: 199~202.

GEOLOGICAL CHARACTERISTICS AND GENETIC MECHANISM OF THE DIAOQUAN SILVER-COPPER DEPOSIT, SHANXI PROVINCE

Li Zhaolong, Zhang Lianying

(Tianjin Institute of Geology, Ministry of Metallurgical Industry, Tianjin 300061)

Key words: Skarn type silver-copper deposit, metallogenic characteristics, Diaquan orefield in Shanxi Province

Abstract

The Diaquan silver-copper deposit, a large-sized deposit recently discovered in northeastern Shanxi, occurs in the skarn zone around a neck facies complex rock body. Orebodies in zonal distribution are strictly controlled by crater structure. Composed of quartz porphyry, granite porphyry, biotite quartz monzonite and gabbro, the complex rock body intruded into Middle and Upper Cambrian and Lower and Middle Ordovician carbonate strata which contain relatively high minor elements such as Ag, Au, Pb and Zn. The Cu, Ag, Au, Pb, Zn, As and Mo contents of granite porphyry and quartz porphyry are 4~9 times higher than their Vinogradov's values in acid rocks, and their whole rock Rb-Sr isotopic isochron age is 130.9×10^6 , indicating products of Yanshanian period. The initial ratio of strontium isotopes ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)₀ is 0.7061, suggesting that the rock body is of mixed crust-mantle type. The lead isotopic characteristics of rocks give the same conclusion.

The orebodies have complicated mineral composition, with 47 metallic minerals already observed. The formation of minerals might be divided into two metallogenic periods and four ore-forming stages. Sulfur isotopic composition ($\delta^{34}\text{S}$) of minerals is between 0.5‰ and 5.7‰, showing hydrothermal characteristics of magma. The lead isotopic composition of Diaquan ores and the characteristic values of the source area are similar to those of biotite quartz monzonite and granite porphyry. $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ of ore-forming fluids is 3.66‰, and δD is -91‰, exhibiting characteristics of initial magmatic water. Meteoric water entered the ore-forming fluids at the late ore-forming stage. When the ore-forming temperature of fluids was 120~400°C and 120~220°C, the salinity of fluids was 3.5‰~3.8‰ NaCl; when the ore-forming temperature was 325~400°C, the salinity of fluids was 40‰~46‰ NaCl. The Diaquan silver-copper deposit was a skarn type silver-copper deposit related to the subvolcanic rock body. Copper and gold mineralization took place relatively early, but the principal ore-forming process occurred somewhat later and was related to volcanic epithermal-mesothermal solution.