

# 陕西南沙河地区车渡金矿床成因

王义忠, 王得权

WANG Yizhong, WANG Dequan

中核核工业集团二一四大队有限公司, 陕西 西安 710054

China Shaanxi Nuclear Industry Group No. 214 Party Co., Ltd., Xi'an 710054, Shaanxi, China

**摘要:** 针对陕西南沙河地区车渡金矿床进行了研究, 研究表明, 中—新元古界碧口群二亚群( $Pt_{2-3}bk_2$ )中玄武质火山凝灰岩具 Sr、Ba、Rb、Ce、P、Sm 相对富集, Ta、Nb、Zr、Hf、Ti 相对亏损的特征, 显示钙碱性火山弧玄武岩的特点; 车渡金矿床具有 2 种成因类型, 一是与中生代逆冲推覆构造形成的韧性剪切带有关的强硅化蚀变岩型金矿, 二是与中—新元古界碧口岩群二亚群火山凝灰岩有关的 BIF 型金矿。单颗粒磁铁矿成分分析认为, 车渡含金磁铁矿石英岩中磁铁矿具有高的 TFeO (平均值 99.59%) 含量和极低的  $TiO_2$ 、MgO、 $Al_2O_3$ 、MnO 含量, 指示车渡磁铁矿石英岩中条带状磁铁矿属于沉积变质型成因条带状含铁建造。含金磁铁矿石英岩型金矿的氢氧同位素显示,  $\delta^{18}O_{\text{水}}$  值为 12.34‰~12.45‰ (平均值 12.40‰),  $\delta D$  值为 -112.6‰~-103.5‰ (平均值 -108.05‰), 与鞍山—本溪地区条带状含铁建造型铁矿  $\delta D$  变化范围 (-129‰~-75‰) 一致, 暗示车渡含金磁铁矿石英岩中石英矿物具有条带状含铁建造特征。

**关键词:** 车渡金矿; 单矿物; 电子探针; 氢氧同位素; 矿床成因

**中图分类号:** P618.51   **文献标志码:** A   **文章编号:** 1671-2552(2019)11-1877-11

**Wang Y Z, Wang D Q. The genesis of the Chedu gold deposit in Nansha River area, Shaanxi Province. *Geological Bulletin of China*, 2019, 38(11):1877-1887**

**Abstract:** In this paper, the research work of the Proterozoic deposit in Nansha River area of Shaanxi Province was carried out, and the results show that the basalt volcanic tuff in Bikou Group 2<sup>nd</sup> sub-group ( $Pt_{2-3}bk_2$ ) is relatively rich in Sr, Ba, Rb, Ce, P and Sm, and depleted in Ta, Nb, Zr, Hf and Ti, exhibiting characteristics of calcium-alkaline volcanic arc basalt. There are two genetic types of the Proterozoic deposits, one is the strongly silicified rock type gold deposits related to the ductile shear zone formed by the Mesozoic thrust Nappe structure, and the other is the BIF type gold deposits related to the 2<sup>nd</sup> subgroup volcanic tuff of the Meso-Neo Proterozoic period. According to composition analysis of single granular magnetite, the authors hold that magnetite has high TFeO (99.59% on average) content and very low  $TiO_2$ , MgO,  $Al_2O_3$  and MnO content in gold magnetic quartz, which indicates that the banded magnetite in the Chedu magnetite quartzite gold ore is of sedimentary metamorphic type, i.e., belonging to quartzite type gold deposit. Hydrogen and oxygen isotope features of gold-bearing magnetite quartzite type gold ore show that  $\delta^{18}O_{\text{water}}$  value is 12.34‰~12.45‰ (12.4‰ on average), and  $\delta D$  value is -112.6‰~-103.5‰ (-108.05‰ on average), consistent with BIF variation range of  $\delta D$ -type iron ore in Anshan-Benxi area (-129‰~-75‰), suggesting that quartz minerals in quartz rocks with gold magnetite have BIF characteristics.

**Key words:** Chedu gold deposit; single mineral; electron microprobe analysis; hydrogen and oxygen isotope; genesis of deposit

车渡金矿床地处扬子板块、秦岭及松潘—甘孜褶皱带的结合部, 属于碧口地块的重要组成部分, 空间上位于阳平关—勉略大断裂带北侧, 区域上金

矿资源十分丰富<sup>[1-2]</sup>。早期研究认为, 车渡金矿床是与印支期韧性剪切作用有关、多期热液叠加富集的金矿床; 而构造变形引发的碧口群火山岩动力分异

收稿日期: 2019-05-02; 修订日期: 2019-09-26

项目资助: 陕西省地勘基金项目《陕西省宁强县南沙河地区金矿普查》(编号: 61201203115)

作者简介: 王义忠(1970-), 男, 高级工程师, 从事固体勘查工作。E-mail: 2488296218@qq.com

作用形成了动力变质热液,是金矿成矿流体的主要来源之一;韧性剪切带内碎裂石英岩等脆性地质体是重要的成矿载体,为含矿组分的富集沉淀提供了有利场所;而后期多次构造活动对矿体进行了破坏,使矿体形态多变<sup>[3]</sup>。但是,对于车渡金矿床的认识仅局限于韧性剪切带控矿,对BIF型(条带状含铁建造型)金矿体尚未识别。本文以车渡金矿床为研究对象,结合对该金矿床的勘查认识,厘定了车渡金矿床中BIF型金矿体,分析了BIF型和强硅化蚀变岩型金矿体的成因,为后期车渡金矿床找矿勘查思路的转变提供参考。

## 1 矿区地质背景

车渡金矿床位于扬子地台北缘秦岭多金属成矿带之“勉、略、宁”成矿亚带南缘,大地构造位置处于扬子板块、秦岭及松潘-甘孜褶皱带的结合部<sup>[4]</sup>,属于碧口地块的重要组成部分。车渡金矿床赋存于阳平关大断裂以北的中-新元古界碧口群(Pt<sub>2-3</sub>bk)火山岩中。区域出露的中-新元古界碧口群火山岩展布于阳平关-勉县深大断裂北西侧,呈北东东-南西西向展布,形成于大陆裂谷环境,是裂谷拉张速度较快时火山作用的产物,为一套巨厚的海相陆源碎屑-火山碎屑沉积岩系。根据前人获得的同位素数据,碧口群同位素年龄值介于1611~764Ma之间,为中-新元古代的产物<sup>[4-6]</sup>。按其岩性组合特征可分为4个亚群,其中第二亚群(Pt<sub>2-3</sub>bk<sub>2</sub>)以酸性火山碎屑岩和中基性火山熔岩组成的变质岩为主,普遍伴随铜、金矿化发育<sup>[7]</sup>。

区域上,碧口群呈北东东-南西西向延展,新元古代晚期-中生代经历了多期次构造变形,主要有早期与板块俯冲碰撞相关的紧闭同斜倒转褶皱变形、晚期大型逆冲型韧性剪切变形及随后的左行走滑型脆韧性剪切变形<sup>[8]</sup>。碧口群韧性剪切带主要是沿早期地层层理或构造片理发育的顺层韧性变形带,剪切面产状主体与地层层理产状一致,发育较多的典型韧性构造,如剪切透镜体、剪切褶皱、旋转碎斑系等韧性构造。区域上金矿资源丰富,已发现青木川<sup>[9]</sup>、广平镇、玉泉坝、小燕子沟<sup>[9-10]</sup>、金厂沟<sup>[11]</sup>、旧房梁<sup>[12]</sup>、八海、关口垭、燕子砭、太阳岭、阳平关、车渡等金矿床(点)近20处(图1),与区域中-新元古界碧口群及中酸性-中基性火山岩有关的韧性剪切带具有成因联系,属于北缘秦岭

多金属成矿带之“勉、略、宁”成矿亚带的重要组成部分,显示出巨大的找金潜力。

## 2 矿床地质特征

### 2.1 矿体特征

车渡金矿床赋存于区域性阳平关-勉县深大断裂带北侧的次级韧-脆性剪切带中,共圈定出金矿化蚀变带2条,编号为Au I和Au II蚀变带(图2)。

Au I蚀变带为车渡金矿床目前已发现规模最大的含金蚀变带,产于阳平关-勉县深大断裂带北侧次级韧-脆性剪切带中,含矿围岩为中-新元古界碧口群二亚群,为磁铁石英岩型金矿石,属于BIF型金矿,伴生有Fe、Ag、Cu矿化,近矿围岩蚀变为磁铁矿化、硅化、褐铁矿化(黄铁矿化)、碳酸盐化。Au I蚀变带呈北东东向展布,走向上具有膨胀狭缩现象,最宽可达6m,共圈定4条金矿体,其特征见表1。

Au II蚀变带位于Au I蚀变带北西侧,二者呈平行带状产出,也赋存于阳平关-勉县深大断裂带北侧次级韧-脆性剪切带中,矿化蚀变以硅化为主,褐铁矿化(黄铁矿化)次之;Au II蚀变带呈北东东向展布,走向东西长约2000m,南北宽20~120m,圈定2条金矿体,分别为Au II-1和Au II-2(表1)。

从表1可以看出,车渡金矿体均受北东东向韧性剪切带控制,赋矿岩性均为蚀变火山岩,为强硅化蚀变岩型金矿石,对矿化富集具有选择性,表现出构造-石英岩双重控制的特点,与区域中生代逆冲推覆作用形成的韧性剪切作用具有成因联系。结合地质勘查、钻探及物探测深工作,认为后期构造活动对矿体形态改造较大,主要表现为在多次推覆剪切作用下形成的一系列褶皱,造成矿体在倾向上多次重复出露,局部地段在走向及倾向上均具有膨胀狭缩的特征。

### 2.2 金矿石特征

车渡金矿床的成因可分为2类,BIF型金矿和蚀变岩型金矿。根据矿床成因的差异,金矿石可分为2类:①磁铁石英岩金矿石,灰黑色,微-细粒结构,条带状构造(图版I-a);磁铁矿呈条带状分布,自形程度较高,多呈正方形,粒径小于0.40mm,含量为35%(图版I-b);石英呈条带状分布,受后期变质作用发生重结晶,粒径0.05~0.1mm,含量约为50%;次生褐铁矿呈粒状,粒径0.1~0.2mm,含量约8%;绿泥石含量约5%,偶见方铅矿、黄铜矿(图版I-

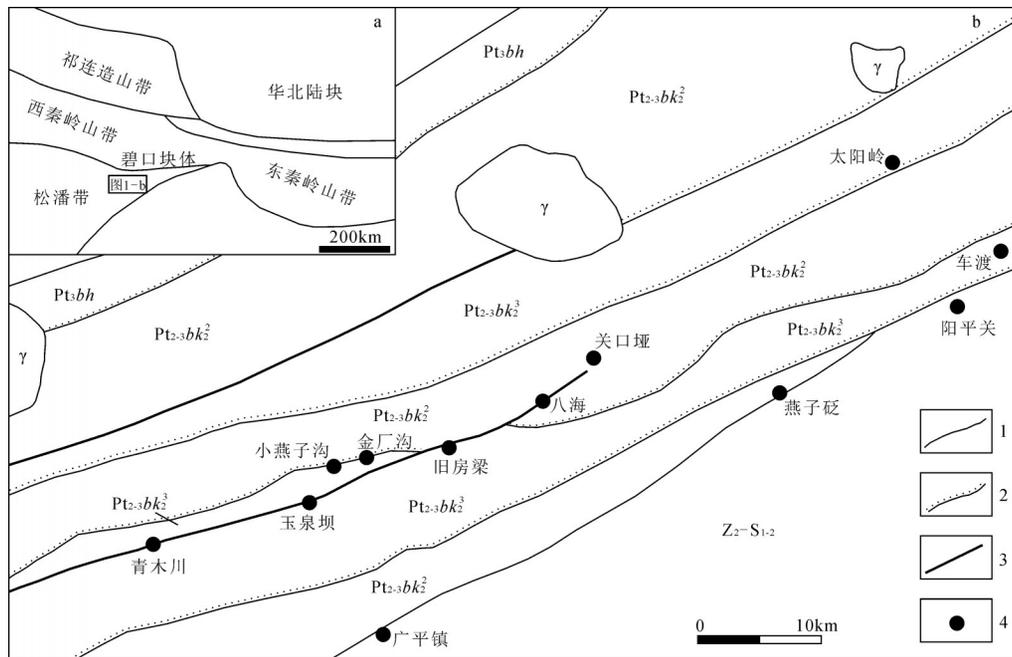


图 1 研究区大地构造位置图(a,据参考文献[1]修改)和区域地质矿产略图(b)

Fig. 1 Geotectonic location map of the study area (a) and regional geological mineral map (b)

1—地质界线;2—不整合面;3—断裂破碎带;4—金矿床; $Z_2-S_{1-2}$ —古生界; $Pt_{3bh}$ —新元古界横单群;  
 $Pt_{2-3}bk_2^3$ —中—新元古界碧口群二亚群三岩组; $Pt_{2-3}bk_2^2$ —中—新元古界碧口群二亚群二岩组; $\gamma$ —酸性侵入岩

c)。②蚀变火山岩型金矿石,土黄色,变余凝灰结构,块状构造,主要蚀变为硅化,其次为褐铁矿化(黄铁矿化)(图版 I-d);矿石主要由石英、凝灰质团块、褐铁矿、黄铁矿、闪锌矿、绿泥石、方解石等组成(图版 I-e、f);黄铁矿大小多在 0.01~0.2mm 之间,后期者为集合体状,呈条纹状集中,褐铁矿化强烈。

### 3 地球化学特征

为了研究陕西南沙河车渡金矿床的成因,本文选取 6 件样品进行测试,其中岩石地球化学样品 4 件(赋矿围岩和赋矿岩石样品各 2 件),氢氧同位素样品 2 件。

#### 3.1 样品选择及测试

本次在车渡金矿区采集 2 件玄武质火山凝灰岩(赋矿围岩)和 2 件磁铁石英型金矿石样品,送至中核工业集团综合分析测试中心进行主量、微量元素测试工作,实验结果见表 2。本文主量元素分析方法:称取  $0.5000 \pm 0.0001$ g 岩石粉末样品和  $4.0000 \pm 0.0001$ g  $Li_2B_2O_7$ ,混合均匀后在高频熔样机熔成玻璃片,然后用 XRF 仪器测定。微量、稀土元素分析方法:称取约 0.040g 岩石粉末样品加酸溶解,蒸干再

加入适量  $HNO_3$  和  $HF$ ,放入烘箱中在  $185^\circ C$  消解 48h,蒸干后再加入  $HNO_3$  和  $HF$ ,然后用 40%  $HNO_3$  提取,稀释后用 ICP-MS(USA Thermo Electron Co. X7 型)测试。

本次采集 2 件具有代表性的磁铁石英岩金矿石样品,进行氢氧同位素分析。其中,石英单矿物的挑选在廊坊地质服务有限公司完成,氢、氧同位素分析测试在中核北京地质研究院稳定同位素实验室完成。

#### 3.2 玄武质火山凝灰岩特征

玄武质火山凝灰岩的  $SiO_2$  含量为 47.47%~52.72%,平均值为 49.48%; $Al_2O_3$  含量为 13.52%~18.99%,平均值为 16.97%; $TFe_2O_3$  含量为 10.36%~15.93%,平均值为 11.95%; $CaO$  含量为 5.83%~13.54%,平均值为 8.27%; $Na_2O$  含量为 2.65%~4.32%,平均值为 3.20%; $K_2O$  含量为 0.26%~2.11%,平均值为 0.87%; $Mg^\#$  值为 38.94~55.37,平均值为 45.83。研究区玄武质凝灰岩样品的  $Mg^\#$  值较低,暗示玄武质岩浆不是原生玄武岩浆,而是经过演化的分异岩浆。2 件样品在 TAS 图解中均落入粗面玄武岩区域,且位于碱性范围(图 3-a);在  $SiO_2-K_2O$ (图

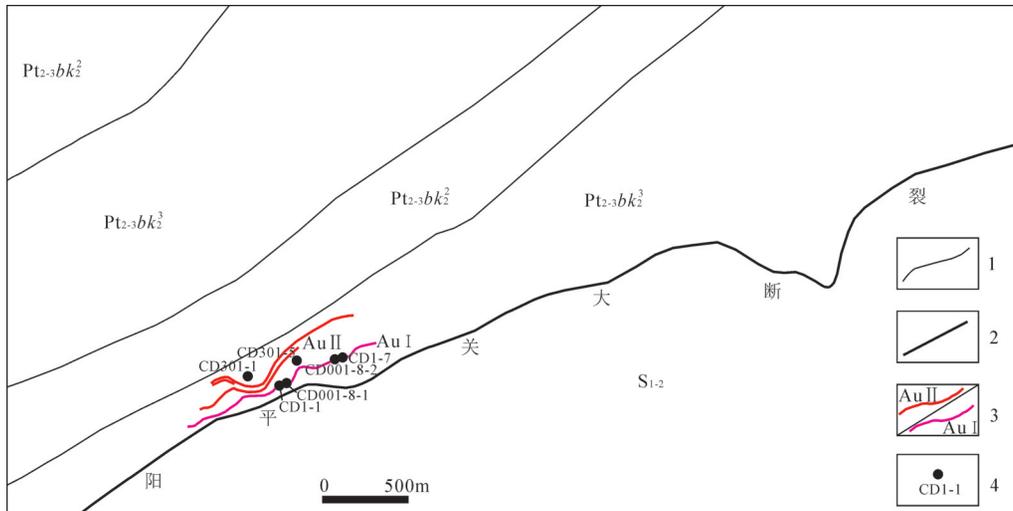


图2 车渡金矿床地质简图

Fig. 2 Simplified geological map of the Chedu gold deposit

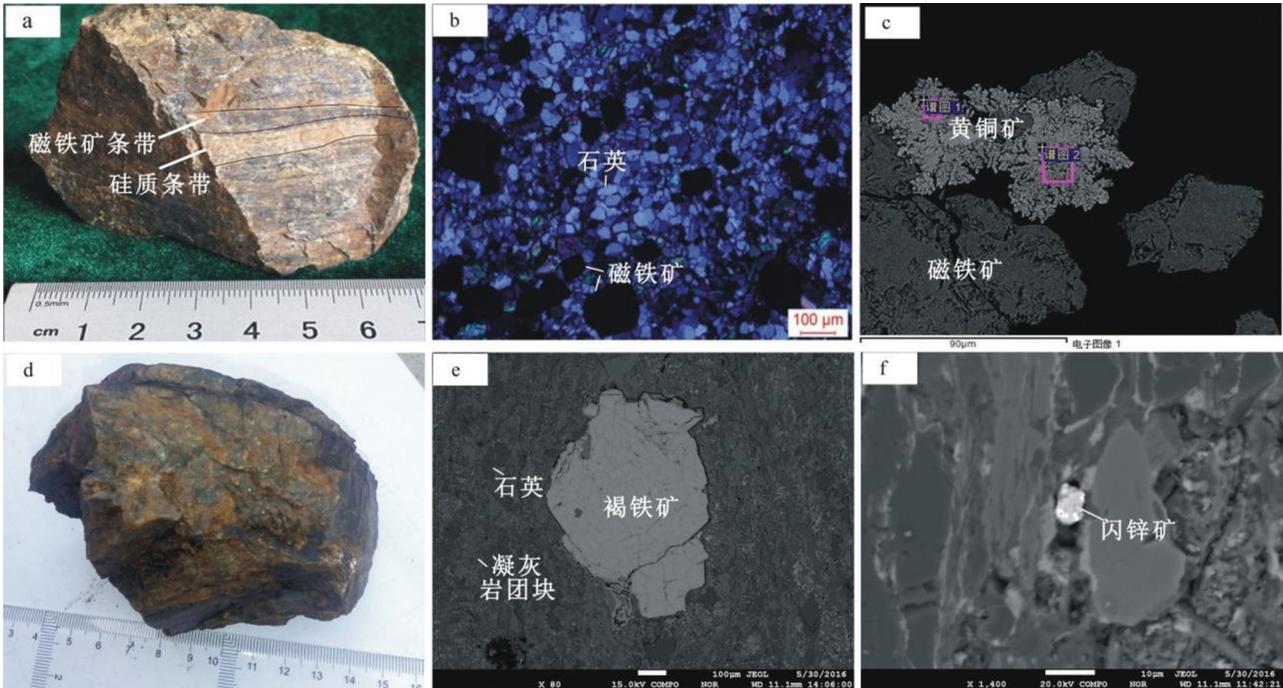
1—地质界线;2—断裂破碎带;3—金矿体及编号;4—样品采集位置;S<sub>1-2</sub>—古生界;  
Pt<sub>2-3</sub>bk<sub>2</sub><sup>3</sup>—中-新元古界碧口群二亚群三岩组;Pt<sub>2-3</sub>bk<sub>2</sub><sup>2</sup>—中-新元古界碧口群二亚群二岩组

3-b)图解中,落入低钾拉斑系列与钙碱性系列的交汇部位。

玄武质火山凝灰岩的稀土元素含量见表2。样品的稀土元素总量变化范围较小,介于 $65 \times 10^{-6} \sim$

$155 \times 10^{-6}$ 之间,平均值为 $108 \times 10^{-6}$ ,总体上稀土元素含量较低。轻、重稀土元素比值介于1.59~2.70之间,平均值为2.17,暗示稀土元素分馏不明显,重稀土元素相对亏损。 $\delta Eu$ 值为0.64~1.47(平均值

图版 I Plate I



a. BIF型金矿石(磁铁石英岩型金矿石); b. 磁铁石英岩微观照片; c. 磁铁石英岩型金矿石微观照片; d. 强硅化蚀变岩型金矿石;  
e. 强硅化蚀变岩型金矿石微观照片; f. 强硅化蚀变岩型金矿石中的闪锌矿

表 1 车渡金矿体特征

Table 1 List of characteristics of the Chedu gold deposit

矿体编号	赋矿岩石	矿体规模			矿体产状		平均品位/(g·t <sup>-1</sup> )	蚀变组合
		控制长/m	平均厚/m	控制斜深/m	倾向/°	倾角/°		
Au I -1-1	磁铁石英岩	720	1.59	90	350~15	43~72	6.14	褐(黄)铁矿化、磁铁矿化、孔雀石化、碳酸盐化
Au I -1-2	磁铁石英岩	280	0.82	53	0~15	66~73	1.75	弱褐(黄)铁矿磁化、铁矿化、碳酸盐化
Au I -1-3	磁铁石英岩	1400	1.35	30	320~350	66~73	3.14	褐(黄)铁矿磁化、铁矿化、碳酸盐化
Au I -2	磁铁石英岩	1200	1.23	88	350~15	40~71	2.58	褐(黄)铁矿磁化、铁矿化、碳酸盐化
Au II -1	强硅化蚀变岩	160	1.75	40	352	83	1.97	硅化、褐铁矿化、黄铁矿化
Au II -2	强硅化蚀变岩	400	0.84	40	352	83	1.68	硅化、褐铁矿化、黄铁矿化、弱磁铁矿化

1.04),具中等负 Eu 异常和正 Eu 异常;  $\delta Ce$  值为 0.89~1.01(平均值 0.96),具较弱的 Ce 异常。在大洋中脊标准化微量元素蛛网图(图 4-a)和球粒陨石标准化稀土元素配分模式图(图 4-b)中,样品形态略有差异,但总体变化趋势一致,具 Sr、Ba、Rb、Ce、P、Sm 相对富集, Ta、Nb、Zr、Hf、Ti 相对亏损的特征,反映车渡金矿床中玄武质火山凝灰岩具有钙碱性火山弧玄武岩特点。

在 Hf/3-Th-Nb/16 图解(图 5-a)和 Hf/3-Th-Ta 图解(图 5-b)中,样品点均落入 N 型洋脊玄武岩区,指示车渡金矿床中玄武质火山凝灰岩形成于大

洋中脊环境。

### 3.3 含金磁铁石英岩特征

含金磁铁石英岩型金矿石 SiO<sub>2</sub> 含量在 53.41%~84.97%之间,平均值为 69.19%; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量在 4.86%~41.99%之间,平均值为 23.43%;二者占氧化物组分的 89.83%~95.4%。 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量介于 0.9%~1.95%之间,平均值为 1.43%; MgO 含量介于 0.24%~0.56%之间,平均值为 0.40%; CaO 含量介于 0.63%~3.52%之间,平均值为 2.11%; 磁铁石英岩除铁的氧化物外,其他氧化物组分含量均很低,表明大陆碎屑物质极少。

表 2 车渡金矿岩石样品主量、微量和稀土元素含量

Table 2 Major, trace and rare earth elements of samples in the Chedu gold deposit

样品号	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	MgO	MnO	CaO	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	烧失量
CD301-1	45.17	13.27	14.98	0.31	3.57	3.59	0.19	6.2	3.78	0.4	<0.01	8.06
CD301-5	48.15	13.77	11.34	0.26	4.04	5.51	0.21	6.62	1.01	0.08	0.5	8.16
CD1-7	84.97	1.95	4.86	0.25	0.24	0.56	0.21	3.52	0.13	0.03	<0.01	3.4
CD1-1	53.41	0.9	41.99	0.16	0.01	0.24	0.57	0.69	0.03	0.41	<0.01	0.93
样品号	Ba	Hf	Nb	Rb	Sr	Ta	Th	U	Zr	Y	La	Ce
CD301-1	138	3.62	2.84	8.32	21	0.15	0.7	0.23	33.4	13.4	7.78	17
CD301-5	61.1	1.87	1.03	3.73	22.3	0.1	0.25	0.23	13.9	12.6	4.91	9.66
CD1-7	83.3	13.2	23	5.34	111	1.04	1.18	0.49	214	30.9	20.7	46.8
CD1-1	28.8	2.41	4.99	8.28	46.6	0.36	0.28	0.26	54.1	17.9	3.9	9.2
样品号	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
CD301-1	2.67	10.1	2.8	0.62	2.45	0.4	2.85	0.49	1.45	0.19	1.74	0.27
CD301-5	1.62	5.6	1.75	0.36	1.57	0.26	2.15	0.41	1.31	0.19	1.75	0.28
CD1-7	6.65	31.6	8.15	2.52	8	1.37	7.74	1.42	3.72	0.46	2.64	0.36
CD1-1	1.46	7.83	2.56	0.83	2.91	0.61	3.97	0.82	2.47	0.34	2.13	0.3

注: CD301-1、CD301-5 为玄武质火山凝灰岩样品, CD1-7、CD1-1 为磁铁石英岩金矿石样品。主量元素含量单位为%, 微量和稀土元素含量单位为 10<sup>-6</sup>

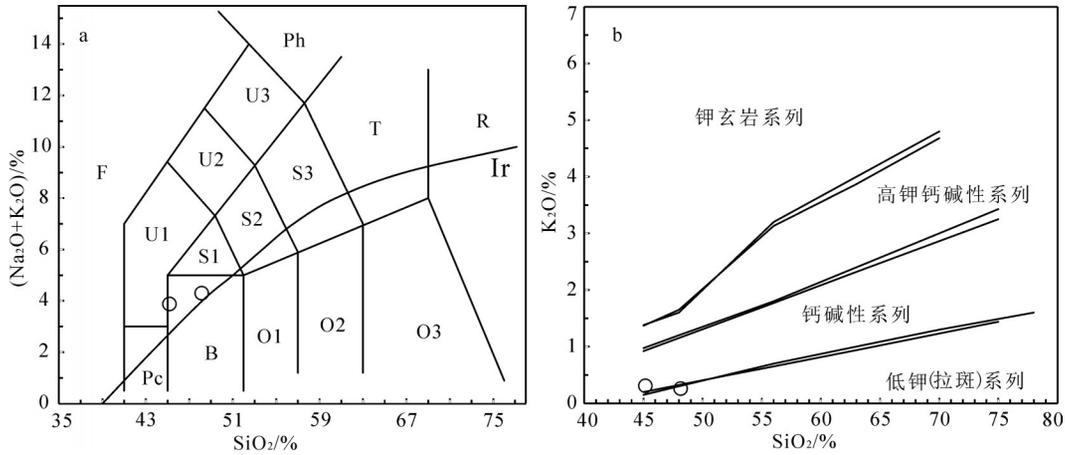


图3 玄武质火山凝灰岩TAS(a)和SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O图解(b)

Fig. 3 TAS (a) and SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O (b) diagrams of basaltic volcanic tuff

Pc—苦橄玄武岩;B—玄武岩;O1—玄武安山岩;O2—安山岩;O3—英安岩;R—流纹岩;S1—粗面玄武岩;S2—玄武质粗面安山岩;S3—粗面安山岩;T—粗面岩、粗面英安岩;F—副长石岩;U1—碱玄岩、碧玄岩;U2—响岩质碱玄岩;U3—碱玄质响岩;Ph—响岩  
Ir—Irvine 分界线,上方为碱性,下方为亚碱性

含金磁铁矿石岩稀土元素总量(REE+Y)为  $44.4 \times 10^{-6} \sim 64.2 \times 10^{-6}$ , 平均值为  $54.32 \times 10^{-6}$ 。在MORB标准化微量元素蛛网图上,含金磁铁矿石岩型金矿石大离子亲石元素Rb、Ba、Th,高场强Hf、Sm正异常,Nb、Ta、Ti负异常(图6-a);在PAAS标准化稀土元素配分图上,配分曲线左倾,  $(La/Yb)_{PAAS} = 0.21 \sim 0.33$ ,显示金矿石重稀土元素富集的特征(图6-b);具有轻微的正Eu异常( $Eu/Eu^* = 1.01 \sim 1.12$ )与正Y异常( $Y/Y^* = 0.90 \sim 1.07$ );海水的Y/Ho值为44~74,且随着深度增加而减小;陆地岩石与球粒陨石的Y/Ho值为26;洋中脊高温热液的Y/Ho值为28~39;含金磁铁矿石岩的Y/Ho值为27.44~

31.14,平均值为29.29,与洋中脊高温热液相似<sup>[14]</sup>。

### 3.4 单颗粒磁铁矿成分

本次对矿区内条带状磁铁矿石金矿石中的单颗粒磁铁矿进行电子探针分析,对磁铁矿的成因类型进行探讨。单颗粒磁铁矿中SiO<sub>2</sub>含量为0%~0.484%,平均值为0.797%;TFeO含量为91.180%~94.299%,平均值为93.284%;Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量为0%~0.077%,平均值为0.171%;TiO<sub>2</sub>含量为0%~0.067%,平均值为0.010%;MgO含量为0%~0.063%,平均值为0.010%;MnO含量为0%~0.087%,平均值为0.011%;V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>含量为0.321%~0.468%,平均值为0.375%;AuO含量为0%~0.105%,平均值为0.026%,

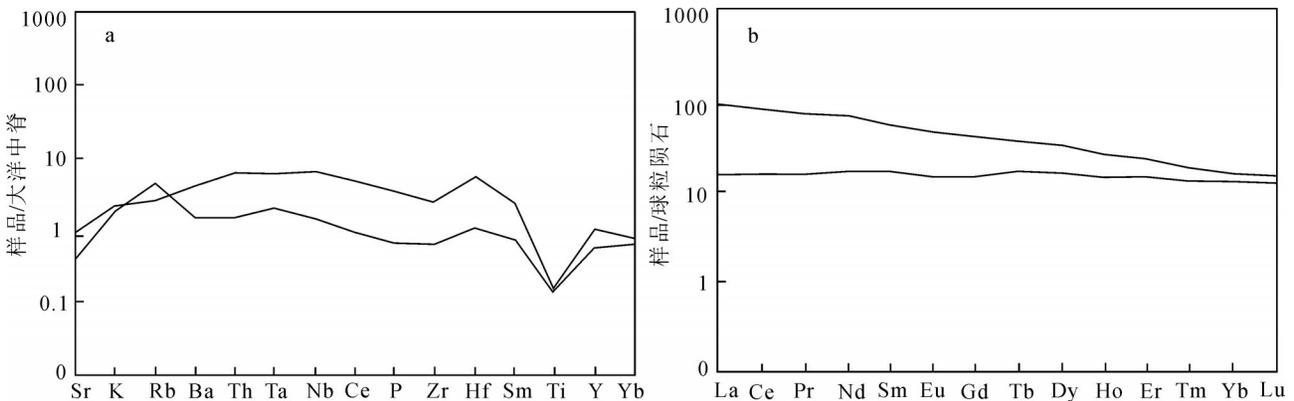


图4 大洋中脊玄武岩标准化微量元素蛛网图(a)和球粒陨石标准化稀土元素配分模式图(b)(标准化值据参考文献[13])

Fig. 4 MORB normalized trace element cobweb diagrams (a) and chondrite-normalized REE patterns (b)

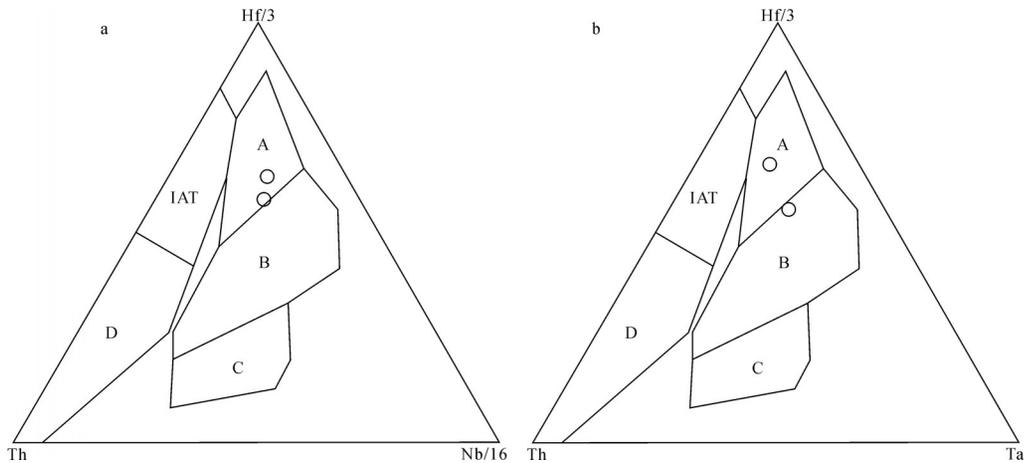


图 5 玄武质火山凝灰岩 Hf/3-Th-Nb/16(a)和 Hf/3-Th-Ta(b)图解

Fig. 5 Hf/3-Th-Nb/16 (a) and Hf/3-Th-Ta (b) diagrams of basalt tuff

A—N型洋脊玄武岩;B—富集型洋脊玄武岩+板内拉斑玄武岩;C—板内碱性玄武岩;  
D—岛弧拉斑玄武岩+岛弧钙碱性玄武岩;IAT—火山弧型玄武岩

代表磁铁矿内可能存在次显微金。

Nadoll 等<sup>[15]</sup>认为,BIF型矿床中的磁铁矿具有低 Al、Ti、V、Mn、Cr、Co、Ni、Ga、Sn 的特征;Dupuis 等<sup>[16]</sup>统计了世界上不同成因类型矿床中磁铁矿组分特征,认为较其他类型的磁铁矿,BIF型铁矿中的磁铁矿具有很低的 TiO<sub>2</sub>、MgO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MnO 含量。车渡金矿磁铁矿石中 TFeO 占氧化物的 98.90%~99.87%,平均值为 99.59%,且其他氧化物含量均非常低,暗示车渡磁铁矿石中条带状磁铁矿属于沉积变质型成因,即 BIF 型金矿床。

对于磁铁矿的标型特征,国内学者常采用陈光远等<sup>[17]</sup>的 TiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO 三角图解。以上方法是将电子探针对单颗粒磁铁矿成分分析结果投影于

三角图解中,以判别磁铁矿成因。从图 7-a 可以看出,磁铁矿数据点落入沉积变质-接触交代区,从图 7-b 可以看出,磁铁矿数据点落入沉积变质型区域。综合认为,车渡金矿区中条带状磁铁矿石为沉积变质成因。

### 3.5 磁铁矿与金的关系

通过电子探针和扫描电镜分析,在磁铁矿中发现了包裹的银金矿和碲金矿(图 8)。但磁铁矿是否作为磁铁矿石型金矿石的主要载金矿物,仍需进一步讨论。本文引用二一四大队在 TC I 0801 中采集的金矿石样品化学分析结果(图 9)。可见,虽然金的品位与铁的含量不呈严格的正比关系,但具明显的正比变化趋势(图 9)。由此认为,磁铁矿是磁

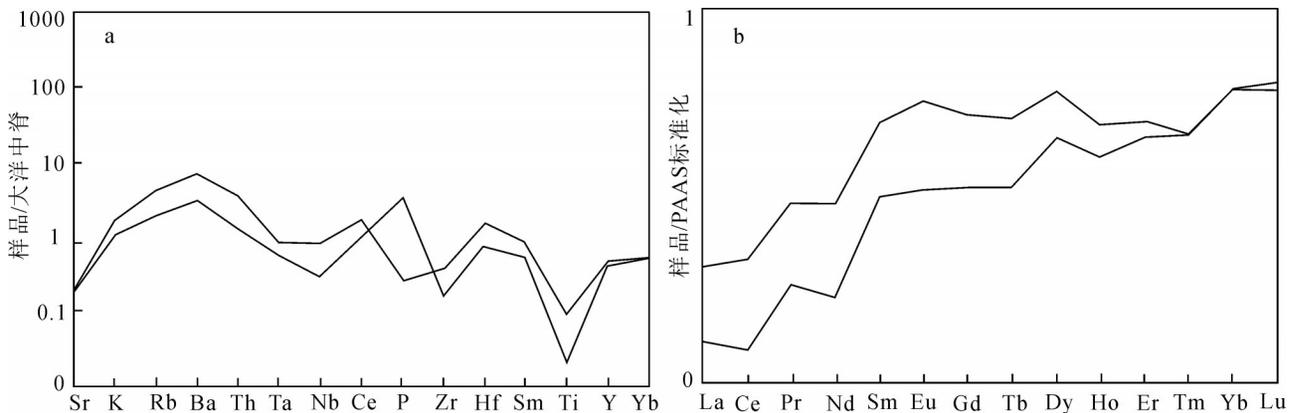


图 6 大洋中脊玄武岩标准化微量元素蛛网图(a)和 PAAS 标准化稀土元素配分模式图(b)(标准化值据参考文献[13])

Fig. 6 MORB normalized trace element cobweb diagram (a) and PAAS normalized REE patterns (b)

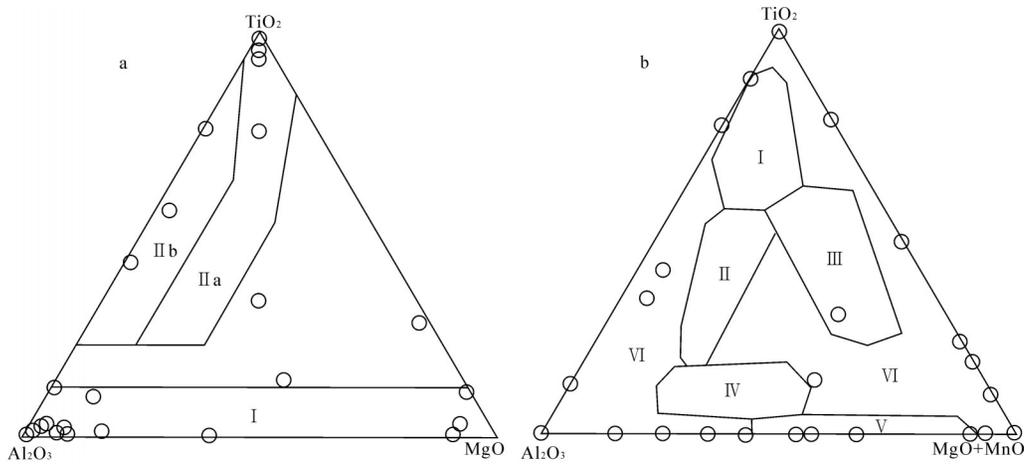


图7 车渡金矿磁铁矿 TiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO(a)和 TiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-(MgO+MnO)(b)图解

Fig. 7 TiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO (a) and TiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-(MgO+MnO) (b) diagrams of magnetite in the Chedu gold deposit

a: I—沉积变质—接触交代区; IIa—超基性—基性—中性岩浆区; IIb—酸性—碱性岩浆区。

b: I—副矿物型; II—岩架型; III—火山岩型(玢岩型); IV—接触交代热液型; V—矽卡岩型; VI—沉积变质型

铁石英岩型金矿石的主要载金矿物。

### 3.6 氢氧同位素特征

本次采集的2件磁铁矿石岩型金矿石的氢氧同位素分析结果见表3。其δ<sup>18</sup>O范围为16.4‰~16.6‰,平均值为16.5‰;石英δ<sup>18</sup>O值较集中,证明其物质来源单一。车渡金矿床中磁铁矿石岩的δ<sup>18</sup>O

范围与鞍山—本溪地区BIF型铁<sup>3</sup>氧同位素数值相近<sup>[19-20]</sup>,与世界上阿尔戈马型BIF的δ<sup>18</sup>O范围(8.1‰~21.5‰)一致<sup>[21]</sup>,显示热水成因硅质岩的特征<sup>[20-22]</sup>。应用δ<sup>18</sup>O<sub>水</sub>=δ<sup>18</sup>O<sub>石英</sub>-1000lnα<sub>Q-W</sub>, 1000lnα<sub>Q-W</sub>=3.38×106T-2-3.4公式<sup>[18]</sup>,计算出的δ<sup>18</sup>O<sub>水</sub>值为12.34‰~12.45‰,平均值为12.40‰。δD值为

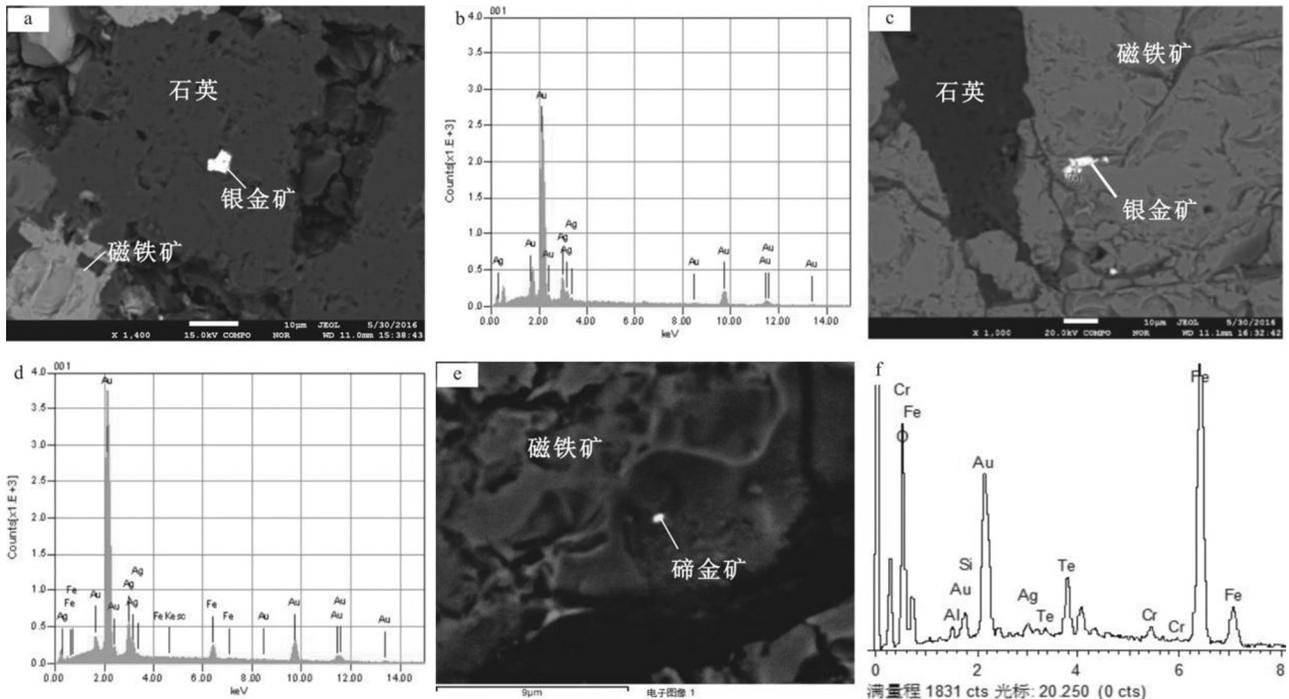


图8 车渡金矿矿石显微照片

Fig. 8 Microscopic photos of the Chedu gold deposit

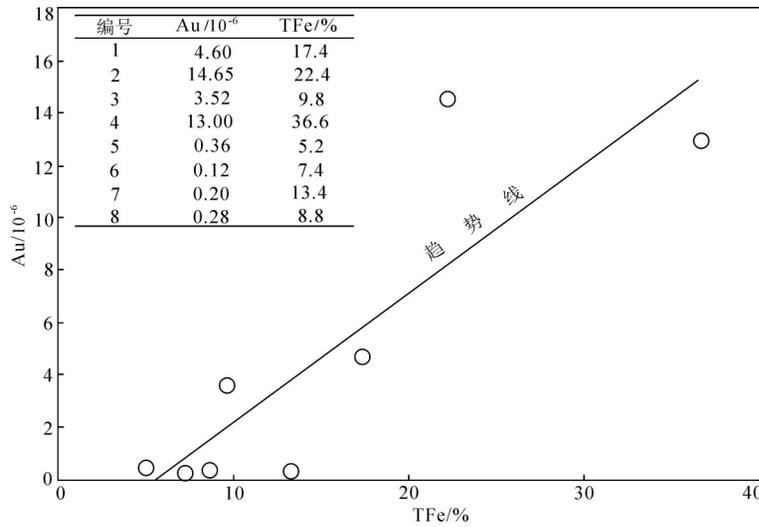


图9 车渡金矿磁铁石英岩金矿石 TFe-Au 关系图

Fig. 9 Diagram of quartzite gold ore TFe-Au in the Chedu gold deposit

-112.6‰ ~ -103.5‰, 平均值为 -108.05‰。与鞍山一本溪地区 BIF 型铁矿的 δD 值变化范围 (-129‰ ~ -75‰) 一致, 并认为鞍山一本溪地区 BIF 型铁矿床的形成可能经历了不同的地质热事件, 矿床的形成受后期热液作用的影响, 尤其是构造条件是铁质活化、迁移和富集的重要条件<sup>[20]</sup>。车渡金矿磁铁石英岩中石英单矿物的 δ<sup>18</sup>O<sub>水</sub>、δD 值的投点位置在鞍山一本溪地区 BIF 型铁矿石单矿物的 δD 的投点位置范围(图 10)。此外, 车渡金矿床的形成受后期构造控制明显, 产于阳平关-勉县深大断裂带北侧次级韧-脆性剪切带中, 与鞍山一本溪地区 BIF 型铁矿床具有相似的控矿特征。因此, 笔者认为车渡含金磁铁石英岩中石英矿物具有 BIF 特征。

## 4 讨论

### 4.1 磁铁矿包裹金的研究意义

载金矿物特征的研究可以解释区域金成矿作

用, 反映区域成矿地质背景条件、成矿机理、矿床成因等信息<sup>[23]</sup>。国内外地质工作者<sup>[24-27]</sup>对 100 多个不同类型(包括绿岩带型、浅变质碎屑岩型、沉积岩型、火山岩型和侵入岩内外接触带型)金矿床统计显示, 载金矿物涉及硫化物及其类似化合物、硅酸盐、碳酸盐和硫酸盐类矿物。与磁铁矿关系密切的条带状硅铁建造(BIF)型金矿, 金矿往往产在氧化物相铁建造中的硫化物相部分, 载金矿物也主要为黄铁矿、石英碳酸岩及绿泥石<sup>[28]</sup>, 仅发现少量以磁铁矿为载金矿物的裂隙金、粒间金, 是后期还原性含金热液侵入在磁铁矿裂隙中富集成矿的结果<sup>[18, 29]</sup>。综上所述, 无论 BIF 铁矿还是其他类型金矿的形成都与还原性的富硫、富硅的含金热液密切相关, 都未在磁铁矿中发

现包裹金和次显微金。车渡金矿磁铁矿包裹金的发现, 证明金是在稍早或同时于磁铁矿结晶时形成, 对 BIF 型金矿的成因机理研究具有重大意义, 证明在 BIF 型铁矿沉积的低氧和缺氧环境<sup>[30]</sup>, 金可以沉积富集成矿。

### 4.2 矿床成因

#### 4.2.1 磁铁石英岩型金矿成因

从矿石结构看, 矿石具有明显的前寒武纪条带状硅铁建造的特征, 初步认为该矿石为 BIF 型金矿。从载金矿物特征看, 磁铁矿单矿物的化学成分具有典型的沉积-变质型磁铁矿特征, 石英氢氧同位素特征与鞍山一本溪地区 BIF 型铁矿氧同位素数值相近。根据这些特征可以判定, 车渡金矿磁铁石英岩型金矿床为 BIF 型金矿。但是, 车渡金矿磁铁矿单矿物 V<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的平均值为 0.375%, 较 Dupuis 等<sup>[16]</sup>总结的 BIF 铁矿的 V<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 值高一个数量级, 可能代表 BIF 型含金磁铁矿与不含金磁铁矿的差异, 其原因

表 3 车渡金矿磁铁石英岩中石英单矿物氢氧同位素值

Table 3 The hydrogen and oxygen isotope values of quartz single mineral in magnetite quartz rock of the Chedu gold deposit

样品原号	岩石	单矿物	δD/‰	δ <sup>18</sup> O <sub>石英</sub> /‰	温度/°C	δ <sup>18</sup> O <sub>水</sub> /‰
CD001-8-1	磁铁石英岩	石英	-112.6	16.6	396	12.45
CD001-8-2	磁铁石英岩	石英	-103.5	16.4	400	12.34

注: δ<sup>18</sup>O<sub>水</sub> = δ<sup>18</sup>O<sub>石英</sub> - 1000lnα<sub>Q-W</sub>, 1000lnα<sub>Q-W</sub> = 3.38 × 106T - 2 - 3.4<sup>[18]</sup>

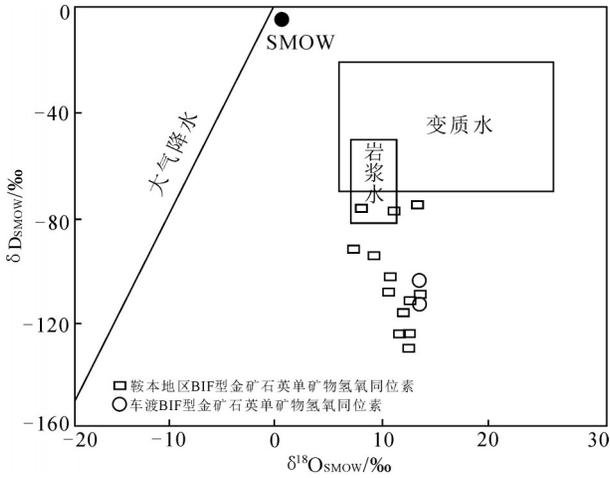


图 10 车渡金矿主成矿阶段流体  $\delta^{18}\text{O}_{\text{水}}-\delta\text{D}$  组成  
Fig. 10 The composition of fluid  $\delta^{18}\text{O}_{\text{water}}-\delta\text{D}$  in the main metallogenic stage of the Chedu gold deposit

有待进一步研究。

4.2.2 强硅化蚀变岩型金矿成因

据区域构造演化分析,印支期华北和扬子板块发生大范围的拼合碰撞,构造变形引发的动力分异作用形成的动力变质热液,是碧口地区金矿床的主要成矿流体来源之一。中生代大面积的逆冲推覆构造造成了大范围的韧性变形,在韧性变形构造动力分异作用下形成大量的含金热液,并沿韧性剪切带向上运移,逐渐集中在相对封闭的韧脆性或脆性裂隙中,发生Au元素的沉淀与富集,形成与韧性剪切带关系密切的蚀变岩型金矿床,其成矿演化与构

造演化吻合。含矿热液与构造破碎带中围岩发生化学交代反应形成蚀变岩矿体<sup>[31-33]</sup>。

4.3 车渡金矿勘查建议

车渡金矿床中BIF型金矿和强硅化蚀变岩型金矿的识别,有助于勘查思路的转变。BIF型金矿石为沉积变质成因,且形成时代较早(1611~764Ma),中生代断裂构造对该类型矿体具破坏作用,因此,在勘查过程中应注重电法、磁法等综合方法的利用;强硅化蚀变岩型金矿形成于中生代,与区域逆冲推覆构造关系密切,而近东西向断裂构造(印支晚期—燕山期)为成矿流体提供了运移通道和成矿空间,在后期找矿勘查过程中应加强韧性剪切带控矿的研究工作。

5 结 论

(1)沙河地区车渡金矿床中玄武质火山凝灰岩为低钾钙碱性岩石,具较低的 $\text{Mg}^\#$ 值,相对富集Sr、Ba、Rb、Ce、P、Sm元素,Ta、Nb、Zr、Hf、Ti相对亏损的特征,反映车渡金矿床中玄武质火山凝灰岩具钙碱性火山弧玄武岩特点。

(2)含金磁铁石英岩型金矿石中 $\text{SiO}_2$ 和 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 含量高,可达氧化物组分的89.83%~95.4%,其他氧化物组分含量均很低,表明大陆碎屑物质加入极少。

(3)单颗粒磁铁矿成分分析显示,车渡含金磁铁石英岩中磁铁矿具有高的 $\text{TFeO}$ (平均值99.59%)含量和极低的 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MnO}$ 含量,指示车渡磁铁石英岩金矿石中条带状磁铁矿属于沉积变质型成因,即BIF型金矿床。

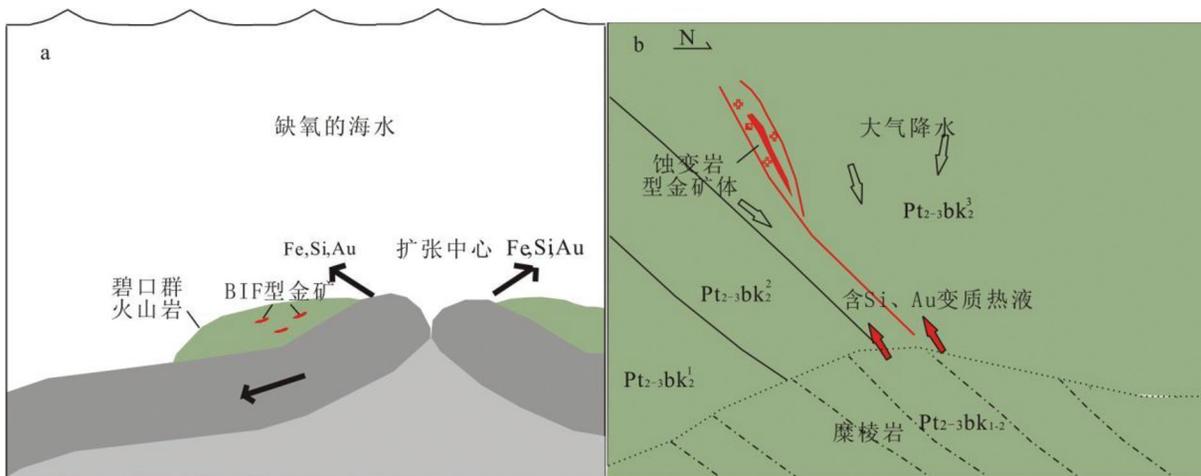


图 11 车渡金矿成矿模式  
Fig. 11 The metallogenic pattern of the Chedu gold deposit

(4) 含金磁铁矿石英岩型金矿石的氢氧同位素显示, 样品中  $\delta^{18}\text{O}_{\text{水}}$  值为 12.34‰ ~ 12.45‰ (平均值 12.40‰),  $\delta\text{D}$  值为 -112.6‰ ~ -103.5‰ (平均值 -108.05‰), 与鞍山—本溪地区 BIF 型铁矿  $\delta\text{D}$  变化范围 (-129‰ ~ -75‰) 一致, 暗示车渡含金磁铁矿石英岩中石英矿物具有 BIF 特征。

(5) 车渡金矿床具有 2 种成因类型, 一是与中生代逆冲推覆构造形成的韧性剪切带有关的强硅化蚀变岩型金矿; 二是与中—新元古界碧口岩群二亚群火山凝灰岩有关的 BIF 型金矿。

## 参考文献

- [1] 李新生, 牛卯胜, 张崇. 碧口地块北缘大型韧性剪切带的构造、成矿意义[J]. 甘肃地质学报, 2004, (1): 54-60.
- [2] 许晨光, 颜丹平, 古术航, 等. 扬子板块西北缘碧口地块中—新生代变质、变形与年代限定[J]. 地学前缘, 2018, 25(1): 80-94.
- [3] 展朝毅. 西秦岭碧口群主要地质特征、典型矿床与找矿方向[J]. 中国科技信息, 2010, (17): 30-33.
- [4] 吴杰, 刘家军, 李静贤, 等. 南秦岭铼厂沟碧口群玄武岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及岩石成因研究[J]. 中国地质, 2014, 41(4): 1341-1355.
- [5] 闫全人, 王宗起, Hanson A D. 等. 扬子板块西北缘碧口群火山岩系的 SHRIMP 年代、Sr-Nd-Pb 同位素特征及意义[J]. 地质学报, 2003(4): 590.
- [6] 平先权, 郑建平, 熊庆, 等. 扬子西北缘碧口块体花岗岩体锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素特征及其地质意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2014, 44(4): 1200-1218.
- [7] 徐学义, 陈隽璐, 李向民, 等. 扬子台台北缘白勉峡组和三湾组火山岩形成构造环境及岩石成因的地球化学约束[J]. 地质学报, 2009, 83(11): 1703-1718.
- [8] 廖时理, 陈守余, 张利亚, 等. 陕西青木川—苍社地区韧性剪切带型金矿床地球化学特征及地质意义[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(3): 1082-1093.
- [9] 邹公明, 李良, 李世金, 等. 陕西小燕子沟金矿床流体包裹体特征及成矿物理化学条件研究[J]. 黄金, 2013, 34(3): 22-26.
- [10] 颜崇高, 李方周, 宋志勇. 宁强县小燕子沟金矿地质特征及成矿条件浅析[J]. 陕西地质, 2012, 30(2): 1-11.
- [11] 张孝攀, 王权锋, 陈聆, 等. 陕西省金厂沟金矿床地质及地球化学特征[J]. 贵金属, 2015, 36(1): 29-35.
- [12] 张利亚, 陈守余, 廖时理. 陕西勉略宁地区旧房梁金矿床元素地球化学特征及成矿意义[J]. 地质科技情报, 2017, 36(2): 151-159.
- [13] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics in ocean basalt: Implication for mantle composition and processes [C]// Saunders A D, Norry M J. Magmatism in the Ocean Basins. Geological Society of London Special Publications, 1989, 42: 313-345.
- [14] 郭林楠, 黄春梅, 张良, 等. 胶东罗山金矿床成矿流体来源: 蚀变岩型和石英脉型矿石载金黄铁矿稀土与微量元素特征约束[J]. 现代地质, 2019, 33(1): 121-136.
- [15] Nadoll P, Angerer T, Mauk J L, et al. The chemistry of hydrothermal magnetite: A review[J]. Ore Geology Reviews, 2014, 61: 1-32.
- [16] Dupuis C, Beaudoin G. Discriminant diagrams for iron oxide trace element fingerprinting of deposit types[J]. Mineralium Deposita, 2011, 46(4): 319-335.
- [17] 陈光远, 黎美华, 汪雪芳, 等. 弓长岭铁矿成因矿物学专辑 第二章磁铁矿[J]. 矿物岩石, 1984, 4(2): 14-41.
- [18] Clayton R N O, Neil J R, Mayeda T K. Oxygen isotope exchange between quartz and water[J]. Journal of Geophysical Research, 1972, 77: 3057-3067.
- [19] 代堰鎔, 张连昌, 王长乐, 等. 辽宁本溪歪头山条带状铁矿的成因类型、形成时代及构造背景[J]. 岩石学报, 2012, 28(11): 3574-3594.
- [20] 杨秀清, 李厚民, 李立兴, 等. 辽宁鞍山—本溪地区铁矿床流体包裹体和硫、氢、氧同位素特征研究[J]. 地质学报, 2014, 88(10): 1917-1931.
- [21] 李延河, 侯可军, 万德芳, 等. Algoma 型和 Superior 型硅铁建造地球化学对比研究[J]. 岩石学报, 2012, 28(11): 3513-3519.
- [22] 李延河, 侯可军, 万德芳, 等. 前寒武纪条带状硅铁建造的形成机制与地球早期的大气和海洋[J]. 地质学报, 2010, 84(9): 1359-1373.
- [23] 史红云, 银剑钊. 金矿床中的金矿物、载金矿物及金赋存状态的研究概况[J]. 黄金科学技术, 1994, (1): 21-25.
- [24] 高振敏, 杨竹森, 李红阳, 等. 黄铁矿载金的原因和特征[J]. 高校地质学报, 2000, (2): 156-162.
- [25] Large R R, Thomas H, Craw D, et al. Diagenetic pyrite as a source of metals in orogenic gold deposits, Otago schist, New Zealand[J]. Geology and Geophysics, 2012, 55: 137-149.
- [26] Thomas H V, Large R R, Bull S W, et al. Pyrite and pyrrhotite textures and composition in sedimentary rocks, laminated quartz veins, and reefs at the Bendigo mine, Australia: Insights for ore genesis[J]. Econ. Geol., 2011, 106: 1-31.
- [27] 陈翠华, 张燕, 顾雪祥, 等. 贵州苗龙金矿床毒砂中金的赋存状态研究[J]. 矿床地质, 2013, 32(5): 932-940.
- [28] Martins B S, Lobato L M, Rosière C A. The Archean BIF-hosted Lamego gold deposit, Riodas Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero: Evidence for Cambrian structural modification of an Archean orogenic gold deposit[J]. Ore Geology Reviews, 2016, 1(72): 963-988.
- [29] 杨东潮, 白德胜, 曹琼. 坦桑尼亚太古宙绿岩带中 BIF 型金矿床的勘查标志——以 Maheiga 金矿床为例[J]. 黄金科学技术, 2013, 21(4): 1-8.
- [30] 张连昌, 翟明国, 万渝生, 等. 华北克拉通前寒武纪 BIF 铁矿研究: 进展与问题[J]. 岩石学报, 2012, 28(11): 3431-3445.
- [31] 代堰鎔, 张连昌, 朱明田, 等. 鞍山陈台沟 BIF 铁矿与太古代地壳增生: 锆石 U-Pb 年龄与 Hf 同位素约束[J]. 岩石学报, 2013, 29(7): 2537-2550.
- [32] 陈柏林, 董法先, 李中坚. 韧性剪切带型金矿成矿模式[J]. 地质论评, 1999, (2): 186-192.
- [33] 陈柏林, 吴淦国, 刘晓春, 等. 北山地区发现韧性剪切带型金矿床[J]. 中国区域地质, 2000, (3): 336.