

青海同仁双朋西金铜矿矿床地质特征及矿床成因

薛 静¹, 戴塔根¹, 息朝庄²

(1. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 湖南 长沙 410083; 2. 湖南金鑫黄金集团有限公司, 湖南 长沙 410005)

摘要: 在翔实的野外工作基础上, 对青海省同仁县双朋西金铜矿床矿石与围岩的微量元素、稀土元素、流体包裹体和同位素地球化学特征展开了系统研究。研究表明, 金矿石和花岗岩长岩的稀土元素配分模式具有相似性, 均为轻稀土元素富集型, 具负铈异常, 基本上无铈异常, 暗示它们之间存在成因联系; 成矿流体为中高温、低盐度、中等密度、中等压力流体, 且以含碳质为特征。铅、硫同位素结果均反映出成矿物质主要来源于深源。据此认为区内矿化是与中高温岩浆热液作用有关的矽卡岩型金铜矿化, 属于印支-燕山期同一构造-岩浆作用的产物。

关键词: 地球化学 流体包裹体 金矿床 矽卡岩 双朋西 青海

中图分类号: P618.51; P611

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2012)01-0028-11

Geological features and genesis of the Shuangpengxi gold deposit in Tongren, Qinghai Province

XUE Jing¹, DAI Ta-gen¹ and XI Chao-zhuang²

(1. School of Geoscience and Info-physics, Central South University, Changsha 410083, China;

2. Hunan Jinxin Gold Group Ltd., Changsha 410005, China)

Abstract: The Shuangpengxi gold deposit, as one of the most important gold deposits in northwest China, is located in the Tongren ore concentration area of Qinghai Province. Gold mineralization occurs within skarn that lies between granodiorite and marble. The ore bodies are in lenticular and veinlike forms. Ores are mainly composed of chalcopyrite, pyrrhotine and pyrite. Gangue minerals comprise diopside, garnet, calcite and sericite. The main types of rock alterations are skarnization, silicification, carbonatization, brecciation and ferritization. The tectonic setting, material source and genesis of the ore deposit are discussed on the basis of trace elements, REE, fluid inclusions and isotope geochemistry of ores and wall rocks as well as characteristics of the ore deposit. Studies show that ores and granodiorite have similar chondrite-normalized REE patterns and are enriched in light REE with a moderate Eu negative anomaly but no Ce anomaly. Microthermometric homogenization measurements of the fluid inclusions show that temperatures are from 215°C to 468°C, corresponding salinities vary from 1.40% to 13.40% NaCl_{eq}, and densities vary from 0.55 g/cm³ to 0.85 g/cm³. The metallogenic pressure is 2.25 MPa~20.61 MPa. and the ore-forming fluids belong to NaCl-KCl-CaCl₂-H₂O types, especially enriched in CO₂, CH₄ and C₂H₂. Sulfur isotopic compositions of sulfides from ores show that the values of δ³⁴S from the early depositional ores range from 2.2‰ to 7.0‰. The ²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb, ²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb and ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb ratios of ores range from 38.19 to 38.53, 15.581 to 15.641 and 18.058 to 18.710, respectively. According to the isotopic data, it is considered that the ore-forming materials were derived from the crust and the

收稿日期: 2010-10-28; 修订日期: 2011-09-01

基金项目: 973项目(2002CG412607) 国家科技攻关项目(2004BA615-02)

作者简介: 薛 静(1980-), 博士研究生, 矿产普查与勘探专业, E-mail: xuejing0118@126.com.

upper mantle. Studies show that the Shuangpengxi ore deposit might be a skarn gold deposit related to hypo- and mesothermal processes and belongs to the acid and intermediate-acid magmatic activities of Indo-Chinese and Yanshanian period.

Key words: geochemistry; fluid inclusion; gold deposit; skarn; Shuangpengxi; Qinghai

青海省同仁县是重要的矽卡岩型金铜矿产地。双朋西金铜矿床位于青海省同仁县东部瓜什则乡，南西距同仁县城 59 km(图 1b)。早在 1966~1975 年，原青海省地质局七队、物探队、青海冶金八队等多家地勘单位在岗察岩体及外围 100 km² 范围内开展了 1:10 000 地质、地球物理和地球化学勘探工作，发现了双朋西金铜矿；1986~1991 年，青海有色七队完成了双朋西金铜矿的详查和补充工作，提交金金属量 846.4 kg，伴生铜金属量 1 585 t，银金属量 2 635 kg；1997 年，青海省第一地质矿产勘查大队在双朋西金铜矿及外围开展了金矿普查，新发现 59 个金(铜)矿体，新增金表内储量 416.3 kg，表外储量 146.4 kg，缓解了双朋西矿山资源危机。

研究(李时新,1998;孙继省等,2005;张涛,2007;息朝庄等,2009),但是对于矿床地球化学缺乏系统研究,导致对矿床成矿物质来源和成矿机理的探讨还缺乏有力的证据。笔者在前人找矿勘探工作基础上,对双朋西金铜矿床展开了系统的地质特征、元素地球化学、流体包裹体和同位素研究,探讨了矿床的产出环境、物质来源和形成过程,建立综合性成矿模式和找矿模型,以期为指导该区金铜矿床找矿勘查提供科学依据。

1 成矿地质背景

从大地构造位置上看，双朋西金铜矿床位于松潘-甘孜印支褶皱系青海南山冒地槽褶皱带北缘(王

前人对双朋西金铜矿地质特征已经进行了一些

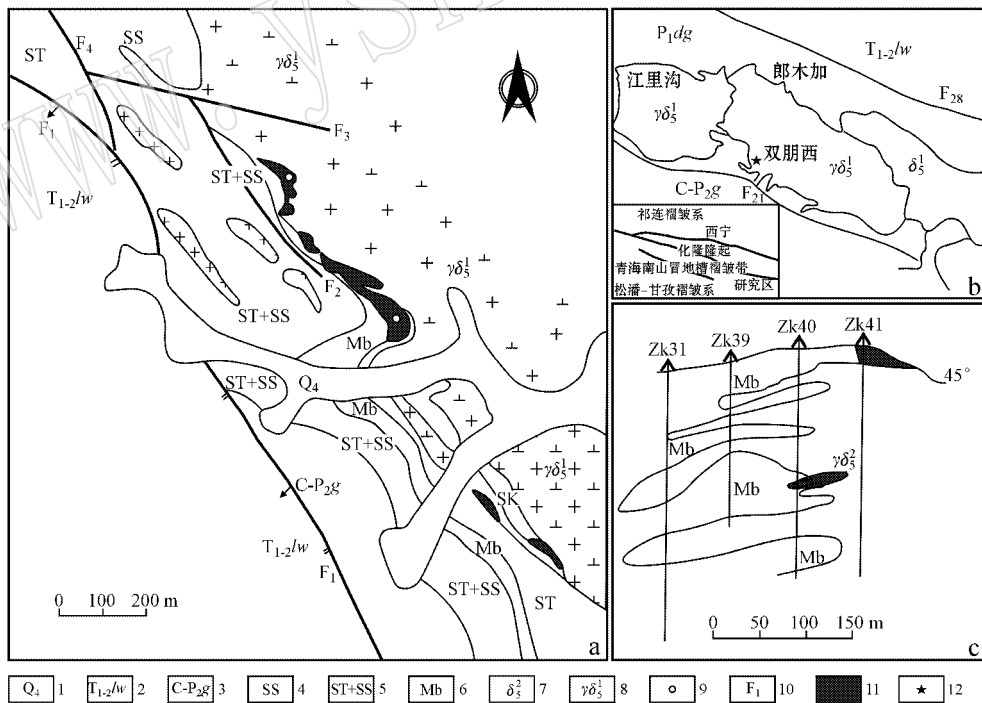


图 1 双朋西金铜矿地质略图[据张涛(2007)修编]

Fig. 1 Geological sketch map of the Shuangpengxi gold deposit(modified after Zhang Tao, 2007)

1—第四系；2—下三叠统隆务河群；3—下二叠统大关山群；4—钙质砂岩；5—石英砂岩；6—大理岩；7—花岗岩；8—花岗闪长岩；9—取样位置；10—断裂；11—金矿床；12—矿床位置

1—Quaternary；2—Lower Triassic Longwuhe Group；3—Lower Permian Daguanshan Group；4—calcareous sandstone；5—quartz sandstone；6—marble；7—granite；8—granodiorite；9—sampling location；10—fault；11—gold deposit；12—deposit location

星等 2008)。区域出露地层为二叠系大关山群甘家组第 4 岩性段、下三叠统隆务河组、第三系和第四系组成的盖层。甘家组第 4 岩性段主要分布在矿区及其北部,是区内金铜矿的主要赋矿地层,岩性为砂岩、板岩、大理岩,其中粗粒大理岩分布广泛,出露厚度大于 100 m,呈灰白色,块状构造,粗粒变晶结构。该地层多沿构造接触带分布,矽卡岩化比较发育,局部夹杂黑色细砂岩;下三叠统隆务河组主要分布在矿区南部,与二叠系甘家组第 4 岩性段呈断层接触,岩性主要以互层状产出的灰绿-紫红色长石英砂岩和灰黄色的石英砂岩为主,其中夹杂有薄层状粉砂岩及薄层状灰岩。

区内侵入岩体分布广泛,代表性的岩体为印支-燕山期闪长岩和花岗闪长岩。花岗闪长岩呈岩株状出露于矿区北部,是区内的主要成矿岩体,出露面积约 16 km²。该岩体与甘家组地层中的大理岩接触带部位常形成 NW 向的矽卡岩带,由于构造作用的破坏,常在岩体内部形成密集的微裂隙带,使岩体与围岩接触带呈波状分布。花岗闪长岩为全晶质粗粒结构,块状构造,主要成分有石英、长石、角闪石、黑云母、更长石和钾长石等,金属矿物有磁铁矿和黄铁矿等。岩石具有绿帘石化、阳起石化、绿泥石化及黄铁矿化(李时新,1998)。

从构造形迹上看,双朋西背斜是矿区的主体构造,分布在矿区中部,由于花岗闪长岩的侵入,北翼不全,南翼较完整。背斜轴线为 NW-SE 向展布,长 22 km。南翼地层倾角较缓,为 23°~30°;北翼地层倾角 35°~45°;矿区内断裂构造发育,大致可以分为成矿前、成矿期和成矿后 3 类,成矿前断裂多属于走向断层,分布于矿区中部,多被岩脉充填。成矿期的断裂比较发育,多分布于岩体接触带或甘家组地层中,规模较小;成矿后的断裂不甚发育,对矿体的破坏作用有限(图 1a)。

2 矿床地质特征

2.1 矿体形态特征

双朋西金铜矿区矿体主要分布在花岗闪长岩与大理岩犬牙交错的接触带上,矿体形态以透镜状、似层状为主,部分赋存于接触带和北西西向断裂带结合部位的矿体呈扁豆状、脉状(图 1c)。矿体长 35~250 m,厚 2.0~11.89 m,倾斜延深 15~130 m,走向 280°~290°,倾向南西,倾角 28°~45°,品位 5.15 ×

10⁻⁶~18.43 × 10⁻⁶。

矿体在空间上分布具有如下特征:矿体赋存于外接触带矽卡岩中,且以顺层产出为主;规模较大的主要矿体分布于地表或近地表,而在海拔标高 3 590 m 以下则均为较小的扁豆状和脉状矿体;早期简单矽卡岩基本不含矿,只有叠加了晚期热液蚀变的含水矽卡岩才是主要的含矿矽卡岩。

2.2 矿石特征

原生矿石的矿石矿物主要有黄铜矿、磁黄铁矿、黄铁矿,含少量黑钨矿、白钨矿、闪锌矿、自然金、胶黄铁矿和辉铋矿等;脉石矿物主要有透辉石、石榴石、阳起石、斜长石、石英、方解石、绿泥石和绢云母等。氧化矿石的矿石矿物主要有孔雀石、蓝铜矿、褐铁矿,少量赤铜矿、铜蓝以及胶黄铁矿和斑铜矿;脉石矿物除了原生矿物的脉石矿物外,尚有黄钾铁矾、水绿矾、纤维水绿矾、玉髓、石膏及自然硫等。

原生矿石结构主要为自形-半自形粒状、填隙结构,其次是乳滴状溶蚀及交代结构;矿石构造为浸染状,其次为团块状、斑点状构造,少量呈脉状构造。氧化矿石主要为隐晶同心环带状、放射状,交代假像及交代结构,矿石构造以浸染状为主,其次为团块状、斑点状,少见脉状构造。

2.3 围岩蚀变

围岩蚀变主要有矽卡岩化、硅化、碳酸盐化、角岩化、褐铁矿化、绢云母化和石英-方解石化,矽卡岩化是金矿体主要围岩蚀变之一,石英-方解石化是发生在整个辉长岩体内与成矿关系最密切的蚀变。矽卡岩化、碳酸盐化、褐铁矿化与金的矿化关系密切,可作为直接的找矿标志。

2.4 成矿期次

根据矿床地质特征和矿石空间分布、结构构造和矿物组合特征,双朋西金矿成矿作用可划分为矽卡岩化期、热液期和氧化期以及若干成矿阶段。矽卡岩化期表现为较为广泛的矽卡岩化,形成大理岩、条带状矽卡岩、角砾状矽卡岩和角岩等。热液期可分为 4 个阶段:石英-黄铁矿阶段(I)、石英-多金属硫化物阶段(II)、铋-金成矿阶段(III)和碳酸盐阶段(IV)。热液期的 I、II 阶段是金属硫化物的主要形成阶段,并有少量金矿物产出;铋-金成矿阶段为金的主成矿阶段,主要由脉石英、自然金、自然铋、辉铋矿等组成,碳酸盐阶段除菱铁矿和方解石外,尚有少量金属硫化物和金矿物生成。在氧化期,原生铁多金属矿石在地表处遭受到氧化淋滤作用,原生氧化

物和硫化物发生分解,并且形成褐铁矿、蓝铜矿、赤铜矿、铜蓝和孔雀石。

3 矿床地质化学特征

3.1 样品和测试方法

用于本次研究的矿石样品均采自双朋西金铜矿床,具体的采取位置见图 1a。矽卡岩型金矿石和花岗闪长岩样品的微量元素和稀土元素的分析工作由国家地质实验测试中心分析完成,微量元素采用 XRF 测定,仪器型号为 X 荧光光谱议 RIX 2100,稀土元素采用等离子体质谱法(ICP-MS),仪器为美国热电公司 TJA(VG)PQ EXCELL ICP-MS。分析结果见表 1。

用于 S、Pb 同位素测试的样品均采自于双朋西金铜矿床金矿坑道的原生矿石。分析步骤和方法如下:样品经破碎过筛后,在双目镜下挑选出较纯的金属硫化物单矿物颗粒,将硫化物单矿物样品破碎至 60~80 目、纯度>99%的单矿物样品 5 g 以上,将挑出的单矿物样品在玛瑙研钵里研磨至 200 目以下分析。S 同位素由中国地质科学院矿产资源研究所同位素实验室测定,分析仪器为 MAT251EM,以 VCDT 为标准,测试精度为 $\pm 0.2\%$ 。Pb 同位素是由中南大学地质研究所 ICP-MS 实验室测定,样品先用 HF+HNO₃ 溶解,然后用离子交换柱分离 Pb,在热离子质谱计 MAT261 上测定,测定前及测定过程中用 NBS981 铅标准校准仪器及监测仪器。全流程 Pb 的空白本底为 10^{-9} g,分析精度优于 0.05%。

3.2 微量元素特征

区内矽卡岩型金矿石样品的 Cu 的含量较高,为 $215 \times 10^{-6} \sim 15\,656 \times 10^{-6}$,平均值为 $6\,729.4 \times 10^{-6}$,Zn 含量为 $30.2 \times 10^{-6} \sim 1\,675 \times 10^{-6}$,平均值为 710.34×10^{-6} ,在蛛网图(图 2)中表现出 Ba、Sr、Ti 亏损,低场强元素含量较低,高场强元素 Zr 含量最高($33.7 \times 10^{-6} \sim 331 \times 10^{-6}$),其次为 Nb 和 Th,Sc、U、Hf 含量较低,亲铁元素中 V 强烈富集,Co/Ni 为 0.33~6.73,平均值为 3.27;Nb/Ta 为 7.4~37.1,平均值为 16.2;Zr/Hf 为 3.3~31.3,平均值为 22.7;Rb/Sr 为 0.07~3.33,平均值为 1.43;Sr/Ba 为 0.37~3.51,平均值为 1.43;U/Th 为 0.2~7.6,平均值为 1.9。

在蛛网图上可看出,在微量元素组成上,花岗闪长岩总体上都表现为贫 Sr、Ba、Ta、Ti,富集 Rb、Th、

Ce、Sm。

3.3 稀土元素特征

矿石样品的 $\Sigma\text{REE} = 14.22 \times 10^{-6} \sim 176.54 \times 10^{-6}$,LREE/HREE 为 2.37~12.19,除了 3# 样品外,其他样品稀土元素配分模式十分相似,均为轻稀土元素相对富集、重稀土元素相对亏损的右倾型,轻稀土元素和重稀土元素之间有明显的分异作用 [$(\text{La}/\text{Sm})_N = 1.05 \sim 9.0$ ($\text{Gd}/\text{Yb})_N = 0.55 \sim 2.3$], $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 为 1.32~13.15,其中 5# 样品轻重稀土元素分异程度较高, $\delta(\text{Eu}) = 0.33 \sim 2.41$,除了 3# 具有明显正铈异常,其余均为负铈异常(图 3)。

花岗闪长岩样品的 $\Sigma\text{REE} = 126.35 \times 10^{-6} \sim 209.68 \times 10^{-6}$,平均值为 170.58×10^{-6} ,LREE 范围在 $89.03 \times 10^{-6} \sim 152.28 \times 10^{-6}$,平均值为 122.52×10^{-6} ,HREE 范围在 $19.69 \times 10^{-6} \sim 45.58 \times 10^{-6}$,平均值为 30.43×10^{-6} ,LREE/HREE 比值范围在 6.60~14.73,平均值为 11.24,轻稀土元素富集,重稀土元素亏损,轻稀土和重稀土元素之间有明显的分异作用 [$(\text{La}/\text{Sm})_N = 3.27 \sim 5.10$ ($\text{Gd}/\text{Yb})_N = 1.54 \sim 2.32$], δEu 范围在 0.69~0.72,平均值为 0.70,具中等的负铈异常。

双朋西金矿床矿石和花岗闪长岩的稀土元素球粒陨石标准化配分模式显示 LREE 相对富集,从花岗闪长岩到矿石,稀土元素总量降低(平均值 $170.58 \times 10^{-6} \sim 84.33 \times 10^{-6}$),且矿石的稀土元素模型总体上类似于花岗闪长岩,表明成矿与中酸性岩浆热液有关,矿床的热液流体主要来源于花岗质熔体(田世洪等 2007),金矿石(3#)稀土元素与其他矿石样品有明显的差异,这些可能反映了矿床的叠生特点。

3.4 同位素地球化学

3.4.1 硫同位素特征

双朋西金铜矿床矿石 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $+2.2\% \sim +7.0\%$ (表 2),峰值为 4.98%左右,呈明显的塔式分布,表明硫为深源或者经历了高度均一化。从不同矿物 $\delta^{34}\text{S}$ 值的变化来看,黄铜矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 平均值为 4.67%,辉钼矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 平均值为 6.2%,具有 $\delta^{34}\text{S}$ 辉钼矿 $> \delta^{34}\text{S}$ 黄铁矿的演化顺序。

绝大部分矽卡岩矿床的硫同位素组成与成矿岩浆岩相似(王建中等 2008),与典型的岩浆硫($S = 0 \pm 5\%$)相比,双朋西金铜矿的硫同位素组成富集重硫,因此,单一的岩浆硫源不能解释现今观察到的矿石硫同位素组成。一般将成矿热液的总硫同位素分为 3 种类型(转引自息朝庄 2009):① $\delta^{34}\text{S}$ 值接近

表 1 双朋西金矿矿石微量元素和稀土元素分析结果和相关特征一览表

 $\omega_B/10^{-6}$

Table 1 Trace elements and REE analyses and related parameters of ores in the Shuangpengxi deposit

样号	1#	4#	12#	3#	5#	D4	D5	Qh11	Qh12	Qh13	Qh14	Qh15
Li	29.9	64.6	79.9	20.2	80.2							
Be	27.4	42	15.3	115	14.5							
Sc	3.04	4.75	2.29	1.91	4.98							
V	32.1	29.8	13.7	209	35.3							
Cr	7.11	10.3	3.37	6.37	10.9							
Co	179	4.81	0.572	6.99	4.44	13.3	11	10.4	14	13.2	12.1	12.4
Ni	26.6	5.48	1.76	20.6	5.51	32.4	26.7	36.8	35.3	38	35.8	31
Cu	15 656	1 927	215	13 700	2 149	24.3	20.7	32.5	27.2	23.2	32.8	23.6
Zn	1 661	115	30.2	1 675	70.5	68	58	109	79	72	100	78
Ga	21.1	25.4	16.3	50.4	21							
Se	1.83	0.301	0.366	0.469	0.318							
Rb	0.995	210	271	13.2	320	153	154	151	155	148	160	153
Sr	13.3	221	81.3	11	203	185	221	122	152	141	126	173
Zr	34.4	294	164	33.7	331	152.5	171	157.3	119.5	201.6	134.5	152.4
Nb	1.53	66.5	69.3	0.631	47.4	10.66	10.86	12.02	11.66	10.22	9.75	11.68
Mo	17.2	96.6	72.7	24.6	4 639	0.9	0.9	0.7	1	1.1	0.9	0.1
Cd	35.7	3.34	1.8	50.5	11.8							
In	1.73	0.543	0.166	6.35	0.604							
Sn	16.6	28	9.39	314	10.9	2.1	2.9	4.7	2.3	2.8	3.6	3.7
Sb	11.2	2.31	169	0.582	0.375							
Cs	1.76	27.5	23.6	38.3	20.1							
Ba	3.77	251	67.4	9.54	545	503	495	492	902	1076	715	724
Hf	1.1	9.58	8.53	10.1	11.4	3.55	4.97	4.64	3.87	5.77	4.25	4.58
Ta	0.107	6.05	9.34	0.017	4.31	0.94	0.95	1.01	1.35	0.96	1.23	1.24
Ω	14.6	127	12.3	1 256	251	4.9	2	2.1	5.1	0.9	2.7	1.4
Re	0.001	0.009	0.002	0.065	0.126							
Tl	5.64	1.92	1.48	0.034	1.65							
Pb	4.11	17	566	14.2	34.2	27.6	20.3	19.5	30.3	29.9	22.3	23.4
Bi						3.83	4.24	1 470	17.5	8.38		
Th	13	12	13	12	11	1.47	29.9	21.3	0.948	32.5	12	11
U						0.418	20.8	13.9	7.16	7.97		
Ti	4 275	3 860	4 278	4 281	3 780	502	2 306	625	300	1 955	3 799	3 456
Au	1	1.43	1.45	1.07	1						1.58	1.83
Ag	0.046	0.053	0.068	0.046	0.073						0.048	0.057
La	8.19	44.2	4.94	1.2	39.9	48.64	25.34	46.21	30.41	33.45	41.59	37.43
Ce	12.4	76.2	9.95	2.75	70.6	94.05	46.97	89.35	56.36	61.99	80.42	72.38
Pr	1.97	8.26	1.27	0.821	8.12	9.9	6.66	9.41	7.98	8.78	8.47	7.62
Nd	7.8	27.3	4.6	4.9	26.2	36.15	24.64	34.34	29.57	32.53	30.91	27.82
Sm	1.63	4.91	1.49	1.14	4.57	6.28	5	5.96	6.01	6.61	5.36	4.82
Eu	0.289	0.588	0.159	0.794	0.728	1.31	1.11	1.24	1.33	1.46	1.12	1.01
Gd	1.36	4.35	1.41	0.803	3.9	4.59	4.65	4.36	5.57	6.13	3.92	3.53
Tb	0.201	0.629	0.323	0.121	0.558	0.63	0.8	0.59	0.95	1.05	0.53	0.48
Dy	1.05	3.7	2.27	0.729	2.91	3.51	4.46	3.33	5.35	5.89	2.99	2.69
Ho	0.199	0.714	0.468	0.144	0.561	0.69	0.9	0.65	1.07	1.18	0.59	0.53
Er	0.589	2.32	1.72	0.373	1.75	1.77	2.55	1.68	3.05	3.36	1.51	1.36
Tm	0.079	0.361	0.31	0.052	0.275	0.27	0.4	0.26	0.47	0.52	0.23	0.21
Yb	0.731	2.6	2.53	0.344	2.05	1.64	2.49	1.56	2.97	3.27	1.41	1.27
Lu	0.14	0.406	0.418	0.05	0.315	0.25	0.38	0.24	0.45	0.49	0.22	0.2
Y	8.84	25.9	19	7.14	22.5	16.83	22.6	15.99	27.11	29.82	14.39	12.95
Σ REE	36.63	176.5	31.86	14.22	162.4	209.7	126.4	199.2	151.5	166.7	179.3	161.4
LREE	32.28	161.5	22.41	11.61	150.1	152.3	89.03	144.7	106.8	117.5	130.2	117.2
HREE	4.35	15.08	9.45	2.62	12.32	25.59	34.58	24.3	41.42	45.58	21.87	19.69
LREE/HREE	7.42	10.71	2.37	4.44	12.19	14.71	6.6	14.72	6.62	6.62	14.73	14.71
$(La/Yb)_N$	7.57	11.49	1.32	2.36	13.15	20.04	6.88	20.02	6.92	6.91	19.93	19.92
δEu	0.58	0.38	0.33	2.41	0.51	0.71	0.69	0.71	0.69	0.69	0.71	0.72
δCe	0.71	0.88	0.91	0.62	0.88	0.96	0.83	0.96	0.83	0.83	0.96	0.96

样品 1# 为浸染状黄铜矿闪锌矿矿石, 4# 为浸染状黄铜矿闪锌矿矿石, 12# 为浸染状闪锌矿黄铜矿矿石, 3# 为块状黄铜矿矿石, 5# 为块状闪锌矿黄铜矿矿石, D4、D5、Qh11、Qh12、Qh13、Qh14、Qh15 为花岗岩闪长岩。

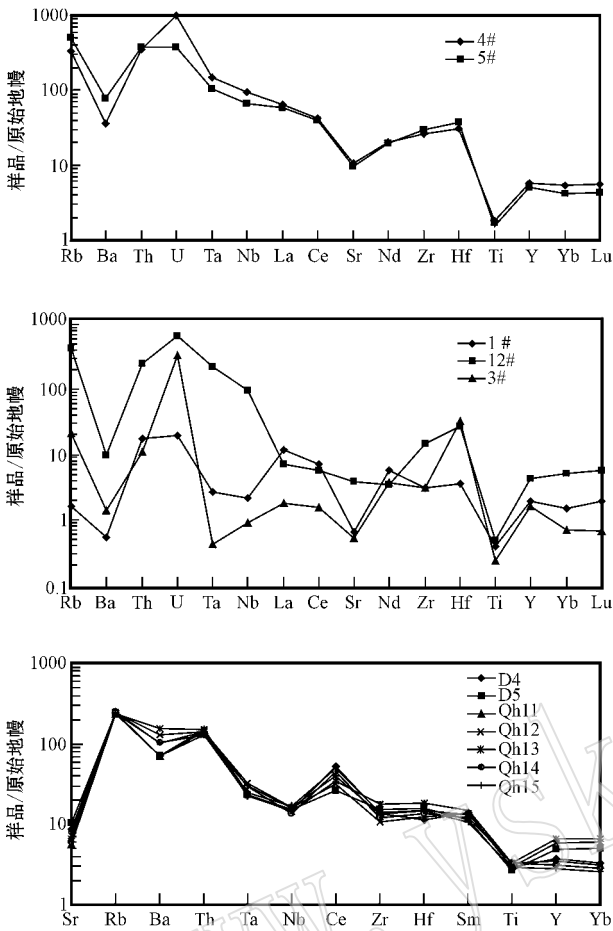


图 2 双明西金铜矿床矿石和花岗闪长岩的微量元素标准化蛛网图

Fig. 2 Primitive mantle normalized trace element patterns of the Shuangpengxi gold deposit

于 0, 硫源一般认为是地幔源,或是地壳深部大量物质均一法的结果;② $\delta^{34}\text{S}$ 值为较大的正值,达 +20%左右,大多认为来自于海水或沉积地层;③ $\delta^{34}\text{S}$ 值介于上述两种类型之间,为 +5%~+15%,硫源为局部围岩或混合源。对于 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化于 +2.2‰~+7.0‰ 之间的金属硫化物,其硫源可能与硫酸盐和岩浆硫的混合作用有关,也可能是从地壳中吸取了各种成因硫。结合本区矿石矿物组合特征,可以推断本区矿石硫来源于混合源,反映了岩浆硫和硫酸盐重硫的混合。

3.4.2 铅同位素特征

通常情况下,金矿床铅同位素示踪研究的目的是确定铅及有关金属物质组分的来源(幔源、壳源或是壳幔混合源),查明铅同位素演化史和影响铅同位素组成变化的地质因素,进而了解金矿床的形成过程。

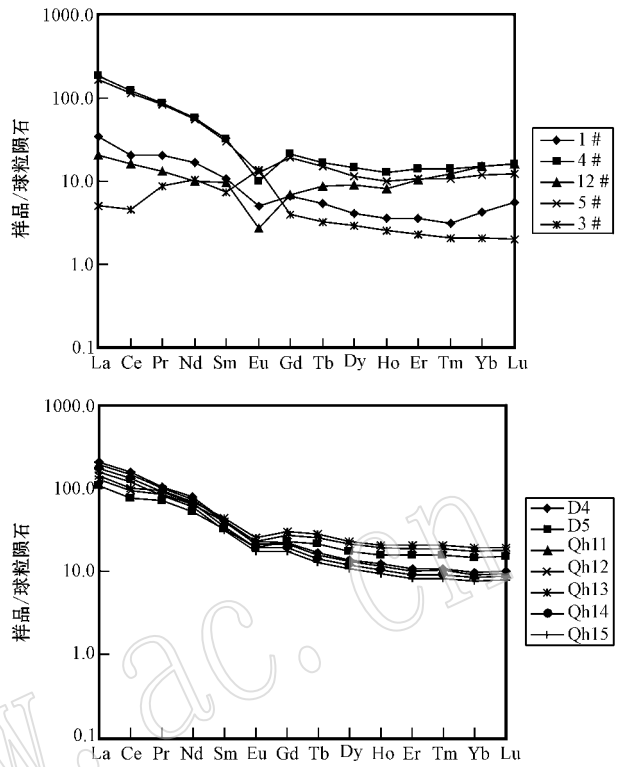


图 3 双明西金铜矿床矿石和花岗闪长岩稀土元素球粒陨石标准化分布型式图

Fig. 3 Chondrite-normalized REE patterns of ores and granodiorite in Shuangpengxi gold deposit

表 2 双朋西矿区硫同位素组成

Table 2 Sulfur isotopic composition of ores in the Shuangpengxi ore deposit

样号	采样位置及样品描述	测定矿物	$\delta^{34}\text{S}/\text{‰}$
KQ20082315	江里沟 PD4 块状矿石	黄铜矿	+4.5
KQ20082317	江里沟 PD4 块状矿石	辉钼矿	+6.2
KQ20082318	江里沟 PD4 块状矿石	黄铁矿	+7.0
KQ20082316	江里沟 PD4 浸染状矿石	黄铜矿	+5.0
KQ20082314	江里沟 PD4 浸染状矿石	黄铁矿	+2.2

为了深入了解双朋西金铜矿床的形成过程,对矿石(黄铁矿)进行了铅同位素测试。由表 3 可以看出,其 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 18.058~18.710,平均值为 18.358 2,极差为 0.652; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 15.581~15.641,平均值为 15.614 6,极差为 0.060; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 38.191~38.531,平均值为 38.335 4,极差为 0.340;上述铅同位素组成的极差均小于 1,说明其铅同位素的组成相当均一。在 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 对 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (图 4)中,所有硫化物数据点主要分布在上地壳铅和造山带铅(图 4)之间,暗示矿床中矿石铅的同位素组成反映了壳源铅和与岩浆作用有关的

表 3 双朋西矿区金铜矿黄铁矿铅同位素组成
Table 3 Lead isotopic composition of pyrite in the Shuangpengxi ore deposit

样号	描述	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$
SPX-1	江里沟 PD4 块状矿石	18.058	15.581	38.154
SPX-3	江里沟 PD4 块状矿石	18.163	15.590	38.191
SPX-5	江里沟 PD4 块状矿石	18.384	15.625	38.385
SPX-6	江里沟竖井 浸染状矿石	18.476	15.641	38.531
SPX-8	江里沟竖井 浸染状矿石	18.710	15.636	38.416

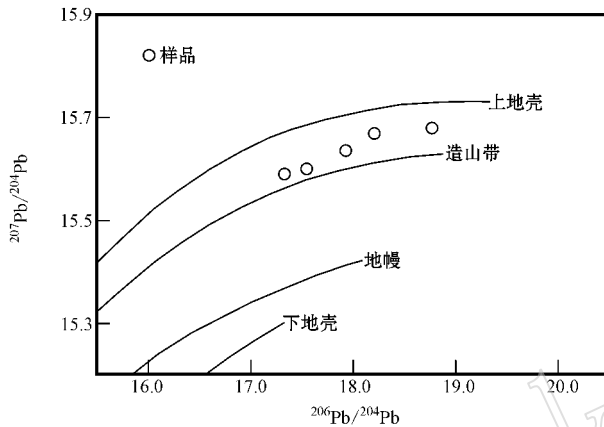


图 4 双朋西金铜矿黄铁矿铅构造模式图(据 Zartman and Doe, 1981)

Fig. 4 Plumbotectonic framework diagram of pyrite from the Shuangpengxi ore deposit (modified after Zartman and Doe, 1981)

铅混合的特点,成矿过程中曾受到岩浆活动的影响。

3.5 流体包裹体地球化学

样品采自于双朋西矿区平硐 PD₁、PD₄、PD₁₁ 的石英-多金属硫化物阶段的石英,其中 J-10、J-11、J-12、J-13 为石英-硫化物阶段的黄铜矿闪锌矿矿石,半自形粒状结构,呈致密块状产出,金属矿物有黄铜矿,呈不规则粒状,含量 12%,与闪锌矿共生,闪锌矿呈不规则粒状,含量 10%,黄铁矿占 8%;J-14、J-15 为石英-硫化物阶段的黄铜矿矿石,金属矿物多呈不规则细脉状分布于矿石中,其含量约占 15%,其中黄铜矿占金属矿物含量的 85%,斑铜矿占 10%,黄铁矿和辉铜矿占 5%。将上述样品磨制成厚度约为 0.2 mm 双面剖光的薄片做岩相学和流体包裹体研究,选择原生包裹体进行显微测温和激光拉曼光谱分析。

流体包裹体的显微测温和流体成分分析工作是在教育部有色金属成矿预测重点实验室(中南大学)流体包裹体实验室完成的。测试所用的仪器为

LINKAM THMSG600 显微冷热台,测温范围为 -196~600℃,仪器测定温度范围为 -196~600℃,测量精度在 -100~25℃ 范围内为 ±0.10℃,25~400℃ 范围内为 ±1℃,400℃ 以上为 ±2℃。测试升温速率一般为 0.20~5℃/min。流体包裹体成分分析由教育部有色金属成矿预测重点实验室(中南大学)流体包裹体测温实验室流体包裹体气液相成分测定实验室完成。流体包裹体的气相成分分析采用加热爆裂法提取气体,分析仪器为 Varian-3400 型气相色谱仪(美国),分析误差 <5%。液相成分分析采用的分析仪器为美国戴安公司生产的 DX-120 Ion Chromatograph 离子色谱仪,重复测定精密密度 <5%。

3.5.1 流体包裹体特征

石英中的原生包裹体大小悬殊,在 1~20 μm,形态主要为椭圆形和不规则状,次为长条形,其中以椭圆形和不规则状最为常见。根据室温条件下和均一状态时相态特征将包裹体分为以下几类:①富液相气液两相水溶液包裹体,在室温下为液相与气相两相,气相分数小于 50%;②富气相气液两相水溶液包裹体,在室温下为液相与气相两相,气相分数大于 50%;③含 NaCl 或 KCl 子矿物包裹体。其中以富气相气液两相水溶液包裹体为主。

3.5.2 流体包裹体的成分

采集了矿区矿体不同深度的 2 件矿石样品进行了包裹体气、液相成分分析。流体成分分析结果(表 4)表明,其成矿溶液均是富含 Na⁺、K⁺、Ca²⁺、F⁻、Cl⁻、SO₄²⁻ 等的复杂成分盐水溶液。成矿流体的液相成分阳离子以 Na⁺、K⁺、Ca²⁺ 为主,Na⁺ 和 K⁺ 的总量低于 Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 的总量,表明成矿流体以变质流体为主,部分 Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 来自主矿物的溶解;阴离子主要以 SO₄²⁻、Cl⁻ 为主,F⁻ 次之;根据以上特点可得出本区成矿流体应属 NaCl-KCl-CaCl₂-H₂O 体系;气相以 H₂O、CO₂ 为主,其次为 H₂、CH₄、N₂、C₂H₂、C₂H₆、O₂、CO 等含量很少。成分中富含 CO₂,含有 CH₄、C₂H₂ 等挥发分,表明成矿环境为还原环境,而且生物参与了成矿作用(杨金中等,2000)。

H₂O/CO₂ 值的大小可以反映成矿作用的强度,其值越小,成矿作用的强度越强,成矿越有利(何明勤等,2004),矿区 H₂O/CO₂ 值石英-硫化物阶段石英为 2.07,大于铋-金成矿阶段黄铁矿 H₂O/CO₂ 值 0.81,可能表明晚阶段黄铁矿成矿作用更为剧烈,这

表 4 双朋西金铜矿包裹体气液相成分及相关参数

μg/g

Table 4 Parameters and composition of gas-liquid phase in fluid inclusions from the Shuangpengxi gold deposit

	H ₂	O ₂	N ₂	CH ₄	CO	C ₂ H ₂	CO ₂	C ₂ H ₆	H ₂ O	F ⁻	Na ⁺ /K ⁺	F ⁻ /Cl ⁻
石英	11.787	无	痕	15.829	无	3.381	510.424	痕	1056	1.259	1.23	0.25
黄铁矿	0.490	痕	0.956	0.864	无	无	523.413	无	425	痕	0.41	接近 0
	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	SO ₄ ²⁻	Li ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	H ₂ O/CO ₂	SO ₄ ²⁻ /Cl ⁻
石英	4.947	0.145	痕	23.418	痕	3.271	0.159	2.654	0.712	11.815	2.07	4.73
黄铁矿	3.924	痕	无	43.106	无	1.392	痕	3.419	痕	5.728	0.81	10.99

与实际地质情况是吻合的。成矿流体的 Na⁺/K⁺ 和 F⁻/Cl⁻ 可以作为判别流体来源的一个标志, 研究区石英-硫化物阶段石英和铋-金成矿阶段黄铁矿样品 Na⁺/K⁺ = 1.23 < 2, 说明成矿流体有可能具岩浆热液特征(庞保成等, 2005; 刘伟等, 2007)。石英-硫化物阶段石英阴离子中 SO₄²⁻ > Cl⁻ > F⁻, SO₄²⁻/Cl⁻ 值为 4.73, 较高, 故这种热卤水应是富钠的硫酸盐型热卤水。铋-金成矿阶段黄铁矿样品 SO₄²⁻ > Cl⁻ > F⁻, SO₄²⁻/Cl⁻ 值为 10.99, 较高, 故其成矿热卤水应是富钾的硫酸盐型热卤水。SO₄²⁻ > Cl⁻, 由于 SO₄²⁻ 含量反映的是介质中与金迁移有密切联系的 HS⁻ 的数量, 金在成矿流体中主要以硫氢络合物的形式迁移, 氯络合物次之。本区样品中 F⁻/Cl⁻ < 1, 表明成矿流体是以岩浆热液为主包含有大气降水的混合流体。

3.5.3 流体包裹体测温结果

5 件测温片的均一温度、冰点、盐度和密度数据列于表 5, 密度根据刘斌等(1995) 的公式计算获得。

由表 5 可知, 所有样品的均一温度变化范围为 215~468℃, 分布较均匀, 但以 340℃ 为峰值, 其中含子矿物的流体包裹体的气液相均一温度范围为

215~418℃。气液相包裹体的冰点为 -2.2~ -9.5℃, 由表 5 和图 5 可知, 其相应的盐度范围为 w(NaCl) = 1.40% ~ 13.40%, 密度为 0.55~0.85 g/cm³。根据流体包裹体的均一温度和流体盐度, 再利用计算流体压力的经验公式(刘斌等, 1995), 计算出金成矿阶段包裹体的流体均一压力范围为 2.25 MPa~20.61 MPa。

4 金矿床成因讨论与初步结论

4.1 花岗岩类的成岩作用

根据花岗岩类微量元素地球化学特点, 并且结合岩体产出的构造环境, Pearce 将花岗岩类划分为 4 大类, 即洋脊花岗岩类(ORG), 火山弧花岗岩类(VAG), 板块内部花岗岩类(WPG) 和同碰撞造山带花岗岩类(SYN-COLG) (Pearce *et al.*, 1984)。由图 6 可见, 双朋西花岗闪长岩全岩样品数据点均投射在同碰撞造山带花岗岩区, 据此可以认为双朋西花岗闪长岩是同碰撞造山期构造-岩浆活动的产物, 花岗岩类岩浆的形成与深部岩浆上涌和地壳镁铁质火成岩的部分熔融有关。在晚华力西期-印支期陆内造

表 5 双朋西矿区流体包裹体特征及参数

Table 5 Microthermometric data and characteristics of fluid inclusions in the Shuangpengxi gold district

样品编号	J-10	J-11	J-12	J-13	J-14	J-15	
矿物	石英	石英	石英	石英	石英	石英	
测试数	26	24	27	26	25	21	
气液比/ %	10~30	25~45	20~40	25~45	20~40	10~30	
d/μm	1~10	5~15	5~15	1~15	1~8	5~15	
t _{均一} /℃	范围	270~410	370~420	385~468	333~368	215~420	255~360
	平均值	332	390	425	353	308	338
t _{冰点} /℃	范围	-1.8~-3.5	-2.6~-8.2	-2.2~-3.1	-4.4~-9.5	-3.4~-3.7	-0.8~-3.1
	平均值	-2.5	-5.3	-2.6	-6.8	-3.5	-1.8
w(NaCl) %	范围	3.06~5.71	4.34~11.93	3.71~5.11	7.02~13.40	5.56~6.01	1.40~5.11
	平均值	4.23	8.18	4.33	10.22	5.78	3.07
压力/MPa	5.33~19.98	5.99~19.98	19.98~20.61	12.15~18.95	2.25~19.98	4.64~17.90	
密度/g·cm ⁻³	0.55~0.80	0.65~0.85	0.64~0.66	0.70~0.80	0.65~0.88	0.59~0.80	

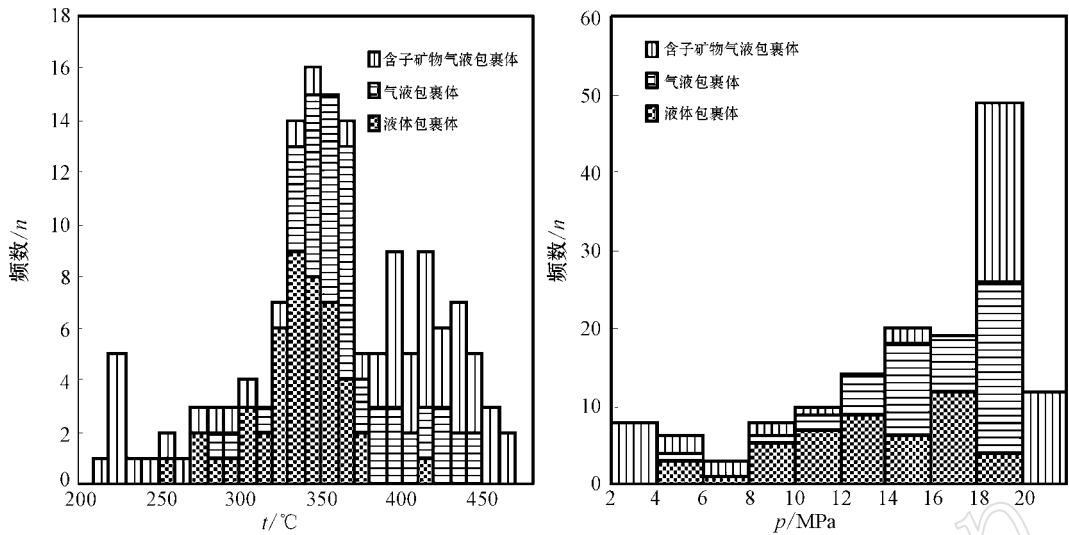


图 5 双朋西矿区流体包裹体均一温度和压力分布直方图

Fig. 5 Histogram of homogenization temperatures and pressures of fluid inclusions in quartz from the Shuangpengxi gold deposit

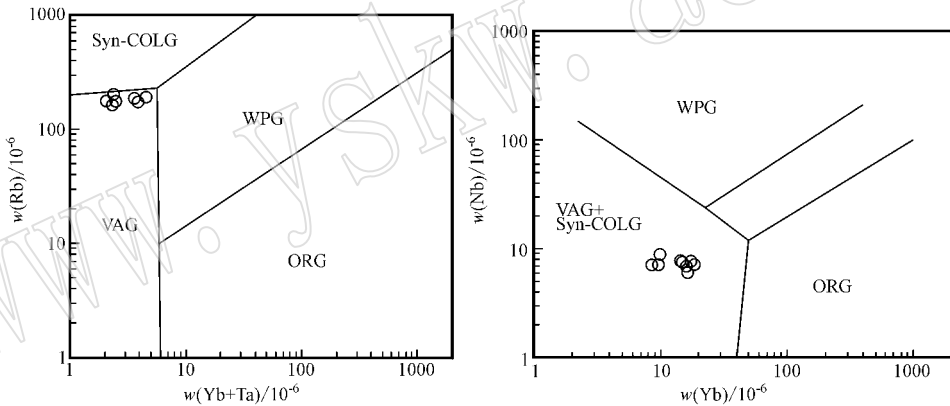


图 6 双朋西花岗闪长岩的 Rb-Yb+Ta 图解和 Nb-Y 图解(底图据 Pearce *et al.*, 1984)

Fig. 6 Rb-Yb+Ta diagram and Nb-Y diagram of Shuangpengxi granodiorite (from Pearce *et al.*, 1984)

Syn-COLG—同构造的碰撞花岗岩; VAG—火山弧花岗岩; WPG—板内花岗岩; ORG—洋中脊花岗岩

Syn-COLG—syn-tectonic collision granite; VAG—volcanic arc granite; WPG—intraplate granite; ORG—ocean mid-ridge granite

山作用下,二叠系大关山群发生褶皱隆起,与此同时,区内深大断裂构造活动和深源岩浆上涌致使地壳内热流值骤然升高,进而导致二叠系大关山群的沉积岩地层发生深熔或重熔作用。由此所产生的岩浆通过结晶分异和上侵定位,不仅可形成大面积分布的花岗岩类,而且可为金矿床的形成提供物质、热力和动力来源。

4.2 矿床成因讨论

根据本区矽卡岩矿床产出的地质环境、矿床与控矿岩体的密切时空关系、同位素特征、流体包裹体研究成果,笔者认为双朋西矽卡岩矿床为与中新世

花岗岩岩浆活动有关的中高温岩浆热液交代型矿床,成矿流体和矿质主要来源于岩浆。除需岩浆提供充足的成矿物质来源以及足够的驱动成矿流体运移的动力和能量外,良好的导矿通道和储矿场所是矽卡岩-岩浆热液矿床的形成不可或缺的重要条件之一(顾雪祥等 2008)。

成矿时期,区域构造伸展有助于成矿压力从静岩压力向静水压力转变,压力的突然下降容易引起成矿流体的沸腾,与温度下降一起共同促进了矿质的沉淀富集(Meinert *et al.*, 2003; 涂宏全等, 2005),适宜成矿温度范围在 160~380°C 区间。含矿热流体

演化的早期阶段,金可与各种不同类型的阴离子团结合形成含水的稳定络合物 $\text{AuHS}(\text{H}_2\text{S})_3$ (聂凤军等 2000),并通过岩体(体)粒间孔隙或原生冷凝细微裂隙进行扩散与运移。该稳定络合物对于成矿体系的温压变化极为敏感,从 $400\sim 340^\circ\text{C}$ 的冷却作用可导致 90% 的含金络合物发生沉淀。同时,减压作用可导致含金络合物的溶解度降低 90% (Mccuaig and Kerrich, 1998; Loucks and Mavrogenes, 1999)。随着温度或压力下降, f_{S_2} 、 f_{CO_2} 也随之减小,稳定络合物 $\text{AuHS}(\text{H}_2\text{S})_3$ 将会遭到破坏,导致 H_2S 、 SiO_2 、 H_2O 大量向围岩渗透、扩散、交代,造成广泛的黄铁矿化、硅化、绢云母化等(陈世忠等 2000),进而发生金的沉淀富集作用,在花岗闪长岩岩体与大理岩的接触带上形成具工业价值的含金矿体。

4.3 初步结论

(1) 双朋西金矿赋矿层位为大关山群。成矿与花岗闪长岩体时空关系密切,近 NW 向断裂大多是矿区最主要的控岩控矿构造。双朋西砂卡岩型金矿床为与岩浆作用有关的中高温岩浆热液交代型矿床,成矿受地层、岩体和构造等多种地质因素控制,具有多期多阶段特点。

(2) 花岗闪长岩和矿石表现为相似的轻稀土元素相对富集、重稀土元素相对亏损的右倾型,负锶异常,轻、重稀土元素分馏程度不同,表明成矿与中酸性岩浆热液有关,矿床的热液流体主要来源于花岗质熔体。

(3) 硫同位素的组成变化范围较窄($+2.2\text{‰}\sim +7.0\text{‰}$),反映了矿石中的硫总体具有混源硫的特征,即硫主要来源于深源岩浆,少量可能来自地层中的海水硫酸盐。铅同位素组成的分析表明,成矿流体中铅来源于较为一致的稳定铅源,具有与深部岩浆作用有关幔源铅与壳源铅相混合的造山带铅特征,揭示成矿热液在成矿过程中受到多源混染的强烈影响。

(4) 通过对双朋西金铜矿床脉石矿物中流体包裹体研究,发现该矿床中成矿期石英中包裹体类型主要有富液相气液相水溶液包裹体、富气相气液相水溶液包裹体和含子矿物包裹体 3 类。流体包裹体成分分析表明,这些脉石矿物中液体包裹体的气相成分以 H_2O 和 CO_2 为主,含少量 CH_4 。显微测温结果表明,该矿床成矿流体为均一温度范围为 $210\sim 370^\circ\text{C}$ 和 $370\sim 460^\circ\text{C}$ 、中等盐度($3.0\%\sim 6.5\%$)和中等密度($0.55\sim 0.88\text{ g/cm}^3$)热液。流体包裹体资料

揭示出,该矿床为典型的中高温砂卡岩型矿床。

综上所述,双朋西金铜矿床是与华力西-印支期陆内碰撞造山环境有关的砂卡岩型金铜矿,它是与华力西-印支期花岗质岩浆活动有关的高温岩浆热液交代型矿床,成矿流体和矿质主要来源于岩浆。

References

- Chen Shizhong, Zhou Jiyuan, Gu Lianxing, *et al.* 2000. Genesis of ore-forming fluids and precipitation mechanism of gold in the mazhuangshan gold deposit, hami, xinjiang [J]. *Mineral Deposits*, 19(3): 193~200 (in Chinese with English abstract).
- Gu Xuexiang, Dong Shuyi, Wang Yinhong, *et al.* 2008. A New Example of Unconformity-Related Endogenic Metallization: the Yanan Au-Cu-Fe Deposit in Shandong Province, China [J]. *Geoscience*, 22(2): 151~161 (in Chinese with English abstract).
- He Mingqin, Yang Shiyu, Liu Jiayun, *et al.* 2004. Characteristics of ore-forming fluids their origin in Jinchangqing gold(copper) ore deposits in xiangyun, yunnan [J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 24(2): 35~40 (in Chinese with English abstract).
- Li Shixin. 1998. The related characteristics of supergene-oxidized zone of Shuangpengxi Gold Deposit, Qinghai Province [J]. *Gold*, 19(9): 9~11 (in Chinese).
- Liu Wei, Dai Tagen, Fu W, *et al.* 2007. Characteristics of ore-forming fluids of the Shihu gold deposit, western Hebei [J]. *Geology in China*, 34(2): 335~341 (in Chinese).
- Liu Bin and Shen Kun. 1995. Formula for calculating oxygen fugacities of fluid inclusions and their applications [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 15(3): 291~302 (in Chinese with English abstract).
- Loucks R R and Mavrogenes J A. 1999. Gold solubility in supercritical hydrothermal brines measured in sythetic fluid inclusions [J]. *Science*, 284: 2159~2163.
- Mccuaig T C and Kerrich R. 1998. P-T-t-deformation-fluid characteristics of lode gold deposits, evidence from alteration systematics [J]. *Ore Geol. Rev.*, 12(6): 381~453.
- Meinert L D, Hedenquist J W and Satoh H. 2003. Formation of anhydrous and hydrous skarn in Cu-Au ore deposits by magmatic fluids [J]. *Econ. Geol.*, 98: 147~156.
- Nie Fengjun and Jiang Sihong. 2000. How is gold transported and deposited during the geologic process [J]. *Journal of Precious Metallic Geology*, 9(2): 94~96 (in Chinese).
- Pearce J A, Harris W N B and Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks [J]. *Journal of Petrology*, 25: 956~983.
- Pang Baocheng, Lin Changsong, Luo Xianrong, *et al.* 2005. The characteristic and origin of ore-forming fluid from micro-disseminated

- gold deposits in youjiang basin[J]. *Geology and Prospecting*, 41(1): 13~17 (in Chinese).
- She Hongquan, Feng Chengquan, Zhang Dequan, *et al.* 2005. Characteristics and metallogenic potential of skarn copper-lead-zinc polymetallic deposits in central eastern Gangdes[J]. *Mineral Deposits*, 24(5): 508~520 (in Chinese).
- Sun Jisheng, Wei Junhao and Wang Zaocheng. 2005. The metallogeny and prospecting indicators of Shuangpengxi Gold Deposit[J]. *Gansu Metallurgy*, 27(4): 22~25 (in Chinese).
- Tian Shihong, Hou Zengqian, Yang Zhusen, *et al.* 2007. REE and Stable Isotope Geochemical Characteristics of the Mashan Au-S Deposit in Tongling, Anhui Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 81(7): 929~938 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jianzhong, Li Jianwei, Zhao Xinfu, *et al.* 2008. Genesis of the Chaoshan gold deposit and its host intrusion, TongHng area: Constraints from $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages and elemental and Sr-Nd-0-C-S isotope geochemistry[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(8): 1875~1888 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xing, Xiao Rongge, Yang Lipeng, *et al.* 2008. Genesis of Garnet Skarn of the Xiekeng Cu-Au Deposit in Qinghai Province[J]. *Geoscience*, 22(5): 733~742 (in Chinese).
- Xi Chaozhuang. 2009. Research on the Geological-Geochemical Characteristics and Metallogenic Prognosis in the Shuangpengxi Deposit Area, Tongren, Qinghai Province[D]. Changsha: Central South University (in Chinese).
- Xi Chaozhuang, Dai Tegen and Wang Mingyan. 2009. Characteristics and Indication Significance of the Primary Halo in Shuangpengxi Gold Deposit in Qinghai[J]. *Metal Mine*, 3: 84~86 (in Chinese).
- Yang Jinzhong, Shen Yuanchao, Liu Tiebing, *et al.* 2008. Geochemical characteristics of ore-forming fluids in the pengjiakuang gold deposit, Shandong province[J]. *Mineral Deposit*, 19(3): 235~244 (in Chinese with English abstract).
- Zartman R E and Doe B R. 1981. Plumbotectonics: the model[J]. *Tectonophysics*, 75: 135~162.
- Zhang Tao. 2007. Ore-forming conditions and metallogeny of gold deposits in Shuangpengxi-Xiechangzhigou, Qinghai Province[J]. *North western Geology*, 40(3): 62~67 (in Chinese).

附中文参考文献

- 陈世忠, 周济元. 2000. 新疆哈密马庄山金矿成矿流体成因及金沉淀机制的探讨[J]. *矿床地质*, 19(3): 193~200.
- 顾雪祥, 董树义, 王银宏, 等. 2008. 不整合面控制内生金属成矿的新实例: 山东沂南金铜铁矿床[J]. *现代地质*, 22(2): 151~161.
- 何明勤, 杨世瑜, 刘家军, 等. 2004. 云南祥云金厂箐金(铜)矿床的成矿流体特征及流体来源[J]. *矿物岩石*, 24(2): 35~40.
- 聂凤军, 江思宏. 2000. 金是通过什么方式搬运与沉淀的[J]. *贵金属地质*, 9(2): 94~96.
- 庞保成, 林畅松, 罗先熔, 等. 2005. 右江盆地微细浸染型金矿成矿流体特征与来源[J]. *地质与勘探*, 41(1): 13~17.
- 孙继省, 魏俊浩, 王造成. 2005. 青海双朋西金矿成矿规律及找矿标志[J]. *甘肃冶金*, 27(4): 22~24.
- 余宏全, 丰成友, 张德全, 等. 2005. 西藏冈底斯中东段砂卡岩铜-铅-锌多金属矿床特征及成矿远景分析[J]. *矿床地质*, 24(5): 508~520.
- 李时新. 1998. 青海双朋西金矿表生氧化带的某些特征[J]. *黄金*, 19(10): 9~11.
- 刘斌, 沈昆. 1995. 流体包裹体的氧逸度计算公式及其应用[J]. *矿物学报*, 15(3): 291~302.
- 刘伟, 戴塔根, 傅文杰, 等. 2007. 冀西石湖金矿成矿流体特征[J]. *中国地质*, 34(2): 335~341.
- 田世洪, 侯增谦, 杨竹森, 等. 2007. 安徽铜陵马山金硫矿床稀土元素和稳定同位素地球化学研究[J]. *地质学报*, 81(7): 929~938.
- 王建中, 李建威, 赵新福, 等. 2008. 铜陵地区朝山砂卡岩型金矿床及含矿岩体的成因: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄、元素地球化学及多元同位素证据[J]. *岩石学报*, 24(8): 1875~1888.
- 王星, 荣荣阁, 杨立朋, 等. 2008. 青海谢坑铜金矿床石榴石砂卡岩成因研究[J]. *现代地质*, 22(5): 733~742.
- 息朝庄. 2009. 青海同仁双朋西矿区地质地球化学特征及成矿预测研究[D]. 中南大学.
- 息朝庄, 戴塔根, 王明艳. 2009. 青海双朋西金矿区原生晕特征及其指示意义[J]. *金属矿山*, (3): 84~86.
- 杨金中, 沈远超, 刘铁兵, 等. 2000. 山东蓬家乔金矿床成矿流体地球化学特征[J]. *矿床地质*, 19(3): 235~244.
- 张涛. 2007. 青海双朋西-斜长支沟地区金矿成矿地质条件及成矿规律[J]. *西北地质*, 40(3): 62~67.