

河北平泉下金宝金矿床载金矿物特征及其成矿指示意义

张建国^{1,2,3}, 邵拥军^{1,2}, 汪程^{1,2}, 刘忠法^{1,2}, 熊伊曲^{1,2}

(1. 中南大学 有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室, 湖南 长沙, 410083;

2. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 湖南 长沙, 410083;

3. 有色金属矿产地质调查中心, 北京 100012)

摘要: 以位于河北永安—下营房—毛家沟金多金属成矿带的下金宝金矿床为研究对象, 借助光学显微镜、电子探针点分析及面分析技术, 对本区金的赋存状态以及主要载金矿物的形成环境和成因类型进行研究。研究表明: 本区“可见金”的粒径集中在 0.005~0.053 mm 范围内, 微细粒级金矿物质量分数占 80%以上, 主要以粒间金、包裹金及裂隙金的形式出现; 载金矿物主要为银金矿、自然金、黄铁矿、闪锌矿; 本区“不可见金”不仅以机械混入的“不可见”显微-超显微包体金存在, 而且以晶格金的形式存在; 本区黝铜矿 As 与 As+Sb 的物质的量比 $x(\text{As})/(x(\text{As})+x(\text{Sb}))$ 高于 0.25, 银金矿中 Au 的质量分数 $w(\text{Au})$ 为 73.512%~80.120%, 闪锌矿的 $w(\text{Zn})/w(\text{Cd})$ 为 79.82~145.33, 表明矿床形成于浅成—中低温环境中; 黄铁矿、闪锌矿的主微量元素特征指示下金宝金矿床为与岩浆侵入活动有关的浅成中低温热液型金矿床。

关键词: 电子探针; 赋存状态; 成矿环境; 矿床成因; 下金宝金矿床

中图分类号: P591⁺.2

文献标志码: A

文章编号: 1672-7207(2018)04-0901-09

Characteristics of gold-bearing minerals in Xiajinbao gold deposit of Hebei and their metallogenic indicating significance

ZHANG Jianguo^{1,2,3}, SHAO Yongjun^{1,2}, WANG Cheng^{1,2}, LIU Zhongfa^{1,2}, XIONG Yiqu^{1,2}

(1. Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Non-Ferrous Metals and Geological Environment Monitoring,

Central South University, Changsha 410083, China;

2. School of Geosciences and Info-physics, Central South University, Changsha 410083, China;

3. China Non-ferrous Metals Resource Geological Survey, Beijing 100012, China)

Abstract: Xiajinbao gold deposit is located in the Yong'an—Xiayingfang—Maojiagou poly-metallic belt, which has favorable metallogenic geological condition. According to systematic petrography observation and in situ elemental analysis by X-ray electron probe microanalyzer(EPMA), Xiajinbao gold deposit occurrence and the ore-forming environment and genesis of gold-bearing minerals were studied. The results show that the visible gold particle has a size of 0.005–0.053 mm in diameter. Fine grained gold composes more than 80% of the total minerals, which occur as mineral inclusions in the fractures or among the particles of the gold-bearing minerals. Major gold-bearing minerals include gold, electrum, pyrite and sphalerite. The “invisible gold” mainly exists in the form of mechanically-mixed “invisible” microscopic- ultramicroscopic gold inclusions, as well as solid solution(lattice gold).The molar ratio of $x(\text{As})/(x(\text{As})+x(\text{Sb}))$ of tetrahedrite is above 0.25. The mass fraction of gold of electrum ranges from 73.512% to 80.120%. The mass fraction ratio of $w(\text{Zn})/w(\text{Cd})$ of sphalerite ranges from 79.82 to 145.33, indicating that the deposit is formed in an epithermal moderate-low temperature environment. Major and trace element features of pyrite and

收稿日期: 2017-05-10; 修回日期: 2017-07-12

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金资助项目(41472302); 中南大学创新驱动计划项目(2015CX008)(Project(41472302) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project(2015CX008) supported by the Innovation-driven Plan of Central South University)

通信作者: 邵拥军, 教授, 博士生导师, 从事矿床学及成矿预测学研究; E-mail: shaoyongjun@126.com

sphalerite indicate that the Xiajinbao gold deposit is a moderate-low temperature hydrothermal gold deposit related to magmatic activities.

Key words: electron probe microanalyzer(EPMA); occurrence; ore-forming environment; genesis; Xiajinbao gold deposit

下金宝金矿床隶属于营坊金矿区, 位于华北地台龙须门中生代次火山岩盆地的东北缘, 是永安一下营坊—毛家沟构造岩浆岩活动带的重要组成部分^[1], 该构造—岩浆活动带位于华北板块与西伯利亚板块、太平洋板块的接合部位^[2]。栾文楼等^[1]对矿区含金石英脉中包裹体类型和均一温度进行了测定, 认为本区成矿温度属于中低温范畴; 袁万明等^[3]对矿区矿石中的锆石和磷灰石的裂变径迹年龄进行了分析, 认为成矿开始年龄为 153.9 Ma; 张建国等^[4]基于本区岩浆锆石的 LA-ICP-MS U-Pb 年代学研究, 指出下金宝花岗斑岩体形成于(158.0±2.5) Ma。整体上看, 人们主要集中于对该矿区成岩成矿年代学及流体包裹体特征等方面的研究, 关于本区矿物学等方面的综合研究较少。为此, 本文作者在矿相学研究的基础上, 通过电子探针测试技术, 分析下金宝金矿床主要载金矿物特征、金的赋存状态、形成环境及矿床成因类型, 旨在为矿床成因的厘定提供矿物学方面的证据。

1 矿区地质概况

矿区处于龙须门中生代断陷盆地东北部边缘。矿区出露地层主要为: 太古界迁西群拉马沟组灰绿色斜长角闪片麻岩; 元古界长城系常州沟组(Chc)、大洪峪组(Chd)和高于庄组(Chg)石英质砂岩; 泥灰质白云岩;

白云质灰岩; 元古界蓟县系雾迷山组(Jxw)及杨庄组(Jxy)碳酸盐岩。其中, 长城系大洪峪组泥灰质白云岩为主要含矿地层。矿区褶皱构造和断裂构造较发育, 褶皱构造主要表现为太古界穹窿构造, 层间滑脱带发育; 断裂构造可分为 NE—NNE 向、EW 向及 SN 向 3 组, 控制了岩浆侵入活动。由于断裂的多期活动性, 晚期断裂活动为多金属矿化提供了动力及空间。区内岩浆活动强烈, 岩浆岩发育, 矿区范围内出露的最大岩体为下金宝花岗斑岩体。金矿体赋存于矿区 F₄ 断层下盘的蚀变花岗斑岩体及岩体与太古代角闪斜长片麻岩的接触带中, 靠近花岗斑岩的蚀变围岩处, 往往有金富集。矿体整体呈 NE 走向, 少数矿体中间转折部位呈 NNE 向, 下金宝岩体、NE 向及 NNE 向断裂构造联合控制了矿体的产状、形态和规模(见图 1)。矿石类型主要为细脉浸染型和石英脉型矿石, 细脉浸染型矿石分布于石英—金矿脉两侧。金属硫化物主要为黄铁矿、方铅矿、黄铜矿、闪锌矿和极少量黝铜矿, 矿石结构包括自形—半自形结构、它形结构、交代结构、出溶结构、包含结构等, 矿石构造以浸染状和脉状为主。围岩蚀变主要有钾化、绢英岩化及硅化等, 矿化主要为黄铁矿化、方铅—闪锌矿化、黄铜矿化等。其中, 硅化、绢云母化、黄铁矿化、方铅—闪锌矿化与金矿化的关系最密切。根据矿脉间的切穿关系及矿物共生组合关系, 将本区成矿过程划分为 3 个阶段: 石英—黄铁矿阶段; 石英—方铅矿—闪锌矿阶段; 石英—多

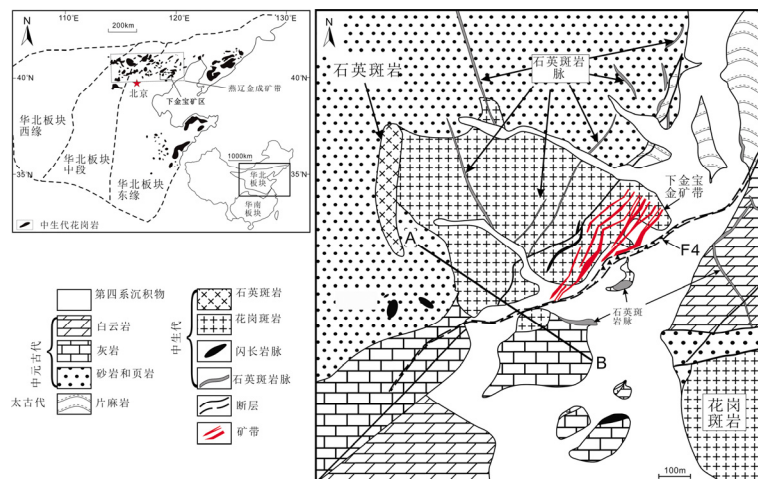


图 1 河北平泉县下金宝矿床地质图

Fig. 1 Geological map of Xiajinbao gold deposit in Pingquan County, Hebei Province

金属硫化物(黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿、黝铜矿)阶段。

2 矿相学特征

本次测试的样品采集于露天采坑以及部分钻孔, 选取有代表性的样品磨制成光片, 进行矿相学研究。矿相学观察表明, 下金宝矿床中金矿物以银金矿为主, 极少部分呈自然金产出, 金矿物的形态较复杂, 以不同形态的粒状为主, 见图 2。在显微镜下对其粒径进行统计(见表 1), 发现本区金矿物的粒径集中在 0.005~0.053 mm 范围内, 微细粒级金矿物质量分数占

表 1 下金宝金矿床中金矿物的粒度分布
Table 1 Grain size distribution of gold minerals in Xiajinbao Gold deposit

颗粒类别	粒度 区间/mm	颗粒 数目/个	数目所占 比例/%	合计 比例/%
微粒	<0.005	8	2.74	33.65
	[0.005~0.010)	90	30.82	
细粒	[0.010~0.037)	145	49.65	49.65
	[0.037~0.053)	34	11.64	
中粒	[0.053~0.074)	6	2.05	13.69
	[0.074~0.100)	3	1.03	
粗粒	[0.100~0.300]	5	1.71	2.74
	>0.300	1	0.34	

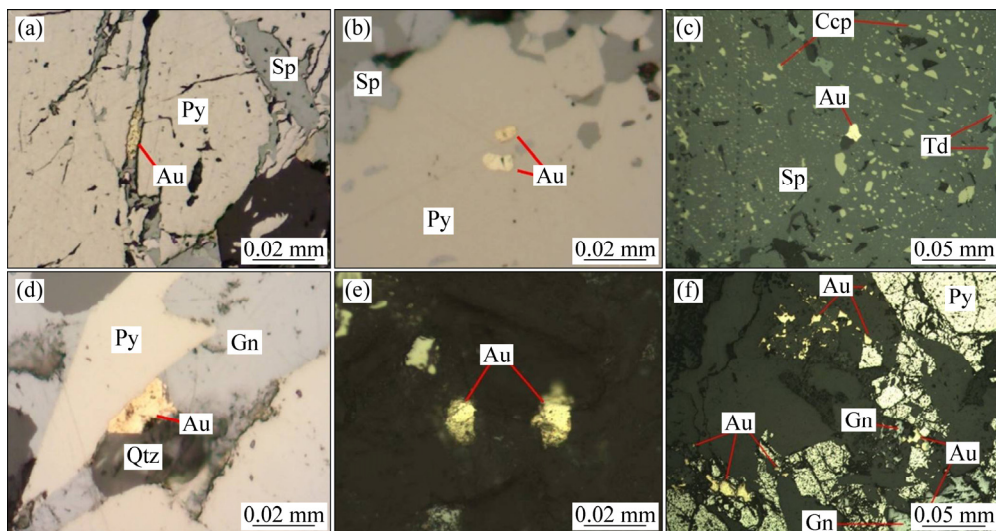
80%以上。

本区金矿物的嵌布以粒间金为主, 次为包裹金及裂隙金, 见表 2。裂隙金多嵌布于黄铁矿的微裂隙中(见图 2(a)和图 2(b)); 包体金呈包裹体状、乳滴状发育在黄铁矿、闪锌矿等载金矿物内(见图 2(c)), 有时金与方

表 2 下金宝金矿床中金矿物的嵌布关系

Table 2 Embedding relations among gold minerals in Xiajinbao gold deposit

嵌布方式	嵌布部位	所占 比例/%	合计 比例/%
裂隙金	黄铁矿裂隙	7.88	9.25
	闪锌矿裂隙	1.37	
粒间金	黄铁矿—石英粒间	3.08	33.24
	黄铁矿—闪锌矿粒间	3.80	
	黄铁矿—方铅矿粒间	0.34	
	黄铁矿—方铅矿—石英粒间	0.34	
	黄铁矿—黄铁矿粒间	0.68	
	闪锌矿—闪锌矿粒间	3.08	
	方解石—石英粒间	0.68	
包体金	闪锌矿—石英粒间	20.21	31.86
	黄铁矿—闪锌矿—石英粒间	1.03	
	闪锌矿内	29.45	
	黄铁矿内	1.05	
独立金	方铅矿内	0.68	25.65
	石英内	0.68	
独立金	石英脉中		25.65



(a) 裂隙金; (b) 黄铁矿中的包体金; (c) 闪锌矿中的包体金; (d) 粒间金; (e) 独立金; (f) 独立金和裂隙金
Py—黄铁矿; Sp—闪锌矿; Gn—方铅矿; Td—黝铜矿; Ccp—黄铜矿; Qtz—石英

图 2 下金宝金矿床中“显微镜可见金”的赋存状态

Fig. 2 Occurrence of “visible gold” in Xiajinbao gold deposit

铅矿、闪锌矿呈连生关系, 形成连生金, 或分布于硅化石英脉中, 形成独立金(见图 2(e))。也可见少量自然金嵌布于石英晶粒之间, 少部分被包裹在石英晶内(图 2(e)和图 2(f))。

3 样品测试

在矿相学研究基础上, 选取本区主要的载金矿物

进行电子探针的点分析和面分析。电子探针分析在中南大学有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室电子探针测试中心完成; 电子探针的仪器型号为津岛 Shimadzu 公司生产的 EPMA-1720/1720H 型。点分析的条件如下: 加速电压为 15 kV, 把束电流为 10 nA, 电子束直径为 1~5 μm , 检测限为 0.01%, 面分析的条件如下: 加速电压为 15 kV, 把束电流为 20 nA, 电子束直径为 1~5 μm 。载金矿物电子探针测试结果见表 3。

表 3 下金宝矿床载金矿物电子探针测试结果(质量分数)

Table 3 EPMA results of gold-bearing minerals in Xiajinbao Gold deposit(mass fraction) %

样品编号	矿物	As	S	Fe	Ag	Co	Ni	Au	$\delta(\text{Fe})/\delta(\text{S})$
K1	黄铁矿	0.116	51.372	44.087	0.011	0.046	0.021	0.022	0.985
K10-2	黄铁矿	0.148	53.849	46.355	0.012	0.046	0.004	0	0.988
	黄铁矿	0.153	53.202	45.546	0	0.028	0.004	0.046	0.983
	黄铁矿	0.140	52.300	42.984	0.033	0.111	0.008	0.005	0.943
Z78	黄铁矿	0.052	51.684	45.764	0	0.053	0.016	0	1.017
	黄铁矿	0.008	53.021	44.813	0.046	0.055	0.025	0.031	0.970
	黄铁矿	0.206	52.646	46.537	0.008	0.034	0.002	0	1.015
样品编号	矿物	As	S	Fe	Te	Ag	Co	Ni	Au
Z78	银金矿	0	0.13	0.085	0.268	23.404	0	0	73.512
	银金矿	0	0.105	0.233	0.254	23.023	0.003	0.008	74.339
BG1514	银金矿	0	0.01	0	—	18.470	0	0.060	80.120
	银金矿	0	0	0.04	—	22.360	0	0.010	75.740
样品编号	矿物	S	Fe	Zn	Ag	Cd	In	Au	Pb
BG1514-02	黝铜矿	3.130	27.440	2.320	0	0.150	0.050	0.120	0
BG0914-07	黝铜矿	4.070	27.080	0.460	0	0.370	0.010	0.100	0
	黝铜矿	3.670	27.300	0.360	0	0.480	0	0.050	0
BG1104-01	黝铜矿	6.080	26.360	0.670	0	0.610	0	0.080	0.020
K1	闪锌矿	32.828	2.759	59.402	0.03	0.732	0	0	0.176
	闪锌矿	33.298	4.483	61.271	0	0.725	0	0.015	0.111
	闪锌矿	33.533	1.974	64.236	0.048	0.691	0	0	0.058
K10-1	闪锌矿	33.170	1.347	63.278	0	0.774	0	0	0.077
	闪锌矿	33.561	1.904	63.627	0	0.795	0	0	0.167
	闪锌矿	32.664	1.456	64.801	0.043	0.614	0	0	0.054
K10-2	闪锌矿	32.589	0.501	63.883	0.039	0.629	0	0	0.117
	闪锌矿	33.005	1.040	65.530	0	0.668	0.012	0	0.077
	闪锌矿	32.907	1.341	64.804	0	0.761	0	0.042	0.063
Z76	闪锌矿	32.897	1.737	63.072	0.003	0.434	0	0	0.168
	闪锌矿	32.141	0.764	65.062	0	0.535	0	0.087	0.123
Z51	闪锌矿	32.208	3.667	57.692	0.031	0.611	0	0	0.06
	闪锌矿	32.661	3.523	57.711	0	0.723	0	0	0.188
	闪锌矿	33.355	3.926	60.027	0	0.649	0	0.107	0.098
	闪锌矿	32.988	0.765	65.811	0.012	0.746	0	0	0.046

注: “0”表示该元素未测出或低于检测限; “—”表示该元素未测。 $\delta(\text{Fe})$ 和 $\delta(\text{S})$ 分别为黄铁矿中 Fe 和 S 元素与其理论的质量分数的偏离度($\delta(\text{Fe})=(100 \times w(\text{Fe})-46.55) \times 100/46.55$; $\delta(\text{S})=(100 \times w(\text{S})-53.45) \times 100/53.45$)。

4 金的赋存状态

近年来, 对于“不可见金”的赋存形式主要有以下2种观点: 一种观点认为金以显微包裹体金的形式存在^[5], 另一种观点认为“不可见金”以“固溶体”(晶格金)形式存在^[6-7]。本文基于 EPMA 的点分析和面分析数据, 对本区“不可见金”的赋存状态进行探讨。

4.1 EPMA 点分析

从表3可见: 黄铁矿中 Au 的质量分数 $w(\text{Au})$ 为 0.005%~0.046%, 闪锌矿中 $w(\text{Au})$ 为 0.015%~0.107%, 黝铜矿中 $w(\text{Au})$ 为 0.050%~0.120%, 在 EPMA 光束的分辨率下(1~5 μm), 金的分布不均匀, 存在金的富集点, 但还没有形成“可见金”, 暗示这部分 Au 以机械混入的“不可见”显微-超显微包体金存在, 但不排除“不可见金”以“固溶体”(晶格金)形式存在的可能。

REICH 等^[7]基于 14 个金矿床中赋金含砷黄铁矿 EPMA 和 SIMS 分析结果, 提出金在黄铁矿中的溶解度限制线可近似地表示为 $x(\text{Au})=0.02x(\text{As})+4 \times 10^{-5}$ (其中, $x(\text{Au})$ 和 $x(\text{As})$ 分别为 Au 和 As 的摩尔分数), 位于溶解度限制线以上的含砷黄铁矿中金为纳米级自然金, 位于溶解度限制线下部的含砷黄铁矿中金主要以固溶体(Au^+)形式存在。下金宝金矿床含砷黄铁矿 EPMA 分析数据点位于金溶解度限制线两侧, 大部分数据点落于金溶解度限制线上方区域(见图3), 表明本区黄铁矿中的 Au 主要以纳米级自然金的形式存在, 部分 Au 以“固溶体”(晶格金)的形式赋存。

本区闪锌矿电子探针测试数据元素相关关系见表4。从表4可见: Au 与其他元素的相关性均不高(相关性系数 <0.4), 暗示 Au 不参与矿物晶胞的组成, 可能以机械混入的“不可见”显微-超显微包体金存在; Cd 和 In 等分散元素具有亲硫等多重地球化学性质, 其元素地球化学参数(原子半径、离子半径等)与 Zn 和 Pb 等元素(特别与 Zn)具有相似性^[8], 主要以类质同象的形式赋存于金属硫化物中^[9]。闪锌矿电子探针测试所得元素相关关系见表4。从表4可见: Au 与 Cd, In 和 Pb 之间具有较小的正相关系数, 暗示部分 Au 离子可能以类质同象的形式赋存于闪锌矿中。

4.2 EPMA 面分析

Au 元素的面扫描分析结果见图4。从图4可见:

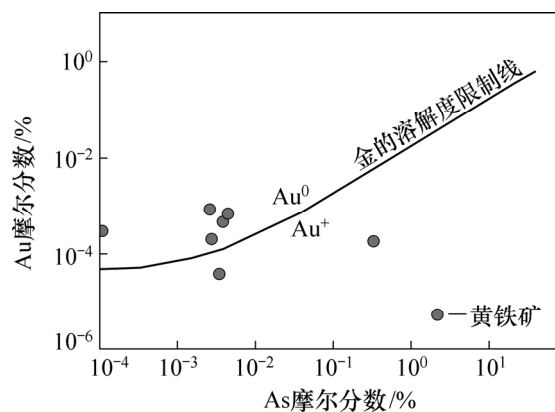


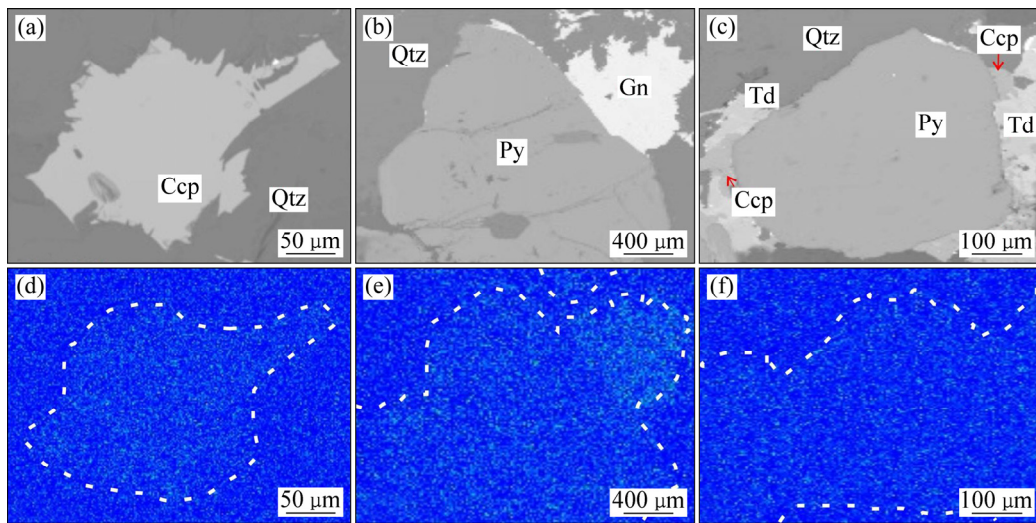
图3 下金宝金矿床黄铁矿 As-Au 图解 (底图据 REICH 等^[7])

Fig. 3 As-Au diagram of pyrite of the Xiajinbao gold deposit(After REICH, et al^[7])

表4 闪锌矿电子探针测试数据元素相关关系

Table 4 Correlation coefficient of different elements of sphalerite

元素	S	Fe	Cu	Zn	Ge	As	Ag	Cd	In	Te	Au	Tl	Pb
S	1.000												
Fe	0.246	1.000											
Cu	-0.280	0.654	1.000										
Zn	0.086	-0.851	-0.906	1.000									
Ge	-0.237	-0.327	-0.168	0.269	1.000								
As	-0.408	0.503	0.890	-0.806	-0.005	1.000							
Ag	-0.126	-0.067	0.057	-0.039	0.180	0.081	1.000						
Cd	0.089	-0.205	-0.181	0.199	-0.558	-0.213	-0.184	1.000					
In	-0.154	-0.395	-0.231	0.388	-0.267	-0.202	-0.235	0.587	1.000				
Te	0.245	-0.343	-0.295	0.348	0.007	-0.370	0.358	-0.107	0.140	1.000			
Au	-0.141	0.037	0.031	0.068	-0.183	-0.304	-0.400	0.092	0.112	-0.169	1.000		
Tl	-0.378	0.241	0.606	-0.510	0.079	0.587	0.215	-0.148	-0.233	0.215	-0.165	1.000	
Pb	-0.158	0.000	0.256	-0.188	-0.057	0.263	-0.323	0.395	0.328	-0.320	0.118	-0.103	1.000



(a) 黄铜矿背散射照片; (b) 黄铁矿和方铅矿背散射照片; (c) 黄铁矿、黝铜矿和闪锌矿背散射照片;
(d) 黄铜矿面扫描照片; (e) 黄铁矿和方铅矿面扫描照片; (f) 黄铁矿、黝铜矿和闪锌矿面扫描照片
Py—黄铁矿; Ccp—黄铜矿; Sp—闪锌矿; Gn—方铅矿; Td—黝铜矿; Qtz—石英。

图 4 金属硫化物背散射及电子探针面扫描照片

Fig. 4 BSE photos and EPMA mapping analysis of metallic sulfides

黄铁矿、闪锌矿、方铅矿、黄铜矿、黝铜矿及石英中未见明显的高亮点, 依稀可见轮廓, 显示良好的均质结构, 表明 Au 在矿物中呈均匀分布状态; 各矿物间的亮度在 EPMA 面扫描照片中具有明显差异, 方铅矿亮度最高, 表明其金的质量分数最高; 黄铁矿、闪锌矿、黄铜矿、黝铜矿次之, 石英最低。由于 EPMA 面分析的精度要比点分析的精度低, 同时, EPMA 微束斑直径为 1~5 μm , 陈懋弘等^[10]认为当金的粒度小于电子探针微束的分辨率且在矿物的尺度上均匀分布时, 则面元素图可出现均匀结构的假象, 但这并不一定说明金以晶格金的形式均匀存在。只有当金的粒度达到或大于电子探针微束的分辨率时, 才可以直接看到 Au 的高亮点^[11]。因此, 下金宝金矿床中“不可见金”主要还是以显微-超显微颗粒金为主, 且粒度大部分小于 EPMA 微束的分辨粒度(1 μm), 可能还存在部分的 Au 以离子形式存在于本区金属硫化物的晶格中。

5 成因意义

5.1 成矿环境

闪锌矿中的某些微量元素质量分数 w 与其形成温度及成因类型有关^[12-13], $w(\text{Zn})/w(\text{Cd})$ 常用来反映成矿温度, $w(\text{Zn})/w(\text{Cd}) > 500$ 指示为高温, $w(\text{Zn})/w(\text{Cd}) \approx 250$ 指示为中温, $w(\text{Zn})/w(\text{Cd}) < 100$ 指示为低温^[14]。

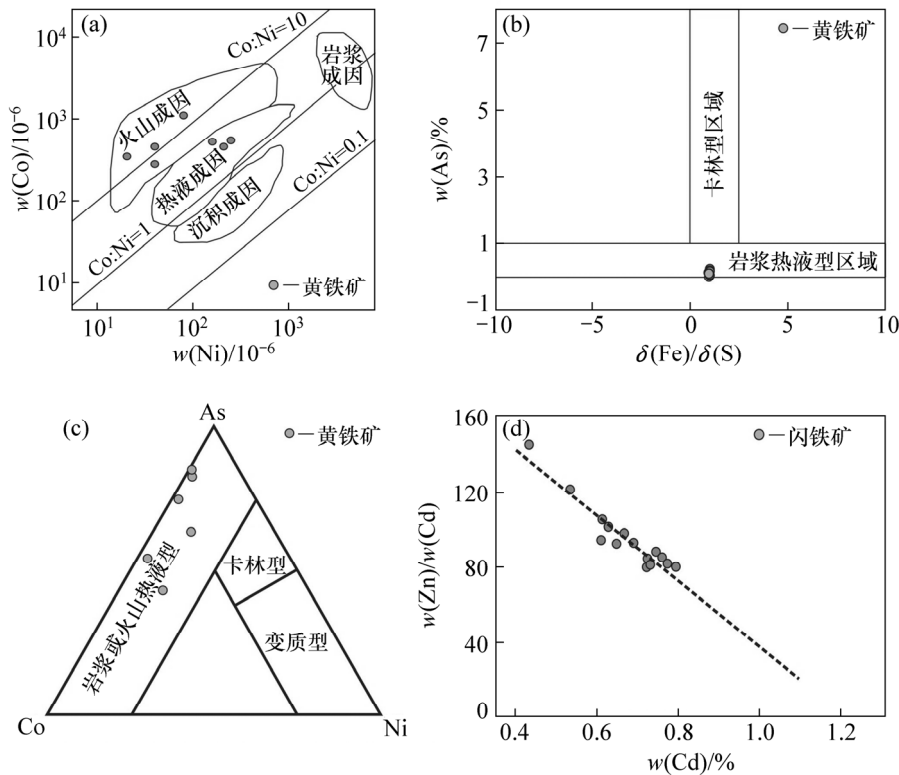
本区闪锌矿的 $w(\text{Zn})/w(\text{Cd})$ 为 79.82~145.33, 表明该矿床形成于中低温环境下, 与文献[15]的研究结果一致。黝铜矿中元素的物质的量比 x 对于成矿具有指示意义^[16], 本区黝铜矿的 $x(\text{As})/(x(\text{As}) + x(\text{Sb}))$ 高于 0.25, 而 $w(\text{Ag})$ 低于检测限, 表明成矿温度低于 325 $^{\circ}\text{C}$ ^[17]。含金矿物中 Au 和 Ag 的质量分数 $w(\text{Au})$ 和 $w(\text{Ag})$ 对于成矿同样具有指示作用^[18], 银金矿中 $w(\text{Au})$ 为 73.512%~80.120%, 平均为 75.928%, 仅 1 个样品中 $w(\text{Au})$ 高于 80.0%。本区金的质量分数总体不高, 表明成矿温度为中-低温, 同时也指示成矿深度较小。

综上所述, 本区闪锌矿、黝铜矿及银金矿的主微量元素特征指示该矿床形成于浅成-中低温环境。

5.2 矿床成因

黄铁矿中微量元素的组合、质量分数及其比值可作为研究矿石成因和矿床类型的灵敏的地球化学指示剂^[19]。下金宝矿床中黄铁矿的 S 和 Fe 的质量分数与靳是琴等^[20]提出的中低温热液成因的黄铁矿中铁、硫的质量分数($w(\text{S})$ 为 52.509%, $w(\text{Fe})$ 为 45.079%)接近, 指示下金宝矿床具有中低温热液矿床的特征。黄铁矿中 $w(\text{As})$ 与次火山岩型及斑岩型矿床相近(0.013%~0.2637%)^[21], 暗示本矿床成因可能为次火山岩型或斑岩型金矿床。

BAJWAH 等^[22]通过研究不同成因的黄铁矿中 Co 和 Ni 的质量分数认为, 沉积型黄铁矿 Co 和 Ni 的质量分数普遍较低, $w(\text{Co})/w(\text{Ni}) < 1.00$, 平均为 0.63; 热



(a) 黄铁矿 Co-Ni 成因图解(据赵振华^[23]修改); (b) 黄铁矿 $w_{As}-\delta Fe/\delta S$ 图解(据严育通等^[24]修改); (c) 黄铁矿 As-Co-Ni 三角相图(据宫丽等^[25]修改); (d) 闪锌矿 $w(Cd)-w(Zn)/w(Cd)$ 相关图解

图5 下金宝金矿床中金属硫化物成因判别图解

Fig. 5 Discrimination diagrams of genesis of metallic sulfides in Xiajinbao gold deposit

液成因的黄铁矿中 Co 和 Ni 质量分数及 $w(Co)/w(Ni)$ 变化较大, $1.17 < w(Co)/w(Ni) < 5.00$; 火山喷气块状硫化物矿床以高 $w(Co)$ (平均质量分数为 480×10^{-6})、低 $w(Ni)$ ($< 100 \times 10^{-6}$)、高 $w(Co)/w(Ni)$ (5~50, 平均为 8.7) 为特征; 岩浆热液成因的黄铁矿 $w(Co)/w(Ni)$ 为 1~5, 个别可能更高。本区黄铁矿样品的 $w(Co)/w(Ni)$ 为 2.19~17.00。表明黄铁矿的成因类型为与岩浆活动有关的热液型, 在黄铁矿的 Co-Ni 成因图解中^[23](见图 5(a)), 样品点落在火山成因和热液成因的区域; 在 $w(As)-\delta Fe/\delta S$ 图解中^[24](见图 5(b)), 本区黄铁矿的样品点落入岩浆热液型的区域内, 指示黄铁矿的成因类型为岩浆热液型。黄铁矿的 As-Co-Ni 三角相图(图 5(c)) 能清楚地反映出不同成因类型的黄铁矿中 As, Co 和 Ni 的质量分数及其变化范围^[25]。本区黄铁矿的 As-Co-Ni 三角相图指示黄铁矿的成因类型为岩浆或火山热液型。

对下金宝金矿床中闪锌矿的 $w(Cd)$ 与 $w(Zn)/w(Cd)$ 进行拟合, 发现两者呈明显的负相关(见图 5(d)), 其负相关方程为 $w(Cd) = 1.357 - 0.007 \times w(Zn)/w(Cd)$, 相关系数 R 为 0.892, 此特征与典型的岩浆热液矿床中

闪锌矿的特征类似^[26]。

综上所述, 下金宝金矿床中黄铁矿与闪锌矿的微量元素特征及其比值和相关图解指示本区黄铁矿与闪锌矿的形成及中低温岩浆热液活动有关, 表明本矿床为与岩浆侵入活动相关的浅成中低温热液型金矿床。

6 结论

1) 自然金、银金矿、黄铁矿、闪锌矿是本区的主要载金矿物, 显微可见的金矿物以粒间金、裂隙金及包裹金的形式嵌布于载金矿物中。可见金的粒径变化范围较大, 但主要集中在 0.005~0.053 mm 范围内, 微细粒级金矿物质量分数在 80% 以上。

2) 本区“不可见金”的赋存形式有 2 种: 一种是以“不可见”显微-超显微包体金存在, 另一种以晶格金的形式存在。

3) 矿床形成于浅成中低温环境, 黄铁矿、闪锌矿的主微量元素特征进一步指示本矿床为与岩浆活动密切相关的浅成中低温热液型金矿床。

参考文献:

- [1] 栾文楼, 于耀先. 河北平泉下营坊金矿床流体包裹体地球化学及其找矿意义[J]. 贵金属地质, 1995, 4(3): 161-167.
LUAN Wenlou, YU Yaoxian. Geochemistry of fluid inclusion of Xiayingfang gold deposit in Pingquan of Hebei Province and ore-searching significance[J]. Journal of Precious Metallic Geology, 1995, 4(3): 161-167.
- [2] 黄典豪, 吴澄宇, 杜安道, 等. 东秦岭地区钼矿床的铼-钨同位素年龄及其意义[J]. 矿床地质, 1994, 13(3): 221-230.
HUANG Dianhao, WU Chengyu, DU Andao, et al. Re-Os ages molybdenum deposits in east Qinling and their significance[J]. Mineral Deposits, 1994, 13(3): 221-230.
- [3] 袁万明, 王世成, 王兰芬. 河北下营坊金矿成矿时代的裂变径迹研究[J]. 核技术, 1999, 22(7): 411-413.
YUAN Wanming, WANG Shicheng, WANG Lanfen. Fission track study on the metallogenetic age of Xiayingfang gold deposit in eastern Hebei[J]. Nuclear Techniques, 1999, 22(7): 411-413.
- [4] 张建国, 邵拥军, 刘忠法, 等. 河北平泉下金宝花岗岩斑岩锆石 U-Pb 年代学、Hf 同位素特征及其地质意义[J]. 中国有色金属学报, 2016, 26(1): 137-148.
ZHANG Jianguo, SHAO Yongjun, LIU Zhongfa, et al. Zircon U-Pb geochronology and Hf isotope characteristics of Xiaojinbao granite-porphry body, Hebei Province, and its geological significance[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2016, 26(1): 137-148.
- [5] BAKKON B M, HOCHERIA M F, MARSHALL A F, et al. High resolution microscope of gold in unoxidized ore from the carlin mine Nevada[J]. Economical Geology, 1989, 84: 171-179.
- [6] PALENIK C S, SATOSHI U, MARTIN R, et al. "Invisible" gold revealed: direct imaging of gold nanoparticles in a Carlin-type gold deposit[J]. American Mineralogist, 2004, 89(10): 1359-1366.
- [7] REICH M, KESLER S, UTSUNOMIYA S, et al. Solubility of gold in arsenic pyrite[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2005, 69(11): 2781-2796.
- [8] HÖLL R, KLING M, SCHROLL E. Metallogenesis of germanium: a review[J]. Ore Geology Reviews, 2007, 30(3): 145-180.
- [9] YE L, LIU T. Sphalerite chemistry, Niujiaotang Cd-Rich zinc peposit, Guizhou, Southwest China[J]. China Journal of Geochemistry, 1999, 18(1): 62-68.
- [10] 陈懋弘, 毛景文, 陈振宇, 等. 滇黔桂“金三角”卡林型金矿含砷黄铁矿和毒砂的矿物学研究[J]. 矿床地质, 2009, 28(5): 539-557.
CHEN Maohong, MAO Jingwen, CHEN Zhenyu, et al. Mineralogy of arsenian pyrites and arsenopyrites of Carlin-type gold deposits in Yunnan—Guizhou—Guangxi “golden triangle” area, southwestern China[J]. Mineral Deposits, 2009, 28(5): 539-557.
- [11] 刘建中, 夏勇, 邓一明, 等. 贵州水银洞超大型金矿床金的赋存状态再研究[J]. 贵州地质, 2007, 24(3): 165-169.
LIU Jianzhong, XIA Yong, DENG Yiming, et al. Re-study on modes of gold occurrence in the Shuiyindong super-large-sized gold deposit[J]. Guizhou Geol, 2007, 24(3): 165-169.
- [12] COOK N J, CIOBANU C L, SKINNER A P W, et al. Trace and minor elements in sphalerite: a LA-ICPMS study[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2009, 73(16): 4761-4791.
- [13] 张政, 唐菊兴, 林彬, 等. 藏南扎西康矿床闪锌矿微量元素地球化学特征及其地质意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2016, 35(6): 1203-1216.
ZHANG Zheng, TANG Juxing, LIN Bin, et al. Geochemical characteristics of trace elements of sphalerite in the Zhaxikang dposit, southern Tibet, and their geological significances[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2016, 35(6): 1203-1216.
- [14] 刘英俊, 曹励明, 李兆麟, 等. 元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1984: 242-300.
LIU Yingjun, CAO Liming, LI Zhaolin, et al. Element geochemistry[M]. Beijing: Science Press, 1984: 242-300.
- [15] ZHANG Jianguo, SHAO Yougjun, WANG Cheng, et al. Ore-forming mechanism of Xiajinbao gold deposit in Pingquan, Hebei based on fluid inclusions and stable isotopes[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2017, 27(6): 1363-1373.
- [16] 徐仕海. 兰坪盆地银铜钴镍多金属矿床黝铜矿系列矿物学特征及其成因意义[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2005, 32(6): 556-564.
XU Shihai. Mineralogy characteristic and the genetic significance of tennantite tetrahedrite from Ag-Cu-Co-Ni polymetal deposits in Lanping basin, Yunnan, China[J]. Journal Chengdu University of Technology, 2005, 32(6): 556-564.
- [17] 毛水和, 李广文. 黝铜矿族矿物的电子探针分析研究与综合利用[J]. 矿产综合利用, 1988(3): 72-77.
MAO Shuihe, LI Guangwen. Study on comprehensive utilization and electron microprobe analysis of tetrahedrite-group minerals[J]. Comprehensive Utilization of Mineral Resources, 1988(3): 72-77.
- [18] 梁俊红, 刘海波, 王建国, 等. 自然金的标型及成色特征在金矿床研究中的意义[J]. 黄金地质, 2000, 12(21): 1-4.
LIANG Junhong, LIU Haibo, WANG Jianguo, et al. The meaning of the typomorphic characteristics of native gold and its

- fineness feature in the researches of ore deposit[J]. *Gold Geology*, 2000, 12(21): 1-4.
- [19] 宋学信, 张景凯. 中国各种成因黄铁矿的微量元素特征[J]. 中国地质科学院矿床地质研究所刊, 1986(2): 166-175.
- SONG Xuexin, ZHANG Jingkai. Minor elements in pyrites of various genetic types from China[J]. *Bulletin of the Institute of Mineral Deposits Chinese Academy of Geological Sciences*, 1986(2): 166-175.
- [20] 靳是琴, 李鸿超. 成因矿物学概论[M]. 长春: 吉林大学出版社, 1984: 1-50.
- JIN Shiqing, LI Hongchao. An introduction to genetic mineralogy[M]. Changchun: Jilin University Press, 1984: 1-50.
- [21] 孙国胜, 初凤友, 胡瑞忠, 等. 我国主要金矿类型中黄铁矿“电子-空穴心”特征及影响因素[J]. *矿物学报*, 2004, 24(3): 211-217.
- SUN Guosheng, CHU Fengyou, HU Ruizhong, et al. Electron hole-core characteristics of pyrite from the main types of gold deposits in China and affecting factors[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2004, 24(3): 211-217.
- [22] BAJWAH Z U, SECCOMBE P K, OFFLER R. Trace element distribution, Co/Ni ratios and genesis of the Big Cadia iron-copper deposit, New South Wales, Australia[J]. *Mineral Deposita*, 1987, 22(4): 292-300.
- [23] 赵振华. 微量元素地球化学[J]. *地球科学进展*, 1992, 7(5): 65-66.
- ZHAO Zhenhua. Principle of trace element geochemistry[J]. *Advance in Earth Sciences*, 1992, 7(5): 65-66.
- [24] 严育通, 李胜荣, 张娜, 等. 不同成因类型金矿床成矿期黄铁矿成分成因标型特征[J]. *黄金*, 2012, 33(3): 11-16.
- YAN Yutong, LI Shengrong, ZHANG Na, et al. Composition typomorphic characteristics and statistics analysis of metallogenic pyrite in gold deposits of different genetic types[J]. *Gold*, 2012, 33(3): 11-16.
- [25] 宫丽, 马光. 黄铁矿的成分标型特征及其在金属矿床中的指示意义[J]. *地质找矿论丛*, 2011, 26(2): 162-166.
- GONG Li, MA Guang. The characteristic typomorphic composition of pyrite and indicate meaning to metal deposits[J]. *Contributions Geology and Mineral Resources Research*, 2011, 26(2): 162-166.
- [26] 司荣军, 顾雪祥, 庞绪成, 等. 云南省富乐铅锌多金属矿床闪锌矿中分散元素地球化学特征[J]. *矿物岩石*, 2006, 26(1): 75-80.
- SI Rongjun, GU Xuexiang, PANG Xucheng, et al. Geochemical character of dispersed element in sphalerite from Fule Pb-Zn polymetal deposit, Yunnan Province[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2006, 26(1): 75-80.

(编辑 陈灿华)