

# 四川平武县金洞沟金矿地质特征及其成因探讨

黄昌华<sup>1,2</sup>, 张成江<sup>1</sup>, 刘治恒<sup>1</sup>

(1. 成都理工大学 核技术与自动化工程学院, 四川 成都 610059; 2. 四川省核工业地质调查院, 四川 成都 610061)

**摘要:** 金洞沟金矿床是位于四川省北部平武县境内的小型岩金矿床。在详细研究矿床地质特征的基础上, 测试了石英包裹体均一温度、盐度、化学成分及 H、O 同位素组成, 分析了金属硫化物(黄铁矿、方铅矿、闪锌矿)的 S 同位素组成, 对金的成矿作用进行了深入探讨。研究表明: 金洞沟金矿床为低温热液型金矿床, 其成矿物源主要是志留系茂县群浅变质碎屑岩系, 矿石中硫化物以黄铁矿为主, 硫化物含量约 1%, 为少硫化物型矿石。流体包裹体及 S、H、O 同位素研究显示成矿流体是主要由大气降水组成的热液, 成矿温度为 125 ~ 185 °C, 平均温度为 148.7 °C, 属低温热液型金矿床。在此基础上, 提出金洞沟金矿床的成矿作用经历了原始含矿岩系(矿源层)的形成、区域变质作用衍生矿源层的形成、热液成矿作用及表生氧化富集等 4 个阶段, 韧性剪切构造活动是引起金活化、迁移和富集的主要因素。该成果为该矿床成因的认识和找矿工作提供了参考。

**关键词:** 金洞沟金矿床; 低温热液型金矿床; 矿床地球化学; 矿床成因; 四川平武县

**中图分类号:** P618.51

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-8527(2010)01-0018-08

## Geological Characteristics and Genesis of the Jindonggou Gold Deposit in Pingwu County, Sichuan Province

HUANG Chang-hua<sup>1,2</sup>, ZHANG Cheng-jiang<sup>1</sup>, LIU Zhi-heng<sup>1</sup>

(1. College of Applied Nuclear Technology and Automation Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China;

2. Sichuan Nuclear Geology Institute, Chengdu, Sichuan 610061, China)

**Abstract:** Jindonggou gold deposit is a small gold deposit located in Pingwu County, north of Sichuan Province. Based on a studied geological characteristics of the Jindonggou gold deposit, the authors measured the homogenization temperature, salinity, chemical composition, as well as H and O isotopic compositions of the fluid inclusions of the quartz, measured S isotopic composition of the metal sulfide (pyrite, galena and sphalerite), and systematically discussed the metallogenesis of the gold deposit. The results show that the deposit belongs to epithermal gold deposit type. The ore-forming source comes from the epimetamorphic clastic rocks of Smx (Silurian System). This gold deposit is characterized by a poor content of sulfide minerals (below 1%). Metallogenic fluid is composed of atmospheric precipitation. The homogenization temperature of fluid inclusions ranges from 125 °C to 185 °C, belonging to epithermal gold deposit type. The metallogenesis of the Jindonggou gold deposit is divided in to four stages, i. e. the formation of gold source bed in the sedimentation, the formation of derivative gold source bed in the regional metamorphism, the formation of the gold deposit in the hydrothermalism and hypergenesis. The regional shear zone movement is likely the major factor leading to activation, migration and concentration of Au. The conclusions are significant for realization of the deposit genesis and mineral exploration.

**Key words:** Jindonggou gold deposit; epithermal deposit; geochemistry of mineral deposit; genesis of the deposit; Pingwu County, Sichuan Province

收稿日期: 2009-01-03; 改回日期: 2009-11-12; 责任编辑: 戚开静。

基金项目: 核工业西南地质局和黄金工业管理局联合项目。

作者简介: 黄昌华, 男, 高级工程师, 1965 年出生, 矿床地质学专业, 主要从事固体矿产勘查及成矿预测工作。

Email: huangch@scng.cn。

## 0 引言

金洞沟金矿床位于四川省平武县坝子乡金宝村境内。自20世纪80年代末以来,已在该区发现金洞沟小型岩金矿床1处、岩金矿点19处及砂金矿床3处,砂金资源量达5 t以上。上述岩金矿床(点)及砂金矿床的发现,表明该区具有较大的找矿前景。本文通过详细的野外地质调查和室内测试石英包裹体均一温度、盐度、化学成分和H、O同位素组成及金属硫化物(黄铁矿、方铅矿、闪锌矿)的S同位素组成,探讨了金洞沟金矿床的地质特征及成因,以期促进该区矿产勘查工作的深入开展。

## 1 区域地质背景

金洞沟金矿床位于四川盆地西北缘龙门山推覆构造带的北东端、青川—茂汶断裂构造南支金洞沟—金坝子含金剪切带内。区域内出露的中、上元古界碧口群和通木梁群构成本区基底,由一套中—深变质的细碧角斑岩系和复理石沉积变质

岩系组成,岩石类型主要有细碧岩、角斑岩、凝灰岩和阳起石片岩等。震旦系、古生界及三叠系构成本区的盖层,其中震旦系、寒武系的岩性主要为白云岩、结晶灰岩、硅质岩、变质砂岩及炭质板岩等。矿区内主要出露志留系茂县群,其岩性主要为结晶灰岩、绢云千枚岩夹变质砂岩及粉砂岩等,是矿区内重要的含金层位,金洞沟金矿床赋存在茂县群上部岩组的绢云千枚岩内。泥盆系至三叠系的岩性主要为绢云千枚岩、板岩、变质砂岩和结晶灰岩等(图1)。

金洞沟金矿床区域内岩浆活动主要在晋宁期和印支期。晋宁期岩浆岩主要分布于轿子顶复背斜核部,早期以海底基性喷发为主,晚期主要为中酸性岩浆侵入,并伴有少量的辉绿岩脉及闪长岩脉。印支期岩浆岩主要分布于木皮复背斜核部,以酸性岩浆侵入为主,呈岩枝、岩脉侵入于碧口群、茂县群,是本区沉积盖层中形成后期释放、聚集的主要热源之一。

金洞沟金矿床区域内构造主要由三大断裂及其推覆体组成,即青川—平武深断裂及木皮复背

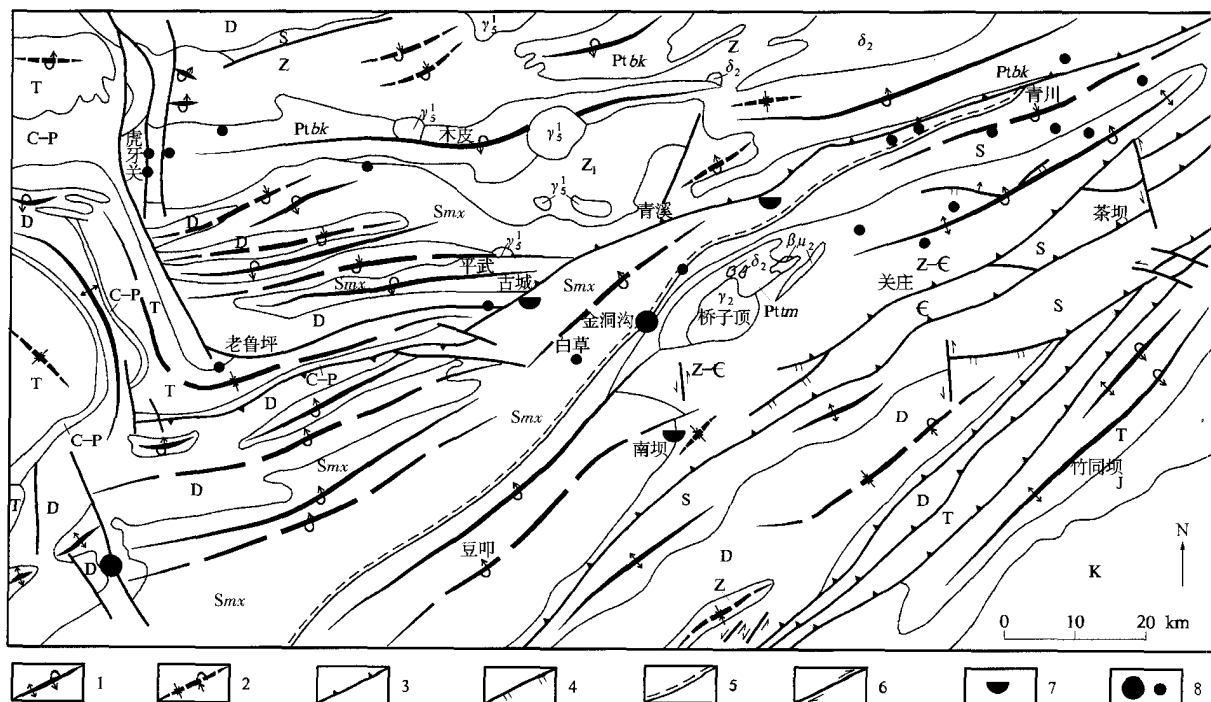


图1 金洞沟地区区域地质构造简图(据参考文献[2]修改)

Fig. 1 Simplified geological map of Jindonggou area(modified from reference[2])

Ptbk. 元古界碧口群; Pttn. 元古界通木梁群; Z. 震旦系; Z-e. 震旦系—寒武系; Smx. 志留系茂县群; D. 泥盆系; C. 石炭系; C-P. 石炭—二叠系; T. 三叠系; J. 侏罗系; K. 白垩系;  $\gamma_1$ . 晋宁期花岗岩;  $\delta_2$ . 闪长岩;  $\beta\mu_2$ . 辉绿岩;  $\gamma_2$ . 印支期花岗岩;  
1. 正常、倒转背斜构造; 2. 正常、倒转向斜构造; 3. 主干冲断裂带; 4. 一般断裂; 5. 韧性剪切带; 6. 走滑断层; 7. 砂金矿床;  
8. 岩金矿床、矿化点

斜推覆体、青川—茂汶断裂及白草复向斜推覆体、龙门山中央断裂及轿子顶复背斜推覆体。它们受东西向、北西—南东向作用力的长期作用,在剖面上构成一个叠瓦状逆冲断裂带,其间夹持的地块均经历了较大的位移。主干断裂切割深、演化历史长,具有地表陡、深部缓的铲式特征<sup>[1-3]</sup>。

## 2 矿床地质特征

金洞沟金矿床产于志留系茂县群内,容矿岩石主要为千糜岩和脉石英。矿床位于青川—茂汶断裂构造南支金洞沟—金坝子含金剪切带内,该韧性剪切带出没于浅变质的志留系茂县群千枚岩系中,总体走向北东,倾向北西,以倾角 $40^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 平行于区域片理方向展布。韧性剪切带内主要表现为一系列的石英脉或透镜状石英所充填并由千糜岩组成的强片理化带,伴有强烈的揉皱、膝折带、SC构造、线理构造、劈理构造、石英细脉弯曲碎裂形成的香肠状构造、构造透镜体等,构造岩主要有千糜岩和砂糖状石英。剪切带形成以后,后期表现为脆性变形特征,如千糜岩等再次破碎形成构造角砾岩。岩石蚀变也反映了韧性剪切带的特征,主要为石英、绢云母、菱铁矿及黄铁矿的组合。矿床范围内韧性剪切带长440 m,宽400~700 m,由5条蚀变片理带( $Sp_1$ 、 $Sp_2$ 、 $Sp_3$ 、 $Sp_4$ 、 $Sp_5$ )组成(图2),它们在走向上呈近于平行的雁列式展布,局部出现分支复合和尖灭再现的现象。工业矿体主要分布在 $Sp_2$ 片理带内,其他4条蚀变片理带内都有金矿化显示。

$Sp_2$ 蚀变片理带分布在剪切带的中心部位,长

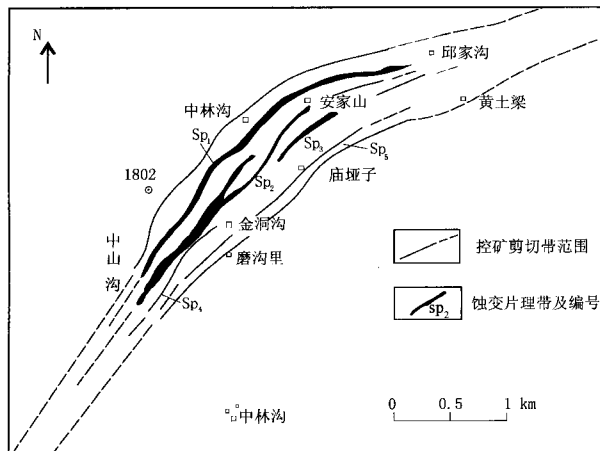


图2 金洞沟金矿床蚀变片理化带的展布特征

Fig. 2 Distribution of the alteration schistosity belt in the Jindonggou gold deposit

约440 m,宽60~80 m,最宽达200 m,总体走向北东,倾向北西,倾角 $55^{\circ}$ 左右。该蚀变片理带由石英脉和千糜岩组成,片理带内出现5条石英密集带,密集带内顺层与切层粗晶、细晶石英脉发育。石英脉两侧的千糜岩中菱镁铁矿、黄铁矿分布密集,粒度粗,岩石蚀变强烈,各种剪切构造发育。

$Sp_2$ 蚀变片理带中的石英脉多呈透镜状产出,单脉长几米至十几米不等,宽0.1~0.5 m,最宽达2 m,沿走向、倾向方向呈尖灭再现。一般切层石英脉宽度大于顺层石英脉宽度,顺层石英脉有2组产状: $300^{\circ} \angle 55^{\circ}$ 和 $335^{\circ} \angle 55^{\circ}$ ,切层石英脉有1组产状: $265^{\circ} \angle 12^{\circ}$ ,切层石英脉与顺层石英脉常呈共扼状产出。石英脉具有多期次贯入的特征,主要有2期,一期是规模较大的顺层和切层的早期菱铁矿石英脉,另一期是细网脉状的后期石英脉。

含黄铁矿的千糜岩及乳白色块状石英脉是主要的容矿岩石,矿体严格受剪切带内蚀变片理带控制,工业矿体主要分布在剪切带中心部位的蚀变片理带内,蚀变片理带两侧向外的金矿化强度减弱。

### 2.1 矿体特征

金洞沟金矿床由12个矿体组成,所有矿体均赋存于 $Sp_2$ 蚀变片理化带的蚀变千糜岩及石英脉中,其中Ⅱ-2、Ⅲ-1、Ⅳ号矿体规模最大,其他矿体规模均较小。

Ⅱ-2号矿体沿走向和倾向呈透镜状,产状( $313^{\circ} \sim 344^{\circ}$ ) $\angle$ ( $32^{\circ} \sim 80^{\circ}$ );矿体长约228 m,最大延深105 m;厚度为0.54~3.79 m,平均厚度为1.30 m;品位为 $1.44 \times 10^{-6} \sim 10.68 \times 10^{-6}$ ,平均品位为 $5.31 \times 10^{-6}$ 。

Ⅲ-1号矿体呈脉状或透镜状,产状( $314^{\circ} \sim 358^{\circ}$ ) $\angle$ ( $35^{\circ} \sim 52^{\circ}$ );矿体长约254 m,最大延深48 m;厚度为0.30~2.26 m,平均厚度为1.24 m;品位为 $1.42 \times 10^{-6} \sim 10.59 \times 10^{-6}$ ,平均品位为 $5.19 \times 10^{-6}$ 。

Ⅳ号矿体沿走向和倾向呈透镜状,产状( $300^{\circ} \sim 354^{\circ}$ ) $\angle$ ( $40^{\circ} \sim 70^{\circ}$ );矿体长310 m,最大延深70 m;厚度一般0.31~5.67 m,平均厚度1.96 m;品位一般 $2.64 \times 10^{-6} \sim 13.29 \times 10^{-6}$ ,平均品位为 $4.47 \times 10^{-6}$ 。

### 2.2 矿石特征

该矿床的矿石矿物组成较简单,除金、银外,其他有用矿物含量很少。金属矿物主要有黄铁矿、

菱镁铁矿和少量的黄铜矿、方铅矿、闪锌矿等；非金属矿物主要为绢云母、石英、方解石、叶绿泥石等。矿石结构主要类型有压碎结构、粒状结构及填隙结构等。矿石构造主要有细脉状、网脉状、斑点状、团块状、角砾状、千糜状及蜂窝状等构造。金多金属硫化物呈星点状、浸染状、斑点状、团块状、脉状等分布于矿石中。

矿石类型主要有蚀变千糜岩型和石英脉型 2 种。蚀变千糜岩型是金洞沟矿床的主要类型，矿体产于硅化、黄铁矿化千糜岩中，黄铁矿呈星点状，含量约为 1%。石英脉型是次要的矿石类型，矿体赋存于细网脉状黄铁矿化石英脉中。

矿石中金主要以自然金等形式存在，多呈中、细粒状嵌布于石英、黄铁矿、方铅矿及闪锌矿等矿物的裂隙和晶隙中。

### 2.3 成矿阶段的划分

根据矿物共生组合、结构构造特点、脉体的穿插关系和矿物生成的先后顺序，将成矿阶段划分为构造热液期和表生期。构造热液期划分为成矿前期、成矿期和成矿后期。

成矿前期划分为 2 个阶段。第一阶段宏观上以含斑、斑状千糜岩与穿插其间分布密集的细小透镜状石英脉的形式产出，主要矿物组合为中晶石英、绢云母、中晶黄铁矿和菱镁铁矿及少量的电气石。第二阶段宏观上粗晶黄铁矿和粗晶菱铁矿分布在石英脉边缘及其千糜岩中，晶体粗大，具有压碎结构，主要矿物组合为石英、菱铁矿和黄铁矿及少量的绢云母。

成矿期主要矿物组合为五角十二面体、立方体、八面体细晶黄铁矿及闪锌矿、方铅矿、黄铜矿、自然金、自然银等，黄铁矿常以集合体出现，形成团块状或细脉状分布于石英脉中及其边部千糜岩中，并与闪锌矿、方铅矿、黄铜矿共生，石英为灰色细晶结构，呈细脉状切穿巨晶或粗晶黄铁矿、菱镁铁矿及粗晶石英。

成矿后期主要矿物组合为重晶石、白云石、石

英、方解石等，石英-方解石呈细脉状、它形，中粗粒结构，上述矿物组合呈细脉状分布于裂隙中。

表生期矿体近地表部分经氧化分解，形成氧化带。金属硫化物形成褐铁矿、针铁矿、铜蓝、孔雀石、铅钒等氧化矿物。石英在地表性质较稳定，仍残留在原地。地表矿石氧化后，使金进一步富集，形成氧化矿石。

### 2.4 主要矿物的标型特征

金洞沟金矿床中主要载金矿物为黄铁矿，根据黄铁矿的晶形、粒度及其含金性等特征，将黄铁矿分为成矿前期和成矿期 2 类。成矿前期黄铁矿多为中、粗粒状的立方体自形晶，呈浅黄色，强金属光泽，粒径为 2.5 ~ 5.0 mm，呈浸染状分布在蚀变片理带或靠近蚀变片理带的千糜岩中。成矿期的黄铁矿呈暗黄色，具暗淡的金属光泽，呈立方体、五角十二面体、八面体自形及它形，粒径一般为 0.1 ~ 0.4 mm，晶体具有碎裂现象，黄铁矿集合体常呈星点状、团块状、细脉状分布于石英脉及蚀变千糜岩中，并与方铅矿、闪锌矿、黄铜矿等共生。黄铁矿的反射率、比重、硬度等参数均比标准黄铁矿略偏低(表 1)。

从表 1、表 2 可知，金洞沟金矿床黄铁矿中 Fe、S 含量普遍比标准黄铁矿中的含量低，明显比理论值亏损 Fe 和 S。成矿前期黄铁矿中 Au、Ag 含量较低， $w(\text{Au})/w(\text{Ag})$  比值为 0.18；成矿期黄铁矿中 Au、Ag 含量高，Au 含量平均  $159.22 \times 10^{-6}$ ，Ag 含量平均  $102.76 \times 10^{-6}$ ， $w(\text{Au})/w(\text{Ag})$  比值为 1.60。黄铁矿中  $w(\text{Co})/w(\text{Ni})$  比值为 0.32 ~ 0.39，变化小，比值较低。根据黄铁矿矿物中 Fe 和 S 亏损、 $w(\text{Au})/w(\text{Ag})$  值高及  $w(\text{Co})/w(\text{Ni})$  比值低等特征，显示金洞沟金矿床具有与典型低温热液型金矿床类似的特征<sup>[4]</sup>。

### 2.5 蚀变类型及分带

金洞沟金矿床围岩蚀变发育，种类较多，主要有硅化、绢云母化、黄铁矿化、菱铁矿化及碳酸盐化等，其中硅化、绢云母化及黄铁矿化是矿

表 1 金洞沟金矿床细晶黄铁矿与标准黄铁矿物性对比  
Table 1 Physical properties of pyrite in the Jingdonggou gold deposit

样号	反射率/%				体积质量/(t/m <sup>3</sup> )	硬度/(kg/mm <sup>2</sup> )
	$R_{470\text{nm}}$	$R_{540\text{nm}}$	$R_{580\text{nm}}$	$R_{650\text{nm}}$		
JTC01-1	45.25	54.87	55.99	54.32	4.89	825
JPD01-2	45.36	54.75	55.78	54.25	4.82	1 005
标准黄铁矿*	46.00	53.60	55.00	55.90	4.92 ~ 5.20	792 ~ 1 259

注：标准黄铁矿\* 根据 Uytendogaardt W 资料，1971<sup>[5]</sup>；JTC01-1、JPD01-2 为成矿期细晶黄铁矿样品；样品由成都理工大学实验室测试。



表2 金洞沟金矿床黄铁矿化学成分特征  
Table 2 Chemical compositions of pyrite in the Jindonggou gold deposit

样号	Fe	S	$w(\text{Fe})/w(\text{S})$
JTC03-1	42.80	48.41	0.88
JPD04-1	42.72	47.99	0.89
JPD05-1	42.53	46.89	0.91
JPD08-1	41.89	47.25	0.89
标准黄铁矿 <sup>*</sup>	46.55	53.45	0.87

样号	Au	Ag	$w(\text{Au})/w(\text{Ag})$
JTC03-1	6.38	35.00	0.18
JPD04-1	159.22	102.76	1.54
JPD05-1	150.32	89.79	1.67
JPD08-1	148.68	92.87	1.60

样号	Co	Ni	$w(\text{Co})/w(\text{Ni})$
JTC03-1	765	1 950	0.39
JPD04-1	670	2 030	0.33
JPD05-1	678	1 987	0.34
JPD08-1	650	2 015	0.32

样号	Cu	Pb	Zn	As
JTC03-1	650.00			3 875
JPD04-1	48.30	775	74.20	3 482
JPD05-1	47.59	765	75.11	3 525
JPD08-1	51.66	786	77.58	3 568

样号	Se	Te	Sb
JTC03-1	15.5	1.20	9.5
JPD04-1	17.3	0.77	6.0
JPD05-1	16.7	0.69	8.0
JPD08-1	15.9	0.75	7.0

注: JTC03-1 为成矿前期中粗晶黄铁矿样品; JPD04-1、JPD05-1、JPD08-1 为成矿期细晶黄铁矿样品; Fe、S 含量单位为%, 其他化学成分含量单位为  $10^{-6}$ ; 样品由成都理工大学实验室测试。

床的主要蚀变, 它们形成的蚀变中心部位控制了金矿体的展布形态。

矿床内蚀变带主要受韧生剪切带控制, 形成了动力变形变质和热液产生的围岩蚀变相结合的蚀变带特征。在韧性剪切带的中心热液蚀变强烈, 硅化、绢云母化及黄铁矿化强烈, 动力变形变质程度高, 蚀变岩主要为黄铁矿、菱镁铁矿组成的麻斑状千糜岩, 石英脉数量多。从韧性剪切带中心往两侧, 热液蚀变强度降低, 硅化、绢云母化、黄铁矿化、菱镁铁矿化等相对较弱, 动力变形变质程度低, 蚀变岩主要由含斑千糜岩组成, 石英脉数量减少。

### 3 包裹体地球化学特征

本次研究工作测试的 4 件样品中, JPD04L03、

JPD04L04 样品采自矿床 II-2 号矿体的 JPD04 坑道中, 为成矿期形成的含金石英脉, JPD01L01、JPD01L02 样品采自矿床内 JPD01 坑道内, 为成矿前期形成的不含金石英脉。本研究对上述 4 件石英样品进行了流体包裹体岩相学、均一温度、化学成分和盐度的测试工作。

镜下观察, 金洞沟金矿床石英脉中存在 3 种类型的原生、次生及假次生流体包裹体, 以原生包裹体为主, 次生包裹体较少。原生包裹体呈椭圆形、米粒状、长条状、三角形等, 大小为  $2 \sim 10 \mu\text{m}$ , 小群、自由分布(图 3(a)、(b))。次生包裹体呈椭圆形、米粒状和不规则状, 大小为  $2 \sim 8$

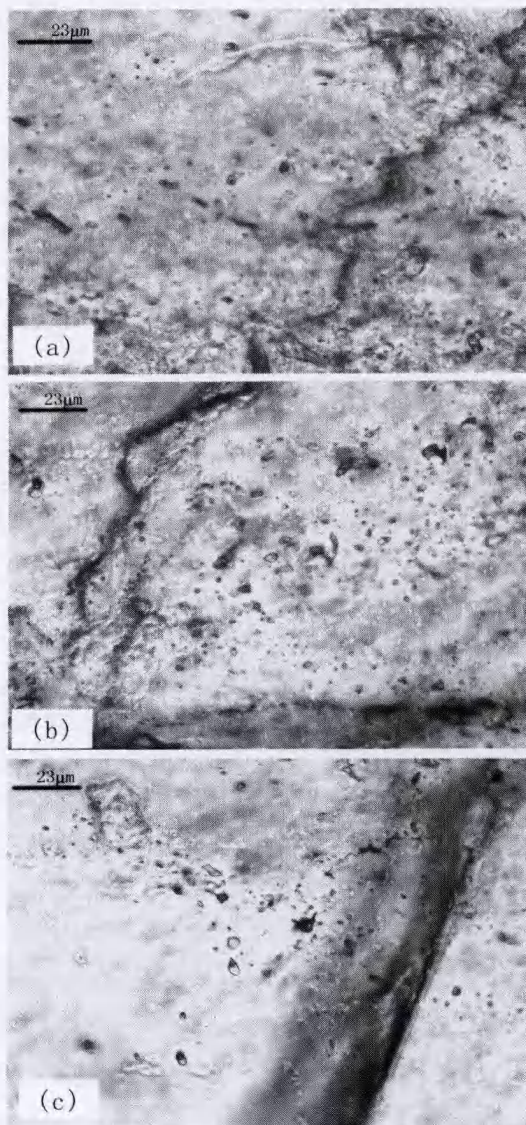


图3 金洞沟金矿床中石英内的流体包裹体

Fig. 3 Fluid inclusions in quartz from the Jindonggou gold deposit

$\mu\text{m}$ , 沿裂隙定向分布(图3(c)), 不作为本次研究对象。

包裹体类型主要为气液两相型, 气液比一般为  $4\% \pm$ , 加热时气泡逐渐缩小, 最终气泡消失, 均一成液相; 部分为  $\text{CO}_2$  气相型, 少数为纯液相型。

### 3.1 均一温度特征

室内采用均一法研究金洞沟金矿床的成矿温度, 分别测量了成矿前期、成矿期石英中流体包裹体的均一温度。其中 JPD01L01、JPD01L02 样品(成矿前期)的均一温度变化范围为  $131 \sim 195\text{ }^\circ\text{C}$ , 平均为  $156.6\text{ }^\circ\text{C}$ ; JPD04L03、JPD04L04 样品(成矿期)的均一温度变化范围为  $125 \sim 185\text{ }^\circ\text{C}$ , 平均为  $148.7\text{ }^\circ\text{C}$ 。金洞沟矿床成矿前期和成矿期的成矿温度变动范围不大, 成矿温度总趋势是向着降低演化, 成矿温度相当于低温热液矿床的温度范围<sup>[7-10]</sup>。

### 3.2 成矿流体成分及盐度特征

矿物中气液包裹体是其所捕获的成矿溶液的天然样品, 对气液包裹体进行成分分析, 可以研究成矿流体的化学组成<sup>[11]</sup>。

本次对金洞沟金矿床分别测定了成矿前期石英(JPD01L01、JPD01L02)及成矿期石英(JPD04L03、JPD04L04)中的流体包裹体成分和盐度(表3)。分析结果表明, 成矿前期及成矿期的流体阳离子均以  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  为主, 其次是  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ , 成矿前期  $w(\text{Na}^+ + \text{K}^+)/w(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$  为 0.2, 成矿期该比值为 0.6, 显示随着成矿作用的演化碱质作用增强。成矿流体阴离子以  $\text{Cl}^-$  为主, 成矿期的  $\text{Cl}^-$  含量明显高于成矿前期的。流体中的气相成分主要以  $\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{CO}_2$  为主, 成矿期的  $\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{CO}_2$  含量明显高于成矿前期, 且成矿期的  $V(\text{CO}_2)/V(\text{H}_2\text{O})$  比值为 0.30, 明显高于成矿前期  $V(\text{CO}_2)/V(\text{H}_2\text{O})$  的比值(0.18), 说明成矿溶液中  $\text{CO}_2$  的变化是酸度的主要调节剂之一, 随着温度

下降,  $\text{CO}_2$  增加, pH 值降低, 使络合物破坏, 引起金的沉淀, 所以  $\text{CO}_2$  的增加有利于金的沉淀。流体中水的增多, 说明了金矿形成过程中热液活动的增强<sup>[9]</sup>。根据库尔洛夫式, 该矿床成矿流体为  $\text{Cl}^- - \text{Ca}^{2+} - \text{Na}^+$  型水溶液。

成矿溶液的盐度一般是指其含盐量, 用所含的 NaCl 质量百分比来表示。金洞沟金矿床成矿流体的含盐度根据冷冻法测定石英流体包裹体的冰点求得, 成矿前期盐度平均值为 8.2%, 成矿期盐度平均值为 9.7%。显示成矿期的盐度高于成矿前期, 金的含量同盐度呈正比关系, 认为该矿床成矿流体属低盐度流体。

## 4 同位素地球化学特征

研究矿床中矿物的硫、氢、氧等元素的同位素分布和变化规律, 可以用来阐明矿床形成条件、矿质来源等一系列问题<sup>[12-13]</sup>。本次对金洞沟金矿床中金属硫化物(黄铁矿、方铅矿、闪锌矿)的硫同位素及石英脉的氢、氧同位素进行了分析测试, 下面分别对 S、H、O 同位素测试结果及其地质意义进行阐述。

### 4.1 硫同位素地球化学

金洞沟金矿床的金属硫化物黄铁矿发育, 其次发育方铅矿、闪锌矿。根据金属硫化物的产出特征, 在矿体部位采集了成矿期细晶黄铁矿、闪锌矿及方铅矿 3 组共 6 个样品, 分析测试 S 同位素, 其测定结果见表 4。由表 4 可知, 矿石中硫同位素都为正值, 以重硫为主, 变化范围较窄 ( $1.2\text{‰} \sim 6.3\text{‰}$ , 平均为  $4.817\text{‰}$ ), 极差很小 ( $5.1\text{‰}$ ), 硫的均一化程度较高。上述特征表明成矿溶液中的硫可能为深源硫。

### 4.2 氢、氧同位素地球化学

金洞沟金矿床含金石英脉中石英的氧同位素及其包裹体水的氢同位素测试结果见表 5。根据公式, 将石英中氧同位素测试结果根据下式换算成

表3 金洞沟金矿床流体包裹体成分分析结果( $w_B/(\mu\text{g/g})$ )  
Table 3 Chemical compositions of fluid inclusions in the Jingdonggou gold deposit( $\mu\text{g/g}$ )

样号	矿物	盐度/%	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{F}^-$	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{CO}_2$	CO	$\text{CH}_4$	$\text{N}_2$	$\text{H}_2\text{O}$
JPD01L01	石英	7.8	1.25	1.15	9.10	3.01	0.61	2.67	1.55	15.23	1.62	0.19	6.62	112
JPD01L02	石英	8.5	5.21	2.24	26.21	9.81	1.45	14.32	1.54	67.24	8.32	0.35	17.66	345
	平均值	8.2	3.23	1.70	17.66	6.41	1.03	8.50	1.55	41.24	4.97	0.27	12.14	229
JPD04L03	石英	10.3	11.44	3.12	11.45	5.24	1.32	13.25	0.78	250.12	7.34	0.45	32.77	956
JPD04L04	石英	9.1	8.23	3.25	12.78	10.85	0.98	38.68	1.89	240.91	9.21	0.67	4.57	714
	平均值	9.7	9.84	3.19	12.12	8.05	1.15	25.97	1.34	245.52	8.28	0.56	18.67	835

注: 样品由国土资源部宜昌地质矿产研究所分析测试。

表4 金洞沟金矿床硫同位素分析结果  
Table 4 Sulfur isotopic composition in the Jindonggou gold deposit

样号	产出岩性	矿物	$\delta^{34}\text{S}/\text{‰}$	$w(\text{Au})/10^{-6}$
JPD01S01	蚀变千糜岩	黄铁矿	6.2	6.80
JPD01S02		闪锌矿	4.8	6.80
JPD04S03	石英脉	黄铁矿	6.0	11.3
JPD04S04		闪锌矿	4.4	11.3
JPD05S05	石英脉	黄铁矿	6.3	16.7
JPD05S06		方铅矿	1.2	16.7

注:样品由成都理工大学实验室分析测试。

表5 金洞沟金矿床石英中氧同位素及其包裹体的氢同位素分析结果  
Table 5 Composition of  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta\text{D}$  isotopes in the Jindonggou gold deposit

样号	矿物	$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{‰}$	$\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}/\text{‰}$
JPD04T01	石英	12.99	-2.50	-74.5
JPD05T02	石英	7.69	-7.80	-70.6
J-10-1*	石英	7.38	-8.33	-64.7
J-12*	石英	13.61	-2.10	-64.4
J-13*	石英	10.26	-5.45	-72.8
J-54*	石英	9.51	-6.20	-73.6

注:样品由国土资源部宜昌地质矿产研究所分析测试;“\*”数据来源于参考文献[10]。

与同位素反应平衡的包裹体水的氧同位素组成(表5):  $\delta^{18}\text{O}_{\text{Q}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}} = 3.38 \times 10^6 T^{-2} - 3.40$  [14]。

由表5可见,  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$  变化范围为  $-2.10\text{‰} \sim -8.33\text{‰}$ ,  $\delta\text{D}$  的变化范围为  $-64.4\text{‰} \sim -74.5\text{‰}$ 。将各矿物包裹体水的  $\delta\text{D}\text{‰}$  和  $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$  数据投点于  $\delta\text{D} - \delta^{18}\text{O}$  相关图解上(图4), 矿床的H、O同位素组成落到岩浆水和变质水之外, 位于大气降水的右下方, 与雨水来源的H、O同位素组成相似, 由于水-岩反应而导致氧同位素的“飘移”现象。金

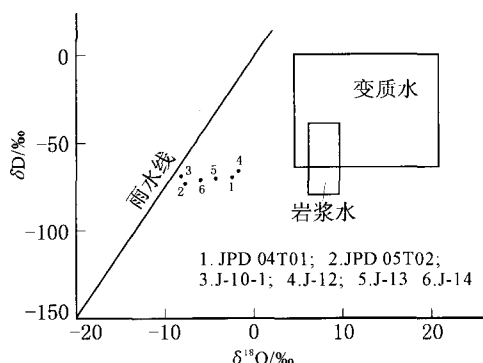


图4 金洞沟金矿床氢-氧同位素图

Fig. 4 The diagram of  $\delta^{18}\text{O}$  vs  $\delta\text{D}$  in the Jindonggou gold deposit

洞沟金矿床金矿石液体包裹体的  $\delta\text{D}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  值与岩浆水和变质水相比偏低, 并位于大气降水域内, 说明成矿流体总体显示大气降水的H、O同位素特征[12-14]。

## 5 金矿床成矿作用分析

综合金洞沟金矿床野外地质的宏观观察及其室内地球化学研究, 可以将金洞沟金矿床的成矿作用划分为4个阶段, 各成矿阶段的特征概述如下:

(1) 金洞沟地区初始矿源层的形成, 即同生沉积阶段, 是形成原始含矿岩系的主要阶段。自晋宁期以来直到印支期以前, 本区构造运动相对微弱, 以地台边缘性质的沉积为主, 主要沉积一套海相地层, 除震旦纪局部地区发生过岩浆活动外, 期间未发生过大规模的岩浆活动。震旦系元吉组、寒武系邱家河组、志留系茂县群、泥盆系危关群及三叠系杂谷脑组构成金洞沟金矿床的原始矿源层, 其中志留系茂县群是区内重要的矿源层, 其含金量高出克拉克值2.5~70倍。

(2) 区域变质作用使原始矿源层中的金、银等成矿组分发生溶离和迁移, 并在剪切带内形成衍生矿源层。印支运动早期, 金洞沟地区发生区域变质作用, 在此过程中, 通过原岩脱水, 汇集成为具有较强溶解能力的热液, 将原岩中碱金属、硫酸盐及部分金、银等成矿组分溶离, 与热液一起发生迁移。与此同时, 茂汶—青川韧性剪切带也开始活动, 使含矿变质热液具有活动和沉淀的场所, 从而形成了沿剪切带分布的数百米宽的金高背景值区的衍生矿源层。

(3) 印支末期金洞沟地区韧性剪切带多期次强烈活动, 是矿床中金活化、迁移和富集的最重要阶段。印支末期是本区推覆构造形成的主要时期, 作为推覆构造主体的青川—茂汶断裂构造南支的金洞沟—金坝子含金剪切带的多次活动, 驱动深源热液沿构造上移, 与大气降水沿断裂构造下渗混合后, 从围岩中吸取成矿元素, 形成成矿热液。含矿热液沿韧性剪切带构造运移, 在其剪切带构造脉动式多次活动中, 含矿热液对剪切带的千糜岩等进行了广泛的交代蚀变和多次的矿化作用, 在剪切带低压容矿空间(石英脉体及其两侧)沉淀富集形成了金矿床[16-17]。

(4) 在表生作用阶段, 后龙门山强烈抬升使韧性剪切带中、上部的脆韧性及脆性部分抬升遭受

剥蚀,含金硫化物在地表或沿构造、裂隙被氧化,使金沿构造裂隙地段进一步富集,形成矿床。

## 6 结 论

金洞沟金矿床的形成与青川—茂汶断裂及白草复向斜推覆体有密切的成因联系,矿体严格受金洞沟—金坝子含金剪切带控制。金矿床中黄铁矿、方铅矿及闪锌矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 为1.2‰~6.6‰,成矿物质来源于地层;成矿流体 $\delta^{18}\text{O}$ 为-2.50‰~-7.80‰, $\delta\text{D}$ 为-70.6‰~-74.5‰,主要来源于大气降水。成矿流体液相中阳离子主要为 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ ,阴离子主要为 $\text{Cl}^-$ ;气相成分中 $\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{CO}_2$ 占绝对优势,成矿流体水化学类型属 $\text{Cl}^- - \text{Ca}^{2+} - \text{Na}^+$ 型。流体包裹体的盐度平均值为9.7%,属低盐度流体。金矿的形成温度为在121~185℃之间,平均148.7℃,为低温热液矿床。金矿床成因类型为低温热液型金矿床。

致谢:论文撰写过程中得到了巫晓兵教授级高级工程师的大力帮助,匿名审稿人提出了很好的修改意见,在此一并致以诚挚的感谢。

## 参考文献:

- [1] 王全伟,姚书振,骆耀南,等.川西北微细浸染型金矿成矿构造系统及其动力学分析[M].成都:电子科技大学出版社,2002:61-65.
- [2] 谢青云,秦南,朱汉卿,等.四川省平武县金洞沟岩金矿床详查地质报告[R].广海:核工业西南地质局282大队,1994:8-59.
- [3] 四川省地质矿产局.四川省区域地质志[M].北京:地质出版社,1991:612-614.
- [4] 栾世伟,陈尚迪,曹殿春,等.金矿床地质及找矿方法[M].成都:四川省科学技术出版社,1987:78-404.
- [5] Uytendogaardt W, Burke E A J. Tables for Microscopic Identification of Ore Minerals [M]. Amsterdam: Elsevier Publication Corporation, 1971: 1-430.
- [6] 胡华斌,毛景文,牛树银,等.鲁西平邑地区磨坊沟金矿床的流体包裹体研究[J].现代地质,2004,18(4):530-536.
- [7] 刘斌,沈昆.流体包裹体热力学[M].北京:地质出版社,1999:1-290.
- [8] 刘伟,范永香,齐金忠,等.甘肃省文县阳山金矿床流体包裹体的地球化学特征[J].现代地质,2003,17(4):444-452.
- [9] 张宝琛,覃功炯,王凤阁,等.辽宁省岫岩县东堡子金矿流体包裹体研究[J].现代地质,2002,16(1):26-30.
- [10] 骆耀南,陈茂勋,夏宗实,等.扬子地台西南缘陆内造山带地质与矿产论文集[M].成都:四川省科学技术出版社,1996:182-185.
- [11] 卢焕章,范宏瑞,倪培,等.流体包裹体[M].北京:科学技术出版社,2004:13-21.
- [12] 陈骏,王鹤年,王汝成,等.地球化学[M].北京:科学技术出版社,2004:106-134.
- [13] 韩吟文,马振东.地球化学[M].北京:地质出版社,2003:246-254.
- [14] Clayton R N, Mayeda T K, O'Neil J R. Oxygen isotope exchange between quartz and water [J]. Journal of Geophysical Research, 1972, 77: 3057-3067.
- [15] 王友文,李兴柱,阎竹斌,等.中国金矿地质及普查勘探方法[R].西安:陕西省地质矿产局,1986:166-187.
- [16] 邓军,翟裕生,杨立强,等.论剪切带构造成矿系统[J].现代地质,1998,12(4):493-500.
- [17] 江思宏,聂凤军,张仪,等.浅成低温热液型金矿床研究最新进展[J].地学前缘,2004,11(2):401-408.