



## 甘肃李坝金矿床金属硫化物 成分特征及其意义

邵拥军<sup>1,2</sup>, 谢友良<sup>1,2,3</sup>, 冯雨周<sup>1,2</sup>, 张宇<sup>1,2</sup>, 刘忠法<sup>1,2</sup>, 蒋梦同<sup>1,2</sup>

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, 长沙 410083;
2. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 长沙 410083;
3. 湖南华中矿业有限公司, 长沙 410003)

**摘要:** 根据脉体穿插关系和矿物组合特征, 将李坝金矿床的成矿作用划分为热液期和表生期, 其中热液期又可划分为黄铁矿阶段、黄铁绢英岩阶段和多金属硫化物阶段 3 个成矿阶段。运用电子探针(EPMA)对 3 个成矿阶段的主要金属硫化物(黄铁矿、毒砂、闪锌矿)开展成分分析和 Au 赋存状态分析。结果表明: 李坝金矿床黄铁矿  $w(\text{Co})/w(\text{Ni})$  比值(0.15~4.50)及闪锌矿内 FeS 分子数(18.81%~22.97%)指示该矿床形成于中高温的物理化学环境。主要金属硫化物含量、黄铁矿 As-Au 图解及 Au 元素面扫描分析图指示黄铁矿和毒砂是李坝金矿床重要载金矿物, Au 主要是以纳米级显微-超显微自然金( $\text{Au}^0$ )的形式存在。综合地质特征及金属硫化物的地球化学特征, 推测李坝金矿床属于与中川岩浆活动有关的中高温中深成热液金矿床。

**关键词:** 金属硫化物; 化学成分; 电子探针; 李坝金矿床

**文章编号:** 1004-0609(2017)-12-2567-16

**中图分类号:** P591

**文献标志码:** A

礼岷金矿带位于华北古陆与扬子古陆碰撞交汇处中秦岭华力西褶皱带南北亚带间的礼县—白云—山阳深大断裂带西段, 李坝金矿床为该矿带内代表性的金矿床。前人在该矿区内已经开展了大量的地质地球化学研究工作, 并在控矿因素、成矿环境、成矿物质来源、成岩成矿年龄、成矿规律及找矿标志等方面取得了丰富的研究成果<sup>[1-10]</sup>。但该矿床在成矿物理化学条件、金的赋存状态以及矿床成因等方面仍然存在争议, 这也明显制约了矿床深边部勘察工作的进一步开展。具体而言, 在成矿物理化学条件方面, 张作衡等<sup>[5]</sup>对李坝金矿床流体包裹体研究表明该矿床均一温度为 208~475 °C, 主要在 300~420 °C 之间, 属于中高温, 这与卢宗柳等<sup>[1]</sup>和黄杰等<sup>[11]</sup>对该矿床流体包裹体研究结果指示其成矿温度属中低温的认识存在较大的差异; 在金的赋存状态方面, 目前在李坝金矿床的相关研究认识均是基于矿相学显微镜观察到的自然金, 但尚不清楚金在该矿床中是否还存在其他赋存形式<sup>[6-7, 12]</sup>。

另外, 关于李坝金矿床成因的认识有早期基于大

地构造背景和地质特征的类卡林型、造山带型<sup>[13-14]</sup>和近些年基于地质特征、流体包裹体、元素地球化学、同位素年代学等系统的地质地球化学研究的与岩浆活动有关的热液充填—交代型<sup>[11, 15-17]</sup>。总体上, 随着研究程度的深入, 不断有新的研究手段应用于研究中, 且对矿床成因的认识也更加清晰。但截止目前, 矿区内尚未开展过系统的成因矿物学研究工作。成因矿物学是现代矿物学的重要组成部分, 其对于认识矿物形成与变化的条件和过程、矿物与介质间的相互作用、矿物及矿床成因等方面具有重要的理论指导意义<sup>[18]</sup>。

电子探针(EPMA)是一种在成因矿物学研究领域应用非常广泛的分析技术, 具有分析速度快, 不损坏样品的优点<sup>[19]</sup>。因此, 本文作者借助于电子探针测试分析技术以李坝金矿床黄铁矿、毒砂、闪锌矿等金属硫化物为研究对象, 在野外地质调研和室内鉴定工作基础上, 运用电子探针分析技术测定并获得了其主量元素和部分微量元素的组成数据, 并开展了 Au 元素的面扫描分析。在此基础上, 探讨了成矿温度和金的赋存状态, 从而为矿床成因的探讨提供依据。

**基金项目:** 中南大学“创新驱动计划”项目(2015CX008)

**收稿日期:** 2016-09-02; **修订日期:** 2017-03-21

**通信作者:** 邵拥军, 教授, 博士; 电话: 13973149482; E-mail: shaoyongjun@126.com

## 1 区域地质背景

李坝金矿床分布于甘肃省礼县境内,大地构造位置上位于华北古陆板块与扬子古陆板块碰撞接触带的中秦岭华力西褶皱带北亚带内,北接祁连山褶皱系和北秦岭加里东褶皱带,南临中秦岭华力西褶皱带南亚带和南秦岭加里东-印支褶皱带(见图 1(a))。区域内出露的地层包括中泥盆统李坝群和西汉水组、中石炭统下加岭组、中下侏罗统、第三系及第四系,岩性分别以细碎屑岩为主的类复理石建造,滨-浅海相的正常沉积泥灰岩、硅质岩、泥岩、粉砂岩、砂岩建造,碎屑岩建造及残积物、坡积物为主,其中中泥盆统李坝群是区内金矿床的重要含矿层(见图 1(b))。区域构造的总体格式为褶皱与断裂组成的褶皱-断裂构造体

系。区域构造骨架为石家河坝复式向斜和其两侧的深大断裂礼县-罗坝-锁龙口断裂、礼县-洮坪-葑子坝断裂,构造线总体方位  $120^{\circ}\sim 130^{\circ}$ 。区域内岩浆活动强烈,并具有多期次活动特征,岩浆活动期主要有海西期、印支期和燕山期。矿区西南向 2~3 km 范围内出露有中川复式岩体,岩性包括黑云母二长花岗斑岩和黑云母二长花岗岩,以岩基形式产出,岩体与金矿化关系密切<sup>[11, 15-17]</sup>。区域内金属矿产主要以金为主,次为铀,南部尚有铜、铅、锌等。

## 2 矿区地质特征

李坝金矿区内出露地层为中泥盆统李坝群第二层,由一套浅变质的细碎屑岩组成(见图 2)。矿区构造格架为褶皱加断裂的构造体系。主干构造为酒店-李

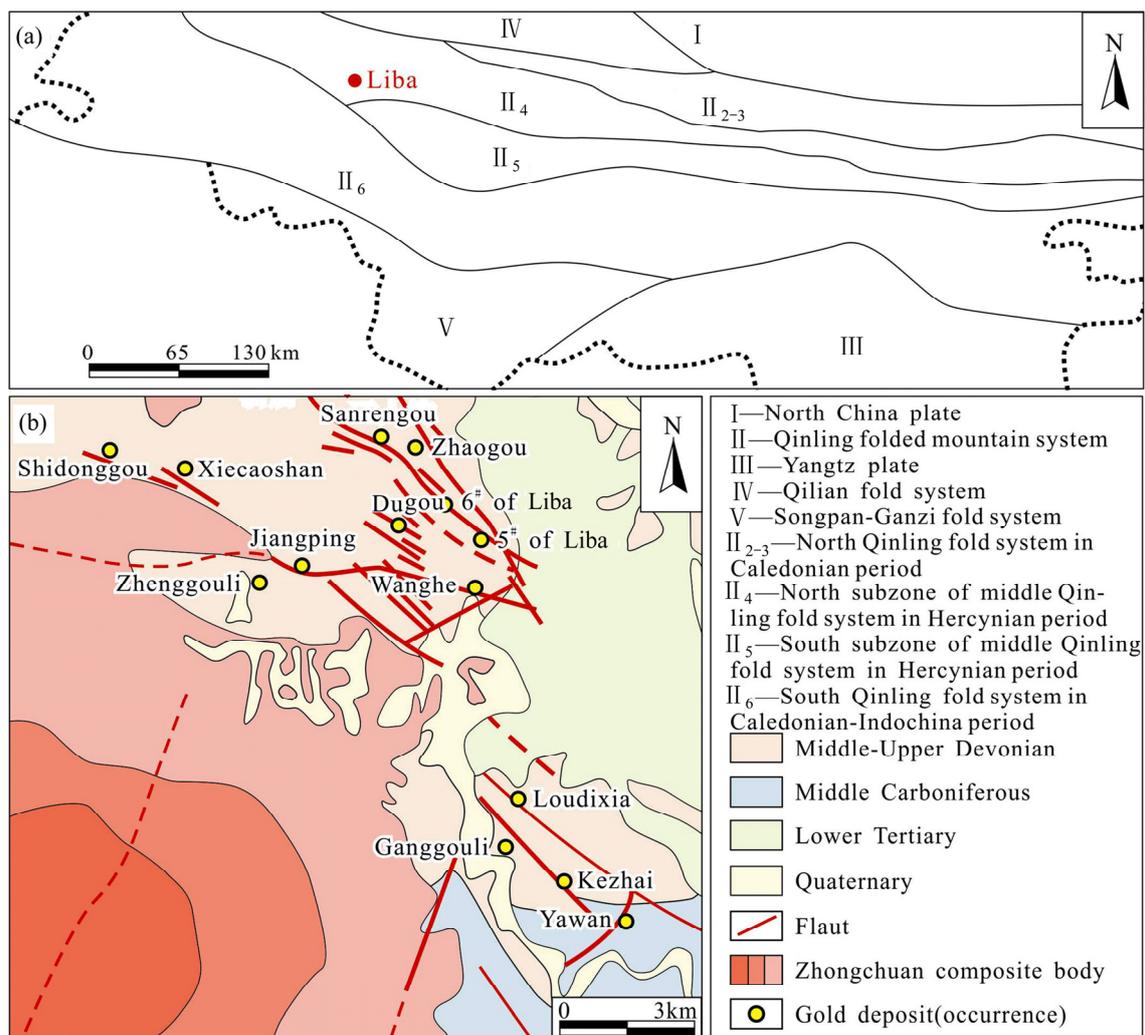


图 1 李坝金矿大地构造位置图及区域地质简图(据文献[11]修改)

Fig. 1 Geotectonic location map(a) and Regional geological map(b) of Liba gold deposit (modified from Ref. [11])

坝复式背斜的次级褶皱和赵沟—申家山倒转向斜。断裂包括北西向、北北西向和近东西向 3 组断裂, 主要断裂有 F<sub>1</sub>、F<sub>3</sub>、F<sub>29</sub>、F<sub>2-1</sub>、F<sub>2-2</sub>、F<sub>8</sub> 等。F<sub>1</sub> 断裂破碎带, 分布于矿区东部, 为矿区主干断裂, 属罗坝—锁龙口断裂的次级分支断裂, 斜向贯穿矿床东北部, 走向北西向, 总体南倾, 局部北倾, 倾向 220°~230°, 倾角 75°~85°, 延深长度大于 6 km, 宽 50~200 m, F<sub>1</sub> 破碎带内未发现成型矿体。矿床西南向 2~3 km 范围内出露中川复式岩体, 且区内岩脉较为发育, 包括云斜煌斑岩脉和闪长岩脉。

李坝金矿区内共圈定金矿体 69 条, 其中规模较大的矿体有 26 号、26-3 号、26-5 号、26-7 号、7-4 号、7-9 号、6 号、6-1 号、6-34 号、6-35 号等, 且已查明的矿体均赋存于矿区内次级断裂破碎带内, 严格受

断裂构造破碎带控制。26 号矿体是本区内正在开采的金属量最大的单个矿体, 该矿体赋存于 F<sub>29</sub> 断裂蚀变带内, 矿体围岩为粉砂质绢云母板岩、粉砂质绢云母板岩夹变细砂岩和粉砂质绢云母绿泥石板岩、粉砂质绢云母绿泥石板岩夹变细砂岩及粉砂质绢云母绿泥石板岩夹斑点状板岩。矿体形态呈似层状、透镜状, 连续性 & 完整性均良好, 倾向北倾, 倾角 >60°, 长 1000 m, 延伸一般为 230 m 左右, 平均厚度 33.59 m, 厚度变化系数 68.95%, 局部地段矿体隐伏并有侧伏趋势。目前已探明该矿体保有资源储量矿石量 3349.51 万 t, 金属量 61374.34 kg, 平均品位 1.83 × 10<sup>-6</sup>。

矿石类型可划分为原生硫化物矿石和氧化矿矿石。其中原生硫化物矿石包括: ①石英-黄铁矿矿石(见图 3(a)); ②石英-绢云母-黄铁矿矿石(见图 3(b)); ③

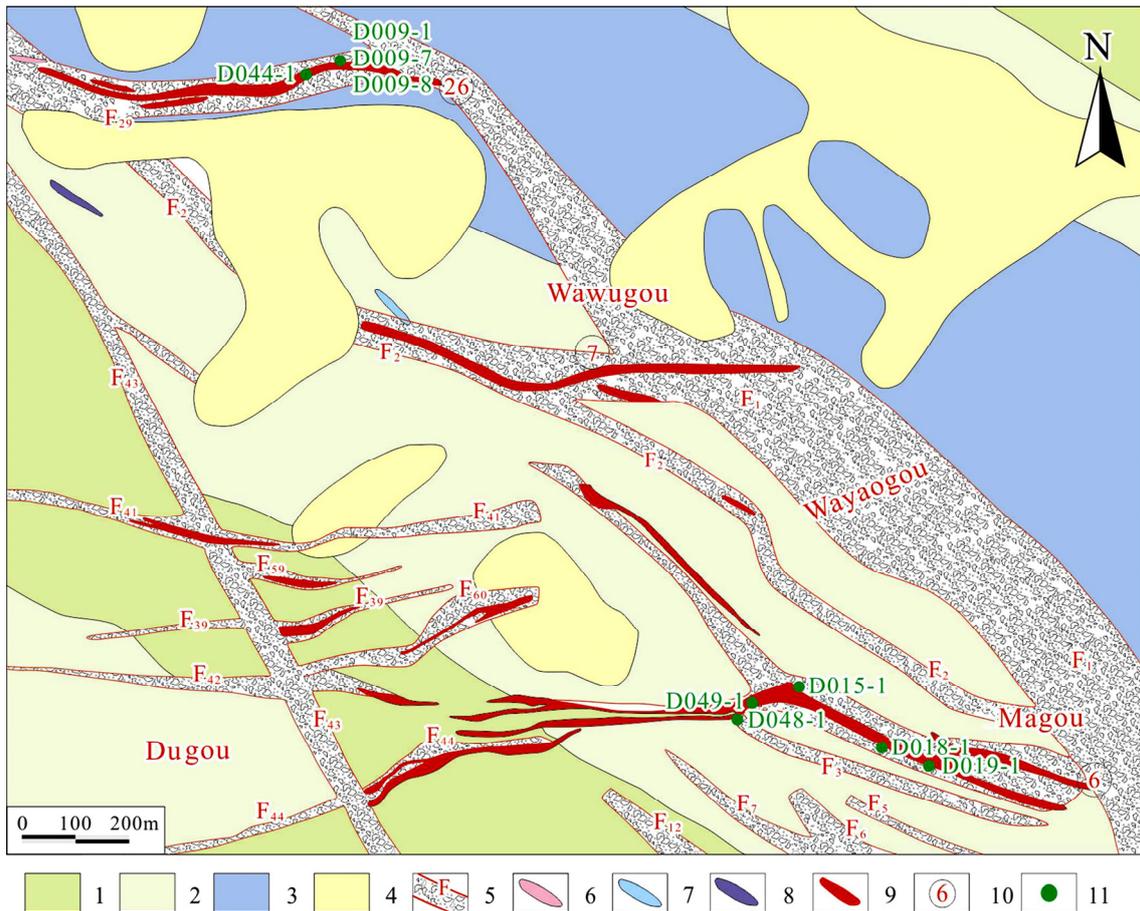


图 2 李坝金矿床矿区地质图(据文献[20]修改): 1—绢云母绿泥石板岩夹变石英砂岩; 2—粉砂质板岩, 石英细砂岩夹粉砂岩, 变石英砂岩; 3—变石英砂岩, 绢云母绿泥石板岩; 4—第四系堆积物; 5—断裂构造带; 6—花岗斑岩脉; 7—闪长岩脉; 8—煌斑岩脉; 9—金矿体; 10—金矿体编号; 11—采样位置

Fig. 2 Geological map of Liba gold deposit(modified from Ref. [20]): 1—Sericite chlorite slate with meta-quartzose sandstone; 2—Silty slate, quartz fine sand with siltstone and meta-quartzose sandstone; 3—Meta-quartzose sandstone and sericite chlorite slate; 4—Quaternary deposits; 5—Fault structure zone; 6—Granite porphyry vein; 7—Diorite dyke; 8—Lamprophyre vein; 9—Gold orebody; 10—Gold orebody number; 11—Sampling location

石英-黄铁矿-方铅矿-闪锌矿矿石(见图 3(c)); 氧化矿矿石主要为褐铁矿矿石(见图 3(d))。区内主要金属矿物为黄铁矿、毒砂、闪锌矿、方铅矿、黄铜矿、褐铁矿等; 非金属矿物包括石英、绢云母、绿泥石、方解石、石膏等。矿石的结构主要有晶粒结构(见图 3(e))、交代结构(见图 3(f), (g))、固溶体分离结构(见图 3(h))和压碎结构(见图 3(i)); 矿石构造包括稀疏浸染状、细脉浸染状、稠密浸染状、条带状、块状及角砾状构造。

区内蚀变广泛发育, 主要有硅化(图 4(a))、绢云母化(见图 4(a)和(b))、绿泥石化(见图 4(c))和碳酸盐化(见图 4(d))。

野外观察发现, 黄铁矿细脉或含黄铁矿石英细脉被含黄铁矿绢云母的石英细脉切割(见图 4(e)和(f)), 并

见多金属硫化物细脉切割错断含黄铁矿绢云母的石英细脉(见图 4(f))。

根据矿脉穿插关系及矿物共生组合, 将李坝金矿床成矿作用划分为热液期和表生期。热液期又可划分为黄铁矿阶段、黄铁绢英岩阶段和多金属硫化物阶段(见表 1)。

黄铁矿阶段金属矿物包括黄铁矿和毒砂, 非金属矿物以石英为主, 并有少量的方解石。黄铁矿呈浸染状产出, 晶形为立方体, 粒径 $>0.1$  mm, 为后生成的各种矿物交代溶蚀现象显著, 呈骸晶、孤岛状、骨架状等交代结构。另外, 能谱定性分析指示该阶段黄铁矿颗粒内发育细小不规则状辉钼矿包体(见图 5(a))。毒砂呈自形-半自形粒状, 粒径大小为 $0.06\sim 0.3$  mm, 较

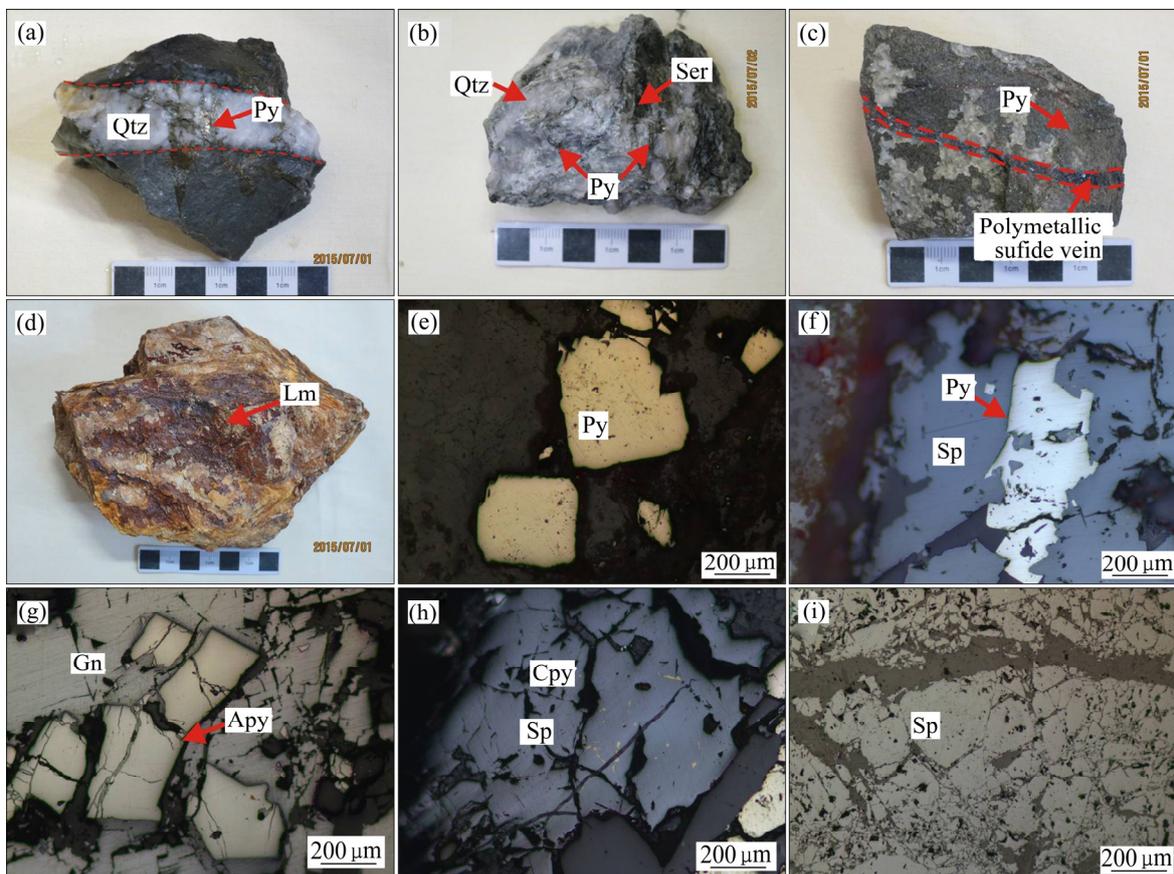


图 3 李坝金矿床矿石类型及显微照片: (a) 浸染状黄铁矿矿石; (b) 黄铁绢英岩; (c) 细脉浸染状多金属硫化物矿石; (d) 块状褐铁矿矿石; (e) 自形-半自形立方体晶粒黄铁矿(-); (f) 闪锌矿交代溶蚀黄铁矿(-); (g) 方铅矿交代溶蚀毒砂(-); (h) 闪锌矿与黄铜矿构成固溶体分离结构(-); (i) 闪锌矿产碎结构(-); Py—黄铁矿; Apy—毒砂; Sp—闪锌矿; Gn—方铅矿; Cpy—黄铜矿; Lm—褐铁矿; Qtz—石英; Ser—绢云母

Fig. 3 Ore types and microphotographs in Liba gold deposit: (a) Disseminated pyrite ore; (b) Beresite; (c) Veinlet disseminated polymetallic sulfide ore; (d) Massive limonite ore; (e) Euhedral and semi-euhedral crystalline pyrite(-); (f) Metasomatism of replacing pyrite with sphalerite(-); (g) Metasomatism of replacing arsenopyrite with galena(-); (h) Sphalerite-chalcopyrite exsolution texture(-); (i) Crushed structure(-); Py—Pyrite; Apy—Arsenopyrite; Sp—Sphalerite; Gn—Galena; Cpy—Chalcopyrite; Qtz—Quartz; Ser—Sericite

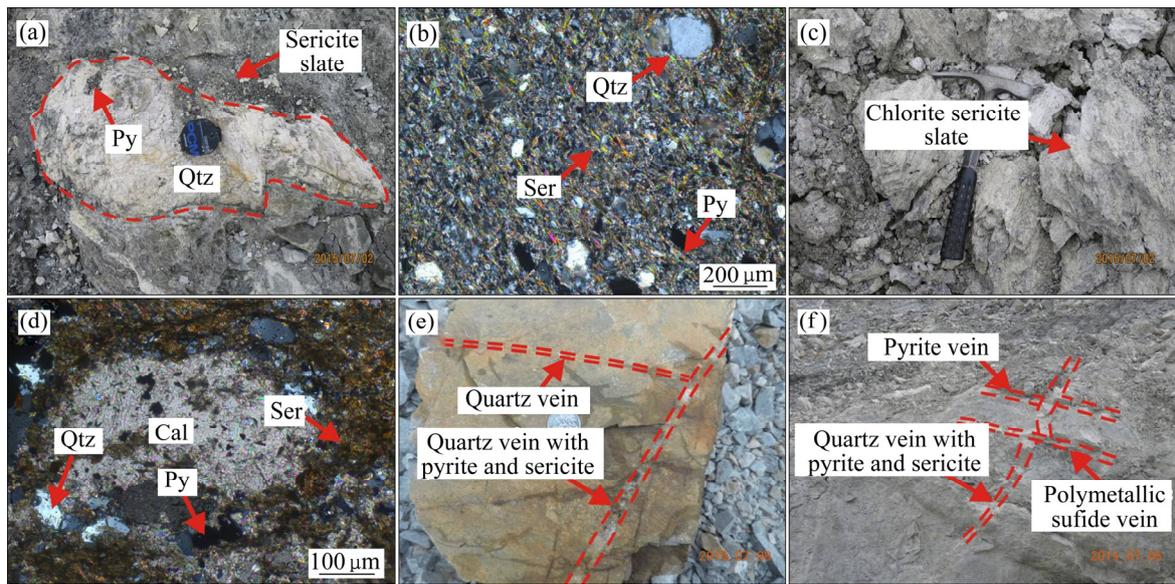


图 4 李坝金矿床典型地质现象照片: (a) 产于绢云母板岩内的团块状石英; (b) 绢云母板岩内黄铁矿呈星散状分布; (c) 绿泥石绢云母板岩; (d) 斑点状板岩内斑点成分包括石英、绢云母、方解石和黄铁矿(-); (e) 含黄铁矿绢云母石英细脉切割错断黄铁矿细脉; (f) 含黄铁矿绢云母石英细脉切割错断黄铁矿细脉并被多金属硫化物细脉切割错断; Py—黄铁矿; Qtz—石英; Ser—绢云母; Cal—方解石

Fig. 4 Graphs showing typical geological phenomena in Liba gold deposit: (a) Quartz gobbet in sericite slate; (b) Disseminated pyrite in sericite slate; (c) Sericite chlorite slate; (d) Compositions of spot in spot-like slate containing quartz, sericite, calcite and pyrite(-); (e) Pyrite and sericite vein cutting pyrite vein (-); (f) Pyrite and sericite vein cutting pyrite vein, cut by vein with polymetallic sulfides; Py—Pyrite; Qtz—Quartz; Ser—Sericite; Cal—Calcite

表 1 李坝金矿床矿物生成顺序简表

Table 1 Simplified paragenetic sequence of minerals from Liba gold deposit

Mineral	Hydrothermal stage			Exogenous stage
	Pyrite phase	Beresite phase	Polymetallic sulfides phase	
Quartz	Abundant	Abundant	Abundant	
Chlorite		Abundant	Abundant	
Sericite		Abundant	Abundant	
Calcite	Trace			Abundant
Arsenopyrite	Local		Local	
Pyrite	Abundant	Abundant	Abundant	
Molybdenite	Local			
Sphalerite			Abundant	
Copper			Local	
Galena			Abundant	
Limonite				Abundant

Note: — Abundant — Local ..... Trace

为破碎, 与黄铁矿伴生, 可见其被黄铁矿交代溶蚀, 表明黄铁矿生成顺序晚于毒砂。

黄铁绢英岩阶段矿物主要有黄铁矿、石英、绢云母。黄铁矿呈浸染状、团块状及细脉状产出; 以微细

粒状自形-半自形立方体为主(见图 3(e)), 粒径不等。

多金属硫化物阶段矿物成分包括黄铁矿、毒砂、闪锌矿、黄铜矿、方铅矿、石英、绢云母、绿泥石和少量的方解石。黄铁矿晶形为自形-半自形立方体、

五角十二面体或他形粒状晶, 粒径 $>0.1$  mm。毒砂自形程度高, 横切面呈板状、菱形, 粒径大小为 $0.2\sim 3.0$  mm。闪锌矿在矿体中呈细脉状穿插, 颜色较深, 呈暗黑色。矿相显微镜下观察发现, 闪锌矿呈半自形-他形粒状, 粒径不等, 部分样品闪锌矿遭受后期压力作用较为破碎(见图 3(i))。黄铜矿呈他形不规则粒状, 粒径 $<0.1$  mm; 方铅矿呈他形不规则粒状, 粒径不等。矿相显微镜下可见黄铁矿交代溶蚀毒砂, 闪锌矿交代溶蚀毒砂和黄铁矿(见图 3(f)), 方铅矿交代溶蚀毒砂

(见图 3(h))、黄铁矿和闪锌矿, 黄铜矿与闪锌矿常构成固溶体分离结构(见图 3(h))。另外, 能谱定性分析指示部分黄铁矿颗粒内发育有细小不规则状闪锌矿和方铅矿包体(见图 5(b)和(c))。上述各金属硫化物的伴生关系表明其生成顺序从早到晚依次为毒砂 $\rightarrow$ 黄铁矿 $\rightarrow$ 闪锌矿(黄铜矿) $\rightarrow$ 方铅矿。

表生期金属矿物以褐铁矿为主。褐铁矿呈红褐色, 在矿区内广泛发育, 显微镜下特征表现为呈半自形-他形针状、不规则状, 粒径 $<0.1$  mm。

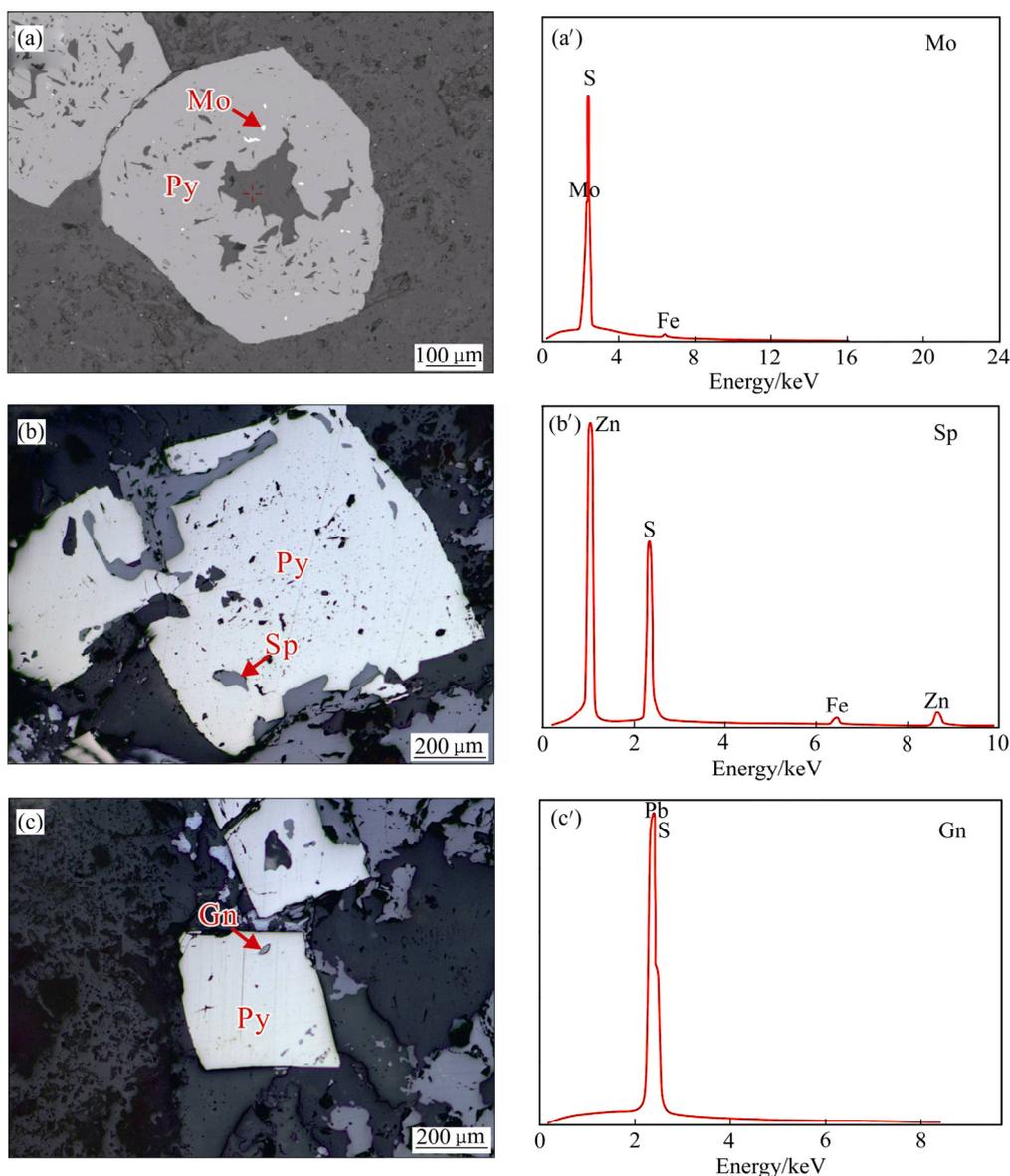


图5 李坝金矿黄铁矿内包体能谱定性分析: (a) 黄铁矿阶段黄铁矿(BSE); (a') 黄铁矿阶段黄铁矿中包裹体能谱定性分析; (b) 多金属硫化物阶段黄铁矿(-); (b') 多金属硫化物阶段黄铁矿中包裹体能谱定性分析; (c) 多金属硫化物阶段黄铁矿(-); (c') 多金属硫化物阶段黄铁矿中包裹体能谱定性分析; Py—黄铁矿; Mo—辉钼矿; Sp—闪锌矿; Gn—方铅矿

Fig. 5 Energy spectrum analysis of inclusions in pyrite in Liba gold deposit: (a) Pyrite of pyrite stage(BSE); (a') EDS spectrogram of pyrite from pyrite stage; (b) Pyrite of polymetallic sulfide stage(-); (b') EDS spectrogram of pyrite from polymetallic sulfide stage; (c) Pyrite of polymetallic sulfide stage(-); (c') EDS spectrogram of pyrite from polymetallic sulfide stage; Py—Pyrite; Mo—Molybdenite; Sp—Sphalerite; Gn—Galena

### 3 样品采集及测试方法

本次研究所涉及的样品均采自矿区内 6 号和 26 号矿体(见图 2)。选取黄铁矿阶段黄铁矿(D009-1、D009-7、D049-1)和毒砂(D049-1); 黄铁绢英岩阶段黄铁矿(D015-1、D018-1)及多金属硫化物阶段黄铁矿(D009-8、D044-1)、毒砂(D019-1)和闪锌矿(D009-8、

D019-1、D048-2)进行电子探针点成分分析(见表 2)。

样品的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分析实验室完成。测试仪器为岛津 EPMA-1720H 型电子探针分析仪。点成分分析条件为加速电压为 15 kV, 电子束流为 10 nA, 电子束斑大小为 Min。校正方法为 ZAF 校正, 检测限为 0.01%。标样采用天然矿物, 面扫描分析条件为加速电压为 15 kV, 电子束流为 20 nA, 电子束斑大小为 Min。测试结果见表 3、4 和 5。

表 2 样品类型及采样位置

Table 2 Sample types and localities

Samples	Lithogy	Classification	Sampling location
D009-1	Pyrite-arsenopyrite-bearing quartz vein	Quartz-pyrite ore	26 <sup>#</sup> ore body
D009-7	Pyrite-bearing quartz vein	Quartz-pyrite ore	26 <sup>#</sup> ore body
D049-1	Pyrite-arsenopyrite-bearing quartz vein	Quartz-pyrite ore	6 <sup>#</sup> ore body
D015-1	Pyrite-sericite-quartz rock	Quartz-sericite-pyrite ore	6 <sup>#</sup> ore body
D018-1	Disseminated pyrite-bearing structural breccia	Quartz-sericite-pyrite ore	6 <sup>#</sup> ore body
D009-8	Pyrite-sphalerite-bearing quartz vein	Quartz-polymetallic sulfide ore	26 <sup>#</sup> ore body
D019-1	Pyrite-galena-bearing quartz vein	Quartz-polymetallic sulfide ore	6 <sup>#</sup> ore body
D044-1	Pyrite-chalcopyrite-galena-bearing quartz mass	Quartz-polymetallic sulfide ore	26 <sup>#</sup> ore body
D048-2	Pyrite-sphalerite-galena-bearing quartz mass	Quartz-polymetallic sulfide ore	6 <sup>#</sup> ore body

表 3 李坝金矿床黄铁矿主量元素和微量元素测试结果

Table 3 Composition of major and trace element of pyrite in Liba gold deposit

Stages	Test points	w/%								Total content/%	Deviation/%		Ratio w(Co)/w(Ni)
		As	Fe	S	Co	Ni	Se	Te	Au		$\delta$ Fe	$\delta$ S	
Pyrite stage	Data1	0.32	46.14	52.54	0.10	0.08	0	0.02	0	99.19	-0.77	-1.70	1.25
	Data2	0.30	46.41	52.73	0.03	0.01	0	0.01	0	99.48	-0.30	-1.35	3.00
	Data3	0.41	46.13	52.69	0.12	0.10	0	0	0	99.45	-0.90	-1.42	1.20
	Data4	0.30	46.56	52.69	0.02	0	0	0.02	0	99.61	0.02	-1.42	-
	Data5	0.47	45.76	52.34	0.05	0.05	0	0	0	98.67	-1.70	-2.08	1.00
	Data6	0.46	46.38	52.51	0.05	0.01	0	0.03	0.08	99.51	-0.37	-1.76	5.00
	Data7	0.31	46.20	52.34	0.05	0	0	0	0.03	98.94	-0.75	-2.08	-
	Data8	0.35	45.74	52.47	0.06	0	0	0	0	98.61	-1.74	-1.83	-
	Data9	0.15	45.76	52.68	0.08	0	0	0	0	98.66	-1.70	-1.44	-
	Data10	0.27	45.49	52.42	0.11	0	0	0	0	98.28	-2.10	-1.93	-
	Data11	0.20	46.44	53.76	0.05	0	0	0.01	0	100.61	-0.24	0.58	-
	Data12	0.22	45.89	52.52	0.13	0	0	0	0	99.04	-1.42	-1.74	-
Beresite stage	Data1	0.68	46.10	52.22	0.09	0	0	0	0.05	99.14	-0.97	-2.30	-
	Data2	0.56	45.47	52.35	0.13	0.04	0	0.03	0.09	98.65	-2.32	-2.06	3.25
	Data3	0.87	45.49	52.74	0.06	0.03	0	0	0	99.20	-2.28	-1.33	2.00
	Data4	0.42	44.55	52.37	0.06	0.03	0	0.02	0.06	97.49	-4.30	-2.02	2.00

续表 3

Continued from Table 3

	Data5	0.23	45.44	52.67	0.07	0.06	0.01	0.02	0.09	98.67	-2.38	-1.46	1.17
	Data6	0.56	46.35	53.23	0.04	0	0	0.03	0	100.22	-0.43	-0.41	-
	Data7	0.34	45.76	52.98	0	0	0	0	0	99.08	-1.70	-0.88	-
	Data8	0.33	46.40	52.96	0.08	0.01	0	0	0	99.79	-0.32	-0.92	-
Beresite	Data9	0.59	45.80	52.50	0.09	0.07	0	0	0.02	99.07	-1.61	-1.78	1.29
stage	Data10	0.37	45.49	52.63	0.06	0.08	0	0	0	98.62	-2.28	-1.53	0.75
	Data11	0.40	46.46	53.36	0.09	0.05	0	0	0.06	100.41	-0.19	-0.17	1.80
	Data12	0.37	46.82	53.34	0.12	0.03	0	0	0.10	100.78	0.58	-0.21	4.00
	Data13	0.39	46.13	53.58	0.08	0.08	0	0	0	100.26	-0.90	0.24	1.00
	Data14	0.34	46.47	53.71	0.04	0	0	0	0.08	100.64	-0.17	0.49	-
	Data1	0.30	46.00	52.81	0.07	0.05	0	0	0	99.23	-1.18	-1.20	1.40
	Data2	0.22	45.81	52.16	0.08	0	0	0	0.05	98.32	-1.59	-2.41	-
	Data3	0.26	45.97	51.85	0.05	0.04	0	0.02	0.05	98.25	-1.25	-2.99	1.25
	Data4	0.22	46.64	52.75	0.07	0	0	0	0	99.68	0.19	-1.31	-
Polymet	Data5	0.76	45.64	52.05	0.04	0.26	0	0	0.03	98.78	-1.95	-2.62	0.15
-allic	Data6	0.32	45.55	52.49	0.04	0	0	0.07	0.03	98.47	-2.15	-1.80	-
sulfide	Data7	0.29	45.70	52.50	0.03	0.03	0	0.05	0.02	98.62	-1.83	-1.78	1.00
stage	Data8	0.18	45.42	52.43	0.08	0.04	0	0	0	98.15	-2.43	-1.91	2.00
	Data9	0.44	44.80	51.40	0.09	0.02	0	0	0.03	96.78	-3.76	-3.84	4.50
	Data10	0.19	45.59	52.77	0.04	0	0	0	0.01	98.60	-2.06	-1.27	-
	Data11	0.50	45.48	52.38	0.07	0.05	0	0.02	0	98.51	-2.30	-2.00	1.40
	Data12	0.41	45.25	52.50	0.04	0	0	0	0	98.19	-2.79	-1.78	-

Test unit: EPMA laboratory, Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals and Geological Environment Monitor (Central South University), Ministry of Education. (Number "0" mean that content of element is less than 0.01%;  $\delta\text{Fe}=[w(\text{Fe})\times 100-46.67]/46.67\times 100\%$ ;  $\delta\text{S}=[w(\text{S})\times 100-53.33]/53.33\times 100\%$ )

表 4 李坝金矿床毒砂主量元素和微量元素测试结果

Table 4 Composition of major and trace element of arsenopyrite in Liba gold deposit

Stage	Test points	w/%					Total content/%	Stage	Test points	w/%					Total content/%
		As	Au	Fe	Co	S				As	Au	Fe	Co	S	
	Data1	43.88	0	34.83	0.15	21.76	100.79		Data1	42.44	0	35.77	0.06	22.53	100.78
	Data2	45.33	0	34.27	0.10	20.72	100.46		Data2	42.28	0	35.93	0.05	22.47	100.75
	Data3	46.90	0	34.31	0.19	20.44	101.49		Data3	42.49	0	35.97	0.08	22.65	101.18
	Data4	45.62	0	34.19	0.18	20.51	100.52		Data4	42.19	0	35.16	0.04	22.33	99.73
Beresite	Data5	46.30	0	34.02	0.28	20.64	101.3	Polymet- allic phase	Data5	42.40	0.01	35.68	0.01	22.34	100.45
phase	Data6	44.34	0	33.98	0.43	21.31	100.36		Data6	42.68	0	35.17	0.03	22.37	100.24
	Data7	46.22	0	34.49	0.17	20.10	100.99		Data7	43.12	0.03	35.29	0.09	21.63	100.34
	Data8	44.99	0	34.40	0.26	21.17	100.82		Data8	43.12	0.09	34.31	0.04	21.93	99.62
	Data9	44.76	0.04	33.99	0.11	20.98	99.88		Data9	43.81	0.12	35.67	0.01	20.53	100.13
	Data10	44.90	0	34.49	0.11	21.35	100.84								

Test unit: EPMA laboratory, Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals and Geological Environment Monitor (Central South University), Ministry of Education (Number "0" mean that content of element is less than 0.01%).

表 5 李坝金矿床闪锌矿电子探针微区成分分析结果

Table 5 Composition of major and trace element of sphalerite in Liba gold deposit

Stages	Test points	w/%									Total content/%	Molecular content/% FeS
		S	Mn	Ge	Cd	Fe	Se	In	Zn	Au		
Polymetallic phase	Data1	32.03	0.08	0.03	2.16	10.84	0.04	0.02	54.30	0	99.50	18.81
	Data2	32.54	0.06	0	2.08	11.52	0	0	54.01	0	100.21	19.83
	Data3	32.22	0.13	0.01	2.12	11.53	0.01	0.01	52.37	0	98.39	20.35
	Data4	32.01	0.09	0	2.02	11.81	0	0	52.33	0	98.26	20.76
	Data5	31.94	0.19	0.03	2.18	12.20	0	0	52.31	0	98.85	21.30
	Data6	32.21	0.29	0.01	2.22	12.88	0	0.07	51.24	0	98.92	22.59
	Data7	32.07	0.35	0.01	2.13	13.10	0.02	0.06	51.0	0	98.7	22.97
	Data8	31.94	0.37	0	2.09	12.61	0	0	51.14	0	98.15	22.25
	Data9	31.99	0.07	0.02	1.92	11.32	0.02	0	53.43	0	98.76	19.74
	Data10	32.18	0.13	0	1.98	11.98	0	0	52.89	0	99.15	20.82
	Data11	32.21	0.15	0.01	2.08	12.23	0	0.02	52.45	0	99.13	21.30
	Data12	32.6	0.13	0	2.07	11.86	0	0.02	52.84	0	99.52	20.67
	Data13	32.56	0.11	0	2.05	11.77	0	0	52.95	0	99.44	20.51
	Data14	32.36	0.13	0.03	2.11	11.76	0	0.02	53.17	0	99.58	20.43
	Data15	32.92	0.09	0	2.00	11.39	0	0	53.3	0	100.13	19.87
	Data16	32.83	0.38	0	2.10	13.06	0	0	51.46	0	99.83	22.75
	Data17	32.74	0.34	0.02	2.02	12.92	0	0.05	52.36	0	100.45	22.26
	Data18	32.74	0.23	0.03	2.05	12.59	0	0.01	51.63	0	99.28	22.06
	Data19	32.63	0.10	0	2.06	11.74	0	0	53.08	0	99.61	20.43
	Data20	33.00	0.11	0	2.07	11.43	0	0	51.71	0	98.33	20.42
	Data21	32.62	0.27	0.02	1.94	12.43	0	0.03	51.45	0	98.79	21.90
	Data22	32.65	0.30	0	2.01	12.33	0	0	51.08	0	98.37	21.89
	Data23	32.66	0.07	0	1.91	11.69	0	0	53.72	0	100.04	20.16
	Data24	32.86	0.10	0	1.94	11.83	0	0	53.20	0	99.94	20.52
	Data25	32.92	0.15	0	1.94	12.22	0	0	52.28	0	99.51	21.34

Test unit: EPMA laboratory, Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals and Geological Environment Monitor (Central South University), Ministry of Education (Number "0" mean that content of element is less than 0.01%;  $FeS = [w(Fe)/A_r(Fe)]/[w(Fe)/A_r(Fe) + w(Zn)/A_r(Zn)]$ ).

## 4 测试结果

### 4.1 黄铁矿化学成分特征

黄铁矿主量元素理论含量为 Fe: 46.67%; S: 53.33%,  $w(Fe)/w(S)$  比值为 0.875。另外,  $\delta Fe$  和  $\delta S$  参数可以用来指示黄铁矿样品中元素 Fe 和 S 偏离理论值的程度,  $\delta Fe$  和  $\delta S$  的详细计算方法参照严育通等<sup>[21]</sup>。由表 3 可知, 黄铁矿阶段、黄铁绢英岩阶段和多金属

硫化物阶段李坝金矿床黄铁矿中  $w(Fe)/w(S)$  比值分别为 0.86~0.88; 0.85~0.88; 0.86~0.89。 $\delta Fe$  为 -1.74~0.02; -4.30~0.58; -3.76~0.19;  $\delta S$  为 -2.08~-1.35; -2.30~0.84; -3.84~-1.20。可以看出, 从黄铁矿阶段到多金属硫化物阶段, 黄铁矿的  $w(S)/w(Fe)$  比值、 $\delta Fe$  值及  $\delta S$  值表现出低→高→低的演化趋势。

### 4.2 毒砂化学成分特征

从表 4 中可以看出, 李坝金矿床黄铁矿阶段毒砂中 As、S、Fe、Co 的含量分别为 43.88%~46.90%、

20.10%~21.76%、33.98%~34.83%、0.10%~0.43%；平均值分别为 45.32%、20.90%、34.30%、0.20%。多金属硫化物阶段毒砂中 As、S、Fe、Co 的含量分别为 42.19%~43.81%、20.53%~22.65%、34.31%~35.97%、0.01%~0.09%；平均值分别为 42.73%、22.09%、35.44%、0.05%。另外，毒砂内还含有极少量的 Au。可见，李坝金矿床的毒砂中 As、S 的变化范围较大，从黄铁矿阶段至多金属硫化物阶段，毒砂中 As 和 Co 元素含量降低，S 和 Au 元素含量升高。

### 4.3 闪锌矿化学成分特征

由表 5 可知，李坝金矿床闪锌矿中 Zn 含量为 51.00%~54.3%，平均 52.47%；S 含量为 31.94%~32.92%，平均 32.46%；Fe 含量为 10.84%~13.10%，平均 12.06%；Cd 含量为 1.91%~2.22%，平均 2.05%。总体上，闪锌矿中 Zn 含量的变化随 Fe 和 Cd 的含量的增加而减少，且显微照片及背散射图像中未发现闪锌矿内有分散元素 Fe 和 Cd 的独立矿物，指示 Fe 和 Cd 是以类质同象的形式赋存于闪锌矿中。另外，闪锌矿中还含有少量的 Mn、Ge、Se、In 等微量元素。

## 5 讨论

### 5.1 成矿温度

系统的矿相学显微镜观察发现，黄铁矿阶段和黄铁绢英岩阶段黄铁矿为自形或半自形立方体晶粒，多金属硫化物阶段黄铁矿出现较多的五角十二面体晶粒，黄铁矿晶粒结构的变化特征指示从黄铁矿阶段至多金属硫化物阶段黄铁矿的形成温度总的变化趋势为逐渐降低<sup>[22]</sup>。

另外，研究发现黄铁矿和闪锌矿中某些微量元素及其比值对研究该矿物形成时的物理化学环境有一定的指示作用。其中黄铁矿的  $w(\text{Co})/w(\text{Ni})$  比值受温度的影响，温度越高，则黄铁矿  $w(\text{Co})/w(\text{Ni})$  比值越大<sup>[23]</sup>。李坝金矿床黄铁矿的电子探针测试结果(见表 3)显示，自黄铁矿阶段至多金属硫化物阶段黄铁矿  $w(\text{Co})/w(\text{Ni})$  比值分别为 1~5(平均 2.29)；0.75~4.00(平均 1.95)；0.15~4.50(平均 1.67)，呈高→低的变化趋势，表明黄铁矿形成温度的变化规律为高→低，这与上述论证结果一致。

此外，研究表明当闪锌矿与黄铁矿共生时，可利用闪锌矿内 FeS 分子数来估算成矿温度范围<sup>[24]</sup>。通过

计算得出李坝金矿床闪锌矿中 FeS 分子数为 18.81%~22.97%，II 型闪锌矿 FeS 分子数为 18.81%~22.97%。从图 6 中可以看出，李坝金矿床闪锌矿 14 个点落入有效位置上，对应温度为 260~282 °C，指示李坝闪锌矿的成矿温度属于中温<sup>[24-25]</sup>。

综上所述，认为李坝金矿床形成于中高温的物理化学环境，这与张作衡等<sup>[5]</sup>通过研究该矿床流体包裹体均一温度指示其形成于中高温环境下的结论相一致。

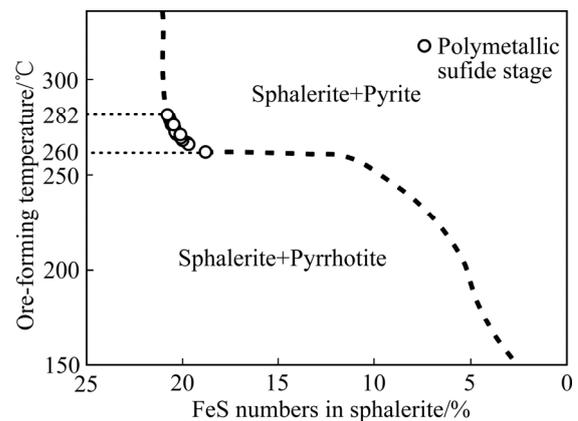


图 6 闪锌矿中 FeS 含量与温度关系(据文献[24]修改)

Fig. 6 Relationship between FeS in sphalerite and formation temperature(modified from Ref. [24])

### 5.2 金的赋存状态

据李坝金矿床电子探针测试结果(见表 3、4 和 5)，黄铁矿阶段样品中黄铁矿点分析共 12 个点中，2 个点检测出金，含金率为 16.7%；黄铁绢英岩阶段样品中黄铁矿点分析共 15 个点中，9 个点检测出金，含金率为 60%；多金属硫化物阶段样品中黄铁矿点分析共 12 个点中，7 个点检测出金，含金率为 58.33%。黄铁绢英岩阶段和多金属硫化物阶段毒砂含金率(44.44%)高于黄铁矿阶段(10%)。李坝金矿床闪锌矿不含金，说明黄铁矿和毒砂为矿区内重要的载金矿物，且黄铁绢英岩阶段和多金属硫化物阶段为形成金的主要成矿阶段，最高含量达 0.12%。

另外，该矿床不同成矿阶段黄铁矿和毒砂测点中均表现为部分测点高出检测限，部分低于检测限，反映金在黄铁矿和毒砂中的分布在电子探针分辨率下是不均匀的，可能存在金的富集点。结合系统的矿相显微镜观察未发现可见金这一事实，暗示金可能是以纳米级显微或超显微颗粒金、晶格金(固溶体金)的形式赋存于黄铁矿和毒砂中<sup>[26-27]</sup>。

REICH 等<sup>[26]</sup>借助高分辨率透射电镜和多种光谱技术, 对美国几个卡林型金矿床和浅成低温热液金矿床中金的赋存状态进行了系统研究, 发现金与砷呈楔形分布, 并确定了金在黄铁矿中的溶解度极限 ( $c_{Au}=0.02c_{As}+4\times 10^{-5}$ )。位于溶解度限制线上方区域, 金以纳米级显微或超显微自然金颗粒( $Au^0$ )形式赋存于黄铁矿中; 位于溶解度限制线下方区域, 金以不可见金固溶体( $Au^+$ )形式赋存于黄铁矿中。李坝金矿床 3 个成矿阶段黄铁矿在 Au-As 关系图(见图 7)中投点结果显示, 不同阶段在限制线上下两个区域均有落点, 且多数集中于上方楔形区, 表明本区黄铁矿中金的赋存状态以纳米级显微或超显微自然金的形式为主, 同时也有少量金以固溶体金的形式存在。

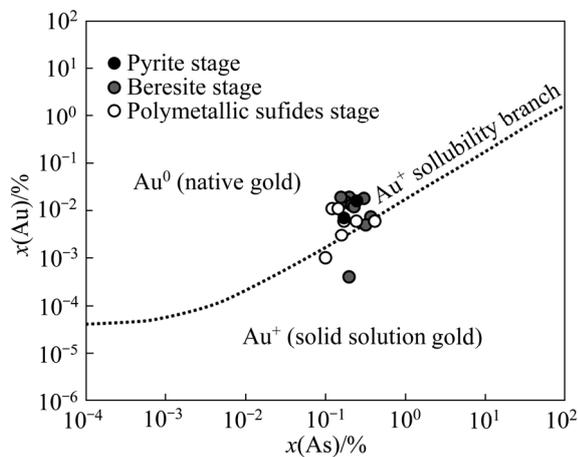


图 7 李坝金矿床黄铁矿 Au-As 关系图(据文献[26]修改)

Fig. 7 Relationship between Au and As contents of pyrites in Liba gold deposit(modified from Ref. [26])

为了更清楚地认识李坝金矿床黄铁矿中金的赋存状态, 选择黄铁矿阶段的黄铁矿和毒砂颗粒、黄铁矿绢英岩阶段的黄铁矿颗粒及多金属硫化物阶段的黄铁矿和毒砂颗粒开展金元素的 EPMA 面扫描分析。

从图 8 中可以看出, 不同成矿阶段黄铁矿的金元素图在 EPMA 分辨率下显示总体上分布较为均匀, 且金色调高于基质, 说明黄铁矿和毒砂是李坝金矿床内重要的载金矿物。另外, 可以看到图中有极少量 Au 的高亮点, 反映了黄铁矿和毒砂中存在金的富集点。金元素图中高亮点很少可能是由于李坝矿区内黄铁矿中金的粒度大多小于电子探针电子束的分辨率(1~2  $\mu\text{m}$ )<sup>[27]</sup>。综上所述, 认为李坝金矿床黄铁矿和毒砂中 Au 的赋存状态主要是以纳米级显微-超显微颗粒金存在的, 且粒径小于电子探针电子束的分辨范围(1~2  $\mu\text{m}$ ), 少量以晶格金的形式存在。

### 5.3 矿床成因

基于前人研究资料和野外细致的观察发现, 区域上金矿床(点)在泥盆系和石炭系地层内均有分布, 且这些金矿床(点)与李坝矿床具有相似的地质特征和矿化特征, 应属同一类型的金矿床<sup>[3-6, 8, 16]</sup>。这种特征表明地层对成矿无明显的控制性。

李坝金矿区内断裂构造十分发育, 其中  $F_1$  断裂为区内的主干断裂, 断裂带内见有有弱的矿化和较强的硅化、绢云母化、碳酸盐化等蚀变现象, 但未发现有成规模的矿体, 而其次级断裂构造则为矿体的主要赋存部位(见图 2), 表明该断裂构造仅为热液运移的通道, 即导矿构造<sup>[11, 15]</sup>。另外, 矿区内北西向、北北西向、近东西向等三组次级断裂, 为重要的容矿构造, 控制着矿体形态、大小、产状及空间展布。

区域上金矿床与岩浆岩有密切的空间关系, 礼岷金矿带内的矿床(点)均围绕中川岩体分布于距岩体 0.8~3.0 km 范围内(见图 1(b)), 李坝金矿床即位于中川岩体北东约 2 km 处, 这种矿床(点)与岩体有规律的空间分布特征显示出金矿化与岩浆活动密切相关。另外, 前人通过同位素地球化学手段从成矿物质来源、成矿流体来源和成岩成矿年代学等方面对矿区内岩浆岩与成矿的关系进行了深入分析: S 同位素特征指示矿石中硫的来源具有多源性, 为岩浆硫和地层硫的混合硫<sup>[1, 3, 11]</sup>; Pb 同位素特征显示矿石与中川岩体和区内岩脉具有相似性, 均为深部壳源成因<sup>[11]</sup>; H—O 同位素组成特征指示本矿床含矿热液以岩浆水为主<sup>[3-4, 8]</sup>。成岩成矿年代学研究结果显示成矿年龄为 171.6~211.1 Ma; 成岩年龄包括印支期(264 Ma)和燕山期(142~200 Ma)两个阶段<sup>[4, 11, 28-30]</sup>。可以看出, 该矿床成矿作用与中川岩体燕山期活动是同时的。综上所述, 李坝金矿床成矿与矿区内各岩体(脉)在时间、空间、成因等方面紧密相连。

另外, 矿区内发育有大量的黄铁矿、毒砂、闪锌矿、方铅矿、黄铜矿等金属硫化物, 且黄铁矿在不同成矿阶段的演化过程中均有发育。研究发现, 黄铁矿和闪锌矿化学成分特征对揭示矿物成因及矿床类型具有重要的指示意义<sup>[31-33]</sup>。黄铁矿的  $w(\text{Co})/w(\text{Ni})$  比值、 $\delta\text{Fe}/\delta\text{S}-w(\text{As})$  图解、 $w(\text{As})-w(\text{Co})-w(\text{Ni})$  图解及  $w(\text{Ni})-w(\text{Co})$  关系图解具有一定的标型意义, 对判定黄铁矿成因及区分矿床类型具有重要的指示作用<sup>[21]</sup>。研究发现, 沉积成因的黄铁矿 Co 和 Ni 含量较低,  $w(\text{Co})/w(\text{Ni}) < 1$ ; 岩浆热液成因的黄铁矿 Co 和 Ni 含量变化较大,  $1 < w(\text{Co})/w(\text{Ni}) < 5$ ; 火山成因的黄铁矿 Co 含量较高, Ni 含量较低;  $w(\text{Co})/w(\text{Ni})$  值为 5~50<sup>[34-36]</sup>。

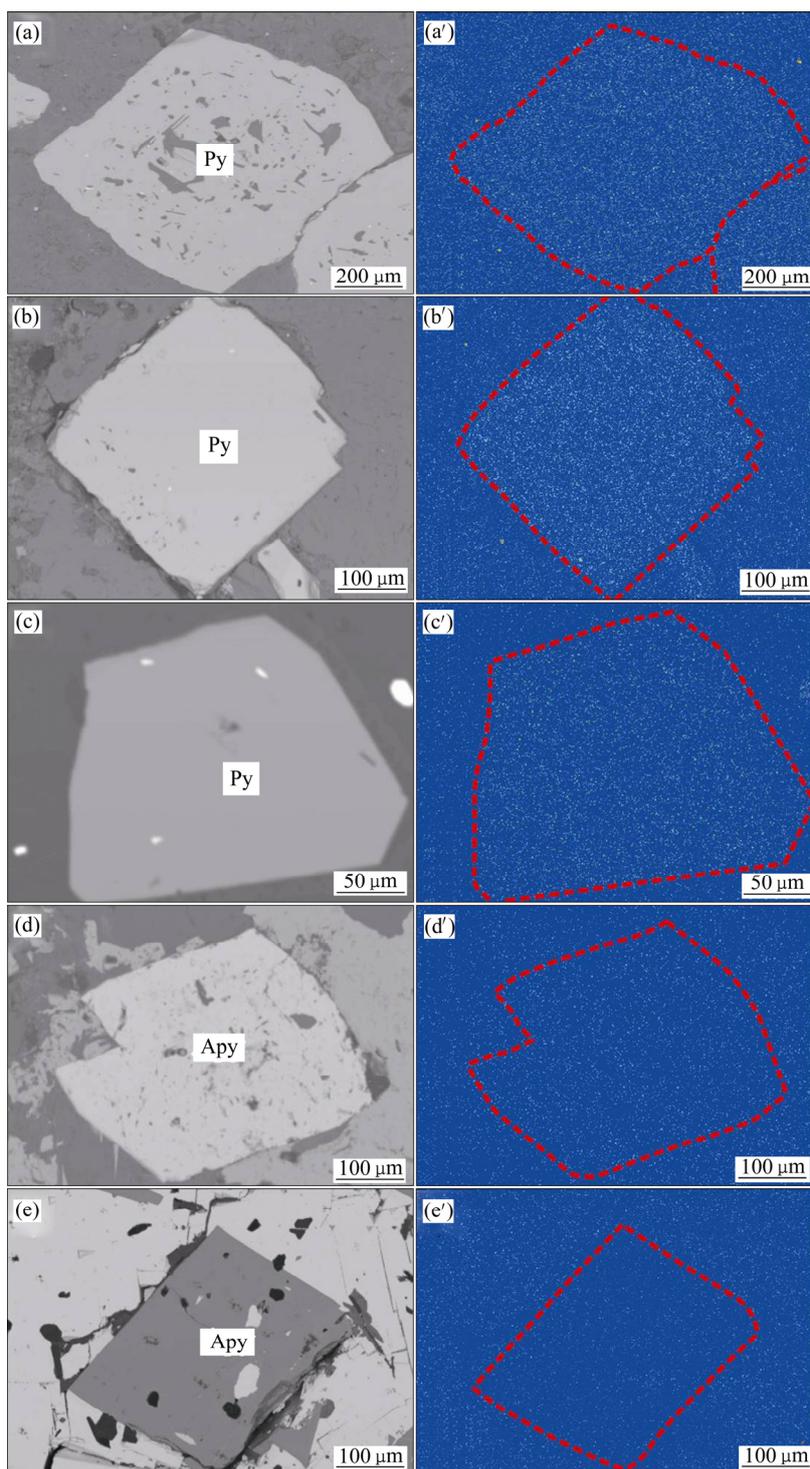


图 8 李坝金矿床黄铁矿和毒砂背散射及金元素面扫描图片：(a) 黄铁矿阶段黄铁矿(BSE)；(a') 黄铁矿阶段黄铁矿中 Au 元素面扫描照片；(b) 黄铁绢英岩阶段黄铁矿(BSE)；(b') 黄铁绢英岩阶段黄铁矿中 Au 元素面扫描结果；(c) 多金属硫化物阶段黄铁矿(BSE)；(c') 多金属硫化物阶段黄铁矿中 Au 元素面扫描结果；(d) 黄铁矿阶段毒砂(BSE)；(d') 黄铁矿阶段毒砂中 Au 元素面扫描结果；(e) 多金属硫化物阶段毒砂(BSE)；(e') 多金属硫化物阶段毒砂中 Au 元素面扫描结果；Py—黄铁矿；Apy—毒砂；Au—金

**Fig. 8** BSE graphs and Au element mapping analysis of pyrite and arsenopyrite in Liba gold deposit: (a) Pyrite of pyrite stage (BSE); (a') Graphs of Au element mapping analysis of pyrite from pyrite stage; (b) Pyrite of beresite stage (BSE); (b') Graphs of Au element mapping analysis of pyrite from beresite stage; (c) Pyrite of polymetallic sulfide stage (BSE); (c') Graphs of Au element mapping analysis of pyrite from polymetallic sulfides stage; (d) Arsenopyrite of pyrite stage (BSE); (d') Graphs of Au element mapping analysis of arsenopyrite from pyrite stage; (e) Arsenopyrite of polymetallic sulfide stage (BSE); (e') Graphs of Au element mapping analysis of arsenopyrite from polymetallic sulfide stage; Py—Pyrite; Apy—Arsenopyrite; Au—Gold

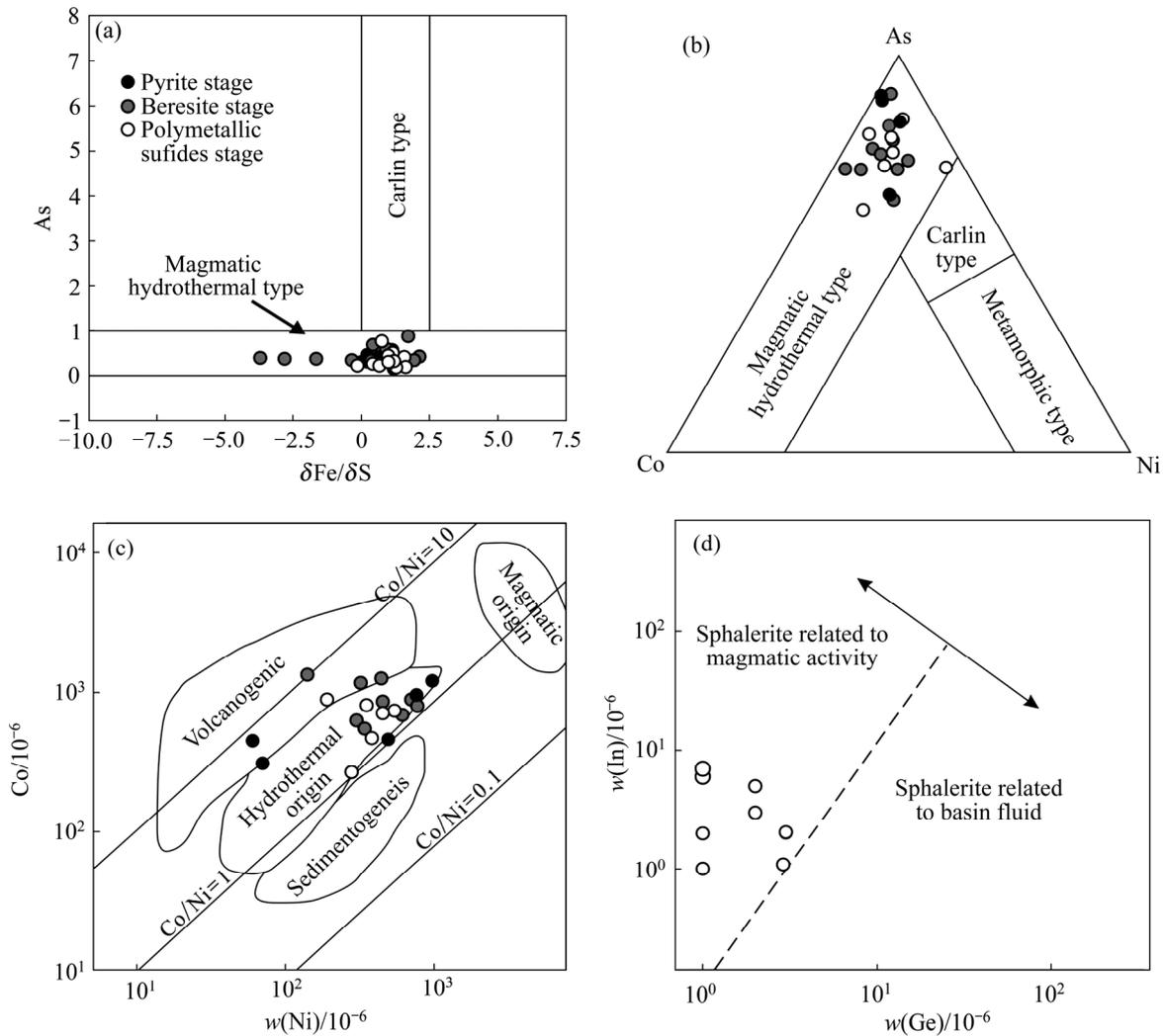


图 9 李坝金矿床成因类型判别图解(据文献[21]和[37]修改): (a)黄铁矿  $\delta Fe/\delta S-w(As)$ 关系图; (b)黄铁矿  $w(As)-w(Co)-w(Ni)$ 三角图; (c)黄铁矿  $w(Ni)-w(Co)$ 关系图; (d)闪锌矿  $w(In)-w(Ge)$ 关系图

Fig. 9 Discrimination diagrams of genesis of Liba gold deposit(modified from Refs. [21] and [37]): (a)  $\delta Fe/\delta S-w(As)$  correlation diagram of pyrite; (b)  $w(As)-w(Co)-w(Ni)$  triangular diagram of pyrite; (c)  $w(Co)-w(Ni)$  relationship diagram of pyrite; (d)  $w(In)-w(Ge)$  relationship diagram of sphalerite

由表2可知李坝金矿床黄铁矿的  $w(Co)/w(Ni)$  比值均落入 1~5 范围内或其附近, 具有岩浆热液型矿床的特征。另外, 李坝金矿床黄铁矿  $\delta Fe/\delta S-w(As)$  图解(见图 9(a))、 $w(As)-w(Co)-w(Ni)$  图解(见图 9(b)) 和  $w(Ni)-w(Co)$  图解(见图 9(c)) 均显示该矿床为岩浆热液成因。此外, 前人提出可以利用在闪锌矿  $w(In)-w(Ge)$  关系图中投点的方法来判别闪锌矿成因及矿床类型<sup>[37]</sup>。从图 9(d) 中可以看出, 李坝金矿床闪锌矿投点较为集中, 均落入“岩浆-火山热液有关的闪锌矿范围内, 表明李坝金矿床闪锌矿的形成与岩浆热液作用密切相关。综合分析认为李坝金矿床属于与岩浆活动有关的热液型金矿床。

## 6 结论

1) 李坝金矿床主要金属硫化物化学成分特征为: 从黄铁矿阶段至多金属硫化物阶段, 黄铁矿的  $w(Fe)/w(S)$  比值表现出低→高→低的演化趋势, 且均低于理论比值; 毒砂中 As 和 Co 元素含量降低, S 元素含量升高; 闪锌矿中 Zn 含量的变化随 Fe 和 Cd 的含量的增加而减少。

2) 李坝金矿床黄铁矿  $w(Co)/w(Ni)$  比值及闪锌矿内 FeS 含量指示该矿床形成于中高温的物理化学环

境。

3) 黄铁矿和毒砂是李坝金矿区内重要的载金矿物, 黄铁绢英岩阶段和多金属硫化物阶段是主要的成矿阶段; 该矿床黄铁矿和毒砂中 Au 的赋存状态是以纳米级显微-超显微自然金(Au)的形式存在, 少量以固溶体金(Au<sup>+</sup>)的形式存在。

4) 李坝金矿床黄铁矿、毒砂、闪锌矿等金属硫化物化学成分特征指示李坝金矿床属于与岩浆活动有关的中高温热液型金矿床。

## REFERENCES

- [1] 卢宗柳, 胡云沪. 甘肃李坝金矿床的地球化学特征[J]. 矿产与地质, 2000, 14(5): 321-324.  
LU Zong-liu, HU Yun-hu. Geochemistry characteristics in Liba gold deposit, Gansu Province[J]. Mineral Resources and Geology, 2000, 14(5): 321-324.
- [2] 刘继顺, 高珍权, 舒广龙. 李坝金矿田构造地球化学特征及其找矿意义[J]. 大地构造与成矿学, 2001, 25(1): 87-94.  
LIU Ji-shun, GAO Zhen-quan, SHU Guang-long. Geochemistry characteristics and prospecting implication in Liba gold mining field[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2001, 25(1): 87-94.
- [3] 张姚代, 王争鸣. 岩体与金矿的关系—以李坝式金矿为例[J]. 甘肃地质学报, 2001, 10(2): 52-65.  
ZHANG Yao-dai, WANG Zheng-ming. Relationship between rock body and gold deposit—A case study of Liba Type gold deposit[J]. Acta Geologica Gansu, 2001, 10(2): 52-65.
- [4] 冯建忠, 汪东波, 王学明, 邵世才, 林国芳, 史建军. 甘肃礼县李坝大型金矿床成矿地质特征及成因[J]. 矿床地质, 2003, 22(3): 257-263.  
FENG Jian-zhong, WANG Dong-bo, WANG Xue-ming, SHAO Shi-cai, LIN Guo-fang, SHI Jian-jun. Geology of gold and metallogenesis of the Liba large-size gold deposit in Lixian, Gansu Province[J]. Mineral Deposits, 2003, 22(3): 257-263.
- [5] 张作衡, 毛景文, 王勇. 西秦岭中川地区金矿床流体包裹体特征及地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 2004, 23(2): 147-157.  
ZHANG Zuo-heng, MAO Jing-wen, WANG Yong. Characteristics of fluid inclusions in the gold deposits within Zhongchuan area, western Qinling and their geological significance[J]. Acta Petrologica et Mineralogical, 2004, 23(2): 147-157.
- [6] 徐岩. 甘肃赵沟金矿床地质特征及控矿因素分析[J]. 黄金地质, 2004, 10(2): 17-20.  
XU Yan. Geological characteristics and ore controlling factors analysis in Zhaogou gold deposit, Gansu Province[J]. Gold Geology, 2004, 10(2): 17-20.
- [7] 罗天伟, 周继强. 甘肃李坝金矿床成矿地质特征[J]. 桂林工学院学报, 2004, 24(4): 407-411.  
LUO Tian-wei, ZHOU Ji-qiang. Geological characteristics of mineralization in Liba gold deposit, Gansu Province[J]. Journal of Guilin University of Technology, 2004, 24(4): 407-411.
- [8] 杨根生, 陈彦文, 胡晓隆, 王建勋, 尹刚, 唐永刚. 甘肃礼县杜沟金矿床地质地球化学特征及成因分析[J]. 西北地质, 2007, 40(3): 75-84.  
YANG Gen-sheng, CHEN Yan-wen, HU Xiao-long, WANG Jian-xun, YIN Gang, TANG Yong-gang. Geochemistry characteristics and analysis of genesis of Dugou gold deposit in Lixian, Gansu Province[J]. Northwestern Geology, 2007, 40(3): 75-84.
- [9] 韩海涛, 刘继顺, 王志平, 夏磊. 李坝—赵沟金矿床煌斑岩(脉岩)与金矿关系[J]. 地质找矿论丛, 2008, 23(1): 43-47.  
HAN Hai-tao, LIU Ji-shun, WANG Zhi-ping, XIA Lei. Relationship between lamprophyre vein(Vein Rock) with mineralization of Liba—Zhaogou gold deposit[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2008, 23(1): 43-47.
- [10] 张汉成, 肖荣阁, 王京彬, 刘金辉, 秦新龙, 白云来. 甘肃李坝金矿围岩蚀变与金成矿关系[J]. 现代地质, 2009, 23(3): 472-480.  
ZHANG Han-cheng, XIAO Rong-ge, WANG Jing-bin, LIU Jin-hui, QIN Xin-long, BAI Yun-lai. Relationship between wall rock alteration and gold mineralization in Liba gold deposit, Gansu Province[J]. Geoscience, 2009, 23(3): 472-480.
- [11] 黄杰, 王建业, 韦龙明. 甘肃李坝金矿床地质特征及成因研究[J]. 矿床地质, 2000, 19(2): 105-115.  
HUANG Jie, WANG Jian-ye, WEI Long-ming. Geological characteristics and genesis of the Liba gold deposit, Gansu Province[J]. Mineral Deposit, 19(2): 105-115.
- [12] 于岚, 张复新, 程彧. 李坝金矿床金的赋存状态与选矿工艺学[J]. 矿产与地质, 2004, 18(1): 86-89.  
YU Lan, ZHANG Fu-xin, CHENG Yu. Gold occurrence and geotechnology of ore dressing of the Liba gold deposit[J]. Mineral Resources and Geology, 2004, 18(1): 86-89.
- [13] LI Z, PETER S G. Comparative geology and geochemistry of sedimentary rock-hosted (Carlin-type) gold deposit in the Peoples Republic of China and in Nevada, USA[R]. U. S. Geological Survey Open File Report, 1998, 160: 98-466.
- [14] KERRICH R, GOLDFARB R, GROVES D, GARWIN S. Characteristics, origin and geodynamic settings of super giant gold metallogenic province[J]. Science in China, 2010, 43(s1): 1-68.
- [15] 张印飞. 甘肃省礼县李坝金矿床地质特征及成因探讨[J]. 地质与资源, 2005, 14(4): 265-267.  
ZHANG Yin-fei. Geological characteristics and analysis of genesis of Liba gold deposit in Lixian, Gansu Province[J]. Geology and Resources, 2005, 14(4): 265-267.
- [16] 温志亮, 郭周平, 杨鹏飞, 吴金刚. 西秦岭李坝式金矿床地球化学特征及找矿方向研究[J]. 地质与勘探, 2008, 44(6): 1-7.  
WEN Zhi-liang, GUO Zhou-ping, YANG Peng-fei, WU Jin-gang.

- Geochemistry characteristics and prospecting analysis of Liba Type gold deposit western Qinling[J]. *Geology and Prospecting*, 2008, 44(6): 1-7.
- [17] 王秀峰. 甘肃礼县李坝金矿床地质特征及构造形成机理[J]. *甘肃冶金*, 2010, 32(1): 57-62.  
WANG Xiu-feng. Geological characteristics and fault mechanism in Liba gold deposit, Gansu Province[J]. *Gansu Metallurgy*, 2010, 32(1): 57-62.
- [18] 李胜荣. 成因矿物学在中国的传播与发展[J]. *地学前缘*, 2013, 20(3): 46-54.  
LI Sheng-rong. Propagation and development of genetic mineralogy in China[J]. *Geoscience Frontiers(Geosci Front)*, 2013, 20(3): 46-54.
- [19] 郭国林, 潘家永, 刘成东, 郭福生. 电子探针化学测年技术及其在地质学中的应用[J]. *东华理工大学学报(自然科学版)*, 2005, 28(1): 39-42.  
GUO Guo-lin, PAN Jia-yong, LIU Cheng-dong, GUO Fu-sheng. Application of electron probe micro-analysis dating method in geosciences[J]. *Journal of East China Institute of Technology(Nature Science)*, 2005, 28(1): 39-42.
- [20] 宋全红, 刘飞, 张万军, 张辉, 王宏阁, 马海霞. 甘肃省礼县李坝金矿勘探报告[R]. 甘肃省: 陇南紫金矿业有限公司, 2014.  
SONG Quan-hong, LIU Fei, ZHANG Wan-jun, ZHANG Hui, WANG Hong-ge, MA Hai-xia. Exploration report of Liba gold deposit in Gansu Province[R]. Gansu Province: Zijin Mining Limited Company in South Gansu, 2014
- [21] 严育通, 李胜荣, 张娜, 蒋亮, 贾宝剑, 李斌凯, 闫丽娜. 不同成因类型金矿床成矿期黄铁矿成分成因标型特征[J]. 2012, 33(3): 11-16.  
YAN Yu-tong, LI Sheng-rong, ZHANG Na, JIANG Liang, JIA Bao-jian, LI Bin-kai, YAN Li-na. Composition typomorphic characteristics and statistics analysis of metallogenic pyrite in gold deposits of different genetic types[J]. *Gold*, 2012, 33(3): 11-16.
- [22] 陈光远. 成因矿物学与找矿矿物学[M]. 重庆: 重庆出版社, 1988.  
CHEN Guang-yuan. Genetic and prospecting mineralogy[M]. Chongqing: Chongqing publishing company, 1988.
- [23] 盛继福, 李岩, 范书义. 大兴安岭中段铜多金属矿床矿物微量元素研究[J]. *矿床地质*, 1999, 18(2): 153-160.  
SHENG Ji-fu, LI Yan, FAN Shu-yi. Study on trace element of mineral in copper polymetallic deposit in the middle of Great Khingan[J]. *Mineral Deposits*, 1999, 18(2): 153-160.
- [24] 卢焕章. 闪锌矿地质温度计和压力计[J]. *地质地球化学*, 1975(2): 8-11.  
LU Huan-zhang. Geothermometer and geobarometry of sphalerite[J]. *Geology-Geochemistry*, 1975(2): 8-11.
- [25] 景向阳, 王维, 张永胜, 宋维刚, 石天成. 青海省茫崖镇乌兰乌珠尔铜矿床地质特征、成因类型及其找矿前景分析[J]. *矿产与地质*, 2010, 24(3): 222-228.  
JING Xiang-yang, WANG Wei, ZHANG Yong-sheng, SONG Wei-gang, SHI Tian-cheng. Geological characteristics, genesis type and prospecting potential analysis of Wulanwuzhu copper deposit in Mangya Town Qinghai Province[J]. *Mineral Resources and Geology*, 2010, 24(3): 222-228.
- [26] REICH M, KESLER S E, UTSUNOMIYA S, PALENIK C S, CHRYSSOULIS S, EWING R C. Solubility of gold in arsenian pyrite[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2005, 69(11): 2781-2796.
- [27] 陈懋弘, 毛景文, 陈振宇, 章伟. 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 Mao-hong, MAO Jing-wen, CHEN Zhen-yu, ZHANG Wei. 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.
- [28] 崔义发. 甘肃李坝金矿床地质特征及控矿因素研究[J]. *西部探矿工程*, 2012(3): 186-188.  
CUI Yi-fa. Geological characteristics and ore control factors analysis of Liba gold deposit, Gansu Province[J]. *West-china Exploration Engineering*, 2012(3): 186-188.
- [29] 李婷, 徐学义, 陈隽璐, 王洪亮, 李智佩, 张欣. 西秦岭造山带礼县地区中川岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及其构造环境[J]. *地质通报*, 2012, 31(6): 875-883.  
LI Ting, XU Xue-yi, CHEN Jun-lu, WANG Hong-liang, LI Zhi-pei, ZHANG Xin. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating and tectonic setting of Zhongchuan intrusion, Lixian area, western Qinling[J]. *Geological bulletin of China*, 2012, 31(6): 875-883.
- [30] 程戩, 董铭, 龙晓泳, 方小敏, 李晓斌, 雷天柱. 西秦岭李坝式金矿床成矿要素分析[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2005, 41(2): 1-5.  
CHENG Yu, DONG Ming, LONG Xiao-yong, FANG Xiao-min, LI Xiao-bin, LEI Tian-zhu. Metallogenic essential factors analysis of Liba gold deposit western Qinling[J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Science Edition)*, 2005, 41(2): 1-5.
- [31] 毛世东, 杨荣生, 秦艳, 郭俊华. 甘肃阳山金矿田载金矿物特征及金赋存状态研究[J]. *岩石学报*, 2009, 25(11): 2776-2790.  
MAO Shi-dong, YANG Rong-sheng, QIN Yan, GUO Jun-hua. Characteristics of gold-bearing mineral and occurrence of gold in the Yangshan gold field, Gansu Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25(11): 2776-2790.
- [32] 毛光周, 华仁民, 高剑峰, 赵葵东, 龙光明, 陆慧娟, 姚军明. 江西金山金矿床含金黄铁矿的稀土元素和微量元素特征[J]. *矿床地质*, 2007, 25(4): 412-426.  
MAO Guang-zhou, HUA Ren-min, GAO Jian-feng, ZHAO Kui-dong, LONG Guang-ming, LU Hui-juan, YAO Jun-ming. REE composition and trace element features of gold bearing

- pyrite in Jinshan gold deposit, Jiangxi Province[J]. *Mineral Deposits*, 2007, 25(4): 412–426.
- [33] 郑杰, 余大龙, 杨忠琴. 黔东八克金矿床毒砂和黄铁矿微量元素地球化学研究[J]. *矿物学报*, 2010(1): 107–114.
- ZHENG Jie, YU Da-long, YANG Zhong-qin. Study of trace element geochemistry characteristics of arsenopyrite and pyrite in Bake gold deposit eastern Qian[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2010(1): 107–114.
- [34] BRALIA A, SABATINI G, TROJA F. A revaluation of the Co/Ni ratio in pyrite as geochemical tool in ore genesis problems[J]. *Mineralium Deposita*, 1979, 14(3): 353–374.
- [35] 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]. *Mineralium Deposita*, 1987, 22(4): 292–300.
- [36] 张宇, 邵拥军, 周鑫, 刘忠法, 郑明泓. 安徽铜陵新桥铜硫铁矿床胶状黄铁矿主、微量元素特征[J]. *中国有色金属学报*, 2013, 23(12): 3492–3502.
- ZHANG Yu, SHAO Yong-jun, ZHOU Xin, ZHENG Ming-hong. Major and trace element characteristics of colloidal pyrites in Xinqiao Cu-S-Fe deposit, Tongling, Anhui Province, China[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2013, 23(12): 3492–3502.
- [37] 吴越. 川滇黔地区 MVT 铅锌矿床大规模成矿作用的时代与机制[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2013.
- WU Yue. The age and ore-forming process of MTV deposits in the boundary area of Sichuan–Yunnan–Guizhou provinces, Southwest China[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2013.

## Implication and component characteristics of metal sulfides in Liba gold deposit, Gansu province

SHAO Yong-jun<sup>1,2</sup>, XIE You-liang<sup>1,2,3</sup>, FENG Yu-zhou<sup>1,2</sup>, ZHANG Yu<sup>1,2</sup>, LIU Zhong-fa<sup>1,2</sup>, JIANG Meng-tong<sup>1,2</sup>

- (1. Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals and Geological Environment Monitor (Central South University), Ministry of Education, Changsha 410083, China;
2. School of Geoscience and Infophysics, Central South University, Changsha 410083, China;
3. Hunan Huazhong Mining Co., Ltd., Changsha 410083, China)

**Abstract:** Based on the ore veins intercalation and minerals association, the mineralization in Liba gold deposit can be divided into hydrothermal stage and exogenous stage. The hydrothermal stage consists of three phases, which are pyrite phase, beresite phase, and polymetallic phase. Component analysis and Au distribution states analysis of metal sulfides (pyrite, arsenopyrite, sphalerite) of three phases were carried out by means of electron probe microanalysis (EPMA). The results show that the  $w(\text{Co})/w(\text{Ni})$  ratio (0.15–4.50) of pyrite and FeS molecular number (18.81%–22.97%) in sphalerite indicate that the Liba gold deposit forms in the medium-high temperature environment. The Au content, As-Au relationship diagram and distribution analysis of Au element in metal sulfides indicate that pyrite and arsenopyrite are the main gold-bearing minerals in Liba gold deposit, besides micro and sub-micro native gold inclusion are the dominant occurrence in pyrite and arsenopyrite. Based on the geological characteristics and the component characteristic of metal sulfides, Liba gold deposit is regarded as a medium-high temperature and medium-deep hydrothermal gold deposit which is closely related to Zhongchuan instructive.

**Key words:** metal sulfides; component; EPMA; Liba gold deposit

**Foundation item:** Project(2015CX008) supported by Innovation-driven Plan in Central South University, China

**Received date:** 2016-09-02; **Accepted date:** 2017-03-21

**Corresponding author:** SHAO Yong-jun; Tel: +86-13973149482; E-mail: shaoyongjun@126.com

(编辑 何学锋)