



甘肃李坝金矿床流体包裹体特征与矿床成因

谢友良^{1,2,3}, 邵拥军^{1,2}, 冯雨周^{1,2}, 张 宇^{1,2}, 刘忠法^{1,2}, 刘清泉^{1,2}, 郑明泓^{1,2}, 谭华杰^{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, 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: 李坝金矿床是礼岷金矿带东段一个大型金矿床, 矿体产于近 NW 向、EW 向韧脆性剪切带中。通过详细的野外调研和室内鉴定, 李坝成矿过程可以划分为热液期和表生期, 其中热液期可细分为黄铁矿阶段(A1)和黄铁矿-绢云母-石英阶段(A2)、多金属硫化物阶段(A3)等主成矿阶段。包裹体岩相学分析和显微测温分析表明, A1 阶段流体包裹体以水溶液包裹体为主, 还有少量的 CO₂ 包裹体(II型)、含 CO₂ 三相水溶液包裹体(III型), 均一温度集中于 380~400 °C, 盐度集中于 5%~8% NaCl_{eq} 之间。A2 阶段流体包裹体以 CO₂ 包裹体(II型)、含 CO₂ 三相水溶液包裹体(III型)为主, 水溶液包裹体较少, 均一温度集中于 320~340 °C 之间, 盐度集中于 8%~11% NaCl_{eq} 之间。A3 阶段流体包裹体以 CO₂ 包裹体(II型)、含 CO₂ 三相水溶液包裹体(III型)为主, 水溶液包裹体较少, 均一温度集中于 280~300 °C 之间, 盐度集中于 2%~6% NaCl_{eq} 之间。通过 H₂O 和 CO₂ 体系联合 *p-t* 图解估算成矿压力为 95~150 MPa, 估算最大成矿深度为 5.6 km。对比研究表明: 李坝金矿床矿体呈似层状、透镜状赋存于浅变质沉积岩中, 且矿体与围岩边界模糊; 金属矿物主要为细粒黄铁矿, 上述矿床地质特征总体与卡林型金矿床一致, 而流体包裹体特征指示该矿床成矿流体具有富 CO₂、中高温、低盐度的特征, 这与造山型金矿床一致。综合地质和流体包裹体特征, 李坝金矿床成因类型为广义的类卡林型。

关键词: 流体包裹体; 成矿流体; 类卡林型金矿; 李坝金矿床; 礼岷金矿带

文章编号: 1004-0609(2018)-05-0994-14

中图分类号: P611

文献标志码: A

研究表明, 造山型、浆控高温热液型、浅成低温热液型、卡林型、热水沉积型等热液金矿床是成矿流体的固体沉淀物或成矿流体与围岩相互作用的产物。因此, 成矿流体的性质和活动规律是判别金矿床成因的重要依据, 而成矿流体活动信息很好地保存在流体包裹体中, 这使得流体包裹体成为金矿床成因研究中最基础和最准确的方法^[1]。如李晶等^[2]对甘肃阳山金矿床流体包裹体岩相学和显微测温分析结果表明, 该矿床具有 CO₂ 包裹体较发育, 均一温度为中高温的特征, 不同于卡林型金矿床, 而与造山型金矿床特征相似, 结合矿床地质特征, 对其成因提出了新的认识, 认为该矿床为卡林型与造山型金矿床之间的过渡类型。邓轲等^[3]对黑龙江省黑河市争光金矿床流体包裹体岩相学和显微测温进行了分析, 结果表明其流体包裹体特征与浅成低温热液型金矿床相符, 明显不同于构造蚀变岩型金矿床, 从而确定了其成因类型为浅成低温热液型。鞠培姣等^[4]借助于流体包裹体岩相学、显微测温及群体包裹体气液相成分分析等方法以包金山金矿

床流体包裹体为研究对象进行了研究, 在此基础上厘定其成因类型为变质热液叠加中温岩浆热液充填交代型矿床(造山型)。研究发现, 造山型和微细粒浸染型金矿床是两类最为常见的金矿床, 同时也是研究程度较为成熟的两类矿床。对比研究这两类金矿床流体包裹体特征表明, 其流体包裹体特征存在明显差异^[1], 主要表现为: 1) 富 CO₂ 的包裹体是造山型金矿床典型特征, 而卡林型金矿床不发育。2) 造山型金矿床包裹体具有中高温(265~460 °C)、低盐度(<12.63% NaCl_{eq})、成矿压力(50~400 MPa)变化范围大的特征; 而卡林型金矿床包裹体具有中低温(160~250 °C)、盐度变化范围较大、成矿压力(25~65 MPa)较低的特征。因此, 通过与造山型、微细粒浸染型金矿床流体包裹体特征对比分析可以厘定矿床成因提供依据。

礼岷金矿带是甘肃礼县-岷县北部地区呈东西向分布的金矿带, 发育有李坝、金山、赵沟、杜沟、三人沟、周家沟、付家坪、锁龙、马泉等多个产于古生界浅变质岩中的金矿床(点)^[5~7]。李坝金矿床是礼岷金

基金项目: 中南大学“创新驱动计划”项目(2015CX008)

收稿日期: 2017-08-24; 修订日期: 2018-03-02

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

矿带东段开采较早的一大型金矿床, 其中 Au 总资源量为 115.8 t, 平均品位 1.89×10^{-6} ^[8]。截至目前, 前人对该矿床区域地质背景、矿床地质特征、成岩成矿年龄、矿床成因、成矿规律及找矿标志等多方面进行了研究, 并积累了丰富的研究成果^[9-18]。但在成矿流体特征方面的研究尚存在争议, 张作衡等^[13]对李坝金矿床流体包裹体的研究指示该矿床均一温度为 208~475 °C, 主要在 300~420 °C 之间, 属于中高温, 这与卢宗柳等^[9]和黄杰等^[19]对该矿床流体包裹体研究结果指示其主成矿阶段成矿温度属中低温的认识明显不同。对比前人研究成果, 未把成矿作用过程、富 CO₂ 包裹体都考虑进去是造成认识不同的根源, 这也制约了李坝金矿床成矿流体特征与演化及成矿机制的系统研究。另外, 前人对李坝金矿床成因提出了不同的观点。任新红^[7]和黄杰等^[19]通过对李坝金矿床流体包裹体特征及 S、Pb、H、O、Rb 和 Sr 同位素特征的研究, 从成矿物质来源、成矿温度、成矿流体介质成分、成矿年龄等方面对该矿床成因类型进行了探讨, 认为其成因类型为岩浆-变质混合成矿流体的热液充填-交代型(造山型); 张姚代等^[11]、周科慧等^[5]对李坝金矿床矿床地质特征研究表明, 矿体主要呈似层状、透镜状赋存于断裂破碎带内, 且与围岩边界模糊; 矿区内主要金属矿物为细粒黄铁矿。另外, 矿区内可见明金, 但粒度细, 且主要赋存于细粒黄铁矿中。其地质特征

总体上与微细粒浸染状金矿床相符合, 因此, 认为其成因类型为微细粒浸染型(卡林型)。对比前人研究成果发现, 李坝金矿床非常复杂, 片面地以矿床地质特征或地球化学特征为矿床成因研究的依据是导致矿床成因认识不同的根源。因此, 本文作者在李坝金矿床地质特征研究的基础上, 对该矿床流体包裹体开展了岩相学、显微测温方面的系统研究, 揭示了成矿流体特征与演化规律, 探讨了流体成矿机制, 并通过与卡林型、造山型金矿床在矿床地质和流体包裹体特征等方面的对比研究, 以期用这种最基础和最准确的研究手段为厘定矿床成因提供依据。

1 区域地质背景

前期研究工作已对李坝金矿床“区域地质背景”和“矿区地质特征”做了细致的描述, 本文不再对这两方面进行详细表述, 详细内容可参考邵拥军等^[20]。

李坝金矿床位于甘肃省李坝县境内, 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中(见图 1(a))。区域内出露的地层主要有泥盆统李坝群和西汉水组细碎屑岩为主的类复理石建造, 中石炭统下加岭组滨-浅海相的泥质砂质建造, 中下侏罗统、第三系碎屑岩建造及第四

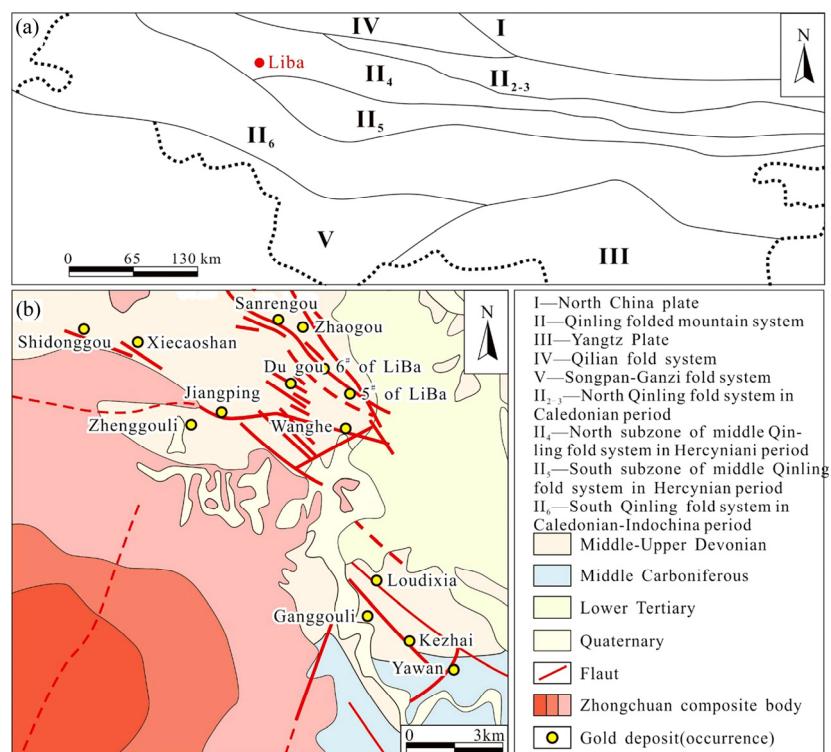


图 1 李坝金矿大地构造位置图及区域地质简图(据文献[11]修改)

Fig. 1 Geotectonic location map (a) and regional geological map (b) of LiBa gold deposit (modified after Ref. [11])

系残积物、坡积物。其中中泥盆统李坝群类复理石建造是区内金矿床的重要含矿层(见图 1(b))。区域构造由一系列褶皱与断裂组成。区域内主要构造包括石家庄河坝复式向斜、礼县—洮坪—苇子坝断裂和礼县—罗坝—锁龙口断裂。区域内岩浆活动强烈, 在海西期、印支期和燕山期均有出露, 具有多旋回、多期次特征。与李坝金矿床成矿关系密切的中川复式岩体位于矿区西南向距矿区 2~3 km 的区域内, 岩性主要为黑云母二长花岗斑岩和黑云母二长花岗岩^[11, 15~17]。区域内金属矿产主要以金为主, 次为铀, 南部有少量的铜铅锌。

2 矿区地质特征

李坝金矿区内出露地层以中泥盆统李坝群浅变质碎屑岩为主, 在矿区分布最为广泛。矿区构造以褶皱和断裂为主。酒店—李坝复式背斜的次级褶皱和赵沟—申家山倒转向斜为矿区内的主要褶皱构造。断裂构造按走向可划分为近 EW、NW 和 NNW, 主要断裂

构造包括 F₁、F₃、F₂₉、F₂₋₁、F₂₋₂ 和 F₈。其中 F₁ 断裂为矿区最主要的断裂构造, 属罗坝—锁龙口断裂的次级断裂, 分布于矿区东部, 沿走向贯穿了整个矿区, 走向 NW, 总体南倾, 倾向 220°~230°, 倾角 75°~85°, 沿走向长度>6 km, 宽 50~200 m, F₁ 断裂中仅发现有弱矿化现象, 未发现具有工业价值的矿体。矿区出露的岩体主要为中川复式岩体。另外, 矿区内还发育有云斜煌斑岩和闪长岩岩脉。

截止目前, 在李坝金矿区内共圈定 69 条金矿体, 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 号和 6-35 号, 且已查明的矿体均赋存于矿区次级断裂破碎带内, 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, 关于矿体特征的详细描述可以参考邵拥军等^[20]。

根据前期研究成果^[20], 李坝金矿床矿石类型包括原生硫化物矿石和氧化矿矿石。原生硫化物矿石包括石英—黄铁矿矿石(见图 3(a))、石英—绢云母—黄铁矿矿石(见图 3(b))和石英—黄铁矿—方铅矿—闪锌矿矿石

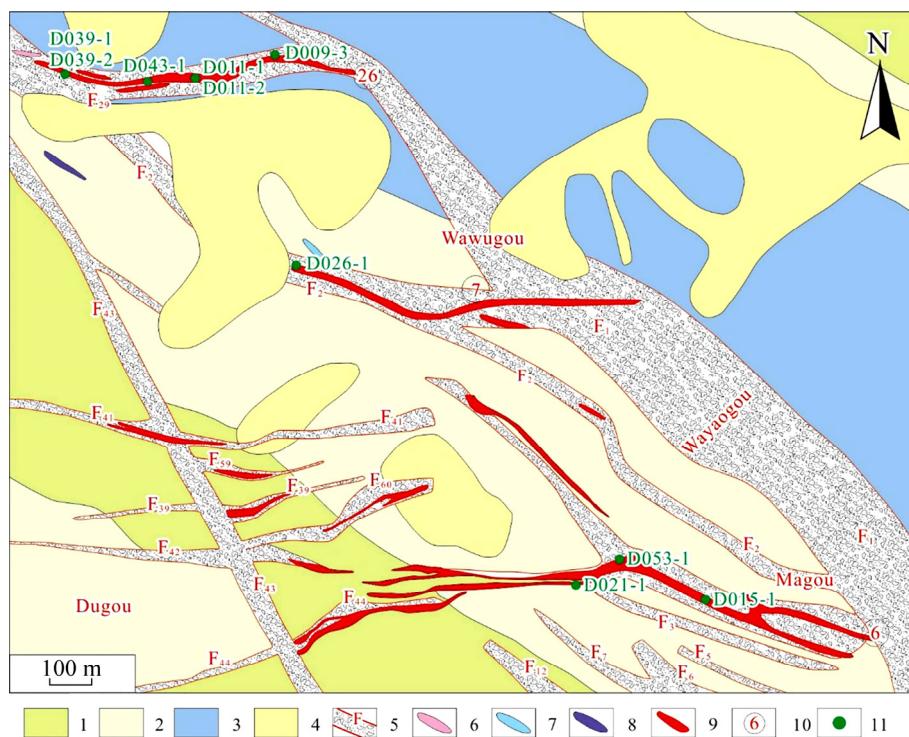


图 2 李坝金矿床矿区地质图(据文献[8]修改): 1—绢云母绿泥石板岩, 夹变石英砂岩; 2—粉砂质板岩, 石英细砂岩夹粉砂岩, 变石英砂岩; 3—变石英砂岩, 绢云母绿泥石板岩; 4—第四系堆积物; 5—断裂构造带; 6—花岗斑岩脉; 7—闪长岩脉; 8—煌斑岩脉; 9—金矿体; 10—金矿体编号; 11—采样位置

Fig. 2 Geological map of Liba gold deposit(modified after Ref. [8]): 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

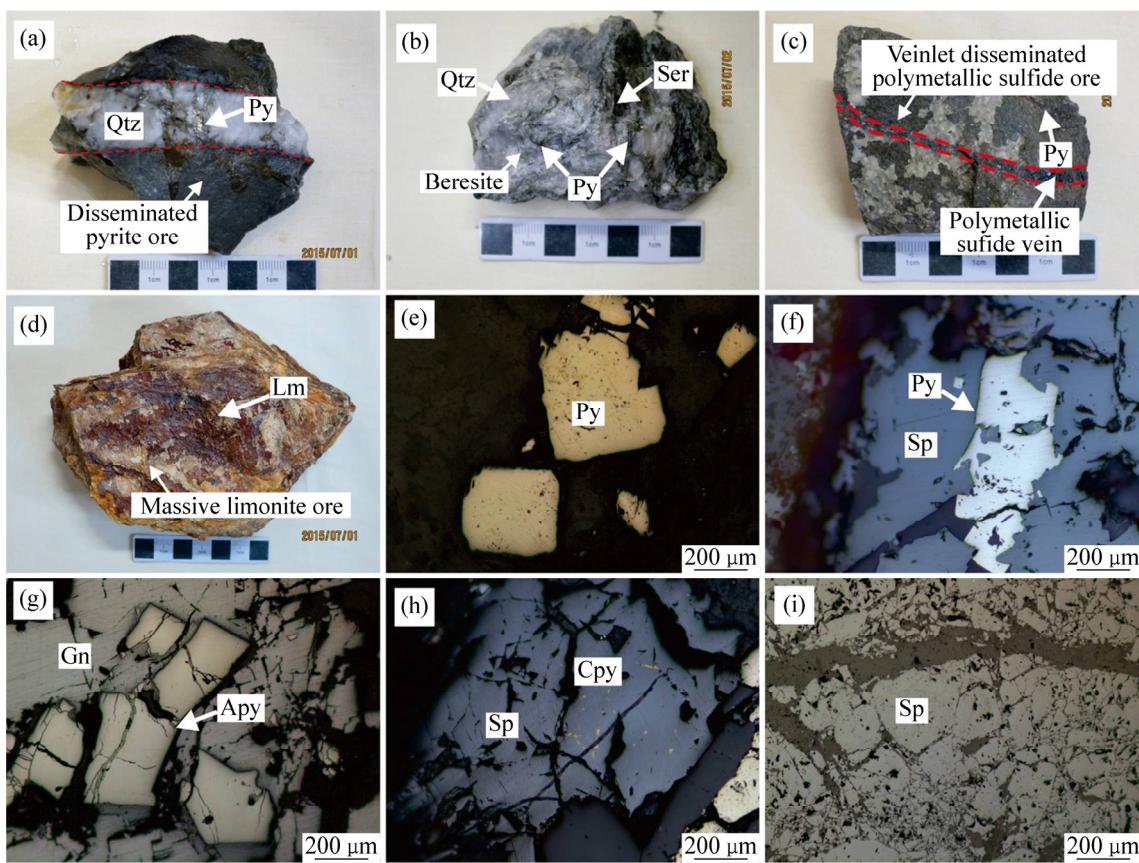


图3 李坝金矿床矿石类型及显微照片: (a) 浸染状黄铁矿矿石; (b) 黄铁绢英岩; (c) 细脉浸染状多金属硫化物矿石; (d) 块状褐铁矿矿石; (e) 自形-半自形立方体晶粒黄铁矿(-); (f) 闪锌矿交代溶蚀黄铁矿(-); (g) 方铅矿交代溶蚀毒砂(-); (h) 闪锌矿与黄铜矿构成固溶体分离结构(-); (i) 闪锌矿压碎结构(-); Py—黄铁矿; Apy—毒砂; Sp—闪锌矿; Gn—方铅矿; Cpy—黄铜矿; Lm—褐铁矿; Qtz—石英; Ser—绢云母

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—Copper; Qtz—Quartz; Ser—Sericite

(见图3(c)); 氧化矿矿石为褐铁矿矿石(见图3(d))。矿区内的金属矿物有黄铁矿、毒砂、闪锌矿、方铅矿、黄铜矿和褐铁矿; 非金属矿物包括石英、绢云母、绿泥石、方解石和石膏。矿石结构有晶粒结构(见图3(e))、交代结构(见图3(f)和(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、块状和角砾状构造。

根据前期研究成果^[20], 李坝金矿床蚀变十分发育, 蚀变类型包括硅化(见图4(a))、绢云母化(见图4(a)和4(b))、绿泥石化(见图4(c))和碳酸盐化(见图4(d))。

前期研究发现^[20], 李坝金矿床成矿作用过程包括热液期(A)和表生期(B)。热液期可分为黄铁矿阶段(A1)、黄铁矿-绢云母-石英阶段(A2)和多金属硫化物

阶段(A3)(见表1), 其中A2和A3阶段为主成矿阶段。

热液期: 石英-黄铁矿阶段金属矿物以黄铁矿为主, 还有少量的毒砂, 非金属矿物以石英为主, 还有少量的方解石。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。毒砂呈自形-半自形粒状, 粒径大小为0.06~0.3 mm, 较为破碎。

黄铁矿-绢云母-石英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

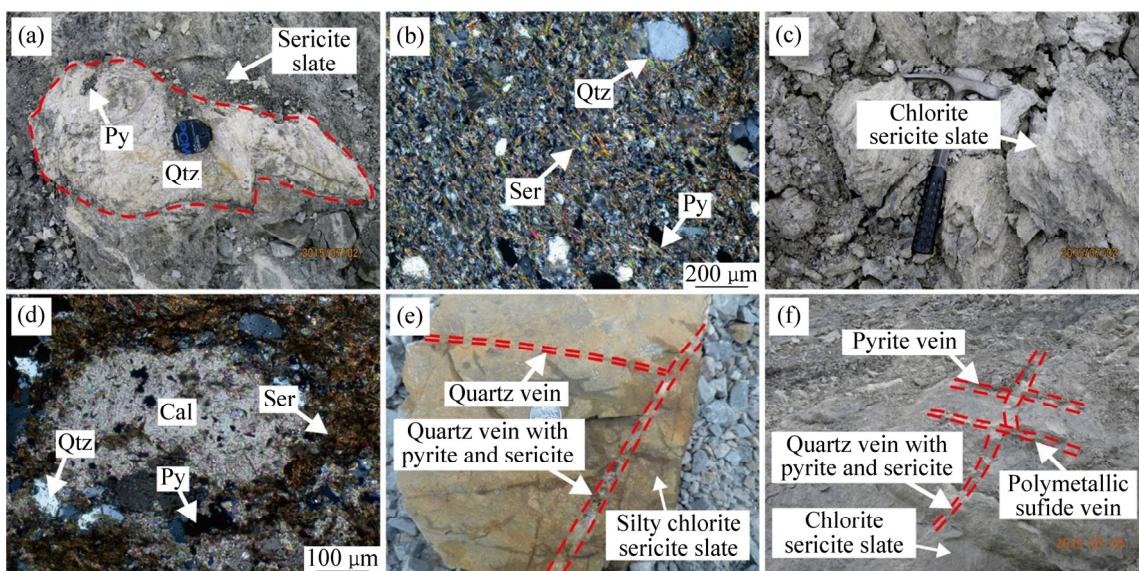


图4 李坝金矿床典型地质现象照片: (a) 产于绢云母板岩内的团块状石英; (b) 绢云母板岩内黄铁矿呈星散状分布; (c) 绿泥石绢云母板岩; (d) 斑点状板岩内斑点成分包括石英、绢云母、方解石和黄铁矿(-); (e) 含黄铁矿绢云母石英细脉切割错断黄铁矿细脉; (f) 含黄铁矿绢云母石英细脉切割错断黄铁矿细脉并被多金属硫化物细脉切割错断; Py—黄铁矿; Qtz—石英; Ser—绢云母; Cal—方解石

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-like slate contains quartz, sericite, calcite and pyrite (-); (e) Vein with pyrite and sericite cutting vein with pyrite; (f) Vein with pyrite and sericite cutting vein with pyrite, 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 Au deposit

Minerals	Hydrothermal stage			Exogenous stage
	Pyrite phase	Beresite phase	Polymetallic sulfides phase	
Quartz	—	—	—	—
Chlorite	—	—	—	—
Sericite	—	—	—
Calcite	—	—	—
Arsenopyrite	—	—	—	—
Pyrite	—	—	—	—
Molybdenite	—	—	—	—
Sphalerite	—	—	—	—
Copper	—	—	—	—
Galenz	—	—	—	—
Limonite	—	—	—	—

Note: — Abundant — Local Trace

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0.2~3.0 mm。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。

表生期金属矿物以褐铁矿为主。褐铁矿呈红褐色,

在矿区广泛发育, 显微镜下特征表现为呈半自形-他形针状、不规则状, 粒径 $<0.1\text{ mm}$ 。

3 流体包裹体特征

3.1 包裹体岩相学特征

本次研究所涉及的样品均采自矿区内6号、7号和26号矿体(见图2)。选取黄铁矿阶段(D011-2、D026-1、D053-1)、黄铁矿-绢云母-石英阶段(D015-1、D021-1、D039-1、D039-2、D043-1)、多金属硫化物阶段(D009-3、D011-1)的代表性样品进行包裹体特征研究(见表2)。

系统的包裹体岩相学特征研究表明, 李坝金矿床各成矿阶段石英中原生包裹体发育, 根据其在室温(20°C)下的相态特征可划分为3种类型。

I型包裹体: 室温下呈气液两相产出, 由液相盐水溶液和气相气泡组成。I型包裹体气相体积分数 $<50\%$ (见图4(a)和(b))。该类包裹体直径为 $5\sim15\text{ }\mu\text{m}$, 多呈椭圆状、负晶形、不规则状分布于石英中。

II型包裹体: 室温下呈液相 CO_2 、气相 CO_2 两相产出(见图4(b)~(d)), 包裹体直径为 $6\sim15\text{ }\mu\text{m}$, 形态多为负晶形、椭圆状、不规则状, 可见其与I型、III型包裹体共生。

III型包裹体: 室温下呈盐水溶液相、液相 CO_2 、气相 CO_2 三相产出, 具有典型的“双眼皮”特征, CO_2 相占包裹体体积分数 $>50\%$ (见图4(c)和(d)), CO_2 部分均一为液相, 最终以碳质相膨胀达到完全均一。该类包裹体直径为 $7\sim20\text{ }\mu\text{m}$, 形态多呈椭圆状、负晶形, 可见其与I型、II型包裹体共生。

表2 样品类型及采样位置

Table 2 Sample types and localities

Samples	Lithology	Classification	Sampling location
D011-2	Pyrite-bearing quartz mass	Quartz-pyrite ore	26# ore body
D026-1	Pyrite-bearing quartz vein	Quartz-pyrite ore	26# ore body
D053-1	Pyrite-bearing calcite-quartz mass	Quartz-pyrite ore	6# ore body
D015-1	Pyrite-sericite-bearing quartz mass	Quartz-sericite-pyrite ore	26# ore body
D021-1	Pyrite-sericite-chlorite-bearing quartz mass	Quartz-sericite-pyrite ore	6# ore body
D039-1	Pyrite-sericite-bearing quartz mass	Quartz-sericite-pyrite ore	26# ore body
D039-2	Pyrite-sericite-bearing quartz mass	Quartz-sericite-pyrite ore	26# ore body
D043-1	Pyrite-sericite-bearing quartz mass	Quartz-sericite-pyrite ore	26# ore body
D009-3	Pyrite-galena-bearing quartz mass	Quartz-polymetallic sulfide ore	26# ore body
D011-1	Pyrite-galena-bearing calcite-quartz mass	Quartz-polymetallic sulfide ore	26# ore body

3.2 包裹体显微测温方法

包裹体显微测温工作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完成, 测试所用仪器为Linkam THMS-600型地质用冷热台, 测温范围为 $-196\sim600^\circ\text{C}$, $-196\sim30^\circ\text{C}$ 内测试精度为 $\pm0.1^\circ\text{C}$, $30\sim600^\circ\text{C}$ 内测试精度为 $\pm1^\circ\text{C}$ 。温度变化速率设置为 $10\sim30^\circ\text{C}/\text{min}$, 当接近相变点时, 设置为 $0.1\sim1^\circ\text{C}/\text{min}$ 。

通过冷热台测得了包裹体的二氧化碳熔化温度、初始熔化温度 T_i 、冰的最终熔化温度、部分均一温度和气液均一温度。利用BROWN^[21]的Flincor程序, 通过BROWN和LAMB^[22]等式计算出包裹体的盐度、密度等参数。

3.3 包裹体显微测温结果

本次研究对李坝金矿床10件样品进行冷冻法和均一法测温, 共测得213个包裹体, 测试结果列于表3。不同成矿阶段(A1、A2和A3)的均一温度、盐度如图5所示。

1) A1阶段包裹体显微测温结果

本阶段包裹体较为发育, 类型以Ia型水溶液包裹体为主, 还有少量的II型纯 CO_2 包裹体和III型水溶液 CO_2 三相包裹体, 可见3种类型包裹体共生。

I型包裹体共测得47个数据, 冰的最终融化温度变化范围为 $-7.1\sim-1.8^\circ\text{C}$, 均一温度介于 $330\sim440^\circ\text{C}$ 之间, 平均温度 389°C (见图5(a)), 最终均一为液相; 盐度为 $3.76\sim9.45\% \text{NaCl}_{\text{eq}}$ (见图5(b)), 平均值为 $6.49\% \text{NaCl}_{\text{eq}}$ 。II型包裹体测得4个数据, 固态 CO_2 熔化温度范围为 $-58.0\sim-57.6^\circ\text{C}$; 均一温度为 $30.3\sim30.6^\circ\text{C}$, 平均温度 30.4°C , 最终均一为碳质液相。III型包裹体测得9个数据, 固态 CO_2 熔化温度范围为 $-58.1\sim$

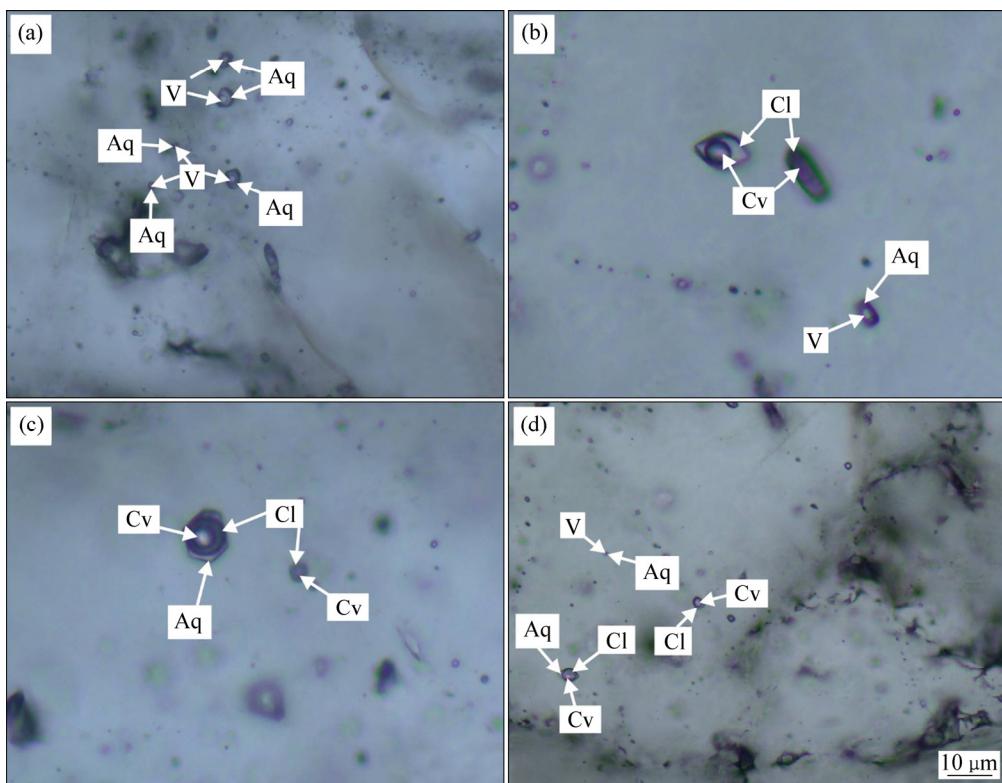


图5 流体包裹体镜下显微特征(Aq—水溶液相; V—气相; Cl—液相CO₂; Cv—气相CO₂): (a) Ia型包裹体群生; (b) Ia型包裹体与II型包裹体共生; (c) II型包裹体与III型包裹体共生; (d) I型、II型、III型包裹体共生

Fig. 5 Microphotographs of fluid inclusions in Liba gold deposit (Aq—Aqueous solution; V—Vapor; Cl—CO₂ liquid; Cv—CO₂ vapor): (a) Type Ia inclusions in group; (b) Type Ia inclusions coexist with Type II inclusions; (c) Type II inclusions coexist with Type III inclusions; (d) Type III inclusions coexist with Type Ia and Type II inclusions

-57.7 °C, CO₂笼合物熔化温度为8.2~8.8 °C, CO₂相部分均一温度介于30.2~30.7 °C, 平均温度30.5 °C, 均一为碳质液相; 最终均一温度为444~460 °C, 平均温度456 °C(见图5(a)), 碳质相膨胀充满整个包裹体达到均一; 盐度为2.42%~3.57% NaCl_{eq}, 平均值为2.93% NaCl_{eq}(见图5(b))。

2) A2阶段包裹体显微测温结果

本阶段包裹体较为发育, 类型以Ia型水溶液包裹体为主, 其次为III型水溶液CO₂三相包裹体, II型纯CO₂包裹体最少, 可见3种类型包裹体共生。

I型包裹体共测得69个数据, 冰的最终融化温度变化范围为-8.8~0.6 °C, 均一温度为290~330 °C, 平均温度330 °C(见图5(c)), 最终均一为液相; 盐度为0.99%~12.63% NaCl_{eq}, 平均值为8.67% NaCl_{eq}(见图5(d))。II型包裹体测得9个数据, 固态CO₂熔化温度范围为-59.1~58.3 °C; 均一温度为27.3~30.5 °C, 平均温度30.4 °C, 最终均一为碳质液相。III型包裹体测得15个数据, 固态CO₂熔化温度范围为-59.3~-56.7 °C, CO₂笼合物熔化温度为7.7~8.2 °C, CO₂相

部分均一温度介于27.8~30.4 °C, 平均温度30.5 °C, 均一为碳质液相; 最终均一温度为345~359 °C, 平均温度353 °C(见图5(c)), 碳质相膨胀充满整个包裹体达到均一; 盐度为3.57%~4.51% NaCl_{eq}, 平均值为4.07% NaCl_{eq}(见图5(d))。

3) A3阶段包裹体显微测温结果

本阶段包裹体较为发育, 类型以I型水溶液包裹体为主, 还有少量的II型纯CO₂包裹体和III型水溶液CO₂三相包裹体, 可见3种类型包裹体共生。

I型包裹体共测得36个数据, 冰的最终融化温度变化范围为-6.2~1.2 °C, 均一温度为265~315 °C, 平均温度292 °C(见图5(e)), 最终均一为液相; 盐度为1.98%~9.45% NaCl_{eq}, 平均值为4.32% NaCl_{eq}(见图5(f))。II型包裹体测得14个数据, 固态CO₂熔化温度范围为-62.5~57.1 °C; 均一温度为29.1~30.6 °C(平均温度30.0 °C), 最终均一为碳质液相。III型包裹体测得10个数据, 固态CO₂熔化温度范围为-62.5~57.1 °C, CO₂笼合物熔化温度为7.9~8.7 °C, CO₂相部分均一温度介于29.1~30.5 °C(平均温度30.0 °C), 均一为碳

表3 李坝金矿床流体包裹体显微测温结果

Table 3 Microthermometric data of fluid inclusions in Liba gold deposit

Sample No	Stage	Type	Frequency	Size/ μm	$\varphi v/\%$	$t_{\text{m}(\text{CO}_2)}/^{\circ}\text{C}$	$t_{\text{m}(\text{ice})}/^{\circ}\text{C}$	$t_{\text{m}(\text{cla})}/^{\circ}\text{C}$	$t_{\text{hc}}/^{\circ}\text{C}$	$t_{\text{h}}/^{\circ}\text{C}$	Salinity/% NaCl_{eq}	Density/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)
D011-2	A1	I	12	5~20	15~30		-6.2~-2.3			345~420	3.76~9.45	0.50~0.67
		II	3	8~16	20~60	-58.0~-57.6			30.4~30.6			0.66
		III	5	10~18	50~85	-58.1~-57.7		8.2~8.8	30.2~30.6	444~460	2.42~3.57	1.01~1.02
D026-1	A1	I	20	6~15	20~30		-7.1~-2.7			330~440	4.39~10.61	0.48~0.75
D053-1	A1	I	15	8~18	20~35		-6.2~-1.8			345~436	2.96~9.45	0.48~0.66
		II	1	9~18	30~80	-58.8			30.3			0.66
		III	4	8~20	65~90	-58.1~-57.6		8.1~9.0	30.4~30.7	452~475	2.03~3.76	1.01~1.02
D015-1	A2	I	15	6~16	20~30		-7.5~-4.6			320~360	7.25~11.1	0.69~0.8
D021-1	A2	I	7	7~15	20~30		-7.4~-4.6			325~350	7.25~10.98	0.72~0.8
		II	5	8~20	30~65	-59.1~-58.3			27.3~28.3			0.69~0.7
		III	7	10~20	70~85	-59.3~-58.4		7.7~8.2	27.8~28.8	345~356	3.57~4.51	1.02~1.03
D039-1	A2	I	16	10~15	20~30		-8.8~-0.6			290~340	0.99~12.63	0.64~0.85
		III	1	8~16	25~60	-58.6		7.8	28.8	358	4.26	1.02
		I	13	7~14	20~35		-7.6~-4.7			310~380	7.39~11.22	0.76~0.81
D039-2	A2	II	4	9~17	30~70				30.2~30.5			0.66
		III	3	10~18	60~80	-57.6~-56.7		7.7~8.1	29.8~30.2	354~358	3.57~4.51	1.02~1.03
		I	18	10~17	20~30		-8.1~-1.5			320~354	2.47~11.82	0.71~0.82
D043-1	A2	III	4	8~22	65~80	-58.6~-57.6		7.7~8.2	29.6~30.4	350~359	3.76~4.32	1.02~1.03
		I	20	8~15	15~30		-4.6~-1.2			265~315	1.98~7.25	0.71~0.94
		II	10	7~18	30~60	-60.2~-57.1			29.1~30.3			0.66~0.68
D009-3	A3	III	9	10~23	55~80	-60.3~-58.6		7.9~8.7	29.1~30.4	290~320	2.22~3.57	1.01~1.02
		I	16	5~16	20~30		-6.2~-1.3			275~315	2.14~9.45	0.71~0.81
		II	4	9~18	30~80	-62.5~-61.8			29.8~30.6			0.66~0.67
D011-1	A3	III	1	8~22	50~85	-62.5		8.7	30.5	310	2.62	1.02

Main minerals are all quartz. 1) 20 °C; φv —Gas phase volume fraction of type I inclusions, CO_2 phase volume fraction of type II inclusions. $t_{\text{m}(\text{CO}_2)}$ —Melting temperature of CO_2 ; $t_{\text{m}(\text{ice})}$ —Final melting temperature of ice; $t_{\text{m}(\text{cla})}$ —Melting temperature of CO_2 ; t_{hc} —Partial homogenization temperature of CO_2 , inclusions marked (V) homogenize to gas phase, non-marked homogenize to liquid phase; t_{h} —Total homogenization temperature.

质液相; 最终均一温度为 290~320 °C, 平均温度 303 °C(见图 5(e)), 碳质相膨胀充满整个包裹体达到均一; 盐度为 2.22%~3.57% NaCl_{eq} , 平均值为 2.86% NaCl_{eq} (见图 5(f))。

4 讨论

4.1 成矿流体特征及其演化

包裹体岩相学特征研究表明, 李坝金矿床热液期不同成矿阶段与金属矿物共生的石英内均发育有 I 型、II 型和 III 型三类包裹体, 反映了李坝金矿床成矿

期成矿流体具有富 CO_2 的特征^[4, 23], 且成矿作用与 $\text{NaCl}-\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 流体的不混溶关系密切^[24~25]。另外, 显微镜下观察发现, I 型、II 型和 III 型原生包裹体在同一视域中共生, 表明包裹体被捕获时处于一种不均匀的热液体系状态^[26~27]。

包裹体显微测温结果显示:

1) 李坝金矿床主成矿期 A1 阶段的成矿流体为高温、低盐度的 $\text{NaCl}-\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 流体体系; A2 阶段的成矿流体为中高温、低盐度的 $\text{NaCl}-\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 流体体系; A3 阶段的成矿流体为中高温、低盐度的 $\text{NaCl}-\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 流体体系, 盐度变化范围较大。从 A1 阶段到 A3 阶段, 随着成矿过程的进行, 流体的温度

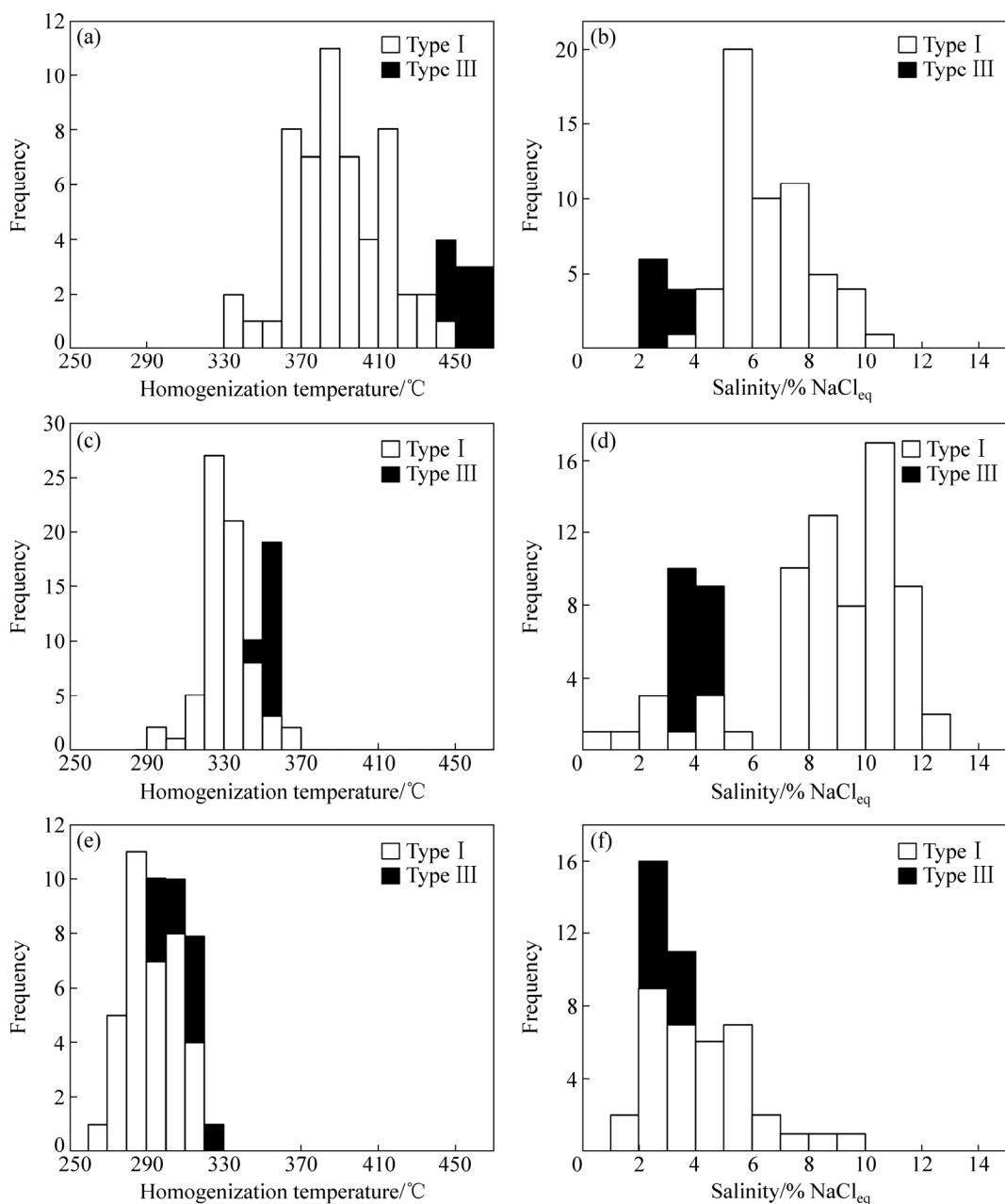


图 6 李坝金矿床包裹体均一温度和盐度直方图: (a) 黄铁矿阶段均一温度直方图; (b) 黄铁矿阶段盐度直方图; (c) 黄铁矿-绢云母-石英阶段均一温度直方图; (d) 黄铁矿-绢云母-石英阶段盐度直方图; (e) 多金属硫化物阶段均一温度直方图; (f) 多金属硫化物阶段盐度直方图

Fig. 6 Histograms of homogenization temperatures and salinities of fluid inclusions in different phases in Liba gold deposit: (a) Pyrite stage homogenization temperatures; (b) Pyrite stage salinities; (c) Pyrite–sericite–quartz stage homogenization temperatures; (d) Pyrite–sericite–quartz stage salinities; (e) Polymetallic sulfides phase homogenization temperatures; (f) Polymetallic sulfides phase salinities

呈逐渐降低的变化趋势, 盐度在 A2 阶段有小幅度的升高, 而后逐渐降低(见图 6)。

2) A1 阶段 I 型包裹体密度范围为 0.48~0.75 g/cm³; A2 阶段 I型包裹体密度范围为 0.64~0.85 g/cm³; A2 阶段 I型包裹体密度范围为 0.71~0.94 g/cm³。可以

看出, 从 A1 阶段至 A3 阶段, 流体的密度呈逐渐增大的变化趋势。

3) 不同成矿阶段固相 CO₂ 熔化温度范围为 -62.5~ -55.6 °C, 低于 CO₂三相点温度, 反映了 II 型和 III 型包裹体的气相成分除 CO₂ 外, 可能还含有 N₂、

CH₄、H₂和CO等成分。

综上所述, 李坝金矿床热液期成矿流体属于富CO₂、中温和中低盐度体系, 具有多数金矿床成矿流体的典型特征, 可能为岩浆期后热液。NaCl-H₂O-CO₂流体来源于矿区酸性岩浆热液, 在运移过程中由于压力突然降低流体发生不混溶相分离作用, 分离为富CO₂和富NaCl-H₂O(少量CO₂)两种独立的流体。

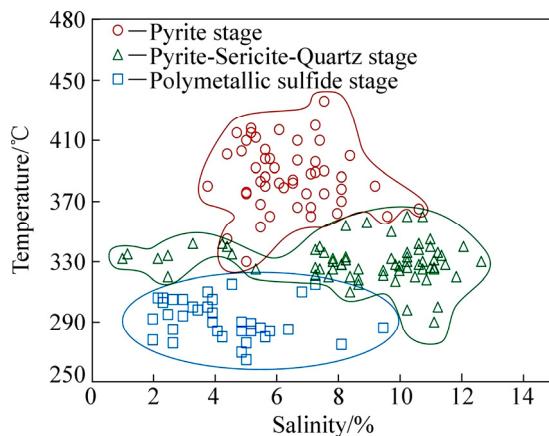


图7 包裹体均一温度-盐度关系图

Fig. 7 Relationship between homogenization temperature and salinity of fluid inclusions

4.2 成矿压力与成矿深度

卢焕章等^[28]认为若在测温片同一视域内同时看到纯H₂O包裹体和纯CO₂包裹体, 表明两者是同时被捕获的, 可以通过测得纯H₂O包裹体和纯CO₂包裹体的均一温度, 在H₂O和CO₂体系联合P-T图解上获得包裹体的捕获压力。本文选择热液期捕获的流体包裹体的两个端元组分进行等容线相交法估算压力, 其中纯H₂O包裹体密度由Ia型包裹体(盐度<5%)计算得出, 为0.71~0.81 g/cm³; 纯CO₂包裹体密度由II型包裹体计算得出, 为0.66~0.70 g/cm³。将两端元包裹体密度投影在H₂O-CO₂体系联合P-T图解上(见图7)。从图7中可以看出, 成矿压力范围为95~150 MPa。高压部分按照静岩压力估算成矿深度(ρ 取用大陆岩石平均密度, 为2.70 g/cm³, g 取9.8 m/s²), 计算公式为: $H=P/(\rho g)$ 。采用最高压力150 MPa计算获得成矿深度5.6 km, 为深度的上限。

4.3 矿床成因

李坝金矿床为礼岷金矿带东段一大型金矿床, 关于其成因类型的认识仍存在分歧^[5, 7, 11], 包括卡林型、造山型两种观点。通过综合对比研究李坝金矿床与卡

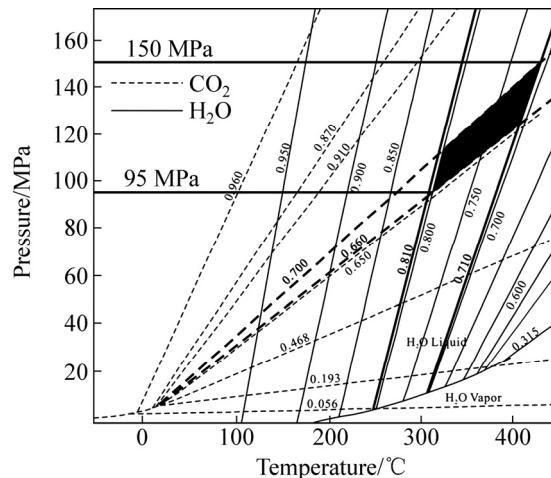


图8 H₂O和CO₂体系联合P-T图解(图中数据为密度, g/cm³, 据文献[29]修改)

Fig. 8 P-T diagram of H₂O-CO₂ system (Data on line is density, g/cm³, modified after Ref. [29])

林型、造山型金矿床的地质特征与流体包裹体特征^[30~32], 可以为厘定李坝金矿床成因类型提供依据(见表4)。

1) 地质特征方面

基于前人研究成果结合系统的野外调研, 李坝金矿床赋矿围岩为一套浅变质碎屑岩, 岩性包括粉砂质绢云母板岩、变细砂岩及斑点状板岩等; 矿体受韧脆性剪切带或正断层控制明显; 矿区内相关蚀变包括硅化、绢云母化、碳酸盐化等, 并具有从矿化中心向边缘呈带状分布的特征, 依次为黄铁绢英岩化带、绢云母化带、绿泥石化带, 兼有卡林型、造山型金矿床特征; 但矿体形态主要为似层状、透镜状, 与围岩界线模糊, 金属矿物以黄铁矿、毒砂为主; 且矿相学结合电子探针分析发现, 矿区内自然金是以纳米级显微显微-超显微自然金的形式存在^[20], 与卡林型金矿床的特征相符。

2) 流体包裹体特征方面

包裹体岩相学观察发现, 李坝金矿床包裹体类型包括水溶液包裹体、纯CO₂包裹体、含CO₂-水溶液三相包裹体, 反映了流体在运移过程中发生过不混溶作用, 这与造山型金矿床一致。包裹体显微测温结果表明, 李坝金矿床成矿温度变化范围为265~460 °C, 盐度<12.63% NaCl_{eq}, 估算得成矿压力为95~150 MPa, 与造山型金矿床特征(主成矿温度: 200~500 °C; 低盐度; 成矿压力: 50~400 MPa)相符, 明显不同于卡林型金矿床(主成矿温度: 160~250 °C; 成矿压力: 25~65 MPa)。

表4 李坝金矿与造山型和卡林型金矿的地质和成矿流体特征对比

Table 4 Geological and fluid features of Liba deposit and comparison with orogenic and Carlin gold deposits

Aspect	Orogenic-type ^[30–31]	Carlin-type ^[30, 32]	Liba deposit	Remark
Lithology	Anyone	Calcareous siltstone	Metamorphic clastic rock	Both
Structure	Ductile shear zone	Normal fault	Ductile shear zone and normal fault	Both
Ore bodies	Veins with clear border	Veins or bedded with fuzzy border	Bedded and lenticular	Carlin
Ore types	Veins or altered rocks	Altered rocks	Veins or altered rocks	Both
Minerals	Pyrite	Pyrite and arsenopyrite	Pyrite and arsenopyrite	Carlin
Native gold	Coarse-grained gold	Fine-grained gold	Micro-grained gold	Carlin
Fluid inclusions	II and III types	I type	I, II and III types	Orogenic
Fluid salinity	<6% NaCl _{eq}	<8% NaCl _{eq}	<12.63% NaCl _{eq}	Orogenic
Fluid sources	Metamorphic water	Formation or meteoric water	Magmatic and metamorphic water ^[11]	Orogenic
Ore-forming temperature	200–500 °C	160–250 °C	265–460 °C	Orogenic
Ore-forming pressure	50–400 MPa	25–65 MPa	95–150 MPa	Orogenic

3) 成矿流体来源方面

李坝金矿床H、O同位素研究结果表明其成矿流体为变质水与岩浆水混合而成^[11]，不同于起始流体为“建造水或大气降水”的卡林型金矿床，而与造山型金矿床流体主要来源于“变质流体”的特征相符。

综上所述，李坝金矿床地质特征复杂，部分特征与造山型金矿床特征一致，但总体上与卡林型金矿一致，突出表现在矿体特征、矿石矿物组合、金的赋存状态等方面。而流体包裹体特征研究结果表明，李坝金矿床成矿流体在富CO₂、低盐度、成矿温度、成矿压力等方面具有造山型金矿床特征。对比研究发现，李坝金矿床地质和包裹体特征不同于典型的卡林型或造山型金矿床，而与滇黔桂地区的水银洞、烂泥沟以及甘肃阳山金矿床相似^[2, 33]，此类矿床被视为卡林型与造山型之间的过渡类型。综合地质和流体包裹体特征，认为李坝金矿床为广义的类卡林型金矿床。

5 结论

1) 李坝金矿床是礼岷金成矿带上的一个重要矿床，矿体主要产于F₁断层的次级断层中，矿床成矿作用过程经历了热液期和表生期两期成矿作用，其中热液期可分为黄铁矿阶段、黄铁绢英岩阶段、多金属硫化物阶段。

2) 李坝金矿床不同成矿阶段石英中，广泛发育有水溶液包裹体(I型)、CO₂包裹体(II型)、含CO₂水溶

液三相包裹体(III型)，并观察到3种类型包裹体在同一视域中共存。

3) 黄铁矿阶段，包裹体均一温度为，盐度为，为高温、低盐度流体；黄铁绢英岩阶段，包裹体均一温度为，盐度为，为中高温、低盐度流体。从黄铁矿阶段至多金属硫化物阶段，流体的温度呈逐渐降低的变化趋势，盐度盐度经历了小幅度升高又明显降低的变化趋势，密度则表现出升高的变化趋势。李坝金矿床成矿压力为95~150 MPa，成矿深度最大为5.6 km。

4) 对比研究表明，李坝金矿床在矿体特征、矿石矿物组合、金的赋存状态等地质特征方面与卡林型金矿床一致；在富CO₂、低盐度、成矿温度、成矿压力等包裹体特征方面符合造山型金矿床。地质和包裹体特征指示李坝金矿床成因类型为类卡林型。

REFERENCES

- [1] 陈衍景, 倪培, 范洪瑞, PIRAJNO F, 赖勇, 苏文超, 张辉. 不同类型热液金矿系统的流体包裹体特征[J]. 岩石学报, 2007, 27(9): 2085–2108.
CHEN Yan-jing, NI Pei, FAN Hong-rui, PIRAJNO F, LAI Yong, SU Wen-chao, ZHANG Hui. Diagnostic fluid inclusions of different types hydrothermal gold deposits[J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 27(9): 2085–2108.
- [2] 李晶, 陈衍景, 李强之, 赖勇, 杨荣生, 毛世东. 甘肃阳山金矿流体包裹体地球化学和矿床成因类型[J]. 岩石学报, 2007, 23(9): 2144–2154.

- LI Jing, CHEN Yan-jing, LI Qiang-zhi, LAI Yong, YANG Rong-sheng, MAO Shi-dong. Fluid inclusion geochemistry and genetic type of the Yangshan Gold deposit, Gansu, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(9): 2144–2154.
- [3] 邓轲, 李诺, 杨永飞, 张成, 于援帮, 张东财. 黑龙江省黑河市争光金矿流体包裹体研究及矿床成因[J]. *岩石学报*, 2013, 29(1): 231–240.
- DENG Ke, LI Nuo, YANG Yong-fei, ZHANG Cheng, YU Yuan-bang, ZHANG Dong-cai. Fluid inclusion constraints on the origin of the Zhengguang gold deposit, Heihe City, Heilongjiang Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29(1): 231–240.
- [4] 裴培姣, 赖健清, 莫青云, 石坚, 谭辉越, 陶诗龙. 湖南双峰县包金山金矿成矿流体与矿床成因[J]. *中国有色金属学报*, 2016, 26(12): 2625–2639.
- JU Pei-jiao, LAI Jian-qing, MO Qing-yun, SHI Jian, TAN Hui-yue, TAO Shi-long. Ore-forming fluid and genesis of Bao Jinshan gold deposit in Shuangfeng county, Hunan Province[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2016, 26(12): 2625–2639.
- [5] 周科慧, 方春家. 甘肃省礼岷金矿带成矿构造与控矿规律浅析[J]. *甘肃冶金*, 2008, 30(6): 52–55.
- ZHOU Ke-hui, FANG Chun-jia. Analysis of ore-forming structures and regularities in Lixian-Minxian metallogenic belt, Gansu Province[J]. *Gansu Metallurgy*, 2008, 30(6): 52–55.
- [6] 王秀峰. 甘肃省礼县赵沟金矿床地质特征及成因探讨[J]. *甘肃冶金*, 2009, 31(6): 48–51.
- WANG Xiu-feng. Geologic characteristics and genesis analysis of Zhaogou gold deposit in Lixian, Gansu Province[J]. *Gansu Metallurgy*, 2009, 31(6): 48–51.
- [7] 任新红. 三岔沟金矿床地质特征及找矿方向[J]. *甘肃冶金*, 2010, 32(1): 66–69.
- REN Xin-hong. Geologic characteristics and prospection of San Rengou gold deposit[J]. *Gansu Metallurgy*, 2010, 32(1): 66–69.
- [8] 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]. 礼县: 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]. Lixian: Zijin Mining Limited Company in South Gansu, 2014.
- [9] 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.
- [10] 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, 23(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 Metallogenesis*, 2001, 25(1): 87–94.
- [11] 张姚岱, 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.
- [12] 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 Jianjun. Geology of gold and metallogenesis of the Liba large-size gold deposit in Lixian, Gansu Province[J]. *Mineral Deposits*, 2003, 22(3): 257–263.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 罗天伟, 周继强. 甘肃李坝金矿床成矿地质特征[J]. *桂林学院学报*, 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.
- [16] 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.
- [17] 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.

- [18] 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.
- [19] 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, 2000, 19(2): 105–115.
- [20] 邵拥军, 谢友良, 冯雨周, 张宇, 刘忠法, 蒋梦同. 甘肃李坝金矿床金属硫化物成分特征及其意义[J]. 中国有色金属学报, 2017, 27(12): 2567–2582.
SHAO Yong-jun, XIE You-laing, FENG Yu-zhou, ZHANG Yu, LIU Zhong-fa, JIANG Meng-tong. Implication and composition characteristics of metal sulfides in Liba gold deposit, Gansu Province[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2017, 27(12): 2567–2582.
- [21] BROWN P E. FLINCOR: A microcomputer program for the reduction and investigation of fluid-inclusion data[J]. American Mineralogist, 1989, 74(11): 1390–1393.
- [22] BROWN P E, LAMB W M. P–V–T properties of fluids in the system $H_2O \pm CO_2 \pm NaCl$: New graphical presentations and implications for fluid inclusion studies[J]. Geochimica Et Cosmochimica Acta, 1989, 53(6): 1209–1221.
- [23] 王力, 潘忠翠, 孙丽伟. 山东莱州新城金矿床流体包裹体[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2014, 44(4): 1166–1176.
WANG Li, PAN Zhong-cui, SUN Li-wei. Fluid inclusions of the Xincheng gold deposit of Laizhou city in Shandong Province[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2014, 44(4): 1166–1176.
- [24] GUHA J, LU H Z, DUBE B, ROBERT F, GAGNON M. Fluid characteristics of vein and altered wall rock in Archean mesothermal gold deposits[J]. Economic Geology, 1991, 86(3): 667–684.
- [25] 熊伊曲, 邵拥军, 刘建平, 隋含涛, 赵睿成. 锡田矿田石英脉型钨矿床成矿流体[J]. 中国有色金属学报, 2016, 26(5): 1107–1119.
XIONG Yi-qu, SHAO Yong-jun, LIU Jian-ping, WEI Han-tao, ZHAO Rui-cheng. Ore-forming fluid of quartz vein type tungsten deposit in Xitian ore field[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2016, 26(5): 1107–1119.
- [26] XU G, POLLARD P J. Origin of CO_2 -rich fluid inclusions in synorogenic veins from the Eastern Mount Isa Fold Belt, NW Queensland, and their implications for mineralization[J]. Mineralium Deposita, 1999, 34(4): 395–404.
- [27] WILKINSON J J. Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits[J]. Lithos, 2001, 55(1/4): 229–272.
- [28] 卢焕章, 范宏瑞, 倪培, 欧光习, 沈昆, 张文淮. 流体包裹体[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 1–492.
LU Huan-zhang, FAN Hong-rui, NI Pei, OU Guang-xi, SHEN Kun, ZHANG Wen-huai. Fluid inclusions[M]. Beijing: Science Press, 2004: 1–492.
- [29] EROEDDER A, BODNAR R J. Geologic pressure determinations from fluid inclusion studies[J]. Annual Review of Earth & Planetary Sciences, 1980, 8(1): 263–301.
- [30] KERRICH R, GOLDFARB R, GROVES D, GARWIN S, JIA Y F. The characteristics, origins, and geodynamic settings of supergiant gold metallogenic provinces[J]. Science in China Series D, 2000, 43(Supp): 1–68.
- [31] 陈衍景. 造山型矿床、成矿模式及找矿潜力[J]. 中国地质, 2006, 33(6): 1181–1196.
CHEN Yan-jin. Orogenic-type deposits and their metallogenic model and exploration potential[J]. Geology in China, 2006, 33(6): 1181–1196.
- [32] CLINE J S, HOFSTRA A A. Ore-fluid evolution at the Getchell Carlin-type gold deposit, Nevada, USA[J]. European Journal of Mineralogy, 2000, 12(1): 195–212.
- [33] 苏文超. 扬子地块西南缘卡林型金矿床成矿流体地球化学研究[D]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 2002.
SU Wen-chao. Geochemical study of ore-forming fluids of Carlin-type gold deposits in southwestern margin of Yangtze Block[D]. Guiyang: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2002.

Characteristic of fluid inclusions and genesis of Liba gold deposit, Gansu Province, China

XIE You-liang^{1,2,3}, SHAO Yong-jun^{1,2}, FENG Yu-zhou^{1,2}, ZHANG Yu^{1,2}, LIU Zhong-fa^{1,2},
LIU Qing-quan^{1,2}, ZHENG Ming-hong^{1,2}, TAN Hua-jie^{1,2}

(1. Key Laboratory of Metallogenetic Prediction of Nonferrous Metals and Geological Environment Monitoring,
Ministry of Education, Central South University, Changsha 410083, China;

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

3. Hunan Huazhong Mining Co., Ltd, Changsha 410083, China)

Abstract: Liba gold deposit is a large deposit, which is located in the east area of Lixian–Minxian metallogenetic belt and ore bodies of which are hosted in NW, EW directional dutile-brittle shear zones. Based on detailed field investigation and indoor identification, mineralization in Liba gold deposit can be divided into hydrothermal period and exogenous period. The hydrothermal stage can be subdivided into pyrite stage(A1) and main stages of mineralization including pyrite-sericite-quartz stage(A2) and polymetallic stage(A3). A comprehensive study, including petrography and microthermometry shows that A1 stage fluid inclusions are dominated by H₂O-solution and minor of CO₂-bearing, pure CO₂ in compositions, with homogenization temperature clustering concentrated in the range from 380 °C to 400 °C, and the salinities concentrated in the range from 5% to 8% NaCl_{eq}. The A2 stage fluid inclusions are dominated by pure CO₂, CO₂-bearing and minor H₂O-solution in composition, with homogenization temperature clustering concentrated in the range from 320 °C to 340 °C, and the salinities concentrated in the range from 8% to 11% NaCl_{eq}. The A3 stage fluid inclusions are dominated by pure CO₂, CO₂-bearing and minor H₂O-solution in composition, with homogenization temperature clustering concentrated in the range from 280 °C to 300 °C, and the salinities concentrated in the range from 2% to 6% NaCl_{eq}. The fluid inclusions are deduced to be trapped at pressure of the range from 95 MPa to 150 MPa, with the largest metallogenetic depth is estimated 5.6 km. Comparative analysis shows that Liba gold deposit accord with carlin type gold deposit in stratoid and lenticular orebody hosted in low metamorphic sedimentary rock, fuzzy boundary between orebody and surrounding rock and fine pyrites, while it accord with orogenic gold deposit, because the fluid inclusion analysis shows that the mineralization fluid is characteristic by CO₂-bearing, medium-high temperature and low salinity. Based on geological and fluid inclusions characteristics, Liba gold deposit is regarded as carlin-like gold deposit.

Key words: fluid inclusion; ore-forming fluid; carlin-like gold deposit; Liba gold deposit; Lixian–Minxian metallogenetic belt

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

Received date: 2017-08-24; **Accepted date:** 2018-03-02

Corresponding author: SHAO Yong-jun; Tel: +86-13973149482; E-mail: shaoyongjun126.com

(编辑 何学锋)