

四川耳泽金矿床成矿流体不混溶的流体包裹体证据

陈 晨,李葆华*,许 龙

(成都理工大学地球科学学院,四川 成都 610059)

[摘 要]木里耳泽金矿床矿体位于上二叠统岗达概组,矿体形态受断裂构造和层间破碎带控制,大多数呈透镜状或脉状。成矿阶段划分为菱铁矿阶段与石英—硫化物—金阶段。矿床中流体包裹体类型分为H₂O包裹体、CO₂包裹体、H₂O—CO₂包裹体,主要分布于石英—硫化物—金阶段。本文主要运用包裹体均一测温法探讨了成矿流体不混溶的热力学条件。H₂O包裹体均一温度为124.6℃~247.6℃,盐度为5.86%~3.06%。H₂O—CO₂包裹体的完全均一温度为179.6℃~296.6℃,部分均一温度为15.6℃~30.6℃,水合物最后融化温度范围为7.5℃~9.1℃,相应的盐度约为1.83%~4.87%。计算的成矿压力为1 010 bar。测试过程中,富H₂O相的H₂O—CO₂包裹体和富CO₂相的H₂O—CO₂包裹体的完全均一温度和压力非常接近,可以证明它们是同一时期捕获的CO₂与NaCl—H₂O不混溶流体包裹体组合。

[关键词]流体包裹体;不混溶流体;金矿床;四川耳泽

[中图分类号]P618.51 **[文献标识码]**A **[文章编号]**1000-5943(2018)02-0125-06

木里耳泽金矿床位于木里县水洛乡。矿区东西长2 200 m,南北宽300~700 m,面积约1.1 km²。前人主要对耳泽金矿床的矿床地质特征(曾道龙,1991;周光明1992)、矿床地球化学(陈彬彬,2009;郑明华等,1983)、矿床成因(李新敏,1989;郑大中,1997)及找矿标志进行了研究,取得了一定的成就,但该矿床流体包裹体的研究较早,测温方法采用爆裂法,但是爆裂法受外界的影响因素较大,从而得到的数据误差可能较大。本文主要是通过流体包裹体岩相学以及均一法显微测温;并结合前人的矿床地球化学等资料来探讨木里耳泽金矿床成矿流体性质及成矿机制。

1 矿床地质特征

矿床位于川西高原,大地构造位置处于松潘—甘孜褶皱带的东南缘。耳泽矿区内出露的地层

主要为下三叠统领麦沟组(T₁l)和上二叠统的岗达概组(P₂g)。下三叠统与上二叠统呈明显的整合过渡关系。下三叠统领麦沟组(T₁l)岩性为白云岩、生物碎屑灰岩。上二叠统的岗达概组(P₂g)岩性为大理岩、凝灰岩。

矿区内的构造主要为此唤背斜及北西向和北东向断裂。此唤背斜形成于印支期,由上二叠统大理岩夹凝灰岩、泥质板岩及下三叠统白云岩组成,轴线经金棚沟—IV号矿体—此唤山一线呈近东西向展布,向东倾伏,西端被麻婆贡河断层所截,两翼地层产状平缓,为基本对称开阔的弧形丘状褶皱。麻婆贡河断裂,走向北西,大致平行麻婆贡河展布,为一顺扭平移断层。干海子断层走向北西,沿断裂带岩石破碎,为逆断层。构造破碎带,呈北西西展布,可能是此唤背斜形成时因岩层上拱所诱导出的张应力造成的。矿区主要矿体分布于此唤背斜近轴部北翼,受走向北西向西向破碎带控制(图1)。

[收稿日期]2018-01-26 **[修回日期]**2018-04-10

[基金项目]国家自然科学基金项目“甘肃干沙河稀土矿床碱性岩浆—流体演化过程研究”(批准号:41372094)。

[作者简介]陈晨(1993—),女,硕士研究生,主要从事流体包裹体学研究。

[通讯作者]李葆华(1960—),男,教授,主要从事矿床学、流体包裹体学研究。

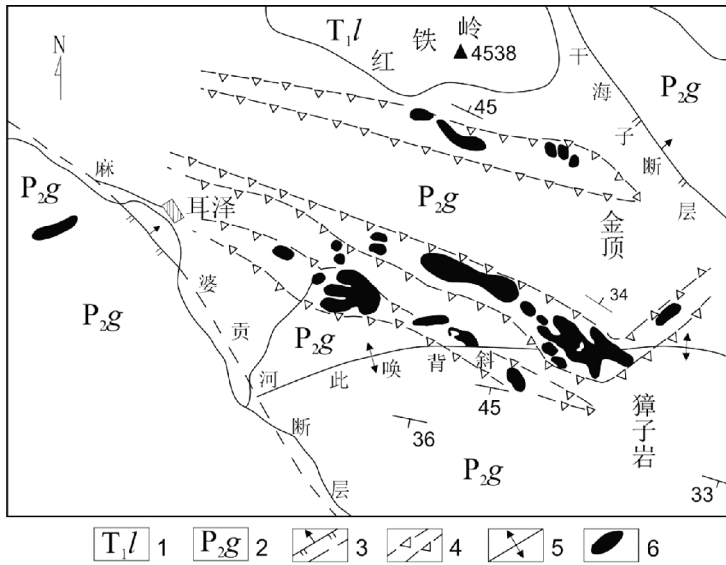


图1 四川木里耳泽金矿床地质略图(郑明华等,1995)

Fig. 1 Geological sketch of Muli Erze gold deposit in Sichuan

1—下三叠统;2—上二叠统;3—断层;4—挤压破碎带;5—背斜;6—金-菱铁矿矿体

耳泽金矿床的矿体位于上二叠统岗达概组上段,矿床内已发现矿体近百个,规模较大的仅10余个。矿区内各种矿体大小不等,矿体明显地受挤压破碎带的控制,其空间产出位置与破碎带的延展方向一致。该矿区的主矿体走向与

矿带方向大体一致,沿北西西-南东东向断续分布,总体北倾。该矿床中的矿体形态复杂,主要有透镜状、脉状、复合型和瘤状等。其中3、4号矿体是矿床内的主矿体,规模最大,控制程度最高。

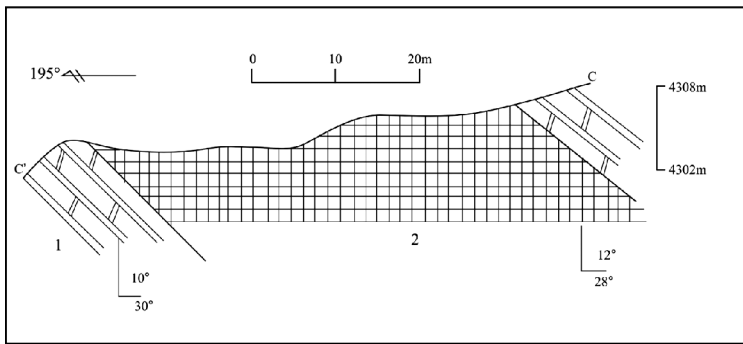


图2 木里耳泽金矿4号矿体剖面图(李新敏等,1989)

Fig. 2 Profile of No. 4 orebody of Muli Erze gold deposit

1—大理岩;2—矿体

矿石结构类型主要有共边结构、包含结构、环带结构、自形晶-它形晶结构等。浸染状、块状、晶洞晶簇状、细脉状、梳状等构造。矿石中金属矿物包括菱铁矿、黄铁矿、黄铜矿、微量自然金、方铅矿、毒砂,非金属矿物包括石英、方解石;自然金主要赋存于黄铁矿、毒砂等矿物的裂纹中、晶粒间,常与黄铁矿、黄铜矿、黝铜矿、石英连生。银金矿常于黝铜矿、黄铁矿等连生,呈不规则粒状、细发丝状、微细脉状产出。

矿床中围岩蚀变作用较弱,蚀变带宽仅数十厘米至数米,且不具分带现象。常见蚀变有黄铁

矿化、硅化、碳酸盐化。

耳泽金矿床可分为原生成矿期和次生氧化期,其中原生成矿期又分为2个阶段: I 菱铁矿阶段主要形成的矿物为菱铁矿,同时伴随着少量的硫化物生成; II 石英-硫化物-金阶段析出的矿物主要为石英和细粒黄铁矿,伴有少量的其他硫化物,并且是该矿床金析出的主要阶段。

2 样品采集与测试方法

流体包裹体研究所用样品全部采于耳泽金矿

床的坑道中,分别代表本矿床原生成矿期菱铁矿阶段和石英—硫化物—金阶段的菱铁矿和石英。其中菱铁矿是矿石中最主要的矿物,占80%~95%,颜色为米黄色、淡黄色、黄灰色,切面多呈它形粒状、菱形,粒径一般为1~5 mm。石英以两种形式出现,一种是石英呈线状或者薄透镜状产出,在菱铁矿中断续分布。另一种是在菱铁矿体的中部或上部,常出现一些大小不等的晶洞,石英即在此种晶洞中形成大小不等的、晶形十分完整的晶体。

显微测温工作在成都理工大学地球科学学院资源勘查系流体包裹体实验室完成,包裹体显微测温所用仪器为 LinkamTHMSG600 冷热台,测温范围为 $-196^{\circ}\text{C}\sim 600^{\circ}\text{C}$,精度为 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$,并利用标准样品对冷台进行了系统校正。包裹体测试过程中,采取变速升温方法,低温下($<31^{\circ}\text{C}$)升温速率为 $2^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$,靠近 CO_2 固相融化温度、水溶液融化温度(冰点)、 CO_2 笼合物融化等温度时速率降为 $0.2^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 。中、高温下($>31^{\circ}\text{C}$),升温速率一般为 $5\sim 10^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$,在相变温度附近时,降为 $0.5\sim 1^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 。

3 包裹体特征

对菱铁矿样品和石英样品中的包裹体进行观察与测温。耳泽金矿床中原生成矿期两个成矿阶

段中均存在大量的包裹体。

菱铁矿阶段菱铁矿中含少量气液 H_2O 包裹体,包裹体的形态多为不规则状,呈孤立状或星散状分布,该类型的包裹体大小较小,约 $2\sim 6\ \mu\text{m}$ 。

石英—硫化物—金阶段石英中的包裹体包括 H_2O 单相包裹体、气液 H_2O 包裹体、 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 包裹体和纯 CO_2 包裹体;液相 H_2O 包裹体相对较少,约占4%,多呈无色;形态多为不规则状,呈孤立或星点状分布。气液 H_2O 包裹体数量最多,约占55%,无色透明,其形态多呈管状、负晶形、椭圆状和不规则状,呈孤立或星点状分布。其中不同形态的包裹体大小有较大的区别,形状规则的包裹体较小,直径约为 $3\sim 40\ \mu\text{m}$,不规则状的包裹体较大,直径约为 $30\sim 160\ \mu\text{m}$ 。气液 H_2O 包裹体中气相所占比例变化不大,一般为3%~7%(图3A)。 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 包裹体在室温下(20°C)按相态分可分为两种三相 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 包裹体和两相 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 包裹体,该类型的包裹体根据 CO_2 所占比例又可分为富 H_2O 相 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 包裹体(图3B)和富 CO_2 相 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 包裹体(图3C)。 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 包裹体较多,约占包裹体总数的35%,其形态多为负晶形型、管状、椭圆状和不规则状,包裹体多呈星点状分布,极少数呈孤立状分布。 CO_2 包裹体也较少,约占包裹体总数的5%。形态多为不规则状,极少数为管状,呈孤立状分布。包裹体一般较大,多为 $40\sim 135\ \mu\text{m}$ (图3D)。

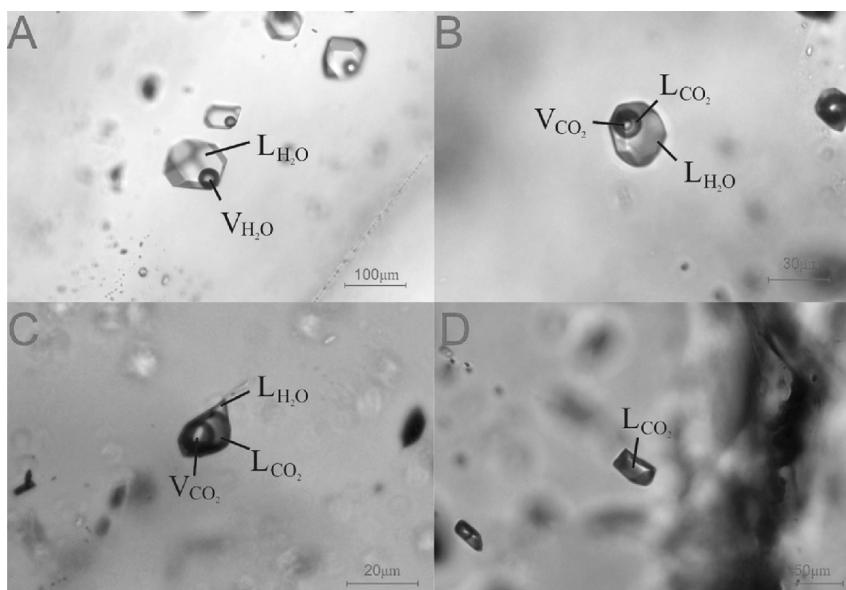


图3 耳泽金矿床中流体包裹体显微照片

Fig. 3 Micro graphs of fluid inclusion in Erze gold deposit

A—气液 H_2O 包裹体;B—富 H_2O 的三相 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 包裹体;C—富 CO_2 的三相 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 包裹体;
D— CO_2 包裹体;L H_2O —液相水;V H_2O —气相水;L CO_2 —液相 CO_2 ;V CO_2 —气相 CO_2

4 流体包裹体显微测温结果

耳泽金矿床的流体包裹体显微测试结果如表1、表3、图4所示。

表1 耳泽金矿床中气液 H₂O 包裹体显微测温结果

Table 1 Microthermometric data of gas-liquid H₂O inclusions of Erze gold deposit

样品编号	主矿物	包裹体类型	完全均一温度/℃	平均值/℃	冰点温度/℃	盐度/wt%NaCl	平均值/wt%NaCl
菱铁矿阶段 E-1	菱铁矿	气液 H ₂ O 包裹体	186 ~ 220	203(2)			
石英 E ₂ -1	石英	气液 H ₂ O 包裹体	181.6 ~ 243.4	206(10)	-2.4 ~ -3.6	4.03 ~ 5.86	4.87(10)
一硫化物 E ₂ -2	石英	气液 H ₂ O 包裹体	124.6 ~ 214.3	170.6(12)	-1.8 ~ -3.4	3.06 ~ 5.56	4.48(12)
一金 E ₃ -1	石英	气液 H ₂ O 包裹体	181.4 ~ 247.6	215.2(5)	-2.0 ~ -3.6	3.39 ~ 5.86	4.56(5)
阶段 E3-2	石英	气液 H ₂ O 包裹体	180.1 ~ 184.6	182.9(6)	-2.9 ~ -3.5	4.80 ~ 5.71	5.51(6)

注:括号内为测试包裹体数量

表2 耳泽金矿床中 H₂O-CO₂ 包裹体显微测温结果

Table 2 Microthermometric data of gas-liquid H₂O-CO₂ inclusions of Erze gold deposit

样品编号	主矿物	包裹体类型	部分均一温度/℃	平均值/℃	完全均一温度/℃	平均值/℃	笼合物熔化温度/℃	盐度/wt%NaCl	平均值/wt%NaCl
E ₂ -1	石英	富 H ₂ O 相 H ₂ O-CO ₂ 三相包裹体	25.9 ~ 30.6	29(5)	209.9 ~ 257.1	232.2(5)	7.5 ~ 9.1	1.83 ~ 4.87	3.1(5)
石英 E ₂ -2	石英	富 H ₂ O 相 H ₂ O-CO ₂ 三相包裹体	26.3 ~ 27.5	26.9(2)	179.6 ~ 207.4	193.5(2)	9.0 ~ 9.1	1.83 ~ 2.03	1.93(2)
一硫化物 E ₃ -1		富 H ₂ O 相 H ₂ O-CO ₂ 三相包裹体	21.2 ~ 30.1	26.9(15)	204.3 ~ 296.6	257.7(15)	7.9 ~ 9.1	1.83 ~ 4.14	2.8(15)
阶段		富 CO ₂ 相 H ₂ O-CO ₂ 三相包裹体	15.6 ~ 28.3	22.0(2)	256.3 ~ 274.2	265.2(2)	7.8 ~ 8.3	3.38 ~ 4.32	3.85(2)

注:括号内为测试包裹体数量

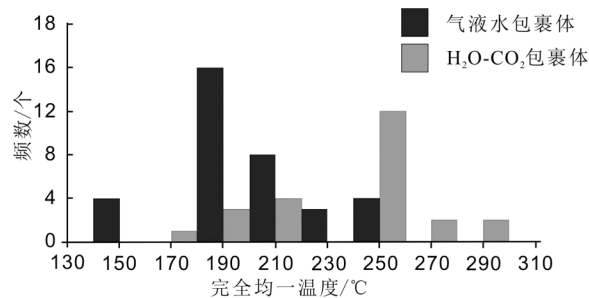


图4 耳泽金矿床流体包裹体均一温度直方图

Fig. 4 Temperature histogram of fluid inclusion in Erze gold deposit

从表中以及图中可以看出:

1) 耳泽金矿床中气液 H₂O 包裹体均一温度为 124.6℃~247.6℃, 主要集中在 170℃~250℃ 之间; H₂O-CO₂ 三相包裹体完全均一温度为 179.6℃~296.6℃, 主要集中在 250℃~270℃,

部分均一温度为 15.6℃~30.6℃, 水合物最后熔化温度范围为 7.5℃~9.1℃, 相应的盐度 ω (NaCl) 约为 1.83%~4.87% (刘斌等, 1999)。

2) 菱铁矿阶段气液 H₂O 包裹体均一温度变化范围为 183℃~220℃, 平均为 203℃。石英一硫化物一金阶段中 H₂O 包裹体均一温度为 124.6℃~247.6℃, 平均为 193.5℃。冰点温度为 -3.6℃~-1.8℃, 相应盐度为 5.86%~3.06% (刘斌等, 1999)。与前人测试结果 (郑明华, 1995; 郑大中, 1997) 基本一致。从菱铁矿阶段到石英一硫化物一金阶段形成温度呈下降趋势。

3) 在石英一硫化物一金阶段的结晶过程中, 内晶形成温度较高, 外晶形成温度较低, 晶体结晶为降温过程。

5 压力计算

四川耳泽金矿床各阶段石英中 H₂O 包裹体、H₂O-CO₂ 包裹体密切共生。在矿床成矿压力研究中广泛应用的一种有效的地质压力计就是 H₂O-CO₂ 包裹体测压法。进行压力测定的方法主要包括容度法(Reodder E, 1980; 李善鹏等, 2003)、图表法(Schwartz M O, 1989)、软件计算法(Brown P E, 1995; Bakker R J, 2003)、迭代法(宋玉财, 2007; 李葆华, 2010)等。本文采用 NaCl-H₂O-CO₂ 体系包裹体均一压力的计算方法(李葆华, 2010)进行了均一压力的计算。结果表明耳泽金矿床包裹体的均一压力范围为 803.5 ~ 1 143.5 bar, 平均值为 956.9 bar。

耳泽金矿床石英中 H₂O 包裹体和 CO₂ 包裹

体密切共生, 在研究这一类的共生包裹体时, 首先测定 H₂O 包裹体的冰点温度、均一相态和均一温度, 测定 CO₂ 包裹体的均一温度和均一相态, 再用 NaCl-H₂O 体系等容式(刘斌, 1999)和 CO₂ 的状态方程(郑大中, 1997)联合求出成矿形成时的压力和温度:

$$P = A_1 + A_2 \cdot (T - 273.15),$$

$$P = \frac{R \cdot T}{V - b} - \frac{a(T)}{\sqrt{T} \cdot V(V + b)},$$

式中: P 为压力, bar; T 为温度, K; V 为 CO₂ 的摩尔体积; A_1 、 A_2 、 $a(T)$ 、 b 为常数。将上述数据代入以上方程式可得出温度与压力的一组数据(表 3, 图 5)。从图 5 中可知气液 H₂O 包裹体和 CO₂ 包裹体共同捕获的压力约为 1010 bar, 捕获时的温度约为 310°C。

表 3 耳泽金矿床石英中 CO₂ 包裹体和 H₂O 包裹体等容式的温度-压力关系表

Table 3 Relation between temperature and pressure of CO₂ inclusion and H₂O inclusion in quartz of Erze gold deposit

温度(°C)	100	150	200	250	300	350
CO ₂ 包裹体(bar)	297.6	486.1	667.0	842.2	1 013.0	1 180.2
气液 H ₂ O 包裹体(bar)				229.7	947.2	1 664.5

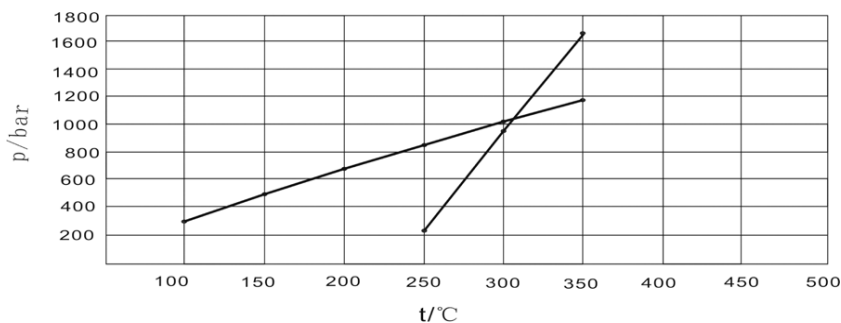


图 5 耳泽金矿床石英中 CO₂ 包裹体和 H₂O 包裹体等容式的温度-压力关系图

Fig. 5 Temperature-pressure relation of CO₂ and H₂O inclusion in quartz of Erze gold deposit

6 讨论

某一体系中具有两种或更多种流体相相互组合而共存的现象称为流体的不混溶。自然界中存在着许多不混溶的过程, 包括基性岩浆和酸性岩浆之间、岩浆与热液、岩浆与 CO₂、盐水溶液与 CO₂ 等(卢焕章, 2004)。判别 H₂O-CO₂ 体系不混溶流体包裹体组合的方法(刘斌, 1999)为: (1) 包裹体的产状相同、成因类型一致, 为共生包裹体; (2) 具有两种相态; 不同包裹体中相态充填度各不相同, 一种相态富含一种组分; 组合中从富含

一种组分到富含另一种组分, 其不同相态体积比的包裹体同时存在, 有时构成一个连续变化系列; (3) 测定均一温度过程中, 两种包裹体的均一方式不同: 富某一组分相态的包裹体通过这一组分相态体积扩大, 另一组分相态体积缩小, 最终消失而均一; 富另一组分相态的包裹体通过另一组分相态扩大而使第一组分的相态缩小直至消失而均一; (4) 热力学数值计算, 比较完全均一温度, $\Delta t = |t_{\text{h富CO}_2} - t_{\text{h富H}_2\text{O}}| / t_{\text{h富CO}_2} < 0.1$; 再比较均一压力, $\Delta p = |p_{\text{h富CO}_2} - p_{\text{h富H}_2\text{O}}| / p_{\text{h富CO}_2} < 0.1$ 。

四川耳泽金矿床中 H₂O 包裹体、H₂O-CO₂ 包裹体、CO₂ 包裹体广泛密切共生, 显示出它们是

由流体不混溶作用形成的。富 H₂O 相的 H₂O-CO₂ 包裹体和富 CO₂ 相的 H₂O-CO₂ 包裹体在加热时均一方式有所不同,富 H₂O 相的 H₂O-CO₂ 包裹体升温时 CO₂ 相的体积逐渐缩小,最后均一成 H₂O 相;富 CO₂ 相的 H₂O-CO₂ 包裹体升温时,CO₂ 相的体积逐渐扩大,最终均一成 CO₂ 相。富 H₂O 相 H₂O-CO₂ 包裹体完全均一温度为 245.4℃;富 CO₂ 相 H₂O-CO₂ 包裹体为 265.2℃, $\Delta t = |265.2 - 245.4| / 265.2 = 0.03 < 0.1$;富 H₂O 相的 H₂O-CO₂ 和富 CO₂ 相的 H₂O-CO₂ 的包裹体均一压力比较, $\Delta p = |894 - 956| / 894 = 0.069 < 0.1$,两者相差较小。进一步的判断它们为同一条件下捕获的不混溶流体包裹体组合。

根据耳泽金矿床氢氧同位素的测定结果(周光明,1992;郑明华,1995),测定数据投点大部分落于岩浆水和变质水区之外,且氧同位素表现出具有与岩石交换后的大气降水特征,说明了含矿热液来源于大气降水。大气降水沿破碎带和裂隙以及围岩中的其他通道下渗,在深部受热流值的影响取得热量,并在此过程中不断地溶滤围岩中的成矿组分而成为含矿热水溶液(卢武长,1986;郑明华,1995)。

当含矿流体温度逐渐升高,密度不断降低,在达到一定深度时,热流体回返上升,环流到北西西向构造破碎带中,突然降低的压力致使 CO₂ 在成矿溶液中的溶解度减小,流体中的 CO₂ 挥发组分分离,造成流体发生相的分离,造成了流体的不混溶从而分离出富 CO₂ 的流体和富 H₂O 的流体。Au 沉淀的主要机制可能是 CO₂ 的溶离作用使 Au 在成矿流体中的溶解度降低,因而导致了金的沉淀(张德会,1997),并在有利的构造部位卸载并富集形成金矿床。

7 结论

(1)耳泽金矿床中的流体包裹体数量多,形态多样,主要有 H₂O 包裹体、H₂O-CO₂ 包裹体、CO₂ 包裹体 3 种类型。它们是同时期捕获的 CO₂ 与 NaCl-H₂O 不混溶流体包裹体组合。

(2)富 H₂O 相 H₂O-CO₂ 包裹体与富 CO₂ 相 H₂O-CO₂ 包裹体的完全均一温度以及压力一致,

表明低盐度的成矿流体发生了不混溶,致使流体的 pH 值升高、氧逸度降低,因而可能导致 Au 在成矿流体中的溶解度降低并在有利的构造部位卸载并富集形成金矿床。

(3)根据共生的 H₂O 包裹体和 CO₂ 包裹体而计算的成矿温度为 310℃,成矿压力为 1 010 bar。

[参考文献]

Bakker R J. 2003. Package fluids: 1. Computer programs for analysis of fluid inclusion data and for modeling bulk fluid properties [J]. *Chemical Geology*, 194(1/2/3): 3-23.

Brown P E, Hagemann S G. 1995. MacFlincor and its application to fluids in Archean lode-gold deposits [J]. *Geochemica et Cosmochimica Acta*, 59: 3943-3952.

Reodder E, Bodnar R J. 1980. Geologic pressure determinations from fluid inclusion studies [J]. *Ann Rev Earth Planet Sci*, (8): 263-301.

Schwartz M O. 1989. Determining phase volumes of mixed CO₂-H₂O inclusions using microthermometric measurements [J]. *Mineralium Deposita*, 24: 43-47.

陈彬彬. 2009 木里耳泽微细浸染型金矿的地质特征与成矿规律研究 [D]. 桂林理工大学, 1-60.

李葆华, 顾雪祥, 付绍洪, 等. 2010. 贵州水银洞矿床成矿流体不混溶的包裹体证据 [J]. *地质前缘*, 17(2): 286-295.

李善鹏, 邱楠生, 尹长河. 2003. 利用流体包裹体研究沉积盆地古压力 [J]. *矿产与地质*, 17(2): 161-165.

李新敏, 李开元, 等. 1989. 四川木里耳泽金矿床矿床地质特征、成矿条件及找矿初步研究 [R]. 成都: 四川省地质矿产局.

刘斌, 沈坤. 1999. 流体包裹体热力学 [M]. 北京: 地质出版社.

卢焕章, 范宏瑞, 倪培, 等. 2004. 流体包裹体 [M]. 北京: 科学出版社.

卢武长. 1986. 稳定同位素地球化学 [M]. 成都: 成都地质学院.

宋玉财, 胡文瑄, 倪培, 等. 2007. 含 CO₂ 盐水流体包裹体摩尔体积和组分求解新方法 [J]. *中国科学: D 辑*, 37(3): 363-369.

曾道龙. 1991. 四川金矿成矿地质条件及分布规律的初步研究 [J]. *黄金地质科技*, (2): 33-41.

张德会. 1997. 成矿流体中金的沉淀机理研究述评 [J]. *矿物岩石*, 17(4): 122-130.

郑大中. 1997. 四川木里耳泽金矿的成矿机制新探 [J]. *黄金*, 18(8): 8-10.

郑明华, 阳正熙, 顾雪祥. 1995. 四川木里耳泽岩溶型金矿床形成条件和成矿机制 [J]. *地质科学*, 30(4): 364-373.

郑明华, 张斌, 张占鳌, 等. 1983. 我国金矿床类型的初步划分 [J]. *成都地质学院学报*, (1): 27-42.

周光明, 张新润. 1992. 耳泽古溶洞中的菱铁矿-铁帽型金矿床的地质特征 [J]. *矿物岩石*, 2: 45-49.