

张锦让,温汉捷,邹志超.滇西北兰坪盆地金满脉状铜矿床成矿流体特征及其成矿意义.吉林大学学报(地球科学版),2017,47(3):706-718. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.201703106.

Zhang Jinrang, Wen Hanjie, Zou Zhichao. Ore-Forming Fluid Characteristics of the Jinman Vein-Type Copper Deposits in the Western Lanping Basin and Its Metallogenic Significance. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2017, 47(3):706-718. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.201703106.

## 滇西北兰坪盆地金满脉状铜矿床成矿 流体特征及其成矿意义

张锦让<sup>1,2</sup>, 温汉捷<sup>2</sup>, 邹志超<sup>3</sup>

1. 中国地质调查局成都地质调查中心, 成都 610081
2. 中国科学院地球化学研究所, 贵阳 550002
3. 成都理工大学地球科学学院, 成都 610059

**摘要:**滇西北兰坪盆地西缘发育大量沉积岩容矿脉状铜多金属矿床,矿体的分布受逆冲推覆系统控制,金满其中储量最大、品位最高的铜矿床。成矿过程可分为 3 个阶段:成矿前(不含矿化石英-铁白云石脉)、主成矿阶段(含铜硫化物石英脉)、晚成矿阶段(少硫化物方解石+石英脉)。流体包裹体岩相学和显微测温结果表明:成矿前和主成矿期石英中流体包裹体特征变化不大,成矿前和主成矿期石英中均存在 3 种类型的包裹体,以水溶液包裹体为主,含 CO<sub>2</sub> 水溶液包裹体次之,富 CO<sub>2</sub> 包裹体较少出现。含 CO<sub>2</sub> 水溶液包裹体测温结果也差别不大,均一温度都集中在 240±320 °C,盐度( $w(\text{NaCl})$ )集中在 1%~4%。水溶液包裹体均一温度变化也不大,集中在 160~230 °C,明显低于含 CO<sub>2</sub> 水溶液包裹体;盐度却存在较大的变化,主成矿期盐度变化范围明显较大,且峰值高于成矿前。晚成矿阶段则仅出现水溶液包裹体,均一温度和盐度都明显降低,均一温度集中在 120±185 °C,盐度集中在 1.4%~9.3%。结合其他证据,笔者认为金满铜矿床包含两种不同性质的流体:深源流体,以中高温、中低盐度、富含 CO<sub>2</sub> 为特征;盆地卤水,以中低温、中高盐度、贫 CO<sub>2</sub> 为特征。成矿过程中未发生明显的沸腾和相分离作用,深源流体和盆地卤水的混合可能是导致 Cu 等成矿元素沉淀的重要机制。

**关键词:**成矿流体;沉积岩容矿脉状铜矿床;金满脉状铜矿床;兰坪盆地

doi:10.13278/j.cnki.jjuese.201703106

中图分类号:P618.41

文献标志码:A

### Ore-Forming Fluid Characteristics of the Jinman Vein-Type Copper Deposits in the Western Lanping Basin and Its Metallogenic Significance

Zhang Jinrang<sup>1,2</sup>, Wen Hanjie<sup>2</sup>, Zou Zhichao<sup>3</sup>

1. Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu 610081, China
2. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China
3. College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

收稿日期:2016-11-26

作者简介:张锦让(1985—),男,副研究员,主要从事矿床地球化学方面的研究,E-mail:zhangjinrang123@163.com

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(41403038,41403036);中国地质调查局地质调查项目(121201010000150016)

Supported by National Natural Science Foundation for Young Scientists of China (41403038,41403036) and Geological Survey Projects of China Geological Survey(121201010000150016)

**Abstract:** A large number of sediment-hosted vein-type copper deposits controlled by a thrust-nappe system have been discovered in the west part of the Lanping basin, among which, the Jinman deposit is the largest in tonnage scale and with the highest Cu grade. The mineralization process of this deposit can be divided into three stages, including the early stage (pre-ore quartz-ankerite vein stage), the major stage (massive polymetallic sulphide-quartz vein stage), and the late stage (carbonate-quartz stage). The detailed studies of fluid inclusions distinguishes three types of fluid inclusions dominated by aqueous water in both pre-ore and syn-ore quartz from the Jinman deposit, including aqueous water, CO<sub>2</sub>-bearing, and pure CO<sub>2</sub> inclusions. There is no obvious difference between pre-ore and syn-ore quartz in terms of the type of fluid inclusions and microthermometric parameters of their CO<sub>2</sub>-bearing inclusions. The homogenization temperatures of CO<sub>2</sub>-bearing inclusions in both pre-ore and syn-ore quartz vary from 217 to 334 °C (peak at 240320 °C), with corresponding salinities ranging from 1% to 4%. The homogenization temperatures of aqueous inclusions in both pre-ore and syn-ore quartz vary from 143 °C to 239 °C (peak at 160230 °C), much lower than those of CO<sub>2</sub>-bearing inclusions. However, the salinities of aqueous inclusions show significant difference between pre-ore (3.1%18.0%) and syn-ore quartz (4.1%22.8%). Quartz-calcite vein in the late mineralizing stage only have aqueous inclusions, with homogenization temperature of 120185 °C, and salinities of 1.4%9.3%. The fluid inclusion characteristics, together with other evidence, indicate that (1) there are two fluid systems responsible for Cu mineralization in the Jinman deposit one is deep crustal fluids, characterized by high CO<sub>2</sub> content and relatively low salinities, and the other is basin brine, characterized by relatively high salinities and low temperatures. (2) The fluid mixing, without boiling or phase separation, might be the major precipitation mechanism.

**Key words:** ore-forming fluid; sediment-hosted vein-type copper deposits; Jinman vein-type copper deposit; Lanping basin

## 0 引言

“三江”中段兰坪盆地是一个典型的中—新生代陆内盆地,在大地构造上属环特提斯构造域,是中国著名的三江构造带中一个重要组成部分<sup>[1-5]</sup>。盆地中北部广泛发育一系列喜马拉雅期沉积岩容矿Pb、Zn、Cu等贱金属矿床,包括中国最大的金顶Pb-Zn矿床、河西—三山Cu-Ag-Co多金属矿化区、盆地西缘的Cu多金属矿化带等<sup>[2]</sup>。兰坪盆地西缘存在一系列脉状铜矿床(金满、连城等一系列铜矿床/点),这些矿床显著区别于世界已知的各类沉积岩容矿的贱金属矿床(多为Pb-Zn矿脉,独立的Cu矿脉比较少见),显示出独特的成矿特征<sup>[2-7]</sup>。金满铜矿床位于盆地西缘铜多金属矿化带上,是兰坪盆地储量最大、品位最高的脉状铜矿床<sup>[2, 7-10]</sup>。

金满铜矿床和盆地内普遍存在的Pb-Zn矿床在矿体产出形态、流体包裹体特征、同位素特征及成矿时代上都存在较大的差异<sup>[5, 11-15]</sup>。有关金满铜矿床成矿流体研究,前人开展了大量深入研究,亦取得

了很多的进展,然而,对金满铜矿床成矿流体性质的认识分歧仍较大,争论主要集中在盆地流体<sup>[2, 9, 16-17]</sup>和与深部作用(隐伏岩浆活动、深部变质作用,甚至幔源流体活动)有关的流体上<sup>[14, 18-19]</sup>。成矿流体性质认识的分歧,导致矿床成因亦存在很大争议,如改造成矿<sup>[9, 20]</sup>、喷流(热水)沉积矿床<sup>[14, 21]</sup>和造山型铜矿床<sup>[2]</sup>。近年来的研究发现,金满铜矿床主成矿期石英脉中存在大量富CO<sub>2</sub>流体包裹体,这在整个兰坪盆地是具有十分特殊性的,不属于典型的盆地流体系统<sup>[14, 22-26]</sup>。富CO<sub>2</sub>包裹体的大量发现,为解决金满铜矿床成矿流体性质的争论提供了一个理想窗口。

本文在充分收集和总结前人成果的基础上,对金满铜矿床各成矿阶段石英/方解石样品进行了详细的岩相学观察和显微测温工作,探讨了金满铜矿床成矿流体的性质、来源及演化,同时深入探讨了本矿床Cu等成矿元素的沉淀机制,以期对认识金满铜矿床成因提供新的资料。

## 1 成矿地质背景

兰坪盆地是一个典型的中—新生代陆内盆地,大地构造上处于特提斯与环太平洋两大巨型构造域的结合部位,位于阿尔卑斯—喜马拉雅巨型构造带东段弧形转弯处(即青藏高原东缘),受到印度板块和欧亚板块相互作用的影响,地质构造活动复杂。滇西“三江”地区包括怒江、澜沧江和金沙江—哀牢山 3 条板块缝合线,兰坪盆地是处在澜沧江与金沙江—哀牢山缝合线之间的一个微板块,即昌都—思茅微板块,其东侧与扬子板块相接,西侧与藏滇板块毗邻<sup>[1, 19]</sup>。以盆地东、西边缘金沙江—哀牢山断裂和澜沧江断裂及盆地中轴断裂为主的盆地断裂系统控制了盆地的构造演化。

兰坪盆地内部主要出露中—新生界,古生界仅在盆地边缘有少量出露<sup>[13, 15]</sup>。兰坪盆地的新生代岩浆岩多分布于盆地的边缘,其最显著的特点是受澜沧江和金沙江—哀牢山等断裂控制<sup>[2, 7]</sup>。盆地内部只在南部永平、巍山一带出露有水云、卓潘、莲花山等碱性岩体,岩体的成岩年龄为 6823 Ma<sup>[1, 27-28]</sup>。虽然张成江等<sup>[27]</sup>根据航磁资料、重力测量及遥感资料,曾推测兰坪盆地中北部沿兰坪—思茅断裂存在一巨大的隐伏岩浆系统,但盆地中北部至今没有新生代岩浆活动的报道。

兰坪盆地自形成以来,经历了复杂的构造演化过程,主要经历了特提斯、印度—亚洲碰撞两大构造演化事件,形成特提斯、碰撞造山两大成矿系统<sup>[1-2, 29]</sup>。受印度—亚洲大陆对接碰撞(始于 65 Ma 左右)的影响,盆地两侧的中生代地层作为构造岩片,由盆地两侧向中央推进,推覆于古近系之上,形成近平行的东、西两大逆冲推覆构造系统,在盆地内形成一系列的推覆体和飞来峰,控制着盆地内 Pb-Zn-Ag-Cu 多金属矿床的分布(图 1)<sup>[2, 30-31]</sup>。东部逆冲推覆构造控制了盆地东缘的 Pb-Zn-Ag-Cu 多金属矿床,主要包括金顶 Pb-Zn 矿床、河西—三山 Pb-Zn-Ag-Cu 多金属成矿带及一系列小型 Pb-Zn 矿床(点);西部逆冲推覆构造则控制了盆地西缘的 Cu-Ag(Pb-Zn)多金属矿床,主要包括白秧坪、富隆厂、金满、连城、科登润等 Cu 多金属矿床。

## 2 矿床地质特征

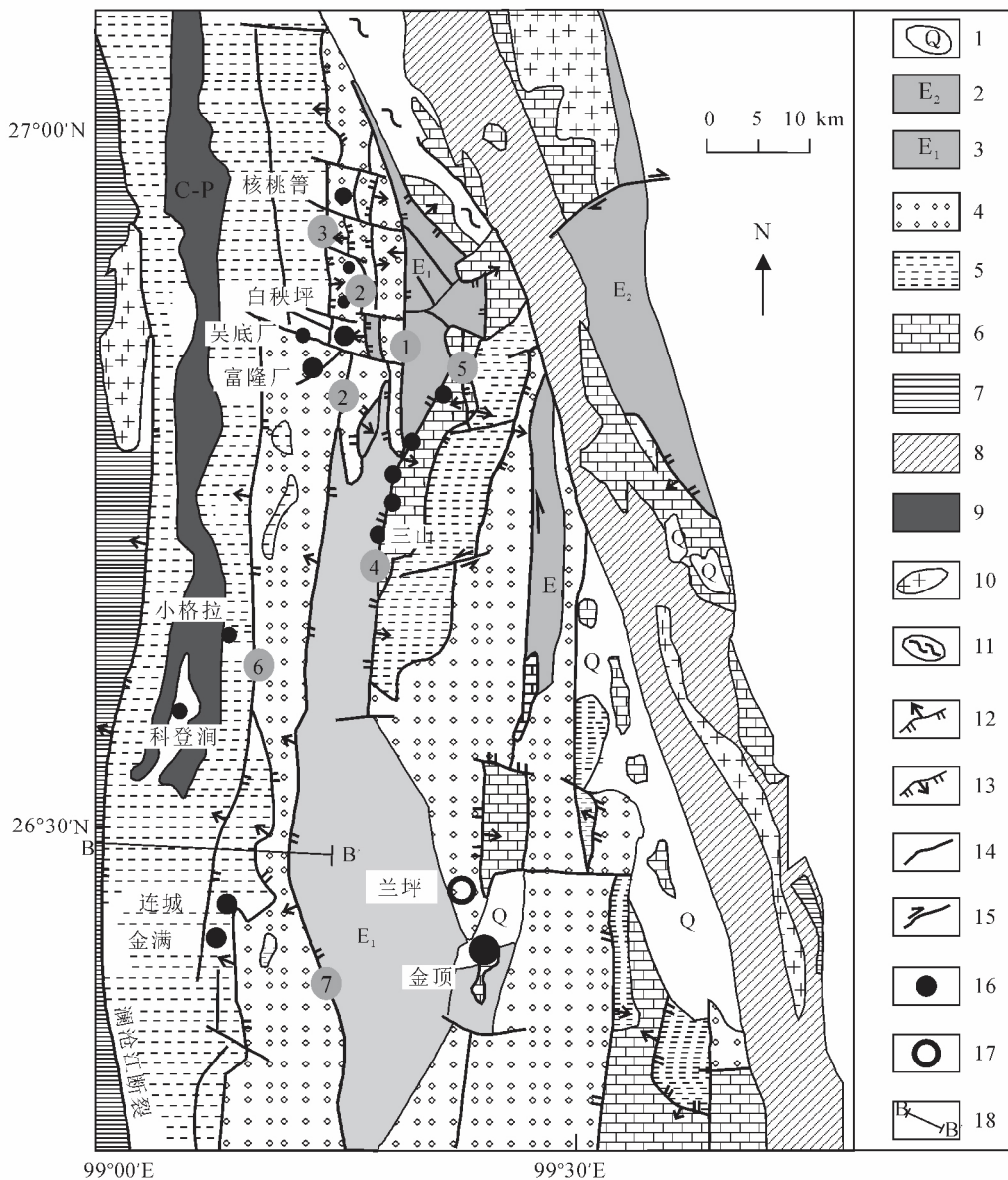
金满铜矿床紧靠澜沧江深大断裂,是西矿带规模最大的、品位最高的 Cu 矿床,拥有产量大于 20

万 t 的 Cu,平均品位为 2.6%<sup>[3, 9]</sup>。矿区内断裂和褶皱非常发育,主要构造为金满—连城复式倒转背斜,背斜轴向为 NNE 向,并伴有一系列近 SN 向、倾向 W 的逆断层(图 2)<sup>[2]</sup>。矿区广泛出露有中侏罗统花开佐组( $J_2h$ )和上侏罗统坝注路组( $J_3b$ )。花开佐组为浅绿灰色、灰白色长石石英砂岩夹绢云母板岩、钙质板岩,局部夹白云岩,为矿区主要赋矿层位;上侏罗统坝注路组主要为紫红色绢云母板岩夹数层薄至中厚层砂岩<sup>[9-10]</sup>。

矿体主要产出在中侏罗统花开佐组中,特别是花开佐组上段( $J_2h_2$ )。矿体主要分布在次级背斜的层间破碎带和轴部附近的张裂隙中<sup>[2, 9]</sup>。按照矿体的产出特征可将其大致分为两类:一类产于花开佐组上段上部( $J_2h_2^2$ )与下部( $J_2h_2^1$ )之间砂岩与泥岩接触界面及其附近的层间断裂破碎带中,其规模大、品位高、稳定性好,呈带状、似层状或大脉状产出,如 I 号主矿体(图 2b)<sup>[9]</sup>。I 号主矿体长 1 350 m,厚 115 m,平均厚度 8.2 m,延深 350 m,走向北东 25°,倾向北西,倾角为 70°85°,局部直立或微弱倒转,金属铜的品位为 0.65%12.02%,平均品位 2.58%,平均含银 21.9 g/t。另一类赋存于花开佐组上段上部砂岩或砂岩夹泥岩的裂隙、断裂或劈理带中,呈脉状,主矿体以外的所有矿体均赋存于该部位。该类矿体的规模较小、品位低、稳定性差,也称为细脉型矿体。

矿床围岩蚀变以中低温蚀变类型为主,主要有硅化、方解石化、重晶石化和菱铁矿化等,主要形成硅化岩石及大量含矿石英脉、方解石脉,这些脉体厚度变化较大,几毫米到几十厘米均有出现(图 3a、b、c)。矿石矿物主要以黝铜矿、砷黝铜矿、黄铜矿、斑铜矿、辉锑矿等铜、锑硫化物为主;脉石矿物有重晶石、石英、方解石、铁白云石等。矿石构造多为浸染状、块状、角砾状、脉状、网脉状等。结构以充填、交代及半自形粒状结构为主,有的矿石中还出现生物结构,如黄铁矿、黄铜矿和斑铜矿的草莓结构和木质结构<sup>[9, 32]</sup>。

据矿床矿化形式、矿物共生组合和矿脉穿插关系,金满铜矿床成矿作用可分为成矿前、主成矿期、成矿后 3 个阶段。3 个阶段的矿物组合(图 3)分别是:1)石英+铁白云石+少量黄铜矿+黝铜矿+少量黄铁矿;2)主成矿期石英+方解石+大量黄铜矿、斑铜矿、黝铜矿+少量砷黄铁矿;3)成矿后石英+方



1.第四系沉积物;2.始新统砂岩、泥岩;3.古新统砂岩;4.白垩系砂岩、粉砂岩;5.侏罗系泥岩、砂岩;6.三叠系碎屑岩、灰岩;7.中—上三叠统泥页岩;8.三叠系变质岩;9.石炭系—二叠系安山岩、玄武质安山岩;10.岩浆岩;11.雪龙山变质岩;12.逆断层;13.正断层;14.断层(性质不明);15.走滑断层;16.矿床;17.城镇;18.剖面。①匡底断裂;②四十里箐断裂;③富隆厂断裂;④华昌山断裂;⑤水磨房断裂;⑥营盘断裂;⑦大山箐断裂。据文献[2]修改。

图 1 兰坪盆地中北部地质特征及矿产分布图

Fig.1 Geological map showing geology and distribution of main deposits in middle-northern Lanping basin

解石+少量黄铜矿、斑铜矿、铜蓝及黄铁矿<sup>[13]</sup>。成矿后的表生氧化作用形成了褐铁矿、铜蓝等次生矿物。

### 3 典型矿床流体包裹体地球化学

系统采集了金满铜矿床成矿流体包裹体研究样品 30 余件。将各成矿阶段样品磨制成厚度约为 0.1 mm 双面剖光的薄片进行岩相学和流体包裹体

观察,然后挑选有代表性的包裹体样品进行显微测温 and 激光拉曼光谱分析。流体包裹体的测温工作在中国科学院矿床地球化学国家重点实验室的流体包裹体室完成,测试仪器为 Linkam THMSG 600 型冷热台,测温范围为 -196-600 °C,冷冻数据(50 °C 以下)和加热数据(100 °C 以上)精度分别为 ±0.2 °C 和 ±2 °C<sup>[33]</sup>。单个包裹体的激光拉曼探针成分分

析在中国科学院矿床地球化学国家重点实验室的激光拉曼光谱实验室完成,测试仪器为 Renishaw 公司生产的 InVia Reflex 型显微共焦激光拉曼光谱仪,光源为 Spectra-Physics 氩离子激光器,波长 514 nm,激光功率 20 mW,空间分辨率为 12  $\mu\text{m}$ ,积分时间一般为 30 s,局部测试积分时间适当延长,1004 000  $\text{cm}^{-1}$  全波段一次取谱。

### 3.1 流体包裹体岩相学

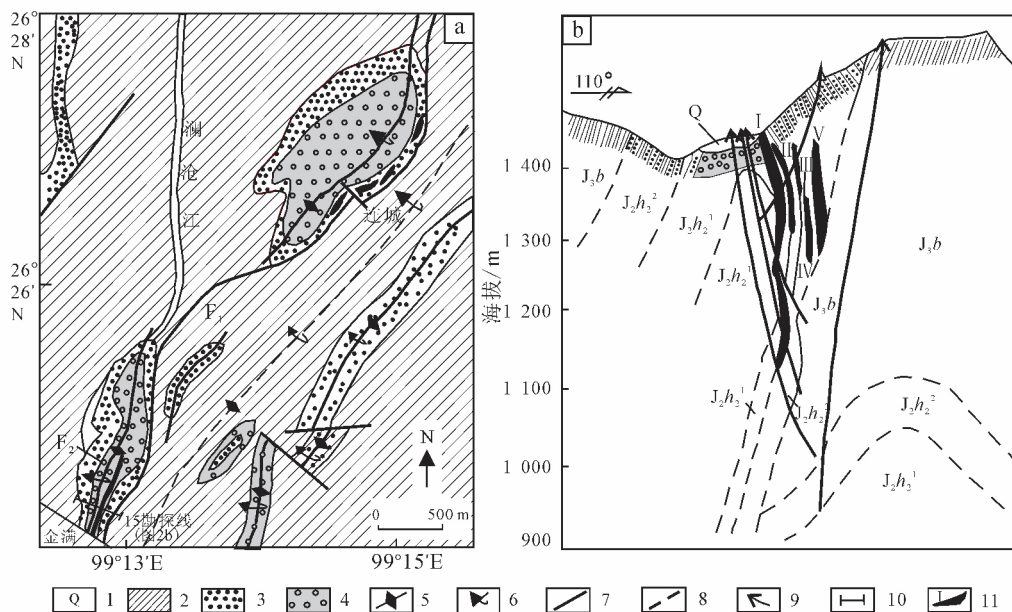
金满铜矿床不同阶段石英/方解石脉中存在大量的包裹体,既有原生成因,又有次生成因。次生包裹体多沿矿物裂隙成线状分布,形态多不规则,本次研究中予以剔除。

根据流体包裹体在室温下的相态特征和气相组成,可将流体包裹体划分为 3 种主要类型:1)水溶液包裹体(A型),成矿各阶段均有出现,包裹体大小变化较大,直径为 640  $\mu\text{m}$ ,形态多样,常见的有椭圆形、负晶形和不规则形等。其在室温下由气液两相构成,气液比多集中在 10%~20% (图 4a、b、c、d、e、f)。2)含  $\text{CO}_2$  水溶液包裹体(B型),此类包裹体主要出现在金满铜矿床的早中阶段,直径为 635  $\mu\text{m}$ ,多呈椭圆状和负晶形,包裹体多孤立分布,少数在硫

化物周围密集成群分布。按室温下包裹体相数,这类包裹体可以分为三相型(B-1)和两相型(B-2)。包裹体中  $\text{CO}_2$  相( $\text{L}_{\text{CO}_2} + \text{V}_{\text{CO}_2}$ )所占比例差别较大,可变化于 20%~70% (图 4b、d)。3)富/纯  $\text{CO}_2$  包裹体(C型),包裹体只出现  $\text{CO}_2$  相,水溶液相不可见或极少。此类包裹体也主要出现在金满矿床的早中阶段,个体为 1036  $\mu\text{m}$ ,多呈椭圆状和负晶形,多呈孤立状分布(图 4a、c)。金满铜矿床成矿前和主成矿期石英脉中发育有 A、B、C 型 3 类包裹体,以 A 型包裹体为主、B 型包裹体次之、C 型包裹体偶有出现(图 4a、b、c、d);成矿后石英/方解石主要发育有 A 型包裹体,多沿方解石解理生长,B 型和 C 型包裹体极少出现(图 4e、f)。

### 3.2 流体包裹体显微测温结果

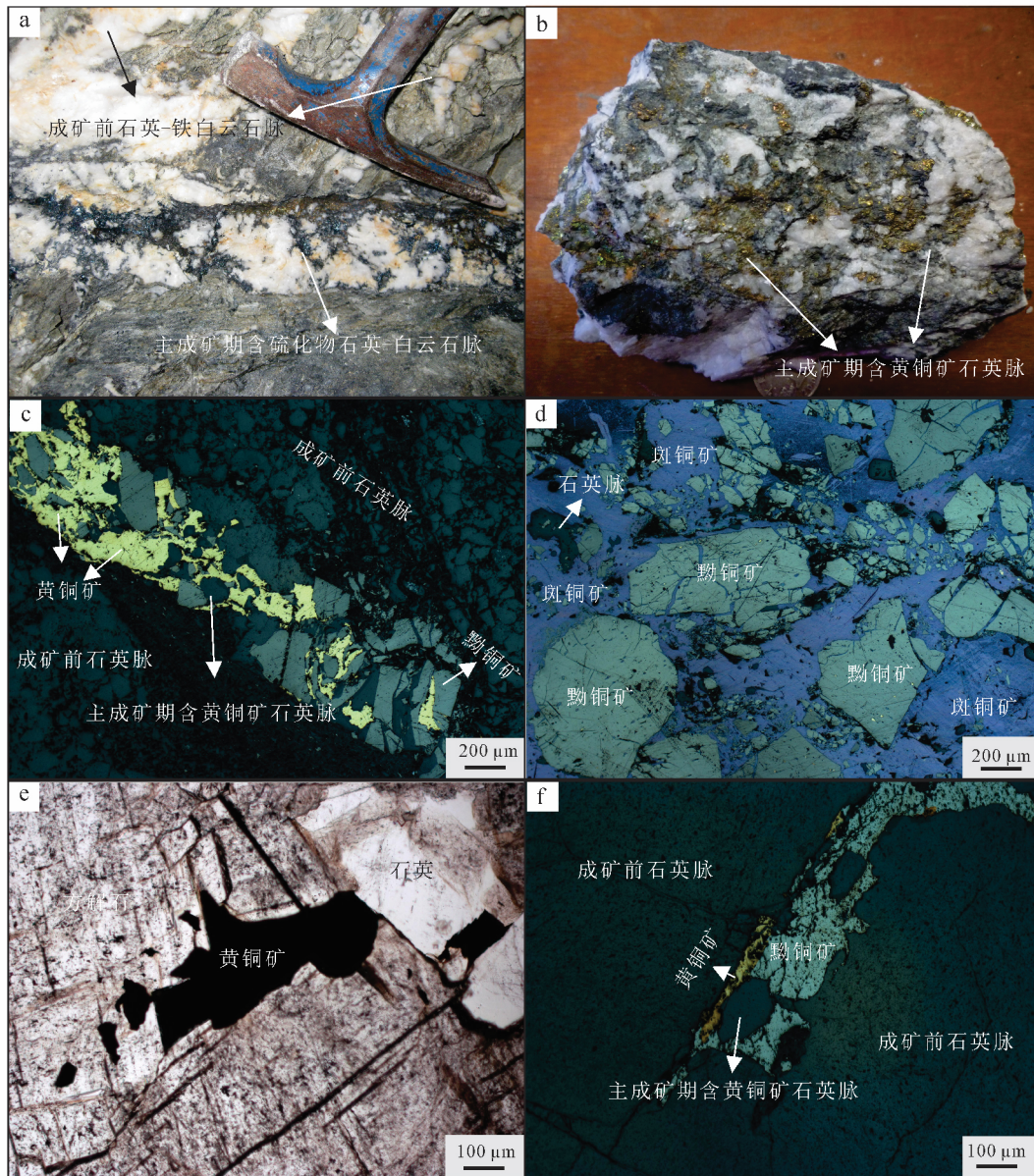
在对流体包裹体进行详细的岩相学观察和包裹体分类的基础上,选择具代表性的流体包裹体开展显微测温工作。通过对包裹体的冷冻、回温和加热,测得固体  $\text{CO}_2$  熔化温度( $T_{\text{m, CO}_2}$ )、冰点温度( $T_{\text{m, ice}}$ )、 $\text{CO}_2$  笼合物完全熔化温度( $T_{\text{m, cla}}$ )、部分均一温度( $T_{\text{h, CO}_2}$ )以及完全均一温度( $T_{\text{h}}$ )。



1.第四系沉积物;2.上侏罗统坝注路组( $J_3b$ )绢云母板岩;3.中侏罗统花开佐组上段上部( $J_2h_2^2$ )砂岩;4.花开佐组上段下部( $J_2h_2^1$ )钙质板岩;5.背斜轴部;6.倒转地层;7.断层;8.推测断层;9.钻孔;10.勘探线;11.矿体及编号。据文献[9]修编。

图 2 金满-连城矿床地质简图(a)和金满矿区 15 线勘探剖面图(b)

Fig.2 Geologic map of the Jinman and Liancheng deposits (a) and a cross-section through the orebody of the Jinman deposit (b)



a.主成矿期硫化物石英-白云石脉切割早期石英-铁白云石脉;b.含黄铜矿石英脉;c.含黄铜矿石英脉充填在早期碎裂状石英脉中;d.斑铜矿交代早期黝铜矿石英脉;e.黄铜矿沿方解石裂隙充填;f.主成矿期硫化物石英脉切割早阶段不含矿石英脉。

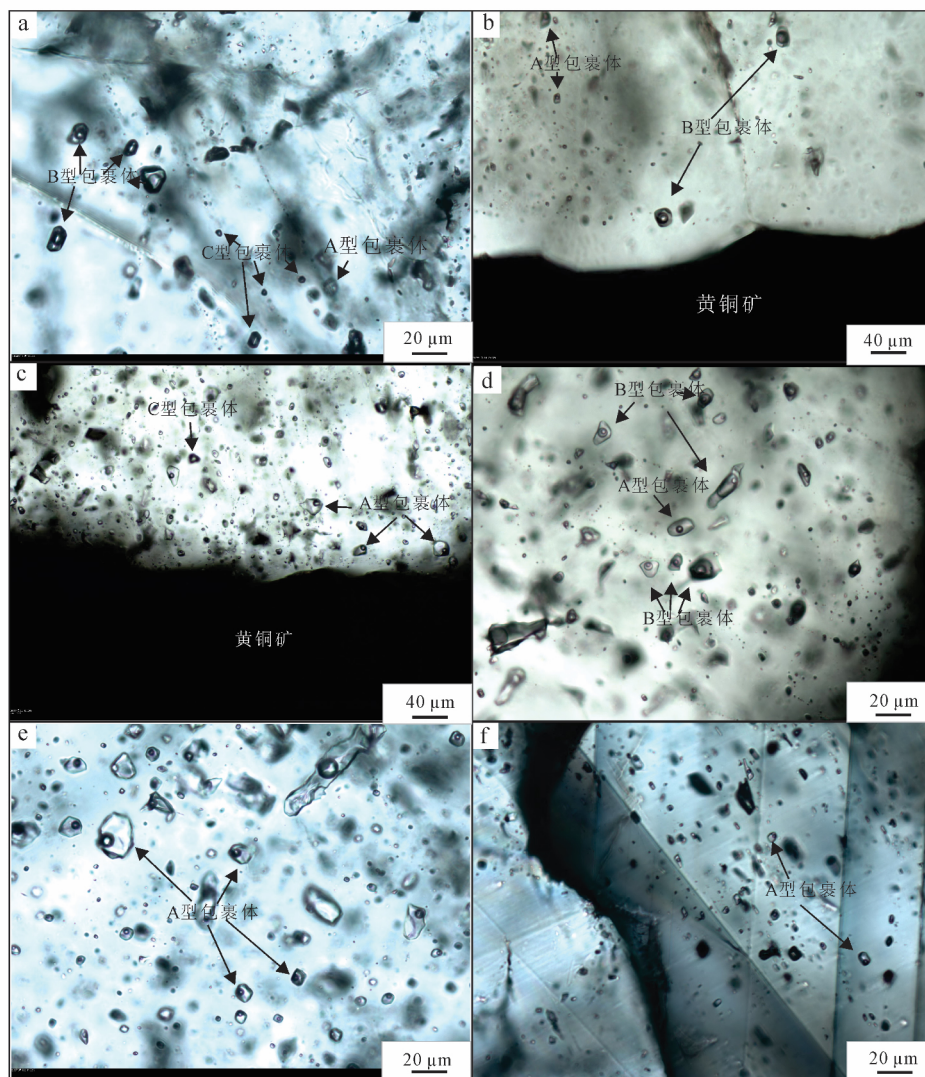
图 3 金满铜矿床矿物组合手标本及镜下照片

Fig.3 Scanned pictures of ores and photomicrographs showing relationships of hydrothermal minerals in the Jinman copper deposits

对于水溶液包裹体,根据测得的冰点温度,在 Bodnar<sup>[34]</sup>冰点与盐度关系表上就可以查得其盐度;含 CO<sub>2</sub> 水溶液包裹体的盐度计算,则是根据 Roedder<sup>[34]</sup>给出的笼合物熔化温度和盐度关系表中查得。本次,笔者在前人数据的基础上,重点对该矿床成矿早中阶段石英中流体包裹体进行了较系统的测温工作,各阶段显微测温结果简要列于表 1。

各阶段测温情况分述如下:

1)成矿前石英脉中存在 3 种类型的包裹体,以水溶液包裹体为主,其次是含 CO<sub>2</sub> 水溶液包裹体,纯/富 CO<sub>2</sub> 包裹体偶有出现。含 CO<sub>2</sub> 水溶液包裹体可以分为三相型(B-1)和两相型(B-2)。实验测得固相 CO<sub>2</sub> 的熔化温度为 -57.1—56.8 °C,与纯 CO<sub>2</sub> 的三相点温度(-56.6 °C)<sup>[34]</sup>基本相同,表明此类包裹体气相组成基本为 CO<sub>2</sub>,其他挥发组分的加入不明显。



a. 水溶液包裹体(A型)、含 $\text{CO}_2$ 水溶液包裹体(B型)和少量富 $\text{CO}_2$ 包裹体(C型)分布在石英颗粒中; b. 水溶液包裹体(A型)与含 $\text{CO}_2$ 水溶液包裹体共存于与黄铜矿密切共生的石英颗粒中; c. 水溶液包裹体和少量富 $\text{CO}_2$ 包裹体(C型)分布在与黄铜矿密切共生的石英颗粒中; d. 含 $\text{CO}_2$ 水溶液包裹体和少量水溶液包裹体分布在石英颗粒中; e. 水溶液包裹体(A型)群体生长在成矿晚期石英颗粒中; f. 成矿晚期方解石中群状分布的水溶液包裹体(A型)。

图 4 金满铜矿床脉石矿物中包裹体照片

Fig.4 Photomicrographs of fluid inclusion at 25 °C in the Jinman deposit

表 1 兰坪盆地金满铜矿床流体包裹体显微测温数据

Table 1 Fluid inclusion types and microthermometric data in the Jinman deposit

寄主矿物	包裹体类型	$T_{m,\text{CO}_2}/^\circ\text{C}$	$T_{m,\text{cla}}/^\circ\text{C}$	$T_{h,\text{CO}_2}/^\circ\text{C}$	$T_h/^\circ\text{C}$	$T_{m,\text{ice}}/^\circ\text{C}$	$w(\text{NaCl})/\%$
成矿前石英	A型				143236	-14.3-1.8	3.118.0
	B型	-57.1-56.8	7.89.6	21.830.1	224334		0.84.3
	C型			20.829.7			
主成矿期石英	A型				116239	-20.5-2.3	4.122.8
	B型	-57.8-56.7	7.69.8	22.130.1	217327		0.44.6
	C型			21.829.6			
成矿后石英/方解石	A型				120185	-6.1-0.8	1.49.3

CO<sub>2</sub> 笼合物熔化温度为 7.89.6 °C,对应的盐度为 0.8%4.3%(表 1)。CO<sub>2</sub> 部分均一温度为 21.830.1 °C,大部分均一到液相;完全均一温度为 224334 °C。

水溶液包裹体冷冻法测得冰点温度为 -14.3-1.8 °C,对应的盐度为 3.1%18.0%;包裹体大多完全均一至液相,完全均一温度为 143236 °C。冷冻回温过程中,少数包裹体显示较低的共结点温度(-37-28 °C),表明成矿流体可能存在别的流体体系参与。

2)主成矿期石英脉中也存在 3 种类型的包裹体,但含 CO<sub>2</sub> 水溶液包裹体和富 CO<sub>2</sub> 包裹体明显减少,以水溶液包裹体为主。

水溶液包裹体冷冻法测得冰点温度为 -20.5-2.3 °C,对应的盐度为 4.1%22.8%;包裹体多均一至液相,完全均一温度为 116239 °C。与成矿前石英脉相比,水溶液包裹体均一温度变化不明显,但盐度的分布范围明显变大。

含 CO<sub>2</sub> 水溶液包裹体亦可分为三相型(B-1)和两相型(B-2)。实验测得固相 CO<sub>2</sub> 的熔化温度为 -57.8-56.7 °C,表明此类包裹体气相组成基本为

CO<sub>2</sub>。显微测温结果表明,CO<sub>2</sub> 笼合物熔化温度为 7.69.8 °C,对应的盐度为 0.4%4.6%。CO<sub>2</sub> 部分均一温度为 22.130.1 °C,大部分均一到液相;完全均一温度为 217327 °C。与成矿前石英脉相比,含 CO<sub>2</sub> 水溶液包裹体显微测温数据变化不明显。

3)成矿后的石英/方解石脉中仅发育有水溶液包裹体,多呈气液两相,含 CO<sub>2</sub> 包裹体鲜有出现。流体包裹体完全均一温度为 120185 °C,多在 150 °C 左右,对应的盐度为 1.4%9.3%,包裹体密度为 0.920.97 g/cm<sup>3</sup>[9]。

测温结果(图 5)表明,随着成矿作用的进行,各阶段脉石中流体包裹体特征表现出一定的变化规律。从早阶段到中阶段(图 4、5):流体包裹体类型变化不大,成矿前和主成矿期石英中均存在 3 种类型的包裹体,以水溶液包裹体为主,含 CO<sub>2</sub> 水溶液包裹体次之,纯 CO<sub>2</sub> 包裹体较少出现;含 CO<sub>2</sub> 水溶液包裹体测温数据变化不大,均一温度都集中在 2 40 320 °C,盐度集中在 1% 4%;水溶液包裹体

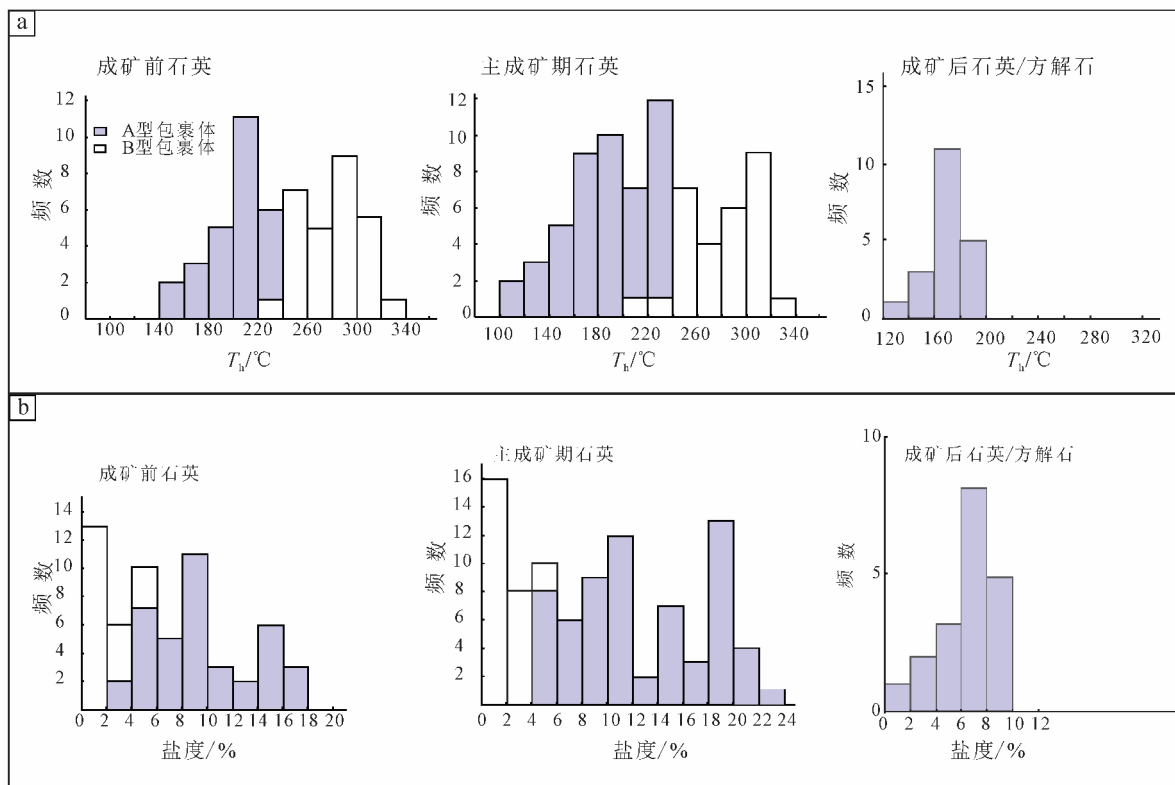


图 5 金满铜矿床流体包裹体均一温度及盐度图解

Fig.5 Histograms of microthermometric data of fluid inclusions from the Jinman Cu deposit



均一温度变化也不大,集中在 160230 °C,明显低于含 CO<sub>2</sub>水溶液包裹体。盐度存在较大的变化,主成矿期盐度变化范围明显较大,且峰值高于成矿前。从主成矿阶段到晚阶段均一温度和盐度则都明显降低,显示出大气降水的特点。

## 4 讨论

### 4.1 成矿流体特征、来源及指示意义

前人曾对兰坪盆地 Pb-Zn 多金属矿床的成矿流体特征进行过一些研究,积累了大量的数据。兰坪盆地 Pb-Zn 多金属矿床成矿流体整体是一种中低温(集中在 100250 °C)、中高盐(集中在 10.0%~18.0%)、贫 CO<sub>2</sub>的流体,结合 C、H、O 等同位素的特征表明,成矿流体主要是源于大气降水的盆地卤水体系<sup>[2-3, 5, 9, 35-37]</sup>。

金满脉状铜矿床流体包裹体研究表明,成矿流体整体上是一种中高温、中低盐度、极富 CO<sub>2</sub>的流体。成矿早、中阶段,出现大量富 CO<sub>2</sub>包裹体,这在整个兰坪盆地是十分罕见的,不属于典型的盆地流体系统。尽管单从流体成分还不能具体确定金满脉状铜矿床中富 CO<sub>2</sub>流体的来源<sup>[14, 26, 38]</sup>,但至少可以确定不大可能是大气降水主导的盆地流体,不属于典型的盆地流体系统<sup>[14, 26, 38-39]</sup>。

研究表明,这种富 CO<sub>2</sub>流体常见于造山型矿床和与岩浆岩有关的矿床中<sup>[14, 22-26, 38-42]</sup>。关于这种富 CO<sub>2</sub>流体,一般认为有以下几种可能的来源:幔源流体、下地壳中高级变质流体、岩浆热液或碳酸盐地层的分解<sup>[14, 22-26, 33, 38-42]</sup>。金满铜矿床除接触带附近较小的范围内发生了接触变质作用外,其他地区均未发生强烈的变质作用,事实上整个兰坪盆地自其形成以来,都没发生过强烈的变质作用,盆地内亦没有同期变质岩的出露,因此区内这种富含 CO<sub>2</sub>的成矿流体是变质成因的可能性较小。前人对 H、O 的研究表明<sup>[3, 9, 13, 18, 43]</sup>,金满铜矿床成矿流体的 δD 值为 -110‰ - 51‰,对应的流体 δ<sup>18</sup>O 值为 2.2‰~9.5‰,显示出岩浆水/变质水和大气降水混合的特征。金满铜矿床主成矿期硫化物的 He、Ar 同位素的研究表明,根部带成矿流体主要为地壳流体和饱和大气水的混合,没有明显的地幔流体成分混入<sup>[43]</sup>,从而有效地排除了地幔流体作为这种富 CO<sub>2</sub>流体主要来源的可能。同时,王光辉<sup>[10]</sup>通过对盆地西缘铜矿床矿石矿物铅同位素组成、盆地上地壳沉积岩铅及盆地上地幔的铅同位素组成的对比研究,也指出

盆地西缘铜矿床成矿过程中无地幔物质的加入。金满矿床的 δ<sup>34</sup>S 值变化较大,为 -17.9‰~16.3‰,整体上呈现出零值附近的塔式分布<sup>[1, 3, 9-10, 13, 18-19]</sup>。前人对该矿床硫同位素组成的地质解释存在很大的分歧,考虑到 δS 值零值附近的塔式分布的特征, Ji 等<sup>[18]</sup>和赵海滨<sup>[13]</sup>认为主要是深部地幔/岩浆来源;李峰<sup>[9]</sup>则认为硫化物 δD 值变化较大,应代表多种硫源混合的结果。综合 S 同位素和成矿流体特征,赵海滨<sup>[13]</sup>认为金满铜矿床中 S 主要为深源硫,同时有盆地围岩地层硫的加入,从而导致其硫化物具有跨度极大的 δS 值。

另外,兰坪盆地边缘发育有大量喜马拉雅期碱性岩体,形成时代为 6823 Ma(长石、云母、锆石和全岩的 K-Ar、Rb-Sr、U-Pb 年龄),盆地内部在南部永平、巍山一带也出露有少量碱性岩体,这些岩体的成岩年龄为 5523 Ma<sup>[1, 27-28]</sup>,这与金满铜矿床的成矿时代(5648 Ma)十分一致,二者显示出一定的内在联系。虽然盆地中北部至今尚无岩浆活动的报道,但张成江等<sup>[27]</sup>及薛春纪等<sup>[1]</sup>都曾推测盆地中北部应该存在一个巨大的隐伏岩浆系统。综合流体包裹体特征及 H、O、S、He、Ar 同位素的研究,笔者推测金满铜矿床中高温、中低盐度、富 CO<sub>2</sub>的流体可能与盆地隐伏壳源岩浆活动有关,但目前仍缺乏直接证据,尚需进一步探讨。同时,也不能排除富 CO<sub>2</sub>流体是来源于盆地基底变质岩系局部发生动力变质作用而形成的变质流体的可能性<sup>[2, 5]</sup>,故笔者将这种富 CO<sub>2</sub>的流体称为深源流体,但它应该可以作为在兰坪盆地内寻找脉状铜矿床的标志之一。

显然金满铜矿床成矿流体又与典型的岩浆热液(高温、高盐度、富 CO<sub>2</sub>)不同,成矿早、中阶段石英脉中主要包括 A 型、B 型包裹体,且局部可见 A 型、B 型和 C 型包裹体密切共生,A 型均一温度集中在 160230 °C,B 型含 CO<sub>2</sub>水溶液包裹体集中在 240320 °C,两类包裹体均一温度数据几乎没有重叠区域。在均一温度-盐度图解(图 6)中,A 型包裹体表现为中低温、中高盐度;B 型包裹体则刚好相反,表现为中高温、极低盐度(集中在 3%以内),这一现象较难用流体的不混溶作用来解释(沸腾作用),而应该是低盐度、中高温、富 CO<sub>2</sub>流体和中高盐度、中低温、贫 CO<sub>2</sub>流体混合的结果<sup>[14, 25, 38-39]</sup>。考虑到兰坪盆地广泛发育有中低温、高盐度的盆地卤水系统,我们推测这种中高盐度 NaCl-H<sub>2</sub>O 流体可能与盆地广泛存在的盆地流体系统有关,而和富 CO<sub>2</sub>流体不存在

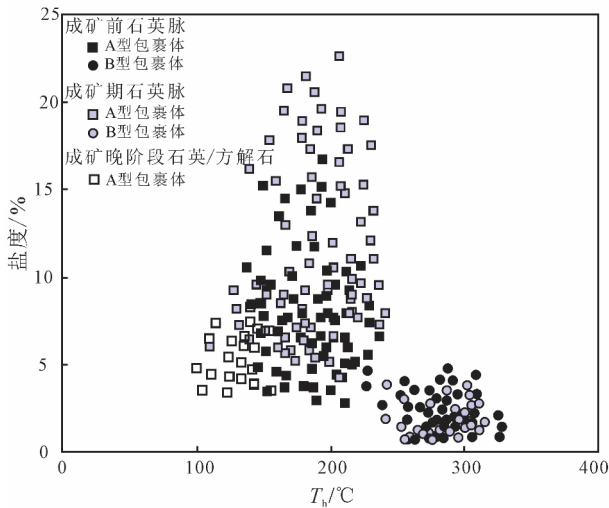


图6 金满铜矿床流体包裹体均一温度-盐度图解

Fig.6 Plot of homogenisation temperature vs. salinity in the Jinman copper deposit

成因上的联系。

综上,金满脉状铜矿床成矿过程中主要存在2种性质流体参与:深源流体(中高温、低盐度、富CO<sub>2</sub>流体),在整个兰坪盆地相对罕见,可能是盆地内部寻找中高温矿床的标志之一;2盆地卤水(中低温、中高盐度、贫CO<sub>2</sub>流体),相当于兰坪盆地成矿作用的背景流体。

#### 4.2 成矿流体演化及矿质沉淀机制

金属从各种流体中沉淀形成矿床的机制历来是矿床学研究的重要问题,也是当前成矿流体地球化学研究的热点。卢焕章<sup>[38]</sup>指出,单纯的冷却可能不是矿质沉淀的最有效机制,压力降低也并不一定引起矿物溶解度减小与沉淀。近年来,成矿流体的沸腾和混合机制对成矿物质沉淀的意义正越来越为人们所认识<sup>[14-15, 22, 24, 26, 38, 42]</sup>。

综合前面对流体包裹体的研究,并结合前人工作,认为金满脉状铜矿床中流体的不混溶现象不明显,成矿前和主成矿期石英中虽然也存在3类包裹体密切共生的现象,但A型和B型包裹体均一温度存在一个系统的差别,代表两种不同成因的流体(浅源盆地卤水和深源流体)。在均一温度-盐度图解(图6)中,A型和B型包裹体数据具有一定的相关性,两者呈缓倾的斜曲线,斜率为负值。这种变化趋势反映了浅源盆地卤水(中低温、中高盐度、贫CO<sub>2</sub>流体)和深源流体(中高温、低盐度、富CO<sub>2</sub>流体)发生了混合作用<sup>[38-40]</sup>。

据此,我们推测金满脉状铜矿床主要的成矿机制是向上运移的深源流体与向下运移的盆地卤水的混合(图7),深源流体可能沿深大断裂向上运移,浅源盆地卤水可能源于向下的大气降水和地层建造水,两种流体的混合导致成矿流体物理化学性质的改变,进而导致了部分矿质的沉淀。这个模式能够很好地解释为什么该矿床成矿前和主成矿期石英中水溶液包裹体和含CO<sub>2</sub>包裹体常常共生在一起,并没有明显的相互穿插关系,应该是同一期的捕获的产物;但两类包裹体的均一温度却存在明显的差别,又表现出应是从两种无成因联系的流体中捕获的。同时,也能较好地解释金满铜的 $\delta^{34}\text{S}$ 值跨度极大,但又整体上呈现出零值附近塔式分布的特征。另外,李峰和甫为民<sup>[9]</sup>都曾指出,晚期较多大气降水沿裂隙渗入与成矿流体发生了混合,同样导致成矿流体物理化学性质的改变,进而导致了部分矿质的沉淀。

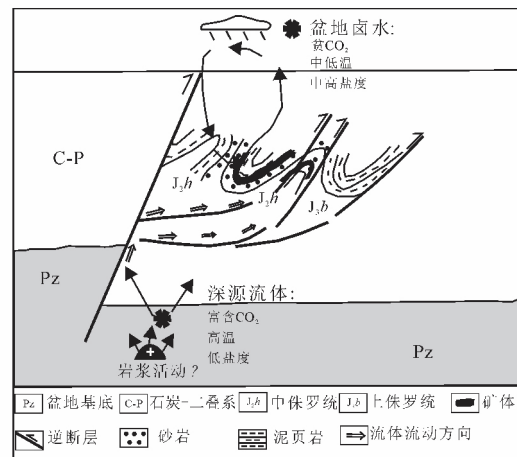


图7 金满铜矿床成矿作用示意图

Fig. 7 Schematic diagrams indicating a possible mineralization model for the Jinman copper deposit

## 5 结论

1)金满脉状铜矿床成矿前和主成矿期石英中均存在3种类型的包裹体:以水溶液包裹体为主、含CO<sub>2</sub>水溶液包裹体次之、纯CO<sub>2</sub>包裹体较少出现。含CO<sub>2</sub>水溶液包裹体测温数据变化不大,均一温度都集中在240-320℃,盐度集中在1%-4%;水溶液包裹体均一温度变化也不大,集中在160-230℃,明显低于含CO<sub>2</sub>水溶液包裹体;盐度却存在较大的变

化,主成矿期盐度变化范围明显较大,且峰值高于成矿前。晚成矿阶段则仅出现水溶液包裹体,均一温度和盐度则都明显降低,均一温度都集中在 120185℃,盐度集中在 1.4%~9.3%。

2)金满脉状铜矿床包含 2 种不同性质的流体:

①深源流体,以中高温、中低盐度、富含 CO<sub>2</sub> 为特征;②盆地卤水,以中低温、中高盐度、贫 CO<sub>2</sub> 为特征。

3)综合流体包裹体地球化学的研究成果,并结合前人关于成矿元素分带特征和同位素方面的研究,认为金满脉状铜矿床成矿过程中未发生明显的沸腾和相分离作用,深源流体和盆地卤水的混合可能是导致 Cu 等成矿元素沉淀的重要机制。另外,成矿晚期可能存在大气降水的参与。

致谢:在云南野外地质考察期间,三江铜业相关人士给予了大力支持,在此表示衷心感谢。

#### 参考文献(References):

- [1] 薛春纪,陈毓川,杨建民,等. 滇西兰坪盆地构造体制和成矿背景分析[J]. 矿床地质,2002,21(1): 36-44.  
Xue Chunji, Chen Yuchuan, Yang Jianmin, et al. Analysis of Ore-Forming Background and Tectonic System of Lanping Basin, Western Yunnan Province [J]. Mineral Deposits, 2002, 21(1): 36-44.
- [2] 侯增谦,宋玉财,李政,等. 青藏高原碰撞造山带 Pb-Zn-Ag 矿床新类型:成矿基本特征与构造控矿模型[J]. 矿床地质,2008,27(2): 123-144.  
Hou Zengqian, Song Yucai, Li Zheng, et al. Thrust-Controlled, Sediments-Hosted Pb-Zn-Ag-Cu Deposits in Eastern and Northern Margins of Tibetan Orogenic Belt: Geological Features and Tectonic Model [J]. Mineral Deposits, 2008, 27(2): 123-144.
- [3] He Longqing, Song Yucai, Chen Kaixu, et al. Thrust-Controlled, Sediment-Hosted, Himalayan Zn-Pb-Cu-Ag Deposits in the Lanping Foreland Fold Belt, Eastern Margin of Tibetan Plateau [J]. Ore Geology Reviews, 2009, 36: 106-132.
- [4] 邓军,侯增谦,莫宣学,等. 三江特提斯复合造山与成矿作用[J]. 矿床地质,2010, 29(1): 37-42.  
Deng Jun, Hou Zengqian, Mo Xuanxue, et al. Super Imposed Ore Genesis and Metallogenesis in Sanjiang Tethys [J]. Mineral Deposits, 2010, 29(1): 37-42.
- [5] 宋玉财,侯增谦,杨天南,等. 三江喜马拉雅期沉积岩容矿贱金属矿床基本特征与成因类型[J]. 岩石矿物学杂志,2011, 30(3): 355-380.  
Song Yucai, Hou Zengqian, Yang Tiannan, et al. Sediment Hosted Himalayan Base Metal Deposits in Sanjiang Region: Characteristics and Genetic Types [J]. Acta Petrol Mineral, 2011, 30(3): 355-380.
- [6] Misra K C. Understanding Mineral Deposits [M]. London: Kluwer Academic Publishers, 2000.
- [7] 侯增谦,潘桂棠,王安建,等. 青藏高原碰撞造山带: II:晚碰撞转换成矿作用[J]. 矿床地质,2006, 25(5): 521-543.  
Hou Zengqian, Pan Guitang, Wang Anjian, et al. Metallogenesis in Tibetan Collisional Orogenic Belt: II: Mineralization in Late-Collisional Transformation Setting [J]. Mineral Deposits, 2006, 25(5): 521-543.
- [8] 何明勤,刘家军,李朝阳. 兰坪盆地铅锌铜大型矿集区的流体成矿作用机制:以白秧坪铜钴多金属地区为例[M]. 北京:地质出版社,2004.  
He Mingqin, Liu Jiajun, Li Chaoyang. Mechanism of Ore-Forming Fluids of the Lanping Pb-Zn-Cu Polymetallic Mineralized Concentration Area: An Example Study on the Baiyangping Ore District [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2004.
- [9] 李峰,甫为民. 滇西红层铜矿地质[M]. 昆明:云南大学出版社,2000.  
Li Feng, Fu Weimin. Geology of Red Bed Copper Deposits in Western Yunnan [M]. Kunming: Yunnan University Press, 2000.
- [10] 王光辉. 滇西兰坪盆地金满—连城脉状铜矿床成因研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2010.  
Wang Guanghui. The Genetic Model of Liancheng-Jinman Vein-Type Copper in the Lanping Basin, Yunman Province [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2010.
- [11] 胡瑞忠,钟宏,叶造军,等. 金顶超大型铅-锌矿床氦、氩同位素地球化学[J]. 中国科学: D 辑, 1998, 28(3): 208-213.  
Hu Ruizhong, Zhong Hong, Ye Zaojun, et al. Helium and Argon Isotopic Geochemistry of Jinding Superlarge Pb-Zn Deposit [J]. Science China: Series D, 1998, 28(3): 208-213.
- [12] 薛春纪,陈毓川,杨建民,等. 滇西北兰坪铅锌铜银矿田含烃富 CO<sub>2</sub> 成矿流体及其地质意义[J]. 地质学报, 2002, 76(2): 244-253.  
Xue Chunji, Chen Yuchuan, Yang Jianmin, et al. The CO<sub>2</sub>-Rich and Hydrocarbon-Bearing Ore-Forming Fluid and Their Metallogenic Role in the Lanping Pb-Zn-Ag-Cu Ore Field, North-Western Yunan [J]. Acta Geological Sinica, 2002, 76(2):

- 244-253.
- [13] 赵海滨. 滇西兰坪盆地中北部铜多金属矿床成矿地质特征及地质条件[D].北京:中国地质大学,2006.  
Zhao Haibin. Study on the Characteristics and Metallogenic Conditions of Copper-Polymetallic Deposits in Middle-Northern Lanping Basin, Western Yunnan [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2006.
- [14] Chi Guoxiang, Xue Chunji. Abundance of CO<sub>2</sub>-Rich Fluid Inclusions in a Sedimentary Basin-Hosted Cu Deposit at Jinman, Yunnan, China; Implications for Mineralization Environment and Classification of the Deposit [J]. *Mineralium Deposita*, 2011, 46: 365-380.
- [15] Xue Chunji, Zeng Rong, Liu Shuwen, et al. Geologic, Fluid Inclusion and Isotopic Characteristics of the Jinding Zn-Pb Deposit, Western Yunnan, South China; A Review [J]. *Ore Geology Reviews*, 2007, 31: 337-359.
- [16] 刘家军,李朝阳,潘家永,等. 兰坪—思茅盆地砂页岩中铜矿床同位素地球化学[J]. *矿床地质*, 2000, 19(3): 223-234.  
Liu Jiajun, Li Chaoyang, Pan Jiayong, et al. Isotopic Geochemistry of Copper Deposits from Sandstone and Shale of Lanping-Simao Basin, Western Yunan [J]. *Mineral Deposits*, 2000, 19(3): 223-234.
- [17] 吴南平,蒋少涌,廖启林,等. 云南兰坪—思茅盆地脉状铜矿床铅、硫同位素地球化学与成矿物质来源研究[J]. *岩石学报*, 2003, 19(4): 799-807.  
Wu Nanping, Jiang Shaoyong, Liao Qilin, et al. Lead and Sulfur Isotope Geochemistry and the Ore Sources of the Vein-Type Copper Deposit in Lanping-Simao Basin, Yunan province [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2003, 19(4): 799-807.
- [18] Ji Hongbing, Li Chaoyang. Geochemistry of Jinman Copper Vein Deposit, West Yunnan Province, China: II: Fluid Inclusion and Stable Isotope Geochemical Characteristics [J]. *Chinese J Geochemy*, 1998, 17(1): 81-90.
- [19] 阙梅英,程敦模,张立生,等. 兰坪—思茅盆地铜矿床[M].北京:地质出版社,1998.  
Que Meiyong, Cheng Dunmo, Zhang Lisheng, et al. Copper Deposits in Lanping-Simao Basin [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998.
- [20] 何明勤,宋焕斌,冉崇英,等. 云南兰坪金满脉状铜矿床改造成因的证据[J]. *地质与勘探*, 1998, 34(2): 13-15.  
He Mingqin, Song Huanbin, Ran Congying, et al. Evidence for Transformed Genesis of the Jinman Copper Deposit in Lanping [J]. *Geology and Prospecting*, 1998, 34(2): 13-15.
- [21] 颜文,李朝阳. 一种新类型铜矿床的地球化学特征及其热水沉积成因[J]. *地球化学*, 1997, 26(1): 54-63.  
Yan Wen, Li Chaoyang. Geochemical Characteristics and Hydrothermal Sedimentary Genesis of a New Type of Copper Deposits [J]. *Geochimica*, 1997, 26(1): 54-63.
- [22] Phillips G N, Powell J K. Link Between Gold Provinces [J]. *Economic Geology*, 1993, 88: 1084-1098.
- [23] Rosenbaum J M, Zindler A, Rubenstone J L. Mantle Fluids: Evidence from Fluid Inclusions [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1996, 60: 3229-3252.
- [24] Diamond L W. Review of the Systematics of CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O Fluid Inclusions [J]. *Lithos*, 2001, 55: 69-99.
- [25] Wilkinson J J. Fluid Inclusions in Hydrothermal Ore Deposits [J]. *Lithos*, 2001, 55: 229-272.
- [26] 陈衍景,倪培,范宏瑞,等. 不同类型热液金矿系统的流体包裹体特征[J]. *岩石学报*, 2007, 23(9): 2085-2108.  
Chen Yanjing, Ni Pei, Fan Hongrui, et al. Diagnostic Fluid Inclusions of Different Types of Hydrothermal Gold Deposits [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(9): 2085-2108.
- [27] 张成江,倪师军,滕彦国,等. 兰坪盆地喜马拉雅期构造-岩浆活动与流体成矿的关系[J]. *矿物岩石*, 2000, 20(2): 35-39.  
Zhang Chengjiang, Ni Shijun, Teng Yanguo, et al. Relationship Between Himalayan Tectono-Magmatic Activity and Mineralization in the Lanping Basin [J]. *Mineral Petrologica*, 2000, 20(2): 35-39.
- [28] 董方浏,莫宣学,侯增谦,等. 云南兰坪盆地喜马拉雅期碱性岩<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar年龄及地质意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 2005, 24(2): 103-109.  
Dong Fangliu, Mo Xuanxue, Hou Zengqian, et al. <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar Ages of Himalayan Alkaline Rocks in the Lanping Basin, Yunnan and Their Geological Significance [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2005, 24(2): 103-109.
- [29] 李文昌,潘桂棠,侯增谦,等. 西南“三江”多岛弧盆-碰撞造山成矿理论与勘查技术[M].北京:地质出版社,2010.  
Li Wenchang, Pan Guitang, Hou Zengqian, et al. The Mineralization Theories and Techniques of the Arc-Basin System of “Three-River” Area of

- Southwest China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2010.
- [30] 徐启东,李建威. 云南兰坪北部铜多金属矿化区成矿流体流动与矿化分带:流体包裹体和稳定同位素证据[J]. 矿床地质, 2003, 22(4): 365-376.
- Xu Qidong, Li Jianwei. Ore-Forming Fluid Migration in Relation to Mineralization Zoning in Cu-Polymetallic Mineralization District of Northern Lanping, Yunnan; Evidence from Fluid Inclusions and Stable Isotopes [J]. Mineral Deposits, 2003, 22(4): 365-376.
- [31] 何龙清,陈开旭,余凤鸣. 云南兰坪盆地推覆构造及其控矿作用[J]. 地质与勘探, 2004, 40(4): 7-12.
- He Longqing, Chen Kaixu, Yu Fengming. Nappe Tectonics and Their Ore-Controlling of Lanping Basin in Yunnan Province [J]. Geology and Prospecting, 2004, 40(4): 7-12.
- [32] 刘家军,李朝阳,张乾,等. 滇西金满铜矿床中木质结构及其成因意义[J]. 中国科学:D辑, 2001, 31(2): 89-95.
- Liu Jiajun, Li Chaoyang, Zhang Qian, et al. Wood Textures in the Jinman Cu Deposit in Western Yunnan and Their Significance for Ore Genesis [J]. Science China: Series D, 2001, 31(2): 89-95.
- [33] Su Wenchao, Heinrich C A, Pettke T, et al. Sediment-Hosted Gold Deposits in Guizhou, China: Products of Wall-Rock Sulfidation by Deep Crustal Fluids [J]. Economic Geology, 2009, 104: 73-93.
- [34] Bodnar R J. Revised Equation and Table for Determining the Freezing Point Depression of H<sub>2</sub>O-NaCl Solutions [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1993, 57: 683-684.
- [35] 叶庆同,胡云中,杨岳清. 三江地区区域地球化学背景和金银铅锌成矿作用[M]. 北京:地质出版社, 1992.
- Yie Qingtong, Hu Yunzhong, Yang Yueqing. The Regional Geochemical Background of Gold and Silver Lead-Zinc Mineralization of Sanjiang Region [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1992.
- [36] 薛春纪,陈毓川,杨建民,等. 金顶铅锌矿床地质-地球化学[J]. 矿床地质, 2002, 21(3): 270-277.
- Xue Chunji, Chen Yuchuan, Yang Jianmin, et al. Geology and Geochemistry of the Jinding Pb-Zn Deposit [J]. Mineral Deposits, 2002, 21(3): 270-277.
- [37] 徐晓春,谢巧勤,陆三明,等. 滇西兰坪盆地西缘铜矿床矿物流体包裹体研究[J]. 矿物学报, 2005, 25(2): 170-176.
- Xu Xiaochun, Xie Qiaoqin, Lu Sanming, et al. Fluid Inclusion Characteristics of Copper Deposits on the Western Border of Lanping basin, Yunnan Province [J]. Acta Mineral Sinica, 2005, 25(2): 170-176.
- [38] 卢焕章,范宏瑞,倪培,等. 流体包裹体[M]. 北京:科学出版社, 2004.
- Lu Huanzhang, Fan Hongrui, Ni Pei, et al. Fluid Inclusions [M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [39] Xue Chunji, Chi Guoxiang, Chen Yuchuan, et al. Two Fluid Systems in the Lanping Basin, Yunnan, China: Their Interaction and Implications for Mineralization [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2006, 89: 436-439.
- [40] Kerrich R, Fyfe W S. The Gold-Carbonate Associations: Source of CO<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> Fixation Reactions in Archean Lode Deposits [J]. Chemical Geology, 1981, 33: 265-294.
- [41] 李文昌,尹光侯,余海军,等. 云南普朗斑岩型铜矿床成矿流体特征及矿床成因[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2013, 43(5): 1436-1447.
- Li Wenchang, Yin Guanghou, Yu Haijun, et al. Characteristics of the Ore-Forming Fluid and Genesis of the Pulang Copper Deposit in Yunnan Province [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2013, 43(5): 1436-1447.
- [42] 薛建玲,李胜荣,孙文燕,等. 胶东邓格庄金矿床流体包裹体氦、氩同位素组成及其成矿物质来源示踪[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2013, 43(2): 400-414.
- Xue Jianling, Li Shengrong, Sun Wenyan, et al. Helium and Argon Isotopic Composition in Fluid Inclusions and the Source of Ore-Forming Materials of Denggezhuang Gold Deposit in Jiaodong Peninsula [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2013, 43(2): 400-414.
- [43] 张锦让,温汉捷,邹志超,等. 云南兰坪盆地西缘脉状铜矿床富CO<sub>2</sub>流体来源的He和Ar同位素证据[J]. 地球化学, 2015, 44(2): 167-177.
- Zhang Jinrang, Wen Hanjie, Zou Zhichao, et al. Origin of CO<sub>2</sub>-Rich Ore-Forming Fluids in the Vein-Type Cu Deposits in Western Lanping Basin, Yunnan; Evidence from He and Ar Isotopes [J]. Geochimica, 2015, 44(2): 167-177.