

云南大坪喜马拉雅期碰撞造山型金矿流体包裹体及其 H-O 同位素组成*

张 燕^{1,3}, 孙晓明^{2,3**}, 石贵勇², 熊德信^{1,4}, 翟 伟², 潘伟坚¹, 胡北铭¹

(1 中山大学地球科学系, 广东 广州 510275; 2 中山大学海洋学院, 广东 广州 510275; 3 华东有色地质矿产勘查局, 江苏 南京 210007; 4 广东省肇庆学院, 广东 肇庆 526061)

摘 要 大坪金矿区金矿石可分为 2 种类型: 晚元古宙闪长岩岩体中者 (a) 和 D₂ 灰岩地层中者 (b), 其中闪长岩岩体中金矿石可分为 4 个主要成矿期: 白钨矿期 (阶段 Ia)、主成矿期 (阶段 IIa)、碳酸盐期 (阶段 IIIa) 和无矿期 (阶段 IVa), 而灰岩地层中样品可分为 2 个期次: 主成矿期 (阶段 IIb) 和碳酸盐期 (阶段 IIIb)。本文利用显微测温 and 拉曼光谱分析, 对大坪金矿晚元古宙闪长岩岩体和 D₂ 灰岩地层中含金石英脉中的含 CO₂ 流体包裹体和 H-O 同位素进行了研究, 结果显示: 闪长岩岩体中金矿石主成矿阶段的包裹体中气相组成为 CO₂、N₂ 和 C₂H₄, 盐度 w(NaCl_{eq}) 为 4.80 % ~ 12.23 %, 完全均一温度 290.6 ~ 460.1 °C, 而灰岩地层中主成矿阶段的包裹体气相组成为 CO₂ 和 CH₄, 盐度 w(NaCl_{eq}) 为 0.63 % ~ 8.66 % 之间, 均一温度 249.6 ~ 360.7 °C。比较而言, 灰岩中主成矿期金矿石流体包裹体的均一温度和盐度均较闪长岩中者为低, 而两者成矿流体的 δD-δ¹⁸O_{H₂O} 组成区别不大, 均主要落在原生岩浆流体和变质流体范围内, 显示两者成矿流体来源基本一致, 均主要来自下地壳和上地幔, 但闪长岩中金矿成矿早于灰岩中者。

关键词 地球化学; 含 CO₂ 流体包裹体; 氢氧同位素; 喜马拉雅期造山型金矿; 大坪金矿; 哀牢山金矿带

Fluid inclusions and H-O isotopic compositions of Daping Cenozoic orogenic type gold deposit in Yunnan Province, China

ZHANG Yan^{1,3}, SUN XiaoMing^{2,3}, SHI GuiYong², XIONG DeXin^{1,4}, ZHAI Wei²,
PAN WeiJian² and HU BeiMing²

(1 Department of Earth science, Sun YatSen University, Guangzhou 510275, Guangdong, China; 2 School of Marine Sciences, Sun Yatsen University, Guangzhou 510275, Guangdong, China; 3 Eastern China Geological and Mining Organization for Non-ferrous Metals, Nanjing 210007, Jiangsu, China; 4 Zhaoqing University, Zhaoqing 526061, Guangdong, China)

Abstract

Gold ores in the Daping gold deposit in Yunnan Province may be divided into two types: (a) Late Proterozoic diorite hosted; (b) Middle Devonian (D₂) limestone hosted. Mineralization in the type a can be divided into four stages: scheelite stage (Ia), main metallogenic stage (IIa), carbonate stage (IIIa), and barren stage (IVa), while that in the b can only divided into two stages: main metallogenic stage (IIb) and carbonate stage (IIIb). In this study,

*本文得到国家自然科学基金 (编号: 40830425、40673045、40373027)、国家重点基础研究发展规划 (973) 项目 (2002CB412610、2009CB421006) 项目和高等学校博士学科点专项科研基金 (编号: 200805580031) 的联合资助

第一作者简介 张 燕, 女, 1979 年生, 矿床学博士, 研究方向为矿床地球化学。Email: dixiezhy@126.com

**通讯作者 孙晓明, Email: eessxm@mail.sysu.edu.cn

microthermometric measurement and Laser Raman analysis were performed for the CO₂-bearing fluid inclusions in the auriferous quartz veins in Daping gold deposit, and their H-O isotopic compositions were also determined. The results show that the gaseous phases of fluid inclusions in main metallogenic stage of diorite hosted gold ores (IIa) are composed mainly of CO₂, N₂ and C₂H₄, and the salinity $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ and homogenization temperature t_h are 4.80 % ~ 12.23 % and 290.6 ~ 460.1 °C, while the gaseous phases of fluid inclusions in main metallogenic stage of limestone hosted gold ores (IIb) are composed mainly of CO₂ and CH₄, and the salinity and homogenization temperature are 0.63 % ~ 8.66 % and 249.6 ~ 360.7 °C. Comparatively speaking, the T_h and salinity in the type b ores are lower than those in type a, but δD - $\delta^{18}O_{\text{H}_2\text{O}}$ compositions of ore-forming fluids in the two different type gold ores are nearly the same, both of them were projected in the fields of primary magmatic water and metamorphic fluid, suggesting that the ore-forming fluids in the different gold ores in the Daping mine might have derived from same source: lower crust and upper mantle. The gold mineralization in the diorite hosted ores may be earlier than the limestone hosted.

Key words: geochemistry, CO₂-bearing fluid inclusions, H-O isotopic composition, Cenozoic orogenic type gold deposit, Daping gold deposit, Ailaoshan gold belt

云南哀牢山金矿带是中国最重要的喜马拉雅期金矿带之一, 其中已发现多个大中型金矿。位于云南元阳境内的大坪金矿是哀牢山金矿带中的主要含金多金属硫化物热液石英脉型金矿之一。该金矿自被发现以来, 已有不少学者对其成矿作用进行了研究, 但在成矿物质来源和成矿流体的性质等关键问题上仍存在不同看法, 一般认为其成矿流体来源于拉张构造环境下的岩浆热液或深源流体与大气降水相混合的热液(毕献武等, 1996a; 1996b; 1997; 1999; 胡瑞忠等, 1999; 韩润生等, 1994; 1997), 但最近的研究认为该矿主要是沿剪切带上升的壳(下地壳)幔混合流体成矿(孙晓明等, 2006a; 2006b; 2006c; 2007; 熊德信等, 2006a; 2006b; 2007a; 2007b; Sun et al., 2009)。此外, 前人的研究主要集中于闪长岩岩体中矿体成矿特征, 对于较晚发现的占大坪金矿较大部分的D₂灰岩地层中石英脉样品的成矿流体还缺乏研究。本文在前人工作基础上, 主要对大坪金矿闪长岩岩体和灰岩地层中含金石英脉的流体包裹体和氢氧同位素进行研究, 以探讨该矿闪长岩岩体和灰岩地层中成矿流体和不同成矿阶段流体的特征。

1 矿床地质概况

大坪金矿区在大地构造上位于扬子准地台的丽江台缘褶皱带, 三级构造单元为点苍山-哀牢山断褶束, 地质力学上属于青藏高原“歹”字型构造体系中部的东南段, 与墨江金矿、镇源老王寨金矿、金平铜厂同处于哀牢山深大断裂西侧的浅变质岩带内。矿床受哀牢山深大断裂的次级断裂——小寨金平断裂、小新街断裂和三家河断裂所控制(图1)。矿区约60%被面积约100 km²的桃家寨岩体占据, 南部及外围零星出露奥陶系、志留系、泥盆系的碎屑沉积岩和碳酸盐岩。桃家寨岩体主要由闪长岩组成, 其中侵入有喜山期的煌斑岩脉。由于受后期强烈构造运动的作用, 多期次、多类型的浅色中酸性岩, 煌斑岩脉侵入, 致使闪长岩体接触边部发生蚀变, 局部较为强烈, 故岩相分带不明显。闪长岩原生色为暗绿色, 风化后呈砖红色, 具有全晶质半自形细-粗粒结构, 块状构造, 主要矿物成分为斜长石约占25%~70%, 角闪石约占10%~20%(局部达50%); 次要矿物为黑云母、碱性长石、石英; 副矿物为钛铁矿、磷灰石、榍石、绿帘石、黄铁矿等(大坪金矿普查报告, 2006)。金世昌等用Rb-Sr等时线法测得闪长岩的成岩年龄为481 Ma左右, 属于加里东期侵入岩(金世昌等, 1994; 胡云中等, 1995); 但是, 最近的研究表明, 其年龄为晚元古代(张燕等, 2009)。矿区内断裂构造发育, 其中小新街断裂呈北北西向贯穿闪长岩体, 该断裂两侧的次一级北西向断裂控制着含金石英脉的分布。

矿区含矿灰岩主要属于中泥盆统(图1), 主要呈灰色, 不规则似层状, 其中含金矿脉长度约1 000 m,

厚度 0.14~2.55 m, 平均为 0.75 m, 矿体多呈不规则似层状分布。灰岩的主要矿物成分为方解石约占 10%~60%, 绢云母约占 10%, 粘土矿物约占 5%~30%; 次要矿物为石英、黄铁矿等。

矿床主要由数百条含金多金属硫化物石英矿脉组成, 矿脉成带出现, 且具薄而长的特点, 矿脉多数长约 200~1500 m, 厚度多为 0.2~0.8 m。矿脉由石英脉、少部分构造破碎蚀变闪长岩和蚀变破碎灰岩组成。其中灰岩中的矿体形态均为不规则似层状。石英脉在断裂带中断续分布, 尖灭再现, 脉间距离一般小于 2 m, 有时被后期断层及煌斑岩脉错断, 错距小, 一般 1~2 m, 局部大于 3 m。矿脉中的矿石一般都具挤压破碎现象。脉与上下盘围岩接触附近有明显的滑动面和断层泥。闪长岩中的矿石矿物主要由自然金、白钨矿、多种硫化物(黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、斑铜矿和闪锌矿等)组成, 而脉石矿物主要为石英、方解石、白云石、绿泥石、绢云母等。前人对大坪金矿近矿绢英岩化蚀变岩中的绢云母等进行了 ^{40}Ar - ^{39}Ar 定年, 得出其成矿年代为 33.76 Ma (孙晓明等, 2006c)。灰岩中的金属矿物呈细脉状、浸染状、团块状分布于石英脉中。矿石中金属矿物主要为褐铁矿, 其次为孔雀石等, 含量 1%~5%; 脉石成分以石英和蚀变破碎灰岩为主, 其中穿插有脉状的方解石和部分粘土矿物。矿床详细地质特征参见胡云中等(1995)和武警黄金部队大坪矿区金矿普查报告(2006)。

2 样品和分析方法

本次研究的含金石英脉样品采集于大坪金矿 3 号、6 号、8 号、51 号和 52 号等主要含金石英脉的采矿坑道中(图 1), 其近矿围岩为蚀变闪长岩、蚀变破碎灰岩, 围岩蚀变强烈, 主要有硅化、绢云母化、绿泥石化、绿帘石化、方解石化和铁白云石化。除石英外, 原岩造岩矿物多数已经蚀变, 其中的斜长石多数已经明显的碎裂岩化, 一些蚀变较轻的还保存了长石原有的晶型。而石英大部分受到韧性变形, 发育明显的波状消光和核幔构造, 其间充填有很多方解石细脉。

闪长岩中的金矿脉在矿物组成上具有明显的分带性, 从矿脉中心到边部分别是团块状含金多金属硫化物带(矿石带)→少量硫化物(主要为黄铁矿)含金石英脉带→含白钨矿石英脉带, 另外有晚期方解石细脉穿插于含金多硫化物带中。在白钨矿石英脉中基本未见碳酸盐, 黄铁矿等硫化物很少, 有时见白钨矿晶体的微裂隙中充填有黄铁矿、黄铜矿和碳酸盐矿物。闪长岩中的多金属硫化物中除黄铁矿外还大量出现黄铜矿、方铅矿和磁铁矿; 形成于糜棱岩化之前的早期大颗粒的黄铁矿多呈压碎结构, 沿碎裂面常被黄铜矿和方铅矿交代, 而同期形成的黄铁矿多呈细小它形粒状或浸染状嵌布在石英颗粒中。黄铜矿多呈星点状延黄铁矿裂隙分布。其中在灰岩地层中的主成矿阶段, 硫化物多呈团块状和浸染状分布于石英等矿物中, 对于晚期的石英脉中充填有大量的方解石和铁白云石等碳酸盐矿物。

根据野外和显微镜下对矿化类型的观察, 本文将该矿区的金矿石划分为 2 种类型: 闪长岩中者和灰岩中者, 分别记为 a 和 b; 其中闪长岩中金矿石又可划分为 4 个大期次: 白钨矿期(阶段 Ia)、主成矿期(阶段 IIa)、碳酸盐期(阶段 IIIa)和无矿期(阶段 IVa), 而灰岩矿段可分为 2 个期次: 主成矿期(阶段 IIb)和碳酸盐期(阶段 IIIb)。其中闪长岩岩体中的无矿期石英脉大部分被碳酸盐脉所充填, 并发育有后期的反倾石英脉, 这些反倾石英脉和断层的产状基本一致, 形成时间晚于主矿体, 记为阶段 IVa。

流体包裹体显微测温在中山大学地球科学系流体包裹体实验室的 Linkam THMSG600 型冷热台上完成, 测温范围为 -196.0~600.0℃, 测温精度为 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 。升降温速率不超过 $15^\circ\text{C}/\text{min}$, 临近相变点时降为 $1^\circ\text{C}/\text{min}$ 。测温前用纯 CO_2 包裹体(熔点为 -56.6°C)、纯水(熔点为 0°C)和重铬酸钾(熔点为 398°C)对冷热台进行了温度校正。

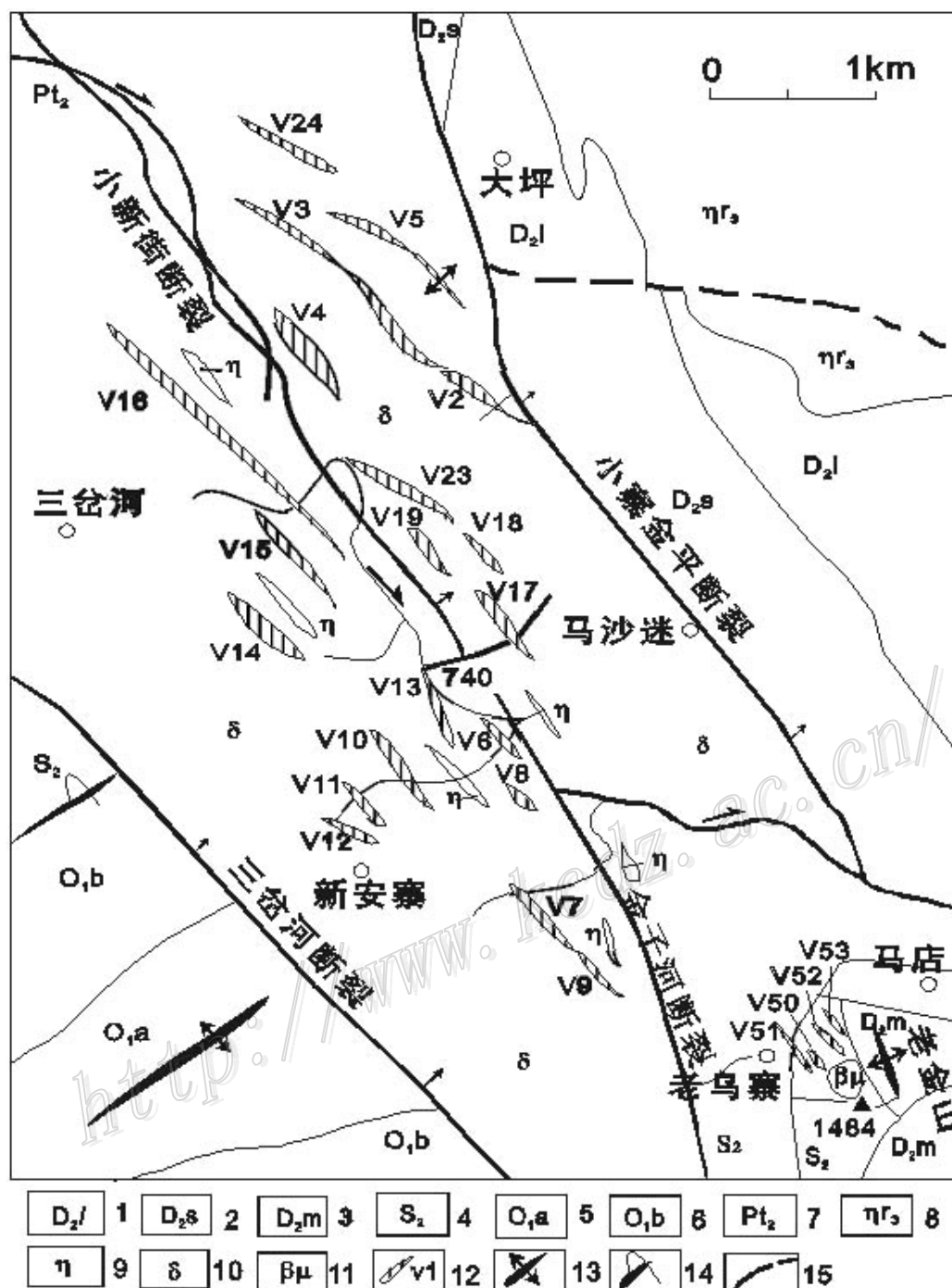


图1 大坪金矿区矿脉分布图 (据应汉龙, 1998和武警黄金部队第十支队, 2005改编)

1—中泥盆统老阱寨组灰岩; 2—中泥盆统宋家寨组碳泥质页岩夹硅质页岩及灰岩; 3—中泥盆统马鹿洞组微晶灰岩、白云质灰岩、白云岩夹角砾状灰岩、板岩; 4—中志留统白云岩、白云质灰岩; 5—下奥陶统中组砂岩夹板岩; 6—下奥陶统下组; 7—哀牢山群阿龙组片岩和片麻岩; 8—黑云二长花岗岩; 9—二长岩、石英二长岩; 10—闪长岩、花岗闪长岩; 11—煌斑岩; 12—含金石英脉及其代号; 13—背斜; 14—向斜; 15—推测断裂

Fig.1 Distribution sketch of ore-veins in Daping gold deposits (modified after Ying, 1998, and 10th gold detachment of the Chinese People's Armed Police Force, 2005)

1—Limestone of Laojingzhai Fm. of Middle Devonian; 2—Carbonaceous to argillaceous shale intercalated with siliceous shale and limestone of Songjiazhai Fm. of Middle Devonian; 3—Micritic limestone, dolomitic limestone, limestone and slate of Maludong Fm. of Middle Devonian; 4—Dolostone and dolomitic limestone of Middle Silurian; 5—Sandstone intercalated with slate of Lower Ordovician; 6—Lower formation of Lower Ordovician; 7—Gneiss and schist of Precambrian Ailaoshan Group; 8—Biotite monzonitic granite; 9—Monzonite and quartz monzonite; 10—Diorite and granodiorite; 11—Lamprophyre A; 12—Auriferous quartz veins and their numbers; 13—Anticline; 14—Syncline; 15—Hypothetical fault

此次流体包裹体测定的矿物包括石英、铁白云石和方解石。以测定 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 型包裹体为例说明本次显微测温需要测定的相变点: 在室温下开始降温, 在温度低于 $t_{\text{h,CO}_2}$ 时会发现 V_{CO_2} 相在 L_{CO_2} 相中移动, 并且逐渐变大, 到 -60°C 以下时 V_{CO_2} 相突然变形或消失, 记下全结冰温度 $t_{\text{f,CO}_2}$; 回温到 -56.6°C 以下三相点 $t_{\text{m,CO}_2}$ 时 V_{CO_2} 相突然出现; 升温到 -10°C 以上即 $t_{\text{m,cla}}$ 时, 突然出现 V_{CO_2} 相回位或 L_{CO_2} 相扩大, 此时 CO_2 水合物分解; 继续升温到 $t_{\text{h,CO}_2}$ 时 L_{CO_2} 和 V_{CO_2} 相均一; 再升温到包裹体完全均一温度 t_{h} 。测温过程中估算 30°C 时包裹体中 V_{CO_2} 相的体积分数, 用于计算包裹体的物化参数。最后, 利用FlinCor软件 (Brown, 1989) 计算成矿流体的各项物化参数。

单个流体包裹体的激光拉曼光谱分析主要在中山大学测试中心 Ranishaw RM2000 型拉曼光谱仪上完成, 室温下测定, 氙离子激光器 (514 nm), 扫描功率为 20 Mw。

将石英样品碎至 0.25 ~ 0.3 mm 粒级, 在双目镜下手选至纯度大于 99 % 的样品 10 g。同位素测试由中国国家地质测试中心同位素实验室 MAT 253 EM 型质谱计上完成。流体包裹体 H 同位素用爆裂法取水, 锌法制氢; 石英氧同位素用 BrF_5 法; H、O 同位素采用 MAT 251 EM 质谱计测定, 采用的国际标准为 SMOW, H 同位素分析精度为 $\pm 2\text{‰}$, O 同位素分析精度为 $\pm 0.2\text{‰}$ 。根据石英中流体包裹体的均一温度和矿物-水氧同位素方程, 计算出流体的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值。流体的均一温度为其峰值, 石英与水的氧同位素平衡公式采用 $\delta_{\text{Q-H}_2\text{O}} = 3.38 \times 10^6/T^2 - 3.4$ (Clayton, 1972)。

3 流体包裹体研究

3.1 白钨矿石英脉阶段 (阶段 Ia)

该类石英显乳白色, 油脂光泽, 半自形-自形晶, 粒径一般大于 1 mm。该类石英脉原生流体包裹体非常发育, 多呈面状分布或沿石英生长环带分布, 少数呈孤立状; 多呈负晶形、椭圆形和不规则形状; 大小不一, 一般为 5~12 μm 。包裹体类型主要为 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 型三相包裹体 (图 2a), 仅见极个别的水溶液包裹体。均一温度在 $299.4 \sim 423.7^\circ\text{C}$ 之间, 峰值 $320 \sim 380^\circ\text{C}$ (图 3a), 其中 $340 \sim 360^\circ\text{C}$ 出现频率最高, 包裹体的盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 在 6.37 % ~ 14.64 % 之间, 峰值 9 % ~ 10.5 % (熊德信等, 2007)。该阶段的包裹体的气相组成基本为纯 CO_2 , 少数包裹体含有一定量的 N_2 (熊德信等, 2007)。

3.2 主成矿阶段

3.2.1 闪长岩岩体中样品 (阶段 IIa)

该类石英多呈白色或烟灰色, 结晶程度稍差, 不规则粒状, 粒径一般为 $0.5 \text{ mm} \times 2.5 \text{ mm}$ 。该类石英脉中的原生流体包裹体非常发育, 多呈不规则状成群分布; 大小不一, 一般为 2~20 μm , 多数集中在 6~10 μm , 包裹体类型主要为纯气态 CO_2 包裹体、 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 型三相包裹体和两相包裹体 (图 2b、2c), 仅见极个别的水溶液包裹体。 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 型包裹体中 CO_2 体积一般为 20 % ~ 80 %。此外, 限于包裹体的透视性, 本文选用测温的包裹体多为 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 型三相包裹体。

本阶段 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 型包裹体的三相点为 $-59.2 \sim -55.4^\circ\text{C}$, 多集中于 $-56.4 \sim -57.4^\circ\text{C}$ (图 3b)。 CO_2 包裹体的均一温度在 $23.6 \sim -30.8^\circ\text{C}$, 多数集中于 $24 \sim 28^\circ\text{C}$ (图 3c), 基本上都均一为液相。 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 型包裹体在降温过程中均形成 CO_2 水合物, 测得其分解温度在 $2.7 \sim 7.7^\circ\text{C}$ 之间, 峰值 $4.0 \sim 5.0^\circ\text{C}$ (图 3d); 相应地包裹体的盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 在 4.80 % ~ 12.23 % 之间, 峰值 9 % ~ 10.5 %; 测得全均一温度 $290.6 \sim 460.1^\circ\text{C}$, 峰值 $320 \sim 340^\circ\text{C}$ 和 $390 \sim 400^\circ\text{C}$ (图 3e), 基本上都均一为 CO_2 相。计算其密度为 $0.53 \sim 0.77 \text{ g/cm}^3$, 峰值 $0.68 \sim 0.72 \text{ g/cm}^3$ 。

拉曼光谱分析结果表明, 该阶段的包裹体的气相组成基本为纯 CO_2 , 少数包裹体含有一定量的 N_2 和 C_2H_4 (图 4a)。

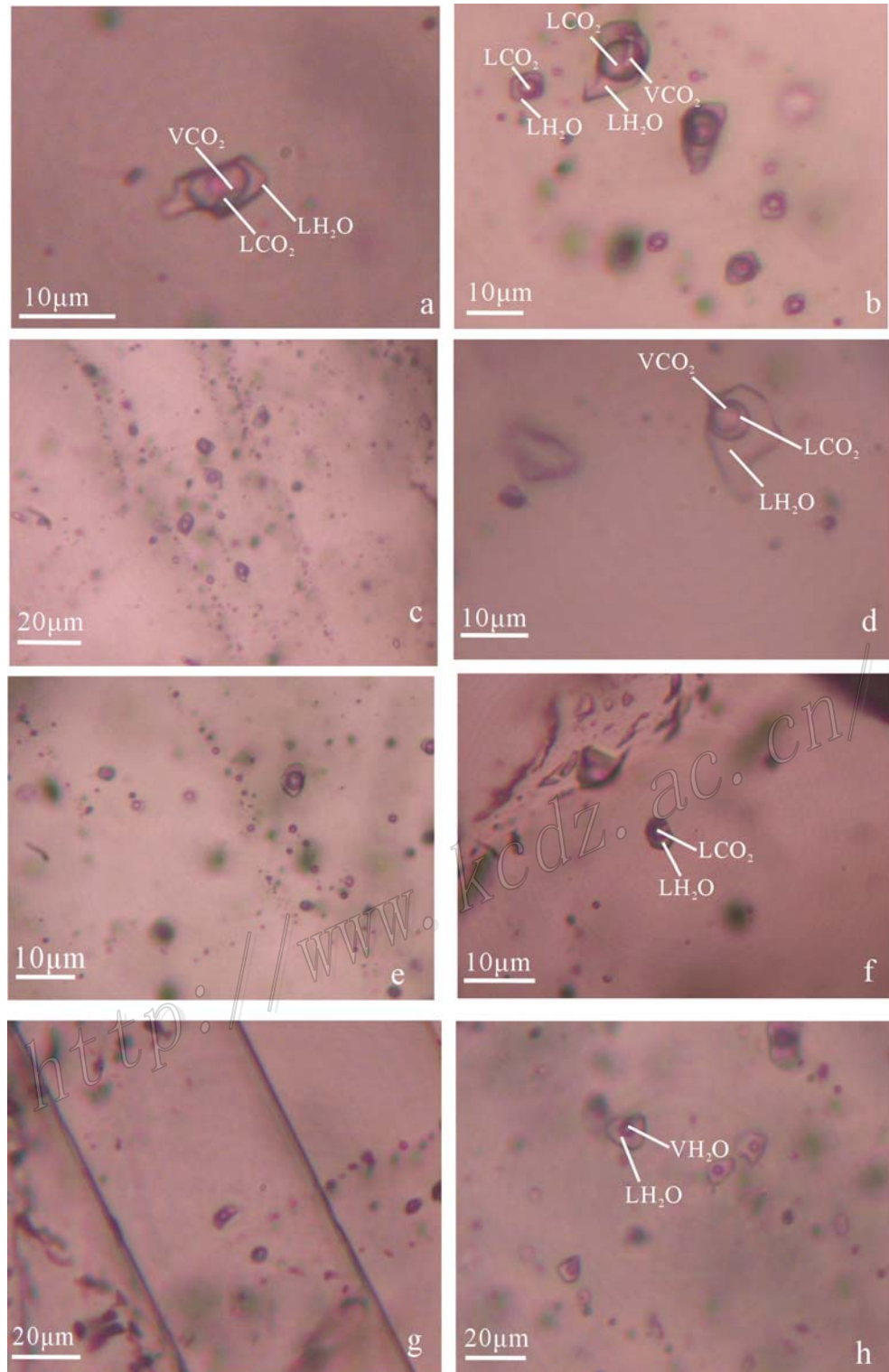


图2 大坪金矿石英脉中的流体包裹体.

a. 阶段Ia中的 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 型包裹体; b. 阶段IIa中的 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 型包裹体; c. 阶段IIa中的延石英裂隙分布的包裹体; d. 阶段IIb中的 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 型包裹体; e. 阶段IIb中广泛分布的 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 型包裹体; f. 阶段IIIa中的 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 型包裹体; g. 阶段IIIb中的 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 型包裹体; h. 阶段IVa中的 H_2O 溶液包裹体

Fig. 2 Fluid inclusions in auriferous quartz veins in Daping gold deposit.

a. the $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ inclusions at stage Ia; b. the $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ inclusions at stage IIa; c. the $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ inclusions at stage IIa; d. the $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ inclusions at stage IIb; e. the $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ inclusions at stage IIb; f. the $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ inclusions at stage IIIa; g. the $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ inclusions at stage IIIb; h. the H_2O inclusions at stage IVa

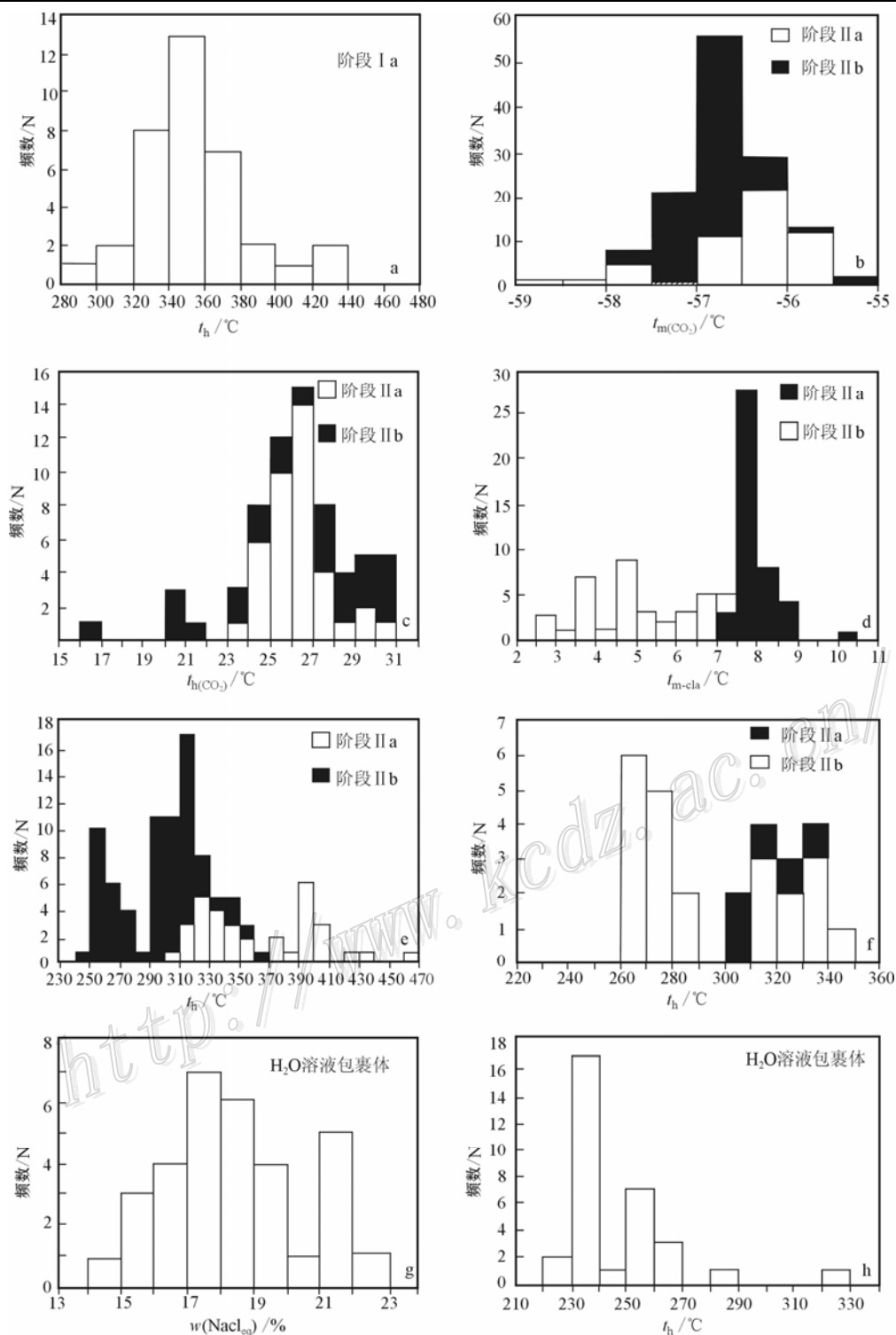


图 3 大坪金矿流体包裹体测温结果

a. 阶段Ia包裹体的全均一温度(据熊德信等, 2007); b. 主成矿阶段流体包裹体的三相点; c. 主成矿阶段 CO_2 - H_2O 型包裹体的均一温度; d. 主成矿阶段 CO_2 - H_2O 型包裹体的 CO_2 水合物分解温度; e. 主成矿阶段 CO_2 - H_2O 型包裹体的全均一温度; f. 阶段IIIa(据熊德信等, 2007)和阶段IIIb包裹体的全均一温度; g. 阶段IVa中 H_2O 溶液包裹体的盐度; h. 阶段IVa H_2O 溶液包裹体的均一温度

Fig.3 Histograms showing the microthermometry data of the fluid inclusions in Daping gold deposit

a. Homogenization temperatures of the CO_2 - H_2O inclusions at stag Ia; b. CO_2 triple points of the fluid inclusions at stage IIa and IIb; c. CO_2 homogenization temperatures of the CO_2 - H_2O inclusions at stage IIa and IIb; d. CO_2 clathrates dissolution temperatures at stage IIa and IIb; e. Homogenization temperatures of the CO_2 - H_2O inclusions at stag IIa and IIb; f. Homogenization temperatures of the CO_2 - H_2O inclusions at stag IIIa and stage IIIb; g. Salinities of the H_2O inclusions at stage IVa; h. homogenization temperatures of the H_2O inclusions at stage IVa

3.2.2 灰岩地层中样品(阶段 IIb)

该阶段的石英略带黄色,多分布于黄铁矿的晶隙中。该阶段的包裹体以 CO_2 - H_2O 型三相和两相包裹体(图 2d、2e)为主,仅发现个别原生水溶液包裹体。 CO_2 - H_2O 型包裹体中 CO_2 体积一般为 20%~80%,所测包裹体多数 CO_2 体积小于 50%。

此阶段 CO_2 相的三相点为 $-56.4 \sim -57.7^\circ\text{C}$,多数都在 -57°C 以下(图 3b),测温过程中发现有个别包裹体的全结冰温度低于 -110°C 。所有包裹体的 CO_2 相均一成液相,其中 CO_2 包裹体的均一温度在 $26.5 \sim -30.1^\circ\text{C}$,峰值 $28 \sim 29^\circ\text{C}$ (图 3c);水合物分解温度为 $5.4 \sim 8.8^\circ\text{C}$,峰值 $7.5 \sim 8^\circ\text{C}$ (图 3d);盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为 0.63%~8.66%之间,峰值 4.5%~5.5%;密度 $0.654 \sim 0.9345 \text{ g/cm}^3$,峰值 $0.62 \sim 0.68 \text{ g/cm}^3$ 。全均一温度 $249.6 \sim 360.7^\circ\text{C}$,峰值 $290 \sim 320^\circ\text{C}$ (图 3e)。

拉曼光谱分析显示,该阶段的包裹体的气相组成基本为纯 CO_2 ,少数包裹体含有一定量的 CH_4 (图 4b)。

3.2.3 碳酸盐阶段(III)

该阶段石英呈淡黄白色,常与方解石、白云石共生,很少有金属矿物,含金性差。该类脉体阶段 IIIa 和阶段 IIIb 的石英脉和石英脉中的包裹体具有相似的性质。石英脉宽数 mm 至数 cm 左右,主要以微脉或网脉形式穿切硫化物,局部呈团块状。主要组成矿物为方解石,少量石英、铁白云石和黄铁矿,方解石发育明显的菱形解理。此阶段流体包裹体很稀少,以 CO_2 - H_2O 型包裹体(图 2f、2g)为主,其 CO_2 相体积一般小于 50%;此外还含少量水溶液包裹体;形态多为不规则状;其长轴一般在 $6 \mu\text{m}$ 以下。鉴于包裹体的透视性,本文只测出了一些包裹体的全均一温度,阶段 IIIa 均一温度 $300 \sim 330.1^\circ\text{C}$,峰值 310°C ;阶段 IIIb 的均一温度 $260.6 \sim 343.3^\circ\text{C}$,峰值 $260 \sim 270^\circ\text{C}$ (图 3f)。

拉曼光谱分析结果表明,该阶段的包裹体的气相组成基本为纯 CO_2 ,没有检测到其他气体(图 4c)。

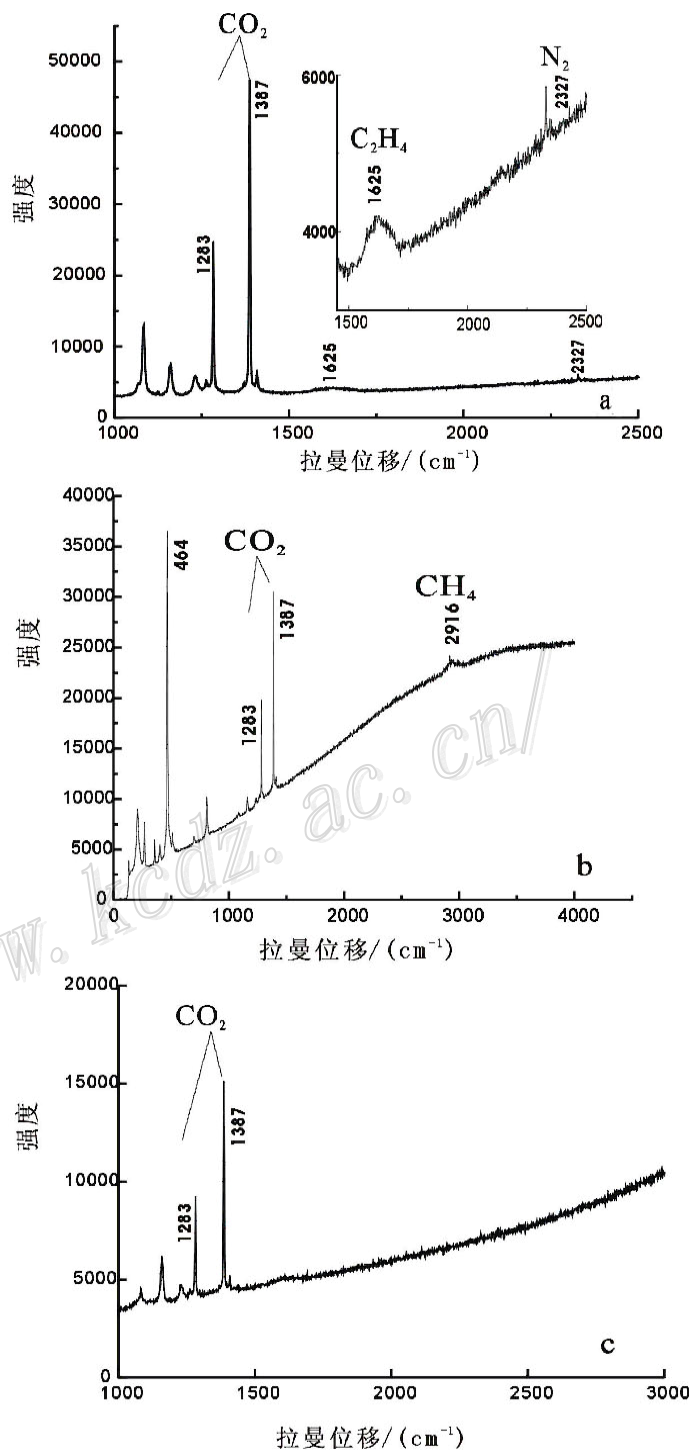


图 4 大坪金矿含金石英脉中流体包裹体气相组分拉曼光谱

a. 阶段IIa含 N_2 和 C_2H_4 的 CO_2 包裹体(样品 07302); b. 阶段IIb含 CH_4 的 CO_2 包裹体(样品 07348); c. 阶段IIIb CO_2 包裹体(样品 07355)

Fig.4 Laser Raman spectra of gases in fluid inclusions in the auriferous veins from Daping gold deposit

a. N_2 - C_2H_4 -bearing CO_2 inclusions in stage IIa (sample 07302); b. CH_4 -bearing CO_2 inclusions in stage IIb (sample 07348); c. CO_2 inclusions in stage IIIb (sample 07355)

3.3 无矿期 (阶段 IVa)

本阶段的石英呈烟灰色, 结晶程度较低, 不规则粒状, 粒径较小, 0.25 mm 左右, 多同蚀变矿物共生。本阶段的包裹体以气液两相 (气相体积为 20 % 左右) 水溶液包裹体为主, 多呈不规则状, 大小 2 ~ 20 μm 不等, 多数在 8 ~ 10 μm , 大者可达 20 μm , 很多呈线状延石英裂隙分布 (图 2h)。此类包裹体冰点温度介于 -20.2 ~ -10.3 $^{\circ}\text{C}$ 之间, 相对应的流体盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为 14.26 % ~ 22.49 %, 峰值在 17 ~ 19 (图 3g)。均一温度为 228.2 ~ 320 $^{\circ}\text{C}$, 峰值主要在 230 ~ 270 $^{\circ}\text{C}$ (图 2h); 流体密度为 0.885 ~ 0.999 g/cm^3 。

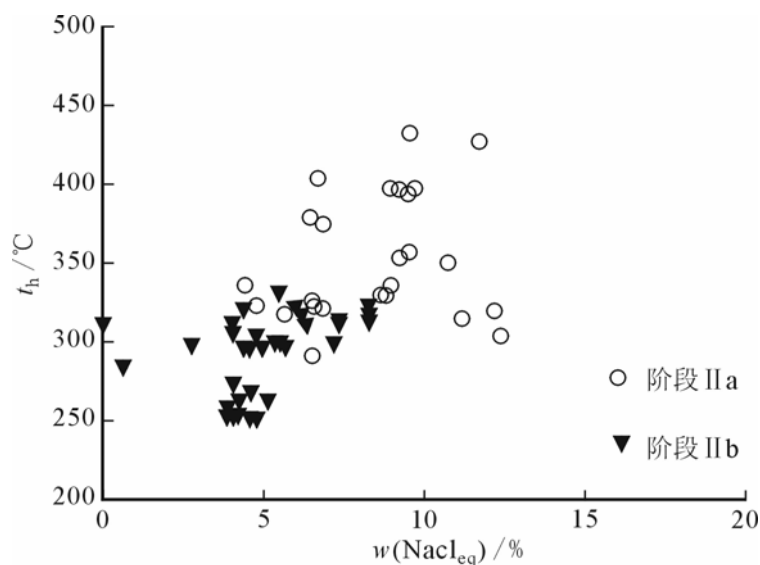


图 5 大坪金矿流体包裹体的均一温度与盐度关系图

Fig.5 Diagram of homogenization temperature vs. salinity of fluid inclusions in Daping gold deposit

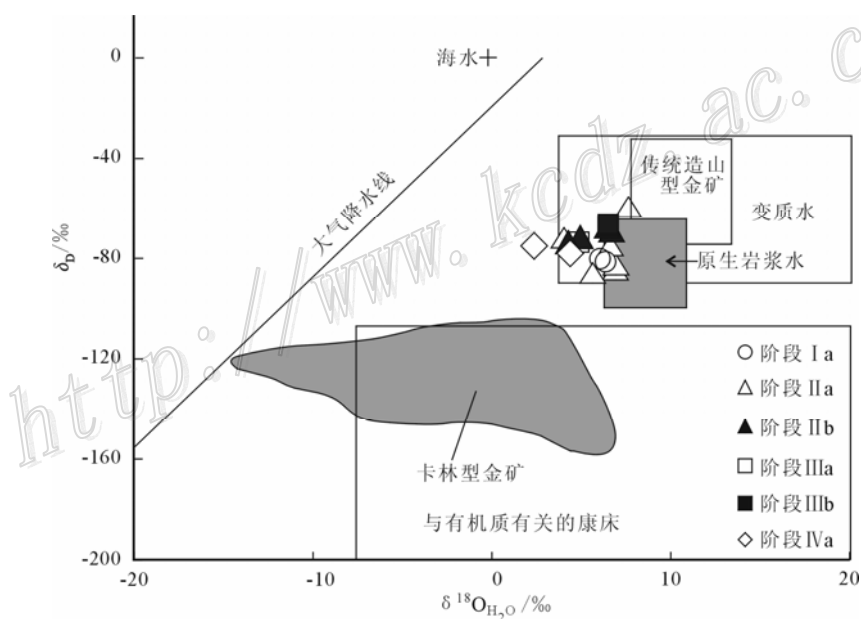


图 6 大坪金矿石英脉流体 δD - $\delta^{18}\text{O}$ 同位素组成图

(图中不同成因水的 δD - $\delta^{18}\text{O}$ 同位素组成据 Sheppard, 1986; 卡林型金矿范围据 Field et al., 1985)

Fig. 6 Plot of δD and $\delta^{18}\text{O}$ for ore fluids from the Daping gold deposit

Magmatic, metamorphic, and organic (e.g., devolatilization of organic matter in sediments) water fields after Sheppard, 1986; fields for Nevada Carlin deposits after Field et al., 1985

4 成矿流体 δD - $\delta^{18}\text{O}$ 同位素组成

大坪金矿石英脉中流体包裹体 δD - $\delta^{18}\text{O}$ 同位素分析结果见表 1。在 δD - $\delta^{18}\text{O}$ 图上, 多数大坪样品落在原始岩浆水和变质水之间 (图 6), 其中晚成矿阶段的样品落在变质水内。

表 1 大坪金矿石英脉石英中流体包裹体δD-δ¹⁸O同位素组成

Table 1 δD-δ¹⁸O Compositions of fluid inclusions in quartz Vein of Daping Gold deposits

样品号	采样位置	样品性质	$t_b/^{\circ}\text{C}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}/\text{‰}$	$\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{‰}$	阶 段	数据来源
04114	6 号矿体	石英脉	346.14	11.8	-81	6.38	阶段 Ia	本文
04130	8 号矿体	含白钨矿石英脉	316.39	12.4	-80	6.07		
04116	6 号矿体	富硫化物石英脉	333.38	10.6	-74	4.81		
04120	8 号矿体	硫化物石英脉	350.37	12.8	-62	7.50		
07302		富铜金矿石	350.62	12.2	-85	6.91	阶段 IIa	
07303		富铜金矿石	355.25	12.0	-83	6.84		
07305		富铜金矿石	326.4	12.6	-76	6.59		
07306	900 平硐	硫化物石英脉	376.61	12.2	-60	7.59		
07307	掌子面	硫化物石英脉	296.13	12.7	-87	5.66		
07310		含金石英脉	370.78	11.3	-68	6.54		
07346	51 号矿体	含硫化物石英脉	293.2	11.5	-75	4.36	阶段 IIb	
07347	52 号矿体		311.87	13.3	-70	6.82		
07353	马店村后山	含金石英脉	274.09	12.9	-73	5.01		
04107	6 号矿体	硫化物石英脉	312.08	10.5	-73	4.03	阶段 IIIa	
07355	马店村后山	浸染状矿脉	309.21	13.1	-67	6.53	阶段 IIIb	
07319	900 平硐		248.86	11.4	-75	2.39	阶段 IVa	
	掌子面	反倾石英脉						
07320			240.64	13.8	-78	4.39		
Y-2	5 号脉	少硫化物石英	260	12.3	-41	3.30		李定谋等,
Y-24	24 号脉	少硫化物石英	264	12.1	-49	3.28		2000
V1-1	1 号矿体	石英黄铁矿	260	12.1	-113	3.10		葛良胜等, 2007
V1-6	1 号矿体	石英	260	13.3	-70	4.3		
V8-A[6]	8 号矿体	石英黄铁矿	270	12.7	-108	4.14		
V9-4[7]	9 号矿体	石英、黄铁矿	270	14.1	-72	5.54		
V9-5[8]	9 号矿体	石英、方铅矿	270	13.5	-75	4.94		
V23-1[3]	23 号矿体	石英	258.57	13.1	-64	4.04		
V23-3[9]	23 号矿体	石英、黄铁矿	258.57	14.3	-89	5.24		
V23-5[10]	23 号矿体	石英、方铅矿	258.57	13.5	-101	4.44		
V5-1[11]	5 号矿体	石英、黄铁矿	284.4	13.3	-75	5.32		
SBT-1[5]		石英、黄铁矿	284.4	13.0	-90	5.02		
SBT-2[12]		石英、黄铁矿	284.4	12.8	-76	2.90		

*其中 04107、04114、04116、04120 和 04130 计算所用的 T 值来自熊德信等，2007。

5 讨 论

5.1 成矿流体特征

大坪金矿闪长岩岩体石英脉中早期成矿流体中多数为CO₂≥H₂O，而主成矿阶段和晚成矿阶段中的流体包裹体CO₂<H₂O，特别是最后的无矿期主要以H₂O溶液包裹体为主。而对于灰岩地层石英脉中的流

体包裹体大多都是 $\text{CO}_2 < \text{H}_2\text{O}$ 。关于高 CO_2 的流体,一般以下几种可能的来源:幔源、下地壳中高级变质流体(麻粒岩相、榴辉岩相等)和岩浆热液(Diamond, 2001; Wilkinson, 2001; Andersen et al., 1997; Xafier et al., 1999; Ertan et al., 1999; Lowenstern, 2001)。单从流体成分看还不能具体确定本区高 CO_2 的成矿流体的来源,但至少可以确定不大可能有大量大气降水的加入。曾有学者认为大坪金矿的成矿流体可能主要为花岗岩浆热液、大气降水构成的混合热液与闪长岩发生水/岩反应而形成的改造热液(韩润生等, 1997; 金世昌等, 1994),但缺乏确切的岩浆热液的证据,而矿脉中广泛分布的白钨矿的微量元素组成不具备岩浆热液成因的白钨矿的特征(孙晓明等, 2006c)。对比显示,本区闪长岩岩体中的成矿流体可能主体为深源流体,而与矿区外围出露的斜长花岗岩体等中酸性侵入岩不大可能有直接联系;而灰岩地层中样品的包裹体组成类似于一些与非深源的岩浆热液有关的中温热液金矿,如山东三山岛金矿、广东河台金矿以及新疆乔尔山金矿(李兆麟等, 2001)等,这些矿床的成矿流体均是 $\text{CO}_2 < \text{H}_2\text{O}$,而区别于与深源的变质-岩浆热液有关的矿床,如巴西FMP金矿(成矿流体 $\text{CO}_2 \gg \text{H}_2\text{O}$)。

以上分析表明,大坪金矿闪长岩岩体和灰岩地层主成矿阶段石英脉中的流体包裹体基本上只有 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 型包裹体和纯 CO_2 包裹体2种类型,成矿流体是以 CO_2 和 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 型包裹体为主的低到中等盐度的 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}\text{-NaCl}$ 体系的流体,早期成矿流体中还含有少量的 N_2 等气体(熊德信等, 2007a),主成矿阶段的流体中含有 N_2 、 C_2H_4 和 CH_4 等气体,只有极少的原生水溶液包裹体,表明在成矿过程中不存在大量循环地下水或大气降水参与成矿。晚成矿阶段的包裹体以 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 型为主,气相组成基本为纯 CO_2 ,基本不含其他气体。而无矿期的石英脉中的包裹体以水溶液包裹体为主,水溶液包裹体的均一温度比主成矿阶段包裹体的均一温度明显偏低。从成矿早期到主成矿期到成矿晚期再到无矿期,流体包裹体的均一温度呈下降的趋势。

闪长岩中主成矿阶段石英脉中包裹体的均一温度、密度、盐度都分别高于灰岩主成矿阶段石英脉中的包裹体(图5),可能说明闪长岩中的矿体形成略早于灰岩中。而根据Flincon软件(Brown, 1989)计算出的包裹体盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 整体上变化范围较大(0.63%~12.23%),这也同熊德信等(2007a)的测试结果相吻合。Wilkinson(2001)认为这通常可以作为相分离作用的证据。另外,同熊德信等(2007a)的测试结果不同的是,这次样品的流体包裹体含有较多的 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 型包裹体,且 CO_2 的体积变化比较大(20%~80%),特别是灰岩地层中的流体组成中部分包裹体的 $\text{CO}_2 < \text{H}_2\text{O}$,这同典型的造山型金矿(或剪切带金矿、中温热液金矿),如加拿大太古宙绿岩带中金矿(卢焕章等, 2004)、广东河台金矿(翟伟, 2003))非常相似。

在均一温度与盐度关系图上(图5),阶段IIa和阶段IIb的投点均有一个明显密集区,不同成矿阶段的密集区对应的均一温度和盐度均与各阶段的均一温度峰值、盐度峰值一致,因此它们分别可以代表各阶段的成矿流体的一般特征。对比显示,从闪长岩岩体主成矿流体到灰岩地层中主成矿阶段,流体的盐度呈逐渐下降的趋势,如果符合单一成矿流体的演化特征,则说明灰岩地层中主成矿流体形成时间晚于闪长岩岩体主成矿阶段的成矿流体。

5.2 成矿流体 $p\text{-}t$ 条件

本次测试的主要是 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 型包裹体,所以用 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 体系来表征流体包裹体的 $p\text{-}t$ 范围。阶段IIb与阶段IIa相比, $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 型包裹体均一温度和成矿压力都有明显下降。在阶段IIa出现大量含 N_2 和 C_2H_4 的 CO_2 包裹体,阶段IIa则不出现此类包裹体;与此相似的是阶段IIb出现含 CH_4 的 CO_2 包裹体,阶段IIb则不出现此类包裹体;表明成矿作用是在减压沸腾的环境中进行的快速沉淀的过程。阶段IIa体系的平均密度为 0.85 g/cm^3 ,阶段IIb体系的平均密度为 0.86 g/cm^3 。按以上 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 型包裹体测定数据,用Flincon软件(Brown, 1989)计算阶段IIa成矿压力为 $116.8 \sim 446.0\text{ MPa}$,均值 254.6 MPa ,按红河断裂带上地壳平均密度 2.7 g/cm^3 (郝天珧等, 2005)计算(阶段IIb同),相当于成矿深度 $4.4 \sim 16.9\text{ km}$,平均 9.6 km 。计算阶段IIb成矿压力为 $105.0 \sim 411.7\text{ MPa}$,均值 264.6 MPa ,相当于成矿深度 $4.0 \sim 15.6\text{ km}$,平均 10.0 km 。

所以,从2个主成矿阶段(阶段IIa和阶段IIb)的包裹体均一温度和计算的成矿压力看,该矿是中深中温热液矿床。

5.3 δD - $\delta^{18}O$ 同位素组成

前人对大坪金矿成矿流体的氢氧同位素也进行了一些研究。李定谋等的研究表明,大坪金矿含金石英脉流体 δD 变化范围是-113‰~-70‰; $\delta^{18}O_{H_2O}$ 的变化范围是3.1‰~4.3‰(李定谋等,2000);葛良胜等的研究表明含金石英脉流体 δD 变化范围是-113‰~-64‰; $\delta^{18}O_{H_2O}$ 的变化范围是2.9‰~5.54‰(葛良胜等,2007)(表1)。本次的研究显示,闪长岩岩体中金矿石 $\delta^{18}O_{H_2O}$ 值为2.39‰~7.59‰, δD 值为-85‰~-60‰;灰岩地层中金矿石 $\delta^{18}O_{H_2O}$ 值为4.36‰~6.82‰, δD 值为-75‰~-67‰。对照大坪金矿不同阶段样品及其在 δD - $\delta^{18}O$ 图上的投点发现,早阶段和主成矿阶段以及成矿后期的氢氧同位素变化不大,基本上都落在岩浆水和变质水附近,接近传统造山型金矿的范围(图6)。同时,大坪金矿不同成矿阶段成矿流体氧同位素组成变化较小,不同围岩中氧同位素也没有太大差别,没有明显的同一体系热液经长期演化后氧同位素向大气降水线漂移的现象,这也同前人的研究相吻合。

熊德信等(2006b)在含金石英脉中发现了高结晶度石墨微粒,说明了下地壳麻粒岩相变质流体在该区金矿成矿过程中起到了重要作用。他们还还对大坪金矿的白钨矿流体包裹体的惰性气体和Re-Os同位素组成进行了研究,认为该区成矿流体主体是深源壳幔混合流体,其中壳源组分主要来自于下地壳,而非地壳浅部的大气降水、岩浆水或它们的混合流体,其形成机制可能与本区强烈的壳幔作用有关(熊德信等,2006a;2007a;孙晓明等,2006a;2006b;2006c;2007a;2007b)。本文的研究结果再次证实,本区新生代强烈的壳幔相互作用对金的成矿起到重要控制作用。

6 结 论

(1)大坪金矿脉的流体包裹体基本由液态 CO_2 包裹体和 CO_2 - H_2O 型包裹体组成,早成矿阶段白钨矿石英脉中同时富含气相 CO_2 包裹体,闪长岩和灰岩主成矿阶段的成矿流体是以 CO_2 和 CO_2 - H_2O 型包裹体为主的低到中等盐度的 CO_2 - H_2O -NaCl体系的流体,早期成矿流体中还含有少量的 N_2 等气体,主成矿阶段的流体中含有 N_2 、 C_2H_4 和 CH_4 等气体,只有极少的原生水溶液包裹体;晚成矿阶段的包裹体以 CO_2 - H_2O 型为主,气相组成基本为纯 CO_2 。而无矿期的石英脉中的包裹体以水溶液包裹体为主。

(2)该矿的早成矿阶段和主成矿阶段的原始流体可能主要来源于下地壳变质流体,同时有地幔流体的加入。闪长岩中金矿脉和灰岩中的成矿流体组成基本一致,但前者成矿早于后者。

志 谢 野外工作得到云南元阳大坪金矿地质科的大力支持,矿区资料的收集工作得到云南省地质调查院、云南省地质矿产勘查开发局、武警黄金部队第十支队和第十三支队的大力帮助。激光拉曼光谱分析工作得到中山大学现代测试中心张卫红老师的支持和指导,中国地质测试中心同位素室万德芳老师协助完成了氢氧同位素分析,在此一并表示感谢!

参 考 文 献

- 毕献武,胡瑞忠,何明友.1996a.哀牢山金矿带ESR年龄测定及其地质意义.科学通报,41(4):1301-1303.
毕献武,胡瑞忠,何明友.1996b.哀牢山金矿带的成矿时代及其成矿机制探讨.地质地球化学,24(1):16-19.
毕献武,胡瑞忠,何明友.1997.哀牢山金矿带主要金矿床成矿流体特征.矿物学报,17(4):435-441.
毕献武,胡瑞忠.1998.哀牢山金矿带成矿流体稀土元素地球化学.地质论评,44(30):264-269.

- 毕献武, 胡瑞忠. 1999. 云南大坪金矿床矿化剂来源及其对金成矿的制约. 矿物学报, 19(1): 28-33.
- 范宏瑞, 谢奕汉, 赵 瑞, 等. 2000. 小秦岭含金石英脉复式成因的流体包裹体证据. 科学通报, 45(5): 537-542.
- 葛良胜, 邓 军, 杨立强, 等. 2007. 云南大坪超大型金多金属矿床地质地球化学特征. 地质与勘探, 43(3): 17-24.
- 韩润生, 金世昌. 1994. 云南元阳金矿床成因及找矿标志. 有色金属矿产与勘查, 3(4): 218-222.
- 韩润生, 金世昌, 雷 丽. 1997. 云南元阳大坪改造型金矿床的成矿热液系统地球化学. 矿物学报, 17(3): 337-344.
- 郝天珩, 江为为, 胥 颐, 等. 2005. 红河断裂带深部结构的地球物理研究. 地球物理研究, 20(3): 584-593.
- 胡瑞忠, 毕献武. 1999. 哀牢山成矿带成矿流体的He和Ar同位素地球化学. 中国科学(D辑), 29(4): 321-330.
- 李定谋, 李保华. 2000. 云南哀牢山金矿床的成矿条件. 沉积与特提斯地质, (1): 60-77.
- 李兆麟, 翟 伟, 黄栋林, 等. 2001. 新疆乔尔山和粤西河台韧性剪切带金矿床中熔融包裹体的发现及矿床成因. 矿床地质, 20(3): 208-215.
- 卢焕章, Guy Archambault, 李院生, 等. 1999a. 山东玲珑—焦家地区形变类型与金矿的关系. 地质学报, 73(2): 174-187.
- 卢焕章, Guha J, 方根保. 1999b. 山东玲珑金矿的成矿流体特征. 地球化学, 28(5): 421-437.
- 卢焕章, 范宏瑞, 倪 培, 等. 2004. 流体包裹体. 北京: 科学出版社. 1-487.
- 孙晓明, 徐克勤, 任启江, 等. 1996. 夹皮沟金矿带韧性剪切变形中的水岩反应及物质级分变化规律. 矿床地质, 15(4): 308-316.
- 孙晓明, 杨荣勇, 徐兆文, 等. 1998a. 金堆城超大型钼矿床水-岩 δD - $\delta^{18}O$ 同位素交换体系理论模型及成矿流体来源. 地质地球化学, 26(2): 16-21.
- 孙晓明. 1998b. 韧性剪切带中两类脆性构造及其对金矿化的控制意义. 中山大学学报(自然科学版), 37(1): 98-102.
- 孙晓明, 熊德信, 石贵勇, 等. 2006a. 云南大坪金矿白钨矿帽性气体同位素组成特征及其成矿意义. 岩石学报, 22(3): 725-732.
- 孙晓明, 熊德信, 王生伟, 等. 2006b. 壳幔相互作用及其对哀牢山金矿带金成矿的贡献: 以云南大坪金矿为例. 地质地球化学研究进展——庆贺王德滋院士致力于地质科学六十周年暨80华诞. 南京: 南京大学出版社. 269-279.
- 孙晓明, 石贵勇, 熊德信, 等. 2006c. 云南哀牢山金矿带大坪剪切带型金矿成矿 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 定年. 地质学报, 81(1): 88-92.
- 孙晓明, 石贵勇, 熊德信, 等. 2007. 云南哀牢山金矿带大坪金矿铂族元素(PGE)和Re-Os同位素地球化学及其矿床成因意义. 地质学报, 81(3): 394-404.
- 熊德信, 孙晓明, 石贵勇, 等. 2006a. 云南大坪金矿白钨矿微量元素、稀土元素和Sr-Nd同位素组成特征及其意义. 岩石学报, 22(3): 733-741.
- 熊德信, 孙晓明, 翟 伟, 等. 2006b. 云南大坪金矿含金石英脉中高结晶度石墨包裹体: 下地壳麻粒岩相变质流体参与成矿的证据. 地质学报, 80(9): 1448-1456.
- 熊德信, 孙晓明, 翟 伟, 等. 2007a. 云南大坪韧性剪切带型金矿富 CO_2 流体包裹体及其成矿意义. 地质学报, 81(4): 640-653.
- 熊德信, 孙晓明, 石贵勇. 2007b. 云南哀牢山喜马拉雅期造山型金矿带矿床地球化学及成矿模式. 北京: 地质出版社. 1-144.
- 徐 莉, 孙晓明, 翟 伟, 等. 2005. 中国大陆科学钻探(CCSN)高压超高压变质岩中石英脉流体包裹体初步研究. 岩石学报, 21(2): 505-512.
- 徐 莉, 孙晓明, 翟 伟, 等. 2006. 中国大陆科学钻探(CCSN)HP-UHP变质岩中石英脉 δD - $\delta^{18}O$ 同位素组成及其意义. 岩石学报, 22(7): 2009-2017.
- 杨敏之, 吕古贤. 1996. 胶东绿岩带金矿地质地球化学. 北京: 地质出版社. 1-121.
- 曾章仁, 张连昌, 韩兆信. 1994. 新疆康古尔糜棱岩带蚀变岩型金矿床地质特征及成因. 矿床地质, 13(2): 97-103.
- 翟 伟. 2003. 粤西河台金矿床地球化学与成因研究(博士学位论文). 广州: 中山大学.
- 张 燕. 2009. 云南哀牢山大坪喜马拉雅期碰撞造山型金矿床地球化学及成矿机制(博士学位论文). 广州: 中山大学.
- 郑永飞, 陈江峰. 2000. 稳定同位素地球化学. 北京: 科学出版社. 1-275.
- Bi X W, Hu R Z and He M Y. 1996a. ESR dating of Ailaoshan gold metallogenic belt and geologic significance. Chinese Science Bulletin, 41(18): 1546-1549(in Chinese with English abstract).
- Bi X W, Hu R Z and He M Y. 1996b. An approach to the metallogenic era and the metallogenic mechanism of Ailaoshan gold belt. Geology-Geochemistry, 24(1): 16-19(in Chinese).
- Bi X W, Hu R Z and He M Y. 1997. Characteristics of ore-forming fluid of three gold deposits in Ailaoshan gold Metallogenic belt. Acta Mineralogica Sinica, 17(4): 435-441 (in Chinese with English abstract).
- Bi X W and Hu R Z. 1999. Mineralizer source and its constraints on gold mineralization of the Daping gold deposit, Yunnan. Acta Mineralogica Sinica, 119(1): 28-33 (in Chinese with English abstract).
- Chi G X, Benoît Dubé, Kenneth Williamson Anthony E. Williams-Jones. 2006. Formation of the Campbell-Red Lake gold deposit by H_2O -poor, CO_2 -dominated fluids. Mineralium Deposita, 40: 726-741.
- de Ronde C. E. J. 2000. Round hill shear zone hosted gold deposit, Macraes Flat, Otago, New Zealand: Evidence of a magmatic ore fluid. Econ. Geol., 95: 1025-1048.

- Diamond L W. 2001. Review of the systematics of CO₂-H₂O fluid inclusions. *Lithos*, 55: 69-99.
- Fan H R, Xie Y H, Zhao R, et al. 2000. Dual origins of Xiaojinqing gold-bearing quartz veins: Fluid inclusion evidence. *Chinese Science Bulletin*, 45(15): 1424-1430.
- Ge L S, Deng J, Yang L Q, et al. 2007. Geology and geochemistry of Daping super-large gold-polymetallic deposit in Yunnan Province. *China Geology and Prospecting*, 43(3): 17-24 (in Chinese with English abstract).
- Goldfarb R J, Groves D I and Gardoll S. 2001. Orogenic gold and geologic time: A global synthesis. *Ore Geology Reviews*, 18: 1-75.
- Goldfarb R J, Ayuso R Miller M L, et al. 2004. The Late Cretaceous Donlin Creek gold deposit, southwestern Alaska: Controls on epizonal ore formation. *Econ. Geol.*, 99(4): 643-671.
- Goldfarb R J, Baker T and Dubé B. 2005. Distribution, character, and genesis of gold deposits in metamorphic terranes. In: Hedenquist J W, Thompson J F H, Goldfarb R J and Richards J P, eds. *Economic Geology 100th Anniversary Volume*. Society of Economic Geologists, Littleton, 407-450.
- Groves D I, Goldfarb R J, Gebre-Mariam, et al. 1998. Orogenic gold deposits: A proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types. *Ore Geology Reviews*, 13: 7-27.
- Groves D I. 1993. The crustal continuum model for late-Archean lode-gold deposits of the Yilgarn Block, Western Australia. *Mineralium Deposita*, 28: 366-374.
- Groves D I, Goldfarb R J, Robert F, et al. 2003. Gold deposits in metamorphic belts: Overview of current understanding, outstanding problems, future research, and exploration significance. *Econ. Geol.*, 98: 1-29.
- Han R S and Jin S C. 1994. Genesis and criteria for ore prospecting in the Yuanyang gold deposit, Yunnan Province. *Geological exploration and non-ferrous metals*, 3(4): 218-222 (in Chinese with English abstract).
- Han R S, Jin S C and Lei L. 1997. Geochemistry of ore-forming hydrothermal system of Daping reworked gold deposit, Yuanyang, Yunnan. *Acta Mineralogica Sinica*, 17(3): 337-344 (in Chinese with English abstract).
- Hao T Y, Jiang W W, Xu Y, et al. 2005. Geophysical research on deep structure feature in study region of red river fault zone. *Progress in Geophysics*, 20(3): 584-593 (in Chinese with English abstract).
- Hu R Z and Bi X W. 1999. He and Ar isotope geochemistry of ore-forming fluid in Ailaoshan gold metallogenic belt. *Science in China (series D)*, 29(4): 321-330 (in Chinese).
- Jia Y and Kerrich R. 1999. Nitrogen isotope systematics of mesothermal lode gold deposits: Metamorphic, Granitic water, or mantle origin? *Geology*, 27: 1051-1054.
- Jia Y and Kerrich R. 2000. Giant quartz vein systems in accretionary orogenic belts: The evidence for a metamorphic fluid origin from $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{13}\text{C}$ studies. *Earth and Planetary Science Letters*, 184: 211-224.
- Jia Y, Li X and Kerrich R. 2001. Stable isotope (O, H, C, S, C, and N) systematic of quartz vein systems in the turbidite-hosted central and north Deborah gold deposits of the Bendigo gold field, Central Victoria, Australia: Constrains on the origin of ore-forming fluids. *Econ. Geol.*, 96: 705-721.
- Kerrick R, Wyman D, Hollings P, et al. 2000. Reply to the comment by Kamber and collerson on "variability of Nb/U and Th/La in 3.0 to 2.7 Ga Superior Province ocean plateau basalts: Implications for the timing of continental growth and lithosphere recycling". *Earth and Planetary Science Letters*, 177: 3410-345.
- Li D M and Li B H. 2000. The mineralization conditions of Ailaoshan gold deposits in Yunnan. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 20(1): 60-77 (in Chinese).
- Li Z L, Zhai W, Huang D L, et al. 2001. The discovery of melt inclusions in Hetai and Qiaogashan ductile shear zone gold deposits and the genetic study of these deposits. *Mineral Deposits*, 20(3): 208-215 (in Chinese with English abstract).
- Lu H Z, J. Guha, Fang G B. 1999b. Characteristics of ore-forming fluid in Linglong gold mine, Shandong, China. *Geochimica*, 28(5): 421-437.
- Lu H Z, Guy Archambault, L Y S. et al. 1999a. The relation between deformation types and gold mineralization in the Linglong-Jiaojia district, Shandong Province, China. *Acta Geologica Sinica*, 73(2): 174-187 (in Chinese with English abstract).
- Lu H Z, Fan H R, Ni P, et al. 2004. *Fluid inclusions*. Beijing: Science Press. 1-487 (in Chinese).
- Mikucki E J. 1998. Hydrothermal transport and depositional processes in Archean lode-gold systems: A review. *Ore Geology Review*, 13: 307-321.
- Mumm A S, Oberthür T, Vetter U, et al. 1997. High CO₂ content of fluid inclusions in gold mineralisations in the Ashanti Belt, Ghana: A new category of ore forming fluids? *Mineralium Deposita*, 32: 107-118.

- Nesbitt B E, Murowchick J B and Muehlenbachs K. 1986. Dual origins of lode gold deposits in the Canadian Cordillera. *Geology*, 14: 506-509.
- Shelton K L, So C and Chang J. 1988. Gold-rich vein deposits of the Republic of Korea, Geochemical studies of the Jungwon gold area. *Econ. Geol.*, 83: 1221-1237.
- Sun X M, Xu KQ, Ren Q J, et al. 1996. Fluid-rock interaction and chemical variations during ductile deformation in the Jiapigou gold belt. *Mineral Deposits*, 15(4): 308 - 317(in Chinese with English abstract).
- Sun X M, Xiong D X, Shi G Y, et al. 2006a. Noble gas isotopic compositions of scheelites in Daping gold mine in Yunnan Province, China, and their metallogenic significances. *Acta Petrologica Sinica*, 22(3):725-732 (in Chinese with English abstract).
- Sun X M, Xiong D X, Shi G Y, et al. 2006b. Crust-mantle interaction in the Ailaoshan gold belt and its contribution to gold mineralization: a case study of Daping gold mine in Yunnan Province. China. Nanjing: Nanjing University Press. 269-279 (in Chinese with English abstract).
- Sun X M, Shi G Y, Xiong D X, et al. 2006c. ^{39}Ar - ^{40}Ar dating of Daping ductile shear zone hosted gold deposit, Yunnan Province, China. *Acta Geologica Sinica*, 81(1): 88-92(in Chinese with English abstract).
- Sun X M, Shi G Y, Xiong D X. et al. 2007. Platinum group elements geochemistry and Re-Os isotopic compositions and their metallogenic implications of Daping gold deposit in Ailaoshan gold belt, Yunnan Province, China. *Acta Geologica Sinica*, 81(3): 394-404(in Chinese with English abstract).
- Sun X M, Zhang Y, Xiong D X, et al. 2009. Crust and mantle contributions to gold-forming process at the Daping deposit, Ailaoshan gold belt, Yunnan, China. *Ore Geology Reviews* 36(1) (doi: 10.1016/j.oregeorev.2009.05.002).
- Taylor H P. 1979. Oxygen and hydrogen isotope relationships. In: Barnes H L. ed. *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*. 2nd. New York:wiley, 236-277.
- Wilkinson J J. 2001. Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. *Lithos*, 55: 229-272.
- Xiong D X, Sun X M, Shi G Y, et al. 2006a. Trace elements, REE and Nd-Sr isotopic compositions in scheelites and their significances for the mineralization in Daping gold mine in Yunnan province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 22(3): 733-741 (in Chinese with English abstract).
- Xiong D X, Sun X M, Zhai W, et al. 2006b. Graphite inclusions with high crystallinity in the auriferous quartz veins from Daping gold deposit in Yunnan Province, China: Evidence for involvement of metamorphic fluid from granulite-facies lower crust in the mineralization. *Acta Geologica Sinica*, 80(9): 1448-1456(in Chinese with English abstract).
- Xiong D X, Sun X M, Zhai W, et al. 2007a. CO_2 -rich fluid inclusions in auriferous quartz veins from the Daping ductile shear zone hosted gold deposit in Yunnan Province, China, and its implications for gold mineralization, 81(5): 640-653(in Chinese with English abstract).
- Xiong D X, Sun X M and Shi G Y. 2007b. Geochemistry and Metallogenic Model of Ailaoshan Cenozoic Orogenic Gold Belt in Yunnan Province, China. Beijing: Geol. Pub. House. 1-144(in Chinese with English abstract).
- Xu L, Sun XM, Zhai W, et al. 2005. Preliminary studies of fluid inclusions in quartz veins of HP-UHP metamorphic rocks, CCSD. *Acta Petrologica Sinica*, 21(2): 505-512 (in Chinese with English abstract).
- Xu L, Sun XM, Zhai W, et al. 2006. δD - $\delta^{18}\text{O}$ isotope compositions of fluid inclusions in quartz veins of HP-UHP metamorphic rocks from CCSD and its implication. *Acta Petrologica Sinica*, 22(7): 2009-2017(in Chinese with English abstract).
- Yang M Z and Lü G X. 1996. The geology-geochemistry of gold deposits of the Greenstone Belt in Jiaodong district, China. Beijing: Geol. Pub. House. 1-121 (in Chinese).
- Zeng Z R, Zhang L C and Han Z X. 1994. Geological characteristics and genesis of the altered rock Rype gold deposit In Kanggul Mylonite zone, Xinjiang. *Mineral Deposits*, 13(2): 97-103 (in Chinese with English abstract).