

doi:10.3969/j.issn.1007-3701.2018.02.003

## 广东高州石龙金矿床成矿流体地球化学研究

黄惠兰<sup>1</sup>, 黄蔚<sup>2</sup>, 谭靖<sup>1</sup>, 付建明<sup>1</sup>, 李芳<sup>1</sup>, 杨小丽<sup>1</sup>

HUANG Hui-Lan<sup>1</sup>, Huang Wei<sup>2</sup>, TAN Jing<sup>1</sup>, FU Jian-Ming<sup>1</sup>, LI Fang<sup>1</sup>, YANG Xiao-Li<sup>1</sup>

(1. 中国地质调查局武汉地质调查中心, 武汉 430205; 2. 广东省地质调查院, 广州 510080)

(1. Wuhan Center of China Geological Survey, Wuhan 430205, China; 2. Guangdong Geological Survey, Guangzhou)

**摘要:** 广东石龙金矿床是与燕山期中酸性-次火山岩有关的金矿床, 矿化类型有角砾岩型、黄铁矿-多金属硫化物细脉充填型及破碎蚀变岩型。金多金属矿脉均赋存于NE向的韧-脆性剪切变形变质带内。通过对矿石中的石英、重晶石和闪锌矿中流体包裹体测定, 其均一温度(Th)在115°-305°C之间, 盐度(S)在2.07-11.7%NaCleqv之间。拉曼分析结果表明: 流体主要成分是H<sub>2</sub>O, 另有少量CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S和CH<sub>4</sub>等。应用同步辐射X射线荧光微探针无损分析技术, 对石英流体包裹体中的微量元素进行了测定, 一般含金矿石品位高的样品, 其流体包裹体中的Au含量亦高; 相应铁含量也高, 但包裹体中Pb、Zn的含量则不一定都高。结合成分分析和前人研究结果, 认为成矿流体主要来自大气降水, 矿床属于中低温浅成热液金矿床。

**关键词:** 石龙金矿床; 韧-脆性剪切变形; 流体包裹体; 均一温度; 中低温浅成热液; 广东; 高州。

中图分类号: P611; P618.51

文献标识码: A

文章编号: 1007-3701(2018)02-0114-015

Huang H L, Huang W, Tan J, Fu J M, Li F, Yang X L. Study on ore-forming fluid geochemistry of Shilong gold deposit in Gaozhou, Guangdong. *Geology and Mineral Resources of South China*, 2018, 34(2):114-125.

**Abstract:** The Shilong gold deposit in Guangdong are related to the acid volcanic rocks in Yanshanian, and the mineralization types are breccia type, pyrite-polymetallic sulphide filling type and crushing alteration rock type. The polymetallic veins are all in the north-eastern ductile-brittle shear deformation metamorphic zone. The homogeneous temperature(Th) is between 115-305 °C and the salinity (S) is between 2.07-11.7 % NaCleqv as measured by fluid inclusions in quartz, barite and sphalerite in ores. Laser Raman Spectroscopy analysis showed that there are mainly H<sub>2</sub>O, and a small amount of CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S and CH<sub>4</sub> in the fluid inclusions. The trace elements in fluid inclusions of quartz were measured by synchrotron X-ray fluorescence microprobe nondestructive analysis technique. When the gold ore has a high grade, the content of Au in the fluid inclusions was also high, but the Pb, Zn content in inclusions is not necessarily high. Combined with the composition analysis and previous research results, it is believed that the ore-forming fluid is mainly from atmospheric precipitation, and the deposit is a medium-low-short hydrothermal gold deposit.

**Keywords:** Shilong gold deposit; ductile-brittle shear deformation; fluid inclusions; homogeneous temperature; medium and low temperature shallow hydrothermal fluid; Gaozhou, Guangdong

收稿日期: 2017-9-28; 修回日期: 2018-3-4

基金项目: 中国地质调查局项目“南岭成矿带中西段地质矿产调查”(编号: 121201009000150002)。

第一作者: 黄惠兰(1959-), 女, 高级工程师, 主要从事实验地球化学研究工作, E-mail: hhuilan502@163.com.

广东高州石龙金矿田属廉江—信宜断裂带中段和北西向茂名盆地的交汇部位,是岑溪—博白地区金银铜铅锌成矿带金矿集区之一,矿田内已发现多个中型金矿床和矿化点<sup>[1-2]</sup>,如庞西垌—金山银金矿床<sup>[3-9]</sup>。前人的研究重点集中在云开地区金矿床地球化学、成矿条件与成矿预测研究<sup>[10-16]</sup>,取得了一定的成果和认识,但缺乏对成矿流体性质以及成矿过程的深入研究。故本文拟通过对石龙金矿床流体包裹体的岩相学、显微测温学、激光拉曼和同步辐射分析研究,揭示金富集的成矿流体组成、来源及其演化,进而探讨成矿元素的沉淀,为深入认识该矿田的成矿机制、分布规律提供依据。

### 1 矿床地质特征

高州石龙金多金属矿床位于广东东北向廉江—信宜断裂带中段和北西向茂名盆地的交汇部位,即广东省高州市西部,直距约 16 km。矿区由陈家坡、大岭和大利三个矿床呈北东排列组成<sup>[17]</sup>。出露地层以中新元古代云开群(图 1 震旦系范围)为主,其次为零星分布的下白垩统。云开群在本区为

一套中深变质岩系,岩性为黑云母变粒岩、二云石英片岩、黑云母石英片岩、石英岩以及黑云斜长片麻岩、黑云二长片麻岩等,并经历了多期变形变质改造,形成一系列北东走向为主体的脆—韧性剪切变形变质带。地层走向北东,倾向南东为主,局部倾向北西,矿体主要分布于该套地层中(图 1)。

区内石牙岭断裂以东分布有元古界混合花岗岩,岩性以片麻状花岗岩为主。燕山期花岗岩沿石牙岭断裂两侧呈岩株、岩脉分布。岩性为粗粒黑云母钾长花岗岩。

构造由北东向构造和北西断裂组成区内基本构造格架,其中北东向构造为主导构造,控制了 M 矿体的空间展布。褶皱以无根勾状褶皱、紧闭同斜褶皱为特征,其上迭加有一系列规模大小不等的含金糜棱岩带和硅化碎裂岩带,组成一个脆—韧性剪切变形带,断裂带呈舒缓波状,以倾向南东为主,倾角 40°—85°。早期为韧性变形,晚期则为脆性叠加,矿体受控于韧—脆性断裂破碎带<sup>[1]</sup>。

石龙金多金属矿床主要产在断裂带的硅化碎裂岩中。矿化与构造作用有密切联系,且具多期次、多阶段特点。根据相互穿插关系和共生组合特征,

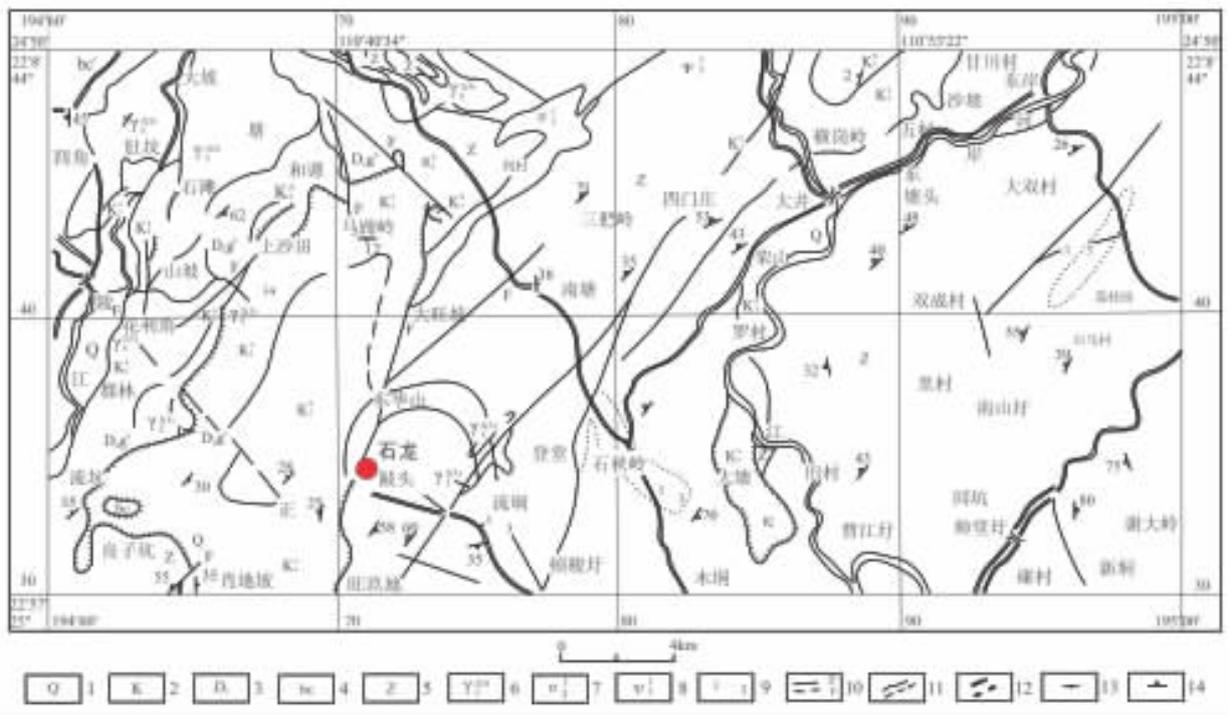


图1 广东高州市石龙金多金属矿床矿区地质图(据文献[1]修改)

Fig. 1 Geological map of the mining area of Shilong gold polymetallic deposit in Gaozhou,Guangdong

1.第四系;2.白垩系;3.泥盆系中统;4.寒武系八村群;5.震旦系;6.燕山五期花岗岩;7.印支期辉长岩;8. 印支期辉岩;9.加里东期混合花岗岩;10.实推测断层;11.实推测地质界线;12.实推测不整合接触界线;13.岩溶产状;14.片理或片麻产状。

可将成矿作用分为5个阶段:Ⅰ、金—糜棱岩—黄铁矿阶段;Ⅱ、金—硅化碎裂岩—黄铁矿阶段;Ⅲ、石英—多金属硫化物阶段,Ⅳ、硫酸盐阶段,Ⅴ、氧化阶段。近矿围岩蚀变,主要为硅化、黄铁矿化,其次为绢云母化、绿泥石化,还有重晶化和方解石化。

## 2 矿化特征

区内金矿的分布较广泛,具有工业意义的金矿体均赋存于变质围岩接触带附近。金矿化类型以细脉浸染蚀变型为主,部分产于变质地层中的石英脉型金矿。矿石中的金属矿物有黄铁矿、方铅矿、闪锌矿、黄铜矿、辉铜矿、自然金等,脉石矿物有石英、重晶石、方解石、绿泥石、绢云母等。表生矿物有褐铁矿、磷酸氧铅矿等。自然金呈粒状、树枝状,粒径0.01–0.3 mm,产于矿石的裂隙或晶洞中,并与黄铁矿共生。黄铁矿至少有两期,早期黄铁矿呈灰黄色,细粒半自形,有的受到后期方铅矿、闪锌矿和黄铜矿的交代,与金关系密切;晚期黄铁矿色泽明亮,以粗粒自形为主。黄铜矿为他形粒状,多被辉铜矿、闪锌矿交代。方铅矿为他形粒状,粒径粗大,并包裹和交代了黄铜矿、黄铁矿。另有一种方铅矿,由于受到后期压力作用,有明显的片理化,呈片状、丝状。闪锌矿大多为他形粒状,粒径粗大,生成较晚,包裹和交代了其它金属矿物黄铁矿、黄铜矿等。

石龙金矿床中的矿石类型可分为含金石英脉矿石、含金石英(硅质)黄铁矿矿石、含金硅化糜棱岩矿石、多金属角砾状矿石。其中以含金石英黄铁矿矿石、多金属角砾状矿石品位较富。含金石英黄铁矿矿石一般分布于矿脉中硅质(化)脉内。多金属角砾状矿石多分布于矿脉内较晚期角砾或碎裂岩内。含金硅化糜棱岩矿石一般分布于硅化脉体之间或脉壁的糜棱岩带内。矿石为半自形、他形粒状,压碎粒状结构,块状、条带状、细脉浸染状(细脉多沿张性裂隙充填,发育晶洞和梳状构造)、角砾状和蜂窝状构造,其中以条带状构造矿石矿化最好,其次为角砾状蜂窝状和块状。

本区热液活动与构造作用有很密切的关系,矿化期次亦表现为多世代的特点,至少经历了下列5个矿化阶段,其特点:

(1)金—糜棱岩—黄铁矿阶段(图2a):以灰黑

色糜棱岩为特点,伴生有灰黄色黄铁矿化。为金矿化初步富集阶段。金品位一般小于 $1.0 \times 10^{-6}$ ,构不成工业矿体。

(2)金—硅化碎裂岩—黄铁矿阶段(图2b):以出现烟灰色他形细粒状石英为特点,伴生有黄铁矿。为金矿主要形成阶段。以出现乳白色梳状石英、粒状黄铁矿和黄铜矿。

(3)石英—多金属硫化物阶段(图2c,图d):以金属硫化物黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿等为特征。早期烟灰色石英呈角砾状,可使原先沉淀的金进一步富集从而形成富矿。

(4)硫酸盐阶段(图2e):是本区热液矿化的结束阶段,以出现白色半透明块状石英脉、重晶石脉、方解石脉为特点,少量方铅矿。

(5)褐铁矿阶段(图2f):表生风化产物,金属硫化物氧化流失,形成金—褐铁矿组分,金品位相应提高。

## 3 流体包裹体类型及显微测温研究

### 3.1 实验方法和仪器

为了解广东高州石龙金—多金属矿床成矿流体来源、成分及演化特征,探讨金成矿作用的相互关系,采集了一套样品,在岩矿鉴定基础上,选择了各成矿期中有代表性的矿物测定。首先将岩石磨制成0.07–0.08 mm的包裹体测温片进行流体包裹体岩相学、均—冷冻法测温及其激光拉曼等成分分析。包裹体测温用仪器为Linkan-THMS-600地质型冷热台,测试前用人造纯 $H_2O$ (0wt.%NaCl),10 wt.% NaCl及25% $H_2O-CO_2$ 包裹体(国际标样)进行系统校正,误差为 $0.2^\circ C \pm$ 。

### 3.2 岩相学流体包裹体特征

对石龙含金多金属矿床中不同阶段的石英、闪锌矿和重晶石中的流体包裹体进行了较详细测定,包裹体类型较为简单,主要多为单相盐水溶液包裹体和两相盐水溶液包裹体,另有少量气体和 $CO_2$ 混合包裹体。包裹体大小为2–25  $\mu m$ ;气液比在8–20%之间;包裹体在主晶中多呈小群状、自由状分布,部分沿显微裂隙分布;形态为米粒状、椭圆形、多边形和不规则状。第1、5成矿阶段中包裹体相对较少,而第2、3、4成矿阶段中包裹体较发育。其结果见图表(图3,表1)。

### 3.3 流体包裹体显微测温结果

石龙金多金属矿床的均一温度和盐度测定结果(图4,表2):(1)第I阶段(图4-(1))(含金黄铁矿-石英脉)石英中两相气液包裹体(Th)为208~305℃,盐度介于10.5~11.7%NaCleqv.;(2)第II阶段(图4-(2))(含金黄铜矿-黄铁矿化石英脉)石英中两相气液包裹体(Th)为190~270℃,盐度介于7.86~11.6%NaCleqv.;(3)第III阶段(图4-(3))(含金多金属铅锌矿-石英脉)闪锌矿和石英分别(Th)为170~230℃和(Th)为180~240℃,盐度介于8.56~9.98%NaCleqv.和7.86~11.5%NaCleqv.;闪锌矿冷冻过程中由于是半透明矿物,是在红外显微镜下进行测定的。在测温过程中当升温到某一温度后,包裹体内透明度会降低,壁会增厚,有时气泡移动到黑壁上,为了降低测量误差,实验中采取了Goldstein(1994)的循环冷冻-加热技术<sup>[18]</sup>;(4)第IV阶段(图

4-(4))(含金重晶石石英脉)石英和重晶石分别(Th)为165~215℃和(Th)为155~215℃,盐度介于5.11~10.61%NaCleqv.和4.18~10.5%NaCleqv.;(5)第V阶段(图4-(5))(含金-褐铁矿-石英脉)石英中两相气液包裹体(Th)为115~156℃,盐度介于2.07~7.3%NaCleqv.;此阶段褐铁矿-石英细脉,有大量的褐铁矿,另有少量黄铁矿以及金矿化。该阶段成矿流体演化为低温度低盐度流体,即不同阶段流体包裹体的温度和盐度从早期到晚期逐渐降低的。

### 4 同步辐射(SRXRF)X射线荧光微探针分析

实验测试在中国科学院地质与地球物理研究所探针室(北京)完成的。采用同步辐射X射线荧光微探针无损分析技术对广东石龙含金多金属矿

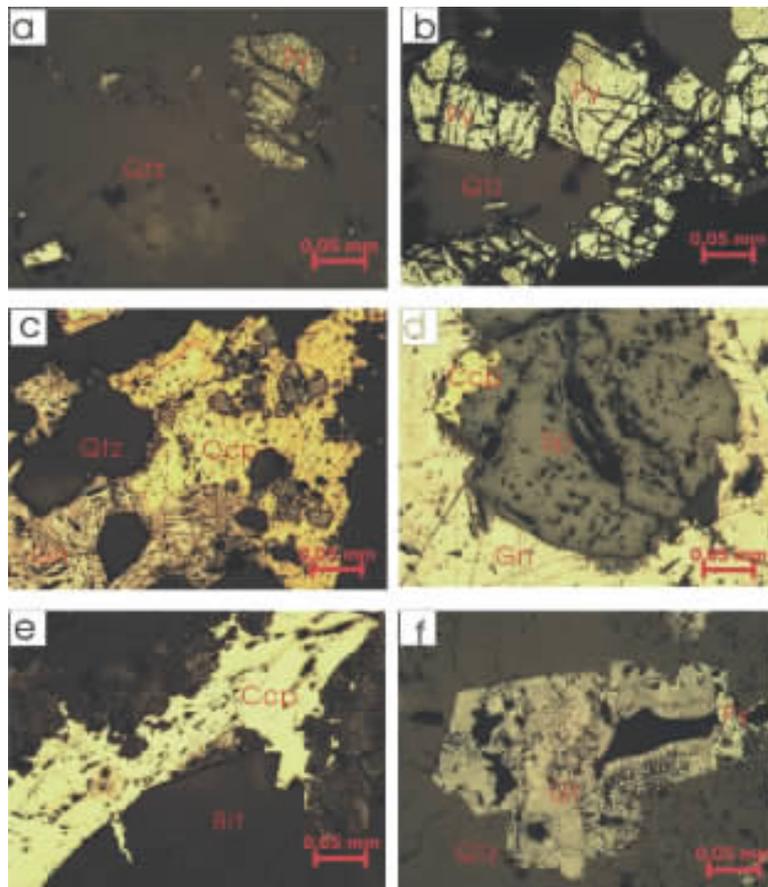


图2 广东高州石龙金矿床中矿石镜下特征

Fig. 2 Microscopic features of ore in Shilong gold deposit in Gaozhou, Guangdong

(a)SL4-1第I阶段中黄铁矿(Py)呈糜粒状;(b)SL5-1第II阶段中黄铁矿(Py)呈压碎状;(c,d)SL6-1第III阶段中方铅矿(Gn)交代黄铁矿(Py)和黄铜矿(Ccp);(e)SL8-1第IV阶段中方铅矿(Gn)呈脉状;(f)SL9-1第V阶段中褐铁矿(Ht)交代黄铁矿(Py)。

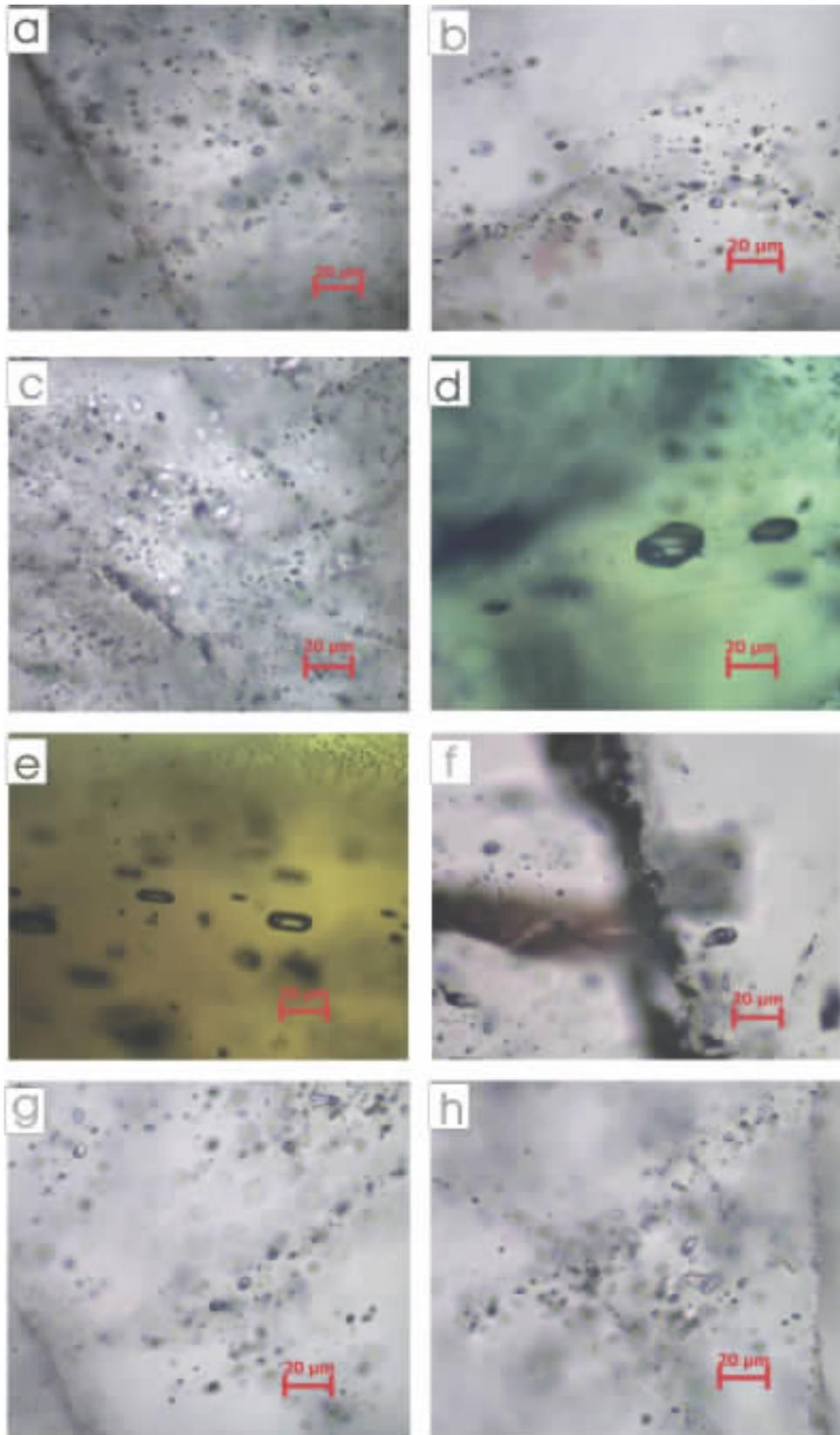


图3 广东高州石龙金多金属矿床各矿物流体包裹体特征

Fig. 3 Characteristics of fluid inclusions in various minerals of Shilong gold polymetallic deposit in Gaozhou, Guangdong  
 (a)SL4-1石英中气液包裹体(I);(b)SL5-1石英中气液包裹体(II);(c,d)SL6-1闪锌矿和石英中气液包裹体(III);(e,f,g)SL8-1重晶石和石英中气液包裹体(IV);(h)SL9-1石英中气液包裹体(V).

表1 广东高州石龙金多金属矿床中石英、闪锌矿和重晶石流体包裹体特征  
Table 1 Characteristics of fluid inclusions in quartz, sphalerite and barite of Shilong gold polymetallic deposit, in Gaozhou, Guangdong

样号	岩性	测定矿物	包裹体类型及其比例	室温时的组成相态及相比(vol%)	包裹体大小(μm)	包裹体形态	包裹体分布特点
SL4	含金-糜棱岩-黄铁矿-石英脉(I)	石英	单相盐水溶液包裹体	LH20 100 LH20 90~95 VH20 5~10	3~15 5~15	米粒状、椭圆形和不规则状 多边形、负晶形不规则状	米粒状、椭圆形和不规则状 多边形、负晶形不规则状
			两相盐水溶液包裹体	LH20 85~90 VH20 10~15	3~25	负晶形、圆形	负晶形、圆形
			单相气体包裹体	V 100	2~25	椭圆形和不规则	椭圆形和不规则
SL5	含金-碎裂岩-黄铁矿-黄铁矿-石英脉(II)	石英	单相盐水溶液包裹体	LH20 100 LH20 80~85 VH20 15~20	3~25 5~15	负晶形、多边形和米粒状 负晶形、多边形和椭圆形	群体分布或自由分布 成群分布或沿裂隙分布
			两相盐水溶液包裹体	LH20 85~90 VH20 15~20	3~10	椭圆形和不规则	自由分布或沿裂隙分布
			单相气体包裹体	V 100		负晶形、不规则状和椭圆形	群体分布或自由分布
SL6	含金-多金属铅锌矿-石英脉(III)	石英	单相盐水溶液包裹体	LH20 100 LH20 80~85 VH20 15~20	2~15 3~25	负晶形、不规则状和椭圆形 负晶形、不规则状和椭圆形	负晶形、不规则状和椭圆形 负晶形、不规则状和椭圆形
			两相盐水溶液包裹体	LH20 85~90 VH20 10~15	3~20 5~25	米粒状、椭圆形和不规则状 负晶形、椭圆形、多边形	自由、小群分布或沿裂隙分布 成群或串分布或自由分布
			单相气体包裹体	V 100	2~12	负晶形、椭圆形	小群分布或沿裂隙分布
SL8	含金-方铅矿-重晶石石英脉(IV)	石英	单相气体包裹体	V 100	3~18		
			单相气体包裹体	LH20 85~90 VH20 10~15	5~30 3~25	米粒状、椭圆形和不规则状 椭圆形、负晶形和多边形	自由分布或沿裂隙分布 成群或小群分布
			两相盐水溶液包裹体	LH20 75~80 VH20 20~25	3~25 3~25	负晶形、不规则状和椭圆形 椭圆形、多边形、不规则状和椭圆形	小群分布或自由分布 自由、小群分布或沿裂隙分布
SL9	含金-褐铁矿-梳状石英脉(V)	石英	单相气体包裹体	V 100	2~12	负晶形 圆形	小群分布或沿裂隙分布
			单相盐水溶液包裹体	LH20 100 LH20 75~80 VH20 20~25	3~15 4~20	米粒状、椭圆形和负晶形 负晶形、不规则状和椭圆形	自由、小群分布或沿裂隙分布 群体分布或自由分布
			单相气体包裹体	V 100	3~15	负晶形、圆形	小群分布或沿裂隙分布

表2 广东高州石龙金多金属矿床中流体包裹体的均一温度-盐度和密度特征

Table 2 The homogeneous temperature, salinity and density characteristics of fluid inclusions in the Shilong gold polymetallic deposit, Gaozhou, Guangdong

样号	成矿阶段	测定矿物	均一温度(°C)	平均(°C)	冰点温(°C)	平均(°C)	盐度(% NaCleqvl)	平均(%Na Cleqvl)	密度(g/cm <sup>3</sup> )	平均(g/cm <sup>3</sup> )
SL4-1	含金黄铁矿石英脉(I)	石英	208~305	256.5	-7.0~-8.0	-7.5	10.5~11.7	11.1	0.940~0.831	0.886
SL5-1	含金黄铜矿-石英脉(II)	石英	190~260	225	-5.0~-7.9	-6.45	7.86~11.6	9.73	0.937~0.891	0.914
SL6-1	含金铅锌矿-石英脉(III)	石英	180~235	207.5	-5.0~-7.8	-6.4	7.86~11.5	9.68	0.947~0.919	0.933
		闪锌矿	170~228	199	-5.5~-6.6	-6.05	8.56~9.98	9.27	0.962~0.914	0.938
SL8-1	含金重晶石石英脉(IV)	石英	165~215	190	-3.1~-7.1	-5.1	5.11~10.5	7.81	0.940~0.933	0.936
		重晶石	155~215	185	-2.5~-7.0	-4.8	4.18~10.5	7.34	0.943~0.933	0.938
SL9-1	含金-褐铁矿-石英脉(V)	石英	115~156	136	-1.2~-4.6	-2.94	2.07~7.3	4.68	0.961~0.965	0.963

床的石英中流体包裹体进行了测定。

#### 4.1 实验条件

用同步辐射 X 射线荧光先将石英晶体(本底)测试两次,探测器计数,包裹体测试 2~3 次,测试时电子束能量为 1.1~2.8GeV, 电子束流为 10~60Ma, 光源点至线终距离为 43 m, 束线终端至样品距离 400 mm。电压为 2~18keV, 电流 12nA, 能量分辨率为 165eV(在 5.9keV 处)。

#### 4.2 测定结果

选择石龙金矿床中的含金黄铁矿-黄铁矿化石英脉(SL5);含金多金属铅锌矿矿石(SL6 和 SL7)和重晶石石英脉(SL8)四个样品的石英中单个流体包裹体共采谱 20 多个(选其中四个代表性谱图,见图 5),在 BSRF 专用模式下,经拟合、归一化、扣除本底和吸收校正等程序<sup>[19-20]</sup>,最后得出各元素的荧光计数,然后用标样(NIST612)作比较,算出各微量元素(Ti、Cr、Mn、Co、Ni、Cu、Zn、Gn、Ge、As、Sn、Ba、Zr、Au、Pb 等)的含量(表 3)。并得到这些样品中微量元素的数据。

从表中要可以看出:其中含金黄铁矿石英脉中(SL5)石英包裹体 Au 含量为 0.27 μg/g, Zn 为 0.00~194 μg/g, Pb 为 21.04~83926.2 μg/g, Fe 为 10.3~316.4 μg/g;含金铅锌矿矿石(SL6 和 SL7)中石英包裹体 Au 为 65.2 μg/g 和 18.8 μg/g, Zn 为 3.5~38.0

μg/g 和 2.2~3.5 μg/g, Pb 为 54.2~188.1 μg/g 和 509.9~74965.8 μg/g, Fe 为 1138.5~2931.5 μg/g 和 3.72~22.1 μg/g;重晶石石英脉(SL8)中石英包裹体 Au 为 0.1~1.2 μg/g, Zn 为 7.4~17.0 μg/g, Pb 为 51.7 μg/g, Fe 为 137.8 μg/g。结果表明:广东石龙金-多金属铅锌矿床中,一般含金矿石品位高的样品,其流体包裹体中的 Au 含量亦高;相应铁含量也高,但包裹体中 Pb、Zn 的含量则不一定都高。分析结果对进一步研究石龙金-多金属矿床成矿机理、矿床成因以及指导找矿等提供了重要的依据。

## 5 激光拉曼光谱分析

对广东高州石龙金矿床石英中流体包裹体进行了激光拉曼光谱分析,选择不同阶段中石英(SL5-1, SL6-1, SL7-1 和 SL8-1)中的两相包裹体进行了测定(图 6, 表 4)。

#### 5.1 实验条件:

分析仪器为英国 Renshaw 公司 inVia 型激光拉曼探针, Ar+激光器波长 514.5 nm; 激光功率 30 mw; 扫描速度 10 秒/6 次叠加; 光谱仪缝 20 μm; 温度 23°C; 湿度为 65%。

#### 5.2 测试结果

测试结果表明(表 4), 第二阶段(SL5)石英中

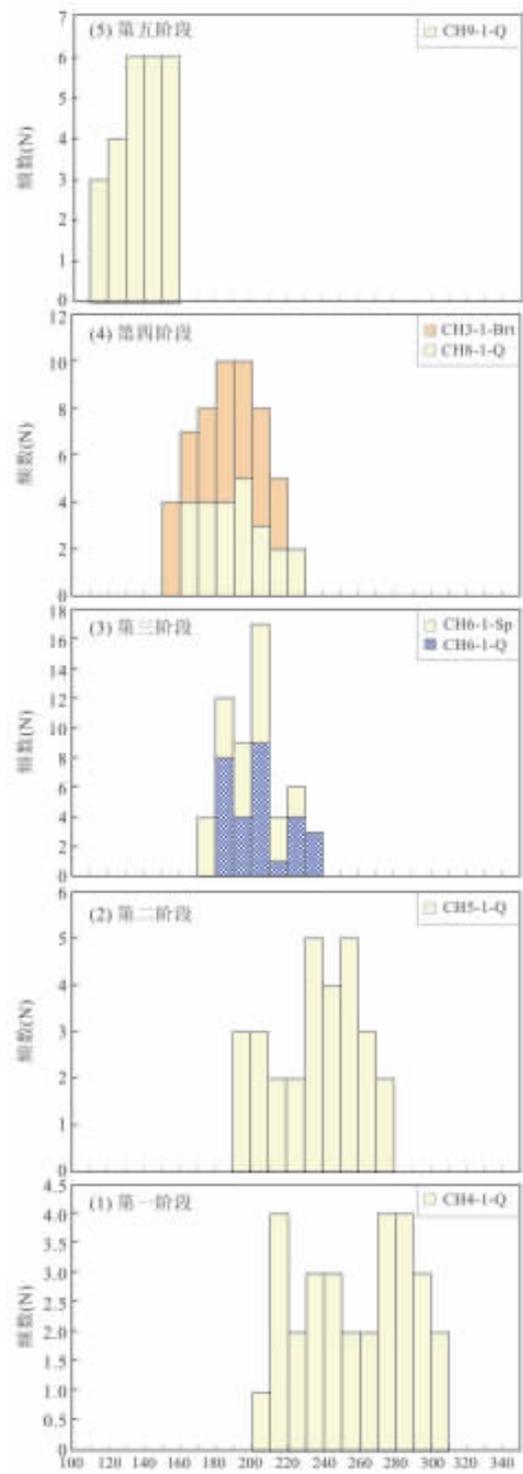


图4 广东高州石龙金多金属矿床中各阶段中流体包裹体直方图

Fig. 4 Histogram of fluid inclusions in various stages of Shilong gold polymetallic deposit in Gaozhou, Guangdong

(1)SL4-1含金黄铁矿石英脉中石英(I);(2)SL5-1含金黄铜矿-石英脉中石英(II);(3)SL6-1含金铅锌矿-石英脉中石英和闪锌矿(III)(4)SL8-1含金重晶石石英脉中石英和重晶石(IV)(5)SL9-1含金-褐铁矿和梳状石英脉中石英(V).

流体部分主要是 H<sub>2</sub>O 和 CO<sub>2</sub>, 含量分别为 96.36% 和 2.09%, 另有少量 H<sub>2</sub>S 等; 第三阶段(SL6,SL7)石英中流体部分 H<sub>2</sub>O 为 69.28%、84.38%, CO<sub>2</sub> 含量较高为 30.27%和 15.63%, 另有少量 CH<sub>4</sub> 等; 第四阶段(SL8) 石英中流体部分 H<sub>2</sub>O 和 CO<sub>2</sub> 为 94.38%和 5.46%, 另有少量 CH<sub>4</sub> 等。总的来说气相部分都以 CO<sub>2</sub>(1285cm<sup>-1</sup>、1388cm<sup>-1</sup>)和 N<sub>2</sub>(2330cm<sup>-1</sup>)为主, 其次是 CH<sub>4</sub> (2913 ~ 2919cm<sup>-1</sup>) 的特征谱峰<sup>[21-22]</sup>; 液相部分主要 H<sub>2</sub>O(或为纯 H<sub>2</sub>O), 另有少量 H<sub>2</sub>S。从早期的石英到晚期的石英, 包裹体中 H<sub>2</sub>O 的含量增多, 说明在后期阶段, 有较多天水的加入。这与镜下观察以及冷冻测定结果基本一致。激光拉曼光谱分析结果表明成矿流体属于 NaCl-H<sub>2</sub>O-(CO<sub>2</sub>)体系。

## 6 讨论

### 6.1 成矿流体物理化学条件

对矿区地表、坑道和钻孔中的金矿石和黄铁-铅锌矿石中的流体包裹体进行了显微测温, 结果表明(表 2 和图 4), 从均一温度和盐度直方图上可见, 流体均一温度从早阶段(I II)190~305℃ 经中阶段(III IV)155~235℃, 到晚阶段(V)114~156℃, 温度有逐步降低趋势。水溶液包裹体盐度从早阶段 7.86~11.70% NaCleqv 到中阶段 4.18~11.50% NaCleqv, 到晚阶段 2.07~7.30% NaCleqv, 盐度逐渐降低。石龙金矿均一温度最佳值为 140~260℃, 后期成矿流体中加入了部分盐度很低的大气水, 晚期石英的盐度较低, 事实上, 前人对高州地区金矿床脉石矿物的 C-H-O 等同位素研究表明, 早阶段成矿流体来源于变质流体, 中阶段为变质流体与大气降水热液混合, 晚阶段流体为大气降水热液<sup>[1]</sup>。这表明金矿化期后, 形成石英的流体主要为大气水溶液。

在均一温度-盐度双变量图上(图 7), 各种矿物的投影点在盐度为 4.6~11.0 %NaCleqv 的范围内平行温度轴分布, 表征出自然冷却的特征。晚期的一些低温包裹体确实与大气降水混合有关, 而且包裹体数量众多, 不过这一混合作用主要是在成矿期后发生的。拉曼分析结果显示, 早期金矿化的部分包裹体由于含少量 CO<sub>2</sub> 或 CH<sub>4</sub> 等, 但在冷冻/加热过程中并未明显看到笼形物, 这时用冰点温度所求得的盐度也往往较高。

根据测得的流体包裹体均一温度和盐度数据

表3 广东高州石龙同步辐射分析石英包裹体中部分元素含量( $\mu\text{g/g}$ )

Table 3 Analysis of contents of some elements in inclusions of quartz in Shilong, Gaozhou, Guangdong

N	Ti	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Zr	Au	Pb
1	9.5	3.1	1.9	316.4	2.1	0.0	212	1.9	0.0	0.0	0.0	9.1	0.0	131
2	4.1	9.6	0.0	65	4.2	0.6	5.8	0.0	2.2	1.7	0.0	0.0	0.3	21.0
3	0.0	46.5	14.7	10.3	7.0	23.3	17.9	0.0	0.0	0.0	631.9	0.0	0.0	83926
4	11.5	9	1.6	2932	26.1	0.0	5.4	3.5	3.5	5.5	20.4	56.3	0.0	54.2
5	0.0	187	7.3	1138.6	11.9	2.9	4.6	38.0	0.8	4.9	0.0	16.1	65.2	188.1
6	0.0	0.0	6.9	0.0	6.1	11.6	4.4	2.2	0.0	0.0	694.6	0.0	0.0	59032
7	76.7	2.4	0.0	3.7	5.5	1.6	0.3	3.5	4.1	3.4	0.0	0.0	18.8	510
8	84.8	8.4	15.5	22.1	4.3	18.8	48.2	0.0	180.2	209.8	1171.7	0.0	0.0	74966
9	75.9	6.7	0.0	137.8	1.9	4.1	0.24	14.5	5.8	0.9	0.0	0.0	0.05	51.7
10	928	0.0	2.3	0.0	0.0	2.8	2.5	17.0	2.9	0.4	7.3	23.6	1.1	0.0
11	1022	5.2	2.4	0.0	0.0	0.6	1.1	7.4	8.5	0.0	5.1	21.1	1.2	0.0

注:表中SL5-(1),(2),(3); SL6-(4),(5); SL7-(6),(7),(8); SL8-(9),(10),(11).

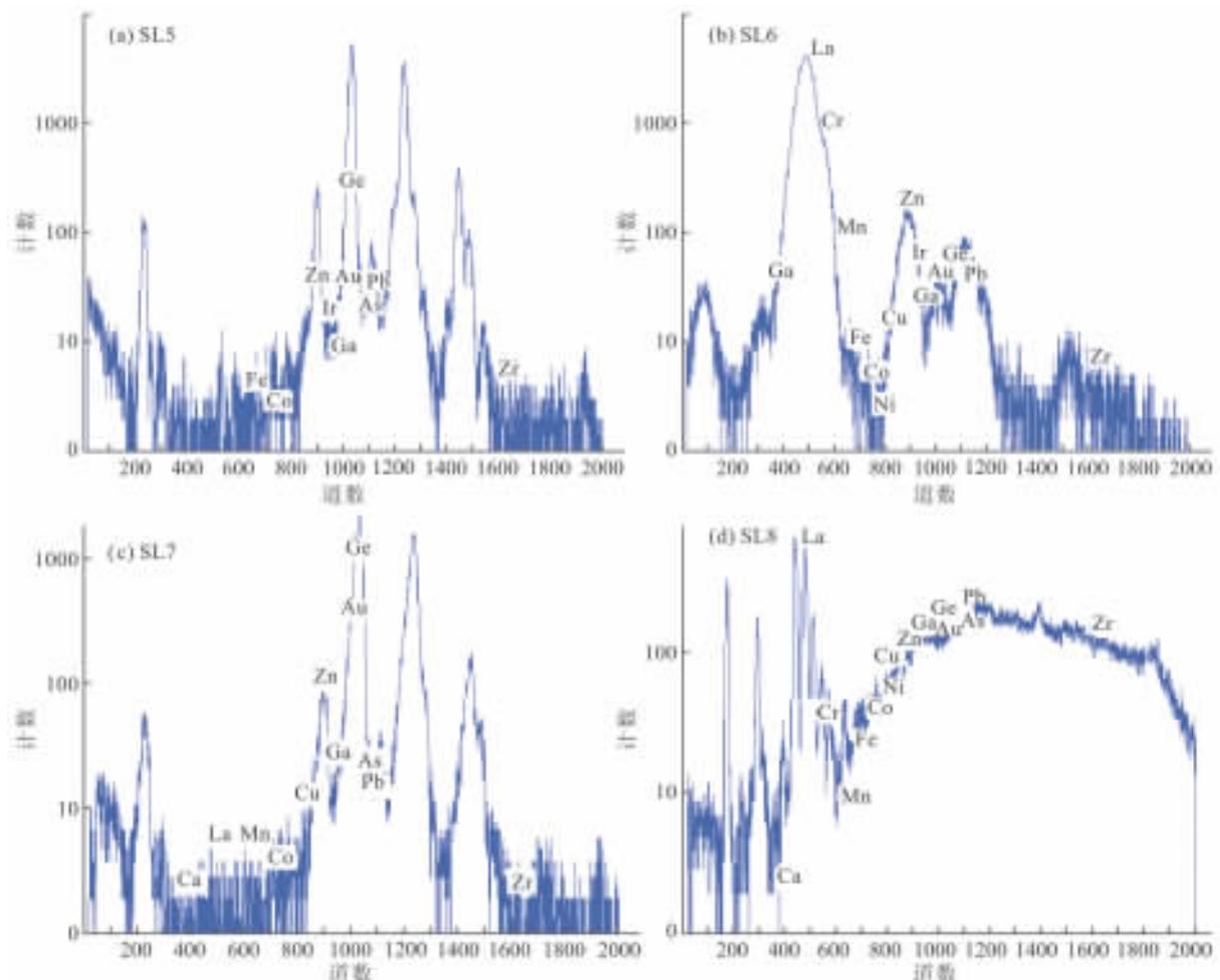


图5 广东高州石龙金矿床中石英中流体包裹体同步辐射X射线分析图谱

Fig. 5 X ray analysis Atlas of fluid inclusions in quartz in Shilong gold deposit, Gaozhou, Guangdong

(a) SL5石英中包裹体谱图, (b) SL6石英中包裹体谱图,

(c) SL7石英中包裹体谱图, (d) SL8 石英中包裹体谱图

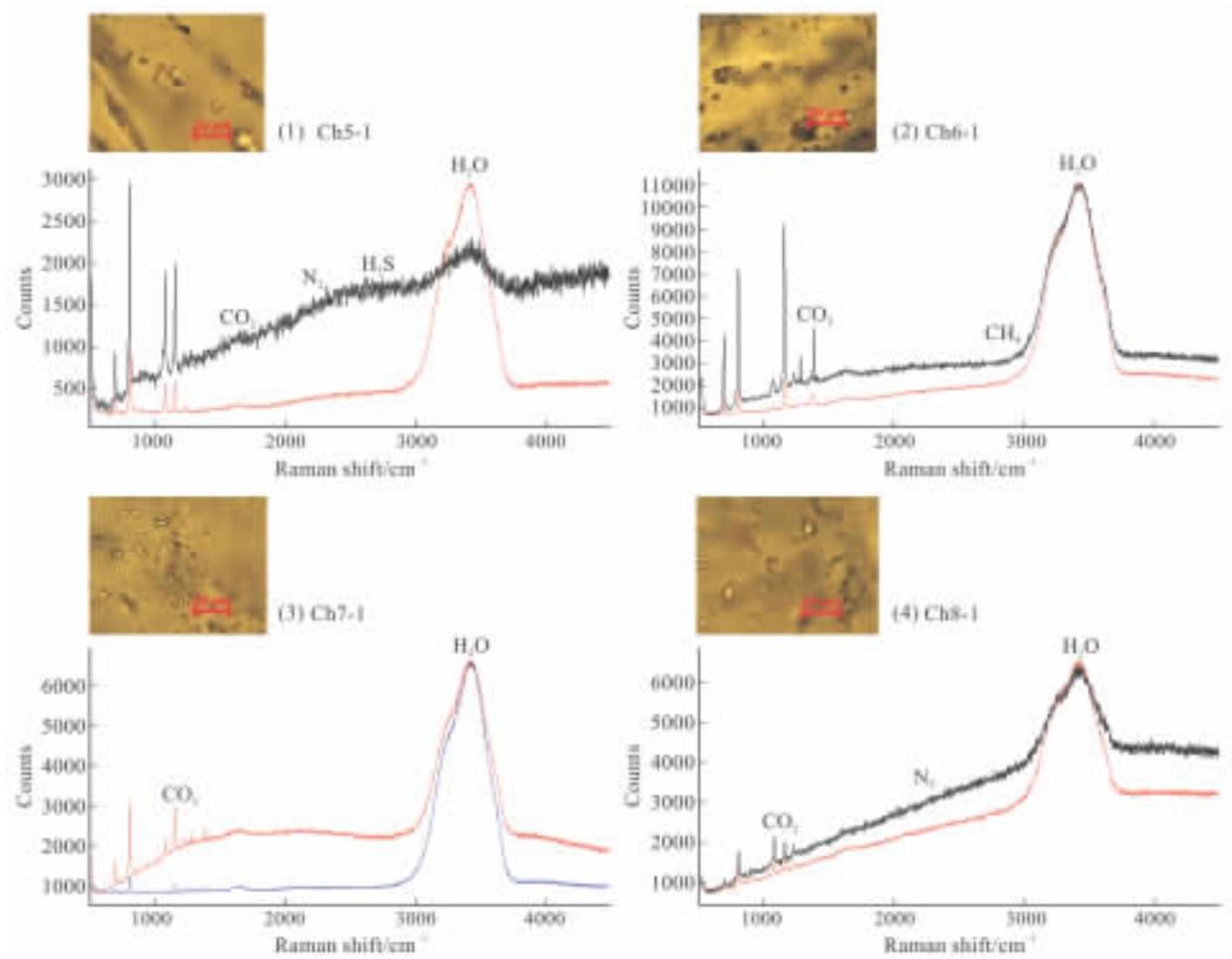


图6 广东高州石龙矿床石英中单个包裹体激光拉曼光谱分析结果

Fig. 6 Raman spectroscopic results of a single inclusion in quartz from Shilong deposit, Gaozhou, Guangdong

(1)SL5-1 石英中气液包裹体;(2)SL6-1石英中气液包裹体;(3)SL7-1石英中气液包裹体;(4)SL8-1石英中气液包裹体.

投点到  $\text{NaCl-H}_2\text{O}$  体系的 T-W- $\rho$  相图上<sup>[24]</sup>, 得出均一温度区间的流体包裹体密度为  $0.886\text{--}0.963\text{ g/cm}^3$ 。根据流体包裹体热力学计算深度为  $1.04\text{--}2.1\text{ km}$ 。

## 6.2 流体演化特征

早期硫化物阶段, 由于地壳的抬升, 成矿流体也随之上升, 流体  $\text{O}_2$  和  $\text{CO}_2$  逃逸, 成矿流体由氧化转换为还原, 同时成矿流体的溶解度继续降低, 大量的铁、铜等较高温元素卸载, 与硫结合, 形成黄铜矿和黄铁矿等, 同时载金络合物  $\text{Au}(\text{HS})_2^-$  的分解, 金以自然金的形式包裹在硫化物中或充填在硫化物或脉石矿物裂隙内。大气降水沿构造破碎带、裂隙带以及岩石的孔隙向下渗透, 这种水渗到一定的深度时, 由于地热梯度和热源驱动, 向浅部环流<sup>[23]</sup>。在循环过程中, 淋滤出了原岩中的成矿元素, 当这些含矿溶液上升到一定部位, 由于物理化学条件的

变化, 在构造破碎带的有利空间卸载, 形成含金—热液 Pb、Zn 多金属矿床。实际上, III—IV 阶段形成的硫化物和石英、重晶石等脉石矿物叠加交代较早阶段 (I II) 使得流体表现出明显的叠加混合的特征。成矿晚期 (石英—方解石阶段) 流体演化为低温中低盐度, 形成大量的方解石和石英。

## 7 结论

(1) 石龙金多金属矿脉均赋存于 NE 向的韧—脆性剪切变形变质带内, 矿体的产状与剪切变形变质带的产状基本一致, 多呈脉状, 受糜棱岩化带和迭加的脆性构造裂隙控制。成矿早阶段矿物组合以石英—黄铁矿组合为特征, 中阶段以多金属硫化物和自然金为标志, 晚阶段为几乎不含矿的石英—碳

表4 石英中流体包裹体液相、气相成分的拉曼光谱分析结果

Table 4 Raman spectra of fluid inclusion and gas phase in quartz

实验 编号	送样编号	液			相%*			盐水溶液(mol/L)					
		CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S	CH <sub>4</sub>	SO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	总和	HS <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	
17R-265	SL5(II)	2.09	1.55			96.36	100					0.09	
17R-266	SL6(III)	30.27		0.45		69.28	100	0.02					
17R-267	SL7(III)	15.63				84.37	100					0.01	
17R-268	SL8(IV)	5.46		0.16		94.38	100					0.14	

实验 编号	送样编号	气							相%*				
		CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S	CH <sub>4</sub>	SO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	Cl <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CO	F <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	总和
17R-265	SL5(II)		8.64						63.71		21.42		100
17R-266	SL6(III)	97.26									2.31		100
17R-267	SL7(III)	92.67									5.17		100
17R-268	SL8(IV)	71.44									28.56		100

\*摩尔数的相对百分含量

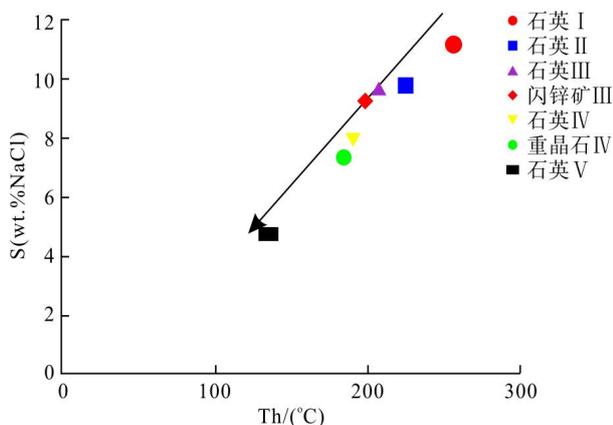


图7. 石龙金矿床不同矿物中流体包裹体中均一温度-盐度和密度分布图

Fig.7 Frequency distribution of the salinity and density of fluid inclusions in the different mineral from Shilong Gold Deposit

酸盐细脉。

(2) 石龙金-多金属铅锌矿床中,一般含金矿石品位高的样品,其流体包裹体中的 Au 含量亦高;相应铁含量也高,但包裹体中 Pb、Zn 含量高的,则 Au 的含量相对较低。

(3) 石龙金矿均一温度(Th)为 115~305℃之间,盐度(S)为 2.07~11.7wt.% NaCl;初熔温度为-20.8~-21.2℃,属 H<sub>2</sub>O—NaCl 体系;从矿化早期到晚期均显示成矿温度和盐度由高到低的变化规律。成

矿流体的密度为 0.886~0.963g/cm<sup>3</sup>,矿化密度从低到高的变化规律。拉曼分析其流体成分主要是 H<sub>2</sub>O,另有少量和 CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S 和 CH<sub>4</sub> 等。根据流体包裹体热力学计算深度为 1.04~2.1 km,该矿床属于中低温浅成热液矿床。

野外工作中得到广东地调院罗大略等地质人员的大力支持和协助;中国地质大学(武汉)彭松柏教授和长江大学路远发教授提出了宝贵的建议和指导;同步辐射实验工作得到李葵发教授的帮助,一并谨致谢忱。

#### 参考文献:

- [1] 宜昌地质矿产研究所,广西地勘局第六地质队,广东地勘局七〇四队. 岑溪—博白地区金银铜铅锌成矿地质背景及找矿靶区优选[R]. 2000.
- [2] 广东地矿局704地质大队. 广东省高州石龙多金属矿区1995年地质普查工作总结及1996年勘探—开发工作计划[R]. 1996.
- [3] 陈辉琪,张兆昆,张永焕. 广东庞西洞银金矿床地质特征[J]. 广东地质,1987,2(2):3-108.
- [4] 王鹤年,杨建文,陈辉琪. 广东庞西洞银矿床的地球化学研究[J]. 矿床地质, 1992,11(2):179-187.
- [5] 王祖伟,周永章,粤桂云开地区庞西洞—金山银金矿床地球化学特征与资源潜力[M].北京:地质出版社,2003:1-95.

- [6] 王祖伟,周永章.粤桂边境庞西垌—金山银金矿床特征与成因[J].大地构造与成矿学,2002,26(2):193-498.
- [7] 王祖伟,周永章.粤桂云开庞西垌—金山银金矿床地球化学特征与资源评价[M].北京:地质出版社,2003:1-95.
- [8] 孙华山,曹新志,张科.粤西北庞西垌银(金)矿床控矿断裂特征与断裂控矿规律[J].地质找矿论丛,2005,20(3):161-165.
- [9] 林振文,周永章,秦艳,郑义,梁志鹏,邹和平,牛佳.钦杭带南段庞西垌—金山银金矿田控矿构造分析及找矿指示[J].矿床地质,2017,36(4):866-878.
- [10] 广东省地质科学研究所.粤西含金地层划分、区域变质和同位素年代地质学研究[R].1987.
- [11] 成都地质学院,广西地质六队.广西云开地区金矿成矿条件与预测研究报告[R].1990.
- [12] 广西地矿局,广东地矿局.云开隆起区银矿床地质特征、成矿条件及找矿预测研究报告[R].1992.
- [13] 毛景文,陈懋弘,袁顺达,郭春丽.华南地区钦杭成矿带地质特征和矿床时空分布规律[J].地质学报,2011,85(5):636-658.
- [14] 安国英,雷英凭,代晓莉.广西云开地区地球化学特征和找矿远景预测[J].物探与化探,2012,36(4):539-540.
- [15] 周永章,李兴远,郑义,沈文杰,何俊国,虞鹏鹏,牛佳,曾长育.钦杭结合带成矿地质背景及成矿规律[J].岩石学报,2017,33(3):667-681.
- [16] 郑义,余盼,王岳军,林振文.粤西—桂东四套成矿系统地质特征、成因类型及构造启示[J].岩石学报,2017,33(3):682-694.
- [17] 刘宏信.粤西高州石龙金矿的地球化学特征[J].西部探矿工程,2006,119(3):112-114.
- [18] Goldstein R H, Reynolds T J. Systematics of Inclusion in diagenetic minerals [C]. Society of Sedimentary Geology, SEPM Short Course, 1994, 31:199.
- [19] 安庆襄,詹秀春,巢志瑜,吴应荣.同步辐射X射线荧光微探针测定岩石中的元素分布[J].岩矿测试,1991,10(2):84-88.
- [20] 李学军,巢志瑜,冼鼎昌.同步辐射X线荧光分析[J].物理,1993,22(9):553-558.
- [21] 徐培苍.地学中的拉曼光谱[M].西安:陕西科学技术出版社,1996.
- [22] Korsakov A V, Dieing T, Golovin A V, Toporski J. Raman imaging of fluid inclusions in garnet from UHPM rocks (Kokchetav massif, Northern Kazakhstan) [J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular & Biomolecular Spectroscopy, 2011, 80(1):88.
- [23] 袁奎荣,梁金城,邓燕华,盛云台,张乐凯.华南花岗岩断裂带中热液银金矿床的几个地质问题[J].桂林冶金地质学院学报,1983,3:1-8.
- [24] 刘斌,沈昆.流体包裹体热力学[M].北京:地质出版社,1999.