

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2023.11.006

广西镇龙山岩浆热液成矿系统

——来自成矿流体、成矿物质的证据

陈港¹, 陈懋弘^{1*}, 葛锐², 李杨林³, 王昱³, 庞宏海⁴, 黄锐⁴, 吴启强⁵CHEN Gang¹, CHEN Maohong^{1*}, GE Rui², LI Yanglin³, WANG Yu³, PANG Honghai⁴, HUANG Rui⁴, WU Qiqiang⁵

1. 中国地质科学院矿产资源研究所自然资源部成矿作用与评价重点实验室, 北京 100037;

2. 万宝矿产有限公司, 北京 100053;

3. 昆明理工大学国土资源工程学院, 云南 昆明 650093;

4. 广西壮族自治区二七三地质队, 广西 贵港 537101;

5. 广西壮族自治区第六地质队, 广西 贵港 537100

1. MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China;

2. Wanbao Mining Ltd., Beijing 100053, China;

3. Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, Yunnan, China;

4. No.273 Geological Team of Guangxi Zhuang Autonomous Region, Guigang 537101, Guangxi, China;

5. No.6 Geological Team of Guangxi Zhuang Autonomous Region, Guigang 537100, Guangxi, China

摘要:镇龙山岩浆热液成矿系统位于广西“山字形构造”前弧一个较大的短轴背斜构成的穹窿中,矿床(点)主要赋存于寒武系和泥盆系碎屑岩中。为探讨各矿床(点)之间的成因联系,在野外调查的基础上,对典型矿床进行了流体包裹体测温、激光拉曼及氢-氧-硫同位素研究。研究结果表明,包裹体主要为水溶液、气液两相包裹体,且含CO₂和CH₄包裹体较多,偶见含NaCl子晶的包裹体。高温矿床均一温度为320~339℃,盐度为8%~9% NaCl eqv;中温矿床均一温度为280~299℃,盐度为7%~8% NaCl eqv;低温矿床均一温度为160~179℃,盐度为5%~6% NaCl eqv。石英中流体包裹体 δD_{V-SMOW} 集中在-55‰~-80.1‰之间, $\delta^{18}O_{V-PDB}$ 集中在-9.1‰~-18.8‰之间,氢-氧同位素图解主要落在岩浆水的范围内,并有向大气降水偏移的趋势,表明上述矿床流体的主要来源可能是岩浆水,后期有大气降水的混入。单矿物的硫同位素峰值集中在-2‰~2‰之间,其中毒砂以正值为主,辉锑矿以负值为主,总体具有相对均一的硫源,说明硫化物中的硫均来自岩浆。上述研究表明,镇龙山地区矿床(点)分布具有明显的岩浆-热液成矿系统的分带特点,岩体及其边缘发育斑岩型高温热液矿床,外围逐渐过渡到中温和中低温热液矿床,建立了镇龙山地区岩浆热液成矿系统的水平和垂直矿化分带模型。

关键词:成矿流体;成矿物质;岩浆热液成矿系统;广西镇龙山**中图分类号:**P611 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2023)11-1854-21

Chen G, Chen M H, Ge R, Li Y L, Wang Y, Pang H H, Huang R, Wu Q Q. Magmatic-hydrothermal metallogenic system in Zhenlongshan, Guangxi: Evidence from ore-forming fluids and materials. *Geological Bulletin of China*, 2023, 42(11): 1854-1874

Abstract: The Zhenlongshan magmatic hydrothermal metallogenic system is located in the dome formed by a large short axis anticline

收稿日期:2021-10-30;修订日期:2021-12-22

资助项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)课题《改造型花岗岩钨锡稀有金属成矿作用》(编号:2012CB416704)和找矿突破战略行动地质矿产勘查项目《广西镇龙山地区岩浆热液成矿系统及成矿预测研究》(编号:桂国土资函[2018]757号)

作者简介:陈港(1997-),男,在读博士生,矿物学、岩石学、矿床学专业。E-mail:ccc0105@163.com

*通信作者:陈懋弘(1971-),男,博士,研究员,从事矿床学及构造地质学研究。E-mail: mhchen666@163.com

in the front arc of the "mountain shaped structure" in Guangxi. The deposits (occurrence) mainly occur in the Cambrian and Devonian clastic rocks. Fluid inclusion thermometry, laser Raman, and H-O-S isotope studies were conducted on typical ore deposits. The system elucidated the source of ore-forming fluids, characteristics and evolution of ore-forming fluids, and sources of ore-forming materials for gold, silver, copper, lead, and zinc deposits around the porphyry, and preliminarily explored the genetic connections of various ore deposits (occurrence) around the porphyry. The results show that the inclusions are mainly gas-liquid inclusions, and contain more CO_2 and CH_4 inclusions, and occasionally contain NaCl daughter crystals. The homogenization temperature of high temperature deposit is $320\sim 339^\circ\text{C}$, and the salinity is $8\%\sim 9\%$ NaCl eqv; the homogenization temperature of medium temperature deposit is $280\sim 299^\circ\text{C}$, and the salinity is $7\%\sim 8\%$ NaCl eqv; the homogenization temperature of low temperature deposit is $160\sim 179^\circ\text{C}$, and the salinity is $5\%\sim 6\%$ NaCl eqv. That is, with the decrease of homogenization temperature, salinity also decreases. The $\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}$ and $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-PDB}}$ of quartz concentrate in $-55\%\sim -80.1\%$ and $-9.1\%\sim -18.8\%$. The H-O isotopic diagram is mainly in the range of magmatic water and tends to shift to meteoric water, which indicates that the main source of fluid in the above deposit may be magmatic water, and there is the mixing of meteoric water in the later stage. The sulfur isotope peak values are concentrated in the range of $-2\%\sim 2\%$, in which arsenopyrite is mainly positive and stibnite is mainly negative. Generally, there is a relatively uniform sulfur source, indicating that the sulfur in sulfide comes from magma. The above research shows that the distribution of ore deposits (occurrence) in Zhenlongshan area has obvious zoning characteristics of magmatic hydrothermal metallogenic system. Porphyry high temperature hydrothermal deposits are developed in the pluton and its edge, and the periphery gradually transits to medium and low temperature hydrothermal deposits. The horizontal and vertical mineralization zoning model for the magmatic hydrothermal metallogenic system in Zhenlongshan area are established.

Key words: metallogenic fluid; metallogenic material; magmatic-hydrothermal metallogenic system; Zhenlongshan of Guangxi

成矿系统一直是矿床学领域研究的热点问题(翟裕生, 1999; 2007; 2020; 翟裕生等, 2008), 而斑岩型矿床成矿系统或岩浆-热液矿床成矿系统长期以来是岩石学、矿床学、流体作用等研究的热点和重点。自 Silltoe (1990; 2010) 和 Sinclair (2007) 提出斑岩成矿系统以来, 越来越多的成矿系统相继被发现 (Mao et al., 2011; Zhao et al., 2018; Xie et al., 2019; Zhai et al., 2019a, b)。斑岩或岩浆热液成矿系统可以围绕岩体外延 $5\sim 15\text{ km}$ 的水平面展布, 垂向上有超过 3 km 的岩浆补给通道, 并形成一系列的元素分带。不同学者从成矿时代 (Mao et al., 2011; Zhao et al., 2018; Zhai et al., 2018)、成矿物质、成矿流体 (Mao et al., 2011; Zhai et al., 2018; 王莹等, 2019) 等方面对不同的矿床(田)进行研究, 以验证成矿系统的存在。大部分矿床, 尤其是岩浆-热液矿床的形成都离不开成矿热液流体作用(王雪苹等, 2014), 而流体包裹体是研究成矿流体最直接的手段, 保留了成矿演化各阶段所捕获的古流体 (Fan et al., 2000; 卢焕章, 2009; 卢焕章等, 2016; 倪培等, 2014; 2020)。对矿体和岩浆岩进行系统的碳、氢、氧、硫、铅等传统稳定同位素测试, 以此来示踪成岩成矿流体的来源及其演化规律, 并探讨成矿物质来源(李建威等,

2020; 钟宏等, 2021)。

近年的勘查工作发现, 广西镇龙山地区围绕岩体发育一系列的矿床(点)(图 1)。自 1958 年, 广西二七三地质队、第六地质队等在镇龙山地区陆续开展地质填图、找矿工作, 并对该地区的铅锌矿、锑矿、铜矿等开展了矿产普查、详查、勘探工作。前人对该地区只进行了初步研究(李培喜等, 1993; 李蔚铮等, 1998; 李建强等, 2008; 李传华等, 2014; 张武饰等, 2020), 很多科学问题还有待回答, 如岩浆岩形成时间及成矿时代, 成矿物质来源、成矿流体演化, 以及成矿机制和矿床模型均需进一步研究。

笔者对研究区的典型矿床开展流体包裹体、激光拉曼及氢-氧-硫同位素研究, 探讨斑岩体与外围金银铜铅锌矿的成矿流体特征, 流体演化过程和成矿物质来源, 初步构建镇龙山岩浆热液成矿系统模型。通过成矿系统的验证和发现, 为后续找矿工作提供了强有力的线索和证据。

1 区域地质背景

广西镇龙山是桂中与桂南的天然屏障, 镇龙山穹窿是广西“山字形构造”前弧弧顶区一个较大的短轴背斜(杨志强等, 2004)。广西镇龙山区位于

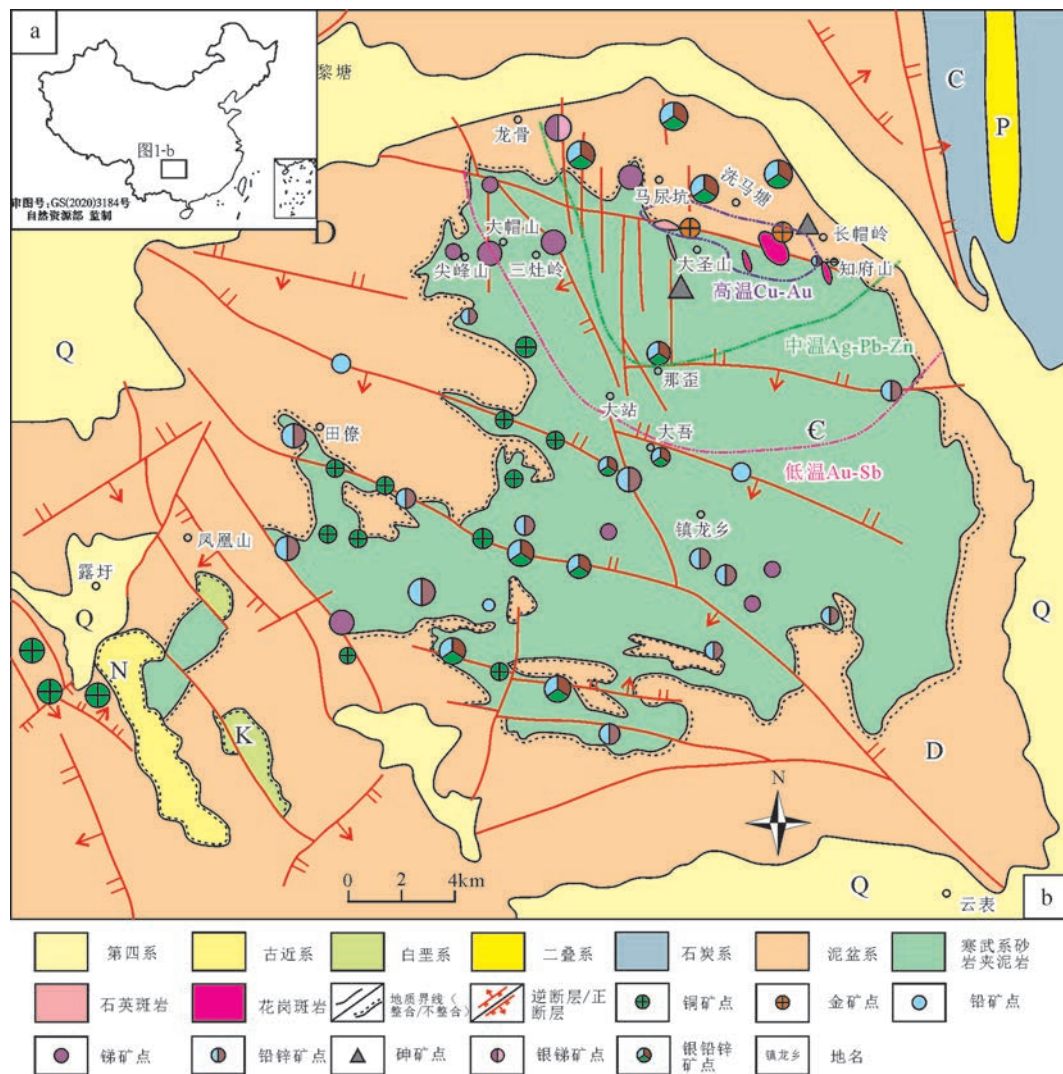


图1 广西镇龙山地区地质简图及矿床(点)分布(据广西壮族自治区二七三地质队,2019 修改)

Fig. 1 Geological map and distributopn of deposit (occurrence) of the Zhenlongshan area, Guangxi

钦-杭成矿带南西段的大瑶山南西侧,介于大瑶山凸起和大明山隆起之间,大黎-凭祥深大断裂纵贯全区。区内褶皱构造发育,断裂构造极发育,岩浆活动较强,寒武系变质砂岩和泥盆系砂质岩中 Au、Ag 丰度普遍偏高(周永章等,2015;2017)。发育与岩浆活动有关的斑岩及岩浆-热液等多金属矿化,是广西重要的成矿集中区(张武饰等,2020)。

研究区出露的地层主要为寒武系和泥盆系。寒武系出露于背斜核部,可细分为小内冲组下段(ϵx^1)、小内冲组上段(ϵx^2)、黄洞口组(ϵh),为一套类复理石建造的碎屑岩。泥盆系有莲花山组(D_1l)、那高岭组(D_1n)、郁江组(D_1y),为一套砂

岩、粉砂岩、页岩、泥灰岩组成的海进序列沉积岩。泥盆系与下伏寒武系呈角度不整合接触,部分地段呈断层接触。

研究区所处位置为穹窿核部,底层为寒武系油积碎屑岩建造,形成以东西向为主的褶皱基底。盖层为下泥盆统滨海相碎屑岩建造,两者呈角度不整合接触。断裂构造可分为近东西向、北北西向及北西向 3 组,其中近东西向的 F_1 (长帽岭-羊角山)断裂规模最大,长度大于 18 km,总体倾向 $205^\circ \sim 195^\circ$,倾角 $60^\circ \sim 86^\circ$,破碎带宽 5~31 m。加里东期褶皱发育,呈紧密的线状分布,走向近东西向,背斜向斜轴线依次平行排列(图 1)。

区域上分布的岩浆岩主要为白垩纪燕山晚期岩浆岩,岩性主体为花岗斑岩、石英斑岩、隐爆角砾岩。花岗斑岩由马尿坑—长帽岭一带沿区域性断裂带连续出露,呈带状分布。在长帽岭北出露有隐爆角砾岩和石英斑岩。穹窿北部马尿坑—长帽岭岩体,为燕山期的产物,沿北西西向断裂侵入,呈岩脉、岩株、岩墙等形式产出,岩性主要为石英斑岩和花岗斑岩。这些岩体与铅锌锑等矿床的形成在成因和空间分布上都有十分密切的关系。

2 典型矿床(点)地质特征

2.1 知府山多金属矿点

研究区出露地层主要为寒武系和泥盆系。寒武系主要为黄洞口组和小内冲组上段,泥盆系主要为郁江组、那高岭组和莲花山组(图 2)。该矿区断裂构造发育。可分为近东西向、北北西向及北西向 3 组,具有多期次活动特征。研究区内有少量岩浆岩出露,在 F_1 断裂可见 2 处石英斑岩脉充填。知府山铅锌锑多金属矿(床)点产于 F_1 区域断裂破碎带

内,与长帽岭斑岩铜矿为同一构造,破碎带近东西向穿越研究区,宽 5.0~31.0 m,往东部分地段被浮土覆盖。破碎带总体倾向南西,倾角 $73^\circ\sim 80^\circ$,被硅化压碎岩、构造角砾岩、霏细斑岩、花岗斑岩等岩石充填,蚀变有硅化、黄铁矿化、电气石化、毒砂矿化及锑、铅、锌矿化(图 3)。矿石矿物主要为辉锑矿、方铅矿和闪锌矿,脉石矿物主要为石英、方解石。

2.2 洗马塘金矿点

矿区出露地层为寒武系黄洞口组,下泥盆统莲花山组。寒武系与泥盆系呈角度不整合接触或断层接触(图 4)。

本区位于镇龙山复背斜之北翼边部,复背斜轴向近于东西向,岩层走向多为北西向,倾向北东,倾角一般为 $20^\circ\sim 40^\circ$ 。下泥盆统莲花山组褶曲不明显或为开阔的波状挠曲,基本上属单斜层。同时,本区还位于狮子岭矿区南北向大断裂和长帽岭—镇龙山东西向大断裂的交点,断裂构造发育,并有火成岩活动,形成了许多矿化蚀变断裂带。断裂根据走向可分为 2 组:①近东西向的构造大断裂(即知府山—镇龙山破碎带),沿此构造中有次一级与其斜交的派生裂隙,多呈北西向;②近南北向的构造断裂,在镇龙山顶处特别发育(图 5)。

区内见淡白色、灰白色石英斑岩,风化后被铁染成淡黄色,斑晶几乎等粒,斑状结构,块状构造。主要由微粒石英、斜长石组成,斑晶多为他形晶,以石英为主,大颗粒为自形或半自形,分布不均匀。石英风化面凸出,长石风化为高岭土。

矿化蚀变石英斑岩,颜色因含较多电气石、毒砂、黄铁矿等矿物,呈灰色—暗灰色,斑状结构,块状构造,一般在长石、石英斑晶边缘被电气石交代,变为球粒状或方形电气石几何体。石英斑晶大小不等,粒径在 0.25~2.2 mm 之间;毒砂呈细小棱柱状晶粒,大小 0.04 mm×0.09 mm~0.13 mm×0.26 mm 之间;黄铁矿呈细粒致密状几何体零星分布,边部往往被毒砂交代呈不规则状。蚀变石英斑岩多发育于接触带,宽度不一,一般为 0.5~5 m。在裂隙中亦有蚀变现象,矿化蚀变程度往外部递减。毒砂矿脉主要矿物组

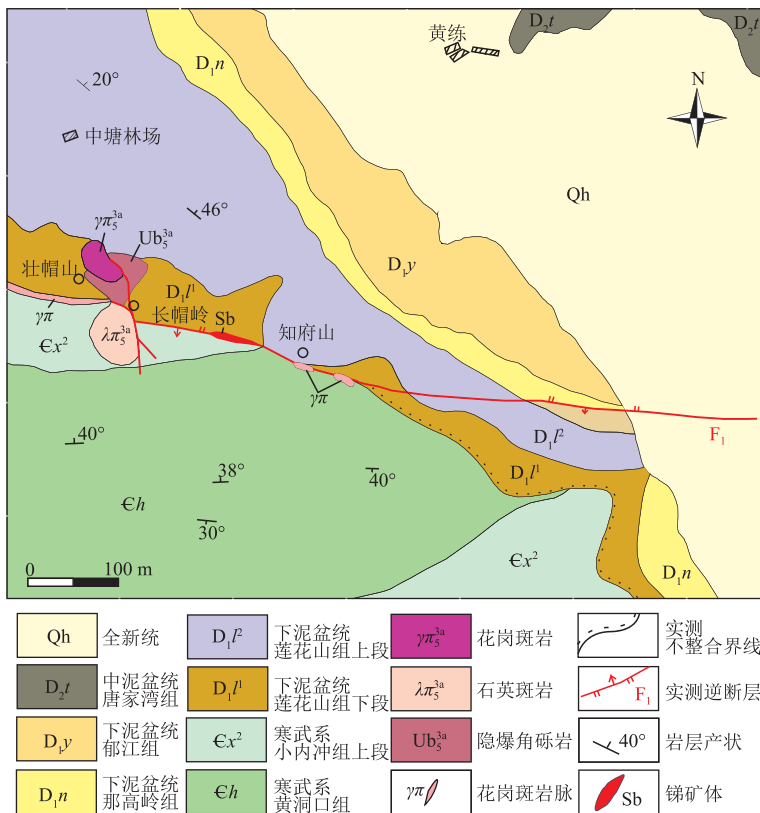


图 2 知府山矿点地质平面图(据广西壮族自治区二七三地质队,2019 修改)

Fig. 2 Geological plan of Zhifushan mine site

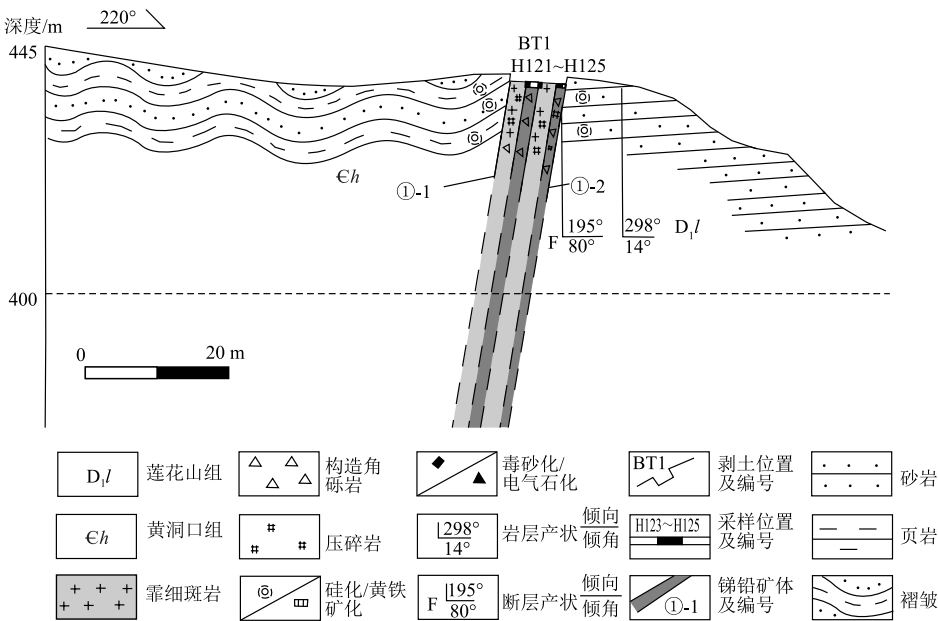


图3 知府山矿区0线勘探线剖面图(据广西壮族自治区二七三地质队,2019 修改)

Fig. 3 Geological profile line 0 in Zhifushan deposit

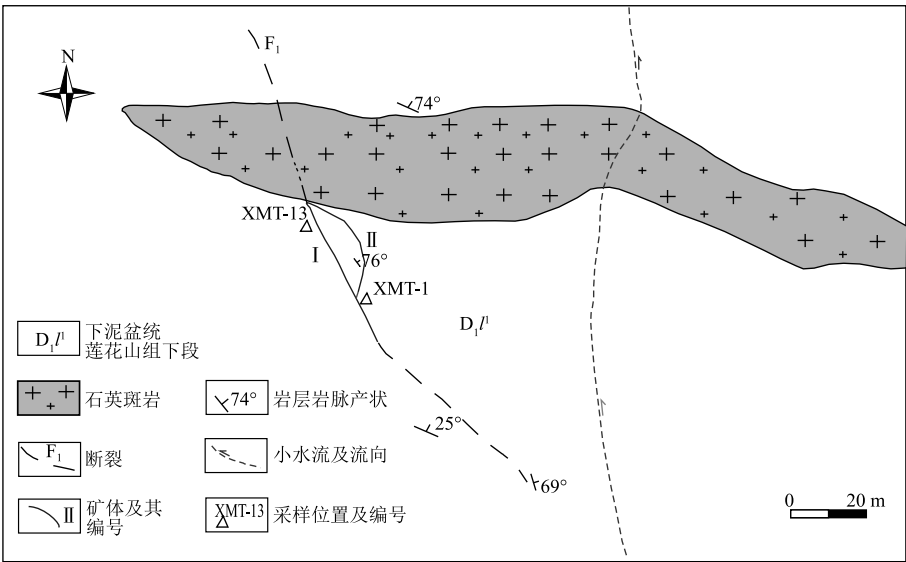


图4 洗马塘金矿地质平面图(据广西壮族自治区二七三地质队,2019 修改)

Fig. 4 Geological map of Xiamatang gold deposit

合为毒砂+黄铁矿+石英。毒砂不含金,黄铁矿可能是主要的载金矿物。矿化以金银为主,主要赋存在黄铁石英脉中。高温毒砂不含金银。

2.3 长帽岭-壮帽山铜矿点

矿区出露地层为寒武系小内冲组,下泥盆统莲花山组。寒武系与泥盆系呈角度不整合接触或断层接触(图6)。寒武系小内冲组主要分布于F₁断裂

以南一带,岩性主要为一套灰色—灰绿色中—厚层状细砂岩、粉砂岩、泥质粉砂岩及中—薄层泥岩组合,局部夹不等粒砂岩,具类复理石沉积建造特点,轻微变质,厚约601 m。下泥盆统莲花山组主要分布于F₁断裂以北一带,按岩性组合分上、下2个岩性段。莲花山组下段(D₁l')分布于长帽山东侧,岩性以紫灰色、紫红色中厚层状砂岩、长石石英砂岩

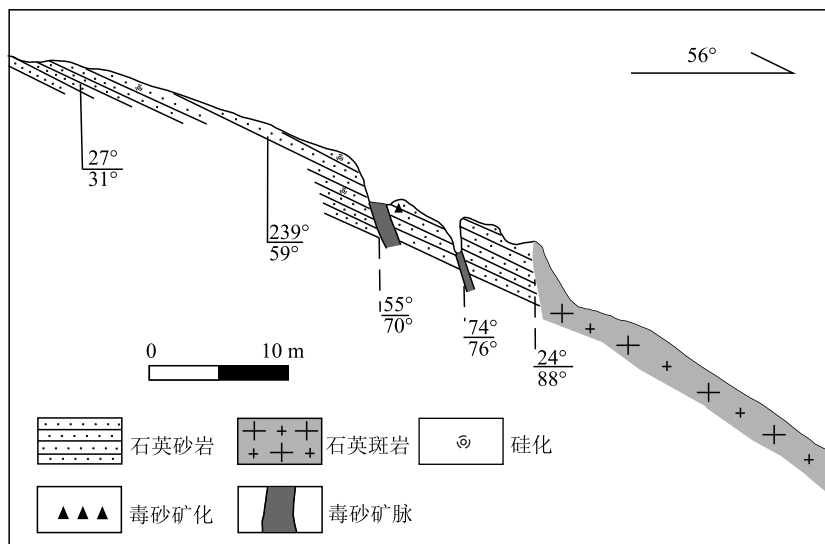


图 5 洗马塘金矿剖面(据广西壮族自治区二七三地质队,2019 修改)

Fig. 5 Geological profile of Ximatang gold deposit

为主,局部夹砾岩,底部为底砾岩,厚 232 m。莲花山组上段(D_1l^2)为紫红色厚—中厚层状泥岩夹粉砂岩、砂岩,厚 249 m。

矿区构造主要为断裂构造,未见褶皱。可分为近东西向、北北西向和北西向 3 组。①近东西向断裂倾向南,倾角 $60^\circ \sim 86^\circ$,属于压扭性逆冲断裂。断裂带由断层泥、构造角砾岩、压碎岩、石英脉、岩脉等充填,并以岩脉充填为主,长帽岭石英斑岩、壮帽山花岗岩即产于其中。在东段蚀变破碎带中局部具有锑矿化并形成矿体。断裂切穿寒武系和泥盆系,旁侧次一级构造发育。②北北西向断裂是矿区规模仅次于近东西向的断裂,也是主要的控岩控矿构造。与矿化关系较密切的为 F_4 断裂,该断裂带由 2 条相距 40~150 m 的断层组成,走向 $300^\circ \sim 335^\circ$,倾向西,局部倾向东,倾角 $75^\circ \sim 88^\circ$,长 900~1350 m。③北西向断裂主要有 F_9 、 F_{12} ,出露长度为 450~1000 m,破碎带宽 2~12 m,走向 $285^\circ \sim 300^\circ$,倾向南西或北东,倾角 $70^\circ \sim 75^\circ$,由构造角砾岩及压碎岩组成。蚀变以硅化、褐铁矿化、电气石化为主。

矿区岩浆岩主要为长帽岭岩株和壮帽山岩株。长帽岭岩株分布在主峰长帽岭一带,产于近东西向 F_1 断裂和北北西向 F_4 断裂的复合部位,呈不规则状分布,面积约 0.2 km^2 。岩体主要由花岗斑岩组成,岩石呈灰色或肉红色,斑状结构,块状构造。斑晶

成分主要为长石(钾长石为主)、石英、黑云母;基质成分为长石(斜长石为主)、石英及少量电气石、锆石、钛铁矿、金红石、磷灰石等。岩体边部具有较强的硅化和浸染状(局部微细脉状)黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、毒砂等矿化。围岩主要为小内冲组砂岩、泥岩,北部为莲花山组石英砂岩。壮帽山岩株是斑岩型铜矿的主要靶区。岩体分布于长帽岭岩株北侧的壮帽岭一带,产于 F_1 断裂与 F_4 断裂的复合部位,主要受 F_4 断裂控制,呈不规则状分布,长约 800 m,宽 100~650 m,面积约 0.22 km^2 ,为矿区的主要岩体。岩体垂直向上呈岩筒,与围岩接触面呈不规则状,界面较陡,围岩主要为莲花山组石英砂岩,并具有强烈蚀变作用。岩体由内向外,岩性依次为花岗斑岩→隐爆角砾岩→震碎角砾岩(图 7)。

2.4 那歪金银矿床

矿区出露地层有寒武系黄洞口组和小内冲组(图 8)。

矿区断裂构造主要为近南北向断裂,其次为北西向断裂。近南北向断裂(以矿体代号命名)主要有 F_6 、 F_7 、 F_8 三条,为本区主要容矿控矿构造。其中 F_6 断裂带倾向为 $71^\circ \sim 81^\circ$,长度大于 3 km(图 9)。 F_6 、 F_7 、 F_8 号断裂是矿区的主要赋矿断裂。矿区内未见有岩浆岩出露分布。矿体产于构造破碎带中,矿石为硅化压碎岩、构造角砾岩。具压碎状结构,块状构造、蜂窝状构造。矿石具褐铁矿化、铅锌矿化、黄铁矿化、硅化,局部毒砂矿化。矿物成分主要为石英、粘土类矿物等,金属矿物有褐铁矿、黄铁矿、方铅矿、闪锌矿、黄铜矿等。根据矿石的结构构造及矿物成分组合,矿石的自然类型有浸染状压碎岩型、细脉浸染状压碎岩型及块状角砾岩型(主要为铅锌矿石)。矿石的工业类型有金银矿石、含砷金银矿石及铅锌银矿石。

2.5 大帽山和三灶山银铅锌矿点

大帽山矿区出露地层有寒武系黄洞口组、下泥盆统莲花山组、那高岭组、郁江组等。

大帽山矿区褶皱构造不发育,岩层总体倾向北,为一单斜构造。岩层倾角一般小于 30° 。主要

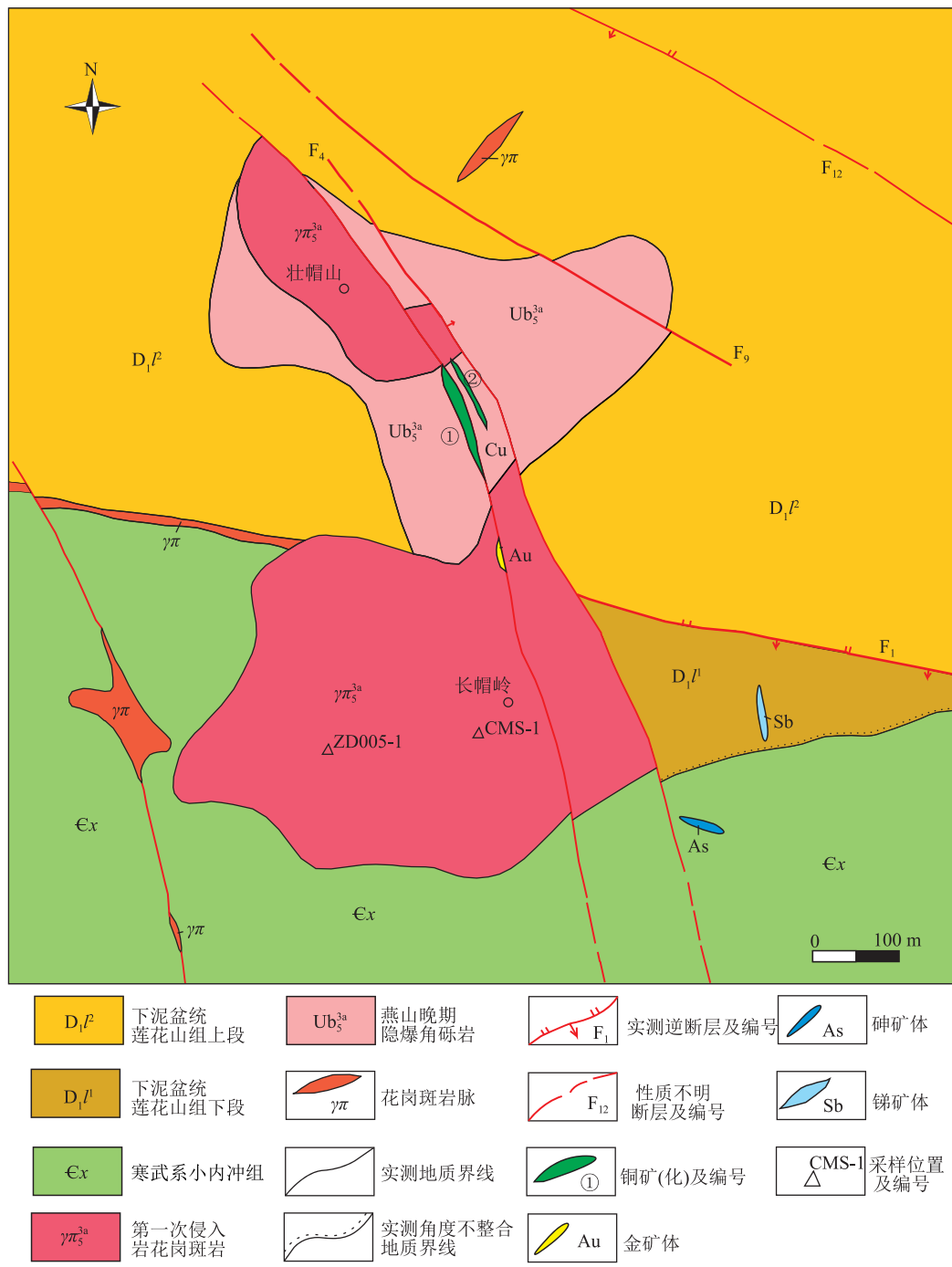


图 6 长帽岭-壮帽山铜矿地质平面图(据广西壮族自治区二七三地质队,2019 修改)

Fig. 6 Geological map of Changmaoling-Zhuangmaoshan copper deposit

出露基底为莲花山组、那高岭组与郁江组。岩性主要为砂岩、泥岩(图 10)。

矿区断裂构造主要为近南北向断裂,其次为北西向断裂。近南北向断裂主要有 F_{10} 、 F_{22} 、 F_{23} 、 F_{24} 、 F_{25} 五条,北西走向断裂主要有 F_{20} 、 F_{21} 两条。断裂倾向东或北东,倾角 $70^{\circ}\sim 85^{\circ}$,破碎带宽 $0.5\sim 5.12$ m,

具膨胀缩小特征。断裂岩性为角砾岩、糜棱岩等,断面略具舒缓波状,局部发育斜向擦痕,上、下盘接触面局部可见炭化断层泥。近南北向断裂是本区主要导矿、容矿断层,铅锌矿体主要赋存于该组断裂内(图 11)。

大帽山矿区未见岩浆岩出露,而见于矿区外围

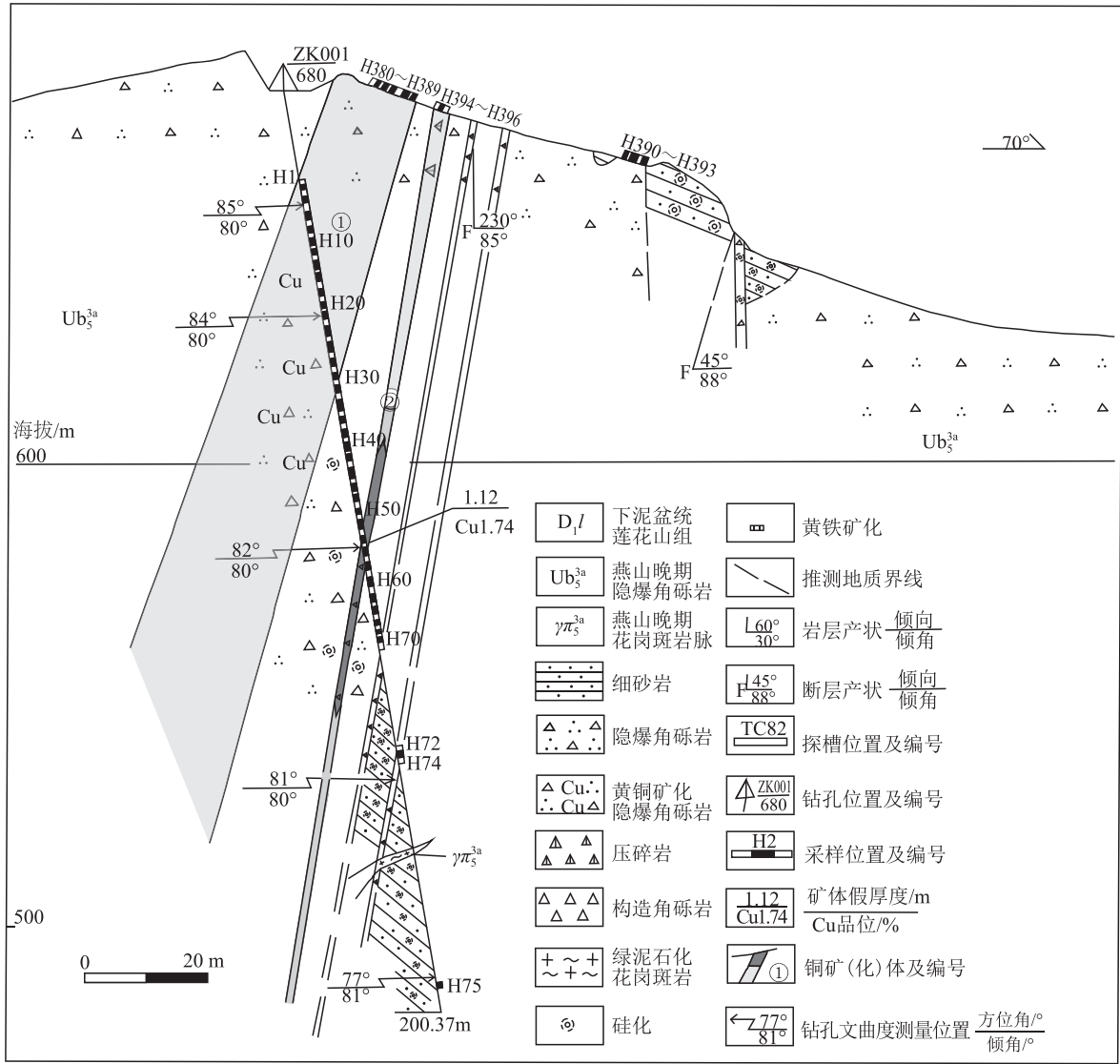


图 7 壮帽山铜矿勘探线剖面图(据广西壮族自治区二七三地质队,2019 修改)

Fig. 7 Geological profile of Zhuangmaoshan copper deposit

马尿坑—长帽岭一带,沿羊角山—长帽岭断层侵入,呈岩枝、岩脉、岩墙产出,是燕山晚期岩浆活动的产物(96 Ma,资料未发表)。岩性主要为石英斑岩($\lambda\pi_5^{3a}$)和花岗斑岩($\gamma\pi_5^{3a}$)。岩体及岩体接触带具电气石化、硅化、黄铁矿化、角岩化等蚀变,具浅成、超浅成酸性岩侵入特征。大帽山矿区大致圈定了 2 个铅锌矿(化)体,编号分别为⑩、⑮。矿体赋存于近南北走向断层中,呈脉状、透镜状产出;均呈近南北走向,倾向东,倾角较陡。无论在走向上还是倾向上,矿体都具有膨胀收缩现象。在倾向上,矿体呈舒缓波状延展。赋矿岩性主要为硅化构造角砾岩,铅锌矿与热液石英关系密切。

2.6 大吾铜矿点

矿区出露地层有寒武系小内冲组、黄洞口组及下泥盆统莲花山组、第四系(图 12)。

矿区位于镇龙山穹窿南西翼,地层总体走向为近东西向,总体倾向北或北东,偶有倾向南或南东(次级褶皱),倾角 $10^\circ\sim 67^\circ$,多为宽缓褶曲(图 13)。区内见有多条断裂构造发育,走向主要呈北西西向,偶见近南北向次级小断层。矿区内未见有岩浆岩出露。

大吾铜矿点为铜多金属矿床,矿体主要产于 I 号含矿断裂破碎带中,其次为旁侧的 III、IV 号含矿断裂破碎带,并严格受断裂破碎带控制,呈脉状、透

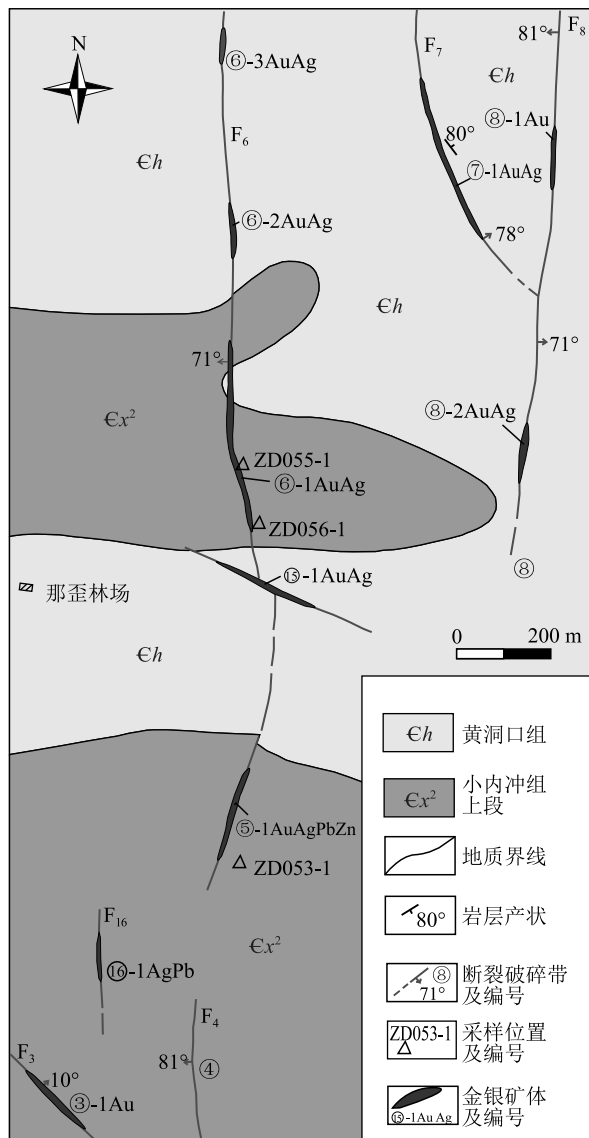


图8 那歪金银矿地质平面图

(据广西壮族自治区二七三地质队,2019 修改)

Fig. 8 Geological map of Nawai Au-Ag deposit

镜状、扁豆状产出。矿体产状与断裂破碎带产状基本一致,近地表倾向北及北东,倾角 $45^{\circ} \sim 89^{\circ}$,深部局部倾向南及南西,倾角 $55^{\circ} \sim 80^{\circ}$ 。含矿断裂破碎带的顶、底板围岩为:寒武系小内冲组泥质粉砂夹含炭泥岩,或为泥盆系莲花山组石英砂岩。矿体直接顶、底板围岩则为硅化构造角砾岩、含炭质压碎岩等。矿体沿 I 号含矿断裂破碎带断续分布,其厚度、品位沿走向及倾向变化较大,有尖灭再现、分支复合、膨大收缩现象。膨大部位厚度达 5.62 m,狭小部位仅 0.58 m。

3 样品采集与测试方法

在广西镇龙山各典型矿床的不同中段系统采集了不同成矿阶段的典型样品,并在详细的野外和镜下观察的基础上,选取与成矿有关的热液石英和方解石进行成矿阶段划分,并开展了流体包裹体测温、激光拉曼光谱分析及氢-氧-硫同位素测试。

流体包裹体气相成分的激光拉曼光谱分析、测温工作及氢氧同位素测试均在核工业北京地质研究院分析测试中心完成。激光拉曼分析仪器为 LABHR-VIS, 型号为 LabRAMHR800 研究级显微激光拉曼光谱仪,使用 Yag 晶体倍频固体激光器,波长为 532 nm,扫描范围为 $100 \sim 4200 \text{ cm}^{-1}$ 。包裹体测温工作分析仪器为 LINKAM THMS600 型冷热台(编号 7035),检测方法和依据为 EJ/T 1105—1999。 $\delta^{18}\text{O}$ 测定采用 BrF_5 方法获得 O_2 , 转变为 CO_2 后在质谱仪上分析获得氢氧同位素组成,再经标准计算得到石英 $\delta^{18}\text{O}$, 分析精度为 $\pm 0.2\%$ 。 δD 测定采用高真空热爆法取水、锌还原法制氢,在质谱仪上分析得到氢同位素组成,通过标准计算,得到包裹体 $\delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}}$, 分析精度为 $\pm 2\%$ 。

本次采集了镇龙山地区各典型矿床的矿石样品,挑取其中的金属硫化物单矿物,制备样品用于硫同位素测试。镇龙山地区的硫化物组合主要为黄铜矿、黄铁矿、方铅矿、闪锌矿、辉锑矿和毒砂,矿物组合较简单且硫酸盐矿物很少见。本次硫同位素测试工作在北京核工业地质分析测试研究中心完成。首先将样品破碎,挑选出硫化物单矿物并粉碎至 40~80 目,在双目镜下挑纯至纯度 95% 以上,再磨至 200 目以下。测定数据采用国家硫同位素标准 (Ag_2S) GBW-4414 ($\delta^{34}\text{S} = -0.07\text{‰}$) 和 GBW-4415 ($\delta^{34}\text{S} = 22.15\text{‰}$) 校正,测量误差为 $\pm 0.2\text{‰}$ 。

4 分析结果

4.1 流体包裹体

4.1.1 流体包裹体岩相学

显微岩相学观察发现,镇龙山地区各矿床的包裹体主要为气液包裹体,且含 CO_2 和 CH_4 包裹体较多,偶见含 NaCl 子晶的包裹体。根据包裹体在室温下 (25°C , 50% 湿度) 的物理相态特征和化学成分

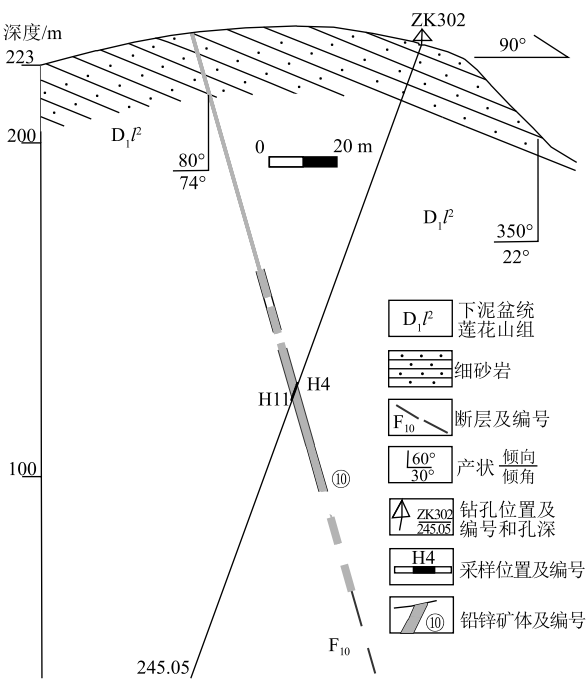


图 11 大帽山银铅锌矿剖面图
(据广西壮族自治区二七三地质队,2019 修改)
Fig. 11 Geological profile of Damaoshan Ag-Pb-Zn deposit

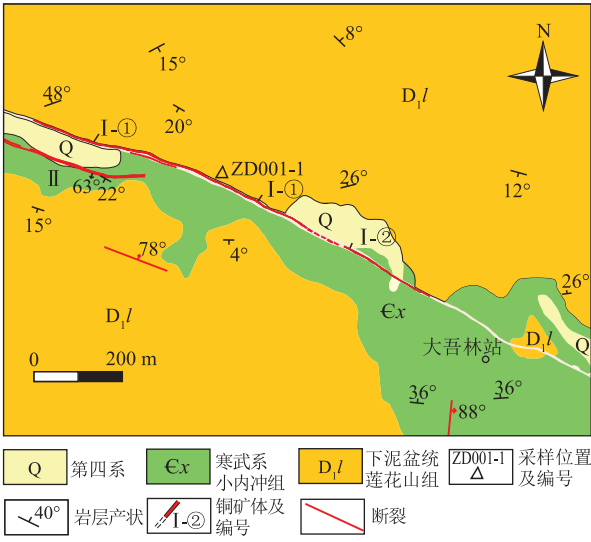


图 12 大吾铜矿地质平面图
(据广西壮族自治区二七三地质队,2019 修改)
Fig. 12 Geological map of Dawu copper deposit

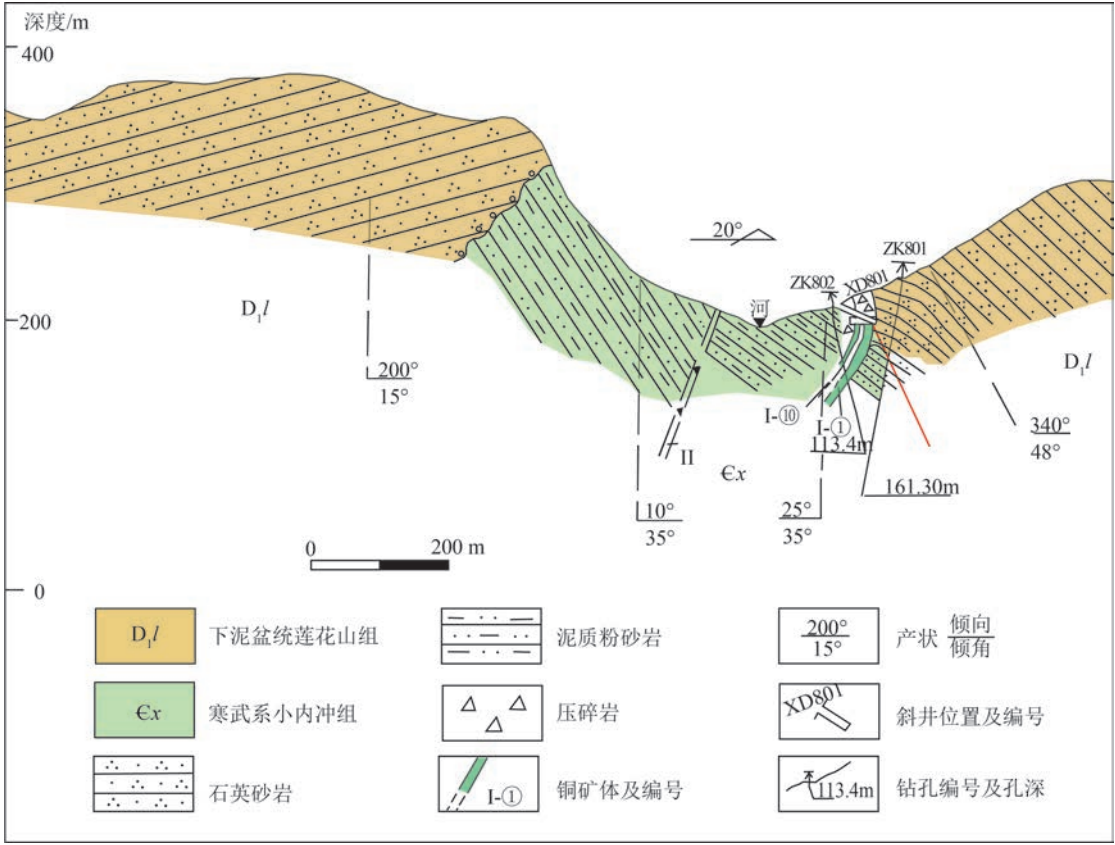


图 13 大吾铜矿矿体剖面图(据广西壮族自治区二七三地质队,2019 修改)
Fig. 13 Geological profile of Dawu copper deposit

两相,偶见深灰色—黑色的气相包裹体。包裹体大小多数为 3~8 μm,气液比在 80%以上,多为不规则形态,常见群状或孤立状分布。该类型包裹体远少于富液相包裹体。

Ⅲ型:含子晶多相包裹体,呈灰色—深灰色,由气—液—固三相组成,包裹体中基本只含有一个子晶,子晶多呈立方体,沿包裹体壁分布。该类型包裹体发育最少。

4.1.2 激光拉曼

首先选取一些具有代表性的富液和富气包裹体进行激光拉曼测试,再进行测温工作,以确保包裹体在测温之前不受破坏。结果显示,包裹体中的气相成分主要为 CO₂(谱峰位置 1277~1384 cm⁻¹)、CH₄(谱峰位置 2911~2914 cm⁻¹)、H₂O(谱峰位置 3393 cm⁻¹、3441 cm⁻¹)(图 15)。

4.1.3 显微测温

将激光拉曼测试完的样品进行测温处理,在冷热台下,可以发现,Ⅰ型富液包裹体在镜下较多见,也获得最多的实验数据;Ⅱ型富气包裹体在本次实验获得数据较少;Ⅲ型含子晶包裹体在壮帽山样品中多见,本次实验获得几例子晶熔化温度。

镇龙山地区各典型矿床的流体包裹体显微测温结果详见表 1 和图 16、图 17。其中Ⅰ型包裹体的盐度和Ⅲ型包裹体的子晶熔化温度换算均根据 Bodnar(1993)给出的冰点温度—盐度关系表查出。

大吾铜矿,测得的均为Ⅰ型富液包裹体,均一温度区间为 88~160℃,盐度区间为 4.49%~11.34% NaCl eqv,冰点温度区间为 -7.7~-2.7℃。

大帽山铅锌矿,测得的均为Ⅰ型富液包裹体,均一温度区间为 89~277℃,盐度区间为 3.39%~16.05% NaCl eqv,冰点温度区间为 -12.1~-2.0℃。

三灶山矿,测得的均为Ⅰ型富液包裹体,均一温度区间为 78~182℃,盐度区间为 3.39%~6.74% NaCl eqv,冰点温度区间为 -4.2~-2.0℃。

知府山多金属矿,Ⅰ型富液包裹体,均一温度区间为 159~371℃,盐度区间为 5.11%~12.51% NaCl eqv,冰点温度区间为 -8.7~-3.1℃;Ⅱ型富气包裹体,均一温度区间为 316~372℃,盐度区间为 3.06%~3.87% NaCl eqv,冰点温度区间为 -2.3~-1.8℃。

洗马塘金矿,Ⅰ型富液包裹体,均一温度区间为 144~263℃,盐度区间为 1.23%~17.43% NaCl eqv,冰点温度区间为 -13.6~-0.7℃;Ⅱ型富气包裹体,均一温度区间为 380~419℃,盐度区间为 6.01%~7.31% NaCl eqv,冰点温度区间为 -4.6~-3.7℃。

壮帽山铜矿,Ⅰ型富液包裹体,均一温度区间为 225~357℃,盐度区间为 5.71%~7.02% NaCl eqv,冰点温度区间为 -4.4~-3.5℃;Ⅱ型富气包裹体,均一温度区间为 243~322℃,盐度区间为 4.34%~4.8% NaCl eqv,冰点温度区间为 -2.9~-2.6℃;Ⅲ型含子晶多相包裹体,均一温度区间为 270~383℃,石盐熔化温度区间为 130~180℃,盐度区间为 4.18%~30.7% NaCl eqv。

4.2 氢—氧同位素

本次测试主要选用了镇龙山地区 7 个代表性矿床(点)中与成矿有关的石英脉样品,实验结果详见

表 1 镇龙山地区各矿床包裹体显微测温结果
Table 1 Microthermometry results of inclusions in Zhenlongshan area

矿床	包裹体类型	$T_{m,ice}/^{\circ}C$	$T_h/^{\circ}C$	$T_M/^{\circ}C$	盐度/% NaCl eqv
大帽山($n=88$)	I	-6.4~-2.6	138~263		4.34~9.73
大吾($n=57$)	I	-7.7~-2.7	88~160		4.49~11.34
那歪($n=35$)	I	-12.1~-2.0	89~277		3.39~16.05
三灶山($n=23$)	I	-4.2~-2.0	78~182		3.39~6.74
知府山 ($n=121$)	I	-8.7~-3.1	159~371		5.11~12.51
	II	-2.3~-1.8	316~372		3.06~3.87
洗马塘($n=69$)	I	-13.6~-0.7	144~263		1.23~17.43
	II	-4.6~-3.7	380~419		6.01~7.31
壮帽山($n=36$)	I	-4.4~-3.5	225~357		5.71~7.02
	II	-2.9~-2.6	243~322		4.34~4.8
	III		270~383	130~180	4.18~30.7

注: $T_{m,ice}$ —冰点温度; T_h —均一温度; T_M —子晶熔化温度

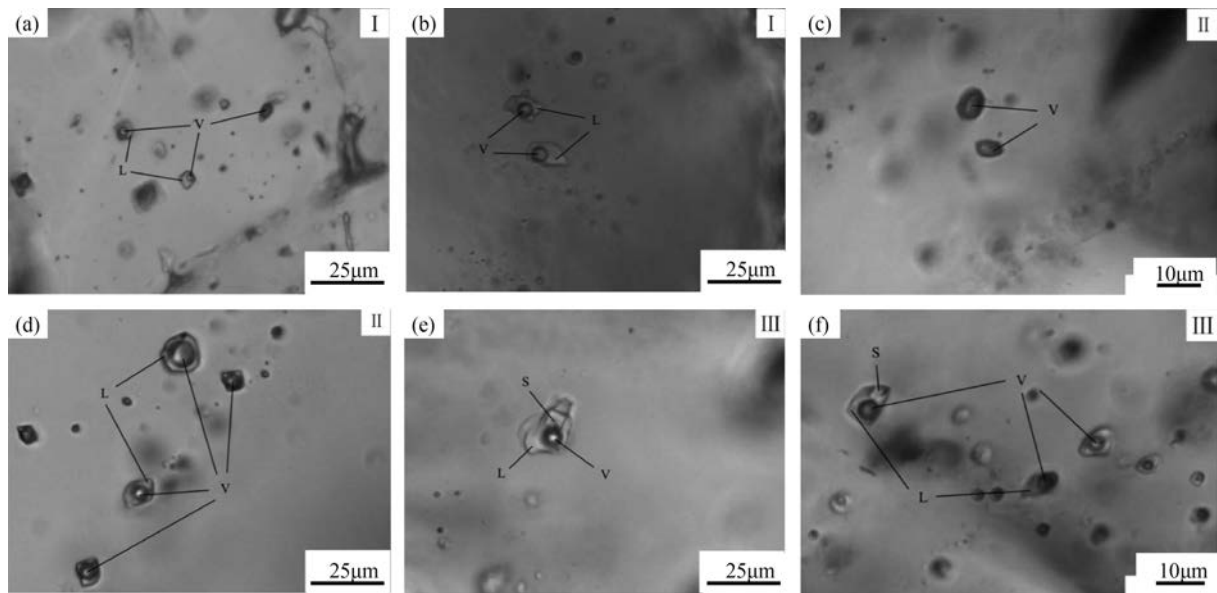


图 14 镇龙山区各矿床包裹体显微照片

Fig. 14 The photomicrographs of the fluid inclusions from Zhenlongshan area

L—液相;V—气相;S—固相

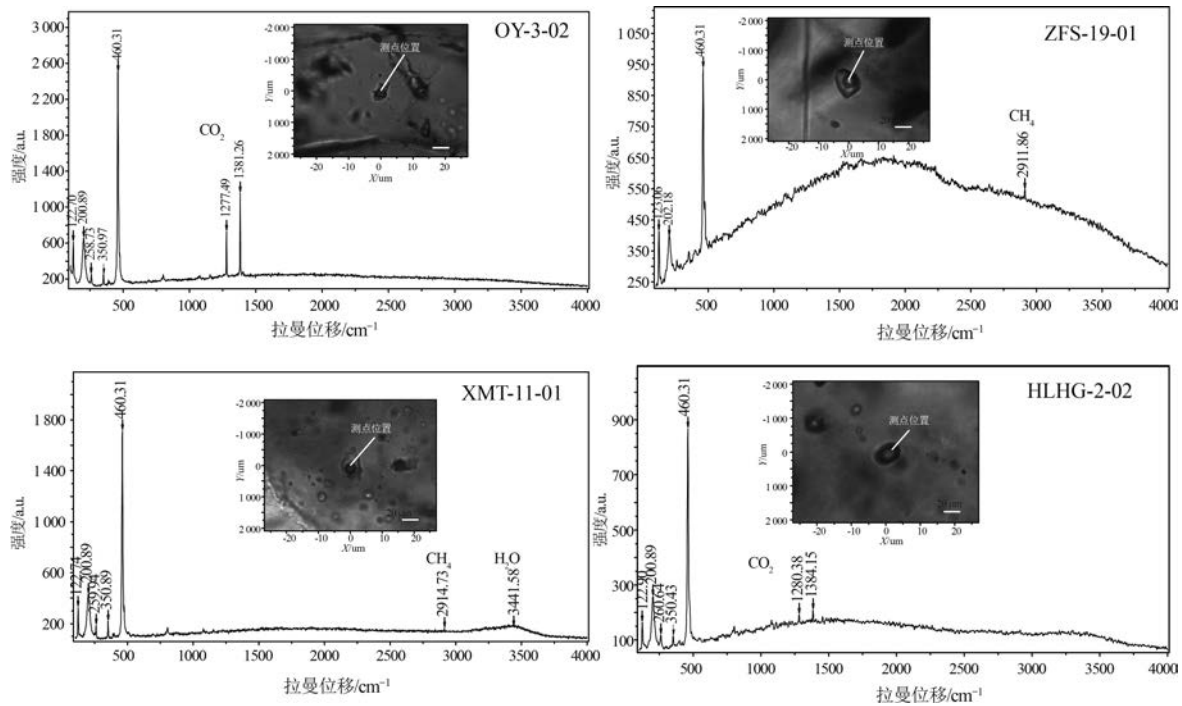


图 15 镇龙山区各矿床包裹体激光拉曼图谱

Fig. 15 Laser Raman spectra of fluid inclusions in the Zhenlongshan area

表 2. 流体中 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值据矿物中流体包裹体的均一温度和矿物-水的氧同位素分馏方程计算求得 (Clayton et al., 1972), 石英与水之间氧同位素分馏方程采用 $1000\ln\alpha_{\text{石英-水}} = 3.38 \times 10^6 / T^2 - 3.4$, 方

解石与水之间氧同位素分馏方程采用 $1000\ln\alpha_{\text{方解石-水}} = 2.78 \times 10^6 / T^2 - 2.89$ (O'Neil et al., 1969), 式中: $T(\text{K}) = 273.15 + t(^{\circ}\text{C})$, t 为均一温度。均一温度采用各矿床成矿阶段的平均温度。结合包裹体

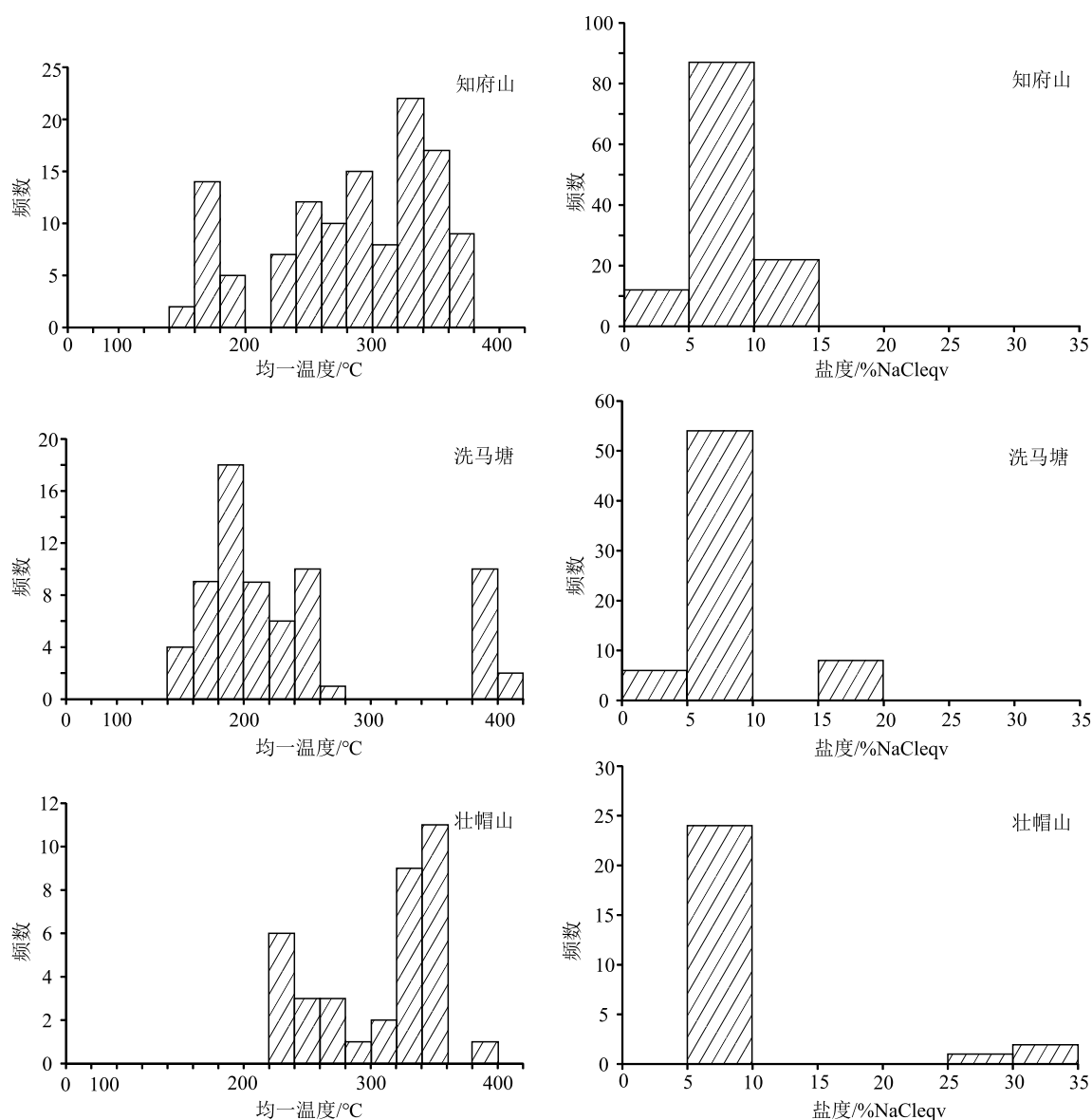


图 16 镇龙山地区各矿床包裹体均一温度及盐度直方图(其一)

Fig. 16 Histogram of homogenization temperature and salinity of inclusions in Zhenlongshan area (1)

均一温度处理后进行 $\delta^{18}\text{O}$ - δD 同位素投图(图 18), 镇龙山区各矿床的 δD 值介于 -80.1‰ ~ -55.0‰ 之间, $\delta\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值介于 0.3‰ ~ 12.8‰ 之间, 成矿流体大多集中在岩浆热液区间, 且有混合大气降水的趋势。知府山和壮帽山 $\delta\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 的值偏大, 可能是由于成矿温度高、蚀变较强造成的。

4.3 硫同位素

镇龙山地区典型矿床的硫化物硫同位素测试结果详见表 3。由硫同位素直方图(图 19)可见, 大帽山银铅锌矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 范围为 -1.5‰ ~ -0.7‰ , 大吾铜矿为 -6‰ ~ -4.8‰ , 大帽山铅锌矿床为 -0.6‰ ~

2.7‰ , 三灶山矿为 -0.6‰ ~ -0.3‰ , 知府山为 -0.7‰ ~ 5.2‰ , 洗马塘为 0.1‰ ~ 2‰ , 壮帽山为 0‰ ~ 1.5‰ , 大多符合塔式分布。

5 讨论

5.1 成矿物理化学条件

一般而言, 金属矿物的沉淀方式有 4 种: 流体混合、流体沸腾、流体不混溶、自然冷却。其中流体沸腾和流体不混溶现象广泛存在于各类矿床中 (Sollitoe, 2010; 简伟等, 2010; 卢焕章, 2011)。镇龙山各矿床 I、III 型包裹体全部均一至液相, II 型包

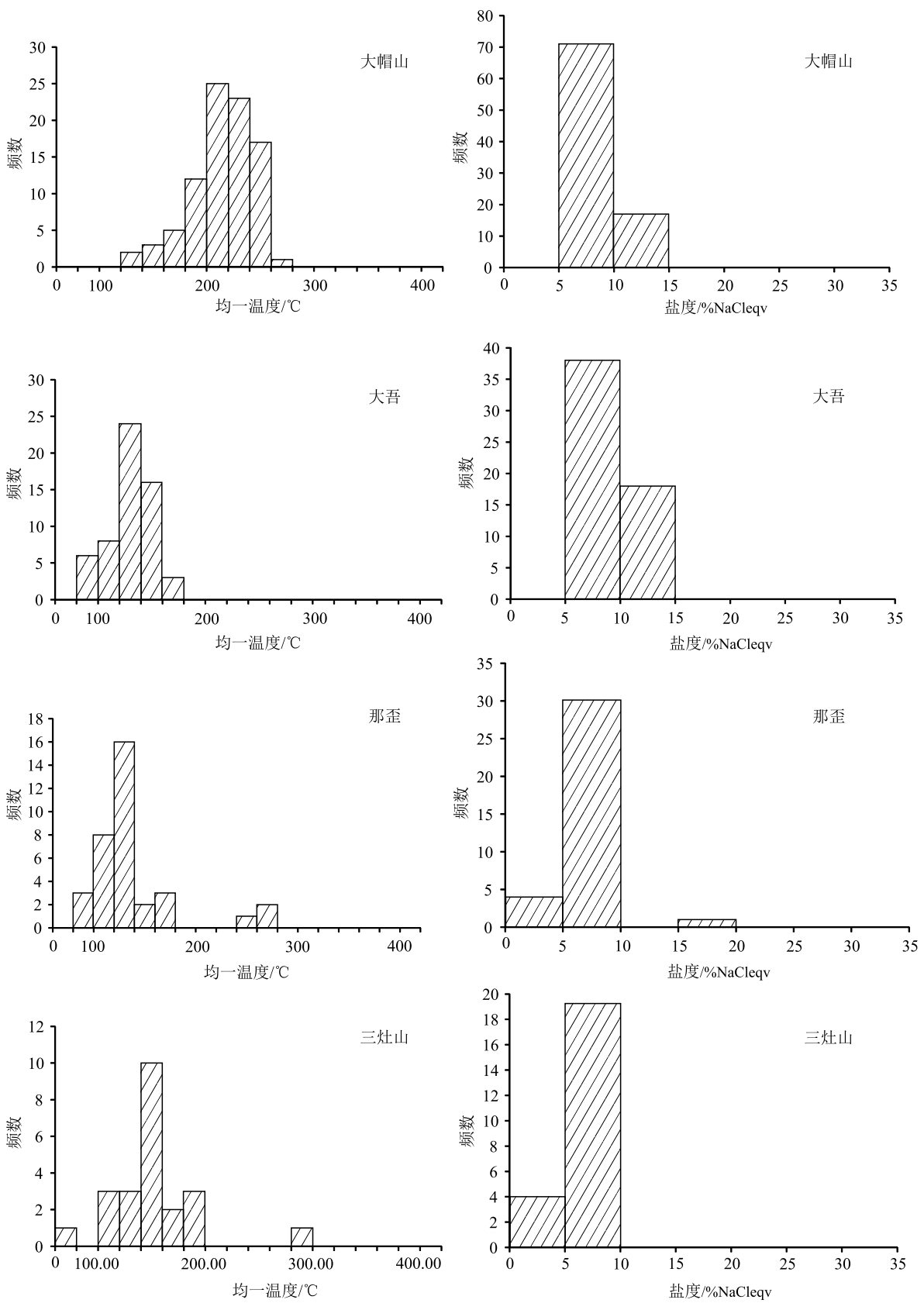


图 17 镇龙山区各矿床包裹体均一温度及盐度直方图(其二)

Fig. 17 Histogram of homogenization temperature and salinity of inclusions in Zhenlongshan area (2)

表 2 镇龙山地区各矿床氢-氧同位素测试结果
Table 2 H-O isotope test results in Zhenlongshan area

序号	样品 原号	矿物	检测结果				
			δD_{V-SMOW} /‰	δO_{V-PDB} /‰	δO_{V-SMOW} /‰	T_h /℃	δO_{H_2O} /‰
1	DZTK-1	石英	-76.1	-14.4	16	220	5.5
2	DW-2	石英	-59.6	-13.8	16.7	140	0.3
3	DW-5	石英	-61.4	-13.5	17	140	0.6
4	LG-13	石英	-75.6	-12.6	17.9	140	1.5
5	LG-16	石英	-65.9	-11.7	18.9	140	2.5
6	OY-4	石英	-70.6	-9.9	20.7	160	6.1
7	OY-5	石英	-69	-9.1	21.5	160	6.9
8	OY-6	石英	-64.4	-12.2	18.3	160	3.7
9	ZFS-22	石英	-55	-13.1	17.4	340	11.8
10	ZFS-24	石英	-56	-14.4	16	340	10.4
11	ZFS-25	石英	-58.7	-13.6	16.9	340	11.3
12	XMT-2	石英	-70.4	-16.4	14	200	2.3
13	XMT-6	石英	-62.2	-13.8	16.7	200	5.0
14	XMT-7	石英	-67.3	-11.1	19.4	200	7.7
15	XMT-10	石英	-68.6	-14.7	15.7	200	4.0
16	XMT-11	石英	-66.2	-14.9	15.6	200	3.9
17	XMT-12	石英	-64.8	-14.1	16.3	200	4.6
18	ZMS-2	石英	-74.5	-16.6	13.8	360	8.8
19	ZMS-4	石英	-80.1	-18.8	11.6	360	6.6
20	ZMS-5	石英	-75.4	-13.7	16.8	360	11.8
21	ZMS-6	石英	-73.2	-12.7	17.8	360	12.8

裹体则全部均一至气相。包裹体的气体组分主要为 CO₂、CH₄和 H₂O。在流体包裹体组合中,富液、富气和含子晶的高盐度流体包裹体同时存在于同一视域内(图 14-f),且这 3 类包裹体的均一温度近一致,表明在成矿过程中发生了流体沸腾作用,这是岩浆热液矿床中较常见的现象,可能是导致矿质沉淀的因素之一(刘晓菲等,2013)。

知府山样品在野外和室内镜下鉴定区分出了高温—中温—低温带,野外调查发现围绕岩体向外呈现磁黄铁矿—黄铜矿—铅锌矿—辉锑矿的分带。显微测温发现,其液相包裹体的均一温度呈现较明显的 3 个峰值,分别为:高温区间 320~339℃,对应的高频盐度区间为 8%~9% NaCl eqv;中温区间280~299℃,

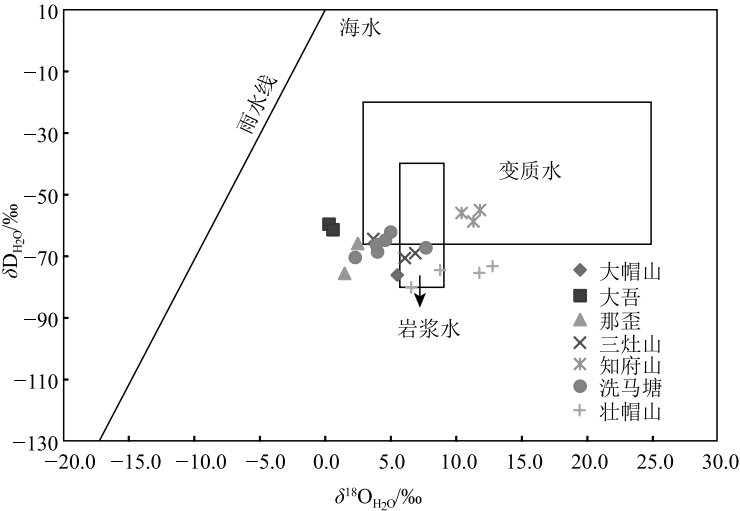


图 18 $\delta^{18}O$ - δD 同位素图解(据 Taylor, 1974)
Fig. 18 Diagram of $\delta^{18}O$ - δD isotopes

表 3 镇龙山地区各矿床硫同位素测试结果
Table 3 S isotope test results in Zhenlongshan area

序号	样品原号	岩性/矿物	$\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}/\text{‰}$	序号	样品原号	岩性/矿物	$\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}/\text{‰}$
1	DZTK-1	黄铜矿	-1.4	19	ZFS-25	闪锌矿	4.7
2	DZTK-4	黄铜矿	-1.5	20	ZFS-25	方铅矿	3.4
3	DZTK-7	黄铜矿	-0.7	21	XMT-2	毒砂	0.8
4	DW-1	方铅矿	-6	22	XMT-6	黄铁矿	1.1
5	DW-5	黄铜矿	4.8	23	XMT-7	黄铁矿	1.2
6	LG-1	黄铁矿	1.4	24	XMT-9	黄铁矿	0.1
7	LG-1	辉锑矿	-0.6	25	XMT-9	毒砂	0.7
8	LG-11	黄铁矿	2.3	26	XMT-10	黄铁矿	0.8
9	LG-13	黄铁矿	2.4	27	XMT-11	黄铁矿	1.9
10	LG-16	黄铁矿	2.7	28	XMT-11	毒砂	0.7
11	OY-4	辉锑矿	-0.6	29	XMT-12	黄铁矿	2
12	OY-5	辉锑矿	-0.3	30	XMT-12	毒砂	0.6
13	OY-6	辉锑矿	-0.5	31	ZMS-2	毒砂	1.4
14	ZFS-17	辉锑矿	-0.7	32	ZMS-3	黄铁矿	0
15	ZFS-22	闪锌矿	5.2	33	ZMS-3	毒砂	1.5
16	ZFS-22	方铅矿	1.6	34	ZMS-4	黄铁矿	0.7
17	ZFS-24	闪锌矿	4.1	35	ZMS-4	毒砂	1.5
18	ZFS-24	方铅矿	2.6	36	ZMS-5	毒砂	0.2

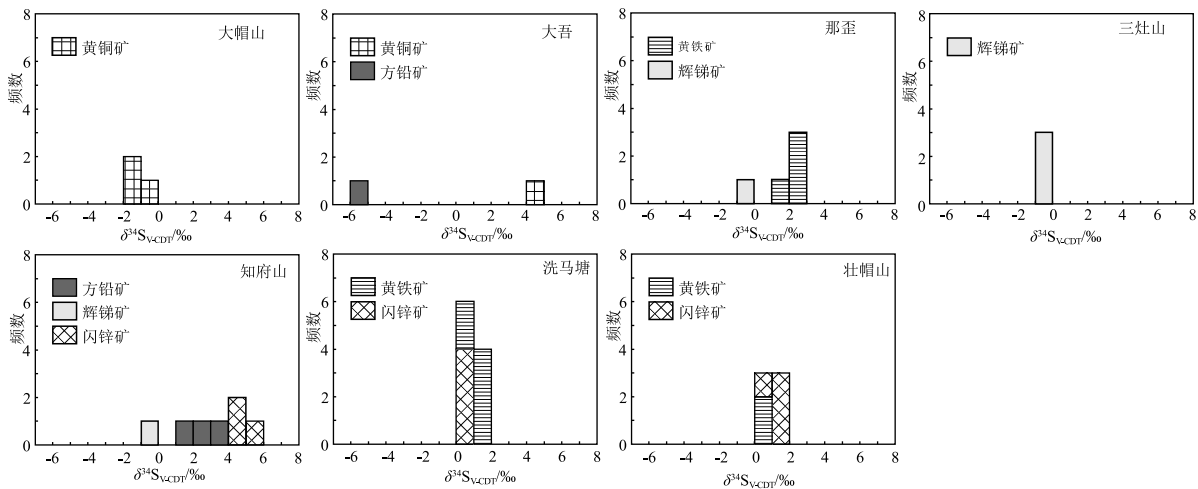


图 19 镇龙山地区各矿床硫化物硫同位素组成直方图

Fig. 19 Histogram of sulfur isotope composition of sulfide deposits in Zhenlongshan area

对应的高频盐度区间为 7%~8% NaCl eqv;低温区间 160~179℃,对应的高频盐度区间为 5%~6% NaCl eqv。以上结果表明,随着均一温度区间的降低,盐度区间也有所降低。距离岩体的远近与均一温度和盐度成负相关,即距离岩体越远,均一温度和盐度越低。研究区北部的壮帽山、洗马塘等矿

床,流体包裹体的均一温度峰值区间存在差异,大致表现为在该区以出露岩体为中心向外依次呈现高温、中温、低温的变化,盐度区间略有变化,但仍集中在 5%~9% NaCl eqv 区间,体现了岩体对矿床形成和分布的控制作用。研究区南部的大吾铜矿等大体上表现出同样的特征,在未查明该地区是否有隐伏岩体控制成矿作用之前,暂且认为是北部的岩浆热液成矿系统的远端效应。

5.2 成矿流体物质来源

氢氧同位素示踪成矿流体来源作为一种成熟的方法来研究热液矿床地球化学,能够将不同源区的流体区分开来 (Hoefs, 1997; 郑永飞等, 2000; Pirajno, 2009)。基于此,笔者对镇龙山地区的那歪、大吾、大帽山、三灶山、知府山、洗马塘、壮帽山等矿床进行了氢氧同位素测定分析,并依据包裹体测温数据对分析结果进行处理,绘制 $\delta^{18}\text{O}$ - δD 同位素图解 (图 18)。结果显示,大吾、大帽山、三灶山和洗马塘矿床的样品主要落在岩浆水的范围内,并有向大气降水偏移的趋势,表明上述矿床的流体主要来源是岩浆水,后期有大气降水的混入。而知府山和壮帽山矿床,除岩浆水外还有一定变质水的加入,推测可能由于距离岩体较近,在温度较高的岩体侵入时,重新活化形成部分变质水加入。

硫化物是岩浆热液矿床的主要产出形式,通过对硫化物的硫同位素组成进行分析,可以解决成矿物质来源问题 (Ohmoto, 1972; 1979)。硫化物中硫同位素的变化是分馏作用导致的,主要受温度或氧化还原反应影响,能为研究矿床成因和成矿环境提供依据。因此,对比不同地质体中硫化物的硫同位素,可以有效示踪成矿物质来源。镇龙山地区矿床的硫化物组合主要为磁黄铁矿、黄铜矿、黄铁矿、方铅矿、闪锌矿、辉锑矿和毒砂,矿物组合较简单且硫酸盐矿物很少见,这种硫化物组合特征说明主成矿期成矿流体为还原性,成矿流体中硫可能主要以 HS^- 、 S^{2-} 等形式存在,反映成矿热液中不同价态的硫之间及不同成矿阶段的硫同位素分馏都较弱。同时,从上述硫化物中硫同位素组成看,硫化物间的硫同位素基本达到平衡,结合本次研究区未见硫酸盐矿物的事实,硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 可以代表成矿热液的总硫同位素组成,故矿床中几种与矿化密切相关的硫化物硫同位素组成也基本代表了成矿物质的硫同位素组成 (Sakai,

1968; Robert, 1974; 郑永飞等, 2000)。研究区各矿床 (点) $\delta^{34}\text{S}$ 峰值基本在 -2‰ ~ 2‰ 之间 (图 19),几乎都在零值附近,与幔源硫 ($0\pm 3\text{‰}$) 范围基本一致,说明硫化物中的硫均来自幔源岩浆 (图 20),具有相对均一的硫源。综上所述,本区所研究的矿床成矿过程中的 S 元素主要来自于岩浆岩。这与邻区大平天山岩浆热液成矿系统中硫同位素来源一致 (陈港等, 2020)。延伸至广西桂东地区 (东部的宝山铜矿和大黎钨矿) (蒋兴洲等, 2016; 李忠阳等, 2019),在该时期均存在同一来源的矿床 (点),表明这一期活动在区域成矿中有重要贡献,为找矿指导提供了有力指导。

5.3 成矿模型

白垩纪晚期,大瑶山岩浆活动受太平板块俯冲影响,形成了华南陆内伸展的构造背景,并复活了一系列北东向区域大断裂,加厚地壳折沉和大规模岩石圈伸展形成了一系列与岩浆岩有关的矿床 (Mao et al., 2013; 毕诗健等, 2015)。镇龙山地区岩体均形成于晚白垩世早期 (约 93 Ma, 未发表数据)。花岗岩岩浆沿北西西向大断裂侵入至近地表的浅成环境,由于富含大量的挥发分 (如 B 等元素),常常形成隐爆角砾岩,如长帽岭-壮帽山产出的隐爆角砾岩,岩体发生明显的电气石化,甚至岩体附近的热液石英脉也含电气石。

富含挥发分和成矿物质的岩浆热液沿着次级断裂交代和充填,大断裂构造及其次级构造为含矿热液提供了流动通道与沉淀场所,在岩体及其边缘

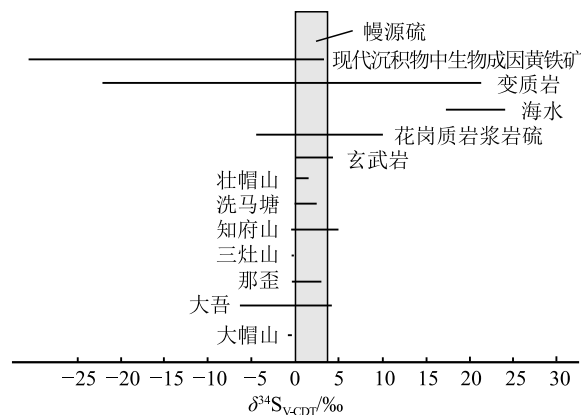


图 20 镇龙山地区各矿床硫化物硫同位素组成分布图 (据 Hoefs, 1997)

Fig. 20 Diagram of sulfur isotope of sulfide deposits in Zhenlongshan area

形成高温铜金矿床,具有斑岩型矿床的基本特征,发育强烈的电气石化和硅化。岩体和围岩发育明显的黄铜矿化,以浸染状和脉状矿化为主,矿物组合为黄铁矿+黄铜矿+毒砂+磁黄铁矿,硫化物以粗大的粒状毒砂为主,但也含少量的磁黄铁矿、黄铜矿和闪锌矿,表现为明显的高温矿物组合。其形成原因与知府山岩体、长帽岭岩体和洗马塘岩体都是富液相和气相的非均匀体系相关,在岩体及成矿早阶段的部分颗粒中发现 L、V 和 S 型包裹体共存,测温发现其均一温度彼此接近(320~339℃),结合富气相包裹体均一至气相,富液相包裹体均一至液相的现象表明,成矿流体可能是由于压力释放和温度降低引起原来的均匀流体发生沸腾作用。综上,岩浆流体在上升过程中经历了沸腾和流体不混溶作用,这 2 种作用直接导致流体的相分离,从而导致 H_2S 、 CO_2 、 CH_4 、 H_2O 等酸性挥发分的逸出,而这些酸性挥发分的逸出能有效提高流体的 pH 值,降低矿物在热液流体中的溶解度,从而促进黄铜矿、闪锌矿、方铅矿、毒砂等矿石矿物在主成矿阶段的沉淀。

远离岩体,沿断层充填,逐渐形成中温银铅锌矿床和低温锑银热液脉状矿床。中温矿床矿化以硅化为特征,如知府山、壮帽山、洗马塘等岩体外围的矿点,其矿石出现少量电气石化,晚期出现碳酸盐脉。硫化物以闪锌矿和方铅矿为主,含有较多的乳滴状细小黄铜矿(黄铜矿“病毒”);少量方铅矿,但出现高温的黄铜矿和毒砂矿物,显示高温向中温过渡的特征。低温矿床的矿物组合出现辉锑矿、重晶石和菱铁矿,针状和矛状毒砂,(辉)硫锑铅矿。通过对三灶山的样品分析发现,矿物组合具有分带性,中间为黄铁矿和闪锌矿,往外依次为毒砂,最外为(辉)硫锑铅矿,暗示结晶温度越来越低,并且存在低温针状毒砂。

通过流体包裹体测试发现,远离岩体的流体包裹体均一温度峰值区间存在差异,大致表现为在该区以出露岩体为中心向外依次呈现高温、中温、低温的变化,其液相包裹体的均一温度也表现出较明显的 3 个峰值,对应的高频盐度区间也相应发生变化。即随着均一温度区间的降低,盐度区间也有所降低,体现了岩体对矿床形成和分布的控制作用。

那歪、大吾、大帽山、三灶山及知府山、洗马塘、壮帽山等矿床的成矿流体的主要来源可能是岩浆水,后期可能有大气降水的混入;知府山和壮帽山矿床,除岩浆水外还有一定变质水的加入,低温热液矿床已经有明显的大气水加入,出现辉锑矿、针状毒砂、重晶石、菱铁矿等典型低温矿物组合。氢-氧同位素和硫同位素组成均反映成矿流体和成矿物质来源于岩浆岩。

因此,镇龙山矿田的矿床均为与燕山晚期岩浆热液系统有关的矿床。最主要的控矿因素为岩体和断裂构造,这与祝新友(2010)认为湖南黄沙坪的岩浆-热液系统受北北西向断裂控制一致。矿床的硫源均来自幔源岩浆,成矿流体主要来自岩浆,大气降水和变质水混合沿断裂破碎带下渗过程中,活化基底地层中的部分成矿元素(主要为 Pb、Zn),参与岩浆热液活动。平面上围绕岩体,总体显示出由高温元素(Cu-Au)到低温元素(Au、Sb)的分带特点。因此,笔者提出镇龙山矿床分带模型:(次火山岩)斑岩型金铜矿-中温热液型银铅锌矿-低温热液型锑矿模型(图 21)。

高温矿化带以铜金矿化为主,发育粗大的粒状毒砂(不含金),强烈的电气石化、硅化和绢云母化,出现大量的隐爆角砾岩,矿物组合为黄铁矿+黄铜矿+粗粒毒砂+磁黄铁矿等高温矿物组合,甚至形成独立的毒砂矿床(如洗马塘)。浸染状、细脉状构造

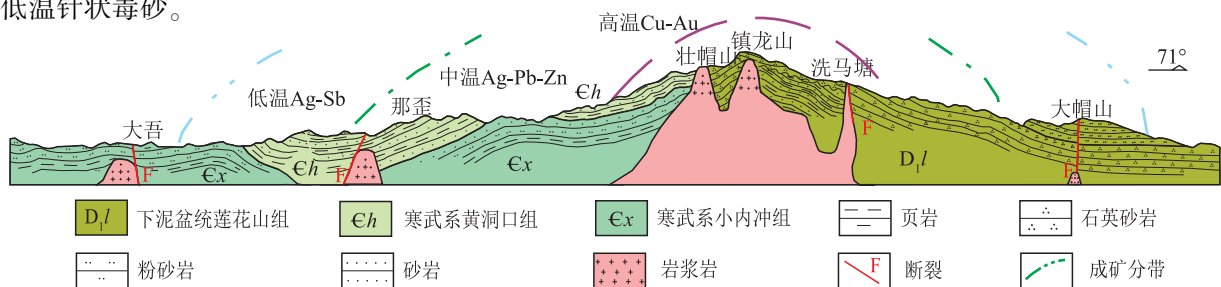


图 21 镇龙山地区矿床模型

Fig. 21 Deposit model of Zhenlongshan area

发育,剪节理两侧热液蚀变晕分带发育,具有斑岩型矿床的基本特点。典型矿点如知府山内带的铜矿化、长帽岭-壮帽山铜金矿点、洗马塘金矿点等。在邻区的大平天山地区,前人已经发现类似的现象(陈懋弘等,2016;2019;葛锐,2019)。纵观整个钦杭成矿带,从北东到南西,发育多个类似的岩浆热液成矿系统,如德兴成矿系统(Mao et al.,2011)、湖南宝山铜多金属和水口山铜多金属矿床成矿系统(Zhao et al.,2018;秦锦华等,2020)、圆珠顶铜铅多金属矿床系统(陈懋弘等,2015)及最近在大瑶山发现的大平天山、镇龙山和一些亟待验证的岩浆热液成矿系统。这些成矿系统的验证和发现,为后续找矿工作提供了强有力的线索和证据。

中温矿化带以寒武系中的脉状银铅锌矿化为主,硅化强烈,以切层石英脉为主,顺层的矽卡岩型为辅。矿物组合主要为方铅矿+闪锌矿+黄铁矿,也常见高温(毒砂、磁黄铁矿)或低温(辉锑矿)矿物。一般沿近南北向、北东向或北西向断层破碎带发育,断层两侧多表现为分带性,中间为硅化矿化断层角砾岩和碎裂岩,两侧常有劈理化、透镜体化现象,指示断层的长期活动性,为典型的热液脉状矿床。典型矿点有知府山岩体外围银铅锌矿化、长帽岭-壮帽山金矿化、洗马塘外围铅锌矿化、那歪金银矿床等。

低温矿化带以锑(银铅锌)矿化为主,细粒针状毒砂发育,碳酸盐化为主,石英-白云石-方解石脉发育,矿物组合为辉锑矿+含银硫锑铅矿+针状毒砂+闪锌矿+黄铁矿+重晶石+菱铁矿等低温矿物组合,且具有分带性,核部为黄铁矿和闪锌矿,向外为毒砂和石英,最外为硫锑铅矿。典型矿点如大帽山、三灶山锑银铅锌矿床等。

由于本次对南部矿区研究较少,暂将大吾铜矿定为远接触带低温热液型矿床,以铅锌铜矿化为主,可以划分为2个成矿阶段,主成矿阶段为石英+黄铜矿+方铅矿+闪锌矿+黄铁矿,是主要的矿石沉淀阶段,成矿晚阶段为白云石(方解石)+黄铁矿+石英,矿物组合十分简单,切割关系清楚。特别是出现斑铜矿,目前尚不能判断是原生还是次生矿物,有待今后研究。

6 结 论

(1)流体包裹体分析显示,广西镇龙山各矿床

(点)的成矿温度和盐度围绕斑岩体呈现向外围逐渐减小的趋势,符合岩浆热液成矿系统的特点。

(2)氢氧同位素测试结果显示,广西镇龙山地区高温矿床成矿流体来源于岩浆水,低温矿床向大气降水方向漂移;硫同位素指示成矿物质来源于岩浆。综合说明这些矿床均为岩浆热液矿床。

(3)广西镇龙山地区北部矿床(点)分布具有明显的岩浆-热液成矿系统的分带特点,岩体及其边缘发育斑岩型-高温热液矿床,外围逐渐过渡到中温和中低温热液矿床,以此构建了镇龙山岩浆热液成矿系统模型。

致谢:野外工作期间得到广西贵港各矿业公司的大力支持,审稿专家提出很多建设性意见,在此一并表示感谢。

参考文献

- Bodnar R. J. A method of calculating fluid inclusion volumes based on vapor bubble diameters and PVTX properties of inclusion fluids [J]. *Economic Geology*, 1983, 78: 535-542.
- Bodnar R. J. Revised equation and table for determining the freezing point depression of $H_2O-NaCl$ solutions [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1993, 57(3): 683-684.
- Clayton R., O'Neil J., Mayeda T. Oxygen isotope exchange between quartz and water [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1972, 77(17): 3057-3067.
- Fan H., Groves D., Mikucki E., et al. Contrasting fluid types at the Nevea gold deposit in the Southern Cross greenstone belt, Western Australia: Implication for the origin of auriferous fluids depositing ores within an Archean banded iron formation [J]. *Economic Geology*, 2000, 95(7): 1527-1536.
- Hoefs J. *Stable Isotope Geochemistry* (Forth Edition) [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1997: 201.
- Mao J., Zhang J., Pirajno F., et al. Porphyry Cu-Au-Mo-epithermal Ag-Pb-Zn-distal hydrothermal Au deposits in the Dexing area, Jiangxi province, East China—a linked ore system [J]. *Ore Geology Reviews*, 2011, 43(1): 203-216.
- Mao J., Cheng Y., Chen M., et al. Major types and time-space distribution of Mesozoic ore deposits in South China and their geodynamic settings [J]. *Mineralium Deposita*, 2013, 48: 267-294.
- O'Neil J., Clayton R., Mayeda T. Oxygen isotope fractionation in divalent metal carbonates [J]. *The Journal of Chemical Physics*, 1969, 51: 5547-5558.
- Ohmoto H. Systematics of sulfur and carbon isotopes in hydrothermal ore deposits [J]. *Economic Geology*, 1972, 67(5): 551-578.
- Ohmoto H. Isotopes of sulfur and carbon [J]. *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*, 1979, 45(5): 509-567.
- Pirajno F. *Hydrothermal Processes and Mineral System* [M]. Berlin: Springer, 2009: 1-1250.
- Robert O. Hiroshi Ohmoto; Sulfur and Carbon Isotopes and Ore Genesis:

- A Review[J].Economic Geology,1974,69(6): 826-842.
- Sakai H.Isotopic properties of sulfur compounds in hydrothermal processes[J]. Geochemical Journal,1968,2(1): 29-49.
- Sillitoe R H,Bonham H F.Sediment-hosted gold deposits: Distal products of magmatic-hydrothermal systems[J].Geology,1990,18(12): 157-161.
- Sillitoe R H.Porphyry copper systems[J].Economic Geology,2010,105(1): 3-41.
- Sinclair W D.Porphyry deposits.Mineral deposits of Canada: A synthesis of major deposit-types, district metallogeny, the evolution of geological provinces, and exploration methods [C]//Canada: Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication, 2007,5: 223-243.
- Xie G,Mao J,Richards J,et al.Distal Au deposits associated with Cu-Au skarn mineralization in the Fengshan area, eastern China[J].Economic Geology,2019,114: 127-142
- Zhai D,Williams-Jones A,Liu J,et al.Mineralogical, fluid inclusion and multiple isotope (H-O-S-Pb) constraints on the genesis of the Sandaowanzi epithermal Au-Ag-Te deposit, NE China[J].Economic Geology,2018,113: 1359-1382.
- Zhai D,Liu J,Cook N,et al.Mineralogical, textural, sulfur and lead isotope constraints on the origin of Ag-Pb-Zn mineralization at Bianjiadayuan, Inner Mongolia, NE China [J]. Mineralium Deposita, 2019a,54: 47-66.
- Zhai D, Williams-Jones J, Liu J, et al. Evaluating the use of the molybdenite Re-Os chronometer in dating gold mineralization: Evidence from the Haigou deposit, NE China[J].Economic Geology, 2019b,114: 897-915.
- Zhao P,Yuan S,Mao J,et al.Constraints on the timing and genetic link of the large-scale accumulation of proximal W-Sn-Mo-Bi and distal Pb-Zn-Ag mineralization of the world-class Dongpo orefield, Nanling range, South China[J].Ore Geology Reviews,2017,95: 140-1160.
- Zhao P,Yuan S,Mao J,et al.Constraints on the timing and genetic link of the large-scale accumulation of proximal W-Sn-Mo-Bi and distal Pb-Zn-Ag mineralization of the world-class Dongpo orefield, Nanling Range, South China[J].Ore Geology Reviews,2018,95: 1140-1160.
- 毕诗健,杨振,李巍,等.钦杭成矿带大瑶山地区晚白垩世斑岩型铜矿床: 锆石 U-Pb 定年及 Hf 同位素制约[J].地球科学(中国地质大学学报),2015,40(9): 1458-1479.
- 陈港,陈懋弘,马克忠,等.广西贵港六梅金矿的成因类型及找矿意义[J].黄金科学技术,2020,28(4): 479-496.
- 陈懋弘,李忠阳,李青,等.初论广西大瑶山地区多期次花岗岩岩浆活动与成矿系列[J].地学前缘,2015,22(2): 41-53.
- 陈懋弘,李忠阳,韦子任,等.广西贵港大平天山岩浆热液成矿系统[C]//第十三届全国矿床会议论文集.北京: 中国地质学会,2016: 45-46.
- 陈懋弘,党院,李忠阳,等.广西大瑶山地区多期次岩浆活动及成矿作用[M].北京: 地质出版社,2019: 1-251.
- 葛锐.广西贵港市头闸银铅锌矿床地质特征和成因研究[D].中国地质大学(北京)硕士学位论文,2019.
- 广西壮族自治区二七三地质队.广西镇龙山区岩浆热液成矿系统及成矿预测研究报告[R].贵港: 广西壮族自治区二七三地质队, 2019: 1-115.
- 简伟,柳维,石黎红.斑岩型钼矿床研究进展[J].矿床地质,2010,29(2): 308-316.
- 蒋兴洲,康志强,许继峰,等.广西大瑶山隆起宝山铜矿区斑岩体锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J].桂林理工大学学报,2015,35(4): 766-773.
- 李传华,廖航.广西镇龙山锑金多金属矿床成矿模式初论——以小圣矿区为例[J].大众科技,2014,16(9): 139-141,125.
- 李建强,陈冬梅,陈贤.宾阳县镇龙山银锑多金属矿床地质特征及其成因[J].南方国土资源,2008,(5): 42-44.
- 李建威,赵新福,邓晓东,等.新中国成立以来中国矿床学研究若干重要进展[J].中国科学: 地球科学,2020,49(11): 1720-1771.
- 李培喜.广西镇龙山金(银)矿的构造控制特征[J].黄金,1993,23(12): 1-6.
- 李蔚铮,许仿实,李先粤.广西龙头山—镇龙山区金(银)铜铅锌矿成矿规律和成矿预测[J].华南地质与矿产,1998,25(4): 34-46.
- 李忠阳,党院,韦子任,等.广西大瑶山大黎斑岩型铜钼矿床辉钼矿 Re-Os 同位素年龄及其地质意义[J].桂林理工大学学报,2019,39(2): 249-257.
- 刘晓菲,袁顺达,王旭东,等.湖南金船塘锡铋矿床流体包裹体特征及矿床成因的初步研究[J].岩石学报,2013,29(12): 4245-4260.
- 卢焕章,毕献武,王蝶,等.斑岩铜(钼-金)矿床的成矿流体[J].矿床地质,2016,35(5): 933-952.
- 卢焕章.论成矿流体[J].矿物学报,2009,29(S1): 230-231.
- 卢焕章.流体不混溶性和流体包裹体[J].岩石学报,2011,27(5): 1253-1261.
- 倪培,迟哲,潘君屹,等.热液矿床的成矿流体与成矿机制——以中国若干典型矿床为例[J].矿物岩石地球化学通报,2020,37(3): 369-394.
- 倪培,范宏瑞,丁俊英.流体包裹体研究进展[J].矿物岩石地球化学通报,2014,33(1): 1-5.
- 秦锦华,王登红,陈毓川,等.矿田尺度成矿规律与成矿系列研究——以湖南水口山为例[J].地质学报,2020,94(1): 255-269.
- 王雪苹,舒晓峰,朱传宝,等.青海五一河地区岩浆热液型铁多金属矿床地质特征与成矿模式[J].地质与勘探,2014,50(2): 234-245.
- 王莹,谢玉玲,钟日晨,等.大别造山带沙坪沟斑岩型钼-热液脉型铅锌矿成矿系统: 流体包裹体及稳定同位素约束[J].中国有色金属学报,2019,29(3): 628-648.
- 杨志强,李骏青,马天龙,等.广西贵港—平南地区铅锌铜矿床地质特征[J].地质与勘探,2004,12(6): 28-33.
- 翟裕生.地球系统、成矿系统到勘查系统[J].地学前缘,2007,12(1): 172-181.
- 翟裕生.矿床学思维方法探讨[J].地学前缘,2020,27(2): 1-12.
- 翟裕生.论成矿系统[J].地学前缘,1999,17(1): 14-28.
- 翟裕生,王建平,邓军,等.成矿系统时空演化及其找矿意义[J].现代地质,2008,26(2): 143-150.
- 张武饰,黄锐,梁明建.浅谈广西镇龙山穹窿铜矿成矿地质条件及成矿规律[J].世界有色金属,2020,13(22): 97-98.
- 郑永飞,徐宝龙,周根陶.矿物稳定同位素地球化学研究[J].地学前缘,2000,22(2): 299-320.
- 钟宏,宋谢炎,黄智龙,等.近十年来中国矿床地球化学研究进展简述[J].矿物岩石地球化学通报,2021,40(4): 819-844.
- 周永章,郑义,曾长育,等.关于钦-杭成矿带的若干认识[J].地学前缘,2015,22(2): 1-6.
- 周永章,李兴远,郑义,等.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.