

文章编号: 1000-4734(2016)04-0503-07

云南都龙锡锌多金属矿床成矿阶段与成矿流体

叶霖¹, 鲍谈^{1,2}, 刘玉平¹, 张乾¹, 王小娟^{1,2},
何芳^{1,2}, 王大鹏¹, 蓝江波¹

(1. 中国科学院地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002; 2. 中国科学院大学, 北京 100039)

摘要: 云南马关都龙锡锌多金属矿床位于滇东南老君山锡锌钨多金属成矿区南部, 是我国三大锡石硫化物矿床之一, 其地质及成矿作用复杂, 矿物种类繁多。本文根据矿床中矿物共生组合特征, 从早到晚划分出以下4个阶段:

(a) 夕卡岩阶段, 早期为无水夕卡岩阶段, 形成矿物以石榴石和透辉石为主, 晚期为含水夕卡岩阶段, 形成矿物以阳起石、绿帘石、绿泥石和符山石等为主; (b) 氧化物阶段, 磁铁矿、锡石和白钨矿等氧化物在此阶段大量沉淀; (c) 硫化物阶段, 早期形成磁黄铁矿→黄铁矿→黄铜矿、辉钼矿, 晚期形成闪锌矿(黄铜矿)和少量方铅矿组合; (d) 碳酸盐阶段(方铅矿及少量闪锌矿), 其成矿元素与夕卡岩蚀变类型的垂直分带特征与典型夕卡岩型矿床较类似, 矿化类型和围岩蚀变的分带与隐伏岩体距离有关, 该矿床属于与燕山晚期花岗岩有关的岩浆热液夕卡岩型多金属矿床。流体包裹体研究表明, 从成矿早阶段到晚阶段, 成矿流体从中高温较高盐度逐渐演化为中低温低盐度流体, 压力的降低和大气降水的混入造成的流体沸腾可能是 Sn 和 Zn 等成矿元素大量沉淀的主要机制。该研究成果为认识都龙矿床成矿作用提供了实际地质和地球化学依据。

关键词: 都龙锡锌多金属矿床; 成矿阶段; 成矿流体; 岩浆热液夕卡岩型矿床

中图分类号: P579; P618.4

文献标识码: A

doi: 10.16461/j.cnki.1000-4734.2016.04.008

作者简介: 叶霖, 男, 1970年生, 博士, 研究员, 从事矿床地球化学研究。E-mail: yelin@vip.gyig.ac.cn

Mineralization Stages and Ore-Forming Fluid of Dulong Sn-Zn Polymetal Ore Deposit, Yunnan Province, China

YE Lin¹, BAO Tan^{1,2}, LIU Yu-ping¹, ZHANG Qian¹, WANG Xiao-juan^{1,2}, HE Fang^{1,2},
WANG Da-peng¹, LAN Jiang-bo¹

(1. State key Lab. of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China;

2. University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: As one of the three largest Sn-polymetallic deposits in China, Dulong ore deposit is located in the southern Laojunshan Sn-Zn-W polymetal mineralization area in south-eastern Yunnan Province, China, and is characterized by complicated geological process, mineralization, and mineral assemblages. Research on mineral assemblages of the deposit indicates four mineralization stages from early to late; (a) skarn stage, the mineral assemblages are dominated by anhydrous skarn (e.g. garnet and diopside) in the early skarn stage and hydrous skarn (e.g. actinolite, epidote, chlorite and vesuvianite); (b) oxide stage, magnetite, cassiterite and scheelite formed in quantity at the stage; (c) sulphide stage, the mineral assemblages are composed by pyrrhotite, pyrite, chalcopyrite and molybdenite at the early higher temperature stage and sphalerite with minor galena at later lower temperature stage; and (d) carbonate stage, the calcite vein with galena, which occurs around the surface, formed at the stage. The vertical zoning of ore-forming elements and skarn assemblages are related to the distance of concealed granite, corresponding with the typical skarn type deposit, and it is suggested that Dulong deposit is a magmatic hydrothermal skarn type deposit related to Yanshanian granite. The research on fluid inclusion shows that the salinity of ore-forming fluid decreased gradually from the early to the late stage, and the

收稿日期: 2016-05-11

基金项目: 云南华联锌铜股份有限公司委托项目(KY20120910); 中国科学院地球化学研究所“十二五”项目群(SKLODG-ZY125-02, SKLODG-ZY125-04); 国家自然科学基金(批准号: 41173063)

major cassiterite, scheelite and magnetite mineralization formed at high-intermediate temperature and chalcopyrite, sphalerite and galena formed at intermediate-low temperature. It is suggested that the fluid boiling, which caused by the loss of pressure quickly and mixing with meteoric water, is the key mineralization mechanism for ore-forming elements in abundance. The research provides a new geological and geochemical evidence for understanding the mineralization of Dulong Sn-Zn polymetal ore deposit.

Keywords: Dulong Sn-Zn polymetal ore deposit; mineralization stage; Ore-forming fluid; magmatic hydrothermal skarn type deposit

滇东南都龙锡锌多金属超大型矿床是我国最重要的锡矿资源基地之一,是继个旧、大厂之后我国又一重要的锡金属资源基地^[1]。矿区位于云南省马关县都龙镇东侧,累计已探明 Sn 约 40 万吨、Zn 400 余万吨,并伴生 Pb、Ag、Cu、In 和 Cd 等多种有益组分,这些有用元素储量均已达到大(超大)型规模,其中伴生 In 储量约 6000 吨。都龙矿床的开采历史长达百余年,自上世纪 80 年代以来,在区域地质及岩浆岩演化^[2-4]、矿床地质特征^[5-8]、矿床地球化学^[9-13]等方面积累了大量研究成果,为认识区域及都龙矿床成矿作用奠定了坚实的基础。但是,该矿床矿物种类繁多,地质及成矿作用复杂,相关矿物生成顺序和成矿阶段的划分依然存在不少问题,矿床成因认识方面也存在较大分歧,包括岩浆热液成因、热水沉积、沉积-变质-热液改造成矿等不同成因观点,难以建立统一成矿模式,影响了矿区深部及外围地质勘探工作的深入。本文通过对都龙矿床成矿阶段的梳理,并对不同成矿阶段流体包裹体进行了显微测温,从成矿流体演化方面对都龙矿床进行剖析,为认识都龙矿床成矿作用提供更为翔实的地质地球化学依据。

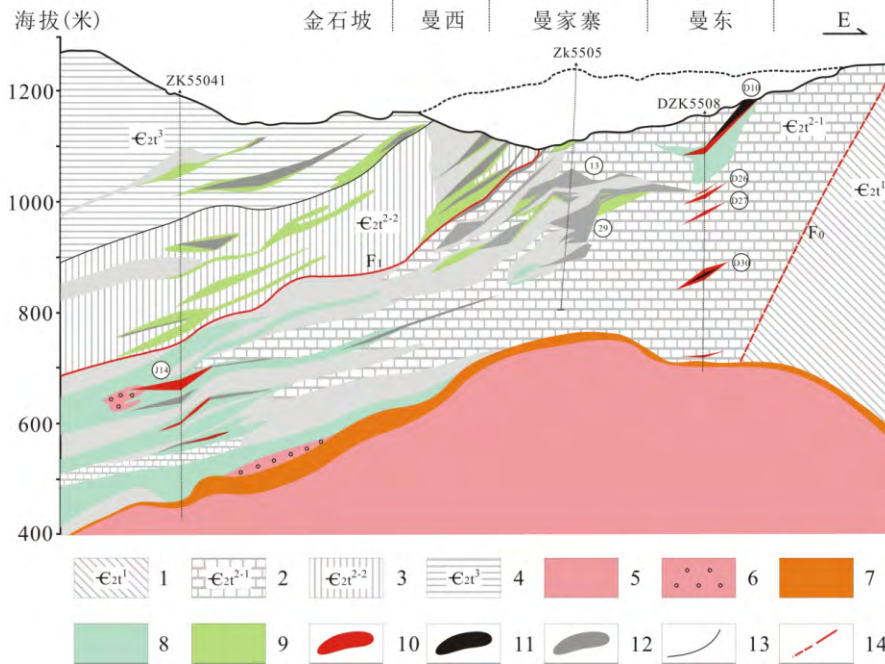
1 区域及矿区地质简介

都龙矿床位于老君山变质核杂岩之西南部,大地构造背景属于华南褶皱系西端与扬子地块、哀牢山褶皱系等三大构造单元交接部位^[14]。区域内大面积出露加里东期南温河和燕山晚期老君山 S 型花岗岩,其中,燕山晚期老君山花岗岩为复式岩体,其主体出露于矿区北侧,南北长约 14 km,东西宽约 9 km,面积约 134 km²,并向南倾伏于矿区深部,根据该岩体的产状、岩石结构构造特征及同位素年龄差异可以划分为二期^[4,11,15]:第一期(γ_b^{3a})为中-粗粒二云二长花岗岩,呈岩基产出,分布于复式岩体边缘;第二期(γ_b^{3b})为中细粒二云母花岗岩,呈岩株侵入第一期岩体中;第三期为花岗斑岩、石英斑岩等脉岩。区域出露地层以前寒武系猛洞岩群为主,主要为片岩、片麻岩、变粒岩、硅质岩及斜长

角闪岩。马关-都龙大断裂呈弧型展布于都龙矿床北东侧,矿区内主要的控矿构造为 NW 向马关-都龙断裂派生的一系列 SN 向次级断裂^[5]。

矿区出露地层以中寒武统田蓬组(C_2t)为主,由上而下分为 5 个岩性段,下部(C_2t^1)以碎屑岩为主夹少量碳酸盐岩扁豆体,中部($C_2t^2-C_2t^4$)为碎屑岩与碳酸盐岩互层,而上部(C_2t^5)则以碎屑岩为主。其中,中寒武统田蓬组第二段(C_2t^2)是矿区 Sn、Zn、Cu 工业矿体最主要的赋存层位,其岩性复杂,为石英云母片岩、大理岩、夕卡岩、变粒岩及少量片麻岩组成的复合岩性段。

都龙矿床 Sn-Zn 主矿体赋存于中、浅变质的中寒武统田蓬组(C_2t)第二段至第四段片岩、大理岩夹似层状夕卡岩中,矿体主要呈似层状、透镜状、囊状及网脉状,与围岩产状基本一致(图 1),在平面上呈南北向带状分布,剖面上具叠瓦状排列特征,局部地段可见矿体切穿地层(图 1)。此外,近年来华联地勘公司在矿区地质勘探找矿过程中,在曼家寨西部-金石坡矿段深部和曼东地区均找到很好的 W 矿化,白钨矿呈(网)脉状产于中寒武统田蓬组第二段第一亚段石榴石透辉石夕卡岩中,规模达到中型矿床^[7]。矿区南北向断层发育,为主要控矿构造(如 F_0 和 F_1),而东西向断层规模均较小,常错断 Sn-Zn 矿体。已有的钻探揭露矿区深部均存在隐伏花岗岩(图 1),岩性与老君山第一期中-粗粒二云二长花岗岩(γ_b^{3a})相似,我们同位素定年结果(课题组数据,未发表)表明两者形成时间在误差范围内一致,因此,深部的隐伏花岗岩可能是老君山老君山第一期花岗岩向南侧伏组成部分。总体上,矿床中金属矿物主要为铁闪锌矿、磁黄铁矿、锡石、磁铁矿、黄铜矿、黄铁矿、毒砂、白钨矿和辉钼矿等,脉石矿物主要为石英、绿泥石、阳起石、透闪石、透辉石、绿帘石、绢云母、斜长石等。矿石中变晶结构、交代结构和固溶体出溶结构广泛发育,偶见交代残留胶状结构。矿石构造主要为纹层状-条带状构造、块状构造、片状-片麻状构造、斑点状-斑杂状构造、浸染状构造和脉状-网脉状构造等。



1-中寒武统田蓬组第一段: 黑云母斜长(角闪)片麻岩和斜长变粒岩; 2-中寒武统田蓬组第二段第一亚段: 石英云母片岩夹中厚层钙质和白云质大理岩; 3-中寒武统田蓬组第二段第二亚段: 中厚层钙质大理岩夹石英云母片岩; 4-中寒武统田蓬组第三段: 灰绿色云母片岩夹钙质大理岩; 5-燕山晚期花岗岩; 6-燕山晚期花岗斑岩; 7-硅化壳; 8-石榴石透辉石夕卡岩(干夕卡岩); 9-绿泥石阳起石夕卡岩(湿夕卡岩); 10-W 矿体及编号; 11-铜矿体; 12-锡锌矿体及编号; 13-地质界线; 14-断层

图 1 都龙矿区 55 号勘探线剖面简图(据华联地质勘探公司, 2014 修改)

Fig. 1. Sketch map of No.55 profile of Dulong ore area (modified after Hualian mineral Resource Exploration Lt. Co., 2014).

2 矿化阶段及其流体包裹体特征

根据我们野外和室内研究的结果, 本矿床按矿物组合和形成先后顺序由早到晚可划分以下 4 个阶段: (1) 夕卡岩阶段(以石榴石、透辉石→阳起石、绿帘石、绿泥石和符山石等为主); (2) 氧化物阶段(以磁铁矿、锡石和白钨矿等为主); (3) 硫化物阶段(磁黄铁矿→黄铁矿→黄铜矿、辉钼矿→闪锌矿、黄铜矿、方铅矿); (4) 碳酸盐阶段(方铅矿、闪锌矿)。显微镜下观察表明, 都龙矿床不同成矿阶段萤石、石英和方解石中流体包裹体众多, 类型多样, 其中包裹体一般随机成群或孤立分布、少数沿裂隙分布, 根据室温下的相组成和加热时的相变特征, 本矿床原生包裹体可划分为富液相水溶液包裹体(I型)、富气相水溶液包裹体(II型)、纯气相包裹体(III型)和熔融包裹体(IV型) 4 种类型。

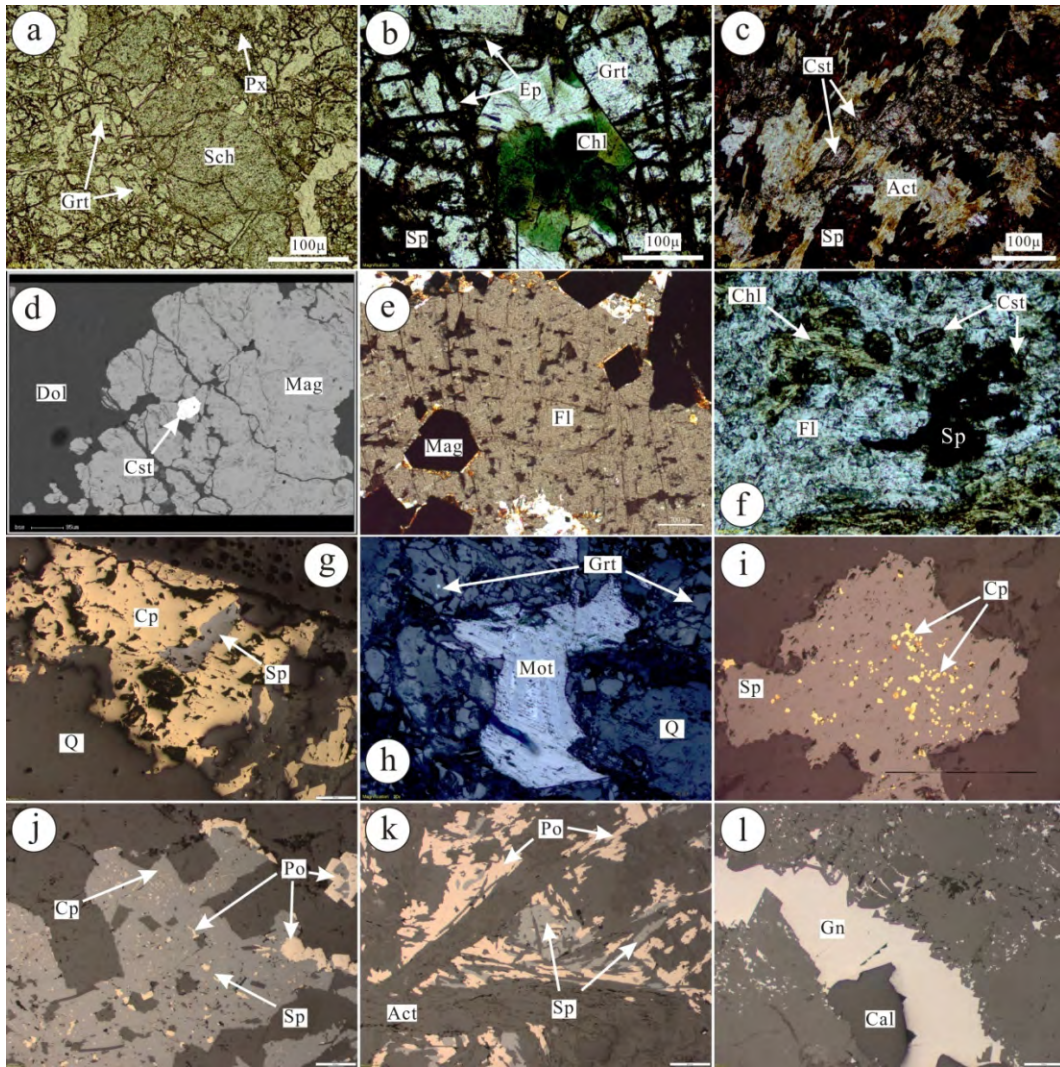
2.1 夕卡岩阶段

该阶段可分为早期和晚期夕卡岩阶段, 其中, 早期夕卡岩阶段矿物组合包括钙质系列(钙铁榴石、钙铝榴石、透辉石、钙铁辉石、符山石等)(图 2a)、

镁质系列(蛇纹石和镁橄榄石)和部分锡石, 本阶段形成的岩石及矿物组合主要分布在矿区深部(图 1), 靠近深部隐伏花岗岩。由于其中石榴石、辉石晶型较差, 并且遭受后期强烈交代蚀变作用, 其中没有保存较好的包裹体, 因此尚未开展该阶段流体包裹体方面的研究。晚期夕卡岩阶段(退化蚀变阶段), 形成阳起石、绿泥石、绿帘石、金云母、黑云母等含水硅酸盐矿物组合(图 2b,c), 部分磁铁矿与锡石生成。测试对象为该阶段形成与磁铁矿共生的萤石, 其中以发育 I 型富液相水溶液包裹体为特征, 这类包裹体呈椭圆形, 大小一般在 10~15 μm 之间, 气相百分比在 35%~45%之间, 孤立分布。

2.2 氧化物阶段

随着成矿流体温度的降低, 氧化物阶段形成大量脉状白云石+磁铁矿+锡石组合矿体, 并穿插早期形成的夕卡岩。其矿物组合以锡石、磁铁矿和白云母为主(图 2c-f), 由于此阶段形成的脉状矿体规模大, 且 Sn 品位较高, 因此, 此阶段是 Sn 成矿的重要阶段之一, 该阶段形成的锡石颗粒较小, 晶形较差, 呈褐色, 此外, 本阶段还可以形成少量的细



a-早期夕卡岩阶段：充填于石榴石和透辉石间隙的白钨矿细脉（单偏光）；b-晚期夕卡岩阶段：绿泥石和绿帘石交代石榴石，闪锌矿充填于其中间隙（单偏光）；c-晚期夕卡岩阶段：阳起石间隙充填的锡石及闪锌矿（单偏光）；d-氧化物阶段：白云石间隙中磁铁矿与锡石共生（电子探针背散射照片）；e-氧化物阶段：磁铁矿萤石脉（单偏光）；f-氧化物阶段：锡石与闪锌矿交代绿泥石（单偏光）；g-早期硫化物阶段：黄铜矿闪锌矿石英英脉（反射光）；h-早期硫化物阶段：充填于石榴石间隙的辉钼矿细脉（反射光）；i-晚期硫化物阶段：闪锌矿中黄铜矿“病毒”结构（反射光）；j-晚期硫化物阶段：闪锌矿中磁黄铁矿和黄铜矿“病毒”结构（反射光）；k-晚期硫化物阶段：磁黄铁矿和闪锌矿交代阳起石（反射光）；l-碳酸盐阶段：充填于碳酸岩中方铅矿方解石细脉；Grt-石榴石；Px-透辉石；Chl-绿泥石；Ep-绿帘石；Act-阳起石；Sch-白钨矿；Cst-锡石；Mag-磁铁矿；Cp-黄铜矿；Mot-辉钼矿；Sp-闪锌矿；Po-磁黄铁矿；Gn-方铅矿；Dol-白云石；Q-石英；Fl-萤石；Cal-方解石

图 2 都龙矿床不同矿化阶段矿物共生组合

Fig. 2. Mineral assemblages of different ore forming stage, Dulong ore deposit.

脉状白钨矿（图 2a），穿插早期形成的夕卡岩。已有的工程揭露都龙矿床中磁铁矿和白钨矿主要分布在隐伏花岗岩岩体上方 200 m 范围内。该阶段与磁铁矿、锡石共生的白云石中发育大量 I 型富液相水溶液包裹体和 III 型纯气相包裹体（图 3a），并含少量 II 型富气相水溶液包裹体，且 3 种类型包裹体密切共生。其中，I 型包裹体多呈菱形或长方形，大小为 8~18 μm，气相百分比在 30%~40% 之间，孤立或成群分布；III 型包裹体呈菱形或长方形产出，大小一般为 10~20 μm，孤立或成群分布；II 型包

裹体呈菱形或长方形，大小一般为 10~20 μm，气相百分比在 75%~90% 之间，孤立或成群分布。镜下同一视域内，气相分数变化很大的富液相包裹体、富气相包裹体和纯气相包裹体共存现象非常普遍，且富液相包裹体和富气相包裹体的均一温度相近，但均一相态不同，暗示其流体具不混溶或沸腾特征。

2.3 硫化物阶段

按照矿物组合和矿物生成顺序此阶段又可以分为早期硫化物阶段和晚期硫化物阶段。

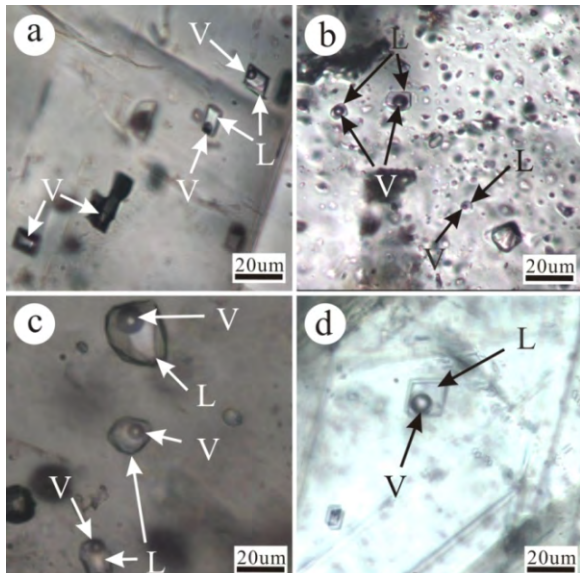


图3 各成矿阶段包裹体特征
a-氧化物阶段与磁铁矿共生白云石中富液相包裹体(I型)与纯气相包裹体(III型); b-早期硫化物阶段萤石中富液相包裹体(I型); c-晚期硫化物阶段石英中富液相包裹体(I型); d-碳酸盐阶段方解石中富液相包裹体(I型); v-气相; L-液相

图3 各成矿阶段包裹体特征

Fig. 3. Fluid inclusions of different ore forming stages.

(a) 早期硫化物阶段: 此阶段形成的金属矿物包括黄铜矿、磁黄铁矿、毒砂、黄铁矿和辉钼矿(图2g-i), 脉石矿物包括石英、萤石、绿泥石和绿帘石等, 此阶段是Cu矿化的重要阶段。其中石英和萤石中包裹体类型基本一致, 均发育大量I型富液相水溶液包裹体(图3b)和III型纯气相包裹体, 其次为少量II型富气相水溶液包裹体(图3b), 3种类型包裹体密切共生。I型富液相水溶液包裹体呈负晶型、近圆形或椭圆形, 大小一般在 $8\sim 20\ \mu\text{m}$ 之间, 气相百分比在 $25\%\sim 35\%$ 之间, 孤立或成群分布; III型纯气相包裹体呈近圆形或椭圆形, 大小一般在 $12\sim 25\ \mu\text{m}$ 之间, 孤立或成群分布; II型富气相水溶液包裹体呈近圆形或椭圆形, 大小一般在 $10\sim 20\ \mu\text{m}$ 之间, 气相百分比在 $75\%\sim 90\%$ 之间, 孤立或成群分布。与氧化物阶段白云石中包裹体一样, 镜下同一视域内, 气相分数变化很大的富液相包裹体、富气相包裹体和纯气相包裹体共存现象非常普遍, 且富液相包裹体和富气相包裹体的均一温度相近、均一相态不同, 显示出流体的不混溶或沸腾特征^[16-17]。

(b) 晚期硫化物阶段: 此阶段形成的金属矿物包括闪锌矿、方铅矿、黄铁矿(图2j-k), 脉石矿物包括石英、萤石和方解石等, 此阶段是锌矿化的重要阶段, 闪锌矿常交代磁黄铁矿。石英和萤石中的包裹体类型基本一致, 均发育大量I型富液相水

溶液包裹体(图3c)和III型纯气相包裹体, 其次为少量II型富气相水溶液包裹体, 且3种类型包裹体密切共生。其中, I型富液相水溶液包裹体常呈负晶型、近圆形或椭圆形, 大小一般在 $8\sim 20\ \mu\text{m}$ 之间, 气相百分比在 $20\%\sim 30\%$ 之间, 孤立或成群分布; III型纯气相包裹体多呈近圆形或椭圆形, 大小一般在 $8\sim 20\ \mu\text{m}$ 之间, 孤立或成群分布; II型富气相水溶液包裹体呈近圆形或椭圆形, 大小一般在 $8\sim 20\ \mu\text{m}$ 之间, 气相百分比在 $75\%\sim 90\%$ 之间, 孤立或成群分布。该阶段形成的流体包裹体与氧化物阶段白云石和早期硫化物阶段石英及萤石中包裹体组合特征基本一致, 镜下同一视域内, 气相分数变化很大的富液相包裹体、富气相包裹体和纯气相包裹体共存现象非常普遍, 且富液相包裹体和富气相包裹体的均一温度相近, 而均一相态不同, 表明流体具不混溶或沸腾特征^[16-17]。

2.4 碳酸盐阶段

碳酸盐阶段是矿区成矿最晚阶段, 期间形成大量碳酸盐矿物-方解石细脉, 并伴有微弱的铅锌矿化, 以方铅矿为主(图2l), 含少量闪锌矿和黄铁矿, 多呈方铅矿方解石细脉产于大理岩中, 主要分布于远离隐伏岩体靠近地表附近, 如辣子寨矿段等^[8], 该阶段一般无重要工业矿化。其方解石中包裹体类型单一, 以I型富液相水溶液包裹体为主(图3d), 多呈菱形或长方形, 大小一般在 $10\sim 20\ \mu\text{m}$ 之间, 气相百分比在 $15\%\sim 25\%$ 之间, 孤立或成群分布。

3 流体包裹体显微测温

本次研究对上述不同成矿阶段中萤石、白云石、石英和方解石中流体包裹体开展了系统的包裹体显微测温工作, 共获得近600组流体包裹体显微测温数据(图4), 测试结果表明:

(1) 晚期夕卡岩阶段: 该阶段萤石中I型富液相水溶液包裹体均一温度变化范围为 $376\sim 419\ ^\circ\text{C}$ (平均 $398\ ^\circ\text{C}$, $N=18$), 峰值集中在 $390\sim 410\ ^\circ\text{C}$, 冰点温度变化范围为 $-4.9\sim -7.4\ ^\circ\text{C}$, 对应的盐度 $w(\text{NaCl eq.})$ 为 $7.7\%\sim 11.0\%$, 主要集中在 $8.0\%\sim 9.5\%$, 显示高温和中等盐度流体特征。

(2) 氧化物阶段: 该阶段白云石中I型富液相水溶液包裹体均一温度变化范围为 $323\sim 405\ ^\circ\text{C}$ (平均 $358\ ^\circ\text{C}$, $N=133$), 峰值集中在 $330\sim 390\ ^\circ\text{C}$, 冰点温度变化范围为 $-6.3\sim -10.9\ ^\circ\text{C}$, 所对应的盐度 $w(\text{NaCl eq.})$ 在 $9.6\%\sim 14.9\%$ 之间, 主要集中在 $10.5\%\sim 13\%$; 其中II型富气相水溶液包裹体均一温

度变化范围为 346~373 °C, 冰点温度变化范围为 -0.5~-0.9 °C, 对应的盐度为 0.9%~1.5%之间。表明此阶段的成矿流体属于高温中等盐度流体和高温低盐度流体的共生流体。

(3) 早期硫化物阶段: 该阶段的石英和萤石中 I 型富液相水溶液包裹体均一温度变化范围为 245~362 °C (平均 304 °C, $N=204$), 峰值集中在 280~330 °C, 冰点温度变化范围为 -4.3~-10.2 °C, 对应的盐度为 6.9%~14.1%, 主要集中在 8%~12.5%之间; 其中的 II 型富气相水溶液包裹体均一温度变化范围为 295~317 °C, 冰点温度变化范围为 -0.5~-1 °C, 所对应的盐度在 0.9%~1.7%之间。表明此阶段的成矿流体属于中温中等盐度流体和中温低盐度流体的共生流体。

(4) 晚期硫化物阶段: 该阶段是闪锌矿等硫化物析出的主要阶段, 与这些硫化物共生的石英和萤石中 I 型富液相水溶液包裹体均一温度变化范围为 188~308 °C (平均 246 °C, $N=204$), 峰值集中在 210~290 °C, 冰点温度变化范围为 -2.4~-9.2 °C, 对应的盐度在 4.0%~10.1%之间, 主要集中在 6.5%~10.5%; 其中 II 型富气相水溶液包裹体均一温度变化范围为 241~268 °C, 冰点温度变化范围为 -0.4~-1 °C, 对应的盐度为 0.7%~1.7%。表明此阶段的成矿流体属于中温中等盐度流体和中温低盐度流体的共生流体。

(5) 碳酸盐阶段: 该阶段方解石中 I 型富液相水溶液包裹体均一温度相对最低, 其变化范围在 170~245 °C 之间 (平均 204 °C, $N=45$), 峰值集中在 180~230 °C, 而冰点温度变化范围为 -2.5~-7.5 °C, 所对应盐度在 4.2%~11.7%之间, 主要集中在 6%~10.5%。表明此阶段的成矿流体属于低温中低盐度的流体。

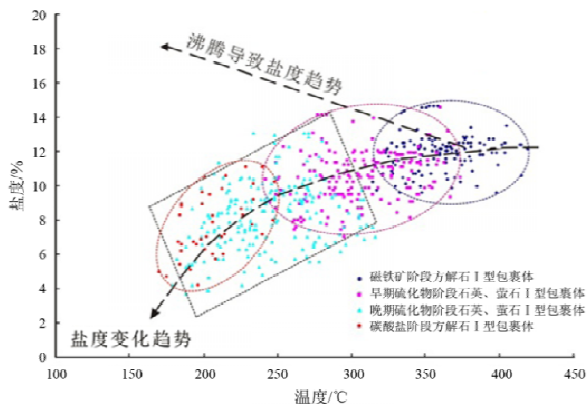


图 4 都龙矿床成矿流体包裹体均一温度-盐度关系图

Fig. 4. Diagram of temperature and salinity for fluid inclusions, Dulong ore deposit.

4 讨论

由于都龙矿床 Sn-Zn 主矿体产于层状绿泥石阳起夕卡岩中, 长期以来, 一些学者把它作为热水沉积主要证据之一^[18-19], 但近年来的勘探与研究结果表明, 构造(断层、层间滑脱面、褶皱等)是本矿床主要控矿因素, 且矿区深部存在燕山晚期隐伏花岗岩, 其凸起部位 Sn、Zn、W、Cu、Mo 等矿化较好^[7], 在隐伏岩体顶部 0~100 m 外接触带内, 尽管 W、Sn、Cu、Mo 矿化程度存在一定差异, 但矿化普遍, 除金石坡矿段外, 曼西、曼家寨和曼东矿段深部都存在该类矿化。此外, 在典型的层状 Sn-Zn 主矿体中, 也存在局部 W 矿化(如 ZK55033 钻孔), 且从矿区深部(靠近隐伏岩体)至地表浅部, 矿化类型和夕卡岩类型均呈有规律变化, 在靠近隐伏岩体附近, 成矿元素以 W、Fe(磁铁矿)、Cu、Mo 和 Sn 等高温元素组合为主, 围岩蚀变为石榴石化和透辉石化等“干夕卡岩”^[7]; 离岩体较远的矿体, 成矿流体温度相对较低, 成矿元素则以 Sn-Zn 为主, 围岩蚀变为绿泥石、阳起石、透闪石等“湿夕卡岩”组合, 石榴石明显减少, 其颜色也相对较浅; 远离岩体的矿体, 成矿流体温度最低, 形成了以辣子寨为代表的碳酸岩地层中脉状 Pb(-Zn) 矿床^[8]。

可见, 都龙矿区成矿元素与夕卡岩化等蚀变类型的垂直分带特征与典型夕卡岩型矿床类似, 如秘鲁的 Antamina Cu-Zn 等矿床^[20]。我们认为云南马关都龙 Sn-Zn 多金属矿床的形成属于与燕山晚期花岗岩有关的岩浆热液夕卡岩型多金属矿床, 其中层状夕卡岩的形成应为成矿流体顺层交代的结果, 矿化类型和围岩蚀变的分带与隐伏岩体距离有关。

包裹体均一温度和盐度关系(图 4)表明, 从晚期夕卡岩阶段、经过氧化物阶段、早期硫化物阶段、晚期硫化物阶段, 最后到碳酸盐阶段, 包裹体均一温度是逐渐降低的; 从晚期夕卡岩阶段到氧化物阶段 I 型富液相水溶液包裹体盐度升高, 但从氧化物阶段到早期硫化物阶段、晚期硫化物阶段, 最后到碳酸盐阶段 I 型富液相水溶液包裹体盐度又逐渐降低。我们的氢、氧、碳同位素研究表明, 氧化物阶段成矿流体以岩浆水为主, 在早期硫化物阶段有一定大气降水混入, 而晚期硫化物阶段大气降水大量混入, 成矿流体变为岩浆水和大气降水的混合流体, 这也很好的解释了从早到晚成矿流体盐度逐渐降低的原因。值得注意的是, 氧化物阶段、早期和晚期硫化物阶段均存在富液相(I 型)、富气相(III 型)和纯气相(II 型)包裹体共存现象, 测温结果表明, 不同阶段 I 型和 III 型包裹体具有相似的均一

温度, 但均一相态不同, 暗示其流体具不混溶或沸腾特征, 部分气相分数中等(40%~60%)的气液水两相包裹体, 在升温至与其同期次捕获的原生包裹体相同的均一温度后, 气泡没有发生明显变化或者气泡仅稍微变小, 但不能均一, 表明它们是在沸腾状态下捕获的由气和液两相组成的不均匀流体相, 即非均一捕获^[16-17,21-22]。可见, 都龙矿床在 Sn、Zn 主成矿阶段由于压力的释放和大气降水的混入造成的沸腾作用产生了两种不混溶的流体相共存, 这可能是本矿床成矿物质大量析出的主要机制。

5 结论

(1) 都龙矿床按矿物组合和形成先后顺序由早到晚可划分以下4个阶段: (a) 夕卡岩阶段, 早期为无水夕卡岩阶段, 形成矿物以石榴石和透辉石为主, 晚期为含水夕卡岩阶段, 形成矿物以阳起石、

绿帘石、绿泥石和符山石等为主; (b) 氧化物阶段, 磁铁矿、锡石和白钨矿等矿物在此阶段大量富集;

(c) 硫化物阶段形成磁黄铁矿→黄铁矿→黄铜矿、辉钼矿→闪锌矿、黄铜矿、方铅矿; (d) 碳酸盐阶段主要形成方铅矿及少量闪锌矿。其成矿元素与夕卡岩蚀变类型的垂直分带特征与典型夕卡岩型矿床较类似, 该矿床属于与燕山晚期花岗岩有关的岩浆热液夕卡岩型多金属矿床, 其中层状夕卡岩的形成应为成矿流体顺层交代的结果, 矿化类型和围岩蚀变的分带与隐伏岩体距离有关;

(2) 从成矿早阶段到晚阶段, 成矿流体从中高温较高盐度逐渐演化为中低温低盐度, 流体的沸腾可能是 Sn 和 Zn 等成矿元素大量沉淀的主要机制。

致谢: 野外工作得到云南都龙锌铜公司和华联地勘公司广大地质人员的大力支持与帮助, 在此一并致谢!

参考文献:

- [1] 周祖贵. 都龙矿区资源总价值[J]. 云南冶金, 2002, 31(5): 62-64.
- [2] 颜丹平, 周美夫, 王焰. 都龙-Song Chay 变质穹隆体变形与构造年代-南海盆地北缘早期扩张作用始于华南地块张裂的证据[J]. 中国地质大学学报, 2005, 30(4): 402-412.
- [3] 刘玉平, 叶霖, 李朝阳. 滇东南发现新元古代岩浆岩: SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学和岩石地球化学证据[J]. 岩石学报, 2006, 22(4): 916-926.
- [4] 张斌辉, 丁俊, 任光明, 等. 云南马关老君山花岗岩的年代学、地球化学特征及地质意义[J]. 地质学报, 2012, 86(4): 587-601.
- [5] 宋焕斌. 云南东南部都龙锡石-硫化物型矿床的成矿特征[J]. 矿床地质, 1989, 8(4): 29-38.
- [6] 秦德先, 刘春学. 矿产资源经济学[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [7] 缪应理, 张世奎, 韦文彪, 等. 云南都龙锡多金属矿床金石坡矿段钨铜钼矿化特征及地质意义[J]. 矿物学报, 2013, 33(4): 510-514.
- [8] 张世奎, 缪应理, 郭跃进. 云南马关都龙辣子寨碳酸盐岩型铅锌矿体的发现及其地质意义[J]. 矿物学报, 2013, 33(4): 456-461.
- [9] 刘玉平, 李朝阳, 刘家军. 都龙矿床含矿层状夕卡岩成因的地质地球化学证据[J]. 矿物学报, 2000, 20(4): 378-384.
- [10] 廖震, 刘玉平, 李朝阳, 等. 都龙锡锌矿床绿泥石特征及其成矿意义[J]. 矿床地质, 2010, 29(1): 169-176.
- [11] 刘玉平, 李正祥, 李惠民, 等. 都龙锡锌矿床锡石和锆石 U-Pb 年代学: 滇东南白垩纪大规模花岗岩成岩成矿事件[J]. 岩石学报, 2007, 23(5): 967-976.
- [12] 王小娟, 刘玉平, 缪应理, 等. 都龙锡锌多金属矿床 LA-MC-ICPMS 锡石 U-Pb 测年及其意义[J]. 岩石学报, 2014, 30(3): 867-876.
- [13] 何芳, 张乾, 王大鹏, 等. 云南都龙 Sn-Zn 多金属矿床成矿物质来源—硫、碳、氧稳定同位素证据[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2014, 33(6): 900-907.
- [14] 张世涛, 冯明刚, 吕伟. 滇东南温河变质核杂岩解析[J]. 中国区域地质, 1998, 17(4): 390-397.
- [15] 冯佳睿, 毛景文, 裴荣富, 等. 滇东南老君山地区印支期成矿事件初探-以新寨锡矿床和南秧田钨矿床为例[J]. 矿床地质, 2011, 30(1): 57-73.
- [16] Roedder E. Fluid inclusions[J]. Reviews in Mineralogy, 1984, 12: 1-64.
- [17] 卢焕章, 范宏瑞, 倪培, 等. 流体包裹体[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [18] 周建平, 徐克勤, 华仁民. 滇东南锡多金属矿床成因商榷[J]. 云南地质, 1997, 16(4): 309-349.
- [19] 周建平, 徐克勤, 华仁民. 滇东南喷流沉积硫化物块状硫化物特征与矿床成因[J]. 矿物学报, 1998, 18(2): 158-168.
- [20] Meinert L D, Dipple G M, Nicolescu A S. World skarn deposits [J]. Economic Geology, 2005, 100th Anniversary Volume: 299-336.
- [21] 池国祥, 卢焕章. 流体包裹体组合对测温数据有效性的制约及数据表达方法[J]. 岩石学报, 2008, 24(9): 1945-1953.
- [22] 陈思尧, 顾雪祥, 程文斌, 郑砾, 韩思宇, 彭义伟. 云南羊拉铜矿床成矿流体特征及成矿过程[J]. 地学前缘, 2013, 20(1): 82-91.