

文章编号: 0258-7106(2009)03-0282-15

新疆阿尔泰大东沟铅锌矿床流体包裹体特征及成矿作用*

刘敏¹, 张作衡¹, 王永强², 郭旭吉², 陈伟十¹

(1 中国地质科学院矿产资源研究所 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037;

2 新疆有色地质勘查局 706 队, 新疆 阿勒泰 836500)

摘要 大东沟铅锌矿床位于阿尔泰山南缘克兰盆地内, 矿体呈层状展布, 与地层产状一致, 直接容矿围岩为下泥盆统康布铁堡组火山-沉积岩, 矿石构造以条带状、浸染状、细脉状为主, 矿石矿物成分相对简单, 主要为方铅矿、闪锌矿和黄铁矿等。文章对大东沟铅锌矿床不同成矿阶段的石英、方解石和闪锌矿中的流体包裹体进行了测温, 对石英和闪锌矿中的流体包裹体进行了激光拉曼光谱分析, 并对部分石英样品进行了气相及离子色谱分析。结果表明, 大东沟铅锌矿床流体包裹体主要有 NaCl-H₂O、CO₂-H₂O±CH₄ 和 CO₂-H₂O-NaCl 三种类型, 均一温度变化范围较大, 为 97.3~480℃, 主要集中于 140~300℃, 流体盐度 $\alpha(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为 0.2%~57.1%, 主要集中于 3.2%~14.8%, 流体包裹体气相成分主要为 CO₂ 和 H₂O, 含少量 CH₄、N₂、H₂ 等, 液相成分以 Na⁺、Ca²⁺、F⁻、Cl⁻ 为主, K⁺、SO₄²⁻ 次之, 并含少量 Mg²⁺、Br⁻ 和 NO₃⁻, 计算所得的离子浓度为 36.6%~58.0%。结合已有的稳定同位素资料, 方解石中的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 值为 -4.2‰~0.4‰, 石英流体包裹体中的 $\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}$ 为 -89‰~-127‰, 计算所得的石英及方解石的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{K}}$ 值在 -11.4‰~7.6‰ 之间, 表明成矿流体主要为岩浆水与大气降水的混合物, 流体中的碳主要来源于海相碳酸盐岩, 成矿流体的物理化学条件的改变及流体的不混溶作用在成矿过程中起了重要作用。

关键词: 地质学; 流体包裹体; 成矿作用; 大东沟铅锌矿; 阿尔泰

中图分类号: P618.42; P618.43

文献标志码: A

Fluid inclusion characteristics and mineralization of Dadonggou Pb-Zn ore deposit in Altay, Xinjiang

LIU Min¹, ZHANG ZuoHeng¹, WANG YongQiang², GUO XuJi² and CHEN WeiShi¹

(1 MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2 No. 706 Geological Party, Xinjiang Geoexploration Bureau for Nonferrous Metals, Altay 839000, Xinjiang, China)

Abstract

The Dadonggou Pb-Zn ore deposit is located in the Kelan volcanic-sedimentary basin, the biggest basin on the southern margin of the Altay Mountains, with the attitude of its ore bodies the same as that of the strata. The ore-bearing wall rock is mainly volcanic-sedimentary rock of the Lower Devonian Kangbutiebao Formation, and the ores occur in bedded, disseminated and veinlet forms. Ore minerals consist simply of galena, sphalerite and pyrite. In this paper, the authors carried out systemic measurements of homogeneous and freezing temperatures and salinities of fluid inclusions in quartz, calcite and sphalerite formed at different ore-forming stages in the Dadonggou Pb-Zn deposit. Chromatographic analysis of quartz samples and laser Raman spectroscopic analy-

* 本文为国家科技支撑重点项目(编号 2006BAB07B08-01 和 2006BAB07B02-05)和地质调查项目(编号 1212010634001)联合资助的成果
第一作者简介 刘敏,女,1983年生,在读硕士,岩石学、矿物学、矿床学专业。Email: liuminhello@163.com
收稿日期 2009-01-04; 改回日期 2009-03-23。张绮玲编辑。

sis of fluid inclusions in quartz and sphalerite were also conducted. Three main types of fluid inclusions, namely NaCl-H₂O inclusions, CO₂-H₂O ± CH₄ inclusions and CO₂-H₂O-NaCl inclusions were identified. The homogenization temperatures of the fluid inclusions vary remarkably from 97.3°C to 480°C, mostly in the range of 140~300°C. The salinities $\omega(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ of fluids range from 0.2% to 57.1%, mostly between 3.2% and 14.8%. The gas components of fluid inclusions are mainly CO₂ and H₂O, with minor amounts of such components as CH₄, N₂ and H₂. The liquid components of fluid inclusions are mainly Na⁺, Ca²⁺, F⁻ and Cl⁻, subordinately K⁺ and SO₄²⁻, and small amounts of Mg²⁺, Br⁻ and NO₃⁻, with the calculated ion concentration ranging from 36.6% to 58.0%. According to previously analyses of the isotopic composition of C, H, O and S of the ores, the $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ values of calcite range from -4.2‰ to 0.4‰, the $\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}$ of the inclusions in quartz range from -89‰ to -127‰, and the $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ values of quartz and calcite range from -11.4‰ to 7.6‰. It is suggested that the ore-forming fluid was mainly derived from the mixed meteoric water and magmatic water. The carbon in the ore fluid was mainly derived from marine carbonates. The change of physicochemical conditions and the immiscibility of CO₂-H₂O exerted the main effect on the ore-forming process of the Dadonggou Pb-Zn ore deposit.

Key words: geology, fluid inclusion, mineralization, Dadonggou Pb-Zn ore deposit, Altay

阿尔泰多金属成矿带是中国重要的成矿带之一,位于该带的阿尔泰山南缘泥盆纪火山-沉积盆地是一个重要的铅、锌、铁矿化集中区,已经发现有可可塔勒、铁木尔特等铅锌矿和蒙库铁矿等矿床。前人对该带内铅锌矿床的成因普遍认识为喷流沉积成因(王京彬等,1998;秦克章等,1998;王书来等,2005,2007;申茂德等,2003;尹意求等,2005;刘悟辉等,2006;郭正林等,2007)。关于成矿物质来源方面,前人的工作主要集中于使用稳定同位素、稀土元素及 Sr-Nd-Pb 同位素组合来揭示成矿流体来源(王京彬等,1998;王登红等,2002;万博等,2006;王书来等,2007),近年有关该区的流体包裹体研究也取得了一定的进展(王京彬等,1998;徐九华等,2005)。大东沟铅锌矿床是新疆有色地勘局 706 队于 1999 年对乌拉斯沟-大东沟一带进行地质调研工作时新发现的一处中型矿床,关于该矿床的地质特征,王永强等^①和刘敏等(2008)曾做了简单介绍,刘敏等(2008)对稳定同位素组成进行了较为系统的研究。本文主要通过对大东沟铅锌矿流体包裹体的研究,揭示该矿床成矿流体的物理化学条件、基本组成及流体演化过程,并运用已有的氢、氧、碳和硫等稳定同位素特征,结合区域资料,进一步探讨大东沟矿床的成矿物质来源和成矿作用。

1 区域地质概况

阿尔泰多金属成矿带位于西伯利亚板块和哈萨克斯坦-准噶尔板块的结合部位,在泥盆纪—早石炭世,准噶尔洋向北俯冲,致使西伯利亚板块南缘演变为活动大陆边缘,形成沟(乌伦古海沟)-弧(喀拉通克岛弧)-盆(克兰弧后盆地)体系(王少怀,2006)。之后,在早期拉张条件下形成了冲呼尔、麦兹、克兰等火山沉积盆地和海相火山-盆地成矿系统,与钙碱性火山作用有关的铜铅锌成矿作用(VMS 矿床)广泛发育,构成了阿尔泰多金属成矿带(张连昌等,2006;万博等,2006;李文渊,2007)。

阿尔泰山南缘的克兰泥盆纪火山沉积盆地在大地区构造位置上,处于西伯利亚板块的晚古生代阿尔泰大陆边缘。该区域构造线呈北西-南东向,以阿勒泰复式向斜为主体,其内部次级褶皱和北西向断裂均发育,早泥盆世该区域火山活动强烈,以中酸性-酸性为主,主要为流纹质、英安质火山碎屑岩及熔岩等;中泥盆世火山活动减弱,以基性为主,形成玄武质及中基性凝灰岩。盆地内出露的地层为下泥盆统康布铁堡组和中泥盆统阿勒泰镇组。前者为一套含铁、铜、铅、锌和金的中等变质海相中酸性火山岩-火

① 王永强,朱天伦,李长江,黄新曙. 2007. 大东沟铅锌矿普查报告(内部资料)。

山碎屑岩-陆源碎屑沉积岩-碳酸盐岩建造,后者为一套浅海相的陆源碎屑沉积夹基性火山岩、化学沉积岩和碳酸盐岩(申茂德等,2003;郭旭吉,2004;尹意求等,2005;焦学军等,2005)。

2 矿床地质特征

大东沟铅锌矿位于阿勒泰市北东12 km处,其地理坐标为:东经88°06'~88°08',北纬47°56'~47°58',该矿床产于阿勒泰陆缘活动带克兰晚古生代盆

地中部的阿勒泰复式向斜内。其铅和锌平均品位为2.8%,目前共圈定22条铅锌矿体(其中包括10条盲矿体),估算铅和锌储量为15万吨。

矿体主要赋存于下泥盆统康布铁堡组上亚组第二岩性段内,赋矿岩性主要为砂卡岩化变质质砂岩及不纯大理岩,矿体呈层状、似层状、透镜状分布(图1),基本顺层产出,大致平行,沿走向呈膨大缩小现象。矿体走向280~320°,倾向39~48°,倾角75~85°,局部产状较陡,偶见有反倾现象,矿体一般长100~600 m,厚2~12 m,垂直深度35~590 m^①。矿

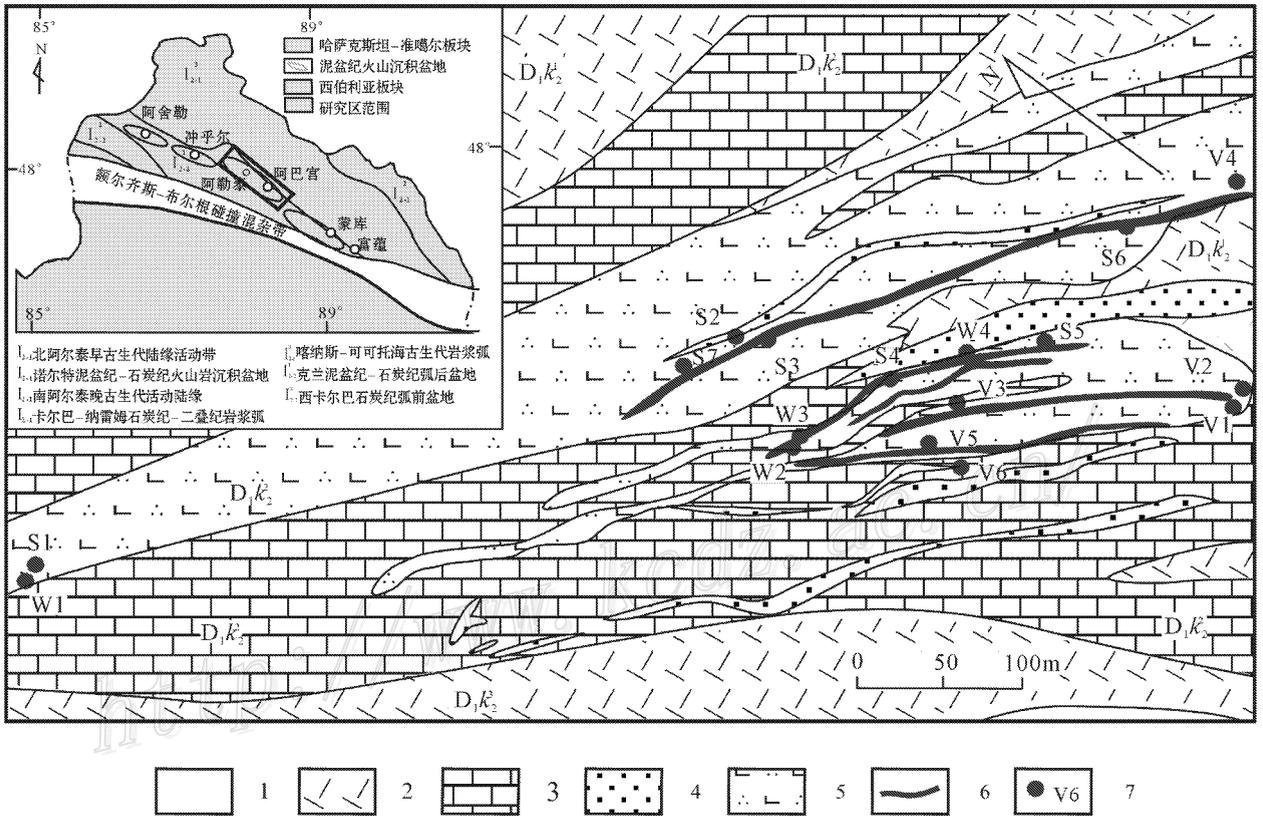


图1 大东沟铅锌矿地质略图(根据新疆有色勘查局706队1:10 000矿区地质图修改,2006)

D₁k₂—康布铁堡组上亚组第一岩性段;D₁k₃—康布铁堡组上亚组第二岩性段;D₁k₄—康布铁堡组上亚组第三岩性段;
1—第四系;2—变晶屑凝灰岩;3—不纯大理岩;4—变石英砂岩;5—变质钙质砂岩;6—矿体;7—采样点及样品编号

Fig. 1 Geological map of Dadonggou Pb-Zn ore deposit (modified after the geological map of Pb-Zn ore deposit at 1:10 000 by the No. 706 Geological Party of Xinjiang Geoprospection Bureau for Nonferrous Metals, 2006)

D₁k₂—the first member of the Upper Subformation of the Kangbutiebao F.; D₁k₃—the second member of the Upper Subformation of the Kangbutiebao F.; D₁k₄—the third member of the Upper Subformation of the Kangbutiebao F.; 1—Quaternary; 2—crystalloblast tuff; 3—impure marble; 4—meta-quartz sandstone; 5—metacalcereous sandstone; 6—ore bodies; 7—sampling location and its number

① 王永强,朱天伦,李长江,黄新曙. 2007. 大东沟铅锌矿普查报告(内部资料)。

石矿物主要有闪锌矿、方铅矿、磁铁矿、黄铁矿及少量黄铜矿、磁黄铁矿、毒砂等,次生矿物有褐铁矿、黄钾铁矾、孔雀石等,方铅矿、闪锌矿呈条带状、浸染状、团块状、星点状分布,并在地表形成硫化物铁帽,其中闪锌矿含量大于方铅矿;脉石矿物主要有石英、长石、绢云母、黑云母、白云母、绿泥石、角闪石和方解石,深部似砂卡岩中还见有少量绿帘石、萤石和石榴子石。矿石结构主要为自形-半自形粒状结构、他形粒状结构及交代熔蚀结构。矿石构造主要有浸染状、细脉状和条带状构造。

矿区围岩蚀变发育,主要蚀变类型有绢云母化、碳酸盐化、砂卡岩化、硅化、叶蜡石化、高岭石化、黄铁矿化等,其中砂卡岩化与成矿关系最密切。

依据不同矿化类型的野外穿插关系,以及矿石结构构造特征、分布、产出状态及矿物组合关系,成矿可划分为以下几个阶段(刘敏等,2008)。

(1)与似砂卡岩有关的铅、锌矿化阶段:是矿床最早也是最重要的成矿阶段,以锌矿化为主,其矿化与似砂卡岩的形成密切相关,该阶段中闪锌矿多呈半自形-他形,黄铁矿多呈团块状出现,自形程度较高,粒度较大,也有少量呈细粒浸染状,似砂卡岩化常呈层状出现,主要矿物组合为石榴子石、绿泥石、绿帘石、角闪石、黑云母等。矿化多呈致密块状或稠密浸染状,构成重要的铅锌富矿石,矿体多经历了后期热液改造,常见后期形成的石英脉和方解石脉。

(2)多金属硫化物阶段:主要矿物组合为方铅矿-闪锌矿-黄铁矿-黄铜矿-磁黄铁矿,多呈条带状、稠密浸染状出现,其中条带状矿石延伸不稳定。和与似砂卡岩有关的铅、锌矿化阶段相比,此阶段的方铅矿含量较高,且方铅矿粒度较大,自形程度较高。黄铁矿多呈他形细粒状。

(3)石英脉型铅成矿阶段:常呈石英脉出现,除方铅矿外,常与黄铁矿、毒砂及少量闪锌矿共生。该阶段形成最晚,野外常可见其产物切穿其他阶段的产物,方铅矿多呈团块状、星点状自形-半自形粒状。

3 流体包裹体地球化学特征

3.1 样品特征及测试方法

本次研究共采取了不同成矿阶段的样品 50 件,挑选出不同成矿阶段中透明矿物相对发育的样品制成包裹体光薄片,在显微镜下进行观察,最终挑选出 17 件样品(样品编号中第一个字母代表成矿阶段,即

S 代表与似砂卡岩有关的铅、锌成矿阶段;W 代表多金属成矿阶段;V 代表石英脉型铅成矿阶段)进行测试(采样位置标于图 1),划分出包裹体的类型及期次,圈出适合测温的包裹体,并用酒精对包裹体片进行浸泡,清洗薄片去除树胶以便进行下一步工作。

流体包裹体的显微测温工作在国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室完成,测试所用仪器为英国产 LINKAM THMSG600 显微冷热台,测温范围为 $-198 \sim 600^{\circ}\text{C}$,误差为 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 。实验过程中为防止包裹体在加热过程中爆裂,先进行冷冻测温。而对于含子矿物包裹体,在升温过程中仔细观察气、液、固三相的变化,并记录其子矿物消失温度及均一温度。当温度接近相变点时,控制升温速度,使其小于 $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。尤其是对于含 CO_2 包裹体进行均一法测温时,由于所测的含 CO_2 包裹体在加热过程中极易爆裂,故在升温过程中采取先以 $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的速率加热,当 CO_2 液相或气相开始晃动时,则降低升温速率至 $0.5^{\circ}\text{C}/\text{min}$,包裹体达到均一后,升温速率也不宜大,避免包裹体爆裂。

包裹体的盐度根据不同的包裹体类型查表或计算,对于 $\text{NaCl}-\text{H}_2\text{O}$ 两相包裹体,根据所测得的冰点查冰点换算表(Bodnar,1993),得到流体包裹体的盐度值;对于含 NaCl 子矿物包裹体则利用子矿物熔化温度与盐度换算表(卢焕章等,2004)得到包裹体的盐度值;含 CO_2 的包裹体,由于笼合物的形成,将水从水溶液中移出,这样就增加了剩余水溶液的盐度,因而利用冰的熔化温度就不能获得正确的盐度数值,可以利用笼合物的熔化温度来确定包裹体的盐度(卢焕章等,2004)。

大东沟铅锌矿床单个流体包裹体激光拉曼光谱测定在核工业地质分析测试研究中心完成。所用仪器为 LABHR-VIS LabRAM HR 型显微激光拉曼光谱仪,光源为 yag 晶体倍频固体激光器,激光波长为 532 nm ,功率为 50 MW ,实验室温度为 25°C ,湿度为 50% 。本次实验主要选取了不同成矿阶段石英中的不同类型的包裹体进行测试,并选取了少量透明度较高的闪锌矿中不同类型的包裹体进行了测试,但闪锌矿均表现出较强的荧光干扰。

流体包裹体的气相及离子色谱分析是在国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室完成的,气相色谱所用仪器为 GC-2010 型气相色谱仪。样品预处理为:将石英样品装入烧杯,加入王水 30 ml 、去离子水 20 ml ,电热板 $80 \sim 100^{\circ}\text{C}$ 保温 3 h ,其间勤于搅

拌,倾去酸液,用去离子水洗涤样品,直到洗涤液电导与去离子水电导一致,用去离子水浸泡过夜,定量滤纸过滤后将试样于90~95℃烘干4h,干燥后备用(杨丹等,2007)。流体包裹体的离子色谱分析程序为称取适量经过清洗的试样于瓷皿中,加盖置于马弗炉中,于450~500℃下加热0.5h,使包裹体充分爆裂,冷却后将试样倒入石英烧杯中,加适量纯水,置于超声波清洗器中,数分钟后取出,将溶液倒入样品管,如此4次,制成大约30ml溶液,继续浸取3次,制成空白溶液,将已处理过的空白溶液及试样溶液进行测试。实验所用仪器为Shimadzu HIC-SP Super型离子色谱仪。

3.2 流体包裹体岩相学特征

大东沟铅锌矿床的流体包裹体主要发育在石英、方解石、闪锌矿中,既有原生包裹体,也有次生及假次生包裹体,贯穿成矿的全过程,总的特点是流体包裹体数量多,形状多呈不规则状,其长轴长大多介于5~15 μm 。假次生及次生包裹体主要呈线状分布,多为负晶形或圆形,假次生包裹体主要以水溶液包裹体为主,次生包裹体则主要以水溶液包裹体及 CO_2 包裹体为主,原生包裹体类型多样,按照流体包裹体在室温下的物理相态和化学组成,可将原生包裹体划分为如下3种类型: $\text{NaCl-H}_2\text{O}$ 型、 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}\pm\text{CH}_4$ 型和 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O-NaCl}$ 型。其中 $\text{NaCl-H}_2\text{O}$ 型包裹体可进一步划分为I类气液两相包裹体和II类含子矿物多相包裹体, $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}\pm\text{CH}_4$ 型包裹体可进一步划分为III类以水溶液为主的含 CO_2 包裹体及IV类富 CO_2 包裹体。本次研究主要选择呈孤立状及群状分布的原生包裹体及没有切穿矿物边缘的假次生包裹体,其特征列于表1。

(1) $\text{NaCl-H}_2\text{O}$ 型包裹体

离子色谱分析结果表明,该类包裹体应该为 $\text{Na}(\text{Ca},\text{K})\text{Cl}(\text{F})\text{-H}_2\text{O}$ 体系,为便于描述在此简称为 $\text{NaCl-H}_2\text{O}$ 型包裹体(下文中 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O-NaCl}$ 型包裹

体命名与此类似)。拉曼光谱分析结果表明该类包裹体的气相中含 CO_2 ,但含量较少,常温下和低温下均未观察到含 CO_2 三相的特征,其微量的 CO_2 不足以改变包裹体中 $\text{NaCl-H}_2\text{O}$ 的基本特征。

I类气液两相包裹体(图2a、2c),该类包裹体约占包裹体总数的50%,个体一般较小,长轴长5~10 μm ,少数可达30 μm ,一般小于10 μm ,其气相分数为5%~50%,一般为5%~10%。包裹体形态为椭圆形、长条形、圆形、菱形和负晶形,呈群状、线状及孤立状分布。此类包裹体分布较为普遍,存在于成矿各阶段,方解石中此类包裹体最为发育,个体相对较大。

II类含子矿物包裹体(图2g、2i),一般由气相、液相和固相组成,少数该类包裹体中仅出现子矿物未出现气泡(图2i)。多呈椭圆状及不规则状,呈线状或孤立状分布,一般长10~16 μm ,气相分数为10%~15%,一般气泡体积大于子矿物,少数子矿物占包裹体总体积的70%。子矿物多数呈立方体或近圆形,部分包裹体在显微镜下观察时未见有子矿物,而降温后出现子矿物,这种子矿物多数在100℃以下消失。子矿物主要成分为 NaCl ,少数为 KCl ,据激光拉曼谱图推断闪锌矿中可能还有 $\text{Na}_2\text{Ca}_2(\text{CO}_3)_3$ (?)及 FeTiO_3 。该类包裹体在成矿各阶段中均有发育,但数量不多。

(2) $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}\pm\text{CH}_4$ 型包裹体

该类型流体包裹体气相中除 CH_4 外,还含有少量 N_2 。

III类以水溶液为主的含 CO_2 包裹体(图2d、2e),该类包裹体约占包裹体总数的20%~30%,一般呈椭圆形及不规则状,多呈群状及孤立状分布,长轴长一般5~15 μm ,由 V_{CO_2} 、 L_{CO_2} 和 $L_{\text{H}_2\text{O}}$ 三相组成, $V_{\text{CO}_2}+L_{\text{CO}_2}$ 占包裹体总体积的10%~40%,部分在室温下呈两相,但降温后出现三相。该类包裹体以在石英脉型铅成矿阶段最为发育。

表1 大东沟铅锌矿中流体包裹体基本特征

Table 1 Basic characteristics of fluid inclusions in the Dadonggou Pb-Zn ore deposit

类型	形态	长轴长/ μm	分布形态	气相分数/%	占总数的百分比/%
I	椭圆形、长条形、圆形、菱形	5~10,最大可达54	群状、线状、孤立状	5~50	40~60
II	椭圆形、不规则状	一般10~16	孤立状	10~15	5
III	椭圆形、不规则状	一般5~15	群状、孤立状	10~40	20~30
IV	椭圆形、菱形、不规则状	一般5~10	群状、线状	70~95	5~10
V	不规则状	一般8~18	群状、孤立状	10~20	2

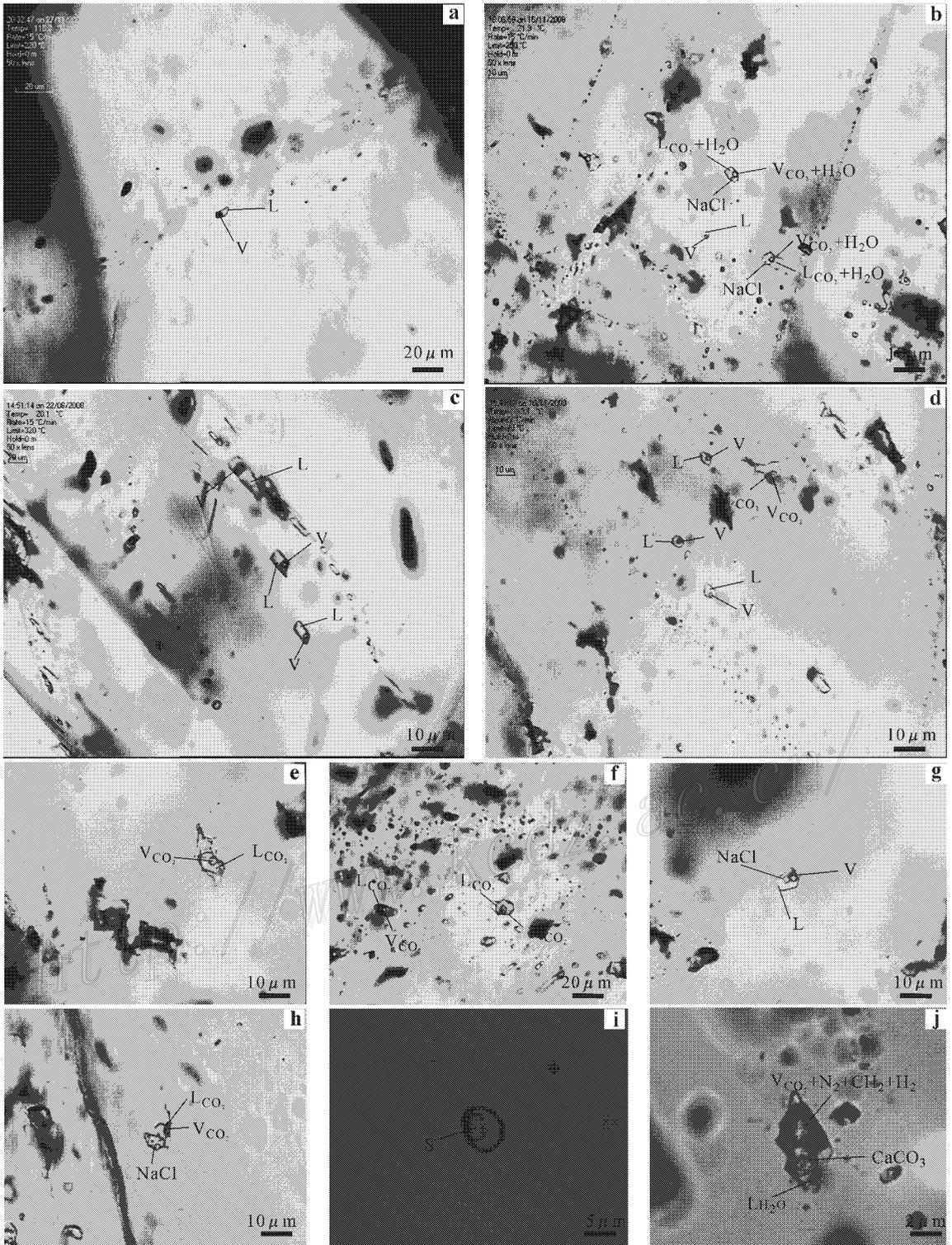


图 2 大东沟铅锌矿床中不同类型流体包裹体显微照片

- a. 闪锌矿中的 I 类液相包裹体；b. 石英中的 I 类、V 类原生包裹体与次生 IV 类包裹体；c. 方解石中呈线状分布的 I 类液相包裹体；
- d. 石英中的 I 类与 III 类包裹体共存；e. 石英中的 III 类包裹体；f. 石英中的 IV 类气相包裹体；g. 石英中的 II 类包裹体；
- h, j. 石英中的 V 类包裹体；i. 闪锌矿中的 II 类包裹体

Fig. 2 Microphotographs showing characteristics of different types of fluid inclusions in the Dadonggou Pb-Zn deposit
 a. I type inclusions in sphalerite ; b. I , V type primary inclusions and IV type secondary inclusions in quartz ; c. I type inclusions in calcite ;
 d. I type and III type inclusions in quartz ; e. III type inclusions in quartz ; f. IV type inclusions in quartz ; g. II type inclusions in quartz ;
 h & j. V type inclusions in quartz ; i. II type inclusions in sphalerite

Ⅳ类富 CO₂ 包裹体(或纯 CO₂ 包裹体)(图 2f), CO₂ 相体积分数大于 70%,多呈椭圆形、菱形、负晶形、不规则状(图 2f),呈群状、线状、孤立状分布于石英中,闪锌矿及方解石中少见。

(3) CO₂-H₂O-NaCl 型包裹体

V类含 CO₂ 及子矿物包裹体(图 2b、2h、2j),由 V_{CO₂}、L_{CO₂}、L_{H₂O}及子矿物 4 相组成,多呈不规则状,呈群状分布,长轴长一般 8~18 μm,CO₂ 相体积分数约为 10%~20%,子矿物多呈立方体状及不规则状,主要为 NaCl,少数为 CaCO₃(图 2j),其分布仅限于石英脉型铅成矿阶段。

在观察过程中还见到少量单相包裹体,但由于其个体一般较小,冷冻到 -100℃ 并未出现气泡,且受寄主矿物透明性及内反射等条件限制,冰点温度不易观察,因此未做进一步工作。

3.3 测温结果及相关参数

(1) NaCl-H₂O 型包裹体

对矿床不同成矿阶段 17 件样品中 185 个 I 类包裹体及 37 个 II 类包裹体进行了测量,测温结果列于表 2,从表 2 及图 3、图 4 中可以看出在各类包裹体中 NaCl-H₂O 型包裹体均一温度变化范围最大。与似砂卡岩有关的铅、锌成矿阶段,I 类包裹体均一温度范围为 136~422℃,主要集中于 170~257℃,平均为 227℃,闪锌矿中的部分包裹体均一温度超过 500℃。利用冰点温度在冷冻温度-盐度数值表中查得流体包裹体的盐度值 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为 0.7%~22.1%。用包裹体均一温度和盐度在 NaCl-H₂O 体系参数表中查得密度范围为 0.68~1.04 g/cm³,对应的圈闭压力约为 0.3~19.1 MPa;II 类包裹体均一温度范围为 278~480℃,部分闪锌矿和石英中含子矿物包裹体均一温度和子矿物消失温度均高于 500℃,所测得的包裹体均一温度主要集中于 442~480℃,只有个别包裹体均一温度小于 400℃,子矿物熔化温度为 241~460℃,对应的盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为 34.1%~54.5%,密度为 0.89~1.08 g/cm³,圈闭压力约为 30.0~41.0 MPa。多金属成矿阶段中 I 类包裹体均一温度范围为 129~446℃,主要集中于 180~257℃,平均温度为 228℃,盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为 0.2%~17.2%,密度为 0.67~0.99g/cm³,对应的圈闭压力约为 0.3~15.0 MPa;II 类包裹体数目较少,所测的 3 个包裹体均一温度范围为 319~400℃,子矿物熔化温度为 324~433℃,对应的盐度 $w(\text{Na-}$

Cl_{eq}) 为 39.8%~51.0%,密度约为 1.07 g/cm³,对应的圈闭压力约为 8.6~17.6 MPa。石英脉型铅成矿阶段中 I 类包裹体均一温度范围为 107~480℃,主要集中于 140~240℃,盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为 0.4%~23.2%,密度为 0.64~1.07 g/cm³,对应的圈闭压力约为 0.2~18.4 MPa;II 类包裹体均一温度介于 97~480℃,部分高于 500℃,但主要集中于 140~195℃ 及 336~393℃,子矿物熔化温度为 21~479℃,对应的盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为 26.4%~57.1%,密度为 0.88~1.02 g/cm³,圈闭压力约为 9.5~41.7 MPa。该类型包裹体中既有子矿物先消失的不饱和盐水包裹体,也有气泡先消失的过饱和盐水包裹体,还有的包裹体直到爆裂子矿物也未消失,说明它不是真正意义上的子矿物,而是在包裹体形成时被包裹进去的晶体。

(2) CO₂-H₂O±CH₄ 型包裹体

对不同成矿阶段石英中的 75 个 III 类包裹体及 52 个 IV 类包裹体测温,除少数均一至液相外,大多数都均一到 CO₂ 相,另外有相当一部分包裹体在均一前爆裂而未能获得完全均一温度。III 类包裹体仅发育于石英脉型铅成矿阶段,加热后都均一到液相,CO₂ 初熔温度为 -59.7~-56.7℃,表明包裹体中 CO₂ 不纯,有 CH₄ 和 N₂。CO₂ 笼形化物熔化温度为 -38.5~6.8℃(图 5),主要集中于 -14~-8℃ 及 2~6℃。CO₂ 相部分均一温度为 -15.8~27.2℃,主要集中于 13~19℃ 及 21~25℃(图 6)。该类包裹体在实验过程中,加热速度控制在 0.5℃/min 以下,但大多数包裹体均在未均一时爆裂或是 CO₂ 相缓慢扩大,当 CO₂ 相基本填充整个包裹体时突然爆裂,少数此类包裹体在加热过程中,出现了 CO₂ 相与水溶液相界线逐渐变模糊,并最终达到均一。对于实验过程中含 CO₂ 包裹体在均一前发生爆裂这一现象笔者专门咨询了卢焕章教授,他表示含 CO₂ 包裹体是在 CO₂ 相逐渐扩大或瞬间扩大后爆裂,爆裂温度虽然稍低于其均一温度,但基本上可以代表其均一温度。该类包裹体完全均一温度变化于 217~368℃,盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为 6.0%~21.4%,密度为 0.80~1.01g/cm³。

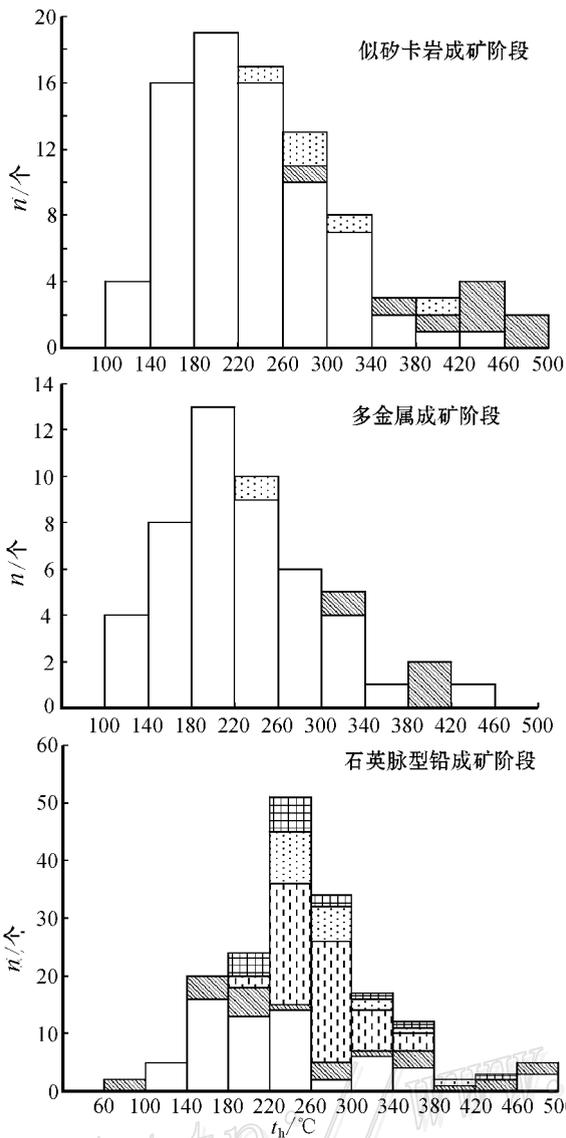
IV 类包裹体在成矿各阶段均有发育。与似砂卡岩有关的铅、锌阶段主要以 CO₂ 包裹体为主,测得 CO₂ 初熔温度为 -59.8~-57.3℃,CO₂ 笼形化物熔化温度为 -51.1~8.9℃,CO₂ 相部分均一温度为 -24.3~13.1℃,大多数低于 -10℃,这说明包裹体

表 2 大东沟铅锌矿流体包裹体测温结果

Table 2 Microthermometric measurements and calculated parameters of fluid inclusions in the Dadonggou Pb-Zn ore deposit

样品编号	矿物 类型	$t_h/^\circ\text{C}$		子矿物熔化温度/ $^\circ\text{C}$		冰点温度/ $^\circ\text{C}$	水合物溶化温度/ $^\circ\text{C}$	$w(\text{NaCl}_{\text{eq}})\%$	
		范围	平均值	范围	平均值			范围	平均值
S1	石英 I	136~292(24)	174			-12.3~-0.5(24)		0.9~16.2(24)	9.6
	石英 IV	257~281(2)	269				-9.6~-9.0(2)	21.3~21.4(2)	21.4
	闪锌矿 I	288~422(4)	351			-11.4~-1.4(4)		2.4~15.4(4)	8.1
S2	石英 I	180~303(13)	219			-10~-0.8(12)		1.4~13.9(12)	5.4
	石英 IV	296~311(8)	303				-33.2~-12		
S3	石英 I	198~348(5)	264			-4.3~-0.8(5)		1.4~6.9(5)	3.8
	石英 IV	381(1)	381				-8.9	13.1(1)	13.1
S4	石英 I	180~289(7)	212			-5.6~-2.1(7)		3.6~8.7(7)	5.7
	石英 II	278(1)	278	450(1)	450			53.3(1)	53.3
	石英 IV						-51.1~-35.7(4)		
S5	石英 I	235~308(2)	272			-15.4~-15.2(2)		18.8~19.0(2)	18.9
	石英 II	351~>500(9)	445	240~460(5)	329			34.0~54.5(5)	41.7
S6	石英 I	203~268(14)	248			-19.6~-0.4		0.7~22.1(14)	8.2
	闪锌矿 I	281~320(6)	305			-1.9~-4.6(6)		3.2~7.3(6)	4.4
S7	闪锌矿 II	>500 $^\circ\text{C}$							
W1	石英 I	254~265(2)	259			-5.0~-4.9(2)		7.7~7.9(2)	7.8
	石英 IV	248(1)	248				-47.8~-8.0(4)	21.0(1)	21.0
W2	方解石 I	141~300(24)	210			-9.8~-0.1(24)		0.4~13.7(24)	2.6
W3	方解石 I	129~320(9)	201			-0.4~-0.1(9)		0.2~0.7(9)	0.4
W4	石英 I	168~446(11)	262			-13.3~-5.4(11)		8.4~17.2(11)	11.8
	石英 II	319~400(3)	371	324~433(3)	384				
V1	石英 I	336~335(2)	344			-12.9~-8.5		12.3~16.8(2)	14.5
	石英 II	210~293(2)	252	256~259(2)	258			35.0~35.3(2)	35.2
	石英 III	361	361				-10.0~-8.0(2)	21.0(1)	21.0
	石英 IV						-12.5~14(6)	21.4~0.1(3)	8.2
V2	石英 I	235(1)	235			-12.5		16.4(1)	16.4
	石英 II	145~205(3)	181	45~400(3)	164.2			26.7~47.4(3)	33.6
	石英 III	202~299(27)	248				-14.7~-6.2(26)	20.2~21.2(3)	20.8
	石英 IV	232~271(8)	245				-43.3~-9.2(10)	21.3~21.4(2)	21.4
	石英 V	202~292(10)	242	169(1)	169			30.5(1)	30.5
V3	石英 I	153~253(7)				-16.5~-5.0(7)		7.9~19.8(7)	13.5
	石英 III	217~332(12)	286				-11.2~-6.8(26)	6.0~21.4	13.3
	石英 IV	254~334(6)	290				-10.5~7.0	5.7~21.4(12)	15.5
	石英 V	212(1)	212	3~211(2)				26.3~32.4(2)	29.4
	石英 I	107~480(17)	284			-24.2~-3.8(12)		6.2~23.2(12)	14.8
V4	石英 II	97~480(19)	335	21~479(19)	268			26.4~57.1(19)	34.8
	石英 III	219~249(4)	236				-25.5~1.1(3)	14.3~21.4(2)	17.9
	石英 IV	402(1)	402				-11.9		
	石英 V	336~435(3)	381	221~280(3)	247			32.9~34.1(3)	34.6
	石英 I	122~331(19)	192			-15.6~2.2(15)		5.3~19.1(15)	12.2
V5	石英 II	>500 $^\circ\text{C}$		299(1)	299			38.2(1)	38.2
	石英 III	268~324(6)					-38.5~-8.5(7)	21.1~21.3(3)	21.3
	石英 I	126~336(17)	208			-22.5~-0.2(14)		0.4~23.2(14)	14.5
	石英 III	277~368(9)	314				-12.2~-1.3(9)	16.8~21.4(9)	20.2
	石英 IV	260~344(4)	285				-14.5~-7.9(4)	21.0~21.4(4)	21.3
V6	石英 V	285(1)	285						

注 样品编号中 S 代表与似砂卡岩有关的铅、锌成矿阶段, W 代表多金属成矿阶段, V 代表石英脉型铅成矿阶段。括号中数字为测试数。



□ I类气液两相包裹体 ▨ II类含子矿物包裹体 ▤ IV类富CO₂包裹体
 ▩ III类含CO₂包裹体 ▧ V类含CO₂及子矿物包裹体

图3 大东沟铅锌矿包裹体体均一温度直方图

Fig. 3 Histogram showing homogenization temperature of fluid inclusions in the Dadonggou Pb-Zn ore deposit

中含有 CH₄ 及 N₂, 其完全均一温度为 257~381℃, 密度为 0.83~0.97 g/cm³; 多金属成矿阶段中该类型包裹体数量较少, CO₂ 初熔温度较低, 为 -61.6~-59.4℃, 笼合物熔化温度为 -47.8~19.7℃, CO₂ 相部分均一温度为 -21.9~0.8℃, 该阶段中此类包裹体绝大多数为纯 CO₂ 包裹体或 CO₂ 相比比例大于 90%, 较难获得其完全均一温度, 仅获得一个完全温度为 248℃, 由于缺乏数据, 未能计算出包裹体的密度; 石英脉型铅成矿阶段中 CO₂ 初熔温度为 -59.2~-56.8℃, CO₂ 笼形化物熔化温度为 -43.3~

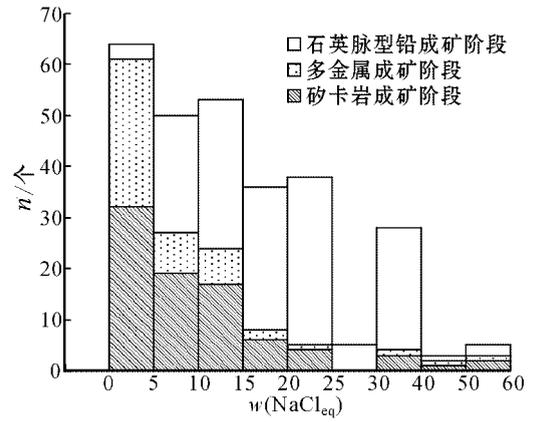


图4 大东沟铅锌矿流体包裹体盐度直方图

Fig. 4 Histogram showing salinity of fluid inclusions in the Dadonggou Pb-Zn ore deposit

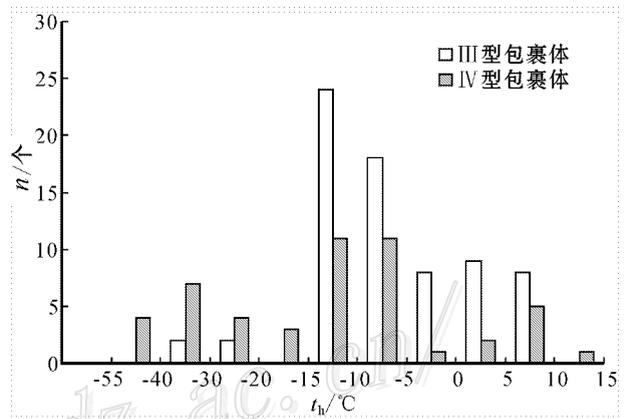


图5 CO₂ 笼形化合物熔化温度直方图

Fig. 5 Histogram showing melting temperatures of CO₂ clathrates

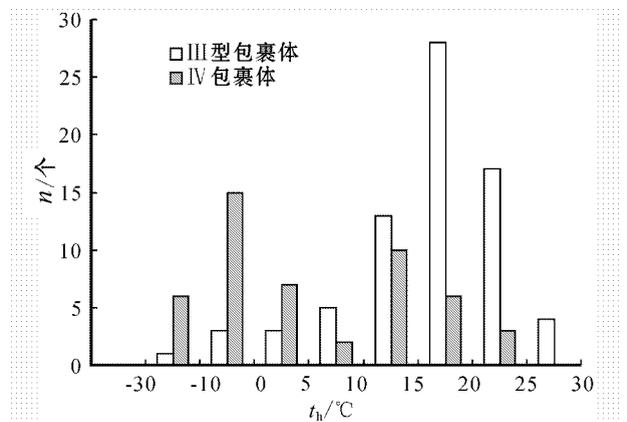


图6 CO₂ 包裹体部分均一温度直方图

Fig. 6 Histogram showing partial homogenization temperatures of CO₂ inclusions

14.0℃, CO₂ 相部分均一温度为 -6.7~23.1℃, 完全均一温度为 232~402℃, 盐度变化范围较大, $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为 0.01%~21.4%, 多数盐度高于 18.5%, 密度为 0.79~0.98 g/cm³。

(3) CO₂-H₂O-NaCl 型包裹体

对 16 个 CO₂-H₂O-NaCl 型包裹体进行了测定(表 2), 该类型包裹体数量较少, 且仅发育于石英脉型铅成矿阶段, 部分包裹体在初次观察时并未见有子矿物, 而冷冻后则出现子矿物, 但多数在 100℃ 以下消失。CO₂ 的初熔温度为 -60.1~-57.2℃, CO₂ 笼形化物融化温度为 -14.7~5.6℃, CO₂ 相部分均一温度为 -8.1~25.8℃, 完全均一温度为 202~434℃, 测到的子矿物融化温度为 3~285℃, 多数子矿物直到包裹体爆裂也未消失, 部分子矿物在气泡消失前消失, 对应的盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为 26.3%~37.0%, 密度为 0.90~1.10 g/cm³。

3.4 激光拉曼光谱分析

对大东沟铅锌矿床中不同类型包裹体中的气相、液相及固相进行了激光拉曼分析, 结果表明, I 类及 III、IV 类包裹体中气相以 CO₂、CH₄、N₂ 及 H₂O 为主(图 7a、7f、7h), 液相以 H₂O 为主, 含少量 CO₂ 及 CO₃²⁻(图 7b、7g)。部分 IV 类包裹体气相中仅含有 CH₄ 及 N₂ 而没有检测到 CO₂。闪锌矿中的 I 类包裹体气相则主要以 N₂ 为主, 含少量 CO₂, 其拉曼光谱位移在 2 000~4 000 范围内均出现较大的隆起, 峰谱特征明显不同于树胶, 分析认为可能是受到闪锌矿自身荧光的干扰。在荧光显微镜下利用红外荧光观察时, 闪锌矿缝隙及边缘均出现较明显的荧光, 但闪锌矿中荧光不强, 这可能是因为实验过程中所用荧光显微镜光源的波段与激发出闪锌矿中荧光所需要的波段不匹配, 因此未能激发出闪锌矿中荧光。II 类及 V 类含子矿物包裹体比较复杂, 气相以 CO₂、CH₄ 和 N₂ 为主(图 7c), 含少量 H₂, 液相以水为主(图 7i、7l)。由于离子体不具有拉曼活性, 因此多数子矿物的图谱特征不明显, 只能根据其形态特征及在加热过程中的变化判断其为石盐子矿物或氯化钾子矿物。石英中的包裹体仅在 SS(图 7j)中表现出强烈的 1 088 cm⁻¹ 峰, 表明其含有 CaCO₃ 子矿物。闪锌矿中还发现另外 2 种子矿物, 其峰谱位置分别为 684 cm⁻¹ 和 1 091 cm⁻¹(图 7d、7e), 其中 684 cm⁻¹ 的峰谱特征(图 7e)与 TiFeO₃ 基本符合, 另外一个谱图(图 7d)中除出现 1 091 cm⁻¹ 的峰以外还出

现了 3 623 cm⁻¹ 的峰, 3 623.2 cm⁻¹ 峰可能为羟基(O-H)内伸缩振动所表现出来的峰, 从峰值 1 091.3 cm⁻¹ 看, 表明可能有 CO₃²⁻ 存在, 子矿物为含水碳酸盐, 其峰谱特征与 Na₂Ca₂(CO₃)₃ 最为相近, 但单从 1 091.3 cm⁻¹ 来看其应该更接近于菱锌矿, 由于可识别的有效峰位数较少, 故较难判断。

3.5 流体包裹体成分色谱分析

由于包裹体大部分离子拉曼活性不强, 所以本次研究还选取了不同成矿阶段的样品进行了流体包裹体成分的气相和离子色谱分析, 其结果列于表 3 和 4。由表可知, 不同成矿阶段流体包裹体液相中气体及离子组成相差不大, 气相均以 CO₂ 及 H₂O 为主, 其次为 N₂、CO、O₂ 和 CH₄, 少量 C₂H₂、C₂H₄ 和 C₂H₆。由表 3 可看出 H₂O 的含量在各成矿阶段变化不大, N₂ 与 O₂ 大致呈正相关关系, 两者与 CO₂、CO 及 CH₄ 大致呈负相关关系。由表 4 可看出不同成矿阶段的样品中阳离子均以 Ca²⁺、Na⁺ 为主, 其次为 K⁺。与似砂卡岩有关的铅、锌成矿阶段及多金属成矿阶段均含少量 Mg²⁺, 而石英脉型铅成矿阶段的 3 个样品中只有 1 个含有少量 Mg²⁺, 所测 5 个样品中均未测到 Li⁺。而阴离子则是以 F⁻、Cl⁻ 为主, 其次为 SO₄²⁻, 并含少量 Br⁻, 个别含有少量 NO₃⁻。与似砂卡岩有关的铅、锌成矿阶段及石英脉型铅成矿阶段 F⁻ 摩尔含量高于 Cl⁻, (Na⁺ + K⁺) / Ca²⁺ 摩尔比值小于 0.5, 多金属成矿阶段中 Cl⁻ 摩尔含量则高于 F⁻ 离子, (Na⁺ + K⁺) / Ca²⁺ 摩尔比值大于 0.5。计算结果显示, 大东沟铅锌矿包裹体溶液总离子浓度为 36.6%~58.0%, 高于单个包裹体显微测温获得的盐度(0.2%~57.1%)。

4 讨论和结论

4.1 成矿流体的温压条件

流体包裹体研究表明, 大东沟铅锌矿床中发育丰富的原生流体包裹体及假次生包裹体, 这些包裹体反映了成矿流体的基本特征。大东沟铅锌矿床在不同成矿阶段均出现了 I 类气液两相包裹体、II 类含子矿物包裹体和 IV 类富 CO₂ 包裹体, 石英脉阶段还出现了 5 类包裹体共存的现象, 这些包裹体常紧密共生, 显示出它们捕获于一种不均匀的流体状态(Shepherd et al., 1985)。测温结果表明, NaCl-H₂O 型包裹体与 CO₂-H₂O ± CH₄ 型和 CO₂-H₂O-NaCl 型

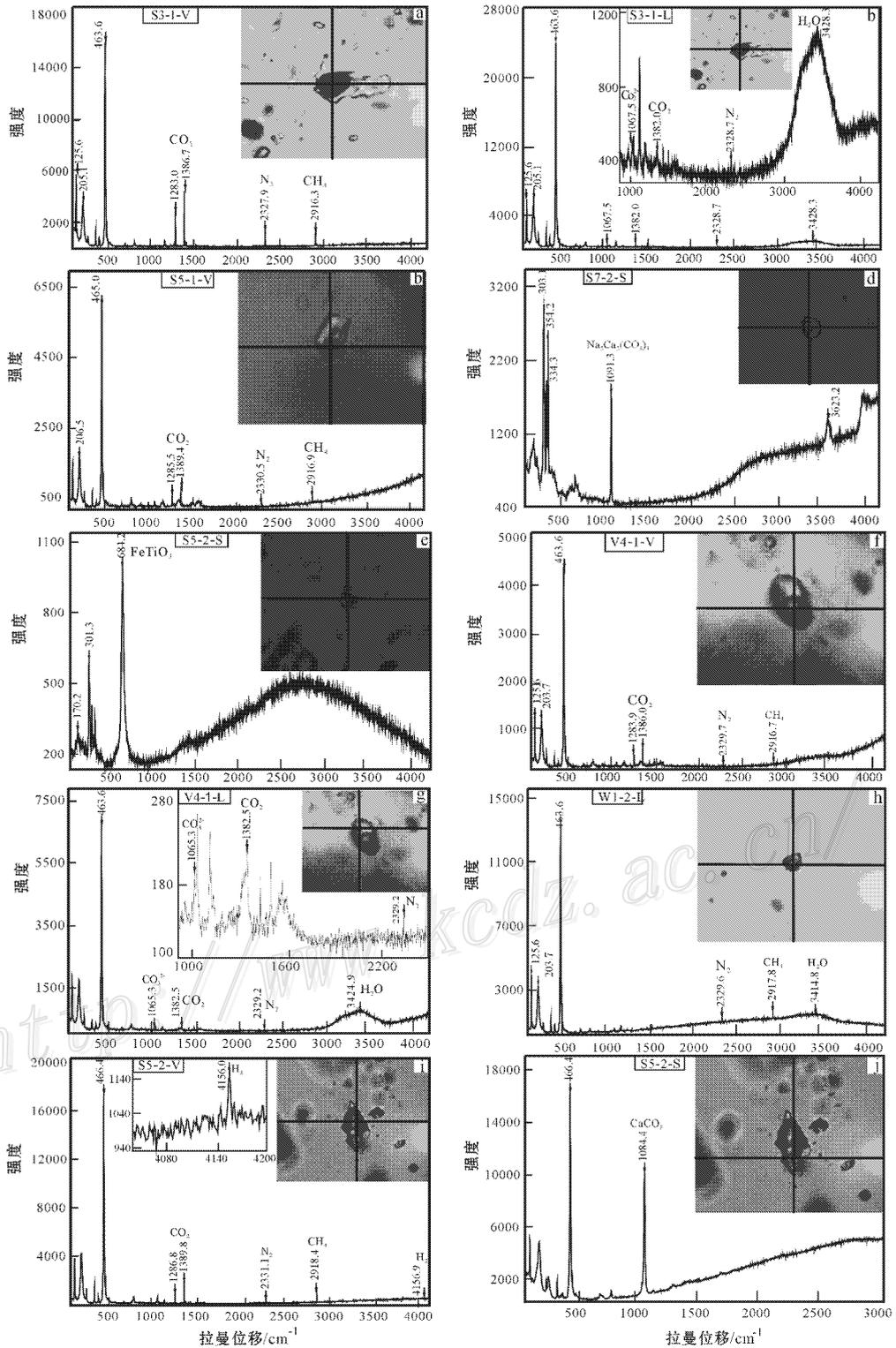


图7 流体包裹体的激光拉曼光谱图

a, b. I类包裹体气、液相成分; c. II类包裹体气液相成分; d, e. II类包裹体固相成分; f, g. III类包裹体气液相成分; h. IV类包裹体气相成分; i, j. V类包裹体气、固相成分

Fig. 7 Laser Raman spectra of fluid inclusions

a, b. Vapor and liquid phase composition of I type inclusion; c. Vapor and liquid phase composition of II type inclusion; d, e. Solid phase composition of II type inclusion; f, g. Vapor and liquid phase composition of III type inclusion; h. Vapor phase composition of IV type inclusion; i, j. Vapor and solid phase composition of V type inclusion

表 3 大东沟铅锌矿石英中流体包裹体成分的气相色谱分析结果

Table 3 Gas chromatographic analyses of fluid inclusions in quartz from the Dadonggou Pb-Zn deposit

样品号	$w(B)(\mu\text{g/g})$							
	CH ₄	C ₂ H ₂ + C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO ₂	H ₂ O	O ₂	N ₂	CO
S1-2	2.346	0.242	0.050	144.990	202.094	5.807	25.207	33.073
W4-2	13.393	0.417	0.130	232.927	244.816	0.860	22.949	39.443
V2	2.000	0.110	0.040	157.155	111.860	9.745	35.770	21.905
V4	1.199	0.072	微量	92.922	61.965	10.230	33.277	13.843
V5	1.942	0.135	微量	158.261	140.348	18.367	60.570	29.681

样品号	相对摩尔分数/%							
	CH ₄ /10 ⁻⁶	C ₂ H ₂ + C ₂ H ₄ /10 ⁻⁶	C ₂ H ₆ /10 ⁻⁶	CO ₂	H ₂ O	O ₂	N ₂	CO
S1-2	1302.594	82.811	15.328	2.934	94.917	0.161	0.799	1.049
W4-2	6929.208	132.648	35.440	4.370	93.053	0.022	0.679	1.166
V2	1120.485	37.889	11.427	3.200	94.564	0.273	1.145	0.701
V4	651.823	24.756	微量	1.836	96.352	0.279	1.035	0.430
V5	564.154	24.353	微量	1.665	96.515	0.266	1.003	0.492

表 4 大东沟铅锌矿石英中流体包裹体成分的离子色谱测定结果

Table 4 Ion chromatographic analyses of fluid inclusions in quartz from the Dadonggou Pb-Zn deposit

样品号	$w(B)(\mu\text{g/g})$										
	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	F ⁻	Cl ⁻	Br ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	H ₂ O(GC)	$w(B)$ 总离子 %
S1-2	10.381	5.330	0.698	56.963	26.613	25.058	0.336	0	1.053	202.094	38.4
W4-2	23.960	8.149	0.322	45.829	18.598	36.911	0.334	0.071	7.262	244.816	36.6
V2	5.321	3.607	0	50.697	23.688	12.659	0.292	0.077	4.815	111.860	47.4
V4	6.013	2.603	0.258	40.662	20.305	12.465	0.110	0	3.003	61.965	58.0
V5	13.665	2.950	0	56.814	27.696	26.338	0.241	0	5.266	140.348	48.7

包裹体均一温度具有很大的重叠区间,而 NaCl-H₂O 型及 CO₂-H₂O-NaCl 型包裹体多数均一至水溶液相,CO₂-H₂O±CH₄ 型包裹体则多数均一至 CO₂ 相,极少数均一到液相。尽管 I 类包裹体均一温度小于其他类型包裹体,但这可能是流体在演化过程中的压力波动导致连续多次不混溶作用的结果(Robert et al., 1987; Hagemann et al., 2003),这些特点都说明了大东沟铅锌矿在成矿过程中经历了不混溶作用。

一般认为从均匀流体中捕获的包裹体,其均一温度和圈闭压力代表了包裹体捕获时温度和压力的下限,应用时需要测试温度的压力进行校正,而从流体不混溶或沸腾过程中捕获的流体包裹体,其捕获端员组分的包裹体均一温度及圈闭压力基本代表了捕获温度的压力,无需进行温度和压力的校正(Roedder, 1984; Shepherd et al., 1985; 卢焕章等, 1998)。大东沟铅锌矿主要成矿温度集中于 220~480℃,流体密度为 0.89~1.08 g/cm³,估算得该矿床成矿时的压力为 10~45 MPa,对应的静岩压力深度为 1~4 km。

4.2 成矿流体及成矿物质来源

根据刘敏等(2008)所测得的稳定同位素数据,大东沟铅锌矿石英氢氧同位素组成为 δD 值为 $-127\text{‰} \sim -89\text{‰}$,计算所得的 $\delta^{18}O_{\text{水}}$ 值为 $-2.2\text{‰} \sim 7.3\text{‰}$,说明成矿流体主要来源于岩浆水与大气降水的混合,氢氧同位素均出现了较大的变化区间,这主要是受到大气降水的影响。方解石中 $\delta^{13}C$ 范围为 $-4.2\text{‰} \sim 0.4\text{‰}$, $\delta^{18}O_{\text{V-SMOW}}$ 为 $-2.4\text{‰} \sim 14.6\text{‰}$, $\delta^{18}O$ 偏低同样说明了大气降水的影响,其碳氧同位素数据表明矿床形成后受到了中-低温蚀变的影响。

大东沟矿床硫化物 $\delta^{34}S_{\text{V-CDT}}$ 值变化较大($11.7\text{‰} \sim -22.3\text{‰}$),其中方铅矿及闪锌矿 $\delta^{34}S_{\text{V-CDT}}$ 值分布范围相对集中,且基本为正值,主要分布于 $4\text{‰} \sim 6\text{‰}$,具有深部来源的特征。而黄铁矿($-12.1\text{‰} \sim 11.7\text{‰}$)、磁黄铁矿($-22.3\text{‰} \sim -10.7\text{‰}$)及毒砂($-17.2\text{‰} \sim -3.1\text{‰}$)的 $\delta^{34}S_{\text{V-CDT}}$ 值偏低,这可能反映了成矿物质的多来源及成矿作用的多阶段性。

4.3 流体成矿作用探讨

关于阿尔泰南缘块状硫化物矿床的成因,廖启

林等(2000)认为新疆阿尔泰山南缘块状硫化物矿床均产于陆缘裂谷带的早-中泥盆世火山岩中,主成矿阶段即块状硫化物形成时均有中高温火山热液的成矿特征,成矿物质均具有多来源,矿源层是其重要矿质来源之一,海底火山喷流-沉积是其最基本的成矿作用。王书来等(2007)认为麦兹盆地铅锌矿床主成矿作用发生于火山活动的间隙期,由下盘深部的岩浆活动所驱动的热液循环而形成,岩浆活动所提供的热能加速了流体与火山岩及下伏泥盆纪地层的水/岩交换,使之成为富含金属元素的热液,沿一定的通道(如同生断层)向上运移,在有利部位沉淀成矿。麦兹盆地铅锌矿床不同于典型的火山岩容矿的块状硫化物矿床(VHMS)和典型的沉积岩容矿的硫化物矿床(SEDEX型),属于之间的过渡类型,其矿化特征与伊比利亚型矿床相类似。

通过综合研究发现,大东沟铅锌矿具有以下特征:①矿床伴有典型的喷流沉积岩,矿区普遍发育有硅质岩、局部硅化较强,并发育有石膏层。②大东沟铅锌矿体产于下泥盆统康布铁堡组上亚组第二岩性段中部和下部岩层中,说明矿床具有层控及时控特征。③大东沟铅锌矿床中矿体往往呈层状、似层状或透镜体状产于地层中,与围岩产状基本一致。④矿体和矿石具有微层理甚至微细沉积韵律,常具有顺层条带状构造反映了同生沉积的特征。黄铁矿是所有金属矿物中形成最早的矿物,它总是被晚期的硫化物(包括黄铁矿、闪锌矿及方铅矿等)交代。⑤容矿岩石主要为变钙质砂岩及不纯大理岩,为一套海相火山沉积岩。⑥测定的 $\delta^{34}\text{S}$ ($-22.3\% \sim -11.7\%$)值变化较大,既有深源硫,也有海水 SO_4^{2-} 来源硫及生物来源硫的特征。以上特征与徐克勤等(1996)所总结的喷流沉积矿床的特征相类似,说明大东沟铅锌矿床为喷流沉积成因。

结合色谱分析结果认为大东沟铅锌矿成矿流体属 $\text{Na}(\text{Ca},\text{K})\text{Cl}(\text{F})-\text{CO}_2-\text{H}_2\text{O}$ 体系,流体运移过程中发生了不混溶,根据观察闪锌矿中仅出现水溶液包裹体及含子矿物包裹体,其共生石英中则既发育了气液两相包裹体及含子矿物包裹体又发育了富 CO_2 包裹体,说明大规模成矿的过程伴随了不混溶作用的发生。根据流体包裹体测温结果可大致将成矿流体的演化划分为以下几个阶段:

(1)在温度高于 500°C 、压力大于 45 MPa 、深度大于 4.5 km ,原始岩浆流体上升过程中减压而产生沸腾,捕获盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 约 55% 的最原始的成矿

流体,在上升冷却过程中,磁铁矿、部分金属硫化物及金等首先析出,随着温度继续降低, CaF_2 饱和度降低,从而析出萤石等。

(2)在 $350\sim 480^\circ\text{C}$ 左右,压力为 $45\sim 20\text{ MPa}$ 之间,深度为 $2\sim 4\text{ km}$,原始流体与大气降水等混合,由于压力减小,流体再次发生沸腾,并伴随着富 CO_2 流体从富水流体中分离出来,从而包裹体的盐度出现较大的变化范围,大量释放出的还原硫与金属离子结合,导致了大量铅、锌、金的沉淀。

(3)在 $220\sim 320^\circ\text{C}$,压力为 $2\sim 15\text{ MPa}$ 之间,混合流体由于富 CO_2 流体的分离而出现多种类型包裹体,其盐度变化也较大,部分闪锌矿等继续沉淀。

(4) $140\sim 220^\circ\text{C}$,压力小于 2 MPa ,流体演化末期富 CO_2 流体已从富水流体中分离,该阶段所捕获的流体包裹体多以液相包裹体和多相包裹体为主,盐度则相对偏小。

在实验过程中不同成矿阶段均观察到大量的次生水溶液包裹体及 CO_2 包裹体,说明矿床形成后经历了后期热液蚀变。

4.4 结 论

通过对大东沟铅锌矿流体包裹体并结合地质特征及稳定同位素的研究,初步得出以下几点认识:

(1)矿床属喷流沉积改造型矿床。

(2)流体包裹体的均一温度主要集中于 $140\sim 300^\circ\text{C}$,盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 则主要集中于 $3.2\% \sim 14.8\%$,其气相成分主要为 CO_2 和 H_2O ,含少量 CH_4 、 N_2 、 H_2 等;液相成分以 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 F^- 、 Cl^- 为主, K^+ 、 SO_4^{2-} 次之,并含少量 Mg^{2+} 、 Br^- 及 NO_3^- 。

(3)成矿流体主要为岩浆水与大气降水的混合物。

(4)主要成矿温度集中于 $220\sim 480^\circ\text{C}$,流体密度为 $0.89\sim 1.08\text{ g/cm}^3$,估算得该矿床成矿时的压力为 $10\sim 45\text{ MPa}$,对应的静岩压力深度为 $1\sim 4\text{ km}$ 。

(5)矿床形成后经历了后期热液改造。

志 谢 新疆阿尔泰山有色地质706队郭正林总工程师、董秀芝工程师、黄新曙工程师、李长江工程师及大东沟项目组在野外工作期间给予大力支持,室内研究过程得到了国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室徐文艺研究员、杨丹助理研究员、加拿大魁北克大学卢焕章教授、核工业北京地质研究院欧光习研究员、张敏工程师等的悉心帮助和指导,一并致谢。

References

- Bodnar R J. 1993. Revised equation and stable for determining the freezing point depression of H₂O-NaCl solutions[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57: 683-684.
- Chu X L. 1996. Carbon isotopes in mantle[J]. *Advance in Earth Sciences*, 11(5): 446-452 in Chinese with English abstract).
- Guo X J. 2004. Geology and oringin of Hongdun lead zinc deposit[J]. *Xinjiang Nonferrous Metal*, 27(3): 12-17 in Chinese).
- Guo Z L, Guo X J, Wang S L and Qin K Z. 2007. Characteristics and Pb-Zn, Fe and Au exploration potentials of Maize Devonian volcano-sedimentary basin on southern margin of Altay[J]. *Mineral Deposits*, 26(1): 128-138 in Chinese with English abstract).
- Hagemann S G and Luders V. 2003. P-T-X conditions of hydrothermal fluids and precipitation mechanism of stibnite-gold mineralization at the Wiluna lode-gold deposits, Western Australia: Conventional and infrared microthermometric constraints[J]. *Mineralium Deposita*, 38: 936-952.
- Jiao X J, Ma Z M, Guo X J and Zhang L C. 2005. Devonian volcano-sediments and mineralization of Kelang basin in southern Altay mountain[J]. *Northwestern Geology*, 38(3): 21-27 in Chinese with English abstract).
- Li W Y. 2007. Classification, distribution and forming setting of massive sulfide deposits[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 29(4): 331-343 in Chinese with English abstract).
- Liao Q L, Dai T G, Liu W H and Qiu D S. 2000. Preliminary study on metallogenetic environment of typical massive sulfide deposits in southern margin of Altay mountain[J]. *Geology and Prospecting*, 36(6): 23-26 in Chinese with English abstract).
- Liu M, Zhang Z H, Wang Y Q and Guo X J. 2008. Geology and stable isotope geochemistry of the Dadonggou Pb-Zn ore deposit, Altay, Xinjiang, NW China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 82(11): 1504-1513 in Chinese with English abstract).
- Liu W H and Liao Q L. 2006. Preliminary study on metallogenetic models of typical copper, nickel and lead-zinc deposits in southern margin of Altay mountains[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 21(3): 173-177 in Chinese with English abstract).
- Lu H Z, Fan H R, Ni P, Ou G X, Shen K and Zhang W H. 2004. Fluid inclusions[M]. Beijing: Science Press. 205-226.
- Qin K Z, Wang J B, Zhang J H and Deng J N. 1998. Metallogenetic conditions for the Keketale-style large-scale Pb-Zn deposit on the southern margin of Altay, Xinjiang[J]. *Geological Exploration for Nonferrous Metals*, 7(2): 65-74 in Chinese with English abstract).
- Robert F and Kelly W C. 1987. Ore-forming fluids in Archean gold-bearing quartz vein at the Sigma mine, Abitibi greenstone belt, Quebec Canada[J]. *Econ. Geol.*, 82: 1464-1482.
- Rodder E. 1984. Fluid inclusions[A]. *Reviews in Mineralogy*[C]. Mineralogical Society of America, 12: 1-644.
- Shepherd T J, Rakin A H and Alderton D H M. 1985. A practical guide to fluid inclusion studies[M]. Blackie & Son Limited. 1-154.
- Shen M D, An Y C and Ma Z M. 2003. Tectonic evolution and metallogeny of Kelan Devonian volcanic base in the southern margin of Altay Mountains, Xinjiang[J]. *Xinjiang Nonferrous Metal*, 26(4): 2-6 in Chinese).
- Wan B and Zhang L C. 2006. Sr-Nd-Pb isotope geochemistry and tectonic setting of Devonian polymetallic metallogenetic belt on the Southern margin of Altay, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(1): 145-152 in Chinese with English abstract).
- Wang D H, Chen Y C, Xu Z G, Li T D and Fu X J. 2002. Mineralogetic series and regularity of mineralization in the Altai Metallogenetic Province[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 493 in Chinese).
- Wang J B, Qin K Z, Wu Z L, Hu J H, Deng J N, et al. 1998. Volcanic-exhalative-sedimentary lead zinc deposits in the Southern margin of the Altai, Xinjiang[M]. Beijing: Geol. Pub. House. 79-123 in Chinese).
- Wang S H. 2006. Mineralization evolution and geological features of Altay copper-gold polymetallic ore belt[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 21(2): 80-86 in Chinese with English abstract).
- Wang S L, Guo Z L, Wang Y W and Mao Z L. 2005. Geological characteristics of Pb-Zn deposits in Devonian volcanic-sedimentary basins in the south margin of Altay mountain: Case study of Keketale Pb-Zn deposit, Xinjiang, China[J]. *Geology and Prospecting*, 41(6): 27-33 in Chinese with English abstract).
- Wang S L, Chen K Q, Kang J C and Guo Q. 2007. Stable isotope of Pb-Zn deposits occurred in the Maizi Devonian volcanic-sedimentary basin in the South margin of Altay mountain, Xinjiang[J]. *Geology and Prospecting*, 43(6): 25-31 in Chinese with English abstract).
- Xu J H, Ding R F, Xie Y L, Zhong C H and Yuan X. 2005. Pure CO₂ fluid inclusion of Sarekuobu gold ore deposit in the south margin of Altay mountain[J]. *Chinese Science Bulletin*, 50(4): 380-386 in Chinese).
- Xu K Q, Wang H N, Zhou J P and Zhu J C. 1996. A discussion on the exhalative sedimentary massive sulfide deposits of south China[J]. *Geological Journal of China Universities*, 3(3): 241-256 in Chinese with English abstract).
- Yang D, Xu W Y, Cui Y H, Chen W S and Lian Y. 2007. Determination of gaseous components in fluid inclusion samples by two-dimensional gas chromatography[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 26(6): 451-454 in Chinese with English abstract).
- Yin Y Q, Yin Y M, Li J X, Guo Z L and Guo X J. 2005. Sediment-structural evolution and lead-zinc mineralization in the Devonian volcano-sedimentary Kelan basin in southern Altay, Xinjiang[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 29(4): 475-481 in Chinese with English abstract).
- Zhang L C, Xia B, Niu H C, Li W Q, Fang W X, Tang H F and Wan B. 2006. Metallogenetic systems and belts developed on the late Paleozoic continental margin in Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1387-1398 in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 储雪蕾. 1996. 地幔的碳同位素[J]. 地球科学进展, 11(5): 446-452.
- 郭旭吉. 2004. 红墩铅锌矿床地质特征及成因[J]. 新疆有色金属, 27(3): 12-17.
- 郭正林, 郭旭吉, 王书来, 秦克章. 2007. 阿尔泰山南缘麦兹泥盆纪火山-沉积盆地成矿特点及其铅、锌、铁、金找矿潜力分析[J]. 矿床地质, 26(1): 128-138.
- 焦学军, 马忠美, 郭旭吉, 张连昌. 2005. 阿尔泰山南缘克朗盆地泥盆纪火山沉积与矿产[J]. 西北地质, 38(3): 21-27.
- 李文渊. 2007. 块状硫化物矿床的类型、分布和形成环境[J]. 地球科学与环境学报, 29(4): 331-343.
- 廖启林, 戴塔根, 刘悟辉, 邱冬生. 2000. 新疆阿尔泰山南缘典型块状硫化物矿床成矿环境浅析[J]. 地质与勘探, 36(6): 23-26.
- 刘敏, 张作衡, 王永强, 郭旭吉. 2008. 新疆阿尔泰山大东沟铅锌矿床地质特征及稳定同位素地球化学研究[J]. 地质学报, 82(11): 1504-1513.
- 刘悟辉, 廖启林. 2006. 阿尔泰山南缘典型铜、镍、铅锌矿床成矿模式初探[J]. 地质找矿论丛, 21(3): 173-177.
- 卢焕章, 范宏瑞, 倪培, 欧光习, 沈昆, 张文淮. 2004. 流体包裹体[M]. 北京: 科学出版社. 205-226.
- 秦克章, 王京彬, 张进红, 邓吉牛. 1998. 阿尔泰山南缘可可塔勒式大型铅锌矿床的成矿条件分析[J]. 有色金属矿产与勘查, 7(2): 65-74.
- 申茂德, 安银昌, 马忠美. 2003. 新疆阿尔泰山南缘克朗泥盆纪火山盆地构造演化与成矿[J]. 新疆有色金属, (4): 2-6.
- 万博, 张连昌. 2006. 新疆阿尔泰山南缘泥盆纪多金属成矿带 Sr-Nd-Pb 同位素地球化学与构造背景探讨[J]. 岩石学报, 22(1): 145-152.
- 王登红, 陈毓川, 许志刚, 李天德, 付旭杰. 2002. 阿尔泰山成矿省的成矿系列与成矿规律研究[M]. 北京: 原子能出版社.
- 王京彬, 秦克章, 吴志亮, 胡建辉, 邓吉牛等. 1998. 阿尔泰山南缘火山喷流沉积型铅锌矿床[M]. 北京: 地质出版社. 79-123.
- 王少怀. 2006. 阿尔泰山多金属成矿带矿床地质特征及其成矿历史演化[J]. 地质找矿论丛, 21(2): 80-86.
- 王书来, 郭正林, 王玉往, 毛政利. 2005. 新疆阿尔泰山南缘产于泥盆纪火山-沉积盆地铅锌矿床地质特征——以可可塔勒铅锌矿为例[J]. 地质与勘探, 41(6): 27-33.
- 王书来, 陈克强, 康吉昌, 郭全. 2007. 新疆阿尔泰山南缘产于麦兹泥盆纪火山-沉积盆地铅锌矿稳定同位素特征[J]. 地质与勘探, 43(6): 25-31.
- 徐九华, 丁汝福, 谢玉玲, 钟长华, 原旭. 2005. 阿尔泰山南缘萨热阔布金矿床的纯 CO₂ 流体[J]. 科学通报, 50(4): 380-386.
- 徐克勤, 王鹤年, 周建平, 朱金初. 1996. 论华南喷流-沉积块状硫化物矿床[J]. 高校地质学报, 2(3): 241-256.
- 杨丹, 徐文艺, 崔艳合, 陈伟十, 连玉. 2007. 二维气相色谱法测定流体包裹体中气相成分[J]. 岩矿测试, 26(6): 451-454.
- 尹意求, 杨有明, 李嘉兴, 郭正林, 郭旭吉. 2005. 新疆阿尔泰山南缘克朗盆地沉积构造演化与铅锌成矿[J]. 大地构造与成矿学, 29(4): 475-481.
- 张连昌, 夏斌, 牛贺才, 李文铅, 方维萱, 唐红峰, 万博. 2006. 新疆晚古生代大陆边缘成矿系统与成矿区带初步探讨[J]. 岩石学报, 22(5): 1387-1398.

<http://www.kcdz.ac.cn/>